

## コンクリート部材の補修・補強に関する 共同研究報告書（Ⅰ）

－炭素繊維シート接着工法による  
コンクリート部材の補強効果に関する研究－

平成11年3月

建設省土木研究所  
構造橋梁部 橋梁研究室  
炭素繊維補修・補強工法技術研究会

Copyright©(1999) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



# コンクリート部材の補修・補強に関する 共同研究報告書 (I)

## ー炭素繊維シート接着工法による コンクリート部材の補強効果に関する研究ー

平成11年3月

建設省土木研究所  
構造橋梁部 橋梁研究室  
炭素繊維補修・補強工法技術研究会

### 要 旨

現在、日本では約13万橋（橋長15m以上）の道路橋が供用されており、こうした膨大な数の道路橋を適切に維持管理していくことが重要な課題となっている。炭素繊維シート接着工法は、軽量で施工性に優れ、腐食を生じないといった特徴を有している。このような特徴を有する炭素繊維シート接着工法を橋梁上部工のコンクリート部材の補修・補強工法として用いることが検討されている。一方、炭素繊維シート接着工法は新しい工法であり、その補強効果、適用範囲（適用可能な構造物の損傷度など）が十分に明らかにはされていない。

本研究は、建設省土木研究所と炭素繊維補修・補強工法技術研究会共同で、これらの問題を明らかにし、合理的補強設計方法を確立するために、平成8年度より3ヵ年、各種試験を行ったものである。試験は、炭素繊維シートの材料特性の把握、RCげた、PCげたにおける曲げ補強およびせん断補強効果について検討を行った。また、RC床版においては疲労耐久性向上のための補強効果を検討するために輪荷重走行試験を実施した。

本報告書は、これら試験のうち、平成8年度および平成9年度分の研究成果をとりまとめたものである。

キーワード：炭素繊維シート、コンクリートげた、RC床版、補修・補強、疲労

## 共同研究者名簿

### 建設省土木研究所

|        |                         |  |
|--------|-------------------------|--|
| 岡原 美知夫 | (構造橋梁部 部長)              |  |
| 藤城 泰行  | (現(社)全国地質調査業協会連合会 専務理事) |  |
| 西川 和廣  | ( 〃 橋梁研究室 室長)           |  |
| 神田 昌幸  | (現 建設省都市局 街路課 課長補佐)     |  |
| 内田 賢一  | (構造橋梁部 橋梁研究室 研究員)       |  |
| 廣松 新   | ( 〃 〃 研究員)              |  |
| 長屋 優子  | (現 建設省土木研究所 企画部 企画課)    |  |
| 宮崎 和彦  | (構造橋梁部 橋梁研究室 研究員)       |  |
| 松尾 伸二  | ( 〃 〃 交流研究員)            |  |

### 炭素繊維補修・補強工法技術研究会

|        |                    |          |
|--------|--------------------|----------|
| 古賀 政二郎 | ((株)大林組)           |          |
| 鈴木 巧   | ((株)大林組)           |          |
| 渡辺 英夫  | ((株)オリエンタルコンサルタンツ) |          |
| 鈴木 章夫  | (鹿島建設(株))          |          |
| 後藤 和満  | ((株)建設技術研究所)       |          |
| 矢田 聡   | ((株)コンステック)        |          |
| 小野 定   | (清水建設(株))          | ～平成10年7月 |
| 前田 敏也  | (清水建設(株))          | 平成10年7月～ |
| 江口 和雄  | (ショーボンド建設(株))      |          |
| 佐野 正   | (ショーボンド建設(株))      |          |
| 山田 寛次  | (新日本製鐵(株))         |          |

宇治 公隆 (大成建設 (株))  
堀 倫裕 (大成建設 (株))

堀川 道広 ((株) 長大) ~平成10年11月  
今門 宏之 ((株) 長大) 平成10年11月~

服部 明生 (東レ (株))  
深川 英明 (東レ (株))

小林 朗 (東燃 (株)、現 日鉄コンポジット (株))  
杉山 哲也 (東燃 (株)、現 日鉄コンポジット (株))

遠藤 喜弘 (日東紡績 (株))

常田 哲夫 (日本技術開発 (株))

神内 隆行 ((株) ニューテック)

梅田 均 (ピーシー橋梁 (株))

谷木 謙介 (三菱化学 (株))  
藤田 崇 (三菱化学 (株)) 平成10年11月~  
太田黒 博文 (三菱化学 (株)) ~平成10年11月

## まえがき

安定成長期に入った我が国の経済状況下において、社会資本である既設橋梁構造物は維持管理しながら、また必要によりリニューアルを施しながら延命を図り、長期間使用していくことが重要な課題となってきた。しかしながら、近年、大型車交通量の増加にともなう橋梁上部工のコンクリート構造物の早期劣化が顕在化してきており、さらに、平成5年11月の車両制限令の車両総重量規制緩和および道路構造令の設計自動車荷重の増大にともない、ますます劣化が促進されることが懸念されるようになってきている。このような背景のもと、橋梁上部工のコンクリートの主げたや床版の耐荷力ならびに疲労耐久性の向上を早期に図る必要が生じている。

既設コンクリート構造物の補強工法としては、従来から鋼板接着工法による曲げ耐力の向上が行われており、近年では外ケーブル工法も採用されるようになってきている。床版についても、従来から鋼板接着工法の他、上面増厚工法が用いられており、また近年、下面増厚工法等も採用されはじめている。ただし、これらの工法は施工が繁雑であったり、交通規制が必要となる。既設コンクリート構造物の補強工法の選定にあたっては、それら各工法の特徴ならびにその構造物の損傷状態を考慮する必要がある。

本研究は、既設コンクリート構造物の耐荷力および疲労耐久性の向上を目的として、軽量で施工性に優れ、腐食しないという特徴を有しており、近年、施工実績が増加している炭素繊維シート接着工法に着目して各種試験を行ったものである。試験は、炭素繊維シートの材料特性の把握、RCげた、PCげたにおける曲げ補強およびせん断補強効果について検討を行った。また、RC床版においては疲労耐久性向上のための補強効果を検討するため、輪荷重走行試験機による疲労試験を行った。なお、本研究は、建設省土木研究所と炭素繊維補修・補強工法技術研究会共同で、炭素繊維シート接着工法の特徴を活かした既設コンクリート構造物の補強方法を確立するために、平成8年度から3ヶ年行ったものである。

本報告書は、これら試験のうち、平成8年度および平成9年度分の研究成果をとりまとめたものである。

# 第I編 炭素繊維シートの材料特性に関する研究

## 目 次

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 1. 目的                   | I-3  |
| 2. CFRPシート単体試験          | I-4  |
| 2.1 目的                  | I-4  |
| 2.2 疲労載荷前のCFRPシート静的引張試験 | I-4  |
| 2.2.1 試験条件および使用材料       | I-4  |
| 2.2.2 試験方法              | I-5  |
| 2.2.3 試験結果              | I-5  |
| 2.3 疲労載荷後のCFRPシート静的引張試験 | I-8  |
| 2.3.1 試験条件および使用材料       | I-8  |
| 2.3.2 疲労載荷時の応力レベル       | I-8  |
| 2.3.3 試験方法              | I-8  |
| 2.3.4 試験結果              | I-8  |
| 2.4 試験結果のまとめ            | I-9  |
| 3. 付着試験                 | I-14 |
| 3.1 目的                  | I-14 |
| 3.2 試験体                 | I-14 |
| 3.3 使用材料                | I-15 |
| 3.4 試験方法                | I-16 |
| 3.4.1 静的試験              | I-16 |
| 3.4.2 疲労載荷および疲労後の静的試験   | I-17 |
| 3.5 試験結果                | I-18 |
| 3.5.1 静的試験              | I-18 |
| 3.5.2 疲労載荷および疲労後の静的試験   | I-20 |
| 3.6 試験結果のまとめ            | I-23 |
| 4. 継手試験                 | I-39 |
| 4.1 目的                  | I-39 |
| 4.2 使用材料                | I-39 |
| 4.3 試験体                 | I-40 |

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 4.4 試験方法              | I-43 |
| 4.4.1 静的試験            | I-43 |
| 4.4.2 疲労載荷および疲労後の静的試験 | I-43 |
| 4.5 試験結果              | I-43 |
| 4.5.1 静的試験            | I-43 |
| 4.5.2 疲労載荷および疲労後の静的試験 | I-45 |
| 4.6 試験結果のまとめ          | I-46 |
| 5. 考察                 | I-69 |
| 5.1 CFRPシートの単体試験      | I-69 |
| 5.2 付着試験              | I-70 |
| 5.3 継手試験              | I-70 |

## 第Ⅱ編 炭素繊維シートによる鉄筋コンクリートげたの曲げ補強に関する研究

### 目 次

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| 1. 試験目的                            | II-3  |
| 2. 試験計画                            | II-4  |
| 2.1 試験体の設定                         | II-4  |
| 2.2 試験パラメータおよび試験ケース                | II-5  |
| 2.3 載荷荷重および載荷方法                    | II-7  |
| 2.3.1 載荷荷重                         | II-7  |
| 2.3.2 載荷方法                         | II-7  |
| 2.4 測定項目および計器配置                    | II-9  |
| 3. 材料試験結果                          | II-12 |
| 4. 載荷試験結果                          | II-13 |
| 4.1 静的載荷試験時の変位および主鉄筋応力度と炭素繊維シートひずみ | II-13 |
| 4.1.1 試験体の変位                       | II-13 |
| 4.1.2 主鉄筋応力度                       | II-14 |
| 4.1.3 炭素繊維シートひずみ                   | II-15 |
| 4.1.4 炭素繊維シートの弾性係数と補強効果との関係        | II-15 |
| 4.1.5 炭素繊維シートの補強量と補強効果との関係         | II-15 |
| 4.2 疲労試験時の変位および主鉄筋応力度と炭素繊維シートひずみ   | II-23 |
| 4.2.1 疲労載荷回数と変位との関係                | II-23 |
| 4.2.2 疲労載荷回数と主鉄筋ひずみ（応力度）との関係       | II-23 |
| 4.2.3 疲労載荷回数と炭素繊維シートひずみとの関係        | II-24 |
| 4.3 疲労試験後の静的載荷試験における終局破壊までの挙動      | II-32 |
| 4.3.1 各試験体の終局破壊までの挙動               | II-32 |
| 4.3.2 載荷荷重と変位との関係                  | II-33 |
| 4.3.3 載荷荷重と主鉄筋ひずみとの関係              | II-33 |
| 4.3.4 載荷荷重とコンクリートの圧縮ひずみとの関係        | II-33 |
| 4.3.5 載荷荷重と炭素繊維シートひずみとの関係          | II-33 |

|                                             |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 5. 補強効果に関する考察 .....                         | II-37 |
| 5.1 炭素繊維シートの接着性および養生の影響 .....               | II-37 |
| 5.2 炭素繊維シートの弾性係数（高強度タイプと高弾性タイプ）の違いの影響 ..... | II-37 |
| 5.3 炭素繊維シートによる補強効果 .....                    | II-38 |
| 5.4 疲労載荷後の静的破壊挙動 .....                      | II-40 |
| 6. まとめ .....                                | II-41 |
| 7. 今後の課題 .....                              | II-42 |
| 付属資料 .....                                  | II-43 |
| 資料-1 検討対象橋梁モデル .....                        | II-43 |
| 資料-2 試験体の計算応力度および計算曲げ耐力 .....               | II-47 |
| 資料-3 各試験体の載荷過程の記録 .....                     | II-51 |
| 資料-4 ひび割れ観察図 .....                          | II-60 |
| 資料-5 写真集 .....                              | II-81 |

## 第III編 炭素繊維シートによる鉄筋コンクリート床版の補強に関する研究

### 目 次

|                                                |        |
|------------------------------------------------|--------|
| 1. はじめに .....                                  | III-3  |
| 2. 供試体 .....                                   | III-4  |
| 3. 使用材料 .....                                  | III-11 |
| 4. 試験要因 .....                                  | III-13 |
| 4.1 供試体の補強仕様 .....                             | III-13 |
| 4.2 炭素繊維シートの引張剛性および曲げ剛性 .....                  | III-15 |
| 5. 試験方法 .....                                  | III-19 |
| 6. 試験結果および考察 .....                             | III-24 |
| 6.1 初期損傷の状況 .....                              | III-24 |
| 6.2 各供試体の破壊荷重と破壊回数 .....                       | III-33 |
| 6.3 各供試体の破壊状況 .....                            | III-34 |
| 6.4 炭素繊維シートの補強効果 .....                         | III-44 |
| 6.5 補強後の載荷回数と RC 床版中央のたわみ .....                | III-46 |
| 6.6 補強後の RC 床版中央の鉄筋ひずみ .....                   | III-48 |
| 6.7 RC 床版中央の炭素繊維シートのひずみ .....                  | III-53 |
| 6.8 補強 RC 床版の疲労耐久性に及ぼす炭素繊維シートの各種要因の影響の検討 ..... | III-59 |
| 6.8.1 引張剛性および曲げ剛性の影響 .....                     | III-59 |
| 6.8.2 付着応力度の影響 .....                           | III-65 |
| 6.8.3 炭素繊維シート補強 RC 床版の破壊メカニズム .....            | III-73 |
| 7. まとめ .....                                   | III-75 |
| 8. 今後の課題 .....                                 | III-76 |
| 参考文献 .....                                     | III-77 |

## 第 I 編 炭素繊維シート of 材料特性に関する研究



## 1. 目的

本研究は、「炭素繊維シート接着工法によるコンクリート部材の補強効果に関する研究」において、使用する材料の力学特性等、補強設計を実施する際に重要となる構造特性を把握することを目的とする。

試験は、炭素繊維補強プラスチック（CFRP）シート単体の引張試験（疲労載荷前後、促進暴露前後）、鉄筋コンクリート試験体を用いての付着試験（疲労載荷前後）、継手試験（疲労載荷前後）を実施した。これらの試験に用いたCFRPシートは、表-1.1に示す分類のものである。

表-1.1 炭素繊維補強プラスチック（CFRP）シートの分類表

| 公称弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 保証引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> ) |              |                  |                |
|----------------------------------|-------------------------------|--------------|------------------|----------------|
|                                  | 20,000                        | 25,000       | 30,000           | 35,000         |
| 2.35×10 <sup>6</sup>             |                               |              | A FTS-C0-20/30   | A FTS-C1-20/30 |
|                                  |                               |              | B トレカクス 2方向      | B トレカクス200/300 |
|                                  |                               |              | C MRK-M2-20S/30S | C MRK-M2-20/30 |
| 4.00×10 <sup>6</sup>             |                               |              | A FTS-C5-30      |                |
|                                  |                               |              | C MRK-M4-30      |                |
| 4.45×10 <sup>6</sup>             |                               | B トレカクス HM30 |                  |                |
| 5.50×10 <sup>6</sup>             | A FTS-C7-30                   |              |                  |                |
| 6.50×10 <sup>6</sup>             | A FTS-C8-30                   |              |                  |                |
|                                  | C MRK-M6-30                   |              |                  |                |

A, B, C: シート製造メーカーを表す。

当表において、保証引張強度は（引張強度の平均値 $\bar{X}$  - 3×標準偏差 $\sigma$ ）であり、公称弾性係数は引張試験時に得られた初期弾性係数の平均値である。

## 2. CFRPシート単体試験

### 2.1 目的

CFRPシート単体試験は、表-1.1に示した炭素繊維シートの代表的なものについて、次の条件下で引張試験を実施し、保証引張強度と公称弾性係数の評価を行うことを目的とする。

- (1) 保証引張強度と公称弾性係数の代表的な炭素繊維シートについて、CFRPシートの疲労載荷前の状態で静的引張試験を行なう。
- (2) さらに保証引張強度または公称弾性係数の代表的なもの4種類について、200万回疲労後に静的引張試験を行なう。
- (3) 代表的な高強度炭素繊維シート及び高弾性炭素繊維シート各1種類について、2,000時間促進暴露後に静的引張試験を行なう。
- (4) (3)で促進暴露したものを、さらに200万回疲労後に静的引張試験を行なう。

### 2.2 疲労載荷前のCFRPシート静的引張試験

#### 2.2.1 試験条件および使用材料

表-2.1に試験条件および使用材料を、図-2.1にCFRPシート試験体の概要を示す。疲労載荷前のCFRPシート静的引張試験は、促進暴露処理前後の試験体を対象に静的引張強度及び弾性係数を測定する。促進暴露は(社)日本塗料検査協会にて、サンシャインカーボンアーク灯により、2,000時間実施した。(社)日本塗料検査協会による促進暴露報告書を添付する。

表-2.1 CFRPシート単体の疲労載荷前静的引張試験の試験条件と使用材料

| 試験条件             | 炭素繊維シート分類 |                                  |                                  | 繊維<br>厚 さ<br>(mm) | 試験体本数 |    |    |    |
|------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------|-------|----|----|----|
|                  | 材料No.     | 公称弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 保証引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |                   | 本数    | 小計 | 合計 |    |
| 促進暴露前の<br>静的引張試験 | A         | 1                                | 2.35×10 <sup>6</sup>             | 35,000            | 0.167 | 3  | 12 | 27 |
|                  |           | 2                                | 4.00×10 <sup>6</sup>             | 30,000            | 0.165 | 3  |    |    |
|                  |           | 3                                | 5.50×10 <sup>6</sup>             | 20,000            | 0.143 | 3  |    |    |
|                  |           | 4                                | 6.50×10 <sup>6</sup>             | 20,000            | 0.143 | 3  |    |    |
|                  | B         | 5                                | 2.35×10 <sup>6</sup>             | 35,000            | 0.167 | 3  | 6  |    |
|                  |           | 6                                | 4.45×10 <sup>6</sup>             | 25,000            | 0.163 | 3  |    |    |
|                  | C         | 7                                | 2.35×10 <sup>6</sup>             | 35,000            | 0.167 | 3  | 9  |    |
|                  |           | 8                                | 4.00×10 <sup>6</sup>             | 30,000            | 0.165 | 3  |    |    |
|                  |           | 9                                | 6.50×10 <sup>6</sup>             | 20,000            | 0.143 | 3  |    |    |
| 促進暴露後の<br>静的引張試験 | B         | 5                                | 2.35×10 <sup>6</sup>             | 35,000            | 0.167 | 3  | 3  | 6  |
|                  | C         | 9                                | 6.50×10 <sup>6</sup>             | 20,000            | 0.143 | 3  | 3  |    |

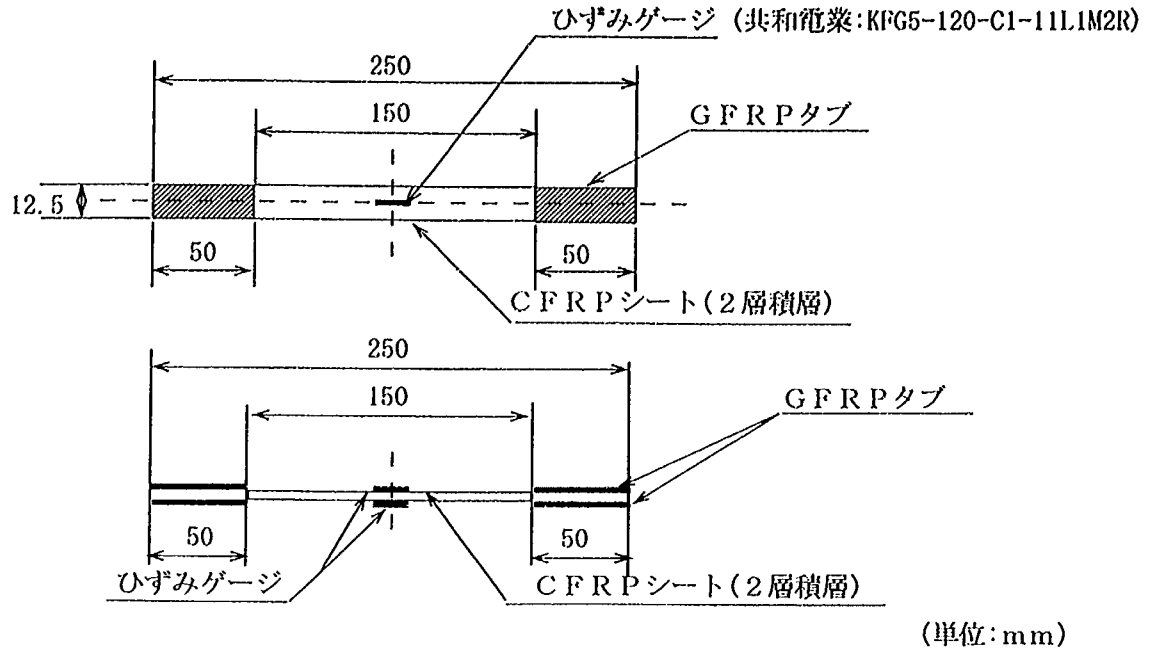


図-2.1 CFRPシート単体の静的引張試験用試験体形状寸法およびひずみゲージ位置

## 2.2.2 試験方法

試験は次の方法により実施した。

- ・試験方法：JIS K 7073に準拠。
- ・試験装置：INSTRON 1125
- ・試験温度：室温
- ・炭素繊維シート積層数：2層
- ・試験本数：試験体分類につき各3本。
- ・ひずみゲージ：試験体中央部の2面に各1枚貼り付ける。
- ・引張強度：破断荷重を炭素繊維の純断面積（試験体幅×繊維厚さ）で除した値。
- ・引張弾性係数：応力-ひずみ曲線の破断荷重の20～60%の勾配から求める。

ひずみ値は、2枚のひずみゲージのひずみ値の平均とする。

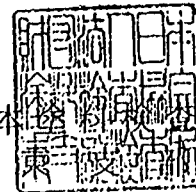
## 2.2.3 試験結果

CFRPシート単体の疲労載荷前の静的引張試験の結果は、表-2.2の通り。

# 試験結果報告書

炭素繊維による補修・補強工法技術研究会 殿

財団法人 日本炭素繊維協会



依頼 No.91594

報告日：平成10年 3 月 5 日

| 品 名   | CFRP硬化板<br>・高強度タイプ<br>・高弾性率タイプ | 試料受付日  | 平成 9 年 1 0 月 2 3 日 |
|-------|--------------------------------|--------|--------------------|
|       |                                | 試料採取日  | 平成 一 年 一 月 一 日     |
|       |                                | 試料採取場所 | 提 出                |
|       |                                | 試料数量   | 2                  |
| 製 造 者 | 高強度タイプ：東レ(株) 高弾性率タイプ：三菱化学(株)   |        |                    |

J I S K 5 4 0 0 「塗料一般試験方法」の9.8.1に規定するサンシャインカーボンアーク  
灯式耐候性試験機を用いて、2000時間促進耐候性試験を行った。

ただし、水噴霧時間は120分中18分間。

試験片は依頼者に返却した。

備考：試験片のグレードとしては、依頼者よりつぎのように示された。

高強度タイプ：弾性係数  $2.35 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>  
引張強度 35,000 kgf/cm<sup>2</sup>

高弾性率タイプ：弾性係数  $6.50 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>  
引張強度 20,000 kgf/cm<sup>2</sup>

以 下 余 白

表-2.2 CFRPシート単体の疲労载荷前静的引張試験結果

| 試験条件             | 材料No. |   | 公称<br>弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 保証<br>引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 繊維厚さ<br>(mm) | 試験体<br>No. | 試験体の幅 (mm) |       |       |       | 破断荷重<br>(kgf) | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |        | 弾性係数<br>×10 <sup>6</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> ) |      | 載荷ピッチ<br>(kgf) |
|------------------|-------|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------|------------|------------|-------|-------|-------|---------------|--------------------------------|--------|-------------------------------------------------|------|----------------|
|                  |       |   |                                      |                                      |              |            | ①          | ②     | ③     | 平均    |               | 平均                             | 平均     |                                                 |      |                |
| 促進暴露前の<br>静的引張試験 | A     | 1 | 2.35X10 <sup>6</sup>                 | 35,000                               | 0.167<br>×2層 | 1          | 12.62      | 12.57 | 12.55 | 12.58 | 1,770         | 42,100                         | 41,800 | 2.61                                            | 2.61 | 100            |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 2          | 12.61      | 12.56 | 12.49 | 12.55 | 1,730         | 41,300                         |        | 2.63                                            |      |                |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 3          | 12.72      | 12.69 | 12.62 | 12.68 | 1,780         | 42,000                         |        | 2.59                                            |      |                |
|                  |       | 2 | 4.00X10 <sup>6</sup>                 | 30,000                               | 0.165<br>×2層 | 1          | 12.77      | 12.73 | 12.71 | 12.74 | 1,815         | 43,200                         | 39,700 | 4.14                                            | 4.01 | 100            |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 2          | 12.60      | 12.53 | 12.49 | 12.54 | 1,440         | 34,800                         |        | 3.89                                            |      |                |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 3          | 12.60      | 12.55 | 12.52 | 12.56 | 1,700         | 41,000                         |        | 4.01                                            |      |                |
|                  |       | 3 | 5.50X10 <sup>6</sup>                 | 20,000                               | 0.143<br>×2層 | 1          | 12.52      | 12.55 | 12.61 | 12.56 | 1,125         | 31,300                         | 31,900 | 5.67                                            | 5.75 | 50             |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 2          | 12.54      | 12.54 | 12.61 | 12.56 | 1,145         | 31,900                         |        | 5.78                                            |      |                |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 3          | 12.61      | 12.58 | 12.54 | 12.58 | 1,170         | 32,500                         |        | 5.81                                            |      |                |
|                  |       | 4 | 6.50X10 <sup>6</sup>                 | 20,000                               | 0.143<br>×2層 | 1          | 12.31      | 12.35 | 12.37 | 12.34 | 998           | 28,300                         | 25,800 | 7.02                                            | 6.73 | 50             |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 2          | 12.32      | 12.27 | 12.33 | 12.31 | 797           | 22,600                         |        | 6.54                                            |      |                |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 3          | 12.46      | 12.54 | 12.45 | 12.48 | 950           | 26,600                         |        | 6.64                                            |      |                |
|                  | B     | 5 | 2.35X10 <sup>6</sup>                 | 35,000                               | 0.167<br>×2層 | 1          | 12.61      | 12.61 | 12.66 | 12.63 | 1,900         | 45,000                         | 45,800 | 2.48                                            | 2.48 | 100            |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 2          | 12.36      | 12.26 | 12.16 | 12.26 | 1,860         | 45,400                         |        | 2.51                                            |      |                |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 3          | 12.65      | 12.60 | 12.55 | 12.60 | 1,980         | 47,000                         |        | 2.44                                            |      |                |
|                  |       | 6 | 4.45X10 <sup>6</sup>                 | 25,000                               | 0.163<br>×2層 | 1          | 12.39      | 12.49 | 12.58 | 12.49 | 1,395         | 34,300                         | 33,100 | 4.60                                            | 4.48 | 50             |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 2          | 12.56      | 12.50 | 12.46 | 12.51 | 1,330         | 32,600                         |        | 4.39                                            |      |                |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 3          | 12.38      | 12.38 | 12.38 | 12.38 | 1,310         | 32,500                         |        | 4.44                                            |      |                |
|                  | C     | 7 | 2.35X10 <sup>6</sup>                 | 35,000                               | 0.167<br>×2層 | 1          | 12.54      | 12.52 | 12.52 | 12.53 | 1,950         | 46,600                         | 51,600 | 2.52                                            | 2.73 | 100            |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 2          | 12.54      | 12.55 | 12.55 | 12.55 | 2,310         | 55,100                         |        | 2.87                                            |      |                |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 3          | 12.56      | 12.55 | 12.55 | 12.55 | 2,220         | 53,000                         |        | 2.81                                            |      |                |
|                  |       | 8 | 4.00X10 <sup>6</sup>                 | 30,000                               | 0.165<br>×2層 | 1          | 12.54      | 12.55 | 12.55 | 12.55 | 1,770         | 42,700                         | 41,400 | 4.47                                            | 4.23 | 100            |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 2          | 12.56      | 12.55 | 12.56 | 12.56 | 1,730         | 41,700                         |        | 4.17                                            |      |                |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 3          | 12.54      | 12.55 | 12.55 | 12.55 | 1,650         | 39,800                         |        | 4.04                                            |      |                |
|                  |       | 9 | 6.50X10 <sup>6</sup>                 | 20,000                               | 0.143<br>×2層 | 1          | 12.56      | 12.55 | 12.55 | 12.55 | 890           | 24,800                         | 26,300 | 6.47                                            | 6.55 | 50             |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 2          | 12.55      | 12.54 | 12.54 | 12.54 | 1,000         | 27,900                         |        | 6.53                                            |      |                |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 3          | 12.56      | 12.54 | 12.54 | 12.55 | 940           | 26,200                         |        | 6.64                                            |      |                |
| 促進暴露後の<br>静的引張試験 | B     | 5 | 2.35X10 <sup>6</sup>                 | 35,000                               | 0.167<br>×2層 | 1          | 12.38      | 12.32 | 12.31 | 12.34 | 2,066         | 50,100                         | 47,500 | 2.60                                            | 2.55 | 100            |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 2          | 12.49      | 12.48 | 12.44 | 12.47 | 2,054         | 49,300                         |        | 2.61                                            |      |                |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 3          | 12.51      | 12.46 | 12.44 | 12.47 | 1,798         | 43,200                         |        | 2.44                                            |      |                |
|                  | C     | 9 | 6.50X10 <sup>6</sup>                 | 20,000                               | 0.143<br>×2層 | 1          | 12.52      | 12.48 | 12.48 | 12.49 | 898           | 25,100                         | 24,800 | 6.75                                            | 6.39 | 50             |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 2          | 12.63      | 12.55 | 12.54 | 12.57 | 957           | 26,600                         |        | 6.24                                            |      |                |
|                  |       |   |                                      |                                      |              | 3          | 12.36      | 12.44 | 12.48 | 12.43 | 803           | 22,600                         |        | 6.18                                            |      |                |

## 2.3 疲労載荷後のCFRPシート静的引張試験

### 2.3.1 試験条件および使用材料

表-2.3に試験条件および使用材料を示す。試験体は図2.1に示す通り、表-2.1の試験体と同時に作製した。疲労載荷後のCFRPシートの静的引張試験は、促進暴露処理前後の試験体を対象に、200万回疲労載荷後の静的引張強度および弾性係数を測定する。促進暴露処理方法は、疲労載荷前のCFRPシート静的引張試験と同様である。

表-2.3 CFRPシート単体の疲労載荷後静的引張試験の試験条件と使用材料

| 試験条件                        | 炭素繊維シート分類 |   |                                  |                                  | 最大応力<br>( $\sigma_{max}$ )<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 試験体本数 |    |
|-----------------------------|-----------|---|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------|-------|----|
|                             | 材料<br>No. |   | 公称弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 保証引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |                                                      | 本数    | 合計 |
| 促進暴露前で<br>200万回疲労載荷後の静的引張試験 | B         | 5 | $2.35 \times 10^6$               | 35,000                           | 2,500                                                | 1     | 4  |
|                             | A         | 2 | $4.00 \times 10^6$               | 30,000                           | 4,000                                                | 1     |    |
|                             | A         | 3 | $5.50 \times 10^6$               | 20,000                           | 4,500                                                | 1     |    |
|                             | C         | 9 | $6.50 \times 10^6$               | 20,000                           | 6,000                                                | 1     |    |
| 促進暴露後で<br>200万回疲労載荷後の静的引張試験 | B         | 5 | $2.35 \times 10^6$               | 35,000                           | 2,500                                                | 1     | 2  |
|                             | C         | 9 | $6.50 \times 10^6$               | 20,000                           | 6,000                                                | 1     |    |

### 2.3.2 疲労載荷時の応力レベル

疲労載荷時の応力は、L-20荷重で設計されたRCTげた橋のTげた梁下面に貼り付けたCFRPシート1層がL-25荷重によって発生する応力度を想定して、上限応力を表-2.3の最大応力を目途に設定し、下限応力を死荷重相当時のゼロに近ずけるため上限応力の1/10とした。

### 2.3.3 試験方法

#### (1) 疲労載荷

- ・試験装置：疲労載荷=INSTRON 1341
- ・疲労載荷回数：200万回
- ・載荷速度：10Hz
- ・応力比(R)：0.1 ( $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ )

#### (2) 静的引張試験

2.2 疲労載荷前のCFRPシート静的引張試験と同様。

### 2.3.4 試験結果

CFRPシート単体の200万回疲労載荷後の静的引張試験結果は、表-2.4の通り。

## 2.4 試験結果のまとめ

CFRPシート単体引張試験結果のまとめを表-2.5に示す。また、各引張試験の応力-ひずみ曲線を次の通り示す。

- ・促進暴露無・疲労前の静的引張試験…図-2.2～図-2.10
- ・促進暴露無・疲労後の静的引張試験…図-2.3.1, 図-2.5.1, 図-2.8.1 および 図-2.10.1
- ・促進暴露後・疲労前の静的引張試験…図-2.3.2, 図-2.10.2
- ・促進暴露後・疲労後の静的引張試験…図-2.3.3, 図-2.10.3

これらより以下の評価を得ることができる。

- (1) 疲労载荷および促進暴露を行なわない試験体の静的引張試験結果において、引張強度の平均値はいずれも保証引張強度を上回っており、弾性係数はほぼ公称弾性係数に近い前後の値を示した。
- (2) 実構造物にCFRPシートを貼り付けた状態を想定した応力レベル下での200万回疲労载荷後の静的引張試験試験体では、疲労による引張強度および弾性係数の低下は見られなかった。
- (3) サンシャインカーボンアーク灯による2,000時間促進暴露後の静的引張試験、および同暴露後に疲労载荷を経て行なった静的引張試験結果では、引張強度、弾性係数に大きな変化は見られなかった。ただし、促進暴露後に疲労载荷を経た高弾性タイプのCFRPシートに、引張強度の若干の低下が見られた。

表-2.4 CFRPシート単体の疲労載荷後静的引張試験結果

| 試験条件                    | 材料No. |   | 公称<br>弾性係数<br>$\times 10^6$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 保証<br>引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 繊維厚さ<br>(mm)          | 疲労載荷                           |             | 試験体<br>No. | 試験体の幅<br>(mm) |       |       |       | 破断荷重<br>(kgf) | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>$\times 10^6$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 載荷<br>ピッチ<br>(kgf) |
|-------------------------|-------|---|-------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------|------------|---------------|-------|-------|-------|---------------|--------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------|
|                         |       |   |                                                       |                                      |                       | 最大応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 荷重<br>(kgf) |            | ①             | ②     | ③     | 平均    |               |                                |                                                 |                    |
| 促進暴露前<br>疲労載荷後の<br>静的引張 | B     | 5 | 2.35                                                  | 35,000                               | 0.167<br>$\times 2$ 層 | 2,500                          | 104/10.4    | 1          | 12.55         | 12.57 | 12.47 | 12.53 |               |                                |                                                 |                    |
|                         |       |   |                                                       |                                      |                       |                                |             | 2          | 12.54         | 12.56 | 12.49 | 12.53 | 2,050         | 49,000                         | 2.49                                            | 100                |
|                         | A     | 2 | 4.00                                                  | 30,000                               | 0.165<br>$\times 2$ 層 | 4,000                          | 165/16.5    | 1          | 12.63         | 12.63 | 12.60 | 12.62 |               |                                |                                                 |                    |
|                         |       |   |                                                       |                                      |                       |                                |             | 2          | 12.59         | 12.60 | 12.58 | 12.59 | 1,880         | 45,300                         | 4.34                                            | 100                |
|                         |       | 3 | 5.50                                                  | 20,000                               | 0.143<br>$\times 2$ 層 | 4,500                          | 160/16.0    | 1          | 12.67         | 12.56 | 12.50 | 12.58 |               |                                |                                                 |                    |
|                         |       |   |                                                       |                                      |                       |                                |             | 2          | 12.67         | 12.57 | 12.51 | 12.58 | 1,200         | 33,400                         | 5.82                                            | 50                 |
|                         | C     | 9 | 6.50                                                  | 20,000                               | 0.143<br>$\times 2$ 層 | 6,000                          | 215/21.5    | 1          | 12.53         | 12.56 | 12.56 | 12.55 |               |                                |                                                 |                    |
|                         |       |   |                                                       |                                      |                       |                                |             | 2          | 12.52         | 12.51 | 12.51 | 12.51 | 1,025         | 28,600                         | 7.06                                            | 50                 |
| 促進暴露後<br>疲労載荷後の<br>静的引張 | B     | 5 | 2.35                                                  | 35,000                               | 0.167<br>$\times 2$ 層 | 2,500                          | 104/10.4    | 1          | 12.37         | 12.43 | 12.30 | 12.37 | 1,868         | 45,200                         | 2.58                                            | 100                |
|                         | C     | 9 | 6.50                                                  | 20,000                               | 0.143<br>$\times 2$ 層 | 6,000                          | 215/21.5    | 1          | 12.56         | 12.62 | 12.54 | 12.57 | 805           | 22,400                         | 6.50                                            | 50                 |

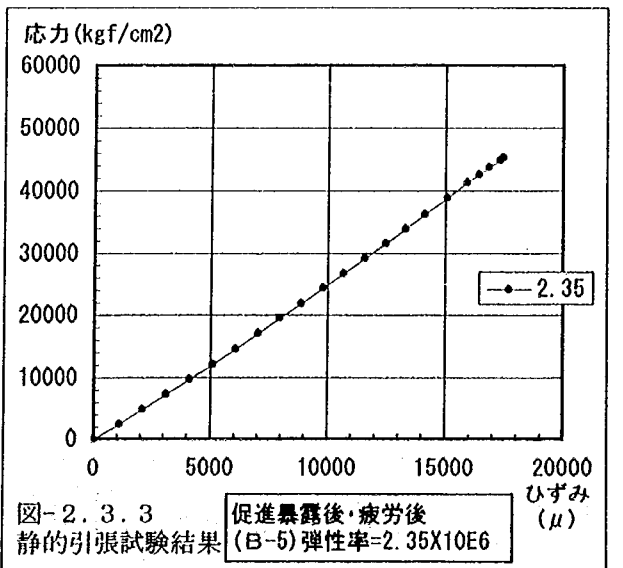
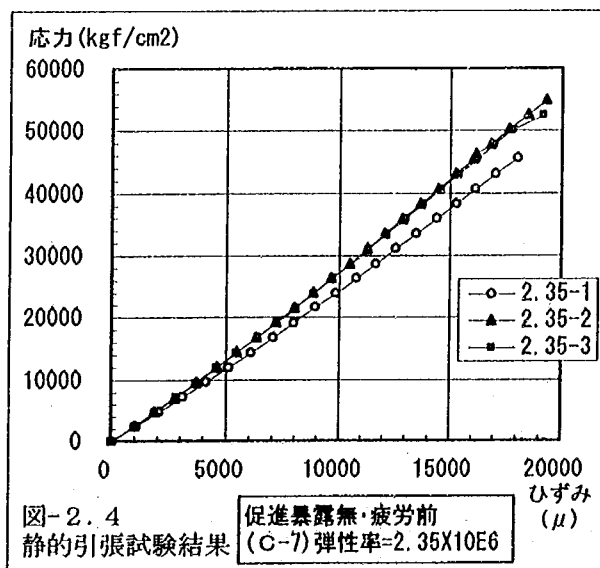
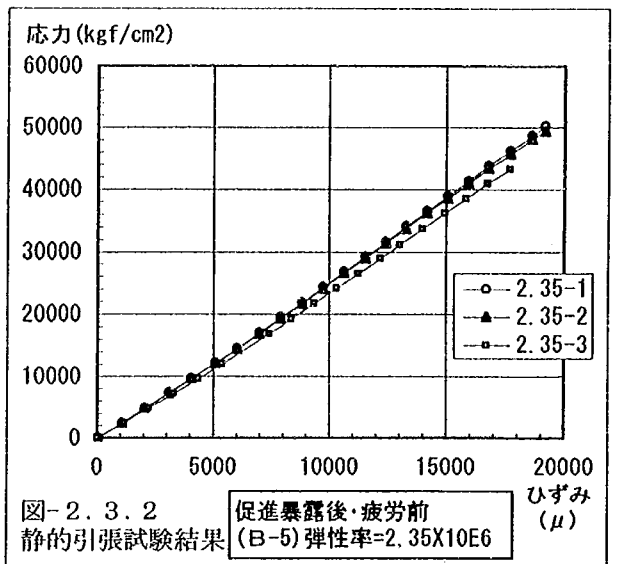
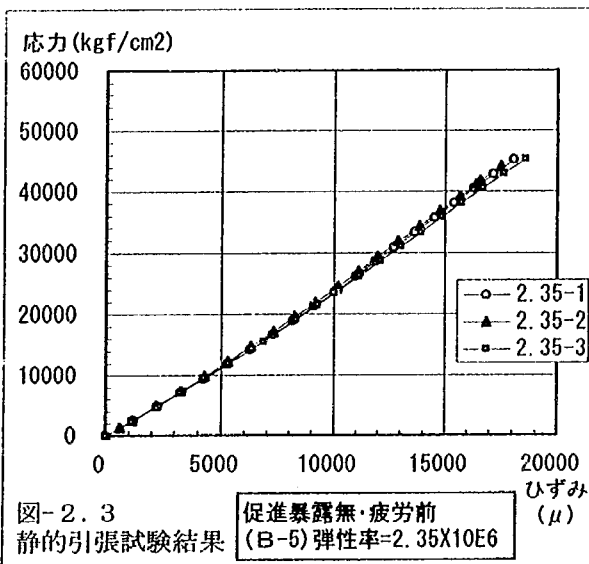
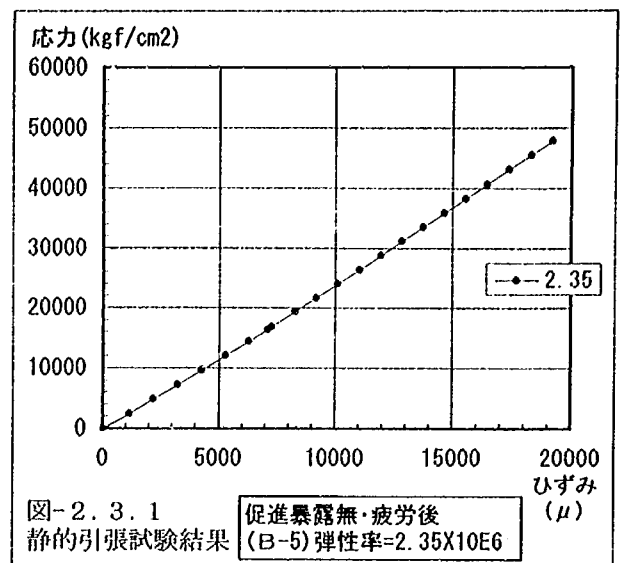
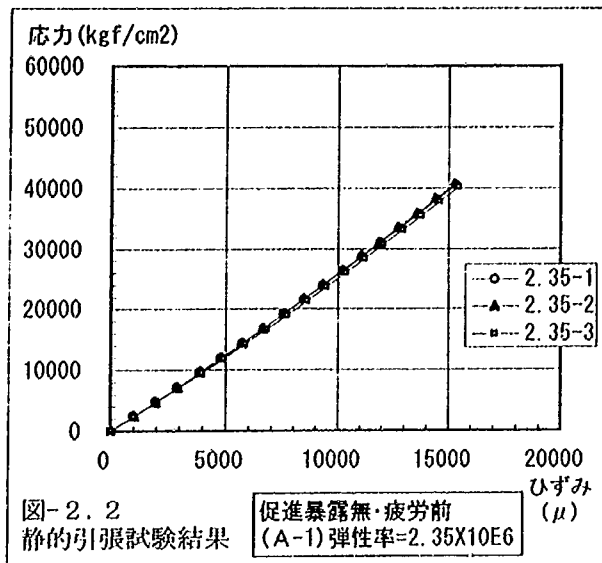
上段：疲労試験前の試験体寸法

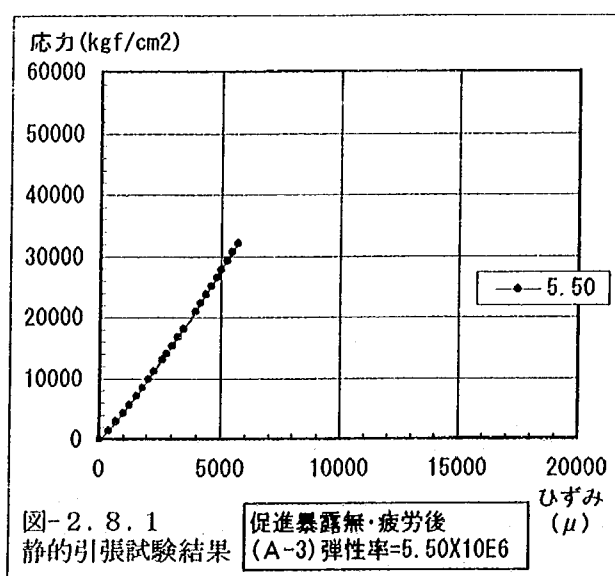
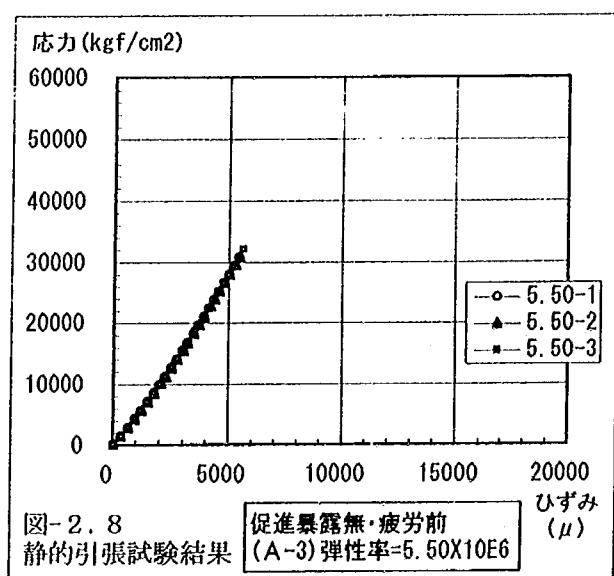
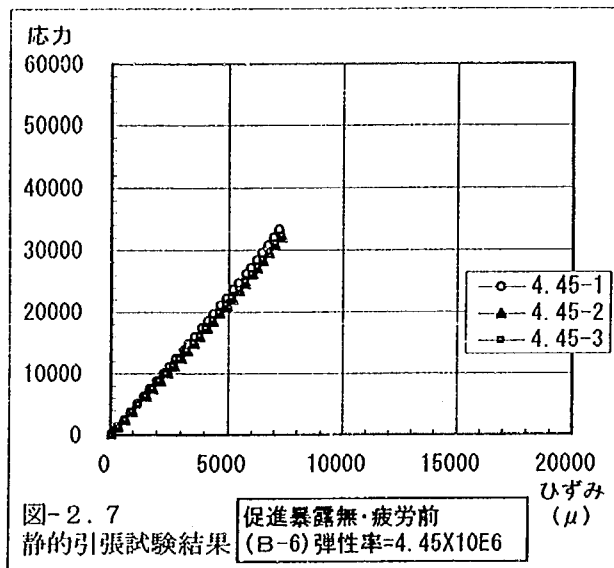
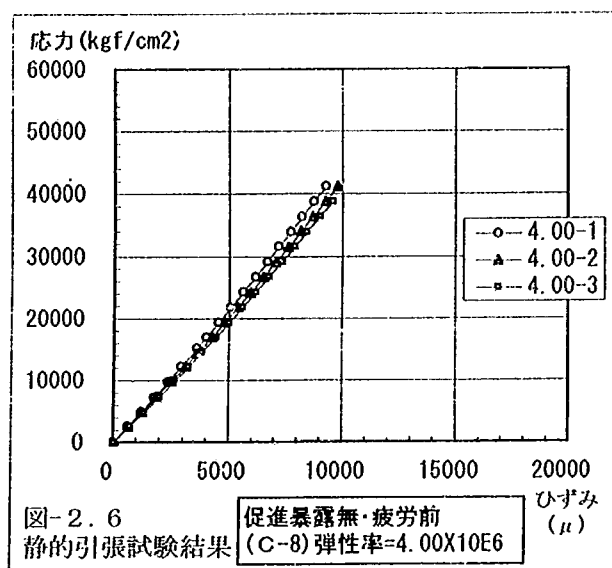
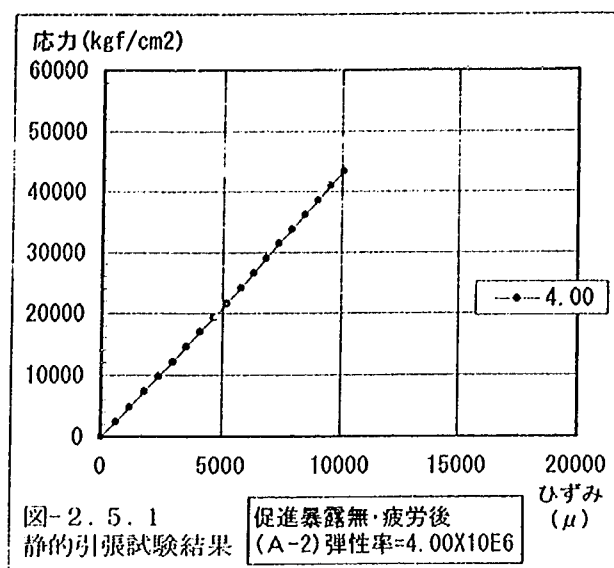
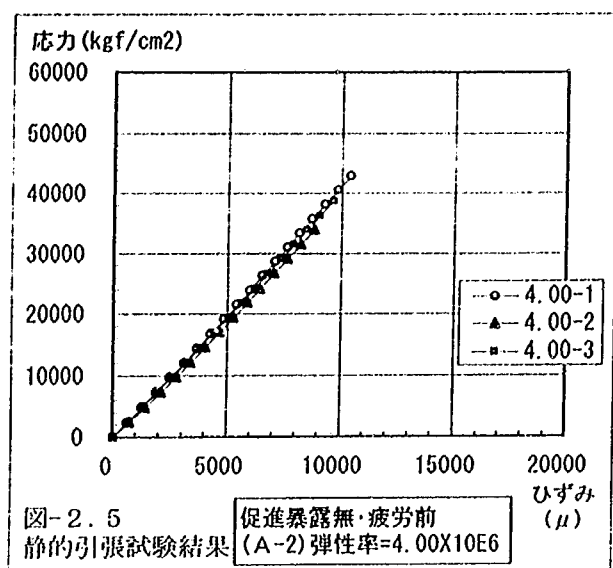
下段：疲労試験後の試験体寸法

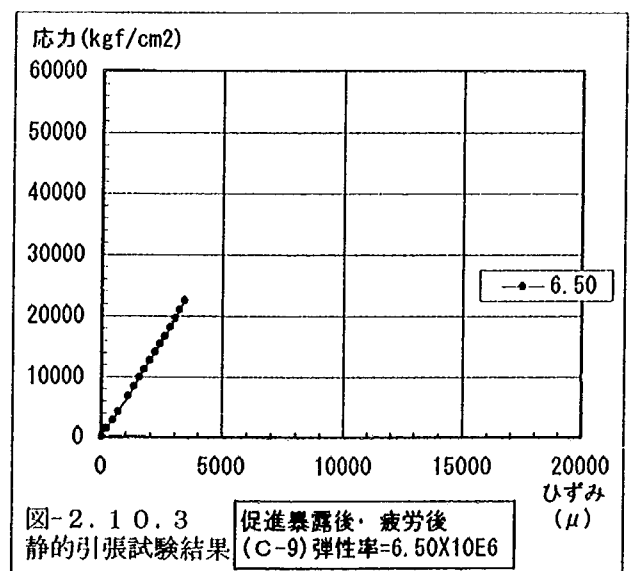
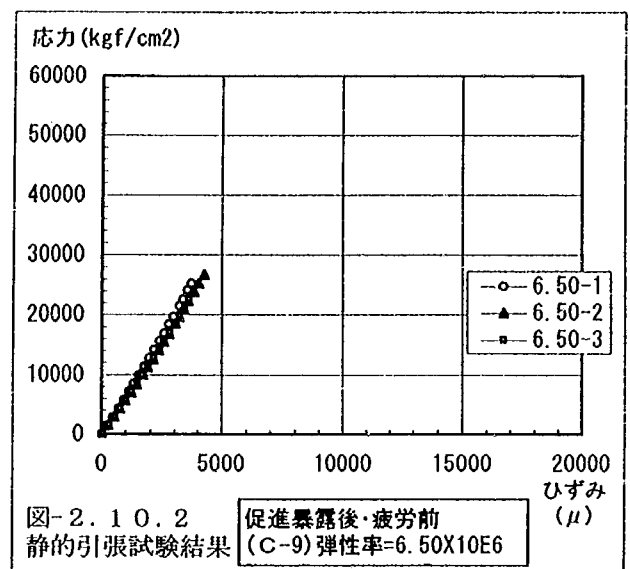
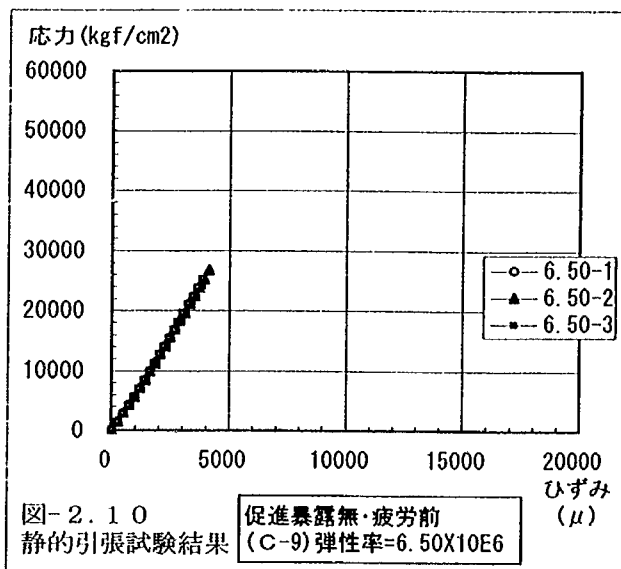
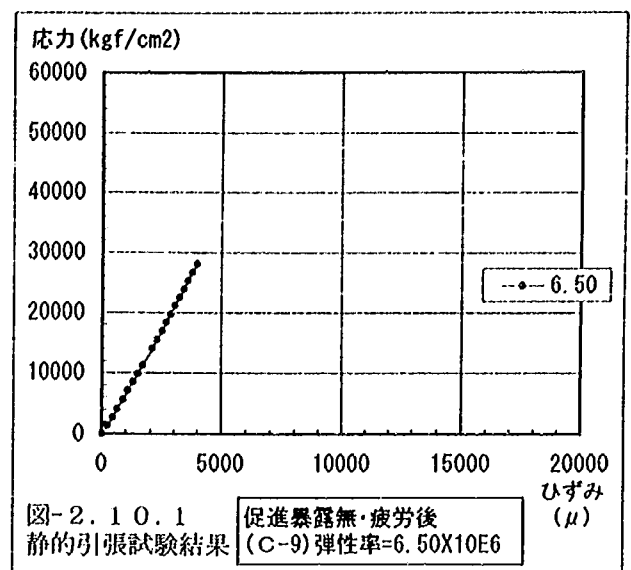
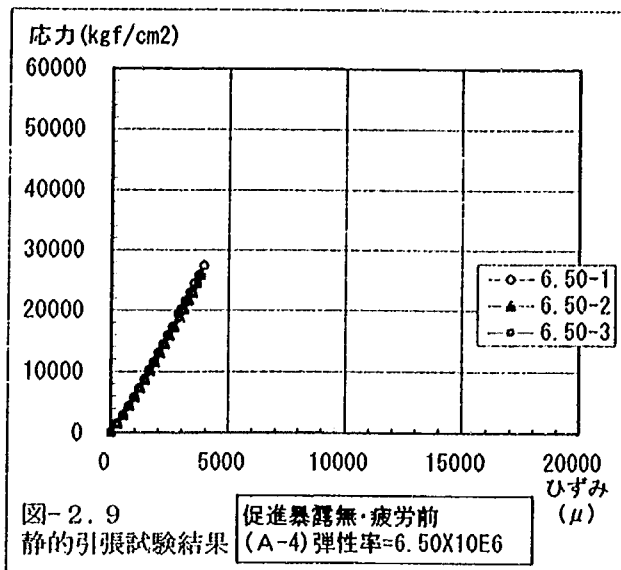
表-2.5 CFRPシート単体の引張試験結果のまとめ

| 材料No. |   | 公称<br>弾性係数<br>( $\times 10^6$ ) | 保証<br>引張強度 | (kgf/cm <sup>2</sup> )    |        |      |                           |        |        |                           |        |        |                           |        |        |
|-------|---|---------------------------------|------------|---------------------------|--------|------|---------------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|
|       |   |                                 |            | 促進暴露無時試験結果                |        |      |                           |        |        | 促進暴露有時試験結果                |        |        |                           |        |        |
|       |   |                                 |            | 疲労載荷前 (n=3の平均)            |        |      | 200万回疲労載荷後 (n=1)          |        |        | 疲労載荷前 (n=3の平均)            |        |        | 200万回疲労載荷後 (n=1)          |        |        |
|       |   |                                 |            | 弾性係数<br>( $\times 10^6$ ) | 引張強度   | 図No. | 弾性係数<br>( $\times 10^6$ ) | 引張強度   | 図No.   | 弾性係数<br>( $\times 10^6$ ) | 引張強度   | 図No.   | 弾性係数<br>( $\times 10^6$ ) | 引張強度   | 図No.   |
| A     | 1 | 2.35                            | 35,000     | 2.61                      | 41,800 | 2.2  | —                         | —      | —      | —                         | —      | —      | —                         | —      | —      |
|       | 2 | 4.00                            | 30,000     | 4.01                      | 39,700 | 2.5  | 4.34                      | 45,300 | 2.5.1  | —                         | —      | —      | —                         | —      | —      |
|       | 3 | 5.50                            | 20,000     | 5.75                      | 31,900 | 2.8  | 5.82                      | 33,400 | 2.8.1  | —                         | —      | —      | —                         | —      | —      |
|       | 4 | 6.50                            | 20,000     | 6.78                      | 26,000 | 2.9  | —                         | —      | —      | —                         | —      | —      | —                         | —      | —      |
| B     | 5 | 2.35                            | 35,000     | 2.48                      | 45,800 | 2.3  | 2.49                      | 49,000 | 2.3.1  | 2.55                      | 47,500 | 2.3.2  | 2.58                      | 45,200 | 2.3.3  |
|       | 6 | 4.45                            | 25,000     | 4.47                      | 33,100 | 2.7  | —                         | —      | —      | —                         | —      | —      | —                         | —      | —      |
| C     | 7 | 2.35                            | 35,000     | 2.73                      | 51,600 | 2.4  | —                         | —      | —      | —                         | —      | —      | —                         | —      | —      |
|       | 8 | 4.00                            | 30,000     | 4.23                      | 41,400 | 2.6  | —                         | —      | —      | —                         | —      | —      | —                         | —      | —      |
|       | 9 | 6.50                            | 20,000     | 6.55                      | 26,300 | 2.10 | 7.06                      | 28,600 | 2.10.1 | 6.39                      | 25,500 | 2.10.2 | 6.50                      | 22,400 | 2.10.3 |

注) 表中の「図No.」は、応力-ひずみ曲線の図のNo.を示す。







### 3. 付着試験

#### 3.1 目的

付着試験の目的は次の2項目とする。

- (1) 静的試験による付着破壊性状の確認。
- (2) コンクリート構造物に実際に貼付けたCFRPシートに発生する応力に相当する応力レベルでの、200万回繰り返し疲労载荷が静的な付着性状に与える影響の把握。

試験パラメータは、炭素繊維シートが高強度タイプ、高弾性タイプの2種、定着長さLが10、20、30cm、および、コンクリート設計基準強度 $\sigma_c$ が150、250、350kgf/cm<sup>2</sup>である。

#### 3.2 試験体

付着試験体は、図-3.1に示すように、試験体の4面中央部横断方向に幅20mm、深さ20mmのノッチを有し、断面の中心に引張载荷用の全ネジボルトを挿入した断面100mm角、長さ620mmのコンクリートブロックの材軸方向両面に、幅50mmの炭素繊維シート積層数1枚を、所定の定着長さに貼り付けたものである。なお、全ネジボルトは、中央部ノッチ部でボルトが引張力を負担しないよう切断されている。

なお、図-3.1には、ひずみゲージ（共和電業(株)製KFG5-120-C1-11L1M2R）の取付位置を合わせて示す。また、ひずみゲージの数量を表-3.1に示す。

表-3.1 各試験時のひずみ計測点数

| 試 験 条 件       | 炭素繊維シート用ゲージ<br>( 1 体当たり) |    |    | 合 計 |
|---------------|--------------------------|----|----|-----|
|               | 定着長さ (cm)                |    |    |     |
|               | 10                       | 20 | 30 |     |
| 疲労載荷無・静的付着試験用 | 6                        | 10 | 14 | 136 |
| 疲労載荷有・静的付着試験用 |                          |    | 14 | 28  |

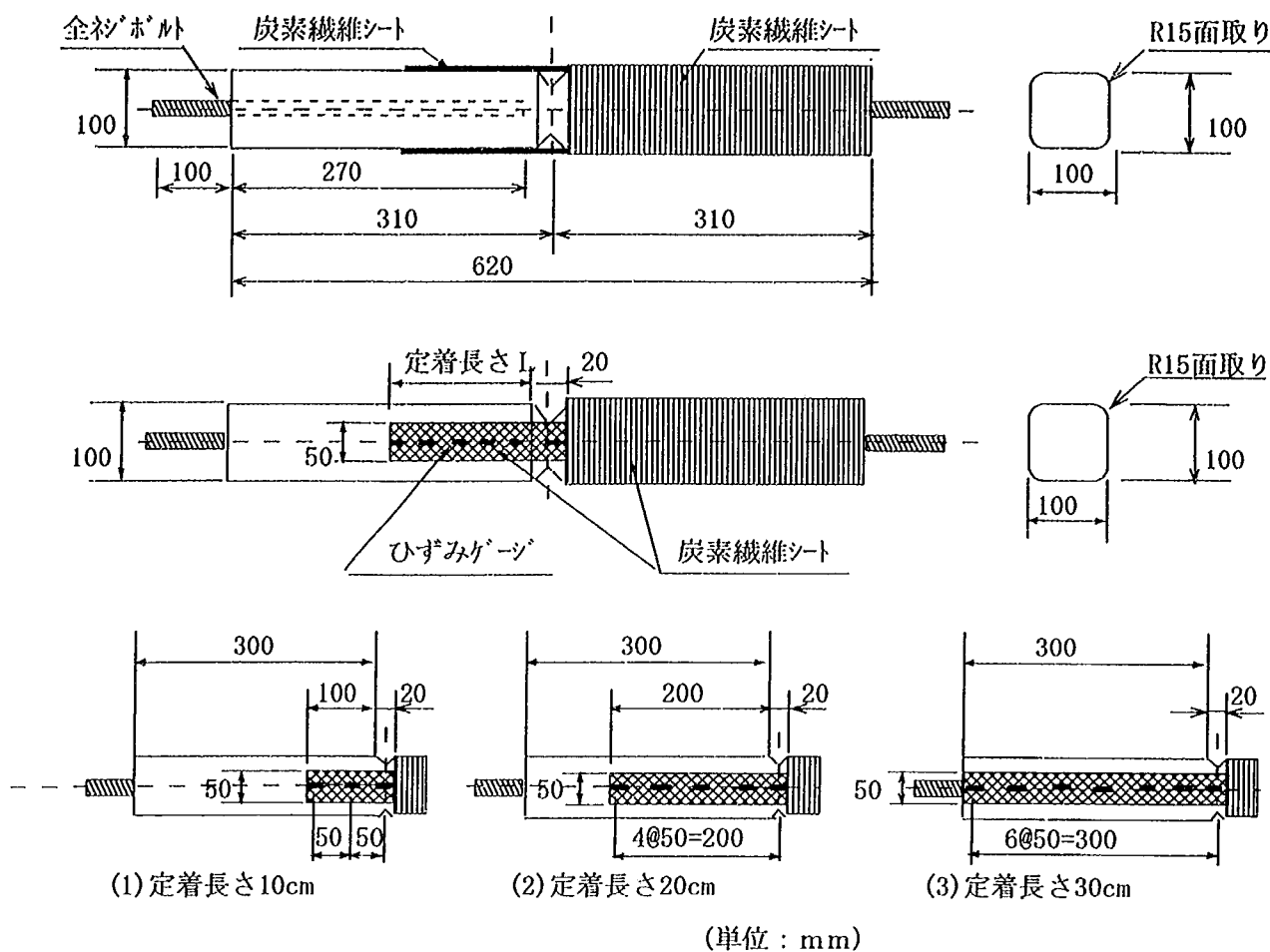


図-3.1 付着試験用試験体形状

### 3.3 使用材料

付着試験体のコンクリート配合を表-3.2に、その材料特性値試験結果を表-3.3に示す。なお、使用する炭素繊維シートの分類は表-2.1に示すB-5およびC-9とする。

表-3.2 コンクリートの配合

| 設計基準強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | W/C<br>(%) | S/a<br>(%) | 配 合 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |     |       |
|----------------------------------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|-----|-------|
|                                  |            |            | セメント                     | 水   | 細骨材 | 粗骨材 | 混和剤   |
| 150                              | 71         | 48.5       | 248                      | 176 | 180 | 975 | 2.654 |
| 250                              | 55.5       | 47.1       | 315                      | 175 | 828 | 972 | 3.371 |
| 350                              | 45.2       | 45.4       | 392                      | 177 | 768 | 964 | 4.194 |

(注) 混和剤は、  
AE減水剤ボゾリス  
No. 70を使用。

表-3.3 コンクリート材料特性値試験結果

| 対象<br>付着試験    | 試験体名  |       | 設計基準強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 圧縮強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 弾性係数<br>(10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | ポアソン比 | 材 令                |
|---------------|-------|-------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|-------|--------------------|
| 静的<br>付着試験    | FC150 | No. 1 | 150                              | 158                            | 1.92                                           | 12.8                           | 0.184 | 76日<br>(9/18~12/3) |
|               |       | No. 2 |                                  | 158                            | 1.84                                           | 15.6                           | 0.142 |                    |
|               |       | No. 3 |                                  | 153                            | 1.83                                           | 13.9                           | 0.218 |                    |
|               |       | 平均    |                                  | 156                            | 1.86                                           | 14.1                           | 0.181 |                    |
|               | FC250 | No. 1 | 250                              | 237                            | 2.21                                           | 17.4                           | 0.185 |                    |
|               |       | No. 2 |                                  | 226                            | 2.37                                           | 18.7                           | 0.160 |                    |
|               |       | No. 3 |                                  | 231                            | 2.41                                           | 18.3                           | 0.177 |                    |
|               |       | 平均    |                                  | 231                            | 2.33                                           | 18.1                           | 0.174 |                    |
|               | FC350 | No. 1 | 350                              | 343                            | 2.55                                           | 23.6                           | 0.168 |                    |
|               |       | No. 2 |                                  | 346                            | 2.68                                           | 22.1                           | 0.178 |                    |
|               |       | No. 3 |                                  | 359                            | 2.60                                           | 23.4                           | 0.167 |                    |
|               |       | 平均    |                                  | 349                            | 2.61                                           | 23.0                           | 0.171 |                    |
| 疲労試験<br>No. 1 | FC350 | No. 1 | 350                              | 350                            | 3.11                                           | 22.6                           | 0.213 | 76日<br>(9/18~12/3) |
|               |       | No. 2 |                                  | 357                            | 2.92                                           | 22.3                           | 0.216 |                    |
|               |       | 平均    |                                  | 354                            | 3.02                                           | 22.5                           | 0.215 |                    |
| 疲労試験<br>No. 2 | FC350 | No. 1 | 350                              | 332                            | 2.33                                           | 22.2                           | 0.221 | 76日<br>(9/18~12/3) |
|               |       | No. 2 |                                  | 334                            | 2.37                                           | 19.0                           | 0.207 |                    |
|               |       | No. 3 |                                  | 324                            | 2.20                                           | 20.1                           | 0.227 |                    |
|               |       | 平均    |                                  | 330                            | 2.30                                           | 20.4                           | 0.218 |                    |

### 3.4 試験方法

付着試験は、建設省土木研究所材料構造共同実験棟に設置されている載荷試験機（MTS社製）を用いて実施した。載荷は加力装置を用いて、全ネジボルトに引張力を加える方法で行なった。なお、全ネジボルトを加力フレームに垂直に取り付け、試験体に局部曲げが生じないように配慮した。

#### 3.4.1 静的試験

静的試験の載荷方法は単調引張載荷とし、破壊まで行なう。静的試験を行なう試験体種類は、表-3.4に示す12体である。試験時には、図-3.1に示すコンクリートブロックに引張荷重を載荷した際のCFRPシート各部のひずみ分布測定を行なう。

表-3.4 付着試験(静的試験)試験体

| 試験体<br>No. | コンクリート<br>設計基準強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 定着長さ<br>L<br>(cm) | 貼付幅<br>W<br>(cm) | CFRPシート分類 |                                  |                                  |
|------------|--------------------------------------------|-------------------|------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|
|            |                                            |                   |                  | 材料<br>No. | 公称弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 保証引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| F T- 1     | 350                                        | 10                | 5                | B-5       | 2. 35×10 <sup>6</sup>            | 35, 000                          |
| F T- 2     | 350                                        | 20                |                  |           |                                  |                                  |
| F T- 3     | 250                                        | 30                |                  |           |                                  |                                  |
| F T- 4     | 350                                        |                   |                  |           |                                  |                                  |
| F T- 5     | 250                                        |                   |                  |           |                                  |                                  |
| F T- 6     | 150                                        |                   |                  |           |                                  |                                  |
| F T- 7     | 350                                        | 10                |                  | C-9       | 6. 50×10 <sup>6</sup>            | 20, 000                          |
| F T- 8     | 350                                        | 20                |                  |           |                                  |                                  |
| F T- 9     | 250                                        | 30                |                  |           |                                  |                                  |
| F T-10     | 350                                        |                   |                  |           |                                  |                                  |
| F T-11     | 250                                        |                   |                  |           |                                  |                                  |
| F T-12     | 150                                        |                   |                  |           |                                  |                                  |

### 3.4.2 疲労載荷および疲労載荷後の静的試験

疲労載荷および疲労載荷後の静的試験は、表-3.5に示す2体の試験体を用いて、次により行う。

- (1) 試験体の形状、寸法は図-3.1と同様で、定着長さは疲労載荷の影響を確実に対比することができる30cmとする。
- (2) コンクリートの設計基準強度は、 $350 \text{ kgf/cm}^2$ とする。
- (3) 繰り返し載荷荷重は、載荷レベルおよびCFRPシート応力レベルをCFRPシートの公称弾性係数に応じて表-3.5の通りとし、応力比を0.1とする。疲労載荷は繰り返し荷重を載荷速度2Hzで200万回載荷し、疲労載荷中は、1, 10, 100, 1000, 1万, 10万, 20万回で、また、20万回以降は200万回まで20万回毎にCFRPシートのひずみを測定する。
- (4) 疲労載荷後の静的試験は、3.4.1静的試験に準ずる。

表-3.5 付着試験(疲労試験)試験体

| 試験体<br>No. | 定着長さ<br>L<br>(cm) | 貼付幅<br>W<br>(cm) | CFRPシート分類 |                                  |                                  | CFRPシート<br>応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )<br>( $\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ ) | 疲労荷重<br>(kgf)<br>( $P_{\max}/P_{\min}$ ) |
|------------|-------------------|------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
|            |                   |                  | 材料<br>No. | 公称弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 保証引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |                                                                           |                                          |
| HF-1       | 30                | 5                | B-5       | $2.35 \times 10^6$               | 35,000                           | 2,500 / 250                                                               | 417.5 / 41.8                             |
| HF-2       | 30                | 5                | C-9       | $6.50 \times 10^6$               | 20,000                           | 6,000 / 600                                                               | 858 / 85.8                               |

### 3.5 試験結果

#### 3.5.1 静的試験

##### (1) 破壊状況

各試験体の破壊状況を、図-3.2および図-3.3に示す。

高強度タイプの炭素繊維シートを貼り付けた試験体No. FT-1～FT-6は、いずれも荷重の増加とともにCFRPシートの付着切れが進行し、試験体に貼り付けたCFRPシートのいずれかの面、または両面同時に付着切れが生じ終局状態に至った。付着切れしたCFRPシートの裏面には、いずれもコンクリートの破片が全面に付着していた。一方、高弾性タイプの炭素繊維シートを貼り付けた試験体No. FT-7～FT-12は、いずれも中央ノッチ部でCFRPシートが破断し終局状態に至った。

なお、コンクリート設計基準強度は、どのタイプの炭素繊維シートを用いた試験体においても、破壊状態を変えるほどの影響を与えていない。

##### (2) 最大荷重と平均付着強度

試験体No. FT-1～FT-12の最大荷重と平均付着強度を表-3.7に示す。ここで、平均付着強度 $\tau_{ef}$ は次式により求めた値である。

$$\tau_{ef} = P_u / \{ (\text{貼付面積}) \times 2 \} = P_u / \{ (L \times 5.0) \times 2 \}$$

ただし、 $P_u$ ：最大荷重

$L$ ：炭素繊維シート定着長さ

なお、高弾性タイプの平均付着強度は、試験体の破壊がCFRPシートの破断であったが、便宜的に本式で求めることとした。

炭素繊維シート種類、炭素繊維シート定着長さ、および、試験体のコンクリート設計基準強度と最大荷重および平均付着応力度の関係を、図-3.4～図-3.6に示す。

図-3.4は、高強度タイプの炭素繊維シートの場合では、定着長さが長くなるにつれて最大荷重が増加する傾向にあること、しかも定着長さが10cmから20cmへ変化する時の増加傾向が大きいことを示している。一方、高弾性タイプの炭素繊維シートの場合では、定着長さが長くなっても必ずしも最大荷重が増加していないことを示している。これは、高強度タイプの破壊性状が付着切れであるのに対し、高弾性タイプの破壊性状がシート破断であることを特徴的に示しているといえる。図-3.5は、高強度タイプの炭素繊維シートの場合において、試験体のコンクリート設計基準強度に関係なく、平均付着応力度が $9 \text{ kgf/cm}^2$ であっても付着切れを起こしていることから、付着切れ防止のためには更に低い平均付着応力度が要求されることを示している。図-3.6は、高弾性タイプの場合において、実際施工上の最小定着長さであると想定される定着長さ20cm時で、コンクリート設計基準強度 $35.0 \text{ kgf/cm}^2$ のとき平均付着応力度 $12 \text{ kgf/cm}^2$ 、同じく $25.0 \text{ kgf/cm}^2$ のとき $10 \text{ kgf/cm}^2$ と、コンクリート設計基準強度が低くなるにつれて、平均付着強度の低下傾向がみられるものの、この程度の平均付着強度を確保すれば十分安全にCFRPシート破断とすることができると

とを示している。また、コンクリート設計基準強度が  $350 \text{ kgf/cm}^2$  のときは、定着長さが  $10 \text{ cm}$  であっても平均付着強度  $25 \text{ kgf/cm}^2$  を発揮してCFRPシート破断とすることができることを示している。

### (3) CFRPシートの中央ノッチ部最大ひずみ

CFRPシートの中央ノッチ部最大ひずみと定着長さとの関係、および、この関係に与えるコンクリート設計基準強度の影響を図-3.7に示す。図-3.7は高強度タイプの炭素繊維シートの場合には、最大ひずみレベルが  $8,000 \sim 13,000 \mu$  であり、しかも定着長さが長くなる程、また、コンクリート設計基準強度が大きくなる程、CFRPシート引張自由端側の最大ひずみが増加することを示している。これは、図-3.4では最大荷重に与えるコンクリート設計基準強度の影響については明確にみられなかったものの、やはり、コンクリートの圧縮強度で代表される弾性係数や引張強度が、炭素繊維シートの付着性状に影響を与えていることを示しているといえよう。

一方、高弾性タイプの炭素繊維シートの場合には、最大ひずみレベルが  $4,000 \sim 5,000 \mu$  であり、しかも定着長さおよびコンクリートの設計基準強度が、CFRPシート引張自由端側の最大ひずみにほとんど影響を与えておらず、定着長さが  $10 \text{ cm}$  あればCFRPシート破断が発生することから、これ以上の定着長さの影響を受けないことを示しているといえる。

CFRPシートの中央ノッチ部における荷重-ひずみ曲線を図-3.8(1)～図-3.8(12)に示す。これらの図において、荷重  $0 \text{ kgf}$  時にひずみが  $1,000 \sim 3,500 \mu$  まで横軸に沿って増大している区間は、載荷前に試験体ノッチ部にひび割れを入れ、コンクリートの引張抵抗力を無くしたために生じた、CFRPシートの持つ緩み除去の区間である。また、原点から出発し荷重増加と共にひずみが増加している曲線は、試験体ノッチ部が健全で、コンクリートの引張抵抗力を保持させたまま載荷を行った試験体であり、載荷重が  $500 \sim 800 \text{ kgf}$  へ達した段階で試験体ノッチ部が破断して載荷重のすべてをCFRPシートが急に負担することとなることから、このときに載荷重の増加がないにも関わらず、ひずみの急激な増加がみられる。

これらの図より、高強度タイプは、保証引張強度を公称弾性係数で除した設計終局ひずみ約  $14,000 \mu$  の  $60 \sim 95\%$  程度のひずみを発揮して付着破壊をし、高弾性タイプは、同じく設計終局ひずみ約  $3,000 \mu$  の  $130 \sim 160\%$  程度のひずみを発揮して破断していることが判る。

また、いずれのタイプの荷重-ひずみ曲線においても、載荷重が比較的小さい間は荷重増加度に比して伸びひずみの発生が多く、載荷重が大きくなるにつれて荷重-ひずみ関係が直線に近ずき、下に凸な曲線を示す特徴を有しているといえる。

### (4) CFRPシートのひずみ分布

高強度タイプ炭素繊維シートで定着長さ  $30 \text{ cm}$  の試験体で得られた、中心から  $0, 5, 10, 15 \text{ cm}$  位置でのCFRPシートの荷重-ひずみ曲線を図-3.9(4)～(6)に示す。いずれの図においても、中心から  $5 \text{ cm}$  および  $10 \text{ cm}$  の荷重-ひずみ曲線は、付着切れの徴候から進行そして完全付着切れまでのCFRPシートひずみの増加状況を良くとらえているといえる。つまり、CFRPシートひずみは、 $2,500 \times (1/10 \sim 1/5) \mu$  程度から増加傾向が目立ち、 $1,000 \mu$  を過ぎる頃から

わずかな荷重増加によって大きなひずみが生じ、 $2,500 \sim 3,000 \mu$ 程度からCFRPシート中央部0 cm位置の自由伸びである曲線勾配とほぼ等しくなることを示している。

一方、高弾性タイプ炭素繊維シートで定着長さ30 cmの試験体で得られた、中心から0, 5, 10, 15 cm位置でのCFRPシートの荷重-ひずみ曲線は図-3.9 (10) ~ (12) に示した通りである。高弾性タイプ短繊維シートを用いた試験体は、定着長さ10 cmの場合でCFRP破断であったことから、定着長さ30 cmの場合でも中心から10 cm位置のCFRPシートは完全には付着切れしていない可能性が強く、中心から5 cm位置のCFRPシートから得られたひずみが付着切れをよく捉えていると考えられる。これによれば、 $2,500 \times 1/10 \mu$ 程度と小さいひずみで付着切れの徴候が見られるものの、 $1,000 \mu$ を過ぎる頃からの荷重増加によっても大きなひずみは発生せず、この程度のひずみ段階でCFRPシート中央部0 cm位置の自由伸びである曲線勾配に近づく様子が見られ、高強度タイプの炭素繊維シートの場合とは付着切れ機構が異なることが想定される。

付着切れの進行範囲が非常に小さいと考えられる約800 kgfから約300~400 kgfごとの荷重段階のCFRPシートの定着長さ方向ひずみ分布の変化を、高強度タイプ炭素繊維シートについては図-3.10 (1) ~ (6) に、また、高弾性タイプ炭素繊維シートについては図-3.11 (1) ~ (6) にそれぞれ示す。いずれの図においても、ひずみ分布は、中央から離れるに従って二次曲線的に減少しており、CFRPシートとコンクリートとの付着機構により、CFRPシートに作用する引張力がコンクリートへ伝達されていることが判る。

また、図-3.10 (1) ~ (6) から、高強度タイプ炭素繊維シートの場合は、全体にひずみレベルが高く、かつ、荷重の増加に伴って、分布曲線が中央から離れる方向へ急速に広がっていく様子をうかがうことができる。これに比して、図-3.11 (1) ~ (6) から、高弾性タイプ炭素繊維シートの場合は、全体にひずみレベルが小さく、荷重が増加しても分布曲線の広がりが少なく、中央から10 cmを過ぎた位置のひずみは急激に減少していくことも見ることもできる。

### 3.5.2 疲労載荷および疲労後の静的試験

#### (1) 破壊状況

試験体HF-1, HF-2の疲労後静的試験による破壊状況を図-3.12に示す。

高強度タイプ炭素繊維シートを貼付けた試験体HF-1は、FT-1~FT-6の疲労無静的載荷試験結果と同様に、試験体両面ともCFRPシートの付着切れで破壊に至ったと見られた。しかし、試験後の試験体観察では、片面でCFRPシートの破断が発見され、この面ではCFRPシート破断時衝撃の影響で付着切れが発生した可能性が高く、疲労載荷期間中にコンクリート表面に塗布したプライマー等樹脂類の硬化進行により付着能力が向上したものと想定できよう。

一方、高弾性タイプ炭素繊維シートを貼付けた試験体HF-2は、FT-7~FT-12の疲労無静的載荷試験結果と同様、試験体両面でのCFRPシート破断で破壊に至った。

## (2) 最大荷重および平均付着応力度

試験体HF-1およびHF-2の最大荷重および平均付着応力度を、コンクリート設計基準強度と炭素繊維シートの種類、および、定着長さが等しいFT-4およびFT-10の疲労無静的載荷試験の各値と比較して、表-3.8に示す。

高強度タイプの試験体HF-1は、最大荷重3.94tf、平均付着強度13.14kgf/cm<sup>2</sup>であり、疲労無試験体FT-4の各値2.75tf、9.16kgf/cm<sup>2</sup>の約1.5倍を示した。これは、試験誤差では片付け得ない程の大きい差であり、破壊状況において片面のCFRPシート破断の傾向が見られたように、やはり疲労載荷期間中の付着性能の向上が原因と想定できよう。

高弾性タイプの試験体HF-2は、最大荷重2.06tf、平均付着強度6.87kgf/cm<sup>2</sup>と、疲労無試験体FT-10の各値2.05tf、6.83kgf/cm<sup>2</sup>とほとんど変化のない値が得られた。この試験体は、疲労載荷期間中での付着性能向上効果が発揮される以前にCFRPシートのひずみが終局ひずみへ到達してしまい、CFRPシートの破断による破壊となったものといえる。

## (3) CFRPシートの中央ノッチ部最大ひずみ

CFRPシートの中央部における荷重-ひずみ曲線を、図-3.13および図-3.14に示す。

高強度タイプの試験体HF-1および高弾性タイプの試験体HF-2の、疲労載荷後の静的載荷試験で得られた荷重-ひずみ曲線は、いずれも試験体中央ノッチ部のひび割れ発生後に疲労載荷を行ったことから載荷重初期に塑性ひずみと考えられる500~700μのひずみを示した後、疲労無静的載荷試験体FT-4およびFT-10と類似の曲線を示している。

高強度タイプ試験体HF-1の最大ひずみは11,500~12,500μで、保証引張強度を公称弾性係数で除した設計終局ひずみ約14,000μの80~90%に達しており、CFRPシート破断直前のひずみ状態であったことが明らかである。

一方、高弾性タイプ試験体HF-2の最大ひずみは3,000~4,000μで、同じく設計終局ひずみ約3,000μの100~130%と、FT-10の疲労無静的載荷試験結果と同じ傾向のひずみ度を発揮している。

## (4) CFRPシートのひずみ分布

疲労載荷後の静的載荷試験で得られた、付着切れの進行範囲が小さいと考えられる約800kgfから、約300~400kgfごとの載荷重段階の、CFRPシートの定着長さ方向ひずみ分布の変化を、高強度タイプ試験体HF-1については図-3.15に、また、高弾性タイプ試験体HF-2については図-3.16に、それぞれ示す。

HF-1およびHF-2のひずみ分布は、疲労無静的載荷試験体FT-4およびFT-10のひずみ分布にそれぞれ良く似ており、分布型の差異は無いといえ、高強度タイプ試験体での設定疲労荷重上限値約400kgf、および、高弾性タイプ試験体での設定疲労荷重上限値約850kgfで行った疲労載荷の影響が、静的試験荷重約800kgf以上でのひずみ分布にはほとんど及んでいないことを示している。

#### (5) 疲労载荷試験中のCFRPシートのひずみ分布

疲労载荷試験中に得られた疲労回数とCFRPシートの中央ノッチ部ひずみとの関係を、高強度タイプ試験体HF-1については図-3.17(1), (2)に、高弾性タイプ試験体HF-2については図-3.18(1), (2)に、それぞれ示す。

高強度タイプ試験体のひずみは、上限载荷時の場合、10万回载荷までは大きな変化はないものの、10万回以降やや減少し、100万回以降やや増加の傾向を、また下限荷重の場合、100万回载荷まではやや増加し、100万回以降もそのまま増加の傾向を、それぞれ示している。

一方、高弾性タイプ試験体のひずみは、上限载荷時の場合、10万回载荷以降やや増加するものの、100万回以降では落ち着いた傾向を、また下限荷重の場合、1万回から10万回载荷までやや大きい増加の後、100万回前後ではやや増加ではあるものの落ち着いた傾向を、それぞれ示している。

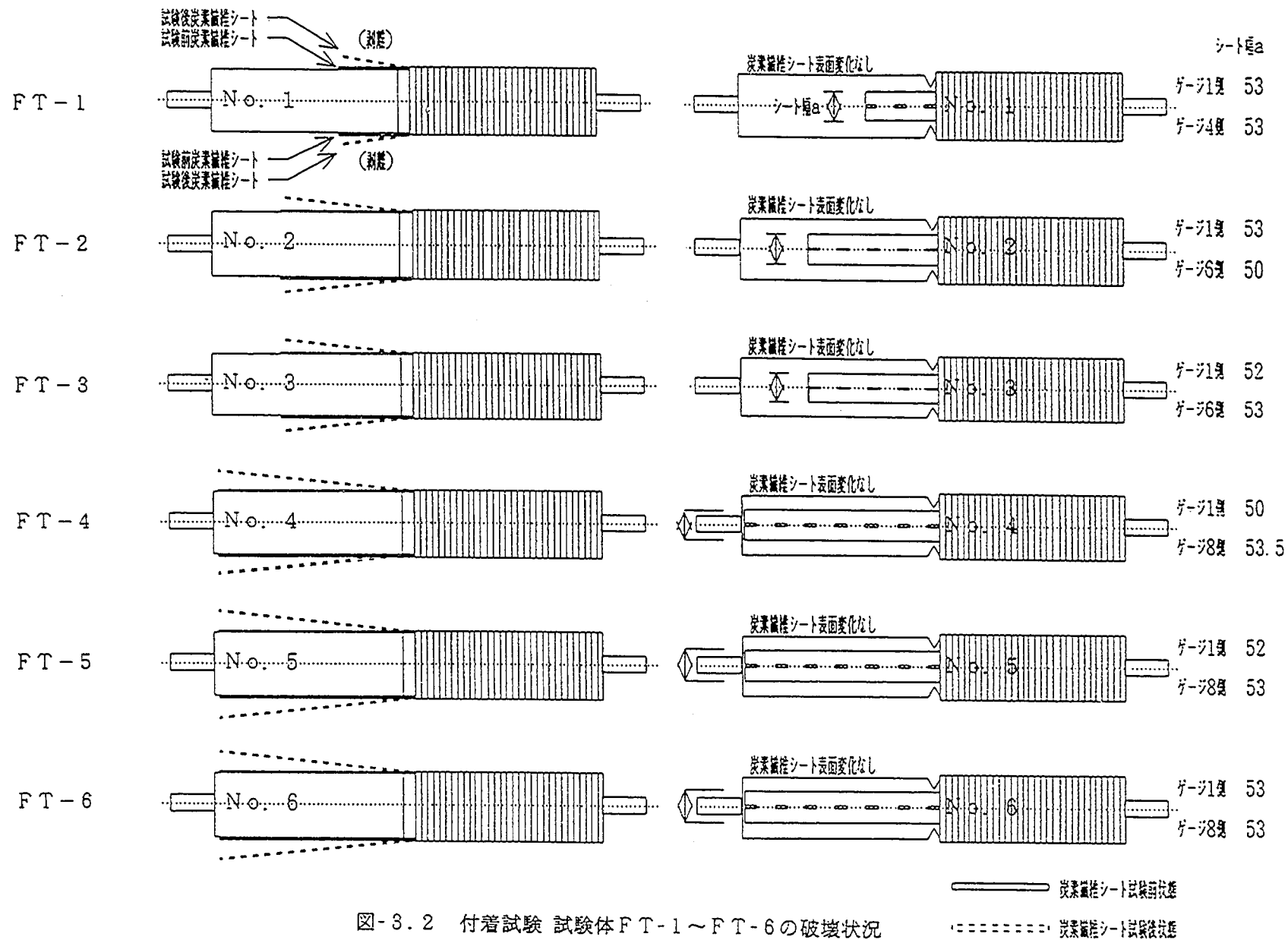
CFRPシートは、本報告書2.3で見られたように、単体では疲労の影響がほとんど無いことが一般に知られている。従って、これらの試験体におけるCFRPシート中央ノッチ部のひずみは、一定上限荷重に対して一定値を示すはずであるにも関わらずこれが変化するのは、図-3.9～図-3.10のCFRPシート各部の荷重-ひずみ曲線で見られたように、疲労载荷中にも付着切れ進行が起こり、ひずみ $\epsilon$ の構成要素である伸びを生じているCFRPシート部分の長さ変化が一様ではないことに微妙に影響されていると想定される。また、下限荷重に対して変化するのは、上限荷重によって発生した伸びが除荷時に可逆的変形を呈していないことに起因していると想定される。

いずれにしても、今回対象としている载荷範囲の疲労は、最大荷重およびひずみ分布の進展、ひいてはひずみ分布を形成する付着抵抗機構にほとんど影響を与えていないことが明らかになった。

### 3.6 試験結果のまとめ

今回実施した疲労無静的および疲労後の静的付着試験によって判明した事項は、次の通りである。

- (1) コンクリート試験体に貼り付けたシートの種類(高強度タイプ、高弾性タイプ)により、破壊状況、ひずみの大きさ、および、ひずみ伝播の傾向が異なる。
- (2) 高強度タイプの炭素繊維シートを貼り付けた試験体の破壊は、定着長さ(10, 20, 30 cm)にかかわらず、すべて付着切れで決まり、荷重の増加に伴い力の伝播が外側に移行し、最終的に付着切れとなった。
- (3) 高弾性タイプの炭素繊維シートを貼り付けた試験体の破壊は、定着長さにかかわらず全てシート破断で決まり、また、荷重の増加に伴う力の伝播範囲は中央から20 cm程度までと、高強度タイプと比べその範囲が短く、ひずみも小さかった。
- (4) 高強度タイプ、高弾性タイプとも、疲労後の静的載荷試験結果は疲労前以上を確保し、今回のそれぞれの応力レベル $\sigma_{\max}=2,500$ および $6,000 \text{ kgf/cm}^2$ 下で、200万回の疲労による性能低下などの影響は明確には現われなかった。
- (5) 最大荷重とコンクリート強度の間には、高強度タイプの場合はコンクリート強度の高い方が最大荷重は大きい傾向にあった。高弾性タイプの場合は明確な相違は確認できなかった。
- (6) 高強度タイプのCFRPシートとコンクリートの付着性状について、CFRPシートのひずみは、 $150 \sim 250 \mu$ に達するまではコンクリートと同じひずみであるが、それ以降はCFRPシートのひずみが大きく増加して、付着切れ破壊直前には、コンクリートには接着していないノッチ部のCFRPシートに貼り付けたひずみゲージの荷重-ひずみ関係と一致することが確認できた。



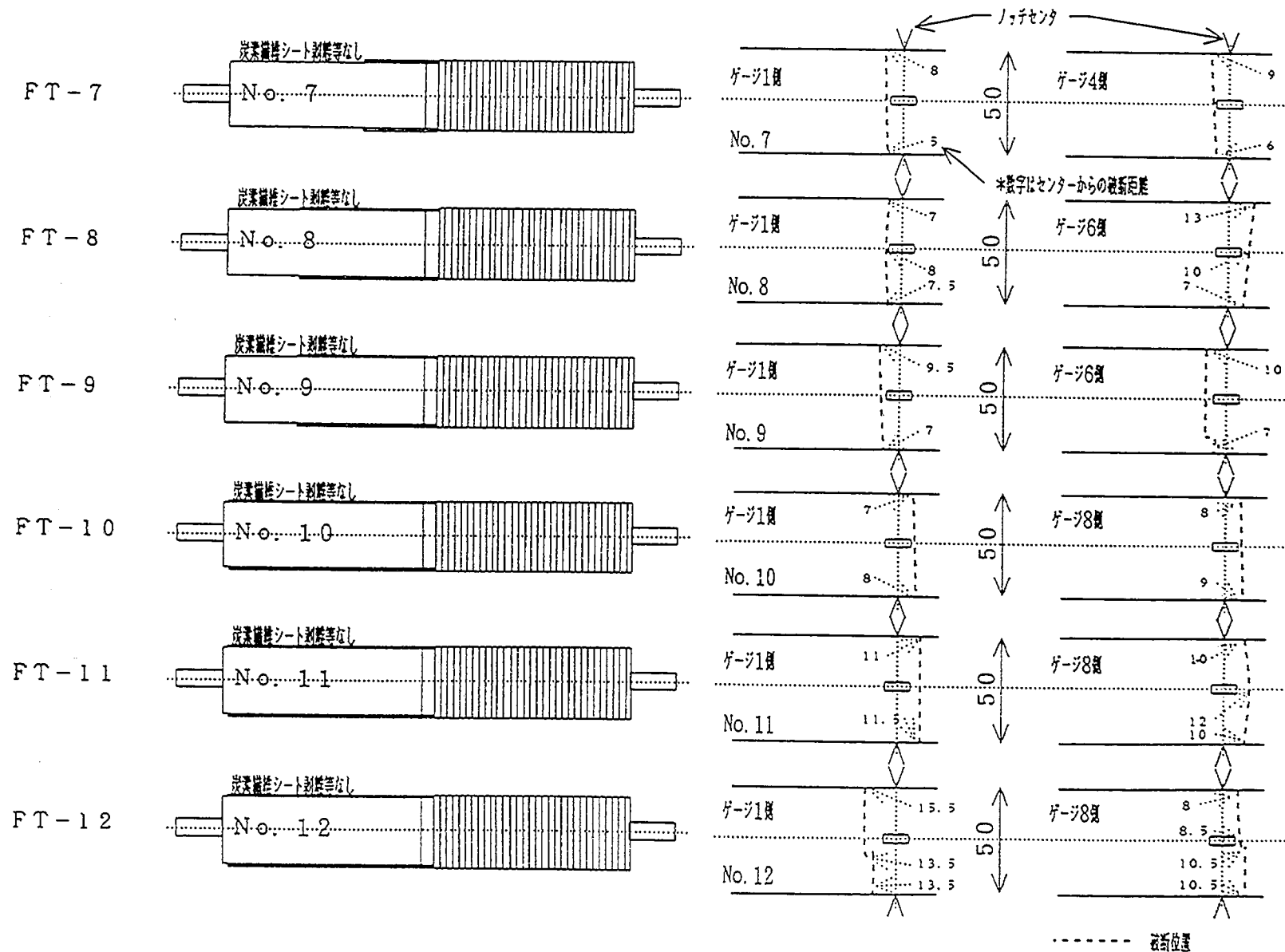
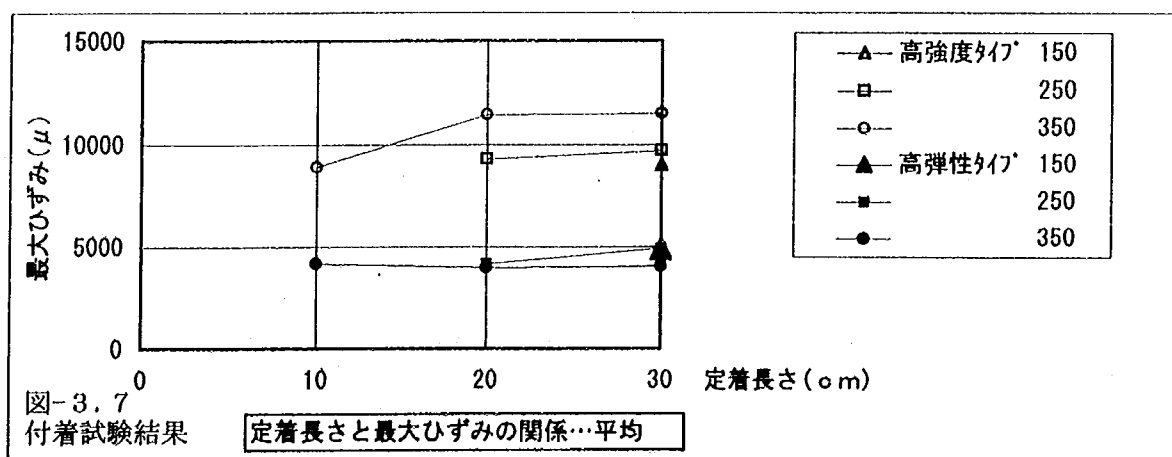
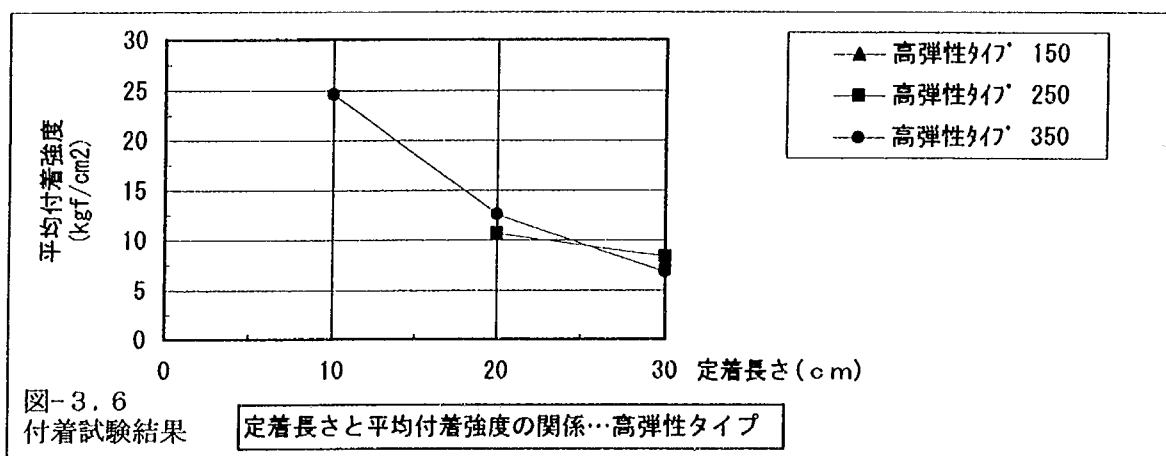
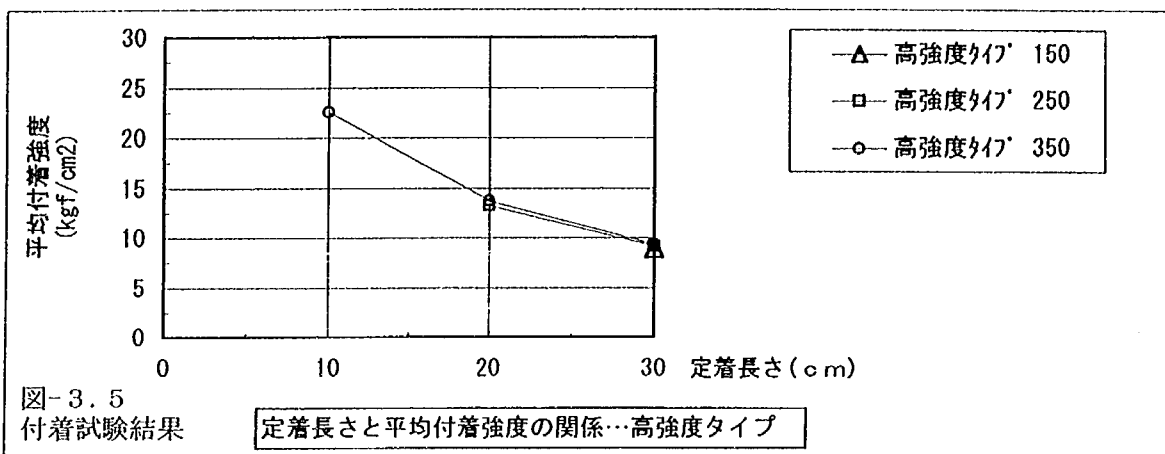
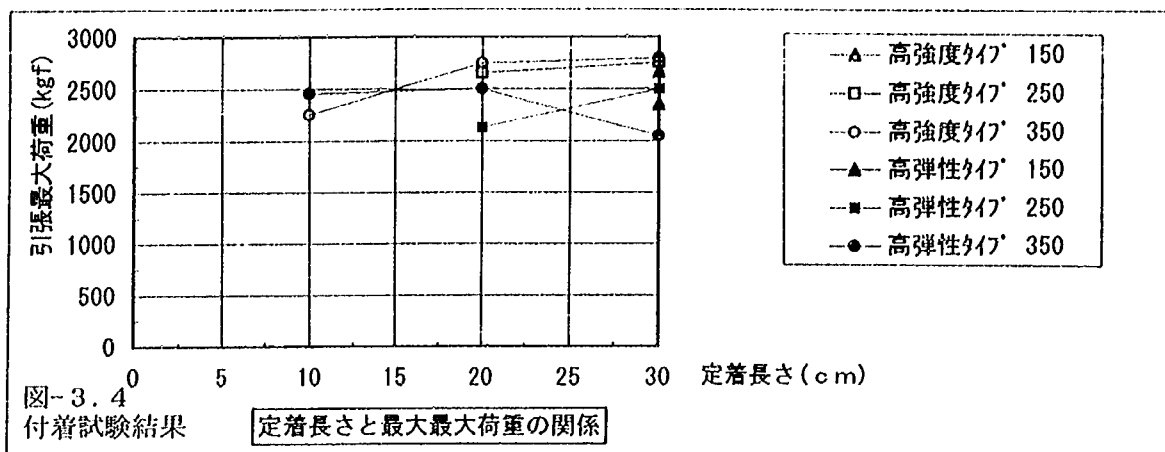


図-3.3 付着試験 試験体FT-7～FT-12の破壊状況

表-3.7 付着試験(静的試験)の最大荷重と付着強度

| 試験体<br>No. | CF<br>シート<br>タイプ | 定着<br>長さ<br>(cm) | 貼付<br>幅<br>(cm) | コンクリート圧縮強度                     |                               | 最大荷重<br>(kgf) | 平均<br>付着強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 破 壊<br>状 況      | 参照図No.    |                    |              |            |
|------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------|--------------------------------------|-----------------|-----------|--------------------|--------------|------------|
|            |                  |                  |                 | 基準強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 実強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |               |                                      |                 | 荷重-ひずみの関係 |                    |              | ひずみ<br>分 布 |
|            |                  |                  |                 |                                |                               |               |                                      |                 | 中心部       | 中心から5, 10, 15cmの位置 |              |            |
| FT-1       | 高<br>強<br>度      | 10               | 5               | 350                            | 349                           | 2,255         | 22.55                                | 付 着<br>破 壊      | 3.8(1)    | —                  | —            | 3.10(1)    |
| FT-2       |                  | 20               |                 | 350                            | 349                           | 2,752         | 13.75                                |                 | 3.8(2)    | —                  | —            | 3.10(2)    |
| FT-3       |                  | 30               |                 | 250                            | 231                           | 2,655         | 13.28                                |                 | 3.8(3)    | —                  | —            | 3.10(3)    |
| FT-4       |                  |                  |                 | 350                            | 349                           | 2,800         | 9.33                                 |                 | 3.8(4)    | a面: 3.9(4a)        | b面: 3.9(4b)  | 3.10(4)    |
| FT-5       |                  |                  |                 | 250                            | 231                           | 2,753         | 9.18                                 |                 | 3.8(5)    | a面: 3.9(5a)        | b面: 3.9(5b)  | 3.10(5)    |
| FT-6       |                  |                  |                 | 150                            | 156                           | 2,665         | 8.88                                 |                 | 3.8(6)    | a面: 3.9(6a)        | b面: 3.9(6b)  | 3.10(6)    |
| FT-7       | 高<br>弾<br>性      | 10               | 5               | 350                            | 349                           | 2,460         | 24.60                                | シ ー<br>ト<br>破 壊 | 3.8(7)    | —                  | —            | 3.11(1)    |
| FT-8       |                  | 20               |                 | 350                            | 349                           | 2,503         | 12.52                                |                 | 3.8(8)    | —                  | —            | 3.11(2)    |
| FT-9       |                  | 30               |                 | 250                            | 231                           | 2,133         | 10.67                                |                 | 3.8(9)    | —                  | —            | 3.11(3)    |
| FT-10      |                  |                  |                 | 350                            | 349                           | 2,050         | 6.83                                 |                 | 3.8(10)   | a面: 3.9(10a)       | b面: 3.9(10b) | 3.11(4)    |
| FT-11      |                  |                  |                 | 250                            | 231                           | 2,501         | 8.34                                 |                 | 3.8(11)   | a面: 3.9(11a)       | b面: 3.9(11b) | 3.11(5)    |
| FT-12      |                  |                  |                 | 150                            | 156                           | 2,348         | 7.83                                 |                 | 3.8(12)   | a面: 3.9(12a)       | b面: 3.9(12b) | 3.11(6)    |



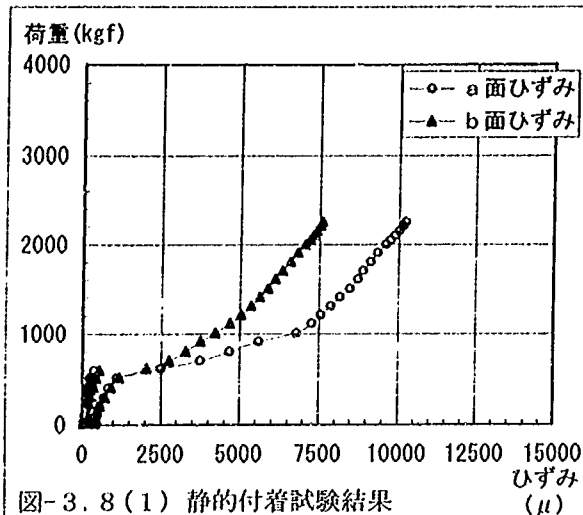


図-3.8(1) 静的付着試験結果

荷重とひずみの関係…高強度タイプ(FT-1)  
定着長さ=10cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$

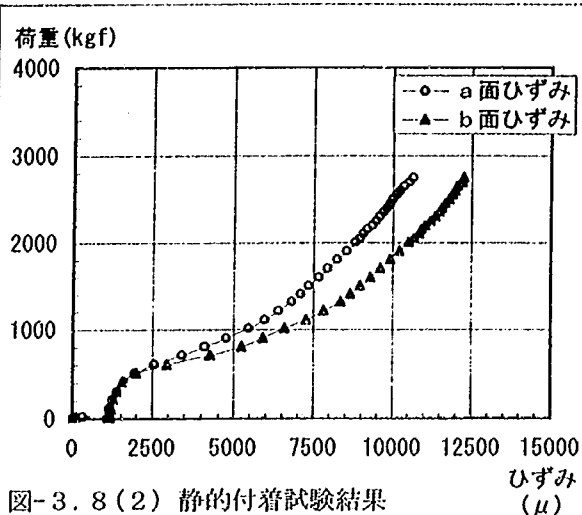


図-3.8(2) 静的付着試験結果

荷重とひずみの関係…高強度タイプ(FT-2)  
定着長さ=20cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$

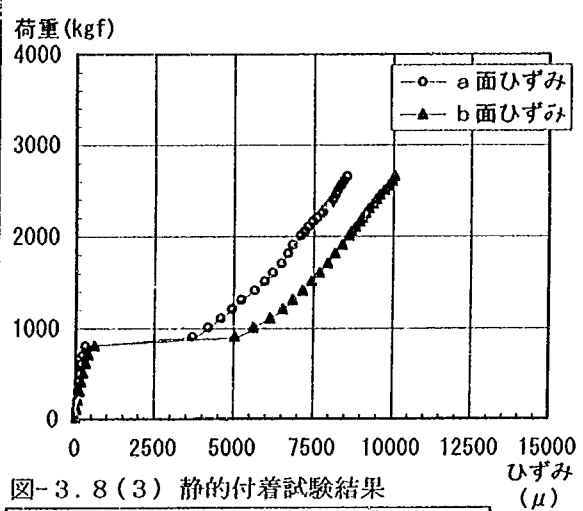


図-3.8(3) 静的付着試験結果

荷重とひずみの関係…高強度タイプ(FT-3)  
定着長さ=20cm,  $\sigma_c=250\text{kgf/cm}^2$

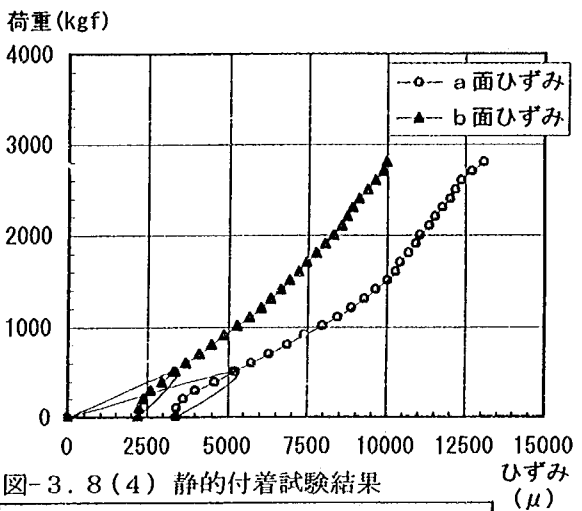


図-3.8(4) 静的付着試験結果

荷重とひずみの関係…高強度タイプ(FT-4)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$

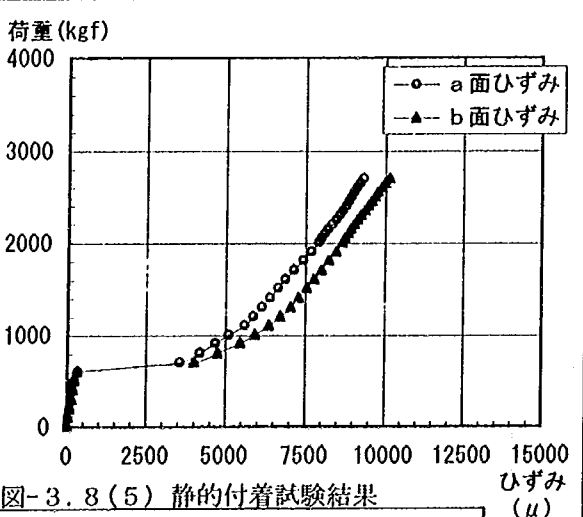


図-3.8(5) 静的付着試験結果

荷重とひずみの関係…高強度タイプ(FT-5)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=250\text{kgf/cm}^2$

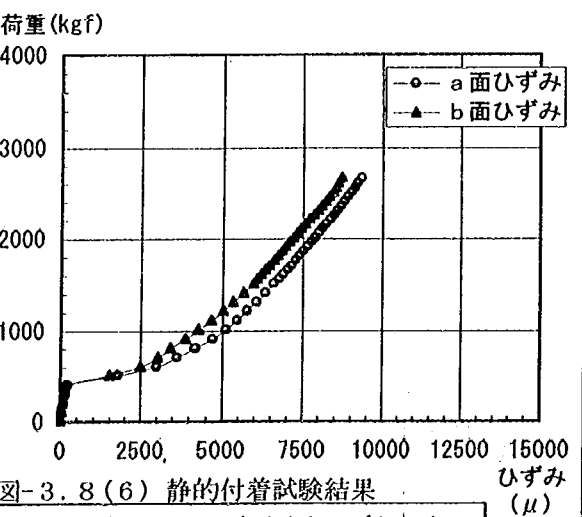
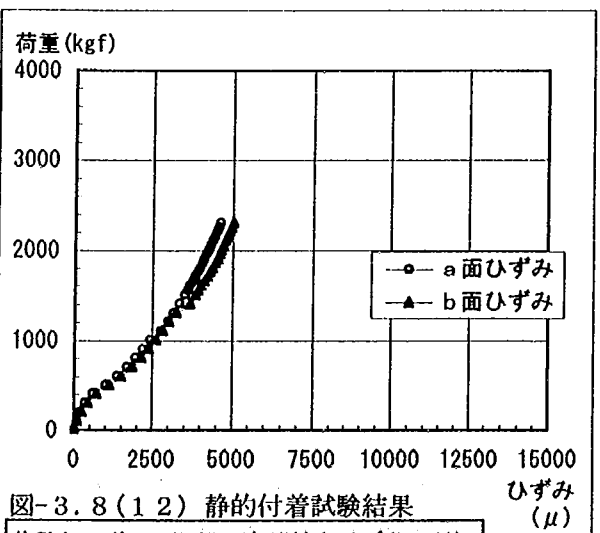
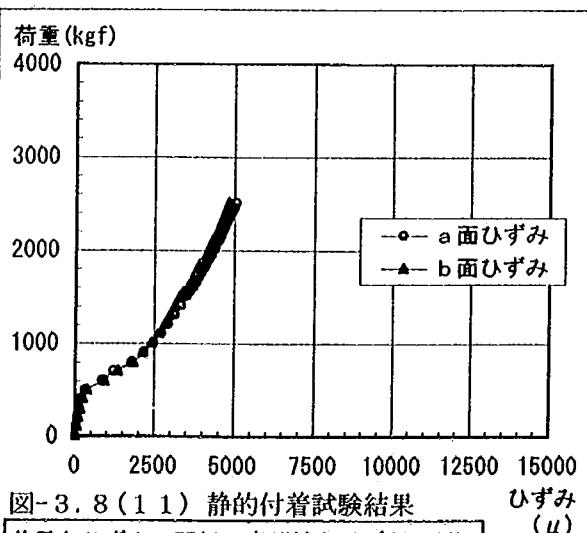
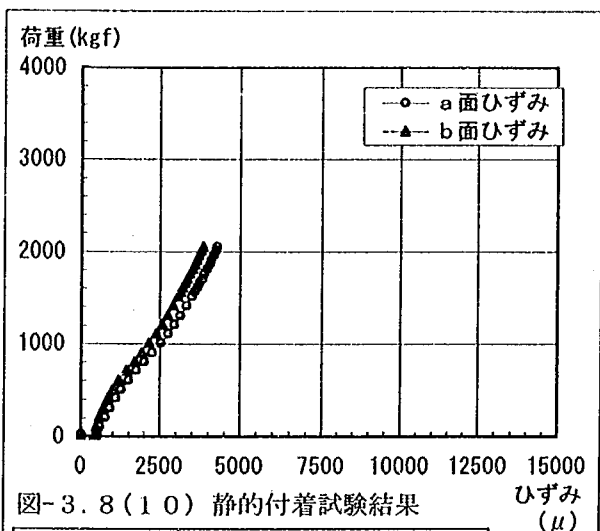
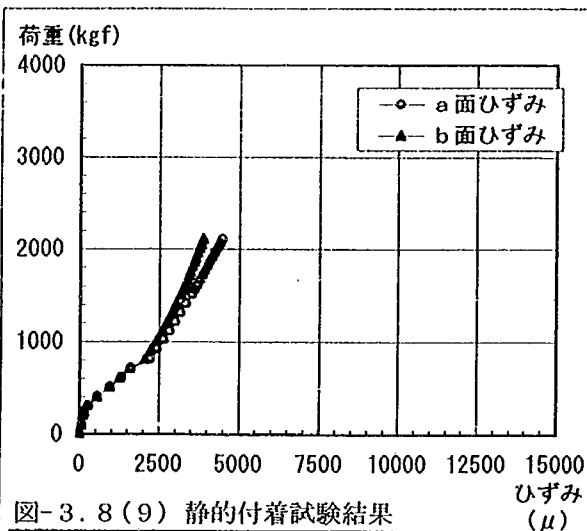
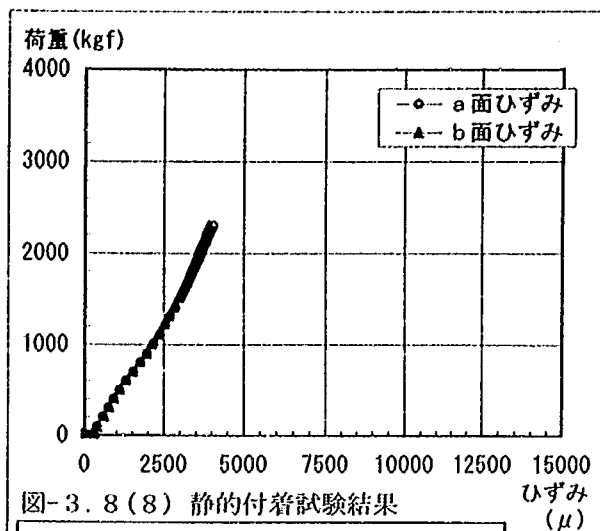
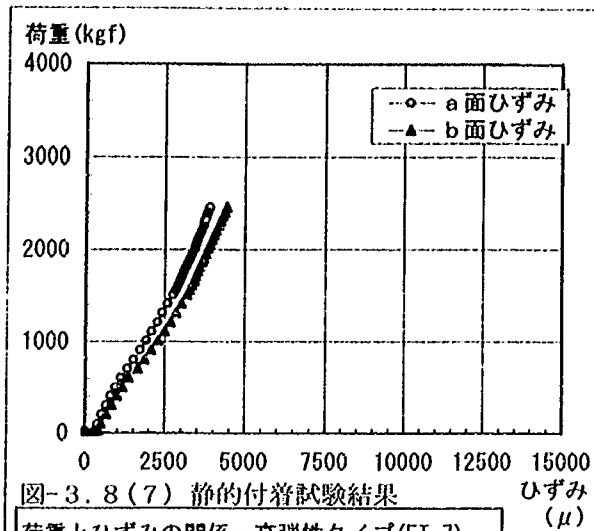


図-3.8(6) 静的付着試験結果

荷重とひずみの関係…高強度タイプ(FT-6)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=150\text{kgf/cm}^2$



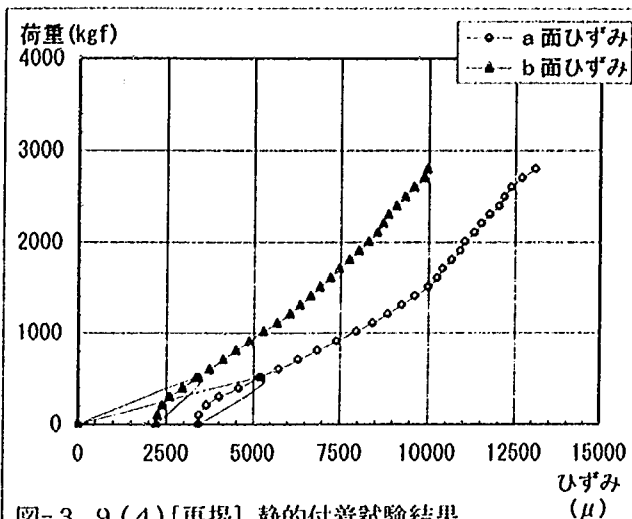


図-3.9(4) [再掲] 静的付着試験結果

荷重とひずみの関係…高強度タイプ (FT-4)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$

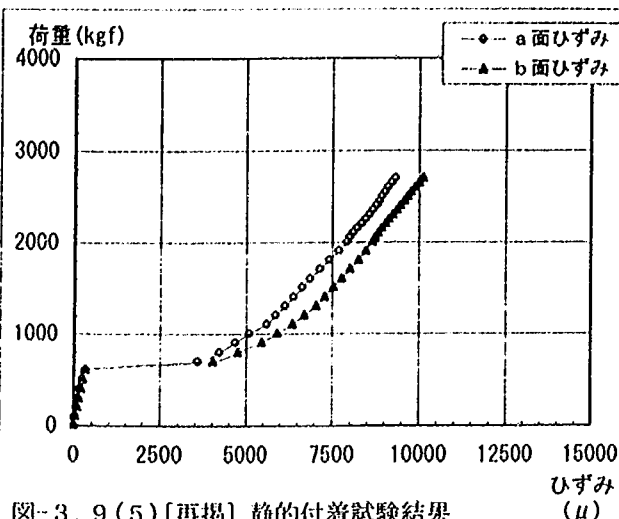


図-3.9(5) [再掲] 静的付着試験結果

荷重とひずみの関係…高強度タイプ (FT-5)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=250\text{kgf/cm}^2$

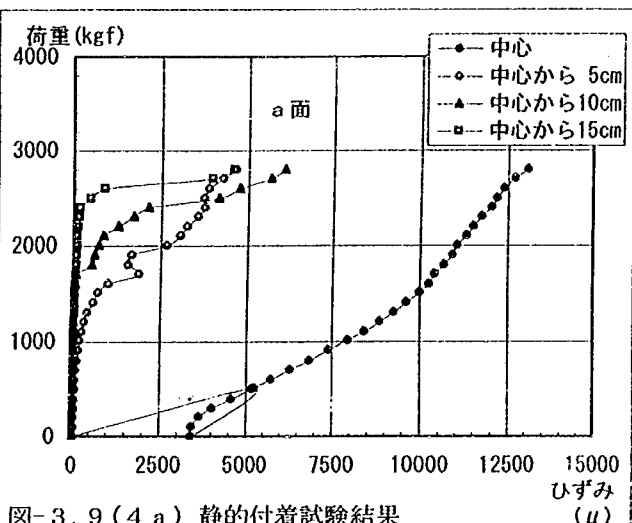


図-3.9(4a) 静的付着試験結果

荷重と a 面ひずみの関係…高強度タイプ (FT-4)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$

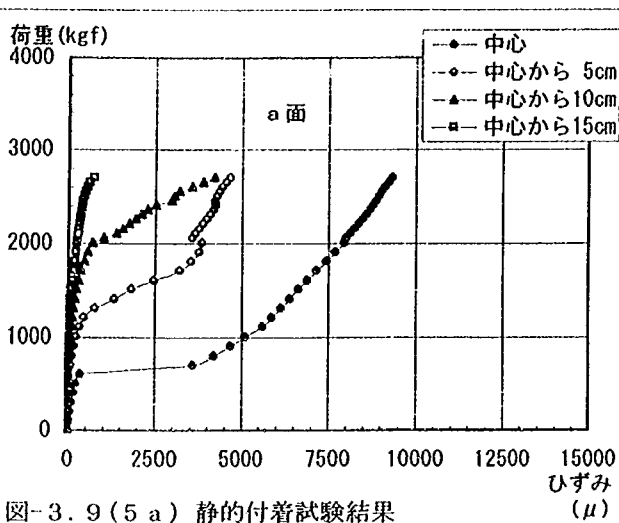


図-3.9(5a) 静的付着試験結果

荷重と a 面ひずみの関係…高強度タイプ (FT-5)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=250\text{kgf/cm}^2$

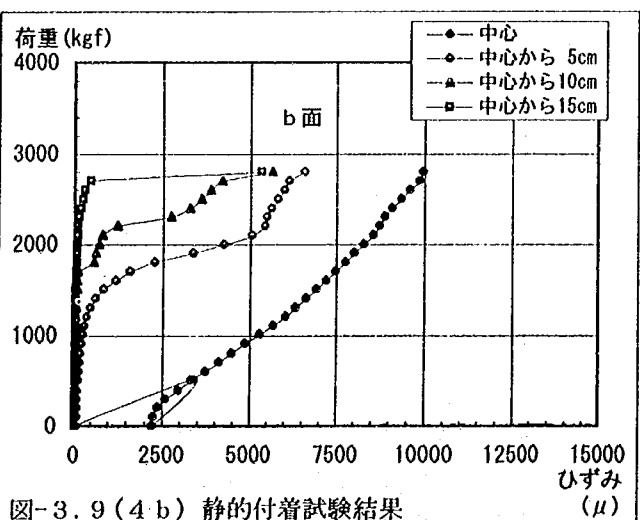


図-3.9(4b) 静的付着試験結果

荷重と b 面ひずみの関係…高強度タイプ (FT-4)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$

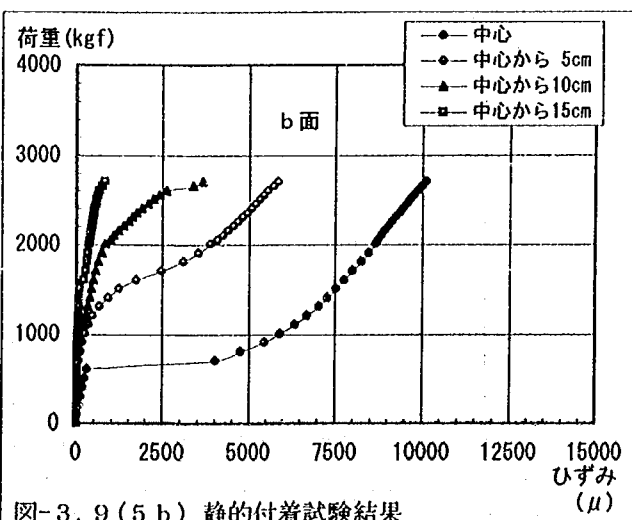


図-3.9(5b) 静的付着試験結果

荷重と b 面ひずみの関係…高強度タイプ (FT-5)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=250\text{kgf/cm}^2$

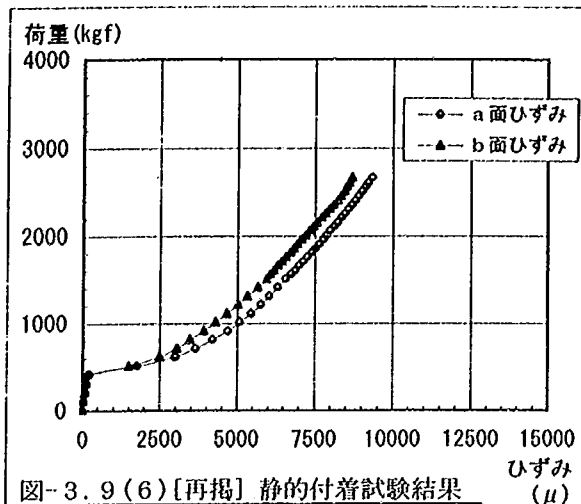


図-3.9(6)[再掲] 静的付着試験結果

荷重とひずみの関係…高強度タイプ(FT-6)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=150\text{kgf/cm}^2$

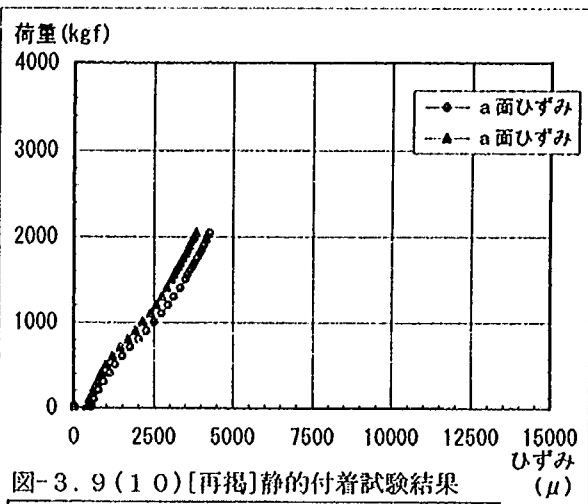


図-3.9(10)[再掲] 静的付着試験結果

荷重とひずみの関係…高弾性タイプ(FT-10)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$

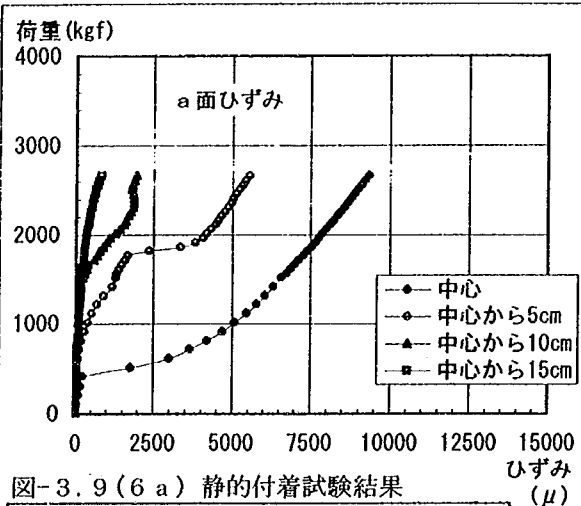


図-3.9(6a) 静的付着試験結果

荷重とa面ひずみの関係…高強度タイプ(FT-6)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=150\text{kgf/cm}^2$

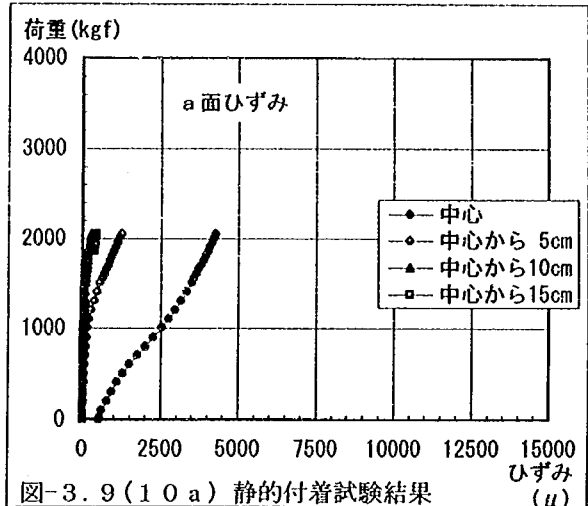


図-3.9(10a) 静的付着試験結果

荷重とa面ひずみの関係…高弾性タイプ(FT-10)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$

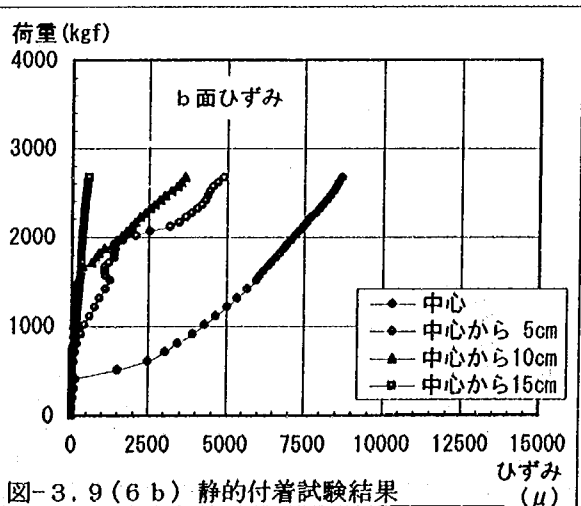


図-3.9(6b) 静的付着試験結果

荷重とb面ひずみの関係…高強度タイプ(FT-6)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=150\text{kgf/cm}^2$

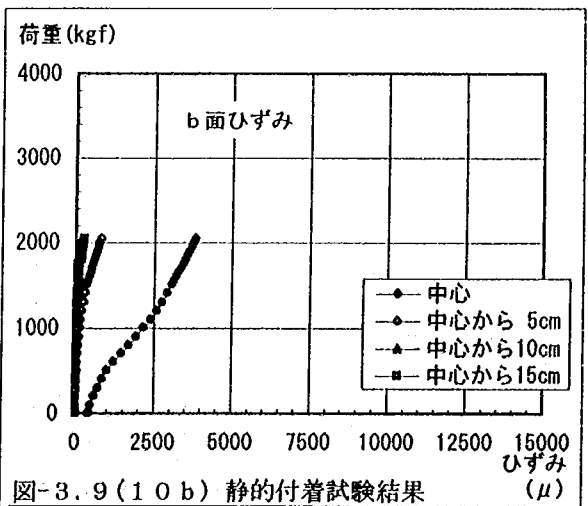
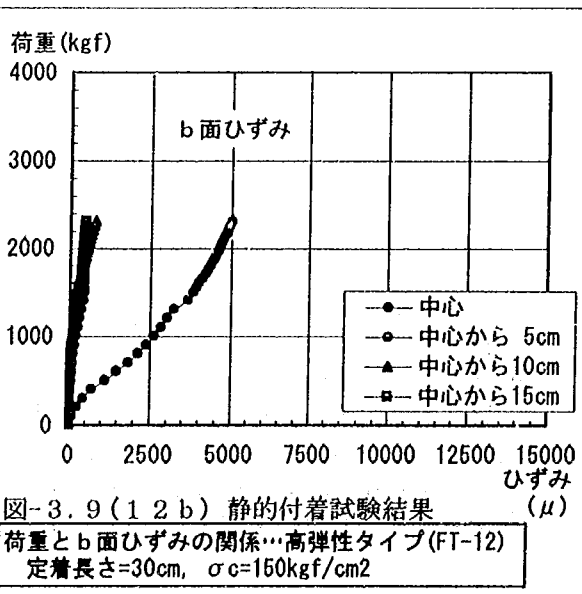
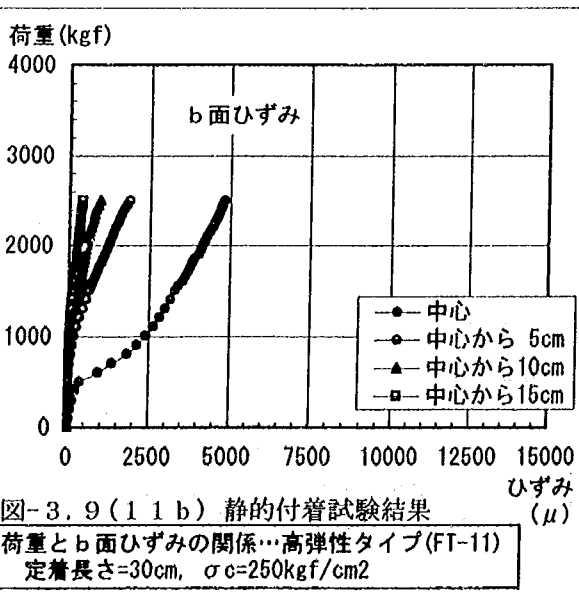
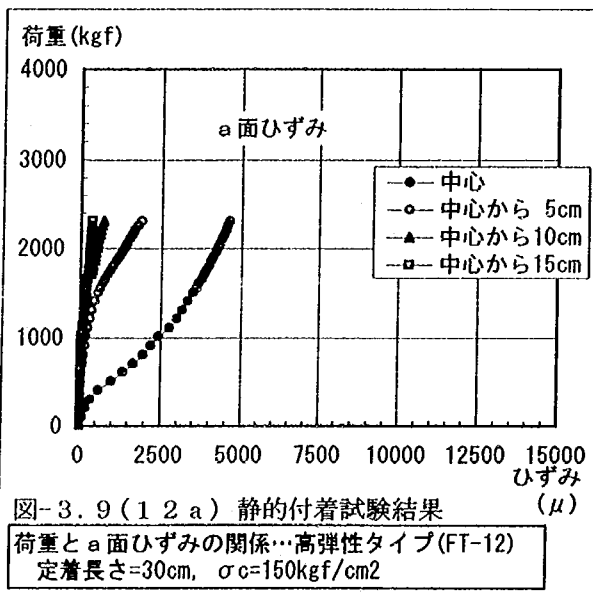
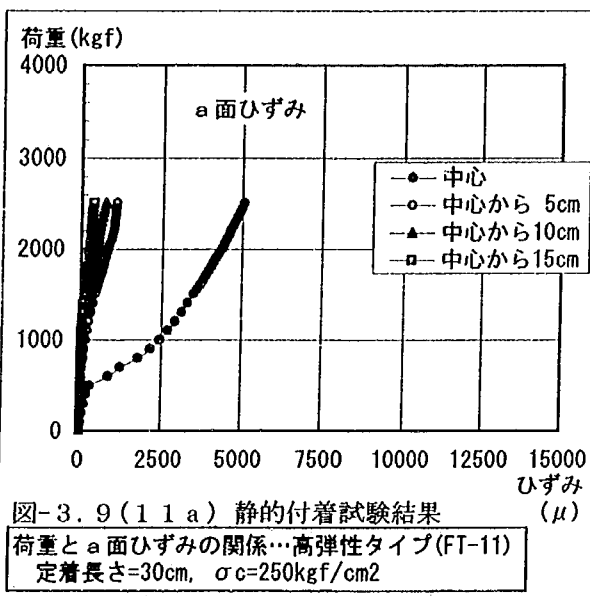
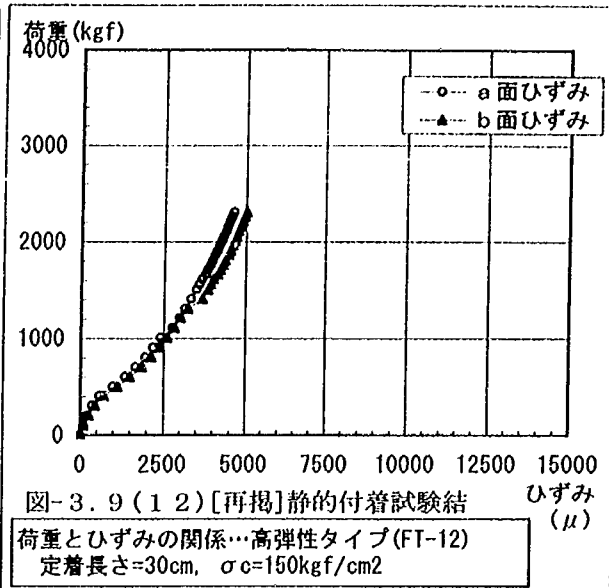
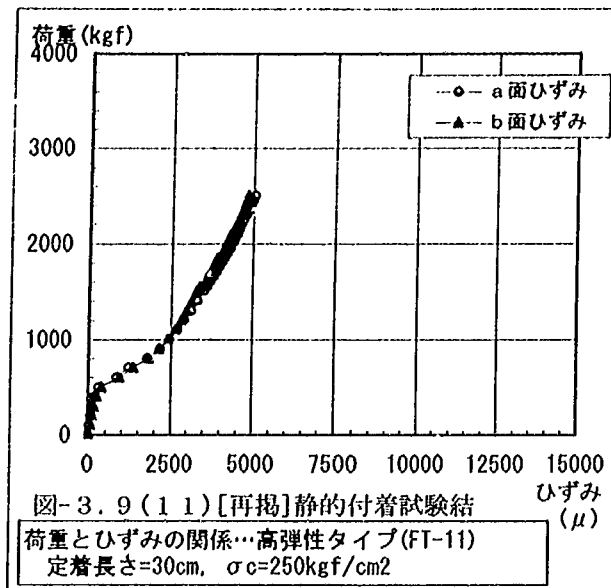
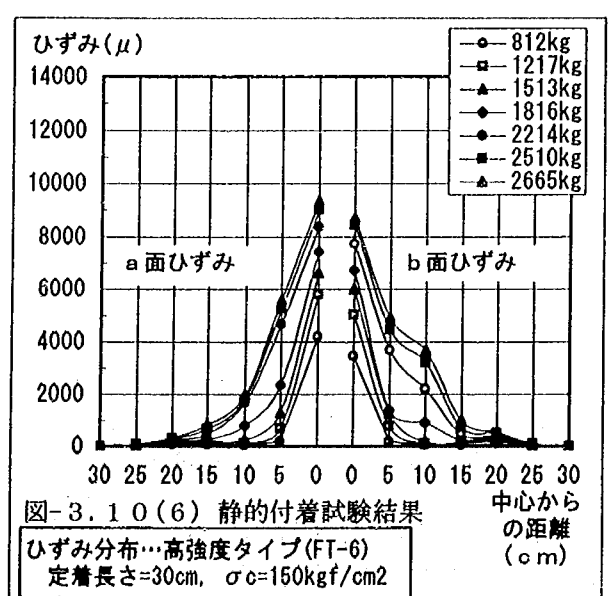
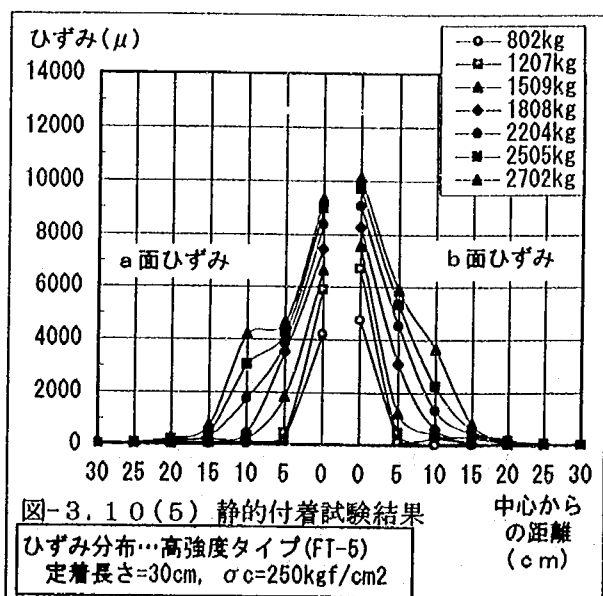
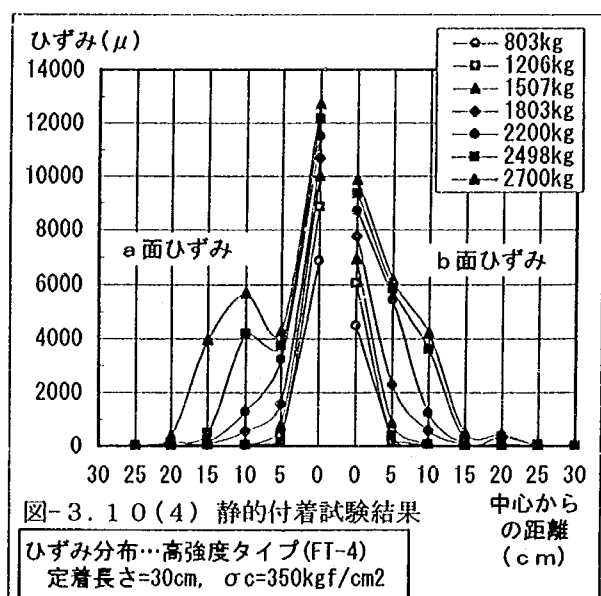
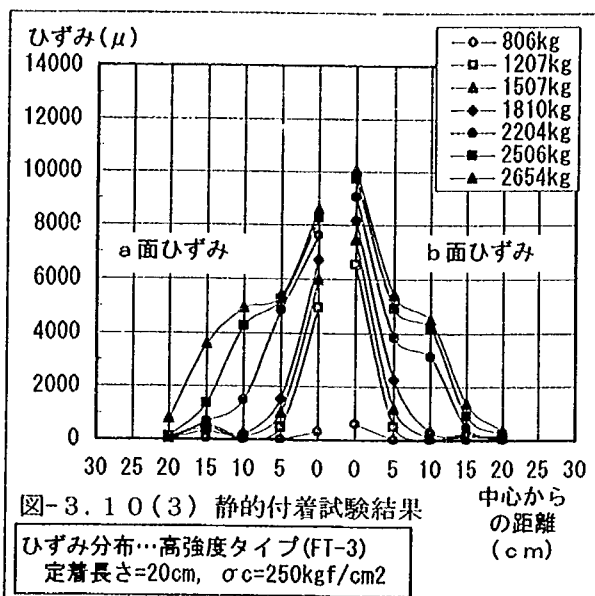
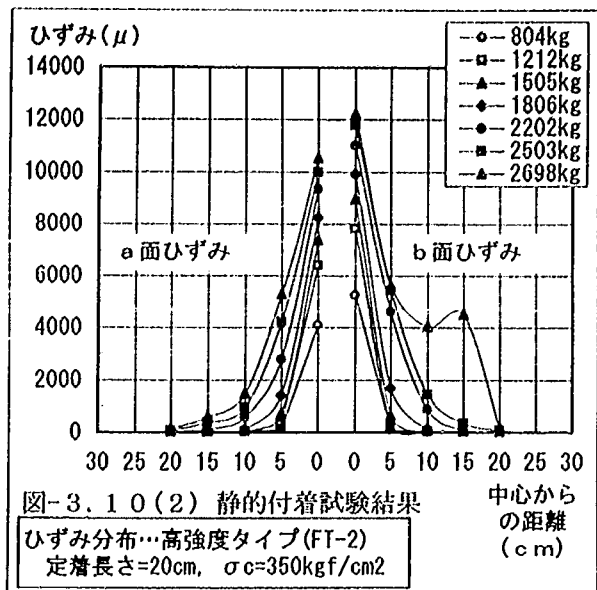
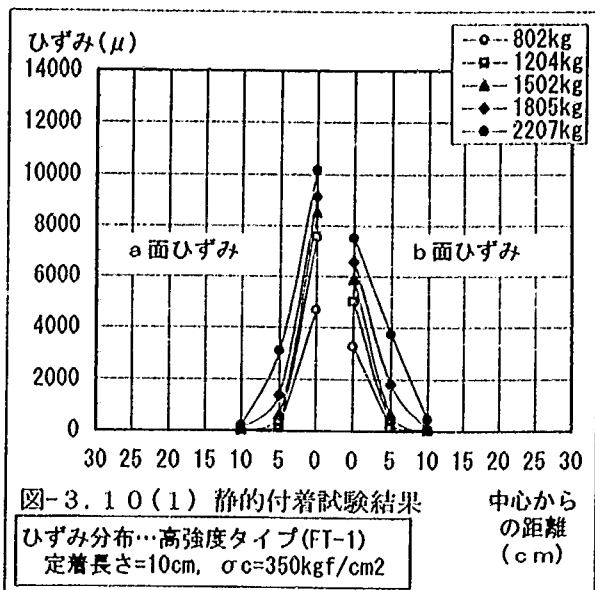
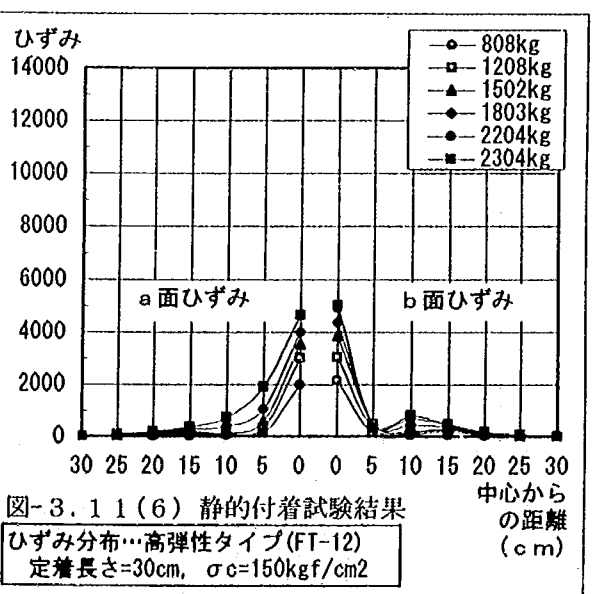
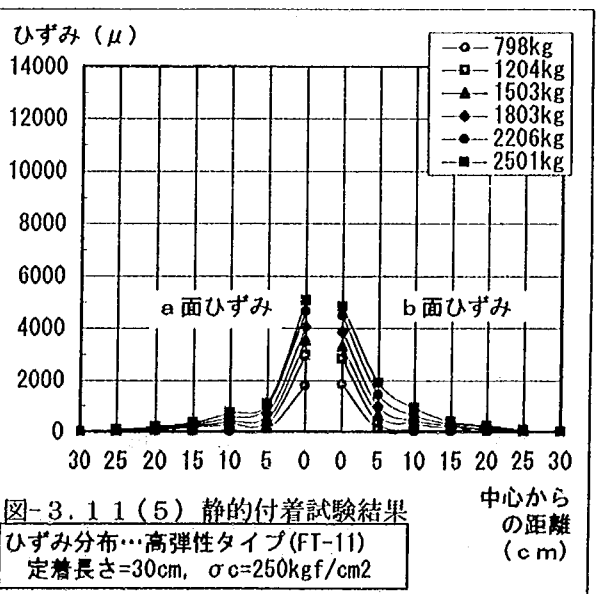
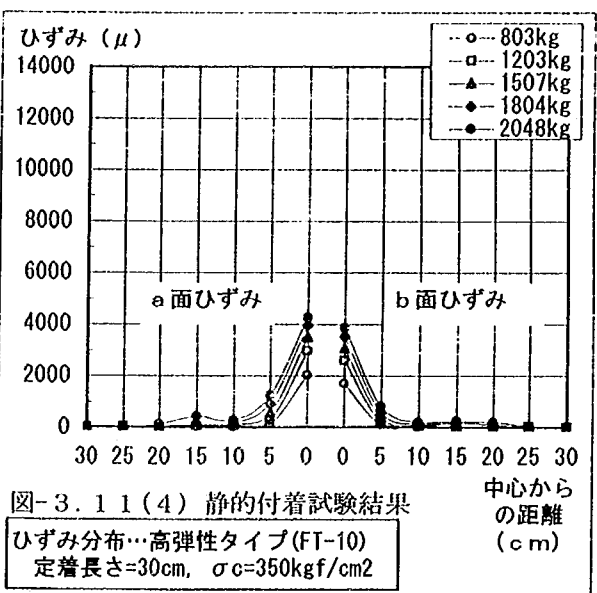
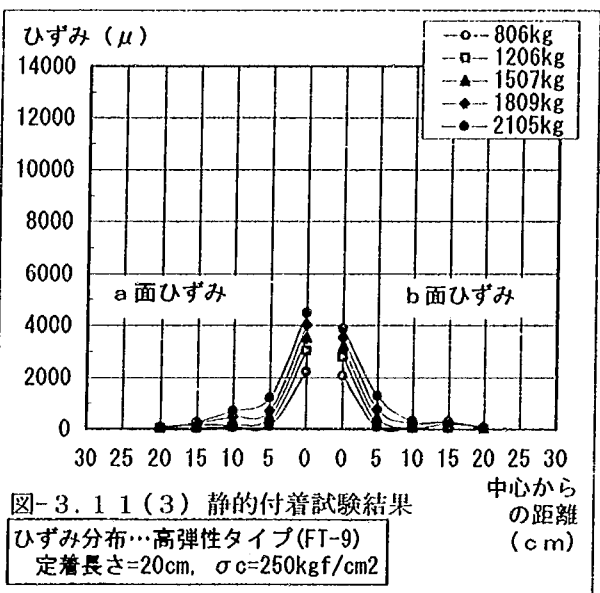
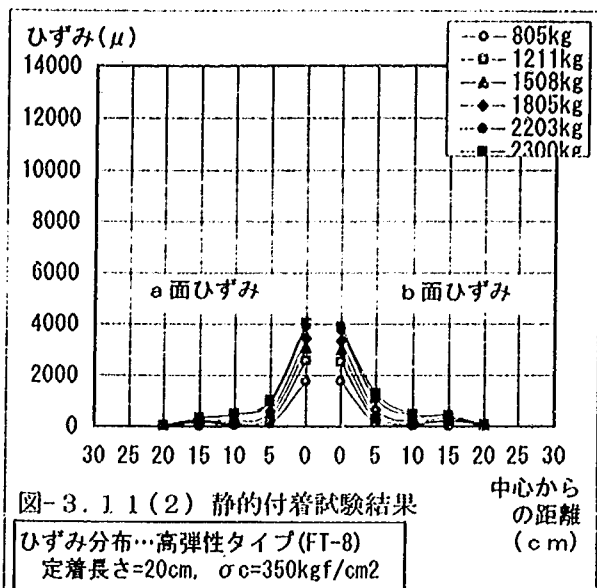
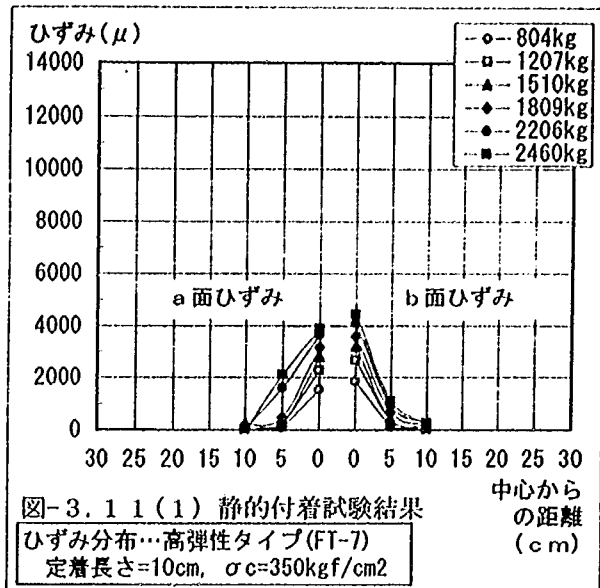


図-3.9(10b) 静的付着試験結果

荷重とb面ひずみの関係…高弾性タイプ(FT-10)  
定着長さ=30cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$







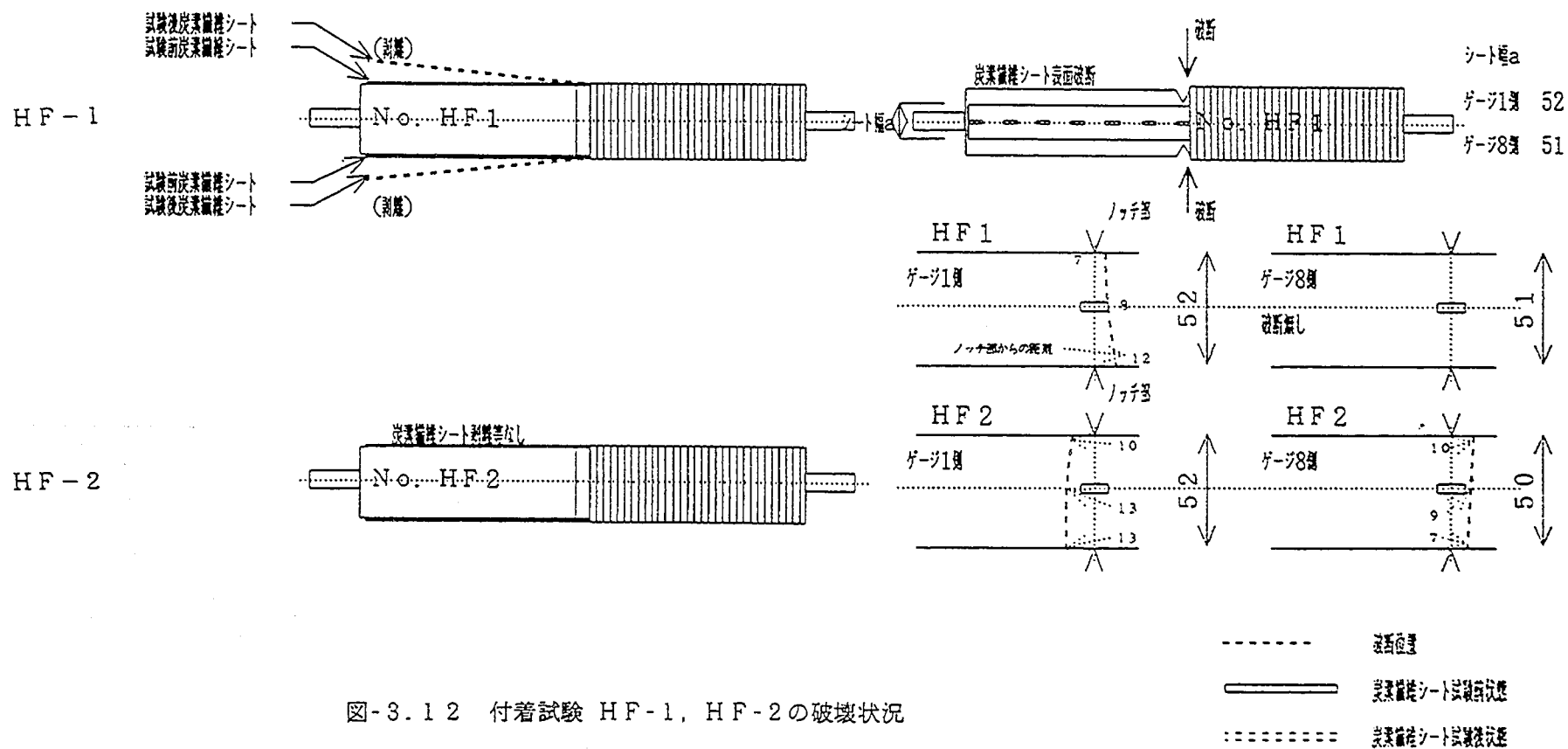


図-3.12 付着試験 HF-1, HF-2の破壊状況

表-3.8 疲労後の付着試験(静的試験)の最大荷重と付着強度

| 試験体<br>No.      | CF<br>シート<br>タイプ | 定着<br>長さ<br>(cm) | 貼付<br>幅<br>(cm) | コンクリート圧縮強度                     |                               | 最大荷重<br>(kgf)    | 平均付着<br>強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 破壊状況                  | 参照図No.        |           |
|-----------------|------------------|------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------|--------------------------------------|-----------------------|---------------|-----------|
|                 |                  |                  |                 | 基準強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 実強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |                  |                                      |                       | 荷重-ひずみ<br>の関係 | ひずみ<br>分布 |
| HF-1<br>(FT-4)  | 高強度              | 30               | 5               | 350                            | 354<br>(349)                  | 3,942<br>(2,749) | 13.14<br>(9.16)                      | 付着破壊, シート破断<br>(付着破壊) | 3.13          | 3.14      |
| HF-2<br>(FT-10) | 高弾性              | 30               | 5               | 350                            | 330<br>(349)                  | 2,061<br>(2,050) | 6.87<br>(6.83)                       | シート破断<br>(シート破断)      | 3.15          | 3.16      |

( ) 内は、疲労前試験体試験結果。

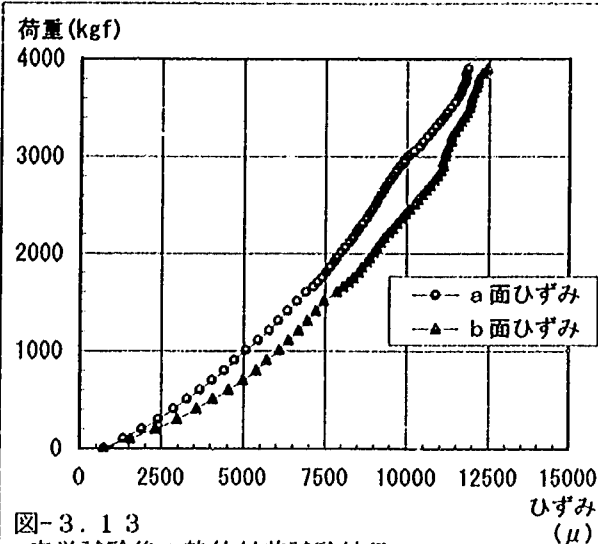


図-3.13  
疲労試験後の静的付着試験結果

荷重とひずみの関係  
高強度タイプ(HF-1), 定着長さ=30cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$

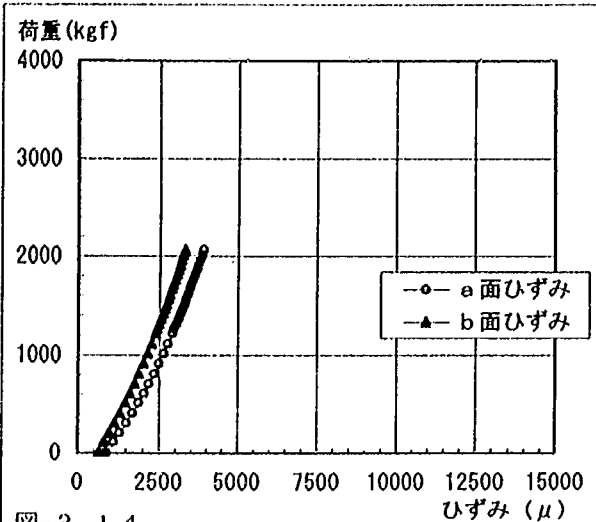


図-3.14  
疲労試験後の静的付着試験結果

荷重とひずみの関係  
高弾性タイプ(HF-2), 定着長さ=30cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$

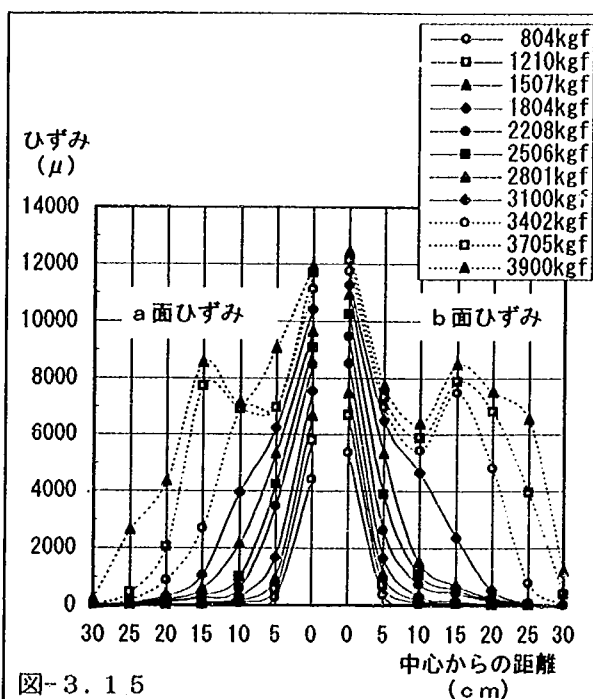


図-3.15  
疲労試験後の静的付着試験結果

ひずみ分布  
高強度タイプ(HF-1), 定着長さ=30cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$

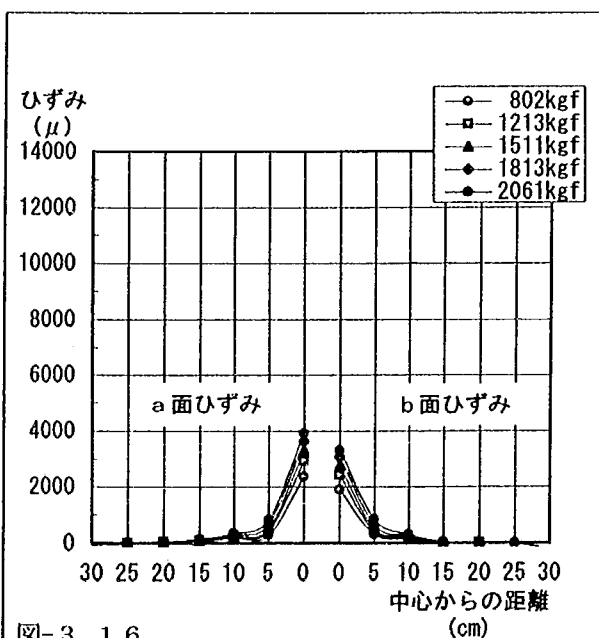


図-3.16  
疲労試験後の静的付着試験結果

ひずみ分布  
高弾性タイプ(HF-2), 定着長さ=30cm,  $\sigma_c=350\text{kgf/cm}^2$

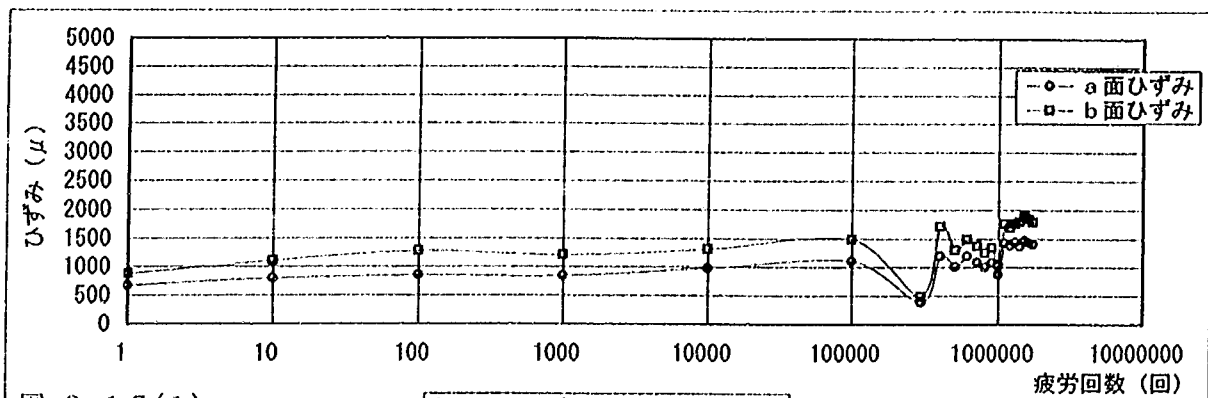


図-3.17(1)  
付着試験体の疲労試験結果

高強度タイプ (HF-1)  
下限荷重時のCFRPひずみ

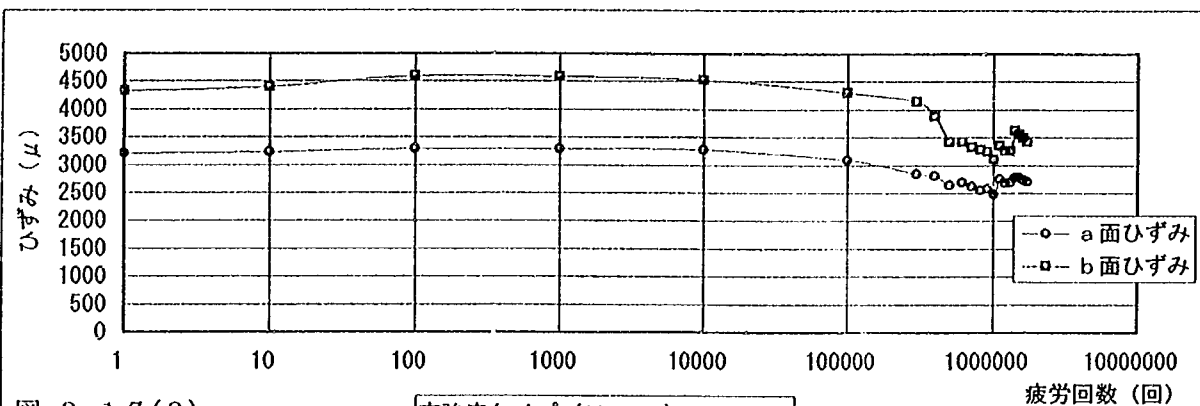


図-3.17(2)  
付着試験体の疲労試験結果

高強度タイプ (HF-1)  
上限荷重時のCFRPひずみ

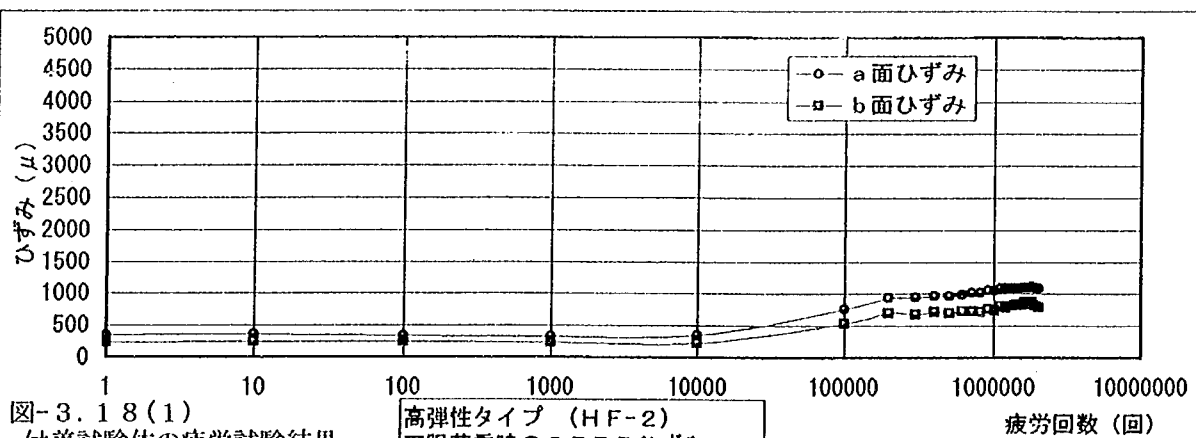


図-3.18(1)  
付着試験体の疲労試験結果

高弾性タイプ (HF-2)  
下限荷重時のCFRPひずみ

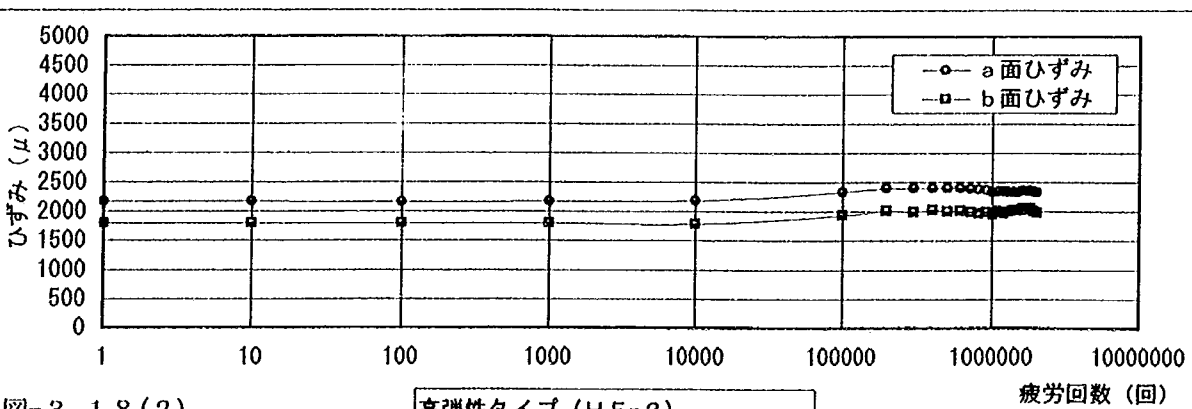


図-3.18(2)  
付着試験体の疲労試験結果

高弾性タイプ (HF-2)  
上限荷重時のCFRPひずみ

## 4. 継手試験

### 4.1 目的

継手試験の目的は、次の2項目とする。

- (1) 静的な継手破壊状況の確認。
- (2) 繰り返し载荷の継手強度への影響の把握。

まず、継手を有するCFRPシートを貼り付けた鉄筋コンクリートはりの静的曲げ試験により、破壊状況を確認する。次に同様の試験体に、コンクリート構造物に実際に貼り付けたCFRPシートに発生する応力に対応した応力レベルで200万回の繰り返し疲労载荷を行ったのち、静的曲げ試験により継手性能を把握する。試験パラメータは、炭素繊維シートが高強度タイプ、高弾性タイプの2種、継手長さLが0, 5, 10, 15cmである。

### 4.2 使用材料

継手試験体に用いたコンクリートの配合は、付着試験体のコンクリート設計基準強度 $350\text{ kgf/cm}^2$ と同じである。コンクリート圧縮試験および引張試験の結果を表-4.1に、鉄筋の引張試験の結果を表-4.2に示す。CFRPシートは付着試験(表-3.5)に用いたものと同じもので、表-4.3の通りである。

表-4.1 コンクリート圧縮強度及び引張試験結果 材令9/28~12/10(74日間)

| 試験片<br>No. | 圧縮強度<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 弾性係数<br>$\times 10^5$ ( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 引張強度<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | ポアソン比 |
|------------|-------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------|-------|
| 1          | 470                           | 3.46                                        | 34.7                          | 0.274 |
| 2          | 483                           | 3.38                                        | 39.5                          | 0.211 |
| 3          | 476                           | 3.29                                        | 29.8                          | 0.246 |
| 平均         | 476                           | 3.38                                        | 34.7                          | 0.244 |

表-4.2 鉄筋引張試験の結果

| 鉄筋             | 試験片<br>No. | 降伏点<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 引張強度<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 弾性係数<br>$\times 10^6$ ( $\text{kgf/cm}^2$ ) |
|----------------|------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|
| D10<br>(SD295) | 1          | 3,687                        | 5,566                         | 1.86                                        |
|                | 2          | 3,701                        | 5,594                         | 1.86                                        |
|                | 3          | 3,701                        | 5,552                         | 1.86                                        |
|                | 平均         | 3,696                        | 5,571                         | 1.86                                        |

### 4.3 試験体

継手性能は、継手長さを変化させた炭素繊維シートを貼った鉄筋コンクリートはりの曲げ試験により評価する。

図-4.1 に静的曲げ試験体計8体の構造寸法を、また表-4.3に継手試験に使用する炭素繊維シートの仕様と継手長さ、幅を示す。各試験体は、図-4.2のように、RCはりの下面に継手長さ4水準のCFRPシートを支点の外側まで貼り付け、試験中の付着切れ防止のために、横方向巻立を行う。CFRPシートの貼付け幅は既往の実験等を参考に、高強度タイプは5cm、高弾性タイプは8cmとした。ひずみゲージは、軸方向下端筋(2本)の中央部側面内側に各1ヶ所計2ヶ所、CFRPシートの中央部で継手中央部および中央から両側へ100mmの計3ヶ所とした。また、試験体上部中央と両支点計3ヶ所に変位計を設置し、試験体の変位(たわみ)を測定することとした。図-4.3にゲージ取り付け位置および変位計の設置位置を示す。試験時の各試験体の測定点数を表-4.4に示す。

表-4.3 継手試験(静的曲げ試験)に使用する炭素繊維シート

| 試験体<br>No. | 継手長さ<br>L(cm) | 貼付幅<br>W(cm) | 炭素繊維シート分類 |                                  |                                  |
|------------|---------------|--------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|
|            |               |              | 材料<br>No. | 公称弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 保証引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| TG-1       | 継手なし          | 5            | B-5       | $2.35 \times 10^6$               | 35,000                           |
| TG-2       | 5             |              |           |                                  |                                  |
| TG-3       | 10            |              |           |                                  |                                  |
| TG-4       | 15            |              |           |                                  |                                  |
| TG-5       | 継手なし          | 8            | C-9       | $6.50 \times 10^6$               | 20,000                           |
| TG-6       | 5             |              |           |                                  |                                  |
| TG-7       | 10            |              |           |                                  |                                  |
| TG-8       | 15            |              |           |                                  |                                  |

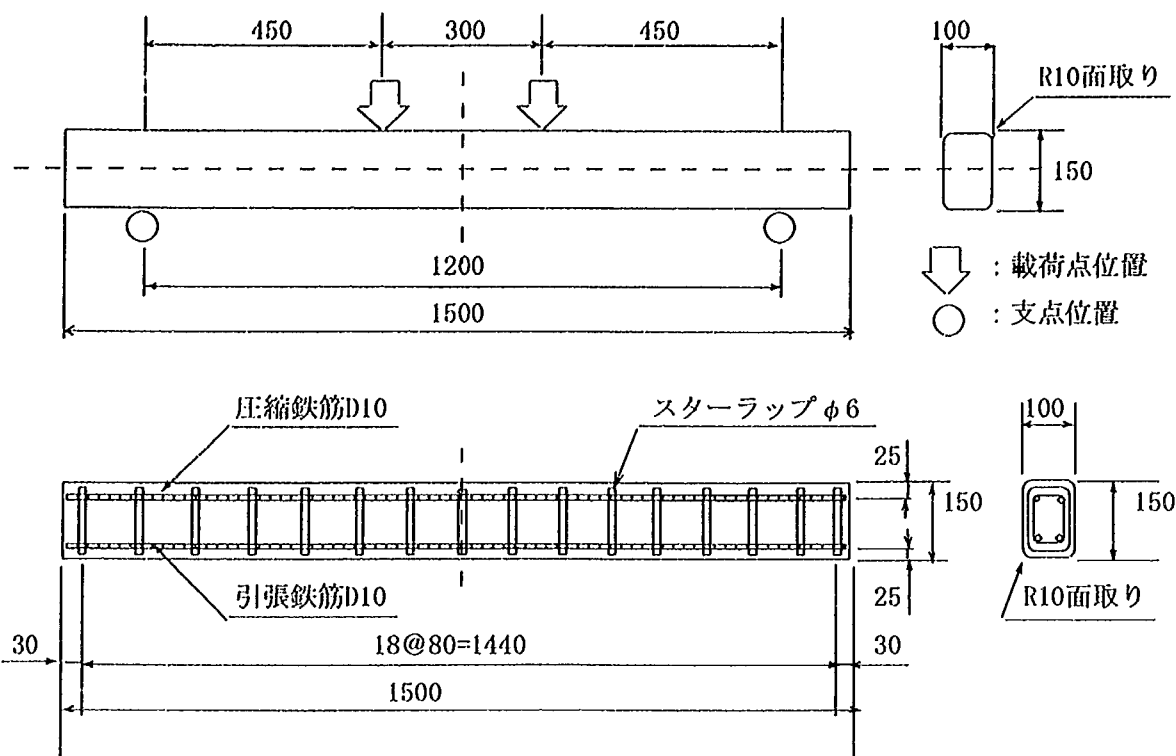


図-4.1 継手試験試験体構造寸法図

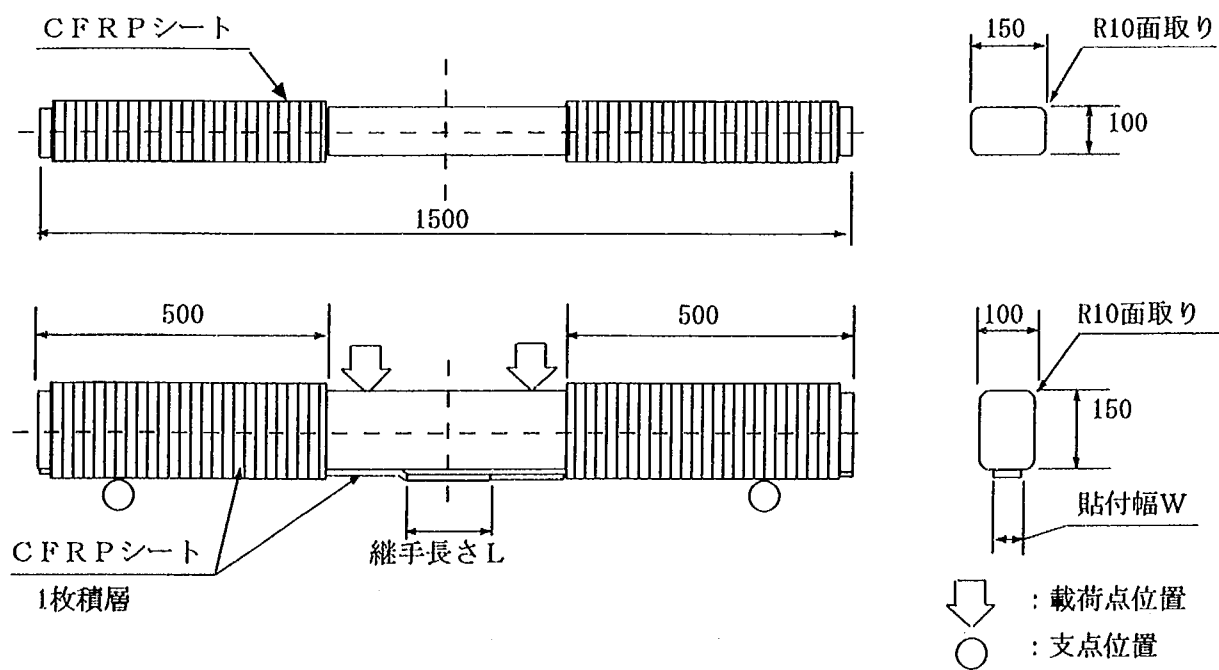


図-4.2 継手試験試験体CFRPシート貼付後形状

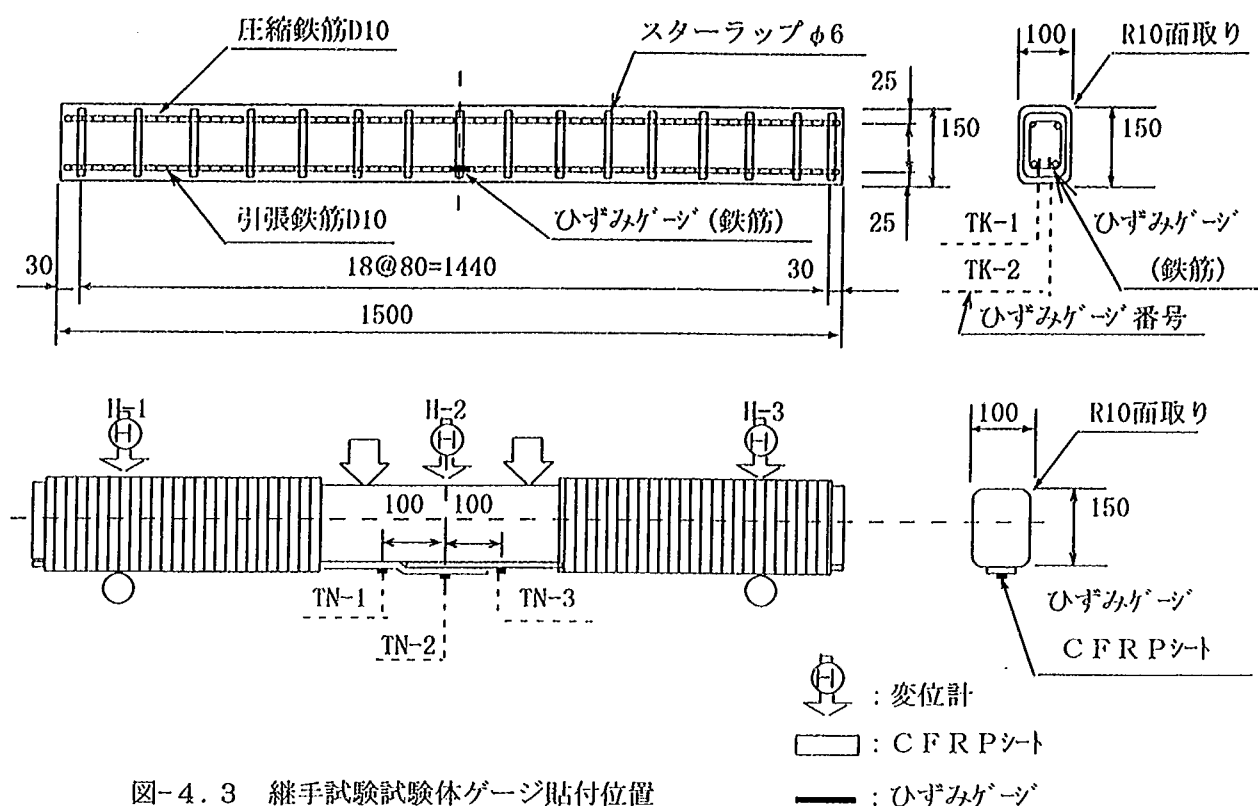


図-4.3 継手試験試験体ゲージ貼付位置

表-4.4 各試験時の測定点数

| 試験名  | 試験体  | 鉄筋用ゲージ<br>(1体当たり) | CFRPシート用ゲージ<br>(1体当たり) | 変位計<br>(1体当たり) | 小計 | 合計 |
|------|------|-------------------|------------------------|----------------|----|----|
| 継手試験 | 静的試験 | 2                 | 3                      | 3              | 8  | 64 |
|      | 疲労試験 | 2                 | 3                      | 3              | 8  | 16 |

疲労試験を行う試験体は、表-4.5に示す2体である。その形状、寸法は図-4.2に示したとおりで、CFRPシートの積層数は静的試験と同様1層とし、継手長さは実施工で採用する継手長さ20cmに施工上の安全性を加味して $L=15\text{ cm}$ とする。ゲージおよび変位計は図-4.3、表-4.4に示すとおりである。

表-4.5 継手試験(疲労試験)試験体

| 試験体<br>No. | 継手長さ<br>$L$<br>(cm) | 貼付幅<br>$W$<br>(cm) | CFRPシート分類 |                                  |                                  | CFRPシートの応力<br>$\sigma_{\max}/\sigma_{\min}$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 試験荷重<br>$P_{\max}/P_{\min}$<br>(kgf) |
|------------|---------------------|--------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|            |                     |                    | 材料<br>No. | 公称弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 保証引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |                                                                       |                                      |
| TG-9       | 15                  | 5                  | B-5       | $2.35 \times 10^6$               | 35,000                           | 2,500/250                                                             | 1,170/585                            |
| TG-10      | 15                  | 8                  | C-9       | $6.50 \times 10^6$               | 20,000                           | 6,000/600                                                             | 1,300/650                            |

## 4.4 試験方法

静的曲げ試験および疲労載荷からなる継手試験は、建設省土木研究所材料構造共同実験棟内に設置されている載荷試験機(MTS社製)を用いて実施した。

### 4.4.1 静的試験

静的試験の載荷方法は単調載荷とし、CFRPシートの破断または付着切れによる破壊まで行った。

### 4.4.2 疲労載荷および疲労後の静的試験

- (1) 疲労試験は繰り返し荷重200万回載荷とし、載荷レベルをRC梁に各弾性係数のCFRPシートを1枚貼り付けた際に弾性計算した鉄筋の応力が2,000または6,000kgf/cm<sup>2</sup>に達する時にCFRPシートに発生する応力から決定し、応力比を0.5とした。載荷速度は3~5Hzとした。
- (2) 疲労試験中のCFRPシートのひずみ測定は、1, 10, 100, 1000, 1万, 10万, 20万回、その後200万回まで20万回毎に行った。
- (3) 疲労試験終了後静的継手試験を実施した。

## 4.5 試験結果

### 4.5.1 静的試験

#### (1) 破壊状況

各試験体の、ひび割れ発生荷重、最大荷重、CFRPシートの最大ひずみ、および破壊状況の一覧を表-4.6に示す。また、各試験体のひび割れ観察図を図-4.4~4.13に示す。

高強度タイプのCFRPシート破断の発生は、No.1が両端部2ヶ所、No.2がラップから5cm離れた位置1ヶ所、No.4ではラップからわずかに離れた所でそれぞれ始まり、ラップ部を平行にクラックが走り短冊状に破壊していた。ただし、No.3試験体は破壊時に付着切れが起きたが、他の試験体と比較するとCFRPシートの接着面に多数のひび割れが生じており、ひずみの変化の大きいところで破断が生じたものと思われる。

一方、高弾性タイプについては、いずれも破断が中央から左右10cm内のひび割れ発生位置(載荷点位置)に沿って、ひび割れが大きく開くと同時にCFRPシートが破断した。

#### (2) 荷重と中央変位

高強度タイプの各継手長さに対応した中央変位を、図-4.14および図-4.14(1a)~4.14(4a)に、高弾性タイプを図-4.15および図-4.15(1a)~4.15(4a)に示す。高強度タイプは、3.5tまで変位が漸増するが、その後は荷重の増加に比べ変位が急激に増大し、5.2~5.5tで終局に至った。高弾性タイプは、1.0~1.5tまで変位が漸増し、その後勾配が急

になり、3.0～4.0 tで終局に至った。中央変位は高強度タイプが18 mm、高弾性タイプが2.1～3.3 mmであった。

高強度タイプ、高弾性タイプとも、継手の有無および継手長さが最大荷重、中央変位に与える影響は認められなかった。なお、高強度タイプと高弾性タイプを比較すると、最大荷重発現度は高強度タイプの方が、また、中央変位の低減度は高弾性タイプの方が優位であった。

### (3) 鉄筋のひずみ

荷重と鉄筋ひずみの関係を、高強度タイプについては図-4.14 (1b)～4.14 (4b)に、また、高弾性タイプについては図-4.15 (1b)～4.15 (4b)に示す。高強度タイプは継手長さに係わらず、材料試験結果から求めた降伏点ひずみをやや越える2,300～2,400  $\mu$ で降伏に至っている。一方、高弾性タイプは鉄筋降伏前にCFRPシート破断で終局に至ったため、1,900  $\mu$ 程度がひずみの最大値として得られている。

### (4) CFRPシートのひずみ

荷重とCFRPシートひずみとの関係を、高強度タイプについて図-4.14 (1c)～(4c)に、また、高弾性タイプについて図-4.15 (1c)～(4c)に、それぞれ示す。

高強度タイプ試験体TG-1～TG-4の荷重-ひずみ曲線は、前項3.5付着試験結果で示した図-3.9 (4)～(6)中の試験体中央部ノッチから5および10 cm位置の、CFRPシートの荷重-ひずみ曲線と類似の傾向を示している。つまり、曲線は2,000  $\times$  (1/10～1/5)  $\mu$ 程度から付着切れの前徴と見られるひずみ増加が目立ち始め、2,000～3,000  $\mu$ を過ぎる頃から付着切れの進行と見られる急激なひずみ増加となり、継手無試験体TG-1では中央部ひずみが13,000  $\mu$ に、継手有試験体TG-2～TG-4では継手端部ひずみが10,000～15,000  $\mu$ に、それぞれ保証引張強度を公称弾性係数で除した設計終局ひずみ約14,000  $\mu$ 近くに達して、いずれも母材破壊したことを示している。従って、TG-1とTG-2～TG-4とでは、中央部ひずみと端部ひずみの進展が逆転している。

一方、高弾性タイプ試験体TG-5～TG-8の荷重-ひずみ曲線は、前項3.5付着試験結果で示した図-3.9 (10)～(12)中のCFRPシートの荷重-ひずみ曲線とはやや異なる傾向を示している。つまり、曲線は載荷直後から付着切れの前徴と見られるひずみ増加が、また、200  $\mu$ を過ぎる頃から付着切れの進行と見られる急激なひずみ増加が見られ、継手無試験体TG-5では中央部ひずみが2,700  $\mu$ に、継手有試験体TG-6～TG-8では2,200～2,500  $\mu$ に、それぞれ設計終局ひずみ約3,000  $\mu$ の70～90%へ達して、いずれも母材破壊したことを示している。従って、この場合もTG-5とTG-6～TG-8とでは、中央と端部のひずみ進展が逆転している。ただし、試験体TG-7においてCFRPシート端部の破断ひずみが1,200～1,300  $\mu$ と設計終局ひずみ約3,000  $\mu$ の40%と異常に低いのは、曲げ試験体のひび割れ発生部でCFRPシートが破断していることから、ひび割れ進展によりCFRPシートのひずみがひずみ限界値へ達したことによる破断が原因である。

## 4.5.2 疲労载荷および疲労後の静的試験

### (1) 疲労試験中の鉄筋およびCFRPシートのひずみ

疲労試験中に得られた疲労回数と曲げ試験体中央部の鉄筋およびCFRPシートのひずみとの関係を、高強度タイプ試験体TGH-1については図-4.16 (1)～(2)に、高弾性タイプ試験体TGH-2については図-4.17 (1)～(2)に、それぞれ示す。

高強度タイプ試験体TGH-1中央部の鉄筋およびCFRPシートのひずみは、上限荷重载荷の場合、1万回载荷までは大きな変化はないものの、10万回以降については、CFRPシートの付着切れ進行に伴うCFRPシートから鉄筋への応力分担の移動と考えられる、鉄筋ひずみのやや増加およびCFRPシートひずみのやや減少を示しており、下限荷重载荷の場合は、10万回载荷時点で、鉄筋およびCFRPシートのひずみ共、CFRPシートの付着切れ進行に伴う除荷時の非可逆的変形と考えられる、急激な増加ののち落ち着いた傾向を示している。

一方、高弾性タイプ試験体TGH-2中央部の鉄筋およびCFRPシートのひずみは、上限荷重载荷時、下限荷重载荷時ともに、疲労载荷直後から漸増傾向を示しており、これは繰り返し曲げ疲労によるひび割れ進展に伴う鉄筋およびCFRPシートひずみの増加に起因するものと想定される。

### (2) 疲労後静的载荷試験の破壊状況

各試験体のひび割れ観察図を図-4.18～4.19に、CFRPシートの破断位置を図-4.20に示す。高強度タイプおよび高弾性タイプ試験体は、いずれもCFRPシート破断で終局に至っている。

### (3) 最大荷重

疲労载荷後の静的载荷試験結果を表-4.7に示す。

高強度タイプ試験体TGH-1の最大荷重は、疲労無試験体TG-4と比して約90%に低下しており、疲労試験中での付着切れ進行によるCFRPシートの応力分担低下の影響が現れている。一方、高弾性タイプ試験体TGH-2の最大荷重は、疲労無試験体TG-8と比して約74%に低下しており、ひび割れ進展部でのCFRPシートのひずみが限界ひずみに達して、早期にCFRPシート破断に至ったものである。

### (4) 試験体中央の変位

疲労载荷後の静的载荷試験で得られた荷重－中央変位曲線を、高強度タイプについては図-4.21 (1)に、高弾性タイプについては図-4.22 (1)に、それぞれ示した。

いずれのタイプの荷重－中央変位曲線も、疲労無静的载荷試験で得られた荷重－中央変位曲線と類似である。しかし、疲労無静的载荷試験の場合と同様、高強度タイプ試験体は大変形まで追随して粘りのある変位補強効果を発揮した後にCFRPシート破断に至ったが、高弾性タイプ試験体は、小さい変形下においてCFRPシート破断を生じ、変位補強効果の脆性的な終局を呈したと言える。

### (5) 鉄筋およびCFRPシートのひずみ

疲労試験後の静的载荷試験で得られた、試験体中央部の鉄筋およびCFRPシートに関する荷重－ひずみ曲線を、高強度タイプ試験体については図-4.21 (2)～(3)に、高弾性タイプ試験体につい

ては図-4.22 (2) ～ (3) に、それぞれ示す。鉄筋およびCFRPシートの荷重－ひずみ曲線は、両タイプの炭素繊維シート共、疲労無静的載荷試験での荷重－ひずみ曲線と類似であった。しかし、CFRPシートの最大ひずみは、疲労無静的載荷試験時に比して、高強度タイプの場合13%増で付着切れ進行の影響を、高弾性タイプについては18%減でひび割れ進展の影響をそれぞれ受けていると言える。

#### 4.6 試験結果のまとめ

継手試験において、疲労無静的載荷試験および200万回疲労後の静的載荷試験の各試験体は、高強度タイプおよび高弾性タイプ共、CFRPシート継手部での異常は観察されず、全てCFRPシート母材部での破断で破壊した。

高強度タイプの試験体は、最大荷重，中央変位，CFRPシートの最大ひずみが疲労の有無に関わらずほぼ同様な値で得られたと言えることから、実構造物に貼り付けた状態を想定した応力レベル下での疲労の影響をほとんど受けなかったと考えられる。

一方、高弾性タイプの試験体は、最大荷重およびCFRPシートの最大ひずみが、疲労無静的載荷試験結果と比較して、疲労後静的載荷試験結果の方が20～30%程低い値で、継手部両側の母材部CFRPシート破断による破壊であった。これは、ひび割れ発生およびひび割れ進展部でのCFRPシートのひずみが限界ひずみに達して破断に至ったものと考えられる。

表-4.6 継手試験：静的試験

| 試験体<br>No. | 継手<br>長さ<br>(cm) | 貼付幅<br>(cm) | 炭素繊維シート分類 |                                  |                                  | コンクリート<br>圧強強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | ひび割れ<br>発生荷重<br>(kgf) | 鉄筋降伏<br>荷 重<br>(kgf) | CFRPシート<br>破断荷重<br>(kgf) | CFRPシート<br>3点の最大ひずみ<br>破断直前(μ) | 破 壊 状 況       |
|------------|------------------|-------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------------|---------------|
|            |                  |             | 材料<br>No. | 公称弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 保証引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |                                          |                       |                      |                          |                                |               |
| TG-1       | なし               | 5           | B-5       | 2.35×10 <sup>4</sup>             | 35,000                           | 476                                      | 1,400                 | 3,900                | 5,393                    | 15,027                         | シート破断         |
| 2          | 5                |             |           |                                  |                                  |                                          | 1,100                 | 3,900                | 5,496                    | 11,754                         | シート破断         |
| 3          | 10               |             |           |                                  |                                  |                                          | 1,100                 | 4,100                | 5,504                    | 15,810                         | 継手部剥がれorシート破断 |
| 4          | 15               |             |           |                                  |                                  |                                          | 1,000                 | 4,100                | 5,488                    | 14,647                         | シート破断         |
| 5          | なし               | 8           | C-9       | 6.50×10 <sup>4</sup>             | 20,000                           |                                          | 1,400                 | 降伏せず                 | 3,198                    | 2,664                          | シート破断         |
| 6          | 5                |             |           |                                  |                                  |                                          | 1,400                 | 降伏せず                 | 3,845                    | 2,530                          | シート破断         |
| 7          | 10               |             |           |                                  |                                  |                                          | 1,200                 | 降伏せず                 | 2,502                    | 1,359                          | シート破断         |
| 8          | 15               |             |           |                                  |                                  |                                          | 1,200                 | 降伏せず                 | 3,398                    | 2,283                          | シート破断         |

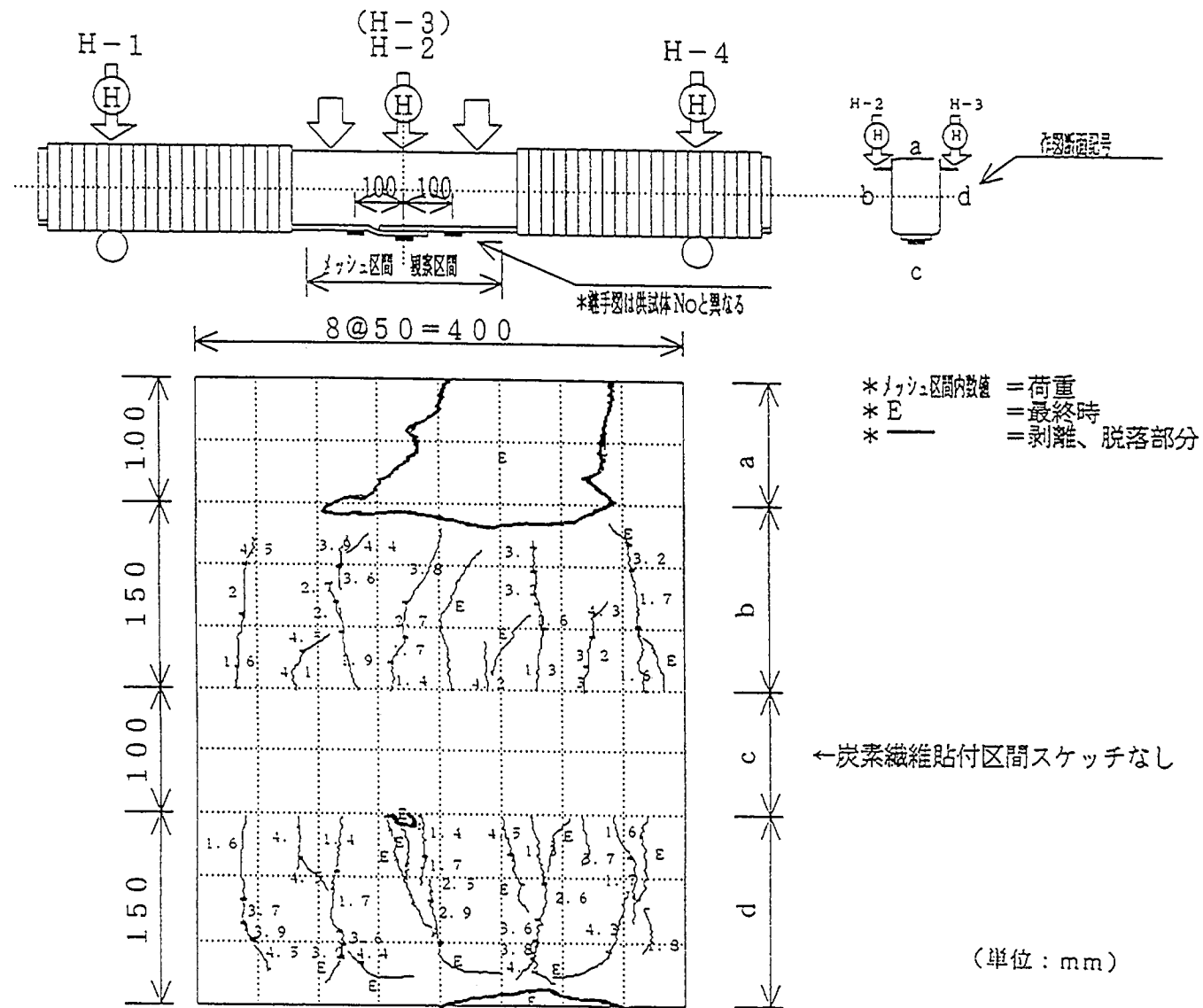


図-4.4 継手試験 試験体ひび割れ観察図 (試験体No. TG-1)

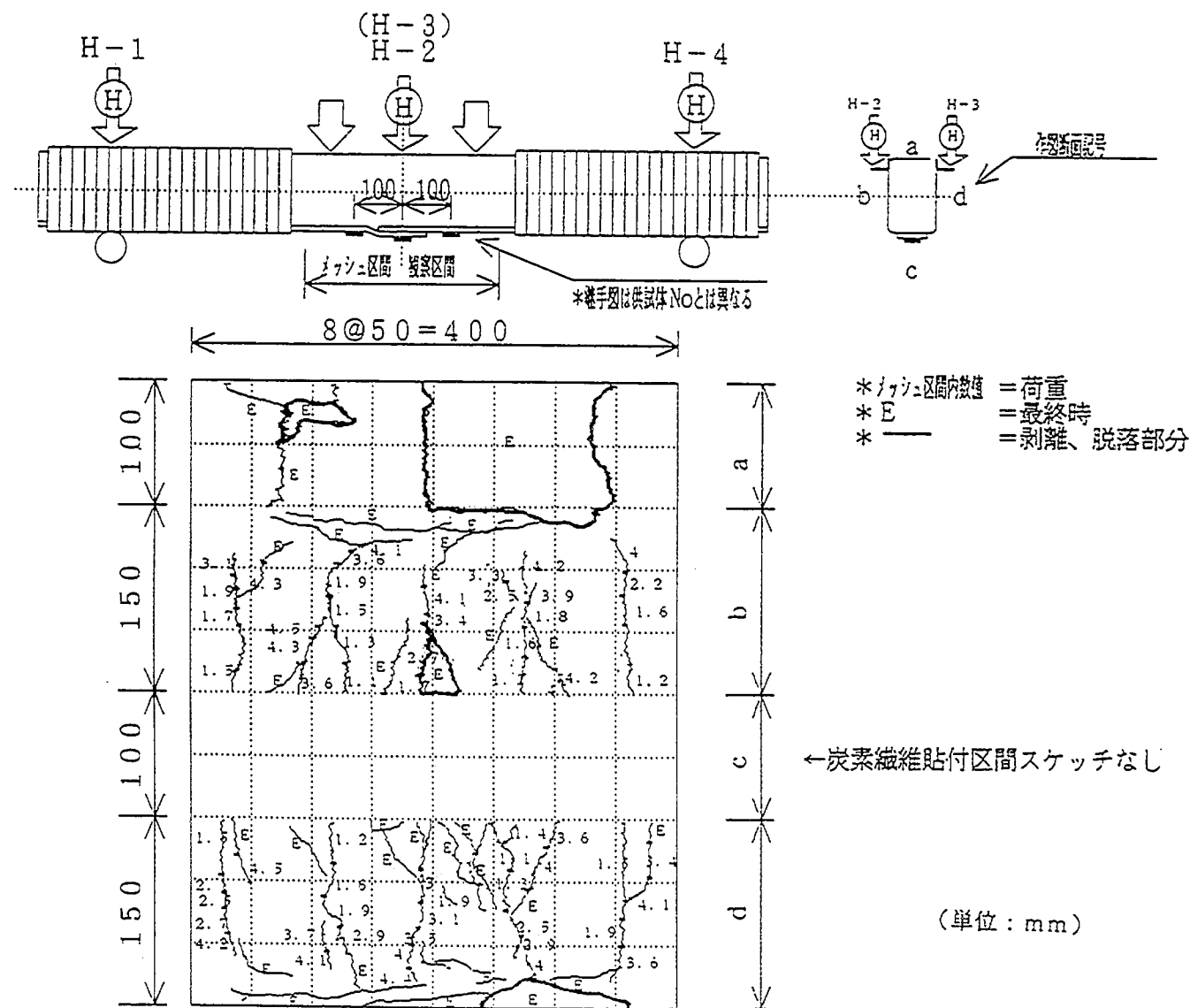


図-4.5 継手試験 試験体ひび割れ観察図 (試験体No. TG-2)

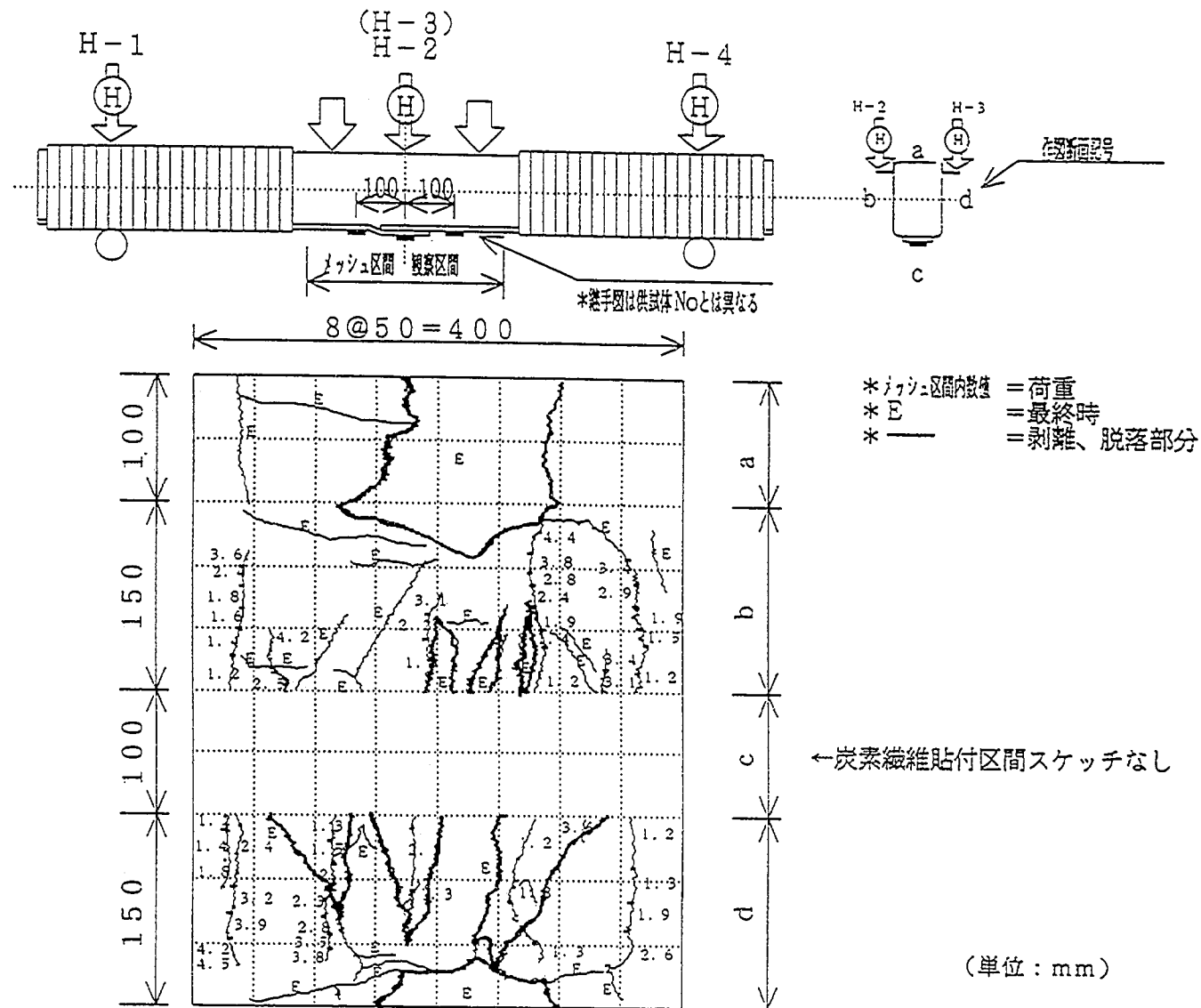


図-4.6 継手試験 試験体ひび割れ観察図 (試験体No. TG-3)

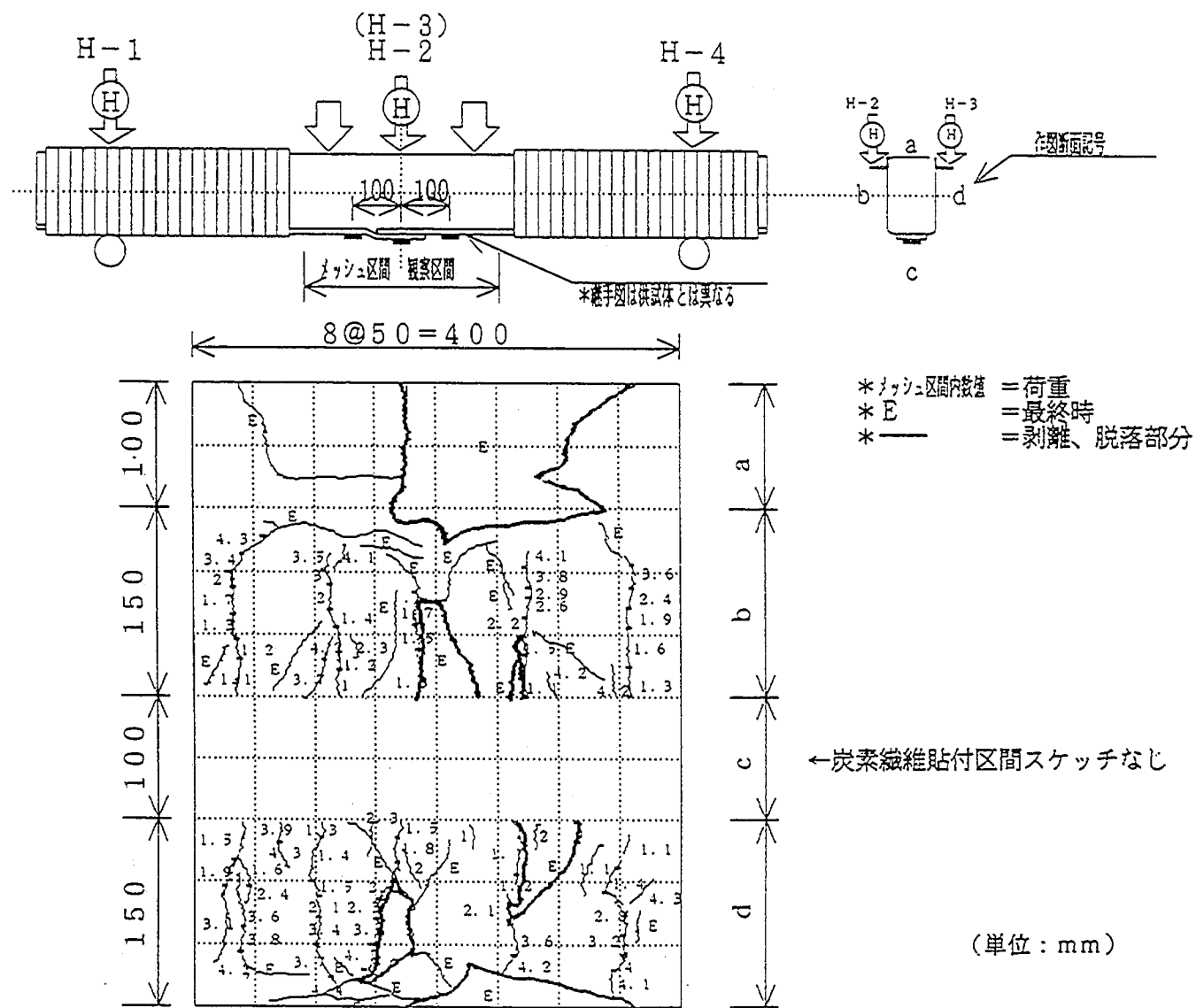


図-4.7 継手試験 試験体ひび割れ観察図 (試験体No. TG-4)

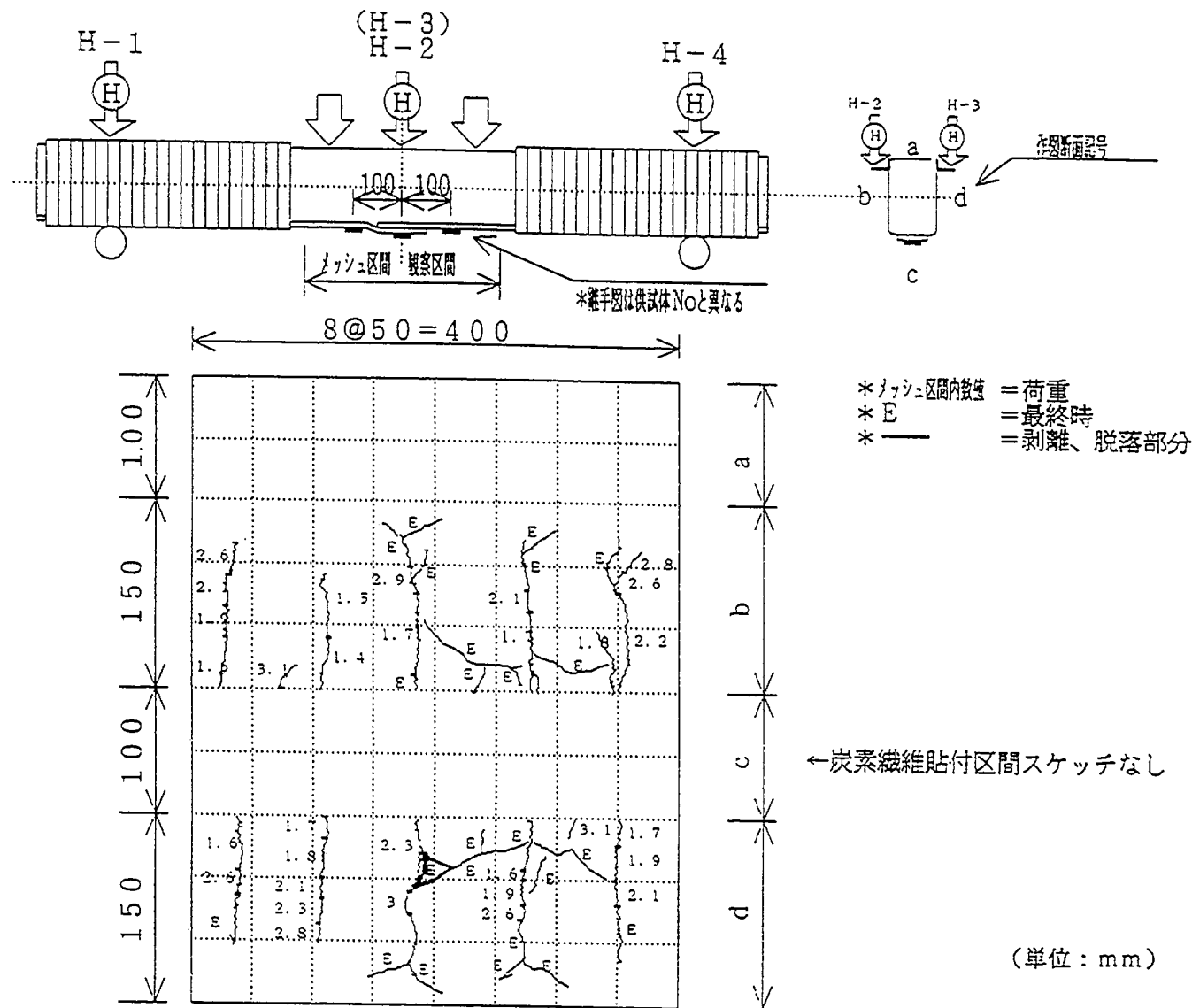


図-4.8 継手試験 試験体ひび割れ観察図 (試験体No. TG-5)

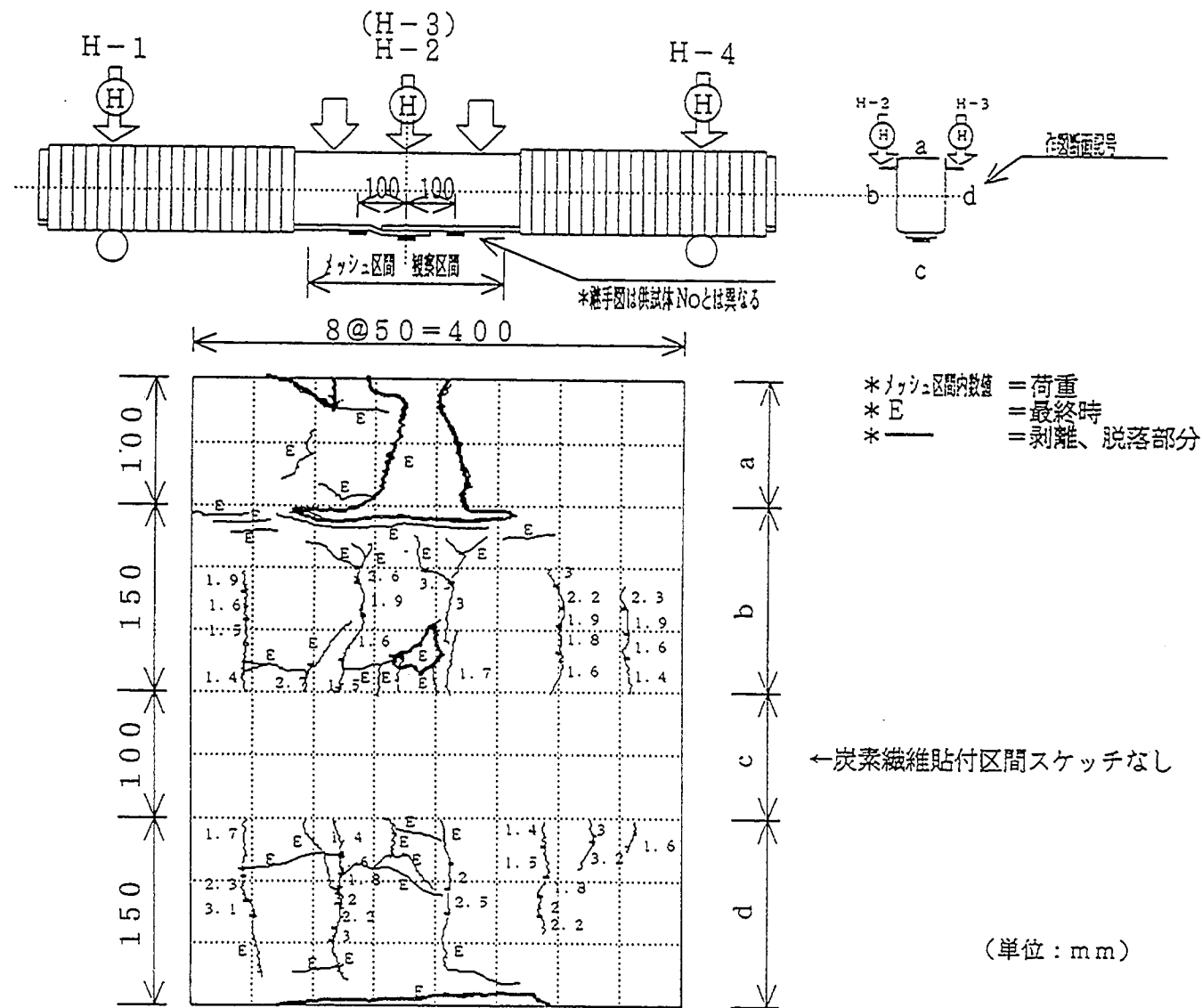


図-4.9 継手試験 試験体ひび割れ観察図 (試験体No. TG-6)

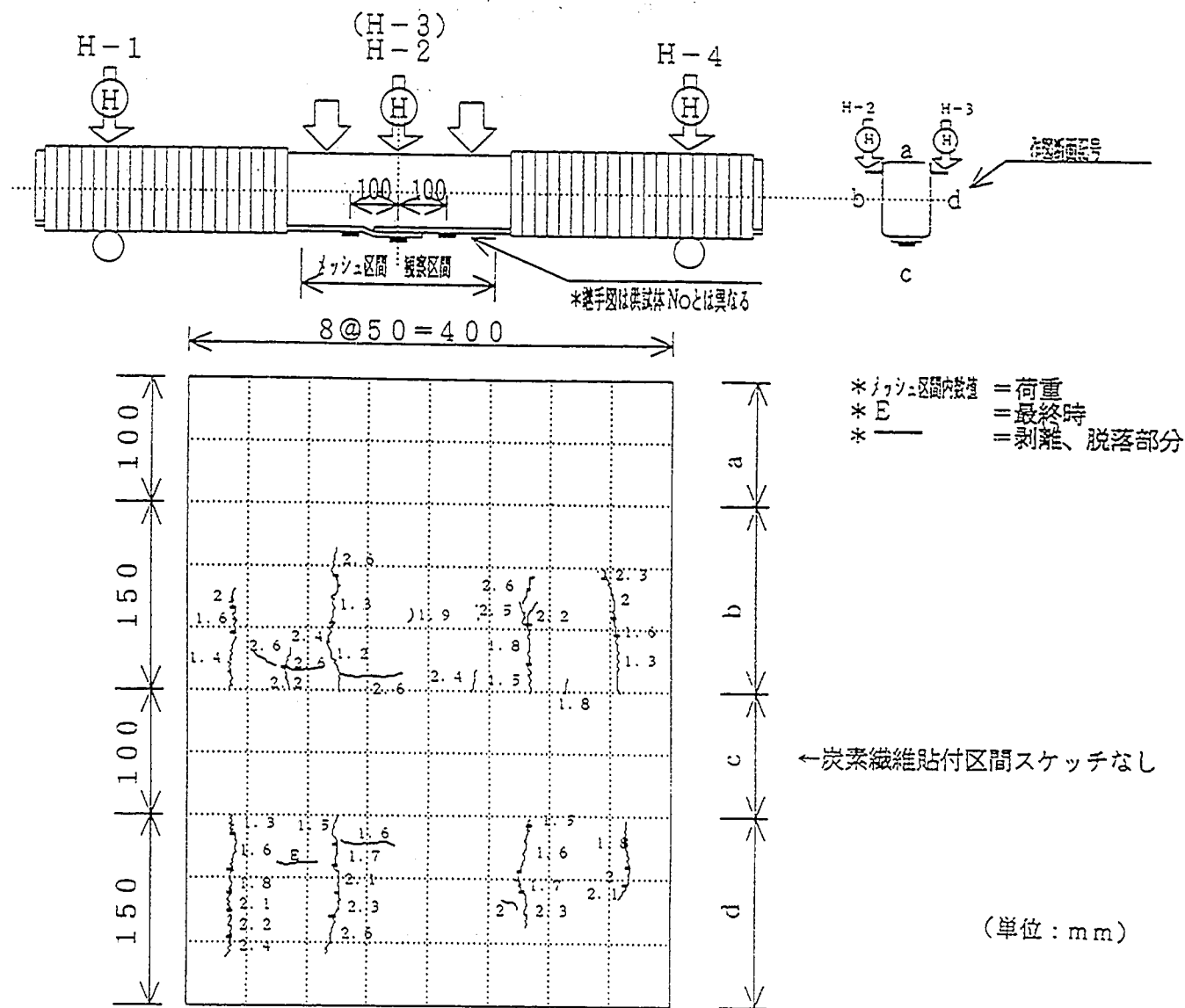


図-4.10 継手試験 試験体ひび割れ観察図 (試験体No. TG-7)

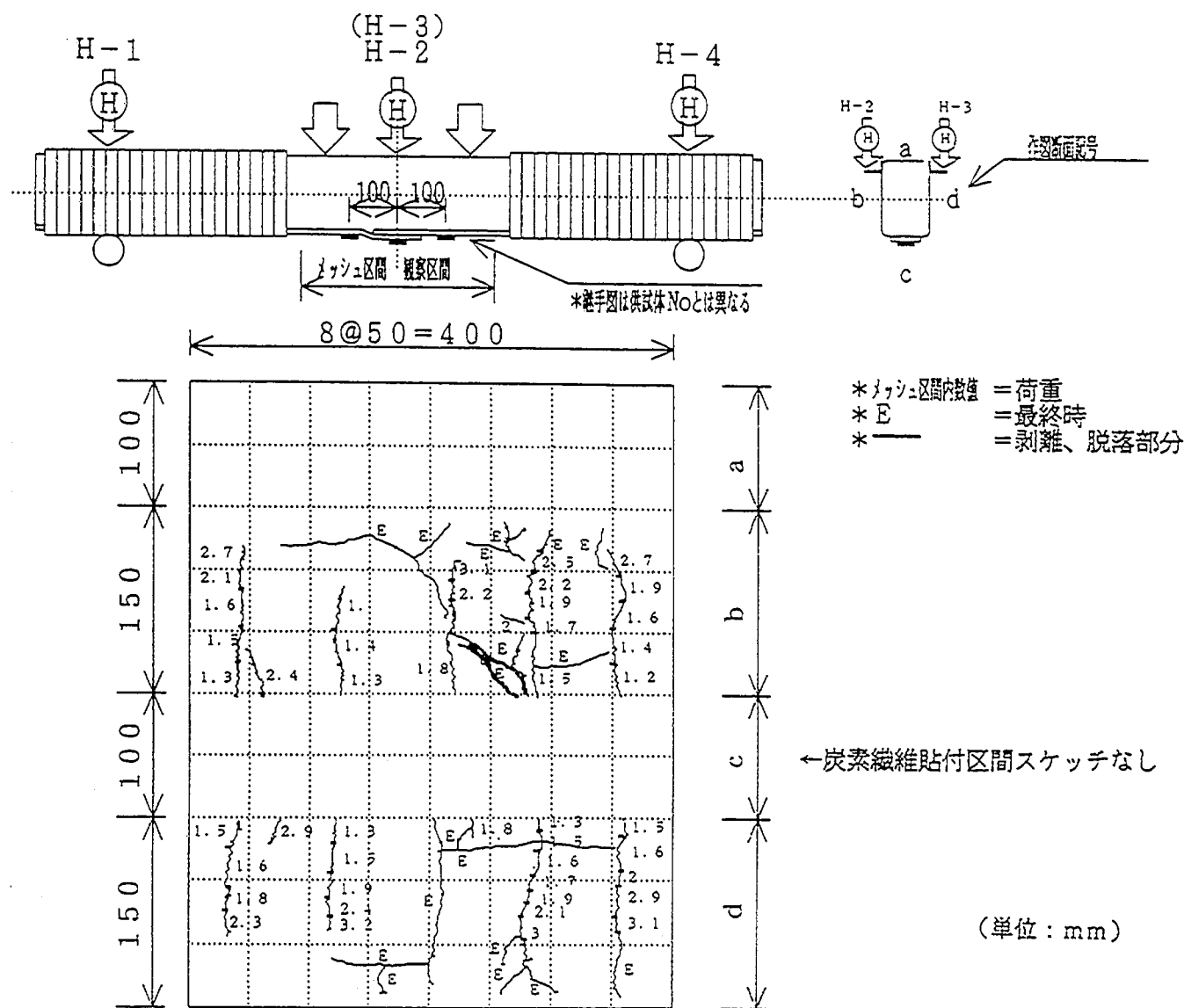


図-4.1.1 継手試験 試験体ひび割れ観察図 (試験体No. TG-8)

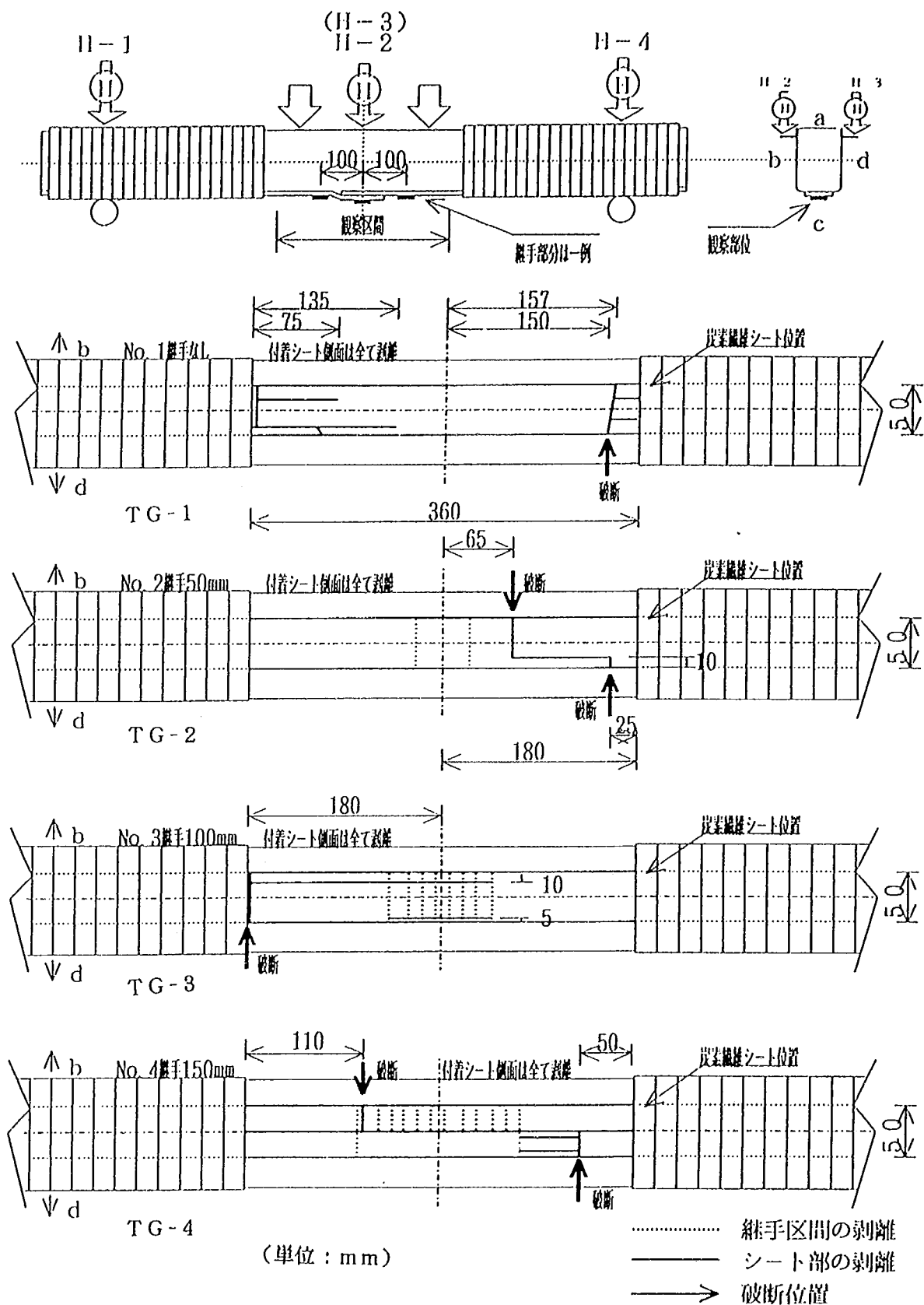


図-4.12 継手試験 試験体CFRP観察図 (試験体No. TG-1~4)

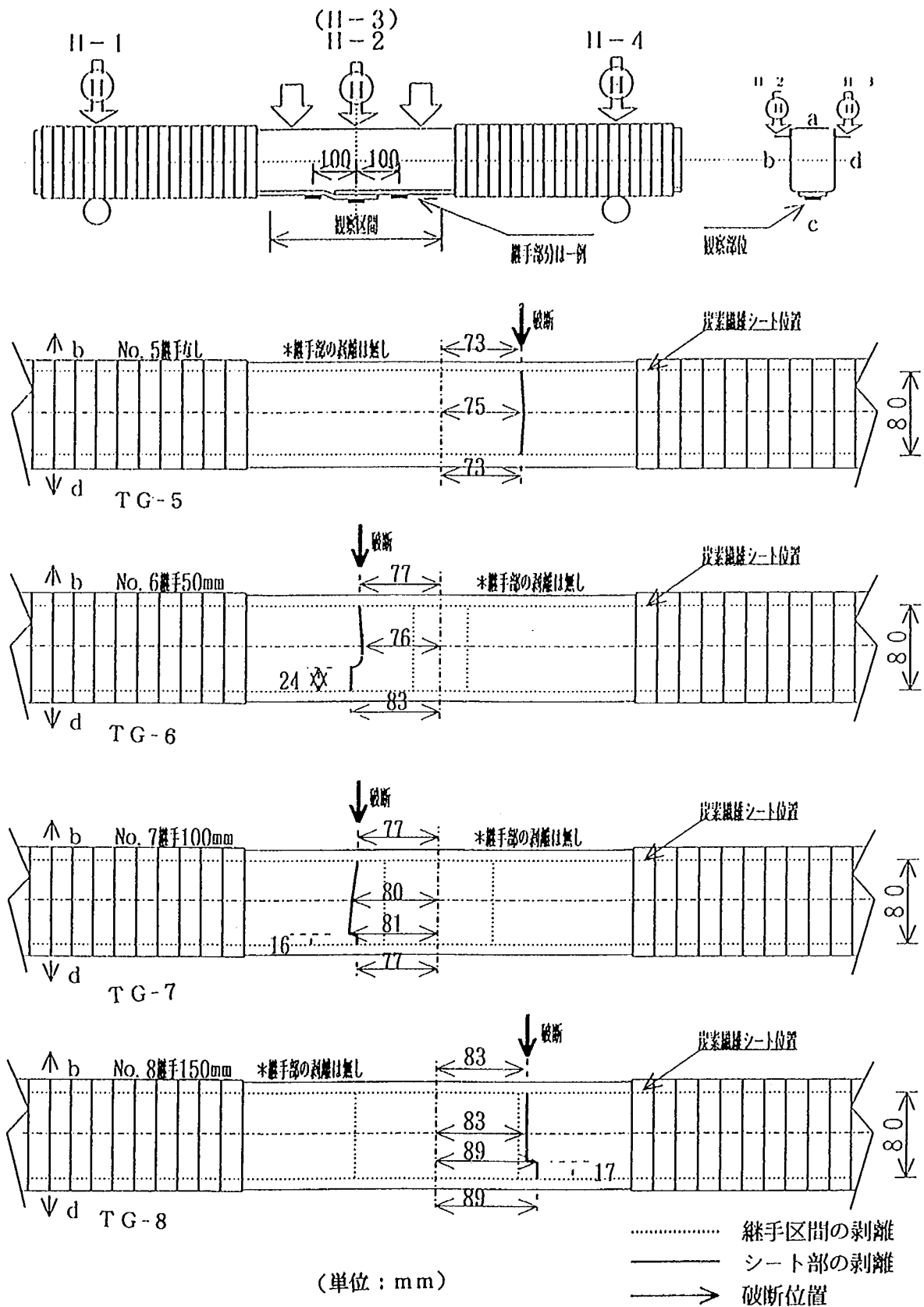
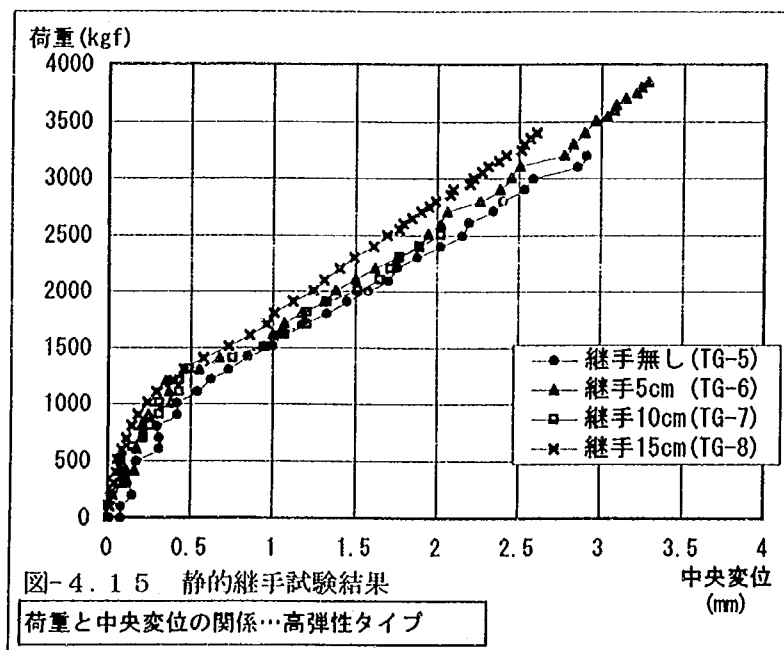
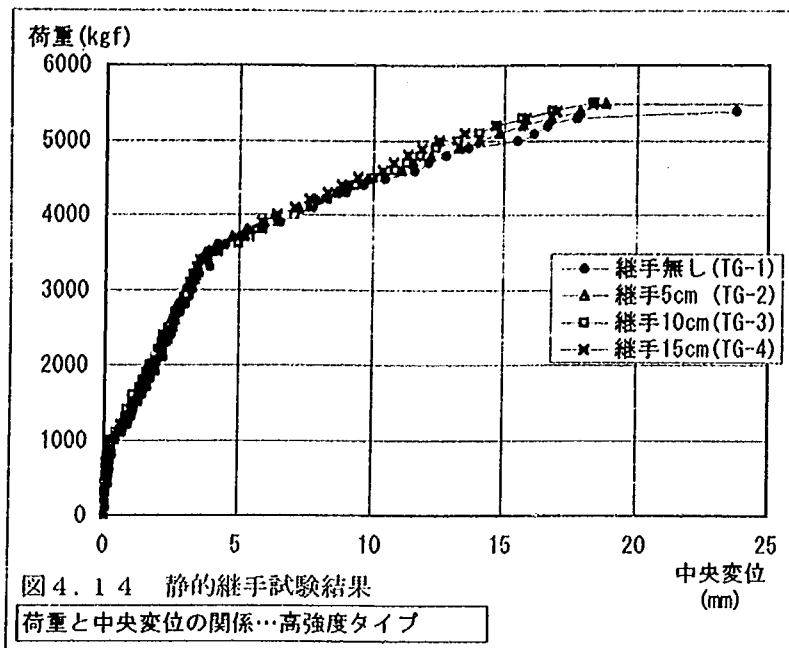


図-4.13 継手試験 試験体CFRP観察図 (試験体No. TG-5～8)



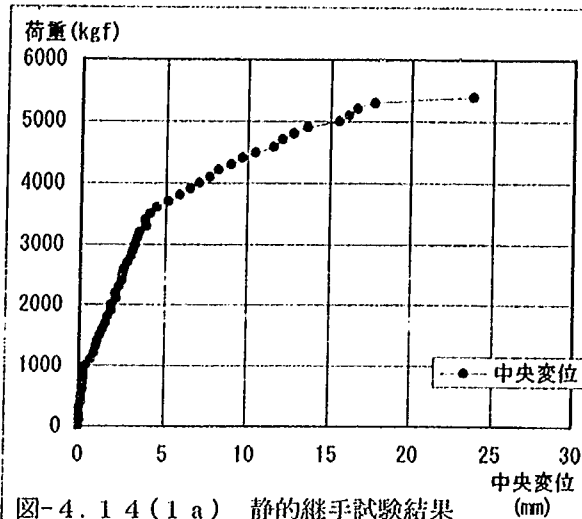


図-4.14(1a) 静的継手試験結果  
荷重と中央変位の関係  
…高強度タイプ、継手無し(TG-1)

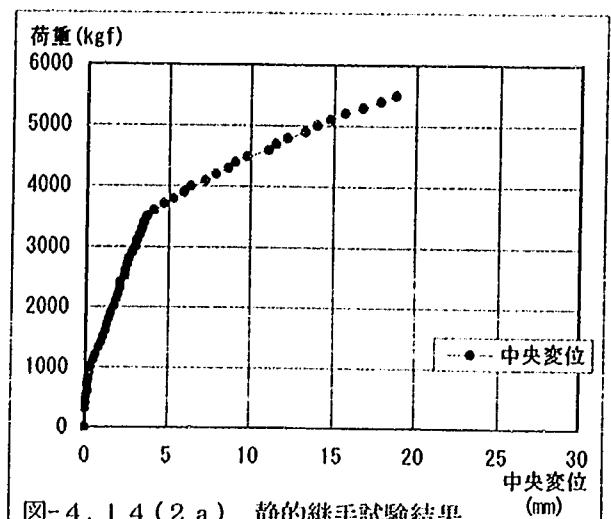


図-4.14(2a) 静的継手試験結果  
荷重と中央変位の関係  
…高強度タイプ、継手5cm(TG-2)

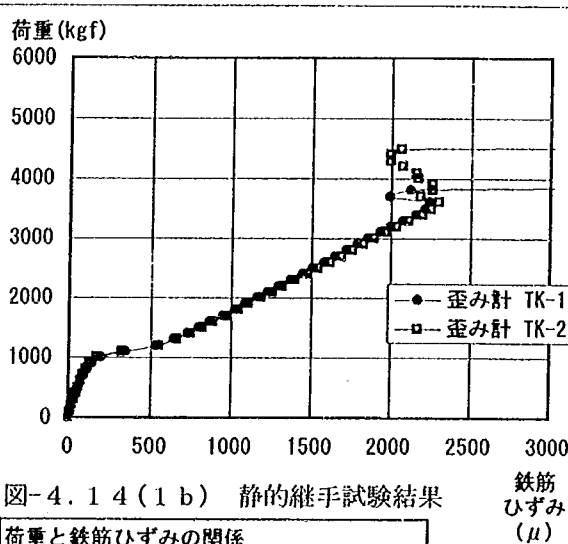


図-4.14(1b) 静的継手試験結果  
荷重と鉄筋ひずみの関係  
…高強度タイプ、継手無し(TG-1)

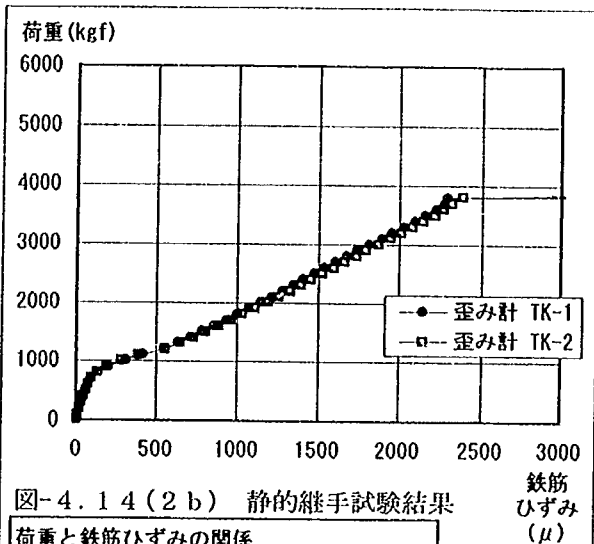


図-4.14(2b) 静的継手試験結果  
荷重と鉄筋ひずみの関係  
…高強度タイプ、継手5cm(TG-2)

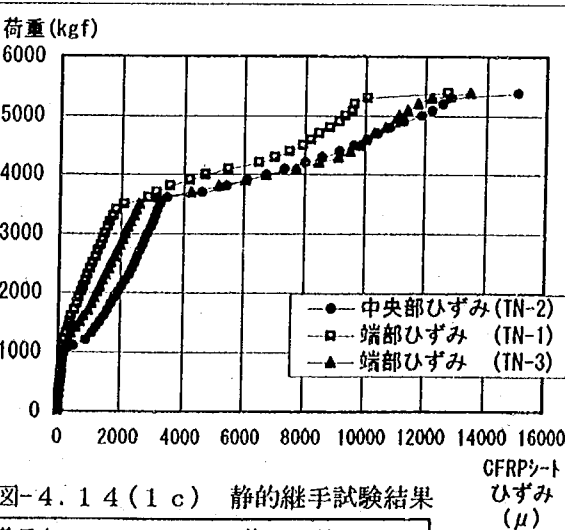


図-4.14(1c) 静的継手試験結果  
荷重とCFRPシートひずみの関係  
…高強度タイプ、継手無し(TG-1)

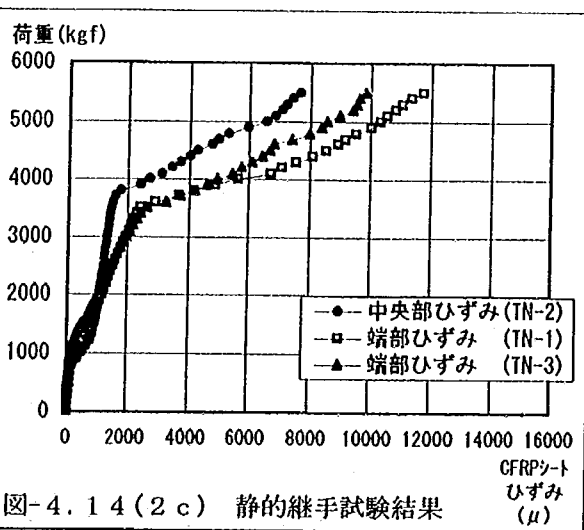


図-4.14(2c) 静的継手試験結果  
荷重とCFRPシートひずみの関係  
…高強度タイプ、継手5cm(TG-2)

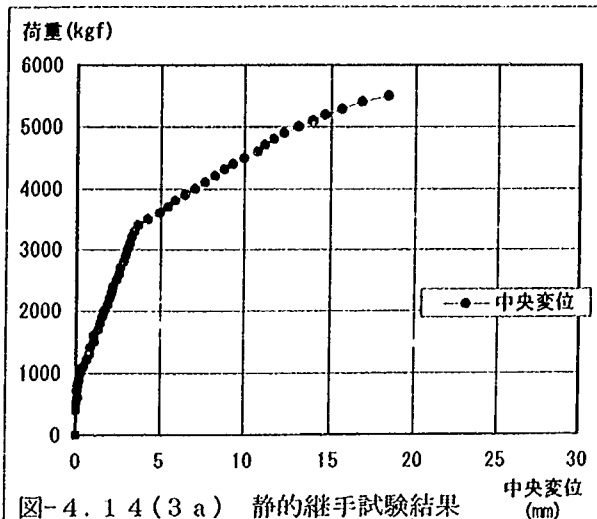


図-4.14(3a) 静的継手試験結果

荷重と中央変位の関係  
…高強度タイプ、継手10cm(TG-3)

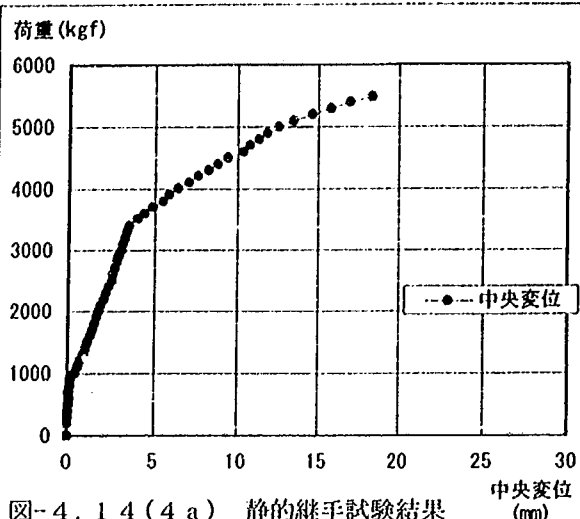


図-4.14(4a) 静的継手試験結果

荷重と中央変位の関係  
…高強度タイプ、継手15cm(TG-4)

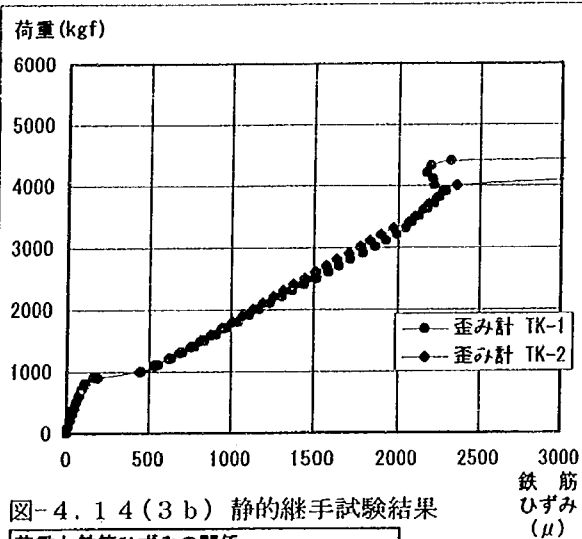


図-4.14(3b) 静的継手試験結果

荷重と鉄筋ひずみの関係  
…高強度タイプ、継手10cm(TG-3)

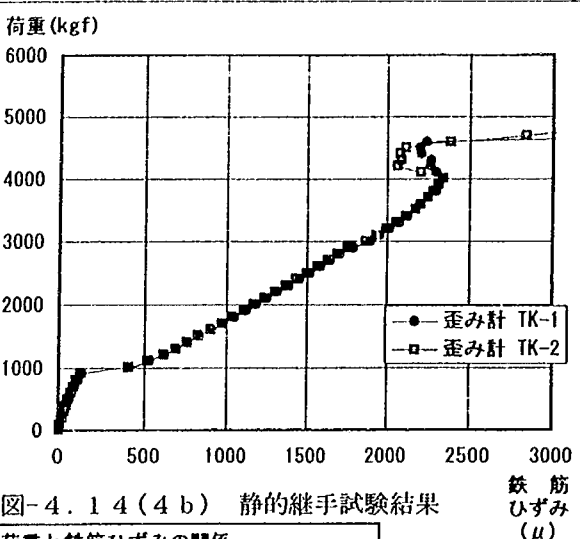


図-4.14(4b) 静的継手試験結果

荷重と鉄筋ひずみの関係  
…高強度タイプ、継手15cm(TG-4)

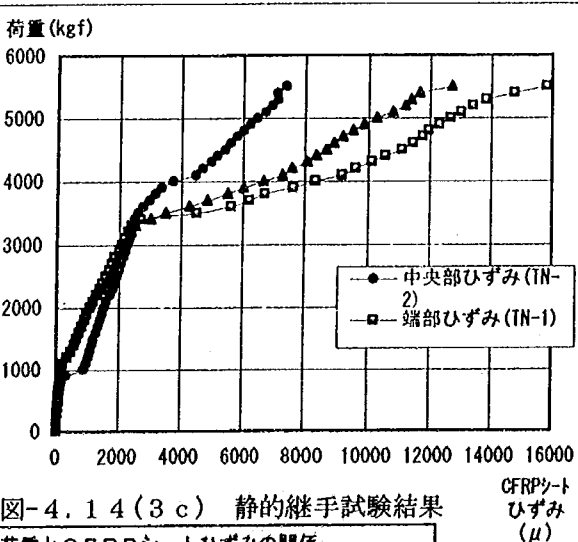


図-4.14(3c) 静的継手試験結果

荷重とCFRPシートひずみの関係  
…高強度タイプ、継手10cm(TG-3)

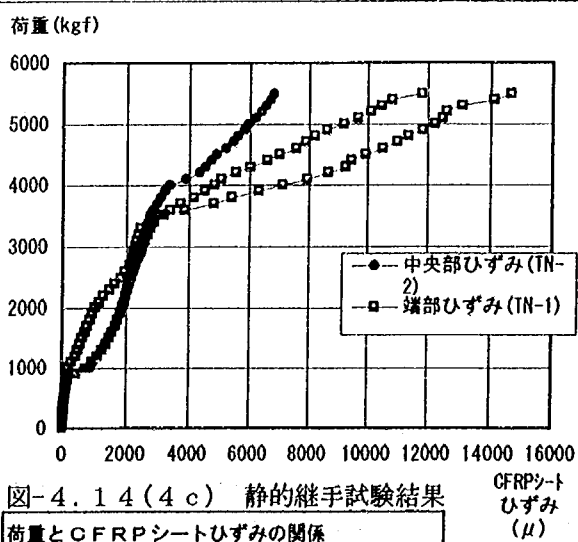
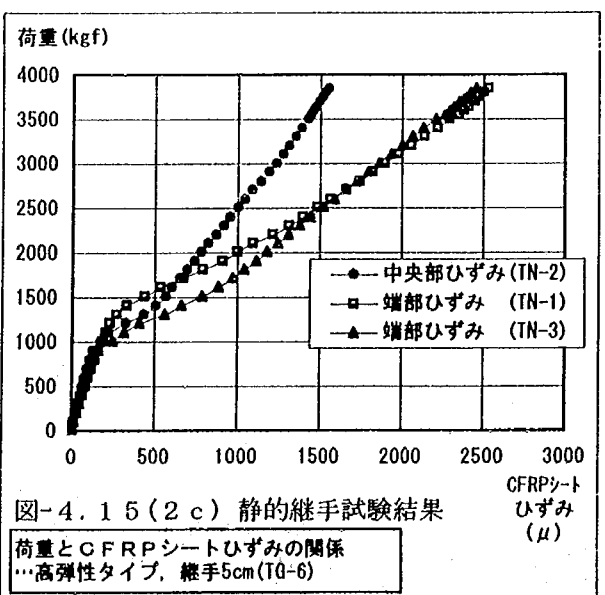
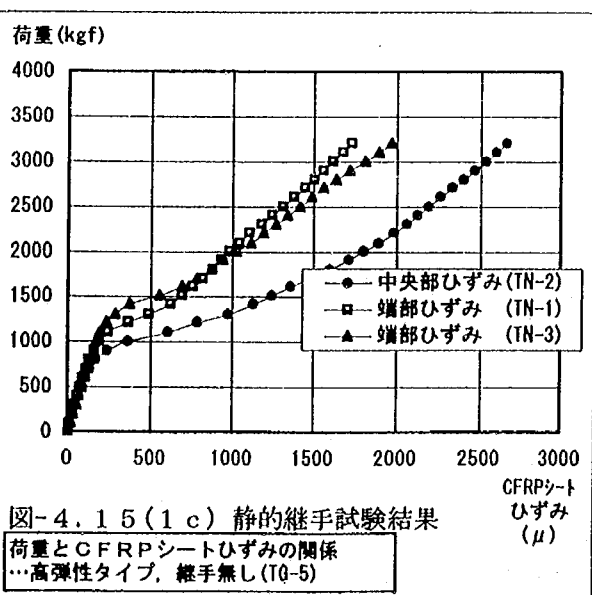
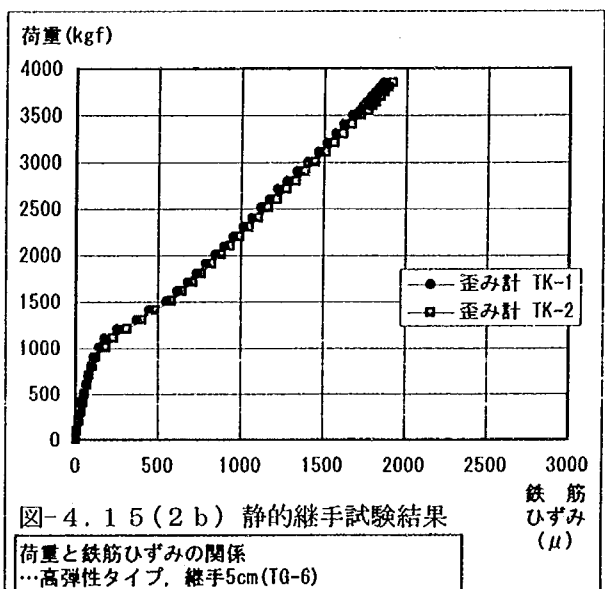
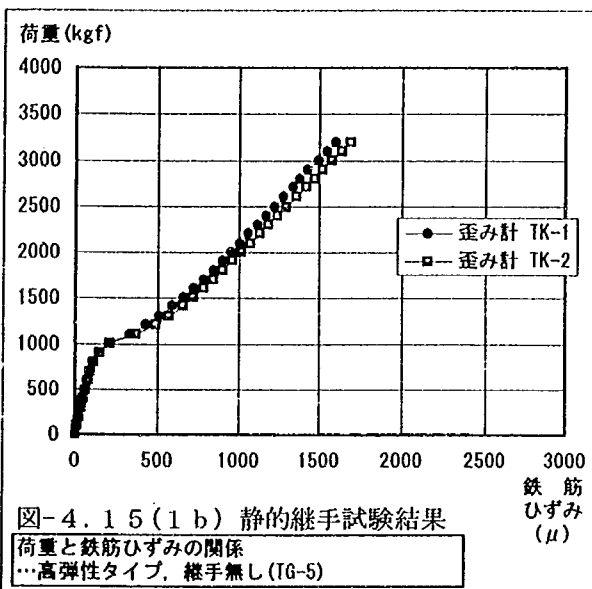
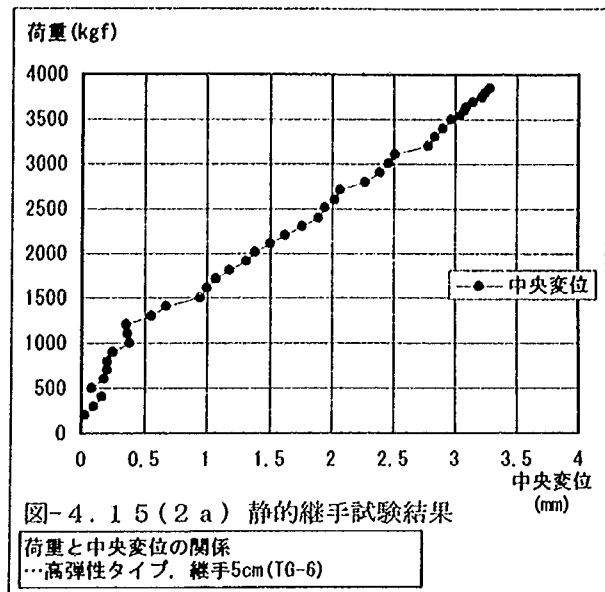
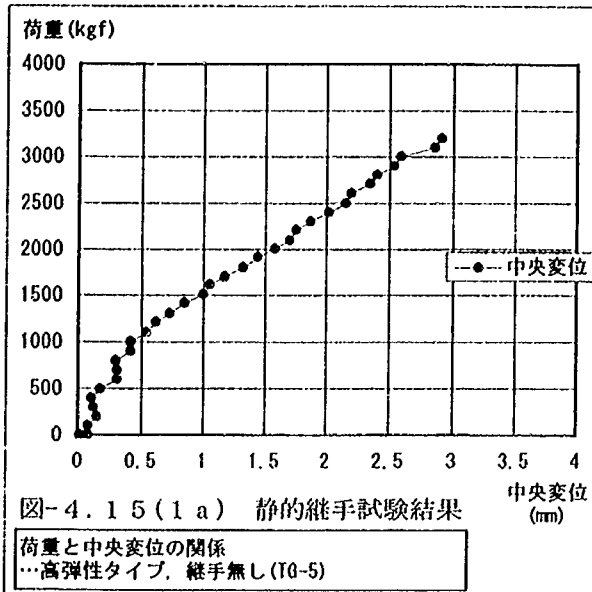
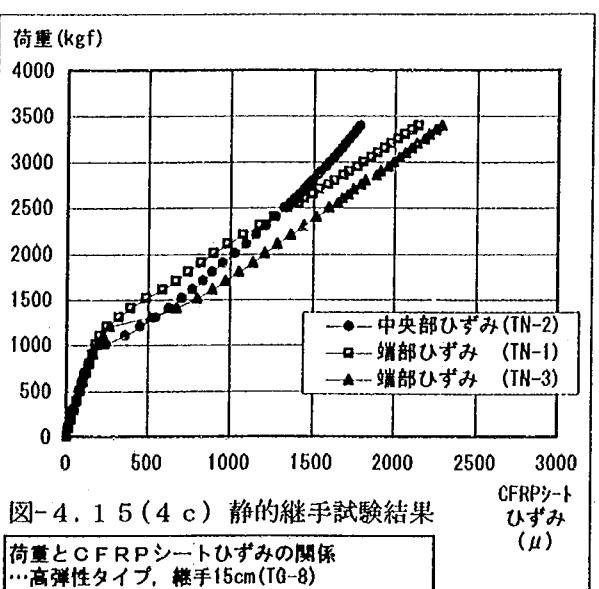
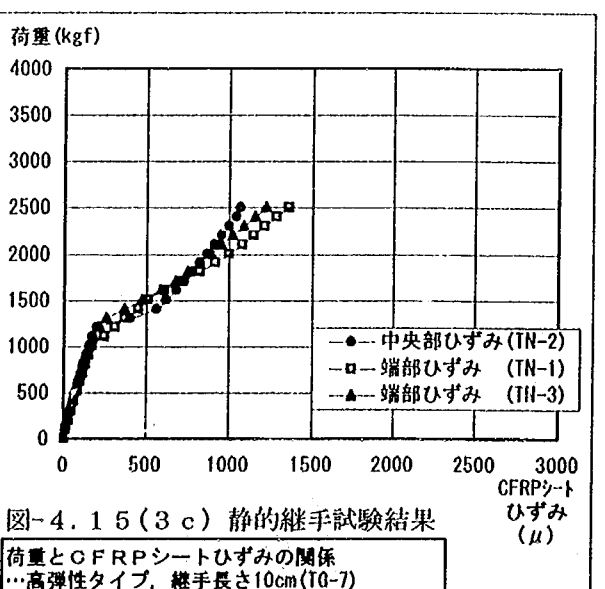
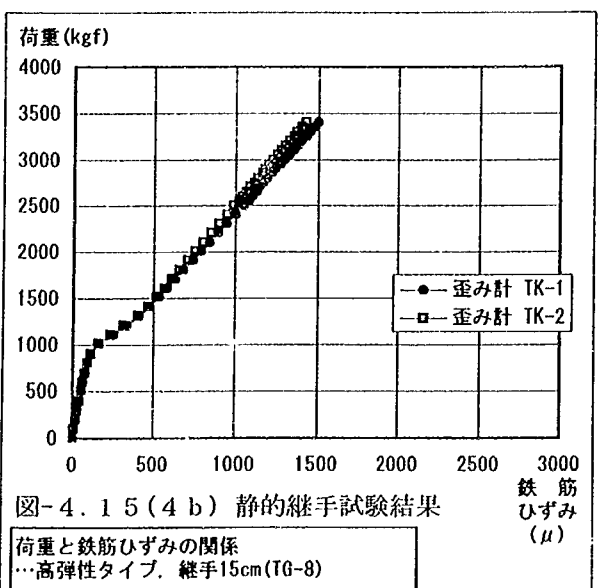
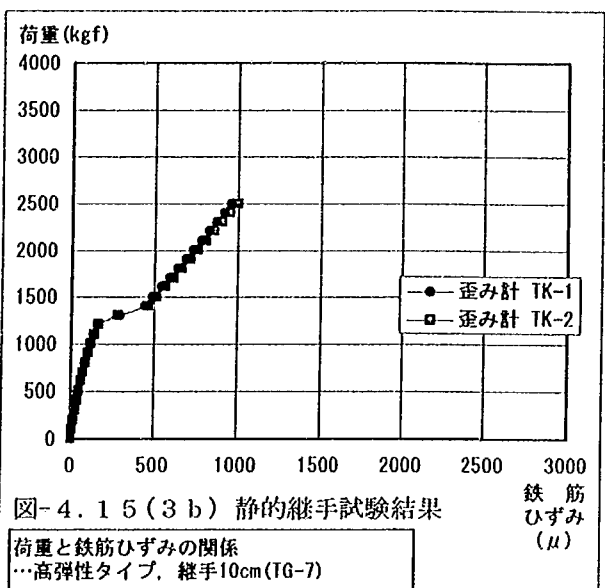
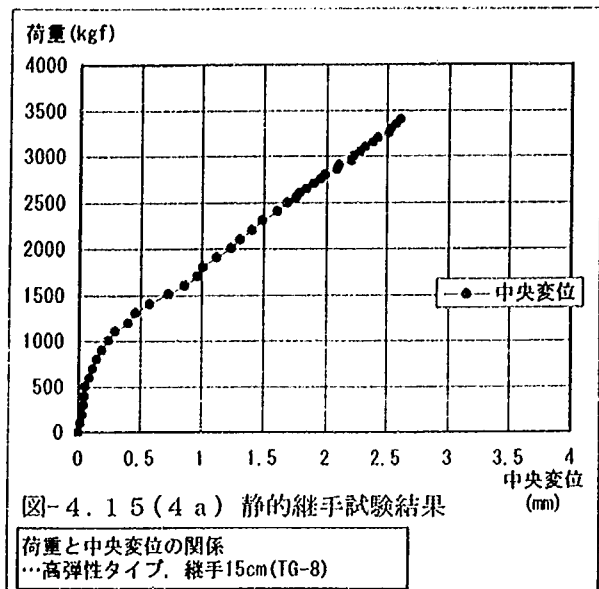
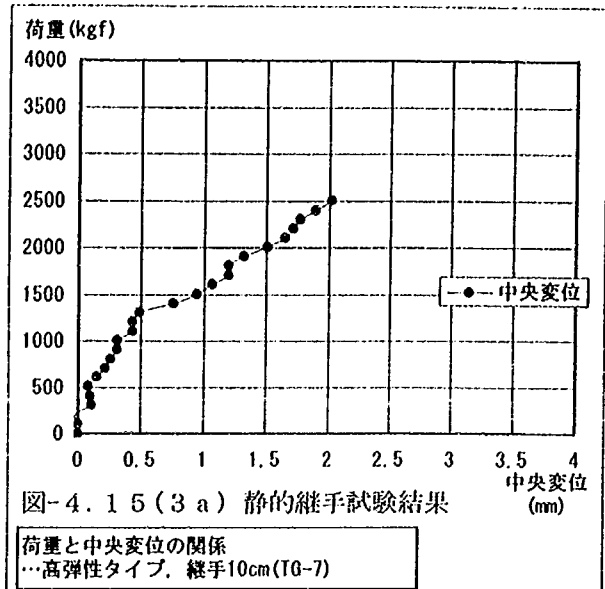
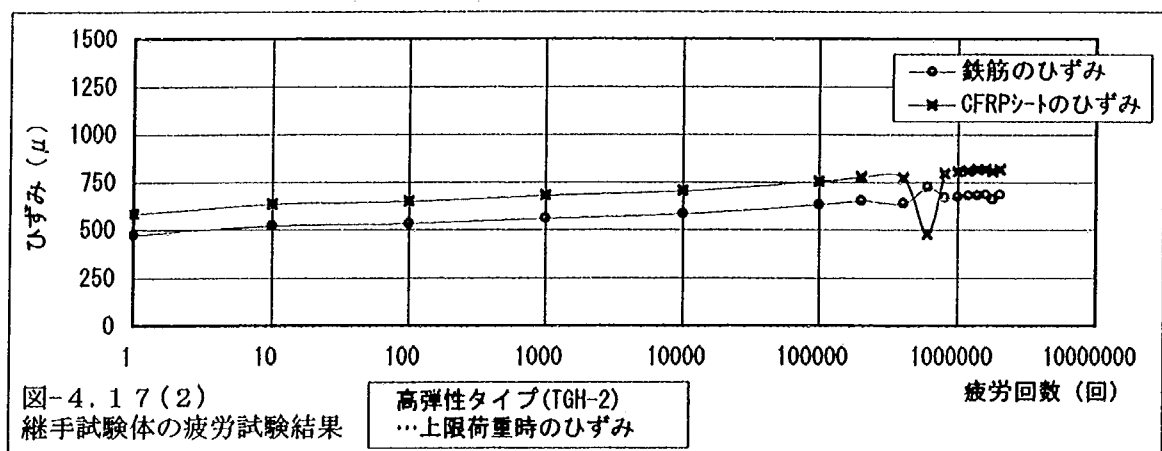
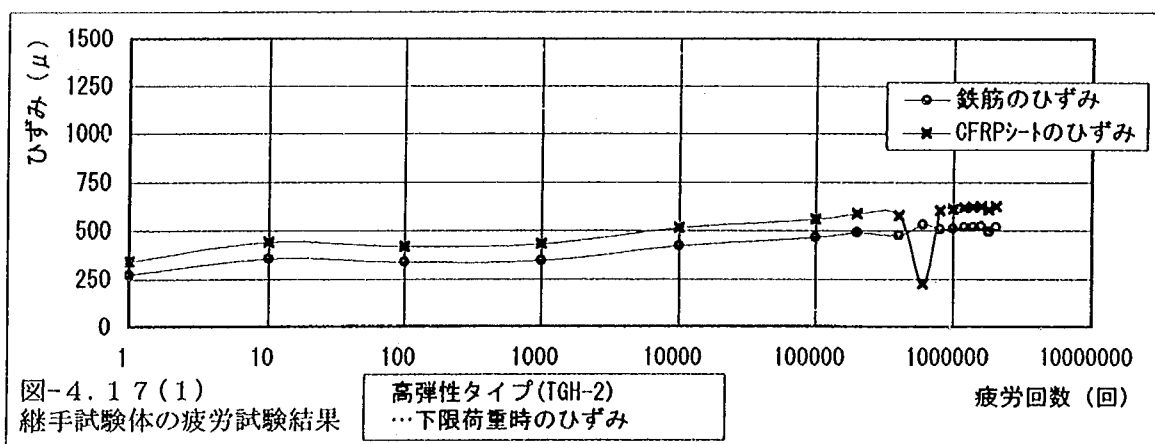
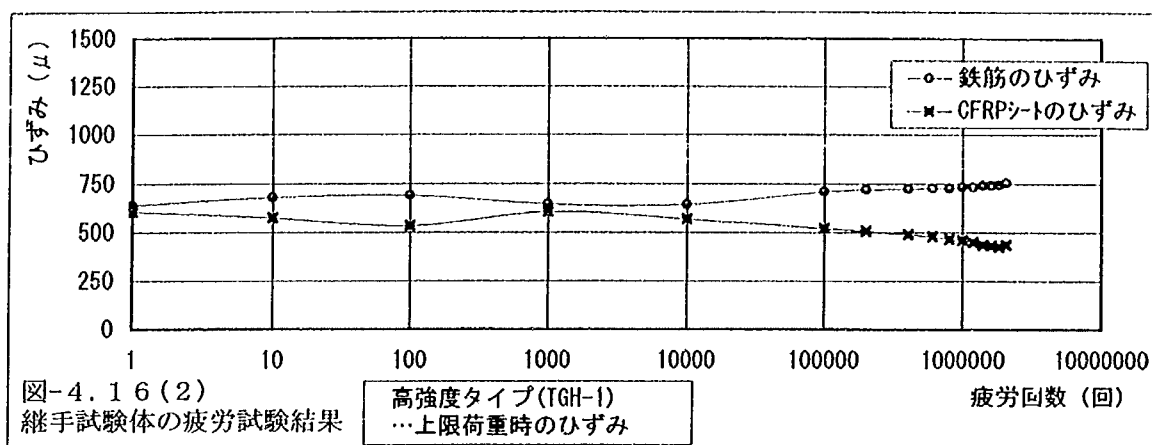
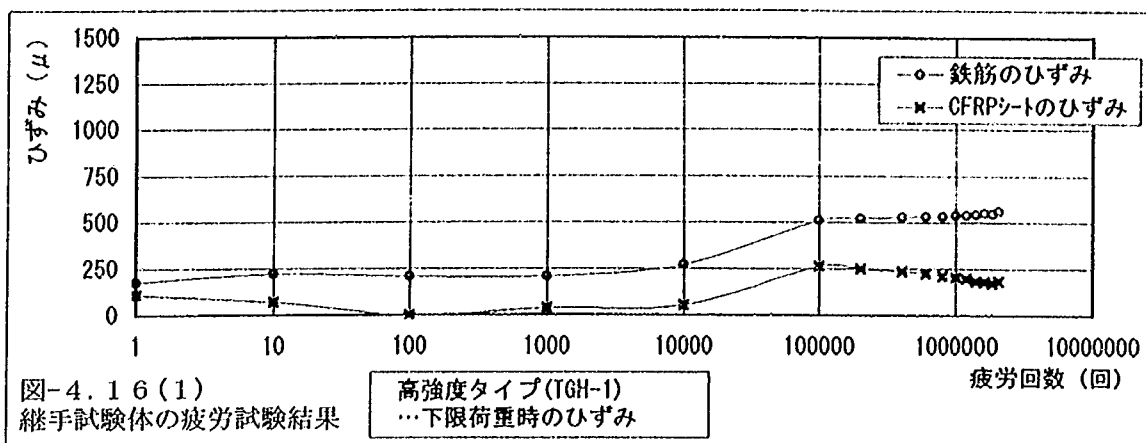


図-4.14(4c) 静的継手試験結果

荷重とCFRPシートひずみの関係  
…高強度タイプ、継手15cm(TG-4)







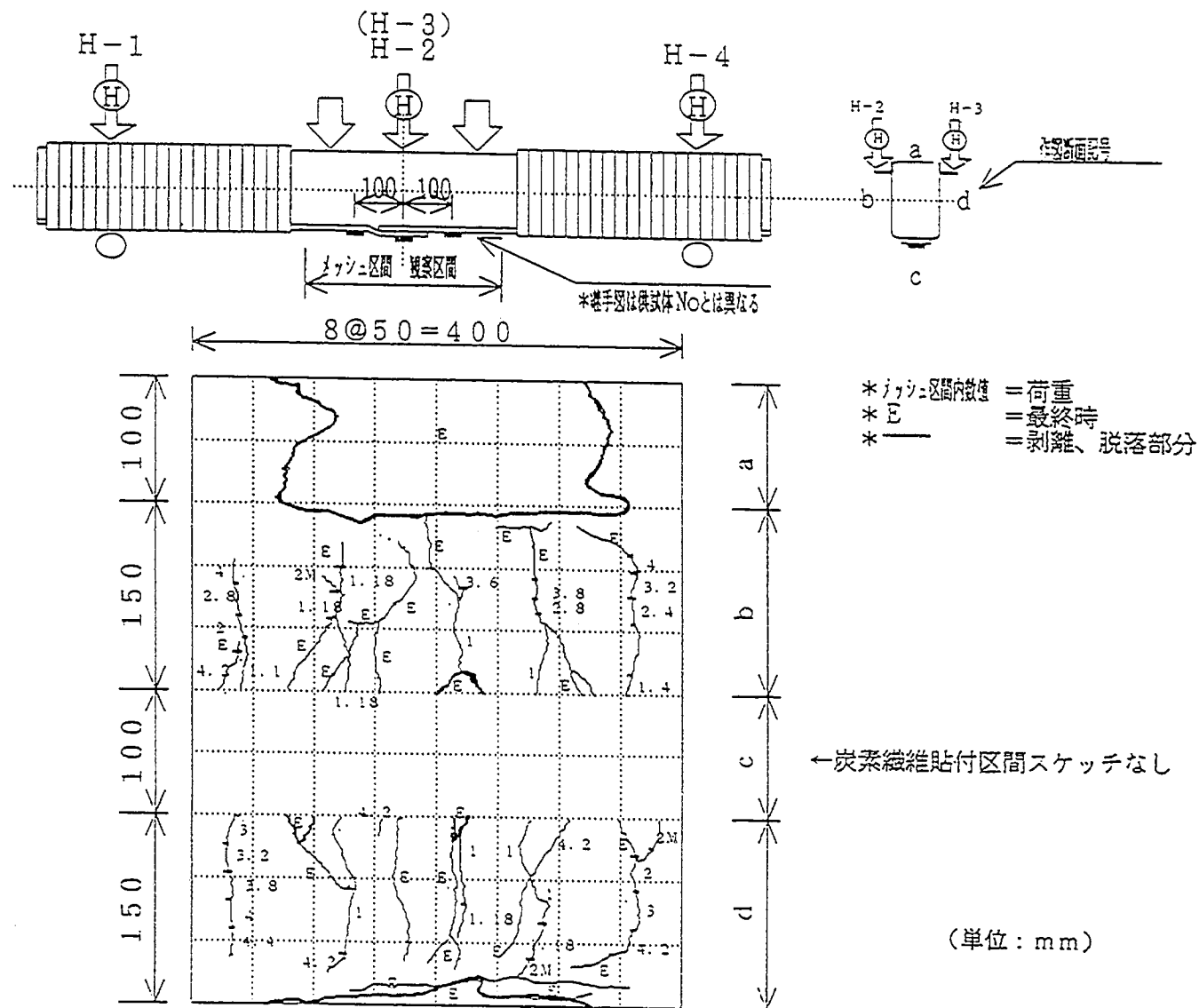


図-4.19 継手試験 試験体ひび割れ観察図(試験体No. TGH-2)

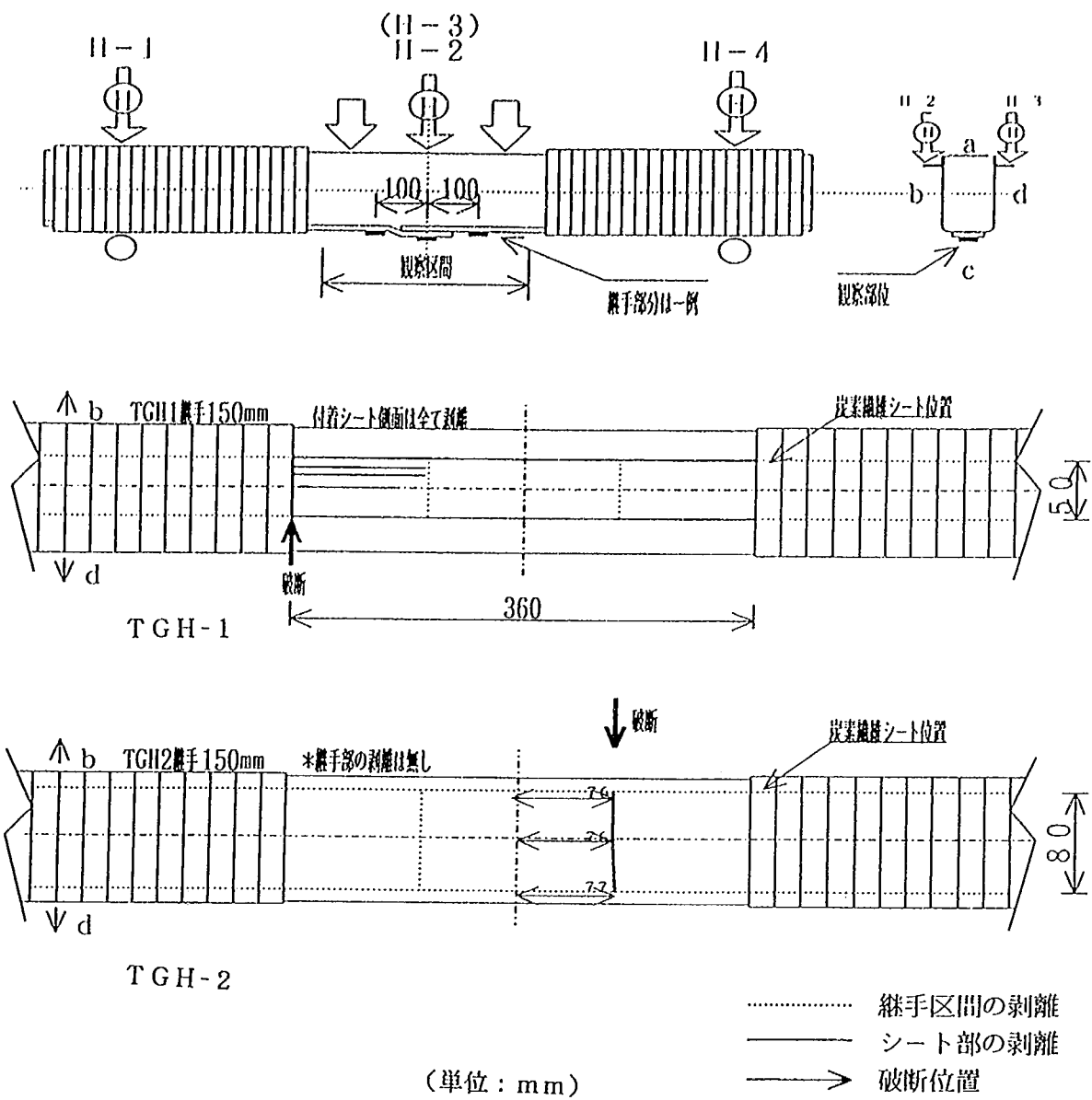


図-4.20 継手試験 試験体CFRP観察図 (試験体No. TGH-1, -2)

表-4.7 継手試験：疲労試験後の静的試験結果

| 試験体<br>No. | 継手<br>長さ<br>(cm) | 貼付幅<br>(cm) | 炭素繊維シート分類 |                                  |                                  | コンクリート<br>圧強強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | ひび割れ<br>発生荷重<br>(kgf) | 鉄筋降伏<br>荷 重<br>(kgf) | CFRPシート<br>破断荷重<br>(kgf) | CFRPシート<br>3点の最大ひずみ<br>破断直前(μ) | 破 壊 状 況 |
|------------|------------------|-------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------------|---------|
|            |                  |             | 材料<br>No. | 公称弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 保証引張強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |                                          |                       |                      |                          |                                |         |
| TGH-1      | 15               | 5           | B-5       | $2.35 \times 10^4$               | 35,000                           | 574                                      | 1,000                 | 3,800                | 4,940                    | 16,549                         | シート破断   |
| (TG-4)     |                  |             |           |                                  |                                  | (476)                                    | (1,000)               | (4,100)              | (5,488)                  | (14,647)                       | シート破断   |
| TGH-2      | 15               | 8           | C-9       | $6.50 \times 10^4$               | 20,000                           | 551                                      | 1,000                 | 降伏せず                 | 2,499                    | 1,873                          | シート破断   |
| (TG-8)     |                  |             |           |                                  |                                  | (476)                                    | (1,200)               | 降伏せず                 | (3,398)                  | (2,283)                        | シート破断   |

( ) 内は、静的試験結果。

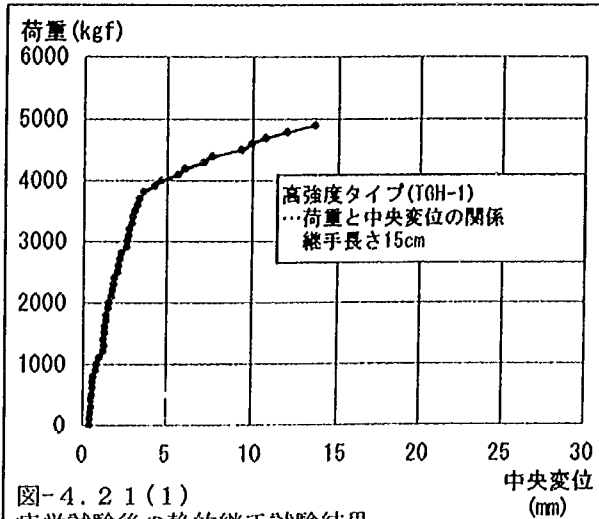


図-4.21(1)  
疲労試験後の静的継手試験結果

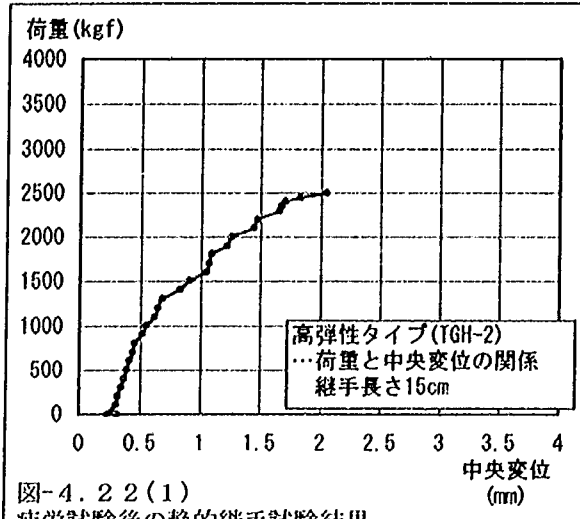


図-4.22(1)  
疲労試験後の静的継手試験結果

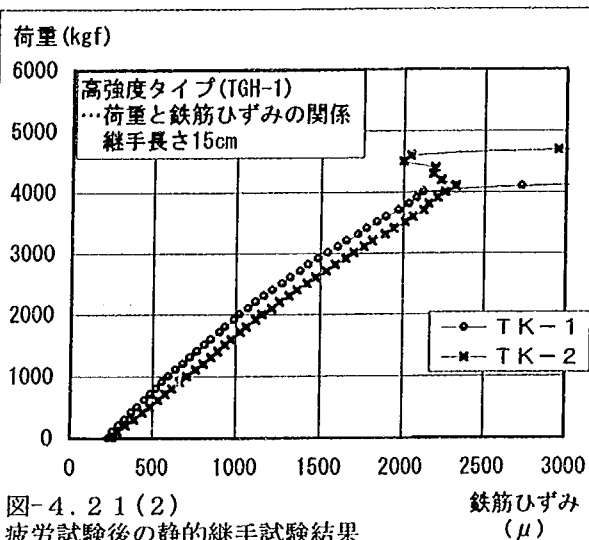


図-4.21(2)  
疲労試験後の静的継手試験結果

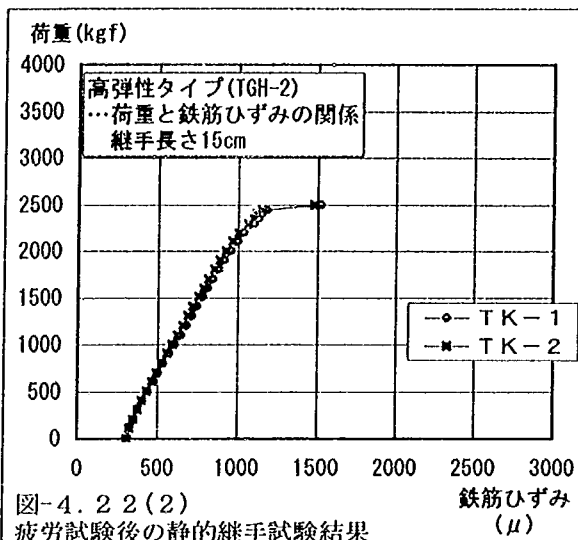


図-4.22(2)  
疲労試験後の静的継手試験結果

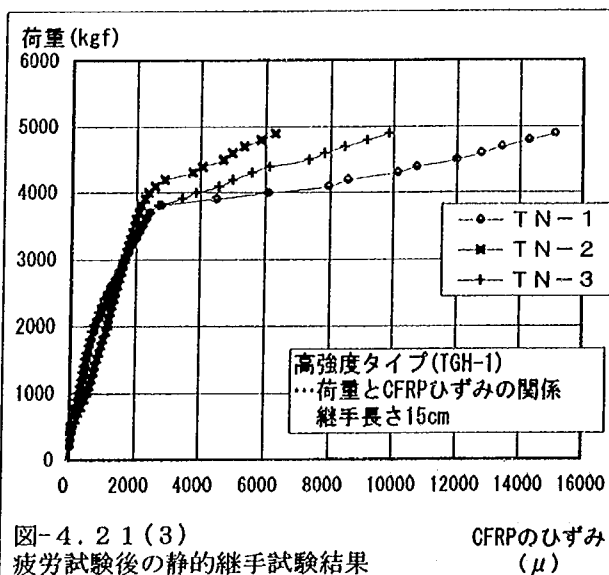


図-4.21(3)  
疲労試験後の静的継手試験結果

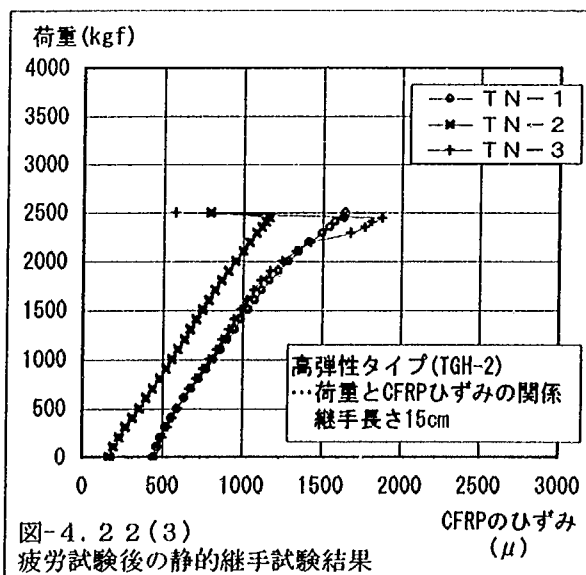


図-4.22(3)  
疲労試験後の静的継手試験結果

## 5. 考察

今回の一連のCFRPシートの材料特性に関する研究で明らかになった事項、および今後の課題は次のとおりと考えられる。

### 5.1 CFRPシートの単体試験

CFRPシートの単体試験では、公称弾性係数と保証引張強度とが異なる炭素繊維シートで製作されたCFRPシートを対象にして、促進暴露前について高強度タイプから高弾性タイプまでの9種類、促進暴露後について高強度タイプと高弾性タイプを各1種類、200万回疲労載荷後について高強度タイプから高弾性タイプまで4種類、そして、汎用性のある高強度タイプと高弾性タイプ各1種類を、それぞれ静的引張試験により引張強度と弾性係数を測定し、その変化状況を調査した。

その結果、高強度タイプCFRPシートは、促進暴露、疲労、そして促進暴露と疲労の複合作用の影響をほとんど受けないことが明らかとなったことから、一般環境では汎用的に適用可能であると考えられる。しかし、高弾性タイプCFRPシートは、促進暴露による紫外線劣化作用および同様の促進暴露と200万回疲労の複合作用を受けた場合において、促進暴露と疲労の両方共無作用の場合に比して、性能値にやや低下が見られた。これは、疲労作用のみの場合には性能値の低下が見られなかったことから、促進暴露の紫外線による劣化の影響を受けたと考えられる。従って、紫外線の影響を受ける部位のCFRPシートを用いた補強には耐候性に優れた塗装を考慮する必要がある。環境条件のパラメータは、この外にも例えば、水分、湿度などと多く、これらについては影響はないといわれるものの、同様の評価は今後の研究課題と考えられる。

一方、静的引張試験結果において、引張強度の平均値はいずれのCFRPシートも保証引張強度( $X-3\sigma$ )を大きく上まわった。弾性係数は、後に提案する公称弾性係数前後の値を示した。従来、CFRPシートの弾性係数は、炭素繊維シート・メーカーでは、JIS K 7073に準拠し初期弾性係数を公称弾性係数としていた。しかし、土木学会より連続繊維補強材の引張試験方法(案)(JSC E-531-1995)が提案され、弾性係数は荷重-ひずみ曲線の最大引張荷重の20%と60%の間で求めることとなった。CFRPシートについても、その使用方法が鉄筋の応力低減および部材の終局耐力向上の両方に用いられることから、最近では本試験法に準拠し測定しつつある。材料メーカーで実施した最近の試験結果を参考資料として表-5.2に添付する。

各メーカーによる最近のCFRP引張試験実績および単体試験結果を見たとき、設計計画時において、材料分類上使用している保証引張強度を設計基準値として用いることはともかく、公称弾性係数を設計基準値として用いると、荷重分担度が正しく評価されず、設計計算結果の信頼度が損なわれる可能性がある。従って、材料分類表とは別に設計用基準値を設定し直すことが必要であり、最近の実績に基づき表-5.1に示すように提案する。

表-5.1 CFRP設計用基準値表

| 公称弾性係数<br>$E_c$ kgf/cm <sup>2</sup> | 保証引張強度( $X_c$ kgf/cm <sup>2</sup> ) |        |        |        |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|--------|--------|
|                                     | 20,000                              | 25,000 | 30,000 | 35,000 |
| $2.50 \times 10^6$                  |                                     |        | ○      | ○      |
| $4.00 \times 10^6$                  |                                     |        | ○      |        |
| $4.50 \times 10^6$                  |                                     | ○      |        |        |
| $5.50 \times 10^6$                  | ○                                   |        |        |        |
| $6.50 \times 10^6$                  | ○                                   |        |        |        |

## 5.2 付着試験

高強度タイプおよび高弾性タイプの炭素繊維シートを貼付したコンクリートブロックに軸方向力を載荷してCFRPシートの付着性能を調査する付着試験では、疲労無の静的試験と疲労後の静的試験とでほぼ同様の結果が得られ、両タイプのCFRPシートの付着性能は疲労による低下などの影響を受けないことを確認できた。しかし、今回のCFRPシートの破壊状況が、高強度タイプについては付着切れ、高弾性タイプについては破断と大きく異なるため、付着長さをパラメータとして双方が包含された付着性能評価方法等を今回の試験で見出すことはできなかった。しかし、両タイプの試験体で付着切れまたは破断に至る過程のCFRPシート各部の荷重-ひずみ曲線の視察結果では、特に付着切れの進行過程におけるひずみ状態を、コンクリートとの付着ひずみ区間、付着切れの前徴から付着切れ進行状態を示す遷移ひずみ区間、付着切れが完全に終了した自由ひずみ区間の三部分に分けることができ、設計検討のための付着切れ開始時期の目安を遷移ひずみ区間の初期段階におけるCFRPシートのひずみ、例えば250 $\mu$ 程度とする等も一つの方法と考えられる。

なお、高強度タイプCFRPシートの付着性能は、コンクリートの設計基準強度の高い程優れている傾向がみられ、コンクリート表面部の諸弾性係数および緻密さに影響されることを確認することができた。

## 5.3 継手試験

高強度タイプおよび高弾性タイプの炭素繊維シートを貼付した鉄筋コンクリートはりの曲げ試験によって行う継手試験は、付着試験と類似に、継手長さをパラメータとして実施した。疲労载荷無の静的载荷試験では、高強度タイプおよび高弾性タイプとも継手長さの違いによる継手性能には大きな違いは認められず、いずれも母材破壊であった。ただし、高弾性タイプについては、ひび割れなどの要因の影響を受けやすいことが判明した。疲労後の静的载荷試験では、高強度タイプについては、疲労無の静的载荷試験結果とほぼ似たような性能値が得られ、疲労载荷による継手部性能の低下などの影響を受けないことを確認することができた。一方、高弾性タイプについては、疲労後の静的载荷試験で、最大荷重、CFRPシートのひずみとも、疲労無の静的载荷試験結果に比して、20～30%程度低く、しかも、継手部以外の一般

部で母材破断しており、これは高弾性タイプが高強度タイプに比べ大きな荷重を負担することから、疲労  
載荷中のひび割れの進展によりCFRPシートのひずみがひずみの限界値に到達して破断したことなど、  
疲労による影響を受けた可能性も考えられる。従って、高弾性タイプについては、これらを勘案した設計  
法を検討する必要があると考える。

以 上

表-5.2(1/3) 材料メーカーによる最近の引張試験結果

グラフ縦軸は「発生頻度(%)」を表す。

強度グラフの横軸は「kgf/mm<sup>2</sup>」を、弾性係数グラフの横軸は「tf/mm<sup>2</sup>」を表す。

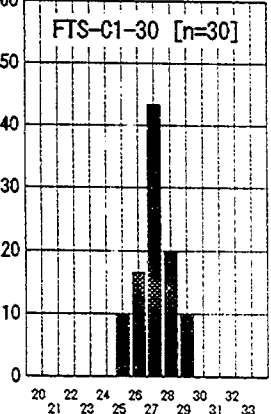
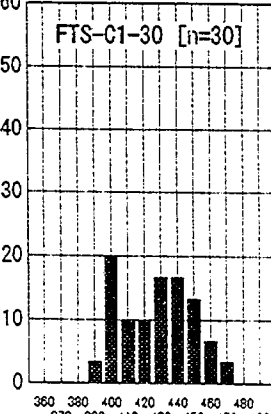
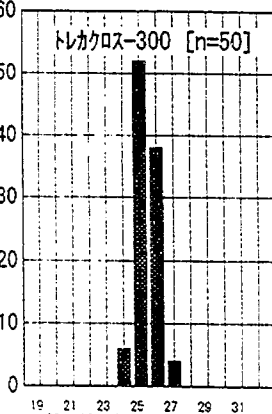
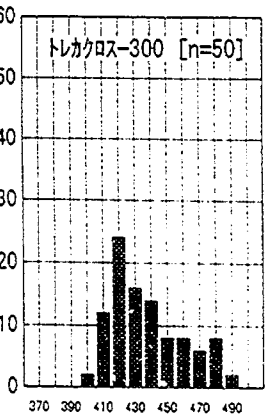
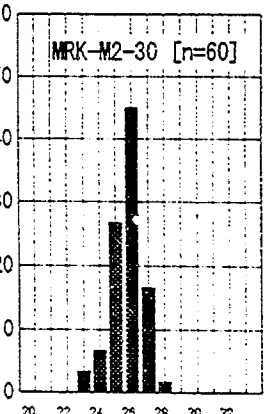
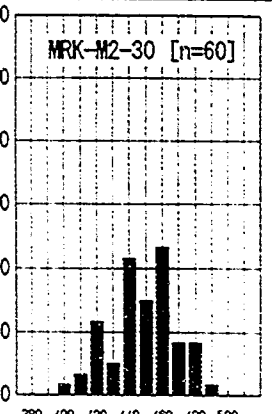
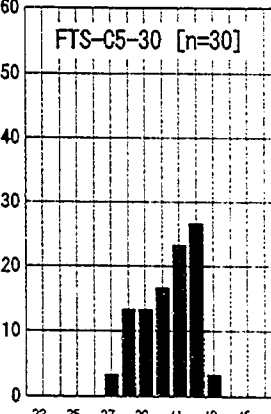
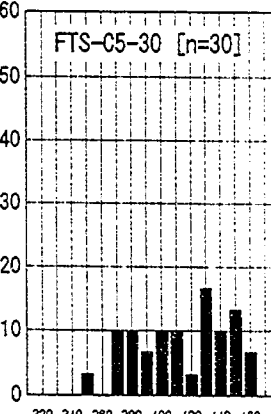
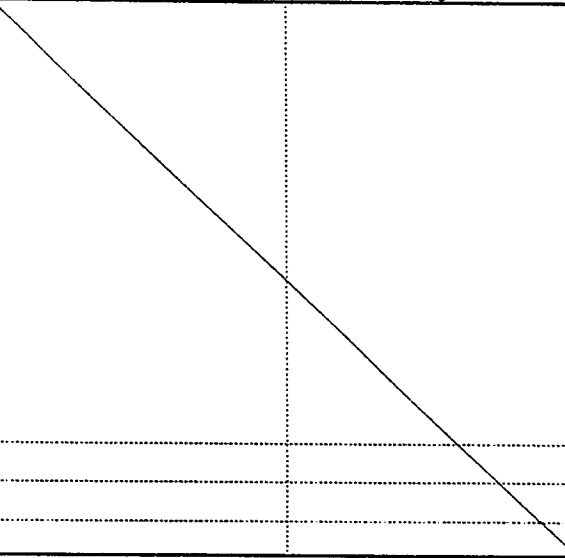
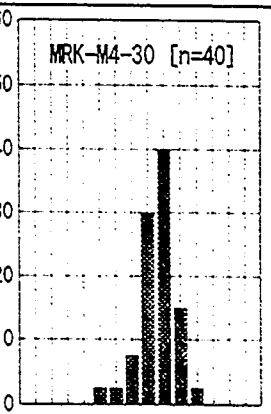
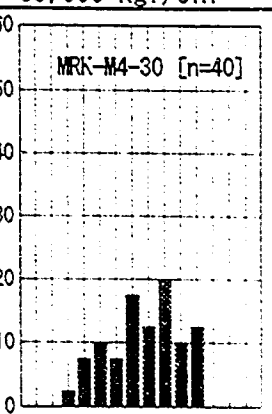
| 公称値                                                                                                                                                          | A社                                                                                 |                                                                                    | B社                                                                                  |                                                                                     | C社                                                                                   |                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                              | 引張弾性係数                                                                             | 引張強度                                                                               | 引張弾性係数                                                                              | 引張強度                                                                                | 引張弾性係数                                                                               | 引張強度                                                                                 |
| (弾性係数)<br>2.50<br>X10 <sup>6</sup><br>kgf/cm <sup>2</sup><br>25.0tf/mm <sup>2</sup><br><br>(引張強度)<br>35,000<br>kgf/cm <sup>2</sup><br>350kgf/mm <sup>2</sup> |   |   |   |  |   |   |
| 平均 X                                                                                                                                                         | 2.70 X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                          | 42,900 kgf/cm <sup>2</sup>                                                         | 2.55 X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                           | 43,800 kgf/cm <sup>2</sup>                                                          | 2.58 X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                            | 44,900 kgf/cm <sup>2</sup>                                                           |
| 標準偏差 σ                                                                                                                                                       | 0.106X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                          | 2,190 kgf/cm <sup>2</sup>                                                          | 0.057X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                           | 2,280 kgf/cm <sup>2</sup>                                                           | 0.095X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                            | 1,970 kgf/cm <sup>2</sup>                                                            |
| X-3σ                                                                                                                                                         | —                                                                                  | 36,300 kgf/cm <sup>2</sup>                                                         | —                                                                                   | 37,000 kgf/cm <sup>2</sup>                                                          | —                                                                                    | 39,000 kgf/cm <sup>2</sup>                                                           |
| (弾性係数)<br>4.00<br>X10 <sup>6</sup><br>kgf/cm <sup>2</sup><br>40.0tf/mm <sup>2</sup><br><br>(引張強度)<br>30,000<br>kgf/cm <sup>2</sup><br>300kgf/mm <sup>2</sup> |  |  |  |                                                                                     |  |  |
| 平均 X                                                                                                                                                         | 4.03 X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                          | 41,500 kgf/cm <sup>2</sup>                                                         |                                                                                     |                                                                                     | 4.16 X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                            | 43,700 kgf/cm <sup>2</sup>                                                           |
| 標準偏差 σ                                                                                                                                                       | 0.161X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                          | 3,000 kgf/cm <sup>2</sup>                                                          |                                                                                     |                                                                                     | 0.113X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                            | 2,140 kgf/cm <sup>2</sup>                                                            |
| X-3σ                                                                                                                                                         | —                                                                                  | 32,500 kgf/cm <sup>2</sup>                                                         |                                                                                     |                                                                                     | —                                                                                    | 37,300 kgf/cm <sup>2</sup>                                                           |

表-5.2(2/3) 材料メーカーによる最近の引張試験結果

グラフ縦軸は「発生頻度(%)」を表す。

強度グラフの横軸は「kgf/mm<sup>2</sup>」を、弾性係数グラフの横軸は「tf/mm<sup>2</sup>」を表す。

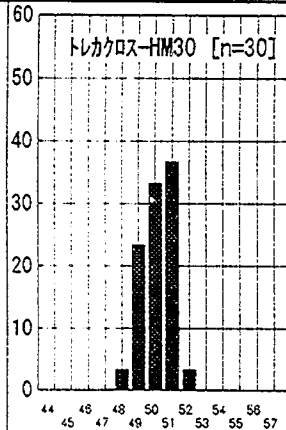
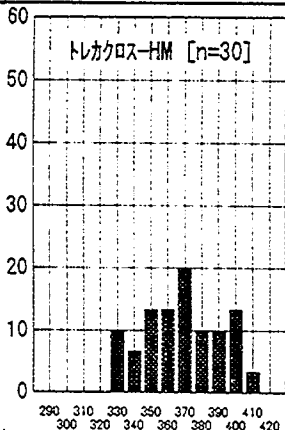
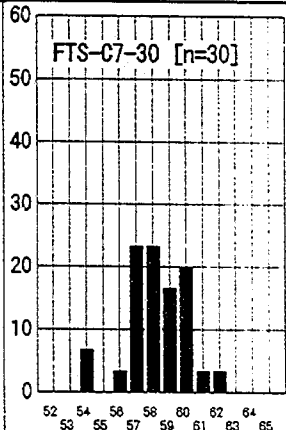
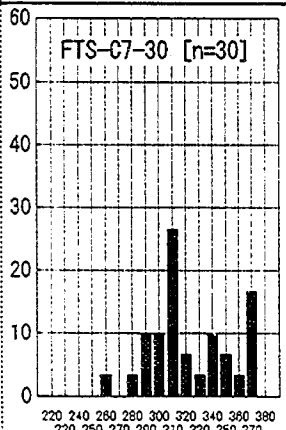
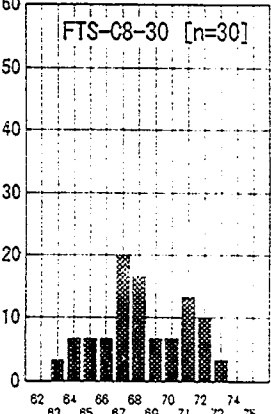
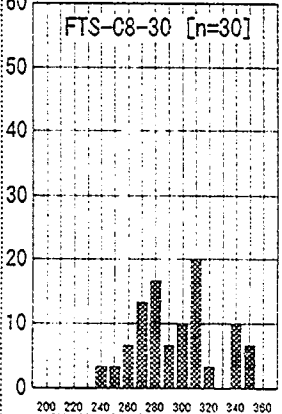
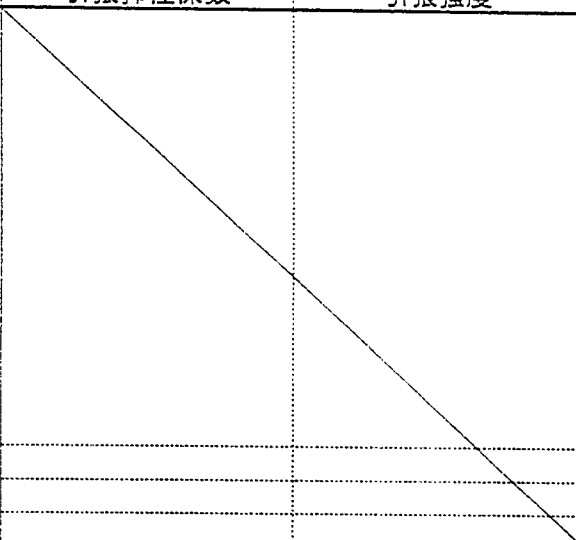
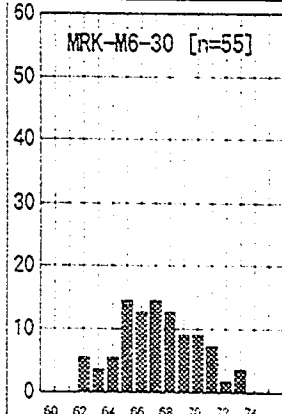
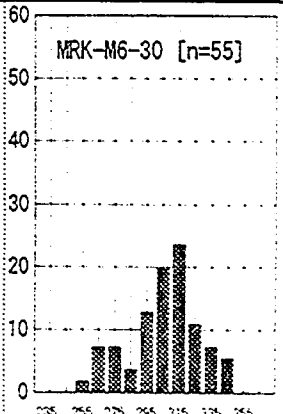
| 公称値                                                                                                                                                          | A社                                                                                                     |                                                                                                        | B社                                                                                                      |                                                                                                        | C社     |      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|------|
|                                                                                                                                                              | 引張弾性係数                                                                                                 | 引張強度                                                                                                   | 引張弾性係数                                                                                                  | 引張強度                                                                                                   | 引張弾性係数 | 引張強度 |
| (弾性係数)<br>4.50<br>X10 <sup>6</sup><br>kgf/cm <sup>2</sup><br>45.0tf/mm <sup>2</sup><br><br>(引張強度)<br>25,000<br>kgf/cm <sup>2</sup><br>250kgf/mm <sup>2</sup> |                                                                                                        |                                                                                                        | <br>トルカウス-HM30 [n=30] | <br>トルカウス-HM [n=30] |        |      |
| 平均 X                                                                                                                                                         |                                                                                                        |                                                                                                        | 5.01 X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                                               | 37,000 kgf/cm <sup>2</sup>                                                                             |        |      |
| 標準偏差 σ                                                                                                                                                       |                                                                                                        |                                                                                                        | 0.083X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                                               | 2,270 kgf/cm <sup>2</sup>                                                                              |        |      |
| X-3σ                                                                                                                                                         |                                                                                                        |                                                                                                        | —                                                                                                       | 30,200 kgf/cm <sup>2</sup>                                                                             |        |      |
| (弾性係数)<br>5.50<br>X10 <sup>6</sup><br>kgf/cm <sup>2</sup><br>55.0tf/mm <sup>2</sup><br><br>(引張強度)<br>20,000<br>kgf/cm <sup>2</sup><br>200kgf/mm <sup>2</sup> | <br>FTS-C7-30 [n=30] | <br>FTS-C7-30 [n=30] |                                                                                                         |                                                                                                        |        |      |
| 平均 X                                                                                                                                                         | 5.82 X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                                              | 32,300 kgf/cm <sup>2</sup>                                                                             |                                                                                                         |                                                                                                        |        |      |
| 標準偏差 σ                                                                                                                                                       | 0.177X10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup>                                                              | 3,000 kgf/cm <sup>2</sup>                                                                              |                                                                                                         |                                                                                                        |        |      |
| X-3σ                                                                                                                                                         | —                                                                                                      | 23,300 kgf/cm <sup>2</sup>                                                                             |                                                                                                         |                                                                                                        |        |      |

表-5.2(3/3) 材料メーカーによる最近の引張試験結果

グラフ縦軸は「発生頻度(%)」を表す。

強度グラフの横軸は「kgf/mm<sup>2</sup>」を、弾性係数グラフの横軸は「tf/mm<sup>2</sup>」を表す。

| 公称値                                                                                                                                                       | A社                                                                                |                                                                                   | B社                                                                                 |      | C社                                                                                  |                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                           | 引張弾性係数                                                                            | 引張強度                                                                              | 引張弾性係数                                                                             | 引張強度 | 引張弾性係数                                                                              | 引張強度                                                                                |
| (弾性係数)<br>6.50<br>$\times 10^6$<br>kgf/cm <sup>2</sup><br>65.0tf/mm <sup>2</sup><br><br>(引張強度)<br>20,000<br>kgf/cm <sup>2</sup><br>200kgf/mm <sup>2</sup> |  |  |  |      |  |  |
| 平均 X                                                                                                                                                      | 6.81 $\times 10^6$ kgf/cm <sup>2</sup>                                            | 29,500 kgf/cm <sup>2</sup>                                                        |                                                                                    |      | 6.76 $\times 10^6$ kgf/cm <sup>2</sup>                                              | 30,500 kgf/cm <sup>2</sup>                                                          |
| 標準偏差 σ                                                                                                                                                    | 0.269 $\times 10^6$ kgf/cm <sup>2</sup>                                           | 2,870 kgf/cm <sup>2</sup>                                                         |                                                                                    |      | 0.278 $\times 10^6$ kgf/cm <sup>2</sup>                                             | 2,230 kgf/cm <sup>2</sup>                                                           |
| X-3σ                                                                                                                                                      | —                                                                                 | 20,800 kgf/cm <sup>2</sup>                                                        |                                                                                    |      | —                                                                                   | 23,800 kgf/cm <sup>2</sup>                                                          |

第II編 炭素繊維シートによる鉄筋コンクリートげたの  
曲げ補強に関する研究



## 1. 試験目的

現在、わが国では約13万橋（橋長15m以上）の道路橋が供用されており、これらの道路橋を適切に維持管理していくことが重要な課題となっている。この内、鉄筋コンクリート（R C）Tげた橋は、交通量の増大や車両の大型化にともない損傷が発生しているものや耐力不足のものがあるため、効果的な補強工法の確立が急務となっている。

本研究では、コンクリート構造物の補強工法の一つとして、軽量で耐食性に優れ、高引張強度・高弾性の炭素繊維シートを接着する工法に注目して、R C Tげた橋に対する炭素繊維シート接着工法の曲げ疲労耐久性を明確にし、補強効果の評価方法を検討することを目的とし、模型試験体を用いた曲げ疲労試験を行った。

載荷試験における確認評価項目は、以下のとおりである。

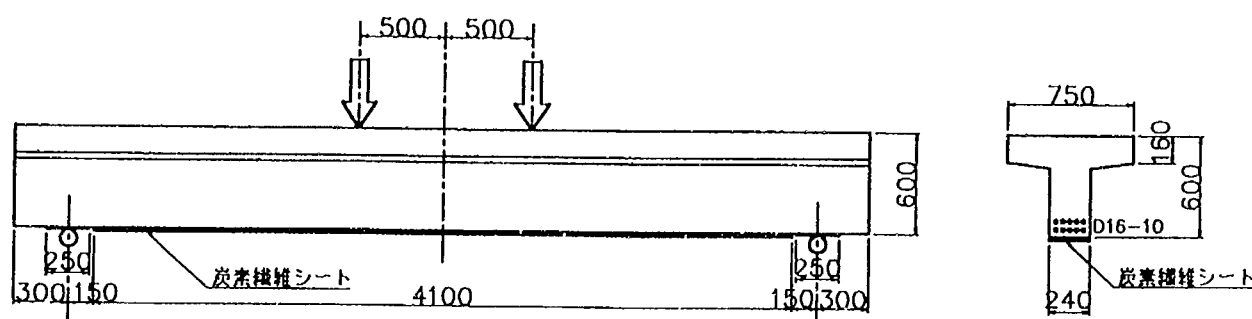
- ①設計荷重相当の繰返し応力（疲労荷重）を受けた場合の補強効果
  - ・主鉄筋応力度の変化
  - ・たわみ（曲げ剛性）の変化
  - ・炭素繊維シートの発生応力度
- ②炭素繊維シートの種類（高強度タイプ、高弾性タイプ）と補強効果との関係
- ③疲労試験後の終局曲げ耐力と炭素繊維シートの破壊モード

## 2. 試験計画

### 2.1 試験体の設定

試験体は、L-20荷重で設計されたRC単純Tげた橋（付属資料：資料－1参照、支間14.5m、有効幅員7.5m）の主げたの配筋と設計応力度を参考にし、けた高を実RCTげたのほぼ1/2とした。（図－2.1.1参照）。

使用するコンクリートの設計基準強度と鉄筋の種類は、上記のRC単純Tげた橋と同一とする。



図－2.1.1 試験体の形状寸法

試験体設定にあたっての基本方針は、以下の通りである。

- ・着目点：実橋の耳げたの曲げ応力度に着目する。
- ・試験体規模：実橋の1/2程度とする。
- ・破壊モード：曲げ破壊先行型とする。従って、せん断耐力を曲げ耐力に比べて十分確保する。
- ・けた断面：試験体形状は、実橋けた断面の1/2を完全に変現しようとすると、床版とウェブの厚さがかなり薄くなり荷重試験中に横倒れ等の不安がある。また、試験目的から各荷重段階における試験体主鉄筋の鉄筋比と発生応力状態がそれぞれ実橋の応力状態と合っていれば、ほぼ満足できるものとし、完全に相似させる必要性は小さいと判断した。このため、試験体の安定性と製作性を考慮し、主げた断面形状の主要部は、同時に試験計画を進めているプレテンげたに合わせ、両者の対比に便を図ることとした。
- ・桁断面の相似比：表－2.1.1に実橋と試験体との主げた断面の相似比を示す。
- ・荷重方法：図－2.1.1に示す2点荷重方式とする。

表-2.1.1 試験体主げた断面の相似比

| 項 目                       | 実橋断面                        | 試験体断面                       | 相似比   |
|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------|
| 断面形状                      |                             |                             |       |
| ・床版幅 b                    | 2 1 0 0 mm                  | 7 5 0 mm                    | 2.8 0 |
| ・床版厚 t                    | 1 7 0 mm                    | 1 7 7.5 mm                  | 0.9 8 |
| ・けた高 h                    | 1 1 5 0 mm                  | 6 0 0 mm                    | 1.9 2 |
| ・ウェブ厚 t <sub>w</sub>      | 4 5 0 mm                    | 2 4 0 mm                    | 1.8 8 |
| 粗骨材径                      | 2 5 mm                      | 2 0 mm                      | —     |
| 主鉄筋                       |                             |                             |       |
| ・配筋                       | D32×10=79.42cm <sup>2</sup> | D16×10=19.99cm <sup>2</sup> | —     |
| ・鉄筋径                      | 3 2 mm                      | 1 6 mm                      | 2.0 0 |
| ・1本の断面積                   | 7.94cm <sup>2</sup>         | 1.99 cm <sup>2</sup>        | —     |
| ・有効高さ                     | 1 0 5 0 mm                  | 5 4 5 mm                    | 1.9 3 |
| ・鉄筋比 $\rho = A_s / t_w d$ | 1.68%                       | 1.52 %                      | 1.1 0 |

## 2.2 試験パラメータおよび試験ケース

試験パラメータは、表-2.2.1に示す炭素繊維シートの種類（高強度タイプ、高弾性タイプの2種類）と、損傷の有無（活荷重作用時の主鉄筋応力度）とした。N0.4試験体では鉄筋腐食等の損傷を想定して、B活荷重時の主鉄筋応力度を2500kgf/cm<sup>2</sup>まで発生させることにした。

試験体は、表-2.2.1および表-2.2.2に示すように、無補強の基準試験体1体と、貼付けた炭素繊維シートを高強度タイプとしたもの1体、および高弾性タイプとしたもの2体の合計4体とした。

N0.2と3の試験体下面に接着する炭素繊維シートの補強量は、無補強試験体N0.1の支間中央部に、実橋におけるB活荷重時相当の試験荷重（22.8tf）を載荷した場合に、その主鉄筋応力度が道路橋示方書Ⅲに規定される許容応力度（1800kgf/cm<sup>2</sup>）程度となるような量とした。なお、炭素繊維シートの接着は試験体の下面のみとした。

N0.4試験体の炭素繊維シートの補強量は、B活荷重相当の試験荷重（33.3tf）載荷時の主鉄筋応力度が2500kgf/cm<sup>2</sup>程度となるような量とした。

表-2.2.1 試験パラメータ

| 試験体NO. | 補 強<br>有 無 | 損 傷<br>有 無 | 炭素繊維シート                     |                             |                             | B活荷重時<br>の主鉄筋応<br>力度目標値<br>kgf/cm <sup>2</sup> |
|--------|------------|------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|
|        |            |            | 弾性係数<br>kgf/cm <sup>2</sup> | 引張強度<br>kgf/cm <sup>2</sup> | 積 層 数<br>層                  |                                                |
| N0.1   | 無し         | 無し         | —                           | —                           | —                           | 2,000                                          |
| N0.2   | 有り         | 無し         | 2.35×10 <sup>6</sup>        | 35,000                      | 300g/m <sup>2</sup><br>× 8層 | 1,800                                          |
| N0.3   | 有り         | 無し         | 6.50×10 <sup>6</sup>        | 20,000                      | 300g/m <sup>2</sup><br>× 3層 | 1,800                                          |
| N0.4   | 有り         | 有り         | 6.50×10 <sup>6</sup>        | 20,000                      | 300g/m <sup>2</sup><br>× 6層 | 2,500                                          |

表 - 2.2.2 載荷試験ケース (計画値)

| NO | CFRP<br>補強                                                                                         | 目 的                                                                             | 静的載荷時 (鉄筋・CFRP応力、載荷荷重P)                                                                    |                                                                             |                                                                                     |                                                                               |                                                                                                           | 疲労試験時                                                                | 終局曲げ耐力<br>(累加強度)                                                        |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
|    |                                                                                                    |                                                                                 | 曲げひびわれ<br>発生荷重                                                                             | 鉄筋応力<br>死荷重時相当                                                              | 鉄筋応力<br>L-20相当<br>(許容応力度)                                                           | 鉄筋応力<br>B活荷重相当                                                                | 鉄筋降伏荷重                                                                                                    | 鉄筋応力振幅<br>$\Delta\sigma = \sigma_B - \sigma_D$                       |                                                                         |
| 1  | 無                                                                                                  | ・基準試験体(無補強)<br>; CFRPによる補強効果<br>を把握するための比<br>較基準試験体                             | $f_{td}=21.8\text{kgf/cm}^2$<br>(引張強度)<br>$M_{cr}=4.02\text{tfm}$<br>$P_{cr}=4.7\text{tf}$ | $\sigma_s=905\text{kgf/cm}^2$<br>$M_D=8.7\text{tfm}$<br>$P_D=10.3\text{tf}$ | $\sigma_s=1810\text{kgf/cm}^2$<br>$M_{20}=17.4\text{tfm}$<br>$P_{20}=20.5\text{tf}$ | $\sigma_s=2010\text{kgf/cm}^2$<br>$M_B=19.3\text{tfm}$<br>$P_B=22.8\text{tf}$ | $\sigma_s=\sigma_{sy}=3000$<br>$\text{kgf/cm}^2$<br>$M_D=28.8$<br>$P_D=34.0$                              | $\Delta\sigma_s=1105$<br>$\text{kgf/cm}^2$                           | $M_u=30.6\text{tfm}$<br>$P_u=36.0\text{tf}$                             |
| 2  | 高強度タイプ<br>$E=2.35 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$<br>$t=0.0167\text{cm}$<br>$b=24\text{cm}$<br>$n=8$ 層 | ・標準弾性のCFRPによる<br>補強効果の確認<br>; B活荷重時応力レ<br>ベル下の疲労強度特性                            | NO.1と同一                                                                                    | NO.1と同一                                                                     | $\sigma_s=1640\text{kgf/cm}^2$<br>$\sigma_{cr}=967$ "                               | $\sigma_s=1805\text{kgf/cm}^2$<br>$\sigma_{cr}=1178$ "                        | $\sigma_s=3000$<br>$\sigma_{cr}=1958$<br>$M_{20}=$ NO.1と<br>$P_{20}=$ 同一                                  | $\Delta\sigma_s=900$<br>$M_D=32.1\text{tfm}$<br>$P_D=37.9\text{tf}$  | $M_u=94.4$<br>$P_u=111$                                                 |
| 3  | 高弾性タイプ<br>$E=6.5 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$<br>$t=0.0143\text{cm}$<br>$b=24\text{cm}$<br>$n=3$ 層  | ・高弾性のCFRPによる<br>補強効果の確認<br>; "                                                  | "                                                                                          | "                                                                           | $\sigma_s=1659\text{kgf/cm}^2$<br>$\sigma_{cr}=2726$ "                              | $\sigma_s=1824\text{kgf/cm}^2$<br>$\sigma_{cr}=3321$ "                        | $\sigma_s=3000\text{kgf/cm}^2$<br>$\sigma_{cr}=5462$ "<br>$M_{20}=$ "<br>$P_{20}=$ "                      | $\Delta\sigma_s=919$<br>$M_D=31.7\text{tfm}$<br>$P_D=37.5\text{tf}$  | $M_u=43.3$<br>$P_u=50.9$                                                |
| 4  | 高弾性タイプ<br>$E=6.5 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$<br>$t=0.0143\text{cm}$<br>$b=24\text{cm}$<br>$n=6$ 層  | ・鉄筋応力度を許容応<br>力度より大きく超過<br>させた場合の補強効<br>果の確認<br>(塩害等により鉄筋断<br>面積が減少した場合<br>を想定) | "                                                                                          | "                                                                           | $\sigma_s=2162\text{kgf/cm}^2$<br>$\sigma_{cr}=4549$ "                              | $\sigma_s=2499\text{kgf/cm}^2$<br>$\sigma_{cr}=5768$ "                        | $\sigma_s=3000\text{kgf/cm}^2$<br>$\sigma_{cr}=6924$<br>$M_{20}=24.8\text{tfm}$<br>$P_{20}=29.2\text{tf}$ | $\Delta\sigma_s=1594$<br>$M_D=28.3\text{tfm}$<br>$P_D=33.3\text{tf}$ | $M_u=34.0\text{tfm}$<br>$P_u=40.0\text{tf}$<br>$M_u=47.0$<br>$P_u=55.3$ |

- 備考：1) CFRP接着補強後の応力度の計算方法：単鉄筋矩形断面として応力度の算定 ( $n=15$ ) を行った。炭素繊維シート接着後の応力度算出における仮定は、  
 ①断面の維ひずみは中立軸からの距離に比例する。②コンクリートの引張強度は無視する。③炭素繊維シートは鉄筋と共同して引張力を負担する。④炭素繊維シートは活荷重のみ負担する。  
 2) コンクリートおよび鉄筋の材料特性は、設計計算値とした。  
 2) 曲げひびわれ発生荷重の計算方法：T型断面の断面係数に、コンクリートの引張強度 ( $f_{td}=0.5 \times \sigma_{ck}^{2/3}$ ) を乗じて求めた。  
 3) 終局曲げ耐力の計算方法：道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編に示されている曲げ耐力式により、RCと炭素繊維との累加強度方式で求めた。

## 2.3 載荷荷重および載荷方法

### 2.3.1 載荷荷重

載荷荷重は、L-20荷重で設計されたRCTげた橋耳げたの支間中央部における主鉄筋の死荷重作用時と活荷重(L-20、B活荷重)作用時の応力度を参考にして、N0.1無補強試験体の主鉄筋応力度がRCTげた橋の死荷重時・L-20荷重時・B活荷重時の設計応力度と同程度となるように決定した。(表-2.2.2参照)。

### 2.3.2 載荷方法

載荷は、図-2.1.1に示すように2点曲げ載荷とした。各試験体の載荷方法は以下の通りとした。

#### (1) 試験体N0.1

初めに表-2.2.2に示したB活荷重時(22.8tf)まで段階的に静的載荷試験を行い、次に死荷重時(10.3tf)を下限荷重、B活荷重時を上限荷重として、疲労試験(N=200万回、載荷速度=2.5Hz)を行った。最後に静的載荷試験により破壊に至らしめた。具体的なステップは次の通り。

##### ・ステップ1 (曲げひび割れ導入)

0→曲げひび割れ発生荷重(曲げひび割れ導入)→除荷→

パイ型変位計取付け

##### ・ステップ2 (静的載荷試験)

0→主鉄筋の死荷重時応力度到達荷重→

主鉄筋のL-20許容応力度到達荷重→

主鉄筋のB活荷重応力度到達荷重

##### ・ステップ3 (疲労試験)

0→主鉄筋の死荷重時応力度到達荷重→B活荷重応力度到達荷重

この間で、以下の荷重により疲労試験を行う。

下限値：死荷重応力到達荷重

上限値：B活荷重応力到達荷重

繰り返し数は200万回とする。

載荷速度は、2.5Hzとする。

データの測定は、1, 10, 100, 1000, 1万, 10万, 20万, 20万回以降は、200万回まで20万回毎に静的載荷状態で行う。

##### ・ステップ4 (静的破壊試験)

0→死荷重応力度到達荷重→主鉄筋のL-20応力度到達荷重→B活荷重応力度到達荷重→鉄筋降伏応力度到達荷重→終局荷重→除荷

## (2) 試験体N0. 2, 3, 4

活荷重時載荷状態までの静的載荷試験により曲げひびわれを導入した後、炭素繊維シートの接著作業を実橋の施工条件に極力合わせることを考慮し、死荷重時載荷状態で試験体下面の支間方向に炭素繊維シートを試験体に接着した。その後、エポキシ樹脂が完全に硬化するまでの間、死荷重時とT-20荷重時との間で、1週間繰返し荷重（10.3～17.5tf / 1Hz）を加えた。その後、試験体N0. 1と同様に200万回疲労試験と静的破壊試験を行った。具体的なステップは次の通り。

### ・ステップ1（曲げひび割れ導入）

0 → 曲げひび割れ発生荷重（曲げひび割れ導入） → 除荷 →  
パイ型変位計取付け

### ・ステップ2（炭素繊維シート接着と養生）

0 → 主鉄筋の死荷重時応力度到達荷重 →  
主鉄筋のL-20許容応力度到達荷重 →  
主鉄筋のB活荷重応力度到達荷重 → 除荷  
0 → 死荷重相当荷重 → 炭素繊維シート貼付 → 養生

養生期間は7日間とする。

炭素繊維シートの養生時の載荷荷重と載荷速度は、T荷重（20トン）1台が時速50km/hで車頭間隔15m程度で走行する場合を想定する。

荷重は死荷重応力度到達荷重とT-20荷重時応力度到達荷重の間（10.3～17.5tf）で繰返し載荷する。

載荷速度は1Hzとする。

### ・ステップ3（静的載荷試験）

0 → 主鉄筋の死荷重時応力度到達荷重 →  
主鉄筋のL-20許容応力度到達荷重  
→ 主鉄筋のB活荷重応力度到達荷重 → 除荷

### ・ステップ4（疲労試験）

0 → 主鉄筋の死荷重時応力度到達荷重 → B活荷重応力度到達荷重

この間で疲労試験；主鉄筋の応力振幅 $\Delta\sigma$

載荷は、以下の荷重間で繰り返し載荷を行う。

下限値：死荷重応力到達荷重（ $P_s=10.3\text{tf}$ ）

上限値：B活荷重応力到達荷重（N0. 2, 3： $P_s=22.8\text{tf}$ 、N0. 4： $P_s=33.3\text{tf}$ ）

繰返し数は200万回とする。

載荷速度は、2.5Hzとする。

データの測定は、1, 10, 100, 1000, 1万, 10万, 20万, 20万回以降は200万回まで20万回毎に疲労試験の載荷レベルまで静的に載荷して計測を行う。

・ステップ5（静的破壊試験）

0→死荷重応力度到達荷重→主鉄筋の $\epsilon_{20}$ 応力度到達荷重→B活荷重応力度到達荷重→鉄筋降伏応力度到達荷重→終局荷重→除荷

## 2.4 測定項目および計器配置

載荷試験における測定項目は、以下のとおりである。また、所定の載荷荷重ステップ時には目視観察によりひび割れの発生状況および進展状況など試験体の変状を調査した。

### 1) 静的載荷試験時

- ・荷重－変位
- ・荷重－ひずみ（コンクリート、鉄筋、炭素繊維シート）
- ・荷重－ひび割れ幅、ひび割れ長さ

### 2) 疲労試験時

- ・回数－変位
- ・回数－ひずみ（コンクリート、鉄筋、炭素繊維シート）
- ・回数－ひび割れ幅、ひび割れ長さ
- ・各測定時の荷重－変位
- ・各測定時の荷重－ひずみ（コンクリート、鉄筋、炭素繊維シート）
- ・各測定時の荷重－ひび割れ幅、ひび割れ長さ

上記の項目について測定するため、試験体には各種の計器を設置した。図－2.4.1に鉄筋ひずみゲージ貼付け位置、図－2.4.2にコンクリートおよび炭素繊維シートゲージ貼付け位置、図－2.4.3に変位計の取付け位置を示す。また、載荷試験時の各試験体の測定点数を表－2.4.4に示す。

表－2.4.4 各試験体の測定点数

| 供試体  | コンクリート用<br>ゲージ | 炭素繊維<br>シート用ゲージ | 変位計 | $\pi$ 型<br>変位計 | 鉄筋<br>ゲージ | 結線数 |
|------|----------------|-----------------|-----|----------------|-----------|-----|
| N0.1 | 9              | —               | 10  | 2              | 24        | 45  |
| N0.2 | 9              | 9               | 10  | 2              | 24        | 54  |
| N0.3 | 9              | 9               | 10  | 2              | 24        | 54  |
| N0.4 | 9              | 9               | 10  | 2              | 24        | 54  |

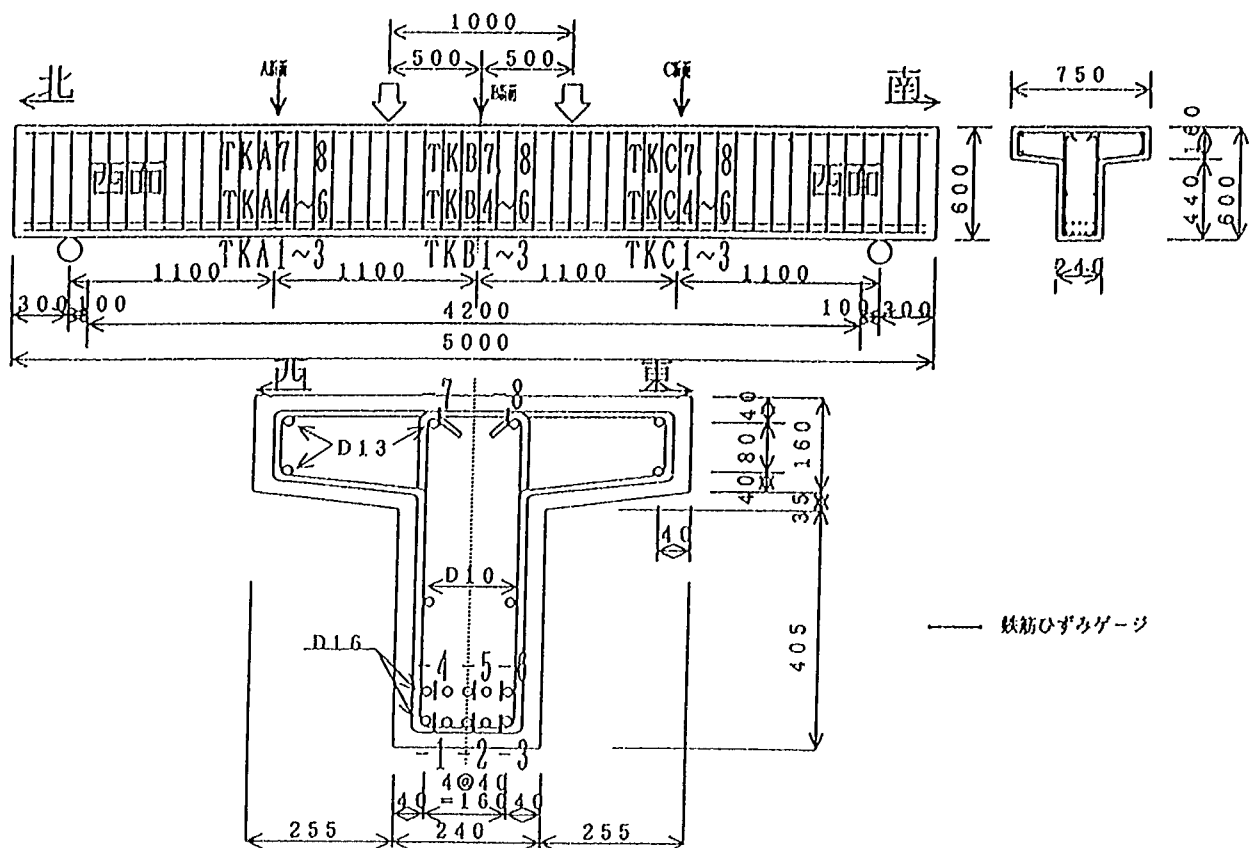


図-2.4.1 配筋および鉄筋ひずみゲージ位置図

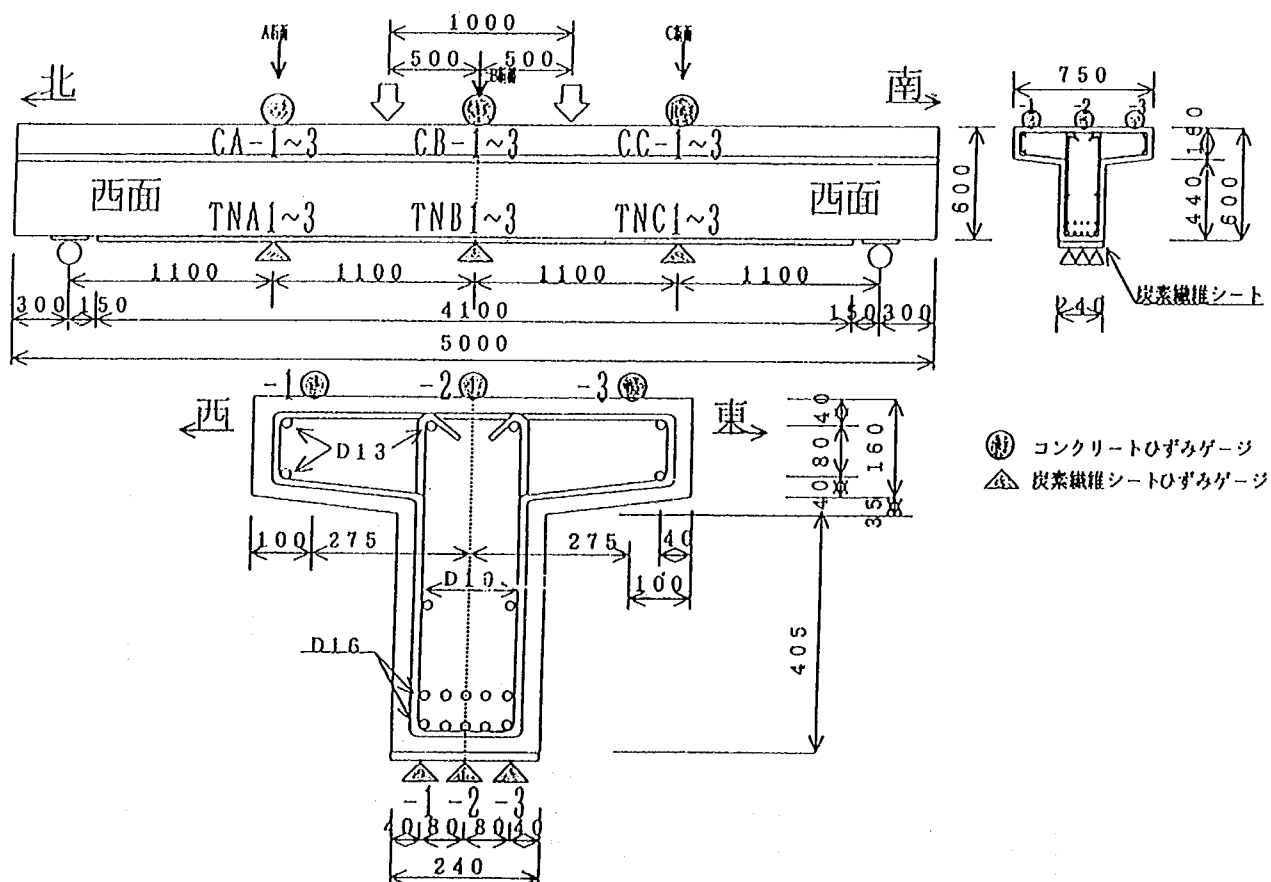


図-2.4.2 コンクリートおよび炭素繊維シートのひずみゲージ位置図

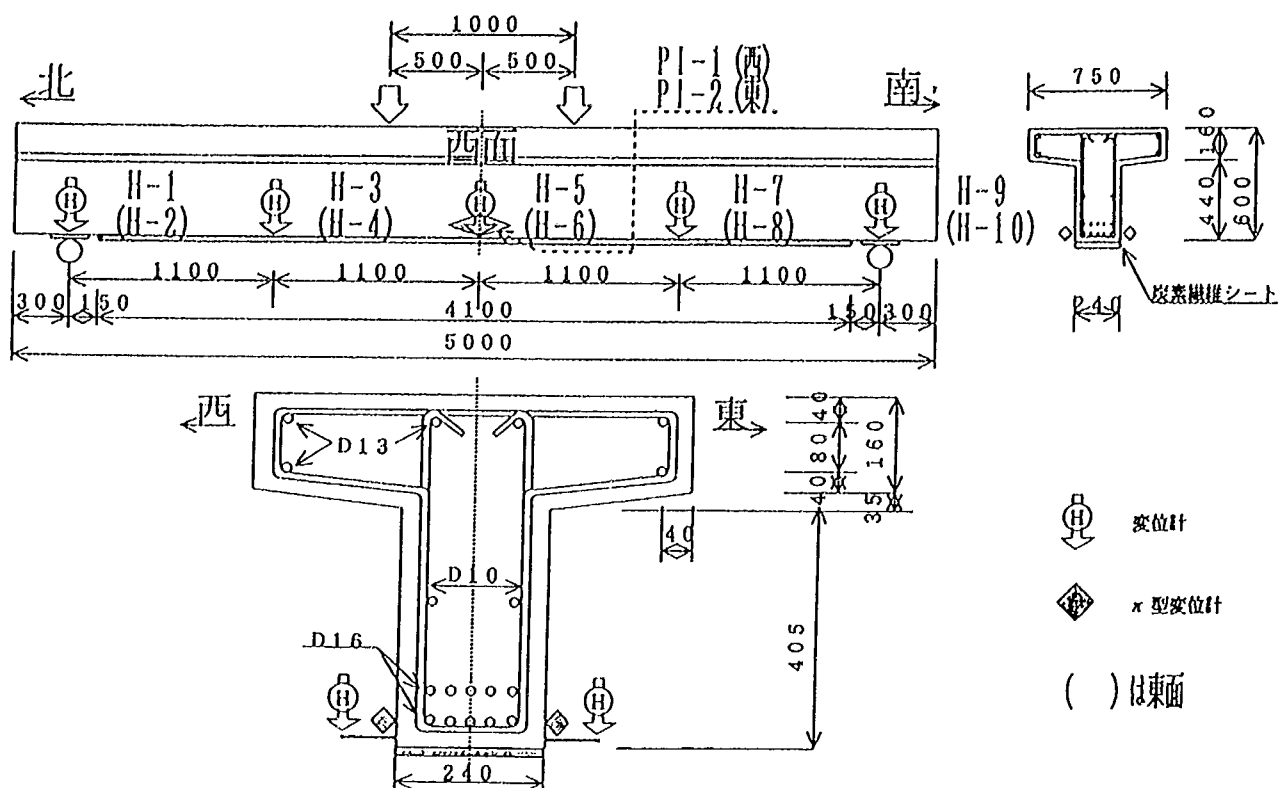


図-2.4.3 変位計取り付け位置図

### 3. 材料試験結果

試験体に使用した鉄筋とコンクリートの材料特性を把握するため、載荷試験に先立って鉄筋の引張試験とコンクリートの圧縮強度試験を行った。

表-3.1.1に材料試験の数量を、表-3.1.2に鉄筋の試験結果、表-3.1.3にコンクリートの試験結果を示す。

表-3.1.1 材料試験の数量

| 供 試 体                                               | 試 験 名  | 数量(本) | 備 考                                                                      |
|-----------------------------------------------------|--------|-------|--------------------------------------------------------------------------|
| コンクリート<br>円柱供試体<br>( $\phi 10 \times 20\text{cm}$ ) | 圧縮強度試験 | 12    | 弾性係数、ポアソン比測定<br>: コンプレッソメータ                                              |
|                                                     | 引張強度試験 | 12    | 最大割裂荷重のみ測定                                                               |
| 鉄筋試験片                                               | 引張強度試験 | 9     | D19 (SD345), D13 (SD295)<br>D16 (SD295): 各3本 (L=50cm)<br>弾性係数測定1本当りゲージ2枚 |

表-3.1.2 鉄筋の試験結果

| 鉄筋             |      | 降伏点<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 引張強度<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 弾性係数<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) |
|----------------|------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| D10<br>(SD345) | No.1 | 3967                         | 5756                          | 1820000                       |
|                | No.2 | 3785                         | 5742                          | 1890000                       |
|                | No.3 | 3701                         | 5613                          | 1840000                       |
|                | 平均   | 3818                         | 5704                          | 1850000                       |
| D13<br>(SD295) | No.1 | 3512                         | 5241                          | 1860000                       |
|                | No.2 | 3583                         | 5260                          | 1850000                       |
|                | No.3 | 3583                         | 5257                          | 1890000                       |
|                | 平均   | 3559                         | 5253                          | 1866667                       |
| D16<br>(SD295) | No.1 | 3505                         | 5504                          | 2090000                       |
|                | No.2 | 3535                         | 5514                          | 2110000                       |
|                | No.3 | 3520                         | 5451                          | 2000000                       |
|                | 平均   | 3520                         | 5490                          | 2066667                       |

表-3.1.3 コンクリートの試験結果

| コンクリート   |      | 圧縮強度<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 弾性係数<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) | 引張強度<br>( $\text{kgf/cm}^2$ ) |
|----------|------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| RC-NO. 1 | No.1 | 263                           | 252000                        | 22.1                          |
|          | No.2 | 263                           | 247000                        | 23.4                          |
|          | No.3 | 261                           | 249000                        | 21.5                          |
|          | 平均   | 262                           | 249333                        | 22.3                          |
| RC-NO. 2 | No.1 | 390                           | 265000                        | 27.5                          |
|          | No.2 | 402                           | 262000                        | 27.0                          |
|          | No.3 | 399                           | 252000                        | 27.9                          |
|          | 平均   | 397                           | 259667                        | 27.5                          |
| RC-NO. 3 | No.1 | 351                           | 262000                        | 24.7                          |
|          | No.2 | 359                           | 258000                        | 27.8                          |
|          | No.3 | 343                           | 242000                        | 28.5                          |
|          | 平均   | 351                           | 254000                        | 27.0                          |
| RC-NO. 4 | No.1 | 396                           | 247000                        | 28.1                          |
|          | No.2 | 379                           | 262000                        | 24.4                          |
|          | No.3 | 394                           | 247000                        | 25.8                          |
|          | 平均   | 390                           | 252000                        | 26.1                          |

## 4. 載荷試験結果

### 4.1 静的載荷試験時の変位および主鉄筋応力度と炭素繊維シートひずみ

試験体支間中央部の変位と主鉄筋応力度の測定結果を表-4.1.1に示す。また、炭素繊維シートによる補強効果を明確にするため、死荷重相当載荷とB活荷重相当載荷との間の荷重変化に対する主鉄筋応力度と変位（それぞれ活荷重応力度と活荷重変位）を表-4.1.2に示す。なお、試験体No.1（無補強試験体）と試験体No.2、No.3、No.4（炭素繊維シートで補強した試験体）とでは、養生の有無の差により疲労試験初期の載荷条件が異なっているので直接の比較を行うことは適切ではない。したがって試験体No.1の基準は、炭素繊維シートで補強した試験体の死荷重相当載荷時の変位と主鉄筋応力度がほぼ同じ値を示した、疲労回数1万回目の計測値とした。以下この値を比較基準値とする。

また、B活荷重相当である22.8tf載荷までの試験体ごとの載荷重と支間中央部変位との関係を図-4.1.1から図-4.1.4に示す。さらに変位増加の傾向をより明確にするため、活荷重載荷試験時の初期変位をゼロとした載荷重と活荷重変位との関係を図-4.1.5から4.1.8に示す。なお、B活荷重相当載荷時の、載荷重と支間中央部炭素繊維シートひずみとの関係を図-4.1.9から図-4.1.11に示す。

#### 4.1.1 試験体の変位

##### 試験体No.1

活荷重変位を示した図-4.1.5において、試験体No.1の疲労載荷前の静的載荷試験結果と疲労載荷後の静的載荷試験結果とを荷重ゼロから22.8tfまでの範囲で比較すると、載荷による中央変位の最大量はほぼ等しい。この結果により、RC桁の曲げ剛性に及ぼす疲労載荷の影響は小さかったと考えられる。

また、活荷重変位（死荷重～B活荷重間の中央変位増加量）は、疲労載荷1万回後で2.35mm、疲労載荷終了後の破壊試験時で2.44mmであり、約4%の増加が見られた。

##### 試験体No.2

補強前の静的載荷時の中央変位は試験体No.1とほぼ同じであった。炭素繊維シートによる補強効果を比較基準、炭素繊維シート補強後および疲労載荷後のそれぞれの活荷重変位で比較する。まず炭素繊維シート補強後の活荷重変位は、比較基準に対して約75%に低減され明らかな補強効果が確認された。次に疲労載荷後の活荷重変位は比較基準に対して83%に低減、炭素繊維シート補強後と比較して11%増と補強効果に変化が見られた。

##### 試験体No.3

炭素繊維シート補強後および疲労載荷後の活荷重変位は、比較基準のそれぞれ77%および82%であり、試験体No.2と同様に補強後の補強効果が確認されると共に、疲労載荷後の補強効果に変化が見られた。

#### 試験体No. 4

この試験体は、塩害等により鉄筋断面積が減少した場合を想定し、静的全載荷重を試験体No. 1～No. 3の5割増、疲労試験時の載荷振幅を8割増としたものである。補強前の静的載荷時の活荷重変位は、試験体No. 1、No. 2およびNo. 3と比較し5～9%程度大きかった。炭素繊維シート補強後および疲労載荷後の補強効果を22.8 tf載荷時の活荷重変位で比較すると、それぞれ比較基準の82%および88%であり、試験体No. 2、No. 3と同様に補強効果が確認されると共に疲労載荷後の補強効果に変化が見られた。

### 4.1.2 主鉄筋応力度

#### (1) 補強前の静的載荷時

B活荷重相当である22.8 tf 載荷時の主鉄筋の応力度は試験体No. 1～No. 4とも約1900～2000kgf/cm<sup>2</sup>であり、計算値とほぼ一致した。なお、補強前死荷重相当時の主鉄筋応力度が炭素繊維シート補強後および疲労載荷後に比して小さくなっているのは、補強前の処女載荷時は試験体に生じたコンクリートのひび割れが進展してゆく段階であるので、コンクリートの荷重分担比率が高く、鉄筋の荷重分担比率が低かったことを示していると考えられる。

#### (2) 炭素繊維シート補強後および疲労載荷後の静的載荷時

##### 試験体No. 1

疲労200万回後における22.8 tfまでの静的載荷試験による主鉄筋応力度は、その変化を試験体No. 1の疲労1万回後（比較基準）と比較すると、8%程度増加しており、疲労載荷中のひび割れ進展によるコンクリートの引張抵抗減少の影響が見られる。

##### 試験体No. 2

炭素繊維シートによる補強効果を比較基準、炭素繊維シート補強後および疲労載荷後のそれぞれの死荷重～B活荷重間の主鉄筋活荷重応力度で比較する。まず補強後の主鉄筋活荷重応力度は、比較基準に対して約81%に低減され補強効果が確認された。次に疲労載荷後の主鉄筋活荷重応力度は、比較基準に対し85%となり、補強効果が補強後（疲労前）より低下する傾向が見られた。

##### 試験体No. 3

炭素繊維シート補強後および疲労載荷後の死荷重～B活荷重間の主鉄筋活荷重応力度は、両者共比較基準の84%であり、試験体No. 2と同様に補強効果が確認された。また疲労載荷後も補強効果に変化は見られなかった。

##### 試験体No. 4

炭素繊維シート補強後および疲労載荷後の死荷重～B活荷重間の主鉄筋活荷重応力度は、それぞれ比較基準の76%および77%であり、炭素繊維シートの補強効果および疲労載荷後の補強効果の持続が確認された。また、8割増の載荷振幅の場合は、補強後で比較基準の140%、疲労載荷後で同じく143%となり、変化は僅少であることから、載荷振幅が大きい場合でも補強効果の持続が確認された。

### 4.1.3 炭素繊維シートひずみ

各試験体下面に貼付した炭素繊維シート(以下、樹脂が含浸硬化した炭素繊維シートをCFRPシートとも称す)のB活荷重載荷時に得られた荷重-CFRPシートひずみ曲線は、図-4.1.9から図-4.1.11に示したように、いずれも、やや上に凸の曲線であり、とくに、5t以下の低荷重域において勾配の大きい変化が見られた。これは、載荷初期においてはCFRPシートの緩みが、その後は接着樹脂のせん断変形または付着切れ進行が原因と想定される。また、これと同様の原因と想われる疲労載荷後の僅かな残留ひずみが見られた。なお、試験体No. 3の炭素繊維シートによる補強直後の曲線は、荷重増加の途中数カ所で、4.3.1で後述する炭素繊維シート貼付後の養生中に発生した皸の影響と考えられる、ひずみの緩和が見られた。

### 4.1.4 炭素繊維シートの弾性係数と補強効果との関係

試験体No. 2(高強度タイプ)と試験体No. 3(高弾性タイプ)は、炭素繊維シートの断面積と弾性係数との積である引張剛性( $A \times E$ )をほぼ等しくなるように設定したものである。炭素繊維シート接着工法の特徴は、コンクリート構造体の表面に補強材が位置することであり、応力の伝達がコンクリート構造体側の片面からのみ行われることである。このような応力伝達機構の場合に炭素繊維シートの弾性係数の違いによる影響に着目してみた。

#### (1) 炭素繊維シート補強後

変位・主鉄筋応力度の低減度とも同程度であり、炭素繊維シート補強後の段階では高強度タイプと高弾性タイプとの違いは見られない。

#### (2) 疲労載荷後

高強度タイプは、疲労載荷前に比べ、変位において9%程度、主鉄筋応力度において5%程度の増加が見られた。また、高弾性タイプは、変位においては5%程度の増加が見られたが、主鉄筋応力度は1%程度の増加であった。この傾向は試験体No. 4(高弾性タイプ)でも同様であり、高弾性タイプの方が高強度タイプにくらべ疲労の影響が少ない傾向であったものの、変位の発現と計測誤差等を勘案し主鉄筋応力度に信頼性があると考えれば、一般的に言われるように、高強度タイプの方が疲労の影響が少ない傾向にあると言える。

### 4.1.5 炭素繊維シートの補強量と補強効果との関係

試験体No. 3と試験体No. 4とを比較すると、炭素繊維シート補強後の主鉄筋応力度の低減度は補強量の多い試験体No. 4の方が大きくなっていることから、補強量が増加すると補強効果も増加する傾向にあることが示されている。

表-4.1.1 支間中央部の変位と主鉄筋応力度

| 試験体 No     | 荷重<br>( t f ) |       |       |       |       | 変位<br>( mm ) |       |       |       |       | 主鉄筋応力度<br>( kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |
|------------|---------------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------------|------|------|------|------|
|            | 1             | 2     | 3     | 4-1   | 4-2   | 1            | 2     | 3     | 4-1   | 4-2   | 1                                 | 2    | 3    | 4-1  | 4-2  |
| 最初の静的載荷時   |               |       |       |       |       |              |       |       |       |       |                                   |      |      |      |      |
| 曲げひび割れ発生   | 7.00          | 10.07 | 8.99  | 8.04  | 8.04  | 0.50         | 0.89  | 0.83  | 0.68  | 0.68  | 339                               | 455  | 559  | 356  | 356  |
| 死荷重相当      | 10.33         | 10.29 | 10.32 | 10.36 | 10.36 | 1.08         | 1.11  | 1.16  | 1.21  | 1.21  | 685                               | 596  | 793  | 814  | 814  |
| L-20 相当    | 20.55         | 20.53 | 20.50 | 29.13 | 29.13 | 3.66         | 3.69  | 3.83  | 6.30  | 6.30  | 1677                              | 1735 | 1726 | 2573 | 2573 |
| B活荷重相当     | 22.81         | 22.86 | 22.88 | 22.80 | 33.33 | 4.29         | 4.28  | 4.43  | 4.65  | 7.48  | 1909                              | 1967 | 1942 | 2011 | 2995 |
| 炭素繊維シート補強後 |               |       |       |       |       |              |       |       |       |       |                                   |      |      |      |      |
| 死荷重相当      | 10.3          | 10.30 | 10.27 | 10.43 | 10.43 | 2.52         | 2.60  | 2.57  | 3.48  | 3.48  | 1095                              | 1124 | 1089 | 1283 | 1283 |
| L-20 相当    |               | 20.53 | 20.52 | 29.15 | 29.15 |              | 4.02  | 4.02  | 6.31  | 6.31  |                                   | 1757 | 1741 | 2374 | 2374 |
| B活荷重相当     | 22.8          | 22.80 | 22.85 | 22.80 | 33.33 | 4.87         | 4.36  | 4.38  | 5.40  | 7.03  | 2056                              | 1900 | 1892 | 2012 | 2633 |
| B活荷重-死荷重   | 12.5          | 12.50 | 12.58 | 12.37 | 22.90 | 2.35         | 1.76  | 1.81  | 1.92  | 3.55  | 961                               | 776  | 803  | 729  | 1350 |
| 破壊試験       |               |       |       |       |       |              |       |       |       |       |                                   |      |      |      |      |
| 死荷重相当      | 10.45         | 10.20 | 10.31 | 10.59 | 10.59 | 3.92         | 3.25  | 2.87  | 4.82  | 4.82  | 1186                              | 1180 | 1186 | 1356 | 1356 |
| L-20 相当    | 20.64         | 20.44 | 20.68 | 29.17 | 29.17 | 6.04         | 4.86  | 4.51  | 8.00  | 8.00  | 2084                              | 1855 | 1865 | 2482 | 2482 |
| B活荷重相当     | 22.98         | 22.76 | 22.90 | 22.80 | 33.37 | 6.36         | 5.21  | 4.80  | 6.88  | 8.67  | 2223                              | 2000 | 1995 | 2092 | 2730 |
| B活荷重-死荷重   | 12.53         | 12.56 | 12.59 | 12.21 | 22.78 | 2.44         | 1.96  | 1.93  | 2.06  | 3.85  | 1037                              | 820  | 809  | 736  | 1374 |
| 鉄筋降伏       | 42.15         | 49.70 | 47.29 | 54.13 | 54.13 | 11.50        | 11.09 | 9.85  | 12.13 | 12.13 | 4204                              | 4043 | 3740 | 3991 | 3991 |
| シート破断または剥離 |               | 66.91 | 52.15 | 73.97 | 73.97 |              | 23.16 | 12.07 | 20.00 | 20.00 |                                   |      |      |      |      |
| 圧壊         | 49.39         | 48.31 | 48.14 | 49.70 | 49.70 | 68.12        | 59.93 | 56.88 | 54.95 | 54.95 |                                   |      |      |      |      |

注) 4-1はB活荷重相当として他の試験体と同様の22.81tを、4-2はB活荷重として33.31tを載荷したものである。

注) 試験体No1(無補強試験体)の炭素繊維シート補強後の値は疲労回数1万回の後に実施した静的載荷時のものであり、比較基準としたものである。凡例のため斜体で示した。

表-4.1.2 荷重変化に対する変位と主鉄筋応力度

| 試験体No                         | 変位<br>( mm )   |                |                |                |                | 主鉄筋応力度<br>( kgf/cm <sup>2</sup> ) |               |               |               |               |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                               | 1              | 2              | 3              | 4-1            | 4-2            | 1                                 | 2             | 3             | 4-1           | 4-2           |
| ① 試験体No1 疲労1万回後<br>( 比較基準 )   | 2.35<br>(100)  |                |                |                |                | 961<br>(100)                      |               |               |               |               |
| ② 炭素繊維シート 補強後<br>(② / ① ×100) |                | 1.76<br>( 75 ) | 1.81<br>( 77 ) | 1.92<br>( 82 ) | 3.55<br>(151)  |                                   | 776<br>( 81 ) | 803<br>( 84 ) | 729<br>( 76 ) | 1350<br>(140) |
| ③ 疲労載荷後<br>(③ / ① ×100)       | 2.44<br>(104)  | 1.96<br>( 83 ) | 1.93<br>( 82 ) | 2.06<br>( 88 ) | 3.85<br>(164)  | 1037<br>(108)                     | 820<br>( 85 ) | 809<br>( 84 ) | 736<br>( 77 ) | 1374<br>(143) |
| ④ = ② - ①<br>(④ / ① ×100)     |                | -0.59<br>(-25) | -0.54<br>(-23) | -0.43<br>(-18) | +1.20<br>(+51) |                                   | -185<br>(-19) | -158<br>(-16) | -232<br>(-24) | +389<br>(+40) |
| ⑤ = ③ - ①<br>(⑤ / ① ×100)     | +0.09<br>(+ 4) | -0.39<br>(-17) | -0.42<br>(-18) | -0.29<br>(-12) | +1.50<br>(+64) | + 76<br>(+ 8)                     | -141<br>(-15) | -152<br>(-16) | -225<br>(-23) | +413<br>(+43) |
| ⑥ = ③ - ②<br>(⑥ / ① ×100)     |                | +0.20<br>(+ 9) | +0.12<br>(+ 5) | +0.14<br>(+ 6) | +0.30<br>(+13) |                                   | + 44<br>(+ 5) | + 6<br>(+ 1)  | + 6<br>(+ 1)  | + 24<br>(+ 2) |

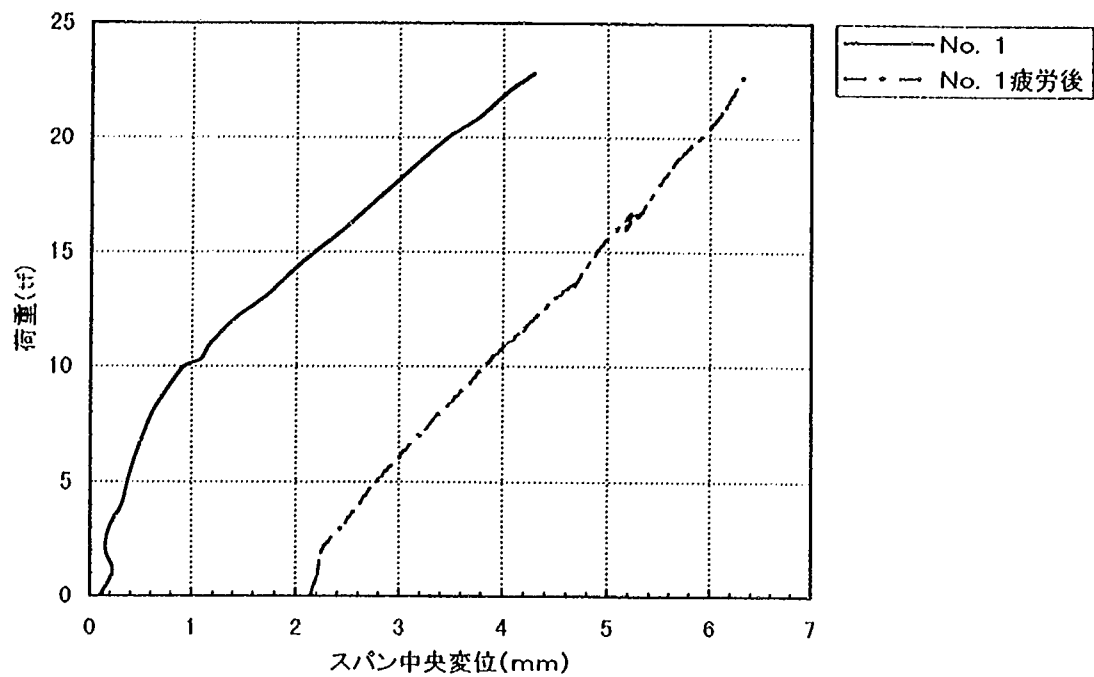


図-4.1.1 支間中央部の変位 (試験体 No. 1)

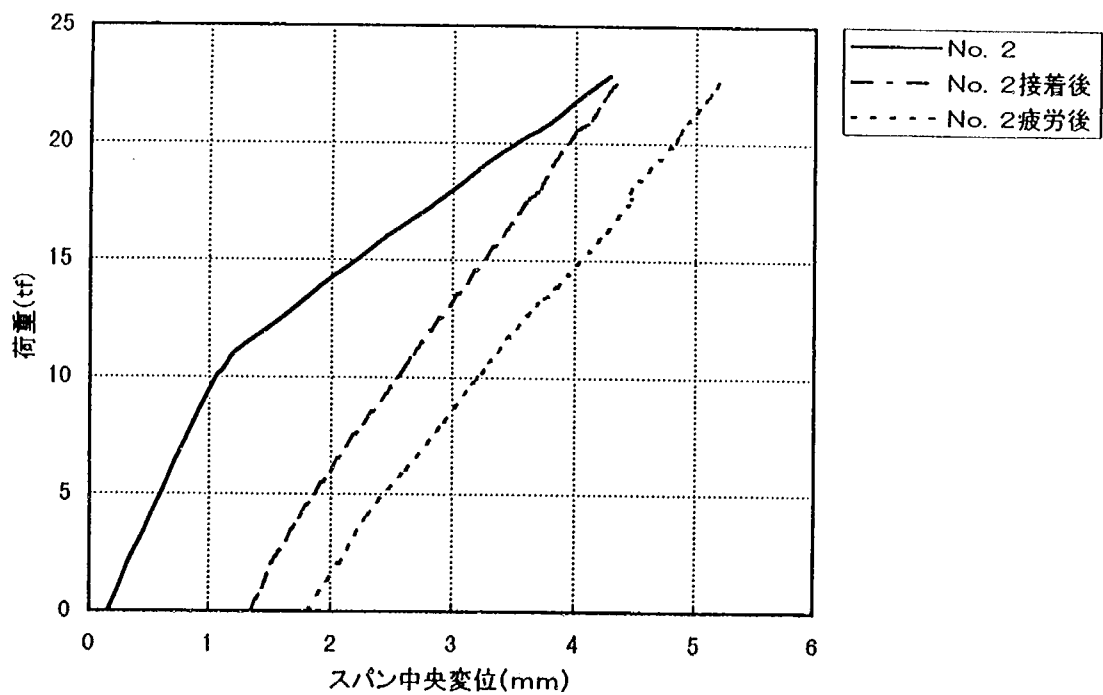


図-4.1.2 支間中央部の変位 (試験体 No. 2)

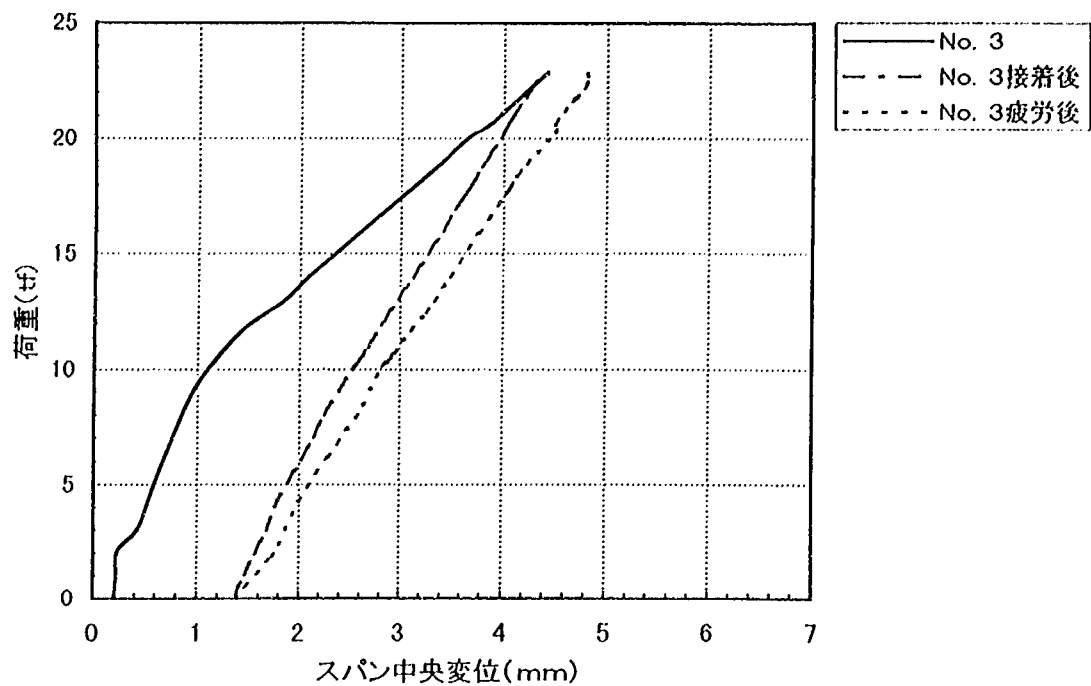


図-4.1.3 支間中央部の変位 (試験体 No. 3)

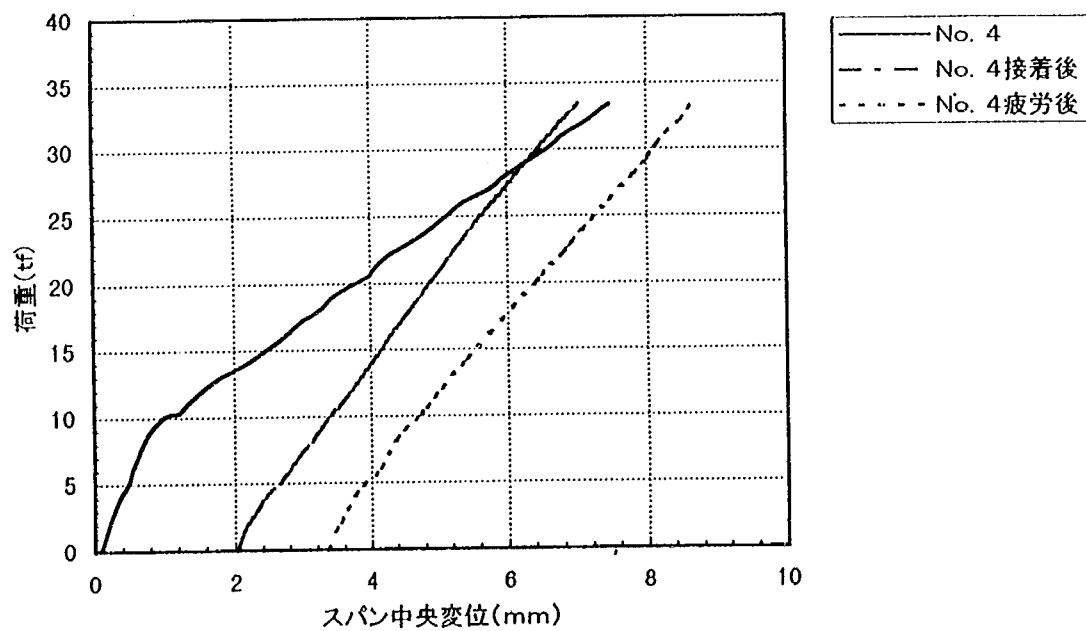


図-4.1.4 支間中央部の変位 (試験体 No. 4)

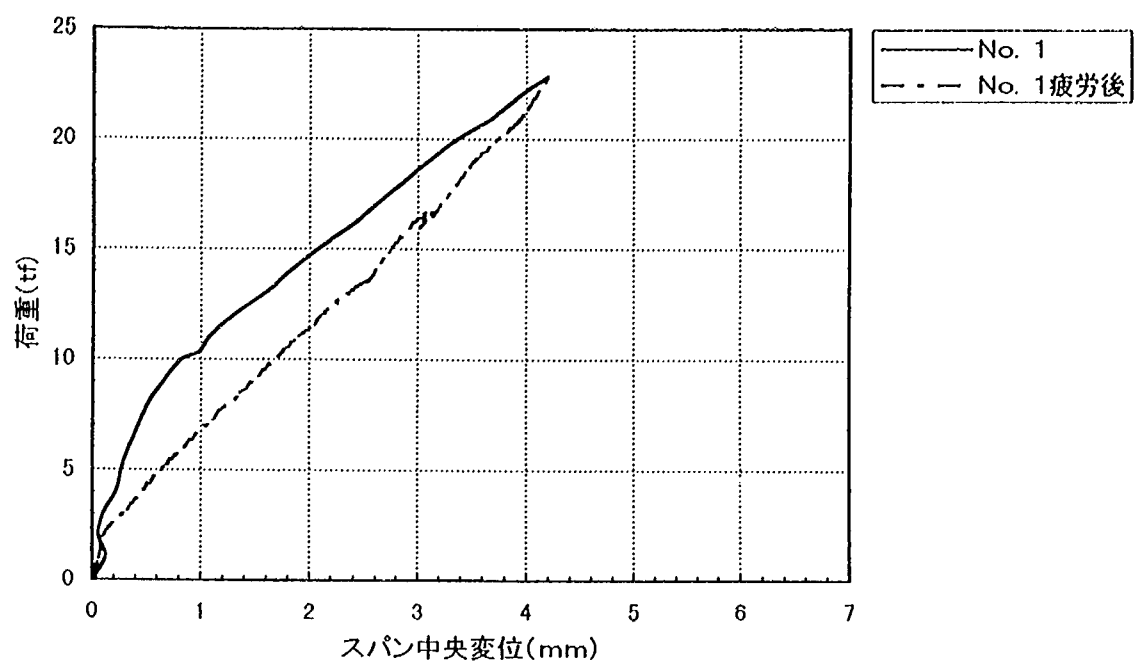


図-4.1.5 支間中央部の活荷重変位 (試験体 No. 1)

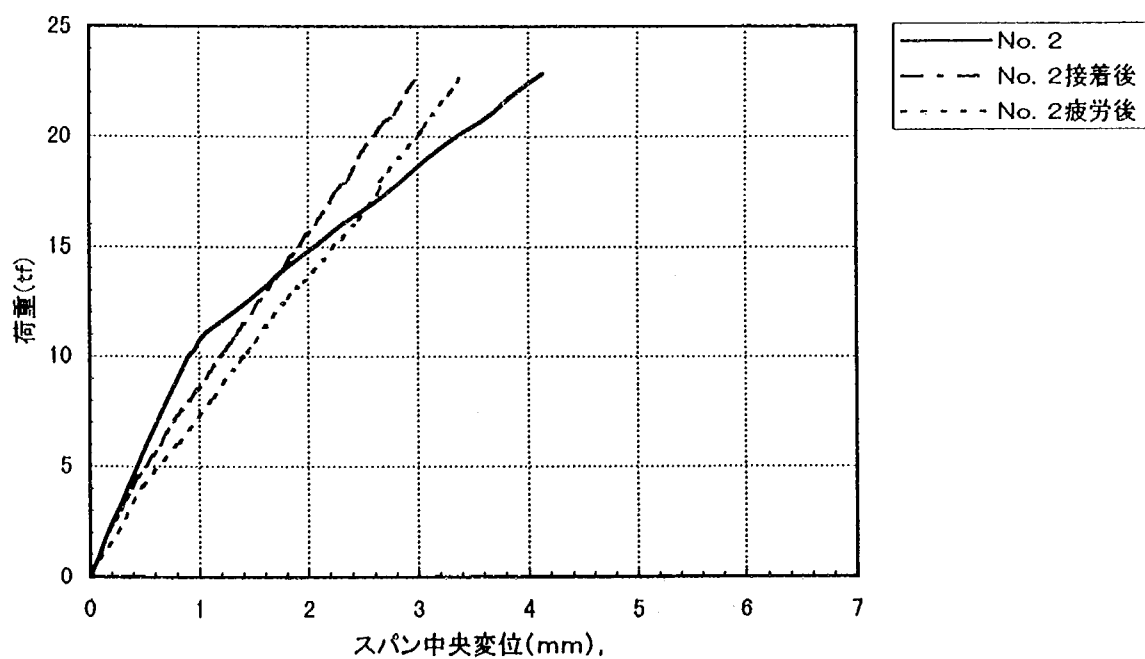


図-4.1.6 支間中央部の活荷重変位 (試験体 No. 2)

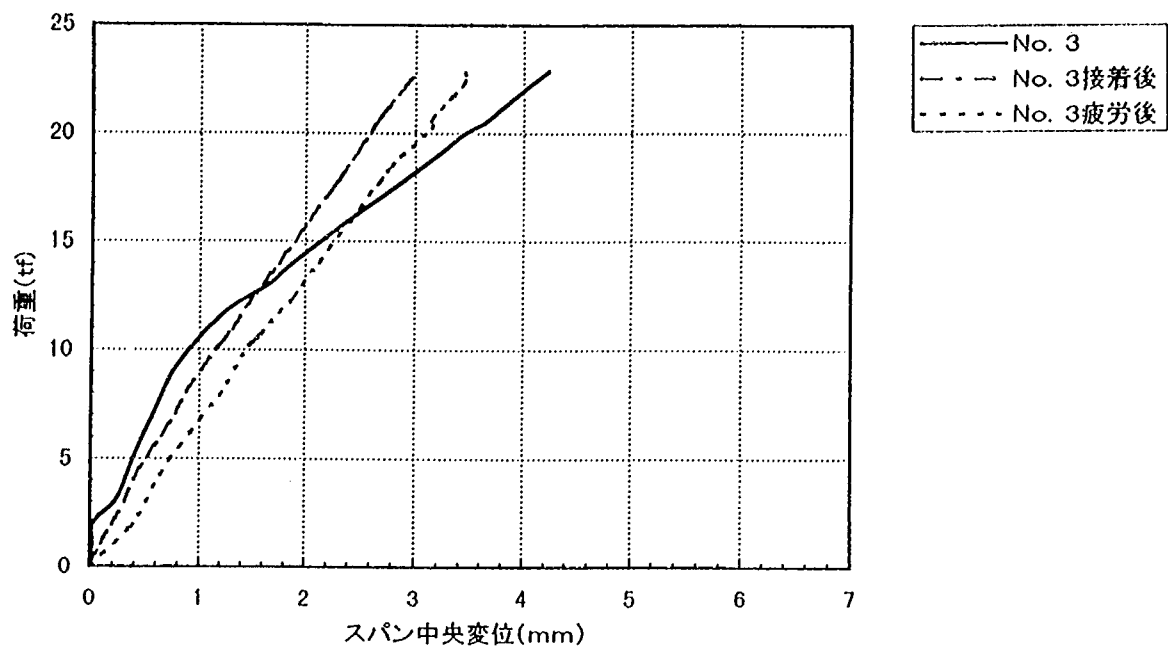


図-4.1.7 支間中央部の活荷重変位 (試験体 No. 3)

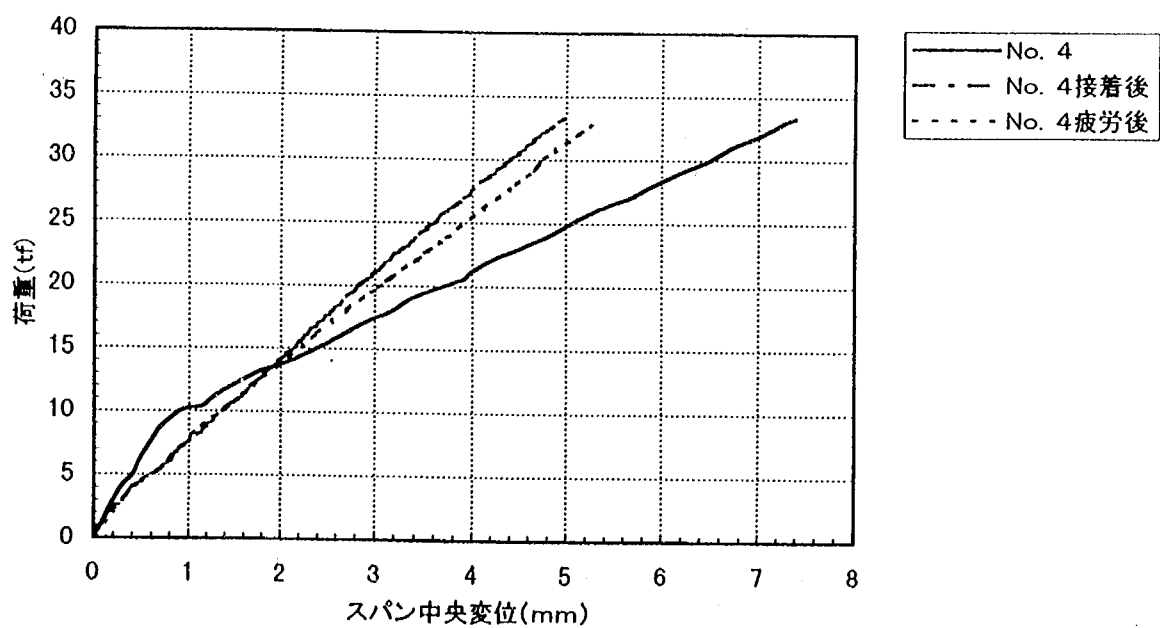


図-4.1.8 支間中央部の活荷重変位 (試験体 No. 4)

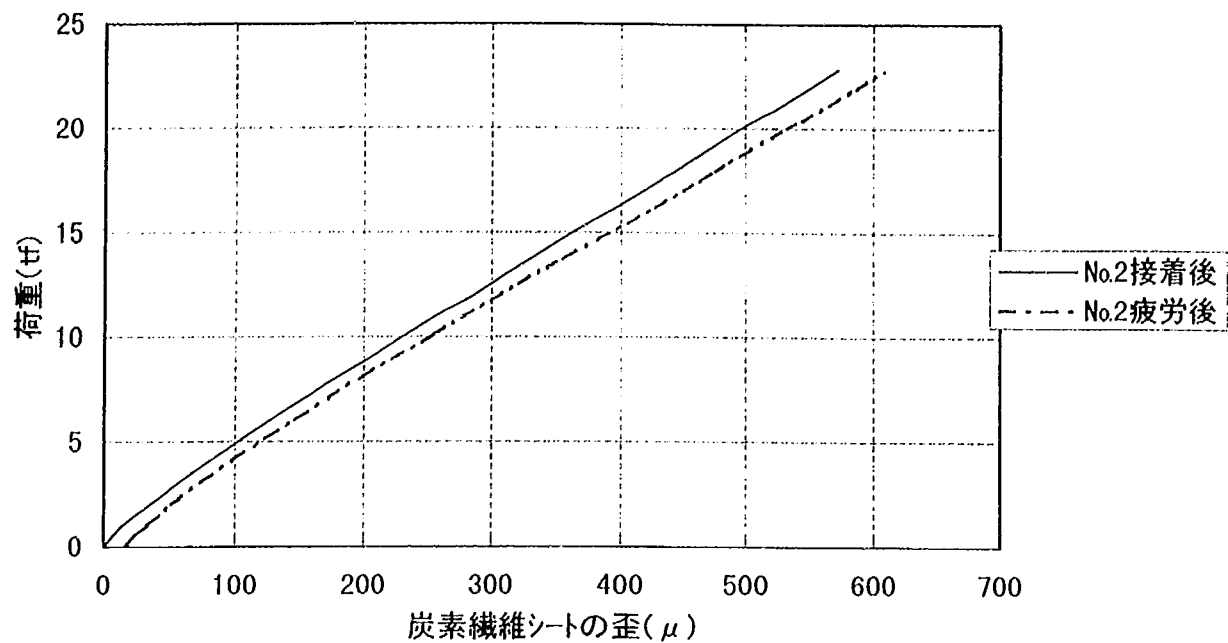


図-4.1.9 支間中央部CFRPシートひずみ (試験体No. 2)

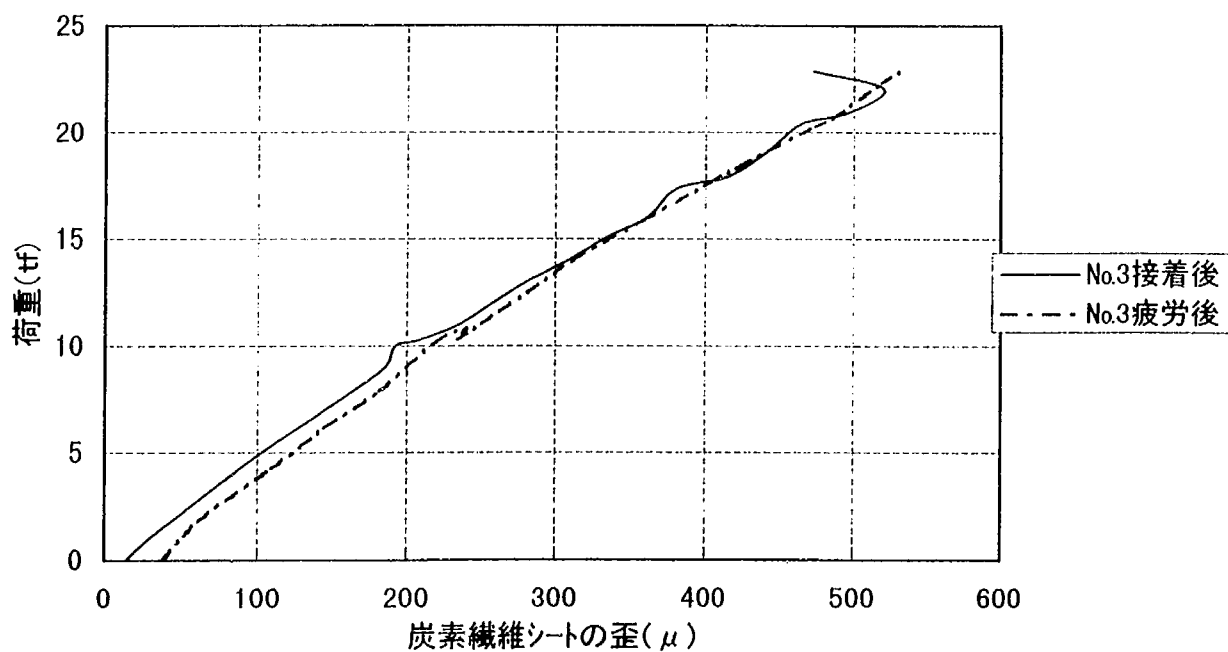


図-4.1.10 支間中央部CFRPシートひずみ (試験体No. 3)

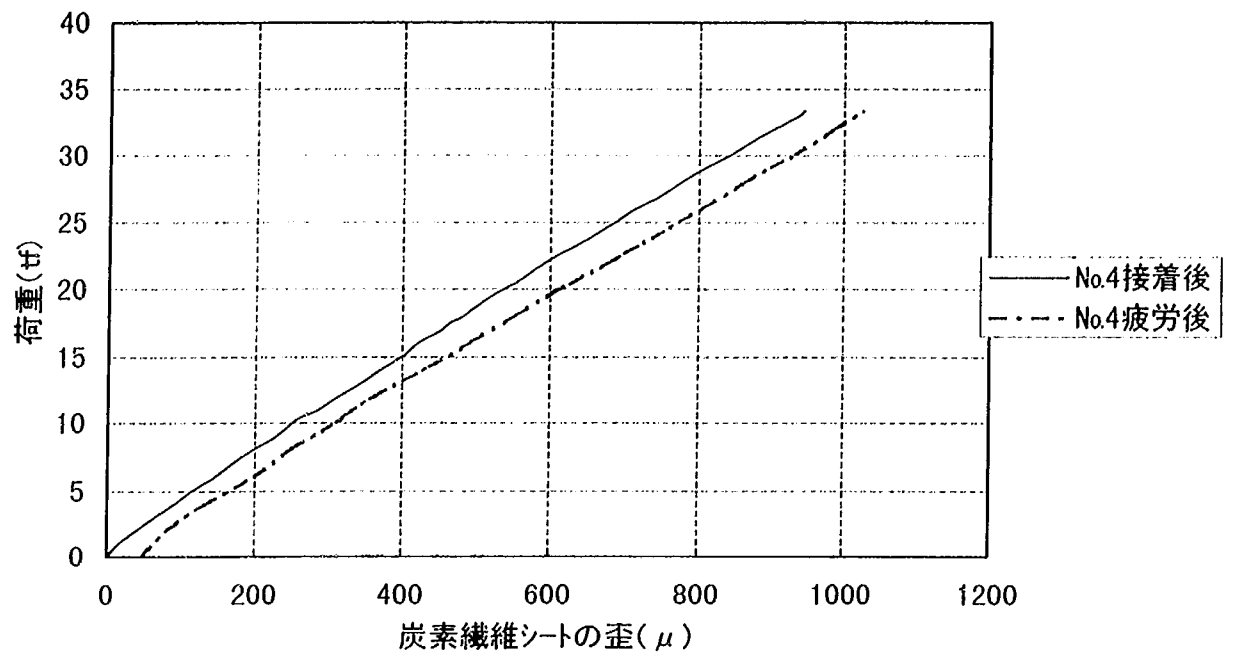


図-4.1.11 支間中央部CFRPシートひずみ (試験体No. 4)

## 4.2 疲労試験時の変位および主鉄筋応力度と炭素繊維シートのひずみ

疲労試験時における各載荷回数ごとの試験体支間中央部の変位と主鉄筋応力度を表-4.2.1から表-4.2.5に示す。なお、試験体No.4については2種類の上限荷重（22.8 t、33.3 t）時の値を示した。

また、死荷重載荷時とB活荷重載荷時の変位振幅を図-4.2.1および図-4.2.2に、同じく主鉄筋ひずみ振幅を図-4.2.3および図-4.2.4に、活荷重変位（B活荷重時と死荷重時との差）を図-4.2.5および図-4.2.6に、同じくB活荷重による主鉄筋応力度を図-4.2.7および図-4.2.8に示す。

さらに、B活荷重相当載荷時の、支間中央部炭素繊維シートひずみを図-4.2.9に示す。

### 4.2.1 疲労載荷回数と変位との関係

図-4.2.1によると各試験体とも疲労載荷回数とともに徐々に変位が増加している。この傾向は、炭素繊維シートによる補強を行っていない試験体No.1および載荷荷重の大きい試験体No.4が顕著である。試験体No.4のB活荷重時たわみが他の試験体と比べ大きいのは載荷荷重自体が大きいためであり、死荷重時のたわみが大きいのはB活荷重時の残留変位の影響と考えられる。

他の試験体の上限載荷荷重である22.8 t時の試験体No.4のたわみを記載したのが図-4.2.2である。他の試験体と比べ試験体No.4のたわみが22.8 t時、死荷重時とも大きくなっている。これもB活荷重時の残留変位の影響と考えられる。

B活荷重による活荷重変位のみを示した図-4.2.5によると、炭素繊維シートで補強した試験体No.2およびNo.3は、試験体No.1に比較し変位の変化が小さく、また、疲労回数による影響をほとんど受けていない傾向が示されている。また、試験体全体の変位の変化を示した図-4.2.1とは異なった傾向が示されている。すなわち、載荷荷重の大きい試験体No.4をのぞき活荷重変位の変化は僅かであったことである。これは補強材として用いた炭素繊維シートの補強効果は、今回の条件下では疲労の影響をほとんど受けなかったと判断できる。

他の試験体の上限載荷荷重である22.8 t時の試験体No.4のたわみを示した図-4.2.6によると、試験体No.4の活荷重変位の変化量は試験体No.2およびNo.3と同程度であるが、疲労回数による影響が大きいことが示されている。

### 4.2.2 疲労載荷回数と主鉄筋ひずみ（応力度）との関係

図-4.2.3によると各試験体とも疲労載荷回数とともに徐々に主鉄筋ひずみが増加している。試験体No.4のB活荷重時主鉄筋ひずみが他の試験体と比べ大きいのは載荷荷重自体が大きいためであり、死荷重時の主鉄筋ひずみが大きいのも載荷荷重の影響と考えられる。

他の試験体の上限載荷荷重である22.8 t時の試験体No.4の主鉄筋ひずみを示したのが図-4.2.4である。他の試験体と比べ試験体No.4の主鉄筋ひずみが22.8 t時および死荷重時に大きくなっている。これも他の試験体に比べて大きい載荷荷重の影響と考えられる。

B活荷重による主鉄筋応力度の変化のみを示した図-4.2.7によると、試験体No.1の場合には疲労回数による変化がほとんど見られないが、炭素繊維シートで補強した試験体No.2、No.3およびNo.4はいずれも若干の増加傾向が示されている。これは疲労載荷回数増加に伴うCFRPシートの付着切れ進行によるCFRPシートから鉄筋への荷重分担度の移行によるものと考えられる。

他の試験体の上限載荷荷重である22.8tf時の試験体No.4の主鉄筋応力度の変化を用いた図-4.2.8によると、試験体No.4の主鉄筋活荷重応力度の変化量は試験体No.2およびNo.3と同程度であることが示されている。

### 4.2.3 疲労載荷回数と炭素繊維シートひずみとの関係

疲労載荷試験中の炭素繊維(CFRP)シートひずみは、図-4.2.9によると、No.2、No.3、No.4の試験体においていずれも10万回載荷頃から大きな変化が見られた。これは、図-4.2.8に示した鉄筋応力度と同様の傾向であり、CFRPシートの付着切れ進行に伴うCFRPシートと鉄筋間での荷重分担度相互移行を表すものと考えられる。なお、試験体No.4のCFRPシートが疲労載荷初期からゆっくりとした漸増傾向を示したのは、図-4.2.8ではこの間の鉄筋応力度に殆ど変化がないことから、疲労載荷初期時のCFRPシートの荷重分担度が鉄筋より高いと想定することができる。

表-4.2.1 疲労試験時：支間中央部の主鉄筋応力度と変位（試験体No.1）

No. 1

| 載荷試験 | 回数      | 下限荷重       |             |               |                                 | 上限荷重       |             |               |                                 | たわみ差<br>(mm) | 鉄筋<br>応力差<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 載荷速度<br>(Hz) |
|------|---------|------------|-------------|---------------|---------------------------------|------------|-------------|---------------|---------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|
|      |         | 荷重<br>(tf) | たわみ<br>(mm) | 主鉄筋ひずみ<br>(μ) | 主鉄筋応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 荷重<br>(tf) | たわみ<br>(mm) | 主鉄筋ひずみ<br>(μ) | 主鉄筋応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |              |                                     |              |
| 静的試験 | 静的      |            | 1.08        | 331           | 685                             |            | 4.29        | 921           | 1906                            | 3.21         | 1221                                | 手動           |
| 疲労試験 | 1       | 10.3       | 2.14        | 467           | 967                             | 22.8       | 4.41        | 932           | 1929                            | 2.27         | 962                                 | 手動           |
|      | 10      |            | 2.39        | 495           | 1025                            |            | 4.66        | 959           | 1985                            | 2.27         | 960                                 | 手動           |
|      | 100     |            | 2.50        | 503           | 1041                            |            | 4.86        | 972           | 2012                            | 2.36         | 971                                 | 手動           |
|      | 1000    |            | 2.57        | 520           | 1076                            |            | 4.78        | 983           | 2035                            | 2.21         | 959                                 | 1.0          |
|      | 10000   |            | 2.52        | 529           | 1095                            |            | 4.87        | 993           | 2056                            | 2.35         | 961                                 | 2.5          |
|      | 100000  |            | 2.71        | 537           | 1112                            |            | 5.06        | 997           | 2064                            | 2.35         | 952                                 | 2.5          |
|      | 200000  |            | 2.78        | 552           | 1143                            |            | 5.07        | 1009          | 2089                            | 2.29         | 946                                 | 1.7          |
|      | 400000  |            | 3.25        | 554           | 1147                            |            | 5.55        | 1008          | 2087                            | 2.30         | 940                                 | 2.5          |
|      | 600000  |            | 3.39        | 565           | 1170                            |            | 5.67        | 1020          | 2111                            | 2.28         | 941                                 | 2.5          |
|      | 800000  |            | 3.18        | 551           | 1141                            |            | 5.66        | 1010          | 2091                            | 2.48         | 950                                 | 2.5          |
|      | 1000000 |            | 3.36        | 566           | 1172                            |            | 5.71        | 1018          | 2107                            | 2.35         | 935                                 | 2.5          |
|      | 1200000 |            | 3.42        | 561           | 1161                            |            | 5.76        | 1016          | 2103                            | 2.34         | 942                                 | 2.5          |
|      | 1400000 |            | 3.51        | 563           | 1165                            |            | 5.84        | 1017          | 2105                            | 2.33         | 940                                 | 2.5          |
|      | 1600000 |            | 3.47        | 559           | 1157                            |            | 5.83        | 1020          | 2111                            | 2.36         | 954                                 | 2.5          |
|      | 1800000 |            | 3.60        | 574           | 1188                            |            | 5.91        | 1027          | 2126                            | 2.31         | 938                                 | 2.5          |
|      | 2000000 |            | 3.68        | 577           | 1194                            |            | 5.99        | 1030          | 2132                            | 2.31         | 938                                 | 2.5          |

・下限荷重：死荷重相当  
・上限荷重：B活荷重相当

・たわみ差：上限荷重一下限荷重  
・鉄筋応力差：上限荷重一下限荷重

・たわみ：中央2点の平均  
・鉄筋ひずみ：中央3点の平均

表-4.2.2 疲労試験時：支間中央部の主鉄筋応力度と変位（試験体No.2）

NO. 2

| 載荷試験      | 回数      | 下限荷重       |             |                     |                                 | 上限荷重       |             |                     |                                 | たわみ差 | 鉄筋応力差 | 載荷速度 |
|-----------|---------|------------|-------------|---------------------|---------------------------------|------------|-------------|---------------------|---------------------------------|------|-------|------|
|           |         | 荷重<br>(tf) | たわみ<br>(mm) | 主鉄筋ひずみ<br>( $\mu$ ) | 主鉄筋応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 荷重<br>(tf) | たわみ<br>(mm) | 主鉄筋ひずみ<br>( $\mu$ ) | 主鉄筋応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |       |      |
| 静的載荷      | 1       | 10.3       | 1.11        | 288                 | 596                             | 22.8       | 4.28        | 950                 | 1967                            | 3.17 | 1371  | —    |
| 炭素繊維シート養生 | 1       | 10.3       | 2.58        | 507                 | 1049                            | 17.5       | 3.58        | 740                 | 1532                            | 1.00 | 483   | 1.0  |
|           | 330000  |            | 2.98        | 556                 | 1151                            |            | 3.82        | 764                 | 1581                            | 0.84 | 430   | 1.0  |
|           | 500000  |            | 2.99        | 562                 | 1163                            |            | 3.84        | 769                 | 1592                            | 0.85 | 429   | 1.0  |
|           | 600000  |            | 3.12        | 560                 | 1159                            |            | 3.94        | 767                 | 1588                            | 0.82 | 429   | 1.0  |
| 静的載荷      | 1       | 10.3       | 2.60        | 543                 | 1124                            | 22.8       | 4.36        | 918                 | 1900                            | 1.76 | 776   | —    |
| 疲労試験      | 1       | 10.3       | 2.69        | 548                 | 1134                            | 22.8       | 4.41        | 922                 | 1909                            | 1.72 | 775   | 手動   |
|           | 10      |            | 2.76        | 553                 | 1145                            |            | 4.45        | 924                 | 1913                            | 1.69 | 768   | 手動   |
|           | 100     |            | 2.80        | 552                 | 1143                            |            | 4.53        | 926                 | 1917                            | 1.73 | 774   | 手動   |
|           | 1000    |            | 2.81        | 551                 | 1141                            |            | 4.53        | 928                 | 1921                            | 1.72 | 780   | 1.0  |
|           | 10000   |            | 2.86        | 554                 | 1147                            |            | 4.60        | 932                 | 1929                            | 1.74 | 782   | 2.5  |
|           | 100000  |            | 2.89        | 568                 | 1176                            |            | 4.70        | 949                 | 1964                            | 1.81 | 788   | 1.5  |
|           | 200000  |            | 2.85        | 553                 | 1145                            |            | 4.66        | 941                 | 1948                            | 1.81 | 803   | 1.5  |
|           | 400000  |            | 2.98        | 572                 | 1184                            |            | 4.80        | 954                 | 1975                            | 1.82 | 791   | 2.5  |
|           | 600000  |            | 3.03        | 576                 | 1192                            |            | 4.88        | 962                 | 1991                            | 1.85 | 799   | 2.5  |
|           | 800000  |            | 3.03        | 579                 | 1199                            |            | 4.94        | 969                 | 2006                            | 1.91 | 807   | 2.5  |
|           | 1000000 |            | 3.07        | 586                 | 1213                            |            | 4.94        | 971                 | 2010                            | 1.87 | 797   | 2.5  |
|           | 1200000 |            | 3.02        | 571                 | 1182                            |            | 4.90        | 958                 | 1983                            | 1.88 | 801   | 2.5  |
|           | 1400000 |            | 3.10        | 579                 | 1199                            |            | 4.98        | 967                 | 2002                            | 1.88 | 803   | 2.5  |
|           | 1600000 |            | 3.15        | 579                 | 1199                            |            | 5.02        | 967                 | 2002                            | 1.87 | 803   | 2.5  |
|           | 1800000 |            | 3.20        | 590                 | 1221                            |            | 5.08        | 978                 | 2024                            | 1.88 | 803   | 2.5  |
|           | 2000000 |            | 3.22        | 592                 | 1225                            |            | 5.11        | 980                 | 2029                            | 1.89 | 804   | 2.5  |

・下限荷重：死荷重相当

・たわみ差：上限荷重－下限荷重

・たわみ：中央2点の平均

・上限荷重：B活荷重相当(但し、シート養生時はL-20荷重相当)

・鉄筋応力差：上限荷重－下限荷重

・鉄筋ひずみ：中央3点の平均

表-4.2.3 疲労試験時：支間中央部の主鉄筋応力度と変位（試験体No.3）

No.3

|           | 回数      | 下限荷重       |             |                     |                                 | 上限荷重       |             |                     |                                 | たわみ差 | 鉄筋応力差 | 載荷速度 |
|-----------|---------|------------|-------------|---------------------|---------------------------------|------------|-------------|---------------------|---------------------------------|------|-------|------|
|           |         | 荷重<br>(tf) | たわみ<br>(mm) | 主鉄筋ひずみ<br>( $\mu$ ) | 主鉄筋応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 荷重<br>(tf) | たわみ<br>(mm) | 主鉄筋ひずみ<br>( $\mu$ ) | 主鉄筋応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |       |      |
| 静的載荷      | 1       | 10.3       | 1.16        | 383                 | 793                             | 22.8       | 4.43        | 938                 | 1942                            | 3.27 | 1149  | —    |
| 炭素繊維シート養生 | 1       | 10.3       | 2.44        | 497                 | 1029                            | 17.5       | 3.60        | 750                 | 1553                            | 1.16 | 524   | 1.0  |
|           | 330000  |            | 2.80        | 578                 | 1196                            |            | 3.74        | 772                 | 1598                            | 0.94 | 402   | 1.0  |
|           | 500000  |            | 2.92        | 562                 | 1163                            |            | 3.86        | 768                 | 1590                            | 0.94 | 427   | 1.0  |
|           | 600000  |            | 2.90        | 566                 | 1172                            |            | 3.80        | 769                 | 1592                            | 0.90 | 420   | 1.0  |
| 静的載荷      | 1       | 10.3       | 2.57        | 526                 | 1089                            | 22.8       | 4.38        | 914                 | 1892                            | 1.81 | 803   | —    |
| 疲労試験      | 1       | 10.3       | 2.66        | 543                 | 1124                            | 22.8       | 4.43        | 917                 | 1898                            | 1.77 | 774   | 手動   |
|           | 10      |            | 2.69        | 545                 | 1128                            |            | 4.53        | 928                 | 1921                            | 1.84 | 793   | 手動   |
|           | 100     |            | 2.73        | 549                 | 1136                            |            | 4.56        | 931                 | 1927                            | 1.83 | 791   | 手動   |
|           | 1000    |            | 2.79        | 540                 | 1118                            |            | 4.61        | 928                 | 1921                            | 1.82 | 803   | 1.0  |
|           | 10000   |            | 2.69        | 540                 | 1118                            |            | 4.54        | 930                 | 1925                            | 1.85 | 807   | 2.5  |
|           | 100000  |            | 2.80        | 555                 | 1149                            |            | 4.65        | 939                 | 1944                            | 1.85 | 795   | 1.5  |
|           | 200000  |            | 2.78        | 558                 | 1155                            |            | 4.65        | 944                 | 1954                            | 1.87 | 799   | 1.5  |
|           | 400000  |            | 2.91        | 570                 | 1180                            |            | 4.78        | 954                 | 1975                            | 1.87 | 795   | 2.5  |
|           | 600000  |            | 2.97        | 578                 | 1196                            |            | 4.81        | 962                 | 1991                            | 1.84 | 795   | 2.5  |
|           | 800000  |            | 2.94        | 552                 | 1143                            |            | 4.82        | 941                 | 1948                            | 1.88 | 805   | 2.5  |
|           | 1000000 |            | 3.06        | 564                 | 1167                            |            | 4.93        | 951                 | 1969                            | 1.87 | 802   | 2.5  |
|           | 1200000 |            | 3.04        | 569                 | 1178                            |            | 4.93        | 957                 | 1981                            | 1.89 | 803   | 2.5  |
|           | 1400000 |            | 3.01        | 571                 | 1182                            |            | 4.9         | 959                 | 1985                            | 1.89 | 803   | 2.5  |
|           | 1600000 |            | 3.02        | 568                 | 1176                            |            | 4.94        | 958                 | 1983                            | 1.92 | 807   | 2.5  |
|           | 1800000 |            | 2.96        | 573                 | 1186                            |            | 4.86        | 958                 | 1983                            | 1.90 | 797   | 2.5  |
|           | 2000000 |            | 3.08        | 574                 | 1188                            |            | 4.98        | 962                 | 1991                            | 1.90 | 803   | 2.5  |

・下限荷重：死荷重相当

・たわみ差：上限荷重－下限荷重

・たわみ：中央2点の平均

・上限荷重：B活荷重相当(但し、シート養生時はL-20荷重相当)

・鉄筋応力差：上限荷重－下限荷重

・鉄筋ひずみ：中央3点の平均

表-4.2.4 疲労試験時：支間中央部の主鉄筋応力度と変位（試験体No.4）

No.4-1（上限荷重を22.8tonとしたとき）

| 載荷試験      | 回数      | 下限荷重       |             |                     |                                 | 上限荷重       |             |                     |                                 | たわみ差 | 鉄筋応力差 | 載荷速度 |
|-----------|---------|------------|-------------|---------------------|---------------------------------|------------|-------------|---------------------|---------------------------------|------|-------|------|
|           |         | 荷重<br>(tf) | たわみ<br>(mm) | 主鉄筋ひずみ<br>( $\mu$ ) | 主鉄筋応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 荷重<br>(tf) | たわみ<br>(mm) | 主鉄筋ひずみ<br>( $\mu$ ) | 主鉄筋応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |       |      |
| 静的載荷      | 1       | 10.3       | 1.21        | 393                 | 814                             | 22.8       | 4.53        | 956                 | 1978                            | 3.32 | 1164  | —    |
| 炭素繊維シート養生 | 1       | 10.3       | 3.36        | 577                 | 1194                            | 17.5       | 4.53        | 808                 | 1673                            | 1.17 | 479   | 1.0  |
|           | 330000  |            | 3.57        | 628                 | 1300                            |            | 4.58        | 824                 | 1706                            | 1.01 | 406   | 1.0  |
|           | 500000  |            | 3.67        | 630                 | 1304                            |            | 4.66        | 821                 | 1699                            | 0.99 | 395   | 1.0  |
|           | 600000  |            | 3.68        | 626                 | 1296                            |            | 4.68        | 813                 | 1683                            | 1.00 | 387   | 1.0  |
| 静的載荷      | 1       | 10.3       | 3.48        | 620                 | 1283                            | 22.8       | 5.30        | 966                 | 1999                            | 1.82 | 716   | —    |
| 疲労試験      | 1       | 10.3       | 3.64        | 617                 | 1277                            | 22.8       | 5.53        | 978                 | 2024                            | 1.89 | 747   | 手動   |
|           | 10      |            | 3.64        | 617                 | 1277                            |            | 5.59        | 980                 | 2028                            | 1.95 | 751   | 手動   |
|           | 100     |            | 3.74        | 624                 | 1292                            |            | 5.70        | 985                 | 2039                            | 1.96 | 747   | 手動   |
|           | 1000    |            | 3.78        | 623                 | 1290                            |            | 5.78        | 988                 | 2045                            | 2.00 | 755   | 1.0  |
|           | 10000   |            | 3.79        | 623                 | 1290                            |            | 5.82        | 991                 | 2051                            | 2.03 | 761   | 2.5  |
|           | 100000  |            | 3.94        | 645                 | 1335                            |            | 6.01        | 1015                | 2100                            | 2.07 | 765   | 1.5  |
|           | 200000  |            | 3.95        | 649                 | 1343                            |            | 6.09        | 1023                | 2108                            | 2.14 | 765   | 1.5  |
|           | 400000  |            | 3.93        | 644                 | 1333                            |            | 6.32        | 1019                | 2109                            | 2.39 | 776   | 2.5  |
|           | 600000  |            | 4.37        | 624                 | 1292                            |            | 6.52        | 996                 | 2062                            | 2.15 | 770   | 2.5  |
|           | 800000  |            | 4.10        | 636                 | 1317                            |            | 6.32        | 1009                | 2089                            | 2.22 | 772   | 2.5  |
|           | 1000000 |            | 4.35        | 641                 | 1327                            |            | 6.51        | 1014                | 2099                            | 2.16 | 772   | 2.5  |
|           | 1200000 |            | 4.44        | 634                 | 1312                            |            | 6.58        | 1005                | 2081                            | 2.14 | 769   | 2.5  |
|           | 1400000 |            | 4.69        | 638                 | 1321                            |            | 6.66        | 1006                | 2083                            | 1.97 | 762   | 2.5  |
|           | 1600000 |            | 4.54        | 637                 | 1319                            |            | 6.68        | 1008                | 2086                            | 2.14 | 767   | 2.5  |
|           | 1800000 |            | 4.75        | 631                 | 1306                            |            | 6.77        | 1000                | 2070                            | 2.02 | 764   | 2.5  |
|           | 2000000 |            | 4.65        | 639                 | 1323                            |            | 6.82        | 1012                | 2095                            | 2.17 | 772   | 2.5  |

・下限荷重：死荷重相当

・上限荷重：22.8ton(但し、シート養生時はL-20荷重相当)

・たわみ差：上限荷重-下限荷重

・鉄筋応力差：上限荷重-下限荷重

・たわみ：中央2点の平均

・鉄筋ひずみ：中央3点の平均

表-4.2.5 疲労試験時：支間中央部の主鉄筋応力度と変位（試験体No.4）

No.4-2（上限荷重を33.3tonとしたとき）

| 載荷試験      | 回数      | 下限荷重       |             |                     |                                 | 上限荷重       |             |                     |                                 | たわみ差 | 鉄筋応力差 | 載荷速度 |
|-----------|---------|------------|-------------|---------------------|---------------------------------|------------|-------------|---------------------|---------------------------------|------|-------|------|
|           |         | 荷重<br>(tf) | たわみ<br>(mm) | 主鉄筋ひずみ<br>( $\mu$ ) | 主鉄筋応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 荷重<br>(tf) | たわみ<br>(mm) | 主鉄筋ひずみ<br>( $\mu$ ) | 主鉄筋応力<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |       |      |
| 静的載荷      | 1       | 10.3       | 1.21        | 393                 | 814                             | 33.3       | 7.48        | 1447                | 2995                            | 6.27 | 2181  | —    |
| 炭素繊維シート養生 | 1       | 10.3       | 3.36        | 577                 | 1194                            | 17.5       | 4.53        | 808                 | 1673                            | 1.17 | 479   | 1.0  |
|           | 330000  |            | 3.57        | 628                 | 1300                            |            | 4.58        | 824                 | 1706                            | 1.01 | 406   | 1.0  |
|           | 500000  |            | 3.67        | 630                 | 1304                            |            | 4.66        | 821                 | 1699                            | 0.99 | 395   | 1.0  |
|           | 600000  |            | 3.68        | 626                 | 1296                            |            | 4.68        | 813                 | 1683                            | 1.00 | 387   | 1.0  |
| 静的載荷      | 1       | 10.3       | 3.48        | 620                 | 1283                            | 33.3       | 7.03        | 1272                | 2633                            | 3.55 | 1350  | —    |
| 疲労試験      | 1       | 10.3       | 3.64        | 617                 | 1277                            | 33.3       | 7.07        | 1268                | 2625                            | 3.43 | 1348  | 手動   |
|           | 10      |            | 3.64        | 617                 | 1277                            |            | 7.14        | 1273                | 2635                            | 3.50 | 1358  | 手動   |
|           | 100     |            | 3.74        | 624                 | 1292                            |            | 7.25        | 1277                | 2643                            | 3.51 | 1351  | 手動   |
|           | 1000    |            | 3.78        | 623                 | 1290                            |            | 7.34        | 1283                | 2656                            | 3.56 | 1366  | 1.0  |
|           | 10000   |            | 3.79        | 623                 | 1290                            |            | 7.40        | 1284                | 2658                            | 3.61 | 1368  | 2.5  |
|           | 100000  |            | 3.94        | 645                 | 1335                            |            | 7.58        | 1308                | 2708                            | 3.64 | 1373  | 1.5  |
|           | 200000  |            | 3.95        | 649                 | 1343                            |            | 7.66        | 1318                | 2728                            | 3.71 | 1385  | 1.5  |
|           | 400000  |            | 3.93        | 644                 | 1333                            |            | 7.82        | 1312                | 2716                            | 3.89 | 1383  | 2.5  |
|           | 600000  |            | 4.37        | 624                 | 1292                            |            | 8.05        | 1288                | 2666                            | 3.68 | 1374  | 2.5  |
|           | 800000  |            | 4.10        | 636                 | 1317                            |            | 7.89        | 1302                | 2695                            | 3.79 | 1378  | 2.5  |
|           | 1000000 |            | 4.35        | 641                 | 1327                            |            | 8.05        | 1307                | 2705                            | 3.70 | 1378  | 2.5  |
|           | 1200000 |            | 4.44        | 634                 | 1312                            |            | 8.12        | 1298                | 2687                            | 3.68 | 1375  | 2.5  |
|           | 1400000 |            | 4.69        | 638                 | 1321                            |            | 8.21        | 1299                | 2689                            | 3.52 | 1368  | 2.5  |
|           | 1600000 |            | 4.54        | 637                 | 1319                            |            | 8.23        | 1301                | 2693                            | 3.69 | 1374  | 2.5  |
|           | 1800000 |            | 4.75        | 631                 | 1306                            |            | 8.34        | 1295                | 2681                            | 3.59 | 1375  | 2.5  |
|           | 2000000 |            | 4.65        | 639                 | 1323                            |            | 8.39        | 1307                | 2705                            | 3.74 | 1382  | 2.5  |

・下限荷重：死荷重相当

・上限荷重：B活荷重相当(但し、シート養生時はL-20荷重相当)

・たわみ差：上限荷重-下限荷重

・鉄筋応力差：上限荷重-下限荷重

・たわみ：中央2点の平均

・鉄筋ひずみ：中央3点の平均

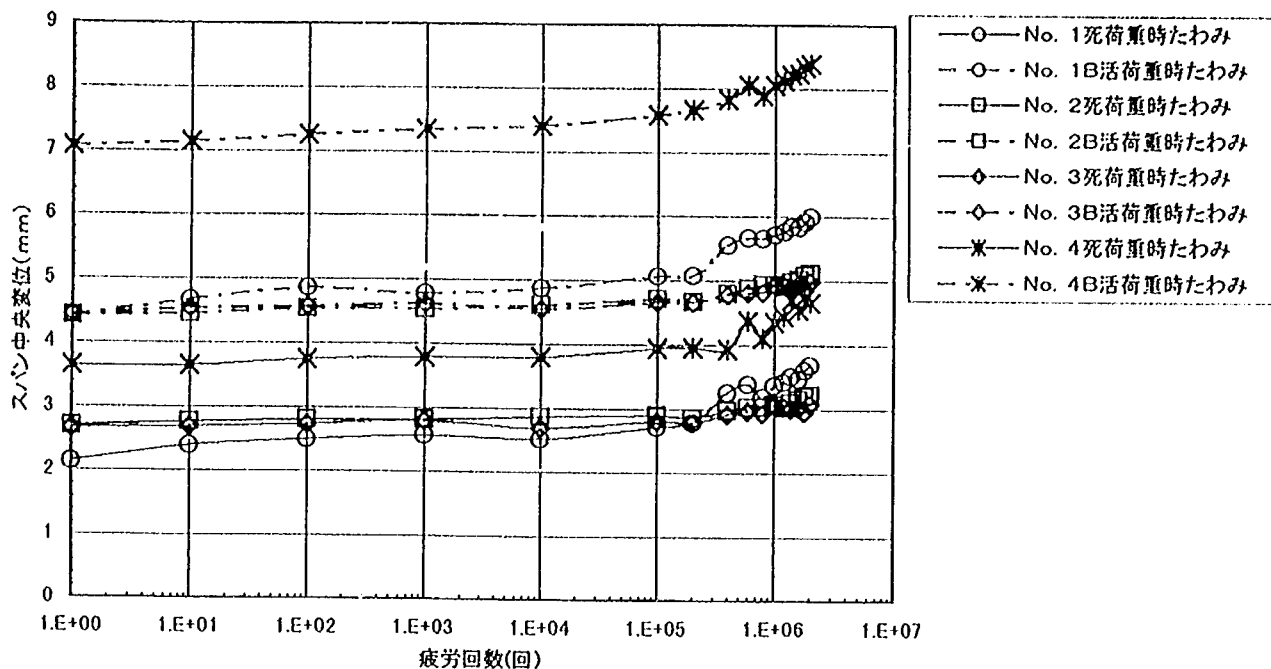


図-4.2.1 疲労载荷回数と支間中央部変位振幅の関係図

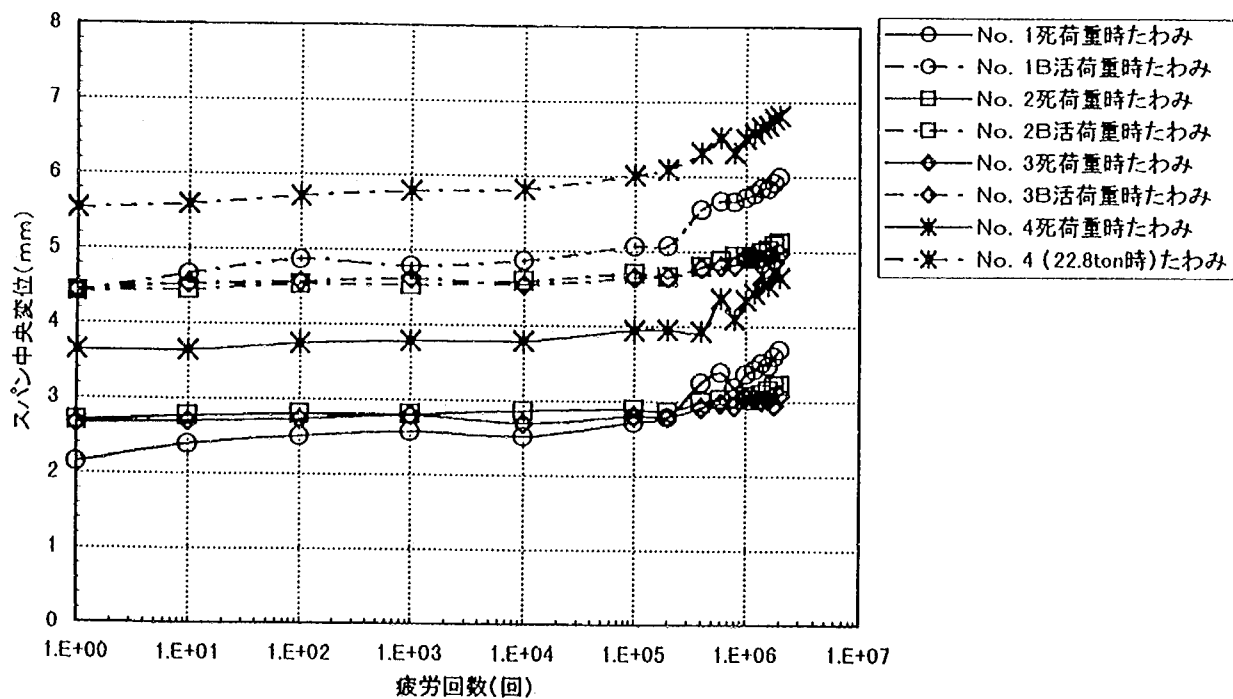


図-4.2.2 疲労载荷回数と支間中央部変位振幅の関係図 (No. 4 : 22.8tで比較)

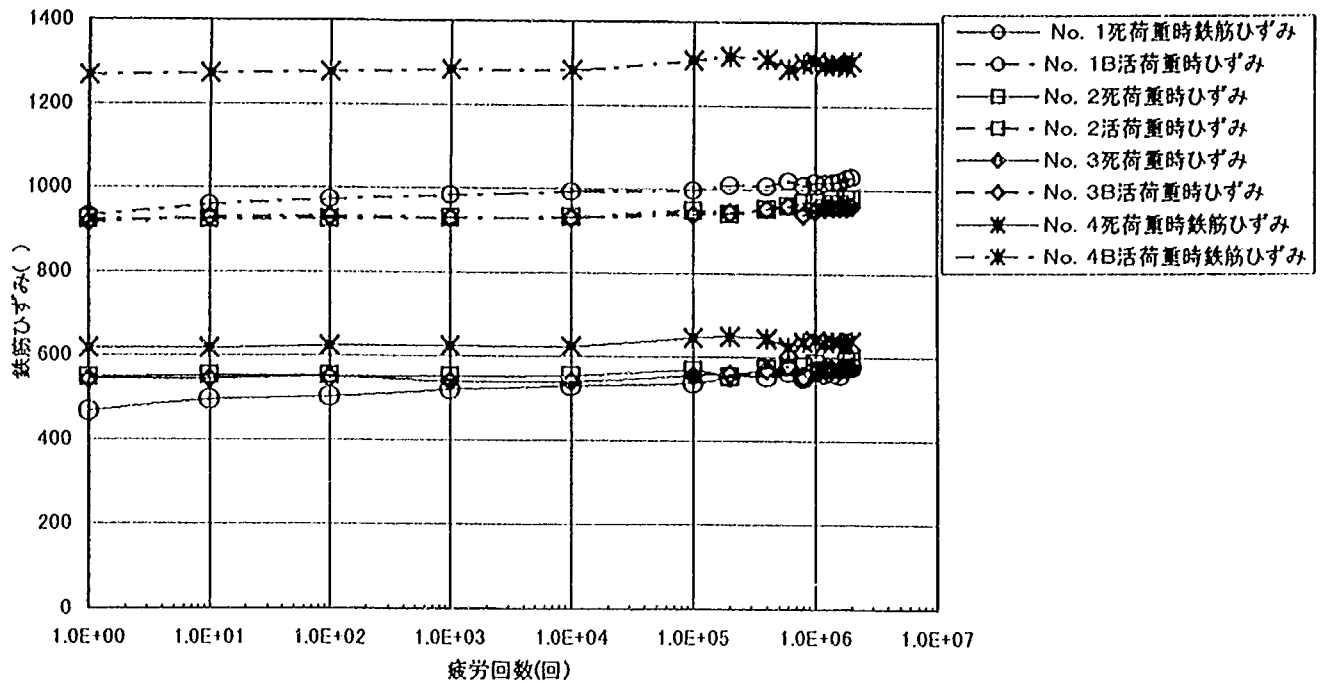


図-4.2.3 疲労载荷回数と主鉄筋ひずみ振幅の関係図

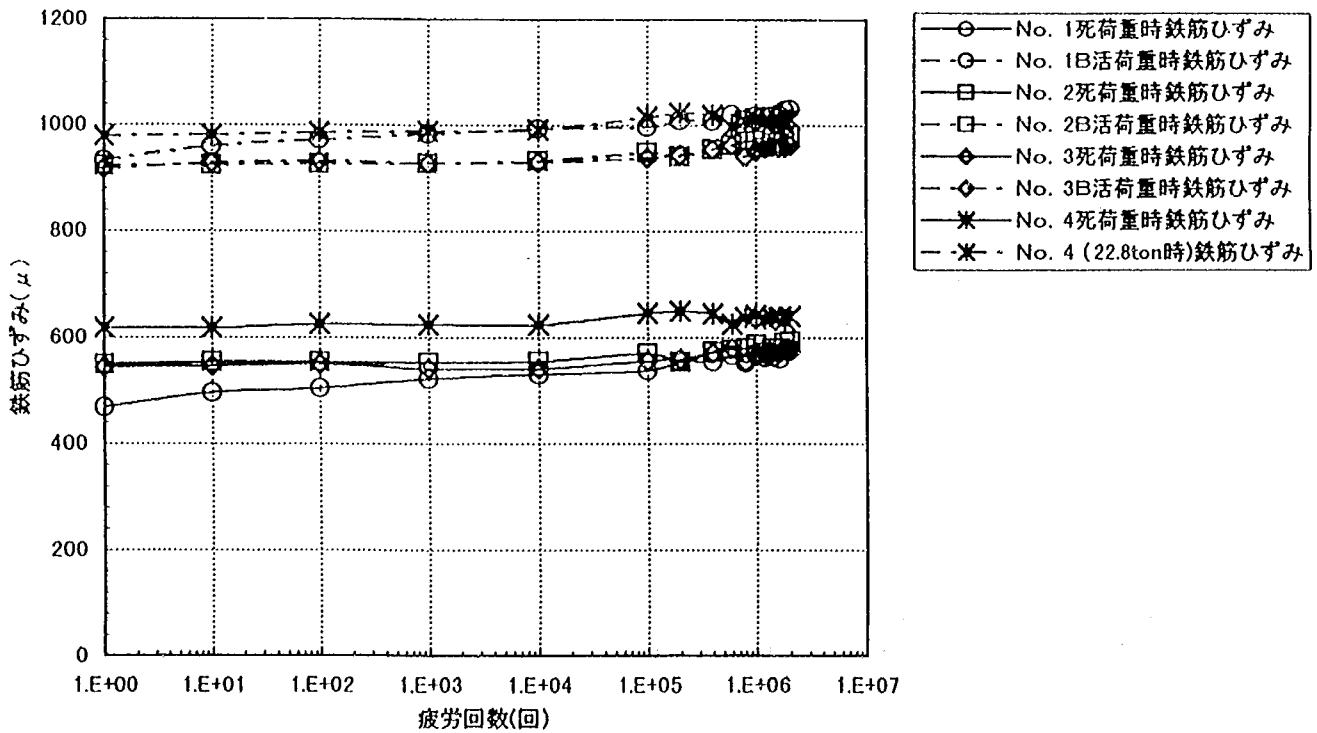
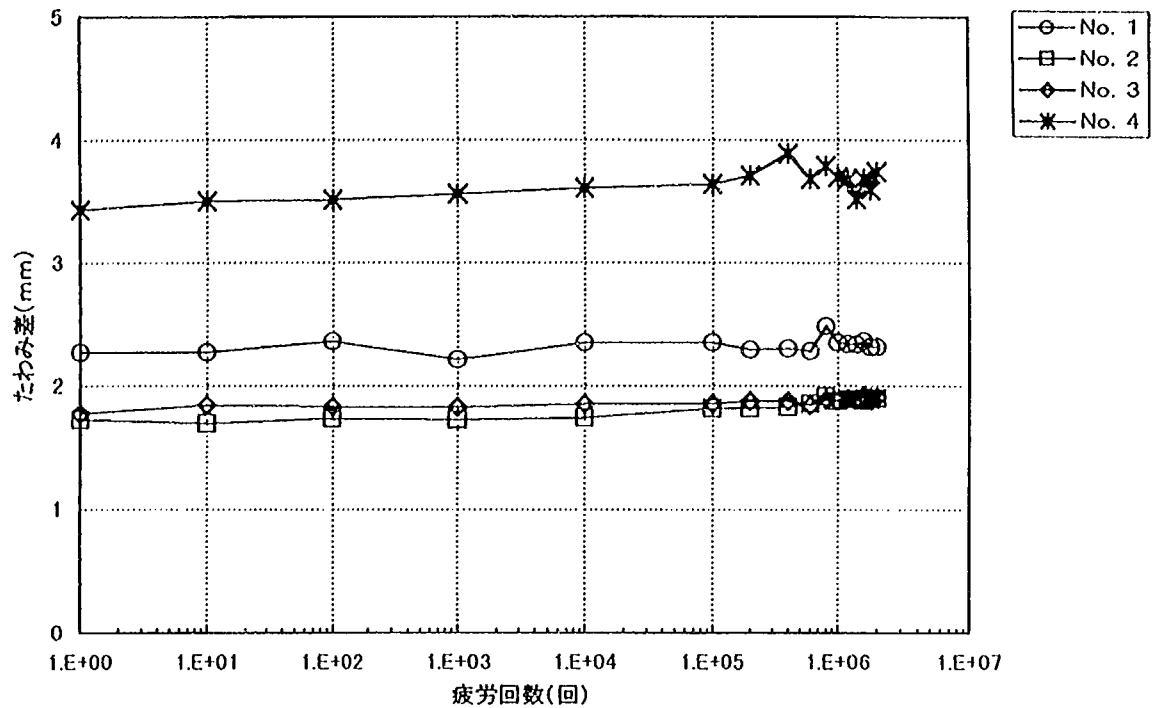


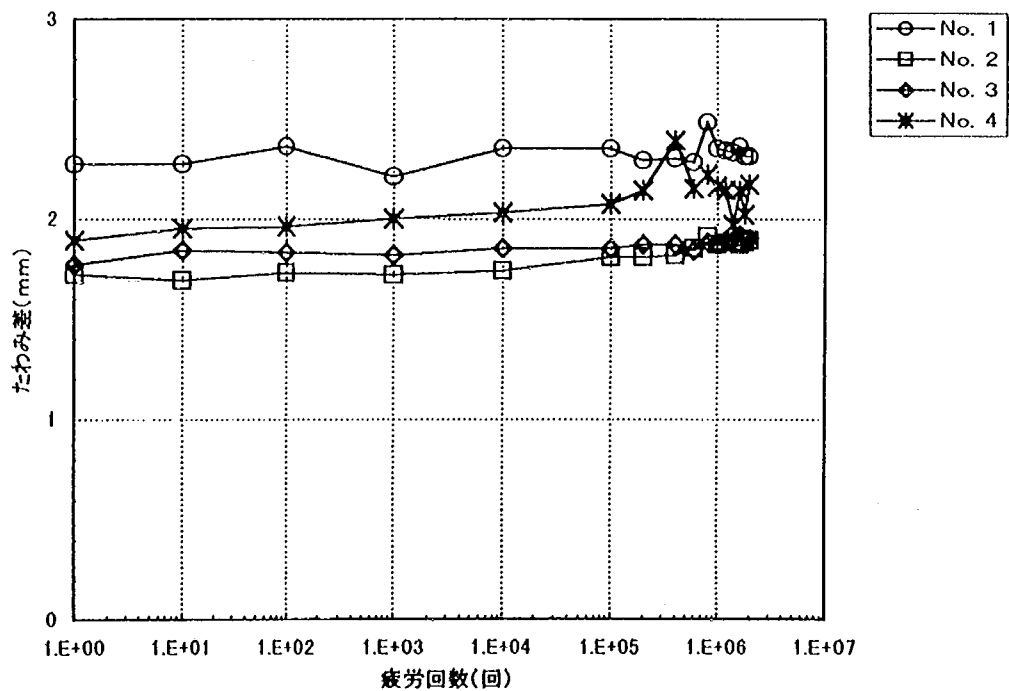
図-4.2.4 疲労载荷回数と主鉄筋ひずみ振幅の関係図 (No. 4 : 22.8t で比較)

|      |                                          |
|------|------------------------------------------|
| B活荷重 | No. 1～No. 3 : 22.8ton<br>No. 4 : 33.3ton |
| 死荷重  | No. 1～No. 4 : 10.3ton                    |



図－4.2.5 疲労載荷回数と活荷重変位の関係図(B活荷重時－死荷重時)

|      |                       |
|------|-----------------------|
| B活荷重 | No. 1～No. 4 : 22.8ton |
| 死荷重  | No. 1～No. 4 : 10.3ton |



図－4.2.6 疲労載荷回数と活荷重変位の関係図(B活荷重時－死荷重時)(No. 4 : 22.8tで比較)

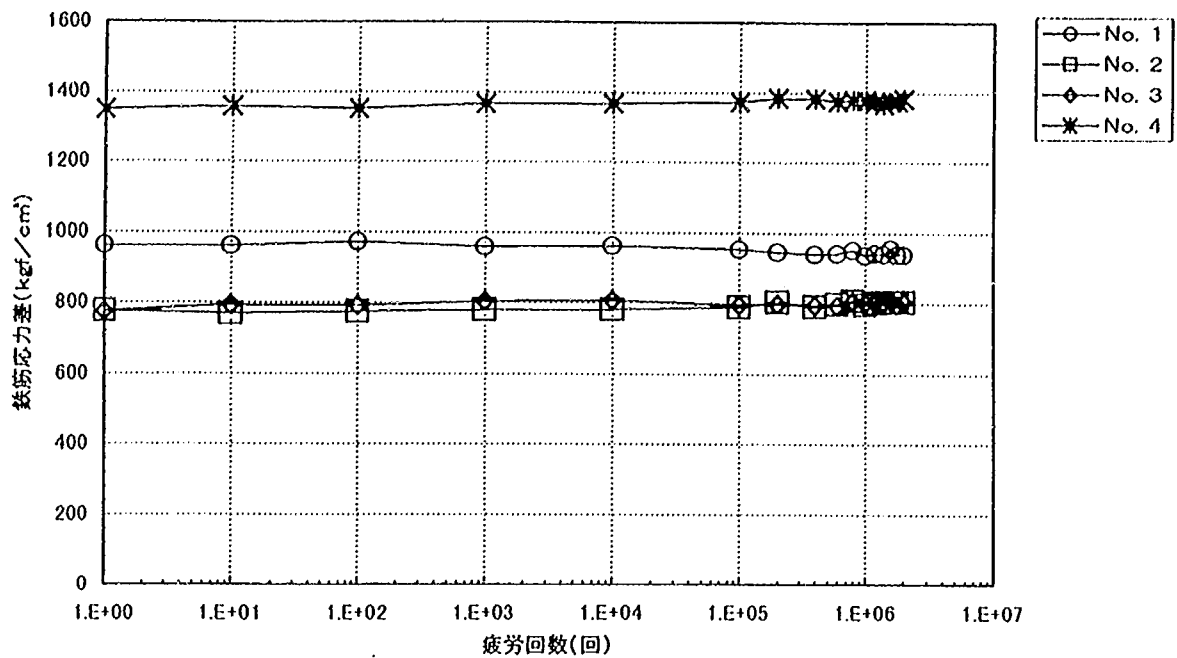


図-4.2.7 疲労载荷回数と鉄筋活荷重応力度の関係図(B活荷重時-死荷重時)

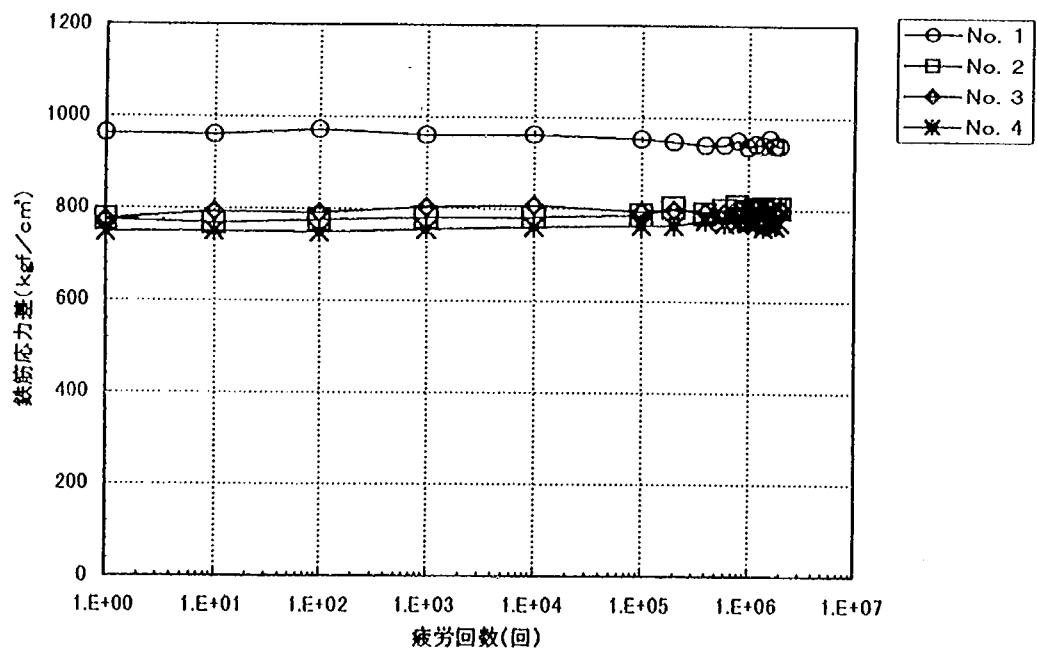


図-4.2.8 疲労载荷回数と鉄筋活荷重応力度の関係図(B活荷重時-死荷重時)(No.4:22.81で比較)

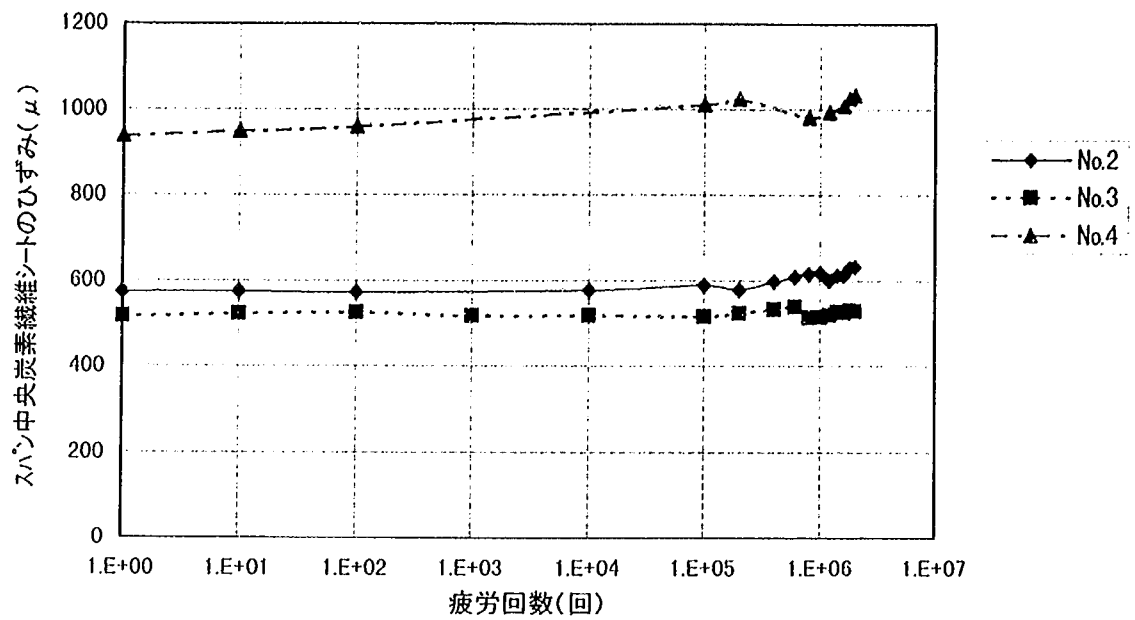


図-4.2.9 疲労载荷回数とCFRPシートひずみの関係図

(B活荷重载荷時、No.2、3: 22.8tf、No.4: 33.3tf)

### 4.3 疲労試験後の静的載荷試験における終局破壊までの挙動

各試験体は、200万回の疲労載荷後に静的載荷試験により終局挙動を確認した。載荷荷重と支間中央部における変位、主鉄筋ひずみ、コンクリートの圧縮ひずみ、および炭素繊維シートのひずみとの関係を図-4.3.1から図-4.3.4にそれぞれ示す。なお、それぞれの図中、各試験体の履歴には疲労載荷時に生じた残留変位および残留ひずみが含まれている。

また、各試験体において測定した荷重と3箇所の炭素繊維シートのひずみとの関係を図-4.3.5から4.3.7に示す。

#### 4.3.1 各試験体の終局破壊までの挙動

##### 試験体No. 1

載荷荷重42.15 tf にて主鉄筋が降伏した。この時の中央変位は11.5 mmであった。その後載荷を継続し載荷荷重49.39 tf、中央変位68.12 mm にて最大荷重を記録、同時にコンクリートの圧壊が発生、終局に至った。

##### 試験体No. 2

載荷荷重49.70 tf にて主鉄筋が降伏した。この時の中央変位は11.09 mmであり試験体No. 1の主鉄筋降伏時中央変位よりも若干小さかった。その後載荷を継続し載荷荷重66.91 tf、中央変位23.16 mmにて大きな音とともに炭素繊維シートのコンクリートとの付着切れが発生し最大荷重を記録した。この時、付着切れ発生の音が試験体中央部付近から端部に移行するのを聞き取ることができた。さらに載荷を継続したところ載荷荷重48.31 tf 中央変位59.93 mmにてコンクリートが圧壊し終局に至った。

##### 試験体No. 3

載荷荷重47.29 tf にて主鉄筋が降伏した。この時の中央変位は9.85 mmであり試験体No. 1の主鉄筋降伏時中央変位よりも小さかった。その後載荷を継続し載荷荷重52.15 tf、中央変位12.07 mm にて炭素繊維シートが破断、最大荷重を記録した。破断箇所は、スパン中央から300 mmの位置であり、試験体の補強前静的載荷時から生じていたひび割れ部分であった。炭素繊維シートの破断は、炭素繊維シート貼付後の養生時からこのひび割れ部に発生していた炭素繊維シートの鍍の部分で発生していた。さらに載荷を継続し載荷荷重48.14 tf、中央変位56.88 mmにてコンクリートが圧壊し終局に至った。

##### 試験体No. 4

載荷荷重54.13 tf、中央変位12.13 mm にて主鉄筋が降伏した。試験体No. 1～No. 3の主鉄筋降伏時載荷荷重よりも大きかった。その後載荷を継続し載荷荷重 73.97 tf、中央変位約 20 mm にて炭素繊維シートが破断し最大荷重を記録した。破断箇所はスパン中央から 350 mmの位置であった。さらに載荷を継続したところ載荷荷重 49.70 tf、中央変位54.95 mm にてコンクリートが圧壊し終局に至った。

#### 4.3.2 載荷荷重と変位との関係

図-4.3.1に各試験体の載荷荷重と支間中央変位との関係を示す。試験体No.1と比較して試験体No.2、No.3およびNo.4は鉄筋降伏までの曲げ剛性が高くなっている。また、鉄筋降伏後から炭素繊維シートの破断あるいは付着切れまでの曲げ剛性は試験体No.1、No.2、No.4の順に高くなっている。以降、圧壊までの挙動は全ての試験体でほぼ同様であった。試験体No.3については鉄筋降伏から炭素繊維シートの破断までの変位量が少なかったため鉄筋降伏以降の曲げ剛性の向上等は判別し難い。

#### 4.3.3 載荷荷重と主鉄筋ひずみとの関係

各試験体の載荷荷重と支間中央の鉄筋ひずみとの関係を図-4.3.2に示す。試験体No.2、No.3およびNo.4は、試験体No.1と比較して、鉄筋降伏までの荷重増加に対するひずみ増加の割合が小さくなっており、炭素繊維シート補強により鉄筋応力度が低減されていることが示されている。また、この傾向は補強した炭素繊維シートの弾性係数と断面積との積である引張剛性が最も大きい試験体No.4が顕著である。鉄筋降伏ひずみについては各試験体とも2,000 $\mu$ 程度であったが、各試験体による明確な差異は見られなかった。

#### 4.3.4 載荷荷重とコンクリートの圧縮ひずみとの関係

図-4.3.3に各試験体の載荷荷重と支間中央部コンクリートの圧縮ひずみとの関係を示す。図-4.3.1とほぼ同様な傾向であり、コンクリートの圧縮ひずみと変位の相関性が良く示されている。

#### 4.3.5 載荷荷重と炭素繊維シートひずみとの関係

図-4.3.4に各試験体の載荷荷重と支間中央の炭素繊維シートのひずみとの関係を示す。試験体No.2およびNo.4においては鉄筋降伏後急激に炭素繊維シートのひずみが増加しており、炭素繊維シートの荷重負担割合は鉄筋降伏後に急激に増加することを示している。また、試験体No.2とNo.3を比較すると高弾性タイプの炭素繊維シートを使用した試験体No.3の方が同じ載荷荷重時のひずみが大きくなっている。試験体No.2と3とは補強した炭素繊維シートの弾性率と断面積との積をほぼ等しくしたものであるが、コンクリート表面に貼り付けての補強の場合には異なった挙動となる傾向があることが示されている。

図-4.3.5から4.3.7に各試験体の炭素繊維シートのひずみを示す。支間中央部の測定値をTNB、支間中央より両側にそれぞれ1,100 mm 離れた位置での測定値をTNA、TNCとした。試験体No.2およびNo.3においては試験体中央部のTNBひずみが最も大きくなってはいるものの、試験体No.3では3カ所の測定値の違いがほとんど見られない。これは、炭素繊維シート貼り付け直後の養生中に発生した皸およびその部分で進展したであろうひび割れの影響と考えられる。

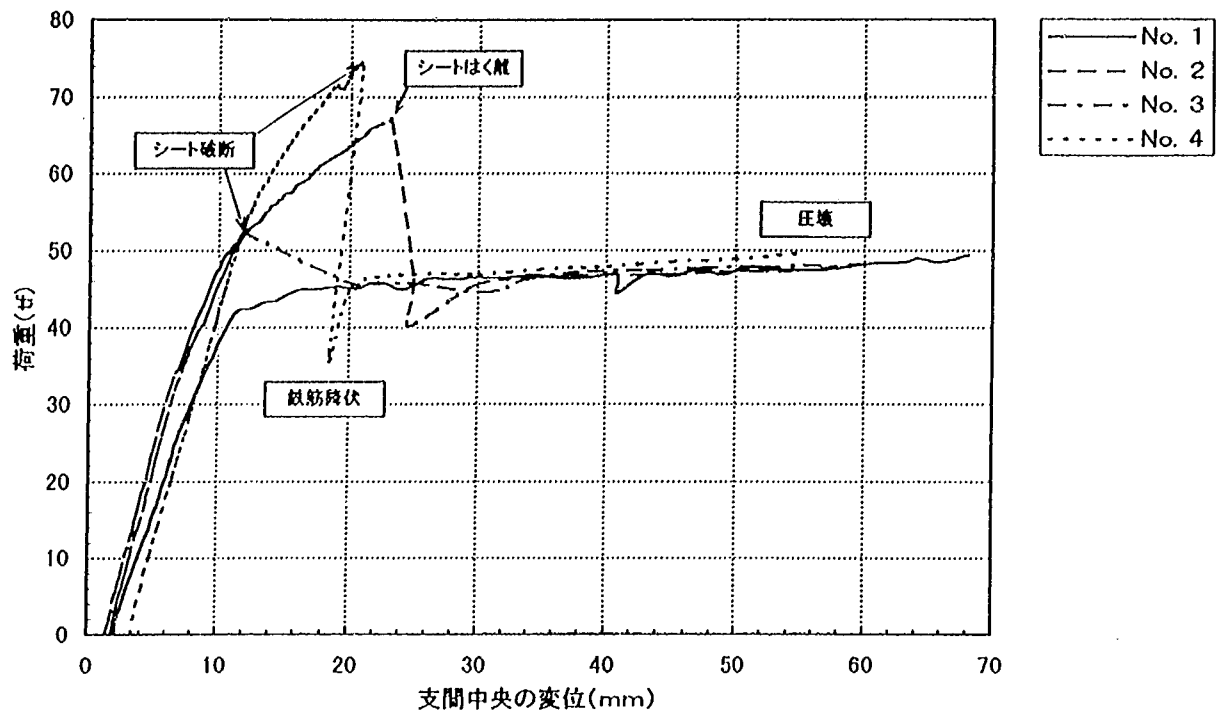


図-4.3.1 荷重と支間中央部変位との関係図

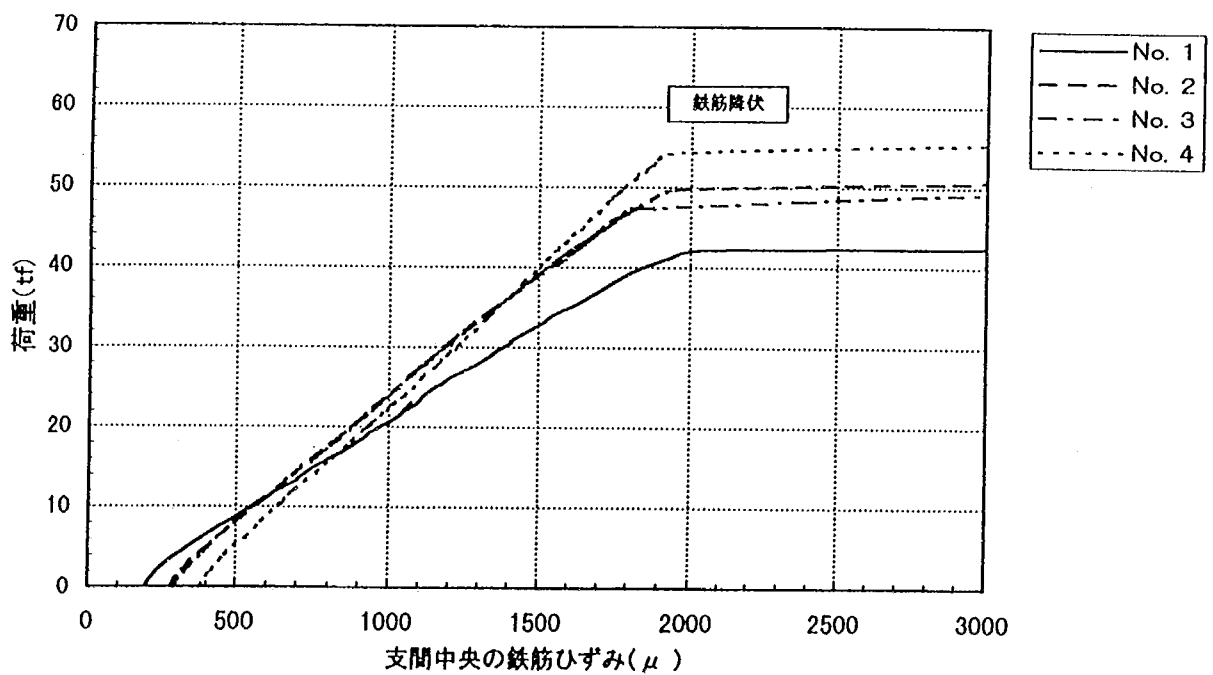


図-4.3.2 荷重と支間中央部主鉄筋ひずみとの関係図

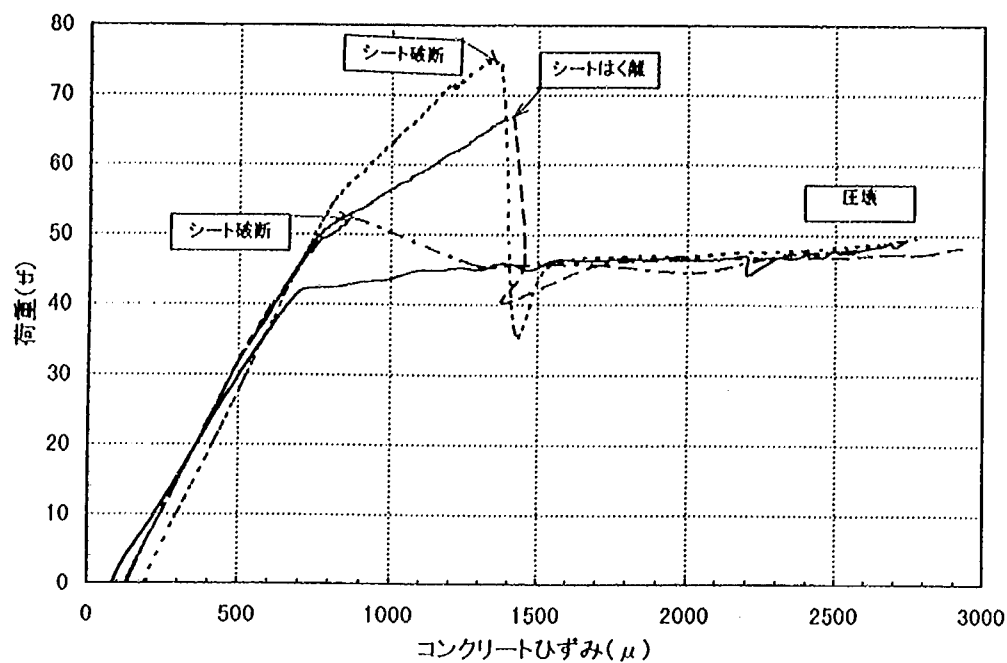


図-4.3.3 荷重と支間中央部コンクリートの圧縮ひずみとの関係図

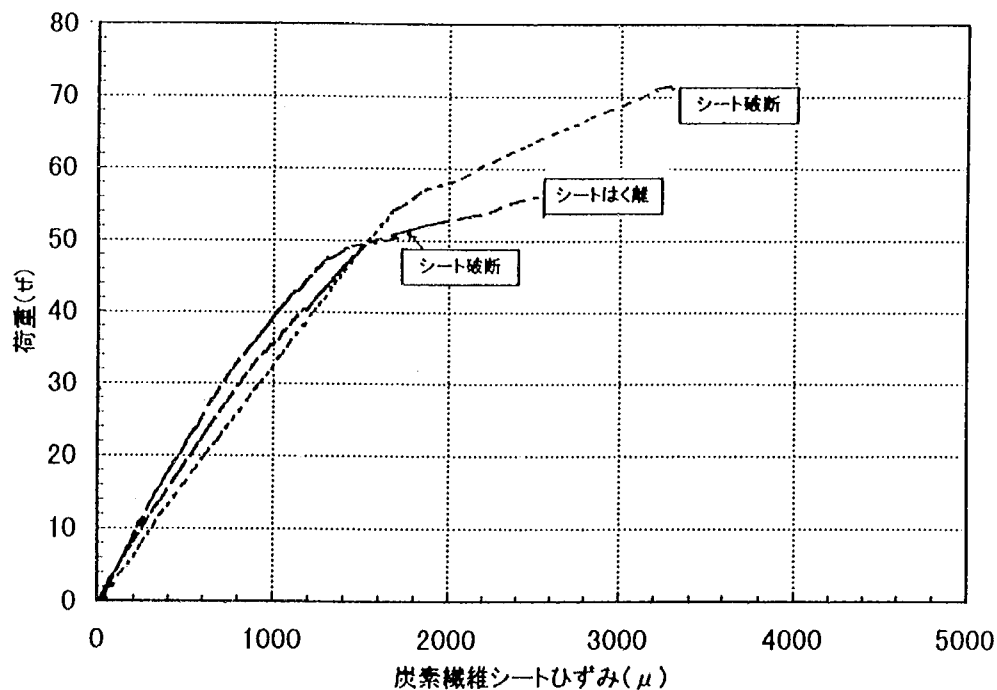


図-4.3.4 荷重と支間中央部炭素繊維シートひずみとの関係図

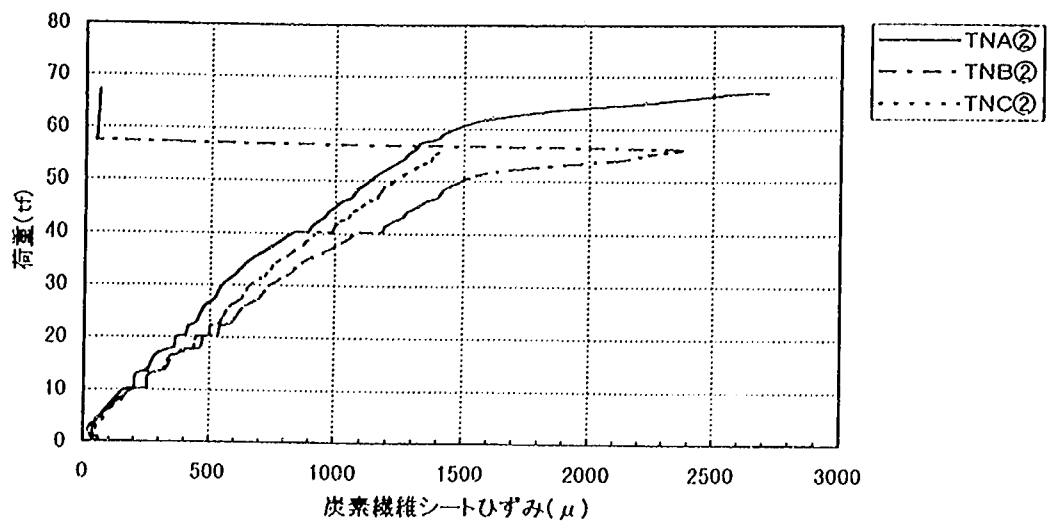


図-4.3.5 荷重と炭素繊維シートひずみとの関係図 (試験体No. 2)

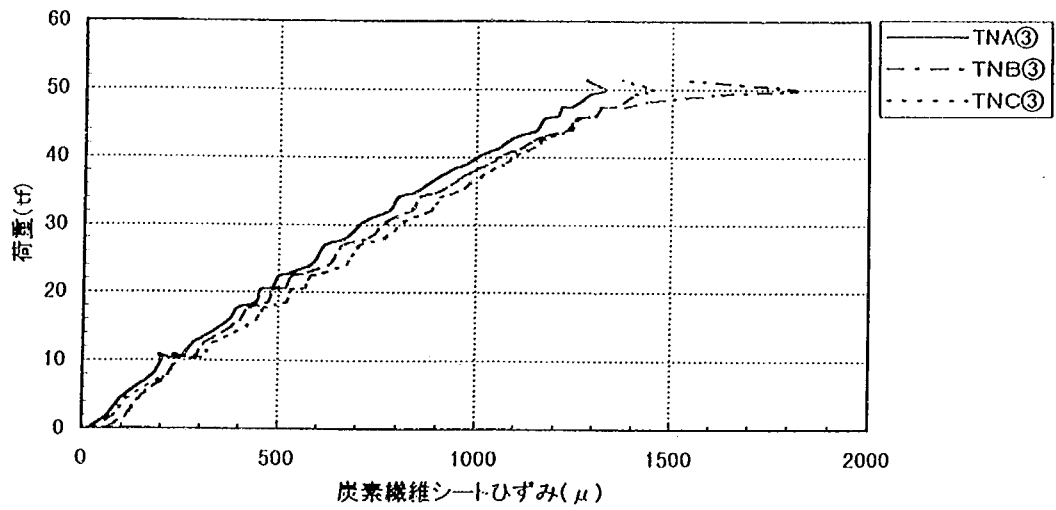


図-4.3.6 荷重と炭素繊維シートひずみとの関係図 (試験体No. 3)

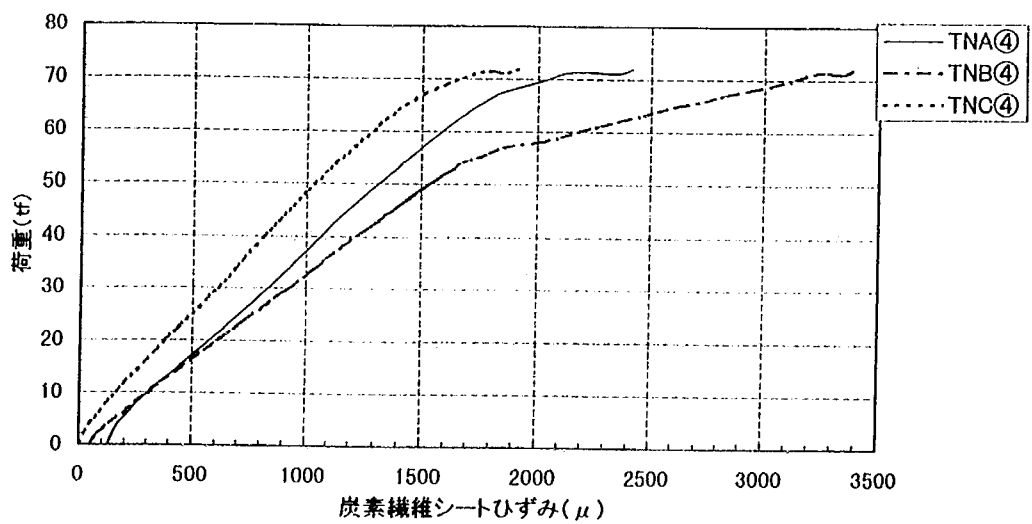


図-4.3.7 荷重と炭素繊維シートひずみとの関係図 (試験体No. 4)

## 5. 補強効果に関する考察

炭素繊維シート貼り付け後1週間の間繰り返し荷重を載荷し、その後200万回の疲労試験の後静的破壊試験を行った結果、以下のことが確認された。

### 5.1 炭素繊維シートの接着性および養生の影響

試験体No.2、No.3およびNo.4試験体は、炭素繊維シート貼り付け終了後からエポキシ樹脂が完全に硬化するまでの1週間、死荷重時とT-20荷重時に相当する荷重との間で、載荷速度1Hzで60万回繰り返し載荷を行った。さらに、その後死荷重時とB活荷重時に相当する荷重間（試験体No.2、およびNo.3は22.8 t、試験体No.4は33.3 t）で200万回の疲労試験を行った。この間に炭素繊維シートは、部分的な剥離や剥落などの現象をまったく生じなかった。

また、試験体No.2およびNo.4は、炭素繊維シートの積層数が6層以上となるため、貼り付けは2日に分けて実施し、すべての炭素繊維シート貼り付けが終了した直後にT-20荷重相当の繰り返し載荷を開始した。したがって、コンクリートに接している部分の炭素繊維シートは含浸させたエポキシ樹脂の硬化反応がある程度進行した後に繰り返し載荷を開始した。これに対して試験体No.3は貼り付け開始した日に貼り付けを終了し、直後にT-20荷重時相当の繰り返し載荷を開始した。すなわち、コンクリートに接している部分の炭素繊維シートに含浸させたエポキシ樹脂は、その硬化反応を開始する前に繰り返し載荷が開始されたこととなる。このため、初期載荷時に試験体に発生していたひび割れ箇所で、炭素繊維シートに皺が発生しそのままの状態での硬化した。

### 5.2 炭素繊維シートの弾性係数（高強度タイプと高弾性タイプ）の違いの影響

試験体No.2は高強度タイプ、試験体No.3は高弾性タイプの炭素繊維シートを用いて補強した。この2つの試験体の補強層数は、RC理論によりB活荷重時の主鉄筋応力度がほぼ同等となるようにした。2つの試験体の疲労試験後の支間中央部における死荷重～B活荷重間の変位と主鉄筋応力度、静的破壊試験における曲げ耐力と破壊性状を表-5.1.1に示す。

表-5.1.1から、本試験の積層数の範囲においては、以下のような傾向がある。

- 1) 200万回の疲労試験前後のB活荷重時による主鉄筋応力度と変位はほぼ同等である。
- 2) 最大荷重（曲げ耐力）は、高強度タイプを貼付した試験体No.2の方が、高弾性タイプを貼付した試験体No.3に比べて大きい。高強度タイプは、炭素繊維シートの引張耐力が高く、炭素繊維シートとコンクリートとの付着破壊で最大荷重が決定されている。一方、高弾性タイプは、炭素繊維シートの引張耐力が小さく、シートの破断で最大荷重が決定されている。

しかし、主鉄筋応力度の低減を目的として実施した本試験の範囲では、鉄筋応力度低減効果に大きな差はないと言える。

表-5.1.1 試験体No.2 とNo.3 の比較

|                                                                   | No.2 (高強度タイプ：8層)                                   | No.3 (高弾性タイプ：3層)                                   |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 炭素繊維シートの特<br>・剛性： $Acf \cdot Ecf$<br>・引張耐力： $Acf \cdot \sigma cf$ | $7.54 \times 10^6 \text{ kgf}$<br>112 tf           | $6.69 \times 10^6 \text{ kgf}$<br>20.6 tf          |
| 死荷重～B活荷重間の変位<br>・疲労載荷試験開始前<br>・疲労載荷試験終了時                          | 1.76 mm<br>1.89 mm                                 | 1.81 mm<br>1.90 mm                                 |
| 死荷重～B活荷重間の主鉄筋応力度<br>・疲労載荷試験開始前<br>・疲労載荷試験終了時                      | 776 kgf/cm <sup>2</sup><br>804 kgf/cm <sup>2</sup> | 803 kgf/cm <sup>2</sup><br>803 kgf/cm <sup>2</sup> |
| 静的破壊試験時<br>・最大荷重（曲げ耐力）<br>・破壊状況                                   | 66.91 tf<br>炭素繊維シートとコンクリート<br>との付着破壊               | 52.15 tf<br>炭素繊維シートの破断                             |

### 5.3 炭素繊維シートによる補強効果

#### (1) 活荷重変位

B活荷重（22.8 tf - 10.3 tf = 12.5 tf）による支間中央の変位を表-5.1.2に示す。

表-5.1.2 B活荷重による支間中央の変位

| 載荷状態                                    | 活荷重変位 (mm)                                     |                                               |                                               |                                               |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
|                                         | 試験体No.1<br>$I = 333,663 \text{ cm}^4$<br>(100) | 試験体No.2<br>$I = 385,333 \text{ cm}^4$<br>(87) | 試験体No.3<br>$I = 382,883 \text{ cm}^4$<br>(87) | 試験体No.4<br>$I = 439,552 \text{ cm}^4$<br>(76) |
| ① 試験体No.1<br>疲労1万回後 比較基準                | 2.35<br>(100)                                  |                                               |                                               |                                               |
| ② 炭素繊維シート補強後<br>(②/ ①×100)              |                                                | 1.76<br>(75)                                  | 1.81<br>(77)                                  | 1.92<br>(82)                                  |
| ③ 疲労載荷後<br>(③/ ①×100)<br>(試験体No.1 との比較) | 2.44<br>(104)<br>(100)                         | 1.96<br>(83)<br>(80)                          | 1.93<br>(82)<br>(79)                          | 2.06<br>(88)<br>(84)                          |

注) 断面二次モーメント I は材料の試験結果を用いて算出したものである。

注) 試験体No欄の ( ) 内は断面二次モーメントの逆数を示し、試験体No.1を100として表した。

たわみ計算値は、同じ載荷荷重、載荷状態の時、換算断面2次モーメント（I）に反比例するので、試験体No.2、No.3とも試験体No.1の87%となる。これに対し、たわみ実測値は炭素繊維シート補強後の場合、試験体No.2で試験体No.1の75%、試験体No.3で同77%であった。疲労載荷後は試験体No.2で試験体No.1の疲労履歴後の80%、試験体No.3で同79%であった。

これらの結果より炭素繊維シートによる補強効果は、試験体No.2で計算値の1.9倍（炭素繊維シート補強後）から1.5倍（疲労履歴後）、試験体No.3で計算値の1.8倍（炭素繊維シート補強後）から1.6倍（疲労履歴後）大きいことが示されている。なお、試験体No.4については載荷条件が異なるため比較は行わない。

計算結果よりも補強効果が高い理由としては、RCけたの最下端に貼り付けた炭素繊維シートによるひび割れ拘束効果が考えられる。すなわち通常は無視している引張側のコンクリートが、ひび割れが進展しないことにより有効断面として作用し、その結果断面二次モーメント（I）が増加したものと考えられ、疲労試験後においても断面二次モーメントの増加は保たれていたと考えられる。

## (2) B活荷重による支間中央の主鉄筋応力度

当実験は表-2.2.2の計画表に示したようにB活荷重相当時の主鉄筋応力度を2,000 kgf/cm<sup>2</sup>程度から1,800 kgf/cm<sup>2</sup>程度まで200 kgf/cm<sup>2</sup>程度低減させることを目的のひとつとしたものである。表-5.1.3に3.に示した材料の試験結果を用いた死荷重相当載荷からB活荷重相当載荷までの主鉄筋応力度増加量の計算値および実測値を示す。

炭素繊維シートによる鉄筋応力度低減効果の計算値は、試験体No.2で193 kgf/cm<sup>2</sup>、試験体No.3で175kgf/cm<sup>2</sup>である。これに対し実測値は炭素繊維シート補強後で185 kgf/cm<sup>2</sup>（試験体No.2）、158 kgf/cm<sup>2</sup>（試験体No.3）であり、計算値の90～96%であった。また、疲労載荷後の実測値は、無補強試験体の疲労載荷後主鉄筋応力度の実測値と比較すると、試験体No.2で217 kgf/cm<sup>2</sup>、試験体No.3で228 kgf/cm<sup>2</sup>であり、計算値を大きく上回った。

試験体No.4では載荷荷重条件が大きく異なるので直接の比較は困難であるが、試験体No.1に比べ主鉄筋応力度は低減されている。

表-5.1.3 B活荷重による支間中央の主鉄筋応力度

|                              | 主鉄筋応力度変化(kgf/cm <sup>2</sup> ) |              |              | 備考                     |
|------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------|------------------------|
|                              | 試験体No.1                        | 試験体No.2      | 試験体No.3      |                        |
| 計算値                          | 1,062                          | 869          | 887          | 資料2, (1)<br>参照         |
| 試験体No.1との差 (①)               | 0                              | 193          | 175          |                        |
| 炭素繊維シート補強後                   | 961                            | 776          | 803          | 表-4.1.2<br>補強後、<br>参照  |
| 試験体No.1との差<br>(①の値を100とした比較) | 0                              | 185<br>(96)  | 158<br>(90)  |                        |
| 疲労載荷後                        | 1,037                          | 820          | 809          | 表-4.1.2<br>疲労載荷後<br>参照 |
| 試験体No.1との差<br>(①の値を100とした比較) | 0                              | 217<br>(112) | 228<br>(130) |                        |

注) 主鉄筋応力度の計算値は材料の試験結果を用いて算出したもので、資料-2、(1)を参照のこと。

注) 試験体No.1の炭素繊維シート補強後の値は疲労試験1万回後に実施した静的載荷時のものである。

## 5.4 疲労載荷後の静的破壊挙動

200万回疲労載荷後に行った各試験体の静的載荷試験時の終局破壊荷重を表-5.1.4に示す。

表-5.1.4 200万回疲労試験後の静的破壊荷重

| 試験体             | 試験結果   |          |                       | 計算方法 1  |       | 計算方法 2 |       | 備 考 |
|-----------------|--------|----------|-----------------------|---------|-------|--------|-------|-----|
|                 | 最大荷重   | 破壊状況     | CFシートの変位              | 計算値     | 試験/計算 | 計算値    | 試験/計算 |     |
| No.1: 無補強       | 49.4tf | コンクリート圧壊 | —                     | 43.3tf  | 1.14  | 43.3tf | 1.14  |     |
| No.2: 高強度タイプ 8層 | 66.9tf | 付着破壊     | $2300 \times 10^{-6}$ | 136.0tf | 0.49  | 55.9tf | 1.20  |     |
| No.3: 高弾性タイプ 3層 | 52.2tf | CFシート破断  | $1800 \times 10^{-6}$ | 58.8tf  | 0.89  | 48.3tf | 1.08  |     |
| No.4: 高弾性タイプ 6層 | 74.0tf | CFシート破断  | $3200 \times 10^{-6}$ | 75.7tf  | 0.98  | 77.1tf | 0.96  |     |

注) 計算方法 1 : 主鉄筋は降伏強度、炭素繊維シートは引張強度に到達しているものと仮定して最大荷重を計算したもので、資料 2、(2) 参照のこと。

注) 計算方法 2 : 主鉄筋は降伏強度、炭素繊維シートは最大荷重時の測定平均ひずみを用いて最大荷重を計算したもので、資料 2、(3) 参照のこと。

これより、以下のことが言える。

- 1) 炭素繊維シートで補強された試験体 No. 2、No. 3 および No. 4 の最大荷重は、無補強の試験体 No. 1 に対していずれも増加している。
- 2) 試験体 No. 2、No. 3 および No. 4 は、B 活荷重載荷および主鉄筋降伏までは同様な荷重～変位挙動を示す。しかしながら、試験体 No. 2 では 66.9tf 時に炭素繊維シートとコンクリートとの付着破壊が生じ、試験体 No. 3 では 52.1tf 時に、No. 4 は 74.0tf 時に炭素繊維シートの破断が生じて最大荷重を示す。炭素繊維シートで補強された試験体は最大荷重以後、急激に荷重が低下し無補強である試験体 No. 1 と同様な挙動を示す。
- 3) 最大荷重時の主鉄筋のひずみは 3 試験体とも降伏に達している。しかし、炭素繊維シートのひずみは、試験体 No. 4 ではほぼ破断ひずみに達しているが、試験体 No. 2 では破断ひずみの 15%、試験体 No. 3 では破断ひずみの 59% 程度となっている。このため、最大荷重の計算値は炭素繊維シートのひずみに試験値を用いた『計算方法 2』が試験値と比較的よく合っている。従って、付着破壊した No. 2 試験体の最大荷重を事前に推定するためには、例えば、付着限界応力度  $4.5 \text{ kgf/cm}^2$  より支間中央部の CFRP シートの許容限界ひずみを逆算して「計算方法 2」を適用する等が考えられる。なお、試験体 No. 3 の炭素繊維シートのひずみが小さいのは、貼り付けが終了した直後の、コンクリートに接している部分の炭素繊維シートに含浸させたエポキシ樹脂の硬化反応が開始する前に L-20 荷重時相当の繰り返し載荷を開始したこと、補強前の静的載荷時に試験体に発生していたひび割れ箇所が炭素繊維シートに皺が発生しそのままの状態での硬化したため、この部分の CFRP シートのひずみが終局ひずみに到達したと推定される。

## 6. まとめ

炭素繊維シートで曲げ補強した、実橋の1/2規模の鉄筋コンクリートTげたを対象としたB活荷重相当の静的載荷試験と200万回繰返し載荷試験、および、繰返し載荷試験後の静的破壊試験の結果、次の点が明らかとなった。

- 1) 炭素繊維シート貼付による鉄筋コンクリートげたの曲げ補強は、けたのたわみ低減および主鉄筋応力度の低減に有効であり、その補強効果に及ぼす繰返し載荷の影響はほとんど見られない。
- 2) 補強に用いる炭素繊維シートの弾性係数と断面積の積を等しくした場合、それが高強度タイプと高弾性タイプの何れであっても、B活荷重によるけたの主鉄筋応力度と変位に対する、その補強効果は同等である。
- 3) 補強に用いる炭素繊維シートの弾性係数と断面積の積が増加するに伴い、主鉄筋応力度と変位の低減効果は増加するものの、低減効果の増加傾向は必ずしも補強量に比例し得ない。
- 4) 今回の炭素繊維シートで補強した鉄筋コンクリートTげた試験体の破壊形態は、ここで実施した載荷条件下において、高強度タイプ炭素繊維シートの場合には炭素繊維シートの付着破壊、高弾性タイプ炭素繊維シートの場合には炭素繊維シートの破断であった。
- 5) 炭素繊維シートで曲げ補強した鉄筋コンクリートTげたは、その補強量に応じて、鉄筋降伏荷重および終局曲げ耐力が向上することが明らかとなり、B活荷重相当載荷時の鉄筋応力度低減効果を調査することを主目的とした今回の実験でも、鉄筋降伏荷重を1.3倍、終局耐力を1.5倍まで向上させることができた。

## 7. 今後の課題

今回実施した一連の実験は、炭素繊維シート接着による鉄筋コンクリートげたの曲げ補強効果を実験的に確認することが主目的であり、その主目的を十分に達成していると考えている。しかし、試験結果の評価から導かれる補強効果の一般化を行うための、設計・施工両面からの検討には未だ不十分な点も多い。その中から、今後の課題として以下を記しておく。

- 1) 炭素繊維シートによるひび割れ拘束効果、および、それが部材の有効断面二次モーメントに与える影響を明らかにする必要がある。
- 2) 今回、T-20相当荷重繰返し載荷状態の下で炭素繊維シート貼付けを行った場合、すでにコンクリートに生じているひび割れの開閉により炭素繊維シートに皺が発生し終局曲げ耐力の向上に悪影響が生じた。従って、T-20荷重の繰返し通行等がある一般の供用条件下で実施工を行う場合において、鉄筋コンクリートげたに既に発生している大きなひび割れに対しては、例えば、施工時に交通制限を行う場合は計画終局曲げ耐力の低減は行わないが、これを行わない場合は計画終局曲げ耐力の低減を行う、等の設計・施工上の対応検討が必要である。

## 付 属 資 料

### ●資料－１ 検討対象橋梁モデル

土木学会ライブラリー第３号に示されている『L－２０荷重で設計された一般的なＲＣＴ桁橋』を検討対象モデルとした。以下に、ＲＣＴげた橋の概要を示す。

#### (1) 構造および設計条件

##### ■一般条件

橋梁形式：ＲＣ単純Ｔ桁橋

等 級：１等橋

桁 長：15.1m

支 間：14.5m

幅 員： 7.5m（道路２車線、歩道なし）

##### ■適用示方書

ＲＣ鉄筋コンクリート道路橋示方書、Ｓ３９年

鋼道路橋示方書、Ｓ３９年

##### ■設計活荷重

主桁設計用活荷重（鋼道示８条・９条）：L－２０

##### ■使用材料

コンクリート： $\sigma_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$

鉄筋：ＳＤ３０（ $\sigma_{sa}=1800\text{kgf/cm}^2$ ）

##### ■出 典

土木学会コンクリートライブラリー第３号

#### (2) 構造図

付図－1.1に示す通りである。

### (3)設計応力度

#### ■検討対象部材

支間中央部（曲げ）耳桁とする。

#### ■設計曲げ応力度

○TL-20荷重に設計曲げ応力度

・設計曲げモーメント

$$\text{死荷重 } M_D = 68.8 \text{ tfm}$$

$$\text{活荷重 } M_L = 67.9$$

$$\text{合計 } M_{D+L} = 136.7$$

・断面の条件

$$\text{フランジ幅 } b = 205 \text{ cm}$$

$$\text{有効高さ } d = 105 \text{ cm}$$

$$\text{床版厚さ } t = 17 \text{ cm}$$

$$\text{主鉄筋量 } A_s = 10\text{-D32} = 79.42 \text{ cm}^2$$

・主鉄筋の設計曲げ応力度

$$\text{死荷重 } \sigma_{SD} = 891 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\text{活荷重 } \sigma_{SL} = 871$$

$$\text{合計 } \sigma_{S,D+L} = 1770$$

○B活荷重による設計応力度

・L-20荷重とB活荷重によって発生する曲げモーメントの一般的比率を利用して、L-20荷重による設計曲げモーメントと鉄筋応力度にこの比率を乗じて、B活荷重による設計曲げモーメントと鉄筋応力度を算出する。

・支間14.5mに対する設計活荷重曲げモーメントの比率

$$M_B / M_{L-20} = 1.27$$

・設計曲げモーメント

$$\text{死荷重 } M_D = 68.8 \text{ tfm}$$

$$\text{活荷重 } M_L = 67.9 \times 1.27 = 86.2$$

$$\text{合計 } M_{D+L} = 155.0$$

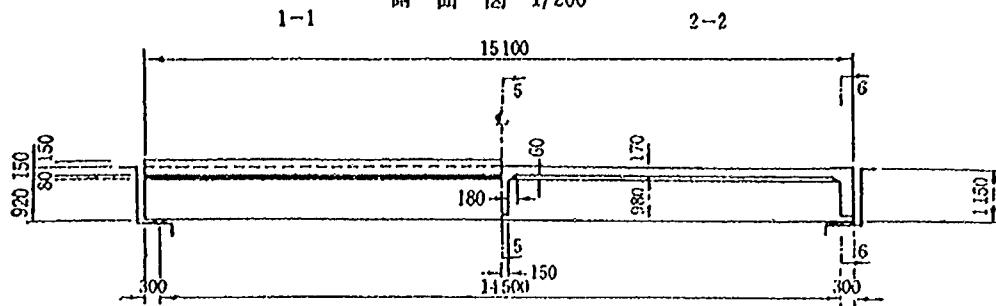
・主鉄筋の設計応力度

$$\text{死荷重 } \sigma_{SD} = 891 \text{ kgf/cm}^2$$

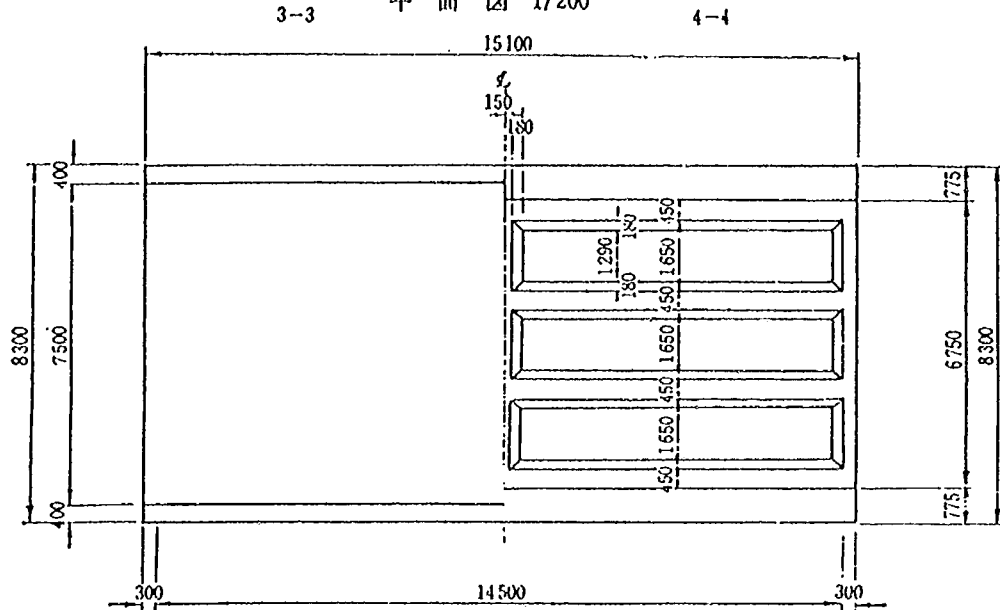
$$\text{活荷重 } \sigma_{SL} = 871 \times 1.27 = 1106$$

$$\text{合計 } \sigma_{S,D+L} = 1997$$

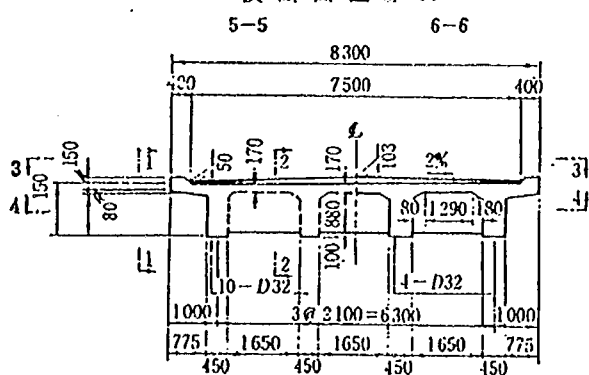
侧面图 1/200



平 面 图 1/200



横断面图 1/200

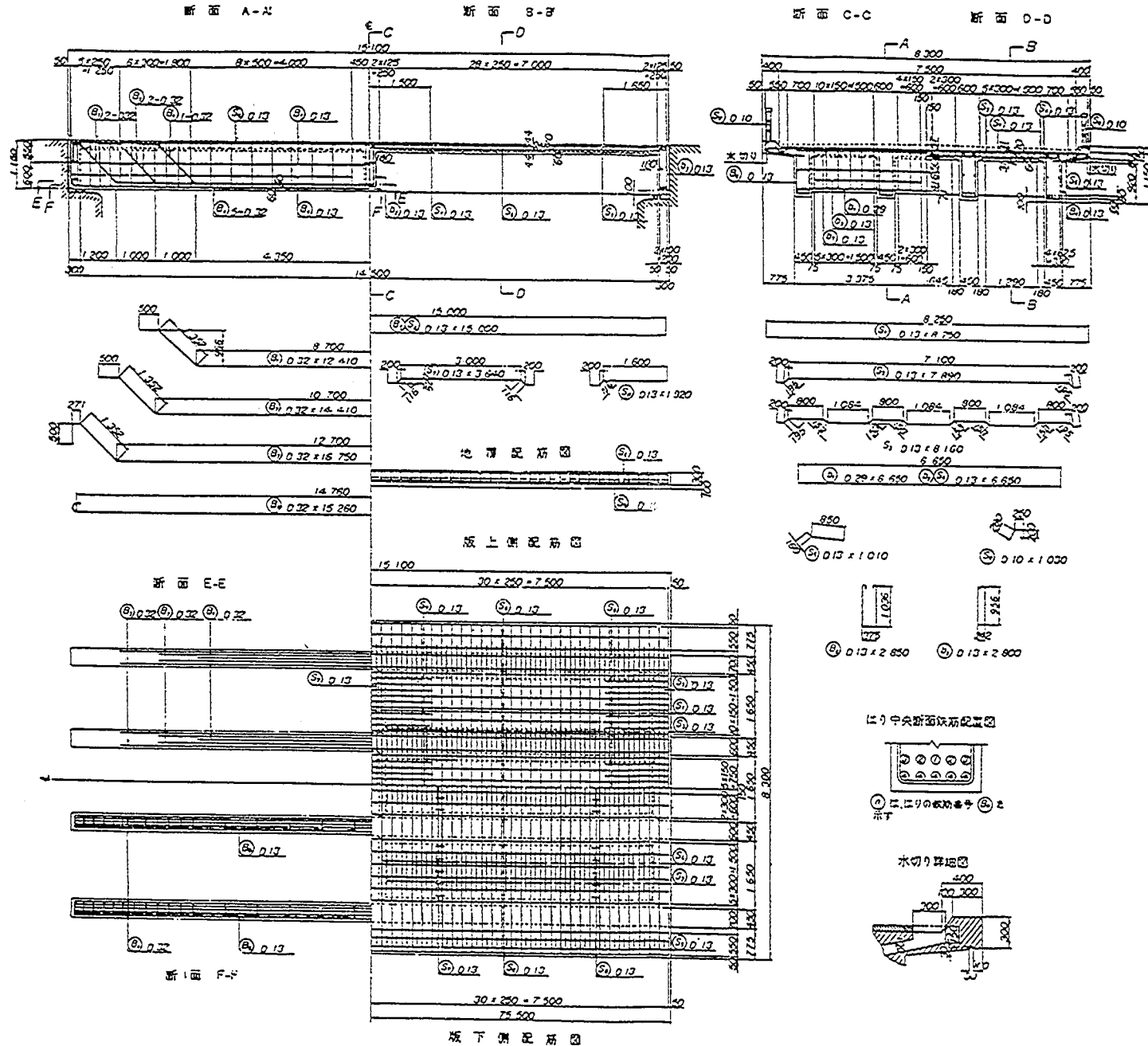


## 設計条件

|        |               |                          |                                  |                                                                 |
|--------|---------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 設計荷重   | 活荷重           | スラブ                      | T-20                             |                                                                 |
|        |               | はり                       | L-20                             |                                                                 |
|        | 衝撃係数          | スラブ                      | $i=20/(50+l)$                    |                                                                 |
|        |               | はり                       | $i=7/(20+l)$                     |                                                                 |
| 許容応力度  | 鉄筋            | 引張応力度                    | $\sigma_{ts}=1800\text{kg/cm}^2$ |                                                                 |
|        | コンクリート        | 曲げ圧縮応力度                  | $\sigma_{cs}=80\text{kg/cm}^2$   |                                                                 |
|        |               | 支圧応力度                    | $\sigma_{cs}=80\text{kg/cm}^2$   |                                                                 |
|        |               | せん断力度                    | 腹鉄筋の計算をしない場合                     | はり $\tau_{os}=7\text{kg/cm}^2$<br>版 $\tau_{os}=9\text{kg/cm}^2$ |
|        |               |                          | 腹鉄筋の計算をする場合                      | $\tau_{os}=20\text{kg/cm}^2$                                    |
|        |               | 付着応力度                    | $\tau_{cs}=16\text{kg/cm}^2$     |                                                                 |
|        | 鉄筋            | 種類                       | SD-30                            |                                                                 |
| コンクリート | $\sigma_{ck}$ | 240kg/cm <sup>2</sup> 以上 |                                  |                                                                 |
|        | 粗骨材の最大寸法      | 25mm                     |                                  |                                                                 |

付図-1.1 検討対象概要モデル図

鉄筋コンクリートT形けた橋 (道路橋)



| 材料表    |    |       |         |         |         |
|--------|----|-------|---------|---------|---------|
| 材料名    | 単位 | 数量    | 重量 (kg) | 重量 (kg) | 重量 (kg) |
| コンクリート | m³ | 55.2  |         |         |         |
| 鉄筋     | kg |       |         |         |         |
| φ10    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ13    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ17    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ20    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ25    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ30    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ35    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ40    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ45    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ50    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ55    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ60    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ65    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ70    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ75    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ80    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ85    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ90    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ95    |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ100   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ105   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ110   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ115   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ120   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ125   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ130   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ135   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ140   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ145   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ150   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ155   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ160   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ165   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ170   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ175   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ180   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ185   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ190   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ195   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ200   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ205   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ210   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ215   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ220   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ225   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ230   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ235   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ240   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ245   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ250   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ255   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ260   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ265   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ270   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ275   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ280   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ285   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ290   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ295   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ300   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ305   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ310   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ315   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ320   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ325   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ330   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ335   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ340   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ345   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ350   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ355   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ360   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ365   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ370   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ375   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ380   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ385   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ390   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ395   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ400   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ405   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ410   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ415   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ420   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ425   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ430   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ435   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ440   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ445   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ450   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ455   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ460   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ465   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ470   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ475   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ480   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ485   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ490   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ495   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ500   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ505   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ510   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ515   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ520   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ525   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ530   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ535   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ540   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ545   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ550   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ555   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ560   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ565   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ570   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ575   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ580   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ585   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ590   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ595   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ600   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ605   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ610   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ615   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ620   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ625   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ630   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ635   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ640   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ645   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ650   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ655   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ660   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ665   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ670   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ675   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ680   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ685   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ690   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ695   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ700   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ705   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ710   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ715   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ720   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ725   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ730   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ735   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ740   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ745   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ750   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ755   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ760   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ765   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ770   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ775   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ780   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ785   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ790   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ795   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ800   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ805   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ810   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ815   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ820   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ825   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ830   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ835   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ840   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ845   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ850   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ855   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ860   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ865   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ870   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ875   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ880   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ885   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ890   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ895   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ900   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ905   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ910   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ915   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ920   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ925   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ930   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ935   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ940   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ945   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ950   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ955   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ960   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ965   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ970   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ975   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ980   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ985   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ990   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ995   |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |
| φ1000  |    | 1,030 | 127     | 577     | 70.4    |

| 設計条件 |      |     |              |
|------|------|-----|--------------|
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20         |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20         |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
| 橋脚間隔 | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |
|      | 橋脚間隔 | スパン | 7.20 (150=1) |

## ●資料－２ 試験体の計算応力度および計算曲げ耐力

３．に示した材料試験の結果を用いて、単鉄筋コンクリート矩形ばりの曲げ応力度の計算方法による各試験体の曲げ応力度、および、複鉄筋コンクリート矩形ばりの曲げ終局耐力を計算した。

### (1) 試験体の計算応力度

|                     | NO1(NO2補強前) |         |         |         |         | NO2補強後：高強度8層 |         |         |         |         |
|---------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|---------|
|                     | 死荷重         | L-20    | B活荷重    | 死+L20   | 死+B活    | L-20         | B活荷重    | 死+L20   | 死+B活    | 主筋降伏    |
| フランジ幅 b             | 75          | 75      | 75      |         |         | 75           | 75      |         |         | 75      |
| フランジ厚 t             | 17.75       | 17.75   | 17.75   |         |         | 17.75        | 17.75   |         |         | 17.75   |
| はり高 h               | 60          | 60      | 60      |         |         | 60           | 60      |         |         | 60      |
| ウェブ幅 b0             | 24          | 24      | 24      |         |         | 24           | 24      |         |         | 24      |
| 主鉄筋量 As             | 19.9        | 19.9    | 19.9    |         |         | 19.9         | 19.9    |         |         | 19.9    |
| 有効高 d               | 54          | 54      | 54      |         |         | 54           | 54      |         |         | 54      |
| ヤング係数 $E_s$         | 8.3         | 8.3     | 8.3     |         |         | 8.0          | 8.0     |         |         | 8.0     |
| CFRP Aof            | 0           | 0       | 0       |         |         | 3.21         | 3.21    |         |         | 3.21    |
| ヤング係数比 $n_{of}$     | 0           | 0       | 0       |         |         | 9.05         | 9.05    |         |         | 9.05    |
| 中立軸 X1              | 1412.77     | 1412.77 | 1412.77 |         |         | 1531.16      | 1531.16 |         |         | 1531.16 |
| X2                  | 1989.23     | 1989.23 | 1989.23 |         |         | 2075.94      | 2075.94 |         |         | 2075.94 |
| X3                  | 44.60       | 44.60   | 44.60   |         |         | 45.56        | 45.56   |         |         | 45.56   |
| X                   | 13.73       | 13.73   | 13.73   |         |         | 14.50        | 14.50   |         |         | 14.50   |
| 断面2次 I              | 333663      | 333663  | 333663  |         |         | 385333       | 385333  |         |         | 385333  |
| 曲げモーメント M           | 870000      | 870000  | 1060000 | 1740000 | 1930000 | 870000       | 1060000 | 1740000 | 1930000 | 2530000 |
| 圧縮応力度 $\sigma_o$    | 35.8        | 35.8    | 43.6    | 71.6    | 79.4    | 32.7         | 39.9    | 68.5    | 75.7    | 95.2    |
| 引張応力度 $\sigma_s$    | 871.6       | 872     | 1082    | 1743    | 1934    | 714          | 869     | 1585    | 1741    | 2075    |
| $\sigma_{of}$       | 0           | 0       | 0       | 0       | 0       | 930          | 1133    | 930     | 1133    | 2704    |
| 許容応力度 $\sigma_{ca}$ | 80          | 80      | 80      | 80      | 80      |              |         |         |         |         |
| $\sigma_{sa}$       | 1800        | 1800    | 1800    | 1800    | 1800    |              |         |         |         |         |
| $\sigma_{ofa}$      |             |         |         |         |         |              |         |         |         |         |

CFRP特性 繊維量 300g/m<sup>2</sup> 層数 8層  
 厚さ 0.0167mm 幅 24cm  
 弾性係数 2.35E+08 引張強度 35000kg/cm<sup>2</sup>

|                     | NO3補強前  |         |         |         |         | NO3補強後：高弾性3層 |         |         |         |         |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|---------|---------|
|                     | 死荷重     | L-20    | B活荷重    | 死+L20   | 死+B活    | L-20         | B活荷重    | 死+L20   | 死+B活    | 主筋降伏    |
| フランジ幅 b             | 75      | 75      | 75      |         |         | 75           | 75      |         |         | 75      |
| フランジ厚 t             | 17.75   | 17.75   | 17.75   |         |         | 17.75        | 17.75   |         |         | 17.75   |
| はり高 h               | 60      | 60      | 60      |         |         | 60           | 60      |         |         | 60      |
| ウェブ幅 b0             | 24      | 24      | 24      |         |         | 24           | 24      |         |         | 24      |
| 主鉄筋量 As             | 19.9    | 19.9    | 19.9    |         |         | 19.9         | 19.9    |         |         | 19.9    |
| 有効高 d               | 54      | 54      | 54      |         |         | 54           | 54      |         |         | 54      |
| ヤング係数 $E_s$         | 8.1     | 8.1     | 8.1     |         |         | 8.1          | 8.1     |         |         | 8.1     |
| CFRP Aof            | 0       | 0       | 0       |         |         | 1.03         | 1.03    |         |         | 1.03    |
| ヤング係数比 $n_{of}$     | 0       | 0       | 0       |         |         | 25.6         | 25.6    |         |         | 25.6    |
| 中立軸 X1              | 1394.86 | 1394.86 | 1394.86 |         |         | 1526.70      | 1526.70 |         |         | 1526.70 |
| X2                  | 1974.47 | 1974.47 | 1974.47 |         |         | 2073.31      | 2073.31 |         |         | 2073.31 |
| X3                  | 44.44   | 44.44   | 44.44   |         |         | 45.53        | 45.53   |         |         | 45.53   |
| X                   | 13.61   | 13.61   | 13.61   |         |         | 14.47        | 14.47   |         |         | 14.47   |
| 断面2次 I              | 327189  | 327189  | 327189  |         |         | 382883       | 382883  |         |         | 382883  |
| 曲げモーメント M           | 870000  | 870000  | 1060000 | 1740000 | 1930000 | 870000       | 1060000 | 1740000 | 1930000 | 2530000 |
| 圧縮応力度 $\sigma_o$    | 36.2    | 36.2    | 44.1    | 72.4    | 80.3    | 32.9         | 40.1    | 69.1    | 76.2    | 95.6    |
| 引張応力度 $\sigma_s$    | 870     | 870     | 1060    | 1740    | 1930    | 728          | 887     | 1598    | 1756    | 2116    |
| $\sigma_{of}$       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 2649         | 3227    | 2649    | 3227    | 7702    |
| 許容応力度 $\sigma_{ca}$ | 80      | 80      | 80      | 80      | 80      |              |         |         |         |         |
| $\sigma_{sa}$       | 1800    | 1800    | 1800    | 1800    | 1800    |              |         |         |         |         |
| $\sigma_{ofa}$      |         |         |         |         |         |              |         |         |         |         |

CFRP特性 繊維量 300g/m<sup>2</sup> 層数 3層  
 厚さ 0.0143cm 幅 24cm  
 弾性係数 8.50E+06 引張強度 20000kg/cm<sup>2</sup>

|                    | NO4補強前  |         |         |         |         | NO4補強後:標準6層 |         |         |         |         |         |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                    | 死荷重     | L-20    | B活荷重    | 死+L20   | 死+B活    | L-20        | B荷重     | 死+L20   | 死+B活    | 主筋降伏    | 死+主筋降伏  |
| フランジ幅 b            | 75      | 75      | 75      |         |         | 75          | 75      |         |         | 75      |         |
| フランジ厚 t            | 17.75   | 17.75   | 17.75   |         |         | 17.75       | 17.75   |         |         | 17.75   |         |
| はり高 h              | 60      | 60      | 60      |         |         | 60          | 60      |         |         | 60      |         |
| ウェブ幅 b0            | 24      | 24      | 24      |         |         | 24          | 24      |         |         | 24      |         |
| 主鉄筋量 As            | 19.9    | 19.9    | 19.9    |         |         | 19.9        | 19.9    |         |         | 19.9    |         |
| 有効高 d              | 54      | 54      | 54      |         |         | 54          | 54      |         |         | 54      |         |
| ヤング係数 Es           | 8.2     | 8.2     | 8.2     |         |         | 8.2         | 8.2     |         |         | 8.2     |         |
| CFRP Aef           | 0       | 0       | 0       |         |         | 2.06        | 2.06    |         |         | 2.06    |         |
| ヤング係数比 ncf         | 0       | 0       | 0       |         |         | 25.6        | 25.6    |         |         | 25.6    |         |
| 中立軸 X1             | 1403.82 | 1403.82 | 1403.82 |         |         | 1667.50     | 1667.50 |         |         | 1667.50 |         |
| X2                 | 1981.84 | 1981.84 | 1981.84 |         |         | 2182.31     | 2182.31 |         |         | 2182.31 |         |
| X3                 | 44.52   | 44.52   | 44.52   |         |         | 46.72       | 46.72   |         |         | 46.72   |         |
| X                  | 13.67   | 13.67   | 13.67   |         |         | 15.33       | 15.33   |         |         | 15.33   |         |
| 断面2次 I             | 330431  | 330431  | 330431  |         |         | 439552      | 439552  |         |         | 439552  |         |
| 曲げモーメント M          | 870000  | 1610000 | 1960000 | 2480000 | 2830000 | 870000      | 1610000 | 2480000 | 2830000 | 2530000 | 3400000 |
| 圧縮応力 $\sigma_c$    | 36.0    | 66.6    | 81.1    | 102.6   | 117.1   | 30.3        | 56.2    | 66.3    | 82.1    | 88.2    | 124.2   |
| 引張応力 $\sigma_s$    | 870.8   | 1611    | 1962    | 2482    | 2832    | 628         | 1161    | 1498    | 2032    | 1825    | 2696    |
| $\sigma_{cf}$      | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 2263        | 4188    | 2263    | 4188    | 6582    | 6582    |
| 許容応力 $\sigma_{oa}$ | 80      | 80      | 80      | 80      | 80      |             |         |         |         |         |         |
| $\sigma_{sa}$      | 1800    | 1800    | 1800    | 1800    | 1800    |             |         |         |         |         |         |
| $\sigma_{cfa}$     |         |         |         |         |         |             |         |         |         |         |         |

CFRP特性 繊維量 300g/m2 層数 6層  
 厚さ 0.143mm 幅 24cm  
 弾性係数 6.50E+06 引張強度 20000kg/cm2

(2)

RCT桁の破壊抵抗曲げモーメントの算出  
(中立軸がフランジ内のため床版Mu算出ソフトを使用)  
土研炭補研共同研究、桁補強SWG

設計引張強度(kgf/cm<sup>2</sup>)

30タイプ 35.000

HMタイプ 20.000

No. 1 補強無し  
No. 2 30タイプ8層  
No. 3 HMタイプ3層  
No. 4 HMタイプ6層

|                                                   | No. 1    | No. 2    | No. 3    | No. 4    |
|---------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 床版厚さh(cm)                                         | 60       | 60       | 60       | 60       |
| 圧縮縁から炭素繊維シートまでの距離(cm)                             | 60       | 60       | 60       | 60       |
| 床版幅b(cm)                                          | 75       | 75       | 75       | 75       |
| 上端から下端筋までの距離d11(cm)                               | 54.5     | 54.5     | 54.5     | 54.5     |
| 上端から上端筋までの距離d12(cm)                               | 4        | 4        | 4        | 4        |
| コンクリート設計基準強度 $\sigma_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 262      | 397      | 351      | 390      |
| コンクリート終局ひずみ $\epsilon_{cu}$                       | 0.0035   | 0.0035   | 0.0035   | 0.0035   |
| 下端筋断面積 $A_s$ (cm <sup>2</sup> )                   | 19.99    | 19.99    | 19.99    | 19.99    |
| 上端筋断面積 $A_s$ (cm <sup>2</sup> )                   | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 鉄筋降伏点応力度 $\sigma_{sy}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 3520     | 3520     | 3520     | 3520     |
| 鉄筋ヤング係数 $E_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )              | 2066667  | 2066667  | 2066667  | 2066667  |
| 炭素繊維断面積 $A_f$ (cm <sup>2</sup> )                  | 0        | 3.2064   | 1.0296   | 2.0592   |
| 炭素繊維設計引張強度 $\sigma_f$ (kgf/cm <sup>2</sup> )      | 35000    | 35000    | 20000    | 20000    |
| 炭素繊維ヤング係数 $E_f$ (kgf/cm <sup>2</sup> )            | 2350000  | 2350000  | 6500000  | 6500000  |
| 炭素繊維破断ひずみ $\epsilon_{fu}$                         | 0.014894 | 0.014894 | 0.003077 | 0.003077 |
| 最初の中立軸位置 $x_0$ (cm)                               | 36.65995 | 11.417   | 31.92982 | 31.92982 |
| 圧縮縁から力の釣り合った中立軸までの距離 x(cm)                        | 5.209007 | 9.477005 | 12.05943 | 12.64409 |
| 終局時のコンクリート圧縮応力の合力 $C_c$ (kgf)                     | 70431.35 | 182615.3 | 90958.4  | 111450.3 |
| 終局時の上端筋の応力度 $\sigma'_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )    | 1678.852 | 3336.758 | 1069.027 | 1160.732 |
| 終局時の上端筋の合計圧縮力 $C_s$ (kgf)                         | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 終局時の下端筋の応力度 $\sigma_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 3520     | 3520     | 3520     | 3520     |
| 終局時の下端筋の合計引張力 $T_s$ (kgf)                         | 70364.8  | 70364.8  | 70364.8  | 70364.8  |
| $T_s/(C_c+C_s)$                                   | 0.999055 | 0.385317 | 0.773593 | 0.631356 |
| 終局時のCFの応力度 $\sigma_f$ (kgf/cm <sup>2</sup> )      | *****    | 35000    | 20000    | 20000    |
| 終局時のCFの合計引張力 $T_f$ (kgf)                          | *****    | 112224   | 20592    | 41184    |
| $T_s+T_f$ (kgf)                                   | *****    | 182588.8 | 90956.8  | 111548.8 |
| $(T_s+T_f)/(C_c+C_s)$                             | *****    | 0.999855 | 0.999982 | 1.000884 |
| コンクリート圧縮縁ひずみ                                      | 0.0035   | 0.002794 | 0.000774 | 0.000822 |
| 中立軸から圧縮コンクリートの重心までの距離 $l_x$ (cm)                  | 3.042235 | 5.692053 | 7.890783 | 8.262229 |
| 圧縮縁から圧縮コンクリートの重心までの距離 $kx/2$ (cm)                 | 2.166772 | 3.784952 | 4.16865  | 4.381857 |
| 長方形応力度分布を仮定したときのkの値                               | 0.809524 | 0.761369 | 0.337077 | 0.354527 |
| 破壊抵抗曲げモーメント $M_u$ (kg·cm)                         | 3682620  | 11560742 | 5000127  | 6434077  |
| 破壊抵抗曲げモーメント $M_u$ (t·m)(計算値)                      | 36.8     | 115.6    | 50.0     | 64.3     |
| 本試験における荷重(tf)に換算(計算値)                             | 43.3     | 136.0    | 58.8     | 75.7     |
| 破壊抵抗曲げモーメント $M_u$ (t·m)(実験値)                      | 42.0     | 56.9     | 44.4     | 62.9     |
| 最大荷重(tf)(実験値)                                     | 49.4     | 66.9     | 52.2     | 74.0     |
| 実験値／計算値                                           | 1.14     | 0.49     | 0.89     | 0.98     |

(3)

RCT桁の破壊抵抗曲げモーメントの算出  
(中立軸がフランジ内のため床版Mu算出ソフトを使用)  
土研炭補研共同研究、桁補強SWG

No. 1 補強無し  
No. 2 30タイプ8層  
No. 3 HMタイプ3層  
No. 4 HMタイプ6層

[炭素繊維の引張応力度は、終局時に  
炭素繊維に加わっていた応力度を使用]

|                                                   | No. 1    | No. 2    | No. 3    | No. 4    |
|---------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 床版厚さh(cm)                                         | 60       | 60       | 60       | 60       |
| 圧縮縁から炭素繊維シートまでの距離(cm)                             | 60       | 60       | 60       | 60       |
| 床版幅b(cm)                                          | 75       | 75       | 75       | 75       |
| 上端から下端筋までの距離d11(cm)                               | 54.5     | 54.5     | 54.5     | 54.5     |
| 上端から上端筋までの距離d12(cm)                               | 4        | 4        | 4        | 4        |
| コンクリート設計基準強度 $\sigma_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 262      | 397      | 351      | 390      |
| コンクリート終局ひずみ $\epsilon_{cu}$                       | 0.0035   | 0.0035   | 0.0035   | 0.0035   |
| 下端筋断面積As(cm <sup>2</sup> )                        | 19.99    | 19.99    | 19.99    | 19.99    |
| 上端筋断面積As(cm <sup>2</sup> )                        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 鉄筋降伏点応力度 $\sigma_{sy}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 3520     | 3520     | 3520     | 3520     |
| 鉄筋ヤング係数Es(kgf/cm <sup>2</sup> )                   | 2066667  | 2066667  | 2066667  | 2066667  |
| 炭素繊維断面積Af(cm <sup>2</sup> )                       | 0        | 3.2064   | 1.0296   | 2.0592   |
| 終局時の炭素繊維引張応力度 $\sigma_f$ (kgf/cm <sup>2</sup> )   |          | 5405     | 11700    | 20800    |
| 炭素繊維ヤング係数Ef(kgf/cm <sup>2</sup> )                 | 2350000  | 2350000  | 6500000  | 6500000  |
| 炭素繊維破断ひずみ $\epsilon_{fu}$                         |          | 0.0023   | 0.0018   | 0.0032   |
| 最初の中立軸位置xo(cm)                                    | 36.65995 | 36.2069  | 39.62264 | 31.34328 |
| 圧縮縁から力の釣り合った中立軸までの距離 x(cm)                        | 5.209007 | 12.60523 | 13.96853 | 12.53425 |
| 終局時のコンクリート圧縮応力の合力Cc(kgf)                          | 70431.35 | 87627.27 | 77593.01 | 113124.6 |
| 終局時の上端筋の応力度 $\sigma'_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )    | 1678.852 | 863.0393 | 805.5996 | 1189.065 |
| 終局時の上端筋の合計圧縮力Cs(kgf)                              | 0        | 0        | 0        | 0        |
| 終局時の下端筋の応力度 $\sigma_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )     | 3520     | 3520     | 3275.522 | 3520     |
| 終局時の下端筋の合計引張力Ts(kgf)                              | 70364.8  | 70364.8  | 65477.69 | 70364.8  |
| Ts/(Cc+Cs)                                        | 0.999055 | 0.803001 | 0.843861 | 0.622012 |
| 終局時のCFの応力度 $\sigma_f$ (kgf/cm <sup>2</sup> )      | *****    | 5405     | 11700    | 20800    |
| 終局時のCFの合計引張力Tf(kgf)                               | *****    | 17330.59 | 12046.32 | 42831.36 |
| Ts+Tf(kgf)                                        | *****    | 87695.39 | 77524.01 | 113196.2 |
| (Ts+Tf)/(Cc+Cs)                                   | *****    | 1.000777 | 0.999111 | 1.000633 |
| コンクリート圧縮縁ひずみ                                      | 0.0035   | 0.000612 | 0.000546 | 0.000845 |
| 中立軸から圧縮コンクリートの重心までの距離 lx(cm)                      | 3.042235 | 8.284236 | 9.195768 | 8.184947 |
| 圧縮縁から圧縮コンクリートの重心までの距離 kx/2(cm)                    | 2.166772 | 4.320997 | 4.772761 | 4.349306 |
| 長方形応力度分布を仮定したときのkの値                               | 0.809524 | 0.274674 | 0.248247 | 0.363006 |
| 破壊抵抗曲げモーメントMu(kg·cm)                              | 3682620  | 4755180  | 4102639  | 6554323  |
| 破壊抵抗曲げモーメントMu(t·m)(計算値)                           | 36.8     | 47.6     | 41.0     | 65.5     |
| 本試験における荷重(tf)に換算(計算値)                             | 43.3     | 55.9     | 48.3     | 77.1     |
| 破壊抵抗曲げモーメントMu(t·m)(実験値)                           | 42.0     | 56.9     | 44.4     | 62.9     |
| 最大荷重(tf)(実験値)                                     | 49.4     | 66.9     | 52.2     | 74.0     |
| 実験値／計算値                                           | 1.14     | 1.20     | 1.08     | 0.96     |

\*資料-3 各試験体の載荷過程の記録(実験進行記録表)

No. 1

| 実験進行表(兼データファイル目録) |       |      |                 | 供試体名: RC1            |       |      |                    |
|-------------------|-------|------|-----------------|----------------------|-------|------|--------------------|
|                   |       |      |                 | DATEFILE: *KETA1*RC1 |       |      |                    |
| FILE              | 荷重    | 変位   | 備考              | FILE                 | 荷重    | 変位   | 備考                 |
| No. (ton)         | (mm)  |      |                 | No. (ton)            | (mm)  |      |                    |
| 1-1               | 0.00  | 0.00 | ステップ1(曲げひび割れ導入) | 31                   | 19.04 | 3.21 |                    |
| 2                 | 1.00  | 0.05 | 載荷析荷重負荷         | 32                   | 20.04 | 3.47 |                    |
| 3                 | 1.97  | 0.11 |                 | 33                   | 20.55 | 3.66 | L-20相当             |
| 4                 | 3.03  | 0.16 |                 | 34                   | 21.05 | 3.81 |                    |
| 5                 | 4.03  | 0.24 |                 | 35                   | 22.10 | 4.07 |                    |
| 6                 | 4.98  | 0.32 |                 | 36                   | 22.81 | 4.29 | 8活荷重相当             |
| 7                 | 6.06  | 0.39 |                 | 37 除                 | 20.03 | 4.31 |                    |
| 8                 | 7.00  | 0.50 | 曲げひび割れ発生        | 38                   | 10.03 | 2.73 |                    |
| 9 除               | 1.00  | 0.27 |                 | 39                   | 7.00  | 2.19 |                    |
| 10                | 0.00  | 0.20 |                 | 40                   | 0.03  | 0.95 |                    |
| 11                | 0.00  | 0.10 | π型変位計取り付け後      | 3-41                 | 0.03  | 0.78 | ステップ3(疲労試験)        |
| 2-12              | 1.06  | 0.22 | ステップ2(静的載荷試験)   | 42                   | 10.28 | 2.14 |                    |
| 13                | 2.01  | 0.15 |                 | 43                   | 22.86 | 4.41 | 3-1(繰り返し1回)        |
| 14                | 3.03  | 0.19 |                 | 44 除                 | 10.33 | 2.77 |                    |
| 15                | 4.01  | 0.32 |                 | 45                   | 0.04  | 0.95 |                    |
| 16                | 5.03  | 0.37 |                 | 56                   | 0.24  | 1.03 |                    |
| 17                | 6.00  | 0.43 |                 | 57                   | 10.27 | 2.39 |                    |
| 18                | 6.97  | 0.52 |                 | 58                   | 22.80 | 4.66 | 3-10(繰り返し10回)※注1   |
| 19                | 8.00  | 0.61 |                 | 59 除                 | 10.29 | 2.82 |                    |
| 20                | 9.03  | 0.76 |                 | 60                   | 0.40  | 1.02 |                    |
| 21                | 9.97  | 0.91 |                 | 61                   | 0.00  | 1.07 |                    |
| 22                | 10.33 | 1.08 | 死荷重相当           | 62                   | 10.31 | 2.50 |                    |
| 23                | 11.00 | 1.17 |                 | 63                   | 22.90 | 4.86 | 3-100(繰り返し100回)※注2 |
| 24                | 12.50 | 1.41 |                 | 64 除                 | 10.24 | 2.88 |                    |
| 25                | 13.04 | 1.70 |                 | 65                   | 0.00  | 1.08 |                    |
| 26                | 14.01 | 1.93 |                 | 66                   | 0.26  | 1.05 |                    |
| 27                | 15.04 | 2.19 |                 | 67                   | 10.31 | 2.52 |                    |
| 28                | 16.01 | 2.46 |                 | 68                   | 22.73 | 4.78 | 3-1K(繰り返し1000回)    |
| 29                | 17.00 | 2.70 |                 | 69 除                 | 10.33 | 2.87 |                    |
| 30                | 18.03 | 2.96 |                 | 70                   | 0.00  | 1.05 |                    |

No. 2

| 実験進行表(兼データファイル目録) |       |      |                  | 供試体名: RC1            |       |      |                   |
|-------------------|-------|------|------------------|----------------------|-------|------|-------------------|
|                   |       |      |                  | DATEFILE: *KETA1*RC1 |       |      |                   |
| FILE              | 荷重    | 変位   | 備考               | FILE                 | 荷重    | 変位   | 備考                |
| No. (ton)         | (mm)  |      |                  | No. (ton)            | (mm)  |      |                   |
| 3-71              | 0.00  | 1.05 |                  | 101 除                | 10.36 | 3.68 |                   |
| 72                | 0.00  | 0.87 |                  | 102                  | 0.00  | 1.83 |                   |
| 73                | 0.00  | 1.19 |                  | 103                  | 0.00  | 1.89 |                   |
| 74                | 10.37 | 2.52 |                  | 104                  | 10.35 | 3.36 |                   |
| 75                | 22.78 | 4.87 | 3-10K(繰り返し1万回)   | 105                  | 22.76 | 5.71 | 3-1M(繰り返し100万回)   |
| 76 除              | 10.21 | 2.93 |                  | 106 除                | 10.27 | 3.78 |                   |
| 77                | 0.00  | 1.10 |                  | 107                  | 0.00  | 1.89 |                   |
| 78                | 0.00  | 1.09 |                  | 108                  | 0.00  | 1.97 |                   |
| 79                | 10.39 | 2.71 |                  | 109                  | 10.30 | 3.42 |                   |
| 80                | 22.85 | 5.06 | 3-100K(繰り返し10万回) | 110                  | 22.80 | 5.76 | 3-1.2M(繰り返し120万回) |
| 81 除              | 10.32 | 3.11 |                  | 111 除                | 10.30 | 3.72 |                   |
| 82                | 0.00  | 1.26 |                  | 112                  | 0.00  | 1.88 |                   |
| 83                | 0.00  | 1.15 |                  | 113                  | 0.00  | 0.93 |                   |
| 84                | 10.28 | 2.78 |                  | 114                  | 10.26 | 3.51 |                   |
| 85                | 22.81 | 5.07 | 3-200K(繰り返し20万回) | 115                  | 22.79 | 5.84 | 3-1.4M(繰り返し140万回) |
| 86 除              | 10.29 | 3.19 |                  | 116 除                | 10.26 | 3.88 |                   |
| 87                | 0.00  | 1.34 |                  | 117                  | 0.00  | 2.06 |                   |
| 88                | 0.00  | 1.75 |                  | 118                  | 0.00  | 1.90 |                   |
| 89                | 10.28 | 3.29 |                  | 119                  | 10.30 | 3.47 |                   |
| 90                | 22.76 | 5.55 | 3-400K(繰り返し40万回) | 120                  | 22.89 | 5.83 | 3-1.6M(繰り返し160万回) |
| 91 除              | 10.31 | 3.68 |                  | 121 除                | 10.24 | 3.86 |                   |
| 92                | 0.00  | 1.78 |                  | 122                  | 0.00  | 1.94 |                   |
| 93                | 0.00  | 1.91 |                  | 123                  | 0.00  | 2.13 |                   |
| 94                | 10.29 | 3.39 |                  | 124                  | 10.29 | 3.60 |                   |
| 95                | 22.85 | 5.67 | 3-600K(繰り返し60万回) | 125                  | 22.78 | 5.91 | 3-1.8M(繰り返し180万回) |
| 96 除              | 10.3  | 3.75 |                  | 126 除                | 10.33 | 3.91 |                   |
| 97                | 0.00  | 1.86 |                  | 127                  | 0.00  | 2.07 |                   |
| 98                | 0.00  | 1.62 |                  | 128                  | 0.00  | 2.20 |                   |
| 99                | 10.32 | 3.18 |                  | 129                  | 10.29 | 3.68 |                   |
| 100               | 22.79 | 5.66 | 3-800K(繰り返し80万回) | 130                  | 22.80 | 5.99 | 3-2.0M(繰り返し200万回) |

試験機のレンジ

\*荷重: 50ton/100% (const: -0.01ton/1\*10<sup>-6</sup>)

\*変位: ±150mm/100%, 油圧130kg/cm<sup>2</sup>

※注1: 変位の値はD5、D6平均値で支承の変位を補正したものである。

※注2: 繰り返し回数100回までは、手動により載荷を行った。

No. 3

| 実験進行表(兼データファイル目録) |         |      |            | 供試体名: RC1            |       |       |                   |
|-------------------|---------|------|------------|----------------------|-------|-------|-------------------|
|                   |         |      |            | DATEFILE: ¥KETA1¥RC1 |       |       |                   |
| FILE              | 荷重      | 変位   | 備考         | FILE                 | 荷重    | 変位    | 備考                |
| No.               | (ton)   | (mm) |            | No.                  | (ton) | (mm)  |                   |
| 3-131             | 除 10.26 | 4.07 |            | 161                  | 16.52 | 5.29  |                   |
| 132               | 0.00    | 2.23 | 200万回終了後残留 | 162                  | 18.75 | 5.63  |                   |
| 133               | 0.00    | 2.23 | 支承交換       | 163                  | 19.21 | 5.72  |                   |
| 134               | 10.27   | 4.01 |            | 164                  | 20.64 | 6.04  |                   |
| 135               | 22.78   | 6.44 |            | 165                  | 21.51 | 6.17  |                   |
| 136               | 除 10.30 | 4.12 |            | 166                  | 22.98 | 6.36  |                   |
| 137               | 0.00    | 2.29 |            | 167                  | 21.99 | 6.27  |                   |
| 4-138             | 0.00    | 2.15 |            | 168                  | 22.80 | 6.49  |                   |
| 139               | 0.98    | 2.21 |            | 169                  | 23.97 | 6.56  |                   |
| 140               | 2.06    | 2.26 |            | 170                  | 24.88 | 6.71  |                   |
| 141               | 3.21    | 2.47 |            | 171                  | 25.39 | 6.88  |                   |
| 142               | 4.09    | 2.62 |            | 172                  | 26.14 | 6.95  |                   |
| 143               | 5.23    | 2.83 |            | 173                  | 27.30 | 7.28  |                   |
| 144               | 6.03    | 3.00 |            | 174                  | 28.09 | 7.51  |                   |
| 145               | 7.30    | 3.26 |            | 175                  | 29.08 | 7.72  |                   |
| 146               | 8.48    | 3.51 |            | 176                  | 30.67 | 8.09  |                   |
| 147               | 9.27    | 3.68 |            | 177                  | 30.72 | 8.13  |                   |
| 148               | 10.15   | 3.86 |            | 178                  | 31.99 | 8.40  |                   |
| 149               | 10.45   | 3.92 |            | 179                  | 33.04 | 8.70  |                   |
| 150               | 11.03   | 4.06 |            | 180                  | 33.94 | 8.92  |                   |
| 151               | 11.56   | 4.20 |            | 3-181                | 34.99 | 9.23  |                   |
| 152               | 11.81   | 4.23 |            | 182                  | 35.91 | 9.52  |                   |
| 153               | 13.27   | 4.58 |            | 183                  | 37.17 | 9.84  |                   |
| 154               | 13.59   | 4.69 |            | 184                  | 38.07 | 10.07 |                   |
| 155               | 13.49   | 4.66 |            | 185                  | 39.00 | 10.37 |                   |
| 156               | 13.51   | 4.68 |            | 4-186                | 39.87 | 10.66 |                   |
| 157               | 15.06   | 4.90 |            | 187                  | 41.07 | 10.99 | 鉄筋露伏 1y=8.8mm ※注3 |
| 158               | 16.60   | 5.21 |            | 188                  | 42.15 | 11.50 |                   |
| 159               | 15.99   | 5.17 |            | 189                  | 42.52 | 12.64 |                   |
| 160               | 16.63   | 5.28 |            | 190                  | 43.17 | 13.39 |                   |

※注3: 支承交換時に0測定したため、変位置から2.23mmを減らした数を8.8mmで除した割合である。

No. 4

| 実験進行表(兼データファイル目録) |       |       |        | 供試体名: RC1            |       |       |             |
|-------------------|-------|-------|--------|----------------------|-------|-------|-------------|
|                   |       |       |        | DATEFILE: ¥KETA1¥RC1 |       |       |             |
| FILE              | 荷重    | 変位    | 備考     | FILE                 | 荷重    | 変位    | 備考          |
| No.               | (ton) | (mm)  |        | No.                  | (ton) | (mm)  |             |
| 191               | 43.45 | 14.39 |        | 221                  | 47.98 | 58.96 | (6.4y)      |
| 192               | 43.95 | 15.03 |        | 222                  | 48.36 | 60.97 |             |
| 193               | 44.89 | 16.31 |        | 223                  | 48.48 | 63.07 | (7.0y)      |
| 194               | 44.88 | 17.51 |        | 224                  | 48.93 | 64.16 |             |
| 195               | 45.16 | 18.20 |        | 225                  | 48.45 | 65.94 |             |
| 196               | 45.25 | 19.47 |        | 226                  | 49.39 | 68.12 | 圧壊発生 (7.5y) |
| 197               | 44.97 | 20.56 |        |                      |       |       |             |
| 198               | 45.76 | 21.62 |        |                      |       |       |             |
| 199               | 45.66 | 22.80 |        |                      |       |       |             |
| 200               | 46.35 | 24.16 |        |                      |       |       |             |
| 201               | 46.24 | 26.13 |        |                      |       |       |             |
| 202               | 46.24 | 27.42 |        |                      |       |       |             |
| 203               | 46.23 | 28.54 |        |                      |       |       |             |
| 204               | 46.44 | 29.72 |        |                      |       |       |             |
| 205               | 46.75 | 31.84 |        |                      |       |       |             |
| 206               | 46.8  | 34.16 |        |                      |       |       |             |
| 207               | 46.8  | 34.86 |        |                      |       |       |             |
| 208               | 46.35 | 36.81 |        |                      |       |       |             |
| 209               | 46.53 | 38.83 |        |                      |       |       |             |
| 210               | 46.89 | 40.85 |        |                      |       |       |             |
| 211               | 45.24 | 40.92 | 変位計故障① |                      |       |       |             |
| 212               | 44.34 | 40.94 |        |                      |       |       |             |
| 213               | 46.81 | 43.12 |        |                      |       |       |             |
| 214               | 46.63 | 44.91 | (5.1y) |                      |       |       |             |
| 215               | 47.49 | 47.14 |        |                      |       |       |             |
| 216               | 46.83 | 48.91 | (5.6y) |                      |       |       |             |
| 217               | 47.88 | 51.11 |        |                      |       |       |             |
| 218               | 47.44 | 53.03 |        |                      |       |       |             |
| 219               | 47.43 | 55.02 | (6.0)y |                      |       |       |             |
| 220               | 47.53 | 57.02 |        |                      |       |       |             |

No. 5

| 実験進行表(兼データファイル目録) |       |      |          | 供試体名: RC2             |       |      |            |
|-------------------|-------|------|----------|-----------------------|-------|------|------------|
|                   |       |      |          | DATEFILE : *KETA1*RC2 |       |      |            |
| FILE              | 荷重    | 変位   | 備考       | FILE                  | 荷重    | 変位   | 備考         |
| No.               | (ton) | (mm) |          | No.                   | (ton) | (mm) |            |
| 1-1               | 0.00  | 0.00 |          | 31                    | 17.01 | 2.75 |            |
| 2                 | 1.04  | 0.06 |          | 32                    | 17.97 | 3.00 |            |
| 3                 | 2.01  | 0.13 |          | 33                    | 19.06 | 3.25 |            |
| 4                 | 3.01  | 0.20 |          | 34                    | 20.10 | 3.55 |            |
| 5                 | 4.07  | 0.28 |          | 35                    | 21.02 | 3.69 |            |
| 6                 | 5.04  | 0.35 |          | 36                    | 21.02 | 3.83 |            |
| 7                 | 6.01  | 0.44 |          | 37                    | 21.98 | 4.05 |            |
| 8                 | 7.05  | 0.54 |          | 38                    | 22.86 | 4.28 |            |
| 9                 | 8.02  | 0.66 |          | 39 除                  | 20.11 | 4.13 |            |
| 10                | 9.08  | 0.76 |          | 40                    | 10.12 | 2.58 |            |
| 11                | 10.07 | 0.89 | ひび割れ発生   | 41                    | 7.10  | 2.08 |            |
| 12 除              | 0.00  | 0.19 |          | 42                    | 0.00  | 0.97 |            |
| 2-13              | 0.00  | 0.16 | PI型取り付け後 | 43                    | 0.00  | 0.83 | プライマー塗布    |
| 14                | 1.02  | 0.24 |          | 44                    | 10.33 | 2.27 | Pホルド       |
| 15                | 2.02  | 0.32 |          | 45                    | 10.32 | 2.58 |            |
| 16                | 3.06  | 0.42 |          | 46                    | 17.44 | 2.98 |            |
| 17                | 4.00  | 0.50 |          | 47                    | 10.32 | 3.82 |            |
| 18                | 5.05  | 0.60 |          | 48                    | 17.52 | 3.82 |            |
| 19                | 5.01  | 0.68 |          | 49                    | 10.30 | 2.99 |            |
| 20                | 7.00  | 0.77 |          | 50                    | 17.51 | 3.84 |            |
| 21                | 7.98  | 0.86 |          | 51                    | 10.35 | 3.12 |            |
| 22                | 9.01  | 0.96 |          | 52                    | 17.57 | 3.94 |            |
| 23                | 10.04 | 1.06 |          | 53 除                  | 0.00  | 1.77 |            |
| 24                | 10.29 | 1.11 | 死荷重相当    | 3-54                  | 0.00  | 1.35 | 炭素ゲージ貼り付け後 |
| 25                | 11.04 | 1.21 |          | 55                    | 1.00  | 1.45 |            |
| 26                | 12.02 | 1.47 |          | 56                    | 2.07  | 1.53 |            |
| 27                | 13.06 | 1.73 |          | 57                    | 3.01  | 1.63 |            |
| 28                | 14.03 | 1.95 |          | 58                    | 3.99  | 1.74 |            |
| 29                | 15.00 | 2.21 |          | 59                    | 5.01  | 1.86 |            |
| 30                | 16.07 | 2.47 |          | 60                    | 5.99  | 2.00 |            |

No. 6

| 実験進行表(兼データファイル目録) |       |      |             | 供試体名: RC2             |       |      |                  |
|-------------------|-------|------|-------------|-----------------------|-------|------|------------------|
|                   |       |      |             | DATEFILE : *KETA1*RC2 |       |      |                  |
| FILE              | 荷重    | 変位   | 備考          | FILE                  | 荷重    | 変位   | 備考               |
| No.               | (ton) | (mm) |             | No.                   | (ton) | (mm) |                  |
| 3-61              | 7.05  | 2.12 |             | 91                    | 22.81 | 4.45 | 4-10(繰り返し10回)    |
| 62                | 8.00  | 2.27 |             | 92 除                  | 10.41 | 2.92 |                  |
| 63                | 9.02  | 2.42 |             | 93                    | 0.00  | 1.48 |                  |
| 64                | 10.00 | 2.55 |             | 94                    | 0.00  | 1.52 |                  |
| 65                | 10.30 | 2.60 | 死荷重相当       | 95                    | 10.36 | 2.80 |                  |
| 66                | 11.00 | 2.69 |             | 96                    | 22.81 | 4.53 | 4-100(繰り返し100回)  |
| 67                | 11.99 | 2.83 |             | 97 除                  | 10.33 | 2.97 |                  |
| 68                | 13.04 | 2.98 |             | 98                    | 0.00  | 1.53 |                  |
| 69                | 14.02 | 3.12 |             | 99                    | 0.00  | 1.55 |                  |
| 70                | 15.06 | 3.27 |             | 100                   | 10.33 | 2.81 |                  |
| 71                | 16.03 | 3.42 |             | 101                   | 22.80 | 4.53 | 4-1K(繰り返し1000回)  |
| 72                | 17.02 | 3.55 |             | 102 除                 | 10.33 | 3.00 |                  |
| 73                | 17.54 | 3.61 | T-20相当      | 103                   | 0.00  | 1.53 |                  |
| 74                | 18.06 | 3.71 |             | 104                   | 0.00  | 1.60 |                  |
| 75                | 19.04 | 3.81 |             | 105                   | 10.35 | 2.86 |                  |
| 76                | 20.03 | 3.95 |             | 106                   | 22.80 | 4.60 | 4-10K(繰り返し1万回)   |
| 77                | 20.53 | 4.02 | L-20相当      | 107 除                 | 10.36 | 3.06 |                  |
| 78                | 21.01 | 4.13 |             | 108                   | 0.00  | 1.60 |                  |
| 79                | 22.02 | 4.25 |             | 109                   | 0.00  | 1.66 |                  |
| 80                | 22.80 | 4.36 | 巨活荷重相当      | 110                   | 10.35 | 2.89 |                  |
| 81 除              | 20.06 | 4.25 |             | 111                   | 22.79 | 4.70 | 4-100K(繰り返し10万回) |
| 82 除              | 10.09 | 2.86 |             | 112 除                 | 10.33 | 3.12 |                  |
| 83 除              | 7.09  | 2.43 |             | 113                   | 0.00  | 1.66 |                  |
| 84 除              | 0     | 1.44 |             | 114                   | 0.00  | 1.54 |                  |
| 4-85              | 10.29 | 2.69 |             | 115                   | 10.26 | 2.85 |                  |
| 86                | 22.83 | 4.41 | 4-1(繰り返し1回) | 116                   | 22.8  | 4.66 | 4-200K(繰り返し20万回) |
| 87 除              | 10.35 | 2.90 |             | 117 除                 | 10.34 | 3.09 |                  |
| 88                | 0.00  | 1.47 |             | 118                   | 0.00  | 1.56 |                  |
| 89                | 0.00  | 1.49 |             | 119                   | 0.00  | 1.78 |                  |
| 90                | 10.34 | 2.76 |             | 120                   | 10.37 | 2.98 |                  |

## 試験機のレンジ

\* 荷重: 50ton / 100% (const: -0.01ton / 1 \* 10<sup>-5</sup>)\* 変位: ±150mm / 100% , 油圧130kg/cm<sup>2</sup>

※注1: 変位の値はD5、D6平均値で支承の変位を補正したものである。

※注2: 繰り返し回数100回までは、手動により載荷を行った。

No. 7

| 実験進行表(兼データファイル目録) |       |      |                   | 供試体名: RC2            |       |      |                   |
|-------------------|-------|------|-------------------|----------------------|-------|------|-------------------|
|                   |       |      |                   | DATEFILE: *KETA1*RC2 |       |      |                   |
| FILE              | 荷重    | 変位   | 備考                | FILE                 | 荷重    | 変位   | 備考                |
| No. (ton)         | (mm)  |      |                   | No. (ton)            | (mm)  |      |                   |
| 4-121             | 22.82 | 4.80 | 4-400K(繰り返し40万回)  | 151                  | 22.82 | 5.02 | 4-1.6M(繰り返し160万回) |
| 122 除             | 10.34 | 3.21 |                   | 152 除                | 10.35 | 3.38 |                   |
| 123               | 0.00  | 1.76 |                   | 153                  | 0.00  | 1.89 |                   |
| 124               | 0.00  | 1.78 |                   | 154                  | 0.00  | 1.94 |                   |
| 125               | 10.34 | 3.03 |                   | 155                  | 10.35 | 3.20 |                   |
| 126               | 22.85 | 4.88 | 4-600K(繰り返し60万回)  | 156                  | 22.81 | 5.08 | 4-1.8M(繰り返し180万回) |
| 127 除             | 10.35 | 3.26 |                   | 157 除                | 10.40 | 3.42 |                   |
| 128               | 0.00  | 1.79 |                   | 158                  | 0.00  | 1.94 |                   |
| 129               | 0.00  | 1.81 |                   | 159                  | 0.00  | 1.97 |                   |
| 130               | 10.30 | 3.03 |                   | 160                  | 10.35 | 3.22 |                   |
| 131               | 22.84 | 4.94 | 4-800K(繰り返し80万回)  | 161                  | 27.83 | 5.11 | 4-2.0M(繰り返し200万回) |
| 132 除             | 10.30 | 3.29 |                   | 162 除                | 10.34 | 3.47 |                   |
| 133               | 0.00  | 1.81 |                   | 163                  | 0.00  | 1.97 | 変位計盛り替え値          |
| 134               | 0.00  | 1.87 |                   | 5-164                | 0.00  | 1.81 | D3.4.5.6.7.8 盛り替え |
| 135               | 10.36 | 3.07 |                   | 165                  | 1.04  | 2.07 |                   |
| 136               | 22.84 | 4.94 | 4-1.0M(繰り返し100万回) | 166                  | 4.09  | 2.30 |                   |
| 137 除             | 10.33 | 3.34 |                   | 167                  | 6.06  | 2.62 |                   |
| 138               | 0.00  | 1.87 |                   | 168                  | 8.13  | 2.94 |                   |
| 139               | 0.00  | 1.77 |                   | 169                  | 9.91  | 3.20 |                   |
| 140               | 10.33 | 3.02 |                   | 170                  | 10.20 | 3.25 |                   |
| 141               | 22.84 | 4.90 | 4-1.2M(繰り返し120万回) | 171                  | 12.65 | 3.62 |                   |
| 142 除             | 10.39 | 3.28 |                   | 172                  | 13.86 | 3.85 |                   |
| 143               | 0.00  | 1.79 |                   | 173                  | 16.25 | 4.26 |                   |
| 144               | 0.00  | 1.88 |                   | 174                  | 17.62 | 4.46 |                   |
| 145               | 10.34 | 3.10 |                   | 175                  | 17.78 | 4.45 |                   |
| 146               | 22.82 | 4.96 | 4-1.4M(繰り返し140万回) | 176                  | 20.05 | 4.83 |                   |
| 147 除             | 10.34 | 3.35 |                   | 177                  | 20.44 | 4.86 |                   |
| 148               | 0.00  | 1.85 |                   | 178                  | 22.00 | 5.11 |                   |
| 149               | 0.00  | 1.88 |                   | 179                  | 22.76 | 5.21 |                   |
| 150               | 10.37 | 3.15 |                   | 180                  | 24.05 | 5.39 |                   |

No. 8

| 実験進行表(兼データファイル目録) |       |       |        | 供試体名: RC2            |       |       |            |
|-------------------|-------|-------|--------|----------------------|-------|-------|------------|
|                   |       |       |        | DATEFILE: *KETA1*RC2 |       |       |            |
| FILE              | 荷重    | 変位    | 備考     | FILE                 | 荷重    | 変位    | 備考         |
| No. (ton)         | (mm)  |       |        | No. (ton)            | (mm)  |       |            |
| 5-181             | 26.02 | 5.71  |        | 211                  | 61.79 | 18.41 |            |
| 182               | 27.35 | 5.92  |        | 212                  | 62.66 | 19.28 |            |
| 183               | 29.80 | 6.33  |        | 213                  | 63.88 | 20.21 |            |
| 184               | 32.02 | 6.67  |        | 214                  | 64.87 | 21.00 |            |
| 185               | 34.30 | 7.15  |        | 215                  | 65.90 | 21.63 |            |
| 186               | 36.19 | 7.65  |        | 216                  | 66.70 | 22.97 |            |
| 187               | 38.23 | 8.11  |        | 217                  | 66.91 | 23.16 | 炭素繊維シート貼付  |
| 188               | 40.24 | 8.64  |        | 218                  | 46.13 |       |            |
| 189               | 40.13 | 8.81  |        | 219                  | 40.15 | 24.66 | D6 復原 盛り替え |
| 190               | 41.29 | 9.02  |        | 220                  | 45.49 | 29.85 | (2.7v)     |
| 191               | 42.31 | 9.25  |        | 221                  | 46.40 | 34.94 | (3.2v)     |
| 192               | 43.00 | 9.40  |        | 222                  | 46.73 | 39.77 | (3.6v)     |
| 193               | 44.14 | 9.64  |        | 223                  | 46.85 | 44.82 | (4.0v)     |
| 194               | 45.17 | 9.88  |        | 224                  | 47.29 | 50.02 | (4.5v)     |
| 195               | 46.24 | 10.17 |        | 225                  | 47.33 | 54.76 | (4.9v)     |
| 196               | 46.91 | 10.37 |        | 226                  | 48.31 | 59.93 | 圧壊 (5.4v)  |
| 197               | 48.34 | 10.69 |        |                      |       |       |            |
| 198               | 49.70 | 11.09 | 鉄筋露伏   |                      |       |       |            |
| 199               | 51.11 | 11.60 |        |                      |       |       |            |
| 200               | 52.36 | 12.05 |        |                      |       |       |            |
| 201               | 53.29 | 12.71 |        |                      |       |       |            |
| 202               | 54.01 | 13.71 |        |                      |       |       |            |
| 203               | 55.15 | 13.60 |        |                      |       |       |            |
| 204               | 56.14 | 14.34 |        |                      |       |       |            |
| 205               | 57.31 | 15.15 | (2.0v) |                      |       |       |            |
| 206               | 57.67 | 15.55 | (2.5v) |                      |       |       |            |
| 207               | 58.22 | 15.81 | (3.1v) |                      |       |       |            |
| 208               | 58.93 | 16.42 |        |                      |       |       |            |
| 209               | 59.87 | 17.03 | (3.7v) |                      |       |       |            |
| 210               | 60.94 | 17.66 | (4.1v) |                      |       |       |            |

NO. 9

| 実験進行表(兼データファイル目録) |          |         |                       | 供試体名: RC3            |          |         |                         |
|-------------------|----------|---------|-----------------------|----------------------|----------|---------|-------------------------|
|                   |          |         |                       | DATEFILE: *KETA1*RC3 |          |         |                         |
| FILE No.          | 荷重 (ton) | 変位 (mm) | 備考                    | FILE No.             | 荷重 (ton) | 変位 (mm) | 備考                      |
| 1-1               | 0.00     | 0.00    | ステップ1(曲げひび割れ導入)       | 31                   | 17.98    | 3.14    |                         |
| 2                 | 0.98     | 0.05    |                       | 32                   | 18.99    | 3.40    |                         |
| 3                 | 1.99     | 0.11    |                       | 33                   | 20.01    | 3.65    |                         |
| 4                 | 2.99     | 0.22    |                       | 34                   | 20.50    | 3.83    | L-20相当                  |
| 5                 | 4.06     | 0.30    |                       | 35                   | 21.04    | 3.97    |                         |
| 6                 | 5.00     | 0.38    |                       | 36                   | 21.99    | 4.20    |                         |
| 7                 | 6.02     | 0.41    |                       | 37                   | 22.88    | 4.43    | B活荷重相当                  |
| 8                 | 6.98     | 0.58    |                       | 38 除                 | 20.05    | 4.18    |                         |
| 9                 | 8.01     | 0.72    |                       | 39                   | 10.08    | 2.61    |                         |
| 10                | 8.99     | 0.83    | 曲げひび割れ発生              | 40                   | 7.06     | 2.09    |                         |
| 11 除              | 0.00     | 0.16    |                       | 41                   | 0.00     | 0.95    |                         |
| 2-12              | 0.00     | 0.20    | ステップ2(静的載荷試験)α型変位計取付後 | 42                   | 0.00     | 0.83    | プライマー塗布のため載荷            |
| 13                | 1.01     | 0.22    |                       | 43                   | 10.29    | 2.33    | 荷重保持 14:35 ~ 約23時間      |
| 14                | 2.04     | 0.23    |                       | 44                   | 10.30    | 2.44    | 炭素繊維貼り付け後               |
| 15                | 3.02     | 0.42    |                       | 45                   | 17.50    | 3.60    | 疲労開始 1Hz 10. 3 ~ 17. 5t |
| 16                | 4.01     | 0.51    |                       | 46                   | 10.32    | 2.80    |                         |
| 17                | 5.01     | 0.59    |                       | 47                   | 17.53    | 3.74    | 2-330K                  |
| 18                | 6.01     | 0.67    |                       | 48                   | 10.31    | 2.92    |                         |
| 19                | 7.04     | 0.77    |                       | 49                   | 17.52    | 3.86    | 2-500K                  |
| 20                | 8.02     | 0.85    |                       | 50                   | 10.33    | 2.90    |                         |
| 21                | 9.00     | 0.95    |                       | 51                   | 17.51    | 3.80    | 2-600K                  |
| 22                | 10.04    | 1.11    |                       | 52 除                 | 0.00     | 1.55    |                         |
| 23                | 10.32    | 1.16    | 死荷重相当                 | 3-53                 | 0.00     | 1.37    | 炭素繊維ゲージ貼り付け             |
| 24                | 22.08    | 1.29    |                       | 54                   | 1.05     | 1.46    |                         |
| 25                | 12.01    | 1.51    |                       | 55                   | 1.96     | 1.56    |                         |
| 26                | 12.98    | 1.84    |                       | 56                   | 3.01     | 1.68    |                         |
| 27                | 14.00    | 2.07    |                       | 57                   | 4.03     | 1.76    |                         |
| 28                | 15.00    | 2.34    |                       | 58                   | 5.06     | 1.88    |                         |
| 29                | 16.02    | 2.61    |                       | 59                   | 6.06     | 2.02    |                         |
| 30                | 17.03    | 2.89    |                       | 60                   | 7.07     | 2.14    |                         |

NO. 10

| 実験進行表(兼データファイル目録) |          |         |               | 供試体名: RC3            |          |         |                   |
|-------------------|----------|---------|---------------|----------------------|----------|---------|-------------------|
|                   |          |         |               | DATEFILE: *KETA1*RC3 |          |         |                   |
| FILE No.          | 荷重 (ton) | 変位 (mm) | 備考            | FILE No.             | 荷重 (ton) | 変位 (mm) | 備考                |
| 3-61              | 8.02     | 2.24    |               | 91 除                 | 10.3     | 2.79    |                   |
| 62                | 9.05     | 2.39    |               | 92                   | 0.00     | 1.43    |                   |
| 63                | 9.99     | 2.52    |               | 93                   | 0.00     | 1.45    |                   |
| 64                | 10.27    | 2.57    | 死荷重相当         | 94                   | 10.39    | 2.73    |                   |
| 65                | 10.95    | 2.68    |               | 95                   | 22.80    | 4.56    | 4-100(繰り返し 100回)  |
| 66                | 12.05    | 2.83    |               | 96 除                 | 10.32    | 2.83    |                   |
| 67                | 13.06    | 2.98    |               | 97                   | 0.00     | 1.45    |                   |
| 68                | 14.00    | 3.12    |               | 98                   | 0.00     | 1.45    |                   |
| 69                | 15.02    | 3.27    |               | 99                   | 10.35    | 2.79    |                   |
| 70                | 16.00    | 3.41    |               | 100                  | 22.84    | 4.61    | 4-1K(繰り返し 1500回)  |
| 71                | 17.07    | 3.56    |               | 101 除                | 10.35    | 2.90    |                   |
| 72                | 17.54    | 3.63    | L-20相当        | 102                  | 0.00     | 1.48    |                   |
| 73                | 17.95    | 3.69    |               | 103                  | 0.00     | 1.40    |                   |
| 74                | 19.08    | 3.84    |               | 104                  | 10.31    | 2.69    |                   |
| 75                | 20.03    | 3.97    |               | 105                  | 22.83    | 4.54    | 4-10K(繰り返し 1万回)   |
| 76                | 20.52    | 4.02    | L-20相当        | 106 除                | 10.37    | 2.79    |                   |
| 77                | 20.98    | 4.09    |               | 107                  | 0.00     | 1.38    |                   |
| 78                | 22.05    | 4.25    |               | 108                  | 0.00     | 1.46    |                   |
| 79                | 22.85    | 4.38    | B活荷重相当        | 109                  | 10.31    | 2.80    |                   |
| 80 除              | 20.06    | 4.16    |               | 110                  | 22.79    | 4.65    | 4-100K(繰り返し 10万回) |
| 81                | 10.13    | 2.73    |               | 111 除                | 10.31    | 2.89    |                   |
| 82                | 7.07     | 2.28    |               | 112                  | 0.00     | 1.43    |                   |
| 83                | 0.00     | 1.43    |               | 113                  | 0.00     | 1.47    |                   |
| 4-84              | 10.38    | 2.66    |               | 114                  | 10.34    | 2.78    |                   |
| 85                | 22.80    | 4.43    | 4-1(繰り返し1回)   | 115                  | 22.84    | 4.65    | 4-200K(繰り返し 20万回) |
| 86 除              | 10.32    | 2.75    |               | 116 除                | 10.37    | 2.90    |                   |
| 87                | 0.00     | 1.38    |               | 117                  | 0.00     | 1.48    |                   |
| 88                | 0.00     | 1.44    |               | 118                  | 0.00     | 1.62    |                   |
| 89                | 10.35    | 2.69    |               | 119                  | 10.33    | 2.91    |                   |
| 90                | 22.86    | 4.53    | 4-10(繰り返し10回) | 120                  | 22.83    | 4.78    | 4-400K(繰り返し 40万回) |

## 試験機のレンジ

\*荷重: 50ton/100% (const:  $-0.01\text{ton}/1 \times 10^{-6}$ )\*変位:  $\pm 150\text{mm}/100\%$  , 油圧  $130\text{kg}/\text{cm}^2$ 

※注1: 変位の値はD5、D6平均値で支承の変位を補正したものである。

※注2: 繰り返し回数100回までは、手動により載荷を行った。

No. 11

| 実験進行表(兼データファイル目録) |         |      |                    | 供試体名:RC3             |         |      |                    |
|-------------------|---------|------|--------------------|----------------------|---------|------|--------------------|
|                   |         |      |                    | DATEFILE: ¥KETA1¥RC3 |         |      |                    |
| FILE              | 荷重      | 変位   | 備考                 | FILE                 | 荷重      | 変位   | 備考                 |
| No.               | (ton)   | (mm) |                    | No.                  | (ton)   | (mm) |                    |
| 4-121             | 除 10.34 | 3.01 |                    | 151                  | 除 10.34 | 3.13 |                    |
| 122               | 0.00    | 1.63 |                    | 152                  | 0.00    | 1.70 |                    |
| 123               | 0.00    | 1.65 |                    | 153                  | 0.00    | 1.84 |                    |
| 124               | 10.39   | 2.97 |                    | 154                  | 10.36   | 2.96 |                    |
| 125               | 22.82   | 4.81 | 4-600K(繰り返し 60万回)  | 155                  | 22.78   | 4.86 | 4-1.8M(繰り返し 180万回) |
| 126               | 除 10.37 | 3.03 |                    | 156                  | 除 10.34 | 3.06 |                    |
| 127               | 0.00    | 1.64 |                    | 157                  | 0.00    | 1.69 |                    |
| 128               | 0.00    | 1.59 |                    | 158                  | 0.00    | 1.76 |                    |
| 129               | 10.34   | 2.94 |                    | 159                  | 10.34   | 3.08 |                    |
| 130               | 22.82   | 4.82 | 4-800K(繰り返し 80万回)  | 160                  | 22.84   | 4.98 | 4-2.0M(繰り返し 200万回) |
| 131               | 除 10.37 | 3.03 |                    | 161                  | 除 10.35 | 3.18 |                    |
| 132               | 0.00    | 1.61 |                    | 162                  | 0.00    | 1.79 |                    |
| 133               | 0.00    | 1.74 |                    | 5-163                | 0.00    | 1.36 | 変位計交換              |
| 134               | 10.37   | 3.06 |                    | 164                  | 1.82    | 1.73 |                    |
| 135               | 22.81   | 4.93 | 4-1M(繰り返し 100万回)   | 165                  | 4.25    | 1.99 |                    |
| 136               | 除 10.35 | 3.14 |                    | 166                  | 6.15    | 2.27 |                    |
| 137               | 0.00    | 1.72 |                    | 167                  | 7.89    | 2.55 |                    |
| 138               | 0.00    | 1.72 |                    | 168                  | 10.21   | 2.83 |                    |
| 139               | 10.3    | 3.04 |                    | 169                  | 10.79   | 2.97 |                    |
| 140               | 22.87   | 4.93 | 4-1.2M(繰り返し 120万回) | 170                  | 10.31   | 2.87 |                    |
| 141               | 除 10.3  | 3.11 |                    | 171                  | 12.50   | 3.25 |                    |
| 142               | 0.00    | 1.72 |                    | 172                  | 14.02   | 3.49 |                    |
| 143               | 0.00    | 1.69 |                    | 173                  | 15.90   | 3.77 |                    |
| 144               | 10.35   | 3.01 |                    | 174                  | 17.69   | 4.03 |                    |
| 145               | 22.78   | 4.90 | 4-1.4M(繰り返し 140万回) | 175                  | 18.46   | 4.14 |                    |
| 146               | 除 10.34 | 3.10 |                    | 176                  | 20.29   | 4.51 |                    |
| 147               | 0.00    | 1.72 |                    | 177                  | 20.68   | 4.51 |                    |
| 148               | 0.00    | 1.69 |                    | 178                  | 22.33   | 4.80 |                    |
| 149               | 10.38   | 3.02 |                    | 179                  | 22.90   | 4.80 |                    |
| 150               | 22.85   | 4.94 | 4-1.6M(繰り返し 160万回) | 180                  | 24.23   | 5.02 |                    |

No. 12

| 実験進行表(兼データファイル目録) |       |       |          | 供試体名:RC3             |       |       |           |
|-------------------|-------|-------|----------|----------------------|-------|-------|-----------|
|                   |       |       |          | DATEFILE: ¥KETA1¥RC3 |       |       |           |
| FILE              | 荷重    | 変位    | 備考       | FILE                 | 荷重    | 変位    | 備考        |
| No.               | (ton) | (mm)  |          | No.                  | (ton) | (mm)  |           |
| 5-181             | 26.87 | 5.42  |          | 211                  | 47.36 | 43.23 | (4.6v)    |
| 182               | 28.06 | 5.61  |          | 212                  | 47.71 | 47.32 | (5.0v)    |
| 183               | 30.47 | 6.00  |          | 213                  | 0.46  | 52.10 | (5.5v)    |
| 184               | 32.02 | 6.30  |          | 214                  | 48.14 | 56.88 | 圧壊 (6.0v) |
| 185               | 34.07 | 6.71  |          |                      |       |       |           |
| 186               | 34.64 | 6.96  |          |                      |       |       |           |
| 187               | 0.09  | 7.23  |          |                      |       |       |           |
| 188               | 38.08 | 7.46  |          |                      |       |       |           |
| 189               | 39.11 | 7.68  |          |                      |       |       |           |
| 190               | 40.39 | 7.89  |          |                      |       |       |           |
| 191               | 41.20 | 8.19  |          |                      |       |       |           |
| 192               | 42.46 | 8.37  |          |                      |       |       |           |
| 193               | 42.46 | 8.68  |          |                      |       |       |           |
| 194               | 43.09 | 8.87  |          |                      |       |       |           |
| 195               | 43.97 | 9.07  |          |                      |       |       |           |
| 196               | 45.64 | 9.40  |          |                      |       |       |           |
| 197               | 46.03 | 9.51  |          |                      |       |       |           |
| 198               | 47.29 | 9.85  | 鉄筋降伏 1σY |                      |       |       |           |
| 199               | 47.33 | 9.95  |          |                      |       |       |           |
| 200               | 48.19 | 10.18 |          |                      |       |       |           |
| 201               | 49.19 | 10.45 |          |                      |       |       |           |
| 202               | 49.88 | 10.84 |          |                      |       |       |           |
| 203               | 51.29 | 11.44 |          |                      |       |       |           |
| 204               | 52.15 | 12.07 | 炭素繊維破断   |                      |       |       |           |
| 205               | 45.79 | 19.93 | (2.0v)   |                      |       |       |           |
| 206               | 45.58 | 21.80 | (2.5v)   |                      |       |       |           |
| 207               | 45.67 | 25.08 | (3.1v)   |                      |       |       |           |
| 208               | 44.56 | 30.66 |          |                      |       |       |           |
| 209               | 46.24 | 33.94 | (3.7v)   |                      |       |       |           |
| 210               | 47.24 | 38.63 | (4.1v)   |                      |       |       |           |

※注3: ( )内数字は、ひび割れ図に対応するものである。

No. 13

| 実験進行表(兼データファイル目録) |       |       |          | 供試体名: RC4            |       |      |           |
|-------------------|-------|-------|----------|----------------------|-------|------|-----------|
|                   |       |       |          | DATEFILE: *KETA1*RC4 |       |      |           |
| FILE              | 荷重    | 変位    | 備考       | FILE                 | 荷重    | 変位   | 備考        |
| No. (ton)         | (mm)  |       |          | No. (ton)            | (mm)  |      |           |
| 1-1               | 0.00  | 0.00  |          | 31                   | 19.02 | 3.46 |           |
| 2                 | 1.00  | 0.09  |          | 32                   | 20.04 | 3.79 |           |
| 3                 | 2.10  | 0.16  |          | 33                   | 20.53 | 3.99 |           |
| 4                 | 3.09  | 0.23  |          | 34                   | 21.01 | 4.05 |           |
| 5                 | 3.98  | 0.30  |          | 35                   | 22.05 | 4.28 |           |
| 6                 | 4.99  | 0.40  |          | 36                   | 22.95 | 4.58 |           |
| 7                 | 6.02  | 0.53  |          | 37                   | 24.01 | 4.89 |           |
| 8                 | 7.09  | 0.57  |          | 38                   | 25.04 | 5.14 |           |
| 9                 | 8.04  | 0.68  | ひび割れ発生   | 39                   | 26.00 | 5.37 |           |
| 10 除              | 0.00  | 0.09  |          | 40                   | 27.04 | 5.75 |           |
| 2-11              | 0.00  | 0.08  | *型変位計取付後 | 41                   | 28.01 | 5.98 | L-20相当    |
| 12                | 0.97  | 0.15  |          | 42                   | 29.13 | 6.30 |           |
| 13                | 2.01  | 0.21  |          | 43                   | 30.07 | 6.59 |           |
| 14                | 3.08  | 0.29  |          | 44                   | 31.09 | 6.82 |           |
| 15                | 4.09  | 0.37  |          | 45                   | 32.11 | 7.15 |           |
| 16                | 5.05  | 0.49  |          | 46                   | 32.99 | 7.36 |           |
| 17                | 6.08  | 0.55  |          | 47                   | 33.31 | 7.48 | B活荷重相当    |
| 18                | 6.97  | 0.62  |          | 48 除                 | 22.83 | 5.90 |           |
| 19                | 8.05  | 0.71  |          | 49 除                 | 10.32 | 3.50 |           |
| 20                | 9.04  | 0.82  |          | 50 除                 | 0.00  | 1.62 |           |
| 21                | 10.13 | 1.03  |          | 51                   | 0.00  | 1.31 |           |
| 22                | 10.36 | 1.221 | 死荷重相当    | 52                   | 10.26 | 3.01 | プライマー塗布   |
| 23                | 11.01 | 1.34  |          | 53                   | 10.27 | 3.36 | Pホルド貼り付け後 |
| 24                | 12.05 | 1.56  |          | 54                   | 17.59 | 4.53 |           |
| 25                | 13.08 | 1.83  |          | 55                   | 10.24 | 3.57 | 2-330K    |
| 26                | 13.87 | 2.14  |          | 56                   | 17.52 | 4.58 | 2-330K    |
| 27                | 15.03 | 2.46  |          | 57                   | 10.35 | 3.67 |           |
| 28                | 16.02 | 2.73  |          | 58                   | 17.46 | 4.66 |           |
| 29                | 17.07 | 2.97  |          | 59                   | 10.42 | 3.68 |           |
| 30                | 18.01 | 3.25  |          | 60                   | 17.48 | 4.68 | 2-600K    |

タッチ 34.1%

試験機のレンジ

\*荷重: 50ton/100% (const: -0.01ton/1 \* 10<sup>-6</sup>)\*変位: ±150mm/100% , 油圧130kg/cm<sup>2</sup>

※注1: 変位の値はD5、D6平均値で支承の変位を補正したものである。

※注2: 繰り返し回数100回までは、手動により載荷を行った。

No. 14

| 実験進行表(兼データファイル目録) |       |       |              | 供試体名: RC4            |       |      |                 |
|-------------------|-------|-------|--------------|----------------------|-------|------|-----------------|
|                   |       |       |              | DATEFILE: *KETA1*RC4 |       |      |                 |
| FILE              | 荷重    | 変位    | 備考           | FILE                 | 荷重    | 変位   | 備考              |
| No. (ton)         | (mm)  |       |              | No. (ton)            | (mm)  |      |                 |
| 61 除              | 0.00  | 2.29  |              | 91                   | 25.00 | 5.64 |                 |
| 3-62              | 0.00  | 2.04  | 炭素繊維ゲージ貼り付け後 | 92                   | 26.06 | 5.81 |                 |
| 63                | 0.98  | 2.10  |              | 93                   | 26.96 | 5.95 |                 |
| 64                | 2.01  | 2.19  |              | 94                   | 28.13 | 6.13 |                 |
| 65                | 2.97  | 2.33  |              | 95                   | 29.15 | 6.31 | L-20相当          |
| 66                | 3.92  | 2.44  |              | 96                   | 30.04 | 6.45 |                 |
| 67                | 5.01  | 2.65  |              | 97                   | 30.99 | 6.62 |                 |
| 68                | 5.92  | 2.79  |              | 98                   | 32.01 | 6.78 |                 |
| 69                | 7.02  | 2.94  |              | 99                   | 33.01 | 6.96 |                 |
| 70                | 8.12  | 3.13  |              | 100                  | 33.33 | 7.03 |                 |
| 71                | 8.93  | 10.06 |              | 101                  | 22.89 | 5.66 |                 |
| 72                | 10.06 | 3.14  |              | 102                  | 10.41 | 3.75 |                 |
| 73                | 10.43 | 3.48  | 死荷重相当        | 103 除                | 0.00  | 2.21 |                 |
| 74                | 10.92 | 3.57  |              | 4-104                | 10.34 | 3.64 |                 |
| 75                | 11.91 | 3.72  |              | 105                  | 33.36 | 7.07 | 4-1(繰り返し1回)     |
| 76                | 12.91 | 3.87  |              | 106 除                | 10.29 | 3.74 |                 |
| 77                | 13.90 | 4.02  |              | 107                  | 0.00  | 2.21 |                 |
| 78                | 15.01 | 4.18  |              | 108                  | 0.00  | 2.23 |                 |
| 79                | 16.05 | 4.31  |              | 109                  | 10.27 | 3.64 |                 |
| 80                | 16.95 | 4.44  |              | 110                  | 33.30 | 7.14 | 4-10(繰り返し10回)   |
| 81                | 17.54 | 4.53  | T-20相当       | 111 除                | 10.29 | 3.77 |                 |
| 82                | 17.94 | 4.59  |              | 112                  | 0.00  | 2.25 |                 |
| 83                | 19.09 | 4.75  |              | 113                  | 0.00  | 2.32 |                 |
| 84                | 19.98 | 4.88  |              | 114                  | 10.39 | 3.74 |                 |
| 85                | 20.45 | 4.96  |              | 115                  | 33.28 | 7.25 | 4-100(繰り返し100回) |
| 86                | 21.02 | 5.05  |              | 116 除                | 10.35 | 3.83 |                 |
| 87                | 21.99 | 5.19  |              | 117                  | 0.00  | 2.33 |                 |
| 88                | 22.83 | 5.30  |              | 118                  | 0.00  | 2.41 |                 |
| 89                | 22.99 | 5.34  |              | 119                  | 10.36 | 3.78 |                 |
| 90                | 24.07 | 5.50  |              | 120                  | 33.36 | 7.34 | 4-1K(繰り返し1000回) |

\*タッチ 34.0

\*25ton過ぎで荷重安定

No. 15

| 実験進行表(※データファイル目録) |         |      |                   | 供試体名: RC4            |         |      |                    |
|-------------------|---------|------|-------------------|----------------------|---------|------|--------------------|
|                   |         |      |                   | DATEFILE: ¥KETA1¥RC4 |         |      |                    |
| FILE              | 荷重      | 変位   | 備考                | FILE                 | 荷重      | 変位   | 備考                 |
| No.               | (ton)   | (mm) |                   | No.                  | (ton)   | (mm) |                    |
| 121               | 除 10.26 | 3.90 |                   | 151                  | 33.3    | 7.89 | 4-800K(繰り返し 80万回)  |
| 122               | 除 0.00  | 2.38 |                   | 152                  | 除 10.28 | 4.42 |                    |
| 123               | 0.00    | 2.43 | 2.3Hzで10K~        | 153                  | 0.00    | 3.01 |                    |
| 124               | 10.36   | 3.79 |                   | 154                  | 0.00    | 3.18 |                    |
| 125               | 33.33   | 7.40 | 4-10K(繰り返し 1万回)   | 155                  | 10.32   | 4.35 |                    |
| 126               | 除 10.35 | 3.91 |                   | 156                  | 33.33   | 8.05 | 4-1M(繰り返し 100万回)   |
| 127               | 0.00    | 2.42 |                   | 157                  | 除 10.30 | 4.56 |                    |
| 128               | 0.00    | 2.42 | 確認用               | 158                  | 0.00    | 3.16 |                    |
| 129               | 0.00    | 2.62 |                   | 159                  | 0.00    | 3.25 |                    |
| 130               | 10.34   | 3.94 |                   | 160                  | 10.35   | 4.44 |                    |
| 131               | 33.3    | 7.58 | 4-100K(繰り返し 10万回) | 161                  | 33.3    | 8.12 | 4-1.2M(繰り返し 120万回) |
| 132               | 除 10.35 | 4.06 |                   | 162                  | 除 10.28 | 4.65 |                    |
| 133               | 0.00    | 2.60 |                   | 163                  | 0.00    | 3.22 |                    |
| 134               | 0.00    | 2.66 |                   | 164                  | 0.00    | 3.29 |                    |
| 135               | 10.32   | 3.95 |                   | 165                  | 10.32   | 4.69 |                    |
| 136               | 33.29   | 7.66 | 4-200K(繰り返し 20万)  | 166                  | 33.30   | 8.21 | 4-1.4M(繰り返し 140万回) |
| 137               | 除 10.31 | 4.11 |                   | 167                  | 除 10.36 | 4.70 |                    |
| 138               | 0.00    | 2.65 |                   | 168                  | 0.00    | 3.21 |                    |
| 139               | 0.00    | 3.09 |                   | 169                  | 0.00    | 3.34 |                    |
| 140               | 10.30   | 3.93 |                   | 170                  | 10.35   | 4.54 | 4-1.6M(繰り返し 160万回) |
| 141               | 33.34   | 7.82 | 4-400K(繰り返し 40万回) | 171                  | 33.33   | 8.23 | (160万回)            |
| 142               | 除 10.3  | 4.36 |                   | 172                  | 除 10.25 | 4.74 |                    |
| 143               | 0.00    | 3.02 | D2 D6 盛り返え        | 173                  | 0.00    | 3.35 |                    |
| 144               | 0.00    | 3.20 |                   | 174                  | 0.00    | 3.14 | 油圧降下 ( 休 )         |
| 145               | 10.31   | 4.37 |                   | 175                  | 0.00    | 3.40 | 中2回のため計測           |
| 146               | 33.32   | 8.05 | 4-600K(繰り返し 60万回) | 176                  | 10.31   | 4.75 |                    |
| 147               | 除 10.3  | 4.56 |                   | 177                  | 33.34   | 8.34 | 4-1.8M(繰り返し 180万回) |
| 148               | 0.00    | 3.17 |                   | 178                  | 除 10.32 | 4.78 |                    |
| 149               | 0.00    | 2.91 |                   | 179                  | 0.00    | 3.37 |                    |
| 150               | 10.35   | 4.10 |                   | 180                  | 0.00    | 3.42 |                    |

No. 16

| 実験進行表(※データファイル目録) |         |      |                    | 供試体名: RC4            |       |       |      |
|-------------------|---------|------|--------------------|----------------------|-------|-------|------|
|                   |         |      |                    | DATEFILE: ¥KETA1¥RC4 |       |       |      |
| FILE              | 荷重      | 変位   | 備考                 | FILE                 | 荷重    | 変位    | 備考   |
| No.               | (ton)   | (mm) |                    | No.                  | (ton) | (mm)  |      |
| 4-181             | 10.32   | 4.65 |                    | 211                  | 41.00 | 9.90  |      |
| 182               | 33.32   | 8.39 | 4-2.0M(繰り返し 200万回) | 212                  | 41.87 | 9.99  |      |
| 183               | 除 10.32 | 4.87 |                    | 213                  | 43.00 | 10.17 |      |
| 184               | 0.00    | 3.48 | D3~8まで             | 214                  | 43.58 | 10.33 |      |
| 5-185             | 0.00    | 3.34 |                    | 215                  | 44.75 | 10.46 |      |
| 186               | 2.03    | 3.54 |                    | 216                  | 45.93 | 10.65 |      |
| 187               | 4.02    | 3.75 |                    | 217                  | 46.79 | 10.78 |      |
| 188               | 6.11    | 4.15 |                    | 218                  | 47.93 | 10.96 |      |
| 189               | 8.14    | 4.38 |                    | 219                  | 48.73 | 11.14 |      |
| 190               | 10.07   | 4.73 |                    | 220                  | 49.84 | 11.34 |      |
| 191               | 10.59   | 4.82 | 死荷重                | 221                  | 50.87 | 11.53 |      |
| 192               | 12.03   | 5.05 |                    | 222                  | 51.94 | 11.72 |      |
| 193               | 14.26   | 5.43 |                    | 223                  | 52.81 | 11.92 |      |
| 194               | 16.15   | 5.74 |                    | 224                  | 54.13 | 12.13 | 鉄筋降伏 |
| 195               | 18.08   | 6.06 |                    | 5-225                | 54.91 | 12.39 |      |
| 196               | 19.84   | 6.39 |                    | 226                  | 55.82 | 12.62 |      |
| 197               | 20.50   | 6.49 |                    | 227                  | 57.01 | 12.90 |      |
| 198               | 22.06   | 6.78 |                    | 228                  | 58.03 | 13.20 |      |
| 199               | 22.78   | 6.89 |                    | 229                  | 59.02 | 13.62 |      |
| 200               | 23.87   | 7.08 |                    | 230                  | 60.16 | 13.93 |      |
| 201               | 26.12   | 7.46 |                    | 231                  | 61.12 | 14.33 |      |
| 202               | 28.06   | 7.81 |                    | 232                  | 62.12 | 14.71 |      |
| 203               | 29.17   | 8.00 | L-20相当             | 233                  | 63.22 | 15.16 |      |
| 204               | 30.10   | 8.11 |                    | 234                  | 64.01 | 15.46 |      |
| 205               | 32.08   | 8.46 |                    | 235                  | 64.91 | 15.85 |      |
| 206               | 33.37   | 8.67 | 日活荷重相当             | 236                  | 65.98 | 16.30 |      |
| 207               | 34.10   | 8.78 |                    | 237                  | 66.98 | 16.78 |      |
| 208               | 35.68   | 9.05 |                    | 238                  | 68.05 | 17.19 |      |
| 209               | 38.06   | 9.36 |                    | 239                  | 68.95 | 17.69 |      |
| 210               | 40.02   | 9.71 |                    | 240                  | 70.07 | 18.18 |      |

No. 17

盛り替え値  
D5:18.44  
D6:19.07  
D7:12.30

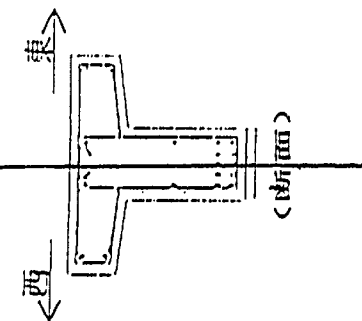
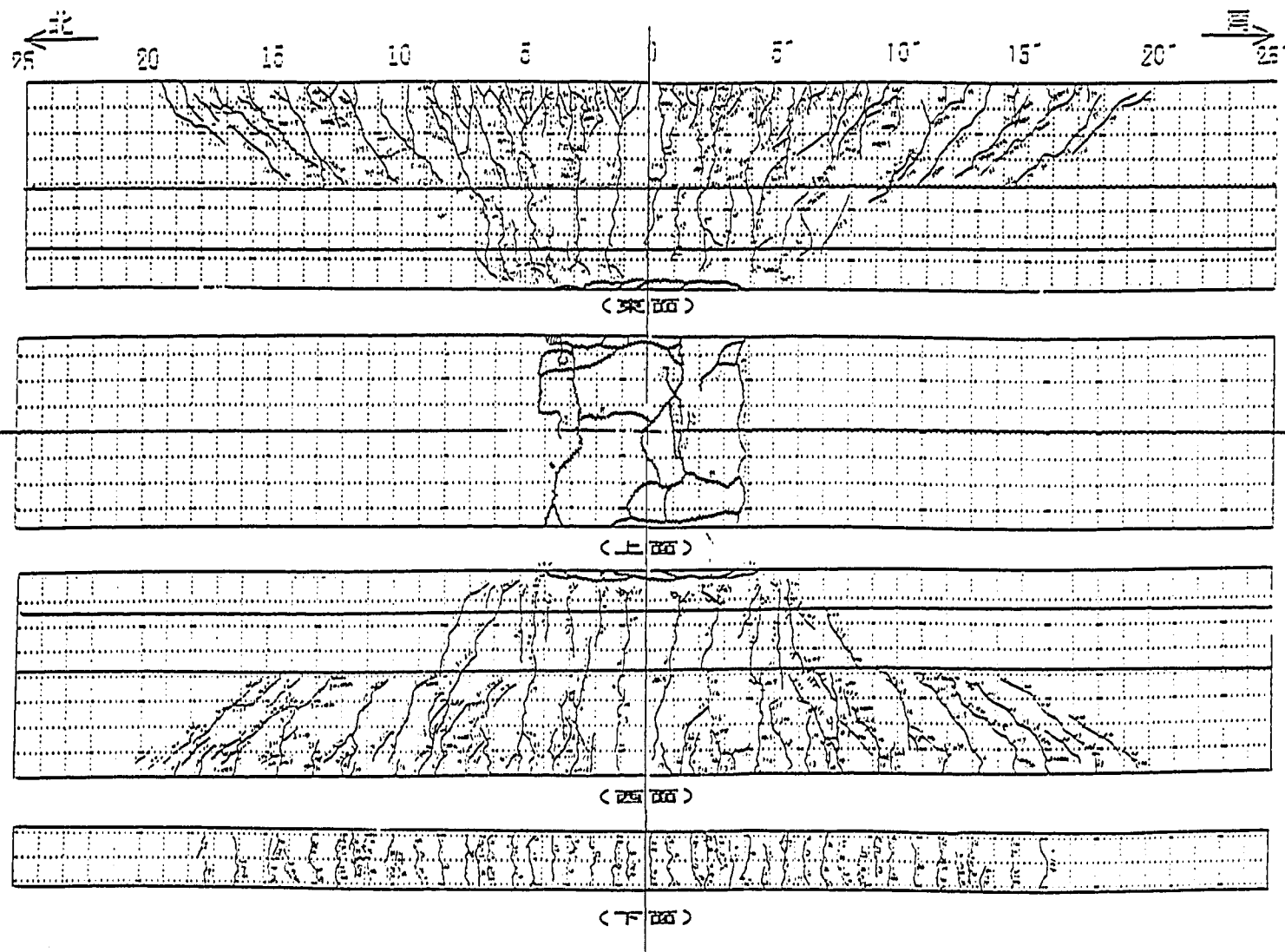
| 実験進行表(兼データファイル目録) |         |       |                       | 供試体名:RC4            |       |      |    |
|-------------------|---------|-------|-----------------------|---------------------|-------|------|----|
|                   |         |       |                       | DATEFILE:¥KETA1¥RC4 |       |      |    |
| FILE              | 荷重      | 変位    | 備考                    | FILE                | 荷重    | 変位   | 備考 |
| No.               | (ton)   | (mm)  |                       | No.                 | (ton) | (mm) |    |
| 5-241             | 71.17   | 18.67 |                       |                     |       |      |    |
| 242               | 71.30   | 18.98 |                       |                     |       |      |    |
| 243               | 71.15   | 19.17 |                       |                     |       |      |    |
| 244               | 71.11   | 19.46 | Pmax72.34             |                     |       |      |    |
| 245               | 71.93   | 19.75 | Pmax72.95             |                     |       |      |    |
| 246               | 73.97   | 6.63  | 破断 $\pi$ 型除く D5、6、7除く |                     |       |      |    |
| 247               | 36.52   | 18.51 |                       |                     |       |      |    |
| 248               | 45.31   | 20.24 | 変位制御                  |                     |       |      |    |
| 249               | 46.81   | 24.97 | (2.0y)                |                     |       |      |    |
| 250               | 46.82   | 30.02 | (2.4y)                |                     |       |      |    |
| 251               | 47.50   | 34.90 | (2.8y)                |                     |       |      |    |
| 252               | 47.89   | 40.17 | (3.2y)                |                     |       |      |    |
| 253               | 48.52   | 45.07 | (3.6y)                |                     |       |      |    |
| 254               | 48.79   | 49.93 | (4.0y)                |                     |       |      |    |
| 255               | 49.70   | 54.95 | 圧壊 (4.4y)             |                     |       |      |    |
| 256               | 49.58   | 59.70 | (4.8y)                |                     |       |      |    |
| 257               | 除 30.00 | 55.81 |                       |                     |       |      |    |
| 258               | 10.00   | 50.51 |                       |                     |       |      |    |
| 259               | 0.00    | 47.58 |                       |                     |       |      |    |
|                   |         |       |                       |                     |       |      |    |

データNo. 246

荷重 73.97tf

シート破断時に、変位計が外れたため、No. 246以降の中央の変位は、概算です。

●資料－４ ひび割れ観察図



ひび割れ観察図 (RC1 供試体)

## 凡 例

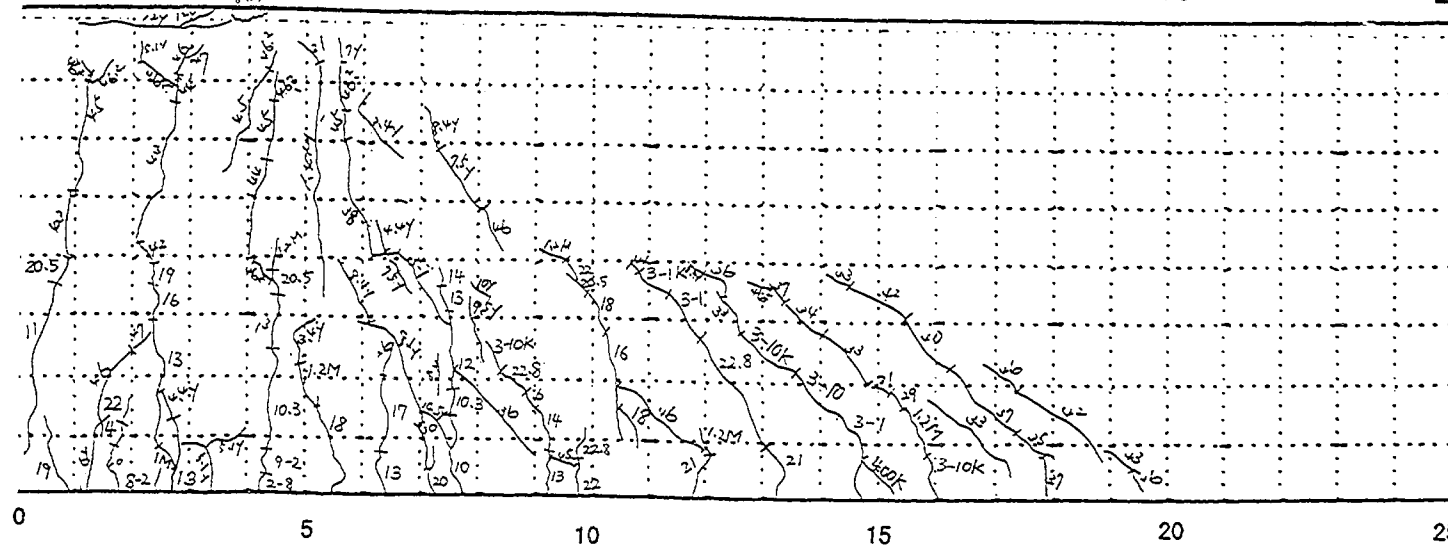
1. ひび割れ図中の数字は荷重及び記号であり実験進行表に対応するものである。
2. RC2, RC3, RC4 の下面は、炭素繊維貼付前までのひび割れである。

## 0



南

25'

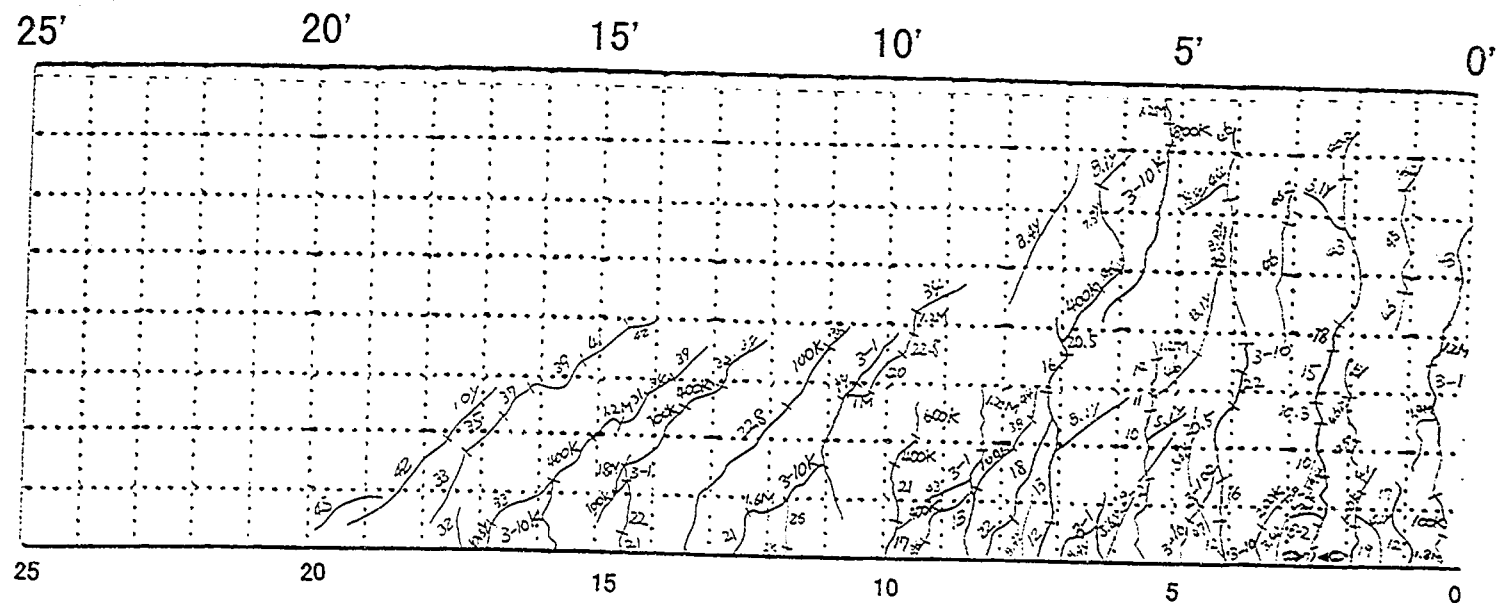


25

【東面】 RC1

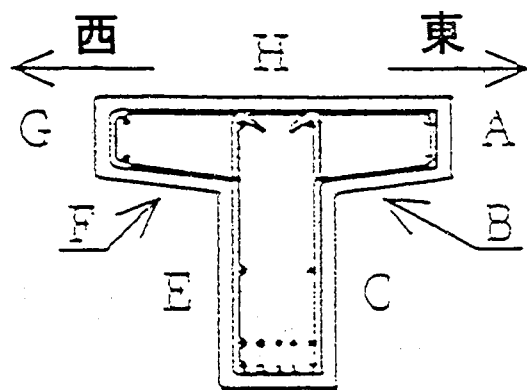
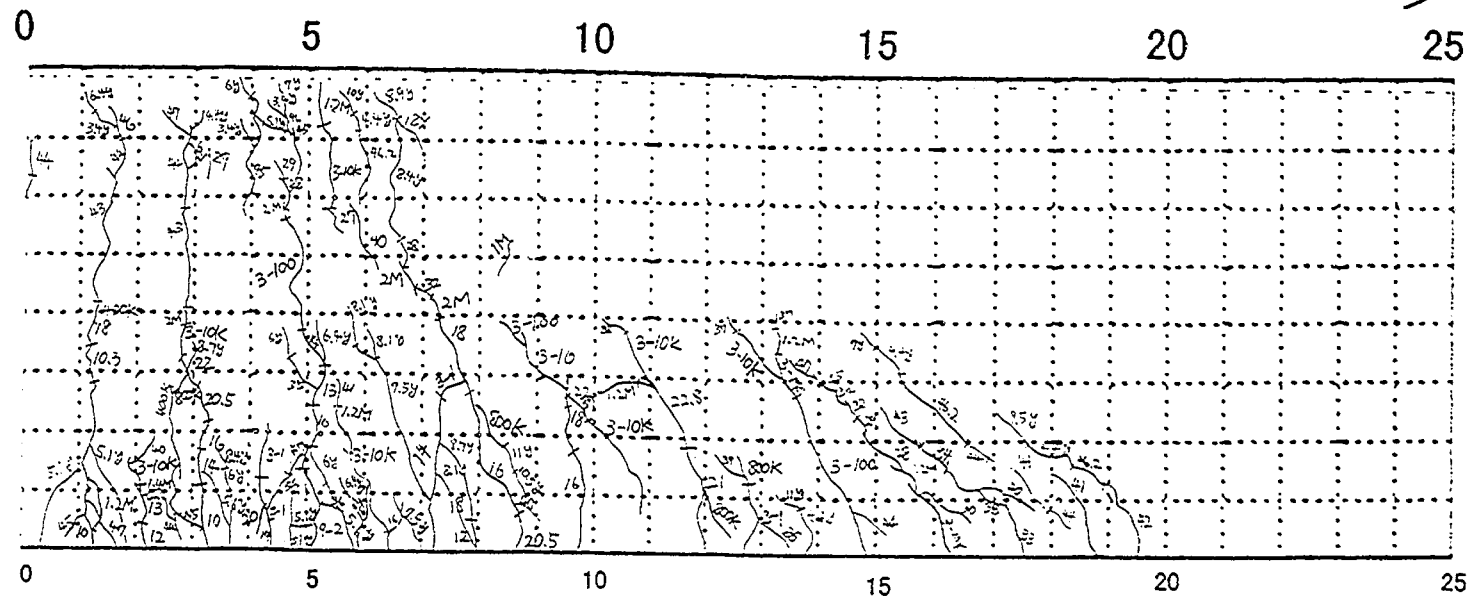
RC1

南 ←



11-63

→ 北



北側から見たところ

【上面】<sub>RC1</sub>

北 ←

25

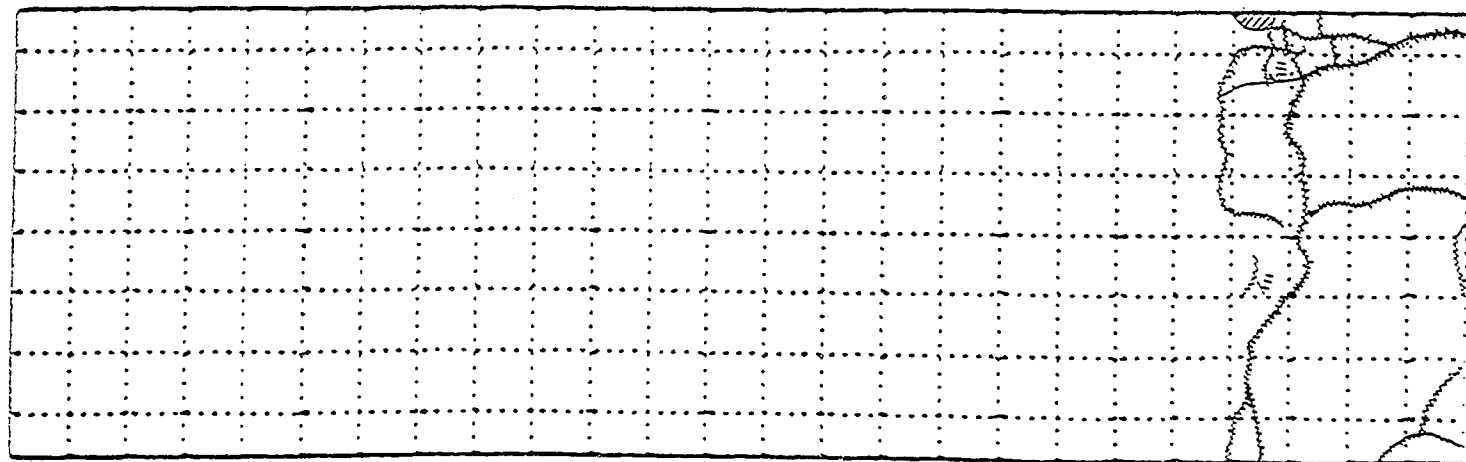
20

15

10

5

0



0'

5'

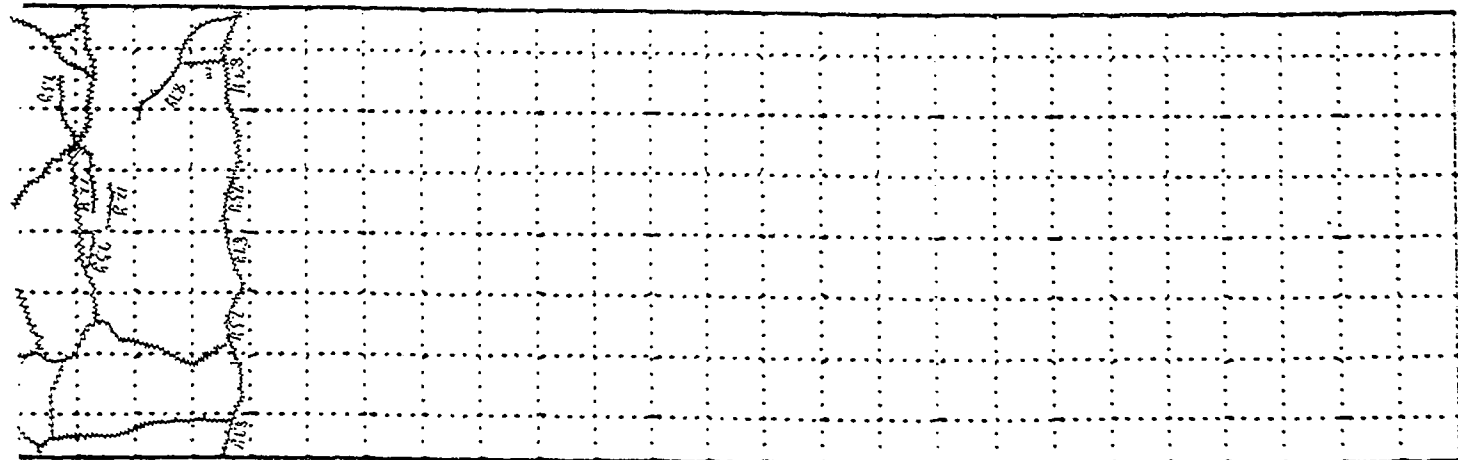
10'

15'

20'

25'

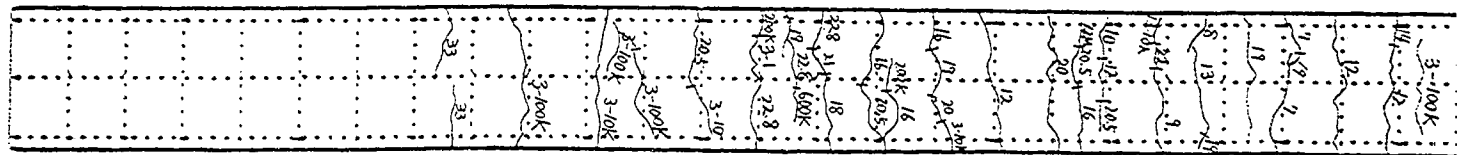
→ 南



【 下面 】 RC1

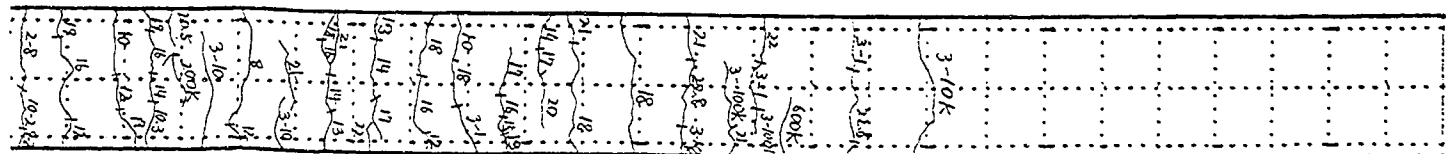
北 

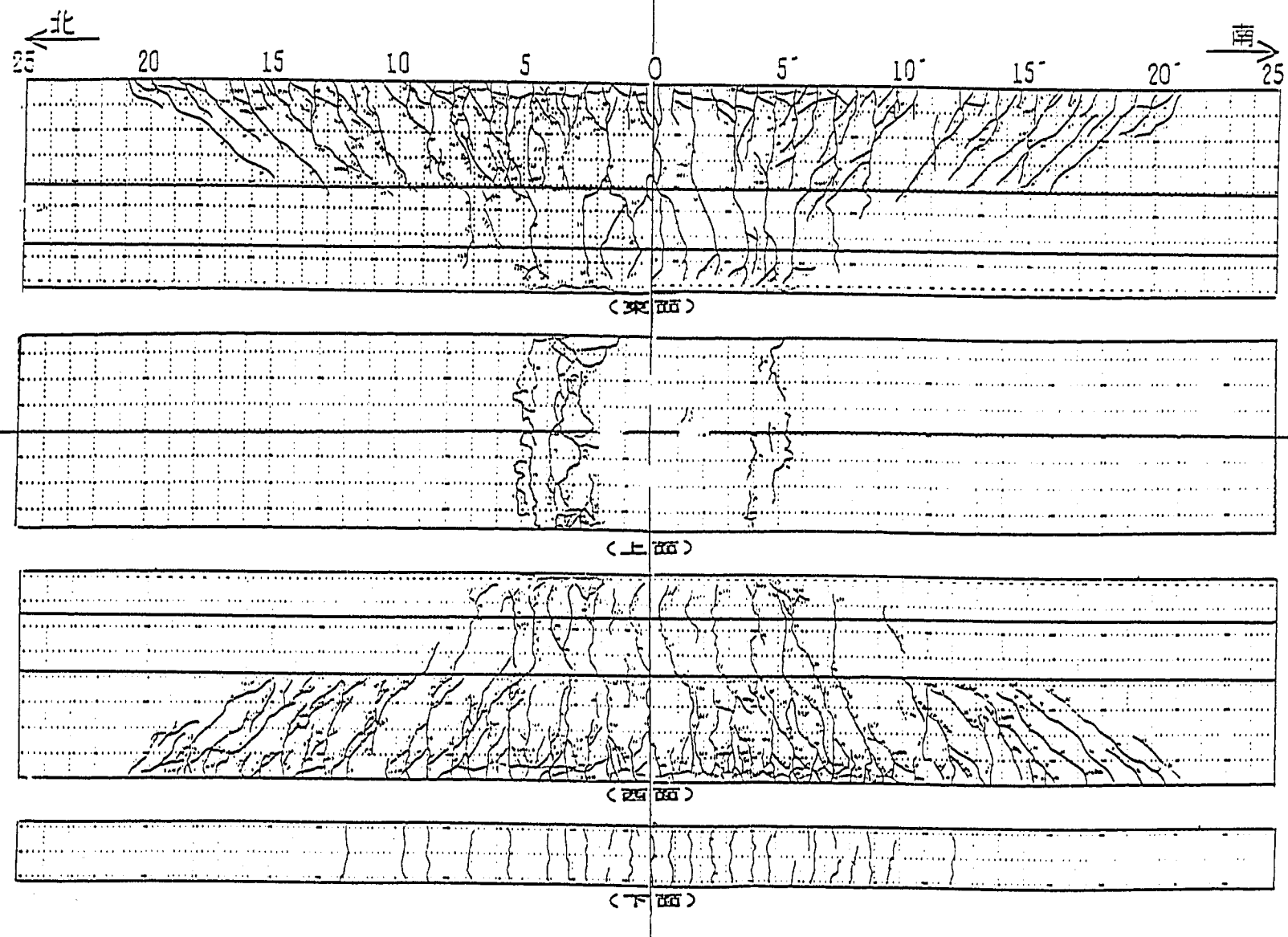
25                      20                      15                      10                      5                      0



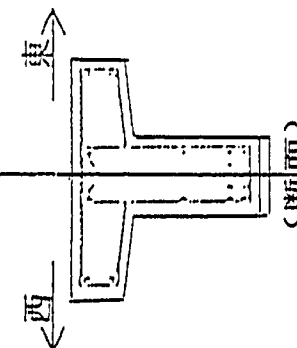
→ 南

0'                      5'                      10'                      15'                      20'                      25'





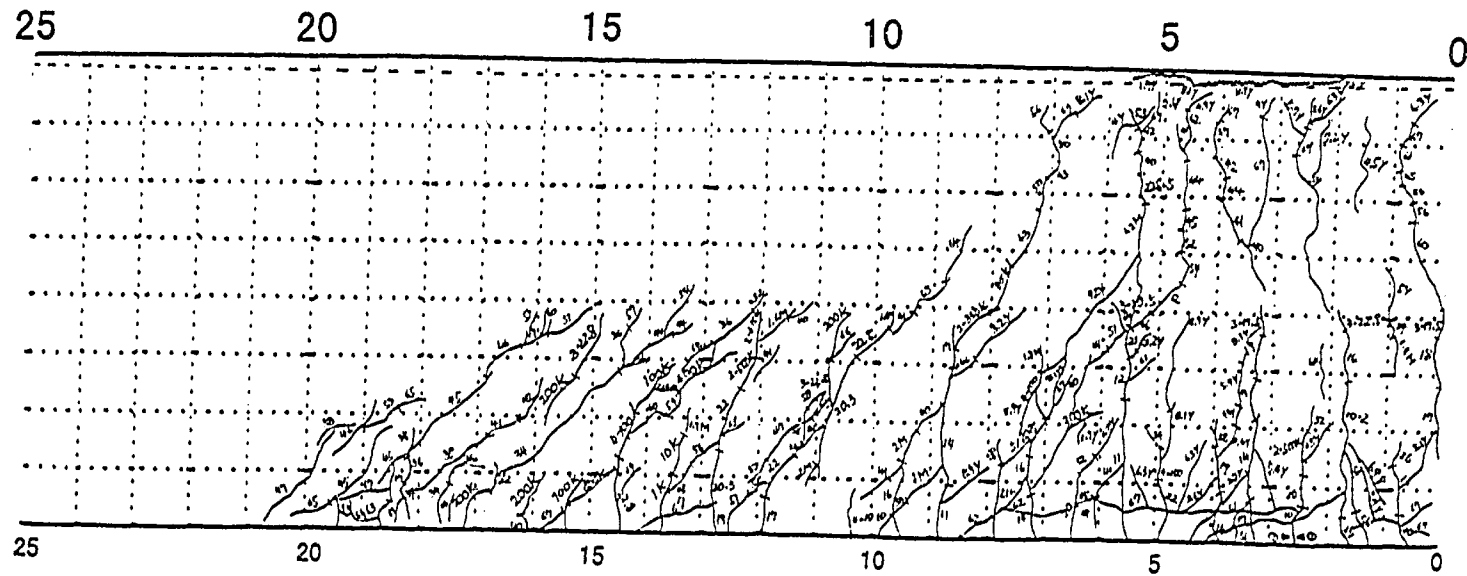
ひび割れ観察図 (RC 2 供試体)



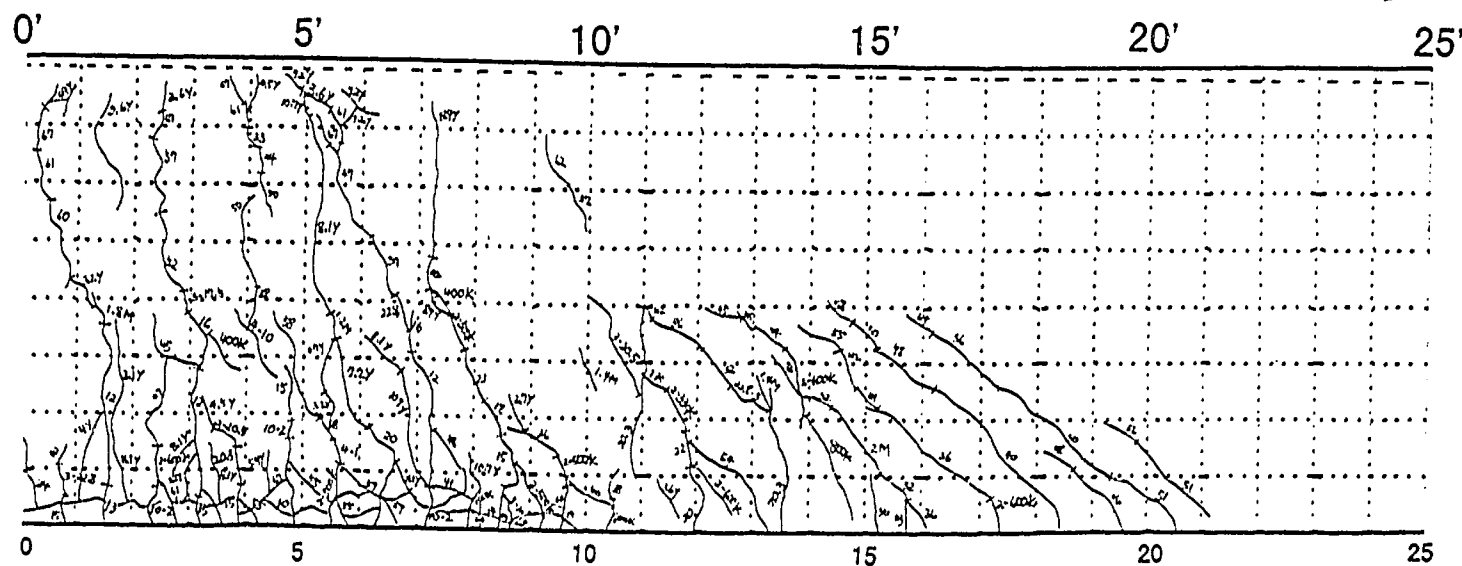
## 凡 例

- ひび割れ図中の数字は荷重及び記号で実験進行表に対応するものである。
- RC2, RC3, RC4 の下面は、炭素繊維貼付前までのひび割れである。

北 ←

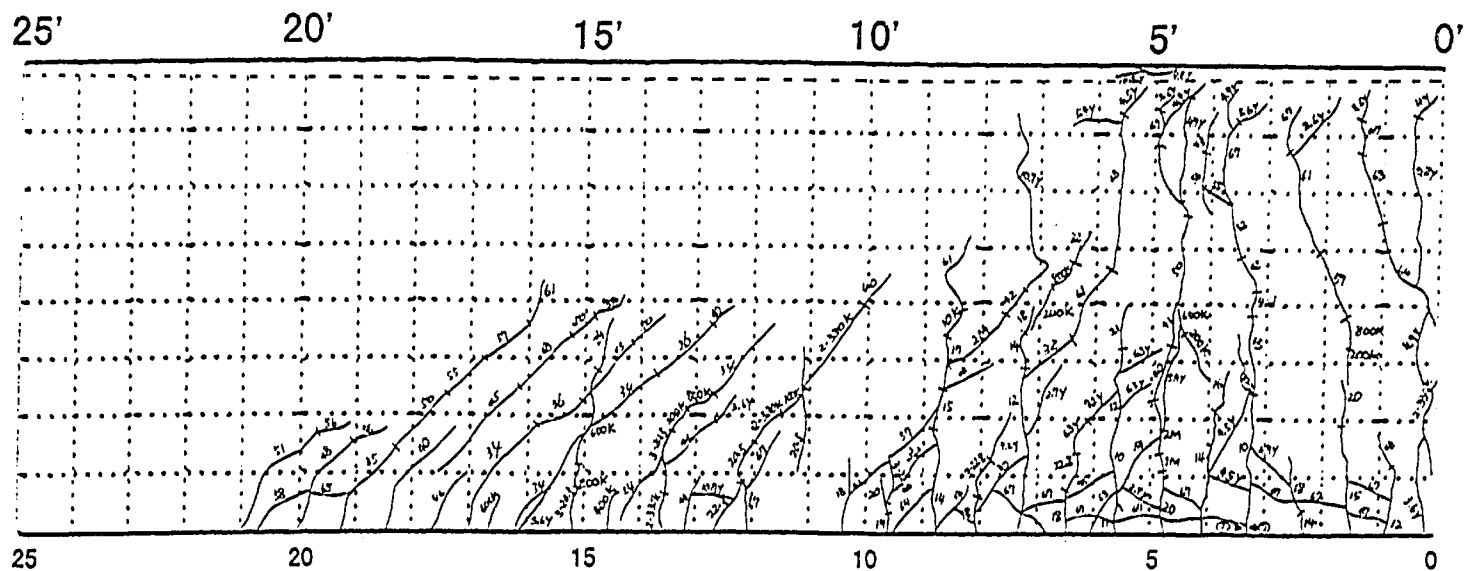


→ 南

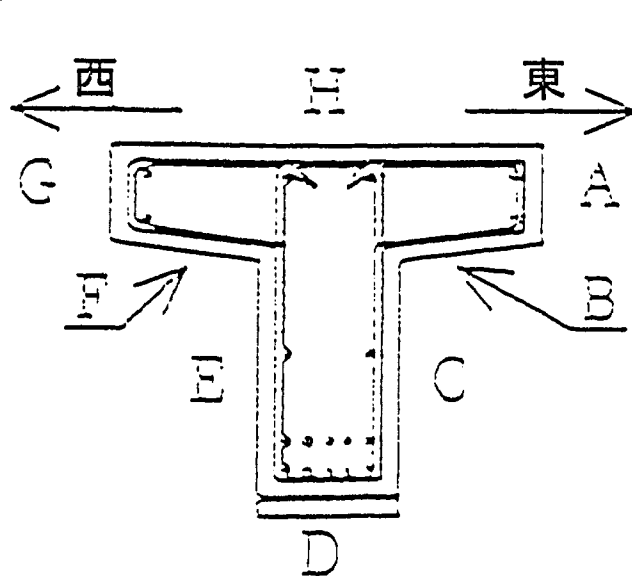


# 【東面】RC2

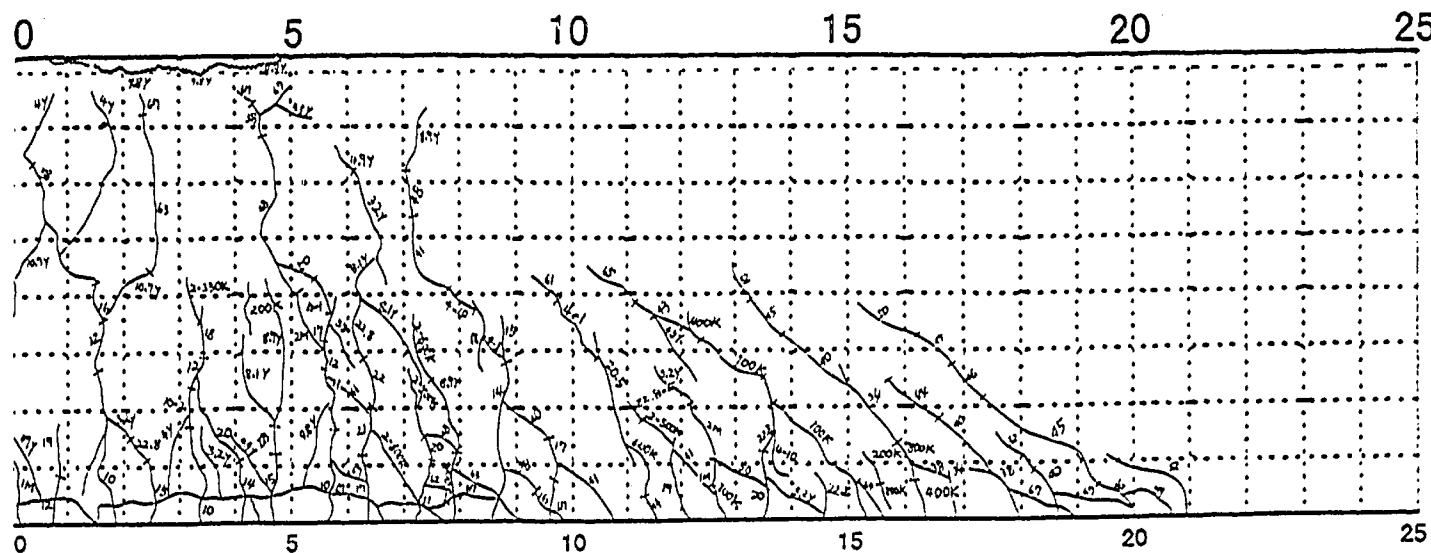
南 ←



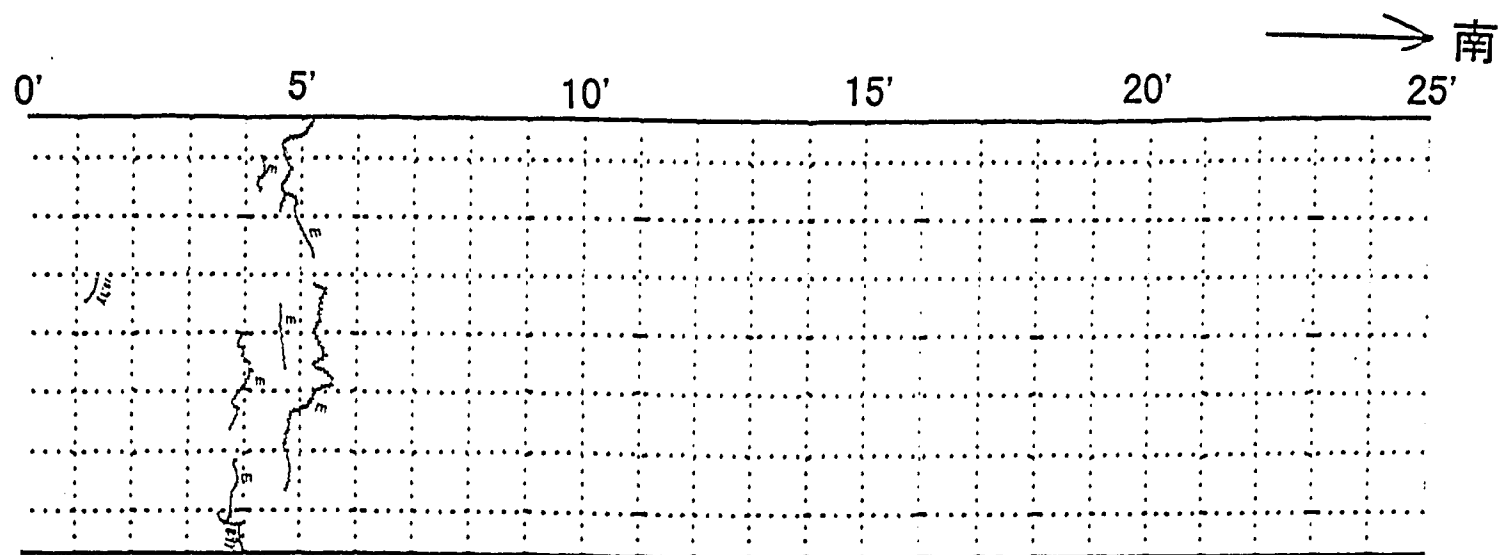
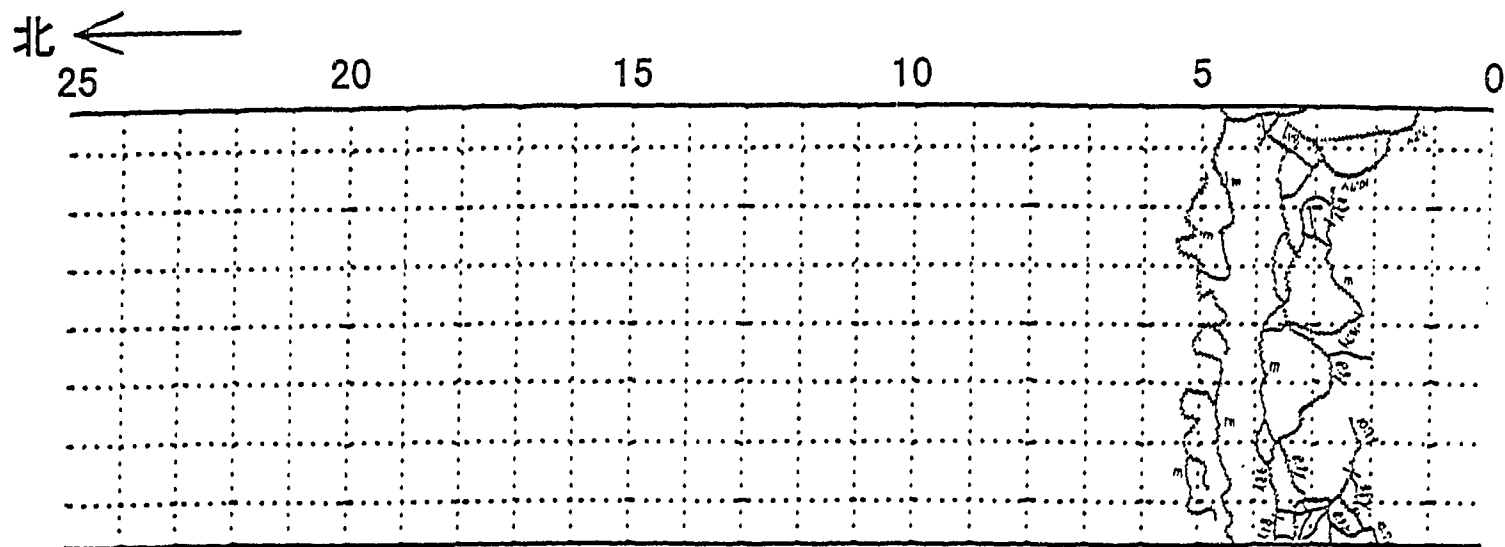
89-II



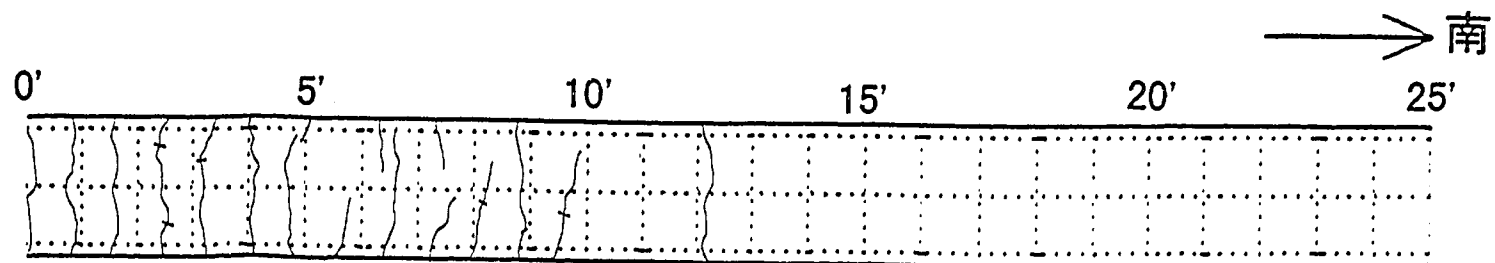
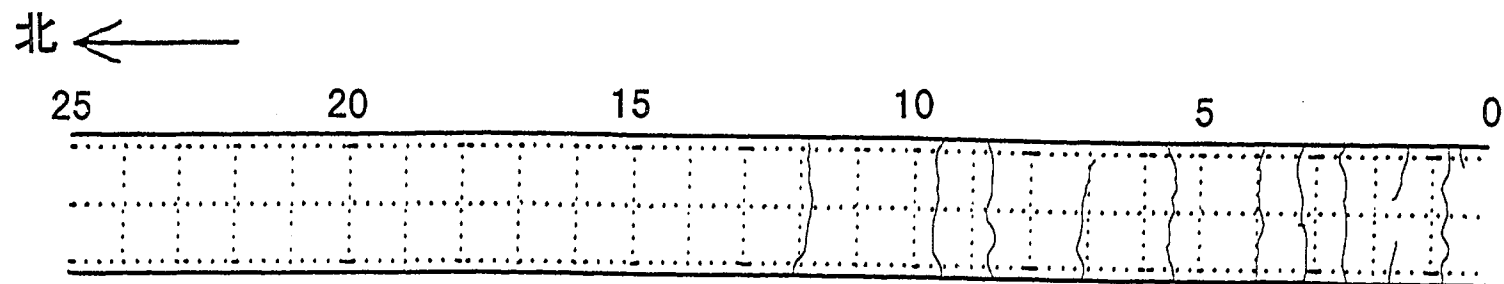
→ 北

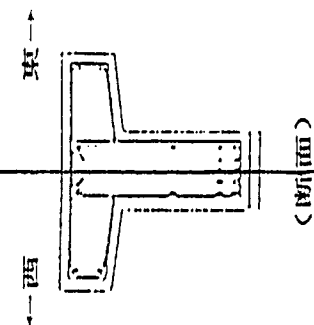
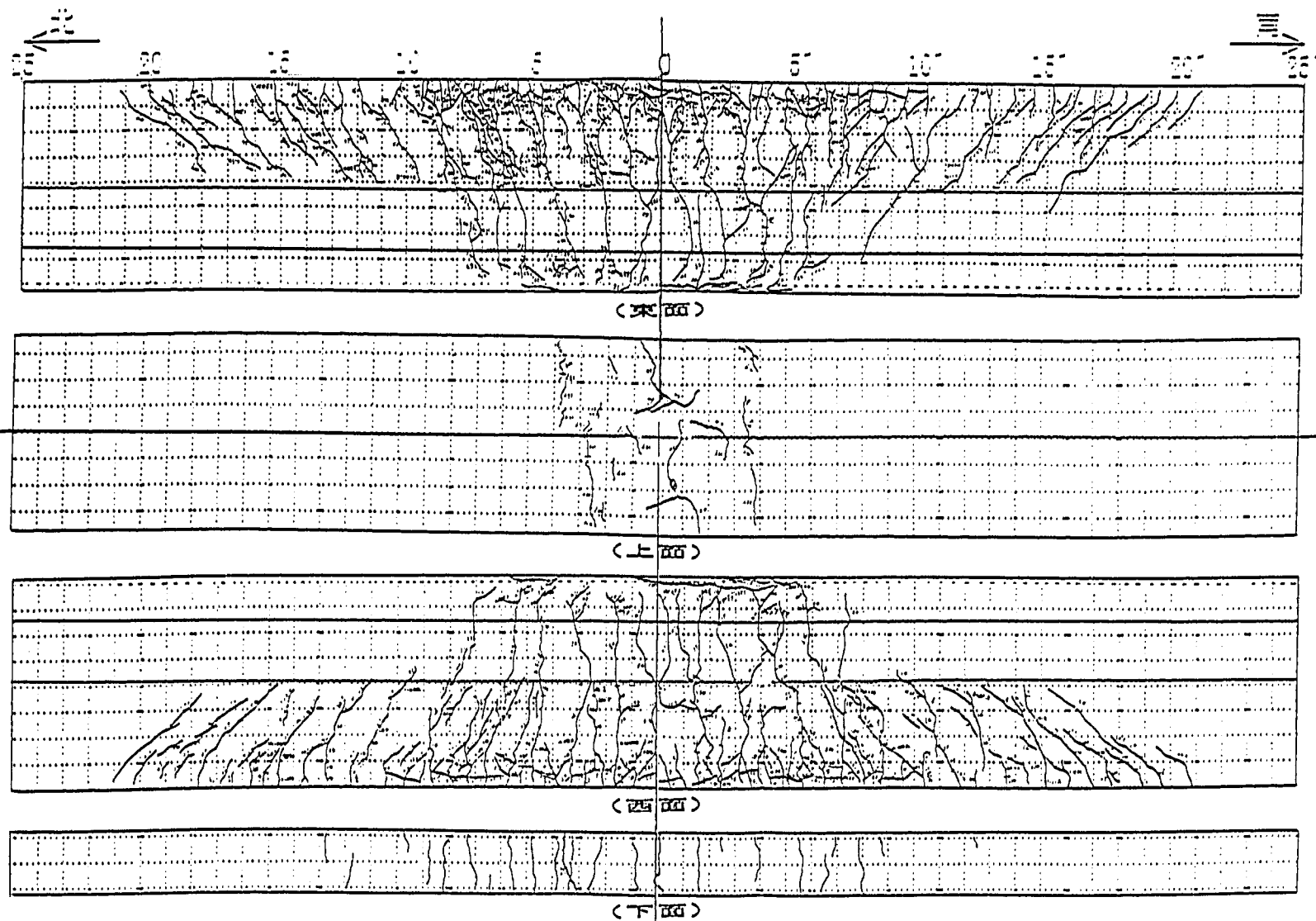


【上面】 RC2



【 下面 】 RC2





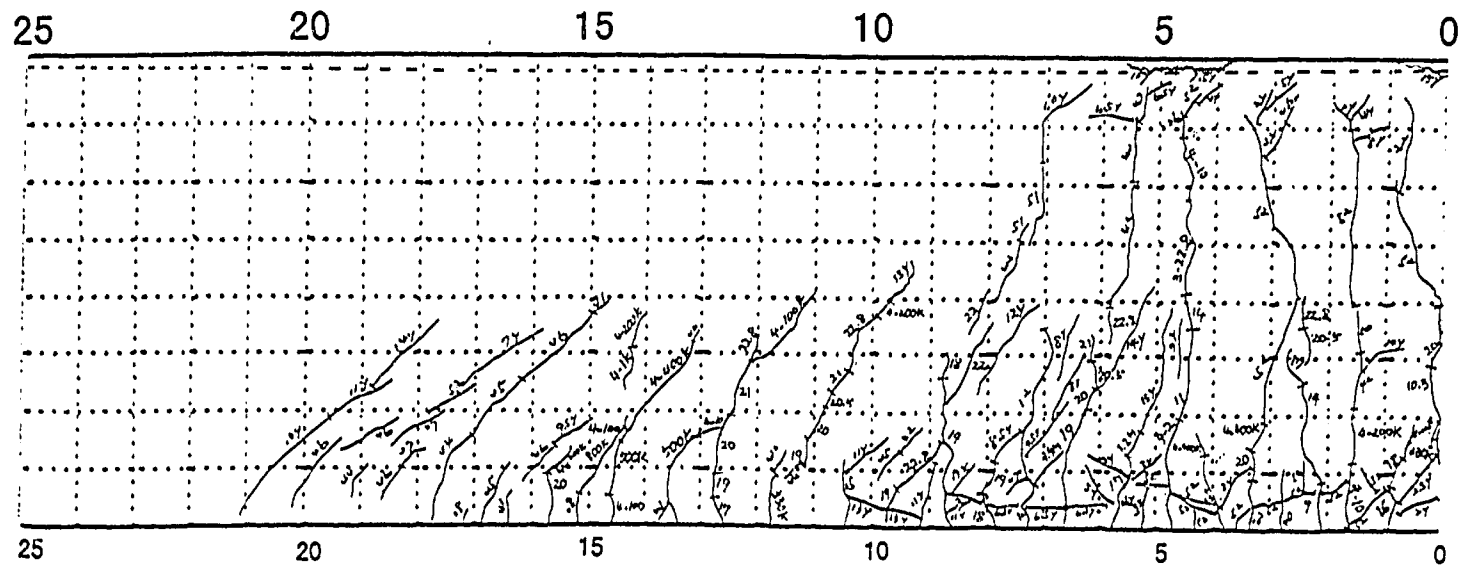
ひび割れ観察図 (RC3 供試体)

凡 例

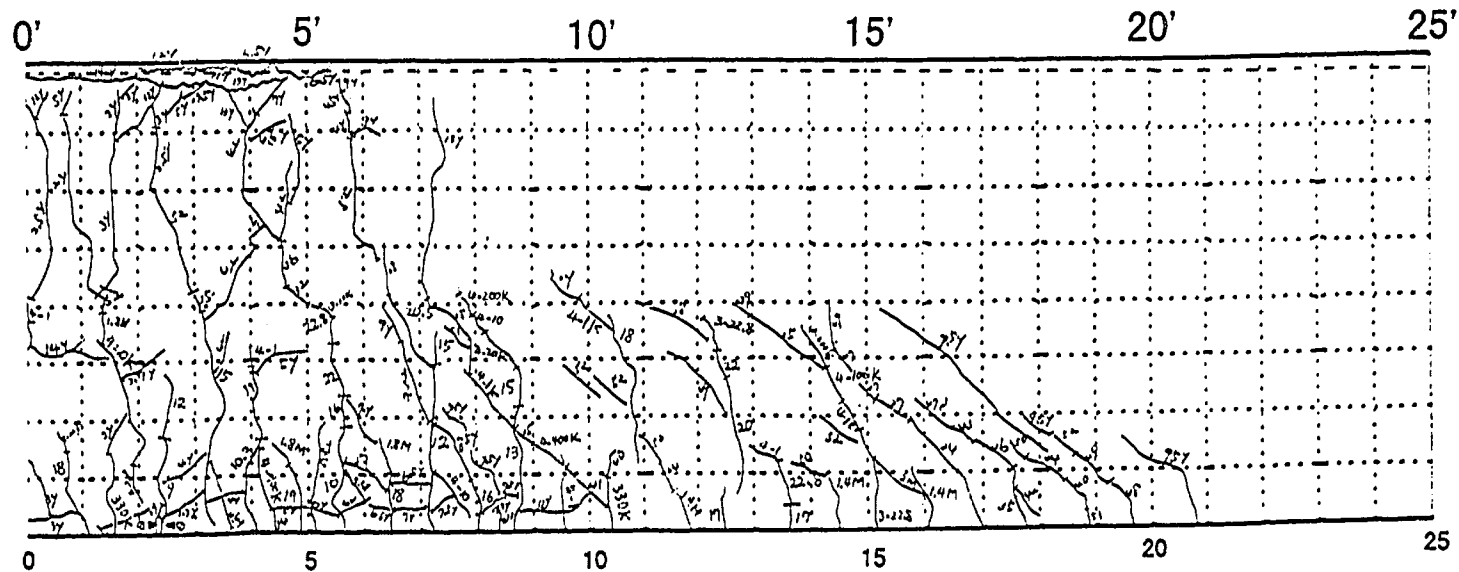
1. ひび割れ図中の数字は荷重及び記号であり実験進行表に対応するものである。
2. RC2, RC3, RC4 の下面は、炭素繊維紙貼付前までのひび割れである。

# 【西面】 RC3

北 ←

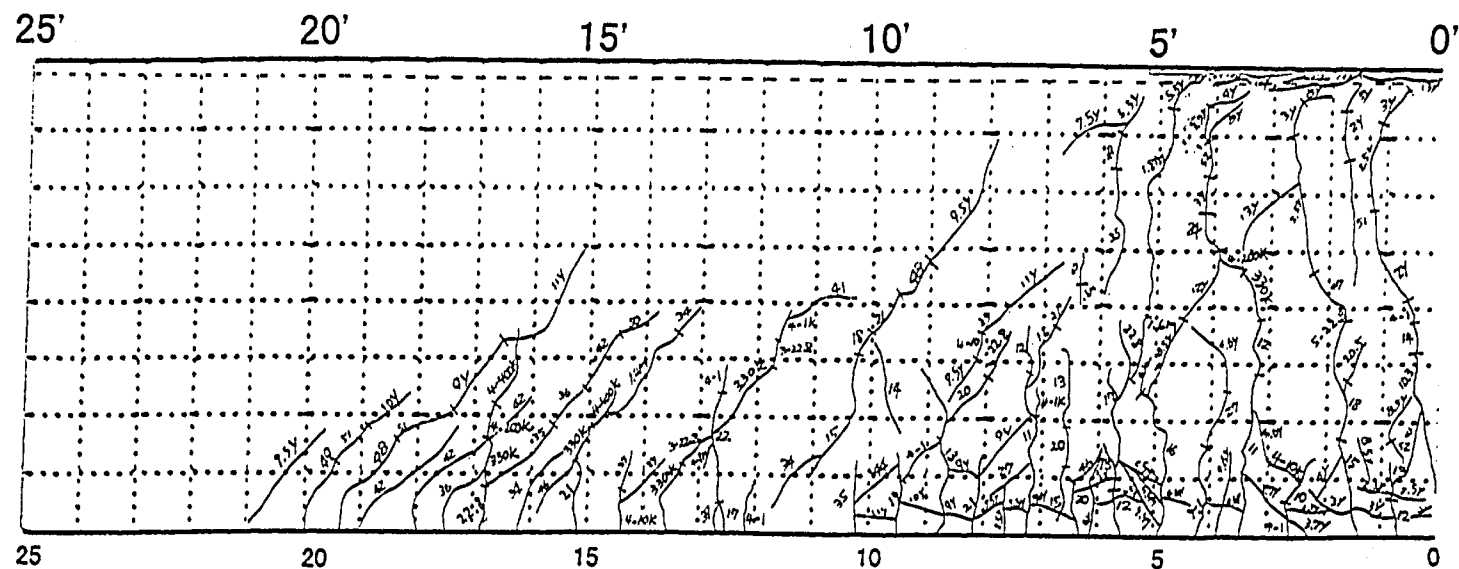


→ 南

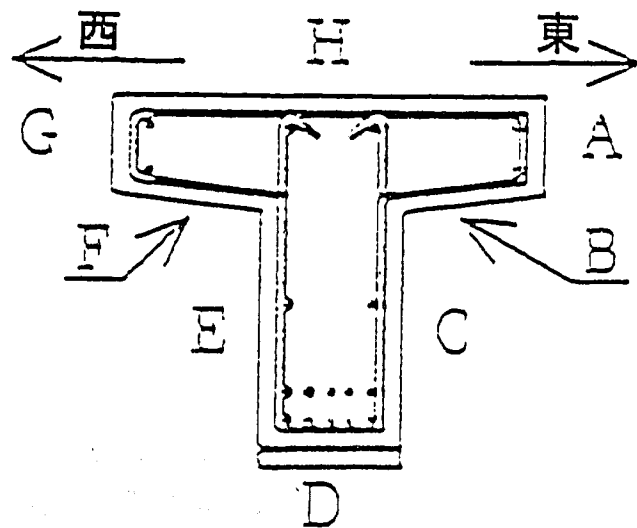


# 【東面】RC3

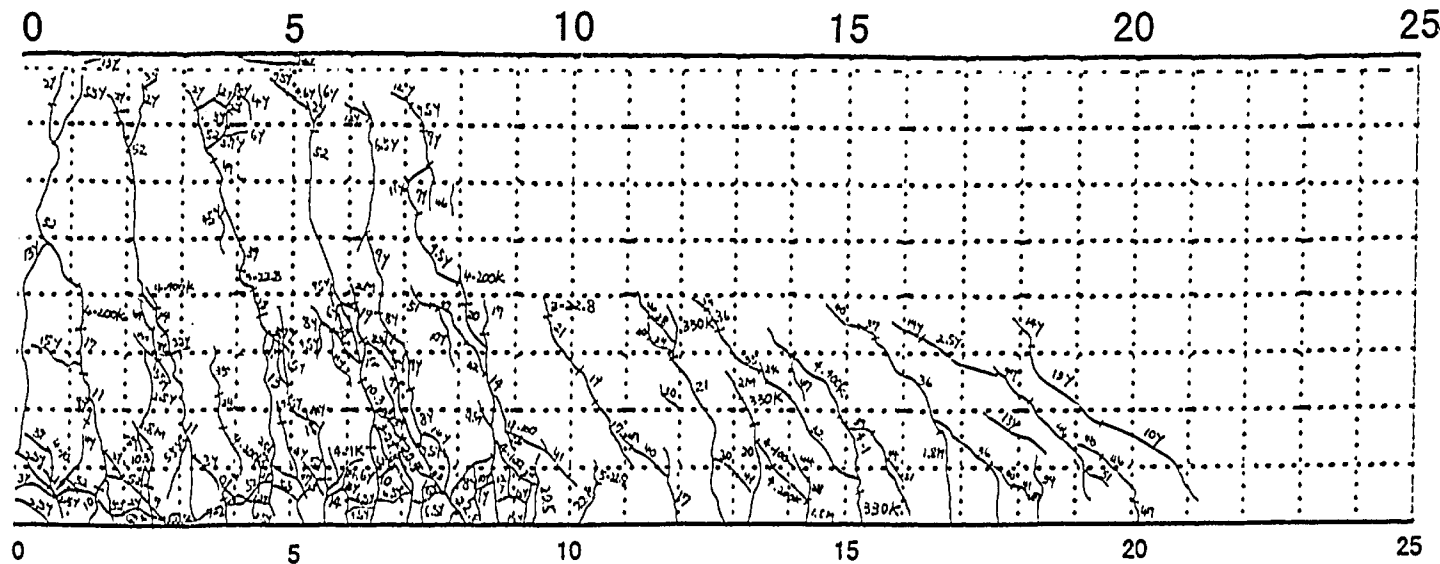
南 ←



II-73



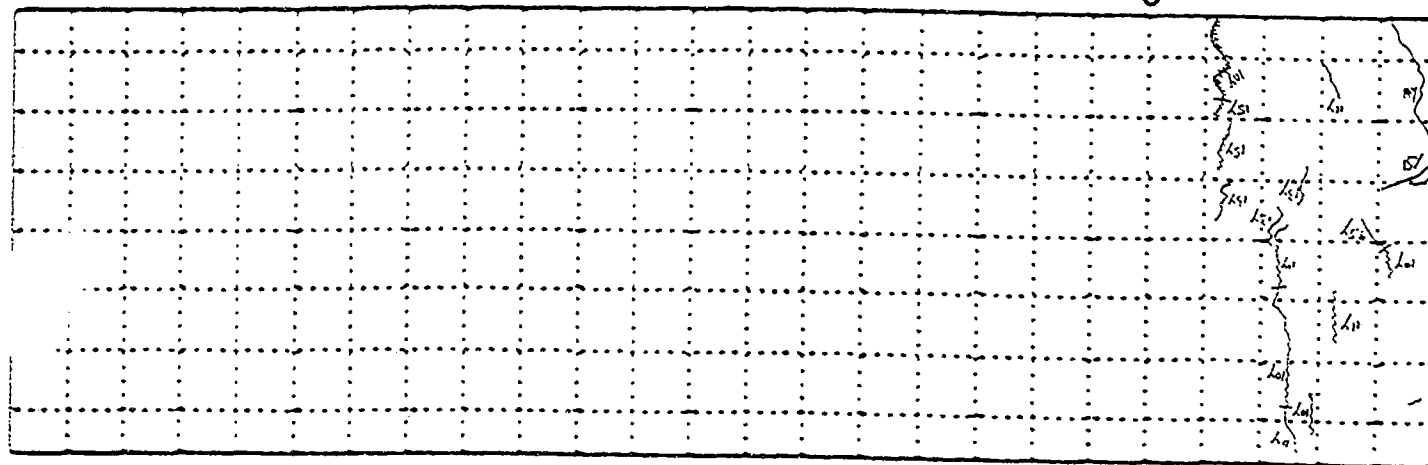
→ 北



# 【上面】RC3

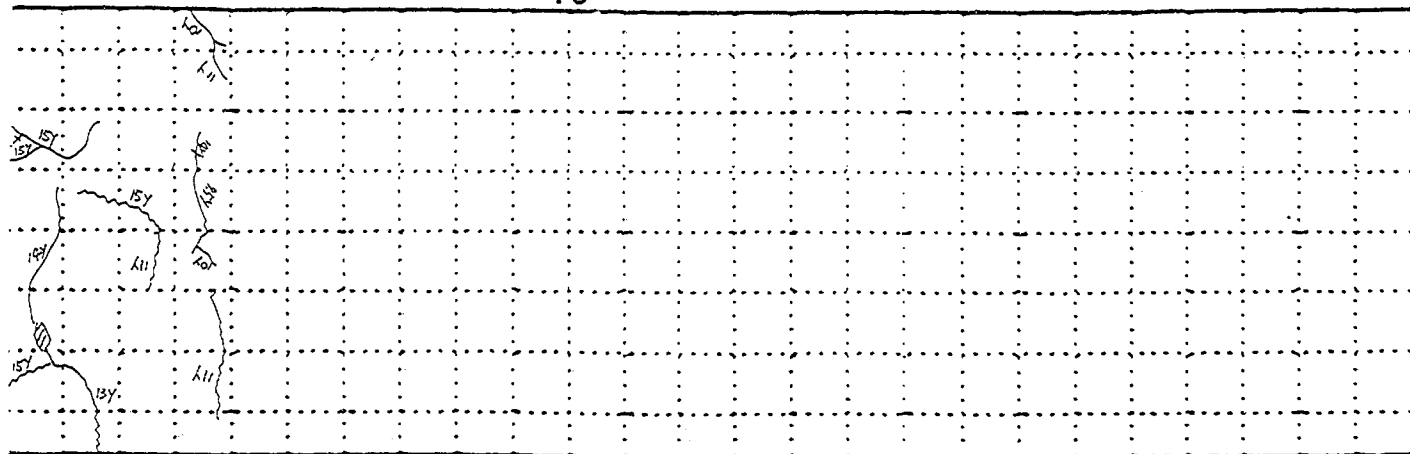
北 ←

25 20 15 10 5 0

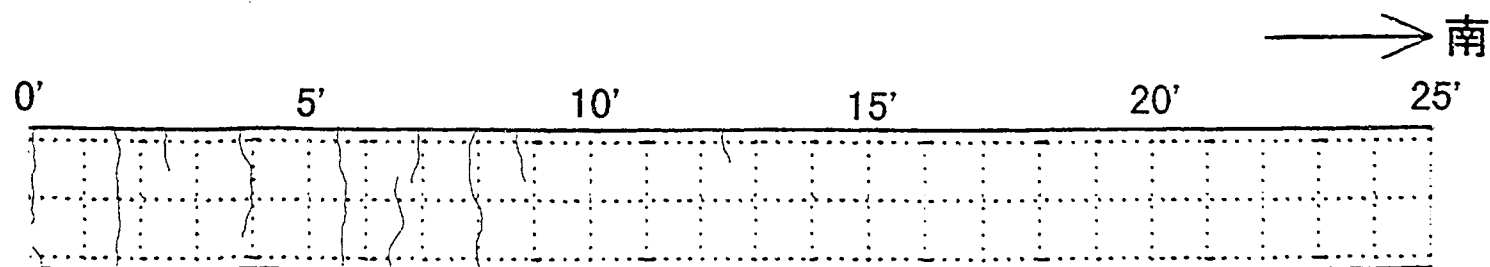
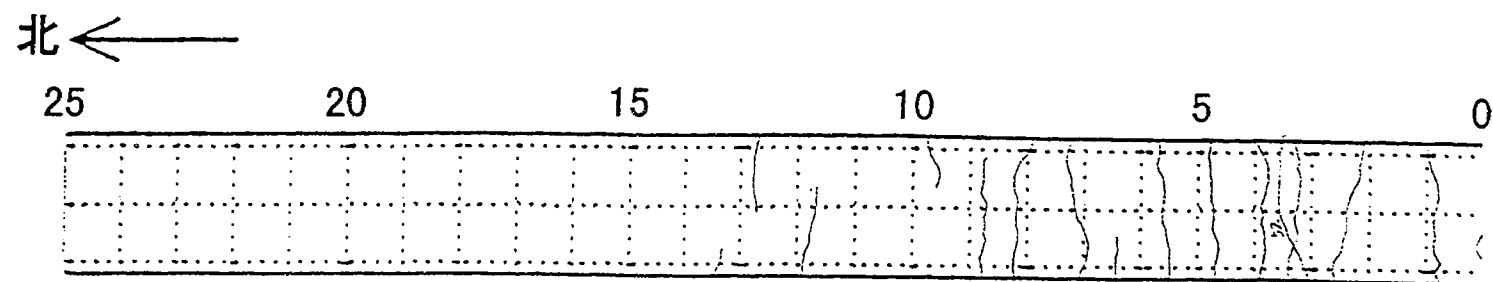


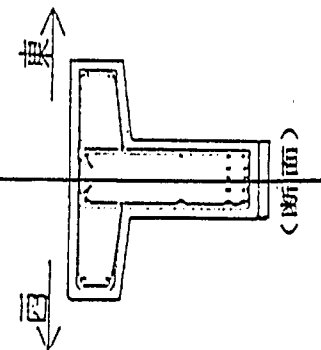
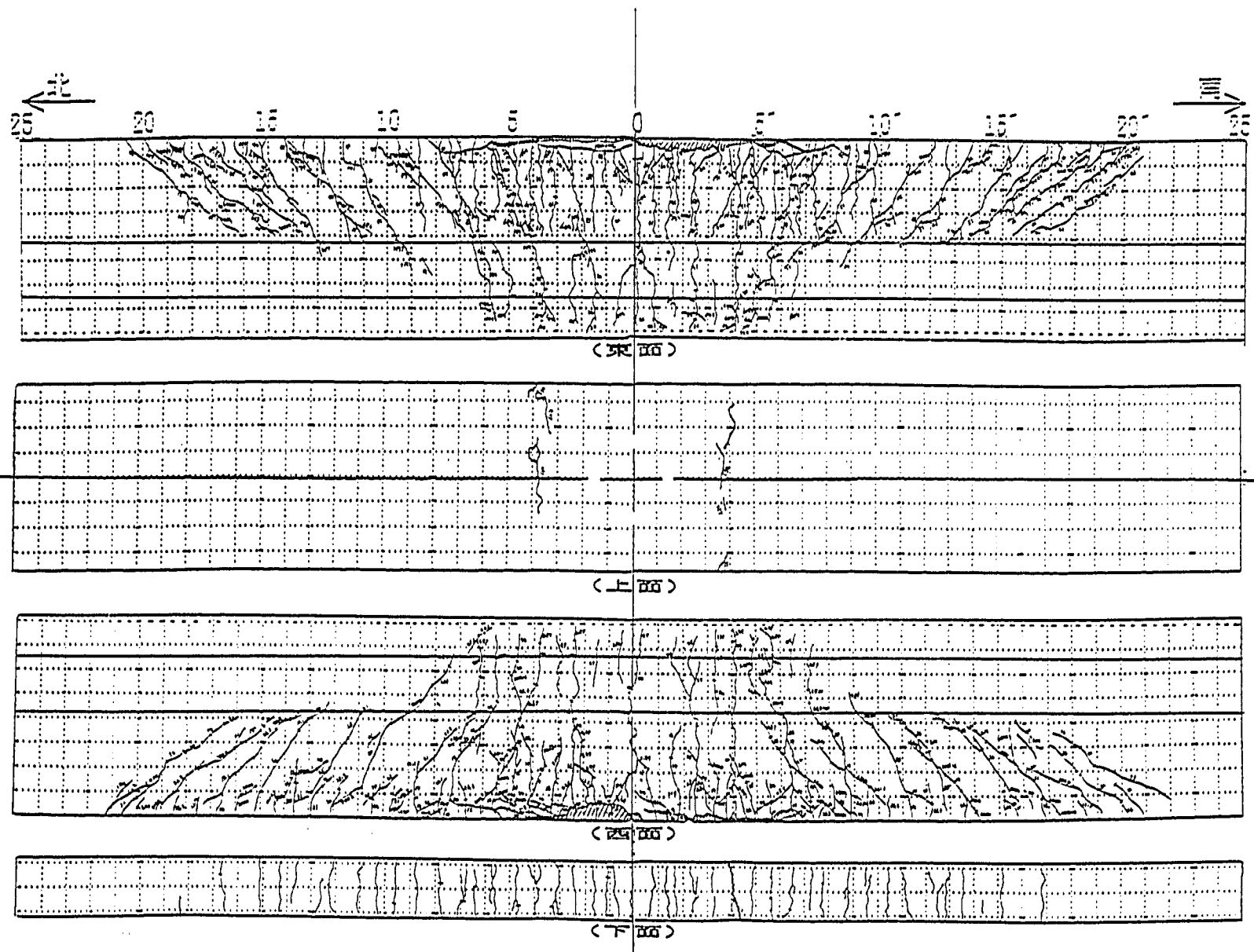
→ 南

0' 5' 10' 15' 20' 25'



【 下面 】 RC3





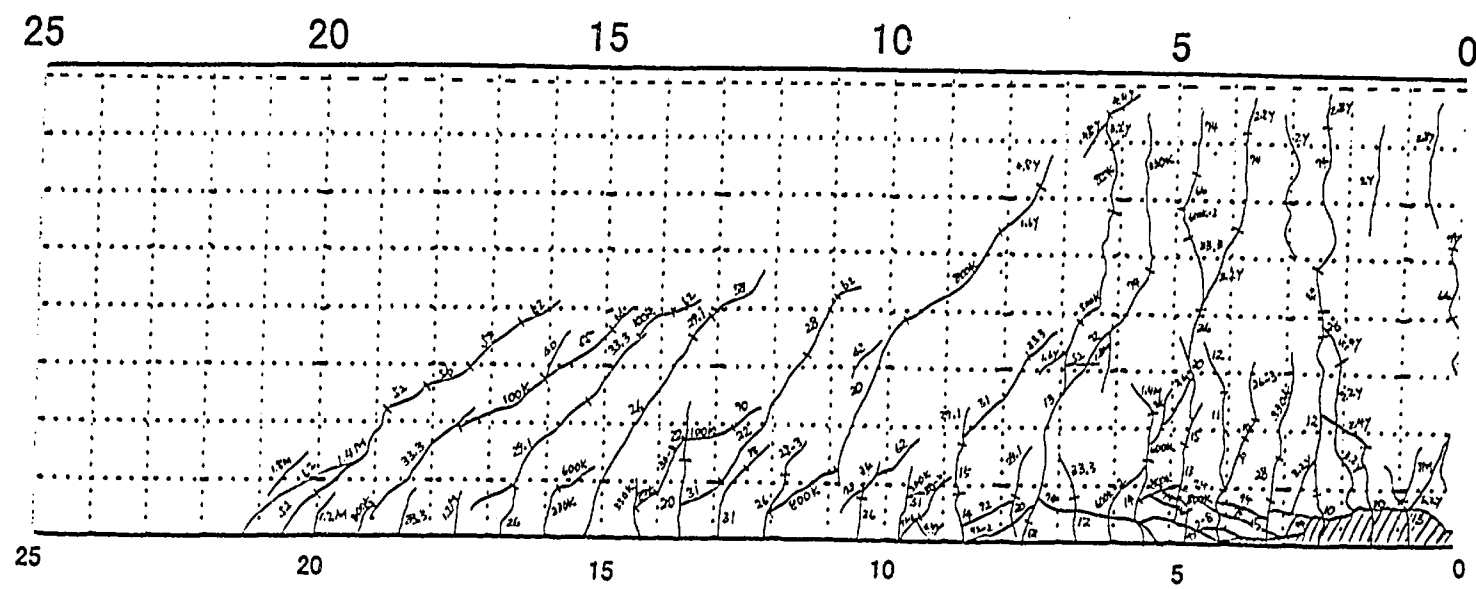
ひび割れ観察図 (RC4 供試体)

凡 例

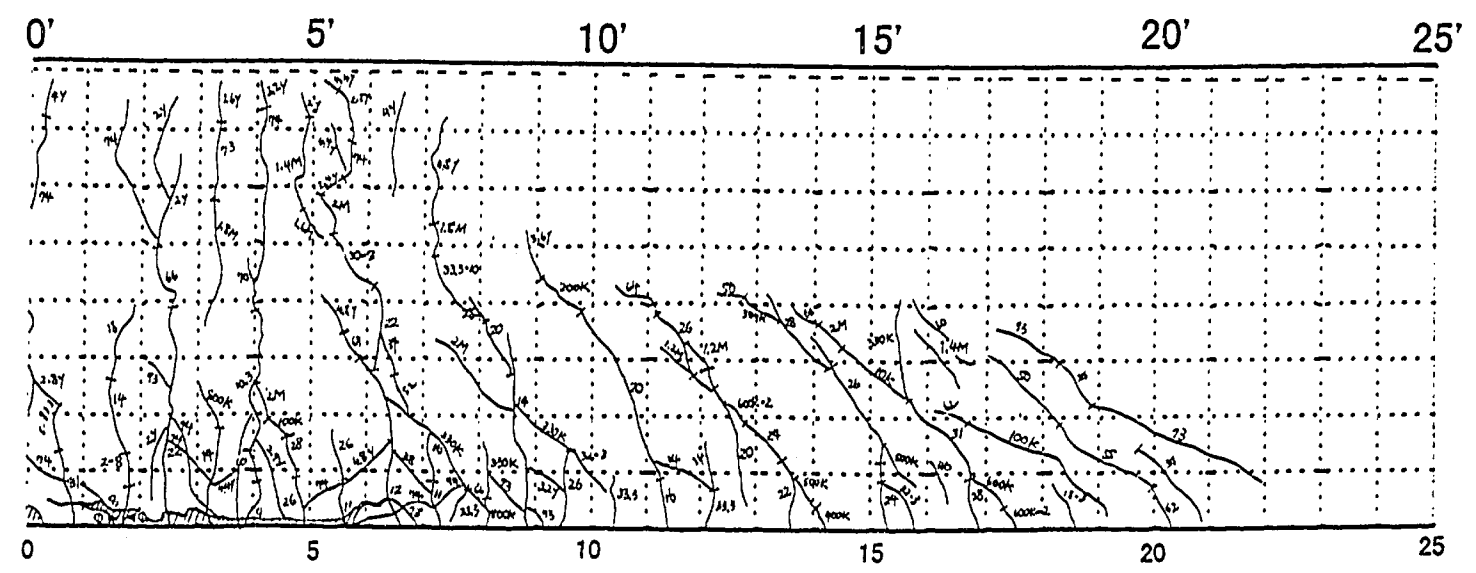
1. ひび割れ図中の数字は荷重及び記号であり実験進行表に対応するものである。
2. RC2, RC3, RC4 の下面は、炭素繊維貼付前までのひび割れである。

【西面】RC4

北 ←

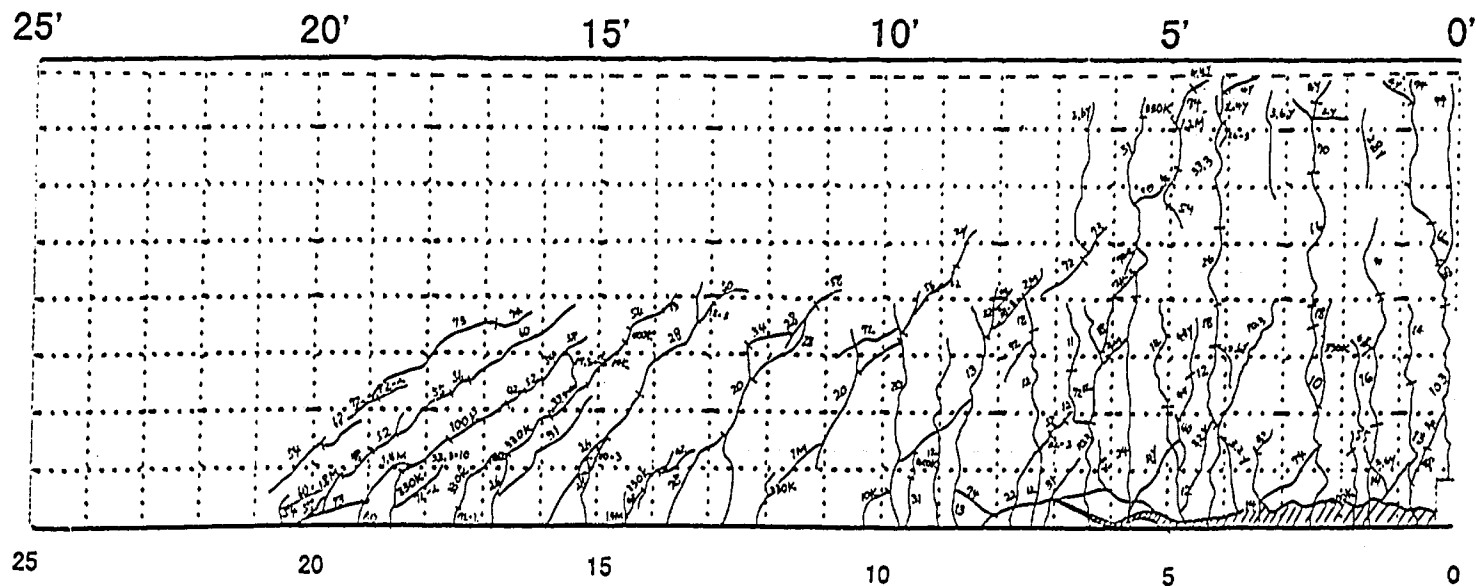


→ 南

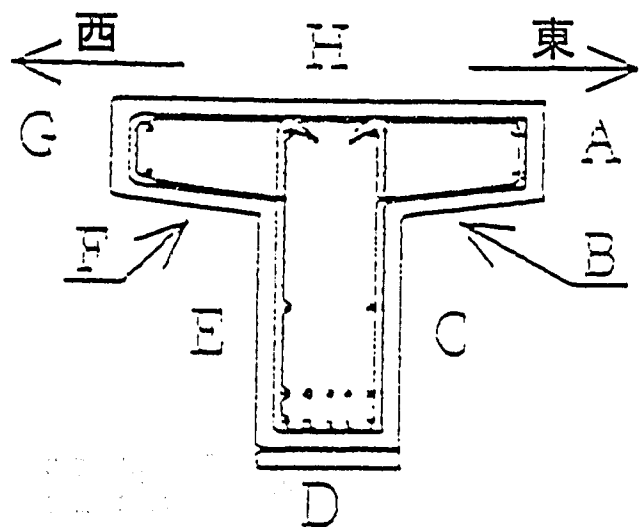
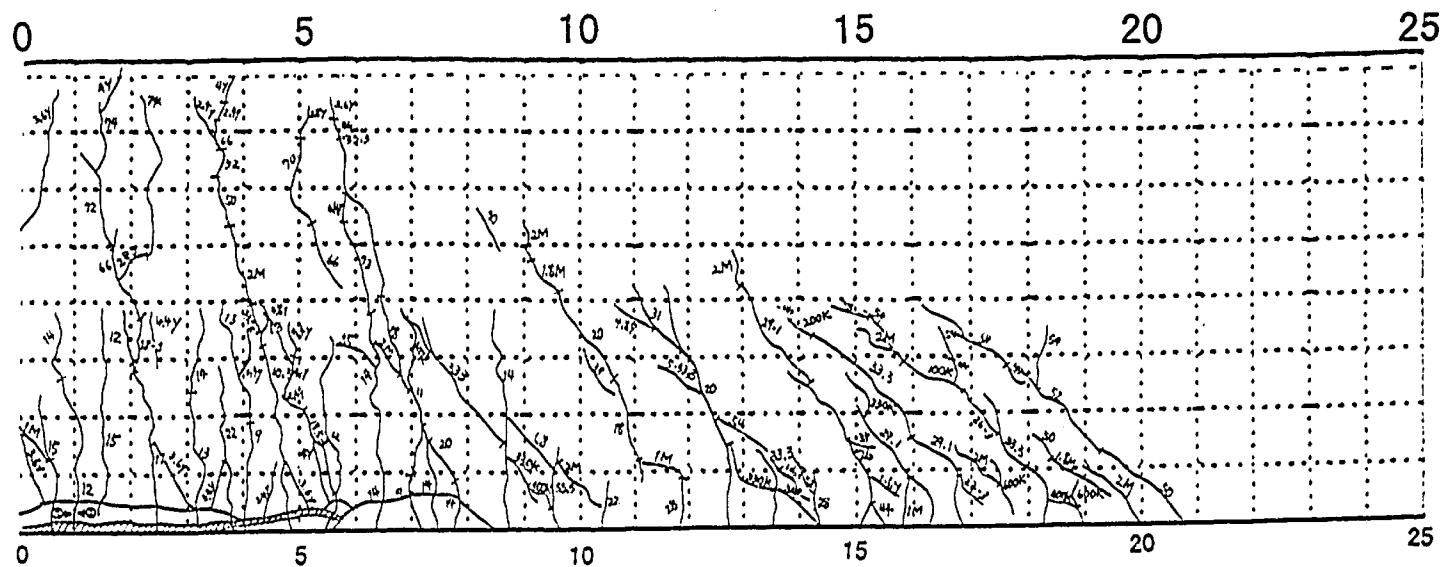


# 【東面】 RC4

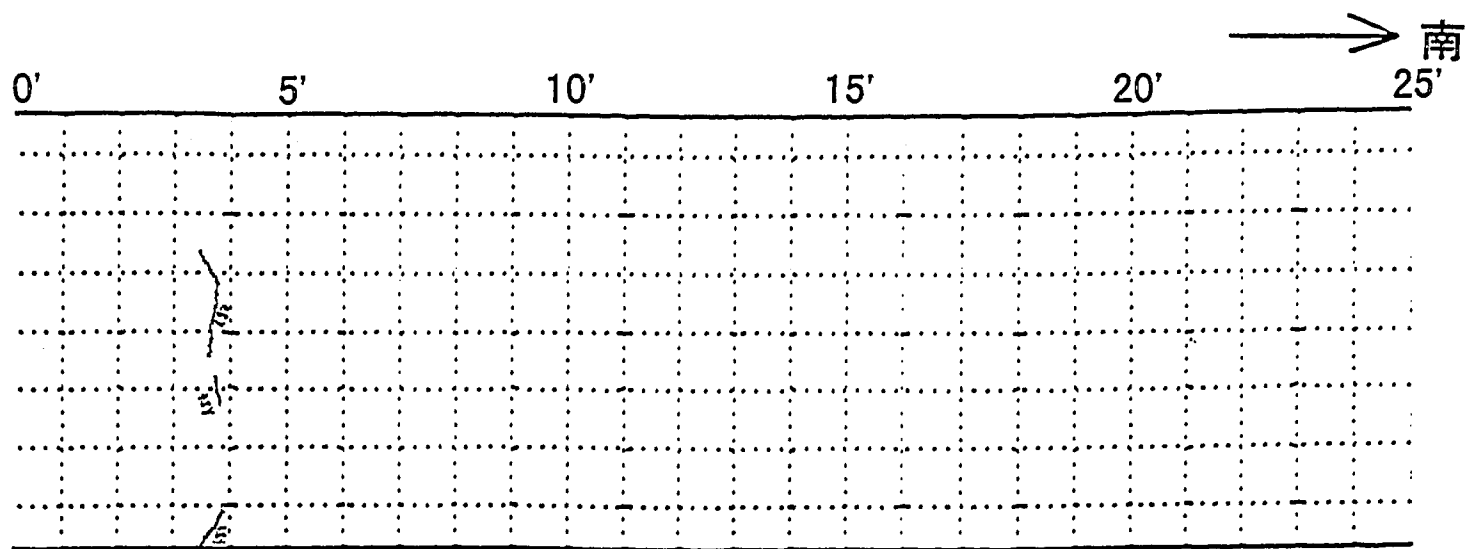
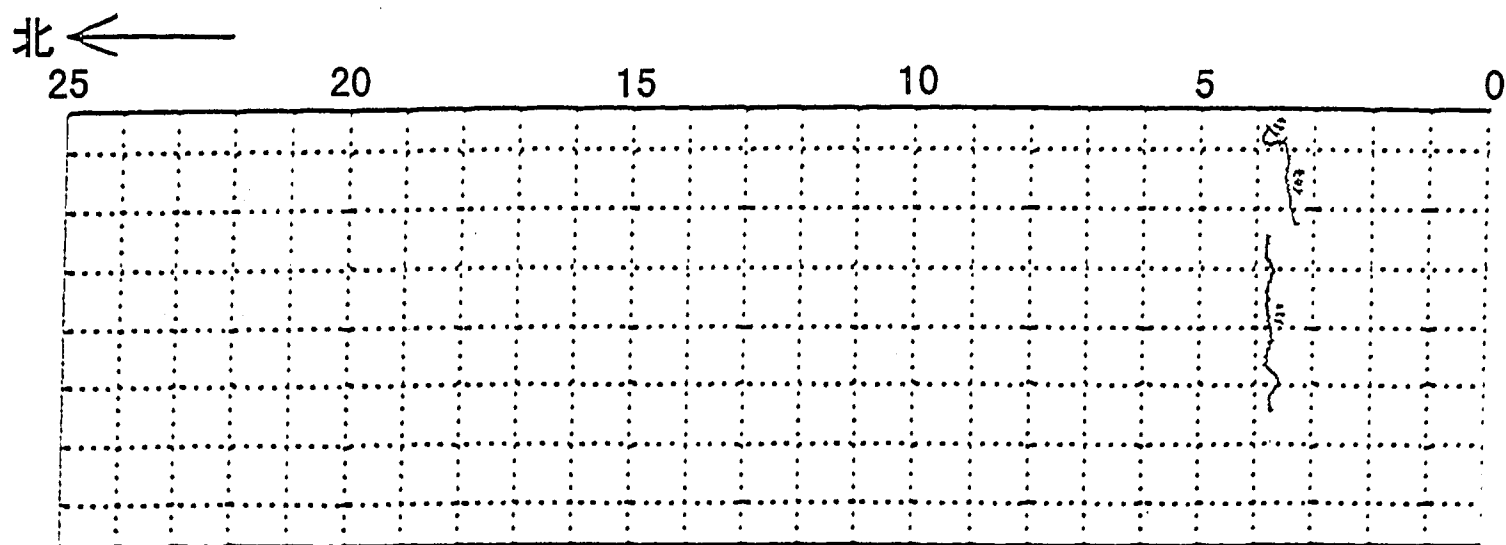
南 ←



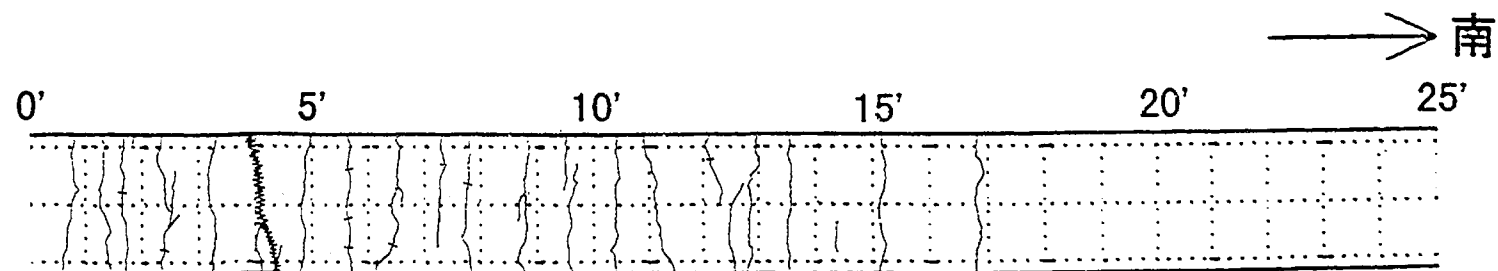
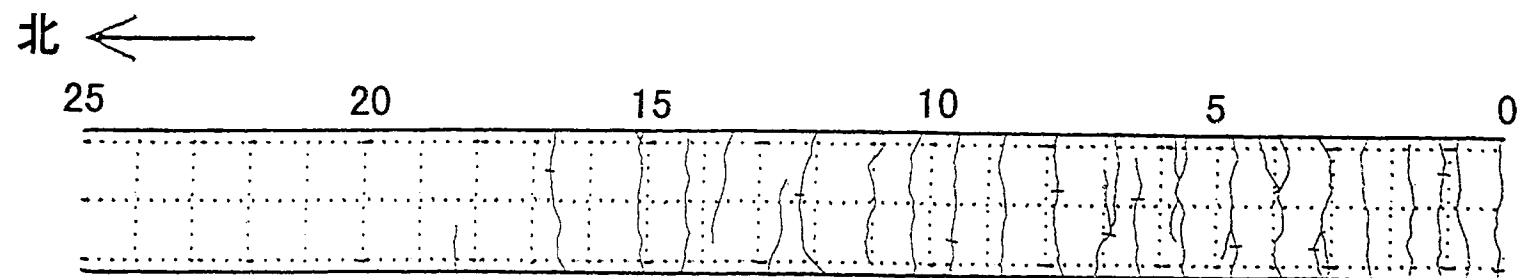
→ 北



# 【上面】 RC4

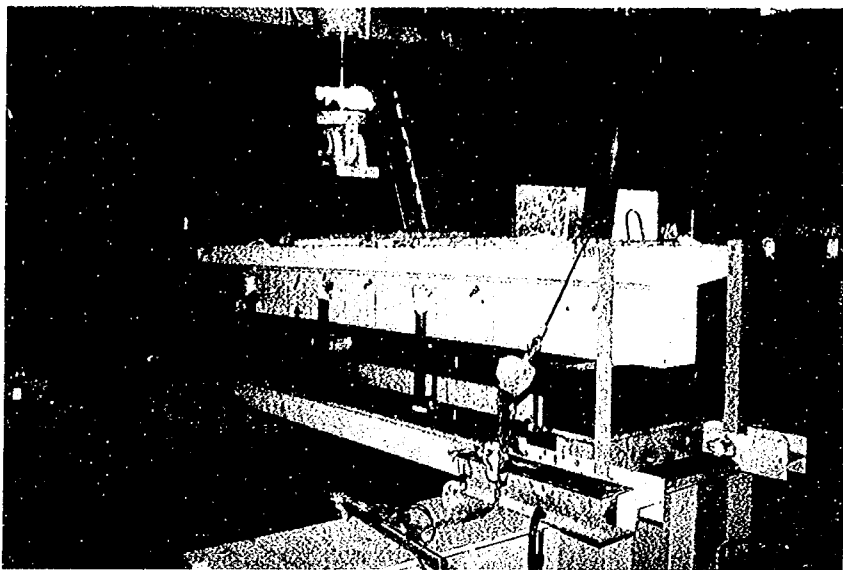


【 下面 】 RC4



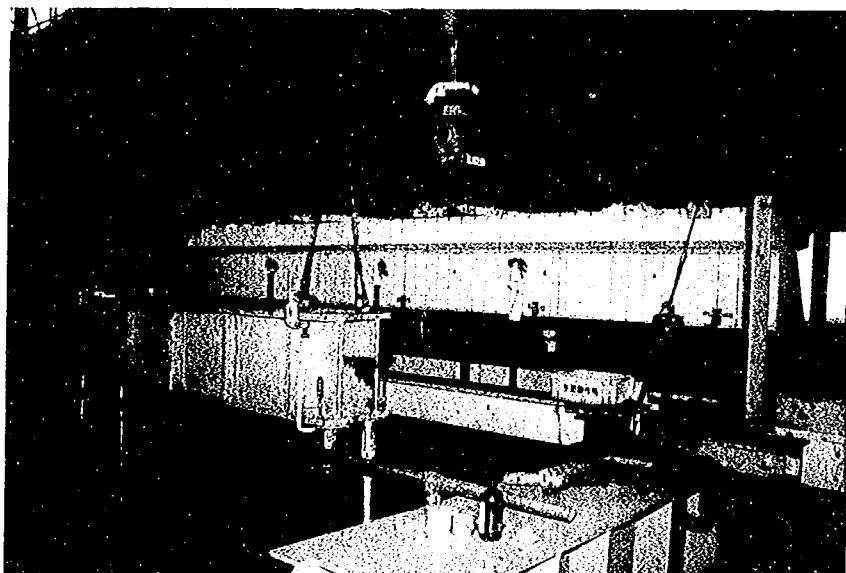
## ●資料－5 載荷試験の写真集

※写真集中のFILE No. は実験進行表に対応しています。

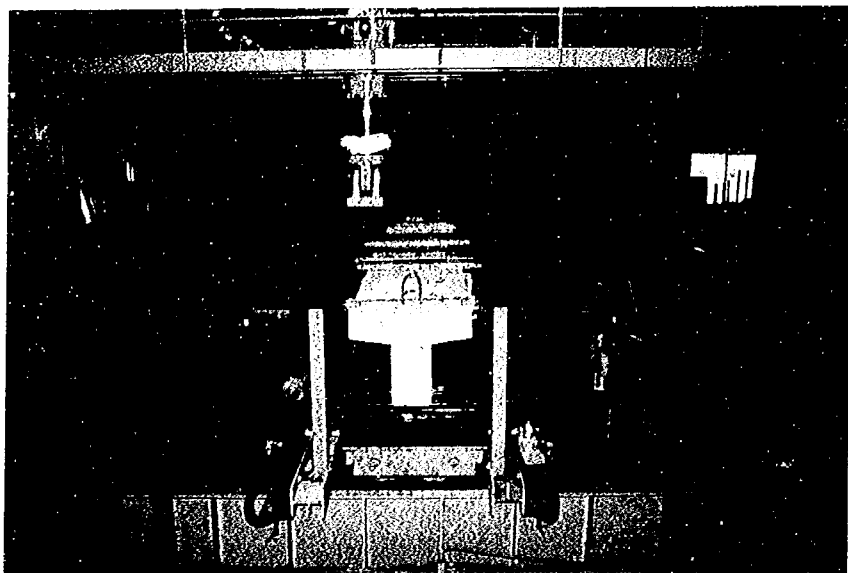


RC1 — 無補強(基準試験体)

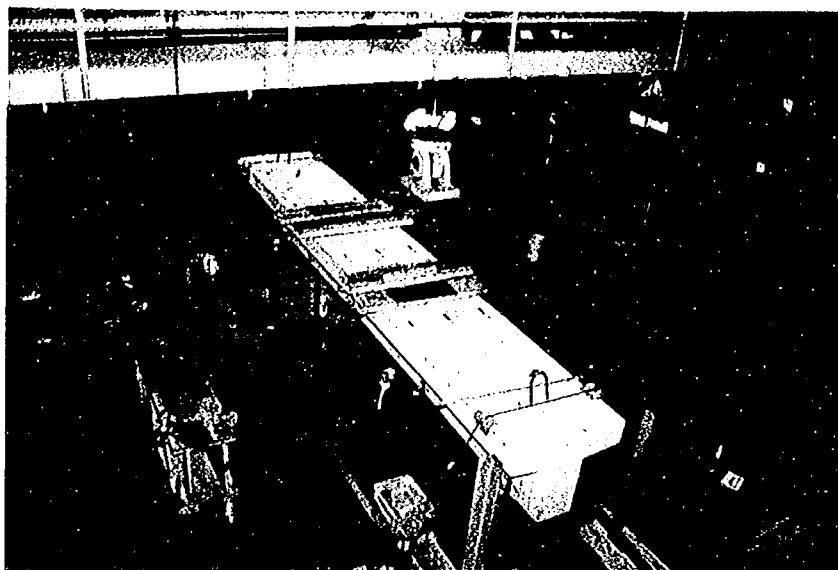
1 供試体設置状況



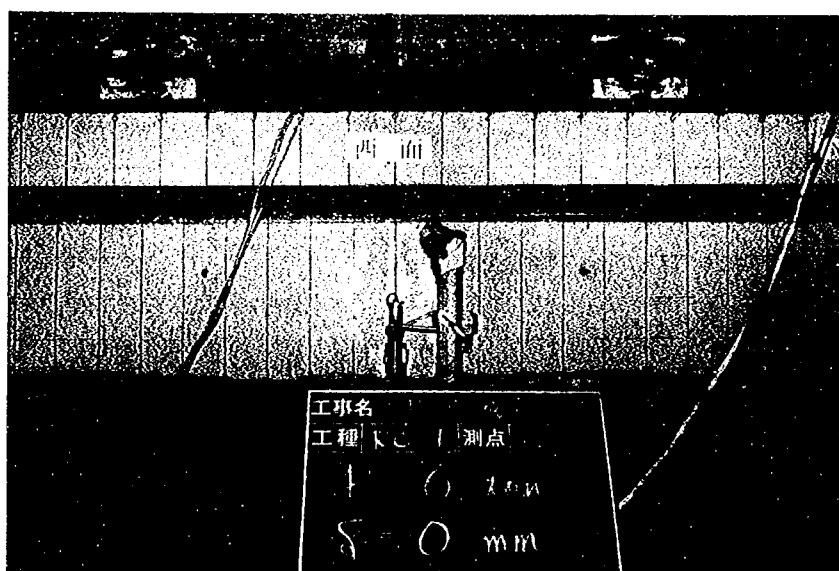
2 供試体設置状況



3 供試体設置状況

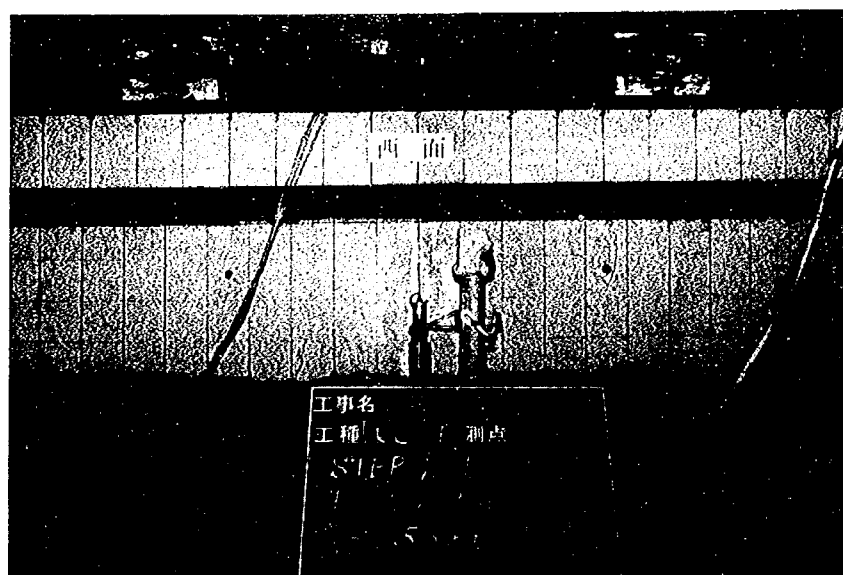


4 供試体設置状況



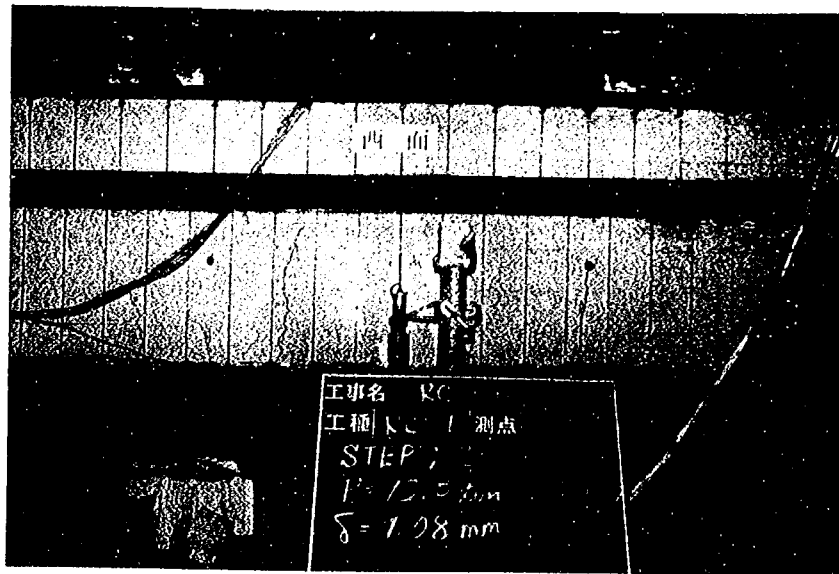
5 FILE No. 1-1

STEP1 (曲げひび割れ導入)

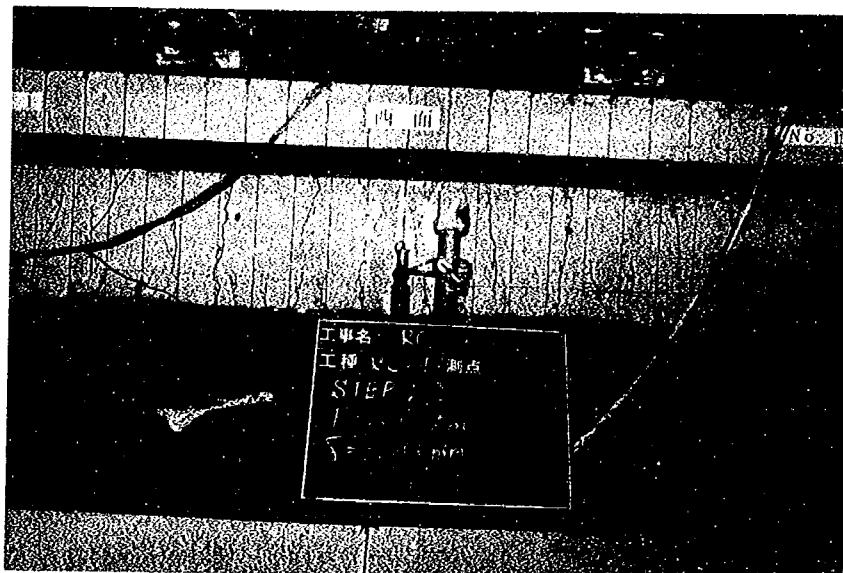


6 FILE No. 8

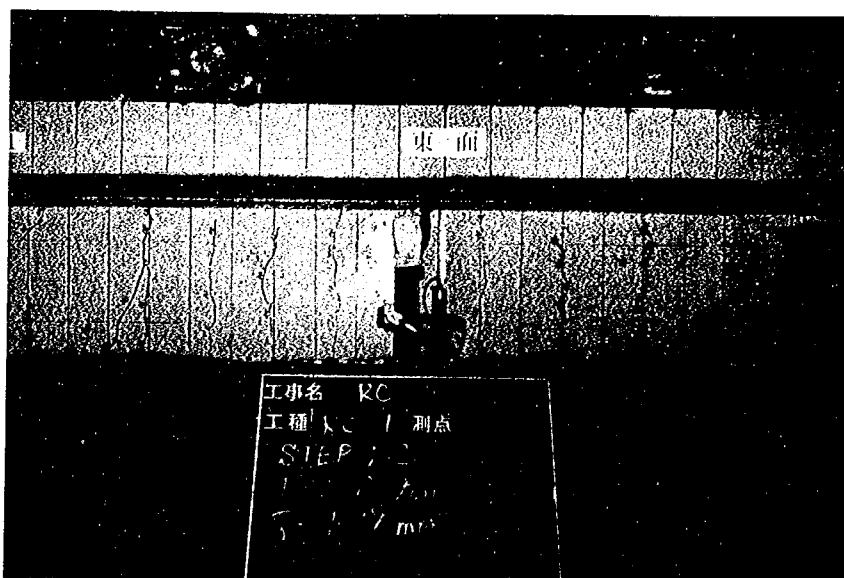
曲げひび割れ発生



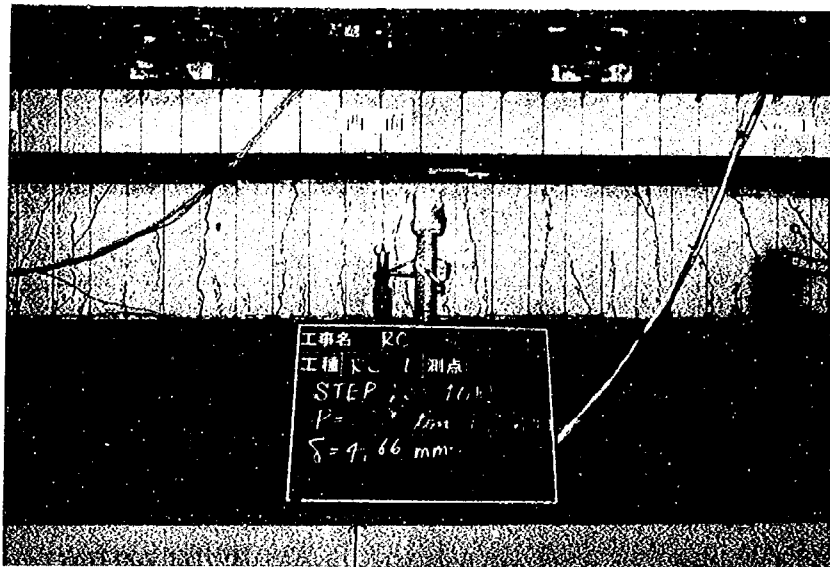
7 FILE No. 2-22  
STEP2 (静的載荷試験)  
死荷重相当



8 FILE No. 33  
L-20相当

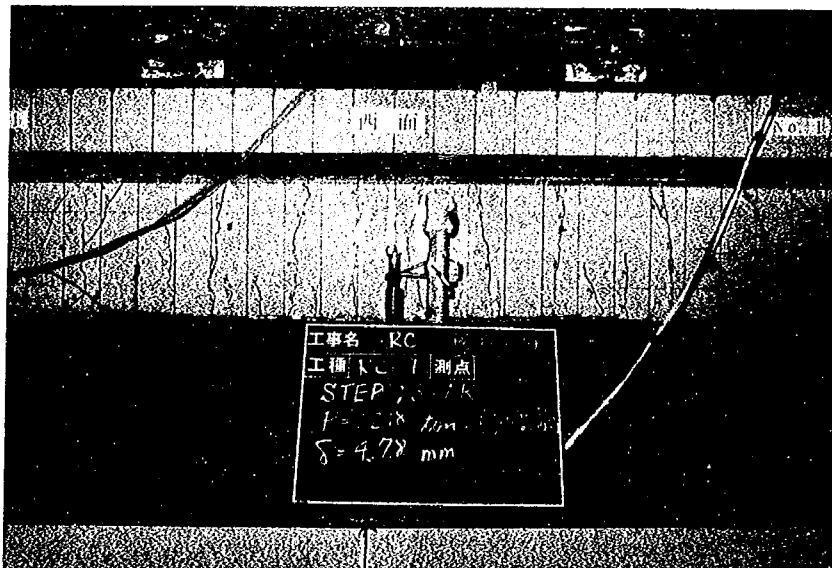


9 FILE No. 36  
B活荷重相当



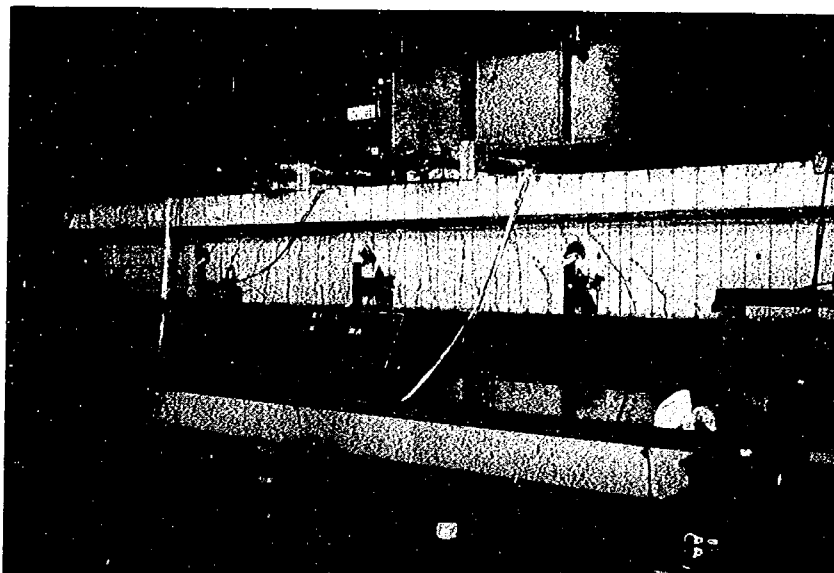
10 FILE No. 3-58

STEP3 (疲労試験)  
繰り返し10回



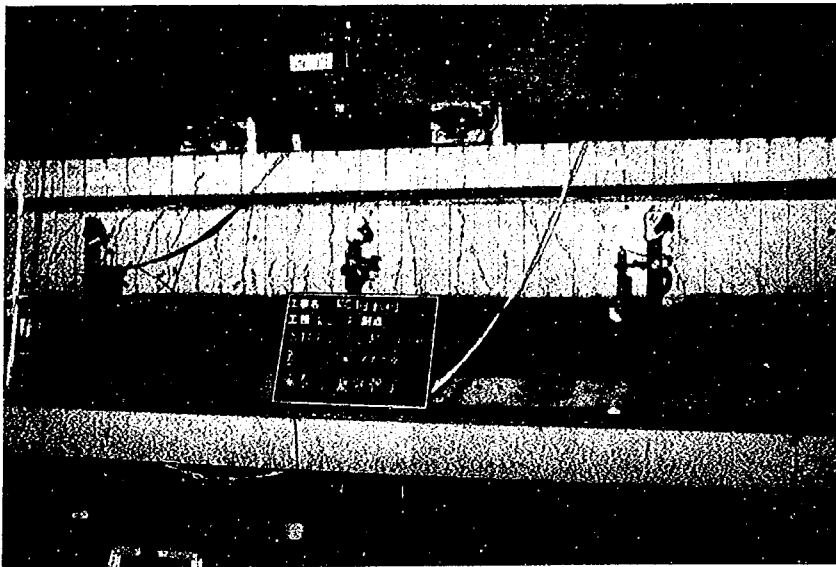
11 FILE No. 68

繰り返し1000回

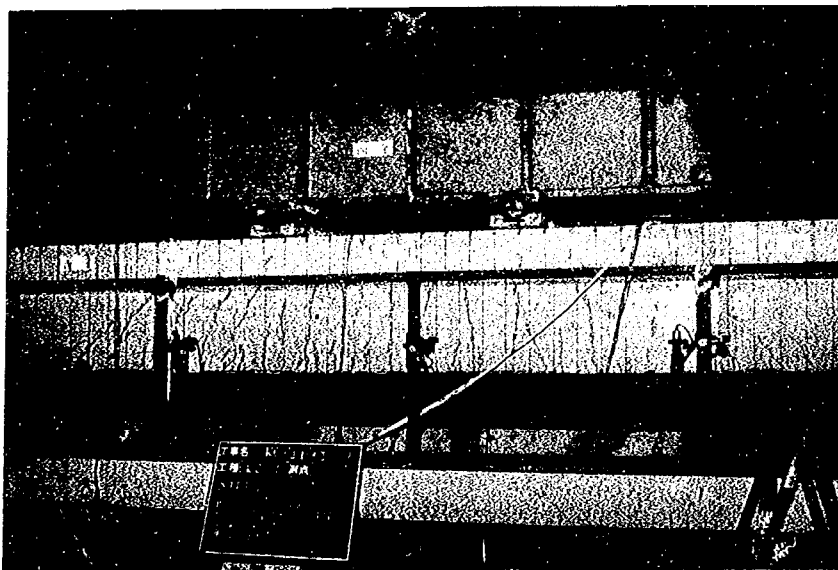


12 FILE No. 80

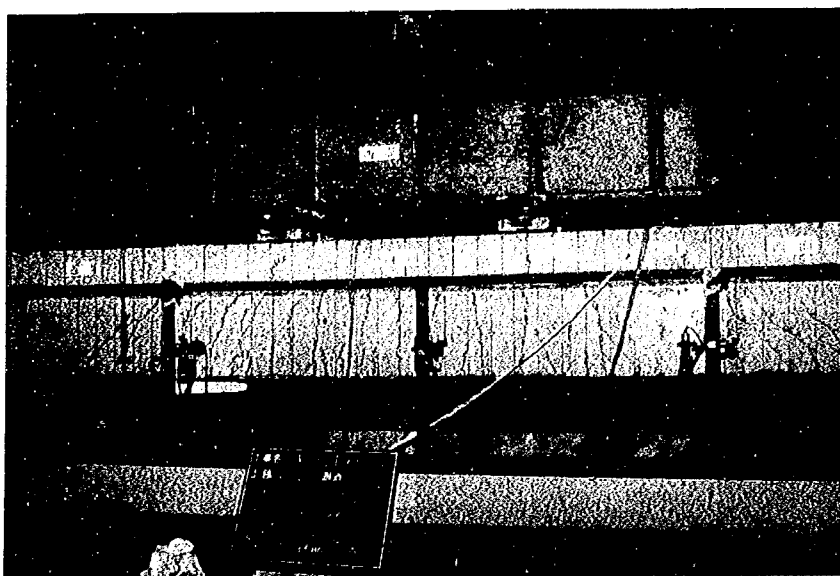
繰り返し10万回



13 FILE No. 130  
繰り返し200万回



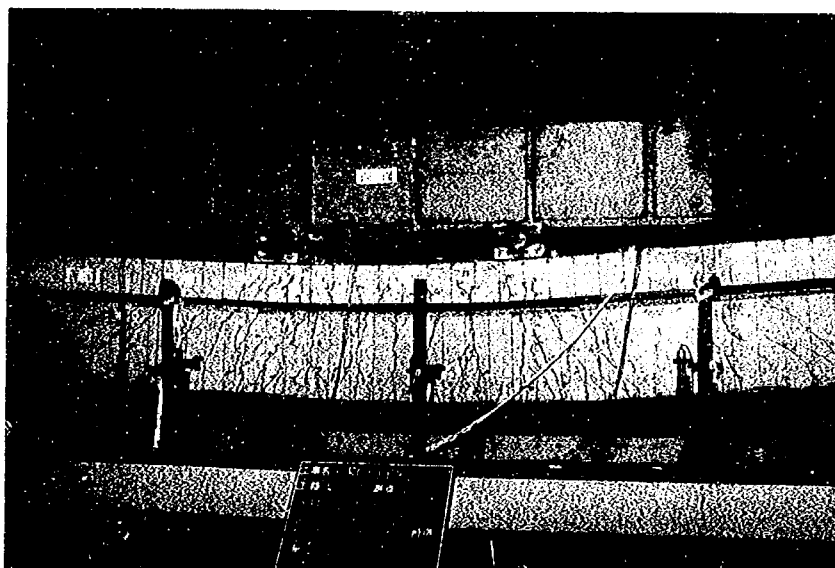
14 FILE No. 4-166  
STEP4 (静的破壊試験)



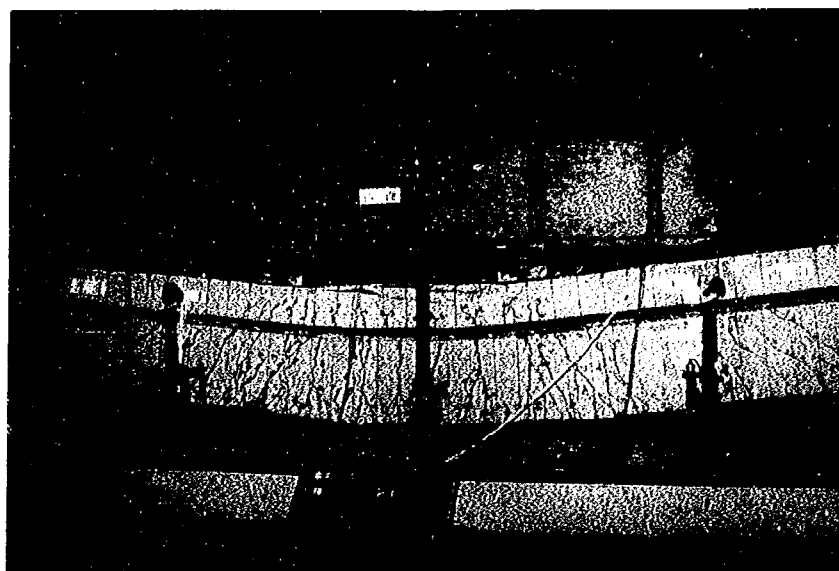
15 FILE No. 187  
鉄筋降伏



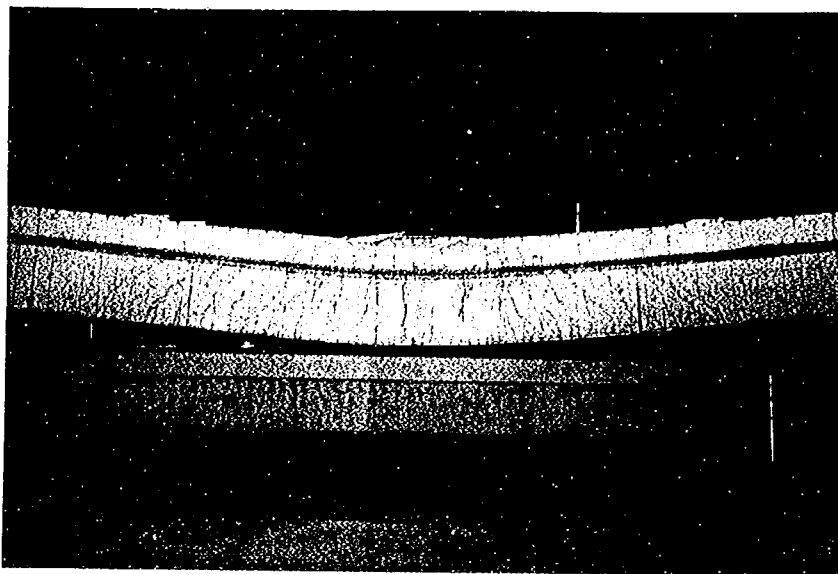
16 FILE No. 226  
压壞



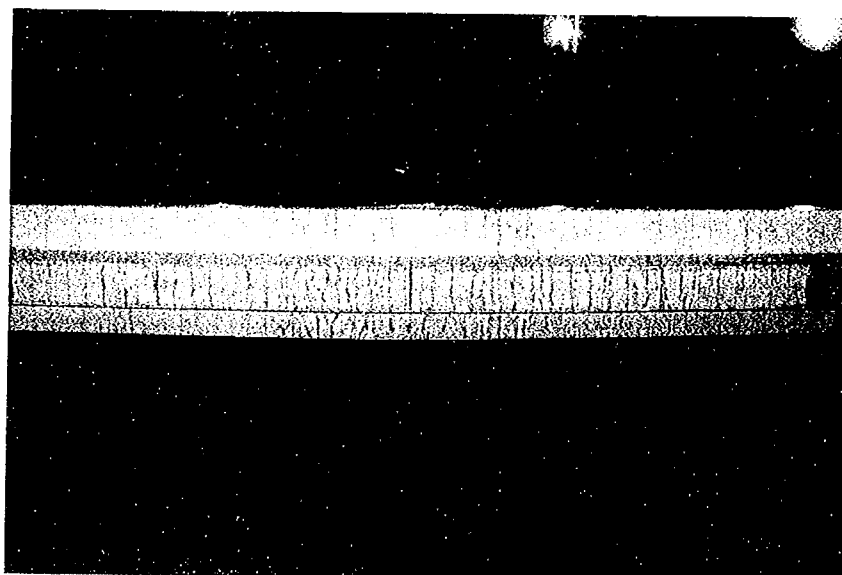
17 FILE No. 242  
破壞過程



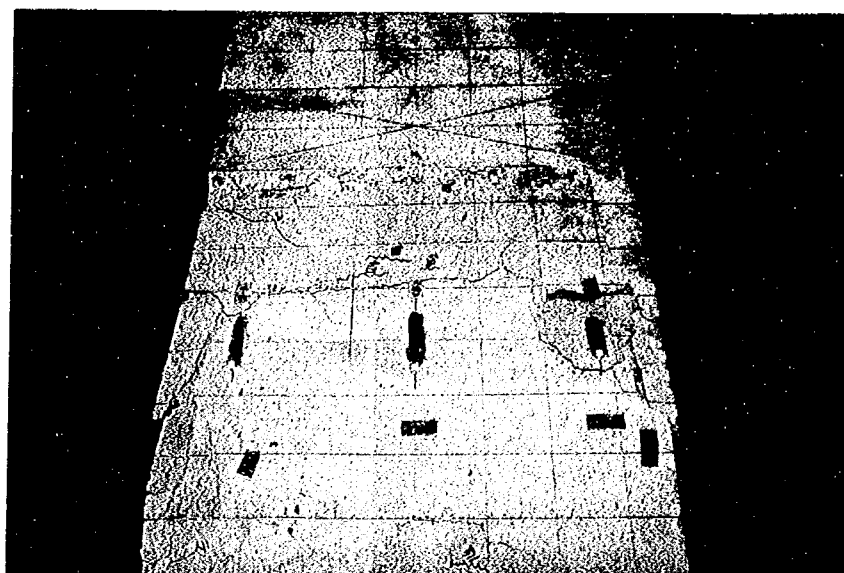
18 FILE No. 256  
破壞過程



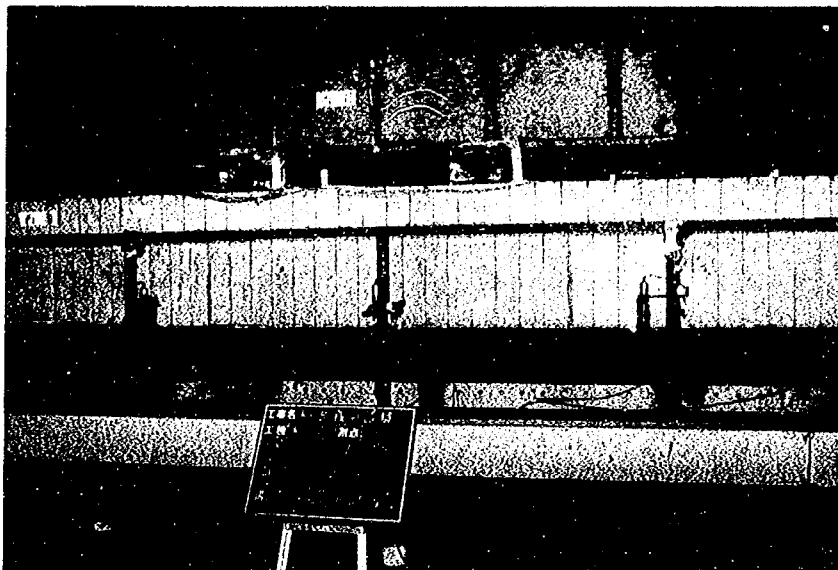
19 試験終了後の供試体  
(横方向)



20 試験終了後の供試体  
(下方向)

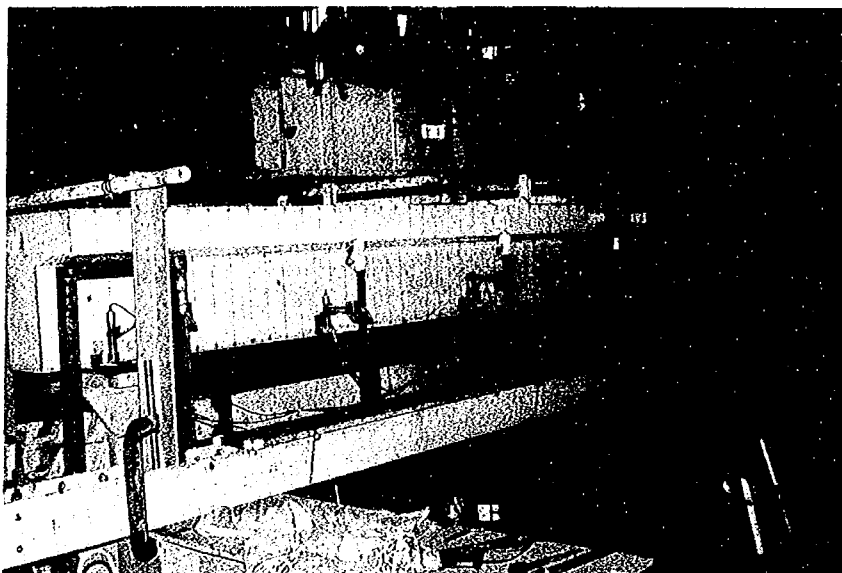


21 試験終了後の供試体

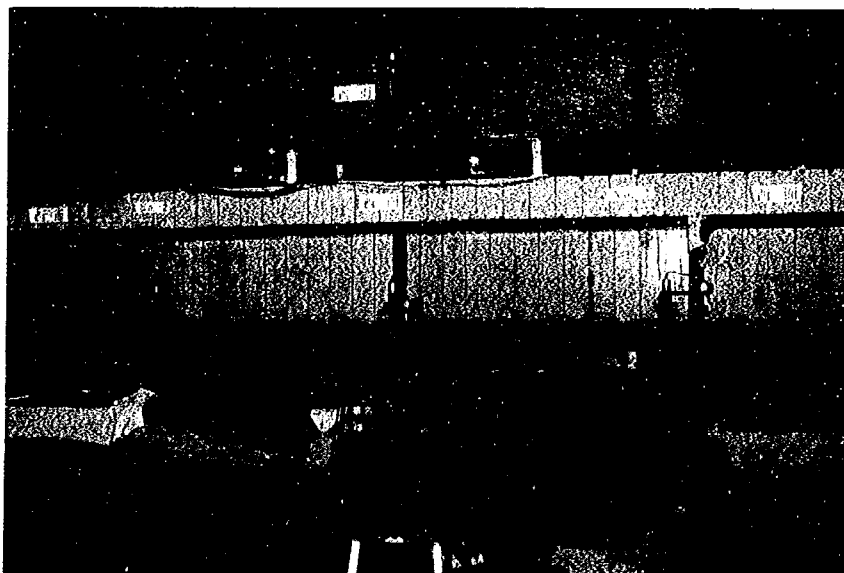


RC2 - 標準(8層×0.167mm)

22 供試体設置状況

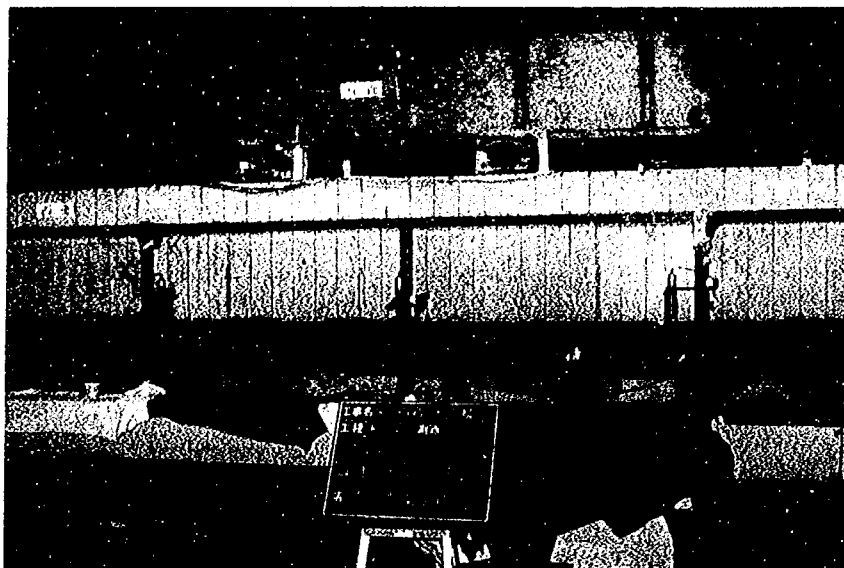


23 供試体設置状況

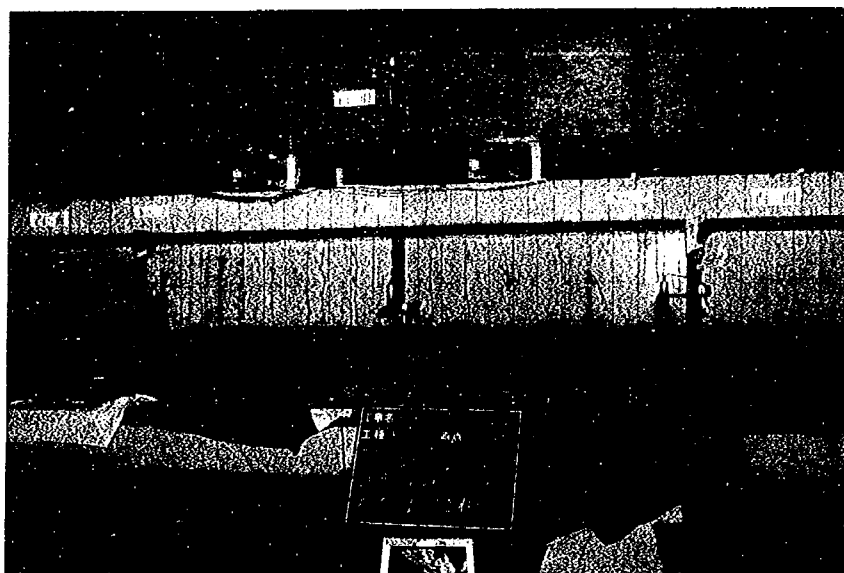


24 FILE No. 1-11

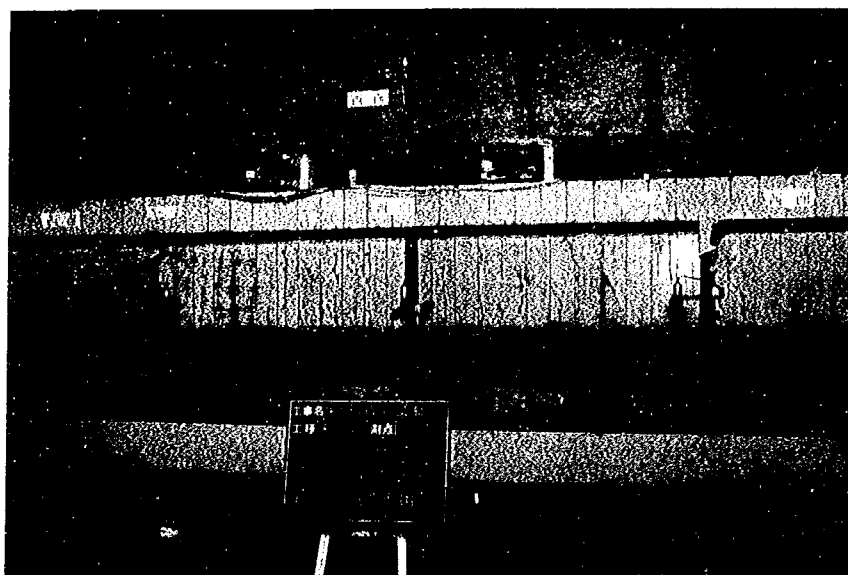
STEP1 (曲げひび割れ導入)  
曲げひび割れ発生



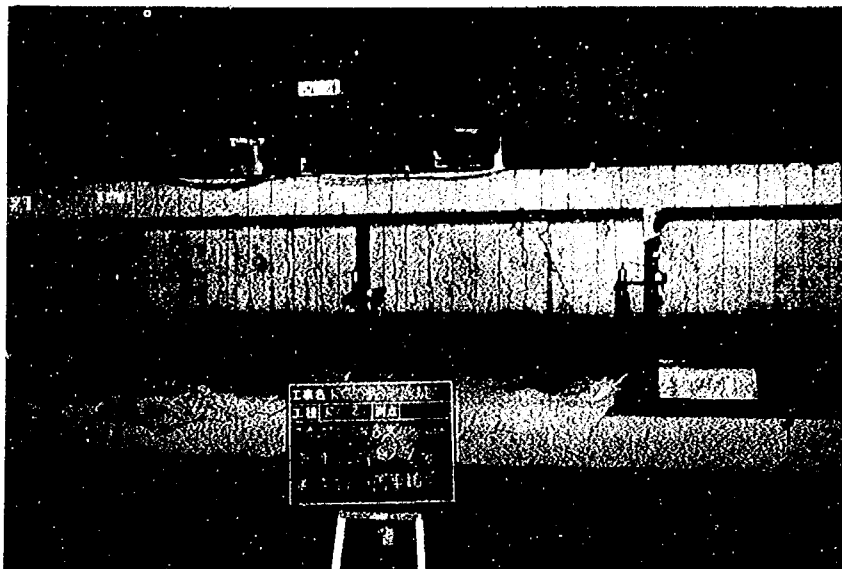
25 FILE No. 2-24  
STEP2 (炭素繊維シート  
接着と養生) 死荷重相当



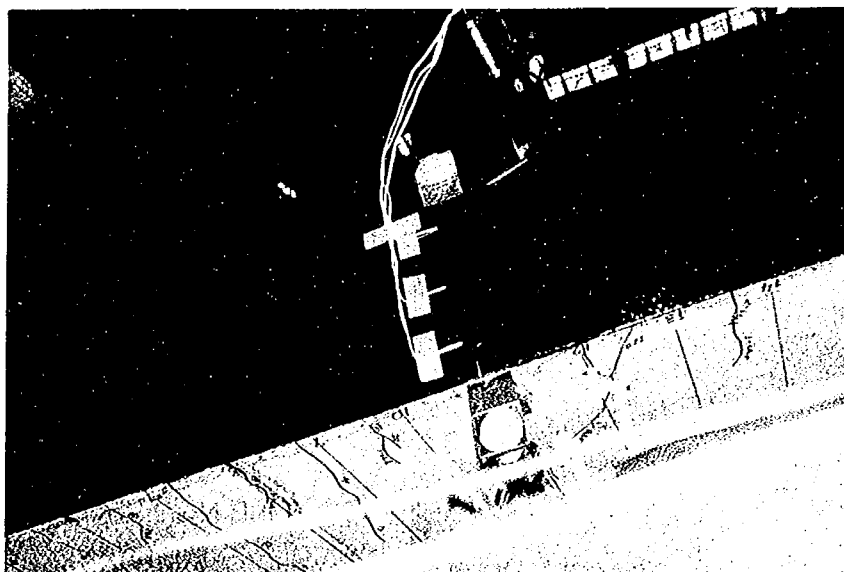
26 FILE No. 35  
L-20相当



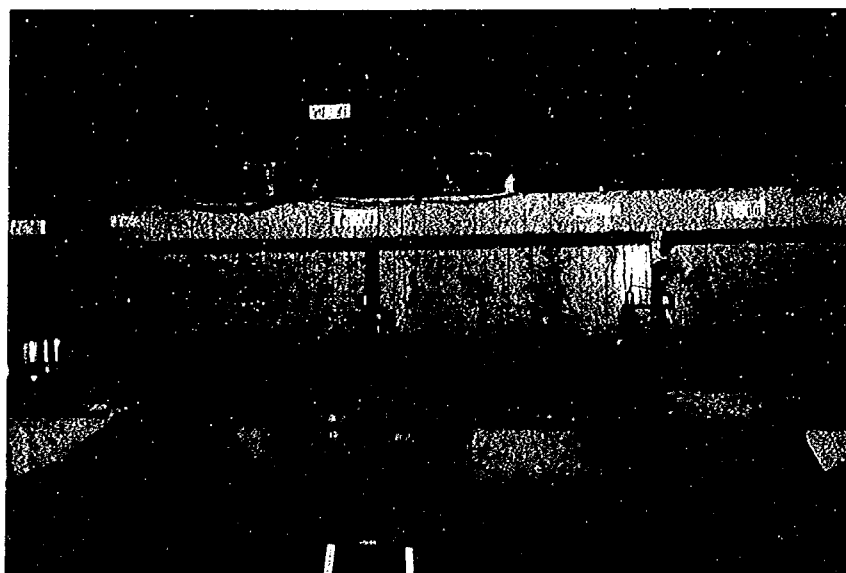
27 FILE No. 38  
B活荷重相当



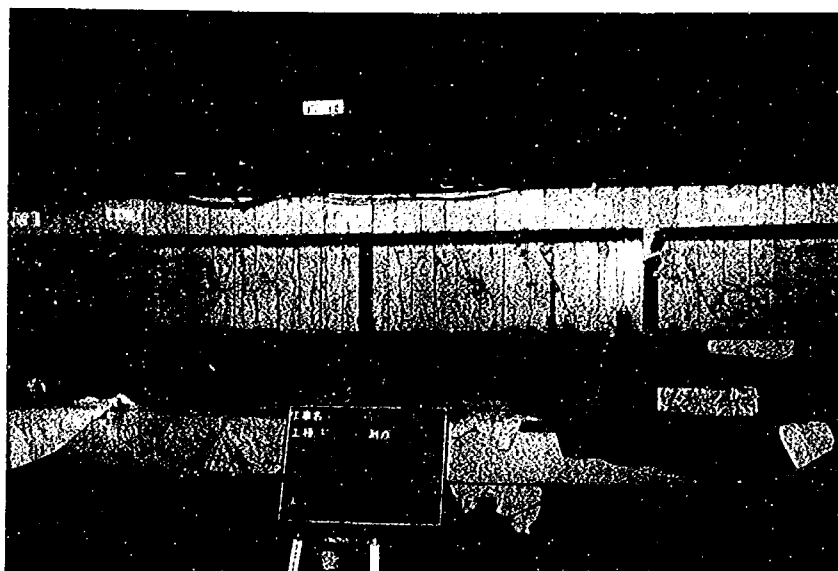
28 FILE No. 3-80  
STEP3 (静的载荷試験)  
B活荷重相当



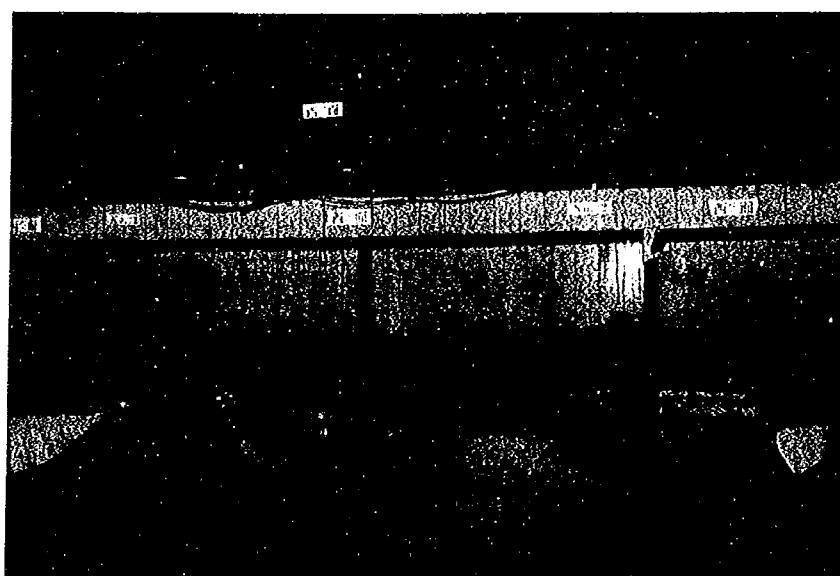
29 FILE No. 3-80  
B活荷重相当時の  
シートの様子



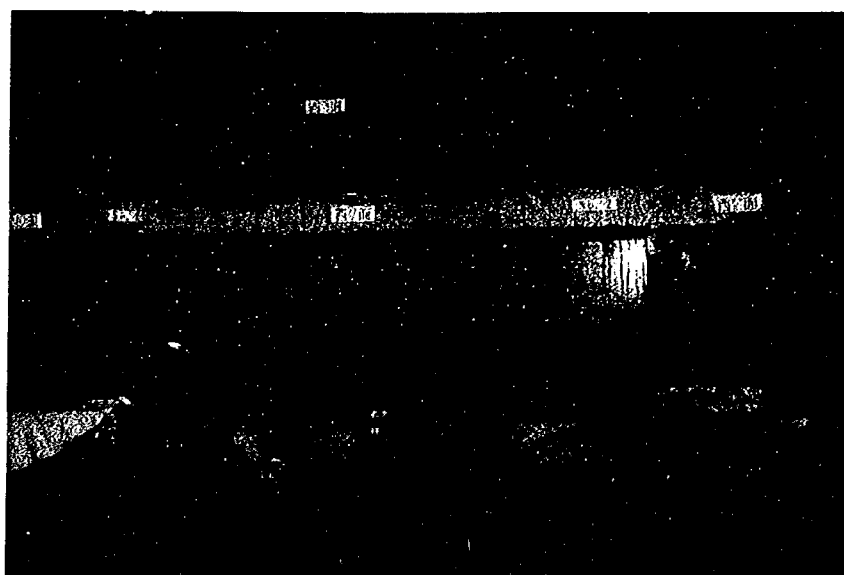
30 FILE No. 4-161  
STEP4 (疲労試験)  
繰り返し200万回終了



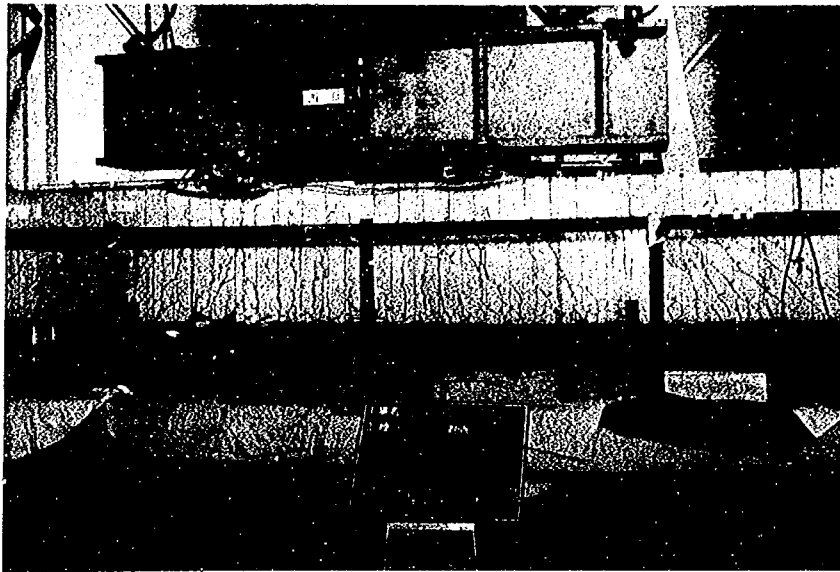
31 FILE No. 5-188  
STEP5 (靜的破壞試驗)



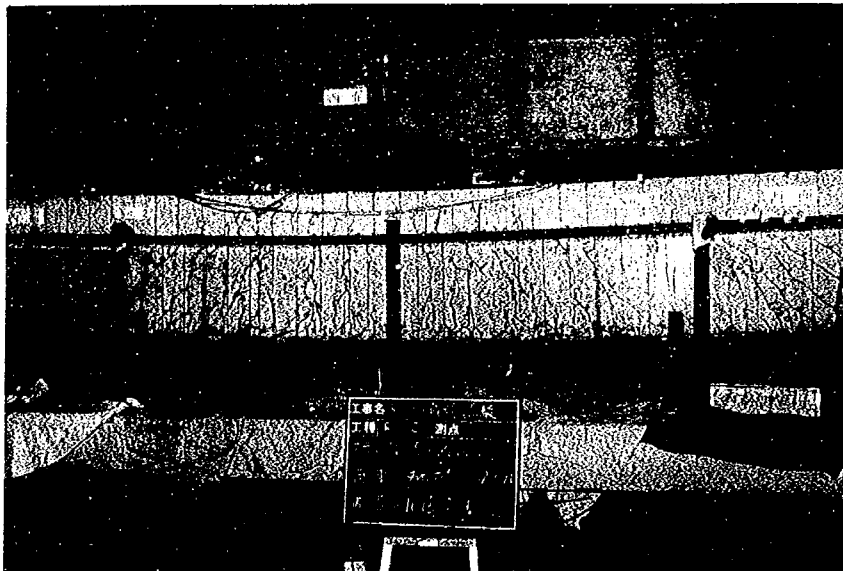
32 FILE No. 198  
鉄筋降伏



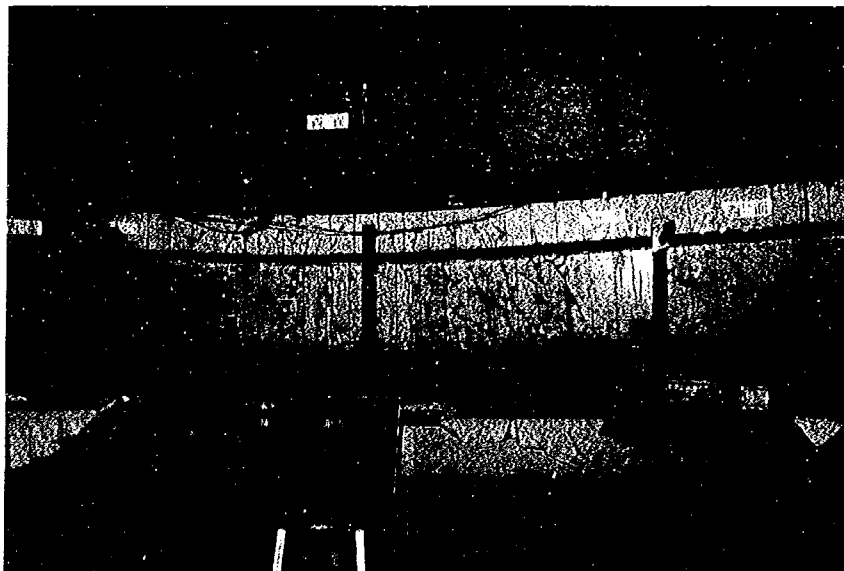
33 FILE No. 209  
破壞過程



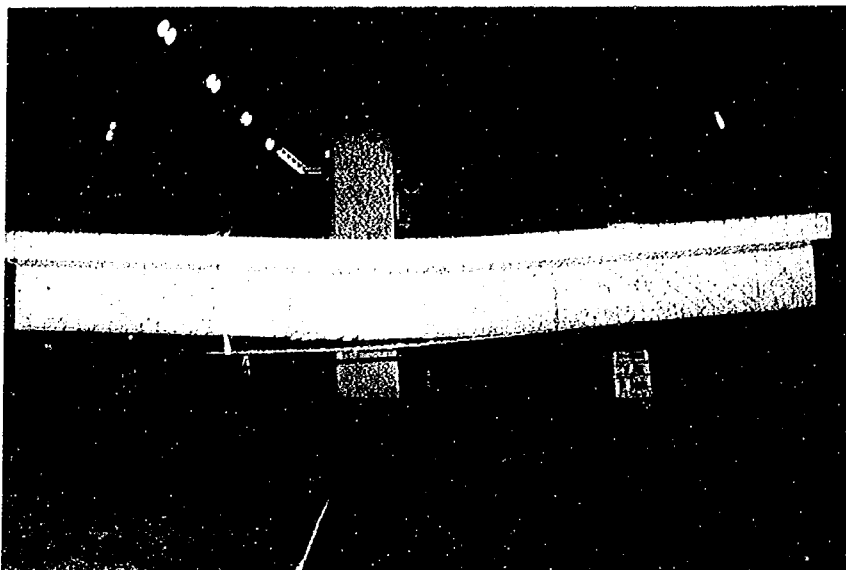
34 FILE No. 218  
炭素繊維剥離



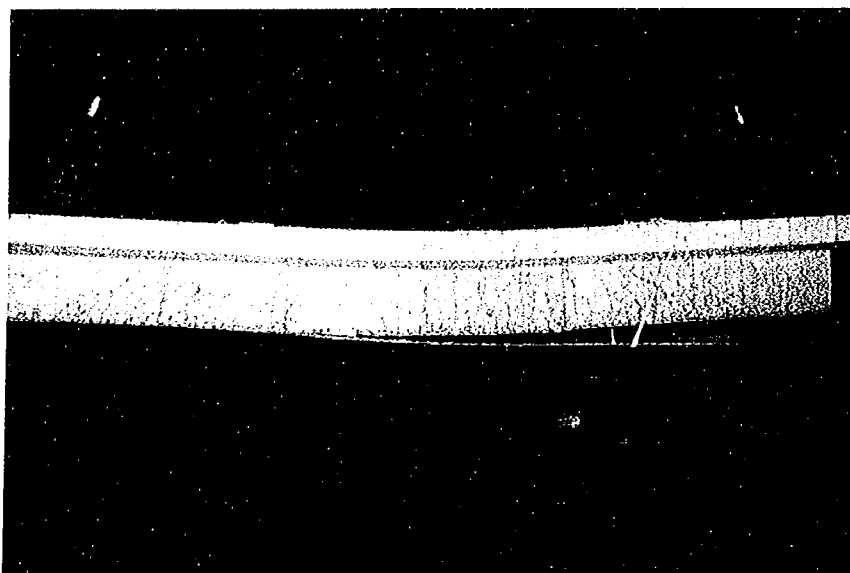
35 FILE No. 226  
圧壊



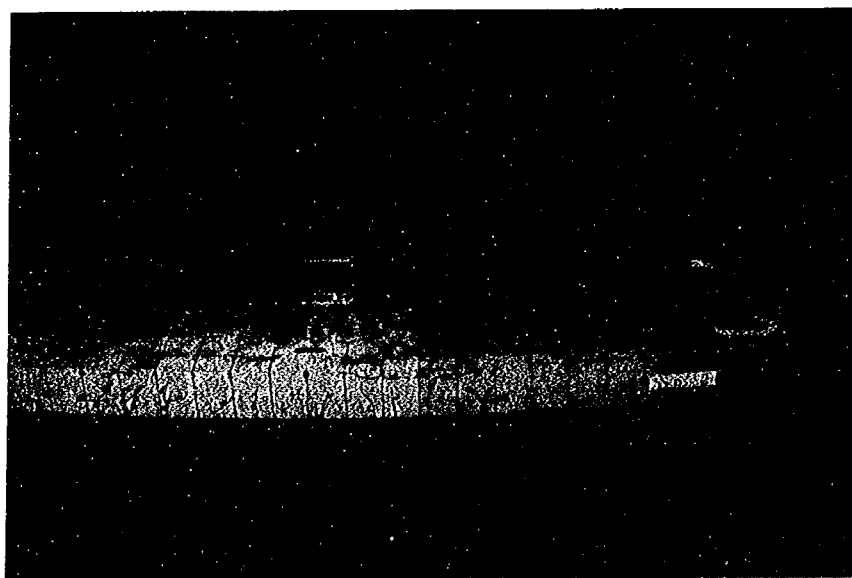
36 FILE No. 233  
試験終了



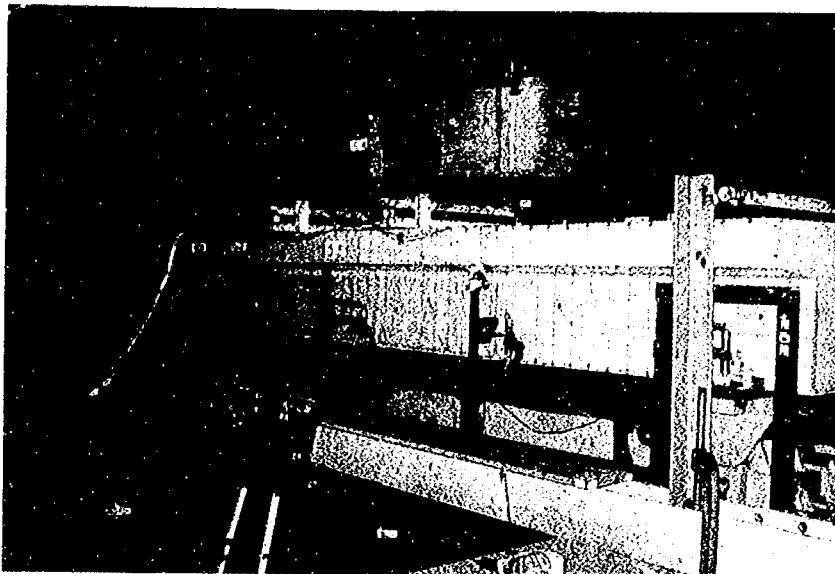
37 試験終了後の供試体  
(横方向)



38 試験終了後の供試体  
(横方向)



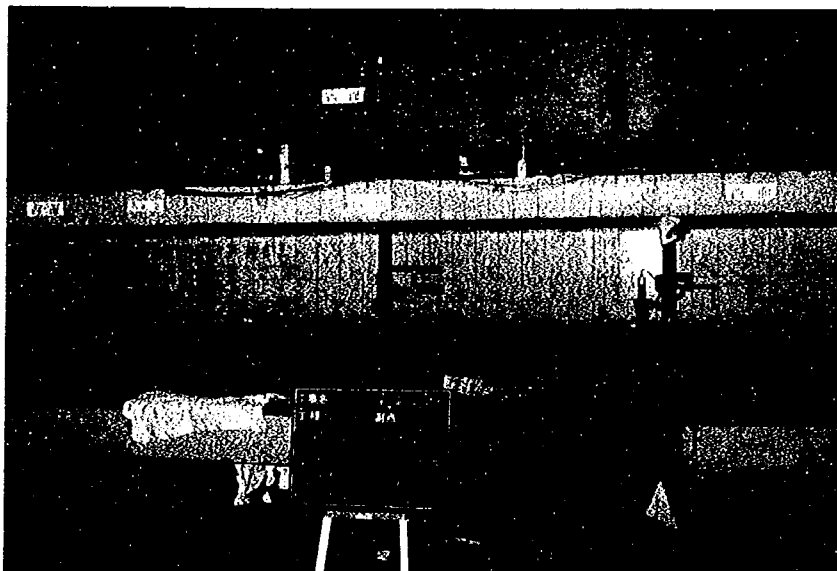
39 試験終了後の供試体



RC3 — 高弾性(3層×0.143mm)

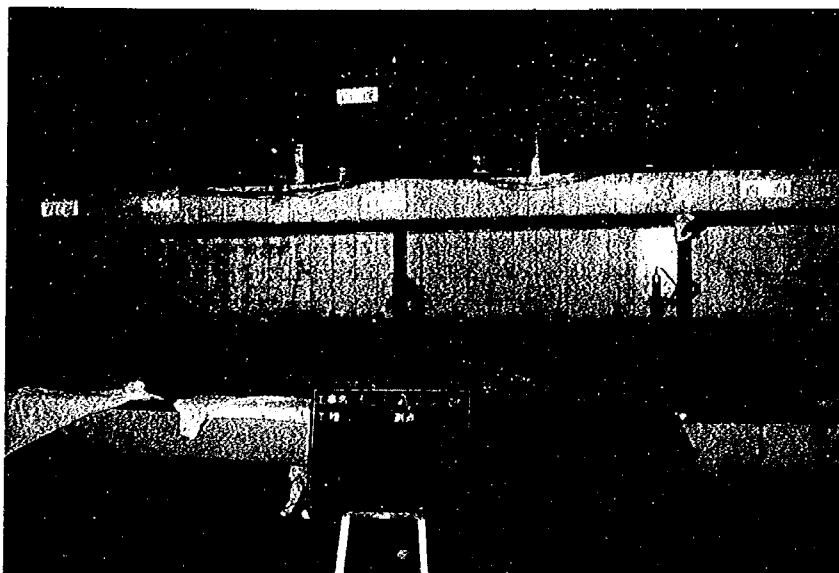
40 FILE No. 1-1

STEP1 (曲げひび割れ導入)  
供試体設置状況



41 FILE No. 10

曲げひび割れ発生

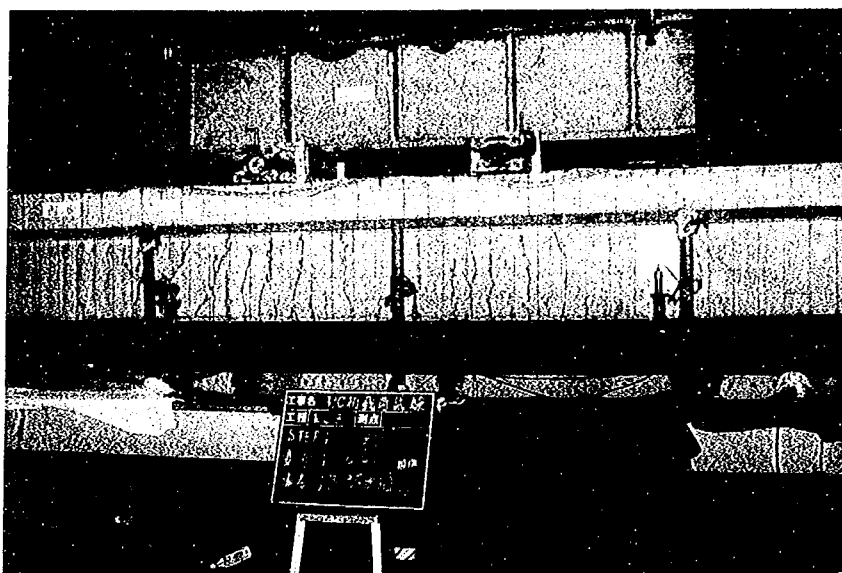


42 FILE No. 2-23

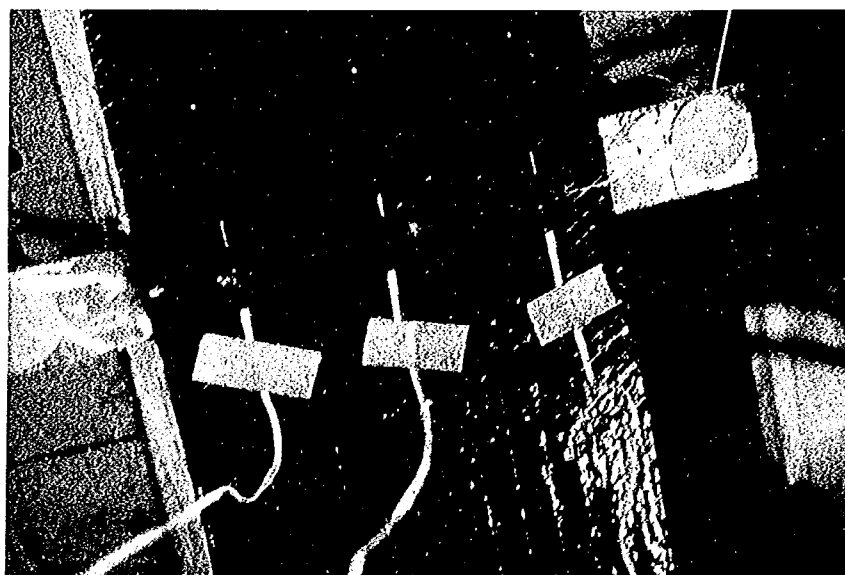
STEP2 (静的载荷試験)  
死荷重相当



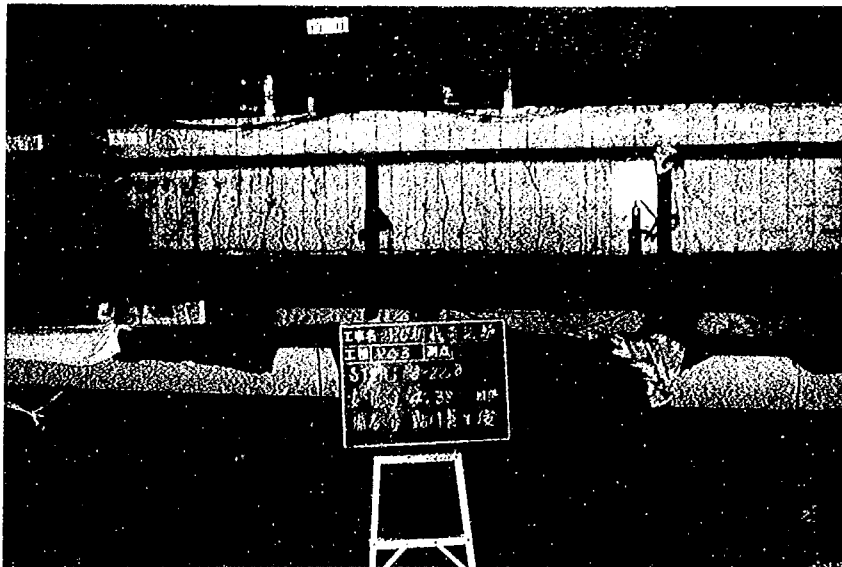
43 FILE No. 34  
L-20相当



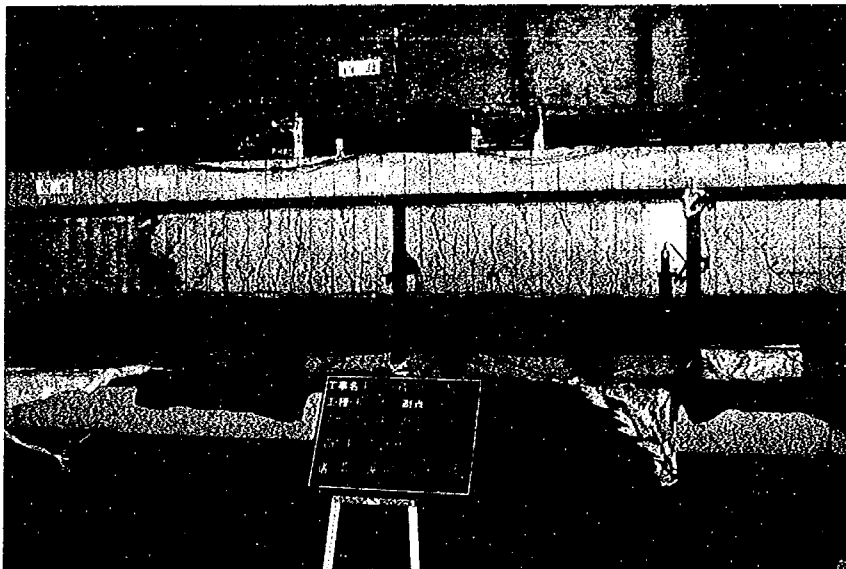
44 FILE No. 37  
B活荷重相当



45 FILE No. 37  
B活荷重相当時の  
シートの様子



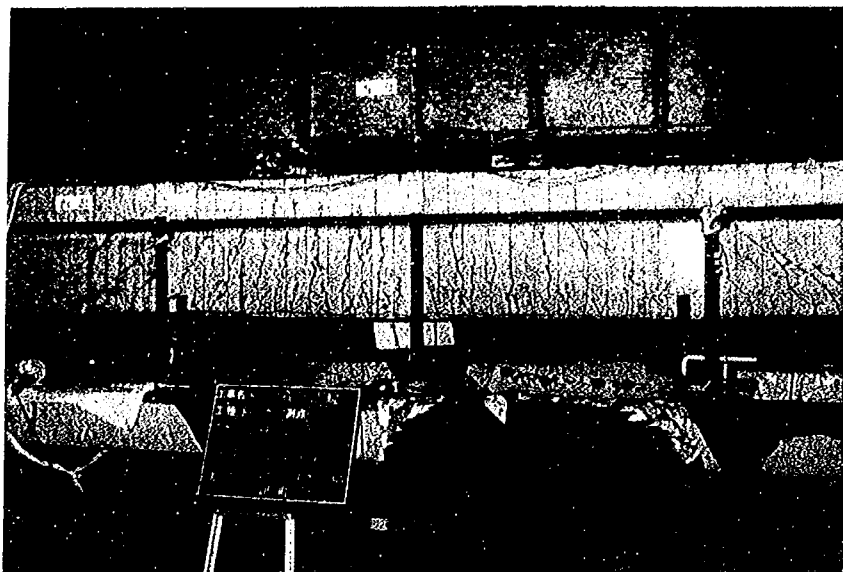
46 FILE No. 3-79  
STEP3 (静的載荷試験)  
B活荷重相当



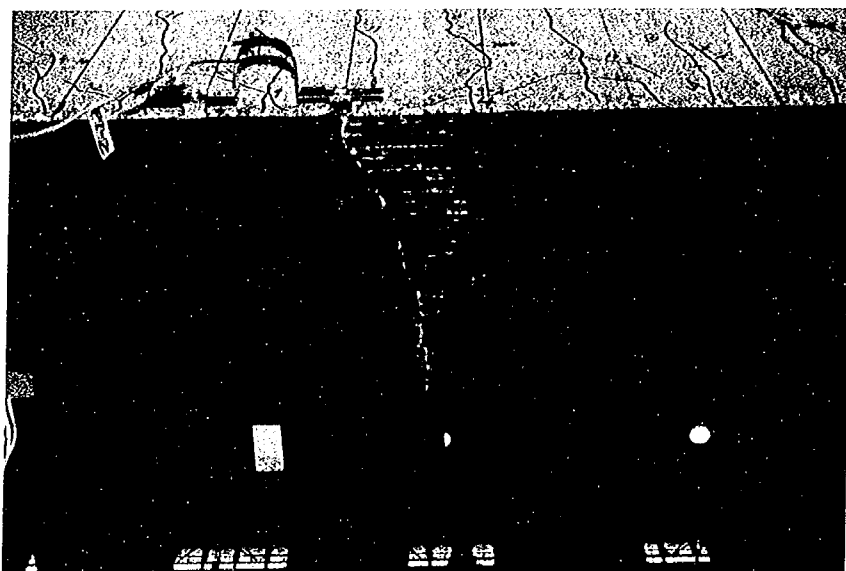
47 FILE No. 4-160  
STEP4 (疲労試験)  
繰り返し200万回終了



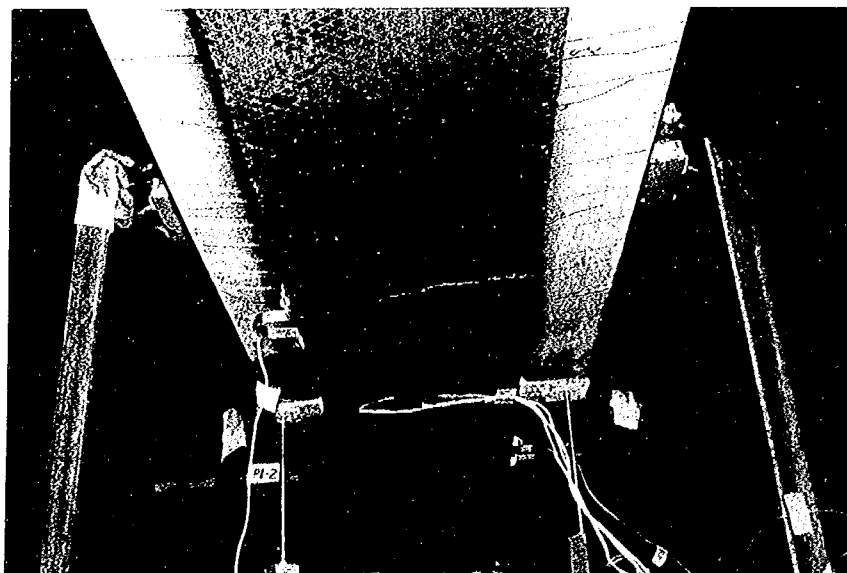
48 FILE No. 5-199  
STEP5 (静的破壊試験)  
鉄筋降伏



49 FILE No. 204  
炭素繊維シート破断



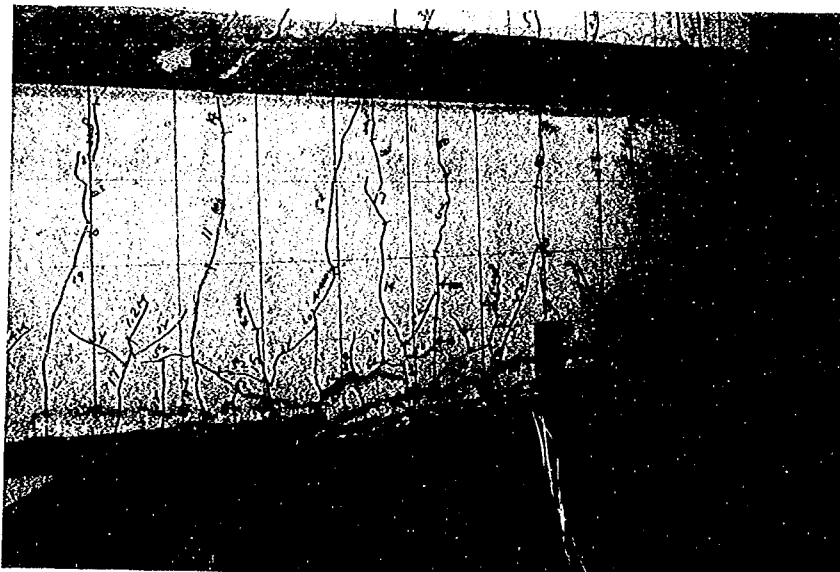
50 炭素繊維シート  
破断の様子



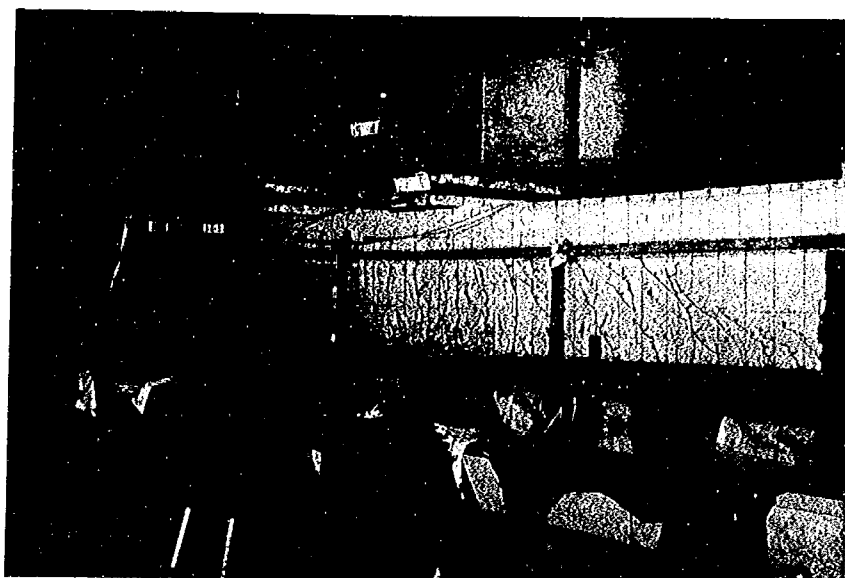
51 炭素繊維シート  
破断の様子



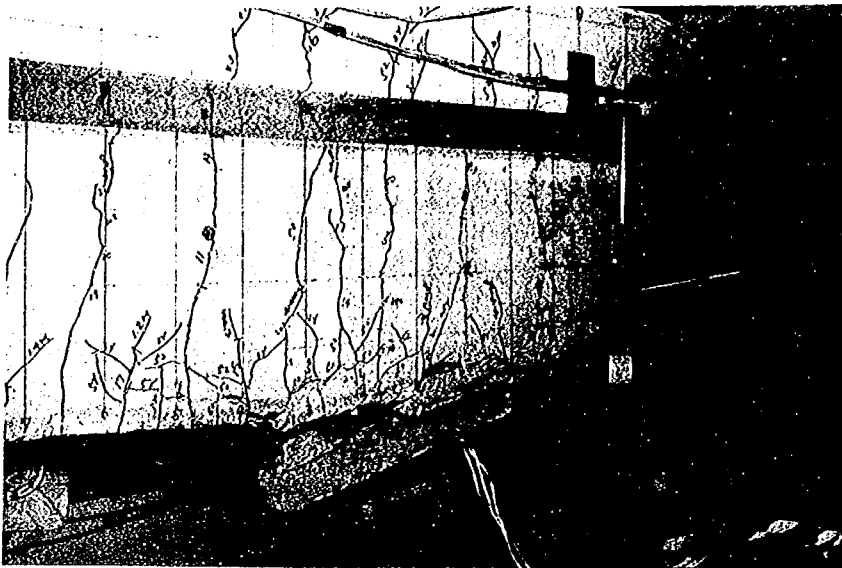
52 FILE No. 207  
破壊過程



53 破壊の様子



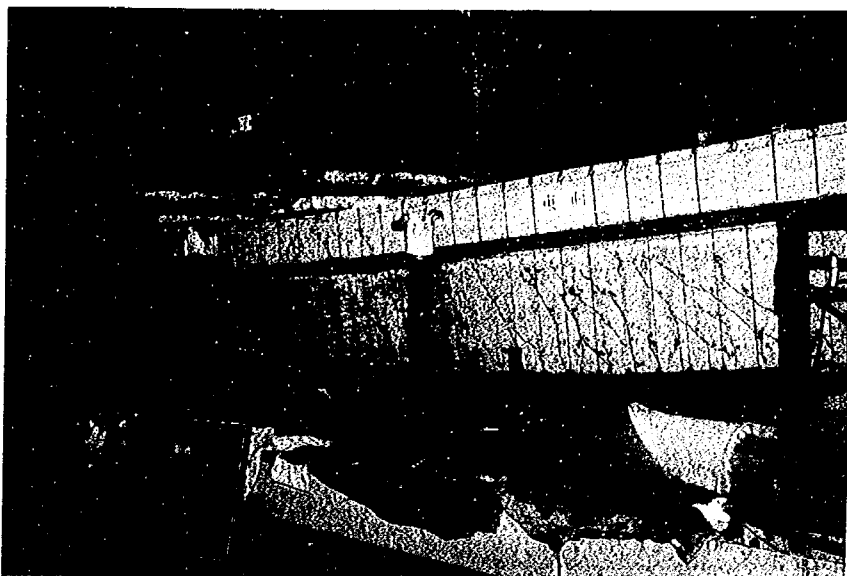
54 FILE No. 214  
圧壊



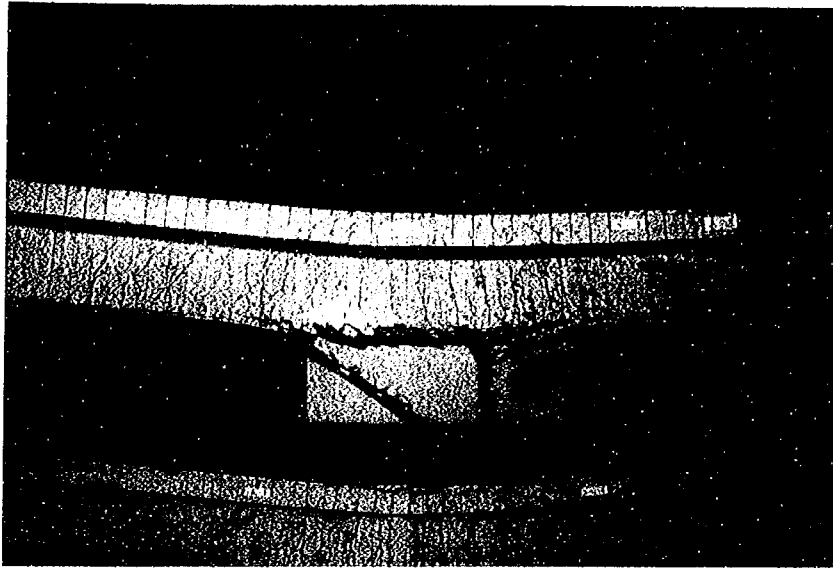
55 圧壊時の様子



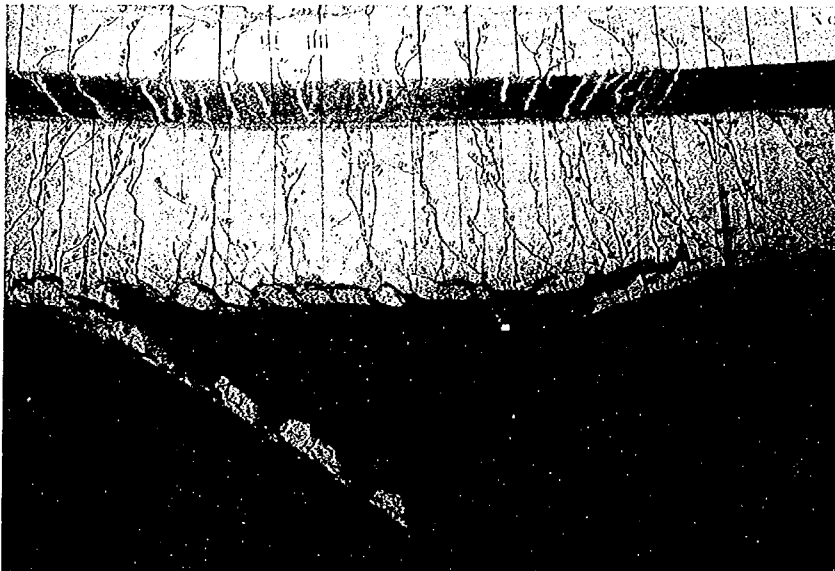
56 FILE No. 222  
破壊過程



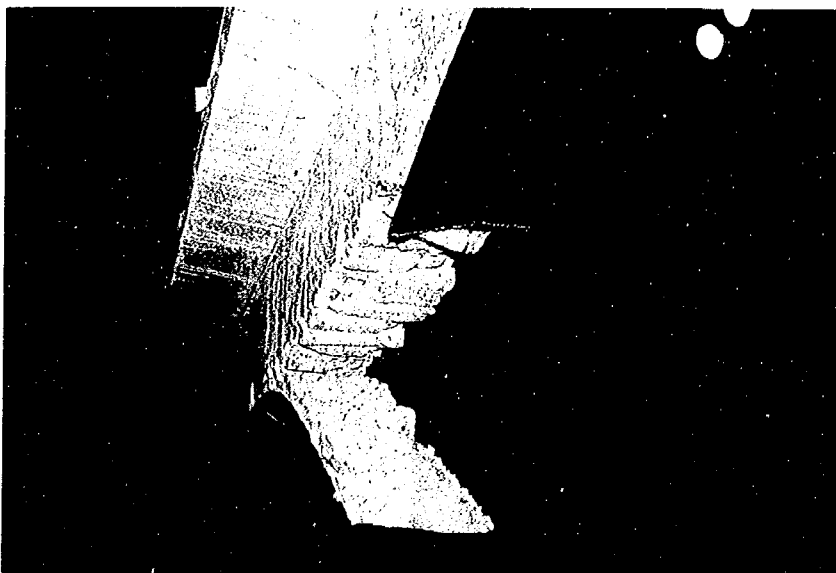
57 FILE No. 232  
破壊過程(終局状態)



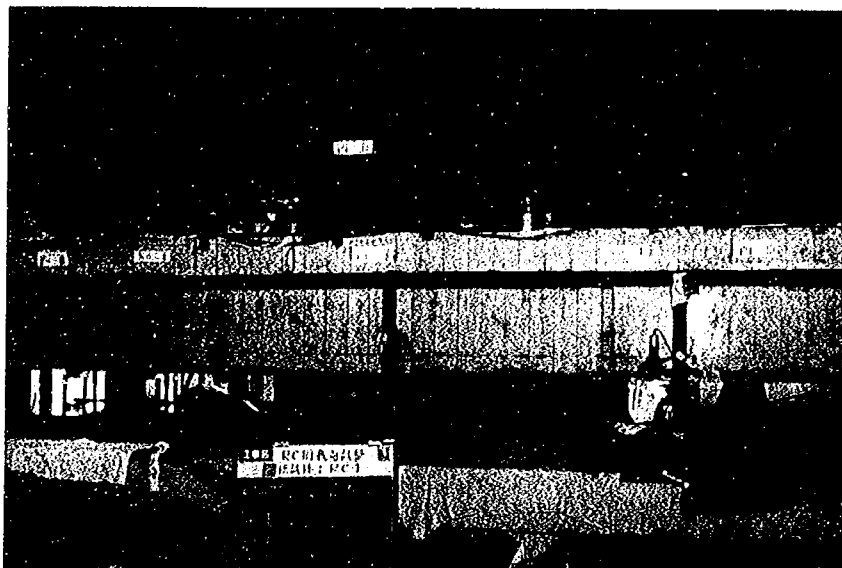
58 試験終了後の供試体  
(横方向)



59 試験終了後の供試体  
(横方向)

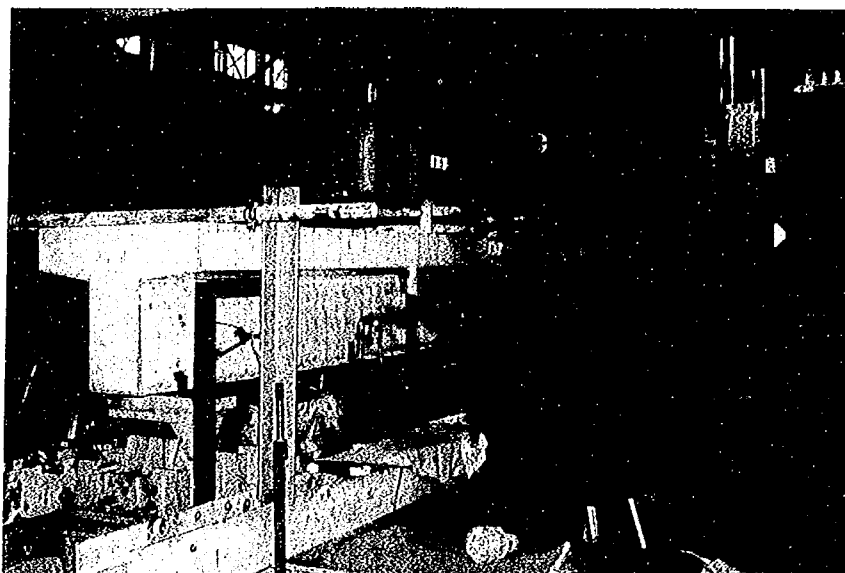


60 試験終了後の供試体  
(下方方向)

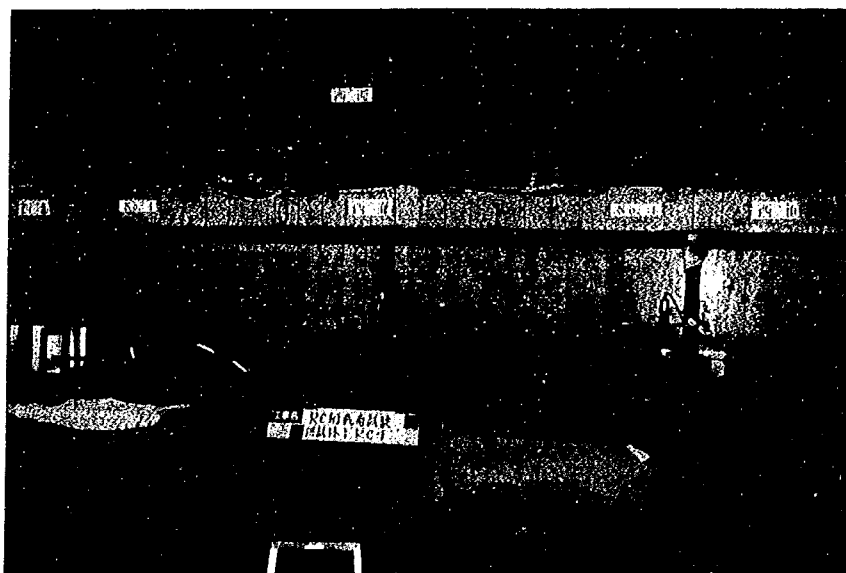


RC4 — 高弾性(6層×0.167mm)

61 供試体設置状況



62 供試体設置状況

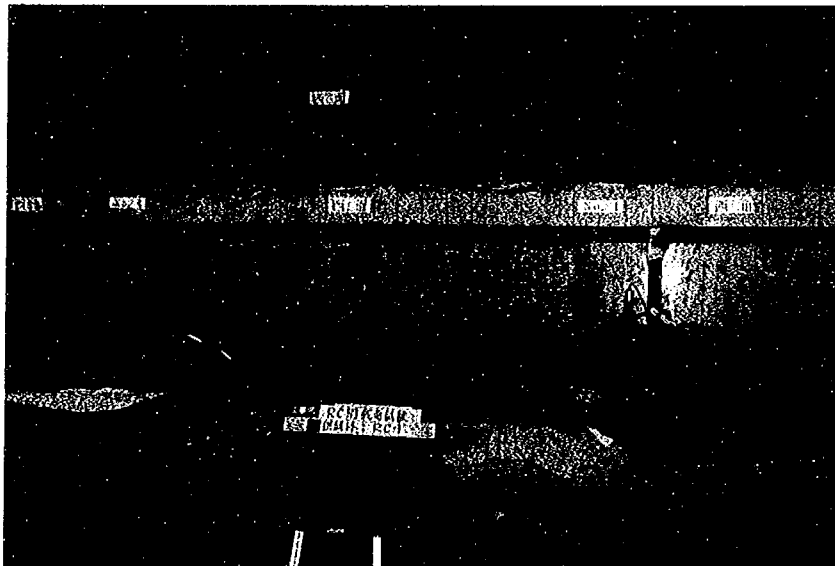


63 FILE No. 1-9

STEP1 (曲げひび割れ導入)  
曲げひび割れ発生



64 FILE No. 2-35  
STEP2 (静的载荷試験)  
死荷重相当



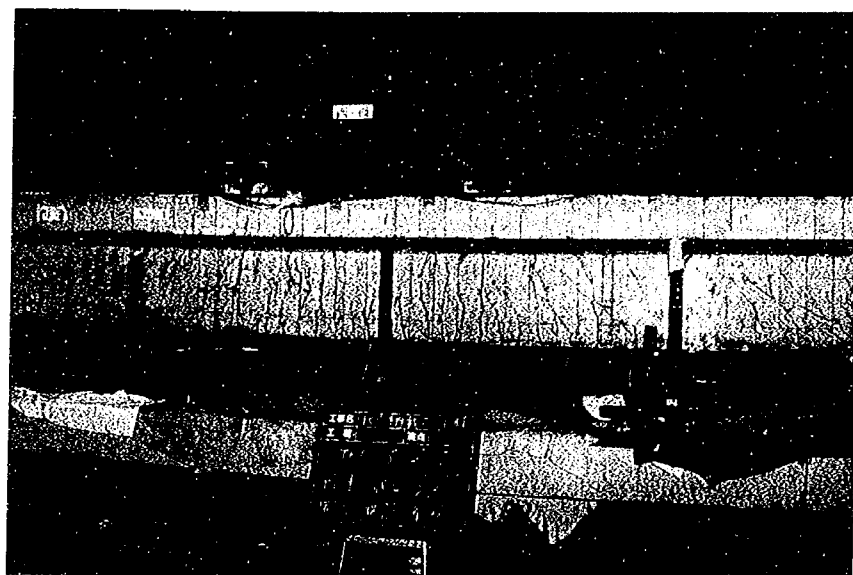
65 FILE No. 41  
L-20相当



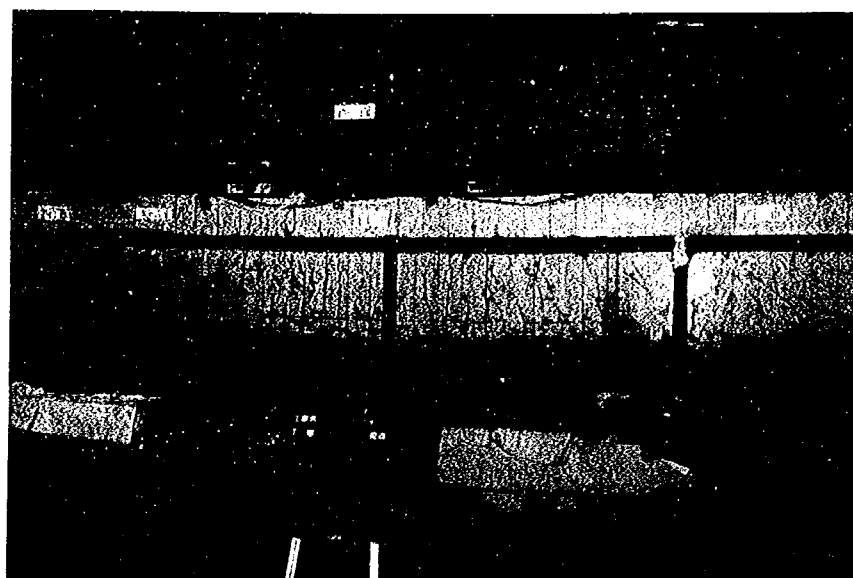
66 FILE No. 47  
B活荷重相当



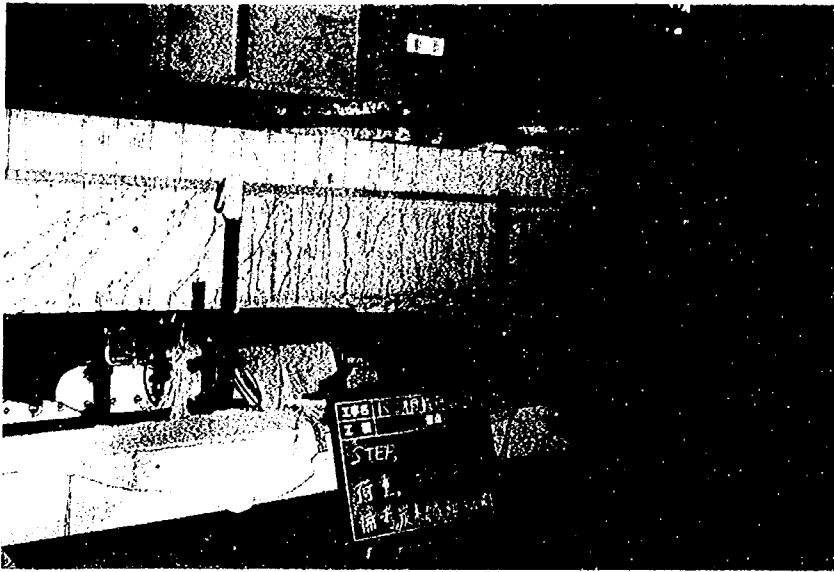
67 FILE No. 4-182  
STEP4 (疲労試験)  
繰り返し200万回終了



68 FILE No. 5-225  
STEP5 (静的破壊試験)  
鉄筋降伏

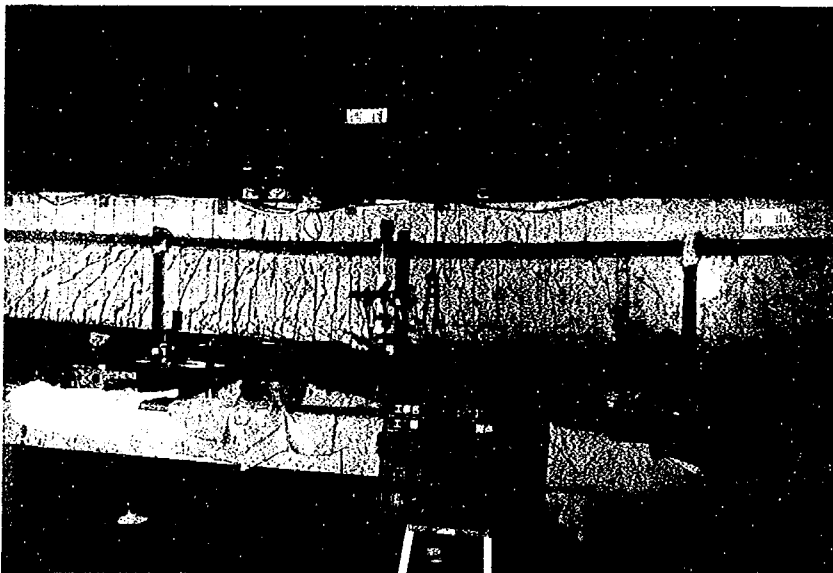


69 FILE No. 246  
炭素繊維シート破断(正面)



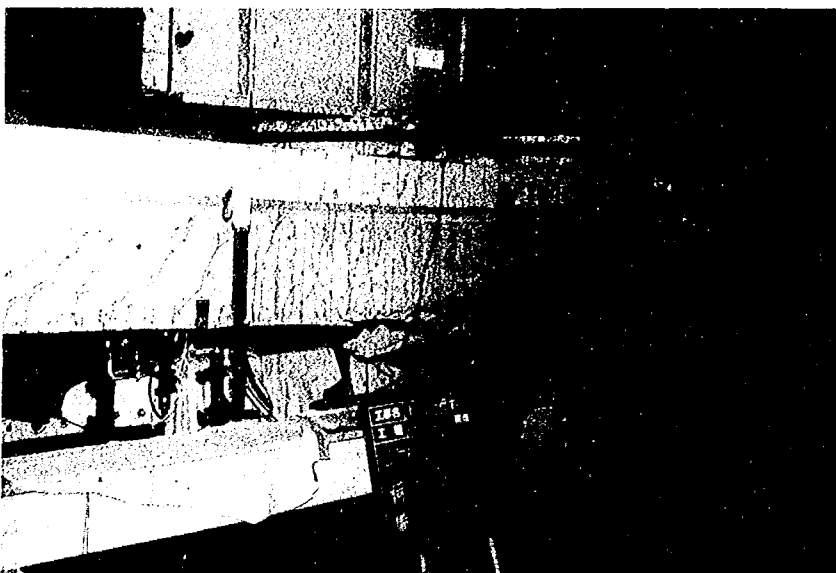
70 FILE No. 246

炭素繊維シート破断(横方向)



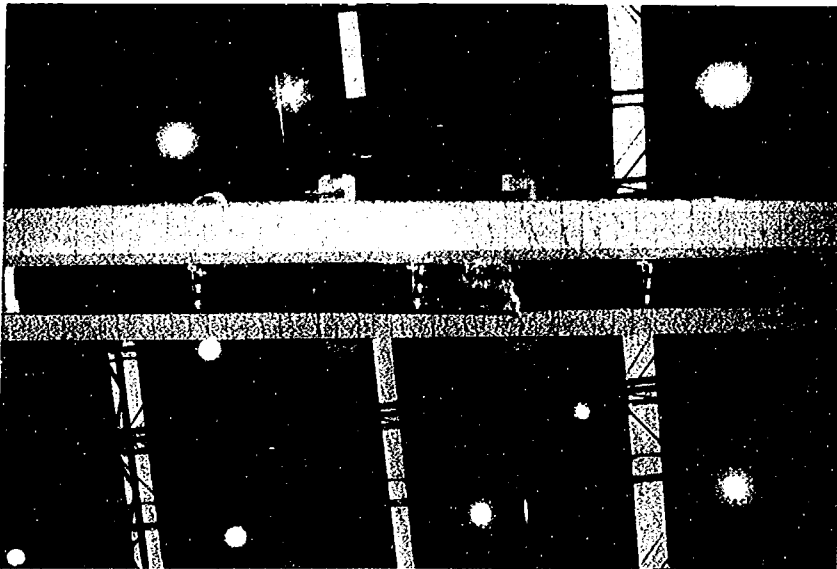
71 FILE No. 255

圧壊

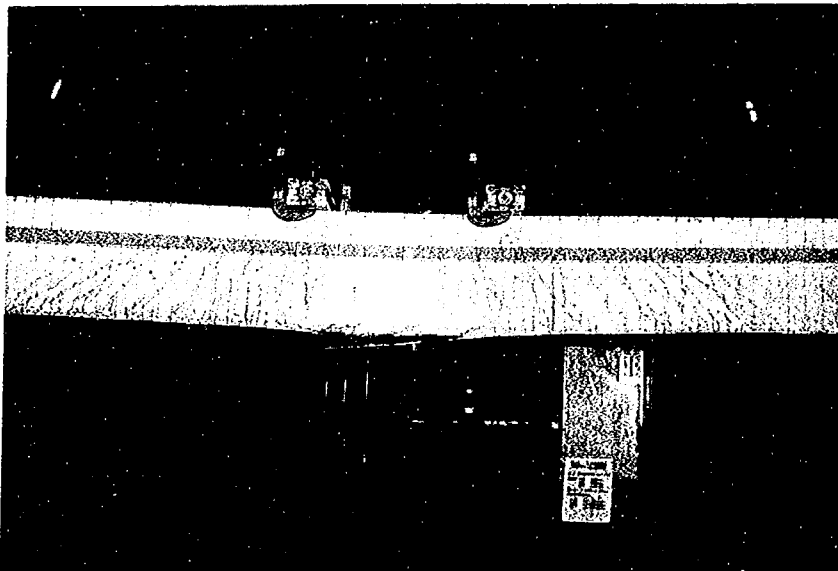


72 FILE No. 256

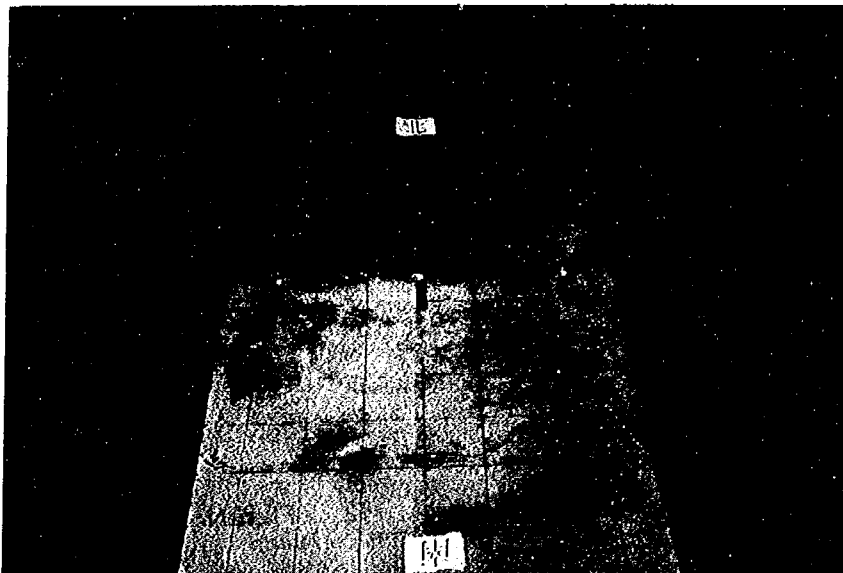
試験終了



73 試験終了後の供試体  
(炭素繊維シートの様子)



74 試験終了後の供試体  
(横方向)



75 試験終了後の供試体

第Ⅲ編 炭素繊維シートによる鉄筋コンクリート床版の  
補強に関する研究



## 1. はじめに

自動車交通量の増大に伴い、道路橋における鉄筋コンクリート床版（以下 RC 床版）の早期劣化が顕在化している。また、平成5年の車両制限令における車両総重量緩和や、道路構造令の設計自動車荷重の変更により車両の大型化が進み、より劣化進行が懸念され、既設の道路橋 RC 床版の耐荷力を向上させる必要がある。その対策の一つとして、炭素繊維シートを既設 RC 床版の下面に貼り付けることにより、構造耐力を向上させるとともに疲労耐久性を向上させる、炭素繊維シート接着工法が採用されている。しかしながら、この工法による RC 床版の補強効果、疲労耐久性については未だ十分に解明されていないのが現状である。

そこで本研究では、建設省土木研究所の輪荷重走行試験機を用い、より実状に近い条件での載荷試験を行って、RC 床版への炭素繊維シート補強が疲労耐久性、および耐荷力に及ぼす影響を評価した。また、試験結果をもとに疲労劣化進行のメカニズムについて検討した。

本研究は、建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室と炭素繊維補修・補強工法技術研究会の共同研究のもと、平成8年度より3年間の計画で実施されているもので、本編は共同研究のうちの平成8年度、9年度の炭素繊維シートによる RC 床版の補強に関する研究成果をとりまとめたものである。

## 2. 供試体

古い道路橋示方書に従い設計されて、現在も供用中の実橋 RC 床版は多数あるが、その中でも昭和 39 年鋼道路橋示方書に準拠しているものは現行道路橋示方書と比較して鉄筋の許容応力度が  $1,800\text{kgf/cm}^2$  と高く、また配筋比が 25% 以上と低いため、比較的多くのものが潜在的に劣化を生じる危険性を有していると判断される。現行の道路橋示方書では鉄筋の応力度は、許容応力度  $1,400\text{kgf/cm}^2$  に対して  $200\text{kgf/cm}^2$  程度余裕を持たせるのが望ましいとされ、また配筋比は一般に 80% 以上となる。このため、本研究で利用した RC 床版供試体は昭和 39 年鋼道路橋示方書に従って設計・製作した。供試体の形状・寸法・配筋を図 2.1 に示す。また、鉄筋ひずみゲージの貼り付け位置を図 2.2、図 2.3 に示す。平成 8 年度に実施した供試体 (No.1、No.3、No.4、No.6、No.9) および平成 9 年度に実施した供試体 (No.5、No.8) は図 2.2 の通りひずみゲージを配置したが、測定結果の評価の結果、No.2、No.7 についてはひずみゲージの数量を減らし図 2.3 の通りとした。ゲージは、主筋、配筋の交点から 20mm ずらしている。なお、ゲージは中央位置について 2 枚貼付し、動的ひずみ計での測定に供するとともに、残りの 1 枚は他のゲージと同様に静的測定に供した。中央位置以外は各測定点 1 枚のゲージを貼付した。ゲージは東京測器社製ワイヤーストレインゲージ (FLA3-11-3L、FLA3-11-3LT) を用いた。鉄筋は、リブが供試体中で水平に位置するように曲げ加工しているため、ゲージはリブの一部を研磨して貼付した。ゲージは、ゲージ接着専用の接着剤 (東京測器社製 CN) で鉄筋に貼付し、その上に VM テープを巻き付け防水処理し、さらに包帯を巻いて防水ゴムを塗布してゲージの損傷を防いだ。供試体端部には  $\phi 40\text{mm}$  のシース管をあらかじめ配置し、試験機に固定できるようにした。鉄筋組み立て状況を写真 2.1 に示す。

なお、比較のために平成 8 年道路橋示方書に準拠した供試体の試験結果を引用しているが、その供試体の形状・寸法・配筋は図 2.4 に示す通りである。また、鉄筋ひずみゲージの貼り付け位置は図 2.5 に示す通りである。

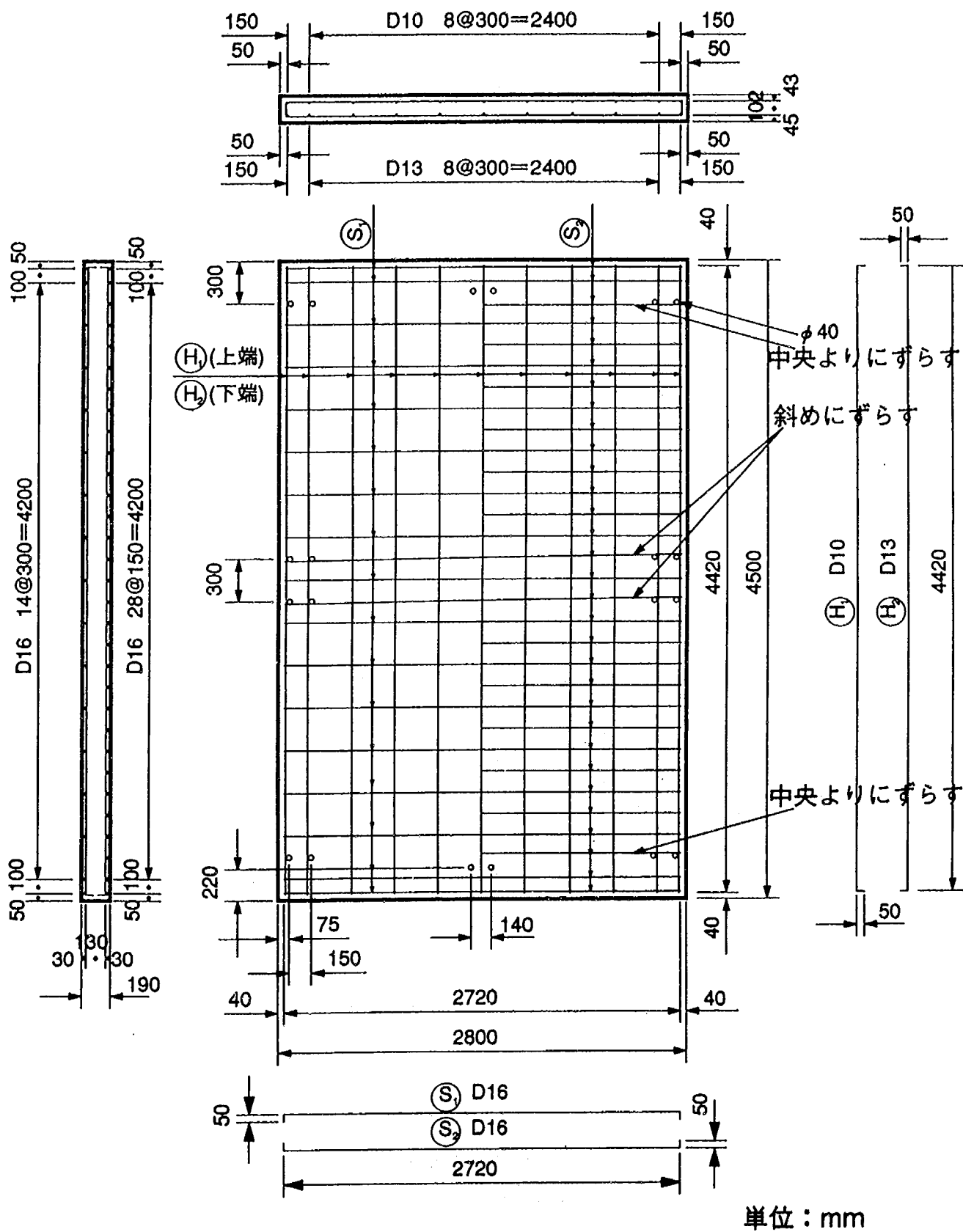
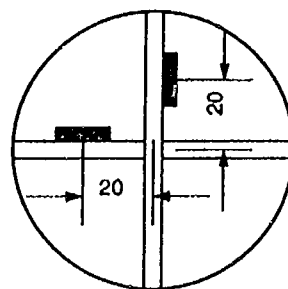


図 2.1 S39 配筋図



拡大図

上面

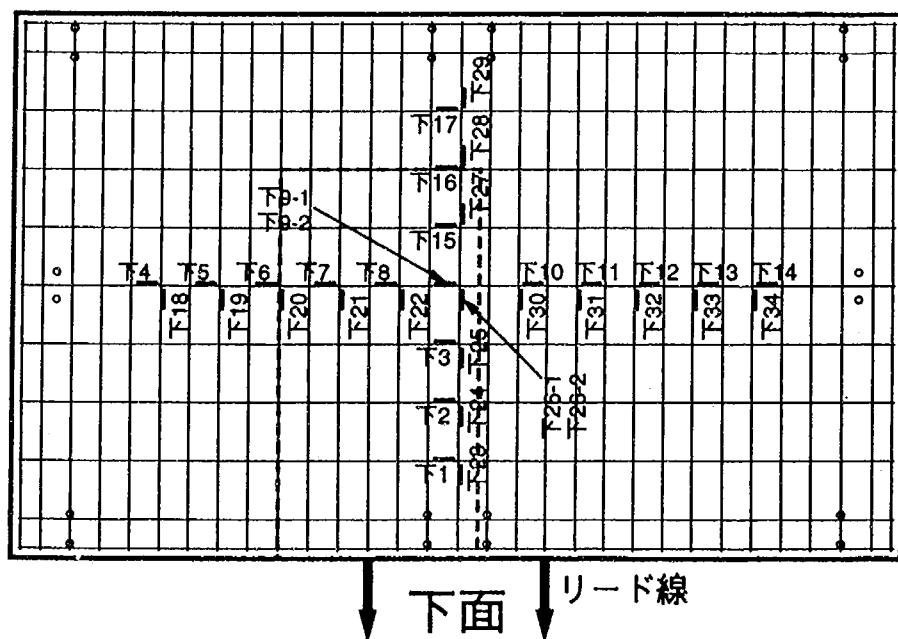
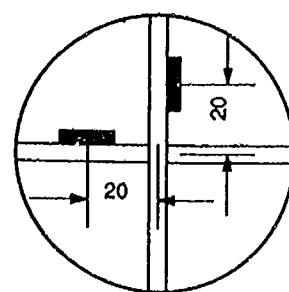
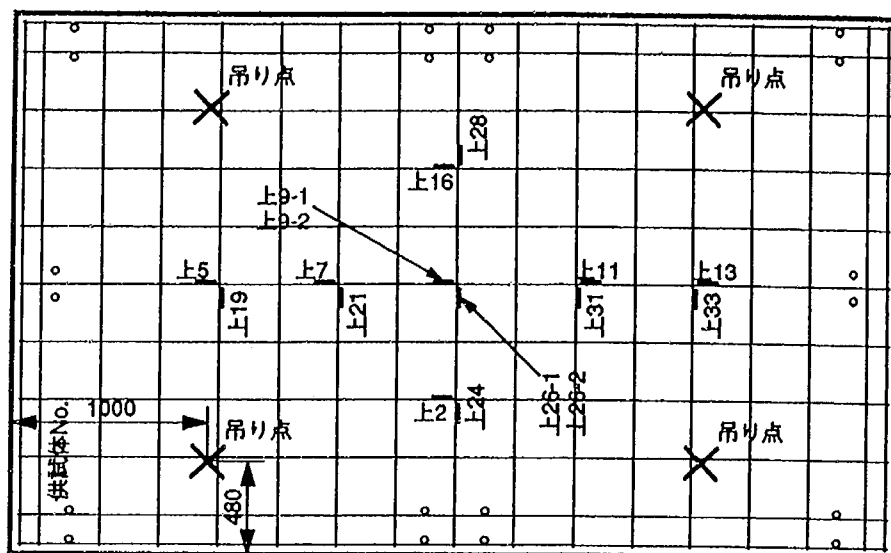


図 2.2 ひずみゲージ貼付位置図  
(供試体 No. 1~No5、No. 8)



拡大図

上面

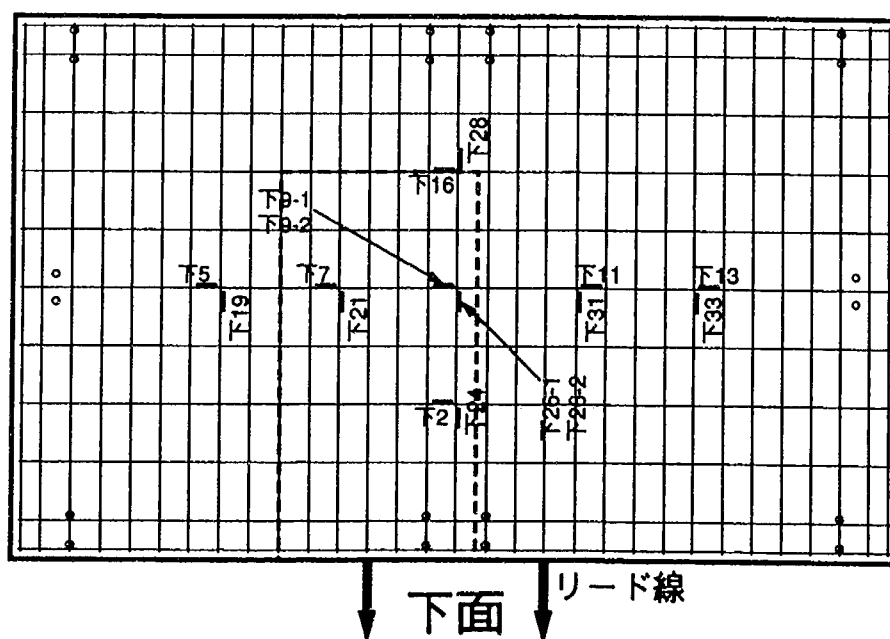


図 2.3 ひずみゲージ貼付位置図  
(供試体 No. 6、No. 9)

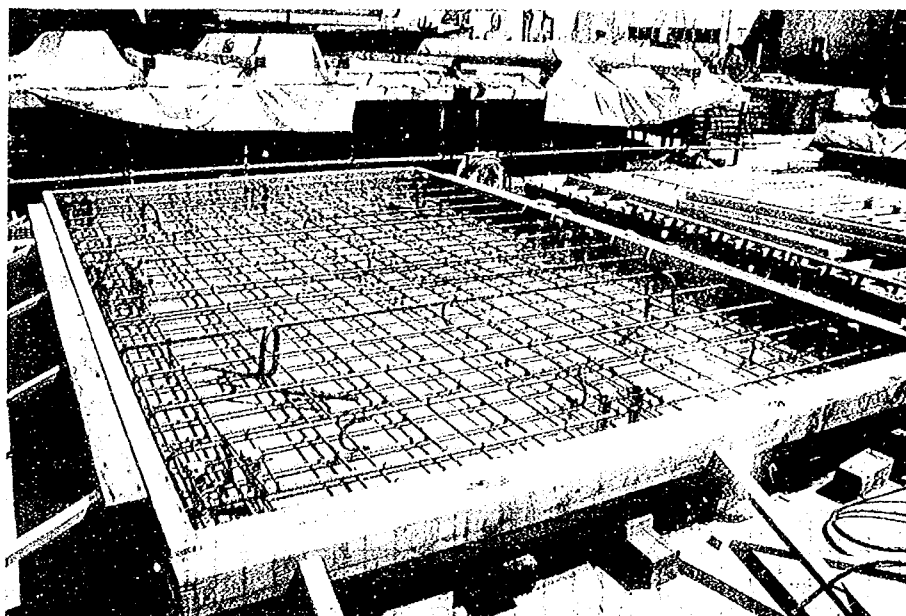


写真 2.1 鉄筋組み立て状況

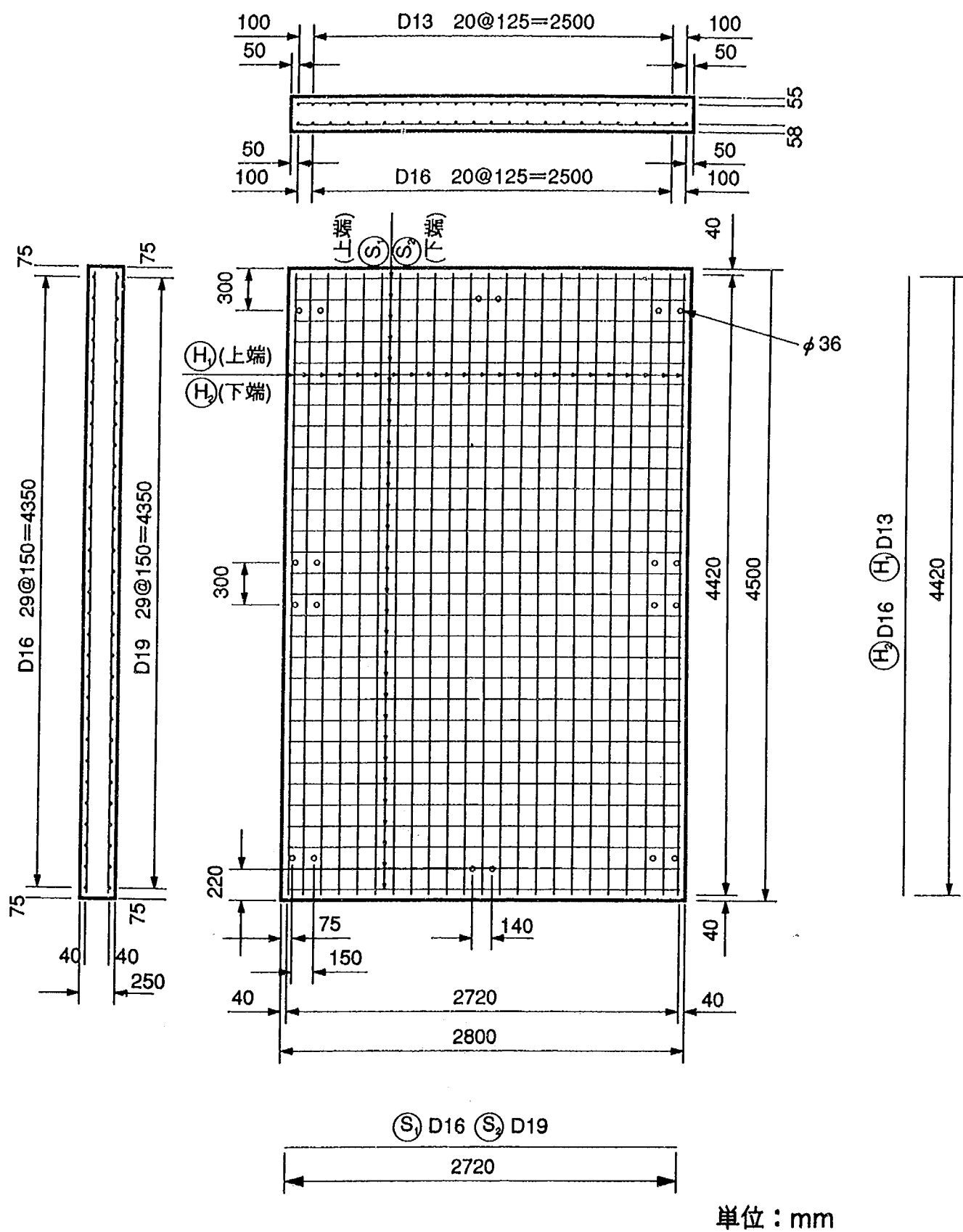
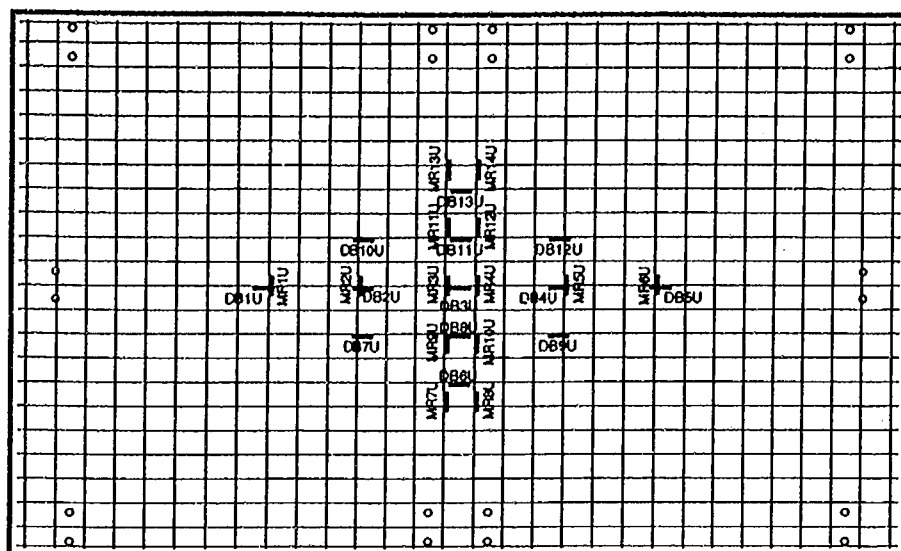
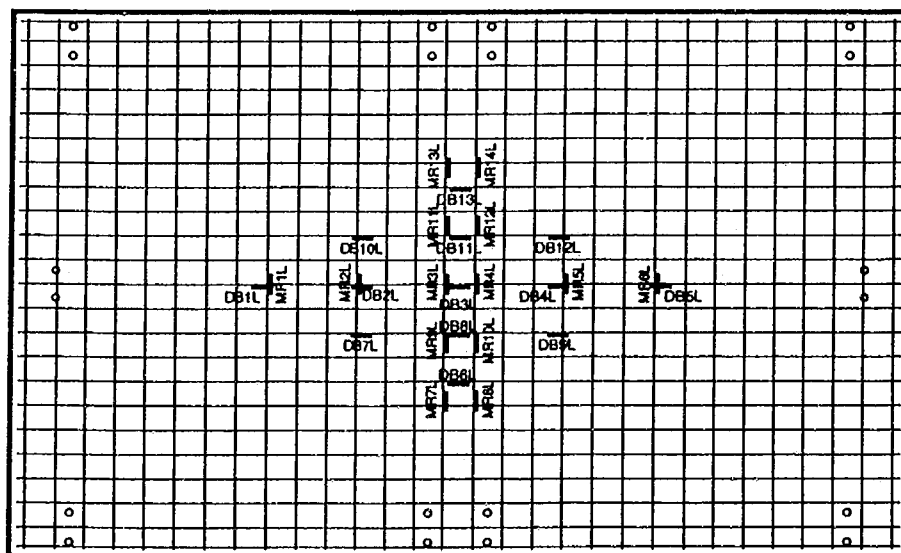


图 2.4 H8 配筋图



上面



下面

図 2.5 ひずみゲージ貼付位置図  
(供試体 No. 10)

### 3. 使用材料

RC 床版供試体の製作に使用したコンクリートの使用材料を表 3.1、配合を表 3.2、フレッシュコンクリートの物性を表 3.3 に示す。また、使用した鉄筋の物理的性質を表 3.4 に、炭素繊維シートの物理的性質を表 3.5 に示す。炭素繊維シートの貼り付けには、プライマーおよび含浸接着樹脂を使用した。プライマーおよび含浸・接着樹脂はいずれも、2 液混合型の常温硬化型エポキシ樹脂であり、その品質規格をそれぞれ表 3.6、表 3.7 に示す。

表3.1 コンクリートの使用材料

| 配合  | 材料   | 品質                                            |
|-----|------|-----------------------------------------------|
| 配合1 | セメント | 秩父小野田社製普通ポルトランドセメント、比重3.16                    |
|     | 細骨材  | 神奈川県津久井郡城山町産砕砂、表乾比重2.61<br>千葉県富津市産山砂、表乾比重2.58 |
|     | 粗骨材  | 神奈川県津久井郡城山町産砕砂、表乾比重2.64                       |
| 配合2 | セメント | 日本セメント社製普通ポルトランドセメント、比重3.16                   |
|     | 細骨材  | 千葉県君津市産山砂、比重2.58<br>埼玉県秩父郡産砕砂、比重2.63          |
|     | 粗骨材  | 山梨県大月市産、表乾比重2.65<br>青森県八戸市産、表乾比重2.70          |

表3.2 コンクリートの配合

| 配合No. | 水セメント比<br>W/C<br>(%) | 細骨材率<br>s/a<br>(%) | 単位量(kg/m³) |           |          |      |      |       | 備考               |
|-------|----------------------|--------------------|------------|-----------|----------|------|------|-------|------------------|
|       |                      |                    | 水<br>W     | セメント<br>C | 細骨材<br>s |      | 粗骨材G | 混和材   |                  |
|       |                      |                    |            |           | 砕砂       | 山砂   |      |       |                  |
| 配合1   | 62.5                 | 46.9               | 157        | 252       | 702      | 175  | 1006 | 0.945 | H8.9.10、H9.7.9打設 |
| 配合2   | 60.5                 | 46.6               | 151        | 250       | 266      | 1034 | 611  | 0.625 | H9.7.29打設        |

表3.3 フレッシュコンクリートの物性

| 生コン車No. | 1                                               | 2         | 3         | 4                         | 5         | 6                          | 7         | 8         |
|---------|-------------------------------------------------|-----------|-----------|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|-----------|
| スランプ    | 7.5cm                                           | 7.0cm     | 9.0cm     | 6.5cm                     | 10.0cm    | 9.5cm                      | 9.0cm     | 9.5cm     |
| 空気量     | 5.0%                                            | 5.4%      | 5.5%      | 4.5%                      | 4.9%      | 4.1%                       | 3.9%      | 4.7%      |
| 練上り温度   | 18℃                                             | 18℃       | 17℃       | 32℃                       | 31℃       | 31℃                        | 31℃       | 31℃       |
| 単位体積重量  | 2.286kg/l                                       | 2.272kg/l | 2.272kg/l | 2.272kg/l                 | 2.257kg/l | 2.300kg/l                  | 2.315kg/l | 2.300kg/l |
| 摘要      | 供試体No.1, No.3,<br>No.4, No.6, No.9<br>H8.9.10打設 |           |           | 供試体No.5, No.8<br>H9.7.9打設 |           | 供試体No.2, No.7<br>H9.7.29打設 |           |           |

表3.4 鉄筋の物理的性質

| 種類  | 使用供試体                       | 降伏点(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強度(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 伸び(%) |
|-----|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|-------|
| D10 | 供試体No.1,No.3,No.4,No.6,No.9 | 3500                      | 4990                       | 21.9  |
|     | 供試体No.2,No.5,No.7,No.8      | 3949                      | 5939                       | 18.5  |
| D13 | 供試体No.1,No.3,No.4,No.6,No.9 | 3673                      | 5418                       | 22.9  |
|     | 供試体No.2,No.5,No.7,No.8      | 3540                      | 5041                       | 22.9  |
|     | 供試体No.10                    | 3378                      | 4837                       | 23.2  |
| D16 | 供試体No.1,No.3,No.4,No.6,No.9 | 3469                      | 5173                       | 25.1  |
|     | 供試体No.2,No.5,No.7,No.8      | 3653                      | 5337                       | 19.6  |
|     | 供試体No.10                    | 3540                      | 5184                       | 20.7  |
| D19 | 供試体No.10                    | 3602                      | 5439                       | 20.0  |

表3.5 炭素繊維シートの物理的性質

| 繊維種類        | 繊維目付(g/m <sup>2</sup> ) | 弾性係数(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 引張強度(kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|-------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 高強度型炭素繊維シート | 300                     | $2.35 \times 10^6$         | 35000                      |
| 高弾性型炭素繊維シート | 300                     | $6.50 \times 10^6$         | 20000                      |

表 3.6 プライマーの品質規格

| 試験法            | 試験用基板 | 接着強度                                                   |
|----------------|-------|--------------------------------------------------------|
| JIS K 5400に準ずる | モルタル板 | 1.4N/mm <sup>2</sup> 以上<br>(15 kgf/cm <sup>2</sup> 以上) |

表 3.7 含浸・接着樹脂の品質規格

| 項目      | 規格値                                                    | 試験法        |
|---------|--------------------------------------------------------|------------|
| 引張強度    | 29N/mm <sup>2</sup> 以上<br>(300kgf/cm <sup>2</sup> 以上)  | JIS K 7113 |
| 曲げ強度    | 39N/mm <sup>2</sup> 以上<br>(400kgf/cm <sup>2</sup> 以上)  | JIS K 7203 |
| 引張せん断強度 | 9.8N/mm <sup>2</sup> 以上<br>(100kgf/cm <sup>2</sup> 以上) | JIS K 6850 |

## 4. 試験要因

### 4.1 供試体の補強仕様

本研究は、炭素繊維シートの接着枚数、炭素繊維シートの弾性係数の相違が、RC 床版の疲労耐久性、および耐荷力に及ぼす影響を把握することを目的とした。

試験要因を表 4.1.1 に示す。No.3、No.4、No.5、No.6 は高強度型炭素繊維シートの補強量の相違について、また、No.7、No.8 は高弾性型炭素繊維シートの補強量の相違について検討した。なお、No.2 はあらかじめひび割れを発生すべく初期載荷をしたが、初期載荷で想定している RC 床版中央の変位より 1/4 点（床版中央点より輪荷重走行方向に RC 床板全長の 1/4）の方が変位が大きくなったために、補強することなく試験を行った供試体である。また、No.9 は No.6 と同じ検討要因であるが、No.9 供試体は初期損傷状態で No.2 供試体と同様に RC 床版中央の変位より 1/4 点の方が変位が大きく、炭素繊維シートで補強後の破壊位置が RC 床版中央ではなく、1/4 点付近となっていたために、No.6 供試体をあらためて試験した。

コンクリートの配合は生コン工場の変更により表 3.2 に示す配合 1、配合 2 の 2 種類を採用した。配合 1 は供試体 No.1、No.3、No.4、No.5、No.6、No.8、No.9 に使用したもので、相武生コン横浜工場から購入したコンクリートのものである。配合 2 は、供試体 No.2、No.7 に使用したもので、神奈川アサノ横浜工場から購入したコンクリートのものである。輪荷重走行試験開始時（炭素繊維シートで補強した RC 床版では、初期載荷開始時）のコンクリート圧縮強度は、表 4.1 に示すとおり  $241 \sim 347 \text{ kgf/cm}^2$  であった。

炭素繊維シートによる補強は、平成 8 年道路橋示方書で設定されている設計荷重に基づき必要量を算定した。同示方書の解説では、鉄筋の許容応力度  $1,400 \text{ kgf/cm}^2$  に対して  $200 \text{ kgf/cm}^2$  程度余裕を持たせるのが望ましいとされているが、本研究では RC 床版の延命効果、経済性を考え合わせ、鉄筋の応力度が  $1,400 \text{ kgf/cm}^2$  以下となるように炭素繊維シート量を決定した。計算の結果、高強度型の炭素繊維シートを用いた場合には、主筋方向、配力筋方向ともに 4 層づつ必要となる。炭素繊維シートで補強した RC 床版の平成 8 年道路橋示方書の設計荷重に対する応力度の計算結果を表 4.1.2 に示す。試験では、この  $4 \times 4$  層を最大積層数とし、これより積層数を少なくした場合の補強効果について検討することとし、主筋方向  $\times$  配力筋方向の積層数が  $4 \times 4$  層、 $3 \times 3$  層、 $2 \times 2$  層、 $1 \times 1$  層の 4 供試体とした。高弾性型の炭素繊維シートは、主筋方向  $\times$  配力筋方向に  $2 \times 2$  層が必要であることから、試験では  $2 \times 2$  層および  $1 \times 1$  層貼り付けした場合について試験した。これら炭素繊維シートで補強した供試体と比較するために、無補強・無損傷の供試体 S39-1、S39-2、H8 についても載荷試験を行った。

表4.1.1 試験要因

| No.              | 記号            | 炭素繊維シートタイプ | 積層数<br>(主筋方向×配力筋方向) | 試験<br>年度 | 初期<br>損傷度 | コンクリート圧縮強度<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) |
|------------------|---------------|------------|---------------------|----------|-----------|--------------------------------------|
| 1                | S39-1         | —          | —                   | H8       |           | 274                                  |
| 2                | S39-2         | —          | —                   | H9       |           | 271                                  |
| 3                | S39+1×1S-D2   | 高強度        | 1層×1層               | H8       | II        | 347                                  |
| 4                | S39+2×2S-D2   | 高強度        | 2層×2層               | H8       | II        | 296                                  |
| 5                | S39+3×3S-D2   | 高強度        | 3層×3層               | H9       | II        | 326                                  |
| 6                | S39+4×4S-D2   | 高強度        | 4層×4層               | H8       | II        | 269                                  |
| 7                | S39+1×1E-D2   | 高強度        | 1層×1層               | H9       | II        | 291                                  |
| 8                | S39+2×2E-D2   | 高強度        | 2層×2層               | H9       | II        | 241                                  |
| 9 <sup>*1</sup>  | (S39+4×4S-D2) | 高強度        | 4層×4層               | H8       | II        | 326                                  |
| 10 <sup>*2</sup> | H8            | —          | —                   | —        |           | 282                                  |

\*1 載荷初期で破壊したため、No.6で再試験

\*2 別の試験データから引用

S39+1×1S+D2

初期損傷度 D2; 損傷度 II

炭素繊維シートタイプ S; 高強度型、E: 高弾性型

積層数 (主筋方向積層数×配力筋方向積層数)

設計規準 S39; 昭和39年道路橋示方書、H8; 平成8年道路橋示方書

表4.1.2 炭素繊維シート補強した床版の応力度の計算結果 (H8道示設計荷重)

| 方向<br>供試体   | 主筋方向 |        |         | 配力筋方向 |        |         |
|-------------|------|--------|---------|-------|--------|---------|
|             | 鉄筋   | コンクリート | 炭素繊維シート | 鉄筋    | コンクリート | 炭素繊維シート |
| S39         | 2214 | 85.5   | —       | 5175  | 118.2  | —       |
| S39+1×1S-D2 | 1857 | 78.9   | 2424    | 2835  | 86.4   | 4609    |
| S39+2×2S-D2 | 1606 | 74.0   | 2075    | 1937  | 72.6   | 3219    |
| S39+3×3S-D2 | 1420 | 70.2   | 1816    | 1463  | 64.5   | 2482    |
| S39+4×4S-D2 | 1277 | 67.2   | 1615    | 1170  | 59.1   | 2023    |
| S39+1×1E-D2 | 1536 | 72.5   | 5451    | 1732  | 69.1   | 8023    |
| S39+2×2E-D2 | 1190 | 65.3   | 4132    | 1017  | 56.0   | 4933    |

(単位 kgf/cm<sup>2</sup> 許容応力度 鉄筋1400kgf/cm<sup>2</sup>、コンクリート70kgf/cm<sup>2</sup>、  
炭素繊維シート11800kgf/cm<sup>2</sup> (高強度タイプ)、6600kgf/cm<sup>2</sup>)

## 4.2 炭素繊維シートの引張剛性および曲げ剛性

本研究では、炭素繊維シートの積層数を変化させ、また弾性係数の異なる炭素繊維シートを使用しているため、これらの物理的特性を定量的に示すものとして、炭素繊維シートの引張剛性 ( $E \cdot A$ ) および曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) を示す。炭素繊維シートは、RC 床版下面に貼り付けて硬化した後は、炭素繊維とエポキシ樹脂からなる複合材料である炭素繊維強化プラスチック (以下、CFRP) となる。CFRP をコンクリート構造物の補強に使用する場合には、コンクリート断面の曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) が非常に大きいため (コンクリート部材の部材厚数 100mm に対して CFRP は 1 層あたり 1 mm 程度以下)、一般に CFRP の曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) は無視できるとして、CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ ) のみに着目し炭素繊維の実断面積とヤング係数が設計計算には用いられているが、ここでは、炭素繊維繊維とエポキシ樹脂の複合体としての厚さ等を考慮して、CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ ) および曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) を算出した。計算はマトリックス (エポキシ樹脂) に炭素繊維が均一に分散しているものとして行った (図 4.2.1)。

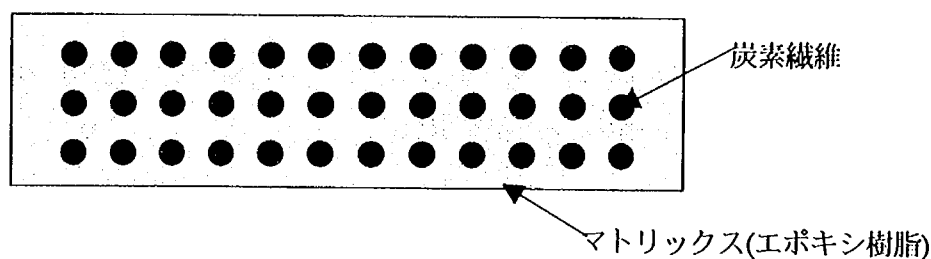


図 4.2.1 CFRP の断面の模式図

### (1) CFRP のヤング係数

一方向繊維強化複合材料の繊維方向のヤング係数は、次式で示される。

$$E_{frp} = V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m$$

ここに

$E_{frp}$  : CFRP の繊維方向のヤング係数 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$V_f$  : 繊維含有率

$E_f$  : 炭素繊維のヤング係数 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$E_m$  : 樹脂のヤング係数 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

高強度型、高弾性型の炭素繊維シートのヤング係数を CFRP の状態として求めた結果を表 4.2.1 に示す。繊維含有率は、樹脂の標準塗布量から樹脂の体積を算定して求めた。また炭素繊維シートのヤング係数は公称値を使用した。

表4.2.1 炭素繊維の種類とFRPの性質

| 繊維種類     |                     | 高強度型      | 高弾性型      |
|----------|---------------------|-----------|-----------|
| 繊維ヤング係数  | kgf/cm <sup>2</sup> | 2.35E+06  | 6.50E+06  |
| 繊維目付け    | g/m <sup>2</sup>    | 300       | 300       |
| 繊維密度     | g/cm <sup>3</sup>   | 1.8       | 2.1       |
| 繊維厚さ     | cm                  | 0.0167    | 0.0143    |
| 樹脂ヤング係数  | kgf/cm <sup>2</sup> | 2.00E+04  | 2.00E+04  |
| 樹脂塗布量    | g/m <sup>2</sup>    | 800       | 800       |
| 樹脂密度     | g/cm <sup>3</sup>   | 1.16      | 1.16      |
| 樹脂厚さ     | cm                  | 0.0690    | 0.0690    |
| FRP厚さ    | cm                  | 0.0857    | 0.0833    |
| 繊維含有率    | %                   | 19.5%     | 17.2%     |
| FRPヤング係数 | kgf/cm <sup>2</sup> | 4.742E+05 | 1.133E+06 |

## (2)CFRP 積層板の引張剛性

本研究では、炭素繊維シートを主鉄筋方向および配力鉄筋方向に交互に積層して CFRP の積層板を形成している。次式により CFRP 積層板の引張剛性 ( $E \cdot A$ )を求める。

$$E'A' = b \sum E_j \cdot t_j \quad (j=1, \dots, n)$$

ここに、

$E'$  : 等価ヤング係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$A'$  : 等価断面積 (cm<sup>2</sup>)

$E_j$  :  $j$  層目のヤング係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)

$t_j$  :  $j$  層目の厚さ(cm)

$b$  : CFRP の幅(cm)

表 4.2.2 に各供試体の CFRP 積層板の引張剛性 ( $E \cdot A$ )を示す。ここで CFRP の幅は単位幅 (1m) とし、繊維直角方向のヤング係数は樹脂と同じ値として計算した。

## (3)CFRP 積層板の曲げ剛性

主鉄筋方向/配力鉄筋方向の順で交互に積層された CFRP 積層板の曲げ剛性 ( $E \cdot I$ )を次式により求める。算出結果を表 4.2.2 に示す。

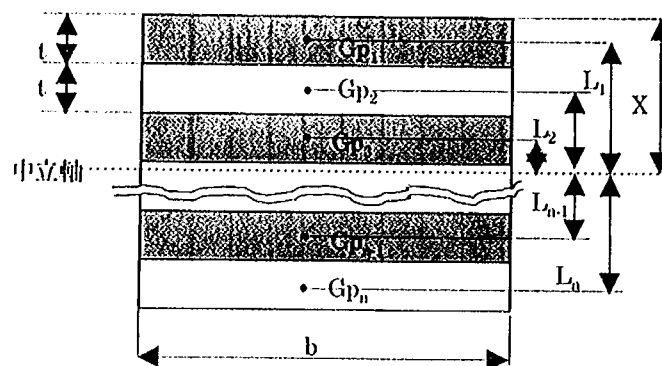


図 4.2.2 CFRP の積層構造

中立軸までの距離

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n \{1/2 + (i-1)\} E_i}{\frac{n}{2} (E_1 + E_2)}$$

曲げ剛性 ( $E \cdot I$ )

$$E' I' = \sum_{i=1}^n b t L_i^2 E_j$$

ここに

j : i が奇数なら 1

i が偶数なら 2

$E'$  : 等価ヤング係数 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$I'$  : 等価断面 2 次モーメント ( $\text{cm}^4$ )

$E_j$  : j 番目の層のヤング係数 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$E_1$  : 繊維方向のヤング係数 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$E_2$  : 繊維直角方向のヤング係数 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

n : 2, 4, 6, 8 (総積層数)

b : 部材幅 (cm)

t : 1 層あたりの厚さ (cm)

X : 圧縮端から中立軸までの距離 (cm)

$G_{pi}$  : i 層目の重心位置 (cm)

$L_i$  : 中立軸から i 層目の重心位置までの距離 (cm)

表 4.2.2 各供試体の炭素繊維シートの引張剛性および曲げ剛性の関係

| 供試体             |                         | S39+1X1S-D2 | S39+2X2S-D2 | S39+3X3S-D2 | S39+4X4S-D2 | S39+1X1E-D2 | S39+2X2E-D2 |
|-----------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 繊維種類            |                         | 高強度型        | 高強度型        | 高強度型        | 高強度型        | 高弾性型        | 高弾性型        |
| シートヤング係数        | kgf/cm <sup>2</sup>     | 2.35E+06    | 2.35E+06    | 2.35E+06    | 2.35E+06    | 6.50E+06    | 6.50E+06    |
| 合計積層数           | 層                       | 2           | 4           | 6           | 8           | 2           | 4           |
| 0° 方向           | 層                       | 1           | 2           | 3           | 4           | 1           | 2           |
| 90° 方向          | 層                       | 1           | 2           | 3           | 4           | 1           | 2           |
| FRP厚さ(1層当たり)    | cm                      | 0.0857      | 0.0857      | 0.0857      | 0.0857      | 0.0833      | 0.0833      |
|                 |                         |             |             |             |             |             |             |
| 合計厚さ            | cm                      | 0.1714      | 0.3428      | 0.5142      | 0.6856      | 0.1665      | 0.3331      |
| CFRPヤング係数(0° )  | kgf/cm <sup>2</sup>     | 4.74E+05    | 4.74E+05    | 4.74E+05    | 4.74E+05    | 1.13E+06    | 1.13E+06    |
| CFRPヤング係数(90° ) | kgf/cm <sup>2</sup>     | 2.00E+04    | 2.00E+04    | 2.00E+04    | 2.00E+04    | 2.00E+04    | 2.00E+04    |
| CFRPの引張剛性       | kgf/m幅                  | 4.24E+06    | 8.47E+06    | 1.27E+07    | 1.69E+07    | 9.60E+06    | 1.92E+07    |
| CFRPの曲げ剛性       | kgf・cm <sup>2</sup> /m幅 | 5.29E+03    | 6.46E+04    | 2.52E+05    | 6.27E+05    | 4.72E+03    | 1.36E+05    |
|                 |                         |             |             |             |             |             |             |

## 5. 試験方法

試験では、図 5.1 に示す輪荷重走行試験機を使用した。試験機の仕様を表 5.1 に示す。また、試験状況を写真 5.1 に示す。輪荷重走行試験機は、幅 50cm の鉄輪を供試体長さ方向（橋軸方向に対応）に±1.5m 往復させて、RC 床版が受ける実際の挙動にできるだけ近い条件を再現している。載荷速度は 30～50 回／分とした。供試体には、炭素繊維シートを貼り付ける前にあらかじめこの輪荷重走行試験機で 16tf の一定荷重を作用させて初期損傷を与え、ひび割れを発生させた後に、炭素繊維シートを貼り付けた。炭素繊維シートの貼り付けは、図 5.3、表 5.2 に示す損傷度 II（S39 供試体に対しては、たわみが除荷時で 4mm、載荷時で 8mm 程度となった状態）となった時点で行った。ここで用いている損傷度は、建設省土木研究所の橋梁点検要領（案）<sup>9)</sup>に基づくものであり、損傷度 II は『二方向のひび割れが生じ、漏水や遊離石灰が認められる。（損傷が大きく、詳細調査を実施し補修するかどうかの検討を行う必要がある。）』という状態である。なお、供試体下面の中央付近の 80cm×80cm を対象に、定期的に CCD カメラでひび割れ状況を記録した。

炭素繊維シートの貼り付けは、まず主筋方向（橋軸直角方向）から行ない、次に配力筋方向（橋軸方向）へと交互に行った。貼り付け範囲は図 5.2 に示す通りである。炭素繊維シートの接着は、RC 床版を試験機の桁上に設置したまま実橋と同様の手順で下面から行い、接着完了後、最低 7 日間の養生期間を確保した。施工中および養生期間中は載荷を行わなかった。

載荷方法は、図 5.4 に示すように、16tf を初期荷重として所定の荷重で一定回数（40,000 回）載荷させた後、荷重を増加させてあらためて一定回数載荷する、階段状荷重漸増載荷（以下、階段載荷）とした。なお、載荷回数は、輪荷重走行試験機の鉄輪が RC 床版供試体の中央を通った回数である。初期損傷を与えるための 16tf および階段載荷における荷重 2tf ずつの増加、一定回数として 40,000 回としたのは、過去の橋梁研究室の試験結果を参考にしている。

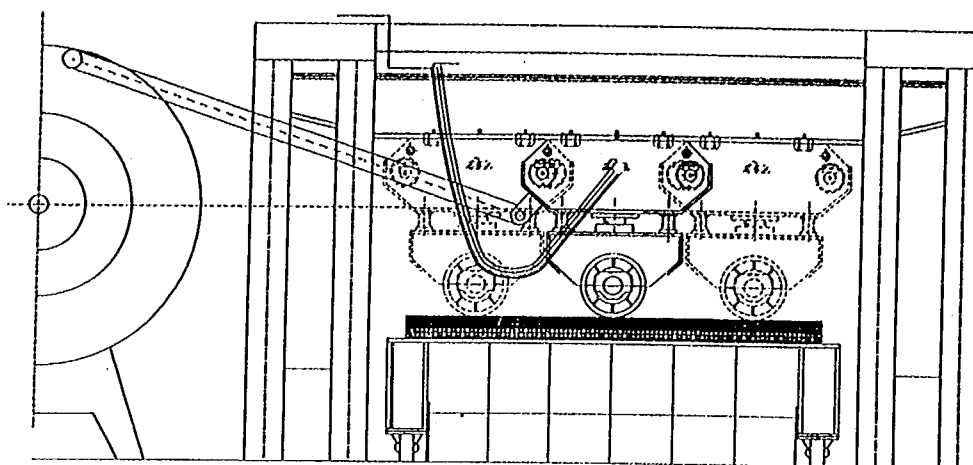


図 5.1 輪荷重走行試験機

表5.1 輪荷重走行試験機の仕様

| 項目    |                | 仕様        |                                                     |
|-------|----------------|-----------|-----------------------------------------------------|
| 形状・寸法 |                | 試験機寸法     | フレーム：高さ約5m×長さ約8m<br>フライホイール：直径3.5m、重さ10tf           |
|       |                | 供試体最大寸法   | 幅3.0m×長さ4.5m×厚さ0.35m(床版)<br>治具の取替えにより桁部を含めた床版の試験も可能 |
|       |                | 車輪の種類     | 鉄輪：直径700mm×幅300mm                                   |
|       |                |           | 鉄輪：直径700mm×幅500mm                                   |
|       |                |           | ゴムタイヤ：9.00-R20-14PR相当                               |
| 性能    | 駆動             | 走行範囲      | ±0.5／±1.0／±1.25／±1.5m                               |
|       |                | 最大回転速度    | 59.8／42.3／37.8／34.7rpm                              |
|       | 載荷             | 最大載荷力     | 走行時：50tf(490kN)<br>停止時：100tf(981kN)                 |
|       |                | 最大載荷ストローク | 200mm                                               |
|       |                | その他       | 設置台数                                                |
| 設置場所  | 土木研究所 構造力学実験施設 |           |                                                     |

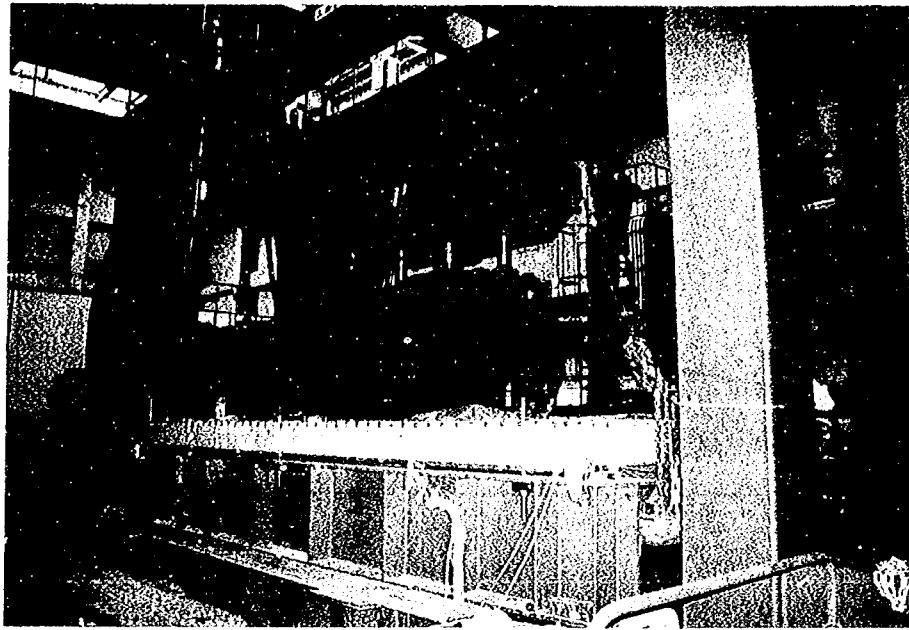


写真 5.1 試験状況

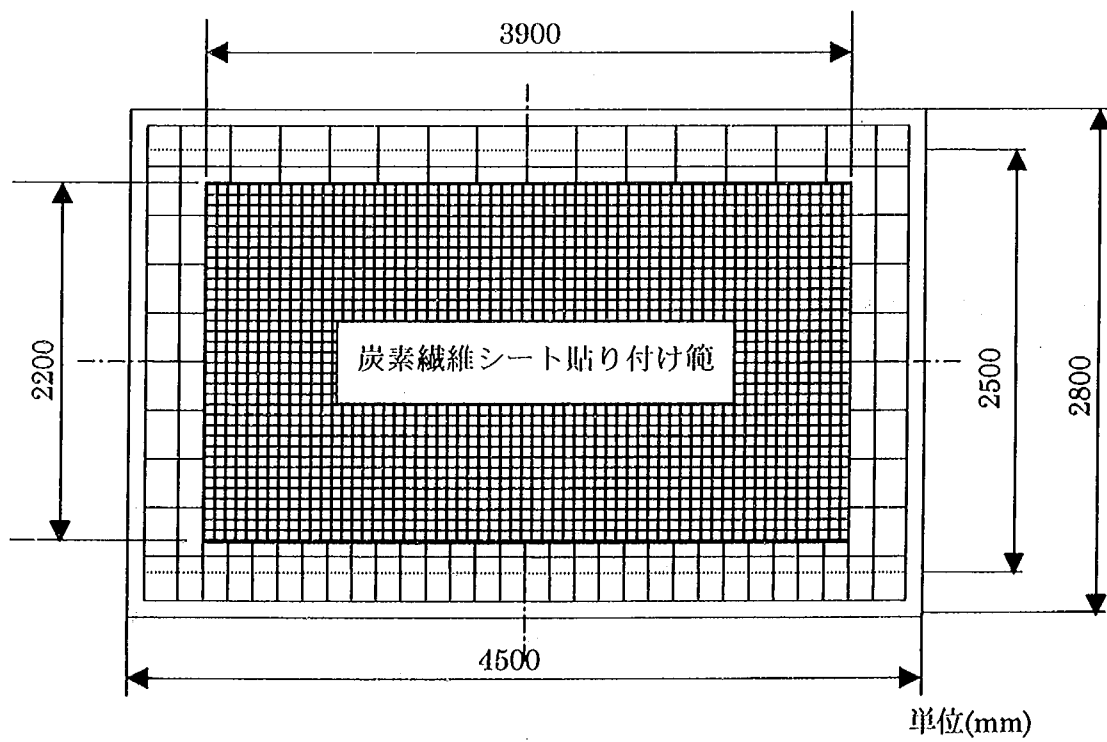


図 5.2 炭素繊維シートの貼り付け範囲

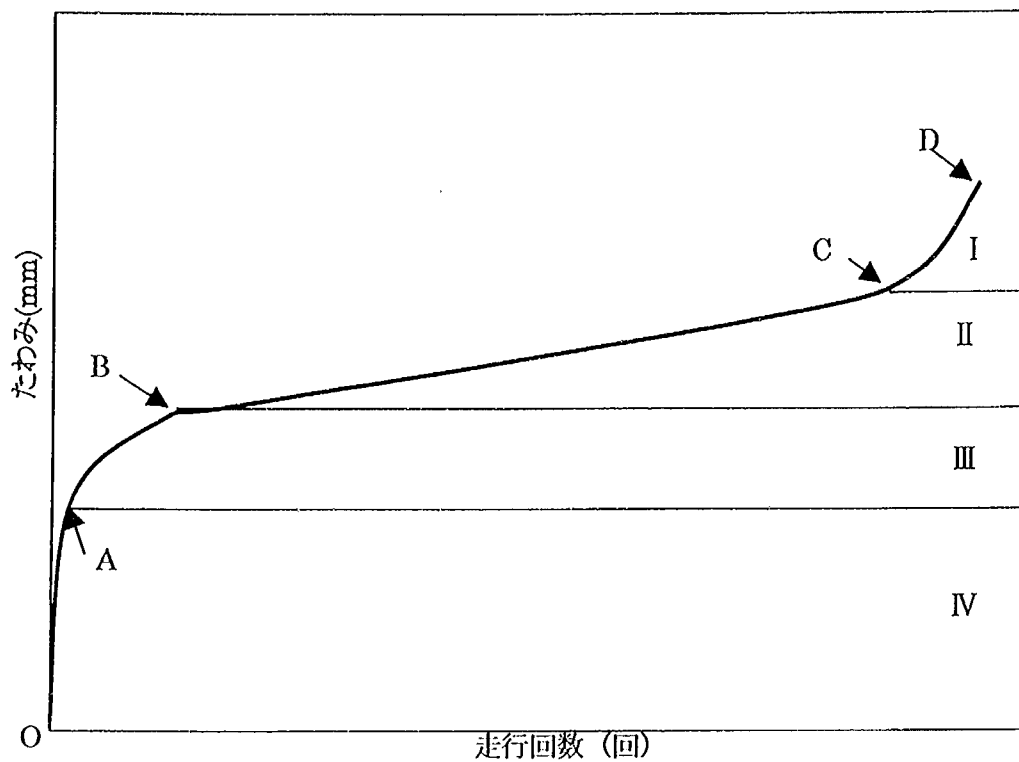


図 5.3 走行回数と劣化の関係

表 5.2 初期損傷の指標

| 橋梁点検要領(案)<br>における損傷度 | RC 床版損傷度の変化点 | たわみ(mm)<br>損傷目標値 |      |
|----------------------|--------------|------------------|------|
|                      |              | 除荷               | 16tf |
| O.K.                 |              |                  |      |
| IV                   | ○            |                  |      |
| III                  | A            | 3                | 6    |
|                      |              |                  |      |
| II                   | B            | 4                | 8    |
|                      |              |                  |      |
| I                    | C            | 5                | 10   |
|                      |              |                  |      |
|                      | D            |                  |      |

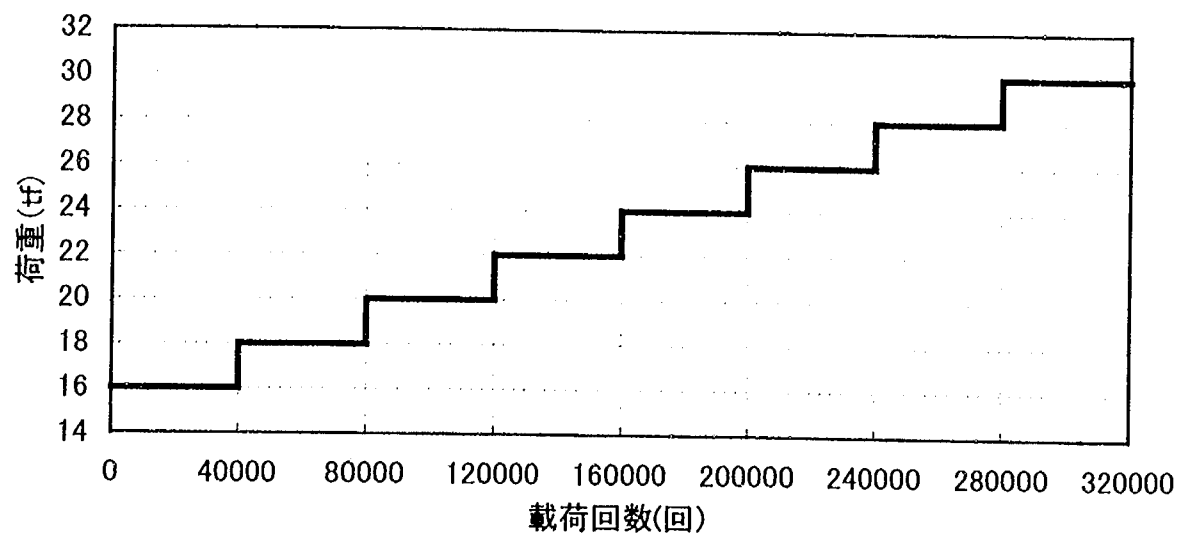


図5.4 載荷方法

## 6. 試験結果および考察

### 6.1 初期損傷の状況

初期載荷において炭素繊維シート接着を行う前の載荷回数、たわみの値を表 6.1.1 に示す。16tf 載荷時のたわみ 8mm を損傷度Ⅱの指標として初期損傷を与えたが、CCD カメラで測定した部分のひび割れ密度は各供試体で 5~9m/m<sup>2</sup> (載荷時) の範囲でばらついた。また載荷時たわみが 8mm に達するまでの載荷回数も各供試体で 3,500~50,000 回と広い範囲でばらついた。このときの活荷重たわみは S39+4×4S-D2 を除いておおむね載荷時たわみの 1/2 の 4mm 程度であった。S39+4×4S-D2 の初期損傷時の活荷重たわみは、4.4mm と他の供試体より 10%程度高く、損傷度Ⅱに達するまでの載荷回数は S39+2×2E-D2 と同じ 3,500 回であり他の供試体より著しく少なかった。

平成 8 年道路橋示方書で設計された RC 床版は、16tf の荷重で 4 万回載荷後も昭和 39 年道路橋示方書で設計された RC 床版に比べ、たわみが非常に少なく、ひび割れもほとんど発生していなかった。

表 6.1.1 初期損傷時のたわみおよびひび割れ密度

| 供試体名        | 炭素繊維シートの種類 | 積層数<br>主筋×配力筋 | 荷重<br>(tf) | 載荷回数<br>(回) | たわみ<br>(mm) |        |        | ひび割れ密度<br>(m/m <sup>2</sup> ) |        |
|-------------|------------|---------------|------------|-------------|-------------|--------|--------|-------------------------------|--------|
|             |            |               |            |             | 除荷          | 載荷     | 活荷重    | 除荷                            | 載荷     |
| S39-1       | なし         | なし            | 16         | (5005)      | (3.90)      | (7.97) | (4.07) | (5.26)                        | (7.40) |
| S39-2       | なし         | なし            | 16         | (130006)    | (4.44)      | (7.99) | (3.55) |                               |        |
| S39+1×1S-D2 | 高強度        | 1×1           | 16         | 16010       | 4.19        | 8.15   | 3.96   | 6.08                          | 7.29   |
| S39+2×2S-D2 | 高強度        | 2×2           | 16         | 28014       | 3.95        | 8.02   | 4.07   | 2.75                          | 5.23   |
| S39+3×3S-D2 | 高強度        | 3×3           | 16         | 16010       | 4.04        | 8.04   | 4.00   | 7.01                          | 8.95   |
| S39+4×4S-D2 | 高強度        | 4×4           | 16         | 3511        | 3.65        | 8.04   | 4.39   | 4.89                          | 6.40   |
| S39+1×1E-D2 | 高弾性        | 1×1           | 16         | 50304       | 4.11        | 8.00   | 3.89   | 5.74                          | 7.63   |
| S39+2×2E-D2 | 高弾性        | 2×2           | 16         | 3512        | 4.05        | 7.99   | 3.94   | 4.89                          | 6.58   |
| H8          | なし         | なし            | 16         | (40000)     | (0.64)      | (1.83) | (1.19) | (0.05)                        | (0.09) |

○ S39 無補強 RC 床版では 16tf 一定荷重で損傷度Ⅱに達した時の走行回数とたわみ

○ H8 無補強 RC 床版では 4 万回 16tf 載荷時の回数およびたわみ

図 6.1.1、図 6.1.2、図 6.1.3 にそれぞれ載荷回数と RC 床版中央の除荷時たわみ、載荷時たわみ、活荷重たわみ（載荷時たわみと除荷時たわみの差）の関係を示す。活荷重たわみは、初期の数百回の載荷で 3.5~4.0mm 程度まで急速に増加し、これ以降の増加は緩やかとなる。除荷時たわみ（残留たわみ）も載荷の初期段階で急速に増加するが、その増加は活荷重たわみに比べて緩やかである。活荷重たわみがほぼ停留した後も、除荷時たわみは緩やかに増加する。

図 6.1.4、図 6.1.5、図 6.1.6 に RC 床版中央部下側主鉄筋の除荷時ひずみ、載荷時ひずみ、活荷重ひずみを示す。同様に図 6.1.7、図 6.1.8、図 6.1.9 に RC 床版中央下側配力鉄筋の除荷時ひずみ、載荷時ひずみ、活荷重ひずみを示す。昭和 39 年道路橋示方書の RC 床版(No1~No9)は、同じ諸元で、無補強状態であった

が、初期載荷終了時の主鉄筋の載荷時ひずみは  $1200 \sim 1400 \mu$ 、配力鉄筋の載荷時ひずみは  $600 \sim 1000 \mu$  と広い範囲でばらついた。平成 8 年道路橋示方書に準拠した RC 床版 H8 の鉄筋ひずみは他の昭和 39 年道路橋示方書に準拠した RC 床版の鉄筋ひずみの数分の 1 と小さくなっている。

主鉄筋、配力鉄筋ともに活荷重ひずみは、載荷開始直後に急速に増加した後、減少または停留する。これより、ひび割れは繰り返し載荷の初期段階で急速に RC 床版下面から RC 床版上面方向に進展し、RC 床版の曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) が低下し、引張鉄筋のひずみは増加するが、その後ひび割れ深さがほぼ一定となるために活荷重ひずみもほぼ一定となると考えられる。除荷時ひずみは初期に急速に増加するが、活荷重ひずみがほぼ一定値となった後も、緩やかに増加する。

図 6.1.10 に除荷時のひび割れ密度と載荷回数の関係を、図 6.1.11 に載荷時のひび割れ密度と載荷回数の関係を示す。ひび割れ密度は、たわみや鉄筋ひずみに比べて緩やかに増加し損傷度Ⅱに達した時点でも停留傾向を示していない。初期載荷の終了時で載荷時のひび割れ密度は最も小さい S39+2×2S-D2（初期載荷後高強度 2×2 層補強）で  $5\text{m/m}^2$ 、最も大きな S39+3×3S-D2（初期載荷後高強度 3×3 層補強）で  $9\text{m/m}^2$  と大きくばらついた。

図 6.1.12 から図 6.1.17 に初期載荷終了時の RC 床版下面のひび割れは状況を示す。初期損傷終了時のひび割れは、RC 床版中央では 10cm 程度の間隔で主鉄筋方向・配力鉄筋方向に格子状に生じていた。周辺部ではひび割れ間隔は 20～30cm と広くなり RC 床版中央から 4 隅に向かう放射状のひび割れが見られた。

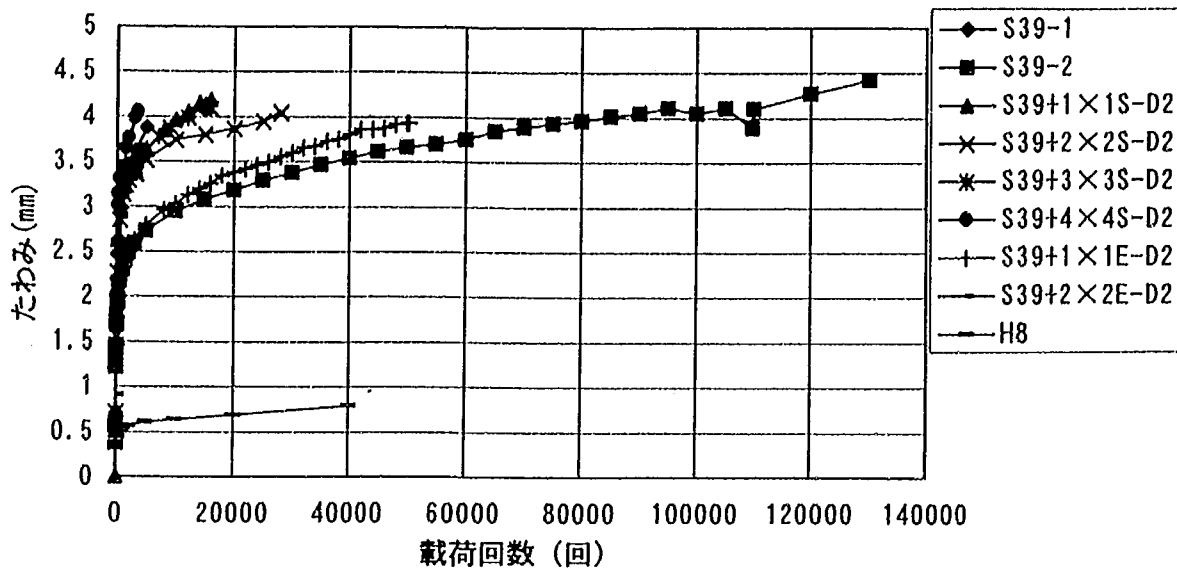


図6.1.1 補強前 床版中央の除荷時たわみ (荷重16tf)

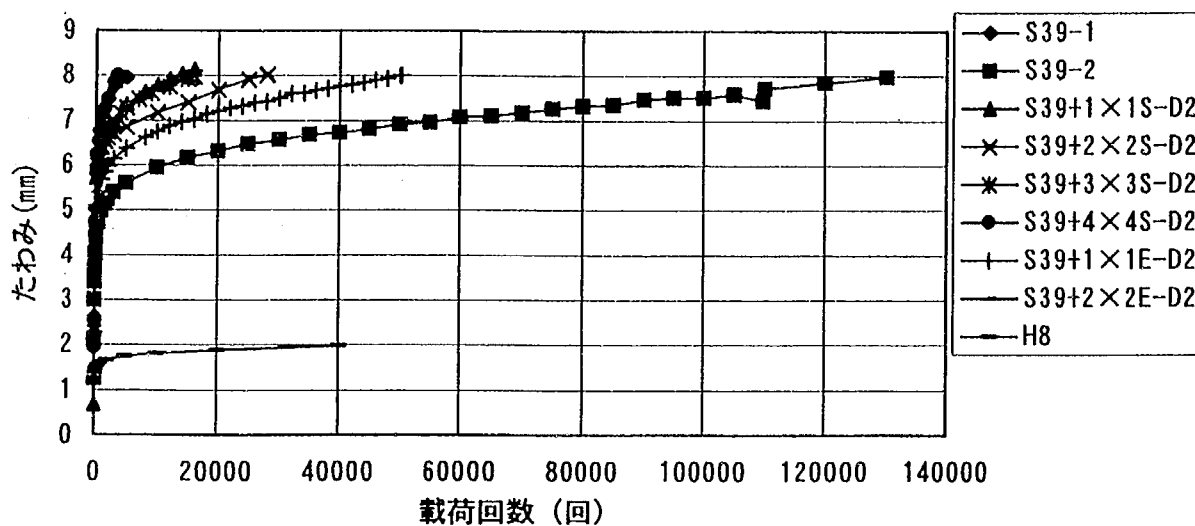


図6.1.2 補強前 床版中央の載荷時たわみ (荷重16tf)

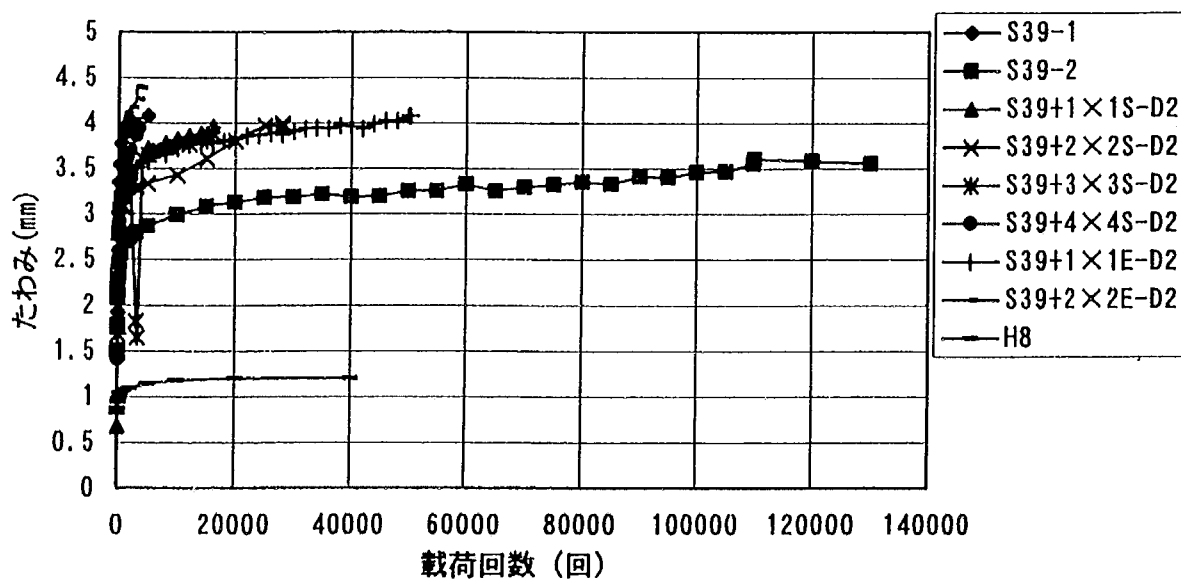


図6.1.3 補強前 床版中央の活荷重たわみ (荷重16tf)

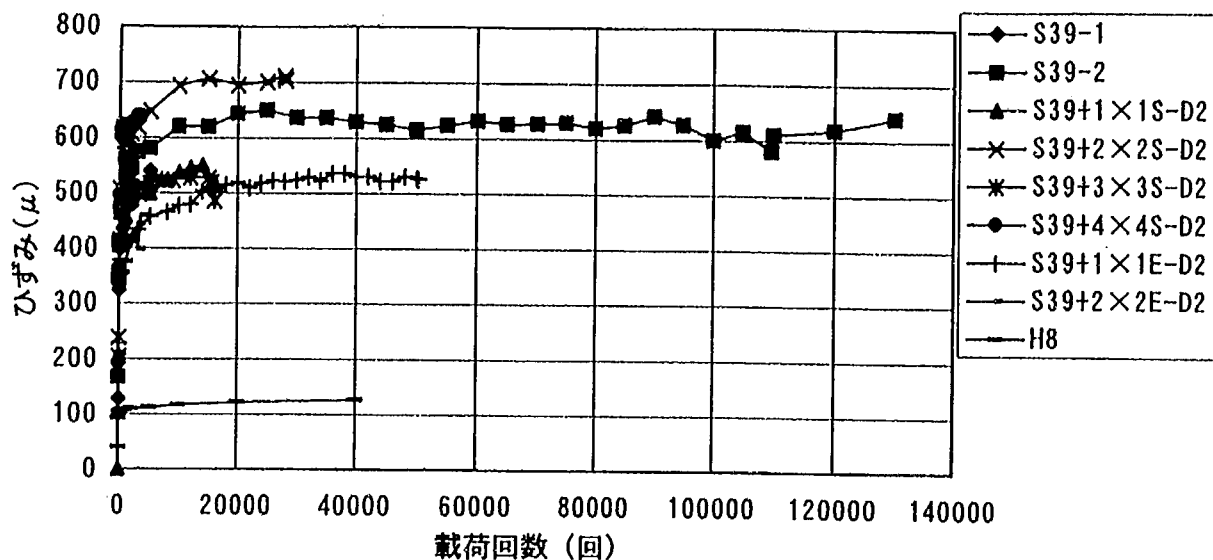


図6.1.4 補強前 床版中央主鉄筋(下)の除荷時ひずみ(荷重16tf)

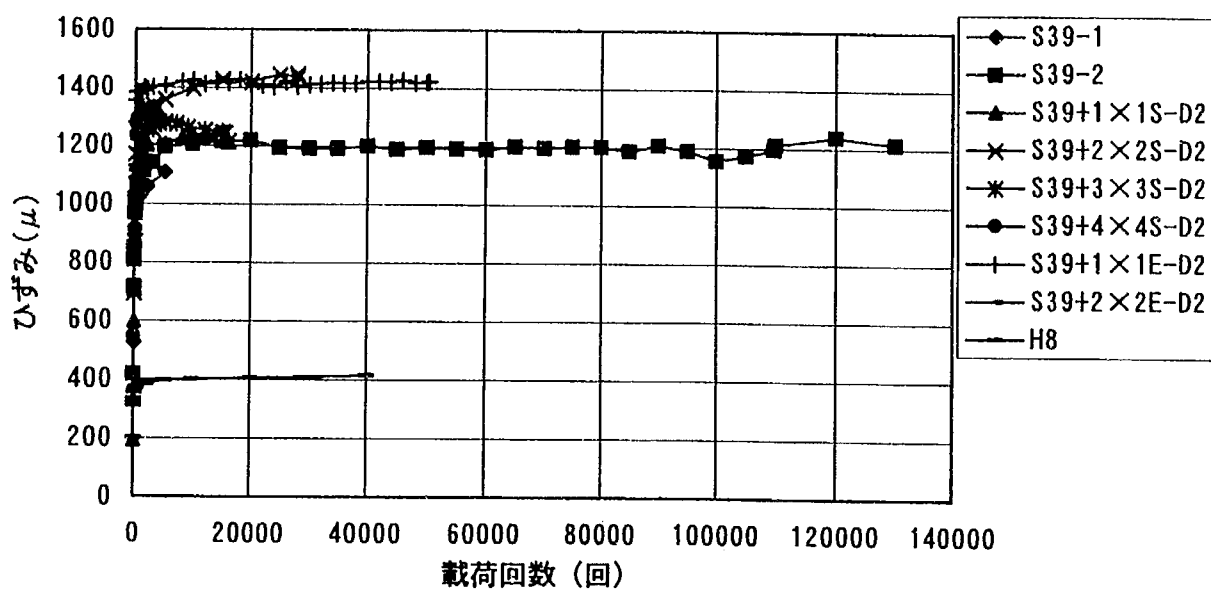


図6.1.5 補強前 床版中央主鉄筋(下)の載荷時ひずみ(荷重16tf)

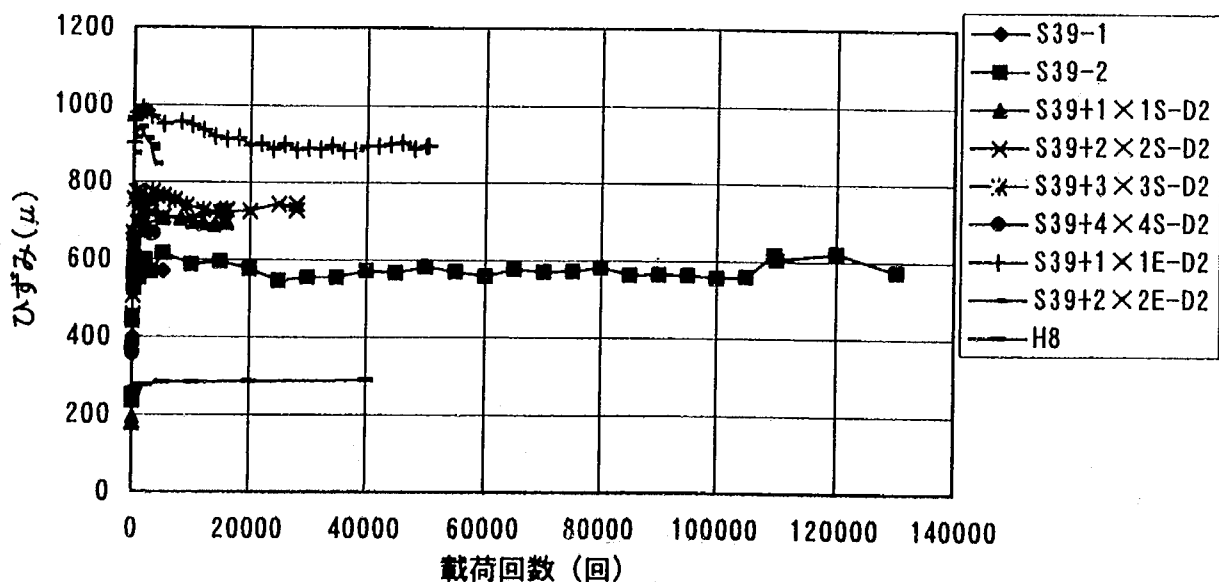
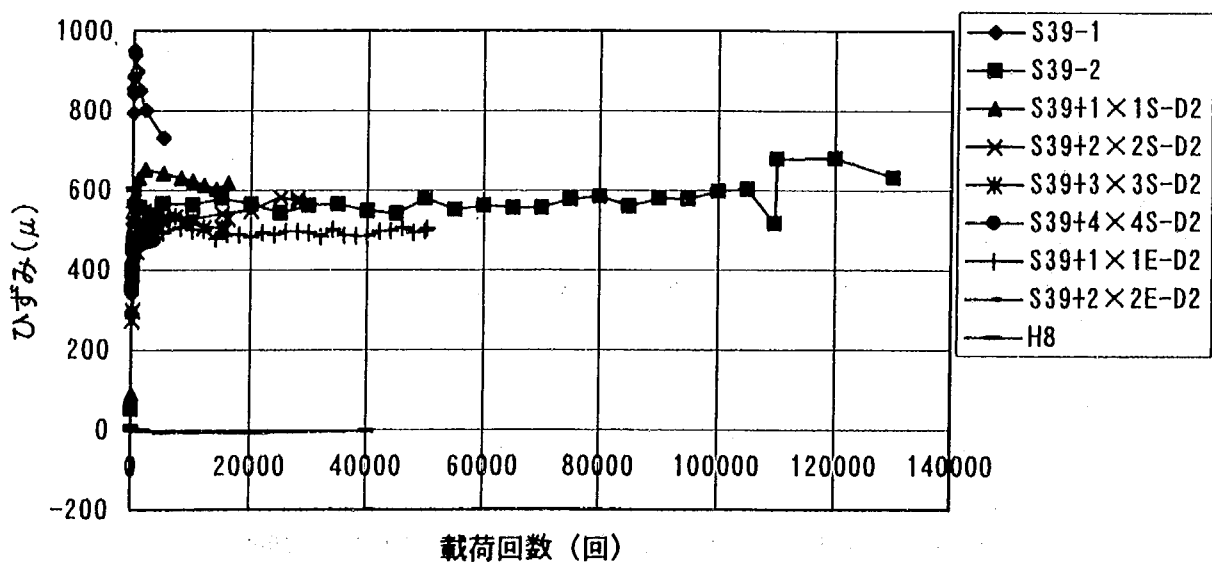
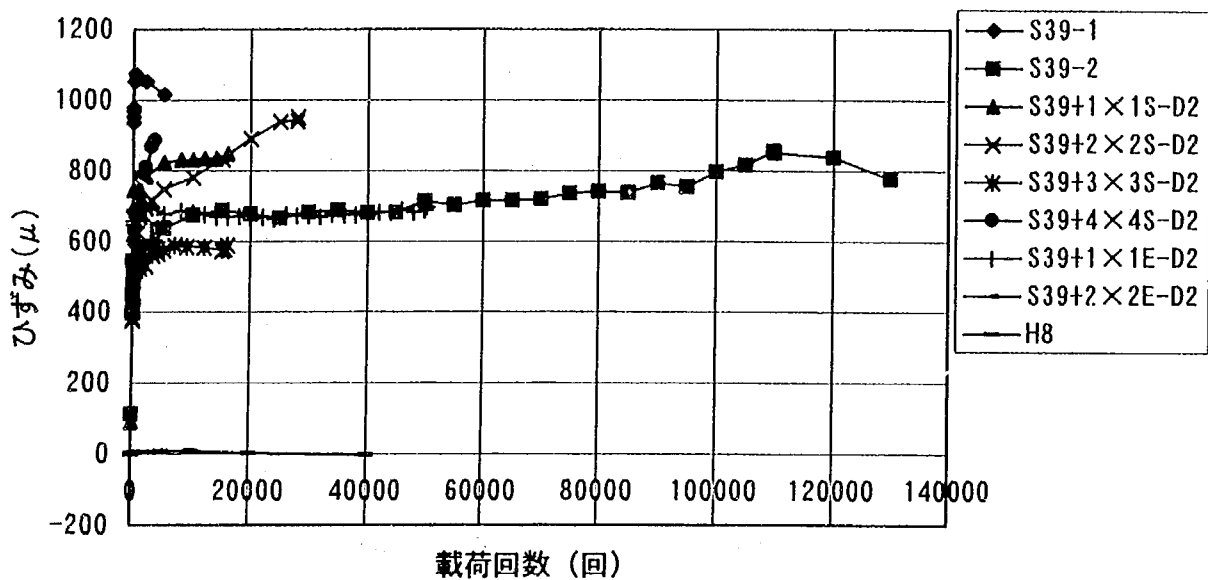
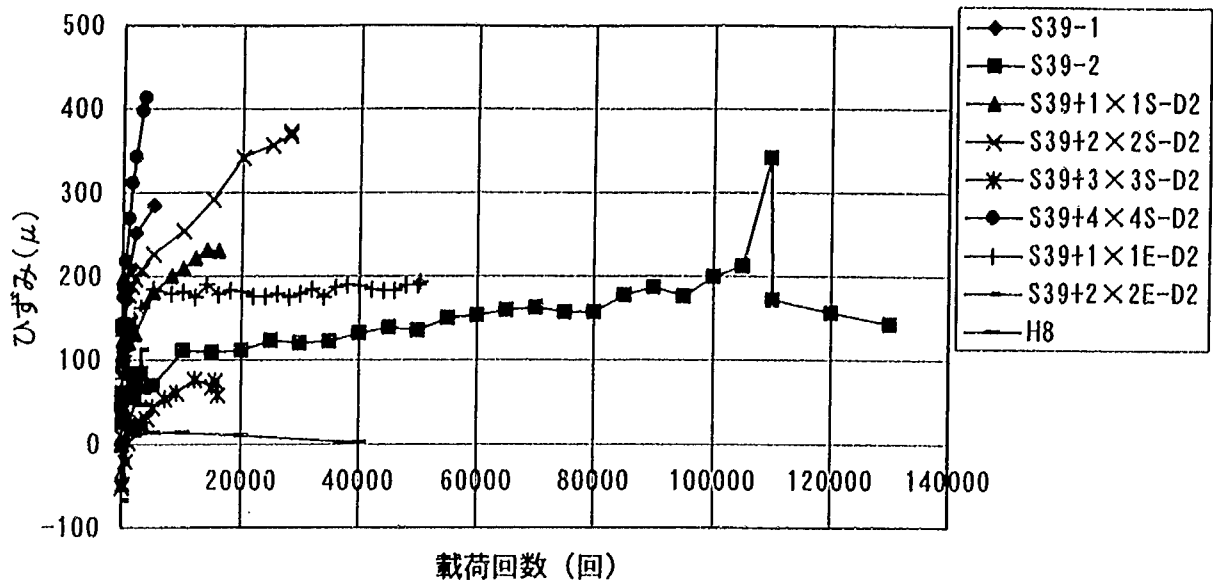


図6.1.6 補強前 床版中央主鉄筋(下)の活荷重ひずみ(荷重16tf)



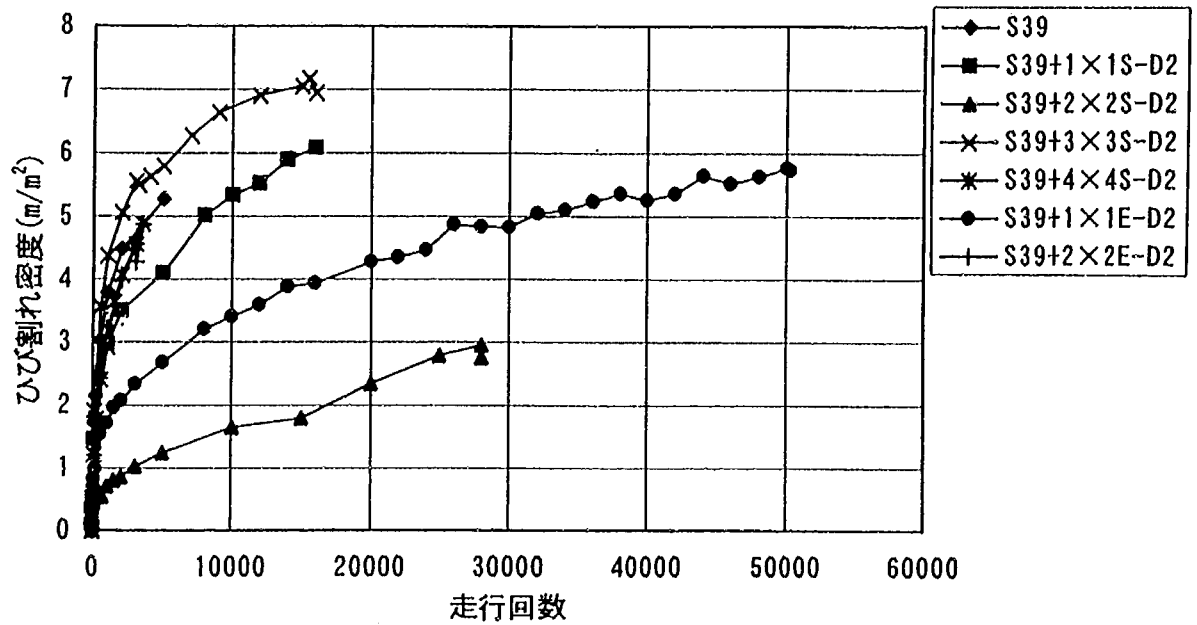


図6.1.10 走行回数とひび割れ密度（除荷時）

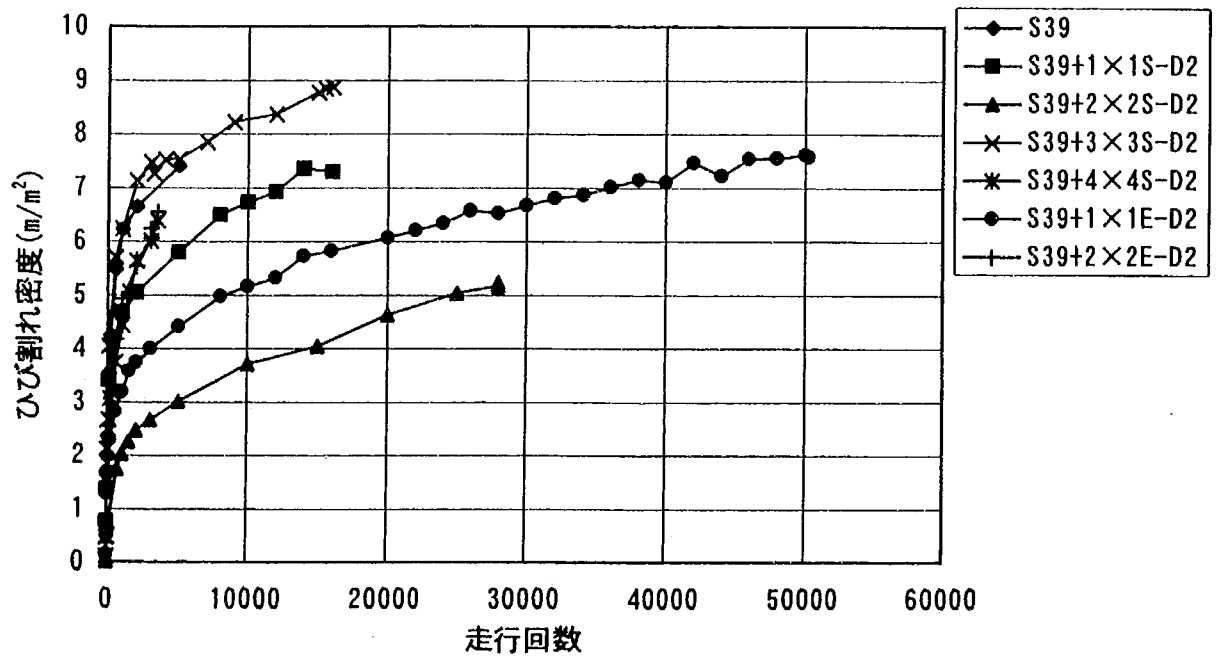


図6.1.11 走行回数とひび割れ密度（載荷時）

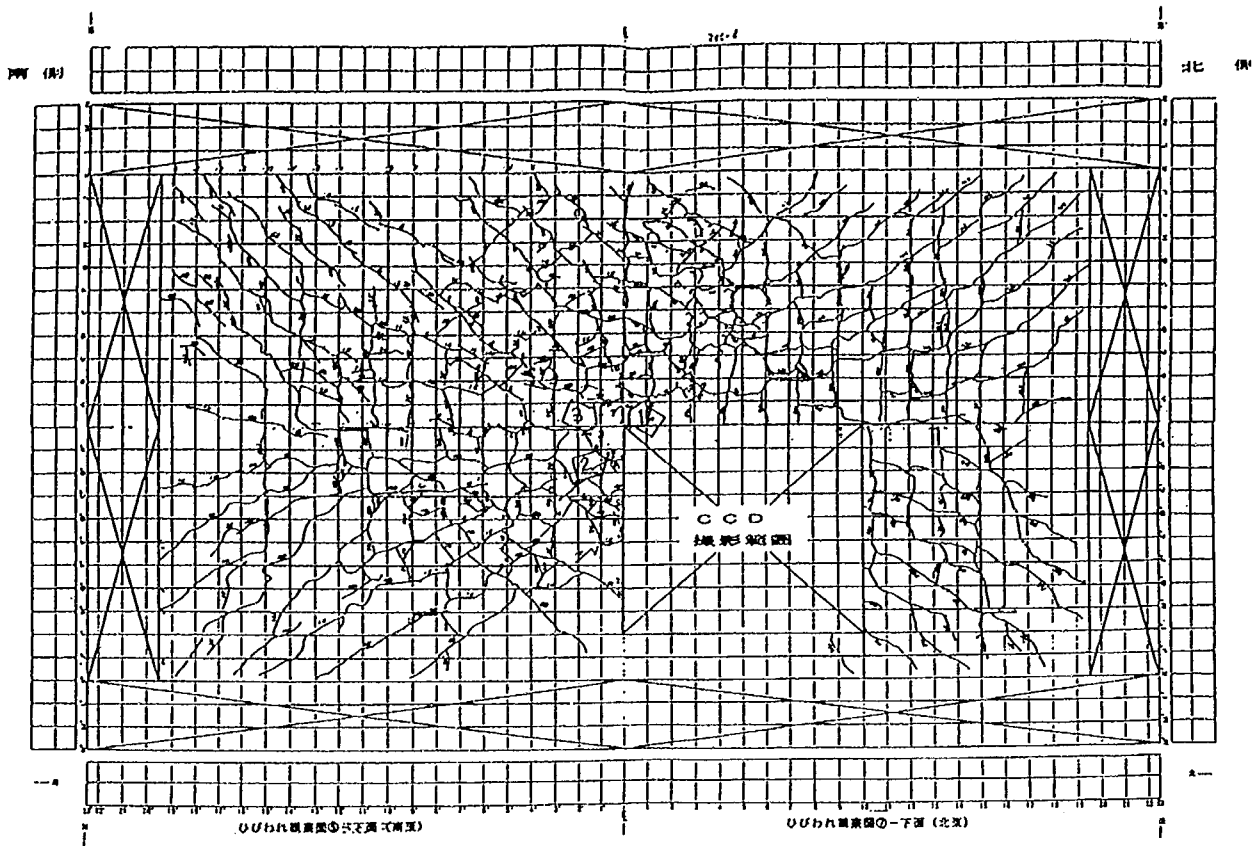


図 6.1.12 初期損傷を与えた供試体 (S39+1×1S-D2) のひび割れ状況

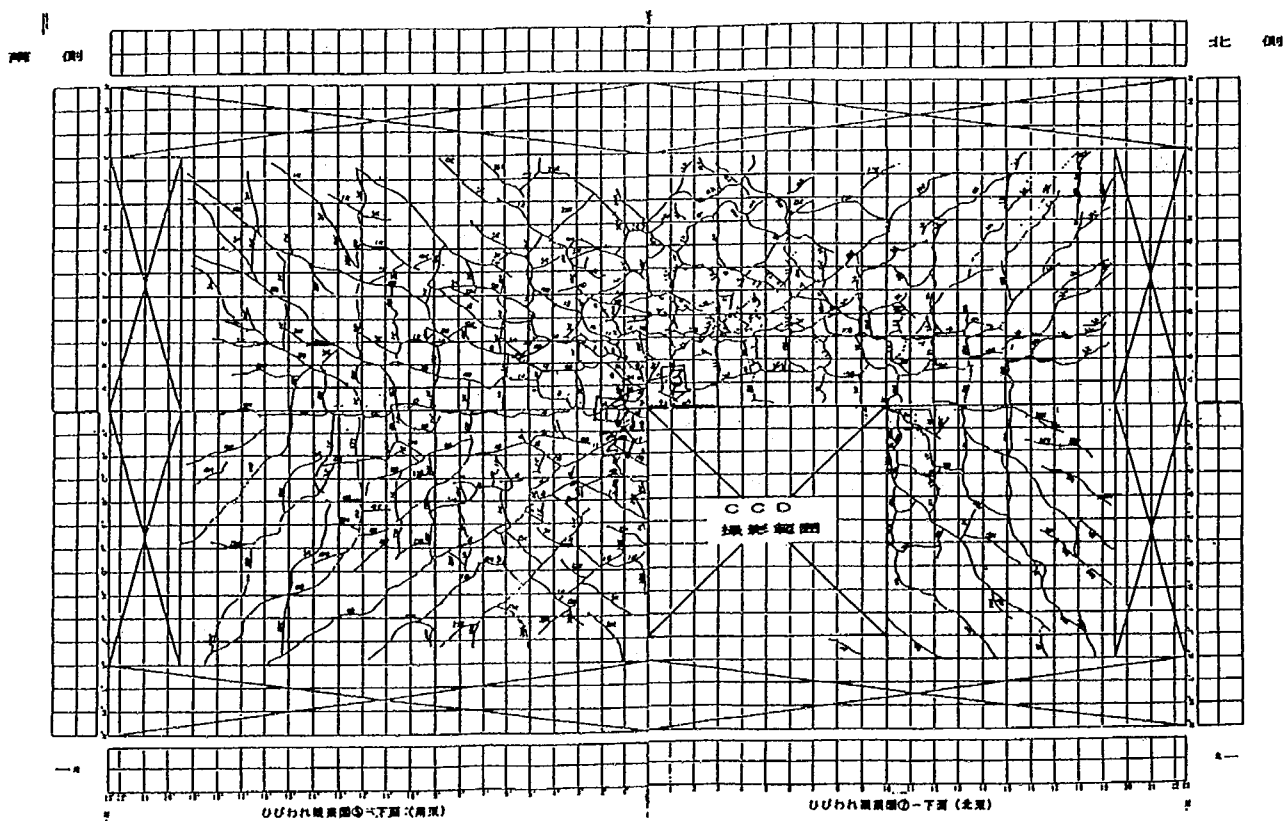


図 6.1.13 初期損傷を与えた供試体 (S39+2×2S-D2) のひび割れ状況

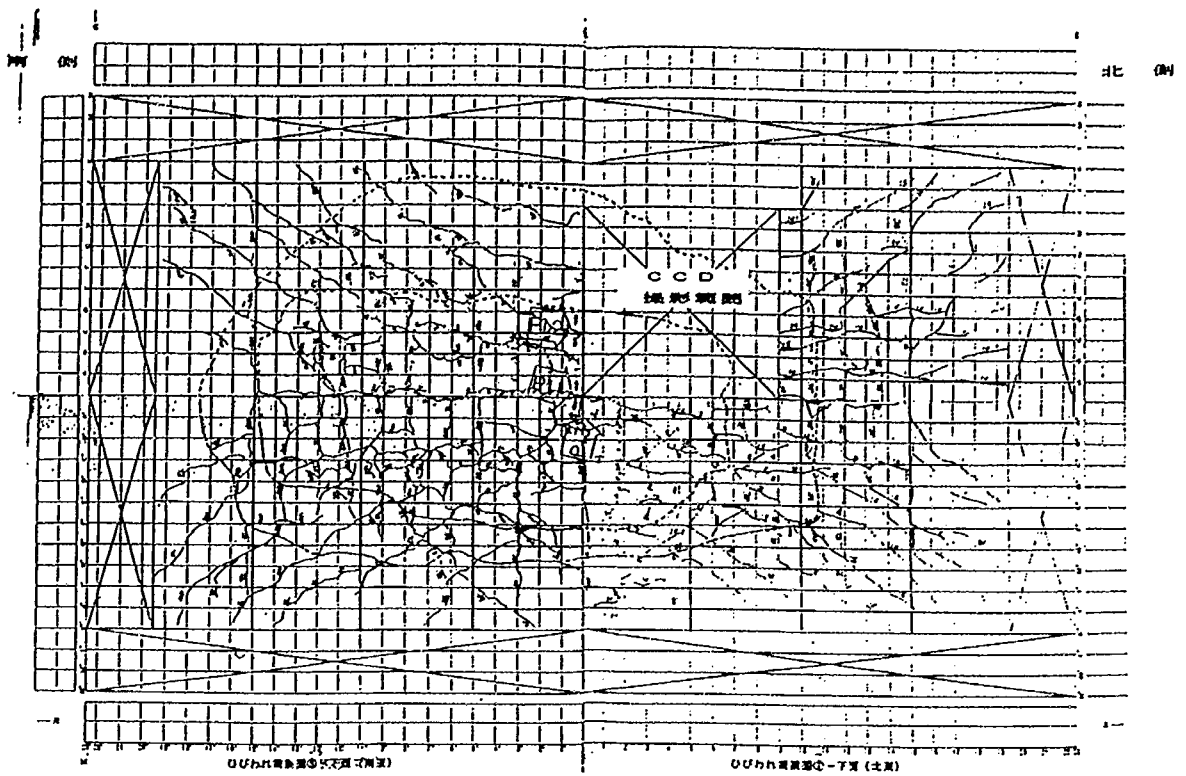


図 6.1.14 初期損傷を与えた供試体 (S39+3x3S-D2) のひび割れ状況

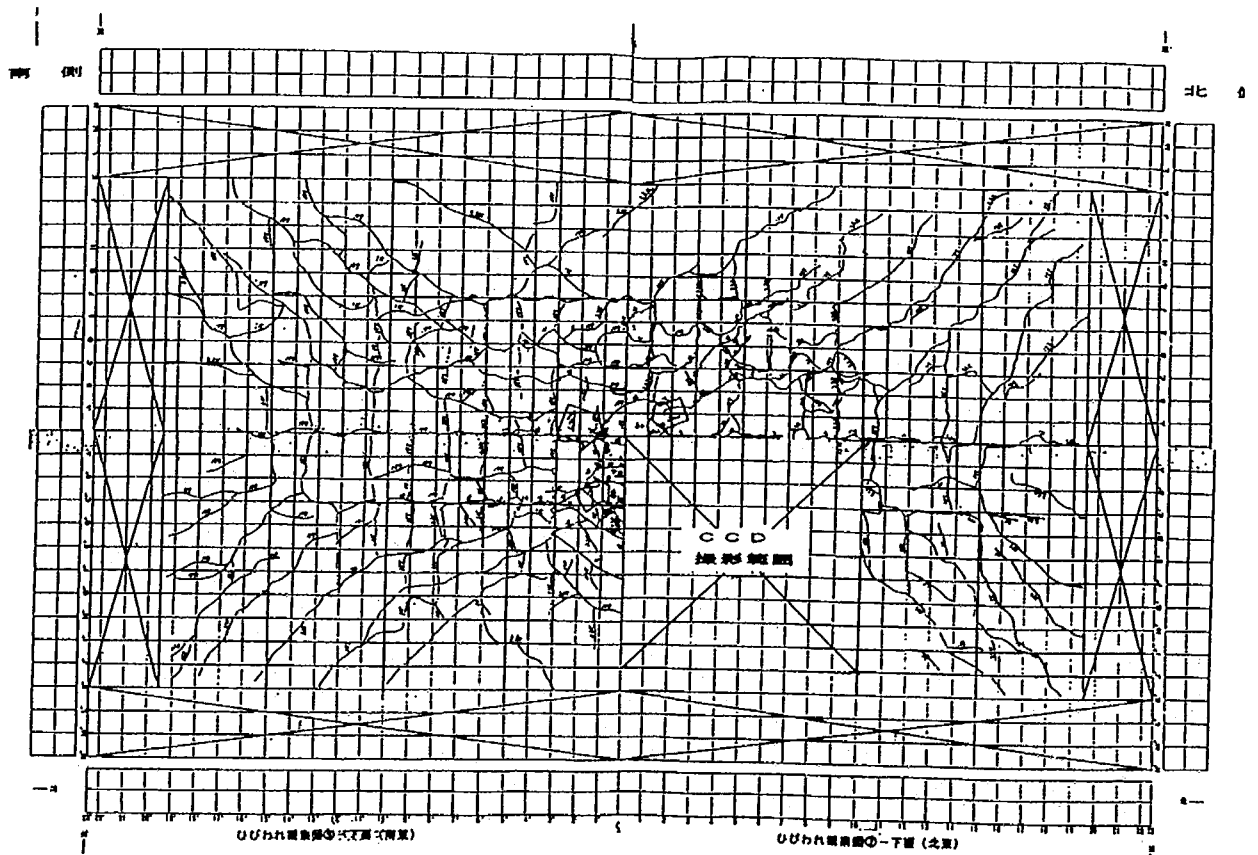


図 6.1.15 初期損傷を与えた供試体 (S39+4x4S-D2) のひび割れ状況

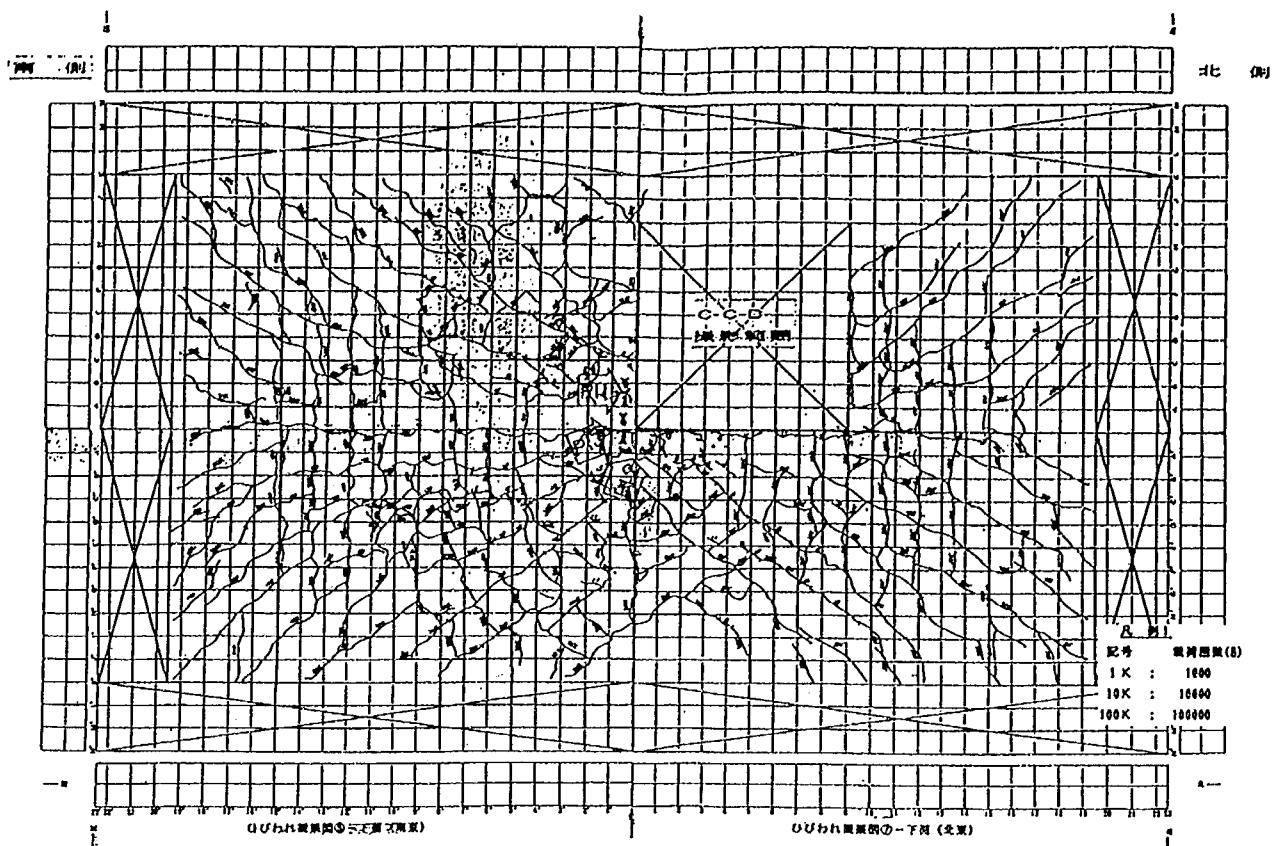


図 6.1.16 初期損傷を与えた供試体 (S39+1×1E-D2) のひび割れ状況

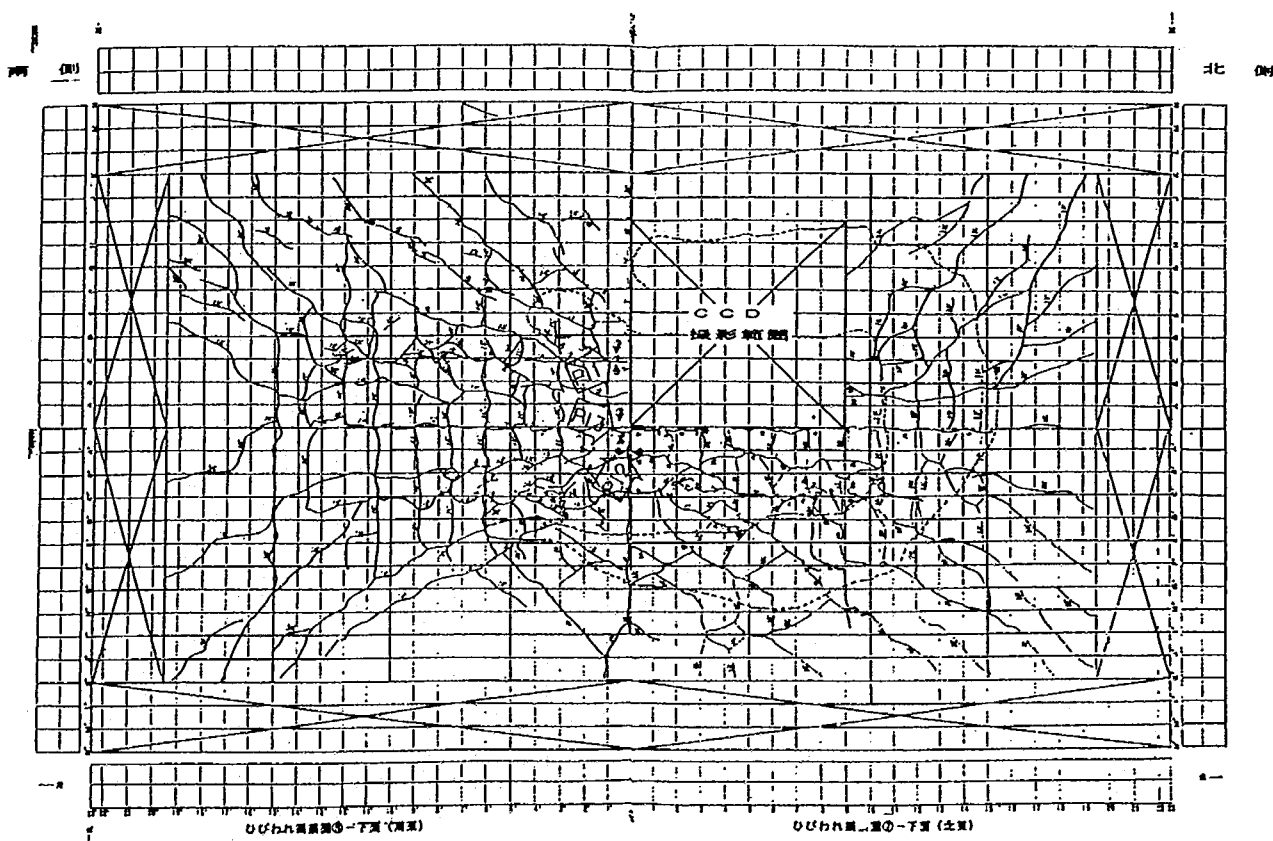


図 6.1.17 初期損傷を与えた供試体 (S39+2×2E-D2) のひび割れ状況

## 6.2 各供試体の破壊荷重と破壊回数

表 6.2.1 に各供試体の破壊時の荷重および載荷回数を示す。以下、補強後の破壊時までの載荷回数を破壊回数と呼ぶ。いずれの供試体も繰り返し載荷中に押し抜きせん断破壊した。高強度型炭素繊維シート  $2 \times 2$  層で補強した S39+2 $\times$ 2S-D2 が最も疲労耐久性が高く、高強度型  $3 \times 3$  層、高強度型  $4 \times 4$  層、高弾性型  $1 \times 1$  層、高弾性型  $2 \times 2$  層と炭素繊維シートの補強量 (CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ )) を増やして補強した RC 床版はいずれも高強度型  $2 \times 2$  層で補強した RC 床版より低い荷重、載荷回数で破壊した。積層数が共に  $1$  層  $\times$   $1$  層の高強度型炭素繊維シートで補強した S39+1 $\times$ 1S-D2 と高弾性型炭素繊維シートで補強した S39+1 $\times$ 1E-D2 を比べると、高弾性型で補強した S39+1 $\times$ 1E-D2 の方が破壊回数、破壊荷重共に高くなった。炭素繊維シートで補強した RC 床版の疲労耐久性は、昭和 39 年示方書に準じて製作した無補強 RC 床版に比べて大幅に向上した。しかしながら、最も疲労耐久性の高かった高強度型  $2 \times 2$  層補強の S39+2 $\times$ 2S-D2 でも平成 8 年示方書に順じて製作した RC 床版 H8 に比べると低かった。

表6.2.1 各供試体の破壊回数および破壊時荷重

| 供試体名                 | 炭素繊維シートの種類 | 積層数<br>主筋方向<br>$\times$ 配力筋<br>方向 | CFRPの<br>引張剛性<br>kgf/m幅 | CFRPの曲<br>げ剛性<br>kgf $\cdot$ cm <sup>2</sup> /m幅 | 予備載荷<br>回数<br>(回) | 破壊回数<br>(回) | 破壊時<br>荷重(tf) |
|----------------------|------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------|-------------------|-------------|---------------|
| S39-1                | なし         | なし                                |                         |                                                  | 5005              | 27392       | 16            |
| S39-2                | なし         | なし                                |                         |                                                  | 130006            | 224764      | 16            |
| S39+1 $\times$ 1S-D2 | 高強度        | $1 \times 1$                      | 4.24E+06                | 5.29E+03                                         | 16010             | 114496      | 20            |
| S39+2 $\times$ 2S-D2 | 高強度        | $2 \times 2$                      | 8.47E+06                | 6.46E+04                                         | 28014             | 200626      | 26            |
| S39+3 $\times$ 3S-D2 | 高強度        | $3 \times 3$                      | 1.27E+07                | 2.52E+05                                         | 16010             | 173860      | 24            |
| S39+4 $\times$ 4S-D2 | 高強度        | $4 \times 4$                      | 1.69E+07                | 6.27E+05                                         | 3511              | 132070      | 22            |
| S39+1 $\times$ 1E-D2 | 高弾性        | $1 \times 1$                      | 9.60E+06                | 4.72E+03                                         | 50304             | 155210      | 22            |
| S39+2 $\times$ 2E-D2 | 高弾性        | $2 \times 2$                      | 1.92E+07                | 1.36E+05                                         | 3512              | 144643      | 22            |
| H8                   | なし         | なし                                |                         |                                                  |                   | 255649      | 28            |

( ) S39 無補強 RC 床版では、16tf 一定荷重で損傷度 II に達するまでの載荷回数

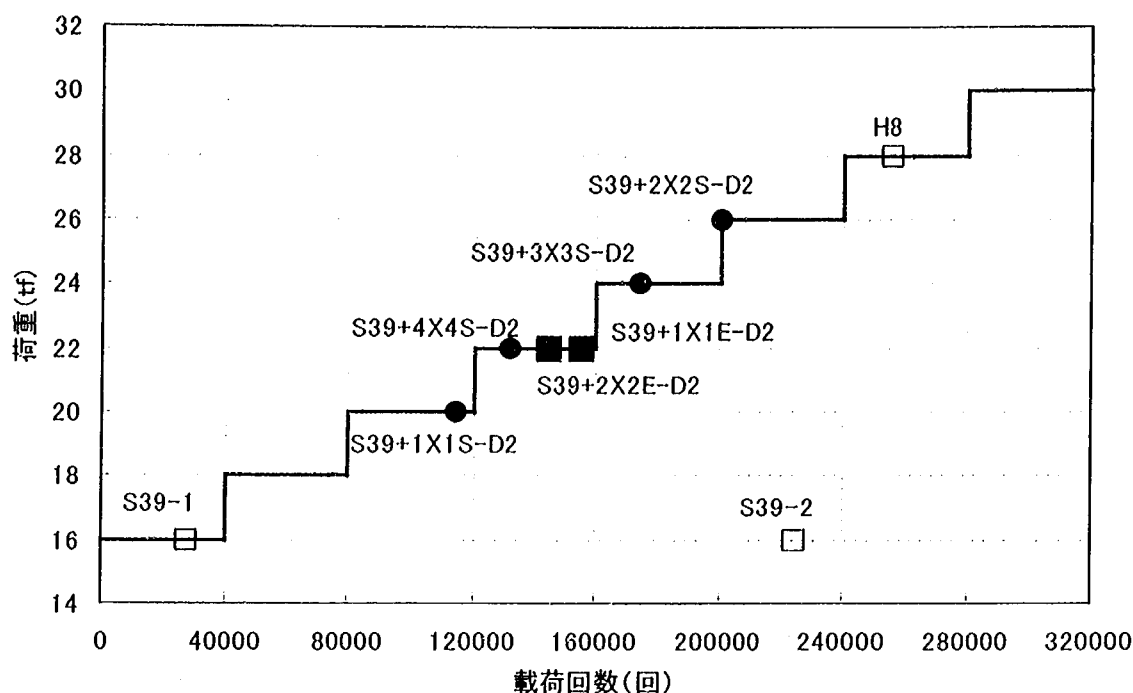


図6.2.1 階段載荷による疲労試験結果

### 6.3 各供試体の破壊状況

各供試体の破壊後のひび割れ状況（上・下面、内部切断面）を、図 6.3.1～図 6.3.9 に示す。いずれの供試体も最終的な破壊は押抜きせん断破壊によって生じた。上面では、載荷板の幅 0.5m 程度で車輪の進行方向に 1.3～1.7m 程度の長さで陥没が生じていた。RC 床版下面では、主筋方向に幅 1.5～1.9m 程度の幅で、車輪の走行方向には 1.8～2.8m 程度の長さで抜け落ちていた。

炭素繊維シートで補強した RC 床版では、下面の抜け落ち部に沿って部分的に剥離を生じていたが、端部からの全面的な剥離は生じなかった。高強度型の炭素繊維シートで補強した供試体（S39+1×1S-D2～S39+4×4S-D2）では、破壊後も炭素繊維の破断は生じていなかった。高弾性型では、RC 床版の抜け落ち後、RC 床版の中央で配筋鉄筋方向の炭素繊維シートの破断が見られた。

試験終了後、RC 床版をダイヤモンドカッターで切断した後、炭素繊維シートを RC 床版から引き剥がしたところ、抜け落ち部周辺の剥離部を含めて炭素繊維シートに RC 床版コンクリートの表層のコンクリートが付着した状態で剥がれており、床版コンクリートと炭素繊維シートの界面または樹脂層内部での剥離は観察されなかった。また炭素繊維シートの補強量（引張剛性（E・A））の多いもの（積層数が多いものや、高弾性炭素繊維シートを使用したもの）ほど、炭素繊維シートに付着したコンクリートが厚くなる傾向が見られた。

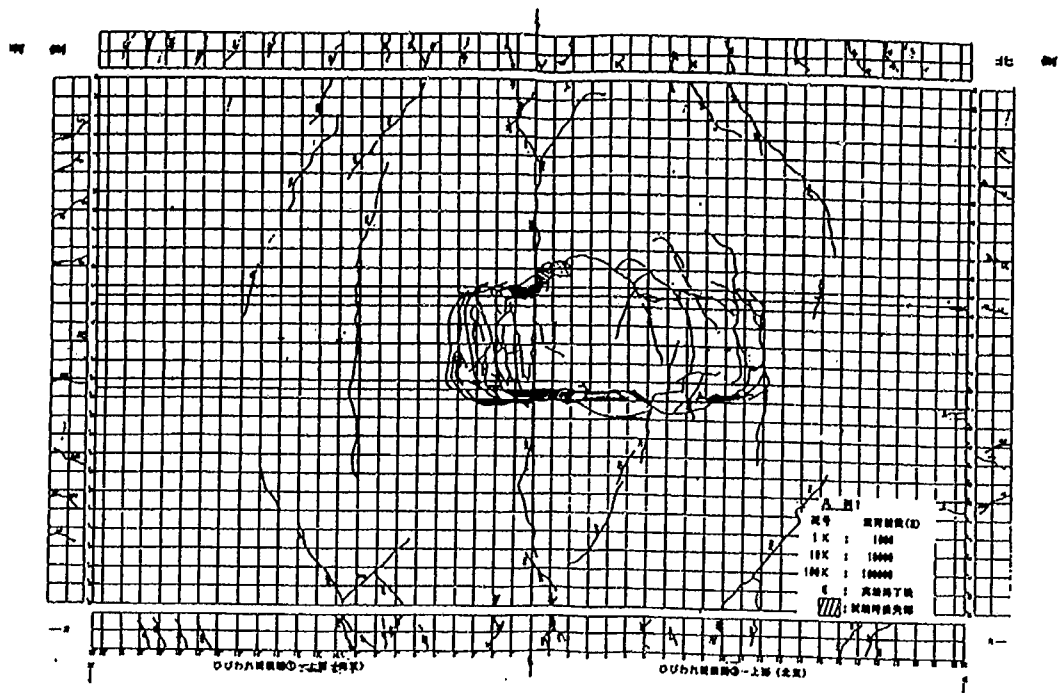


図 6.3.1(a) S39-1 ひび割れ観測図 (上面)

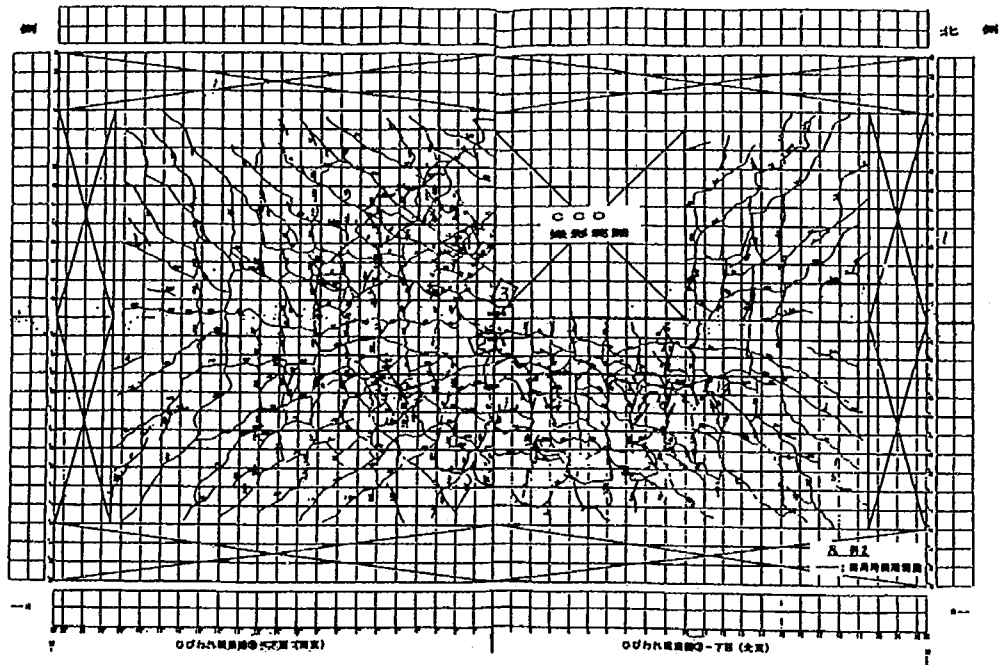


図 6.3.1(b) S39-1 ひび割れ観測図 (下面)

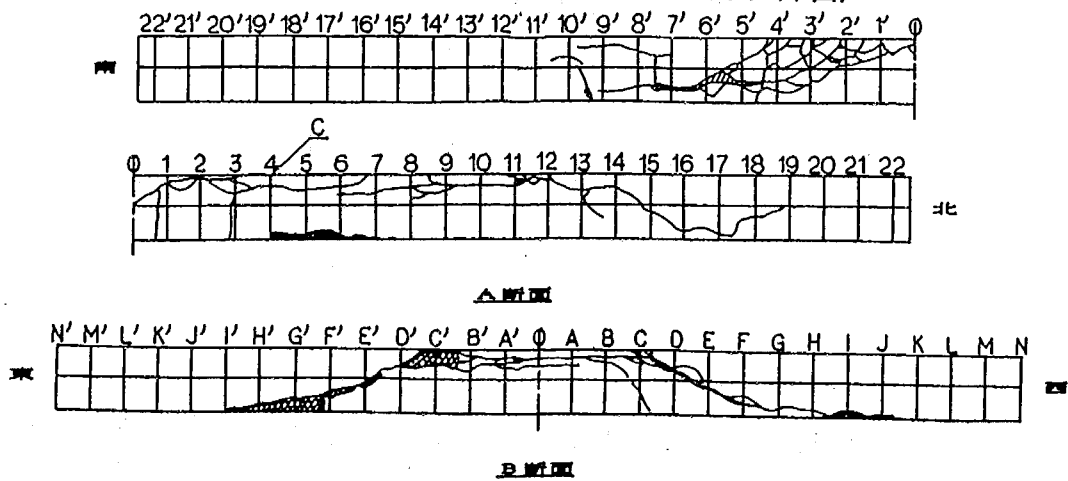


図 6.3.1(c) S39-1 ひび割れ観測図 (内部 断面)

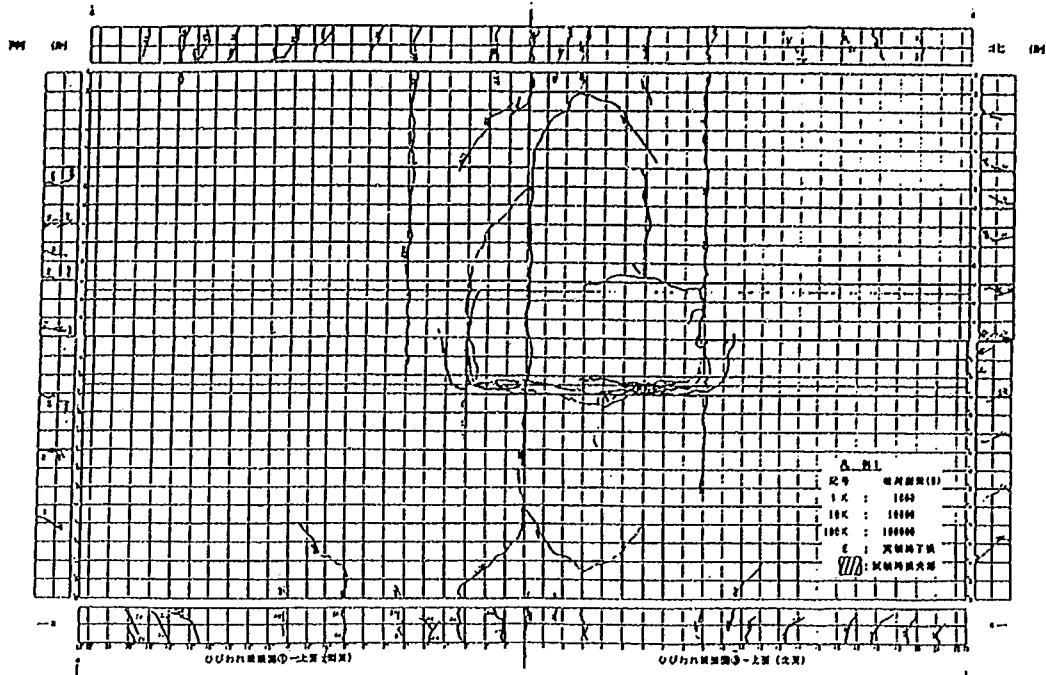


図 6.3.2(a) S39-2 ひび割れ観察図 (上面)

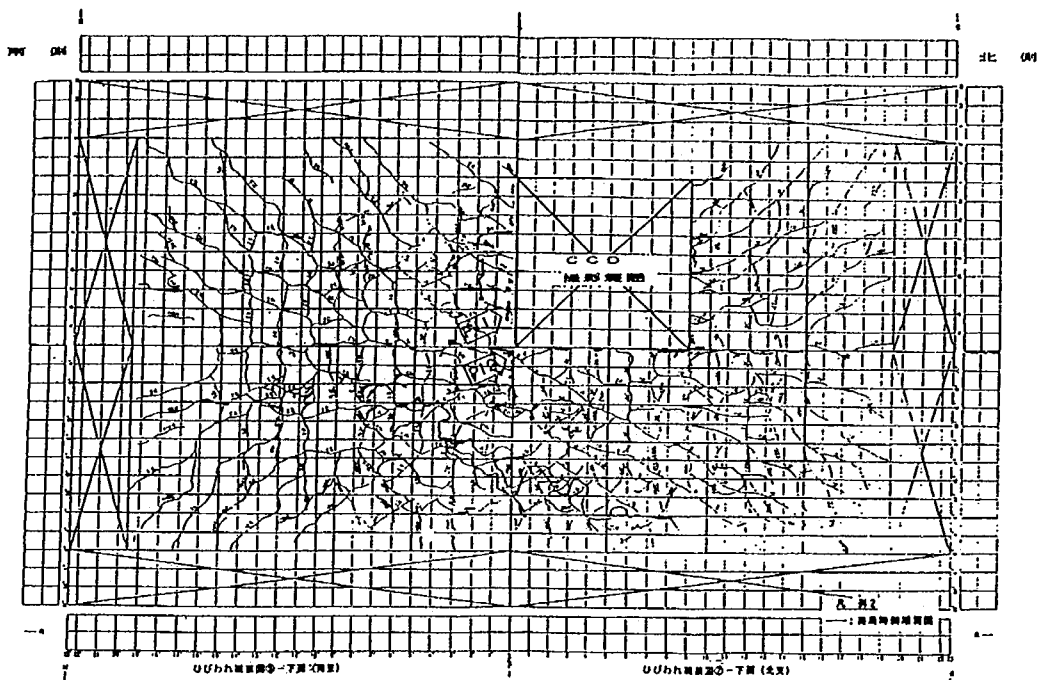


図 6.3.2(b) S39-2 ひび割れ観察図 (下面)

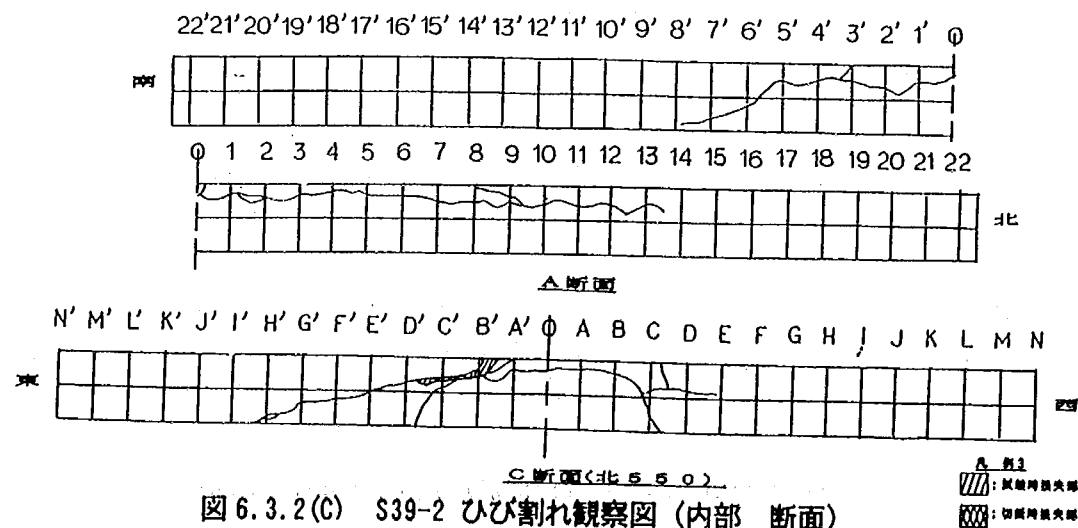
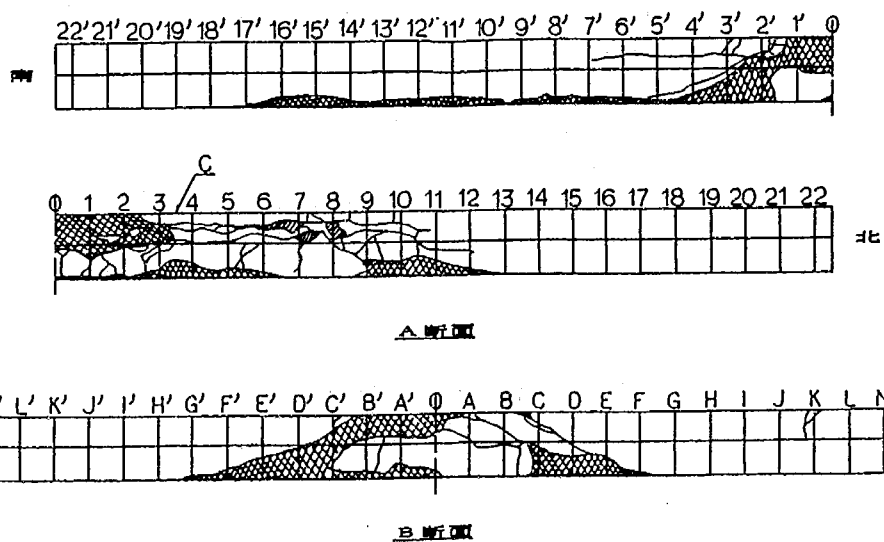
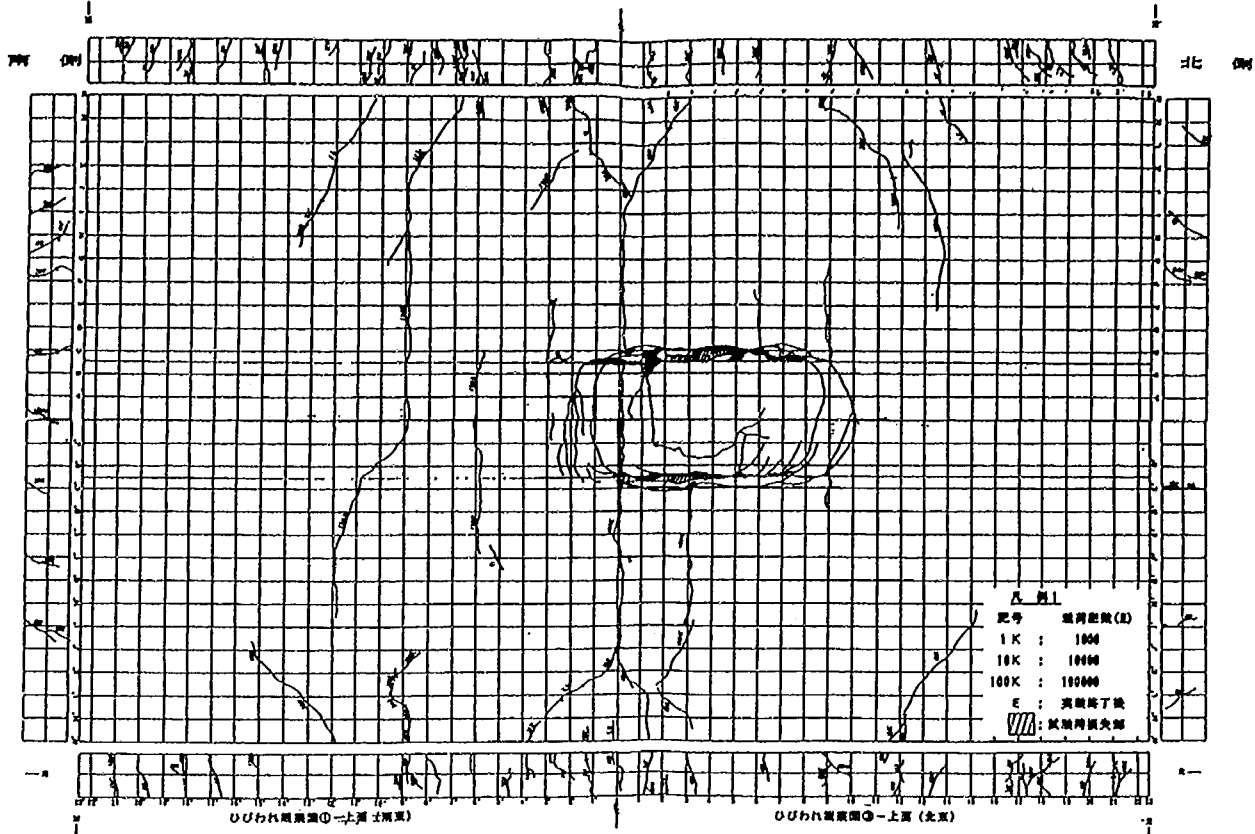


図 6.3.2(c) S39-2 ひび割れ観察図 (内部 断面)





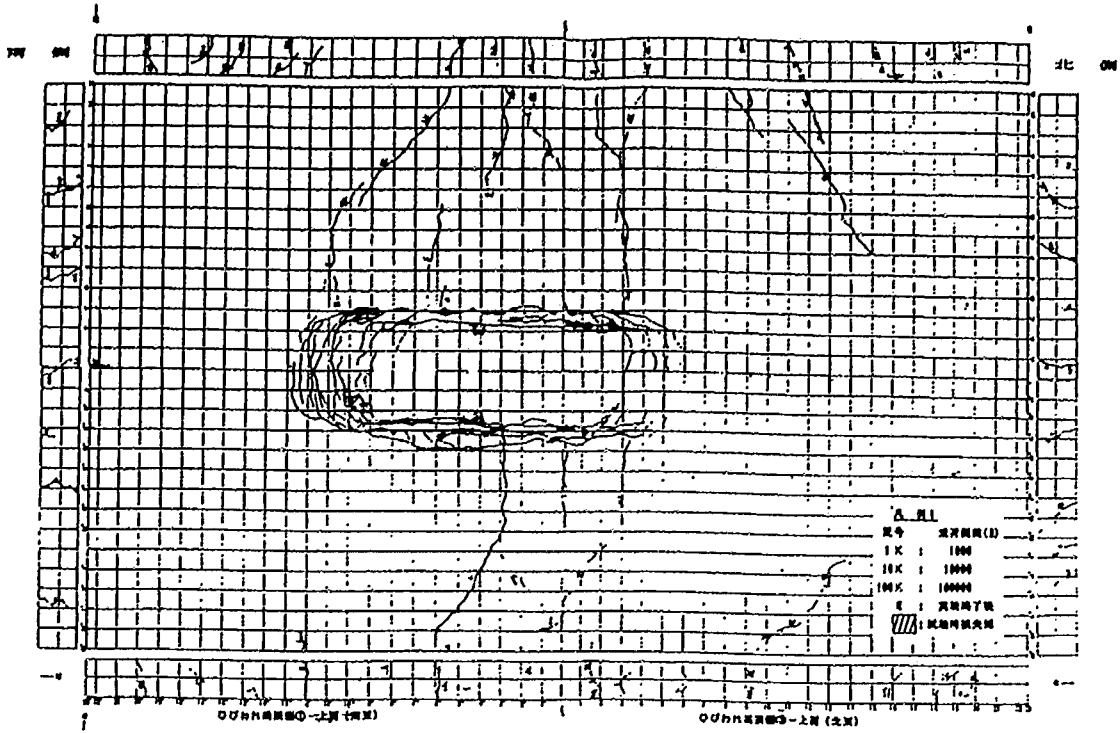


図 6.3.5(a) S39+3×3S-D2 ひび割れ観察図 (上面)

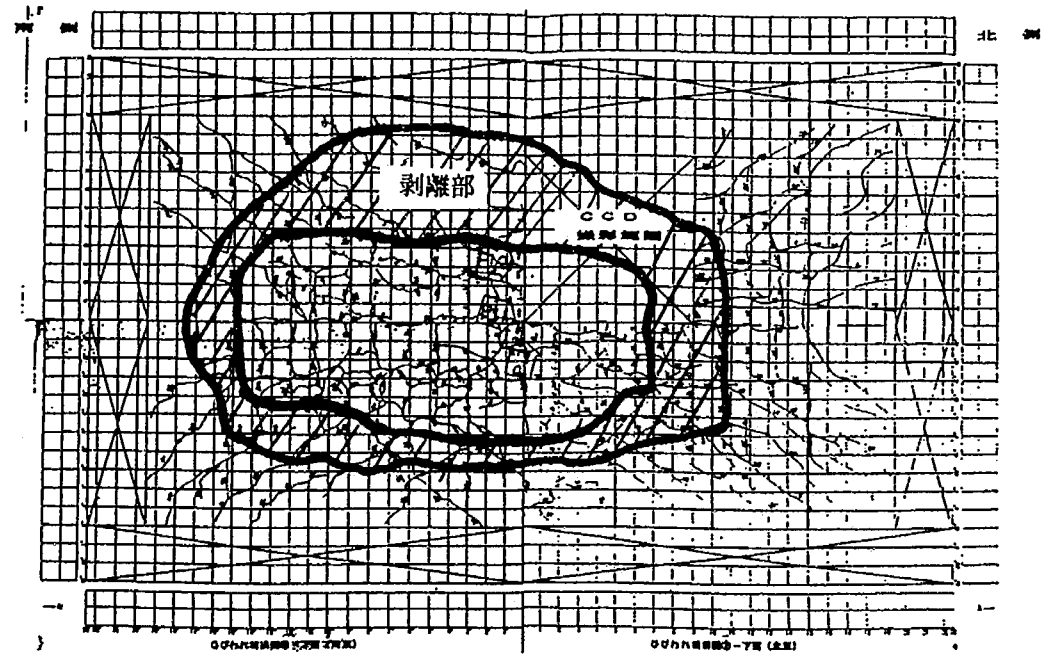


図 6.3.5(b) S39+3×3S-D2 ひび割れ観察図 (下面)

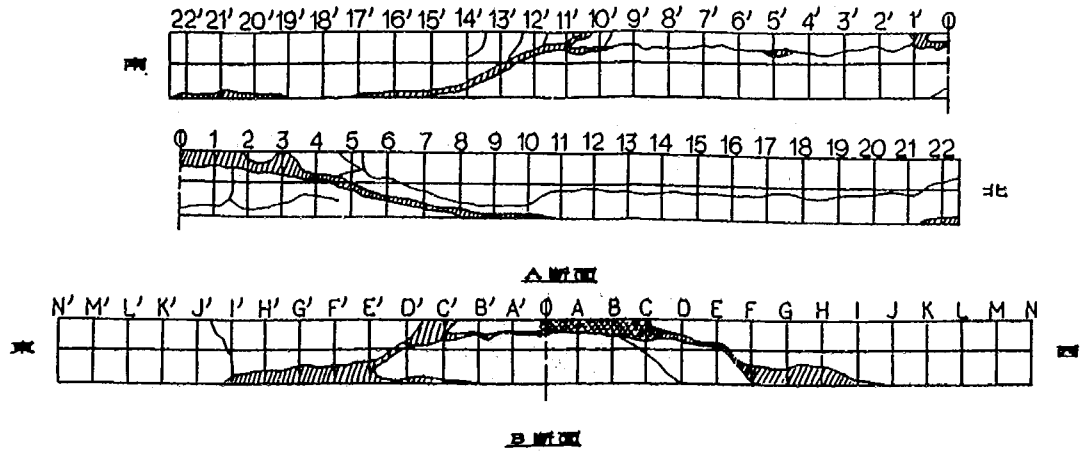


図 6.3.5(c) S39+3×3S-D2 ひび割れ観察図 (内部断面)

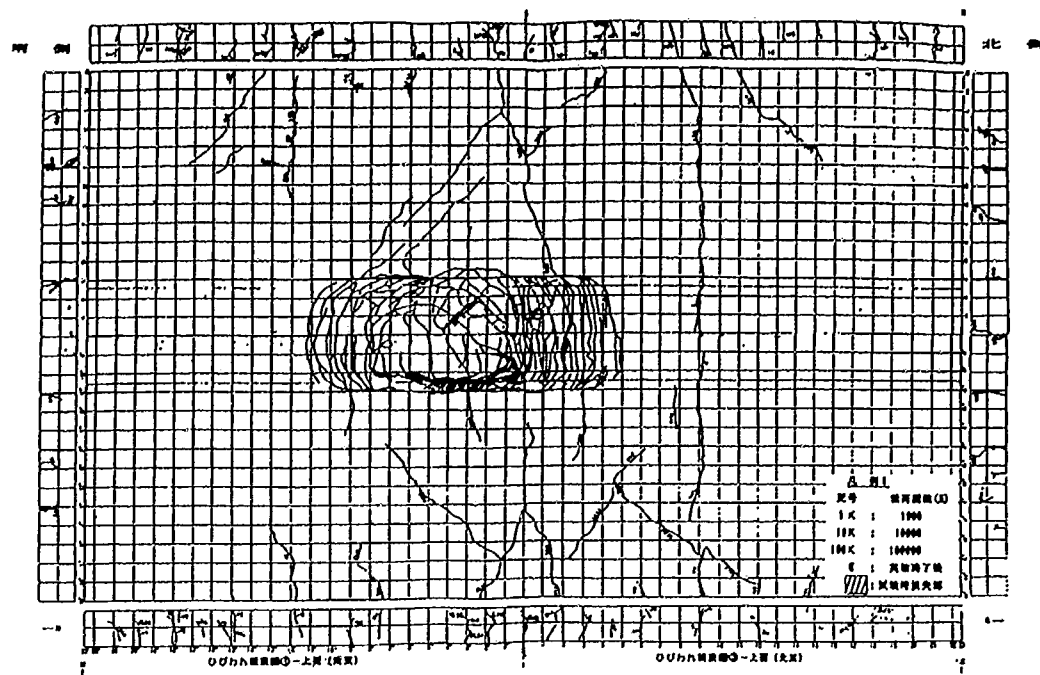


図 6.3.6(a) S39+4×4S-D2 ひび割れ観察図 (上面)

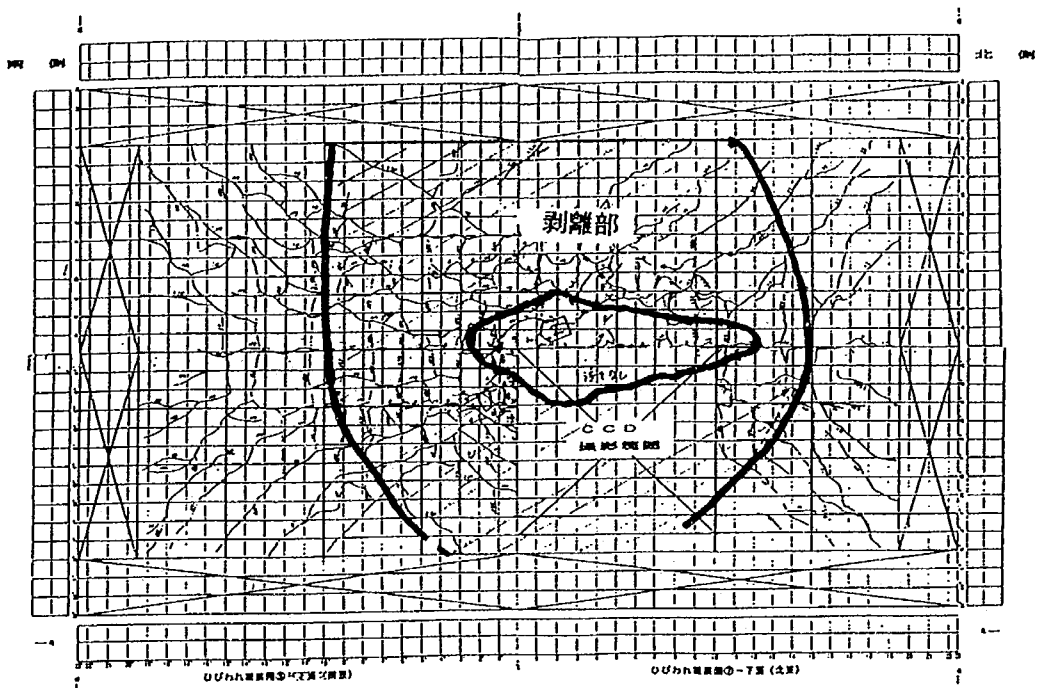


図 6.3.6(b) S39+4×4S-D2 ひび割れ観察図 (下面)

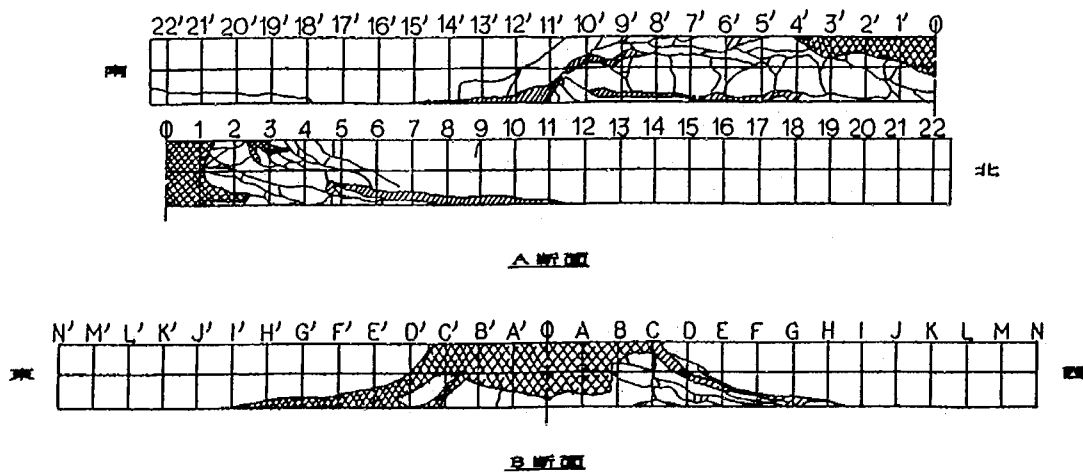


図 6.3.6(c) S39+4×4S-D2 ひび割れ観察図 (内部 断面)

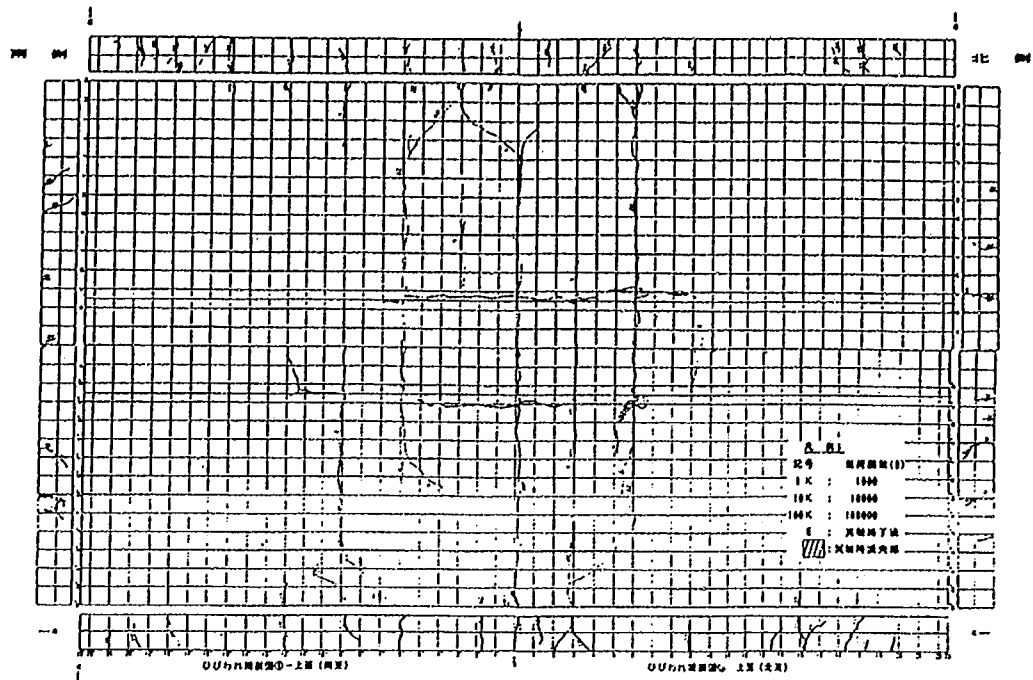


図 6.3.7(a) S39+1×1E-D2 ひび割れ観察図 (上面)

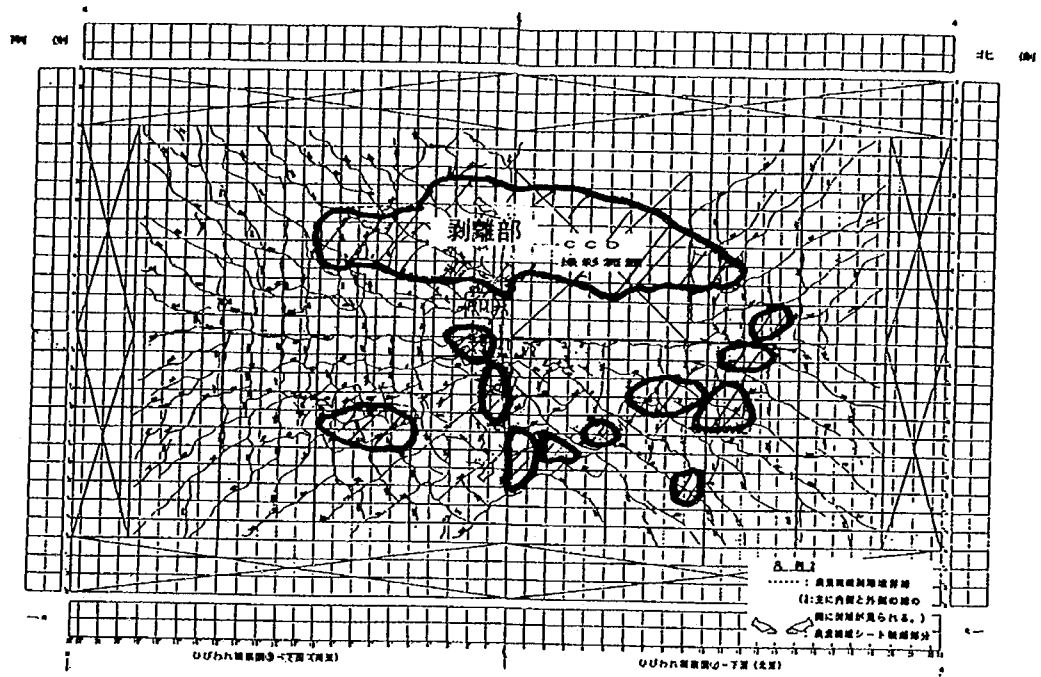


図 6.3.7(b) S39+1×1E-D2 ひび割れ観察図 (下面)

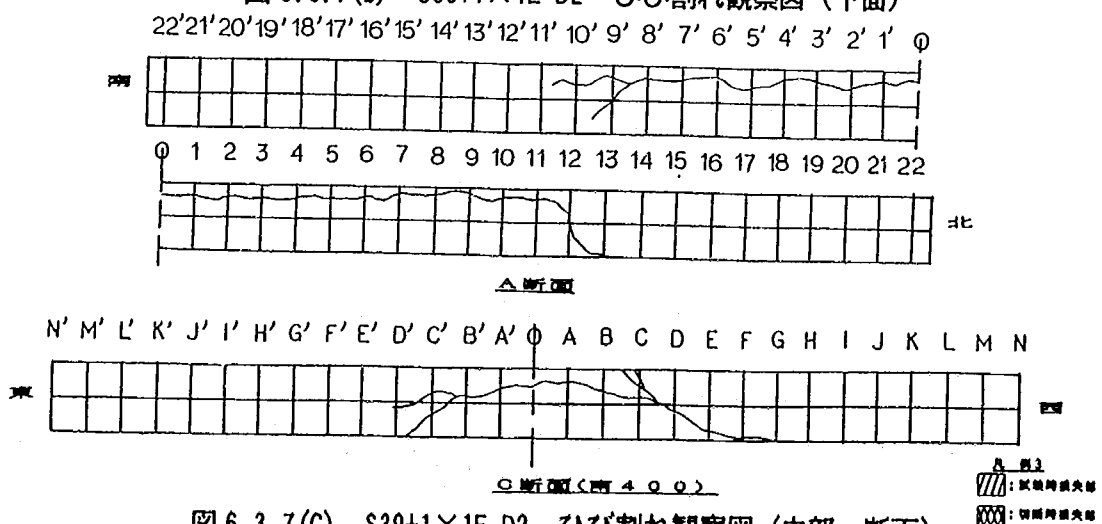


図 6.3.7(c) S39+1×1E-D2 ひび割れ観察図 (内部 断面)

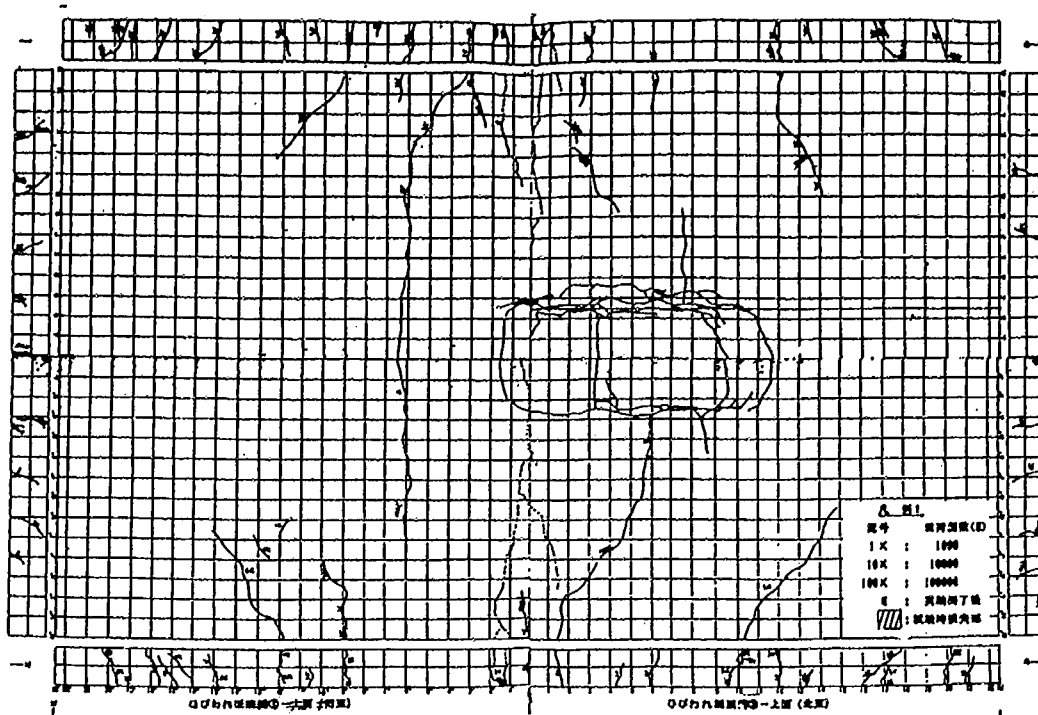


図 6.3.8(a) S39+2×2E-D2 ひび割れ観察図 (上面)

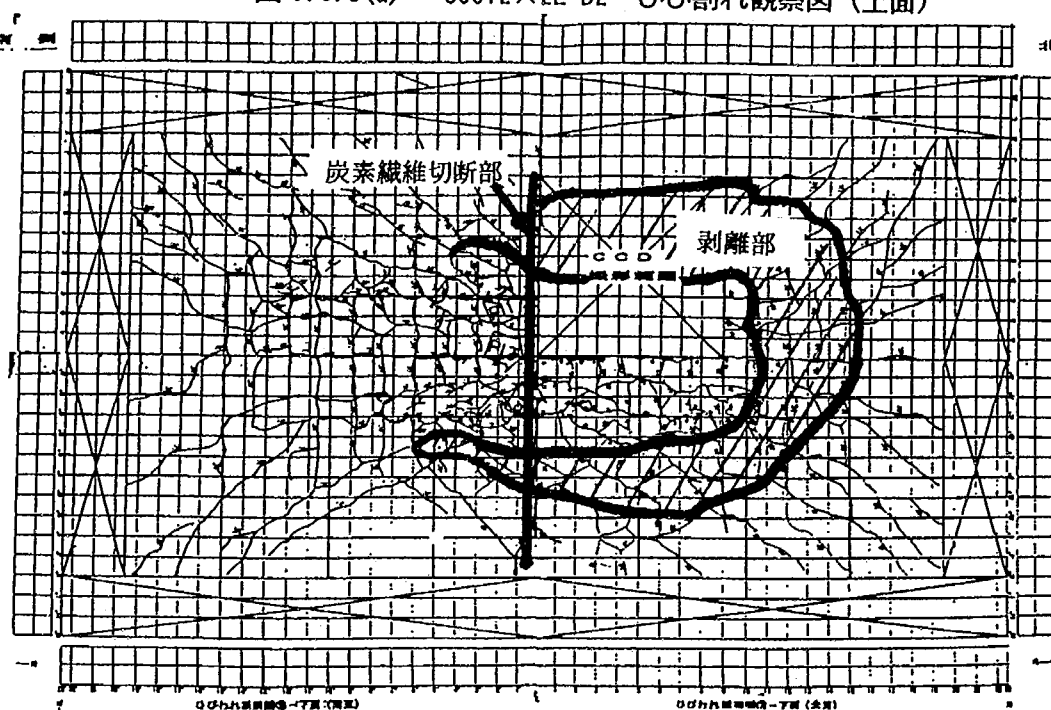


図 6.3.8(b) S39+2×2E-D2 ひび割れ観察図 (下面)

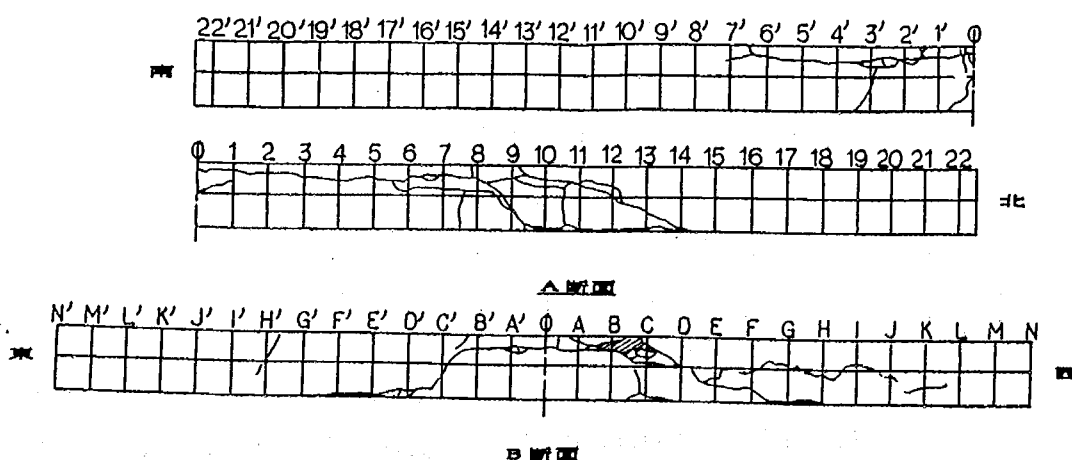


図 6.3.8(c) S39+2×2E-D2 ひび割れ観察図 (内部 断面)

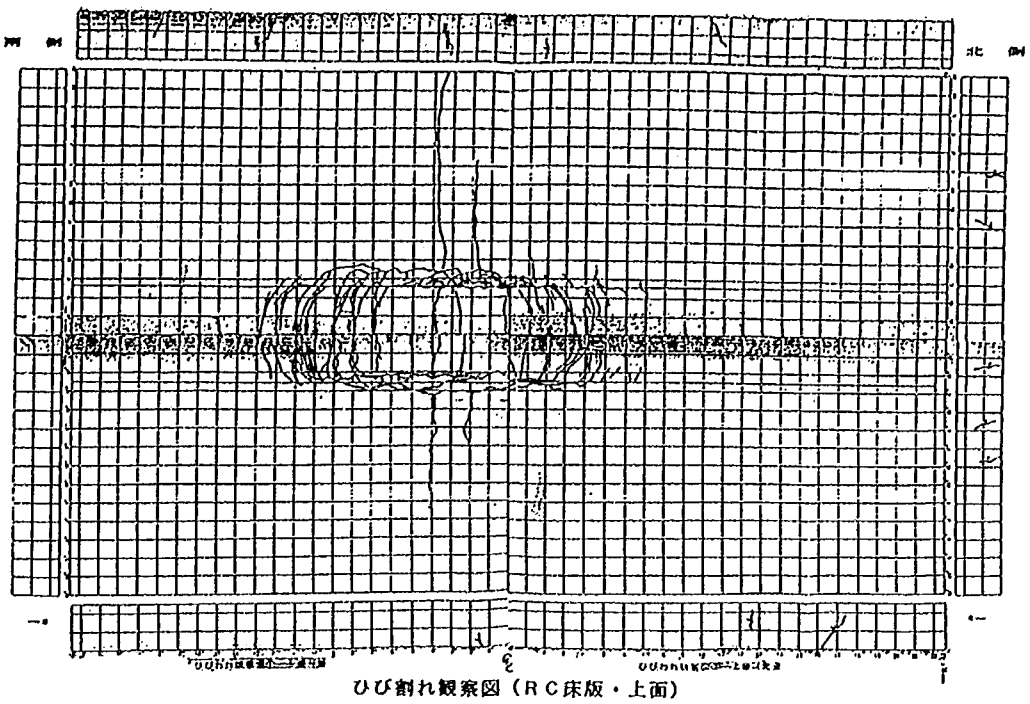


図 6.3.9(a) H8 ひび割れ観察図 (上面)

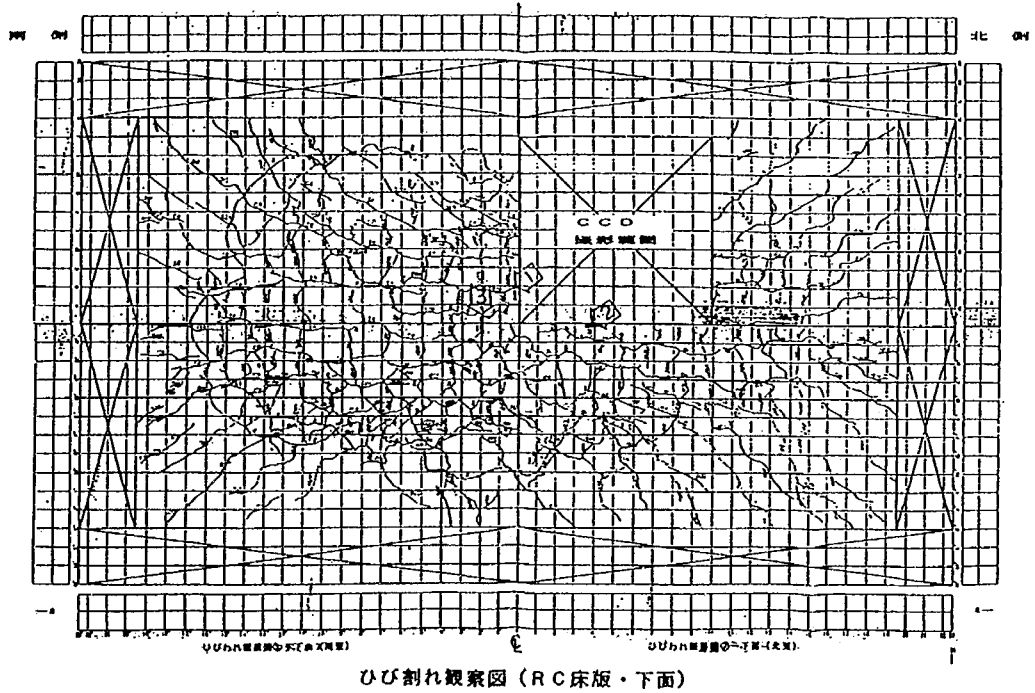


図 6.3.9(b) H8 ひび割れ観察図 (下面)

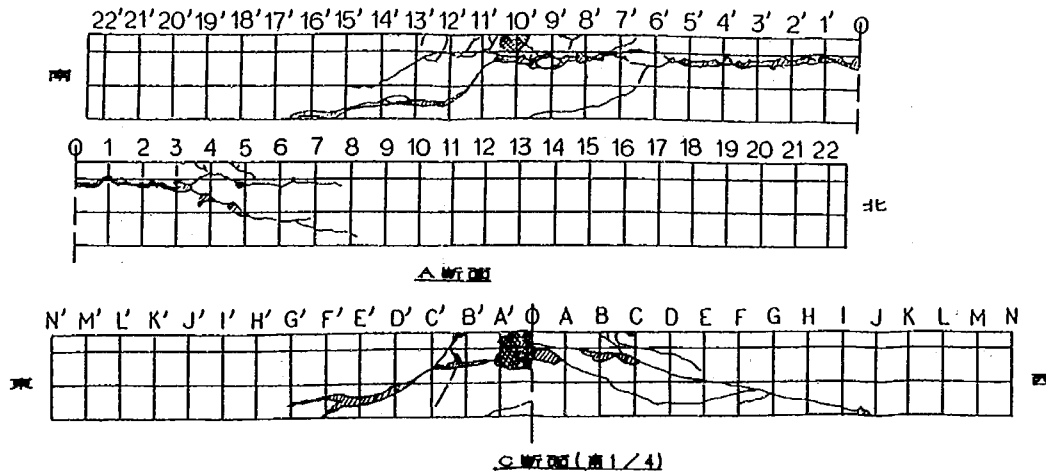


図 6.3.9(c) H8 ひび割れ観察図 (内部 断面)

## 6.4 炭素繊維シートへの補強効果

表 6.4.1 に炭素繊維シート補強前後の RC 床版中央の活荷重たわみ、ひび割れ開閉幅の変化を、表 6.4.2 に RC 床版中央下側の主鉄筋、配力鉄筋の活荷重ひずみの変化を示す。なお各供試体ともひび割れ幅の計測用に  $\pi$  ゲージを 3 箇所とりつけたが、最もひび割れの開閉幅が大きな 1 箇所を選択して比較した。ひび割れ方向は、S39+2×2S-D2 と S39+3×3S-D2 では主筋方向（開閉方向が配力筋方向）、それ以外の供試体では配力筋方向（開閉方向が主筋方向）であった。また図 6.4.1 に炭素繊維シート補強直後の RC 床版中央の活荷重たわみ、ひび割れ開閉幅および RC 床版中央下側の主鉄筋および配力鉄筋の活荷重ひずみの低減率を示す。

高強度型、高弾性型ともに炭素繊維シートの積層数が多くなるほどたわみの低減効果が高い。CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ ) がほぼ等しい S39+2×2S-D2（高強度型 2×2 層）と S39+1×1E-D2（高弾性型 1×1 層）、S39+4×4S-D2（高強度型 4×4 層）と S39+2×2E-D2（高弾性型 2×2 層）では活荷重たわみの低減率は、それぞれほぼ等しくなっている。鉄筋ひずみとひび割れ開閉幅についても同様におおむね補強量が多くなるほど低減効果が高い傾向にある。

表 6.4.3 に、補強前後の鉄筋の活荷重応力度の実測値と計算値を示す。計算値は、平成 8 年道路橋示方書鋼橋編の設計曲げモーメント式を用いて活荷重を 16tf として算出した。鉄筋の活荷重応力度の実測値は、主鉄筋で計算値の 40～60%、配力鉄筋で計算値の 15～20% とともに計算値より小さな値となった、とくに配力鉄筋で計算値との差が大きかった。

表 6.4.1 補強前後の活荷重たわみ、ひび割れ幅の比較

| 試験体<br>名称   | RC床版下面中央の活荷重たわみmm |       |     | 活荷重によるひび割れ開閉幅mm |       |     |
|-------------|-------------------|-------|-----|-----------------|-------|-----|
|             | 補強前               | 補強後   | 低減率 | 補強前             | 補強後   | 低減率 |
| S39+1×1S-D2 | 3.956             | 2.714 | 31% | 0.172           | 0.099 | 42% |
| S39+2×2S-D2 | 3.994             | 2.373 | 41% | 0.111           | 0.063 | 43% |
| S39+3×3S-D2 | 3.887             | 2.060 | 47% | 0.255           | 0.104 | 59% |
| S39+4×4S-D2 | 3.935             | 2.090 | 47% | 0.093           | 0.002 | 98% |
| S39+1×1E-D2 | 4.073             | 2.373 | 42% | 0.233           | 0.097 | 58% |
| S39+2×2E-D2 | 4.385             | 2.373 | 46% | 0.205           | 0.148 | 28% |

表 6.4.2 補強前後の鉄筋の活荷重ひずみの比較

| 試験体<br>名称   | RC床版中央下主鉄筋の活荷重ひずみ $\mu$ |     |     | RC床版中央下配力鉄筋の活荷重ひずみ $\mu$ |     |     |
|-------------|-------------------------|-----|-----|--------------------------|-----|-----|
|             | 補強前                     | 補強後 | 低減率 | 補強前                      | 補強後 | 低減率 |
| S39+1×1S-D2 | 694                     | 493 | 29% | 616                      | 250 | 59% |
| S39+2×2S-D2 | 743                     | 419 | 44% | 578                      | 250 | 57% |
| S39+3×3S-D2 | 729                     | 344 | 53% | 529                      | 89  | 83% |
| S39+4×4S-D2 | 666                     | 337 | 49% | 472                      | 129 | 73% |
| S39+1×1E-D2 | 896                     | 432 | 52% | 503                      | 183 | 64% |
| S39+2×2E-D2 | 846                     | 462 | 45% | 537                      | 137 | 74% |

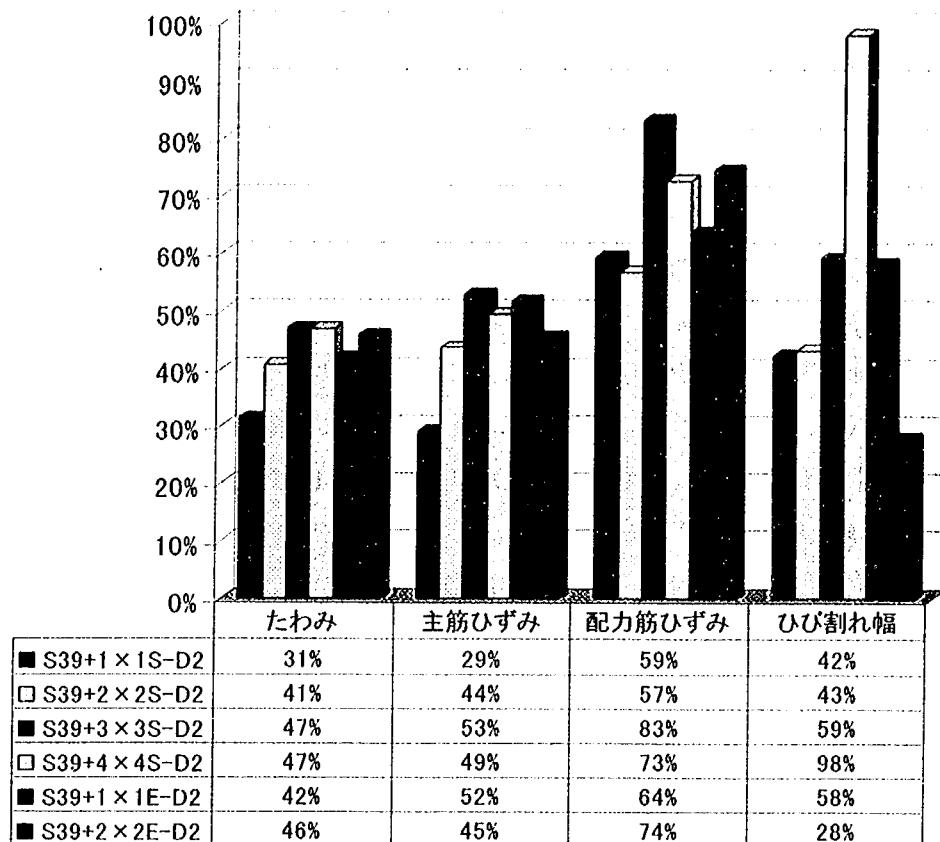


図 6.4.1 炭素繊維シート補強によるたわみ、ひずみ、ひび割れ幅の低減効果

表6.4.3 補強前後の鉄筋応力度の実測値と計算値

| 試験体<br>名称   |       | 主鉄筋応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |             | 配力鉄筋応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> ) |      |             |
|-------------|-------|-------------------------------|------|-------------|--------------------------------|------|-------------|
|             |       | 補強前                           | 補強後  | 補強後/<br>補強前 | 補強前                            | 補強後  | 補強後/<br>補強前 |
| S39+1×1S-D2 | 実測値   | 1457                          | 1035 | 0.71        | 1294                           | 525  | 0.41        |
|             | 計算値   | 3219                          | 2648 | 0.82        | 8216                           | 4536 | 0.55        |
|             | 実測/計算 | 0.45                          | 0.39 | 0.86        | 0.16                           | 0.12 | 0.74        |
| S39+2×2S-D2 | 実測値   | 1560                          | 880  | 0.56        | 1214                           | 525  | 0.43        |
|             | 計算値   | 3219                          | 2246 | 0.70        | 8216                           | 3109 | 0.38        |
|             | 実測/計算 | 0.48                          | 0.39 | 0.81        | 0.15                           | 0.17 | 1.14        |
| S39+3×3S-D2 | 実測値   | 1531                          | 722  | 0.47        | 1111                           | 187  | 0.17        |
|             | 計算値   | 3219                          | 1950 | 0.61        | 8216                           | 2352 | 0.29        |
|             | 実測/計算 | 0.48                          | 0.37 | 0.78        | 0.14                           | 0.08 | 0.59        |
| S39+4×4S-D2 | 実測値   | 1399                          | 708  | 0.51        | 991                            | 271  | 0.27        |
|             | 計算値   | 3219                          | 1720 | 0.53        | 8216                           | 1883 | 0.23        |
|             | 実測/計算 | 0.43                          | 0.41 | 0.95        | 0.12                           | 0.14 | 1.19        |
| S39+1×1E-D2 | 実測値   | 1882                          | 907  | 0.48        | 1056                           | 384  | 0.36        |
|             | 計算値   | 3219                          | 2128 | 0.66        | 8216                           | 2784 | 0.34        |
|             | 実測/計算 | 0.58                          | 0.43 | 0.73        | 0.13                           | 0.14 | 1.07        |
| S39+2×2E-D2 | 実測値   | 1777                          | 970  | 0.55        | 1128                           | 288  | 0.26        |
|             | 計算値   | 3219                          | 1582 | 0.49        | 8216                           | 1637 | 0.20        |
|             | 実測/計算 | 0.55                          | 0.61 | 1.11        | 0.14                           | 0.18 | 1.28        |

## 6.5 補強後の載荷回数と RC 床版中央のたわみ

図 6.5.1～図 6.5.4 に補強後の載荷回数と、それぞれ RC 床版中央の除荷時たわみ・載荷時たわみ・活荷重たわみおよびたわみ率の関係を示す。ここで、載荷方法が 4 万回ごとに 2tf 荷重を増加させる階段載荷となっているため、異なる荷重レベルでの RC 床版剛性の比較を行うために、活荷重たわみ（載荷時たわみ－除荷時たわみ）<sup>1</sup> を荷重で除した“たわみ率”を用いた。

$$\text{たわみ率} = \text{活荷重たわみ} / \text{活荷重} \quad (\text{mm/tf})$$

除荷時たわみは、載荷の初期段階から S39+1×1S-D2（高強度型 1×1 層）が多く、S39+2×2E-D2（高弾性型 2×2 層）は低く、他の 4 体はほぼ同じ値となっている。除荷時たわみは、載荷回数の増加とともに漸増しているが補強量の最も少ない S39+1×1S-D2（高強度型 1×1 層）の増加率が高い以外は他の供試体は、ほぼ同程度の増加率を示している。

S39+2×2S-D2（高強度型 2×2 層）、S39+3×3S-D2（高強度型 3×3 層）、S39+2×2E-D2（高弾性型 2×2 層）の 3 体については破壊直前まで計測を行っており、破壊前の 2～4 万回で除荷時たわみの急増が確認されている。

図 6.5.3 の活荷重たわみについてみると、S39+1×1S-D2 を除いて各供試体の活荷重たわみは同一荷重段階ではほぼ一定であり、各荷重段階内での活荷重たわみの漸増傾向は顕著ではない。いずれの供試体も破壊直前の荷重段階では、活荷重たわみが増加している。

つぎに図 6.5.4 に示すたわみ率は、S39+3×3S-D2 が最も低くなっているが、おおむね炭素繊維シートの引張剛性（E・A）が高いものほど、たわみ率が低くなる傾向にある。RC 床版の断面の曲げ剛性が大きいものほど、たわみ率は低くなることから、接着した炭素繊維シートが RC 床版の断面の曲げ剛性の向上に有効に寄与していたことがわかる。たわみ率は、荷重変更時に階段状に増加している。一般に RC 部材の曲げ剛性の低下要因としては、引張縁方向から圧縮縁方向へのひび割れの進展の影響が大きい。同一の供試体についてみれば、載荷中にひび割れ深さが一定で RC 床版の断面の曲げ剛性が一定であれば、荷重の大きさによらずたわみ率も一定となると考えらるが、このたわみ率の階段状の増加は、荷重増加時にひび割れ深さが深くなっていることを示していると考えらる。たわみ率は、一つの荷重段階内では緩やかな漸増傾向を示しているが、炭素繊維シートで補強した床版について比べると最も補強量の少ない S39+1×1S-D2 ではその増加率が高い傾向にある。S39+3×3S-D2 は、120,000 回の 20⇒22tf への荷重増加時にたわみ率がステップ上に増加し、その後破壊直前に増加している。高弾性型炭素繊維を用いた S39+1×1E-D2、S39+2×2E-D2 は破壊直前のたわみ率の増加が顕著である。

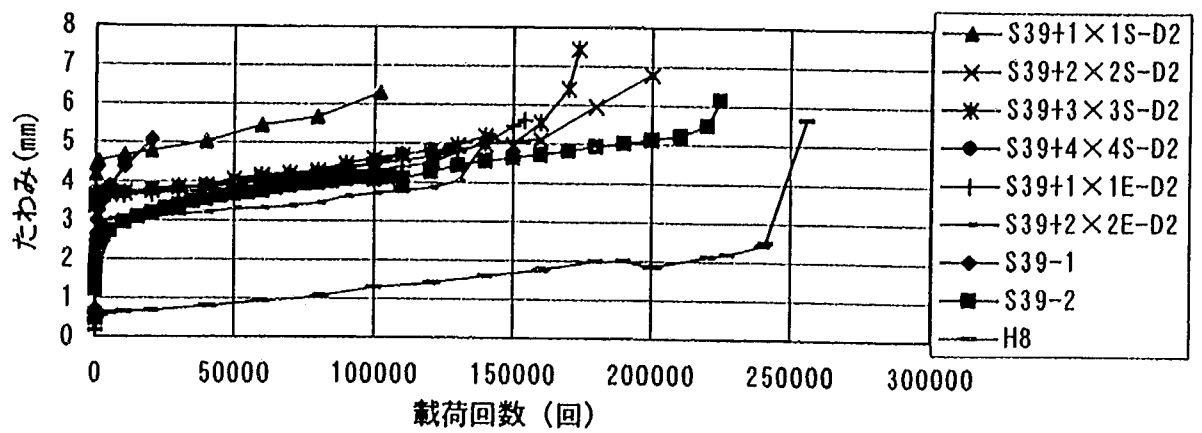


図6.5.1 補強後 床版中央の除荷時たわみ

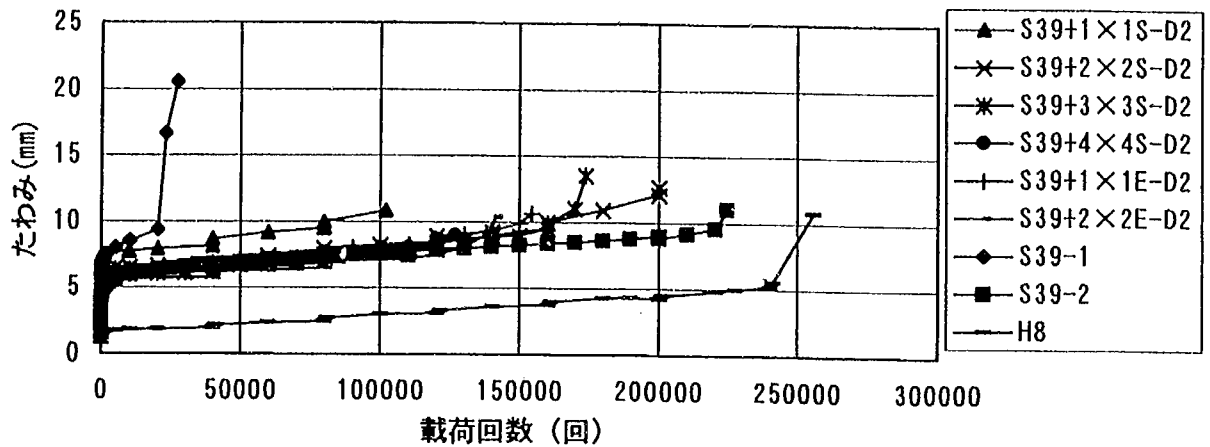


図6.5.2 補強後 床版中央の載荷時たわみ

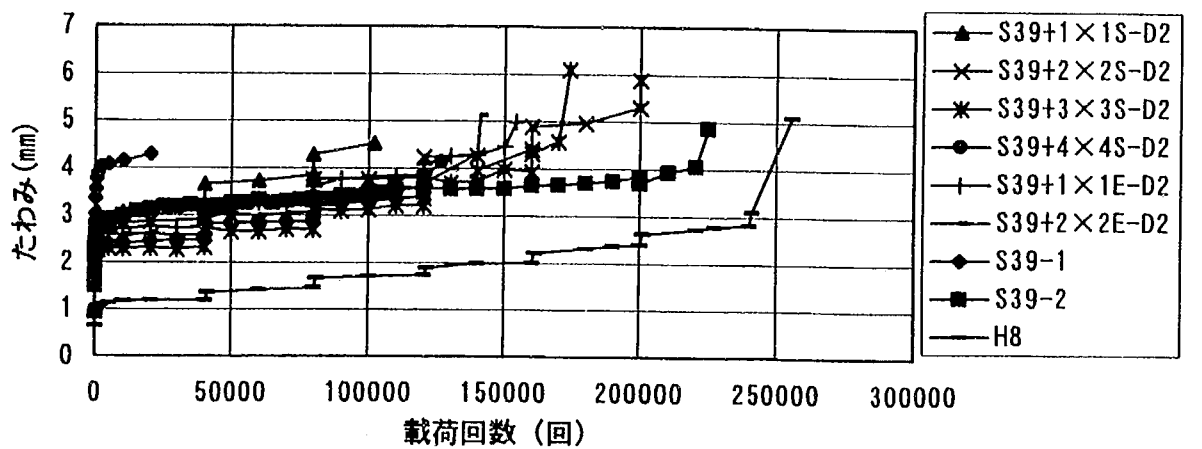


図6.5.3 補強後 床版中央の活荷重たわみ

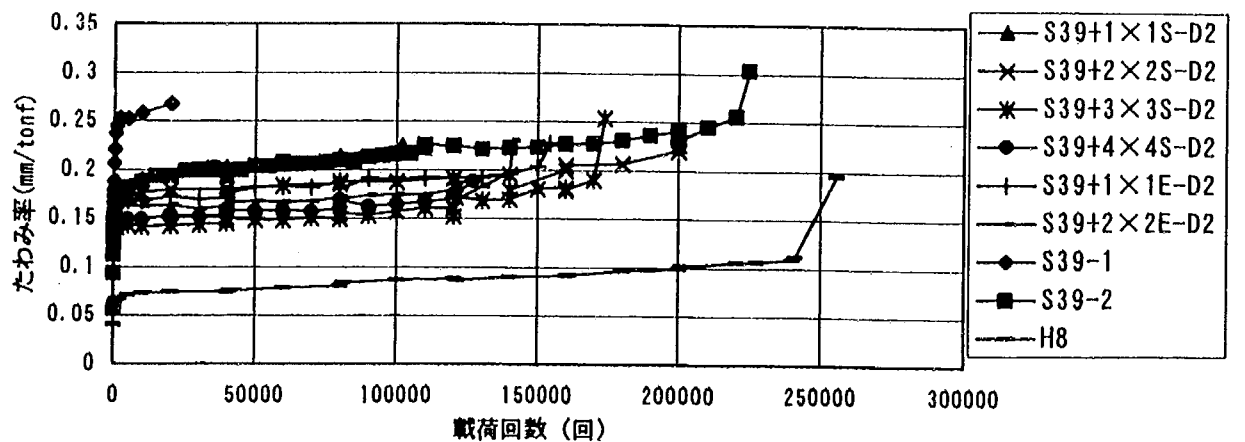


図6.5.4 補強後 床版中央のたわみ率

## 6.6 補強後の RC 床版中央の鉄筋ひずみ

図 6.6.1～図 6.6.6 に RC 床版中央下側の主鉄筋について、図 6.6.7～図 6.6.12 に RC 床版中央下側の配力鉄筋について、それぞれ除荷時ひずみ（残留ひずみ補正前、補正後）、載荷時ひずみ（残留ひずみ補正前、補正後）、活荷重ひずみ、ひずみ率を示す。ひずみ率は、たわみ率と同様に活荷重ひずみを荷重で除したものである。また除荷時ひずみおよび載荷時ひずみについては、補強直後の残留ひずみを 0 として補正したものを示している。

高強度型炭素繊維シートを用いて補強した供試体では、主鉄筋の活荷重ひずみとひずみ率は、S39+3×3S-D2 と S39+4×4S-D2 がほぼ同じ値となっているが、それ以外の供試体では補強量の多いものほど低くなっている。同様に高弾性型炭素繊維シートを用いたものでは補強量の多い S39+2×2E-D2 の方が活荷重ひずみとひずみ率が低くなっているが、CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ ) が同じ高強度型炭素繊維シートで補強した S39+4×4S-D2 供試体よりも大きな値を示している。補強前の初期載荷終了時の主鉄筋のひずみは、高強度型炭素繊維シートの補強に使用した試験体ではいずれも 700～750 $\mu$  程度であったのに対して、高弾性型炭素繊維シートの補強に使用した試験体ではこれよりも大きく 850～900 $\mu$ （最大時、約 950 $\mu$ ）となっており、補強前の初期状態が影響していたものと考えられる。

配力鉄筋のひずみは、同様に補強量の多いものほど活荷重ひずみとひずみ率が低くなるが、S39+4×4S-D2 と S39+2×2E-D2 がほぼ同等で、S39+1×1E-D2 は S39+2×2S-D2 より低い値となっている。主鉄筋のひずみ率は、破壊前を除いてほぼ一定であったのに対して配力鉄筋のひずみ率は、すべての試験体で荷重変更時にステップ状に増加している。配力鉄筋方向断面では、階段載荷の荷重変更に伴い損傷が段階的に進行していたと考えられる。補強量の少ない S39+1×1S-D2、S39+2×2S-D2 の 2 体では、ひずみ率は荷重増加時にステップ状に増加した後、同一荷重段階内ではひずみ率は減少する傾向にあるのに対して、これ以外の試験体では同一荷重段階内ではひずみ率は漸増する傾向にあり、補強量の多寡によって異なった傾向を示している。

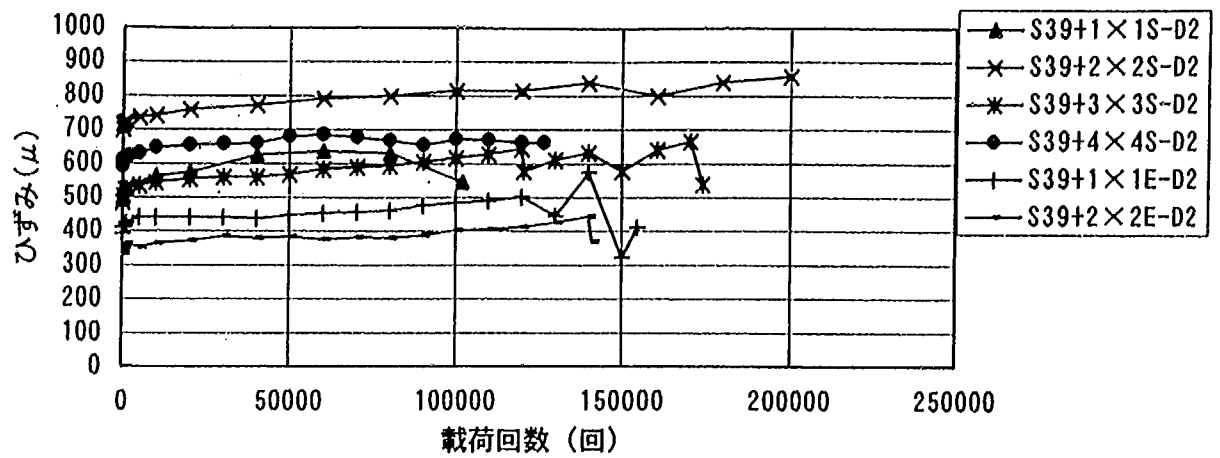


図6.6.1 補強後 床版中央主鉄筋(下)の除荷時ひずみ

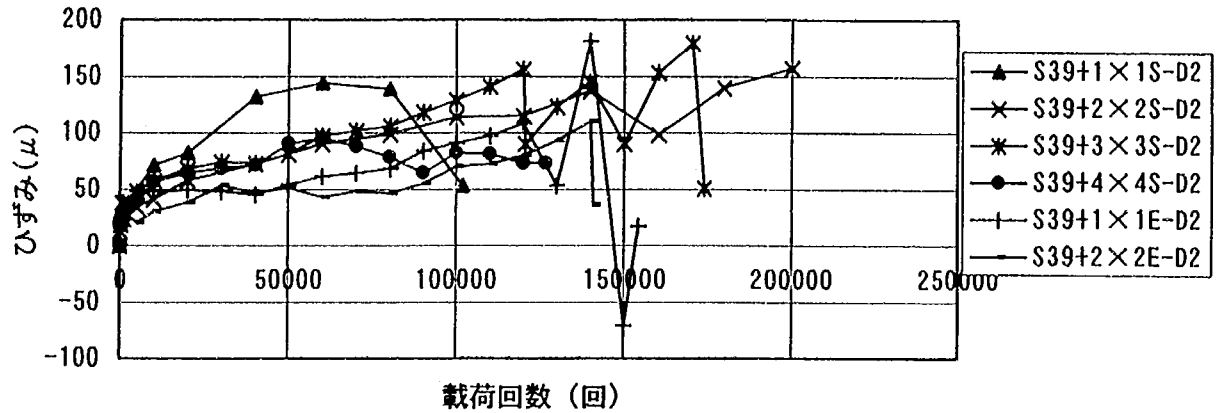


図6.6.2 補強後 床版中央主鉄筋(下)の除荷時ひずみ(残留ひずみ0補正後)

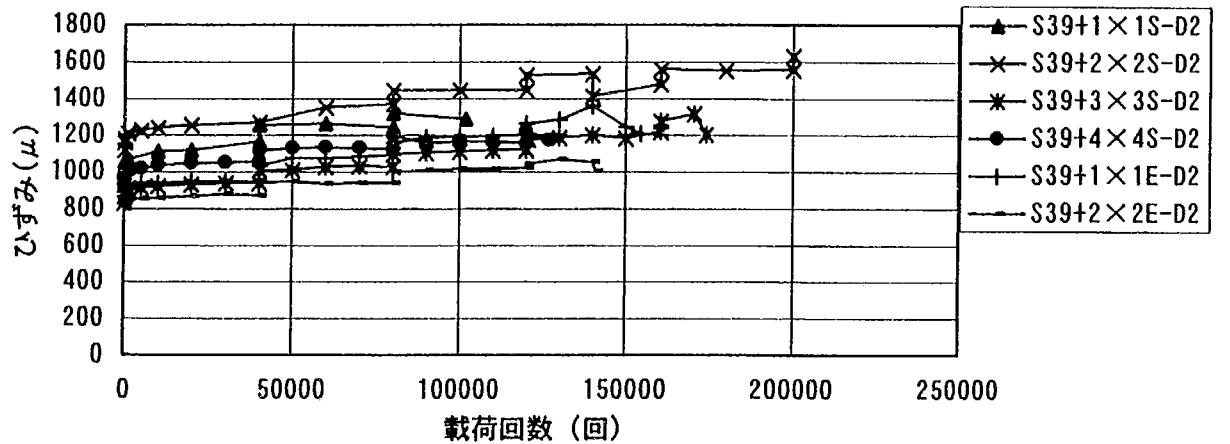


図6.6.3 補強後 床版中央主鉄筋(下)の載荷時ひずみ

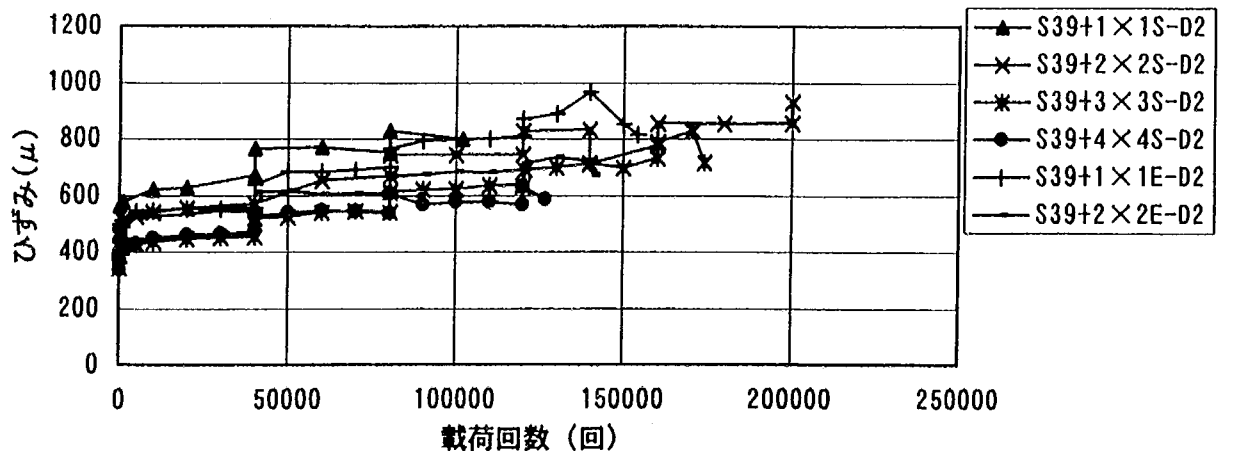


図6.6.4 補強後 床版中央主鉄筋(下)の載荷時ひずみ(残留ひずみ0補正後)

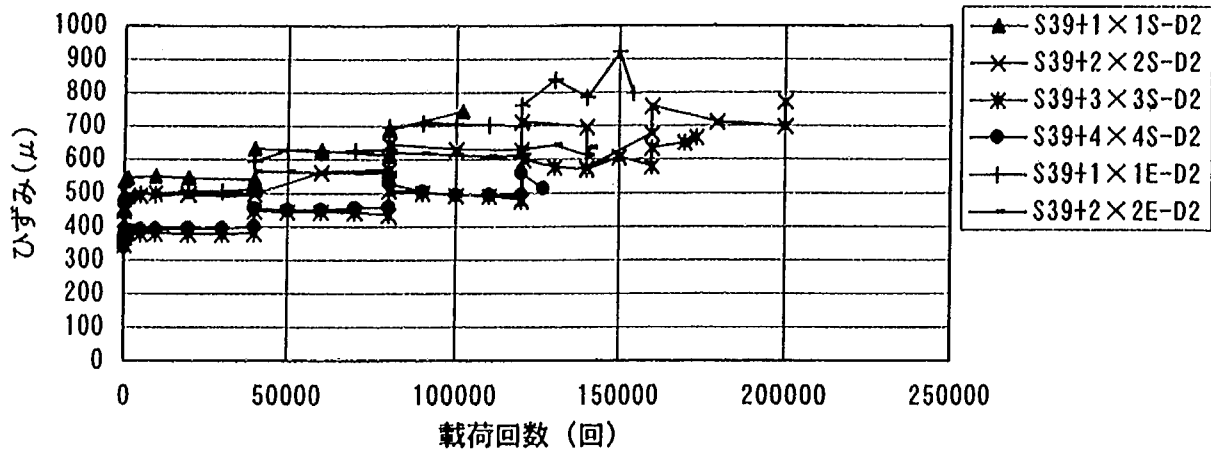


図6.6.5 補強後 床版中央主鉄筋（下）の活荷重ひずみ

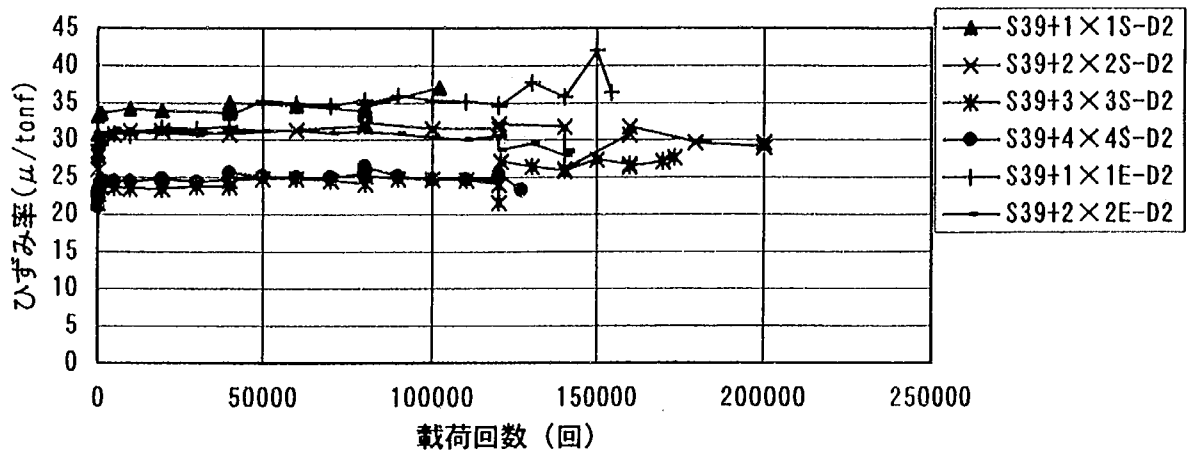
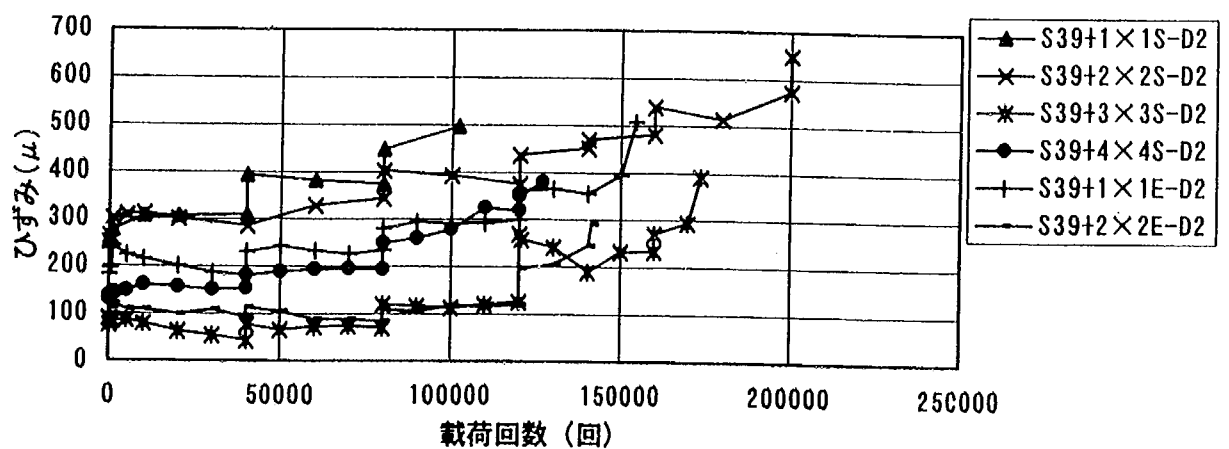
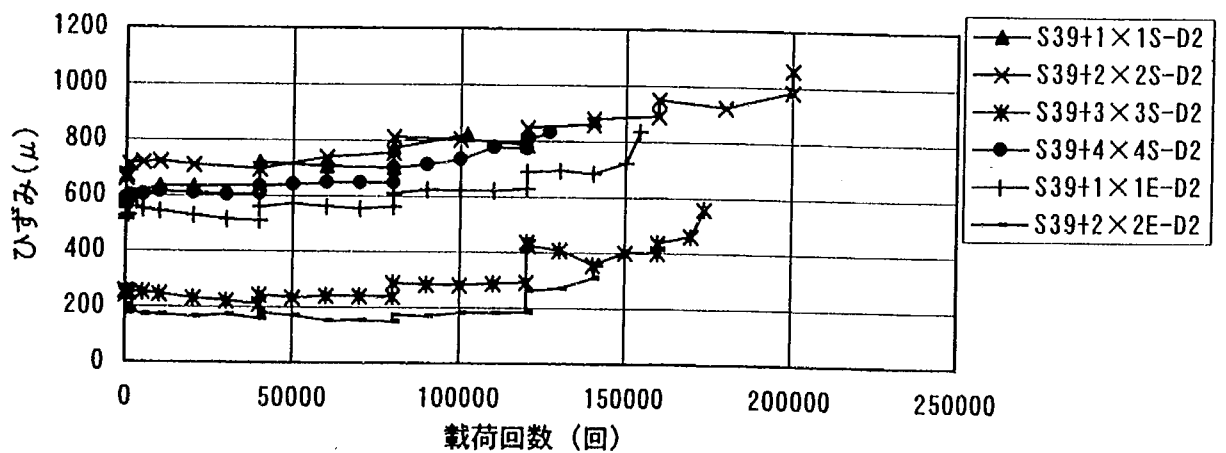
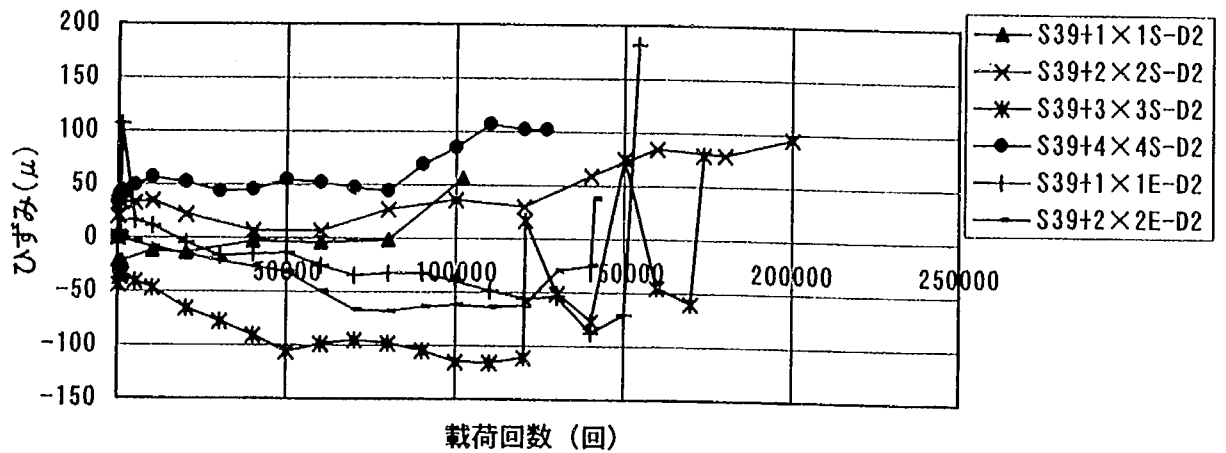
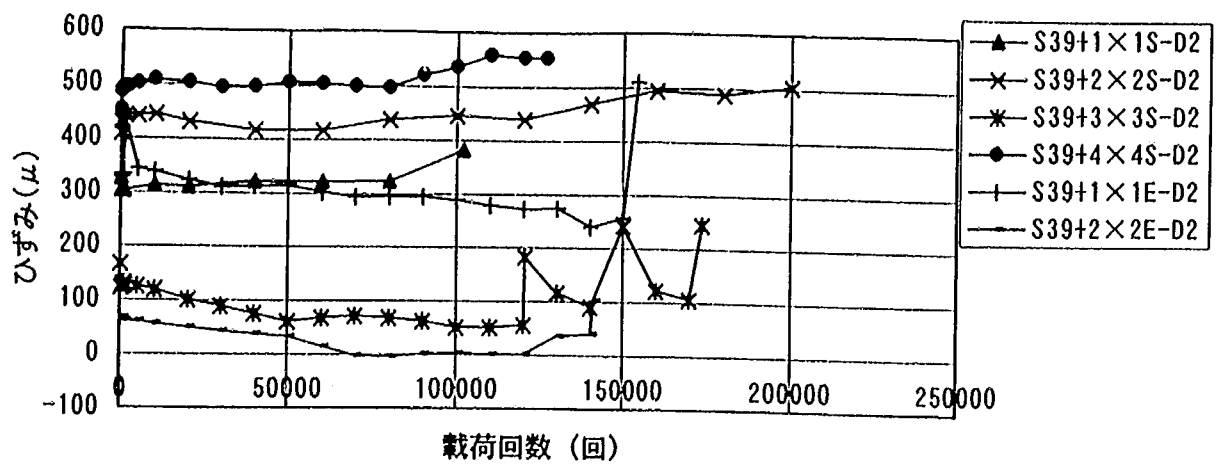


図6.6.6 補強後 床版中央主鉄筋（下）のひずみ率



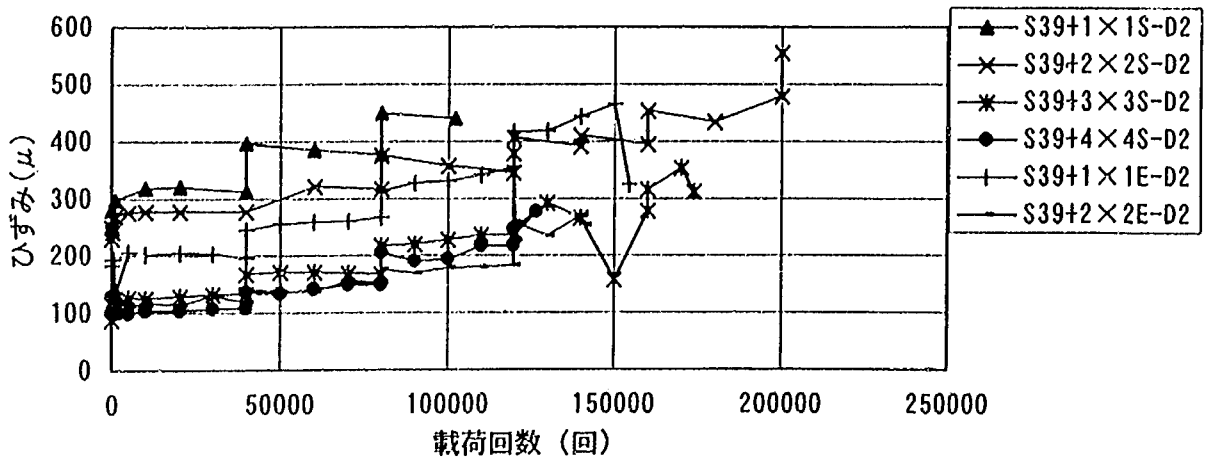


図6.6.11 補強後 床版中央配力鉄筋（下）の活荷重ひずみ

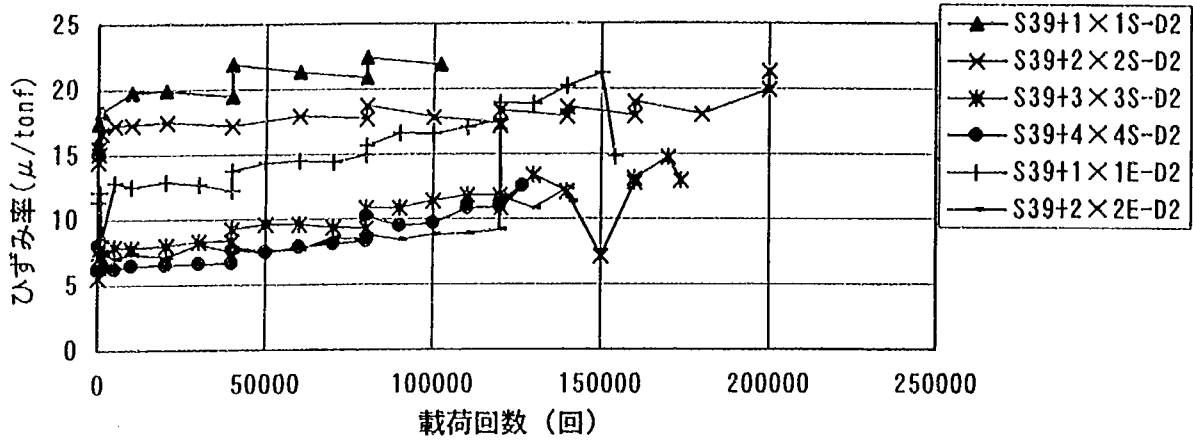


図6.6.12 補強後 床版中央配力鉄筋（下）のひずみ率

## 6.7 RC 床版中央の炭素繊維シートのひずみ

図 6.7.1～図 6.7.4 に RC 床版中央の主鉄筋方向の炭素繊維シート、図 6.7.5～図 6.7.8 に RC 床版中央の配力鉄筋方向の炭素繊維シートのそれぞれ除荷時ひずみ、載荷時ひずみ、活荷重ひずみ、ひずみ率をそれぞれ示す。

主鉄筋方向の除荷時ひずみは、載荷回数の増加に伴い増加するが、破壊直前には S39+2×2S-D2 を除いて減少している。配力鉄筋方向の除荷時ひずみは、S39+1×1S-D2 を除いて載荷の初期段階では減少傾向を示し圧縮側のひずみを示した後、破壊前に急速に引張側に増加している（S39+4×4S-D2 を除く）。

高強度型炭素繊維シート、高弾性型炭素繊維シート共に炭素繊維シートの積層数が多いものほど同一荷重での主鉄筋方向および配力鉄筋方向の載荷時ひずみおよび活荷重ひずみが小さい。これは補強量に応じて RC 床版の断面の曲げ剛性が増加しているためと考えられる。ただし、高弾性型炭素繊維シートを用いた S39+1×1E-D2 と S39+2×2E-D2 の配力鉄筋方向の炭素繊維シートのひずみはほぼ等しい、S39+2×2S-D2 はこれより補強量の多い S39+3×3S-D2 より活荷重ひずみが主鉄筋方向および配力鉄筋方向とも小さくなるなど、異なる傾向も見られた。主鉄筋方向の載荷時ひずみの最大値は S39+2×2S-D2 が最大で約 1600 $\mu$ 、他の供試体ではおおむね 1000～1400 $\mu$  であった。配力鉄筋方向の載荷時ひずみの最大値は、S39+1×1S-D2 と S39+2×2S-D2 がともに約 1600 $\mu$  と大きく、S39+4×4S-D2 は 600 $\mu$  以下と小さく、他の供試体は 1000～1200 $\mu$  程度であった。試験で測定されたひずみの最大値は、炭素繊維シートの破断ひずみ（高強度型で 15000 $\mu$ 、高弾性型で 4000 $\mu$  程度）と比べるといずれも数分の 1 と小さい値であった。

ひずみ率についてみると、主鉄筋方向、配力鉄筋方向とも、最も疲労耐久性の高かった S39+2×2S-D2 では載荷の初期段階から破壊近くまでひずみ率は、ほぼ一定で大きな変化はなく、補強量の少ない S39+1×1S-D2 では、補強直後からひずみ率は漸減傾向を示したのちに破壊前に増加しており、補強量の多い S39+4×4S-D2 は緩やかな増加傾向を示している。S39+3×3S-D2、S39+1×1E-D2、S39+2×2E-D2 の主鉄筋方向の炭素繊維シートのひずみ率は、載荷回数の増加に伴い緩やかに減少しているが、これらの供試体の主鉄筋のひずみ率は、逆に載荷回数の増加に伴い増加している。すなわち、これは載荷回数の増加に伴い、炭素繊維シートの応力分担が減少し、鉄筋の応力分担が増加しているためと考えられる。

つぎに炭素繊維シートのひずみとヤング係数およびシート厚さから炭素繊維シート 1cm 幅あたりに生じている張力を算出した。図 6.7.9～図 6.7.12 に RC 床版中央の主鉄筋方向の炭素繊維シート、図 6.7.13～図 6.7.16 に RC 床版中央の配力鉄筋方向の炭素繊維シートに対してそれぞれ除荷時張力、載荷時張力、活荷重張力および張力率を示す。張力率は、活荷重張力を荷重で除したものである。張力は、ひずみにヤング係数、シート厚、積層数を乗じたものなので載荷回数に伴う増減の傾向はひずみと同一であるが、同じひずみであれば補強量の多いものほど炭素繊維シートの負担する引張力が大きくなり、補強量の差による炭素繊維シートの負担する引張力の差について比較することができる。

主鉄筋方向の載荷時張力および活荷重張力は、CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ ) が大きなものほど高くなっており、最も CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ ) の高い S39+2×2E-D2（高弾性型 2×2 層）では載荷時の最大で 180kgf/cm 幅を示しているが、最も CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ ) の少ない S39+1×1S-D2（高強度型 1×1 層）では最大でも 60kgf/cm 幅以下と 3 倍以上の差が生じている。配力鉄筋方向についても同様の傾向がみられる。配力鉄

筋方向の載荷時張力および活荷重張力は、同一供試体では主鉄筋方向のそれぞれの張力より概ね同等か低い値となっている。しかしながら、S39+2×2E-D2 の配力筋方向の載荷時張力および活荷重張力は、主鉄筋方向のそれぞれの張力より高い値を示しており、200kgf/cm 幅以上の最大値を示している。

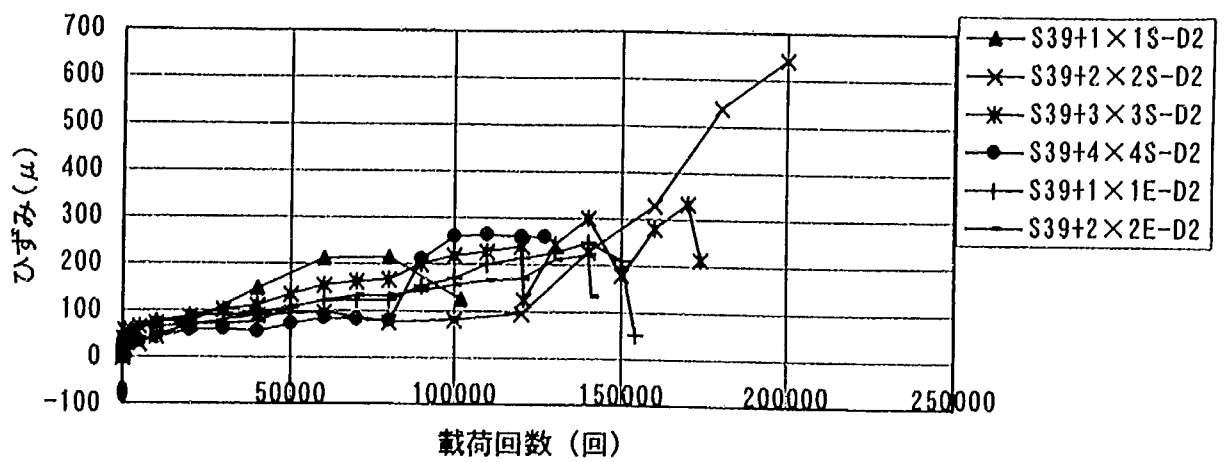


図6.7.1 補強後 床版中央炭素繊維シートの主筋方向除荷時ひずみ

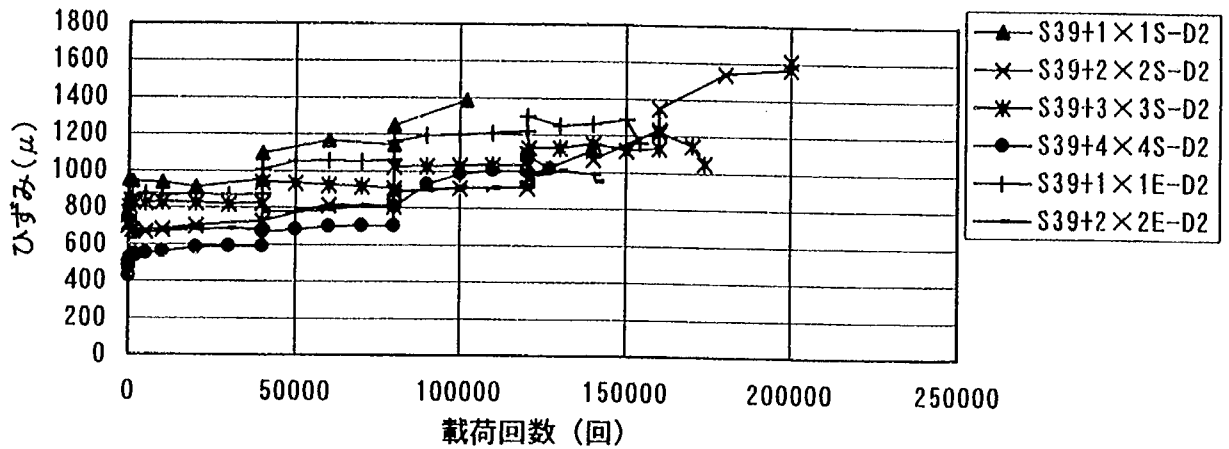


図6.7.2 補強後 床版中央炭素繊維シートの主筋方向載荷時ひずみ

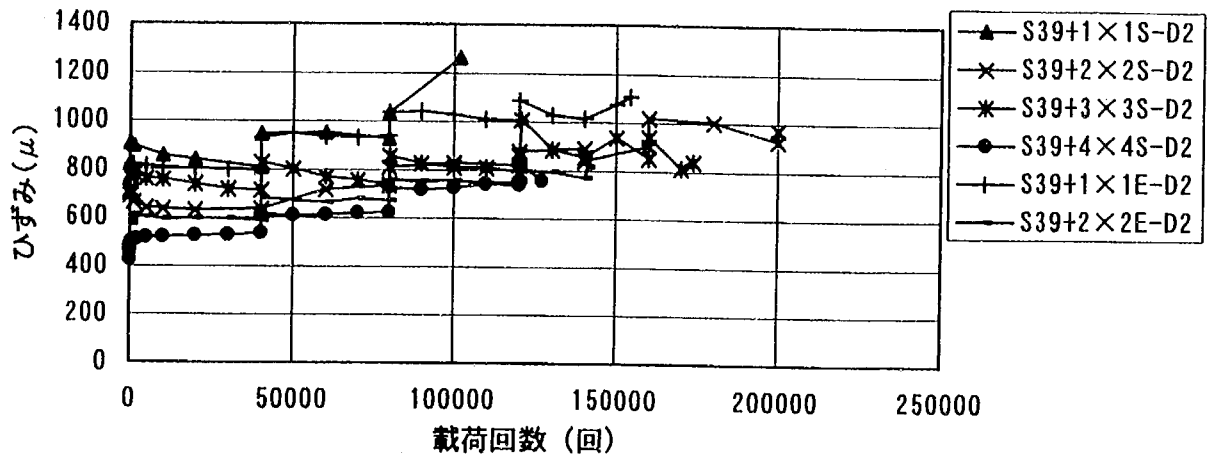


図6.7.3 補強後 床版中央炭素繊維シートの主筋方向活荷重ひずみ

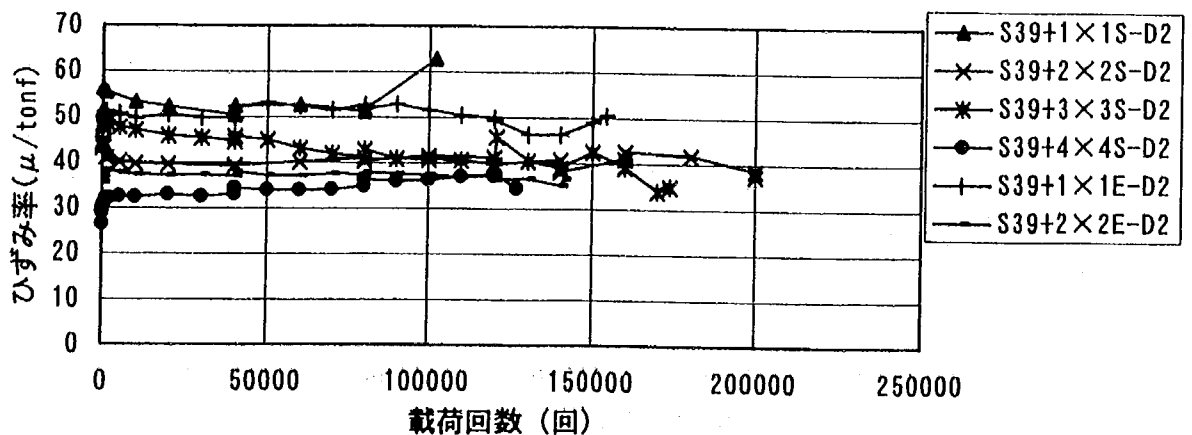


図6.7.4 補強後 床版中央炭素繊維シートの主筋方向のひずみ率

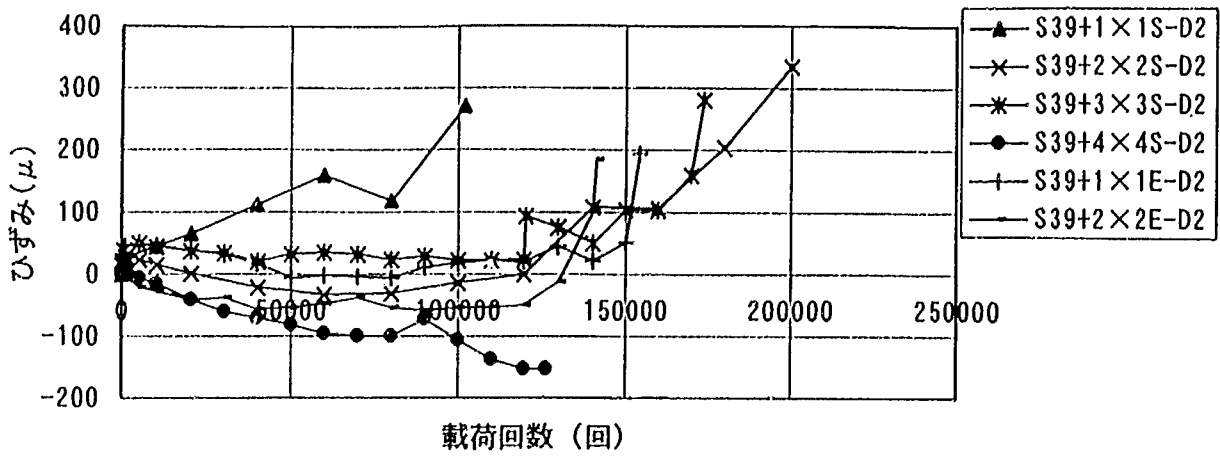


図6.7.5 補強後 床版中央炭素繊維シートの配力筋方向除荷時ひずみ

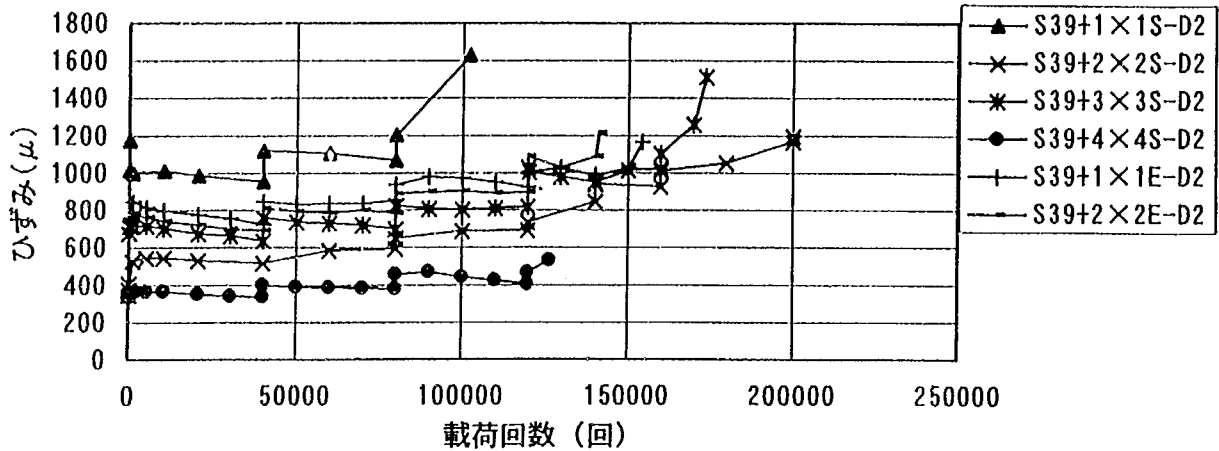


図6.7.6 補強後 床版中央炭素繊維シートの配力筋方向載荷時ひずみ

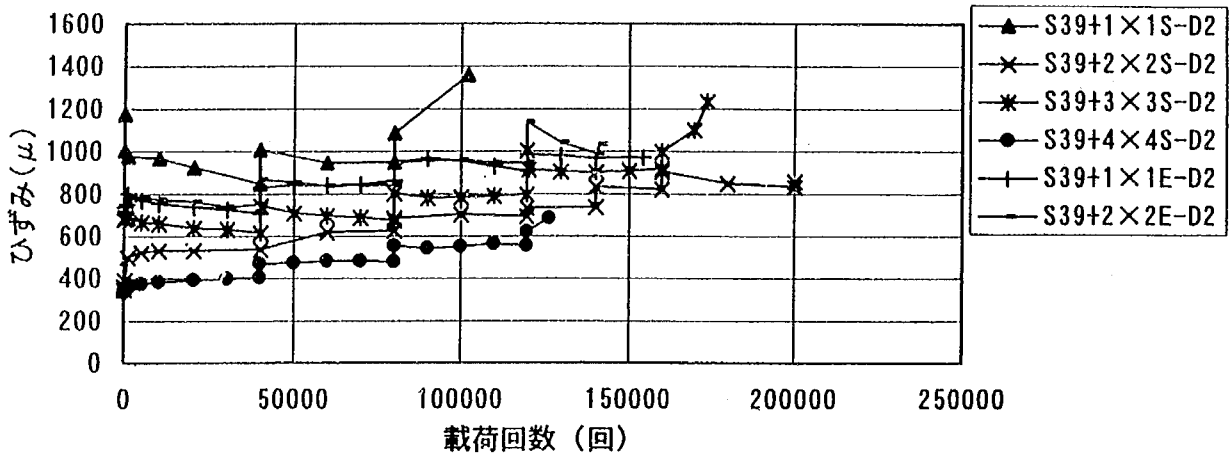


図6.7.7 補強後 床版中央炭素繊維シートの配力筋方向活荷重ひずみ

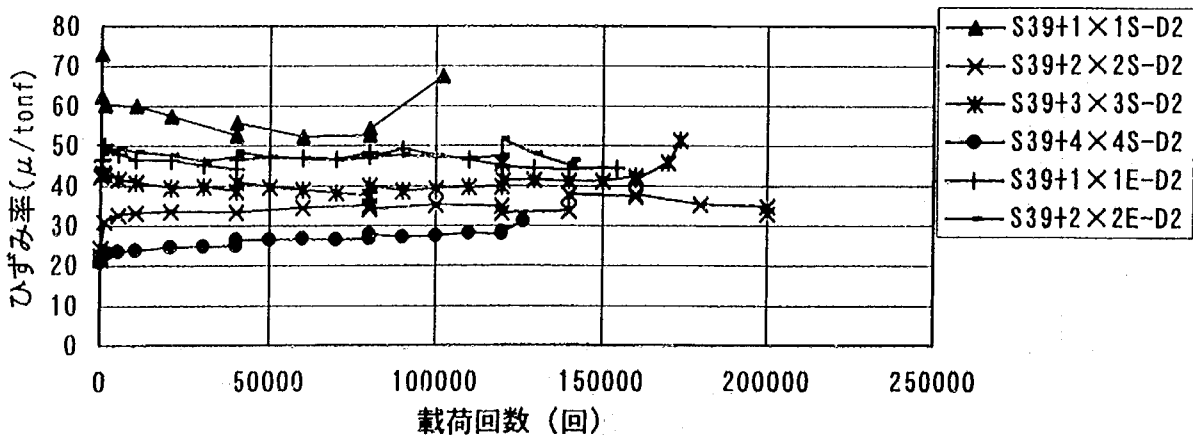


図6.7.8 補強後 床版中央炭素繊維シートの配力筋方向のひずみ率

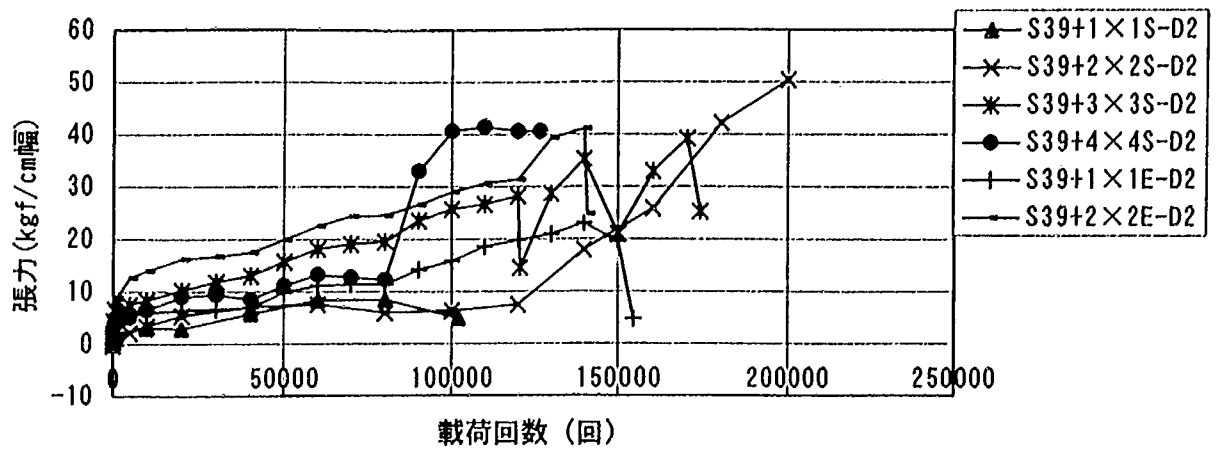


図6.7.9 補強後 床版中央主筋方向炭素繊維シートの除荷時張力

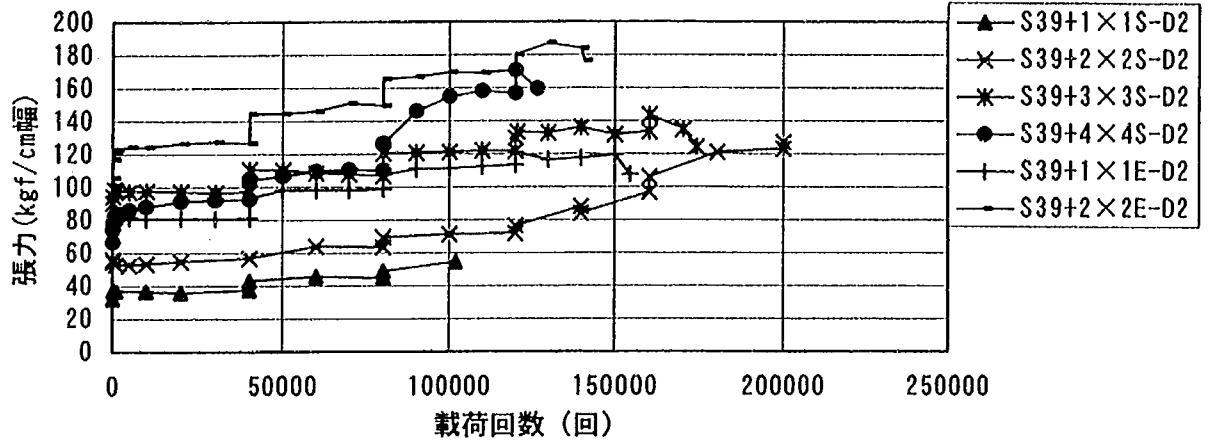


図6.7.10 補強後 床版中央主筋方向炭素繊維シートの載荷時張力

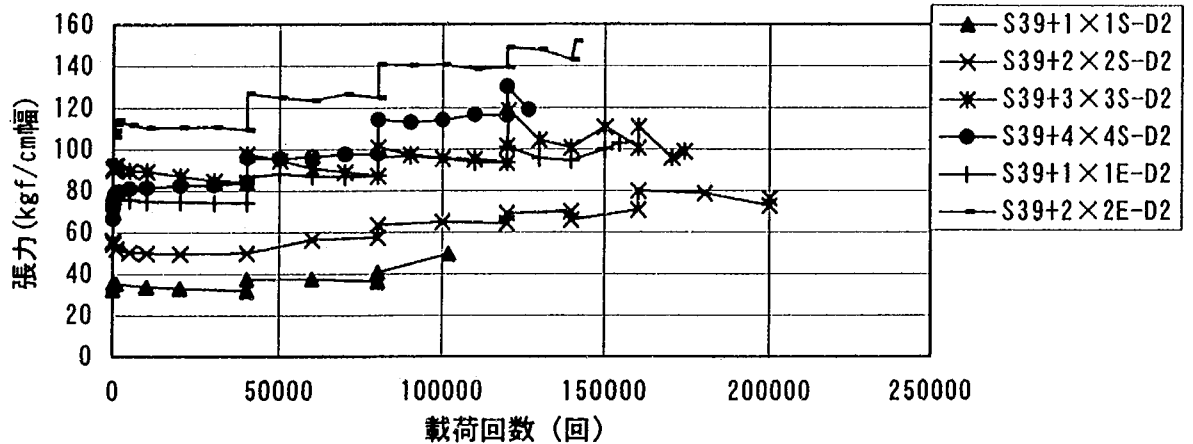


図6.7.11 補強後 床版中央主筋方向炭素繊維シートの活荷重張力

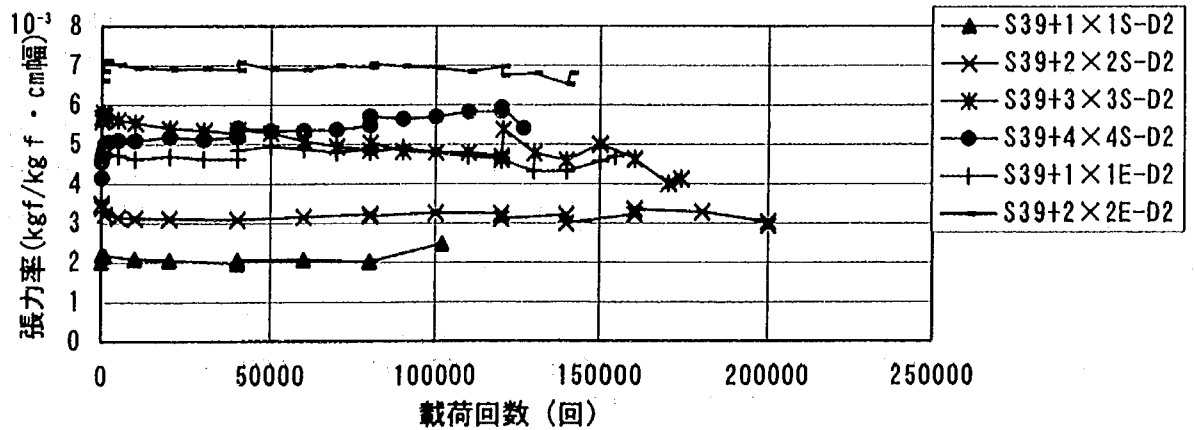


図6.7.12 補強後 床版中央主筋方向炭素繊維シートの張力率

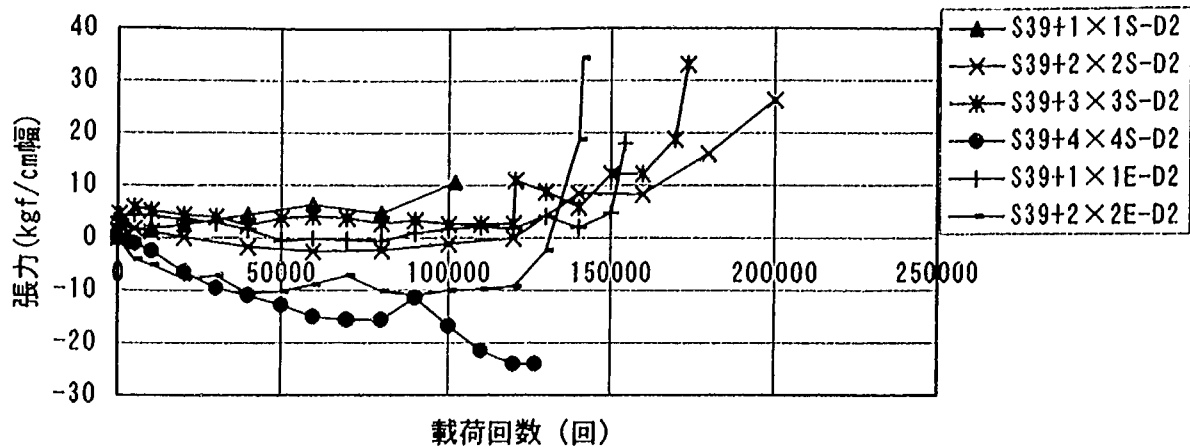


図6.7.13 補強後 床版中央配力筋方向炭素繊維シートの除荷時張力

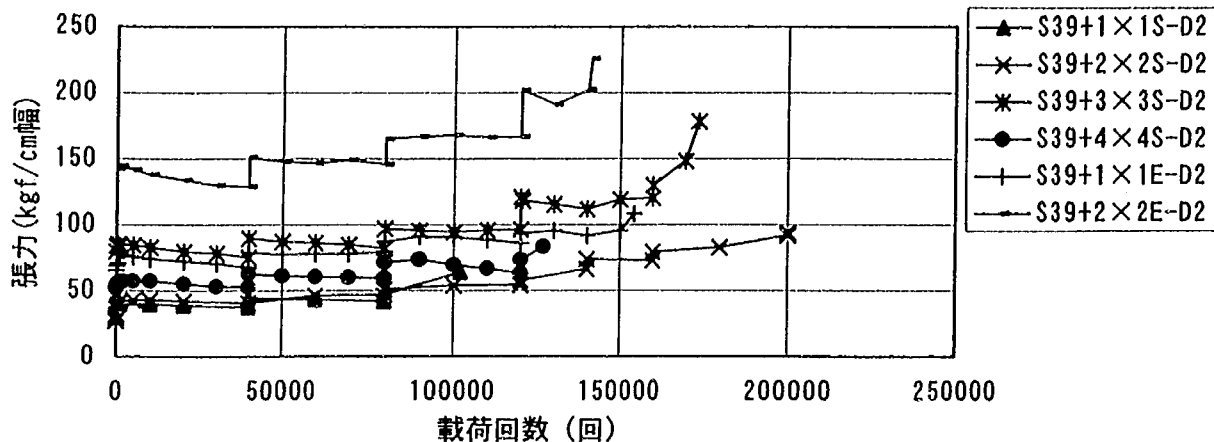


図6.7.14 補強後 床版中央配力筋方向炭素繊維シートの載荷時張力

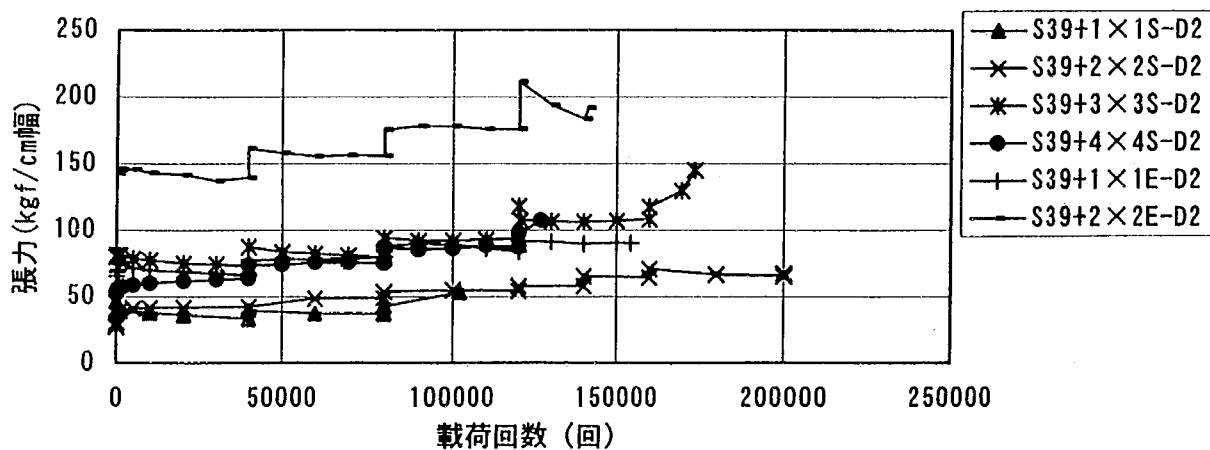


図6.7.15 補強後 床版中央配力筋方向炭素繊維シートの活荷重張力

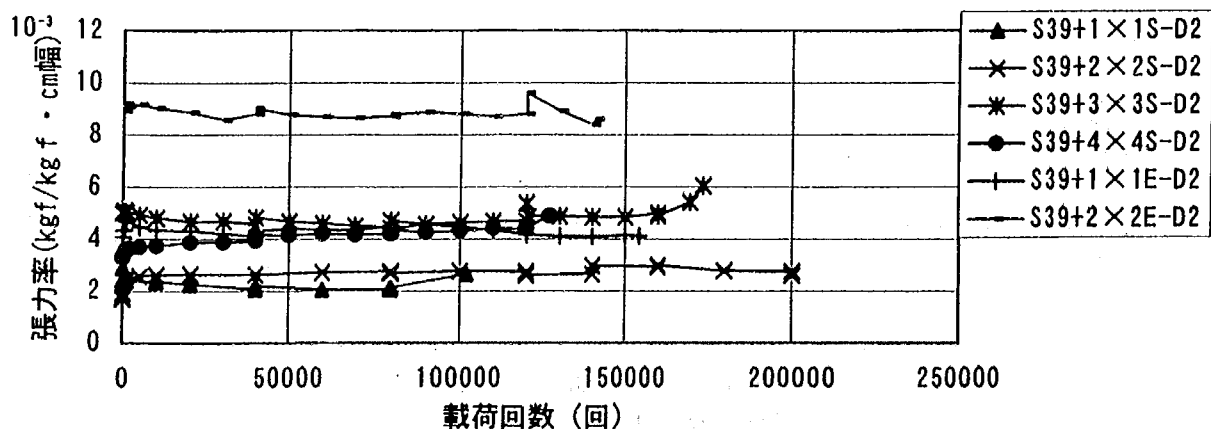


図6.7.16 補強後 床版中央配力筋方向炭素繊維シートの張力率

## 6.8 補強 RC 床版の疲労耐久性に及ぼす炭素繊維シートの各種要因の影響の検討

炭素繊維シートの貼り付け量、種類（炭素繊維シートのヤング係数）を変化させて補強した RC 床版の輪荷重走行試験を行った。その結果、炭素繊維シートで補強することにより、無補強の RC 床版試験体と比較して破壊回数が増加することが確認された。しかしながら、ある補強量で破壊回数は最大となり、それ以上補強量を増やすと、逆に破壊回数は減少する傾向がみられた。この原因としては、本研究では 4 万回載荷ごとに 2tf づつ荷重を増加させる階段載荷によって試験を行っているため、破壊時には実橋より相当高い荷重が作用しており、荷重が増加することにより炭素繊維シートで補強した RC 床版の破壊メカニズムに何らかの変化が生じていたと推定される。具体的には、高い荷重が作用した場合には、一般的な RC 床版の疲労メカニズムのほかに、炭素繊維シートと床版コンクリートの付着疲労破壊などについても検討する必要がある。

付着疲労破壊には、破壊回数（載荷荷重）に対する、炭素繊維シートの引張剛性（ $E \cdot A$ ）および曲げ剛性（ $E \cdot I$ ）が大きな影響を与えていると考えられる。そこで本節では、炭素繊維シートの引張剛性（ $E \cdot A$ ）・曲げ剛性（ $E \cdot I$ ）および炭素繊維シートとコンクリートの付着応力度が炭素繊維シートで補強した RC 床版の疲労耐久性に及ぼす影響について検討した。このとき、各供試体の破壊回数（載荷荷重）と各種要因（CFRP の剛性など）の関係を定量的に検討するためには、各供試体で破壊荷重が異なっており載荷荷重の大小の影響を取り除くため破壊回数の換算を行なう必要があると考えられるが、炭素繊維シートで補強した床版の破壊メカニズムは複雑であり、現状ではこの影響を定量的に評価することは困難である。一方、本研究では、すべての供試体で同じ荷重履歴（初期荷重 16tf、4 万回載荷ごとに 2tf 荷重を増加）を用いているので破壊回数によって疲労耐久性の高低を評価し、各種要因が炭素繊維シートで補強した RC 床版の疲労耐久性に及ぼす影響の大小を比較することは可能である。そのため本節では、破壊回数の換算は行わず、階段載荷の破壊回数を用いて検討を行った。CFRP の引張剛性（ $E \cdot A$ ）など各種要因と破壊回数のグラフを本節では示しているが、上述の様に階段載荷による破壊回数であるので 4 万回ごとに荷重が増加していることに留意しなければならない。

### 6.8.1 引張剛性および曲げ剛性の影響

#### (1) 炭素繊維シートの引張剛性の影響

炭素繊維シートの積層数を増やしたり、ヤング係数の高い炭素繊維シートを使用して CFRP の引張剛性（ $E \cdot A$ ）が増加すると、既設の鉄筋、コンクリートの応力度は低減されるため、CFRP の引張剛性（ $E \cdot A$ ）が高いほど破壊回数も増加するものと考えられる。しかし、荷重を増加させる促進試験では CFRP の引張剛性（ $E \cdot A$ ）が 2 番目に低い S39+2×2S-D2 が最も破壊回数が大きく、これ以上 CFRP の引張剛性（ $E \cdot A$ ）を増加させると破壊回数は逆に減少する結果となった。

支間 2.5m の単純版に対して道路橋示方書の曲げモーメント式を用いて活荷重を本試験の活荷重の初期荷重 16tf とした場合および各供試体の破壊時の載荷荷重とした場合について、鉄筋・コンクリート・炭素繊維シートの活荷重応力度を算定した結果を表 6.8.1（主鉄筋方向）、表 6.8.2（配力鉄筋方向）に示す。なお、

応力度の算定では通常の設計計算で用いられているように炭素繊維の実断面積を用いた。鉄筋応力度の計算値と破壊回数の関係を図 6.8.1、図 6.8.2 に示す。計算は、道路橋示方書のモーメント式を用いて線形計算としているため鉄筋応力度が降伏点を超えているものもあるが、鉄筋ひずみの実測値では降伏ひずみを超えるひずみは観測されなかった。鉄筋応力度－破壊回数の関係では鉄筋応力度  $1500\text{kgf/cm}^2$  付近で破壊回数が最大となるピークがみられる。

表 6.8.1 に CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ ) および曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) と破壊回数の関係を示す。ここで CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ ) および曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) は、「4.2 に示炭素繊維シートの引張剛性および曲げ剛性」に示す方法で算定したものである (表 4.2.2 参照)。図 6.8.3 には、CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ ) と破壊回数の関係を示す。無補強から CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ ) の増加に伴い、破壊荷重および破壊回数は増加するが引張剛性 ( $E \cdot A$ )  $8.5 \times 10^6 \text{kgf/m}$  (S39+2×2S-D2) で最大となり、その後は引張剛性 ( $E \cdot A$ ) の増加に伴い破壊荷重・破壊回数は減少する。破壊回数のピークまでは、シートの引張剛性 ( $E \cdot A$ ) が高いほど RC 床版の鉄筋応力度、たわみ、ひび割れ開閉に対する高い抑制効果が得られるためと考えられる。ピーク後の破壊回数の減少は、CFRP とコンクリートの付着疲労破壊の影響などによるものと考えられるが、付着疲労破壊の影響については「6.8.2 付着応力度の影響」で検討する。

## (2)炭素繊維シートの曲げ剛性の影響

図 6.8.4 に CFRP の曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) と破壊回数の関係を示す。一般に CFRP の曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) が高くなるほど、ピール破壊 (斜め引き剥がし破壊) が生じ易いとされている。表 6.8.1 に示すように高弾性型 1×1 層 (S39+1×1E-D2) と高強度型 2×2 層 (S39+2×2S-D2) を比較すると、高弾性型のほうが引張剛性 ( $E \cdot A$ ) は若干高く ( $9.6 \times 10^6 : 8.5 \times 10^6$ )、曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) は 1/10 と非常に小さい ( $4.7 \times 10^3 : 65 \times 10^3$ )。ピール破壊の影響があるとすれば、引張剛性 ( $E \cdot A$ ) が同じであれば、曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) の低いもののほうが疲労耐久性は向上するはずである。しかしながら試験結果では、曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) の高い高強度型 S39+2×2S-D2 のほうが破壊荷重が 2 段階 (4tf) 高く、破壊回数も多い。また高弾性型 2×2 層 (S39+2×2E-D2) と高強度 4×4 層 (S39+4×4S-D2) を比較すると同様に高弾性型のほうが引張剛性 ( $E \cdot A$ ) は若干高く ( $19 \times 10^6 : 16 \times 10^6$ )、曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) は 1/4 以下と小さい ( $136 \times 10^3 : 627 \times 10^3$ ) が、破壊荷重は同じで破壊回数には両者に大きな差は認められない。

以上の検討より、炭素繊維シートと RC 床版コンクリートのピール破壊の影響は明確には認められず、CFRP の曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) が疲労破壊に及ぼす影響は少ないものと考えられる。

表6.8.1 各供試体の炭素繊維シートの応力度と平均付着応力度の計算値と疲労回数(主筋方向)

| 供試体           |                        | S39                 | S39+1X1S-D2 | S39+2X2S-D2 | S39+3X3S-D2 | S39+4X4S-D2 | S39+1X1E-D2 | S39+2X2E-D2 |
|---------------|------------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 繊維種類          |                        | なし                  | 高強度型        | 高強度型        | 高強度型        | 高強度型        | 高弾性型        | 高弾性型        |
| シートヤング係数      | kgf/cm <sup>2</sup>    |                     | 2.35E+06    | 2.35E+06    | 2.35E+06    | 2.35E+06    | 6.50E+06    | 6.50E+06    |
| 合計積層数         | 層                      | 0                   | 2           | 4           | 6           | 8           | 2           | 4           |
| 方向            |                        | 主筋                  | 主筋          | 主筋          | 主筋          | 主筋          | 主筋          | 主筋          |
| 積層数           | 層                      | 0                   | 1           | 2           | 3           | 4           | 1           | 2           |
| シート断面積        | cm <sup>2</sup> /m幅    |                     | 1.67        | 3.34        | 5.01        | 6.68        | 1.43        | 2.86        |
| CFRPの引張剛性     | kgf/m幅                 | 0                   | 4.24E+06    | 8.47E+06    | 1.27E+07    | 1.69E+07    | 9.60E+06    | 1.92E+07    |
| CFRPの曲げ剛性     | kgf・cm <sup>2</sup> /m | 0                   | 5.29E+03    | 6.46E+04    | 2.52E+05    | 6.27E+05    | 4.72E+03    | 1.36E+05    |
| 荷重<br>16tf    | コンクリート活荷重応力            | kgf/cm <sup>2</sup> | 125         | 114         | 106         | 99          | 94          | 104         |
|               | 鉄筋活荷重応力                | kgf/cm <sup>2</sup> | 3219        | 2648        | 2246        | 1950        | 1720        | 2128        |
|               | シート活荷重応力               | kgf/cm <sup>2</sup> |             | 3878        | 3320        | 2906        | 2584        | 8722        |
|               | シート引張ひずみ               | μ                   |             | 1650        | 1413        | 1237        | 1100        | 1342        |
|               | シート引張力                 | kgf/m幅              |             | 6476        | 11089       | 14559       | 17261       | 12472       |
|               | 平均付着応力度                | kgf/cm <sup>2</sup> | 0           | 0.59        | 1.01        | 1.33        | 1.58        | 1.14        |
| 破壊<br>荷重      | コンクリート活荷重応力            | kgf/cm <sup>2</sup> |             | 228         | 276         | 238         | 207         | 229         |
|               | 鉄筋活荷重応力                | kgf/cm <sup>2</sup> |             | 5296        | 5840        | 4680        | 3784        | 4682        |
|               | シート活荷重応力               | kgf/cm <sup>2</sup> |             | 7756        | 8632        | 6974        | 5685        | 19188       |
|               | シート引張ひずみ               | μ                   |             | 3300        | 3673        | 2968        | 2419        | 2952        |
|               | シート引張力                 | kgf/m幅              |             | 12953       | 28831       | 34942       | 37974       | 27439       |
|               | 平均付着応力度                | kgf/cm <sup>2</sup> | 0           | 1.18        | 2.63        | 3.19        | 3.47        | 2.51        |
| 破壊荷重          | tf                     | 16                  | 20          | 26          | 24          | 22          | 22          | 22          |
| 破壊回数(補強後載荷回数) | 回                      | 27,392              | 114,496     | 200,626     | 173,860     | 132,070     | 155,210     | 144,643     |

表6.8.2 各供試体の炭素繊維シートの応力度と平均付着応力度の計算値と疲労回数(配力筋方向)

| 供試体           |                        | S39                 | S39+1X1S-D2 | S39+2X2S-D2 | S39+3X3S-D2 | S39+4X4S-D2 | S39+1X1E-D2 | S39+2X2E-D2 |
|---------------|------------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 繊維種類          |                        | なし                  | 高強度型        | 高強度型        | 高強度型        | 高強度型        | 高弾性型        | 高弾性型        |
| シートヤング係数      | kgf/cm <sup>2</sup>    |                     | 2.35E+06    | 2.35E+06    | 2.35E+06    | 2.35E+06    | 6.50E+06    | 6.50E+06    |
| 合計積層数         | 層                      | 0                   | 2           | 4           | 6           | 8           | 2           | 4           |
| 方向            |                        | 配力筋                 | 配力筋         | 配力筋         | 配力筋         | 配力筋         | 配力筋         | 配力筋         |
| 積層数           | 層                      |                     | 1           | 2           | 3           | 4           | 1           | 2           |
| シート断面積        | cm <sup>2</sup> /m幅    |                     | 1.67        | 3.34        | 5.01        | 6.68        | 1.43        | 2.86        |
| CFRPの引張剛性     | kgf/m幅                 | 0                   | 4.24E+06    | 8.47E+06    | 1.27E+07    | 1.69E+07    | 9.60E+06    | 1.92E+07    |
| CFRPの曲げ剛性     | kgf・cm <sup>2</sup> /m | 0                   | 5.29E+03    | 6.46E+04    | 2.52E+05    | 6.27E+05    | 4.72E+03    | 1.36E+05    |
| 荷重<br>16tf    | コンクリート活荷重応力            | kgf/cm <sup>2</sup> | 192         | 139         | 115         | 102         | 93          | 157         |
|               | 鉄筋活荷重応力                | kgf/cm <sup>2</sup> | 8216        | 4536        | 3109        | 2352        | 1883        | 2784        |
|               | シート活荷重応力               | kgf/cm <sup>2</sup> |             | 7374        | 5160        | 3981        | 3246        | 12867       |
|               | シート引張ひずみ               | μ                   |             | 3138        | 2196        | 1694        | 1381        | 1980        |
|               | シート引張力                 | kgf/m幅              |             | 12315       | 17234       | 19945       | 21683       | 18400       |
|               | 平均付着応力度                | kgf/cm <sup>2</sup> | 0           | 0.63        | 0.89        | 1.03        | 1.11        | 0.95        |
| 破壊<br>荷重      | コンクリート活荷重応力            | kgf/cm <sup>2</sup> |             | 278         | 299         | 245         | 205         | 345         |
|               | 鉄筋活荷重応力                | kgf/cm <sup>2</sup> |             | 9072        | 8083        | 5645        | 4143        | 6125        |
|               | シート活荷重応力               | kgf/cm <sup>2</sup> |             | 14748       | 13416       | 9554        | 7141        | 28307       |
|               | シート引張ひずみ               | μ                   |             | 6276        | 5709        | 4066        | 3039        | 4355        |
|               | シート引張力                 | kgf/m幅              |             | 24629       | 44809       | 47868       | 47703       | 40480       |
|               | 平均付着応力度                | kgf/cm <sup>2</sup> | 0           | 1.27        | 2.30        | 2.46        | 2.45        | 2.08        |
| 破壊荷重          | tf                     | 16                  | 20          | 26          | 24          | 22          | 22          | 22          |
| 破壊回数(補強後載荷回数) | 回                      | 27,392              | 114,496     | 200,626     | 173,860     | 132,070     | 155,210     | 144,643     |

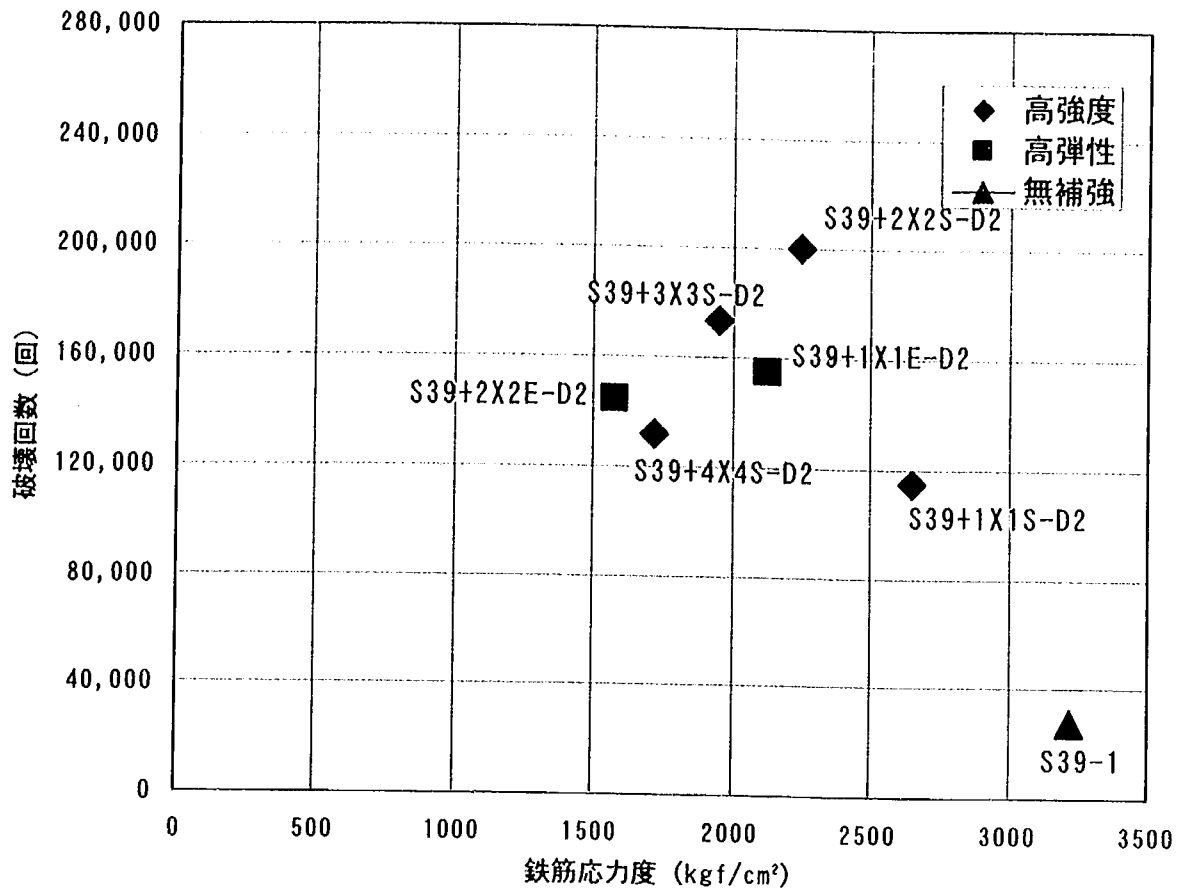


図6.8.1 鉄筋応力度と破壊回数 (主筋方向—応力計算荷重16tf)

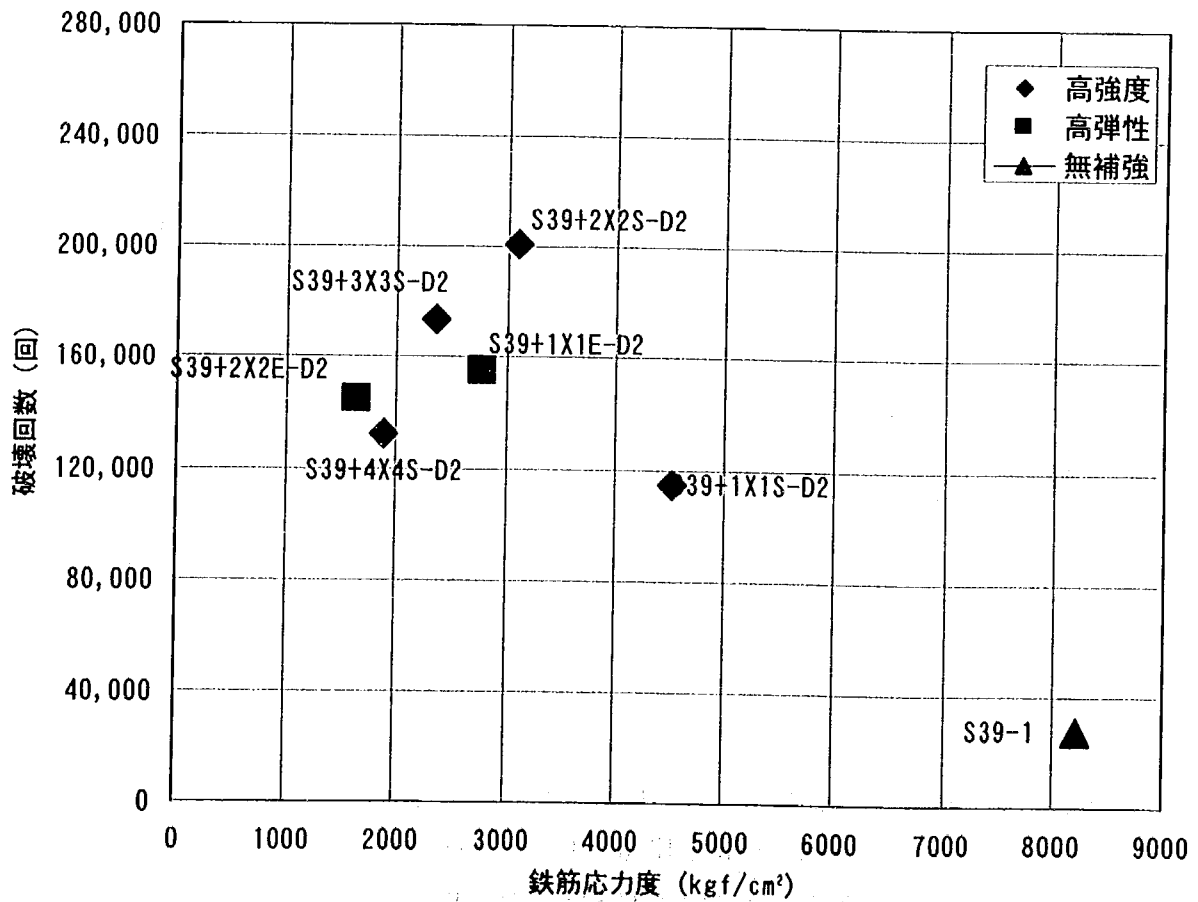


図6.8.2 鉄筋応力度と破壊回数 (配力筋方向—応力計算荷重16tf)

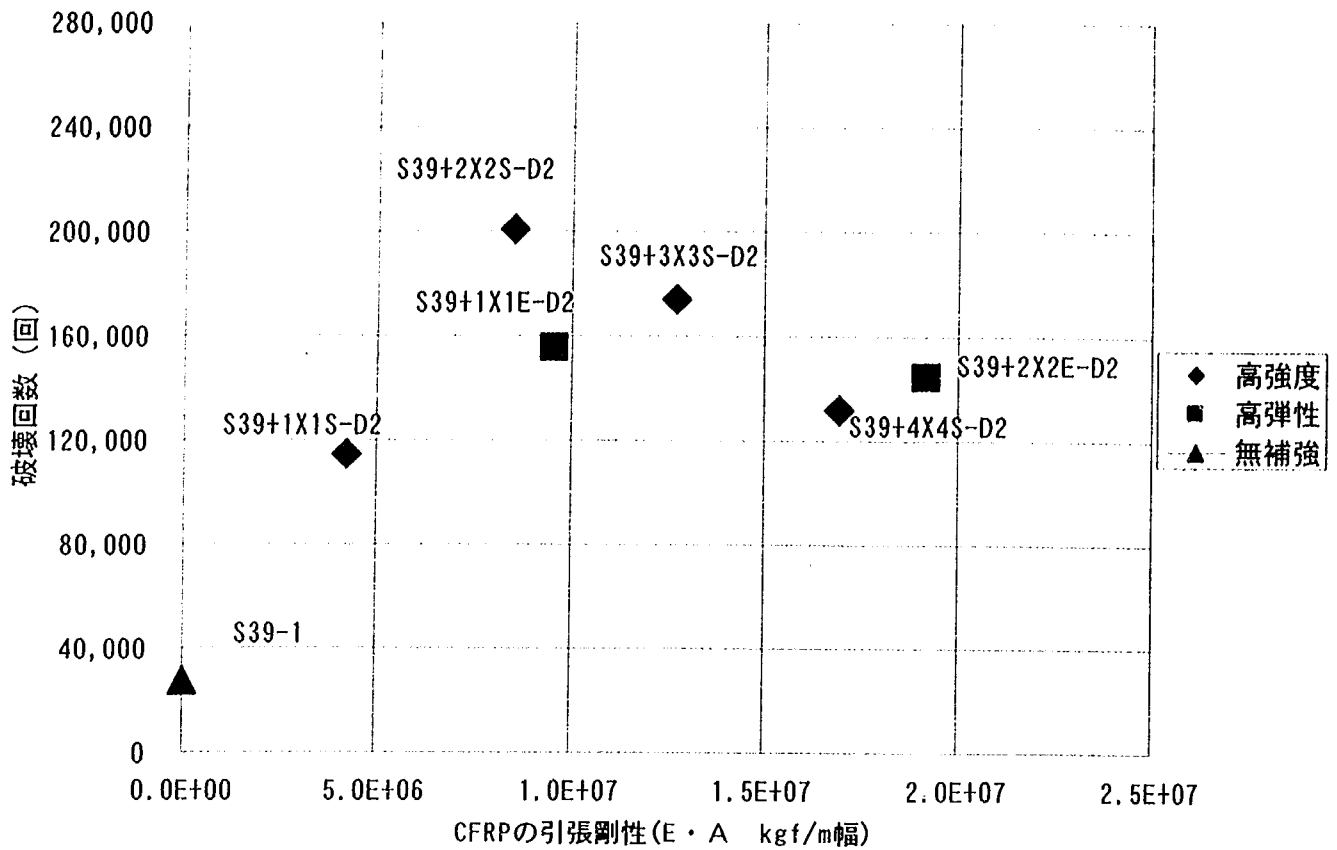


図6.8.3 CFRPの引張剛性と破壊回数

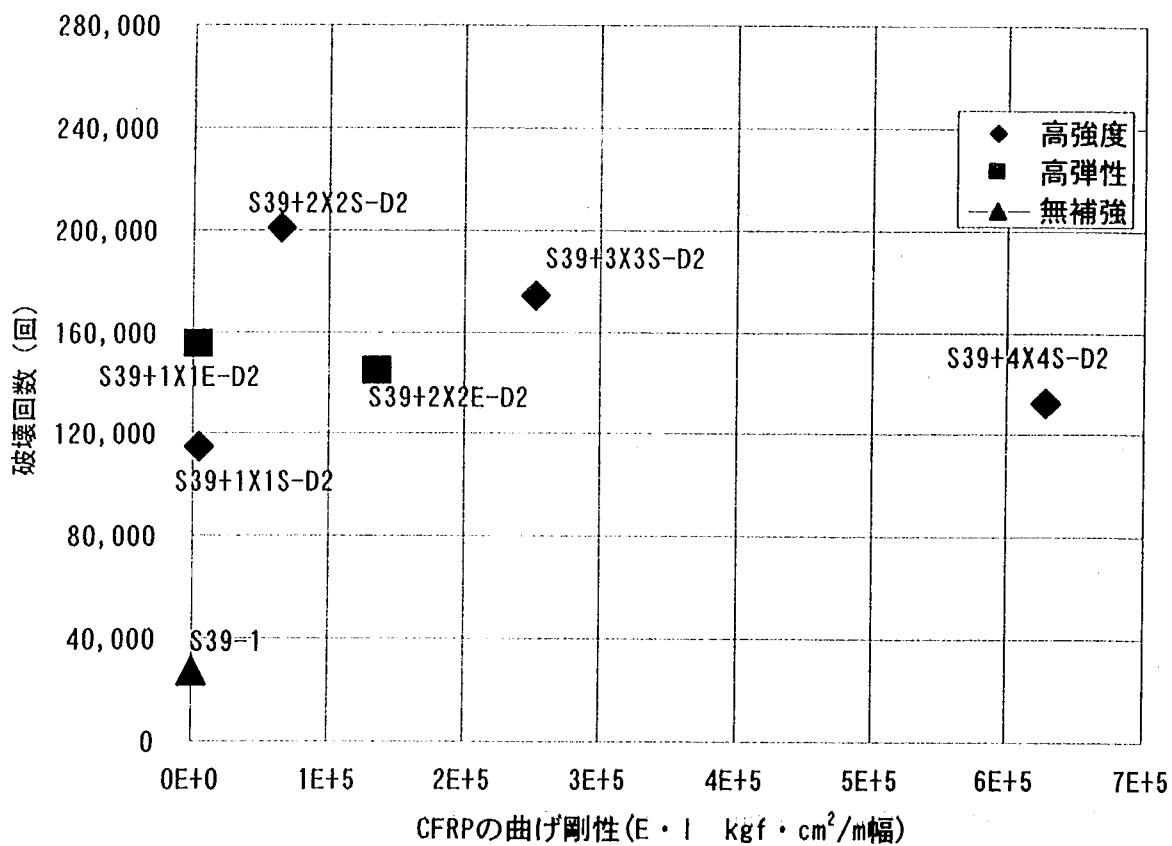


図6.8.4 CFRPの曲げ剛性と破壊回数

## 6.8.2 付着応力度の影響

炭素繊維シートで補強した RC 床版に曲げモーメントが作用した場合、CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ ) が高くなつて CFRP の負担する引張力が増加し、結果として CFRP とコンクリートの付着応力度も高くなる。ここでは CFRP とコンクリートの付着応力度と破壊回数の関係について検討する。

CFRP とコンクリートの平均付着応力度を次式で示す。

$$\begin{aligned}\tau_b &= P_{cf}/L \\ \tau_b &= \frac{P_{cf}}{L} \\ &= \frac{\sigma_{cf} \cdot A_{cf}}{L} \\ &= \frac{E_{cf} \varepsilon_{cf} A_{cf}}{L}\end{aligned}$$

ここに、

$\tau_b$  : 平均付着応力度(kgf/cm<sup>2</sup>)

$L$  : 付着長さ(cm)

$P_{cf}$  : 炭素繊維シートが負担する単位幅あたりの引張力(kgf/cm)

$$P_{cf} = \sigma_{cf} \cdot A_{cf}$$

$\sigma_{cf}$  : 炭素繊維シートの引張応力度(kgf/cm<sup>2</sup>)

$A_{cf}$  : 炭素繊維シートの単位幅あたりの断面積(cm<sup>2</sup>/m)

$E_{cf}$  : 炭素繊維シートのヤング係数(kgf/cm<sup>2</sup>)

$\varepsilon_{cf}$  : 炭素繊維シートのひずみ

初期荷重 16tf および破壊時の載荷荷重に対して計算した平均付着応力度を表 6.8.1 (主鉄筋方向)、表 6.8.2 (配力鉄筋方向) に示す。ここで平均付着応力度の計算には、平成 8 年道路橋示方書Ⅱ鋼橋編の曲げモーメント式を用いて算出した炭素繊維シートの応力度を用いた。付着長さは、モーメントの影響範囲、ひび割れ間隔、有効付着範囲などの影響を受けるが、ここでは全供試体の炭素繊維シートの貼り付け寸法が同一であるので各供試体間の比較を目的として、簡単のため主鉄筋方向、配力鉄筋方向のそれぞれ炭素繊維シートの貼り付け長さの 1/2 を付着長とした。付着応力度の絶対値を検討する場合には、実際の付着長さ、付着応力度の分布を用いる必要がある。

荷重 16tf 時の平均付着応力度の計算値 (表 6.8.3~6.8.4) と破壊回数の関係を、図 6.8.5 (主鉄筋方向)、図 6.8.6 (配力鉄筋方向) に示す。平均付着応力度の増加に伴い破壊回数も増加するが、ピーク後は平均付着応力度の増加に伴い破壊回数は減少する。図 6.8.7 (主鉄筋方向)、図 6.8.8 (配力鉄筋方向) は同様に破壊時の載荷荷重に対して示したものであり、同様の傾向が認められる。

本研究では、階段状に荷重を増加させているため、平均付着応力度も階段状に増加する。載荷荷重と載荷回数の履歴は全供試体で共通としているが、同じ載荷荷重に対して各供試体で生じる付着応力度が異なるため、載荷履歴を付着応力度についてみると、初めから異なった載荷履歴となる。図 6.8.9（主鉄筋方向）、図 6.8.10（配力鉄筋方向）には載荷履歴を載荷回数と平均付着応力度の計算値の関係で示した。また図中に各供試体の破壊回数を示した。

載荷履歴を平均付着応力度についてみれば、炭素繊維シートの引張剛性（ $E \cdot A$ ）が高いものほど、載荷履歴が高応力側にシフトする。主鉄筋側では、補強量と破壊回数の関係で、破壊回数のピーク前に位置する供試体 S39+1×1S-D2 を除いて破壊時の平均付着応力度は、 $1.5\text{kgf/cm}^2$  を超えた領域で生じている。またこの範囲では平均付着応力度が高いほど破壊回数は減少する傾向にある。配力筋側も同様の傾向を示している。

図 6.8.11、図 6.8.12 は同様に炭素繊維シートのひずみの測定値から算出した平均付着応力度と載荷回数の関係を主鉄筋方向、配力鉄筋方向について示したものである。ここで平均付着応力度は、6.7 で求めた炭素繊維シートの RC 床版下面中央での単位幅あたりの張力を付着長（同様に炭素繊維シート長さの 1/2）で除したものである。

ひずみの測定値から求めた付着応力度は、道路橋示方書の設計曲げモーメント式を用いて求めた図 6.8.9、図 6.8.10 より低い値となっているが、各供試体の付着応力度の大小関係はほぼ同じ傾向にある。設計値より試験値が低くなった原因としては、道路橋示方書の曲げモーメント式が衝撃などを考慮した安全側の評価式であること、設計上はコンクリートの引張強度を無視しているが実際にはコンクリートも引張力を負担していることなどが考えられる。CFRP の引張剛性（ $E \cdot A$ ）の高いものほど平均付着応力度は高く、補強量の最も少ない S39+1×1S-D2 を除くとおおむね平均付着応力度が高くなるのに従い破壊回数が小さくなる傾向にある。

ここで、鉄筋および炭素繊維シートのひずみの測定結果から炭素繊維シートの付着破壊について検討する。6.6 の鉄筋ひずみ、6.7 の炭素繊維シートのひずみの検討では、炭素繊維シートの引張剛性（ $E \cdot A$ ）の高い S39+3×3S-D2、S39+4×4S-D2、S39+1×1E-D2、S39+2×2E-D2 の 4 体の試験体では、載荷回数の増加に伴い鉄筋のひずみ率の増加傾向、炭素繊維シートのひずみ率の低減傾向がみられた。炭素繊維シートの付着破壊範囲が広がると、付着破壊を生じた範囲の炭素繊維シートの応力負担が減少し、相対的に鉄筋の応力負担が増加することになる。そこで各測定時点での鉄筋と炭素繊維シートの引張力の負担割合（これを張力比と呼ぶ）について検討する。

$$R_p = P_{cf} / P_{rb}$$

$$P_{cf} = \varepsilon_{cf} \cdot E_{cf} \cdot A_{cf}$$

$$P_{rb} = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s$$

ここに、

$R_p$  : 張力比 (tf/tf)

$P_{cf}$  : 炭素繊維シート (1m 幅) の負担する張力(tf)

$P_{rb}$  : 鉄筋 (床版 1m 幅) の張力(tf)

$\varepsilon_{cf}$  : 炭素繊維シートのひずみ

- $E_{cf}$  : 炭素繊維シートのヤング係数 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $A_{cf}$  : 炭素繊維シート (1m 幅) の断面積(cm<sup>2</sup>)  
 $\varepsilon_s$  : 鉄筋のひずみ  
 $E_s$  : 鉄筋のヤング係数(kgf/cm<sup>2</sup>)  
 $A_s$  : 鉄筋の RC 床版 (1m 幅) の断面積 (cm<sup>2</sup>)

図 6.8.13 に主鉄筋方向、図 6.8.14 に配力鉄筋方向の張力比と載荷回数関係を示す。張力比は、活荷重ひずみを用いて算出した。補強量が少なく付着応力度が低い S39+1×1S-D2、S39+2×2S-D2 の 2 つの供試体の張力比は、主鉄筋方向・配力鉄筋方向ともに、張力比は、ほぼ一定で載荷の初期段階から破壊前まで大きな変化はない。配力鉄筋方向では、この 2 つの供試体より補強量の多い S39+3×3S-D2、S39+4×4S-D2、S39+1×1E-D2、S39+2×2E-D2 の 4 体の張力比は、載荷回数が増加するに伴い、明らかな減少傾向を示している。とくに CFRP の引張剛性 (E・A) の大きな S39+2×2E-D2 で張力比の減少率が大きい。本研究で用いた階段載荷における高い荷重レベルでは、これより補強量の多い S39+3×3S-D2、S39+4×4S-D2、S39+1×1E-D2、S39+2×2E-D2 では繰り返し載荷中に徐々に付着破壊が進行し炭素繊維シートの荷重分担が減少していたことが推定される。

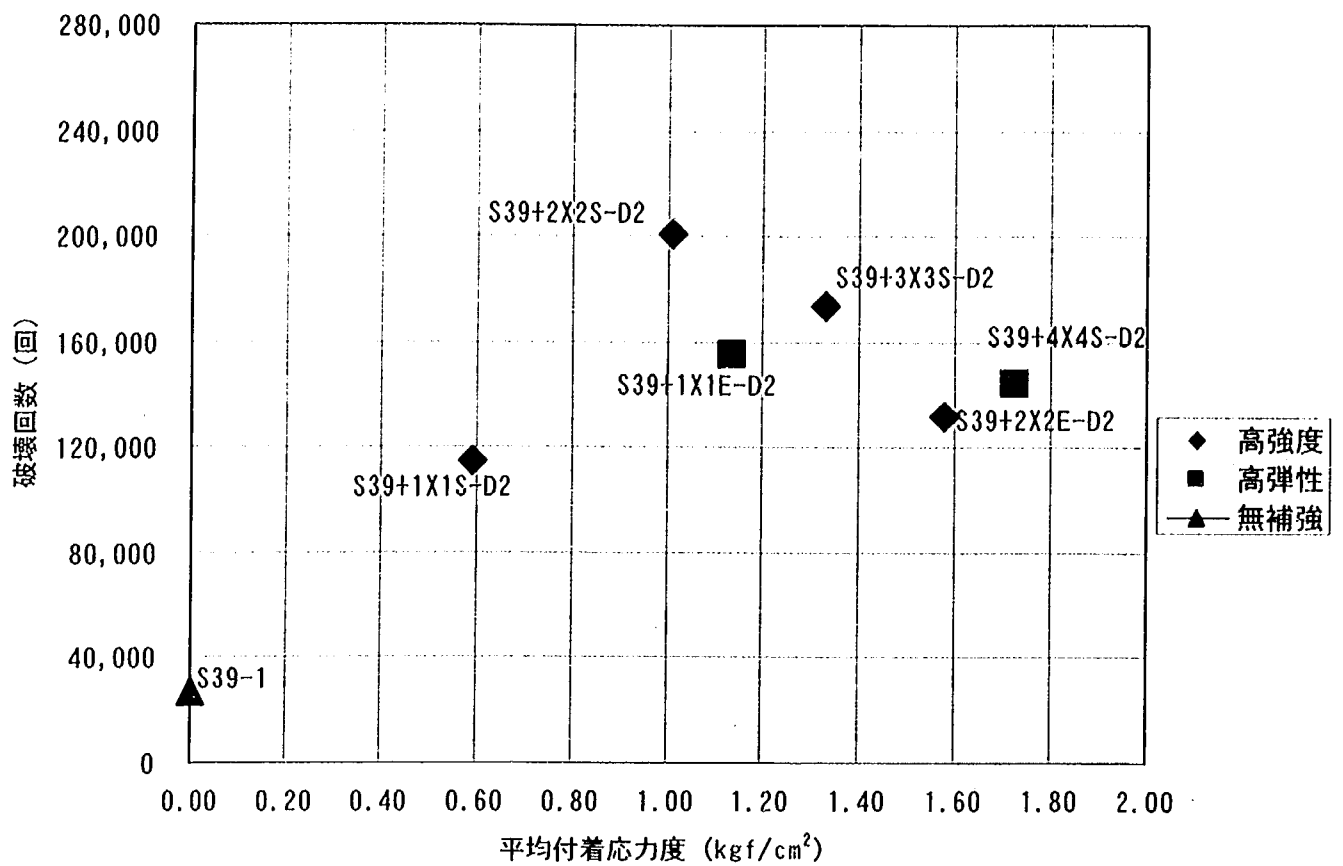


図6.8.5 平均付着応力度と破壊回数（主筋方向－応力計算荷重16tf）

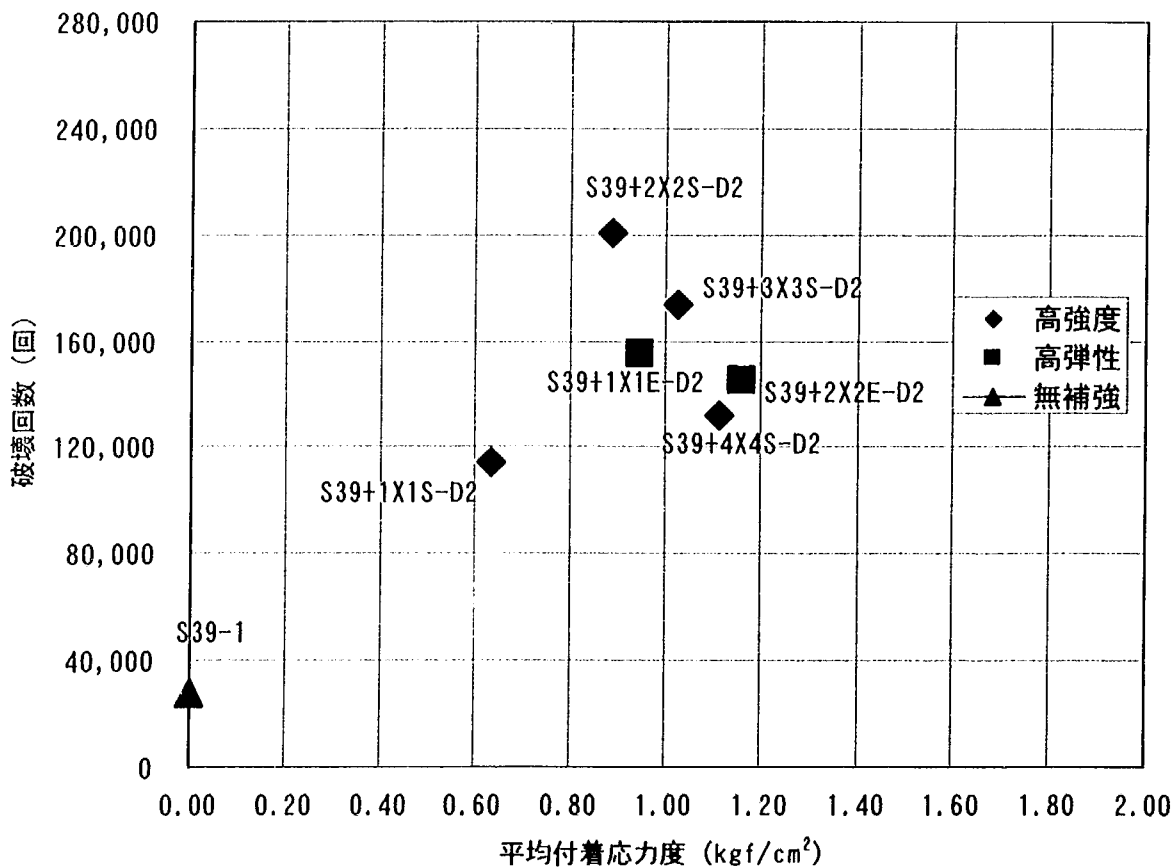


図6.8.6 平均付着応力度と破壊回数（配力筋方向－応力計算荷重16tf）

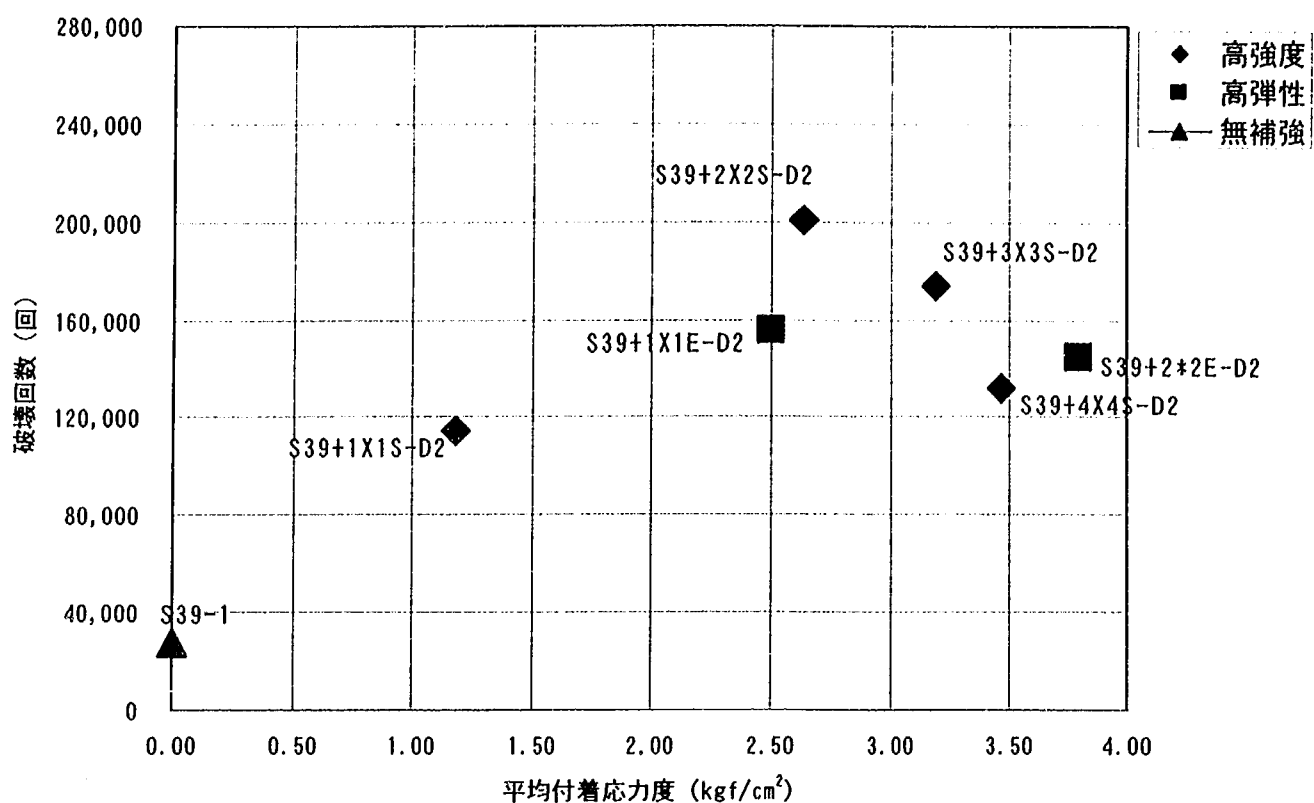


図6.8.7 平均付着応力度と破壊回数（主筋方向一応力計算荷重・破壊時荷重）

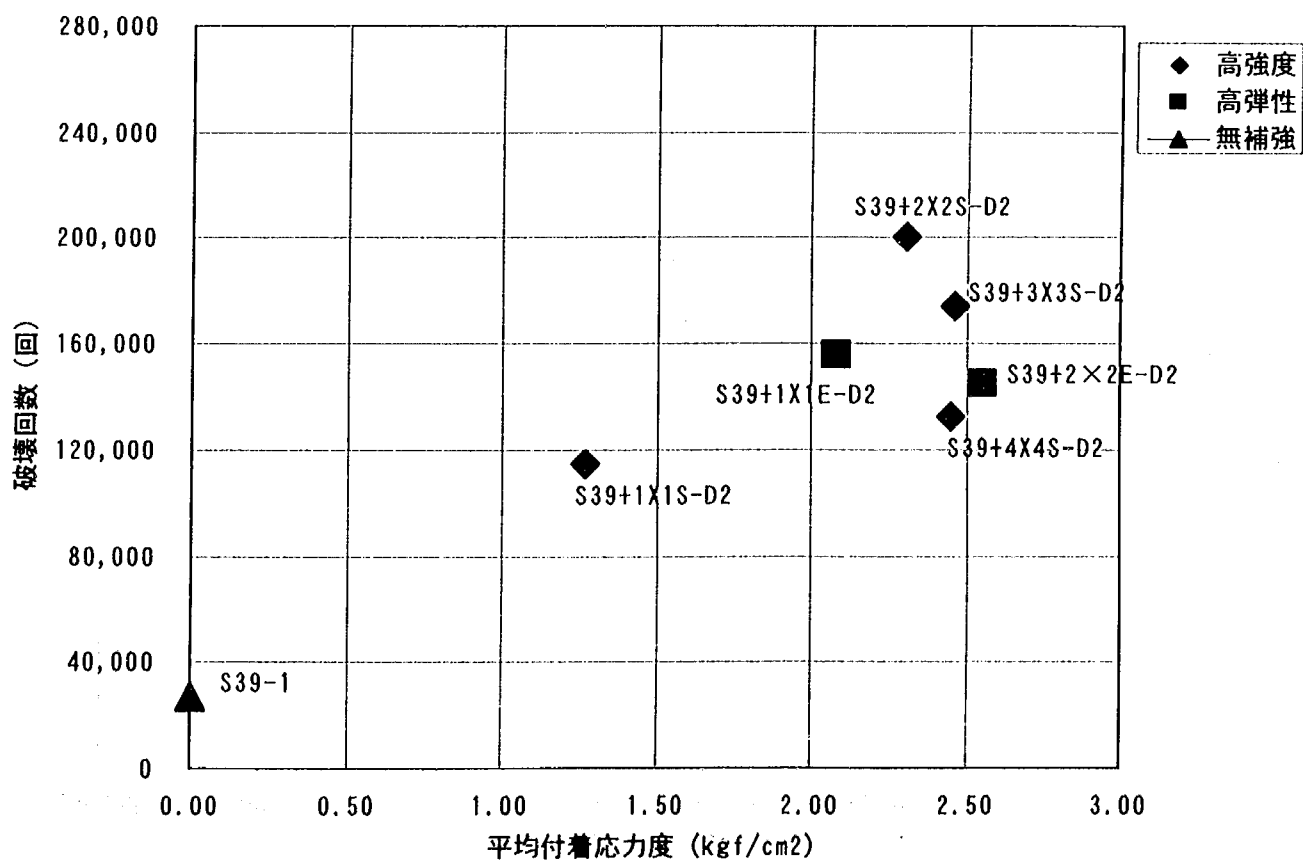


図6.8.8 平均付着応力度と破壊回数（配力筋方向一応力計算荷重・破壊時荷重）

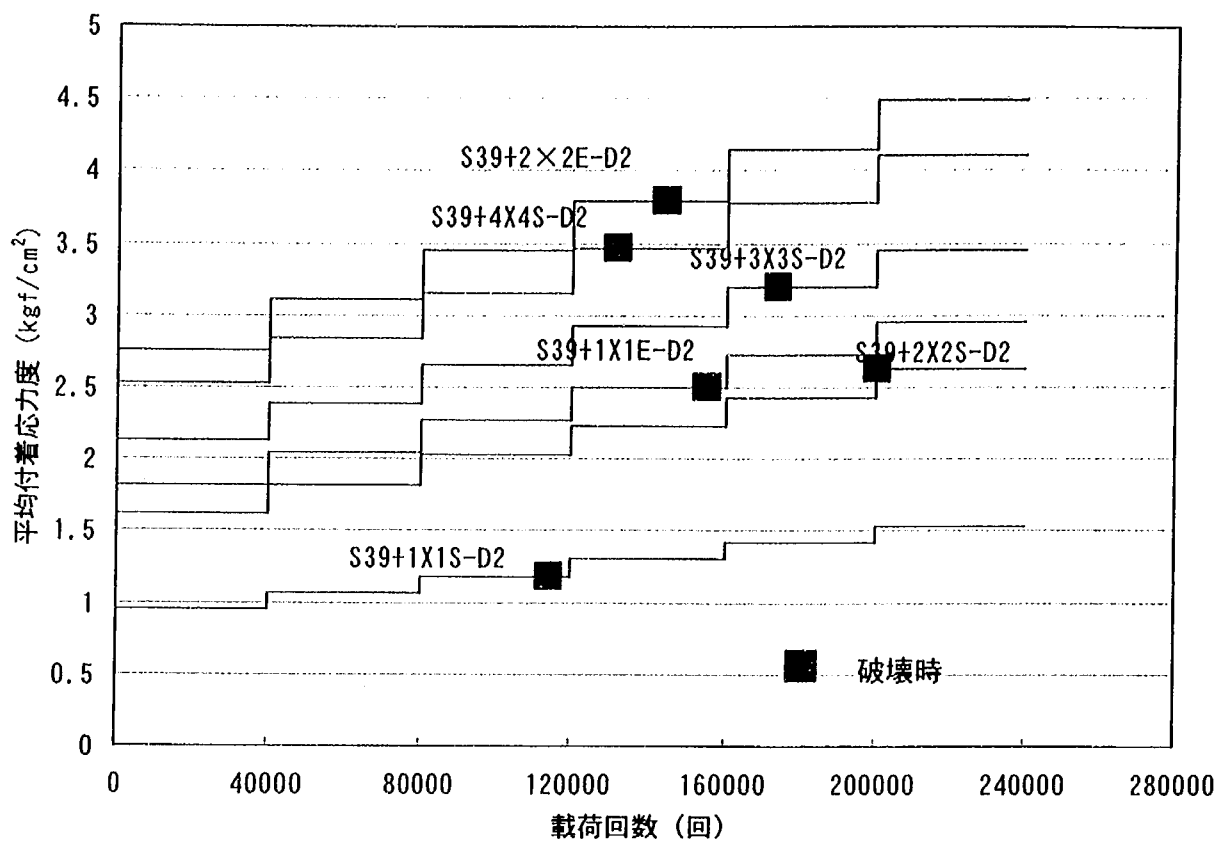


図6.8.9 平均付着応力度（主筋方向）と载荷ステップ

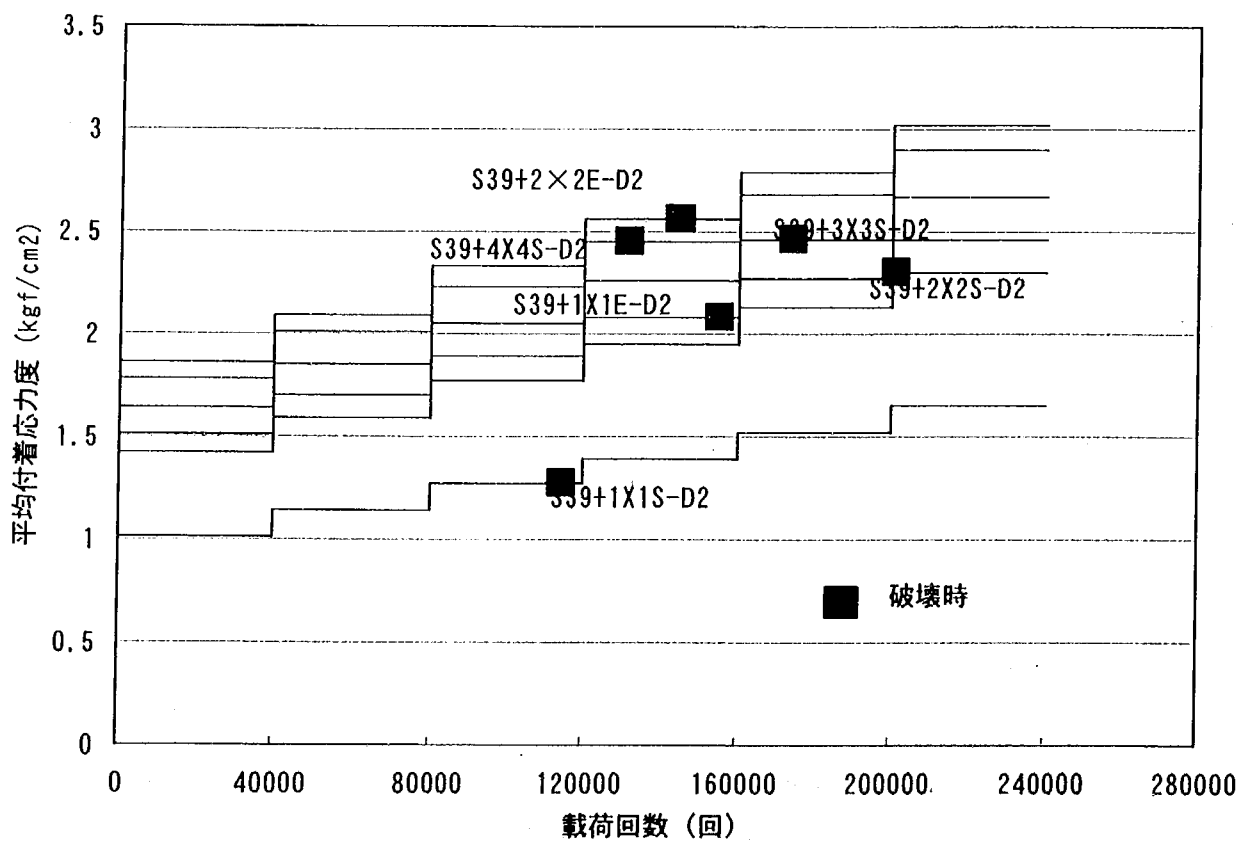


図6.8.10 平均付着応力度（配力筋方向）と载荷ステップ

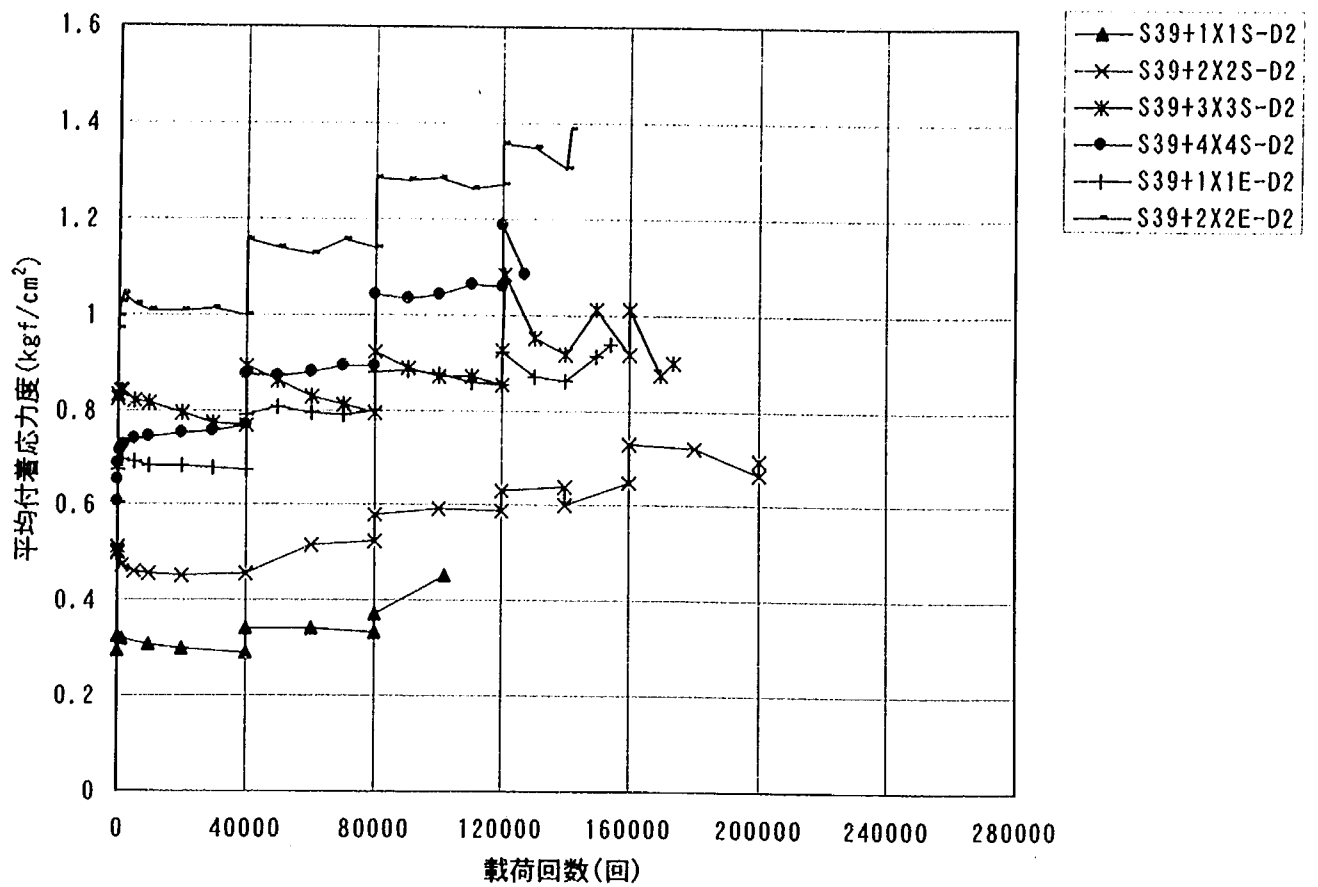


図6.8.11 主鉄筋方向の平均付着応力度 (実験値)

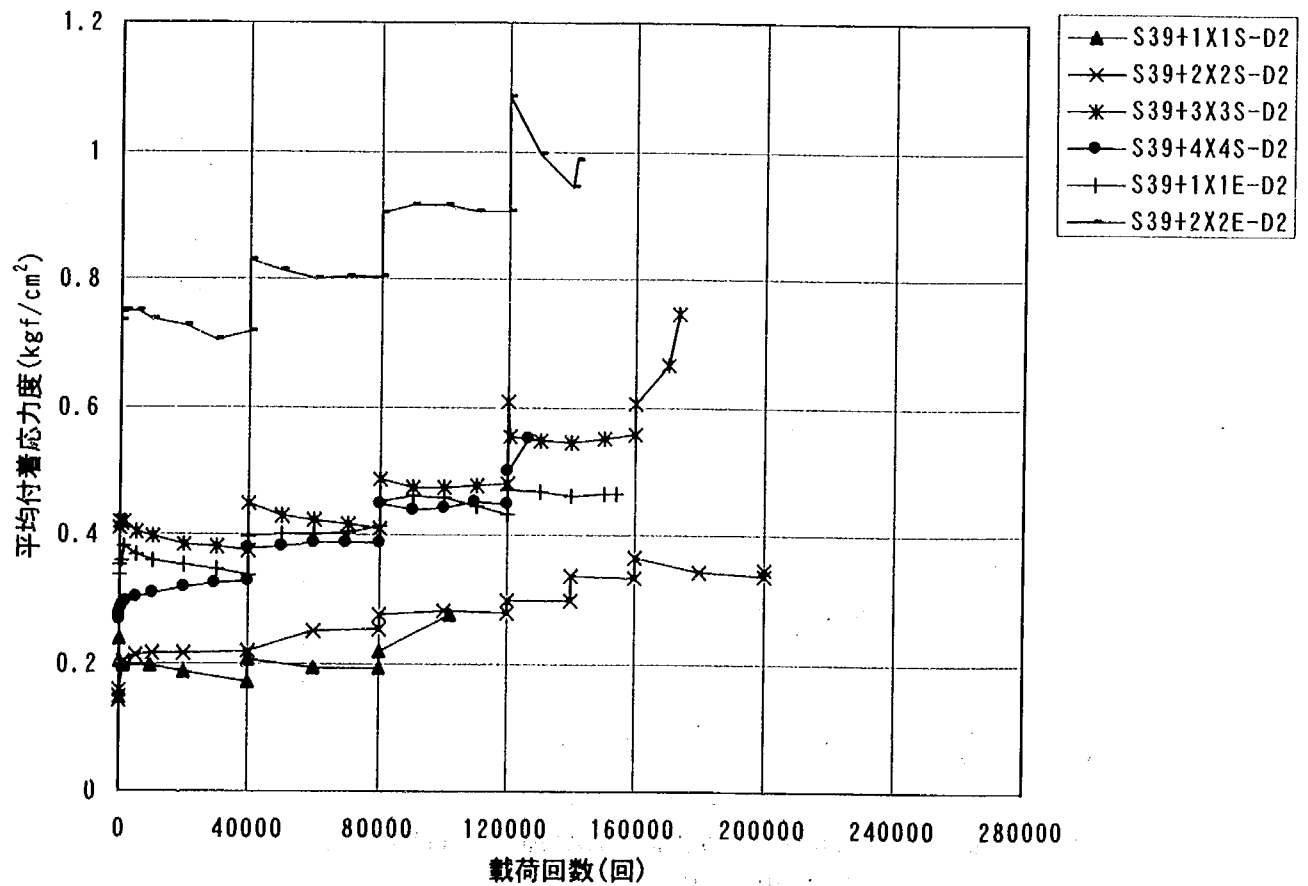


図6.8.12 配力鉄筋方向の平均付着応力度 (実験値)

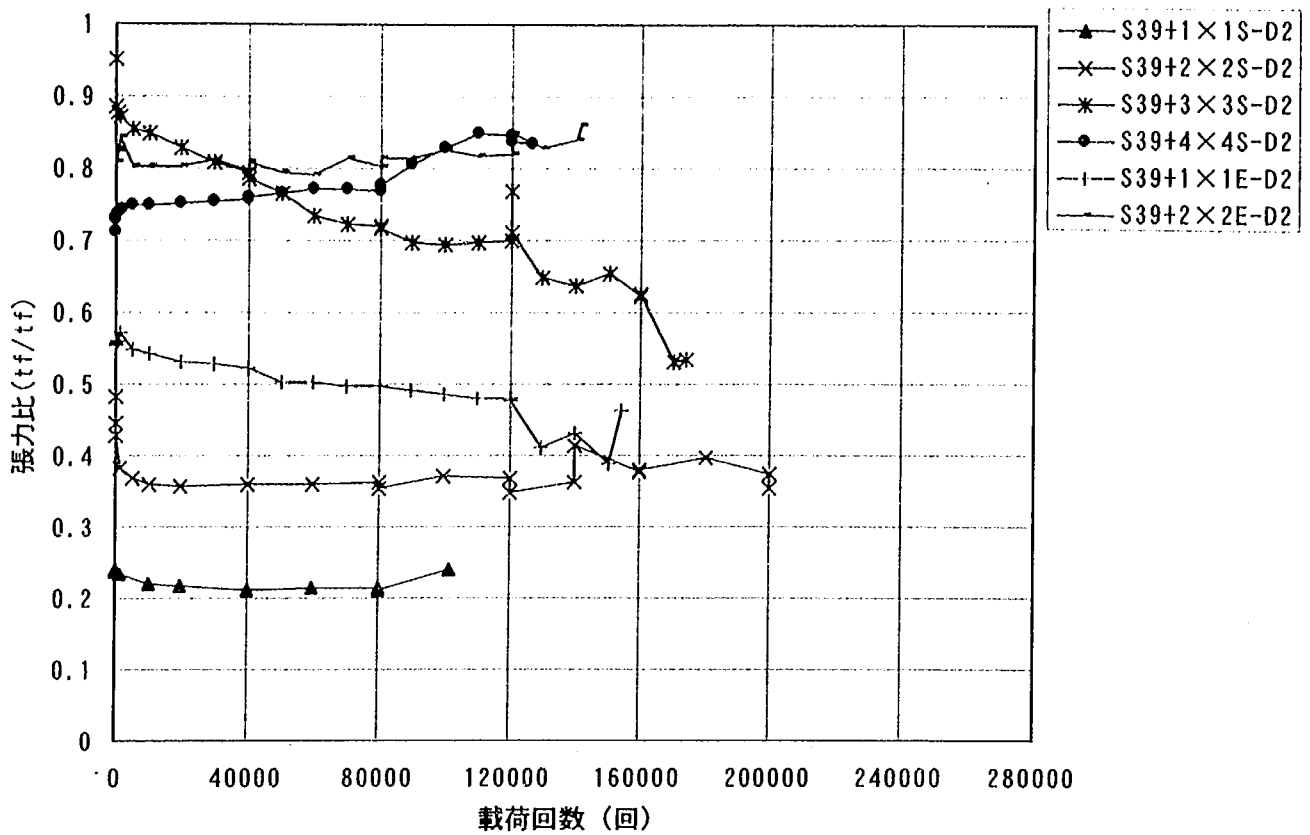


図6.8.13 主筋方向の鉄筋と炭素繊維シートの張力比 (活荷重時)

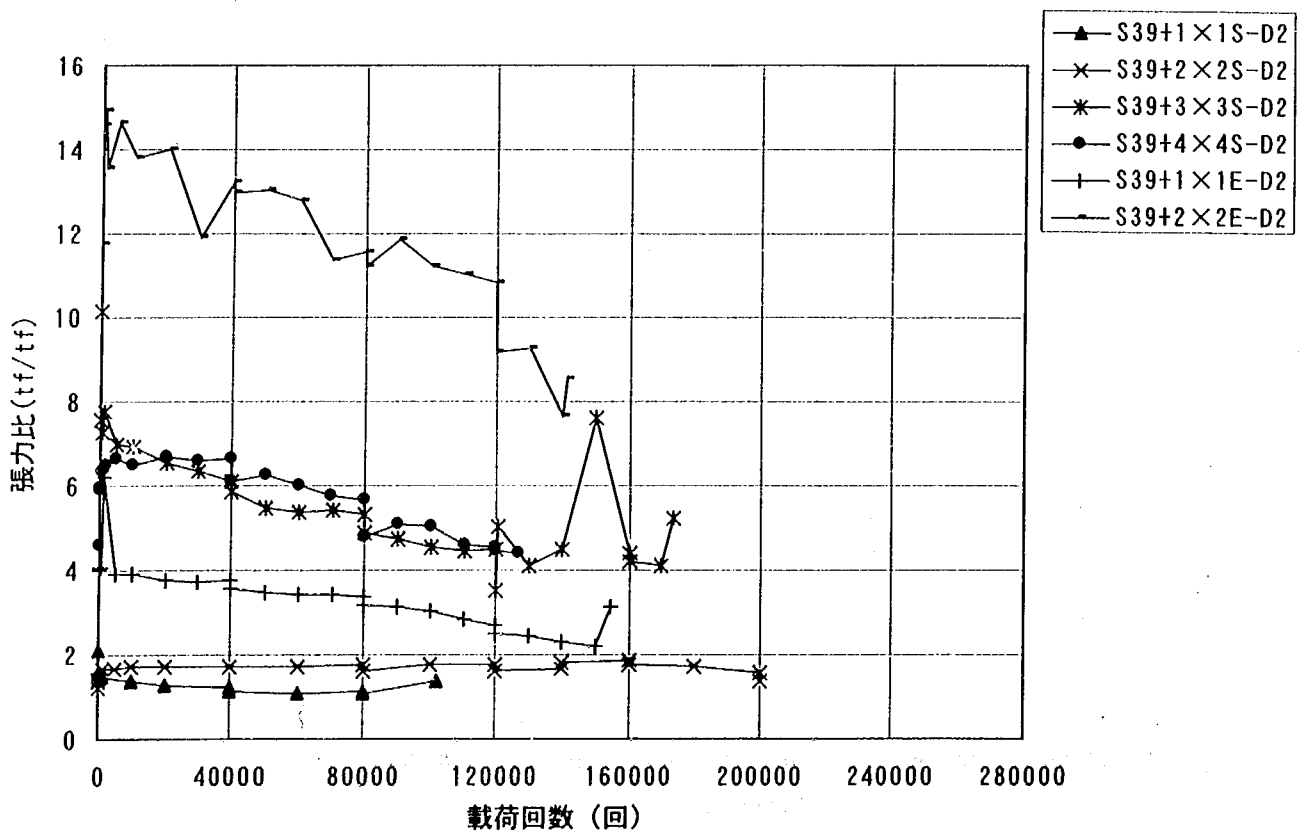


図7.2.14 配筋方向の鉄筋と炭素繊維シートの張力比 (活荷重時)

### 6.8.3 炭素繊維シート補強 RC 床版の破壊メカニズム

RC 床版の疲労破壊のメカニズムとしては、載荷荷重による曲げひび割れの発生、繰返し荷重による RC 床版下面のひび割れの RC 床版上部への進展、移動荷重によるせん断力、ねじりモーメントによる貫通ひび割れの発生、ひび割れのすり磨きによる床版コンクリートの劣化、押しぬきせん断による抜け落ちといったプロセスが松井らにより提案されている。

炭素繊維シートを RC 床版下面に接着することで RC 床版の曲げ剛性の向上によるたわみの減少、ひび割れの拘束によるひび割れ進展の抑止効果により、RC 床版の疲労耐久性が向上するものと考えられている。

炭素繊維シートで補強した RC 床版は、コンクリートに炭素繊維シートを接着した複合構造であり、RC 床版自体の疲労破壊メカニズムと同時に炭素繊維シートと床版コンクリートの付着部の疲労破壊メカニズムについても考慮する必要がある。RC 床版下面のひび割れを跨ぐ炭素繊維シートとコンクリートの付着領域には高いせん断応力（付着応力）が作用し、ひび割れ近傍で炭素繊維シートとコンクリートの付着疲労破壊が進行するものと考えられる（図 6.8.15）。

炭素繊維シートで補強した RC 床版の疲労破壊は、次の二つの要因に依存すると考えられる。

- ① RC 床版自体（コンクリート）の疲労
- ② コンクリートと炭素繊維シートの付着部の疲労

図 6.8.16 は、一定荷重下での RC 床版の疲労寿命と補強量との関係を、(a)荷重レベルが高い場合と(b)低い場合に分けて概念的に示したものである。荷重レベルが高い場合には、①の RC 床版自体の疲労に加え②の付着部の疲労の影響も考えられるため、①の要因で決まる寿命と補強量の関係を実線で示し、②の要因で決まる寿命と補強量の関係を破線で示す。荷重レベルが低い場合には、②の要因の影響は少なく、①の要因が主因と考えられる。

補強量の少ない場合や、荷重が低く付着応力度の低い場合では、①の RC 床版自体の疲労が支配的であり、通常の RC 床版と同様にひび割れの動きにより床版コンクリートが疲労し、この領域Ⅰでは補強量が増大するのに伴い疲労寿命も増加する。補強量の高い領域や荷重が高く付着応力度が高い領域Ⅱでは、②の付着部の疲労破壊が支配的であり、この範囲では補強量が増加するのに伴い付着応力度が高くなり付着部の疲労破壊が進行し、これに伴いひび割れの拘束効果も低減し床版コンクリートの疲労も進展すると考えられる。本実験では、階段載荷により高い荷重で実験を行っており、S39+2×2S-D2 を境界としてこれより CFRP の補強量の少ない S39+1×1S-D2 は①の領域、これより補強量の多い S39+3×3S-D2、S39+4×4S-D2、S39+1×1E-D2、S39+2×2E-D2 は②の領域に相当するものと考えられる。

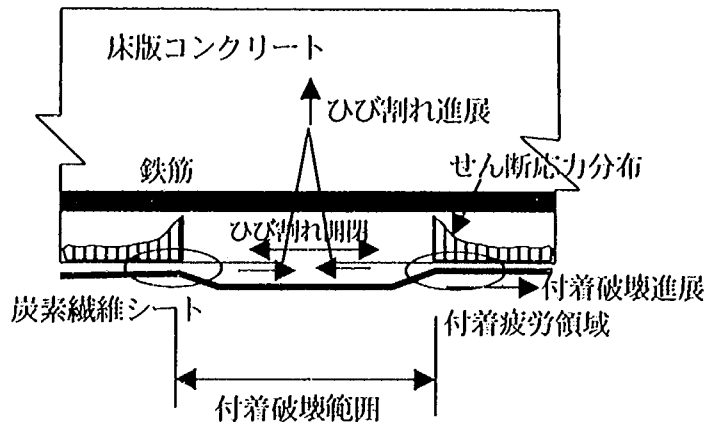


図 6.8.15 付着疲労の概念図

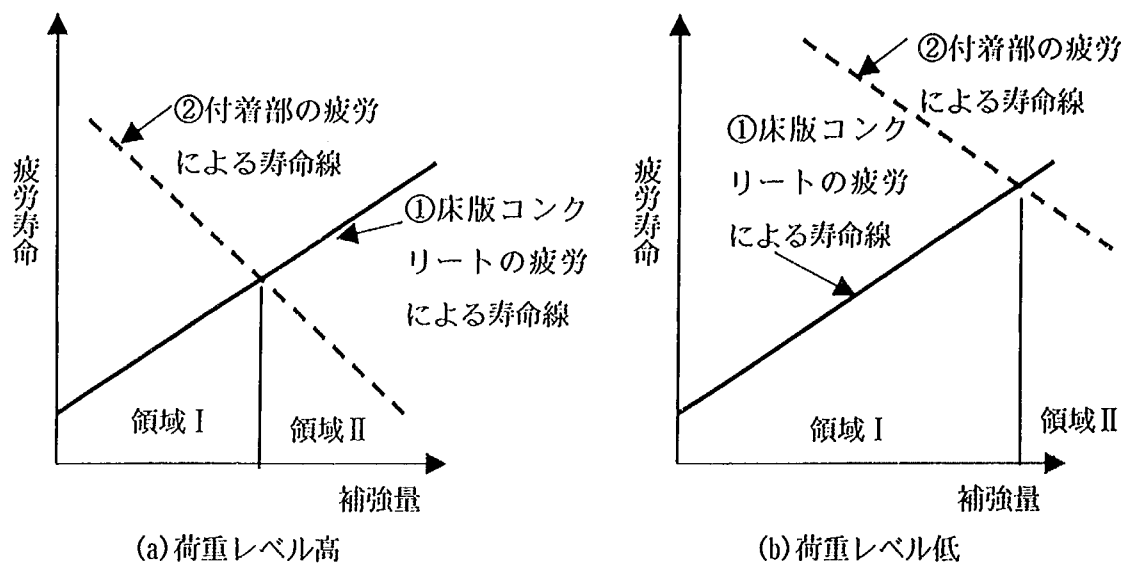


図 6.8.16 補強量と疲労寿命の概念図

## 7. まとめ

輪荷重走行試験機を用い、炭素繊維シートによる RC 床版の疲労耐久性の向上効果について検討した。以下に本年度の研究により明らかとなった知見について記述する。

- 1)古い基準で設計された RC 床版を、炭素繊維シートで補強することにより疲労耐久性は向上する。さらに、二方向のひび割れおよび貫通ひび割れが生じている程度の損傷を有する RC 床版に対しても、その効果が期待できる。
- 2)炭素繊維シートの補強量の増加に伴い、たわみおよび鉄筋のひずみは小さくなる。
- 3)炭素繊維シートの引張剛性 ( $E \cdot A$ )がある値を超えると、疲労耐久性は補強量の増加とともに減少する傾向を示した。本研究で行なった階段載荷の大きな荷重を受ける場合には、補強量が多くなるとシートが受け持つ引張力が大きくなり、コンクリートと炭素繊維シートの付着応力度が大きくなり付着疲労破壊の影響を受けていることが考えられるので、この影響を考慮する必要がある。

## 8. 今後の課題

これまでの研究では、主に炭素繊維シートの補強量をパラメータとした試験を行ない、その補強効果について検討した。今後の課題としては、以下に示すように、付着疲労破壊の影響、RC 床版の初期損傷度の影響、養生中の振動影響について検討する必要がある。

- 1) CFRP の引張剛性 ( $E \cdot A$ )、曲げ剛性 ( $E \cdot I$ ) が付着疲労破壊に及ぼす影響について検討する必要がある。また本研究では階段載荷により実際の自動車荷重より相当大きな荷重を載荷しているが、実際の自動車荷重レベルで付着疲労破壊が生じるか否か、荷重レベルおよび走行回数が付着疲労強度に及ぼす影響について確認する必要がある。
- 2) 本研究では、初期損傷度 II と一定の損傷を与えて補強を行ったが、補強前の損傷度が補強性能に及ぼす影響について検討する必要がある。
- 3) 施工直後のエポキシ樹脂養生中に RC 床版に作用する繰り返し荷重が、補強性能に及ぼす影響の有無について確認する。

今後これらの課題について検討を加え、炭素繊維シートの補強効果を明らかにすると共に、炭素繊維シートによる RC 床版の補強設計法の確立を図りたい。

#### 参考文献

- 1) 建設省土木研究所：土木研究所資料 橋梁点検要領（案），1997.12
- 2) 松井繁之、庄中憲、石井孝男、国原博司：23 年間供用された鋼道路橋 RC 床版の疲労試験、土木学会第 48 回年次学術講演会、1993
- 3) 森成道、松井繁之、若下藤紀、西川和廣：炭素繊維シートによる床版下面補強に関する研究、橋梁と基礎、1995-3
- 4) 西川和廣、神田昌幸、内田賢一：輪荷重走行試験機による道路橋床版の疲労試験、土木学会第 51 回年次学術講演会、1996
- 5) 高井 剣・松井繁之・林田充弘：「炭素繊維シートによる床版補強に関する研究」，土木学会第 52 回年次学術講演会、1997
- 6) 西川和廣、神田昌幸、内田賢一、淵上優子、宮崎和彦：炭素繊維シート接着工法による RC 床版の補強効果に関する実験的研究、土木学会第 52 回年次学術講演会、1997
- 7) 宇治公隆、西川和廣、内田賢一、松尾伸二：炭素繊維シートによる道路橋床版の補強に関する研究、コンクリート構造物の補強設計・施工の将来像シンポジウム論文集、土木学会、1998

