

土 木 研 究 所 資 料

衝撃荷重を受けるPRC桁の応答特性

平成5年3月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

Copyright © (1993) 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。

衝撃荷重を受けるPRC桁の応答特性

(前) 構造橋梁部 構造研究室 室長 横山 功一*
構造橋梁部 構造研究室 室長 佐藤 弘史
構造橋梁部付 (併任) 大塚 久哲**
構造橋梁部 構造研究室 長尾 彰洋

*現 在：(財)先端建設技術センター 先端建設技術研究所 研究第一部長

**本務先：建設省建築研究所 国際地震工学部 第二耐震工学室長

要 旨

本研究では、ロックシェッド桁の衝撃耐力の増加を図るための新しい部材として、施工性に優れたPC桁と耐衝撃性に優れた靱性の高いRC桁の中間的な特性を備えたPRC桁に着目し、同桁模型に対して静的載荷試験及び衝撃載荷試験を行った。

本研究により、PRC桁における静的耐力と衝撃耐力の関係、エネルギー吸収性能、PC桁やRC桁との応答の相違点等に関していくつかの知見が得られた。

キーワード： PRC桁、衝撃荷重、衝撃耐力、エネルギー吸収性能

目 次

まえがき	1
1. 研究の目的	2
2. 試験の概要	2
2.1 静的載荷試験	2
2.2 衝撃載荷試験	2
3. 試験体	3
3.1 試験体の製作条件及び形状寸法	3
3.2 試験体破壊荷重の算定	5
3.3 材料試験	7
4. 静的載荷試験	8
4.1 試験概要	8
4.2 計測要領	8
4.3 試験結果（P R C桁試験体No. 1）	10
5. 衝撃載荷試験	15
5.1 試験概要	15
5.2 計測要領	15
5.3 データのまとめ方	16
5.4 衝撃載荷試験結果	19
5.4.1 P R C桁試験体No. 2の試験結果	19
5.4.2 P R C桁試験体No. 3の試験結果	32
5.4.3 P R C桁試験体No. 4の試験結果	43
5.5 試験結果比較	54
5.5.1 載荷方法に関する検討	54
5.5.2 落下高さの影響	54
5.5.3 衝撃エネルギーと位置エネルギーの関係	59
5.5.4 残留ひずみの検討	59
6. 実験の総括とP C，R C桁との比較	64
6.1 P R C桁の特性	64
6.2 各種桁の特性比較	64
あとがき	70

まえがき

現在のロックシェッドは材質上、P C構造、R C構造及び鋼構造に分類される。一般には、P C構造とR C構造が広く用いられているが、P C構造はR C構造に比べ、施工性に優れるものの靱性性能で劣るといわれている。

本研究では、ロックシェッド桁の衝撃耐力の増加を図るために、施工性の面で優れたP C桁と耐衝撃性の面で靱性の高いR C桁の両方の特性を備えたP R C桁に着目し、同桁模型に対して静的載荷試験および衝撃載荷試験を行った。

本実験により、P R C桁における静的耐力と衝撃耐力の関係、エネルギー吸収性能、P C桁及びR C桁の応答との相違点等に関して、いくつかの知見が得られた。

1. 研究の目的

本研究では、落石覆工の衝撃耐力の増加と施工性の改善を図るために、RC構造とPC構造の複合的構造としてのPRC桁に着目し、PRC桁模型に対して静的荷重載荷試験及び衝撃荷重載荷試験を実施したものである。

この実験によりPRC桁の衝撃荷重に対する応答特性を明らかにし、さらに既に実験を終了しているPC桁及びRC桁の応答特性との相違点を明らかにすることを本研究の目的とする。

2. 試験の概要

本研究の試験内容は、大別して下記に示す2項目からなる。

①静的載荷試験

②衝撃載荷試験

以下にこれらの内容を示す。

2.1 静的載荷試験

静的載荷試験は、試験体1体について、著しい変形が生じるまで載荷し、荷重-変位曲線、荷重-ひずみ曲線を作成するとともに、その結果を考察した。また標準円柱形供試体にて圧縮強度試験を行い、コンクリートの圧縮強度及び弾性係数等について整理した。

2.2 衝撃載荷試験

衝撃載荷試験は、衝撃載荷装置を使用し、3体について試験した。計測は、衝撃荷重、重錘加速度、桁加速度、桁変位、鋼材ひずみの5項目を行った。これらの計測結果から、時刻歴波形図を作成するとともに、荷重-変位曲線、荷重-ひずみ曲線等を作成し、その結果を整理した。

試験方法としては、まず1体目は重量0.5tの重錘の落下高さを段階的に上げて行き、破壊に至るまで試験を行った。2体目、3体目はそれぞれ1体目の破壊落下高さの約1/3、2/3の位置から試験を開始し、高さを変化させて破壊に至るまで試験した。

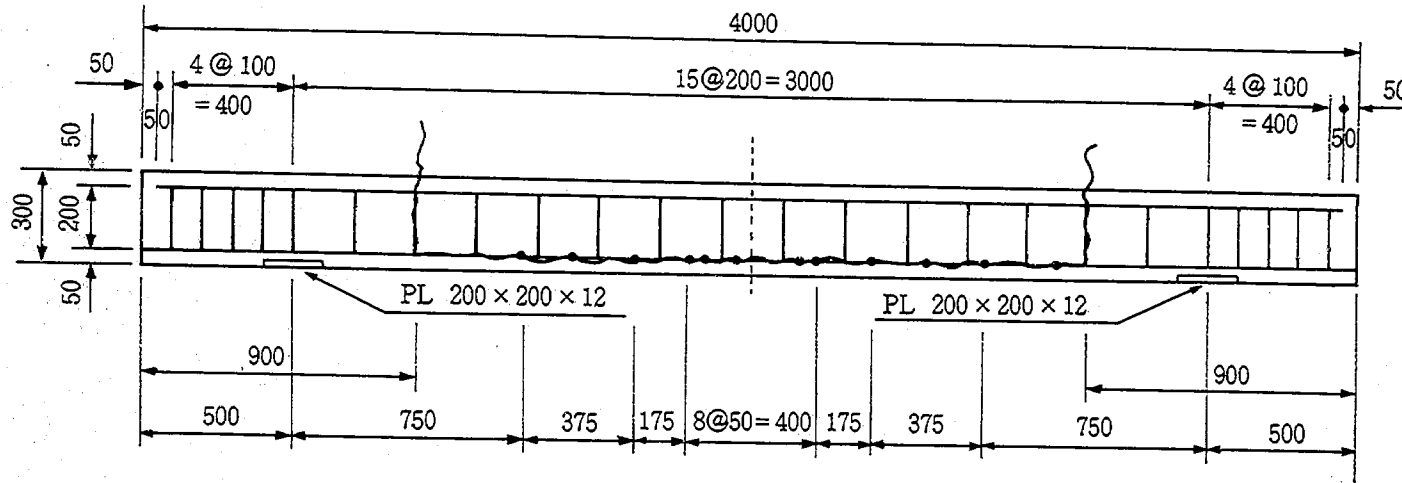
3. 試験体

3.1 試験体の製作条件及び形状寸法

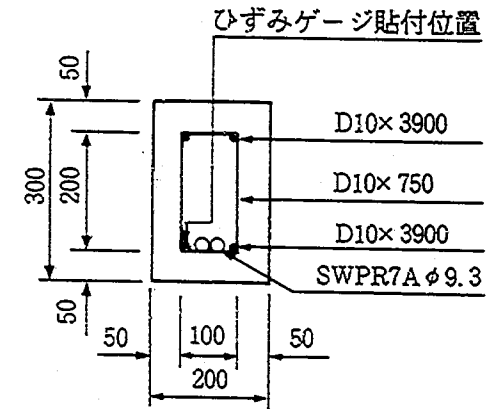
静的載荷試験及び衝撃載荷試験に用いる試験体は、過去に行われたP C桁とR C桁の実験¹⁾を考慮し下記の条件で製作した。

- (1) P R C桁の推定破壊荷重は 6.73 t とする。(推定破壊荷重の項 参照)
- (2) 試験装置の規模から、試験体は矩型断面(縦300mm×横200mm)とし、部材の全長は 4 mで支間長 3 mとする。一般図を図-3.1に示す。
- (3) 主筋に相当する鋼材は、P C鋼より線(SWPR7A9.3mm 7本より)を内側に配置し、同一平面内で組立鉄筋としての異形鉄筋(SD295A・D10)を外側に配置する。
- (4) 主鉄筋には、ひずみゲージを貼付するものとする。

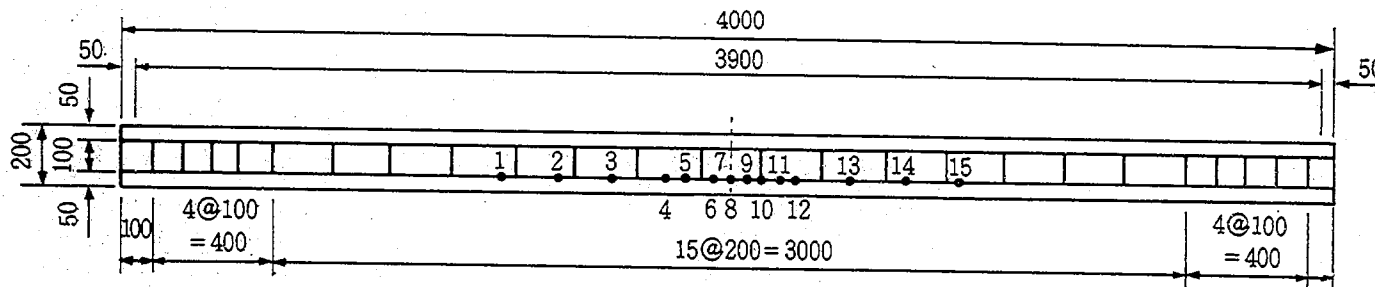
側面図



断面図



背面図



凡例

- ・ ひずみゲージ15枚
- 引張鋼材 (D10)

図-3.1 試験体形状寸法 (単位mm)

3.2 試験体の破壊荷重の算定

破壊抵抗曲げモーメント (M_u) の算出式:

$$M_u = 0.93 \sigma_{pud} A_p (d_p - 0.4 x_p) + \sigma_{syd} A_s (d_s - 0.4 x_s)$$

$$\text{ここに } x_p = \frac{0.93 \sigma_{pud} A_p}{0.68 b \sigma_{cd}}, \quad x_s = \frac{A_s \sigma_{syd}}{0.68 b \sigma_{cd}}$$

ただし、上の式は鋼材降伏先行型の場合であり、以下の条件を満足する場合に成立する。

$$\frac{A_p}{b d_p} + \frac{A_s}{b d_s} \cdot \frac{\sigma_{syd}}{0.93 \sigma_{pud}} \cdot \frac{d_s}{d_p} \leq p_o \left(= \frac{0.68 \varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + 0.015} \cdot \frac{\sigma_{cd}}{0.93 \sigma_{pud}} \right)$$

記号の説明

- σ_{pud} : P C 鋼材の引張強さ
- σ_{syd} : 鉄筋の降伏点
- A_p : P C 鋼材量
- A_s : 引張鋼材量 (鉄筋)
- d_p : P C 鋼材の有効高さ
- d_s : 鉄筋の有効高さ
- x_p : 圧縮縁から P C 鋼材に対する中立軸までの距離
- x_s : 圧縮縁から鉄筋に対する中立軸までの距離
- σ_{cd} : コンクリートの設計基準強度
- b : 圧縮フランジの有効幅
- p_o : 終局つり合い鋼材比
- ε_{cu} : コンクリートの終局ひずみ ($\varepsilon_{cu} = 0.0035$)

設計強度 (σ_{cd}) = 400 kg/cm² に対して計算すると、

$$\begin{aligned} \frac{A_p}{b d_p} + \frac{A_s}{b d_s} \cdot \frac{\sigma_{syd}}{0.93 \sigma_{pud}} \cdot \frac{d_s}{d_p} &= \frac{1.0322}{20 \times 25} + \frac{1.4266}{20 \times 25} \times \frac{3000}{0.93 \times 17500} \times \frac{25}{25} = 0.00259 \\ p_o &= \frac{0.68 \times 0.0035}{0.0035 + 0.015} \times \frac{400}{0.93 \times 17500} = 0.00316 \\ 0.00259 &< 0.00316 \end{aligned}$$

したがって鋼材降伏先行型の破壊形式となる。

$$x_p = \frac{0.93 \times 17500 \times 1.0322}{0.68 \times 20 \times 400} = 3.09 \text{ cm}$$

$$x_s = \frac{1.4266 \times 3000}{0.68 \times 20 \times 400} = 0.79 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} M_u &= 0.93 \times 17500 \times 1.0322 \times (25 - 0.4 \times 3.09) + 3000 \times 1.4266 \times (25 - 0.4 \times 0.79) \\ &= 399212 + 105642 = 504855 \text{ kg} \cdot \text{cm} = 5.05 \text{ t} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

よって推定破壊荷重 P_u は

$$P_u = \frac{4}{l} M_u = \frac{4}{3} \times 5.05 = 6.73 \text{ t}$$

D10, 2本 ($A = 0.7133 \text{ cm}^2$)

2本で $A_s = 1.4266 \text{ cm}^2$

$\phi 9.3$, 2本 ($A = 0.5161 \text{ cm}^2$)

2本で $A_p = 1.0322 \text{ cm}^2$

鋼棒 $\sigma_{sy} = 3000 \text{ kg/cm}^2$ (降伏点)

P C 鋼より線 $\sigma_{su} = 17500 \text{ kg/cm}^2$ (引張強度)

参考のために鉄筋の降伏モーメントを計算すると、

$$\begin{aligned} M_y &= A_s \cdot \sigma_{sy} \left(d - \frac{1}{2} \frac{A_s \sigma_{sy}}{0.85 \sigma_{ck} \cdot b} \right) \\ &= (1.0322 + 1.4266) \times 3000 \times \left(25 - \frac{1}{2} \times \frac{2.4588 \times 3000}{0.85 \times 400 \times 20} \right) \\ &= 180409 \text{ kg} \cdot \text{cm} \\ &= 1.804 \text{ t} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

$$\therefore P_y = \frac{4}{3} \times 1.804 = 2.51 \text{ t}$$

3.3 材料試験

試験体の7日強度がNo.1では406kg/cm²、No.2では402kg/cm²、No.3では436kg/cm²、No.4では439kg/cm²という結果(平均値421kg/cm²)が得られた。

また、試験体の実験時の圧縮強度と弾性定数を調べるためにコンクリート圧縮強度試験を行った。表-3.1に試験結果を示す。これは各供試体に対して3本ずつの試験体を製作して行った試験結果の平均値である。圧縮強度としては、設計基準強度400kg/cm²に対し、平均値で472~550kg/cm²であった。

表-3.1 コンクリート圧縮強度試験結果

試験体 番号	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性定数 (×10 ⁵ kg/cm ²)	
		E _e (接線)	E _y (割線)
No. 1	492.3	2.879	2.408
No. 2	472.4	2.929	2.624
No. 3	550.0	2.989	2.496
No. 4	537.4	3.039	2.590

4. 静的載荷試験

4.1 試験概要

静的載荷試験は、本研究所所有の衝撃載荷装置（静的載荷機能）を使用し、油圧ジャッキ（定格出力50t）を取り付けて行った。荷重は0.2t刻みで載荷していき、荷重の増加が得られなくなっているからは、変位量の増加が5mm毎の挙動を破壊に至るまで調査した。（試験の全景を写真－4.1に示す。）

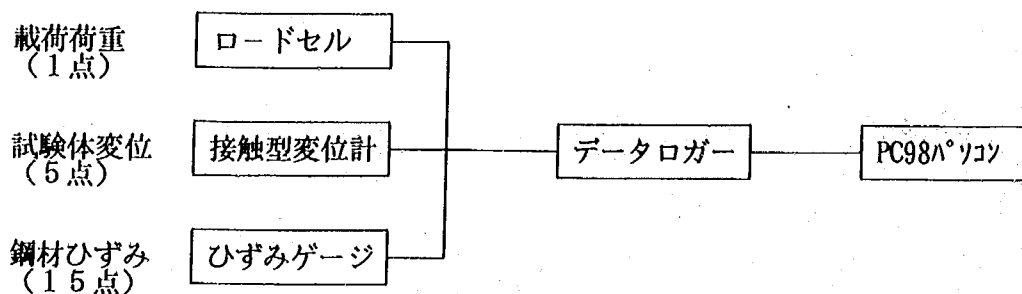
なお載荷時には衝撃試験と同様に載荷板を使用して行った。



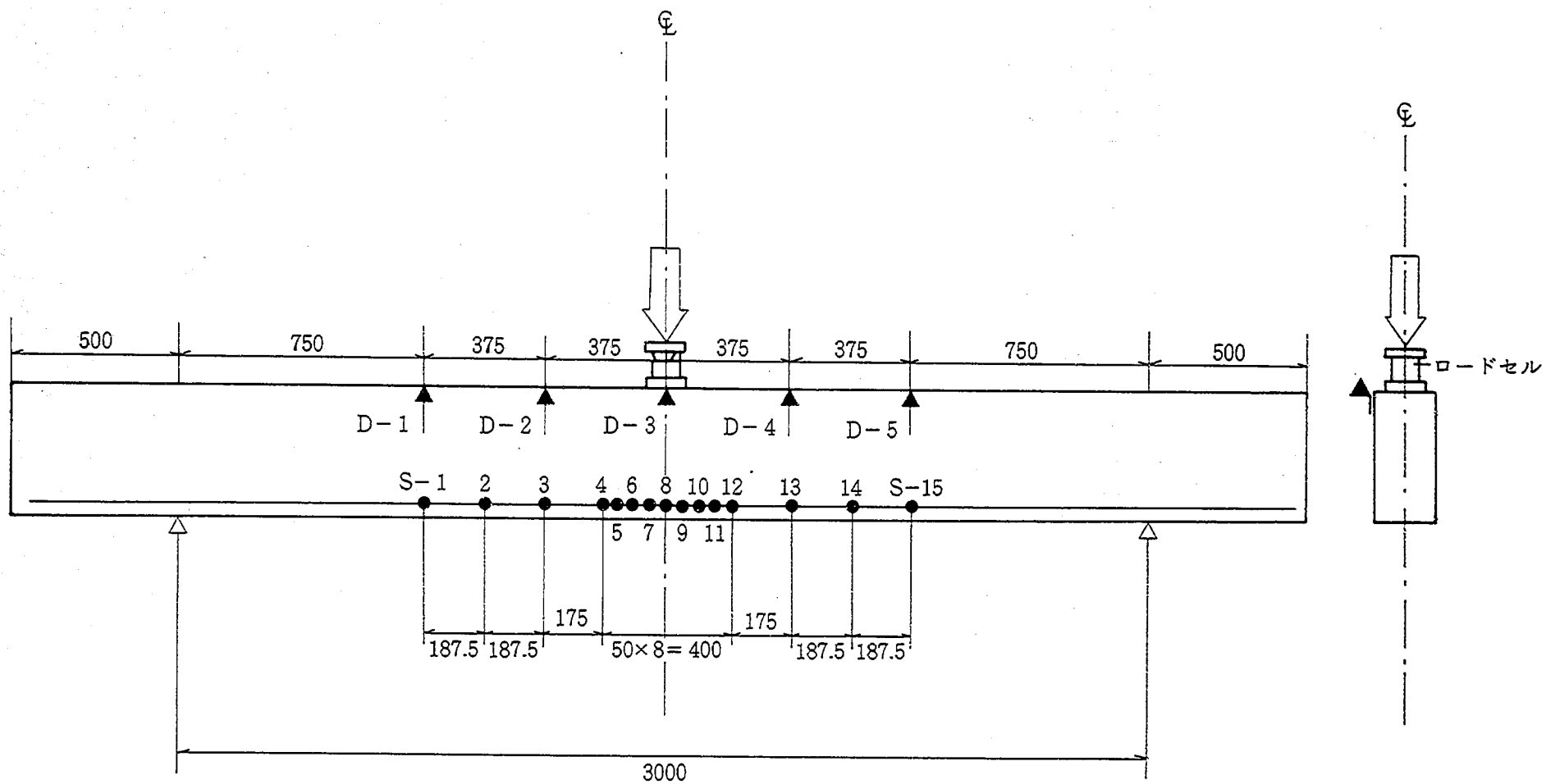
写真－4.1 静的載荷試験全景

4.2 計測要領

静的載荷試験に使用する各計測器の配置は図－4.2に示す。計測は図－4.1に示すように、ロードセルにより載荷荷重、接触型変位計により試験体鉛直変位、試験体埋設ひずみゲージにより鋼材ひずみを測定し、それらのデータをデータロガーにより収集した。また破壊パターンについて調べるために、ひびわれ発生後、載荷ステップ毎に写真撮影を行った。



図－4.1 計測ブロック図



- ▲ — 接触型変位計
- — 鋼材ひずみ

図-4.2 計測器配置図

4.3 試験結果（P R C桁試験体No.1）

試験結果を以下の図表に示す。

表-4.1 計測成分表（静的載荷試験）、図-4.3 荷重-変位曲線、図-4.4 荷重-ひずみ曲線
本試験の載荷状況は次のとおりである。

P=7.4 t(桁中央変位 15.8mm)まで 0.2 t刻みで載荷。

P=7.5 t まで載荷した後、荷重は増加しなかった。

桁中央変位 19.3 ~ 75.3mm まで約5mm 刻みで載荷。

損傷状況はP=4.0tでクラックが発生し、P=6.8tでS-6, 7, 10のゲージが降伏した。その後損傷が進行し、最大荷重発生後（P=7.5t）は、上記のように桁中央変位で制御し載荷した。変位制御載荷中、変位を60mmから65mmにする途中でP C 鋼より線が1本破断し、70mmから75mmに変位制御する間にもう片方のP C 鋼より線が破断し、最大変位75.3mmで試験を終了した。最終的には図-4.5に示すように合計8箇所のひび割れが発生し、ジャッキ直下ではコンクリートの圧潰が見られた。

表-4.1 計測成分表（静的載荷試験）

No.	記号	単位	計測内容
1	LOAD	TON	載荷荷重（ロードセル）
2	D-1	mm	鉛直変位 南側からD-1～D-5 D-3が桁中央
3	D-2	mm	
4	D-3	mm	
5	D-4	mm	
6	D-5	mm	
7	S-1	μ	引張側主鉄筋ひずみ 南側からS-1～S-15 S-8が桁中央
8	S-2	μ	
9	S-3	μ	
10	S-4	μ	
11	S-5	μ	
12	S-6	μ	
13	S-7	μ	
14	S-8	μ	
15	S-9	μ	
16	S-10	μ	
17	S-11	μ	
18	S-12	μ	
19	S-13	μ	
20	S-14	μ	
21	S-15	μ	

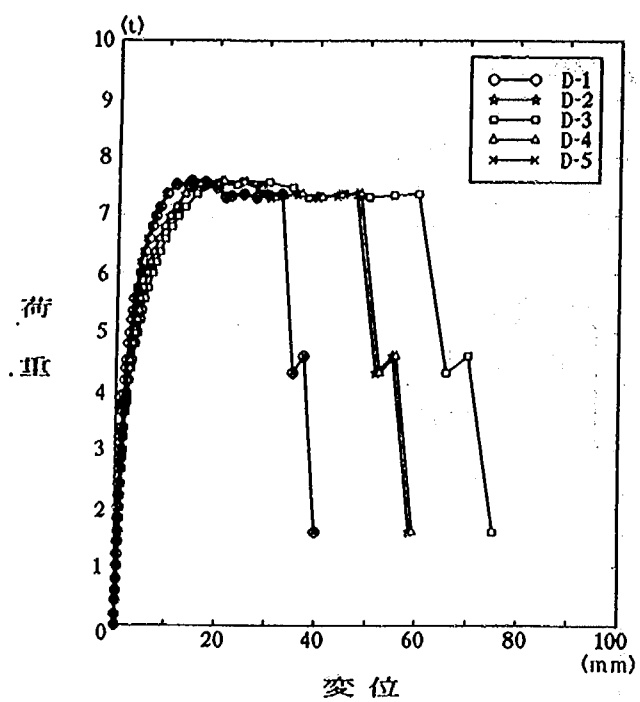


図-4.3 荷重-変位曲線

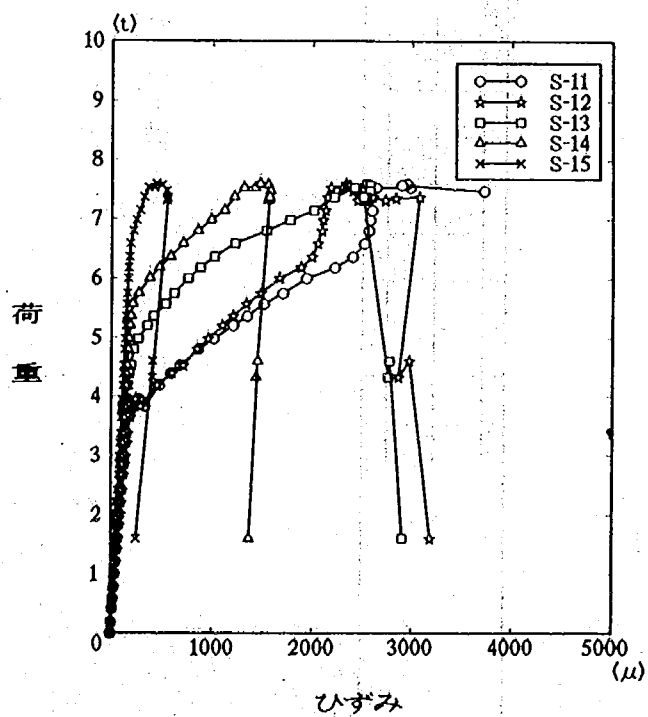
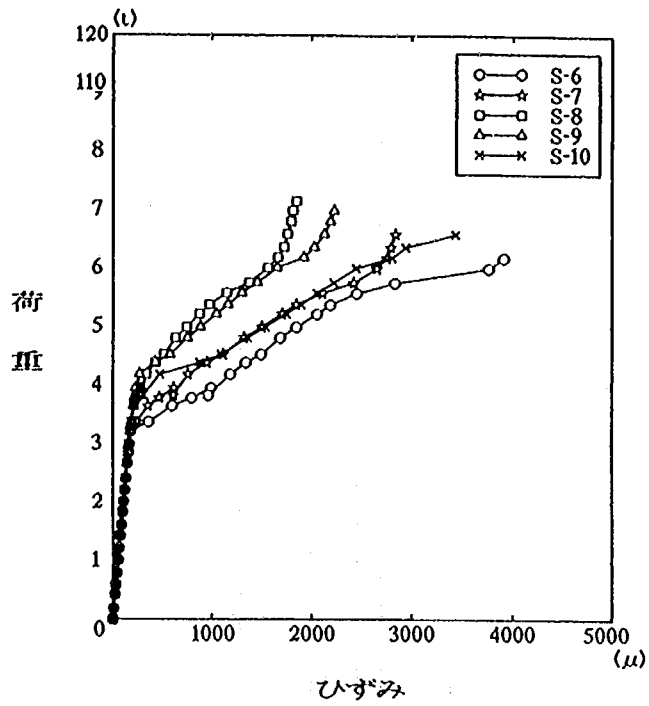
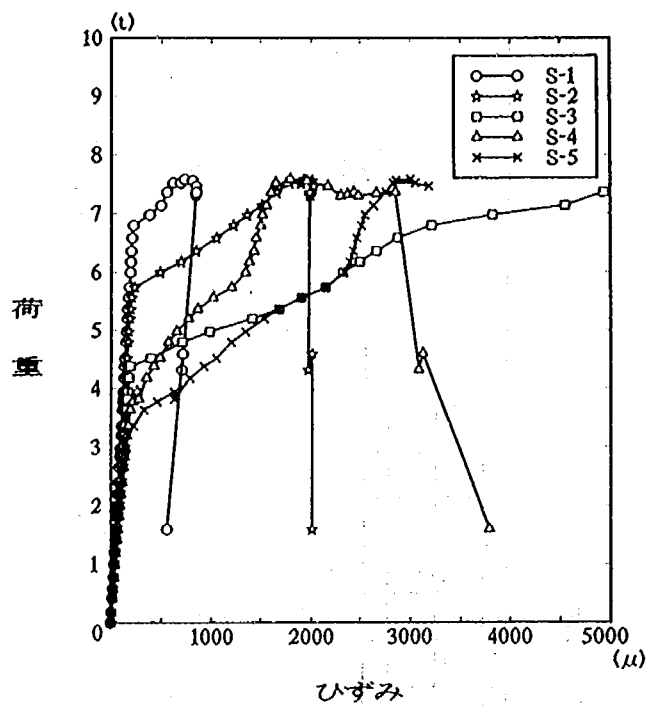
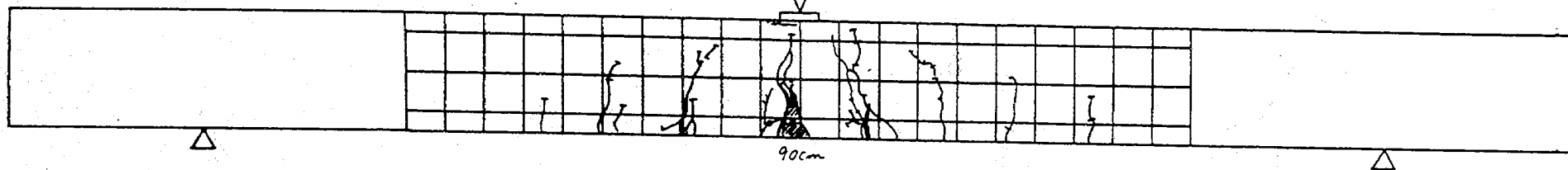


図-4.4 荷重-ひずみ曲線

No. 1 東側

桁中央変位 = 75mm



西側

桁中央変位 = 75mm

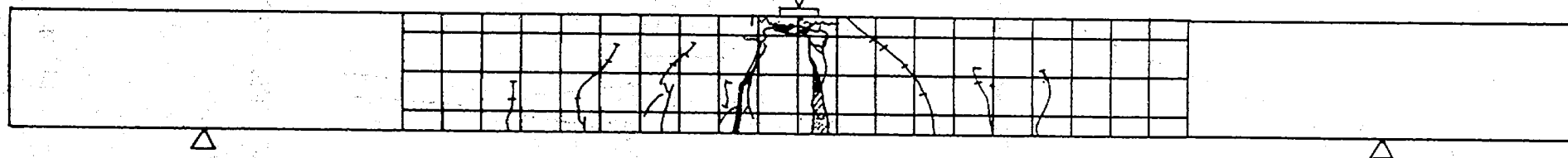


図-4.5 損傷状況図

5. 衝撃載荷試験

5. 1 試験概要

衝撃載荷試験は、本研究所所有の衝撃載荷装置を使用して実施した。(全景を写真-5. 1に示す。) 衝撃載荷試験に用いた重錘の重量は500kgとし、自由落下に近い状態で載荷した。載荷方法は漸増繰り返し載荷を行った。1体目は高さ5cmから開始し、10cmからは10cmピッチで落下高さを増していき、破壊に至るまでの挙動をとらえるように衝撃載荷試験を行った。2体目、3体目は1体目の破壊落下高さをもとに40cm、60cmから開始し、10cmピッチで衝撃載荷試験を行った。

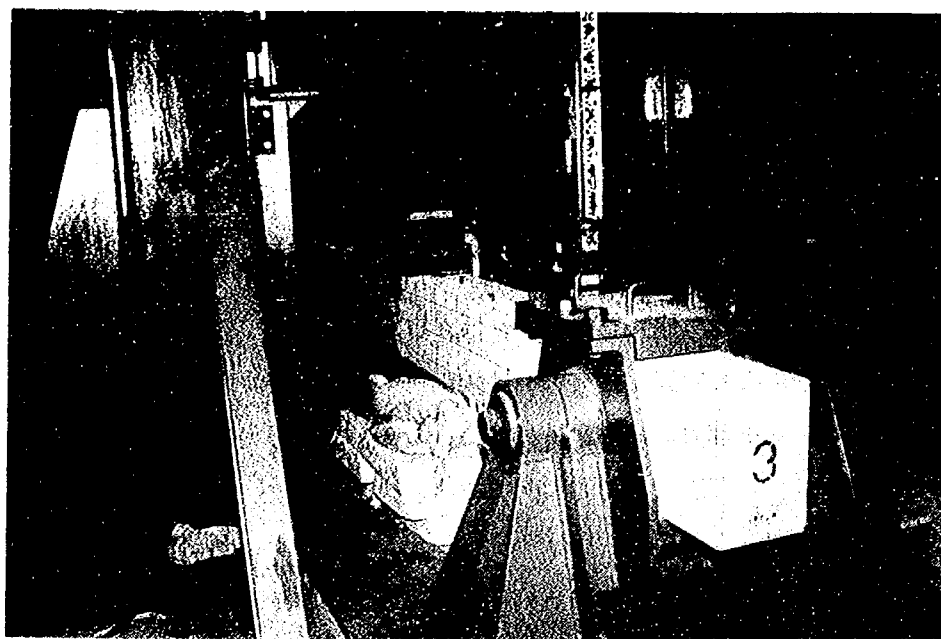


写真-5. 1 衝撃載荷試験全景

5. 2 計測要領

計測は図-5. 1に示すように加速度計により重錘・桁加速度、ロードセルにより載荷荷重、変位計により試験体鉛直変位、試験体埋設ひずみゲージにより鋼材ひずみを測定し、デジタルデータレコーダー、PCMデータレコーダーに収録した。

破壊パターンを調べるため載荷1回毎にひびわれ部分が見えるように写真撮影を行った。また、これと同時に残留変位量も計測した。

各計測器の配置については、図-5. 2に示すとおりとする。

データレコーダーへのデータ収録仕様を以下に示す。

- ・収録内容：重錘及び桁加速度、載荷荷重、試験体変位、ひずみ
- ・収録回数：合計20回（試験体No.2：10回、試験体No.3：6回、試験体No.4：4回）
- ・サンプリング周波数：2000Hz
- ・収録時間：落下直前から桁の振動が納まるまでの間（約6秒）

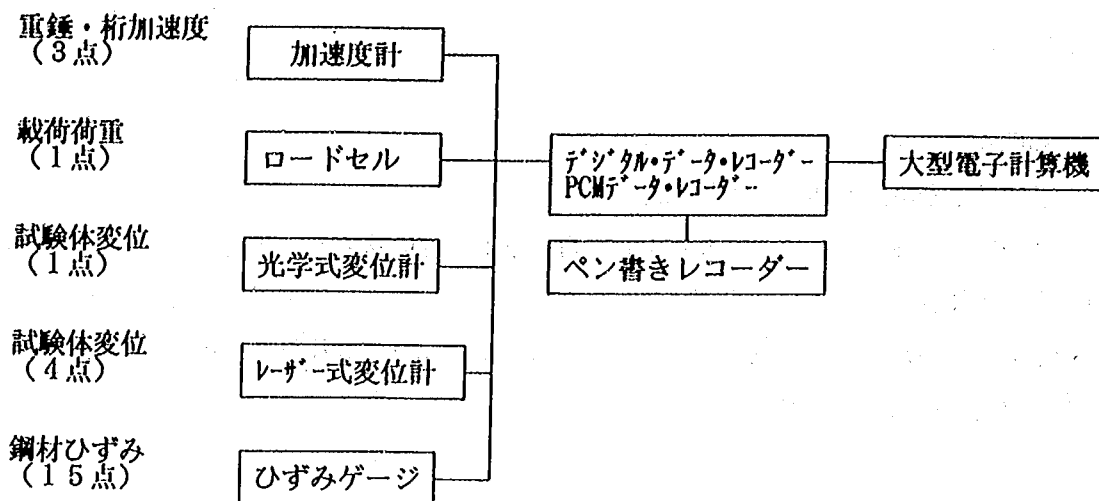


図-5.1 計測ブロック図

5.3 データのまとめ方

(1) 時刻歴波形図の作成

PCMデータレコーダーにより収録したデータはAD変換を行い、較正値を乗じて実波形とする。デジタルデータレコーダーにより収録したデータは較正値を乗じて実波形とする。実験時及びAD変換時のデータ収録には実験データ部の前後が含まれているので、これを実験データ部のみ(0.2秒程度)に整理する。なお、サンプリング間隔は1/2000 secである。

(2) 衝撃力の算定

ロードセル及び重錘加速度計により測定された衝撃波形から衝撃力の算定を行う。

$$\text{衝撃力} \quad P = \text{重錘の加速度} \times \text{重錘の質量}$$

$$\text{衝撃力} \quad P = \text{ロードセルの最大荷重}$$

これらの衝撃力の値と重錘の位置エネルギーを対比させて整理する。

(3) 衝撃荷重-変位、ひずみのとりまとめ

ロードセルによる衝撃荷重と、これに対応する供試体変位、鋼材ひずみの値を求める。変位及び鋼材ひずみは波形の最大値を用いる。

(4) 静的載荷試験結果との比較

静的載荷試験での荷重-変位、ひずみ曲線と衝撃載荷試験での衝撃力-変位、ひずみ曲線とを対比させる。

(5) 衝撃吸収エネルギーの算定

荷重と桁変位の関係から衝撃吸収エネルギーを算定する。衝撃吸収エネルギーは、ロードセルの荷重と桁最大変位までの、荷重と変位の積より求めるものとする。この算出方法を以下に示す。

衝撃エネルギーの算出方法（荷重と桁変位の関係から求める方法）

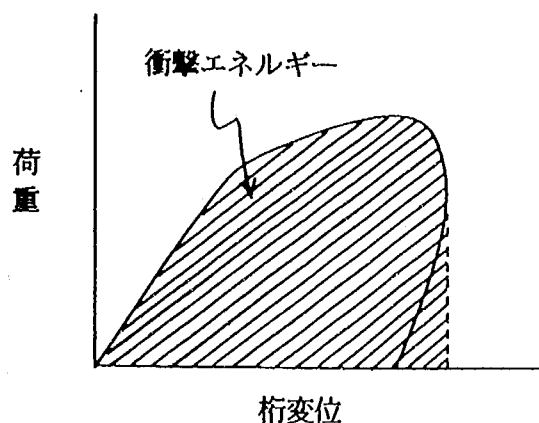
図－５．３に荷重と桁変位の履歴曲線を示す。図中の斜線部の面積は、荷重と桁変位の積で表され、衝撃荷重を受け桁が変形する過程における桁の衝撃吸収エネルギーと考えられる。よって衝撃エネルギーは次式で計算される。

$$\text{衝撃吸収エネルギー}(E) = \int \text{荷重}(P) d\delta$$

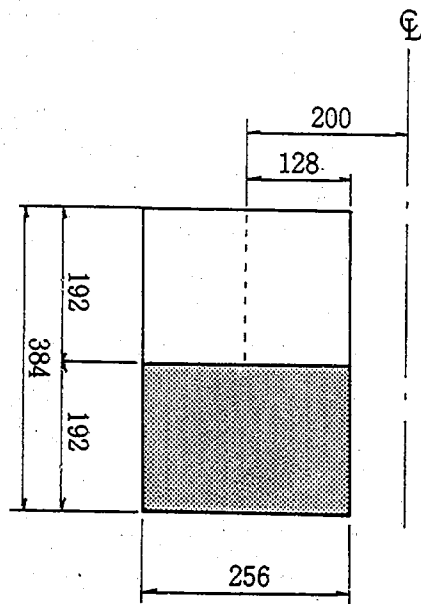
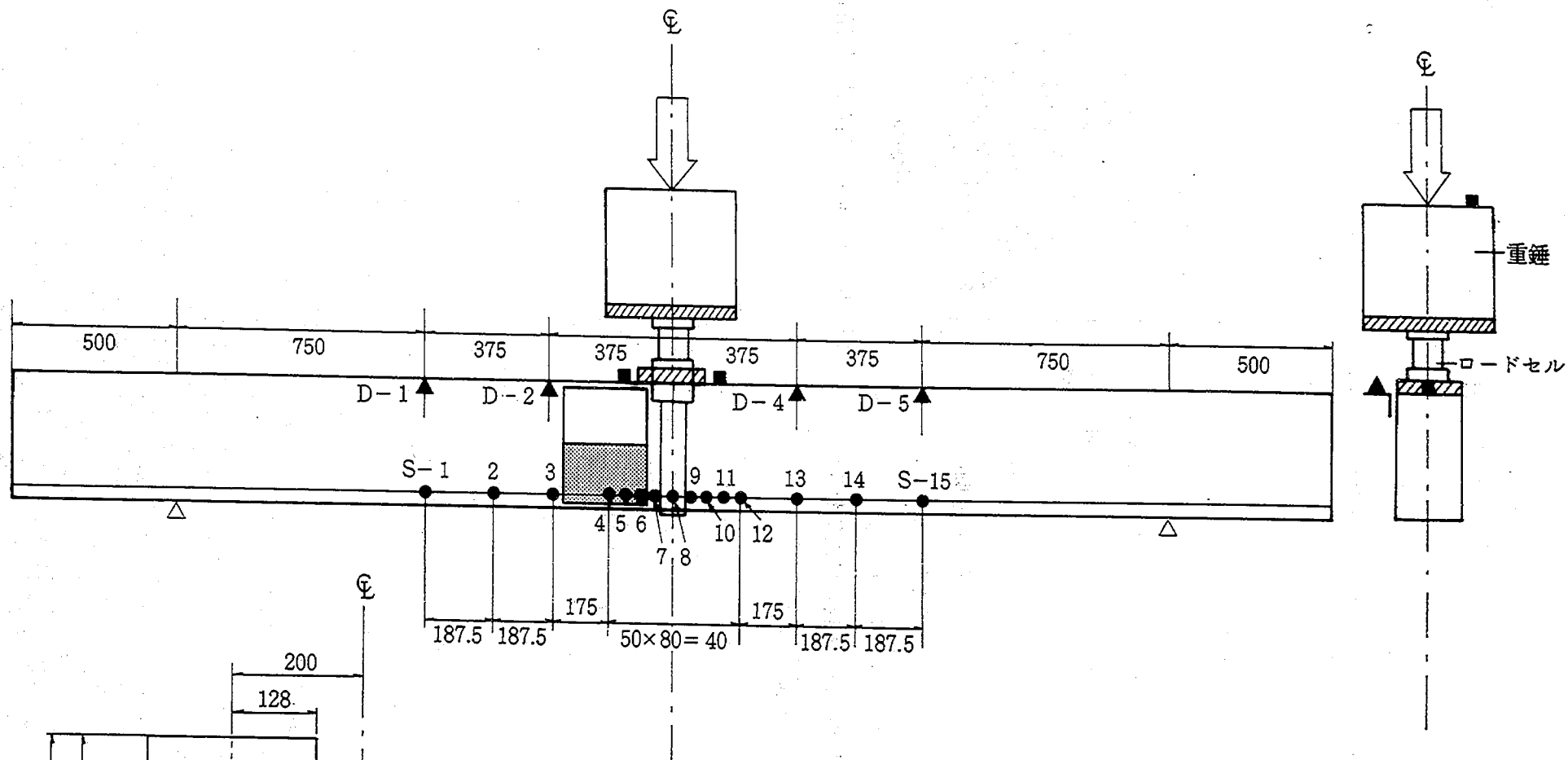
ただし、積分は桁が破壊しない場合は最大変位まで行い、桁が破壊した場合には、荷重が０kgとなるまでの変位に対して行うものとする。

ここで求まる衝撃吸収エネルギーの単位はtf・mmとなり、重錘が有する位置エネルギーと同単位となる。衝撃吸収エネルギーと位置エネルギーを対比することにより、その大きさを定量的に把握することが可能となる。

衝撃吸収エネルギーの算出に用いる荷重は衝撃荷重を直接的に計測したロードセルの値を使用する。



図－５．３ 荷重と桁変位の履歴曲線



OPT ターゲット詳細図

図-5.2 計測器配置図

注) 桁加速度はセンターより150mmの位置

- ▲ — 変位計
- — 鋼材ひずみ
- — 加速度計

5. 4 衝撃載荷試験結果

5. 4. 1 PRC桁試験体No. 2の試験結果

衝撃載荷試験は次の表- 5. 1 に示すような計測成分で行った。

重錘重量 $W = 0.5 \text{ t}$

載荷ステップ

落下高さ $H = 5 \text{ cm}$

落下高さ $H = 10 \sim 90 \text{ cm}$ (10cmピッチで増加)

試験結果を以下の図表に示す。

図- 5. 4 損傷状況図

図- 5. 5 荷重-落下高さの関係

図- 5. 6 荷重-変位曲線

図- 5. 7 荷重-ひずみ曲線

図- 5. 8 荷重と桁中央変位の履歴曲線

図- 5. 9 衝撃エネルギー-落下高さの関係

表- 5. 2 桁の衝撃吸収エネルギー

図- 5. 7 に示すとおり主鉄筋の残留ひずみはS-1, 2, 3, 6, 10, 11, 14, 15のゲージで引張（プラス）、桁中央であるゲージ（S-4, 5, 7, 8, 9, 12, 13）では圧縮（マイナス）が記録された。損傷状況は、落下高さ $H = 10 \text{ cm}$ でクラックが始まり $H = 30 \text{ cm}$ で桁上面からもクラックが発生した。 $H = 80 \text{ cm}$ 以上になると新たなクラックは認められず、クラック幅のみ増加が見られた。 $H = 90 \text{ cm}$ でP C鋼より線が2本とも破断し試験体が、クッション材に落下した。

表-5.1 計測成分表（衝撃載荷試験）

No	記号	単位	計測内容
1	LOAD	TON	載荷荷重（ロードセル）
2	A- 1	G	重錘加速度
3	A- 2	G	桁加速度（南側）
4	A- 3	G	桁加速度（北側）
5	O P T	mm	鉛直変位 〔南側からD-1～D-5 O P Tが桁中央〕
6	D- 1	mm	
7	D- 2	mm	
8	D- 4	mm	
9	D- 5	mm	
10	S- 1	μ	引張側主鉄筋ひずみ 〔南側からS-1～S-15 S-8が桁中央〕
11	S- 2	μ	
12	S- 3	μ	
13	S- 4	μ	
14	S- 5	μ	
15	S- 6	μ	
16	S- 7	μ	
17	S- 8	μ	
18	S- 9	μ	
19	S-10	μ	
20	S-11	μ	
21	S-12	μ	
22	S-13	μ	
23	S-14	μ	
24	S-15	μ	

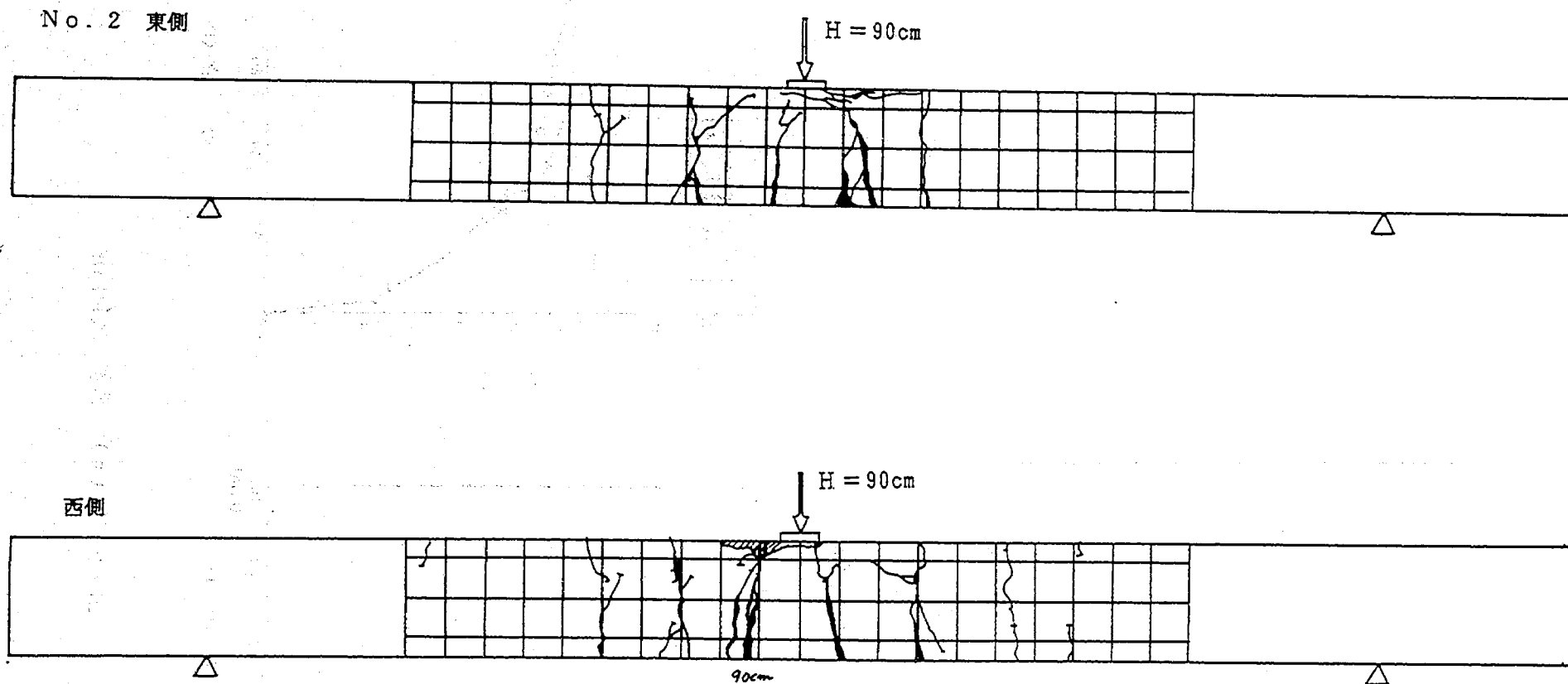


図 - 5 . 4 損傷状況図

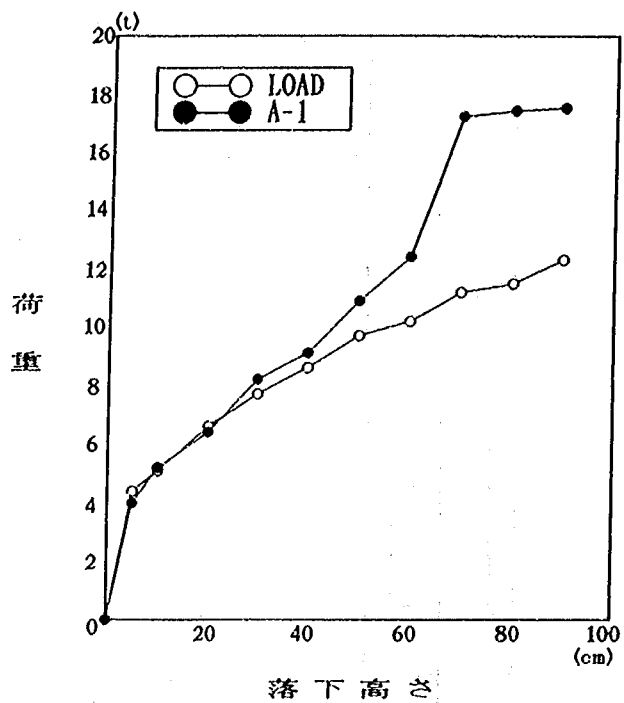


図-5.5 荷重-落下高さの関係

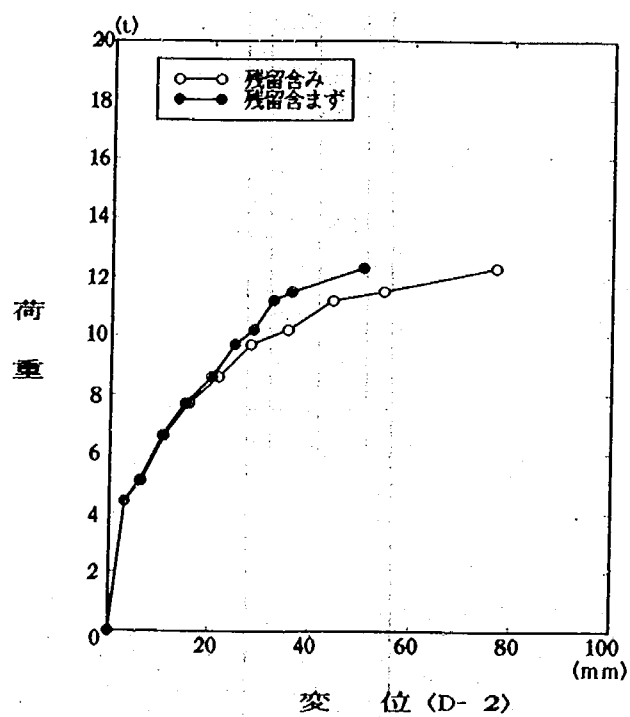
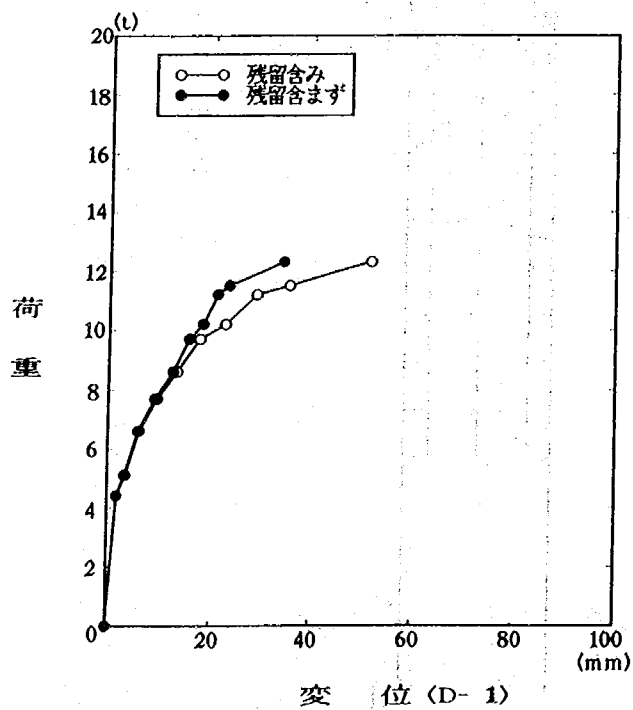


図-5.6(a) 荷重-変位曲線

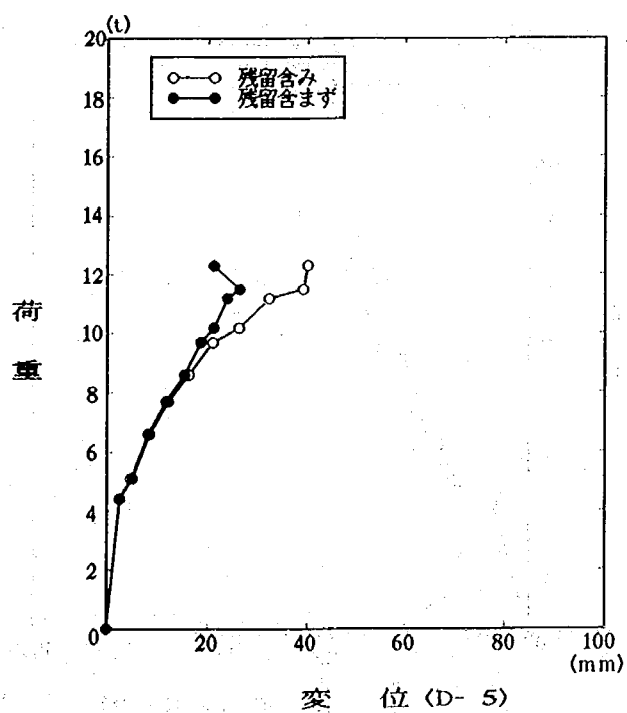
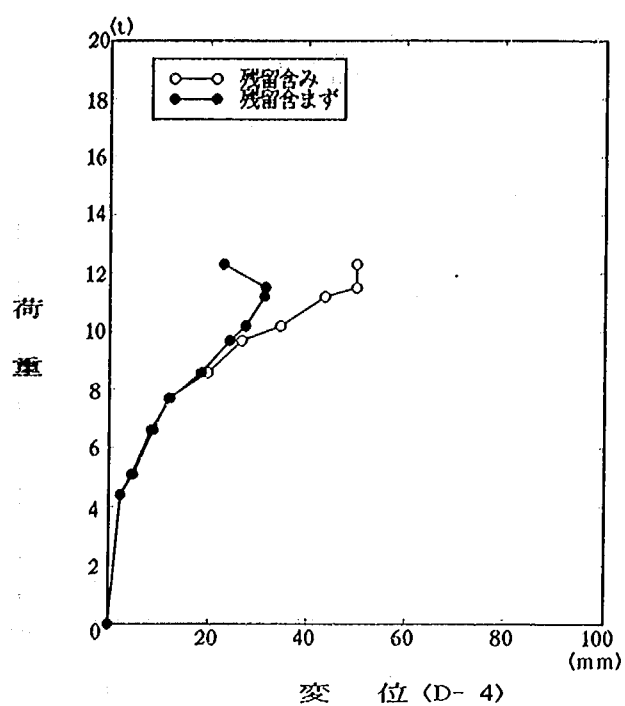
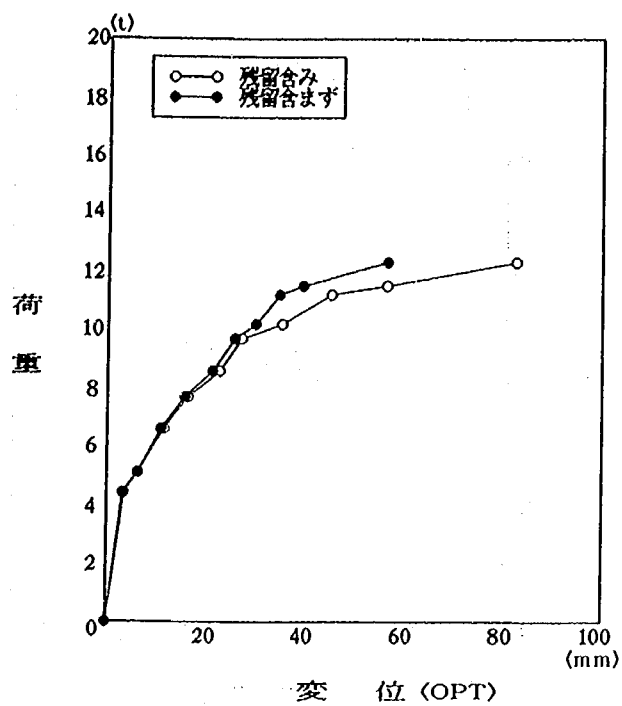


図-5.6 (b) 荷重-変位曲線

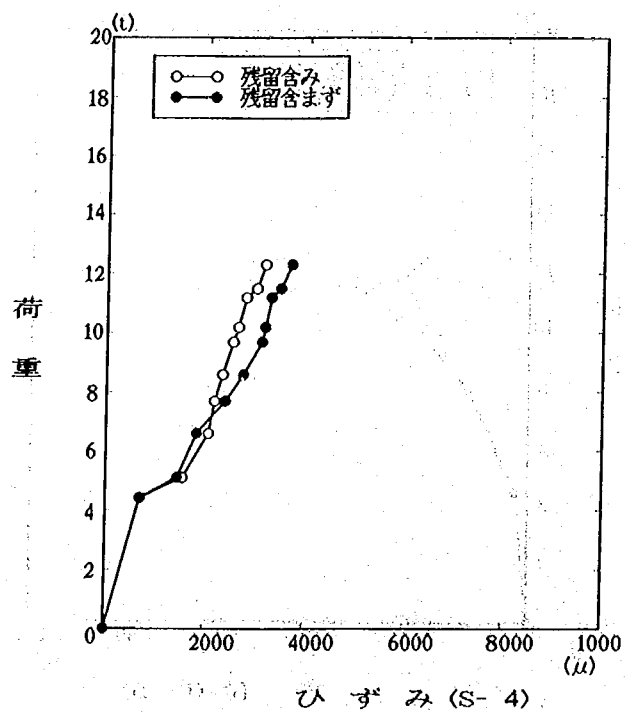
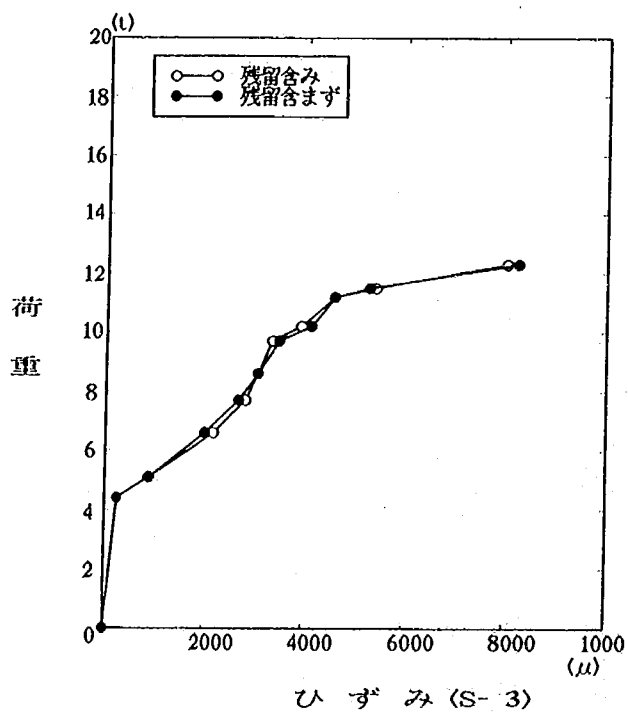
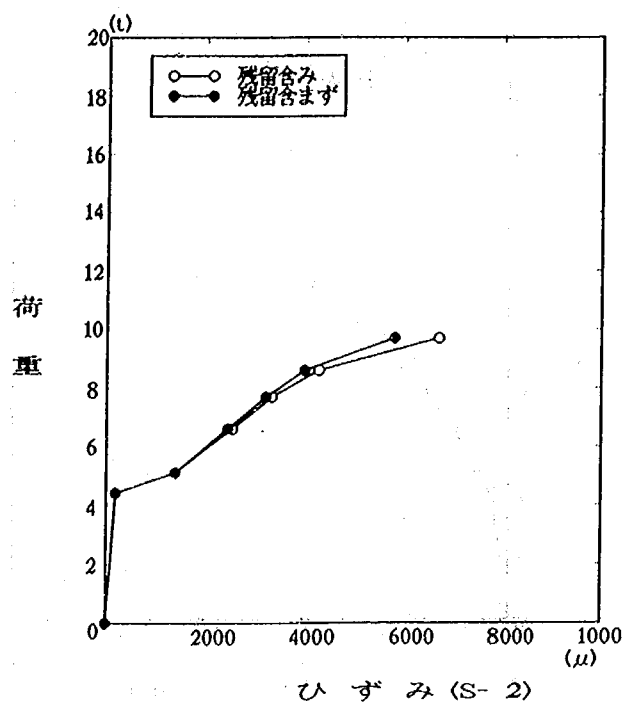
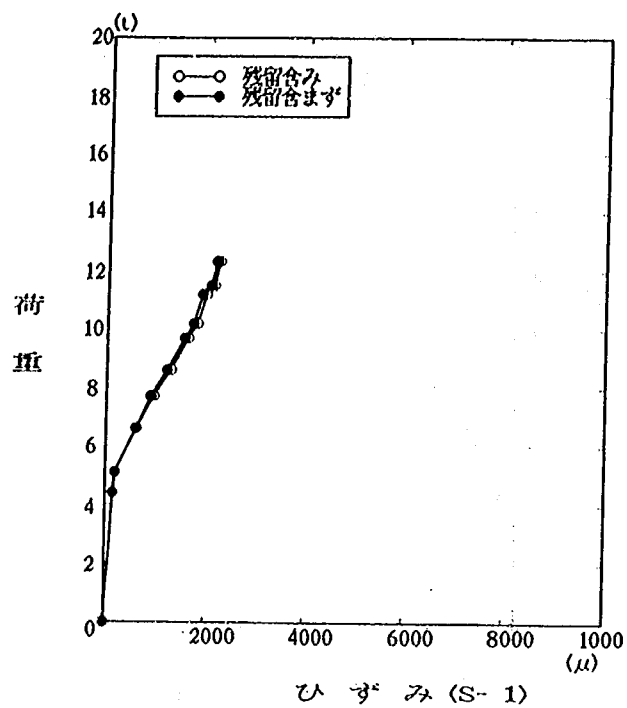


図-5.7 (a) 荷重-ひずみ曲線

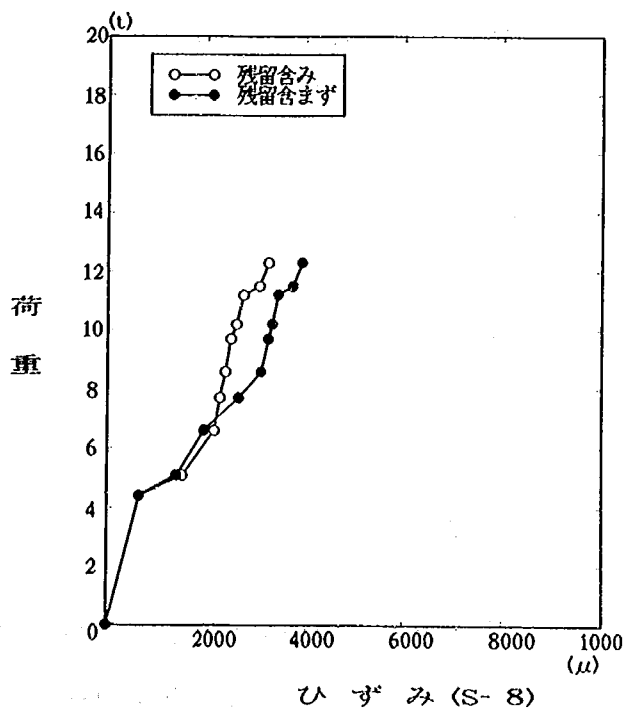
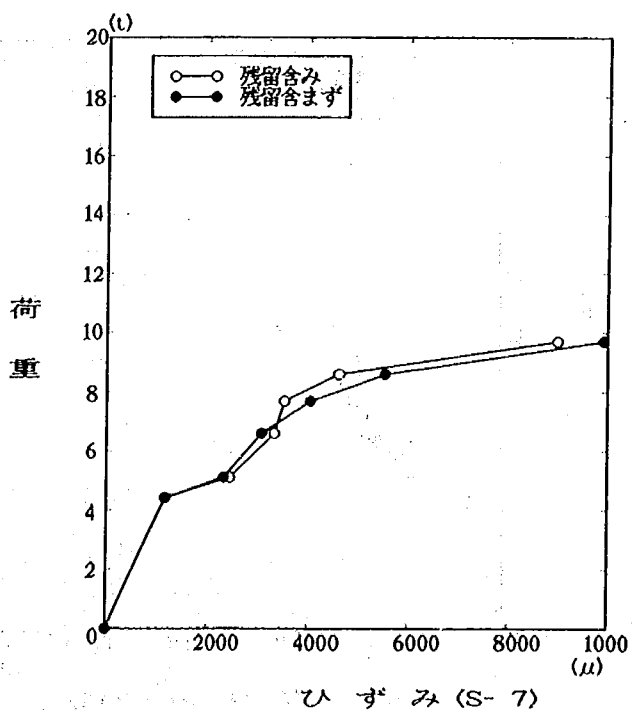
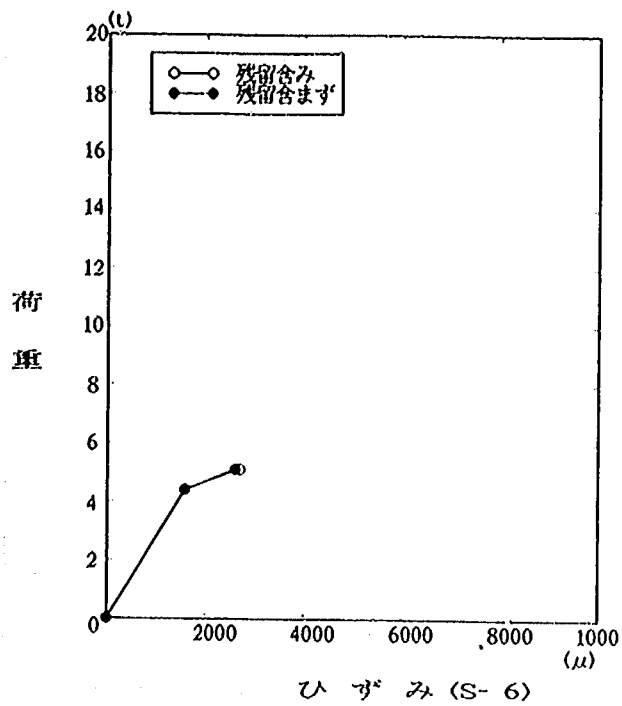
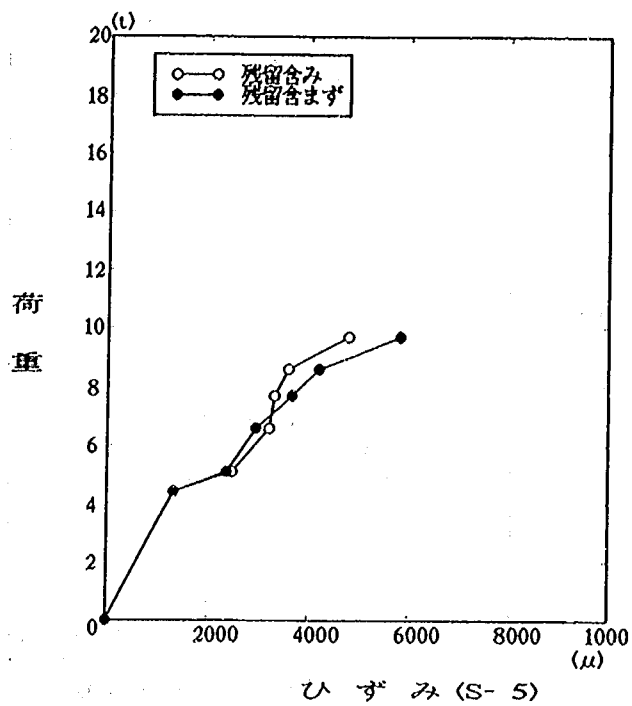


図-5.7(b) 荷重-ひずみ曲線

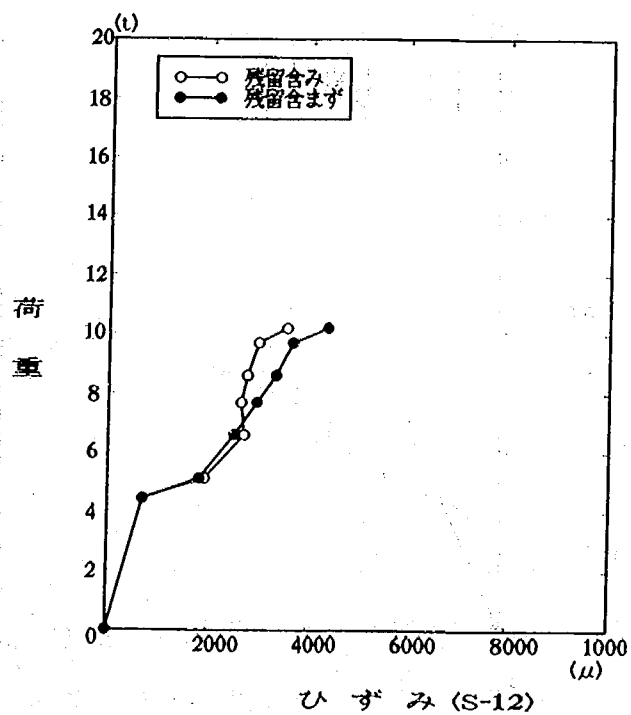
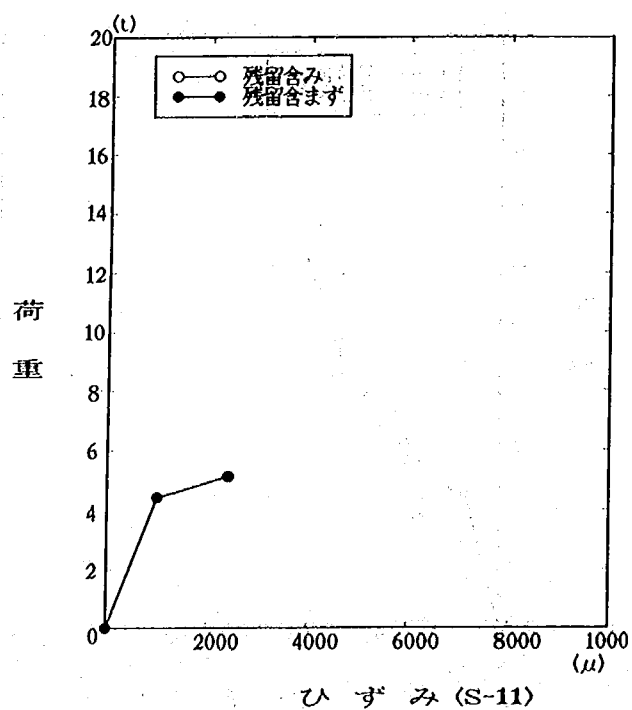
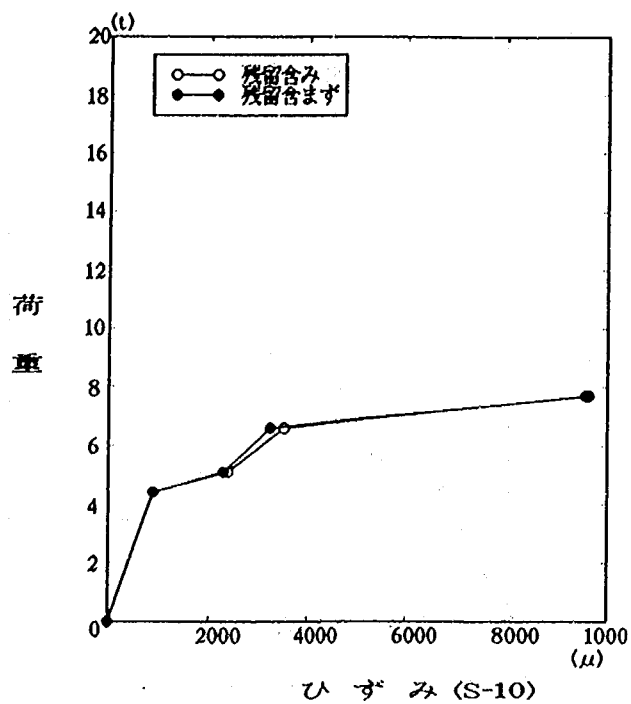
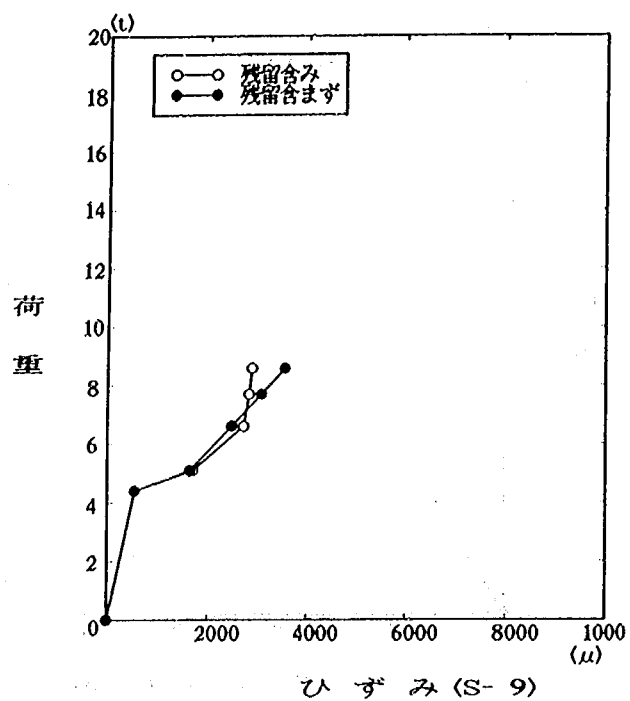


図-5.7(c) 荷重-ひずみ曲線

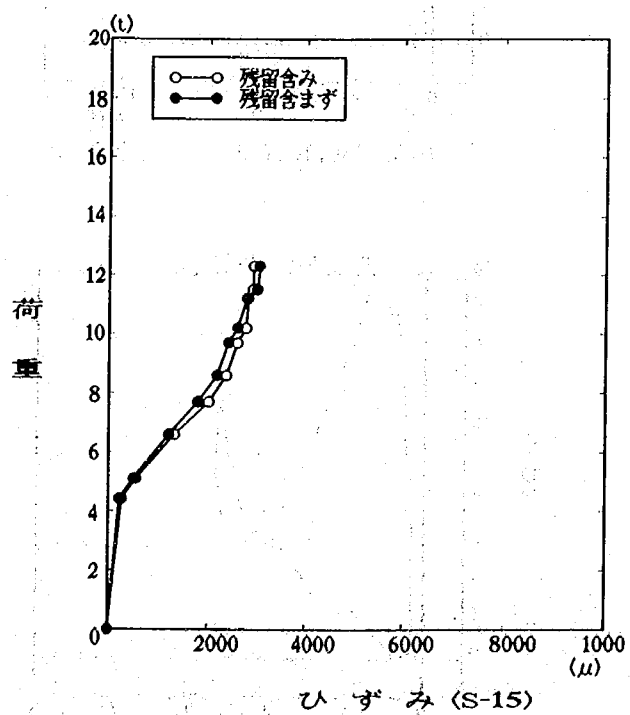
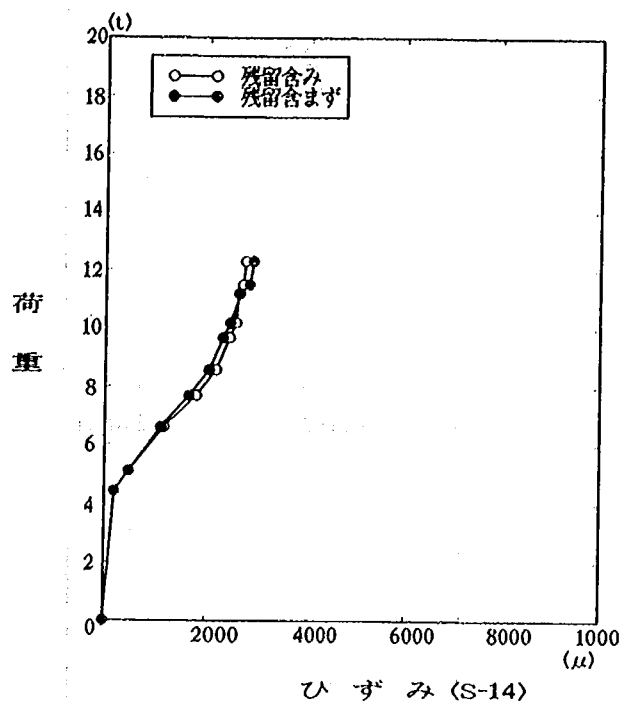
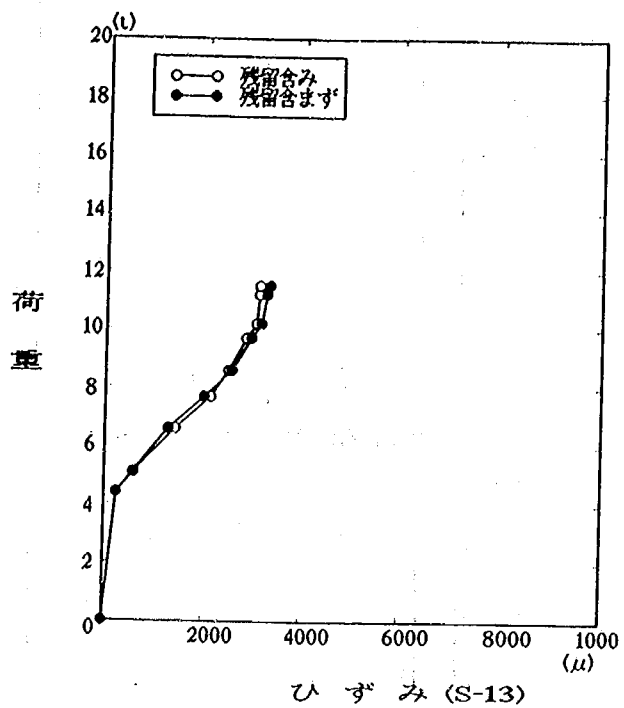


図-5.7 (d) 荷重-ひずみ曲線

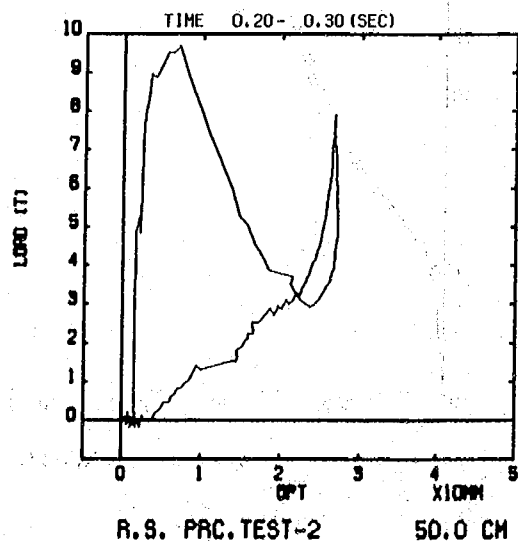
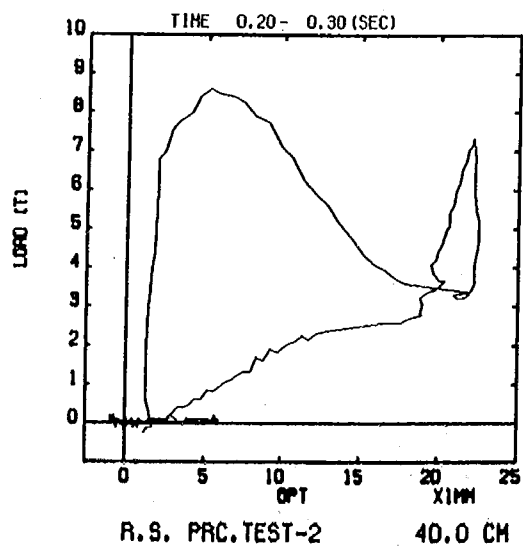
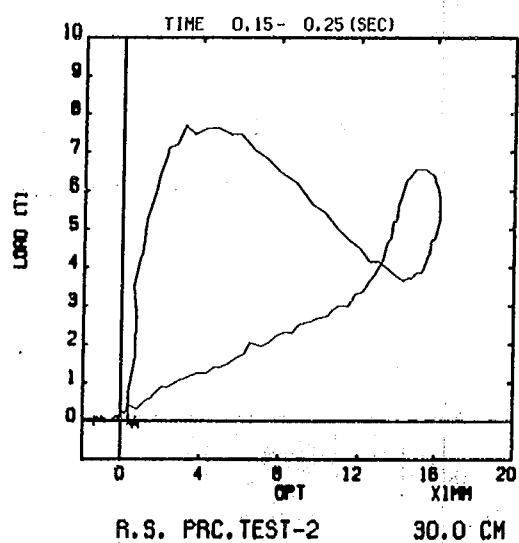
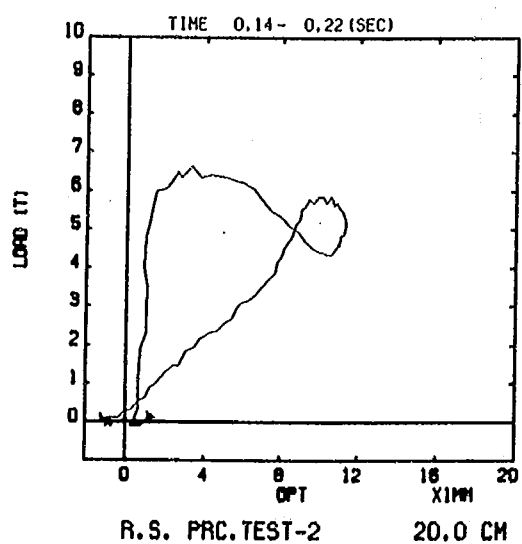
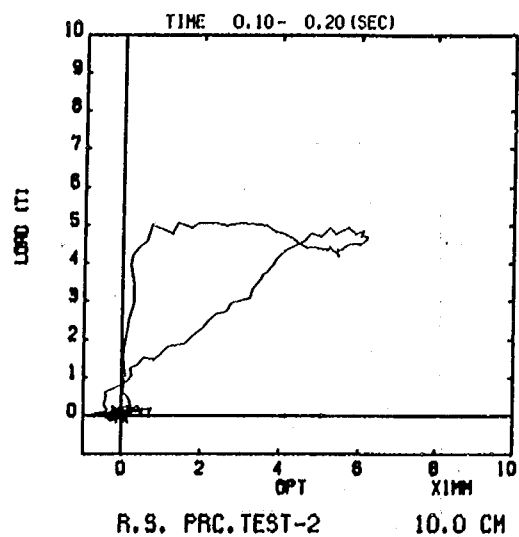
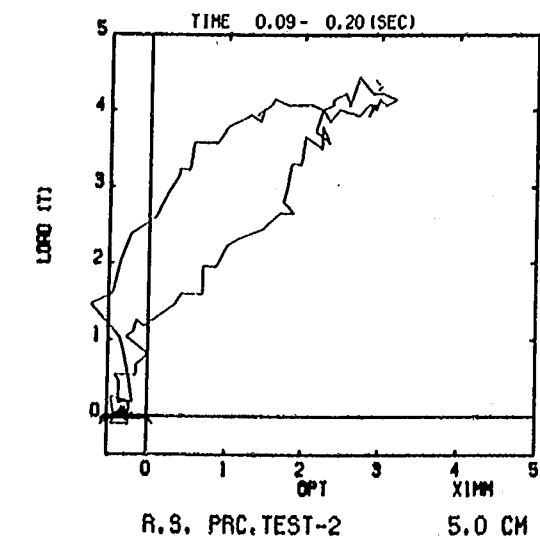


図-5.8(a) 荷重と桁中央変位の履歴曲線

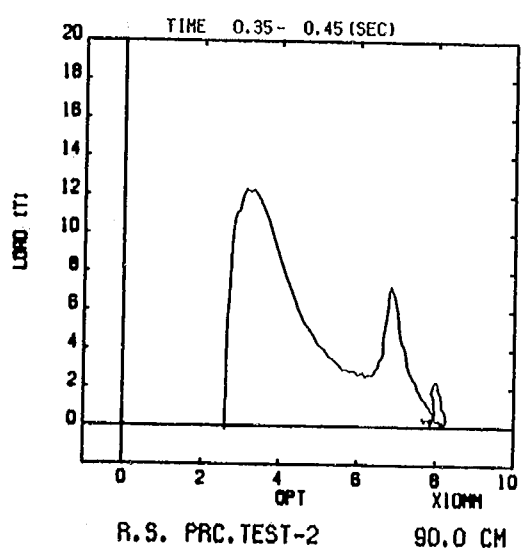
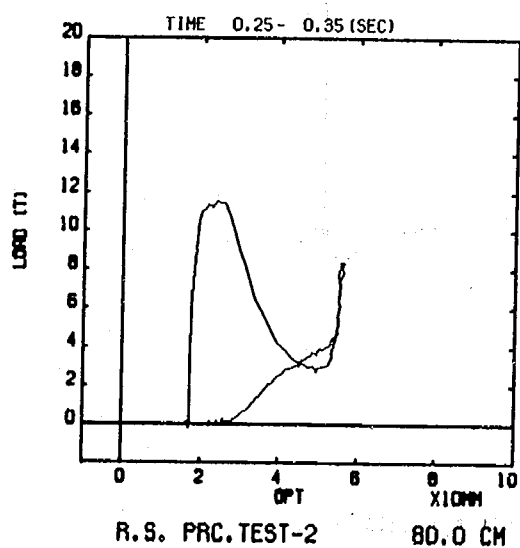
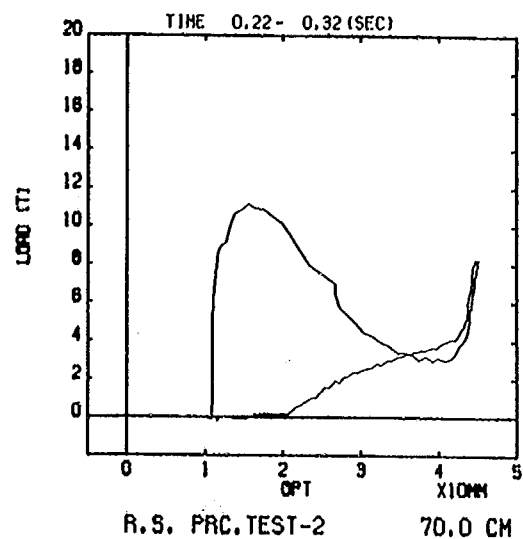
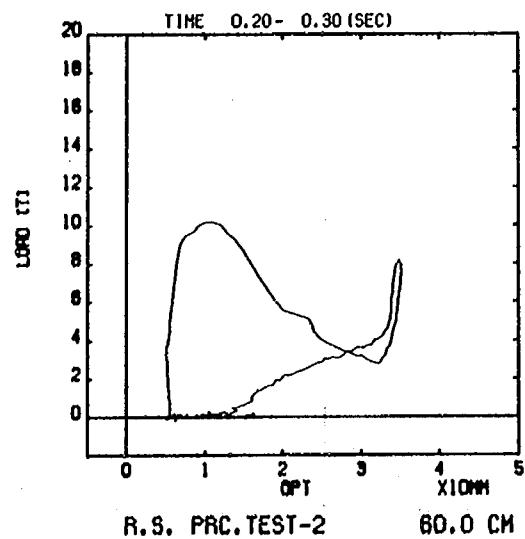


図-5.8 (b) 荷重と桁中央変位の履歴曲線

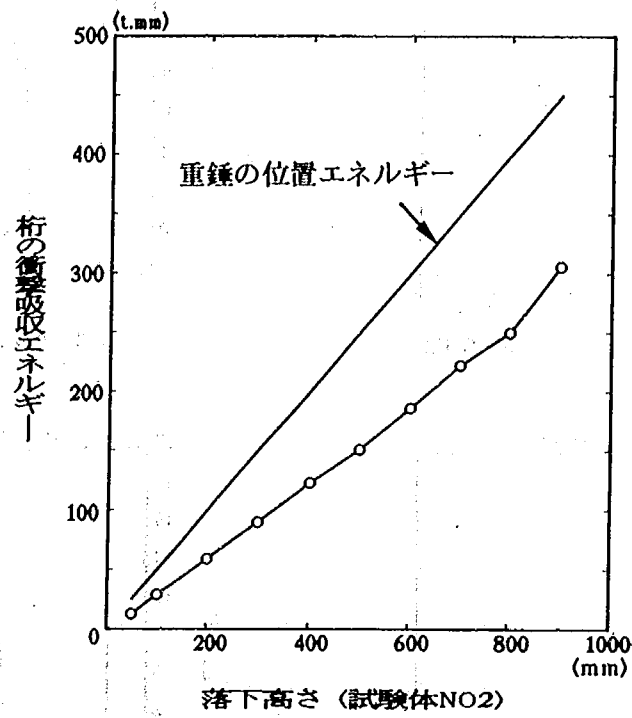


図-5.9 衝撃エネルギー—落下高さの関係

表-5.2 桁の衝撃吸収エネルギー

試験体 No.2

落下高さH (mm)	ロードセルの 最大荷重 (t)	桁中央変位 (mm)	桁の衝撃吸収 エネルギー (t・mm)	位置エネルギー (t・mm)	位置エネルギー と桁衝 撃吸収エネルギー の比 (%)
50	4.431	3.5	12.649	25	51
100	5.068	6.3	28.715	50	57
200	6.625	10.8	59.178	100	59
300	7.687	15.6	89.836	150	60
400	8.607	21.1	122.723	200	61
500	9.668	25.6	150.223	250	60
600	10.164	29.8	185.729	300	62
700	11.155	34.6	221.739	350	63
800	11.509	39.4	249.495	400	62
900	12.287	56.7	305.774	450	68
					平均 60 (%)

$$\text{位置エネルギー と桁衝撃吸収エネルギー の比} = \frac{\text{桁の衝撃吸収エネルギー}}{\text{位置エネルギー}} (\%)$$

5.4.2 PRC桁試験体No.3の試験結果

衝撃載荷試験は次の表-5.1に示すような計測成分で行った。

重錘重量 $W = 0.5 \text{ t}$

載荷ステップ

落下高さ $H = 40 \sim 90 \text{ cm}$ (10cmピッチで増加)

試験結果を以下の図表に示す。

図-5.10 損傷状況図

図-5.11 荷重-落下高さの関係

図-5.12 荷重-変位曲線

図-5.13 荷重-ひずみ曲線

図-5.14 荷重と桁中央変位の履歴曲線

図-5.15 衝撃エネルギー-落下高さの関係

表-5.3 桁の衝撃吸収エネルギー

図-5.13から、S-1, 2, 13, 14, 15のゲージでは残留値は引張（プラス）の値が記録された。これらの位置は、比較的載荷位置から離れており、スターラップ間に位置していた。S-3, 4, 7, 8, 10, 11, 12のゲージは残留値が圧縮（マイナス）の値を示した。（S-5, 6, 9のゲージは、1回目の衝撃載荷後に、測定不能となった。）損傷状況は、落下高さ $H = 40\text{cm}$ で桁上面に達するクラック発生し $H = 80\text{cm}$ までクラックが増え続けた。そしてそれ以上になると新たなクラックは認められず、クラック幅のみ増加が見られた。 $H = 90\text{cm}$ で鉄筋およびPC鋼より線が2本とも破断し桁中央付近でコンクリートが崩落した。

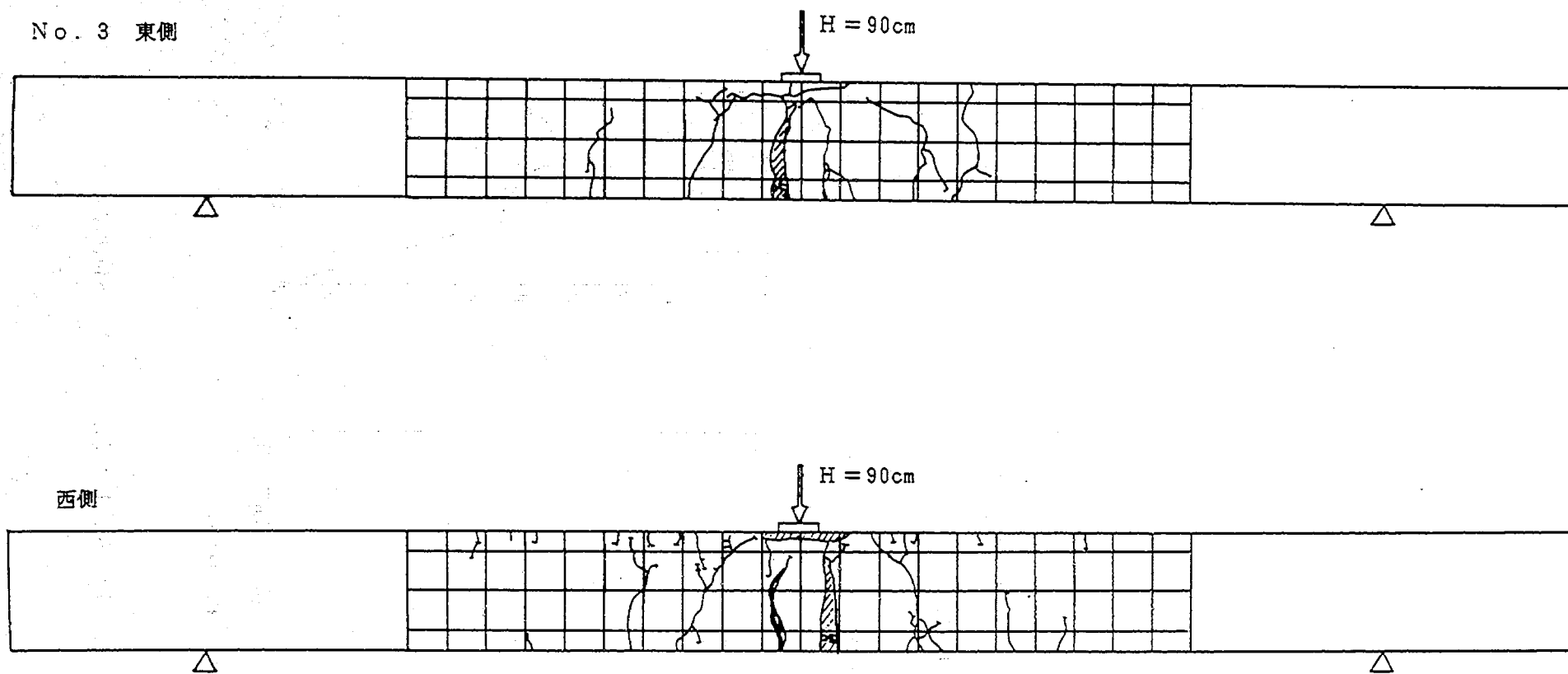


図-5.10 損傷状況図

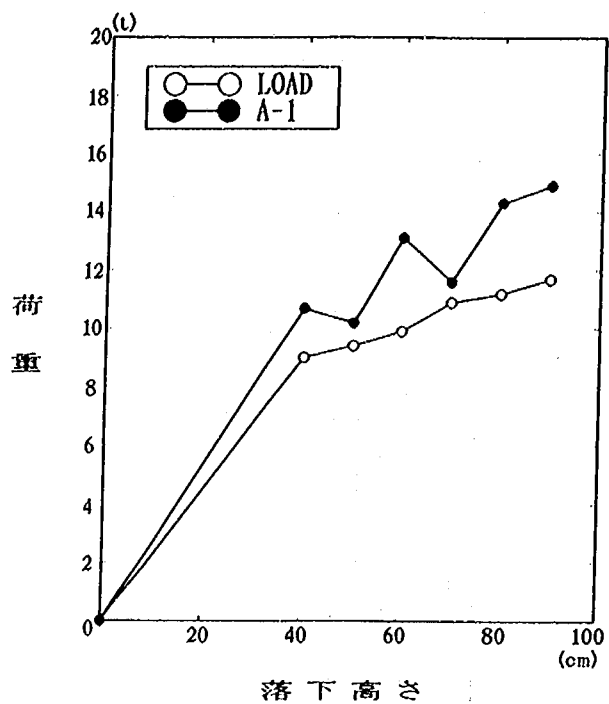


図-5.11 荷重-落下高さの関係

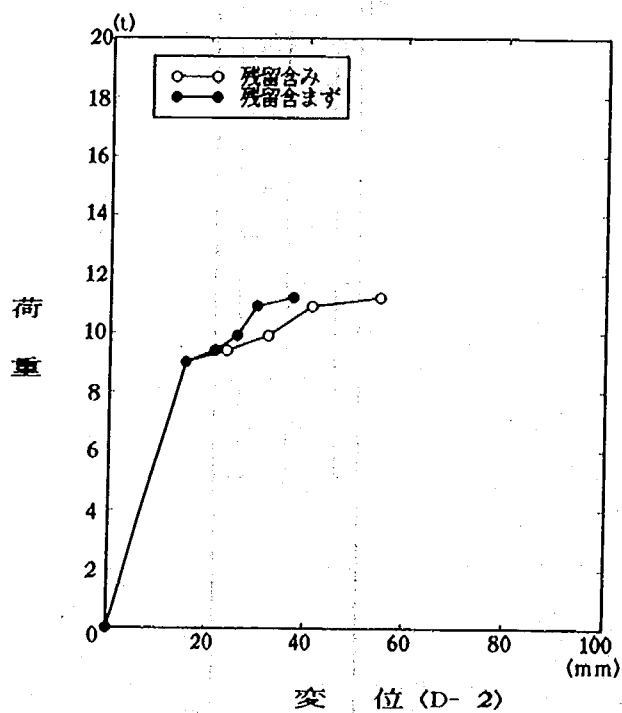
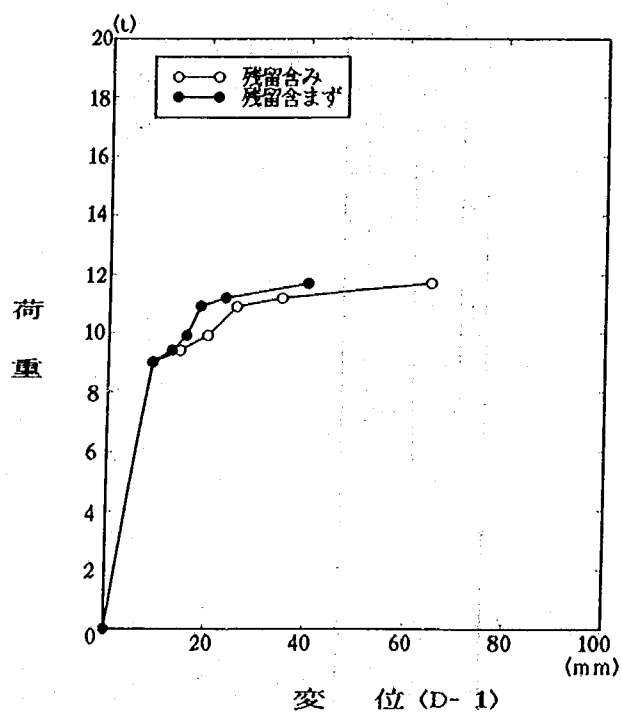


図-5.12(a) 荷重-変位曲線

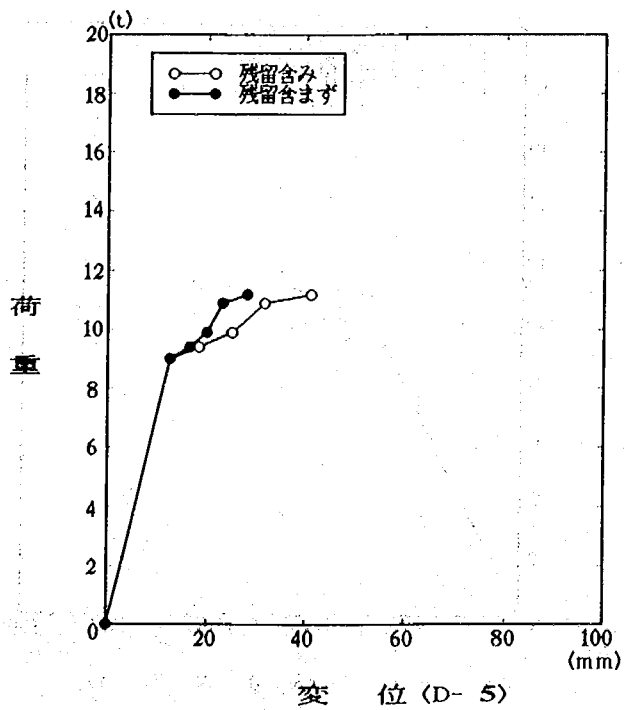
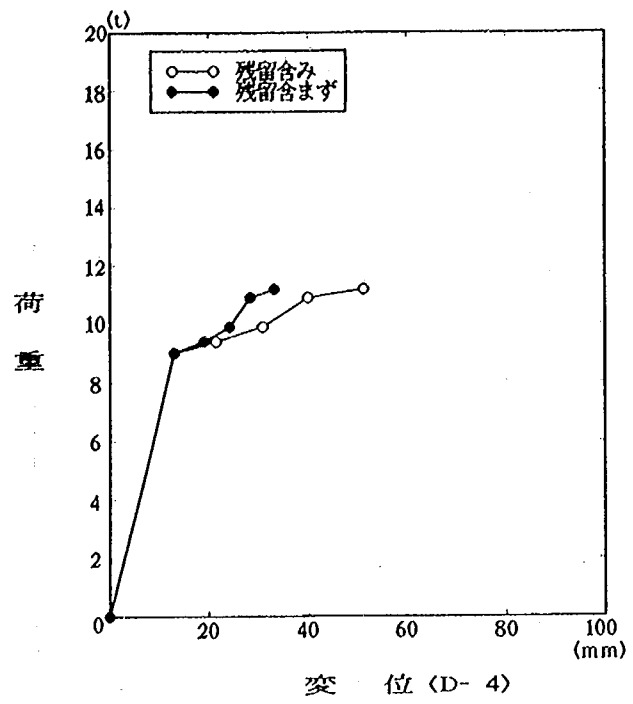
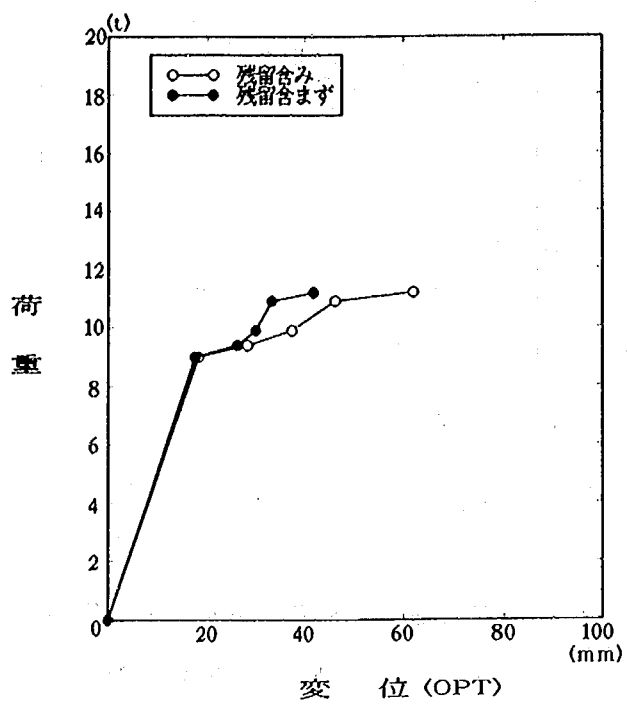


図-5.12 (b) 荷重-変位曲線

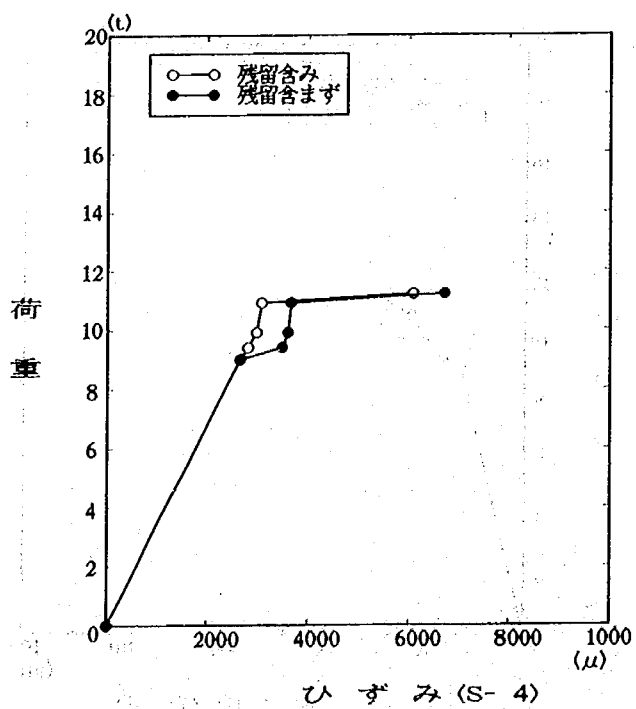
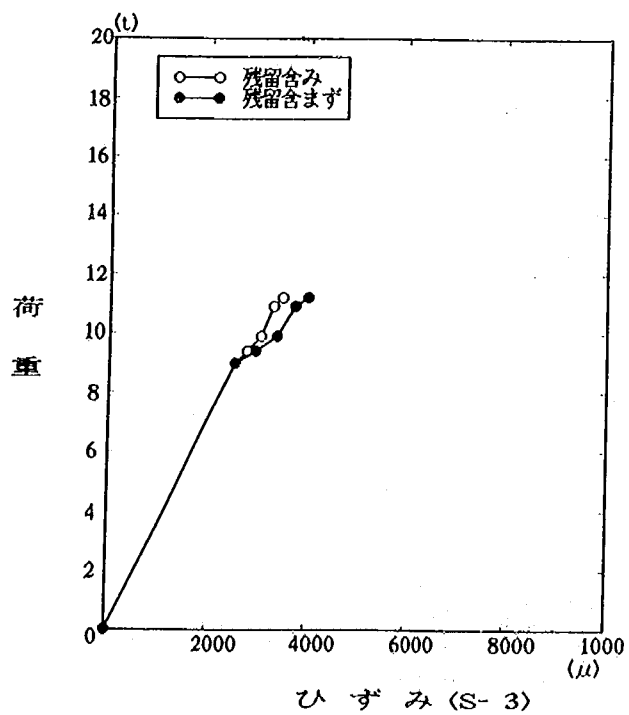
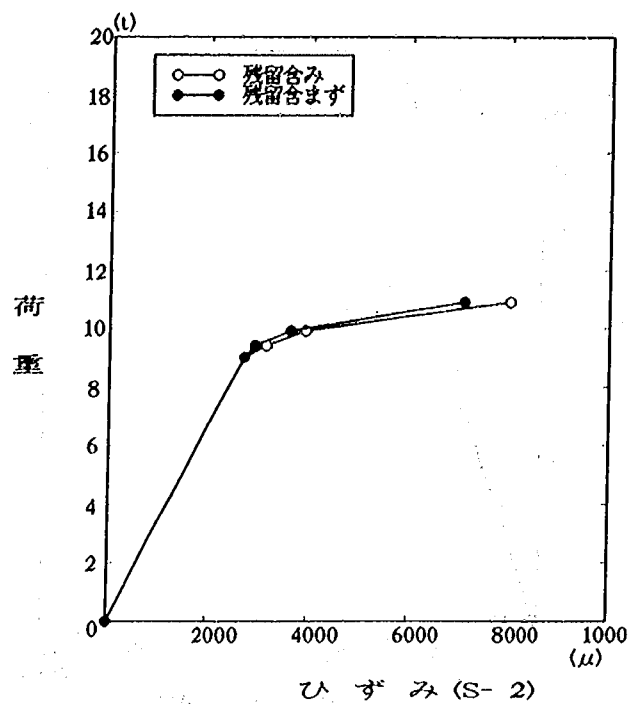
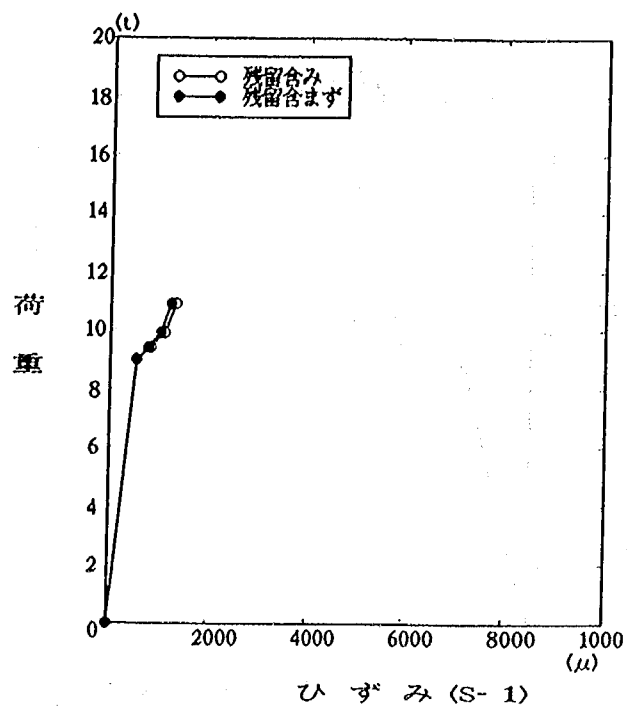


図-5.13 (a) 荷重-ひずみ曲線

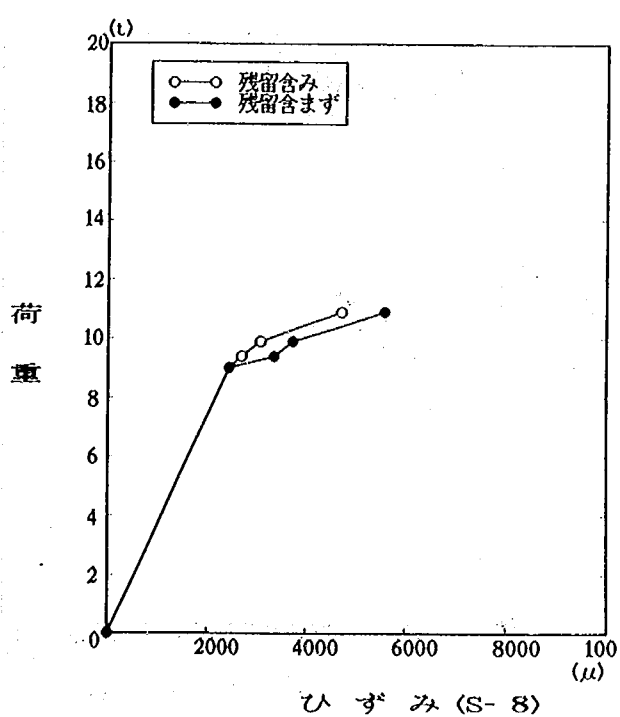
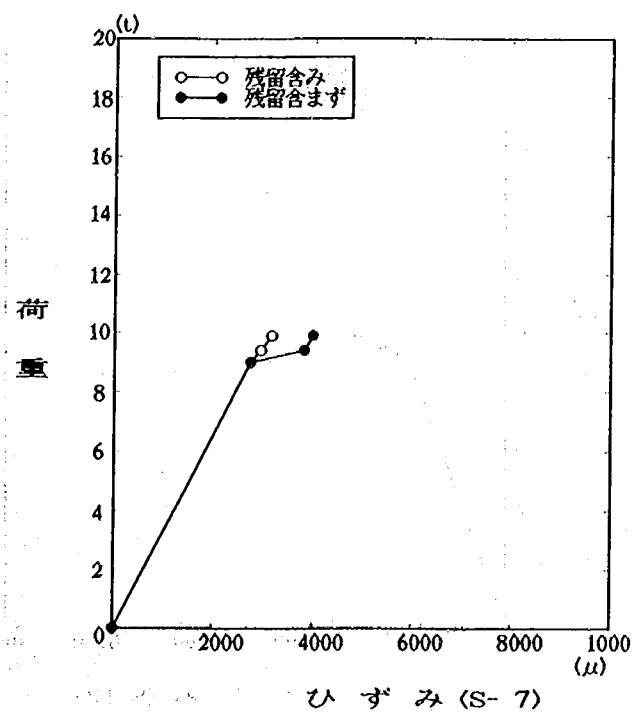
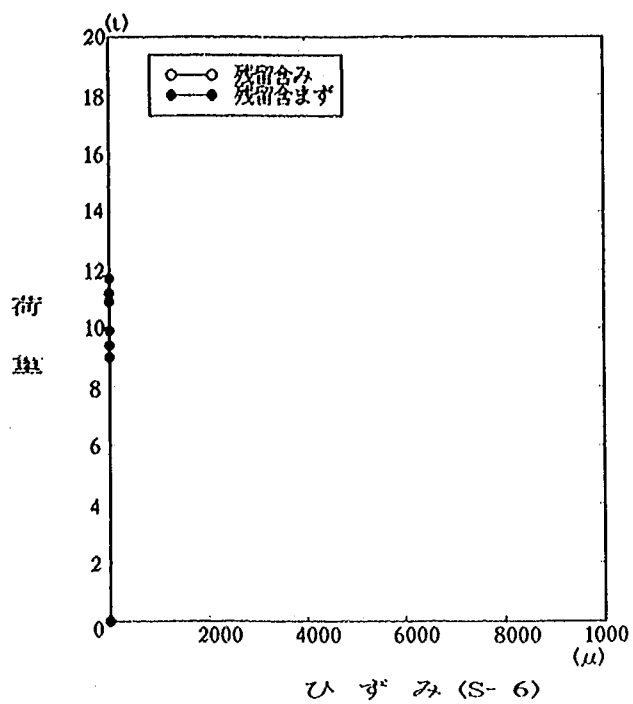
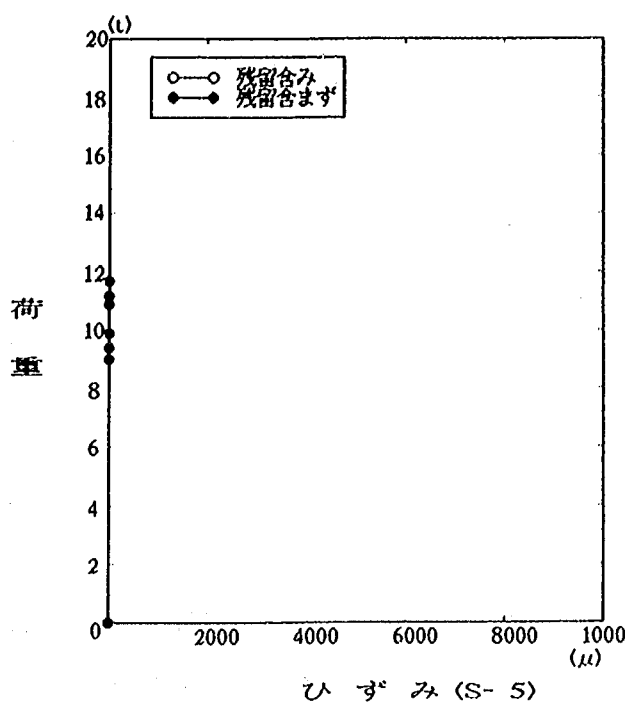


図-5.13 (b) 荷重-ひずみ曲線

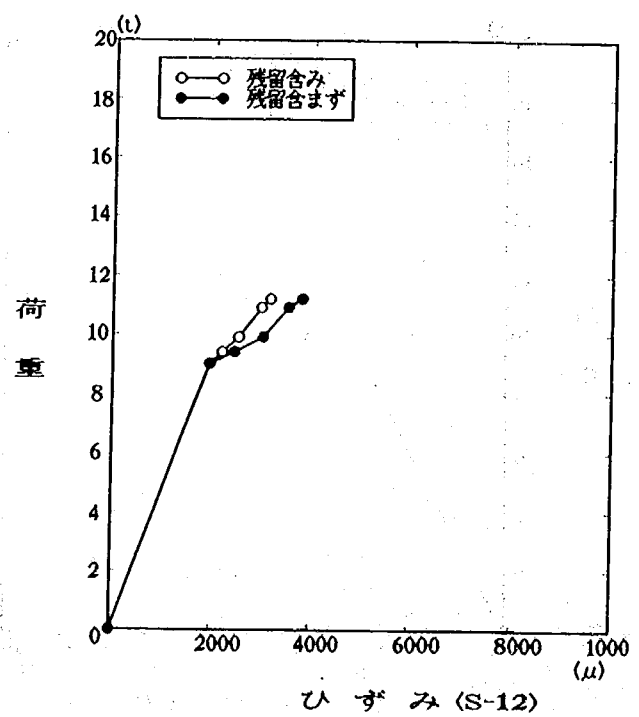
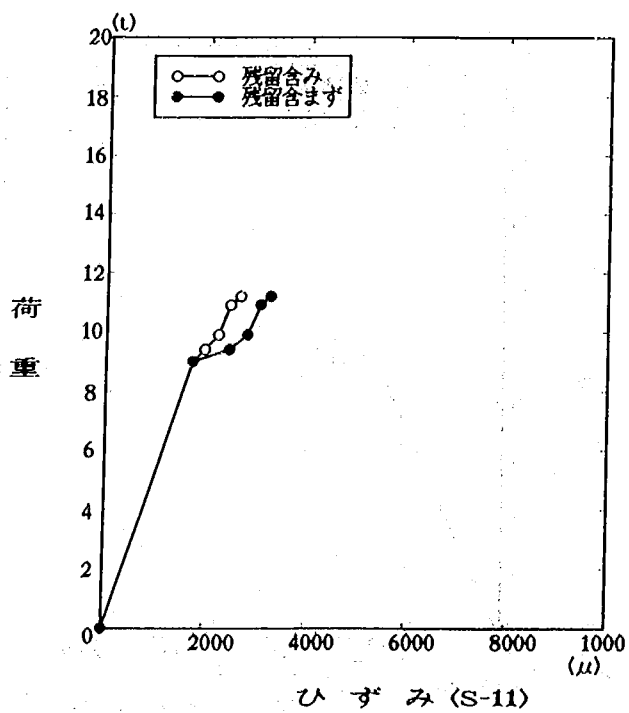
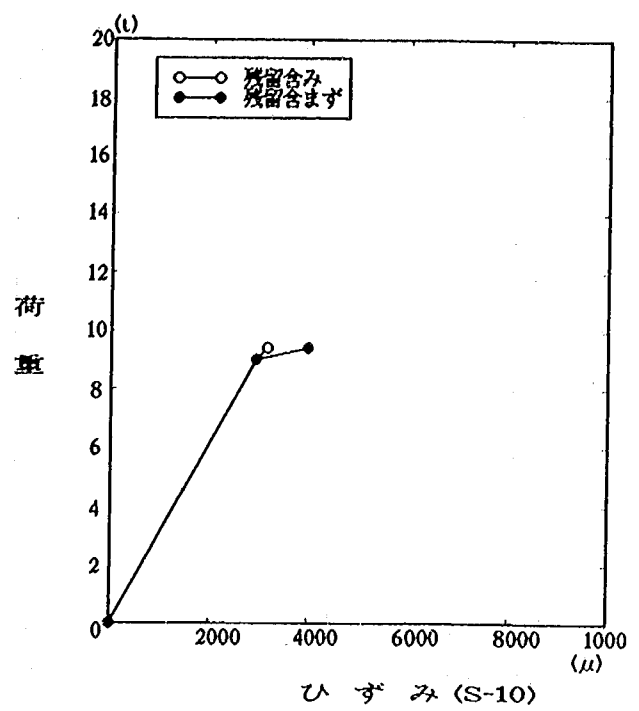
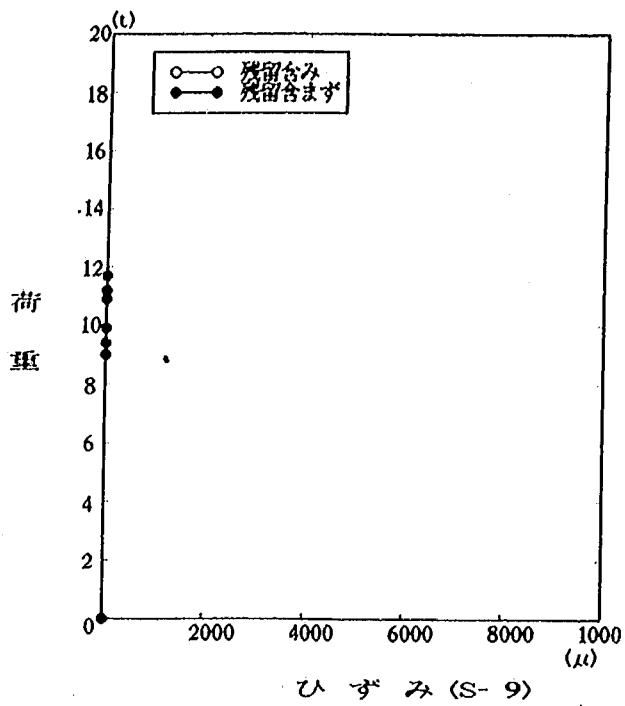


図-5.13 (c) 荷重-ひずみ曲線

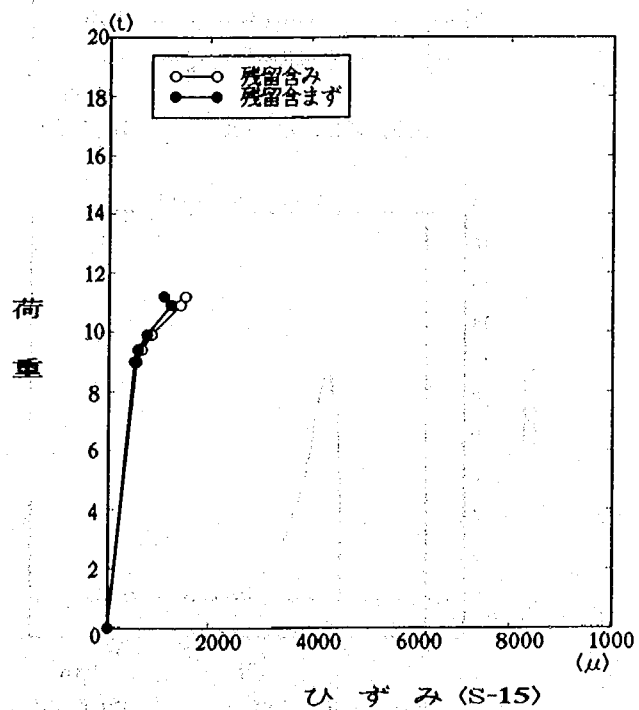
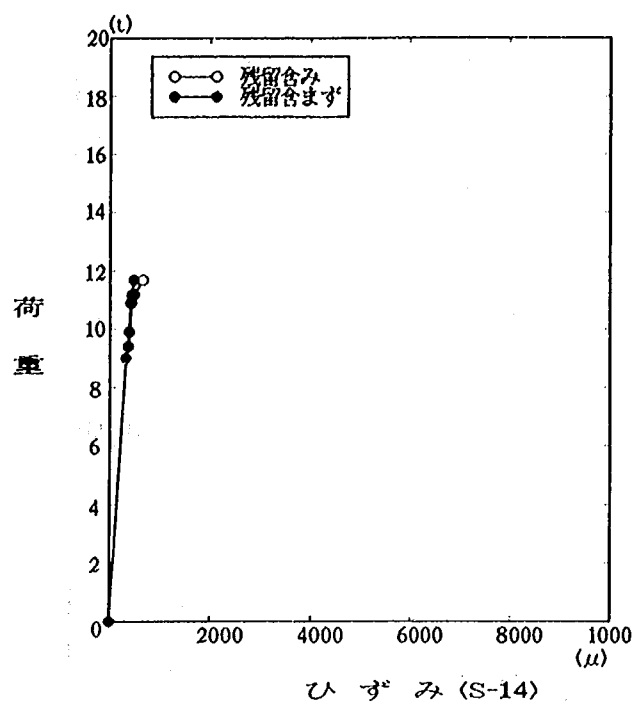
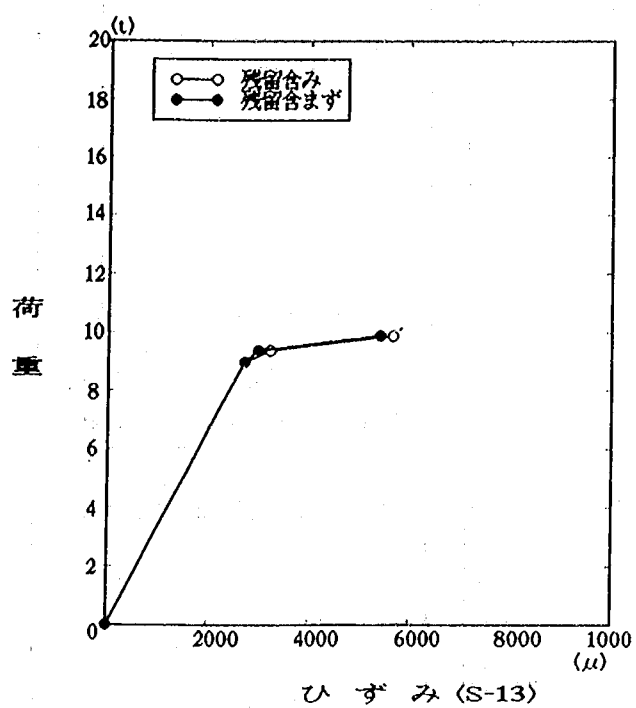
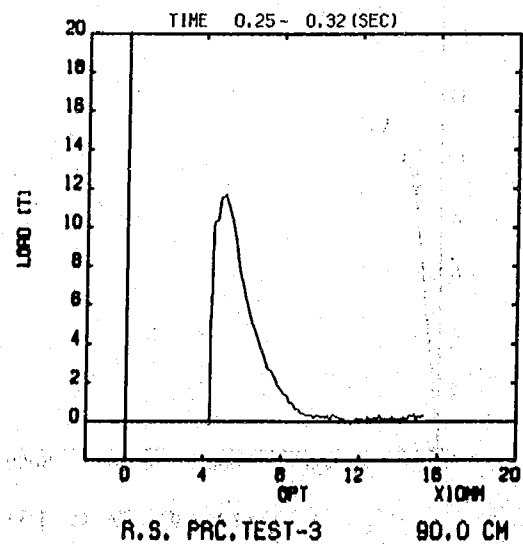
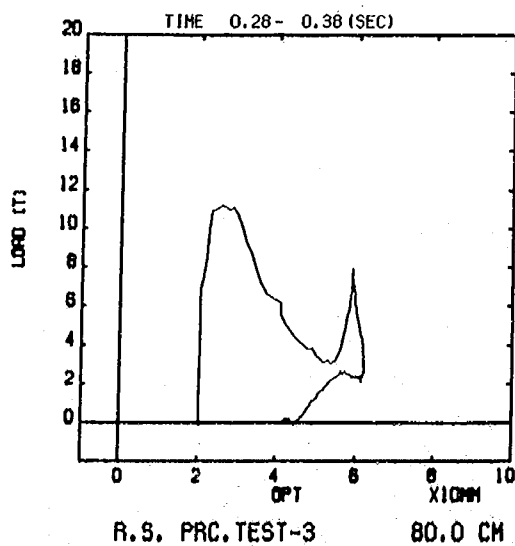
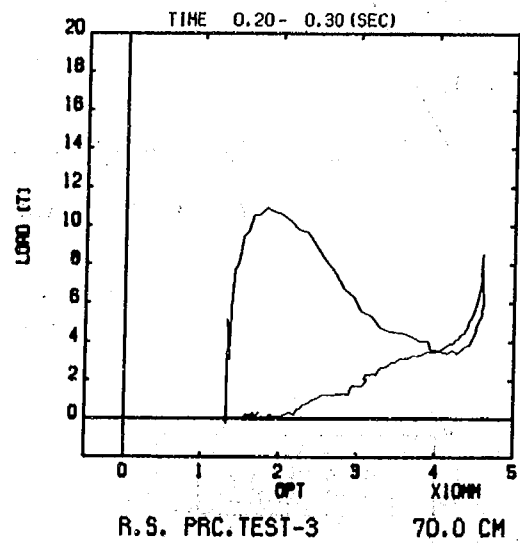
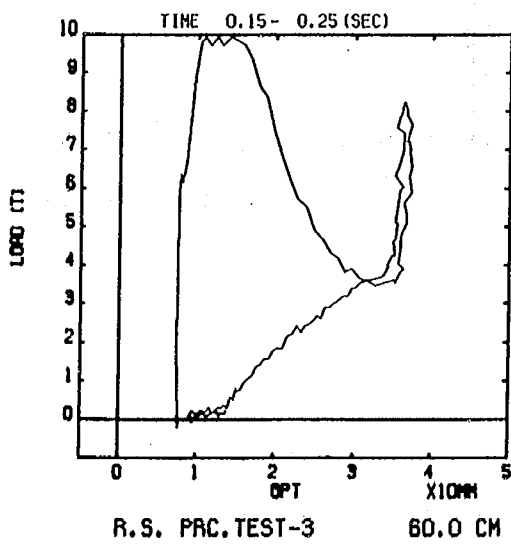
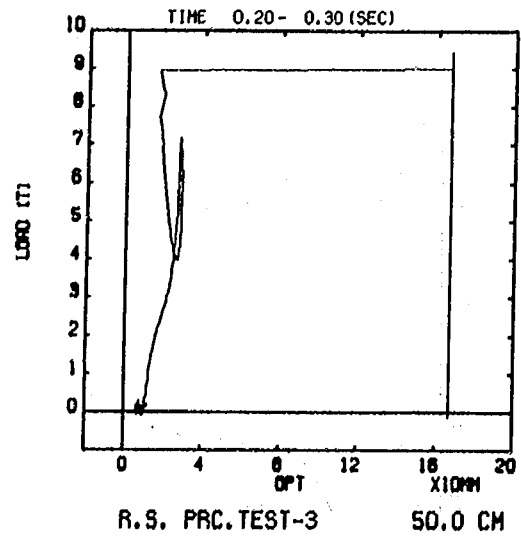
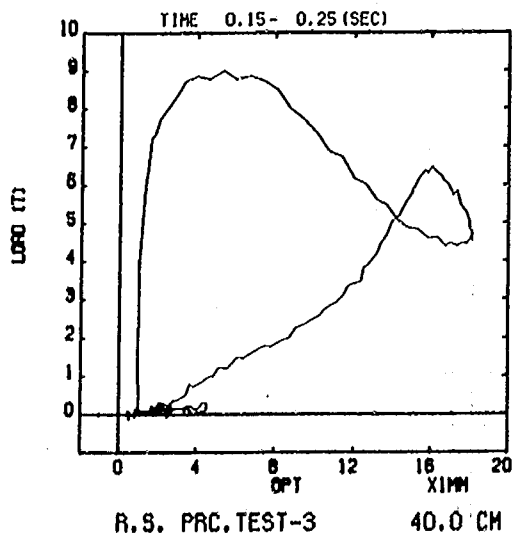


図-5.13 (d) 荷重-ひずみ曲線



落下高さ $H = 50\text{cm}$ では、測定に誤りがあり

正しいデータは記録できなかった

図-5.14 荷重と桁中央変位の履歴曲線

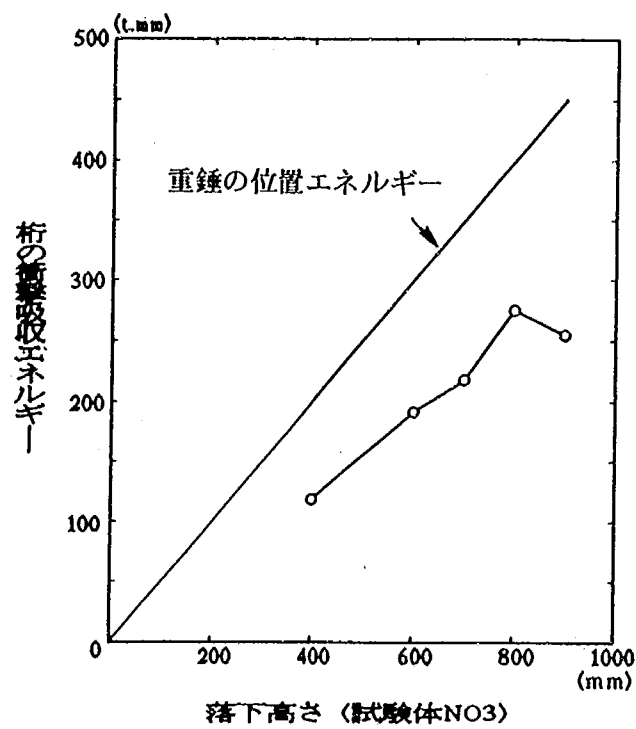


図-5.15 衝撃エネルギーと落下高さの関係

表-5.3 桁の衝撃吸収エネルギー
試験体 No.3

落下高さ H (mm)	ロードセルの 最大荷重 (t)	桁中央変位 (mm)	桁の衝撃吸収 エネルギー (t・mm)	位置エネルギー (t・mm)	位置エネルギー と桁衝 撃吸収エネルギー の比 (%)
400	8.999	17.4	118.564	200	59
500	9.424	—	—	250	—
600	9.919	29.7	191.371	300	64
700	10.911	33.1	218.117	350	62
800	11.194	41.8	275.064	400	69
900	11.690	123.7	254.975	450	57
					平均 62 (%)

$$\text{位置エネルギー と桁衝撃吸収エネルギー の比} = \frac{\text{桁の衝撃吸収エネルギー}}{\text{位置エネルギー}} (\%)$$

5.4.3 PRC桁試験体No.4の試験結果

衝撃载荷試験は次の表-5.1に示すような計測成分で行った。

重錘重量 $W = 0.5 \text{ t}$

载荷ステップ

落下高さ $H = 60 \sim 80 \text{ cm}$ (10cmピッチで増加)

落下高さ $H = 85 \text{ cm}$

試験結果を以下の図表に示す。

図-5.16 損傷状況図

図-5.17 荷重-落下高さの関係

図-5.18 荷重-変位曲線

図-5.19 荷重-ひずみ曲線

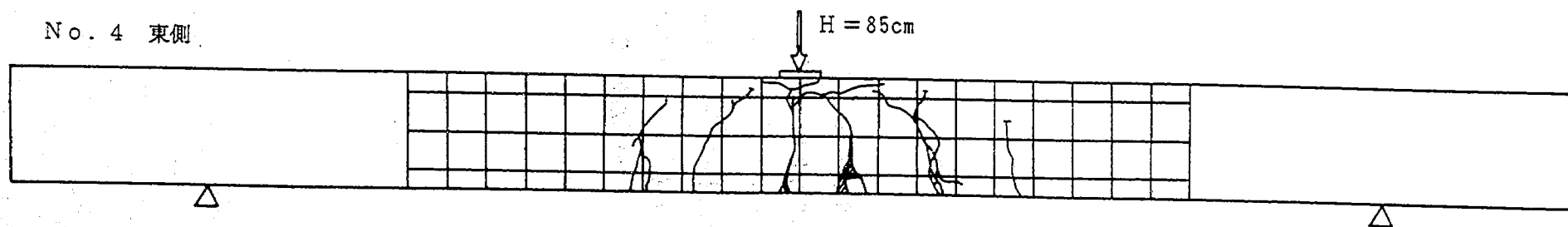
図-5.20 荷重と桁中央変位の履歴曲線

図-5.21 衝撃エネルギー-落下高さの関係

表-5.4 衝撃エネルギー

図-5.19から、残留が引張（プラス）の値を示したものは、S-1, 2, 14, 15のゲージで载荷位置から最も離れた位置付近のものだけであった。载荷板付近のゲージ（S-6, 8, 9）は1回目の衝撃载荷でオーバースケールをおこしてしまい、S-5, 10 も2回目の衝撃载荷でオーバースケールをおこしてしまった。その他のゲージの残留値は圧縮（マイナス）の値を示していた。損傷状況は落下高さ $H=60 \text{ cm}$ でクラック発生、上面からもクラックが発生した。 $H=80 \text{ cm}$ になると新たなクラックは認められず、クラック幅の増加が見られた。 $H=85 \text{ cm}$ で桁中央付近でコンクリートの崩落がおき、PC鋼より線が2本とも破断したが、試験体はクッション材に接触しなかった。

No. 4 東側



西側

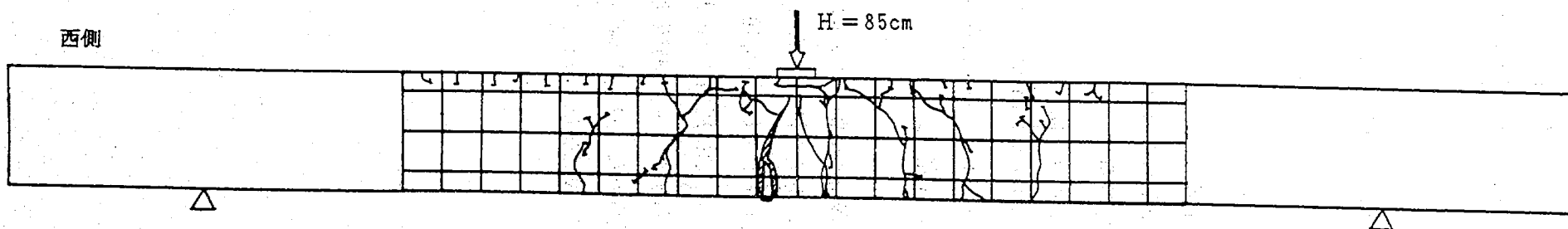


図-5.16 損傷状況図

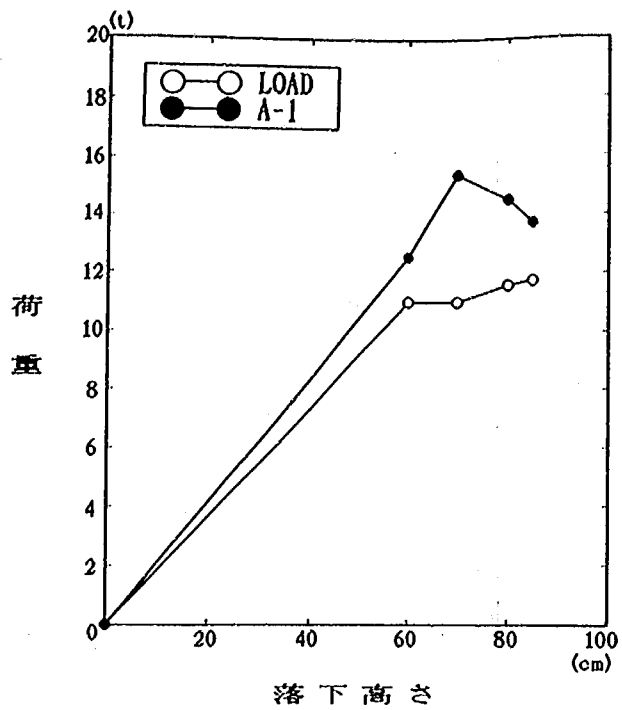


図-5.17 荷重-落下高さの関係

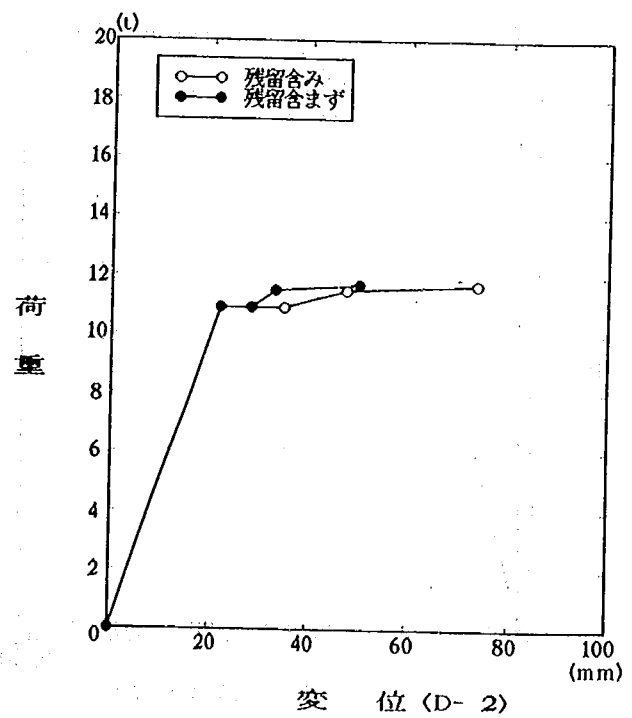
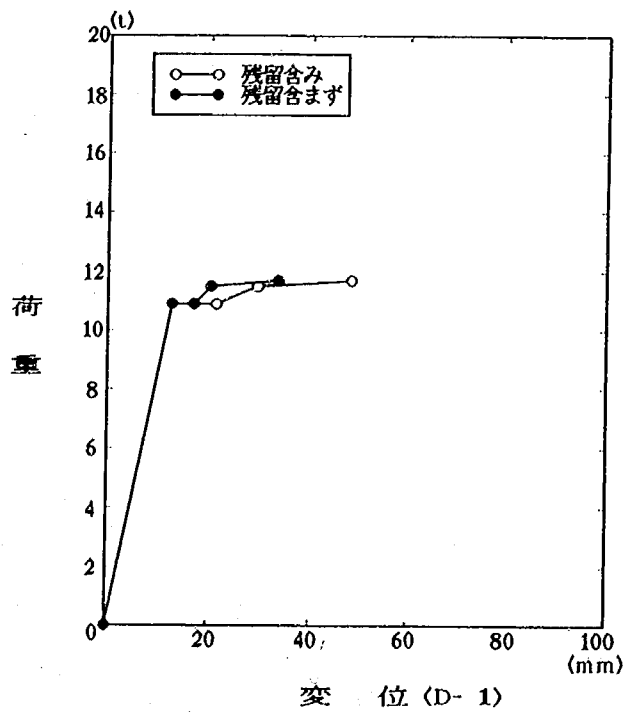


図-5.18(a) 荷重-変位曲線

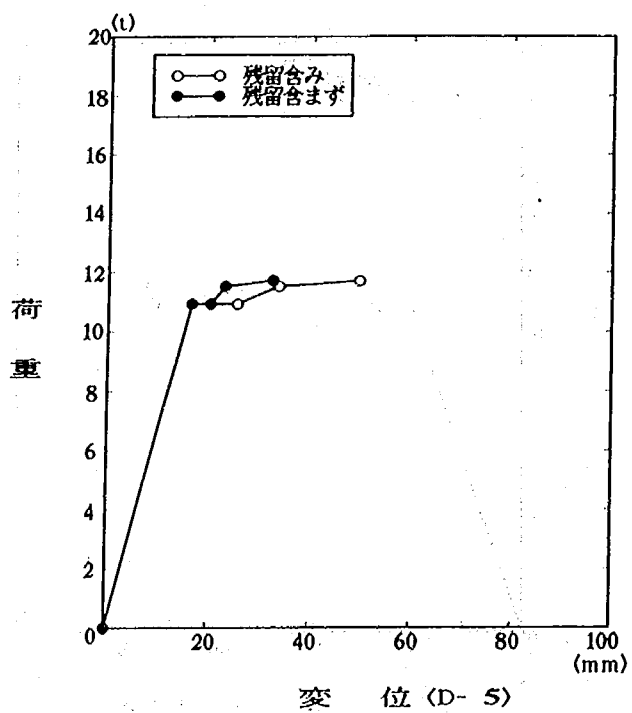
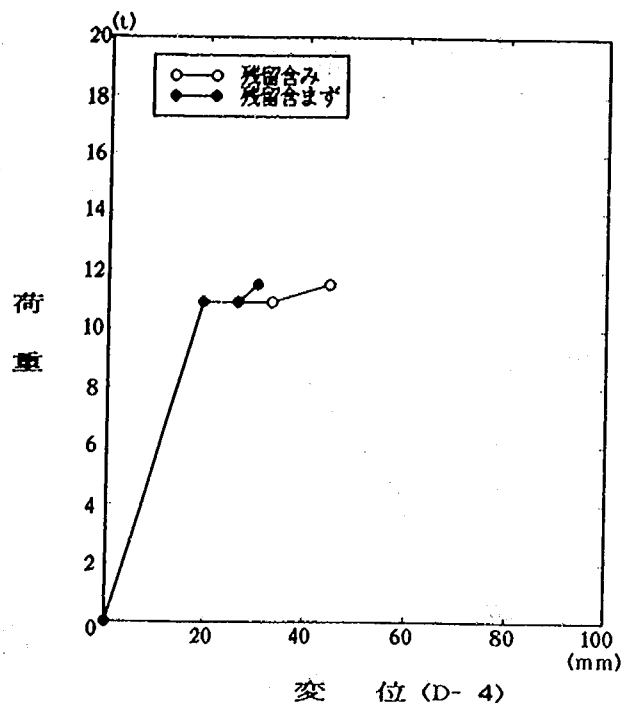
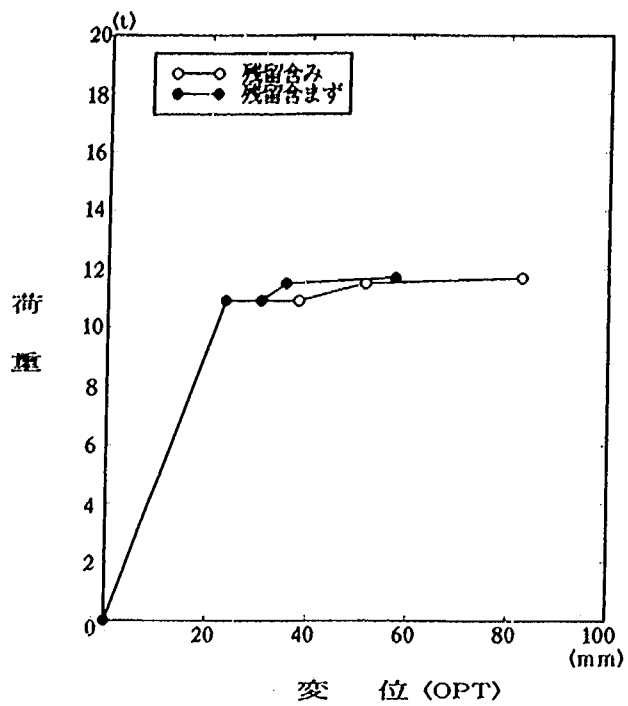


図-5.18 (b) 荷重-変位曲線

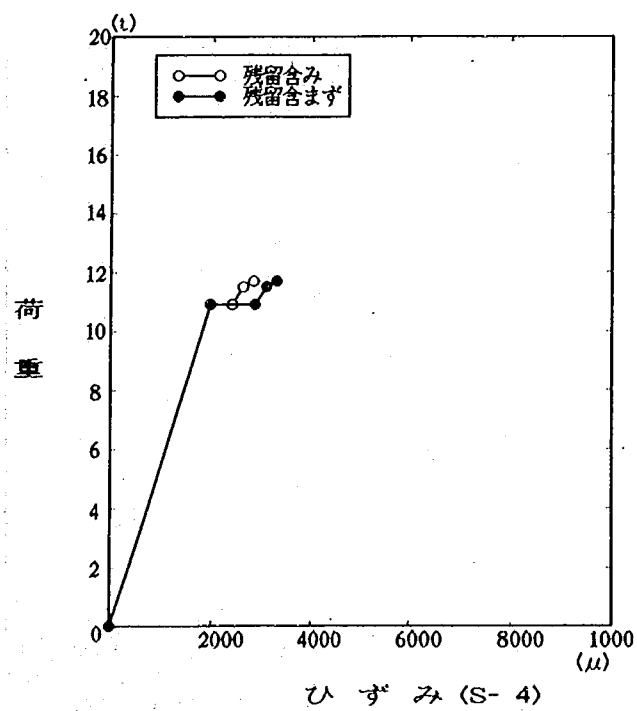
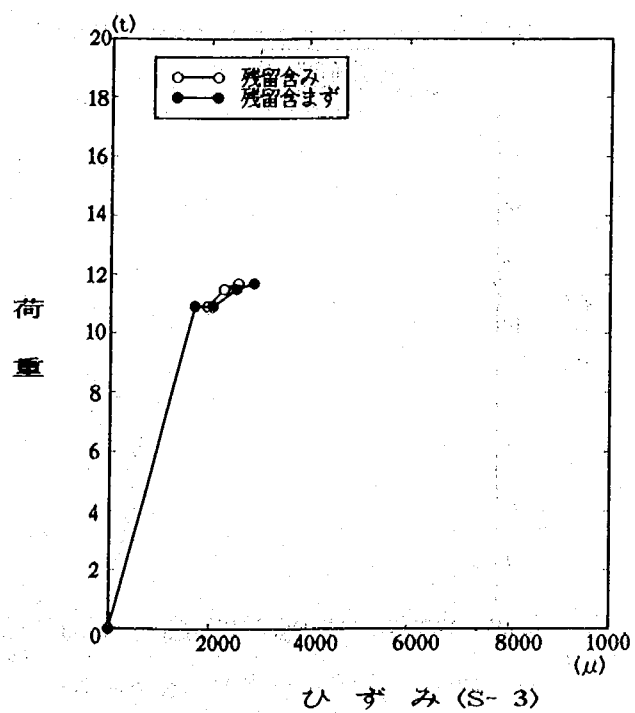
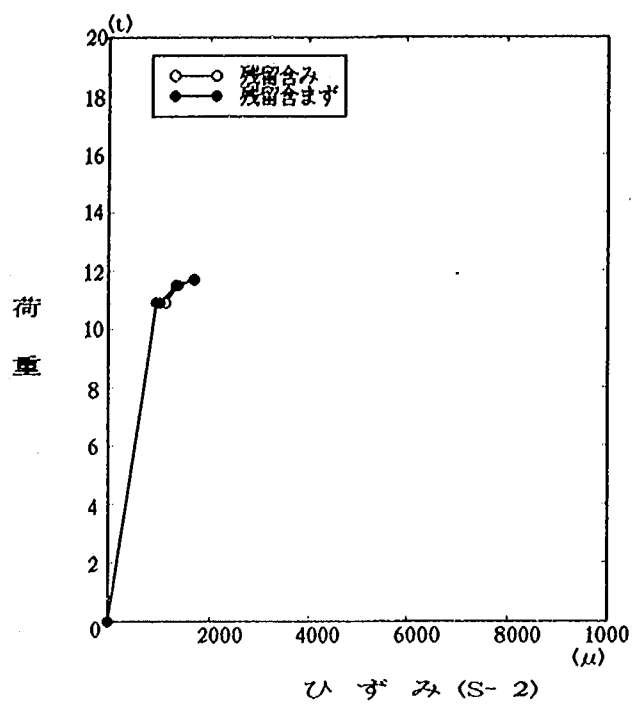
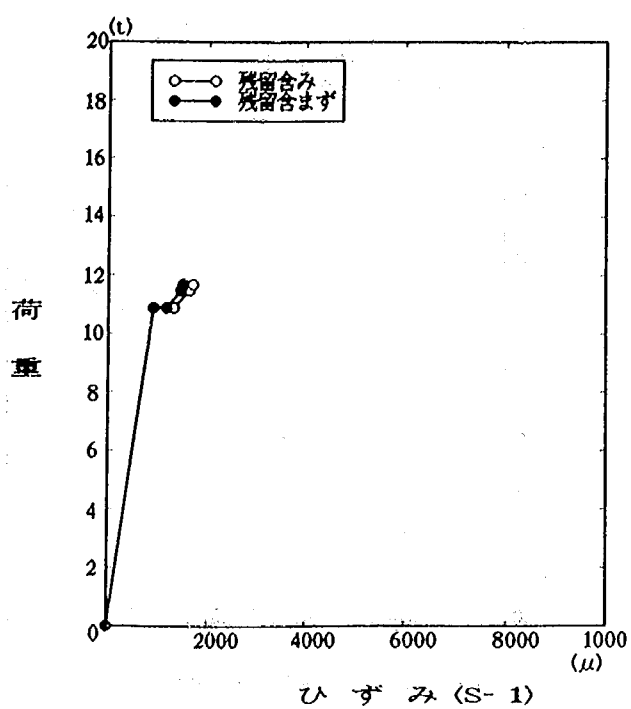


図-5.19 (a) 荷重-ひずみ曲線

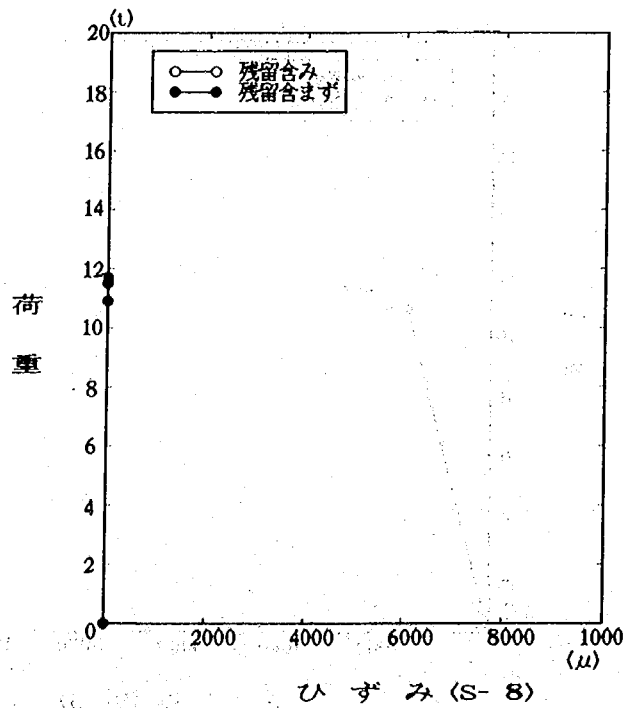
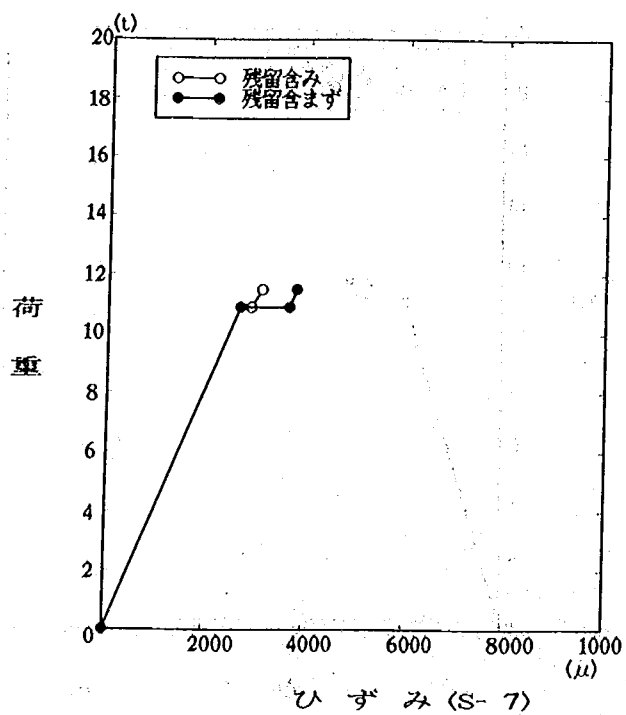
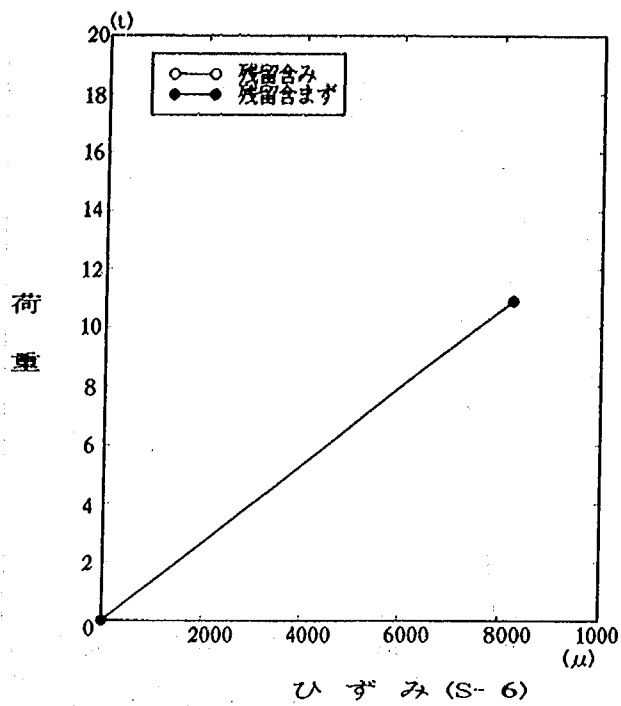
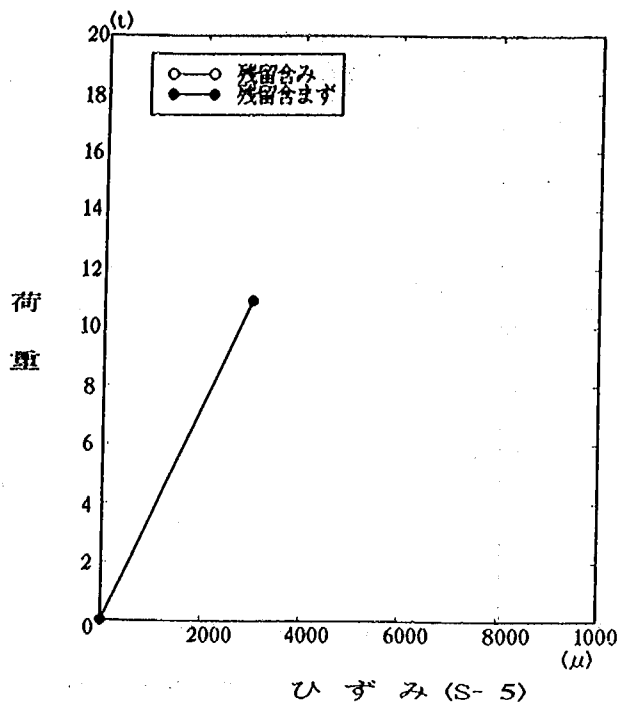


図-5.19 (b) 荷重-ひずみ曲線

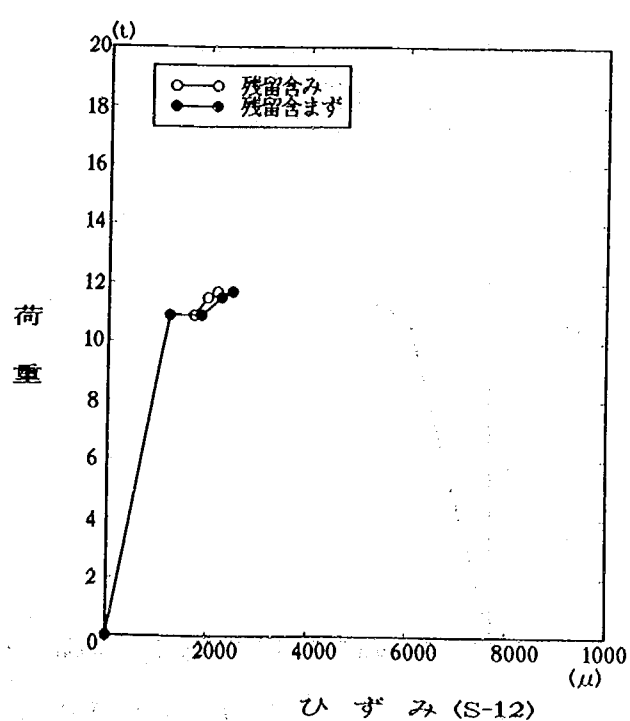
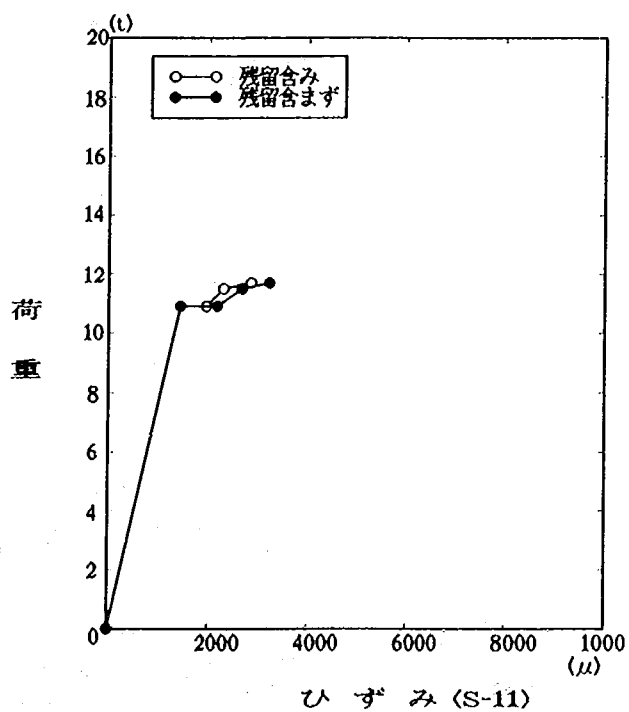
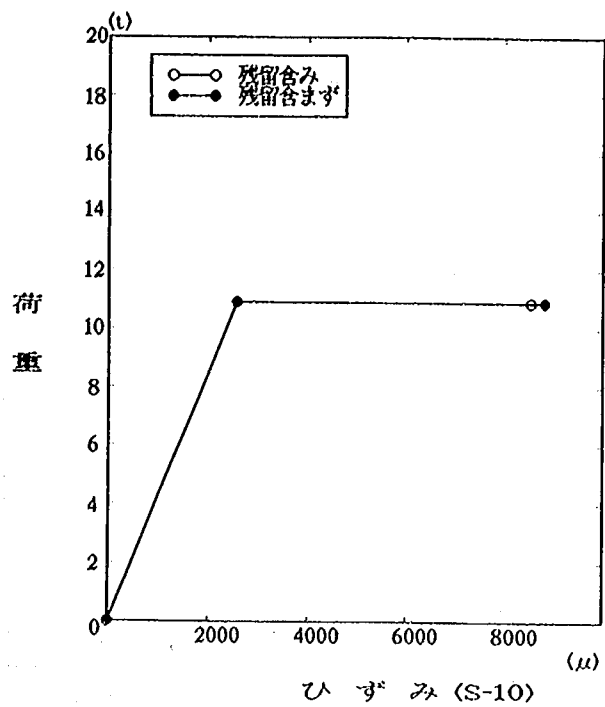
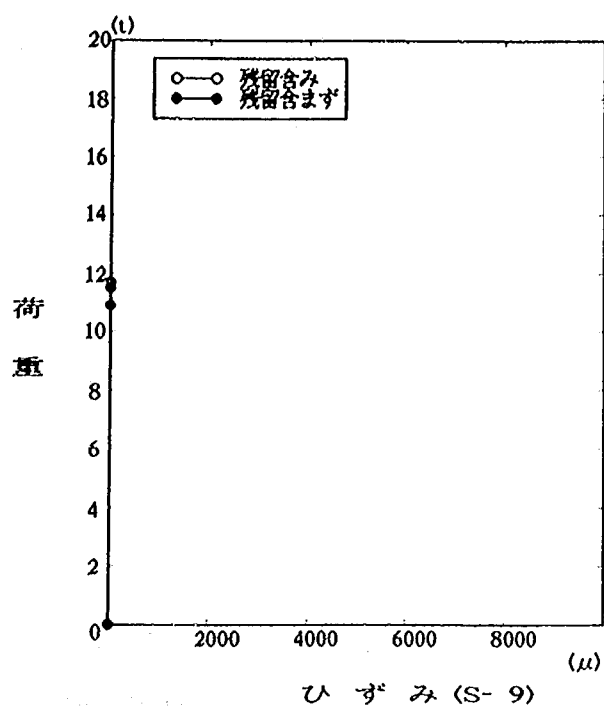


図-5.19 (c) 荷重-ひずみ曲線

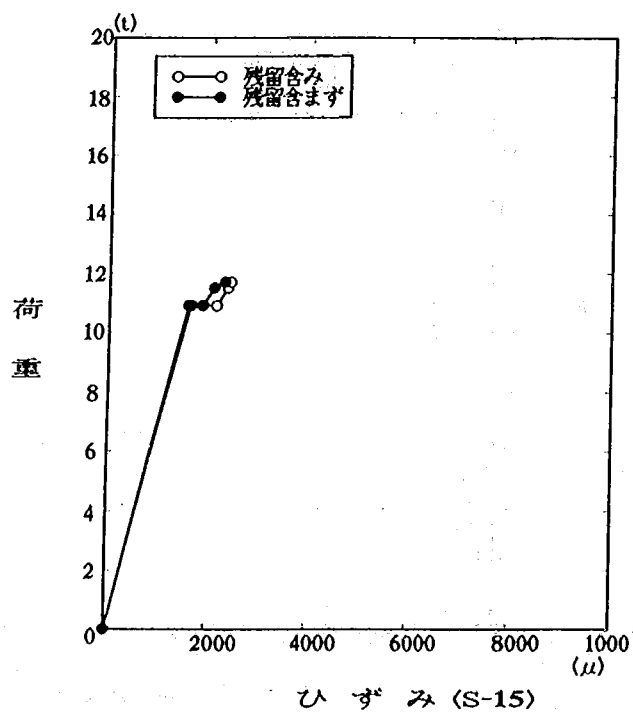
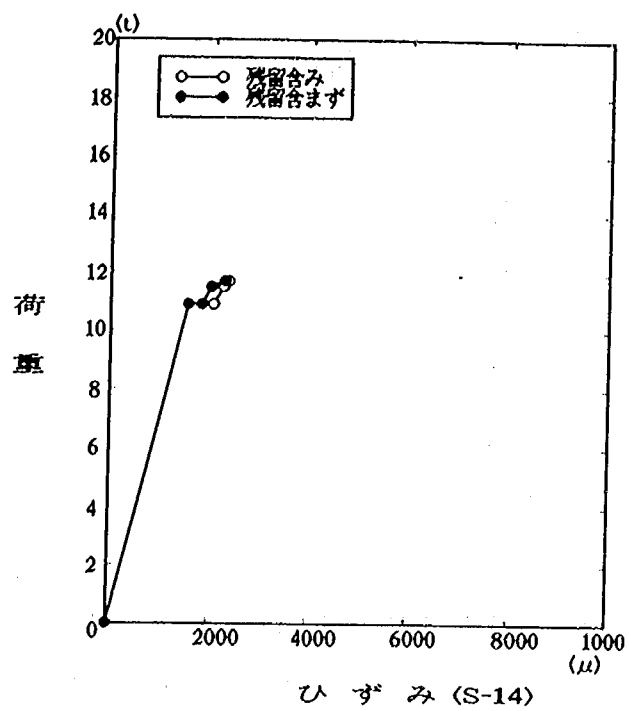
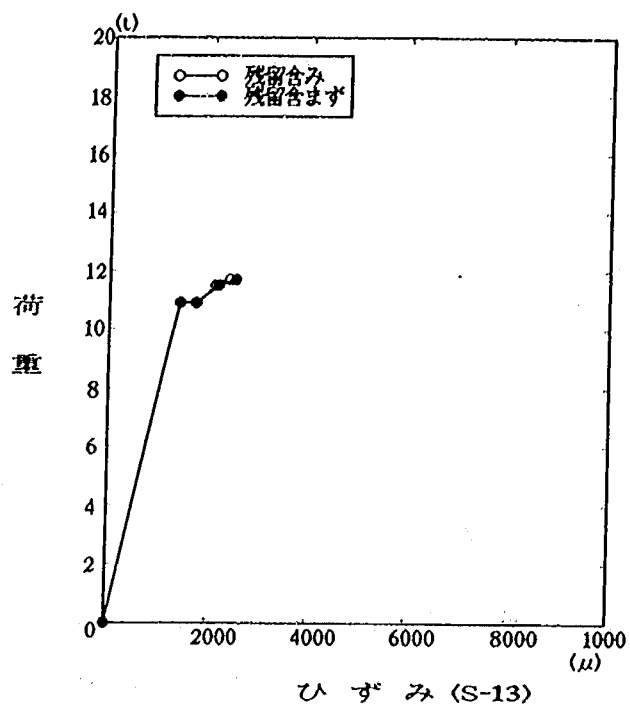


図-5.19 (d) 荷重-ひずみ曲線

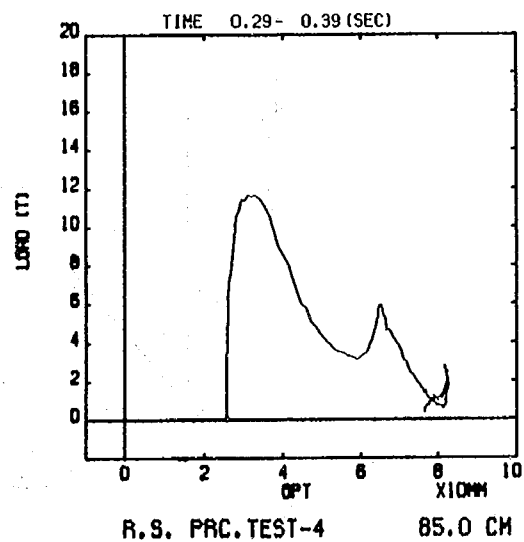
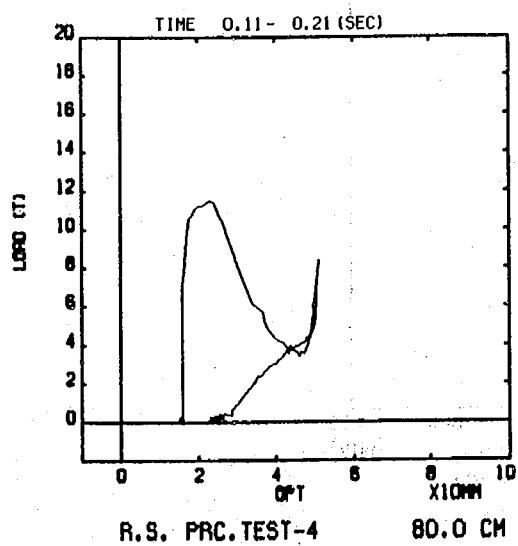
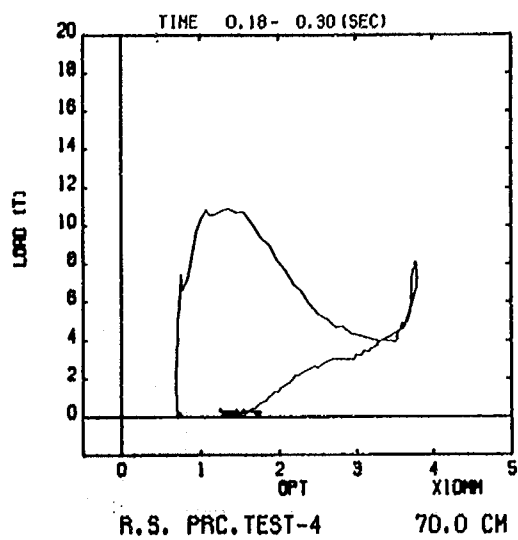
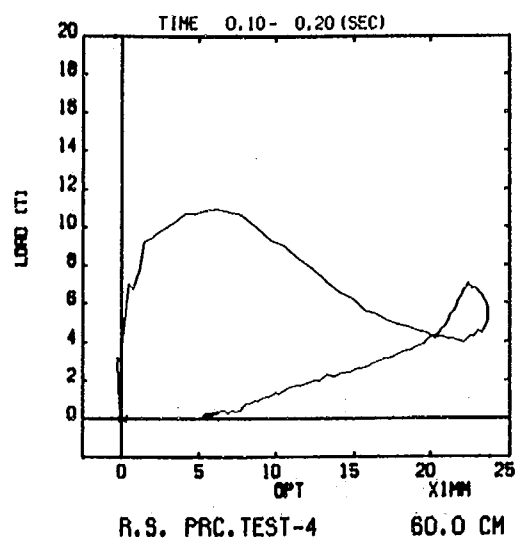


図-5. 20 荷重と桁中央変位の履歴曲線

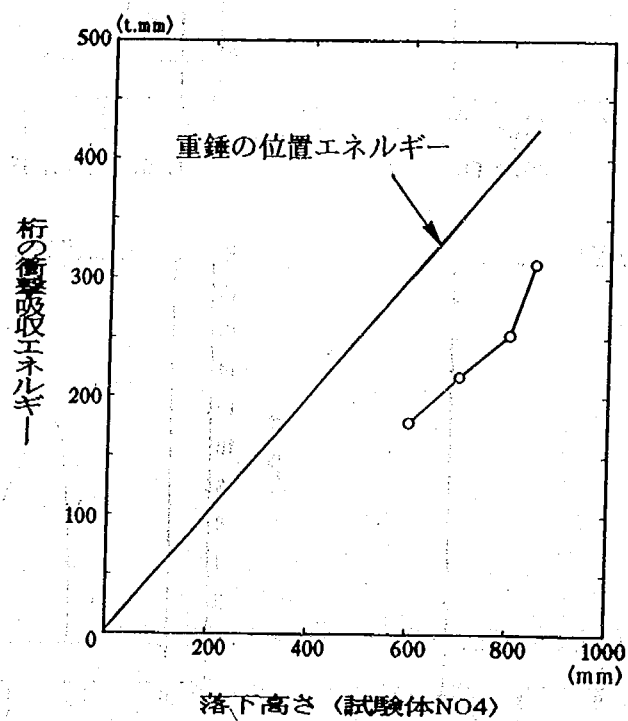


図-5.21 衝撃エネルギーと落下高さの関係

表-5.4 桁の衝撃吸収エネルギー
試験体 No.4

落下高さ H (mm)	ロードセルの 最大荷重 (t)	桁中央変位 (mm)	桁の衝撃吸収 エネルギー (t・mm)	位置エネルギー (t・mm)	位置エネルギー と桁衝 撃吸収エネルギー の比 (%)
600	10.943	23.6	177.851	300	59
700	10.872	30.7	216.649	350	62
800	11.510	35.5	252.375	400	63
850	11.652	57.3	311.991	425	73
					平均 64 (%)

$$\text{位置エネルギー と桁衝撃吸収エネルギー の比} = \frac{\text{桁の衝撃吸収エネルギー}}{\text{位置エネルギー}} \quad (\%)$$

5.5 試験結果比較

5.5.1 載荷方法に関する検討

1) 荷重と桁中央変位の関係

図-5.22は荷重と桁中央変位の関係を示したものである。クラックは静的載荷で4.0t、衝撃載荷では試験体No.2より落下高さ10cm（衝撃荷重4.4t）程度で発生すると推定できる。

同図において、処女載荷時の結果を結んだ線（図中の破線）を衝撃載荷時の荷重-変位包絡線とすることができる。すなわちこの包絡線は健全な桁に初めて衝撃力が作用するときの荷重-変位関係を示すものと思われる。静的載荷の最大荷重である約7.5tまでは、静的載荷、衝撃載荷共に試験結果が包絡線にほぼ一致している。

衝撃載荷試験では、どの試験体においてもロードセルによる衝撃荷重が約11t（落下高さ70cm）のとき、桁中央変位が約35mmとなるが、その後は破壊状況によって、荷重、変位の値に差がでている。

鋼材の破断時期は、静的載荷、衝撃載荷とも、荷重に差はあるが、変位が約60mmの時に生じている。

2) 荷重とひずみの関係

図-5.23は、荷重とゲージ(S-2,7,8)のひずみの関係を示したものである。

どの図も試験体No.2では、徐々にひずみが大きくなる傾向にあり、低荷重時には静的載荷の伸びと比較的似たような値を示した。つまり、落下高さが低いと静的載荷と似たような荷重とひずみの関係の挙動をとることが知られる。

試験体No.3,4では、試験体No.2に比べて大きな荷重となるが、高荷重であってもひずみの値が大きいとは限らないことが分かる。これは処女載荷の場合、剛性低下が生じていないからである。

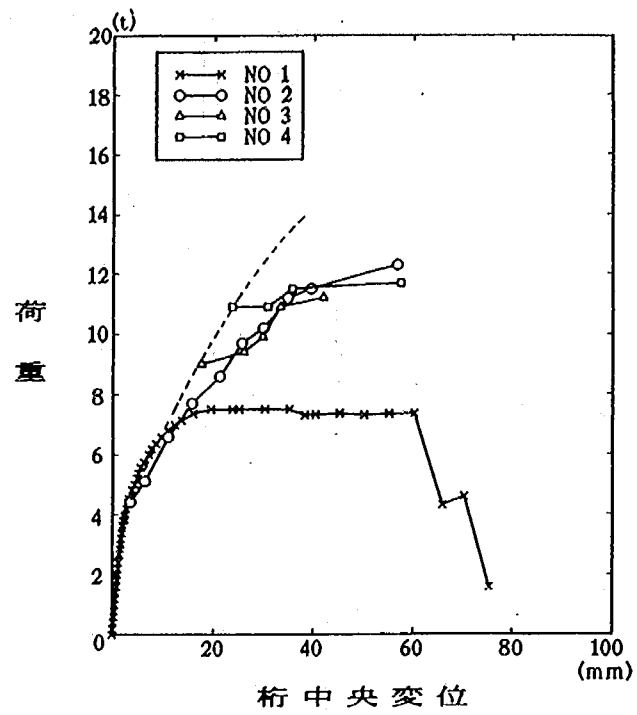
5.5.2 落下高さの影響

1) 衝撃エネルギーと落下高さの関係

図-5.24に衝撃吸収エネルギーと落下高さの関係を示す。衝撃吸収エネルギーは、荷重（ロードセルの値）と変位が描くループの面積として求めたものを用いた。3線とも、破壊寸前の落下高さになるまでは、ほぼ同一曲線上にあるといえる。破壊寸前では、損傷の程度によって衝撃エネルギーの値に変化が生じた。

2) 落下高さと最大変位の関係

図-5.25に落下高さと最大変位の関係を示す。これらは、終局前では、処女載荷の落下高さに関係なく落下高さに対して直線的に変位が増加していった。終局になった時には、クラックの本数が増えず、クラック幅の増加が大きくなり、変位の増加が大きくなっている。なお、試験体No.2は落下高さ90cmで大変位（崩落）のために、桁がクッション材位置まで落下している。試験体No.3は変位計が測定範囲外となっている。試験体No.4は、試験体No.2,3の結果をふまえて、落下高さを85cmとして、クッション材等にさわらない段階で終局変位としている。



図－5．2 2 荷重と桁中央変位の関係

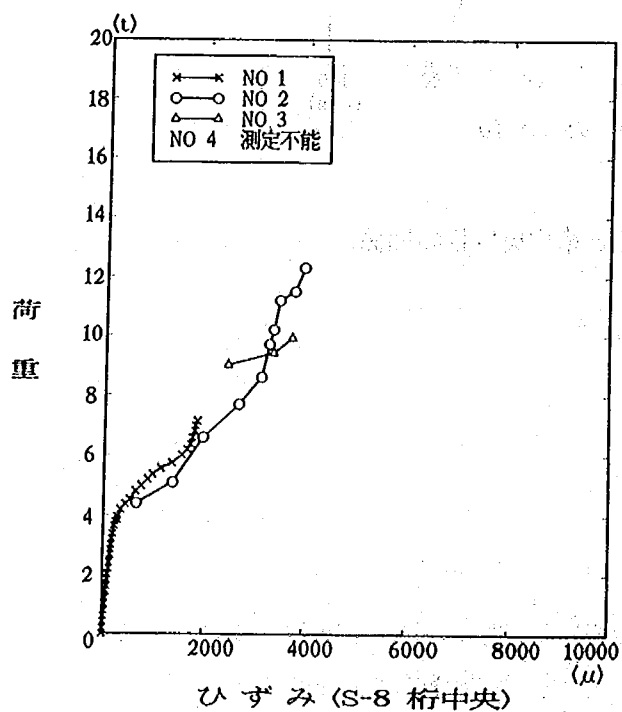
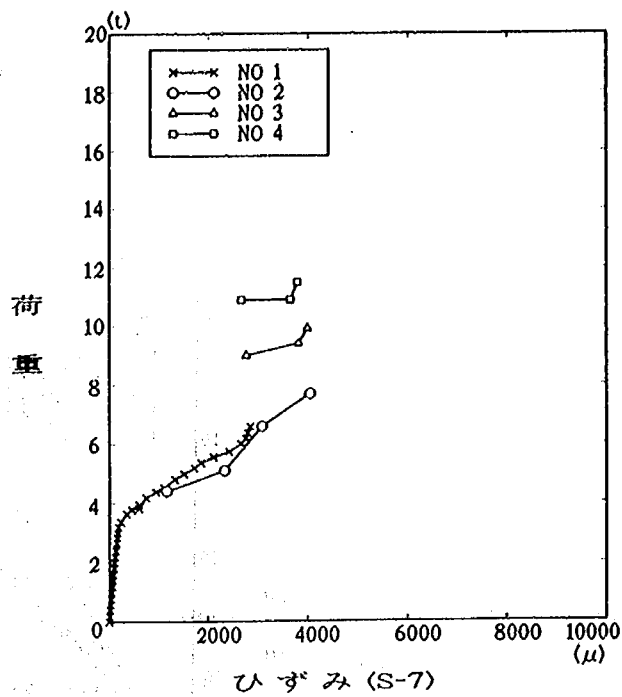
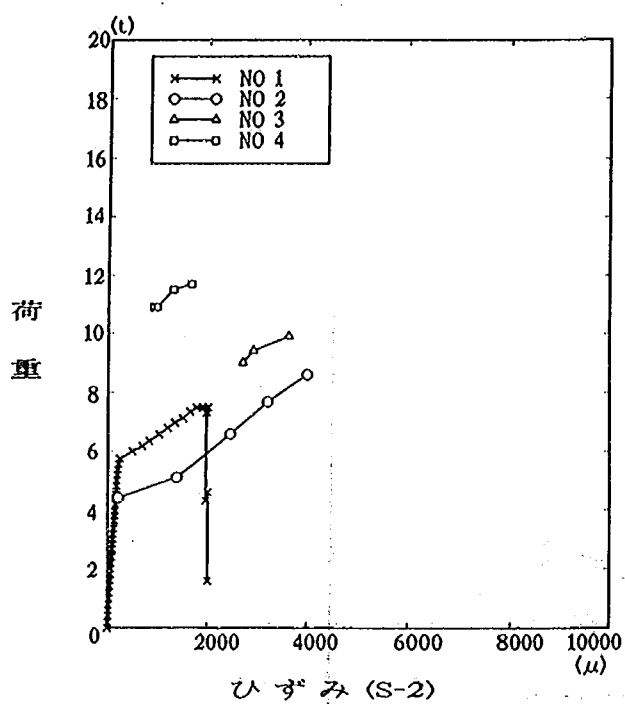


図-5.23 荷重とひずみの関係

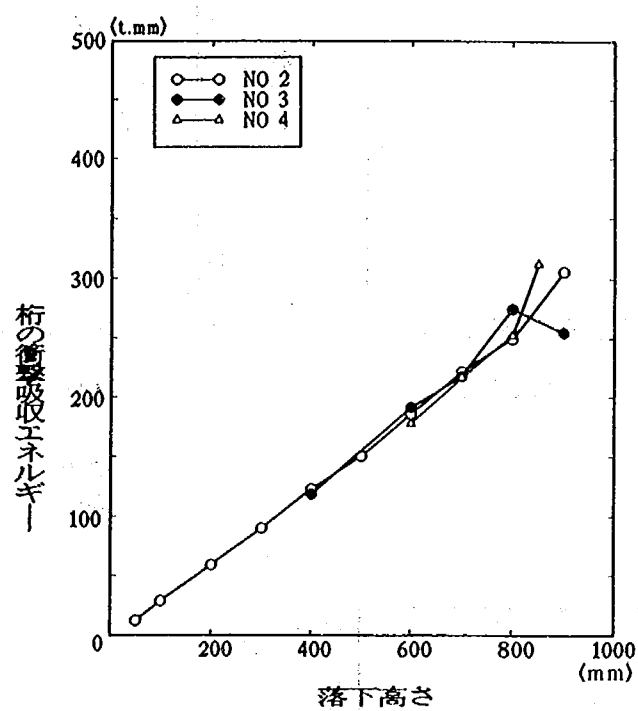
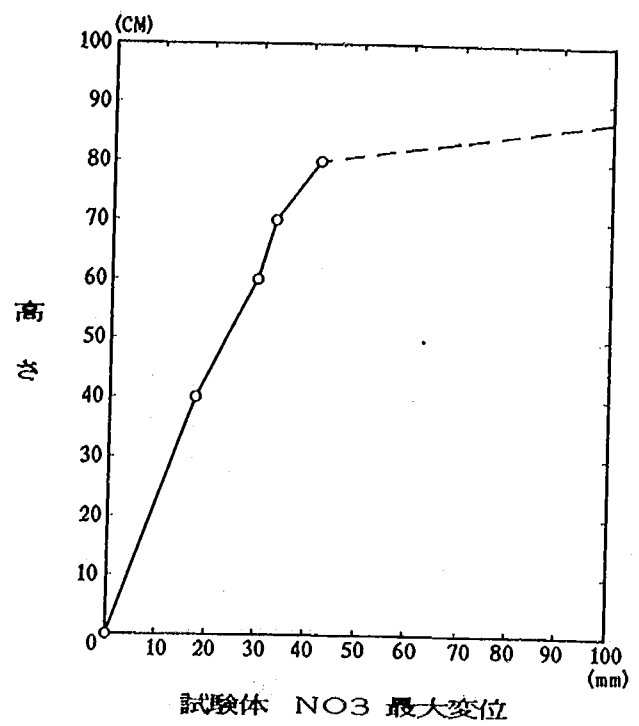
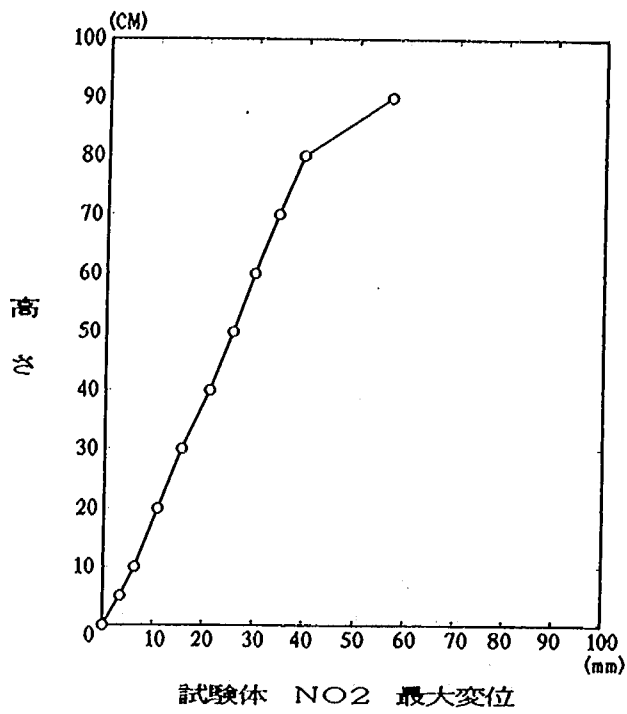


図-5. 2 4 衝撃吸収エネルギーと落下高さの関係



注) 落下高さ90cmでは
変位計がふりきれている。

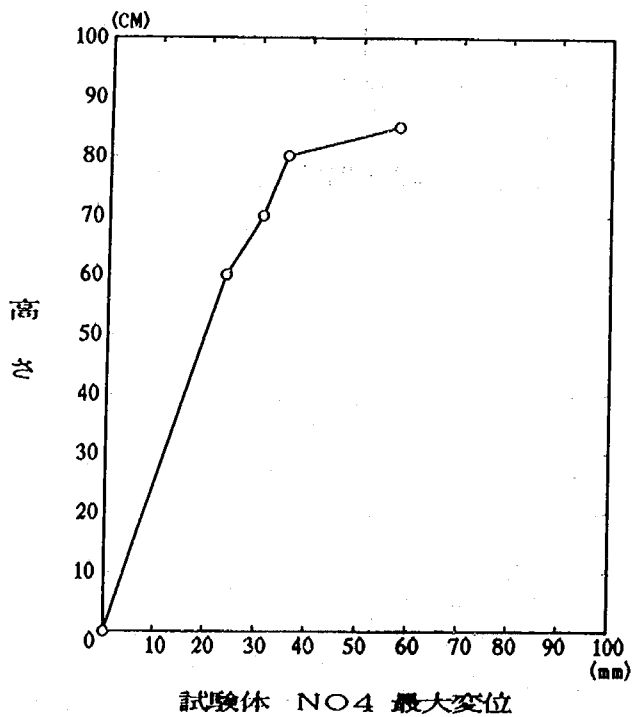


図-5.25 落下高さと最大変位の関係

5. 5. 3 衝撃エネルギーと位置エネルギーの関係

図-5. 26より、位置エネルギーと衝撃吸収エネルギーとの比は60～64%となり、処女載荷と最終載荷を除けば、どの試験体もほぼ直線となる。試験体No. 2は最終載荷のときにP C鋼より線は2本とも破断したため、桁下に配置したクッション材上に落ちてしまった。そのために、最大変位は実際の値よりも小さく表され、衝撃エネルギーは不正確に記録された。

試験体No. 3の最終載荷は、引張鋼材がすべて破断してしまい、桁の下に配置したクッション材上に落ちてしまった。そのため、図示された桁の衝撃吸収エネルギーは不正確なものである。

試験体No. 4ではP C鋼より線が破断し、変位が大きくなったものの鉄筋は破断しなかった。そのため、衝撃吸収エネルギーは鉄筋によって保持されるので、比較的大きな値を示した。

5. 5. 4 残留ひずみの検討

表-5. 5は試験体No. 2の残留ひずみの変化を表した。表の上には大まかな最終クラック図を示した。クラックが発生した位置にあるゲージは早期のうちにオーバースケールをおこし計測不能になってしまった。クラックに挟まれた区間(S-8など)は残留ひずみが圧縮(マイナス)として記録される結果となった。

表-5. 6は試験体No. 3の残留ひずみの変化を表している。試験体No. 3では、2箇所のゲージ(S-6, 9)付近で幅がかなり広いクラックが入った。最終載荷のときには、すべてのゲージで引張(プラス)を受けた結果を示したが、圧縮(マイナス)側に残留値が記録されたままで終了するものがあった。

表-5. 7は試験体No. 4の残留ひずみの変化を表した。この試験体でも、S-6のゲージ付近でかなり幅の広いクラックが入った。落下高さ $H=70\text{cm}$ のとき、桁中央付近で残留値が大きく引張(プラス)に記録された。クラックに近い位置であっても、圧縮(マイナス)を記録した部分があり、短区間の間に、P C鋼より線の影響を受ける部分と受けない部分とが存在していることが示された。

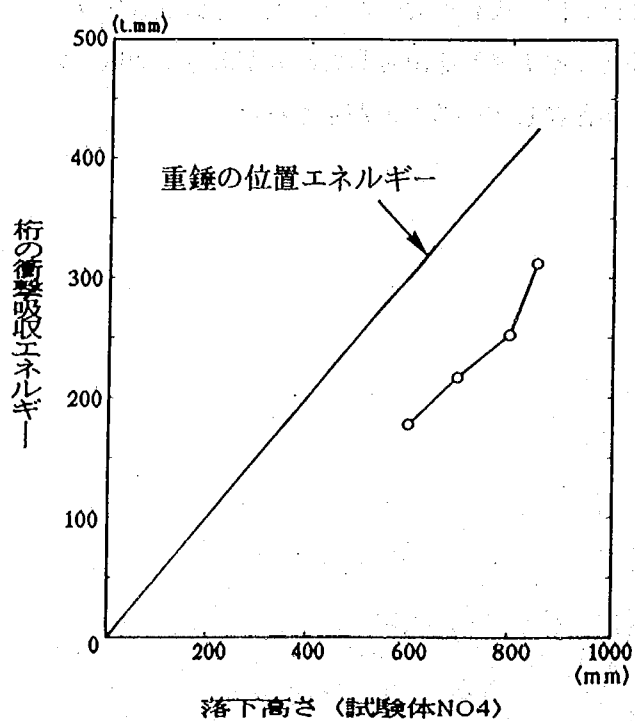
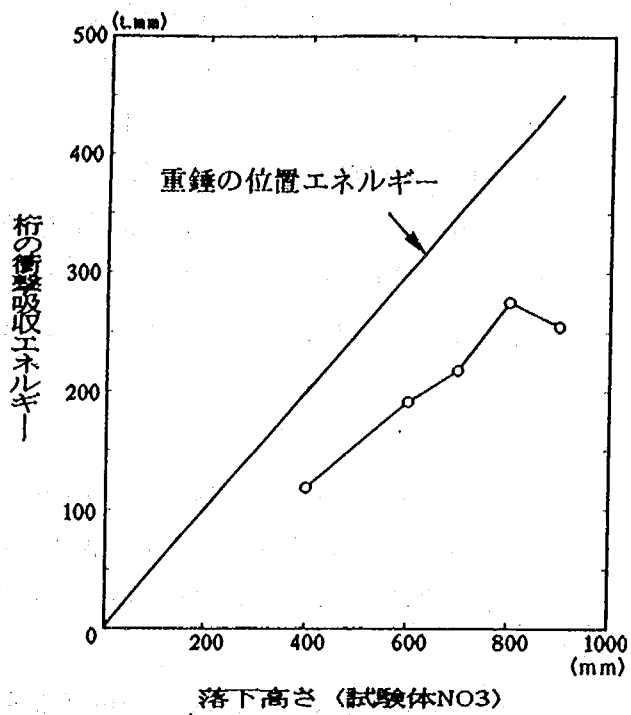
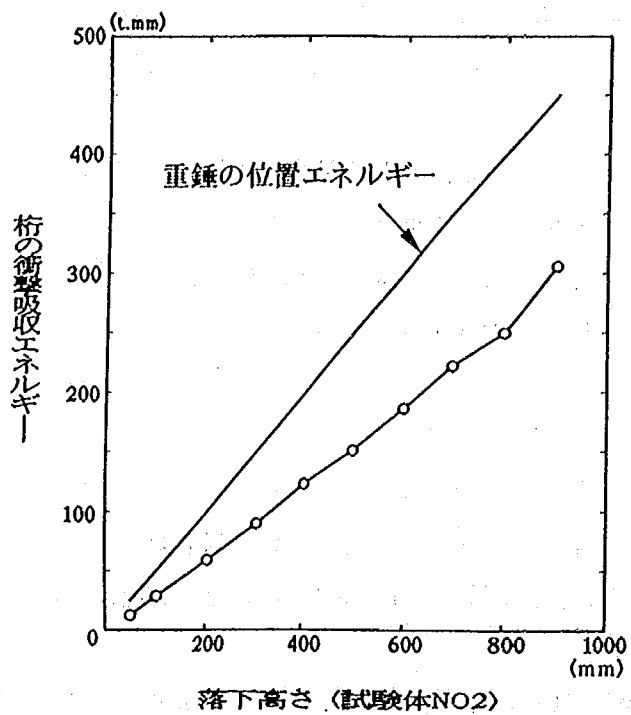


図-5. 26 衝撃エネルギーと位置エネルギーの関係

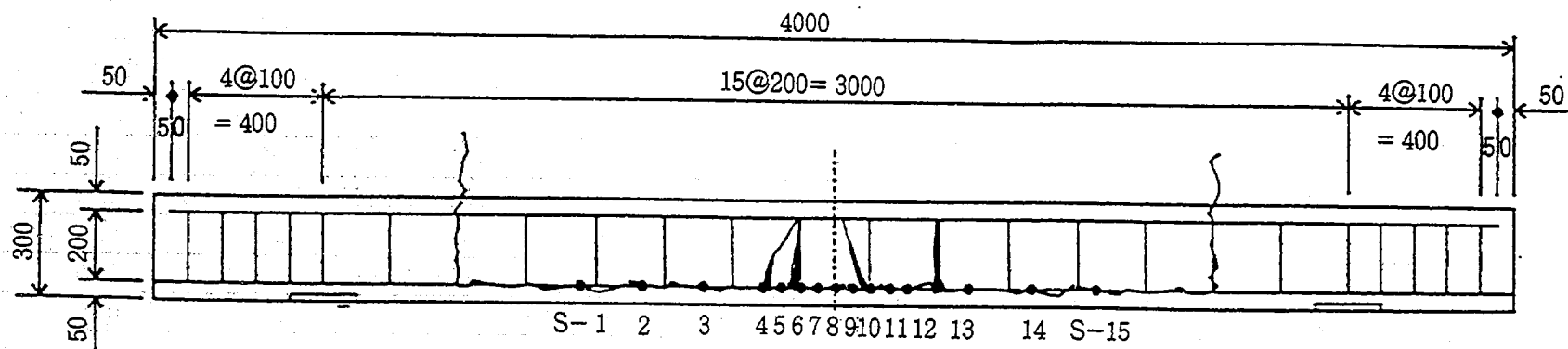


表-5. 5 残留ひずみと位置エネルギーの関係 (試験体No.2)

ゲージ (μ) 落下高さ (cm)	S- 1	S- 2	S- 3	S- 4	S- 5	S- 6	S- 7	S- 8	S- 9	S-10	S-11	S-12	S-13	S-14	S-15
5	-1	-2	-1	-2	-3	-5	-2	-2	-2	0	-1	-1	-1	0	49
10	0	1	9	104	100	90	121	111	64	83	27	102	9	2	53
20	2	85	170	241	259	252	249	221	239	271	207	198	132	52	110
30	58	117	130	-217	-355	6972	-531	-374	-249	-70	-	312	124	132	215
40	68	289	-10	-407	-614	-	-931	-718	-663	-	-	-589	-66	125	193
50	70	909	-146	-577	-1055	-	-933	-755	-754	-	-	-683	-101	121	186
60	77	2897	-196	-537	-1372	-	-10	-727	-739	-	-	-848	-101	112	177
70	73	6200	-1	-500	2549	-	-	-706	-	-	-	-881	-152	-24	23
80	61	-	134	-472	-	-	-	-680	-	-	-	-875	-221	-133	-87
90	61	-	-225	-519	-	-	-	-681	-	-	-	4359	-274	-87	-116

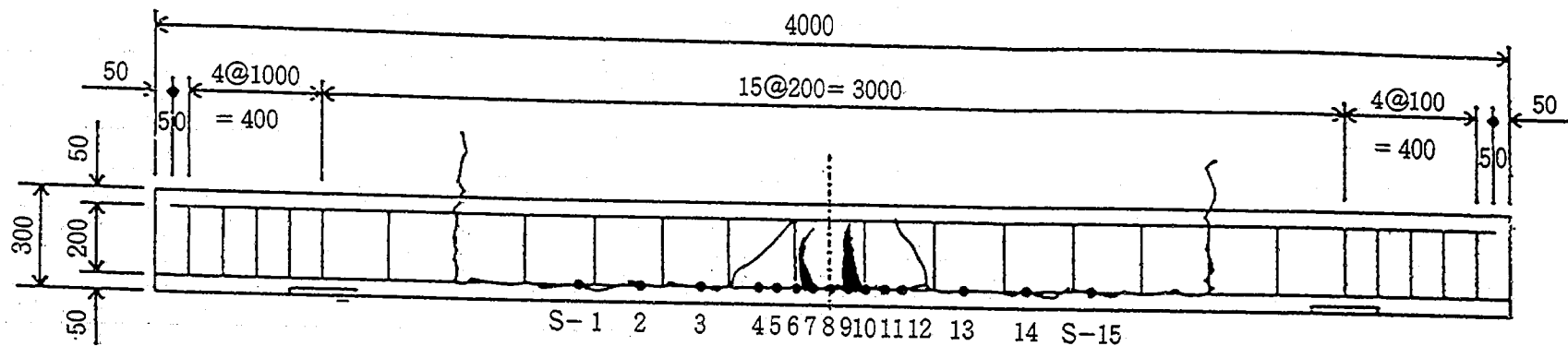


表-5. 6 残留ひずみと位置エネルギーの関係 (試験体No.3)

ゲージ (μ) 落下高さ (cm)	S- 1	S- 2	S- 3	S- 4	S- 5	S- 6	S- 7	S- 8	S- 9	S-10	S-11	S-12	S-13	S-14	S-15
4.0	-1	-2	-2	-2	-2	-	-1	-2	-	-2	-2	6	-2	-1	48
5.0	51	241	-173	-689	-	-	-860	-651	-	-829	-485	-249	231	12	75
6.0	83	298	-328	-625	-	-	-820	-650	-	-	-569	-491	255	23	89
7.0	100	882	-436	-579	-	-	-	-880	-	-	-601	-571	-	32	189
8.0	106	4296	-500	-636	-	-	-	-	-	-	-599	-647	-	48	423
9.0	247	6679	462	-	-	-	-	-	-	-	-336	96	-	190	1109

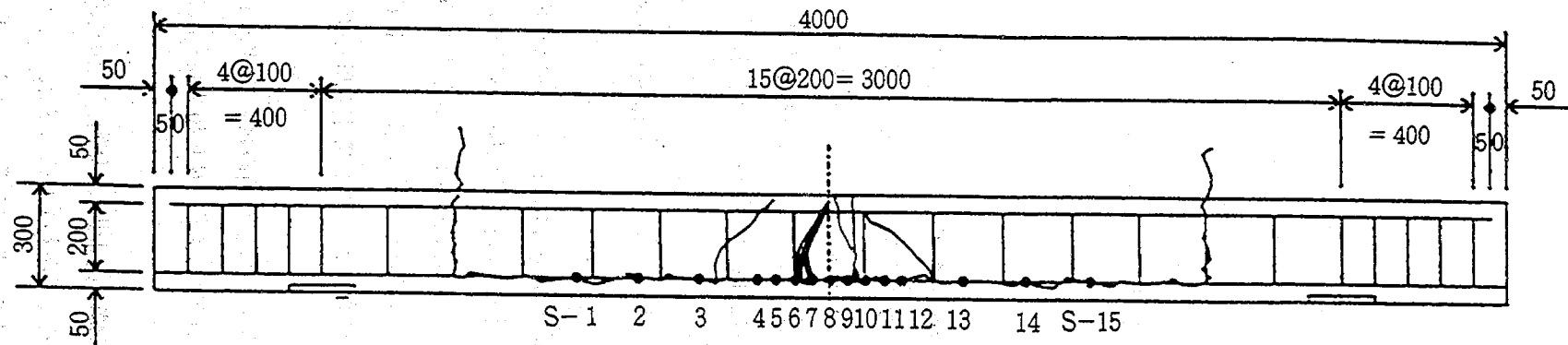


表-5. 7 残留ひずみと位置エネルギーの関係 (試験体No.4)

ゲージ (μ) 落下高さ (cm)	S- 1	S- 2	S- 3	S- 4	S- 5	S- 6	S- 7	S- 8	S- 9	S-10	S-11	S-12	S-13	S-14	S-15
6 0	-2	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	50
7 0	141	103	-109	-464	-942	1279	-767	2622	2663	-302	-236	-149	-6	223	266
8 0	175	35	-260	-476	2874	—	-691	771	3086	1498	-373	-279	-65	237	274
8 5	200	12	-329	-476	6563	—	-664	630	—	4143	-371	-310	-128	76	113

6. 実験の総括とP C, R C桁との比較

6. 1 P R C桁の特性

今回のP R C桁の静的載荷試験から、次のことが分かった

- ・クラックは、4.0t程度で発生し、最大荷重は約7.5tであった。
- ・最大変位は約75.0mm発生したが、鋼材の破断は約60.0mmで発生した。

また衝撃載荷試験から、次の点が明らかになった。

- ・クラックは、静的載荷と同様4.0t程度で発生し、最大荷重は約12tであった。
- ・衝撃載荷の場合、P C鋼より線の残留ひずみが圧縮となる場合が生じた。
- ・衝撃吸収エネルギーや最大変位は、桁が健全であれば、落下高さの増加に従って直線的に増加していく。
- ・衝撃吸収エネルギーの計算値より位置エネルギーの6割程度のエネルギーが、桁によって吸収されていることが示された。

6. 2 各種桁の特性比較

本試験シリーズとして過去にP C桁とR C桁についても同様の試験を実施¹⁾しているので、3種類の桁の特性について比較する。ここに、P C桁は引張側にP C鋼より線を配したのみで、鉄筋がない断面(20×30cm)、R C桁は鉄筋(D16, 2本)のみでP C鋼より線がない断面(20×40cm)であった。破壊荷重は、P C桁で5.4t、R C桁で6.3tと算定された。P R C桁は上記のP C桁に組立鉄筋(D10, 2本)を配したもので、その効果を破壊荷重の算出に考慮すれば、3. 2章に述べたごとく6.7tと上昇する。このような3種類の桁に関し、実験結果から次のようなことが分かった。

まず図-6. 1に静的載荷試験の荷重-変位曲線図を示す。実験からは、試算とは異なりR C桁が最も大きな耐力を示した。

表-6. 1は、各桁の靱性率を求めたものである。ここで、試験体の降伏判定は、試験体の鋼材ひずみが材料試験より求めた鋼材の降伏ひずみの値を超えた点とし、終局変位 δU は図-6. 1に示すとおり荷重が急激に下がったときの値とした。また最大荷重 P_{max} は、静的載荷中に記録した荷重の最大値である。表より、靱性率に着目すると、 $\mu = 19.8$ とR C桁が最も優れた結果を示した。P C桁は、 $\mu = 4.1$ (ただし、破壊荷重まで達していない)と、最も小さな値になった。そして本試験のP R C桁は、 $\mu = 15.3$ となりR C桁とP C桁の中間的な結果を示した。

図-6. 2は、静的載荷時と衝撃載荷時の荷重-変位曲線を示す。衝撃載荷時は、いずれも静的載荷時の最大耐力を上回っており、P C桁とP R C桁では静的載荷時の約1.7倍、R C桁では約2.8倍を示すものがあった。

図-6. 3は、図-6. 2の値を P_Y 、 δ_Y で正規化したものである。同図より衝撃載荷時の靱性率は、P C桁で10を越える程度なのに対し、P R C桁、R C桁では約20まで達している。ただし、P C桁では $\delta_Y = 9.7\text{mm}$ と他の桁に比べて2倍程度になっていることに注意する必要がある。これは、P C桁では引張鉄筋がないためP C鋼材のひずみが降伏ひずみを越えた点を降伏としているためである。この降伏ひ

ずみを鉄筋の降伏ひずみと同等に取れば、P C桁の靱性率は当然ながらもっと大きくなる。正規荷（P / PY）の最大値は静的載荷ではP R C桁が約1.5 と最も高い値を示したが、衝撃載荷ではP R C桁が約2.5、P C桁が約2.3 に対し、R C桁は約3.3 と高い値を示している。

図- 6 . 4 は、上記のP / PY ~ $\delta / \delta Y$ 曲線において処女載荷を結んだ包絡線を比較したものである。同図から、3 種の正規化された包絡線そのものには、大差はないようであるが、R C桁が最も靱性を期待できるようである。

表- 6 . 1 各桁の靱性率

	降伏ひずみ $\varepsilon Y (\mu)$	降伏変位 $\delta Y (mm)$	降伏荷重 $P Y (t)$	終局変位 $\delta U (mm)$	最大荷重 $P_{max}(t)$	靱性率 μ
PRC 桁	1852	4.3	4.980	65.8	7.581	15.3
P C 桁	3063	9.685	5.813	40.095*	7.050	4.1
R C 桁	1656	4.043	6.003	80.0	7.850	19.8

* P C桁は、終局に至るまで試験を行なわなかったもので、参考値として記載する。

$$\text{靱性率 } \mu = \frac{\text{終局変位 } \delta U}{\text{降伏変位 } \delta Y}$$

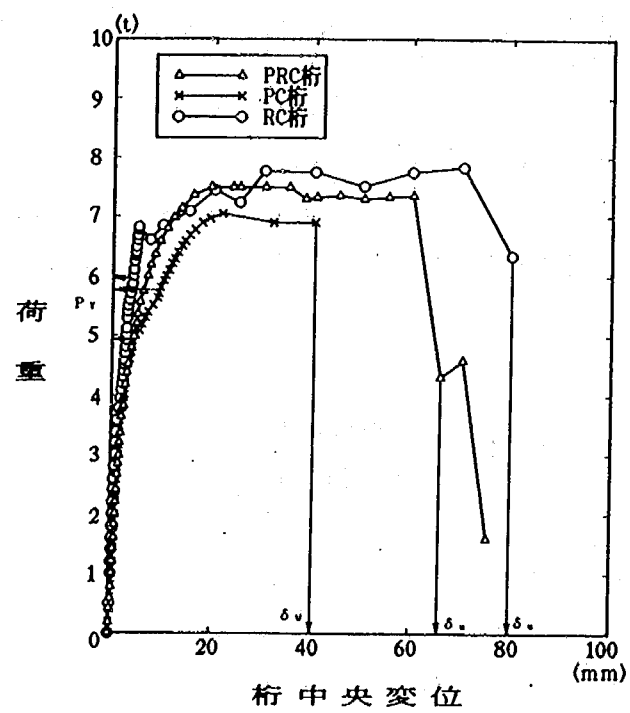


図-6.1 荷重-変位曲線比較(静的載荷試験)

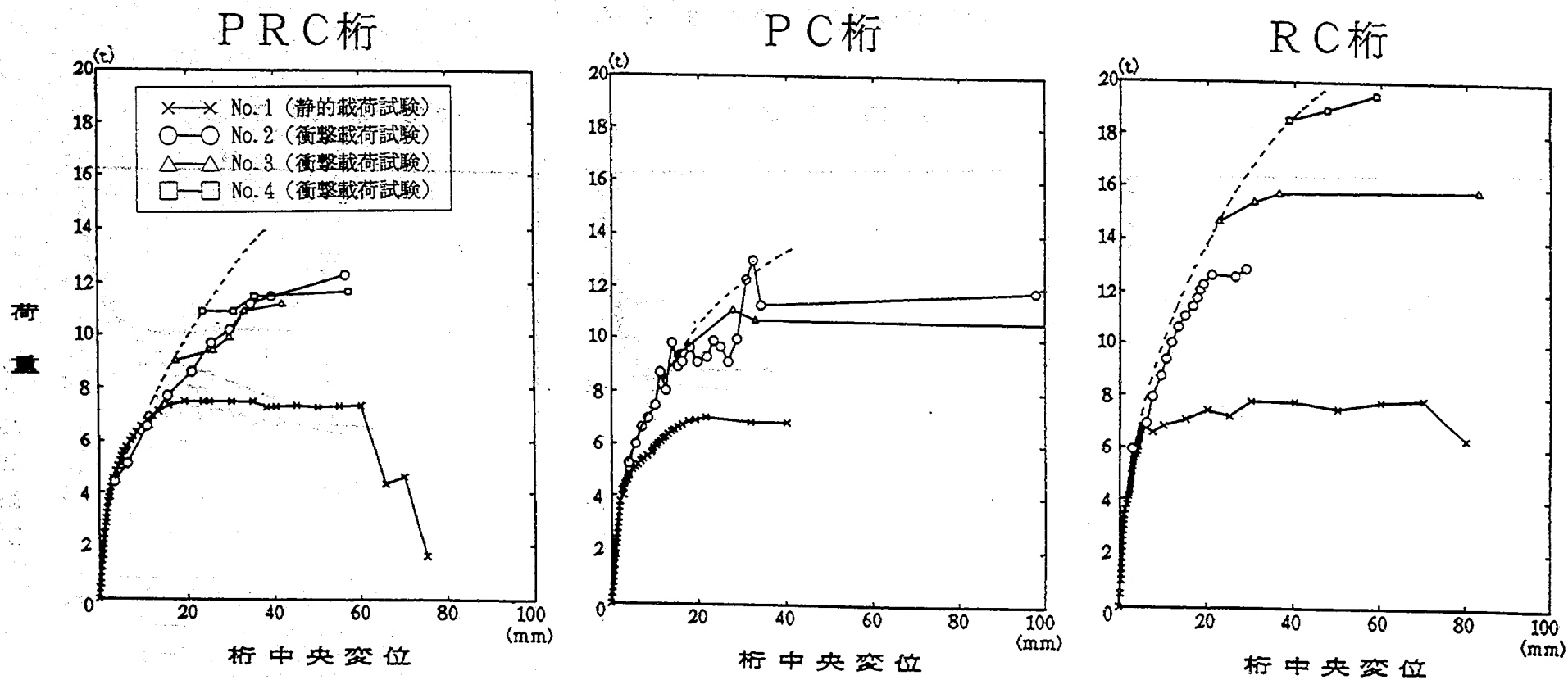
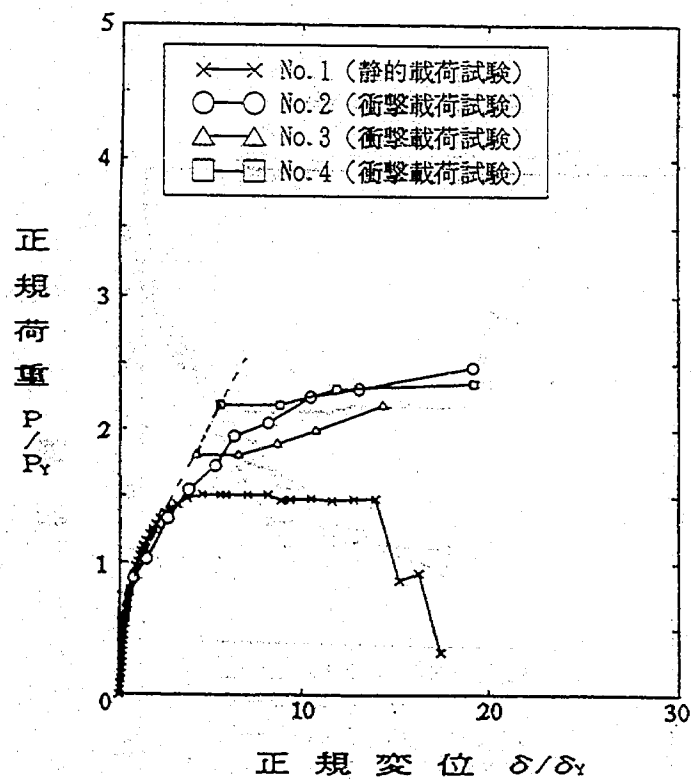
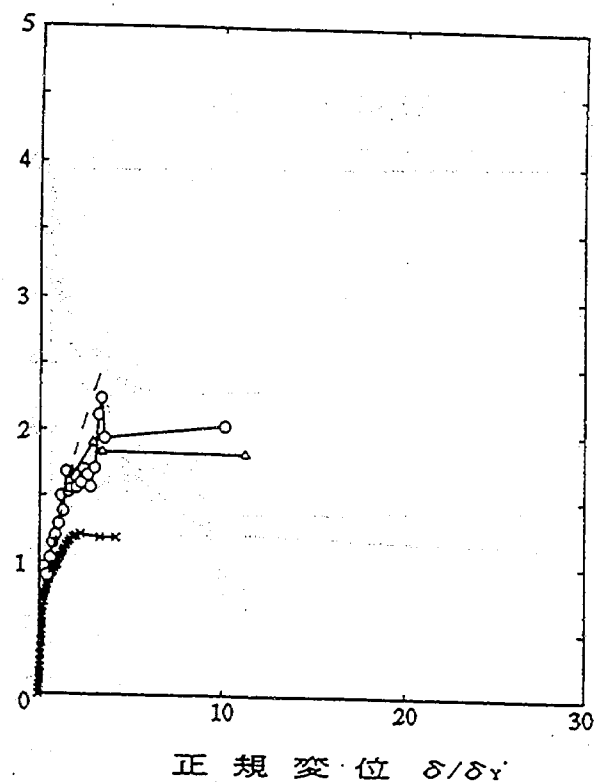


図-6.2 荷重-変位曲線比較 (衝撃载荷試験)

PRC桁



PC桁



RC桁

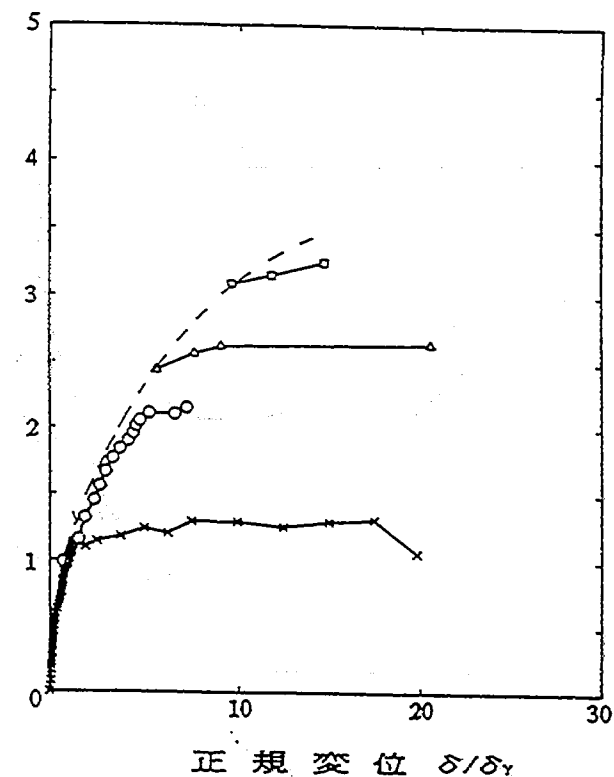


図-6.3 正規化した荷重-変位の関係

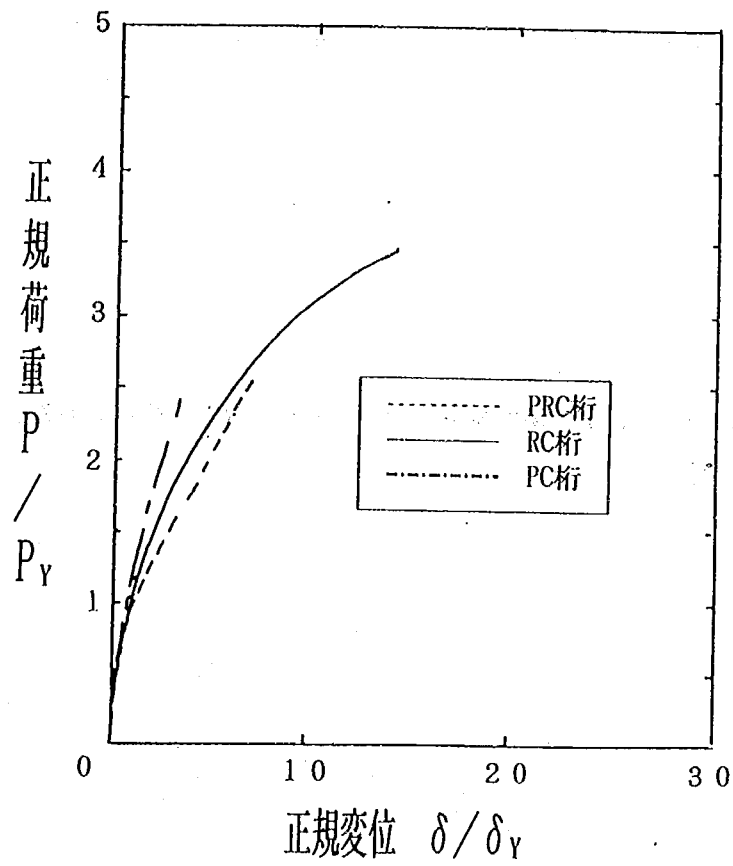


図-6.4 正規化した荷重-変位の関係（包絡線の比較）

あ と が き

本研究では、ロックシェッド桁の衝撃耐力の増加を図るために、施工性の面で優れたP C桁と耐衝撃性の面で靱性の高いR C桁の両方の特性を備えたP R C桁に着目し、同桁模型に対して静的載荷試験および衝撃載荷試験を行った。

本実験によりP R C桁においても、P C桁、R C桁と同様に衝撃時の最大耐力は静的載荷時のそれを上回ることと、P R C桁の靱性率はP C桁とR C桁の中間に位置することが分かった。

今後P R C桁の設計にあたっては、初期プレストレスの設定や断面決定において種々の自由度があるためロックシェッドに適したP R C桁の開発には更なる研究が必要である。

参考文献

- 1) 横山, 大塚, 小路, 金子; 衝撃荷重を受けるP C, R C桁の応答特性, 土木研究所資料第3045号
平成3年12月

衝撃荷重を受けるPRC桁の応答特性

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3173号
平成5年3月 (1993)

横山 功一 佐藤 弘史
大塚 久哲 長尾 彰洋

要旨：本研究では、ロックシェッド桁の衝撃耐力の増加を図るための新しい部材として、施工性に優れたPC桁と耐衝撃性に優れた靱性の高いRC桁の中間的な特性を備えたPRC桁に着目し、同桁模型に対して静的載荷試験及び衝撃載荷試験を行った。

本研究により、PRC桁における静的耐力と衝撃耐力の関係、エネルギー吸収性能、PC桁やRC桁との応答の相違点等に関していくつかの知見が得られた。

キーワード：PRC桁、衝撃荷重、衝撃耐力、エネルギー吸収性能

郵便はがき

切手
はって
下さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

構造橋梁部構造研究室 行

No. 3

No. 3

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3173号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印