共同研究報告書
整理番号第361号

FRPを用いた橋梁の設計技術に関する共同研究報告書(II)

－引抜成形GFRP材を用いた車道用床版の輪荷重走行試験－

平成19年2月

独立行政法人土木研究所
旭硝子マテックス（株）
石川島播磨重工業（株）

共同研究報告書
第361号2007年2月

FRPを用いた橋梁の設計技術に関する共同研究報告書(II)

－引抜成形GFRP材を用いた車道用床版の輪荷重走行試験－

独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ 橋梁チーム
上席研究員　村越　潤
主任研究員　田中　良樹
研　究　員　長屋　優子
旭硝子マテックス(株) 提案企画部
渡辺　哲也
石川島播磨重工業(株) 橋梁事業部設計部技術開発グループ
課　　長　小川　潤一郎
鈴木　統

要旨

繊維強化プラスティクス(FRP)の道路橋床版(車道部)への適用性を検討するため，引抜成形GFRP材(ガラス繊維／ビニルエステル)を用いた総FRP床版の輪荷重走行試験を実施した。総FRP床版供試体は100 kNの輪荷重を約70万回走行させても特段の変状は見られなかった。その後さらに鉄筋コンクリート床版の疲労耐久性の評価法である階段載荷試験を255 kNまで実施した。その間，床版上板の局部曲げによるひび割れや曲げに伴うせん断ひび割れ，層間剥離，パネル間接合部の剥離などが発生したが，版全体の残留変位は小さかった。本報告書では，これらの試験結果を示した上で，損傷が厳しかった上板の局部曲げ疲労について，設計の基礎となるS-N線を整理するとともに，FRP床版の設計・施工において考慮すべき事項をとりまとめた。

キーワード：引抜成形GFRP，橋梁床版，総FRP床版，疲労，輪荷重走行試験

目　次

1．はじめに …… 1

2．既往の研究 …… 2

2.1　FRP の道路橋床版への適用事例と課題 …… 2

2.2　箱断面 GFRP 部材の静的及び疲労挙動 …… 3

2.3　FRP 床版の静的及び疲労挙動 …… 4

3．試験方法 …… 5

3.1　材料 …… 5

3.2　供試体 …… 7

3.3　載荷方法と測定項目 …… 12

3.4　解体調査 …… 22

4．走行試験前における静的載荷試験結果 …… 24

4.1　版としての挙動 …… 24

4.2　載荷点付近の局部的な挙動 …… 27

5．一定荷重走行試験結果 …… 29

5.1　供試体の変状 …… 29

5.2　動的挙動の経時変化 …… 31

5.3　一定荷重走行試験後の静的挙動 …… 46

6．階段載荷試験結果 …… 51

6.1　走行試験中の変状観察 …… 51

6.2　動的挙動の経時変化 …… 57

6.3　各ステップの静的挙動 …… 76

7．解体後の断面観察 …… 83

7.1　セル内面のひび割れ …… 83

7.2　接着接合部の剥離 …… 93

8．考察 …… 101

8.1　版全体の静的挙動 …… 101

8.2　上板の静的挙動 …… 106

8.3　繰返し載荷に伴う変位の推移 …… 111

8.4　上板下面の疲労 …… 114

8.5　床版への適用性 …… 118

9．まとめ …… 120

参考文献 …… 121

付録資料 …… 123
付録１．FEMによる事前検討 …… 125
付録２．供試体の組立て工程 …… 133
付録３．材料試験結果 …… 138

1．はじめに

米国では凍結防止剤の散布による鉄筋コンクリート床版(RC 床版)の塩害対策として，コンクリートのかぶり厚の増加，水セメント比の低減，エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用などが施されている。また，近年，さらなる耐久性向上を求めてステンレス鋼材などの高耐食性鋼材を用いた鉄筋の使用，電気防食など，さまざまな対策の適用性の検討と試験的導入が行われている[1.1)-1.3)]。その対策工法の一つとして，繊維強化プラスティクス(FRP)を部分的あるいは全面的に床版材料に採用するための研究と試験施工事例が報告されている[1.4)]。FRP は，比較的高価であるが，塩化物に対する耐腐食性に優れた材料であることからライフサイクルコストの軽減が期待されるとともに，従来の材料に比べて軽量であることから床版取替えなどにおける施工時間の短縮が期待される。米国においては，1960 年代に建設された RC 床版はかぶりが比較的小さく，床版取替え時に現行基準に適したかぶり厚の適用は死荷重の過大な増加を招くことから，既設床版の取替えにおいては FRP の適用機会が得られる可能性がより大きいと考えられる。

日本では，これまでの RC 床版の損傷のほとんどが大型車の繰返し載荷に起因した疲労によるものであった[1.5),1.6)]。しかし，1990 年代のスパイクタイヤの禁止以降，凍結防止剤の散布量が急増しており，米国と同様の塩害劣化が懸念される[1.7)]。

道路橋の床版に FRP を適用した場合，大型車の輪荷重が版上に直接載荷されることとなるので，輪荷重の繰返し載荷による疲労に対する耐久性を確認する必要がある。特に日本では RC 床版，鋼床版ともに多くの疲労損傷の経験から，FRP を道路橋の床版に適用する際に疲労に対する検討が不可欠である。日本において，総 FRP 歩道橋の適用事例が 1 件あるが[1.8)]，車道用に総 FRP 床版を適用した事例がない理由の一つには，疲労に対する懸念があげられる。

車両が通行する道路橋の床版に総 FRP 床版を採用した事例は海外で既に 50 橋以上となっている[1.4)1.8)]。しかし，FRP 床版の車両走行下における疲労耐久性は，実際の道路へ適用しても直ちに把握することが容易でない。既往の研究では，実物大の FRP 床版供試体を用いた定点疲労試験[1.9)]や版厚 50mm の小型 FRP 床版供試体による輪荷重走行試験[1.10)]などの事例があるが，RC 床版の疲労耐久性評価のために開発された輪荷重走行試験[1.11)1.12)]のような，現実的な荷重レベルで走行載荷した事例はこれまでに見られない。

本共同研究では，平成 14～16 年度にかけて，FRP の道路橋床版への適用性を明らかにするため，道路橋床版に FRP を適用する場合の力学的特性を把握するとともに，施工性，経済性も考慮に入れてその適用性について検討を行った[1.13)-1.15)]。このうち，表面疵が引抜成形 GFRP 厚板の静的挙動及び疲労挙動に及ぼす影響について検討した結果は，共同研究報告書第 341 号としてとりまとめた[1.16)]。その後引き続き，引抜成形 GFRP 厚板を用いた総 FRP 床版の輪荷重走行試験を実施した。本報告書は，その結果得られた総 FRP 床版の疲労挙動に関する知見についてとりまとめたものである。

2．既往の研究

2.1　FRP の道路橋床版への適用事例と課題

FRP を床版に適用した事例のうち，米国 Salem Avenue Bridge の適用事例報告は FRP の道路橋への適用に際して様々な視点から多くの課題を紹介している[2.1)]。オハイオ州道路局(ODOT)は，同橋の床版取替えの際，3 種類の総 FRP 床版と FRP コンクリート合成床版の計 4 種類の床版を試験的に適用した。Salem Avenue Bridge は，橋長 210 m，幅員 14.63 m であり，元の RC 床版の版厚は 200 mm であった。この既設床版の版厚は床版取替えの制約の一つであった。総 FRP 床版の個々のパネル(プレハブ部材)の大きさは 14.63 m×2.44 m であった。総 FRP 床版の採用によって床版自重を元の RC 床版から 80 %軽減した。

施工時の課題として，製品によっては工期を短縮できたものもあったが，継手の調整，不陸調整に手間を要したこと，軽量とはいっても重機は必要であったこと，照明柱などの付属物の固定に工夫がいることなどが挙げられた。

供用後，2 種類の総 FRP 床版は剥離が発生するとともに，いたるところで漏水が発生したため，供用 3 ヶ月で通行止めとなり，1 年半後に普通の RC 床版に変更された。剥離の原因は，輪荷重の繰返し載荷と温度変化によるものであり，1 種類の総 FRP 床版はハンドレイアップ部の品質の悪さにも起因した。路面はポリマー(材質，厚さなど詳細は不明)で保護されたが，温度変化による伸縮や不陸によりほとんどの継手部分でひび割れが発生した。

なお，FRP コンクリート合成床版は，当然ながら自重軽減の効果はなく，コンクリートの施工が入るために十分な工期短縮にはならなかったが，型枠を省略できるとともに，総 FRP 床版のような施工，維持管理の問題は見られなかった。

米国道路庁(FHWA)では，各州における約 50 橋の試験施工から FRP の道路橋への適用性について経験を蓄積しているところであり，道路橋に用いる FRP に関する今後の調査すべき課題として表-2.1 に示す項目を列挙している[2.2)]。

表-2.1　道路橋に用いる FRP に関する今後の調査すべき課題[2.2)]

1) 温度特性(全体及び局所的な影響)	10) 橋梁用防護柵と床版への取り付け
2) (桁との)合成挙動	11) 疲労及び長期性能
3) 桁との連結	12) 点検及びモニタリング方法
4) 設計の合理化	13) 補修，補強及び補剛
5) たわみ管理	14) クリープ及び破断による脆性破壊の可能性
6) 樹脂や接着剤の選定，等級区分，耐久性	15) (RC 床版取替における)死荷重を軽減した後の動的荷重に対する橋全体系の挙動の変化
7) 輪荷重下の局部変形	16) 再利用，リサイクル材の可能性
8) (路面の)表面保護層の選定と施工	
9) パネル間の現場接合	

注) カッコ内は本共同研究担当者の解釈による補足。

2.2　箱断面 GFRP 部材の静的及び疲労挙動

Nagaraj らは，102mm×102mm×6 mm の箱断面の引抜成形 GFRP 部材(grass/polyester，V_f : 40 %)を用いて，支間 1828 mm，3 点曲げ載荷による静的及び疲労試験を実施した。疲労試験は，荷重振幅一定，応力比 0.1，1～5 Hz で行われ，10 万回ごとの静的載荷により曲げ剛性の確認が行われた[2.3)]。この試験から以下の結果が得られた。

a) 製造時の層構成のばらつき及び剛性の圧縮時と引張時の違いなどにより，中立軸は必ずしも図心と一致しなかった。

b) 静的載荷の終局時に圧縮フランジの局部座屈が見られた。

c) 曲げ疲労試験では、以下の順で破壊が生じた。

① 荷重直下付近のフランジとウェブの角に微細なひび割れが生じる。

② 載荷点付近のウェブに局部変形が生じる。

③ フランジとウェブの角のひび割れが軸方向に伸展する。

④ ウェブがほとんどの荷重を直接受けるようにして，弱軸方向（面外曲げか）の曲げ破壊が生じ，終局に至る。

d) 曲げ疲労試験の結果は実測ひずみで S-N 図上に整理された。文献ではひずみの測定位置が不明確であり，破壊形態との関係も不明確であるが，概して荷重レベルに応じて疲労寿命が変化していたことが分かる。

e) 疲労試験中の曲げ剛性の低下は破壊直前まで見られなかった。

f) GFRP はせん断剛性が低いので，たわみの算定にウェブのせん断弾性係数を考慮する必要がある。

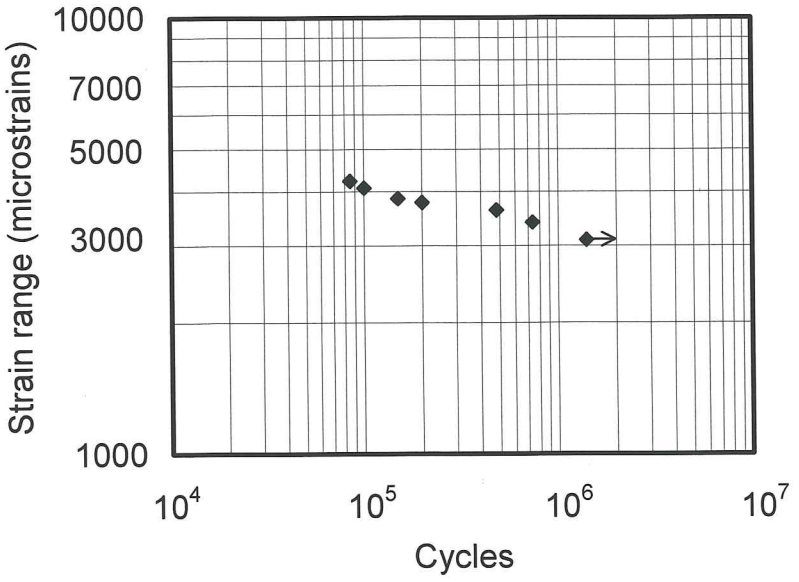


図-2.1　箱断面 GFRP 部材の疲労試験結果(Nagaraj らの結果より[2.3)])

2.3 FRP 床版の静的及び疲労挙動

Hayes らは，12 本の正方形中空箱断面の引抜成形 GFRP の上下に引抜成形 GFRP 平板を張り合わせた床版供試体(長さ 1.22 m×支間 3@1.22 m(3 径間連続版)×高さ 121 mm)を用いて，静的及び疲労試験を実施した[2.4]。高さは対象としていた既設橋の床版取替えを考慮して 127 mm 以下とするように制約されていた(既設橋の床版は厚い鋼グレーチング床版)。個々の箱断面部材の断面は 102 mm×102 mm×6.35 mm，平板は厚さ 9.35 mm で，いずれも引抜成形 GFRP(glass/polyester，V_f：不明)であった。箱断面部材間はエポキシ樹脂接着剤で接着するとともに，ウェブに貫通孔を設けてφ25.4 mm の FRP ボルト・ナットで箱断面部材 12 本をまとめて横締めされた。ボルトピッチは床版支間方向に 305 mm 間隔であった。また，上下の平板との接着はエポキシ樹脂接着剤によった。載荷は静的，疲労ともに床版中央に載荷面積 508 mm×305 mm で荷重を負荷した。疲労試験としては，最大荷重 92.5 kN(最大設計輪重に相当)，上下限の荷重比 0.1，2～3 Hz で 300 万回まで定点繰返し載荷が行われ，その後に静的破壊試験が行われた。これらの試験から主に以下の結果が報告された。

a) 荷重 92.5kN を載荷した際の最大たわみは 3.81 mm であり，床版支間の 1/270 であった。

b) 静的載荷では 347 kN で一旦荷重が低下した。さらに載荷を続けたところ直線性は失われながらも最大荷重は 369 kN まで増加し，押し抜きせん断破壊(上板の曲げ破壊，下板のせん断破壊，FRP ボルトのせん断破壊の複合的な破壊)に至った。

c) 3 百万回の繰返し載荷の結果，疲労による外見上の変状は見られなかった。3 百万回の繰返し載荷を行った後の 92.5kN 静的載荷時最大たわみ 4.32 mm は，繰返し前の同たわみ 3.81mm よりもやや大きい傾向が見られた。

d) 3 百万回の繰返し載荷を行ったパネル(3 スパンのうちの 1 スパン)の破壊時の荷重，たわみ，ひずみ及び破壊形態は，繰返し載荷を行わなかったパネルの破壊時に比べて顕著な差がなく，繰返し載荷による顕著な剛性低下は認められなかった。

Coogler らは，版厚 195mm，板厚 15.9～19.1 mm(変断面)の 2 室(2 セル)の箱断面引抜成形 GFRP 部材により構成された総 FRP 床版供試体の静的載荷試験を行い，その挙動が FEM 解析により精度よく予測できることを報告している[2.5]。床版支間直角方向の挙動はフィーレンディールに類似していたとしている。

また，Coogler らは同文献の中で，同じ部材で構成された既設橋 FRP 床版のひずみ計測を行った結果(結果の詳細の記述はない)，既設の FRP 床版は一方向版として設計されたが，実際の挙動では二方向版として挙動していたこと，特に軸直角方向の剛性が低いことから設計での配慮が必要であると述べている。さらに，ACI で FRP の疲労強度として $0.2f_u$ 以下(f_u：引張破断強度)を推奨している事例などを引用して，FRP 床版にも長期耐久性の検討が必要であり，現行の設計では疲労の照査が行われていないが今後は必要であること(同文献では疲労試験を行っていない)，FRP 床版供試体の断面観察で 5 種類の不完全な箇所(引抜成形材内の層間割れ，接合部の接着不良，各層厚の不均一など)が見られたことを補足している。

Zhou らは，152 mm×152 mm×9.5 mm の箱断面引抜成形 GFRP 部材 10 本を接着剤及びボルトで連結した FRP 床版供試体を作成して，タイヤの形状を模擬した載荷治具を用いて静的載荷試験を実施した[2.6]。その結果，従来の鋼板で載荷した場合と破壊形態が大きく異なり，FRP 床版の上板の軸直角方向の局所曲げ破壊が生じることがわかった。

3．試験方法

3.1 材料

FRP 床版の供試体を形成する引抜成形材の材料諸元を表-3.1.1 に示す。また，参考として表-3.1.2 にビニルエステル樹脂単体の一般的な強度特性を示す。SP250，F1000 いずれも，ガラス繊維，ビニルエステル樹脂で構成された引抜成形 GFRP である。SP250 は中空箱型断面(250 mm×250 mm, 板厚 12 mm)の引抜成形 GFRP 材である(図-3.1.1)。各辺ともに厚さ 12 mm と比較的厚板であるとともに，主要部分の一方向ロービング層の両側表層に 0/90 のクロス材とマット層(ガラス繊維がランダムに入った表面保護層)が配置されている(図-3.1.2)。F1000 は平板の引抜成形 GFRP 材であり，主要部分の一方向ロービング層の両側表層にマット層が配置されている。

床版の組立てに用いる接着剤は 2 液混合型エポキシ樹脂接着剤(シーカデュア W，以下接着剤という)を使用した。

表-3.1.1　試験に用いた GFRP の材料諸元

名　称			SP250		F1000	
断面形状寸法		mm	250(H)×250(W)×12(t)		1000(W) × 4.2(t)	
繊維含有率 V_f		%	57		50	
層構成		%	CSM / RH / ROV = 7.2*2 / 6.6*2 / 72.5		CSM / ROV = 16.9*2 / 66.2	
繊維方向			0	90	0	90
強度	引張	MPa	495	54	474	39
	圧縮	MPa	478	(60)	524	141
	曲げ	MPa	559	168	398	133
	面内せん断	MPa	(30～50)		28～30	
	層間せん断	MPa	(30)		(30)	
	横せん断	MPa	(150)	(30)	(150)	(30)
弾性係数	引張	GPa	38.3	13.8	26.3	12.3
	圧縮	GPa	40.8	-	29.8	10.2
	曲げ	GPa	25.1	12.9	14.4	9.4

注 1)　CSM：マット層，RH：クロス層(0/90)，ROV：ロービング層
注 2)　SP250，F1000 はさまざまな材料構成があるので注意する
注 3)　(　)内数値は既往のデータに基づく参考値
注 4)　SP250 の 0°の引張強度は前回共研報告書 341 号を参照した

表-3.1.2　ビニルエステル樹脂単体の強度特性(参考)

引張強度	MPa	70～90
引張弾性係数	GPa	2.7～3.2
引張伸び率	%	3～6
圧縮強度	MPa	220～260
曲げ強度	MPa	130～150
曲げ弾性係数	GPa	3.0～3.8

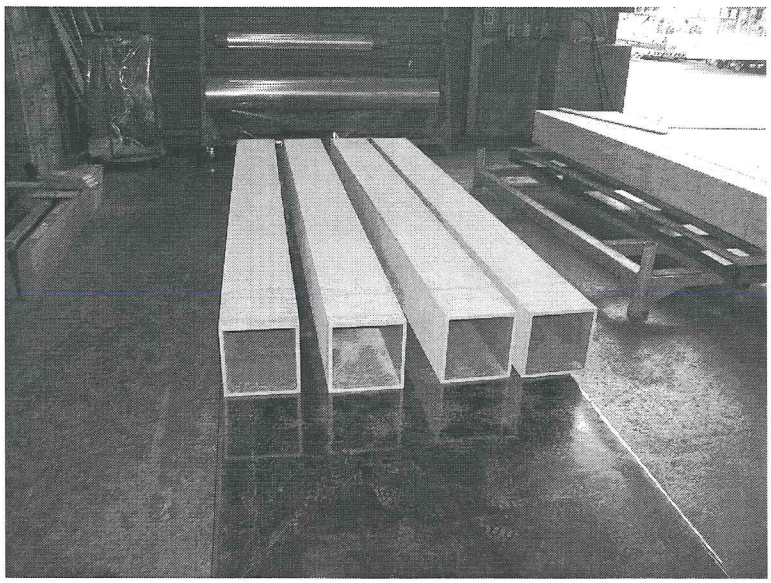


図-3.1.1　SP250 の外観

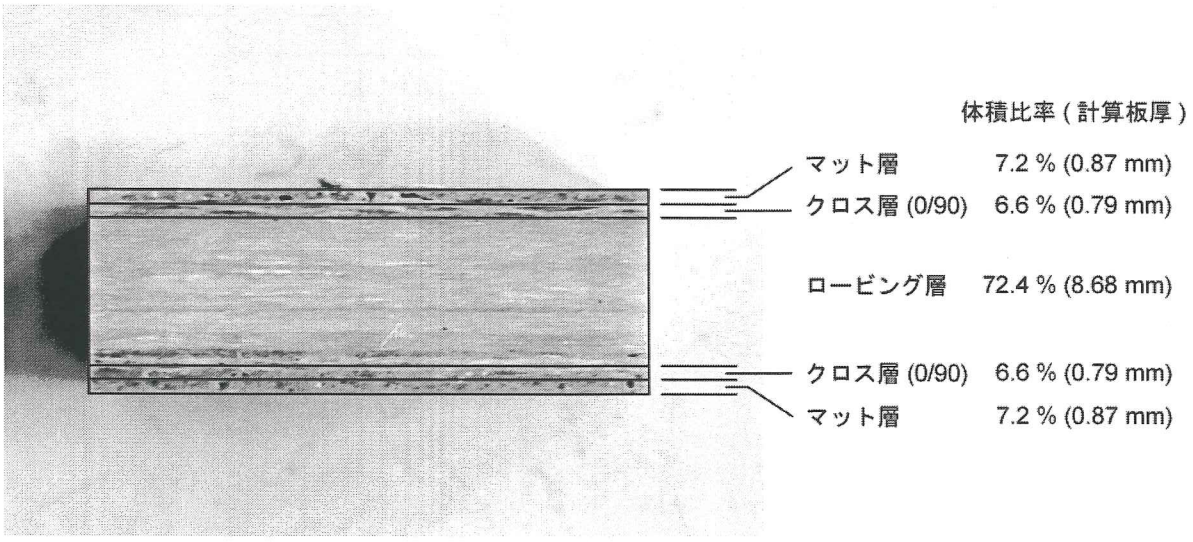


図-3.1.2　SP250 の層構成

3.2 供試体

図-3.2.1 に全 GFRP 床版供試体の形状寸法を示す。また，図-3.2.2 に供試体の外観を示す。比較的大断面で，既存の引抜成形型枠のある SP250 を用いること，既往の RC 床版の輪荷重走行試験の形状寸法 2.8 m(B)×約 0.2～0.25 m(H)×4.5 m(L)と同程度の実物大とすることなどを勘案して，供試体寸法は 2.8 m(B)×0.27 m(H)×3.5 m(L)とした。前掲表-3.1.1 に示した SP250 と F1000 を，接着剤を用いた接着接合により組み立てた。SP250 は，製造工場で 4 個 1 組を 1 パネルとして予め組立てた後，試験施設に搬入して床版供試体を組み立てた(組立て詳細は付録 2 に示す)。1 パネルの基本断面構成を図-3.2.3 に示す。事前に行った FEM 解析及び接着に関する予備試験の結果より [3.1), 3.2)]，輪荷重直下付近で局部応力が大きく，ウェブ間の接着のはがれも懸念されたことから，床版供試体は SP250 の上に F1000 を 3 層(床版支間に対して 90°/ 0° / 90°)，下に 1 層(同 90°)をそれぞれ貼り付けた。結果的に床版高さが約 270 mm となり，版全体としての剛性も大きく改善された。

SP250 間の接着では，部材間に接着剤を塗布した後，H 鋼を両端に置き，ねじ切り鋼棒で締め付けて固定した(図-3.2.4)。また，F1000 の貼り付けでは，接着剤を塗布して貼り合わせた後，部材上面に重し(H 鋼)を置いて固定した(図-3.2.5)。接着剤の塗布量は 1kg/m^2 を目安とした。接着剤が硬化するまでの養生期間は 1 日とした。

パネル間の接着も SP250 と同様の方法で行った(図-3.2.6)。供試体の平坦性を確保するため，できるだけ平坦な場所(土木研究所構造物実験施設内の試験機のレール上)で組立てを行った。その際，接合部の一部，SP250 と下側の F1000 の間に養生用のビニルシートが巻き込まれていた(図-3.2.7)。

表-3.2.1 に試験後に四辺の位置で測定した供試体全高を示す。また，表-3.2.2 に試験後に切断した断面で測定した上板，ウェブ，下板の各厚さを示す(剥離の影響の少ない c ライン(図-3.4.1)のみのデータ)。これらの結果と素材の板厚の差から接着層(SP250，F1000 の接着に用いた接着剤の層)の平均厚さを算出した結果を表-3.2.3 に示す。全高から算出した 1 層当り接着層厚は 0.5 mm，上板，ウェブ，下板の測定結果から算出した 1 層当り接着層厚はそれぞれ 1.3, 1.2, 1.8 mm であった。これらの相違は，接着剤の塗布量，押し付け力などの施工方法や，収縮やクリープにより SP250 の各辺がわずかに内側に反っていたことに起因したものと考えられる。以降の計算に用いる諸元としては全高 270 mm，1 層当り接着層厚は 1.3 mm とする。

参考として，表-3.2.4 に供試体の単位面積当たり質量を示す。

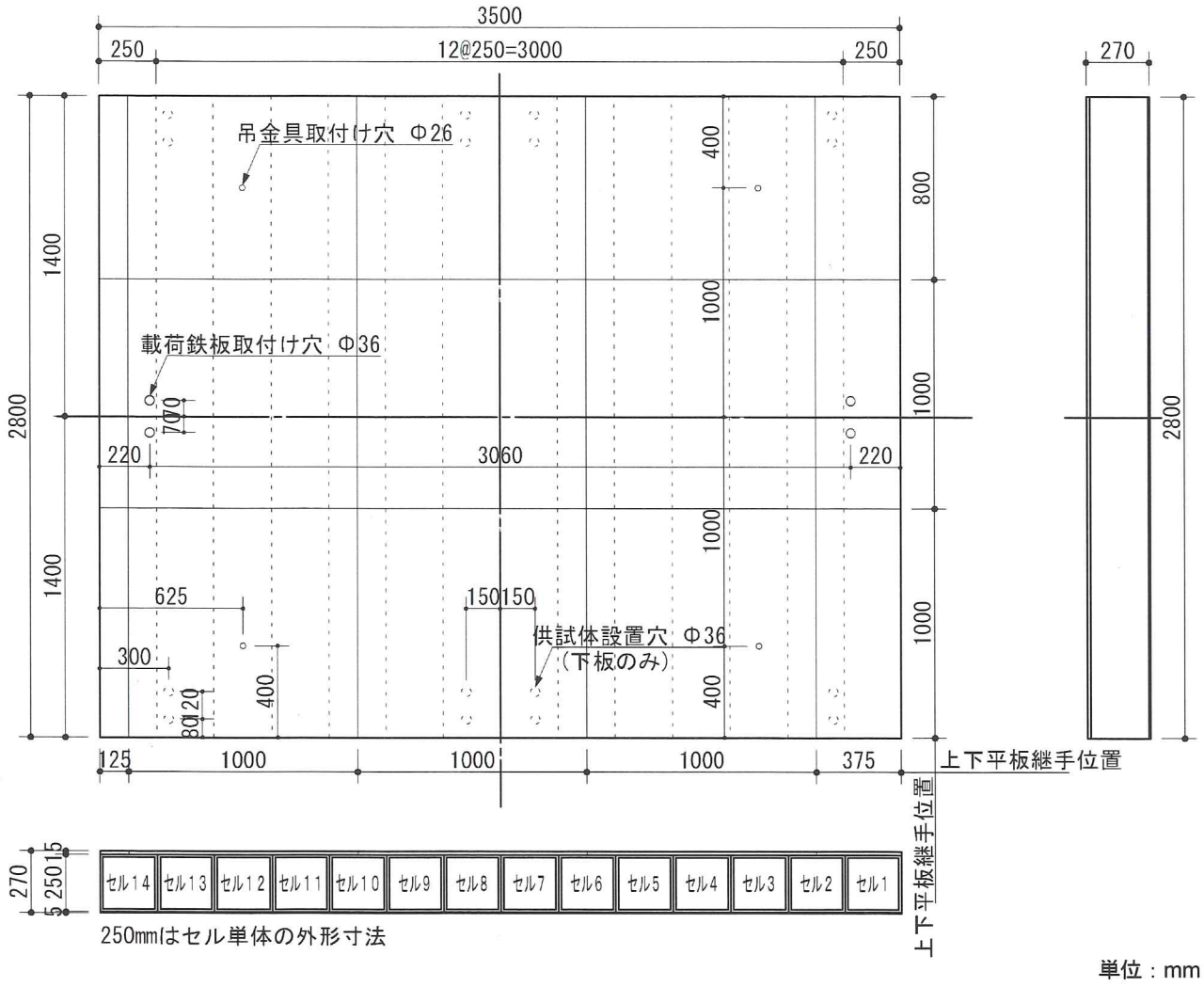


図-3.2.1　供試体の形状寸法

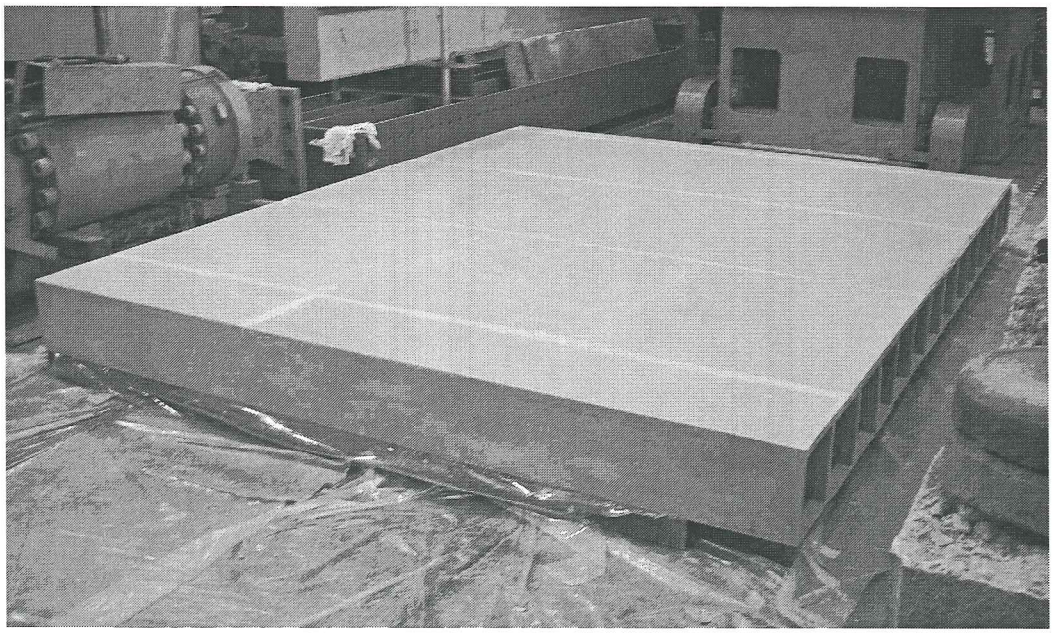
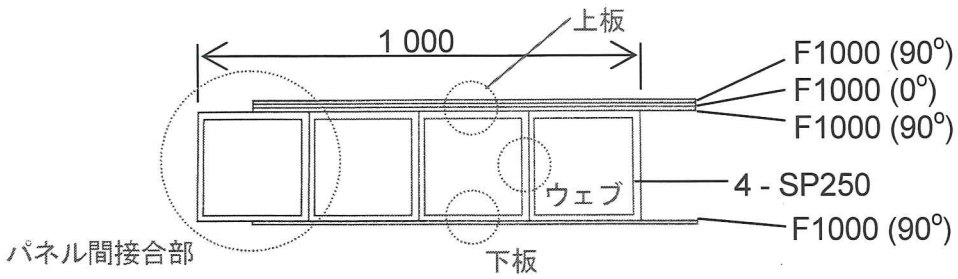


図-3.2.2　供試体の外観



単位：mm

図-3.2.3　パネルの基本断面構成と各部の名称

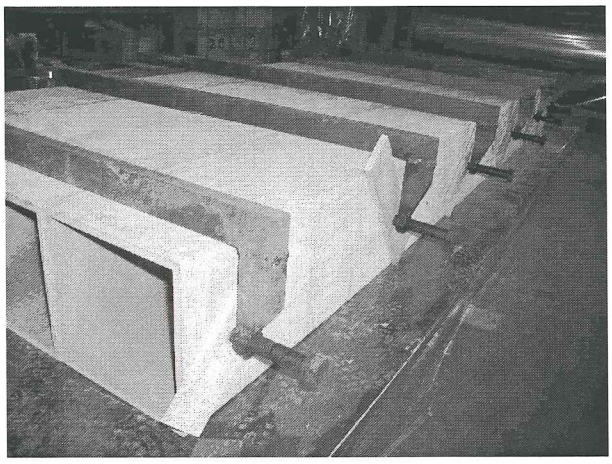


図-3.2.4　SP250 間の接着作業

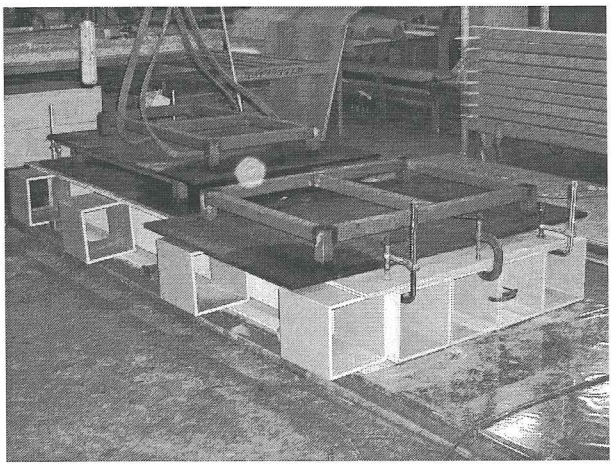


図-3.2.5　F1000 の貼り付け作業

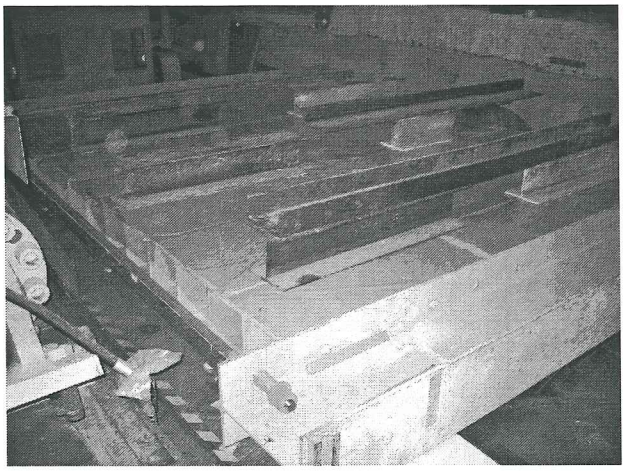


図-3.2.6　パネル間の接着作業

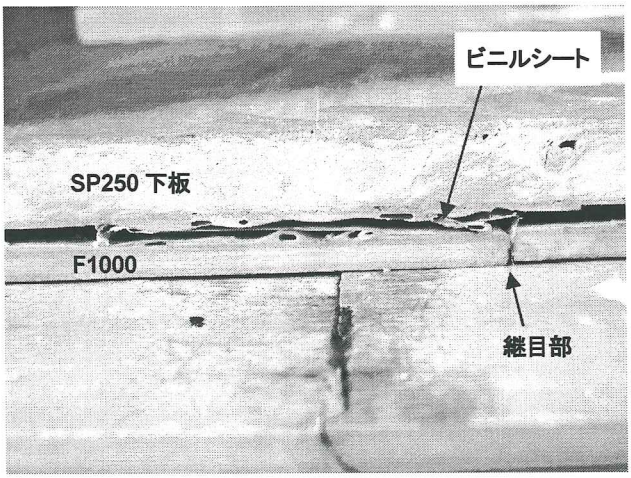


図-3.2.7　ビニルシートの巻き込み状況

表-3.2.1　供試体の全高実測結果

測定点	測定値 (mm)	測定点	測定値 (mm)	測定点	測定値 (mm)
1	266.0	21	267.5	41	270.0
2	267.0	22	269.0	42	270.0
3	267.0	23	269.0	43	268.0
4	270.5	24	269.5	44	267.5
5	270.0	25	268.5	45	267.0
6	270.0	26	267.5	46	270.0
7	268.0	27	268.0	47	270.0
8	269.0	28	269.0	48	270.0
9	270.0	29	269.0	49	270.0
10	269.5	30	268.0	50	270.5
11	269.0	31	268.5	51	270.0
12	267.0	32	271.0	52	269.0
13	268.0	33	270.5	53	269.0
14	270.0	34	270.0	54	268.5
15	270.5	35	268.0	55	270.0
16	266.5	36	268.0	56	270.0
17	267.5	37	270.0	57	270.0
18	268.0	38	268.0	58	268.5
19	269.0	39	268.0	平均値	268.9
20	267.5	40	269.0	標準偏差	1.2

注) 供試体の四辺を測定した

表-3.2.2　上板，ウェブ，下板の厚さ測定結果

測定点	上板	ウェブ	下板
1	27.73	24.42	17.28
2	26.78	26.12	17.39
3	28.34	24.86	17.80
4	28.90	24.56	17.82
5	28.19	25.19	17.70
6	28.61	25.76	17.93
7	27.98	24.35	18.05
8	29.82	24.65	18.73
9	28.20	25.91	17.96
10	28.00	26.06	17.63
11	28.84	25.01	18.42
12	28.23	25.32	18.68
13	29.73	25.53	18.43
14	28.27	—	17.59
平均値	28.4	25.2	18.0
標準偏差	0.8	0.6	0.5

注 1)　ノギスで測定　（1/100 精度）

注 2)　ウェブはセル間のみ

注 3)　X = 500 mm の断面で切断後に計測

表-3.2.3　接着層の厚さ

	全高	上板厚	ウェブ厚	下板厚
実測平均値 A (mm)	268.9	28.4	25.2	18.0
素材板厚計 B (mm)	266.8	24.6	24	16.2
接着層厚 A-B (mm)	2.1	3.8	1.2	1.8
接着層数 (層)	4	3	1	1
1 層当り接着層厚さ (mm)	0.5	1.3	1.2	1.8

表-3.2.4　供試体の自重

項目	単位	供試体	RC 床版
床版厚	m	0.27	0.22
幅 1m 当たり断面積	m^2	0.0625	0.22
単位体積質量	t/m^3	1.9	2.35
$1m^2$ 当たり質量	t/m^2	0.119	0.517
RC 床版に対する比	倍	0.23	1.0

3.3 載荷方法と測定項目

図-3.3.1, 表-3.3.1 に, RC 床版の疲労試験のために導入された輪荷重走行試験機の一般図と主要諸元を示す。この試験機は，任意の荷重をジャッキで保持しながら，床版供試体上を走行しながら載荷することができる装置である。

図-3.3.2～3 に供試体の設置及び載荷の状況を示す。供試体の端部は，2 辺単純支持，2 辺鋼桁で受けた弾性支持とした。床版支間は 2.5 m とし，走行範囲は 2 m とした。RC 床版の試験と同様に，供試体上面の不陸や鉄輪の縁での偏載荷を緩和するため，供試体の上面の輪荷重走行位置に厚さ 3 mm のゴム板を敷き(ひずみゲージ貼り付け位置は切り欠いた)，200 mm×500 mm の鋼製ブロックを並べ，厚さ 16 mm の鋼板を設置し，その上に輪荷重が走行するようにした(図-3.3.4～5)。

走行載荷の方法は，98 kN (10 tf)一定での走行載荷(以下，一定荷重走行載荷という)を 717,000 回行った後，157 kN (16 tf)から走行回数 4 万回(2 万往復)ごとに 20 kN (2 tf)ずつ荷重を増加させていく階段載荷を行った(図-3.3.6)。走行速度は一定荷重走行載荷時に 10 rpm(1 分間に 10 往復，繰返し数 20 回)，階段載荷時に 15 rpm とした。

走行載荷中，供試体の変位及びひずみをモニタリングするとともに，ひび割れ等の変状について目視及びファイバースコープ(階段載荷時のみ)により観察することとした。図-3.3.7 に変位計取り付け位置，図-3.3.8 にひずみゲージ貼り付け位置をそれぞれ示す。ひずみゲージは 3 mm のプラスチック用ゲージ(GFLA-3-50)を用いた。また，図-3.3.9～11 に変位計の取り付け状況を，図-3.3.12～13 に内面のひずみゲージ貼り付け状況をそれぞれ示す。輪荷重の真下に位置する上板上面のひずみゲージは，供試体上面に敷設したゴムの一部を切り欠くことで直接載荷の負担を軽減した。セル内面のひずみゲージの貼り付けは以下の手順で行った。

① 供試体幅 2.8 m よりも長い梁を用意して，ゲージ貼り付け位置に相当する箇所に位置決めをしておく。
② ゴムを介してひずみゲージを裏返して梁に仮固定する。
③ ひずみゲージ用の瞬間接着剤を塗布した後，直ちにセル内に通して，ひずみゲージを所定の貼付位置になるように梁を押しつける。
④ さらにひずみゲージを密着させるようローラーを用いて押し付けた。

これらのうち一部の変位及びひずみは動的に測定を行った。動的測定は，機器の都合により，次の 2 通りのいずれかで測定した。測定箇所と測定方法の対応を表-3.3.2 に示す。

a) 試験機備え付け自動計測システムを利用して，走行開始後 5 分ごとに最大値，最小値を測定する(システム上でデータ処理して最大値，最小値のみを記録する)。以下，この方法による測定結果を DS データという。なお，DS の測定箇所は静的載荷試験時には静的測定を行うことが可能である。ただし，試験終了前の 1 時間は，最大値，最小値だけでなく，波形データが残される。これを DT データという。
b) デジタルデータレコーダ(DDR)を用いて 1 時間ごとに 30 秒間の波形データを測定，記録する。以下，この方法による測定結果を DDR データという。サンプリングタイムは DS, DT と同様に 20 Hz とした。

表-3.3.3～4 に静的載荷試験一覧(走行試験の進行表)を示す。走行試験の前後及び所定の載荷回数ごとに定点での静的載荷を行い，各部の変位，ひずみを測定した。静的載荷方法は，試験機の自動設定で行う方法と手動で行う方法の 2 通りとした。自動設定で行う場合，載荷位置が床版の中央に限定される。また，今回の

試験では,荷重直下の床版の上板やウェブの変形が載荷位置のずれによって大きく変化するにもかかわらず,試験機の不調により載荷位置が中心から約 50 mm ずれることが判明した。これらのことから,一定荷重載荷及び階段載荷それぞれの試験前後,ならびに階段載荷の荷重変更ごとに手動による静的載荷も行った。手動で行う場合は供試体の中央(以下,載荷位置①という)及び中央から 125 mm 走行方向にずれた位置(セル 8 の中心線上,以下,載荷位置②という)の 2 箇所で静的載荷を行った。静的載荷の最大荷重は走行載荷時の荷重とした。自動載荷の際は最大荷重のみ測定し,手動載荷の際は約 10～20 kN ピッチで最大荷重まで載荷し,各段階で測定を行った。なお,階段載荷終了時の静的載荷試験は,センターから北に 500,625,750 ㎜位置での定点載荷を追加し,下面 F1000 の剥離の程度を確認した。

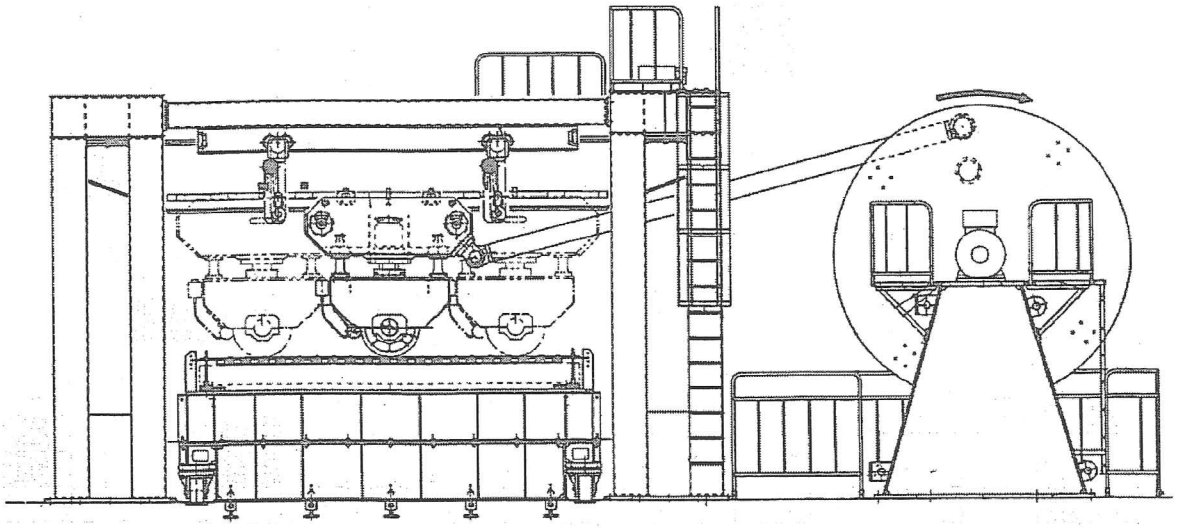
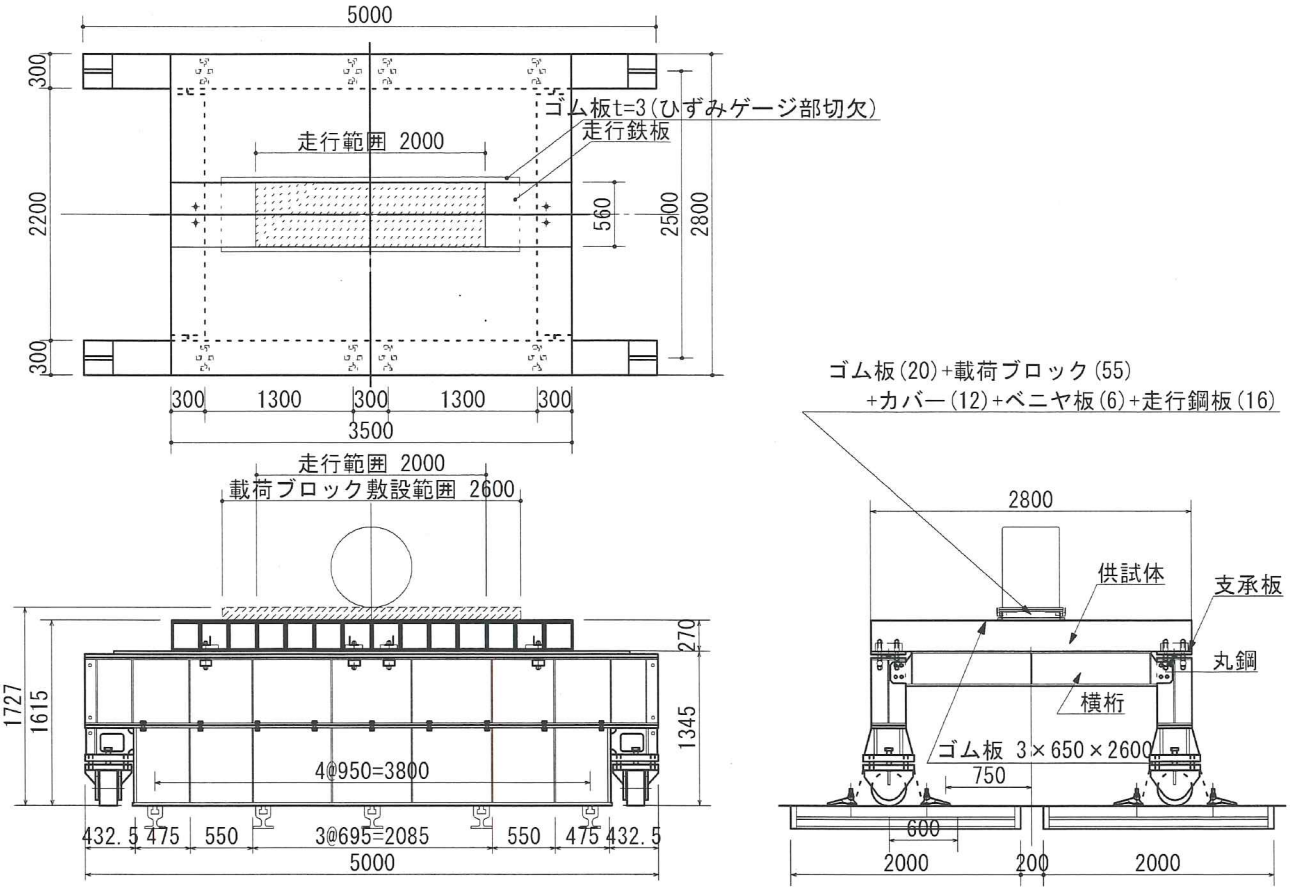


図-3.3.1　輪荷重走行試験機の一般図

表-3.3.1　輪荷重走行試験機の主要諸元

項目				仕様
寸法	試験機	フレーム	高さ	約 5 m
			長さ	約 8 m
		フライホイル	直径	3.5 m
			重さ	10 t
		走行車輪	鉄輪 1	φ 700 × 幅 500 mm（供試体幅 2.8 m 時）
			鉄輪 2	φ 700 × 幅 300 mm（供試体幅 2.3 m 時）
			ゴムタイヤ	9.00-R20-14PR 相当（ダブルタイヤ）
	供試体	最大寸法	長さ	4.5 m
			幅	3.0 m
			厚さ	350 mm
性能	駆動部	走行範囲		1, 2, 2.5, 3 m
		最大回転速度		59.8, 42.3, 37.8, 34.7 rpm（走行範囲による）
				（ゴムタイヤ装着の際は 5rpm）
	載荷部	最大載荷力	走行時	50 tf（490 kN）
			停止時	100 tf（981 kN）
		最大ストローク		200 mm

注) 走行車輪及び走行範囲のアンダーラインは今回の試験における設定を示す。



単位：mm

図-3.3.2　供試体の設置及び載荷の状況

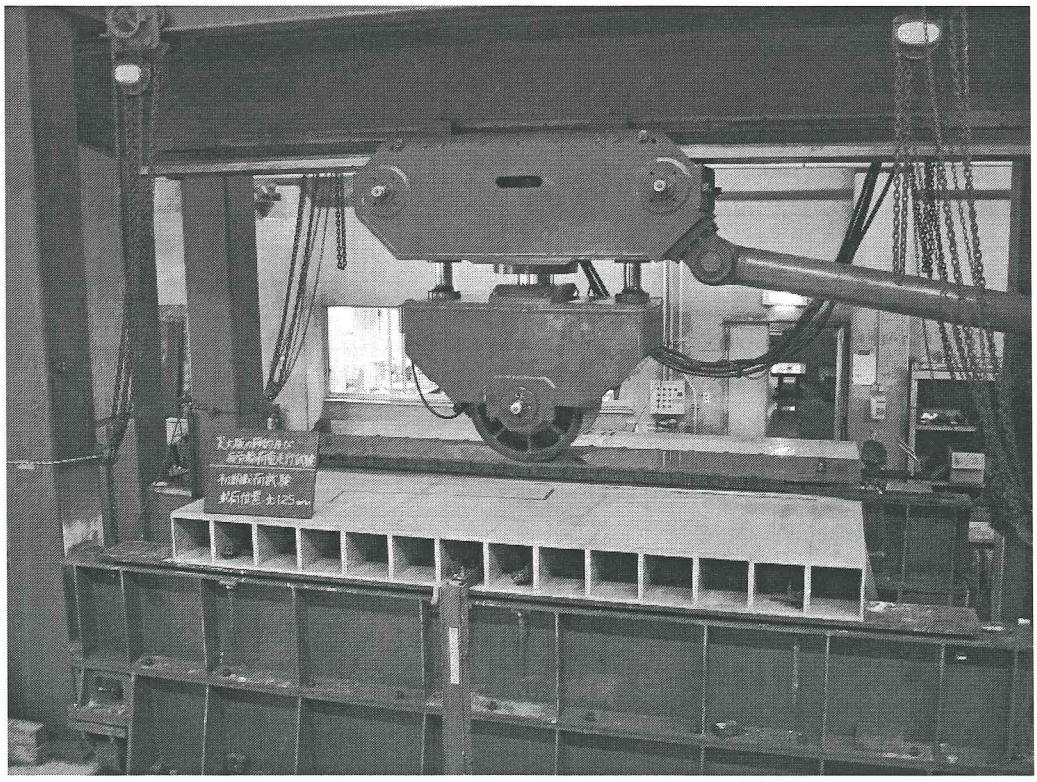


図-3.3.3　床版供試体の外観と載荷状況

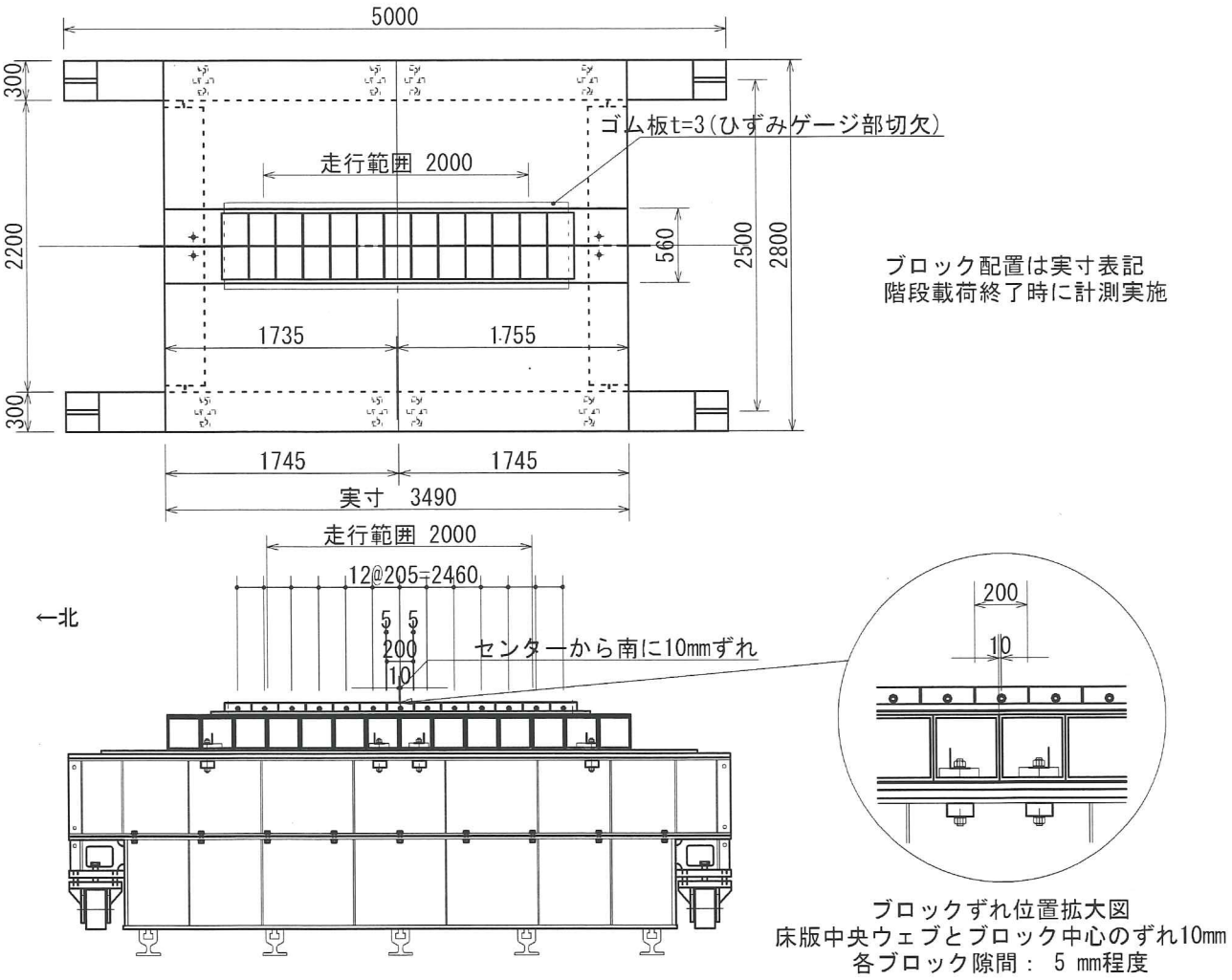


図-3.3.4　載荷ブロック配置詳細図

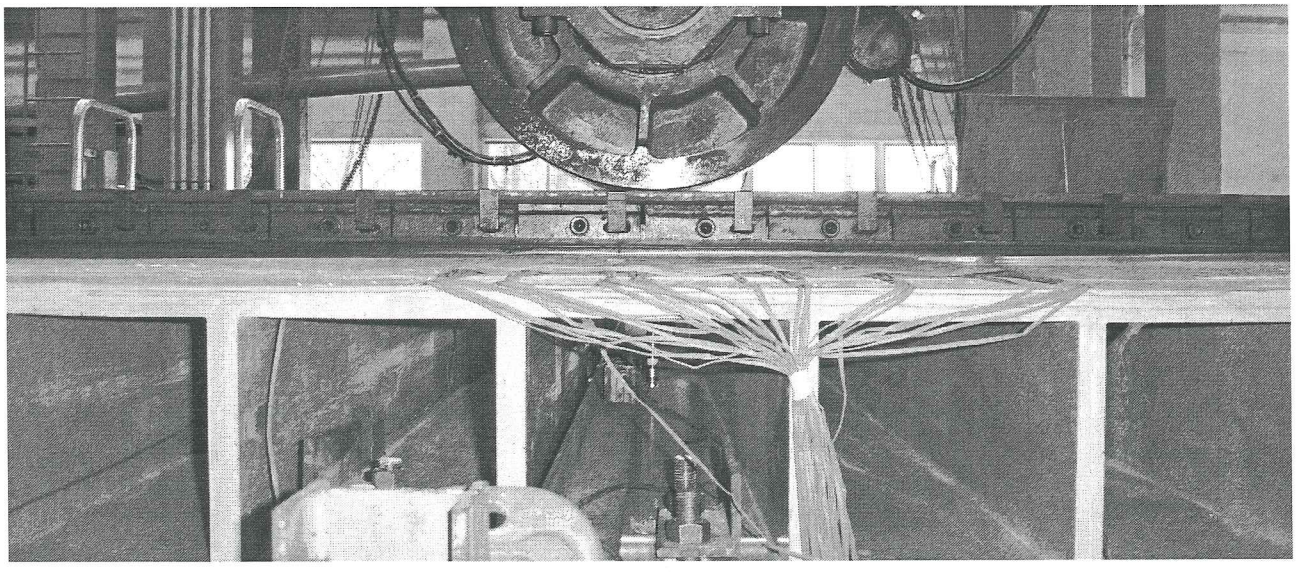


図-3.3.5　載荷ブロック配置状況

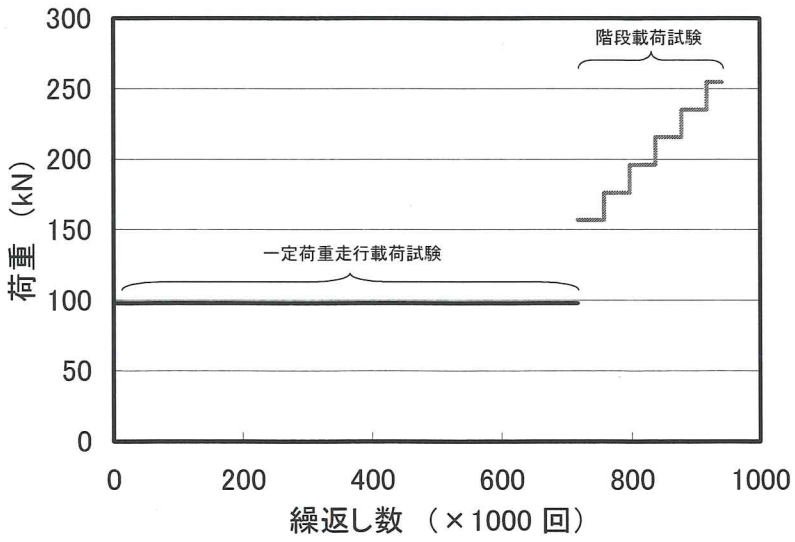


図-3.3.6　輪荷重走行試験の荷重パターン

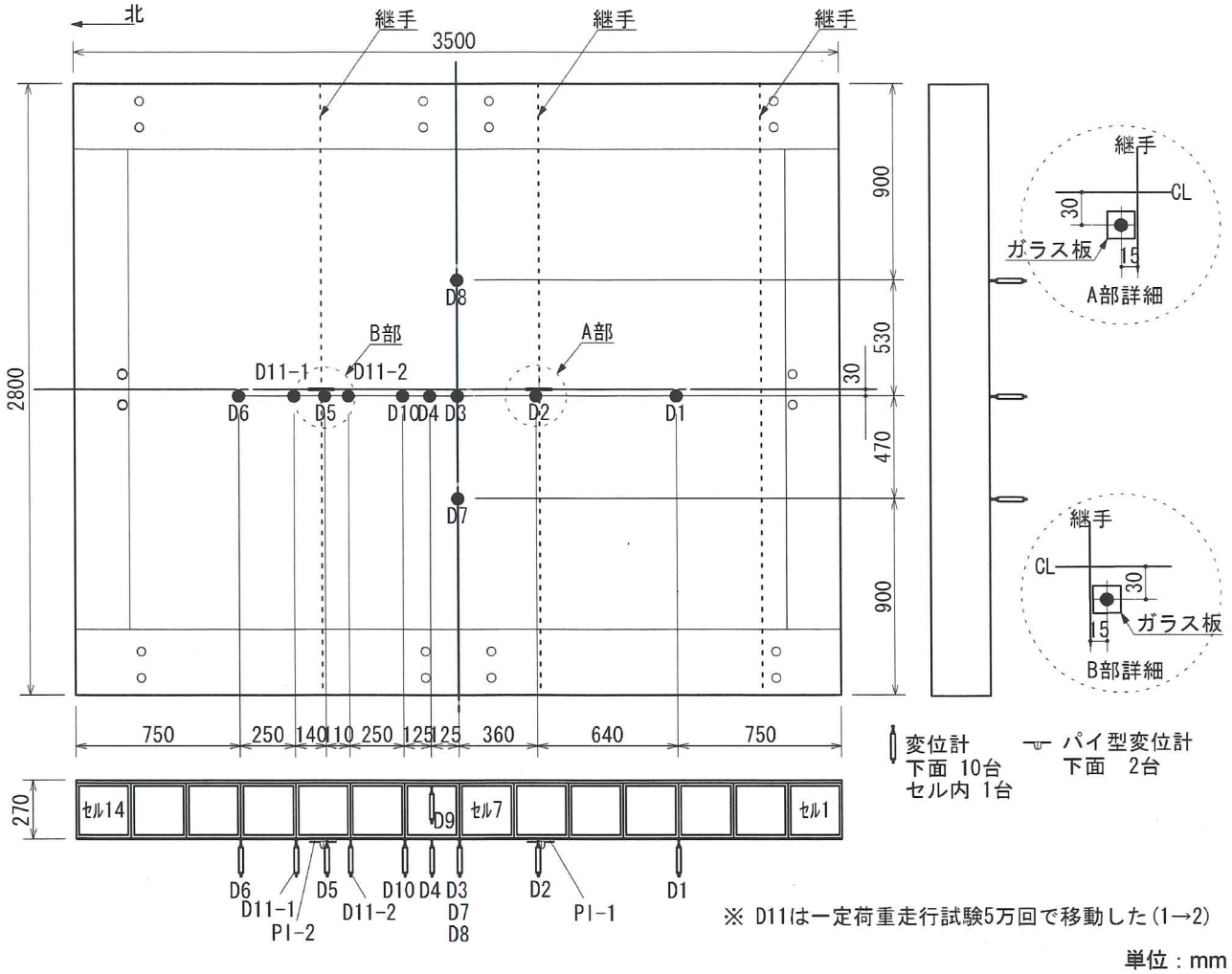
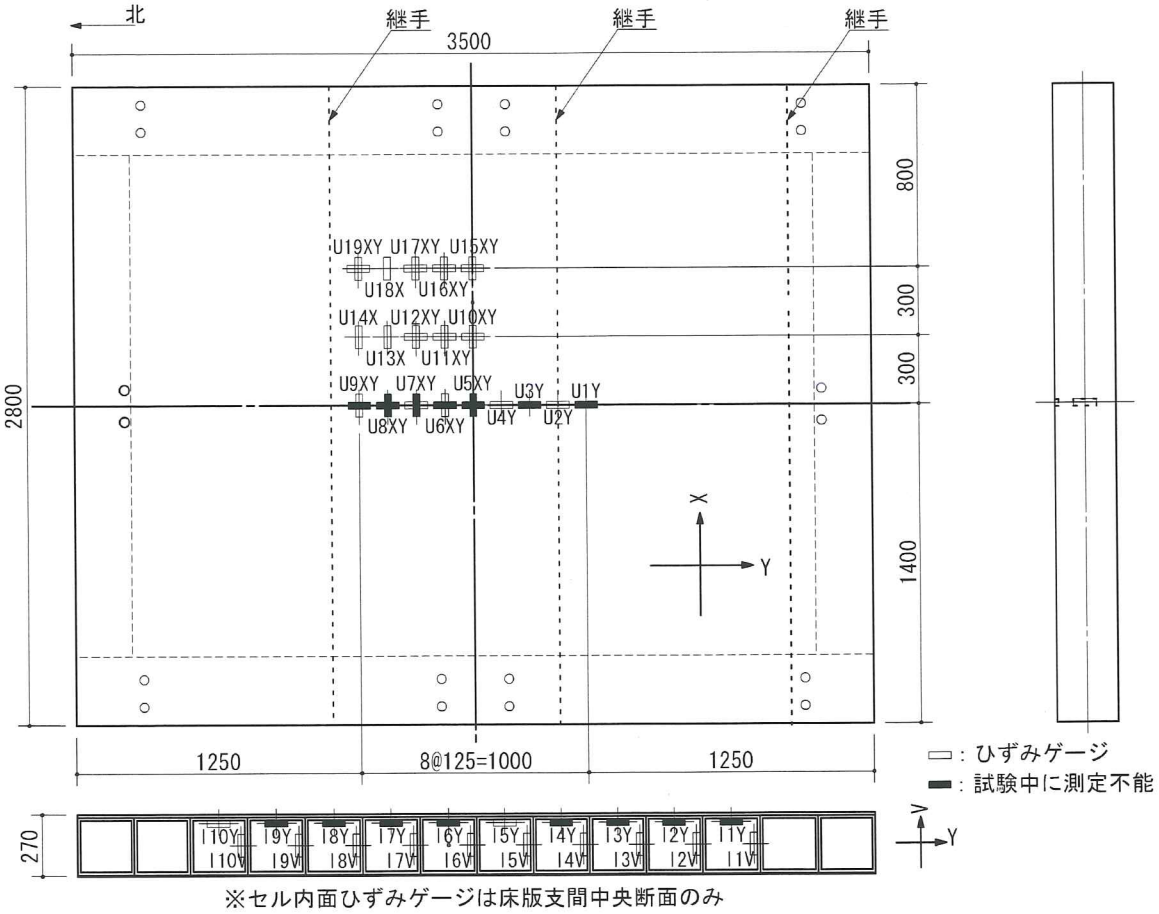
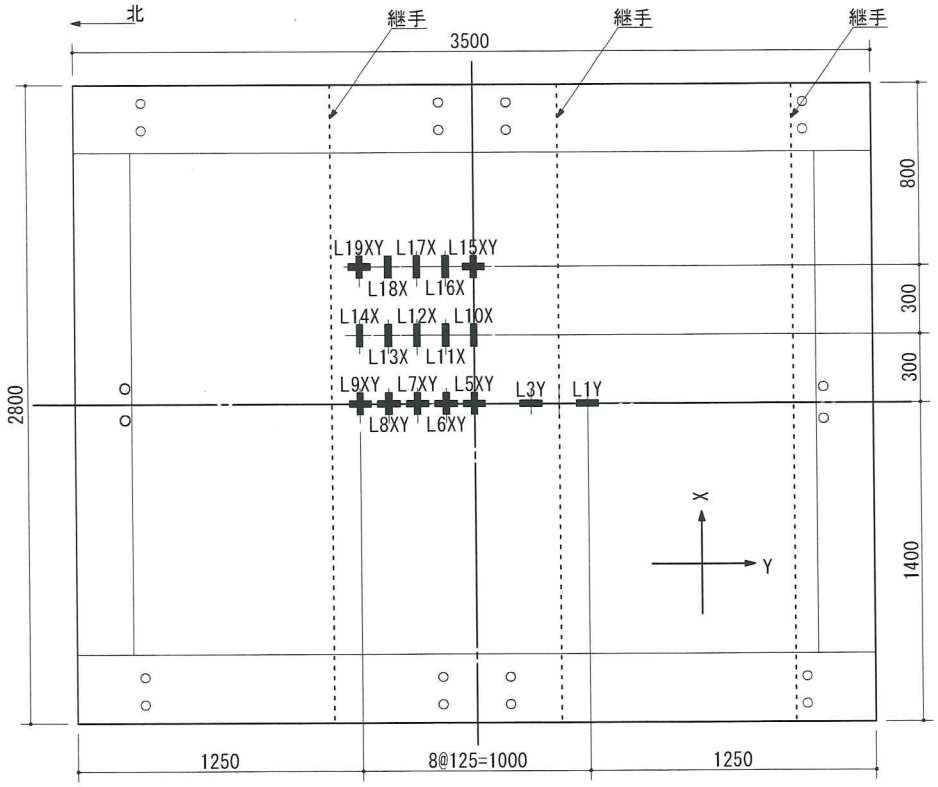


図-3.3.7　変位計取り付け位置



(a) 上面及びセル内面



単位：mm

(b) 下面 (上面からの透視図)

図-3.3.8　ひずみゲージ貼り付け位置

表-3.3.3　静的載荷試験一覧 (一定荷重走行試験の進行表)

載荷回数 (回)	荷　重 (kN)	載荷位置	D3 (mm)	温度 (℃)	湿度 (%)	備　　考
0	100	①中央	2.33			初期の静的載荷試験
0	100	②セル 8 上	2.04			
1	98.9	①中央	2.27			
12	98.9	自動	2.33			
102	98.9	自動	2.32			
1004	98.9	自動	2.33			
3004	99.3	自動	2.32			
5004	98.9	自動	2.33			
7004	98.9	自動	2.34			D10,D11 追加
10004	98.9	自動	2.32			
30004	98.9	自動	2.35			
35604	98.9	自動	2.36			
37004	98.9	自動	2.37			
50004	98.9	自動	2.40			D11 配置換え
50004	98.9	①中央	2.49			
70004	98.9	自動	2.42			
100004	98.9	自動	2.43			
150004	98.6	自動	2.42			
200004	98.9	自動	2.43			
250004	98.9	自動	2.44			
300004	98.6	自動	2.44			
350004	98.6	自動	2.42			
400004	98.6	自動	2.45			
450004	98.9	自動	2.47			
500004	98.9	自動	2.52			
530004	98.9	自動	2.52			
530004	98.6	①中央	2.59			
580004	98.9	自動	2.53			
630004	98.6	自動	2.53			
662004	98.9	自動	2.55			
680004	98.9	自動	2.54			
700004	98.9	自動	2.53			
717004	98.6	自動	2.55			
717004	98.9	①中央	2.63			
717004	98.9	②セル 8 上	2.04			一定荷重走行載荷終了

表-3.3.4　静的載荷試験一覧 (階段載荷試験の進行表)

載荷回数 (回)	荷　重 (kN)	載荷位置	D3 (mm)	温度 (℃)	湿度 (%)	備　　考
717004	156	①中央	4.27	17	68	階段載荷試験開始　Step 1
717004	156	②セル 8 上	3.71			
717004	158	自動	4.21			
718006	158	自動	4.08			
720006	158	自動	4.05			
722006	158	自動	4.11			
727006	158	自動	4.11			I1Y 測定不能
737006	158	自動	4.11			I4Y 測定不能　(732409 回)
747006	158	自動	4.14			
757006	157	自動	4.27			

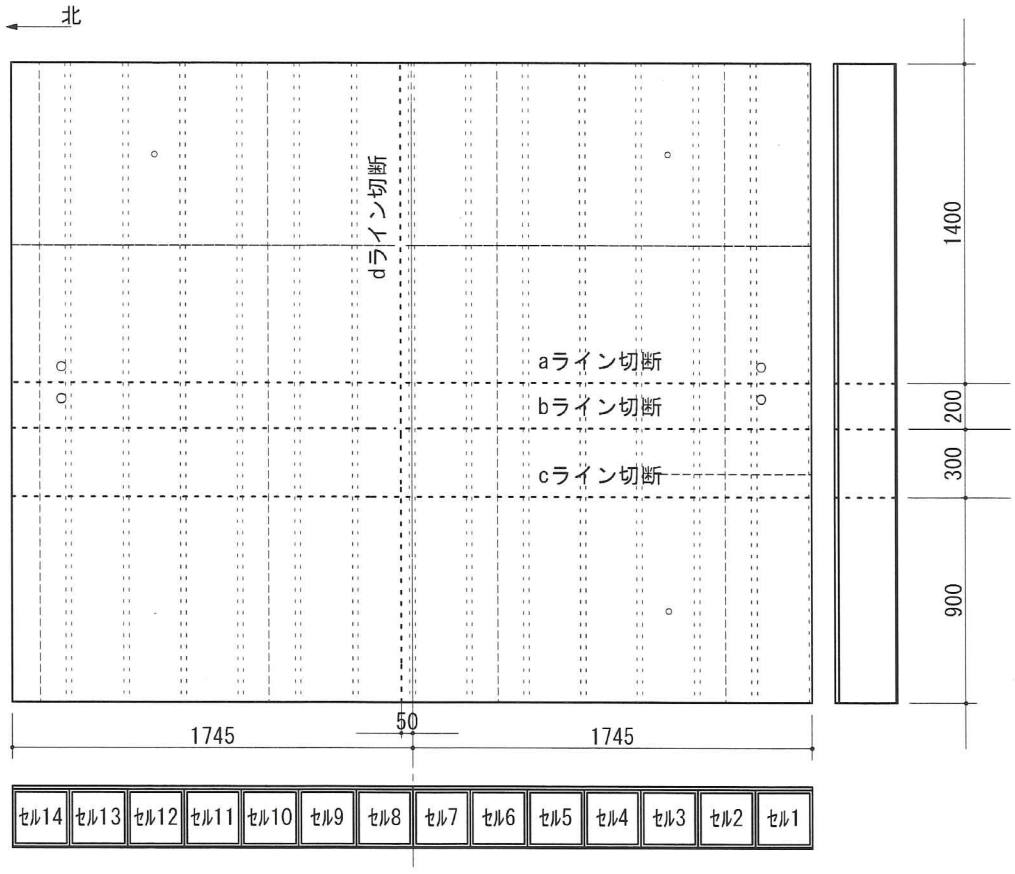
注)　表-3.3.3～4 の D3 の値は残留変位を減じていない。

表-3.3.4(続き)　静的載荷試験一覧 (階段載荷試験の進行表)

載荷回数 (回)	荷　重 (kN)	載荷位置	D3 (mm)	温度 (℃)	湿度 (%)	備　　考
757006	177	①中央	5.08	17	56	Step 2
757006	177	②セル 8 上	4.34			
757006	177	自動	5.03			
758006	177	自動	4.80			
760006	177	自動	4.80			
762006	177	自動	4.81			
767006	177	自動	4.83			
777006	178	自動	4.79			U7Y 測定不能確認
787006	177	自動	4.87			I 7 Y 測定不能確認
797006	177	自動	4.87			UIYY 測定不能確認
797006	197	①中央	5.80	17	60	Step 3
797006	197	②セル 8 上	4.99			
797006	197	自動	5.74			
798006	199	自動	5.49			
800006	197	自動	5.49			I 3 Y 測定不能
802006	198	自動	5.48			U9Y 測定不能
807006	196	自動	5.45			I2Y 測定不能 (803700 回)
817006	197	自動	5.56			
827006	197	自動	5.57			U5X 測定不能
837006	198	自動	5.65			上板下面にひび割れ
837006	216	①中央	6.64	17	60	Step 4
837006	216	②セル 8 上	5.65			
837006	216	自動	6.61			
838006	216	自動	6.21			
840006	216	自動	6.16			
842006	217	自動	6.17			
847006	217	自動	6.17			
857006	217	自動	6.24			
867006	216	自動	6.32			
877006	216	自動	6.32			鋼板にひび割れ確認，交換
877006	238	①中央	7.60	17	64	Step 5
877006	238	②セル 8 上	6.52			
877006	236	自動	7.58			
878006	236	自動	7.02			
880006	236	自動	7.01			
882006	236	自動	7.04			
887006	236	自動	7.30			
897006	236	自動	7.34			
907006	236	自動	7.36			
917006	236	自動	7.52			
917006	254	①中央	8.81	17	64	Step 6
917006	255	②セル 8 上	7.57			
917006	255	自動	8.84			除荷　0 t　熱電対 2 点　計測後追加
918006	256	自動	8.01			
920006	256	自動	8.08			
922006	256	自動	8.10			
927006	256	自動	8.21			
937006	255	自動	8.30			
942368	256	①中央	10.03			鋼板割れ，20 kN ピッチで詳細計測
942368	256	②セル 8 上	8.75			20 kN ピッチで詳細計測
942368	256	北 625 mm	1.85			継手直上
942368	256	北 750 mm	1.43	20	70	継手付近
942368	254	北 500 mm	2.40			継手付近

3.4　解体調査

輪荷重走行試験終了後，供試体の内部を確認するため，図-3.4.1 のとおり，走行方向に平行に 3 箇所，走行方向に直角に 1 箇所(中心からセル 8 よりの断面)で，カッターにより切断した。図-3.4.2 に切断状況を，図-3.4.3 に切断後の状況をそれぞれ示す。切断した箇所の断面とその近傍のセル内面におけるひび割れや剥離の状況及びセル内面のひずみゲージ貼り付け状況を目視観察した。また，各部の板厚をノギスにより測定した。



単位：mm

図-3.4.1　FRP 床版の切断位置

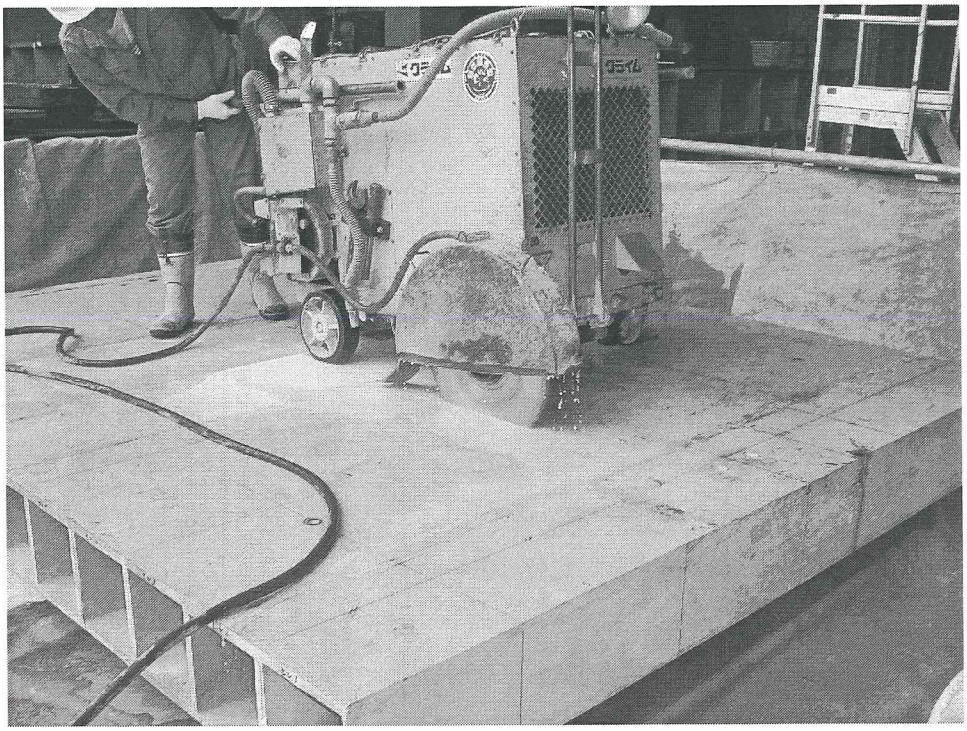


図-3.4.2　輪荷重走行試験後の FRP 床版供試体の切断状況

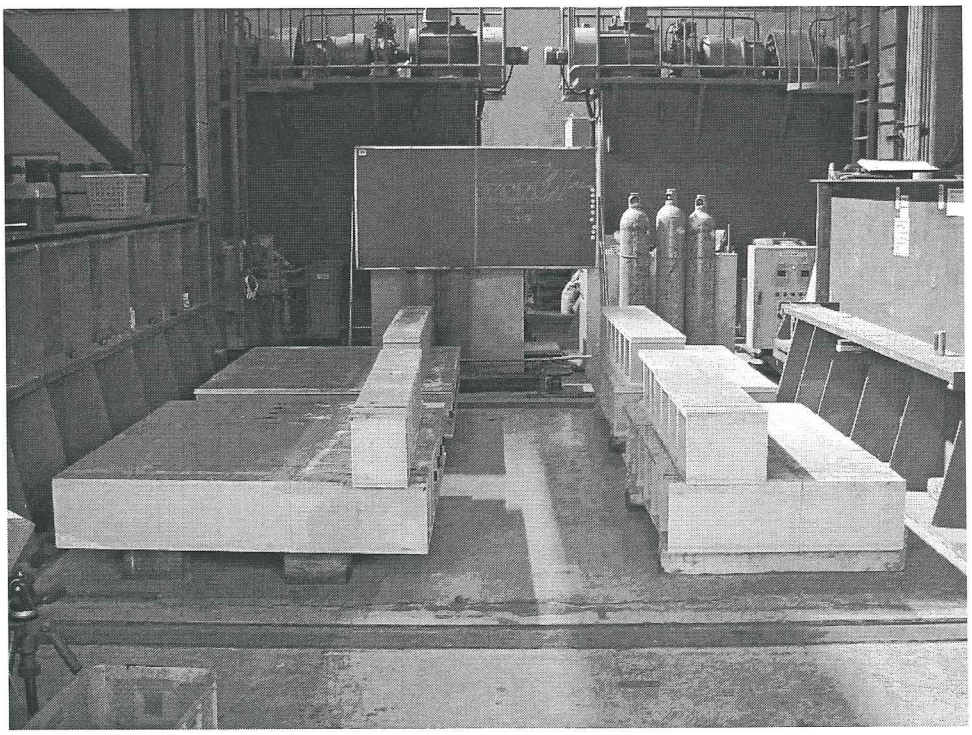


図-3.4.3　切断後の FRP 床版供試体

４．走行試験前における静的載荷試験結果

4.1 版としての挙動

(1) 載荷位置①

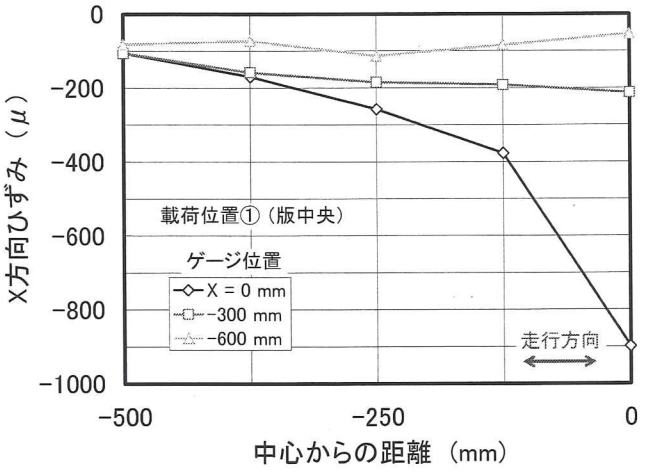
図-4.1.1 及び図-4.1.2 に輪荷重走行試験前に載荷位置①で 100 kN 載荷したときの版上下面のひずみ分布及び床版下面の変位を示す。各ウェブ間の荷重分配は概ね 2 つ隣のウェブまで見られ，荷重のほとんどは両隣のウェブを含む約 1.5 m(セル数で言えば 6 個分ぐらい)までの範囲で負担されていたことがわかる。1 セル当りの単純梁における計算たわみは 6.1 mm であるが，版の試験結果では 2.2～2.4 mm，床版支間の 1/1000 以下であったことからも荷重分配効果が認められた。ただし，図-4.1.1(d)に示した A 点の Y 方向ひずみは圧縮側になっており，載荷点直下のウェブが両隣のウェブよりも突出して局部的にたわむ傾向にあることが伺える。

図-4.1.1(b)に示した B 点の Y 方向ひずみが載荷点中心位置よりも大きいなど，載荷点直下の顕著なひずみ変化が見られるのに対して，同図に示した X = -300 mm の結果では走行方向の変化のほとんどは版全体としての挙動と見られ，ウェブ間の上板の局部的な曲げ変形は床版支間方向にはほとんど伝播していないことがわかる。また，図-4.1.2(b)に示したセル 8 の上板下面の変位(D9)は版全体のたわみ挙動(D4)よりもさらに 0.21 mm 大きく，局部的に変形していたことを示している。

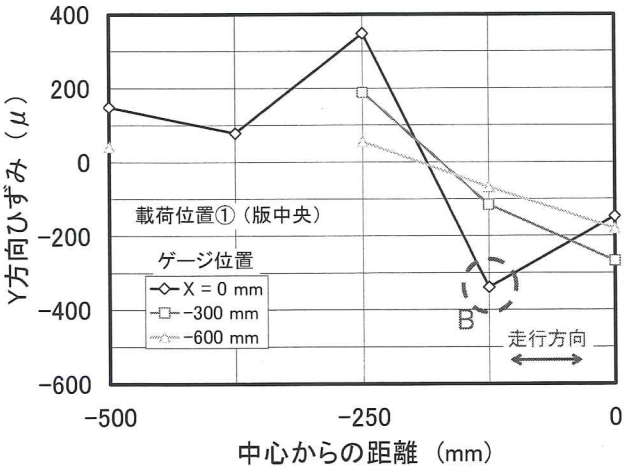
版中央に載荷したときの載荷点直下の下フランジ下面（ウェブ直下）の X 方向ひずみは 500 μ 程度であった。

(2) 載荷位置②

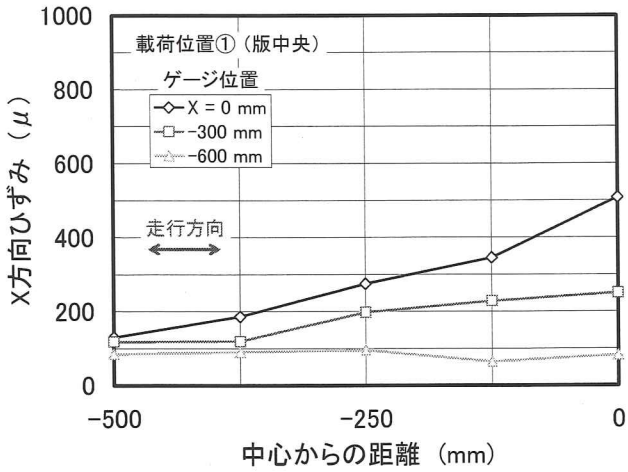
載荷位置①と同様に，図-4.1.3 及び図-4.1.4 に載荷位置②で 100 kN 静的載荷したときの版上下面のひずみ分布及び床版下面の変位を示す。



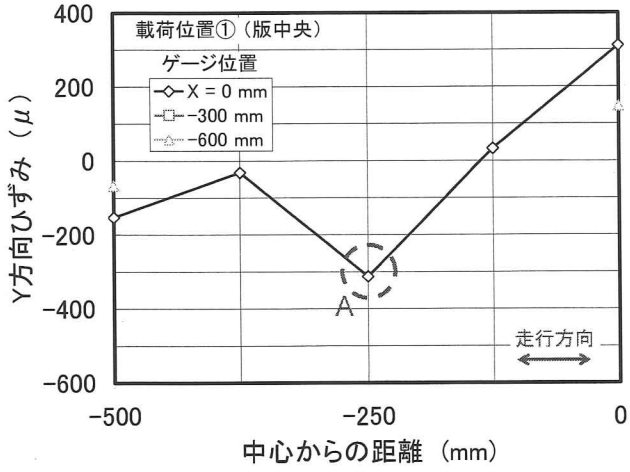
(a) 床版上面の X 方向ひずみ分布



(b) 床版上面の Y 方向ひずみ分布

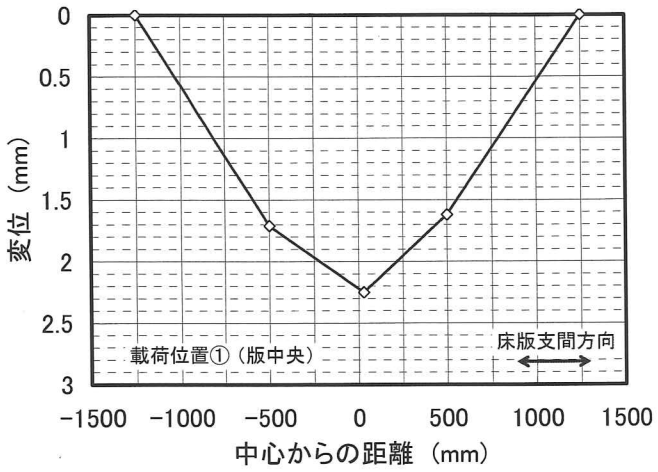


(c) 床版下面の X 方向ひずみ分布

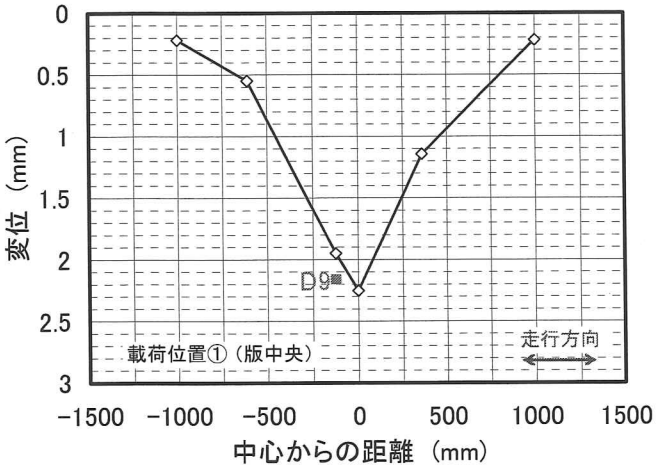


(d) 床版下面の Y 方向ひずみ分布

図-4.1.1　走行試験前の静的挙動 (載荷位置①, 100kN 載荷時ひずみ分布)

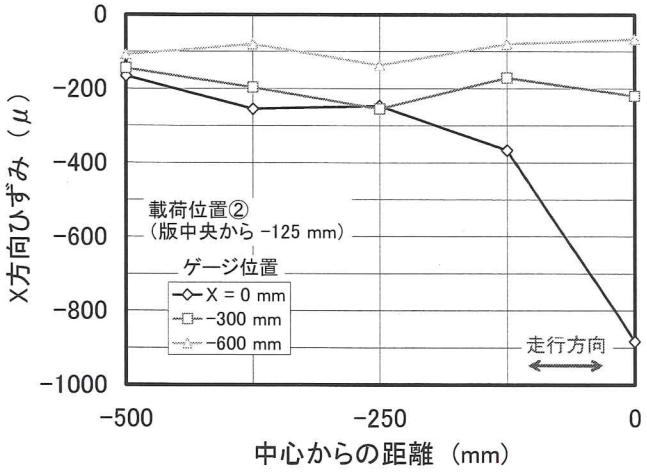


(a) 床版支間方向のたわみ

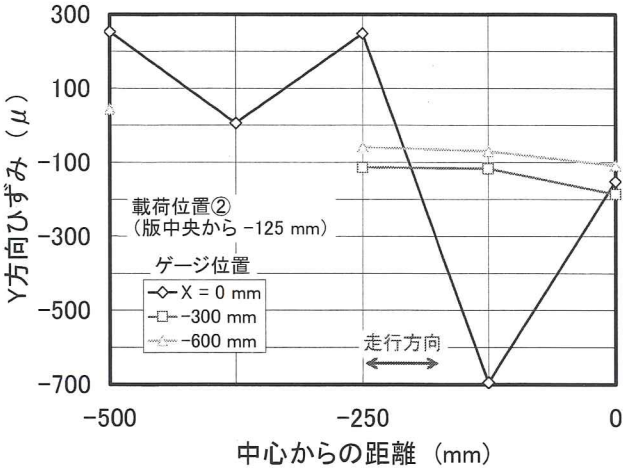


(b) 走行方向のたわみ

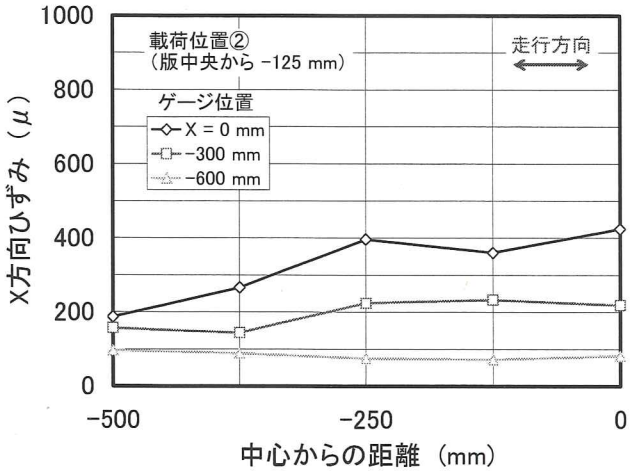
図-4.1.2　走行試験前の静的挙動 (載荷位置①, 100kN 載荷時床版下面変位)



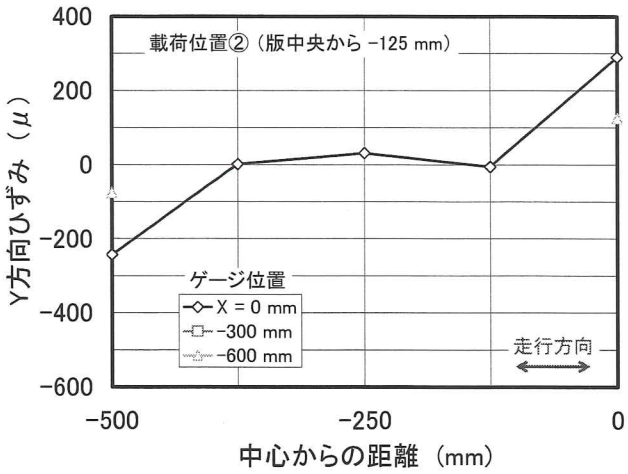
(a) 床版上面の X 方向ひずみ分布



(b) 床版上面の Y 方向ひずみ分布

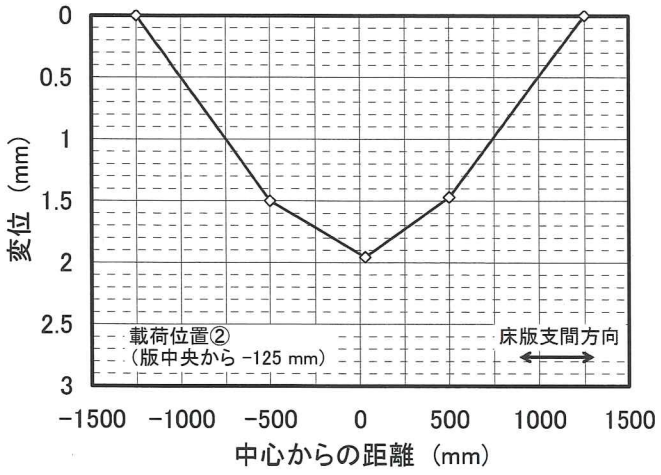


(c) 床版下面の X 方向ひずみ分布

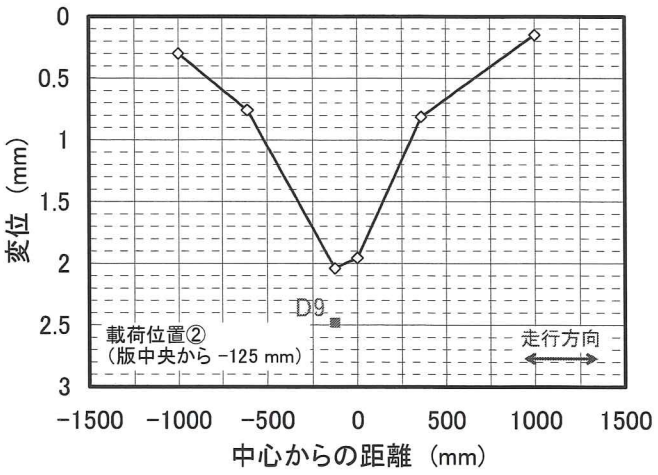


(d) 床版下面の Y 方向ひずみ分布

図-4.1.3　走行試験前の静的挙動 (載荷位置②, 100kN 載荷時ひずみ分布)



(a) 床版支間方向のたわみ



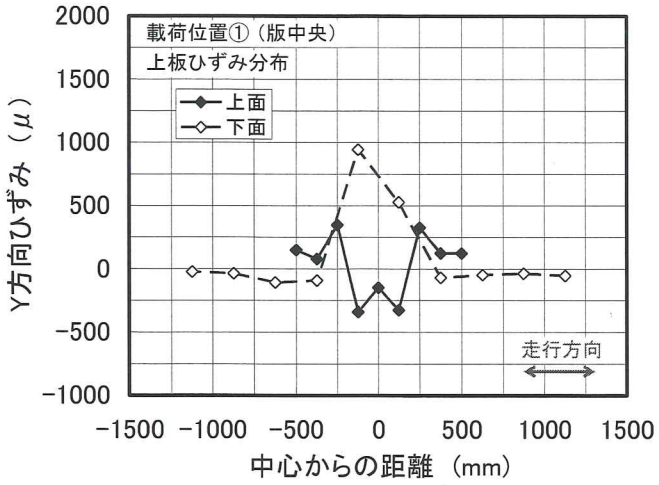
(b) 走行方向のたわみ

図-4.1.4　走行試験前の静的挙動 (載荷位置②, 100kN 載荷時床版下面変位)

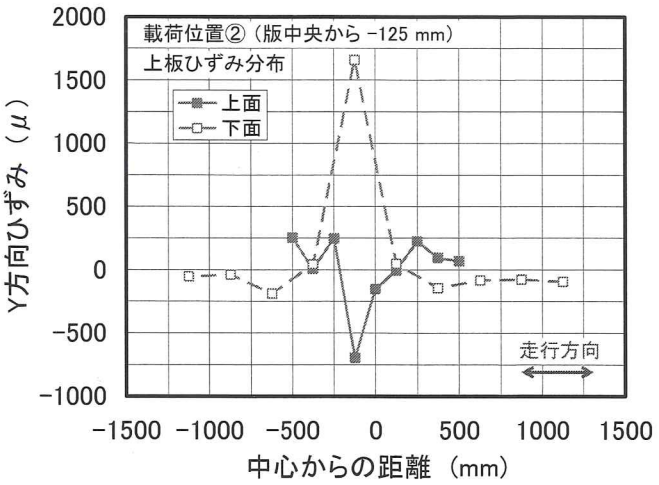
4.2 載荷点付近の局部的な挙動

載荷位置②の場合における載荷点付近の上板の局部的な曲げ変形挙動を見るため，前掲図-4.1.4(b)に載荷点直下の上板下面の変位(D9)を合わせて示した。荷重 100 kN のときのウェブ間の上板下面の局部変位(D9-D4)は最大約 0.4 mm であった（cf. 上フランジを両端固定梁として試算すると最大たわみで 0.24 mm，単純支持とした場合に 1.2 mm)。

図-4.2.1 に，荷重 100 kN を載荷位置①，②それぞれに載荷したときの載荷点直下の上板下面のひずみ(I6Y)を上板上面のひずみ分布と合わせて示す。載荷位置②のときの載荷点直下の上板の曲げひずみは，上面(U6Y)で圧縮ひずみ-695 μ，下面(I6Y)で引張ひずみ 1660 μ であった。図-4.2.2 に，荷重 100 kN を載荷位置①及び②に載荷したときの各ウェブのひずみを示す。載荷位置①の場合，前項で示したように，載荷点直下のウェブが両隣のウェブよりも突出して押し抜かれるような挙動を示したが，測定した範囲において，ウェブや下板のひずみあるいは載荷位置の違いによるひずみ変化が上板よりも大きい箇所は見られなかった。



(a) 載荷位置①



(b) 載荷位置②

図-4.2.1　100 kN 載荷時の上板上下面ひずみ

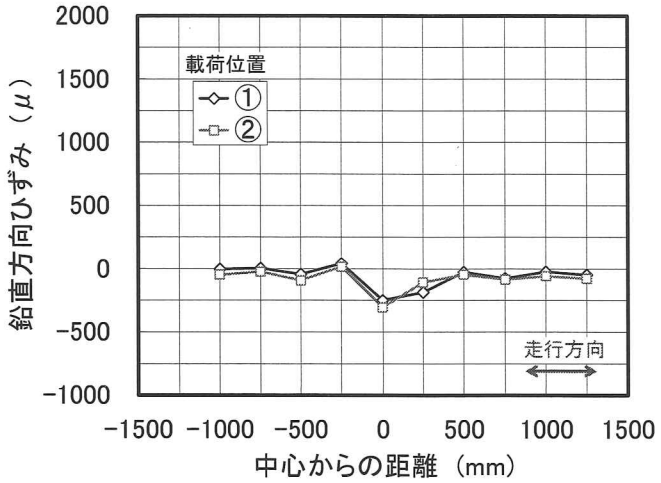


図-4.2.2　100 kN 載荷時のウェブ鉛直ひずみ

注) ウェブのひずみは片面のみの結果

5．一定荷重走行試験結果

5.1　供試体の変状

一定荷重走行試験では，パネル接合部の下面 F1000(図-5.1.1)の剥離が約 7000 回で確認された(後に初期欠陥によることが判明した，前掲図-3.2.7)。また，一定荷重走行試験終了後(717000 回)の観察でセル 8 の床版支間中央付近(走行位置直下)の上板とウェブの角にひび割れが見られた。約 600000 回では，このひび割れは見られなかった。その他の変状は確認できなかった(一定荷重走行試験ではファイバースコープを使用していない)。

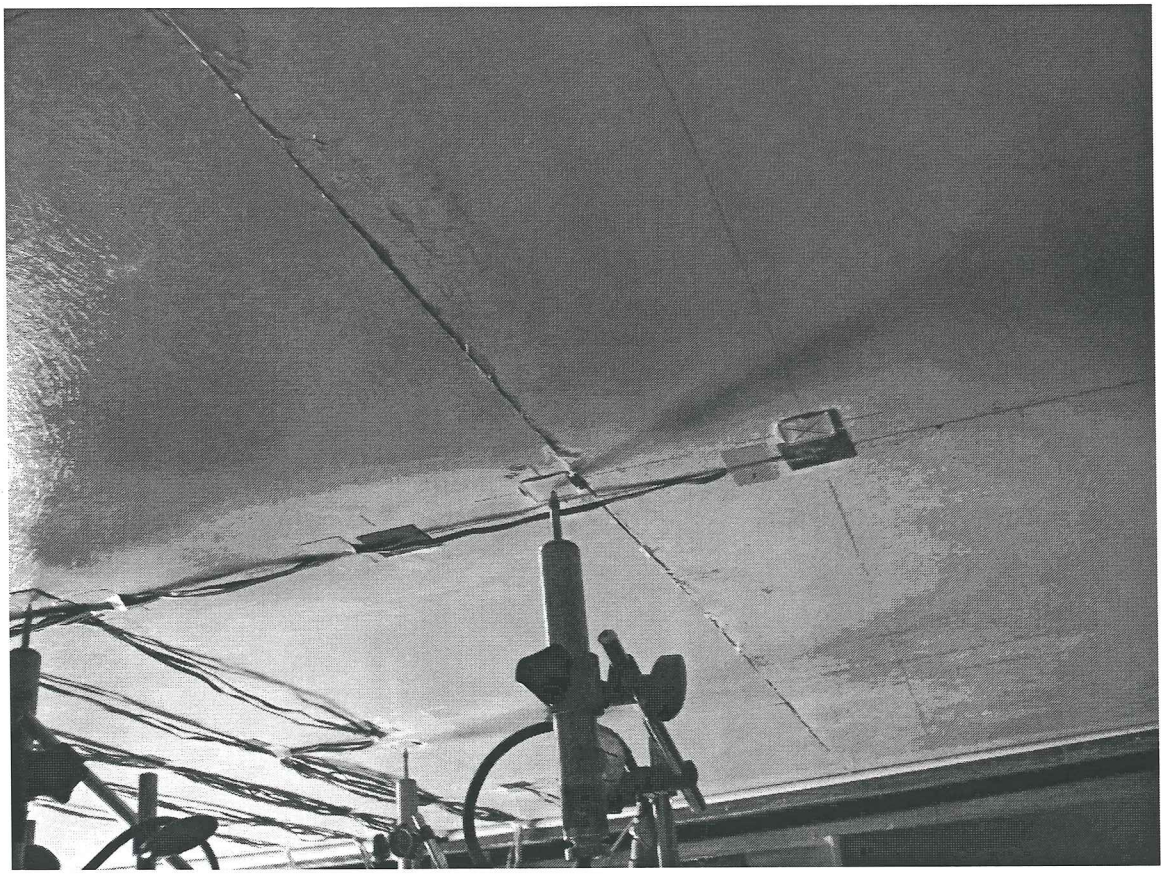
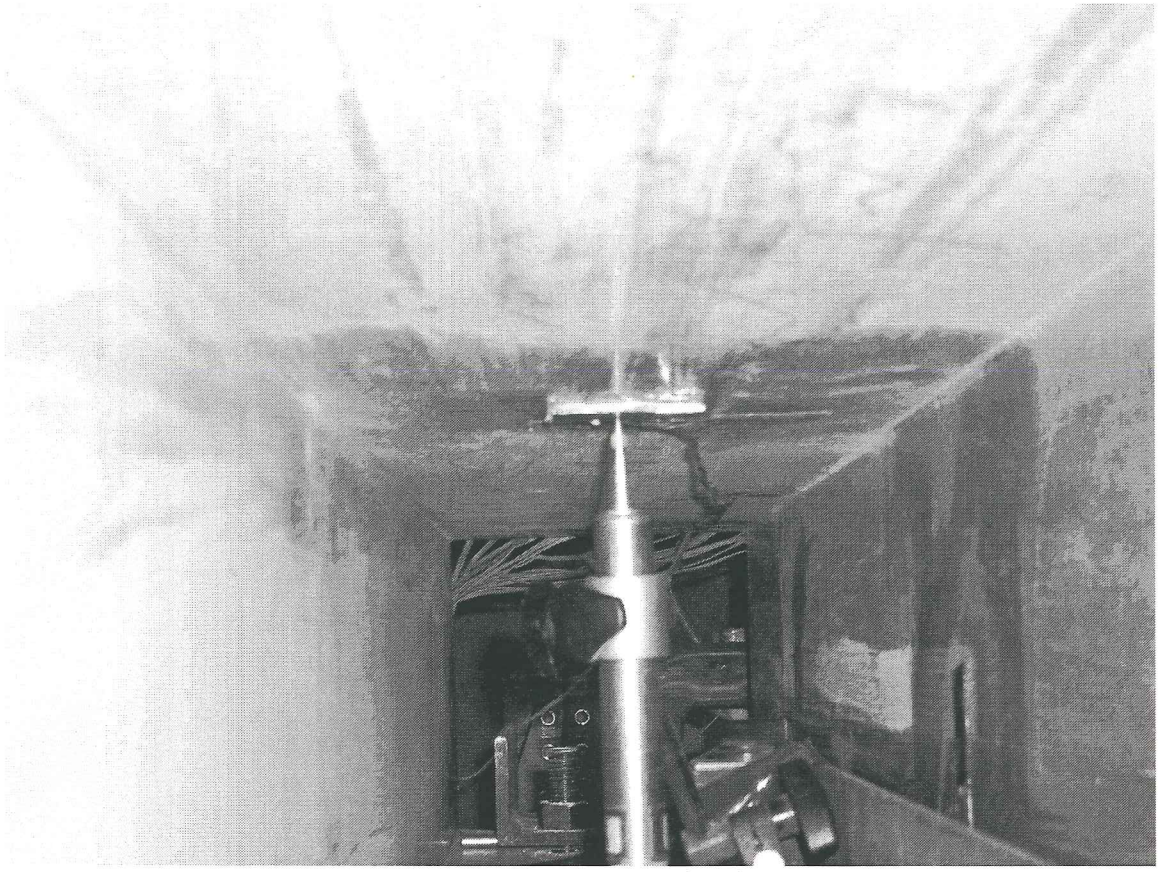
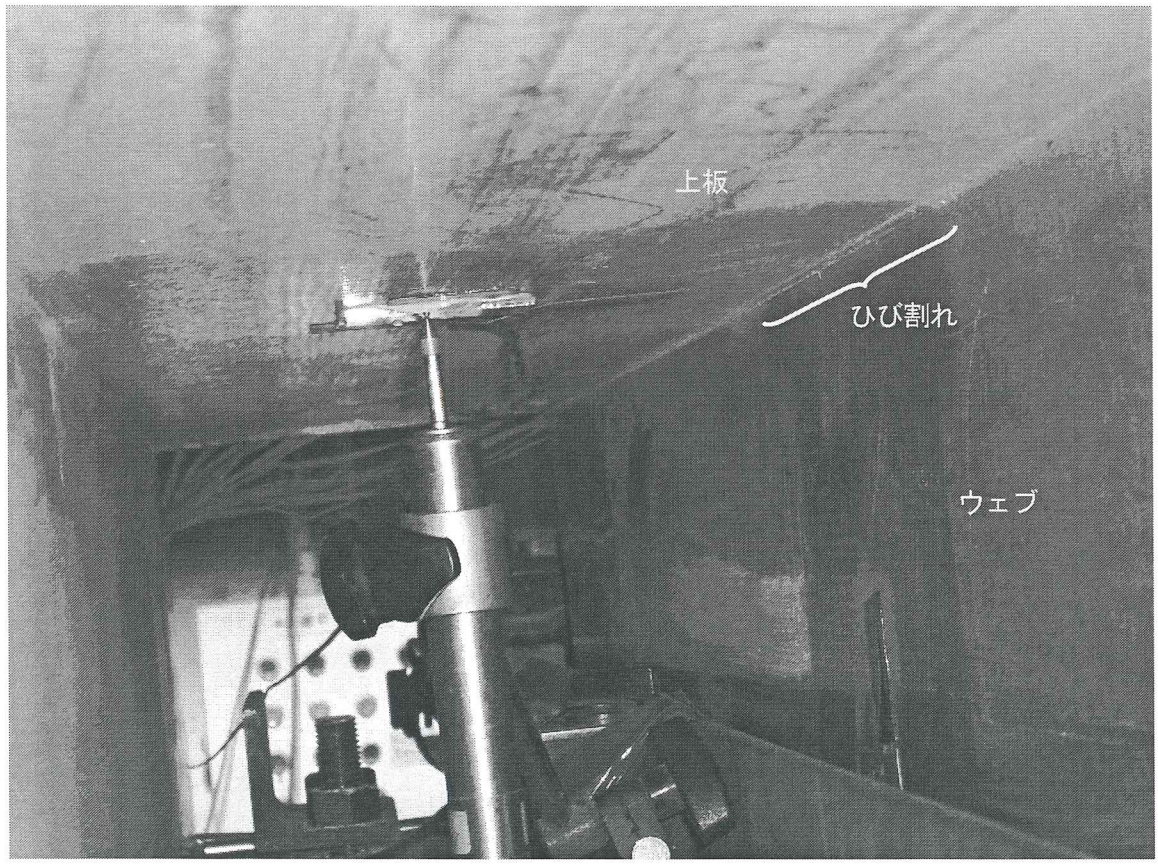


図-5.1.1　セル 10 下面，パネル接合部における下面 F1000 の剥離

(写真は試験開始後約 23 時間後(28000 回)に撮影)



(a)　約 600000 回 (ひび割れなし)



(b) 一定荷重走行終了時，717000 回 (ひび割れあり)

図-5.1.2　セル 8，走行位置直下の上板とウェブ角部のひび割れ

5.2　動的挙動の経時変化

(1) 走行試験開始時

表-5.2.1 に動的測定を行った変位，ひずみの試験開始時における最大値，最小値及びその範囲を示す。そのうち，試験開始時におけるセル内面のひずみ波形を図-5.2.1(a)～(o)に示す。試験開始時における変位の範囲は 2.27 mm であった。また，最大ひずみ範囲は上板下面走行方向ひずみで 2245 μ (I6Y, ほとんど引張域)，ウェブで 664 μ (I3V，最大最小ともに圧縮)であった。

なお，上板下面のひずみのうち，I3Y～I8Y は走行 1 往復につき 2 つのピークが現れるが，I1Y, I10Y のピークは走行範囲との位置関係から走行 1 往復につき 1 つだけであった。また，I2Y, I9Y は双峰の波形となっていた。

(2) 走行試験終了時

表-5.2.1 には，試験終了時における変位，ひずみの最大値，最小値，その範囲及び試験開始時からの変動量について示す。床版中央における変位の範囲は 2.56 mm で，試験開始時より 0.29 mm の増加が見られた。初期の最大ひずみ範囲が見られた I6Y は，走行回数約 18000 回で測定値に異常が見られたので，表中にはその直前における値を示した。試験開始時の I6Y のひずみ範囲(約 2200 μ)は，測定した範囲で最も大きい箇所であった。測定不能となる直前で約 2700 μ に増加していた。I6Y の次に初期ひずみ範囲が大きかった I3Y では，1549 μ (約 90%が引張域)から 2115 μ (すべて引張域)まで 566 μ の増加が認められた。なお，ウェブのひずみ範囲の増加は床版中央 I6V の 82 μ が最大であり，一定荷重走行による増加はほとんど見られなかった。

図-5.2.2(a)～(s)に試験終了時におけるセル内面のひずみ波形を示す。また，図-5.2.3(a)～(c)に試験終了時における床版下面の変位波形を示す。これらのうち，図-5.2.2(p)～(s) I6V, I7V, I7Y, I9Y のひずみ波形及び図-5.2.3(a)～(c) D2, D3, D5 の変位波形は試験終了時のみ計測した。

(3) 経時変化

図-5.2.4(a)～(c)に変位(D2, D3, D5)の最大値，最小値及びその範囲の経時変化を示す。床版支間中央の D3 の変位範囲が繰返しとともに徐々に増加していたことがわかる。最大値，最小値が時期によって上下しているのは気温の変化に伴う供試体や治具の伸縮に起因するものと考えられる。

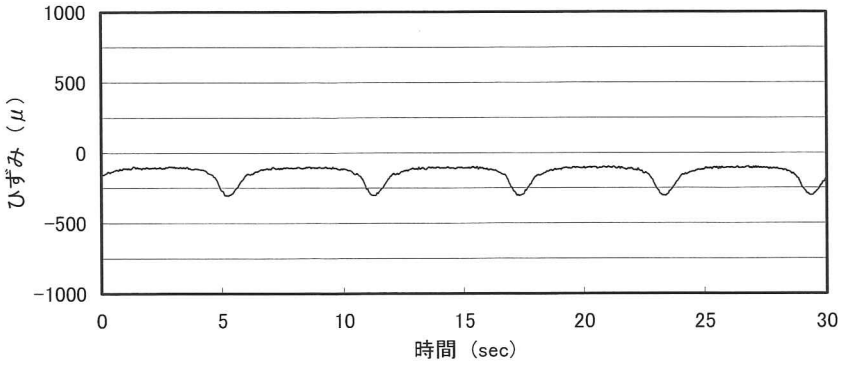
図-5.2.5 に上板下面ひずみ(I6Y, I7Y, I9Y)の最大値，最小値及びその範囲の経時変化を示す。走行開始時のひずみやひずみ範囲が最も大きかった I6Y のひずみ範囲は，約 7000 回までに繰返しとともに増加していたことが認められる。繰返し数 7000 回以降はひずみ範囲に増減が見られるなどの不安定な状態が続いた後，上述のとおり約 18000 回で測定値に異常が見られ(上限値が一定)，約 30000 回で完全に測定不能となった。一方，走行開始直後のひずみ範囲が 1500 μ 程度の I7Y ではひずみ範囲に顕著な経時変化が見られなかった。また，走行開始直後のひずみ範囲が I7Y よりやや大きい程度であった I9Y のひずみ範囲は，約 2000～4000 回の間に多少の低下が見られたが，4000 回以降は I7Y と同様に顕著な経時変化が見られなかった。

図-5.2.6 にウェブ鉛直方向ひずみ(I6V) の最大値，最小値及びその範囲の経時変化を示す。ウェブ鉛直方向のひずみやひずみ範囲は上板下面に比べて小さいが，ひずみ範囲は繰返しとともに徐々に増加傾向にあった。

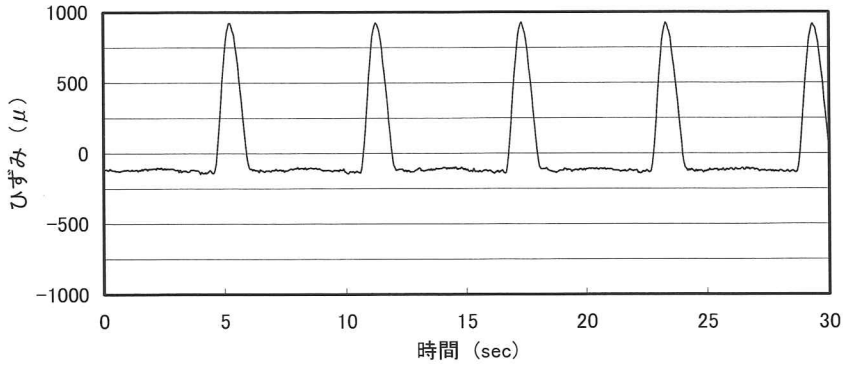
表-5.2.1　動的測定を行った変位，ひずみと一定荷重走行試験前後の変動

部位／測定項目	記号	測定方法	単位	試験開始時			試験終了時			範囲の変動	備考
				最大値	最小値	範囲	最大値	最小値	範囲		
床版下面鉛直変位	D2	DS	mm	2.01	0.14	1.87	2.16	0.17	2.00	0.13	
	D3	DS	mm	2.57	0.30	2.27	2.76	0.20	2.56	0.29	床版中央
	D5	DS	mm	2.04	0.09	1.96	2.40	0.31	2.09	0.13	
ウェブ鉛直ひずみ	I1V	DDR	μ	-96	-306	210	-300	-510	210	0	
	I2V	DDR	μ	-88	-308	219	-326	-540	214	-6	
	I3V	DDR	μ	-17	-681	664	-229	-893	664	0	
	I4V	DDR	μ	-24	-510	486	-238	-731	493	8	
	I5V	DDR	μ	21	-323	343	-188	-534	347	4	
	I6V	DS	μ	-65	-422	357	-281	-720	439	82	床版中央
	I7V	DS	μ	-56	-325	269	-317	-562	245	-24	
	I8V	DDR	μ	-54	-296	242	-229	-538	309	68	
	I9V	DDR	μ	2	-557	559	-276	-791	516	-43	
	I10V	DDR	μ	47	-283	330	-178	-514	336	6	
上板下面走行方向ひずみ	I1Y	DDR	μ	930	-148	1078	1033	-231	1264	186	
	I2Y	DDR	μ	932	-197	1129	938	-362	1299	171	
	I3Y	DDR	μ	1380	-169	1549	2138	23	2115	566	
	I4Y	DDR	μ	1163	-233	1395	1305	-531	1836	441	
	I5Y	DDR	μ	896	-259	1155	653	-536	1189	34	
	I6Y	DS	μ	2212	-33	2245	*2499*	*-168*	*2667*	*422*	18000 回で測定値異常
	I7Y	DS	μ	1331	-167	1498	1050	-525	1575	77	
	I8Y	DDR	μ	750	-279	1029	437	-849	1286	257	
	I9Y	DS	μ	1522	-106	1628	1013	-403	1416	-212	
	I10Y	DDR	μ	549	-197	746	144	-504	649	-98	

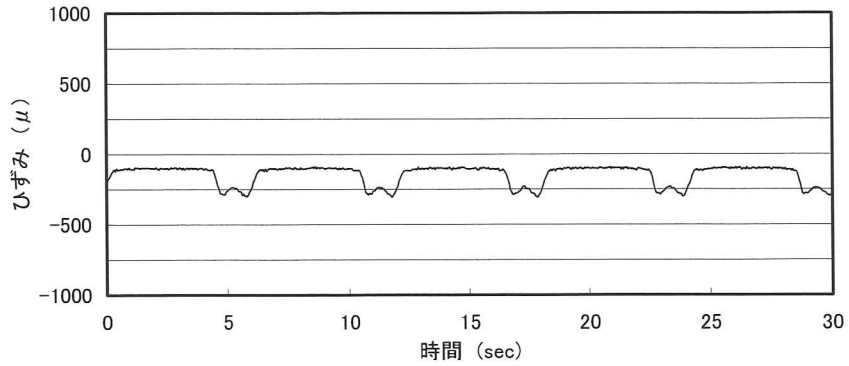
注) I6Y の試験終了時の値は測定値異常(上限値一定)となる直前の測定値を示す。



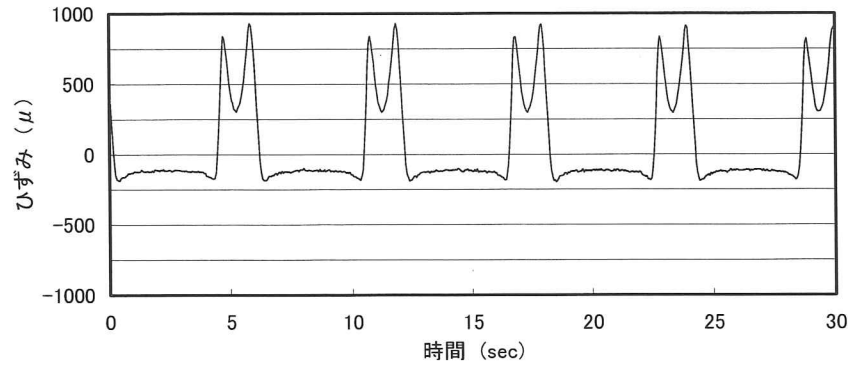
(a) I1V



(b) I1Y

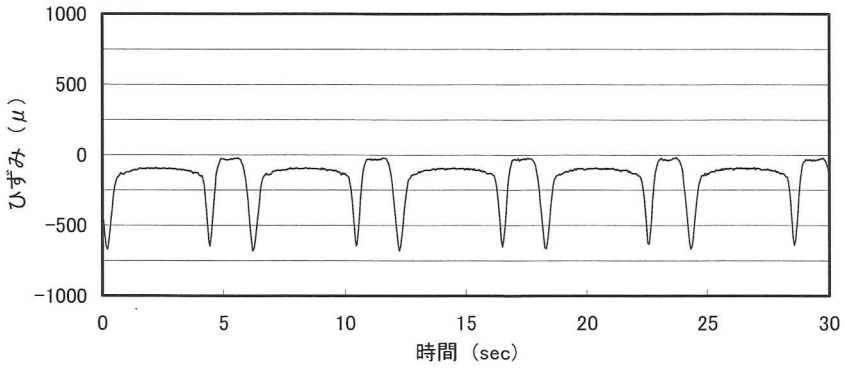


(c) I2V

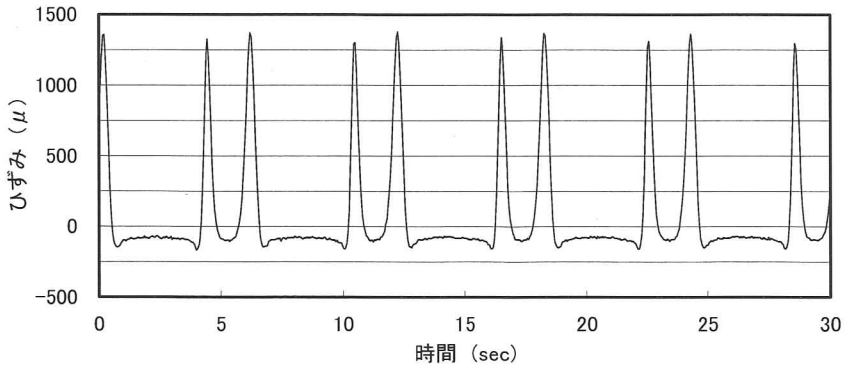


(d) I2Y

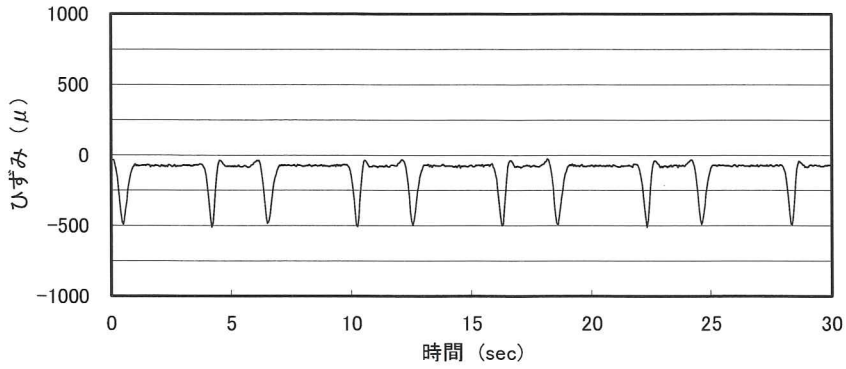
図-5.2.1　一定荷重走行時の内面ひずみ (走行開始時)



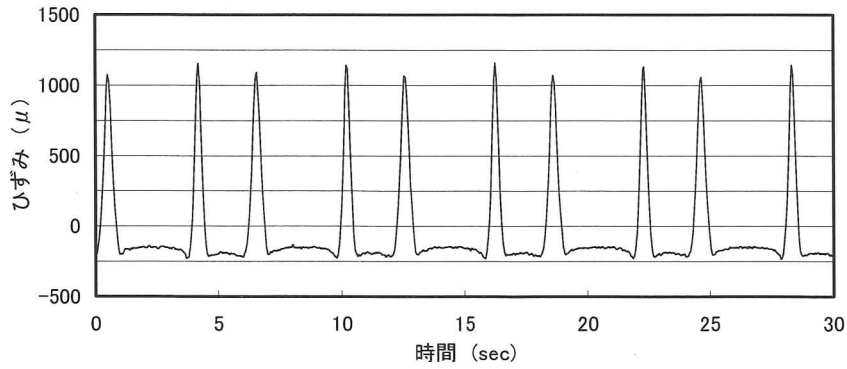
(e) I3V



(f) I3Y

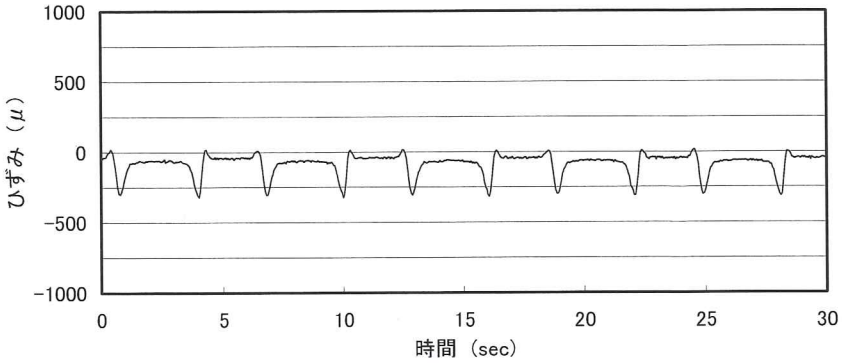


(g) I4V

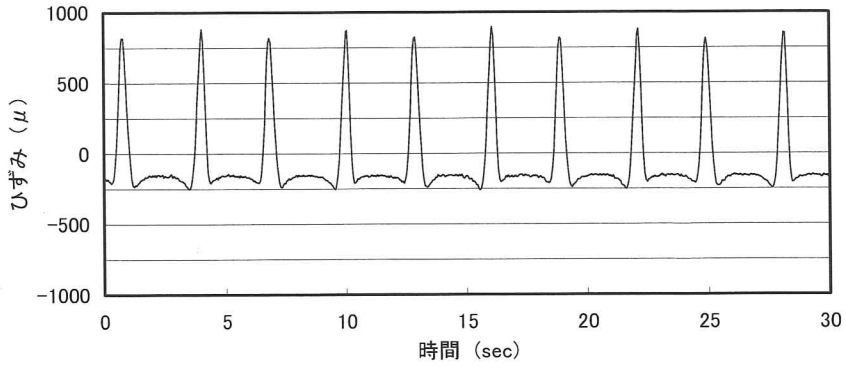


(h) I4Y

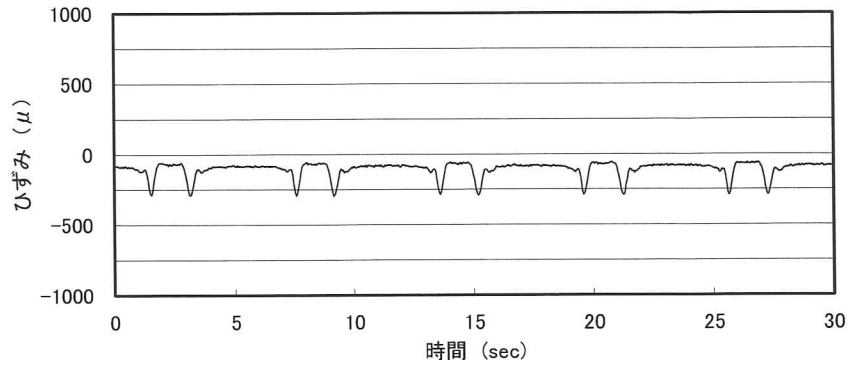
図-5.2.1(続き)　一定荷重走行時の内面ひずみ (走行開始時)



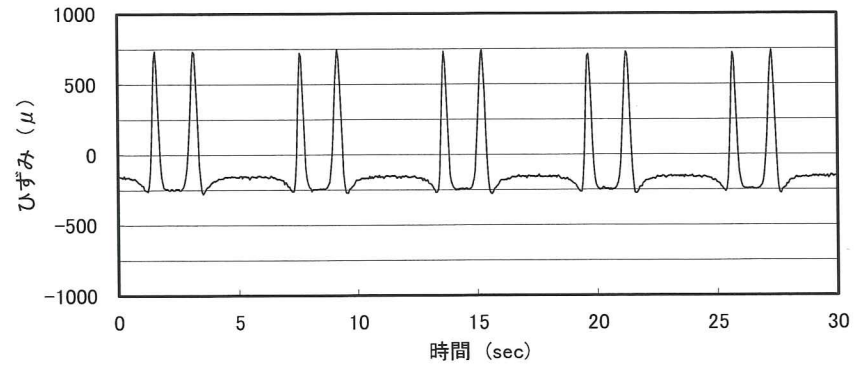
(i) I5V



(j) I5Y

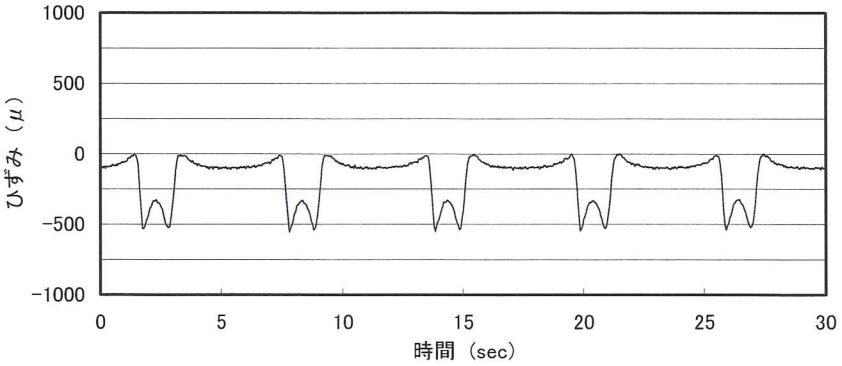


(k) I8V

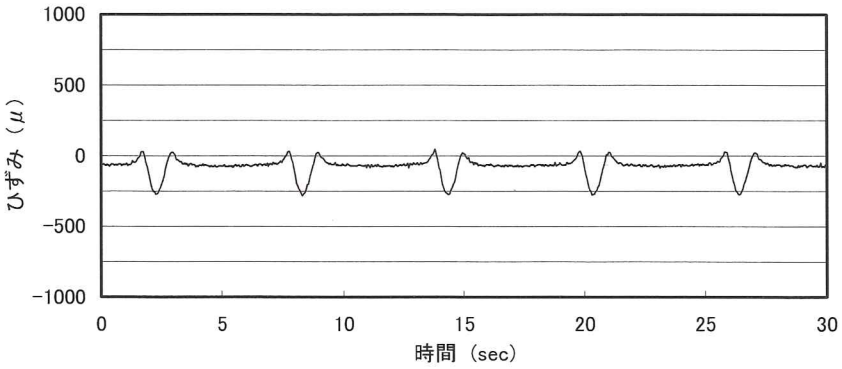


(l) I8Y

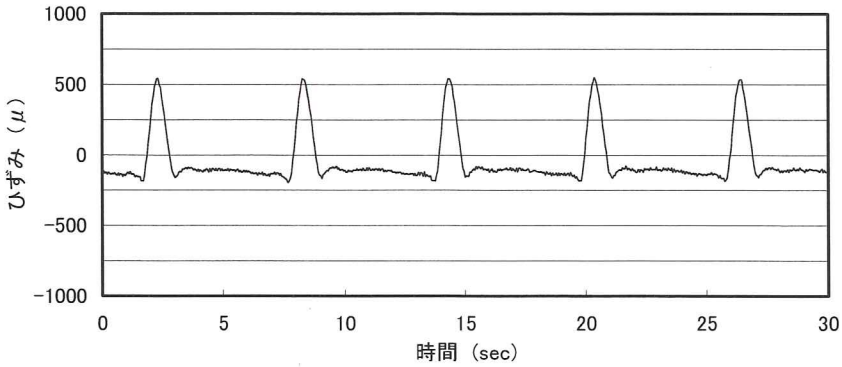
図-5.2.1(続き)　一定荷重走行時の内面ひずみ (走行開始時)



(m) I9V

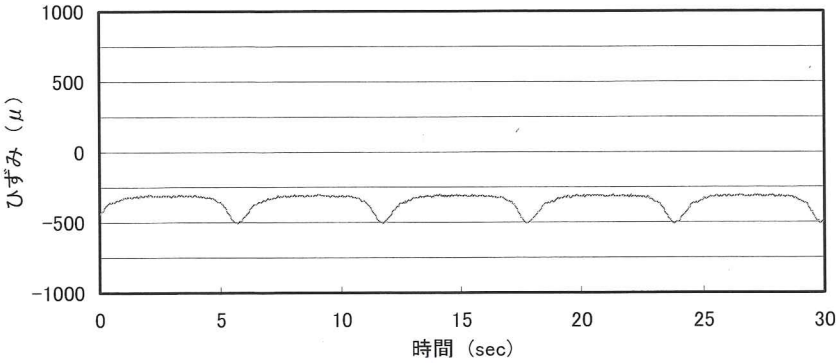


(n) I10V

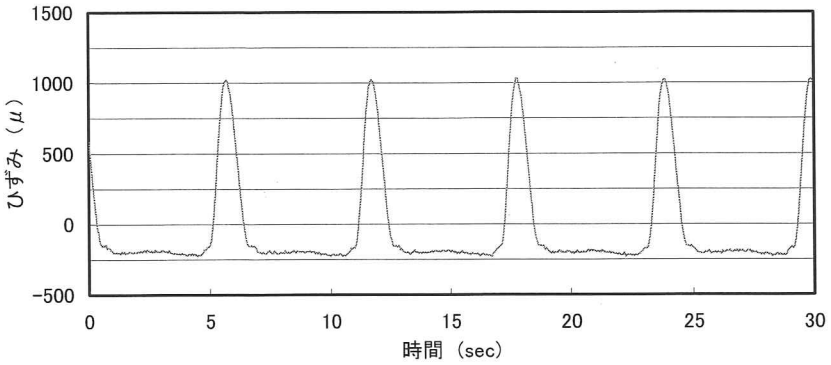


(o) I10Y

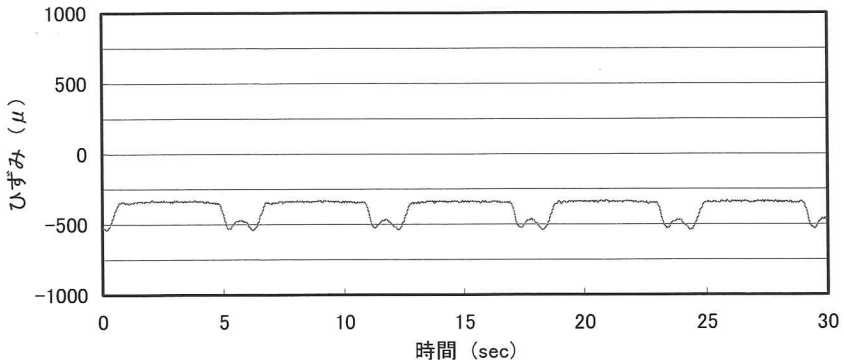
図-5.2.1(続き)　一定荷重走行時の内面ひずみ (走行開始時)



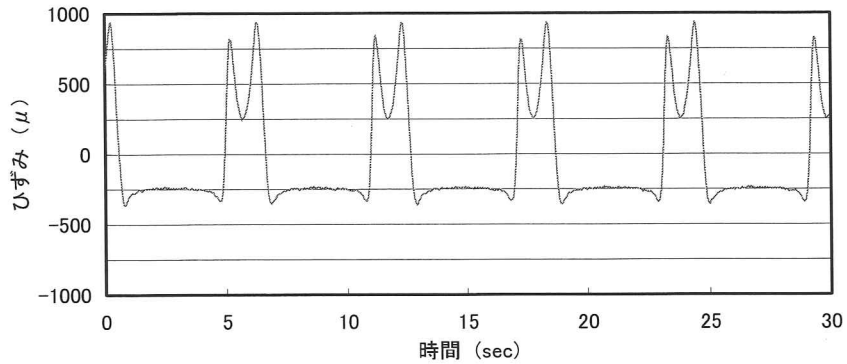
(a) I1V



(b) I1Y

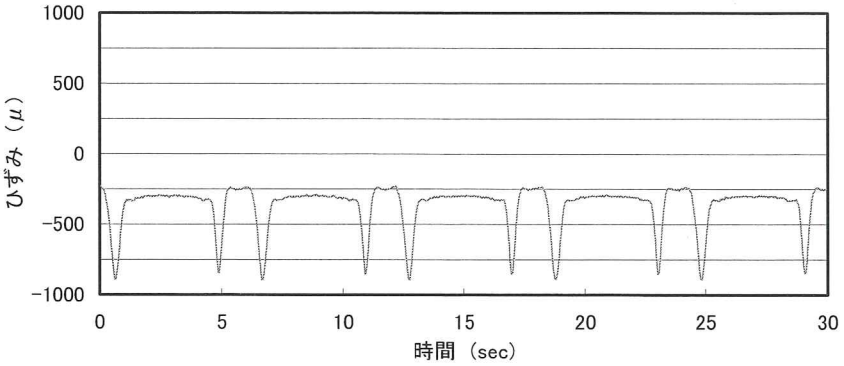


(c) I2V

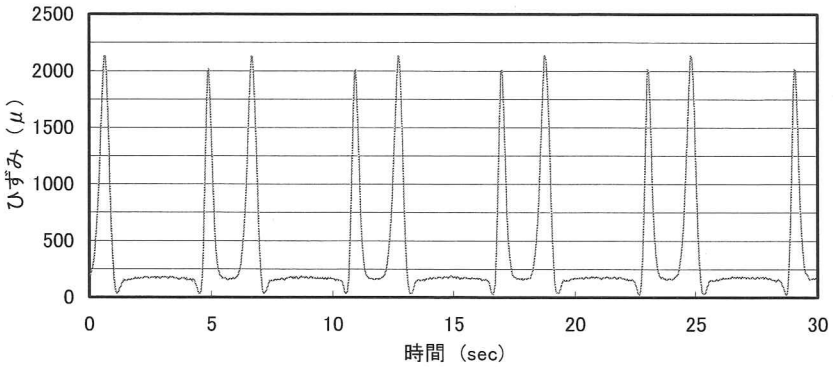


(d) I2Y

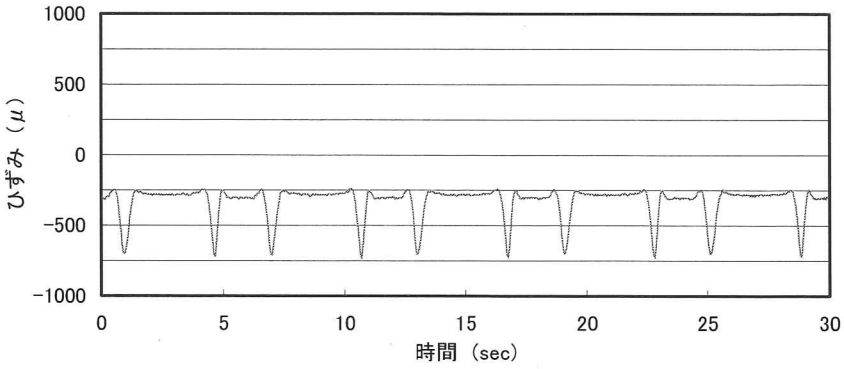
図-5.2.2　一定荷重走行時の内面ひずみ（走行終了時）



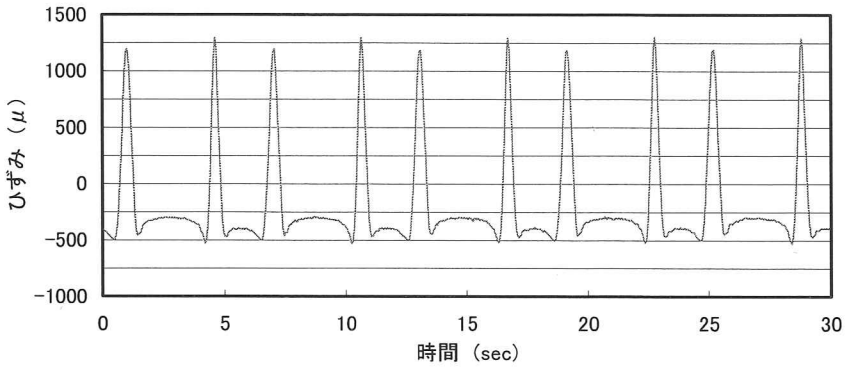
(e) I3V



(f) I3Y

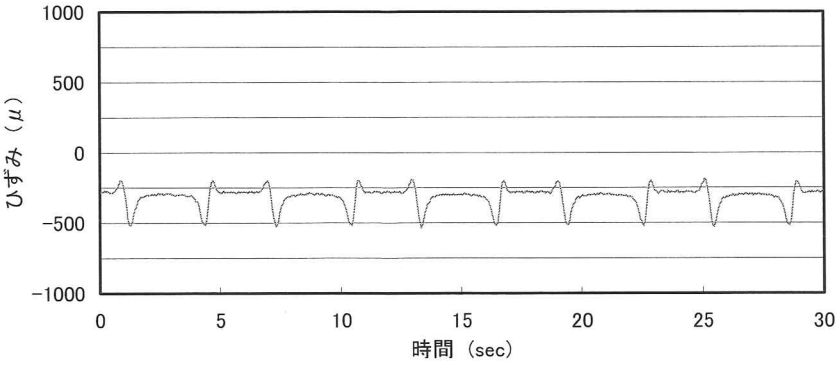


(g) I4V

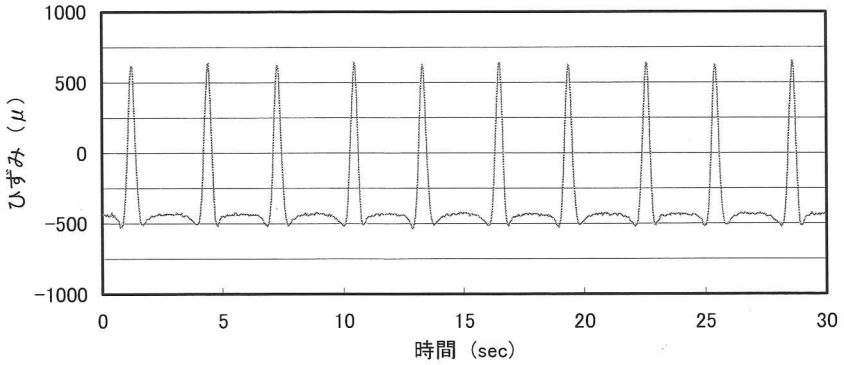


(h) I4Y

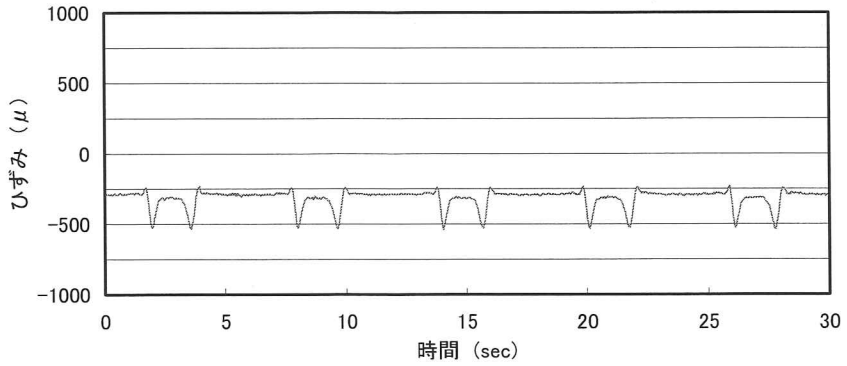
図-5.2.2(続き)　一定荷重走行時の内面ひずみ（走行終了時）



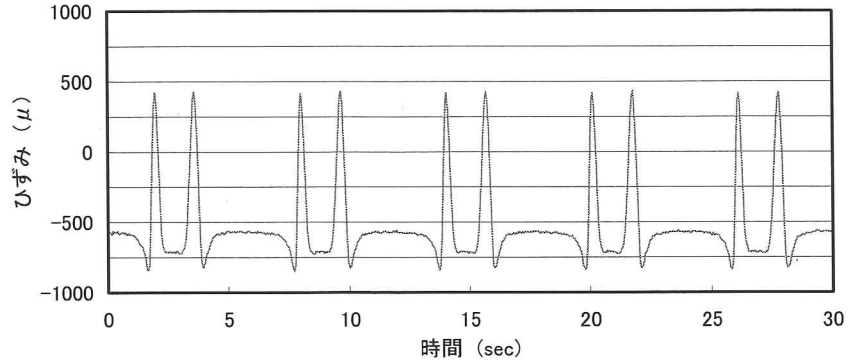
(i) I5V



(j) I5Y

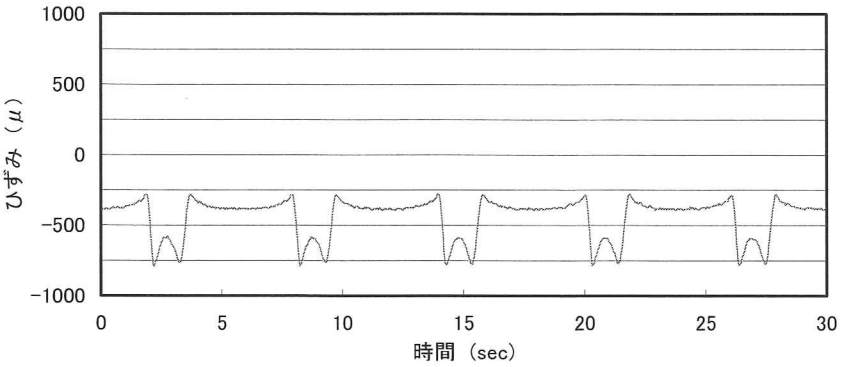


(k) I8V

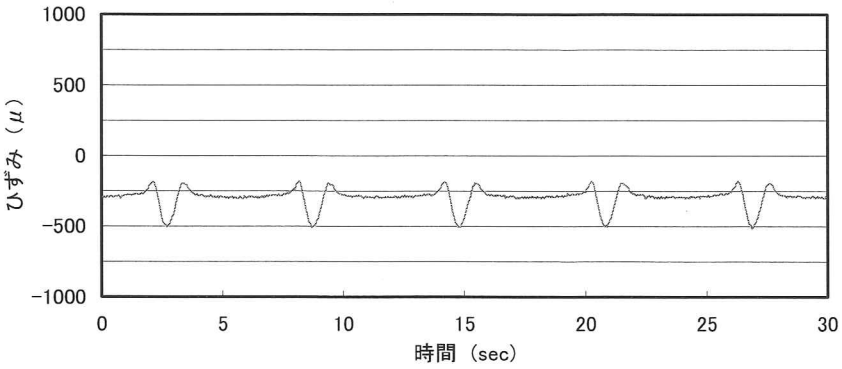


(l) I8Y

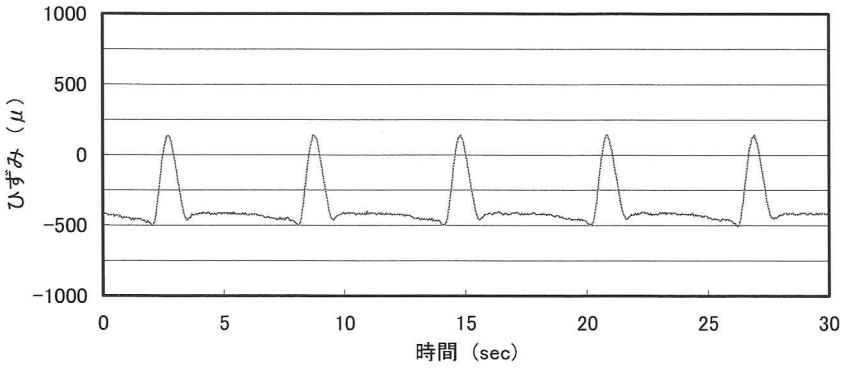
図-5.2.2(続き)　一定荷重走行時の内面ひずみ（走行終了時）



(m) I9V

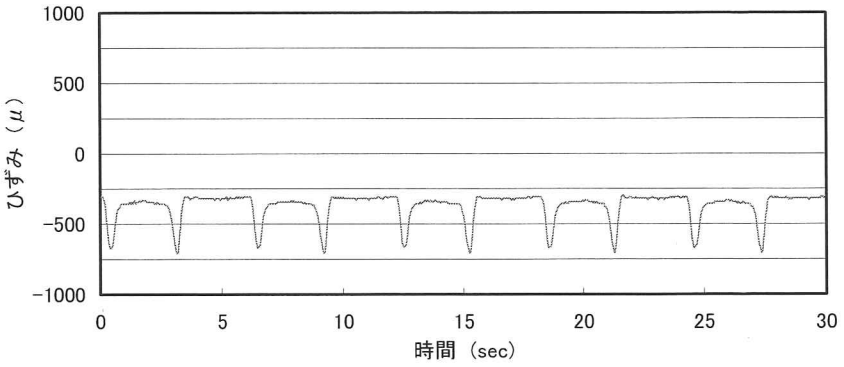


(n) I10V

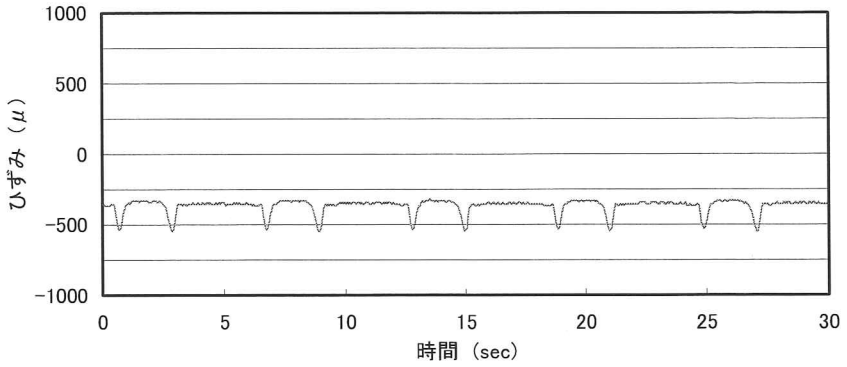


(o) I10Y

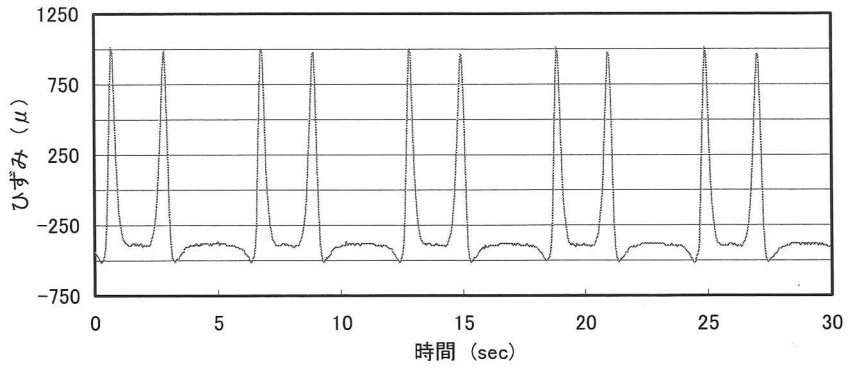
図-5.2.2(続き)　一定荷重走行時の内面ひずみ（走行終了時）



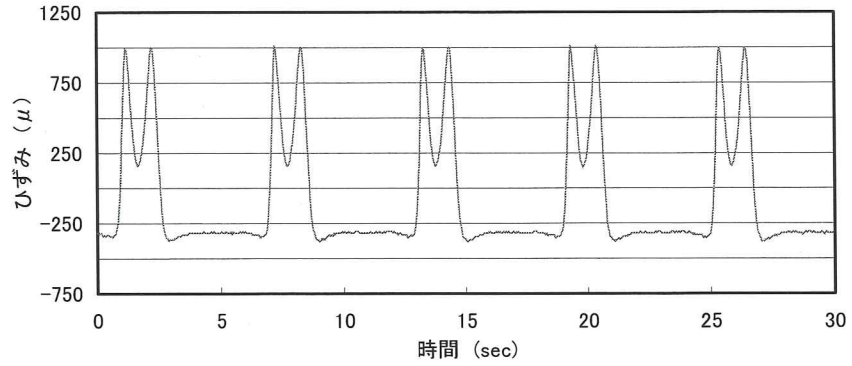
(p) I6V



(q) I7V



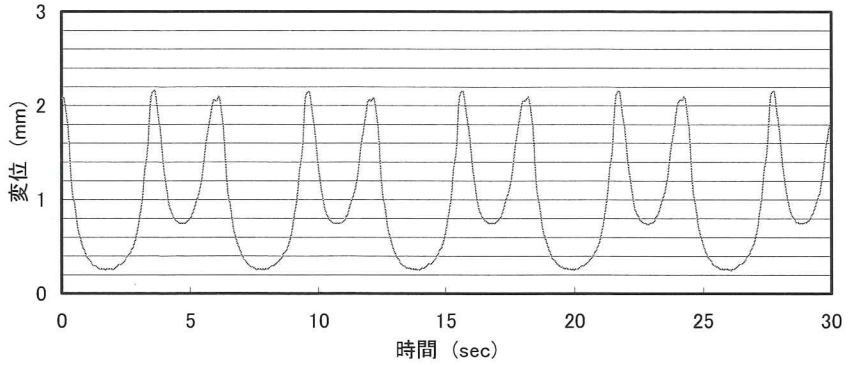
(r) I7Y



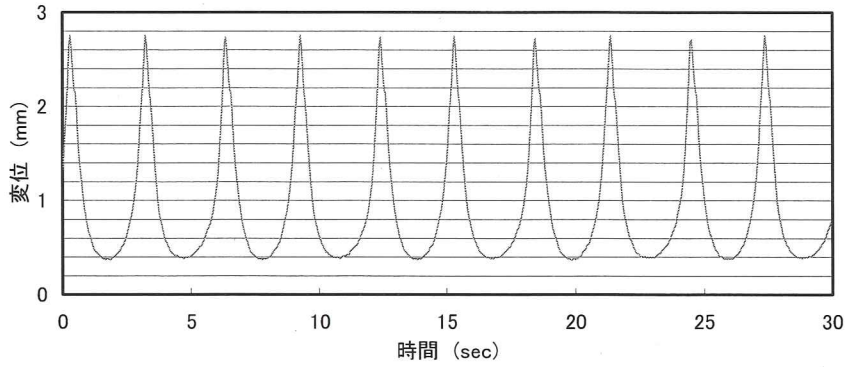
(s) I9Y

図-5.2.2(続き)　一定荷重走行時の内面ひずみ（走行終了時）

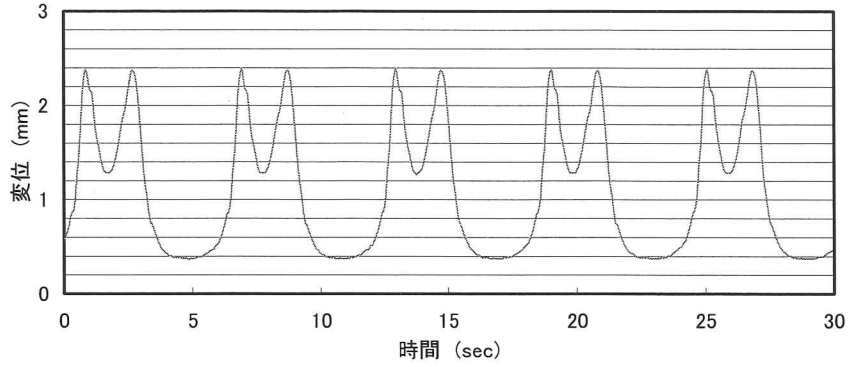
（I6V, I7V, I7Y, I9Y のひずみ波形は走行終了時のみ計測，DT データ）



(a) D2



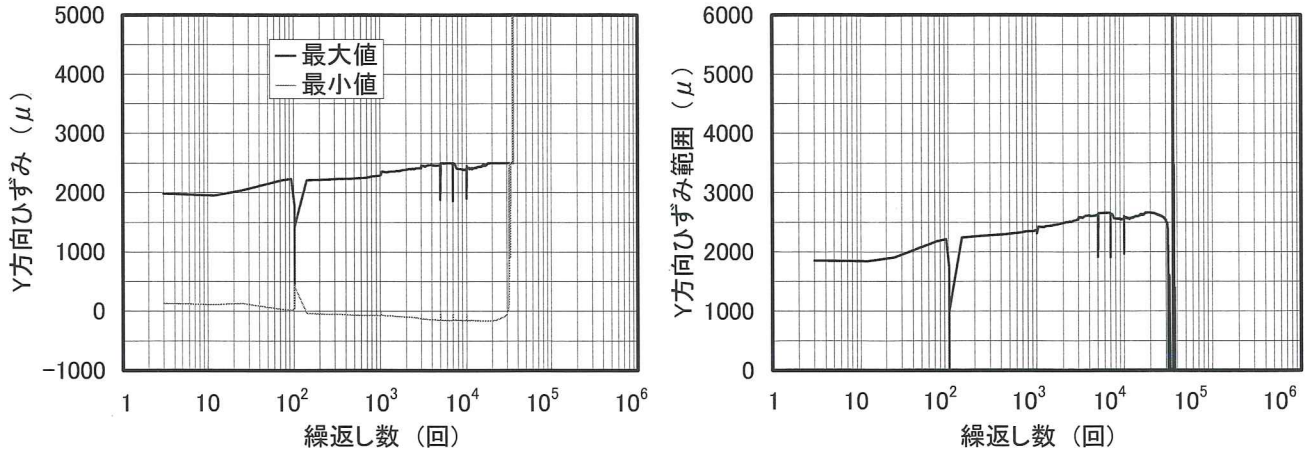
(b) D3



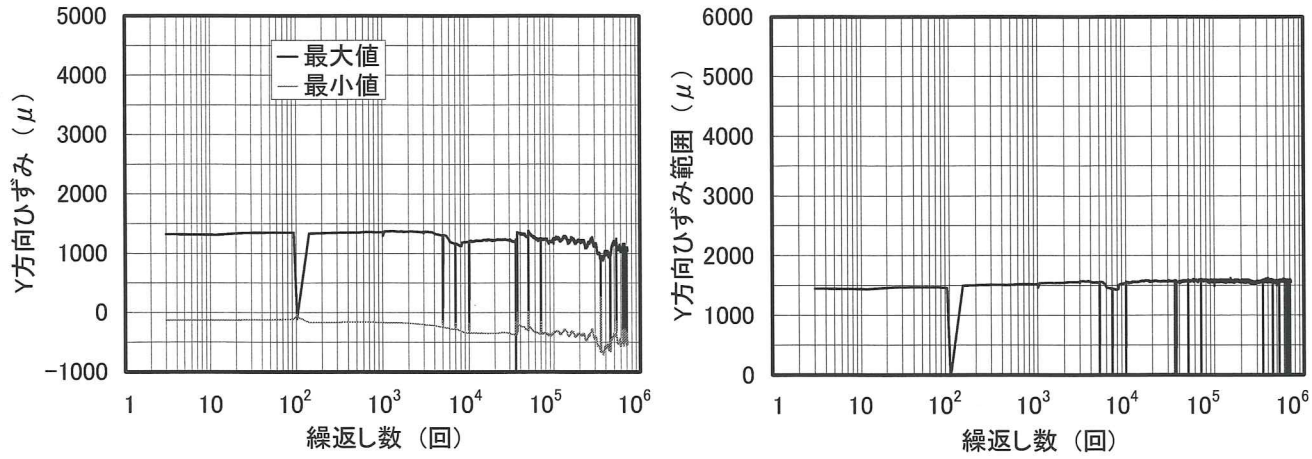
(c) D5

図-5.2.3　一定荷重走行時の下面変位（走行終了時）

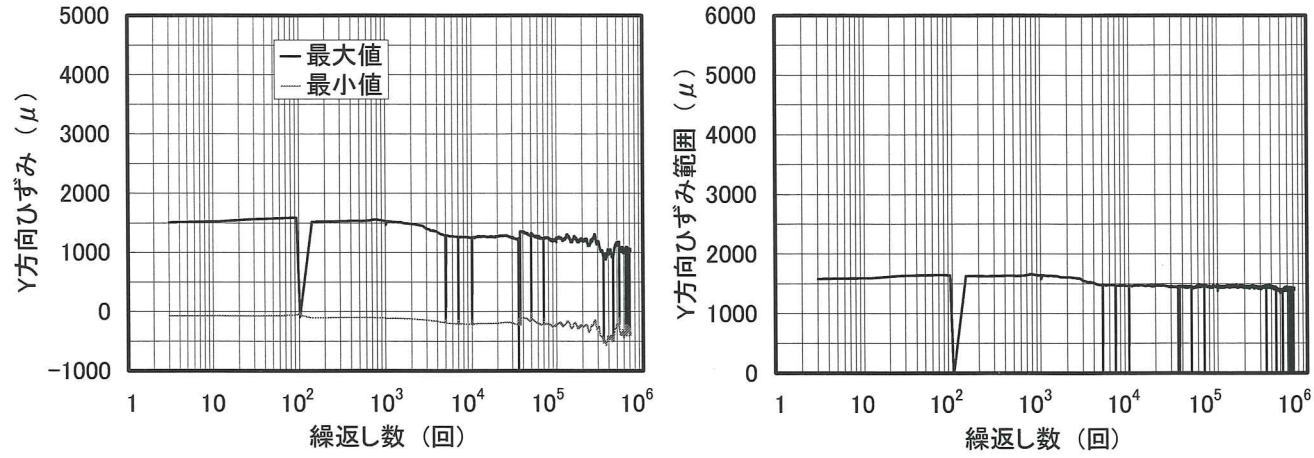
（変位 D2, D3, D5 の波形は走行終了時のみ計測，DT データ）



(a) I6Y (中心から-125 mm)

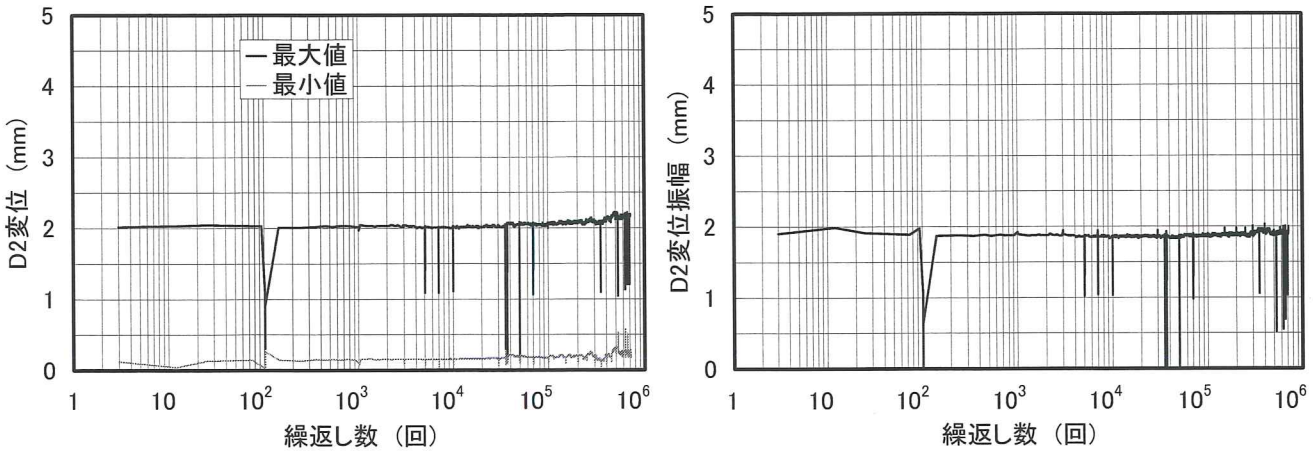


(b) I7Y (中心から-375 mm)

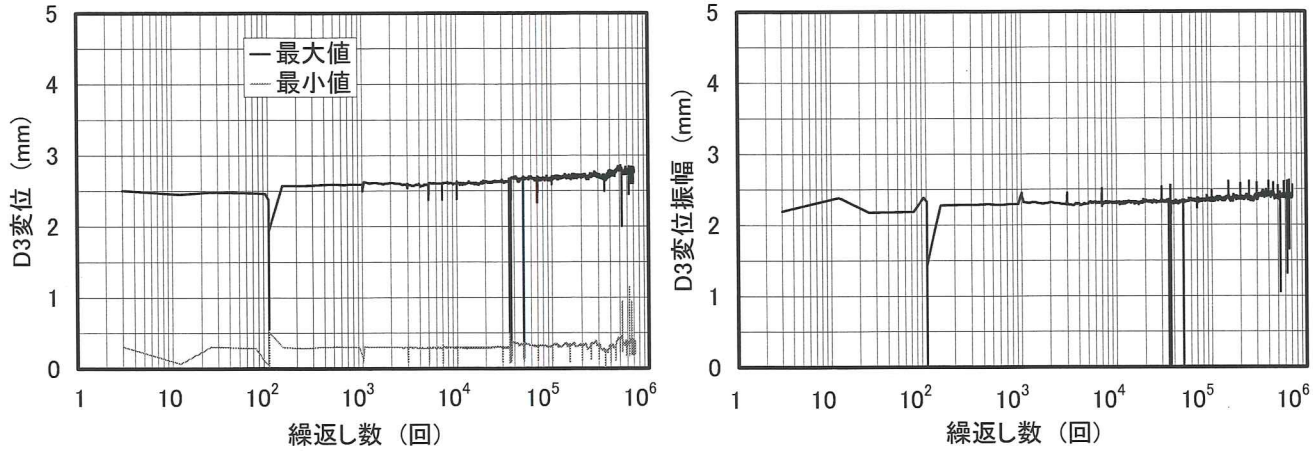


(c) I9Y (中心から-975 mm)

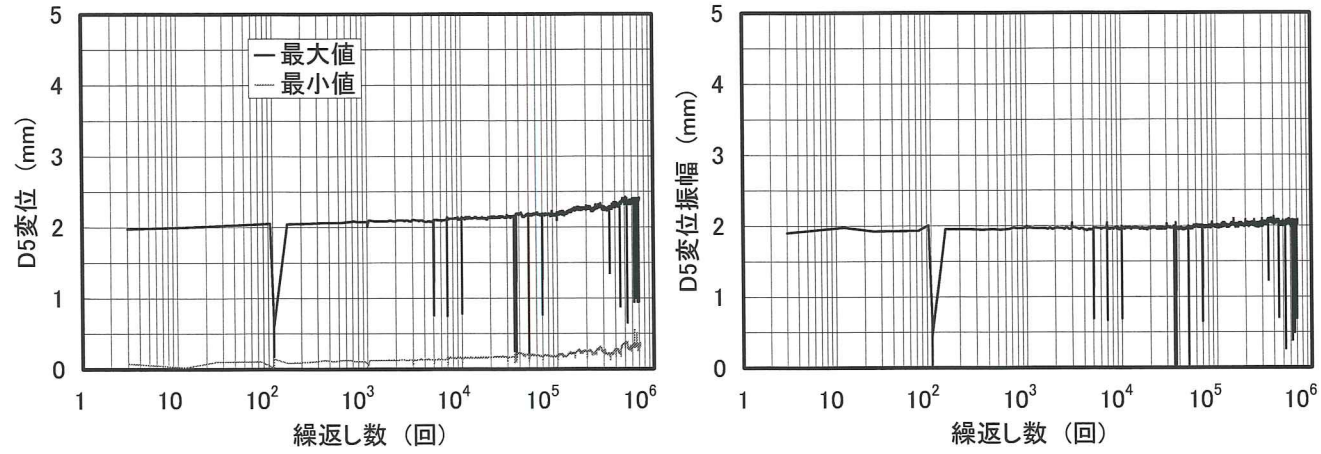
図-5.2.5　一定荷重走行時の上板下面ひずみの経時変化（全期間，DS データ）



(a) D2 (パネル間継手付近，中心から+360 mm)



(b) D3 (床版中央)



(c) D5 (パネル間継手付近，中心から-610 mm)

図-5.2.4　一定荷重走行時の変位の経時変化（全期間，DS データ）

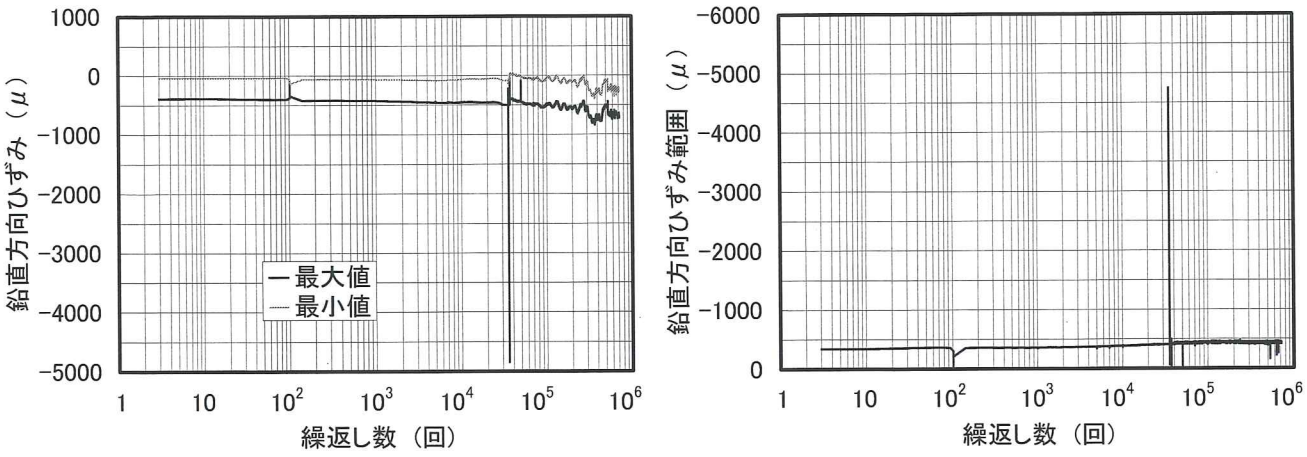


図-5.2.6　一定荷重走行時のウェブ鉛直方向ひずみ I6V の経時変化（全期間，DS データ）

5.3　一定荷重走行試験後の静的挙動

(1) 載荷位置①

図-5.3.1 に一定荷重走行試験後に載荷位置①で 100 kN 載荷したときの床版上下面のひずみ分布を試験前の結果と対比して示す。一部の測定不能となった箇所を除き，一定荷重走行試験前後のひずみ分布の顕著な違いは見られなかった。

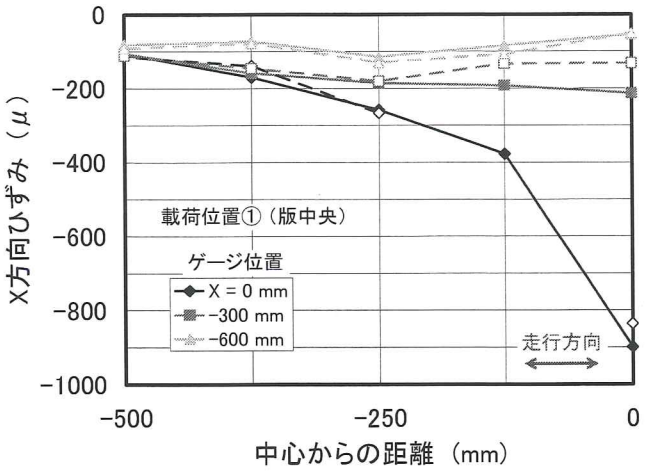
図-5.3.2 に一定荷重走行試験後に載荷位置①で 100 kN 載荷したときの床版下面の変位を試験前の結果と対比して示す。床版中央下面の変位 D3 の試験前後の差はこの図によれば 0.19 mm の増加であった(前掲表-5.2.1 の動的測定結果では 0.29 mm)。

パネル間の接合部で下面の F1000 のはがれが目視により認められたが，たわみ分布の変化にそのはがれの影響は見られなかった。

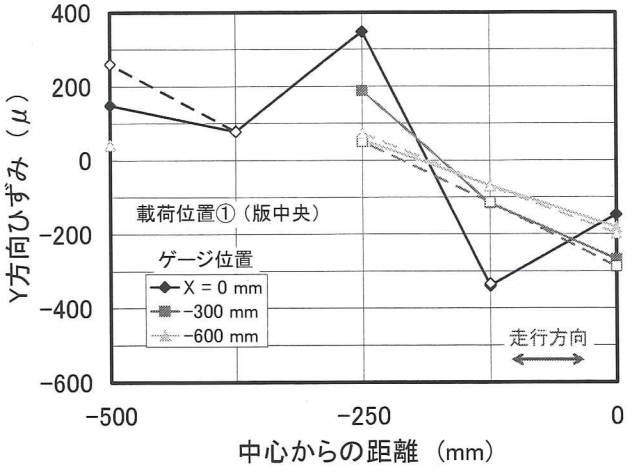
(2) 載荷位置②

図-5.3.3 に一定荷重走行試験後に載荷位置①で 100 kN 載荷したときの床版上下面のひずみ分布を試験前の結果と対比して示す。載荷位置①と同様に，一部の測定不能となった箇所を除き，一定荷重走行試験前後のひずみ分布の顕著な違いは見られなかった。

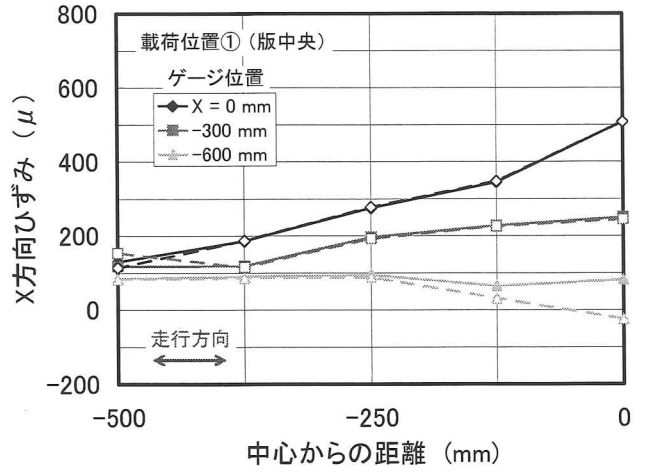
図-5.3.4 に一定荷重走行試験後に載荷位置②で 100 kN 載荷したときの床版下面の変位を試験前の結果と対比して示す。載荷点直下の上板下面の相対変位(上板下面ひずみ D9 から D9 直下床版下面ひずみ D4 を除した値)は，試験前の 0.44 mm から 0.95 mm に増加しており，その増分は 0.51 mm であった。



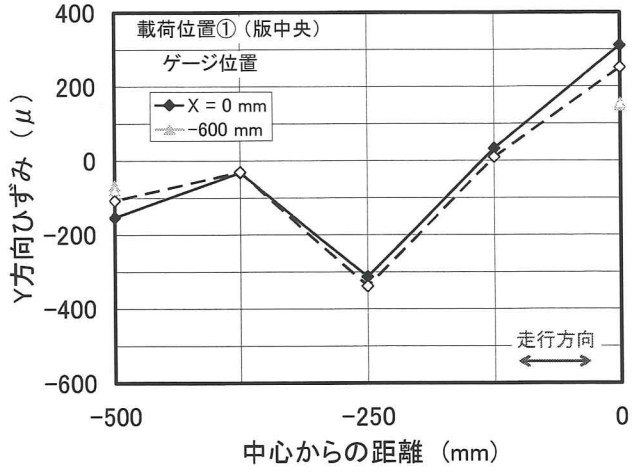
(a) 床版上面の X 方向ひずみ分布



(b) 床版上面の Y 方向ひずみ分布



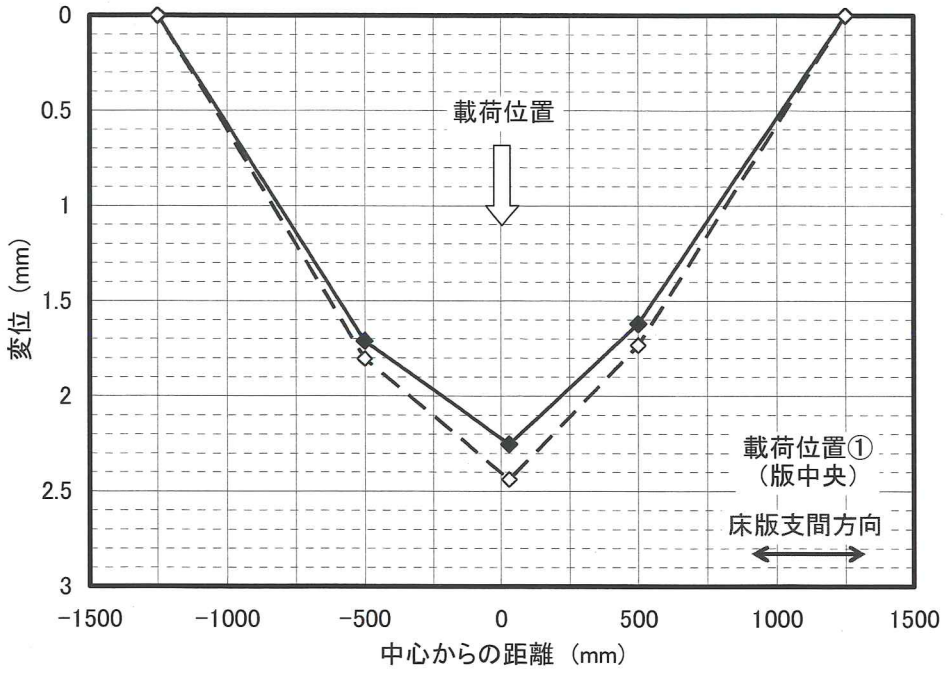
(c) 床版下面の X 方向ひずみ分布



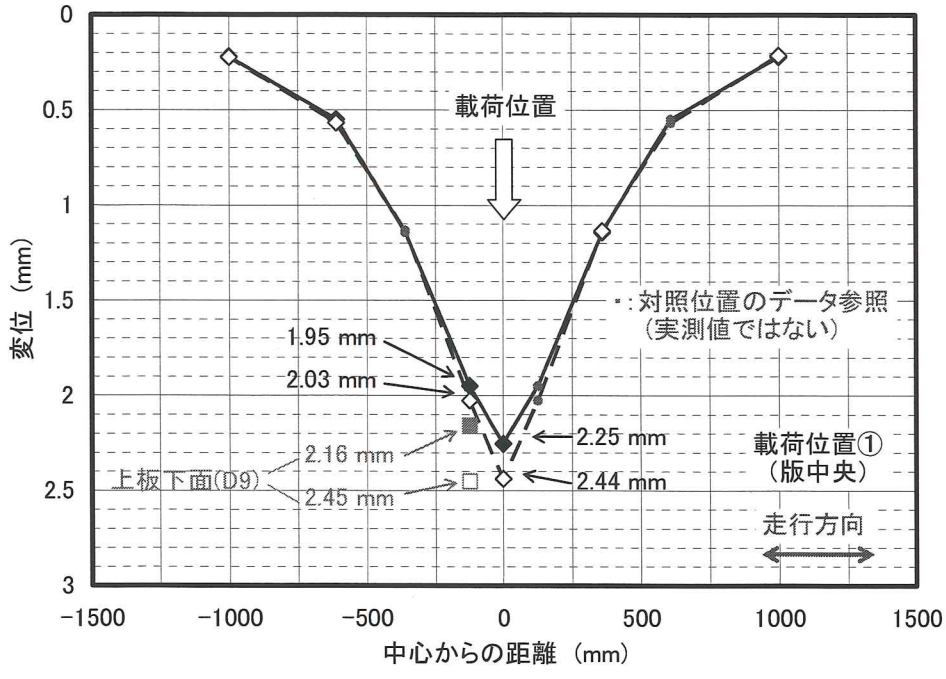
(d) 床版下面の Y 方向ひずみ分布

図-5.3.1　走行試験前後の静的挙動の比較 (載荷位置①, 100kN 載荷時ひずみ分布)

白抜き，破線は 717000 回繰返し後の結果を示す



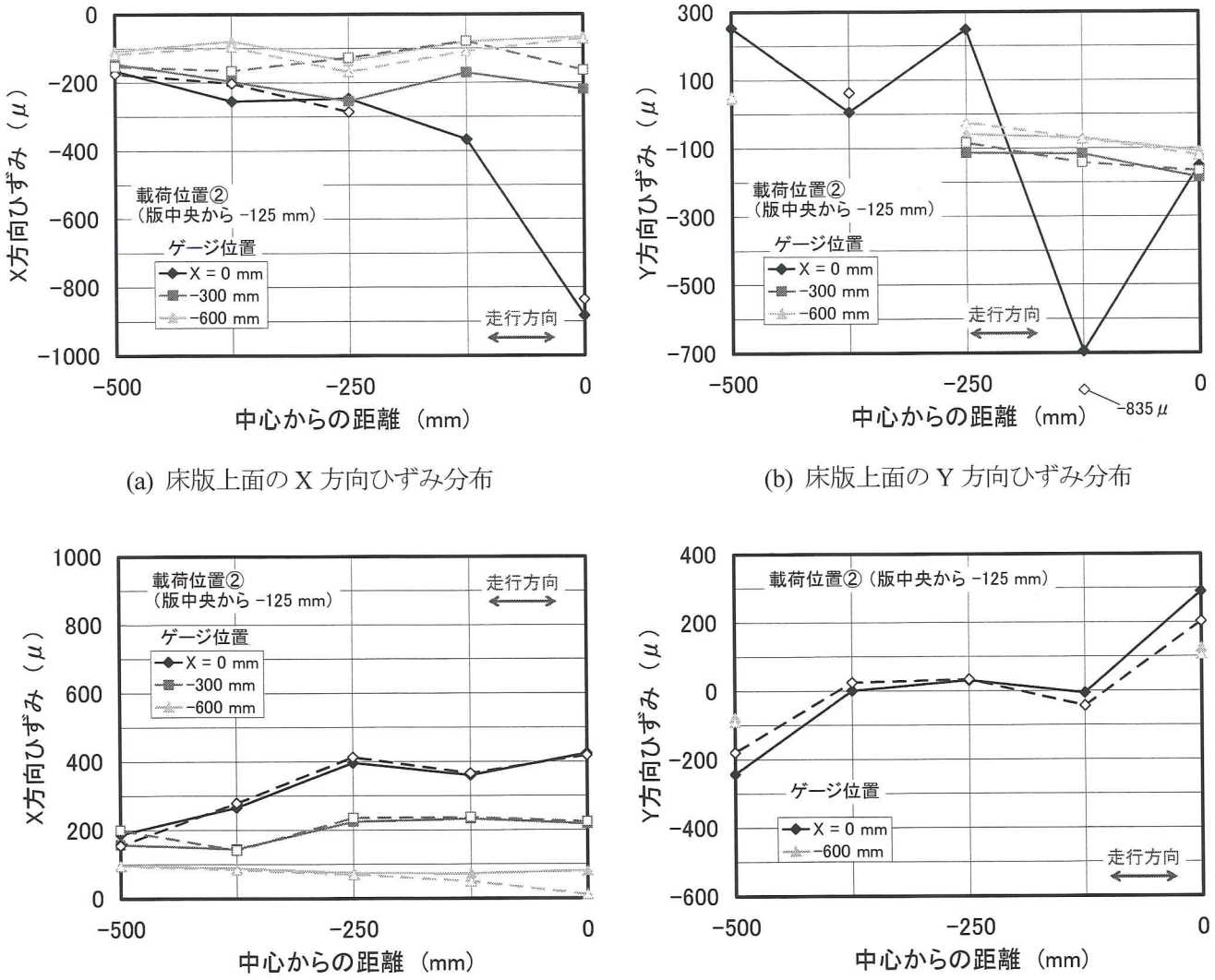
(a) 床版支間方向のたわみ



(b) 走行方向のたわみ

図-5.3.2　走行試験前後の静的挙動の比較 (載荷位置①，100kN 載荷時床版下面変位)

白抜き，破線は 717000 回繰返し後の結果を示す



(a) 床版上面の X 方向ひずみ分布

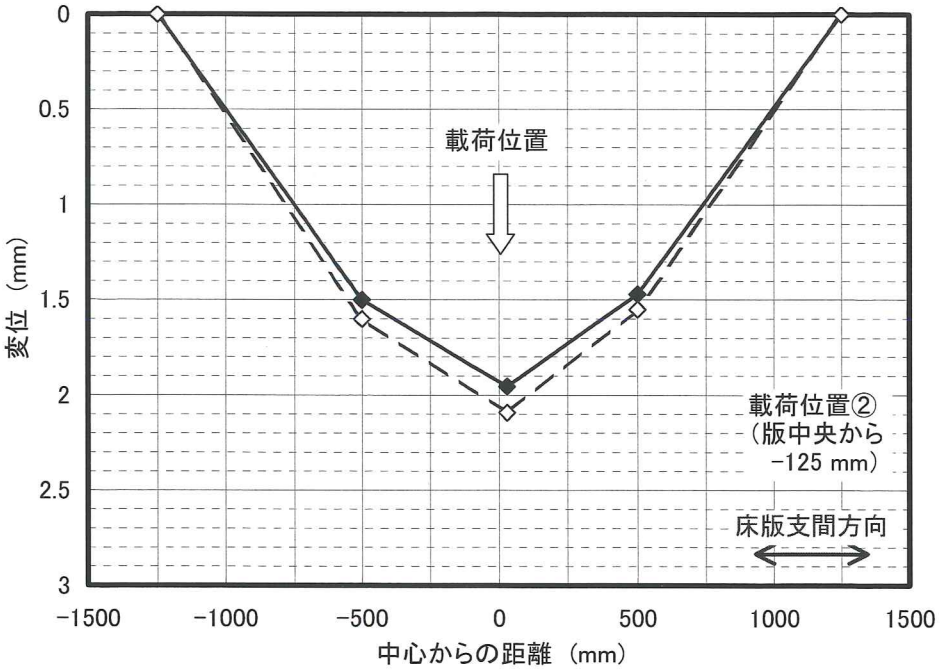
(b) 床版上面の Y 方向ひずみ分布

(c) 床版下面の X 方向ひずみ分布

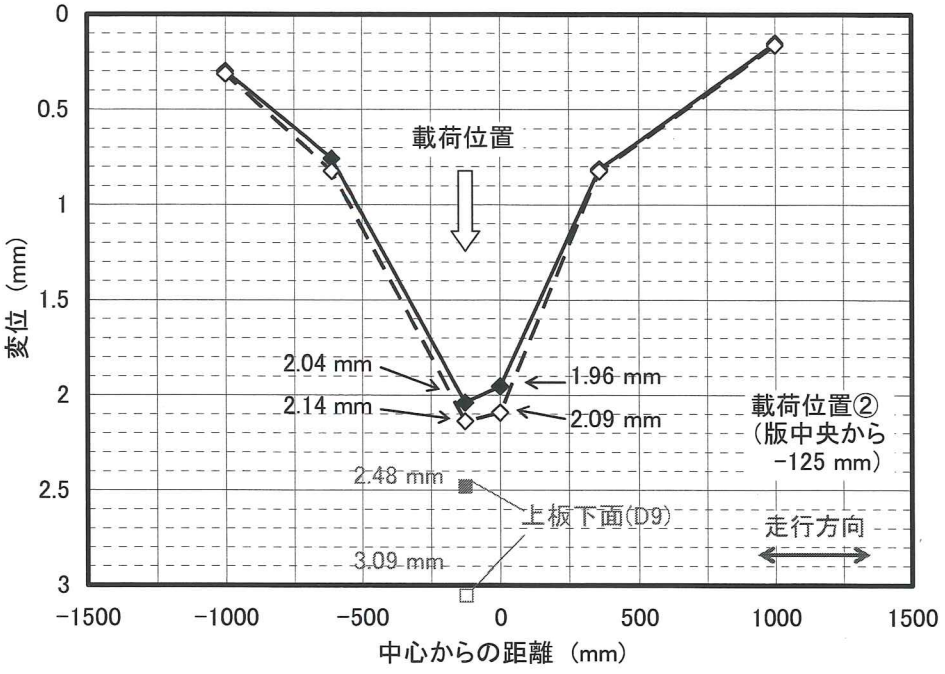
(d) 床版下面の Y 方向ひずみ分布

図-5.3.3　走行試験前後の静的挙動の比較 (載荷位置②, 100kN 載荷時ひずみ分布)

白抜き，破線は 717000 回繰返し後の結果を示す



(a) 床版支間方向のたわみ



(b) 走行方向のたわみ

図-5.3.4　走行試験前後の静的挙動の比較 (載荷位置②, 100kN 載荷時床版下面変位)

白抜き，破線は 717000 回繰返し後の結果を示す

6．階段載荷試験結果

6.1　走行試験中の変状観察

図-6.1.1 に階段載荷試験中における外観観察の経過を示す。走行荷重 157 kN 時にセル内面の角部(SP250 の内面角部)に床版支間方向のひび割れが確認された(図-6.1.2～6.1.4)。ただし，走行中に開閉が確認されたのは載荷点直下(床版支間中央から±250mm)の付近のみであった。走行荷重 196 kN 時に上板下面中央付近(セル 4, 6, 8 の内面)に床版支間方向のひび割れが見られ，3 箇所とも走行中のひび割れ開閉が認められた(図-6.1.5～6.1.7)。

なお，一定荷重載荷時初期より床版下面セル 10 直下の接合部付近で見られた F1000 のはがれは，走行荷重の増加とともにその程度が拡大する傾向が見られた(図-6.1.8～6.1.9)。

表-6.1.1 に階段載荷試験中に動的測定を行っていた箇所の測定機器の状態を示す。上板下面のひずみ(走行方向のみ計測)の多くが階段載荷試験中に測定不能となった。一般に原因としては，ゲージ位置でのひび割れ発生，ひずみゲージの測定限界あるいは接着不良が考えられる。使用したひずみゲージの測定限界はカタログで 3 %までとされており，また既往の疲労試験[6.1)]で 5000 μ 程度まで(これ以上測定できなかったというのではない)測定できていたので今回のひずみレベルでも問題なかったと考えられる。また，セル内面のひずみゲージの接着は遠隔操作により行ったため必ずしも確実な方法とは言えなかったが，試験後の解体においてセル内のひずみゲージの接着，貼り付け方向ともに良好であったことから特段に支障はなかったと考えられる。これらの点から，上板下面のひずみ測定不能の原因はひび割れ発生に起因する可能性が大きいと考えられる(詳細は 7 章で考察)。

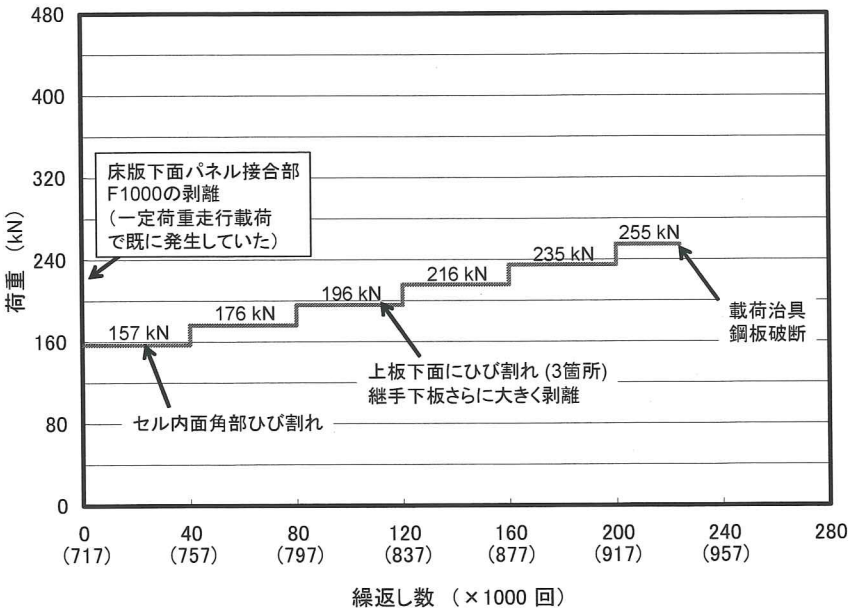


図-6.1.1　階段載荷走行試験における外観観察の主な経過

注) 繰返し数のカッコ内は一定荷重走行載荷分を加えて累積繰返し数を示す。

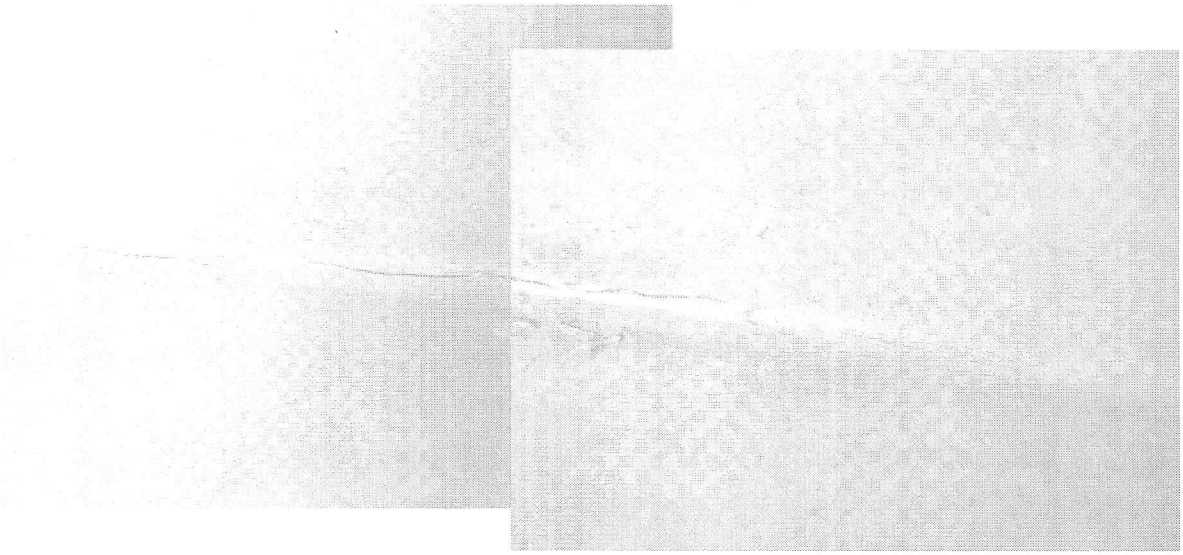


図-6.1.2　セル 6，ウェブと下板の角部のひび割れ (支点鋼桁上付近)
(この位置では載荷中の開閉は見られなかったので，載荷前に出ていた可能性がある)

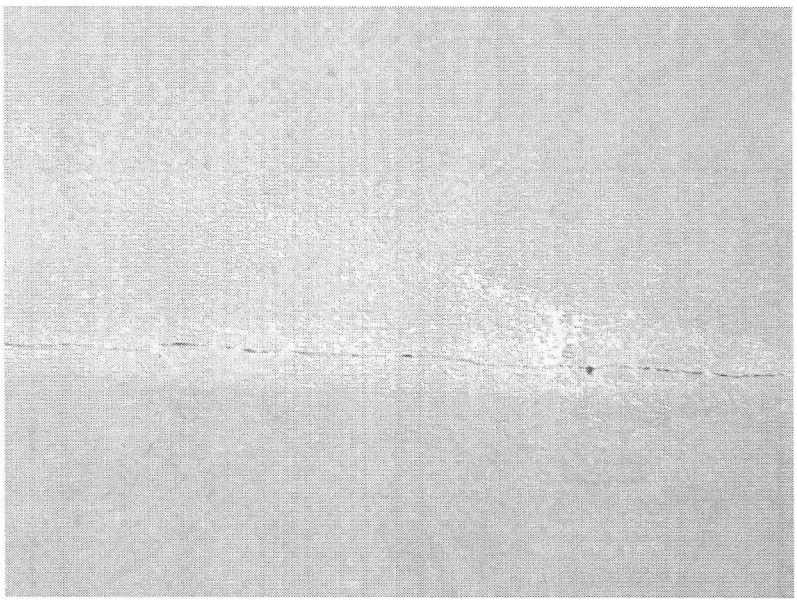


図-6.1.3　セル 6，ウェブと上板の角部のひび割れ (支点から約 600 mm)
(この位置でも載荷中の開閉は見られなかった)

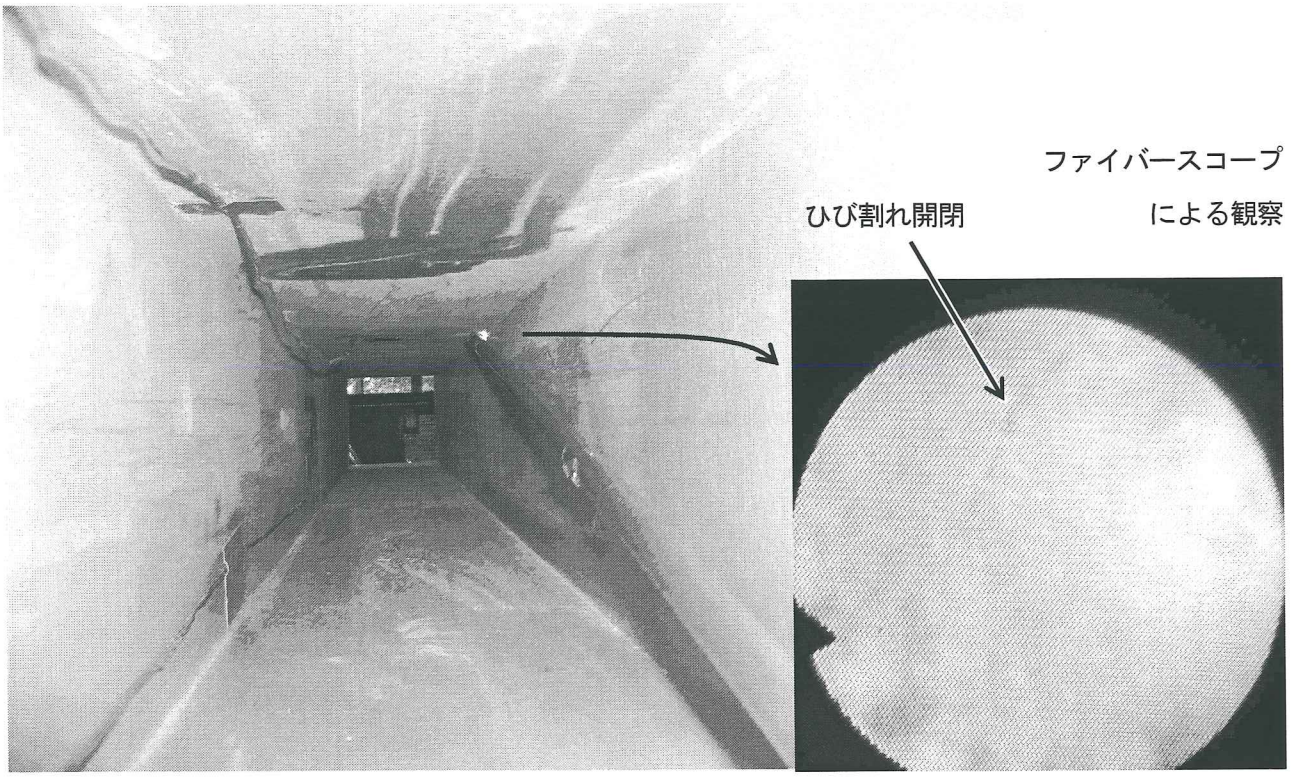


図-6.1.4　セル 6，ウェブと上板の角部のひび割れ (走行位置直下付近)
(157 kN で走行中にひび割れ開閉が見られた)

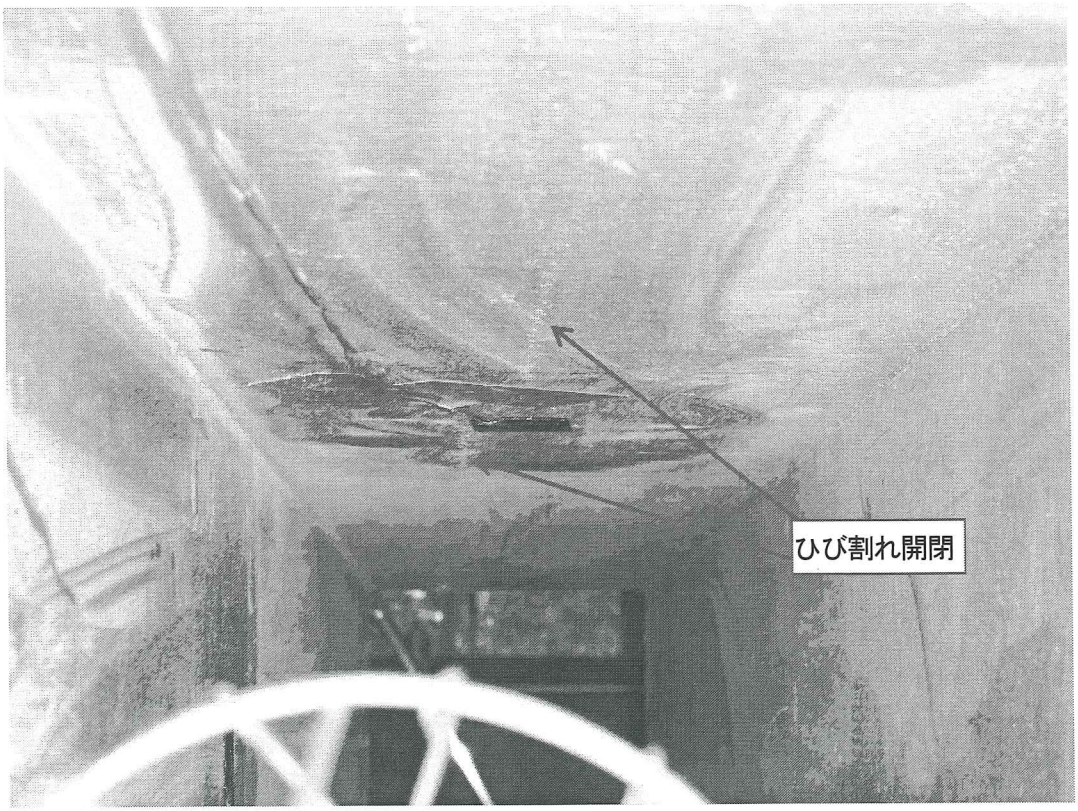


図-6.1.5　セル 4，上板下面のひび割れ (走行位置直下付近)
(196 kN で走行中にひび割れ開閉が見られた)

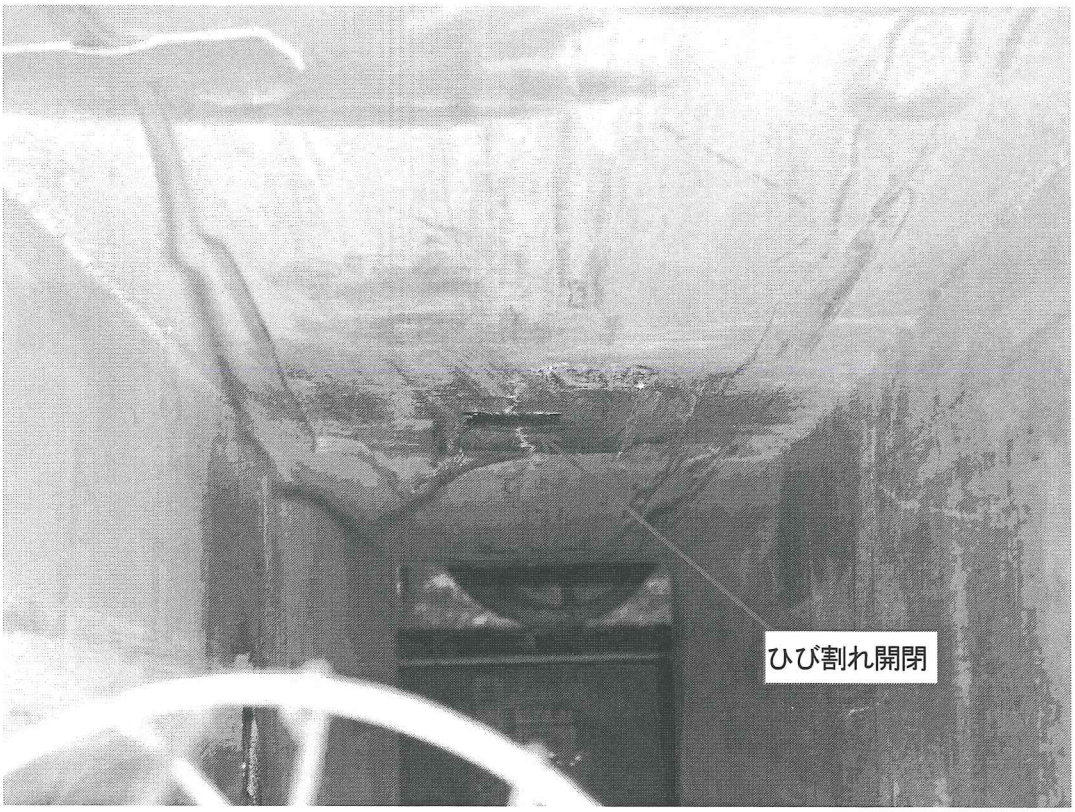


図-6.1.6　セル 6，上板下面のひび割れ (走行位置直下付近)

(196 kN で走行中にひび割れ開閉が見られた)

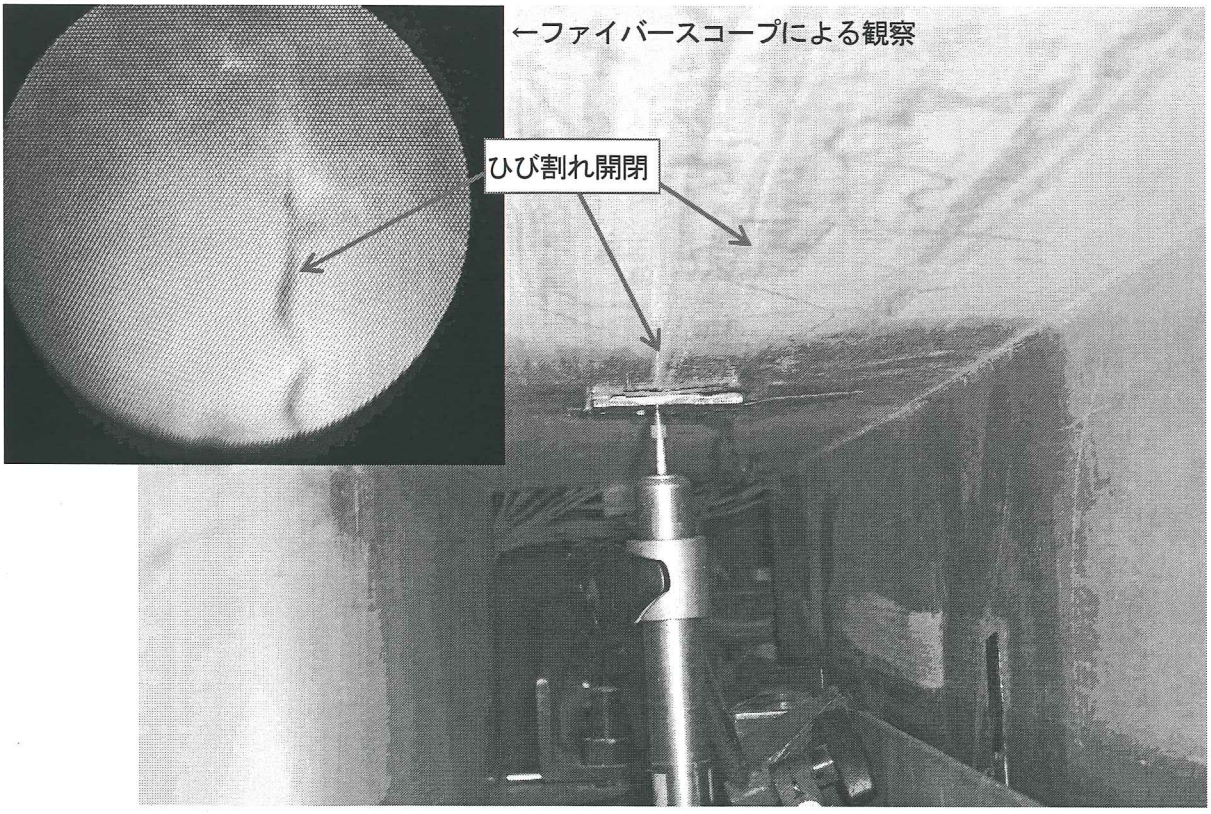


図-6.1.7　セル 8，上板下面のひび割れ (走行位置直下付近)

(196 kN で走行中にひび割れ開閉が見られた)

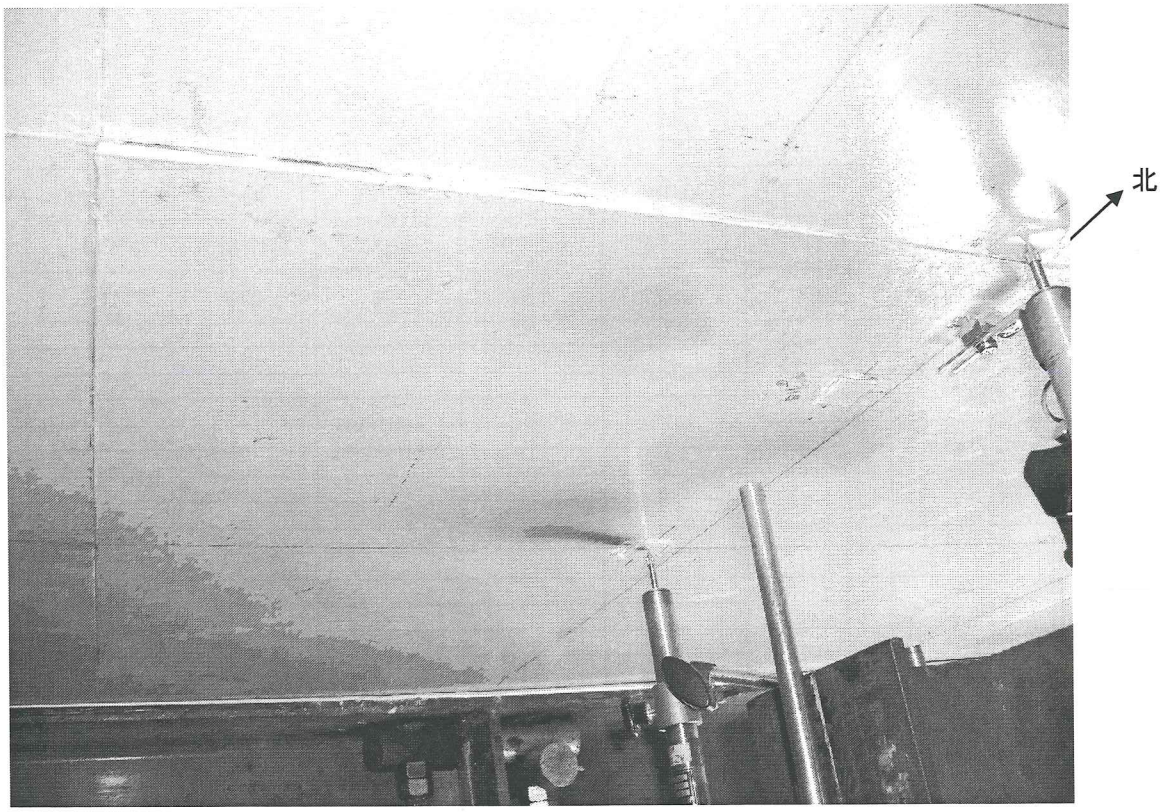


図-6.1.8　パネル接合部，下板 F1000 の剥離 (セル 10 直下付近)

(196 kN 走行試験終了後，無負荷時に撮影)

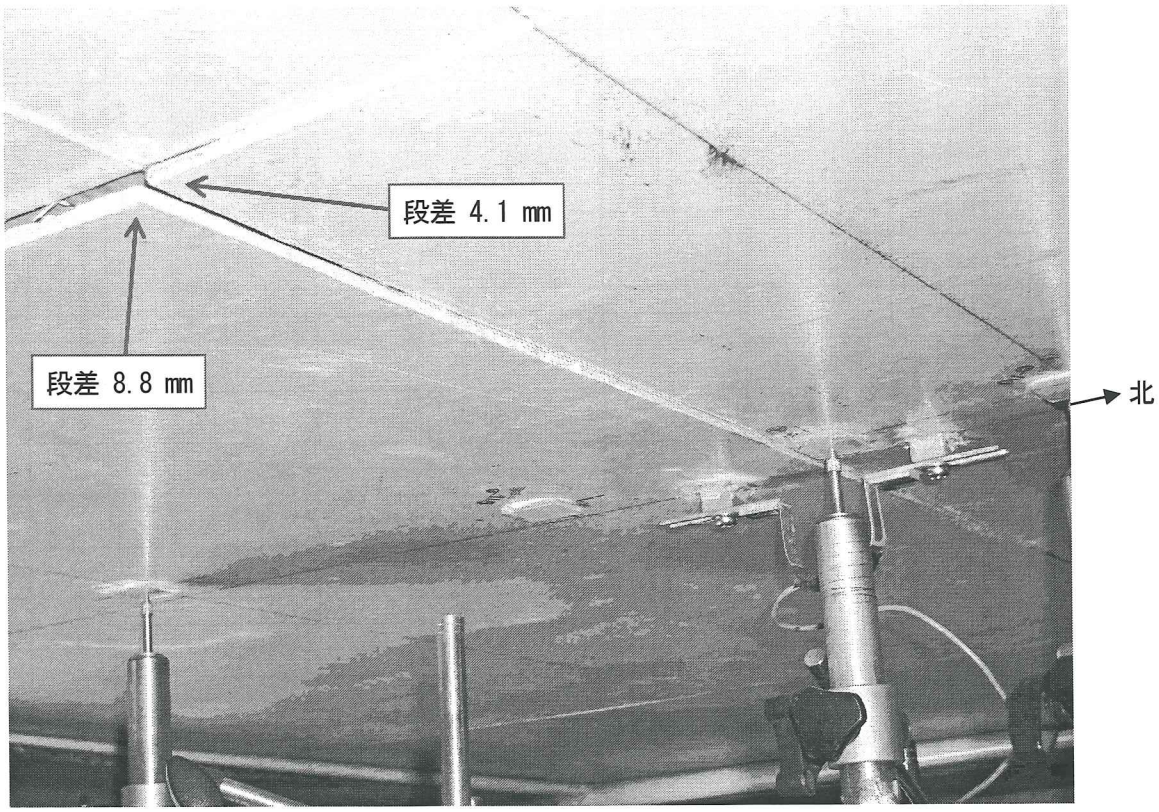


図-6.1.9　パネル接合部，下板 F1000 の剥離 (セル 10 直下付近)

(255 kN 走行試験終了後，無負荷時に撮影)

表-6.1.1　測定機器の状態

繰返し数（×1000回）		（一定荷重）	0-40	40-80	80-120	120-160	160-200	200-
全繰返し数（×1000回）		0-717	717-757	757-797	797-837	837-877	877-917	917-
輪荷重（kN）		98	157	176	196	216	235	255
床版下面変位計	D2		→	→	→	→	→	良好
	D3		→	→	→	→	→	良好
	D4		→	→	→	→	→	良好
	D5		→	→	→	→	→	良好
ウェブ鉛直ひずみ	I1V		→	→	→	→	→	良好
	I2V		→	→	→	→	→	良好
	I3V		→	→	→	→	→	良好
	I4V		→	→	→	→	→	良好
	I5V		→	→	→	→	→	良好
	I6V		→	→	→	→	→	良好
	I7V		→	→	→	→	→	良好
	I8V		→	→	→	→	→	良好
	I9V		→	→	→	→	→	良好
	I10V		→	→	→	→	→	良好
上板下面走行方向ひずみ	I1Y（セル3）		測定不能					
	I2Y（セル4）		→	→	測定不能			
	I3Y（セル5）		→	→	測定不能			
	I4Y（セル6）		測定不能					
	I5Y（セル7）		→	→	→	→	→	良好
	I6Y（セル8）	測定不能						
	I7Y（セル9）		→	測定不能				
	I8Y（セル10）		→	→	→	測定不能		
	I9Y（セル11）		→	→	→	測定不能		
	I10Y（セル12）		→	→	→	→	→	良好
パイ型変位計	PI1		→	→	→	→	→	良好
	PI2		→	→	→	→	→	良好

6.2　動的挙動の経時変化

(1) 残留変位の推移

図-6.2.1 に，走行試験中，所定の回数ごとに行った静的載荷試験における床版下面の残留変位の推移を，一定荷重走行試験時の結果と連続して示す。残留変位は載荷試験によって供試体の構造・材料になんらかの変状が生じたことに起因すると考えられる。特に，床版中央の D3 の残留変位は供試体の全体挙動を知る上で参考となる。床版中央(D3)の残留変位は荷重の増加に応じて直線的に増加する傾向が見られた(図-6.2.1a)。

上板下面の局部変位(D9-D4)の残留変位は 196 kN のステップまでは荷重に応じて直線的に増加したが，216 kN 以降は荷重に応じた増分が小さくなり横ばいに近くなっている(図-6.2.1b)。

一定荷重走行載荷の初期より確認されているセル 10 直下のパネル接合部の下面 F1000 の剥離の影響が大きく出ていると考えられる D5，D11-2 の変位は階段載荷において 216 kN 以降急激に増加，拡大していた(図-6.2.1c)。

(2) 各ステップの動的測定結果

表-6.2.1～6.2.6 に，各ステップの試験開始時及び試験終了時における動的変位，動的ひずみ測定波形の最大値，最小値及び範囲をそれぞれ示す。上板下面のひずみのうち，走行中に測定不能となった箇所については，測定不能となる直前のひずみ波形の最大値，最小値及び範囲を示す(表中イタリックで示す)。

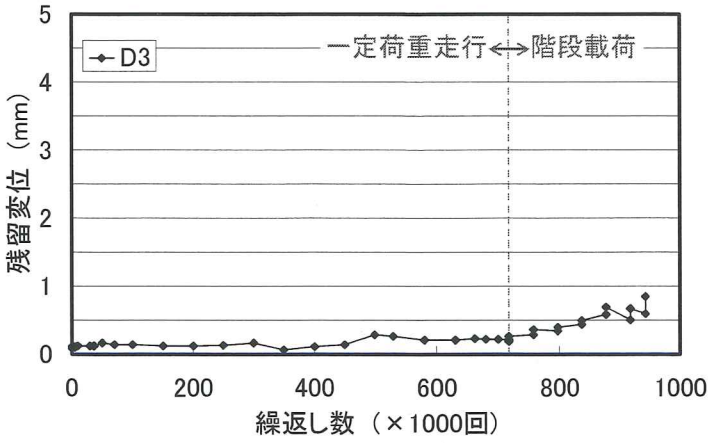
図-6.2.2 に動的測定を行った変位の経時変化をグラフで示す。D2，D3 の変位範囲は荷重に応じて増加していた。D5 はパネル接合部の剥離の影響が含まれるために D2，D3 に比べて不規則な変動が多かった。

図-6.2.3～6.2.4 に動的測定を行ったひずみの経時変化をグラフで示す。走行荷重 255 kN であっても最大ひずみ範囲は 1500 μ 程度(I3V，I9V)であり，ウェブの鉛直ひずみも変位と同様に荷重とともに増加する傾向が見られた。一方，上板下面走行方向のひずみ範囲は，走行荷重 157 kN 時にほとんどの測定点で既に 2000 μ を超えており，同じステップの中でもひずみ範囲の増加が著しいものや，測定不能になるものが見られた。

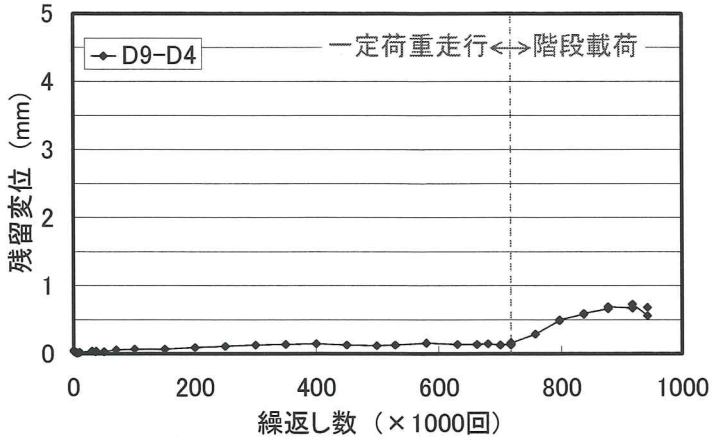
図-6.2.5 にパネル接合部のパイ型変位計の動的測定結果を示す。セル 10 直下のパネル接合部の剥離箇所の開き量(PI-2)は走行荷重 216 kN 時に急激に増加しており，上述の下面 F1000 の剥離に伴う変位の増加と符合している。また，セル 6 直下のパネル接合部の開き量(PI-1)は，セル 10 直下に比べて約 1 桁小さいものの，走行荷重 197 kN 時に急激に増加した。

(3) 走行試験時の温度変化の影響

階段載荷試験は 1 日に 40000 回を 1 日サイクルで実施したことから，温度変化に起因すると思われるひずみの上下限値の変動が見られた。このことから，最後のステップにおいて，供試体近傍の気温の経時変化を測定した。図-6.2.6 に走行荷重の影響が比較的小さいと考えられる箇所(L19X, L19Y)のひずみと気温の相関を示す。L19X のようにばらつきが大きいものもあるが，温度変化に応じて直線的にひずみが変化していたことがわかる。そのときの線膨張係数は 23 μ/℃であった(cf. コンクリート構造物，鋼構造物の場合 10～12 μ/℃)。なお，ひずみの上下限値の差であるひずみ範囲はこれらの温度変化の影響は相殺される。

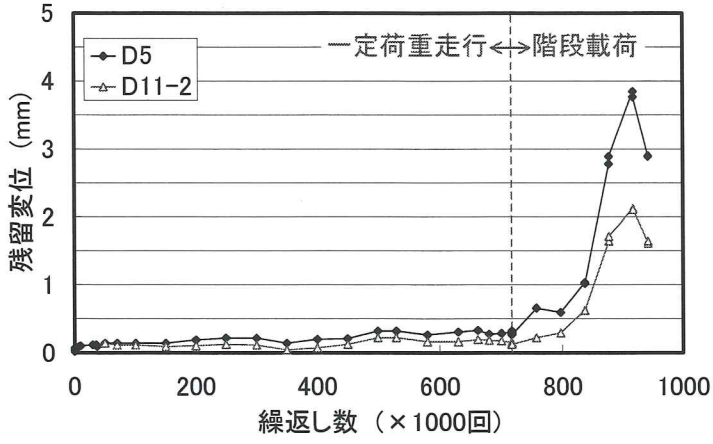


(a) 床版中央の残留変位 (D3)



(b) 上板下面の残留局部変位

(静的載荷②, 局部変位は D9 の変位から D4 の変位を除した値)



(c) パネル接合部不具合箇所付近の残留変位 (D5, D11-2)

図-6.2.1　残留変位の推移　(繰返し数は一定荷重走行時からの累積回数)

表-6.2.1　走行荷重 156 kN 時の動的変位，ひずみの範囲とその変動

157 kN, 0～4 万回

部位，測定項目	記号	測定方法	単位	試験開始時			試験終了時			範囲の変動	備考
				最大値	最小値	範囲	最大値	最小値	範囲		
床版下面鉛直変位	D2	DS	mm	3.53	0.28	3.25	3.60	0.23	3.37	0.12	
	D3	DS	mm	4.48	0.58	3.90	4.67	0.44	4.23	0.33	床版中央
	D5	DS	mm	3.81	0.40	3.42	4.24	0.65	3.59	0.18	
ウェブ鉛直ひずみ	I1V	DDR	μ	-366	-666	300	-422	-711	289	-11	
	I2V	DDR	μ	-383	-729	346	-467	-816	349	3	
	I3V	DDR	μ	-186	-1264	1078	-300	-1393	1093	15	
	I4V	DDR	μ	-249	-1033	784	-366	-1159	793	9	
	I5V	DDR	μ	-188	-722	534	-360	-784	424	-110	
	I6V	DS	μ	-305	-964	659	-439	-1123	684	25	床版中央
	I7V	DS	μ	-378	-757	379	-525	-903	378	-1	
	I8V	DDR	μ	-233	-739	506	-353	-870	517	11	
	I9V	DDR	μ	-242	-1118	876	-341	-1247	906	30	
	I10V	DDR	μ	-159	-690	531	-264	-791	527	-4	
上板下面走行方向ひずみ	I1Y	DDR	μ	1481	-300	1781	*2364*	*-148*	*2512*	731	8500 回で測定不能
	I2Y	DDR	μ	1751	-446	2197	1768	-619	2387	190	
	I3Y	DS	μ	2893	-354	3247	2856	-610	3466	219	
	I4Y	DDR	μ	2254	-673	2927	*2569*	*-549*	*3118*	191	8500 回で測定不能
	I5Y	DDR	μ	1410	-534	1944	1065	-994	2059	115	
	I6Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	一定荷重走行で測定不能
	I7Y	DS	μ	1819	-635	2454	1819	-928	2747	293	
	I8Y	DDR	μ	1121	-1082	2203	705	-1922	2627	424	
	I9Y	DS	μ	1770	-549	2319	1648	-769	2417	98	
	I10Y	DDR	μ	390	-630	1020	131	-823	954	-66	
パネル接合部開き変位	PI1	DDR	mm	0.01	-0.03	0.04	0.05	0.00	0.05	0.01	
	PI2	DDR	mm	0.10	-0.06	0.16	0.25	0.12	0.13	-0.03	

表-6.2.2　走行荷重 177 kN 時の動的変位，ひずみの範囲とその変動

176 kN, 4～8 万回

部位，測定項目	記号	測定方法	単位	試験開始時			試験終了時			範囲の変動	備考
				最大値	最小値	範囲	最大値	最小値	範囲		
床版下面鉛直変位	D2	DS	mm	4.04	0.35	3.69	4.10	0.35	3.75	0.05	
	D3	DS	mm	5.31	0.65	4.66	5.45	0.60	4.85	0.19	床版中央
	D5	DS	mm	4.68	0.69	3.99	5.05	0.67	4.38	0.40	
ウェブ鉛直ひずみ	I1V	DDR	μ	-300	-604	304	-270	-568	298	-6	
	I2V	DDR	μ	-323	-711	388	-319	-692	373	-15	
	I3V	DDR	μ	-109	-1343	1234	-143	-1251	1108	-126	
	I4V	DDR	μ	-197	-1074	878	-221	-1093	872	-6	
	I5V	DDR	μ	-173	-666	493	-242	-645	403	-90	
	I6V	DS	μ	-232	-1001	769	-317	-1050	733	-36	床版中央
	I7V	DS	μ	-305	-720	415	-366	-793	427	12	
	I8V	DDR	μ	-143	-722	579	-189	-737	548	-32	
	I9V	DDR	μ	-128	-1136	1009	-133	-1142	1009	0	
	I10V	DDR	μ	-114	-686	572	-173	-716	544	-28	
上板下面走行方向ひずみ	I1Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	8500 回で測定不能
	I2Y	DDR	μ	2231	-411	2642	*3227*	*174*	*3053*	411	76200 回で測定不能
	I3Y	DS	μ	3394	-378	3772	4053	134	3919	147	
	I4Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	8500 回で測定不能
	I5Y	DDR	μ	1599	-617	2216	1628	-872	2499	283	
	I6Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	一定荷重走行で測定不能
	I7Y	DS	μ	2368	-610	2978	*3198*	*-73*	*3271*	293	68762 回で測定不能
	I8Y	DDR	μ	1170	-1785	2955	1410	-1594	3004	49	
	I9Y	DS	μ	2185	-549	2734	2185	-635	2820	86	
	I10Y	DDR	μ	390	-654	1044	270	-705	975	-69	
パネル接合部開き変位	PI1	DDR	mm	0.03	-0.02	0.06	0.04	-0.03	0.07	0.01	
	PI2	DDR	mm	0.23	0.10	0.13	0.34	0.13	0.21	0.08	

表-6.2.3　走行荷重 197 kN 時の動的変位，ひずみの範囲とその変動

196 kN, 8～12 万回

部位，測定項目	記号	測定方法	単位	試験開始時			試験終了時			範囲の変動	備考
				最大値	最小値	範囲	最大値	最小値	範囲		
床版下面鉛直変位	D2	DS	mm	4.57	0.39	4.19	4.71	0.36	4.35	0.16	
	D3	DS	mm	6.12	0.73	5.39	6.37	0.67	5.70	0.31	床版中央
	D5	DS	mm	5.60	0.71	4.89	5.75	1.18	4.57	-0.32	
ウェブ鉛直ひずみ	I1V	DDR	μ	-276	-594	318	-266	-533	267	-51	
	I2V	DDR	μ	-319	-733	414	-326	-733	407	-7	
	I3V	DDR	μ	-99	-1333	1234	-137	-1388	1251	17	
	I4V	DDR	μ	-203	-1151	948	-227	-1138	911	-37	
	I5V	DDR	μ	-223	-673	450	-201	-677	476	26	
	I6V	DS	μ	-293	-1135	842	-415	-1208	793	-49	床版中央
	I7V	DS	μ	-378	-818	440	-366	-830	464	24	
	I8V	DDR	μ	-173	-793	620	-197	-771	574	-46	
	I9V	DDR	μ	-109	-1238	1129	-75	-1239	1164	35	
	I10V	DDR	μ	-171	-776	605	-197	-763	566	-39	
上板下面走行方向ひずみ	I1Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	8500 回で測定不能
	I2Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	76200 回で測定不能
	I3Y	DS	μ	4468	159	4309	*5017*	*635*	*4382*	73	81656 回で測定不能
	I4Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	8500 回で測定不能
	I5Y	DDR	μ	2049	-739	2788	1959	-861	2820	32	
	I6Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	一定荷重走行で測定不能
	I7Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	68762 回で測定不能
	I8Y	DDR	μ	1757	-1652	3409	2460	-1434	3894	485	
	I9Y	DS	μ	2527	-623	3150	3052	-562	3614	464	
	I10Y	DDR	μ	351	-714	1065	131	-743	874	-191	
パネル接合部開き変位	PI1	DDR	mm	0.04	-0.03	0.08	0.14	-0.05	0.19	0.11	
	PI2	DDR	mm	0.38	0.13	0.25	0.48	0.03	0.45	0.21	

表-6.2.4　走行荷重 216 kN 時の動的変位，ひずみの範囲とその変動

216 kN, 12～16 万回

部位，測定項目	記号	測定方法	単位	試験開始時			試験終了時			範囲の変動	備考
				最大値	最小値	範囲	最大値	最小値	範囲		
床版下面鉛直変位	D2	DS	mm	5.19	0.44	4.75	5.31	0.41	4.90	0.15	
	D3	DS	mm	7.11	0.85	6.26	7.36	0.76	6.60	0.34	床版中央
	D5	DS	mm	6.27	1.22	5.05	7.61	3.15	4.46	-0.59	
ウェブ鉛直ひずみ	I1V	DDR	μ	-261	-538	278	-268	-576	308	30	
	I2V	DDR	μ	-317	-795	478	-334	-793	459	-19	
	I3V	DDR	μ	-83	-1479	1397	-188	-1479	1292	-105	
	I4V	DDR	μ	-193	-1193	999	-210	-1164	954	-45	
	I5V	DDR	μ	-150	-686	536	-191	-741	549	13	
	I6V	DS	μ	-366	-1184	818	-415	-1196	781	-37	床版中央
	I7V	DS	μ	-317	-830	513	-378	-928	550	37	
	I8V	DDR	μ	-152	-776	624	-219	-763	544	-81	
	I9V	DDR	μ	9	-1284	1294	19	-1299	1318	24	
	I10V	DDR	μ	-189	-803	613	-234	-804	570	-43	
上板下面走行方向ひずみ	I1Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	8500 回で測定不能
	I2Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	76200 回で測定不能
	I3Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	81656 回で測定不能
	I4Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	8500 回で測定不能
	I5Y	DDR	μ	2505	-604	3109	1933	-870	2803	-306	
	I6Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	一定荷重走行で測定不能
	I7Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	68762 回で測定不能
	I8Y	DDR	μ	3360	-1022	4382	*3360*	*-1022*	*4382*	0	120395 回で測定不能
	I9Y	DS	μ	3503	-452	3955	*4285*	*61*	*4224*	269	124788 回で測定不能
	I10Y	DDR	μ	218	-696	913	86	-750	836	-77	
パネル接合部開き変位	PI1	DDR	mm	0.17	-0.05	0.21	0.20	-0.06	0.26	0.05	
	PI2	DDR	mm	0.79	0.08	0.71	1.29	0.38	0.91	0.20	

注) I8Y は試験開始時と試験終了時の最大値，最小値は同一時刻のものである(開始直後に測定不能となった)。

表-6.2.5　走行荷重 238 kN 時の動的変位，ひずみの範囲とその変動

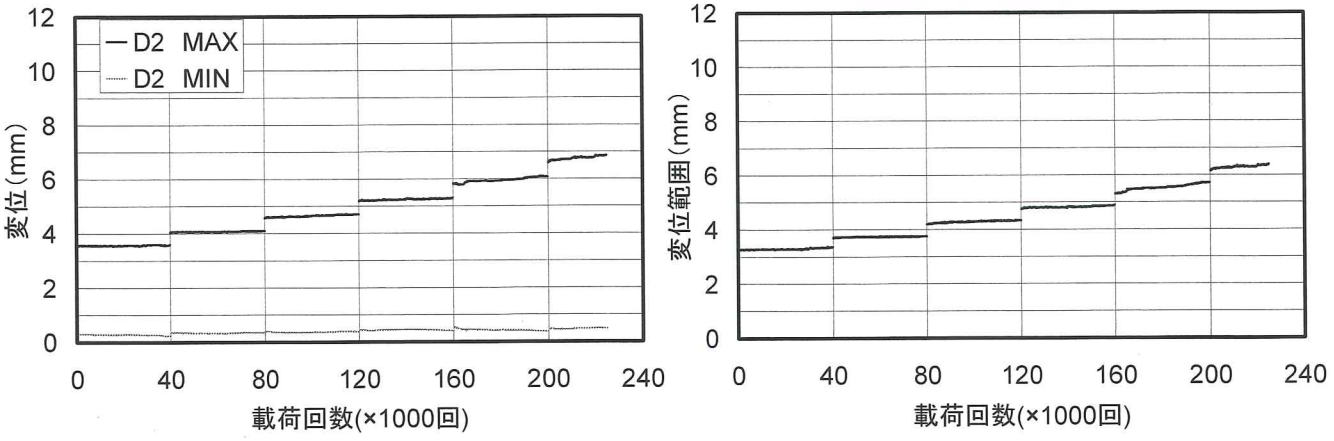
235 kN, 16～20 万回

部位，測定項目	記号	測定方法	単位	試験開始時			試験終了時			範囲の変動	備考
				最大値	最小値	範囲	最大値	最小値	範囲		
床版下面鉛直変位	D2	DS	mm	5.82	0.52	5.31	6.08	0.36	5.71	0.40	
	D3	DS	mm	8.14	0.98	7.16	8.67	0.81	7.86	0.69	床版中央
	D5	DS	mm	8.36	3.07	5.30	9.13	3.92	5.21	-0.09	
ウェブ鉛直ひずみ	I1V	DDR	μ	-293	-602	309	-388	-709	321	11	
	I2V	DDR	μ	-360	-861	501	-508	-1088	579	79	
	I3V	DDR	μ	-167	-1568	1401	-339	-1751	1412	11	
	I4V	DDR	μ	-113	-1166	1054	-362	-1299	938	-116	
	I5V	DDR	μ	-83	-709	626	-338	-834	497	-129	
	I6V	DS	μ	-330	-1208	878	-598	-1501	903	25	床版中央
	I7V	DS	μ	-281	-867	586	-574	-1160	586	0	
	I8V	DDR	μ	-120	-724	604	-420	-962	542	-62	
	I9V	DDR	μ	146	-1296	1442	-101	-1401	1299	-143	
	I10V	DDR	μ	-199	-823	624	-375	-930	555	-69	
上板下面走行方向ひずみ	I1Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	8500 回で測定不能
	I2Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	76200 回で測定不能
	I3Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	81656 回で測定不能
	I4Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	8500 回で測定不能
	I5Y	DDR	μ	2370	-332	2702	1247	-1099	2346	-356	
	I6Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	一定荷重走行で測定不能
	I7Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	68762 回で測定不能
	I8Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	120395 回で測定不能
	I9Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	124788 回で測定不能
	I10Y	DDR	μ	259	-621	879	-203	-1005	803	-77	
パネル接合部開き変位	PI1	DDR	mm	0.22	-0.07	0.28	0.24	-0.06	0.30	0.02	
	PI2	DDR	mm	1.40	0.41	0.99	1.60	0.56	1.04	0.05	

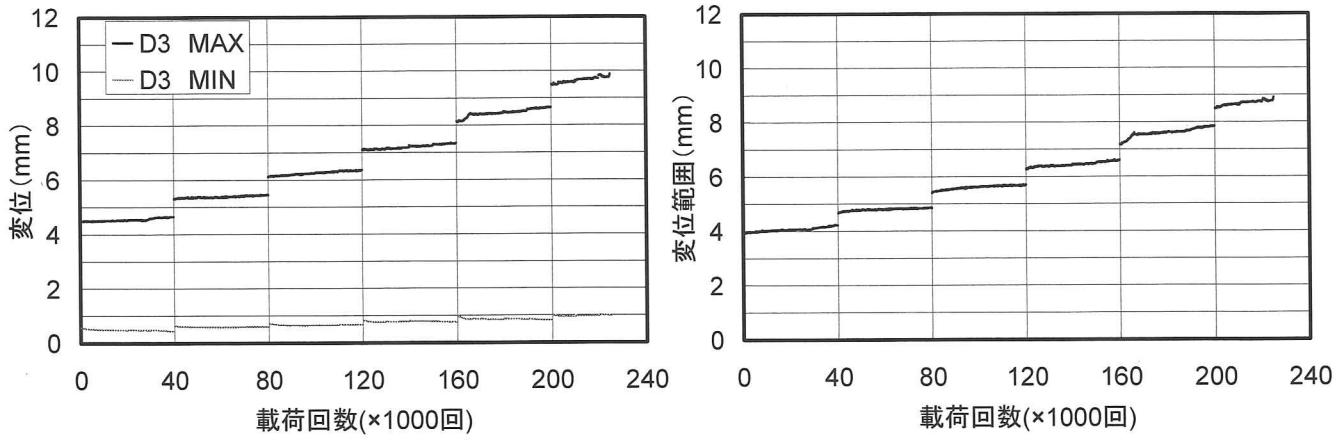
表-6.2.6　走行荷重 254 kN 時の動的変位，ひずみの範囲とその変動

255 kN, 20～22.5 万回

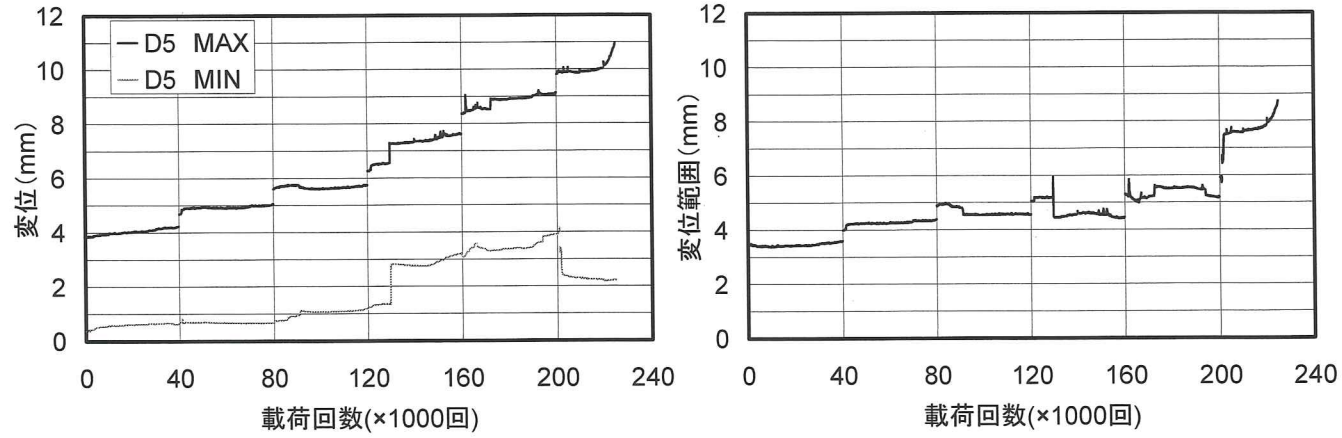
部位，測定項目	記号	測定方法	単位	試験開始時			試験終了時			範囲の変動	備考
				最大値	最小値	範囲	最大値	最小値	範囲		
床版下面鉛直変位	D2	DS	mm	6.59	0.45	6.14	6.95	0.51	6.45	0.31	
	D3	DS	mm	9.50	1.01	8.49	10.32	0.91	9.40	0.91	床版中央
	D5	DS	mm	9.81	3.90	5.91	12.04	2.15	9.89	3.98	
ウェブ鉛直ひずみ	I1V	DDR	μ	-420	-752	332	-317	-681	364	32	
	I2V	DDR	μ	-503	-1110	608	-403	-1069	666	58	
	I3V	DDR	μ	-278	-1804	1526	-163	-1577	1414	-112	
	I4V	DDR	μ	-289	-1333	1044	-263	-1163	900	-144	
	I5V	DDR	μ	-272	-812	540	-264	-786	521	-19	
	I6V	DS	μ	-525	-1575	1050	-452	-1697	1245	195	床版中央
	I7V	DS	μ	-525	-1184	659	-488	-1233	745	86	
	I8V	DDR	μ	-375	-998	623	-345	-962	617	-6	
	I9V	DDR	μ	-34	-1451	1418	-41	-1376	1335	-83	
	I10V	DDR	μ	-373	-977	604	-319	-911	593	-11	
上板下面走行方向ひずみ	I1Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	8500 回で測定不能
	I2Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	76200 回で測定不能
	I3Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	81656 回で測定不能
	I4Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	8500 回で測定不能
	I5Y	DDR	μ	1530	-857	2387	1324	-1202	2526	139	
	I6Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	一定荷重走行で測定不能
	I7Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	68762 回で測定不能
	I8Y	DDR	μ	-	-	-	-	-	-	-	120395 回で測定不能
	I9Y	DS	μ	-	-	-	-	-	-	-	124788 回で測定不能
	I10Y	DDR	μ	-174	-992	818	-107	-1014	908	90	
パネル接合部開き変位	PI1	DDR	mm	0.26	-0.07	0.32	0.27	-0.05	0.31	-0.01	
	PI2	DDR	mm	1.67	0.53	1.14	1.71	0.47	1.24	0.10	



(a) D2

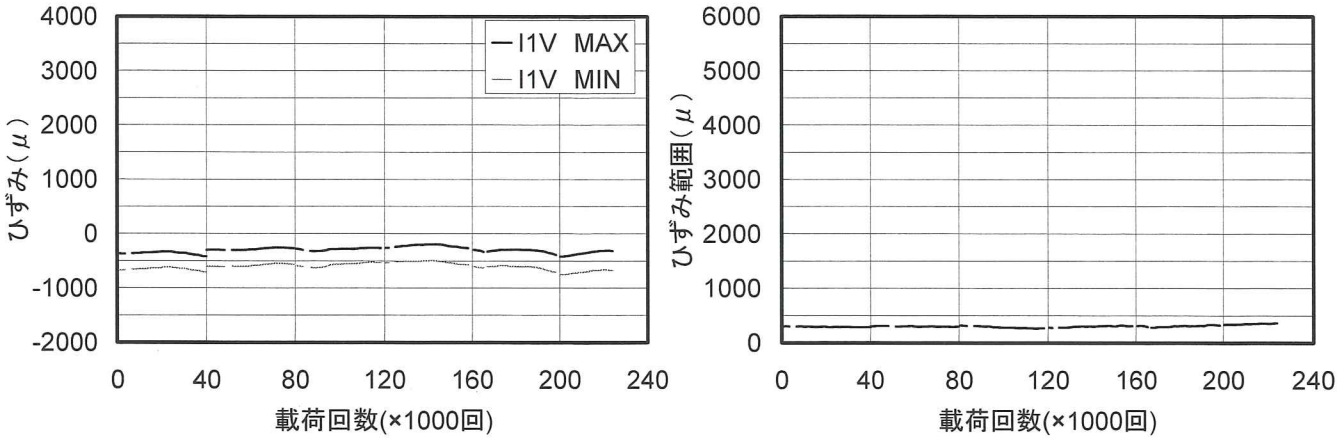


(b) D3 (床版中央)

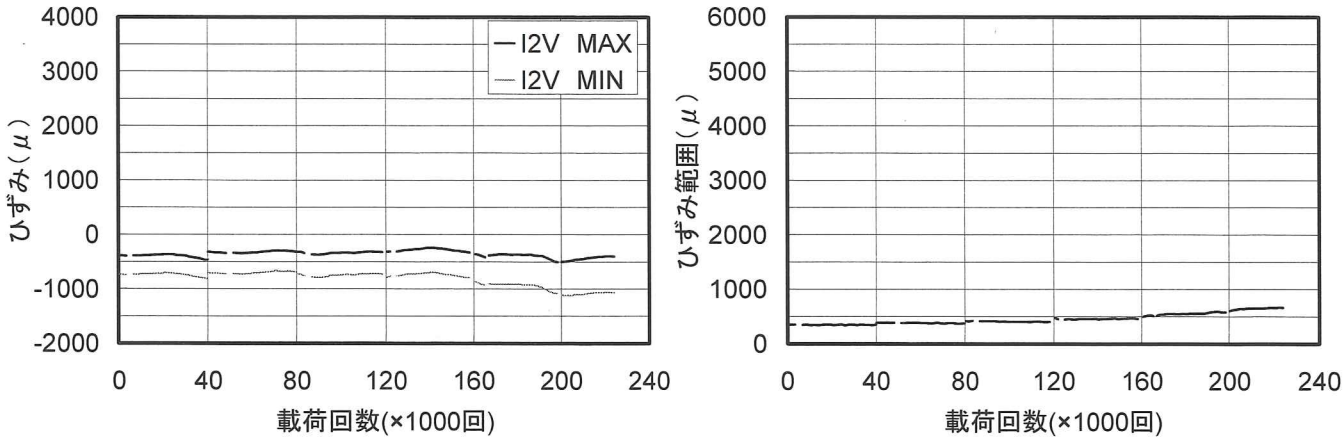


(c) D5

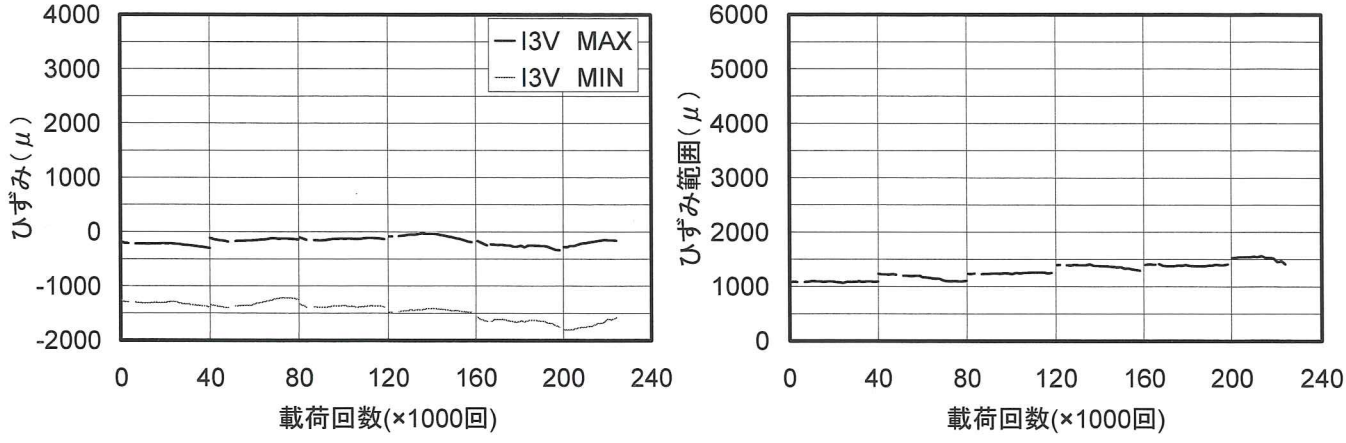
図-6.2.2　階段載荷時の床版下面変位の経時変化 (DS データ)



(a) I1V

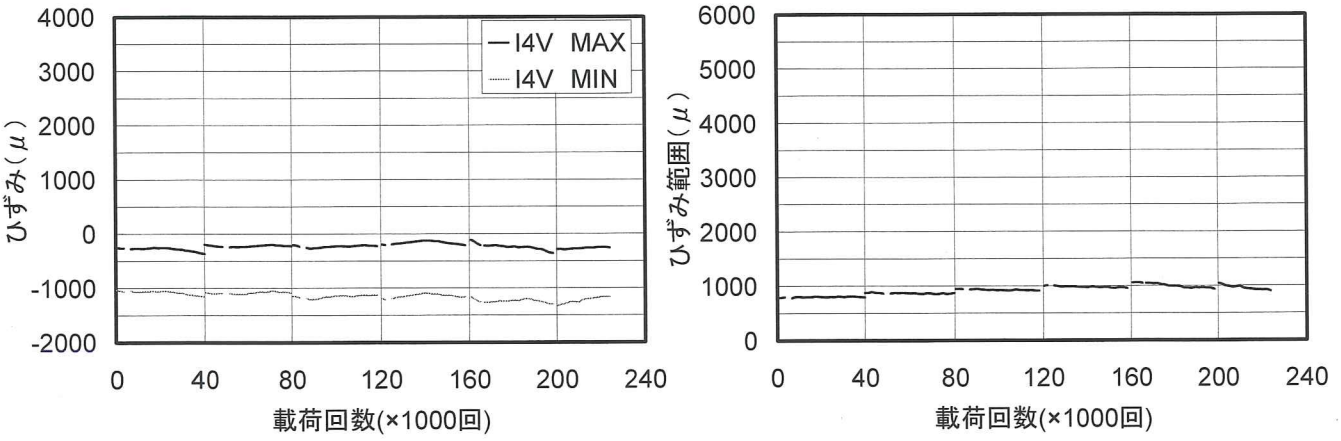


(b) I2V

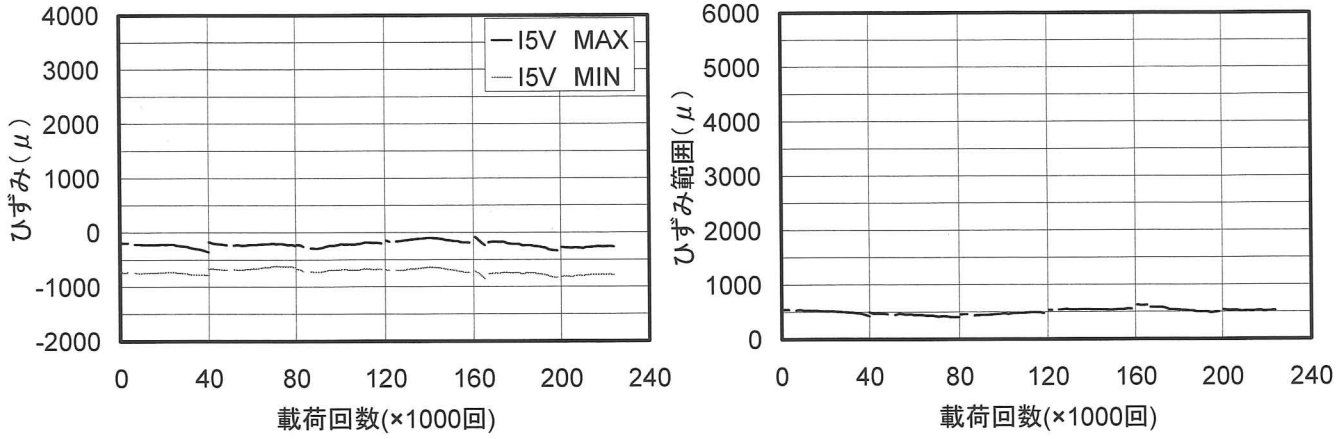


(c) I3V

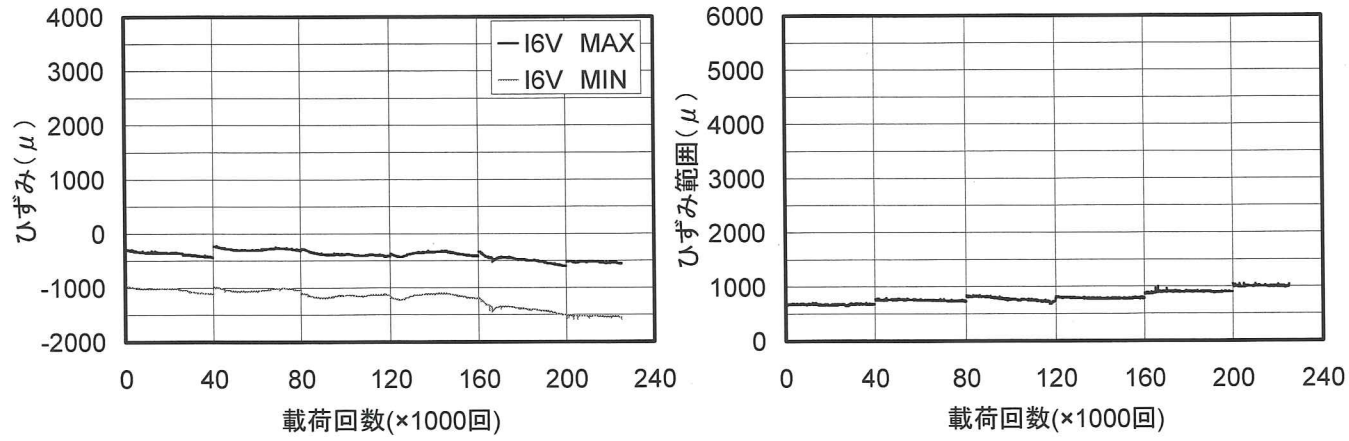
図-6.2.3　階段載荷時のウェブ鉛直ひずみの経時変化



(d) I4V

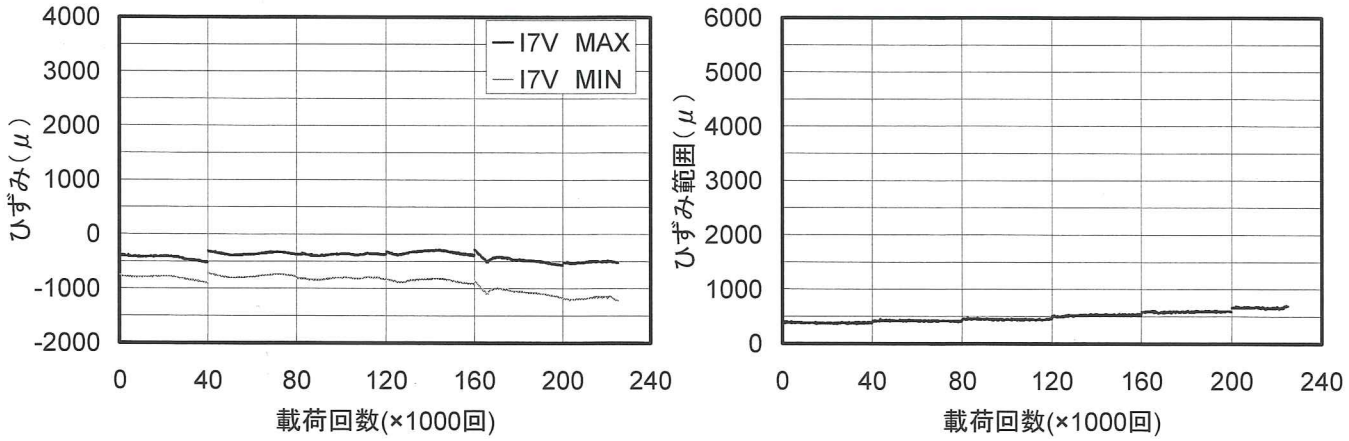


(e) I5V

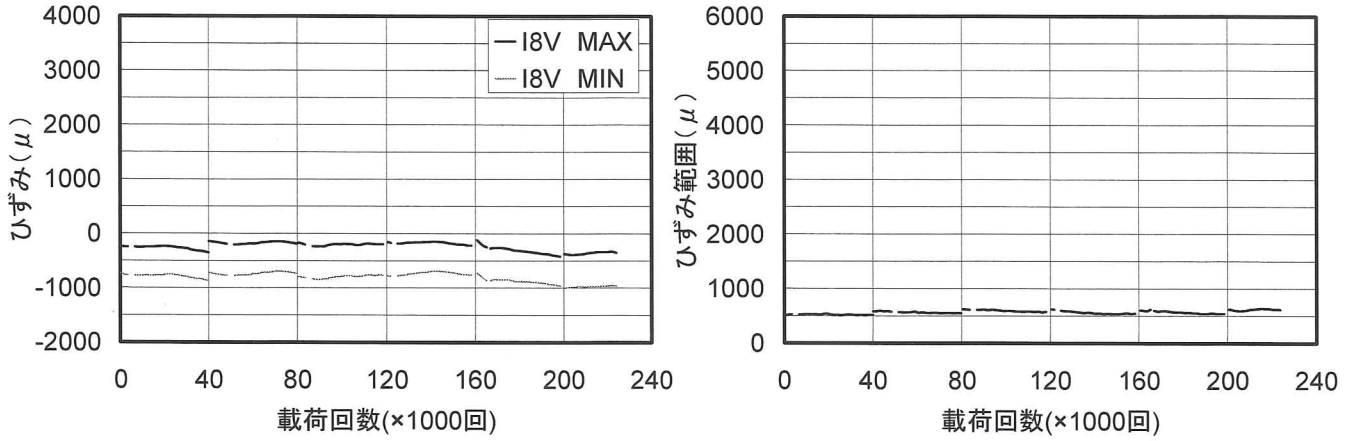


(f) I6V (DS データ)

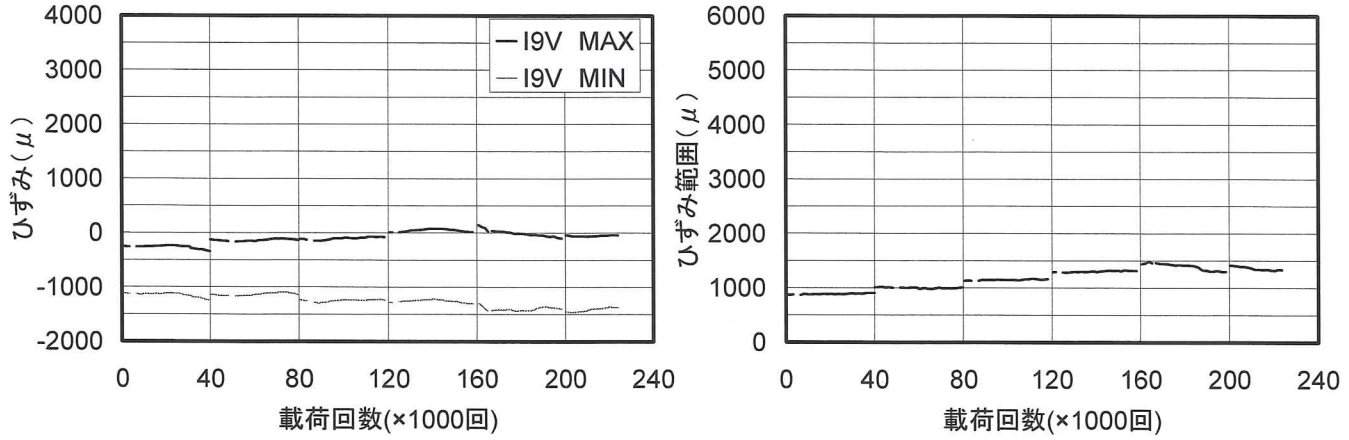
図-6.2.3(続き)　階段載荷時のウェブ鉛直ひずみの経時変化



(g) I7V (DS データ)

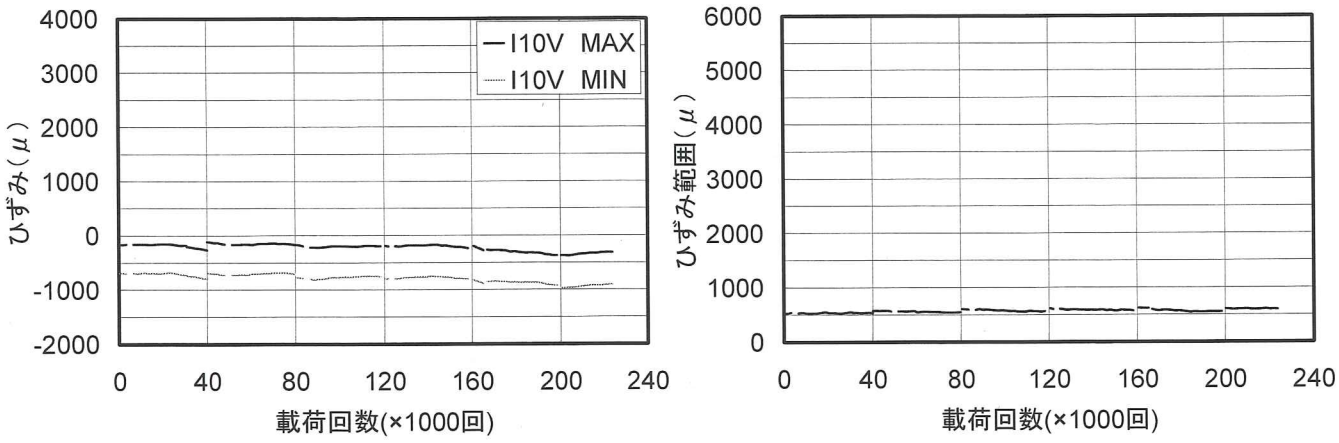


(h) I8V



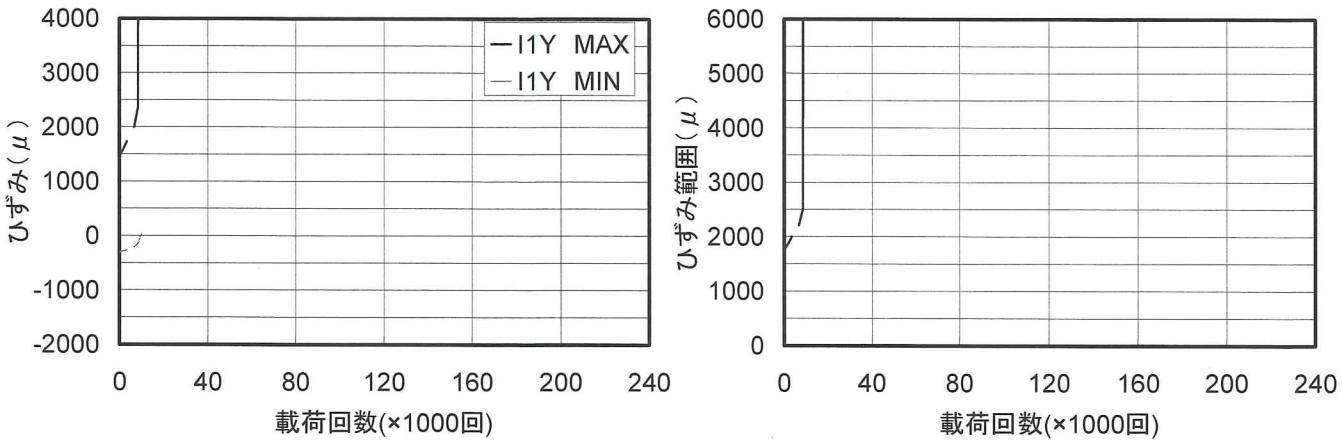
(i) I9V

図-6.2.3(続き)　階段載荷時のウェブ鉛直ひずみの経時変化

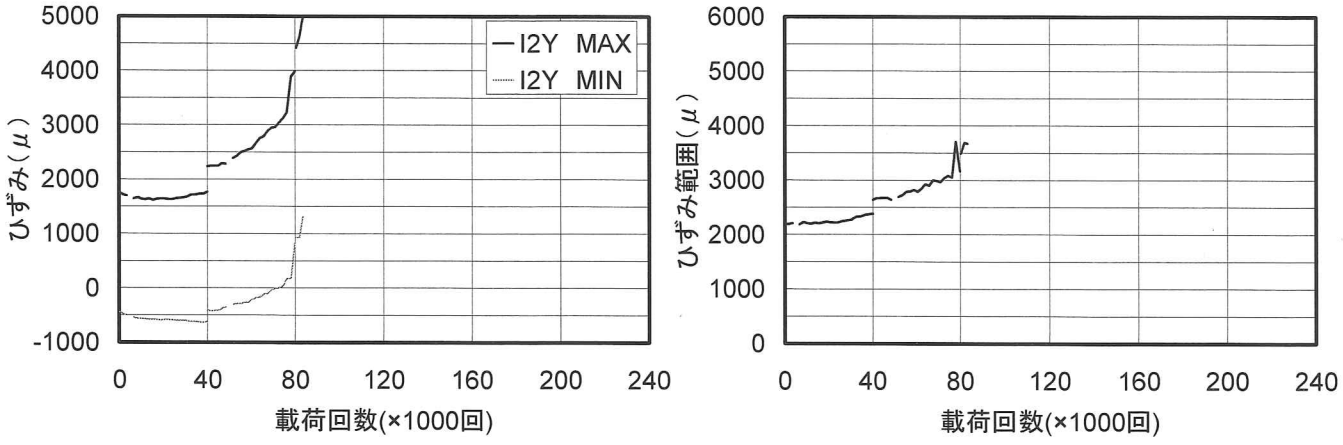


(j) I10V

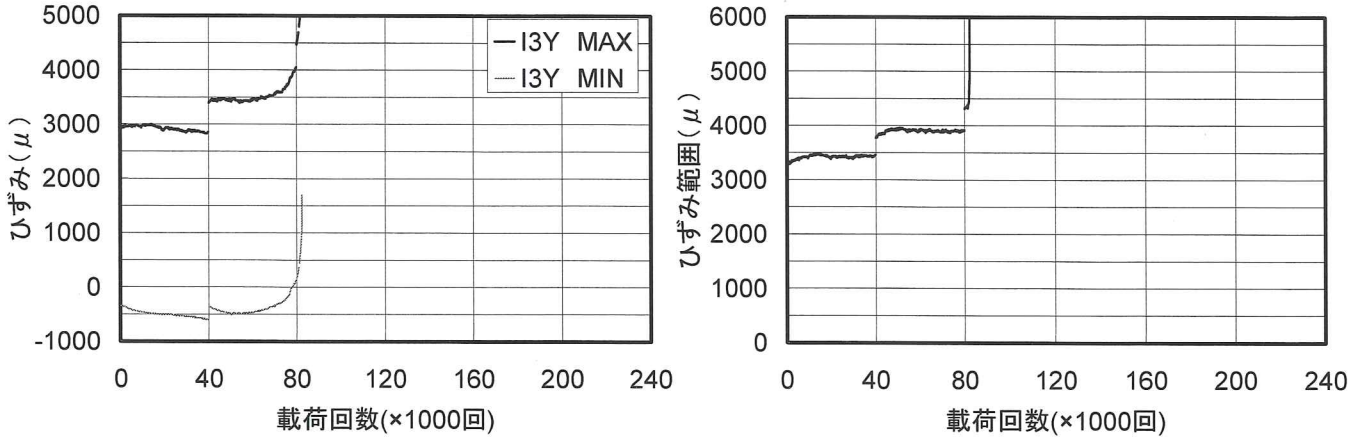
図-6.2.3(続き)　階段載荷時のウェブ鉛直ひずみの経時変化



(a) I1Y

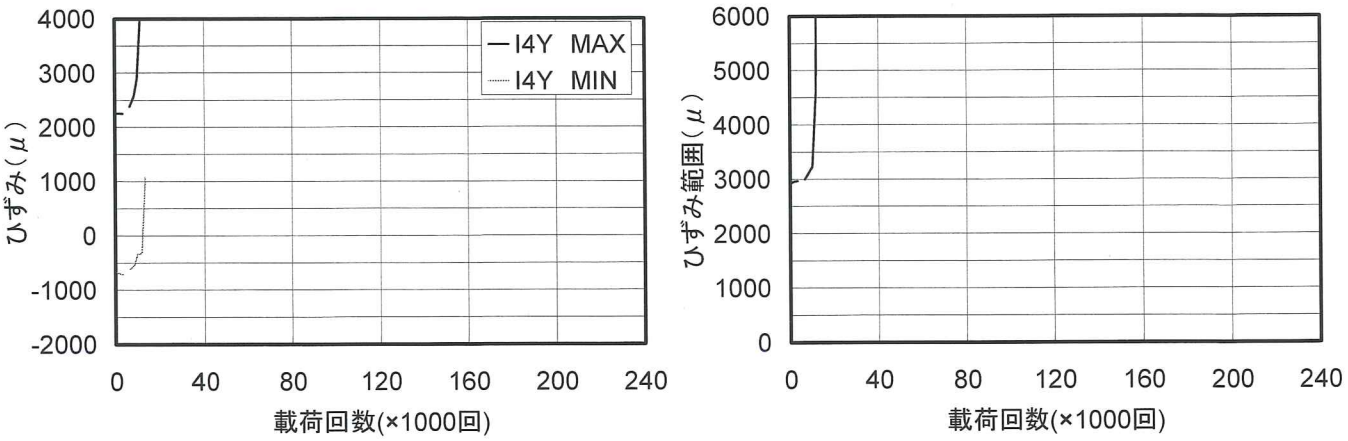


(b) I2Y

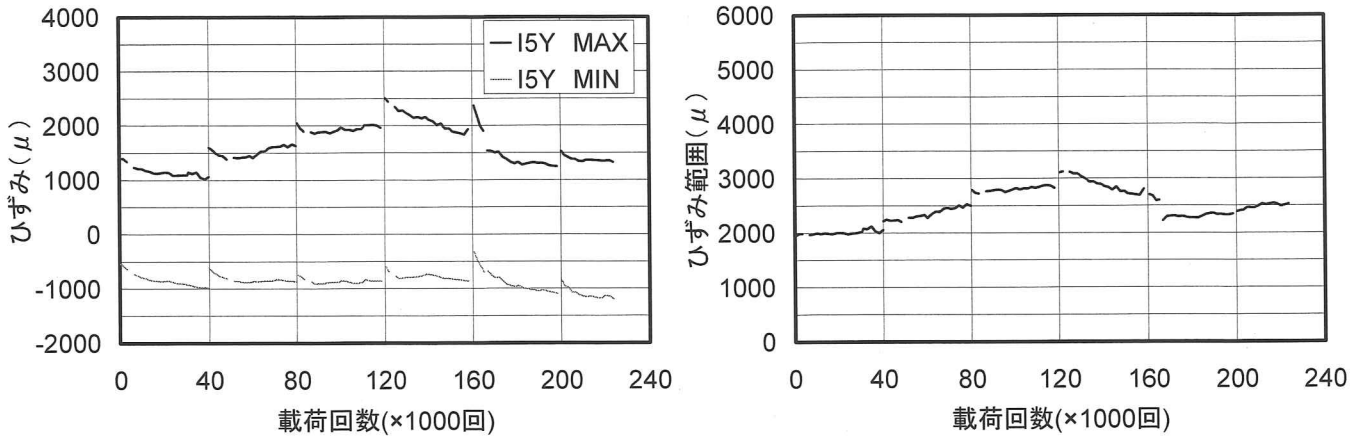


(c) I3Y (DS データ)

図-6.2.4　階段載荷時の上板下面走行方向ひずみの経時変化



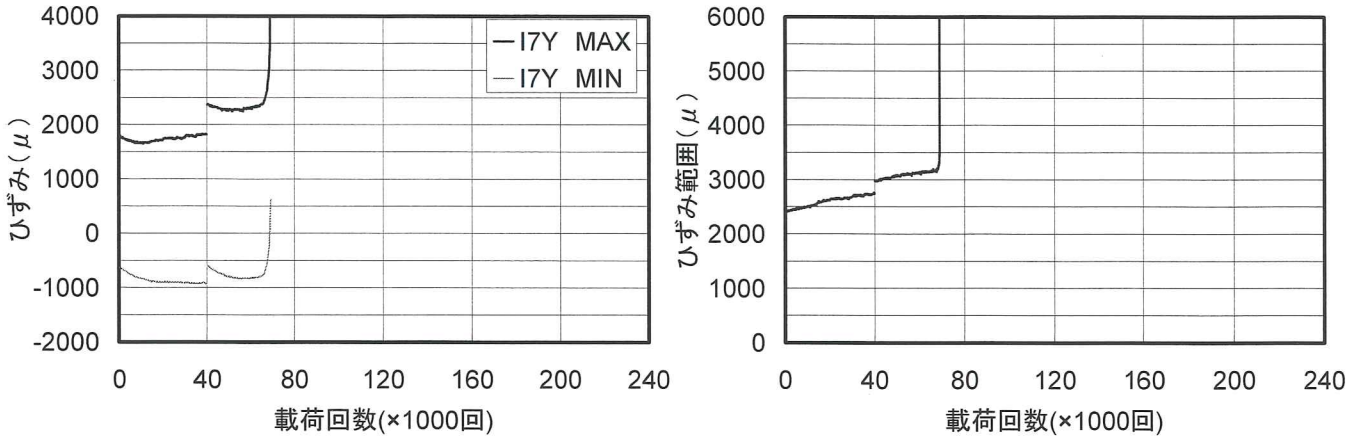
(d) I4Y



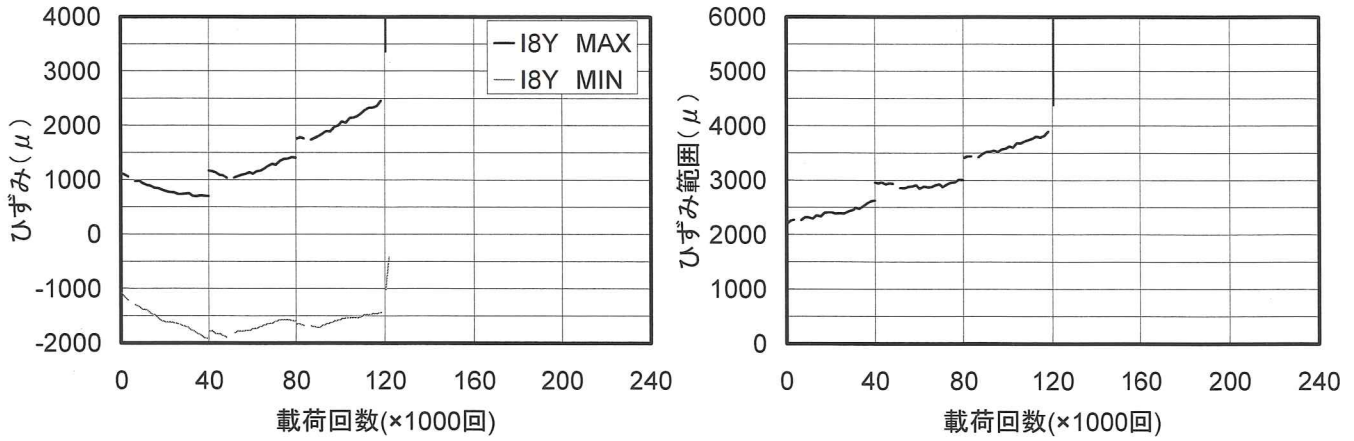
(e) I5Y

(f) I6Y (データなし)

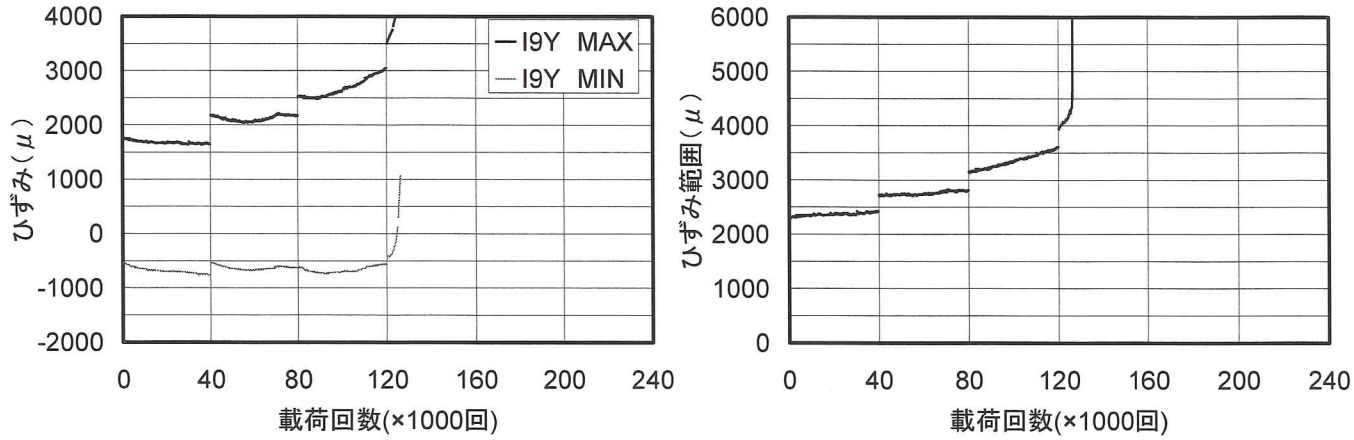
図-6.2.4(続き)　階段載荷時の上板下面走行方向ひずみの経時変化



(g) I7Y (DS データ)

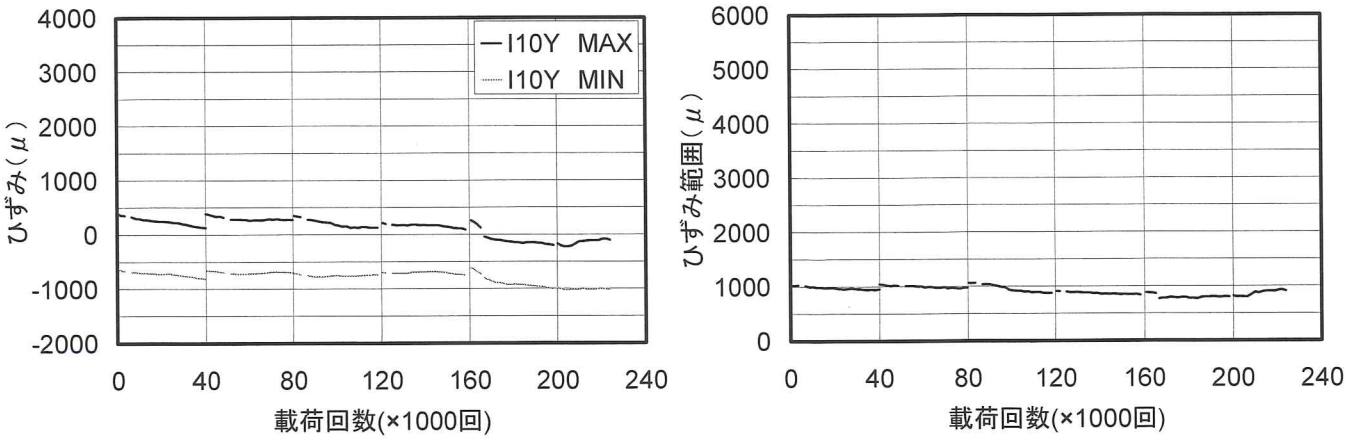


(h) I8Y



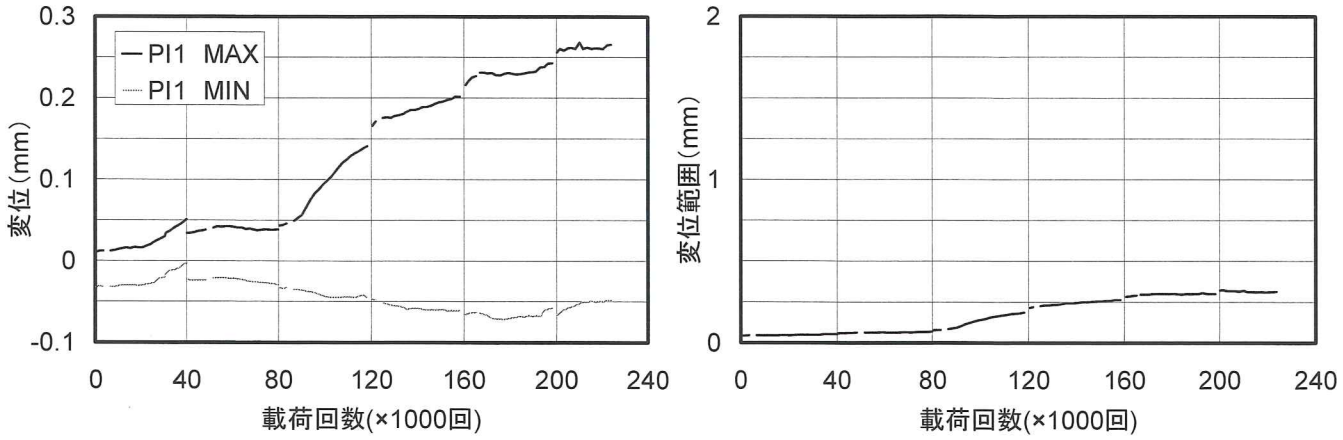
(i) I9Y (DS データ)

図-6.2.4(続き)　階段載荷時の上板下面走行方向ひずみの経時変化

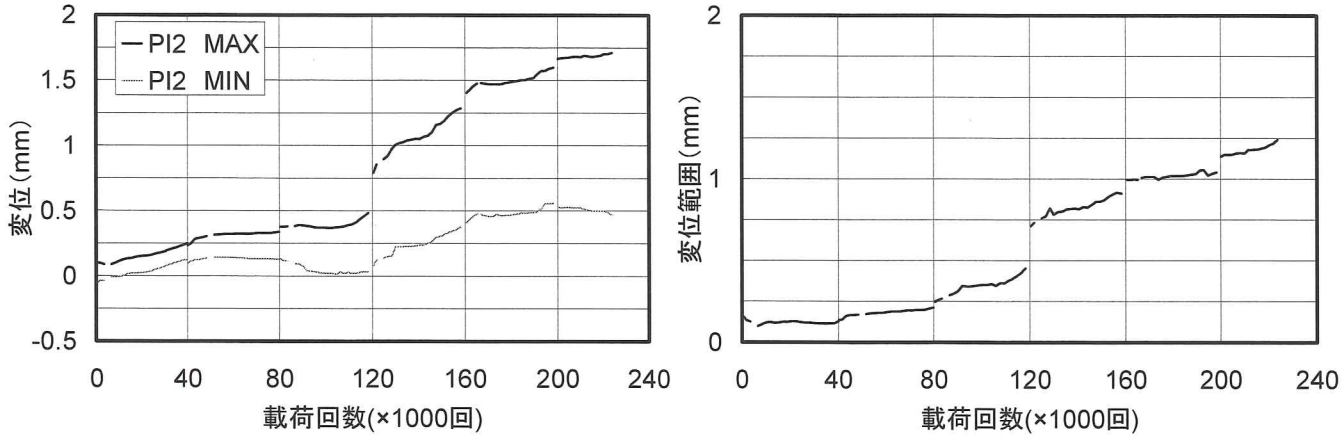


(j) I10Y

図-6.2.4(続き)　階段載荷時の上板下面走行方向ひずみの経時変化

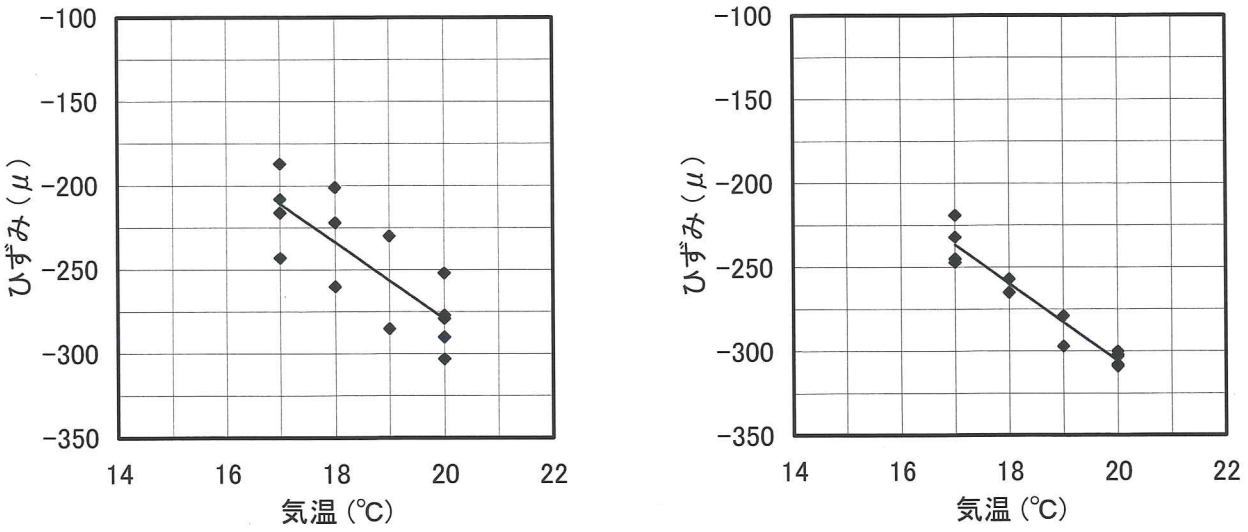


(a) PI1



(b) PI2

図-6.2.5　階段載荷時のパネル接合部の開き量の経時変化



(a) L19X　　(b) L19Y

図-6.2.6　階段載荷時の温度の影響

(温度経時変化測定は 257 kN 時自動静的載荷時のみ)

6.3　各ステップの静的挙動

(1) 載荷位置①

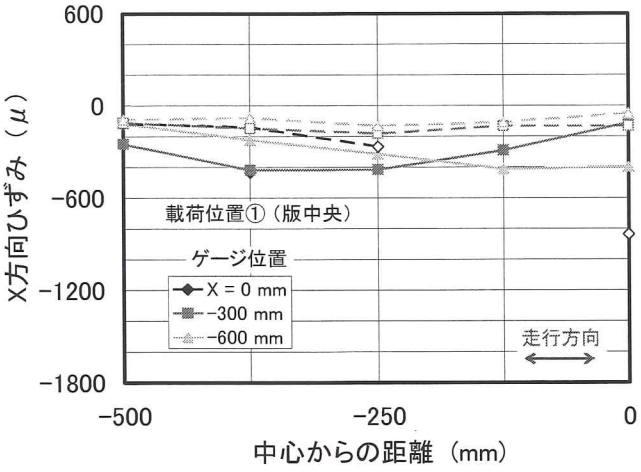
図-6.3.1 に階段載荷試験後の静的載荷試験におけるひずみ分布を示す。床版上面のひずみのうち走行位置の真下のひずみゲージは，一定荷重走行試験後にまだ測定可能なものが残っていたが，階段載荷試験後にはいずれも測定不能となっていた。

図-6.3.2 に各ステップ開始時の静的載荷試験によるたわみ分布を示す。図中，一定荷重走行試験後及び階段載荷試験後における静的載荷試験結果も合わせて示す。床版支間方向のたわみ(図-6.3.2a)は，荷重の増加とともに増加するが，分布形状に顕著な変化は見られない。走行方向のたわみ(図-6.3.2b)の場合も床版中心では荷重に応じて増加するが，たわみの範囲は荷重の増加に伴って載荷点の前後 2 セルの範囲にやや局所化する傾向が見られた(一定荷重走行試験後は載荷点の前後 3 セルの範囲とみていた)。

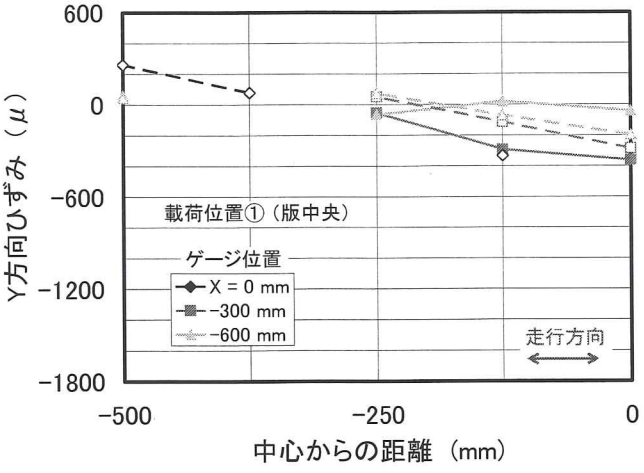
図-6.3.3 に床版中央載荷における床版中央の変位を示す。最大荷重の増加と繰返し載荷の影響により荷重－変位の傾きは小さくなる傾向がある。走行荷重 255 kN のステップ前後の結果を見るとわずか 40000 回の繰返し載荷でも荷重－変位の傾きが小さくなっており，繰返し載荷の影響が明確に生じていたことがわかる。

(2) 載荷位置②

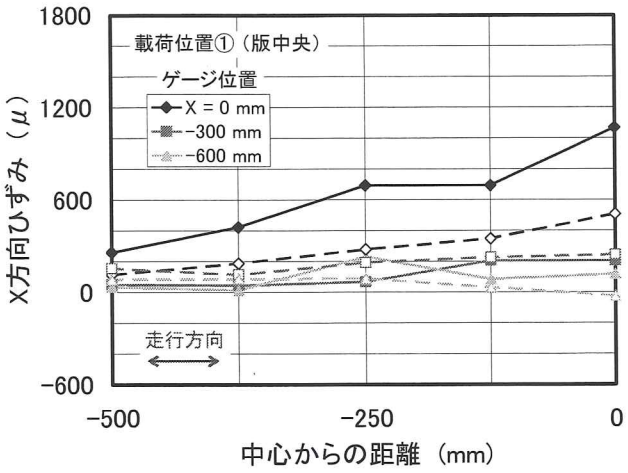
前項と同様に載荷位置②の結果について，図-6.3.4 に階段載荷試験後の静的載荷試験におけるひずみ分布を，図-6.3.5 に各ステップ開始時の静的載荷試験によるたわみ分布をそれぞれ示す。また，図-6.3.6 に載荷位置②のときの載荷点直下の上板下面の局部変位(D9 の変位から D4 の変位を除した値)を示す。前掲図-6.3.3 に示した床版下面の変位と異なり，上板下面の局部変位の場合，荷重－変位の傾きは 98kN から 157kN に移行する間に既に大きな変化が見られ，比較的低い荷重レベルから上板になんらかの変状が生じていたことがわかる。階段載荷試験終了後の 255 kN 静的載荷時で，上板下面の変位は既に 6 mm に達していた。



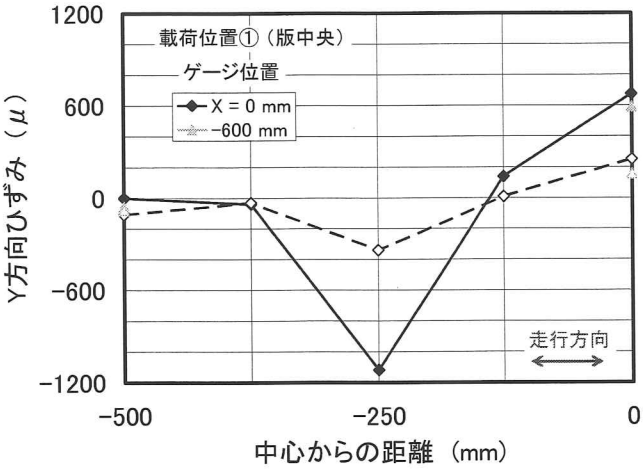
(a) 床版上面の X 方向ひずみ分布



(b) 床版上面の Y 方向ひずみ分布



(c) 床版下面の X 方向ひずみ分布

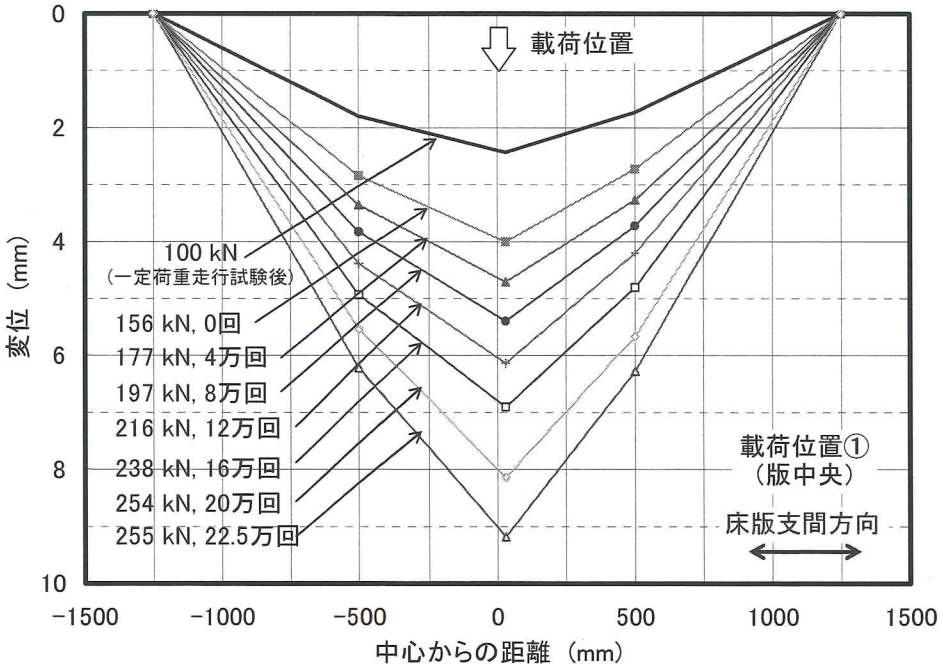


(d) 床版下面の Y 方向ひずみ分布

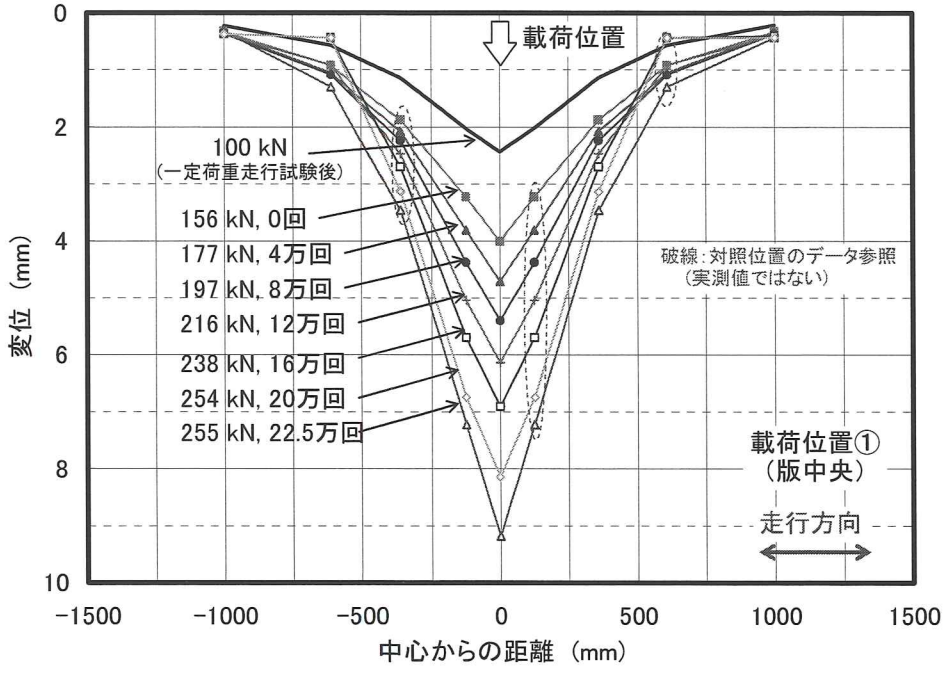
図-6.3.1　階段載荷試験後の静的載荷試験におけるひずみ分布 (載荷位置①)

中塗り，実線は階段載荷終了時，255 kN 静的載荷試験

白抜き，破線は一定荷重走行試験終了時，100 kN 静的載荷試験 (参考)



(a) 床版支間方向のたわみ



(b) 走行方向のたわみ

図-6.3.2　走行試験前後のたわみ分布の変化 (載荷位置①, 床版下面変位)

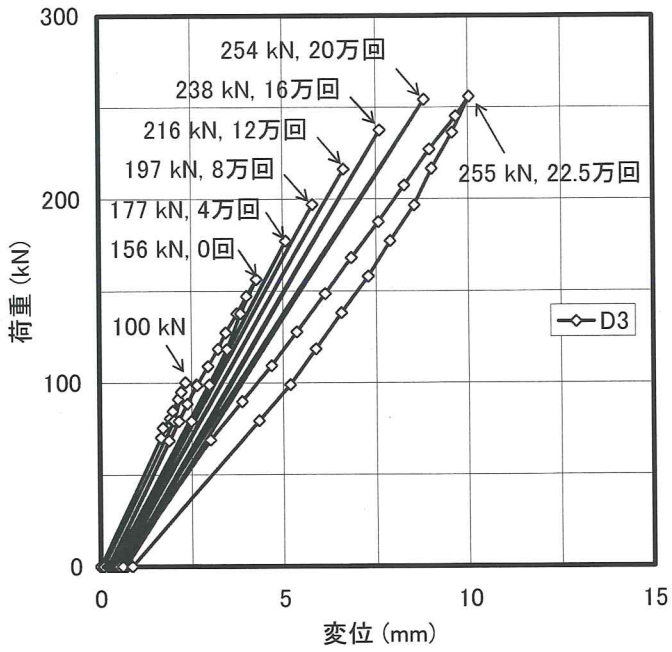
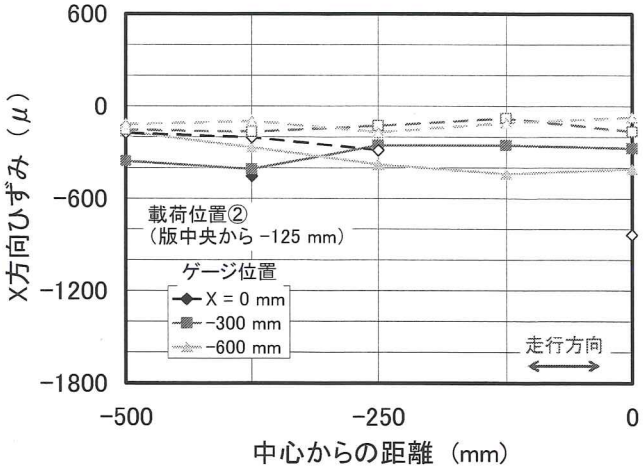
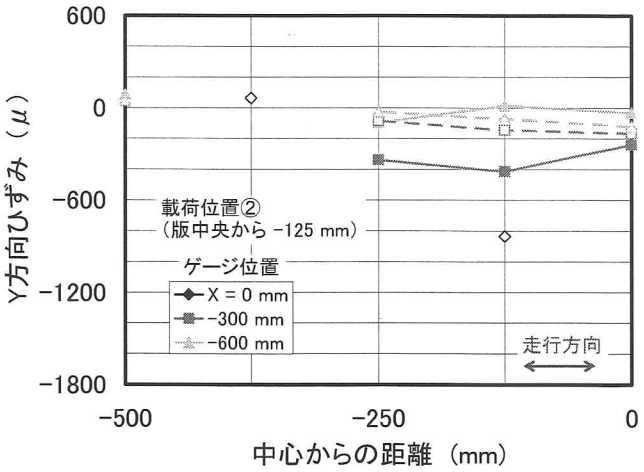


図-6.3.3　床版中央載荷における床版中央の変位

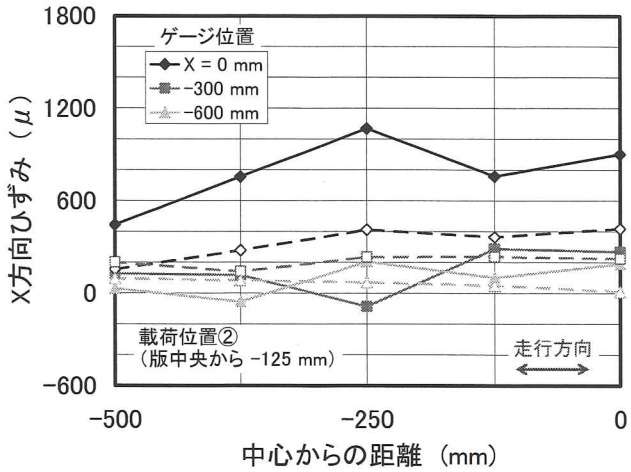
(静的載荷①，D3 の変位)



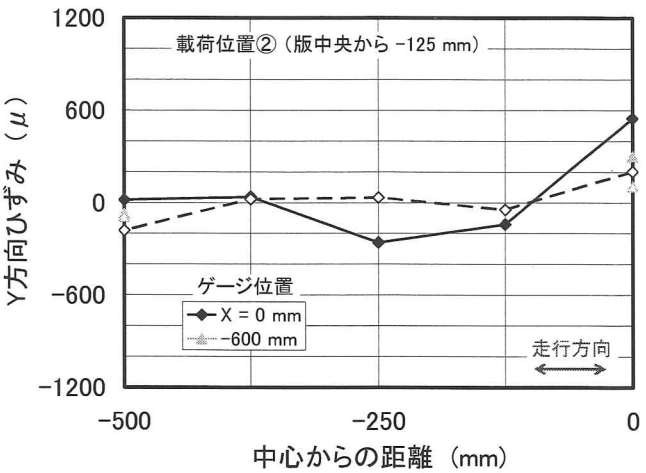
(a) 床版上面の X 方向ひずみ分布



(b) 床版上面の Y 方向ひずみ分布



(c) 床版下面の X 方向ひずみ分布

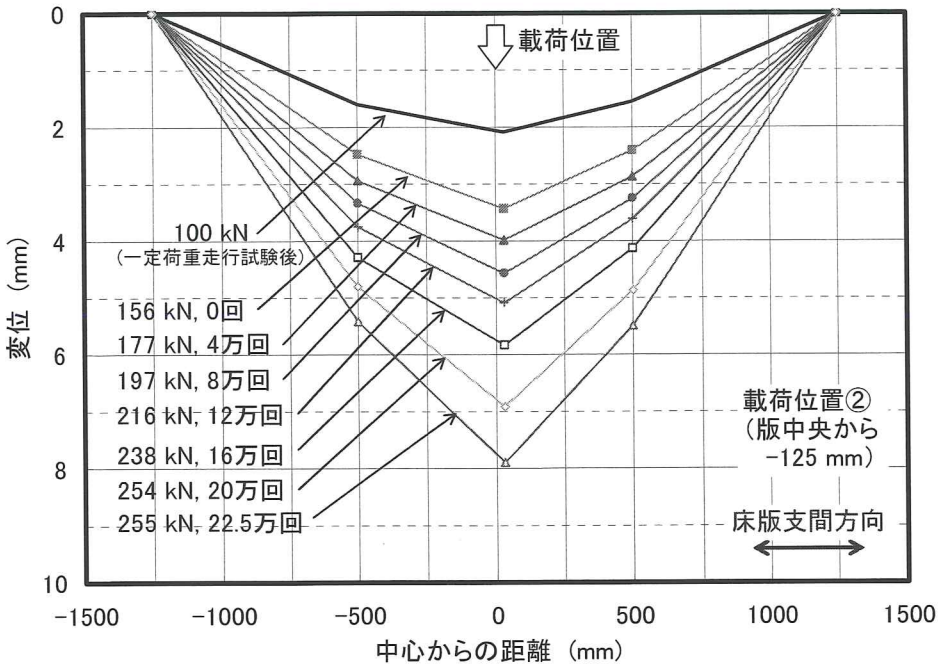


(d) 床版下面の Y 方向ひずみ分布

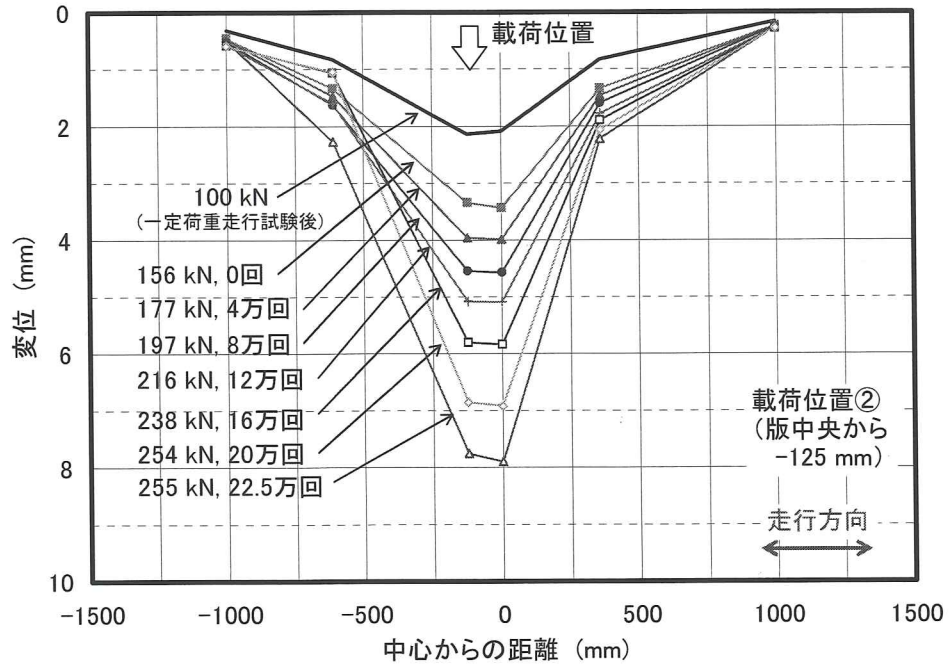
図-6.3.4　階段載荷試験後の静的載荷試験におけるひずみ分布(載荷位置②，100kN 載荷時ひずみ分布)

中塗り，実線は階段載荷終了時，255 kN 静的載荷試験

白抜き，破線は一定荷重走行試験終了時，100 kN 静的載荷試験 (参考)



(a) 床版支間方向のたわみ



(b) 走行方向のたわみ

図-6.3.5　走行試験前後のたわみ分布の変化 (載荷位置②, 床版下面変位)

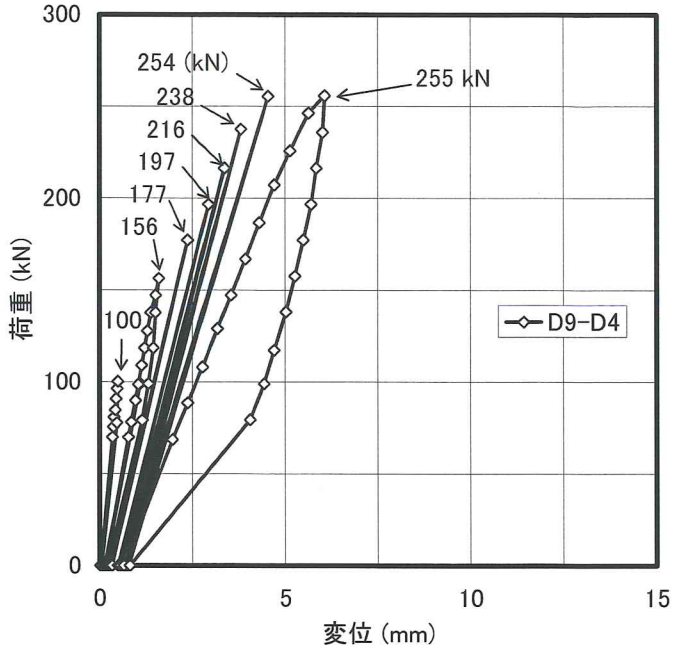


図-6.3.6　上板下面の局部変位

(静的載荷②，局部変位は D9 の変位から D4 の変位を除した値)

7．解体後の断面観察

7.1　セル内面のひび割れ

(1) セル内面の角部のひび割れ

図-7.1.1 にセル内面における上板とウェブの角部ひび割れを示す。また，図-7.1.2 に下板とウェブの角部ひび割れを示す。いずれも切断した箇所から覗く方法によっているため，ひび割れが確認できていない箇所もある。上板との角部のひび割れはセル 6～8，セル 10 に多く見られ，下板との角部のひび割れはセル 8 に多く見られた(セル 8 は切断箇所で見やすい)。角部のひび割れは輪荷重走行位置に依存するものも見られるがそうでないものも多数見られた。セル内側の角部の表層はひび割れが生じやすい箇所であり，輪荷重走行試験以外にも運搬時，組立て時などの不慮の作用による要因も考えられる。図-7.1.3(a)～(d)にパネル接合部に位置していたセル 10 の角部ひび割れ状況を示す。また，図-7.1.4(a)～(d)にセル 8 の角部ひび割れ状況を示す。図-7.1.4(a)に示すセル 8 の上板とウェブの角部に，F1000 の剥離とともに 45° の深いひび割れが見られた。

(2) 上板下面の曲げひび割れ

図-7.1.5 に上板下面のひび割れを示す(角部を除く)。セル 4，6，8 の上板下面で明確な曲げひび割れが見られた。また，セル 3，11 についても軽微ではあるが上板下面に曲げひび割れが見られた(前回報告書[7.1)]の FDP シリーズの疲労試験で試験片表面に見られたひび割れと類似していた)。図-7.1.6 に上板下面の曲げひび割れ状況を示す。また，図-7.1.7～8 にセル 6，8 についてそれぞれ曲げひび割れの詳細を示す。セル 6 では，パネル接合部のため断面欠損していたことから SP250 の上板を貫通するひび割れになっていた。同様のパネル接合部があるセル 10 ではこのようなひび割れは見られなかった。セル 8 では，セル内面のクロス層の継目(箱断面を成形する際にグラスファイバ織物を併合する必要があり，ロービング方向に平行な継目ができる)でひび割れが上下に貫通していた。

(3) 上板下面のせん断ひび割れ

切断面 b ラインで見た場合に，上板内に計 3 箇所で曲げに伴うせん断ひび割れと考えられる斜めひび割れが見られた。図-7.1.9 にセル 5 上板の曲げに伴うせん断ひび割れを示す。また，図-7.1.10 にセル 9 上板の曲げに伴うせん断ひび割れを示す。セル 9 の場合，上板の左右に斜めひび割れが発生しており，さらに上下のクロス層との界面に伸展していた。このうち，セル 10 側(同図の左側)のひび割れはセル内面のクロス層の継目に沿って発生していた。また，セル 9 の場合，曲げひび割れのように幅が大きくないが，上板下面(斜めひび割れの下)のマット層表面にもひび割れが見られた。

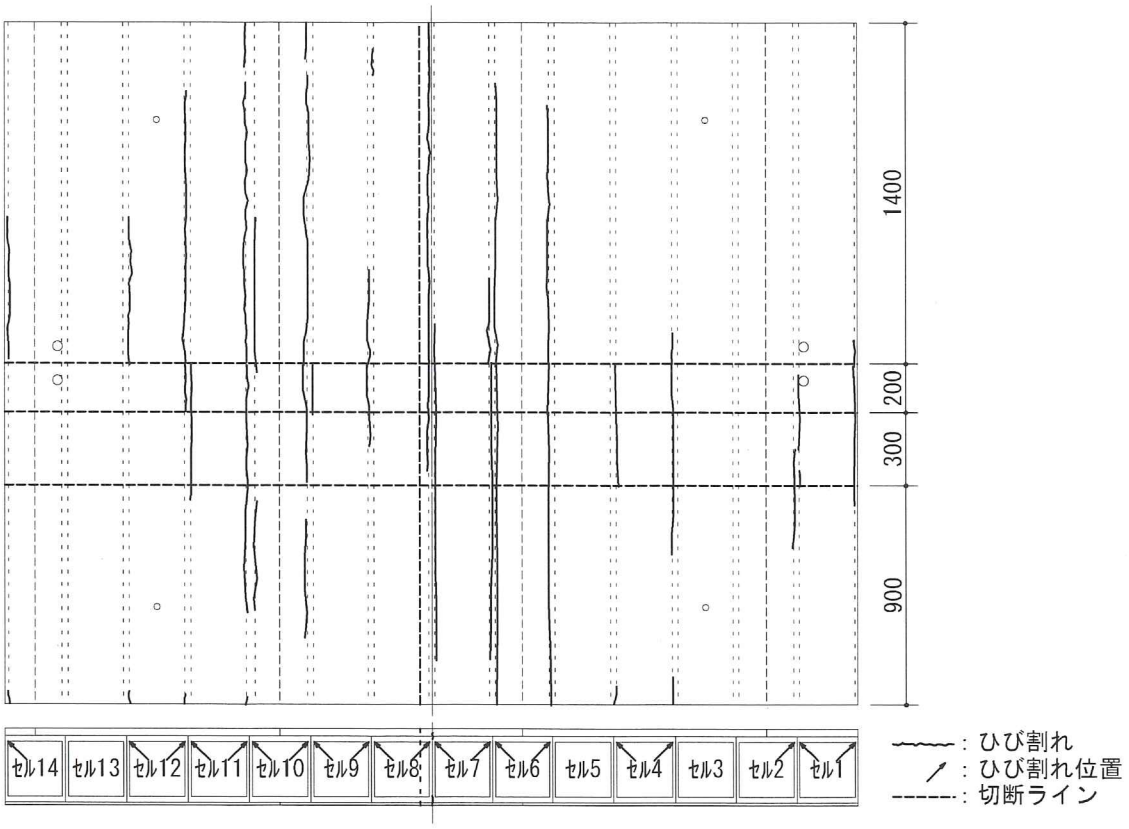


図-7.1.1　上板とウェブの角部ひび割れ(内面，上面からの透視図)

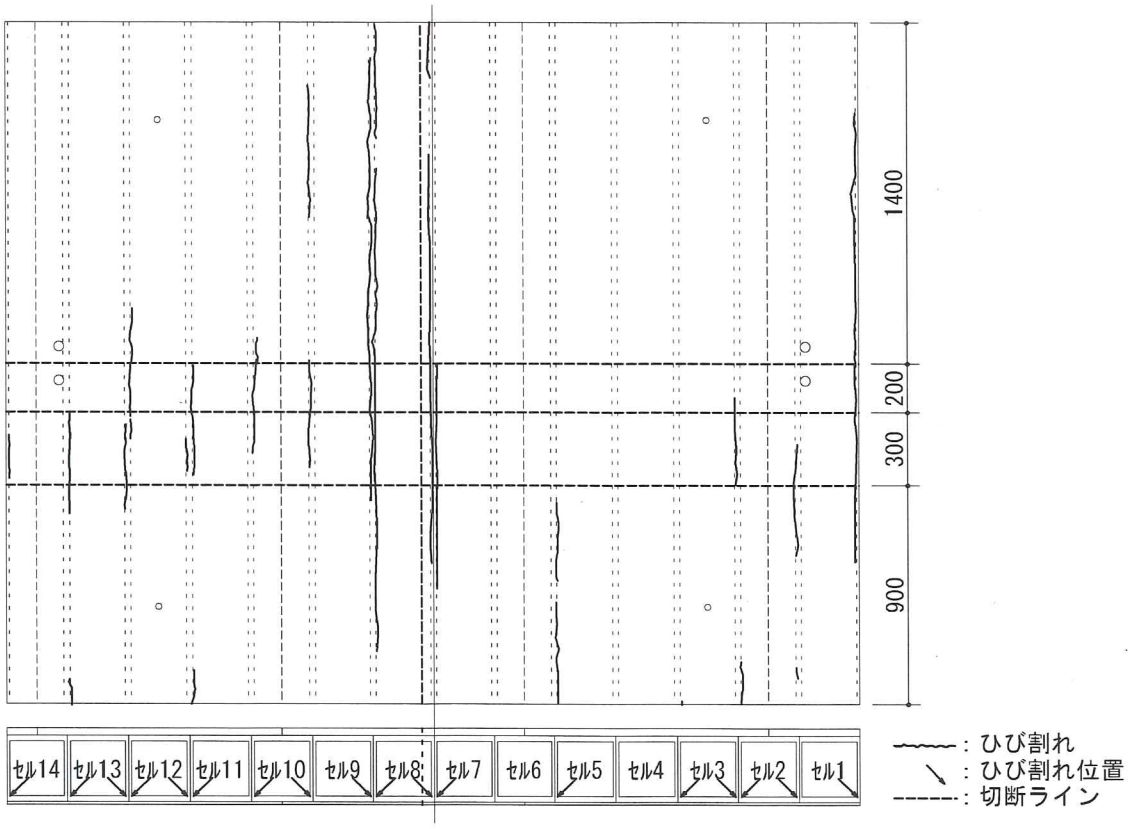
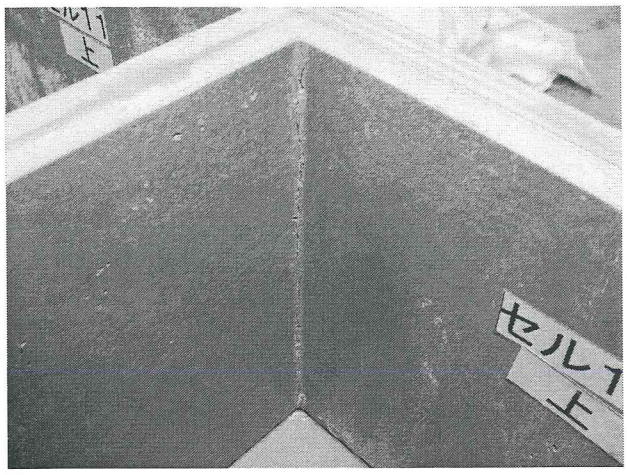
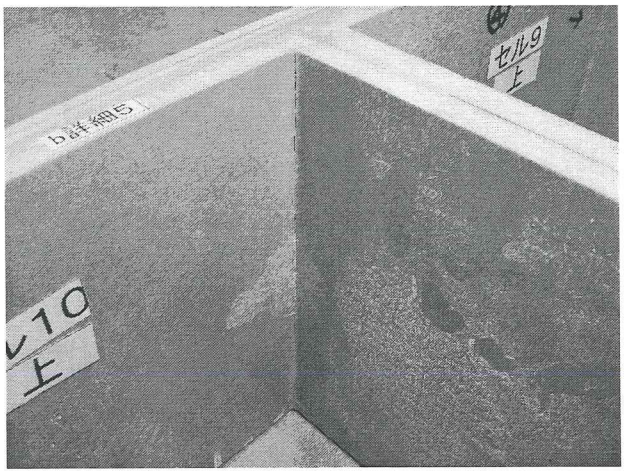


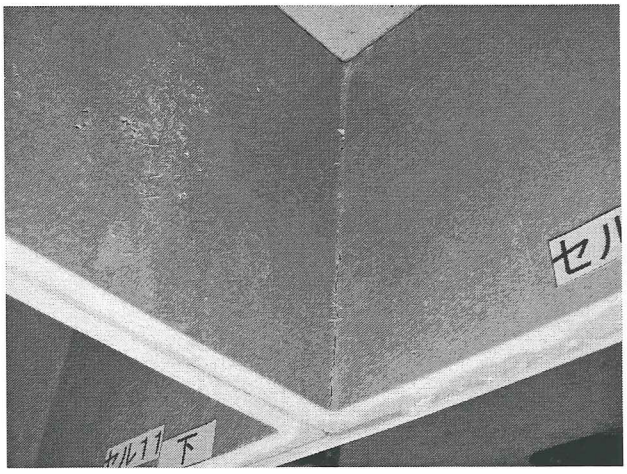
図-7.1.2　下板とウェブの角部ひび割れ(内面，上面からの透視図)



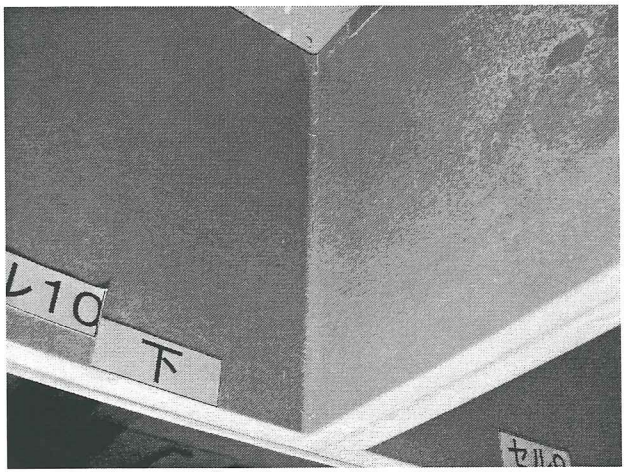
(a)　上板下面とセル 11 側ウェブの角部



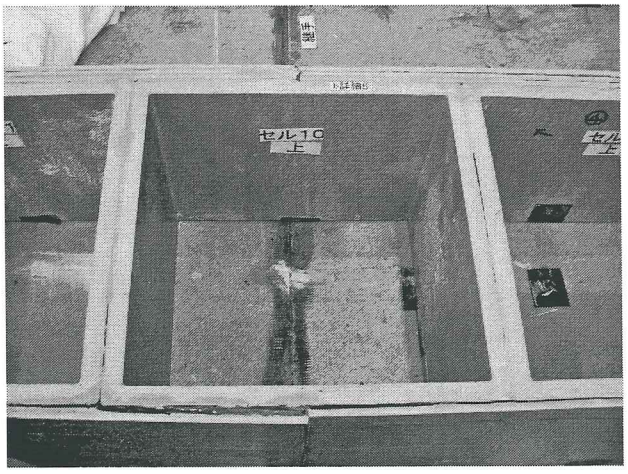
(b)　上板下面とセル 9 側ウェブの角部



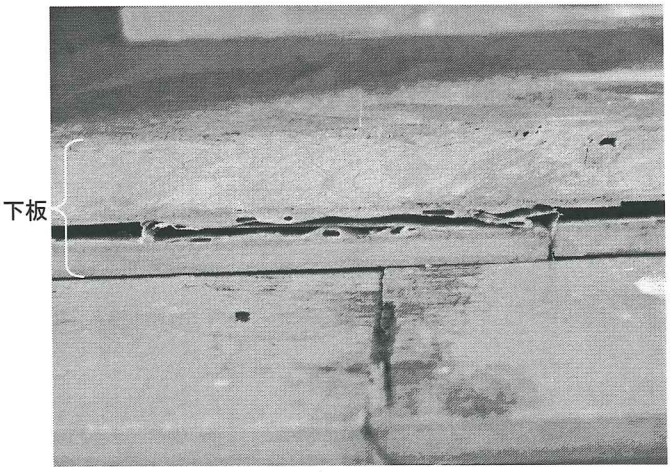
(c)　下板上面，左角



(d)　下板上面，右角

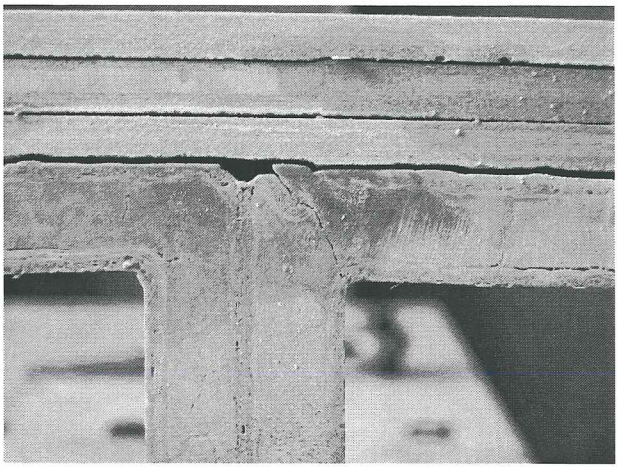


(e)　下板 F1000 の剥離

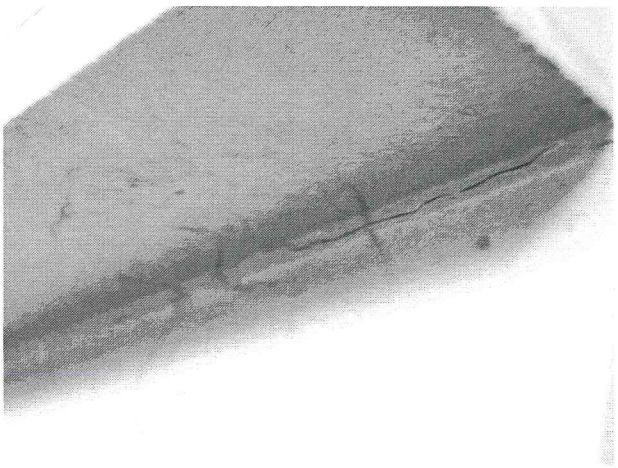


(f)　下板 F1000 の剥離 (拡大図)

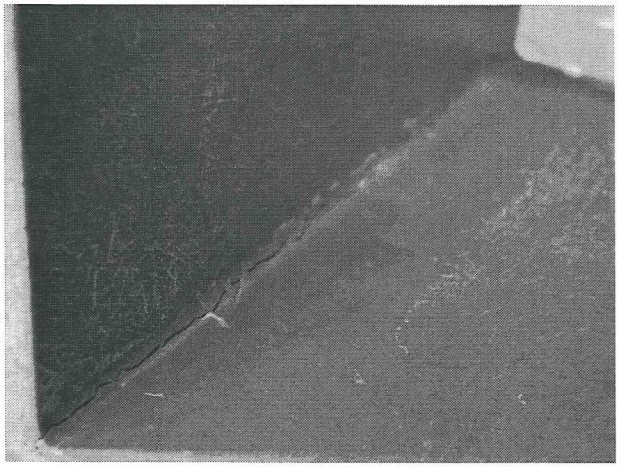
図-7.1.3　セル 10 の角部ひび割れと下面 F1000 の剥離 (a ライン付近)



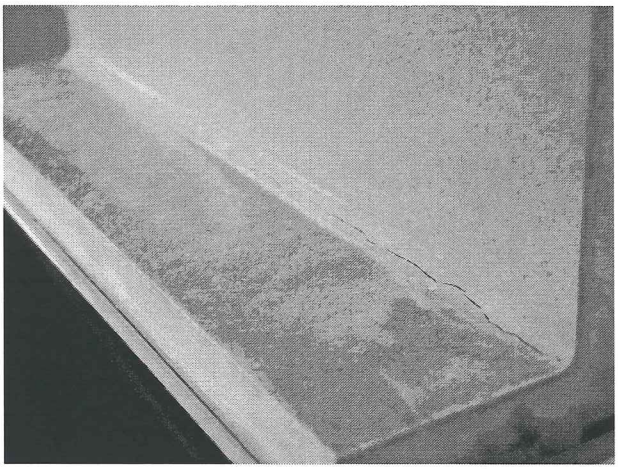
(a)　上板下面，左角



(b)　上板下面，右角



(c)　下板上面，左角

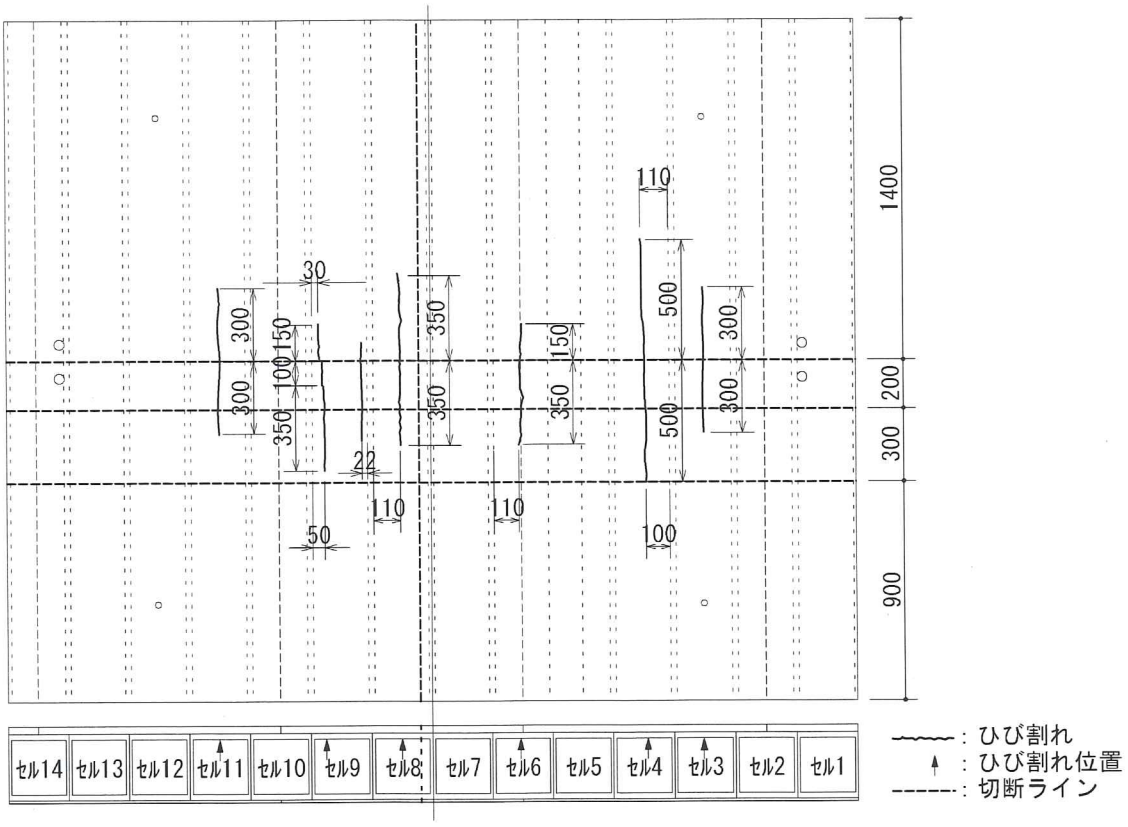


(d)　下板上面，右角



(e)　上板断面

図-7.1.4　セル 8 の角部ひび割れと上板剥離 (a ライン付近)



単位: mm

図-7.1.5　上板下面のひび割れ(内面，上面からの透視図)



(a)　セル 4，a ライン付近



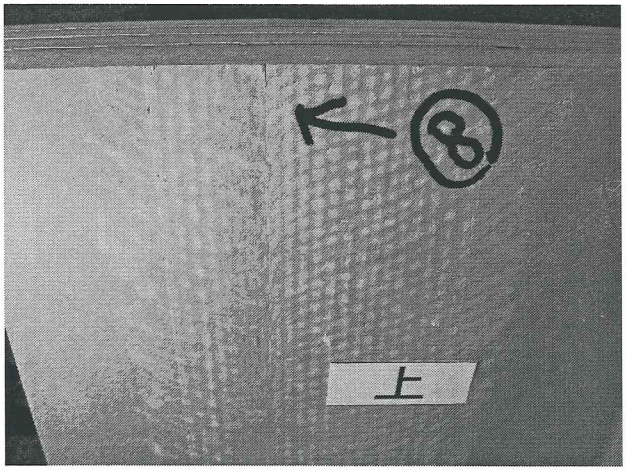
(b)　セル 6，a ライン付近



(c)　セル 6，b ライン付近

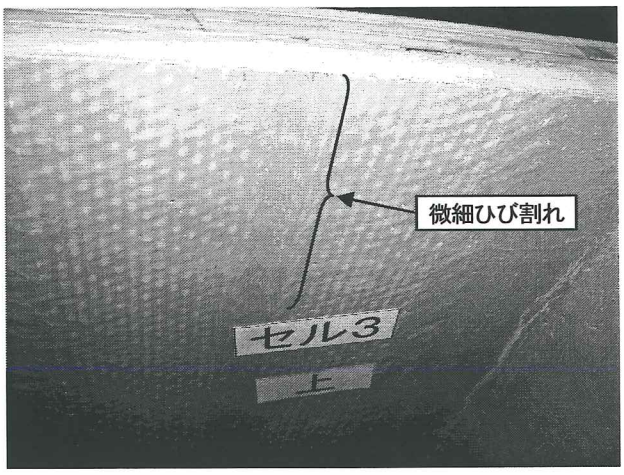


(d)　セル 8，a ライン付近

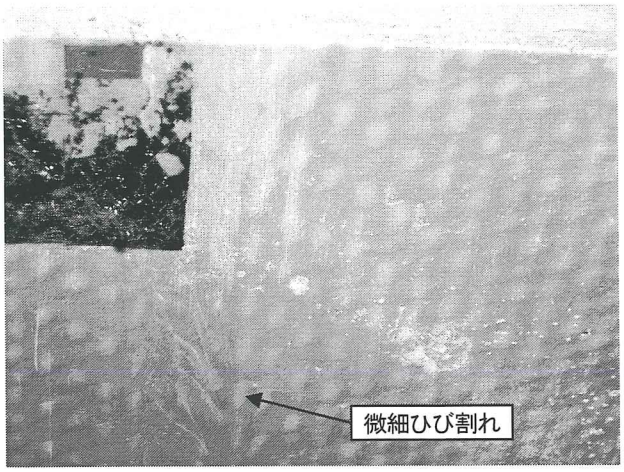


(e)　セル 8，b ライン付近

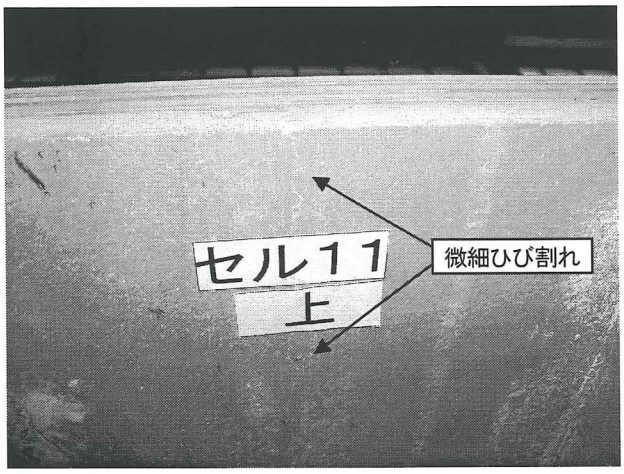
図-7.1.6　上板下面の曲げひび割れ (セル内面)



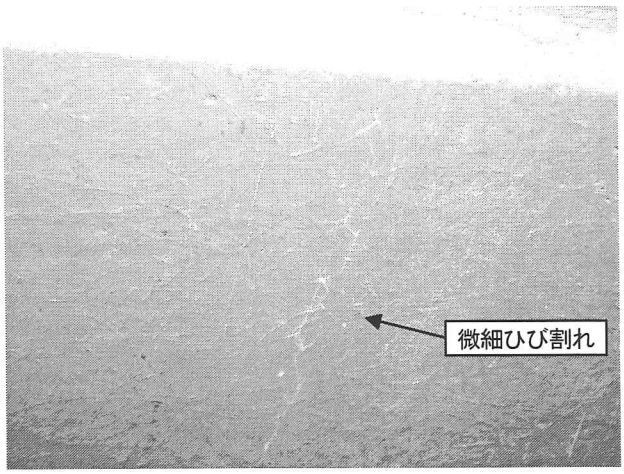
(f)　セル 3，c ライン付近



(g)　セル 3，a ライン付近

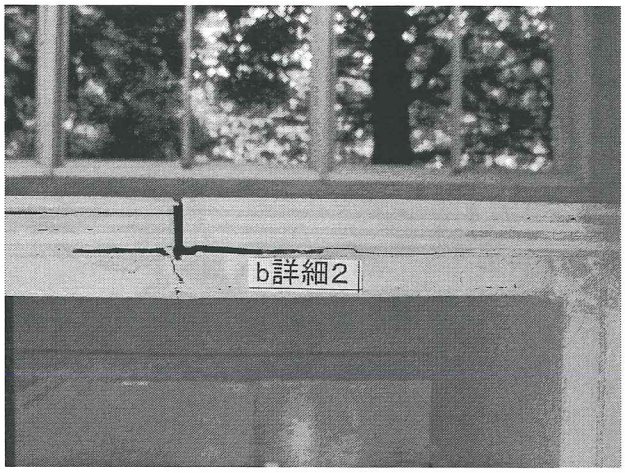


(h)　セル 11，b ライン付近



(i)　セル 11，c ライン付近

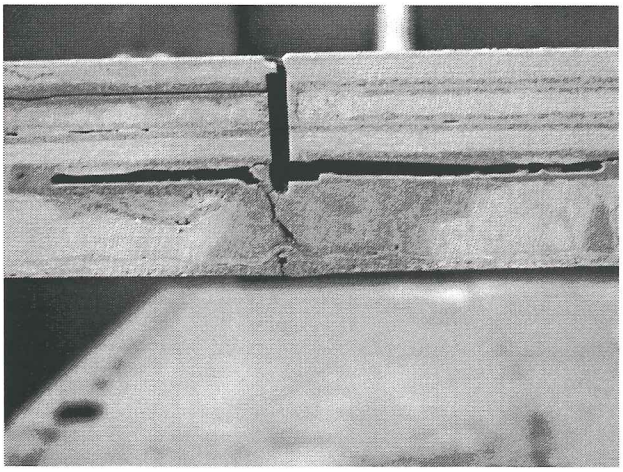
図-7.1.6(続き)　上板下面の曲げひび割れ (セル内面)



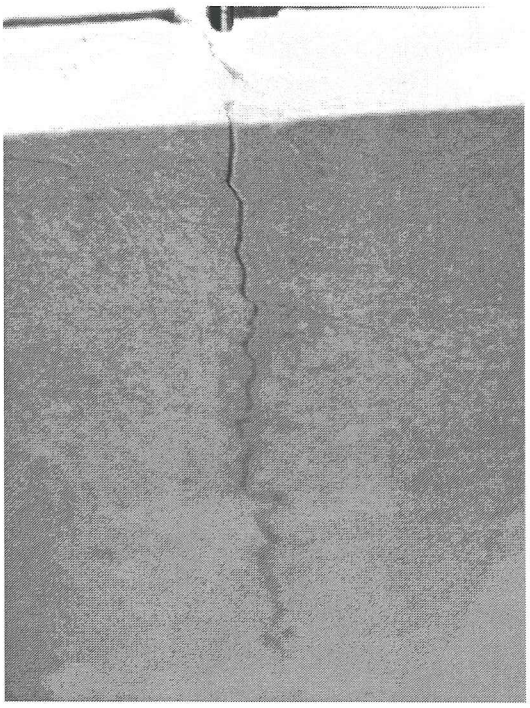
(a)　断面



(b)　斜め上から



(c)　断面拡大

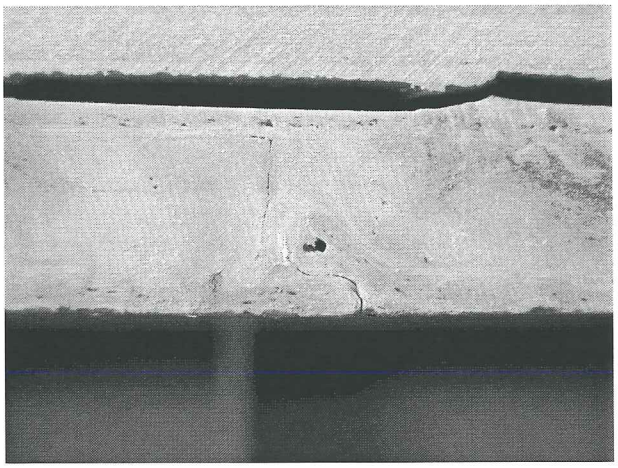


(d)　斜め下から

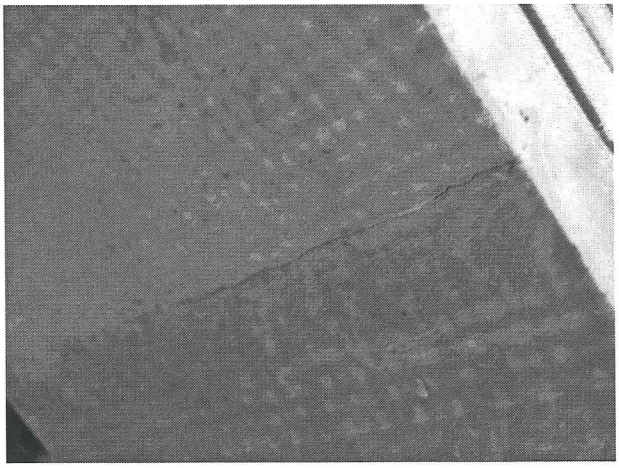
図-7.1.7　セル 6 上板の曲げひび割れ (b ライン付近)



(a)　断面 (前掲図-7.1.4(e)と同じ)



(b)　断面拡大



(c)　下面 (内面)

図-7.1.8　セル 8 上板の曲げひび割れ (b ライン付近)

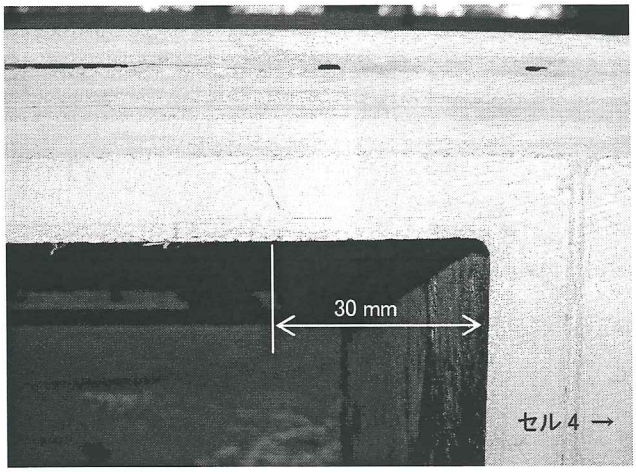
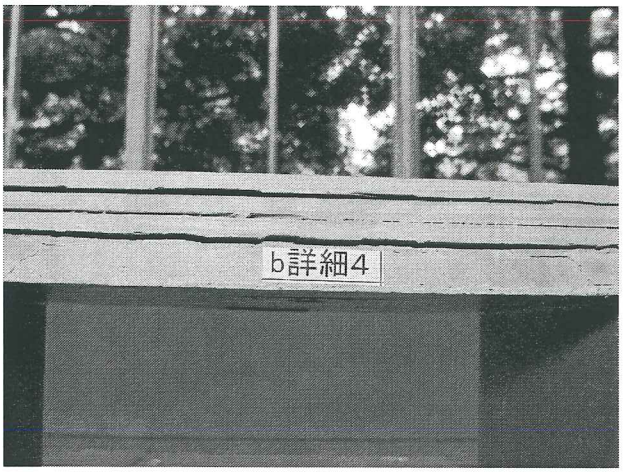
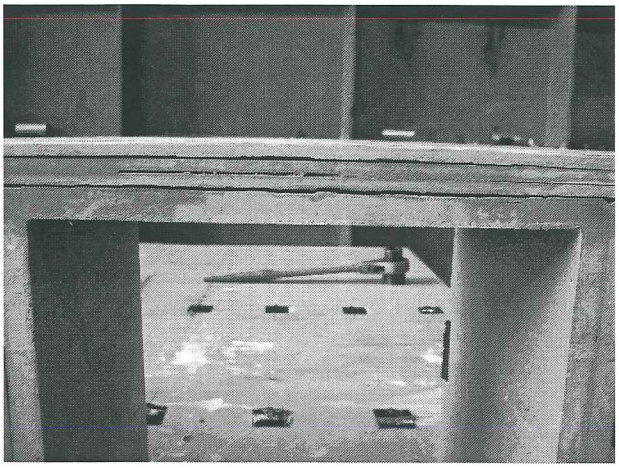


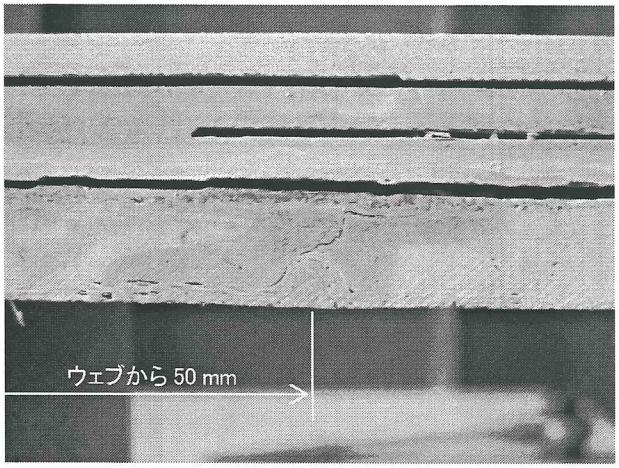
図-7.1.9　断面内のせん断ひび割れ (セル 5，b ライン付近)



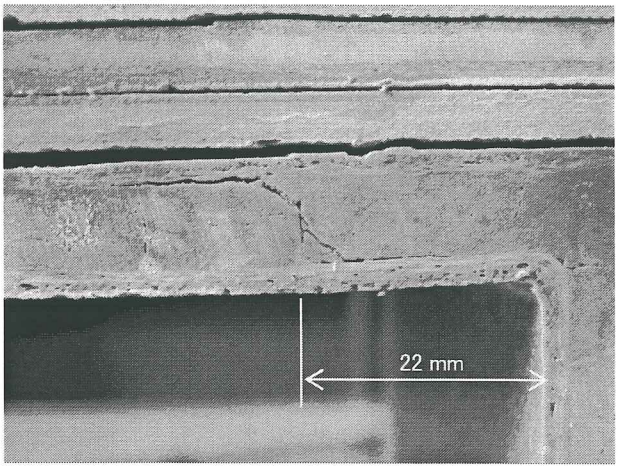
(a)　断面



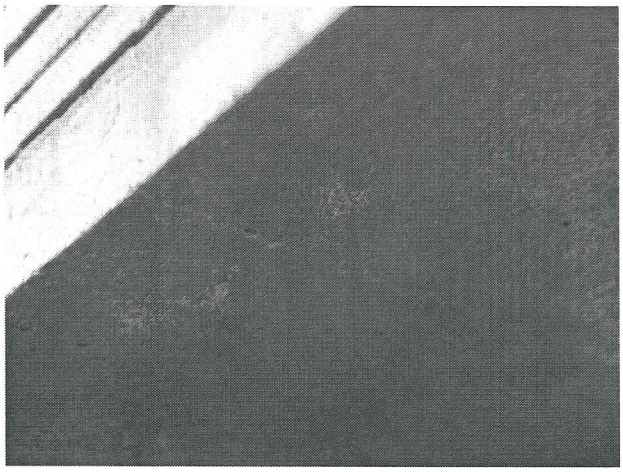
(b)　断面



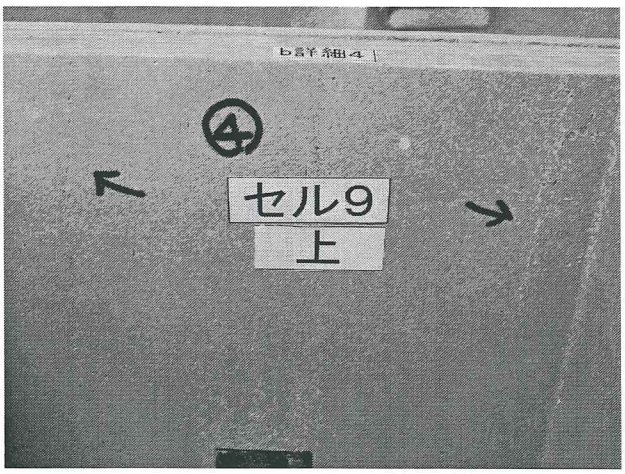
(c)　断面拡大 (セル 10 側ひび割れ)



(d)　断面拡大 (セル 8 側ひび割れ)



(e)　下面 (セル 10 側ひび割れ)



(f)　下面

図-7.1.10　断面内のせん断ひび割れ (セル 9，b ライン付近)

7.2　接着接合部の剥離

(1) パネル接合部の剥離

図-7.2.1 及び図-7.2.2 に床版上下面のパネル接合部における F1000 の剥離範囲を示す。3 章で示したとおり，セル 10 のパネル接合部の SP250 と F1000 の間に養生用のビニルシートが巻き込まれていたため，接合部の欠陥となっていた。このため，この接合部では F1000 の剥離が一定荷重走行試験の早期より認められ，階段載荷試験終了時には図-7.2.2 に示すように広範囲に剥離が伸展していた。同図には，剥離箇所の段差量を参考として示す。

(2) F1000 接着面の剥離(上記パネル接合部を除く)

図-7.2.3～7.2.4 にそれぞれ走行方向(Y 方向に切断，a ライン)及び床版支間方向(X 方向に切断，d ライン)切断面の写真を示す。a ライン，d ラインともに多くの箇所に F1000 間あるいは F1000 と SP250 の間に層間剥離が見られた。

図-7.2.5～7.2.7 に断面の拡大写真を示す。F1000 の接着層に製作時の空隙が存在していたことがわかる。これらの層間剥離はもともとの剛性の違いにより剥離し易い上にこれらの空隙によって層間に沿ったひび割れが発生しやすいと考えられる。

(3) SP250 間の剥離

図-7.2.8(a)～(d)に SP250 間の空隙及び剥離状況を示す。ウェブ間にも空隙が見られる箇所があった。パネル接合部では図-7.2.8(b)に示したように完全に付着切れが生じていた箇所も見られた。

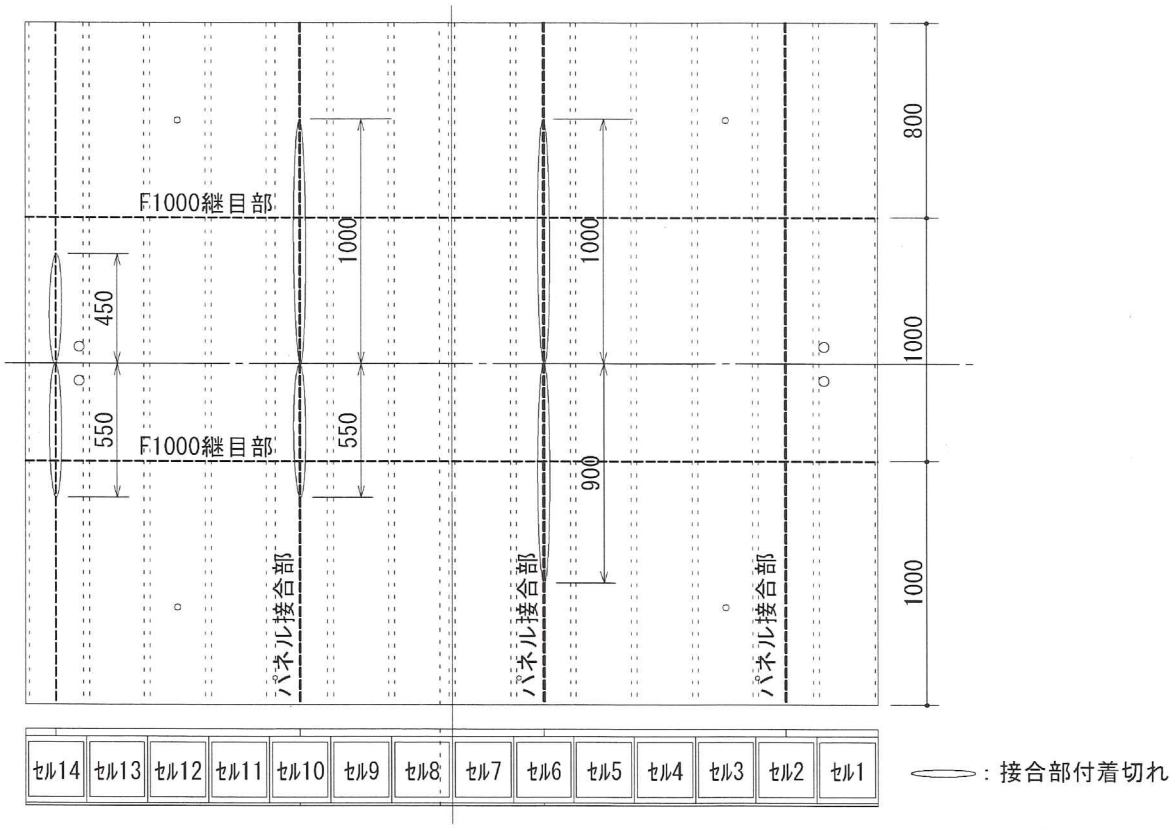
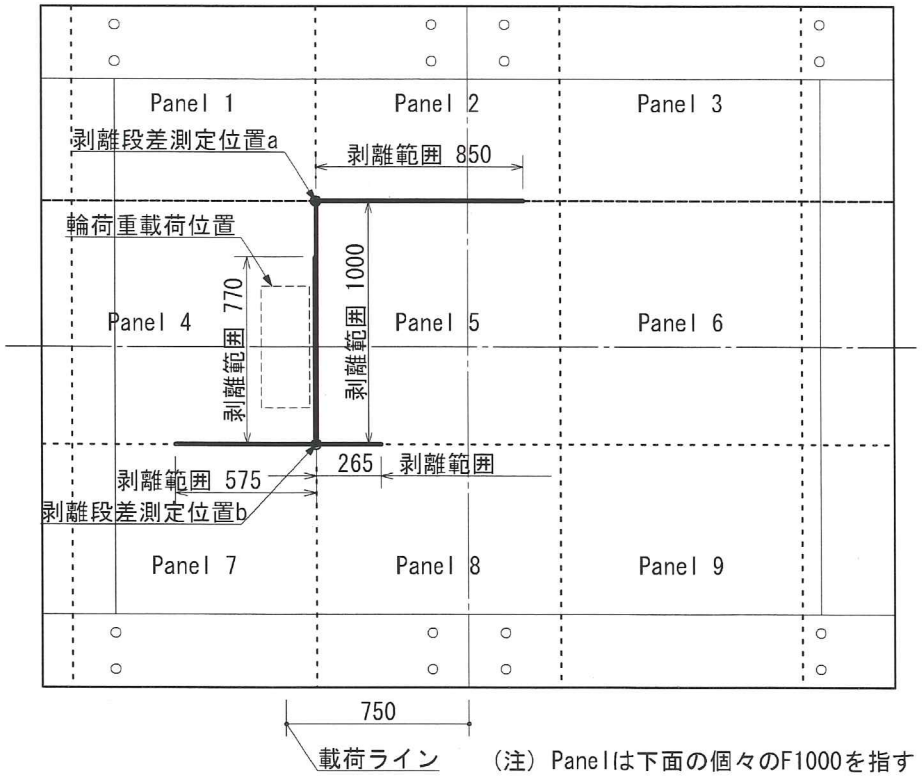


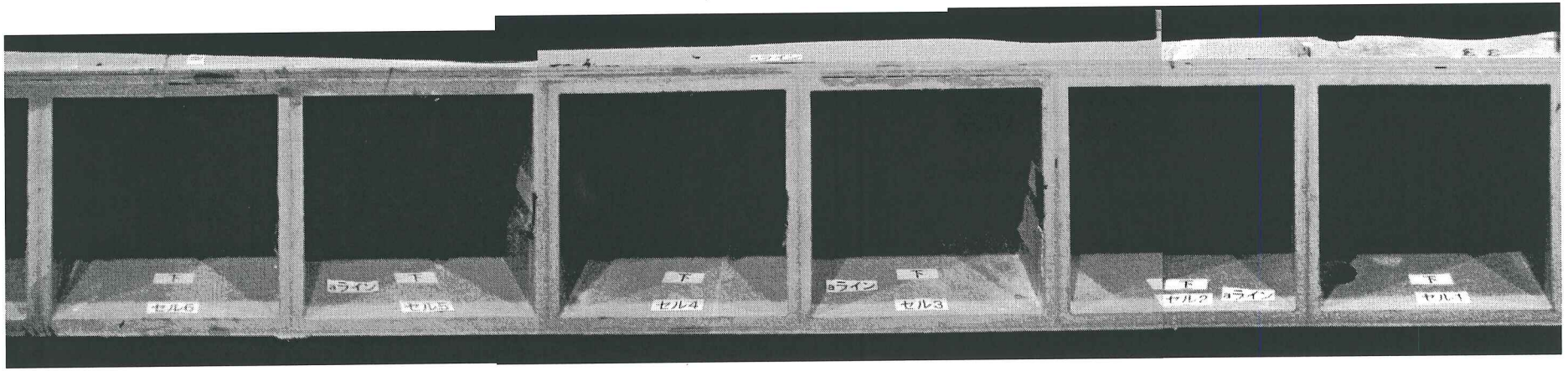
図-7.2.1　パネル接合部付近の剥離 (床版上面)

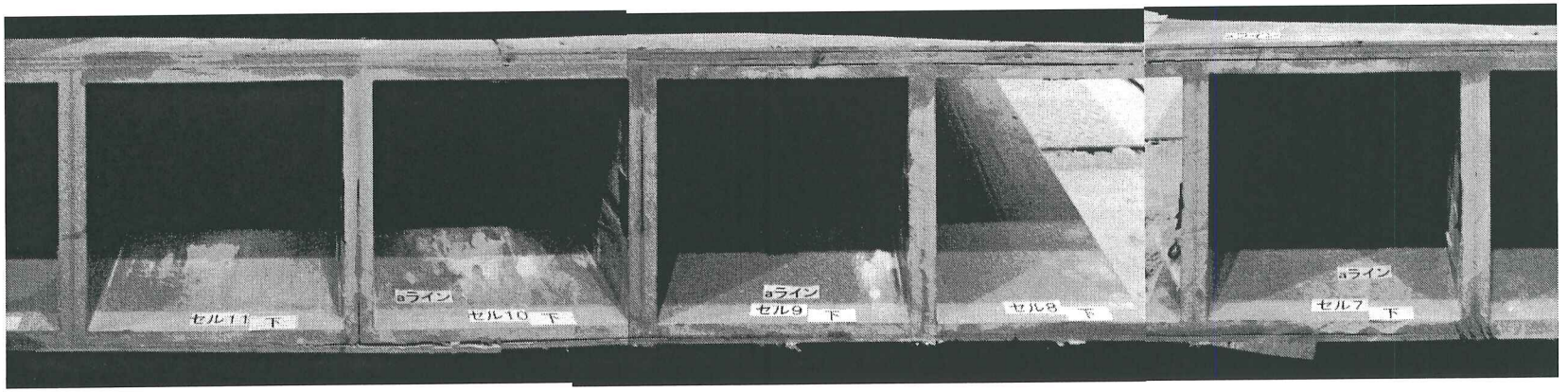


段差測定結果 (mm)

載荷荷重 (kN)	0	100
a 点，Panel 4 側	0.0	0.0
a 点，Panel 5 側	4.0	4.5
b 点，Panel 4 側	8.0	10.5
b 点，Panel 5 側	2.8	2.9

図-7.2.2　パネル接合部付近の剥離 (床版下面，上面からの透視図)





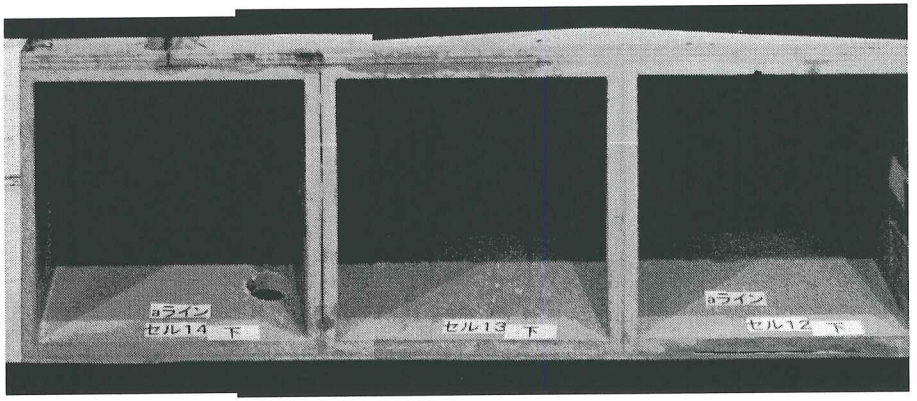


図-7.2.3　断面写真 (aライン)

(注)　断面を基準に画角補正した後合成した。

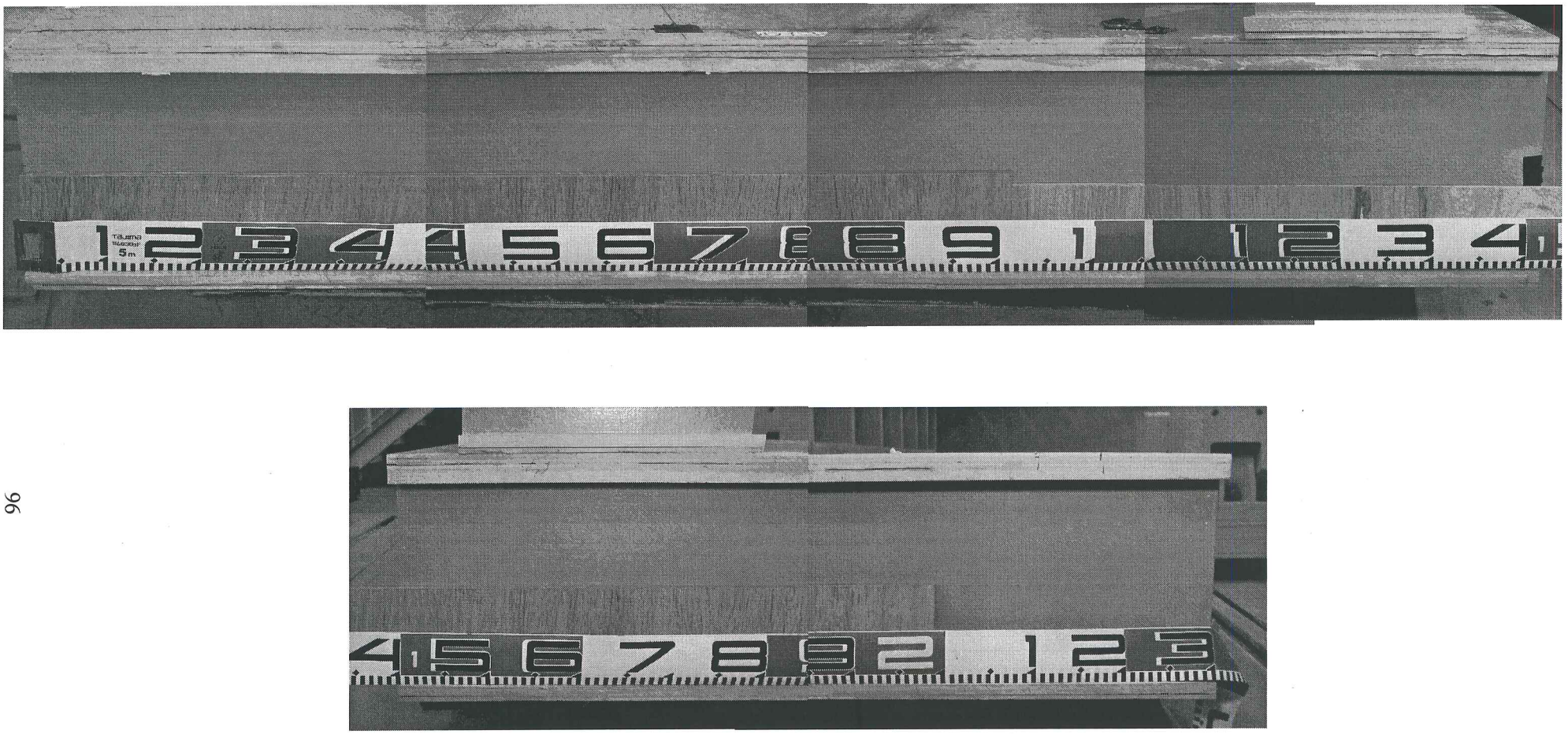
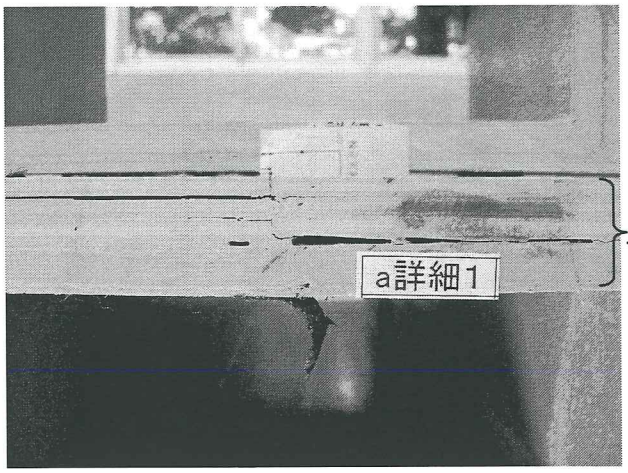


図-7.2.4　断面写真 (dライン)

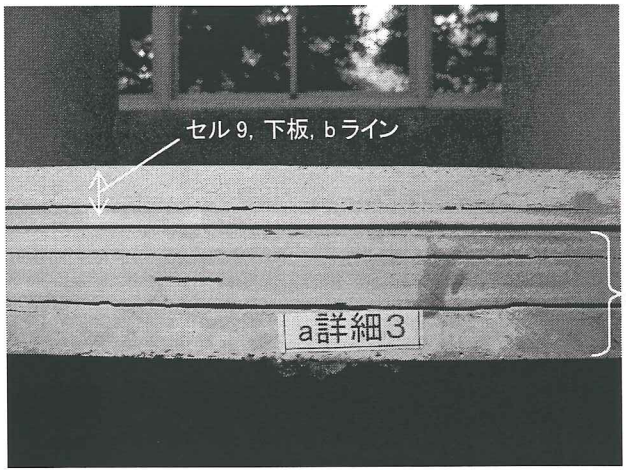
(注)　断面を基準に画角補正した後合成した。



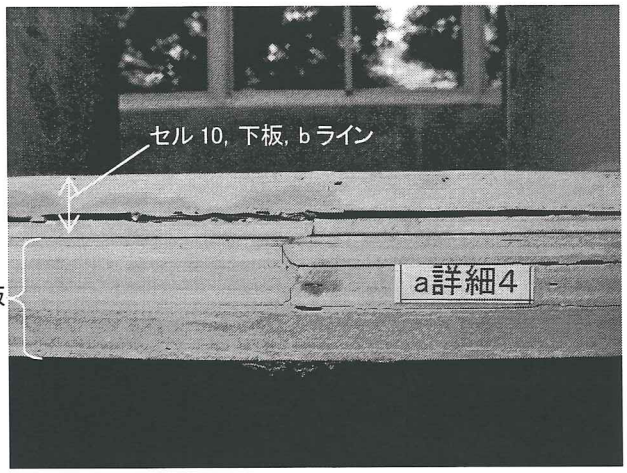
(a)　セル 6，上板



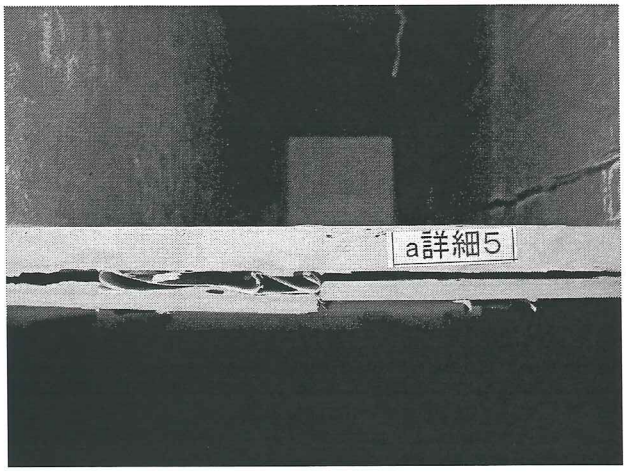
(b)　セル 6，下板



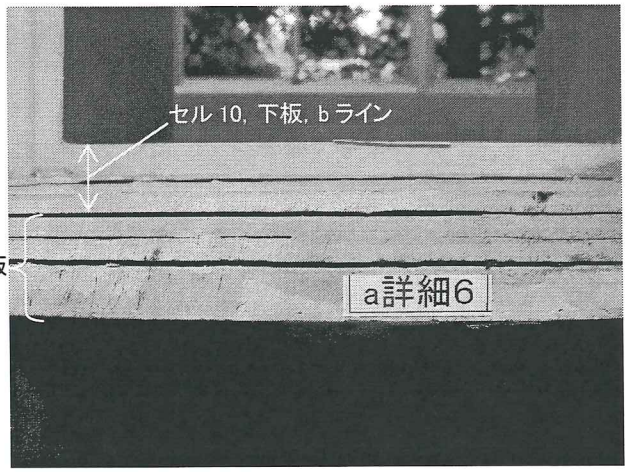
(c)　セル 9，上板



(d)　セル 10，上板



(e)　セル 10，下板

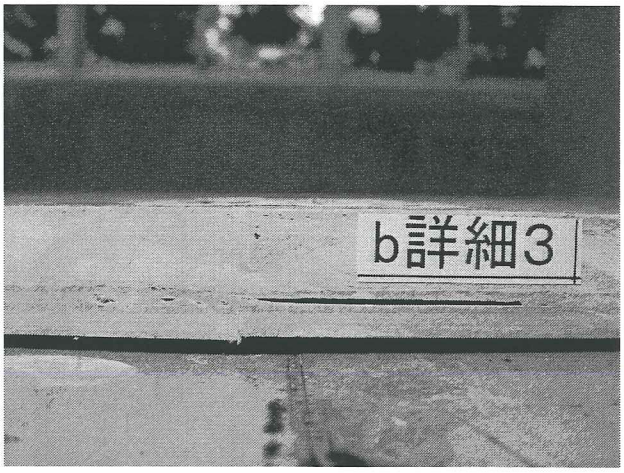


(f)　セル 7，上板

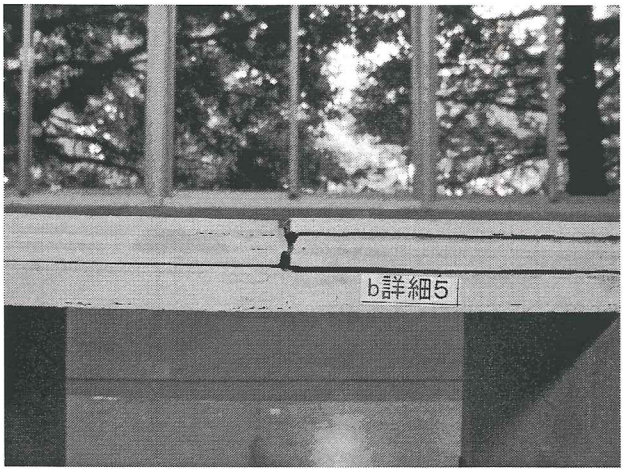
図-7.2.5　接着層の空隙と剥離 (a ライン)



(a)　セル 4,5 境界部



(b)　セル 6,　下板

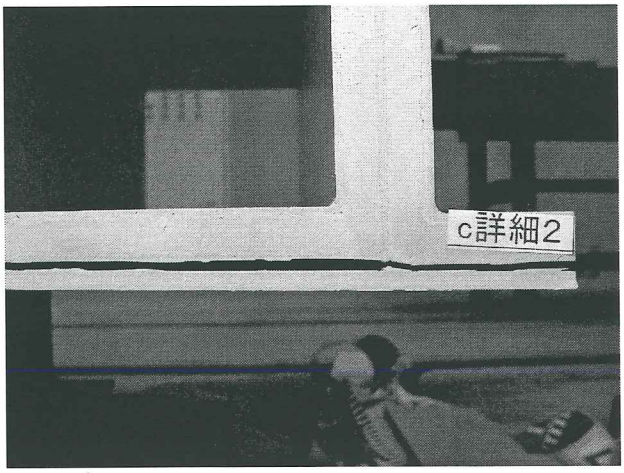


(c)　セル 10,　上板

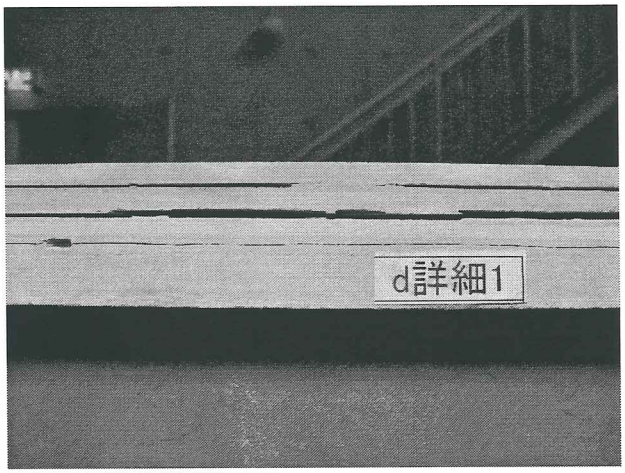
図-7.2.6　接着層の空隙と剥離 (b ライン)



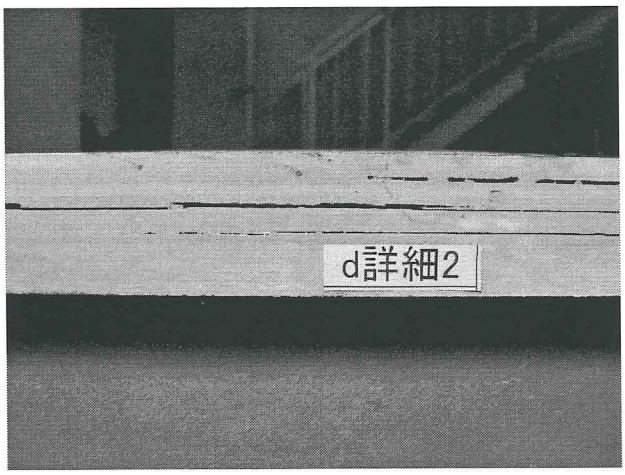
(a)　セル 1，c ライン



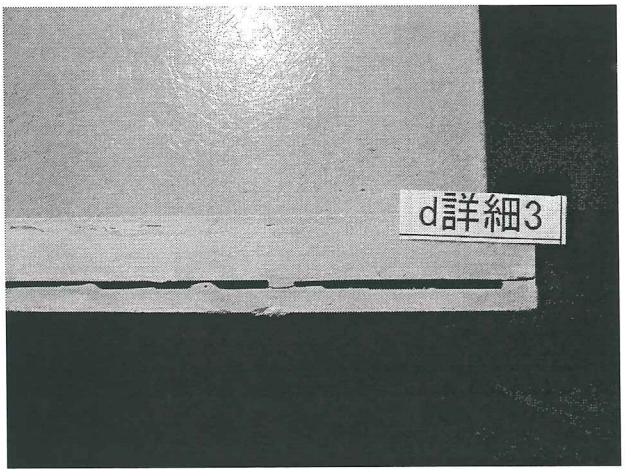
(b)　セル 7, 8 境界部，c ライン



(c)　セル 8，上板，d ライン

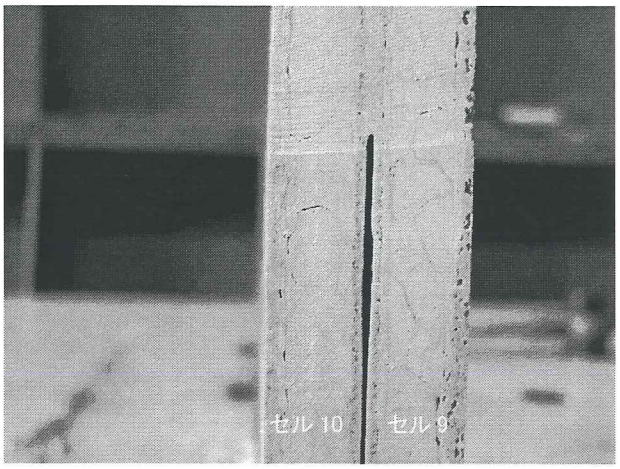


(d)　セル 8，上板，d ライン

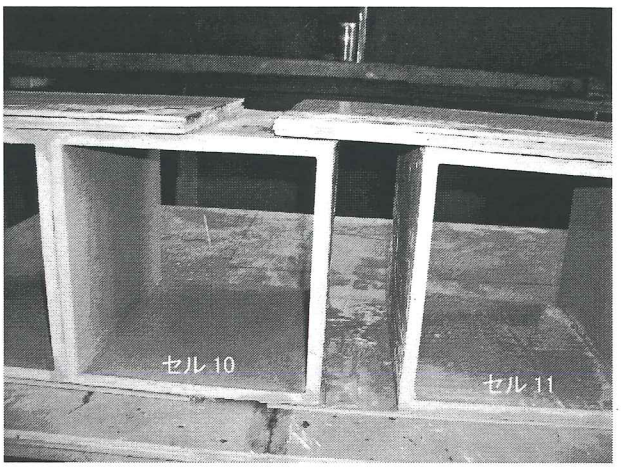


(e)　セル 8，下板，d ライン

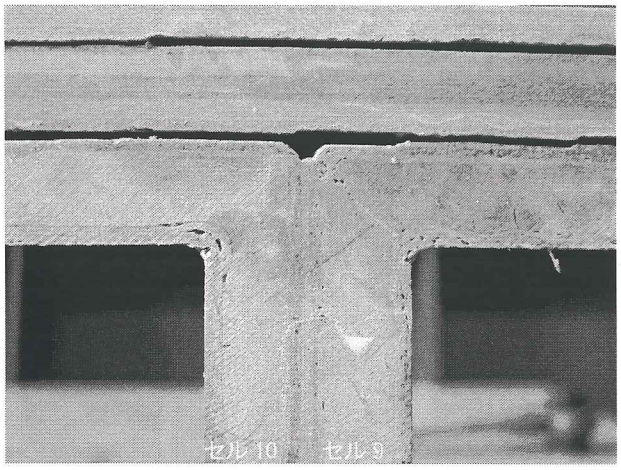
図-7.2.7　接着層の空隙と剥離



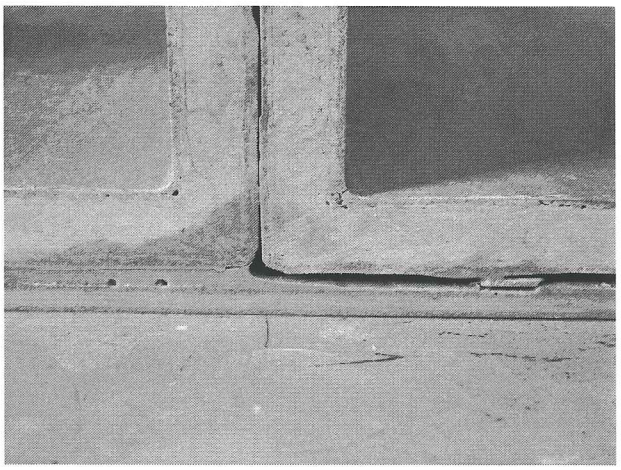
(a)　ウェブ間接合部の空隙(セル 9, 10 間，b ライン)



(b)　セル 10 接合部の分離(b ライン)



(c)　上板付近のウェブ間接合部(セル 9, 10 間，b ライン)



(d)　下板付近のウェブ間接合部

図-7.2.8　　SP250 間の接着層の空隙と剥離

8．考察

8.1 版全体の静的挙動

(1) たわみ分布

図-8.1.1 に走行試験前の静的載荷試験結果(図-4.1.2 再掲)を示す。また，図-8.1.2 に FEM による事前検討で得られたたわみ図を示す(付録 1 より，付図-2.2)。供試体は床版支間方向には SP250 の曲げ剛性により単純版(あるいは単純ばり)のたわみ分布を示した。しかし，走行方向には上板及び下板の剛性が比較的弱いために版としての挙動の範囲が載荷位置の周囲 6 セル程度の範囲に(特に大きい変位は周囲 2～4 セルの範囲に)限定されていた。FEM による事前検討では解析モデルの板厚が供試体の板厚と異なるが，これらのたわみ分布の傾向は FEM の結果とよく一致している。載荷位置直下の局部的な変形挙動を見ると(図-8.1.3)，本供試体のように幅 250 mm の四角セルを並べた FRP 床版の走行方向の荷重分配効果は小さく，上板，下板ともに板厚を数 mm 厚くするぐらいでは荷重分配の改善は難しいと考えられる。なお，図-8.1.1 に示すとおり，走行載荷試験前の静的載荷試験では荷重 100 kN 載荷時の供試体の最大たわみは約 2.2 mm(床版支間に対する比 1/1000)であった。参考として，表-8.1.1～2 に断面諸元とそれに基づく 1 セルの単位荷重 100 kN 当たり最大たわみ(幅 250 mm のはりとして計算)の計算結果(6.1 mm)を示す。

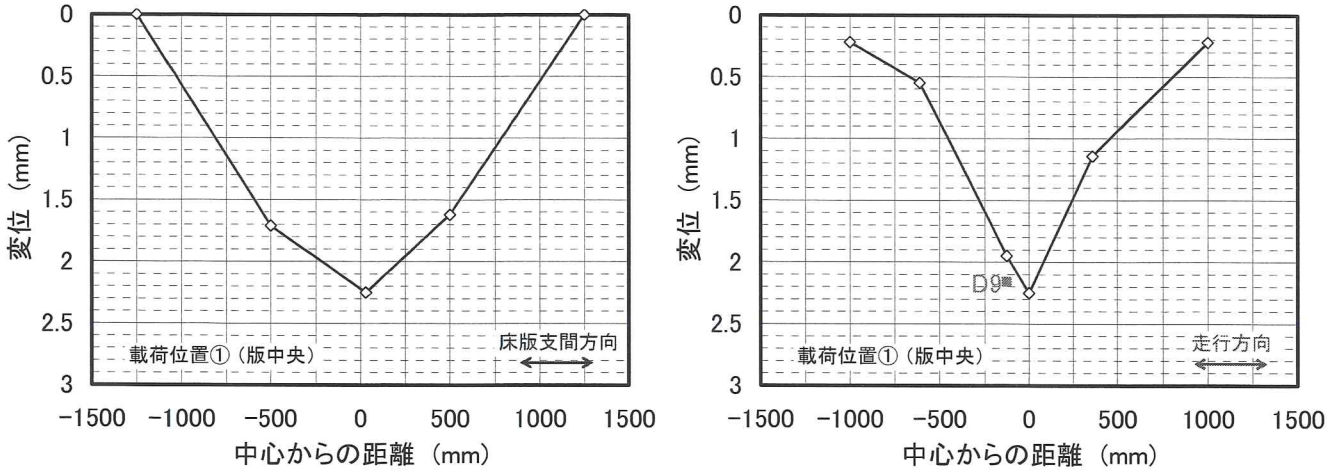
(2) 版の耐力

載荷試験に先立ち，供試体の概ねの耐荷力を把握するため，幅 250 mm のはり断面として各層の限界耐力を算定した。試験後の解体調査から得られた断面諸元(表-8.1.1)を使って再計算した結果を表-8.1.3 に示す。また，参考として，断面保持が成立し，かつ座屈は生じないとした場合の SP250 単体の計算耐力を表-8.1.4 に示す。SP250 単体でも計算曲げ耐力が 671 kN であることから，SP250 の上下に F1000 を貼り付けた断面ではなお十分な曲げ耐力を有する。ただし，下板の F1000 は SP250 のロービング層と直交する方向に貼り付けているため，この層の曲げ引張耐力(計算値)は 215 kN と比較的小さく，載荷荷重の増加とともにひび割れの発生が懸念された。しかし，本供試体の場合，下板の F1000 のはがれが先行したため，F1000 の曲げひび割れは見られなかった。

なお，表-8.1.5 に示すように，1 セル当たりの 100 kN 載荷時の X 方向ひずみ(計算値)は 5380 μ と相当に大きい値となるが，走行載荷試験前の静的載荷試験での X 方向ひずみは 500 μ 程度であった(前掲図-4.1.1(c))。これは，版としての評価が入っていないことが大きいが，その他に接着剤の剛性を考慮していないことも一因として挙げられる。

(3) ウェブの耐力

表-8.1.3 の下段にウェブのせん断耐力の計算値を示す。また，表-8.1.6 に載荷位置直下のウェブの圧縮破壊耐力の計算値を示す。SP250 で構成した供試体はウェブ厚が 24～26 mm 程度と比較的厚いため，ウェブのせん断耐力(計算値)が 325 kN，圧縮耐力(計算値)が 720 kN と十分な耐力を有していた。



(a) 床版支間方向のたわみ　　(b) 走行方向のたわみ

図-8.1.1　走行試験前の静的挙動 (100kN 載荷時床版下面変位)

(図-4.1.2 再掲)

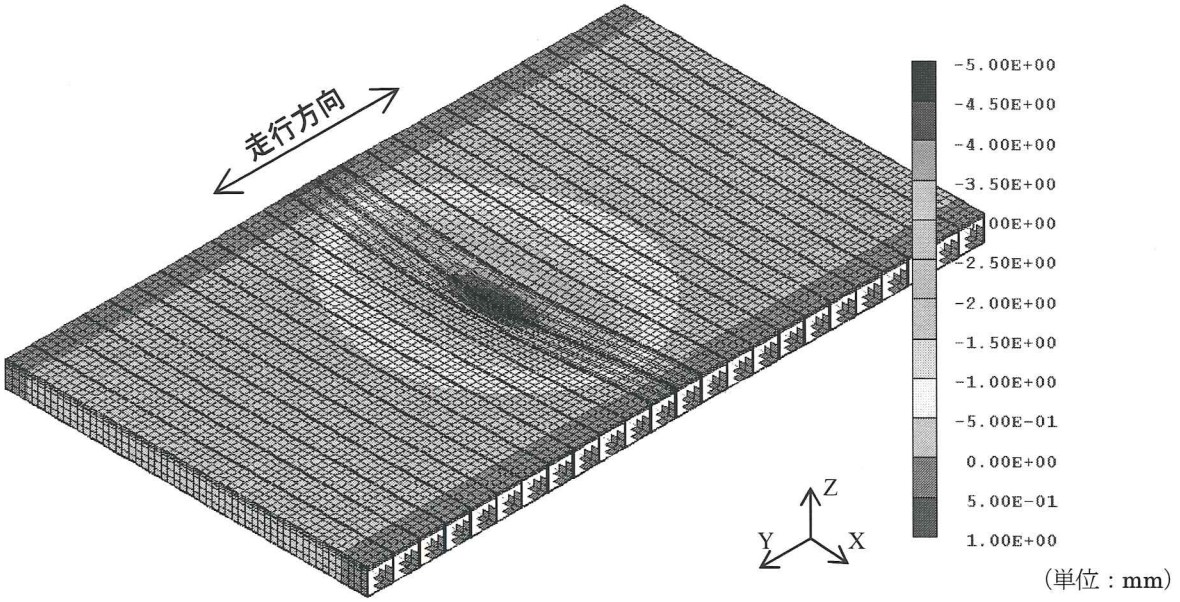


図-8.1.2　載荷位置①における上面たわみ分布図

（付録１にカラー掲載）

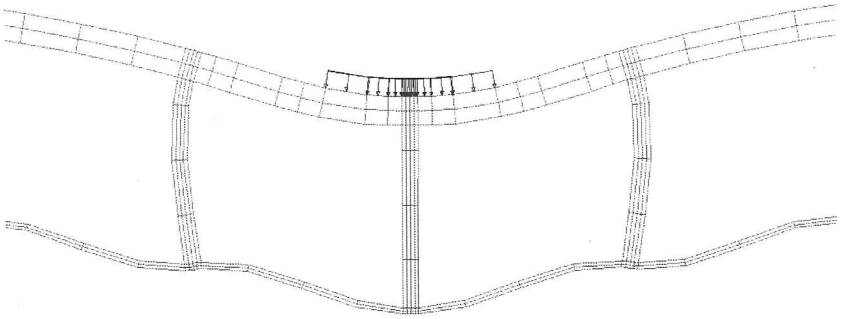


図-8.1.3　載荷位置付近の変形挙動 (載荷位置①)

(付録１より)

表-8.1.1　供試体の断面諸元 (床版支間方向)

層番号	層構成	強度 f_u	弾性係数 E	E/E_5 n	幅 b	高さ h	中立軸からの距離 y	断面積 A	換算断面積 A_e	$A_e \cdot y$	$A_e \cdot y^2$	I_o
		MPa	GPa	-	mm	mm	mm	mm^2	mm^2	mm^3	mm^4	mm^4
1	F1000/90	141	10.2	0.258	250	4.2	139.4	1050	271	37749	5262214	1544
2	F1000/0	524	29.8	0.753	250	4.2	133.9	1050	791	105935	14184702	1544
3	F1000/90	141	10.2	0.258	250	4.2	128.4	1050	271	34770	4464502	1544
4	SP250/uFl	478	40.8	1.032	250	12	119.0	3000	3095	368283	43825699	36000
5	SP250/W	559	39.55	1.000	24	226	-	5424	5424	0	0	23086352
6	SP250/lFl	485	38.3	0.968	250	12	-119.0	3000	2905	-345717	41140301	36000
7	F1000/90	39	12.3	0.311	250	4.2	-121.6	1050	327	-39708	4828532	1544
								15624	13083	161312	113705950	23164526

接着層　1.3 mm
全高さ　272 mm
上板厚　28.5 mm

e = 12.33 mm
I = 134881551 mm^4

注 1) 断面保持を仮定
2) 接着層は強度なしとして厚さのみ考慮

表-8.1.2　1セル当たり 100 kN 載荷時最大たわみ(幅 250 mm のはりとして計算)

荷重	P	100	kN
支間	L	2500	mm
断面二次モーメント	I	134881551	mm^4
弾性係数	E	39.55	GPa
中央たわみ	δ	6.1	mm

表-8.1.3　各層ごとの曲げ耐力計算表(はりとして算定)

対象とする層	耐　力	
1　F1000/90 圧縮	強度　f_u	141 MPa
	f_u/n	547 MPa
	中立軸からの距離　y	129.17 mm
	断面定数　Z	1044214 mm^3
	曲げ耐力　M_u	570894 kN･mm
	支間　L	2500 mm
	最大荷重　P_{max}	913 kN
4　SP250/0 圧縮	強度　f_u	478 MPa
	f_u/n	463 MPa
	中立軸からの距離　y	112.67 mm
	断面定数　Z	1197134 mm^3
	曲げ耐力　M_u	554699 kN･mm
	支間　L	2500 mm
	最大荷重　P_{max}	888 kN
6　SP250/0 引張	強度　f_u	485 MPa
	f_u/n	501 MPa
	中立軸からの距離　y	137.33 mm
	断面定数　Z	982174 mm^3
	曲げ耐力　M_u	491901 kN･mm
	支間　L	2500 mm
	最大荷重　P_{max}	787 kN
7　F1000/90 引張	強度　f_u	39 MPa
	f_u/n	125 MPa
	中立軸からの距離　y	142.83 mm
	断面定数　Z	944353 mm^3
	曲げ耐力　M_u	118424 kN･mm
	支間　L	2500 mm
	最大荷重　P_{max}	189 kN
5　SP250/W せん断	せん断強度　v_u	30 MPa
	ウェブ断面積　A	5424 mm^2
	せん断耐力　S_u	163 kN
	最大荷重　P_{max}	325 kN

表-8.1.4　SP250 の曲げ耐力

断面二次モーメント I	mm^4	108124352
縁端までの距離 y	mm	125
断面定数 Z	mm^3	864995
引張強さ f_u	MPa	485
破壊曲げモーメント M_{max}	kN･mm	419522
支間 L	mm	2500
最大荷重 P_{max}	kN	671

注 1) 単純支持，中央 1 点載荷とした場合
2) 破断まで断面保持するとした場合
3) 座屈が生じないとした場合

表-8.1.5　1 セル当たり 100 kN 載荷時 X 方向ひずみ

荷重	P	100	kN
支間	L	2500	mm
断面定数	Z	944353	mm^3
弾性係数	E	12.3	GPa
X 方向ひずみ	ε_x	5381	μ
6 セルで負担するとした場合		897	μ

表-8.1.6　ウェブの圧縮耐力

圧縮強度	f'_u	60	MPa
ウェブ厚	t_w	24	mm
載荷幅	W	500	mm
最大荷重	P_{max}	720	kN

8.2　上板の静的挙動

(1) 上板下面のたわみ

走行載荷試験前の静的載荷試験，載荷位置②での 100 kN 載荷時の上板下面の変位は 0.44 mm であった(図-8.2.1)。表-8.2.1 の断面諸元に基づき算定した上板下面の変位を表-8.2.2 に示す。X 方向載荷幅 500 mm の範囲での単純版と仮定し，上板の支持条件をウェブ間で両端固定として等分布載荷した場合の上板下面中央の変位は 0.26 mm，ウェブ間で単純支持としてウェブ間 226mm の中央に線荷重を載荷した場合の同変位は 2.07 mm である。実際にはウェブ位置で回転が完全に拘束されていないこと(図-8.2.2)，X 方向の版としての作用は多少あることを考慮する必要はあるが，概して見れば，走行載荷試験前の初期の段階では，上板の支持条件，載荷状況は前者の両端固定，等分布荷重に近かったと考えられる。

(2) 上板のひずみ

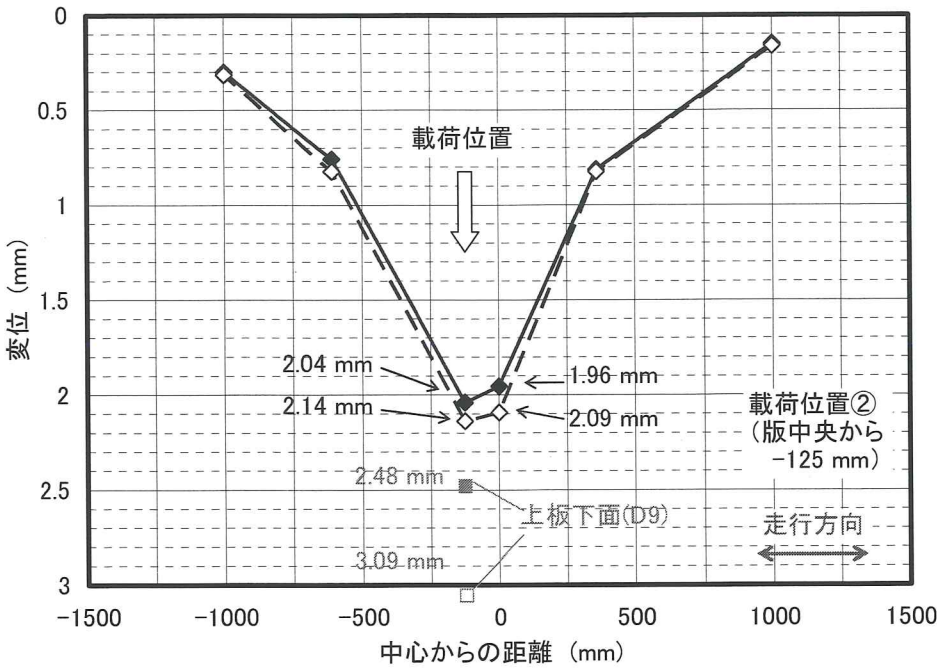
図-8.2.3 に走行載荷試験前の静的載荷試験における 100 kN 載荷時の上板の上下面 Y 方向ひずみ分布を示す(図-4.2.6 再掲)。これらの結果からも，載荷位置のごく周辺で上板の局部変形が生じていたことがわかる。載荷位置②の場合，上板下面の最大ひずみは載荷点直下で 1700 μ であった。上記たわみと同様に，載荷幅 500 mm の単純版として算出した，上板下面の単位荷重 100 kN 当たり Y 方向ひずみを表-8.2.3 に示す。同ひずみは，両端固定，等分布荷重とした場合に 1100 μ，単純支持，線荷重とした場合に 6600 μ であった。実測値 1700 μ と比べてどちらの載荷条件も差があるが，たわみと同様，概して初期の段階では，上板の支持条件，載荷状況は前者の両端固定，等分布荷重に近かったと考えられる。

なお，図-8.2.4 に事前検討した FEM(付録 1.，付図-2.4a，付図-2.7a)による載荷位置付近の上板上面の Y 方向応力度分布を示す(下面のデータなし)。前項の版全体の挙動とともに上板の局部の静的挙動も FEM で予測できることが分かった。

(3) 上板の耐力

表-8.2.4 に載荷幅 500 mm の単純版として算出した上板各層の耐力を示す。F1000 を 3 層重ねたことにより，上板の曲げ剛性は大きく改善されたが，上板下面に位置する SP250 の直角方向曲げ強度が低いため，同部位の 349 kN (等分布荷重とした場合)が最大耐力となる。

次いで SP250 の断面内での層間せん断耐力が 360 kN と比較的厳しい箇所となる。また，同表に示していないが，SP250 と F1000 の間の接着層は空隙が多いこともあり，SP250 断面内の層間せん断耐力より低いことが考えられる。SP250，F1000 の付着切れが生じると，さらに SP250 の軸直角方向曲げ耐力が低下する。



(b) 走行方向のたわみ

図-8.2.1　走行試験前後の静的挙動の比較 (載荷位置②，100kN 載荷時床版下面変位)

白抜き，破線は 717000 回繰返し後の結果を示す

(図-5.3.4 再掲)

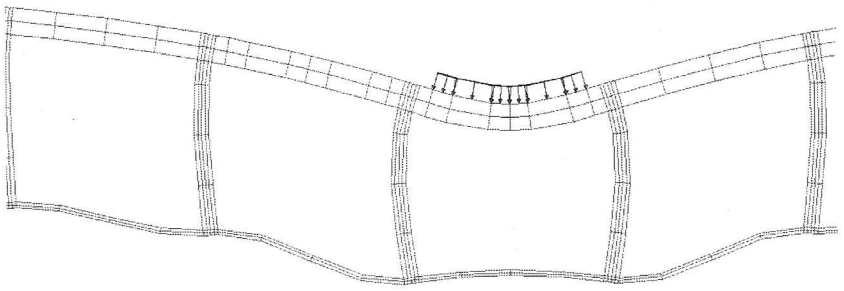


図-8.2.2　載荷位置付近の変形モード (載荷位置②)

(付録１より)

(注) 解析モデルは供試体に比べてウェブの板厚が小さい(対上板厚)のでウェブ上端付近の変形がやや誇張されている。

表-8.2.1　供試体上板の断面諸元

層番号	層構成	強度 f_u	弾性係数 E	E/E_4 n	幅 b	高さ h	中立軸からの距離 y	断面積 A	換算断面積 A_e	$A_e \cdot y$	$A_e \cdot y^2$	I_o
		MPa	GPa	-	mm	mm	mm	mm^2	mm^2	mm^3	mm^4	mm^4
1	F1000/0	398	14.4	1.116	500	4.2	20.4	2100	2344	47821	975556	3087
2	F1000/90	133	9.4	0.729	500	4.2	14.9	2100	1530	22800	339727	3087
3	F1000/0	398	14.4	1.116	500	4.2	9.4	2100	2344	22035	207132	3087
4	SP250/uFl	168	12.9	1.000	500	12	0	6000	6000	0	0	72000
								12300	12219	92657	1522416	81261

接着層　1.3 mm
上板厚　28.5 mm

e = 7.58 mm
$I = 901030\ mm^4$

注 1) 断面保持を仮定
2) 接着層は強度なしとして厚さのみ考慮
3) b は載荷幅のみ考慮
4) 層構成は X 方向を 0 とした場合
5) 弾性係数は各板の曲げ試験結果による

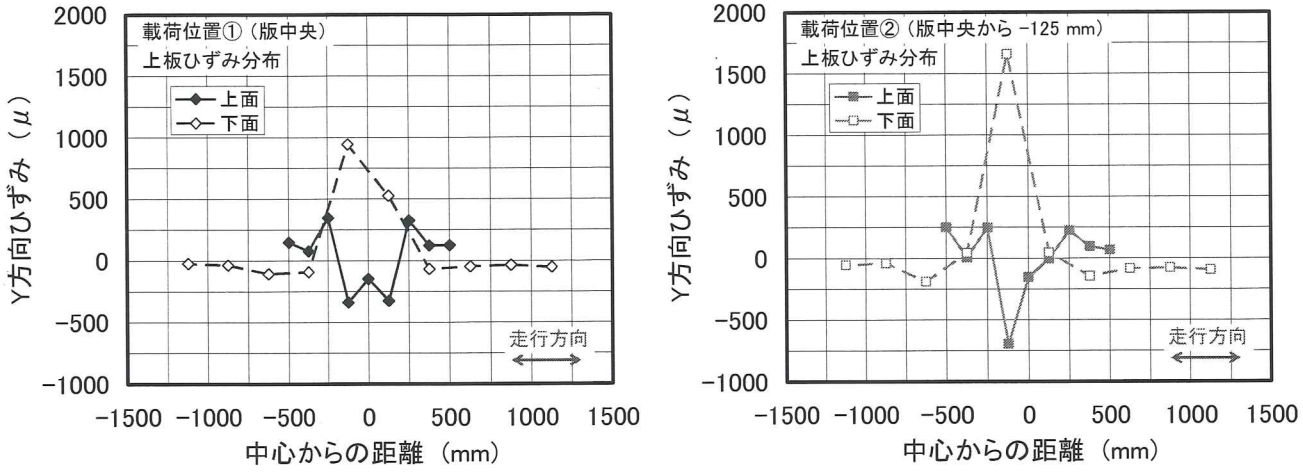
表-8.2.2　上板下面の単位荷重 100kN 当たり最大たわみ

荷重	P	100	kN	
等分布荷重	q	0.442	kN/mm	
支間	L	226	mm	
断面二次モーメント	I	901030	mm^4	
弾性係数	E	12.9	GPa	
最大たわみ	δ	0.26	mm	←両端固定，等分布載荷
最大たわみ	δ	2.07	mm	←単純支持，線載荷

注) 載荷幅直下の 500mm 幅のはりとして仮定

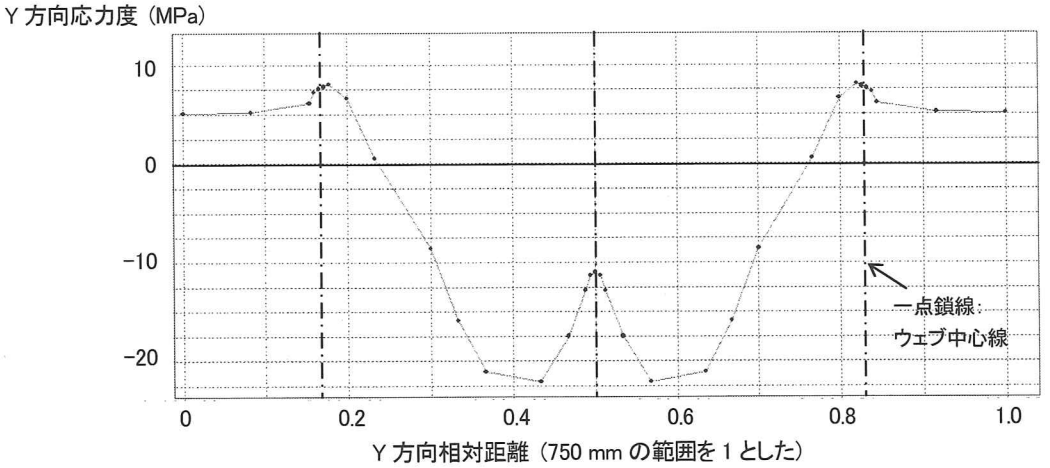
表-8.2.3　上板下面の単位荷重 100 kN 当たり Y 方向ひずみ

		支持条件	単純支持	単純支持	両端固定	両端固定
		載荷条件	線荷重	等分布荷重	線荷重	等分布荷重
荷重	P	kN	100	100	100	100
支間	L	mm	226	226	226	226
断面定数	Z	mm^3	66334	66334	66334	66334
弾性係数	E	GPa	12.9	12.9	12.9	12.9
Y 方向ひずみ	ε_y	μ	6603	3301	3301	1100

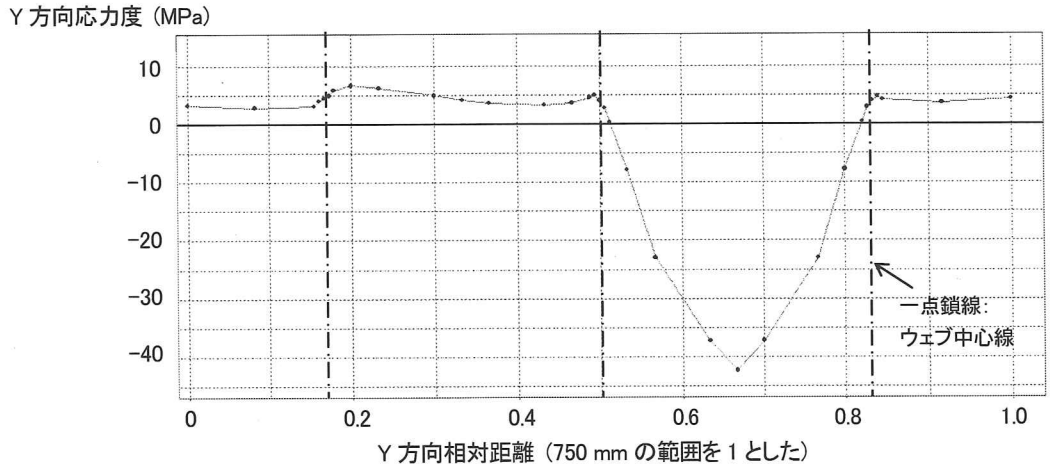


(a) 載荷位置①　　(b) 載荷位置②

図-8.2.3　100 kN 載荷時の上板上下面ひずみ (図-4.2.1 再掲)



(a) 載荷位置①



(b) 載荷位置②

図-8.2.4　事前検討の FEM から得られた載荷位置付近の上板上面，Y 方向応力度 (付録 1 より)

表-8.2.4　供試体上板の耐力 (載荷幅 500 mm の単純版として算定)

対象とする層	耐力計算			備　　考
1　F1000/90 曲げ	f_u	398	MPa	
	f_u/n	357	MPa	
	y	14.92	mm	
	Z	60404	mm^3	
	M_{max}	21537	kN･mm	
	L	226	mm	
	P_{max}	381	kN	線荷重とした場合
	P_{max}	675	kN	等分布荷重とした場合
2　F1000/0 曲げ	f_u	133	MPa	
	f_u/n	183	MPa	
	y	9.42	mm	
	Z	95684	mm^3	
	M_{max}	17464	kN･mm	
	L	226	mm	
	P_{max}	309	kN	線荷重とした場合
	P_{max}	547	kN	等分布荷重とした場合
3　F1000/90 曲げ	f_u	398	MPa	
	f_u/n	357	MPa	
	y	3.92	mm	
	Z	230048	mm^3	
	M_{max}	82022	kN･mm	
	L	226	mm	
	P_{max}	1452	kN	線荷重とした場合
	P_{max}	2569	kN	等分布荷重とした場合
4　SP250/uFl 90 曲げ	f_u	168	MPa	
	y	13.58	mm	
	Z	66334	mm^3	
	M_{max}	11144	kN･mm	
	L	226	mm	
	P_{max}	197	kN	線荷重とした場合
	P_{max}	349	kN	等分布荷重とした場合
4　SP250 層間せん断	v_u	30	MPa	
	S_{max}	180	kN	
	P_{max}	360	kN	線荷重とした場合
4　SP250 横せん断	v_u	30	MPa	推定値
	S_{max}	180	kN	
	P_{max}	180	kN	ウェブ直前に線荷重載荷した場合
1,3　F1000 横せん断	v_u	150	MPa	推定値
	S_{max}	315	kN	
	P_{max}	315	kN	ウェブ直前に線荷重載荷した場合
2　F1000 横せん断	v_u	30	MPa	推定値
	S_{max}	63	kN	
	P_{max}	63	kN	

8.3 繰返し載荷に伴う変位の推移

(1) 版中央変位の推移

図-8.3.1 に FRP 床版の階段載荷試験における床版中央変位(D3)の推移を示す。また比較のため，図-8.3.2 に，同様の載荷方法の下で見られた RC 床版の中央変位の推移を示す[8.1)]。平成 8 年版道路橋示方書に従って設計された RC 床版と比較すると， GFRP 床版は，従来から指摘されているように素材の弾性係数が低いことから，変位が著しく大きい傾向にあることが確認できる。しかし，除荷時の変位は，FRP 床版の方が RC 床版より明らかに小さいことがわかる。RC 床版の場合，床版下面のひび割れが格子状に発生，増加して，残留変位が徐々に増加するが，FRP 床版の場合は上板下面にひび割れが見られるものの，版全体のたわみに影響するような損傷は見られなかった。また，RC 床版(H8 道示)の場合，ひび割れの発達とともに損傷が進行して，約 26 万回に押し抜きせん断破壊が生じて終局に至ったが，FRP 床版は載荷治具の一部である鋼板が破断して試験を終了したが，FRP 床版の終局的な破壊には至っていなかった。約 260 kN(20 万回以降)に FRP 床版の変位の増加がやや急になっているのは，上板の F1000 と SP250 の間の接着層の付着切れや，パネル接合部付近の下面 F1000 の剥離拡大が起因していたと考えられる。

昭和 39 年版道路橋示方書に従った RC 床版の場合，平成 8 年版の場合と比べて床版厚が小さく，鉄筋量が少ないなどの理由により，疲労耐久性は著しく低いことが知られている(図-8.3.2)。FRP 床版の疲労耐久性は，昭和 39 年版に従った RC 床版と比較すると，著しく高いことがわかる。

(2) 上板下面変位の推移

図-8.3.3 に FRP 床版の階段載荷試験における上板下面変位(D9 の変位から D4 の変位を除した値)の推移を示す。変位は版全体の半分程度ではあるが，版全体が床版支間 2500 mm に対して 10 mm，上板が支間(ウェブ間距離)226 mm に対して 5 mm であることを考えると，輪荷重を直接受ける上板の負担が相当大きいことがわかる。特に変位計を設置した箇所の上板下面には 196 kN 走行載荷時に曲げひび割れが発生していたことから，その剛性低下による影響も含まれている。図-8.3.4 に一定荷重走行試験の結果も含めて，上板下面の残留変位の推移を示す。一定荷重走行試験中は上板下面の曲げひび割れが確認されず，残留変位はごく軽微であったが，階段載荷試験後，上板下面の曲げひび割れが見られ，残留変位の増加が急になったことがわかる。階段載荷試験後の解体調査より，上板角部のひび割れ(前掲図-7.1.4(a))，上板中央の曲げひび割れ(前掲図-7.1.8)，上板の F1000 と SP250 の間の接着層の付着切れ(前掲図-7.2.7(c)～(e))が確認された。残留変位の増加はこれらの損傷の発生，伸展によると考えられるが，発生時期は明確でない。

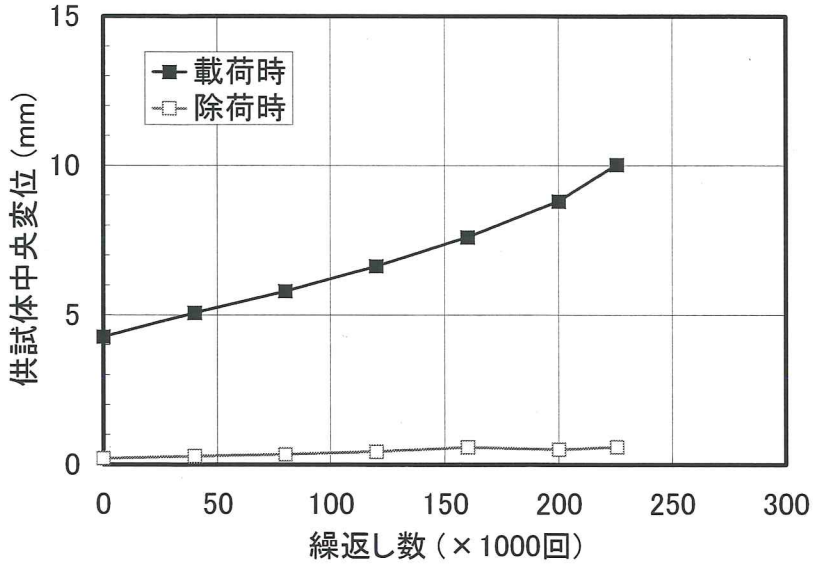
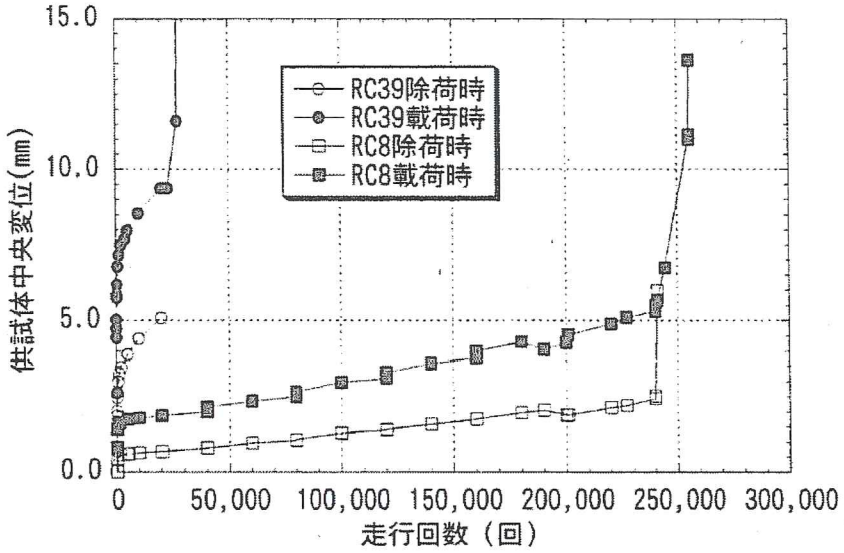


図-8.3.1　階段載荷時の床版中央変位の経時変化 (静的載荷試験，載荷位置①のデータ)



供試体名	供試体数（体）	適用示方書（年）	床版厚（cm）	鉄筋方向	呼び径	有効高さ（cm）	間隔（cm）
RC39	9	39	19	主鉄筋	D16 (D16)	15.7 (3)	15 (30)
				配力鉄筋	D13 (D10)	14.3 (4.3)	30 (30)
RC8	1	8	25	主鉄筋	D19 (D16)	21 (4)	15 (15)
				配力鉄筋	D16 (D13)	19 (5.6)	12.5 (12.5)

（　）：圧縮側の値

図-8.3.2　RC 床版の階段載荷時の床版中央変位の経時変化の一例 [8.1)]

(昭和 39 年版及び平成 8 年版道路橋示方書に従って設計された床版の輪荷重走行試験結果)

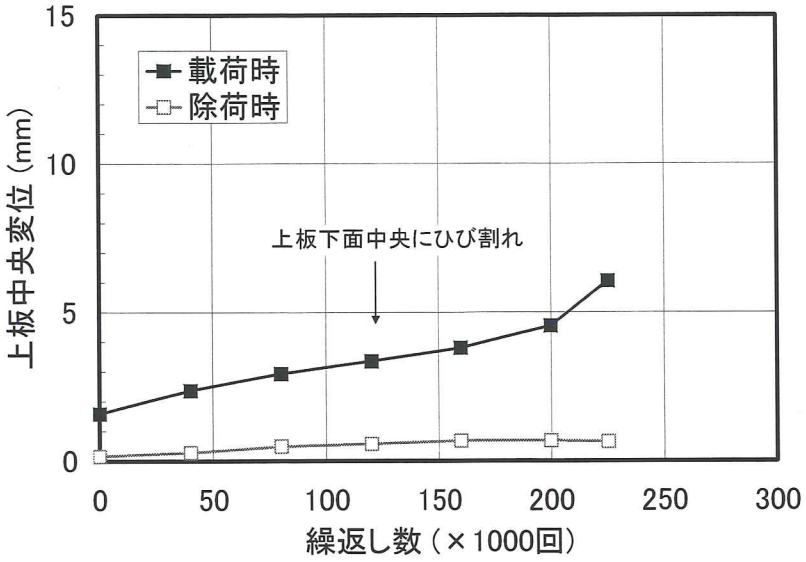


図-8.3.3　階段載荷時の上板下面変位の経時変化

(静的載荷試験，載荷位置②，局部変位は D9 の変位から D4 の変位を除した値)

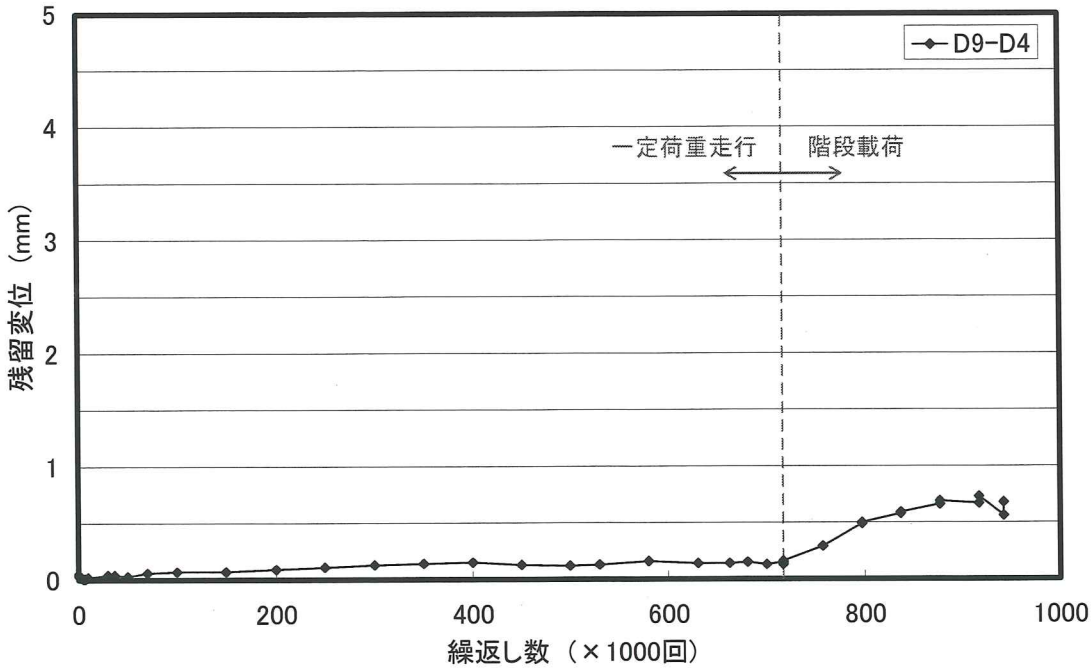


図-8.3.4　上板下面の残留変位の推移　(繰返し数は一定荷重走行時からの累積回数)

(静的載荷②，局部変位は D9 の変位から D4 の変位を除した値)

(図-6.2.1b 再掲)

8.4　上板下面の疲労

表-8.4.1 に，各セルにおける上板下面の Y 方向ひずみと繰返し数の関係を一覧で示す。また，それらの値から，等価換算繰返し数を算出した結果も示す。換算方法は式(1)のとおりである。

$$N_2 = (S_2 / S_1)^{1/m} \cdot N_1 \qquad (1)$$

ここに，S_1：実際の載荷応力レベル (各荷重での走行試験終了時のひずみ範囲とした)

S_2：等価換算する載荷応力レベル (各最終荷重時のひずみ範囲とした)

N_1：S_1 で行った実際の繰り返し数

N_2：等価換算繰返し数

m：S-N 線の傾き (ここでは，m＝ −0.13)

ここでは，各測定位置で測定不能となった段階での最終ひずみ範囲を基準値として，それまでの繰返し載荷の影響を換算した。その際，S-N 線の傾き-0.13 は，本共同研究において実施した SP250 素材(多くは人工的な表面疵を有するもの)の疲労試験結果から得られた以下に示すマット層表面ひずみの実測値と繰返し数の関係によることとした[8.2)]。

$$\Delta \varepsilon = 14800\, N_s^{-0.13} \qquad (2)$$

ここに，$\Delta \varepsilon$ ：ひずみ範囲（μ）

N_s：ひずみの監視により判別した表層の変状発生までの繰返し数

図-8.4.1 に，上板下面のひずみ範囲とひずみゲージが測定不能となるまでの等価換算繰返し数の関係を示す。図中，式(2)とその元データを併せて示す(前回報告書[8.2)]より)。素材の試験ではロービング層の 0° 方向に引張載荷した場合の結果であり，いずれも比較的早期にマット層にひび割れが見られたため，その表層ひび割れ発生に関する S-N 線を整理したものである。床版の上板下面の場合，曲げによるひずみの繰返しであるとともに，作用方向はロービング層に 90° 方向であるが，素材の結果と床版上板下面の S-N の関係は概ね同じであった。ロービング層に比べて方向性に鈍感なマット層のひび割れに着目したため，作用方向の影響が小さく，また表層表面で直接測定したひずみで整理したため，引張と曲げの差が出なかったと考えられる。ただし，セル7,10,12の上板下面のひび割れは角部のものを除いて目視では確認できていない(7 章及び表-8.4.1～2)。

マット層のひび割れは直ちに上板の破壊を意味するものではないが，上板の疲労設計を行う上での一つの指標になると考えられる。道路橋床版の厳しい荷重環境を考慮すれば，上板下面のマット層に疲労によるひび割れが生じないように上板の厚さや層構成を決めるのがよい。床版用の引抜成形 FRP で表面保護のためにたいてい設けられるマット層を対象とした，式(2)の S-N 線に基づく疲労照査は，繊維の方向や繊維の強度の影響を受けず，汎用性が高いと考えられる。

今回の供試体の場合，事前検討の FEM の結果を参考にして，箱断面の SP250 の上に F1000 を 3 層貼り付け，荷重直下の局部ひずみを大きく抑制したことが，疲労耐久性の改善に大きく貢献したものと推察される。

表-8.4.1　上板下面のひずみと等価換算繰返し数

測定箇所	荷重 (kN)	実際の繰返し数 (回)	ひずみ範囲 (μ)				最終荷重時のひずみ時の等価換算繰返し数 N2 (回)	備　考
			試験開始時	試験終了時	S1	S2		
I1Y (セル 3)	98	717000	1078	1264	1264	2512	3635	8500 回で測定不能 軽微な曲げひび割れあり
	157	8500	1781	2512	2512	2512	8500	
			-	-				
						Σ=	12135	
I2Y (セル 4)	98	717000	1129	1299	1299	3053	1004	76200 回で測定不能 曲げひび割れあり
	157	40000	2197	2387	2387	3053	6025	
	176	36200	2642	3053	3053	3053	36200	
			-	-				
						Σ=	43229	
I3Y (セル 5)	98	717000	1549	2115	2115	4382	2642	81656 回で測定不能 曲げに伴うせん断ひび割れあり
	157	40000	3247	3466	3466	4382	6586	
	176	40000	3772	3919	3919	4382	16944	
	196	1656	4309	4382	4382	4382	1656	
			-	-				
						Σ=	27828	
I4Y (セル 6)	98	717000	1395	1836	1836	3118	12178	8500 回で測定不能 曲げひび割れあり
	157	8500	2927	3118	3118	3118	8500	
			-	-				
						Σ=	20678	
I5Y (セル 7)	98	717000	1155	1189	1189	2526	2178	曲げひび割れなし
	157	40000	1944	2059	2059	2526	8311	
	176	40000	2216	2499	2499	2526	36911	
	196	40000	2788	2820	2820	2526	93403	
	216	40000	3109	2803	2803	2526	89190	
	235	40000	2702	2346	2346	2526	22649	
	255	25000	2387	2526	2526	2526	25000	
						Σ=	277642	

注)　m = -0.13

表-8.4.1　上板下面のひずみと等価換算繰返し数 (続き)

測定箇所	荷重 (kN)	実際の繰返し数	ひずみ範囲 (μ)				最終荷重時のひずみ時の等価換算繰返し数 N2 (回)	備　考
			試験開始時	試験終了時	S1	S2		
I6Y (セル 8)	98	18000	2245	2667	2667	2667	18000	18000 回以降測定不能 曲げひび割れあり
			-	-				
						Σ=	18000	
I7Y (セル 9)	98	717000	1498	1575	1575	3271	2594	68762 回で測定不能 曲げに伴うせん断ひび割れあり
	157	40000	2454	2747	2747	3271	10443	
	176	28762	2978	3271	3271	3271	28762	
			-	-				
						Σ=	41799	
I8Y (セル 10)	98	717000	1029	1286	1286	4382	58	120395 回で測定不能 曲げひび割れなし
	157	40000	2203	2627	2627	4382	781	
	176	40000	2955	3004	3004	4382	2190	
	196	40000	3409	3894	3894	4382	16130	
	216	395	4382	4382	4382	4382	395	
			-	-				
						Σ=	19554	
I9Y (セル 11)	98	717000	1628	1416	1416	4224	160	124788 回で測定不能 軽微な曲げひび割れあり
	157	40000	2319	2417	2417	4224	546	
	176	40000	2734	2820	2820	4224	1788	
	196	40000	3150	3614	3614	4224	12051	
	216	4788	3955	4224	4224	4224	4788	
			-	-				
						Σ=	19332	
I10Y (セル 12)	98	717000	746	649	649	908	54225	曲げひび割れなし
	157	40000	1020	954	954	908	58746	
	176	40000	1044	975	975	908	69457	
	196	40000	1065	874	874	908	29949	
	216	40000	913	836	836	908	21325	
	235	40000	879	803	803	908	15533	
	255	25000	818	908	908	908	25000	
						Σ=	274235	

注)　m＝-0.13

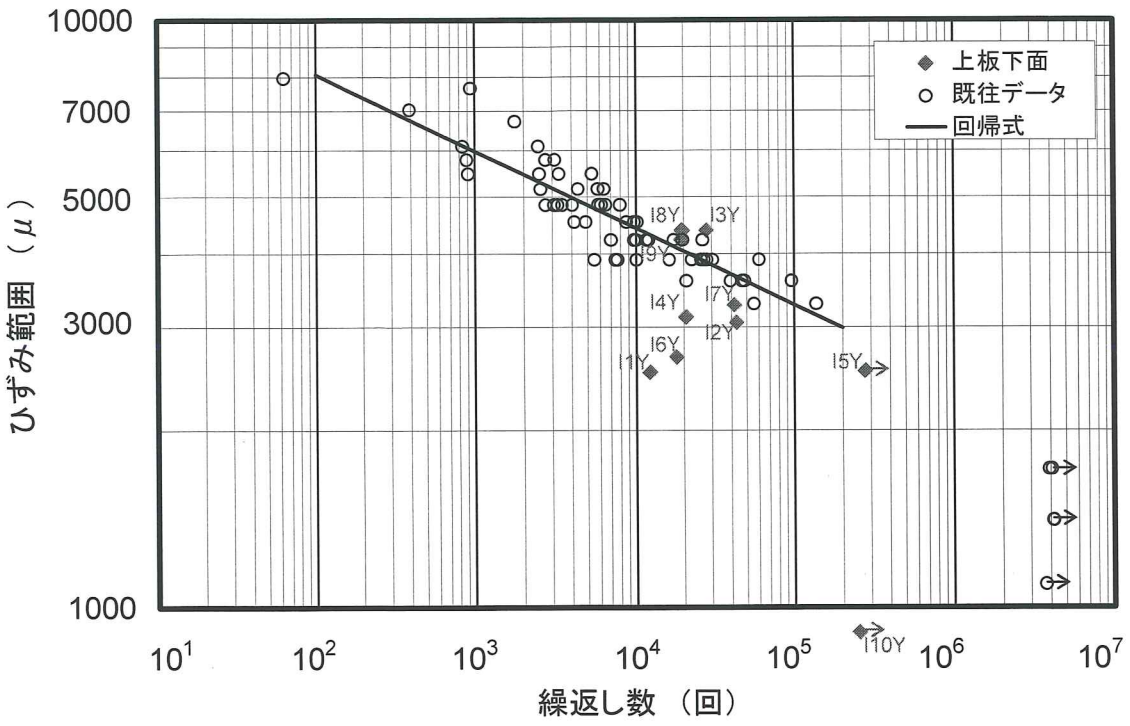


図-8.4.1　上板下面のひずみ範囲と等価換算繰返し数の関係

注)　回帰式：SP250 のマット層の S-N 線 [8.2)]

表-8.4.2　上板下面のひずみと等価換算繰返し数 (S-N データ)

測定位置	最終荷重時のひずみ S2	最終荷重時のひずみ時の等価換算繰返し数 N2 m = -0.13	ひび割れ状況
I1Y (セル 3)	2512	12135	軽微な曲げひび割れ
I2Y (セル 4)	3053	43229	曲げひび割れ
I3Y (セル 5)	4382	27828	曲げせん断ひび割れ
I4Y (セル 6)	3118	20678	曲げひび割れ
I5Y (セル 7)	2526	277642	角部のみ
I6Y (セル 8)	2667	18000	曲げひび割れ
I7Y (セル 9)	3271	41799	曲げせん断ひび割れ
I8Y (セル 10)	4382	19554	角部のみ
I9Y (セル 11)	4224	19332	軽微な曲げひび割れ
I10Y (セル 12)	908	274235	角部のみ

8.5 床版への適用性

(1) 力学的特性

SP250 のようにロービング層の両面にマット層，クロス層といった表層が存在する引抜成形 GFRP 材は，静的試験，疲労試験ともに表層とロービング層で 2 段階の破断挙動を示す場合があり[8.2]，床版のような載荷状況の下では脆性的な破壊を起こし難い素材であるかもしれない。

一般に FRP は，作用力の方向と繊維の方向の関係によって，引張，圧縮，曲げの強度や弾性係数などの強度特性が顕著に異なる。繊維が通っている断面の強度特性は，繊維の含有率により異なる。一方，繊維の通っていない断面の引張強度，せん断強度は樹脂単体の引張強度特性にほとんど依存しており，かつ繊維の存在による不均一性，ボイドの増加，繊維との付着力のばらつきなどから一般に樹脂単体よりも低い傾向にある。

版部材は二方向の曲げ，せん断が加わり，かつ輪荷重が直接載荷されることにより板厚方向にも大きな力が加わることから，GFRP 材のガラス繊維の高強度特性を有効に使える範囲が限定され，母材の樹脂の強度特性を十分に意識した設計法を確立する必要がある。版の下縁は，マット層とした場合にいずれの方向にもひび割れやすいし，高強度のロービング層を配置してもいずれかの方向に優位である一方で必ず不利な方向が生じる。いずれの場合においても版下面または上板下面の表層ひび割れは避けられない部分が生じるので，ひび割れの分類(原因，幅，深さ)とそれぞれのひび割れに対する考え方を整理しておく必要がある。

この素材の持つ異方性は鋼部材と大きく異なる点であるので，部材設計において剛性の違いとともに特に注意する必要がある。

(2) 設計において配慮すべき事項

以上の点及び今回の試験結果を踏まえて，総 FRP 床版の設計において配慮すべき事項を次に示す。

1) 上板の厚さ及び層構成は，輪荷重による局部曲げ疲労に対して設計する必要がある。その際，上板下面のマット層のひび割れが早期に発生する可能性が高いので，このひび割れに対する設計上の考え方(例えば供用中の発生を許容するか否か)を整理して，それに応じた S-N 線を用いる必要がある。また，曲げに伴うせん断ひび割れの発生は樹脂マトリクスの強度にほとんど依存するので，現時点では層厚を一定以上に確保することで改善するしかないと考えられる。曲げに伴う角部内部のひび割れは，箱断面内側にハンチ(またはフィレット)を設けることである程度改善できると考えられる(負曲げに対する断面増，アーチ作用による引張ひずみ緩和，応力集中緩和など)。このひび割れが発生した場合，上板は単純版の状態となるので，設計上は，あらかじめ単純支持と仮定して設計しておくのがよい。
2) 今回の供試体の場合，ウェブが厚かったため，座屈は見られなかったが，断面合理化のために薄くする場合には，座屈の照査が必要である。また，箱断面を接合する場合に界面割れが生じやすいので[8.3]，既往の研究[8.4]や今回の床版供試体のように，箱断面接合部の上下に GFRP 板を設けることが重要である。既往の研究では，箱断面を接合するために床版直角方向に棒部材を貫通させて固定する方法が取られていたものがあるが[8.4]，この場合に貫通孔に起因したせん断破壊について疲労も含めた検討を行っておく必要がある。
3) 現場接合部(今回の供試体ではパネル間接合部)は，版厚の不連続や接着不良などにより構造上の弱点となりやすい。これらの改善が難しい場合は，現場接合部を想定した断面で上板の厚さ，層構成を検討してお

く必要がある。

4) 今回の供試体のように箱断面部材の上下に箱断面の軸直角方向の成形引抜 GFRP 板を設置することは，版として構成する場合に有効であった。しかし，接着層に空隙が入らないようにするのは容易でないので，接着方法の改善とともに，この点に配慮した疲労照査方法を検討する必要がある。

5) 引抜成形でクロス層を設ける場合，箱断面の一辺に必ず繊維の継目がある(前掲図-7.1.8(b)，7.1.9(c))。クロス層の繊維の継目は，疲労によるひび割れの発生，伸展を促進する可能性が高いので，上板に位置しないように配慮する必要がある。

6) 路面保護も含めた FRP 表面保護，路面からの漏水防止などの水に対する配慮，組み立て時の温度変化に対する配慮，ハンチの施工などによる主桁の不陸調整，防護柵，照明柱，伸縮装置などの付属物の固定方法など，FRP の道路橋への適用に関してさらに数多くの検討課題がある(2 章 2.1)。

(3) 施工性

1) プレストレストコンクリートのための FRP 緊張材の場合，高い応力下で使用されるために施工時に疵が入らないよう鋼材よりも慎重な施工が要求される [8.5]。しかし，前回報告書 [8.2]の表面疵の試験結果より，床版に用いる引抜成形 GFRP 材(SP250 のように表層を有するもの)は，鋼材と同程度の取り扱いでよいと考えられる。ただし，表面疵が表層の厚さを超えている場合には，強度特性の低下を招くので適切な処置が必要である。

2) ハンドレイアップや接着などの手作業は断面形状や強度特性のばらつきを大きくする傾向にある。接合部の寸法精度は，組み立ての効率に大きな影響を及ぼす。床版供試体の製作においては，接着剤の量の影響によって上面に 1 mm 程度の差が生じた。また，GFRP 材を数ヶ月にわたって保管する場合に，クリープ変形によるそりが発生しないように保管方法に配慮する必要がある。

3) 切断面の繊維の扱いや切断時の繊維飛散防止などについて，歩行者や作業員の安全管理に関する配慮が必要である。

4) 施工現場では，仮受けなどの架設用部材として FRP 材を用いた場合，鋼材との材料特性の相違を十分に把握していないと施工時の安全性に影響を与える可能性があるので，定められた用途以外に利用しない等の注意が必要である。

(4) 覆工板としての利用可能性

鋼製の覆工板は各種建設工事の仮設材として広く利用されている。一般に流通しているものは，1m×2m または 1m×3m の面積のものである。入手方法は買取，リースともに普及しており，リースの場合は繰返し利用される場合がある。

覆工板に成形引抜 GFRP 材を適用する場合，まとまった量を工場製作する点で，生産，供給が比較的適応しやすいと考えられる。現時点では，鋼製覆工板の市場価格が低くされていることもあって，GFRP の適用が価格的に厳しい状況にあるので，軽量である点を活かした利用普及を検討する必要がある。実際に適用する場合には，特に上記(3)の施工性の 3)や 4)の点において注意が必要であり，材料特性を現場によく周知しておく必要がある。

９．まとめ

引抜成形 GFRP のみで構成された総 FRP 床版の実物大供試体を作成して，輪荷重走行試験を実施した。主な結果を以下に記す。

1) 総 FRP 床版供試体は 100 kN の輪荷重を約 70 万回走行させても特段の変状は見られなかった。既往の研究や予備検討の結果に基づき，箱断面 GFRP 材(SP250)の上下に GFRP 板(F1000)を貼り付けたことにより，荷重直下の局部ひずみを抑制するとともに，版全体の剛性を大きくしたことが疲労耐久性を確保するのに有効であったと考えられる。

2) 100 kN，70 万回の一定荷重走行試験の後，RC 床版の疲労耐久性を評価するために用いられている階段載荷試験を 255 kN まで行ったが，版全体としては，残留変位が比較的小さく顕著な耐久性の低下は見られなかった。その後解体して断面観察した結果，上板に局部曲げに伴う曲げひび割れ，せん断ひび割れ，角部内部のひび割れなどが発生していた。また，箱断面の上下に設けられた GFRP 板の接着層の剥離が広範囲に見られた。

3) 階段載荷試験で最も厳しい損傷を受けた上板の局部曲げ疲労について，素材の疲労試験で得られたマット層の S-N 線に基づき，累積損傷被害則の適用性を検討し，概ね同被害則が適用できることを確認した。この結果より，輪荷重による局部的な曲げ変形が生じる上板の疲労設計を行う上で基本となる S-N 線(内面表面にマット層がある場合)と疲労耐久性を確保するためのひずみレベルの目安を得た。

4) 供試体製作や輪荷重走行試験を通じて得られた経験を中心に，総 FRP 床版の設計，施工で配慮すべき事項や課題をまとめた。

参考文献

[1 章]

1.1) Virmani, Y.P. and Clemena, G.G.: Corrosion Protection – Concrete Bridges, No. FHWA-RD-98-088, September 1998

1.2) McDonald, D.B., Pfeifer, D.W. and Sherman, M.R.: Corrosion evaluation of epoxy-coated, metallic-clad and solid metallic reinforcing bars in concrete, No. FHWA-RD-98-153, December 1998

1.3) Clemena, G.G. and Virmani, Y.P.: Comparing the chloride resistances of reinforcing bars, Concrete International, pp.39-49, November 2004

1.4) O'Connor, J.S. and Hooks, J.M.: U.S.A.'s experience using fiber reinforced polymer (FRP) composite bridge decks to extend bridge service life, Proceedings of the 19th U.S.-Japan Bridge Engineering Workshop, Technical Memorandum of PWRI No. 3920, pp.237-248, 2003

1.5) 国広哲男：道路橋床版の問題点，橋梁と基礎，pp.1-5，1968.7

1.6) 西川和廣，村越潤，山本悟司，杉山純：活荷重による橋梁上部構造の損傷と対策，土木技術資料，34-8，pp.58-65，1992.8

1.7) コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究―コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査―，土木研究所資料第 3811 号，2001.3

1.8) FRP 橋梁―技術とその展望―，構造工学シリーズ 14，土木学会，2004.1

1.9) Hayes, M.D., Ohanehi, D., Lesko, J.J., Cousins, T.E. and Witcher, D.: Performance of tube and plate fiberglass composite bridge deck, Journal of Composites for Construction, ASCE, 4-2, pp.48-55, 2000

1.10) 繊維強化プラスチックの土木構造材料への適用に関する共同研究報告書(II)，第 252 号，建設省土木研究所，(社)強化プラスチック協会ほか，2000.12

1.11) 前田幸雄，松井繁之：輪荷重移動装置による道路橋ＲＣ床版の疲労に関する研究，第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.221-224，1984

1.12) 道路橋床版の輪荷重走行試験機における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その 1)－標準試験方法および第 1 回試験報告－，土木研究所共同研究報告書第 221 号，1999.3

1.13) 新井恵一，村越潤，大石哲也：FRP を主材料とした床版が橋梁全体の工費に与える影響について，土木学会第 58 回年講概要集，2003.9

1.14) 新材料の土木構造物への適用に関する研究－アルミニウム合金と繊維強化プラスチックの道路橋への適用に関する調査・分析－，土木研究所資料第 3888 号，2004.2

1.15) 村越潤，新井恵一，長屋優子：FRP 部材の接合部の強度特性に関する基礎検討，土木学会第 59 回年講概要集，2004.9

1.16) FRP を用いた橋梁の設計技術に関する共同研究報告書－表面疵を有する引抜成形 GFRP 厚板の静的及び疲労強度特性－，土木研究所共同研究報告書第 341 号，2006.4

[2 章]

2.1) Reising, R.M.W., Shahrooz, B.M., Hunt, V.J., Neumann, A.R., Helmicki, A.J. and Hastak, M.: Close look at construction issues and performance of four fiber-reinforced polymer composite bridge decks, Journal of Composites for Construction, ASCE, 8-1, pp.33-42, 2004

2.2) 前掲 1.4)と同じ

2.3) Nagaraj, V. and Gangarao, H.V.S.: Characterization of GFRP pultruded box beams under static and fatigue loads, SAMPE Q (Soc. Adv. Mater. Process Eng. Quarterly), 24-4, pp. 3-9, July 1993

2.4) 前掲 1.9)と同じ

2.5) Coogler, K., Harries, K.A., Wan, B., Rizos, D.C. and Petrou, M.F.: Critical evaluation of strain measurements in grass fiber-reinforced polymer bridge decks, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 10-6, pp.704-712, 2005

2.6) Zhou, A., Coleman, J.T., Temeles, A.B., Lesko, J.J. and Cousins, T.E.: Laboratory and field performance of cellular fiber-reinforced polymer composite bridge deck systems, Journal of Composites for Construction, ASCE, 9-5, pp.458-467, 2005

[3 章]

3.1) 前掲 1.14)と同じ

3.2) 前掲 1.15)と同じ

[6 章]

6.1) 前掲 1.16)と同じ

[7 章]

7.1) 前掲 1.16)と同じ

[8 章]

8.1) 内田賢一，西川和廣：既設道路橋床版の疲労耐久性に関する検討，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，(社)土木学会，pp.37-42，1998.11

8.2) 前掲 1.16)と同じ

8.3) 前掲 1.15)と同じ

8.4) 例えば，前掲 1.9)

8.5) 総合技術開発プロジェクト，建設事業への新素材・新材料利用技術の開発－FRP 緊張材を用いたプレストレストコンクリート道路橋の設計・施工指針(案)－，建設省土木研究所共同研究報告書第 99 号，2004.3

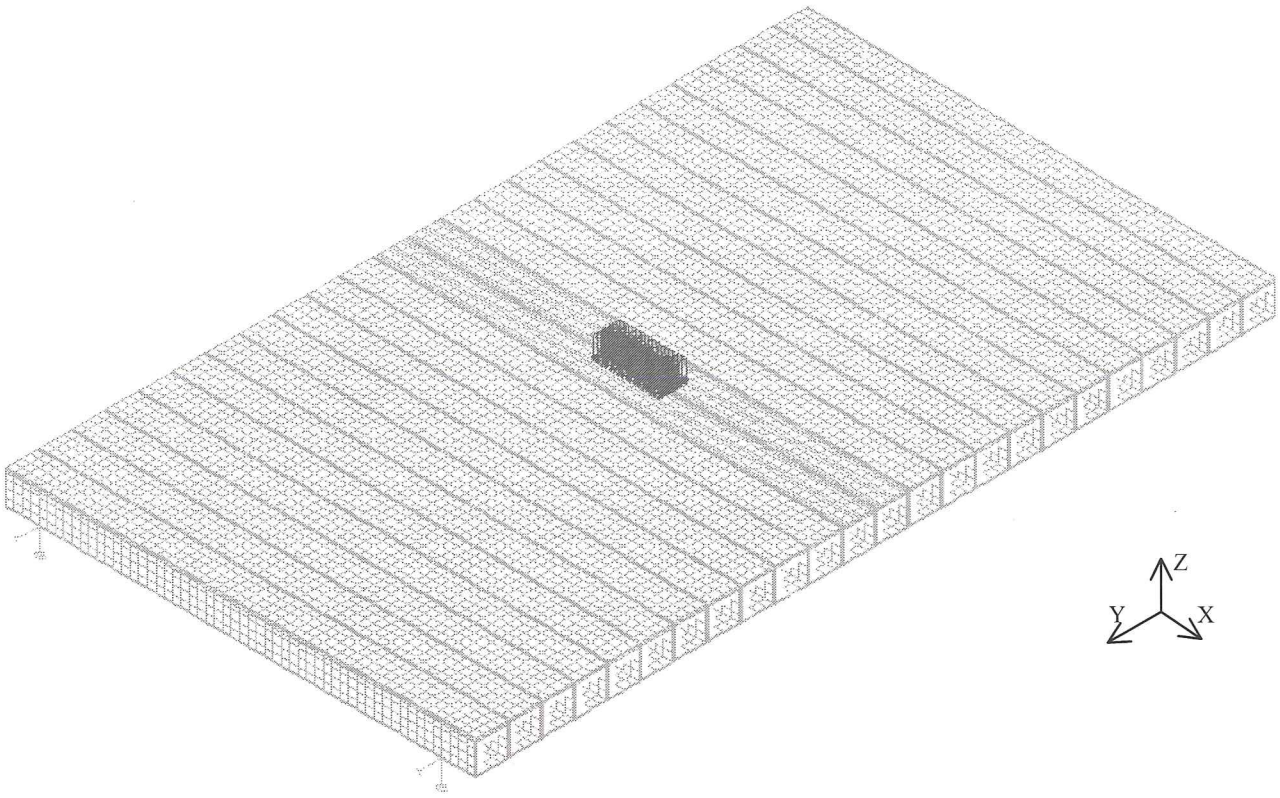
付　　録

付録１．FEMによる事前検討

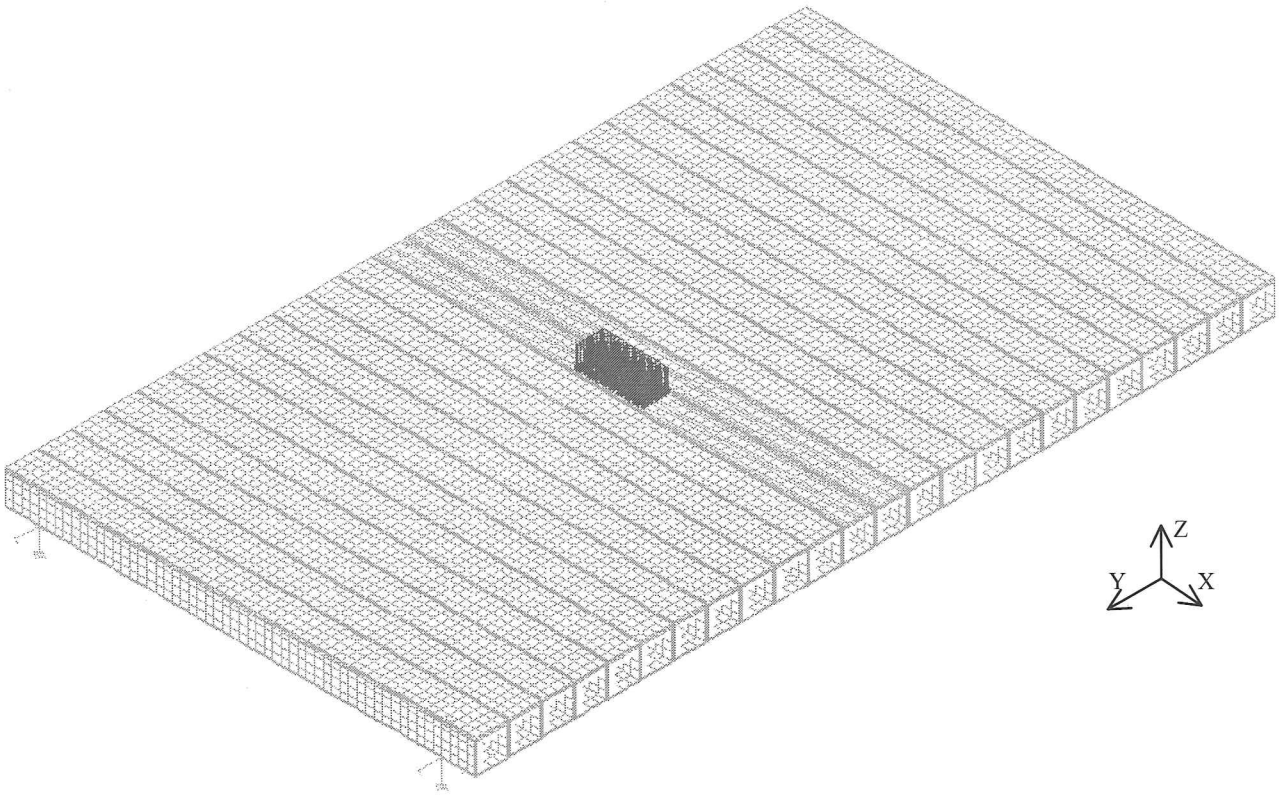
１．検討概要

FRP 床版の供試体を設計する上での参考とするため，三次元ソリッド要素を用いた FEM 解析により弾性挙動の概略を把握することとした。供試体の形状寸法は，床版支間 3 m×長さ 6 m×床版厚 250 mm とした。付図-1.1～1.2 にメッシュ図と載荷位置を示す。載荷位置はウェブ直上に載荷した載荷位置①とウェブ間に載荷した載荷位置②の 2 ケースとした。載荷面積は T 荷重と同様に 500 mm×200 mm とした。

付表-1.1，1.2 に解析に用いた材料諸元及び 1 セル当りの断面諸元を示す。断面諸元は二次元シェル要素による予備計算により，輪荷重 100 kN，衝撃係数 0.4，安全率約 3，版のたわみ許容値 1/600 とした場合に，各部の強度(衝撃考慮)，たわみ(衝撃考慮しない)が許容値以内となるようにした。事前検討の段階では，セルの各部の板厚を調整することとして，上下に F1000 等の板を張り合わせることは想定していなかった。

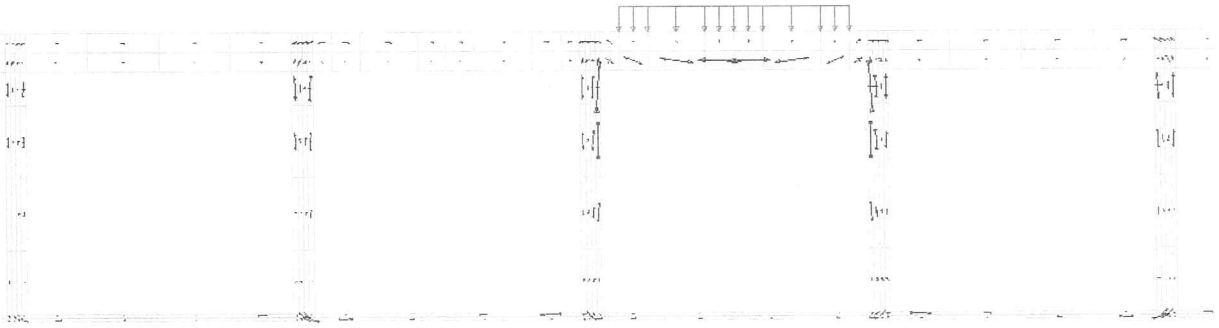


(a)　載荷位置①



(b)　載荷位置②

付図-1.1　FEM モデルと載荷位置



付図-1.2　断面のメッシュ (載荷位置②の主応力図の例)

付表-1.1　FEM 解析に用いた材料諸元

	単位	軸方向 (0°)	軸直角方向 (90°)
引張強さ	MPa	450	147
曲げ強さ	〃	413	281
圧縮強さ	〃	430	182
せん断強さ	〃	106	
層間せん断強さ	〃	38.4	24.6
引張弾性係数	GPa	23.5	10.1
曲げ弾性係数	〃	11.9	11.4
圧縮弾性係数	〃	30.0	16.0
せん断弾性係数	〃	5.8	
ポアソン比	—	0.24	
単位体積重量	kN/m^3	19.0	

注 1) せん断強さは面内方向の値を示す。
注 2) 弾性係数は 0°，90° ともに引張と圧縮の平均値をそれぞれ用いた。
注 3) 板厚方向の弾性係数は、部材軸直角方向と同等であると仮定する。

付表-1.2　FEM 解析に用いた断面諸元(1 セル当り)

セル幅	250 mm
セル高さ	250 mm
上板厚	33 mm
片側ウェブ厚	9 mm
下板厚	7 mm

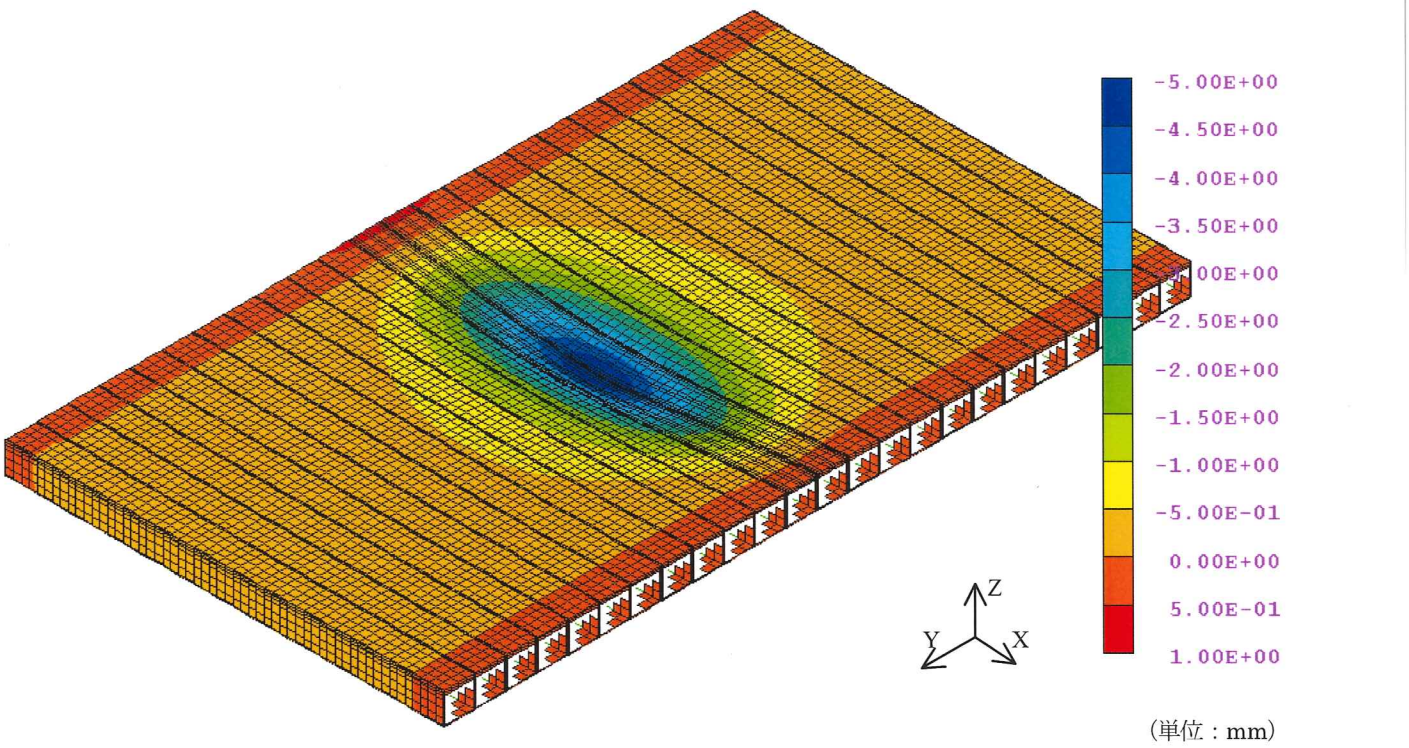
注) セル幅，セル高さはセルの外形寸法を示す。

2．計算結果

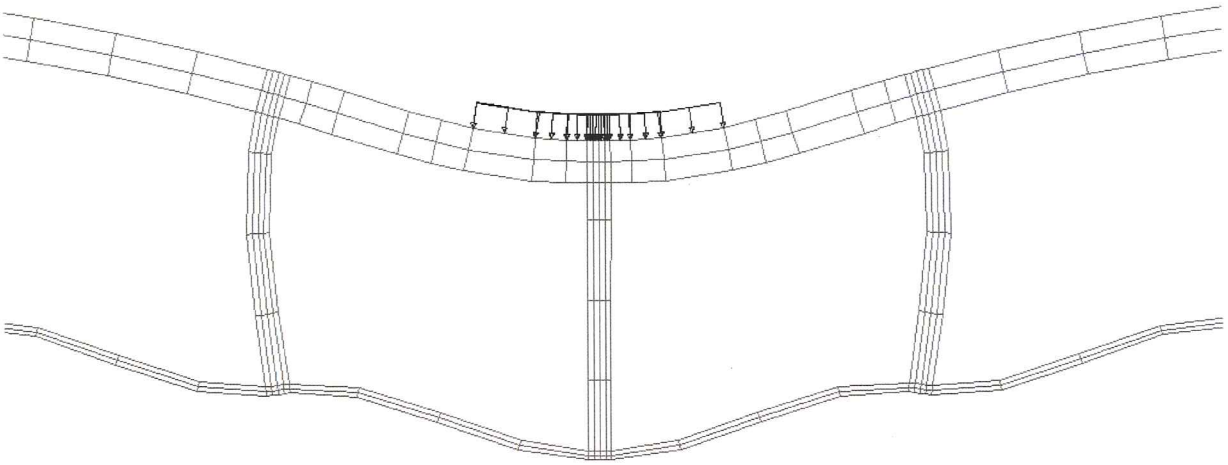
付図-2.1 に載荷位置①における床版上面のたわみ分布図を示す。

付図-2.2～2.4 に，載荷位置①について載荷位置付近の変形モード及び X 方向応力分布を示す。

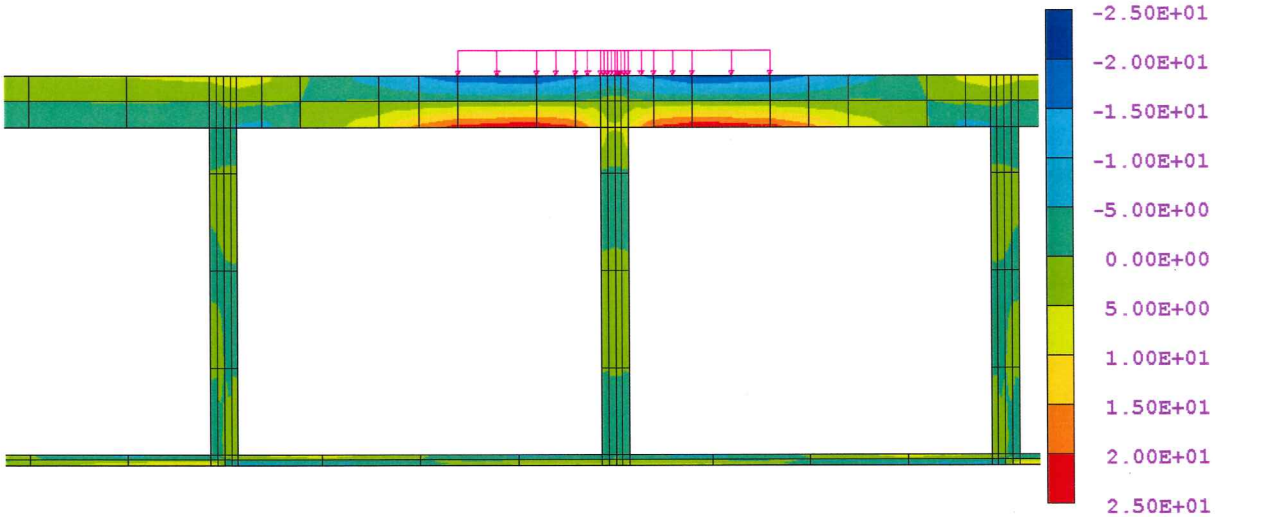
付図-2.5～2.7 に，載荷位置②について載荷位置付近の変形モード及び X 方向応力分布を示す。



付図-2.1　載荷位置①における上面たわみ分布図

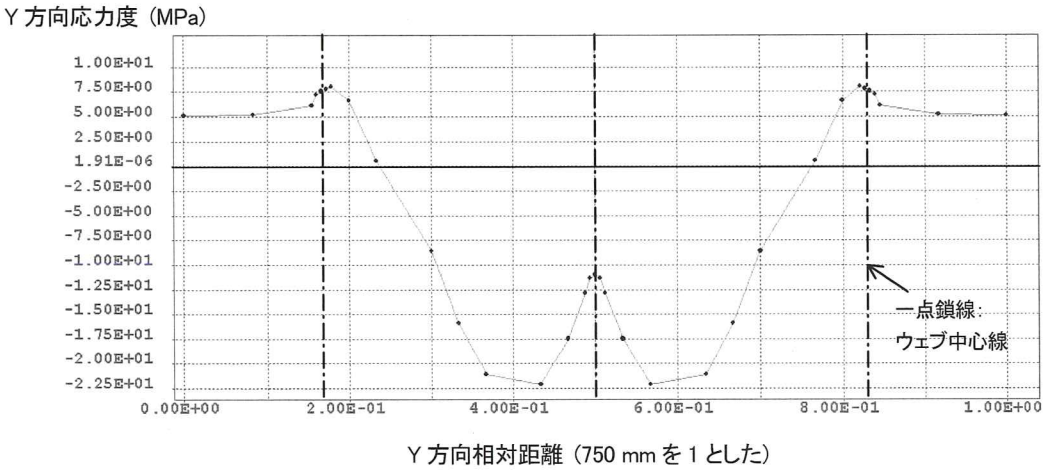


付図-2.2　載荷位置付近の変形モード (載荷位置①)

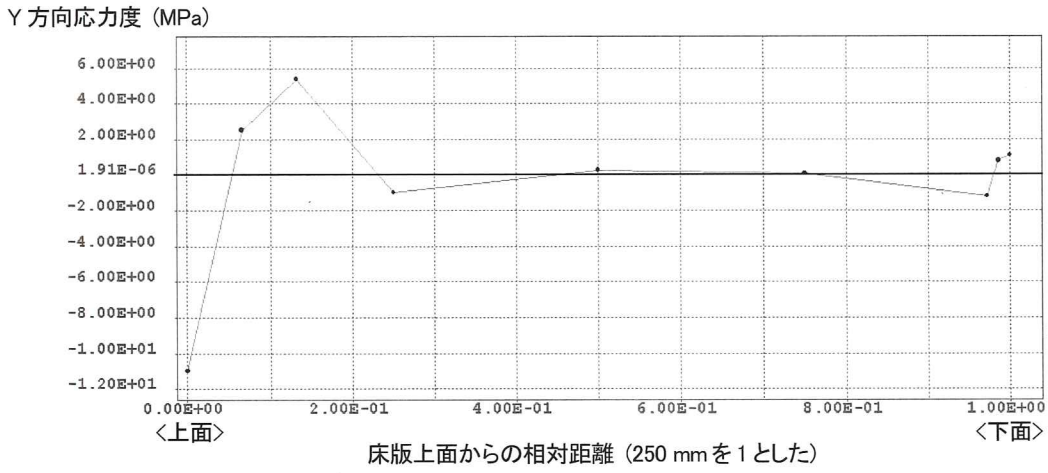


（引張：＋，圧縮－，単位：MPa）

付図-2.3　載荷位置付近の走行方向(Y 方向)応力分布 (載荷位置①)

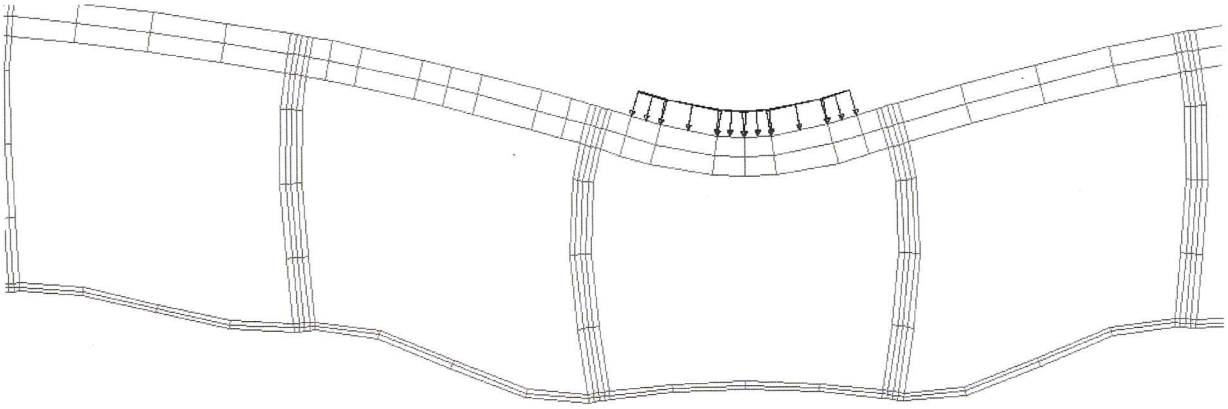


(a)　上板上面

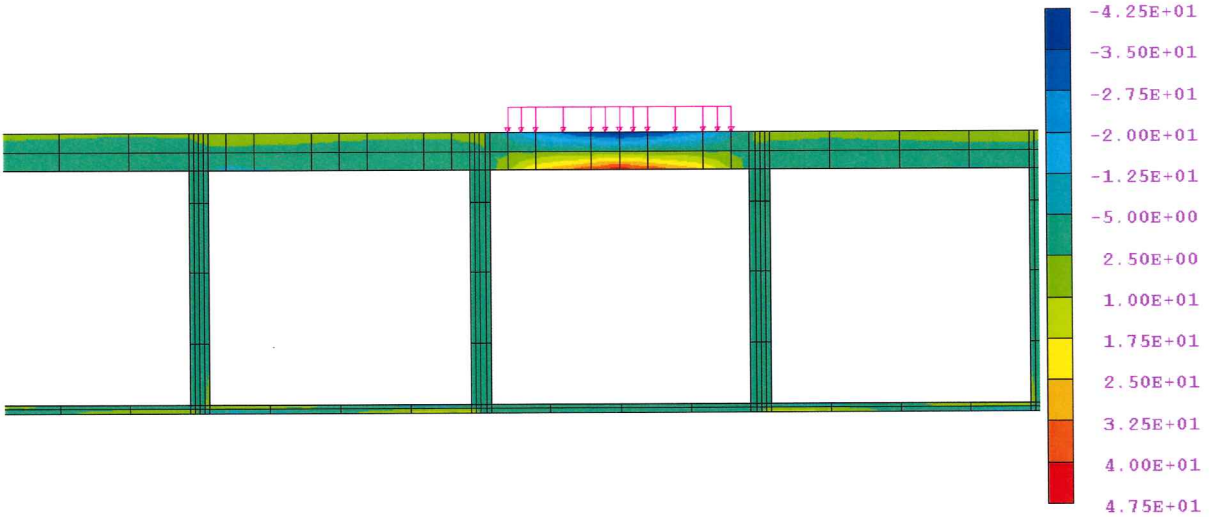


(c)　ウェブ (載荷点直下における SP250 間の接着面の開き方向応力度)

付図-2.4　載荷位置付近の Y 方向応力度 (載荷位置①)

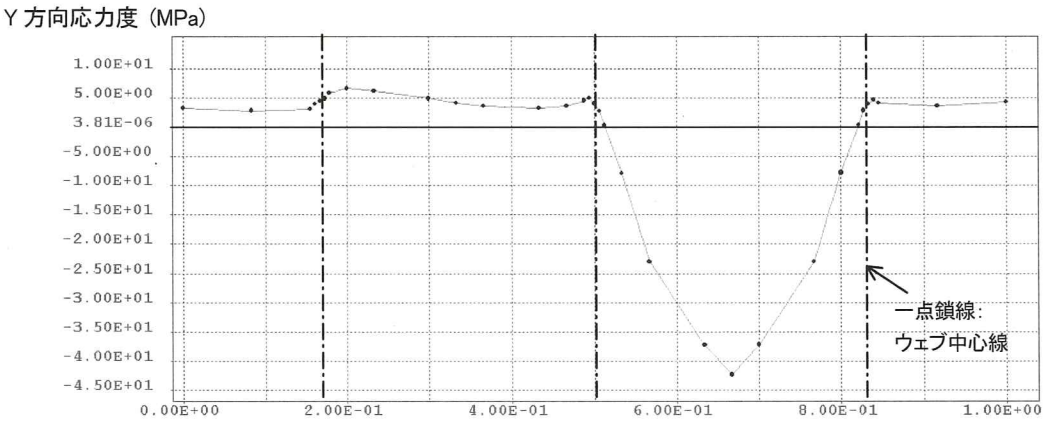


付図-2.5　載荷位置付近の変形モード (載荷位置②)

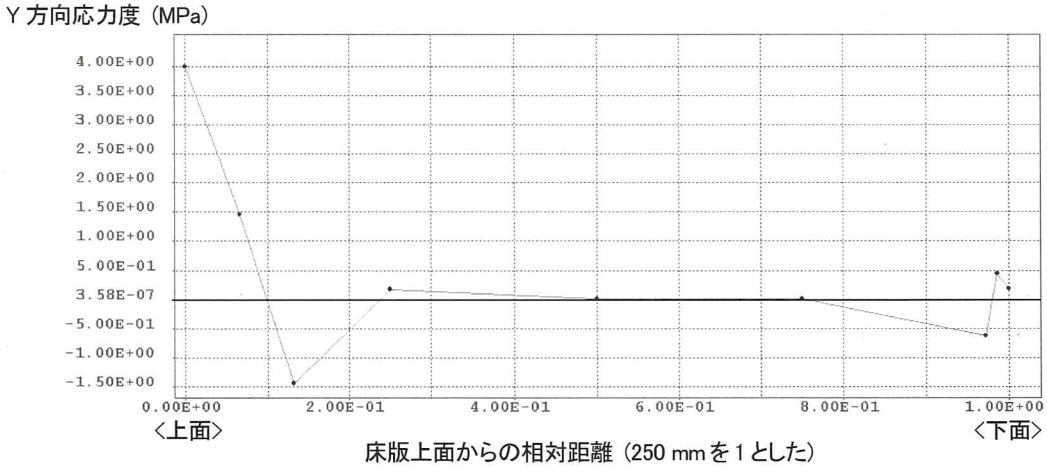


（引張：＋，圧縮－，単位：MPa）

付図-2.6　載荷位置付近の走行方向(Y 方向)応力分布 (載荷位置②)



(a)　上板上面



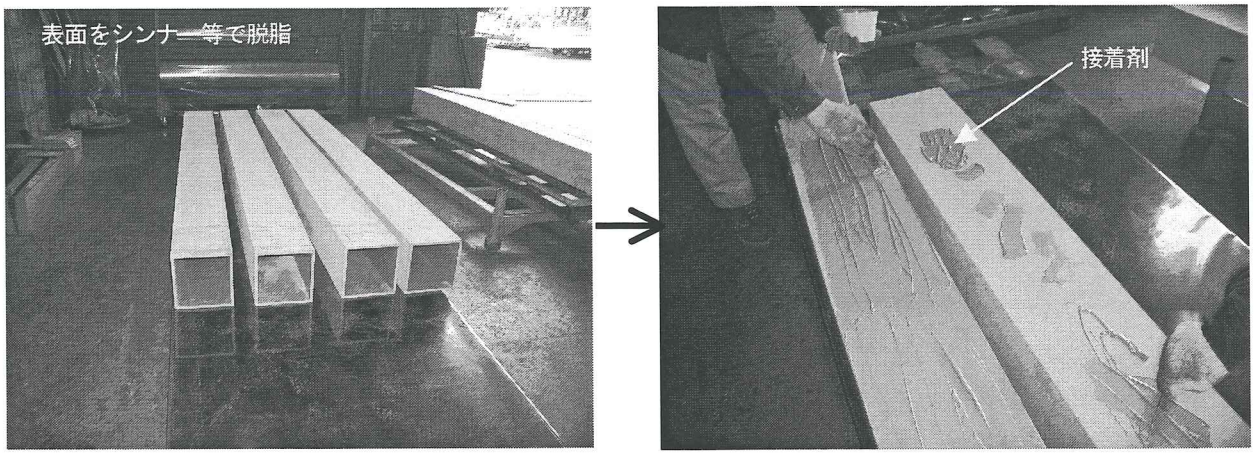
(b)　ウェブ(載荷点直下における SP250 間の接着面の開き方向応力度)

付図-2.7　載荷位置付近の Y 方向応力度 (載荷位置②)

付録２．供試体の組立て工程

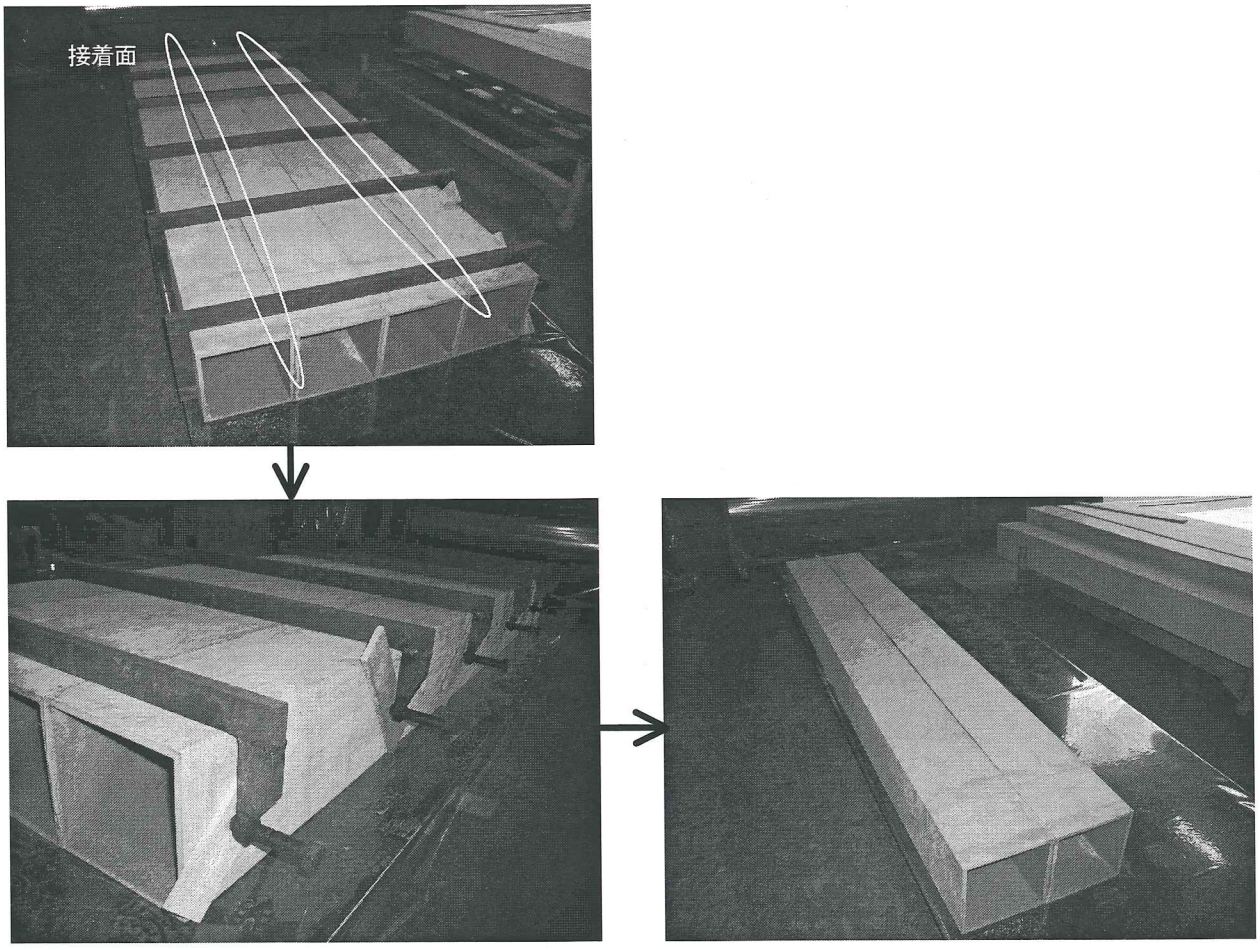
１．角パイプ(SP250)の接着

・サンディング済みの素材を脱脂 → 接着面に接着剤を塗る → 貼付け



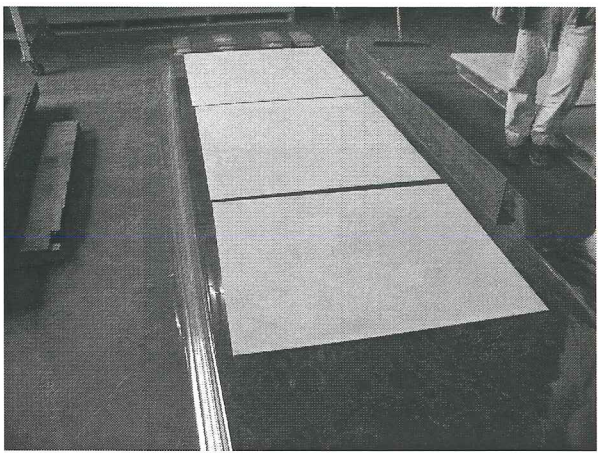
※重量の関係から２本ずつ接着した。(2 本で約 120 kg)

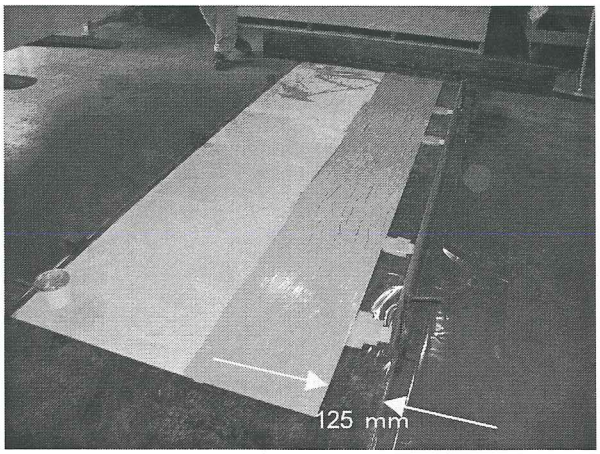
・固定 → 硬化 → ２本接着ものが完成



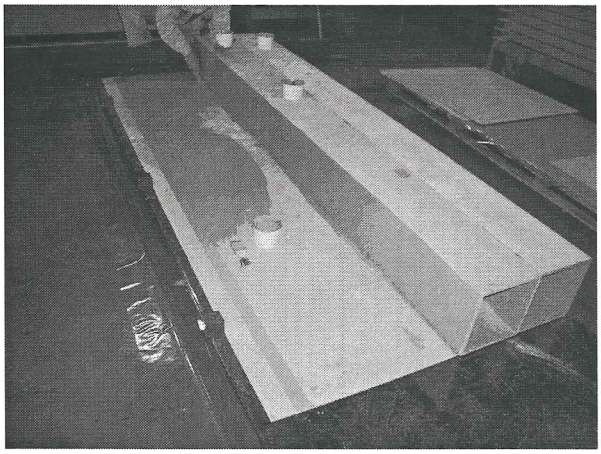
2．角パイプと平板の接着

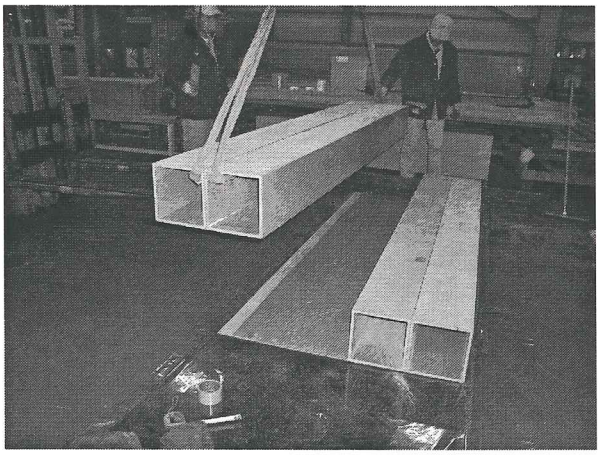
・下側の平板(F1000)を用意 → 125mm オフセット → 角パイプ(SP250)2 本分の所に接着剤を塗る。



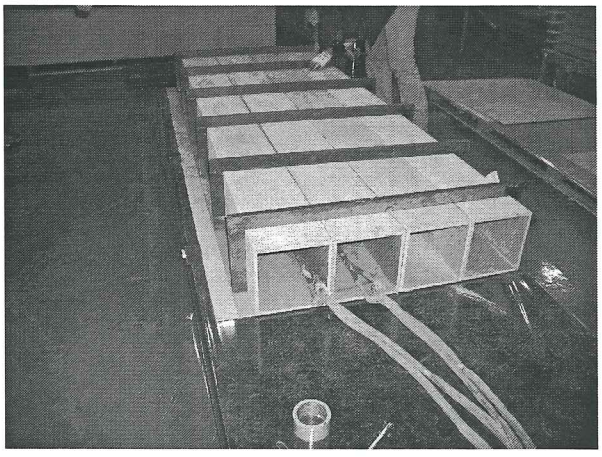


・角パイプ(SP250)を接着する(あらかじめ接着しておいた 2 本) → さらに角パイプ 2 本を接着(計 4 本)

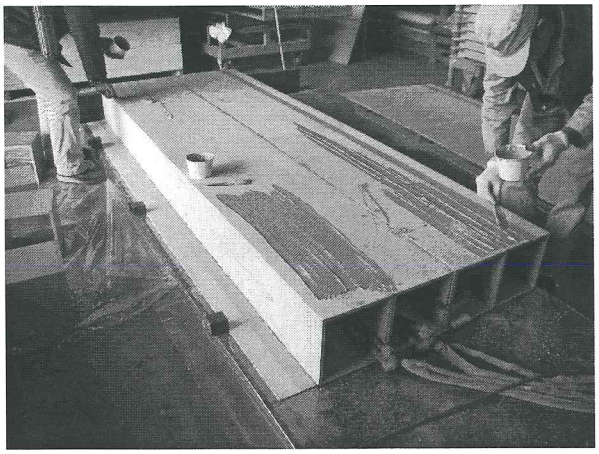


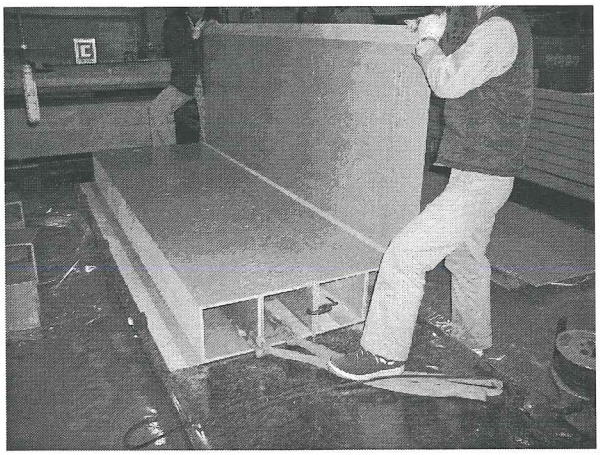


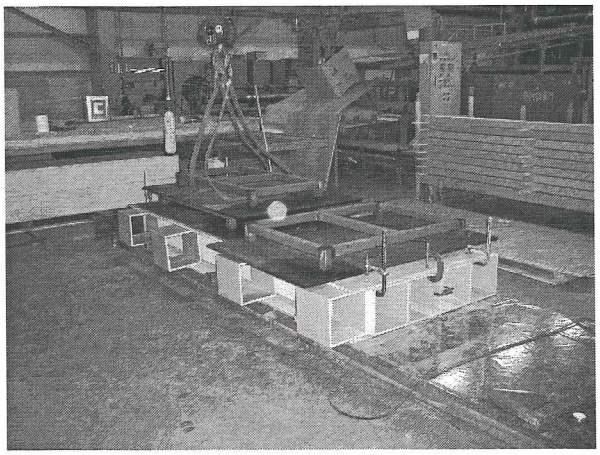
・角パイプ(SP250)同士を固定する。　→　硬化



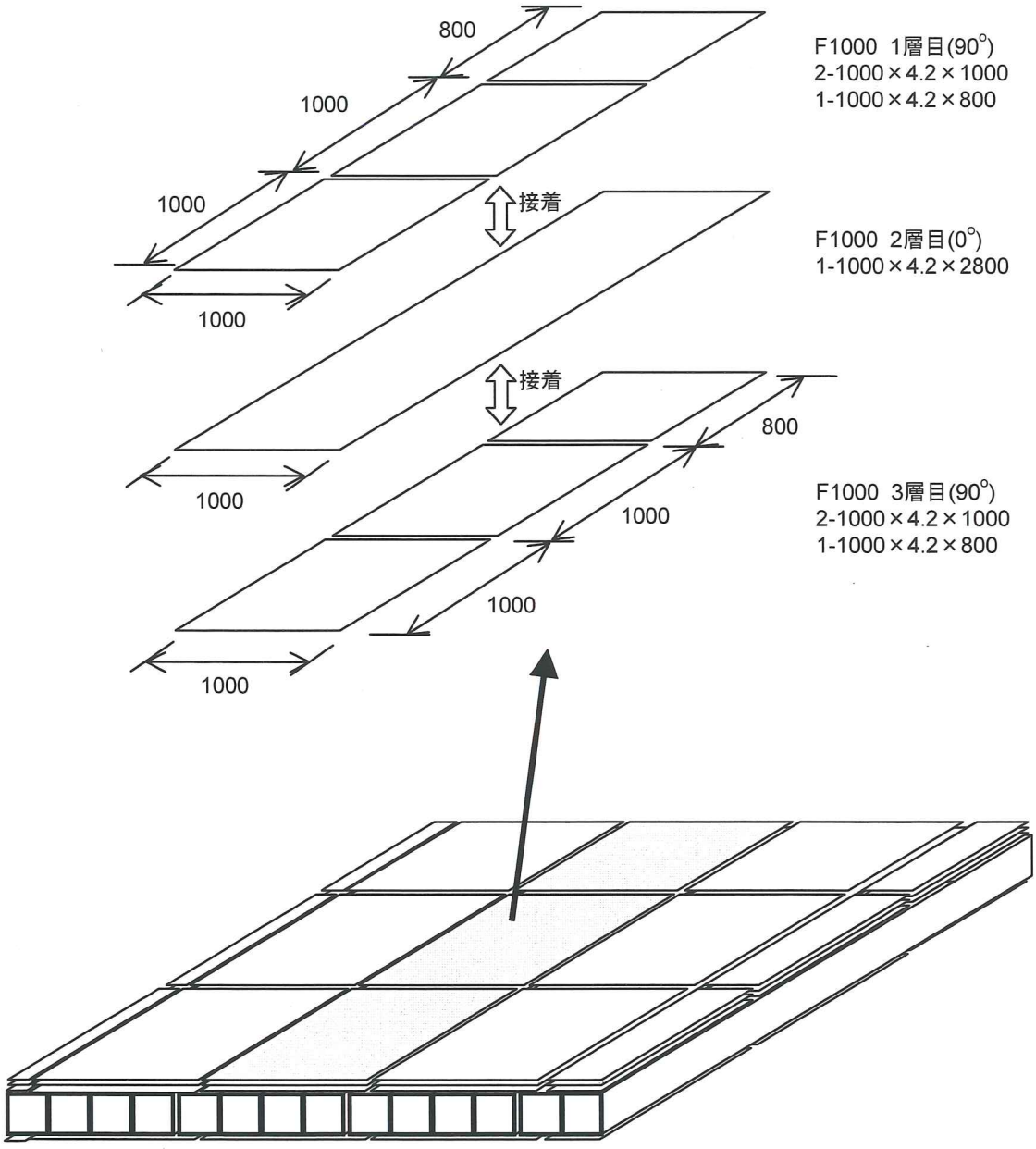
・上側の平板(F1000，3 枚接着済み，次頁)を接着する。 → 硬化 → 出荷前の 1 パネル(1m幅品)が完成





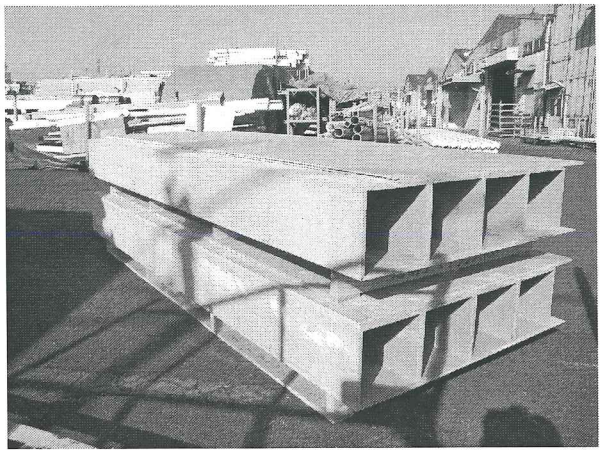


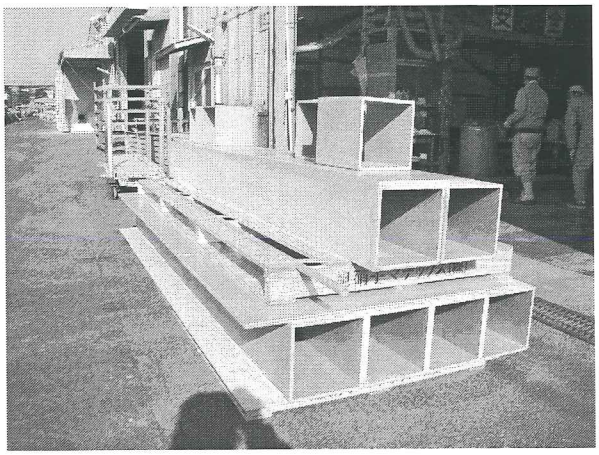
各パネルの上板の F1000 の重ね方



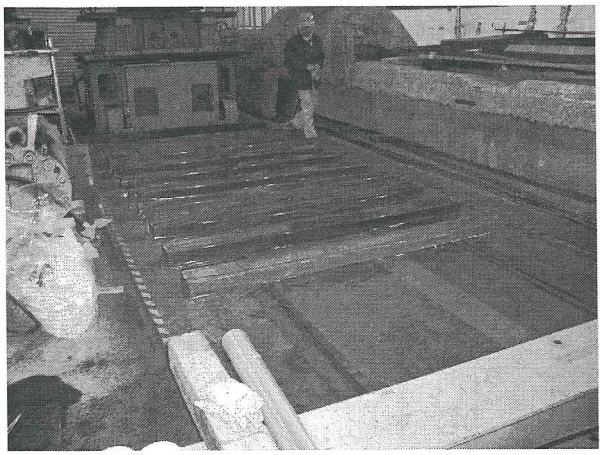
3．１m幅品同士の接着

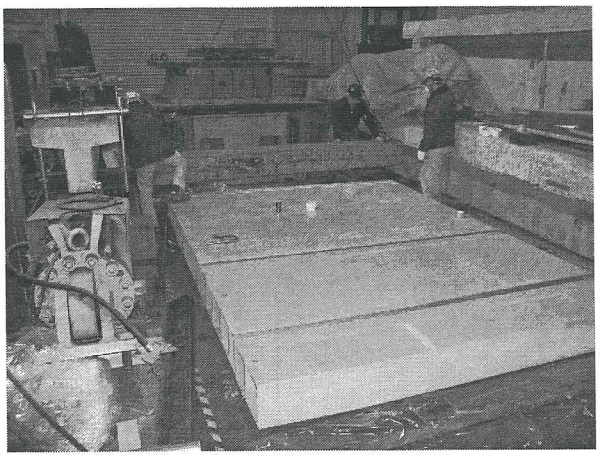
・出荷形態（１m幅品）



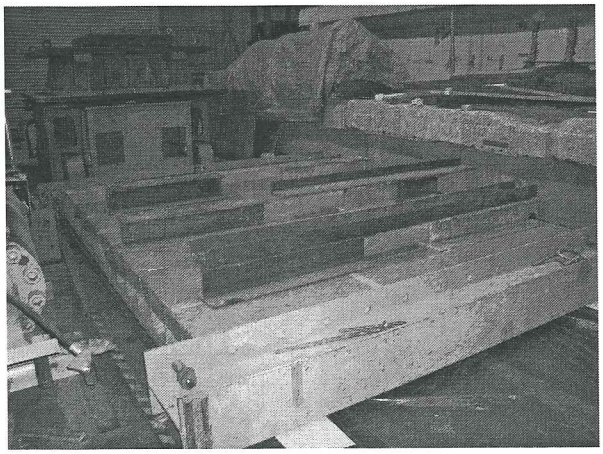


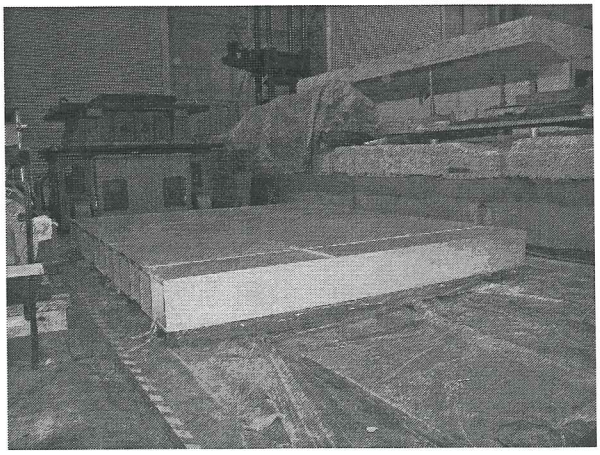
・接着場所（土研）　→　４体を接着





・PC 棒を用いて圧着　→　硬化　→　完成



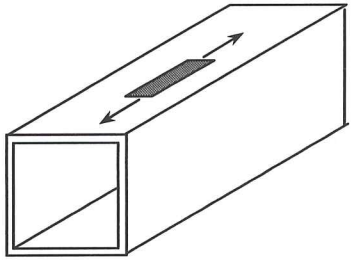


付録３．材料試験結果

１．SP250

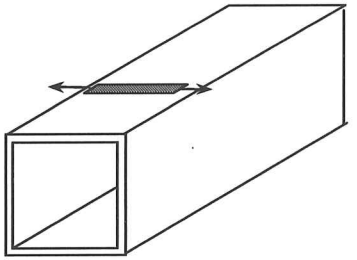
引張試験 0°方向

No.	幅 mm	厚さ mm	断面積 mm^2	最大荷重 kN	引張強度 MPa	弾性係数 GPa	ポアソン比 (厚み方向)
1	10.43	11.86	123.7	47.63	385.0	35.4	0.31
2	10.28	11.90	122.3	51.53	421.2	35.3	0.33
3	10.44	11.88	124.0	51.20	412.8	37.8	0.32
平均					406.4	36.2	0.32



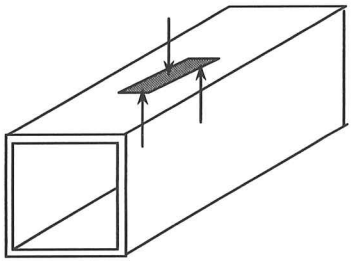
引張試験 90°方向

No.	幅 mm	厚さ mm	断面積 mm^2	最大荷重 kN	引張強度 MPa	弾性係数 GPa	ポアソン比 (厚み方向)
1	10.17	11.81	120.1	6.13	51.0	13.7	0.28
2	10.29	11.80	121.4	6.57	54.1	13.8	0.22
3	10.34	11.82	122.2	6.80	55.6	15.2	0.25
4	10.37	11.77	122.1	7.53	61.7	13.7	0.22
5	10.39	11.97	124.4	5.77	46.4	12.8	0.25
平均					53.8	13.8	0.24



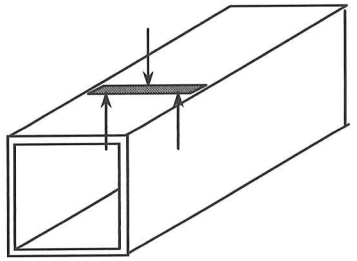
曲げ試験 0°方向

No.	幅 mm	厚さ mm	断面定数 mm^3	支間 mm	最大荷重 N	ΔP/Δδ N/mm	曲げ強度 MPa	弾性係数 GPa
1	14.88	12.07	361.3	200	4370	348	604.8	26.6
2	14.83	11.93	351.8	200	3500	280	497.5	22.2
3	14.9	12.00	357.6	200	3910	304	546.7	23.6
4	14.93	12.04	360.7	200	4150	336	575.2	25.8
5	14.88	11.91	351.8	200	4000	340	568.5	27.1
平均							558.5	25.1



曲げ試験 90°方向

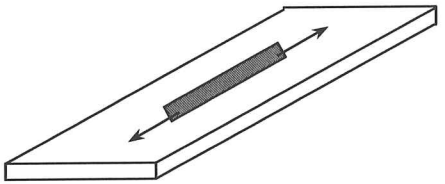
No.	幅 mm	厚さ mm	断面定数 mm^3	支間 mm	最大荷重 N	ΔP/Δδ N/mm	曲げ強度 MPa	弾性係数 GPa
1	15.13	11.80	351.1	200	1090	160	155.2	12.9
2	15.18	11.88	357.1	200	1320	161	184.8	12.7
3	15.22	11.94	361.6	200	1260	161	174.2	12.4
4	15.27	11.8	354.4	200	1200	164	169.3	13.1
5	15.21	11.81	353.6	200	1120	168	158.4	13.4
平均							168.4	12.9



2．F1000（過去データ，2001 年 2 月）

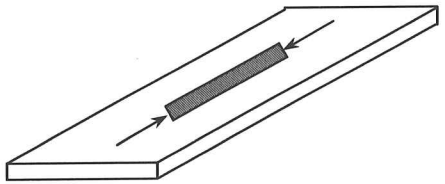
引張試験 0°方向

No.	幅 mm	厚さ mm	断面積 mm^2	最大荷重 kN	引張強度 MPa	弾性係数 GPa	ポアソン比
1	25.0	4.18	104.5	49.8	476.6	25.8	0.21
2	25.1	4.14	103.9	49.6	477.3	27.6	0.22
3	25.1	4.18	104.9	45.3	431.8	21.2	0.29
4	25.1	4.14	103.9	52.8	508.1	29.6	0.25
5	25.0	4.19	104.8	50.0	477.3	27.2	0.30
平均					474.2	26.3	0.25



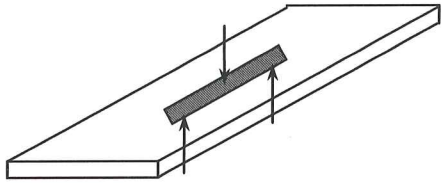
圧縮試験 0°方向

No.	幅 mm	厚さ mm	断面積 mm^2	最大荷重 kN	圧縮強度 MPa	弾性係数 GPa
1	13.01	4.17	54.3	32.2	593.5	28.2
2	13.03	4.13	53.8	29.3	544.5	27.3
3	13.03	4.19	54.6	23.7	434.1	31.7
4	12.99	4.15	53.9	28.7	532.4	28.8
5	13.02	4.17	54.3	28.0	515.7	33.0
平均					524.0	29.8



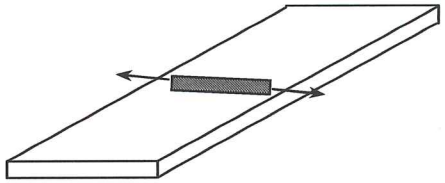
曲げ試験 0°方向

No.	幅 mm	厚さ mm	断面定数 mm^3	支間 mm	最大荷重 N	ΔP/Δδ N/mm	曲げ強度 MPa	弾性係数 GPa
1	15.21	4.2	44.7	80	900	130	402.5	14.8
2	15.24	4.21	45.0	80	831	123	369.2	13.8
3	15.19	4.19	44.4	80	895	127	402.7	14.5
4	15.20	4.23	45.3	80	932	134	411.2	14.9
5	15.24	4.2	44.8	80	910	123	406.2	13.9
平均							398.4	14.4



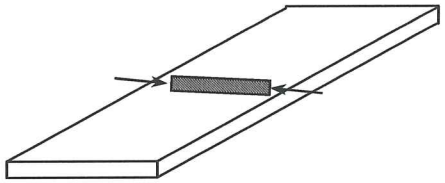
引張試験 90°方向

No.	幅 mm	厚さ mm	断面積 mm^2	最大荷重 kN	引張強度 MPa	弾性係数 GPa	ポアソン比
1	24.81	4.28	106.2	4.45	41.9	13.4	0.11
2	25.23	4.22	106.5	3.76	35.3	12.2	0.13
3	25.14	4.20	105.6	3.79	35.9	10.8	0.11
4	24.85	4.23	105.1	4.12	39.2	11.9	0.12
5	25.11	4.2	105.5	4.48	42.5	13.0	0.13
平均					39.0	12.3	0.12



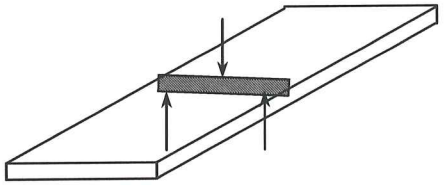
圧縮試験 90°方向

No.	幅 mm	厚さ mm	断面積 mm^2	最大荷重 kN	圧縮強度 MPa	弾性係数 GPa
1	13.05	4.09	53.4	7.78	145.8	10.9
2	13.07	4.09	53.5	7.26	135.8	10.8
3	13.04	4.09	53.3	7.98	149.6	10.5
4	13.07	4.12	53.8	7.68	142.6	9.66
5	13.03	4.1	53.4	6.87	128.6	9.17
平均					140.5	10.2



曲げ試験 90°方向

No.	幅 mm	厚さ mm	断面定数 mm^3	支間 mm	最大荷重 N	ΔP/Δδ N/mm	曲げ強度 MPa	弾性係数 GPa
1	15.24	4.17	44.2	80	313	82	141.7	9.50
2	15.25	4.16	44.0	80	323	85	146.9	9.91
3	15.20	4.15	43.6	80	259	78	118.7	9.19
4	15.18	4.16	43.8	80	272	76	124.2	8.90
5	15.2	4.15	43.6	80	287	81	131.6	9.54
平均							132.6	9.4



面内せん断試験

No.	幅 mm	厚さ mm	最大荷重 kN	せん断強度 MPa	せん断弾性係数 GPa
1	24.68	4.16	5.75	28.0	5.0
2	24.71	4.13	5.85	28.7	4.5
3	24.76	4.16	4.81	23.3	4.4
4	24.56	4.12	5.72	28.3	4.7
5	24.68	4.16	6.24	30.4	4.7
平均				27.7	4.7

