

# 横桁で支持された合成床版の移動載荷疲労試験 — 第二東名高速道路 須津川橋（下り線） —

## Wheel Load Fatigue Tests on Composite Slab Supported by Cross Beams — Sudogawa Bridge (down line) of the 2nd Tomei Expressway —

栗田 繁実\*<sup>1</sup> 林 暢彦\*<sup>2</sup> 生駒 元\*<sup>3</sup> 永山 弘久\*<sup>4</sup> 佐藤 徹\*<sup>5</sup>  
Shigemi KURITA Nobuhiko HAYASHI Motoshi IKOMA Hirohisa NAGAYAMA Toru SATO

### Summary

For the Sudogawa Bridge of the 2nd Tomei Expressway, a new-type plate double-I-girder bridge is planned, in which upper cross beams and main girders support the composite slabs in two directions. This structural system is suitable for wide bridges or bridges to be widened in the future when the composite slabs are applied to a plate double-I-girder bridge having main girders at intervals of 10 m. This paper reports the results of wheel load fatigue tests which were performed to confirm the stipulated fatigue strength and determine the static behavior of the composite slab used in the system.

キーワード：合成床版、移動載荷疲労試験、疲労耐久性、2主桁桁橋、横桁

### 1. はじめに

中日本高速道路株式会社が建設を進める第二東名高速道路須津川橋下り線は、橋長699m、片側2車線、有効幅員11.625mで供用を開始する13径間連続2主桁桁橋である。本橋は将来、片側3車線、有効幅員16.5mに幅員を拡幅することも計画されており、構造的、耐久性、経済性、将来の拡幅施工性に着目して構造形式を比較検討した結果<sup>1)</sup>、「合成床版を横桁で支持する鋼橋形式」を新たに開発し、採用することとなった。

本形式は、主桁間隔10mの鋼2主桁と3.5m間隔で上段配置された横桁で格子状に合成床版を支持する床組構造を採用している。合成床版は、底鋼板、頭付きスタッド、補剛リブからなるロビンソン型合成床版を基本とし、横桁と底鋼板を高力ボルト接合することで、ハンチや下側鉄筋を省略するなど構造の合理化、簡素化を図っている<sup>2)</sup>（図-1、2参照）。

本形式は、須津川橋で初めて採用される形式であり、床版の疲労耐久性を確認する必要があると考え、移動載荷疲労試験機を用いて実験的に検証することにした。さらに、本形式の静的変形挙動や応力性状を把握するため、静的載荷試験およびFEM解析を実施した。

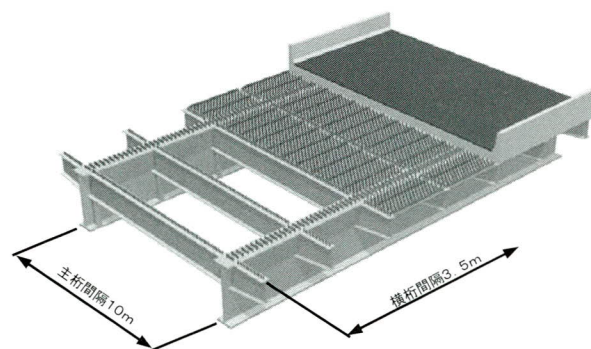


図-1 合成床版を横桁で支持する2主桁桁橋（暫定系）

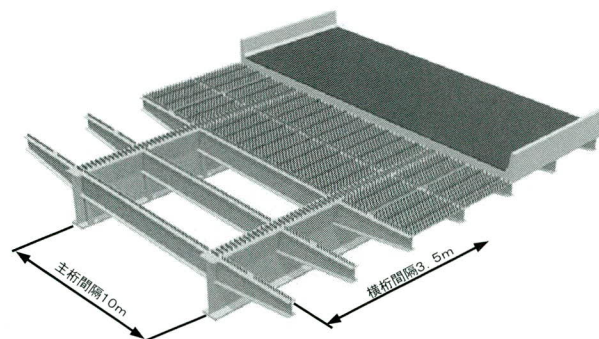


図-2 合成床版を横桁で支持する2主桁桁橋（完成系）

\*<sup>1</sup>生産本部保全部保全技術課

\*<sup>2</sup>生産本部技術研究所技術開発課

\*<sup>3</sup>生産本部設計部設計一課課長代理

\*<sup>4</sup>生産本部設計部次長

\*<sup>5</sup>生産本部技術研究所技術開発課長

## 2. 試験概要

### (1) 試験目的

本試験の目的を以下に示す。

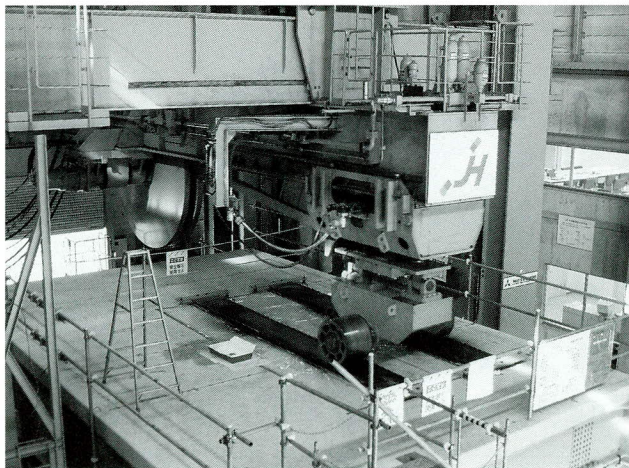
- 移動載荷疲労試験を行い、合成床版の疲労耐久性を確認する。
- 静的載荷試験を行い、合成床版の変形挙動と応力性状を把握する。
- 本床版の施工性を確認し、床版コンクリート施工時の変形挙動を把握する。

### (2) 試験設備

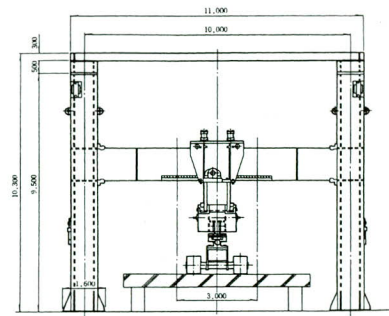
試験は、中日本高速道路株式会社が所有する移動載荷疲労試験機を使用して実施した。表一1に試験機諸元、写真一1に試験状況、図一3,4に試験機の概要を示す。

表一1 試験機諸元

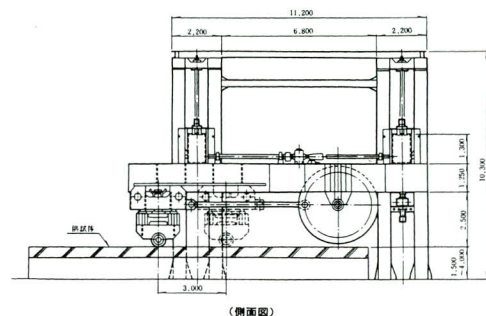
供試体最大寸法		幅7m×長さ15m
載荷点 移動装置	鉛直方向	床版より1.5～4.0m
	幅走行	試験機中心より±1.5m
移動載荷最大荷重		490kN
移動載荷方式		単輪載荷 一軸載荷、二軸載荷
移動載荷ストローク		±1.5m
移動載荷速度		30 min <sup>-1</sup>
動的定点最大荷重		980kN
動的定点繰返し速度		2Hz (±15mm)
静的定点最大荷重		2,940kN
繰返し載荷波		正弦波、三角波、 可変台形波、任意波



写真一1 試験状況



図一3 試験機概要 (正面図)



図一4 試験機概要 (側面図)

### (3) 試験供試体

試験供試体は、実橋の横桁間3パネルをモデル化した実物大供試体としたが、試験機の制約により主桁間隔のみ実橋の2/3スケールとした(表一2参照)。また、供試体のディテールは、橋梁支間中央部を再現した。図一5～7に供試体の一般図、配筋図、部分詳細図などの供試体概要図を示す。

床版コンクリートの設計基準強度は30N/mm<sup>2</sup>とし、試験開始時には設計基準強度が発現するように配合設計を行った(表一4)。床版コンクリートの圧縮試験および静弾性係数試験結果を表一3に示す。なお、試験期間の都合上、早強ポルトランドセメントを使用した。

供試体は、主桁をコンクリート床に設置された受台に

表一2 供試体スケール比較

	実橋	供試体	供試体/実橋
床版厚(底鋼板を含む)	258mm	258mm	1.0
横桁間隔	3,500mm	3,500mm	1.0
主桁間隔	10,000mm	6,500mm	2/3
床版辺長比	2.9	1.9	—

表一3 コンクリートの圧縮強度、静弾性係数

材齢(日)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数(N/mm <sup>2</sup> )
3	26.7	—
7	33.6	—
28	43.9	28.8×10 <sup>4</sup>



表-4 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法(mm)	荷卸時の目標スランプ(cm)	水結合材比 W/(C+F) (%)	荷卸時の目標空気量(%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>2</sup> )					
					水 W	セメント C	混和材 F	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
25	9 ±2.5	45.2	4.5 ±1.5	42	168	342	30	739	1029	0.744 (C+F)×0.2%
						(C+F=372)				

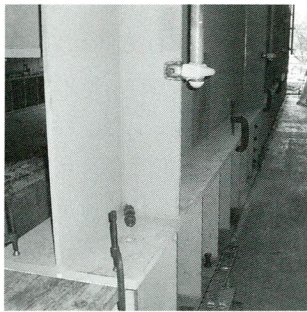
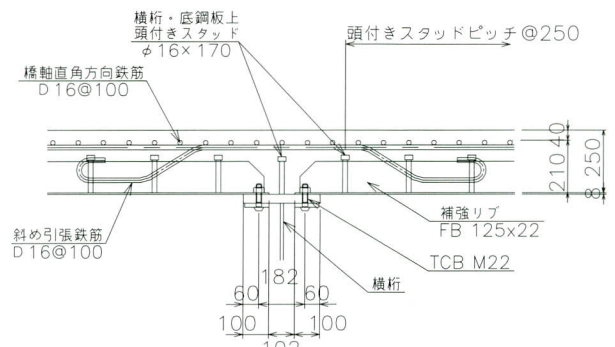
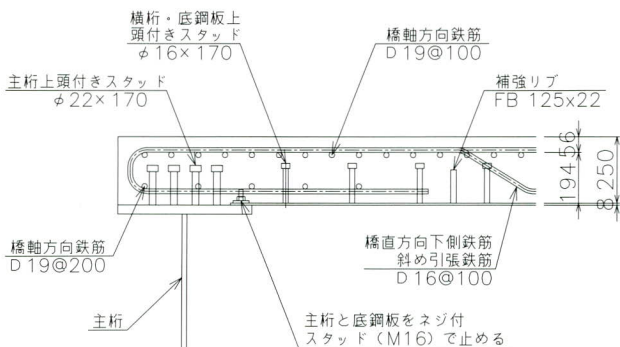
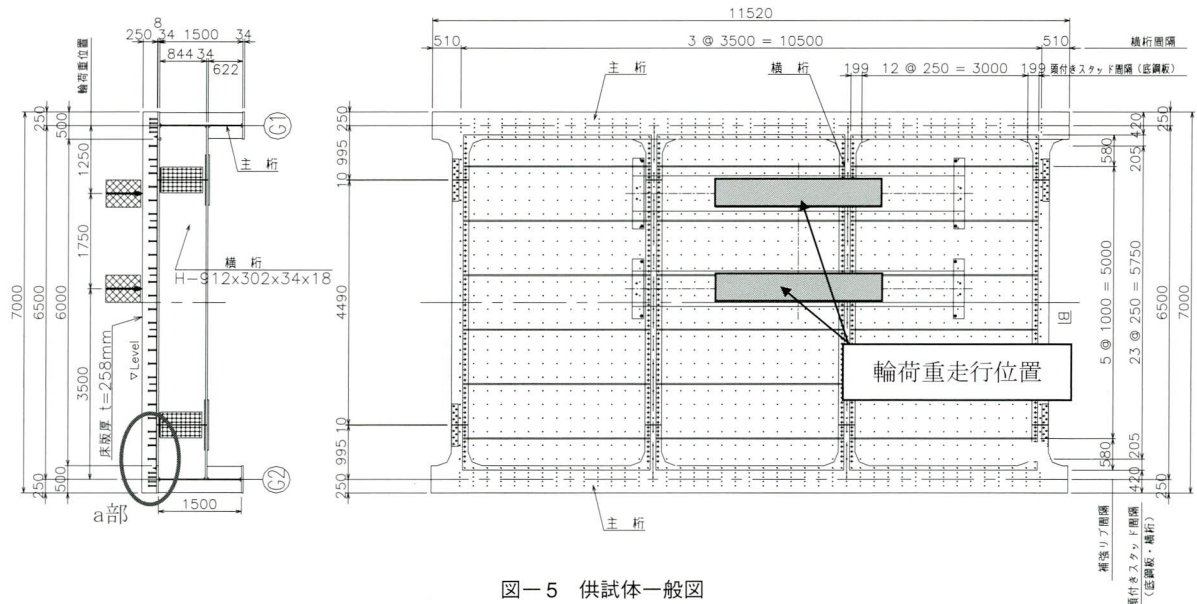
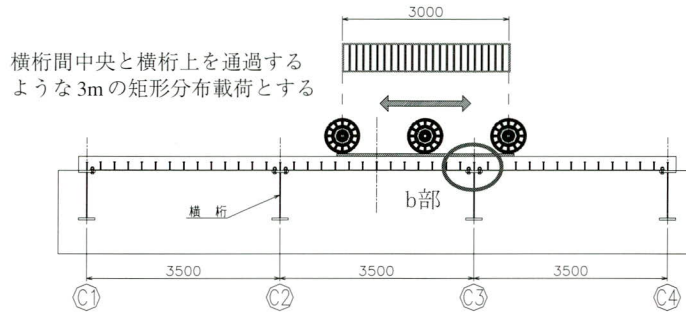


写真-2 供試体固定状況



直接載せ、フランジ同士を約1.75m間隔でシャコマンを使用して固定した。主桁の固定状況を写真-2に示す。

先に述べたとおり、実橋で10.0mの主桁間隔を試験体

では6.5mとしたが、このことは以下の検討より、試験目的に大きな影響を及ぼさないと判断した。

主桁間隔を実橋の10.0mとした場合（図-8）と供試体の6.5mとした場合（図-9）の2ケースについて2次元FEM解析により床版の曲げモーメントを算出し、両者を比較した。

- ・解析モデル…底鋼板5パネルをモデル化、主桁と横桁は棒要素。
- ・拘束条件 …主桁ラインの鉛直方向のみ拘束。
- ・載荷荷重 …横桁間中央に輪荷重100kNを載荷。

図-10に橋軸方向床版曲げモーメント分布、図-11に橋軸直角方向床版曲げモーメント分布、表-5に最大曲げモーメントの比較を示すが、橋軸方向、橋軸直角方向ともに、両ケースの違いは5%程度であった。

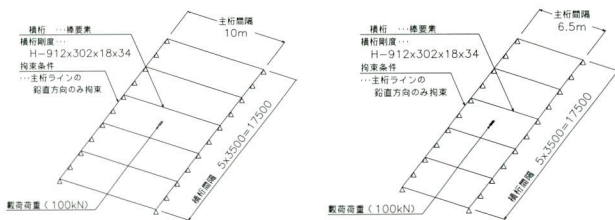


図-8 主桁間隔10mモデル 図-9 主桁間隔6.5mモデル

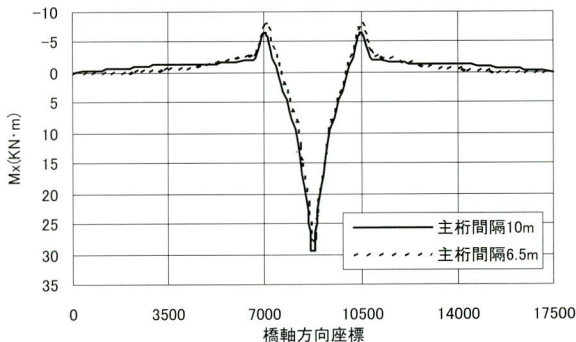


図-10 橋軸方向床版曲げモーメント

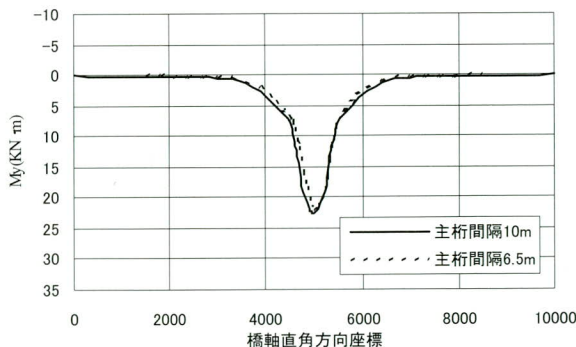


図-11 橋軸直角方向床版曲げモーメント

表-5 最大曲げモーメント比較

	橋軸方向最大曲げモーメント(kN・m)	橋軸直角方向最大曲げモーメント(kN・m)
主桁間隔 10m	29,499	22,646
主桁間隔6.5m	27,892	22,045
6.5m/10m	0.95	0.97

#### (4) 載荷位置と着目位置

本合成床版は橋軸方向（車両進行方向）に3.5m間隔で横桁に弾性的に支持されているため、横桁間中央と横桁上ではその挙動が大きく異なる。また、輪荷重による床版のせん断応力は、輪荷重を主桁近傍に載荷した方が大きくなると考えられる。これらより輪荷重の移動載荷範囲を以下のとおり設定した（図-5参照）。

・橋軸方向

着目点である横桁間中央（P21）と横桁上（C3）を完全に通過するような3m区間に矩形分布載荷する。

・橋軸直角方向

床版に作用するせん断応力が大きくなるように主桁近傍（L1, CL）に載荷中心を偏心させて載荷する。

また、静的載荷試験では、横桁間中央（P21）と横桁上（C3）にそれぞれ輪荷重を載荷した。

#### (5) 載荷パターン

移動載荷疲労試験の荷重強度およびステップは、過去に実施された長支間床版の試験実績<sup>3)</sup>を参考に図-12に示す階段状載荷とした。なお、試験期間の制約より最大走行回数を70万往復とした。

・STEP1：200kN（4万往復）

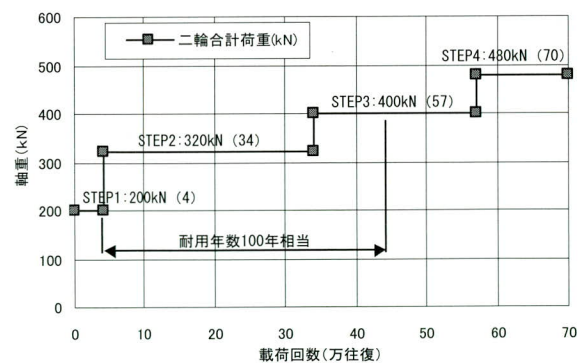


図-12 荷重載荷パターン

・STEP2：320kN（30万往復）←過積載相当

・STEP3：400kN（23万往復）←ひび割れ発生限界

・STEP4：480kN（13万往復）←一軸二輪の最大荷重

### 3. 移動載荷疲労試験結果

移動載荷疲労試験により得られた走行回数と床版たわみの関係および走行回数とひずみの関係について以下に述べる。ここで、着目する位置は、輪荷重走行位置であるL1, CL断面と横桁間中央(P21)および横桁上(C3)の交点N1～N4とする(図-13)。

#### (1) 走行回数とたわみの関係

着目点N1とN3、着目点N2とN4は同傾向の計測結果を示したため、それぞれ絶対値の大きいN1, N2の結果を示す。

図-14, 15は、走行回数と床版たわみ(載荷時計測値、除荷時計測値)の関係を示す。着目点N1, N2ともに走行回数が増すとともにたわみの計測値は増加している。しかし、図-16, 17に示すとおり、載荷時計測値から除荷時計測値を引いた弾性たわみは、走行回数が増しても急激な変化はなく、載荷ステップと同様に階段状となった。さらに、この弾性たわみを軸重200kNに換算した弾性たわみ(換算値)は、載荷開始から70万往復走行

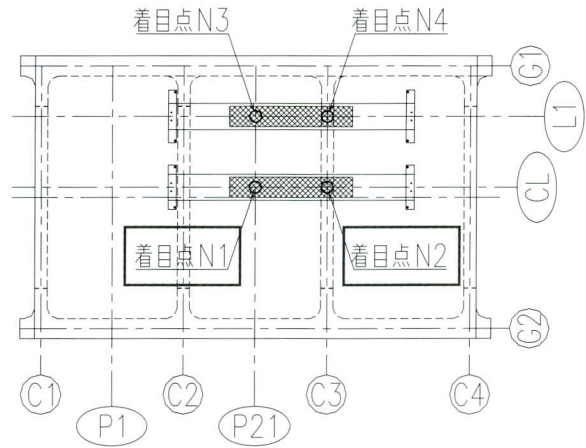


図-13 着目位置

終了に至るまでほぼ一定であることがわかった。また、着目点N1の弾性たわみ(換算値)の最大値は0.453mm、解析値は0.451mm、着目点N2の弾性たわみ(換算値)の最大値は0.280mm、解析値は0.277mmであり、解析値と弾性たわみ(換算値)は良く一致している。

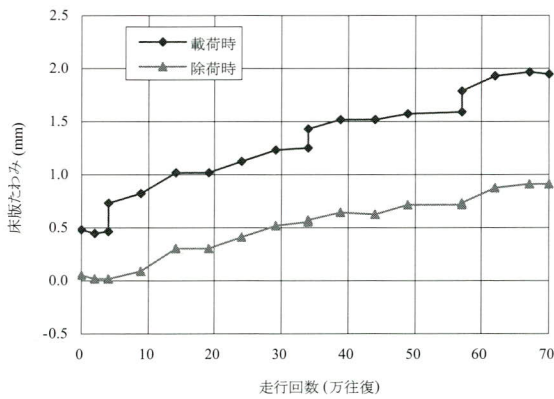


図-14 着目点N1 床版たわみ

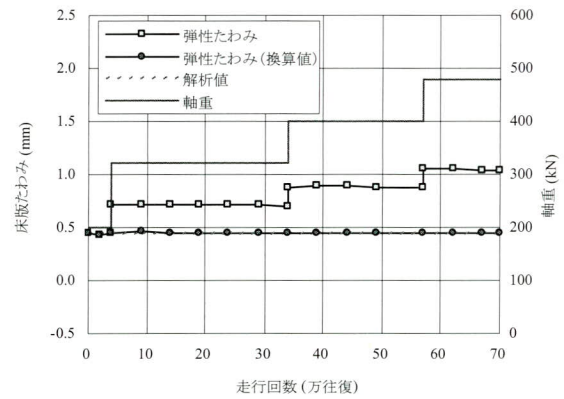


図-16 着目点N1 床版弾性たわみ

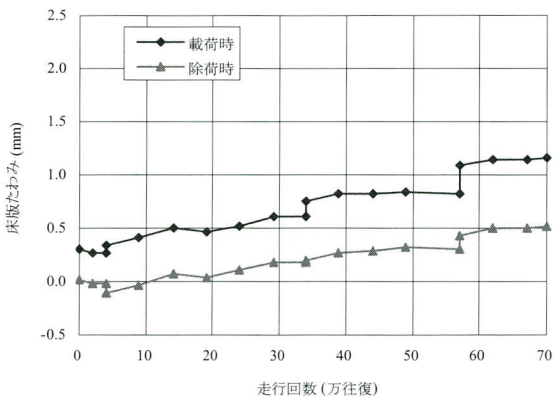


図-15 着目点N2 床版たわみ

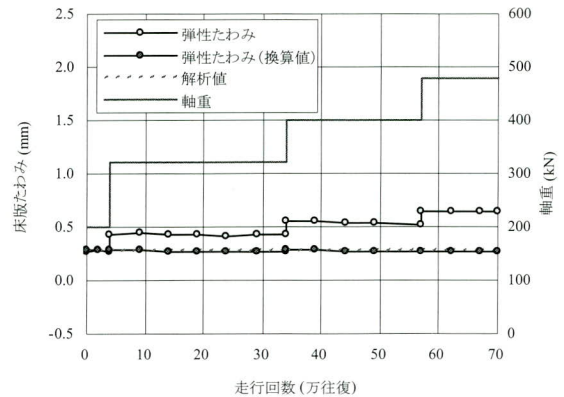


図-17 着目点N2 床版弾性たわみ



## (2) 走行回数とひずみの関係

床版たわみと同様に、ひずみの計測結果も着目点N1～N4で同様な傾向を示したため、ここでは、ひずみの絶対値が最も大きい着目点N1の結果を図-19～22に示す。図-19, 20は橋軸方向ひずみ、図-21, 22は橋軸直角方向ひずみを示す。また、図-19, 21は床版コンクリート上面の計測結果、図-20, 22は底鋼板下面の計測結果を示す。なお、ひずみゲージ貼付位置を図-18に示す。

図-19, 21に示すとおり、床版コンクリート上面の除

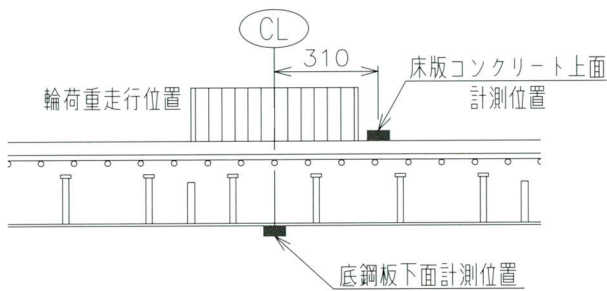


図-18 計測位置

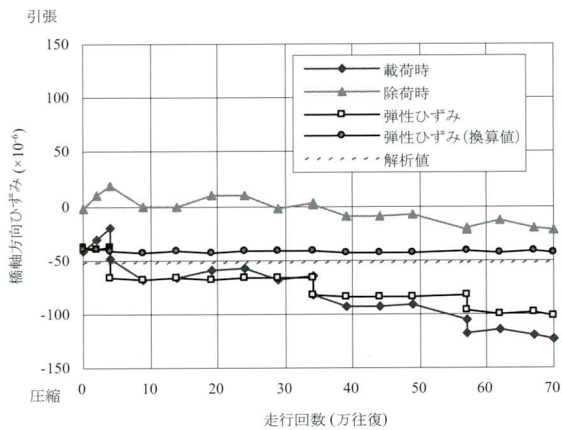


図-19 橋軸方向 コンクリート上面ひずみ

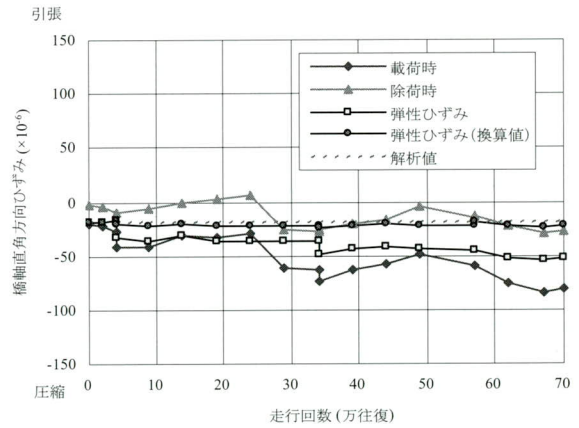


図-21 橋軸直角方向 コンクリート上面ひずみ

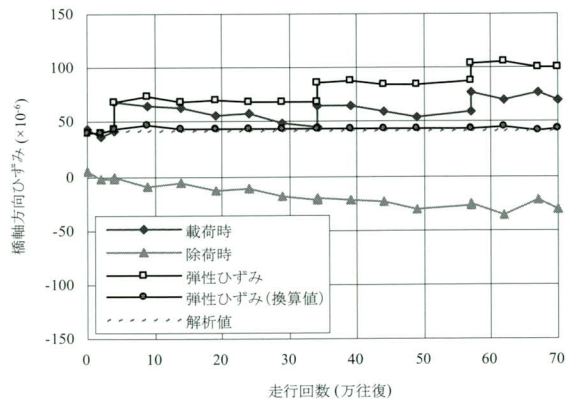


図-20 橋軸方向 底鋼板下面ひずみ

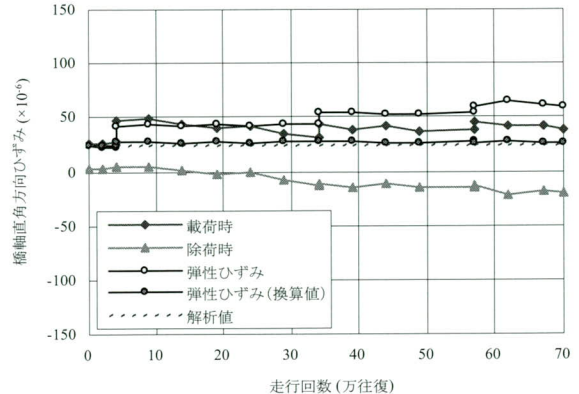


図-22 橋軸直角方向 底鋼板下面ひずみ

荷時のひずみは、圧縮ひずみが徐々に増加している。一方、底鋼板下面の除荷時ひずみも、図-20, 22に示すとおり走行回数が増すとともに圧縮ひずみが増加している。これは、コンクリート打込み時に引張となった底鋼板に輪荷重が載荷され、スタッド間にわずかな剥離等が生じることにより引張応力が開放され、圧縮ひずみが増加しているとも考えられる。

しかし、弾性たわみと同様、載荷時計測値から除荷時計測値を引いた弾性ひずみは、走行回数が増加しても急激な変化はなく、載荷ステップと同様に階段状となる。さらに、この弾性たわみを軸重200kNに換算した弾性ひずみ(換算値)は、載荷開始から70万往復走行終了に至るまでほぼ一定であった。また、弾性ひずみ(換算値)と解析値は概ね一致している。

## (3) ひび割れ観察および内部観察結果

移動載荷疲労試験中および試験終了後に適宜床版コンクリート表面のひび割れ観察を行ったが、目視で確認できるひび割れは観察されなかった。



また、試験終了後、床版内部のひび割れや鋼製パネルの変状を確認する目的で、着目断面である輪荷重走行位置（L1, CL）外縁と横桁間中央（P21）および横桁上（C3）に沿って供試体を切断して内部観察を行った（図-23参照）。

切断面を目視で観察した結果、移動載荷疲労試験により発生したと考えられるひび割れは確認されなかった（写真-3～7）。また、内部観察用供試体のコンクリートをはつりとり、鋼製パネルを目視で確認したが、底鋼板、頭付きスタッド、補剛リブにも全く変状は確認されなかった（写真-8）。

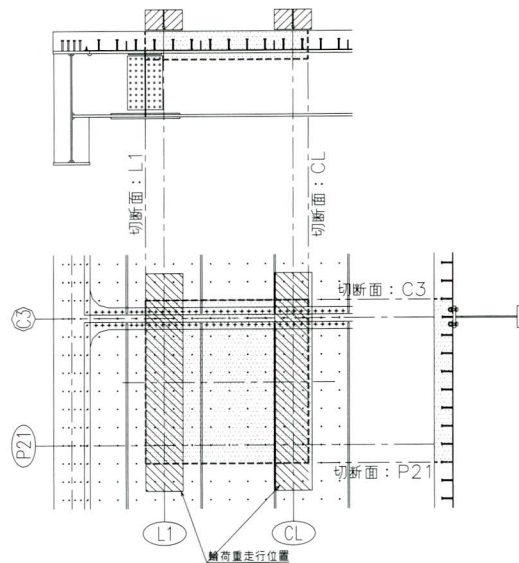


図-23 供試体切断位置

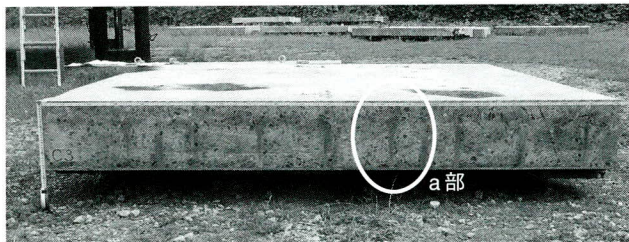


写真-3 C3切断面



写真-4 P21切断面

ひび割れ無し

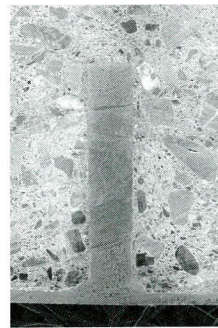


写真-5 a部詳細

補剛リブ、頭付きスタッド、鉄筋などの周辺部の変状無し

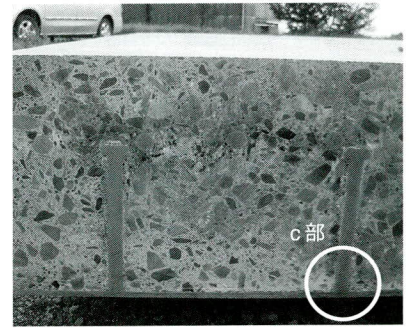


写真-6 b部詳細

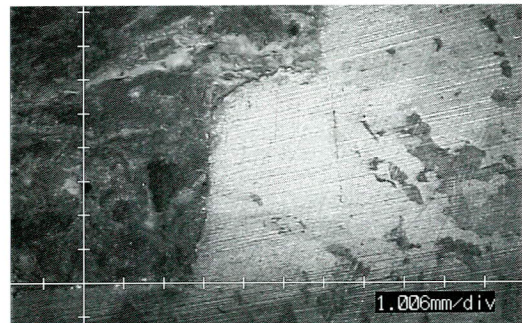


写真-7 c部詳細（マイクロSCOOPによる拡大）

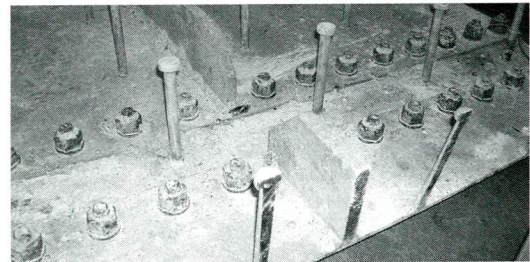


写真-8 試験終了後の鋼製パネル

#### (4) 移動載荷疲労試験結果のまとめ

移動載荷疲労試験結果は以下のとおりであった。

- ① 鉛直変位、各部のひずみは、走行開始から70万往復走行終了まで徐々に増加していくが、急激な変化は生じず、弾性たわみ（換算値）および弾性ひずみ（換算値）はほぼ一定であった。
  - ② 移動載荷疲労試験中および70万往復走行終了後、目視で確認できるひび割れは、床版表面、床版切断面には確認されなかった。また、スタッドやリブ回りのコンクリートも健全な状態であった。
  - ③ 試験終了後、鋼製パネル（補剛リブ、底鋼板、頭付きスタッド）には全く変状はみられなかった。
- 以上より、本合成床版は、走行回数が増加しても剛性がほとんど低下することなく、十分な耐久性を有していると考えられる。



## 4. 静的載荷試験および解析結果

### (1) 静的載荷試験の目的

本合成床版の変形挙動と応力性状を把握することを目的として静的載荷試験を実施した。また、3次元FEM解析を実施し、計測値との比較を行った。解析は汎用有限要素法プログラム「MSC.visualNastran for Windows（日本エムエスシー株式会社）」を使用した。

### (2) 解析モデル

#### a) 要素の構成

表-6に示す要素を使用して、供試体のモデル化を行った。図-24に解析モデルを示す。

表-6 要素の構成

供試体	要素
コンクリート, 補剛リブ	8 節点ソリッド要素
主桁, 横桁, 底鋼板	4 節点シェル要素
頭付きスタッド	コンクリートと底鋼板の節点を共有することでモデル化
鉄筋	モデル化せず

#### b) 材料特性

解析に使用した各部材の材料定数、諸元を表-7, 8に示す。コンクリートの静弾性係数は材料試験の結果を、床版厚は計測値を使用した。( )内はそれぞれ、静弾性係数の公称値、床版厚の設計値を示す。

表-7 材料定数

	静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
コンクリート	2.88×10 <sup>4</sup> (2.8×10 <sup>4</sup> )	1/6
鋼	2.0×10 <sup>5</sup>	0.3

表-8 材料諸元

床版厚	267mm (258mm) ※底鋼板を含む
主桁	WEB: 18mm, FLG: 34mm
横桁	WEB: 18mm, FLG: 34mm
鋼製パネル	底鋼板: 8mm, 補剛リブ: 22mm

#### c) 拘束条件

主桁下フランジの節点の全自由度を拘束した。

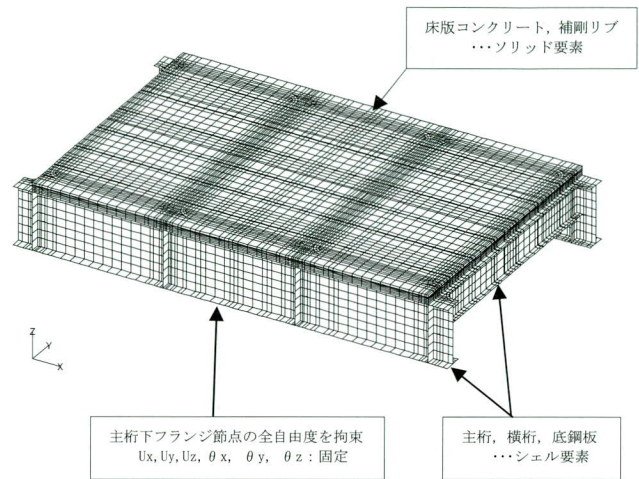


図-24 解析モデル

#### d) 荷重載荷位置

載荷は、以下の3ケースとした。

CASE0: コンクリート打込み時

CASE1: 横桁間中央 (P21) 載荷

CASE2: 横桁上 (C3) 載荷

CASE0は、図-24の解析モデルから床版コンクリートを除く鋼部材 (主桁、横桁、底鋼板、補剛リブ) モデルにコンクリート荷重 (5.53N/mm<sup>2</sup>) を分布荷重として載荷した。

CASE1, 2は、輪荷重 (1輪あたり100kN) を横桁間中央、横桁上に静的に載荷した (図-25~27)。

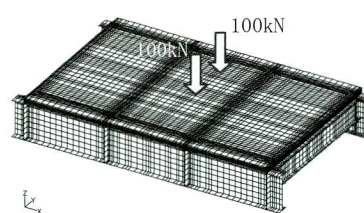


図-25 横桁間中央載荷

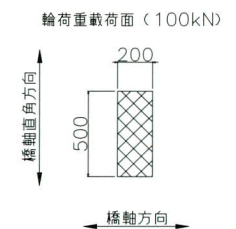


図-27 輪荷重載荷面

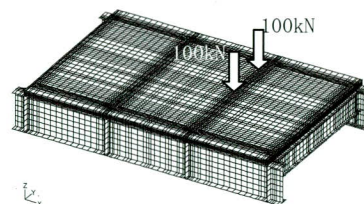


図-26 横桁上載荷



### (3) 解析結果および試験結果との比較

静的荷重試験結果は、移動荷重疲労試験で走行回数4万往復程度まで残留たわみがほとんど生じていないことから、走行回数1000回時の計測値を使用する。

#### a) 荷重と床版たわみ、ひずみの関係

着目点N1における静的荷重試験の荷重と床版たわみの関係を図-28に、コンクリート上面の橋軸方向ひず

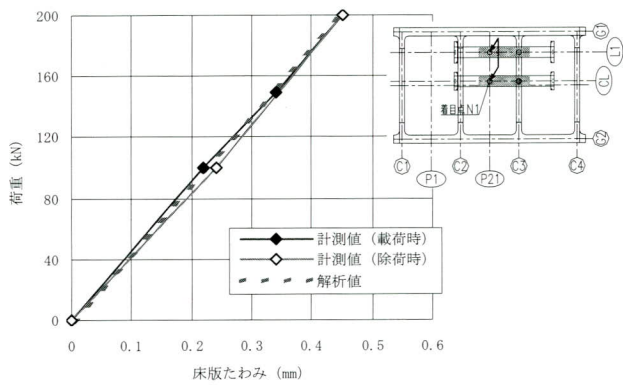


図-28 着目点N1 荷重と床版たわみの関係

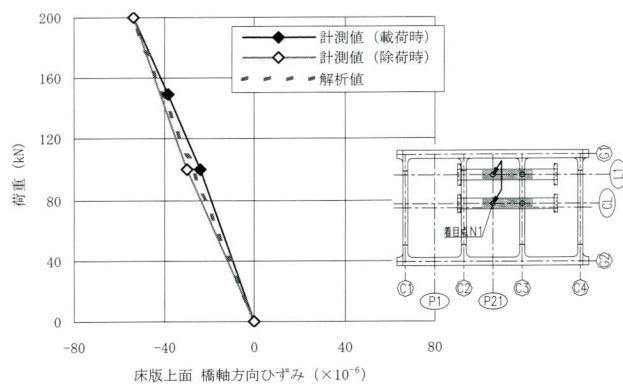


図-29 着目点N1 荷重とコンクリート上面橋軸方向ひずみの関係

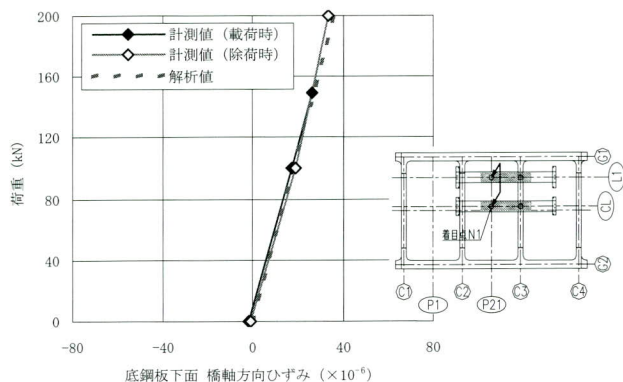


図-30 着目点N1 荷重と底鋼板下面橋軸方向ひずみの関係

みを図-29に、底鋼板下面の橋軸方向ひずみを図-30に示す。

床版たわみおよびひずみの計測値は荷重時、除荷時ともにほぼ線形的な挙動を示しており、計測値と解析値はよく一致している。

#### b) 床版のたわみ分布

横桁間中央 (P21) に軸重200kNを載荷した場合のP21断面およびCL断面の床版たわみ分布を図-31, 32に示す。P21断面、CL断面ともに計測値と解析値はよく一致している。

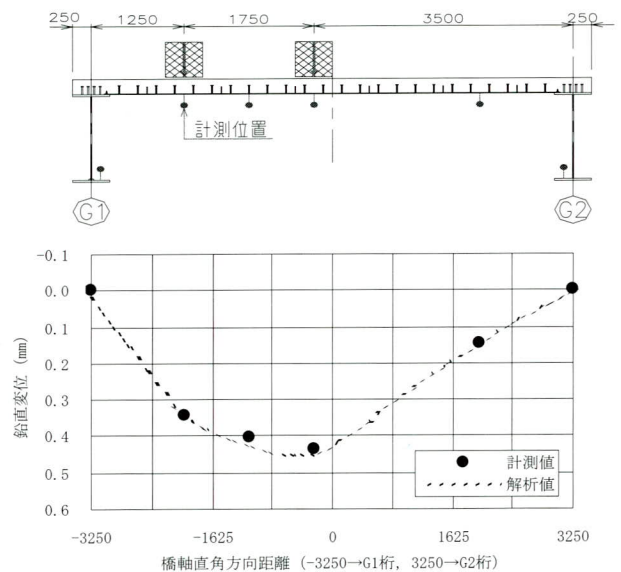


図-31 P21断面床版たわみ分布 横桁間中央載荷

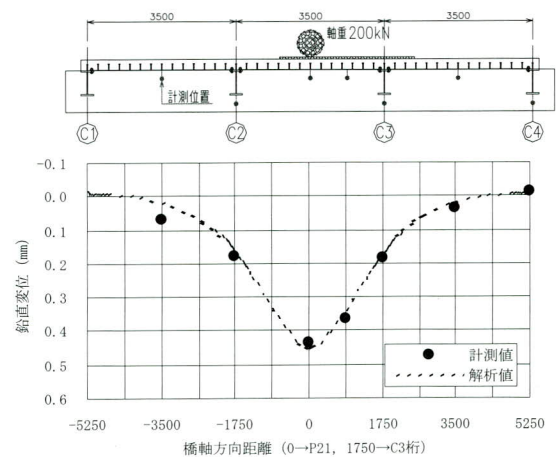


図-32 CL断面床版たわみ分布 横桁間中央載荷

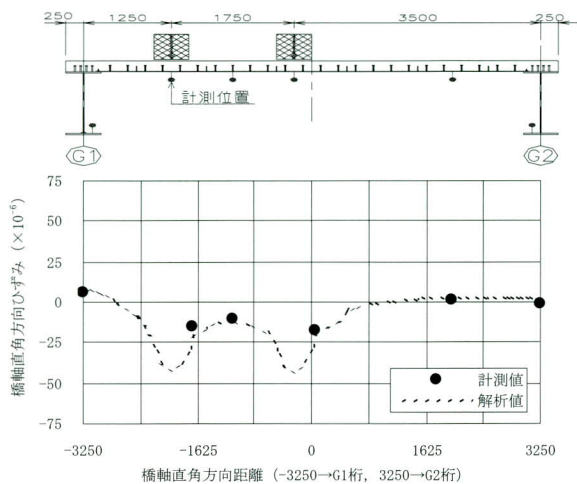


図-33 コンクリート上面橋軸直角方向ひずみ (P21断面)

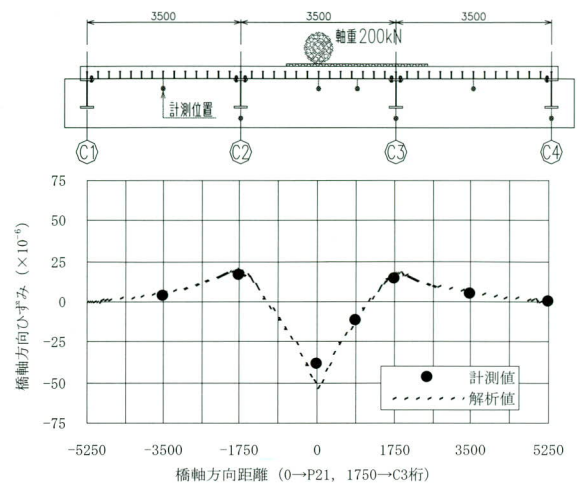


図-36 コンクリート上面橋軸方向ひずみ (CL断面)

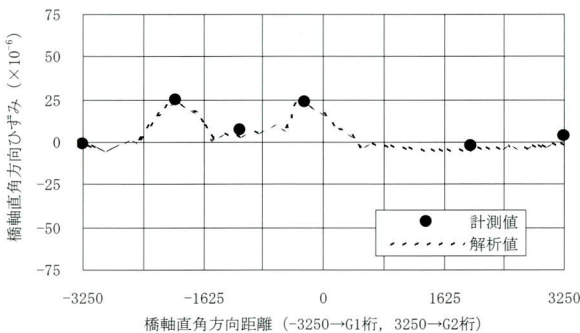


図-34 底鋼板下面橋軸直角方向ひずみ (P21断面)

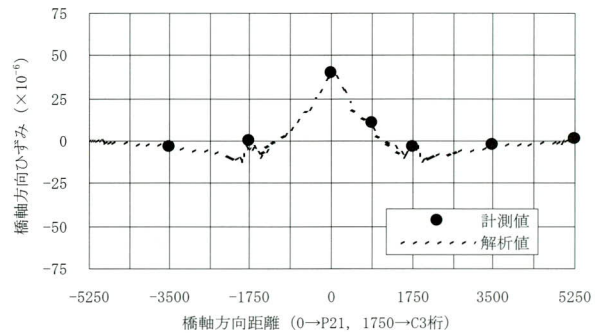


図-37 底鋼板下面橋軸方向ひずみ (CL断面)

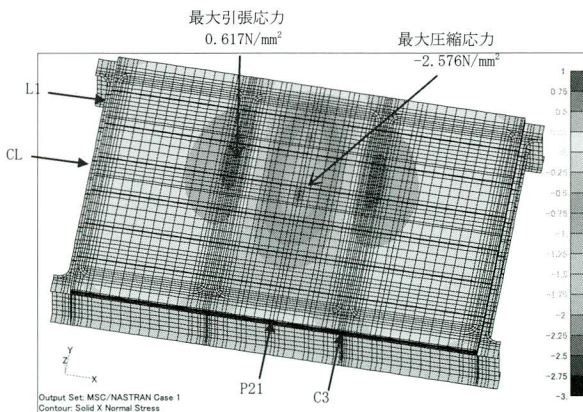


図-35 床版コンクリート上面 橋軸方向応力コンター図

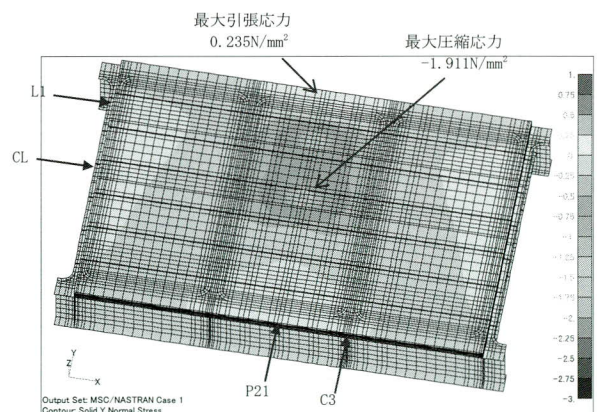


図-38 床版コンクリート上面 橋軸直角方向応力コンター図

c) 床版のひずみ分布

図-33, 34にP21断面における橋軸直角方向ひずみ分布、図-36, 37にCL断面における橋軸方向ひずみ分布を示す。図-33, 36は床版コンクリート上面、図-34, 37は底鋼板下面の計測結果である。なお、荷重は横桁間中央 (P21) に軸重200kNを載荷した。

床版コンクリート上面および底鋼板下面のひずみ分布は、橋軸方向、橋軸直角方向ともに計測値と解析値は良く一致している。

参考として、図-35に床版コンクリート上面の橋軸方向応力コンター図、図-38に床版コンクリート上面の橋軸直角方向応力コンター図を示す。



d) 横桁断面内のひずみ分布

C3横桁のCL断面およびCL断面とL1断面の中間点における橋軸直角方向（横桁方向）断面内ひずみ分布をそれぞれ図-40, 41に示す。ここで、図中の梁理論とは、主桁間隔を単純梁として算出した曲げモーメントに対するひずみである。有効断面を横桁+コンクリートとして算出した結果を梁理論①、有効断面を横桁+コンクリート+底鋼板として算出した結果を梁理論②とした。

図-40, 41 何れも計測値と解析値はよく一致している。図-40では、床版コンクリート部のひずみ分布が非線形となっているが、これは、輪荷重による支圧応力の影響を受けている結果と考えられ、この傾向も解析とよく一致している。一方、図-41は、輪荷重の支圧応力の影響が小さいためひずみ分布はほぼ直線的な分布と

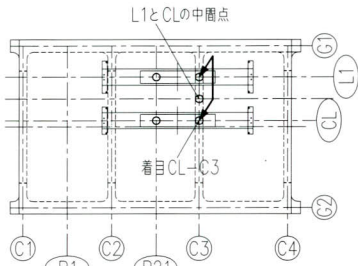


図-39 横桁断面着目位置図

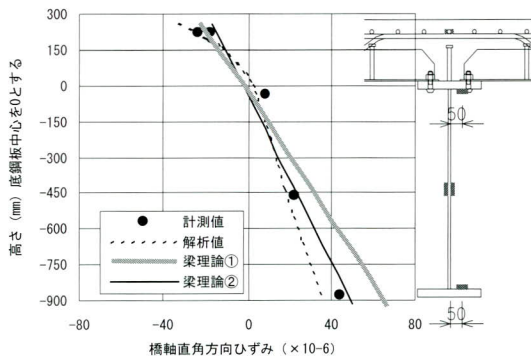


図-40 CL断面 橋軸直角方向ひずみ分布

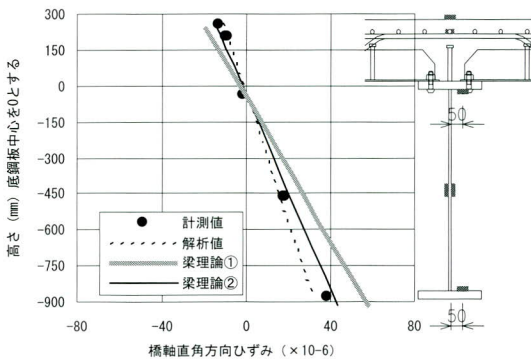


図-41 CL, L1中間断面 橋軸直角方向ひずみ分布

なっている。また、底鋼板を有効とした梁理論②の方が計測値に近い傾向を示している。

(4) 静的載荷試験結果のまとめ

静的載荷試験およびFEM解析結果より以下の結果が得られた。

- ① 静的載荷試験で計測された床版たわみは、解析値と非常によく一致している。
- ② 床版上面、底鋼板のひずみおよびその分布は、橋軸方向、橋軸直角方向ともに計測値と解析値は良く一致している。
- ③ 床版および横桁断面内のひずみ分布も計測値と解析値はよく一致している。また、底鋼板は横桁との合成断面として有効に機能している。

以上より、本合成床版は、FEM解析によりその静的挙動やひずみ特性を把握できることがわかった。

5. 供試体の施工状況および施工時の挙動

(1) コンクリートの施工性

本合成床版は、横桁と底鋼板を高力ボルトで接合し、ハンチャや下側鉄筋を省略している。このため、床版コンクリートの施工性は写真-9に示すとおり非常に良好であった。

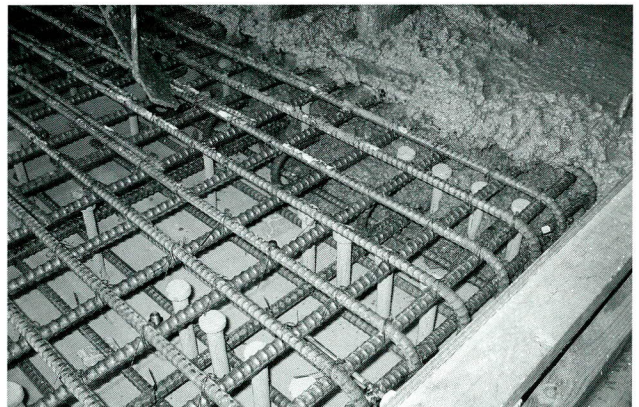


写真-9 コンクリート打込み状況

(2) 床版コンクリート施工時の変形挙動

コンクリート打設時の鋼製パネルの変形挙動について計測を行った結果を以下に示す。図-42は解析結果、図-43はP21断面の鉛直変位分布、図-44はCL断面の鉛直変位分布を示す。いずれも計測値が解析値より若

干大きいですが、全体的な分布は概ね一致している。

また、計測値の最大鉛直変位は4.522mmであり、鉛直変位/横桁間隔は1/778と小さいため、鋼製パネルの製作においては製作キャンバーを考慮する必要がないと判断される。

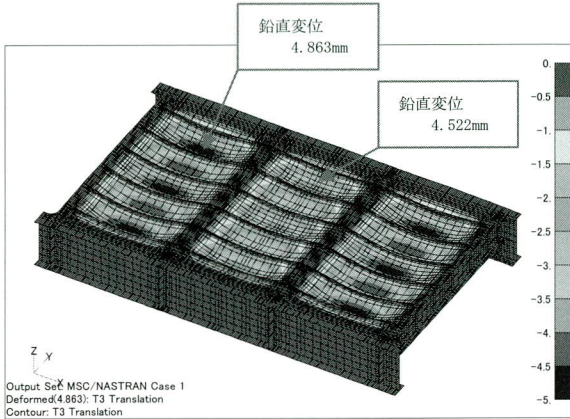


図-42 鉛直変位（コンター図、鳥瞰図）

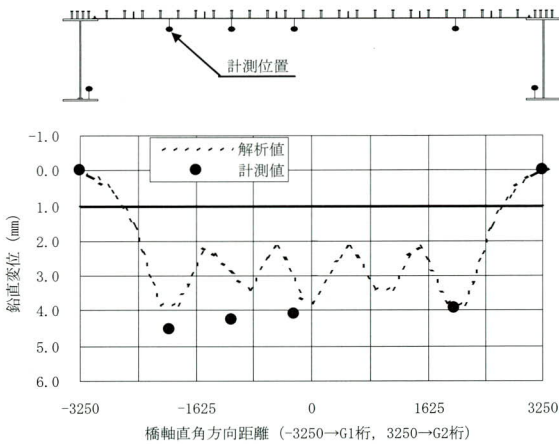


図-43 コンクリート自重によるP21断面鉛直変位

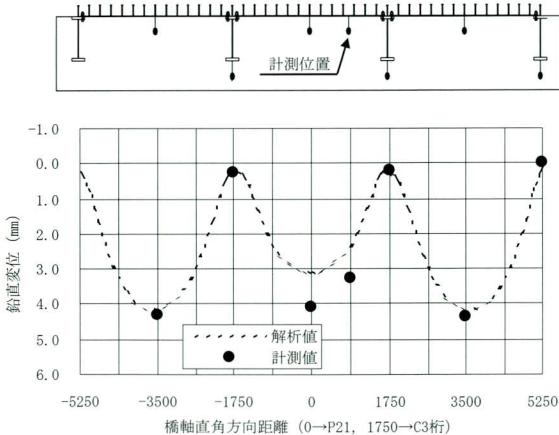


図-44 コンクリート自重によるCL断面鉛直変位

## 6. おわりに

横桁で支持された合成床版の移動載荷疲労試験を実施し、合成床版が十分な疲労耐久性を有していること、解析により十分な精度で静的な力学的挙動を把握できることを確認した。

本試験は、財団法人高速道路技術センターの「合成床版を横桁で支持する鋼橋形式に関する技術検討委員会」（委員長：松井繁之大阪大学大学院教授）の指導の下に実施されたものであり、各委員の方々には多くの貴重なご意見を頂きました。最後に本試験は「第二東名高速道路 須津川橋（鋼上部工）下り線工事特定建設工事共同企業体」の受注工事の一環として実施されたものであり、試験実施にあたり中日本高速道路株式会社横浜支社および同富士工事事務所の方々には多大なるご指導を賜りました。ここに、謝意を表します。

## <参考文献>

- 1) 高橋昭一，高橋章，永山弘久，生駒 元，栗田繁実，阪野崇人：将来拡幅を考慮した橋梁の構造形式検討（第二東名高速道路 須津川橋），平成17年度全国大会第60回年次学術講演会，2005。
- 2) 高橋昭一，築山有二，阪野崇人，永山弘久，生駒元，栗田繁実：将来拡幅を考慮した合理化合成床版を有する2主桁橋の提案：平成17年度全国大会第60回年次学術講演会，2005。
- 3) 長谷俊彦，上東泰越，安松敏雄：長支間PC床版の移動輪荷重走行疲労試験による耐久性の評価，日本道路公団試験研究所報告，Vol.36（1999-11）。

2005.11.7 受付