

## 横桁で支持された合成床版の移動載荷疲労試験

Wheel load fatigue tests on composite slab supported by cross beams

萩原 直樹\*, 青木 圭一\*\*, 栗田 繁実\*\*\*, 阪野 崇人\*\*\*\*, 永山 弘久\*\*\*\*\*  
Hagiwara Naoki, Keiichi Aoki, Shigemi Kurita, Takahito Banno, Hirohisa Nagayama

- \* 中日本高速道路(株) 横浜支社 富士工事事務所 (〒417-0061 静岡県富士市伝法字大原 170-1)  
\*\* 中日本高速道路(株) 横浜支社 横浜技術事務所 (〒227-0042 神奈川県横浜市青葉区下谷本町 35-12)  
\*\*\* (株)宮地鐵工所 保全部 保全技術グループ (〒103-0012 東京都中央区日本橋堀留町二丁目 4 番 3 号)  
\*\*\*\* 瀧上工業(株) 生産本部 技術設計グループ (〒351-2214 愛知県名古屋市中川区清川町 2 丁目 1 番地)  
\*\*\*\*\* (株)宮地鐵工所 設計部 (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通 3)

Targetting bridges planned to broaden the width of the slab in the future, we developed 2-main-girder bridges with a composite slab supported with cross beams. This structural type distinguishes in durability, easy to broaden the slab in the future. The cross beams arranged in the middle or lower parts conventionally changed into the upper parts. Besides, the main girders and cross beams support the composite slab in the 2-direction as a new structural type. And then, we adopt the newly developed composite slab based on the Robinson composite slab, Rationalizing, simplifying the structure with omitting the haunch and lower reinforcements. This paper reports the static behavior of the composite slab and the result of the moving load fatigue test to confirm the fatigue-durability.

**Key Words :** *the composite slab, the moving load fatigue test, stud, the 2-main-girder bridge*

### 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 主鈹桁橋である。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、構造性、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、採用することにした。

本形式は、主桁間隔 10m の鋼 2 主鈹桁と 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、補剛リップ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>。

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。

### 2. 試験概要

#### 2.1 試験目的

試験の目的を以下に示す。

- 移動載荷疲労試験より、合成床版の疲労耐久性を確認する。
- 静的載荷試験より、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。

#### 2.2 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-1 に試験機諸元、写真-1 に試験状況を示す。

#### 2.3 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(床版厚 258mm、主桁間隔 3.5m)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(6.5m)とした(表-2)。また、供試体のディテールは、橋梁支間中央部を再現した。供試体の一般図を図-2 に示す。

表-1 試験機諸元

供試体最大寸法		幅 7m×長さ 15m
荷重点 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
移動荷重最大荷重		490kN
移動荷重方式		単輪荷重 一軸荷重, 二軸荷重
移動荷重ストローク		±1.5m
移動荷重速度		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
繰返し荷重波		正弦波, 三角波, 可変台形波, 任意波

表-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-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>

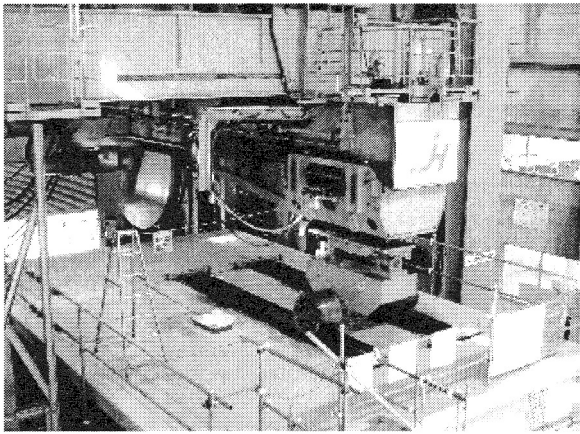


写真-1 試験状況

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-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-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.

ここで, 主桁間隔を実橋の 10.0m とした場合 (図-2) と供試体の 6.5m (図-3) とした場合を想定して 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. 解析条件として, 床版を積層シェル要素, 主桁と横桁を棒要素としてモデル化し, 主桁ラインの鉛直方向のみ固定した. 荷重は横桁間中央に輪荷重 100kN を載荷した. なお, 床版の異方性は考慮していない.

解析結果は, 曲げモーメント分布はほぼ一致しており, 最大曲げモーメントの比較では, 橋軸方向, 橋軸直角方向ともに, 両ケースの違いは 5%程度であり (表-5), 本橋試体は, 実物大相当であると判断した.

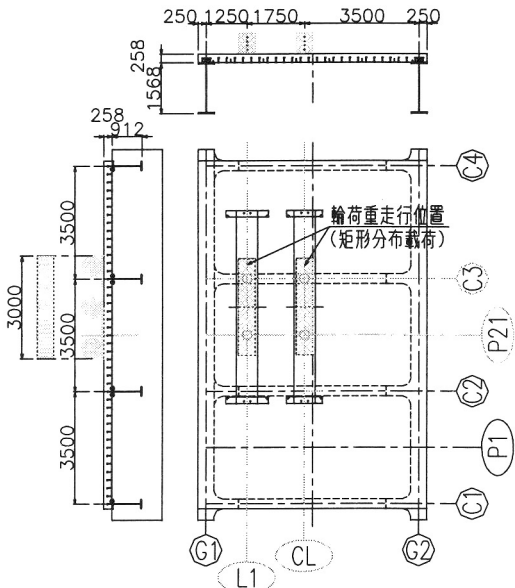


図-1 橋試体一般図

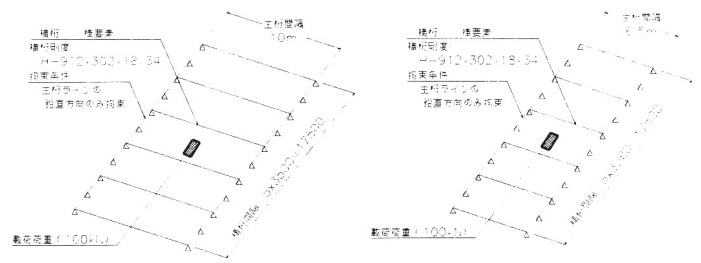


図-2 主桁間隔 10m モデル 図-3 主桁間隔 6.5m モデル

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

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>3</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%

## 2.4 載荷位置と着目位置

本床版は、上段配置された横桁で支持されており、横桁間中央と横桁上でその挙動や応力性状が大きく異なることが予想される。そこで、橋軸方向には、横桁間中央と横桁上を完全に通過するような 3m の矩形分布載荷を行った。また、橋軸直角方向は、輪荷重による床版せん断応力が大きくなるように主桁近傍に載荷中心を偏心させた (図-1)。

## 2.5 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-4 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。また、床版の耐用年数は文献<sup>3)</sup>を基に算出した。

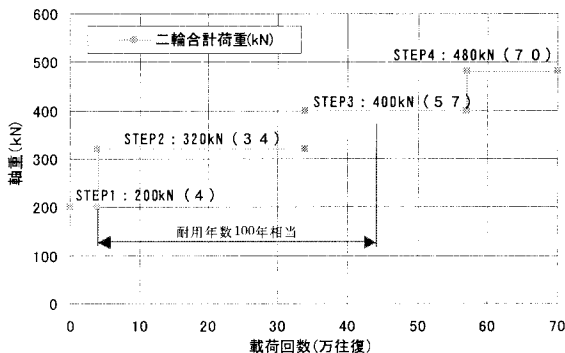


図-4 載荷パターン

## 3. 移動載荷疲労試験結果

輪荷重走行位置である L1,CL 断面および横桁間中央 (P21) と横桁上 (C3) に着目して計測を行ったが、いずれも同様な傾向を示したので、CL 断面と P21 断面の交点に着目した結果を示す (図-5)。

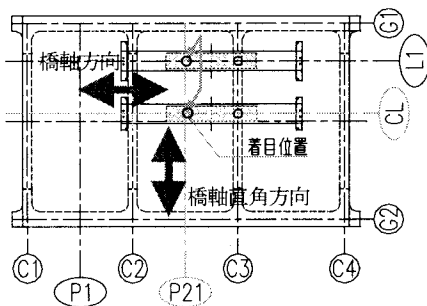


図-5 着目位置図

### 3.1 走行回数と床版たわみの関係

図-6 に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。計測結果より、走行回数が増すにつれて残留たわみが増加する。しかし、図-7 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と走行回数の関係は、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 200 kN に換算した弾性たわみ (換算値) は、走行開始から 70 万往復走行完了までほぼ一定であった。また、解析値と弾性たわみ (換算値) は、良く一致していた。なお、解析値とは、第 4 章に示す 3 次元 FEM 解析結果をいう。

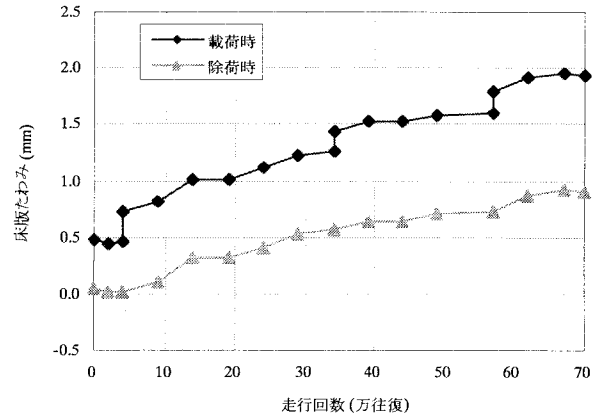


図-6 床版たわみ (P21-CL)

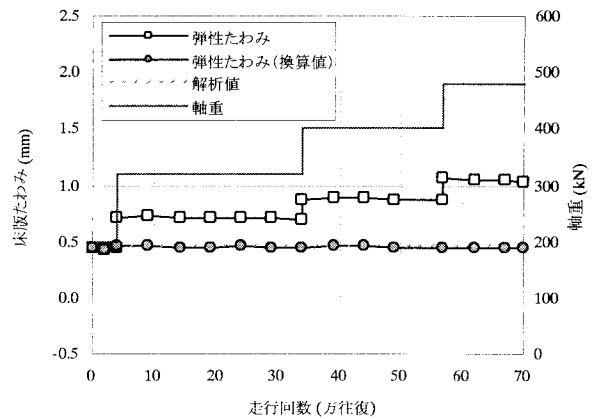


図-7 床版弾性たわみ (P21-CL)

### 3.2 走行回数とひずみの関係

走行回数とひずみの関係を図-9~12 に示す。図-9 は床版コンクリート上面の橋軸方向ひずみ、図-10 は底鋼板下面の橋軸方向ひずみ、図-11 は床版コンクリート上面の橋軸直角方向ひずみ、図-12 は底鋼板下面の橋軸直角方向ひずみと走行回数の関係をそれぞれ示す。また、計測位置図を図-8 に示す。

弾性ひずみ (換算値) に着目すると、図-9~12 のすべてにおいて、走行開始から 70 万往復走行終了に至るまでの間、急激な変化がなく、ほぼ一定の値を示している。また、計測値と解析値はよく一致していた。これは他の着目箇所においても同様の傾向であった。

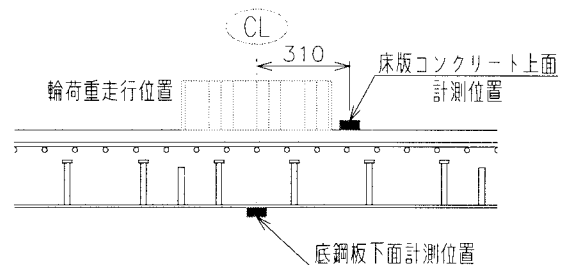


図-8 計測位置図

### 3.3 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。

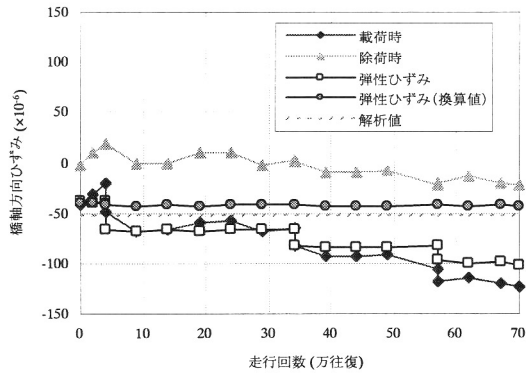


図-9 床版コンクリート上面 橋軸方向ひずみ

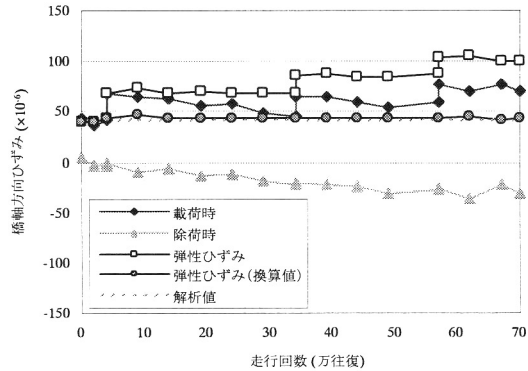


図-10 底鋼板下面 橋軸方向ひずみ

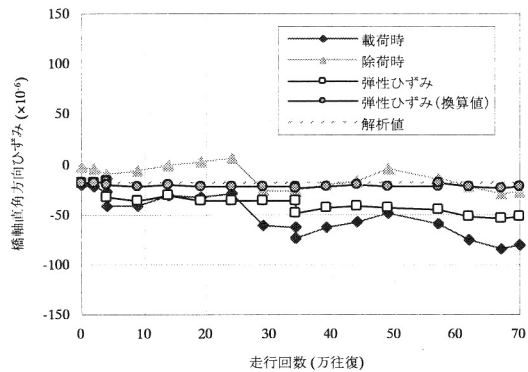


図-11 床版コンクリート上面 橋軸直方向ひずみ

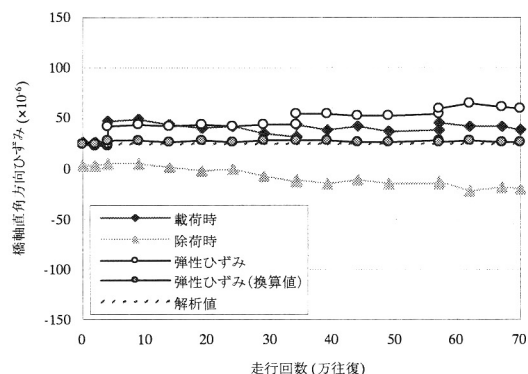


図-12 底鋼板下面 橋軸直方向ひずみ

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、供試体を切断して内部観察を行ったが、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-2）。さらに、供試体のコンクリートをはつり、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。

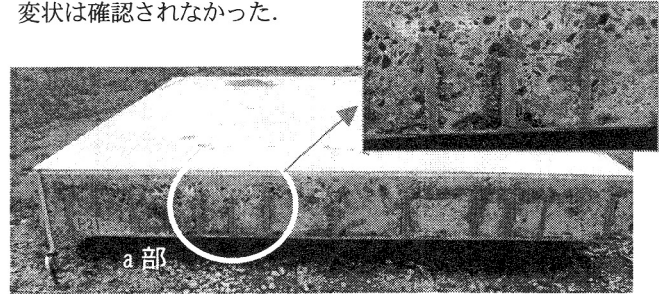


写真-2 P21 切断面

### 3.4 移動載荷疲労試験のまとめ

合成床版を横桁で支持する鋼橋形式の移動載荷疲労試験の結果、床版たわみおよび各部のひずみは、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ものの、急激な変化は生じず、弾性たわみ（換算値）はほぼ一定であった。

この結果より、本合成床版は、走行回数の増加によって剛性がほとんど低下することなく、十分な疲労耐久性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

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、3次元 FEM 解析との比較を行った。解析は汎用有限要素法プログラム「MSC.visualNastran for Windows」を使用した。

### 4.1 解析モデル

#### (1)要素の構成

表-5 に示す要素を使用して、供試体のモデル化を行った。図-14 に解析モデルを示す。

表-5 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

#### (2)材料特性

解析に使用した各部材の材料定数、諸元を表-6 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-6 材料定数、材料諸元

	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
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	

### (3)拘束条件

主桁下フランジの節点の全自由度を拘束した。

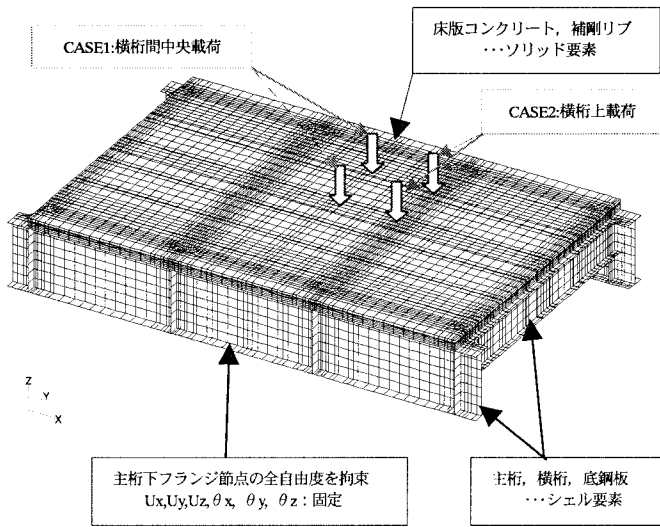


図-14 解析モデル

### (4)荷重載荷位置

載荷位置は、CASE1:横桁間中央 (P21) 載荷 CASE2:横桁上 (C3) 載荷の2種類とし、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。

### 4.2 解析結果および試験結果との比較

静的載荷試験結果は、移動載荷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。

#### (1)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-15, 16 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。

#### (2)床版のひずみ分布

図-17, 18 に CL 断面における橋軸方向ひずみ分布を示す。図-17 は床版コンクリート上面、図-18 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計測値と解析値は良く一致している。

参考として、図-19 に床版コンクリート上面の橋軸方向応力コンター図を示す。

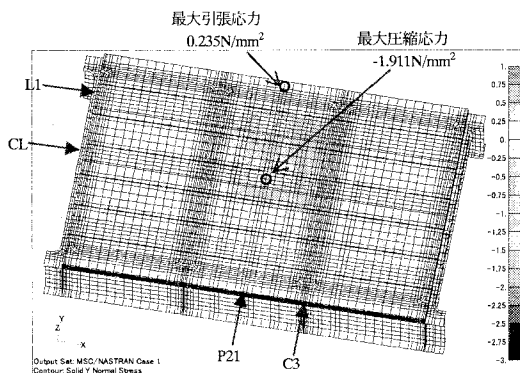


図-19 床版コンクリート上面 橋軸方向応力コンター図

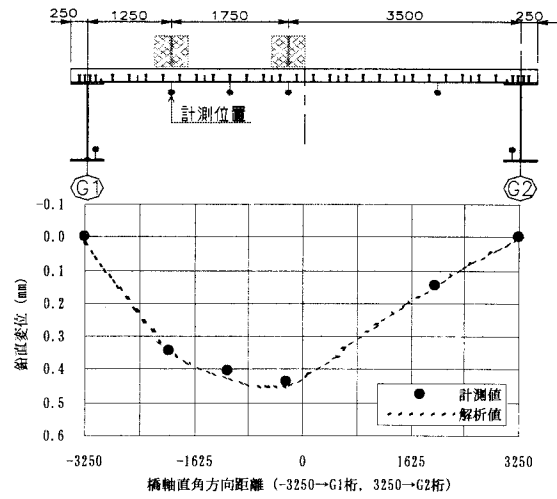


図-15 P21 断面床版たわみ分布 横桁間中央載荷

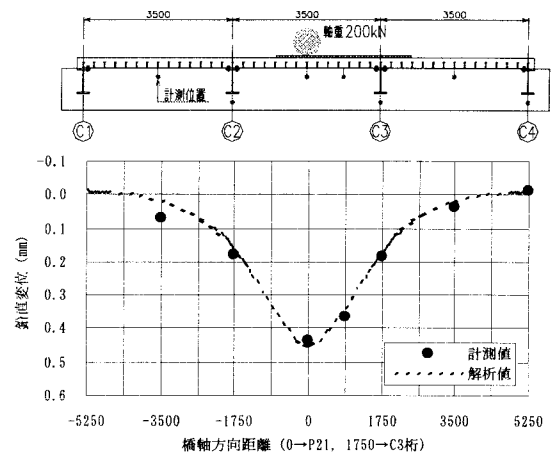


図-16 CL 断面床版たわみ分布 横桁間中央載荷

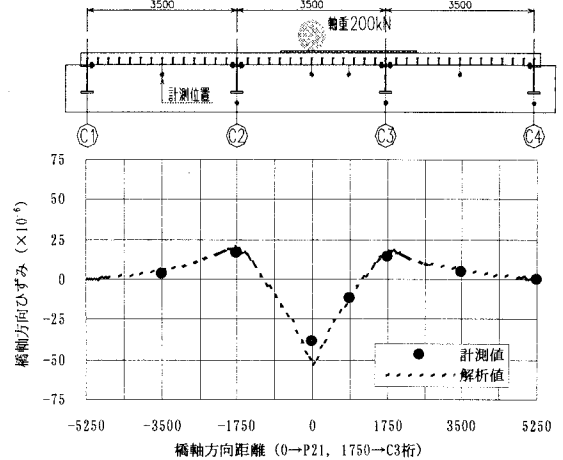


図-17 コンクリート上面橋軸方向ひずみ (CL 断面)

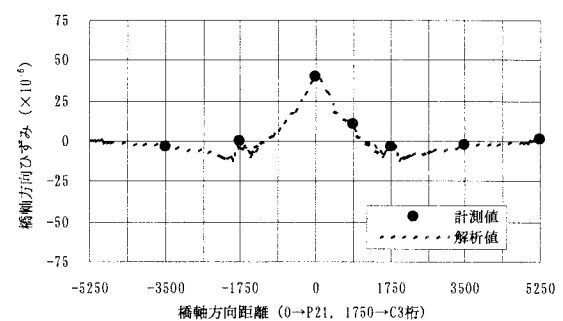


図-18 底鋼板下面橋軸方向ひずみ (CL 断面)

### (3)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-20, 21 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-20, 21 何れも計測値と解析値はよく一致している。図-20 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-21 は、輪荷重の影響が小さいためひずみ分布はほぼ直線的な分布となっている。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。

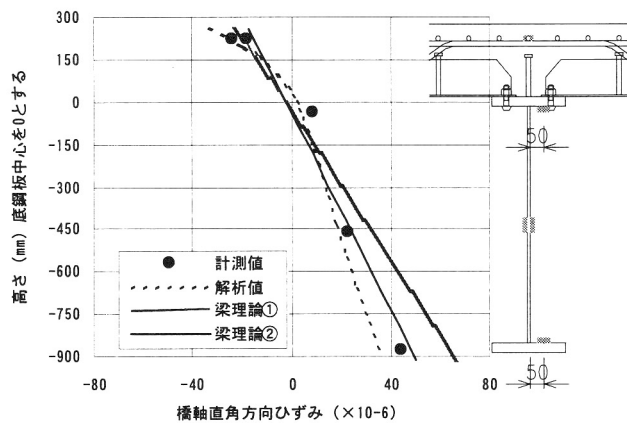


図-20 CL 断面 橋軸直角方向ひずみ分布

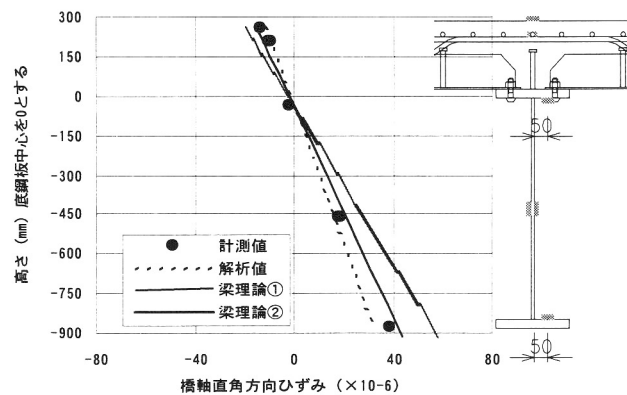


図-21 CL, L1 中間断面 橋軸直角方向ひずみ分布

### 4.3 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。

- 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。
- 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。
- 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

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-4 に示すとおり非常に良好であった。

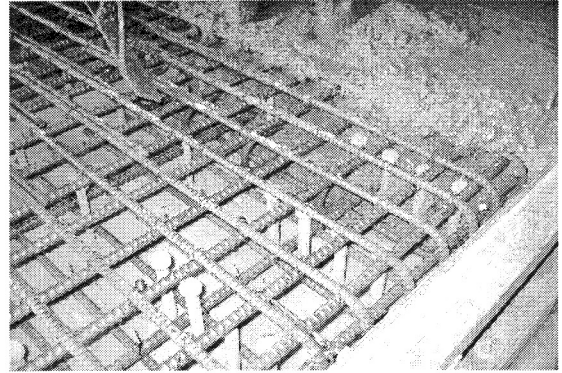


写真-4 コンクリート打込み状況

### 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 主鋼桁橋の提案：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)。
- 4)高橋昭一，鈴木永之，築山有二，永山弘久，生駒元，阪野崇人：上段配置した横桁で合成床版を支持する 2 主鋼桁橋の開発：第 6 回複合構造の活用に関するシンポジウム