

## スタッドジベル付きバルブプレート合成床版の研究

Study on Composite Slab using bulb plate with Stud dowel

杉原伸泰\*, 北村幸嗣\*, 若林保美\*\*, 数藤久幸\*\*\*, 松野進\*\*\*, 松井繁之\*\*\*\*

Nobuyasu SUGIHARA, Koji KITAMURA, Yasumi WAKABAYASHI, Hisayuki SUDO,

Susumu MATSUNO and Shigeyuki MATSUI

- \* 工修 日立造船(株) 技術研究所 鉄構・海洋研究室 (〒551-0022 大阪市大正区船町 2-2-11)  
\*\* 日立造船(株) 鉄構・建機事業本部 橋梁設計部 (〒550-0002 大阪市西区江戸堀 2-6-33)  
\*\*\* 工修 日立造船(株) 鉄構・建機事業本部 技術開発部 (〒550-0002 大阪市西区江戸堀 2-6-33)  
\*\*\*\* 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Recently, the development of bridge slabs with high strength and durability as well as low maintenance costs instead of the ordinary reinforced concrete slabs tends to be required strongly by several administrators. On the recent studies, the composite slabs tend to be attracted attention as the slabs that satisfy these requirements.

New type composite slab using bulb plates with stud dowels was developed. This paper reports a series of tests of the static test using a slab specimen, beam specimens and the wheel running test using slab specimens introduced. Principal results are as follows,

- ① The composite slab using bulb plates with stud dowels has a high static bending strength.
- ② The stiffness and strength as formworks of the composite slab are enough high.
- ③ This composite slab has high fatigue durability on the results of wheel running test.

Key word: composite slab, bulb plate, stud dowel, wheel running test, fatigue durability, bending strength

### 1. はじめに

近年、合成床版は高耐久性、工期短縮および長支間化に対応できる高性能床版として注目されており、国土交通省をはじめ、各公団・公社の道路橋床版への適用実績が急激に増加している。このような状況に対し、各研究機関では多様な構造形式の合成床版が開発され、多くは実橋床版に適用されている。しかし、これまでに開発された合成床版は構造が複雑であるため、製作工程および現場施工工程が多くなり、コストアップにつながっていた。

本研究では、道路橋床版としての性能を保有し、かつ製作工程および現場施工工程を大幅に簡略化した球平形鋼（バルブプレート、以下 BPL と称す）を補強材とする BPL 合成床版を開発した。BPL 合成床版は、スタッド付き BPL を底鋼板に溶接し、その上部に鉄筋を配置してコンクリートを打ち込み一体化する合成床版である。図-1 に BPL 合成床版の鋼殻部構造を示す。本構造は、スタッドおよび BPL がずれ止めとして作用するのみでなく、BPL と底鋼板で囲まれるコンクリート部分を BPL 球頭部とスタッドが拘束することにより、鋼とコンクリートとの合成作用を向上させる効果を有するという特徴がある。

しかし、BPL の拘束効果についての評価はいままでに例がなく、本合成床版の性能評価をする上では、実験的な検証が必要であった。

そこで、梁モデル試験体および平板モデル試験体を用いた静的荷重実験を行い、供用荷重レベルの強度および終局強度、また破壊性状の確認を行った。さらに、本合成床版の疲労耐久性の評価を目的として、輪荷重走行試験を実施した。その結果、本合成床版が高い強度を有するとともに、高い疲労耐久性を有することが確認された。



図-1 バルブプレート合成床版 (BPL 合成床版)

## 2. 静的載荷実験

### 2. 1 梁モデル試験体による静的載荷試験

本合成床版では、底鋼板の補強機能およびコンクリートとのずれ止め機能を確保するためにスタッド付きBPLを採用した。これまでの研究<sup>5)</sup>によって、スタッド付きBPLが十分なせん断耐力を有することが確認されている。そこで、スタッド付きBPLのずれ止め作用およびコンクリート拘束作用による耐力力向上の効果を検討するために梁モデル試験体の静的曲げ載荷実験を実施した。

#### 2. 1. 1 試験体および試験方法

梁モデル試験体の仕様を表-1、試験体形状を図-2に示す。BPLの間隔は、実橋床版支間を5.8mと想定し、鋼型枠部材のコンクリート打ち込み時に対する検討を行った結果、最大450mmとすることが可能であることが分かった。そこで、梁モデル試験体においては、BPLの430mmを基本間隔として、検討を行った。

梁モデル試験体寸法は、幅860mm×高さ260mm×長さ3100mmとし、厚さ6mmの底鋼板にそれぞれ2枚のBPLまたは平型鋼を設置した。BPL寸法はウェブ厚9.5mm、高さ180mmである。また、平型鋼はウェブ厚12mm、高さ180mmとした。上面側には鉄筋(D16)を配筋した。

BPLおよびスタッドそれぞれの耐荷性能と合成挙動への影響を確認するため、梁モデル試験体は6種類とした。B1型試験体は基本形としてスタッド付きBPLを溶接した。B1-Gは鋼殻部表面にグリースを塗布し、鋼とコンクリート間の付着をなくした。また、B1-SはBPL間隔を430mmから300mmと小さくした。B2はBPLのみを設置した試験体、B3はBPLをウェブの高さ中央付近で背面側に5°折り曲げた試験体で背面のコンクリートの拘束を期待したものである。B4は底鋼板補強リブとして平型鋼を使用し、底鋼板にスタッド(φ22mm、高さ150mm)を設置した試験体である。平型鋼には孔、スタッド等のずれ止め部材は設けていない。梁モデル試験体に用いたコンクリートの強度特性を表-2に示す。本試験体には実橋床版と同様、膨張材を添加した。

図-3に梁モデル試験体の3点曲げ載荷試験状況を示す。載荷スパン長は2800mmとし、支間中央のBPL直上に150×150mm、厚さ50mmの載荷ブロックを2箇所設置し、静的載荷を行った。

#### 2. 1. 2 試験結果

図-4に載荷支間中央のたわみと荷重の関係を示す。B1およびB1-Sでは約250kNで若干剛性が変化した。これはBPLとコンクリートとの付着切れが始まったためと考えられる。しかし、その後の剛性の変化は緩やかであり、BPLのスタッドがBPLとコンクリートとの合成効果を高める機能があることを示している。設計相当荷重100kNに対し、付着切れ開始時の強度は約2.5倍、最大

表-1 梁モデル試験体仕様

供試体	寸法 幅×長さ (mm)	床版厚 (底鋼板厚) (mm)	支間長 (mm)	リブ		底鋼板 スタッド	付着
				形状	間隔 (mm)		
B1	860×3000	260(6)	2800	スタッド 付BPL	430	無	有
B1-G					300		無 (グリース塗布)
B1-S				430	有		
B2							BPL
B3							BPL*
B4							平鋼板

BPL\*ウェブ中央で約5° 曲げ加工したBPL

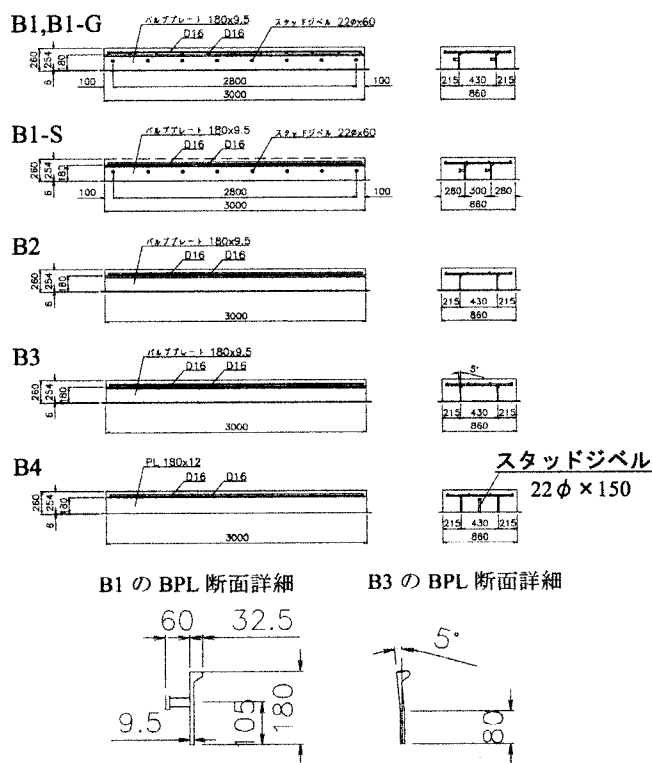


図-2 梁モデル試験体

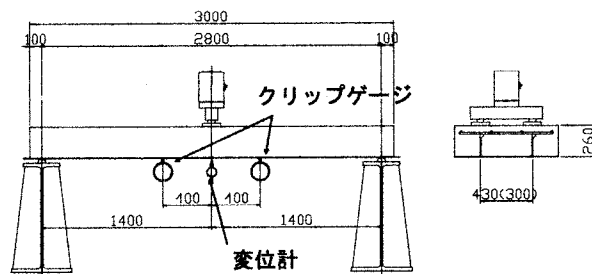


図-3 梁モデル載荷試験状況

表-2 コンクリート強度特性  
(梁モデル試験体)

	(N/mm <sup>2</sup> )
圧縮強度	39.7
引張強度	3.0
ヤング係数	28000

耐力は約6倍であり非常に高い安全余裕度を示した。B1-Gでは荷重約200kNで剛性の急激な変化がみられた。すなわち、グリースによってBPLとコンクリート間の付

着を小さくしたために、早期にずれが生じ、それ以降の剛性も小さい結果となった。B2およびB3は荷重380kNまで、B1と同様の挙動を示し、その後、剛性が急激に低下した。これはBPLとコンクリートとのずれに対する抵抗部材がないためである。また、終局耐力はB1の約80%まで低下した。BPLを折り曲げたB3試験体は、それほどコンクリートの拘束効果を示さなかった。B4では荷重200kNでずれが発生し、その後の強度増加も小さく、最大耐力は400kNでB1の約65%であった。

図-5に支間中央から400mm離れた位置の底鋼板とコンクリートとの相対ずれを示す。底鋼板とのずれの発生荷重は180kNであり、設計荷重の約1.8倍であった。また、平型鋼および底鋼板スタッドを使用したB4も、ずれの発生荷重はほぼ同様であった。

しかし、載荷荷重200kNを超えてからはB1およびB1-Sのずれ量の増分は小さく、スタッドが水平方向のずれ止め部材として有効に機能した結果と言える。

以上より、BPLは平型鋼による補強よりもコンクリートの拘束効果を有し、BPLを用いた梁構造は高い変形性能と剛性を示すことがわかった。

## 2. 2 平板モデルによる静的載荷試験

床版としての耐荷性能を評価するために実物大の床版試験体を用いた平板モデル静的載荷試験を実施した。

### 2. 2. 1 試験方法および試験体

試験体は橋軸方向に2400mm、橋軸直角方向に3300mmを取り出した部分モデルとした。底鋼板厚は6mm、BPL高さ180mm、設置間隔300mmであり、スタッドは底鋼板上面から105mmの位置に設置した。

コンクリートの強度特性を表-3に示す。本試験体においても梁試験体と同様、膨張材を添加した。

図-6に平板モデル載荷試験状況、図-7に試験体形状を示す。荷重は、T荷重を想定し支間中央の曲げモーメントが文献1)に示されるものと等しくなるように約250kNを設計荷重とした。載荷方法は250kN、500kN、750kN、250kN、1400kNの荷重を順に、それぞれ10回、1回、2回、5回、1回載荷するものとした。

表-3 コンクリート強度特性  
(平板モデル試験体)

	(N/mm <sup>2</sup> )
圧縮強度	42.0
引張強度	3.7
ヤング係数	24900

### 2. 2. 2 試験結果

#### (1) 荷重-たわみ関係

図-8に載荷位置における荷重-たわみ関係を示す。250kN載荷開始時のたわみ量を基にする剛性は、全断面有効の梁理論による剛性を1とすると、若干10%程度低

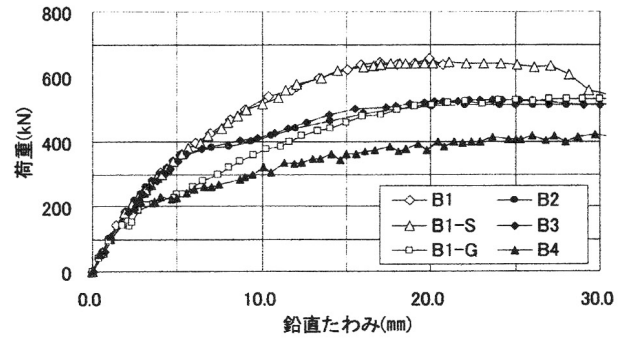


図-4 荷重-たわみ関係 (梁モデル試験体)

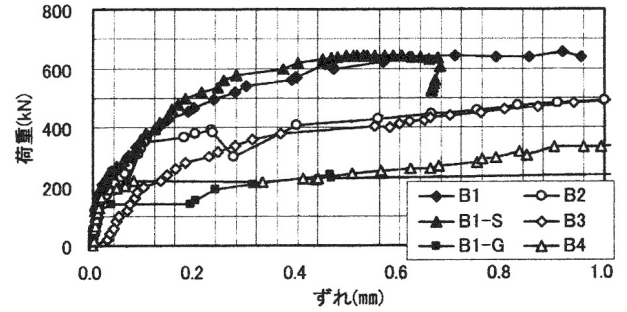


図-5 荷重-ずれ関係 (梁モデル試験体)

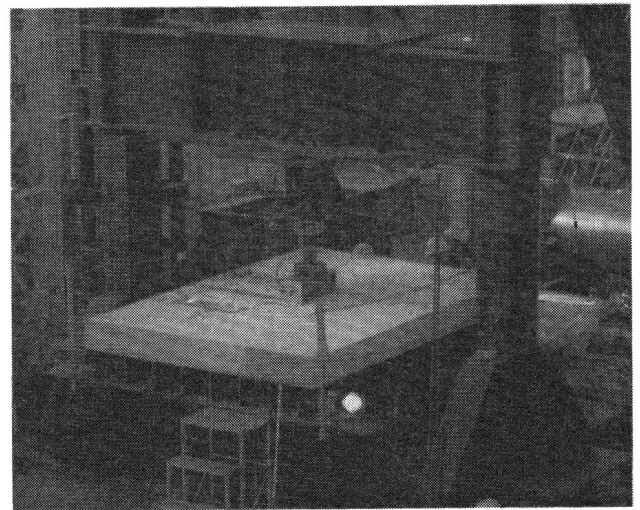


図-6 平板モデル載荷試験状況

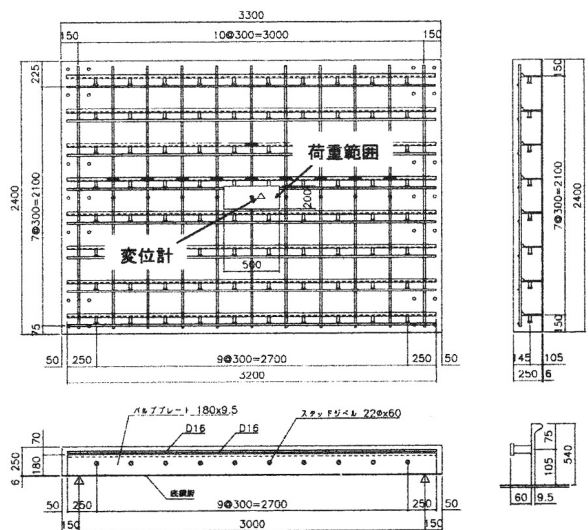


図-7 平板モデル試験体

くなっている。しかし、床版の各ひずみ分布計測結果より、床版ひずみ分布形状が完全合成と仮定した解析結果とほぼ一致していること、また、鋼部材とコンクリート間ではずれは確認されていないこと、250kNを10回繰り返す載荷では、荷重-たわみ関係は線形であり剛性の変化はなかったことから、設計荷重レベルでは完全合成の状態であるとみてよいと考えられる。500kN載荷後では剛性はさらに若干の低下が見られた。750kN載荷後は底鋼板とコンクリートの付着が切れたことによって剛性は0.756まで低下し、250kNの5回繰り返し、750kN載荷及び1400kN載荷後の剛性は0.72に低下し、1400kNでは、押し抜きせん断破壊は生じなかった。

### (2) 橋軸直角方向のひずみ分布

図-9に、設計荷重250kN載荷時の橋軸方向中央位置における底鋼板とコンクリート表面の橋軸直角方向のひずみ分布を示す。図中の解析値は、BPL合成床版の異方性および断面を等価剛性でモデル化したシェル要素を用いて解析した結果を示す。等価剛性は、鋼とコンクリートの完全合成及び全断面有効の仮定から算出した。コンクリート表面のひずみの計測値は、載荷点の影響で解析値よりも大きい分布形状はほぼ等しく、底鋼板のひずみは $20\mu$ の精度で一致している。よって設計荷重時には完全合成の状態に近い。

### (3) 厚さ方向ひずみ分布

図-10に250kN-1回目および5回目載荷時の載荷点近傍における厚さ方向ひずみ分布を示す。全断面有効

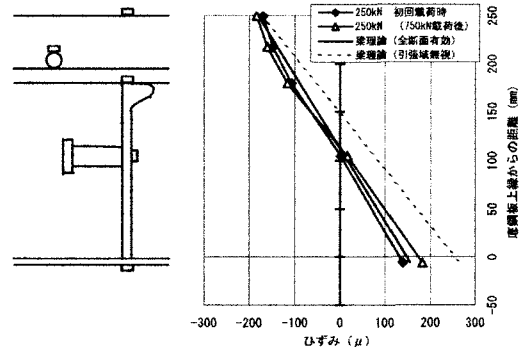


図-10 厚さ方向のひずみ分布 (載荷点近傍)

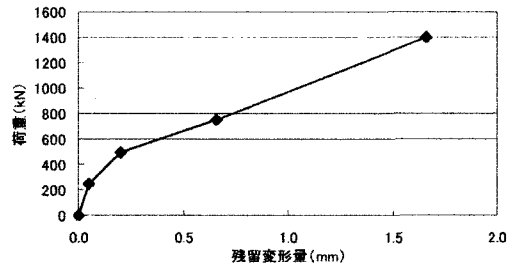


図-11 荷重-残留変位関係 (平板モデル)

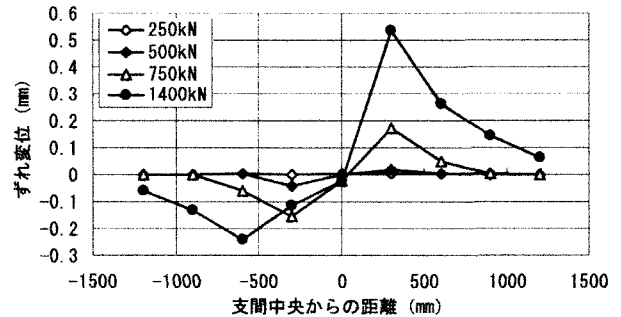


図-12 ずれ量分布 (橋軸方向中央位置)

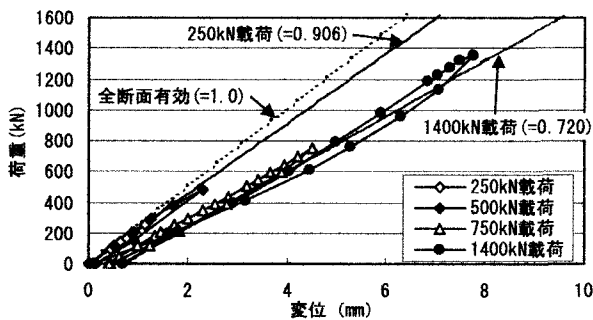


図-8 荷重-たわみ関係 (載荷点近傍)

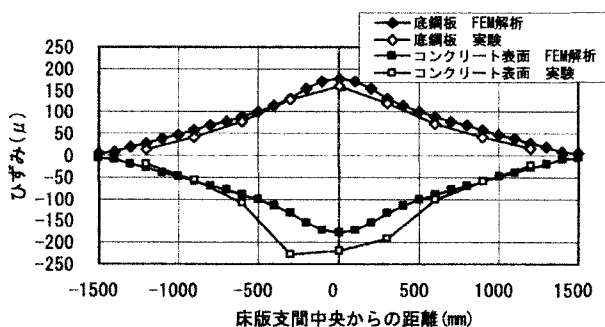


図-9 設計荷重時のひずみ分布 (橋軸方向中央位置)

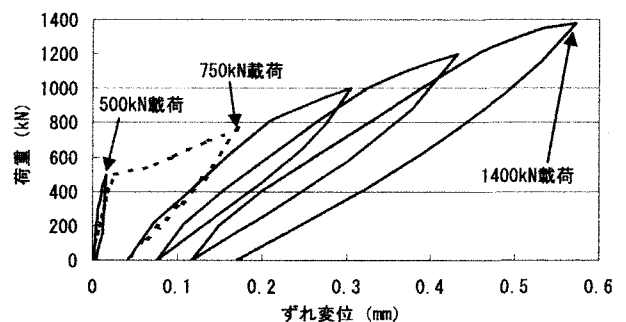


図-13 荷重-ずれ量関係 (載荷点近傍)

とした場合と引張側コンクリートを無視した場合の梁理論値も同時に示す。剛性低下前の250kN載荷は、コンクリートにクラックが発生しておらず実験値は梁理論値とよく一致している。剛性低下後の250kN載荷時では、底鋼板のひずみが増加するが、ひずみ分布は直線に近い状態を示している。また中立軸の移動は約10mmと理論値と比較して小さい。これは鋼とコンクリートとの付着が切れた後もBPLとスタッドにより拘束されていることを示している。

#### (4) 残留たわみ

図-1 1 に荷重位置における荷重と残留たわみの関係を示す。250kN -10 回荷重後の残留たわみが 0.05mm 生じているが、これは試験器具・支持点などの機械的な遊びによるものと考えられる。350kN 近傍では、クラックが発生し、それ以降の荷重において残留たわみが増加したが、1400kN 荷重後でも約 1.6mm と小さい。

#### (5) 底鋼板とコンクリート間の相対ずれ

図-1 2 に各荷重載荷後の橋軸方向中央位置における底鋼板とコンクリートの相対ずれの分布を示す（橋軸直角方向）。設計荷重 250kN 荷重時には、相対ずれは発生せず、500kN 荷重時に荷重点近傍で 0.05mm のずれが確認された。図-1 3 に荷重点近傍でのずれ量の履歴を示す。500kN 荷重時のずれはほとんど生じていない。500kN を超えたときに勾配が減少し、鋼とコンクリートの付着が切れたと考えられる。さらに 1400kN までの荷重を行ったがほぼ 750kN 荷重時の付着が切れた後の勾配で変化した。

以上より、BPL とスタッドを組み合わせた合成床版である BPL 合成床版は、従来の合成床版と比べて構造的に簡素化された合成床版であるにもかかわらず、十分なコンクリートと底鋼板とのずれ止め効果を発揮し、合成床版としての機能を満足していることがわかった。また、この実験結果により、スタッド付き BPL は大きなずれ止め効果を示すために BPL ピッチを 430mm としても良いことが確認された。

### 3. 輪荷重走行試験による疲労試験

静的荷重実験から本合成床版は、BPL およびスタッドのずれ止め作用およびコンクリート拘束作用によって高い合成挙動を示している。しかし、道路橋床版の性能評価を行う上で疲労耐久性の確認は重要な試験項目である。

そのため、BPL 合成床版試験体に対し、輪荷重走行試験を実施し走行荷重に対する疲労耐久性の評価および限界状態における断面性能の確認を行った。

#### 3. 1 試験方法および試験体

輪荷重走行試験状況を図-1 4 に示す。本試験は、大阪大学所有の輪荷重走行疲労試験機を使用して実施した。

走行試験の床版支間を 2.0m とし、単純支持条件で支持桁に設置した。橋軸方向の端部には横桁を設置し弾性支持条件とした。試験体の形状を図-1 5 に示す。

試験体の形状寸法は、走行試験機の荷重能力の上限から 2/3 縮尺モデルとし、試験体床版厚を 180mm、BPL の形状は、鋼材を削り出すことによって製作した。背面スタッドは径 16mm × 長さ 40mm を 200mm 間隔で溶接した。BPL の間隔は 300mm とした。スタッドの取り付け位置は底鋼板上面より 70mm とした。なお、底鋼板板厚は

4.5mm とし、上側鉄筋は D13 を橋軸および橋軸直角方向共 200mm 間隔の配筋とした。

走行試験の荷重プログラムは、図-1 6 に示すように 100kN から開始し最大 240kN まで増大させる階段状とした。なお、設計相当荷重は 100kN である。本実験の実施走行回数は、50 万往復または床版破壊までとした。

本試験体で使用したコンクリート強度特性を表-4 に示す。コンクリートには膨張材を添加した。

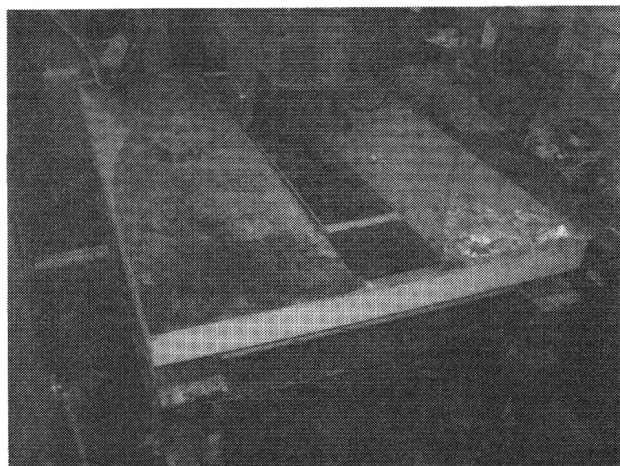


図-1 4 輪荷重走行試験状況

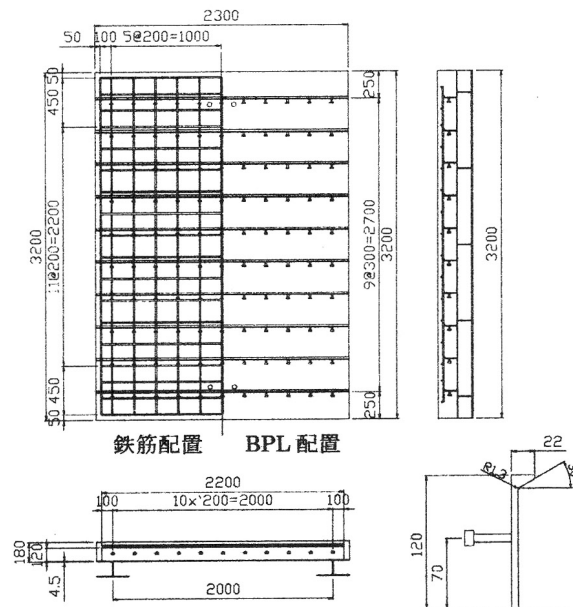


図-1 5 輪荷重走行実験試験体

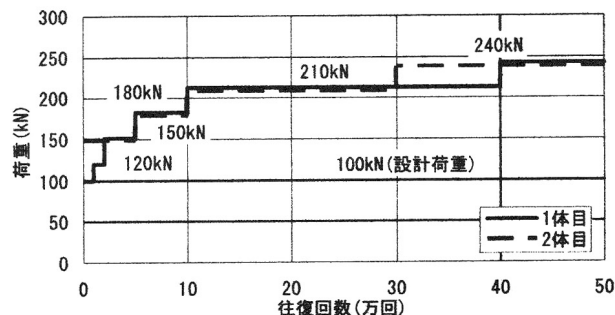


図-1 6 荷重プログラム

表-4 コンクリート強度特性  
(単純版走行試験体)

	(N/mm <sup>2</sup> )
圧縮強度	45.0
引張強度	4.2
ヤング係数	31500

### 3. 2 輪荷重走行試験結果

図-17に輪荷重走行試験によるたわみの経時変化を示す。図中のたわみ値としては、載荷荷重100kNに換算した活荷重たわみを示す。走行載荷中のたわみ増分はほとんどなく、50万往復終了後においても5/100mm程度の増加にとどまっている。この傾向は2体の試験体とも同じ結果で、本試験で採用した荷重条件においては、損傷が進展していないと言える。

図-18に走行試験終了後の床版上面ひび割れ発生状況、図-19に底鋼板とコンクリートの剥離状況を示す。床版上面では橋軸直角方向のひび割れが発生しているが、これは床版試験体設置時の支点部負曲げによるもので、走行荷重によるひび割れ進展は見られなかった。さらに、荷重強度を大きくした2体目についても同様に、ひび割れ進展は認められなかった。底鋼板とコンクリート間の剥離は、走行試験初期段階から走行範囲下の橋軸方向中央部より発生し始め、その後、急速に進展している。走行荷重210kNに上昇した段階では、ほぼ全面に剥離が認められた。しかし、活荷重たわみの変化がほとんどないことから、底鋼板の剥離による床版の剛性の低下はなく、合成床版としての機能が損なわれていないことがわかる。

以上の結果から、スタッド付きBPLによるコンクリートの拘束効果によって合成床版は高い疲労耐久性を有することがわかった。

### 4. まとめ

本研究の結果、補強部材としてBPLを採用することで以下の結論が得られた。

- ① 梁モデル試験体の載荷実験より、BPL合成床版は鋼板とコンクリートとの合成度が高く、高い強度を有している。
- ② 底鋼板とコンクリートとのずれが確認された後もスタッド付きBPLにより高い靱性を有する。
- ③ 輪荷重走行試験結果より、非常に高い疲労耐久性を有することが確認できた。

今後、さらに実験結果の分析を行い、スタッド付きBPLを用いた場合の理論的検討を行う。また、実物大床版試験体を用いた輪荷重走行試験を実施し疲労耐久性の実証を行い、低コストで高耐久性の合成床版の確立をめざす。

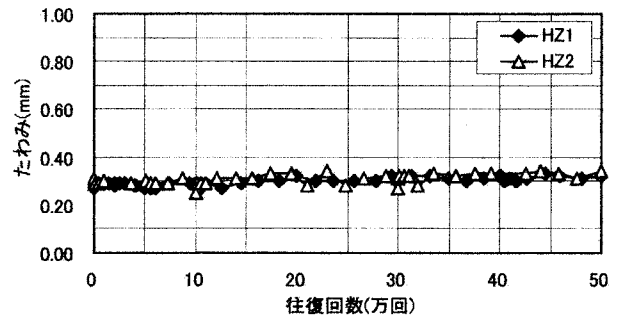


図-17 活荷重たわみ経時変化 (床版中央)

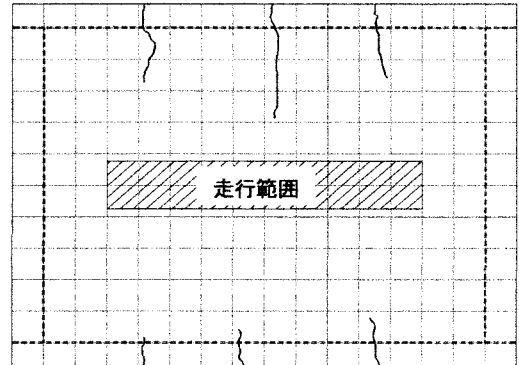


図-18 床版上面ひび割れ発生状況

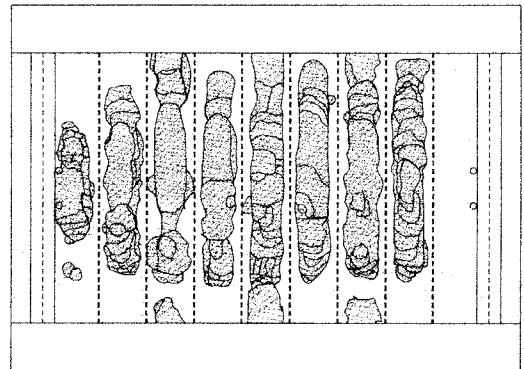


図-19 底鋼板-コンクリート剥離状況

### 参考文献

- 1) 土木学会、鋼構造設計指針 PARTB
- 2) 土木学会、道路橋床版の新技術と性能照査型設計、2000.10
- 3) 日本道路協会、道路橋示方書・同解説、共通編、鋼橋編、2002.3
- 4) 土木学会、鋼・コンクリート複合構造の理論と設計(1)基礎編:理論編、構造工学シリーズ9-A、1998
- 5) 松野進他、合成床版に用いるバルブプレート補強材の押し抜きせん断強度、土木学会第56回年次学術講演会、2001.10
- 6) 安田和宏他、バルブプレート合成床版の強度特性、土木学会第57回年次学術講演会、2002.9