

## バルブプレート合成床版の疲労耐久性に関する実験的研究

Experimental Study on Durability of Composite Slab using Bulb plate with Studs

杉原伸泰\*, 北村幸嗣\*\*, 岩田節雄\*\*, 松井繁之\*\*\*

Nobuyasu SUGIHARA, Koji KITAMURA, Setsuo IWATA and Shigeyuki MATSUI

- \* 工修 Hitz 日立造船(株) 環境・鉄構事業本部 設計部 (〒550-0002 大阪市西区江戸堀 2-6-33)
- \*\* 工博 Hitz 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)
- \*\*\* 工博 大阪大学大学院 工学研究科土木工学専攻 教授 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

Recently, the high strength and durability of bridge slabs have been required. Authors have developed the composite slab using bulb plates with studs, and executed some experiments about load proof performance and fatigue durability. As one of that experiments, the wheel running test using 2/3 scale model had been carried out, and it showed that this composite slabs has high durability. However it is necessary to confirm the damage process under the fatigue load to estimate the limit state. Then, another wheel running test under more severe load condition was carried out. As the result of this test, the fatigue durability of this composite slab is higher than that of RC slab and PC slab, and the damage process of this slab was clarified by observation of concrete crack propagation.

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

### 1. はじめに

バルブプレート合成床版は、底鋼板にスタッド付きバルブプレートを連続すみ肉溶接により設置し、鉄筋をバルブプレート上側に配筋した後にコンクリートを打込み一体化する鋼・コンクリート合成床版である。図-1にバルブプレート合成床版の構造概要を示す。床版コンクリート打込み時においては、底鋼板とバルブプレートからなる鋼殻パネル部材が型枠部材としての機能を果たし、コンクリート硬化後においては、コンクリートと底鋼板およびバルブプレートが一体となって作用荷重に抵抗する。バルブプレートウェブに設置したスタッドによりバルブプレートとコンクリート間の相対ずれを抑制し、また、バルブプレートが床版コンクリートを拘束することによって、鋼とコンクリートを合成する効果が期待できる構造である。

著者らはこれまでにバルブプレート合成床版の耐荷性能および耐久性能についての性能確認試験<sup>1), 2), 3)</sup>を実施している。疲労耐久性能に関しては、縮尺 2/3 の試験体を製作し、輪荷重走行試験により確認を行っている。その結果としては、最大荷重 235kN、総走行回数 100 万回の輪荷重繰り返し载荷に対し、走行最終段階まで耐荷性能を有していることを確認している。また、試験終了後に行った床版試験体の切断面の観察から床版内部にはひび割れが発生

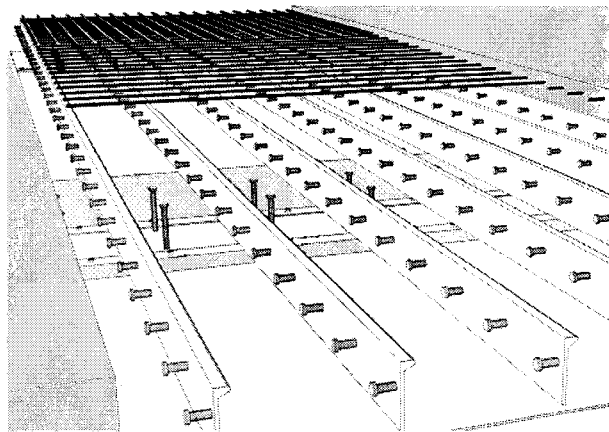


図-1 バルブプレート合成床版の構造概要

しておらず、非常に高い疲労耐久性を有する結果が得られている。

本研究ではさらにバルブプレート合成床版の RC 床版、PC 床版との疲労耐久性能の比較を行うとともに、大きな繰り返し輪荷重载荷による損傷進展状態の確認を行うことを目的として、上記走行試験からさらに载荷荷重を大きくした輪荷重走行試験を実施した。その結果、あらためて本合成床版が床版として十分な耐久性を有していることが確認されたので、ここに報告する。

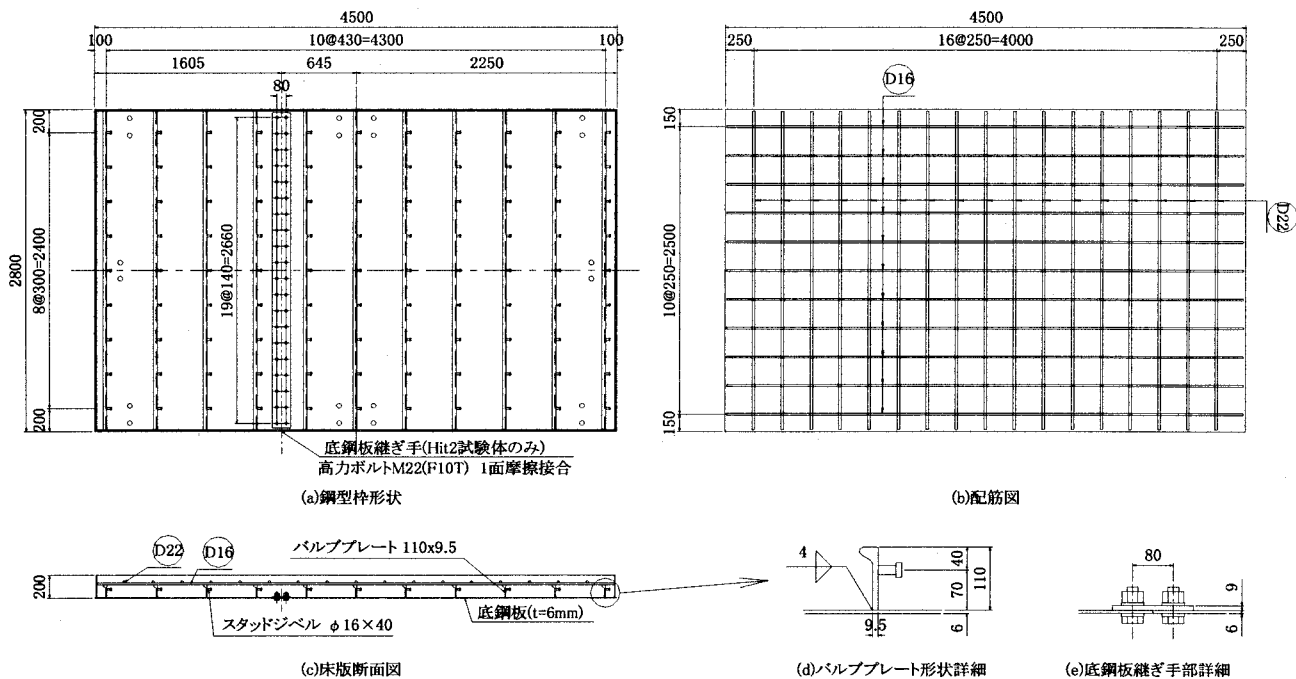


図-2 走行試験体形状

表-1 コンクリート配合

呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	セメント	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C+E (%)	S/a (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )					
						水 W	セメント C	膨張材	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
27	N	12	4.5	53.0	44.1	175	300	30	764	988	3.50

注)セメントN: 普通ポルトランドセメント

## 2. 試験体および試験方法

試験体は2体製作し、1体は底鋼板継ぎ手部の無い試験体(以下、Hit1試験体)、他の1体は底鋼板継ぎ手部を有する試験体(以下、Hit2試験体)とした。その他の諸元については2体とも同一とした。

底鋼板継ぎ手構造は、高力ボルトM22(F10T)を使用した一面摩擦接合とし、底鋼板厚6mmに対し、9mm厚の添接板を使用した。試験体形状を図-2に示す。

試験体の断面決定は、床版支間3.0mの連続版とし、1日当り大型車交通量を2,000台以上として割増した設計曲げモーメントに対して、鋼型枠断面および鉄筋量を決定した。床版厚は底鋼板厚を含み200mmとした。

バルブプレートは、高さ180mm×ウェブ厚9.5mmの型钢を110mm高さまで切削加工により製作し、橋軸方向間隔を430mmとして、連続すみ肉溶接で施工した。

頭付きスタッドΦ16mm×40mmを図-2(d)に示すように、バルブプレートの球突起の無いウェブ面に橋軸直角方向間隔300mmで取り付け、取り付け高さは底鋼板上面より70mm位置とし、バルブプレートの底鋼板への連続すみ肉溶接施工が可能となるよう配慮した。

試験体に使用した鉄筋は、橋軸直角方向鉄筋としてD22を250mm間隔、橋軸方向鉄筋としてD16を250mm間隔でバルブプレート上面に配筋した。鉄筋の材質はSD345

表-2 コンクリートの強度特性

	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	割裂引張強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング率 N/mm <sup>2</sup>
7日	23.6	—	—
28日	29.8	3.2	31,633
91日	32.2	—	32,633

注)封緘養生した試験体の強度特性を示す

表-3 鋼材の強度特性

		ヤング率 N/mm <sup>2</sup>	降伏点 N/mm <sup>2</sup>	引張強さ N/mm <sup>2</sup>	ポアソン比
鉄筋	D16	—	390	565	—
	D22	—	387	582	—
バルブプレート		203,627	374	475	0.28
底鋼板	橋軸方向	208,137	353	471	0.29
	橋軸直角方向	207,465	304	457	0.29

とした。

試験体コンクリートは設計基準強度30N/mm<sup>2</sup>とし、実橋における床版と同様に初期ひび割れ防止を目的として膨張材(30kg/m<sup>3</sup>)を添加した。コンクリートの配合を表-1、コンクリートの強度特性を表-2、鋼材の強度特性を表-3に示す。

走行試験は(独)土木研究所の輪荷重走行試験機を使用

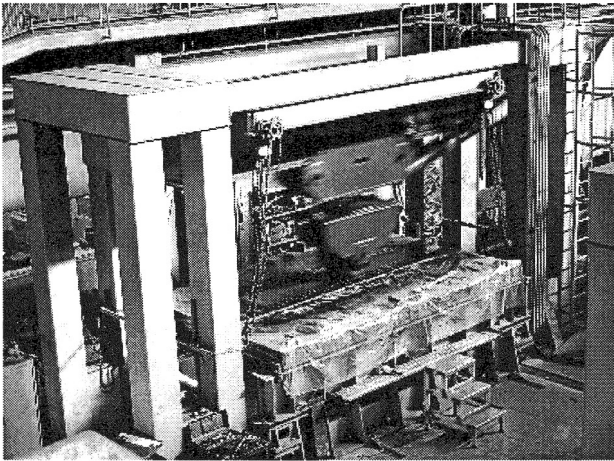


図-3 走行試験状況

して実施した。試験実施状況を図-3に示す。試験はこれまでに同研究所において実施された道路橋床版試験体に対する輪荷重走行試験の方法に準拠して実施した<sup>4)</sup>。

走行試験体は支間 2.5m で支持桁を用いて単純支持し、橋軸方向の端部は横桁(H 型鋼 300mm×300mm)を用いて床版の連続性を模擬するように弾性支持条件とした。

走行試験の荷重プログラムは初期荷重 157kN より開始し、4万回毎に 19.6kN ずつ荷重を増加させ、最大荷重 392kN、総走行回数 52 万回の階段状荷重とした。荷重荷重履歴を図-4に示す。

変位および底鋼板ひずみの計測位置を図-5に○印、+印で示すようにセンサーを設置した。

### 3. 輪荷重走行試験結果

#### 3.1 たわみの経時変化

図-6に輪荷重走行試験における床版中央位置の輪荷重荷重時たわみの経時変化、図-7に除荷時たわみの経時変化を示す。図中には比較のため、平成8年道路橋方書に基づいて設計された2種類の床版、すなわち床版厚 25cm の RC 床版試験体(以下、H8RC)、および 50%のパーシャルプレストレスで設計された床版厚 23cm の PC 床版試験体(以下、PRC50)の結果を併記する。

荷重時たわみの経時変化においては、走行試験が進むにつれて緩やかな増加傾向を示している。Hit1 試験体においては、走行回数 28 万回より若干の増加傾向の変化が見られるが、走行 52 万回まで破壊することなく、走行試験を完了した。

たわみ増加傾向が変化する走行回数 28 万回は試験体底鋼板とコンクリートの剥離域が試験体下面のほぼ全体に進展した走行回数に一致している。なお、Hit2 試験体においては、走行試験開始時点ですでに剥離領域がほぼ全体に進展していたことを確認している。

H8RC 試験体が走行 24 万回にたわみが急増し押し抜きせん断破壊に至っていることと比較すると、パルプレート合成床版が最大荷重 392kN、走行回数 52 万回の走行試

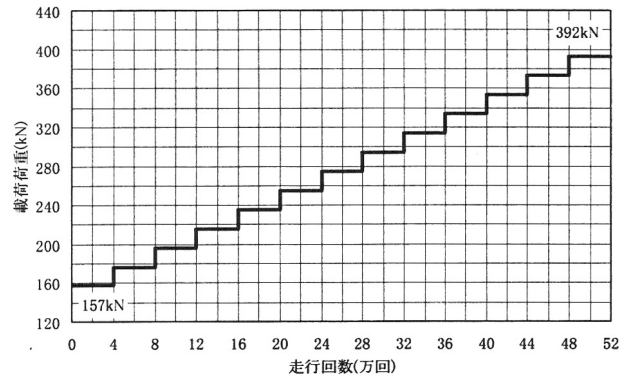


図-4 走行荷重載荷履歴

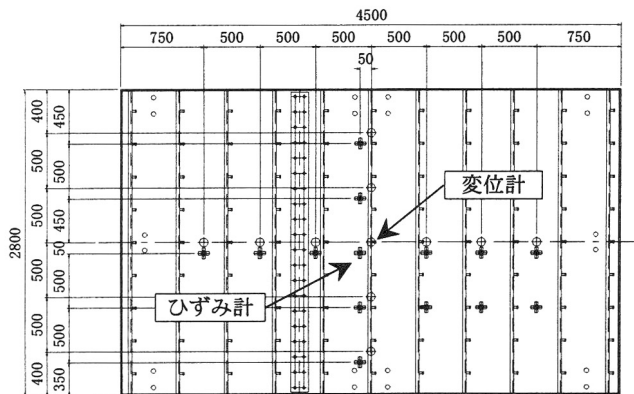


図-5 変位および底鋼板ひずみ計測位置

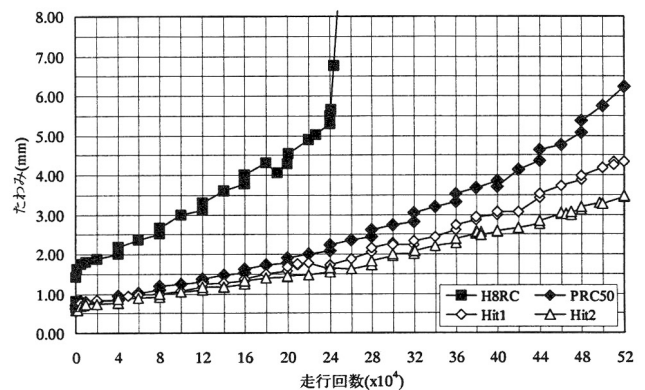


図-6 荷重時たわみの経時変化

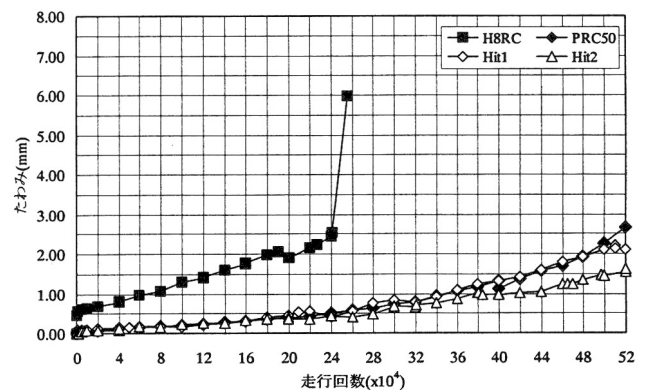


図-7 除荷時たわみの経時変化

験条件でたわみの急激な増加傾向がなく、破壊に至っていないことから、RC床版に比較して耐久性は高いと言える。PRC50 試験体の荷重時たわみの増加幅に比べて Hit1, Hit2 試験体の増加幅が小さくなっている。一方、除荷時たわみは、PRC50 試験体と Hit1 試験体の増加傾向はほぼ同じであるが、Hit2 試験体では 28 万回以後の増加幅が小さく、損傷度が小さかったことがわかる。

図-8 に荷重時たわみから除荷時たわみを差し引いた活荷重たわみの経時変化を示す。Hit1 および Hit2 試験体の経時変化に差は見られなかった。活荷重たわみの増加率は、走行回数と線形関係にあるように見えるが、これは荷重荷重を階段状に準じ増加していることによるもので、言いかえると床版の断面剛性が変化していないと考えられる。Hit1 および Hit2 試験体の初期たわみは PRC 試験体とほぼ同様であるが、活荷重たわみの増加幅は小さいことから、走行荷重による床版の剛性低下率としては PRC50 に比してバルブプレート合成床版は小さいと言える。

図-9 に単位荷重 100kN あたりの換算活荷重たわみの変化を示す。図中にはヤング係数比  $n$  を 7 および 10 とした場合のコンクリート全断面有効の場合と引張域無視の場合の理論値を併記する。Hit1 および Hit2 試験体とも試験開始時には、 $n=10$  の全断面有効の理論値に近い活荷重たわみとなっている。Hit1 試験体においては、走行 28 万回前後で  $n=10$  の引張域無視の理論値に達し、走行 40 万回までたわみ一定で推移している。走行 44 万回でたわみが若干増加し、その後も増加傾向を示した。

Hit2 試験体では走行試験終了となる 52 万回時において  $n=10$  の引張域無視の理論値に達している。Hit1 試験体の結果では、使用限界状態と考えられるコンクリート引張域無視の理論値を若干超えた結果となったが、その後も破壊に至っていないことから、バルブプレート合成床版が本試験終了時まで耐荷性能を有していると言える。

### 3. 2 ひび割れ進展状況

図-10 に走行試験終了後の床版上面および切断面のひび割れ発生状況を示す。床版切断位置は、橋軸方向を床版支間中央より 100mm 位置(A-A)、橋軸直角方向を床版中央から 100mm(B-B)と中央から 600mm(C-C)とそれぞれ離れた位置とした。平面図内の破線はバルブプレート設置位置を示す。

床版上面のひび割れは 2 体の試験体とも、輪荷重走行範囲においてバルブプレート直上に橋軸直角方向ひび割れ①が発生している。バルブプレート角部からひび割れが発生し、床版上面に向かい進展したものと考えられる。支持桁上およびその近傍で床版の橋軸方向中央部より橋軸直角方向のひび割れ②が進展した。

床版切断面では、荷重ブロック面直下でバルブプレート頂部と橋軸直角方向鉄筋につながる水平ひび割れ③の進展が確認された。

Hit1 試験体では図-11 の切断面(A-A)に示すように、

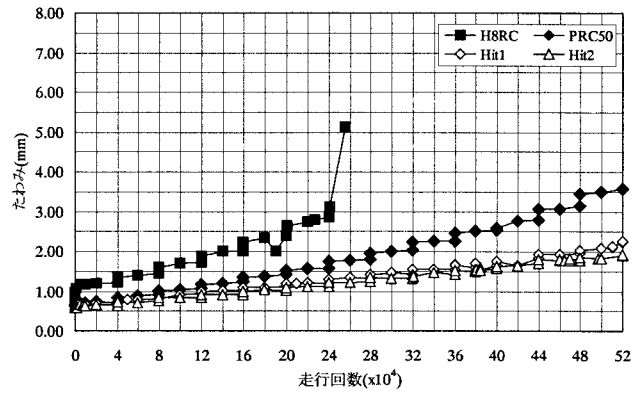


図-8 活荷重たわみの経時変化

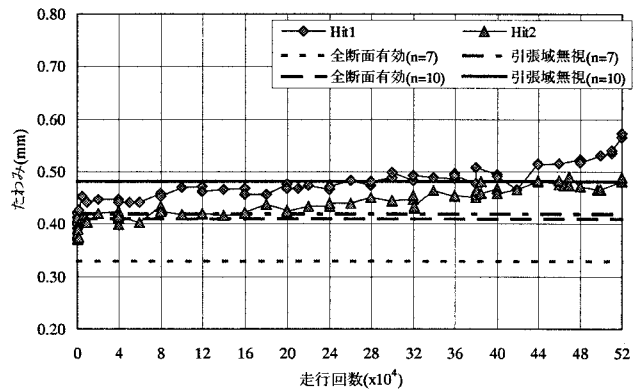
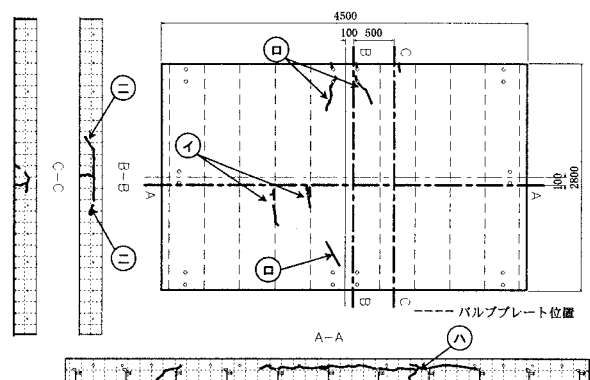
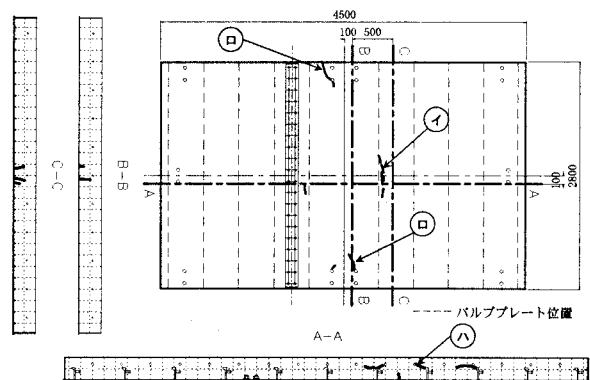


図-9 換算活荷重たわみと理論値との比較



(a)Hit1 試験体



(b)Hit2 試験体

図-10 ひび割れ発生状況

水平ひび割れが橋軸方向の走行範囲 3m 内に進展していた。水平ひび割れ④の橋軸直角方向幅は、床版中央部で約 500mm であり載荷ブロック幅とほぼ一致している。断面 C-C ではひび割れ④の橋軸直角方向幅は約 200mm であった。

Hit1 試験体の床版中央切断面(B-B)では、水平ひび割れ端から床版下面に向かう斜めひび割れ⑤が進展した。このひび割れは約 45 度の角度であり、押し抜きせん断破壊に進行している途中段階にあると考えられる。図-9における換算活荷重たわみの増加する走行 44 万回以降でこの斜めひび割れが進展したものと推察できる。

図-12に Hit2 試験体の底鋼板継ぎ手部近傍の切断面状況を示す。底鋼板継ぎ手部周辺のコンクリートにおけるひび割れ発生が懸念されたが、Hit2 試験体の切断面観察の結果、ひび割れは見られなかった。

### 3. 3 底鋼板ひずみの経時変化

図-13に底鋼板の載荷時および除荷時ひずみの経時変化を示す。図-14に底鋼板の活荷重時ひずみの経時変化を示す。計測位置は床版中央位置の下面側とし、橋軸方向および橋軸直角方向のひずみを測定した。

橋軸直角方向の活荷重ひずみは、20 万回までは載荷荷重の増加に比例して増加傾向を示している。このことから床版支間方向の断面剛性が低下していないと考えられる。

載荷時の橋軸直角方向ひずみでは、Hit1 および Hit2 試

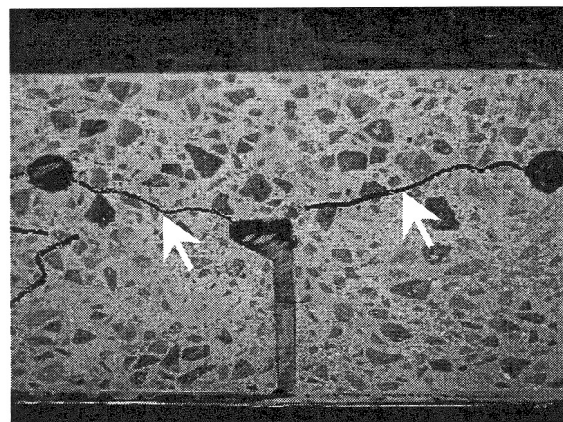


図-11 水平ひび割れ発生状況 (Hit1 試験体)

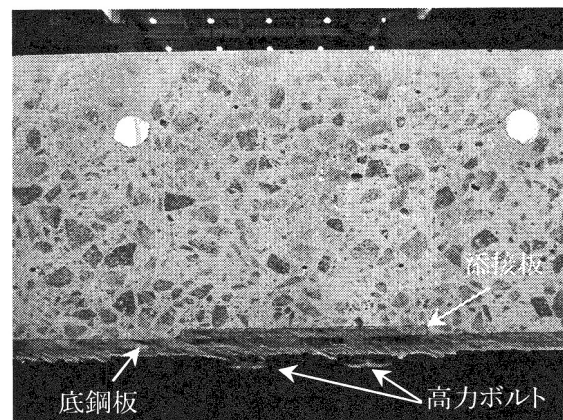
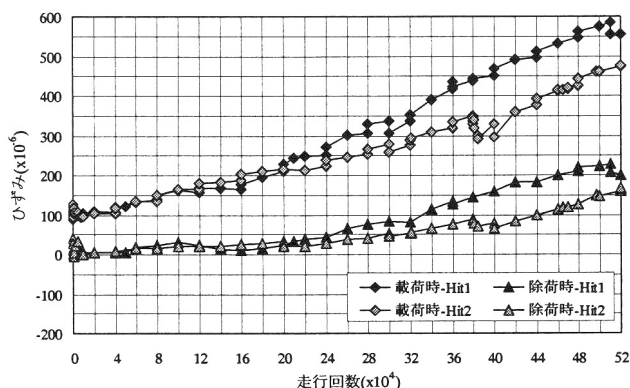
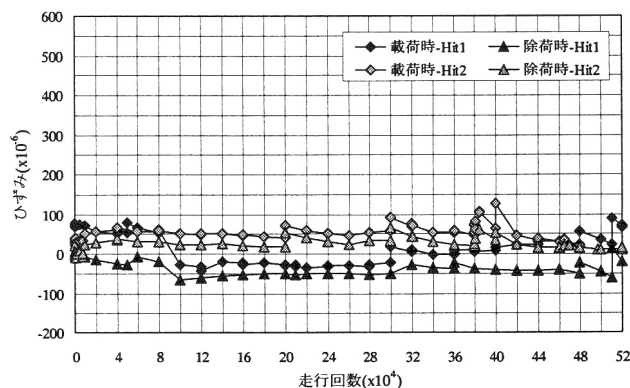


図-12 底鋼板継ぎ手部周囲状況 (Hit2 試験体)

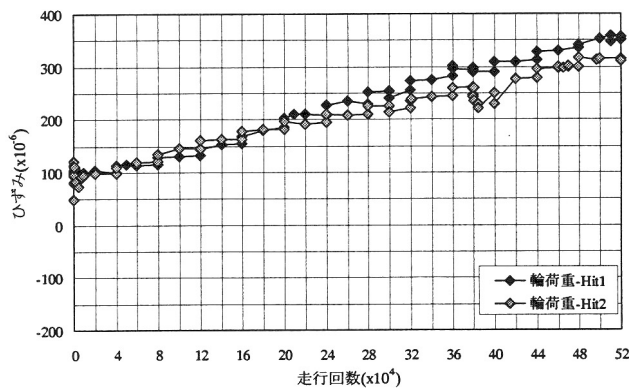


(a) 橋軸直角方向ひずみ

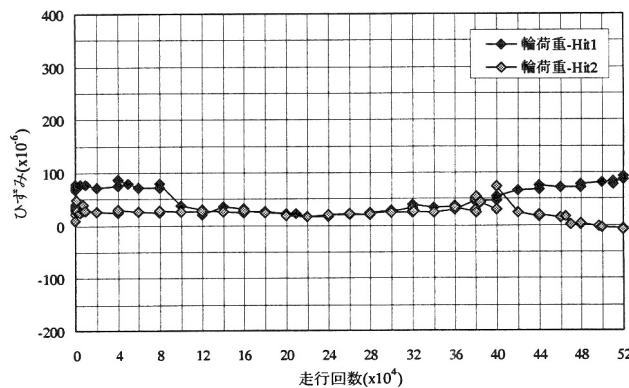


(b) 橋軸方向ひずみ

図-13 載荷時、除荷時の底鋼板ひずみ経時変化



(a) 橋軸直角方向ひずみ



(b) 橋軸方向ひずみ

図-14 活荷重時の底鋼板ひずみ経時変化

験体とも走行回数が約 20 万回からひずみの増加傾向に変化が現れた。除荷時ひずみでは、約 32 万回から傾向に変化が現れた。Hit1 試験体では除荷時のひずみ増加量が Hit2 試験体に比較して大きい。橋軸方向ひずみの経時変化においては、走行試験初期から最終 52 万回の走行終了まで変動が見られない。

Hit1 と Hit2 試験体では、活荷重ひずみに若干差が生じており、走行 52 万回時には約  $50\mu$  となっている。Hit2 試験体では底鋼板継ぎ手部を設けており、その継ぎ手部高力ボルトのジベル効果および添接板の剛性によりひずみの差が生じたと考えられる。

橋軸方向の活荷重時ひずみでは、Hit1 試験体において走行初期の約 8 万回までは約  $80\mu$  程度のひずみを示しているが走行 10 万回では  $20\mu$  まで低下し、その後走行 32 万回まではほぼ一定値にて推移している。32 万回以降は再度増加傾向を示している。Hit2 試験体では走行初期から約  $50\mu$  で一定推移しており、走行 36 万回まで変化はみられない。その後はさらにひずみが小さくなり、最終 52 万回ではほぼ  $0\mu$  まで低下した。走行初期段階における Hit1 および Hit2 試験体の差としては、鋼・コンクリート間の付着切れが原因と考えられる。Hit1 試験体では、走行 10 万回で床版中央部に付着切れが確認されたのに対し、Hit2 試験体では走行試験開始前より付着切れが床版下面全域に進展していた。

#### 4. 破壊進展過程の確認

一般の鋼・コンクリート合成床版の損傷は、

- (a) 鋼部材溶接部の疲労亀裂
- (b) ずれ止め部材周囲のコンクリートの破壊
- (c) リブプレート頭部と鉄筋の高さで進展する水平ひび割れ
- (d) リブプレート位置の床版コンクリート貫通ひび割れ
- (e) 床版コンクリートの押し抜きせん断ひび割れ

が挙げられる。

本走行試験の結果、バルブプレート合成床版では、床版コンクリートの水平ひび割れとそれに続く斜めひび割れが観測された。この斜めひび割れは床版の押し抜きせん断破壊を生じさせる損傷に進展すると考えられるが、今回の 52 万回の走行試験では初期のひび割れ進展で停止していた。鋼部材およびその溶接部においては、亀裂は発見されず損傷は進展していないものと考えられる。

#### 5. まとめ

今回実施したバルブプレート合成床版に対する輪荷重走行試験の結果、得られた知見を以下に示す。

- ① バルブプレート合成床版は最大荷重 392kN、走行回数 52 万回の輪荷重走行試験を未破壊で終了した。この結果、RC 床版、PC 床版に比べて耐久性が高いことが確認された。
- ② ひび割れ観察の結果、載荷ブロック直下でバルブプレート頂部から上側鉄筋につながる水平ひび割れが観測された。
- ③ 活荷重たわみおよび底鋼板の活荷重ひずみの経時変化から、本走行試験条件では底鋼板と床版コンクリートの付着切れおよび載荷ブロック直下に進展した床版コンクリートの水平ひび割れによる床版断面剛性の低下は小さい。
- ④ 底鋼板継ぎ手部周囲のコンクリートにひび割れは発生しておらず、継ぎ手部は耐久性上の弱点とならない。

#### 【参考文献】

- 1) 杉原, 北村, 若林, 数藤, 松野, 松井: スタッドジベル付きバルブプレート合成床版の研究, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.73-78, 2003.6
- 2) 松野, 岩田, 安田, 若林, 数藤: 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 回年次学術講演会講演概要集 I-B293, 2001.10
- 3) 北村, 岩田, 安田, 数藤, 松井: バルブプレート合成床版の強度特性, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集 CS4-050, 2002.9
- 4) 国土交通省土木研究所: 道路橋床版の輪荷重走行試験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 5)-評価編一, 平成 13 年 3 月
- 5) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説, 共通編, 鋼橋編, 2002.3