

# 帯鋼ジベルを用いた鋼・コンクリート合成床版の疲労耐久性

## Fatigue Durability of Composite Slab Using Perfobond Strip

永田淳\*、高田和彦\*\*

Jun Nagata and Kazuhiko Takata

\* (株)横河ブリッジ, 技術本部研究所 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27 番地)

\*\*Ph. D, (株)横河ブリッジ, 橋梁本部技術部 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27 番地)

A composite slab using a perfobond strip was developed to reduce the life cycle cost of a steel bridge. In order to certify the fatigue durability of the composite slab, a wheel running test under stepped load increase from 157kN to 392kN was carried out.

The test showed that the composite slab using a perfobond strip was never destroyed after the loading cycles 520,000. It was confirmed that the fatigue strength of the composite slab was much higher than the RC slab and the same or higher than the PRC (partial prestressed concrete) slab designed by JSHB. Also the structures of connection using a high strength bolt and a stud bolt were investigated and it was appeared that the both connections had necessary fatigue strength.

*Key Words: Perfobond strip, Composite slab, Wheel running test, Connection*

### 1. はじめに

道路橋の床版は車両の輪荷重を直接支持しており、繰り返し载荷を受ける極めて過酷な荷重状態にあるといえる。従来、鋼橋の床版構造には、経済性の高さと施工性の容易さから鉄筋コンクリート床版 (RC 床版) が主に用いられてきたが、近年の重交通により疲労損傷が進み、打ち替えや補修工事が多く実施されるようになってきている。橋のライフサイクルコストを低減する上で、高疲労耐久性の床版の開発が求められている。また、都市部で見られる高架橋や、鉄道や高速道路を跨ぐ跨線・跨道橋では、床版工事の足場や支保工の設置を省略して工事の安全性を高め、さらに工期の短縮化を図るという要求が高まっている。

筆者らは、これらの課題に対して、床版工事の施工性・経済性の向上および床版の高耐久性を目的として、帯鋼ジベルを用いた鋼・コンクリート合成床版の研究開発を行ってきた<sup>1), 2)</sup>。本床版については、各部材の性能試験や実物大モデルを使っての輪荷重載荷実験を行い、200kN 荷重での疲労耐久性を確認している<sup>3)</sup>。

ここでは、157~392kN という大きな荷重下での疲労耐久性を確認するための実験を行ったので報告する。なお、本実験は、建設省土木研究所、(財)土木研究センター、民間企業による「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」の一環として行われたものである。

### 2. 帯鋼ジベルを用いた合成床版の構造

本床版の基本構造は図-1に示すとおり、底鋼板、縦リブ、配力筋の3種の鋼部材とコンクリートで構成される。床版施工のコンクリート打設時には底板を型枠代わりに利用して、現場での型枠・支保工の設置作業をなくし、コンクリート硬化後は、鋼部材とコンクリートが合成して大きな剛性を有する床版となる。縦リブには70φ程度の孔が明いており、その中に配力鉄筋が配置されている。この孔は、コンクリートとのずれ止めとして機能する(帯鋼ジベル)。

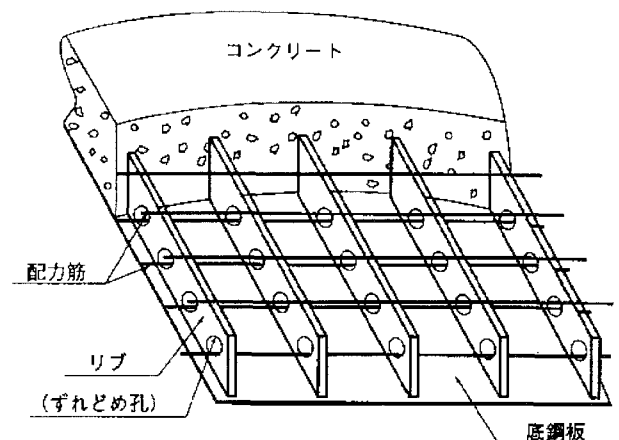


図-1 基本構造図

## 2. 試験の概要

### 2.1 供試体

供試体の形状・寸法を図-2に示す。本実験における供試体は、床版支間 3.0m の連続版として設計した。設計において、合成前死荷重（鋼殻・鉄筋・コンクリート）に対しては孔明きリブおよび底鋼板で抵抗し、合成後死荷重（舗装・壁高欄・遮音壁）および活荷重に対しては底鋼板、リブ、コンクリートが合成した断面で抵抗するものとした。供試体の底板には、支間方向 2 箇所継手を設けている。コンクリートに埋まる上面のみに添接板を配し、1 箇所の継手は底板に貫通孔を設け、高力ボルトに添接板を摩擦接合した。他の 1 箇所は、底板上面にスタッドボルトを溶着させ添接板を接合した。

供試体の諸元および材料試験結果を表-1、表-2に示す。

表-1 供試体諸元

供試体寸法	幅 2.8m × 長 4.5m
床版厚	コンクリート厚 20cm, 底鋼板厚 6mm
縦リブ寸法	高さ 14cm × 厚 12mm, 間隔 30cm
コンクリート	普通コンクリート, $\sigma_{28}=30\text{N/mm}^2$ 膨張材, AE 減水材使用

### 2.2 載荷方法

載荷試験機は、建設省土木研究所の輪荷重走行試験機を用いた（写真-1）。支間長 3.0m の連続版として設計した供試体に対して、供試体の主応力方向を支間 2.5m の単純支持とし、直角方向 2 辺を横桁（H 形鋼）で弾性支持することで、連続版として等価な曲げモーメントが載荷されるようにした。輪荷重は、供試体上に並べた 500 × 200mm の鋼ブロック上を支間直角方向に ±1.5m の範囲で移動する。載荷荷重は、157kN から 4 万回ごとに 19.6kN 増加させ、392kN まで載荷する階段状荷重漸増載荷とする。392kN の載荷最終時の延べ載荷回数は 52 万回となる。載荷荷重と走行回数の関係を図-3 示す。なお、図中の RC 8 供試体、PRC50 供試体とは、それぞれ、平成 8 年の道路橋示方書に準じて製作された RC 床版（床版厚 25cm, コンクリート強度 27N/mm<sup>2</sup>）および同示方書にてフルプレストレスで設計した PC 鋼材料に対して 50% 減じた PRC 床版（床版厚 23cm, コンクリート強度 57N/mm<sup>2</sup>）の供試体である。

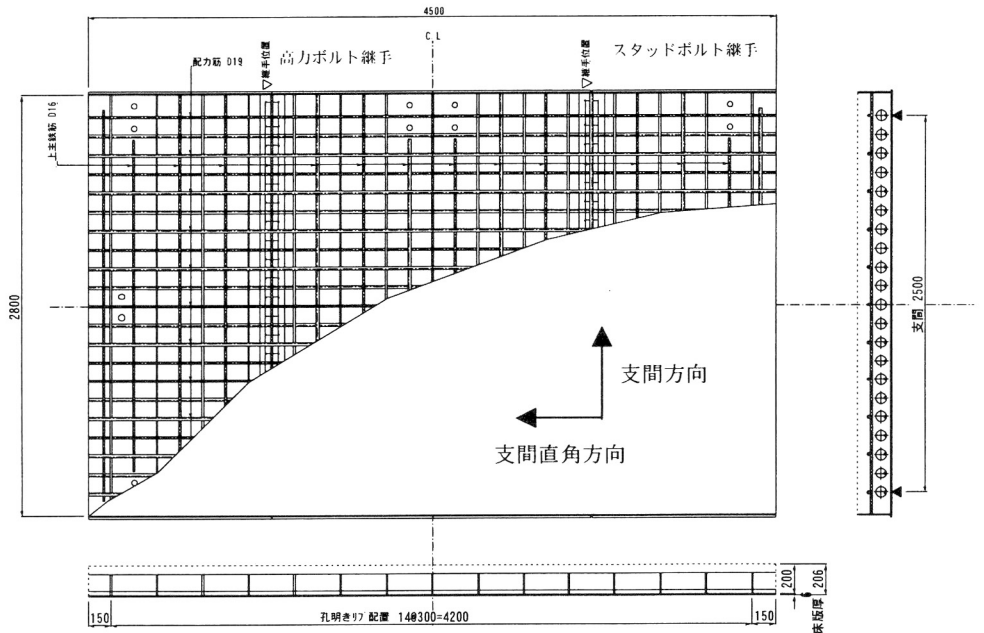


図-2 供試体の概要

表-2 材料試験結果

材料	項目	試験値 (平均) 単位: N/mm <sup>2</sup>
コンクリート	圧縮強度	40.6
	弾性係数	$31.18 \times 10^3$
鉄筋 D16 (SD295)	降伏点	361
	引張強さ	535
リブ t=12 (SS400)	降伏点	278
	引張強さ	443
底板 t=6 (SS400)	降伏点	384
	引張強さ	514

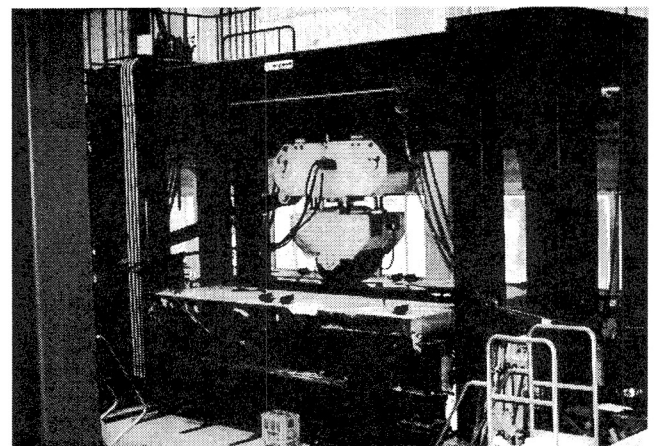


写真-1 試験状況

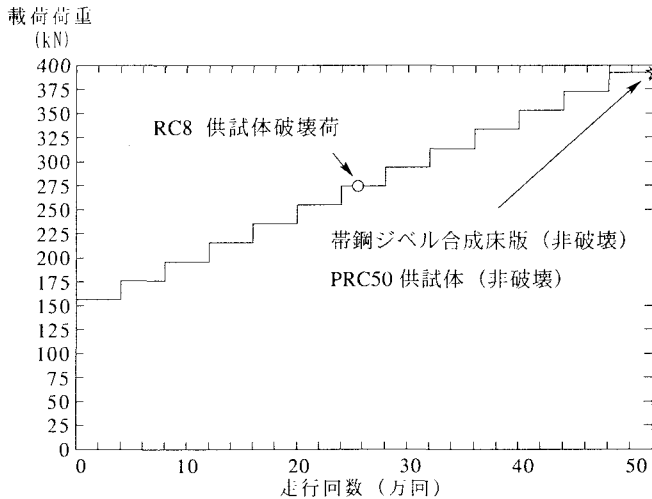


図-3 載荷荷重と載荷回数の関係

### 3. 試験結果

#### 3.1 試験終了時の状況

帯鋼ジベル合成床版に、図-3に示す荷重を載荷した結果は、最終荷重 392kN、走行回数 52 万回に至っても破壊することはなかった。274kN、25.6 万回で破壊した平成8年の道路橋示方書に準じて設計された RC 床版 (図-3) に比べ、高い疲労耐久性を有することが確認できた。

#### 3.2 たわみの変化

帯鋼ジベル合成床版供試体、RC 供試体、PRC50 供試体の中央の鉛直変位と走行回数の関係を図-4に示す。図中の載荷時たわみとは、各荷重ステップでの静的載荷時の鉛直たわみであり、除荷時たわみとは静的載荷後の荷重除荷状態での残留たわみである。帯鋼ジベル合成床版の供試体の載荷開始時におけるたわみ量は、PRC50 供試体とほぼ等しいことがわかる。その後、載荷回数・荷重の増大にともないたわみ量も漸増するが、急激に増加することなく、52 万回載荷終了時において載荷時、除荷時たわみはそれぞれ約 2.5mm、0.8mm である。最終段階においても帯鋼ジベル合成床版は健全な状態であり、剛性の低下が少ないことが分かる。PRC50 供試体とのたわみ値の比較では、PRC50 の試験終了時のたわみが載荷時 6.2mm、除荷時 2.7mm であり、帯鋼ジベル合成床版のたわみに対してそれぞれ約 2.5 倍、3 倍となる。帯鋼ジベル合成床版は PRC50 と比べ、荷重の繰り返し載荷に対して疲労損傷の進行が少ないことがわかった。

帯鋼ジベル合成床版供試体の剛性の変化を調べるために、各荷重ステップでの荷重たわみ値を単位荷重 (98kN) 載荷時に換算して図-5に示した。ここで換算弾性たわみとは、載荷時たわみから除荷時たわみを減じた値に、98kN と載荷荷重値の比を乗じた値であり、各荷重ステップでの供試体に 98kN が載荷された場合のたわみを示している。図には、コンクリートと鋼の弾性係数比  $n$  を  $n=10$

(設計使用値) および  $n=7$  (材料試験結果) とし、引張り領域のコンクリートを無視して行った FEM 解析結果を併記した。供試体の 98kN 換算たわみ量は載荷回数の増加とともに漸増し、最終段階では材料試験結果を用いた  $n=7$  とした解析値にほぼ等しいたわみ量を示している。帯鋼ジベル合成床版供試体は、荷重の繰返し載荷に対して剛性の低下が小さく、実験終了後においても鋼と圧縮側コンクリートで剛性を維持していることがわかる。

次に供試体の版としてのたわみ性状を調べるために、橋軸方向および橋軸直角方向の活荷重たわみの経時変化を求めた (図-6)。載荷荷重 157kN (0 回) では  $n=7$  とした FEM 解析値より小さなたわみであるが、その後徐々に解析値に近づき、最終段階 (52 万回) では FEM 解析値と同じたわみ形状となる。図-6より、帯鋼ジベル合成床版供試体は本試験の載荷の最終段階においても、底鋼板が合成された版としてのたわみ特性を保持していることが確認された。

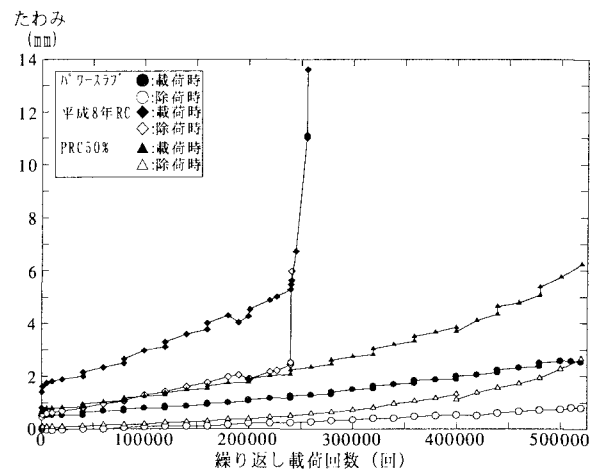


図-4 供試体中央の鉛直変位と走行回数の関係

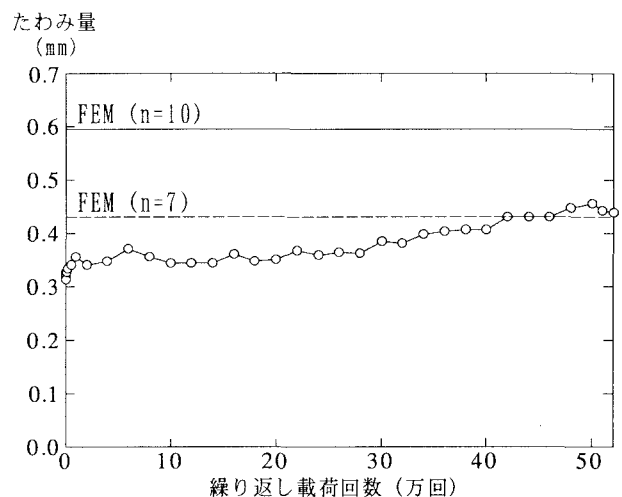


図-5 換算弾性たわみの経時変化

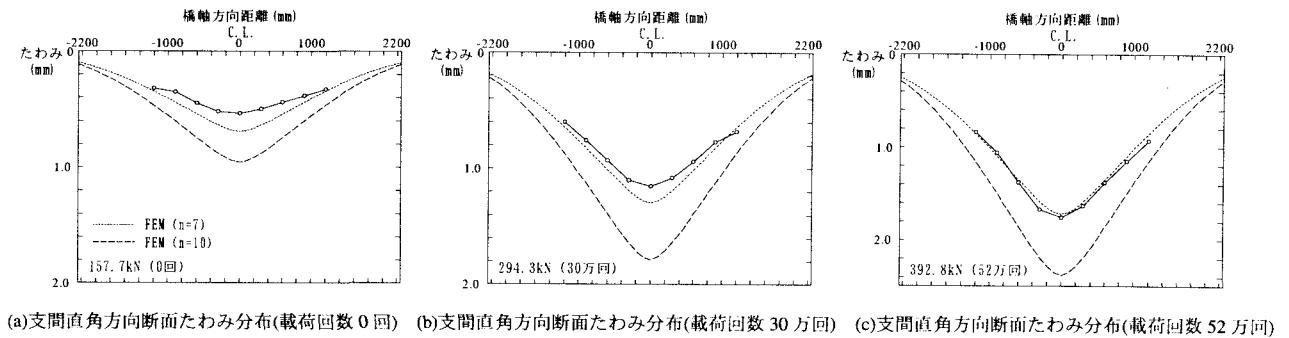
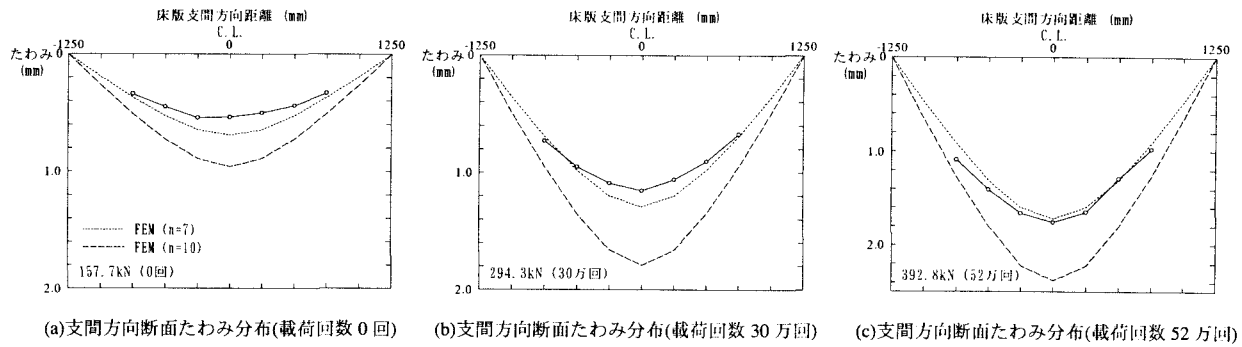


図-6 活荷重たわみ性状の経時変

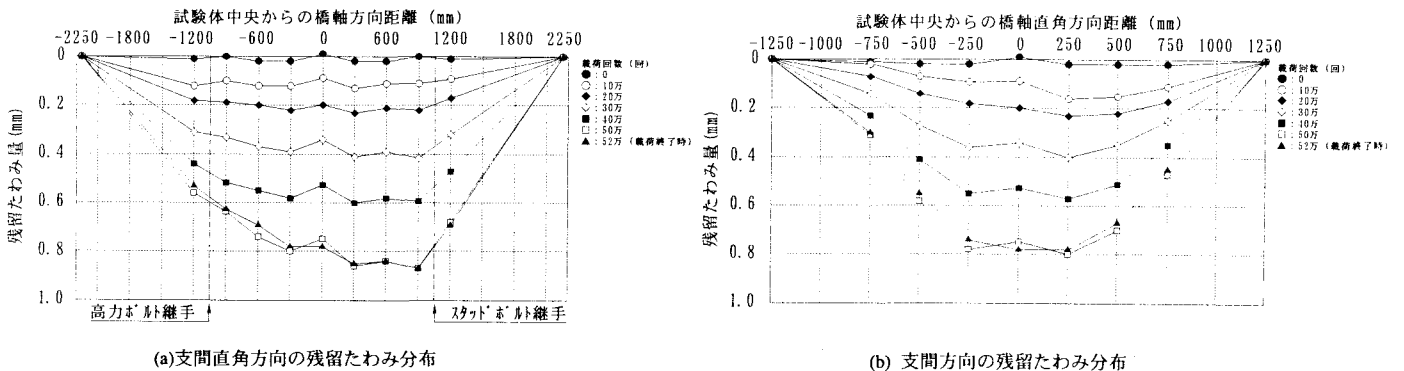


図-7 残留たわみ分布の経時変化

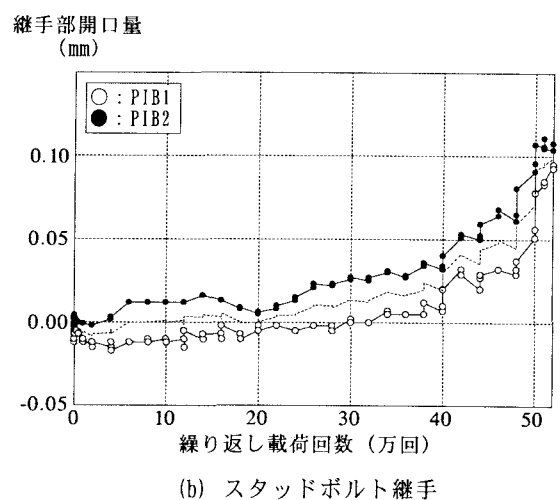
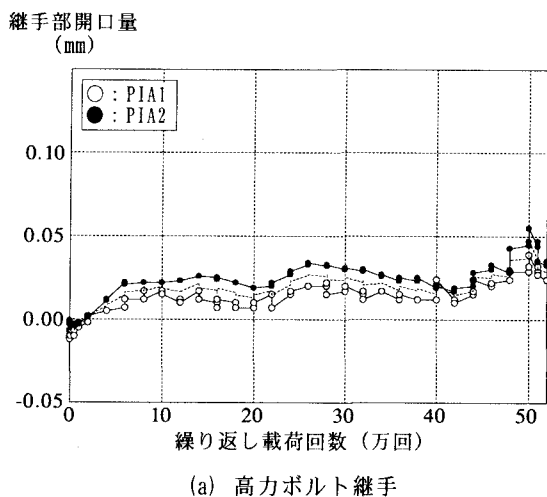


図-8 継手部の目開き量の経時変化

### 3.3 継手部の変化

支間方向および支間直角方向の残留たわみ分布の経時変化を図-7に示す。支間方向の残留たわみ分布は、中央付近を最大とする放物線形状を示し、载荷回数の増加とともに、たわみ量も増加する。一方、支間直角方向の残留たわみ分布は、支間方向の残留たわみと比べて中央部が平らな分布となる。これは、輪荷重が支間直角方向に移動载荷するために载荷範囲全域で疲労が進行するからである。支間直角方向には底板の継手が2箇所あるが、载荷回数40万回までは試験体中央付近がたわみ最大となっており、継手位置での損傷は他位置と同等といえる。载荷回数50万回では、スタッドボルト継手付近がたわみ最大となり、この位置での疲労が他箇所より大きく進行したと考えられる。しかし、他箇所とのたわみ差は0.05mm以下と小さい。

供試体継手部の目開き量の経時変化を図-8に示す。高力ボルト継手部の目開き量は、载荷回数によって目立った増加傾向は示さず、载荷の最終段階まで約0.025mmの開口量で推移している。この目開き量は、载荷の初期段階で添接版のずれが生じ、これが高力ボルトの摩擦力で残留したと考えられる。一方、スタッドボルト継手部の目開き量は、载荷回数40万回までは高力ボルト継手と同程度であるが、载荷回数40万回を越えると急激に増大する。しかし、最終目開き量は約0.1mmと小さい。

図-7、8より、高力ボルト継手は载荷終了時にもほとんど疲労損傷を示さず、大きな耐久性を有していることがわかった。スタッドボルト継手は、高力ボルト継手に比べて性能は劣るが、疲労耐久性の弱点となることはない。

### 3.4 床版のひび割れ性状

図-9に供試体の上面のひび割れ状況を示す。载荷終了時までには、床版上面支持桁上に0.05mm程度の微小なひび割れが発生したが、輪荷重の载荷範囲にはひび割れは発生しなかった。また、継手位置にもひび割れは発生しなかった。実験終了後、供試体を切断し断面を観察した。図-10に切断面の状況を示す。支間直角方向のA-A断面には、目視では大きなひび割れは見られず健全な状態であった。支間方向のB-B断面には、片側の切断面の底鋼板近傍に底板に平行したひび割れが観察された。しかし、反対側断面の底板を打音検査したところ、底板とコンクリートが付着していることが確認され、このひび割れは切断時の振動によって発生したものと考えられた。高力ボルト継手部に沿ったC-C断面では、ボルトやナット表面に沿ったひび割れが観測された。しかし、このひび割れも打音検査により切断時に発生したと判断された。図-11に支間方向中立軸位置の経時変化を示す。図より、载荷回数40万回まで中立軸はほぼ同じ位置で変化せず、コンクリートの損傷が進行していないことがわかる。载荷回数50万回で支点部（支持桁部）近傍の中立軸位置が急激に上昇し、この部のコンクリートに損傷がおこったことがわかる。しかし、支間中央付近の中立軸位置に大きな変化はなく、コンクリートは健全性を保っている。载荷回数50万回で支点部の中立軸位置が変化したことは、図-9において支点部のみでひび割れが観測されていること符合する。

図-9、10、11が示すように、帯鋼ジベル合成床版供試体は、392kNの移動輪荷重実験において、目視できるひ

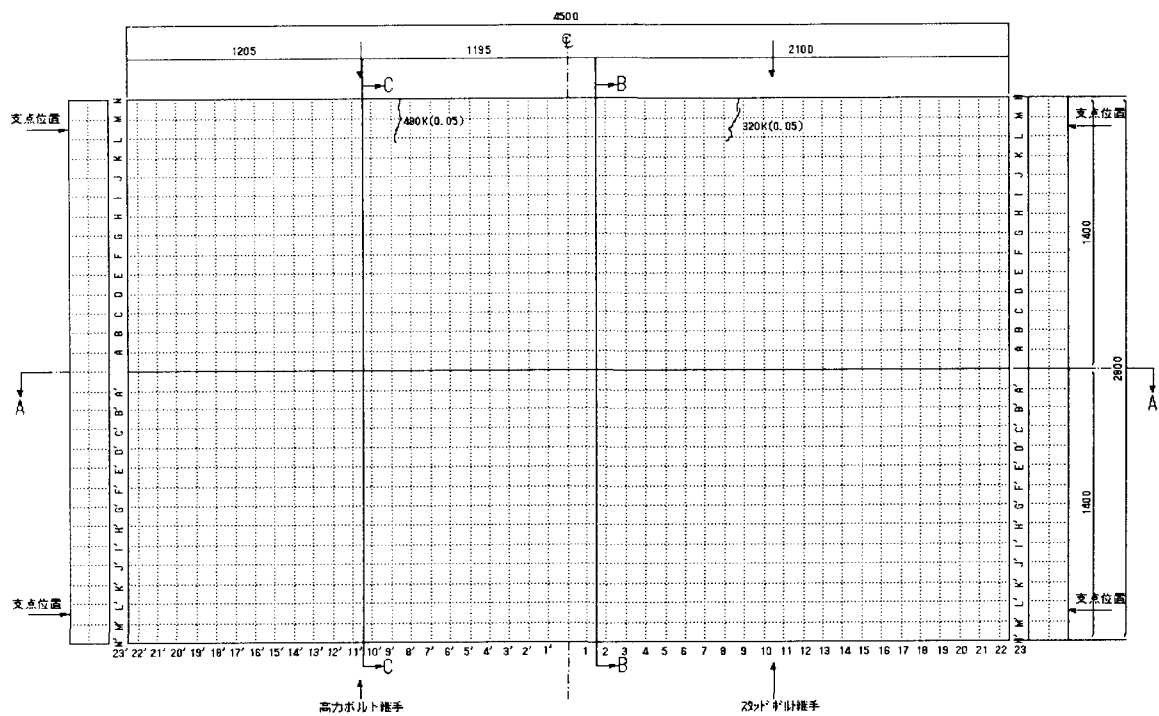
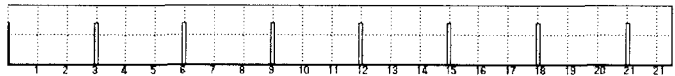
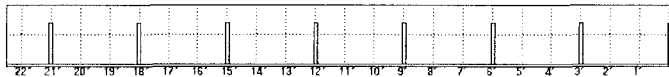
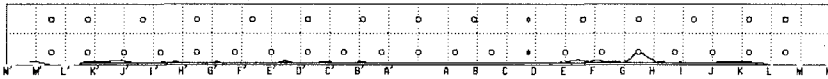


図-9 床版上面のひび割れ状況

A-A断面



B-B断面



C-C断面



ボルト・ナット表面に沿って発生

図-10 供試体断面のひび割れ状況

ひび割れはほとんどなく、コンクリートの疲労損傷が進行していないことがわかる。ただし、底鋼板で覆われた下側引張り領域のコンクリートには、荷重載荷時にひび割れが生じていると考えるのが妥当である。底鋼板が実験により塑性域に達せず、除荷後には底鋼板の弾性変形がなくなるのにもなってコンクリートのひび割れが閉じ、目視できないと考えられる。

高い疲労耐久性を有することが確認され、また、PRC床版の実験結果との比較では同等以上の疲労耐久性を示した。実験終了後の本床版の上面や内部のコンクリートにはほとんどひび割れが観察されず、帯鋼ジベルにより底鋼板とコンクリートは有効に合成していることが確認され、また、底鋼板が、内部のコンクリートのひび割れ損傷を有効に抑制することがわかった。以上より、本形式の合成床版が高い疲労耐久性を有することが明らかとなった。

底鋼板の継手として、高力ボルトによる摩擦接合構造とスタッドボルトで添接板を接合する構造を用いたが、いずれの継手構造も破壊に至ることはなかった。高力ボルト継手の目開き量の増加も0.1mmと小さく、両形式の継手構造は、十分な疲労耐久性を有することが確認された。

最後に、本研究においてご指導を賜りました建設省土木研究所、(財)土木研究センターおよび「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」に携わる関係者の皆様に感謝いたします。

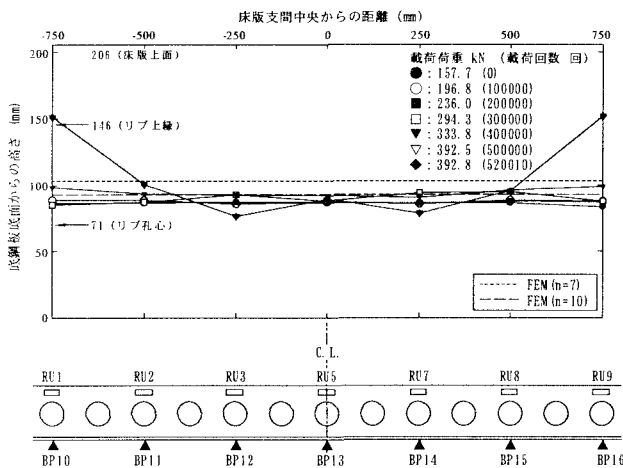


図-11 支間方向中立軸位置の経時変化

#### 4. まとめ

帯鋼ジベルを用いた合成床版は階段状荷重漸増方式を用いた輪荷重走行実験で、荷重157~392kNを52万回まで繰返し載荷したところ、実験終了まで破壊に至ることなく、また、床版剛性の低下も小さかった。帯鋼ジベルを用いた合成床版は、同条件で実験を行ったRC床版と比べて

#### 参考文献

- 1) 大間知, 白水, 清田: 製作・施工の省力化を図った合成床版の開発, 横河ブリッジ技報 No. 24, 1995.1
- 2) 高田, 清田, 大間知, 春日井: 「合成床版」を用いた開断面箱桁の橋の提案, 横河ブリッジ技報 No.25, 1996.1
- 3) 高田, 永田, 清田: 帯鋼ジベルを用いた鋼・コンクリート合成床版の研究開発と適用について, 第4回複合構造の活用に関するシンポジウム, 1999.1