

(論文)

下に凸の曲面を有する鋼板・コンクリート合成床版

Convex Curved Steel Plate-Concrete Composite Slab



山田岳史*(工博)
Dr. Takeshi Yamada



埴 洋二*
Yoji Hanawa



岡本安弘**
Yasuhiro Okamoto



沼田 克**
Katsu Numata

Steel plate-concrete composite slabs have been attracting attention due to their many advantages. Such advantages include high structural performance, workability, and a much shorter construction period. General composite slabs have a bottom skin plate with some kind of stiffeners to increase stiffness. Kobe Steel's newly developed composite slab takes into account the membrane effect of the bottom skin plate without using any bending stiffeners during concrete casting. Static and fatigue tests and elasto-plastic finite element analysis were carried out and results clearly proved the structural characteristics of this new composite slab.

まえばき = 道路橋に一般に用いられる床版として、経済性や施工が比較的容易であることなどから、鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)が多用されてきた。しかし、移動する繰返し荷重による疲労損傷¹⁾や、今後の熟練作業不足が課題となってきている。

一方、現在の合理化鋼橋の標準形式として認知されている少数主桁橋では、床版支間が6m以上の長支間となるため、プレストレストコンクリート床版(以下、PC床版)が採用されている。しかし、品質管理、製作コストなどの点で必ずしも有利とは言えないようである。

そこで、RC床版、PC床版に次ぐ第3の床版として、剛性が高く、床版厚を薄くできること、型枠や配筋作業などの現場作業が軽減できること、品質、維持管理が容易であるなどの特長を有する鋼板・コンクリート合成床版が種々開発され、実用に供されている。これらの合成床版は底鋼板にコンクリート打設時の型枠を兼務させるために、曲げ補剛材などを溶接し、剛性を確保したものがほとんどである。

当社では、底鋼板への溶接作業を低減し、製作コストの縮減を目的として、底鋼板に曲げ補剛材を取付けない合成床版の検討を行っている。すなわち、底鋼板の面部材としての合理的活用を考え、底鋼板に発生する膜力によってコンクリートの打設重量を負担する、図1に示す合成床版(以下、CB床版²⁾)を提案している。この「下に凸の形状をした床版」については、無筋のコンクリート及び鋼板(バックルプレート)が60年以上を経た今も健全である旭橋³⁾が実績を有している。このように本床版はユニークな変断面床版であることから、コンクリート打設時のみならず使用状態においても、その断面形状が曲げモーメント分布に相似していること、長支間ではPC床版重量の90%程度となるなどの合理的構造特性を有している。

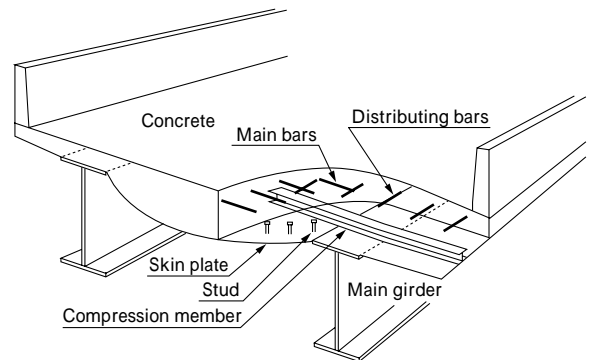


図1 CB床版の概念図

Fig. 1 Composite slab with curved bottom plate

本報では、コンクリート打設時の構造特性、合成床版としての構造特性を把握するために、静的押し抜きせん断耐力に関する実験と解析による検討結果を述べ、さらに、輪荷重走行試験機によって検討した耐久性についても述べる。

1. コンクリート打設時の構造特性

CB床版の最大の特長は、コンクリート打設時の力学特性にある。つまり、従来の合成床版に比べ、CB床版では、コンクリート打設時の重量を底鋼板の膜力によって負担させるため、曲げ補剛材及びそれを取付けるための溶接を省略できることとなる。ただし、この膜力を発生させるためには、圧縮材によって固定間距離を一定にする必要がある。すなわち、図2に示すストラット・メンブレン機構を適用した構造形式である。

ただし、サグが大きくなるにしたがい水平反力 H (圧縮力)は小さくなり、力学的には有利になるものの、床版厚、床版重量が大きくなる。一方、サグが小さい場合には水平反力 H が極めて大きくなり、床版厚以上の高さを有する圧縮材を要することとなる。したがって、サグ

*技術開発本部・機械研究所 **都市環境・エンジニアリングカンパニー 構造技術部

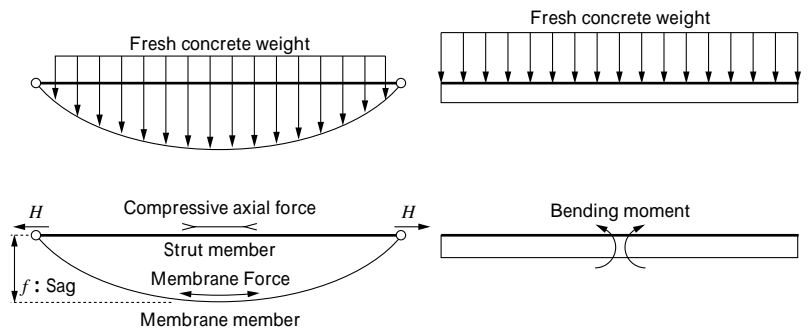


図2 合成床版のコンクリート打設時の力学モデル
Fig. 2 Dynamic model of composite slab during casting

(a) Dynamic model of CB slab

(b) Dynamic model of typical composite slab

f (= 床版厚) とそれに関する打設重量 W と圧縮力 H との関係性を把握しておかねばならない。

ここで、床版支間中央で発生する釣合いモーメント M_0 は、図3に従えば式(1)、(2)のとおりである。

$$M_0 = \frac{5w_1 l^2}{48} + \frac{w_2 l^2}{8}, M_0 = Hf \quad \dots\dots(1)$$

$$H = \frac{(5w_1 + 6w_2)l^2}{48f} \quad \dots\dots(2)$$

図4に床版支間8mの場合の床版重量 W 、水平反力 H とサグ/スパン比 (f/l) の関係を示す。凡例中の h_2 とは図3に示す主桁上の床版厚のことである。この図より、 f/l が小さい場合には床版重量 W が小さいにも拘わらず、水平反力 H が極めて大きいために $H \times W$ は大きな値を示すこととなるが、 f/l が0.01程度で大きく改善され、さらに f/l が大きくなると水平反力 H はほとんど低減せず、床版重量 W のみが増加することとなる。したがって、主桁上床版厚 $h_2 = 20 \sim 30\text{cm}$ とした場合には、図4の変

曲点である $f/l = 0.03 \sim 0.05$ 程度が最適値と考えられる。

2. CB 床版の静的構造特性

2.1 供試体諸元及び試験方法

CB 床版の静的押し抜きせん断特性を把握するために、床版純支間 3000mm を想定し、3/5 縮小供試体を製作した。床版純支間 1800mm、底鋼板厚 6mm の鋼板・コンクリート合成床版である。供試体の支持には、H形鋼 (H-200 × 200 × 8 × 12) の首振り挙動による単純支持効果を期待した。供試体の床版厚は、支間中央で $19\text{cm} (= 4l + 11)^{)}$ 、最小厚さ(支点直上の厚さ)を 11cm とした。

コンクリート打設時には、打設重量によって発生する水平反力に抵抗するため、図5に示すとおり圧縮材として切欠いたC形鋼 (CH-60 × 30 × 2.3) を 50cm 間隔で配置し、C形鋼の重心と主桁上フランジ位置を一致させ、底鋼板との接触面を溶接した。

載荷位置は図6のとおり、圧縮材間の床版支間中央と床版支間 1/4 点の2点である。載荷幅は、T 荷重の接地面積を 3/5 に縮小した $300\text{mm} \times 120\text{mm}$ (主鉄筋方向の長さ × 配力鉄筋方向の長さ) とした。

本床版では、底鋼板とコンクリートの合成を図るために底鋼板に縞鋼板を用いるとともに、頭付きスタッド (13 × 70 @ 250) を配置した。ただし、ロビンソン型合成床版などのようにずれ止めにスタッドを用いる場合には、回転せん断によるスタッド基部での疲労破壊⁵⁾が懸念される。したがって、以下のコンセプトによりスタッドを配置した。

スタッドは、コンクリートと底鋼板の剥離防止のために配置する。

底鋼板とコンクリートの間に発生する水平せん断力に対しては、底鋼板に縞鋼板を用い、縞鋼板の突起により、機械的ずれ止め効果を期待する。

したがって、縞鋼板の突起により、スタッドに作用する水平せん断力が低減できると考え、回転せん断の影響も低減できるものと考えた。ただし、スタッドの配置間隔については、スタッド間における鋼板の剥離挙動を防止するために、鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物⁶⁾ (以下、PART B) に示す最大スタッド間隔の 250mm を準用した。

使用したコンクリートの示方配合は表1のとおりであり、試験直前の圧縮強度は 43N/mm^2 であった。鋼材は全て SS400 ($\sigma_y = 280\text{N/mm}^2$)、鉄筋は SD295 ($\sigma_y = 320\text{N}$

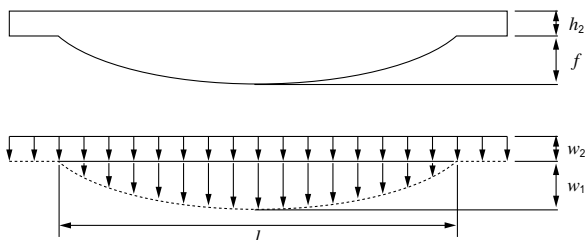


図3 CB 床版の打設重量
Fig. 3 Concrete weight of CB slab

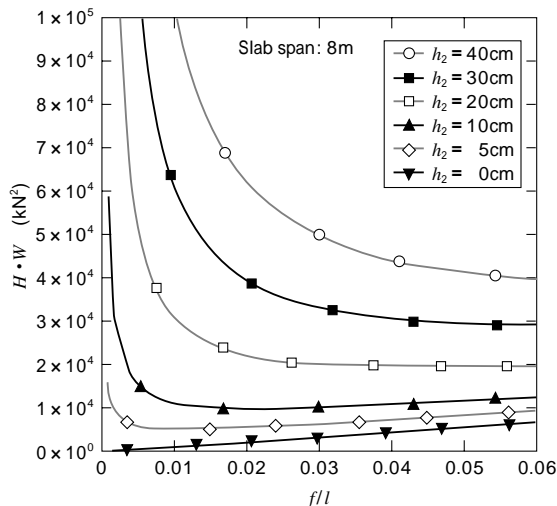


図4 打設重量 W 、水平反力 H とサグ、スパン比 (f/l) との関係
Fig. 4 Relationship between $W \cdot H$ and f/l

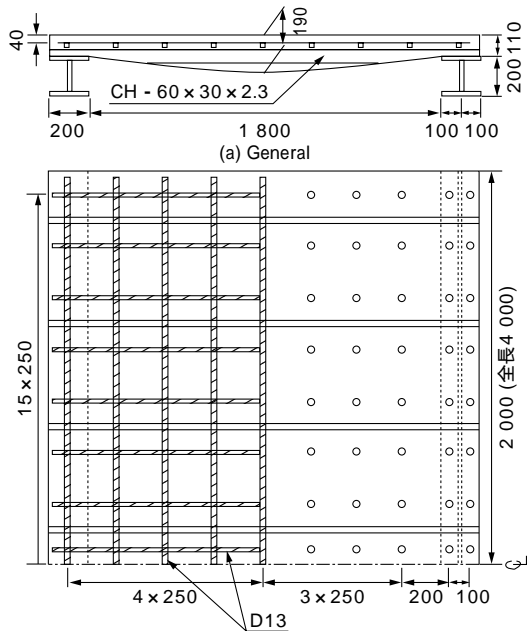


図5 供試体の概要

Fig. 5 Structural outline of CB slab specimen

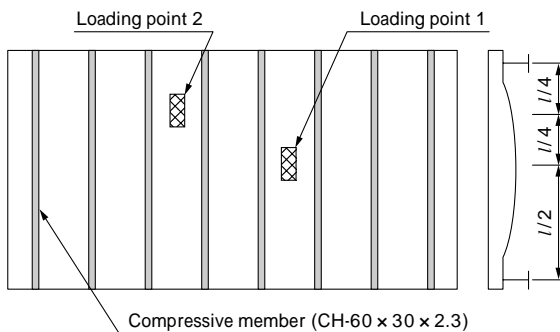


図6 荷重点位置

Fig. 6 Position of loading points

/mm²), スタッドは JIS B 1198 相当である。

2.2 静的押し抜きせん断特性の把握

荷重試験結果と弾塑性有限要素解析⁷⁾結果を比較した荷重 - 変位曲線を図7に、底鋼板の荷重 - ひずみ曲線を図8に示す。

図7の床版支間中央載荷(以下、1/2点載荷)の結果より、荷重と変位の関係及び終局耐力ともに、試験結果と解析結果がほぼ一致することが明らかとなった。

図8に1/2点載荷の結果を示す。図中のX方向とは主鉄筋方向のことであり、Y方向とは配力鉄筋方向のことである。底鋼板のひずみにおいて、主鉄筋方向であるX方向のひずみに関してはほぼ一致するものの、配力鉄筋方向のY方向に関しては一致しない結果となった。

図9に1/2点載荷と1/4点載荷の各荷重点における荷

表1 コンクリートの示方配合
Table 1 Specified mix proportions of concrete

Maximum size of coarse aggregate	Slump	Water-cement ratio	Air content	Sand aggregate ratio	Unit volume (kg/m ³)					
					Air	Cement	Admixture	Fine aggregate	Coarse aggregate	Additive
(mm)	(cm)	W/C (cm)	(%)	s/a (%)	W	C	F	S	5mm ~ 20mm	A
20	8	47	4.5	43.3	167	355	30	745	1 003	0.888

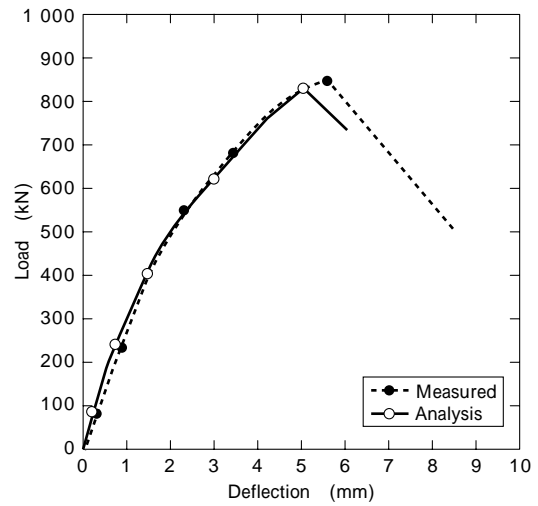


図7 床版支間中央載荷の荷重 - 変位曲線

Fig. 7 Relationship between deflection and load at slab center

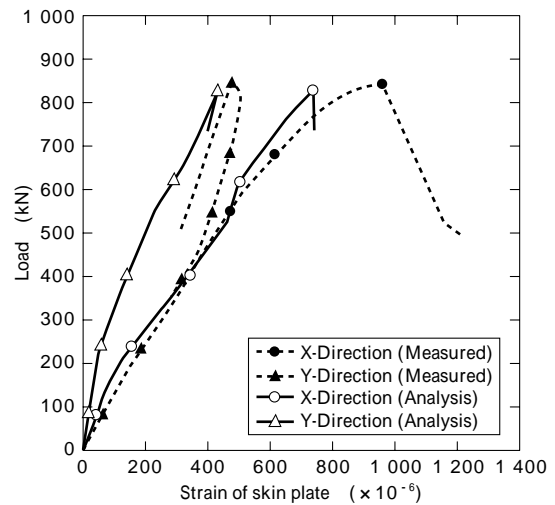


図8 床版支間中央載荷の底鋼板の荷重 - ひずみ曲線

Fig. 8 Relationship between skin plate strain and load at slab center

重 - 変位曲線を示す。1/2点載荷と1/4点載荷では、明らかに床版厚の影響により押し抜きせん断耐力に違いが認められる。

図10に床版支間中央からの偏心量の比(e/l)と各位置での押し抜きせん断耐力比の分布を示す。ここで、 l を床版純支間の1/2とした。図中、 e は試験結果であり、付きの実線は弾塑性有限要素解析結果である。この図より、本供試体の断面構成(最大床版厚19cm, サグ8cm)では、最小の耐力は支間中央断面の60%程度であり、その位置は偏心量0.5であることが明らかとなった。したがって、本床版の耐久性の把握には、床版厚が最小である主桁近傍よりも、偏心量0.5程度の位置において検討する必要があると考えられる。

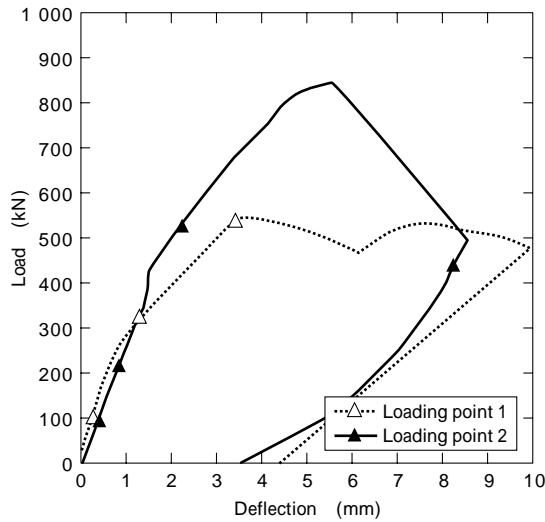


図9 各載荷点の荷重 - 変位曲線
Fig. 9 Relationship between deflection and load

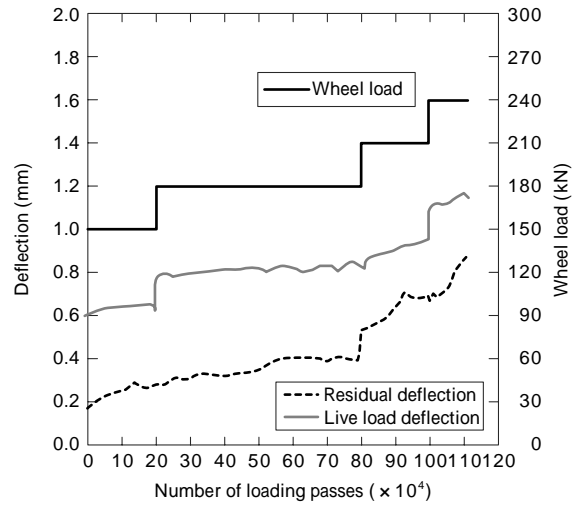


図11 支間中央のたわみ - 走行回数
Fig.11 Relationship between number of loading passes and deflection

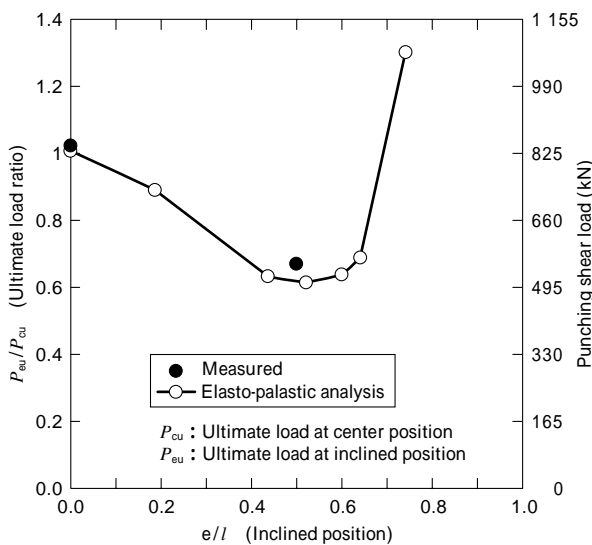


図10 床版支間方向の押し抜きせん断耐力比の分布
Fig.10 Distribution of ultimate load ratio in main bars direction

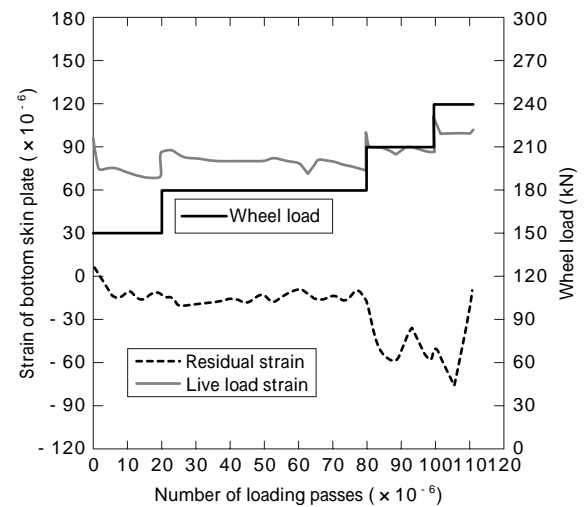


図12 底鋼板の主鉄筋方向ひずみ - 走行回数
Fig.12 Relationship between number of loading passes and strain of skin plate

3. CB 床版の疲労耐久性

3.1 輪荷重移動試験機による疲労試験

大阪大学大学院所有の輪荷重走行試験機によりCB床版の疲労耐久性を把握した。本試験では、基礎的構造特性の把握を主目的としたことから、床版支間中央を走行させた。

疲労試験に用いた供試体は図5に示す静的押し抜きせん断試験に用いたものと同様である。ただし、圧縮材に30の孔あけを施し、圧縮材とコンクリートのずれを防止、圧縮側の配力鉄筋量を引張側の配力鉄筋量(底鋼板を鉄筋に換算)の1/2とし、D16を125mmピッチで配筋した。試験開始時におけるコンクリートの圧縮強度は49N/mm²である。

図11より、試験終了に至るまで活荷重たわみの急激な増加はなく、未破壊のままであったが、残留たわみが80万回以降増加する傾向にあることが確認された。

図12に支間中央における底鋼板のひずみと走行回数の関係を示す。試験終了まで、各方向の活荷重ひずみは輪荷重の増分に応じて増加し、また、活荷重たわみと同

様に活荷重ひずみの急激な増大はなかった。

これらの結果から判断して、本CB床版の耐久性に関して特に問題がないものと判断できる。

3.2 CB床版の耐久性の比較検討

ここでは、RC床版に関する既往の研究成果³⁾を比較対象とし、CB床版の耐久性を検討する。

文献7)のRC床版は、床版厚18cmであり、輪荷重180kNに対して、93.6万回走行で破壊に至っている。

本CB床版の床版厚は最大19cmであるものの、輪荷重の載荷面からのせん断影響面における平均床版厚がほぼ18cmであること、また、本疲労試験では破壊に至らず、破壊形態が不明のままであるが、鋼殻及びスタッドの溶接部などは健全のままであったためRC床版と同様にコンクリートの破壊が先行するものと考え、上記RC床版の走行回数を基準とすることとした。

式(3)のマイナー則により等価繰返し回数を予測すると、本床版の受けた繰返し履歴は上記RC床版のおよそ6倍以上の耐久性を有することが明らかとなった。

$$N_{eq} = \sum_i \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^m n_i \dots \dots \dots (3)$$



写真1 縞鋼板の突起痕
Photo 1 Trace of steel checker plate

ここで、 R_{eg} ：等価繰返し回数

P_0 ：基本荷重（180kN）

P_i ：載荷荷重

n_i ：荷重 P_i の繰返し回数

m ：疲労設計曲線の傾きを表すための定数

（ $m = 12.763$ であるが、安全側の 12.0 とした）

3.3 疲労試験を経た供試体のコンクリート

輪荷重走行試験機による疲労試験終了後、主鉄筋方向と配力鉄筋方向に切断し、内部コンクリートの健全性を調べた。目視によれば、コンクリートには曲げひび割れ、せん断ひび割れなどは確認できず、床版内部のコンクリートは極めて健全な状態であった。

写真1に底鋼板と接触していたコンクリートの状態を示す。縞鋼板の突起痕が極めて鋭利に残っており、底鋼板とコンクリートとの間にずれの動きはほとんどなかったと判断できる。このことから、縞鋼板がずれ止め効果を発揮し、頭付きスタッドに作用する水平せん断力は小さく、軽減されていたと考えられ、スタッド基部の疲労破壊防止に対して縞鋼板の突起が有効であると言える。ただし、鋼板とコンクリートの剥離防止のため、スタッドの配置は必須である。

したがって、内部コンクリートの健全性ならびに与えた等価繰返し回数から判断して、本CB床版は十分な耐疲労性を有するものと判断でき、実用に供しても問題ないものと考えられる。

むすび=底鋼板を面部材として積極的に活用したCB床版の基本的構造特性の把握のために、3/5縮小供試体を用いて、静的押し抜きせん断試験ならびに輪荷重走行試験を行った。以上のことをまとめると以下のとおりである。

1) 本床版の供試体レベルにおいて、床版厚は18cmのRC床版の6倍以上の疲労耐久性を有することを把握した。

2) 合成床版の課題として指摘されている頭付きスタッドの疲労損傷に対して、底鋼板に縞鋼板を用いることが極めて有用であることを確認した。

最後に、大阪大学大学院松井繁之教授には基礎的検討段階から試験の実施に至るまでご指導いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松井繁之ほか：合成構造の活用に関するシンポジウム(1995)，p.13．
- 2) 山田岳史ほか：鋼構造論文集，第9巻，第35号(2002) p.33．
- 3) 北海道開発局：旭橋60周年記念誌(1992)．
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 鋼橋編(2002) p.246．
- 5) 松井繁之ほか：構造工学論文集，Vol.39A(1993) p.1303．
- 6) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物(1997)．
- 7) Diana/Nonlinear Analysis User's manual Release 7．
- 8) 阪神高速道路公団：道路橋RC床版のひび割れ損傷と耐久性(1991)．