

# 角形鋼管を用いた軽量プレキャスト合成床版 (SLaT-FaB 床版) の開発

滝本 和志 (技術研究所) 田中 博一 (技術研究所) 小林 顕 (土木技術本部) 朱 曉旭 (技術研究所) 阿部 寛之 (技術研究所) 高橋 圭一 (技術研究所) 清水 和昭 (技術研究所)

## Development of High Durability Lightweight Precast Steel-Concrete Composite Slab using Square Steel Pipe

Kazushi Takimoto, Hirokazu Tanaka, Ken Kobayashi, Xiaoxu Zhu, Hiroyuki Abe, Keiichi Takahashi and Kazuaki Shimizu

床版取替え工事における急速施工を目的に、軽量コンクリートと角形鋼管を用いた軽量プレキャスト鋼コンクリート合成床版 (SLaT-FaB 床版) を開発した。本論文では、これまでに実施した各種の性能確認試験のうち、床版としての基本的な曲げ耐力を確認するための正曲げ試験、角形鋼管のずれ止めとしての機能を確認するための押抜きせん断試験、機械式定着筋を用いた接合部の継手性能を確認するための鉄筋継手の性能確認試験、および、疲労耐久性を確認するための輪荷重走行試験について報告する。

In this research, an innovative precast steel-concrete composite slabs using lightweight concrete and square steel pipes (SSP) has been proposed for rapid construction of slab replacement works. To verify the performance of the new composite slab, a series of verification tests including push-out test of shear connector SSP, bending test of the slab and the proposed joint part, and wheel load running test were carried out. The test results show that the proposed composite slabs have good performance in strength and fatigue durability. The effectiveness of the proposed composite slab design was validated.

### 1. はじめに

近年、社会インフラの老朽化が顕在化してきているが、高速道路においても、経過年数の増加とともに床版の劣化が進展していることが報告<sup>1)</sup>されている。東・中・西日本高速道路3会社の統計データ<sup>2)</sup>によると、2013年度末には、供用から30年以上経過した橋梁延長は全体の約4割に達しており、大規模更新計画で床版取替が予定されている橋梁延長は約224kmとなっている。大規模更新工事の床版取替えにおいては、工事による交通影響を軽減させるため、プレキャストPC床版を用いることが多くなっている。

一方、鋼コンクリート合成床版(以下、合成床版)は、剛性が大きく高い耐荷力を有しており、底鋼板により型枠・支保工を省略できることから、長支間床版としての採用事例が増えてきている。また、プレキャスト合成床版の開発<sup>3)</sup>により、床版取替工事にも適用され始めている。高速道路の床版取替工事は、施工時間や施工空間といった制約条件の他に、下部構造の耐震性能確保や新旧床版

の段差解消の観点から、取替床版の厚さや重量にも制約を受ける場合がある。

そこで、既設道路橋の床版取替工事に適用することを目指して、軽量コンクリートと角形鋼管を用いることで、軽量化で薄肉化が可能なプレキャスト合成床版(SLaT-FaB床版)の開発を行ってきた。

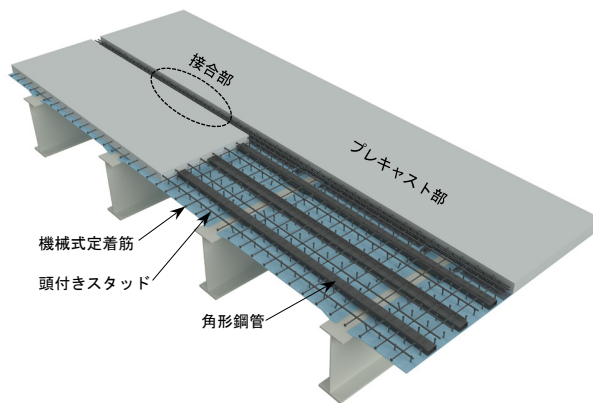
本論文では、床版としての基本的な曲げ耐力を確認するために実施した版の正曲げ試験<sup>4)</sup>、軽量化を図るために配置した角形鋼管のずれ止めとしての性能について検討した押抜きせん断試験<sup>5)</sup>、接合部の施工合理化を目指して考案した機械式定着筋を用いた新しい継手構造の継手性能試験<sup>6)</sup>、および、SLaT-FaB床版の疲労耐久性を検討するために実施した輪荷重走行試験<sup>7)</sup>の結果について報告する。

### 2. SLaT-FaB 床版の概要

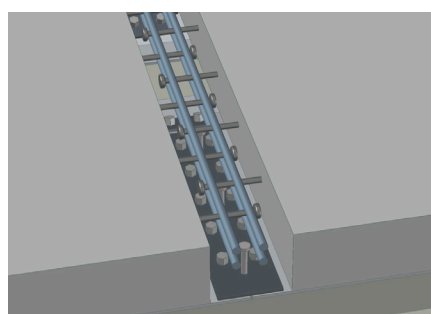
本論文で提案する SLaT-FaB 床版のイメージ図を図-1(a)に示す。橋軸直角方向に角形鋼管を配置し、底鋼板に断続溶接することで、床版断面に

10%程度の中空部を設けることができる。角形鋼管には、軽量化だけでなく、底鋼板の補剛とずれ止めとしての機能も期待している。橋軸直角方向のずれ止め機能と底鋼板とコンクリートを上下に分離しようとする力に対しては、頭付きスタッドを配置する。プレキャスト部には設計基準強度  $50\text{N}/\text{mm}^2$  の軽量コンクリート1種を用いる。

接合部の詳細を図-1(b)に示す。底鋼板は添接板を介してボルト接合する。配力鉄筋は重ね継手とし、両端を加熱成形によって拡径部を設けた機械式定着筋(Tヘッド工法鉄筋)とすることで、継手長さの短縮を図るものである。この継手により、床版厚さは180mmまで薄くすることが可能となった。脆性破壊を防止するために、接合部の主鉄筋は配力鉄筋の上下に配置する。接合部には、物質透過抵抗性や付着強度が高く、急速施工が期待できるラテックス改質速硬コンクリート(LMFC)<sup>8)</sup>を用いる。角形鋼管と軽量コンクリートを使用することにより、同じ厚さのRC床版と比較して約10%、ループ継手を有するプレキャストPC床版に対しては約30%の軽量化となる。



(a) 全体イメージ



(b) 接合部詳細

図-1 SLaT-FaB床版の概要

### 3. 版の正曲げ試験

#### 3.1 試験概要

試験体は2体で角形鋼管の配置をパラメータとした。No.1は角形鋼管の直上を載荷位置に、No.2は角形鋼管の中間を載荷位置とした。試験体の幅は2,000mm、支間長は3,000mm、厚さ180mmとした。底鋼板(SM400)は8mm、角形鋼管(STKR400)は150mm×75mm(厚さ3.2mm)とした。

コンクリートは、設計基準強度  $50\text{N}/\text{mm}^2$  の軽量コンクリート1種である。圧縮鉄筋はSD345とし、主鉄筋にD22を125mmピッチで、配力鉄筋にD16を250mmピッチで配置し、純かぶり30mmを確保した。角形鋼管と頭付きスタッドの配置を図-2に、No.1の配筋図を図-3に示す。鉄筋配置はNo.2も同一である。

試験体中央に設置した200mm×500mmの合板の上に、同じ平面寸法の載荷フレームを設置し、合板と載荷フレームを介して荷重を載荷した。支点はテフロンを用いたピン・ローラー支線で二辺単純支持とした。載荷は、一方向漸増繰返し載荷とした。設計荷重は120kNである。計測項目は、載荷荷重、試験体の鉛直変位、底鋼板、角形鋼管、鉄筋およびコンクリート上面のひずみとした。

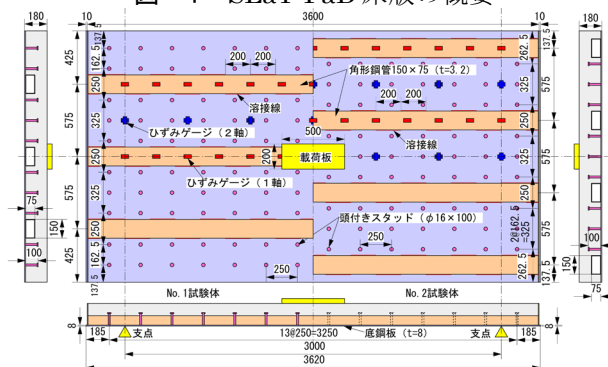


図-2 ずれ止め配置図

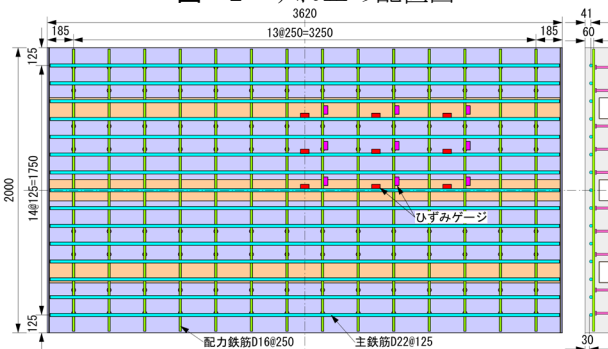


図-3 配筋図 (No.1 試験体)

#### 3.2 試験結果と考察

軽量コンクリートの材料試験結果を表-1に、鉄筋・鋼材の引張試験結果を表-2に示す。

図-4 に荷重-変位曲線の比較を示す。2 体とも載荷荷重が 300kN を越えた時点で底鋼板とコンクリートの付着が切れる音がして剛性が低下し、700kN を越えた時点で押抜きせん断破壊した。

表-3 に最大荷重と最大荷重時の試験体中央変位および初期剛性を示す。初期剛性は、弾性挙動を示していた 300kN 時の割線剛性として求めた。載荷位置に関わらず、最大荷重はほぼ同じ値を示した。付着切れ後の 2 次剛性は同等であるが、初期剛性は No.1 の方が大きくなった。これは、角形鋼管の直上を載荷したことが影響しているものと考えられる。

図-5 に支間(X)方向の断面ひずみ分布を示す。平面座標の原点は載荷点中央、高さ方向は底鋼板下面を原点とした。2 体とも角形鋼管の上面付近が中立軸位置となっている。No.1 は 400kN まで、No.2 は 300kN まで直線分布しており、平面保持が成り立っていたものと考えられる。これは、図-4 の付着切れ発生時点と一致している。付着切れ以降は、重ね梁のような挙動を示しており、特に No.1 の主鉄筋には引張ひずみが発生している。

#### 4. 角形鋼管のずれ止め試験

本論文で提案する SLaT-FaB 床版では、軽量化を図るために角形鋼管を用いているが、角形鋼管には、床版の軽量化だけでなく、底鋼板の補剛とずれ止めとしての機能も期待していることから、ここでは、角形鋼管のずれ止め性能について、押

表-1 軽量コンクリートの材料試験結果

種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
軽量コンクリート	62.1	23.2

表-2 鉄筋・鋼材の引張試験結果

種類	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
主鉄筋 D22	373.4	556.5	185.3	22
配力鉄筋 D16	371.6	560.6	181.4	24
底鋼板	332.8	458.3	175.1	36
角形鋼管	347.5	446.5	182.3	31

表-3 試験結果一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時の中央変位(mm)	初期剛性 (kN/mm)
No.1	726.1	24.0	84.6
No.2	734.5	14.8	74.2

抜きせん断試験により検討した。

#### 4.1 試験概要

押抜きせん断試験の標準的な試験方法として、頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)⑨が提案されている。本研究では、この試験方法を参考に、角形鋼管のせん断耐力と疲労強度を把握するために、静的押抜きせん断試験と押抜き疲労試験を行った。

試験体はすべて同一仕様で、試験体数は、静的

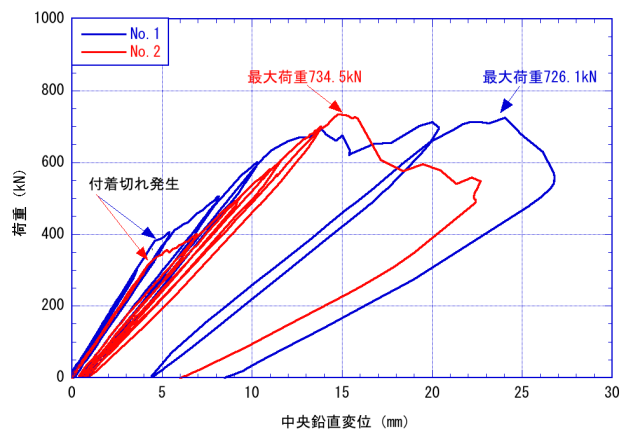
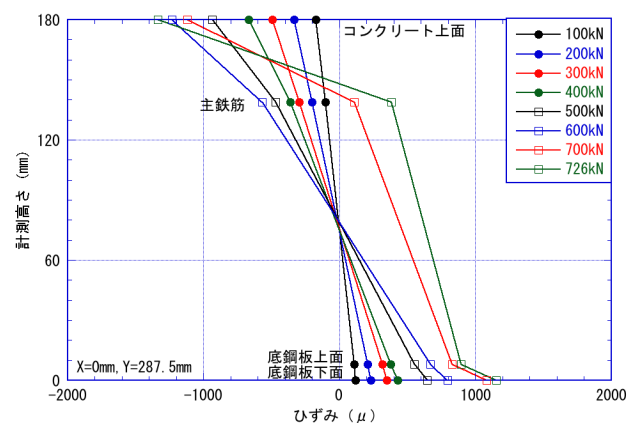
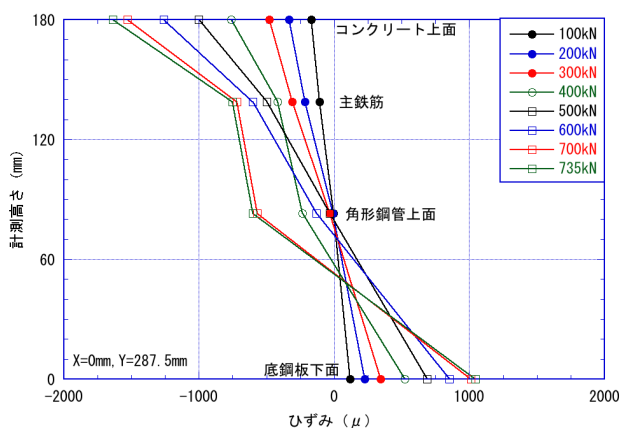


図-4 荷重-変位曲線



(a) No.1 試験体(X=0mm)



(b) No.2 試験体(X=0mm)

図-5 ひずみ分布図

試験体(SP1~SP3)3体、疲労試験体(FP50、FP60、FP65、FP70、FP80)5体の合計8体とした。疲労試験体のFPの後の数値は、静的試験で得られた押抜きせん断耐力に対する比率である。試験体の形状寸法を図-6に示す。試験体は、420mm×400mmのフランジ(厚さ22mm)に、3章と同じ角形鋼管を溶接し、そこに500mm×400mmのコンクリートブロック(厚さ174mm)を打設したT形鋼2つを添接板と高力ボルトで結合した。コンクリートは、設計基準強度50N/mm<sup>2</sup>の軽量コンクリート1種である。フランジと角形鋼管の溶接は、溶接による残留変形を抑制する目的で、中央200mmの範囲とした。角形鋼管内部は中空とし、コンクリートと接するフランジ面にグリース等の剥離剤は塗布していない。

静的試験体のコンクリートブロックと試験機ベッドの間は石膏を用いて不陸調整を行い、溝形鋼とPC鋼棒で開き止めを設置した。静的試験の荷重方法は、一方向(押し込みのみ)の漸増繰返し荷重とした。除荷は、荷重が50kN、100kN、150kN、200kN、250kN、ずれ変位(フランジとコンクリートブロックの鉛直方向の相対変位)が0.25mm、0.50mm、0.75mm、1.0mm、1.5mm、2.0mm、3.0mm、4.5mm、6.0mm、8.0mm、10mmに達した時点で行うことを基準とした。ずれ変位が10mmに達した時点で開き止めを外し、荷重がほぼ0になるところまで荷重を行った。

疲労試験体の設置や開き止めは静的試験と同様とした。下限荷重を10kNとし、荷重振幅を静的試験で得られた押抜きせん断耐力の50%~80%の範囲で、圧縮側の片振り(sin波、2~5Hz)として、1MN高速疲労試験機を用いて繰返し荷重を行った。ここでは、最大振幅が4mmに達した時点までを疲労破壊と定義した。

計測項目は、静的・疲労試験共通で、荷重荷重、鉛直ずれ変位、角形鋼管およびPC鋼棒のひずみとした。ずれ変位は、左右表裏4点の平均値とした。角形鋼管のひずみは側面と下面中央で計測した。疲労試験における計測は、繰返し回数が1万、5万、10万、30万、50万、80万、100万回に達した時点で行った。100万回以降は、適宜計測を行った。

#### 4.2 静的試験結果

軽量コンクリートの材料試験結果を表-4に示す。疲労試験は試験開始と終了時の2回実施した。

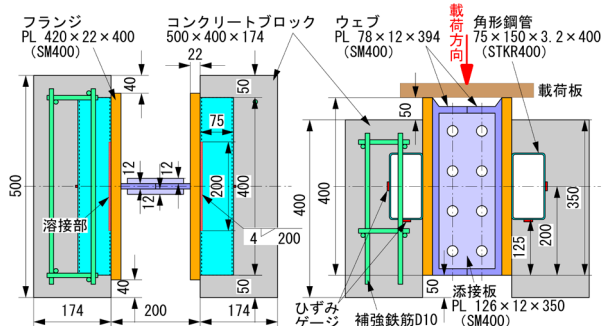


図-6 押抜き試験体

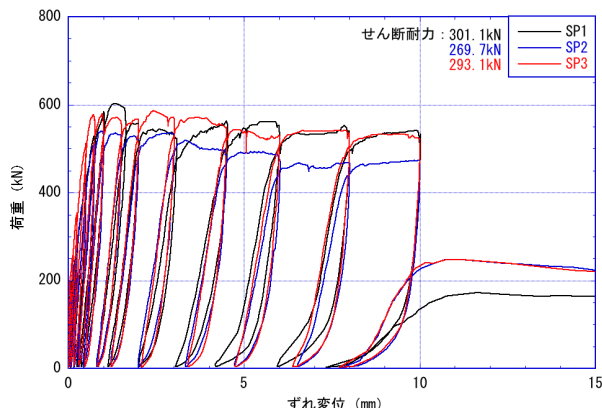


図-7 せん断力とずれ変位の関係

表-4 軽量コンクリートの材料試験結果

試験の種類	材齢(日)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )
静的試験	40	58.4	22.7
疲労試験	90	67.2	24.5
	166	67.0	25.6

静的試験の結果、3体の破壊状況はほぼ同様で、角形鋼管下側のコンクリートの圧縮破壊となった。ずれ変位が0.25mmを越えると、フランジと角形鋼管下側の溶接部から斜め下方にひび割れが発生し、ずれ変位の増加に伴いひび割れ幅が拡大していった。図-7にせん断力とずれ変位の関係を示す。せん断耐力の平均値は288.0kNとなった。ずれ変位が1.0mm~1.5mmでせん断力がピークに達した後は、ずれ変位が増加しても荷重増加は見られず、徐々に荷重が低下していった。開き止め用のPC鋼棒を外した後のせん断力は、10mm時点のせん断力の半分にも達しなかったことから、ずれ変位が10mmに達する前に破壊に至っていたものと考えられる。試験終了後にコンクリートを除去して溶接部を観察したところ、溶接止端部にき裂は見られたものの、貫通したき裂は見られなかった。



### 4.3 せん断耐力評価法

角形鋼管のせん断耐力評価式がないことから、角形鋼管を厚さ 3.2mm、高さ 75mm の形鋼シアコネクタと見なして、形鋼シアコネクタの設計せん断耐力計算式<sup>10)</sup>を用いてせん断耐力を算定した。式(1)はコンクリートが破壊する場合の耐力、式(2)は形鋼シアコネクタが破壊する場合の耐力を示す。

$$V_{su} = 0.0056h_{sc}w_{sc}\sqrt{f'_{cd}}k_1k_2k_3/\gamma_b \quad (1)$$

$$V_{su} = 0.001t_{sc}w_{sc}f_{scy d}/\sqrt{3}/\gamma_b \quad (2)$$

ここに、

$V_{su}$  : 形鋼シアコネクタのせん断耐力(kN)

$k_1 = 2.2(t_{sc}/h_{sc})^{2/3}$  ただし、 $k_1 \leq 1$

$k_2 = 0.4\sqrt{t_f/t_{sc}} + 0.43$  ただし、 $k_2 \leq 1$

$k_3 = \sqrt{s_{sc}/h_{sc}/10}$  ただし、 $k_3 \leq 1$

$f'_{cd}$  : コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$h_{sc}$  : 形鋼の高さ(mm)

$w_{sc}$  : 作用せん断力と直角方向の形鋼の幅(mm)

$t_{sc}$  : 形鋼の溶接部を考慮した厚さもしくは母材の厚さのうち小さい方の値(mm)

$f_{scy d}$  : 形鋼の引張降伏強度(N/mm<sup>2</sup>)

$t_f$  : 形鋼が付いている鋼板の厚さ(mm)

$s_{sc}$  : 作用せん断力方向の形鋼の配置間隔(mm)

$\gamma_b$  : 部材係数(1.0とする)

形鋼シアコネクタの設計せん断耐力式で算定したせん断耐力を表-5に示す。式(1)の方が小さく、実験と同様にコンクリートの破壊で最大せん断力が決まることになる。計算値に対する実験値の比は 1.22 と近似しており、形鋼シアコネクタの設計せん断耐力式を用いて、角形鋼管のせん断耐力を算定できる可能性が得られた。

### 4.4 疲労試験結果

表-6に疲労試験結果を示す。5体のうち FP50試験体は 500 万回繰返し载荷しても破壊しなかったため、载荷を途中で打ち切った。破壊した4体の破壊状況はほぼ同様で、溶接部近傍の角形鋼管の疲労破断であった。静的試験に比べてコンクリートブロックの損傷は軽微であった。これは、最大振幅 4mm を破壊基準としたためと考えられる。角形鋼管の溶接部近傍では、溶接止端部にき裂や破断箇所が多数見られた。

図-8に角形鋼管と頭付きスタッドの S-N 曲線<sup>11),12)</sup>を合わせて示す。角形鋼管の疲労強度は頭

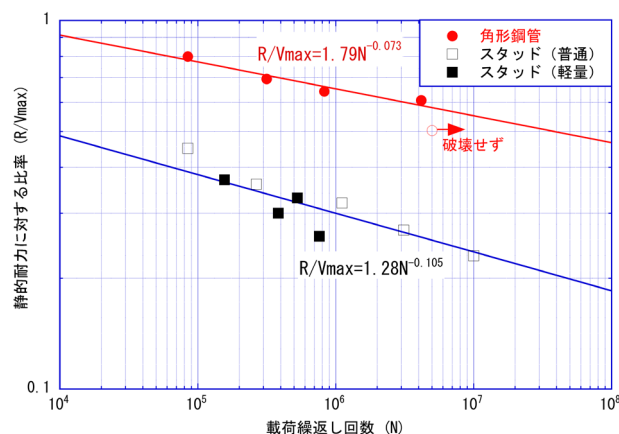


図-8 ずれ止め S-N 曲線<sup>11),12)</sup>

表-5 せん断耐力の計算値

計算値 (kN)		実験値 (kN) $V_{max}$	実験値/ 計算値
式(1)	式(2)		
235.6	285.6	288.0	1.22

表-6 疲労試験結果一覧

試験体名	荷重振幅 R(kN)	破壊回数 N
FP80	230	84,682
FP70	200	315,442
FP65	185	826,160
FP60	175	4,168,159
FP50*	145	5,000,000 以上

\* : FP50 は破壊していない

付きスタッドの疲労強度を上回っており、角形鋼管はずれ止めとして十分な疲労強度を有しているといえる。

## 5. 機械式定着筋の継手性能試験

SLaT-FaB 床版橋軸方向の配力鉄筋の継手構造について、部材の薄肉化や継手長さの短縮を図るために、機械式定着筋を鉄筋継手として用いることを提案している。鉄筋継手の性能が問題となるのは、中間支点部近傍の負曲げモーメントを受ける場合であるので、プレキャスト合成床版が負曲げを受けた場合の圧縮鉄筋接合部の挙動を確認し、接合部仕様を決定することを目的として、重ね継手長さをパラメータとした継手部の静的载荷試験を実施した。

### 5.1 試験概要

中央に現場打ち接合部を有する試験体4体を製作した。圧縮側と引張側ともに T ヘッド工法鉄筋を継手として用いた。プレキャスト部のコンクリートは、

表-7 接合部試験体の種類

試験体名	継手長さ	接合部長さ (mm)	補強方法
JT-15	15d	380	なし
JT-10	10d	290	
JT-5R	5d	200	主鉄筋追加
JT-5P	5d	200	補強プレート

表-8 コンクリートの材料試験結果

種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
軽量コンクリート	62.1	23.2
LMFC	67.3	34.6

表-9 試験結果一覧

試験体名	ひび割れ発生荷重(kN)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
JT-15	100	316.8	373.2
JT-10	100	261.7	381.6
JT-5R	110	267.7	378.4
JT-5P	90	243.8	356.3

設計基準強度 50N/mm<sup>2</sup>の軽量コンクリート 1種、接合部のコンクリートは、LMFCである。試験パラメータは、重ね継手長さ(15d、10d、5d)とし、継手長さ 5d の試験体は、脆性破壊を防止するために、主鉄筋の追加や補強プレートによる補強を施した。試験体の幅は 1,000mm、長さは 2,200mm(支間 1,800mm)とし、接合部が等曲げ区間となるよう 3 等分点荷重を行った。試験体の種類を表-7 に、JT-15 の配筋図を図-9 に示す。図-9 に示すゲージ貼付位置は全試験体共通とした。

計測項目は、載荷荷重、試験体の鉛直変位、プレキャスト部と接合部の界面の開き、鉄筋ひずみ、補強プレートおよびコンクリート表面ひずみとした。

## 5.2 試験結果と考察

表-8 にコンクリートの材料試験結果を、表-9 に試験結果一覧を示す。ひび割れ発生までは、10kN ごとにひび割れ計測を行い、ひび割れ発生荷重を求めた。降伏荷重は、配力鉄筋に貼り付けたひずみゲージのうち、どこか 1 箇所の計測点の値が降伏ひずみ (2085 $\mu$ ) を越えた時点とした。すべての試験体が鉄筋降伏後にプレキャスト部のコンクリート圧壊で終局に至っており、界面のひび割れが大きく開くことはなかったことから、今回検討した 4 種類の継手仕様は、どれも十分な継手性能を有しているものと推察される。

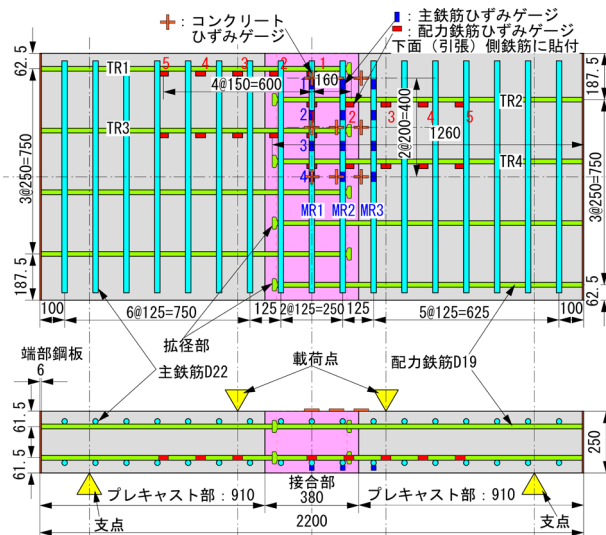


図-9 JT-15 試験体配筋図

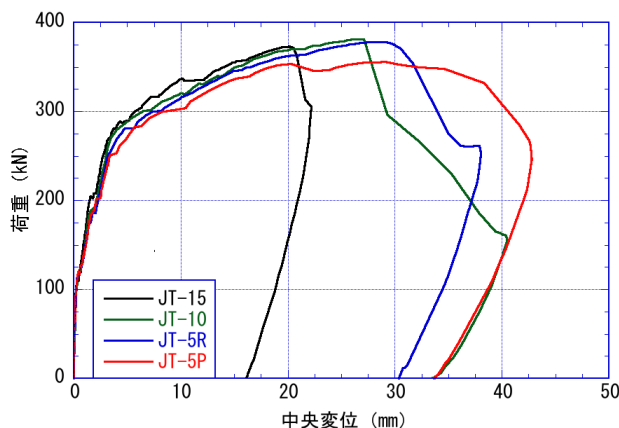


図-10 荷重-変位包絡線

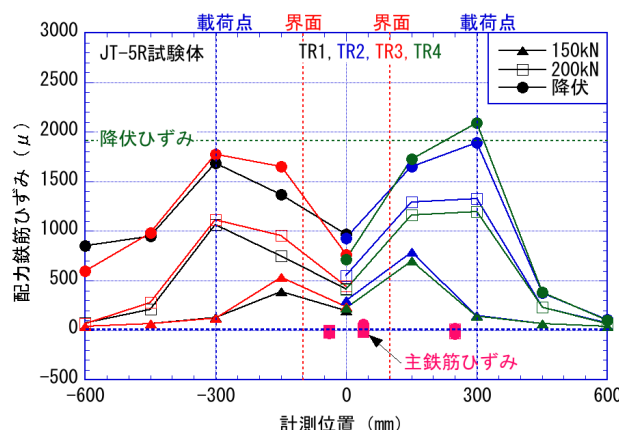


図-11 配力鉄筋のひずみ分布(JT-5R)

図-10 に各試験体の荷重-変位関係の包絡線を示す。中央変位が 20mm までは、どの試験体も同様の挙動を示した。図-11 に JT-5R 試験体の載荷荷重が 150kN、200kN および配力鉄筋降伏時の配力鉄筋のひずみ分布図を示す。主鉄筋ひずみは、1 本につき 4 箇所で計測しているが、4 点のひずみを同じ位置にプロットした。試験体寸法、支持条件より

はり挙動を示したため、主鉄筋にはほとんどひずみが発生していない。配力鉄筋は、載荷点位置のひずみが最も大きくなっているが、これは、ひび割れ発生位置の影響が大きいものと考えられる。

## 6. 輪荷重走行試験

### 6.1 試験概要

試験体は 2 体で、試験パラメータは床版厚さ(180mm、200mm)とした。試験体名をそれぞれ WR-180、WR-200 とする。試験体形状・寸法を図-12 に示す。試験体寸法は、4,500mm×2,800mm とし、中央から 287.5mm の位置に接合部を設けた。底鋼板(SM400A)および添接板の厚さは 8mm、添接板の幅は 165mm とした。底鋼板上に角形鋼管(STKR400 150×75×3.2mm)を橋軸直角方向に 575mm ピッチで 7 本配置した。角形鋼管の溶接による底鋼板の変形を押さえるために、250mm ごとに 150mm 溶接して、100mm 無溶接とする断続溶接とした。橋軸直角方向のずれ止めとして、頭付きスタッド(φ16×100)を、橋軸直角方向に 250mm ピッチで、橋軸方向には、角形鋼管の間に 3 本(162.5mm ピッチ)ずつ配置した。圧縮側の主鉄筋(SD345 D22)は 125mm ピッチで、配力鉄筋(SD345 D16)は 250mm ピッチで配置した。

配力鉄筋の継手は T ヘッド工法鉄筋による重ね継手で、相手側の鉄筋の中間に入るよう千鳥配置とした。首下間の距離 123mm より、重ね継手長は 7.7d となる。脆性破壊を防止するために、コアコンクリート側の首下部に主鉄筋 2 本を追加した。

プレキャスト部および接合部のコンクリートは、接合部試験体と同様である。プレキャスト部の長さは 2,435mm と 1,860mm、接合部は 205mm とした。プレキャスト部の脱型後、接合部界面を高水圧処理し、吸水調整剤を塗布した 2 日後に、LMFC を打設した。

試験体は、床版支間 3.0m の連続版として設計したが、輪荷重走行試験は単純支持で行うため、支間中央の曲げモーメントが同様となるように、橋軸直角方向は支間 2.5m で回転可能な単純支持とした。橋軸方向は弾性支持とし、H 形鋼の横梁と試験体を固定する浮き上がり防止を設置した。

載荷方法は、157kN から 1 ステップ 4 万回ごとに約 20kN ずつ増加させて 392kN まで 13 ステップ合計 52 万回載荷する階段状荷重漸増載荷<sup>13)</sup>とした。試験状況を写真-1 に示す。走行範囲は 3.0m で、

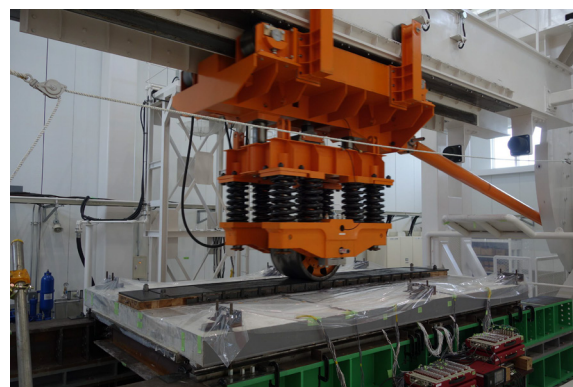


写真-1 試験状況

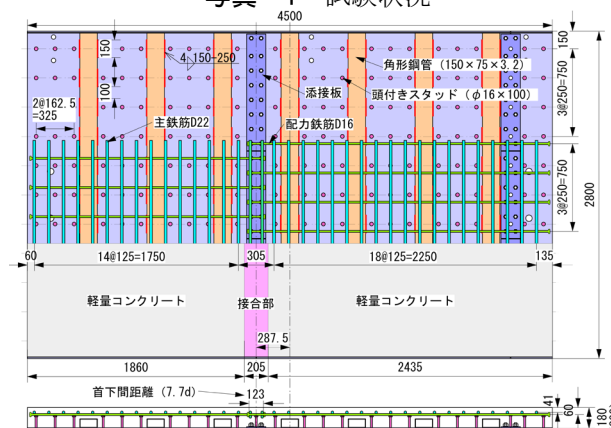


図-12 輪荷重試験体形状・寸法

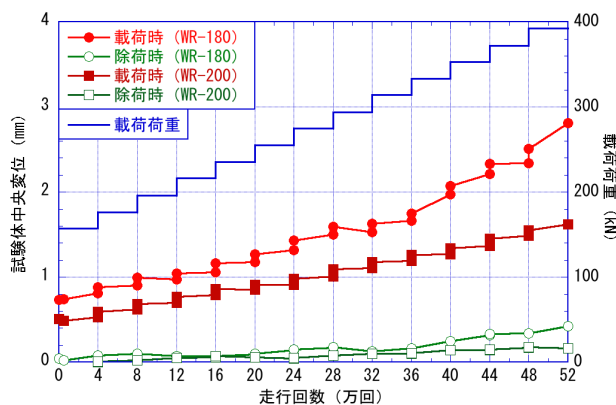


図-13 走行回数と中央変位

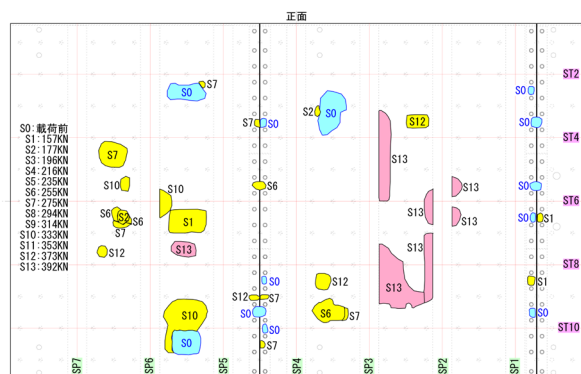


図-14 底鋼板のはく離状況(WR-180)



幅 500mm の鉄輪が最高速度 15rpm(4 万輪/日)で走行した。

計測項目は、載荷荷重、繰返し回数、鉛直変位、継手部の開きおよび底鋼板、角形鋼管、鉄筋、コンクリート上面の各ひずみと、底鋼板のはく離状況およびコンクリート上面のひび割れ状況とし、各荷重ステップの最初と最後の 2 回、静的な載荷を行い計測した。静的載荷における載荷位置は、試験体中央とその左右 500mm の位置の 3 点とした。はく離状況とひび割れ状況は、各ステップ終了後に実施した。また、一部の鉛直変位とひずみについては、動的計測も行った。試験終了後に試験体を十字に切断して、試験体内部のひび割れの進展状況を確認した。

## 6.2 試験結果と考察

コンクリートの材料試験結果を表-10 に、鉄筋・鋼材の材料特性を表-11 に示す。コンクリートの材料特性は、試験開始から終了までに実施した 3 回の圧縮試験結果の平均値である。鋼板の材料特性はミルシートの値である。

輪荷重走行試験では、2 体ともに 52 万回の試験終了まで破壊することはなかった。図-13 に走行回数と試験体中央の載荷時および除荷時鉛直変位(残留変位)の関係を示す。WR-200 の変位は、試験終了まで荷重増加にともなう線形的な変化を示した

WR-180 の変位も、36 万回付近までは WR-200 の 1.4 倍程度と線形的に推移していたが、40 万回付近で少し傾きが変化し、最終的には 1.7 倍を越えたものの、急激な変位増加は見られなかった。52 万回載荷終了後の載荷時変位は、WR-180 が 2.81mm、WR-200 が 1.62mm、残留変位は、WR-180 が 0.42mm、WR-200 が 0.16mm であった。

底鋼板のはく離状況は、各ステップ終了後に打音検査で確認した。図-14 に WR-180 の試験終了時のはく離状況を示す。図中の記号(S1 等)は、はく離が確認されたステップを示す。S0 は、載荷前からはく離していた部分である。ステップ 10(333kN)以降ではく離した箇所が増加しているが、大部分は試験終

表-10 コンクリートの材料試験結果

種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
軽量コンクリート	61.7	25.9
LMFC	76.3	35.4

表-11 鉄筋・鋼材の材料特性

種類	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
主鉄筋 D22	383.5	566.3	182.9	23
配力鉄筋 D16	384.7	567.0	185.7	25
角形鋼管 t3.2	370.2	471.5	187.0	31
側鋼板 t6*	288	435	—	31

\* : ミルシート

了まで付着を保ったままであった。WR-200 のはく離した箇所は非常に少なく、最後まで良好な付着状態を保っていた。

試験終了後に試験体を十文字に切断して観察した WR-180 内部のひび割れ状況を図-15 に示す。角形鋼管端部を起点として圧縮鉄筋に伸びるひび割れが見られたが、押抜きせん断破壊に結びつくひび割れは発生していなかった。WR-200 も同様であった。

本試験では、13 ステップ 52 万回の走行試験において、2 体ともに破壊に至らなかったが、街道ら<sup>14)</sup>は、輪荷重走行試験で押抜きせん断破壊した合成床版試験体の試験結果より、合成床版のせん断強度の評価式を誘導している。街道らによると、合成床版の押抜きせん断強度は、底鋼板のせん断抵抗を無視し、コンクリートの圧縮領域のせん断抵抗のみを考慮した式(3)で評価できるとしている。

$$P_{sx} = 2 \cdot \tau_{smax} \cdot x_m \cdot B \quad (3)$$

$$B = b \cdot d_d \quad (4)$$

ここに、

$P_{sx}$  : 貫通ひび割れ発生後の押抜きせん断強度(N)

$\tau_{smax}$  : コンクリートの最大せん断応力度(N/mm<sup>2</sup>)

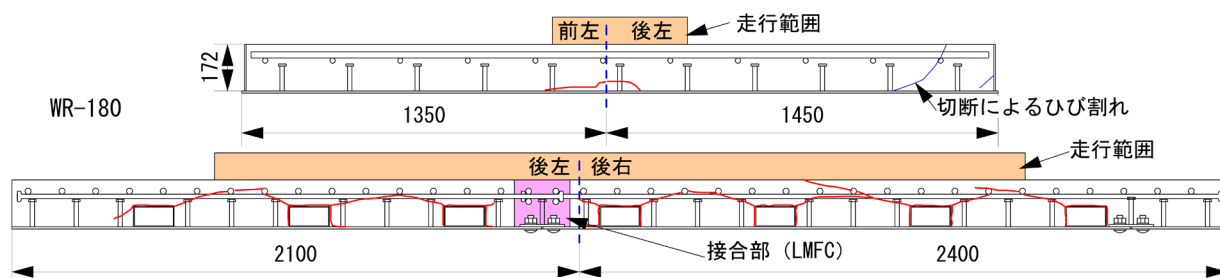


図-15 内部ひび割れ状況(WR-180)



$x_m$  : 主鉄筋に直角な断面のコンクリートの引張領域を無視した場合の中立軸位置(mm)  
 $B$  : 疲労に対する床版の有効幅(mm)  
 $b$  : 配力鉄筋方向の載荷板の辺長(mm)  
 $d_d$  : 合成床版の $B$ を求める場合、コンクリート版厚(mm)

図-16 は、文献 14)の押抜きせん断強度の評価式と RC 床版の疲労寿命曲線の比較に、破壊には至っていないものの今回の試験結果を追加した図である。●が押抜きせん断により破壊した合成床版試験体で、実線が RC 床版の疲労寿命曲線である。

本試験体は軽量コンクリートを用いているため、東山らの方法<sup>15)</sup>により、 $\tau_{smax}$ は式(5)で、 $P_{sx}$ は式(6)で求めた。

$$\tau_{smax} = 0.528 \cdot f_c'^{0.602} \quad (5)$$

$$P_{sx} = 2 \cdot a_{cv} \cdot \tau_{smax} \cdot x_m \cdot B \quad (6)$$

ここに、

$f_c'$  : 軽量コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

$a_{cv}$  : 軽量コンクリートの低減係数(0.785)

中立軸は、底鋼板のヤング係数を 200kN/mm<sup>2</sup>とし、軽量コンクリートと鉄筋の材料試験結果より求めた。2 体の試験体の押抜きせん断強度 $P_{sx}$ は、WR-180 が 491kN、WR-200 が 568kN で、最終の載荷荷重(P=392kN)を押抜きせん断強度で除した無次元量 $P/P_{sx}$ は、それぞれ 0.80、0.69 となる。392kN に換算した等価繰返し回数は 80,306 回である。破壊には至っていない段階で、疲労寿命曲線の上に位置しており、破壊まで荷重した場合、図中のプロットがさらに右に移動することから、本試験に用いた試験体は十分な疲労耐久性を有していることがわかる。

### 6.3 FEM 解析値と実験値との比較

輪荷重走行試験と FEM 解析による試験体中央変位の比較を行った。輪荷重走行試験の各荷重段階における試験体中央位置での静的荷重時の実測値を 157kN に換算したものと FEM 解析により算出した値との比較である。

解析モデルは、床版をシェル要素で構成し、支持桁(主桁および横桁)で単純支持された直交異方性版として、板曲げ解析を行った。解析の実施にあたっては、断面厚さを 200mm と 180mm、ヤング係数比を実験値相当の  $n=7$  と設計相当である  $n=10$ 、コ

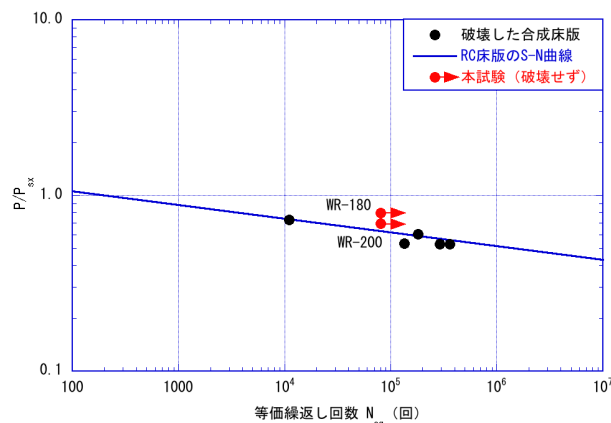
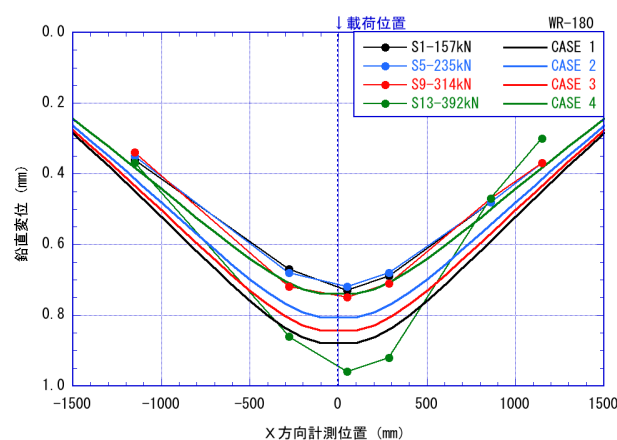
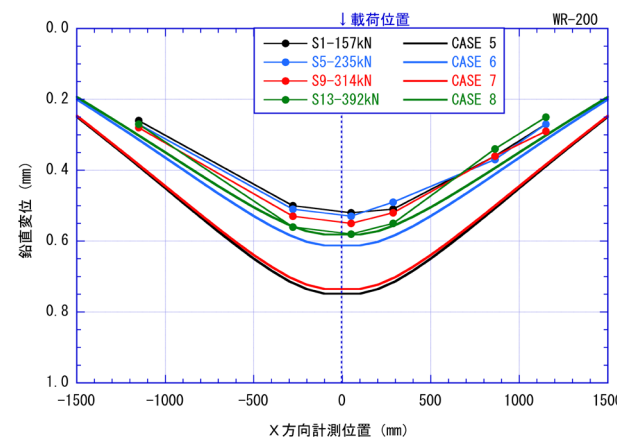


図-16 押抜きせん断強度の評価式と RC 床版の疲労寿命曲線の比較



(a) WR-180 試験体



(b) WR-200 試験体

図-17 FEM 解析値と実験値との比較

ンクリートを全断面有効とした場合、引張側を無視した場合の 8 ケースについて行った。CASE1 から CASE4 が WR-180、CASE5 から CASE8 が WR-200 について解析した結果である。載荷荷重は、載荷板(200mm×500mm)から等分布荷重が床版厚さの 1/2 の面まで 45 度の角度で分散するものとしてモデル化した。主鉄筋方向のみ角形鋼管を考慮した。

図-17に配力鉄筋方向の分布の比較を示す。これらの図での実験値は、各荷重段階における活荷重変位量(載荷時変位-残留変位)を157kNに換算した値である。図-17(a)を見ると、WR-180はステップ9の変位分布が解析CASE4(n=7、全断面有効)の結果とよく一致しているが、ステップ13は解析CASE1(n=10、引張無視)よりも大きな変位が発生している。図-17(b)を見ると、WR-200はステップ13の変位分布が解析CASE8(n=7、全断面有効)の結果とよく一致しており、52万回走行終了時点においても、全断面有効に近い状態にあったものと考えられる。

## 7. まとめ

SLaT-FaB床版の開発において実施した版の正曲げ試験、角形鋼管の押抜きせん断試験、機械式定着筋を用いた新しい継手構造の継手性能に関する静的載荷試験および輪荷重走行試験の結果、以下の知見が得られた。

- (1) 角形鋼管と軽量コンクリートを用いた合成床版は、設計荷重を大きく越える300kNまで、底鋼板とコンクリートが一体となった弾性挙動を示した。
- (2) 押抜きせん断試験より、角形鋼管はずれ止めとして十分な静的耐力・疲労強度を有している。
- (3) 形鋼シアコネクタの設計せん断耐力式を用いて、角形鋼管のせん断耐力を算定できる可能性が得られた。
- (4) 今回検討した4種類の継手仕様は、どれも十分な継手性能を有している。
- (5) 輪荷重157kNから392kNまでの13ステップ52万回の走行試験において、2体ともに破壊には至らず、十分な押抜きせん断強度を有しており、内部にも押抜きせん断破壊に結びつくひび割れは見られなかったことから、本床版が高い疲労耐久性を有していることが確認できた。
- (6) 輪荷重走行試験における床版厚さの影響は、変位の増加傾向と底鋼板のはく離状況に現れた。床版厚さ200mmの試験体は、52万回走行終了時点においても、全断面有効と考えられる。

## 謝辞

SLaT-FaB床版の開発は、近畿大学東山浩士教授のご指導の下、日本ファブテック株式会社と共同で行ってきたものです。東山先生、日本ファブテック 大久保様、山本様に大変感謝申し上げます。

## <参考文献>

- 1) 国土交通省, 床版の損傷事例  
[http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3\\_1\\_4.pdf](http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_4.pdf) (閲覧日: 2019年10月10日)
- 2) 東・中・西日本高速道路の更新計画:  
<http://www.e-nexco.co.jp/koushin/pdfs/150116.pdf> (閲覧日: 2019年10月10日)
- 3) 水野浩, 鳥山裕史, 松井繁之, 街道浩: プレキャスト合成床版の合理化継手構造の継手挙動, 土木学会第65回年次学術講演会論文集, I-308, pp.615-616, 2010
- 4) 滝本和志, 田中博一, 朱曉旭, 大久保宣人, 山本将士, 東山浩士: 角形鋼管を用いた軽量プレキャスト鋼コンクリート合成床版の開発, 第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.183-188, 2018
- 5) 朱曉旭, 滝本和志, 大久保宣人, 東山浩士: 角形鋼管のずれ止め性能に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1165-1170, 2018
- 6) 滝本和志, 田中博一, 山本将士, 東山浩士: プレキャスト床版の継手構造に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.577-582, 2018
- 7) 滝本和志, 田中博一, 大久保宣人, 山本将士, 東山浩士: 角形鋼管を用いた軽量プレキャスト鋼コンクリート合成床版の輪荷重走行試験, 土木学会第74回年次学術講演会論文集, I-345, 2019
- 8) 郭度連, 森山守, 李春鶴, 山中俊幸: ラテックス改質速硬コンクリート(LMFC)の基礎物性と耐久性, プレストレストコンクリート工学会第24回シンポジウム論文集, 2015
- 9) 日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状, JSSCテクニカルレポート No.35, 1996
- 10) 土木学会: 2014年制定 複合構造標準示方書「設計編」, 2015
- 11) 児島哲朗, 鈴木喜弥, 阿部久義, 藤原良憲, 橘吉宏, 平城弘一: 軽量骨材コンクリートを用いたジベル押抜きせん断疲労試験, 土木学会第59回学術講演会, 2004
- 12) 松井繁之, 平城弘一: 限界状態設計法のための頭付きスタッドの静的・疲労強度に関する評価式, 第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 1989
- 13) 国土交通省土木研究所: 道路橋床版の輪荷重走行試験によ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 -, 2001
- 14) 街道浩, 松井繁之: 鋼・コンクリート合成床版の支間部および張出し部のせん断疲労強度評価, 土木学会論文集A, Vol.64, pp.60-70, 2008
- 15) 東山浩士, 水越睦視, 松井繁之, 小田憲司: 軽量コンクリートを用いたRC床版の押抜きせん断耐力の評価とその実用性に関する研究, コンクリート工学論文集, 第16巻第1号, 2005