

高強度 SFRC と中空構造の採用により軽量・高剛性・長寿命を達成した道路橋プレキャスト PC 床版 T-L³Slab™ の開発

村田 裕志*¹・山本 悠人*¹・吉田 昂平*¹・畑 明仁*¹

Keywords : road bridge deck slab, high strength SFRC, voided structure, running wheel fatigue test
道路橋床版, 高強度 SFRC, 中空構造, 輪荷重走行疲労試験

1. はじめに

供用されてから数十年以上が経過した道路橋の床版では、交通量の増加に伴い走行荷重による疲労劣化が数多く生じている。そのため、各事業者により大規模更新事業が進められている。従来の鉄筋コンクリート製の床版（以下、RC 床版）の劣化が多数報告されているが、これは現在の道路橋示方書と比較して当時の示方書に規定される床版厚が小さく、鉄筋量が少ないことが主要因の一つである。例えば昭和 39 年および平成 8 年に制定された道路橋示方書で設計を行うと、床版厚は 190mm から 250mm に増加する。そのため床版更新においては更新後の床版重量を抑制するために RC 床版からプレストレストコンクリート床版（以下、PC 床版）に変更することで床版厚の増加量を減らす対策が取られているが、それでも床版重量の増加により主桁や下部工の補強が必要となるケースが多くある。この問題の解決策として高強度コンクリート材料を用いて薄肉化し、リブ付き構造として軽量化した床版の開発も進められている^{例¹2)}。しかし、一般的な PC 床版よりも剛性が低下するため、活荷重（走行荷重）の作用に対して床版の変形（たわみ）が大きくなり、舗装の寿命に悪影響を及ぼす可能性がある。

そこで著者らは軽量化・高剛性保持・長寿命化をすべて達成する床版として、設計基準強度 80N/mm² の高強度 SFRC（鋼繊維補強コンクリート）を用いて中空構造とした T-L³Slab（ティーエルキューブスラブ）の開発を進めてきた³⁾⁴⁾。「L³」には「Light-weight：軽量」「Low-deflection：高剛性でたわみが小さい」「Long-

life：長寿命」の 3 つの意味が込められている。

本稿では、2 章にて SFRC の材料検討および構造形状の検討結果、3 章にて床版試験体での静的載荷試験・再現解析による耐力確認と輪荷重走行試験による耐疲労性確認の結果、4 章にてまとめを記す。

2. SFRC の配合と構造形式

2.1 SFRC の配合選定とフレッシュ性状結果

本検討において使用した SFRC の使用材料を表-1 に示す。結合材は普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を質量比で 50%ずつ使用した。また、W/B=25%程度であり粉体量が多くなることから、収縮対策として結合材の一部を膨張材と置換した。細骨材には陸砂、粗骨材には硬質砂岩碎石を用いた。化学混和剤は高性能 AE 減水剤と空気量調整を目的とした AE 剤およびスランプフローの保持を目的に別途添加型の流動保持剤を使用した。鋼繊維については、低コストでひび割れ発生後のじん性を発揮できるものとして、写真-1 に示す直径 0.75mm、繊維長 60mm（アスペクト比 80）、規格引張強度 1800N/mm² の端部フック型のものを選択し、これを 40kg/m³ の量で混入した。中空断面に対して十分な充填性を確保するために、スランプフローは 60±10cm と設定し、製造工場での施工時間を考慮して練上り後 60 分間にわたりこのフレッシュ性状を保持することを目標とした。また高強度コンクリートとなるため、練上り時の空気量の目標は通常のコングリートより小さい 2.0~4.5%と設定した。そのため凍結融解に対する抵抗性も併せて検討した。試験練りにお

* 1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室

表-1 SFRC の使用材料
Table 1 Materials of SFRC

		仕様	密度 (g/cm ³)
結合材	セメント	普通ポルトランドセメント	3.15
	混和材①	高炉スラグ微粉末	2.89
	混和材②	膨張材	3.19
細骨材		陸砂 5mm	2.60
粗骨材		硬質砂岩碎石 20mm	2.65
鋼繊維		端部フック仕様	7.85 (外割)
化学混和剤①		高性能 AE 減水剤	—
化学混和剤②		AE 剤	—
化学混和剤③		別途添加型流動保持剤	—



写真-1 使用した鋼繊維
Photo.1 Steel fiber

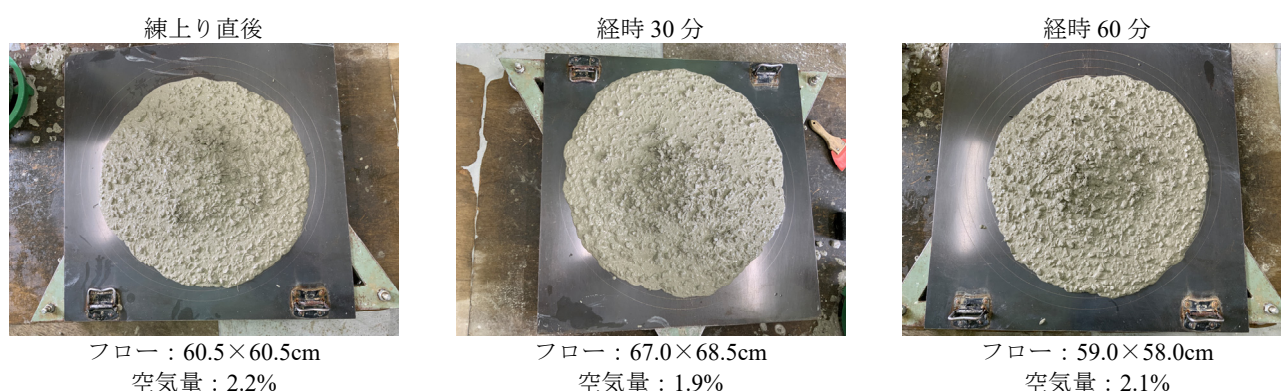


写真-2 フレッシュ性状試験結果
Photo.2 Fresh property test results

けるフレッシュ性状結果とスランプ試験の状況を写真-2に示す。適切に化学混和剤を添加することで材料分離のない良好なフレッシュ性状を保持できる。

2.2 硬化した SFRC の結果

硬化した SFRC に対して実施した試験一覧を表-2に示す。引張軟化曲線は、JCI 基準に準じて切欠きはりの3点曲げ載荷試験（破壊エネルギー試験）を実施し、得られた荷重-変位曲線に対して逆解析を行うことで求めた。なお、繊維長が 40mm を超えているため、試験体寸法は 150×150×530mm とした。各種材料特性に対する鋼繊維の混入の有無の影響を確認するため、引張軟化曲線については鋼繊維ありと鋼繊維なしの 2 水準で試験を実施した。

各種試験結果を表-3 に示す。ヤング係数および引張強度に関しては設計基準強度 80N/mm² に対してコンクリート標準示方書⁹⁾によって算出した計算値を併記する。圧縮強度およびヤング係数に関しては鋼繊維の混入による影響は軽微であり、ヤング係数は計算値と同等の値である。割裂引張強度に関しては鋼繊維ありの供試体が約 9%増加している。これは鋼繊維によってひび割れの開口・進展が抑制されたためと考えられる。切欠きはりの 3 点曲げ載荷試験の逆解析から求められた引張軟化曲線を図-1 に示す。一般的な鋼繊維補強コ

表-2 材料試験項目一覧
Table 2 List of material tests

項目	方法
圧縮強度	JIS A 1108
ヤング係数	JIS A 1149
割裂引張強度	JIS A 1113
引張軟化曲線	JCI-S-002
凍結融解抵抗性	JIS A 1148

表-3 材料試験結果一覧
Table 3 List of material test results

項目		結果 (N/mm ²)
圧縮強度	鋼繊維あり	88.7
	鋼繊維なし	85.5
ヤング係数	鋼繊維あり	3.92×10 ⁴
	鋼繊維なし	3.99×10 ⁴
	計算値	3.80×10 ⁴
割裂引張強度	鋼繊維あり	5.74
	鋼繊維なし	5.29
	計算値	4.27

ンクリートと同様、ひび割れ発生後に鋼繊維の架橋により再度応力が増加することを確認した。その後、ひび割れ幅 6mm 程度まで引張応力を保持しており、十分なじん性があることを確認した。また、図-2 に示すように、小さな空気量においても十分な凍結融解抵抗性を有することを確認した。

2.3 床版の構造形式の選定

前節で決定した SFRC の配合を使用して開発した床版 T-L³Slab の構造形式を述べる。活荷重 (T 荷重の輪荷重 100kN) の作用下で、橋軸方向ではひび割れを許容する RC 構造、橋軸直角方向では引張応力の発生を許容するがひび割れの発生は許容しない PPC (Partially Prestressed Concrete) 構造として形状・緊張力を決定する。そのため一般のフルプレストレスである PC 床版と比較して必要緊張力が小さく、橋軸直角方向の緊張鋼材については PC 鋼材の代わりに材質 SD490 の高強度鉄筋を利用することとした。中空断面は建築分野のボイドスラブと同様に、EPS (ビーズ法発泡ポリスチレンフォーム) を型枠内に固定することで構成した。

鋼主桁スパン 3.2m の場合の T-L³Slab の概要を図-3 に示す。一般的な PC 床版と比較して同等の剛性を保持したまま約 30%の軽量化となる。床版厚は 220mm, 上下フランジ厚は 45mm, ウェブ厚は 45mm~60mm とした。60mm の長さの鋼繊維がフランジ・ウェブの各部位で厚さ方向に配置されにくく、良好な鋼繊維の配向となるようにした。3章にて後述する輪荷重走行疲労試験の供試体にて、試験後の健全部を取り出し、X線CTにて鋼繊維の配向性を確認した結果を図-4 に示す。良好なコンクリートと鋼繊維の充填性が確認できる。

3. 床版の安全性に関する検討

3.1 床版の静的耐力照査

本節では T-L³Slab の曲げ・せん断破壊に対する安全性の検討を実施した結果を記す。

3.1.1 床版試験体の部材諸元

試験に用いた T-L³Slab の試験体は通常のプレキャスト PC 床版と同等の剛性を有するように床版厚を 220mm とし、平面寸法は橋軸方向 2000mm×橋軸直角方向 2800mm とした。上下フランジ厚とウェブ厚は 2.3 節での内容と同じとした。鉄筋は橋軸方向に D19ctc150 (SD345)、橋軸直角方向に D19ctc300 (SD490) とした。橋軸直角方向には SD490 の鉄筋にプレテンションを与えた。初期緊張力は 1 本あたり 126kN である。これは 2 章で述べた通り、T 荷重作用時に橋軸直角方向で引張応力は発生するが、ひび割れは生じない PPC 構造として設計されたものである。

3.1.2 载荷試験

上記の床版において、1点集中载荷試験を実施した。载荷試験の状況を写真-3 に示す。载荷については試験体中央に橋軸方向 200mm×橋軸直角方向 500mm (T 荷

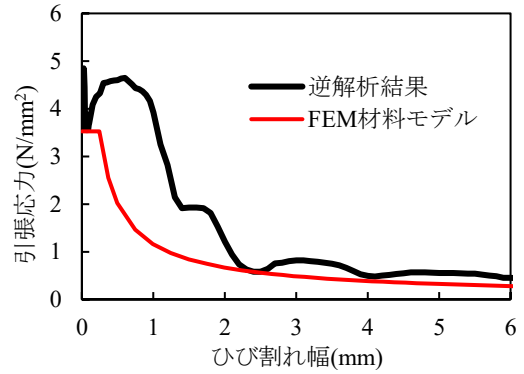


図-1 引張軟化曲線

Fig.1 Tension softening curve

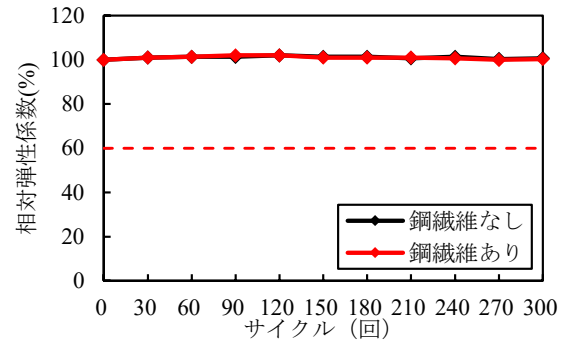


図-2 凍結融解試験結果

Fig.2 Freeze-thaw test results

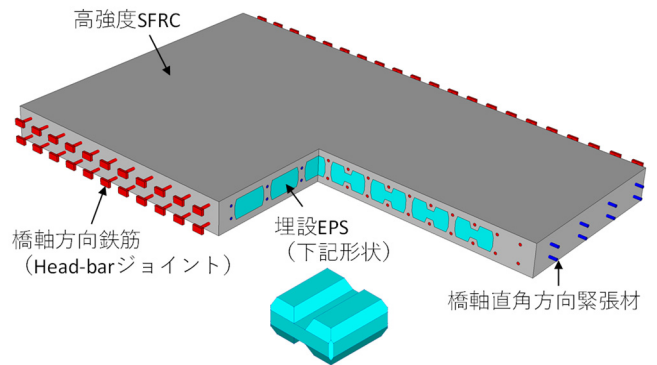


図-3 T-L³Slab 概要図 (下: EPS 形状)

Fig.3 Outline of T-L³Slab

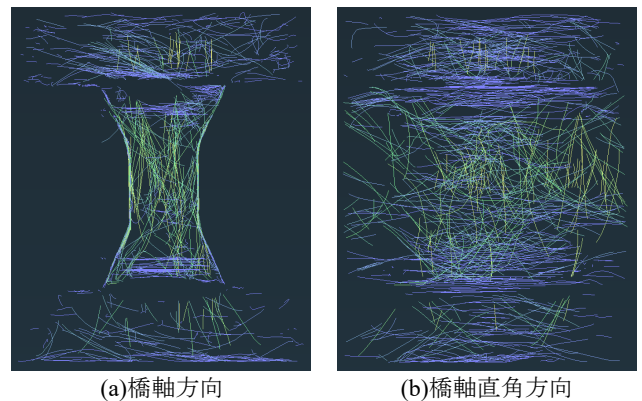


図-4 X線CT画像

Fig.4 X-ray CT image

重の大きさ)の載荷板を介して荷重を与え、荷重低下が生じるまで静的単調加力により実施した。橋軸方向の2辺を支点とし、橋軸直角方向の支点間距離は2500mmとした。なお、支点付近において床版端部の浮き上がり対策は講じていない。なお端部300mmの範囲にはEPSを埋め込んでおらず中実断面となっている。これは想定される破壊モードが載荷板付近での曲げ破壊または押抜きせん断破壊であり、耐力への影響はないと判断したためである。

試験実施時のSFRCの圧縮強度は83.5N/mm²であった。これは実際の製品を想定して蒸気養生後に5日間水中養生を行い、その後気中養生とした供試体を用いて載荷日に実施した結果である。

荷重と床版の鉛直変位の関係を図-5に、試験終了時の試験体の写真を写真-4に示す。図-5における中央たわみは中心の鉛直変位から四隅の鉛直変位の平均値を差し引いた値とした。約180kNでひび割れが発生、約420kNで載荷板直下の橋軸直角方向の鉄筋が降伏した。複数本に分散されたひび割れのうち、載荷板直下のひび割れ幅が拡大し、上面コンクリートの圧縮破壊により荷重が低下した。最大荷重は501kNであり、最大荷重は道路橋示方書におけるT荷重100kN/箇所の約5倍の値となっており、T-L³Slabの十分な耐力が確認された。上面コンクリートの圧縮破壊が生じた後は荷重が十分に低下したため載荷を終了した。また、載荷時には四隅の浮き上がりは確認されなかった。押抜きせん断破壊は生じず、破壊モードは曲げ破壊となった。

3.1.3 非線形有限要素解析による耐力算定

床版耐力の解析的評価を目的に、前項の載荷試験を対象に材料非線形を考慮した有限要素解析を実施した。モデル図を図-6に示す。SFRCのモデルは圧縮強度を83.5N/mm²とし、ヤング係数・引張強度はコンクリート標準示方書⁵⁾にて圧縮強度から定まる諸元、各骨格曲線も同様にコンクリート標準示方書に基づく圧縮応力-ひずみ関係、せん断伝達関数を設定した。ただし、既往研究^{6),7)}を参考に、引張軟化曲線については図-1に示すように逆解析により得られたものを部材内でのバラつきを考慮して70%に低減した曲線を用い、せん断伝達関数は軟化を考慮しその軟化係数を0.4とした。鉄筋は埋込鉄筋要素(トラス要素)とし、降伏後に1%の剛性を持つバイリニアモデルとした。SFRCと鉄筋の付着すべりモデルは、島らが提案する付着応力-鉄筋ひずみ-すべり関係⁵⁾にかぶりの影響を考慮し低減係数0.1を乗じた付着モデルとした。載荷と拘束条件については、載荷板と支承を鋼材でモデル化し、支点を線上に鉛直



写真-3 載荷試験状況
Photo.3 Loading test conditions

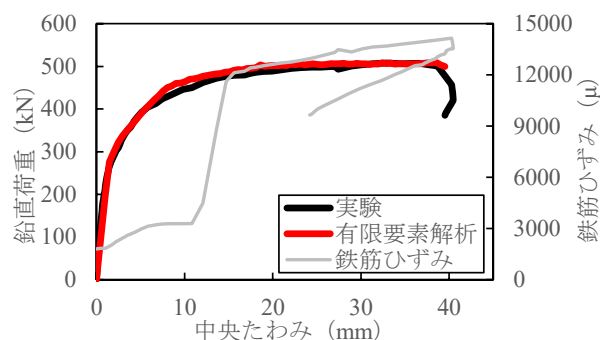


図-5 荷重-変位関係
Fig.5 Load-displacement relationship



写真-4 終局後の試験体上面
Photo.4 Top surface of specimen after failure

支持し、載荷板中央への鉛直方向の強制変位により再現した。EPSの形状はSFRC部の体積と剛性が同等となるようにハンチ部を簡略化し、EPSそのものはモデル化せず空孔とした。

有限要素解析による荷重と鉛直変位の関係を図-5の実験結果に併せて示す。SFRCの代表的な材料特性を用いることで、床版のひび割れ耐力と曲げ耐力を十分な精度で再現可能であることを示した。また図-6に示す通り上面の曲げ圧縮破壊により解析が発散し、実験同様の破壊モードを再現した。

3.2 床版の耐疲労性

本節ではSFRC床版の耐疲労性を確認するために実施した輪荷重走行疲労試験の結果を記す。

3.2.1 輪荷重走行疲労試験の概要と試験体について

輪荷重走行疲労試験は NEXCO 試験法 442⁸⁾に示される、プレキャスト床版の接合部の耐疲労性の確認試験をまず実施した。その後、耐疲労性が高い床版に適用される階段状漸増載荷を実施し、床版試験体の破壊までの耐疲労性を確認した。以下にそれぞれの加力方式の詳細を示す。

前半載荷：NEXCO 試験法 442 に準拠した一定荷重での輪荷重走行試験

東名高速道路の計測データをもとに算出された目標耐用年数 100 年相当となる荷重 250kN×10 万回の載荷を実施し、その後水張り状態にして接合部の漏水確認試験を実施した。

後半載荷：階段状漸増載荷の輪荷重走行試験による破壊までの疲労耐久性確認試験

NEXCO 試験法 442 の実施後、水張りを維持した状態で 275kN, 294kN, 314kN, 334kN, 353kN, 373kN で各 4 万回, 392kN で破壊までの階段状漸増載荷を実施した。

載荷は（国研）土木研究所が保有する輪荷重走行試験機⁹⁾を用いた。試験体の寸法は既往の研究¹⁰⁾を参考に形状を決定し、橋軸直角方向に 2800mm、橋軸方向に 4500mm、厚さは 220mm とし、橋軸方向の継手を有する構造とした。3.1 節での試験体と同様に、橋軸直角方向の SD490 の鉄筋に、1 本あたり初期緊張力 126kN としてプレテンション方式でプレストレスを導入した。支持条件は 4 辺支持（うち、2 辺は弾性支持梁）とした。

計測箇所は輪荷重走行位置の床版下面において変位計 34 点、継手にずれ変位計 10 点、コンクリート・鉄筋のひずみゲージ 78 点を計測した。走行実験中は 2 万回毎に除荷し、残留変位と静的載荷による載荷時変位の計測を実施した。またひび割れ状況を記録した。試験体諸元を図-7 に示す。

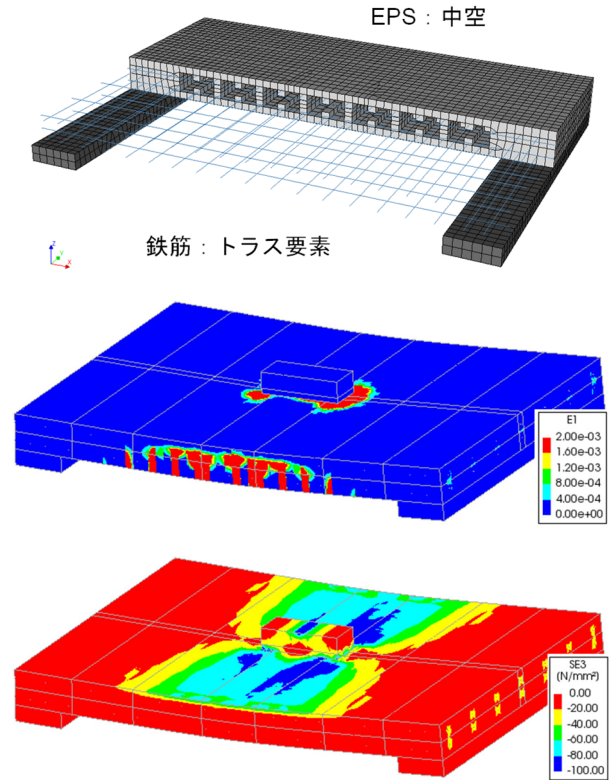
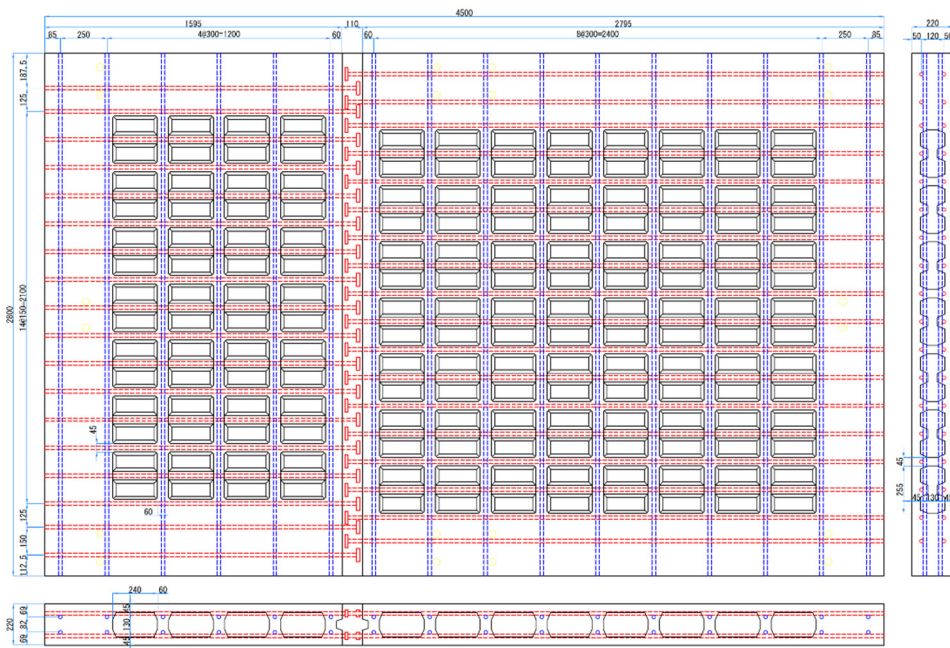


図-6 有限要素モデルと解析結果
Fig.6 Finite element model and analysis results



部材形状	
部材厚	220mm
橋軸方向	4500mm
橋軸直角方向	2800mm
SFRC	
設計基準強度	80N/mm ²
載荷時の強度	89.6~93.3N/mm ²
鋼材	
橋軸方向鉄筋	D19 SD345 間隔 150mm
橋軸直角方向鉄筋	D19 SD490 間隔 300mm
導入緊張力	126kN/本

図-7 輪荷重走行疲労試験の試験体諸元

Fig.7 Test specimen specifications for the running wheel fatigue test

3.2.2 試験結果

前半載荷において床版の損傷はほとんど確認されなかった。残留たわみおよび載荷時のたわみも初期載荷に比べて微小な増加であり、大きく進展している箇所は確認されなかった。その後の漏水確認試験（写真-5）においても接合部の漏水は確認されなかった。

後半載荷では、荷重 392kN での載荷回数 93,648 回（前半載荷を含め合計 453,654 回）において上フランジ部で押抜きせん断破壊が生じたため加力を停止した。変位と走行回数の関係を図-8 に示す。なお今回の試験結果と併せて、既往の研究⁹⁾における乾燥状態での載荷履歴と平成 8 年道路橋示方書に基づき設計された RC 床版および PC 床版の実験結果を示している。残留変位は走行回数 30 万回程度から漸増し、破壊時に急伸していることが確認できる。試験終了時のひび割れ状況と、試験体終了後に切断して観察した内部の破壊状況を図-9 に示す。破壊モードは上フランジの押抜きせん断破壊であり、接合部ではなく一般部にて発生した。

既往研究と比較すると、滞水状態かつ高い荷重条件であるにもかかわらず破壊が生じた走行回数は従来よりも多く、今回開発した T-L³Slab が高い耐疲労性を有していることが確認できた。



写真-5 漏水確認試験の状況
Photo.5 Water leakage confirmation test

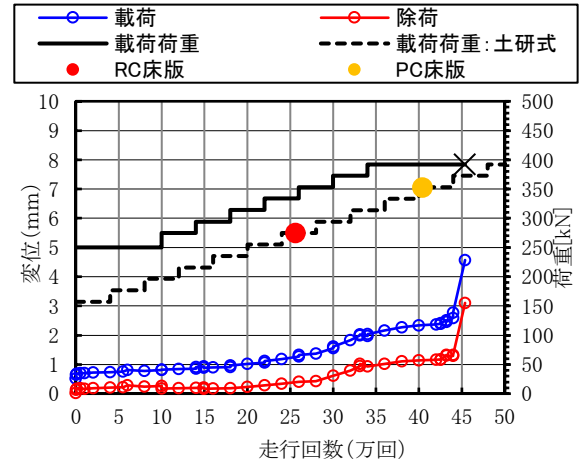
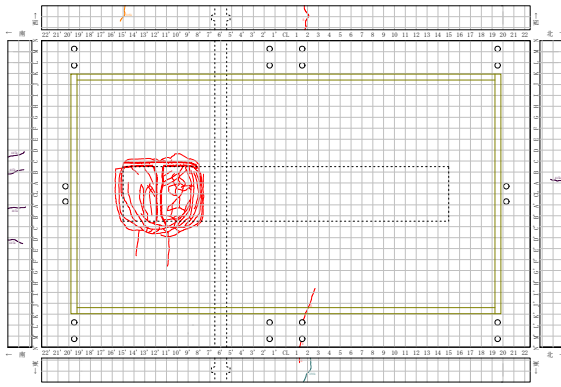
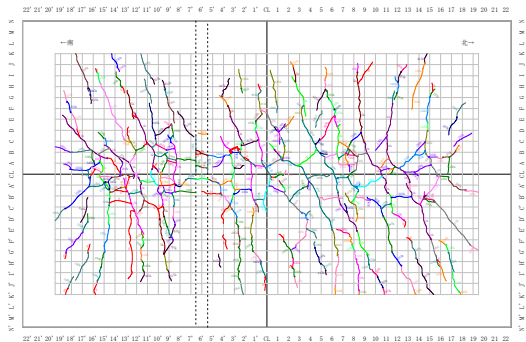


図-8 変位と走行回数の関係
Fig.8 Displacement vs. number of runs



(a) ひび割れ状況



(b) 切断面と破壊状況

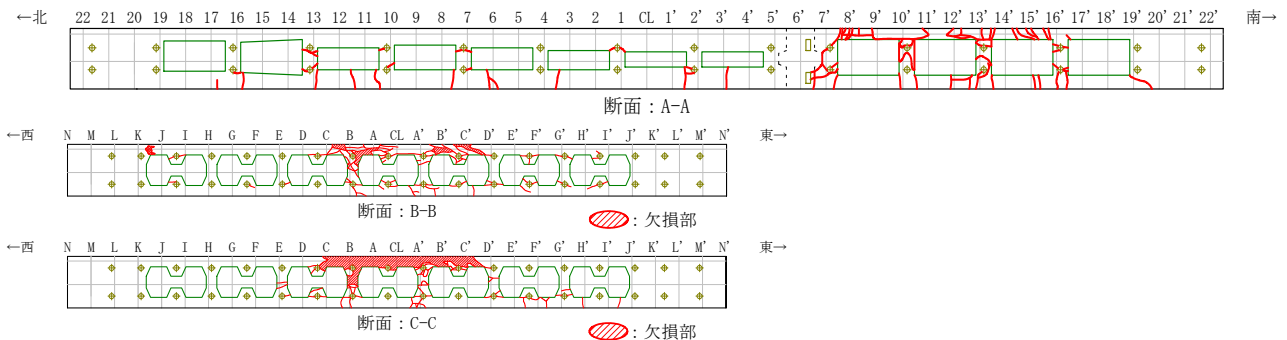


図-9 輪荷重走行疲労試験終了後の試験体状況

Fig.9 Test specimen condition after the running wheel fatigue test

4. まとめ

高強度 SFRC と EPS 埋設による中空構造を用いて軽量化・高剛性・長寿命化を達成できる床版 T-L³Slab を開発し、その各種性能を示した。以下に結果をまとめる。

- (1) T-L³Slab は通常の PC 床版より約 30%重量が軽く、同程度の剛性を有する床版となった。
- (2) 適切な混和材（剤）を使用することで EPS 周りの狭小な空間にも充填可能な SFRC の配合を確立した。
- (3) T-L³Slab は十分な曲げ、押抜きせん断耐力を有し、それらは T 荷重（100kN）の 5 倍以上であった。
- (4) T-L³Slab は、供用 100 年相当の疲労荷重に対して十分に健全であり。従来の設計に基づく各床版よりも高い耐疲労性を示した。

謝辞

輪荷重走行疲労試験は(国研)土木研究所と当社を含む民間 5 社の「短繊維補強コンクリートを用いた橋梁床版の耐久性向上技術に関する共同研究」において実施しました。実施にあたりご助言をいただいた土木研究所の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国総研資料 第 28 号，2002.
- 2) 一宮利通，金治英貞，小坂崇，齋藤公生：鋼床版と同等の軽量かつ耐久性の高い UFC 道路橋床版の開発，プレストレストコンクリート，Vol.56, No.1, 2014.
- 3) 川端康平，村田裕志：設計基準強度 80N/mm² 級の高強度 SFRC の基礎的な強度特性と収縮特性，第 77 回土木学会年次学術講演会講演概要集，V-224, 2022.
- 4) 山本悠人，村田裕志，吉田昂平，畑明仁：高強度 SFRC で製作された中空床版の耐力評価，第 78 回土木学会年次学術講演会講演概要集，V-496, 2023.
- 5) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2023.
- 6) Benny SURYANTO, Kohei NAGAI, Koichi MAEKAWA : Investigating Shear Transfer across Cracks in High performance Steel Fiber-Reinforced Concrete, Vol.32, No.2, pp.1285-1290, 2010.
- 7) 吉田昂平，村田裕志，川端康平，畑明仁：高強度高靱性 SFRC を用いた I 形梁の曲げ・せん断性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.44, No.2, pp.745-750, 2022.
- 8) NEXCO 三社：NEXCO 試験方法 第 4 編 構造関係試験方法，2019.
- 9) (国研) 土木研究所：輪荷重走行試験機
https://www.pwri.go.jp/jpn/about/shisetsu-map/a_d2/index.htm
(最終アクセス 2023.8.2)
- 10) 後藤俊吾，長谷俊彦，本間淳史，平野勝彦：PC 床版の疲労耐久性評価方法の提案，構造工学論文集，Vol.66A, pp.762-773, 2020.