軽量化と高剛性を両立できる高強度 SFRC を用いた中空床版の開発

大成建設(株)　正会員　○山本　悠人
大成建設(株)　正会員　村田　裕志
大成建設(株)　正会員　畑　明仁

１．はじめに

供用して数十年が経過した道路橋の床版は交通量の増加に伴い疲労劣化を起こすものが数多く報告され，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床版（以下，RC 床版）が主に劣化が報告されているが，これは当時の示方書に規定される床版厚や鉄筋量が現在のものよりも小さいことが主要因の一つであり，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[1)]．そのため床版更新においては更新後の上部工の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，それでも上部工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．この課題の解決策として UFC（超高強度繊維補強コンクリート）を用いた軽量な床版の開発[2)]も進められているが，床版厚の減少により剛性が低下するため，活荷重の作用に対して床版の変形（たわみ）が大きくなり，舗装の耐用年数に影響を及ぼす可能性がある．

そこで筆者らは軽量化と高剛性を両立可能な床版として，設計基準強度80N/mm^{2}級の高強度 SFRC（鋼繊維補強コンクリート）を用いた中空構造を有する床版（以下，SFRC 床版）の開発を進めてきた[3,4)]．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章にて静的載荷試験・再現解析による耐力照査と輪荷重走行試験による疲労耐力照査の結果，4章にてまとめを記す．

２．コンクリート配合と構造形式

(1)コンクリート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コンクリートの使用材料を**表-1** に示す．結合材は普通ポルトランドセメントを基本として高炉スラグ微粉末を 50%置換した．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．細骨材に陸砂，粗骨材に硬質砂岩砕石を用いた．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 剤およびフレッシュ性状保持を目的にスランプフロー保持性能を有する別途添加型の減水剤を使用した．鋼繊維については，低コストで高いじん性を発揮できるものとして，**図-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/mm^2 のものを使用した．鋼繊維の混入量は 40kg/m^3 とした．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 60.0±10.0cm と設定し，工場での施工時間を考慮して練り混ぜ後 60 分間にわたりこのフレッシュ性状を保持でき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目標は通常のコンクリートより小さい 2.0~4.5%と設定した．そのため凍結融解に対す

表-1　使用材料

		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		硬質砂岩砕石 20mm	2.65
鋼繊維		端部曲げ仕様	-
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		減水剤	-

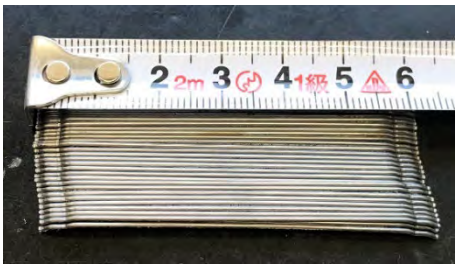


図-1　使用した鋼繊維

キーワード　道路橋床版，高強度鋼繊維補強コンクリート，軽量化，中空床版，疲労耐久性
連絡先　〒245-00051　神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1　ＴＥＬ045-814-7221

練上り直後　　経時 30 分　　経時 60 分



フロー：60.5×60.5
空気量：2.2%

フロー：68.5×67.0
空気量：1.9%

フロー：59.0×58.0
空気量：2.1%

図-2　フレッシュ性状試験結果

る抵抗性も併せて検討した．試験練りにおけるフレッシュ性状結果とスランプ試験の状況を**図-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) 硬化 SFRC の結果

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算出した．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．鋼繊維の混入の有無による強度への影響を確認するため，破壊エネルギー以外の各種試験項目について鋼繊維ありと鋼繊維なしの 2 パターンの試験を実施した．

各種試験結果を**表-3**に示す．またヤング係数および引張強度に関しては設計基準強度80N/mm^{2}に対してコンクリート標準示方書[5]に基づき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小さく，計算値を満足している．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．これは鋼繊維がひび割れの開口・進展を抑制したためである．切欠きはりの3点曲げ載荷試験の逆解析により得られた引張軟化曲線を**図-3**に示す．一般的な繊維補強コンクリートと同様，ひび割れ発生後に鋼繊維のブリッジングにより再度応力が増加していることを確認した．その後，ひび割れ幅6mm 程度まで引張応力を保持しており，十分なじん性を確認できた．凍結融解試験についても，小さな空気量においても十分な抵抗性を示した．

(3) 構造形式の選定

前節で決定した SFRC を使用した床版の構造形式を述べる．橋軸方向には活荷重に対してひび割れを許容する RC 構造，橋軸直角方向に対して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 PC 床版と比較して必要緊張力が小さく，PC 鋼材でなく，橋軸方

表-2　試験項目一覧

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　試験結果一覧[N/mm²]

項目		結果
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

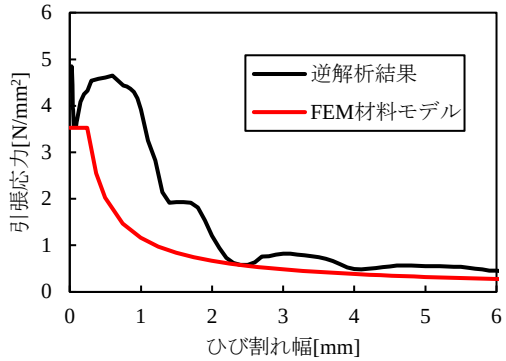


図-3　引張軟化曲線

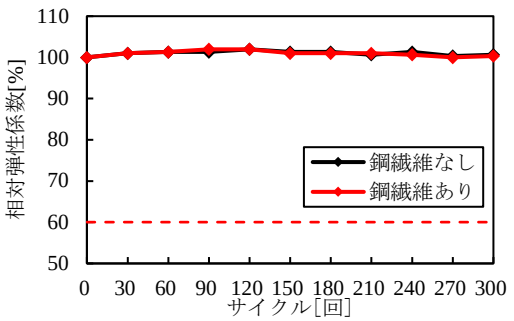


図-4　凍結融解試験結果

向の鉄筋を材質 SD490 の高強度鉄筋とし，それを緊張鋼材として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等で使用されている EPS(ビーズ法ポリスチレンフォーム)を型枠内に固定している．鋼主桁スパン 3.2m の場合の床版形状を**図-5** に示す．床版厚は 220mm であり，フランジ・ウェブ厚は 45mm～60mm であり鋼繊維長さが 60mm であることから各部材において鋼繊維が厚さ方向に配置されにくく．良好な配向性が期待される．3 章にて後述する輪荷重走行試験の供試体にて，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-6** 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．また PC 床版と比較して同等の剛性と 30%の軽量化となる．

３．安全性に関する検討

(1)床版の静的耐力照査

本節では SFRC 床版の曲げ破壊に対する検討結果を記す．

a) SFRC 床版の部材諸元

試験に用いた SFRC 床版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 220m とし，大きさは橋軸方向 2000mm×橋軸直角方向 2800mm とした．上下フランジ厚は 45mm，ウェブ厚は 45mm と 60mm の I 形桁を 2 方向に交差配置する形状とした．鉄筋は橋軸方向に D19ctc150（SD345），橋軸直角方向に D19ctc300（SD490）とした．橋軸直角方向には材質 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．

b) 載荷試験

上記の床版において，1 点載荷試験を実施した．試験体の形状および載荷状況を**図-7** に示す．載荷は試験体中央に T 荷重と同様の大きさ橋軸方向 200mm×橋軸直角方向 500mm の載荷板を介して荷重を与え，荷重低下が生じるまで単調載荷を実施した．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 である．また支点付近において床版端部の浮き上がり対策等は講じていない．また端部 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，耐力への影響が僅かである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/mm^2 であった．これは床版と同様に蒸気養生後に 5 日間水中養生を行い，その後は気中養生にて保管された供試体を用いて載荷日に実施した結果である．荷重と鉛直変位の関係を**図-8** に，試験終了時の試験体の写真を**図-9** に示す．約

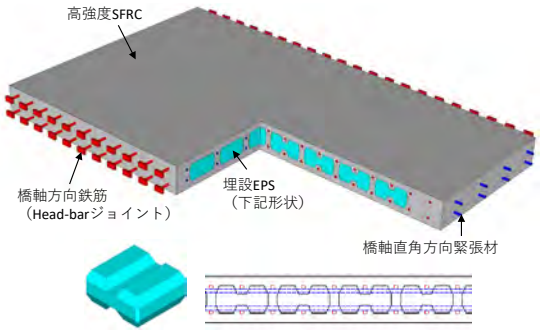


図-5　SFRC 床版概要図（下：EPS 形状）

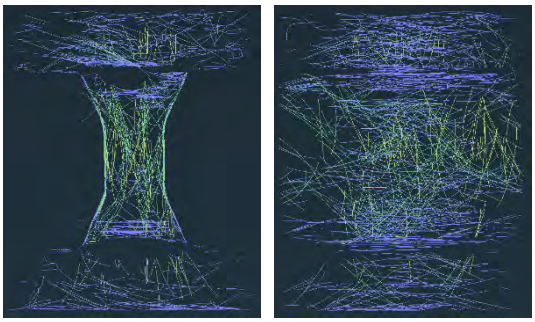


図-6　X 線 CT（左：橋軸，右：直角方向）

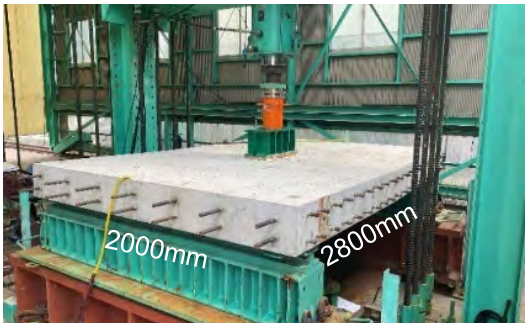


図-7　載荷試験状況

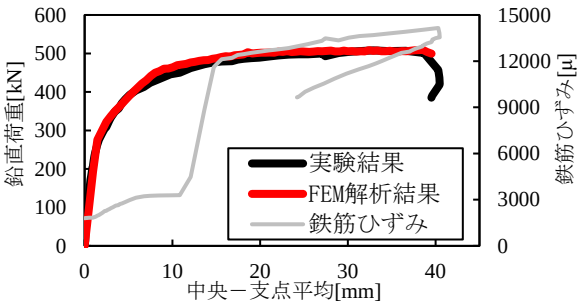


図-8　荷重-変位関係



図-9　荷重低下時の試験体上面

180kN でひび割れが発生，約 420kN で載荷板直下の鉄筋の降伏を確認した．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増加し，上面のコンクリートの圧縮破壊により荷重低下が生じている様子が確認された．最大耐力は 501kN であり，上面コンクリートの圧縮破壊が生じた後は荷重低下が確認されたため載荷を終了した．載荷時には四隅の浮き上がりは確認されず，床版の鉛直変位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．押抜きせん断破壊は生じず，曲げ破壊となった．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，床版の十分な耐力が確認された．

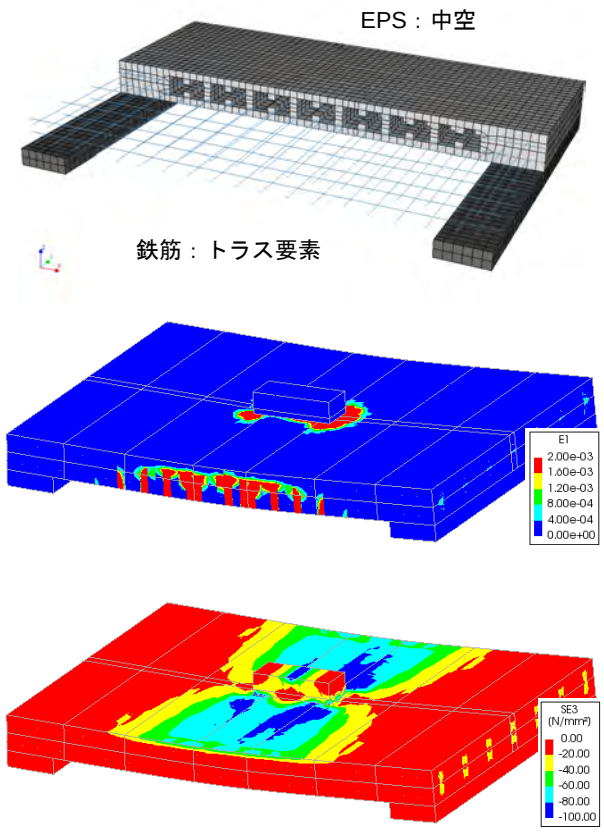


図-10　FEM モデルと解析結果
（中段：最大主ひずみ，下段：最小主応力）

c)　非線形有限要素法による耐力算定

床版耐力の解析的評価を目的に，前章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-10**に示す．コンクリートモデルは圧縮強度を 83.5N/mm^{2}とし．ヤング率・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は**図-3**に示す切欠きはりの曲げ試験から逆解析により得られたものを70%低減した曲線を用い，せん断伝達関数は軟化を考慮し係数を0.4とした．鉄筋はトラス要素の埋込鉄筋とし，降伏後に1%の剛性を持つバイリニアモデルとした．SFRC との付着モデルは，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．載荷方法は載荷板と支承を鋼材でモデル化し，支点の各拘束条件と載荷板中央への鉛直方向の強制変位により再現している．EPS の形状は SFRC 部の体積と剛性が同等となる制約にてハンチ部を簡略化し，モデル上は空洞とした．FEM 解析による荷重と鉛直変位の関係を**図-8**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精度よく算出し，耐力の設計に対しては十分な精度で再現可能であることを確認した．また**図-10**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．

(2) 床版の疲労耐力の照査

本節では SFRC 床版の疲労耐力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．

a)　輪荷重走行疲労試験の概要と試験体について

輪荷重走行試験は NEXCO 試験法 442[8]に示される、プレキャスト床版の接合部の疲労耐力の確認試験と，その後に、疲労耐力が高い床版に適用される階段状漸増載荷の輪荷重走行疲労試験を実施し、SFRC 床版の破壊までの疲労耐力を確認した．以下に加力方式の詳細を示す．

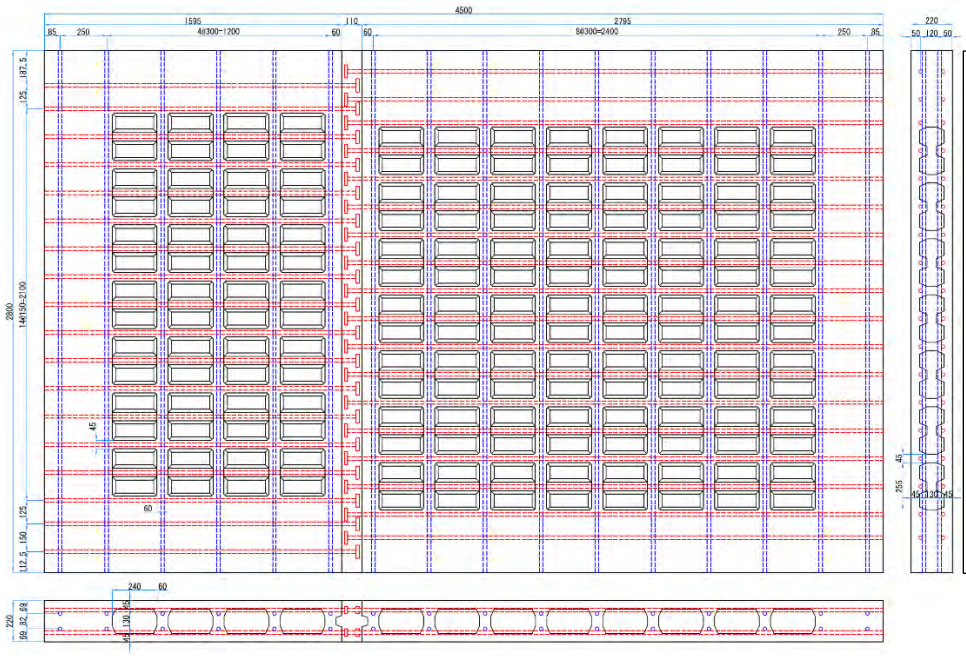
前半載荷：NEXCO 試験法 442 に準拠した一定荷重での輪荷重走行疲労試験

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する．

後半載荷：階段状漸増載荷の輪荷重走行疲労試験による破壊までの疲労耐力確認試験

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する．

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。試験体は既往研究[10]を参考に形状を決



部材形状
　部材厚　220mm
　橋軸方向　4500mm
　橋軸直角方向　2800mm

コンクリート
　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：441N/mm2

図-11　試験体諸元

定し，橋軸直角方向に 2800mm，橋軸方向に 4500mm，橋軸方向に継手を有する構造とした．橋軸直角方向のプレストレスは材質 SD490 呼び名 D19 の橋軸直角方向の鉄筋にプレテンション方式で 441N/mm^2/本を与えた．支持条件は 4 辺支持（うち 2 辺は弾性支持梁固定）とした．計測個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 20,000 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．またひび割れ観察を記録した．試験体諸元を**図-11** に示す．

b)　試験結果

前半載荷において床版の破壊は確認されなかった．残留たわみ及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（**図-12**）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）において押抜きせん断破壊が生じ，破壊区間近くの変位計にて計測されたたわみが 8mm となったため加力を停止し破壊と判断した．走行回数と変位の関係を**図-13** に示す．なお今回の試験結果のほかに既往研究 [1]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 床版の実験結果を合わせて示している．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される．

試験終了時のひび割れ状況と，切断による内部の破壊状



図-12　漏水確認試験状況（上：表面，下：裏面）

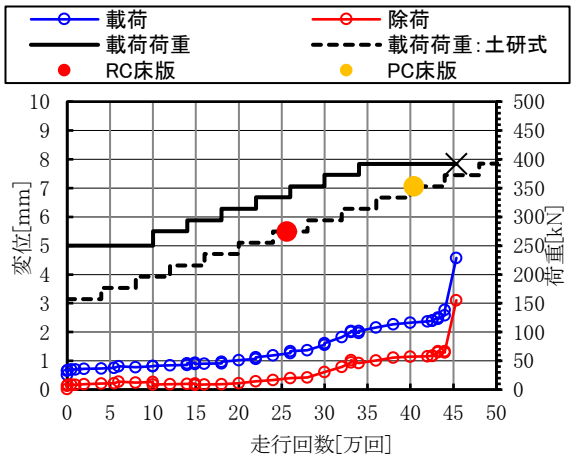


図-13　走行回数と変位の関係

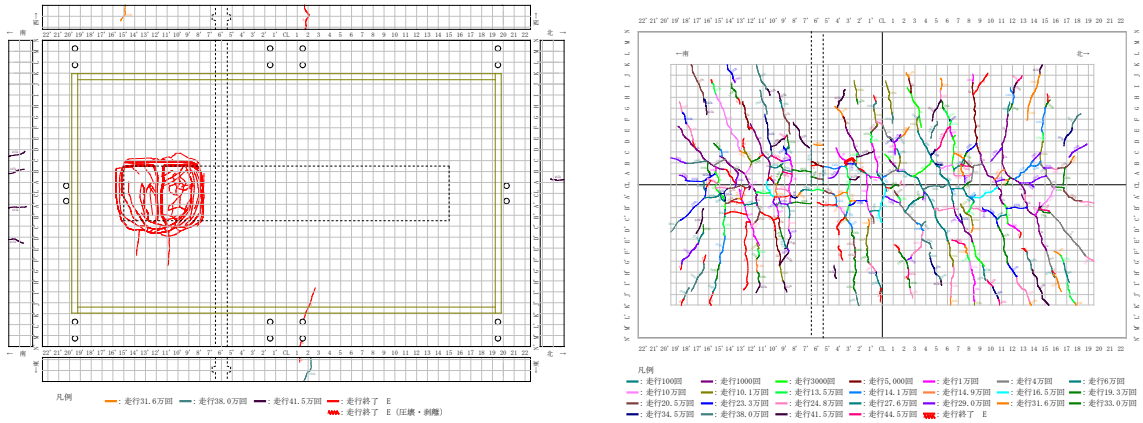


図-14　試験終了後の試験体状況（上：ひび割れ状況，下：切断後観察結果）

況を**図-14** 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，接合部ではなく床版本体にて発生した．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高く，今回開発した SFRC 床版が非常に高い疲労耐力を有していることが確認された．

4．まとめ

軽量化と高剛性を両立できる SFRC 床版の各部材性能を示した，以下に結果をまとめる．

・高強度 SFRC と EPS を用いて通常 PC 床版より 30%重量が軽く，同程度の剛性を有する床版を構築した．

・適切な混和材（剤）を使用することで中空断面の狭小な空間にも充填可能なコンクリート配合を設計した．

・SFRC 床版は十分な曲げ，押抜きせん断耐力を有し，それらは T 荷重の 5 倍以上であった．

・SFRC 床版は，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疲労耐力を示した．

なお輪荷重走行疲労試験は（国研）土木研究所と民間 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」において実施した．関係各位に謝意を表す．

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力に関する試験，国総研資料　第 28 号，2002
2)　武者ら：UFC（ダクタル）を用いた構造物の特徴と展開，大成建設技術センター報　第 42 号，2009
3)　川端ら：設計基準強度 80N/mm^2 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，2022
4)　山本ら：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，2022
5)　土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2023
6)　SURYANTO ら：Investigating Shear Transfer across Cracks in High performance Steel Fiber-Reinforced Concrete、コンクリート工学年次論文集、Vol.32, No.2, 2010
7)　吉田ら：高強度高靭性 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, 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 https://www.pwri.go.jp/jpn/about/shisetsu-map/a_d2/index.htm（最終アクセス 2023.8.2）
10）後藤ら：PC 床版の疲労耐力評価方法の提案，構造工学論文集 Vol.66A，2020