

短繊維補強 PCa コンクリート床版の疲労予測解析

小尾 博俊^{*1}・吉田 昂平^{*1}・村田 裕志^{*1}

Keywords : short fiber reinforced concrete, precast concrete slab, wheel load running test, design fatigue strength equation, FEM analysis

短繊維補強コンクリート, プレキャストコンクリート床版, 輪荷重走行試験, 設計疲労強度式, FEM 解析

1. はじめに

近年, 車両の大型化や交通量の増大に伴い道路橋床版の損傷劣化が進み, 大規模な補修工事や更新事業が計画・実施されている¹⁾。新規あるいは補強床版の開発にあたっては耐疲労性が求められ, これを確認する有効な手段として輪荷重走行試験が広く行われている。この試験は実橋における床版の損傷過程を比較的良く再現できるが, 試験期間が長期に及ぶため多大な労力とコストを必要とする。したがって, 一連の開発で数多くの試験を行うことは一般に困難であり, 加えて試験結果にはある程度のばらつきが含まれる。そこで本研究では, コンクリート系床版の疲労損傷過程を解析的に模擬することを目的に, 汎用解析プログラムと土木学会コンクリート標準示方書等の設計疲労強度式を用いた解析手法について検討した。対象とした疲労試験は, UFC (超高強度繊維補強コンクリート) 床版および SFRC (鋼繊維補強コンクリート) 床版の輪荷重走行試験である。以下に検討結果について述べる。

2. 疲労試験の概要

2.1 UFC 床版の輪荷重走行試験

解析対象とした試験は, (国研)土木研究所にて実施された UFC 床版の輪荷重走行試験である。試験体寸法は図-1 に示すように橋軸方向 4,500mm, 橋軸直角方向 2,800mm の 2 方向リブ付き床版であり, リブ以外のスラブ厚さは 40mm である。床版中心から橋軸方向へ 600mm の位置で大小の床版が接合されており, 橋軸方向のリブには PC 鋼棒で, 橋軸直角方向のリブには PC

鋼より線でそれぞれプレストレスが導入されている。走行試験は初期荷重を 156.8kN として, 走行回数 4 万回毎に 19.6kN ずつ荷重を増加させる階段状漸増載荷で

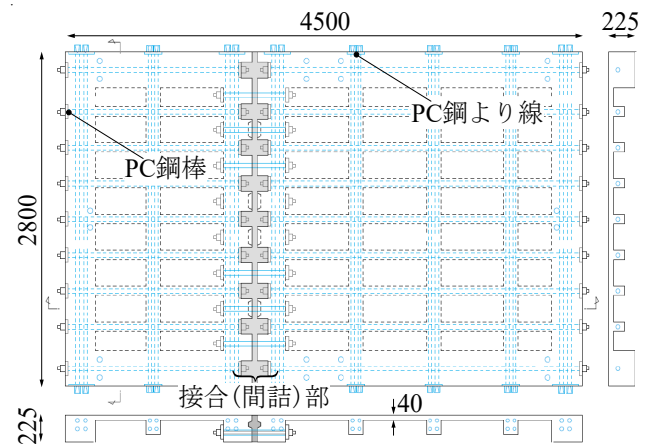


図-1 UFC 床版試験体
Fig.1 UFC slab test specimen

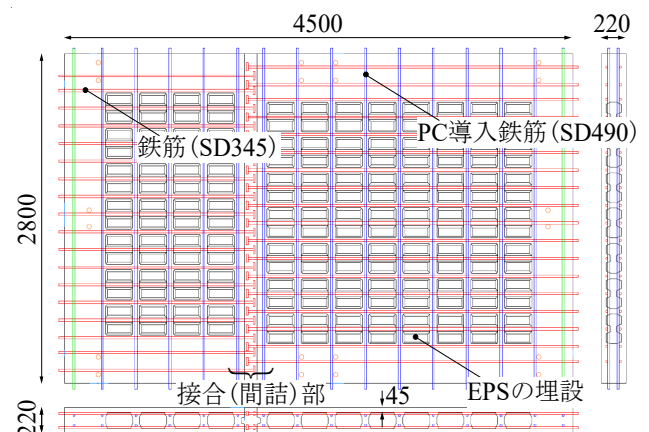


図-2 SFRC 床版試験体
Fig.2 SFRC slab test specimen

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 先端構造研究室

ある。試験結果は図-3 に示すように荷重 392kN, 走行回数 48.1 万回で押抜きせん断により破壊に至っている。

2.2 SFRC 床版の輪荷重走行試験

本試験はダンベル形状の EPS (発砲スチロール) が埋設された SFRC 床版の輪荷重走行試験であり, 先の UFC 床版と同様に(国研)土木研究所にて実施された。試験体寸法は図-2 に示すように橋軸方向 4,500mm, 橋軸直角方向 2,800mm, 版厚 220mm であり, EPS 埋設個所のスラブ厚さは 45mm である。床版中心から橋軸方向へ 600mm の位置に接合部が設けられており, 橋軸直角方向には SD490 の鉄筋にプレストレスを導入している。走行試験は初期荷重 250kN で 10 万回走行後, 水張り状態にして 275kN, 294kN, 314kN, 334kN, 353kN, 373kN で各 4 万回, 392kN で破壊まで走行させる階段状漸増載荷である。試験結果は図-3 に示すように荷重

392kN, 走行回数 45.4 万回で上側スラブの押抜きせん断により破壊に至っている。

3. 疲労予測解析

3.1 解析手法

輪荷重走行試験を再現する疲労解析には汎用解析プログラム Abaqus²⁾を用いた。コンクリート, UFC および鋼材の疲労強度には, コンクリート標準示方書³⁾および UFC 指針⁴⁾に記載されている設計疲労強度式を適用した。紙面の都合上, 式の記載は省略する。なお, 本研究では材料係数等の係数は全て 1.0, 永続作用による応力度は 0.0 とした。コンクリートと UFC の疲労強度式をグラフ化すると図-4 のようになる。縦軸は初期強度に対する疲労強度の比率 (応力比), 横軸は疲労寿命である。UFC については圧縮側の疲労強度は 1 本の直線で表されるのに対し, 引張側は疲労寿命に応じて 3 つの区間から成っている。

解析手順は図-5 に示すように, まず, 床版の自重を載荷する。その後, 走行回数数万回毎 (例えば 4 万回毎では 0, 4, 8, 12, ..., 52 万回) に相当する疲労強度, 輪荷重を定義する。輪荷重は載荷面 500mm × 200mm の範囲を一樣な荷重とし, 順次, ステップ 1 ~ 29 まで移動し 1 往復することで数万回分の走行を模擬した。この操作を繰返し, 床版のたわみが発散したときに計算終了 (破壊に至るもの) とした。

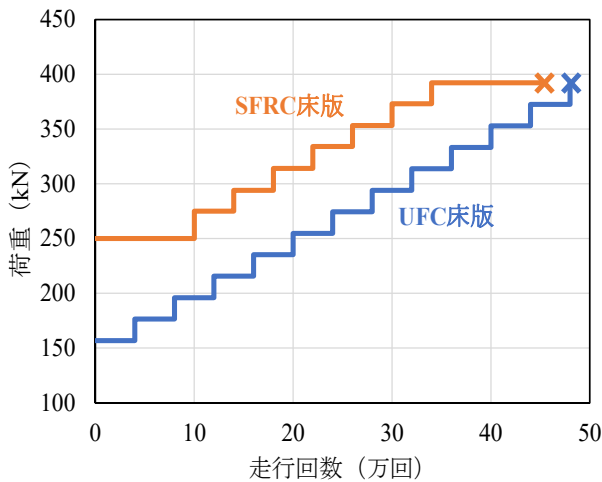


図-3 輪荷重と走行回数の関係

Fig.3 Relationship between wheel load and number of runs

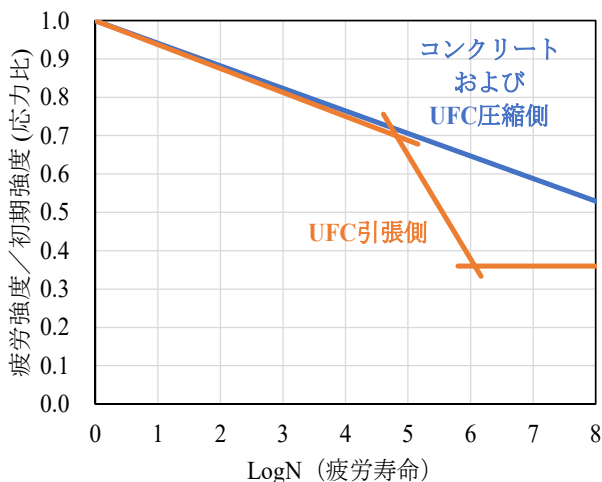


図-4 応力比と疲労寿命の関係

Fig.4 Relationship between stress ratio and fatigue life

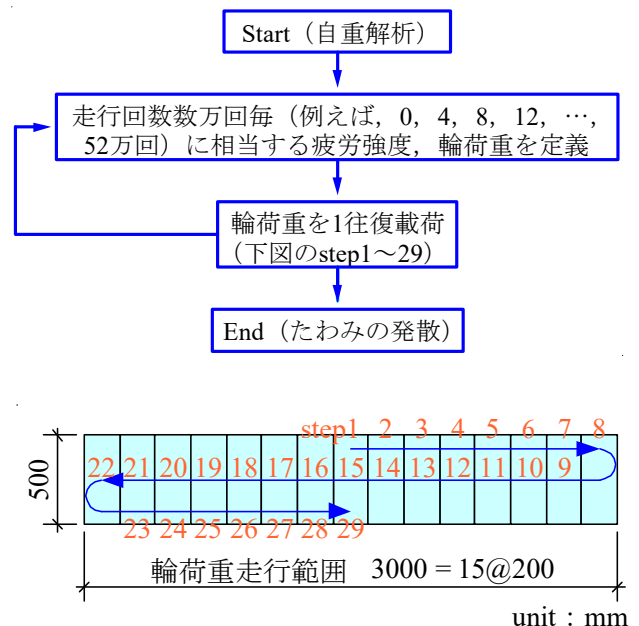
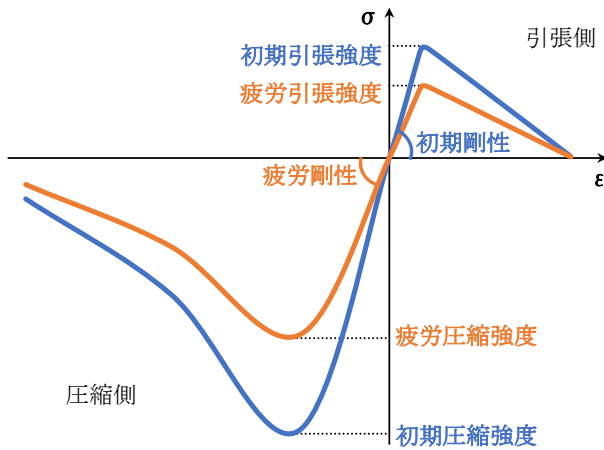


図-5 解析手順

Fig.5 Analysis procedure

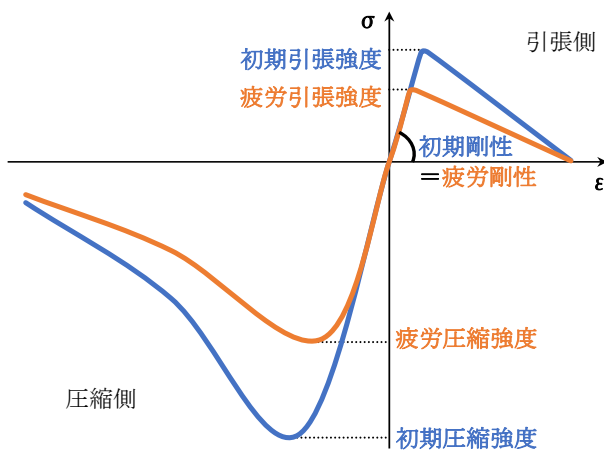
3.2 解析条件

疲労下での材料モデルは次のように定義した。ヤング係数の取扱いについては、示方書類や既往研究等に統一的な見解が見当たらないため、本研究では、ヤング係数が疲労強度と同率で低下すると仮定した場合 (case-1) と、ヤング係数は初期剛性のまま低下しないとした場合 (case-2) で比較することにした。コンクリートを例に case-1, case-2 の応力-ひずみ関係の模式図を図-6に示す。すなわち、case-1 では疲労の進行とともにヤング率も低下させ、case-2 では疲労が進行してもヤング率は初期のまま変わらないものとした。鉄筋、PC 鋼材についても同様の考え方を適用した。



(a) case-1 (疲労剛性 < 初期剛性)

(a) case-1 (Fatigue stiffness < Initial stiffness)

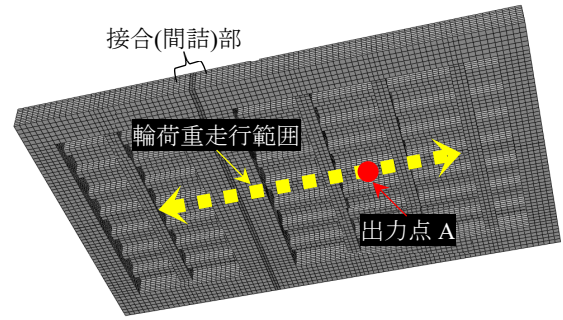


(b) case-2 (疲労剛性 = 初期剛性)

(b) case-2 (Fatigue stiffness = Initial stiffness)

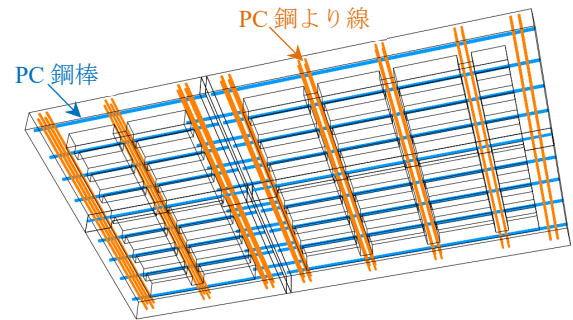
図-6 疲労下におけるコンクリート応力-ひずみ関係の模式図

Fig.6 Concrete stress-strain relationship under fatigue schematic diagram



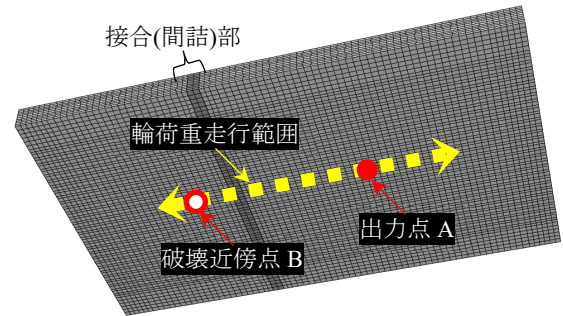
(a) UFC 床版の外観

(a) Appearance of UFC slab



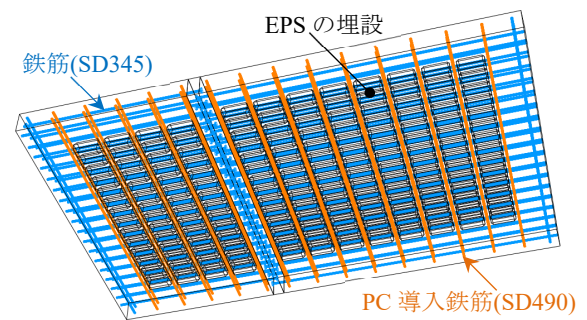
(b) UFC 床版の内部

(b) Inside of UFC Slab



(c) SFRC 床版の外観

(c) Appearance of SFRC slab



(d) SFRC 床版の内部

(d) Inside of SFRC Slab

図-7 解析モデル

Fig.7 Analysis model

解析モデルは図-7 に示すように、床版本体および間詰部は 8 節点ソリッド要素で、鉄筋、PC 鋼棒は 2 節点ビーム要素で、PC 鋼より線は 2 節点トラス要素でそれぞれモデル化した。接合部の床版本体-間詰モルタル間は接触面（境界面）としてモデル化した。鉄筋、PC 鋼材は床版への埋込要素とし、プレストレスは軸応力（緊張力）を付与することで導入した。また、UFC、SFRC および間詰モルタルの各強度は供試体による材料強度試験の結果から設定し、応力-ひずみ（または開口変位）関係は参考文献 3), 4) を基に設定した。数値解析に用いたコンクリート強度を表-1 に示す。

表-1 コンクリート強度
Table 1 Concrete strength

UFC床版		
UFC	ヤング係数(kN/mm^2)	53.2
	圧縮強度(N/mm^2)	217
	引張強度(N/mm^2)	11.3
モルタル	ヤング係数(kN/mm^2)	46.8
	圧縮強度(N/mm^2)	163
	引張強度(N/mm^2)	11.3
SFRC床版		
SFRC	ヤング係数(kN/mm^2)	38.0
	圧縮強度(N/mm^2)	93.3
	引張強度(N/mm^2)	4.0
モルタル	ヤング係数(kN/mm^2)	40.0
	圧縮強度(N/mm^2)	110
	引張強度(N/mm^2)	5.3

4. 解析結果

4.1 UFC 床版

UFC 床版の数値解析では、図-5 に示す手順に基づき走行回数 4 万回毎に最大 52 万回を目指し計算を行った。輪荷重走行時の床版たわみの履歴を図-8 に示す（出力位置は図-7(a)を参照）。試験と解析で初期たわみに 1mm 弱の差が生じているが、走行回数 20 万回以降の履歴は概ね一致している。case-1 は荷重 353kN、走行回数 40 万回で破壊に至るが、case-2 は荷重 392kN、52 万回まで走行しても破壊には至っていない。次に、終局時における試験と解析のひび割れ状況を図-10 に示す。解析の出力は case-1 の最大主ひずみ図である。試験結果と解析結果を比較すると、破壊位置やひび割れ性状などはほぼ再現できていることが分かる。

4.2 SFRC 床版

SFRC 床版の数値解析では走行回数 5 万回、10 万回、その後、4 万回毎に最大 46 万回を目標に計算を行った。走行試験では 10 万回以降、水張り状態で試験を行っているが、水と接している範囲は床版表面に限られた範囲であること、試験後の漏水範囲も限定的であったことから、解析は気中条件として実施した。輪荷重走行時の床版たわみの履歴を図-9 に示す（出力位置は図-7(c)を参照）。case-1 は荷重 373kN、走行回数 34 万回でたわみが急伸し計算を終えるが、case-2 は荷重 392kN、46 万回の走行でも破壊には至っていない。走行回数 20 万回以降のたわみの履歴の傾向は試験と解析で概ね一致している。ただし、試験では上側スラブの押抜きせん断により終局を迎えているが、解析ではたわみは急

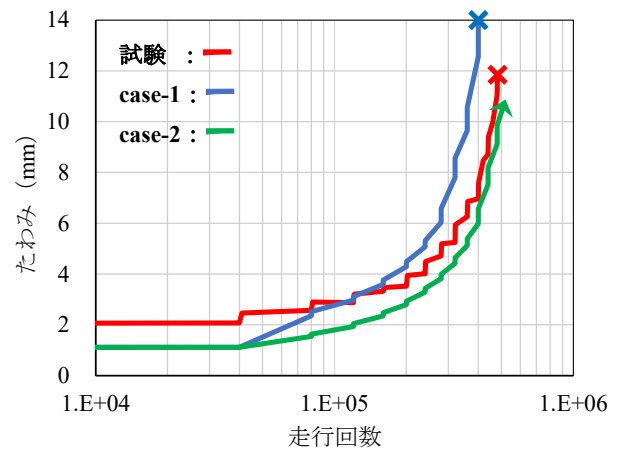


図-8 たわみと走行回数の関係（UFC 床版）
Fig.8 Relationship between deflection and number of runs (UFC slab)

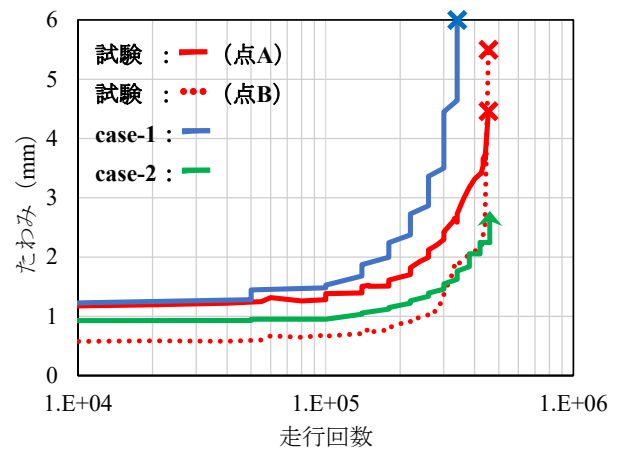
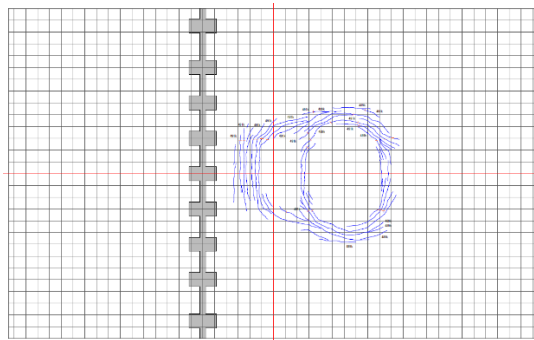
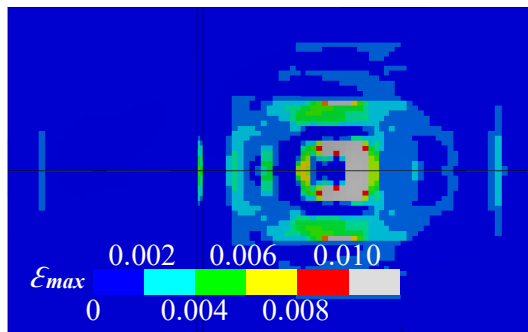


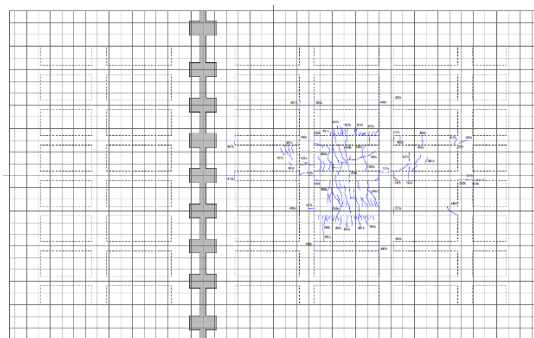
図-9 たわみと走行回数の関係（SFRC 床版）
Fig.9 Relationship between deflection and number of runs (SFRC slab)



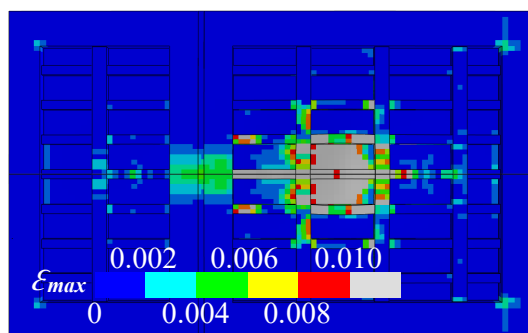
(a) 床版上面 (試験)
(a) Top surface of slab (test)



(b) 床版上面 (解析)
(b) Top surface of slab (analysis)

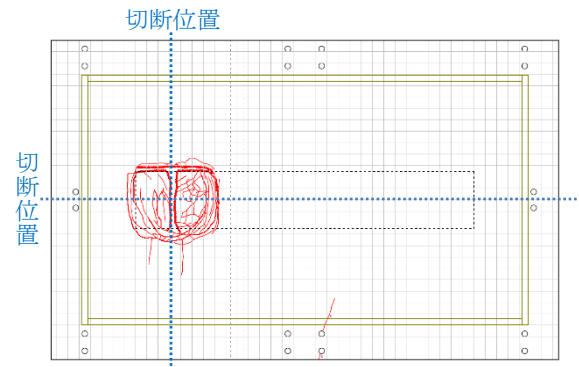


(c) 床版下面 (試験)
(c) Under surface of slab (test)

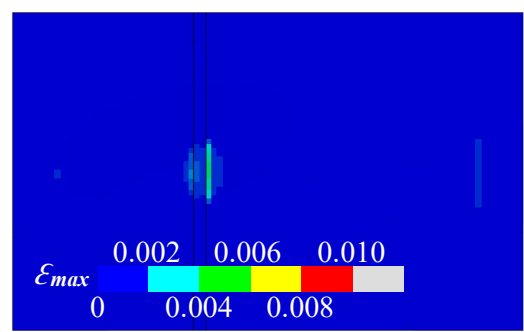


(d) 床版下面 (解析)
(d) Under surface of slab (analysis)

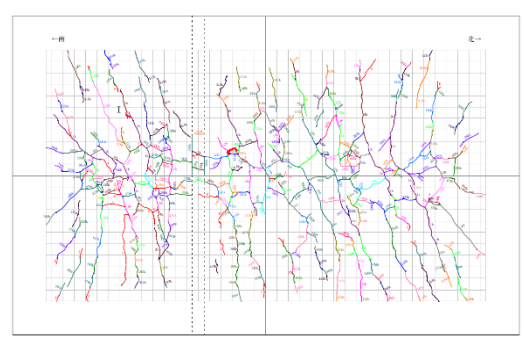
図-10 ひび割れ状況 (UFC 床版)
Fig.10 Cracked condition (UFC slab)



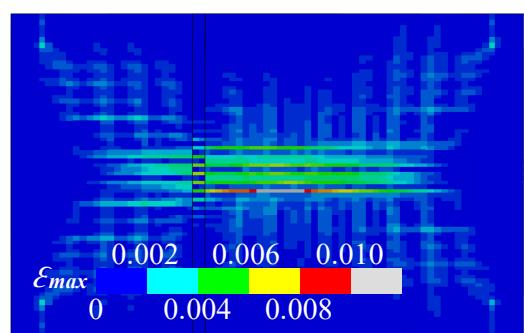
(a) 床版上面 (試験)
(a) Top surface of slab (test)



(b) 床版上面 (解析)
(b) Top surface of slab (analysis)



(c) 床版下面 (試験)
(c) Under surface of slab (test)



(d) 床版下面 (解析)
(d) Under surface of slab (analysis)

図-11 ひび割れ状況 (SFRC 床版)
Fig.11 Cracked condition (SFRC slab)

伸するものの押抜きせん断のような破壊は生じていない。そこで走行試験のたわみの履歴について、たわみが最も大きくなると予想される接合された右側床版の中央付近の点 A と、押抜き破壊の近傍点 B を比較する。たわみは破壊直前まで中央付近の点 A の方が大きく、破壊により一気に近傍点 B が上回っている。一般的に破壊はたわみが大きくなる床版中央付近の点 A で生じると考えるのが自然であり、本走行試験で押抜きせん断破壊が点 B の近傍で生じたことは、試験体の材料分布のばらつき、または輪荷重走行時の不陸、段差による衝撃など走行試験におけるばらつきが影響しているものと考えられる。図-11 に終局時の試験と解析のひび割れ状況を示す。解析の出力は case-1 の最大主ひずみ図である。床版上面は上述のように試験と解析で押抜きせん断の有無により違いがあるが、下面についてはひび割れ分布の傾向は大略一致している。さらに、図-12 に示すように橋軸方向、橋軸直角方向の断面（切断位置は図-11(a)を参照）について比較すると、上下スラ

ブ間のリブ（EPS 埋設個所の隔壁）付近には水平方向のひび割れが確認できる。水平ひび割れの発生原因については塩害・凍害やアルカリ骨材反応などの材料的な劣化現象や、輪荷重の繰返し载荷による力学的な作用に起因するものが考えられているが、明確な発生メカニズムについては未だ研究途中にある^{5) 6)}。一度、水平ひび割れが発生すると、床版の耐荷性・耐疲労性は急激に低下することから、その発生原因の解明は今後の重要な検討課題である。

5. まとめ

本研究では、なるべく簡便な方法でコンクリート系床版の疲労寿命を予測することを目指し、汎用解析プログラムに示方書等の設計疲労強度式を適用した解析手法について検討した。対象とした疲労試験は、UFC 床版および SFRC 床版の輪荷重走行試験であり、床版の疲労損傷過程を解析的に模擬することを試みた。その結果、床版たわみと走行回数の関係を概ね評価できる可能性があること、また、床版に生じるひび割れ性状を大略再現できること、などが分かった。今後は各種床版での検証事例を増やすとともに、水平ひび割れの発生解明に向けた取り組みや、水中環境下における耐疲労性の検証も必要になるものと考ええる。

謝辞

本研究の輪荷重走行試験は、(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る。

参考文献

- 例えば、首都高速道路株式会社：首都高速道路の更新事業（首都高リニューアルプロジェクト）：
<https://www.shutoko.co.jp/company/enterprise/road/plan/>
- Dassault Systemes SIMULIA Corp. :
Abaqus 2022 Documentation, 2022.
- 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編], 2022.
- 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), 2004.
- 小松代亮磨ほか：RC 床版内部水平ひび割れの発生メカニズムに関する一検討，第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集，巻 8，pp.9-12，2014.
- 横山広ほか：面外荷重が作用する RC 床版の上段鉄筋の振る舞いに関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.69A，pp.902-912，2023.

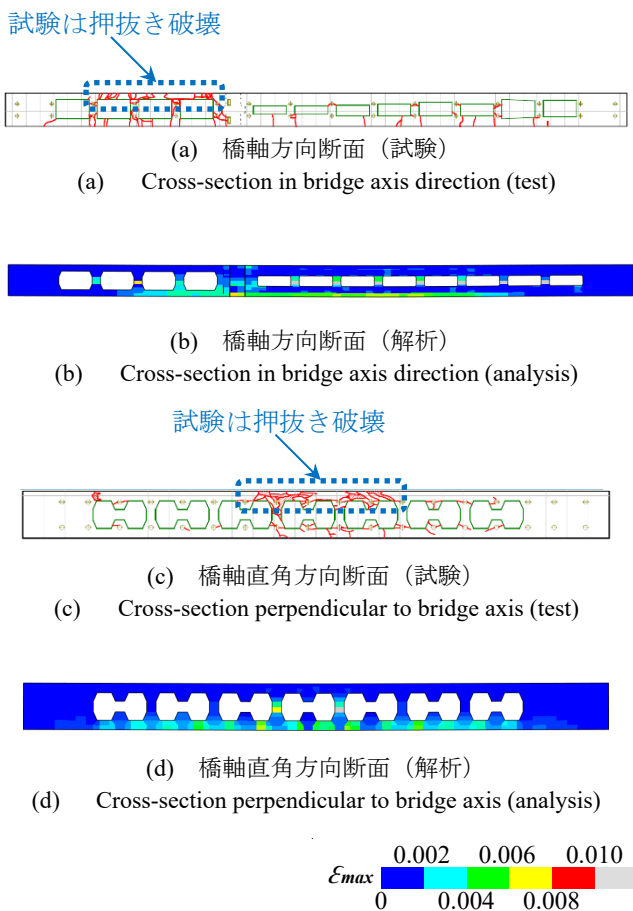


図-12 橋軸および橋軸直角方向断面のひび割れ状況 (SFRC 床版)

Fig.12 Cracked condition in cross-section in the direction of bridge axis and perpendicular to bridge axis (SFRC slab)