

高強度繊維補強モルタルとネジ節鉄筋で接合した プレキャスト PC 床版の耐疲労性試験

Fatigue resistance test of precast PC-slab jointed with high-strength fiber reinforced mortar and screw-type rebar

池野勝哉[†], 倉川義弘^{*}, 水野剣一^{**}, Ruben Vargas^{**}, 前島拓^{***}, 岩城一郎^{****}

Katsuya Ikeno, Yoshihiro Kurakawa, Kenichi Mizuno, Ruben Vargas, Takuya Maeshima, Ichiro Iwaki

[†]博 (工), 五洋建設株式会社, 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

^{*}五洋建設株式会社, 土木部門土木本部土木技術部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

^{**}修 (工), 五洋建設株式会社, 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

^{***}博 (工), 日本大学専任講師, 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

^{****}博 (工), 日本大学教授, 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

The objective of this study is to investigate the fatigue resistance of a slab system consisting of precast PC slabs and a novel joint system consisting of high-strength fiber reinforced mortar and screw-type rebar. The fatigue resistance is assessed through a wheel load test, initially designed to comply with the NEXCO 442 test method to ensure a 100-year service life; subsequently, the test has been extended to further verify fatigue resistance at higher repetitions, higher loads and in wet conditions. The results demonstrate that the slab system's fatigue life largely surpasses 100 years. Furthermore, comprehensive post-test investigation confirmed that no significant or localized damage occurred to either the joint system or the slab during the test.

Keywords: high-strength fiber reinforced mortar, precast PC-slab joint, fatigue resistance

キーワード: 高強度繊維補強モルタル, プレキャスト PC 床版接合部, 耐疲労性

1. はじめに

近年, 老朽化した道路床版の大規模更新事業が進められており, 既設鋼橋の RC 床版からプレストレスを導入したプレキャスト PC 床版 (以下, PC 床版) への取替工事が行われている. PC 床版の橋軸方向における接合には現地施工の省力化・効率化を図るため, 鉄筋先端の工夫や特殊な機械式接合等によって, 従来のループ継手よりも接合幅の狭い方法^{例え}が多数提案されている.

著者らは PC 床版の接合に, 図-1 に示す圧縮強度 100 N/mm² クラスの高強度繊維補強モルタル³⁾とネジ節鉄筋を用いたあき重ね継手による方法⁴⁾を提案している. これは, PC 床版の橋軸方向にネジ節鉄筋を使用し, 接合界面に対面する鉄筋先端が収まるような凹部を設けたもので, 間詰材の施工数量を減らした合理的な継手構造であ

る. 著者らはこれまでに, 圧縮強度 100 N/mm² クラスの高強度繊維補強モルタルを間詰材とするネジ節鉄筋は, 継手長 8D 以上 (D: 鉄筋径) であれば定着具が不要であり, 従来のループ継手と同等以上の曲げ耐力性能を有していること⁴⁾, また, 接合界面は通常の直線形状よりも半円形状の凹部を設けた方がせん断耐力や界面ひび割れ幅の観点で優位性⁵⁾があることを確認している. しかし,

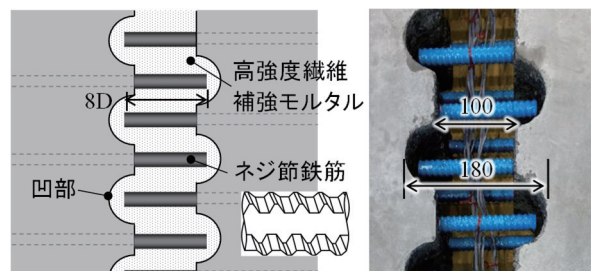


図-1 本研究で提案する継手構造 [単位: mm]

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: katsuya.ikeno@mail.penta-ocean.co.jp

高強度の間詰材を充填した継手構造は、繰返し移動荷重下において PC 床版との強度差による接合部周辺への悪影響が懸念されるとともに、実床版へ供するためには耐用年数 100 年以上の耐疲労性の確認が必要不可欠である。そこで、提案構造で接合した PC 床版について、NEXCO 試験法 442⁶⁾に基づく輪荷重走行試験を実施した。ここで、提案構造における疲労破壊に至るまでの走行試験は非常に長期間に及ぶことが予想されたため、乾燥状態の走行試験（輪荷重 250 kN、10 万回走行）に加えて、輪荷重を最大 490 kN まで段階的に増加した水張り状態での走行を実施した。床版の耐疲労性は、床版上面からの水の供給により床版寿命が乾燥状態の 1/10～1/100 になることが指摘されていることから⁷⁾、本研究では高強度の間詰材と PC 床版の接合界面への水の供給が耐疲労性に与える影響について着目した。

2. 輪荷重走行試験の概要

2.1 試験体の諸元

輪荷重試験体の概要図を図-2 に示す。試験体は 2 枚の PC 床版を製作した後、橋軸方向の中央部において提案構造（図-1 参照）により接合したものをを用いた。

接合した試験体の外寸法は長さ 4,500 mm（橋軸方向）、幅 2,800 mm（橋軸直角方向）、厚さ 220 mm である。厚さ 220 mm は、NEXCO3 社で標準としている RC ループ継手を使用した場合の最小床版厚である。PC 床版の設計基準

強度は 50 N/mm²、粗骨材の最大寸法は 20 mm であり、橋軸方向にはエポキシ樹脂塗装を施したネジ節鉄筋 D19 を 150 mm ピッチ、橋軸直角方向にはエポキシ樹脂塗装を施さない波節鉄筋 D13 を 125 mm ピッチで配置した。PC 鋼材はφ23 mm の SBPR B 種（ポストテンション方式）を採用し、橋軸直角方向に 225～300 mm 間隔で 1 段配置した。ここで、実橋の PC 床版では、PC 鋼より線をプレテンション方式で使用されることが多いが、部材端部でのプレストレスが二次放物分布となることから⁸⁾、プレストレスの調整がしやすい PC 鋼棒によるネジ式定着とし、緊張後に超低粘性 PC グラウトをシース内に充填した。なお、端部緊張力は後藤ら⁹⁾と同様に 311.6 kN（有効プレストレス 619.1 N/mm²）とした。

2.2 使用材料

試験体に用いた鉄筋および PC 鋼棒の機械的性質を表-1 および表-2、PCa 床版および間詰材の試験前後における材料試験値を表-3 に示す。

間詰材に用いた高強度繊維補強モルタルは、セメント、シリカフューム、細骨材、高炉スラグ微粉末などから構成されたプレミックス材に水および高性能 AE 減水剤を投入し、鋼繊維（直径 0.16-0.22 mm、長さ 13-20 mm、引張強度 2,750 N/mm² 以上）を体積比 2.0 % で混入した。練り混ぜには、750 l のパン型モルタルミキサーを用い、フロー試験「JIS R 5201 : 2015 セメントの物理試験方法」によってフレッシュ性状（落下なしのフロー値 240-310 mm）

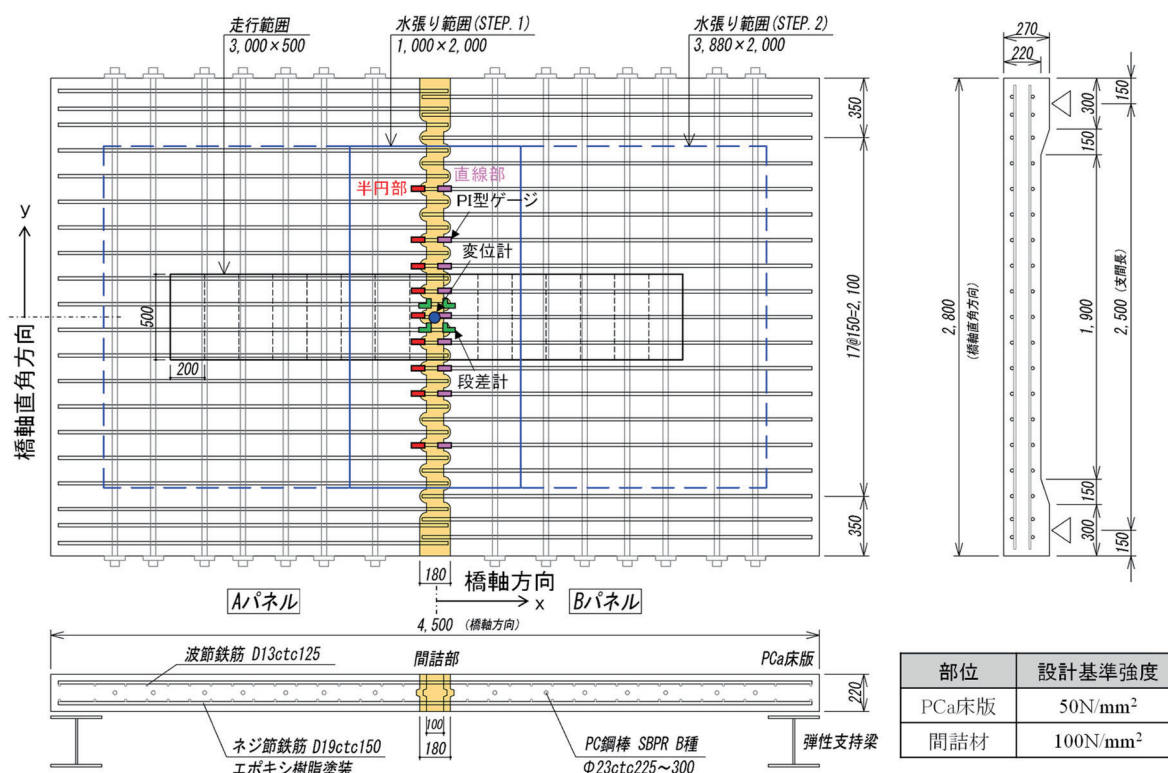


図-2 試験体の概要図 [単位 : mm]

表－1 鉄筋の機械的性質

名 称	呼び名	降伏点 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	弾性係数 [kN/mm ²]	備 考
ネジ節鉄筋	D19	387.6	570.1	194.8	エポキシ 樹脂塗装
波節鉄筋	D13	399.2	577.6	191.8	—

表－2 PC 鋼棒の機械的性質

名 称	呼び名	耐力 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	弾性係数 [kN/mm ²]	備 考
PC鋼棒	φ23	1,063	1,157	201	SBPR B種

表－3 PCa 床版および間詰材の材料試験値

名 称		圧縮強度 [N/mm ²]	割裂強度 [N/mm ²]	弾性係数 [kN/mm ²]	備 考
PCa床版	試験前	61.9	4.7	38.2	コンクリート
	試験後	62.7	—	37.5	
間詰部	試験前	117.7	12.4	42.2	高強度繊維補強 モルタル
	試験後	120.9	—	42.6	

表－4 間詰材の標準配合

単位量 [kg/m ³]			
練り混ぜ水	プレミックス	高性能AE減水剤	鋼繊維 [2.0vol.％]
230.0	2,072.0	6.3	157.0

を管理した。

高強度繊維補強モルタルの標準配合を表－4、写真－1 にフロー試験および混入した鋼繊維を示す。高度繊維補強モルタルは自己充填性を有しているため、流込み速度を一定に保ちながら自然流下により充填し、封緘状態で養生を行った。間詰前後の状況を写真－2 に示す。

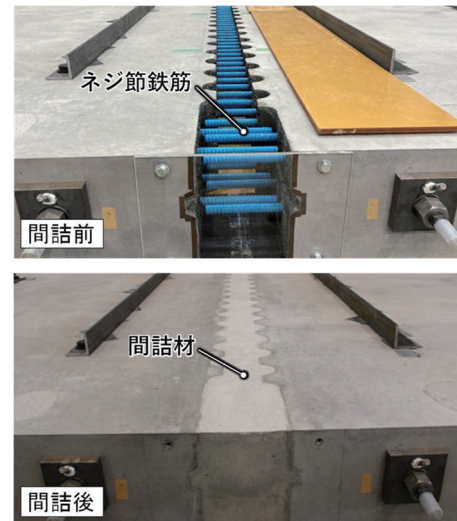
2.3 荷重方法および計測項目

試験機は G&U 技術研究センターが所有する輪荷重走行試験機にて実施した。接合したプレキャスト PC 床版を 2 辺単純支持（支間 2,500mm）となるように架台に設置し、橋軸方向の床版端部には弾性支持梁を設けて、実橋の無限連続版を模擬した。

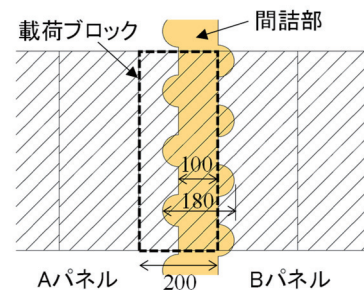
試験機の走行範囲（3,000mm×500mm）には 200mm×500mm の荷重ブロックを 15 ブロック設置し、その軌道上で鉄輪（直径 700mm×幅 500mm）を走行させた。なお、図－3 に示すように提案構造の接合幅が荷重ブロック幅 200mm よりも小さいことから、荷重ブロックが接合幅を跨がないよう B パネル側の床版端部に荷重ブロック端を合わせて設置し、接合界面に輪荷重が直接作用するように工夫した。荷重方法は NECXO 試験法 442⁹⁾に基づき、輪荷重 250kN を乾燥状態で 10 万回走行させた



写真－1 フロー試験(左)と混入した鋼繊維(右)



写真－2 間詰前後の状況



図－3 荷重ブロックの配置 [単位：mm]

後、図－2 に示した水張り範囲（STEP.1：1,000mm×2,000mm）において 6 時間の水張り試験を実施し、床版下面への漏水の有無を確認した。その後、水張り範囲（STEP.2：3,880mm×2,000mm）を拡張し、最大 490kN までの輪荷重を水張り状態で作用させた。

荷重フローを図－4 に示す。250kN の動的荷重が所定の走行回数を完了した時点で床版中央における静的荷重を実施し、床版のたわみ（高感度変位計）、橋軸方向の鉄筋ひずみ（ひずみゲージ）、接合部の目開き（PI 型ゲージ）および段差（カンチレバ型変位計）の計測、ひび割れスケッチを行った。

2.4 本試験サイクルと等価走行回数の関係

本実験の試験サイクルを表－5に示す。輪荷重 250 kN を乾燥状態で 10 万回走行した後、水張り状態としたうえで輪荷重を 250 kN から 310 kN、そして 490 kN と段階的に引き上げて走行した。本研究では、高強度の間詰材と PC 床版との接合界面における水の浸入を促すため、水張り状態（写真－3）での走行を実施した。

本実験では段階的に輪荷重を引き上げているため、基本荷重 $P_0 = 250$ kN による走行回数に換算した等価走行回数 N_{eq} で整理する。等価走行回数 N_{eq} は式(1)のマイナー則により求める。後藤ら⁹⁾は橋軸直角方向の 1 方向のみにプレストレスを導入した PC 床版の輪荷重走行試験データから S-N 曲線（式(2)）を求め、その傾きの逆数 $m = 7.43$ を得ており本研究ではこの値を採用した。また、乾燥と水張り状態の違いによる疲労促進倍率は、PC 床版の水による疲労促進に関する知見が少ないため、RC 床版の水張りによる疲労促進と同等とみなして、松井ら⁷⁾の乾燥状態（式(3)）と水張り状態（式(4)）の S-N 曲線から疲労促進倍率を求めて 15 倍とした⁹⁾。参考として、式(2)～(4)の S-N 曲線を図－5に示す。

$$N_{eq} = \sum (P_i/P_0)^m n_i \quad (1)$$

ここで、 N_{eq} ：基本荷重 P_0 に換算した等価走行回数、 P_0 ：基本荷重（本論文では 250 kN）、 P_i ：走行荷重、 n_i ：荷重 P_i の走行回数、 m ：S-N 曲線の傾きの逆数(7.43)⁹⁾である。

- ・ PC 床版_乾燥状態（後藤ら⁹⁾）

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.13455 \log N + \log 5.65 \quad (2)$$

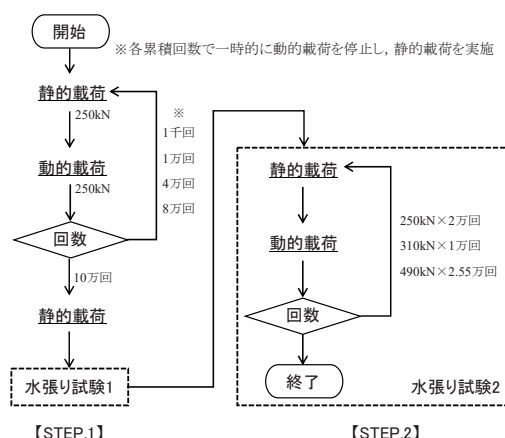
- ・ RC 床版_乾燥状態（松井ら⁷⁾）

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (3)$$

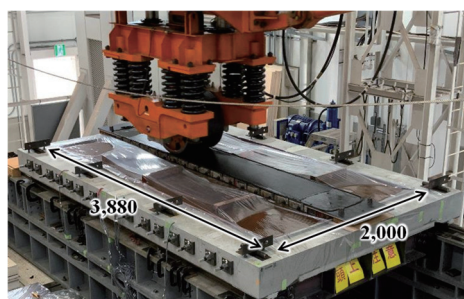
- ・ RC 床版_水張り状態（松井ら⁷⁾）

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \log N + \log 1.23 \quad (4)$$

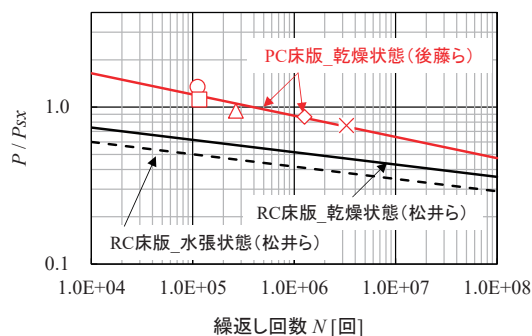
ここで、 P ：作用輪荷重、 P_{sx} ：押抜きせん断耐荷力、 N ：押抜きせん断破壊までの繰返し回数（回）



図－4 载荷フロー



写真－3 水張り状態の走行(STEP.2)



図－5 PC 床版および RC 床版の S-N 曲線^{7,9)}

表－5 試験サイクル

輪荷重 P_i [kN]	荷重毎の走行回数 n_i [回]	累積走行回数 N_i [回]	等価走行回数 ^{※1} N_{eq} [回]	疲労促進倍率 (乾燥/水張り)	耐用年数 ^{※2} T [年]	走行状態	備考
250	100,000	100,000	100,000	15	118	乾燥	STEP.1
250	20,000	120,000	120,000	1	471	水張り	STEP.2
310	10,000	130,000	169,445	1	1,345	水張り	
490	25,500	155,500	3,953,895	1	68,208	水張り	

※1 基本荷重 $P_0 = 250$ kN、 $m = 7.43$ としてマイナー則により算定

※2 後藤ら⁹⁾に倣い、PC 床版の高速道路における 1 年間の等価繰返し回数を 56.6 回/年として、疲労促進倍率を考慮して算定

3. 試験結果および考察

3.1 床版のたわみ

静的載荷（床版中央）における床版中央のたわみを図-6 (a)に示す。ここで、載荷時の合計たわみから除荷時の残留たわみを差し引いた値を活荷重たわみと定義した。

乾燥状態で走行した STEP.1 ($P_i = 250 \text{ kN}$) の床版たわみは、走行回数 N_i に対して概ね一定であり、たわみの増加傾向は認められない。ここで、STEP.1 終了時の活荷重たわみは 0.91 mm 、残留たわみは 0.31 mm 、合計たわみは 1.22 mm であった。その後、NECXO 試験法 442⁶⁾に基づいた 6 時間の水張り試験を行い、床版下面に漏水が無いことを確認した。

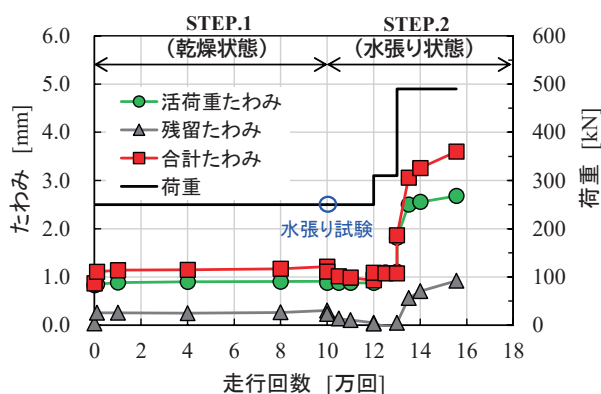
次に水張り範囲を拡張して走行を継続した STEP.2 ($P_i = 250 \text{ kN}, 310 \text{ kN}, 490 \text{ kN}$) では、残留たわみが一時的に減少したが、輪荷重が 310 kN および 490 kN に増加するタイミングで全てのたわみが増加した。残留たわみが一時的に減少した理由は、水張り走行時に床版上面のひび割れ内が浸水することで、試験体が吸水膨張したためだと考えられるが、詳細なメカニズムは確認できていない。STEP.2 の累積走行回数 $N_i = 15.55$ 万回において、床版下面の一部で水染みによる漏水が確認されたため、走行試

験を終了した。

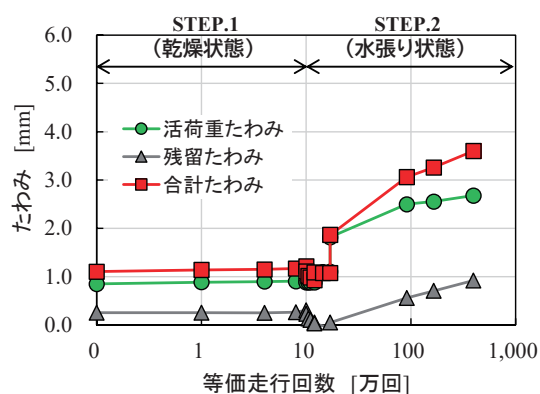
前章で示した等価走行回数 N_{eq} で整理した床版中央のたわみを図-6 (b)に示す。図中より、STEP.1 の乾燥状態において一定であった床版のたわみが、STEP.2 の水張り状態では増加し、輪荷重 $P_i = 490 \text{ kN}$ 時点で活荷重たわみは 2.68 mm 、残留たわみは 0.92 mm 、合計たわみは 3.60 mm となった。これは、輪荷重 ($P_i = 310 \text{ kN}, 490 \text{ kN}$) による繰返し移動荷重に加えて、PC 床版上面の多数のひび割れ面から水が浸入し、PC 床版内部の損傷が進行したものと推察される。本試験において床版下面より漏水が確認された時点を経過限界と定義すると、等価走行回数 N_{eq} は 395 万回であり耐用年数は表-5 より約 6.8 万年と算定される。ここで、一般に RC 床版よりもプレストレスを導入した PC 床版の方が疲労促進倍率は小さいものと考えられるため、RC 床版を参考⁹⁾に疲労促進倍率を 15 倍とした耐用年数は過大評価の可能性があるので注意が必要である。

3.2 接合部の目開きおよび段差

静的載荷（床版中央）における接合部の目開きについて、代表的な PI 型ゲージの等価走行回数 N_{eq} との関係を図-7 に示す。静的載荷（床版中央）における接合部の目



(a) 走行回数 N_i とたわみ



(b) 等価走行回数 N_{eq} とたわみ

図-6 床版中央のたわみ

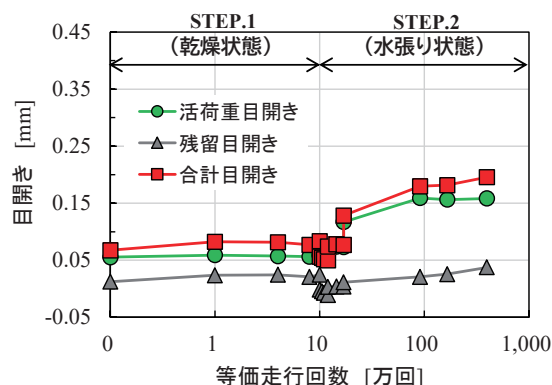


図-7 等価走行回数 N_{eq} と目開き

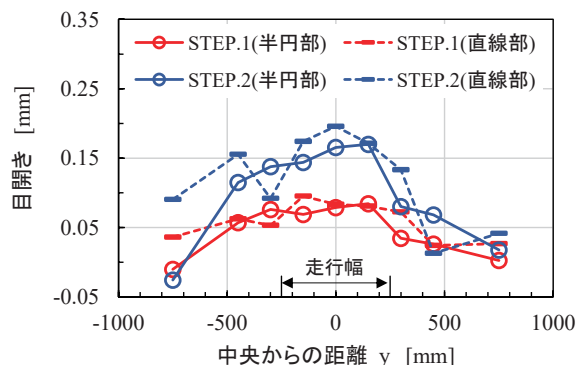


図-8 目開き分布 (STEP.1, STEP.2 終了時)

開きは、概ね図-6 (b)のたわみと調和的な傾向を示し、STEP.1 終了時の活荷重目開きは 0.06 mm、残留目開きは 0.02 mm、合計目開きは 0.08 mm である。3.4 のひび割れ発生状況で後述するように、STEP.1 終了時の接合部に損傷は見当たらず、除荷時の目開きが弾性的な挙動を示している。その後の STEP.2 において、輪荷重の増加に伴い目開きは増加するが、残留目開きは概ねゼロで推移している。すなわち、図-6 (b)で示した残留たわみは増加する一方で、目開きは残留しない傾向が確認された。これは、接合界面の目開きではなく、PC 床版の損傷により残留たわみが生じていることを示唆している。なお、STEP.2 終了時の活荷重目開きは 0.16 mm、残留目開きは 0.04 mm、合計目開きは 0.20 mm であった。目開きは図-2 に示した位置において、接合境界の半円部と直線部のそれぞれで計測しており、STEP.1 および STEP.2 終了時における合計目開き分布を図-8 に示す。なお、 $y = -750\text{mm}$ において目開きがゼロを下回る (-0.03mm) 箇所が見られるが、計測機器の取付け上の問題と考えられる。ここで、横軸は中央からの距離 y として橋軸直角方向を表している。走行幅の範囲における目開き量が大きくなる凸形の分布形状を示し、半円部よりも直線部の方が若干大きくなる傾向が見受けられるが、いずれも STEP.2 終了時において目開きは 0.2 mm 以下であった。

静的載荷 (床版中央) における等価走行回数 N_{eq} と合計段差の関係を図-9 に示す。段差計は図-2 に示した通り、床版中央部の接合界面において A パネルおよび B パネル側のそれぞれに 2 箇所ずつ配置しており、同パネルの最大値を示している。B パネル側の床版端部に載荷ブロック端を合わせて設置したため、A パネル側と比較して B パネル側の段差が若干大きい傾向があるが、いずれも STEP.2 終了時において 0.1 mm 程度であった。

3.3 接合部付近の床版下側の鉄筋ひずみ分布

静的載荷 (床版中央) における等価走行回数 N_{eq} と床版中央の下側の鉄筋ひずみ (降伏ひずみ $\varepsilon_y = 1,990 \mu$) の関係を図-10 に示す。図中の SB-1~3 は PC 床版、SB-4~5 は間詰部での下側鉄筋に貼り付けた上下面のひずみゲージを平均して求めている。床版中央に発生する曲げモーメントに対して、鉄筋ひずみは SB-1 から SB-5 にかけて徐々に小さくなっており、橋軸方向の鉄筋が連続的に引張応力を負担していることが分かる。

STEP.1 では概ね 100μ 以下で一定値だった鉄筋ひずみは、STEP.2 で増加傾向に転じているが降伏ひずみ ε_y の 15% 程度である。接合部付近における橋軸方向 (x 方向) の鉄筋ひずみ分布を図-11 に示す。ひずみ分布は、概ね間詰部を中心に左右対称の形を示している。鉄筋ひずみの空間微分は鉄筋の付着応力に比例することから、ひずみ勾配の大きな間詰部では大きな付着応力が発揮され、付着破壊することなく継手間で応力伝達が行なわれていると推察される。

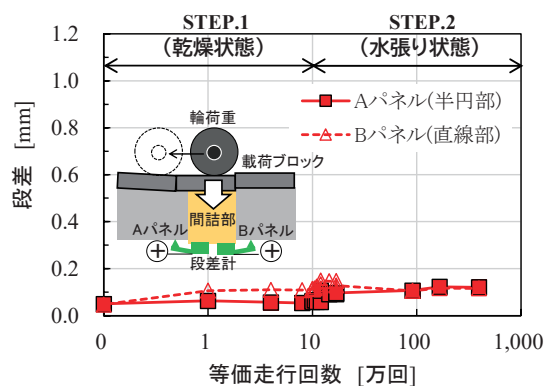


図-9 等価走行回数 N_{eq} と合計段差

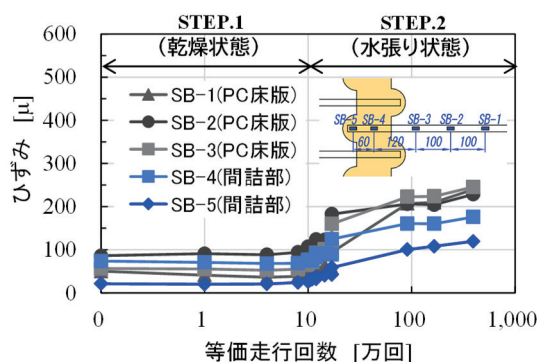


図-10 等価走行回数と鉄筋ひずみ

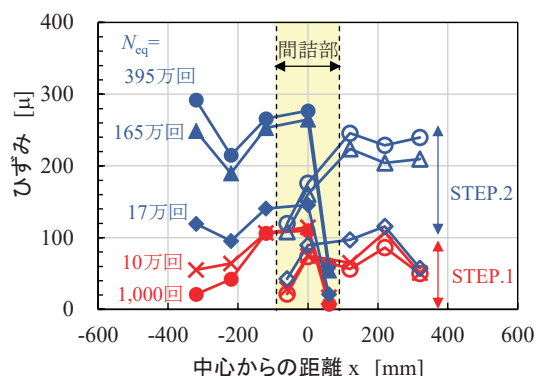
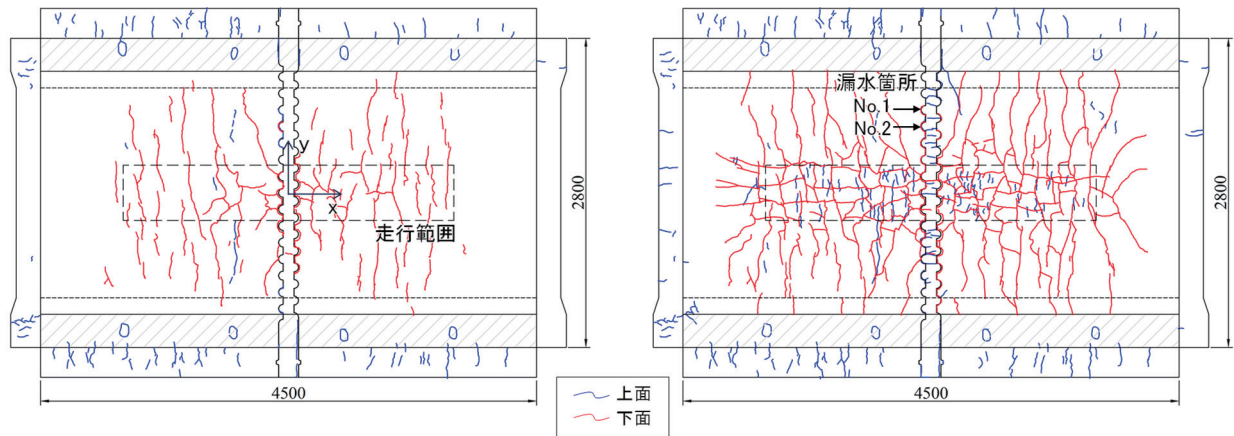


図-11 鉄筋ひずみ分布の変化

3.4 ひび割れ発生状況

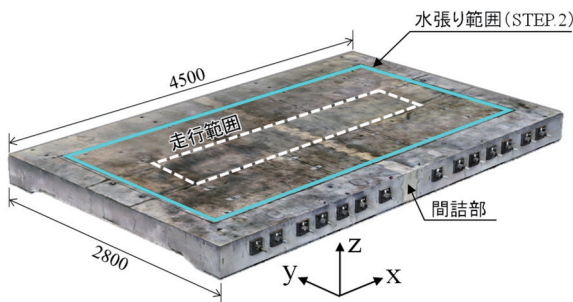
STEP.1 および STEP.2 終了時における試験体の床版上下面 (上面: 青色, 下面: 赤色) のひび割れスケッチを図-12 に示す。また、3D スキャナーを用いた試験終了時の損傷状況を写真-4 に示す。STEP.1 (図-12 (a)) では、間詰部の損傷は見られず、主として PC 床版下面 (赤色) に橋軸直角方向 (走行直角方向) のひび割れが確認できる。走行範囲である床版下面の中央付近では、接合界面に沿ったひび割れが見られるが、水張り試験で漏水が確認されてないことから貫通ひび割れではないと考えられる。なお、STEP.1 終了時の接合界面における活荷重目開きは 0.06 mm、残留目開きは 0.02 mm、合計目開きは



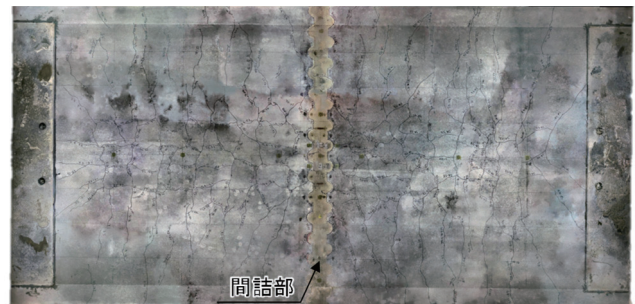
(a) STEP.1 終了時 ($N_{eq}=10$ 万回)

(b) STEP.2 終了時 ($N_{eq}=395$ 万回)

図-12 ひび割れスケッチ



(a) 床版上面



(b) 床版下面

写真-4 試験終了時 (STEP.2 終了) の損傷状況

0.08 mm である。

その後の STEP.2 (図-12(b)) では、床版下面 (赤色) の橋軸方向 (走行方向) にもひび割れが発生し、PC 床版の走行範囲では亀甲状のひび割れに進展している。床版上面 (青色) にも微細なひび割れが多数発生し、間詰部においても橋軸方向 (走行方向) のひび割れが発生した。また、接合界面に沿ったひび割れが走行範囲以外にも進展し、等価走行回数 $N_{eq}=395$ 万回時に図中の矢印位置 (接合界面) の 2 箇所 (No.1, No.2) で床版下面より水染みによる漏水が確認されている。この 2 箇所 (No.1, No.2) において、コアサンプリング (直径 45 mm, 長さ 220 mm) を行い、X 線 CT 計測により空隙の状況を確認した。一例として、No.1 の xz 平面における CT 画像を写真-5 に示す。CT 画像の白い部分は鋼繊維あるいは鉄筋、黒い部分は空隙やひび割れを表している。

CT 画像より、間詰部と PC 床版との境界部に 0.1 mm 以下の空隙 (矢印で図示) が視認されたが断続的であり、厚み方向 z への連なりは確認できなかった。No.2 についても同様の傾向が確認され、漏水の水みちを特定するに

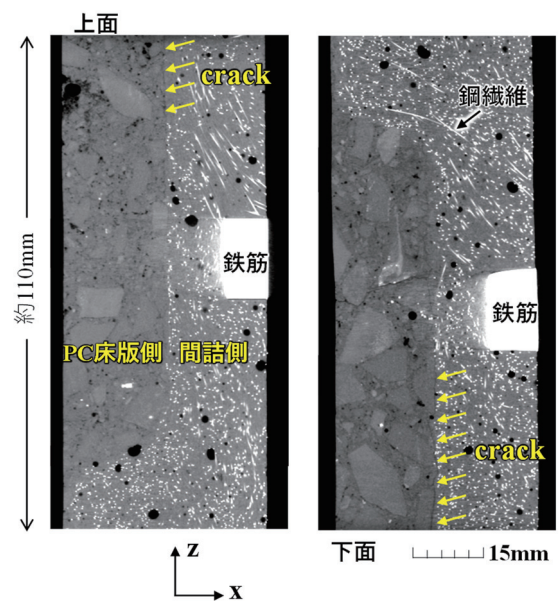


写真-5 漏水箇所の CT 画像 (No.1)

は至らなかった。しかし、輪荷重作用時にはこの空隙がさらに大きくなるものと考えられ、水張り状態では床版下面からの漏水要因になったものと推察される。

4. 接合部の耐疲労性に関する考察

4.1 強制振動試験による内部損傷の可視化

走行試験後の試験体に対して強制振動試験¹⁰⁾を実施し、共振周波数比（試験後 f ／試験前 f_0 ）より内部損傷の可視化を試みた。本手法は、床版上面に接触させた小型加振器で局所振動を励起させ、振動が及ぶ検査範囲の共振周波数を測定するものであり、床版内部の損傷程度を評価するものである^{11),12)}。強制振動試験の概念図を図-13、測定状況を写真-6に示す。

本研究では、掃引周波数を1,000～20,000 Hz、加振器の振幅実効値(RMS)は100 m/s²程度として計77箇所の測定を行った。試験前の健全な状態における共振周波数 f_0 は、試験体製作時に採取した円柱供試体の弾性波速度 v から、 $f_0=v/2h$ （ h ：円柱供試体高さ）より求め、PC床版部9,711 Hz、間詰部9,689 Hzを得た。

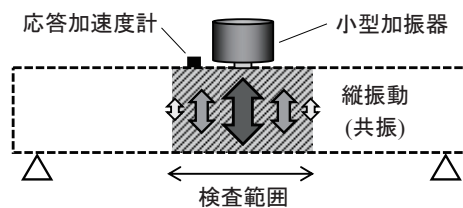


図-13 強制振動試験の概念図



写真-6 小型加振器

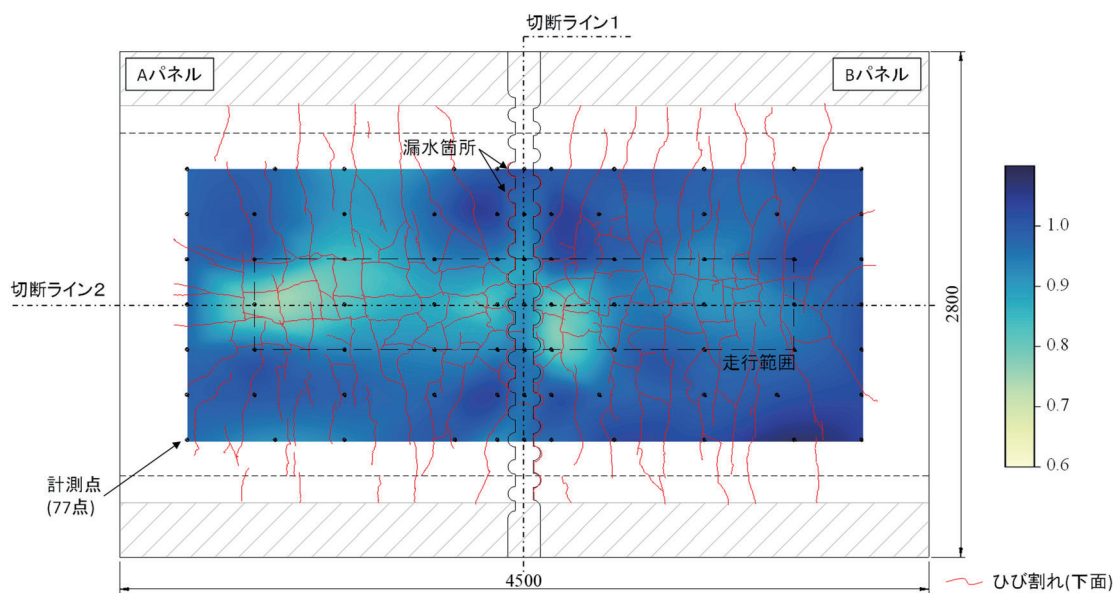


図-14 共振周波数比のコンター

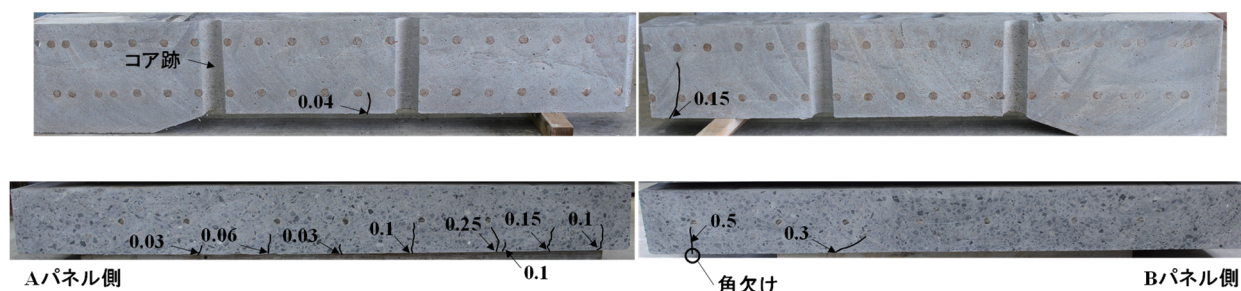


写真-8 切断断面（上段：切断ライン1、下段：切断ライン2）[単位：mm]

共振周波数比のコンターを図-14に示す。なお、図中にSTEP2終了後の床版下面(赤色)のひび割れスケッチを併記している。図中より、輪荷重走行範囲のPCa床版部において、共振周波数比が0.75~0.80程度まで低下している箇所が見受けられ、一定程度の内部損傷が予想される。既往研究¹²⁾によると、水張り状態での輪荷重走行試験では、床版の損傷は橋軸直角方向への進展が小さく、走行範囲に限定されることが指摘されており、本試験においても同様の傾向が伺える。

4.2 切断面観察と考察

強制振動試験結果を参考に、図-14で示した2測線(切断ライン1および2)について試験体を切断した。切断断面を写真-8に示す。写真中の数字は切断後にクラックゲージで計測した最大のひび割れ幅であり、計測位置を矢印で示している。

間詰部を切断面した切断ライン1では、ひび割れは僅か2本であり、最大のひび割れ幅は0.15mmであった。一方、走行方向の切断面である切断ライン2を見ると、PC床版に多数の曲げひび割れが確認された。しかし、輪荷重490kNまで増加した水張り状態での走行試験において、いずれの切断面にも床版劣化のトリガーとなる水平ひび割れは発生していなかった。RC床版の劣化の多くは、水平ひび割れの発生や砂利化によって構造性能が消失されることが指摘されている¹²⁾。本研究は既設鋼橋において、RC床版からPC床版への取替を想定した接合部の耐疲労性の評価が目的であるが、上述の通り、提案構造の接合部のみならずPC床版部にも水平ひび割れが発生しないことを確認した。

図-14の切断ライン2を見ると、Aパネル側の共振周波数比が相対的に低いが、写真-8のAパネル側に多くのひび割れが発生している事象と対応していることが分かる。床版中央では最大のひび割れ幅がBパネル側で0.5mm(ただし、下面に角欠けが見られたため、矢印先端が計測位置)と大きいですが、これも図-14のコンターと対応している。

このように、強制振動試験による共振周波数比によって、外観からは視認できないコンクリート内部損傷の可視化が可能であることが分かる。間詰部および接合界面に着目すると、共振周波数比はほとんど低下しておらず、内部損傷は極めて軽微であったものと考えられる。高強度の間詰材とPC床版の接合界面において、疲労損傷が集中するものと予想していたが、本結果から顕著な疲労損傷は認められず、十分な耐疲労性があったものと推察される。

5. 結論

本研究では、圧縮強度100N/mm²クラスの高強度繊維補強モルタルとネジ節鉄筋で接合したPC床版を用いて

輪荷重走行試験を実施した。その際、高強度の間詰材とPC床版との接合界面の耐疲労性に着目し、NEXCO試験法442⁶⁾に基づく乾燥状態の走行(輪荷重250kN:STEP.1)に加えて、輪荷重を最大490kNまで段階的に増加した水張り状態の走行(STEP.2)を実施した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) NEXCO試験法442⁶⁾の輪荷重走行試験およびその後の水張り試験により、耐用年数100年以上の耐疲労性を確認した。この時の床版中央における合計たわみは1.22mm、接合界面における合計目開きは0.08mmであった。
- (2) 輪荷重を最大490kNまで増加した水張り状態での走行では、等価走行回数 $N_{eq}=395$ 万回で接合界面の一部から水染みによる漏水が確認された。この2箇所においてコアサンプリングを実施し、CT画像を確認すると接合界面において、0.1mm以下の僅かな空隙が断続的に確認された。漏水の水みちを特定するには至らなかったが、輪荷重作用時にはこの空隙がさらに大きくなるものと考えられ、水張り状態では床版下面からの漏水要因になったものと推察された。なお、この時の床版中央における合計たわみは3.60mm、接合界面における合計目開きは0.20mmであった。
- (3) 床版下面より漏水が確認された時点を疲労限界と定義すると、S-N曲線の傾きの逆数 $m=7.43$ かつ疲労促進倍率15倍を仮定した時、耐用年数は約6.8万年と算定された。
- (4) 橋軸方向(走行方向)の鉄筋ひずみ分布および強制振動試験結果より、間詰部での付着破壊は生じておらず、継手間で良好に応力伝達がなされているものと推察された。
- (5) 走行試験後には強制振動試験を実施し、共振周波数比のコンターと試験体切断によるひび割れ箇所が対応していることを確認した。
- (6) 切断面の観察および強制振動試験による共振周波数比のコンターより、床版劣化のトリガーとなる水平ひび割れが発生していないこと、高強度の間詰材とPC床版の接合界面に疲労損傷が集中していないことを確認した。

以上の試験結果より、著者らの提案構造は耐用年数100年以上の耐疲労性を満足するものであり、実床版としての構造性能を有していることを確認した。しかし、現地施工の省力化・効率化を実現するためには、車載プラントの配置や練り混ぜ時間および充填時間の把握など、実規模レベルでの施工性を確認する必要がある。今後は大規模な施工性試験を通して、これらの検討を進めていく予定である。

謝辞

日本大学工学部の相内豪太研究員，同大学博士後期課程の何宗耀氏をはじめとする学生には，強制振動試験についてご協力を賜りました．ここに記して謝意を表します．

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：プレキャスト PC 床版による道路橋更新設計施工要領，pp.73-77，2018.
- 2) 三木朋広：道路橋 PCa 床版の接合部の性能評価事例－輪荷重走行試験を用いた性能確認－，コンクリート工学，Vol.61，No.1，pp.36-43，2023.
- 3) 水野剣一，正木徹，谷口修，茶林敬司：常温硬化特性を有した低炭素型高強度繊維補強モルタルの検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.934-939，2022.
- 4) 池野勝哉，倉川義弘，水野剣一，岩城一郎：高強度繊維補強モルタルとネジ鉄筋の付着性能に着目したプレキャスト床版接合部の曲げ載荷実験，構造工学論文集，Vol.69A，pp.802-811，2023.
- 5) 新沼拓也，池野勝哉，岩城一郎：プレキャスト床版の接合界面形状に着目したせん断耐荷挙動に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.2，pp.823-828，2023.
- 6) 東日本高速道路・中日本高速道路・西日本高速道路：プレキャスト PC 床版接合部の疲労耐久性試験方法，NEXCO 試験法，第 4 編 構造関係試験方法，442，pp.86-89，2020.
- 7) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，pp.49-51，2007.
- 8) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，pp.101-102，2017.
- 9) 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.
- 10) 内藤英樹，齊木佑介，鈴木基行，岩城一郎，子田康弘，加藤潔：小型起振機を用いた強制加振試験に基づくコンクリート床版の非破壊試験法，土木学会論文集 E2，Vol.67，No.4，pp.522-534，2011.
- 11) 内藤英樹，小林珠祐，土屋祐貴，杉山涼亮，山口恭平，早坂洋平，安川義行，鈴木基行：局所振動試験に基づく道路橋 RC 床版の内部損傷評価，土木学会論文集 E2，Vol.73，No.2，pp.133-149，2017.
- 12) 子田康弘，島野孝則，田中泰司，岩城一郎：輪走行作用を受ける道路橋 RC 床版の疲労損傷過程に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.66A，pp.733-739，2020.

(2023 年 9 月 4 日受付)

(2024 年 2 月 6 日受理)