

論文 接合界面形状の違いに着目したプレキャスト PC 床版の耐疲労性試験

Ruben VARGAS*1・池野 勝哉*2・前島 拓*3・岩城 一郎*4

要旨: 本研究では、高強度繊維補強モルタルの間詰材およびネジ節鉄筋を用いたプレキャスト PC 床版の接合構造について、2 種類の接合界面形状の違いに着目した耐疲労性試験を実施した。耐用年数 100 年相当を確認するため、NEXCO 試験法 442 に基づく輪荷重走行試験を実施するとともに、輪荷重を最大 490kN まで段階的に引き上げた水張り状態での走行試験を実施した。その結果、2 種類の接合界面形状を持つ接合構造は、耐用年数 100 年相当以上の耐疲労性を有していることが確認された。また、試験前後の非破壊評価より、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。

キーワード: プレキャスト床版, 接合界面形状, 耐疲労性, 輪荷重走行試験

1. はじめに

近年、老朽化した高速道路床版の大規模更新が進められており、既設鋼橋の RC 床版からプレキャスト PC 床版（以下、PC 床版）への取替工事が各地で実施されている。PC 床版の橋軸方向における接合方法には、従来のループ継手よりも接合幅を狭めた構造¹⁾が多数提案されており、現地施工の省力化・効率化が喫緊の課題である。

著者らは、圧縮強度 100N/mm^2 クラスの高強度繊維補強モルタル²⁾とネジ節鉄筋を用いた接合構造を提案している。これまでに、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 $8D$ (D : 鉄筋径) で従来のループ継手と同等以上の曲げ耐荷性能を有していること³⁾、接合界面形状は直線形よりも半円形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があること⁴⁾を確認している。しかし、繰返し移動荷重下における提案された接合構造の性能や接合部周辺に及ぼす影響については明らかにされていない。さらに、実床版へ供するためには、接合部においても耐用年数 100 年相当の耐疲労性が求められる。

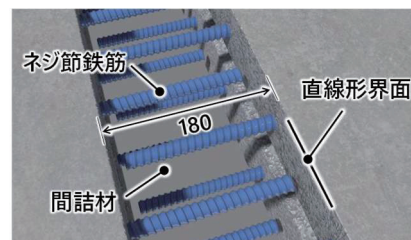
そこで、図-1 に示した 2 種類の接合界面形状を試験因子とした輪荷重走行試験を実施した。なお、疲労破壊に至るまでの走行試験は長期間に及ぶことが予想されたため、NEXCO 試験法 442⁵⁾に規定される乾燥状態の走行試験に加えて、輪荷重を最大 490kN まで段階的に引き上げた水張り状態での走行試験も実施した。床版の耐疲労性は、床版上面からの水の供給が床版寿命を乾燥状態の $1/100 \sim 1/10$ に低下させることが指摘⁶⁾されており、水張り状態での走行試験から接合界面形状による耐疲労性について考察した。

2. 輪荷重走行試験の概要

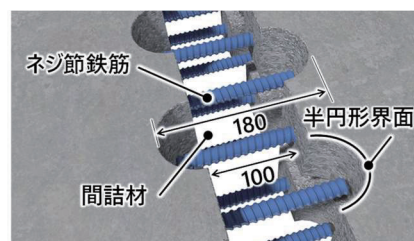
2.1 輪荷重試験体

(1) 試験体諸元および試験ケース

試験体の概要を図-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図-1 に示した 2 種類の接合界面形状で一体化を図った。試験体の外寸法は長さ 4,500mm (橋軸方向)、幅 2,800mm (橋軸直角方向)、厚さ 220mm である。PC 床版の設計基準強度は 50N/mm^2 、粗骨材の最大寸法は 20mm であり、橋軸方向にエポキシ樹脂塗装を施したネジ節鉄筋 D19 を 150mm ピッチ、橋軸直角方向に波節鉄筋 D13 を 125mm ピッチで配置した。PC 鋼材は $\phi 23\text{mm}$ の SBPRB 種を採用し、橋軸直角方向に 225~300mm 間隔で 1 段配置とした。



(a) 直線形



(b) 半円形

図-1 本研究の接合界面形状

*1 五洋建設 (株) 技術研究所 土木技術開発部 修士 (正会員)

*2 五洋建設 (株) 技術研究所 土木技術開発部 博士 (正会員)

*3 日本大学 工学部土木工学科専任講師 博士 (正会員)

*4 日本大学 工学部土木工学科教授 博士 (正会員)

(2) 使用材料

試験体に用いた鉄筋(SD345)およびPC鋼棒の機械的性質を表-1、PC床版および間詰材の試験前後における材料試験結果を表-2に示す。なお、PC床版のコンクリートはNEXCO試験法442⁵⁾に規定された配合とし、PCの端部緊張力は311.6kNとした。

間詰材として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減水剤を投入し、鋼繊維(直径0.16-0.22mm、長さ13-20mm、引張強度2,750N/mm²以上)を体積比2.0%で混入した。練り混ぜには750lのパン型モルタルミキサーを用い、フレッシュ性状をフロー値として240-310mmで管理した。写真-1にフロー試験の状況および混入した鋼繊維を示す。本材料は自己充填性を有しており、自然流下さ

せた後、封緘状態で養生を行った。

2.2 載荷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。試験体のPC床版を2辺単純支持(支間長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、実橋の連続版を模擬した。試験機の走行範囲(3,000mm×500mm)には



写真-1 フロー試験(左)と混入した鋼繊維(右)

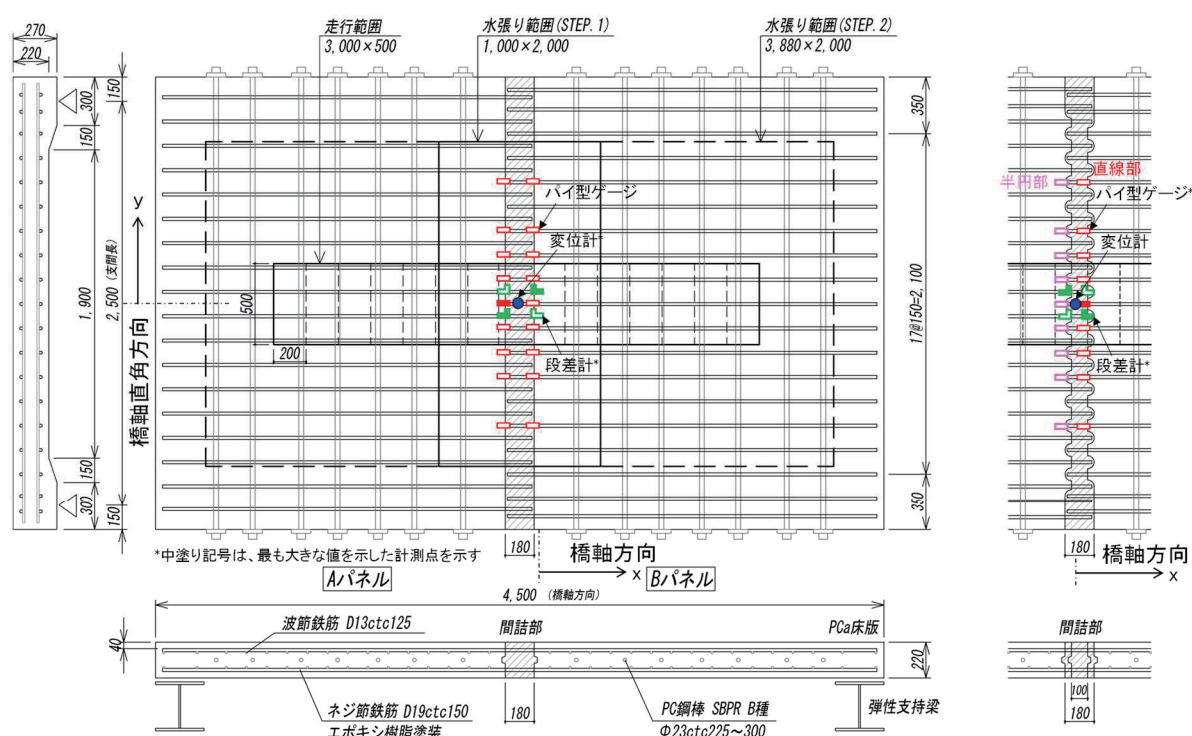


図-2 試験体の概要図(左:直線形, 右:半円形) [単位:mm]

表-1 鉄筋およびPC鋼棒の機械的性質

名称	ケース名	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
ネジ鉄筋	直線形	D19	427.2	606.9	194.2	エポキシ 樹脂塗装
	半円形		387.6	570.1	194.8	
波節鉄筋	直線形	D13	365.8	532.8	194.1	—
	半円形		399.2	577.6	191.8	

名称	ケース名	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	直線形	φ23	1,160	1,218	203	SBPR B種
	半円形		1,063	1,157	201	

表-2 床版および間詰材の材料試験結果

名称	ケース名	時期	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	直線形	試験前	65.6	5.2	41.4	コンクリート
		試験後	68.2	—	41.0	
	半円形	試験前	61.9	4.7	38.2	
		試験後	62.7	—	37.5	
間詰部	直線形	試験前	133.7	10.3	42.5	高強度繊維 補強モルタル
		試験後	140.1	—	43.5	
	半円形	試験前	117.7	12.4	42.2	
		試験後	120.9	—	42.6	

200mm×500mm の載荷ブロックを 15 ブロック設置し、その軌道上で鉄輪(直径 700mm×500mm)を走行させた。ここで、接合幅が載荷ブロック幅 200mm よりも小さいことから、載荷ブロックが接合幅を跨がないように B パネル側の床版端部に載荷ブロック端を合せて設置し、接合界面に輪荷重が直接作用するようにした。

載荷方法は NEXCO 試験法 442⁵⁾に基づき、輪荷重 250kN を乾燥状態で 10 万回走行させた後、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)を拡張した状態で、最大 490kN まで輪荷重を段階的に引き上げ、同試験法の規定以上の条件下における走行試験も実施した。写真-2 に水張り状態の走行状況(STEP.2)を示す。

試験フローを図-3 に示す。所定の走行回数が完了した時点で床版中央における静的載荷を実施し、床版のたわみ(高感度変位計)、接合界面の目開き(パイ型変位計)、段差(カンチレバ型変位計)およびひび割れスケッチを行った。試験サイクルを表-3 に示す。本試験では STEP.2 より段階的に輪荷重を引き上げているため、基本荷重 $P_0=250\text{kN}$ 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。後藤ら⁷⁾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て式(1)のマイナー則より等価走行回数 N_{eq} を算出した。

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

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(250kN)、 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)である。

3. 試験結果および考察

3.1 床版のたわみ

床版中央でのたわみと等価走行回数 N_{eq} の関係を図-4 に示す。ここで、静的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して定義した。

乾燥状態で走行した STEP.1($P_i=250\text{kN}$)では、いずれの接合界面形状も床版中央のたわみは概ね一定であり、増加傾向は認められない。STEP.1 終了時の合計たわみは、「直線形: 0.99mm」、「半円形: 1.22mm」である。その後、NEXCO 試験法 442⁵⁾に基づいた 6 時間の水張り試験を実施し、いずれの接合界面形状も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($P_i=250\text{kN}$, 310kN, 490kN)では、残留たわみ

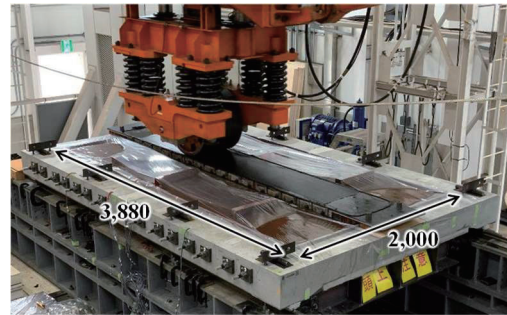


写真-2 水張り状態の走行状況 (STEP. 2)

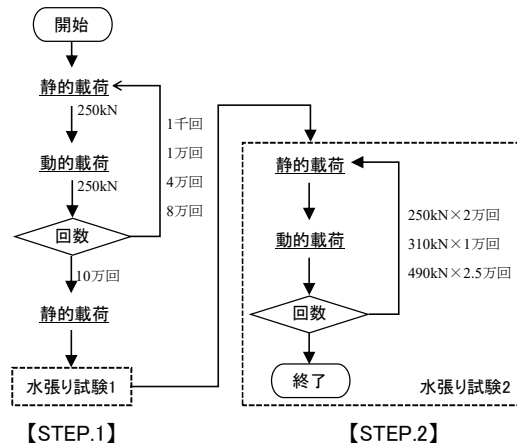


図-3 試験フロー

表-3 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]	備考
250	100,000	100,000	100,000	STEP.1
250	20,000	120,000	120,000	STEP.2
310	10,000	130,000	169,445	
490	25,000	155,000	3,879,690	

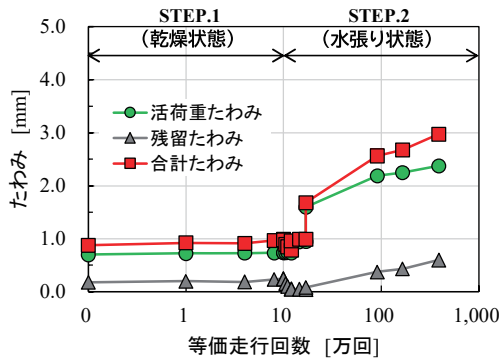
※1 基本荷重 $P_0=250\text{kN}$ 、 $m=7.43$ としてマイナー則により算定

が一時的に減少したが、輪荷重が 310kN および 490kN 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、STEP.2 の水張り走行時に床版上面のひび割れ(STEP.1 終了時に床版上面に小さなひび割れを目視で確認)から試験体が吸水膨張したものと考えられるが、詳細なメカニズムについては今後の検討課題としたい。「直線形」は累積走行回数 $N_i=15.5$ 万回、「半円形」は $N_i=15.55$ 万回において、床版下面の一部(後に示す図-7 に記載)で限定的な水染みが確認されたため、走行試験を終了した。STEP.2 終了時の合計たわみは「直線形: 2.98mm」、「半円形: 3.60mm」であり、STEP.1 および STEP.2 ともに、「半円形」のたわみは「直線形」の約 1.2 倍であった。これは、PC 床版の弾性係数が「直線形」よりも「半円形」が約 10%小さいこと、高強度繊維補強モルタルを充填した接合部の間詰体積が「直線形」よりも「半円形」が 25%少ないこと等の複数の要因が考えられる。

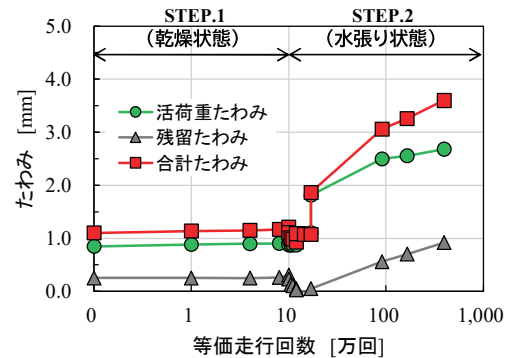
3.2 接合部の目開きおよび段差

床版中央での接合部の目開きについて、最も大きな値を示した計測点のパイ型変位結果を図-5に示す(図-2の中塗り箇所)。いずれの接合界面形状も接合部の目開きは図-4のたわみと調和的な傾向を示し、STEP.1終了時の合計目開きは「直線形：0.07mm」、「半円形：0.08mm」であった。その後のSTEP.2では、輪荷重の増加に伴い目開きは増加しているが、STEP.2終了時の合計目開きは「直線形：0.25mm」、「半円形：0.20mm」であり、「直線形」の方が目開きは大きかった。同様に最も大きな値を

示した計測点の段差結果を図-6に示す(図-2の中塗り箇所)。段差はAパネル側、Bパネル側を区別しており、「半円形」の場合には接合界面の半円部がAパネル側、直線部がBパネル側に該当する。STEP.1では「直線形」と「半円形」に段差の差異は認められないが、STEP.2において「直線形」は最後のステップで大きくなった。この理由として、STEP.2の輪荷重作用下における接合界面の目開きおよび段差は、接触面積(半円形は直線形の約1.2倍)の影響を強く受けるためだと考えられる。

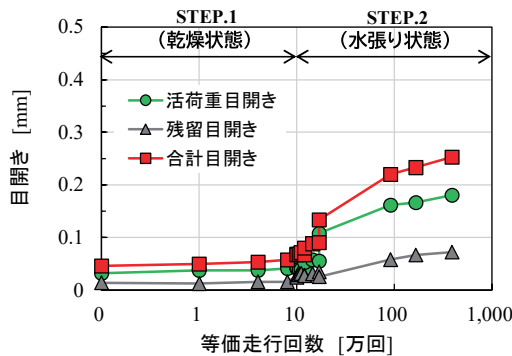


(a) 直線形

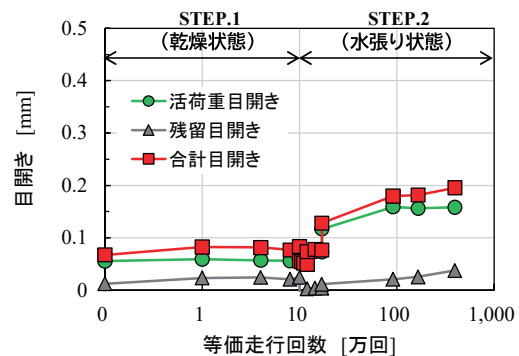


(b) 半円形

図-4 等価走行回数 N_{eq} と床版中央のたわみ

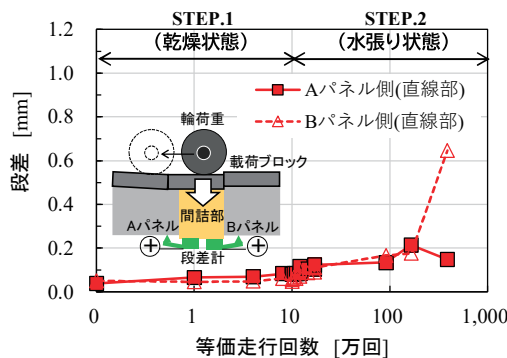


(a) 直線形

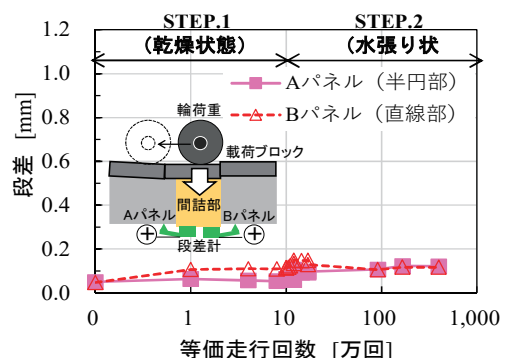


(b) 半円形

図-5 等価走行回数 N_{eq} と目開き

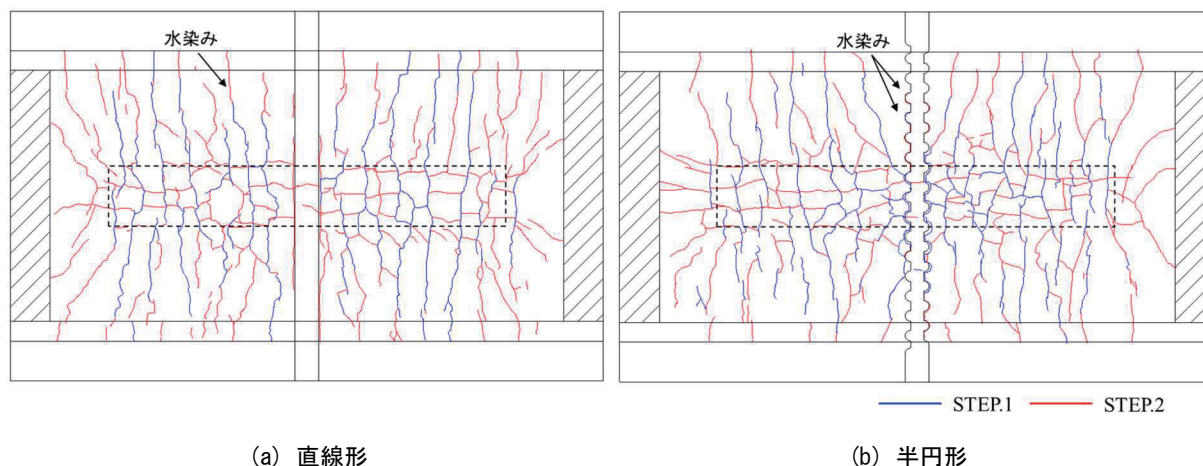


(a) 直線形



(b) 半円形

図-6 等価走行回数 N_{eq} と段差



図－7 ひび割れ発生状況

3.3 ひび割れ発生状況

床版下面のひび割れ発生状況を図－7 に示す。STEP.1 では床版全体に橋軸直角方向のひび割れ（青色）が発生し，STEP.2 では走行範囲において橋軸方向のひび割れ（赤色）が卓越することで，亀甲状のひび割れが形成されていることが分かる。間詰部の損傷は極めて軽微であり，STEP.2 において橋軸方向に2本の微細なひび割れが見られる程度であった。いずれの接合界面形状も接合界面に沿ったひび割れが観察されているが，水張り試験で漏水が確認されていないことから貫通ひび割れではないと言える。

4. 床版内部損傷に関する非破壊評価

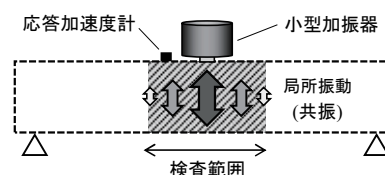
4.1 強制振動試験

走行後の試験体に対して強制振動試験⁸⁾を実施し，得られた共振周波数比（試験後 f /試験前 f_0 ）により内部損傷の評価を行った。本試験は，床版上面に接触させた小型加振器で局所的な振動を励起させ，計測した応答加速度のスペクトルピーク周波数から検査範囲の共振周波数を同定するとともに，試験前後の共振周波数比の低下を床版内部の損傷度として評価するものである^{9),10)}。強制振動試験の概念図を図－8，計測状況を写真－3 に示す。

本研究では，掃引周波数を1,000～20,000Hz，加振器の振幅実効値を100m/s²程度として各ケース計77箇所の計測を行った。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，直線形（PC床版部9,945Hz，間詰部9,855Hz）及び半円形（PC床版部9,711Hz，間詰部9,689Hz）の f_0 値を得た。

4.2 床版内部損傷の可視化

共振周波数比のコンターを図－9 に示す。図中には，強制振動の測定点を黒点（測定間隔は文献10）を参考，コ



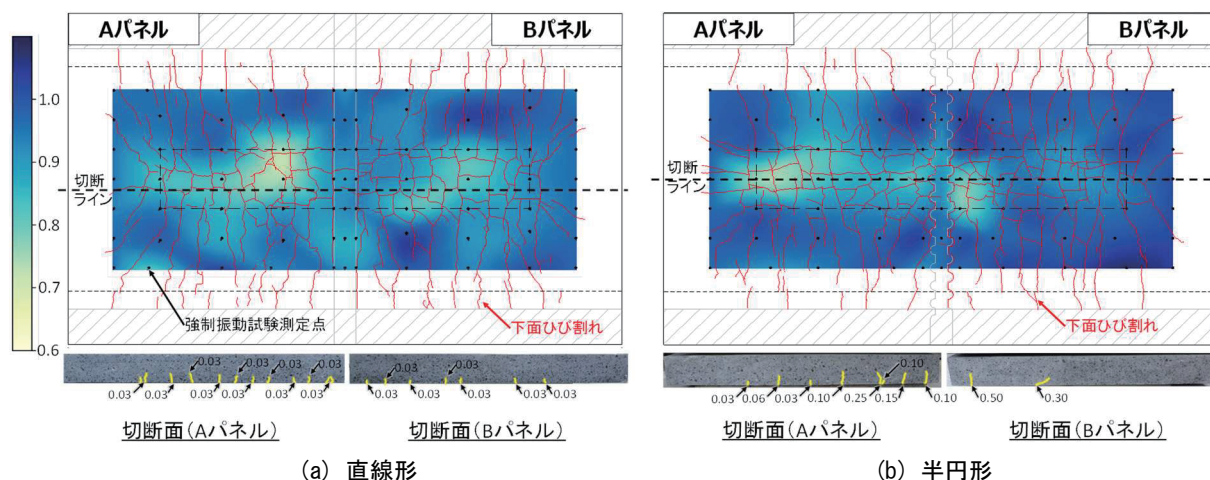
図－8 強制振動試験の概念図⁸⁾



写真－3 強制振動試験の計測状況

ンターは三次補間）で示し，STEP.2 終了後の床版下面（赤色）のひび割れスケッチを併記した。図中より，輪荷重走行範囲のPCa床版部において「直線形」が最小0.75，「半円形」が最小0.77まで共振周波数比が低下しており，一定程度の内部損傷が推察される。

内部損傷の直接観察のため橋軸方向に試験体を切断し，切断面を図－9 の下段に示した。切断面中の数字は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。PC床版に多数の曲げひび割れが確認され，図中の共振周波数比が相対的に低い箇所で，切断面に多くのひび割れが発生している事実と対応していた。このことより，強制振動試験によって，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。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，本提案構造の高強度な間詰材とPC床版の接合界面においては，疲労損傷は少なく十分な耐疲労性があったものと判断される。



図－9 共振周波数比のコンターと切断面

5. まとめ

本研究では、圧縮強度 100 N/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、2 種類の接合界面形状を試験因子とした輪荷重走行試験を実施した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 乾燥状態の輪荷重走行試験およびその後の水張り試験により、2 種類の界面形状（直線形，半円形）ともに耐用年数 100 年相当の耐疲労性を確認した。
- (2) 水張り状態の走行後において，たわみは「直線形」と比較して「半円形」の方が大きかった。これは，PC 床版の弾性係数は「半円形」の方が「直線形」より約 10% 小さく，高強度繊維補強モルタルの体積も「半円形」の方が 25% 少ないためだと考えられた。
- (3) 水張り状態の走行後において，目開きおよび段差はともに，「直線形」の方がやや大きかった。これは接合界面の接触面積の大小による影響を受けたためだと考えられる。
- (4) 走行後に実施した強制振動試験より床版内部損傷を評価し，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。

謝辞

強制振動試験にあたっては，日本大学工学部土木工学科構造・道路工学研究室の相内豪太研究員および学生諸氏に多大なる協力をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 三木朋広：道路橋 PCa 床版の接合部の性能評価事例ー輪荷重走行試験を用いた性能確認ー，コンクリート工学，Vol.61，No.1，pp.36-43，2023.1
- 2) 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.934-939，2022.6

- 3) 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節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.802-811，2023.3
- 4) 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.823-828，2023.7
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 後藤俊吾，長谷俊彦，中間淳史，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.762-773，2020.3
- 8) 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.522-534，2011.1
- 9) 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.
- 10) 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 (材料・コンクリート構造)，Vol.73，No.2，pp.133-149，2017.