

論文 床版取替時の品質と生産性の向上に向けた新たな接合工法の開発

針貝 貴浩*1・野澤 忠明*2・勝見 哲史*3・須山 淳也*4

要旨: 本研究は、床版取替工事における橋軸方向 RC 接合部の品質と生産性の向上を目的に、先端にナット状の定着金物を設けた機械式定着工法と間詰め材として高強度合成繊維モルタルを組み合わせた新たなプレキャスト床版接合工法の開発を行ったものである。本論文では、接合部を模擬した試験体を用いた定着部の引抜試験および接合部を配置した梁の曲げ疲労試験を実施し、配筋ピッチ、継手ラップ長、せん断補強鉄筋の有無が曲げ耐力に及ぼす影響を整理した。さらに、接合部を配置した床版試験体を用いた輪荷重走行試験を実施し、接合部の疲労耐久性の評価を行った。

キーワード: 床版継手、機械式定着工法、高強度合成繊維モルタル、輪荷重走行試験、疲労耐久性

1. はじめに

道路構造物の中で特に直接輪荷重を支持する道路橋床版は、車両の大型化や交通量の増加に伴い劣化が進行し、多くの損傷が発生している状況にある。このような状況の中、高速道路各社を中心に疲労耐久性に優れたプレキャスト PC 床版（以下、PCa 床版）への更新工事が数多く行われている。PCa 床版は品質や工期の面で優れている一方で、床版間の接合部については型枠の設置や鉄筋の組立て、間詰め材の打込み、養生など多くの作業を現場で行う必要があり、省力化や工期短縮、品質向上などの面でさらなる改善が期待されている。そこで著者らは、これら課題を解決すべく橋軸方向 RC 接合部を対象に機械式定着工法と高強度合成繊維モルタルを組み合わせた新たな PCa 床版接合工法を開発した。本論文では開発において実施した各種試験の内容と結果について報告する。

2. 接合構造の概要

接合部は、異形鉄筋の先端にテーパネジ加工を施し、ナット状の定着金物（以下、TP ナット¹⁾（写真-1）を設けた機械式定着工法と間詰め材として高強度合成繊維モルタル（以下、PVA-VFC（写真-2））を組み合わせた構造（図-1）である。TP ナットによる支圧効果と PVA-VFC の優れた強度特性による確実な応力伝達により、従来のループ継手工法に比べて間詰め幅を縮減することができるため、間詰め材の打込み工程の省力化に貢献する。また、ループ継手工法では接合部の橋軸直角方向に対して一般に 6 本の鉄筋をループの中に配置する必要があるため施工効率低下の要因となっていたが、本接合工法では定着鉄筋（以下、TP ナット鉄筋）の外側に上下 1 本ずつ計 2 本を配置する容易な構造であり、さらに下側の鉄筋をあらかじめ前の PCa 床版に結束した状態で次の PCa

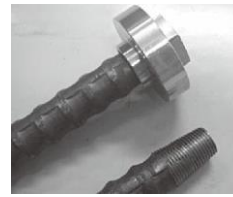


写真-1 TP ナット



写真-2 PVA-VFC

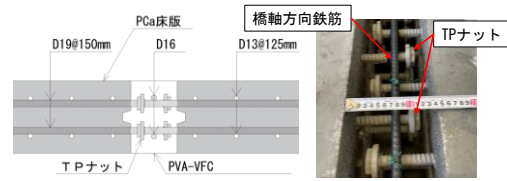


図-1 接合構造概要図

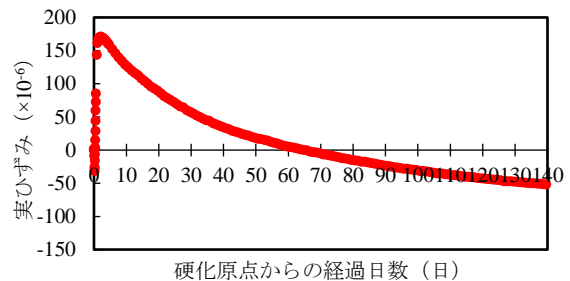


図-2 PVA-VFC の自己収縮ひずみ

床版を架設することで、現場での鉄筋組立作業を上側の 1 本だけに削減することができる。

3. 間詰め材

接合部の間詰め材には、高強度繊維補強セメント系複合材料（以下、VFC）の一種である PVA-VFC を用いた。VFC は、優れた強度特性を有するとともに有害因子の侵入に対する抵抗性が高い材料で、2024 年 9 月に土木学会より設計・施工指針²⁾が発刊され、今後の活用が期待される材料である。本研究では、補強繊維として PVA 繊維

*1 前田建設工業（株） 土木事業本部 修(工) (正会員)

*2 (株) エスイー ESCON 事業部技術開発部 博(工) (正会員)

*3 佐藤工業（株） 土木事業本部

*4 飛島建設（株） 土木本部

を用い、圧縮強度の特性値が 100N/mm^2 となる PVA-VFC を間詰め材として用いた。VFC は一般にセメント量が多く、かつ水セメント比が小さいことから自己収縮が大きい。このため外部拘束環境下ではひび割れの発生が懸念される。そこで、PVA-VFC では収縮低減剤および膨張材を添加することで収縮の抑制を図っている。図-2 に「(仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法」³⁾ に準じ、 20°C 一定封かん養生下での測定結果を示す。図に示すように 20°C 養生下での自己収縮は 140 日経過時点で「24 時間でのひずみの変化量がその時のひずみの 1%以下」³⁾ となっており、ほぼ収束している。また、140 日時点で計測された収縮量は 50×10^{-6} 程度と小さな値であった。さらに、図-3 に間詰め材が PCa 床版に及ぼす影響の解析結果を示す。解析には 3 次元温度応力解析プログラム ASTEAMACS (計算力学研究センター) を用いた。メッシュモデルは接合構造を模擬し、厚さ 220mm の PCa 床版要素の中央部に幅 150mm の間詰め材を配置した。また、間詰め材の収縮ひずみは図-2 の結果より安全を考慮して 150×10^{-6} とし、収縮により PCa 床版部に生じる応力を確認した。その結果、PCa 床版に発生する引張応力は最大 0.71N/mm^2 であり、引張応力と PCa 床版の引張強度の比は 5.07 となった。このことから、PVA-VFC を間詰め材に使用することで、収縮によるひび割れ発生リスクが低く、有害因子の侵入の恐れがほとんどない品質の高い接合部の形成が可能となる。

4. 要素試験

4.1 定着試験

(1) 試験体

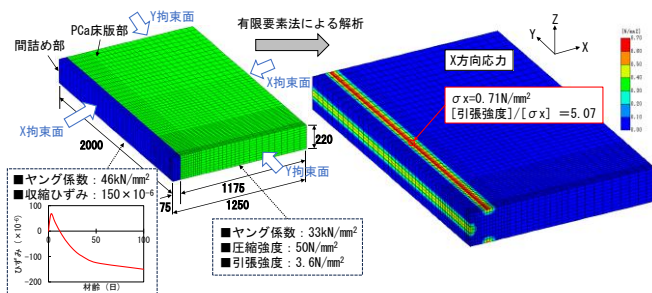


図-3 有限要素法による解析の概要

表-1 定着試験 試験ケース

Case	試験体仕様							PVA-VFC 圧縮強度 (N/mm^2)
	鉄筋ピッチ (mm)	TPナット (mm)	間詰め幅 (mm)	継手ラップ長 (mm)	せん断 補強筋	エポキシ樹脂 塗装鉄筋		
1	@125	$\phi 57$	120	80	なし	—	86.7	
2	@125	$\phi 57$	120	80	あり	—	86.7	
3	@125	$\phi 57$	130	90	なし	—	101.3	
4	@125	$\phi 57$	130	90	あり	●	96.6	
5	@125	$\phi 57$	150	110	なし	—	101.3	
6	@125	$\phi 57$	150	110	あり	—	89.6	
7	@125	$\phi 57$	150	110	あり	●	96.6	
8	@150	$\phi 57$	120	80	なし	—	88.0	
9	@150	$\phi 57$	120	80	あり	—	89.6	
10	@150	$\phi 57$	140	100	あり	●	90.8	
11	@150	$\phi 57$	150	110	あり	●	90.8	

接合部を模擬した試験体を用いた定着部の引抜試験 (定着試験) により、接合部の定着性能を評価した。図-4 に定着試験用試験体の配筋例を示す。試験体は、TP ナット鉄筋を千鳥配筋であき重ね継手状に配置し、その隙間を PVA-VFC で充填することにより鉄筋同士を一体化させた構造である。表-1 に定着試験の検討ケースを示す。検討ケースは、鉄筋ピッチ、継手ラップ長、せん断補強鉄筋の設置の有無、エポキシ樹脂塗装の有無の組合せにより合計 11 ケースとした。TP ナットを取り付ける鉄筋には D19-SD345 (降伏強度 414N/mm^2 , 引張強度 584N/mm^2) を使用し、取り付ける TP ナットの外径は鉄筋径の 3 倍の 57mm とした。せん断補強鉄筋には D16-SD345 を使用した。

(2) 試験方法

写真-3 に定着試験の状況を示す。試験は片側 2 本の鉄筋を架台に固定した状態で、もう一方の鉄筋にセンターホールジャッキを用いて引張力を与えることで定着性能を評価した。荷重は鉄筋の降伏強度の規格値 (345N/mm^2) の 95%に相当する荷重 93.9kN (以下、繰返し荷重) で 20 回繰返し荷重した後、鉄筋の引張強度の規格値 (490N/mm^2) に達する荷重 140.4kN (以下、終局荷重) まで単調荷重する方法とした。荷重はセンターホールジャッキに設置したロードセルにより測定し、変位はジャッキのストロークにより測定した。また、試験体の製作誤差等により荷重中に偏心が生じた場合を考慮し、試験体上下面を鉛直方向に拘束した状態で荷重を行った。

(3) 試験結果

図-5 に定着試験における各ケースの荷重-変位関係、写真-4 に破壊形態の例を示す。試験体の破壊形態は、

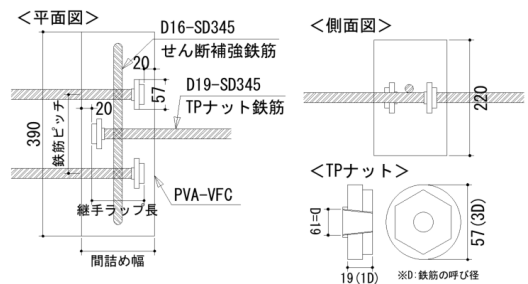


図-4 定着試験用試験体の配筋例

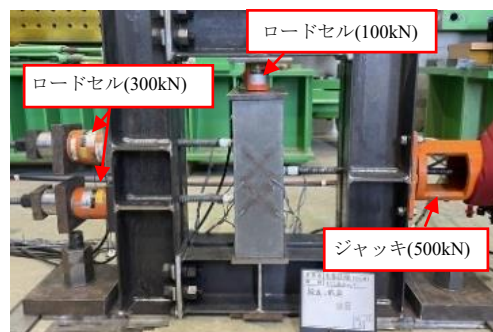


写真-3 定着試験の状況

大きく3パターンに分類された。1つ目は、繰返し荷重に到達する前に PVA-VFC がコーン状に破壊して定着鉄筋が抜け出すことで終局に至った「コーン破壊」(Case1, 8)である。2つ目は、繰返し荷重まで到達したが、終局荷重に到達する前に PVA-VFC がコーン状に破壊して定着鉄筋が抜け出すことで終局に至った「降伏後コーン破壊」(Case2, 3, 9)である。3つ目は、定着鉄筋が抜け出すことなく終局荷重まで到達した「終局荷重到達」(Case4, 5, 6, 7, 10, 11)である。

定着試験の結果より、鉄筋ピッチが小さいほど、また継手ラップ長が長いほど、さらにせん断補強鉄筋を配置することによって、最大荷重が増加する傾向が認められた。これは、せん断補強鉄筋による鉄筋同士の拘束と、千鳥に配置された隣接する TP ナット同士による圧縮ストラットの形成(図-6)が寄与したものと考えられる。図-7 に最大荷重と解析により求めた圧縮ストラットの体積の関係を示す。圧縮ストラットの体積は、千鳥配筋の TP ナットから放射状に広がった応力同士が重なる部分である。なお、TP ナットからの応力伝達角度は、道路橋示方書⁴⁾の PC 定着部からの応力伝達角度を参考に33°とした。この結果より、接合部における圧縮ストラットの体積の増加に伴って、最大荷重が増加する傾向が認められた。また、Case8 と Case9 および Case1 と Case2 の結果より、圧縮ストラットの体積が同じケースでも、せん断補強鉄筋を配置することで最大荷重が55%程度増大することが確認された。さらに、最大荷重と圧縮ストラットの体積は、終局荷重に到達するまでは線形関係を示した。この関係から、近似式より「せん断補強鉄筋：あり」では圧縮ストラットの体積を38.7cm³以上、「せん断補強鉄筋：なし」では圧縮ストラットの体積を84.8cm³以上とすることで、終局荷重以上の引張耐力を確保できることが示唆された。なお、今回の試験範囲ではエポキシ樹脂塗装の有無が接合部の耐力に及ぼす影響について、明確な差異は観察されなかった。

4.2 梁の繰返し曲げ試験

(1) 試験体

定着試験の結果より、終局荷重に到達した仕様の中で最も圧縮ストラットの体積が小さい Case10 (継手ラップ長 100mm)、および比較としてさらに継手ラップ長を小さくした Case9 (継手ラップ長 80mm) を対象に梁の繰返し曲げ試験を実施し、曲げに対する疲労耐久性および曲げ耐力の確認を行った。図-8 に試験体の概要図を示す。試験体は、長さ3,000mm、幅775mm、厚さ220mmであり、中央に接合部を配置した構造である。TP ナット鉄筋は上下2段で配筋し、さらに外側にせん断補強鉄筋を1本ずつ計2本配置した。また、接合部の床版側には深さ25mmのせん断キーを設けた。写真-5 に試験装置と試

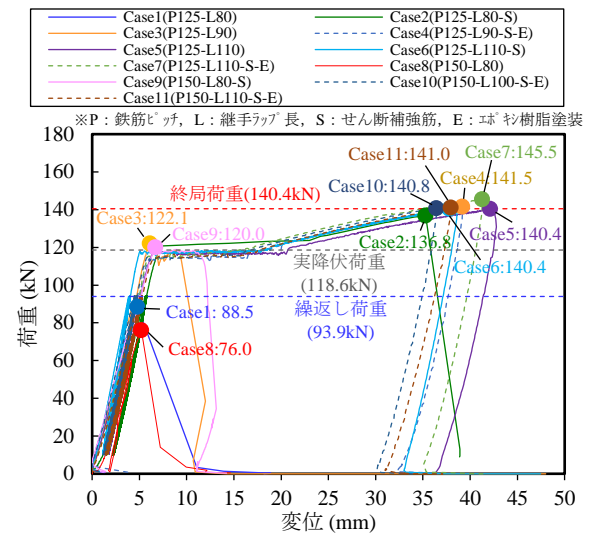


図-5 定着試験 荷重-変位関係

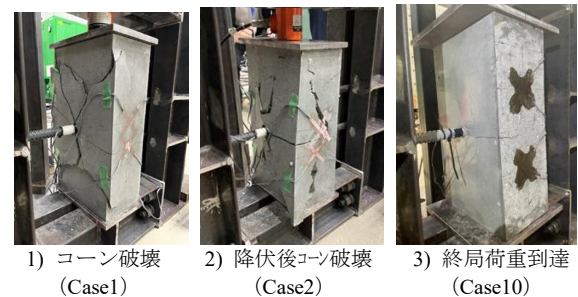


写真-4 定着試験 破壊形態の例

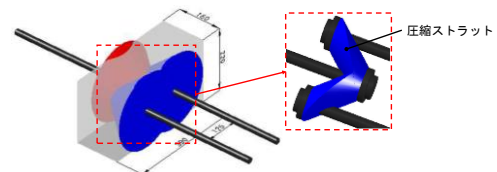


図-6 圧縮ストラットの形成

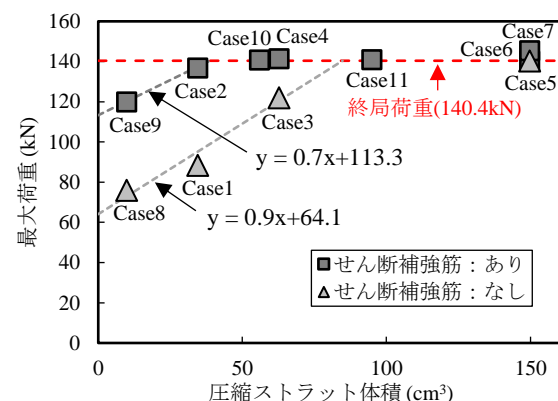


図-7 最大荷重-圧縮ストラット体積関係

験体設置状況を示す。載荷は、支間長2,400mmの3等分点載荷とし、せん断スパン長は800mmである。試験開始時における床版コンクリートおよび PVA-VFC の圧縮強度は表-2 に示す通りである。

(2) 試験方法

梁の繰返し曲げ試験では、輪荷重走行試験における試

験条件（支間距離 2,500mm，載荷荷重 250kN）と同等の性能評価を行うため，試験体に発生する曲げモーメントが同等となるよう荷重条件を設定した。道路橋示方書⁴⁾より，床版支間の方向が車両進行方向に直角の場合における支間直角方向の最大曲げモーメントは， $+(0.10L + 0.07)P$ （ここに， L ：支間距離， P ：載荷荷重）より算出される。この算出式より，後述する輪荷重走行試験の条件下で発生する最大曲げモーメントは 72.5kNm となる。本試験では，この最大曲げモーメントに基づいて等曲げ区間で発生する最大曲げモーメントが 70kNm になるよう，せん断スパン長 800mm および試験体の幅 775mm を考慮して，最大荷重を 135kN，最小荷重を 30kN に設定することとした。

表-3 に繰返し曲げ試験の載荷および測定スケジュールを示す。載荷荷重 45，90，135kN で予備載荷を行った後，繰返し載荷を行い，載荷回数が 100 回，1,000 回，1 万回，10 万回，50 万回の時点で 135kN の静的載荷を行い各段階の荷重-変位関係を確認した。また，繰返し載荷回数が 10 万回完了時点で試験体上面の接合部を含む範囲に水を張り，その状態を 6 時間保持した後に試験体下面からの水漏れの有無を確認した。さらに，50 万回の繰返し載荷を行った後，試験体が終局状態を迎えるまで静的載荷を行う曲げ破壊試験を実施した。

(3) 試験結果

図-9 に継手ラップ長 80mm および 100mm の荷重-変位関係，写真-6 に曲げ破壊後の試験体背面の状態と切断面を示す。繰返し載荷回数 50 万回までの残留変位は継手ラップ長 80mm の方が継手ラップ長 100mm よりも若干大きくなったが，試験体の剛性に大きな違いは認められなかった。また，曲げ破壊試験では，継手ラップ長 80mm の試験体が 225kN で降伏を迎え，その直後に最大荷重 239kN で接合部のコーン破壊により終局状態となった。この傾向は，図-5 の Case9 と同様である。一方，継手ラップ長 100mm の試験体は 215kN で降伏を迎え，その後最大荷重 305kN で床版本体コンクリート上面の圧壊により終局状態となった。なお，継手ラップ長 80mm および 100mm の試験体は，いずれも繰返し載荷回数 10 万回後の水張試験において，試験体下面からの水漏れは認められなかった。

以上の結果より，本研究では曲げに対する疲労耐久性および終局時の安全性の観点から，継手ラップ長 100mm の仕様を選定し輪荷重走行試験を実施することとした。

5. 輪荷重走行試験

5.1 試験体および試験方法

輪荷重走行試験は，NEXCO 試験法 442-2020「プレキャスト PC 床版接合部の疲労耐久性試験方法」⁵⁾に準拠す

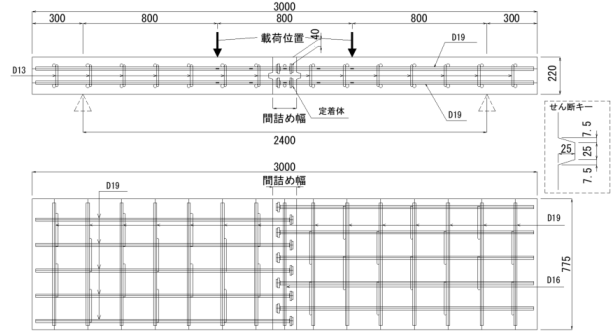


図-8 梁の繰返し曲げ試験 試験体概要図



写真-5 試験体設置状況

表-2 圧縮強度測定結果

継手ラップ長 80mm		継手ラップ長 100mm	
床版 (σ 28)	PVA-VFC (σ 14)	床版 (σ 28)	PVA-VFC (σ 14)
76.2N/mm ²	105N/mm ²	68.3N/mm ²	118N/mm ²

表-3 載荷・測定スケジュール

番号	繰返し数 (回)	周波数 (Hz)	載荷重幅 (kN)	摘要
1	1~3 回	-	45	予備載荷
	1~3 回		90	
	1 回		135	
2	1~100 回	1.0	30~135	静的載荷 3 回
3	1~900 回	1.5	30~135	〃
4	1~9,000 回	1.5	30~135	〃
5	1~90,000 回	1.5	30~135	〃
6	水張試験	-	-	6 時間保持
7	1~400,000 回	1.5	30~135	静的載荷 1 回
8	曲げ破壊試験	-	-	静的載荷

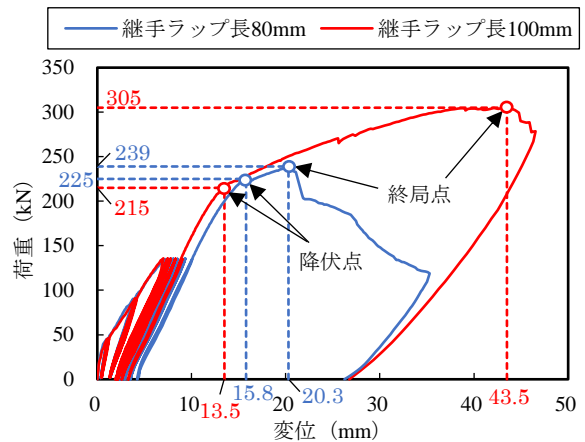
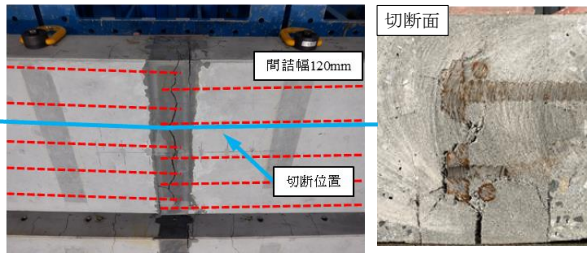


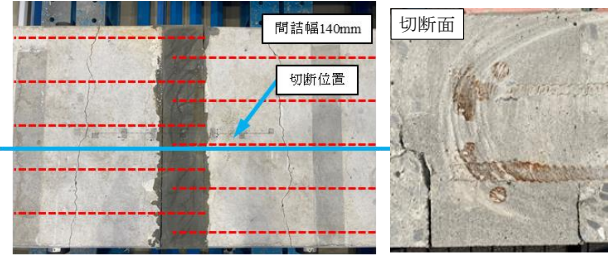
図-9 梁の繰返し載荷試験 荷重-変位曲線

るとともに既往の検討⁶⁾を参考に実施した。

図-10 に試験体概要図を示す。試験体は長さ 4,500mm，幅 2,800mm（床版支間 2,500mm），厚さ 220mm（ハンチ



1) 継手ラップ長 80mm



2) 継手ラップ長 100mm

写真-6 曲げ破壊試験後の試験体背面状態と切断面

部は 270mm) であり、中央に梁の繰返し曲げ試験で選定した接合構造を配置した。床版には PC 鋼材 (φ23mm, SBPR B 種 (ポストテンション方式)) を中央に 1 段 225~300mm 間隔で配置し、311.6kN のプレストレスを導入した。また、試験体下面の床版本体と間詰め材の界面にはパイ型変位計を設置し、輪荷重の繰返し載荷に伴う界面の開き量を測定した。さらに、床版下面には変位計を 15 点設置し輪荷重作用時の床版挙動を確認した。なお、試験開始時の床版コンクリートの圧縮強度は 75.3N/mm²、PVA-VFC の圧縮強度は 101N/mm² であった。

写真-7 に輪荷重走行試験時の状況、図-11 に輪荷重走行試験の載荷プログラムを示す。予備載荷として 500 回 (150kN×250 回, 200kN×250 回) の走行を行い、その後試験法 442 に従い 100 年相当の輪荷重 (250kN×10 万回) を与えてから水張り試験を行った。さらにその後、輪荷重を最大 400kN まで段階的に増加させ、合計 38 万回の輪荷重を与えてから再度水張り試験を実施した。

5.2 試験結果

図-12 に試験体中央のたわみ量の推移を示す。たわみ量は試験体中央の変位量から支点上に設置した変位量を差し引いた値である。250kN×10 万回までの範囲では活荷重たわみは初回以降ほとんど変化が無いが、残留たわみは走行回数の増加に伴って徐々に増加する傾向が認められた。一方、250kN×10 万回以降は輪荷重の増加に伴って活荷重たわみと残留たわみの両方が増加する傾向を示したが、終局の目安となるようなたわみ量の急増は認められなかった。

図-13 に接合部界面の開き量の推移を示す。開き量の最大値は 10 万回走行時点で 0.07mm、38 万回走行時点で 0.16mm であり、一般に長期の耐久性に対して有害なひび割れ幅とされる 0.20mm より小さい値である。また、試験の荷重条件 (250~400kN) が床版の設計荷重 100kN より大きいことを考慮すると、一般的な供用環境下において生じる界面の開き量は極めて小さいと考えられる。

図-14 に走行回数 10 万回および 38 万回時点のひび割れ図を示す。走行回数 10 万回では試験体下面にのみひび割れが確認された。さらに、走行回数 38 万回時点では試験体下面のひび割れが網目状に分散して広がり、試験

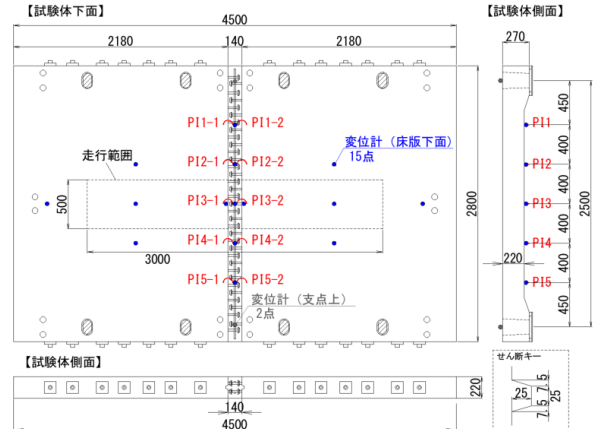


図-10 輪荷重走行試験 試験体概要図



写真-7 輪荷重走行試験の状況

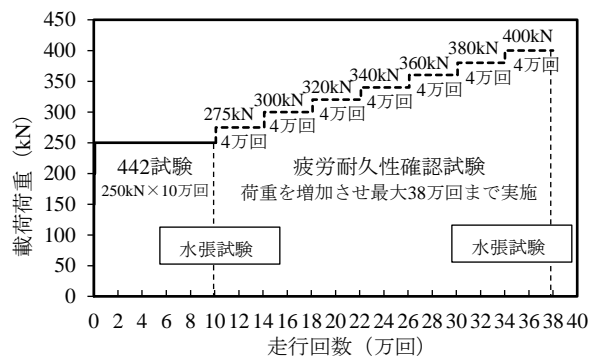


図-11 輪荷重走行試験 載荷プログラム

体上面にもひび割れが確認された。ただし、上面のひび割れのほとんどは床版部で発生しており、接合部上面には有害と考えられるひび割れは認められなかった。また、250kN×10 万回および合計 38 万回の走行完了時点において実施した水張り試験では、いずれも試験体下面からの漏水は認められなかった。

以上より、本接合法は、繰返しの輪荷重に対して高

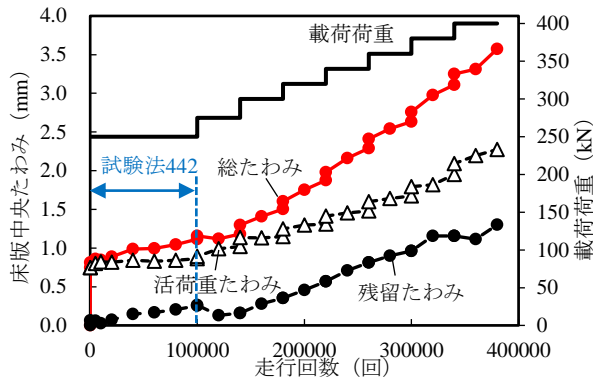


図-12 試験体中央たわみ量の推移

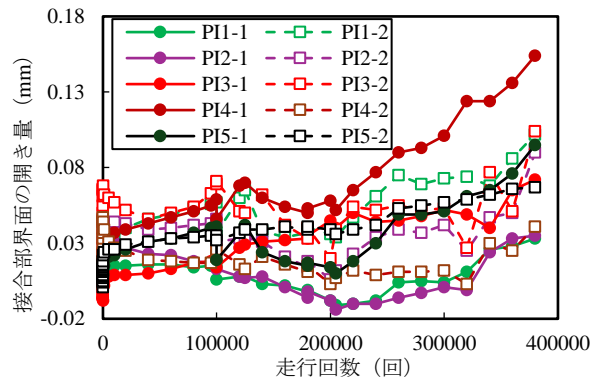


図-13 接合部界面の開き量の推移

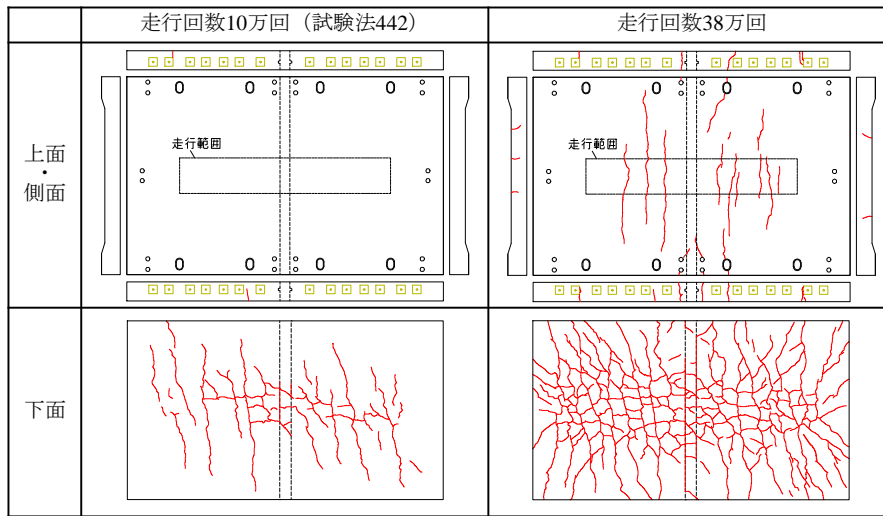


図-14 走行回数 10 万回および 38 万回時点のひび割れ図

い疲労耐久性を有しており、PCa 床版の性能や耐久性上の弱点にはならないと考えられる。

6. まとめ

本研究では PCa 床版間の橋軸方向 RC 接合部を対象に、機械式定着工法と高強度合成繊維モルタルを組み合わせた床版接合工法の検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 間詰め材として収縮低減剤および膨張材を添加した高強度合成繊維モルタルを用いることで、収縮量を低減し有害なひび割れの発生リスクを抑制することが確認された。
- 2) 定着試験より、接合部の鉄筋ピッチが小さいほど、また継手のラップ長が長いほど、さらにせん断補強鉄筋を配置することによって、接合部の引張耐力が増加する傾向が認められた。
- 3) 梁の繰返し曲げ試験より、継手ラップ長を 100mm (間詰め幅 140mm) 以上とすることで、繰返し载荷に対する疲労耐久性を確保し、かつ終局状態において脆性的な破壊を生じないことが確認された。
- 4) 継手ラップ長 100mm (間詰め幅 140mm) の試験体を用いた輪荷重走行試験より、100 年相当 (輪荷重 250kN×10 万回) を上回る疲労耐久性が確認された。

- 5) 本接合工法を用いることで、従来のループ継手工法と同等以上の曲げ耐力と疲労耐久性を確保し、かつ間詰め幅の縮減や配筋作業の削減が可能となるため、PCa 床版取替工事における橋軸方向 RC 接合部の品質と生産性の両面で向上を図ることができる。

参考文献

- 1) 土木研究センター：建技審証第 1010 号「TP ナット鉄筋」, 2021.2
- 2) 土木学会：高強度繊維補強セメント系複合材料の設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー166, 2024
- 3) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書 (II), pp.209-210, 1994
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III, 2012
- 5) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社：NEXCO 試験方法 第 4 編 構造関係試験方法, 2020
- 6) 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, 2020.3