

プレート定着型鉄筋によるプレキャスト床版接合構造の開発と適用

大成建設(株)	正会員	○川口 哲生	正会員	渡部 孝彦
大成建設(株)	正会員	島崎 利孝	正会員	武田 均
大成建設(株)	正会員	細谷 学	正会員	大島 邦裕
		大成建設(株)	正会員	高嶋 光俊
		浙江大学	正会員	趙 唯堅

1. はじめに

近年、社会インフラの老朽化が顕在化してきており、高速道路においても経過年数の増加とともに床版の劣化が進展し、床版取替えが行われている。床版取替えにおいては、通行止め時間の短縮という制約が含まれることが多く、プレキャストPC床版(以降、PCa床版と表記)に取替えることが主流となっている。床版のプレキャスト化では、品質確保の観点で優れ、現場作業の省力化と工期短縮を図るのに有効と考えられるが、PCa床版を適切に接合することが重要であり、接合方法の合理化を図ることで、より省力化や工期短縮を図ることができるものと期待される。そこで、筆者らは、施工の省力化を図るために、新しいPCa床版の接合構造の開発を行い、実橋梁における床版取替えに適用した。本稿では、開発において検討を行った静的耐荷特性とプレート形状の最適化及び実適用の概要を述べる。

2. 本接合構造の概要

写真-1に開発したPCa床版の接合部の概要を示す。本接合構造は、所定の間隔をあけて設置されたPCa床版の互いの端面からプレート定着型鉄筋を突出させ、間詰部に鋼繊維補強モルタルを充填することで、PCa床版を接合する方法である。

写真-2にプレート定着型鉄筋を示すが、使用するプレート定着型鉄筋は異形鉄筋の先端に鋼製プレートを摩擦圧接で接合したものであり、機械式鉄筋定着工法として開発されたものである。これは、半円形フックと比べ、同等以上の定着性能を有することが報告されたものである¹⁾。PCa床版の接合で従来から用いられてきたループ継手では、間詰部内の橋軸直角方向に対し、6本の異形鉄筋を配置する必要があるが、本接合構造では異形鉄筋の配置を省略することが可能である。また、プレート定着型鉄筋と鋼繊維補強モルタルを組み合わせることにより、間詰幅をループ継手の1/3程度である110mmとすることが可能である。なお、本接合構造は、NEXCO試験方法442(プレキャストPC床版接合部の疲労耐久性)²⁾に準拠した輪荷重走行試験を実施し、設計要領第二集 橋梁保全編³⁾に記載されている耐用年数100年相当の疲労耐久性を満足することを確認したものである。



写真-1 PCa床版の継手構造



写真-2 プレート定着型鉄筋

3. 本接合の静的耐荷特性に関する検討

ここでは本接合構造の静的耐荷特性を検証するために、静的曲げ試験を実施した。静的曲げ試験の概要と結果を示す。

(1) 試験概要および使用材料

キーワード 床版取替え、プレキャストPC床版、プレート定着型鉄筋、高強度繊維補強モルタル

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター TEL 045-814-7219

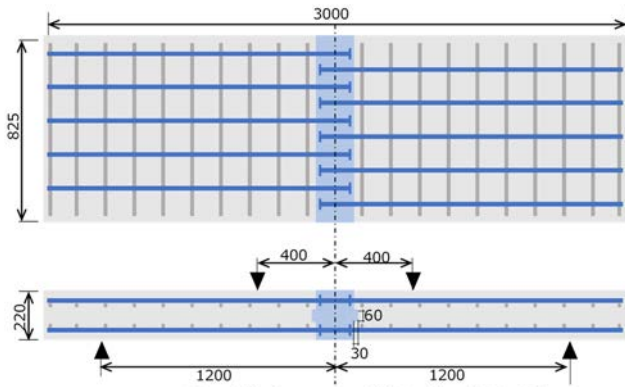


図-1 試験体概要図(静的曲げ試験)

図-1に静的曲げ試験体の概要を示す。試験体は、PCa床版の接合部を模擬しており、事前に製作した2体のPCa床版と接合部より構成される。PCa床版を接合した後の試験体の寸法は3000×825×220mm(長さ×幅×厚さ)である。ここで、試験体の厚さは、設計要領第二集 橋梁保全編³⁾に規定されている床版取替えに用いるPCa床版の標準版厚とした。

表-1に試験ケース一覧を示す。ここでは、間詰幅と間詰材種類を試験要因とした。間詰幅は、100mm(2.4×D)、150mm(5.0×D)、250mm(10×D)、(D:鉄筋径)としており、間詰材は材齢28日で100N/mm²程度の圧縮強度を発現する高強度繊維補強モルタル(以降、高強度型間詰材と表記)を対象とした。さらに、早期交通開放を行う急速施工にも対応することを想定し、早期に硬化する中強度繊維補強モルタル(材齢3時間:24N/mm²、28日:60N/mm²)(以降、中強度型間詰材と表記)について検討を行った。また、比較として、PCa床版の一般的な継手として、これまでに用いられてきたループ継手について比較検討を行った。

a) 使用材料

表-2に試験体の諸元を示す。使用したプレート定着鉄筋は D19 SD345に円形プレートを摩擦圧接したものを使用した。円形プレートの寸法はφ50×12mmであり、材質はS35Cである。また、円形プレートをD19SD345に接合した後、プレート定着鉄筋(全長)に、参考文献³⁾に従ってエポキシ樹脂を塗装した。塗装の仕様は、土木学会編:コンクリートライブラリー112、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針[改訂版]⁴⁾に準拠した。PCa床版の製作では、参考文献³⁾に準拠して、設計基準強度50N/mm²(材齢7日)のコンクリートを用いた。また、軸方向鉄筋と橋軸直角方向鉄筋は、D19 SD345として、図-1に示すように2段配筋とした。間詰材は、高強度型間詰材、中強度型間詰材の両者とも、水、プレミクス粉体から構成される。高強度型間詰材は近年開発されたものであり、専用鋼繊維を含めて、市販されているものである。また、中強度型間詰材は、市販の無収縮モルタルに、鋼繊維を混入したものであり、高強度型間詰材と異なる鋼繊維を使用した。高強度型

表-1 試験ケース一覧(静的曲げ試験)

No.	間詰幅(mm)			間詰材	
	(空重ね継手長)				
	100 (2.4×D)	150 (5×D)	250 (10×D)	高強度 型	中強度 型
1	○			○	
2		○		○	
3	○				○
4		○			○
5			○		○
6	ループ継手, 340mm			収縮補償 コンクリート ($f_{ck}=50\text{N/mm}^2$)	

表-2 試験体の諸元(静的曲げ試験)

名称	諸元
試験体の構成	事前に製作した2体のPCa床版を接合
寸法	3000×825×220 mm (長さ×幅×厚さ)
PCa床版の コンクリート	設計基準強度: 50N/mm ²
鉄筋(軸方向)	- プレート定着型鉄筋(D19 SD345) - 鉄筋ピッチ: 150mm - プレート寸法: φ50mm×12mm - エポキシ樹脂塗装(全長) 2段配筋
鉄筋(橋軸直角方向)	- D19 SD345 - 鉄筋ピッチ: 150mm 2段配筋

表-3 間詰材の配合とコンシステンシー試験と強度試験結果

名称	鋼繊維混入率 (vol.%)	計量値(kg)			コンシステンシー試験		強度特性	
		水	プレミクス 粉体	鋼繊維	モルタルフロー (mm)	練上り温度 (℃)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (10 ⁴ N/mm ²)
高強度間詰材	2.3	50.0	100	9.00	254	20.5	99.4	2.80
中強度型間詰材	1.0	33.8	187.5	7.85	258	20.1	66.8	2.95

表-4 載荷試験結果の一覧(静的曲げ試験)

No.	鉄筋降伏荷重(kN)	目開き量 (使用時荷重 レベル)(mm)	最大 荷重 (kN)	破壊形態
1	182.7	0.22	266.9	曲げ破壊 (PCa 部圧壊)
2	179.3	0.37	280.4	曲げ破壊 (PCa 部圧壊)
3	降伏せず	0.29	187.3	間詰部で破壊
4	188.3	0.28	268.8	曲げ破壊 (PCa 部圧壊)
5	207.9	0.25	270.4	曲げ破壊 (PCa 部圧壊)
6	233.2	0.25	237.7	曲げ破壊 (PCa 部圧壊)

間詰材に混入する鋼繊維の混入量は2.3vol.%とし、中強度型での混入量は1.0vol.%とした。これは、間詰材が材料分離せず、施工性を確保できる範囲内で、最大の繊維混入率を設定したためである。一方で、ループ継手の試験体(No.6)の間詰部には、参考文献³⁾に準拠して膨張材を混和した収縮補償用コンクリート(設計基準強度:50N/mm²)を用いた。

試験体は、事前にPCa床版を製作しておき、所定の材齢を経た後に、接合部に間詰材を充填して一体化させた。ここでは、橋軸方向の接合部を対象とした曲げ試験であることを考慮して、PCa床版の橋軸直角方向のプレストレスは導入していない。PCa床版の製作に用いたコンクリートのスランプは、8.0±2.0cmとし、設計基準強度を50N/mm²として配合を設定した。また、PCa床版と間詰部の接合面には、間詰部のせん断破壊を防止するために、図-1に示すようにせん断キー(高さ30mm)を設置し、脱型後に接合面に目荒らし処理を行った。

PCa床版のコンクリートが所定の強度を発現した後、試験体の接合を行った。表-3に充填した間詰材のコンシステンシー試験と静的載荷試験時の圧縮強度と弾性係数を示す。ここでは施工性を考慮して、間詰材のモルタルフロー(JIS R 5201, 0打)を250mm程度と設定した。ハンドミキサーによって練混ぜを行い、練り上がった後に、接合部に間詰材を充填した。その後、気中養生を行って、間詰材が所定の強度を発現した後に静的曲げ試験に供した。

(2) 載荷試験方法

静的載荷試験は容量1000MNの万能試験機を用いて行った。試験条件は、図-1に示す様に、スパン2400mm、せん断スパン800mm、等モーメント区間長800mmの4点曲げとして、静的単調載荷を実施した。載荷試験時には、供用時の繰返し荷重の影響を確認するため、使用時荷重レベルまで、10回の繰返し載荷を行った。ここで、使用時荷重レベルは、道路橋床版を想定し、下段鉄筋に発生する応力を120N/mm²相当(載荷荷重:63.3kN)とした。また、接合部のひび割れ発生後の繰返し載荷の挙動も確認するために、使用時荷重の2倍の荷重を載荷させて、試験体にひび割れを発生させた後、再度使用時荷重レベルまで、10回の繰返し載荷を行った。その後、試験体が破壊に至るまで、静的単調に載荷を行った。載荷試験時には、荷重、たわみ、PCa床版-間詰部での目開き、等曲げ区間内での鉄筋ひずみを計測した。

(3) 試験結果

a) 荷重-たわみ関係

表-4に載荷試験結果の一覧を示す。鉄筋降伏荷重は、等曲げ区間内の鉄筋に発生したひずみが、鉄筋の規格降伏ひずみに達した時の荷重である。また、試験体側面の4箇所PCa部と間詰部の目開きを計測し、平均化したものを目開き量と

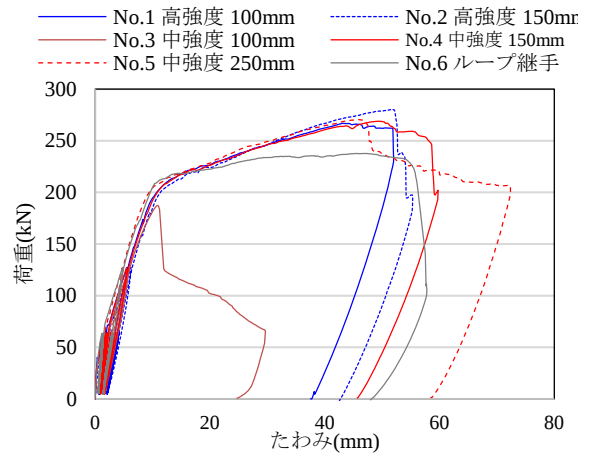


図-2 荷重-たわみ関係(静的曲げ試験)

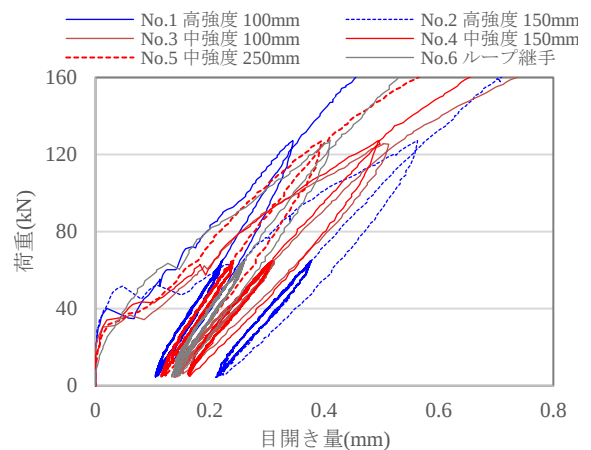


図-3 荷重-目開き量関係(静的曲げ試験)

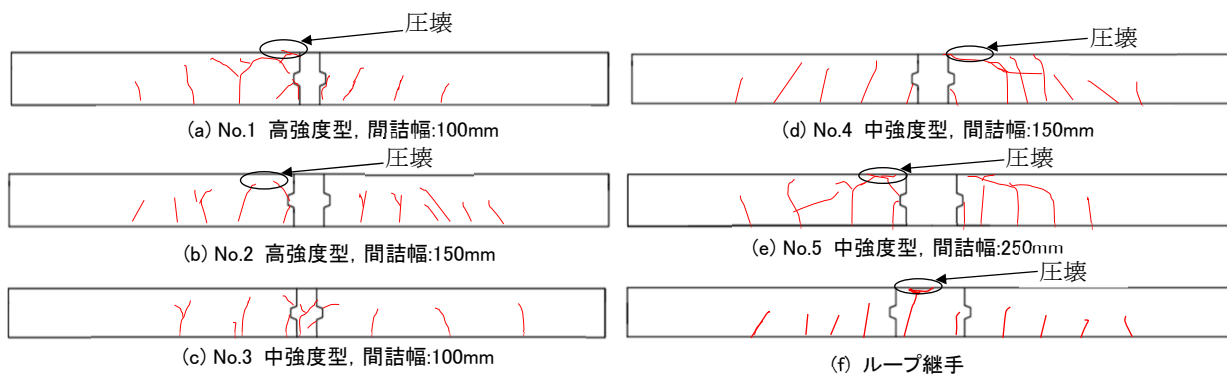


図-4 ひび割れ図(試験終了後)



(a) No.1 高強度型, 間詰幅 100mm



(b) No.3 中強度型, 間詰幅 100mm

写真-3 破壊性状の例

し、試験体にひび割れを発生させた後に、使用時荷重レベルまで繰り返しを行った中で最大となったものを示している。

同表に示すように、No.3(中強度型間詰材, 間詰幅:100mm)のケースでは間詰部で破壊したものの、それ以外のケースは、曲げ破壊に至ることが確認された。図-2に荷重-たわみ関係を示す。ここでは、試験体が破壊して、荷重が低下し始めた後に、安全を確保するために除荷をしている。表-4、図-2より、高強度型間詰材を用いた場合には、間詰幅100mm, 150mmのどちらも、除荷を行うまで、荷重-たわみ関係と最大荷重はループ継手を上回ることがわかった。また、中強度型間詰材を用

いた場合、間詰幅を100mmとしたケースは、載荷荷重が187.3kNとなった時点で、急激に荷重が低下したことがわかった。ところが、間詰幅を150mm, 250mmとすることで、荷重-たわみ関係は、ループ継手の最大荷重を上回ることがわかった。

b) 荷重-目開き関係

図-3に荷重-目開きの関係、表-4に目開き量を示す。試験体にひび割れを発生させた後において、道路橋床版を想定した使用荷重レベル(載荷荷重:63.3kN, 下段鉄筋の発生応力:120N/mm²)における目開き量は、No.2を除き、概ね0.3mm程度以下となり、No.2>No.3>No.4>No.5=No.6>No.1の順に小さくなることがわかった。特に、No.1(高強度型間詰材, 間詰幅:100mm)の目開き量は、ループ継手を下回ることがわかった。また、ひび割れ発生以降に行った10回の繰り返し載荷において、目開き量は大きく変化しておらず、ほぼ一定になることがわかった。

c) 破壊性状

図-4に試験終了時におけるひび割れ図、写真-3に破壊性状の例を示す。図-4(a), (b)に示す様に、高強度型間詰材を用いたケースでは、間詰幅によらず、写真-3(a)の様にPCa部が圧壊して終局に至ることがわかった。一方で、図-4(c), 写真-3(b)に示す様に、中強度型間詰材を用いて、間詰幅を100mmとすると、間詰部のひび割れが大きく拡大し破壊に至ることがわかった。表-4に示すように鉄筋が降伏していないことから、プレート定着鉄筋が間詰部より抜け出し、破壊に至ったものと考えられる。また、図-4(d), (e)に示す様に、中強度型間詰材を用い、間詰幅を150mm, 200mmに増加させると、間詰部は破壊せず、PCa床版が圧壊して終局に至ることがわかった。また、図-4(f)のループ継手では、間詰部の圧縮縁が圧壊することがわかった。

以上より、高強度型間詰材を用いた場合、間詰幅を100mm程度としても、ループ継手と同等以上の静的耐荷力を有し、接合部が破壊に至らず、弱点になっていないことがわかった。そこで、これ以降は、接合部の幅を小さくするために、高強度型間詰材(以降、高強度繊維補強モルタルと表記)を対象に検討を行うこととした。

4. プレート形状の最適化に関する検討

本接合構造において、プレート定着型鉄筋の配置間隔および鉄筋部の重ね継手長を一定とした場合、その定着性能を確保するためには、プレート寸法が大きな要因であり、施工性を考慮したうえで、良好な定着性能を得るためには、プレート間の応力伝達性能を考慮した最適なプレート寸法を検討する必要がある。そこで、高強度繊維補強モルタルを介したプレー

(1) プレート定着型鉄筋を対象とした引抜試験

a) 試験概要

b) 試験結果

図-8に各ケースの鉄筋応力-プレート引抜変位関係を示す。いずれの試験ケースも鉄筋応力が規格引張強度に達するま

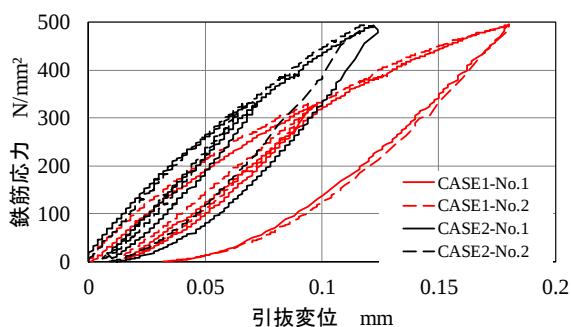


図-8 鉄筋応力-プレート引抜変位関係

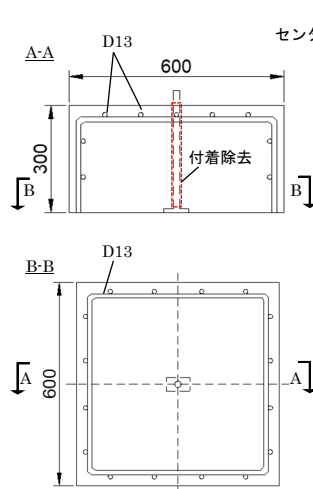
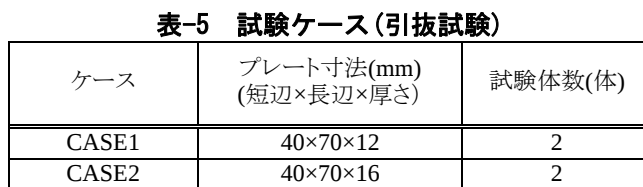


図-5 試験体寸法図
(引抜試験)

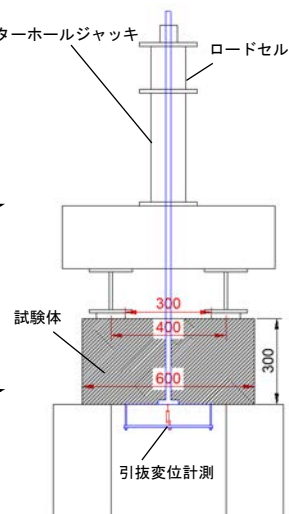


図-6 載荷装置
(引抜試験)

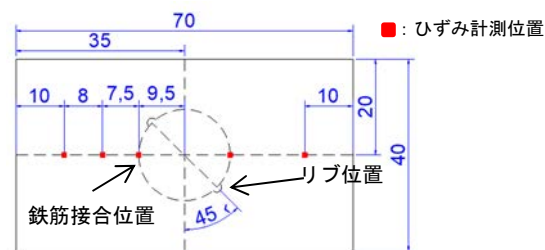


図-7 プレート下面ひずみ計測位置

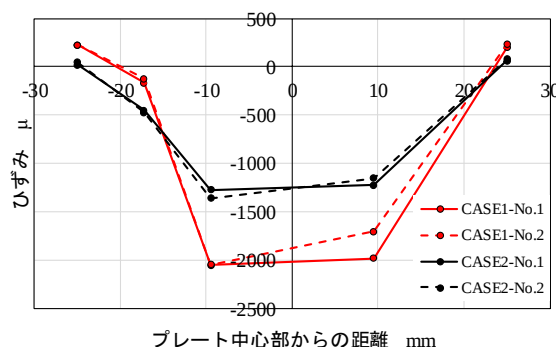


図-9 規格引張強度時ひずみ-計測位置関係

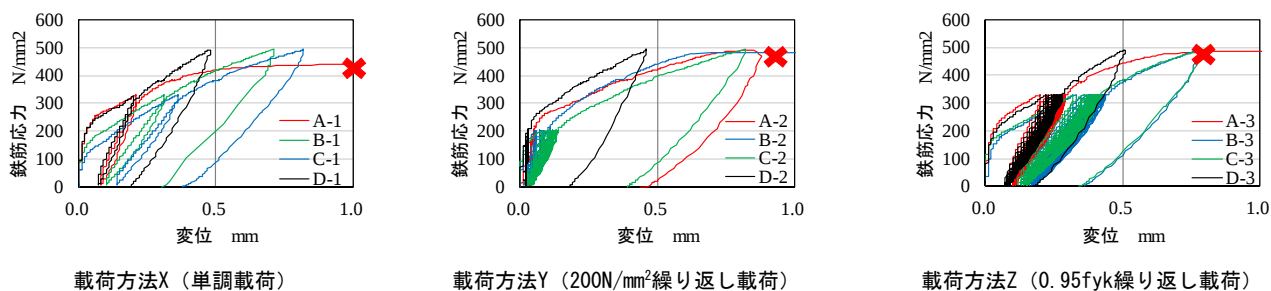


図-13 鉄筋応力-プレート引抜変位関係

ぶりを決定した。プレート厚を16mmとしたDシリーズは、プレート背面とPCa床版間の充填性を考慮し、間詰幅を110mmに設定した。プレート部を除く鉄筋部のラップ長は46mmで統一した。

載荷側プレート部の引抜変位を計測するため、載荷側プレート部の中心にφ5mmの鋼棒を溶接した。なお、鋼棒と間詰材との付着は除去している。プレート定着型鉄筋は、鉄筋部にSD345のD19鉄筋を使用し、矩形プレート部材質はSM490、円型プレート部材質S35Cとした。高強度繊維補強モルタルは専用プレミックス粉体と水と鋼繊維により構成されている。鋼繊維の体積混入率は2.3%とした。試験時の高強度繊維補強モルタルの圧縮強度は72.9N/mm²であった。図-11に載荷概要を示す。載荷装置は試験体を囲む鋼製フレームと載荷側のセンターホールジャッキで構成し、計測器として、載荷側のロードセル、固定側のロードセル、試験体上部のロードセルを設置した。図-12に載荷方法を示す。各シリーズで3つの載荷方法で試験を実施した。いずれの載荷方法も規格引張強度まで載荷後に除荷した。載荷方法2は道路橋示方書に示される鉄筋の許容応力度を上回る200N/mm²の繰返し載荷を実施し、載荷方法3は鉄筋の規格降伏応力度の95%の応力度で繰返し載荷を実施した。また、計測項目は載荷側、固定側のプレート定着型鉄筋の引抜荷重、試験体上部に生じる上部拘束荷重、載荷側プレート定着型鉄筋におけるプレート部引抜変位およびプレート下面ひずみとした。なお、プレート下面ひずみの計測位置は、引抜試験で最大の圧縮ひずみが計測された位置とし(鉄筋接合部の反対面位置)、試験体長手方向における2点の計測を行った。

b) 試験結果

表-7に各ケースの試験結果を示す。図-13に各ケースの鉄筋応力-プレート引抜変位関係を示す。A-1, A-3, B-2は鉄筋応力度が規格引張強度に達する以前にコーン状の破壊を呈して破壊した。A-1, B-2, C-1, D-1の試験後状況を写真-4に示す。A-1の破壊面を確認すると、載荷側プレートと固定側プレートのプレート縁を結んだ界面でコーン状破壊が生じていた。未破壊のケースではいずれも載荷側プレート定着型鉄筋のプレート部形状に沿ったひび割れおよび載荷側プレート定着型鉄筋根本に付着割裂ひび割れが確認された。なお、プレート引抜変位において、載荷方法の違いによる大きな差は確認されなかった。Dシリーズは他シリーズに比べてプレート変位が小さいことがわかった。Cシリーズは引抜変位がDシリーズに比べて大きいものの、Dシリーズ同様に規格引張強度まで破壊することはなかった。プレート長辺の長さが長いC, Dシリーズはプレート長辺の長さが短いA, Bシリーズに比べて、間詰材の破壊が防止されたと考えられる。図-14に載荷方法3の鉄筋応力-プレートひずみ関係を示す。なお、ひずみは最大ひずみを計測した箇所の値を用いている。Aシリーズにおいては、破壊

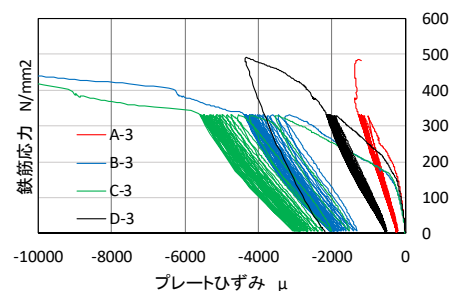


図-14 鉄筋応力-プレートひずみ関係

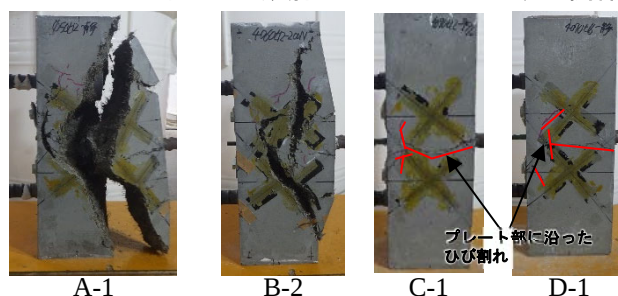


写真-4 試験後状況(定着性能試験)

表-7 試験結果(定着性能試験)

試験ケース		終局状態	破壊時鉄筋 応力度 (N/mm ²)	最大プレート 引抜変位 (mm)	載荷 方法
A シリーズ	A-1	コーン状破壊	460	2.30	1
	A-2	破壊せず	-	0.81	2
	A-3	コーン状破壊	486	1.01	3
B シリーズ	B-1	破壊せず	-	0.70	1
	B-2	コーン状破壊	482	0.70	2
	B-3	破壊せず	-	0.78	3
C シリーズ	C-1	破壊せず	-	0.81	1
	C-2	破壊せず	-	0.81	2
	C-3	破壊せず	-	0.79	3
D シリーズ	D-1	破壊せず	-	0.48	1
	D-2	破壊せず	-	0.46	2
	D-3	破壊せず	-	0.51	3

したケースはいずれも最大ひずみが 2000μ 以内であり、プレートの変形が小さい段階で間詰材が破壊に至った。B, Cシリーズは、いずれの载荷方法においても、最大荷重時のひずみは 5000μ を超えており、プレートは完全に降伏していた。また、鉄筋応力が $100\sim 200\text{N/mm}^2$ 間で、B, CシリーズはA, Dシリーズに比べて、鉄筋応力に対するプレートひずみが顕著に大きくなりはじめている。図-13に示す鉄筋応力-引抜関係でも同様に $100\sim 200\text{N/mm}^2$ 間でB, Cシリーズは、A, Dシリーズに比べて、鉄筋応力に対する引抜変位が顕著に大きくなりはじめている。プレート部の変形により、プレート引抜変位が大きくなったものと考えられる。

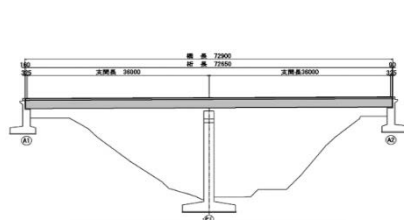


図-15 全体一般図

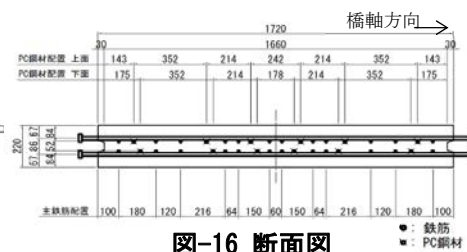


図-16 断面図

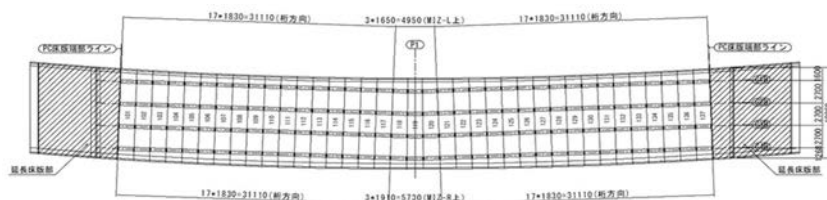


図-17 PCa 床版割付図



写真-5 PCa 床版の架設状況

5. 実橋梁への適用

4 章での検討結果を踏まえ、プレートの形状を $40\times 70\times 16\text{mm}$ として、輪荷重走行試験により供用期間 100 年相当の疲労耐久性を有することを確認した。その後、中国自動車道稗田橋(上り線)における床版取替えに本接合構造を適用した。稗田橋の全体一般図を図-15 に示す。構造形式は、鋼 2 径間非合成連続桁橋、橋長は 72.9m、支間長は、 $36.0 + 36.0\text{m}$ 、有効幅員は 9.5m、横断勾配は $5.5\sim 6.0\%$ (片勾配)である。図-16 に PCa 床版の断面図、図-17 に PCa 床版割付図、写真-5 に PCa 床版の架設状況を示す。当初は他の接合構造で計画がされており、楊重設備などの施工条件に合わせて、PCa 床版の重量を設定する必要があったため、床版幅は 1720mm とし、37 枚の床版を設置した。

6. まとめ

本検討より得られた結果を以下にまとめる。

(1)高強度型間詰材を用いた場合、本研究の範囲 ($100\sim 250\text{mm}$)では間詰幅によらず、荷重-たわみ関係と最大荷重はループ継手のそれを上回り、間詰部では破壊しないことがわかった。一方で、中強度型間詰材を用いた場合では、本研究の範囲では間詰幅を 150mm 以上にすれば、接合部では破壊せず、荷重-たわみ関係と最大荷重はループ継手のそれを上回ることがわかった。

(2)引抜試験を行った結果、プレート厚を12mmから16mmにすることで、プレート引抜変位を約30%、最大プレートひずみを約35%低減できることがわかった。また、定着性能試験を行った結果、長辺の長さが60mm以下では、鉄筋の規格引張強度に達する前にコーン状の破壊を示すケースがあるものの、長辺の長さが70mmではすべてのケースで鉄筋の規格引張強度に達して未破壊となることがわかった。また、引抜試験結果と同様に、プレート厚さが変形性能に大きく影響を及ぼし、プレート厚さを12mmから16mmとすることで、プレート引抜変位が約30~40%低減され、プレートひずみも大幅に低減された。

7. 参考文献

- 1) 土木研究センター:プレート定着型せん断補強筋「Head-bar」、建設技術審査証明報告書, 2012
- 2) NEXCO 三社 NEXCO 試験方法 第4編 構造関係試験方法 令和元年7月
- 3) NEXCO 三社 設計要領第二集 橋梁保全編 令和元年
- 4) 土木学会編:エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針[改訂版], コンクリートライブラリー112, 2003
- 5) 土木学会:鉄筋定着・継手指針「2020 年版」, コンクリートライブラリー156, 2020
- 6) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説(鋼橋編), 2012