

# 道路橋プレキャスト PC 床版の接合技術「アローヘッド®ジョイント」の開発

原 紘一郎 吉武 謙二 太田 智久 高島 英一 田中 博一 南 貴大 吉浦 伸明 尾田 健太郎  
(技術研究所) (技術研究所) (土木技術本部) (土木技術本部) (技術研究所) (技術研究所) (土木技術本部) (土木技術本部)

## Development of precast PC slab joints, “Arrowhead joint”

Koichiro Hara, Kenji Yoshitake, Tomohisa Ohta, Eiichi Takashima, Hirokazu Tanaka,  
Takahiro Minami, Nobuaki Yoshiura and Kentaro Oda

著者らは、道路橋の床版取替工事の施工合理化に向け、機械式定着鉄筋を用いたプレキャスト PC 床版の接合技術、「アローヘッドジョイント」を開発した。本研究では、接合部の耐荷性能評価のための静的曲げ試験や、疲労耐久性評価のための輪荷重走行試験を行い、輪荷重走行試験では、開発した床版接合部が耐用年数 100 年相当以上の疲労耐久性を有することを確認した。本報告では、接合部の仕様決定に至るまでのこれまでの取り組みについて報告する。

The authors have developed “Arrowhead joint,” a joining technology for precast PC slabs using mechanical anchoring bars, to rationalize the construction of aging bridge slab replacements. In this study, static bending tests to evaluate the load carrying capacity of the joint and a wheel load running test to evaluate fatigue durability were conducted. In the wheel load running test, it was confirmed that the developed slab joint had fatigue durability equivalent to a service life of 100 years or more. This report describes our research results to date in determining the specifications of the joints.

### 1. はじめに

高度経済成長期以降に集中的に整備された社会基盤施設の老朽化が深刻な社会問題となっている。橋梁分野に目を向けると、建設後 50 年以上経過する道路橋の割合は、2030 年 3 月には約 54 %、2040 年 3 月には約 75 %に上るとの報告がある<sup>1)</sup>。橋梁構造物中では、RC 床版部の老朽化が著しく、大型車両交通の増加による疲労損傷や、寒冷地での凍結防止剤の散布がその要因であると考えられている。上記の背景の下、現在、NEXCO3 社は「高速道路リニューアルプロジェクト(大規模更新・修繕事業)」と銘打って、床版の老朽化が進展した道路橋床版の大規模更新工事を全国各地で展開している<sup>2)</sup>。

道路橋床版の更新工事では、工期短縮による施工の省力化、周辺交通への負担軽減、床版の長寿命化のため、耐久性の高いプレキャスト PC 床版(以下、PCaPC 床版)が用いられる場合が多い。PCaPC 床版同士を接合する際、従来、「ループ継手」が多く採用されてきた。一方、ループ継手では、鉄筋径に依存するループ鉄筋の曲げ内半径により、

床版の最小厚が制限されることから、ループ鉄筋の鉄筋径が太径化した場合に、床版厚が増加し、死荷重増となる場合がある。さらに、床版を既設桁上に設置後、ループ継手内部に補強筋を床版の外から配筋する必要があることから、施工性にも課題が生じていた。従って、現在では、継手部の鉄筋端部に機械式定着体を接着して、定着部の支圧抵抗と鉄筋の付着によるあき重ね継手により床版同士を接合する手法<sup>3),4)</sup>や、間詰め部のコンクリートに高強度の繊維補強コンクリートを使用し、接合部幅を短縮することで合理化する手法<sup>5),6)</sup>等が提案されている。

本研究では、材料入手の容易さと高耐久を両立した接合部を開発することを目的に、高周波誘導加熱により拡径部を母材鉄筋から一体成形した床版継手用の機械式定着鉄筋と、間詰め部に繊維無しの高強度コンクリートを組み合わせた床版接合技術、「アローヘッドジョイント」を開発した。本論文では、開発した接合部の力学性能を確認するために実施した各種実験について報告する。なお、本論文は、既往の文献<sup>7),8)</sup>に掲載されたものを再構成し、加筆・修正を加えたものである。

## 2. アローヘッド鉄筋の製造方法と単体引張試験

写真-1に、本研究で開発した床版継手用のアローヘッド鉄筋を示す。本鉄筋は、弊社と第一高周波工業(株)が共同で開発した機械式定着鉄筋「Tヘッド工法」鉄筋の加工技術に応用し、高周波誘導加熱により母材鉄筋から、矢尻形状の拡径部を一体成形している。拡径部の外径は鉄筋径の1.5倍程度、長さは鉄筋径の2倍程度である。本研究で開発したアローヘッド鉄筋は、従来のTヘッド工法鉄筋では、拡径部の外径が大きく、床版厚を薄くできないことを踏まえ、床版継手向けに拡径部の寸法を改良している。

参考技術としているTヘッド工法鉄筋は、橋脚やフーチング、タンクの底版や側壁等のせん断補強筋や中間帯鉄筋として、数多くの現場適用実績がある機械式定着鉄筋であり、鉄筋の製造会社や節形状を選ばない加工が可能で、高サイクル疲労を受ける部材への適用も可能である<sup>9)</sup>。図-1に示す通り、アローヘッドジョイントは床版接合部において、母材鉄筋の節とコンクリート間に発生する付着力と、拡径部とコンクリート間に生じる支圧抵抗により外力に抵抗する機構を有する。図-2に、アローヘッド鉄筋の製造工程を示すため、参考技術であるTヘッド工法鉄筋の製造フローを示す<sup>10)</sup>。図中の①から④の詳細を下記に示す。

- ① 鉄筋端部に誘導加熱用コイルをセットする。
- ② 高周波誘導加熱により、鉄筋端部を加熱する。
- ③ 成形型を加熱した鉄筋端部に押し当てる。
- ④ 一体成形加工が完了。

アローヘッド鉄筋は、従来のTヘッド工法鉄筋と同様の加工プロセスにより製造することができる。

本研究では、一体成形したアローヘッド鉄筋の拡径部断面変化部が弱点とならないことを確認するため、鉄筋単体の引張試験を行った。本試験では、供試体の拡径部をアムスラーに固定した治具に噛み合わせ、母材部はアムスラーのチャックに固定することで引張試験を実施している。供試体は400mmとし、母材端部から150mmの位置にて、チャックで固定した。使用した鉄筋は、D19 SD345である。

表-1に単体引張試験の結果を示す。また、写真-2に引張試験終了後の鉄筋の破断状況を示す。本試験より、開発した鉄筋は母材鉄筋側で破断することが明らかとなり、本研究で開発したアローヘッド鉄筋は、母材と同等以上の強度を有し、拡径部と母材鉄筋の断面変化部が弱点にならないことが確認された。



写真-1 アローヘッド鉄筋

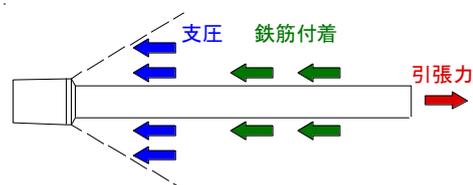


図-1 アローヘッドジョイントの耐荷メカニズム

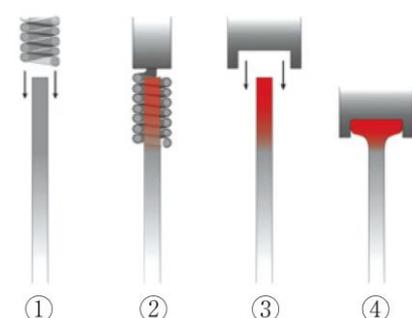


図-2 Tヘッド工法鉄筋の製造フロー<sup>10)</sup>

表-1 引張試験結果

呼び名	鋼種	No.	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
D19	SD345	1	373	571
		2	375	581
		3	373	579

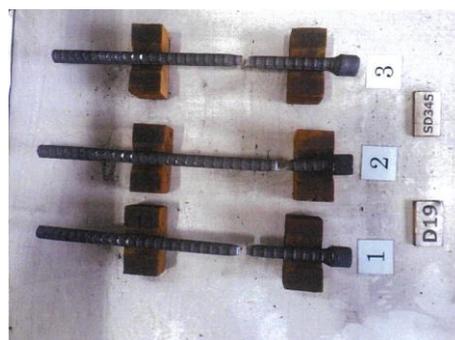


写真-2 試験体の破断状況

## 3. 静的曲げ試験

### 3.1 試験概要

本研究では、開発したアローヘッドジョイントに曲げモーメントが生じた際の耐荷性能を評価するため、床版接合部を対象とした静的曲げ試験を行った。

本試験では、性能比較用の接合部の無い「一体打ち試験体」と、継手長さ 15D(D：鉄筋径)の接合部を有する「接合部有り」試験体の合計 2 体の試験体を用いて試験を行った。図-3 に、試験体の形状・寸法を示す。試験体の配筋及び鉄筋量は、実際の PCaPC 床版と同等とするため、橋軸方向鉄筋の配置間隔は 150 mm とし(接合部内は重ね継手となり、75 mm)、橋軸直角方向鉄筋の配置間隔は 125 mm とした。試験体厚さは実際の PCaPC 床版と同様に 220 mm とした。試験体の橋軸方向鉄筋には、竹節の D19 SD345 を使用し、橋軸直角方向鉄筋にはネジ節の D13 SD345、継手部の補強筋にはネジ節の D19 SD345 を使用した。橋軸直角方向の鉄筋にネジ節鉄筋を採用した理由は、実際の PCaPC 床版は供用時に橋軸直角方向(試験体では、側面方向)に連続的に存在することから、その拘束力を模擬するために、試験体両側面において橋軸直角方向鉄筋にロックナットを接続し、側面方向の変形を拘束したためである。本試験では、実施工する PCaPC 床版では、接合部に干渉する鉄筋をエポキシ樹脂塗装鉄筋とすることから、試験体の軸方向鉄筋の拡径部先端から 500 mm の範囲及び、継手部の補強筋をエポキシ塗装した。

コンクリートには、実際の PCaPC 床版を設計基準強度 50 N/mm<sup>2</sup> で設計することを踏まえ、安全側での評価となるように、試験日材齢での実強度を 50 N/mm<sup>2</sup> 程度とすることを目的に、PCa 部、間詰め部共に、呼び強度 36 の早強コンクリートを使用した。本試験では、試験日材齢で圧縮強度試験を行った。その結果、それぞれの圧縮強度は、一体打ち試験体で、52.1 N/mm<sup>2</sup>、接合部有りの PCa 部で 52.6 N/mm<sup>2</sup>、間詰め部で 51.4 N/mm<sup>2</sup> であった。静弾性係数は、一体打ち試験体で、38.6 kN/mm<sup>2</sup>、接合部有り試験体の PCa 部で 39.2 kN/mm<sup>2</sup>、間詰め部で 38.5 kN/mm<sup>2</sup> であった。

荷重は容量 1MN のジャッキを 2 基使用した 4 点曲げによる荷重とし、荷重スパンは 600 mm、せん断スパンを 800 mm とした。荷重点・支点には、テフロンシートを用いたピンローラー支承を使用し、水平方向の移動と回転を拘束しない条件とした。荷重点と支点には、試験体との間に幅 100 mm の鉄板を挿入し、設置面に荷重が均一に作用するよう、鉄板と試験体の間は石膏による間詰めを行った。計測項目は荷重、試験体変位(スパン中央、荷重点直下、せん断スパン中央)、鉄筋ひずみとした。本試験における変位の計測は、荷重に伴う試験体の支点部での

沈み込みの影響を排除するため、部材側面に接続したチャンネル材に変位計を設置し、計測を行った。

### 3.2 試験結果

図-4 に荷重-変位関係を示す。グラフ横軸の変位は、スパン中央で計測した試験体の鉛直変位であり、

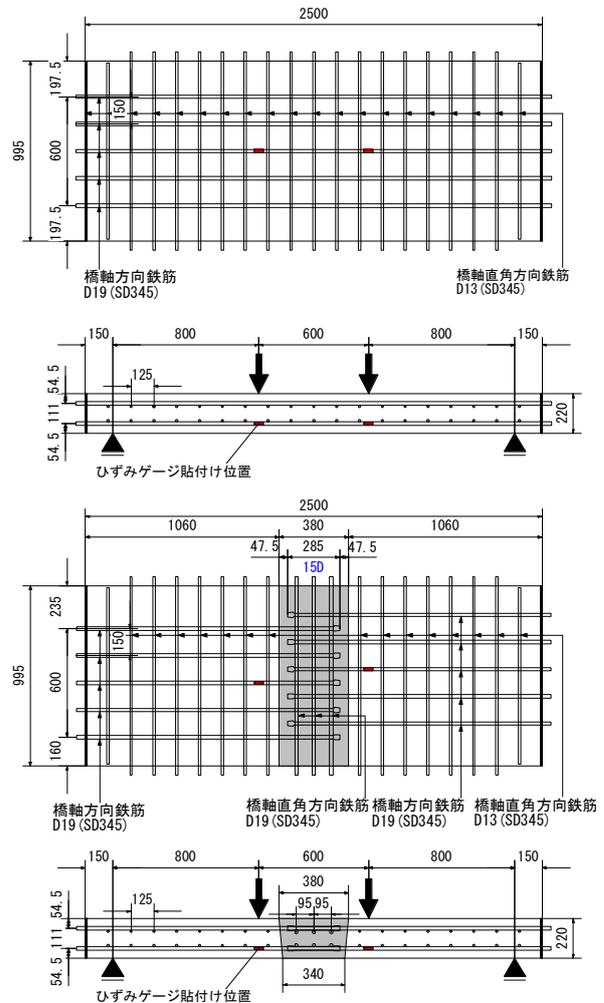


図-3 試験体寸法・配筋仕様

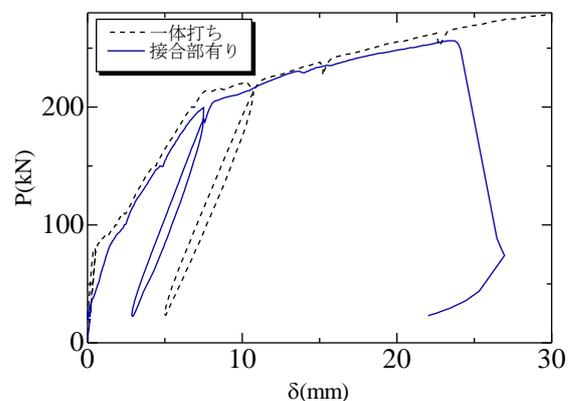


図-4 荷重-変位関係

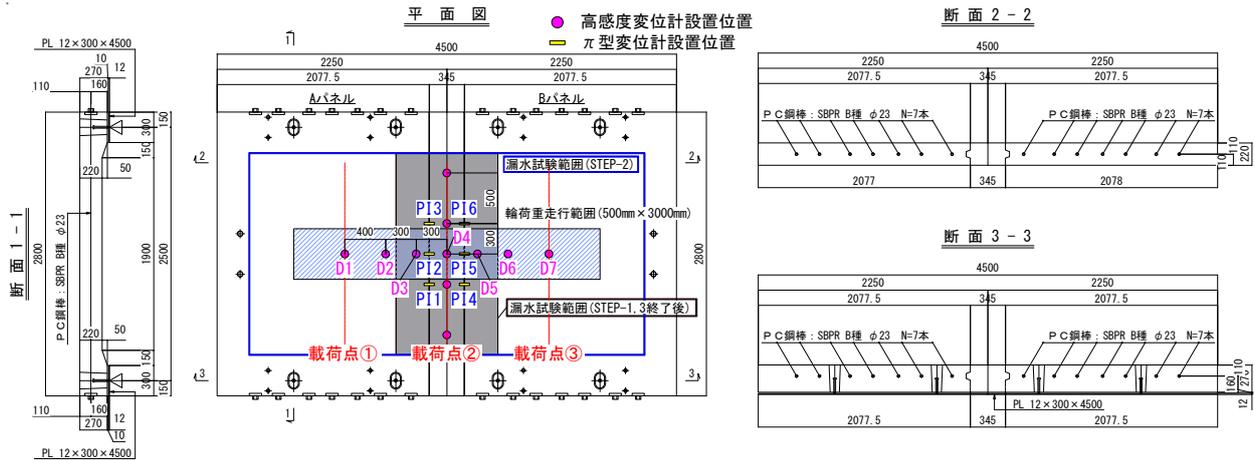


図-5 輪荷重走行試験の試験体詳細

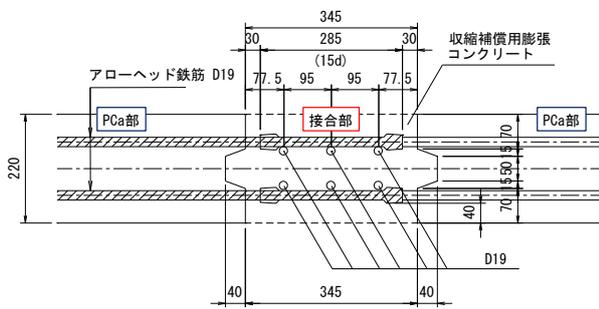


図-6 接合部詳細図

縦軸の荷重は2基のジャッキの合計荷重である。一体打ち試験体は、部材降伏後に荷重点近傍の圧縮縁コンクリートの圧壊によって終局を迎えた。アローヘッドジョイントによる接合部を有する試験体は、曲げひび割れ発生から部材の降伏まで、一体打ち試験体と同等の剛性を示した。また、接合部付近で卓越したひび割れにより荷重低下が発生したものの、一体打ち試験体と同等の剛性で部材降伏後も耐荷性能を保持し、設計に対して十分な変形性能を有することを確認した。

## 4. 輪荷重走行試験

### 4.1 試験概要

本研究では、アローヘッドジョイントの疲労耐久性を確認するため、実物大のPCaPC床版試験体を製作し、輪荷重走行試験に供した。本試験では、全断面施工による床版取替工事を想定し、橋軸方向の接合部(横目地)を対象とした。詳細を以下で述べる。

図-5に試験体の図面、図-6に接合部の詳細図を示す。試験体の寸法、鉄筋やPC鋼材の配置はNEXCO試験法442<sup>1)</sup>に準拠して決定した。試験体の全長は4500mm、幅は2800mm、床版厚は220

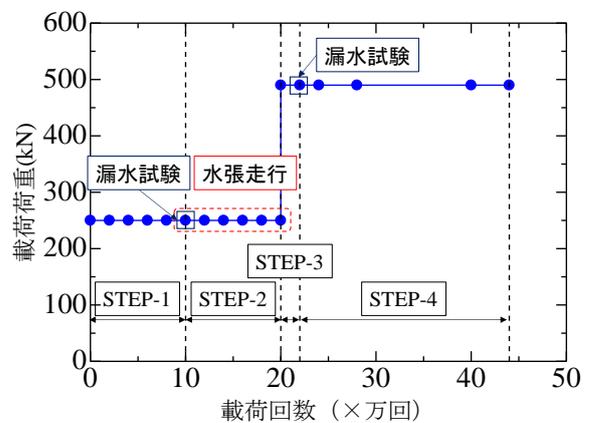


図-7 載荷ステップ

mmである。床版橋軸直角方向はPC構造とし、φ23のPC鋼棒(SBPR B種)を、パネル1枚当たり7本用いて、312 kN/本の緊張力をポストテンションにて与えた。また、橋軸方向はRC構造とし、接合部はアローヘッドジョイントを採用している。継手長さは15D(Dは鉄筋径である)とした。PCa部のコンクリートには設計基準強度50 N/mm<sup>2</sup>の早強コンクリートを使用し、接合部及びスタッドジベル孔には、膨張材を添加した収縮補償用膨張コンクリートを使用した。両コンクリートは、粗骨材最大寸法20mm、スランプ12cmとした。また、図-6に示す通り、接合部とPCa部の界面にはせん断キーを設けて試験体を製作している。

図-7に、本試験における載荷ステップを示す。本試験では、STEP-1がNEXCO試験法の試験項目に該当し、供用期間100年相当を想定した繰り返し載荷として、載荷荷重250 kN×10万回の載荷の後、接合部付近のひび割れ貫通の有無を確認するための漏水試験を行った。STEP-2以降は、床版の破壊状況を確認するための促進疲労載荷とし、STEP-2で

は、載荷荷重を 250 kN として水張走行、STEP-3,4 では、載荷荷重を試験機の最大荷重である 490kN とし、STEP-3 終了時には同じく漏水試験を行った。STEP-1,3 終了時の漏水試験では、**図-5** 中の灰色枠の範囲に、水深 5 mm 程度の水を張り、6 時間の放置後に、試験体下面における漏水の有無を確認した。STEP-2 の水張走行では、**図-5** 中の青色枠の範囲を同じく水深 5 mm 程度の水で満たし、輪荷重走行試験を行った。試験体は、床版支間 2500 mm で単純支持し、橋軸方向は、試験体が無限に長いとみなせる長さの床版と比較して同様のたわみとなるような剛性を持つ H 型鋼材を横梁として単純支持した。また、試験体は浮き上がり防止のため、回転拘束を与えないように支持桁に固定した。本試験では、(株)G&U 技術研究センターが保有する輪荷重走行試験機を使用した。**表-2** に試験機の仕様を示す。載荷時、床版試験体上には 500 mm×200 mm の載荷ブロックを 1 列に並べ、500 mm 幅の鉄輪を 3000 mm の範囲で往復させることで輪荷重載荷を行った。**写真-3** に試験の実施状況を示す。また、**表-3** に、

表-2 試験機の仕様

項目		仕様
形状 寸法	試験機フレーム	高さ約 6.5 m 長さ約 10.1 m
	フライ ホイール	半径 2.3 m
	車輪の種類	鉄輪
駆動	走行範囲	3.0 m or 4.6 m
	フライホイール 回転数	最大 15 rpm
	移動式載荷荷重	120 kN~490 kN
載荷	シリンダー ストローク	295 mm



写真-3 輪荷重走行試験の実施状況

材料試験の結果を示す。材料試験は、STEP-1 の開始時と漏水試験時、STEP-4 終了時に実施した。各試験時において、50 N/mm<sup>2</sup> 以上の圧縮強度を確認している。

本試験での計測項目は、荷重、試験体のたわみ、PCa 部と接合部界面の付着切れ幅とした。また、目視により試験体底面、側面のひび割れ性状の確認を行った。変位計やπ型変位計の設置位置は、**図-5** 中に示した通りである。本試験では、所定の繰返し数到達後に、**図-5** 示す載荷点①~③の位置に静的載荷し、計測を行った。計測の頻度は、STEP-1,2 では、各載荷ステップの繰返し 0 回目、2.5 万回目、5 万回目、7.5 万回目、10 万回目終了後とし、STEP-3 では、載荷の前後とした。STEP-4 では、載荷 2 万回目、6 万回目、18 万回目、22 万回目終了後とした。

## 4.2 試験結果

### 4.2.1 たわみの推移

**図-8** に橋軸方向のたわみ分布の推移、**図-9** に橋軸直角方向のたわみ分布の推移、**図-10** に橋軸方向に設置した D1~D7 の計測値の推移をそれぞれ示す。なお、**図** の凡例中の①~③の値は、それぞれ**図-5** に示した載荷点①~③に対応する。**図-8**、**9** よ

表-3 コンクリート材料試験結果

		STEP-1 開始時	漏水 試験時	STEP-4 終了時
PCa 部	$f'_c$	74.9	73.8	77.7
	$E$	44.6	44.4	44.3
接合部	$f'_c$	73.7	75.9	77.5
	$E$	42.4	43.1	44.7

※ $f'_c$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $E$  : 静弾性係数 (kN/mm<sup>2</sup>)

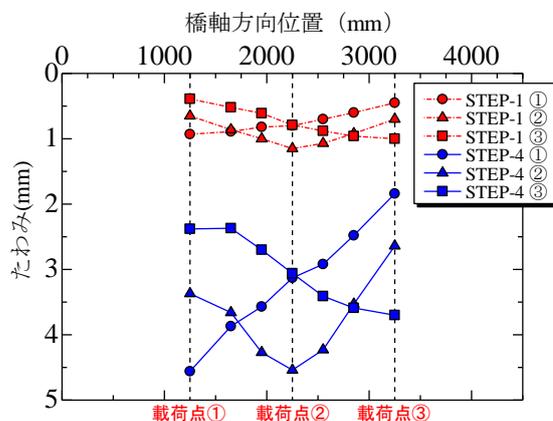


図-8 橋軸方向たわみ分布の推移

り、耐用年数 100 年相当を想定した STEP-1 終了時点において、アローヘッドジョイントを用いた床版接合部は、橋軸方向、橋軸直角方向共に、連続的にたわみが分布しており、促進疲労させた STEP-4 終了時点においても、一体性を保持していることが確認できる。また、図-10 より、D1~D7 で計測したたわみの推移に着目すると、STEP-1~STEP-4 までにたわみは漸増しているものの、載荷点直下の D4 においても、STEP-4 以降で概ね線形的に変形量は増加しており、試験終了時までには破壊は認められなかった。

#### 4.2.2 付着切れ幅の推移

図-11 に、載荷点②において静的載荷した際に  $\pi$  型変位計で計測した、床版接合部と PCa 部の付着切れ幅の推移を示す。耐用年数 100 年相当を想定した STEP-1 終了時点における付着切れ幅は、最大で 0.10 mm 程度であり、近接目視によるひび割れ調査時に補修が必要と判断される 0.20 mm 以上の付着切れは確認されず、接合部と PCa 部の高い一体性が認められた。また、STEP-4 終了時点においても、

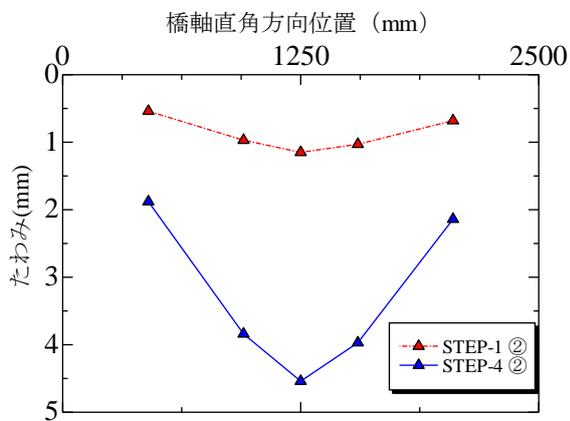


図-9 橋軸直角方向たわみ分布の推移

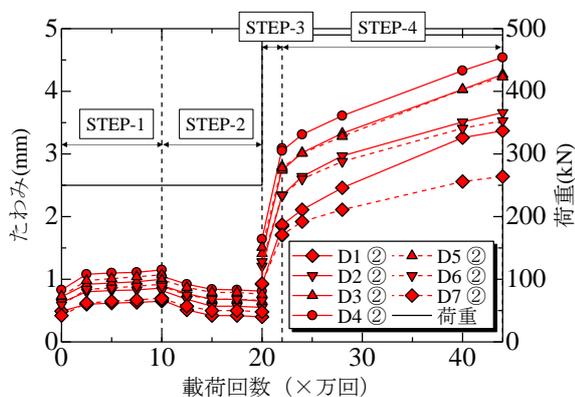


図-10 たわみの推移

接合部界面における破壊の局所化や、界面でのひび割れの貫通は発生せず、一体的に挙動したことが確認された。

#### 4.3 漏水試験結果・ひび割れ性状

写真-4 に STEP-1 終了後の漏水試験の実施状況を示す。本試験では、STEP-1 終了後の試験体底面において、漏水は確認されず、NEXCO 試験法 442 で規定された耐用年数 100 年相当の疲労耐久性評価を満足することが認められた。また、載荷荷重を 490kN とした STEP-3 終了後の漏水試験においても、底面での漏水は認められず、アローヘッドジョイントの高い疲労耐久性が確認された。

図-12 に STEP-1、STEP-4 終了時に、試験体底面で観測したひび割れ性状を示す。STEP-1 終了時点では、概ね橋軸直角方向にのみひび割れの発生が認められた。STEP-4 終了時点では、試験体全体にひび割れが分散し網細化が進展しているものの、押し抜きせん断破壊の兆候は確認されなかった。図-13 は、試験終了後に試験体を 4 か所で切断し、切断面で観測したひび割れ性状である。試験体の橋軸方向、橋軸直角方向それぞれの中央となる A-A'断面、D-D'断面では、試験体上縁までのひび割れの進展が

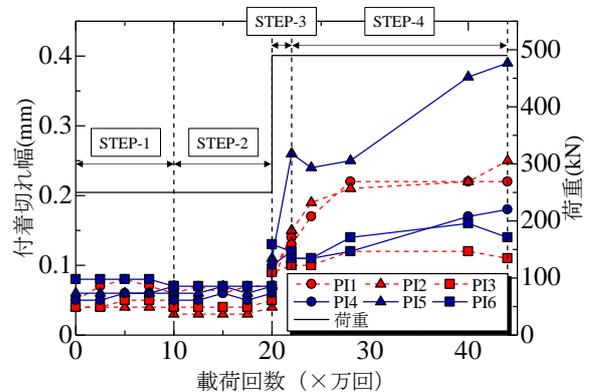


図-11 付着切れ幅の推移



写真-4 漏水試験実施状況 (STEP-1)

認められるが、貫通や局所化は生じていないことを確認した。

## 5. おわりに

本研究では、高周波誘導加熱により拡径部を母材鉄筋から一体成形したアローヘッド鉄筋と、間詰め部に繊維無しの高強度コンクリートを組み合わせた床版接合部、「アローヘッドジョイント」を開発し、その力学性能を検証するための各種実験を行った。以下に、本研究において得られた結果を示す。

- (1) 高周波誘導加熱により一体成形したアローヘッド鉄筋は、単体引張試験の結果、母材鉄筋と同等以上の引張強度を有し、拡径部と母材鉄筋の断面変化部が弱点とならないことが確認された。
- (2) アローヘッドジョイントによる床版接合部を対象とした静的曲げ試験により、本接合構造

は、一体打ち試験体と同様に、部材降伏後も耐荷性能を有することが確認された。

- (3) アローヘッドジョイントによる PCaPC 床版接合部は、耐用年数 100 年相当を想定して実施した輪荷重走行試験において、試験体底面からの漏水は確認されず、高い疲労耐久性を有することが認められた。
- (4) アローヘッドジョイントを用いた PCaPC 床版接合部は、想定耐用年数 100 年を上回る促進疲労を目的とした載荷 STEP 終了後も、漏水や押し抜きせん断破壊は発生せず、高い疲労耐久性と一体性を有することが確認された。

## 謝辞

本試験では、各種性能確認試験の実施に際して、鉄筋の加工及び試験体の製作において、第一高周波工業株式会社、株式会社エスシー・プレコンに多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

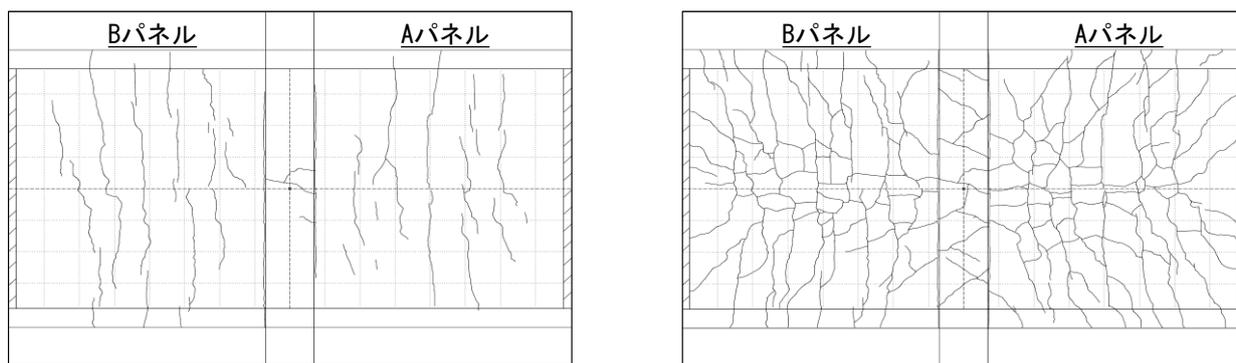


図-12 底面のひび割れ性状 (左 : STEP-1 終了時、右 : STEP-4 終了時)

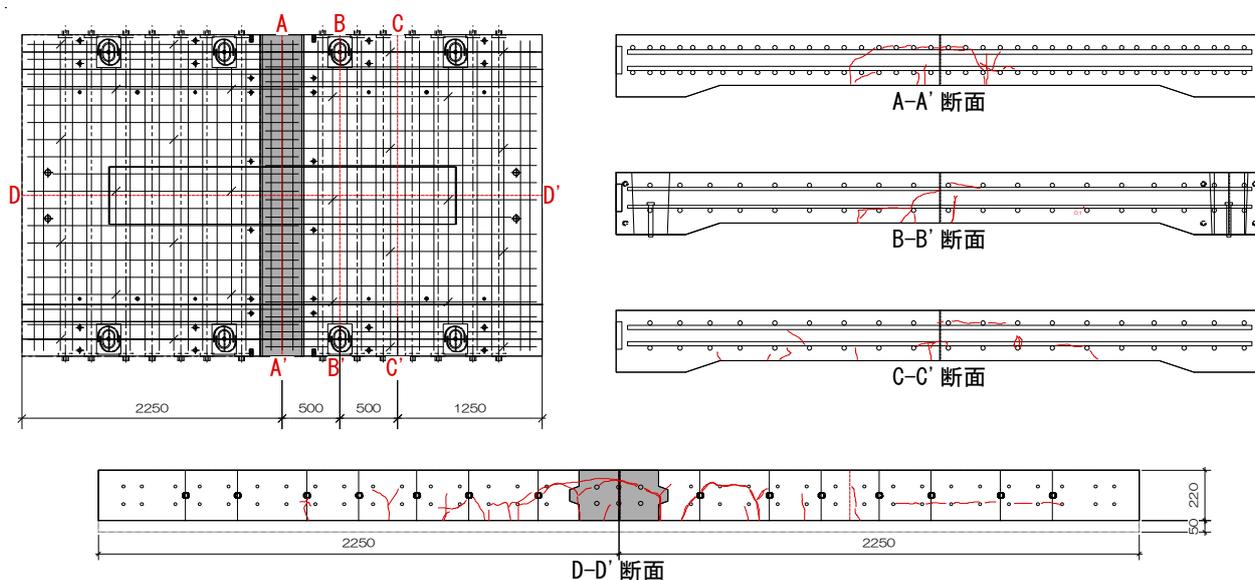


図-13 試験終了後の試験体切断面におけるひび割れ性状

<参考文献>

- 1) 国土交通省：令和6年版国土交通白書，p.140，2024
- 2) NEXCO 東日本オフィシャルサイト内参照：  
<https://www.e-nexco.co.jp/renewal/>（閲覧日：2024年11月1日）
- 3) 阿部浩幸，原健梧，澤田浩昭，中村雅之：プレキャストPC床版の新しいRC接合構造に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.493-498，2007
- 4) 表真也，吉松秀和，中山良直，松井繁之，林川俊郎：床版取替え用プレキャスト床版の合理化継手の開発，構造工学論文集，Vol.60A，pp.1169-1177，2014.3
- 5) 佐々木一成，岩城孝之，富永高行，野村敏雄：超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレキャスト床版接合構造に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.2，pp.583-588，2018
- 6) 竹山忠臣，野並優二，篠崎裕生，松田拓：超低収縮高強度FRCCを用いたプレキャスト床版継手構造，第76回土木学会年次学術講演会講演概要集，2021
- 7) 原紘一郎，吉武謙二，太田智久，高島英一：高周波誘導加熱で一体成形した拡径部を有するPCa床版継手の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.2，pp.511-516，2024
- 8) 原紘一郎，吉武謙二，太田智久，高島英一，田中博一，尾田健太郎，南貴大，吉浦伸明，小野秀平：機械式定着鉄筋を用いた接合部を有するプレキャストPC床版の輪荷重走行試験，第79回土木学会年次学術講演会講演概要集，2024
- 9) （一財）土木研究センター：建設技術審査証明報告書 拡径部による機械式定着鉄筋「Tヘッド工法鉄筋」内容変更・更新令和6年4月，2024
- 10) 石橋忠良：機械式定着鉄筋，コンクリート工学，Vol.54，No.5，pp.453-457，2016.5
- 11) 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，pp.91-94，2019.7