

頂版施工の合理化に資する複合 HPCa 部材と RC 壁との L 形接合構造の開発

Development of L-Shaped Joint Structure between Composite HPCa Member for Rationalization of Top Plate Construction and RC Wall

岩本 拓也 曾我部 直樹 平 陽兵

要 約

RC 躯体の頂版施工の生産性向上を目的として、支保工や配筋、型枠作業を省略できる鋼コンクリート複合ハーフプレキャスト（複合 HPCa）部材の開発を行っている。複合 HPCa 部材を頂版に適用する場合、この部材と RC 壁が交差する部分で両部材を接合する必要がある。これに対して、複合 HPCa 部材の架設作業を容易にする新たな接合構造を考案した。本研究では、RC 躯体の頂版と側壁が交差する L 形接合部に考案した接合構造を適用した供試体に対して正負交番載荷実験を行い、その構造性能について検証した。その結果、考案した接合構造において、壁と頂版との応力伝達部や部材接合部への損傷が抑制されることで、従来の RC 躯体の L 形接合部と同等の耐力および変形性能を有することを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. 複合 HPCa 頂版と RC 壁の L 形接合構造の概要
- III. 正負交番載荷実験による構造性能の検証
- IV. まとめ

I. はじめに

RC 躯体の頂版の支保工、配筋および型枠作業の省力化を目的とし、鋼コンクリート複合ハーフプレキャスト（複合 HPCa）部材の開発を進めている。本部材は、主鋼材やせん断補強筋などを溶接で組み立てた鋼材ユニットと、型枠を代替する PCa 版から構成される HPCa 部材である。既往の検討では、本部材がコンクリート打込み時の支保工を省略し得る高い剛性を確保できることや、コンクリートが硬化した後は、鋼コンクリート複合部材（SRC 部材）として通常の RC 部材と同程度の構造性能を有することを確認している¹⁾。

複合 HPCa 部材を頂版に適用する場合、RC 壁と交差する部分で SRC 部材と RC 部材を接合する必要がある (Fig.1)。部材接合部は、一般に剛域と仮定し破壊は生じないものとして設計される部位であるため、接合部の破壊が頂版や壁よりも先行しないような構造性能が要求される²⁾。また、こうした性能を実現するため、接合部内に配置される鋼材量が多くなることから、施工性への配慮も求められる。

以上のことから、複合 HPCa 部材を RC 躯体の頂版に適用

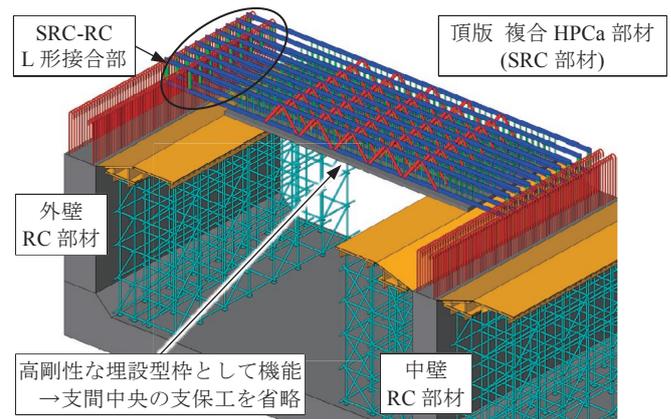


Fig.1 複合 HPCa 部材の適用イメージ
(Application Image of Composite HPCa Member)

するためには、現場での施工性に配慮し、かつ上記性能を満たすような新たな接合構造が求められていた。そこで本研究では、RC 躯体の頂版と側壁との L 形接合部を対象として複合 HPCa 頂版と RC 壁との接合構造を考案し、同接合構造を適用した L 形接合部を模擬した供試体に対する正負交番載荷実験によって、その構造性能を検証した。

II. 複合 HPCa 頂版と RC 壁の L 形接合構造の概要

1. 接合構造を検討する上での課題

Fig.1 に示すように、複合 HPCa 部材は壁付近に設けた支保工上に架設した後に、頂版と壁の接合部の施工を行うことで

キーワード : SRC 構造, L 形接合部, ヒンジリロケーション, 生産性向上, ボックスカルバート

Keywords : SRC structure, L-shaped joint, hinge relocation, productivity improvement, box culvert

設置が完了する。この際、壁の主鉄筋は組上がった状態を想定しており、Fig.2に示すように、曲げ加工された鉄筋が壁から頂版に至る外側主鉄筋として配筋されていると、複合 HPCa 部材の架設時に主鋼材と干渉する懸念がある。そのため、施工性の観点からは、壁主鉄筋の定着部は半円形フックのようなコンパクトな構造とすることが望ましい。しかし、接合部内にこうした定着部を設けると、接合部が閉じる方向に曲げモーメントを受けた際、定着部周辺を適切に補強しなければ同箇所を起点とした損傷が生じる可能性がある。また、頂版主鋼材も接合部内に定着させる必要があるが、鋼材の付着力は異形鉄筋よりも小さいため、一般的には支圧板等を設けて機械的に定着させることが多い。しかし、壁主鉄筋と同様に支圧板を起点とした損傷が接合部内に生じる懸念があるため、局所的に大きな定着力が作用するような定着機構は避けることが望ましい。さらに、現場での施工性を考慮すると、接合部における配筋作業は極力低減することが望ましく、複合 HPCa 部材を架設するだけで、現場作業の大部分が完了するような接合構造が求められていた。

2. 考案した接合構造の概要

(1) 接合部内に応力伝達箇所を設けた接合構造 A

前述の課題に対し、Fig.3に示す接合構造 A を考案した。壁主鉄筋には半円形フックを有する異形鉄筋、頂版主鋼材にはフラットバー (FB) を使用し、主鋼材の表面には凹凸を設けることで主鋼材の付着力を高め、接合部内に局所的な定着力を作用させることなく定着できるようにする。接合部内の壁主鉄筋の間に、頂版の上下主鋼材を繋ぐように設置した孔あき鋼板 (PBL) を配置することで、あき重ね継手と同様な原理でコンクリートと PBL を介して壁主鉄筋と頂版主鋼材の応力を伝達させる。さらに、壁主鉄筋の半円形フックの内部と PBL の孔に貫通鉄筋を配置することで、半円形フックの内部における支圧破壊を抑制する。これにより、先行して組立てた壁主鉄筋の間に主鋼材が位置するように複合 HPCa 部材を吊り降ろすだけで、部材接合部内において頂版主鋼材と壁主鉄筋の応力を伝達できる構造が成立すると考えた。なお、接合部補強筋の仕様は従来と同様とし、複合 HPCa 部材を架設後に場所組みすることを想定している。また、鋼材の表面に設ける凹凸の諸元の設定には、菌田らが提案する突起付き鋼材の付着強度式³⁾を適用することとした。

(2) ヒンジリロケーションを用いた接合構造 B

接合構造 A では、頂版と壁との応力伝達箇所が部材接合部内にあるため、壁主鉄筋と頂版主鋼材が錯綜する接合部において接合部補強筋を場所組みする必要があるという施工上の課題が残されていた。そこで、より施工性に配慮した接合構造として、Fig.4に示す接合構造 B を考案した。接合構造 B は、壁主鉄筋の定着部を頂版の下面付近に設け、同箇所同様に頂版主鋼材と一体化した PBL を配置することで、部材接合

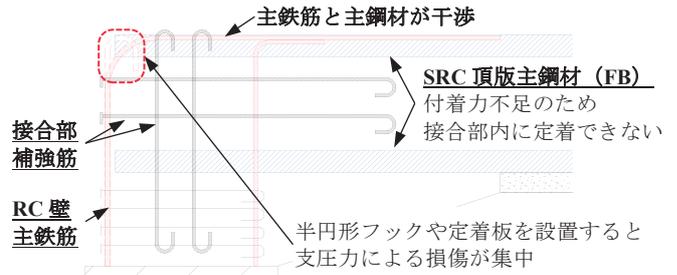


Fig.2 L形接合構造の課題 (Issues of L-shape Joint Structure)

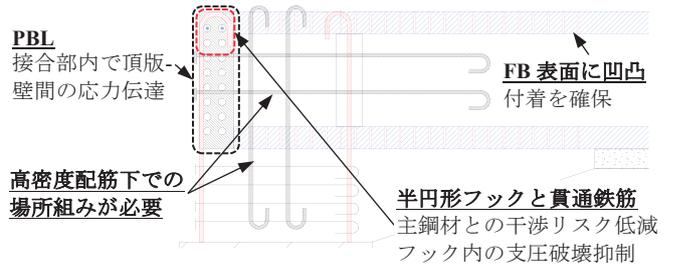


Fig.3 接合部内に応力伝達箇所を設けた接合構造 A (Joint Structure A that Transfers Stress within a Member Joint)

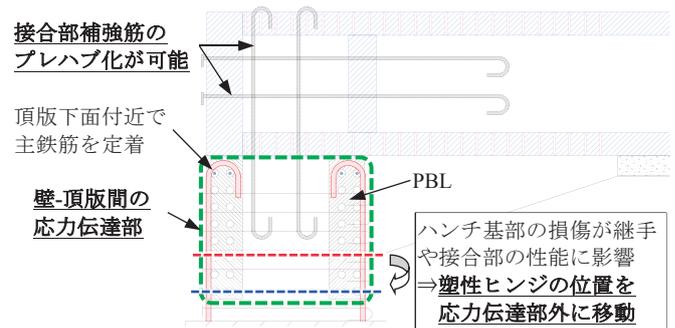


Fig.4 ヒンジリロケーションを用いた接合構造 B (Joint Structure B with Hinge Relocation Applied)

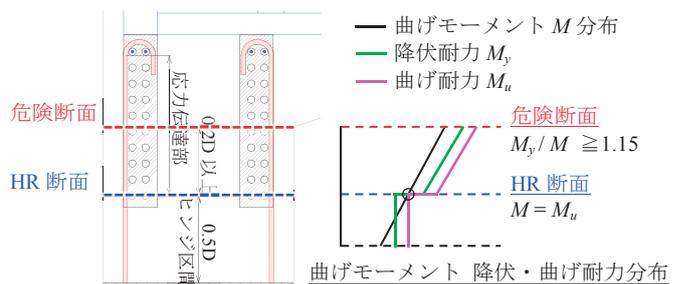


Fig.5 ヒンジリロケーション部の耐力バランスの考え方 (Load-Capacity Balance Concept for Hinge Relocation Section)

部から離れた位置に頂版と壁との応力伝達箇所を設けることを特長としている。これにより、接合部補強筋をあらかじめ複合 HPCa 部材に取り付けても壁主鉄筋に当該鉄筋が干渉しないことから、接合部補強筋のプレハブ化が可能となり、部材接合部における施工性が向上すると考えた。なお、壁主鉄筋や頂版主鋼材の定着構造や、壁主鉄筋と PBL のあき重

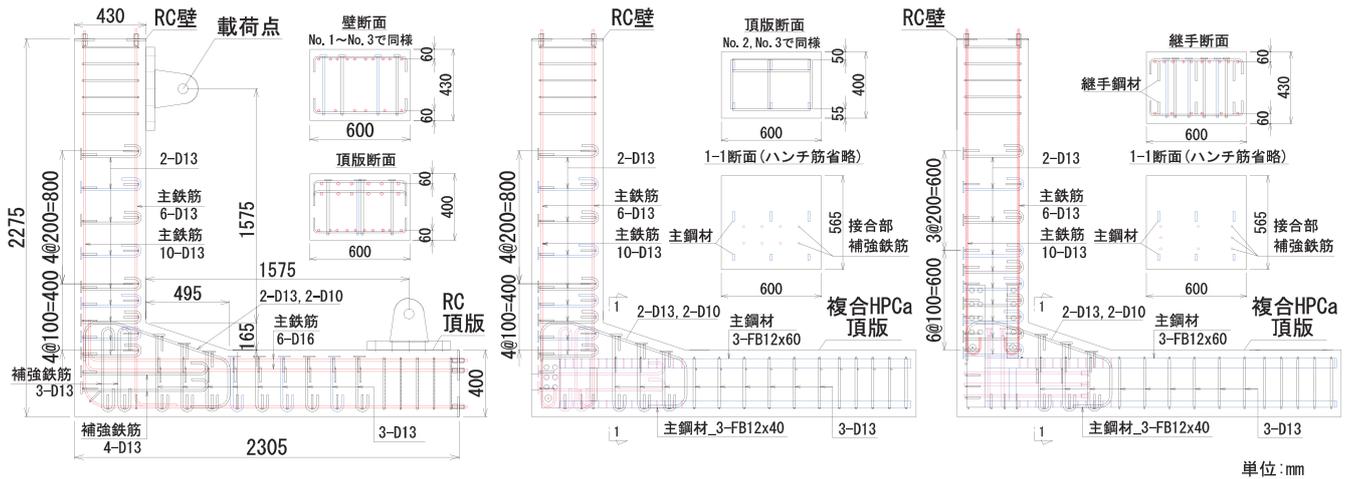


Fig.6 供試体概要 (左から No.1 (従来構造), No.2 (接合構造 A), No.3 (接合構造 B)) (Shape of Specimens (from left to right: No.1, No.2, No.3))

ね継手による応力伝達機構は接合構造 A と同様である。

一方、上記の応力伝達部は地震時に塑性化することが想定される領域に位置しており、地震による損傷が生じると応力伝達性能が損なわれる可能性がある。そこで、ヒンジロケーション⁴⁾の技術を応用し、地震時に塑性化する領域を応力伝達部外に移動させることで、地震によって損傷が生じた状態でも頂版主鋼材と壁主鉄筋の応力伝達性能を確保できると考えた。ヒンジロケーションとは、塑性領域の鋼材量を増やすことで、部材の降伏位置を移動させる技術⁴⁾である。ここでは、既往の研究^{4),5)}を参考に、ヒンジロケーションをさせる前の設計断面(危険断面)に対し、塑性ヒンジを形成させる断面(HR断面)を0.2D(D:断面高さ)程度離れた上で、危険断面における曲げ余裕度(危険断面の降伏耐力/HR断面が曲げ耐力に到達する時点で危険断面に作用する曲げモーメント)が1.15以上となるよう、PBLの諸元を設定した(Fig.5)。また、応力伝達部周辺の損傷を抑制するため、応力伝達部やHR断面から0.5D程度までのヒンジ区間には、壁一般部よりも多くの横拘束筋を配筋することとした。

Ⅲ. 正負交番載荷実験による構造性能の検証

1. 実験概要

考案した接合構造の構造性能を検証するため、RC 躯体の頂版と側壁のL形接合部を1/3スケールに縮小した供試体に対して正負交番載荷実験を行った。実験ケースは、従来の仕様⁶⁾に基づいて設計されたRC構造を想定した供試体 No.1 と考案した接合構造 A を想定した供試体 No.2, および接合構造 B を想定した供試体 No.3 の3 ケースである。

供試体概要を Fig.6, 7 に、材料試験結果の一覧を Table 1 に示す。供試体は1:3のハンチを有する実構造物をモデル化しており、実構造物と同様の鉄筋比や配筋形状となるよう、各鉄筋の諸元を設定した。いずれの供試体も正負の載荷に対して壁が先行して曲げ破壊する諸元となっている。

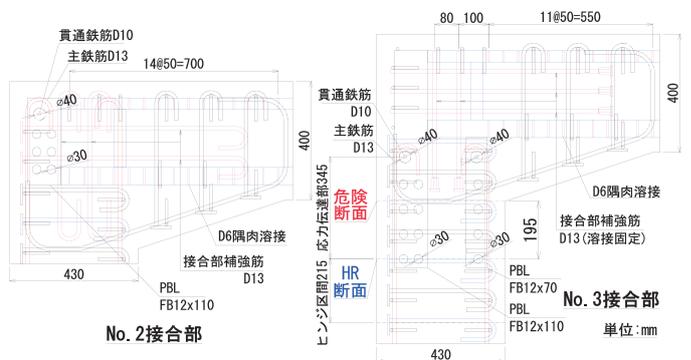


Fig.7 接合部の拡大図 (左: No.2, 右: No.3) (Magnified View of Joints (left: No.2, right: No.3))

Table 1 材料試験結果 (上: No.2, 下: No.3) (Strength of Materials)

材料	項目	試験結果(N/mm ²)		
		No.1	No.2	No.3
コンクリート	圧縮強度	33.3	36.1	35.6
	弾性係数	27,000	283,000	25,700
D13 SD345 壁主鉄筋	降伏強度	374		388
	弾性係数	192,000		197,900
FB SM490YB 頂版主鋼材, PBL	降伏強度	-	396	398
	弾性係数	-	208,000	211,800

No.2 と No.3 の頂版主鋼材および PBL にはフラットバーを使用し、断面幅方向に3列配置した。主鋼材の諸元は、頂版の曲げ耐力が No.1 と同様となるように設定し、接合部内の主鋼材の両面には D6 鉄筋を 50mm 間隔で隅肉溶接することで凹凸を設けた。凹凸の諸元は、部材外側の主鉄筋の付着力が同鋼材の規格降伏荷重以上となるように、菌田らの付着強度式³⁾により設定した。No.2 と No.3 の PBL の孔の諸元は、複合標準示方書⁷⁾から算出される PBL のせん断耐力の合計値が壁主鉄筋の降伏荷重以上となるように設定した。No.3 の PBL の板厚と幅は、危険断面(壁ハンチ基部)における前述の曲げ余裕度が1.15以上となるように設定した。なお、No.3 では PBL の壁側端部に設けた孔の位置を HR 断面とした。

No.2 と No.3 の壁主鉄筋には半円形フックを設け、半円形

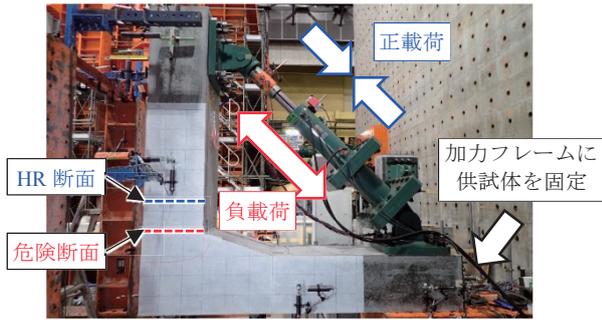


Photo 1 荷荷装置 (Loading Device)

フックと最上部の PBL の孔内には D10 の貫通鉄筋を配筋した。接合部補強筋は各供試体で同じ鉄筋量を配筋し、No.3 では鋼材に溶接して配置することで、同鉄筋を複合 HPCa 部材と一体化させてプレハブ化した状況を模した。

Photo 1 に荷荷装置を示す。供試体に油圧ジャッキを取り付け、頂版端部を加力フレームに固定した上で、接合部が閉じる方向を正荷荷、開く方向を負荷荷とした正負交番荷荷を実施した。No.1 と No.2 では危険断面、No.3 では HR 断面における壁主鉄筋降伏荷荷の計算値まで荷荷した時点の荷荷点水平変位を計測し、以降は同変位を基準とした同一振幅繰返し回数 3 回の振幅漸増型荷荷を行った。荷荷中は、荷荷と荷荷点変位、各種鋼材のひずみを計測した。

2. 実験結果

(1) 荷荷と荷荷点水平変位の関係と損傷過程

Fig.8 に各供試体の荷荷と荷荷点水平変位の関係を、Fig.9 には各供試体の損傷状態を示す。

No.1 と No.2 では、ほぼ同じ履歴特性と損傷過程を示した。±2δ_y に向かう途中で壁主鉄筋が降伏した後に、危険断面に曲げ変形と損傷が集中するようになり、+6δ_y の 2 回目荷荷時に危険断面付近の壁主鉄筋が座屈し、かぶりコンクリートの剥落とともに荷荷が低下した。No.3 では、±2δ_y に向かう途中で壁主鉄筋が降伏した後に、+4δ_y の 1 回目荷荷時に HR 断面付近で壁主鉄筋が座屈し、かぶりコンクリートの剥落とともに荷荷が低下した。

No.1 および No.2 と No.3 の履歴特性を比較すると、荷荷は No.1 および No.2 よりも No.3 の方が大きく、変形性能は同等であった。No.3 の荷荷が No.1 および No.2 よりも大きくなった要因は、No.3 では危険断面での鋼材量が両供試体よりも多く、また、塑性ヒンジの発生位置が荷荷点側に移動し、モーメントアーム長が小さくなったためである。

いずれの供試体も接合部の損傷は終局時でも軽微であり、複合 HPCa 部材である No.2, 3 の頂版部においても損傷やひび割れが集中するような様子は確認されなかった。No.3 の応力伝達部では、HR 断面付近の部材内側のコンクリートが圧壊したものの、同箇所以外の損傷は軽微であった。

以上より、接合構造 A による L 形接合部は、従来の RC 部

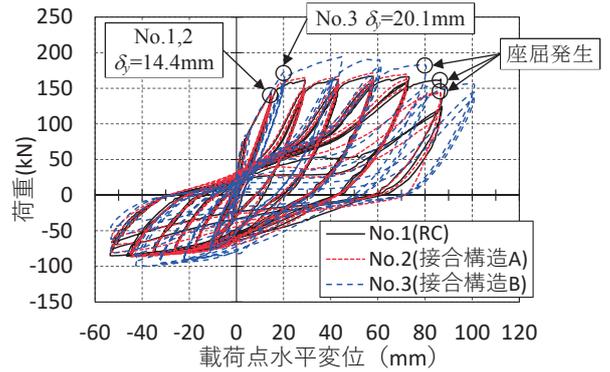
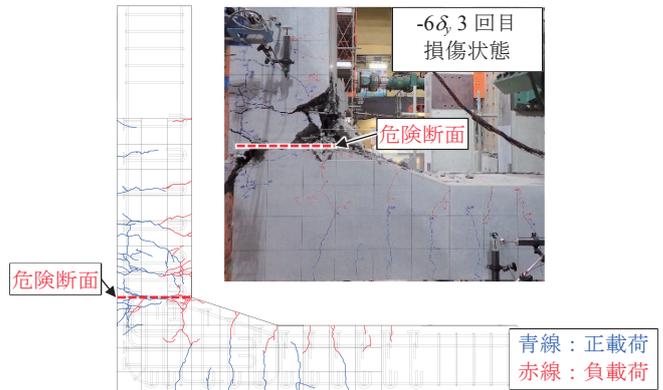
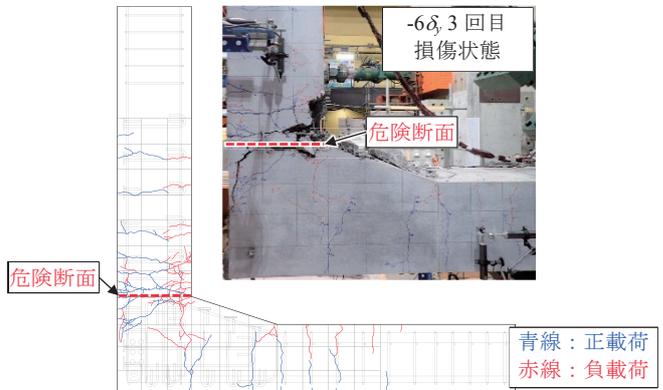


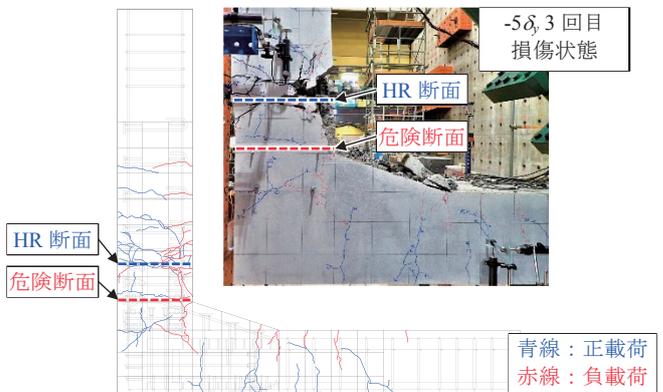
Fig.8 荷荷と荷荷点水平変位の関係 (Load-Displacement Curves)



(a) No.1(ひび割れ図は±5δ_y)



(b) No.2(ひび割れ図は±5δ_y)



(c) No.3(ひび割れ図は±4δ_y)

Fig.9 ひび割れ図と接合部の損傷状態 (Crack Diagrams and Damage to the Joints)

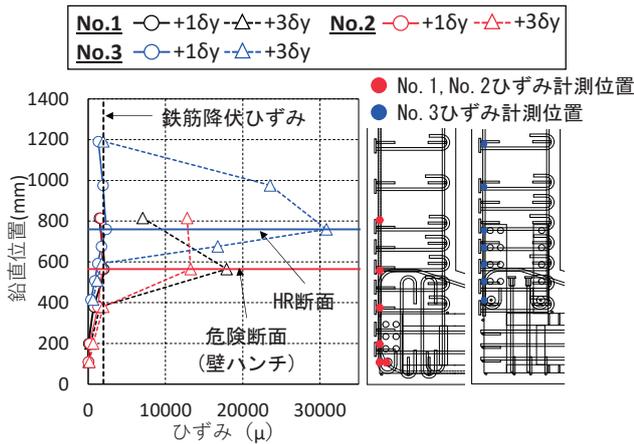


Fig.10 壁主鉄筋のひずみ分布
(Strain Distribution of Wall Rebars)

材同士の L 形接合部と同程度の耐力と変形性能を有することが確認された。また、接合構造 B による L 形接合部においても、塑性ヒンジを壁ハンチ基部から HR 断面付近に移動させることができ、これにより応力伝達部および部材接合部の損傷が抑制されることで、従来の L 形接合部と同程度の耐力と変形性能を有することが確認された。

(2) 壁主鉄筋のひずみ分布

Fig.10 に正側の各載荷ステップ時に計測した各供試体の壁の外側主鉄筋のひずみ分布を示す。図中のひずみ計測位置は、接合部端部からの距離で表しており、図中には危険断面と HR 断面の位置を示している。

No.1 と No.2 では、危険断面のひずみが最も大きく、同箇所周辺で主鉄筋の降伏ひずみを超える塑性領域が拡大した。No.3 では、HR 断面付近でのひずみが最も大きく、HR 断面よりも載荷点側に向かって塑性領域が拡大した。いずれの供試体においても、主鉄筋の定着部周辺のひずみが終局時まで大きく増加していないことから、同部分で主鉄筋が定着されていたと評価できる。

以上より、本供試体の諸元の範囲では、壁外側主鉄筋を接合部内において半円形フックで定着できることが確認できた。また、No.3 では、ヒンジリロケーションで想定したとおり、HR 断面付近に塑性ヒンジが形成され、応力伝達部の損傷を抑制できることが示された。

(3) 頂版主鉄筋、主鋼材のひずみ分布

Fig.11 に正側の各載荷ステップ時に計測した No.1 および No.2 の頂版の外側主鉄筋および主鋼材のひずみ分布を示す。No.2 の主鋼材のひずみ分布は、No.1 の外側鉄筋のそれと概ね同様であり、ハンチとの境界から接合部内部にかけてひずみが低下するような勾配が生じていることから、鋼材表面に設けた凹凸によるコンクリートとの付着が確保されていると考えられる。ここで、Fig.11 に示す 2 点の主鋼材のひずみから算出した No.2 の主鋼材の平均付着応力度と載荷点水平変位との関係を Fig.12 に示す。平均付着応力度は、2 点間の

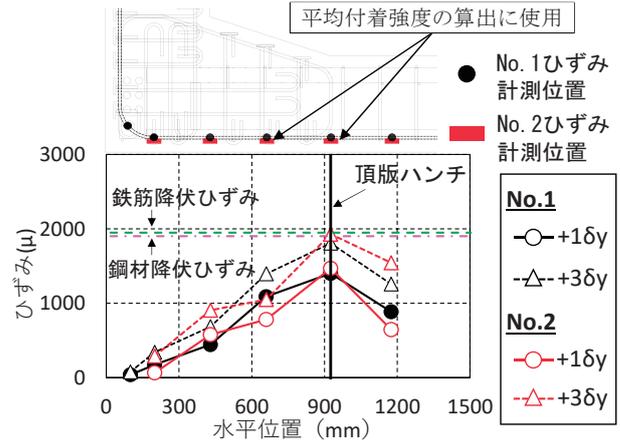


Fig.11 頂版主鉄筋と主鋼材のひずみ分布
(Strain Distribution of Top Plate Rebar and Steel)

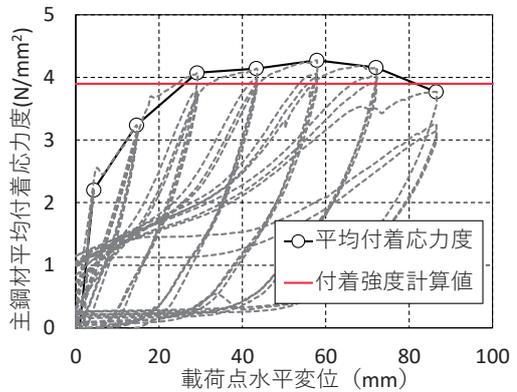


Fig.12 接合部内主鋼材の平均付着応力度と
載荷点水平変位の関係
(Average Bond Stress of Steel and Displacement Curve)

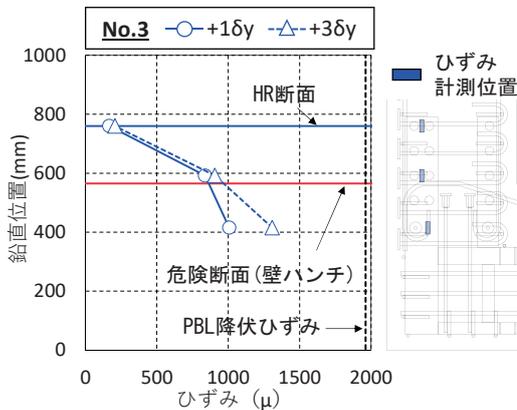


Fig.13 PBL のひずみ分布
(Strain Distribution of PBL)

ひずみ差と主鋼材の弾性係数および断面積を乗じて算出した引張力を 2 点間の有効付着面積で除することで算出した。なお、有効付着面積は凹凸を設けた主鋼材の両側面とした。発生した付着応力度は、菌田らの付着強度式により算出した付着強度 3.9N/mm^2 を上回っており、また、同一振幅による繰返し載荷を受けても付着応力度が安定していることが分かる。以上より、菌田らの付着強度式を用いることで、主鋼材の凹凸の諸元と定着長を設定できる可能性が示唆された。

(4) PBL のひずみ分布

Fig.13 に No.3 の応力伝達部である壁基部の外側に配置した PBL のひずみ分布を示す。同図から、応力伝達部の全域において頂版側に向かってひずみが大きくなっていることが分かる。応力伝達部における No.3 の壁外側の主鉄筋ひずみは、頂版側に向かって小さくなる傾向であったのに対し、PBL ではその反対の傾向を示していることから、壁主鉄筋と PBL との間で応力が伝達されていたと評価できる。なお、終局時まで PBL には降伏ひずみを超えるひずみは生じておらず、応力伝達性能が保持されていたことが確認できた。

IV. まとめ

本研究では、頂版と側壁を接続する L 形接合部を対象として、複合 HPCa 頂版の架設作業に配慮した 2 種類の接合構造を考案し、正負交番載荷実験により、その構造性能を検証した。得られた知見を以下に示す。

- a. 頂版と壁との応力伝達箇所を部材接合部内に設けた接合構造 A は、従来の RC 躯体における L 形接合部と同程度の耐力と変形性能を有し、部材接合部内の損傷も同程度に抑制できる。
- b. ヒンジロケーションを適用した接合構造 B では、接合部の補強筋の場所組み作業を省略できる可能性がある。また、同接合構造では、塑性ヒンジの発生箇所を制御することが可能であり、これにより応力伝達部や部材接合部の損傷が抑制されることで、従来の RC 躯体における L 形接合部と同程度の耐力と変形性能を実現できる。
- c. 接合部内における複合 HPCa 頂版の主鋼材の定着長と

必要となる凹凸の諸元を藺田らが提案した突起付き鋼板の付着強度式により設定することができる。

本研究では、ハンチを有する L 形接合部を対象として接合構造を提案したが、さらに接合部における施工性を向上させるためには、ハンチを簡略化、省略することが望ましい。今後、ハンチの形状や有無が考案した接合構造の構造性能に及ぼす影響について検討する予定である。

参考文献

- 1) 十川貴行ほか; 高剛性を有する複合プレハブ部材の曲げ特性に関する検討, コンクリート工学, Vol.42, No.2, 2020.7, pp.997-1002.
- 2) 土木学会; 2017 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 2017.3, pp.119-121.
- 3) 藺田恵一郎ほか; 突起付き鋼板のせん断伝達特性に関する系統的研究, 土木学会論文, No.598, I-44, 1998.7, pp.182-202.
- 4) 日向大樹ほか; 簡易な曲げ補強による RC ヒンジロケーション梁工法, 鹿島技術研究所年報, 第 66 号, 2018.2, pp.55-62.
- 5) 小寺直幸ほか; 梁端部を高強度鉄筋で補強したヒンジロケーション梁に関する実験的研究, コンクリート工学, Vol.41, No.2, 2019.7, pp.205-210.
- 6) 東日本高速道路関東支社; 東京外環自動車道(千葉県区間)掘割構造物 設計条件に関する統一事項, 2008.11.
- 7) 土木学会; 2014 年制定 複合構造標準示方書[原則編, 設計編], 2014.5, pp.74-78.

Development of L-Shaped Joint Structure between Composite HPCa Member for Rationalization of Top Plate Construction and RC Wall

Takuya Iwamoto, Naoki Sogabe and Yohei Taira

To improve the productivity of the construction of RC top slabs, we have been developing steel-concrete composite half precast (HPCa) members that can save on labor for shoring, reinforcement, and formwork. When composite HPCa members are applied to top slabs, the RC walls must be joined at the intersection of these members. Therefore, a novel joint structure was devised that takes into consideration the erection work of composite HPCa members. In this study, cyclic loading tests were conducted on L-shaped specimens with the proposed joint structure to verify the structural performance. As a result, it was confirmed that the proposed joint structures have the same level of loading capacity and deformation performance as the L-shaped joint in conventional RC structures because the damage to the stress transfer zone between the wall and the top slab and to the member joints is suppressed.