論文 SRC 頂版と RC 壁の L 形接合構造の基礎的検討

岩本 拓也*1・曽我部 直樹*2・十川 貴行*1・平 陽兵*3

要旨: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,型枠作業を省力可能な高剛性を有する 複合プレハブ部材の開発を行っている。その一環として,複合プレハブ部材を頂版として適用する際に壁と の接合部となる隅角部を対象として,施工性に配慮した新たなL形接合構造を考案した。本稿では,実構造 物のL形接合部を模擬した供試体に対して正負交番載荷実験を行い,考案した接合構造の構造性能を検証し た。その結果,考案した接合構造が,従来のRC構造の頂版と壁の接合部と同程度の耐力,剛性および変形性 能を有することを確認した。

キーワード:ボックスカルバート, SRC構造, L形接合部, 生産性向上

1. はじめに

建設業界では、経験豊富な建設技能者の退職に伴う人 材不足が顕在化しつつあり、鉄筋、型枠の組立といった 人力作業の占める割合が大きい RC 躯体構築では、作業 の省力化による生産性の向上が喫緊の課題となっている。

これに対し筆者らは、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た鋼コンクリート複合 プレハブ部材の開発を進めている¹⁾。同部材は,主鉄筋 を代替する主鋼材とせん断補強鉄筋およびブレースを溶 接で組み立てた鋼材ユニットと,型枠を代替する PCa 版 から構成されるプレハブ部材である(図-1)。これまで の検討において,同部材がコンクリート打込み時の荷重 に対して支保工を省略し得る高い剛性を確保できること や,コンクリート硬化後の鋼コンクリート複合部材(以 下,SRC 部材と称する)として,通常の RC 部材と同程 度の曲げ性能を実現できることを確認している¹⁾。

一方で、同部材のような SRC 部材は、RC 部材に比べ てコストが高くなる傾向がある。そのため、同部材を用 いて RC 躯体を構築する場合、生産性を向上させる効果 と全体コストとのバランスを考慮すると、支保工の省略 による適用効果の高い頂版のみを SRC 部材とし、壁や底 版は従来の RC 部材とすることが有効だと考えられる

(図-2)。その場合, 頂版と外壁とのL 形接合部や頂版 と中壁とのT 形接合部において, RC 部材と SRC 部材を 接合させる必要が生じる。RC 部材と SRC 部材の接合部 では, 断面力を確実に伝達させるため, 例えば鉄筋を鋼 材に機械的に定着させることが考えられるが, こうした 構造は許容される施工誤差が小さいため, 部材製作や設 置に高い精度が要求されるだけでなく, 現場で多くの作 業を必要とするといった課題があった。また, L 形や T 形の部材接合部は, 一般的に剛域の設定を行い, 破壊は



図-2 複合プレハブ部材 適用のイメージ

生じないものとして設計される部位である²⁾。すなわち, RC部材とSRC部材の接合部には,接合部の破壊が頂版 や壁よりも先行しないような性能が要求される。

以上のような背景から、同部材を RC 躯体に適用する 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 RC 部材とSRC 部材との接合構造が必要であ った。本稿では、頂版と外壁のL形接合部を対象とした 接合構造を考案した上で、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して正負交番載荷実験を行い、 構造性能を検証した内容について報告する。

*1 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造グループ研究員 修(工) (正会員) *2 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造グループ上席研究員 博(工) (正会員) *3 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造グループ上席研究員 修(工) (正会員)

2. SRC 頂版と RC 壁の L 形接合構造の考案 2.1 SRC 頂版と RC 壁の L 形接合構造の課題

図-2 に示すように、複合プレハブ部材は壁付近に設 けた支保工上に架設した後に、頂版と壁の接合部の施工 を行うことで設置が完了することを想定している。壁の 主鉄筋は組上がった状態を前提としているため、図-3 に示すように、接合部に一般的に用いられる曲げ内半径 100以上(0:主鉄筋径)の曲げ加工がされた鉄筋(以下, 大R鉄筋と称する)を壁から頂版に至る外側主鉄筋とし て配筋すると、 複合プレハブ部材の設置時にその主鋼材 が干渉する懸念がある。そのため、施工の観点からは、 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 構造に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の曲げモーメ ントが接合部に作用した際、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ことや、頂版 主鋼材との応力伝達領域が大R鉄筋を用いた場合よりも 限定されることから, 接合部の損傷が頂版や壁よりも先 行する可能性がある。また, 頂版主鋼材は接合部内に定 着させる必要があるが、鋼材の付着強度は異形鉄筋より 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 板を起点として接合部内に損傷が生じる懸念があるため, 局所的な定着機構以外に主鋼材の定着力を高める機構を 設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、部材接合部における作業は極力低減することが 望ましく、複合プレハブ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。

2.2 考案した接合構造の概要

前述の課題に対し,SRC 頂版と RC 壁を接合する L 形 接合部を対象として,図-4に示す接合構造を考案した。 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を用いる。接合部内では、主鋼材の 表面に凹凸を設けることで主鋼材の付着力を高め、 接合 部内で定着できるようにする。また、接合部内では、上 下の主鋼材と鉛直鋼材をロの字状となるように溶接で繋 ぎ、このうち接合部の端部の鉛直鋼材にはコンクリート と一体となるように孔を設ける(以降,同鋼材を PBL と 称する)。PBLは、コンクリートとの間のずれによるせん 断力を各孔が均一に負担すると仮定した上で、そのずれ せん断耐力が壁主鉄筋の降伏荷重以上となるような諸元 とし,壁主鉄筋の間に主鋼材および PBL を配置すること で、あき重ね継手としてコンクリートと PBL を介して壁 主鉄筋と頂版主鋼材で応力を伝達させる。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プレハブ部材を吊り降ろ すだけで,頂版主鋼材と壁主鉄筋が接合部内に定着され, かつ両部材間で応力を伝達できる接合構造が成立すると 考えた。なお,接合部内の補強鉄筋やハンチは従来の仕 様と同様とすることとした。

2.3 接合部内の頂版主鋼材の付着力

提案した接合構造では、頂版側の接合部の境界から接 合部端部までの区間を主鋼材の定着長とし、同区間での 付着力が主鋼材の規格降伏荷重以上となるように凹凸の 諸元を設定する必要がある。ここでは、その設定におい て薗田の付着強度式³⁾を適用することとした。薗田は、 突起付き鋼板の付着強度式として、式(1)および式(2)を提 案しており、両式の算出結果の小さい値を突起付き鋼板 の付着強度としている。

$$f_b = 0.892 \cdot m \cdot f_c \quad ; \quad m = nh_r/L \tag{1}$$

 $\tau_s = 0.16 \cdot \lambda \cdot f_c \qquad ; \quad \lambda = n s_r / L \tag{2}$

ここで、 τ_b : 突起部の支圧破壊で決まる付着強度 (N/mm²)、 τ_s : 突起間のせん断破壊で決まる付着強度 (N/mm²)、 f_c : コンクリート圧縮強度(N/mm²)、m: 支圧面 積比、 λ : せん断面積比、n: 突起数、 h_r : 突起高さ (mm) (\leq 3.5mm)、 s_r : 突起間隔(mm)、L: 付着長(mm)である。

なお,上式では突起高さに適用範囲があるが,ここで は,適用範囲外でも上式が成立すると仮定して検討を行 うこととした。



3.L形接合部の供試体に対する正負交番載荷実験

3.1 供試体概要

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-壁接合部を1/3スケールに縮小したL形接合部 の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 4に基づいて設計された RC 構造を想 定した供試体 No.1 と,考案した接合構造を想定した供試 体 No.2 の 2 ケースである。

供試体の概要を図-5 に、材料試験結果の一覧を表-1 に示す。図-6 には, No.2 の L 形接合部の拡大図を示 す。本実験では、1:3のハンチを有する実構造物をモデ ル化しており、頂版および壁の部材高さはそれぞれ 400mm と 430mm, ハンチ寸法は 165×495mm である。 No.1 の各種鉄筋には SD345 を使用し,実構造物と同様 の鉄筋比と配筋形状となるように各鉄筋の諸元を設定し た。頂版および壁の部材外側の主鉄筋には D13の大R鉄 筋を 10 本,壁の部材内側の主鉄筋には折曲げ加工を行 った D13 を 6 本使用した。 頂版の部材内側の主鉄筋には 折曲げ加工を行った D16 を 12 本使用し,実構造物を模 擬して2段配筋とした。接合部内の水平および鉛直方向 の補強鉄筋には D13 を使用し、ハンチ筋は鉄筋量が壁内 側主鉄筋量の半分程度となるように、D10およびD13を 使用した。ハンチ筋は,施工性に配慮して接合部の内部 に定着させる形状とした。せん断補強鉄筋には D13 のプ レート定着型鉄筋,配力筋にはD10を使用した。供試体 は、正負の載荷に対して壁とハンチの境界部が頂版に先 行して曲げ破壊する諸元となっている。

No.2 の頂版主鋼材にはフラットバー(SM490Y)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 と同等となるように設定し,部材外 側には FB12×40mm, 部材内側には FB12×60mm を配置 した。接合部内の主鋼材の両面には、隅肉溶接により D6 を 50mm 間隔で溶接することで凹凸を設けた。凹凸の諸 右:No.2(頂版 SRC 供試体))(単位:mm)



(図-5を反転して実構造物と同じ向きで表示) 図-6 No.2 接合部拡大

表-1	材料試験結果	(単位:	N/mm ²)
-----	--------	------	---------------------

材料	項目	No.1	No.2
	圧縮強度	33.3	36.1
コンクリート	弹性係数	27000	28300
	引張強度	2.87	2.95
外側主鉄筋	降伏強度	374	
D13 SD345	弹性係数	192000	
頂版主鋼材	降伏強度	396	
FB SM490Y	弹性係数	208000	

元は、図-6に示す定着長 700mm の区間における部材外 側の主鋼材の付着力が,同鋼材の規格降伏荷重以上とな るように、薗田の付着強度式により設定した。なお、主 鋼材の定着に必要な付着強度は 3.0N/mm² であるのに対 し, 薗田の付着強度式と No.2 のコンクリート圧縮強度の 試験結果から算出される付着強度は 3.9N/mm² である。 接合部内の上下主鋼材には鉛直鋼材として鋼板 (SM490Y FB12×40mm) と PBL (SM490Y FB12×110mm) を溶接した。PBLの諸元は、複合構造標準示方書 5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。なお、実構造物の規 模を想定した場合,必要となる孔数が多く孔を2列に配 置する可能性があるため、供試体でも同様の孔の配置と

した。壁および接合部内の配筋は No.1 と同様とし,壁主

鉄筋には半円形フックを設けた。図-6に示す最上部の

PBL と半円形フック内には D10 の貫通鉄筋を配置した。 ハンチより載荷点側の頂版のせん断補強鉄筋および配力 筋には D13 と D10 を使用し、上下主鋼材に溶接するこ とで配置した。

3.2 載荷方法

写真-1に載荷装置を示す。供試体に油圧ジャッキを 直接取り付け, 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(外側引張)を正載荷,開く方向(内 側引張)を負載荷とした正負交番載荷実験を実施した。 No.1の正負載荷において,主鉄筋降伏荷重の計算値まで 載荷した際に載荷点水平変位+1&(+14.4mm), -1&(-8.8mm)を計測し,以降は,同変位を基準とした同一振幅 の繰返し回数3回の振幅漸増型載荷を行った。No.2では, No.1と同一の±&を用いて載荷を行った。

3.3 計測項目

荷重をロードセル,載荷点の変位を変位計で計測した。 主鉄筋および主鋼材のひずみ分布をひずみゲージにより 計測し,頂版のハンチ基部の曲げひび割れ幅をπゲージ により計測することで,主鉄筋および主鋼材の定着性状 を検証した。接合部の損傷状況の違いや,応力伝達のメ カニズムを検証するため,接合部内の補強鉄筋や PBL, 貫通鉄筋にもひずみゲージを設置した(図-7)。

3.4 実験結果

(1) 荷重と載荷点水平変位の関係と損傷過程

図-8 に各供試体の荷重と載荷点水平変位の関係を, 図-9には各供試体の損傷状況を示す。

両供試体において,ほぼ同じ履歴と損傷過程を示した。 ±2 δ ,に向かう途中で壁の主鉄筋が降伏した後,壁とハ ンチとの境界部に曲げ変形と損傷が集中するようになっ た。±4 δ ,到達時に両供試体でほぼ同じ最大耐力を示し た後に、±6 δ ,の1回目の載荷時に壁主鉄筋の座屈の兆 候が見られ、±6 δ ,の2回目の載荷時にかぶりコンクリ ートの剥落とともに荷重が低下した。





図-7 計測位置図(No.2,赤破線は No.1 大 R 鉄筋))







図-9 ±5δy までのひび割れ図と終局時の損傷状況(左: No.1 (RC 供試体)右: No.2 (頂版 SRC 供試体))

接合部の損傷状況を見ると、両供試体ともに載荷を通 じて大きな損傷は確認されなかった。一方で、ひび割れ の発生状況は若干異なっており、No.2 では壁外側主鉄筋 に沿うような縦方向のひび割れが接合部の内部に伸展す る様子が確認された。なお、No.2 の頂版においては、No.1 よりも曲げひび割れの発生本数は少ないものの、損傷が 特定の箇所に局所化するような様子は確認されなかった。

以上より,本供試体の諸元であれば,考案した接合構 造によるL形接合部は,従来配筋のものと同程度の耐力 と剛性および変形性能を有していると言える。

(2) 主鉄筋および主鋼材のひずみ

図-10 および図-11 に,正側の各載荷ステップ時に 計測した壁と頂版の外側主鉄筋および主鋼材のひずみ分 布を示す。図中のひずみ計測位置は,図-7 に示す接合 部端部からの距離で表している。また,各部材とハンチ との境界部の位置は黒実線で示した。

壁では、両供試体ともに1 & から2 & にかけてハンチ との境界部において主鉄筋が降伏した後に、同箇所周辺 に塑性領域が拡大した。両供試体ともに載荷を通じて接 合部端部のひずみは小さく、主鉄筋が接合部内に定着さ れていたことから、本供試体の諸元であれば壁外側主鉄 筋の定着に半円形フックを適用できると言える。

一方、5 &の鉛直位置 380mm のひずみを見ると、No.1 では降伏ひずみ相当で留まっており、同位置より接合部 内部の鉄筋は塑性化していないのに対し、No.2 では降伏 ひずみを超えており、接合部内における鉄筋の塑性領域 は No.2 の方が大きい。これは、前節で示したとおり、 No.2 では壁主鉄筋に沿ったひび割れが発生し、鉄筋の付 着力が低下したためと考えられる。同ひび割れの発生箇 所は、剛性が大きく変化する頂版主鋼材の端部と一致し ており、同箇所を起点として発生した曲げひび割れが鋼 材に沿って伸展したことが推察される。本実験では、同 ひび割れが接合部の性能に及ぼす影響は限定的であった が、本実験での諸元以外のL形接合部に考案した接合構 造を適用する際には、同ひび割れとそれに伴う壁主鉄筋 の付着切れへの対策が必要となると考えられる。

頂版では、両供試体のひずみ分布は概ね同様であり、 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 凹凸による付着によって、主鋼材が接合部内に定着され ていたと考えられる。ここで、図-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図-12に示す。平均付着 応力度は、2 点間の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。ここで、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、



菌田の付着強度式に従って算出した付着強度 3.9N/mm² を上回っており、また、繰返し載荷を受けても付着応力 度が維持されていることが分かる。以上より、薗田の付 着強度式を用いることで、主鋼材の定着に必要な凹凸の 諸元の設定ができることを確認した。

(3) 頂版の曲げひび割れ幅

図-13 に、供試体 No.2 の±6 & の載荷時に頂版の接 合部内およびハンチとの境界部 (図-9) で計測した曲げ ひび割れ幅と、それぞれの曲げひび割れ幅計測位置に最 も近い位置で計測した頂版外側主鋼材の引張応力との関 係を示す。主鋼材の引張応力は、ひずみゲージの計測値



に各材料の弾性係数を乗じることで算出した。図中には, コンクリート標準示方書²⁾から算出される鋼材応力と曲 げひび割れ幅との関係を示す。曲げひび割れ幅は,主鋼 材と等価な断面積の鉄筋が配置されていると仮定した上 で,収縮およびクリープの影響を考慮せずに算出した。

図-13より,各計測位置における鋼材応力と曲げひび 割れ幅の関係は,コンクリート標準示方書の計算値と概 ね一致した。主鋼材の表面には,ハンチより接合部側で は薗田の付着強度式に基づいた凹凸を,ハンチより載荷 点側ではせん断補強鉄筋を溶接して凹凸を設けており, ハンチを境界として凹凸の形状が異なるが,それぞれの 凹凸によって通常の異形鉄筋と同程度の付着性能を主鋼 材に付与できることが分かった。

(4) 接合部補強鉄筋のひずみ

図-14 に, 接合部内の水平および鉛直補強鉄筋の荷重 -ひずみ関係を示す。鉛直補強鉄筋については, 載荷中 に壁基部の損傷が拡大してひずみゲージのリード線が同 箇所で破断したことから, ±3*δ*, までの結果を示してい る。両供試体の結果の差異は小さく, ひずみの値も小さ いことから, 両供試体の接合部は健全な状態を保持して いたと言える。

(5) PBL および貫通鉄筋のひずみ

図-15 に、No.2 の PBL と貫通鉄筋の荷重-ひずみ関係 のうち、計測ができた 4& までを結果を示す。PBL およ び貫通鉄筋に生じたひずみは 30 µ 程度と小さいことか ら、本供試体の諸元では、壁主鉄筋の半円形フックでの 定着や壁主鉄筋と PBL との間での応力伝達を必要とす ることなく、接合部において断面力が伝達されていたと 言える。これは、接合部が健全な状態を保持しており、 壁主鉄筋および頂版主鋼材がそれぞれ付着によって接合 部内に定着できていたためと考えられる。

5. まとめ

本研究では、頂版と壁を接続するL形接合部を対象として施工性に配慮したRC-SRC接合構造を考案し、同構

造を想定した供試体に対する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。

- (1)本供試体の諸元であれば、考案した RC-SRC 接合構 造を有する L 形接合部は、従来の RC 躯体における L 形接合部と同程度の耐力と剛性および変形性能を 有し、接合部内の損傷も同程度に抑制できる。
- (2) 薗田が提案した突起付き鋼板の付着強度式により、 主鋼材を接合部内に定着させるために必要な鋼材 表面に設ける凹凸の諸元を設定することができる。
- (3) (2)で設定した凹凸とせん断補強鉄筋を溶接して設けた凹凸は、それぞれ異形鉄筋と同程度の付着性能を主鋼材に付与できる。

本研究では、1:3のハンチを有する接合部を想定した 実験による検証を行ったが、ハンチに関する条件は、接 合部の構造性能に大きく影響することが考えられる。今 後、ハンチの形状や有無が、考案したL形接合構造の構 造性能や応力伝達メカニズムに及ぼす影響について、実 験および解析的検討を行う予定である。

参考文献

- 十川貴行,岩本拓也,曽我部直樹,平陽兵: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, pp.997-1002, 2020.7
- 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
- 薗田恵一郎,鬼頭宏明,中島一男,上中宏二朗:突 起付き鋼板のせん断伝達特性に関する系統的研究, 土木学会論文集 No.598,I-44,pp.182-202,1998.7
- 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
- 5) 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