

# 論文 複合ハーフプレキャストにおける主鋼材の継手構造に関する検討

皆川 春奈\*1・岩本 拓也\*2・曾我部直樹\*3

**概要** : 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、型枠作業の省力化が可能な複合ハーフプレキャスト部材の開発を行っている。本部材を分割して架設する場合に必要な主鋼材の継手として、突起付き鋼板と補強筋を用いた継手構造を考案した。そして、継手構造における仕様をパラメータとした3体の梁試験体に対する載荷実験によって、同継手構造の性能について検証した。その結果、継手区間における主鋼材では表面の突起によってコンクリートとの付着を確保でき、補強筋を介して応力を伝達できることが確認された。また、その性能を既往の付着強度算定式を用いて、安全側に評価できる可能性を示した。

**キーワード** : ハーフプレキャスト, SRC 構造, 継手, 突起付鋼板

## 1. はじめに

ボックスカルバートなどの RC 躯体の頂版の支保工、配筋および型枠作業を省力化することを目的として、鋼コンクリート複合ハーフプレキャスト部材（以下、複合 HPCa 部材）の開発を進めている。同部材は、主鉄筋を代替する主鋼材やせん断補強鉄筋などを溶接して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（図-1）。これまでの検討で、鋼材ユニットと PCa 版が一体となってコンクリート打込み時の荷重に抵抗し、支保工を省略可能な剛性を確保していること、コンクリート硬化後は鋼材ユニットを補強材とした鋼コンクリート複合部材（以下、SRC 部材）として頂版に必要な構造性能を満足できることを確認している<sup>1)</sup>。

既往の検討では、壁や柱で支持される頂版の支間内において、複合 HPCa 部材を部材軸方向に分割せずに施工することを想定していた。一方、現場の施工条件や頂版の諸元によっては、部材の運搬・架設時における重量や長さの制約から、複合 HPCa 部材を部材軸方向に分割して施工する方が望ましいケースもある。その際には、連結する SRC 部材間の主鋼材同士の応力を伝達するために、図-2 に示すような主鋼材の継手が必要となるが、従来のボルトによる摩擦接合や、溶接などの構造同士の継手方法では、施工性や品質の確保、コスト等における課題があった。そこで本研究では、複合 HPCa 部材における主鋼材を対象として、安価で施工性に配慮した継手構造を考案し、同継手を有する SRC 梁部材の曲げ実験によりその性能を検証した。

## 2. 主鋼材継手構造の考案

### 2.1 従来の継手構造の課題と考案した継手構造の概要

鋼材の継手には一般的に摩擦接合継手と溶接継手が用いられる。これらの継手構造は、品質や施工性が施工環境や建設技能者の技能に大きく影響される上、品質確保

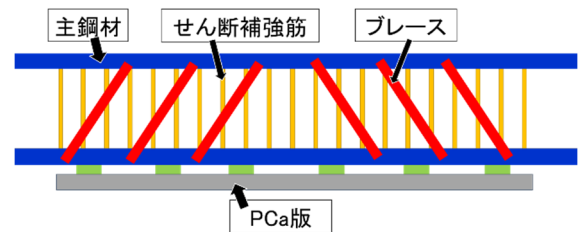


図-1 複合 HPCa 部材

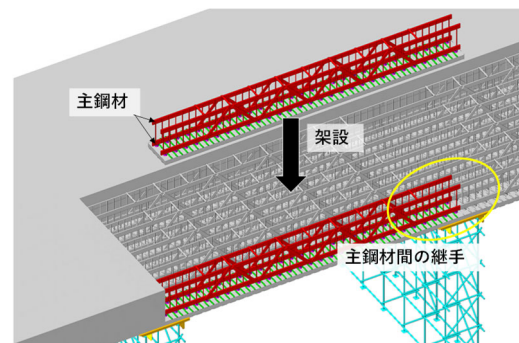


図-2 分割施工のイメージ

のための管理項目も多く、適用においては工程やコストが課題となることが多い。また、複合 HPCa 部材では、PCa 版の上に複数の主鋼材が上下左右に並列されており、継手部周辺において十分な作業空間を確保することが難しい。これらのことから、現場での作業性にも配慮した継手構造とする必要があった。

以上の課題に対して、異形鉄筋を継手部の補強筋として用いた新たな鋼材継手構造を考案した。図-3 に考案した継手構造の概要、図-4 にその応力伝達機構を示す。本継手構造は、先組みした異形鉄筋（継手用鉄筋かご）を、主鋼材の継手部に跨がるように設置することで、主鋼材とコンクリート、コンクリートと鉄筋の付着を介して主鋼材の応力を伝達させようとするものである。継手用鉄筋かごは、鋼材同士の応力を伝達させる鉄筋（継手

\*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 副主任研究員 修（工）（正会員）

\*3 鹿島建設（株） 技術研究所土木構造グループ グループ長 博（工）（正会員）

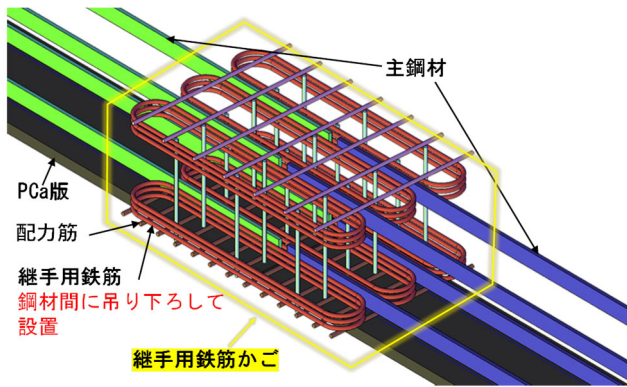


図-3 考案した継手構造の概要

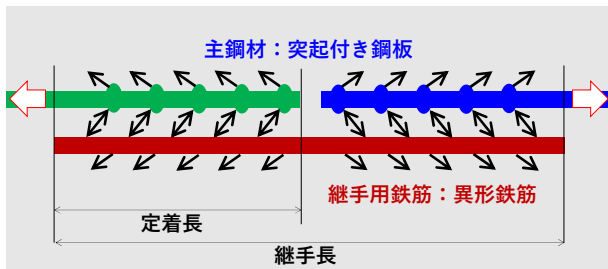


図-4 主鋼材と継手用鉄筋の応力伝達機構

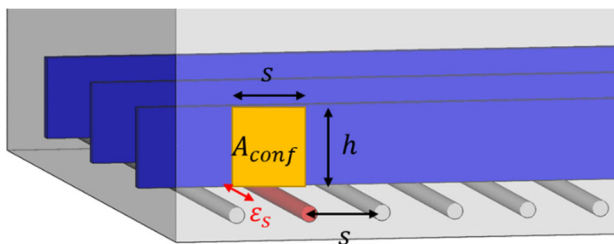


図-5 配力筋による拘束効果の概念図

用鉄筋)と組立て筋から構成され、部材高さ方向および幅方向に継手用鉄筋が複数本配置されている。継手用鉄筋かごを主鋼材間に設置するだけで、複数の主鋼材の継手部を構築できることから、継手部に要する現場作業を大幅に削減することが可能である。また、継手用鉄筋かごには通常の异形鉄筋のみを用いており、鉄筋に特別な加工を要さないことから、継手部に要するコストも抑えることができると考えた。

継手用鉄筋の径や本数は、継手用鉄筋のみを補強材として考慮した RC 断面の曲げ耐力が、主鋼材を補強材として考慮した SC 断面の曲げ耐力を上回るよう、複合構造標準示方書<sup>2)</sup>およびコンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に基づいた断面計算により設定した。本継手構造における継手長は、主鋼材の規格降伏強度に相当する力を付着により伝達するために必要な主鋼材および継手用鉄筋の定着長のうち、大きい方の値を用いて設定した(図-4)。一般に、鋼材の付着強度は鉄筋よりも小さく<sup>2)</sup>、鋼材側で定着長が決定することから、本継手構造では主鋼材の表面に突起を設けることで、鋼材の付着強度を向上させることとした。主鋼材の定着長の設定に関する詳細は次節に

で説明する。継手用鉄筋の必要定着長は、コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に基づく基本定着長により算出することとし、同定着長を低減する際には、その端部に半円形フックや機械式定着体を設けることとした。

## 2.2 主鋼材の必要定着長の算出方法

主鋼材の必要定着長は、主鋼材の軸方向に生じると想定される力を、主鋼材に突起を設けた面の周長に付着強度を乗じた値で除すことで算出した。主鋼材の付着強度の設定には、菌田ら<sup>4)</sup>の突起付き鋼板の付着強度式を適用することとした。菌田らは、式(1)に示す突起部の支圧破壊で決まる付着強度と、式(2)に示す突起部のせん断破壊で決まる付着強度の算定式を提案しており、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。

$$\frac{\tau_b}{F_c} = m \left( 0.892 + 16.3 \frac{\sigma}{F_c} \right) + 0.6 \frac{\sigma}{F_c}; \frac{\sigma}{F_c} \leq 0.07 \quad (1)$$

$$m = \frac{n \cdot h_r}{L}$$

$$\frac{\tau_s}{F_c} = \lambda \left( 0.16 + 1.12 \frac{\sigma}{F_c} \right) + 0.6(1 - \lambda) \frac{\sigma}{F_c} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{n \cdot s_r}{L}$$

ここで、 $\tau_b$ ：突起部の支圧破壊で決まる付着強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\tau_s$ ：突起間のせん断破壊で決まる付着強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma$ ：付着面に与える側圧(N/mm<sup>2</sup>)、 $f_c$ ：コンクリート圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $m$ ：支圧面積比、 $\lambda$ ：せん断面積比、 $n$ ：突起数、 $h_r$ ：突起高さ(mm)( $\leq 3.5$ mm)、 $s_r$ ：突起間隔(mm)、 $L$ ：定着長(mm)である。

式(1)、(2)に示す通り、菌田らの付着強度式は、鋼板に作用する側圧すなわち拘束圧を考慮した形になっている。一方、鉄筋の基本定着長の算定式<sup>3)</sup>では、配力筋などの横方向鉄筋の配筋量に応じて、定着長が低減される。これは、鉄筋周辺に発生する付着割裂ひび割れの拡大を横方向鉄筋が拘束する効果を考慮したものであり、その効果は突起を設けた鋼板においても期待できる可能性がある。そこで、複合 HPCa 部材の主鋼材の上下に配置される配力筋が主鋼材に与える拘束圧を以下のように仮定し、配力筋が横方向鉄筋として主鋼材の付着強度を向上させる効果を設定した上で、菌田式による鋼材の付着強度の算定を試みた。

図-5 に配力筋が主鋼材に与える拘束圧の概念図を示す。主鋼材が付着破壊する際には、その軸方向に沿った付着割裂ひび割れが拡大することで、配力筋には引張力が生じると考えられる。この反力が主鋼材の側面に作用

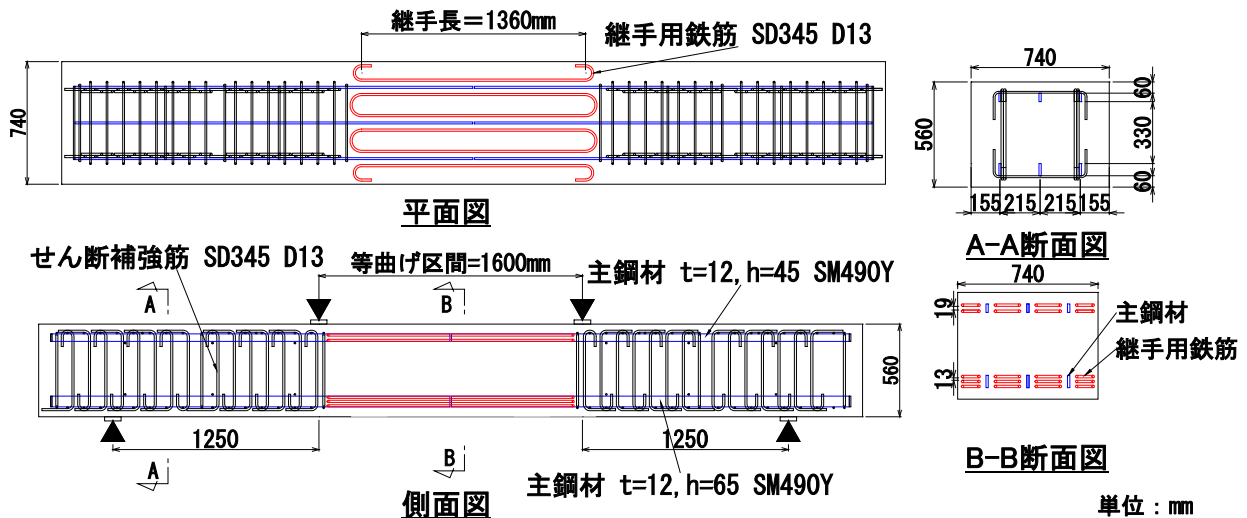


図-6 試験体の概要 (No. 1)

表-1 継手区間における突起付き鋼材の仕様と付着強度の計算値

No.	突起高さ $h_r$ (mm)	突起幅 $b_r$ (mm)	コンクリート強度 $F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	拘束圧 $\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	付着強度 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	継手長 (mm)
1	3	6	30	0	2.67	1360
2				0.51	3.81	946
3				1.53	5.39	678

することで拘束圧が生じると仮定し、拘束圧 $\sigma_{Is}$ を式(3)によって算出する。拘束圧を受ける面積 $A_{conf}$ は、配力筋の配置間隔内における主鋼材の両側面と仮定して式(4)により算出し、配力筋に発生する引張力を算出するためのひずみ $\varepsilon_s$ はある一定値を仮定することとした。

$$\sigma_{Is} = \frac{E_s \cdot \varepsilon_s \cdot A_s}{A_{conf}} \quad (3)$$

$$A_{conf} = 2 \cdot h \cdot c \quad (4)$$

ここで、 $E_s$ :配力筋のヤング係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $A_s$ :配力筋1本の断面積(mm<sup>2</sup>)、 $A_{conf}$ :拘束圧を受ける面積(mm<sup>2</sup>)、 $h$ :鋼材高さ(mm)、 $c$ :配力筋間隔(mm)である。

### 3. 継手構造を有する SRC 梁の載荷実験

#### 3.1 実験概要

考案した継手構造の性能と、前述した主鋼材の付着強度の設定方法の妥当性を検証するため、配力筋の配筋量と継手長をパラメータとした3体のSRC梁部材に対して曲げ載荷実験を実施した。

表-1に各実験ケースにおける継手部の突起付き鋼材の諸元と前述の考え方で評価した付着強度、表-2および表-3に鋼材とコンクリートの材料試験結果の一覧を示す。試験体(No.1)の概要を図-6に示す。

試験体寸法は断面高さ560mm、断面幅740mmであり、大型開削トンネルにおける頂版への適用を想定した複合HPCa部材を2/5相当に縮小したものである。部材上下の

表-2 主鋼材と継手用鉄筋の断面積と材料試験結果

材料	断面積 (mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )
主鋼材	780	211	391
継手用鉄筋	126.7	187	350
配力筋 D10	71.33	186	364
配力筋 D13	126.7	188	390

表-3 実験時材齢のコンクリート材料試験結果

No.	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
1	30.0	35.6	3.11
2	30.4	36.3	2.85
3	30.2	34.2	2.97

主鋼材には、継手区間内に高さ3mm、幅6mmの突起を溶接ビードで形成した鋼板(SM490Y)を使用し、部材幅方向に3列配置した。鋼板の板厚は12mmであり、下側主鋼材は高さ65mm、上側主鋼材は高さ45mmとした。No.1試験体は、配力筋を配置せず、同鉄筋による拘束圧 $\sigma_{Is}$ が生じないようにした試験体である。No.2、No.3試験体は、継手区間内に配力筋を配置して主鋼材の付着強度を高めることで、その定着長を短縮した試験体であり、No.2ではSD345 D10を100mm間隔、No.3ではSD345 D13を60mm間隔で配置した(図-7)。No.2の配力筋量は、実構造物と同等になるように設定し、No.3では主鋼材の定着長をNo.1の約1/2とすることが可能な量として設定した。各試験体の定着長は、主鋼材に発生する引張応力が300N/mm<sup>2</sup>に到達した際に主鋼材が付着破壊することを想定して、式(1)~(4)に基づいて算出した。ここで、

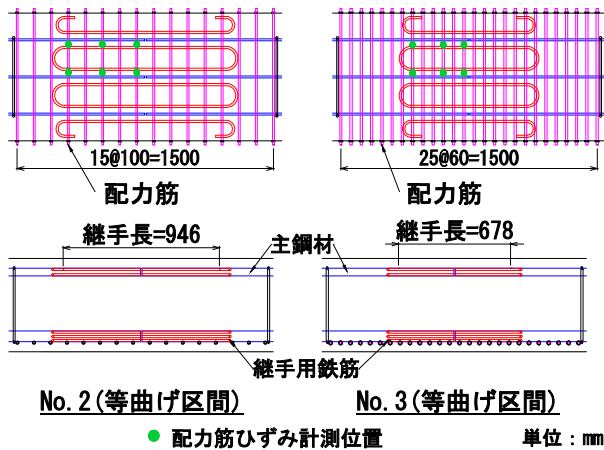


図-7 No. 2, No. 3 試験体の継手部

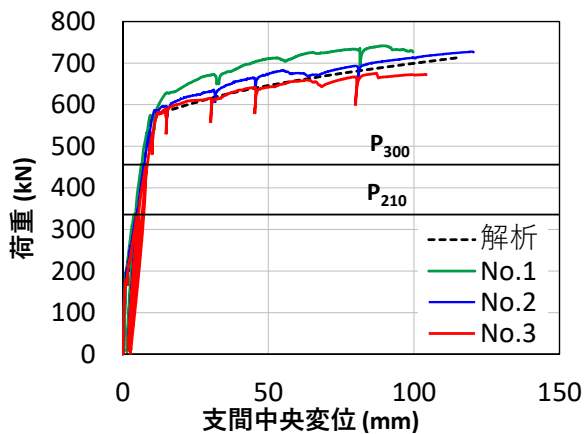


図-8 荷重-支間中央変位

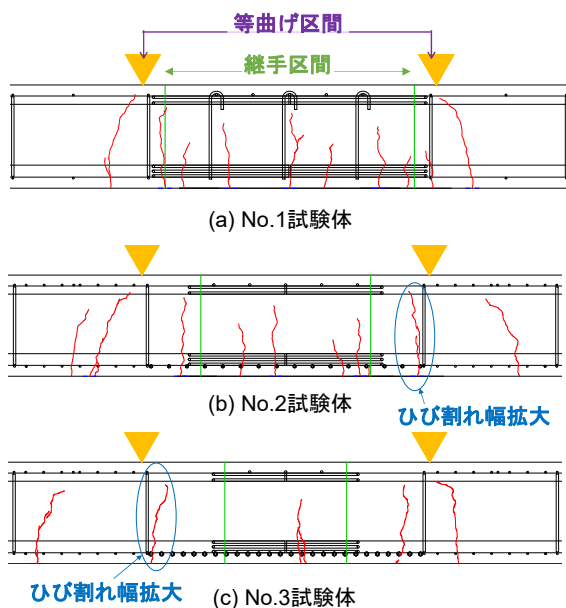


図-9 各試験体のひび割れ発生状況 (P<sub>300</sub>)

主鋼材が最大付着強度に到達する際の配力筋ひずみ $\epsilon_s$ は $500\mu$ と仮定し、配力筋の弾性係数には材料試験結果を用いた。

継手用鉄筋かごは SD345 D13 の継手用鉄筋と SD345 D10 の組立て筋を用いて組み立てた。主鋼材による SC 断面と継手用鉄筋による RC 断面の曲げ耐力を同等とするため、1組の引張主鋼材の応力を継手用鉄筋6本、1組の圧縮鋼材の応力を継手用鉄筋4本で伝達するものとし、各鋼材の両側面に継手用鉄筋を部材高さ方向に複数段配置した。継手用鉄筋は圧接でフープ状に加工したもの、もしくは両端にフックを設けたものを使用した。

載荷方法は、せん断スパン長さを 1250mm、等曲げ区間長さを 1600mm とした 4 点曲げ載荷とした。主鋼材に発生する引張応力が道路橋示方書<sup>5)</sup>に基づく許容応力度 ( $210\text{N/mm}^2$ ) とする荷重  $P_{210}$  で 3 回繰返し載荷し、主鋼材に発生する応力が付着破壊を想定した  $300\text{N/mm}^2$  とする継手破壊荷重  $P_{300}$  で試験体の損傷状態を確認して以降は終局まで単調載荷を実施した。

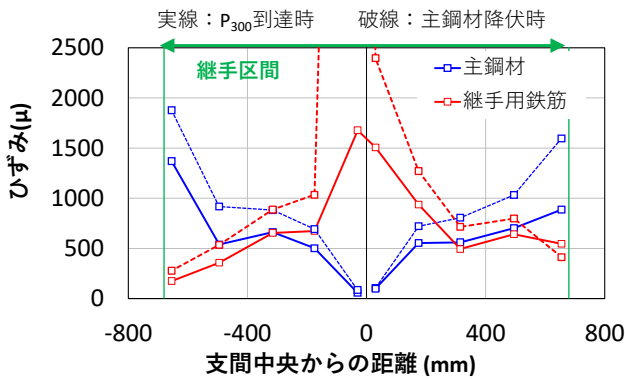
計測は、載荷荷重をロードセルで、変形を変位計で行った。鋼材表面に設置したひずみゲージで、主鋼材と継手用鉄筋、および配力筋のひずみを計測した。

### 3.2 実験結果

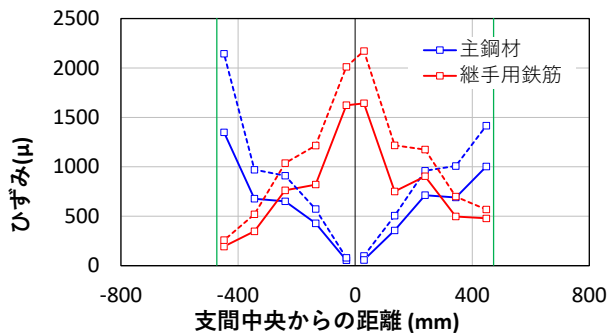
#### (1) 破壊モードと最大耐力

図-8 に荷重と支間中央変位の関係を示す。図中には、連続した主鋼材による SC 断面を対象とし、主鋼材の降伏後の弾性係数を初期弾性係数の 1/100 としたファイバーモデル解析の結果を黒破線で示す。図-9 には継手破壊荷重  $P_{300}$  到達時の各試験体のひび割れ発生状況を示す。いずれのケースも、 $P_{210}$  の繰返し載荷中に変位の増加や継手部の損傷が拡大する様子は確認されず、許容荷重レベルにおける継手部の健全性が確認された。継手破壊荷重  $P_{300}$  に到達した後も継手部に損傷が局所化することなく安定した曲げ挙動を示し、荷重 580kN 付近で主鋼材、継手用鉄筋ともに降伏した。その後、No.1 試験体では載荷点付近に発生した曲げひび割れが拡大し、等曲げ区間内のコンクリートが圧壊することで荷重が低下した。No.2, No.3 では載荷装置のキャパシティにより載荷を終了した。

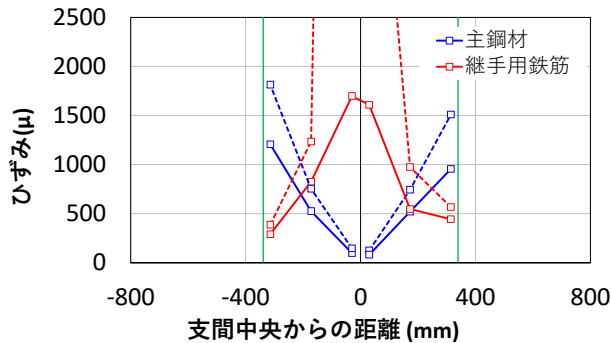
各試験体の結果を比較すると、主鋼材降伏前の段階では顕著な差異は確認されなかったものの、継手長が短くなるにつれて主鋼材降伏後の曲げ剛性が小さく、ひび割れ本数も少なくなる傾向が認められた。今回の実験では、継手区間外の主鋼材には付着強度を高めるための突起を設けていない。そのため、継手長が短い試験体の場合、等曲げ区間内における突起を設けていない主鋼材の範囲が大きくなり、付着強度が低い箇所曲げひび割れが局所化したものと考えられる。さらに、継手端部から載荷点までの区間は継手区間よりも相対的な鋼材量が少ないため、試験体の応力が大きくなることでひび割れ幅が拡



(a) No. 1



(b) No. 2



(c) No. 3

図-10 継手部のひずみ分布

大した可能性がある。なお、ファイバーモデル解析結果との比較では、No.3 が最も近似する結果となった。今回実施したファイバーモデル解析では、継手区間において主鋼材のみをモデル化しているため、等曲げ区間における継手区間が最も短い No.3 が解析結果と近似したものである。

ひび割れ発生荷重および  $P_{210}$  荷重後に等曲げ区間で確認された主たるひび割れに  $\pi$  型変位計を設置してひび割れ幅を計測した。コンクリート示方書<sup>3)</sup>の曲げひび割れ幅の設計応答値算定式に基づいた主鋼材応力が  $300\text{N/mm}^2$  となるとき曲げひび割れ幅の計算値は継手用鉄筋断面で  $0.48\text{mm}$ 、主鋼材断面で  $0.80\text{mm}$  であった。なお、主鋼材断面での計算では、主鋼材の図心位置に断面積が等価な鉄筋を配置した条件で算定した。また、主

鋼材の表面形状による付着への影響は異形鉄筋よりも小さいことを考慮し、普通丸鋼と同様として考え、異形鉄筋を用いた場合のひび割れ幅算定値の 1.3 倍として計算した。鋼材のかぶりはいずれも芯かぶりをを用いた。これらの算定値に対し、 $P_{300}$  到達時のひび割れ幅は No.1 において、 $0.20\sim 0.45\text{mm}$  であった。No.2, No.3 で計測したひび割れ幅は、図-9 中の青色で囲った荷重点付近の継手区間外のひび割れにおいて、示方書式による算定値よりも大きくなる傾向がみられ、No.2 で  $1.18\text{mm}$ 、No.3 で  $1.26\text{mm}$  であった。これは前述のように、今回の実験では継手性能に着目するため主鋼材の継手区間外に突起を設けなかったことに起因すると考えられる。一方で、支間中央や継手区間に発生したひび割れ幅は最大で  $0.85\text{mm}$  であった。なお、荷重終了まで、設計で想定した主鋼材の付着割裂ひび割れは目視では確認できなかった。また、実験で計測されたひび割れ幅と計算値の比較から、本継手は継手用鉄筋の存在により SC 断面よりもひび割れの分散性が向上することがわかった。

### (2) 主鉄筋・継手用鉄筋の応力分布

図-10 に各試験体の継手区間における主鋼材および継手用鉄筋のひずみ分布を示す。ひずみは、断面中央に配置した下側主鋼材の下面に設置したひずみゲージの計測値である。実線は  $P_{300}$  到達時、破線は主鋼材降伏荷重到達時のひずみ分布であり、緑色の線は継手端部の位置を示す。No.1 試験体では、主鋼材のひずみが継手中央に向かって減少する一方で、継手用鉄筋のひずみは増加していることから、コンクリートとの付着を介して主鋼材と継手用鉄筋間で応力が伝達されていたことが確認された。主鋼材の降伏強度相当の荷重到達時点においても上記と同様なひずみ分布を示し、主鋼材、継手用鉄筋ともに端部のひずみは小さいことから、同荷重レベルにおいても応力伝達性能を保持していたと評価できる。

また、配力筋を増やして継手部における拘束を高めて継手長を短くした No.2, 3 試験体では、応力の伝達に伴うひずみ分布の勾配が大きくなったものの、主鋼材降伏荷重到達時でも、主鋼材と継手用鉄筋の端部のひずみが増えることは無く、応力伝達性能を保持していたと評価できる。

### (3) 付着応力と拘束圧の関係

図-11 に主鋼材の引張応力と平均付着応力の関係を示す。引張応力は主鋼材下面の継手端部に設置したひずみゲージの計測値にヤング係数を乗じて算出したものであり、図中には材料試験による降伏強度以下となる範囲のデータを示している。平均付着応力は主鋼材の下面に配置したひずみゲージのうち、継手端部と継手中央部の 2 点の測定値の差分に主鋼材のヤング係数と断面積を乗じて算出した値を 2 点間の鋼材の周面積で除すことによ

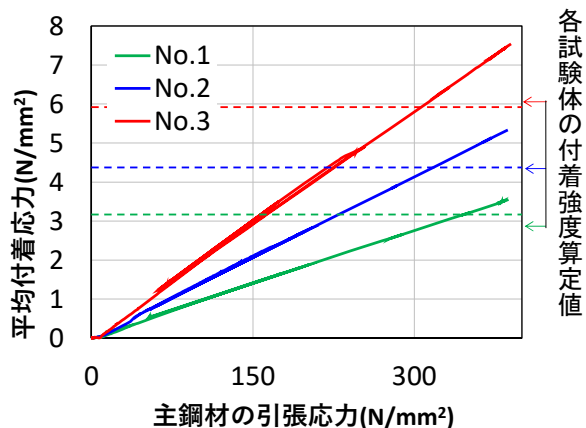


図-11 主鋼材の引張応力-平均付着応力関係

表-4 付着強度の実験値と計算値の比較

付着強度(N/mm <sup>2</sup> )	No.1	No.2	No.3
付着強度算定値 (コンクリート実強度)	3.17	4.37	5.92
最大付着強度	3.55	5.33	7.54
実験値/算定値	1.12	1.22	1.27

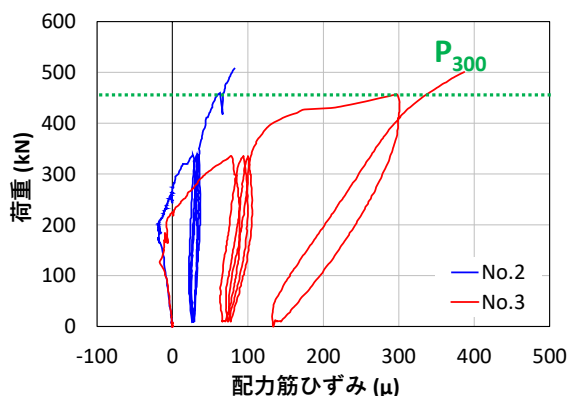


図-12 荷重-配力筋ひずみ関係

って算出した。また、同図には点線で各ケースのコンクリート設計強度(=30N/mm<sup>2</sup>)を用いて菌田式<sup>4)</sup>によって算定した設計付着強度も示す。また、表-4に荷重 P<sub>300</sub>時の平均付着応力と実験で計測できた範囲での最大付着応力、および配力筋の発生ひずみを 500 $\mu$ と仮定して式(1)~(4)で算定した付着強度算定値を示す。最大付着応力はコンクリートの実験時の強度を用いて算定した値に対して10~30%程度、高いことが確認できる。これらの結果から、本実験の範囲においては、突起付鋼板の付着強度を、配力筋による拘束圧を前述のように仮定した上で菌田式によって安全側に設定できる可能性が示唆された。

次に、No.2、No.3における配力筋ひずみの計測結果に基づいて、配力筋の拘束効果について考察する。図-12に荷重と配力筋ひずみの関係を示す。配力筋ひずみは図-7に示す位置で計測し、ここではひずみが最も大きくなった継手端部の試験体側面で計測した結果を示す。両試験体ともに、荷重 200kN 付近から配力筋のひずみが増

加を始め、No.3の方が増加の割合が大きいのことがわかる。No.3では、荷重 400kN を超えた時点でひずみの増加がさらに大きくなっていることから、同時点で付着割裂ひび割れが配力筋の周囲に生じ始めたと推察される。P<sub>300</sub>時点の配力筋ひずみはNo.2で63 $\mu$ 、No.3で293 $\mu$ であり、試験体の設計で拘束圧を設定した際に仮定したひずみ 500 $\mu$ を下回った。前述のように付着強度は、菌田式<sup>4)</sup>による計算値よりも大きかったが、配力筋による拘束効果は、想定よりも低かったことになる。配力筋による拘束効果が想定よりも低いにも拘わらず、計算値以上の付着強度が確保できた要因としては、試験体の設計において見込んでいなかった主鋼材周辺のコンクリートによる拘束等による影響が考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、複合 HPCa 部材の主鋼材を対象とした継手用鉄筋を用いた継手構造を考案し、同継手構造を有する SRC 梁試験体の曲げ載荷実験によりその性能を検証した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 考案した継手構造は、コンクリートとの付着を介して主鋼材と継手用鉄筋間の応力が伝達されることで、主鋼材同士の応力を伝達することができる。
- (2) 考案した継手構造において、継手周囲に配置した配力筋が付着割裂ひび割れに抵抗する様子が確認され、配力筋の拘束効果を見込んで継手長を低減できる可能性がある。
- (3) 配力筋による拘束効果を本論文で述べた方法で仮定した上で、菌田らが提案する突起付き鋼板の付着強度算定式に適用することで、考案した継手構造の継手長を安全側に設定できる可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 十川貴行, 岩本拓也, 曾我部直樹, 平陽兵: 高剛性を有する複合プレハブ部材の曲げ・せん断特性, コンクリート工学, Vol.43, No.2, pp.691-696, 2021.7
- 2) 土木学会: 2014年度制定 複合構造標準示方書 原則編・設計編, 2015.
- 3) 土木学会: 2017年度制定 コンクリート標準示方書【設計編】, 2018.
- 4) 菌田恵一郎, 鬼頭宏明, 中島一男, 上中宏二郎: 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.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 (平成 24 年度版), 2012