

# 論文 複合ハーフプレキャスト部材における鋼材-PCa 版の接合構造と施工時の曲げ挙動に関する検討

岩本 拓也\*1・曾我部 直樹\*2

**要旨** : RC 躯体の頂版施工における鉄筋, 型枠, 支保工作業の省力化を目的として, 鋼材ユニットと PCa 版を一体化した複合ハーフプレキャスト (HPCa) 部材を開発している。PCa 版の製作性や品質に配慮した鋼材ユニットと PCa 版との接合構造を考案し, 構造性能を検証した上で, 同接合構造を適用した複合 HPCa 部材の施工時の曲げ挙動を実物大試験体を用いて検証した。その結果, 考案した接合構造によって鋼材と PCa 版の一体性が確保されることで, 支保工を省略した状態で複合 HPCa 部材へのコンクリートの打込みが可能となることと, その際の接合構造や部材全体の挙動を FEM 解析で評価できることを確認した。

**キーワード** : ハーフプレキャスト, 複合構造, 頂版, 生産性向上, 頭付きスタッド, 接合構造, FEM

## 1. はじめに

大規模な RC 躯体の頂版の施工では, 広い施工範囲における鉄筋, 型枠の組立作業や, コンクリート打込み時の施工時荷重を支えるための大規模な支保工の組立, 解体作業に多大な労力を要する。

これに対して筆者らは, 鉄筋, 型枠, 支保工に関する現場作業を省略できる構造として, プレキャスト (PCa) 版を鋼材ユニットで補強した複合ハーフプレキャスト (HPCa) 部材の開発を進めている (図-1)。既往の検討<sup>1)</sup>では, 縮小模型試験体に対するコンクリート打込み実験を実施し, 施工時の支保工を省略し得る曲げ剛性を確保できることを確認している。しかし, 実物大レベルで同部材の製作性を検討する中で, 当初想定していた鋼材ユニットと PCa 版との接合構造に, 後述する PCa 版の製作性や品質における課題があることが分かってきた。

そこで本研究では, PCa 版の製作性や品質確保に配慮した鋼材ユニットと PCa 版との接合構造を考案し, 実験によってその構造性能を検証した。そして, 同接合構造を有する実大規模の複合 HPCa 部材に対するコンクリート打込み実験を行い, 施工時の複合 HPCa 部材の曲げ挙動を確認した。また, コンクリート打込み時における接合部や複合 HPCa 部材としての全体挙動の評価に対する FEM 解析の有効性についても検討した。

## 2. 鋼材ユニットと PCa 版の接合構造の概要

複合 HPCa 部材は, 埋設型枠となる PCa 版に対し, 主鉄筋を代替する主鋼材とトラス状に配置されたブレース, ならびにせん断補強筋を溶接で組み立てた鋼材ユニットが接合された構造である (図-1)。コンクリート打込み時の施工時荷重に対し, PCa 版と一体化した鋼材ユニットがフレーム構造として抵抗することで, 同部材のみで

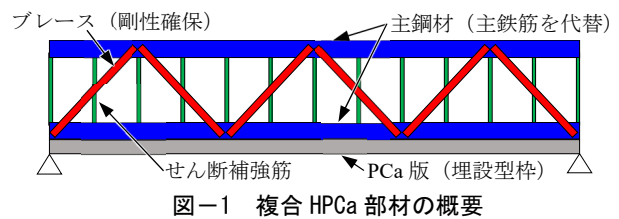


図-1 複合 HPCa 部材の概要

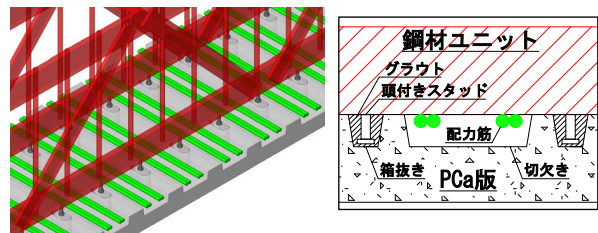


図-2 従来の鋼材ユニット-PCa 版接合構造

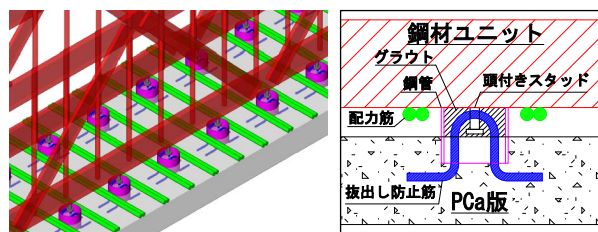


図-3 考案した鋼材ユニット-PCa 版接合構造

支保工を省略し得る剛性を確保することができる。

既往の検討<sup>1)</sup>では, 鋼材ユニットの下面に設置した頭付きスタッドを PCa 版に設けた箱抜きに挿入し, グラウトを充填することで鋼材ユニットと PCa 版を接合する構造としていた (図-2)。同構造では, 鋼材ユニットと PCa 版との間に離隔がないため, 複合 HPCa 部材を部材軸直角方向に連結する際には PCa 版に切欠きを設け, 同箇所配力筋を配置することを想定していた<sup>2)</sup>。このため, 頂版の諸元によっては, 切欠きの数や寸法を大きくする必要があり, PCa 版製作時のコストの増加や, 切欠き部

\*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 グループ長 博 (工) (正会員)

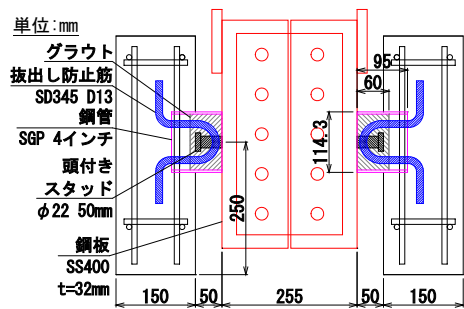


図-4 せん断試験体 (左:正面図 右:側面図)

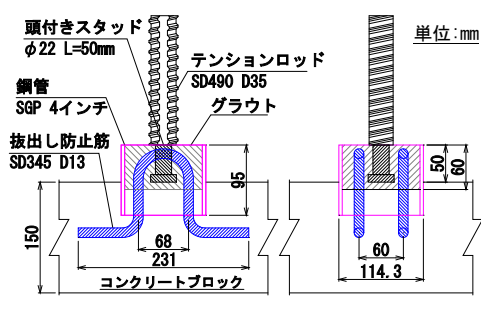


図-5 引抜き試験体 (左:正面図 右:側面図)

付近へのコンクリートの充填性、角欠けなど品質に対する懸念があった。

これに対し、拔出し防止筋を伴う鋼管をPCa版から突出するようにPCa版に埋設し、鋼材ユニット下面に設置した頭付きスタッドを鋼管内に挿入してグラウトを充填する接合構造を考案した(図-3)。これにより、鋼材ユニットとPCa版との間に離隔が生まれ、PCa版に切欠きを設けることなく配筋を設置することが可能になる。また、PCa版の製作時に鋼管を設置するだけで良いため、その操作性や製作コストへの影響も少なくなると考えた。

### 3. 鋼材ユニットとPCa版の接合構造の性能検証

#### 3.1 引抜き、せん断実験の概要

複合 HPCa 部材に施工時荷重が作用すると、鋼材ユニットとPCa版との接合部にはせん断力と引抜き力が作用する。これらの作用に対する接合部の性能は、施工時における複合 HPCa 部材の曲げ挙動に影響を及ぼすことから、考案した接合部を模擬した試験体に対するせん断実験と引抜き実験を実施し、その構造性能を検証した。

図-4、図-5にせん断試験体と引抜き試験体の概要を示す。表-1に使用した材料の強度試験結果を示す。

せん断試験体は、コンクリートブロックと鋼板を考案した接合構造で一体化したものである。鋼管には直径4インチの配管用炭素鋼管(SGP)を使用した。頭付きスタッドの寸法は、複合 HPCa 部材の操作性で決まる最大値である直径22mm、長さ50mmとした。鋼管内には頭付きスタッドを1本、拔出し防止筋SD345 D13を2本設置し、グラウトを充填した。荷重方法は押抜きせん断実験とし、部材厚さ1.2mの複合 HPCa 部材へコンクリートを打ち込む際に接合部に作用する最大設計作用せん断力  $V_d=35\text{kN}$  で繰返し加力した後に単調荷重を行った。

引抜き試験体は、コンクリートブロックにせん断試験体と同じ接合構造を埋設したものである。荷重方法は、加力フレームと油圧ジャッキを用いた引抜き実験とし、せん断実験と同様な条件で設定した最大設計作用引抜き力  $T_d=8.6\text{kN}$  で繰返し加力した後に単調荷重を行った。

せん断実験ではコンクリートブロックと鋼板とのずれ変位を、引抜き実験ではコンクリートブロックからの

表-1 材料試験結果

材料	項目	試験結果 (N/mm <sup>2</sup> )	
		せん断実験	引抜き実験
コンクリート	圧縮強度	58.9	57.1
	割裂強度	3.24	3.89
グラウト	圧縮強度	87.5	85.7
	割裂強度	3.50	3.24
頭付きスタッド	降伏強度	396	
鋼管	降伏強度	203	
拔出し防止筋	降伏強度	380	

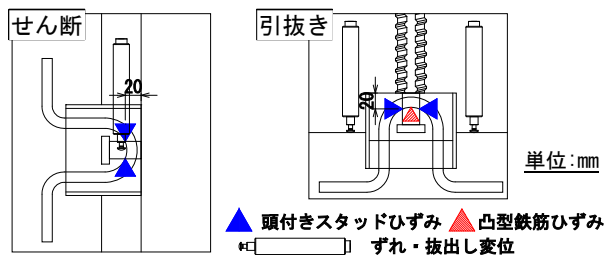


図-6 計測位置図

頭付きスタッドの拔出し変位を計測した。また、頭付きスタッドや拔出し防止筋のひずみも計測した(図-6)。

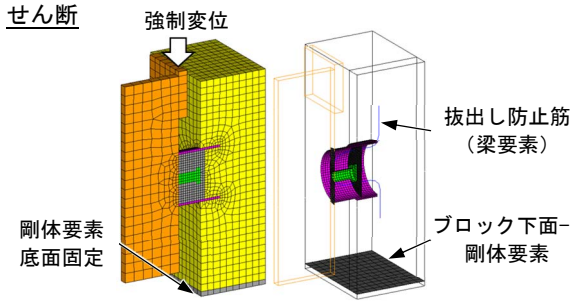
#### 3.2 FEM 解析の概要

接合部の挙動の評価に対する FEM 解析の適用性を検証するため、汎用解析プログラム DIANA10.5 を用いてせん断実験、引抜き実験を対象とした非線形解析を行った。

図-7、図-8に解析モデルを示す。解析モデルは対称性を考慮した1/4モデルとし、拔出し防止筋を梁要素、その他を全てソリッド要素でモデル化した。せん断解析では鋼板要素、引抜き解析では頭付きスタッド要素に鉛直の強制変位を与えることで実験の荷重状況を模擬した。各種鋼材とコンクリートおよびグラウトとの界面や、コンクリートとグラウトとの界面、せん断試験体におけるブロック下面と底面に設置した剛体要素との界面には、表-2に示すインターフェース要素を配置した。

コンクリートとグラウトの材料モデルには、全ひずみ理論に基づく固定ひび割れモデルを使用し、圧縮側構成則には圧縮破壊エネルギーを考慮した放物線モデルを適用した。コンクリートの圧縮破壊エネルギーの算出には中村らの提案式<sup>9)</sup>を用い、グラウトでは國本らの提案式<sup>7)</sup>を用いた。引張側構成則には引張破壊エネルギーを考慮

せん断



引抜き

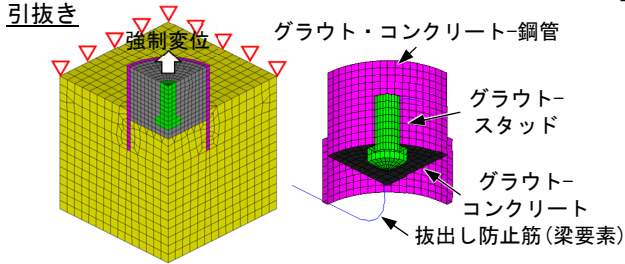


図-7 解析モデル

した Hordijk モデルを使用した。コンクリートの引張破壊エネルギーはコンクリート標準示方書<sup>8)</sup>に基づいて算出し、グラウトは國本ら<sup>7)</sup>の研究を参考に  $0.06\text{N/mm}^2$  と設定した。せん断伝達モデルには Al-Mahaidi モデルを適用した。各鋼材の構成則は、初期剛性  $E$  を  $2.0 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 、降伏後の剛性を  $E/100$  とするバイリニアモデルとした。

3.3 実験結果と FEM 解析結果の比較

図-8 にせん断実験と解析で得られたせん断力とずれ変位の関係を示す。図中の黒点線は設計作用せん断力  $V_d$ 、青破線は複合構造標準示方書<sup>3)</sup> (以下、複合標準) で算出されるせん断耐力  $V_{ssud}$ 、赤一点鎖線は複合標準で算出される残留ずれ変位が急激に大きくなる時点のせん断力  $V_{ss}$  ( $=0.43V_{ssud}$ ) を示す。写真-1 には試験体の損傷状態、図-9 には解析で得られた最大主ひずみ分布図を示す。

実験では、 $V_d$  到達時点でグラウトにひび割れが確認されたが、繰返し加载中に損傷は進展せず、残留変位は  $0.1\text{mm}$  以下であった。その後、せん断力が  $75\text{kN}$  に到達した時点でブロック下面に縦ひび割れが発生し、同ひび割れが開口することでせん断力に対する抵抗力が頭打ちになった。実験と解析を比較すると、せん断力に対する荷初期の剛性は概ね一致しており、グラウトの損傷状態やブロック下面に発生したひび割れを再現できている。一方、せん断耐力は実験よりも解析の方が小さい。図-10 に示すせん断力と頭付きスタッドの軸ひずみとの関係を見ると、解析では実験と異なり荷初期からも頭付きスタッドに軸ひずみが生じ、ひずみの増加勾配も大きいことから、インターフェース要素の粘着力や摩擦係数の設定値が実験よりも小さく、頭付きスタッドの拔出しや鋼管からのグラウトの拔出し、ブロックの回転を過大に評価した可能性が考えられる。

実験におけるせん断耐力は  $98.4\text{kN}$  であり、 $V_{ssud}$  を下

表-2 インターフェース要素

境界要素箇所	モデル
コンクリート・グラウトと鋼材	クーロン摩擦モデル(引張を受けると剥離) $\tan\phi=0.36, c=0.7\text{N/mm}^2, f_t=0.0\text{N/mm}^2$ , 複合構造標準示方書 <sup>3)</sup> 参照
鉄筋	島らの付着すべり関係 <sup>4)</sup>
コンクリートとグラウト	剥離を考慮したバイリニアモデル せん断強度 $=0.53\text{N/mm}^2$ (文献 <sup>5)</sup> を参照), 引張強度 = コンクリートとグラウトの小さい方
ブロック下面と剛体要素	クーロン摩擦モデル(引張を受けると剥離) $\tan\phi=0.36, c=0.0\text{N/mm}^2, f_t=0.0\text{N/mm}^2$

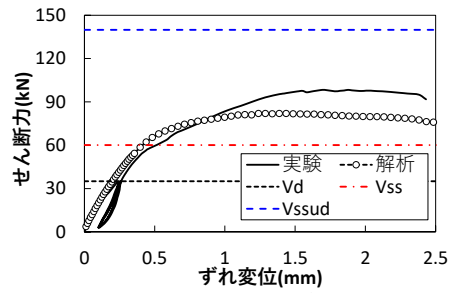


図-8 せん断力-ずれ変位関係



写真-1 せん断試験体損傷状態

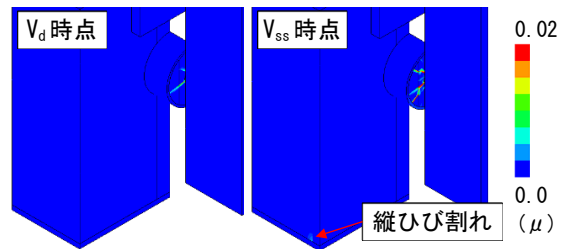


図-9 せん断解析 最大主ひずみ分布

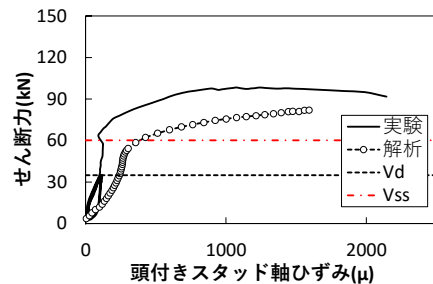


図-10 せん断力-頭付きスタッド軸ひずみ関係

回った。これは、せん断力の作用点とブロック支持点との間に水平距離があり、かつ通常の頭付きスタッドによる接合部とは異なりブロックの回転が鋼板に拘束されない条件であることが要因であると考えられる。一方、 $V_{ss}$  到達時点の変位は  $0.46\text{mm}$  であり、同時点まではせん断力とずれ変位、頭付きスタッド軸ひずみの関係はほぼ線

形であった。一般に、 $V_{ss}$ 到達時点のずれ変位は0.4mm程度<sup>3)</sup>であることから、同時点までは一般的な頭付きスタッドによる接合部と同様なせん断挙動を示したと言える。このことから、 $V_{ss}$ を用いることで同接合構造のせん断耐力の照査を行うことができると考えられる。

図-11 に引抜き実験と解析で得られた引抜き力と拔出し変位の関係を示す。図中の黒点線は $T_d$ 、青破線は複合標準で算出される引抜き耐力 $T_{sud}$ 、赤一点鎖線は日本建築学会の各種合成構造設計指針<sup>9)</sup>で算出されるコーン状破壊耐力 $T_c$ を示す。図-12 に引抜き力と拔出し防止筋ひずみの関係を、写真-2 に試験体の損傷状態を示し、図-13 には解析で得られた最大主ひずみ分布図を示す。

実験では、 $T_d$ 到達時点では損傷は確認されず、繰返し载荷中に拔出し変位が増加することも無かった。20kNの時点で拔出し変位が増大したがその後も荷重は増加し、拔出し防止筋に沿ったひび割れが拡大することで荷重が低下した。拔出し防止筋のひずみを見ると、20kN付近でひずみが急増しており、頭付きスタッドの拔出しに対して拔出し防止筋が抵抗していたことが分かる。実験と解析を比較すると、引抜き力に対する载荷初期の剛性や20kN付近で頭付きスタッドの先端付近にひび割れが生じて剛性が低下する様子を再現できている。また、頭付きスタッドと拔出し防止筋との間のグラウトが破壊するまでの破壊過程や拔出し防止筋の挙動も再現できている。

実験における引抜き耐力は44.5kNであり、 $T_{sud}$ を下回った。これは、頭付きスタッドの埋込長や頭付きスタッドと拔出し防止筋との距離が短く、通常頭付きスタッドとは異なる破壊形態を示したためである。一方、 $T_c$ 到達時点では、拔出し防止筋の存在により安定して引抜きに対する抵抗力を保持していることから、 $T_c$ を用いることで同接合構造の引抜き耐力を照査できると考えられる。

以上より、考案した接合構造は、設計で想定する作用に対して損傷が軽微であり高い一体性を確保できると、設定したFEM解析モデルによりせん断力、引抜き力に対する剛性や損傷過程を再現できることが分かった。また、想定されるせん断力、引抜き力に対して、照査で用いるべき接合部の耐力の考え方を整理することができた。

#### 4. 複合 HPCa 部材のコンクリート打込み実験

##### 4.1 実験概要

考案した接合構造を適用した複合 HPCa 部材に対して、支保工を省略した状態でコンクリートを打込んだ際の挙動を検証するため、部材高さ1.2mの頂版を模擬した実物大試験体に対するコンクリート打込み実験を実施した。

試験体の概要を図-14 に示す。PCa 版の寸法は高さ150mm、幅1,000mm、長さ9,100mmであり、PCa 版には鋼材ユニットとの接合用に直径4インチの鋼管(SGP)

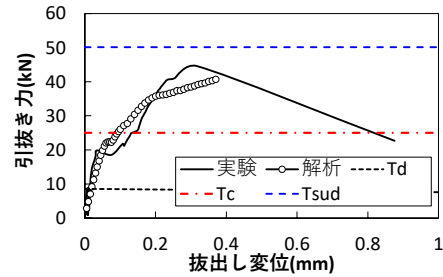


図-11 引抜き力-拔出し変位関係

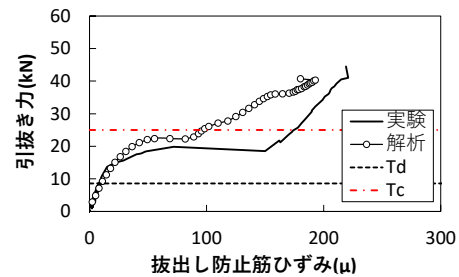


図-12 引抜き力-拔出し防止筋ひずみ関係

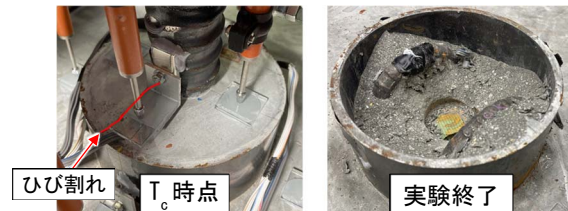


写真-2 引抜き試験体の損傷状態

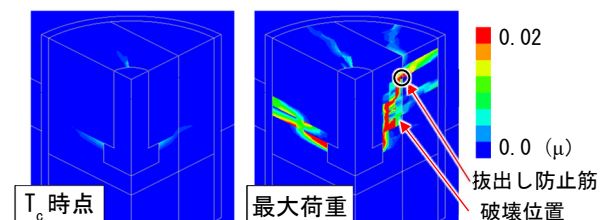


図-13 引抜き解析 最大主ひずみ分布

を250~500mm間隔で2列配置した。鋼管内部には、拔出し防止筋SD345 D10を2本ずつ配置した。鋼材ユニットは、板厚32mm、幅150mmの平鋼(SS400 FB32x150)による上下の主鋼材にブレース(SS400 FB22x90)とSD345 D19を溶接した2組の鋼材を並行に連結して製作した。下側主鋼材の下面には、PCa版との接合用の頭付きスタッド(φ16mm, h=50mm)を250~500mm間隔で設けた。鋼材ユニットの諸元は、コンクリート打込み時の支間中央のたわみが型枠の変形量の許容値<sup>10)</sup>として設定される3.0mm以下、かつPCa版下面に発生するひずみがひび割れ発生ひずみ以下となるよう、後述のFEM解析により設定した。鋼管や頭付きスタッドの諸元は、作用引抜き力が前述の $T_c$ 、作用せん断力が $V_{ss}$ を下回るように設定した。作用引抜き力はコンクリート打込み荷重を接合部の数で除すことで算出し、せん断力は合成桁

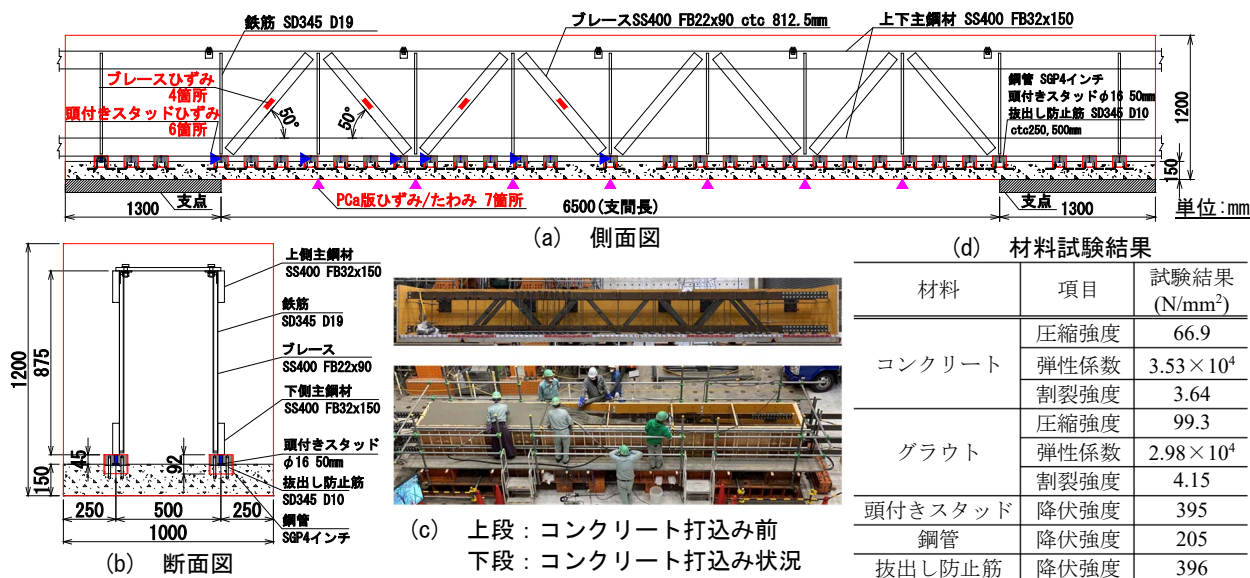


図-14 試験体概要

におけるずれ止めと同様に算出した。

PCa版と鋼材ユニットを製作した後に、鋼管内に頭付きスタッドが位置するように鋼材ユニットをPCa版上に架設し、鋼管内にグラウトを充填することでPCa版と鋼材ユニットを一体化させた。そして、支間長を6.5mとした支点（バタ角）上に試験体を設置して型枠を組み立てた後に、コンクリートを部材高さ方向に3層に分けて打ち込んだ。コンクリートの打込み完了後に、図-14(a)に示す位置でPCa版のたわみやPCa版下面のひずみ、ブレースや頭付きスタッドのひずみを計測した。各計測点のイニシャル値はコンクリート打ち込みの直前に計測した。

#### 4.2 FEM 解析の概要

前章と同様に DIANA10.5 を用いて非線形解析を実施した。図-15に解析モデルの概要を示す。解析モデルは対称性を考慮した1/4モデルとし、抜出し防止筋を梁要素、その他を全てソリッド要素でモデル化した。各材料モデルや境界要素の設定方法は前述のとおりである。支点要素をモデル化し、PCa版上面にコンクリート打込み時の死荷重を面分布荷重として作用させることで、実験の状況を模擬した。コンクリートの死荷重は、材料試験結果に基づいて22.6kN/m<sup>3</sup>とした。

#### 4.3 実験と解析との比較

図-16に支点部の沈下量を補正した部材軸方向のPCa版たわみ分布の実験および解析結果を示す。実験におけるたわみの最大値は1.1mmであり、たわみの許容値<sup>10)</sup>として設定した3.0mmを下回った。解析結果と比較すると、分布形状、たわみ量ともに良く一致している。

図-17にPCa版下面で計測したひずみ分布の実験および解析結果を示す。実験におけるひずみの最大値は68μであり、実験当日の材料試験結果から算出したPCa版の曲げひび割れ発生ひずみである103μを下回った。解

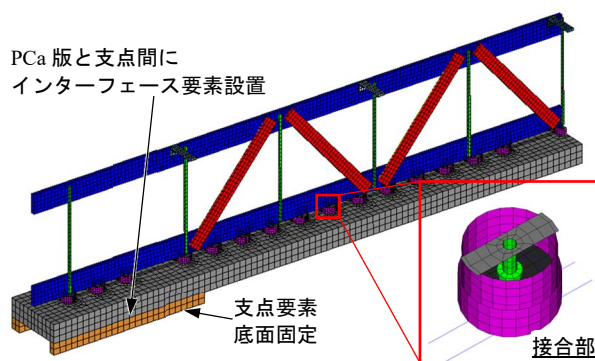


図-15 解析モデル

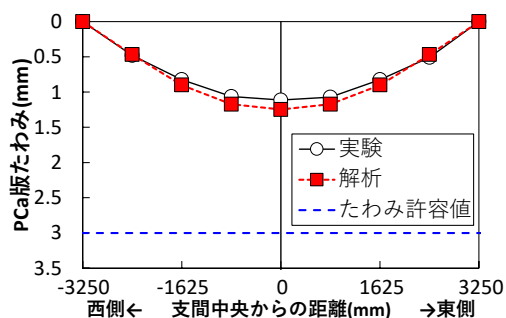


図-16 PCa版たわみ分布

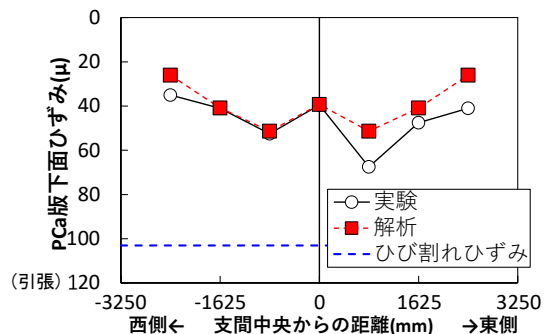


図-17 PCa版下面ひずみ分布

析結果と比較すると、部材中央から西側のスパンでは概

ね一致し、東側のスパンではひずみの大きさは実験結果の方が大きいものの分布形状は再現できている。

図-18 にブレース軸ひずみの実験および解析結果を示す。各ブレースに発生するひずみは実験と解析で良く一致したことから、実大規模においても本部材における鋼材ユニットがフレーム構造として機能することで施工時荷重に抵抗することが確認された。

図-19 に頭付きスタッドの軸ひずみ分布の実験および解析結果を示す。図中の青破線は設計作用引抜き力  $T_d$ 、赤破線はコーン状破壊耐力  $T_c$  に相当する軸ひずみを示す。実験と解析の結果は概ね一致しており、接合部の解析モデルが妥当であったと評価できる。実験、解析ともに、支間中央やブレースの交差部周辺では  $T_d$  相当ひずみよりも大きな引張ひずみが生じた一方で、支点部直上では圧縮ひずみが生じた。これはブレースに発生した軸力が接合部に影響を及ぼしたためだと考えられ、作用引抜き力を算出する際にはこの影響を考慮する必要があることが分かった。一方、接合部の引抜き耐力として設定した  $T_c$  相当ひずみに対しては、発生したひずみは小さいことから、接合部は健全性を保持していたと考えられる。

以上より、考案した接合部を有する実物大規模の複合 HPCa 部材は、鋼材ユニットがフレーム構造として機能することで支保工を省略し得る曲げ剛性を確保できることと、施工時荷重に対して接合部が健全性を保持していたことが分かった。また、前述の解析モデルにより、コンクリート打込み時における複合 HPCa 部材の曲げ挙動を評価できることが分かった。

## 5. まとめ

PCa 版の製作性に配慮した複合 HPCa 部材における鋼材ユニットと PCa 版の接合構造を考案し、接合部と同接合部を有する複合 HPCa 部材の構造性能を実験、FEM 解析により検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 考案した接合部は、設計で想定する作用に対して損傷が軽微であり、高い一体性を確保できる。また、設計作用せん断力に対しては残留ずれ変位が急激に大きくなる時点のせん断力、引抜き力に対してはコーン状破壊耐力で照査できることを示唆した。
- (2) 考案した接合部を有する支間長 6.5m の実物大規模の複合 HPCa 部材に対してコンクリートを打ち込んだ結果、鋼材ユニットがフレーム構造として機能することで、支保工を省略し得る曲げ剛性を確保できることを実証した。また、施工時荷重に対して接合部が健全性を保持できることを確認した。
- (3) 接合部のせん断、引抜き力に対する挙動や、接合部を有する複合 HPCa 部材のコンクリート打込み時における曲げ挙動を設定した FEM 解析モデルによっ

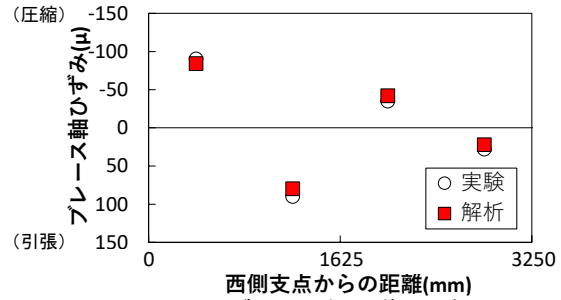


図-18 ブレース軸ひずみ分布

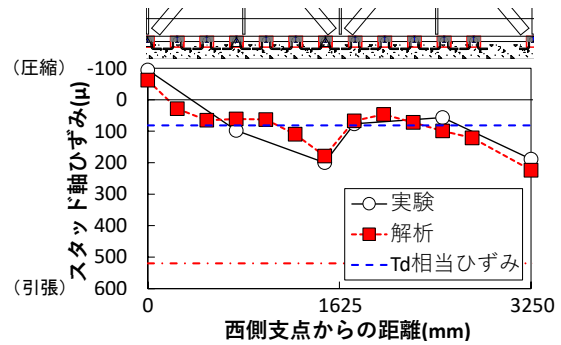


図-19 頭付きスタッドの軸ひずみ分布

て評価できることを示した。

## 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.
- 2) 末長清也, 曾我部直樹, 岩本拓也, 皆川春奈: ハーフプレキャスト部材の配力筋継手構造に関する実験的検討, 土木学会第 77 回年次学術講演会, V-367, 2022.
- 3) 土木学会: 複合構造標準示方書[設計編], 2014
- 4) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり関係, 土木学会論文集, 第 378/V-6 号, pp.165-174, 1987.
- 5) 金享俊, 野口貴文, 米田信年, 濱崎仁: 有限要素逆解析による補修モルタルと躯体コンクリートの付着構成則構築, コンクリート工学, VI.30, No.2, pp.577-582, 2008.
- 6) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001.
- 7) 國本拓也, 田嶋和樹, 白井伸明: グラウト材の力学的性能と破壊エネルギーの実験的評価, コンクリート工学, Vol.30, No.2, pp.673-678, 2008.
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2017
- 9) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説, 1985
- 10) 土木学会: 仮設構造物の計画と施工, 2010