

# RC 躯体構築の施工合理化に資する複合ハーフプレキャスト部材の開発

## Development of Composite Half Precast Members for Rationalization of RC Construction

岩本 拓也 曾我部 直樹

### 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）部材の開発を進めている。本研究では、支保工を省略した状態で複合 HPCa 部材へコンクリートを打ち込んだ際の曲げ性能の検証を目的として、実物大モックアップ実験を行った。その結果、コンクリート打込み時に過大なたわみやひび割れが生じることなく、必要な性能を満足できることを実証した。また、複数の数値解析手法により実物大モックアップ実験の再現解析を行い、本部材の設計、照査における各数値解析手法の適用性について考察した。

### 目 次

- I. はじめに
- II. 複合 HPCa 部材の概要
- III. 複合 HPCa 部材のコンクリート打込み実験と数値解析
- 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、型枠を代替する PCa 版を、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で補強した HPCa 部材である (Fig.1)。既往の検討りでは、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。その後、PCa 版と鋼材ユニットとの一体性や同部材の製作性や品質、現場での施工性に配慮した PCa 版と鋼材ユニットとの接合構造を考案<sup>2)</sup>するなど、本部材の実適用に向けた検討を進めてきた。

本研究では、実際の頂版施工に近い条件でのコンクリート打込み時における複合 HPCa 部材の構造成立性を検証するため、実物大規模のモックアップ試験体に対するコンクリート打込み実験を行った。また、複数の数値解析手法により実物大モックアップ実験の再現解析を行い、コンクリート打込みに対する本部材の設計、照査における数値解析の適用性についても検証した。

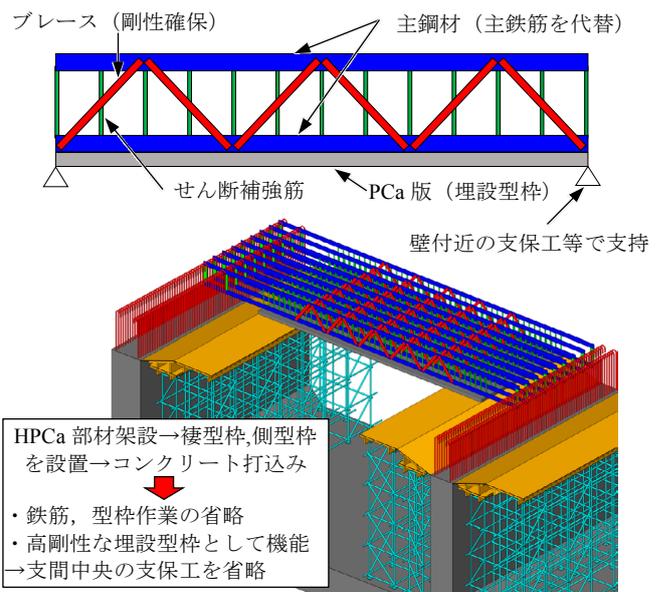


Fig.1 複合 HPCa 部材の概要  
(Image of Composite HPCa Member)

#### II. 複合 HPCa 部材の概要

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のブレース、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を接合した構造である (Fig.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、同部材のみで支保工を省略し得る曲げ剛性を確保

**キーワード** : SRC 構造, 生産性向上, RC 躯体, 頂版, 数値解析

**Keywords** : SRC structure, productivity improvement, box culvert, numerical analysis

することができる。

本部材に施工時荷重が作用すると、PCa版と鋼材ユニット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、本部材の曲げ挙動に影響を及ぼすことから、設計で想定される荷重に対して高い一体性を確保できる接合構造が必要である。また、同箇所の構造は、PCa版の操作性や品質、配力筋の場所組みの作業効率に影響を及ぼすことから、これらに配慮した構造とする必要がある。

これに対し、凸型に加工した抜き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する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構造<sup>2)</sup>を考案している (Fig.2)。既往の検討<sup>2)</sup>において、考案した接合構造は設計で想定されるせん断力、引抜き力に対して損傷が軽微であり、高い一体性を確保できることを確認している。

### Ⅲ. 複合 HPCa 部材のコンクリート打込み実験と数値解析

#### 1. 実験概要

考案した接合構造を有する複合 HPCa 部材に対し、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 のボックスカルバートの頂版を模擬した実物大モックアップ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 Fig.3、使用した材料を Table 1 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) を 250~500mm 間隔で 2 列配置した。鋼管内部には、抜き防止筋 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) とせん断補強筋を兼用する SD345 D19 を溶接した 2 組のフレーム状の鋼材を並行に連結することで製作した。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 間隔で配置した。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>3)</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の生じる大きさ以下となるよう、後述の数値解析により設定した。頭付きスタッドの諸元は、頭

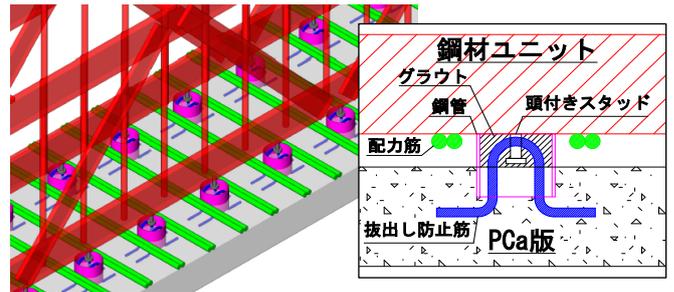
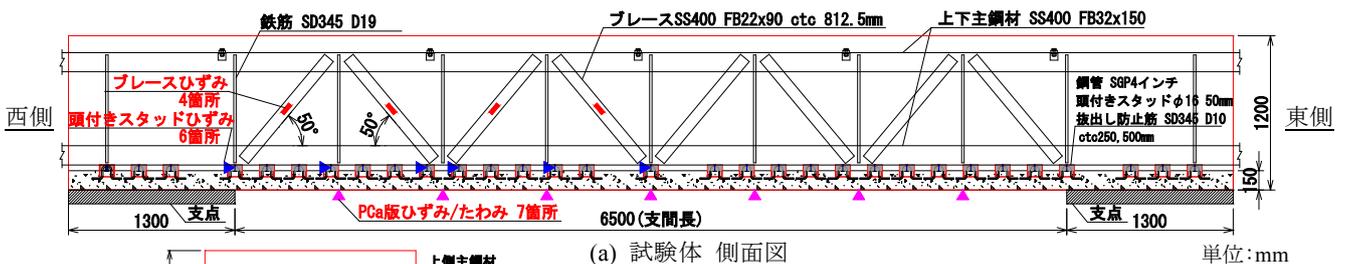


Fig.2 PCa版と鋼材ユニットとの接合構造<sup>2)</sup>  
(Joint Structure of PCa Slab and Steel Unit)

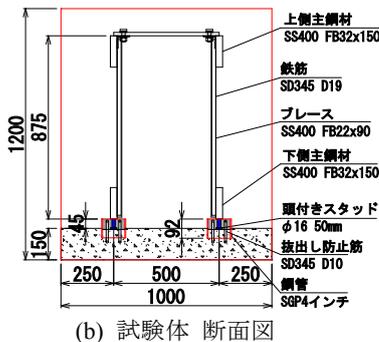
Table 1 材料試験結果  
(Strength of Materials)

材料	項目	試験結果(N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	圧縮強度	66.9
	弾性係数	3.53×10 <sup>4</sup>
	割裂引張強度	3.64
グラウト	圧縮強度	99.3
	弾性係数	2.98×10 <sup>4</sup>
	割裂強度	4.15
頭付きスタッド	降伏強度	395
	鋼管	降伏強度
抜き防止筋	降伏強度	396



(a) 試験体 側面図

単位:mm



(b) 試験体 断面図



(c) 実験状況 (上: コンクリート打込み前 下: コンクリート打込み状況)

Fig.3 コンクリート打込み実験の概要  
(Overview of Concrete Placing Test)

付きスタッドへの作用引抜き力が各種合成設計指針<sup>4)</sup>で算出されるコーン状破壊耐力 $T_c$ を、作用せん断力が複合構造標準示方書<sup>5)</sup>(以下、複合標準と称する)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 $V_{ss}$ ( $=0.43V_{ssud}$ ,  $V_{ssud}$ :複合標準<sup>5)</sup>で算出される頭付きスタッドのせん断耐力)を下回るように設定した。作用引抜き力は接合部の部材軸方向と幅方向の間隔から算出される面積にコンクリート打込み時の分布荷重を乗じることで算出し、せん断力は合成桁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個別に製作した後に、鋼管内に頭付きスタッドが位置するよう鋼材ユニットを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側面および稜面の型枠を組み立てた後に、試験体を部材高さ方向および軸方向に3等分割して9つの打込みエリアに分け、いわゆる「たわら打ち」によりコンクリートを打ち込んだ。コンクリートの打込み完了後に、Fig.3(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。なお、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。

## 2. 解析概要

コンクリート打込み時における複合HPCa部材の曲げ性能の評価に対する数値解析の適用性を検証するため、同実験を対象としてフレームモデル解析とファイバーモデル解析、FEM解析を実施した。各解析の目的と概要を以下に示す。

### (1) フレームモデル

本解析は、コンクリート打込み時の複合HPCa部材のたわみを簡易に評価して鋼材ユニットの諸元を決定することを目的としている。

解析モデルは、たわみを安全側に評価するため、鋼材ユニットのみをモデル化した二次元の骨組みモデルとした。下側主鋼材の要素に単純支持点を設け、同要素にコンクリート打込み荷重(23.5kN/m<sup>3</sup>)を等分布荷重として作用させた。なお、鋼材ユニットの諸元を設定する際の設計荷重には、コンクリート打込み荷重に死荷重と作業時荷重<sup>6)</sup>(2.5kN/m<sup>2</sup>)を加えた値を用いている。

### (2) ファイバーモデル

本解析は、PCa版とPCa版-鋼材ユニットの接合部をモデル化することで、たわみの予測精度を向上させるとともに、PCa版に発生するひずみや接合部への作用力を直接的に評価することを目的としている。

Fig.4に解析モデルの概要を示す。PCa版と鋼材ユニットを線形のファイバー要素、PCa版と鋼材ユニットとの接合部を法線・せん断の2方向の線形ばねでモデル化した2次元モデルである。PCa版要素に単純支持点を設け、同要素にコンク

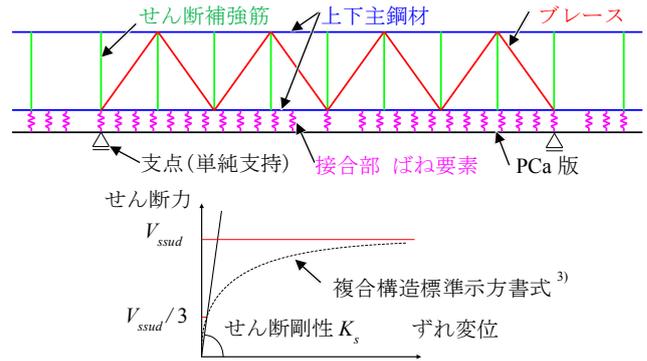


Fig.4 ファイバーモデルとせん断ばねの概要 (Fiber Model Analysis and Shear Spring Model)

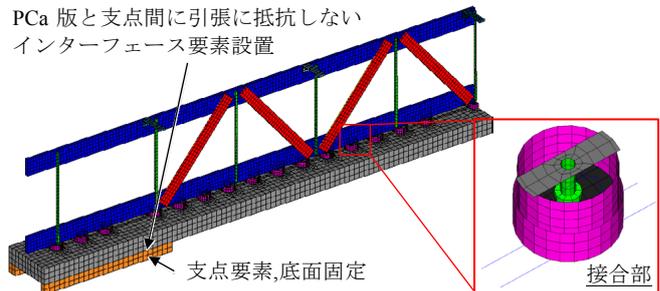


Fig.5 FEM 解析モデル (Finite Element Analysis Model)

Table 2 インターフェース要素 (Interface Element)

箇所	材料モデル
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>5)</sup> 参照
コンクリート・グラウトと鉄筋	島らの付着すべり関係 <sup>7)</sup>
コンクリートとグラウト	剥離を考慮したバイニリアモデル せん断強度 = 0.53N/mm <sup>2</sup> (文献 <sup>8)</sup> を参照), 引張強度 = コンクリートとグラウトの小さい方
支点要素とPCa版要素	クーロン摩擦モデル(引張を受けると剥離) $\tan\phi=0.36$ , $c=0.0\text{N/mm}^2$ , $f_t=0.0\text{N/mm}^2$

リート打込み荷重を等分布荷重として作用させた。法線方向のばね剛性は、頭付きスタッドの断面積と弾性係数の積を頭付きスタッドの長さで除した値とした。せん断方向のばね剛性 $K_s$ は、複合標準<sup>3)</sup>に記載されている頭付きスタッドのせん断力とずれ変位の関係における初期割線勾配(最大せん断力 $V_{ssud}$ の1/3の点における勾配)とした。なお、同解析モデルにおける鋼材ユニットの部分の解析モデルは、前述のフレームモデルの解析モデルと同様である。

### (3) FEM

本解析は、PCa版-鋼材ユニットの接合部における詳細な挙動や、部材全体の曲げ挙動を再現することを目的としている。なお、解析はDIANA10.5を用いた3次元非線形解析である。

Fig.5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、PCa 版-鋼材ユニットの接合部における抜き筋を梁要素、その他を全てソリッド要素でモデル化した。実験における支持点もモデル化し、PCa 版上面にコンクリート打込み荷重を作用させることで、実験の状況を再現した。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の界面には Table 2 に示すインターフェース要素を設けた。

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>10)</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>11)</sup>に基づいて算出し、グラウトは國本ら<sup>10)</sup>の研究を参考に  $0.06\text{N/mm}$  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。

2. 実験と解析との比較、考察

(1) PCa 版のたわみ分布

Fig.6 に、コンクリート打込み完了後に計測した PCa 版のたわみ分布の実験および解析結果を示す。実験、解析ともに、支点部の沈下量を補正した結果を示している。

実験におけるたわみの最大値は 1.1mm であり、たわみの許容値として設定した 3.0mm を下回ることを確認した。解析結果と比較すると、いずれの解析ケースも実験におけるたわみの分布形状を再現できている。鋼材ユニットのみをモデル化したフレームモデルによるたわみの最大値は 1.4mm であり、実験結果を安全側に評価していることから、同解析により複合 HPCa 部材のたわみを算出した上で、鋼材フレームの諸元を決定することは妥当であると言える。また、PCa 版も考慮したファイバーモデルと FEM では、たわみの最大値も概ね一致した。

(2) PCa 版のひずみ分布

Fig.7 にコンクリート打込み完了後に 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。解析は、PCa 版をモデル化したファイバーモデルと FEM の結果を示している。図中の黒破線は、実験当日の PCa 版の引張強度と弾性係数から算出したひび割れ発生時に相当するひずみを示す。

実験におけるひずみの最大値は  $68\mu$  であり、ひび割れ発生時に相当するひずみである  $103\mu$  下回った。解析結果と比較すると、FEM では支間中央から西側のスパンでは実験結果とよく一致し、東側のスパンでは分布形状は再現できているものの、大きさについては実験結果の方が大きい傾向がある。Fig.8 には FEM による PCa 版ひずみのコンター図を示す。接

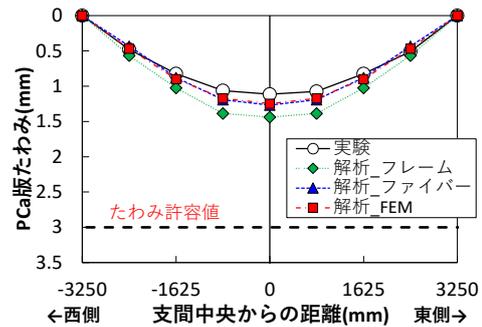


Fig.6 PCa 版たわみ分布 (Deflection Distribution of PCa Slab)

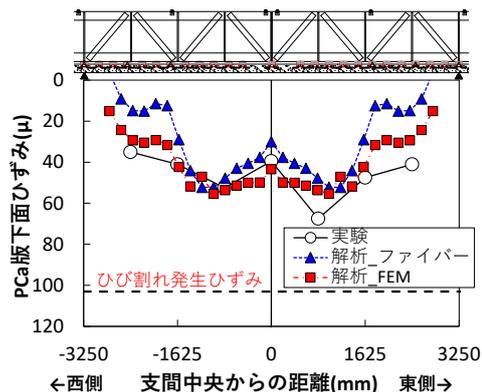


Fig.7 PCa 版下面のひずみ分布 (Strain Distribution of Underside of PCa Slab)

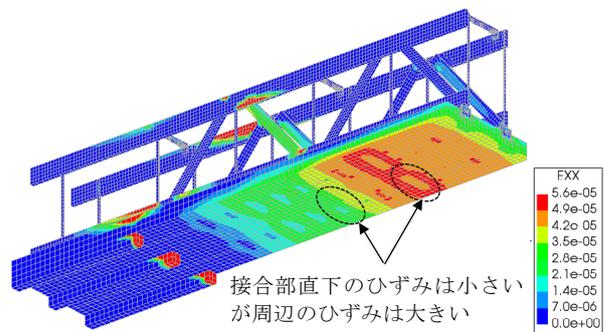


Fig.8 FEM PCa 版ひずみのコンター図 (Contour Plot of Strain of PCa Slab by FEM)

合部の直下ではひずみが小さくなる一方で、接合部から距離が離れるとひずみが大きくなる傾向にあった。また、図中黒丸の領域ではひずみが大きくなるとともに、部材幅方向で発生するひずみの大きさに差異が見られた。このように FEM は、PCa 版ひずみの 3 次元的な分布や接合部が PCa 版ひずみに及ぼす影響を詳細に検証できることから、本構造を合理化する際の検討に有効であると考えられる。

ファイバーモデルでは、支間中央から  $\pm 1625\text{mm}$  までの領域では FEM と同様な結果が得られたものの、支点側のひずみ量は実験結果を過小評価した。これは、FEM では実験の境界条件を詳細にモデル化したのに対し、ファイバーモデルで

は支点を単純支持でモデル化したことが要因であると考えられる。しかしながら、ひずみが最も大きくなる位置とその大きさについては FEM と同等な精度で実験を再現できていることから、設計における PCa 版ひずみの照査に対しては、FEM よりも簡易であるファイバーモデル解析も適用できる可能性がある。

(3) ブレースの軸ひずみ分布

Fig.9 にブレース軸ひずみの実験および解析結果を示す。実験と FEM の結果は、ブレースの両面で計測したブレース軸方向ひずみの平均値を示している。各ブレースに発生するひずみは、実験と全てのケースの解析でよく一致しており、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していること、ならびにその諸元の設定においてフレームモデル解析が有効であることが確認できた。

(4) 頭付きスタッドの軸ひずみ分布

Fig.10 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。図中の黒破線は頭付きスタッドに作用する設計作用引抜き力  $T_d$  に相当する軸ひずみを示し、緑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。

実験では、ブレース交差部周辺では  $T_d$  相当ひずみを上回る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。

実験と FEM の結果を比較すると、ひずみ分布の形状、大きさともによく一致しており、接合部への作用引抜き力を FEM により詳細に評価できることが分かった。実験とファイバーモデルの結果を比較すると、前述のとおり支点部周辺では実験の再現性は低いものの、実験で最も大きなひずみが生じたブレース交差位置や支間中央では FEM と同等の精度で実験を評価できている。このことから、接合部の照査を行うための作用引抜き力の設定においては、FEM よりも簡易なファイバーモデルの適用も有効であると評価できる。

(5) 接合部に作用するせん断力分布

接合部に作用するせん断力は、実験での計測が困難であることから、ファイバーモデルと FEM 解析によって検証する。

Fig.11 にファイバーモデルと FEM で得られた接合部に作用するせん断力の分布図を示す。ファイバーモデルの結果は、接合部のばね要素に作用する水平力を示し、FEM の結果は、接合部要素に発生した水平応力と断面積を積分した値を示している。図中の黒破線は、設計作用せん断力  $V_d$  を示し、緑破線は、複合標準<sup>5)</sup>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。  $V_{ss}$  を算出す

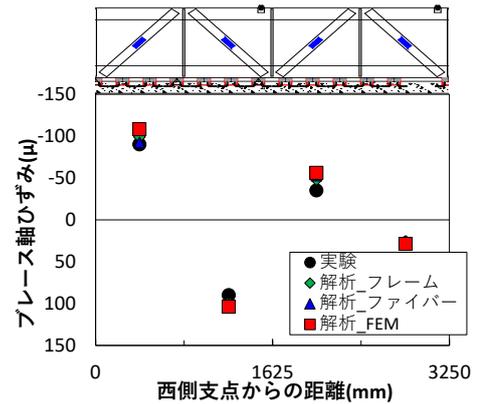


Fig.9 ブレース軸ひずみ分布 (Axial Strain Distribution of Brace)

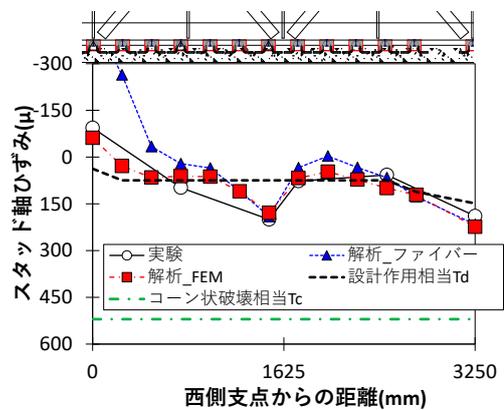


Fig.10 頭付きスタッドの軸ひずみ分布 (Axial Strain Distribution of Headed Studs)

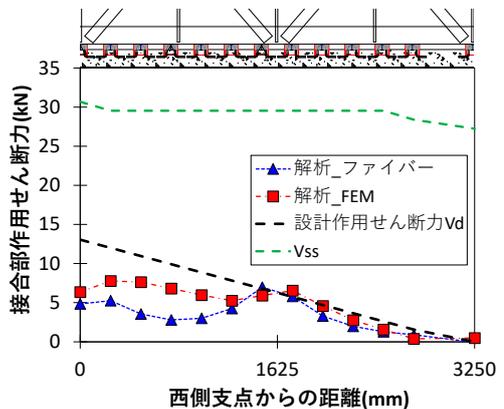


Fig.11 接合部に作用するせん断力分布 (Shear Force Distribution Acting on Joints)

る際には、頭付きスタッドに作用する引抜き力  $T_d$  による耐力低下を考慮している。

$V_d$  と解析結果を比較すると、ブレース交差部から支間中央との間の領域では概ね一致し、ファイバーモデルと FEM の結果も一致した。一方、支点部周辺では解析結果が  $V_d$  を下回り、ファイバーモデルと FEM の解析結果にも差異が生じた。支点部周辺の接合部には、ブレースからの軸力や境界条件が

影響しており、これらを考慮していない  $V_d$  と相違したものと考えられる。しかしながら、支間全長にわたって  $V_d$  は解析結果を上回っていることから、通常の合成桁におけるずれ止めと同様の手法により、本接合構造に作用するせん断力を安全側に評価できることが示唆された。また、解析で算出された作用せん断力は、全ての接合部で  $V_{ss}$  を下回っていることから、実験においても接合部の一体性が確保できていたものと推定される。

#### IV. まとめ

本研究では、支保工を省略した実物大規模の複合 HPCa 部材にコンクリートを打込み、本部材が施工時荷重を受けた際の曲げ性能を検証するとともに、その評価における数値解析の有効性について検討した。得られた知見を以下に示す。

- a. 実物大規模の複合 HPCa 部材において、鋼材ユニットがフレーム構造として機能することで、支保工を省略した状態で問題無くコンクリートを打ち込めることを確認した。
- b. フレームモデルを用いた数値解析により、複合 HPCa 部材のたわみを安全側に評価できることが分かった。
- c. 接合部をばね要素でモデル化したファイバーモデルによる数値解析では、境界条件の設定に課題はあるものの、複合 HPCa 部材のたわみや PCa 版の最大ひずみ、接合部への最大作用力を概ね評価できることを確認した。
- d. 接合部を詳細にモデル化した FEM 解析では、コンクリート打込み時における複合 HPCa 部材の全長にわたるたわみ、各部材の応力、ひずみおよび接合部での作用力を再現することができた。
- e. 複合 HPCa 部材の設計においては、鋼材ユニットの概略設計をフレームモデル解析によって行い、比較的簡

易なファイバーモデル解析によって各部材および接合部の照査を行うことが有効であると考えられる。

#### 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) 安田和弘ほか: 複合ハーフプレキャスト部材における鋼材と PCa 版の接合部に関する実験的検討, 土木学会第 77 回年次学術講演会, CS6-15, 2022.
- 3) 土木学会: 仮設建造物の計画と施工【2010 年改訂版】, 2010.
- 4) 日本建築学会: 各種合成構造設計指針・同解説, 1985.
- 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.
- 6) 土木学会: 2017 年制定コンクリート標準示方書【施工編】, 2017
- 7) 島弘ほか: 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.
- 8) 金享俊ほか: 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, Vol.30, No.2, pp.577-582, 2008.
- 9) Nakamura et al.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001.
- 10) 國本拓也ほか; 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.
- 11) 土木学会: 2022 年制定コンクリート標準示方書【設計編】, 2022.

## Development of Composite Half Precast Members for Rationalization of RC Construction

*Takuya Iwamoto and Naoki Sogabe*

To improve productivity in 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. In this study, concrete placing experiments were conducted on full-scale composite HPCa members to verify the flexural performance when placing concrete. As a result, it was demonstrated that the required performance could be satisfied without excessive deflection or cracking during concrete placement. Numerical analyses were also conducted in the experiments using several methods, and the applicability of each method to the design and verification of composite HPCa members is discussed.