

論文 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

十川 貴行*1・岩本 拓也*2・曾我部 直樹*3・平 陽兵*4

要旨：RC 躯体の頂版施工における支保工，型枠，配筋作業の省力化を目的として，型枠を代替する PCa 版，主鉄筋を代替する主鋼材，せん断補強筋およびブレースを組み合わせた高剛性を有する複合プレハブ部材を開発している。本稿では，支保工を省略して設置したプレハブ部材にコンクリートを打ち込んだ際の剛性と，コンクリート硬化後の複合部材としての曲げ特性を検証した。その結果，コンクリート打込み時には，本部材が想定した機構で施工時荷重に抵抗すること，コンクリート硬化後には，本部材の曲げ耐力，ひび割れ性状を RC 部材と同様に評価できることを確認した。

キーワード：複合プレハブ部材，溶接接合，頂版，曲げ特性，生産性向上

1. はじめに

建設技能者の人材不足が顕在化しつつある近年の建設現場の中でも，鉄筋や型枠組立などの人力作業の占める割合が大きい RC 躯体構築において，作業の省人化および生産性向上は喫緊の課題である。特に，RC 躯体の頂版施工では，コンクリート打込み時の型枠の変形を抑制するために大規模な支保工が必要であり，その組立，解体作業に多大な労力と工期を要することが，RC 躯体構築全体の生産性に大きく影響する要因となっていた。

これに対し，筆者らは RC 躯体の頂版の支保工，型枠および配筋作業の省力化を目的とした複合プレハブ部材を開発している。既往の検討において，実大モックアップ試験体に対してコンクリート打込み時の死荷重を模擬した集中荷重を与え，本部材が支保工を省略し得る剛性を実現できることを確認している¹⁾。

本稿では，本部材を模擬した試験体を対象として，実際にコンクリートを打ち込んだ際のプレハブ部材の剛性，ならびにコンクリート硬化後における複合部材としての曲げ特性を検証した。

2. 複合プレハブ部材の概要

複合プレハブ部材の概要を図-1 に示す。本部材は，型枠を代替する PCa 版に，主鉄筋を代替する主鋼材，せん断補強筋およびブレースなどを溶接によって組み立てた鋼材ユニットが配置されたプレハブ部材である。溶接により格点部を剛結とすることで，コンクリート打込み時の荷重に対し，ブレースが圧縮力，せん断補強筋が引張力を負担するフレーム構造が成り立ち，本部材自体が高い剛性を実現することによって支保工を省力化できる。また，本部材を事前に工場または現場ヤードで製作し，重機によって架設することで，現場作業が若干の配筋作業と棲型枠の組立作業，コンクリート打込み作業のみとなり，頂版施工における現場での型枠，配筋作業を省力化することができる。

3. 試験体の概要

試験体の諸元を図-2 に，主な使用鋼材の諸元を表-1 に，材料試験から得られたコンクリートの物性を表-2 に示す。本試験体は都市内の大型開削トンネルの RC 頂版の約 1/2 スケールのものを想定し，コンクリート打込

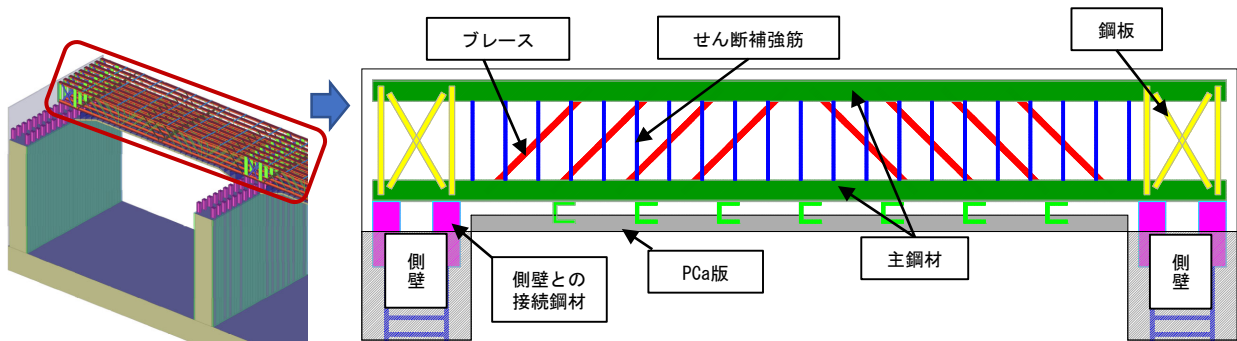


図-1 複合プレハブ部材の概要

*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上席研究員 博(工) (正会員)

*4 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)

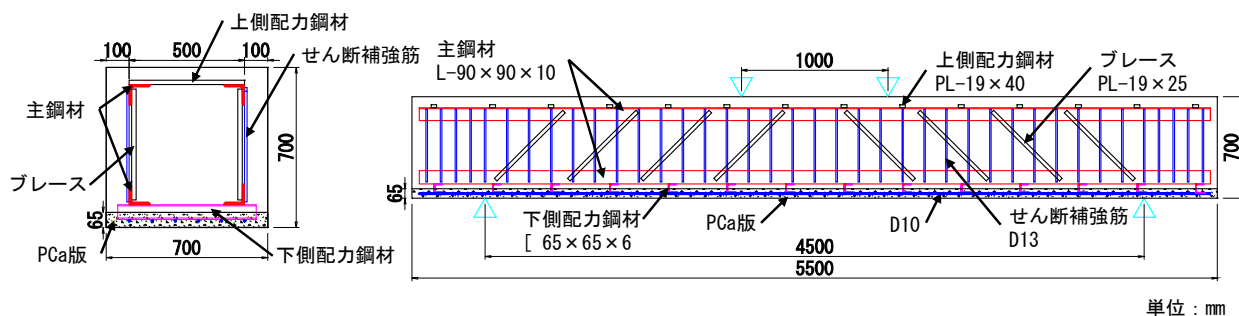


図-2 試験体の諸元（左：断面図，右：側面図）

表-1 主な使用鋼材

部材	寸法	材質	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
主鋼材	等辺山形鋼 90×90×10mm	SS400	304	466
せん断補強筋	呼び名 D13	SD345	379	545
ブレース	鋼板 19×25mm	SS400	274	431
上側配力鋼材	鋼板 19×40mm	SS400	274	431
下側配力鋼材	溝形鋼 65×65×6mm	SS400	326	473
PCa 版内鉄筋	呼び名 D10	SD345	355	525

表-2 コンクリートの物性

部材	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
PCa 版（コンクリート打込み時）	47.9	3.34
PCa 版（曲げ試験時）	50.1	3.45
後打ち部（曲げ試験時）	32.8	2.75

み後の寸法を 700×700×5,500mm とした。曲げ耐力が対象とした RC 頂版と同等となるように、主鋼材として等辺山形鋼（90×90×10）を上下に 2 本ずつ配置した。また、曲げ破壊が先行するように、せん断補強筋として D13 鉄筋を 150mm 間隔で配置した。型枠を代替する PCa 版の寸法は 700×65×5,500mm であり、コンクリート打込み時点での PCa 版の目標圧縮強度を 50N/mm² に設定した。また、PCa 版の軸方向には、D10 鉄筋を 100mm 間隔で配置し、配力方向には、鋼材ユニットとの接合のために溝形鋼（65×65×6）を埋設した。

ブレースには 19×25mm の鋼板を用い、支間中央から端部に向けて「ハ」の字の形状になるように 500mm 間隔で配置した。ブレースの断面形状および配置間隔は、後述するフレームモデルによる解析にて、コンクリート打込み時の試験体のたわみが、一般的な型枠の許容値²⁾ (=3mm) 以内となるように設定した。また、上側主鋼材の配力方向にも 19×40mm の鋼板を 400mm 間隔で配置し、上側主鋼材同士を連結した。

せん断補強筋と主鋼材はフレア K 型溶接によって接合し、その他の鋼材は隅肉溶接により接合した。これらの溶接部の溶接長および脚長は、試験体の架設時およびコ

ンクリート打込み時において、溶接部に発生する応力が鉄筋フレア溶接継手設計施工指針³⁾および道路橋示方書⁴⁾に基づき計算される許容応力度以下となるように設定した。

試験体は以下の手順に従って製作した。まず、写真-1 に示すように PCa 版を製作した。PCa 版は、後打ちコンクリートとの一体性を確保するために、コンクリートの硬化後にハイウォッシャーによって PCa 版上面の目粗し処理を行った。その後、PCa 版に埋設した下側配力鋼材と、鋼材加工工場で作成した主鋼材、せん断補強筋およびブレースなどからなる鋼材ユニットを溶接接合してプレハブ部材を製作した。PCa 版と鋼材ユニットの接合時における溶接作業の状況を写真-2、溶接個所の様子を写真-3 に示す。溶接は、炭酸ガスアーク溶接にて実施した。溶接によって試験体に発生した熱変形は 5mm 以下で、試験体の製作に対して大きな影響は無かった。

4. コンクリート打込み時の複合プレハブ部材の挙動

4.1 検討概要

コンクリート打込み時における本部材の剛性を検証するため、写真-4 に示すように、スパン長が 4,500mm と



写真-1 PCa版の製作状況



写真-2 溶接作業の状況

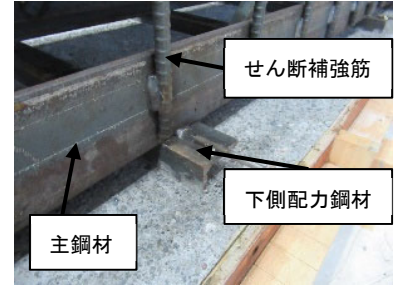


写真-3 溶接箇所の様子

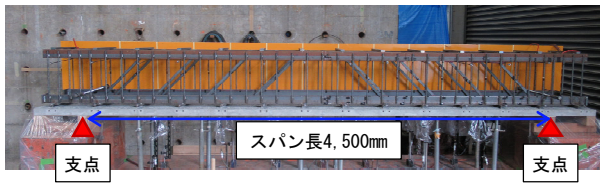


写真-4 試験体の設置状況

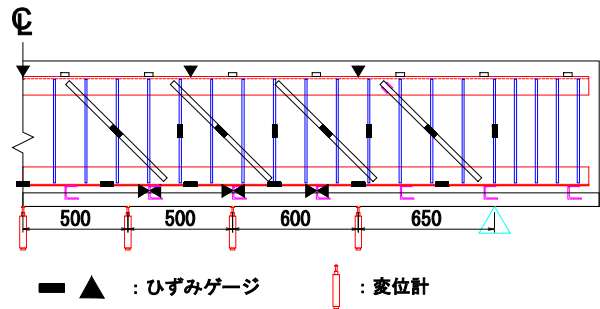


図-3 ひずみおよび変位の計測位置

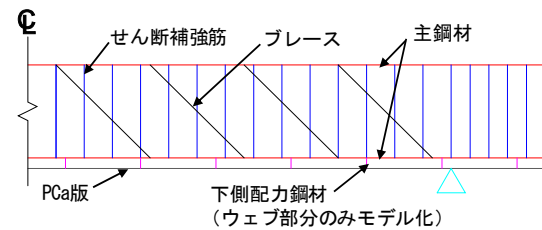


図-4 解析モデル

なるように支点に設置した本試験体に対し、無支保でコンクリートを打ち込んだ際のたわみおよび各鋼材のひずみを計測した。支点では、PCa版の下にテフロンシートを挟むことで、水平方向の摩擦を低減した。また、側面に設置した型枠がコンクリート打込み時のプレハブ部材の剛性に影響しないように、側面の型枠を軸方向に分割し、低剛性なポリスチレンを目地材として設置した。

ひずみゲージおよび変位計の計測位置を図-3に示す。ひずみは、主鋼材、せん断補強筋、ブレースおよび下側配力鋼材を計測した。上側主鋼材はフランジ上面、下側主鋼材はウェブ側面の下縁のひずみを計測した。せん断補強筋およびブレースは、それぞれの部材の長さ方向における中央の軸ひずみを計測した。下側配力鋼材は、PCa版天端付近の鉛直方向ひずみを計測した。変位計は図-3に示す位置に設置し、PCa版のたわみを計測した。

コンクリートは、試験体の高さ700mmを4層に分けて打ち込み、随時、ひずみと変位を計測した。

4.2 予備解析概要

実験に先立ち、コンクリート打込み時の本試験体の挙動を検討するために、図-4に示す解析モデルによる予備解析を実施した。

解析モデルは、PCa版、主鋼材、せん断補強筋、ブレースおよび下側配力鋼材を梁要素に置き換え、格点を剛結としたフレームモデルとした。ブレースおよびせん断補強筋は線形梁要素とし、PCa版、主鋼材および下側配力鋼材は、断面を10分割して非線形性を考慮した梁要素とし、それぞれの材料の断面形状および応力-ひずみ関係を与えた。なお、下側配力鋼材はウェブ部のみをモ

デル化した。

PCa版のコンクリートの応力-ひずみ関係は、コンクリート標準示方書⁵⁾に基づき与え、圧縮強度と引張強度はそれぞれ実験時の材料試験から得られた値とした。鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルで与え、ヤング係数を $E_s=200\text{kN/mm}^2$ として、材料試験の結果から得られた降伏強度を降伏点とし、降伏後の剛性を $E_s/100$ とした。

荷重は、コンクリート標準示方書⁶⁾にて示されている、衝撃を考慮したコンクリートの自重分を、施工時荷重としてPCa版全域に等分布荷重で与えた。

4.3 結果

図-5～図-9にコンクリート打込み終了直後のPCa版のたわみおよび各鋼材のひずみの結果を分布図で示す。なお、これらには予備解析による結果も併記している。

図-5に示す鉛直変位では、試験体中央におけるたわみが約2mmであり、許容値として設定した3mm以内となっていることが分かる。ただし、解析と比較すると、若干、実験値の方が大きい傾向が確認された。

図-6、図-7に示すブレースおよびせん断補強筋のひずみでは、ブレースに圧縮ひずみ、せん断補強筋に引張

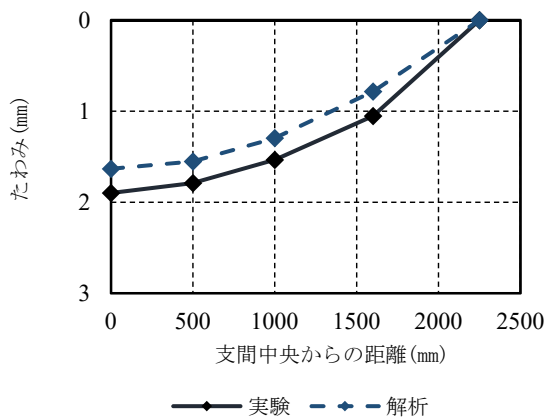


図-5 たわみ

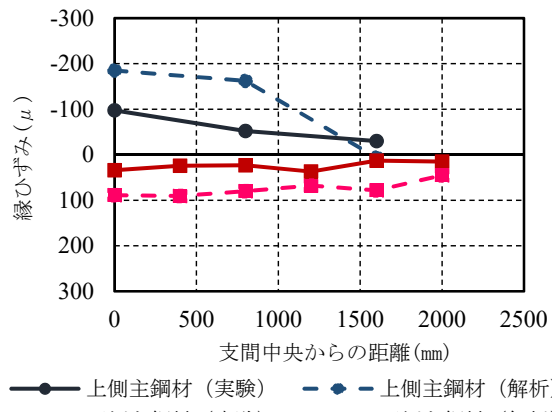


図-8 主鋼材のひずみ

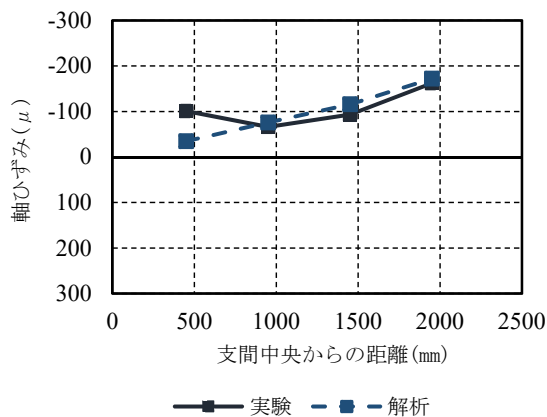


図-6 ブレースのひずみ

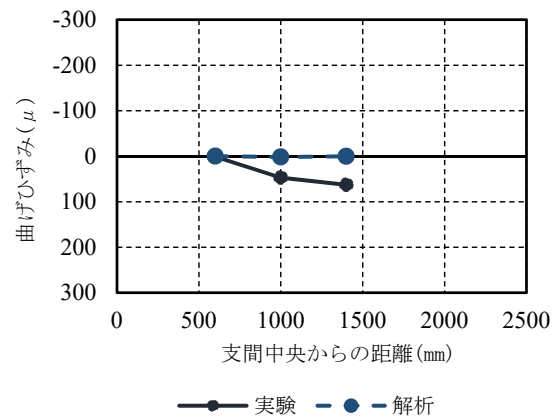


図-9 下側配力鋼材のひずみ

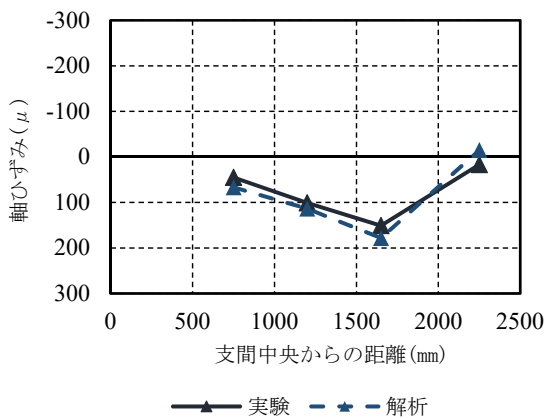


図-7 せん断補強筋のひずみ

ひずみが生じ、実験値は解析値とほぼ一致していた。このことから、コンクリート打込み時に本部材で想定したブレースが圧縮力、せん断補強筋が引張力を受け持つフレーム構造が有効に機能したことを確認した。

図-8 に示す上下主鋼材のひずみでは、下側主鋼材に引張ひずみ、上側主鋼材に圧縮ひずみが生じているが、どちらも実験値が解析値に比べ小さくなる傾向にあった。下側配力鋼材のひずみは、図-9 に示すように、解析においてはほぼゼロであったが、実験においては若干の曲

げひずみが生じた。以上より、実験で生じた下側配力鋼材の曲げ変形によって、主鋼材が予備解析で想定した応力を伝達できなかったことが考えられ、このことが、本部材のたわみが解析値よりも大きくなったことの要因である可能性がある。

また、打込み高さ 400mm から 630mm にかけてコンクリートを打ち込んでいた際に、PCa 版下面の図-10 の赤線に示す個所にひび割れが発生した。当該ひび割れ発生箇所はスパン中央から約 200mm 離れた位置で、下側配力鋼材の埋込み位置の直下であり、ひび割れ幅は最大で 0.04mm であった。解析で想定していなかったひび割れが発生した要因については、コンクリート打込み時までに発生した PCa 版の乾燥収縮の影響や、下側配力鋼材の一部が PCa 版に埋設されていることによる PCa 版の断面欠損の影響などが考えられる。

5. 複合プレハブ部材の曲げ試験

5.1 実験概要

コンクリートの打込みが終了し、コンクリートが硬化した後の試験体に対して曲げ試験を実施した。試験体をスパン 4,500mm で単純支持し、等曲げ区間 1,000mm を有する 2 点載荷とした。加力は油圧式 5,000kN 圧縮試験

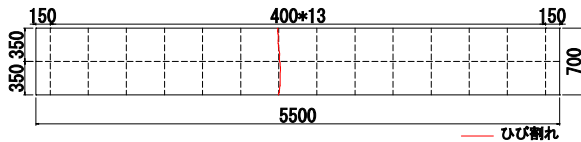


図-10 PCa 版下面のひび割れ

機により行った。

載荷は、曲げひび割れが発生する荷重まで加力した後、除荷した。そして、下側主鋼材の引張応力度が常時の許容応力度 η ($=140\text{N/mm}^2$)となる荷重 431kN 時と、同様に引張応力度が地震時の許容応力度 η ($=210\text{N/mm}^2$)となる荷重 568kN 時で載荷と除荷を 3 回ずつ繰り返した後、試験体が破壊に至るまで単調載荷した。

測定項目は、コンクリート打込み時と同一位置でのひずみと変位の計測に加え、載荷初期に発生したひび割れ 2 か所にパイ型変位計を設置して、随時、ひび割れ幅を計測した。

5.2 結果

(1) 荷重-中央鉛直変位関係およびひび割れ性状

荷重-中央鉛直変位関係を図-11 に、荷重 568kN での繰り返し載荷終了時と、載荷終了後のひび割れ性状を図-12 に示す。図-12 中には、試験体の同位置での配筋図も併記している。実験では約 240kN の荷重で曲げひび割れが発生し、荷重 568kN での繰り返し載荷終了時には、図-12(a)に示すように、曲げひび割れがほぼ等間隔に発生している様子を確認した。その後、荷重 775kN で下側主鋼材が降伏ひずみに達すると、荷重の増加が緩やかとなり、最大荷重 905kN 付近で、図-12(b)に示すように、圧縮縁のかぶりコンクリートが圧壊して荷重が低下した。なお、下側主鋼材が常時および地震時の許容応力度に達する荷重による繰り返し載荷に対して、本試験体の耐力および剛性の大幅な低下は確認されなかった。

図-11 には、ファイバーモデルによる解析結果も併記している。ファイバーモデル解析では、コンクリート断面を高さ方向に 70 分割し、コンクリートの応力-ひずみ関係は、コンクリート標準示方書⁵⁾を基に与え、圧縮強度と引張強度はそれぞれ実験時の材料試験から得られた値とした。鋼材の応力-ひずみ関係は、パイリニアモデルで与え、ヤング係数を $E_s=200\text{kN/mm}^2$ とし、材料試験の結果から得られた降伏強度を降伏点とし、降伏後の剛性を $E_s/100$ とした。図-11 には、単調載荷で解析を行い、圧縮縁におけるコンクリートの最大圧縮ひずみが $3,500\mu$ に達した時点までの解析結果を示している。

図-11 より、曲げひび割れが発生する付近までは、実験と解析結果がよく一致していることがわかる。曲げひび割れ発生から下側主鋼材の降伏までは、実験における繰り返し載荷の影響で、実験では解析に比べわずかに剛

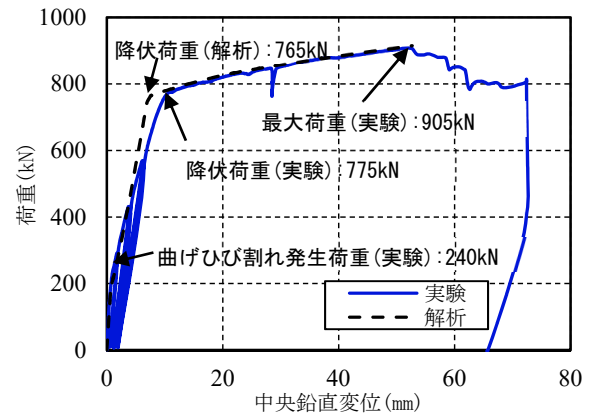
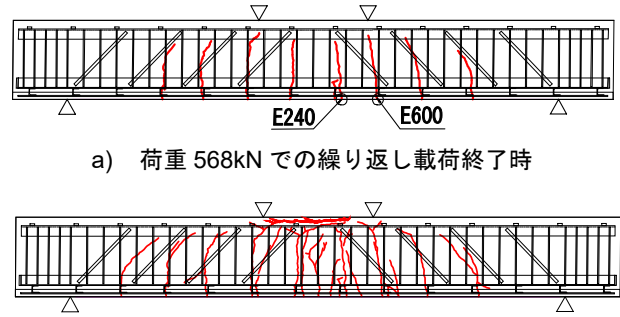


図-11 荷重-中央鉛直変位関係



a) 荷重 568kN での繰り返し載荷終了時

b) 載荷終了時

図-12 ひび割れ性状

性が小さくなったが、下側主鋼材が降伏した時点の荷重はほぼ一致した。また、下側主鋼材の降伏後における荷重の増加の程度も、実験と解析で一致している。以上より、通常の RC 部材と同様に、コンクリートと鋼材を一体としたファイバーモデル解析によって、本部材の曲げ破壊に至るまでの挙動を再現可能であることを確認した。

(2) 曲げひび割れ幅および曲げひび割れ間隔

図-13 に、載荷初期に発生した曲げひび割れ(図-12(a)中の E240, E600)の幅と、下側主鋼材の引張応力度の関係を示す。図中では、下側主鋼材が地震時の許容応力度に達する荷重 ($=568\text{kN}$) での繰り返し載荷終了時までの結果を示している。実験における下側主鋼材の応力度は、同部材に設置したひずみゲージの計測値とヤング係数 $E_s=200\text{kN/mm}^2$ から算出したものである。

図-13 中にはコンクリート標準示方書⁵⁾に示されている曲げひび割れ幅算定式による計算値も併記した。算定式の概要を式(1)に示す。

$$w = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \emptyset)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \epsilon'_{csd} \right] \quad (1)$$

ここで、 w : 曲げひび割れ幅 (mm), k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す定数, k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数, k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数, c : 引張鉄筋のかぶり (mm), c_s : 引張鉄筋の中心間隔 (mm), \emptyset : 引張鉄筋の

径 (mm), σ_{se} : 引張鉄筋の引張応力度 (N/mm²), E_s : 引張鉄筋のヤング係数 (N/mm²), ϵ'_{csd} : コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値である。

計算においては、主鋼材と等価な断面積の鉄筋が一段で配置されていると仮定し、引張鉄筋の間隔 c_s は下側主鋼材の重心距離とした。引張鉄筋のかぶり c は、下側主鋼材下面からコンクリート表面までの距離とした。係数 k_2 は、PCa 版の圧縮強度に基づき算定した。また、载荷中の収縮やクリープの進展は無視できる大きさと考え、 ϵ'_{csd} についてはゼロとした。

図-13 中には、鋼材の表面形状を異形鉄筋と同等とみなした場合 ($k_1=1.0$) と、丸鋼とみなした場合 ($k_2=1.3$) の2ケースの計算値を併記しており、本実験における鋼材応力と曲げひび割れ幅の関係は、鋼材の表面形状を異形鉄筋として仮定した場合のコンクリート標準示方書⁵⁾の計算値とほぼ一致した。

また、式(1)は最大曲げひび割れ間隔と鋼材ひずみに相当する項の積で表現されており、 $1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \emptyset)\}$ の項が最大曲げひび割れ間隔に相当する。そして、趙らの研究⁸⁾によると、最大曲げひび割れ間隔は、平均ひび割れ間隔の1.5倍程度となることが報告されており、本部材の諸元および鋼材の表面形状を異形鉄筋と仮定した場合の平均曲げひび割れ間隔の計算値は457mmとなる。一方、実験においては、図-12(a)に示すように、下側主鋼材とコンクリートが下側配力鋼材によって機械的に一体化したことで、下側配力鋼材付近を起点とした曲げひび割れがほぼ等間隔で発生し、平均曲げひび割れ間隔は406mmとなった。以上より、本部材においては、曲げひび割れ間隔が下側配力鋼材の配置間隔によって制御されることで、異形鉄筋を用いたRC部材と同等のひび割れ分散性を示すことを確認した。

6. まとめ

頂版施工の支保工、型枠、配筋作業の省力化を目的として開発している複合プレハブ部材を模擬した試験体に対し、コンクリートを打ち込んだ際の剛性と、コンクリート硬化後の複合部材としての曲げ特性を検証した結果、以下の知見を得た。

- (1) コンクリート打込み時のたわみ、ひずみの計測結果から、本部材において、ブレースが圧縮材、せん断補強筋が引張材となるフレーム構造が機能したことで、コンクリート打込み時のたわみを許容値以下に制御することができた。
- (2) コンクリート打込み時に、事前の予備解析では想定

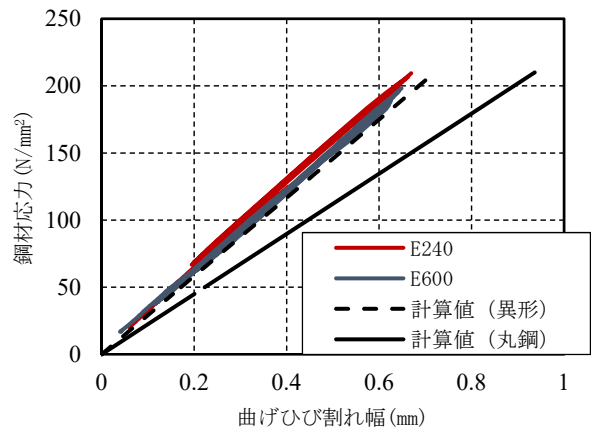


図-13 鋼材応力-曲げひび割れ幅関係

していなかったPCa版下面でのひび割れを確認した。この原因としては、PCa版の脱型から試験時までの乾燥収縮の影響や、下側配力鋼材がPCa版に埋め込まれていることによる断面欠損の影響などが考えられる。

- (3) 曲げ試験において、本部材が通常のRC部材と同様のひび割れ性状、および曲げ破壊性状を示した。また、荷重-中央鉛直変位関係についても、RC部材と同様にファイバーモデル解析によって精度良く再現することができた。
- (4) 曲げ試験において発生した曲げひび割れの幅および平均間隔の検討から、本部材が異形鉄筋を用いたRC部材と同等のひび割れ特性を有していることを確認した。

参考文献

- 1) 曾我部直樹, 岩本拓也, 平陽兵: 頂版の支保工の省力化を目的とした複合プレハブ部材の開発, 土木学会第73回年次学術講演会, CS部門, pp.53-54, 2018.9
- 2) 土木学会: 仮設構造物の計画と施工[2010年改訂版], 2010
- 3) 鉄道総合技術研究所: 鉄筋フレア溶接継手設計施工指針, 1987
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2012
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2017
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書[施工編], 2017
- 7) 日本道路協会: 道路土工カルバート工指針(平成21年度版), 2010
- 8) 趙唯堅, 丸山久一: 鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅算定式の再評価, 土木学会論文集 No.490, V-23, pp.147-156, 1994.5