

論文 小規模建築物用の外殻プレキャスト基礎梁に関する実験的研究

都祭 弘幸*1・藤井 稔己*2・野田 光明*3

要旨：小規模建築物の基礎の構造方法については、告示 平 12 建告第 1347 号第 1 に必要最低限の規定がある。震災後の仮設住宅でも同様の基礎構造が求められるため恒久建築にはならない。本研究は、震災後に早期恒久住宅の促進を図るため、簡単に短期間に施工できる外殻プレキャスト基礎梁に関して検討したものである。基礎立ち上がり部の梁側面を無筋プレキャストコンクリート板とした梁を考案し、その構造実験および解析検討を実施した。それら検討結果から、外殻プレキャストを用いた梁でも在来工法の梁と同等の構造性能があること、並びに解析モデルの妥当性が確認できた。

キーワード：小規模建築物, 基礎梁, プレキャスト板, 耐震性能, 迅速施工

1. はじめに

小規模建築物の基礎については、告示 平 12 建告第 1347 号に定められた構造方法が必要条件となり、同年に施行された「住宅の品質確保の促進等に関する法律」以降、耐久性や安全性が保証されたものが供給できるようになっている(図-1 参照)。しかし、2000 年以前の木造戸建て住宅のような小規模建築物は、柱・梁や筋交い等の接合部や基礎構造の耐震性不足を起因とする地震被害が懸念される。残念なことではあるが、令和 6 年能登半島地震では、石川県だけでも約 9.1 万棟の住宅が被害を受け、そのうち全半壊が約 2.5 万棟にも上る。この地域の震災後における復旧・復興を促進するためには、安定した生活をおくることのできる仮設住宅を短期間に多数建設しなければならない。しかしながら、復旧・復興に欠かせない住宅の基礎が建築基準法に適合しないため、2 年間に限られ、長期の生活拠点となる恒久建築物とはなっていない。

震災後、地域の住民を中心とした建設活動によって、戸建て住宅の基礎を短期間で簡単に建設することはできないだろうか？ その課題を解決するために考案した提案工法が図-2 および図-3 に示す外殻プレキャスト(以下、外殻 PCa と略す)基礎梁である。

外殻 PCa 工法を検討する上で考慮したポイントは、

- (1) 外殻 PCa 板は人が持ち運べるサイズ・重量(10kg 程度)とし、300mm 幅を基本とする
- (2) 外殻 PCa 板の製造コストを考慮して、無筋コンクリートとし、板同士が接する小口は単純化する
- (3) 外殻 PCa 板の設置方法をできるだけ簡素化する
- (4) 布基礎でもべた基礎でも使える外殻 PCa 形状とする

である。

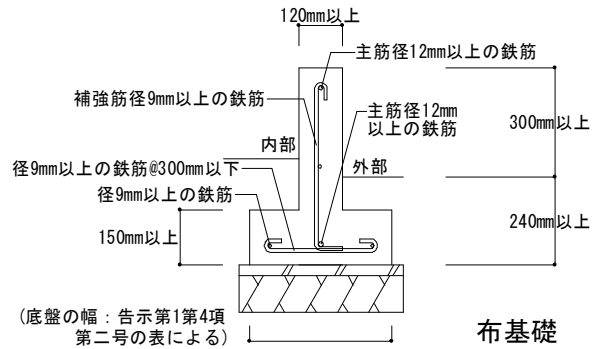


図-1 在来工法基礎(梁断面)

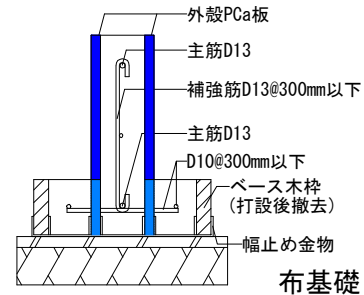


図-2 提案工法基礎(梁断面)

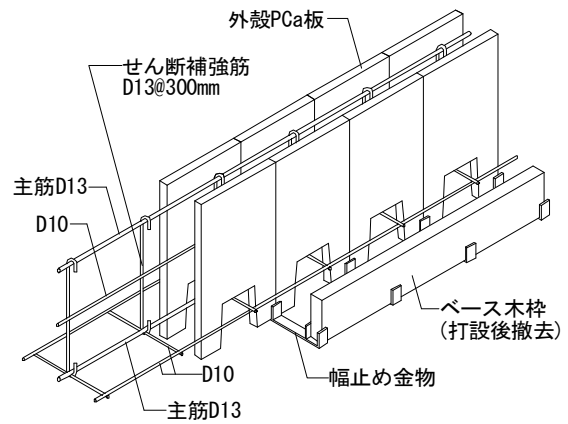


図-3 提案工法施工方法

*1 福山大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*2 工務店 梁山泊 修士(工学) (正会員)

*3 (株)野田設計 代表取締役

本研究成果が実用化できれば次のようなメリットが考えられる。

- (1) 耐久性・安全性に不可欠な建築基準法の仕様規定を満足した高品質の戸建て住宅用基礎梁が短工期で建設することが可能となる
- (2) 外殻 PCa 板は、運搬・設置に特殊な施工機材を必要としないので、建築施工管理技術者の指導があれば一般の方でも建設が可能となる

本研究で提案するような部分的にプレキャスト化した工法や型枠コンクリートブロックを用いた研究には、文献2)から5)のような事例がある。また、外殻 PCa 梁部材に関する研究としては、文献6)~8)があるが単配筋部材ではなく、外殻 PCa 板は部材長さ全域に配置した工法であり、本研究のように外殻 PCa 板を材軸方向に分割した工法の研究事例はほとんどない。

本研究の目的は、分割配置した外殻 PCa 梁部材が在来工法と同等の曲げ変形性能を有すること、および外殻 PCa 構造型枠が大変形まで一体で挙動することを確認することである。

2. 実験計画・方法

2.1 試験体

提案基礎梁の曲げせん断性状を確認するための試験体一覧を表-1に、梁断面図を図-4に試験体形状・配筋図を図-5に示す。試験体は基礎立ち上がり部450mmを取り出した実大4体であり、シアスパン比は3.0である。いずれの試験体も主筋1-D13、せん断補強筋D13@300とした。一般的には腹筋を配筋するが、試験体には配筋していない。

CRC-150は在来工法の試験体であり、他の3体は厚さ25mmの外殻PCaを利用した試験体である。3体のうち、PCN-170は必要梁幅120mmに捨て型枠（断面計算上はPCa部分を見捨てる）として両側にPCa板を設けた試験体である。残り2体は外殻PCa板を構造型枠（PCa部分を構造断面として考慮する）試験体である。

図-6にPCa板の形状および断面寸法を示す。捨て型枠・構造型枠ともに厚さ25mm×幅300mm×せい450mmであるが、構造型枠には後打ちコンクリートとの一体性を図るために梁内側面にコッターを設けている。本来であれば、コッターのせん断実験等を実施してコッター形状や断面積を検証すべきであるが、今回の実験研究では外殻PCa工法の曲げ性能を確認することであることから、後打ちコンクリート部に形成されるコッター面積はPCa縦断面積（厚さ25mm×せい450mm）以上となるように計画した。その結果が図-6(b)である。

外殻PCa板の型枠は木製とし、梁内側面からコンクリートを流し込み、型枠バイブレータで震動を与え製作し

表-1 試験体一覧

| 試験体名 | 工法 | PCa役割 | 梁幅 (mm) | 後打ち幅 (mm) | 梁せい (mm) | 主筋 | せん断補強筋 |
|---------|-------|-------|---------|-----------|----------|-------|----------|
| CRC-150 | 在来 | — | 150 | — | 450 | 1-D13 | D13 @300 |
| PCN-170 | 外殻PCa | 捨て型枠 | 170 | 120 | | | |
| PCS-150 | 工法 | 構造型枠 | 150 | 100 | | | |
| PCS-130 | | | 130 | 80 | | | |

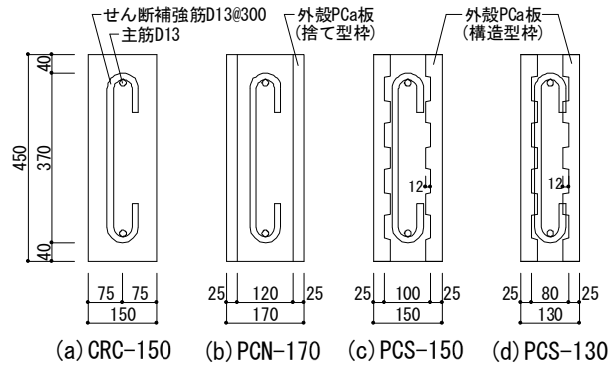


図-4 梁断面図

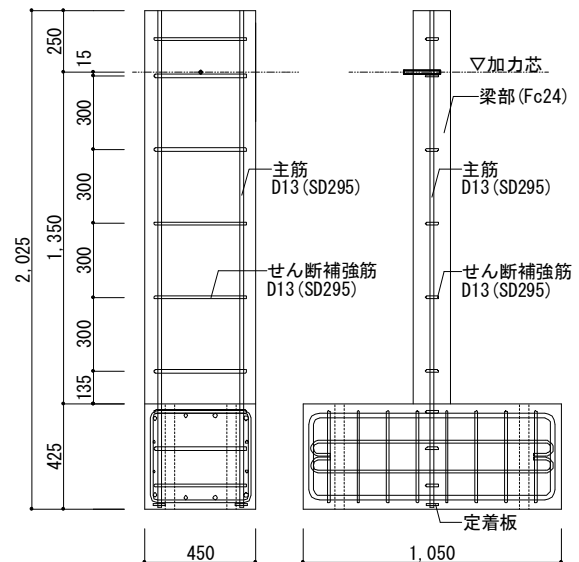


図-5 試験体形状・配筋図

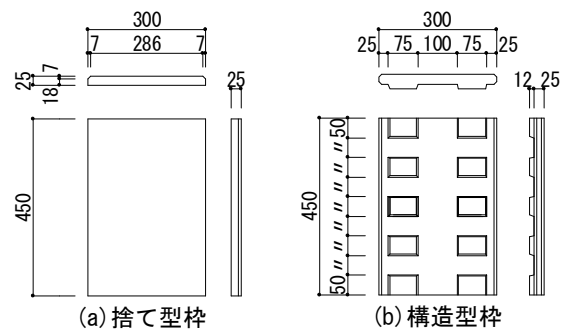


図-6 外殻 PCa 板形状図



写真-1 外殻 PCa 板製作状況

た。試験体の施工は、実際の施工と同様に梁断面上部（正加力時に引張側となる面）からコンクリートを流し込んで製作した。

2.2 使用材料

外殻PCaおよび後打ちコンクリートの材料試験結果を表-2に、主筋・せん断補強筋に使用した鉄筋 D13 の試験結果を表-3に示す。本実験で使用する D13 の降伏比が 66.6% であることから、曲げ降伏後、曲げ耐力は約 1.5 倍まで上昇することが予測できる。せん断に対しては、荒川 mean 式によるせん断強度が曲げ終局強度に対して約 6 倍あり十分な余裕度がある。

2.3 加力方法および変形・ひずみ測定方法

加力は図-7 に示す片持ち梁形式の加力装置を用い、梁であるが柱状に設置し、1MN 油圧ジャッキで引きを正加力として試験体に水平力を作用させた。加力履歴は水平力作用位置における部材角で制御した。具体的には、 $R(\text{rad}) = \pm 1/800, \pm 1/400$ を各 1 回、 $\pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/50, \pm 1/33$ を各 2 回、 $1/20$ を目指した大変形で正負 1 回を計画した。

変形については、制御変位のほか、曲率変形、図-8 に示すヒンジ部せん断変形を測定した。鉄筋については、主筋、せん断補強筋にひずみゲージを貼付してひずみを測定した。

3. 実験結果

3.1 破壊経過および諸強度

各試験体の荷重-部材角関係を図-9 に、 $R=1/50$ ピーク時の破壊状況を写真-1 に、正側包絡線の比較を図-

表-2 コンクリート試験結果

| 使用部位 | 圧縮強度 N/mm ² | ヤング係数 kN/mm ² | 割裂強度 N/mm ² |
|---------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| PCa板 | 34.0 | 34.6 | 3.4 |
| 在来、後打ち部 | 31.2 | 30.9 | 3.0 |

表-3 鉄筋材料試験結果

| 鉄筋径 (材種) | 降伏強度 N/mm ² | 破断強度 N/mm ² | 降伏ひずみ μ | ヤング係数 kN/mm ² | 降伏比 % |
|-------------|---------------------------|---------------------------|----------------|-----------------------------|----------|
| D13(SD295) | 324.3 | 487.1 | 1784 | 181.9 | 66.6 |

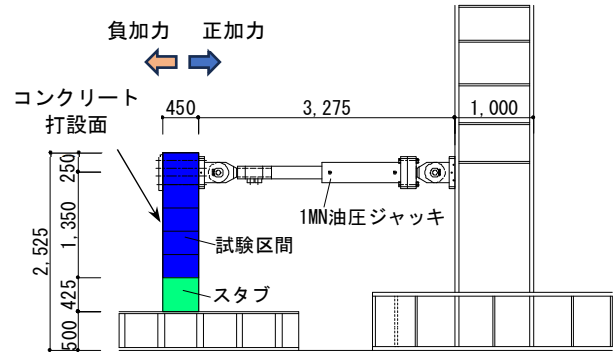


図-7 加力装置

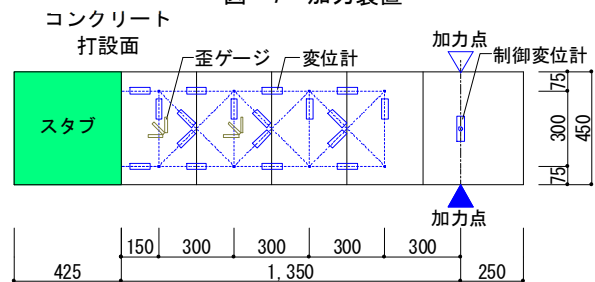
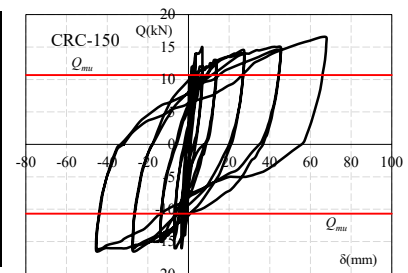


図-8 変位計測計画

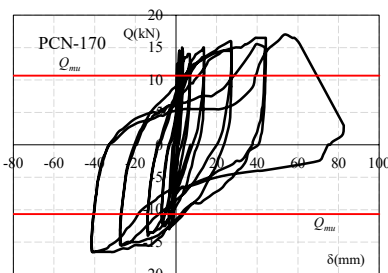
表-4 実験結果一覧

| 試験体名 | 弾性剛性 | | | 曲げひび割れ強度 | | | 曲げ終局強度 | | |
|---------|--------------|----------------|------------|-----------|-------------|------------|-----------|-----------|------------|
| | 実験値 kN/mm | 計算値*1 kN/mm | 実験値 計算値 | 実験値 kN | 計算値*1 kN | 実験値 計算値 | 実験値 kN | 計算値 kN | 実験値 計算値 |
| CRC-150 | 41.7 | 20.6 | 2.02 | 9.5 | 20.6 | 0.46 | 16.5 | 10.7 | 1.54 |
| PCN-170 | 50.0 | 16.6 | 3.01 | 7.0 | 9.8 | 0.71 | 16.8 | 10.7 | 1.57 |
| | | 23.2 | 2.15 | | 13.7 | 0.51 | | | |
| PCS-150 | 41.7 | 14.3 | 2.91 | 8.5 | 8.2 | 1.03 | 16.8 | 10.7 | 1.57 |
| | | 20.6 | 2.02 | | 12.1 | 0.70 | | | |
| PCS-130 | 34.4 | 11.6 | 2.96 | 6.5 | 6.7 | 0.97 | 16.0 | 10.7 | 1.50 |
| | | 17.9 | 1.92 | | 10.6 | 0.61 | | | |

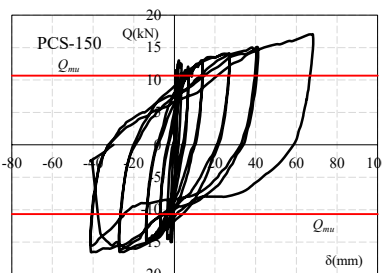
*1: 計算値の上段は外殻PCa板無視、下段は外殻PCa板考慮した値。



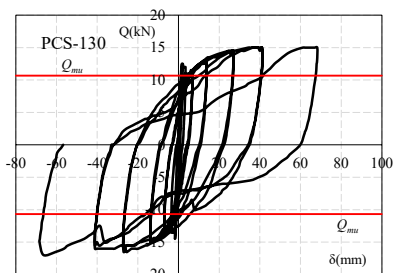
(a) CRC-150



(b) PCN-170



(c) PCS-150



(d) PCS-130

図-9 荷重-変形曲線

10 にそれぞれ示す。また、表-4 に諸強度の実験値と計算値の比較を示す。諸強度の計算式は、文献 9) に準拠した。各試験体の実験値は、弾性剛性および曲げひび割れ強度は正加力時の値で、曲げ終局強度は正・負加力の平均値である。

いずれも試験体も破壊経過は同様であった。R=1/800 のサイクルで曲げひび割れが発生し、そのピーク時には曲げ降伏強度を上回った。ただし、主筋の降伏は R=1/400 のサイクルであった。その後、CRC-150 (在来工法) では R=1/100 で梁上面に主筋付着割裂が発生、PCN-170 では R=1/100 で梁上面の外殻 PCa 板と後打ちとの境界部にひび割れが発生、PCS-150 では R=1/100 で外殻 PCa 板に小さなひび割れが発生、PCS-130 では R=1/33 で梁上面の外殻 PCa 板と後打ちとの境界部にひび割れが発生、等の損傷が見られたが、どの試験体も変形の増大に伴い荷重が計算値の 1.5 倍以上に増加した。在来工法、外殻 PCa 工法にかかわらず、R=1/50 のサイクルで梁端部に圧壊が観察されたが顕著な耐力低下は見られなかった。最終的には R=1/20 の繰り返して主筋が破断し急激に耐力低下した。図-9 および図-10 から、在来工法・外殻 PCa 工法に係わらず大変形まで紡錘形の良好な履歴ループを描くこと、R=1/33 まで曲げ終局強度を維持し安定した履歴を示すことが確認できた。

表-4 より、弾性剛性に関しては捨て型枠・構造型枠ともに外殻 PCa 板を考慮した方が実験値に近くなる傾向がある。しかし、曲げひび割れ強度に関しては外殻 PCa 板を無視した方が実験値に近い。曲げ終局強度については、主筋の降伏比の逆数に比例していずれも 1.5 倍以上となった。

3.2 主筋ひずみ分布

図-11 に在来工法 CRC-150 と外殻 PCa 板を構造型枠とした PCS-150 および PCS-130 の各変形段階における梁上端主筋の材軸方向ひずみ分布を示す。外殻 PCa 板を捨て型枠とした PCN-170 のひずみ分布は PCS-150 と同等であったので省略する。在来工法では R=1/400 で降伏が発生し、R=1/200 で梁せいの約 2/3(300mm)が降伏領域となった。外殻 PCa 工法の 3 体は、R=1/400 で材端部が降伏し、PCS-150 では在来工法と同様に降伏領域が梁せいの約 2/3 まで拡大するが、PCS-130 では大変形まで材端部にひずみが集中する傾向が見られた。

3.3 曲率分布

図-12 に CRC-150 と PCS-150 の R=1/800 から 1/50 までの曲率分布を示す。ともに材端部 150mm の範囲における曲率が增大するが、在来工法の方が梁せい範囲まで曲率が生じている。外殻 PCa 工法の場合、PCa 板により曲げひび割れが材端部および PCa 板同士の境目に限定される傾向があることが分かる。

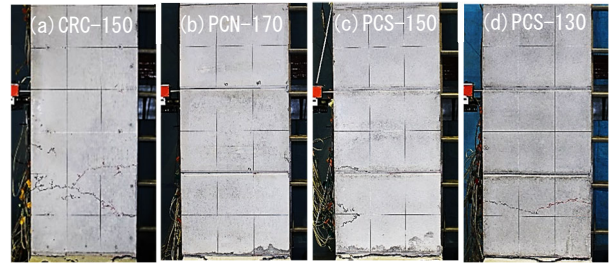


写真-2 破壊状況 (R=1/50 終了時)

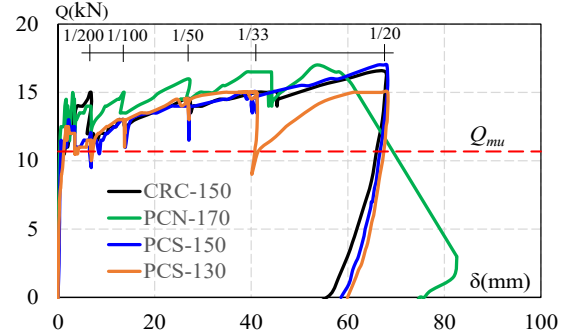


図-10 正側包絡線比較

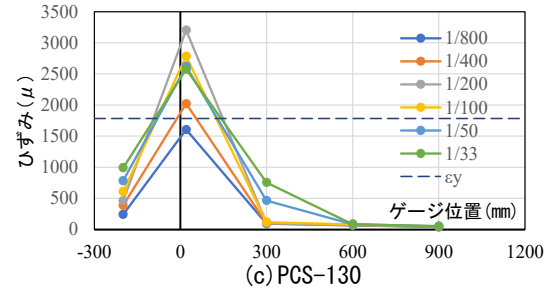
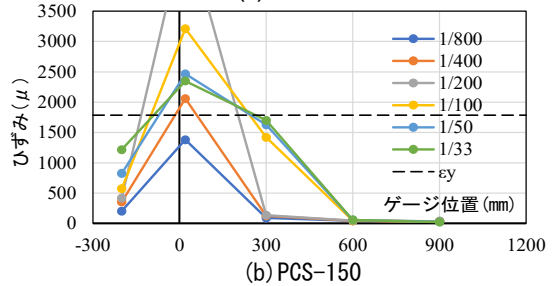
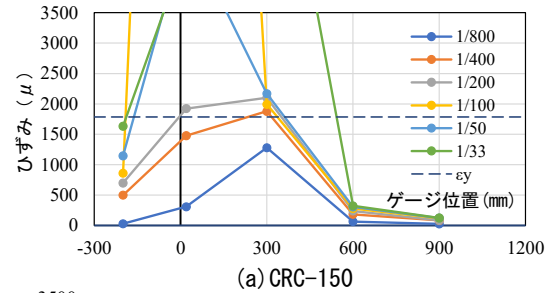


図-11 主筋ひずみ分布 (梁上端筋)

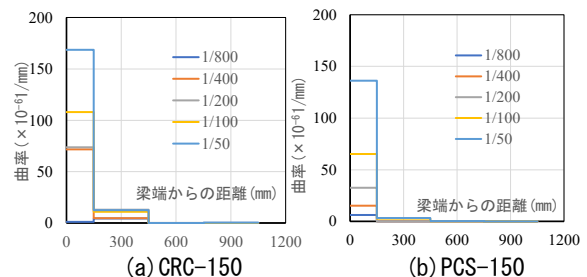


図-12 曲率分布

3.4 せん断変形角の推移

端部梁せい区間のせん断変形角 γ_s の推移を図-13 に示す。せん断変形角の計算は、図-8 に示すヒンジ部に設置した対角方向変位計の計測値 δ_1 と δ_2 から式(1)により算出した。

$$\gamma_s = \frac{\sqrt{h^2 + l^2}}{2hl} (\delta_1 + \delta_2) \quad (1)$$

ここに、 h ：計測高さ(mm)、 l ：計測幅(mm)、 δ_1 ：対角方向変位量 1(mm)、 δ_2 ：対角方向変位量 2(mm)。

在来工法 CRC-150 は、初期の変形段階からせん断変形角が発生するが、外殻 PCa 工法の試験体は捨て型枠・構造型枠に限らず $R=1/100$ までほぼゼロであった。また、PCN-170 と PCS-150 は大変形までせん断変形角はゼロに近い。同じ梁幅 150mm でも外殻 PCa 工法の方がせん断変形を抑制できる。梁幅を 130mm とした PCS-130 は $R=1/50$ 以降でせん断変形角が大きくなる傾向が見られた。

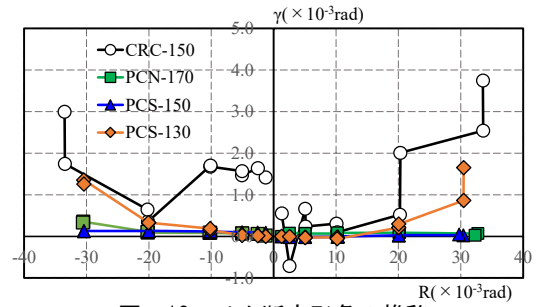


図-13 せん断変形角の推移

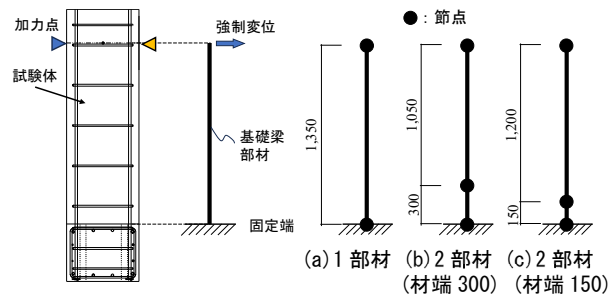


図-14 解析モデル 図-15 部材のモデル化

表-5 解析ケース一覧

| 記号 | 部材数 | 端部部材長 mm | 対象 試験体 |
|-------|--------|-------------|-----------|
| Case1 | S1 | 1350 | PCS-150 |
| Case2 | S2-300 | 300 | |
| Case3 | S2-150 | 150 | |
| Case4 | S2-300 | 300 | CRC-150 |

4. 解析的検討

4.1 基礎梁部材のモデル化

構造実験を行った基礎梁部材について外殻 PCa 工法と解析の適応性を確認するためにファイバーモデルを用いた検討を行う。使用するプログラムは RESP-F3T¹⁰⁾であり、図-14 に示すようにスタブ部を固定とし、梁部材を線材置換したモデルである。解析では実験と同様に片持ち梁形式とし、加力点に相当する節点に一方方向に強制変位を与える方法を用いた。

部材のモデル化として、図-15 に示す 3 つのケースを検討した。(a)は最も簡便な 2 節点で設定できる 1 部材モデル、(b)および(c)は 3 節点 2 部材で構成したモデルである。(b)と(c)の差は、(b)では材端部材長さを 300mm とし、(c)では同長さを 150mm としている。材端部材長さをこのように設定した理由は、主筋ひずみ分布に示したように在来工法では降伏領域が 300mm 程度、外殻 PCa 工法では同領域が 150~300mm 未満であることによる。以上を考慮した解析ケース一覧を表-5 に示す。

4.2 材料の σ - ϵ 関係

図-16 に解析で使用したコンクリートの σ - ϵ 関係を示す。コンクリートは PCa 板と在来工法・外殻 PCa 工法の後打ち部で圧縮強度が異なるので、強度に応じてモデル化を行った。基礎梁は単配筋であり、せん断補強筋で囲われたコア部が存在しないことから一般的にかぶり部分に採用する Fafitis-Shah 式の σ - ϵ 関係を採用した。モデルに適用した式は、最大強度まで式(2)¹¹⁾、下り勾配については式(3)¹¹⁾を用いた。

$$\sigma_c = \sigma_{cB} \left\{ 1 - (1 - \epsilon_c / \epsilon_{co})^n \right\} \quad (2)$$

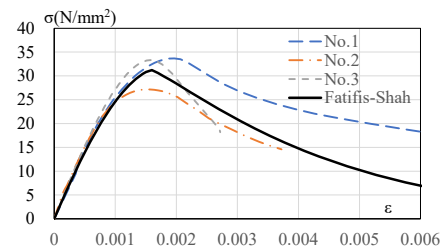


図-16 コンクリート材の σ - ϵ 関係

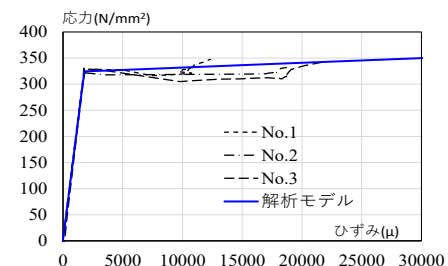


図-17 主筋 D13 の σ - ϵ 関係

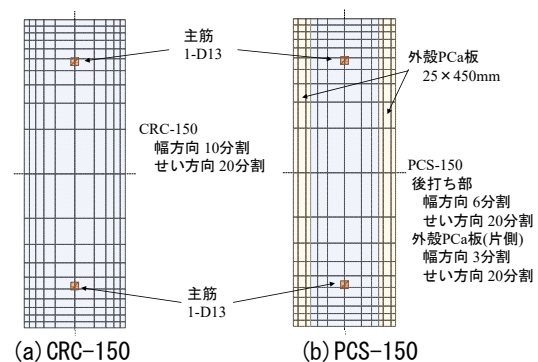


図-18 ファイバー断面

$$\sigma_c = c \sigma_{cB} \left\{ -k \exp(\varepsilon_c - \varepsilon_{co})^{1.15} \right\} \quad (3)$$

ここで、 σ_c 、 ε_c ：コンクリートの応力度およびひずみ、 $c \sigma_{cB}$ 、 ε_{co} ：最大強度時の応力度およびひずみ、 n および k ：係数。

主筋に使用した D13 のモデル化は、材料試験結果を考慮し降伏後の剛性低下率 β を 0.005 とした。解析に用いた鉄筋の $\sigma - \varepsilon$ 関係と材料試験結果の比較を図-17 に示す。

4.3 ファイバー断面

図-18 に解析に用いたファイバー断面を示す。CRC-150、PSC-150 とともに幅方向・せい方向で対数分割した。外殻 PCa 板は後打ち部とコンクリート強度が異なるので、断面性能を後打ち部と分けて設定している。

4.4 解析結果

図-19 に解析結果を PCS-150 の正側包絡線とともに示す。材長 1,350mm を 1 部材でモデル化した場合(S1)、解析値が実験荷重を大幅に上回った。主筋降伏領域を考慮した 2 部材モデルの場合、材端部材長を 300mm とすると 1 部材ほどではないが、在来工法でも外殻 PCa 工法でも実験値の大きく上回った。材端部材長を 150mm とした 2 部材モデルの場合、実験結果と部材角 1/400 以降、非常に良く一致した。ただし、弾性剛性については、図-19 から分かるように 1 部材・2 部材モデルに係わらず実験値の 2 割程度と低い評価となった。

5. まとめ

簡単で、かつ短期間に施工できる基礎梁の外殻 PCa 工法に関して、構造実験および解析的検討から次の事項が確認できた。

- せん断余裕度が大きい曲げ降伏型の外殻 PCa 工法基礎梁は、大変形まで紡錘形の安定した履歴性状を持つことが確認できた。
- 外殻 PCa 工法のヒンジ領域（主筋降伏領域）は、在来工法よりも若干、範囲が小さくなる傾向がある。
- 外殻 PCa 板は梁端部のせん断変形角増加を抑制する働き有する可能性がある。
- 外殻 PCa 工法梁は、部材のヒンジ領域を適切に評価したファイバー解析により、主筋降伏から大変形に至るまで履歴を予測することができる。
- 今後、基礎梁の外殻 PCa 工法を一般化するためには、せん断ひび割れやせん断終局強度などに関する実験や解析が必要となる。また、更なる施工性を考慮し、後打ち部への施工方法としてプレパックドコンクリートの採用が考えられる。

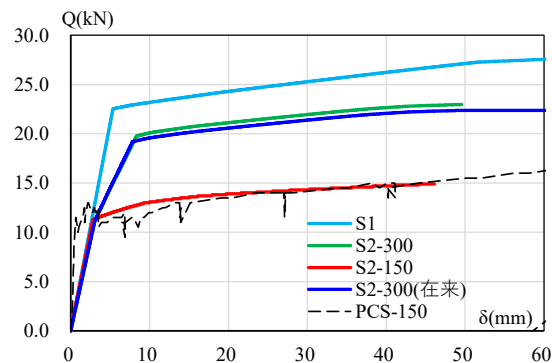


図-19 解析結果

参考文献

- 2015 年度版建築物の構造関係技術基準解説書、pp.80-89, 2015.6
- 星幸男, 新藤忠徳：住宅布基礎のプレキャスト化に関する実験的研究, 日本建築学会大会講演梗概集, 構造IV, pp.169-170, 2001.9
- 下牧徳積, 富山昭宏, 土屋敬, 二木要：布基礎のプレキャスト化に関する研究 —プレキャスト布基礎の接合部強度の検討—, 日本建築学会北陸支部研報告集, pp.95-98, 1998.8
- 渡辺光良, 森田典雄：型枠コンクリートブロックを用いた布基礎に関する研究 (プリズム圧縮強度に関する実験的研究), 日本建築学会大会講演梗概集, 構造系, pp.421-422, 1981.9
- 松村晃, ほか：型枠コンクリートブロックを用いた布基礎に関する研究, その1~その4, 日本建築学会大会講演梗概集, 構造系, pp.1547-1554, 1981.9
- 近藤悟, 鬼塚雅嗣, 柳瀬高仁, 鈴木敏夫：外殻プレキャスト梁の構造性能に関する実験的研究 (その1. 曲げ型の基礎的実験), 日本建築学会大会講演梗概集, 構造IV, pp.527-528, 2000.9
- 正田正高, 山浦一郎, 村田義行, 服部覚志：2面外殻プレキャスト工法の開発 (その1. プレキャスト部材の製作方法と構造性能確認実験), 日本建築学会大会講演梗概集, 構造IV, pp.671-672, 2000.9
- 長井信夫, 都祭弘幸, 翁幸久：高強度外殻プレキャスト部材の構造実験, 日本建築学会大会講演梗概集, 構造IV, pp.361-362, 2001.9
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説, 2021.2
- 構造計画研究所：RESP-F3T マニュアル, 2022.1
- Fafitis, A., and Shah, S.P. : Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Columns, ACI Special Publication, SP-87, pp.213-232, 1985.