

高耐力既製コンクリート杭用パイルキャップ工法の有限要素法解析

Finite Element Method Analysis of High Shear Resistance Pile Cap for Precast Concrete Pile

郡司 康浩*

Yasuhiro Gunji

竹内 章博*

Akihiro Takeuchi

新井 寿昭**

Toshiaki Arai

要 約

本工法は、既製コンクリート杭用パイルキャップのせん断設計をより合理的に行うための工法である。本工法では、従来から既製コンクリート杭用パイルキャップのせん断耐力要素として考えられてきたコンクリートに加え、パイルキャップ内に配置されている鉄筋を適切に考慮することにより、既製コンクリート杭用パイルキャップのせん断耐力を合理的に確保することが可能となる。

本報では、工法概要を改めて簡潔に述べるとともに、工法開発にあたり実施した有限要素法解析の概要と解析結果について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工法概要
- § 3. シミュレーション解析
- § 4. パラメータ解析
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

近年、既製コンクリート杭（以降、既製杭）の高支持力化が進み、柱 1 本に対して杭 1 本で設計するケースが多くなっている。それに伴い、杭 1 本あたりに作用する水平力も従来に比べて増加傾向であり、杭と上部構造をつなぐ部材であるパイルキャップにも、水平力（せん断力）に対するより大きな耐力が求められている。

既製杭用パイルキャップのせん断設計について、例えば、鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針（案）・同解説¹⁾では、原則としてコンクリートのみでせん断耐力を確保する考え方を採用している（一部、終局時に軸力の効果を考慮する方法の記載もある）。これは、パイルキャップ内に配筋されている鉄筋の効果について、実験的な検証も少なく明確な構造規定を設けるまでには至っていないためである。設計的な面から考えると、パイルキャップ内の鉄筋の効果を見込まないことは安全側の設計になる一方、部材の保有しているせん断耐力を過

少評価し、合理的な設計になっていない可能性も考えられる。

そこで、筆者らは既製杭用パイルキャップのせん断設計をより合理的に行うため、従来から耐力要素として考えられてきたコンクリートに加えて、パイルキャップ内の補強鉄筋を適切に考慮できる工法の開発を行い、これまでに構造実験の結果^{例えば 2, 3)}を報告してきた。

本報では、工法概要を改めて簡潔に述べるとともに、工法開発にあたり実施した有限要素法解析の概要と解析結果について報告する。

§ 2. 工法概要

本工法の概要を図-1 に、配筋詳細の一例を図-2 に示す。本工法は、図-1 に示すように、定着筋と埋込み（埋込み長：杭径の 0.5~1.0 倍の長さ）を併用して既製杭をパイルキャップに定着する方式を採用する場合の、パイルキャップのせん断耐力を評価する工法である。既製杭を埋込んだ部分の周囲には、図-2 に示すような補強鉄筋を配置しており、これらの鉄筋の耐力もせん断耐力に見込むことにより、従来よりもパイルキャップのせん断耐力を合理的に確保することが可能となる。

§ 3. シミュレーション解析

3-1 解析の目的

本工法の開発は、文献²⁾に示すように実大規模の構造

* 技術研究所建築技術グループ ** 技術研究所

実験を中心に進めてきた。一方、例えばパイルキャップ内部の応力やひずみの状態など構造実験だけでは把握できないことも多いため、解析的な検討も重要である。そこで、本章ではまず有限要素法解析で構造実験の結果をシミュレーションできることを確認するため行った解析について紹介する。なお、本解析の対象となる構造実験は全6ケースがあるが、紙面の都合上、代表的な3ケースのみについて結果を示す。

具体的には、No.1, No.2, No.6 試験体の結果を紹介する。各試験体の杭材には、杭径 $D=400$ mm の外殻鋼管付きコンクリート杭 (SC 杭) を共通で用い、No.1 試験体はパイルキャップの平面寸法が $2.5D=1,000$ mm、軸力は 0 kN である。No.2 試験体は、パイルキャップの平面寸法が $2.0D=800$ mm で軸力は 0 kN、No.6 試験体は形状が No.2 試験体と同様で、圧縮軸力として 700 kN 作用させている。その他、本解析に対応する構造実験の詳細に関しては、文献²⁾を参照されたい。

3-2 解析概要

解析モデルの概要を図-3に示す。解析モデルは、試験体の対称性を考慮して、 $1/2$ 対称モデルとした。また、構造実験と同じ荷重条件となるように、荷重点および反力点を設けた一次不静定梁形式での荷重を実施した。なお、実験は杭体とパイルキャップを天地逆転させた形で実施しており、解析モデルも実験と同じ向きで作成した。

パイルキャップ、スタブ、杭材についてはソリッド要素で、定着筋についてはトラス要素でモデル化した。また、パイルキャップ内の各鉄筋については、ソリッド要素内の埋込鉄筋要素でモデル化した。

コンクリートの応力-ひずみ関係を図-4に示す。コンクリートには、全ひずみ回転ひび割れモデルを用いた。圧縮側では、破壊域における圧縮破壊エネルギー (G_{fc}) を考慮する放物線モデルを採用し、 G_{fc} は中村らの提案式⁴⁾により求めた。一方、引張側では Hordijk モデルを採用し、引張軟化エネルギー (G_p) はコンクリート標準示方書⁵⁾に記載の式から求めた。杭材に用いる鋼材および各種鉄筋の材料モデルは、Von Mises の降伏条件を用いたバイリニア型の弾塑性モデルとした。なお、各鋼材の降伏応力度等については、文献³⁾を参照されたい。

杭体とパイルキャップコンクリート間には滑り現象や剥離現象を模擬するため、インターフェイス要素を挿入した。構成則はクーロン摩擦モデルとし、粘着力 (c) は文献⁶⁾の結果を参考に 0.9 N/mm²、引張強度 (σ_t) はコンクリートの材料試験結果より No.1 試験体で 1.84 N/mm²、No.2 試験体で 1.75 N/mm²、No.6 試験体で 1.90 N/mm² を採用し、内部摩擦角 (ϕ) は式 $\tan \phi = c/\sigma_t$ の関係から定めた。定着筋およびパイルキャップ内の鉄筋については、パイルキャップコンクリートとの付着滑りを表現するため、島らの提案式⁷⁾による付着滑りモデルを設定した。

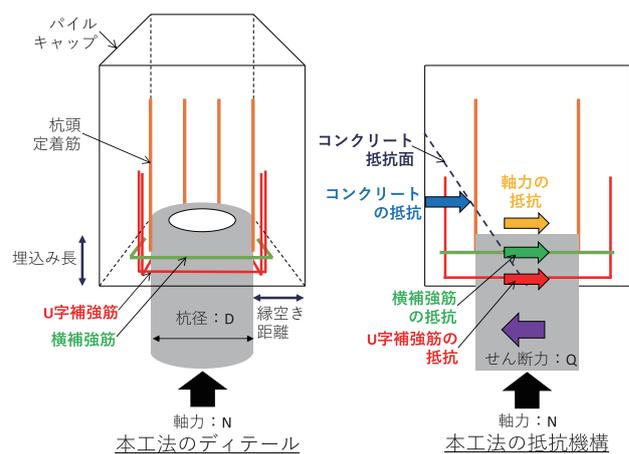


図-1 本工法の概要

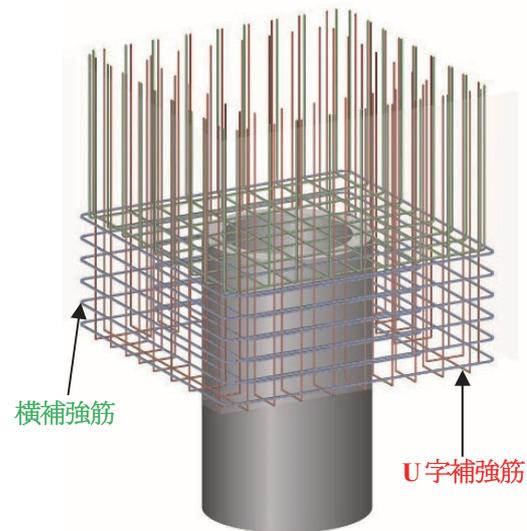


図-2 配筋詳細の一例

解析は、実験と同様に荷重制御により実施した。但し、実験では正負交番での荷重を実施したが、本解析では解析の収束なども考慮して、一方向のみの荷重漸増荷重とした。また、本解析では実験での最大杭頭せん断力まで荷重することを目標とし制御を行った。境界条件は底面固定、対称面の Y 方向変位を拘束した。解析には、汎用解析コード DIANA 10.3 を用いた。

3-3 解析結果

解析結果のうち、杭頭せん断力-杭頭水平変位関係を実験結果 (包絡線) と比較して図-5に示す。図-5を見ると、いずれの試験体の解析結果も実験結果と概ね同様の傾向を示しており、特に杭頭せん断力が 400 kN 程度まではよく一致していることが確認できる。また、No.6 試験体については、全体として実験と解析が良く一致した。

パイルキャップの平面寸法のみ異なる No.1 試験体と No.2 試験体の実験結果に着目すると、杭頭せん断力が 400 kN 程度までは概ね同様の挙動を示しているが、それ以上の杭頭せん断力の範囲では、No.2 試験体が No.

1 試験体よりも同一杭頭せん断力時の杭頭水平変位が大きくなる傾向が見られた。同じように有限要素法解析の結果を見ると、実験と同様に杭頭せん断力が 400 kN 以上の範囲において、No. 2 試験体が No. 1 試験体よりも同一杭頭せん断力時の杭頭水平変位が大きくなっており、有限要素法解析が実験結果の特徴を良く再現しているといえる。

次に、No. 1 試験体の杭頭せん断力が約 600 kN 時点における最大主ひずみコンター図を図-6 に示す。図-6 の左側にはパイルキャップ上面における状況を、右側にはパイルキャップ側面（対称面から Y 方向に +500 mm の面）における状況を示している。

ここで、図-6 では 660×10^{-6} 以上の最大主ひずみが生じている箇所のみ図示しており、この値は実験で観測した最小ひび割れ幅 0.03 mm を、パイルキャップコンクリート要素の大きさで除してひずみに換算した値に概ね対応している。この表示方法は、解析において実験では観察できないような微小なひずみを非表示にすることで、解析のひずみと実験のひび割れとの対応をより明確に示す意図がある。

また、実験において杭頭せん断力が約 600 kN 時点のひび割れ状態を図-7 に示す。なお、図-7 に示すひび割れがパイルキャップ上面から側面に進展した状態は、文献⁸⁾ に示される短期許容レベルに相当する状態（フーチング下面に発生したひび割れが側面まで到達し進展した状態）と概ね対応する状況である。

図-6 と図-7 を比較すると、まずパイルキャップ上面における解析結果では、荷重直交方向および荷重前方向に最大主ひずみが大きい領域が確認できる。一方、実験結果においても、荷重直交方向および荷重方向にひび割れが生じており、実験と解析で傾向が一致しているといえる。

パイルキャップ側面における解析結果では、荷重方向と直交して杭埋込み深さ程度まで最大主ひずみが大きい領域が広がり、杭埋込み深さ以下では荷重方向に向かって斜め方向に最大主ひずみが大きい領域が広がっていることが確認できる。実験結果においても、パイルキャップ側面では、ひび割れが荷重方向に角度をもって進展しており、実験と解析でひび割れの傾向が概ね一致していると判断できる。

これらの結果より、前述の設定を用いた有限要素法解析は、本工法で対象としているパイルキャップのせん断挙動を模擬できると判断した。

§4. パラメータ解析

4-1 解析の目的

構造実験では、荷重装置等の制約条件から軸力ゼロまたは、圧縮軸力の条件で荷重を行ったが、実建物においては杭材が引張軸力を受けることもある。また、構造実

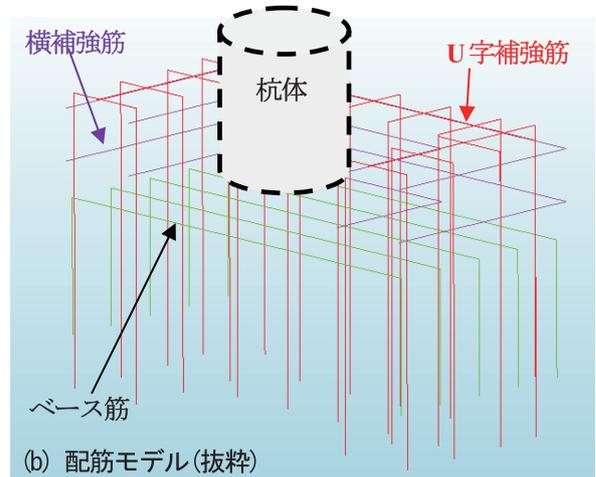
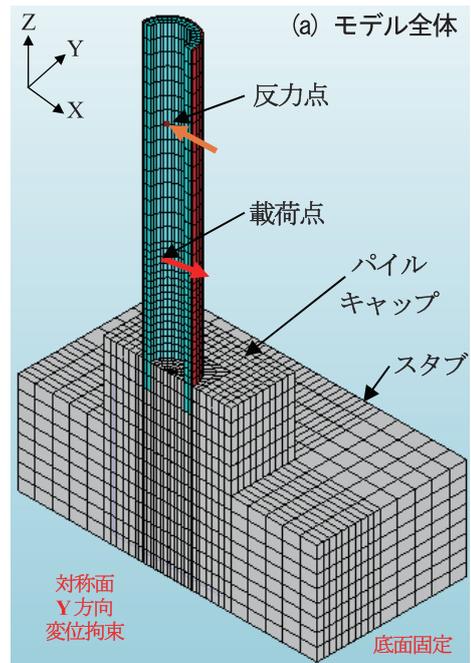


図-3 解析モデル

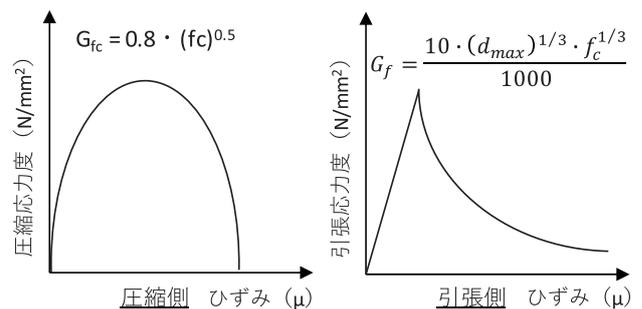
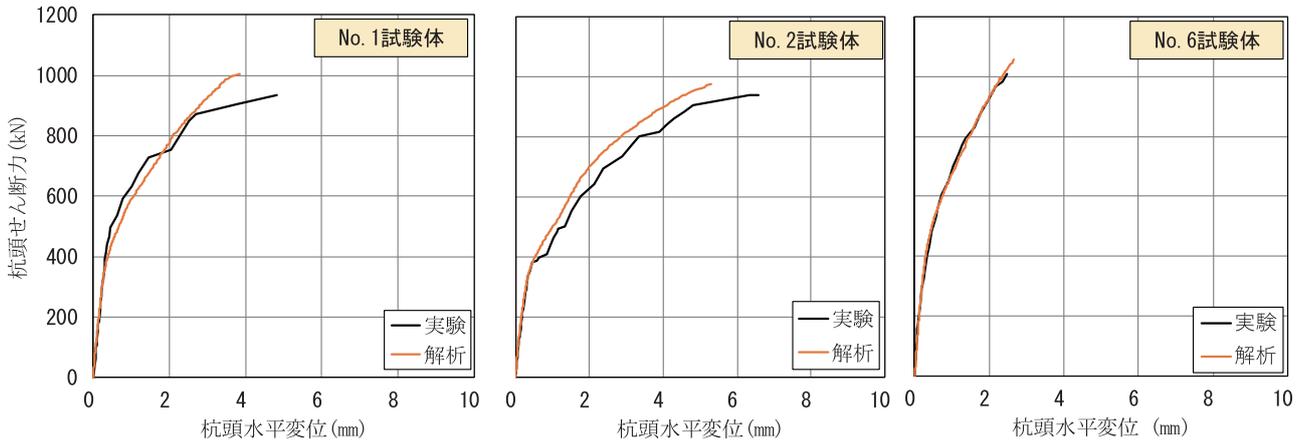


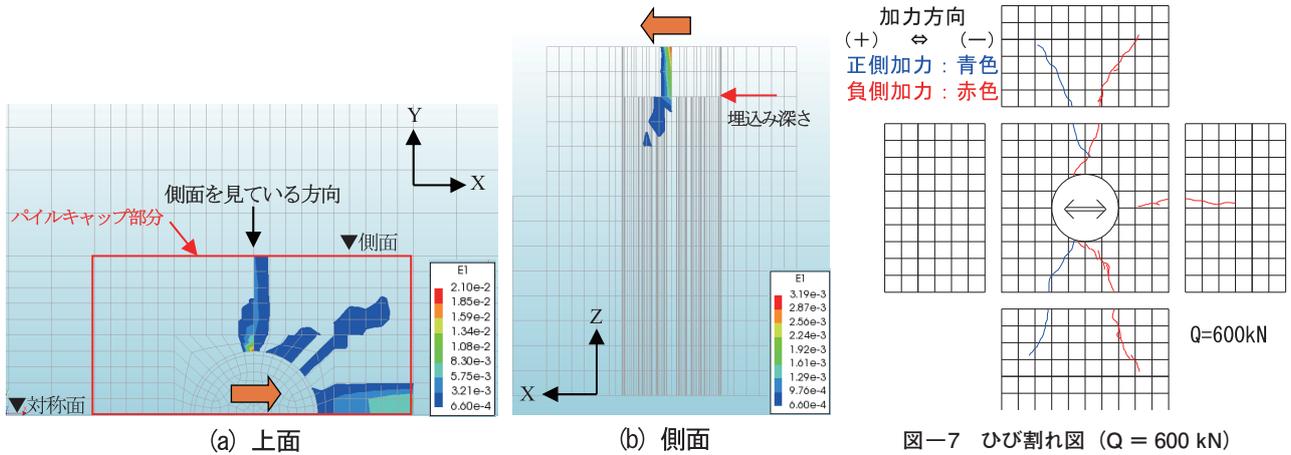
図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

験ではφ400 mm の杭材を用いて実験を実施したが、実務上は実験で用いた杭径の 2~3 倍の杭材が用いられることも多い。

そこで、本章では 3 章において妥当性が確認された解析モデルを用いて、実験では実施できなかったパラメータによる有限要素法解析を行い、軸力条件や杭径の違いが本工法のパイルキャップのせん断挙動に与える影響等について検討した。



図一五 杭頭せん断力—杭頭水平変位関係 (包絡線)



図一六 最大主ひずみコンター図 (Q = 600 kN) 【No.1 試験体】

図一七 ひび割れ図 (Q = 600 kN) 【No.1 試験体】

4-2 引張軸力時における解析

(1) 解析条件

引張軸力を導入した解析は、No. 2 試験体の解析モデルに設定した材料特性等をそのまま使用して実施した。導入する引張軸力については、150 kN に設定した。当該引張軸力は、No. 2 試験体に配置している杭頭定着筋 4-D22 (SD345) が引張降伏する荷重の概ね 1/4 程度の値である。

載荷は、引張軸力を導入した後、シミュレーション解析と同様に荷重制御による一方向荷重漸増制御で実施した。

(2) 解析結果

解析結果のうち、杭頭せん断力—杭頭水平変位関係を図一八に示す。また、図一八中には定着筋の初期応力状態の違いによる影響を検討するため、No. 2 試験体の解析結果 (軸力 0 kN) も併せて示す。

図一八を見ると、杭頭せん断力が約 200 kN 程度までは軸力の違いによる杭頭せん断力—杭頭水平変位関係への影響は見られない。一方、杭頭せん断力が 200 kN を超える範囲で同一杭頭せん断力時における杭頭水平変位を比較すると、No. 2 試験体 (軸力ゼロ) の解析結果よりも引張軸力を導入した解析結果の方が大きくなる結果になっており、杭頭せん断力—杭頭水平変位関係に対して引

張軸力を導入した影響が一定程度見られた。しかしながら、引張軸力を導入した解析結果は、No. 2 試験体の解析結果よりも大きな変形領域まで安定した挙動を示しており、引張軸力がパイルキャップのせん断挙動に悪影響を与えてはいない。

次に、杭頭せん断力が約 600 kN 時点における最大主ひずみコンター図を図一九に示す。図一九は左側にパイルキャップ上面の状態を、右側にパイルキャップ側面の状態を示しており、3章と同様にひずみが 660×10^{-6} 以上となる箇所のみを表示している。

まず、パイルキャップ上面について見てみると、載荷直交方向および載荷前面方向に最大主ひずみの大きな領域が広がっていることが確認できる。この最大主ひずみ分布の特徴は、図一七や文献³⁾に示される本工法のひび割れの特徴と概ね一致していると言える。

パイルキャップ側面について見ると、載荷方向と直交して杭埋込み深さ程度まで最大主ひずみが大きい領域が広がり、杭埋込み深さで深では載荷方向に向かって斜め方向に最大主ひずみが大きい領域が広がっていることが確認できる。この最大主ひずみ分布の特徴も、上面と同様に既往の実験等で示されている本工法のひび割れの特徴と概ね一致していると言える。

また、載荷後面側のパイルキャップとスタブの入隅近

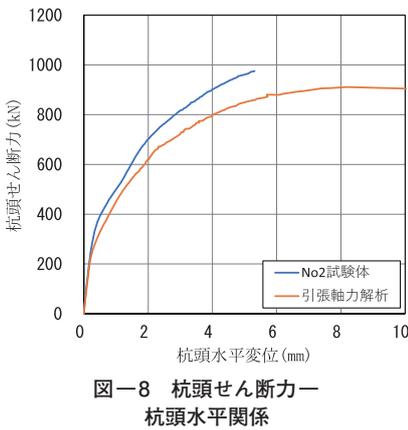


図-8 杭頭せん断力-杭頭水平関係

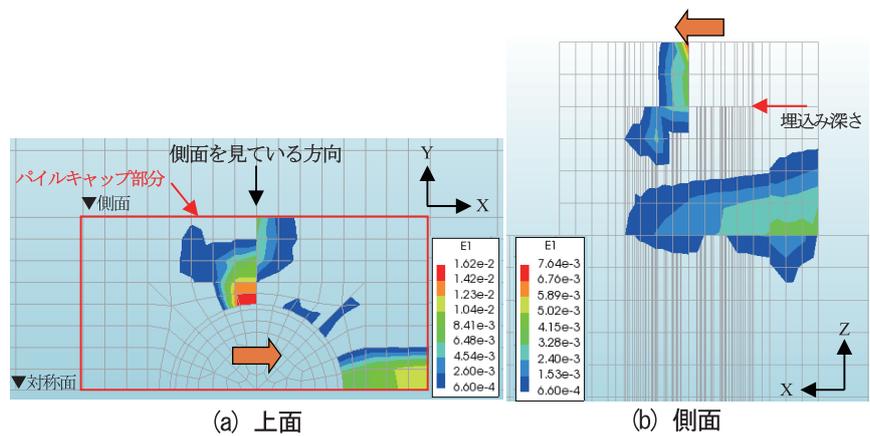


図-9 最大主ひずみコンター図 (引張軸力解析) [Q = 600 kN]

傍における最大主ひずみの大きい領域は、軸力ゼロの解析である No.2 試験体においても確認されているが、その領域の広さは本解析の方が大きい。これは、引張軸力を導入していることにより、No.2 試験体よりもひび割れが発生しやすい条件であることが影響していると考えられる。

前述の結果より、パイルキャップに引張軸力が作用した場合、杭頭せん断力-杭頭水平変位関係には一定程度の影響が見られる一方、最大主ひずみの傾向は既往の実験等で確認されたものと概ね一致している。よって、総じて考えれば、引張軸力が作用するパイルキャップのせん断抵抗機構は、実験で確認した機構と概ね変わらないと考えられる。

4-3 最大径での解析

(1) 解析条件

解析モデルの概要を図-10に示す。解析は、一般の設計で用いられる既製杭の最大径であるφ1,200 mmで行った。パイルキャップの平面寸法は2.0D=2,400 mmで、杭体を0.5D=600 mmパイルキャップに埋め込んだ。杭体の埋込部周囲には、図-1に示す仕様の補強鉄筋(U字補強筋、横補強筋)を配置した。杭頭部には、杭頭定着筋として10-D35(SD390)を配置した。また、各材料の材料特性は、No.2試験体と同様に設定した。

図-10に示す解析モデルでは、荷重後面側に基礎梁を設けている。これは、事前に実施した予備解析で、パイルキャップとスタブの入隅部分に発生するひび割れにより最大耐力が決まってしまったことから、当該部分の拘束を高めるために設置したものである。これまで示した実験や解析の結果から、本工法で対象とするパイルキャップのせん断抵抗機構は、荷重直交および前面側の影響が支配的と考えられるため、荷重後面側に基礎梁を配置することの影響は軽微と考えられる。

荷重は、前述の解析と同様に一次不静定梁形式の一方荷重漸増制御で実施した。荷重点および反力点は、パイルキャップ天端からZ+方向にそれぞれ2,400 mm、4,800 mmの位置とした。また、軸力は0 kNとした。

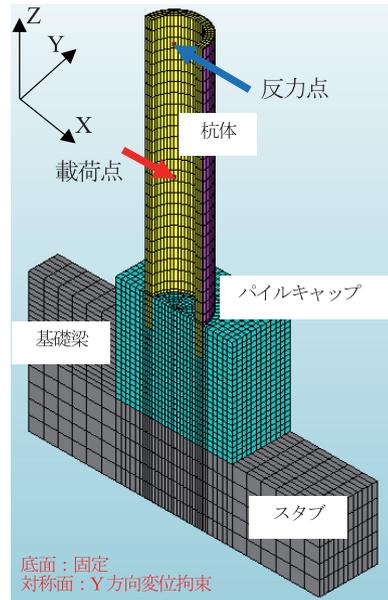


図-10 解析モデルの概要 (最大径)

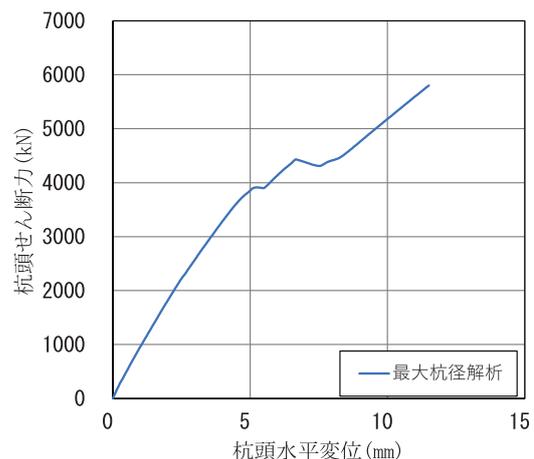


図-11 杭頭せん断力-杭頭変位関係 (最大径)

(2) 解析結果

解析結果のうち、杭頭せん断力-杭頭水平変位関係を図-11に示す。図-11を見ると、杭頭せん断力が4,000 kN直前までは概ね直線的な挙動を示していることが確認できる。一方、杭頭せん断力が4,000 kNおよび4,500 kN近傍において杭頭水平変位が急増する挙動が確認で

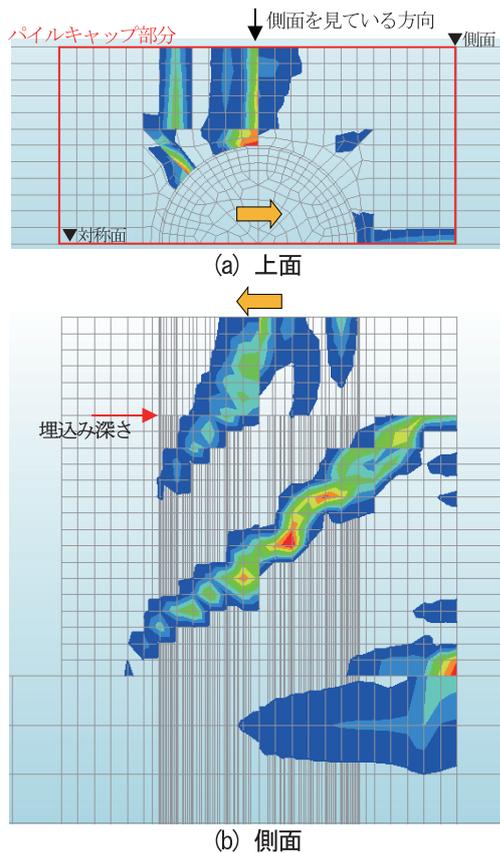


図-12 最大主ひずみコンター図 (最大径)

きる。これは、それぞれ荷重後面側のパイルキャップとスタブ、および基礎梁との入隅部分でひび割れが比較的大きく進展したタイミングと一致しており、パイルキャップのせん断抵抗機構との関係性は小さいと考えられる。

次に、杭頭せん断力が約 4,000 kN 時点における最大主ひずみコンター図を図-12 に示す。図-12 は上段にパイルキャップ上面の状態を、下段にパイルキャップ側面の状態を示しており、ひずみの表示条件は前章までと同様である。

まず、パイルキャップ上面について見てみると、荷重直交方向および荷重前面方向に最大主ひずみの大きな領域が広がっていることが確認できる。一方、本章の解析の特徴として、荷重後面斜め 45 度方向に最大主ひずみの大きな領域が見られるが、最大主ひずみの大きさから判断すると、支配的な最大主ひずみは他の解析と同様に、荷重直交方向に延びる最大主ひずみと考えられる。よって、最大主ひずみ分布の特徴は、図-7 や文献³⁾ に示される本工法のひび割れの特徴と概ね一致していると言える。

パイルキャップ側面について見ると、荷重方向と直交して杭埋込み深さ程度まで最大主ひずみが大きい領域が広がり、杭埋込み深さで深では荷重方向に向かって斜め方向に最大主ひずみが大きい領域が広がっていることが確認できる。この最大主ひずみ分布の特徴も、上面と同様に既往の実験等で示されている本工法のひび割れの特徴と概ね一致していると言える。なお、その他の領域においても最大主ひずみが大きくなっている部分が見られ

るが、これらは主に曲げ系の挙動に起因するものであり、本工法のせん断抵抗機構に与える影響は軽微と考えられる。

これらより、実務上使われる最大径のケースにおいても、パイルキャップのせん断抵抗機構は実験で確認した機構と概ね変わらないことが確認できた。

§5. おわりに

定着筋と埋込みを併用して既製杭をパイルキャップに定着するパイルキャップのせん断耐力を評価する工法を開発するにあたり、有限要素法解析を実施した。

本報では、まず実験結果に対するシミュレーション解析を行い、杭頭せん断力—杭頭水平変位関係やひび割れ性状などを有限要素法解析で模擬できることを示し、解析モデルの妥当性を確認した。

次に、妥当性が確認された解析モデルを用いて、実験では実施できなかった引張軸力時および最大杭径での解析的な検討を実施し、本工法のせん断抵抗機構は軸力条件や杭径によらず、実験で確認した機構と概ね変わらないことを確認した。

なお、本工法は(一財)日本建築総合試験所より、建築技術性能証明(GBRC 性能証明 第 20—05 号)を取得している。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート基礎構造部材の耐震設計指針(案)・同解説, 2017.3
- 2) 郡司他：高耐力既製コンクリート杭用パイルキャップ工法の開発, 西松建設技報 VOL. 43, 2020
- 3) 郡司他：定着筋と埋込みを併用して既製コンクリート杭を定着するパイルキャップのせん断挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 43, No. 2, pp. 475-480, 2021
- 4) 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, 1999.10
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書(2012年制定)設計編, 2012.12
- 6) 松浦他：鋼板とコンクリートの付着性状に関する基礎的検討鋼材断面形状による影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp. 1037-1038, 2005.9
- 7) 鳥他：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—すべり—ひずみ関係, 土木学会論文集第 378 号/5-6, 1987.2
- 8) 土木研究所他：杭基礎の大変形挙動後における支持力特性に関する共同研究報告書(杭頭接合部に関する研究)平成 24 年 3 月