



多段拡大場所打ちコンクリート杭の施工品質および支持力・沈下挙動の評価に関する研究

濱, 健太郎

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2024-09-25

(Date of Publication)

2025-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第9017号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100492526>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏 名 _____ 濱 健太郎 _____

専 攻 _____ 工学研究科 建築学専攻 _____

論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記すること。)

多段拡大場所打ちコンクリート杭の施工品質および

支持力・沈下挙動の評価に関する研究

指導教員 _____ 向井 洋一 教授 _____

(注) 2,000字~4,000字でまとめること。

本論文は、近年主に超高層建物を支持する基礎杭工法として適用が増えつつある「多段拡大場所打ちコンクリート杭（多段拡大杭と略称）」に関して、より合理的な設計・施工を実現するため、最大径 5.5 m の拡大部を有する多段拡大杭の施工方法を確立すること（第 3 章）、施工された多段拡大杭の支持力を適切に評価すること（第 4 章）、荷重が作用する多段拡大杭の沈下挙動を適切に評価すること（第 5 章）、の 3 点について各種検討を行い、得られた結果や知見について取りまとめたものである。以下に、本論文の各章の内容を概説する。

第 1 章では、研究の背景と目的、多段拡大杭の概要、本研究が対象とする課題とその位置付け、および本論文の構成について述べている。多段拡大杭は、場所打ちコンクリート杭の先端と中間部に拡大部を設けることで、支持地盤による鉛直方向の抵抗力を増大させる基礎杭工法である。高支持力化を目的に拡大部の直径が増加傾向にある中で、本研究では既往技術より大きい最大径 5.5 m の拡大部を有する多段拡大杭を検討対象とした。その広範的な実用展開にあたり、設計面では様々な地盤・建物条件に対する検討課題が想定されるが、本研究ではそれらの基礎的な検討として、一様な砂質地盤における 1 本の杭（単杭）に対する支持力・沈下挙動の評価を検討対象とするものとした。

第 2 章では、国内外での多段拡大杭の研究・適用状況と、多段拡大杭の施工方法、支持力の評価、沈下挙動の評価に関連する既往研究について述べた上で、それらに対する本研究の新規性を整理している。

第 3 章では、最大径 5.5 m の拡大部を有する多段拡大杭の施工に関して、試験サイトでの実大施工試験により施工方法および品質について検証した結果と、実工事での施工において施工方法の適用性を検討した事例について述べている。拡大部の掘削には専用の掘削バケット（拡大掘削バケットと呼称）を用いるが、本研究では大径化を実現するため、拡大翼（掘削孔壁を切削する部材）の上部の傾斜角度を従来よりも大きい 30°として高さを抑えることで、アースドリル機（地上で掘削・排土作業を行う施工重機）への適用性を確保した。また、拡大翼の開閉駆動に油圧ジャッキを用いる従来の「油圧式」に加え、それを必要としない「機械式」も適用できるようにすることで、様々な施工条件に対する汎用性を向上させた。このような拡大掘削バケットを用いて最大径 5.5 m かつ上部傾斜角 30°の拡大部を有する多段拡大杭を施工するにあたって、拡大掘削バケットの掘削性能、掘削時の孔壁安定性、コンクリートの打設品質が検討課題として挙げられた。そこで、種々の実大施工試験により、これらの課題について検証を行った。複数の条件で実施した掘削試験では、硬質地盤において機械式および油圧式拡大掘削バケットが同等の掘削性能を有すること、拡大部の直径 5.5 m および上部傾斜角 30°の掘削孔壁が安定性を確保できることを確認した。コンクリート打設後の杭の掘出し調査では、杭形状・寸法が計画値を満足していること、打設したコンクリートに脆弱部や過大なひび割れが無いことを確認した。高強度コンクリート（Fc80、Fc60）や低炭素型セメント（高炉セメント C 種相当）を用いたコンクリートの打設試験では、事前に適切な配合計画を行うことで硬化後のコンクリートが十分な強度を発現することなど

を確認した。また、これらの結果を踏まえて実施した超高層建物における実施工では、拡大部の掘削前に杭全体の地層構成を把握できる油圧式拡大掘削バケットを用いた施工手順を採用することで、拡大部を確実に支持地盤に配置させることができた。

第4章では、砂質地盤における多段拡大杭の支持力特性について、各種実験により検討を行った結果について述べている。多段拡大杭の支持力を評価する際は、杭先端抵抗および周面抵抗に加え、中間拡張部（杭の中間部に設ける拡大部）の抵抗力を評価する必要があるが、その評価式は一般にオーソライズされていない。そこで本研究では、中間拡張部を砂質地盤（平均 N 値 33）に配置した実大場所打ちコンクリート杭（軸部径 D_1 : 1.0 m、中間拡張部径 D_2 : 2.0 m）に対して押し込み載荷試験を行い、中間拡張部の支持力特性を分析した。その結果、中間拡張部の極限支持力度（鉛直変位 $0.1 D_2$ での負担荷重度）を平均 N 値で除した係数（告示式の支持力係数 α に相当）は約 140 となり、杭先端抵抗に対する α の推奨値 120 を上回ることを確認した。荷重-沈下関係から類推される中間拡張部での地盤の支持メカニズムは、杭先端でのそれに類似するものであり、杭先端と同様に支持力を水平投影面積当たりの支持力度で評価できるものと考察した。

また、既往実験によれば、中間拡張部と拡底部（杭の先端に設ける拡大部）の距離（拡大部間隔と呼称）が小さくなると、地盤の支持メカニズムが変化することや支持力が低下する傾向が指摘されている。本研究では、大規模建物の支持地盤となり得る大深度地下に相当する地盤条件での検討例が少ないことに着目し、実地盤の性状を模型スケールで近似できる遠心模型実験により、拘束圧を高めた砂質地盤における拡大部間隔と支持力の関係を検討した。実験では拡大部間隔比 L_p / D_{p2} (L_p : 拡大部間隔、 D_{p2} ($= (D_2 - D_1) / 2$) : 拡大部の突出幅) を 4 通りに変えた模型杭に対し、押し込み載荷試験を行った。その結果、中間拡張部の極限支持力度は $L_p / D_{p2} \leq 8$ の範囲で低下する傾向を示し、この範囲では拡大部を結ぶ円筒面上のせん断抵抗力度と L_p / D_{p2} の関係に応じて支持力を評価できる可能性が示唆された。

第5章では、砂質地盤における多段拡大杭の沈下挙動について、実験・解析の両面から評価方法を検討した内容について述べている。本研究では、実務設計で建物沈下の予測手法として用いられることの多い「ハイブリッド法」に、多段拡大杭の沈下挙動評価を組み込むことを目的としている。同手法では、杭-地盤間の非線形挙動を表現する非線形ばねが杭要素に付与されるが、中間拡張部の非線形ばね（即ち荷重-沈下関係）については評価方法が確立されていない。そこで本研究では、まず実験的検討として、中間拡張部の荷重-沈下関係が分析されている実大載荷試験結果を 6 例（第4章の試験結果を含む）収集し、同関係の統計処理を行った。その結果より、得られた平均曲線は杭先端の荷重-沈下関係として提案されている指数関数型の評価式で概ね評価できること、その式中の曲線形状を規定する係数に統計処理で得られた平均値を与えることで中間拡張部の平均的な荷重-沈下関係を評価できることを示した。また、解析的検討として、構成則に Mohr-Coulomb の破壊規準（弾完全塑性モデル）を適用した地盤モデルを用いた FEM 解析により、中間拡張部と杭先端の

(氏名： 濱 健太郎 NO. 3)

荷重-沈下関係の比較検討を行った。その結果、中間拡径部の同関係は杭先端のそれに比較して曲率の大きい性状を示し、上記実験的検討で得た傾向に対応するものであったことから、実験の補完的な検討を当解析モデルで行うことの妥当性が示唆された。

第6章では、本論文全体の総括を述べるとともに、本論文で示した知見をもとに今後発展が期待される検討課題について言及している。

氏名	濱 健太郎		
論文題目	多段拡大場所打ちコンクリート杭の施工品質および支持力・沈下挙動の評価に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	向井 洋一
	副査	教授	藤永 隆
	副査	准教授	水島 靖典
	副査		
	副査		
印			
要 旨			
<p>都市部では、建築物の超高層化が進み、また長大な柱スパンを有する架構を採用する建物も増えており、柱の軸力負担が増加する傾向とともに、柱直下に設けられる基礎杭には、高軸力を支持する性能が求められている。こうした背景から、大型の基礎杭を構築できる場所打ちコンクリート杭の先端部を拡大し、地盤による抵抗力を高めた拡底杭が適用されてきた。近年、拡底杭の中間部にもさらに拡大部を設け、複数の拡大部により、高軸力に対する支持能力を増加させた「多段拡大場所打ちコンクリート杭(多段拡大杭)」が開発され、適用が進んでいる。一方、多段拡大杭においては、特に中間拡径部が杭全体の支持性能や沈下挙動に寄与するメカニズムが十分に解明されておらず、中間拡径部の施工法についても技術的課題が残されている。本研究では、多段拡大杭に関して、より合理的な設計・施工法を実現することを目的とし、①大径化が進む多段拡大杭の施工品質を確保するための適切な工法の確立、②施工された多段拡大杭の支持力の適切な評価、③荷重が作用する多段拡大杭の沈下挙動の適切な評価、の3点について、信頼性の高い実大試験とともに、複雑な地盤性状を適切に考慮できる模型実験・数値解析により検討を行ったものである。提出された学位論文の構成は以下のとおりである。</p> <p>第1章では、研究の背景と目的、多段拡大杭の概要、本研究が対象とする課題とその位置付け、および本論文の構成について述べている。多段拡大杭は、高支持力化を目的に拡大部の直径が増加傾向にある中で、本研究では既往技術より、さらに大きい最大径 5.5 m の拡大部を有する多段拡大杭を検討対象としている。その広範的な実用展開にあたり、設計面では様々な地盤・建物条件に対する検討課題が想定されており、それらの基礎的な検討として、一様な砂質地盤における1本の杭(単杭)に対する支持力・沈下挙動の評価を本研究における検討対象としている。</p> <p>第2章では、国内外での多段拡大杭の研究・適用状況と、多段拡大杭の施工方法と品質確保に関する研究、ならびに支持力の評価、沈下挙動の評価に関連する既往研究について述べた上で、それらに対する本研究の新規性を整理している。また、国内で既に実用化されている異なる多段拡大杭の工法に関して、施工方法や支持力評価式の比較を示すとともに、本研究で扱う多段拡大杭工法の独自性ととともに、本研究で取り組むべき課題の重要性について示している。</p> <p>第3章では、最大径 5.5 m の大径の拡大部を有する多段拡大杭の施工に関して、試験サイトでの実大施工試験の実施により、施工方法および品質について検証した結果とともに、実工事での施工において当該施工法の適用性を検討した事例について述べている。拡大部の掘削に用いる専用の掘削バケット(拡大掘削バケット)には、大径化を実現するため、拡大翼(掘削孔壁を切削する部材)の上部の傾斜角度を大きくして高さを抑えることで、アースドリル機への適用性を確保するとともに、拡大翼の開閉機構には、従来の「油圧式」ジャッキに加え、油圧を用いない「機械式」の適用を可能とし、様々な施工条件に対する汎用性を向上させている。まず、このような拡大掘削バケットを用いた多段拡大杭の実大施工試験により、拡大掘削バケットの掘削性能、掘削時の孔壁安定性、コンクリートの打設品質を確認するための検証を行っている。複数の条件で実施した掘削試験により、硬質地盤において、機械式および油圧式の拡大掘削バケットがともに同等の掘削性能を有すること、掘削孔壁の安定性を確保できることを確認している。また、コンクリート打設後の杭の掘出し調査により、杭形状・寸法が計画値を満足していること、打設したコンクリートに脆弱部や過大なひび割れが無いことを確認するとともに、使用する高強度コンクリートや低炭素型セメントを用いたコンクリートの打設試験により、事前に適切な配合計画を行うことで硬化後のコンクリートが十分な強度を発現することを確認している。</p>			

氏名	濱 健太郎
----	-------

さらに、これらの結果を踏まえて実施した超高層建物における実施工では、拡大部を確実に支持地盤に配置させるために、拡大部の掘削前に杭全体の地層構成を把握できる油圧式拡大掘削バケットを用いた施工手順を採用し、当該工法の有効な適用性を実証している。

第4章では、砂質地盤における多段拡大杭の支持力特性について、各種実験により検討を行った結果について述べている。多段拡大杭の支持力評価においては、中間拡径部の抵抗力を評価する必要があるが、評価式は十分に検証されていない。そこで本研究では、中間拡径部を砂質地盤に配置した実大場所打ちコンクリート杭に対して押し込み載荷試験を行い、中間拡径部の支持力特性を分析した。その結果、中間拡径部の極限支持力度と平均N値との関係が、杭先端抵抗に対する推奨を上回ることを確認している。また、荷重-沈下関係から類推される中間拡径部での地盤の支持メカニズムは、杭先端でのそれに類似するものであり、杭先端と同様に支持力を水平投影面積当たりの支持力度で評価できるものと考察している。さらに、中間拡径部と杭先端の拡底部との距離（拡大部間隔）による、地盤の支持メカニズムの変化が支持力に影響する可能性に着目し、実地盤の性状を模型スケールで近似できる遠心模型実験により、拘束圧を高めた砂質地盤における拡大部間隔と支持力との関係を検討している。拡大部間隔比を変えた模型杭に対し、押し込み載荷試験を行った結果、中間拡径部の極限支持力度は、拡大部を結ぶ円筒面上のせん断抵抗力と拡大部間隔比との関係に応じて支持力を評価できる可能性が示唆された。

第5章では、砂質地盤における多段拡大杭の沈下挙動について、実験・解析の両面から評価方法を検討している。本研究では、実務設計で建物沈下の予測手法として用いられることの多い「ハイブリッド法」に、多段拡大杭の沈下挙動評価を組み込むことを目的とした。同手法では、杭-地盤間の非線形挙動を表現する非線形ばねが杭要素に付与されるが、中間拡径部の非線形ばね（即ち荷重-沈下関係）については評価方法が確立されていないことから、まず実験的検討として、中間拡径部の荷重-沈下関係が分析されている実大載荷試験結果を収集し、同関係の統計処理を行った。その結果、得られた平均曲線は杭先端の荷重-沈下関係として提案されている指数関数型の評価式で概ね評価できること、その式中の曲線形状を規定する係数に統計処理で得られた平均値を与えることで中間拡径部の平均的な荷重-沈下関係を評価できることを示している。さらに、解析的検討として、構成則に Mohr-Coulomb の破壊規準（弾完全塑性モデル）を適用した地盤モデルを用いた FEM 解析により、中間拡径部と杭先端の荷重-沈下関係の比較検討を行った。その結果、中間拡径部の同関係は杭先端のそれに比較して曲率の大きい性状を示し、実験的検討で得られた傾向に対応するものであったことから、実験の補完的な検討を当該解析モデルで行うことの妥当性が示唆された。

第6章は、本論文の結論であり、論文全体の総括を述べるとともに、各章での検証内容と主要な結果をまとめ、それらの妥当性について説明している。その上で、本論文で示した実験的検討による知見に加え、実験範囲外の条件（杭形状、地盤条件）に対する系統的な検討を数値解析等により実施することで、評価法のさらなる信頼性向上と合理的な設計に繋がられることに言及している。

以上のように、本研究は、高支持力を得るために拡大部径が大きくなる傾向にある多段拡大杭の施工上の課題解決と施工品質確保、ならびに多段拡大杭の広範的な実用について研究したものであり、硬質層と軟弱層が互層状に分布する地盤条件での支持力・沈下挙動の定量的評価に基づく多段拡大杭工法の設計・施工の合理化に寄与する重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の 濱 健太郎 は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。