高支持力埋込み杭の支持力に必要な根固め部の強度に関する研究

THE REQUIRED COMPRESSIVE STRENGTH OF SOIL-CEMENT IN ENLARGED BASE OF BORED PILES TO ENSURE THE BEARING CAPACITY OF THE PILE

土屋富男 ——— * 1 桑原文夫 ——— * 2

Tomio TSUCHIYA ——— * 1 Fumio KUWABARA — * 2

キーワード:

杭基礎, 埋込み杭, 拡大根固め部, ソイルセメント強度, 載荷試験, 原位試験, 支持力

Keywords:

Pile foundation, Bored pile, Enlarged base, Soil-cement strength, Loading test of pile, In-situ test, Bearing capacity

The vertical bearing capacity of bored piles is examined by 4 full scale pile loading tests varying the strength of soil-cement in the enlarged base. Based on 3 failure patterns of the enlarged base, the end bearing capacity is estimated by the soil SPT values and the unconfined compressive strength of the soil-cement. The pile loading tests show that the relation between the strength of soil-cement and pile bearing capacity agrees well to the proposed failure condition by the simple analytical model.

1. 序論

杭先端に拡大根固め部を有する高支持力の埋込み杭（以下、高支持力埋込み杭とする）は、先端根固め部の拡大掘削とセメントミルクの注入・固結によって、根固め部を高強度化し、実質的に先端杭径と長さを増大させて大きな鉛直支持力を得る工法である。したがって、高支持力埋込み杭の支持力を確保するためには、根固め部が重要な役割を担っている。根固め部のソイルセメントは従来工法に比べ格段に高い強度発現を期待する工法となってきたにもかかわらず、根固め部の構築法が従来通りであるため、高支持力杭特有の施工管理の問題や支持力評価の問題^{1)~5)}が生じている。

高支持力埋込み杭は、杭メーカー各社からさまざまな工法が開発され、載荷試験による支持力評価に基づく評定機関による審査を経て、大臣認定を受けている。しかし、あらゆる地盤において、支持力の検証や根固め部の強度の検証がなされているわけではなく、地盤の条件や施工管理によっては強度が低下することが課題⁶⁾となっている。特に根固め部のソイルセメントの強度が低く、ソイルセメントが破壊すると杭から地盤への力の伝達が十分でなく、支持力低下が生じる。根固め部の支持力に及ぼす影響は大きいものの、定量的に根固め部に生じる応力に対応する必要強度が示されておらず、合理的な設定がなされていない。本報告は、実大杭による支持力の検討と簡易計算による支持力の検討を行うことで、支持力に及ぼす根固め部のソイルセメントの強度の影響を検討したものである。

2. 根固め部の強度を考慮した杭先端支持力の検討

根固め部の強度および杭先端支持力については各種の検討がなされている。今ら⁷⁾は載荷試験後の杭の掘出し調査を実施している。

節杭を用いたプレボーリング工法により施工した杭の先端載荷試験を行い、地盤の極限支持力まで載荷した後の杭を掘り出して、根固め部の杭の出来形、内部の健全性、ソイルセメントの強度などの調査を実施した。根固め部の造成地盤はN値50以上の粘土混り砂礫で拡張率約1.4、根固め部のソイルセメントの強度は約11~13 N/mm²であった。根固め部は健全であり、地盤破壊であることを確認したという結果を報告している。

山崎⁸⁾はFEM弾塑性解析により、根固め部形状と強度を変えて検討を行っている。破壊には杭直下と根固め下端の2種類があり、杭直下で起こる破壊に関しては、杭内外周面と根固め部は完全付着の条件を満足し、杭の根固め部への埋込み長さを十分大きくとることにより、根固め部の圧縮強度相当の耐力を確保できる。根固め部下端で起こる破壊に関しては、底面形状を円錐形などにするか、平面形状の場合には、強度を20 N/mm²以上とすることにより、支持層の地盤の支持力にほぼ等しい値とすることができるという結果を示している。

木谷⁹⁾は、模型実験により破壊のモードを示している。鋼製の1/5スケール模型杭で、根固め部の径、長さ、杭下の根固め部の長さをパラメータとした杭について、模型土槽を用いた鉛直載荷試験を行い、試験後掘出して支持力と破壊形状を検討した。節杭はストレート杭より支持力は高い。節杭については、拡張比2倍まで支持力増大に効果がある。杭下長さ比（杭下の根固め部の長さの杭径に対する比）が大きいほど支持力は大きいという結果を報告している。

しかし、根固め部のソイルセメントの強度と杭先端支持力の関係を検討しているものが少ない。本報告では、根固め部のソイルセメントの強度を意図的に低下させた実大の試験杭を作成し、静的鉛直

^{*1} ㈱竹中工務店技術研究所 主席研究員
(〒270-1395 印西市大塚1-5-1)

^{*2} 日本工業大学工学部建築学科 教授・工博

^{*1} Senior Chief Researcher, R&D Institute, Takenaka Corporation

^{*2} Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Nippon Institute of Technology, Dr. Eng.

設定した。試験杭 1 について、室内配合試験の結果（表 1 (a) 参照）がソイルセメント中のセメントミルク含有率 25% で、一軸圧縮強度が 2.9 N/mm^2 であることから、目標の強度 5 N/mm^2 を確保するにはセメントミルク含有率を増加させ 33% とした。施工上の注入方法としては、水を加えて攪拌し密度調整した土（以下、攪拌調整土とする）1 に対しセメントミルクを 0.5 注入し、セメントミルク含有率を 33% に確保する方法とした。試験杭 2 について、室内配合試験の結果（表 1 (a) 参照）がソイルセメント中のセメントミルク含有率 50% で、一軸圧縮強度が 12.5 N/mm^2 であることから、目標の強度 15 N/mm^2 を確保するにはセメントミルク含有率を増加させ 60% とした。施工上の注入方法としては、攪拌調整土 1 に対しセメントミルクを 1.5 注入し、セメントミルク含有率を 60% に確保する方法とした。なお、室内配合試験は文献 10) と同様の方法で行った。

次に、実際に施工を行い根固め部の状況を確認するため、原位置における施工試験を実施した。掘削から根固め部築造、軸部築造の計画サイクルタイムに従って施工した。杭の建込みは行わなかった。施工試験では、杭施工直後の未固結試料の調査と固化後のコア試料の調査を試みた。未固結試料採取には文献 11) の方法を用い、コア採取には文献 6) に示すガイド管を用いた。施工試験杭の未固結試料の試験結果（表 1 (b) 参照）では、試験杭 1 で 2.2 N/mm^2 、試験杭 2 で 15 N/mm^2 となった。施工試験杭では固化後コア採取を試みたが、試験杭 2 のみ採取できた。コア試験では、試験杭 2 で 23 N/mm^2 程度出ている。

次に、載荷試験杭の施工を行った。2 本の載荷試験杭は施工試験杭と同一施工方法によって築造したが、別の杭とした。載荷試験杭での未固結試料採取は行わなかった。それは、杭建込み前に未固結試料採取を行うと、杭建込み時にひずみ計の配線に時間がかかるために、杭高止まりの危険があること、また、杭挿入後は、中空部にひずみ計の配線がされるため、未固結試料採取器が挿入できないことからである。試験杭 1 は載荷試験杭で載荷後にガイド管を用いずにコア採取でき、平均 20 N/mm^2 程度であった。未固結強度が 2.2 N/mm^2 と低かったのは未固結試料採取方法に不備があった可能性も考えられる。荷試験杭の試験杭 2 はコア採取を試みたが採取できなかった。

3.1.3. 鉛直載荷試験

杭体の軸力分布を求めるため、根固め部直上（杭先端部）を含む計 3 深度にひずみゲージを設置した（図 1 参照）。先端に荷重伝達を促すため軸部にフリクションカットを施した。

図 2 に杭頭と杭先端の荷重沈下曲線を示す。杭の軸力は各深度のひずみをもとに、杭および中空部のソイルセメントのヤング係数と断面積を考慮して求めた。ここで、杭は弾性とし、ソイルセメントはひずみに対する非線形性を考慮した。杭先端沈下量は、杭頭沈下量をもとに地中部の深度方向のひずみ値から求めた区間毎の沈下量を合算して求めた。試験杭 1 は杭頭で沈下量約 29mm、約 7.2MN までほぼ直線で、それ以降、急激に沈下量が増加し、8.8MN で極限に到った。杭先端荷重は沈下量約 15mm で約 5MN までほぼ直線で、それ以降急激に沈下量が増加し約 8MN で極限に到った。試験杭 2 は 8MN まで載荷した。杭頭で、沈下量約 19mm で約 6.3MN までほぼ直線であった。杭先端荷重は沈下量約 13mm で約 4.4MN までほぼ直線であった。載荷した範囲においてはほぼ試験杭 1 と同様の傾向

図 2 鉛直載荷試験結果

がみられた。

3.2. 例2

3.2.1. 地盤と杭の概要

地盤と杭の概要を図 3 に示す。表層から GL-14m までは埋土層、GL-33m まではシルト質粘土層、GL-48m までは洪積のシルト質粘土、砂質シルト、細砂の互層、支持層はその下の細砂層である。

杭先端は支持層に先端節径 D_1 (0.55m) 以上根入れさせた GL-50.5m である。根固め部の拡大掘削径 D_2 は 0.8m、拡大根固め部長さは掘削底から上へ 2.5m である。杭先端から掘削底までは 0.5m である。支持層の N 値は 45~80 程度である。ちなみに、杭先端から下 D_1 、上 D_1 の平均 N 値は 53.6、ソイルセメント下端から下 D_2 、上 D_2 の平均 N 値は 53.3 である。杭径と根固め拡大掘削径の比 D_2/D_1 は 1.45 である。支持層近傍の細粒分は深さ GL-49.15m、GL-50.15m、GL-51.15m の位置でそれぞれ 7.2%、7.0%、7.6%、GL-49~52m の間の地層も含めた支持層の土を混合したものは 11.2% であり、細粒分を含んでいる。

3.2.2. 実大杭の根固め部のコア試料

杭の先端支持力に及ぼす根固め部のソイルセメントの強度の影響を検討するため、ソイルセメント強度の異なる載荷試験杭を原位置で築造し、鉛直載荷試験を実施した。試験杭築造に際し、室内配合試験で根固め部への注入量の設定を行って施工法を設定し、原位置敷地における実大施工試験のコア試料の強度を調査した。その施工法で試験杭を施工した。根固め部の強度の目標値を 5 N/mm^2 と 10 N/mm^2 の 2 ケースの試験杭（試験杭 3、4）を計画した。試験杭 3 はソイルセメントの破壊モード、試験杭 4 は地盤の破壊モードを想定した。なお、施工試験杭 3、4 および載荷試験杭 3、4 は、平面的に約 $15\text{m} \times 5\text{m}$ の範囲内で実施した。

表 2 (a) に試験杭 3、4 の施工法を設定するために実施した室内配合試験の結果を示す。この結果に基づき、施工試験杭の施工法を設定した。試験杭 4 について、試験杭 2 のコア強度が 20 N/mm^2 を

図4に杭頭と杭先端の荷重沈下曲線を示す。杭の軸力は、各深度のひずみをもとに、杭および中空部のソイルセメントのヤング係数と断面積を考慮して求めた。ここで、杭は弾性とし、ソイルセメントはひずみに対する非線形性を考慮した。杭先端沈下量は、杭頭沈

(b)

備考	・室内配合試験を参考に設定
----	---------------

下量をもとに地中部の深度方向のひずみ値から求めた区間毎の沈下量を合算して求めた。試験杭 3 は、杭頭で沈下量約 37mm、約 4.8MN までほぼ直線で、それ以降急激に沈下量が増加し、約 5MN で極限に到った。杭先端は、沈下量約 13mm で約 0.9MN までほぼ直線で、それ以降急激に沈下量が増加し杭径の約 10%の沈下量で約 1.4MN で極限に到った。

試験杭 4 は杭頭で、沈下量約 44mm で約 4.9MN までほぼ直線で、それ以降急激に沈下量が増加し、約 5MN で極限に到った。杭先端は、沈下量約 15mm で約 1.6MN までほぼ直線で、それ以降急激に沈下量が増加し約 2.2MN で極限に到った。

4. 事例における杭先端支持力とコア強度

前章で述べた载荷試験結果の支持力を地盤強度から推定される支持力と比較する。図 5 は、ストレート杭を参考に、想定した杭先端の破壊モードを示したものである。地盤の支持力は図 5(a)に示す地盤の破壊モードの支持力（文献 2）で示された根固め部の先端面支持力 R_{pg} と先端摩擦 R_{fg} を合算したもの）に対応した R_{p1} とし、(1)式で設定した。

$$R_{p1} = R_{pg} + R_{fg} = \alpha \cdot \bar{N} \cdot A_2 + \beta \cdot \bar{N} \cdot \phi_2 \cdot L \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 α は地盤の先端支持力係数、 β は地盤の摩擦係数とし、文献 2)を参考に、 α は 200 kN/m²、 β は低めの 3.3 kN/m²とした。 $\bar{N}$ 値は地盤の平均 N 値、 A_2 、 ϕ_2 、 L は根固め部の断面積、周長、長さである。

この地盤の支持力に対する実測支持力の比とコア強度の関係を図 6 に示す。図には、極限支持力が確認された試験杭 1、3、4 を示す。試験杭 1 は、コア強度を○印で示し、平均を●印で示した。試験杭 3 はコア強度を○印で示し、平均を■印で示した。試験杭 4 はコア強度が一点のみであったため、◆印で示した。

試験杭 1 はコアの平均強度が約 20 N/mm²で地盤の支持力 R_{p1} に対する実測杭先端支持力の比は 0.8 であった。試験杭 4 はコア強度が約 5 N/mm²で R_{p1} に対する実測杭先端支持力の比は約 0.35 であった。試験杭 3 はコアの平均強度が 0.9 N/mm²で R_{p1} に対する実測杭先端支持力の比は約 0.2 であった。

ここで、 $\bar{N}$ は試験杭 1 で 60、試験杭 3、4 で 53.3 であった。同図には、文献 6)の適用例 1（文献 6)-1）、文献 7) の例も併記している。極限が確認されていないものについては矢印をつけて示した。 $\bar{N}$ 値は、それぞれ 60、50、拡張率は 1.46、1.4 である。文献 7) はコアの平均強度は約 11 N/mm²、13 N/mm²で 2 例とも地盤の支持力 R_{p1} に対する実測杭先端支持力の比は約 1.0 であり、地盤破壊と考えられる。文献 6)-1 は地盤の支持力相当まで確認できており、破壊に至っていない。

コア強度が約 10 N/mm²以上のものは、ほぼ地盤の支持力に見合う支持力が確保されている。コア強度が約 10 N/mm²を下回るものについては、地盤の支持力の 0.2～0.3 倍の支持力となっており、地盤の支持力は確保されていない。

図 6 に示す簡易計算値については、文献 3)を参考に、図 5 に示す破壊モードに対する杭先端支持力の最小値として、以下のように求めた。

図 4 鉛直载荷試験結果

図 5 杭先端の破壊モード

図 6 地盤の支持力 (R_{p1}) に対する実測杭先端支持力の比とコア強度関係

杭先端支持力 R_p は、図 5 の(a) 地盤の破壊モード R_{p1} 、(b) ソイルセメントのせん断破壊モード R_{p2} 、(c)ソイルセメントへ貫入する破壊モード R_{p3} の最小値とし、(2)式で設定した。

$$R_p = \min (R_{p1}, R_{p2}, R_{p3}) \quad \text{-----}(2)$$

地盤の破壊モードに対応した支持力 R_{p1} は前述の(1)式に示した。ソイルセメントのせん断破壊モードに対応した支持力 R_{p2} は杭の底面積に対する先端面支持力 R_{pg1} 、および杭とソイルセメントとのせん断力およびソイルセメント内のせん断力の合力 R_{fs} を合算した(3)式で設定した。

$$R_{p2} = R_{pg1} + R_{fs} = \alpha \cdot \bar{N} \cdot A_1 + \tau_1 \cdot \phi_1 \cdot L_1 + \tau \cdot \phi_1 \cdot (L - L_1) \quad \text{-----}(3)$$

ここで、 α は地盤の先端支持力係数、 $\bar{N}$ 値は地盤の平均 N 値、 A_1 は杭(拡張部)の断面積とした。 τ_1 は杭とソイルセメントのせん断強度、 τ はソイルセメントのせん断強度、 ϕ_1 、 L_1 は杭(拡張部)の周長、杭の根入れ長さ、 L は根固め部の長さとした。

ソイルセメントへ貫入する破壊モードに対応した支持力 R_{p3} は貫入する杭(拡張部)の断面積に対する先端支持力 R_{ps} と杭とソイルセメントのせん断力 R_{fs1} を合算した(4)式で設定した。

$$R_{p3} = R_{ps} + R_{fs1} = \sqrt{A_2/A_1} \cdot q_u \cdot A_1 + \tau_1 \cdot \phi_1 \cdot L_1 \quad \text{-----}(4)$$

ここで、 A_2 は根固め部の断面積、 q_u は根固め部のソイルセメントの一軸圧縮強度とした。なお、 R_{ps} はプレストコンクリート設計施工規準¹²⁾の支圧強度式に準拠した。これは、杭直下のソイルセメントが局部的に強い圧縮力を受ける場合、杭直下周辺のソイルセメントの拘束効果によって全面圧縮の時に比べて大きな圧縮応力に耐えられる効果を考慮している。

$\alpha = 200 \text{ kN/m}^2$ 、 $\bar{N} = 60, 50$ で、 $\sqrt{A_2/A_1} \leq 2.0$ の範囲、杭とソイルセメントのせん断強度は、並河ら¹³⁾の実験から引張側のせん断強度が $0.2q_u$ 程度であることから、 $\tau_1 = \tau = 0.2q_u$ とした。

図 6 に杭径 0.65m、拡張率 1.46 の杭について、実線で $\bar{N} = 60$ の値を、破線で $\bar{N} = 50$ の値を示す。縦軸 1.0 の線は(1)式の R_{p1} 、原点を通る線はこの場合の R_{p3} が最小である。 $\bar{N} = 60$ の場合、コア強度が約 8 N/mm^2 、 $\bar{N} = 50$ の場合、約 6 N/mm^2 以下では地盤が決まる支持力以下となる。実測データはこの簡易計算式に対し、やや小さめの値となっている。

5. 結論

$\bar{N}$ 値が 50～60 程度以上の実地盤において、実大杭による載荷試験を行い、杭の先端支持力を求め、ソイルセメントの強度を考慮した杭先端支持力の簡易計算値と比較した。得られた結論を以下に示す。

- ① $\bar{N}$ 値 50～60 程度の地盤に設置した拡張率 1.45 の実大杭について、根固め部のソイルセメントの強度を意図的に低下させた杭の鉛直載荷試験を実施し、初めて先端支持力の低下が確認できた。
- ② 鉛直載荷試験によると、 $\bar{N}$ 値が 50～60 程度の地盤に設置した拡張率 (D_2/D_1) 1.4～1.46 の杭の先端支持力は、ソイルセメントのコア強度が 10 N/mm^2 程度以上では地盤の支持力に相当する支持力

が確認でき、6～8 N/mm^2 を下回ると地盤から決まる支持力の 0.2 から 0.3 倍に先端支持力が低下する場合があることが確認できた。

- ③ $\bar{N}$ 値が 50 以上で拡張率 1.4～1.46 の杭の先端支持力の実測値は、 $\bar{N}$ 値が 50～60 で拡張率 1.46 の杭の先端支持力の簡易計算値より、小さめの値となった。

最後に、一連の調査実施に際してご協力頂いた関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会構造委員会基礎構造運営委員会：あらためて杭の先端支持力を考える，2007 年度日本建築学会大会（九州）パネルディスカッション資料，pp.1～83，2007.8
- 2) 日本建築学会基礎構造運営委員会杭の鉛直支持力小委員会：杭の鉛直支持力を考える，pp.1～34，2008.8
- 3) 桑原文夫：建築分野における高支持力杭の現状と課題，基礎工，Vol.36，No.12，pp.2～6，2008.12
- 4) 土屋富男：高支持力埋込み杭の支持力不足－中間層に支持する杭の載荷試験による支持力不足発見－，基礎工，Vol.37，No.9，pp.21～24，2009.9
- 5) 土屋富男，首藤泰彦，丹野吉雄：高支持力埋込み杭の品質確保への取組例，基礎工，Vol.38，No.5，pp.66～69，2010.5
- 6) 土屋富男，首藤泰彦，丹野吉雄：高支持力埋込み杭の根固め部に対する施工管理の提案と実施例，日本建築学会技術報告集，第 18 巻，第 38 号，pp.107～112，2012.2
- 7) 今広人，吉田映，権澤和宏，小松吾郎，桑原文夫，木村亮：先端載荷試験後に掘り出した節杭を用いたプレボーリング工法の根固め部の調査，地盤工学ジャーナル，vol.5，No.4，pp.615～623，2010
- 8) 山崎雅弘，長岡弘明：既製コンクリート杭根固め部の構造耐力機構，日本建築学会構造系論文集，第 374 号，pp.73～80，1997.1
- 9) 木谷好伸：節杭を用いた埋込み杭の拡大根固め球根の鉛直支持性能に関する研究，学位論文，2009.3
- 10) 土屋富男，桑原文夫：埋込み杭の根固め部の築造方法とその強度発現に関する研究，日本建築学会技術報告集，第 18 巻，第 40 号，2012.10
- 11) 横山雅樹，加藤洋一，木谷好伸：埋込み杭の根固め部の未固結試料による品質調査，日本建築学会学術講演梗概集 B1，pp.377～378，2011
- 12) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，1998
- 13) Tutomu Namikawa, Junichi Koseki: Evaluation of Tensile Strength of Cement-Treated Sand Based on Several Types of Laboratory Tests, Soils and Foundations, vol.47, No.4, pp.657～674, 2007

[2012 年 6 月 18 日原稿受理 2012 年 8 月 7 日採用決定]