

岩盤を支持層とする杭基礎の調査・設計・施工法の構築に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～平 30

担当チーム：橋梁構造研究グループ

地質・地盤研究グループ 地質チーム

研究担当者：桐山孝晴、佐々木靖人、

浅井健一、吉田英二、飯島翔一

【要旨】

施工機械の能力向上や山岳部での施工事例の増加等により、岩盤を支持層とする杭基礎の事例が増加している。一方で、道路橋示方書においては岩盤を支持層とする杭の支持力推定式が明確に示されておらず、また、支持層の選定法や地盤調査法が明らかとなっていない。さらに、施工法や施工管理方法に関しても十分に確立されているとは言えない。そこで、岩盤を支持層とする杭基礎に関する地盤調査法・設計法・施工法の確立のための検討を行ったので、ここに報告する。

キーワード：岩盤、杭基礎、地盤調査法、支持力推定式、施工管理方法

1. はじめに

近年、施工機械・施工機材の能力向上や山岳部での施工事例の増加等により、岩盤を支持層とする杭の設計・施工事例が増加してきている¹⁾。岩盤を杭基礎の支持層とする場合には、一般に強固で良好な支持層とみなされ、高い鉛直支持力が期待でき、杭の沈下等の不具合が生じることはないと考えられてきたが、亀裂や風化等の影響で物性値や支持力が大きく異なることや施工時に杭先端地盤を乱すことなどにより、沈下等の不具合を起こす事例が散見されている^{例えぼ²⁾}。また、岩盤は地層の形成過程によって支持層全体が大きな傾斜や不陸を有することが少なくない。このことから、支持層の選定や杭の根入れ深さの設定が難しく、対象とする岩盤が支持層になりうるかどうかを判断するための調査方法や調査結果に基づく地盤定数の評価方法も明らかではない。

岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験やそれに基づく支持力機構に関する研究は、載荷試験を実施する場合に高い載荷荷重が求められ、一般に多くの費用と時間がかかることや、岩種や風化等によって物性値や支持力が異なることなどから、これまで体系的な研究が実施されておらず、結果として道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編³⁾（以下、道示IVという）においても軟岩・土丹を支持層とする打込み杭工法を除いて、杭先端の極限支持力度の推定式が明確に示されてこなかった。そのため、実務では設計者の判断による杭先端支持力度の推定（例えば、良質な砂れき層と同等の値の支持力推定式の適用等）が行われていたり、杭工

法の選択が限定的になっているのが現状である。

また、設計で期待する先端支持力を確実に発揮するためには、岩盤を支持層とする杭基礎において適切な施工や施工管理を行うことが必要であるが、その方法が十分に確立しているとは言えない。

このように、岩盤を支持層とする場合の杭基礎については、調査・設計・施工法が十分に整備されておらず、今後も不具合が生じるおそれがある。

本研究は、岩盤の力学特性や杭工法などの条件の違いを考慮し、それぞれの条件において岩盤を支持層とする杭基礎の地盤調査法、設計法（杭先端極限支持力度の推定式）及び施工法（施工管理方法）を明らかにするため、既往の知見や現地盤での地盤調査結果等の分析、岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験とその結果の分析及び現地盤での実杭の施工試験等の結果や既往の施工実績の分析を行ったものである。

2. 岩盤を支持層とする杭基礎の地盤調査法

2.1 支持層とする岩盤の条件

岩盤は亀裂や風化等の影響で物性値や支持力特性が大きく変化するため、支持層になりうるかどうかを適切に評価する必要があるが、杭基礎においては支持層とする条件や判断するための調査方法が明確に示されていない。そこで、既往の基準類^{4)~6)}における記述を整理するとともに、これまでに収集した岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験結果や不具合事例の分析を踏まえて、支持層確認の目安及び支持層とする岩盤の条件を提案した。

支持層確認の目安としては、これまで収集した岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験での地盤調査結果から、その多くでは支持層確認した層厚は 3m 以上であり、杭先端位置の N 値は 50 以上を示していた。一方で、図-1 に示すように N 値 50 以上到達後に岩盤特有の風化による影響で弱層が出てくる調査結果もあるため、現地ではある程度支持層とする層厚を確保することが重要といえる。

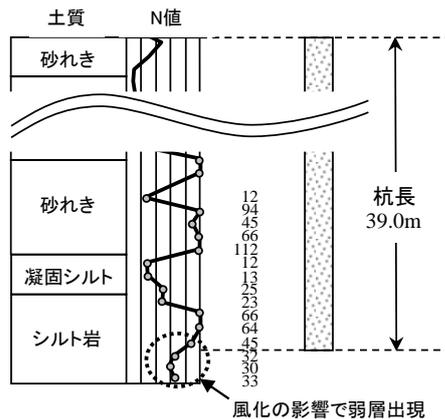


図-1 風化による影響で弱層が出現した調査結果例

岩盤を対象として支持層の選定や支持力評価を行う場合は、岩盤の硬軟、亀裂や風化等の状態を適切に考慮することが重要となることから、本研究では地盤調査の流れとして、まずは岩盤ボーリング（標準貫入試験併用のオールコアボーリング）を行い、現地で得られる岩盤分類から亀裂や風化の状態等を把握して支持層の目安を定め、その後力学試験や N 値から支持層とすべき強度や深度を設定するという考え方を示した。これまで収集した岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験での岩盤ボーリング結果から得られた支持層とした岩盤の岩盤分類が C_M~D 級であったことに加えて、既往の基準類との整合性を踏まえると、支持層とする岩盤の条件は岩盤分類で C_L 級以上が目安のひとつと考えられる。なお、D 級の岩盤については、相対的に変形しやすく、支持力発現までに大きな変形が生じた風化花崗岩の事例のように、条件によっては過大な沈下等が生じるおそれがあるため、慎重に判断する必要がある。ただし、これまで収集した岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験結果では D 級の岩盤であっても十分な支持力等が得られているものが多くあるため、これらの岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験結果を踏まえて N 値 50 以上の地層が深度方向に安定して連続する場合には支持層として扱うことは可能と考えられる。

2.2 不陸・傾斜を把握するための地盤調査方法

岩盤支持層の不陸・傾斜を想定せずに調査・設計・施工が行われた場合には、図-2 に示すような杭の支持層への未到達による支持力不足や構造物の不同沈下等が考えられる。岩盤の支持層の不陸・傾斜は、地形の形成過程による岩盤全体の深さの変化と、岩盤が過去に受けた力や地下水等の影響で亀裂や風化が進行することによる深さの変化があるため、地盤調査でこの支持層の深さの変化に対する不確実性を可能な限り低減しつつ、残された不確実性に関しては、設計者や施工者に対して情報伝達することが重要である。そこで、既往の知見を整理して支持層の不陸や傾斜が生じやすい地形・地質を示すとともに、構造物位置での具体的な地盤調査の方法について検討した。

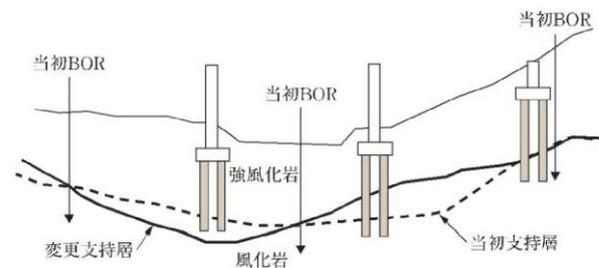


図-2 岩盤支持層が橋軸方向に傾斜していた事例

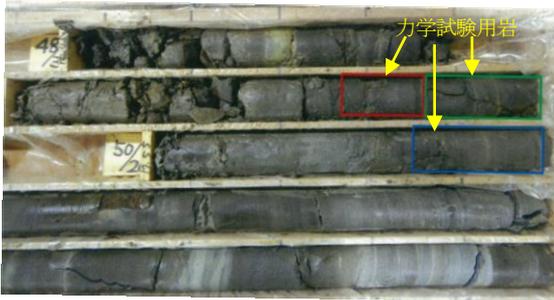
予備調査段階では、下部構造の位置や基礎形式等の検討、さらには本調査の計画を適切に方向づけるため、支持層の力学的性状や空間分布などを大局的に把握することが必要となる。特に、この段階で支持層の不陸・傾斜の存在を把握する上では、資料調査、現地踏査、ボーリング調査に加え、物理探査を適切に組み合わせるのが有効であると考えられる。

本調査段階では、支間割り、基礎形式等が決定された段階で調査を実施することとなるため、個々の下部構造位置でボーリング調査が行われるのが一般的である。ただし、基礎 1 基あたり複数本のボーリングによって支持層の空間分布を把握することは、費用や工期等の制約から容易でない場合もある。そこで、ボーリング調査点間の補完として支持層の不陸・傾斜の把握に簡易なサウンディングを適用できれば、すべてをボーリング調査による場合と比べてより経済的かつ短期間での調査が可能となる。本研究では、貫入能力の観点から大型動的コーン貫入試験を用いた岩盤支持層（泥岩）の不陸や傾斜の把握を試験的に実施し、泥岩上面の不陸を捉えるとともに、泥岩の強風化部と弱風化部の境界の不陸を推定し、岩盤の支持層の上面出現深度

を確認することができた⁷⁾⁸⁾。このことから、大型動的コーン貫入試験による岩盤支持層の把握の適用性と、平面的に支持層の深さの変化を把握する上でのボーリング調査による標準貫入試験とそれを補完する簡易なサウンディングとの組合せが有効であることが確認された。ただし、試料採取のできないサウンディングを単独で用いると支持層の深度を見誤ることがあることから、必ずボーリング調査と併用し、ボーリング調査を補間するものと考えて適用すべきである。

2.3 支持力推定に用いる地盤調査方法

岩盤の力学特性は一軸圧縮強度で評価される場合が多いものの、亀裂や風化等の存在によって力学特性が大きく変化するため、試験結果の評価は容易ではない。また写-1に示すように一軸圧縮試験は試験が実施できる岩石（岩盤から採取したコア供試体）を選定して行うこととなることから、得られた一軸圧縮強度が岩盤層全体の力学特性を代表しているとは言いがたい。



写-1 岩盤から採取したコア例

岩盤層全体としての力学特性を評価するための方法として、トンネル等の分野では、式(1)に示すように、原位置の岩盤と一軸圧縮試験に供する岩石の弾性波速度を用いて亀裂や風化等の影響を補正する準岩盤強度⁹⁾という考え方がある。そこで、これまで収集した岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験での地盤調査結果を用いて準岩盤強度の適用性を確認することとした。

表-1に示すように亀裂の多い硬岩の一部(No.1)では、岩石の弾性波速度よりも岩盤の弾性波速度が極端に小さくなったことで、割れ目係数(VP/vp)が0.62となり、岩盤が亀裂による影響を大きく受けていることが把握でき、準岩盤強度によりその影響を補正することがわかった。このことから、杭基礎においても準岩盤強度の考え方が適用可能であることが確認された。ただし、岩盤の弾性波速度が岩石の弾性波速度を上回る場合、すなわち割れ目係数が1.0以上となる場

合は岩石の応力解放による緩みの影響が考えられるので注意が必要である。

$$q_u' = \left(\frac{VP}{vp}\right)^2 \times q_u \quad (1)$$

ここに、

- q_u' : 準岩盤強度 (kN/m²)
- q_u : 岩石の一軸圧縮強度 (kN/m²)
- VP : 岩盤の弾性波速度 (km/s)
- vp : 岩石の弾性波速度 (km/s)

表-1 割れ目係数及び準岩盤強度

No.	岩盤の種類	岩盤分類	岩盤の弾性波速度 VP (km/s)	岩石の弾性波速度 vp (km/s)	割れ目係数 VP/vp	一軸圧縮強度 q_u (kN/m ²)	準岩盤強度 q_u' (kN/m ²)
1	砂岩	亀裂が多い硬岩	2.380	3.940	0.620	19800	7603
2	泥岩	堆積軟岩	1.800	1.926	0.935	1010	882
3	砂岩	新鮮岩又は亀裂の少ない岩	2.524	2.749	0.918	14950	12587
4	堆積軟岩	堆積軟岩	2.100	1.780	1.180*	1400	1400
5	弱風化岩	亀裂の多い硬岩	2.870	2.880	0.997	20750	20625

※割れ目係数 VP/vp が1.0以上のため、1.0とする。

また、コアそのものは採取できるものの一軸圧縮試験が実施できない場合における、支持力推定に用いる評価方法の確立が課題であった。そこで、三軸圧縮試験又は多段階三軸圧縮試験から得られた粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ から、式(2)により亀裂や風化等の影響を考慮した一軸圧縮強度を推定することに着目した。図-3に示すように泥岩等の比較的新しい生成年代(新第三紀以後)の均質な堆積軟岩(表-1のNo.4)であれば、多段階三軸圧縮試験からの推定値と一軸圧縮強度はよく一致することが分かった。一方で、図-4に示すように亀裂の多い硬岩(表-1のNo.5)では、潜在する亀裂の影響が三軸圧縮試験結果に大きく反映され、それにより推定された一軸圧縮強度は、亀裂の見られない部分での供試体の一軸圧縮強度より小さく推定される結果となった。乖離の理由として、亀裂の影響のほか、鉱物の入り具合、鉱物の風化具合が不均質であったことによる影響も考えられる。そのため岩盤の強度を推定する際には、供試体における亀裂の入り方や風化具合によって、ばらつきが大きい場合は、試験の数を増やすなどの対応が考えられる。

$$q_u = \frac{2c \cos\phi}{1 - \sin\phi} \quad (2)$$

ここに、

- q_u : 岩盤の一軸圧縮強度 (kN/m²)
- c : 粘着力 (kN/m²)
- ϕ : 内部摩擦角 (°)

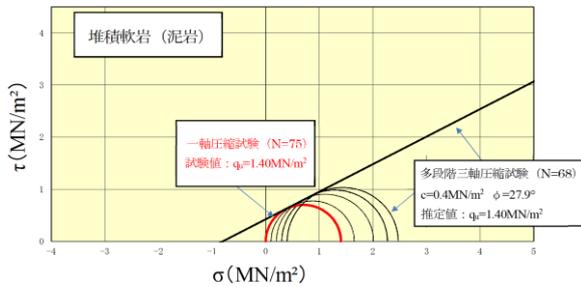


図-3 多段階三軸圧縮試験結果から一軸圧縮強度を推定した例（堆積軟岩、表-1 No.4）

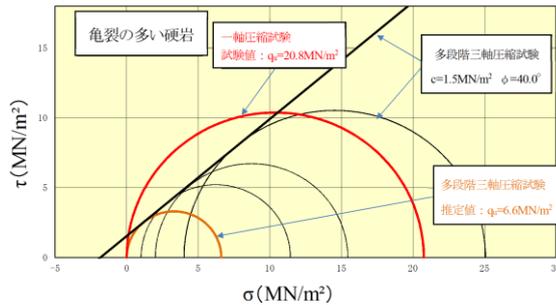


図-4 多段階三軸圧縮試験結果から一軸圧縮強度を推定した例（亀裂の多い硬岩、表-1 No.5）

一方、コアそのものが採取できない場合、支持力推定に用いる地盤調査方法としては土砂と同様に原位置試験の標準貫入試験から得られるN値を用いることが基本になると考えられる。しかし、コアそのものが採取できない場合にやむを得ず換算N値を用いる場合は、近傍で実施された一軸圧縮試験もしくは三軸圧縮試験にて得られる強度定数を踏まえて総合的に評価することが望ましいと考えられる。

3. 岩盤を支持層とする杭基礎の設計法

本章では、岩盤を支持層とする杭基礎の設計法の確立を目的として、岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験を今回新たに行い、その載荷試験データとこれまで収集した岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験データを分析した結果に基づき、杭先端の極限支持力度の推定式を提案した。

3.1 載荷試験データとグルーピング

本章で対象とする杭工法は、中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）、プレボーリング杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法、場所打ち杭工法（オールケーシング工法）とし、対象とする岩盤は軟岩とした。これらの杭工法における杭先端の極限支持力度の推定式を提案するにあたって、岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験データを統計的に分析することとした。しかし、各々の杭工法における岩盤を支持層とする杭の鉛

直載荷試験は多く実施されているとはいえ、杭工法別に支持力推定式を提案するには一定数の載荷試験データが必要であることから、杭先端の支持力機構や施工法が同様とみなせる杭工法についてはグルーピングを実施して、統計量の分析に必要な載荷試験件数を合算した。

グルーピングはプレボーリング杭工法と鋼管ソイルセメント杭工法に対して行った。これらの杭工法は、1)掘削形状が深度方向に一定である杭（いわゆるストレート杭）であり、使用する杭の種類が既製コンクリート杭（PHC杭、SC杭）と外面突起付鋼管で異なるものの、施工方法がセメントミルクを用いてソイルセメント柱を造成し、杭とソイルセメントを一体化させて支持力を発現させる工法である、2)根固部または杭先端固化部には、両工法ともにW/C=60%のセメントミルクを同量程度注入する、3)杭先端部での荷重抵抗は、両工法ともに杭径及びソイルセメント径の1.5倍が先端抵抗に寄与する範囲である、4)両工法の根固部及び杭先端固化部の径は異なるものの、必要強度は同程度である、という点で共通している。以上より、先端抵抗については、同様の施工方法、品質、支持力機構であることから同様の抵抗機構であると考えられる。

また、道示IVにおける杭先端の極限支持力度の推定式およびその根拠となるデータ¹⁰⁾に基づき、プレボーリング杭工法での砂と砂れきにおける杭先端支持力式を鋼管ソイルセメント杭工法のソイルセメント径で再評価を行った結果、プレボーリング杭工法における杭先端支持力式は鋼管ソイルセメント杭工法と同じとなり、プレボーリング杭と鋼管ソイルセメント杭は同等の支持力式として評価できることがわかった。

さらに、今回新たに実施した岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験結果を分析した結果、プレボーリング杭工法と鋼管ソイルセメント杭工法の先端支持力度は同様の傾向を示し、また既往の岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験の結果と同様な結果となった。

以上のことから、プレボーリング杭工法と鋼管ソイルセメント杭工法の岩盤における先端支持力機構は同等とみなせることから、グルーピングして推定式を評価することとした。

検討に用いた岩盤を支持層とする杭の鉛直載荷試験データの数量を表-2に示す。なお、支持層とする岩盤条件を満たさない載荷試験データについては、参考値として杭先端の極限支持力度の推定式を提案する際のデータからは除外することとし、推定精度の確認時に参考として扱った。

表-2 載荷試験データの数量

検討対象とする杭工法	分析に用いる試験データ	支持層とする岩盤条件を満たさない載荷試験データ(参考値)	採用値	グルーピング後の採用値
場所打ち杭工法(オールケーシング工法)	15	3	12	9
プレボーリング杭工法	8	1	7	
鋼管ソイルセメント杭工法	2	0	2	6
中掘り杭工法(セメントミルク噴出攪拌方式)	7	1	6	
合計	37	5	32	32

3. 2 支持力推定式

設計上の地盤から決まる杭の極限支持力の特性値 R_u を推定するための支持力推定式は、極限支持力の特性値 R_u を先端支持力(第1項)と周面摩擦力(第2項)との和で表した式(3)が道示IVで示されており、杭の寸法(杭径、杭長)から決まる杭体、ソイルセメント柱の先端及び周面の表面積に、杭工法や地盤の種類・強度に応じて定められた杭先端の極限支持力度及び最大周面摩擦力度の特性値 (q_d, f_i) を乗ずることによって極限支持力が推定できるようになっている。

本章では、道示IVとの整合を踏まえて支持力推定式は、式(3)とし、岩盤を支持層とする杭基礎の杭先端の極限支持力度の特性値 q_d の推定式を提案した。

$$R_u = q_d A + U \sum L_i f_i \quad (3)$$

ここに、

R_u : 地盤から決まる杭の極限支持力の特性値 (kN)

q_d : 杭先端の極限支持力度の特性値 (kN/m²)

A : 杭先端面積 (m²)、ただし鋼管ソイルセメント杭の場合にはソイルセメント柱径を有効径として求める。

U : 杭の周長 (m)、ただし鋼管ソイルセメント杭の場合にはソイルセメント柱の周長とする。

L_i : 周面摩擦力を考慮する i 層の層厚 (m)

f_i : 周面摩擦力を考慮する i 層の最大周面摩擦力度の特性値 (kN/m²)

3. 3 載荷試験データの整理方法

道示IVでは、杭の鉛直載荷試験で得られた杭頭部の荷重と変位の関係が変位軸に平行になったときの荷重を極限支持力とし、杭頭部の変位が杭径の10%を超えても荷重と変位の関係が変位軸に平行とみなせない場合には、杭頭部の変位が杭径の10%に達したときの荷重を極限支持力とすると定めている。杭頭部の荷重と変位の関係に関連づけて規定されている理由は、基礎の沈下量が上部構造に与える影響を考慮するためである。このことから、杭先端の極限支持力度の評価においても杭先端荷重と杭頭変位の関係で整理することを

原則とした。

表-2 に示す載荷試験データのうち場所打ち杭工法(オールケーシング工法)では、先端載荷試験のデータが複数例あり、先端載荷試験の特性よりジャッキ下端での杭先端変位は計測されているものの、杭頭部においては押し込み試験と逆方向(押し上げ方向)に変位が生じることから、押し込み試験に相当する杭頭変位(押し込み方向)の推定が必要となる。既往の研究¹¹⁾では、杭頭変位が杭径の10%のときの杭先端変位を求め、図-5に示すように杭頭変位が10%のときの杭先端変位の中央値が9%であったため、このときの杭先端荷重を極限支持力とみなしていることから、本章においても、この方法に基づき先端載荷試験の杭先端荷重と杭頭変位の関係を整理した。

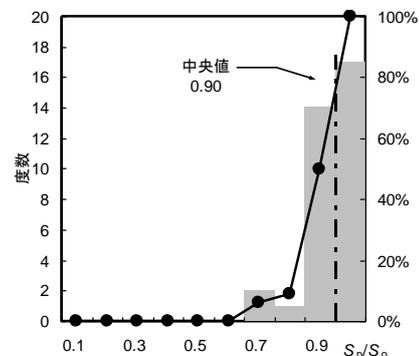


図-5 場所打ち杭工法における杭径の10%変位時の杭頭変位 S_o に対する杭先端変位 S_p の比 (S_p/S_o) の度数分布¹¹⁾

極限支持力は、一般には載荷試験で得られる荷重変位関係の形状から判定されるが、極限支持力の判定結果の人為的誤差を排除するため、極限支持力まで載荷されていないデータも多くこれらも含めて分析対象とするために、式(4)に示す Weibull 分布曲線¹²⁾によって荷重変位関係を近似もしくは外挿した曲線を用いて整理した。

$$\frac{P_o}{P_{ou}} = 1 - e^{-\left(\frac{S_o/D}{S_{os}/D}\right)^m} \quad (4)$$

ここに、

P_o : 杭頭における任意の軸方向荷重(杭頭荷重)

P_{ou} : 杭頭における極限支持力

e : 自然対数の底

S_o : 任意の杭頭荷重によって生ずる杭頭変位

S_{os} : 杭頭変位の特性値

D : 杭径

m : 変位指数

なお、既往の研究¹¹⁾では、荷重変位関係を Weibull 分布曲線で近似もしくは外挿して整理を行う上で、外挿された曲線が信用できるものであるとみなすためには、個々の載荷試験において杭の最大荷重付近まで載荷されていることが望ましい観点から、十分な載荷がなされたと考えることのできる条件として、杭先端荷重が Weibull 分布曲線で求められる降伏荷重の 1.2 倍以上を対象としているが、本章ではできるだけ多くの岩盤を支持層とした杭基礎の載荷試験データに対して検証が行えるように配慮する観点から、推定された極限支持力が不自然に大きな値になっていないかを確認しつつ検討することとした。

3. 4 杭先端地盤の地盤定数

3. 4. 1 杭先端支持力として扱う範囲

杭先端支持力は、載荷試験で計測された杭体の深度方向の軸力（軸ひずみ×軸剛性 EA ）を用いて評価される。杭体下端の軸力を直接計測するのは困難であるため、何らかの方法によって杭体軸力を外挿してこれを予測せざるを得ない。しかし、外挿の方法そのものや、杭体以外の根固部等の軸剛性の評価方法によって予測値は不確実なものとなる。

よって、ここでは文献¹³⁾と同様に、支持層の上端位置を設計上の杭先端位置とみなすことを基本として、図-6 に示すように、設計上の杭先端位置より下方の周面摩擦力は先端支持力に含まれるものと考え、これによって杭体軸力の外挿の不確実性を極力排除することとした。

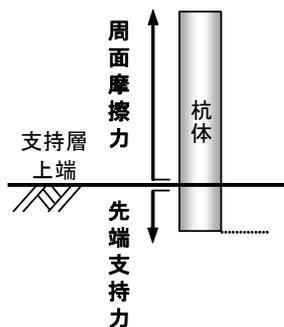


図-6 先端支持力の考慮範囲の基本的な考え方

3. 4. 2 杭先端の極限支持力度の特性値の評価に用いる地盤定数

道示IVでは、地盤の種類が砂・砂れきを対象とする杭先端の極限支持力度の特性値は標準貫入試験から得られる N 値との関係式で評価されている。これに対して、2.3 では岩盤を支持層とする杭基礎の杭先端の極限支持力度の特性値 q_u を推定する地盤定数としては、亀

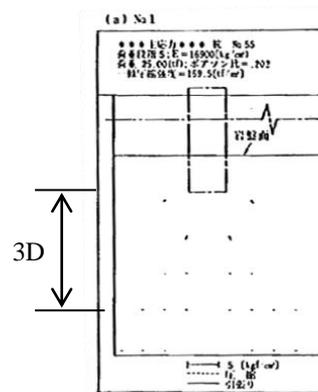
裂や風化などを考慮した上で一軸圧縮強度 q_u や N 値が指標値となることを提案している。

よって、本章では、岩盤を支持層とする杭基礎の杭先端の極限支持力度の特性値 q_u を推定する際に用いる地盤定数として、一軸圧縮強度 q_u および N 値を用いることとした。

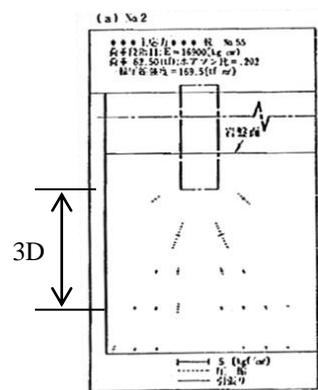
3. 4. 3 地盤定数とその算定範囲

道示IVで対象とする杭基礎の先端地盤は砂および砂れきであり、 N 値の算定範囲は杭体先端から杭径の 3 倍下方までの範囲での平均値としている。これは既往の研究成果¹⁴⁾⁻¹⁶⁾を参考にして、実験結果や解析結果に基づき杭先端支持力に影響する深度方向の範囲から設定されている。

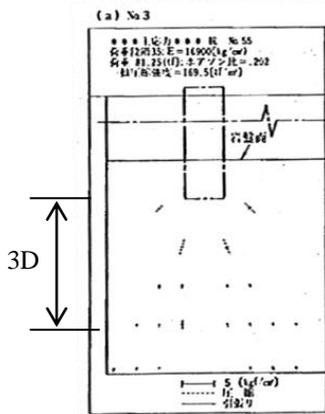
文献¹⁷⁾では、打撃工法（先端閉塞）で施工された杭径 400mm の杭先端周辺の岩盤の応力伝達経路を把握するため、岩を模擬したソイルセメント ($q_u=1660\text{kN/m}^2$) 内にモールドゲージを設置して、載荷試験時の岩盤のひずみを測定した結果、図-7 に示すように均質な地盤条件では杭体先端から杭径の 2~3 倍下方まで圧縮ひずみが発生することが確認されている。



(a)荷重 25tf 時



(b)荷重 62.5tf 時



(c)荷重 81.25tf 時

図一7 地盤内の主応力分布図¹⁷⁾ (D: 杭径)

そこで、杭基礎の先端地盤が岩の場合においても、道示IVにおける N 値の算定範囲との整合を踏まえて、地盤定数の算定範囲を杭体先端から杭径の3倍下方までの範囲と設定した。

一軸圧縮強度 q_u は、杭体先端から杭径の3倍下方までの範囲で実施した一軸圧縮試験、三軸圧縮試験もしくは多段階三軸圧縮試験の結果から得られる値を用いることとし、この範囲で複数試験を実施している場合には平均値を採用することとした。一軸圧縮強度の亀裂や風化に対する補正として用いられる準岩盤強度については、載荷試験データで実施されている件数が7例と少ないことから、支持力推定式では載荷試験データで実施されている件数が21例と多い一軸圧縮強度の値を用いることとした。

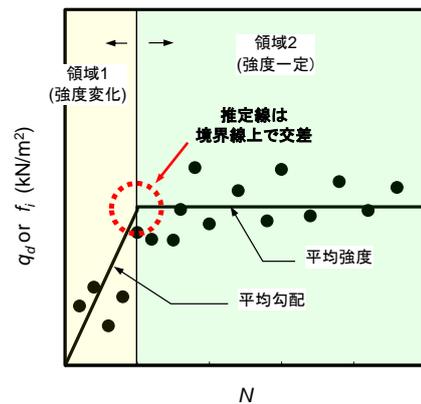
N 値は、載荷試験データにおいては、50以上となるデータがほとんどであり、50回打撃時の貫入量が示されているものについては、式(5)により求められる換算 N 値を用いることとした。

$$\text{換算 } N \text{ 値} = 50 \text{ 回} \times 30 \text{ cm} / (\text{50 回打撃時の貫入量 cm}) \quad (5)$$

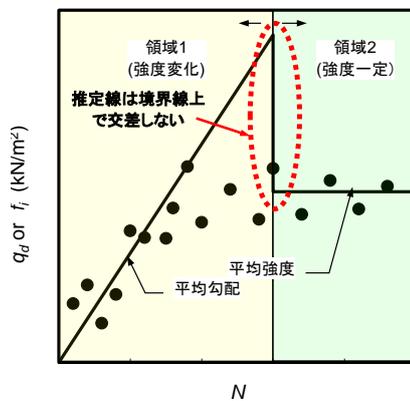
3.5 推定式の算定方法

杭先端の極限支持力度の特性値の推定式は、載荷試験データを用いて、岩盤区分・杭工法区分に応じて、地盤調査方法から得られた q_u 値または N 値との関係式として提案する。

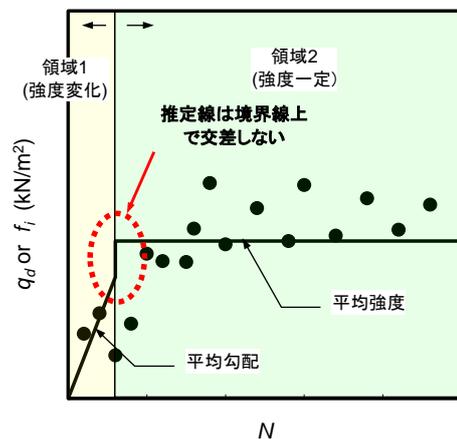
推定式を算定する際の杭先端面積 A の設定については、道示IVに準じることとし、グルーピングして検討するプレボーリング杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法では杭径を有効径として q_d を推定する場合とソイルセメント柱径を有効径として q_d を推定する場合の2つについて検討する。



(a) 境界位置が適切



(b) 境界位置が右過ぎ



(c) 境界位置が左過ぎ

図一8 バイリニア関係と仮定する場合の強度係数決定法の例¹⁰⁾

文献¹⁰⁾では近年確立されているバイリニア型の支持力推定線を前提として、次の要領で推定式の算定方法を標準化した。そこで、本章ではこの方法に準じて、支持力推定式を算定する。

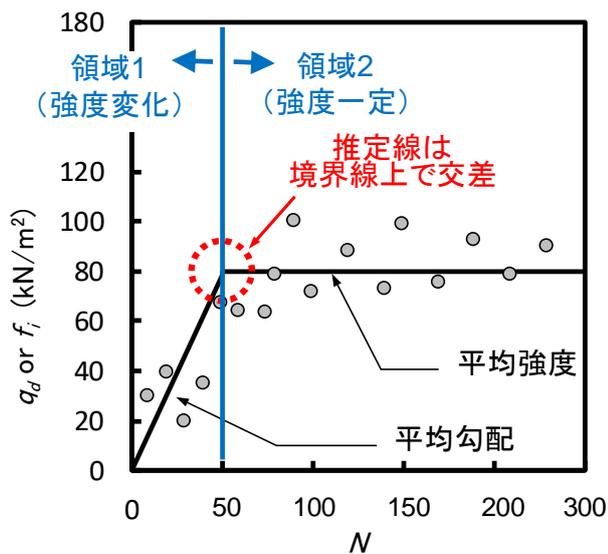
1) 強度-地盤定数関係は、2次勾配を有しないバイリニアモデルとする。すなわち、ある N 値を境界とし、 q_u 値または N 値の増加に伴い強度が上昇する領域（領域1）と q_u 値または N 値の増加に関わらず強度が上昇しない領域（領域2）があるとする。

2) 領域1における推定線の勾配は、領域1に含まれるデータの平均勾配とし、領域2における推定線は、領域2に含まれるデータの平均強度線とする。

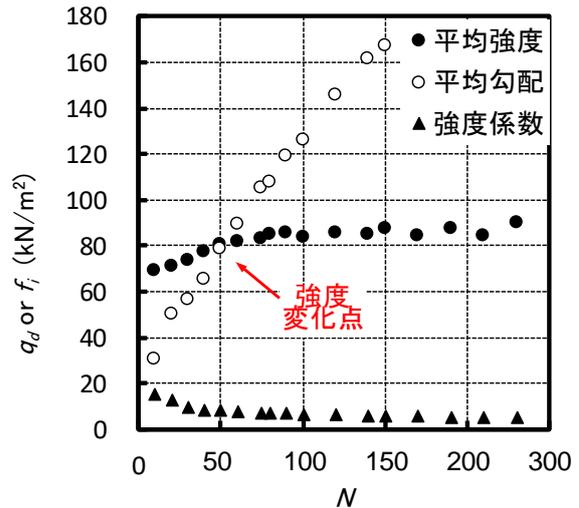
3) 図-8 (a)に示すように「領域1における推定線」と「領域2における推定線」とが2つの境界線上で交わるように境界線の位置を決定するためには、バイリニアモデルにおける強度変化点を適切に定める必要があり、境界線の位置が不適切であると、2つの領域における推定線が境界線上で交差しない（図-8 (b)(c)）。そこで、強度変化点は、図-9 (b)に示す強度変化点判定図を利用して定める。

4) 図-9 (b)に示すように、領域1と領域2の境界 N 値を任意に仮定し、平均勾配（○分布）と平均強度（●分布）の分布図において○分布と●分布の交点を強度変化点とする。ここに、○分布は N 値の小さなデータから順に採用した平均勾配線上端の分布であり、●分布は N 値の大きなデータから順に採用した平均強度の分布である。

5) 図-9 (b)において明確な強度変化点が得られなかった場合には、杭先端の極限支持力度 q_d では N 値の大きな範囲（領域2）を重視して平均強度（●分布）の傾向を優先することにより強度変化点を定める。



(a) バイリニア型推定線



(b) 強度変化点判定図

図-9 強度変化点判定図を利用した推定線の算定例¹⁰⁾

また、文献¹⁰⁾を参考に前述の標準化した方法に加えて以下の点を考慮して強度変化点を定めた。

- ① 図-9 (b) の右軸に、推定式の強度係数（▲分布）を追加し、強度係数が一定の値に収束する点を参考とする。なお、ある N 値における強度係数（▲分布）にその N 値を掛けたものが平均勾配（○分布）である。
- ② データの空白部があり強度変化点の判定が困難なものについては、○分布や●分布に対して、線形近似曲線や多項式近似曲線を用いることによりデータ空白部を補てんする。
- ③ ○分布と●分布の交点が得られない場合には、○分布と●分布が最も接近する点を交点とみなす。
- ④ 図-9 (b) から定める強度変化点は、換算 N 値の信頼性を考慮して上限値を $N=300$ とする。また、支持層とする岩盤条件を考慮して下限値を $N=50$ とする。

次節以降に示す強度変化点判定図内には、データ数 n 、算定式による推定値とデータ実測値との推定比（=実測値/推定値）の統計量として幾何平均 GM 、変動係数 CV を示している。なお、平均勾配（○分布）や平均強度（●分布）の傾向を差し置いて GM が 1.0 に最も近づくような点を狙って強度変化点を定めてしまうと、杭工法の工学的強度特性を誤って評価しかねない¹⁰⁾ことを踏まえて、本研究においても上述の方法で強度変化点を定めた上で、 GM を計算した。

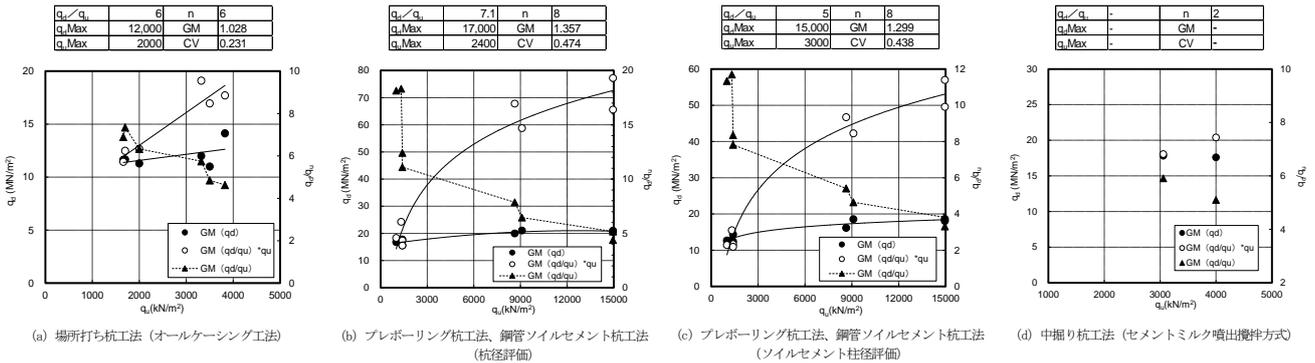


図-10 杭先端の極限支持力度の特性値 q_d の強度変化点判定図 (q_u 値)

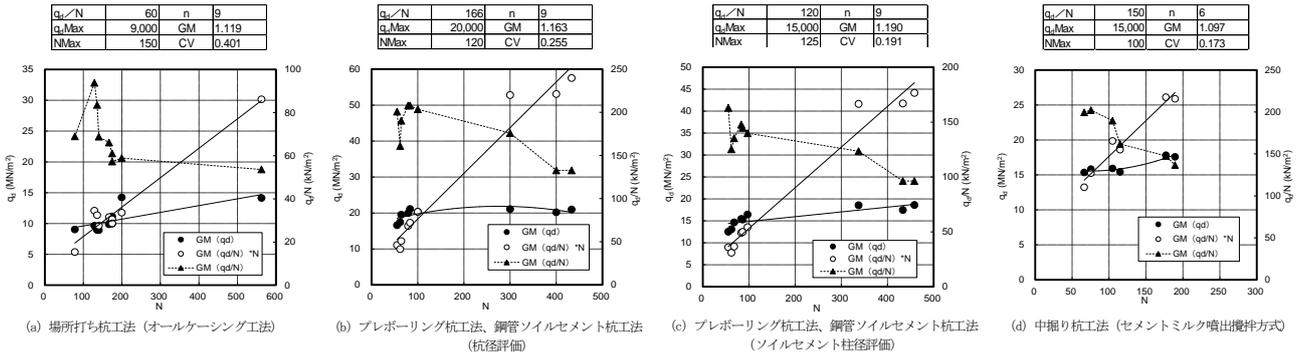


図-11 杭先端の極限支持力度の特性値 q_d の強度変化点判定図 (N 値)

表-3 載荷試験データに基づく算定式 (kN/m^2)

杭工法	算定式に用いる有効径	算定式に用いる地盤定数	載荷試験データに基づく算定式
場所打ち杭工法 (オールケーシング工法)	杭径	一軸圧縮強度 q_u	$6q_u (\leq 12000)$
		N値	$60N (\leq 9000)$
プレボーリング杭工法 鋼管ソイルセメント杭工法	杭径	一軸圧縮強度 q_u	$7q_u (\leq 17000)$
		N値	$165N (\leq 20000)$
	ソイルセメント柱径	一軸圧縮強度 q_u	$5q_u (\leq 15000)$
		N値	$120N (\leq 15000)$
中掘り杭工法 (セメントミルク噴出攪拌方式)	杭径	一軸圧縮強度 q_u	-
		N値	$150N (\leq 15000)$

3. 6 推定式の算定

標準化した推定式の算定方法により、強度変化点判定図を作成し、杭先端の極限支持力度の特性値 q_d の強度変化点を定め、地盤定数に応じて推定式を算定した。一軸圧縮強度 q_u からの推定について図-10に、N値からの推定について図-11に示す。

強度変化点判定図より算定した杭先端の極限支持力度の特性値 q_d の算定式を表-3に示す。

3. 7 推定式の算定結果の考察

3. 7. 1 q_u 値による算定式の力学的な妥当性

これまで岩盤を支持層とする載荷試験結果に基づいた q_u 値による推定式は提案されておらず、従来の道路橋示方書¹⁸⁾による場合、粘性土 ($N \geq 20$, $q_u \geq 0.4\text{N/mm}^2$) を支持層とする場所打ち杭の杭先端の極限

支持力度 $q_d=3q_u$ により推定することが一般的であった。これは Terzaghi の支持力公式から導かれており、岩盤を支持層とする場合であっても力学的には一定の関係になると考えられていたが、表-3に示す算定結果と $q_d=3q_u$ において値に乖離が見られる結果となった。そのため、今回得られた q_u 値による算定式が力学的に妥当な値であるかを検証することにした。

既往の研究¹⁹⁾で実施された、岩盤を模擬した模型による載荷試験結果から、表-4に示す $q_d/q_u=4.5\sim 5.0$ 程度になることが確認されている。また、既往の知見では Skempton によって場所打ち杭の先端極限支持力度が式(6)で提案されており²⁰⁾, $c_b = q_u/2$ と仮定すると、 $q_{dp}=4.5q_u$ となる。他の設計基準²¹⁾を確認すると、軟岩を支持層としたときの抵抗力は式(7)で示されている。

表-4 既往の模型実験による載荷試験結果

	R_u (kN)	q_d (N/mm^2)	q_u (N/mm^2)	q_d/q_u
HS-S	522	83.7	18.9	<u>4.43</u>
SS-S	150	24.1	5.1	<u>4.73</u>
SU-S	197	31.6	6.4	<u>4.94</u>

※ R_u : Weibull 分布曲線により得られた極限支持力

$$q_{dp}=9c_b \quad (6)$$

ここに、

q_{dp} : 場所打ち杭の杭先端の極限支持力度 (kN/m²)

c_b : 底面深さでの粘着力 (kN/m²)

$$R_{pk}=5q_uA_p \quad (7)$$

ここに、

R_{pk} : 杭先端の抵抗力の特性値 (kN)

q_u : 乱さない試料での一軸圧縮強度 (kN/m²)

A_p : 杭の有効断面積(m²)

以上より、算定された q_u 値による推定式 $q_d=6q_u$ は概ね妥当な値であると考えられる。ここで、場所打ち杭工法（オールケーシング工法）で強度変化点により判定した算定式は $q_d=6q_u$ であるが、既往の知見を踏まえて $q_d=5q_u$ として提案する。

3. 7. 2 中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）での q_u 値による推定式

中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）については、N 値による算定式のみ示しており、 q_u 値による算定式はデータ数が 2 例と少ないことから示していない。施工方法は異なる部分があるものの、中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）はプレボーリング杭工法および鋼管ソイルセメント杭工法と同様に杭先端部に根固部を築造することから、先端支持力度機構が類似していると考えられる。また、2.3 に示したように、一軸圧縮強度から支持力度推定できる岩盤条件の場合には、N 値を用いるのではなく一軸圧縮強度から推定することが望ましい。

そこで、算定式の q_d/q_u に関してはプレボーリング杭工法や鋼管ソイルセメント杭工法での q_u 値による算定結果を、算定式の q_d の上限値に関しては中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）での N 値による算定式を参考にして q_u 値による推定式を提案する。なお、載荷試験数が少ないことを踏まえて推定式は安全側となるように設定する。

3. 7. 3 杭先端部の有効径

プレボーリング杭工法と鋼管ソイルセメント杭工法は、グルーピングして支持力度推定式を算定している。杭先端の極限支持力度を算出する際の杭先端断面積の設定において、杭径評価とする場合とソイルセメント柱径評価とする場合では、その面積比率 (A_{sc}/A_p 、 A_{sc} : ソイルセメント柱径での杭先端断面積、 A_p : 杭径での杭先端断面積) により、 q_d/q_u もしくは q_d/N の値が変わる。表-3 に示す杭径評価とする場合とした q_d/q_u または q_d/N の値を、プレボーリング杭工法での平均的な杭径である 600mm (ソイルセメント柱径 700mm) で

の面積比率 1.36 で割り戻すと、 q_d/q_u は 5.14 に、 q_d/N は 121 となり、概ねソイルセメント柱径の評価と同じ値となる。また、図-10 および図-11 においてソイルセメント柱径評価と杭径評価で支持力度推定式の推定精度に大きな差がみられないことから、道示IVとの整合を考慮して、鋼管ソイルセメント杭工法はソイルセメント柱径評価の算定式、プレボーリング杭工法は杭径評価の算定式に基づき提案する。

3. 7. 4 風化花崗岩に支持された場合の影響

圧縮性の高い風化軟岩（風化花崗岩）を支持層とした載荷試験データは場所打ち杭工法（オールケーシング工法）のみであり、他の杭工法（プレボーリング杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法、中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式））では実施されていない。そのため、他の杭工法においても、支持力度推定式の算定条件に差が生じないように圧縮性の高い風化軟岩を含む推定式とする必要がある。このため、場所打ち杭工法（オールケーシング工法）での載荷試験データに基づき、その強度係数 (q_d/N) に着目して、風化花崗岩を含む場合と含まない場合での比率から風化花崗岩による低減係数を算出し、その低減率を他の杭工法の載荷試験データより推定される強度係数に乗じることにより影響を考慮することとする。なお、ここでは N 値による場合の支持力度推定式を想定しており、 q_u 値による場合の支持力度推定式はコアがサンプリングできることから風化花崗岩とは区別できるため低減係数は考慮しないこととする。さらに図-12 に示すように風化花崗岩での三軸圧縮試験結果より得られた c, ϕ を用いて一軸圧縮強度を推定した場合に得られる平均勾配が風化花崗岩以外の平均勾配よりも大きくなったことも低減係数を考慮しない理由の一つである。

図-13 に風化花崗岩を含まない場合の杭先端の極限支持力度の特性値 q_d の強度変化点判定図 (N 値) を示す。データ数が 3 例と少ないものの、平均強度 (●) の上限値を表-3 に示す場所打ち杭工法（オールケーシング工法）の値 12000kN/m² に固定した場合 (図中の点線) での平均勾配 (○) との交点は 175 程度であり、これより $q_d/N \approx 70$ と算定される。風化花崗岩を含む場合は図-11 (a) から $q_d/N=60$ である。よって、風化花崗岩による低減係数は $60/70 \approx 0.85$ とする。風化花崗岩を支持層とした載荷試験データがないプレボーリング杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法、中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）において、表-3 に示す載荷試験データに基づく算定式の q_d/N の値に低減係数 0.85 を乗じることとする。

3. 8 推定式の提案

3.7において考察した結果を踏まえ、軟岩における杭先端の極限支持力度の特性値の推定式を提案する。提案式を表-5に示す。

各杭工法でN値より求める場合の q_d の平均勾配と q_u 値より求める場合の q_d の平均勾配の比を比較する。場所打ち杭工法(オールケーシング工法)においては、 $60/5=12$ となり、プレボーリング杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法、中掘り杭工法(セメントミルク噴出攪拌方式)においては、 $20\sim 25$ と場所打ち杭工法(オールケーシング工法)に比べて大きな値となった。これは、杭先端での施工方法の違いなどによる影響が考えられる。

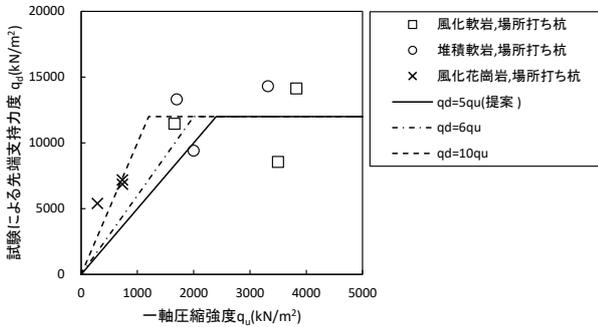


図-12 載荷試験における杭先端極限支持力度(試験値)と一軸圧縮強度の関係

q_u/N	68.5	n	3
q_u/Max	12,000	GM	1.049
N/Max	175	CV	0.197

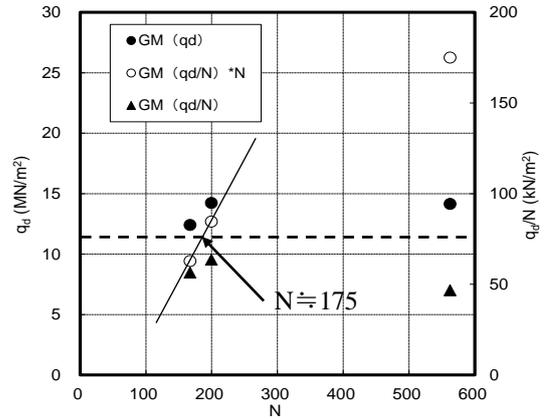
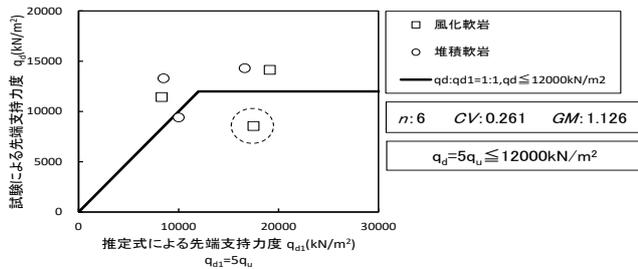


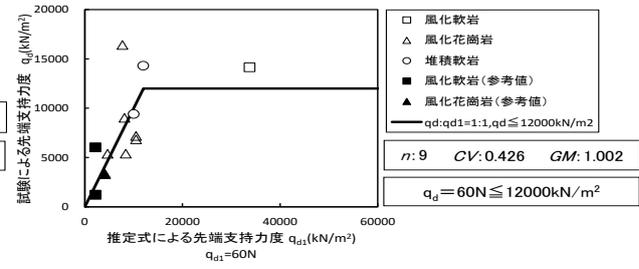
図-13 風化花崗岩を含まない場合の杭先端の極限支持力度の特性値 q_d の強度変化点判定図(場所打ち杭工法:オールケーシング工法、N値)

表-5 杭先端の極限支持力度の推定に関する提案式

杭工法	支持力推定時の杭の有効径	杭先端の極限支持力度の特性値 q_d (kN/m ²)		
		N値より求める場合	q_u 値より求める場合	参考値: 道示IV砂れき式
場所打ち杭工法(オールケーシング工法)	杭径	$60N (\leq 12000)$	$5q_u (\leq 12000)$	$160N (\leq 8000)$
プレボーリング杭工法	杭径	$140N (\leq 17000)$	$7q_u (\leq 17000)$	$300N (\leq 15000)$
鋼管ソイルセメント杭工法	ソイルセメント柱径	$100N (\leq 15000)$	$5q_u (\leq 15000)$	$240N (\leq 12000)$
中掘り杭工法(セメントミルク噴出攪拌方式)	杭径	$125N (\leq 15000)$	$5q_u (\leq 15000)$	$250N (\leq 12500)$

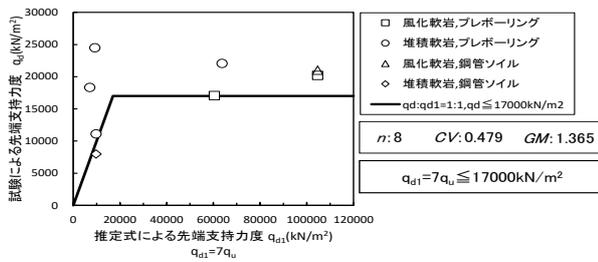


(a) q_u 値により求める場合

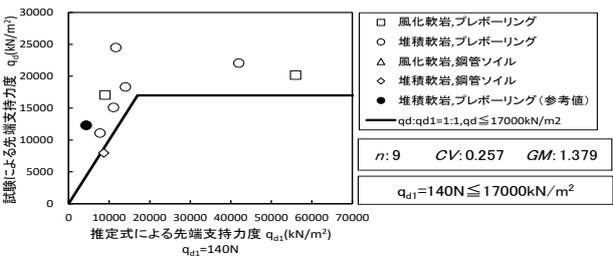


(b) N値により求める場合

図-14 杭先端の極限支持力度の試験値と提案式による推定値の関係(場所打ち杭工法(オールケーシング工法))

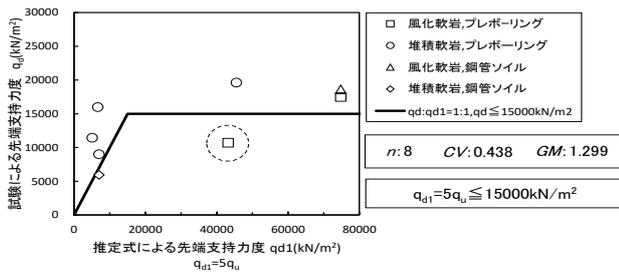


(a) q_u 値により求める場合

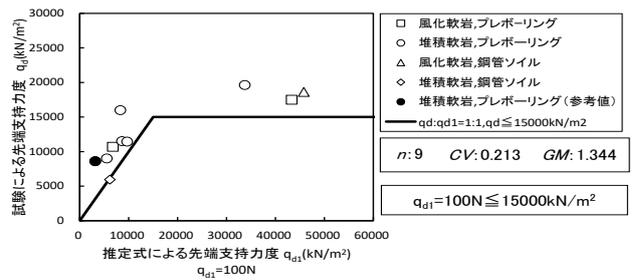


(b) N値により求める場合

図-15 杭先端の極限支持力度の試験値と提案式による推定値の関係(プレボーリング杭工法)

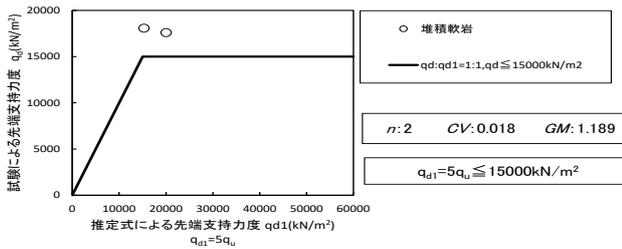


(a) q_u 値により求める場合

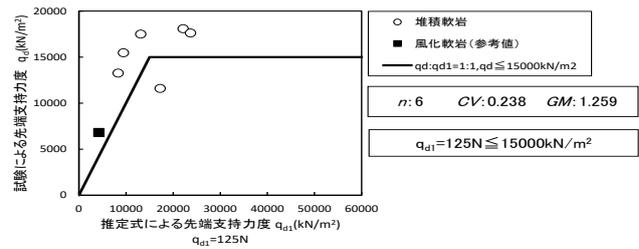


(b) N 値により求める場合

図-16 杭先端の極限支持力度の試験値と提案式による推定値の関係 (鋼管ソイルセメント杭工法)



(a) q_u 値により求める場合



(b) N 値により求める場合

図-17 杭先端の極限支持力度の試験値と提案式による推定値の関係 (中掘り杭工法 (セメントミルク噴出攪拌方式))

3. 9 推定精度の検証

道示IVでは、部分係数を乗じる前の段階では、できるだけ平均的な特性を評価するという方針であり、推定式については載荷試験データの平均的な挙動を再現できるように定められている。そこで、表-5 に示す推定式を用いた場合の杭先端の極限支持力度の推定精度を検証した。図-14～図-17 に杭先端の極限支持力度の試験値と推定値の関係を示す。図中にはデータ数 n 、推定式による推定値と試験値との推定比 (=試験値/推定値) の統計量として幾何平均 GM 、変動係数 CV を示している。 GM が 1.0 に近いほど平均的な挙動に対して推定精度は良好であり、 CV が 0.0 に近いほど推定精度は良好といえる。各図の提案式の推定比の幾何平均 GM の値は 1.002～1.379 であり、道示IVの砂・砂れきの推定式における数値 ($GM \approx 1.00$) に比べて大きな値となった。上記に加えて載荷試験データ数が比較的少ないこと、一部の杭工法では本来算定結果を出すデータ数にも至っていないことから、この載荷試験データだけでは信頼性を評価するのは難しいと考えられる。

q_u 値により求めた推定式の図において、推定比が 1.0 を下回る載荷試験データ (破線で記載) が見られる。一方で、図-16 (b) で同一の載荷試験データで N 値により求めた推定式では推定比は 1.0 以上を示していた。これらのデータについて、土質記事などから亀裂や風化の影響を大きく受けていることが確認されてお

り、一軸圧縮強度が岩盤全体としての強度を必ずしも代表していないことが原因としてあげられる。なお、2 章では一軸圧縮強度における亀裂や風化の影響を考慮する方法として、準岩盤強度が提案されている。よって、推定式を用いて先端支持力を算出する場合には一つの地盤調査方法による結果だけではなく、他の地盤調査方法 (N 値、三軸圧縮試験など) による結果も含めて総合的に判断することが重要となると考えられる。

4. 岩盤を支持層とする杭基礎の施工法

本章では、岩盤を支持層とする杭基礎の施工法の確立を目的として、現地盤での実杭の施工試験等の結果や既往の施工実績の分析を行い、得られた知見や課題を整理したうえで、岩盤を支持層とする杭基礎の施工法および施工管理方法に関する留意点等を明らかにした。対象とする杭工法は、場所打ち杭工法 (オールケーシング工法)、プレボーリング杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法および中掘り杭工法 (セメントミルク噴出攪拌方式) である。

4. 1 場所打ち杭工法 (オールケーシング工法)

4. 1. 1 既往の施工事例の分析

岩盤を支持層とする場所打ち杭工法 (オールケーシング工法) において、これまでの施工事例から軟岩および硬岩において、一般的な施工機械や設備で十分掘削することが可能であるものの、亀裂の有無、風化の状態によっては掘削に時間を要する場合がある。また、

岩盤掘削時にケーシングビットを必要以上に出すことによりケーシングチューブと孔壁の隙間に岩塊がつまり、くさびを形成してケーシングの引抜き不能といった事例も確認されている。

4. 1. 2 施工上の留意点と対策

以下に岩盤を支持層とした場合の施工上の留意点と対策を示す。

- ①既往の施工事例の分析から、周辺地盤の緩みや崩壊を防止するため、掘削底よりケーシングチューブ刃先が常に先行することを原則とする。
- ②ケーシングチューブの回転・引抜きの困難または不能を防止するため、岩盤掘削時の施工機械設備の選定は十分検討する必要がある。
- ③支持層の確認は、施工データを測定して掘削抵抗の変化状況、掘削土の状況、試験杭で定めた管理指標等を参考に総合的に判断するのが望ましい。
- ④スレーキング特性を持つ岩盤での施工は、掘削完了からコンクリート打設までの作業を同日中に実施することを基本とする。

4. 2 プレボーリング杭工法

4. 2. 1 施工試験の分析

風化軟岩および堆積軟岩を対象としたプレボーリング杭工法の載荷試験および施工試験を行い、岩盤を支持層とする場合の施工管理方法について検討した。

施工試験により、砂・砂れきと同様の従来の施工方法および施工管理方法で、所定の品質（強度）が確保されることを確認した。

4. 2. 2 施工上の留意点と対策

以下に、岩盤を支持層とした場合の施工上の留意点と対策を示す。

- ①支持層が傾斜している場合、掘削ロッドの曲がりに伴う掘削孔の曲がり懸念されるため、0.25m/分程度とゆっくりとした速度で掘削を行うことや、掘削ロッドの剛性を大きくするなどの対策を行うのが良い。
- ②泥岩や土丹など根固部に岩塊が混入するおそれがある岩盤においては、プレボーリング杭工法における一般的な注入方法である掘削底から根固液のセメントミルクを注入することが、根固部への岩塊の混入を抑える有効な対策の一つであると考えられる。

4. 3 鋼管ソイルセメント杭工法

4. 3. 1 施工試験の分析

風化軟岩および堆積軟岩を対象とした鋼管ソイルセメント杭工法の載荷試験および施工試験を行い、岩盤を支持層とする場合の施工管理方法について検討した。

施工試験により得られた知見としては、杭先端固化部に岩塊（掘削片）が混入する恐れがある泥岩や土丹などでは、できるだけ岩塊を混入させないようにする施工方法が有効と考えられる。

4. 3. 2 施工上の留意点と対策

以下に岩盤を支持層とした場合の施工上の留意点と対策を示す。

- ①泥岩や土丹など杭先端固化部に岩塊が混入する恐れがある岩盤においては、掘削底からセメントミルクを注入することが、杭先端固化部への岩塊の混入を抑える有効な対策の一つであると考えられる。
- ②岩盤の硬さや傾斜により掘削孔が偏心する恐れがある場合は、トランシットなどで常時測量し傾斜を補正しながら施工するのが良い。

4. 4 中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）

4. 4. 1 既往の施工事例の分析

岩盤を支持層とした中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）での載荷試験の実施例を表-6に示す。これまでに載荷試験が実施されていた杭先端の岩盤を整理すると、機械攪拌方式では風化軟岩および堆積軟岩で先端N値は36～214、高圧噴出方式では、堆積軟岩で先端N値は65～115であった。これまで硬岩を対象とした施工実績がなく、掘削能力の面で施工の不確実性が極めて高いと考えられることから、対象とする岩盤を軟岩のみとした。

中掘り杭工法（セメントミルク噴出攪拌方式）においては、杭工法の特徴から根固部築造時に支持層を確実に拡大掘削しなければならない。砂・砂れきを支持層とする機械攪拌方式の場合、拡大掘削時のオーガ駆動装置の電流値変化などで確認するとともに、拡翼ヘッドに取付けた確認用ピンの変形チェックなどの事後確認を行う。高圧噴出方式の場合、拡大掘削時に噴出圧、噴出量、ロッドの回転数および引上げ速度などが所定の値となっているかを管理・記録することとしている。岩盤を支持層とする高圧噴出方式の場合には先端処理方法の特徴から岩盤の硬軟や岩塊の混入具合によっては適用が制限される場合が考えられ、また機械攪拌方式であっても、岩盤への適用性が確認されていない杭工法もある。

表-6 岩盤を支持層とした中掘り杭工法(セメントミルク噴出攪拌方式)での載荷試験の実施例

根固め球根の築造方法	杭仕様	拡大掘削	杭長	杭径	支持層の岩盤	岩盤の種類	先端N値	
			(m)	(m)				
機械攪拌方式	TAIP工法	鋼管杭	-	26.0	1.0	凝灰岩	風化軟岩	36
	NAKS工法	コンクリート杭	あり	25.0	0.8	泥岩	堆積軟岩	75
	DANK工法	コンクリート杭	あり	27.0	1.0	泥岩	堆積軟岩	167
	DANK工法	コンクリート杭	あり	32.0	1.0	シルト岩	堆積軟岩	100
	DANK工法	コンクリート杭	あり	62.0	1.0	泥岩	堆積軟岩	214
高圧噴出方式	TN工法	鋼管杭	あり	52.1	0.8	土丹	堆積軟岩	115
	STJ工法	コンクリート杭	あり	33.0	0.8	泥岩	堆積軟岩	65

4. 4. 2 施工上の留意点と対策

以下に岩盤を支持層とした場合の施工上の留意点と対策を示す。

- ①岩盤の硬さや傾斜によって掘削孔の曲がりや曲がりに伴う掘削装置の損傷等が懸念される場合には、トランシットなどで常時測量し傾斜を補正しながら低速で掘削するのが良い。
- ②支持層を掘削する場合や機械式方式での拡大掘削する場合に、岩盤の硬軟によってはオーガヘッドやスパイラルオーガが大きく振動し、杭体や掘削装置を損傷させるおそれがあるため、オーガ駆動装置の容量を大きくすることや、掘削速度をできるだけ低速にして振動を抑えながら掘削をすることがよいと考えられる。
- ③泥岩や土丹など根固部に岩塊が混入するおそれがある岩盤においては、掘削底からセメントミルクを注入することが、根固部への岩塊の混入を抑える有効な対策の一つであると考えられる。

5. まとめ

本研究では、岩盤の力学特性や杭工法などの条件の違いを考慮し、それぞれの条件において岩盤を支持層とする杭基礎の地盤調査法、設計法(杭先端極限支持力度の推定式)及び施工法(施工管理方法)について検討を行った。その結果、得られた知見、今後の課題は以下の通りである。

- 1) 支持層とする岩盤条件の設定の目安については、既往の基準や指針等を整理し、これまでに収集した岩盤を支持層とした載荷試験結果の分析および過去の不具合事例を踏まえて、軟岩における支持層の目安を提案した。
- 2) 支持層の不陸・傾斜の把握方法については、既往の知見を整理して支持層の不陸や傾斜が生じやすい地形・地質を示すとともに、予備調査段階、本調査段階での各調査の組合せによる把握方法について提案した。
- 3) 支持力推定に用いる調査方法については、既往の知

見および本研究で実施した地盤調査結果を踏まえて、亀裂や風化等を考慮した地盤調査方法と評価方法を提案した。

4) 杭先端の支持力機構、施工法、載荷試験結果の分析から同様とみなせるプレボーリング杭工法と鋼管ソイルセメント杭工法についてはグルーピングを行い、支持力推定式の検討を行った。

5) 標準化した方法により算定した支持力推定式については、その妥当性やデータの多寡を考慮して軟岩における杭先端の極限支持力度の特性値の推定式を提案した。

6) 既往の施工実績や、本研究で実施した現地盤での実杭の施工性試験等から得られた知見や課題を整理し、場所打ち杭工法(オールケーシング工法)、プレボーリング杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法、中掘り杭工法(セメントミルク噴出攪拌方式)での岩盤を支持層とする杭基礎の施工法および施工管理方法に関する留意点と対策を明らかにした。

今後は、さらなる地盤調査データ、特にデータ数が少ない「準岩盤強度による亀裂を考慮した補正方法」や「三軸圧縮試験、多段階三軸圧縮試験から一軸圧縮強度を求める方法」の検証のための蓄積が必要である。また、支持力推定式の信頼性を評価する上で、さらなる載荷試験データの蓄積が必要である。特に載荷試験数が少ない杭工法や圧縮性が高い風化軟岩(風化花崗岩等)を支持層とした場合での載荷試験データの蓄積が望まれる。施工法については、場所打ち杭工法(オールケーシング工法)において、従来の目視などで支持層の確認が十分にできない場合、施工データに基づく支持層の判断方法として施工管理装置の活用が期待される。また、プレボーリング杭工法、鋼管ソイルセメント杭工法、中掘り杭工法(セメントミルク噴出攪拌方式)において、根固部もしくは杭先端固化部での強度確認データの蓄積が望まれる。

なお、今回報告した内容は、国立研究開発法人土木研究所、一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会、一般社団法人コンクリートパイル建設技術協会、一般社団法人日本基礎建設協会および一般社団法人全国地質調査業協会連合会による共同研究の一部であり、共同研究の報告書は近く公表予定である。

参考文献

- 1) 七澤利明, 眞弓英大, 河野哲也, 坂本裕司, 田辺晶規, 河村淳, 宮原清, 今野貴元: 橋梁基礎形式の選定手法調査, 土木研究所資料 第4339号, 2016.10.

- 2) 村中誠, 岡田和弘, 加藤昌明, 宮部光貴: 新東名高速道路 浜松いなさ JCT~豊田東 JCT 間橋梁下部工の沈下対策工事-愛知県新城市-, 土木施工 Vol.57 No.7, pp194-198, 2016.7.
- 3) (公社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編, 2017.11.
- 4) (公社) 日本道路協会: 杭基礎設計便覧, 2015.3.
- 5) (社) 日本道路協会: 斜面上の深礎基礎設計施工便覧, 2012.4.
- 6) 東日本高速道路(株), 中日本高速道路(株), 西日本高速道路(株): 調査要領, 2017.7.
- 7) 浅井健一: 杭基礎支持岩盤の深さ変化の面的調査のためのサウンディングの適用性検討, 日本応用地質学会平成29年度研究発表会講演論文集, pp.287-288, 2017.10.
- 8) 浅井健一: サウンディングによる地層の深さ変化の面的把握技術, 土木技術資料, Vol.61, No.8, 2019.8.
- 9) (一社) 土木学会: 2016年制定 トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説, p.50, 2016.8.
- 10) 七澤利明, 河野哲也, 宮原清, 大城一徳: 杭の軸方向の支持力及びばね定数推定式の見直しと推定精度の評価に関する研究, 土木研究所資料, 第 4374 号, 2018.3.
- 11) 七澤利明, 河野哲也, 田辺晶規: 岩盤を支持層とする杭の先端極限支持力度の評価, 土木研究所資料 第 4303 号, 2015.2.
- 12) 宇都一馬, 冬木衛, 桜井学: 杭の載荷試験結果の整理法, 基礎工, Vol.10, No.9, pp21-30, 1982.9.
- 13) 中谷昌一, 白戸真大, 横幕清: 杭の軸方向の変形特性に関する研究, 土木研究所資料, 第 4139 号, 2009.3.
- 14) 高野昭信, 岸田英明: 砂地盤中の Non-Displacement Pile 先端部地盤の破壊機構, 日本建築学会論文報告集, No.285, pp.51-62, 1979.11.
- 15) 佐伯英一郎, 岩松浩一, 木下雅敬: Non-Displacement Pile の先端支持力推定のための地盤の「平均 N 値」に関する解析的一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 535 号, pp.87-94, 2000.9.
- 16) 小椋仁志: 杭の先端支持力算定式に関する一考察(先端平均 N 値の平均範囲を中心として), 第 45 回地盤工学シンポジウム論文集, pp.199-204, 2000.10.
- 17) 岡原美知夫, 神長耕二, 中谷昌一, 森浩樹, 北村敬司, 津川優司: 軟岩を支持層とする杭の支持力に関する実験的研究, 土木研究所資料, 第 2720 号, 1989.2.
- 18) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編, 2012.3.
- 19) 今広人, 七澤利明, 河野哲也: 岩盤を支持層とする杭基礎に対する急速載荷試験の適用性の検討, 土木技術資料, Vol. 60, NO. 10, 2018.
- 20) 山肩邦男: 大口径杭の現状と鉛直支持力に関する問題点, 土と基礎, Vol.28, No.11, pp.5-11, 1980.11.
- 21) (社) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻), 2007.7.

A STUDY ON INVESTIGATION, DESIGN AND CONSTRUCTION METHODS FOR PILES EMBEDDED INTO BEARING LAYER OF BEDROCK

Research Period : FY2016-2018

Research Team : Bridge and Structural
Technology

Author : TOSHIAKI Nanazawa

YASUTO Sasaki

KENICHI Asai

TETSUYA Kouno

Abstract : The examples of installation for pile foundations embedded into bearing layer of bedrock increase because of the improvement for function of the construction machines and the increasement of opportunity to construct the structures in the area of mountains. However, the equation to estimate the bearing capacity of piles embedded into the bearing layer of bedrock is not provided clearly on Japanese Specifications for Highway Bridges. In addition, there are no methods to decide the bearing layer, survey the ground surface and manage of constructions. This study establishes the methods to survey the ground surface, design and construct the piles embedded into the bearing layer of bedrock.

Key words : rock, pile foundation, subsurface investigation method, estimation equation of bearing capacity, construction management method