

中間層支持杭の鉛直支持性能に関する研究

鈴木直子 西山高士
渡辺和博 佐原守

Vertical Bearing Performance of Pile on Thin Bearing Layer

Naoko Suzuki Takashi Nishiyama
Kazuhiro Watanabe Mamoru Sahara

Abstract

The vertical bearing performance of a pile on a thin bearing layer is influenced by the soft soil layer under the bearing layer. In recent years, the diameter of a pile tip has become larger than a conventional diameter due to the improvement of the pile construction technology. Hence, there have been an increasing number of cases in which the thickness of the bearing layer is relatively thin compared to the diameter of the pile tip. However, a conventional evaluation method of determining the vertical bearing performance is suggested for a pile having a thick bearing layer. Based on this, the authors examined the vertical bearing performance of the pile tip on the thin bearing layer analytically. Nonlinear finite element analysis was used for this study.

概要

中間層支持杭とは、硬質層と軟弱層の互層地盤において、層厚が有限で杭先端径に対して薄い硬質層、いわゆる中間支持層に杭先端を支持させた杭である。その支持力や沈下という鉛直支持性能を検討する際は、支持層下の軟弱層の影響を考慮する必要がある。近年、施工技術の向上から杭先端の大口径化は著しく、互層地盤では中間層支持杭となるケースが増えている。しかし、鉛直支持性能に関する既往の評価式は、支持層厚が杭先端径に対して十分厚いことを想定しており、中間層支持杭への適用性は未解明である。そこで本研究では、杭の実大載荷試験を再現可能な非線形FEM解析を用いたパラメトリック・スタディにより、既往式の中間層支持杭への適用性の検討と、中間層支持杭の杭先端における極限支持力および荷重～沈下関係の評価式の提案を行った。

1. はじめに

杭先端が硬質地盤(支持層)にある杭は、支持杭と呼ばれる。支持杭は、Fig. 1に示すように支持層が深くまで連続している、あるいは有限でも杭先端径に対して十分厚い場合には完全支持杭、支持層厚が有限で杭先端径に対して薄い場合には中間層支持杭(地層の中間にある支持層に支持させた杭)に分類される。中間層支持杭は、支持層下の軟弱層の影響が懸念される杭とも言える。

杭先端の支持力や沈下という鉛直支持性能に関しては既に多くの研究がある。建築学会の建築基礎構造設計指針(2001)(以下、基礎指針)においても、実大杭の載荷試験に基づき完全支持杭の杭先端の極限支持力や荷重～沈下関係の評価式が示されている。

一方、近年は建物の高層化による荷重増加への対応と施工技術の向上から杭先端の大口径化が著しく、場所打ち杭では5mを超える拡底杭も開発されている。そのため、大阪地区に代表されるような硬質層と軟弱層の互層地盤では中間層支持杭となるケースが増加している。しかし、基礎指針など既往の鉛直支持性能の評価式は完全支持杭を対象としており、中間層支持杭への適用性は未解明である。また、解明のための実大杭の載荷試験によるケーススタディは、コストの問題や実地盤が完全な成層では

ないことから容易ではない。そこで本研究では、実大杭の載荷試験結果を再現可能な非線形FEM解析を用いて、中間層支持杭の杭先端支持力および荷重～沈下関係を検討した。検討対象とする沈下の種類は、既往の評価式に倣い即時沈下とした。

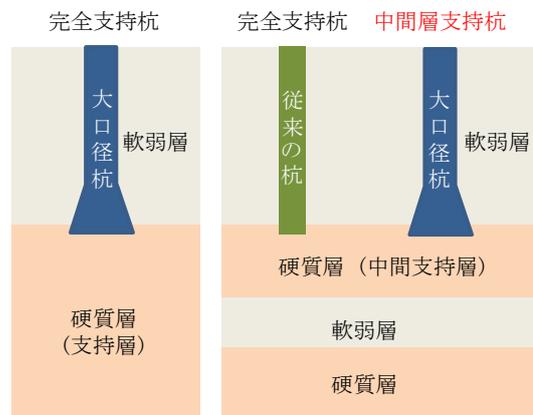


Fig. 1 支持杭の概念図
Conceptual Chart of Bearing Piles

2. FEMの杭先端支持力評価への適用性

中間層支持杭の支持力と沈下を検討する前に、非線形FEM解析により完全支持杭に関する従来の極限支持力の評価式を説明可能であるかを検討した。検討対象は、建築基礎の大口径杭として最も多く用いられる場所打ちコンクリート杭に関する評価式とした。

2.1 解析モデル

本研究で採用するモデル化手法は、場所打ち節付き杭の実大載荷試験に関して極限支持力に至るまでの沈下挙動を再現可能な手法である^(例えば1),2),3)。採用した解析ソフトは汎用FEM解析ソフトSoilPlusである⁴⁾。

解析モデルをFig. 2に示す。地盤と荷重の対称性を考慮し、軸対称モデルを用いた。地盤は砂、砂礫、および粘土地盤とし、それぞれN値=10,20,30,50,75,100,150を想定した。地盤は非線形ソリッド要素でモデル化した。非線形特性としてFig. 3に示す地盤のせん断剛性低下率とせん断ひずみの関係式($G/G_0 \sim \gamma$ 曲線)のうち、各土質の平均曲線を与えた。Fig. 3は基礎指針⁵⁾および参考文献⁶⁾に示されている。いずれの関係式も振動三軸試験等で得た $G/G_0 \sim \gamma$ 関係に対し、せん断ひずみが 10^{-6} から 10^{-2} の範囲を対象として、土質ごとに最小二乗近似で求められた回帰式である。各土質の平均曲線は、試験データにおけるひずみ毎の G/G_0 の平均値に基づいている。砂については後述の解析値の吟味を踏まえて、上限曲線と下限曲線も付記した。上限曲線は試験データの平均値+標準偏差、下限曲線は平均値-標準偏差に基づいている。粘土の平均曲線は砂の上限曲線、砂礫の平均曲線は砂の下限曲線に近い。せん断ひずみが 10^{-2} より大きい範囲の G/G_0 は、回帰式により外挿した。大変形にも対応できるように、数値積分法には選択低減積分を用いた。

地盤の初期変形係数は想定N値からVsを介して次式により推定した。

$$V_s = 91.0 \cdot N^{0.337} \quad (1)$$

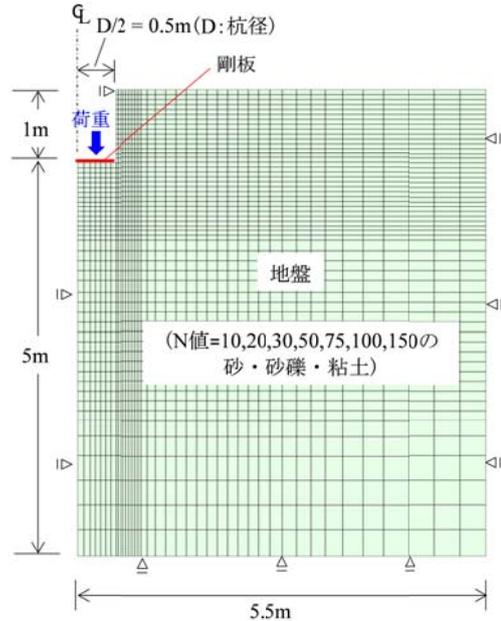
$$G = \rho \cdot V_s^2 / g \quad (2)$$

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (3)$$

ここに、

- N : N値
- V_s : S波速度 (m/s)
- G : 地盤のせん断剛性 (kN/m²)
- ρ : 単位体積重量 (kN/m³)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- ν : 微小ひずみレベルにおけるポアソン比
- E : 地盤の変形係数 (kN/m²)

N値からVsを算定する(1)式は、全土質を対象としている⁷⁾。N値とVsとの関係式には土質や堆積年代を区別した式もあるが、本解析で対象とするN値の範囲では、いずれの関係式を用いてもVsには大差はないことから、解析条件の簡略化のために土質によらず同じ式を用いた。Fig.



N値	qu (kN/m ²)	Vs (m/s)	ν'	ρ (kN/m ³)	E_0 (kN/m ²)	ν
10	500	198	0.49	18	210,000	砂質土 = 0.3
20	1000	250	0.49	18	330,000	
30	1500	286	0.49	18	450,000	粘性土 = 0.3, 0.45
50	2500	340	0.49	18	630,000	
75	3750	390	0.49	18	830,000	
100	5000	430	0.49	18	1,010,000	
150	7500	492	0.49	18	1,340,000	

V_s : N値から換算したS波速度、 qu : N値から換算した一軸圧縮強度、 ν' : N値から E_0 を算出する際のポアソン比、 ρ : 土の単位体積重量、 E_0 : 微小ひずみレベルにおける地盤の変形係数、 ν : 沈下計算に用いるポアソン比

Fig. 2 FEM解析モデル(完全支持杭)
FEM Analysis Model for Bearing Pile

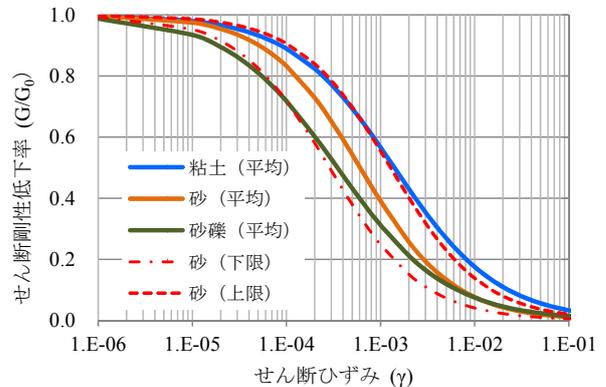


Fig. 3 地盤のせん断剛性低下率とせん断ひずみの関係^{5),6)}

Relationship between Shear Stiffness Reduction Ratio and Shear Strain

2)には、粘土地盤の物性評価を考慮してN値から換算した一軸圧縮強さ qu も併記した。換算式には $qu=50N$ を用いた⁸⁾⁹⁾。この換算式で表される直線は、実測値に基づくN値と qu の関係図において、概ね qu の中央値を示す⁹⁾。なお、本解析におけるN値の想定は、あくまでもVsに基づく地盤の変形係数Eを設定するための条件設定であり、各土質の特性は $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線でのみ表現される。また、Vs

から求まるE, すなわちPS検層のEは, 測定する時の地盤条件や拘束圧が明確であり, その値の信頼性が高いことから, 基礎指針においても沈下計算に用いるには土質によらず合理的とされている。しかし, 一般にPS検層は地震応答解析が必要な超高層建物の設計でのみ実施されるため, 全土質についてN値を指標とすることは実施設計においても有用である。

荷重面の直径は1mとした。これは, 検討対象とする基礎指針の杭先端支持力の評価式が, 杭径1m程度の実大杭の載荷試験結果に基づくことによる。杭先端を模した荷重面は, 実杭の杭先端の根入れ長を考慮し, 杭径と同じ長さだけ地盤上面よりも下方とした。荷重面の不同沈下を避けるため, 載荷面には剛板を設けた。モデル化領域は, 地中応力の伝播範囲を考慮して載荷面から水平および鉛直方向に, それぞれ載荷面直径の5倍を確保した。

2.2 完全支持杭の杭先端支持力評価への適用性

Fig. 4は, 杭先端が砂地盤にある場所打ちコンクリート

杭が完全支持杭である時の, 杭先端N値と支持力度の関係である。基礎指針に示されている図¹⁰⁾に, 本解析で得た値を追記した。基礎指針に従い, 極限支持力は荷重～沈下関係において荷重面の沈下が載荷面直径の10%に達する時の荷重とした。解析で得た曲線は, 概ね実測値の上限と下限に位置している。砂のG/G₀～γ曲線の上限と下限の幅, さらに, 実地盤では砂地盤といえども粘土混じりであることが多いことを考えると, 解析は極限支持力の発現機構を再現していると言える。砂礫の曲線が砂よりも上に位置する理由は, G/G₀～γ曲線において極限支持力が発揮される際の杭近傍地盤のせん断ひずみ(10の-1乗のオーダー)では, 砂礫のG/G₀が砂よりも若干大きいことによる。ただし, せん断ひずみが10⁻²を超える大変形領域のG/G₀は回帰式の外挿によって求めており, その精度を考慮すると, 両者は, ほぼ同等の極限支持力と考えられる。

Fig. 5は, 杭先端が粘土地盤にある場所打ちコンクリート杭が完全支持杭である時の, 杭先端のquと支持力度の

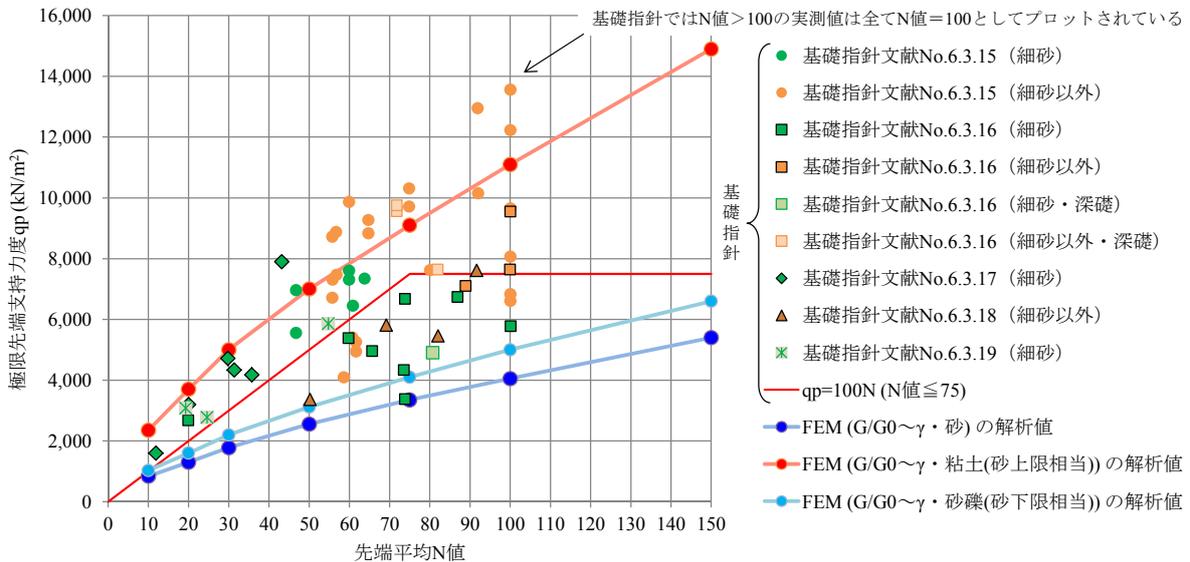


Fig. 4 完全支持杭の杭先端N値と極限先端支持力度の関係(場所打ち杭, 砂地盤)¹⁰⁾に加筆

Relationship between N-Value and Ultimate Bearing Capacity on Pile Tip of Bearing Pile (Cast-In-Place Pile, Sand)

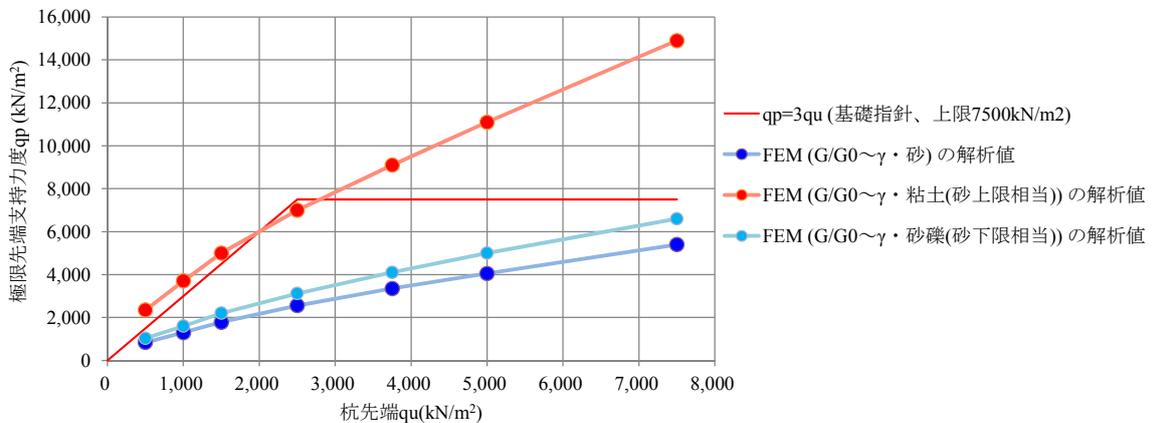


Fig. 5 完全支持杭の一軸圧縮強度quと極限先端支持力度qpの関係(場所打ち杭, 粘土地盤)

Relationship between Uniaxial Compressive Strength and Ultimate Bearing Capacity on Pile Tip of Bearing Pile (Cast-In-Place Pile, Clay)

関係である。地盤の非線形特性が粘土の解析値と基礎指針の評価式はよく対応しており、本解析手法により粘土地盤の杭先端極限支持力も評価できる。

地盤の非線形特性に $G/G_0 \sim \gamma$ 関係を用いたFEM解析は基礎構造の沈下問題での実績は多いが、杭の支持力問題への適用性には未解明な部分もあった。しかし、元来、杭の極限支持力は杭の荷重～沈下関係から評価される値であり、両者の関連性は高い。土質に関係なく本解析手法で極限支持力が発揮される大変形時までの杭先端荷重～沈下関係を再現可能であること、さらに、支持力と沈下の問題を1つの解析モデルで検討可能であることは、杭の鉛直性能評価において有用である。

3. 中間層支持杭の杭先端支持力と沈下挙動

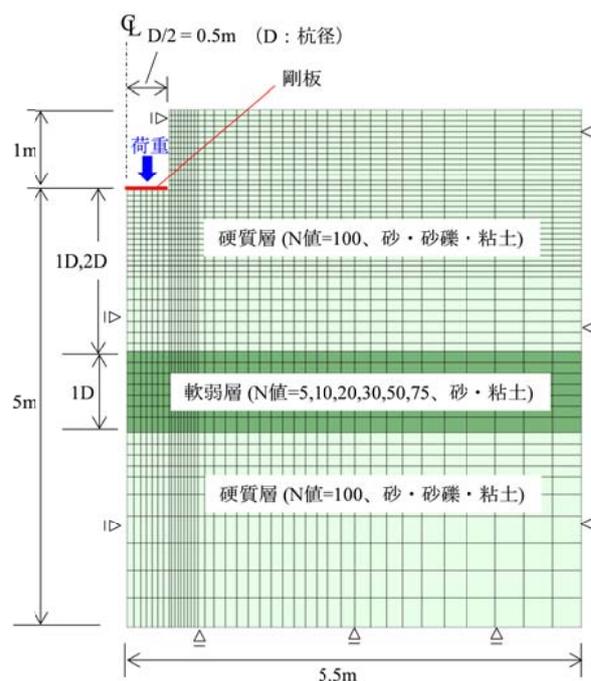
前章では、非線形FEM解析で完全支持杭の杭先端極限支持力を評価可能であることを確認した。続いて本章では、前章の解析手法を用いて、中間層支持杭に関して、その杭先端の極限支持力が完全支持杭に比べてどの程度低下するか、さらに、杭先端の荷重～沈下関係について検討した。

3.1 解析モデル

解析モデルをFig. 6に示す。モデル化手法は2章と同様である。杭先端支持層となる硬質層はN値=100とし、非線形特性は砂、砂礫、および粘土の3ケースとした。下部軟弱層はN値が5, 10, 20, 30, 50, 75の5ケース、非線形特性は各N値に対して砂と粘土の2ケースとした。軟弱層の層厚は杭径Dと同じ厚さ(1D)とした。支持層厚(杭先端から軟弱層までの距離)は、次の考え方にに基づき設定した。地盤を弾性体としたとき、半無限の一様地盤の地表面に円形の等分布荷重が作用すると地中応力の分布はFig. 7となり¹¹⁾、荷重面から載荷径の2倍離れると地中応力は荷重の10%以下と沈下に及ぼす影響は小さい。また、杭先端支持力の算定に用いるN値や一軸圧縮強さ qu は、基礎指針では杭先端から上に1D、下に1Dの範囲の平均値を用いることとしており、下に1Dの範囲にある軟弱層の杭先端支持力への影響は、この平均N値と平均 qu に含まれる。したがって、支持層厚は1Dと2Dの2ケースとした。

3.2 解析結果

解析で得た中間支持杭の極限支持力低下率(完全支持杭の極限支持力に対する中間支持杭の極限支持力の比)をFig. 8(a)～(c)に示す。軟弱層のN値が30以上、すなわち硬質層のN値に対する軟弱層のN値の比 α が0.3以上の場合、N値や土質によらず支持層厚が2Dあると極限支持力の低下は5%程度と小さく、極限支持力度は完全支持杭と同等と見なせる。このことは逆に、 α が0.3以下の場合、軟弱層の影響に留意した設計が必要とも言える。軟弱層の土質が極限支持力の低下に与える影響は、軟弱層のN値が同じであれば粘土よりも砂の方が大きい。これは、Fig. 3の地盤の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線において、同じひずみレベルで



N	Vs (m/s)	v'	ρ (kN/m ³)	E_0 (kN/m ²)	v
5	157	0.49	18	150,000	砂質土 =0.3
10	198	0.49	18	210,000	
20	250	0.49	18	330,000	粘性土 =0.3, 0.45
30	286	0.49	18	450,000	
50	340	0.49	18	630,000	
75	390	0.49	18	830,000	
100	430	0.49	18	1,010,000	

Vs: S波速度、v': N値から E_0 を算出する際のポアソン比。
 ρ : 土の単位体積重量、 E_0 : 微小ひずみレベルにおける地盤の変形係数、v: 沈下計算に用いるポアソン比

Fig. 6 FEM解析モデル(中間層支持杭)
 FEM Analysis Model for Bearing Pile on Thin Layer

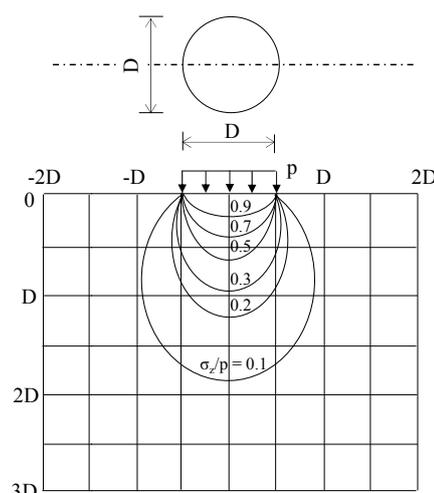


Fig. 7 円形等分布荷重による鉛直応力の分布
 (一様な弾性半無限地盤)¹¹⁾
 Distribution of Vertical Stress under Circular
 Uniform Load (Semi-Infinite and Uniform
 Elastic Ground)

あれば、粘土の剛性低下量は砂よりも小さいことによる。Fig. 8(b)の硬質層が砂礫の場合、軟弱層のN値が50以上の粘土では極限支持力の低下率が1.0以上、すなわち中間層支持杭の極限支持力が完全支持杭よりも上回っている。これは、極限支持力が発揮される時の杭近傍地盤のひずみレベル(10の-1乗オーダー)では粘土のG/G₀は砂礫よりも大きいため、粘土は軟弱層という設定ではあるが結果的に硬質層よりも剛性が大きくなったことによる。軟弱層が粘土のケースについてポアソン比を0.3と0.45の2種類で検討したところ、軟弱層のポアソン比が極限支持力の低下に与える影響は無視できるほど小さい。

Fig. 9は、軟弱層の層厚が極限支持力の低下率に与える影響を検討した結果である。解析モデルはFig. 6を元に、硬質層はN値=100の砂、軟弱層はN値=10の砂と粘土の2種類とし、支持層厚(荷重面から軟弱層までの距離)を1Dに固定した状態で軟弱層の厚さを1D, 2D, 4Dと変化させた。極限支持力の低下率は、軟弱層厚が2D以上で一定値に収束している。Fig. 7の一樣地盤における地中応力分布では、荷重面から載荷径の2倍離れた深さの地中応力は荷重の10%以下と沈下に及ぼす影響は小さいが、互層地盤も同様の傾向と言える。

3.3 中間層支持杭の杭先端荷重～沈下関係

解析で得た中間支持杭の荷重～沈下曲線の一例をFig. 10に示す。Fig. 8で極限支持力低下が最も大きいケースである。荷重と沈下は、それぞれ極限支持力と杭径で正規化している。Fig. 10の解析値をみると、極限支持力が支持層下の軟弱層の影響で低下しても、正規化した荷重～沈下曲線は軟弱層のN値によらず完全支持杭とほぼ同一と見なせる。つまり、即時沈下に限れば、極限支持力をFig. 8に基づき低下させるならば、完全支持杭を対象とした正規化した荷重～沈下曲線を軟弱層の影響を考慮した中間層支持杭の沈下評価に用いることが可能であると考えられる。

Fig. 10には基礎指針、日本建設業協会(BCS)の提案式¹²⁾、および既往の大口径杭の載荷試験結果¹³⁾も追記した。解析で得た曲線は、基礎指針やBCSの提案式よりも大口径杭の載荷試験の曲線に近い結果となった。ただし、

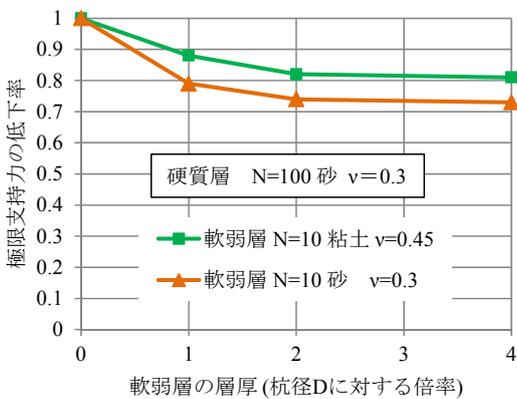


Fig. 9 軟弱層の層厚と杭先端極限支持力の低下率との関係

Relationship between Thick of Soft Layer and Reduction Ratio of Ultimate Bearing Capacity on Pile Tip

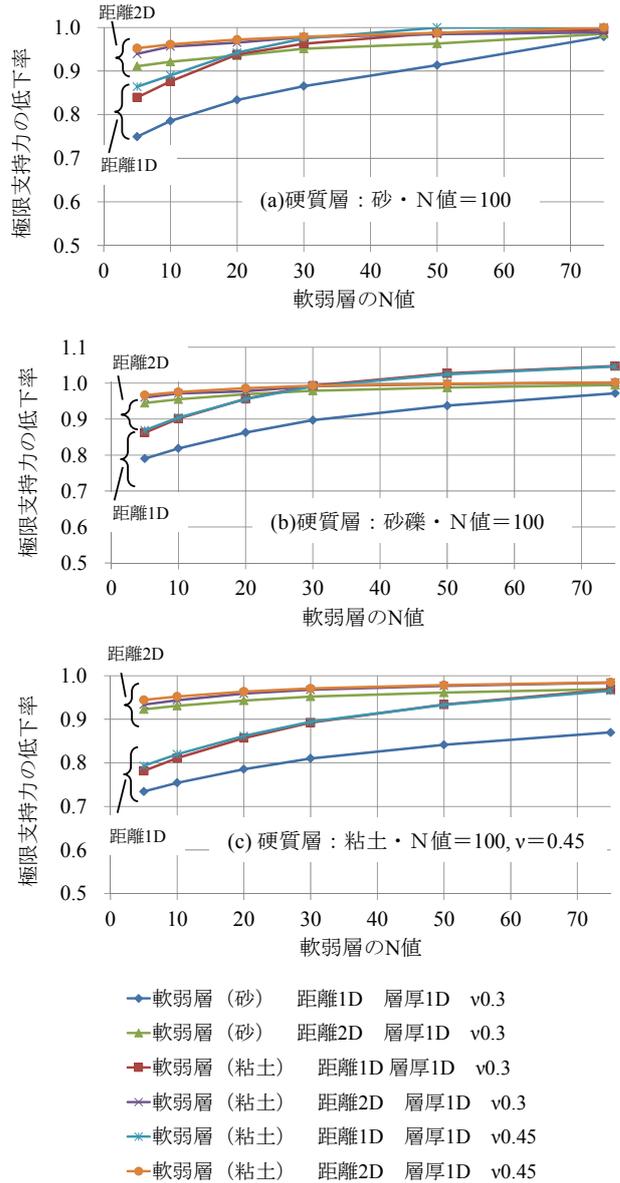
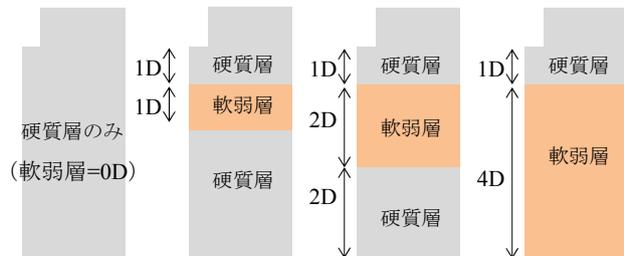


Fig. 8 杭先端極限支持力の低下率(軟弱層の層厚1D)
Reduction Ratio of Ultimate Bearing Capacity on Pile Tip



いずれの提案式も載荷試験に基づいており、地盤物性のばらつきや施工による地盤の緩みの影響を考慮すると、一概にどの曲線が推奨されるかの判断は難しい。しかし、群杭効果や軟弱層の圧密沈下を考慮する必要が無い場合は、沈下を過大に評価し過ぎないように、中間層支持杭の荷重～沈下関係として大口径杭の載荷試験の曲線を用いても良いものと考えられる。

4. まとめ

中間層支持杭の鉛直支持性能のうち、支持力と即時沈下について非線形FEM解析を用いて検討し、以下の知見を得た。

- 1) 地盤の非線形特性に $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線を与えた非線形FEM解析により、基礎指針の場所打ちコンクリート杭に関する杭先端極限支持力の評価式を説明できる。
- 2) 中間層支持杭において、支持層直下の軟弱層の土質が極限支持力の低下に与える影響は、同じN値の軟弱層では粘土よりも砂の方が大きい。
- 3) 中間層支持杭の杭先端の鉛直支持性能は、支持層直下の軟弱層のN値が支持層の0.3倍以上あり、かつ、支持層厚が杭径の2倍以上あれば、完全支持杭と同等と見なせる。
- 4) 極限支持力度と杭径で正規化した中間層支持杭の杭先端荷重～沈下関係は、支持層直下の軟弱層の影響を考慮した極限支持力を用いれば、軟弱層のN値によらず完全支持杭とほぼ同一の曲線で評価できる可能性がある。

中間層支持杭を利用するケースは、今後も増加すると考えられる。実際の互層地盤は解析で想定した地層構成よりも複雑であり、支持層直下の軟弱層が粘土の場合は、別途、圧密沈下の検討も必要となるが、本研究のような中間層支持杭の鉛直支持性能に関する検討は過去に見受けられない。本研究で得た知見を中間層支持杭の安全性向上に役立てるとともに、中間層支持杭を有する建物における杭軸力や沈下の計測により、さらなる評価手法の高度化に努める所存である。

参考文献

- 1) 鈴木直子, 他: 場所打ち節付き杭の鉛直交番載荷試験および引抜き試験(その1～その5), 日本建築学会学術講演梗概集, B-1, pp.567-576, 2008.7
- 2) 鈴木直子, 他: 超高層建物を支持する節付き場所打ち杭の鉛直載荷試験と常時および地震時沈下挙動, 日本建築学会技術報告集, 第15巻, 第30号, pp.399-404, 2009.6
- 3) 鈴木直子, 他: 拡底杭・節付き杭の鉛直荷重～変位の関係と抵抗力の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第656号, pp.1847-1856, 2010.10

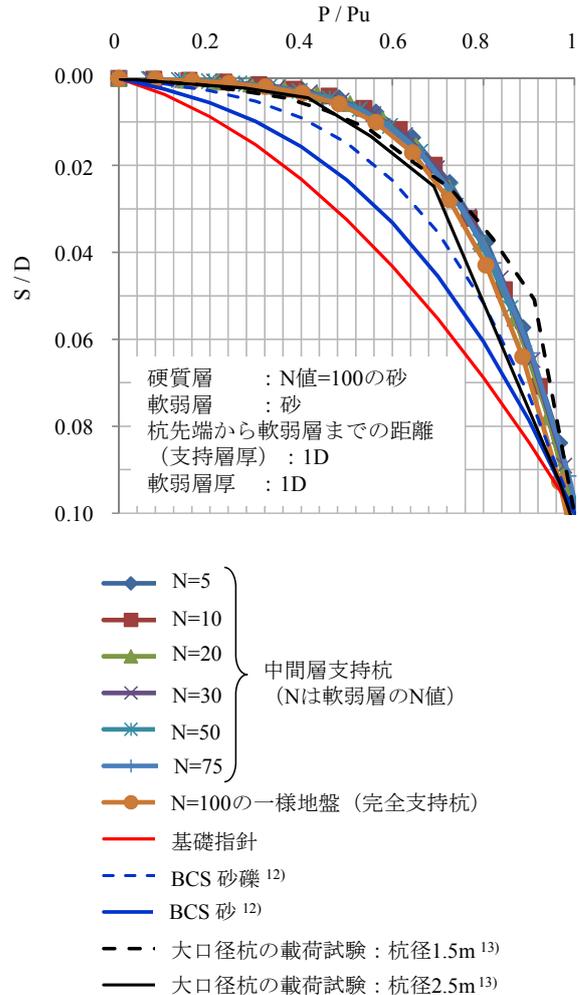


Fig. 10 杭先端における正規化した荷重～沈下曲線
Normalized Curve between Load and Settlement

- 4) 伊藤忠テクノサイエンス
- 5) 日本建築学会: 基礎構造設計指針, pp.142, 2001
- 6) 今津雅紀, 他: 砂礫材料の動的変形特性, 第21 回土質工学研究発表会pp.509-512, 1986
- 7) Imai.T., P and S wave velocities of the ground in Japan, Proc. 9th ICSMFE, Tokyo, Vol.2, 1977
- 8) 地盤工学会編: 地盤調査の方法と解説, 二分冊の1, pp.308-309, 2013
- 9) 地盤工学会編: 新編 基礎の設計計算演習, pp.20, 2000
- 10) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, pp.209, 2001
- 11) 松岡元: 土質力学, 森北出版, pp.83-85, 1999
- 12) 持田悟, 他: 場所打ちコンクリート杭の支持力性能(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.725-726, 2000.7
- 13) 杉村義広, 他: 大口径場所打ちコンクリート杭の先端載荷試験とシミュレーション解析, 日本建築学会構造系論文集第560号, pp.115-123, 2002.10