

既製杭のプレボーリング拡大根固め 工法の拡大掘削径と鉛直支持力

Enlarged Boring Diameter and Vertical Bearing Capacity Installed by Root Enlarged and Solidified Prebored Pilling Method of Precast Pile

小椋 仁志^{*1}、小松 吾郎^{*2}、真鍋 雅夫^{*3}、大島 章^{*4}、千種 信之^{*5}、細田 豊^{*6}、須見 光二^{*7}、三村 哲弘^{*8}

1. はじめに

既製杭のプレボーリング拡大根固め工法では、根固め部の径を杭径の1.1～1.15倍に拡大することによって先端支持力の増大を図っている。この拡大倍率をさらに大きくしたものが、高支持力工法と呼ばれるものである。たとえば、前報¹⁾で紹介したEX MEGATOP工法の拡大掘削径は、基準掘削径(杭径+50mm)の約1.23倍となっている。

拡大倍率は、EX MEGATOP工法のように一つの値に決まっている場合が大半である。これに対して、本報で取り上げるHyper-MEGA工法(以下、本工法と呼ぶ)は、拡大倍率を1～2倍の範囲の任意の値にすることができる。このため拡大掘削径が多様で自由度が大きく、摩擦杭から支持杭まで幅広い用途に適用できる。ジャパンパイル(株)(以下JP社)と日本コンクリート工業(株)(以下NC社)が共同開発し、平成18年3月15日に(財)日本建築総合試験所より性能評価を受け(GBRC建評-05-23A-002～004)、同年5月15日に国土交通省から建築基準法に基づく図書省略の認定を受けている(TACP-0210～0215)。

本報は、本工法の概要と鉛直支持力について検討したものである。特に本工法は多様な拡大掘削径を持つことから、本報では載荷試験結果による先端支持力や周面摩擦力と拡大掘削径との関係を中心に検討を加えることとする。

2. 施工法の概要

2.1 適用できる杭

本工法には、節部径が最大で1200mm(軸部径1000mm)の節杭(拡頭節杭を含む)と、節杭と継いで使用する最大杭径1200mmのPHC杭、PRC杭、SC杭、鋼管等のストレート杭(拡頭杭を含む)が適用できる。それらの組み合わせは自由であるが、根固め部との定着を図るため、下杭には必ず節杭(拡頭節杭を含む)を用いることになっている。

拡頭節杭や拡頭杭を使用して下杭の節杭よりも大きい径のストレート杭を上杭に継ぐことによって、鉛直支持力に対応した大きな水平耐力が得られる。加えて、ストレート杭の杭材をPRC杭、鋼管杭、SC杭などの曲げ・せん断耐力の大きい杭を用いると、さらに大きな水平耐力を得ることができる。杭のコンクリート強度 F_c は、85N/mm²(長期許容圧縮応力度24N/mm²)、105N/mm²(同30N/mm²)および123N/mm²(同35N/mm²)の3種類が実用化されている。また、肉厚はJIS規格に準じた標準厚のほか、肉厚を厚くした特厚杭も製造されている。

2.2 地盤条件、施工深さ

本工法を適用できる地盤条件や最大施工深さは下記のとおりである。

^{*1} OGURA Hitoshi : ジャパンパイル(株)技術開発部
^{*2} KOMATSU Goro : ジャパンパイル(株)技術開発部
^{*3} MANABE Masao : 日本コンクリート工業(株)営業・技術本部
^{*4} OSHIMA Akira : 日本コンクリート工業(株)技術開発部
^{*5} CHIKUSA Nobuyuki : 日本コンクリート工業(株)技術開発部
^{*6} HOSODA Yutaka : 大同コンクリート工業(株)施工技術本部
^{*7} SUMI Mitsuji : (株)ジオトップ施工本部
^{*8} MIMURA Tetsuhiro : (株)ジオトップ施工本部

杭先端地盤：砂質地盤、礫質地盤、粘土質地盤（シルト質地盤を含む）

杭周地盤：砂質地盤（礫質地盤を含む）、粘土質地盤（シルト質地盤を含む）

最大施工深さ：先端地盤が砂質地盤や礫質地盤の場合は68.5m(JP社)・68.0m(NC社)、粘土質地盤の場合は60.0m。

2.3 施工手順

図-1に本工法の施工手順を示す。以下、図の ~ について説明する。

杭芯合わせ～通常掘削部の掘削

掘削芯を確認しつつ、適宜掘削液を送りながら所定の位置まで掘削する。通常掘削部の径は、原則として基準掘削径 D_s （下杭となる節杭の節部径+50mm）である。ただし、施工する上で必要な場合は D_s+50 mmにできる。

拡翼～拡大掘削（杭周充填液注入）

所定の深度まで掘削後、先端部で拡大ヘッドの拡大翼を開き、杭周充填液（セメントミルク）を注入しながら引き上げて所定の範囲を拡大掘削する。拡大掘削径 D_e は、 D_s に対して1～2倍の任意の値である（ $D_e = D_s \cdot \text{拡大比}$ ）。拡大掘削部の範囲は、最小で拡大掘削部下端（ほぼ、杭先端位置）から2mの範囲、最長で拡大掘削部下端から杭長の1/2の範囲である。

なお、杭周充填液は、通常のセメントミルクのほかに、周面摩擦力を増大する目的で膨張材を加えたものもある。前者を標準型、後者を膨張型と呼ぶ。

再掘削～混合攪拌

所定の範囲を上下反復して杭周充填液と掘削土を混

合攪拌することにより、杭周充填液をソイルセメント化する。この工程により、拡大周面部を築造する。

根固め部の築造～掘削装置の引き上げ

根固め部の築造は、以下の方法によって行う。

a. 先端地盤が砂質地盤または礫質地盤の場合

掘削底より上方に拡大根固め部長さ L_g （ L_g は2mと D_e の大きい方の値）の範囲において、根固め液（セメントミルク）を注入しながら、拡大周面部同様に開翼状態で上下反復を繰り返して根固め部を築造する。

b. 先端地盤が粘土質地盤の場合

掘削底より上方に L_g の範囲において、根固め液を注入しながら拡大周面部と同様に開翼状態で上下反復を行った後、根固め部下端で保持した状態で根固め液を連続注入することによって、根固め部を築造する。

根固め部築造後、拡大翼を閉翼して、掘削装置を引き上げる。なお、拡大掘削を行わない場合は、～工程での拡翼作業は行わない。

杭の建て込み

鉛直性を確認しながら杭を建て込む。杭の自重による建て込み後、回転圧入またはモンケンで圧入・軽打することにより、所定の深度まで杭を沈設し定着させる。杭先端は原則として掘削底に定着させる。これは有限要素法による検討結果²⁾³⁾に基づいている。ただし、孔壁崩壊のおそれがある場合は、0.5mを限度に掘削長を長くして、杭先端を掘削底から離してもよい。

拡大ヘッドは、逆転等により開翼する機械式と、地上か

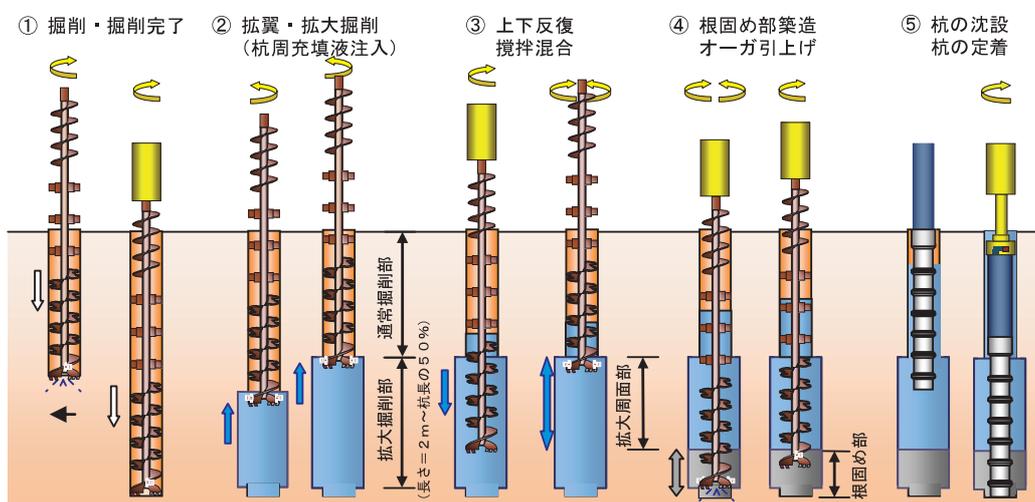


図-1 施工手順

らの送油により開翼する油圧式の2種類ある。なお、 $\alpha = 1.23$ 時の施工手順は、EX MEGATOP工法と同じになる。

以上の施工過程で用いる機材の大半は、汎用の施工機械である。このため、施工やメンテナンスが容易で施工技能の差による影響が少なく、施工管理がしやすい。したがって、施工性が非常に良く、1日に約100~150mの施工が可能である ($\alpha = 1.23$ 以下で機械式開翼の場合)。

プレボーリング拡大根固め工法では、杭の品質を確保するための施工管理が非常に重要になる。特に、拡大翼が確実に開いたかどうか、根固め液が確実に注入されたかどうかの確認がポイントになる。基本的な管理項目のうち、主なものを以下に示す。

- ・掘削モーターの電流値 支持層・拡大等の確認
- ・掘削深度、杭の天端高さ
- ・掘削時や杭建て込み時の傾斜
- ・注入液の量：プラントでの送り量
- ・注入液の質：密度（比重）管理、圧縮試験
- ・時間

また、電流値を一定時間ごとに積分した積分電流値や主な管理項目をリアルタイムに表示する装置⁴⁾も、オプションとして使用されている。

3. 載荷試験の概要

2002年に改訂された地盤工学会基準に準拠して、押込み試験と先端載荷試験の静的載荷試験を、北海道から鹿児島まで全国の様々な地盤で53件実施した。試験杭の一覧を表-1に示す。表中で先端地盤が明記されていない試験は、性能評価基本方針の杭長や地盤条件による制約から先端支持力係数 α の算定には用いず、周面摩擦力の支持力係数 β の算定のみ用いる試験である。また、表中のストレート杭の杭径は、節杭の上方にストレート杭を継いだ場合の杭径である。拡頭杭を用いて節部径よりもさらに大きい杭径にしたものもある。杭径は300mmから1200mm、杭長は4mから68.5m、先端地盤の平均N値は0から64.6まで、拡大比 α は1から2まで多岐にわたっている。試験結果の一例として、図-2に先端が礫地盤に位置する試験杭（節杭 500-400、ストレート杭 500、 $\alpha = 2.0$ 、杭全長30m、根入れ深さ29.2m、標準型、埼玉県）の荷重～変位量曲線を示す。

載荷方式は、原則として予想される第1限界抵抗力まではクリープ変形が生じる段階載荷方式（新規荷重の荷

表-1 載荷試験杭の一覧表

先端地盤	節杭杭径 節-軸(mm)	杭全長 L(m)	先端N値	拡大比 α	ストレート杭 杭径(mm)	杭周 充填液	試験 場所
砂	440-300	18	6.9	1.00	300	標準	埼玉
砂	500-400	11	19.9	1.23	500	膨張	熊本
砂	600-450	16	3.3	1.23	-	膨張	愛知
砂	600-450	26	13.6	1.80	600	膨張	茨城
砂	600-450	38	7.1	1.23	450	膨張	愛知
砂	650-500	9	12.9	1.00	-	標準	愛知
砂	800-600	42	26.4	2.00	800	標準	茨城
砂	800-600	48	58.8	1.40	800	標準	茨城
砂	1000-800	47	24.3	1.23	1000	標準	愛知
砂	1200-1000	68.5	51.5	1.40	1000	標準	茨城
礫	500-400	30	33.6	2.00	500	標準	埼玉
礫	600-450	6	10.6	1.00	-	標準	京都
礫	600-450	30	59.8	1.23	600	膨張	熊本
礫	650-500	21	21.4	1.23	500	標準	栃木
礫	650-500	46	55.3	1.50	600	膨張	茨城
礫	800-600	52	55.9	1.40	800	膨張	茨城
礫	1000-800	49	61.2	1.23	800	膨張	愛知
礫	1200-1000	68.5	64.6	1.20	1000	膨張	茨城
粘土	440-300	4	8.5	1.23	-	膨張	埼玉
粘土	440-300	7	18.0	1.23	-	膨張	熊本
粘土	440-300	20	0.1	1.23	-	標準	愛知
粘土	500-400	11	9.2	1.00	-	標準	大阪
粘土	500-400	18	2.9	1.23	-	膨張	北海道
粘土	500-400	25	5.8	1.23	500	膨張	熊本
粘土	500-400	43	15.7	1.00	400	標準	北海道
粘土	550-400	38	40.8	1.70	500	標準	群馬
粘土	600-450	9	58.3	1.23	600	膨張	埼玉
粘土	600-450	32	5.0	1.60	600	膨張	茨城
粘土	650-500	27	2.5	1.00	500	標準	愛知
粘土	800-600	32	8.5	1.80	600	標準	茨城
粘土	800-600	45	37.7	1.30	600	標準	群馬
粘土	1000-800	44	10.7	1.40	800	膨張	茨城
粘土	1000-800	45	18.0	1.23	800	膨張	北海道
粘土	1200-1000	60	21.5	2.00	1000	標準	茨城
-	440-300	10	-	1.23	-	膨張	愛知
-	440-300	25	-	1.23	300	膨張	埼玉
-	500-400	5	-	1.00	-	標準	宮城
-	500-400	6	-	1.00	-	標準	熊本
-	500-400	10	-	1.23	-	標準	愛知
-	500-400	12	-	1.00	500	膨張	茨城
-	500-400	15	-	1.23	-	標準	栃木
-	500-400	26	-	1.23	400	標準	愛知
-	600-450	6	-	1.23	-	膨張	埼玉
-	600-450	23	-	1.23	450	膨張	埼玉
-	650-500	10	-	1.23	-	膨張	愛知
-	650-500	14	-	1.00	-	標準	千葉
-	800-600	12	-	1.00	800	膨張	茨城
-	800-600	25	-	1.23	800	標準	鹿児島
-	1000-800	42	-	1.23	1000	標準	愛知
-	-	8	-	1.00	500	標準	千葉
-	-	8	-	1.00	500	膨張	千葉
-	-	7.5	-	1.00	1200	標準	千葉
-	-	7.5	-	1.00	1200	膨張	千葉

重保持時間は30分)とし、それ以後は大変位時の挙動を確実に追跡できる連続載荷方式とした。杭先端沈下量が拡大掘削径の10%以上に達するまで載荷することを原則としたが、現場の都合、反力装置の限界、杭の圧縮破壊などにより、10%未満で載荷を中止したものもある。なお、文献5)には表-1中の 1000-800mmの節杭に対して、文献6)には 1200-1000mmの節杭に対して行った先端載荷試験の概要と結果について報告しているので参照されたい。

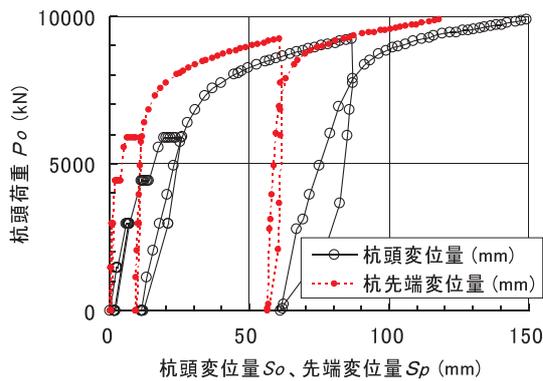


図-2 荷重～変位量曲線

先端抵抗力と周面摩擦力は、載荷試験杭に取り付けたひずみ計の測定値から、以下の手順で算定する。

- i) 測定値のバラツキと傾向を考慮して妥当と判断される値のみを採用し、それらのうち同一断面内で対称位置にある点の平均値をその杭体断面のひずみ値とする。
- ii) 杭頭部の断面のひずみ値 ϵ_i と杭頭荷重 P_o の関係から、最小自乗法によって指数関数式 $P_o = m \cdot \epsilon_i^n$ に回帰し、定数 m 、 n を求める。これをキャリブレーションカーブとする。杭の断面剛性が上杭と異なる場合は、 m の値を補正する。また、ストレート杭と節杭の継杭の場合は、ストレート杭の軸力から節杭の杭頭部のひずみ計位置の軸力を推定し、その推定値とひずみ値から節杭用のキャリブレーションカーブを求める。
- iii) 各断面で得られた平均ひずみ値 ϵ_i を、上記のキャリブレーションカーブの式に代入して、得られた値を軸力 P_i とする。拡大掘削部分や根固め部分は、ソイルセメントの面積やヤング係数の違いによる剛性の違いも考慮する必要がある。このため、軸対称FEMにより予め求めておいた剛性の増加率を用いて P_i を補正する。
- iv) 先端抵抗力 P_p は、杭先端から2m上方（根固め部のほぼ上端）での軸力とし、上下の P_i を内挿して求める。
- v) 各断面の軸力 P_i から求めた各断面間の軸力の差を区間の杭周面積 A_i で除して、区間周面摩擦応力度 f_i を算定する。 A_i の計算に用いる杭径は、節杭（拡頭節杭を含む）では節部径 D_o 、ストレート杭では杭径 D とする。

図-3～5に、図-2に示した試験で得られた軸力分布図、先端抵抗力 P_p ～先端変位量 S_p 曲線、 f_i ～区間変位量 S_i 曲線を一例としてそれぞれ示す。

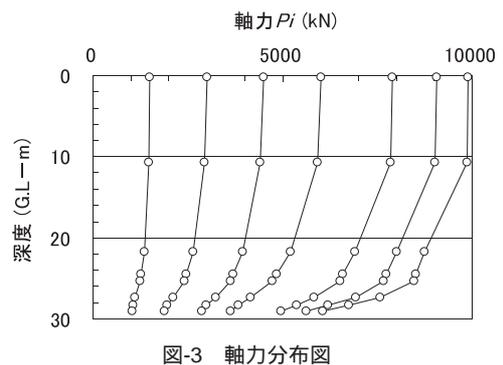


図-3 軸力分布図

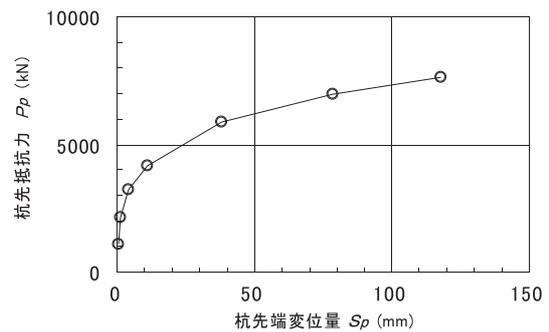


図-4 先端抵抗力 P_p ～先端変位量 S_p 曲線

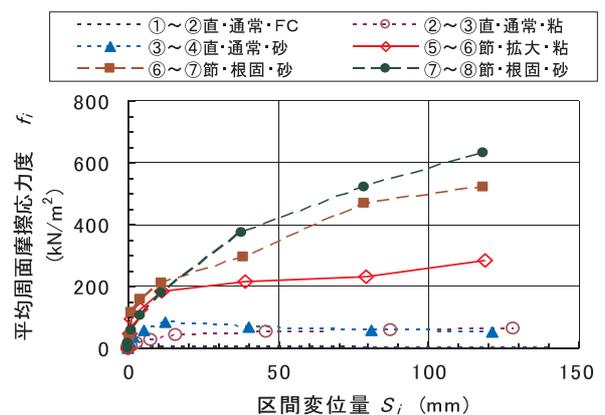


図-5 区間周面摩擦応力度 f_i ～区間変位量 S_i 曲線

力を発揮するためには地盤が極限支持力状態に至るまでは根固め部は破壊せずに杭体の一部として挙動することが前提になる。そこで、このために必要な根固め部の強度を軸対称FEM解析によって検討する。解析は、山崎らが埋込み杭の根固め部を解析した文献7) に示す方法を基本にした。要素は軸対称四辺形要素とし、根固め部はKotsovosの構成式によって非線形性や破壊を考慮している。地盤はN値が20、40、60の3通りを設定し、それぞれ拡大比に応じて想定した先端支持力までは地盤が先に破壊しないものとした。杭径は代表径である節部径800mm、軸部径600mmを採用した。弾性係数等、他の解析条件については、杭先端位置を検討した文献3) に示している。

解析結果の一例として、図-6(a)に拡大比 = 1.25、同

4. 先端支持力の検討

4.1 根固め強度の設定

プレボーリング拡大根固め工法では、所定の先端支持

図(b)に $\omega = 2.0$ の場合の耐力比を示す。いずれも地盤のN値が60、余掘り（杭先端から掘削底までの距離）が0.5mの場合である。耐力比とは各要素に生じる応力のKotsovosの破壊基準に対する比である。耐力比が1になった要素は破壊状態に至ったことになる。根固め部の強度は、(a)が20N/mm²、(b)が25N/mm²である。根固め部の破壊域は、最下端節部よりも下方が主であることが分かる。

図-7は、 $\omega = 2.0$ のときの先端荷重 P_p ~ 変位量 S_p 曲線である。先端荷重とは、杭先端面から3m上方の位置で杭体に与えた荷重である。この図では根固め部の強度を3種類想定しているが、各強度の P_p ~ S_p 曲線は根固め部が破壊することによって、根固め部が破壊しない弾性モデルの曲線から順次離脱していくことが分かる。この P_p ~ S_p 曲線から、所定の先端支持力を確保するのに必要な根固め部の強度を求める。表-2は、 ω を1.0~2.0間の5通り、N値を3通り、根固め部の強度を数通りに変えた解析によって得られた根固め部の必要強度である。

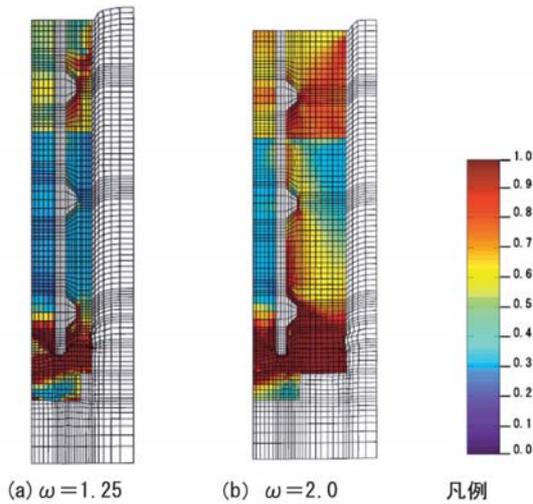


図-6 根固め部の耐力比の分布

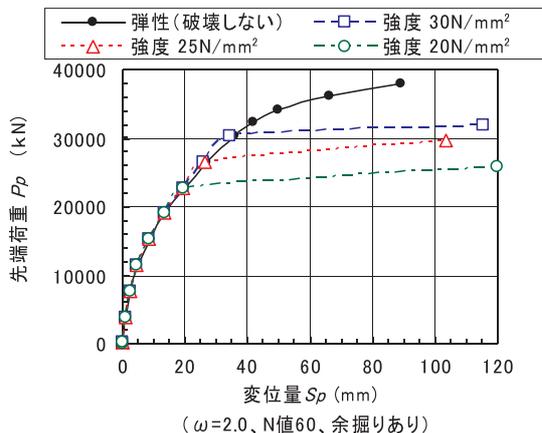


図-7 先端荷重 P_p ~ 変位量 S_p 曲線

表-2 FEMによる根固め部の必要強度

拡大比 ω	先端平均N値		
	$N \leq 20$	$20 < N \leq 40$	$40 < N \leq 60$
1.0	8	13.3	17.3
1.25	8	13.3	17.3
1.5	8	20	20
1.75	8	20	20
2.0	8	20	21.6

この表の値をベースに、掘削土と混合攪拌することによる強度低下や $\omega > 1.25$ での安全性等を考慮して、注入する根固め液（セメントミルク）の管理強度を決め、配合（水セメント比）を決定した。その値を表-3に示す。

実際に施工した杭の根固め部のできあがり状態を確認するために、数カ所の現場で実際に施工した杭を掘り起こして、根固め部のソイルセメントの寸法や強度を測っている。一例として、節部径440mm、軸部径300mm、 $\omega = 2$ 、根入れ深さ5mの杭を掘り起こし、根固め部を切断したものを写真-1に示す。中心部分には節杭の軸部断面（外径300mm、内径180mm）も見える。

根固め径は、所定の掘削径（1.0m）に対して、14~35mm大きい値になっていた。地盤のN値は20以下であるため根固め液の水セメント比は85%としたが、圧縮強度は16.8~23.0N/mm²と必要強度（8.0N/mm²）を十分に上回っていた。なお、杭周部が概ね20N/mm²以上だったので比べて、攪拌オーガの軸部になる中心部は20N/mm²以下が多かった。

他の現場で掘り起こした杭や、ソイルセメント柱のコア強度も、所定の寸法や強度を満足していた。

表-3 根固め液の配合

拡大比 ω	先端平均N値		
	$N \leq 20$	$20 < N \leq 40$	$40 < N \leq 60$
$1.0 \leq \omega \leq 1.25$	100	85	65
$1.25 < \omega \leq 1.75$	85	60	60
$1.75 < \omega \leq 2.0$	85	60	55



写真-1 掘り起こした杭の根固め部断面

4.2 先端平均N値の算定方法

本工法での杭先端平均N値 \bar{N} の算定方法は、基本的にはEX MEGATOP工法の方法¹⁾⁸⁾を用いる。すなわち、杭先端から上方2m間(根固め部)の平均N値 N_U と、杭先端から節部径の2倍の範囲の平均N値 N_L とを、「重み」をつけて平均する。杭先端から上方に $4D$ (D 杭径)下方に $1D$ 間、あるいは上方に $1D$ 下方に $1D$ 間のN値を単純平均する従来の方法に比べると、合理的な算定方法と考えられる。

(1) 杭先端から下方の平均範囲の検討

本工法は、根固め部の径(拡大掘削径)が基準掘削径(節部径+50mm)の1~2倍となる。このため、EX MEGATOP工法のように杭先端から下方の平均範囲を杭先端から節部径の2倍としたのでは、拡大比が大きい場合の根固め径を考慮すると過小になる。根固め部も杭体の一部として作用するものと考え、「杭先端から根固め径の2倍」とするのが妥当とも思える。

しかし、後述するように根固め径が基準掘削径の2倍($=2$)になっても、先端面(最下端節部下面位置)の支持力は $=1$ の時の4倍にはなっていない。つまり、先端支持力は接地面積には比例しないものと考えられる。

そこで、本工法では節部径 D_o の2倍と根固め径 D_e の2倍の平均をとって、「杭先端から($D_o + D_e$)間」を杭先端から下方の平均範囲とする。

(2) 「重み」の検討

表-1に示した試験のうち、杭先端が砂質地盤および礫質地盤の18件について、根固め部の摩擦力が占める割合を求め、それを平均すると0.248となった。すなわち、根固め部上端の支持力(先端支持力)のうち1/4が根固め部周面の摩擦力、約3/4が先端面+最下端節部の支持力と判断される。したがって、先端平均N値 \bar{N} は、「重み」を3とした式(1)で求めることにする。

$$\bar{N} = (N_U + 3N_L) / 4 \quad (1)$$

同様に、杭先端が粘土質地盤の16件についても根固め部の摩擦力が占める割合を求めると、その平均値は0.320となる。先端支持力の1/3が根固め部周面の摩擦力、約2/3が先端面+最下端節部の支持力となっている。したがって、 \bar{N} は「重み」を2とした式(2)で求めることとした。

$$\bar{N} = (N_U + 2N_L) / 3 \quad (2)$$

適用する \bar{N} は、表-1の載荷試験の範囲から、砂質・礫質地盤では3以上とする。また、砂質・礫質地盤では \bar{N} が60を超える時は $\bar{N} = 60$ とし、粘土質地盤では \bar{N} が58.3を超える時は $\bar{N} = 58.3$ として先端支持力を計算する。

4.3 先端支持力の評価位置と支持力式

表-1に示した載荷試験の結果から、本工法の先端支持力を検討する。まず、載荷試験において先端沈下量 S_p が節部径 D_o の10%に達した時の杭頭荷重を極限支持力とする。ただし、 S_p が D_o の10%に至る前に試験を終了している場合には、最終荷重の値を極限支持力とする。極限支持力時の先端抵抗力の値(以下、先端支持力)を用いて支持力算定式を検討する。

図-8に示すように、他のプレボーリング拡大根固め工法と同様、先端支持力 P_p は根固め部のほぼ上端位置(本工法では杭先端から上方に2mの位置)の軸力で評価する。このため、「先端支持力」には根固め部先端面の支持力に加えて、根固め部周面の摩擦力も含んでいることになる。しかし、EX MEGATOP工法始め従来の支持力式は、式(3)には定数を与えている。すなわち両者を分離しておらず、支持力機構からみると不明確なものであった。

$$P_p = \bar{N} A_p \quad (3)$$

ここに、 \bar{N} : 先端支持力係数(定数)

A_p : 杭の断面積(節杭では節部閉塞断面積)

そこで、本工法の支持力式の作成にあたっては、この点を明確にすることを基本方針とした。

先端支持力 P_p を、杭先端面の抵抗 P_{pp} と根固め部周面の摩擦力 P_{fp} に分ける。 P_{pp} としては、最下端節部位置(杭先端面から約0.35m上方位置)での軸力を採用する。これは、最下端節部下面は上方の節部下面とは異なり杭先端面と同様な支持力機構になっている⁹⁾ことと、杭先端面の軸力はその上方の軸力から外挿して求めることになるため精度が悪くなることによる。したがって、 P_{pp} には杭先端から約0.35m間の周面摩擦力を含むことになる。

P_p 、 P_{pp} を節部閉塞断面積 A_p で除した値を、それぞれ先端支持力度 q_p 、最下端節部下面支持力度 q_{pp} とする。

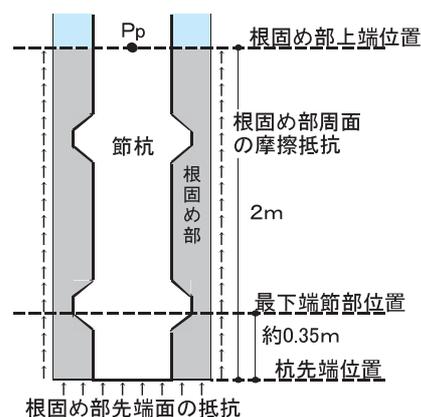


図-8 先端支持力 P_p の評価位置

本工法の先端支持力算定式の作成にあたっては、根固め径が基準掘削径に対して1~2倍の範囲で変わることをご考慮する必要があります。そこで式(3)の α_p を式(4)の形で表すこととし、係数 a 、 b 、 c を載荷試験データから求める。

$$\alpha_p = a \omega^b + c \quad (4)$$

ここに、

α_p : 先端面(最下端節部下面)位置での支持力による支持力係数

f : 根固め部の周面摩擦力による支持力係数

: 拡大比 $= D_e / (D_o + 0.05)$

D_e : 拡大掘削径(根固め径)(m)

D_o : 根固め部に位置する節杭の節部径(m)

4.4 最下端節部下面位置での支持力

図-9(a)(b)に、 α_p と ω の関係を示す。(a)は先端地盤が砂質土と礫質土の場合、(b)は粘土質地盤の場合である。縦軸の α_p は、 q_{pp} を N で除した値である。

図中の一点鎖線は指数関数に最小自乗法近似した回帰曲線であり、砂質・礫質土の場合の回帰式は $\alpha_p = 315.7 \omega^{1.455}$ となる。これから、式(4)の b には1.5を採用する。粘土質地盤の場合は、回帰式が $\alpha_p = 280.5 \omega^{1.259}$ となるため $b = 1.25$ とする。

根固め部先端面の支持力が根固め部の底面積に比例するものとするならば、 $b = 2$ になるはずである。しかし、回帰値は1.455、1.259とかなり小さい。この原因として、次の三つの要因が考えられる。

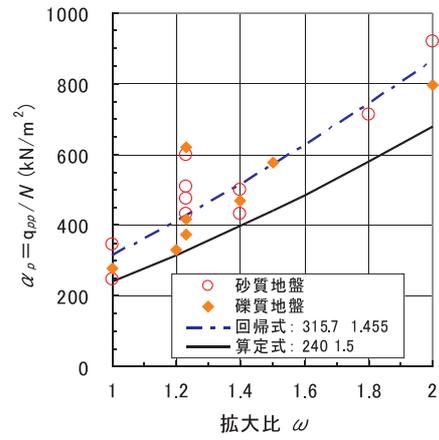
P_{pp} には、根固め部底面と最下端節部下面の間(約0.35m)の周面摩擦力が含まれている。

極限支持力は、 S_p が根固め径 D_e の10%ではなく、建築基準法の制約から前述のように杭径(節部径) D_o の10%に達した時の支持力で評価している。このため、 q_{pp} には S_p が $D_o/10$ から $D_e/10$ になるまでの先端抵抗力の増大が反映されていない。

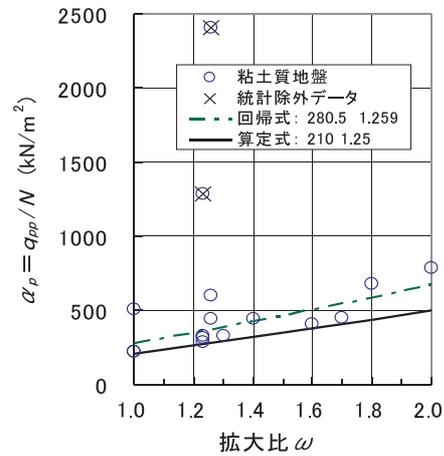
支持力は接地面積に比例しない現象(いわゆる「寸法効果」)が生じている。

これらのうち、寸法効果についてはある程度の影響は考えられるものの、区間長は0.35mと小さいため大きな影響はないものと判断される。

これに対して寸法効果の影響は非常に大きいと思われる。先端支持力を実質的に根固め径で評価しているSuper KING工法は、先端支持力式でこの補正を行っている¹⁰⁾が、本工法と同じような形で表すと $b = 1.6$ 程度に相当している。しかし、 $b < 2$ になるのは寸法効果が主因とすると、



(a) 砂質・礫質地盤



(b) 粘土質地盤

図-9 $\alpha_p \sim \omega$ 関係

$S_p = D_o/10$ 以降の先端抵抗力の増大は砂質・礫質地盤よりも粘土質地盤の方が小さいと考えられるため、 b は粘土質地盤の方が2に近くなるはずであるが、実際には粘土質地盤の方が小さい値となっている。Terzaghi理論に基づく直接基礎の単位面積あたりの支持力を求める算定式では、砂質地盤の項にだけ基礎幅 B が入っている。このことは、粘性土よりも砂質土の方が寸法(杭径、基礎幅など)の影響が大きいことを示唆している。寸法効果についても、高野のように「寸法効果は生じない」という報告¹¹⁾もあるが、模型実験によるものが主であり実大杭での報告は少なく、未だよく分かっていないのが実情である。今後も、 α_p と ω の関係だけでなく、 α_p と根固め径との関係なども検討して、 b が2にならない原因を検討したい。

次に、式(4)の a の値を検討する。前述の手順で決めた b の値を使って、すべてのデータが上回るような a の値を求めると、砂質・礫質地盤では245.5、粘土地盤では219.2

となる。これから a はそれぞれ240、210とする。これにより、 $p = 240^{1.5}$ および $p = 210^{1.25}$ が決定する。図-9(a) (b)に、この式による曲線を併記しておく。

ここで、 p の物理的意味を検討する。根固め部の底面積が A_p とほぼ等しくなる $\alpha = 1$ の場合は、 p はそれぞれ240kN/m²、210kN/m²となる。図-10は、 P_{pp} を A_p ではなく根固め部底面積 A_e で除した値 q_{pe} と杭先端より下方(D_o+D_e)間の平均 N 値 N_L の関係である。砂質・礫質地盤では $q_{pe}/N_L = p = 200 \sim 300$ 、粘土質地盤では150~250の範囲が多いことが分かる。すなわち、見かけ上は p が大きいプレボーリング拡大根固め工法でも、根固め部底面積で評価すれば従来のプレボーリング工法の p である200kN/m²や250kN/m²と同じような値になっている。前述の $\alpha = 1$ の時の p は、これらに対応する値といえる。

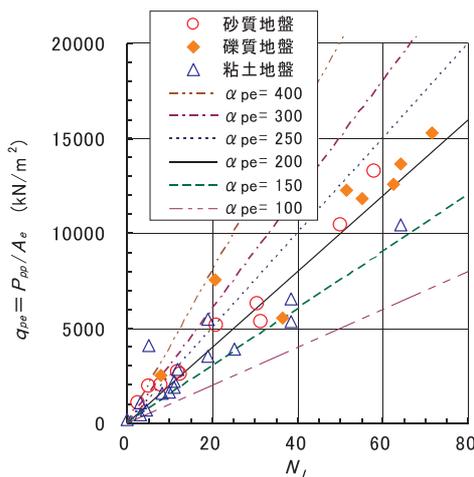
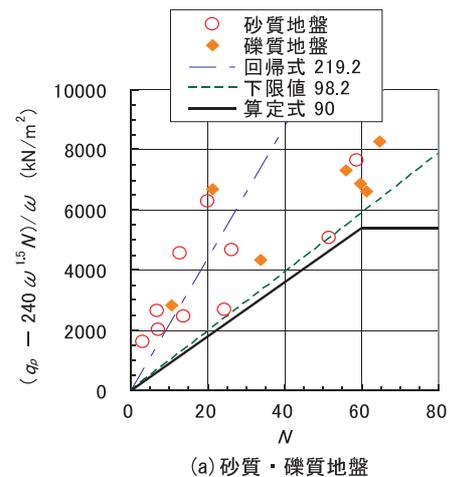


図-10 $q_{pe} \sim N_L$ 関係

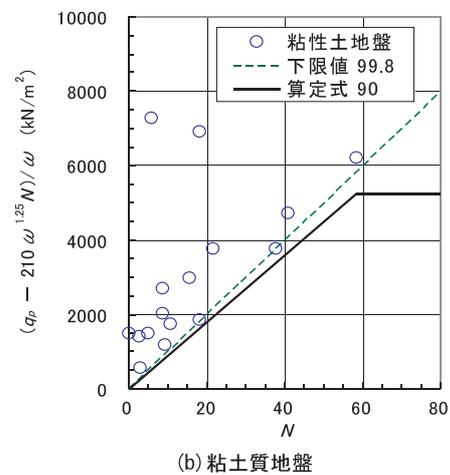
4.5 根固め部の周面摩擦力

前節で決定した p に \bar{N} を乗じた値を q_p から差し引いたものを、根固め部の周面摩擦力度とする。周面摩擦力度は根固め部の周面積に比例するものと考え、周面摩擦力度を A_e で除した値を縦軸に、 \bar{N} を横軸として描いたのが図-11(a) (b)である。両者の関係の勾配が式(4)の c になるが、その下限値は砂質・礫質地盤では98.2、粘土質地盤では99.8となる。これから両地盤とも $c = 90$ を採用する。したがって、 $f = 90$ となる。

ここでは、根固め部の周面摩擦力度として、 q_p から $p\bar{N}$ を差し引いたものを採用した。これは、支持力式は原則として全データを満足するように設定する必要があるためである。実際の周面摩擦力度は $(q_p - q_{pp})$ であり、 $(q_p - p\bar{N})$ よりも小さいことに注意する必要がある。



(a) 砂質・礫質地盤



(b) 粘土質地盤

図-11 根固め部の周面摩擦力度

4.6 先端支持力の算定式

4.4、4.5節をまとめると、 q_p の算定式は式(5) (6)となる。

$$\text{砂質・礫質地盤} \quad q_p = 240^{1.5} + 90 \quad (5)$$

$$\text{粘土質地盤} \quad q_p = 210^{1.25} + 90 \quad (6)$$

$\alpha = 2$ では、砂質・礫質地盤は $q_p = 858$ 、粘土質地盤は $q_p = 679$ となる。図-12(a) (b)に、 $q_p \sim N_L$ 関係と載荷試験データの値を示す。データはいずれも算定式を上回っている。また、EX MEGATOP工法の q_p もほぼ線に乗っており、本工法で $\alpha = 1.23$ とした場合は先端支持力の上からもEX MEGATOP工法に相当していることが分かる。

5. 周面摩擦力の検討

5.1 杭周充填液の強度の設定

埋込み杭の周面摩擦力は、杭周 - 充填材間の摩擦力、充填材内のせん断耐力、充填材 - 地盤間の摩擦力の三つのうち最も小さいもので決まる。杭周充填液の強度の設定にあたっては、 q_p が最も小さくならないようにす

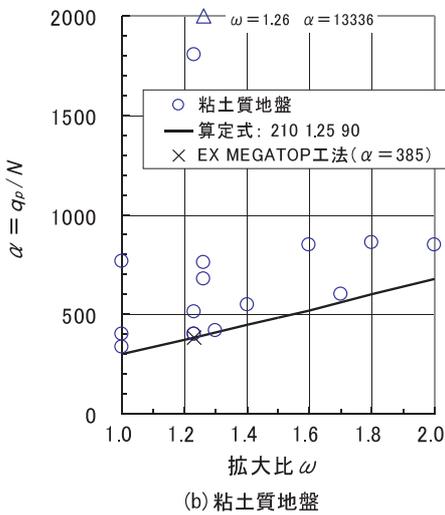
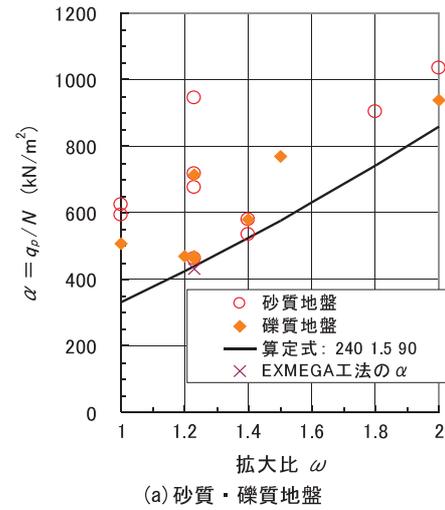


図-12 ~ 関係

る必要がある。そこで、まず、充填材（ソイルセメント）のせん断強度が想定した周面摩擦力の最大値（0.24 N/mm²：標準型・粘性土～0.57N/mm²：膨張型・砂質土）を満足するように設定し、文献12)に示された式を用いて充填材の圧縮強度を計算すると0.86～2.04 N/mm²となる。

次に、掘削土と混合攪拌することによる強度低下を考慮して、杭周充填液（セメントミルク）の必要圧縮強度を求めると6.75～8.9N/mm²となる。これから、杭周充填液の管理強度は10N/mm²に設定した。配合は、この管理強度を満足するように以下のとおりとした。

- 標準型 水セメント比 W/C = 100%
- 混合比 充填液容積：攪拌対象土 = 1 : 2
- 膨張型 水粉体比 W/(C+K) = 85% (K：膨張材)
- 膨張材置換率 K/(C+K) = 6～9%
- 混合比 充填液容積：攪拌対象土 = 1 : 3
- 膨張材には無水石膏が二水石膏を用いるが、その配合

を決めるための膨張量試験や圧縮試験、押抜き試験の概要と結果は、前報¹⁾で詳しく述べているので参照されたい。

杭周充填液の品質管理実績では、圧縮強度は20N/mm²前後と管理強度の2倍程度の値を示している。また、4.1節で述べたような掘り起こし杭やソイルセメント柱から採取した供試体についても圧縮試験を行っているが、いずれも充填材に必要な圧縮強度を十分に満足していた。

5.2 杭周面摩擦力の算定式の作成

3章で述べた手順で求めた杭周面摩擦応力度 f_i から、周面摩擦力の算定式を作成する。算定式は式(7)、(8)になる。

$$\text{砂質土 } P_{fs} = f_s L_s D \quad (\text{kN}) \quad (7)$$

$$f_s = N_s \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$\text{粘性土 } P_{fc} = f_c L_c D \quad (\text{kN}) \quad (8)$$

$$f_c = q_u \quad (\text{kN/m}^2)$$

ここに、 P_{fs} ：砂質土地盤の周面摩擦力 (kN)

f_s ：砂質土地盤の周面摩擦応力度 (kN/m²)

L_s ：杭が砂質土地盤に接する長さの合計 (m)

D ：杭径（節杭の場合は節部径）(m)

：砂質土地盤の周面摩擦係数

N_s ：砂質土地盤の平均N値

P_{fc} ：粘性土地盤の周面摩擦力 (kN)

f_c ：粘性土地盤の周面摩擦応力度 (kN/m²)

L_c ：杭が粘性土地盤に接する長さの合計 (m)

：粘性土地盤の周面摩擦係数

q_u ：一軸圧縮強さの平均値 (kN/m²)

表-1に示した載荷試験のデータを用いて、本工法の周面摩擦力を検討する。4.3節で述べた極限支持力時における周面摩擦応力度の値を用いて算定式を検討する。算定式は性能評価基本方針に則り、データの下限値と、データの平均値（回帰直線）から1.06（：標準偏差）を低減した値（超過確率85.5%）のうちの大きい方の式を採用した。

また、算定式の適用範囲は載荷試験データの範囲をもとに、砂質土地盤の場合は N_s が1以上、粘性土地盤の場合は q_u が10N/mm²以上とする。ただし、 N_s が30を超えるときは $N_s = 30$ として f_s を算定し、 q_u が200kN/m²を超えるときは $q_u = 200$ kN/m²として f_c を算定する。

5.3 ストレート杭の周面摩擦力

ストレート杭のみの載荷試験では、杭体と充填材との間ですべりが生じているのが観察されることがある。また、 $f_i \sim S_i$ 曲線を見ても、節杭の場合は S_i が大きくなって

も f_s は漸増していくことが多いのに対し、ストレート杭の場合はピークに達したあと減少することが多い。これは、ストレート杭は上杭として用いられるため地盤の上載圧の違いが影響しているものと予想されるが、節杭とストレート杭の形状の違いも要因の一つと考えられる。すなわち、節杭が節部の支圧抵抗のために杭体と充填材の間ですべりすることはないと考えられるのに対し、ストレート杭は充填材との付着が切れることによって杭体と充填材の間ですべりが生じることも考えられ、その場合に f_s が減少する現象が現れるものと推測できる。

5.1節の検討で充填材はせん断破壊をおこさないと考えられると、杭体と充填材との間ですべりが生じなければ、周面摩擦力は充填材と地盤との間の摩擦力で決まることになる。この場合は、周面摩擦力は充填材の外径（掘削径）に比例するはずである。しかし、杭体と充填材との間ですべりが生じることがあると、掘削径が大きくなっても必ずしも周面摩擦力は増大するとは限らない。したがって、杭体と充填材との間ですべりが生じることもあると考えられるストレート杭の周面摩擦応力度は、掘削径ではなく杭径 D で整理することにする。

なお、以下に示すデータを検討する過程で原点を通らない回帰式も検討したが、いずれも切片の値が小さかった。このため、原点を通る式になるように勾配の f_s/N_s 、 f_c/q_u の値で検討することとした。

(1) 標準型（杭周充填液に膨張材を使用しない場合）

図-13に砂質地盤の $f_s \sim N_s$ 関係を示す。データ数は33個である。勾配 f_s/N_s の下限値は、5.0、平均 - 1.06 の値は 4.53となった。算定式には下限値の $f_s = 5.0N_s$ を採用する。したがって、 $\alpha = 5.0$ となる。

次に、粘性土地盤の $f_c \sim q_u$ 関係を図-14に示す。データ数は26個である。勾配 f_c/q_u の下限値は0.71、平均 - 1.0 の値は0.69となった。算定式は下限値をベースに $f_c = 0.7q_u$ とする。したがって、 $\beta = 0.7$ となる。

(2) 膨張型（杭周充填液に膨張材を使用する場合）

図-15に砂質地盤の $f_s \sim N_s$ 関係を示す。データ数は33個である。勾配 f_s/N_s の下限値は8.02、平均 - 1.06 の値は 7.42となった。算定式は下限値をベースに $f_s = 8.0N_s$ とする。したがって、 $\alpha = 8.0$ となる。

次に、粘性土地盤の $f_c \sim q_u$ 関係を図-16に示す。データ数は27個である。勾配 f_c/q_u の下限値は0.91、平均 - 1.06 の値は0.839となる。算定式には、下限値をベースに $f_c = 0.9q_u$ を採用する。したがって、 $\beta = 0.9$ となる。

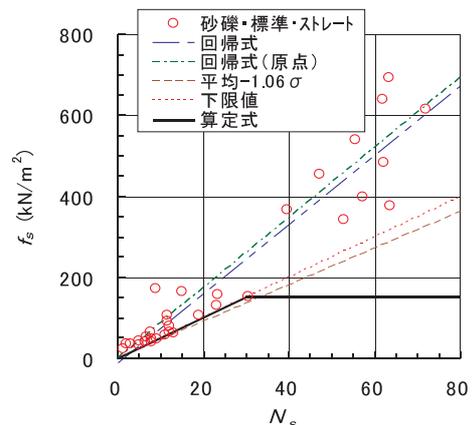


図-13 $f_s \sim N_s$ 関係（ストレート杭・標準・砂質土）

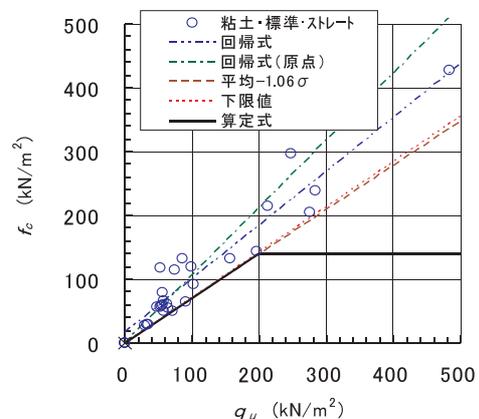


図-14 $f_c \sim q_u$ 関係（ストレート杭・標準・粘性土）

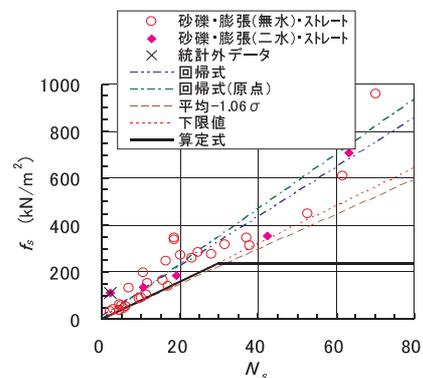


図-15 $f_s \sim N_s$ 関係（ストレート杭・膨張・砂質土）

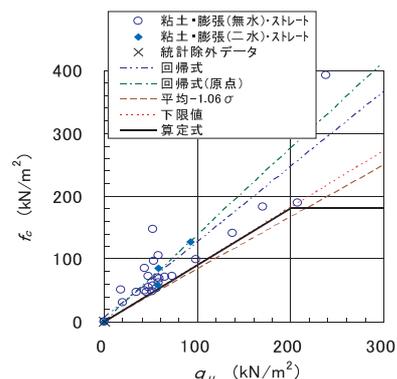


図-16 $f_c \sim q_u$ 関係（ストレート杭・膨張・粘性土）

5.4 節杭の周面摩擦力

節杭の場合、節部の支圧により杭体と充填材との間ですべりが生じることは考えられない。また、載荷試験時の観察でも充填材と地盤との間ですべりが生じている。したがって、節杭の周面摩擦力は充填材と地盤との摩擦力で決まり、充填材の外径（掘削径）に比例するものと考えられる。そこで、節杭の周面摩擦応力度は、節部径 D_o ではなく掘削径（ここでは D_o ）で整理することにする。具体的には、 $f_s/ \omega \sim N_s$ 関係、 $f_c/ \omega \sim q_u$ 関係から f_s 、 f_c の算定式を求めればよい。ただし、通常掘削部分の範囲は、データ処理や周面摩擦力の計算時には $\omega = 1$ として扱う。

(1) 標準型（杭周充填液に膨張材を使用しない場合）

図-17に砂質地盤の $f_s/ \omega \sim N_s$ 関係を示す。データ数は33個である。（平均 - 1.06）の式は $f_s/ \omega = 30.3 + 5.50 N_s$ となるため、の算定式は式(9)とする。

$$N_s = (30 + 5.5 N_s) \text{ を満たす} \tag{9}$$

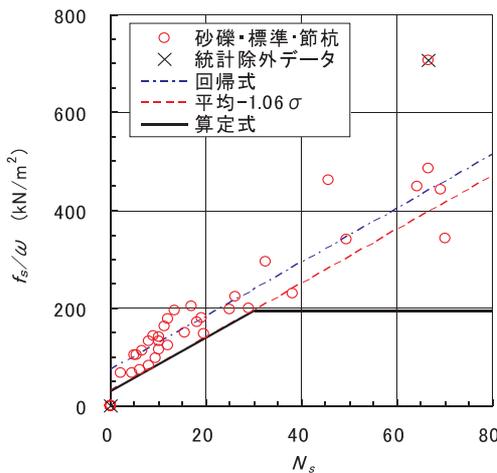


図-17 $f_s/ \omega \sim N_s$ 関係（節杭・標準・砂質土）

次に、粘性土地盤の $f_c/ \omega \sim q_u$ 関係を図-18に示す。データ数は33個である。（平均 - 1.06）の式は $f_c/ \omega = 23.12 + 0.510 q_u$ となるため、の算定式には式(10)を採用する。

$$q_u = (20 + 0.5 q_u) \text{ を満たす} \tag{10}$$

(2) 膨張型（杭周充填液に膨張材を使用する場合）

図-19に砂質地盤の $f_s/ \omega \sim N_s$ 関係を示す。データ数は51個である。（平均 - 1.06）の式は $f_s/ \omega = 0.09 + 9.51 N_s$ となる。これから、の算定式は式(11)とする。

$$= 9.5 \tag{11}$$

次に、粘性土地盤の $f_c/ \omega \sim q_u$ 関係を図-20に示す。データ数は37個である。（平均 - 1.06）の式は $f_c/ \omega = 0.43 + 1.012 q_u$ となるため、の算定式には式(12)を採用する。

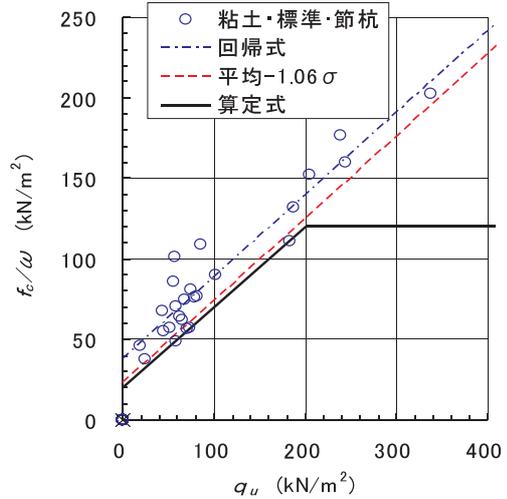


図-18 $f_c/ \omega \sim q_u$ 関係（節杭・標準・粘性土）

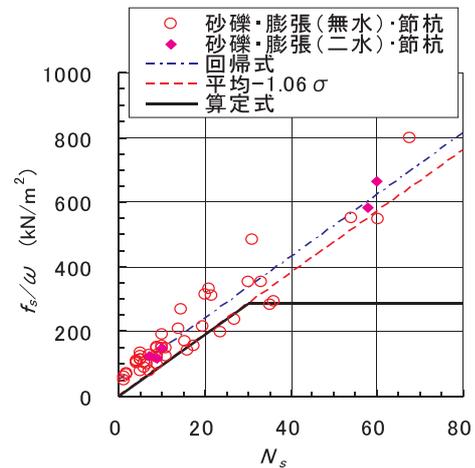


図-19 $f_s/ \omega \sim N_s$ 関係（節杭・膨張・砂質土）

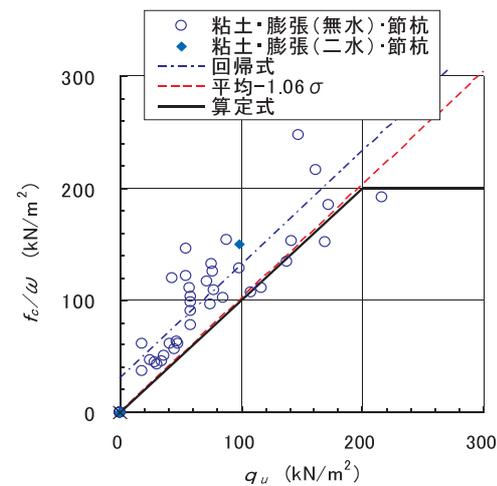


図-20 $f_c/ \omega \sim q_u$ 関係（節杭・膨張・粘性土）

$$= 1.0 \tag{12}$$

膨張型の場合の算定式は、式(11)、(12)のように定数項のない原点を通る形の式になる。

6. 長期許容支持力の検討

4.と5.の検討で決定した算定式から P_p と P_f を求め、安全率を3として長期許容鉛直支持力 R_a を計算する。

図-21は、算定式による長期許容支持力 R_{ac} と、載荷試験で得られた長期許容支持力 R_{at} （極限支持力の1/3）との相関図である。すべての載荷試験で R_{at} は R_{ac} を上回っており、両者の比の平均値は1.44倍、両者の平均値の比では1.24倍となっている。このことから、申請式は安全な長期許容支持力を与えることが確認できる。

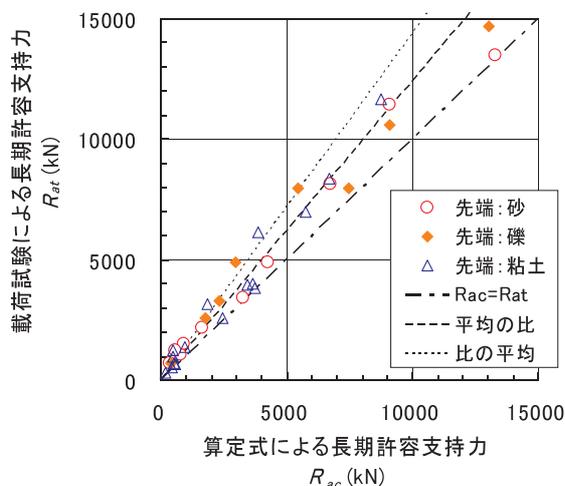


図-21 長期許容支持力の計算値と試験値の相関図

7. おわりに

ここ数年、高支持力工法と呼ばれる既製杭の工法開発が盛んになっている。この背景には、杭工事の低コスト化のために1柱1杭方式の設計が可能な工法が要請されていることがある。高支持力化の手段として多くの工法は、拡大根固め工法を基本にして、その拡大径を増大する手法が取られている。前報で紹介したEX MEGATOP工法や本報で述べたHyper-MEGA工法も、この手法による高支持力工法の一つである。

Hyper-MEGA工法は、拡大倍率を一定値とせず、杭径の1倍から約2倍まで任意に設定できることに特徴がある。このため、開発過程で掘削径が先端支持力や周面摩擦力に及ぼす影響に関して貴重なデータが蓄積された。本報では、性能評価時の審査資料を中心に、その鉛直支持力の特性と支持力算定式の作成方法について述べたが、更にデータを整理すれば本報で紹介した事項の他にも多くの興味深い事項が分かってくるものと思われる。また、本報で述べたように寸法効果など、未だ分かっていないことについても解決の糸口をつかめるかも分

からない。今後も、引き続きデータを整理して検討していきたい。

次に、Hyper-MEGA工法の実施にあたっては、確実に支持力を発現するための入念な施工管理だけでなく、リダンダンシーの乏しい1柱1杭方式に対応するための適切な設計が要求される。すなわち、支持力の増大に伴って支持杭でも必要になる沈下解析、パイルキャップの適切な設計、杭材の選択に始まる大きな水平力に対応した水平抵抗・変位の検討、アスペクト比の大きい建築物で生じる引抜き力等、今まであまり問題のなかった事項にも適切に対応することが必要になる。今後とも、これらの設計に関する課題に取り組んでいく所存である。

【参考文献】

- 1) 小椋仁志, 須見光二, 後庵満丸, 菅一雅, 小松吾郎: EX MEGATOP工法の鉛直支持力 - プレボーリング拡大根固め工法 -, GBRC, Vol.30, No.2, pp.21-30, 日本建築総合試験所, 2005.
- 2) 今 広人, 小椋仁志, 須見光二, 藪内貞男: プレボーリング拡大根固め工法に用いる節杭の先端位置 (FEMによる検討), 第40回地盤工学研究発表会, pp.1539-1540, 2005.
- 3) 小椋仁志, 山崎雅弘: 節杭を用いたプレボーリング拡大根固め工法での杭先端の設置位置 (根固め部の破壊を考慮したFEMによる検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造B -, pp.509-510, 2006.
- 4) 小椋仁志, 飯田 努, 小松吾郎: 既製杭と場所打ち杭の施工・品質管理, 土と基礎, Vol.54, No.6, pp.29-32, 2006.
- 5) 小椋仁志, 桑山晋一, 鈴木良和, 山森貞樹: 大口径埋込み杭の先端抵抗試験と周面抵抗試験, 第40回地盤工学研究発表会, pp.1613-1614, 2005.
- 6) 小椋仁志, 小松吾郎, 須見光二, 大島 章, 山森貞樹: 大口径長尺埋込み杭の先端載荷試験 - 試験結果と課題 -, 第41回地盤工学研究発表会, pp.1561-1562, 2006.
- 7) 山崎雅弘, 竹脇 出, 長岡弘明, 中村恒善: 既製コンクリート杭根固め部の構造耐力の施工形状依存性, 構造工学論文集, Vol.41B, pp.467-476, 1995.
- 8) 小椋仁志, 小林恒一: プレボーリング拡大根固め工法杭に用いた先端平均N値の算定方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造B -, pp.567-568, 2005.
- 9) 小椋仁志, 山肩邦男, 岸田英明: 模型実験による節付き円筒杭の支持力特性の検討, 日本建築学会構造系論文報告集, No.374, pp.87-97, 1987.
- 10) JFEスチール(株): 最近の埋込み杭工法 Super KING工法, 基礎工, Vol.31, No.9, pp.57-59, 総合土木研究所, 2003.
- 11) 岸田英明, 高野昭信, 吉沢孝夫: 砂地盤中のNon-displacement pile (埋込み杭・場所打ちコンクリート杭) 先端部の荷重 - 沈下量関係に杭径が与える影響, 日本建築学会論文報告集, No.284, pp.17-25, 1979.
- 12) 日本建築センター: 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針, 2002.