

## EX MEGATOP工法の 鉛直支持力

### —既製杭のプレボーリング 拡大根固め工法—

小 椋 仁 志\*1  
 須 見 光 二\*2  
 後 庵 満 丸\*3  
 菅 一 雅\*4  
 小 松 吾 郎\*5

#### 1. はじめに

最近、経済的観点から1柱1杭方式が多用されるようになったことなどを背景に、埋込み工法による既製杭の高支持力杭工法が多く開発されている。本報で紹介する「EX MEGATOP工法」もその一つであり、平成16年7月30日に(財)日本建築総合試験所から性能評価(GBRC建評-04-23A-001~003)を受け、同年8月31日に国土交通省から建築基準法施行規則第一条の3に基づく図書省略の認定(TACP-0150~0152)を受けている。

本報は、この工法の概要と支持力式について述べ、さらに載荷試験のデータについて考察を加えたものである。

#### Vertical Bearing Capacity of Pile Installed by “EX MEGATOP” Method

#### —Base Enlarged Pre-boring and Grouting Method for Pre-cast Pile—

- \*1 OGURA Hitoshi : (株)ジオトップ技術本部
- \*2 SUMI Mitsuji : (株)ジオトップ施工本部
- \*3 GOAN Mitsumaru : (株)ジオトップ基礎設計部
- \*4 SUGA Kazumasa : (株)ジオトップ技術本部
- \*5 KOMATSU Goro : 大同コンクリート工業(株)研究開発室

#### 2. EX MEGATOP工法の概要

##### 2.1 MEGA TOP工法からの改良点

節杭は杭軸に節状の突起を一定間隔に持つ既製コンクリート杭である。大正14年に開発されて以来、周囲に砂利を充填しながら打ち込むシーリング工法、セメントミルクが充填された掘削孔の中に節杭を建て込むセメントミルク工法(MT工法、ET工法)、掘削土とセメントミルクを混合攪拌したソイルセメントが充填された掘削孔に節杭を建て込むGMTOP工法と施工法は変わったが、主に摩擦杭や中間支持杭として用いられてきた。その後、先端部から杭長の30~50%の範囲を断面積が約1.5倍になるように拡大掘削することによって支持力を増大したMEGATOP工法では、支持杭としても使用できるようになった。

本報で述べるEX MEGATOP工法は、MEGATOP工法と基本的には同じであるが、下記の点を改良している。

- ①杭の先端地盤が、砂質地盤と礫質地盤に加えて、粘土質地盤にも適用できるようにした。
- ②杭周充填液に膨張材を加えた「膨張型」を追加し、さらに大きな周面摩擦力も選択できるようにした。
- ③杭長の30~50%であった拡大掘削部の長さを、杭長の30%未満も可能にして2m~杭長の50%とした。
- ④先端平均N値を求める際の平均方法を、支持力機構に即した合理的なものに変更した。
- ⑤先端支持力の評価位置を根固め部の上端に変更することによって先端支持力係数 $\alpha$ を $\alpha=430\text{kN/m}^2$ と大きくし、支持杭として用いても十分な先端支持力が得られるようにした。
- ⑥摩擦杭として用いても経済的になるように、根固め液の強度を杭先端のN値に応じて3段階に設定した。

##### 2.2 適用できる杭

適用できる杭は、最小で $\phi 440$ (節部径)~300mm(軸部径)、最大で $\phi 1000$ ~800mm(図-1)のHC-TOPパイルをはじめとする節杭(拡頭節

杭を含む)と、節杭と継いで使用するφ1000mm以下のPHC杭、PRC杭、SC杭、鋼管等のストレート杭(拡頭杭を含む)である。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。

杭のコンクリート強度 $F_c$ は $85\text{N/mm}^2$ (長期許容圧縮応力度 $24\text{N/mm}^2$ )と $105\text{N/mm}^2$ (同 $30\text{N/mm}^2$ )の2種類ある。また、肉厚はJIS規格に準じた標準厚杭のほかに、特厚杭も開発されている。 $F_c=105\text{N/mm}^2$ の特厚杭の許容軸力は、 $F_c=85\text{N/mm}^2$ の標準厚杭の2倍近い値となる。

また、拡頭節杭を使用することで、上杭に最大で節部径と同じ径のストレート杭を継ぐことができる。これによって、鉛直支持力に対応した大きな水平耐力が得られる。ストレート杭の杭材をPRC杭、鋼管杭、SC杭にすると、さらに

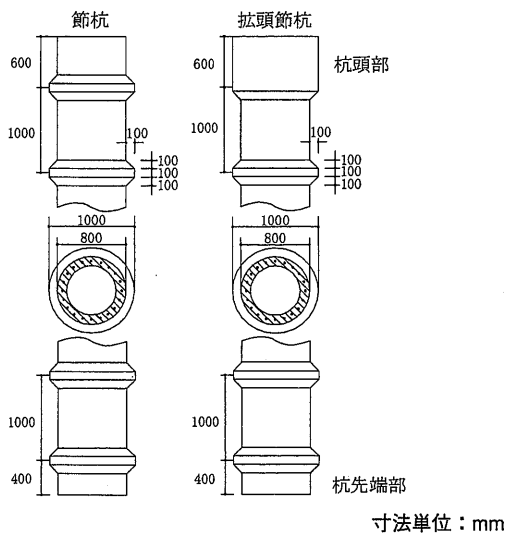


図-1 HC-TOPパイプ(φ1000-800mm)

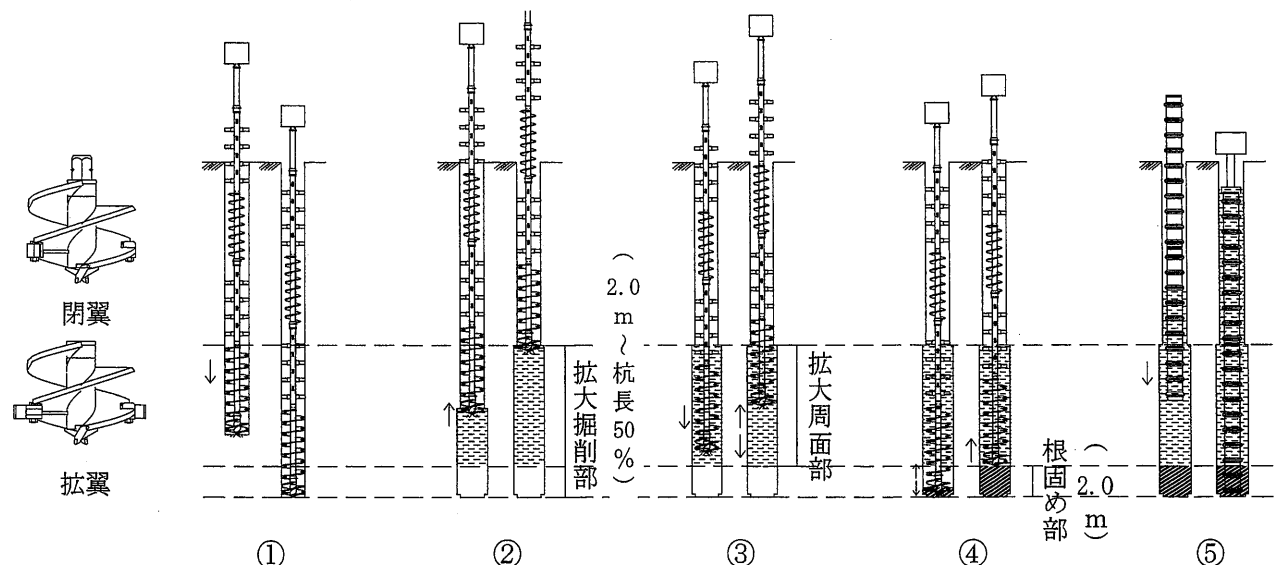


図-2 施工手順

大きな水平耐力を得ることができる。

### 2.3 地盤条件、施工長さ

認定で認められた地盤条件や最大施工長さは下記のとおりである。

- ①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)
- ②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)
- ③最大施工長さ：先端地盤が砂質地盤の場合は47m、礫質地盤の場合は49m、粘土質地盤の場合は45m。

### 2.4 施工手順

図-2にEX MEGATOP工法の施工手順を示す。以下、図の①～⑤について説明する。

- ①杭芯合わせ～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。この通常掘削部の径は、原則として節部径+50mmである。
- ②拡翼～拡大掘削  
先端部でオーガーを逆転させて拡大羽根を開き、所定の深度まで拡大掘削しながら引き上げる。この時、充填液(セメントミルク)を注入する。拡大掘削径は、断面積が1.5倍になるように、通常掘削径の約1.23倍としている。
- ③再掘削～混合攪拌  
正転に切り替えて図の拡大周面部を再掘削した後、逆転に戻し充填液と掘削土を混合攪拌してソイルセメント化する。ただし、拡大掘削部の長さが杭長の30%未満の場合は、通常

掘削部でも混合攪拌を行う工程が加わる。

#### ④根固め部の築造～引き上げ

掘削底より根固め液（セメントミルク）を注入しながら、拡大周面部同様に混合攪拌し根固め部を築造後、正転でオーガーを引き上げる。ただし、先端地盤が粘性土の場合には掘削土を排土するため、混合攪拌はしない。

#### ⑤杭の建て込み

鉛直性を確認しながら杭を建て込む。杭先端は原則として掘削底に定着させるが、これは有限要素法による検討結果<sup>1)</sup>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。

以上の施工過程で用いる機材のうちやや特殊なものは混合攪拌に用いるスリットスクリュー（通常のオーガスクリューに切り欠きを設けたもの）のみで、他はすべて汎用の施工機械を用いている。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。

拡大根固め工法では、確実に拡大部分が築造できるかどうか支持力発現の決め手になる。このため、数ヵ所の現場で実際に施工した杭を掘り起こして、杭周部や根固め部のソイルセメントの寸法を測っている。いずれの現場でも所定の形状や寸法を満たしていた。

### 2.5 根固め液の配合

根固め部は想定される最大荷重時でも壊れないことが必要である。そこで、このために必要な根固め材（ソイルセメント）の強度を検討する。杭先端支持力 $R_p$ は $R_p = \alpha \bar{N} A_p$ より求める（ $\alpha$ ：先端支持力係数、 $\bar{N}$ ：先端平均 $N$ 値、 $A_p$ ：杭先端の有効断面積）。 $\alpha = 430\text{kN/m}^2$ 、 $\bar{N} = 20$ 、40、60を想定すると、先端支持力度はそれぞれ8.6、17.2、25.8MN/m<sup>2</sup>となる。 $A_p$ は節部断面積を採用しているが、それより1.5倍以上面積の大きい根固め部の底面では応力が分散するため、根固め材の必要強度は上記の値より小さくてもよい。2.4節で述べた掘り起こした杭の根固め部から圧縮試験用の供試体を採取して、その4週強度を求めた結果、W/C= 65%の場合でも22.1～

27.4N/mm<sup>2</sup>と必要強度を十分満足する結果になっていた。

先端地盤が砂・礫地盤の場合、根固め材は地上から送った根固め液（セメントミルク）と掘削土砂を混合比（体積比）1：1として混合攪拌したものになる。根固め材の強度は根固め液より低下することから、この低下率を求めるためソイルセメントの圧縮試験を行った。以上の検討や試験から、根固め液の必要強度（圧縮強度の管理値）として以下の値を設定した。

$$\bar{N} \leq 20 \quad : 7\text{N/mm}^2$$

$$20 < \bar{N} \leq 40 \quad : 14\text{N/mm}^2$$

$$40 < \bar{N} \quad : 20\text{N/mm}^2$$

上記の強度になる根固め液の水セメント比W/Cは、GMTOP工法やMEGATOP工法のW/Cも考慮して次のように設定した。

$$\bar{N} \leq 20 : \text{W/C} = 100\% \text{ (GMTOP工法と同じ)}$$

$$20 < \bar{N} \leq 40 : \text{W/C} = 85\%$$

$$40 < \bar{N} : \text{W/C} = 65\% \text{ (MEGA TOP工法と同じ)}$$

それぞれのW/Cの根固め液を作り、その4週圧縮強度を確認した結果、必要強度の1.6～3.6倍の強度が得られていた。

### 2.6 杭周充填液の配合（標準型）

埋込み杭の周面抵抗は、①杭周一充填材間、②充填材内、③充填材－地盤間の三つのうち最も小さいせん断強度で決まることになる。大きな周面摩擦力を発揮させるためには、①と②が③より大きくなる必要があるが、節杭の場合は節部の支圧効果により①は非常に大きい。したがって、②は③よりも大きいことが求められる。これを満足するように、以下の手順で杭周充填液の配合を設定する。

- i) 想定した周面摩擦力の最大値よりも大きくなるように、充填材（ソイルセメント）のせん断強度を設定する。
- ii) 文献2) に示された式を用いて、i) が満足される充填材の圧縮強度を設定する。
- iii) 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）の必要圧縮強度を設定する。この低下率はソイルセメントの圧縮試験を行って求める。
- iv) 杭周充填液の管理強度を、iii) が満足されるように設定する。

v) 杭周充填液の配合を、iv) が満足されるように設定する。

以上の検討結果により、杭周充填液の諸元を以下のように定めた。

水セメント比  $W/C=100\%$

現場目標強度 圧縮強度管理値  $7N/mm^2$

混合比 充填液容積：攪拌対象土=1：2

これらの諸元はGMTOP工法と同じである。

なお、この杭周充填液の品質管理実績では、圧縮強度は $20N/mm^2$ 前後と必要強度の3倍近い値を示している。また、2.4節で述べた掘り起こした杭の杭周部から圧縮試験用のコアを採取して充填材の4週圧縮強度を求めた結果、ii) で求めた必要強度を十分に満足していた。

## 2.7 杭周充填液の配合 (膨張型)

膨張型は、杭周充填液に膨張材を加えることによって、周面摩擦力を標準型よりさらに増大したものである。前節で述べた検討に加えて、膨張量試験、圧縮強度試験、鋼管内の押抜き試験などを行った。図-3に膨張量試験の結果の一例を示す。これらの検討や試験の結果により、杭周充填液 (セメントミルク+膨張材) の諸元を以下のように決めた。

水粉体比  $W/(C+K)=85\%$  ( $K$ :膨張材)

膨張材置換率  $K/(C+K)=6\sim 7\%$

現場目標強度 圧縮強度管理値  $7N/mm^2$

混合比 充填液容積：攪拌対象土=1：3

上記の配合による膨張型の充填材と前節で述べた標準型の充填材を用いた場合の周面摩擦力を

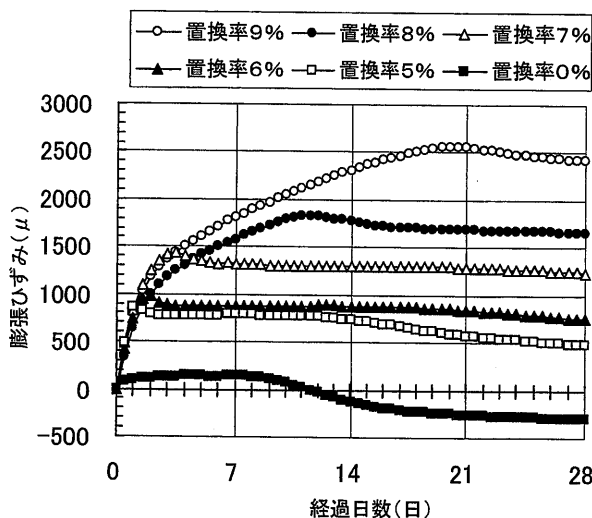


図-3 膨張量試験の結果の一例

比べるため、模型杭の押抜き試験を行った。模型地盤は、中央部に模型節杭 ( $\phi 60-45mm$ ) を挿入するための  $\phi 70mm$  の穴を形成できるようにセメント固化改良したシルトを、内径  $\phi 254mm$ 、板厚 $6.6mm$ の鋼管内に充填して作製した。1週間後に模型杭を設置して充填材を注入し、その2週間後に模型杭の押抜き試験を行った。試験結果を図-4に示すが、膨張型の方が大きな押抜き荷重になっている。充填材の厚さは、実際の杭では $100mm$ 以上であるのに対し、この実験では軸部でも $12.5mm$ に過ぎない。このため、実際の杭ではより大きな膨張効果が発揮されるものと考えられる。実地盤での載荷試験による膨張型の周面摩擦力の測定結果は、5章で示す。

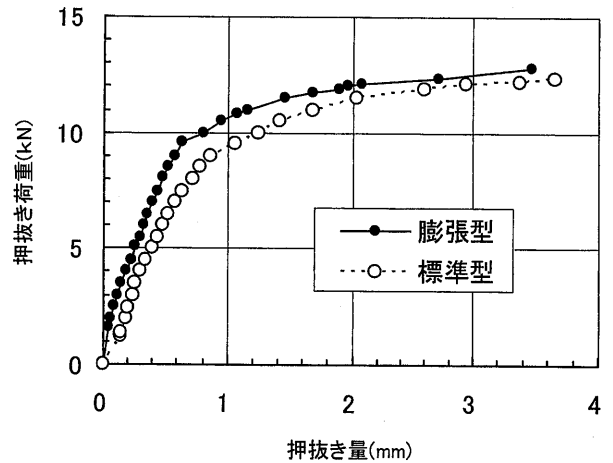


図-4 押抜き試験の結果

## 3. 載荷試験と鉛直支持力の算定式

押込み試験と先端載荷試験の静的載荷試験を2002年に改訂された地盤工学会基準<sup>3)</sup>に則り、全国の様々な地盤で39件行った。杭径は $\phi 440-300mm \sim \phi 1000-800mm$ 、杭長は $4\sim 49.5m$ であ

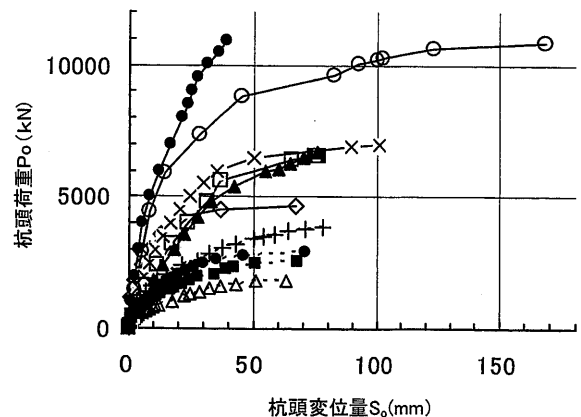


図-5 荷重-変位量曲線の一例

る。試験結果の一例として、**図-5**に先端が砂地盤に位置する試験杭の荷重-変位量曲線を示す。なお、杭径がφ1000-800mmの杭に対しては、先端載荷試験方法を応用した先端抵抗試験と周面抵抗試験を行った。これらの試験については文献4) に述べているので参照されたい。

試験杭に設置したひずみ計の値から杭体各部の軸力を求め、先端支持力 $R_p$ とひずみ計各区間の周面摩擦力 $R_{fi}$ に分けた。第2限界抵抗力時の $R_p$ や $R_{fi}$ の値に基づいて、次に示す支持力算定式の係数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ を求める。

$$R_a = \frac{1}{3} \left\{ \alpha \bar{N} A_p + (\beta \bar{N}_s L_s + \gamma \bar{q}_u L_c) \psi \right\}$$

ここに、

$R_a$  : 長期許容鉛直支持力 (kN)

$\bar{N}$  : 杭先端平均N値

$A_p$  : 杭先端の有効断面積 (m<sup>2</sup>)  $A_p = D_o^2 \pi / 4$

$D_o$  : 節部径 (m)

$\bar{N}_s$  : 杭周面の地盤のうち砂質地盤の平均N値

$\bar{q}_u$  : 杭周面の地盤のうち粘土質地盤の一軸圧縮強さの平均値 (kN/m<sup>2</sup>)

$L_s$  : 杭の周囲の地盤のうち砂質地盤に接する有効長さの合計 (m)

$L_c$  : 杭の周囲の地盤のうち粘土質地盤に接する有効長さの合計 (m)

$\psi$  : 節部の周長またはストレート杭の周長 (m)

$\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ の設定については、それぞれ4章、5章、6章で述べる。

## 4. 先端支持力

### 4.1 先端支持力の評価位置

先端支持力の評価位置は、GMTOP工法やMEGA TOP工法では節杭の支持力機構<sup>5)</sup>を考慮して最下端節部下面位置としていた。これをEX MEGATOP工法では、他の拡大根固め工法と同じように、根固め部の上端、すなわち杭先端から2m上方の位置に変更した。これによって先端支持力は、最下端節部下面位置での支持力と根固め部周面の摩擦力の合計となる。**図-6**に、その両者の内訳を示す。この図は、先端沈下量 $S_p$ が節部径 $D_o$ の10%を超えた試験に限っている。この図から分かるように、先端支持力のうち3割程度を根固め部周面の摩擦力が占めている。

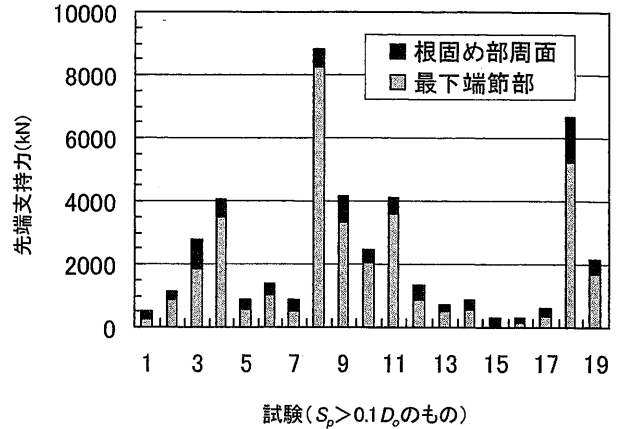


図-6 先端支持力の内訳

MEGATOP工法の先端支持力係数 $\alpha$ が310kN/m<sup>2</sup>であったのに対し、EX MEGATOP工法の $\alpha$ が後述するように430kN/m<sup>2</sup>と3割以上大きくなった原因の大半は、根固め部周面の摩擦力を先端支持力に加えたことによる。これに伴い、杭の周面摩擦力を算定する時には、根固め部すなわち杭先端から2mの間は算定範囲から除外する。

### 4.2 先端平均N値の算定方法

従来、先端平均N値 $\bar{N}$ を算定する際の平均範囲は、杭先端から上方に4d、下方に1d (d: 杭径) 間、もしくは上方に1d、下方に1d間とすることが多かった。しかし、杭先端より下方にも根固め部を持つ埋込杭の場合、これらの平均範囲では、杭の先端支持力に最も寄与する杭先端より下方の地盤<sup>6)</sup>を、**図-7 (a)**のように全く評価しないため不合理であるだけでなく、中間支持杭では**同図 (b)**のように危険側の値を与えてしまうことになる<sup>7)</sup>。

EX MEGATOP工法の $\bar{N}$ の算定方法を設定するにあたっては、支持力機構からみて合理的な範囲と方法にするため下記の検討を行った。

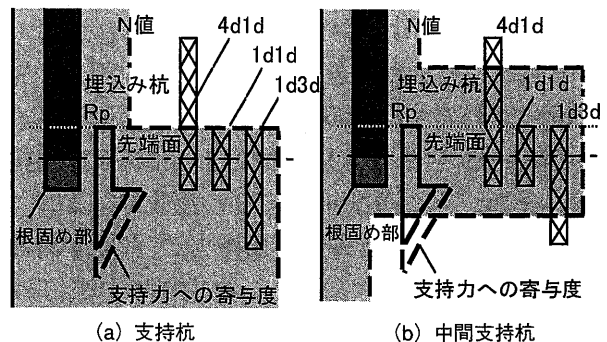


図-7 支持力に寄与する地盤と平均範囲

### (1) 平均範囲の検討

杭の先端抵抗の影響範囲は、高野らの実験<sup>6)</sup>によって杭先端から下方 $2d \sim 3d$ までの範囲であることが確かめられている。一方、節杭の場合、杭先端面だけでなく、最下端節部下面も先端面と同様な支持力機構になる<sup>5)</sup>。これらのことから、杭先端から下方に $2.5D$  ( $D$ :軸部径)までの範囲と、最下端節部下面から下方に $2.5D_0$  ( $D_0$ :節部径)の範囲を考え、両者の大きい方の値を $D_0$ で除すと $1.7 \sim 2.2$ になる。したがって、杭先端から下方には $2D_0$ の範囲を考えればよいことになる。また、先端支持力には前節で述べたように杭先端から $2m$ 間(根固め部)の摩擦力も含まれるため、この範囲の地盤も考慮する必要がある。以上より、先端平均 $N$ 値の平均範囲は「杭先端から上方に $2m$ 、下方に $2D_0$ 間」と設定する。なお、「上方に $2m$ 」を考慮するが、これは「良好な支持層に $2m$ 根入れしないとイケない」という意味ではない。

### (2) 平均方法の検討

杭先端から上方と下方では、先端支持力に寄与する程度が異なる。そこで、先端平均 $N$ 値を算定には、杭先端～上方 $2m$ 間の平均 $N$ 値を $N_U$ 、杭先端～下方 $2D_0$ 間の平均 $N$ 値を $N_L$ とし、それらに「重み」をつけて平均する方法を採用することとした。

「重み」を決めるために、それをいろいろ変えて求めた先端平均 $N$ 値と先端支持力との相関係数を比較したが、データ数が少ないためか有意な差は生じなかった。そこで、載荷試験結果のうち先端沈下量 $S_p$ が $D_0$ の10%を超えるデータを選んで、先端支持力に占める根固め部周面の摩擦力と最下端節部位置での支持力の割合をもとに、「重み」を決めることとした。

前節の図-6に示したように、根固め部周面の摩擦力は先端支持力の約3割を占めているが、先端地盤が砂質地盤と礫質地盤の試験杭に限って各杭の先端支持力に占める根固め部周面の摩擦力を求め、それらを平均すると26%となる。これから、(根固め部の周面摩擦力):(最下端節部位置での支持力)は、1:3になるといえる。以上より、先端平均 $N$ 値 $\bar{N}$ は次式で求めることとした。

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

同様に図-6のうち先端地盤が粘土地盤に位置する試験杭について、先端支持力に占める根固め部周面の摩擦力の割合を求めると42%となる。したがって、(根固め部の周面摩擦力):(最下端節部位置での支持力)はおおむね2:3になることから、 $\bar{N}$ は次式で求めることにする。

$$\bar{N} = (2N_U + 3N_L) / 5$$

以上述べた先端平均 $N$ 値の平均範囲と平均方法は、埋込み杭の支持力機構を反映したものであり、先端支持力に寄与する地盤を適切に評価した合理的なものといえる。

### 4.3 先端支持力の算定式

先端支持力 $R_p$ は次式により求める。

$$R_p = \alpha \bar{N} A_p$$

ここに、 $\alpha$ は先端支持力係数( $\text{kN/m}^2$ )、 $\bar{N}$ は4.2節の方法で求めた先端平均 $N$ 値、 $A_p$ は杭先端の有効断面積( $\text{m}^2$ )で節部閉塞断面積を採用する。載荷試験で得られた先端支持力(4.1節の位置で評価)を $A_p$ で除した先端支持力度 $q_p$ と、 $\bar{N}$ の関係を図-8に示す。 $\alpha$ は $q_p / \bar{N}$ の最小値として得られ、杭先端が砂質地盤および礫質地盤の場合は $\alpha = 430 \text{ kN/m}^2$ 、粘土地盤の場合は $\alpha = 350 \text{ kN/m}^2$ となる。ただし、これらの $\alpha$ の適用範囲は、試験での $\bar{N}$ の範囲や1113号告示の規定から、前者の場合は $\bar{N}$ が3以上の地盤とし、 $\bar{N}$ が60を超えるときは $\bar{N} = 60$ とする。後者の場合は、 $\bar{N} = 0$ の地盤から適用できるが、 $\bar{N}$ が57.2を超えるときは $\bar{N} = 57.2$ とする。

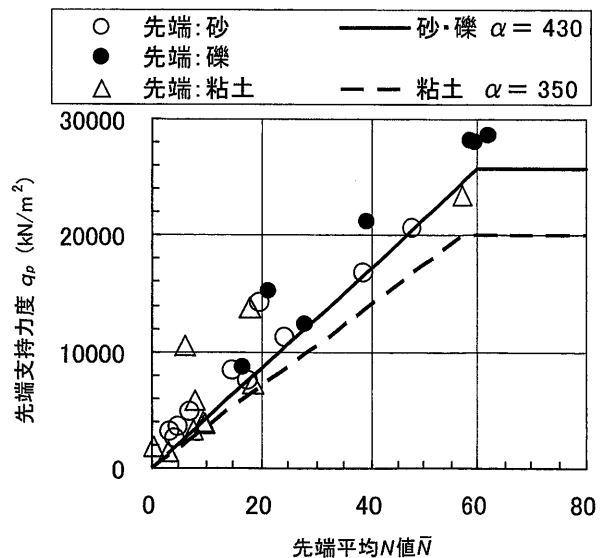


図-8  $q_p \sim \bar{N}$ 関係

#### 4.4 先端支持力係数 $\alpha$ に関する考察

前節の式で、 $R_p$ を最下端節部位置での支持力、 $\bar{N}$ を杭先端から下方に $2D_0$ 間の平均 $N$ 値、 $A_p$ を根固め部の断面積で評価して $\alpha$ を求めると、砂地盤と礫地盤ではおおむね $\alpha = 200 \sim 300 \text{ kN/m}^2$ の範囲に入る。この値は、埋込み杭直下の地盤の極限支持力度で評価した $\alpha$ といえる。

これに対して、根固め部の断面積の1/1.5倍の節部閉塞断面積で $\alpha$ を評価すると、 $R_p$ とは同じ値で、断面積のみ1/1.5倍になるため、 $\alpha$ は前述の値の1.5倍になる。

また、 $R_p$ を根固め部上端で評価すると、根固め部周面の摩擦力が加わることから、4.1節で述べたように $\alpha$ は $120 \text{ kN/m}^2$ 程度大きくなる。いま、地盤の極限支持力度で評価した $\alpha$ を $200 \text{ kN/m}^2$ とすると、 $A_p$ を節部閉塞断面積で評価し、先端支持力を根固め部上端で評価した時の $\alpha$ は、 $200 \times 1.5 + 120 = 420 \text{ kN/m}^2$ と、前節で得られた $430 \text{ kN/m}^2$ に近い値となる。

以上より、EX MEGATOP工法の $\alpha = 430 \text{ kN/m}^2$ は、地盤の極限支持力度で評価した $\alpha = 200 \text{ kN/m}^2$ を、 $A_p$ を節部閉塞断面積で、 $R_p$ を根固め部上端で評価した結果であることが分かる。

### 5. 砂質土地盤の周面摩擦力

#### 5.1 周面摩擦力の算定式

砂質土地盤中の周面摩擦力 $R_{fs}$ は、式 $R_{fs} = \beta \bar{N}_s L_s$   $\psi$ で算定される。この式の $R_{fs}$ として載荷試験で得られたひずみ計取り付け各区間の周面摩擦力(第2限界抵抗力時の値を採用)、 $L_s$ として各区間の距離、 $\psi$ として節杭は節部周長、ストレート杭は杭周長を用いて、周面摩擦応力度 $f_s = \beta \bar{N}_s$ を式 $f_s = R_{fs} / (L_s \psi)$ により求めた。図-9に標準型の場合の $f_s$ と $\bar{N}_s$ の関係を示す。 $\bar{N}_s$ は各区間で測定された $N$ 値の平均値を採用している。この図をもとに検討した結果、 $f_s$ の算定式は以下の式とした。

①ストレート杭(拡頭杭を含む)の $f_s$

$$f_s = \beta \bar{N}_s = 4.8 \bar{N}_s$$

②通常掘削部分の節杭の $f_s$

$$f_s = \beta \bar{N}_s = 32 + 5.3 \bar{N}_s$$

③拡大掘削部分の節杭の $f_s$

$$f_s = \beta \bar{N}_s = 40 + 6.0 \bar{N}_s$$

膨張型の場合、算定式は次のようになる。

□	ストレート杭:標準	- - -	$f_s = 4.8 \bar{N}_s$
○	節杭(通常掘削):標準	—	$f_s = 32 + 5.3 \bar{N}_s$
△	節杭(拡大掘削):標準	- - -	$f_s = 40 + 6.0 \bar{N}_s$

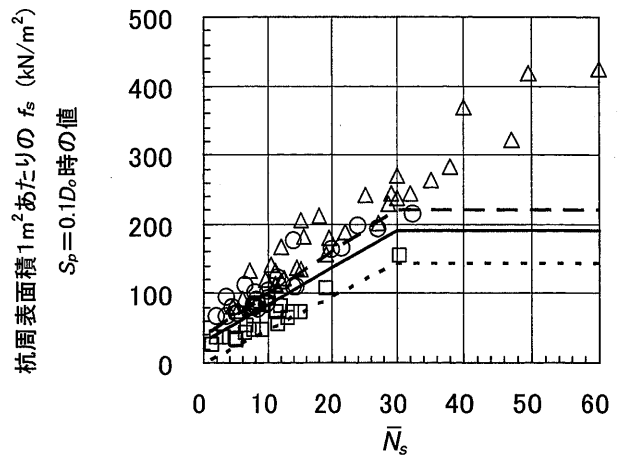


図-9  $f_s \sim \bar{N}_s$ 関係(標準型)

①ストレート杭(拡頭杭を含む)の $f_s$

$$f_s = \beta \bar{N}_s = 8.0 \bar{N}_s$$

②通常掘削部分の節杭の $f_s$

$$f_s = \beta \bar{N}_s = 20 + 9.0 \bar{N}_s$$

③拡大掘削部分の節杭の $f_s$

$$f_s = \beta \bar{N}_s = 31 + 9.0 \bar{N}_s$$

これらの式の適用範囲は、試験での $\bar{N}_s$ の範囲や1113号告示の規定から、 $\bar{N}_s$ は1以上の地盤とし、 $\bar{N}_s$ が30を超えるときは $\bar{N}_s = 30$ とする。

#### 5.2 周面摩擦力に関する考察

(1) 掘削表面積で評価した $f_s$

前節で述べた $f_s$ は、 $\psi$ を杭の周長(節杭は節部周長)で評価して求めたものである。これに対して、 $\psi$ を掘削面の周長で評価すると、節杭の $f_s$ は通常掘削部分でも拡大掘削部分でもほぼ同じ範囲の値になる。したがって、節杭の周面摩擦力は充填材-地盤間(すなわち掘削面)のせん断強度で決まっているものと判断される。

拡大掘削部分の算定式が通常掘削部分よりも大きな $f_s$ を与えるようになっているのは、実際は掘削面で決まるのにかかわらず、建築基準法の規定から杭周面で評価していることによる。

(2) ストレート杭の $f_s$

$f_s$ は、変位量 $S_i$ が5~20mmまでは急激に大きくなるのはどのデータも共通しているが、その後は、増え続けるもの、ほぼ一定値になるもの、最大値に達したあと減少するものの3パターンに分かれる。このうち、減少するものはストレート

ト杭の場合が多い。これは、①ストレート杭は節杭よりも浅い位置にある、②充填材―地盤間のせん断強度が最大値に達する前に、ストレート杭では杭周―充填材間のせん断強度が最大に達する、等の理由が考えられる。

同じストレート杭でも、膨張型は標準型よりも減少するものが少なく、 $f_s$ も大きいことを考えると、上記の②の影響が大きいものと推測される。最大値で整理すると、ストレート杭の $f_s$ は、図-9よりは節杭の $f_s$ に近づいてくる。

### (3) 標準型と膨張型の $f_s$ の比較

2.7節で膨張材の効果について述べたが、これを実地盤での載荷試験による $f_s$ で検証する。図-10は、標準型と膨張型の $f_s$ の比較図である。この図の $f_s$ は、 $L_s \psi$ を掘削面の面積で評価し、 $S_p$ が $0.1D_o$ までの範囲の最大値で整理したものである。この図から、 $\bar{N}_s$ が10以下では両者の $f_s$ はほぼ同じ値であるが、 $\bar{N}_s$ が10以上になると膨張型の方が大きい値になっていることが分かる。すなわち、膨張材の効果は $N$ 値が10以上の地盤で大きく発揮されることになる。5.1節で述べた $f_s$ の算定式も、このことを反映した式になっている。

### (4) 側圧係数 $K$

杭の周面摩擦力を有効応力理論から考えると、次式が成り立つ。

$$f = c + K \cdot \mu \cdot \sigma'_z$$

ここに、 $c$ は地盤の粘着力、 $K$ は側圧係数、 $\mu$

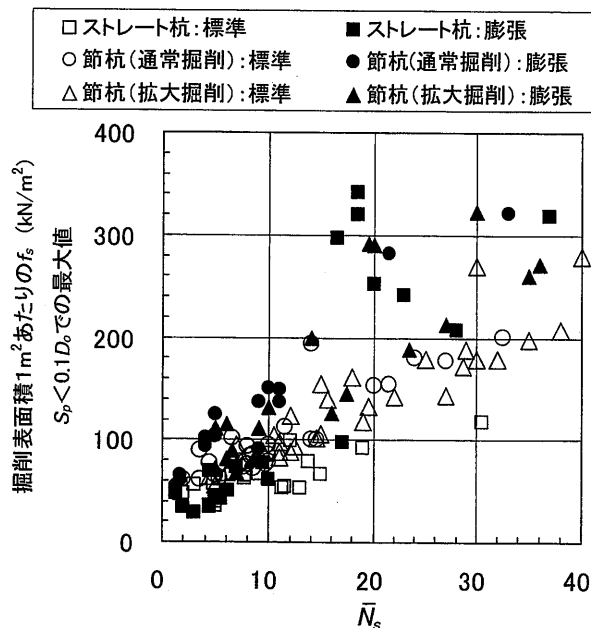


図-10 標準型と膨張型の $f_s$ の比較図

は摩擦係数、 $\sigma'_z$ は有効上載圧である。いま、砂質地盤を考えると $c=0$ とし、 $\mu = \tan \phi$ として内部摩擦角 $\phi$ を大崎式 $\phi = 15 + \sqrt{20N}$ により求める。 $\sigma'_z$ は、土の単位体積重量を $18\text{kN/m}^3$ 、水の単位体積重量を $10\text{kN/m}^3$ として、深度 $z$ と地下水位を考慮して求める。これらの値と載荷試験による $f_s$ から $K$ を逆算し、 $z$ との関係を描いたものが図-11である。

$K$ は深くなるにしたがって小さくなっており、一定値とはいえない。この傾向は小林らの検討結果<sup>9)</sup>でも同じであり、有効応力理論から周面摩擦力を求めようとする、 $K$ を深度によって低減する必要があることが分かる。

なお、 $K$ の大半は、静止土圧係数と受働土圧係数の間の値になっている。

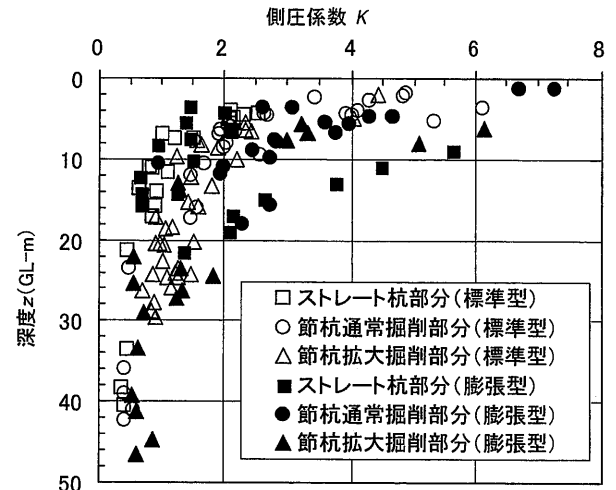


図-11 側圧係数 $K$ の深度分布

## 6. 粘性土地盤の周面摩擦力

### 6.1 周面摩擦力の算定式

粘性土地盤中の周面摩擦力 $R_{fc}$ は、式 $R_{fc} = \gamma \bar{q}_u L_c \psi$ で算定される。前章と同じ方法で周面摩擦応力度 $f_c = \gamma \bar{q}_u$ の算定式を作成した。標準型の場合の $f_c$ と一軸圧縮強さ $\bar{q}_u$ の関係を図-12に、 $f_c$ の算定式を以下に示す。

①ストレート杭(拡頭杭を含む)の $f_c$

$$f_c = \gamma \bar{q}_u = 0.7 \bar{q}_u$$

②通常掘削部分の節杭の $f_c$

$$f_c = \gamma \bar{q}_u = 20 + 0.5 \bar{q}_u$$

③拡大掘削部分の節杭の $f_c$

$$f_c = \gamma \bar{q}_u = 30 + 0.55 \bar{q}_u$$

膨張型の場合、算定式は次のようになる。



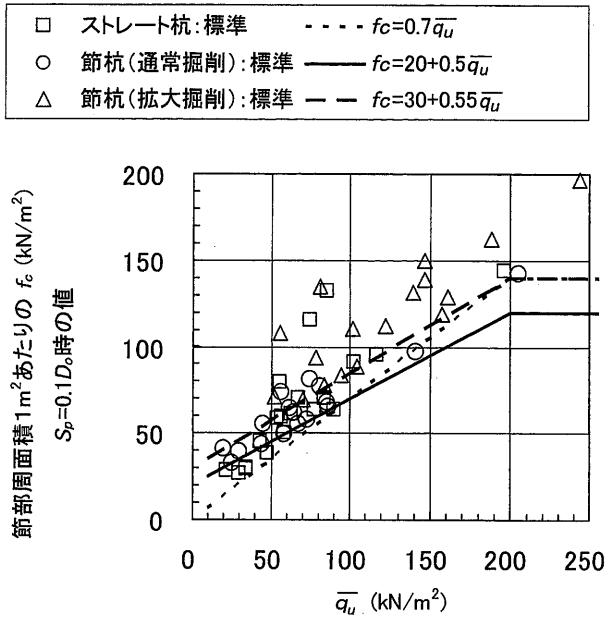


図-12  $f_c \sim \bar{q}_u$  関係 (標準型)

①ストレート杭 (拡頭杭を含む) の  $f_c$

$$f_c = \gamma \bar{q}_u = 0.9\bar{q}_u$$

②通常掘削部分の節杭の  $f_c$

$$f_c = \gamma \bar{q}_u = 15 + 0.9\bar{q}_u$$

③拡大掘削部分の節杭の  $f_c$

$$f_c = \gamma \bar{q}_u = 20 + 1.0\bar{q}_u$$

これらの式の適用範囲は、試験での  $\bar{q}_u$  の範囲や1113号告示の規定から、 $\bar{q}_u$  は10kN/m<sup>2</sup>以上の地盤とし、 $\bar{q}_u$  が200kN/m<sup>2</sup>を超えるときは  $\bar{q}_u = 200$ kN/m<sup>2</sup>とする。

## 6.2 周面摩擦力に関する考察

ストレート杭と節杭の  $f_c$  の違いや、標準型と膨張型の  $f_c$  の違いについては、砂質土の場合よりは差は小さいものの、5.2節の(1)~(3)とほぼ同じ傾向が見られている。本節では粘性土地盤を  $N$  値で評価した場合について考察する。

(1)  $q_u$  と  $N$  値の関係

一軸圧縮強さ  $q_u$  を  $N$  値から求める場合は、次の慣用式が使われることが多い。

$$q_u = N/8 \text{ (kgf/cm}^2) \doteq 12.5N \text{ (kN/m}^2)$$

図-13に、今回の一連の試験で調査した  $q_u$  と  $N$  値の関係を示す。慣用式は、 $q_u$  のほぼ下限値を与えることが分かる。最小自乗法によって回帰式を求めると、次式になる。

$$q_u = 37.8 + 13.3N \text{ (kN/m}^2)$$

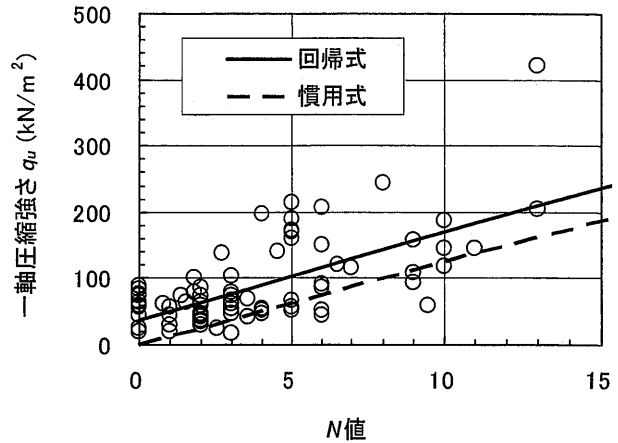


図-13  $N$  値と  $q_u$  の関係

(2)  $f_c$  と  $N$  値の関係

載荷試験による  $f_c$  と  $N$  値の関係を図-14に示す。この図には、前節で作成した標準型の  $f_c$  の算定式について、式中の  $q_u$  を(1)で述べた慣用式を用いて  $N$  値に変えた場合の換算式を併記している。載荷試験による  $f_c$  はいずれも換算式を満足していることが分かる。このことは、膨張型でも同様である。

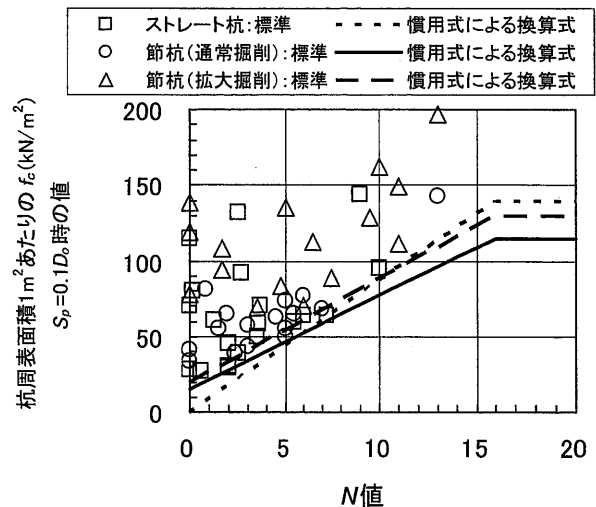


図-14  $f_c \sim N$  値関係

## 7. 支持力算定式の安全性

### 7.1 長期許容鉛直支持力

4~6章で示した支持力算定式による長期許容鉛直支持力  $R_{ac}$  の安全性を検討するため、載荷載荷試験の結果による長期許容鉛直支持力  $R_{at}$  との相関図を図-15に示す。全ての  $R_{at}$  が、 $R_{ac}$  を上回っている。両者の回帰式を求めると  $R_{at} = 1.26R_{ac}$  となり、載荷試験による実際の支持力は支持力式で計算される値より、平均で2割以上大きいことになる。このことから、支持力算定式は安全

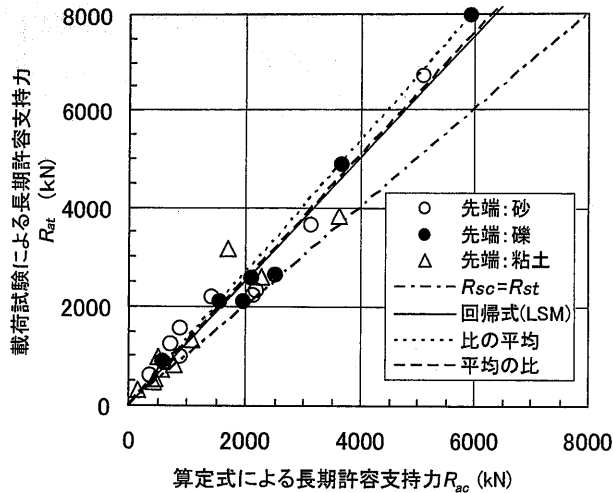


図-15 載荷試験と支持力式による  
長期許容鉛直支持力の相関図

な長期許容鉛直支持力を与えることが分かる。

## 7.2 長期許容支持力時の沈下量

図-16は、算定式による長期許容支持力時の沈下量と節径との比を杭長との関係として示したものである。沈下量杭径比は最大でも1.7%であり、大半は1%以下となっている。したがって、沈下量の面からみても算定式は安全な長期許容支持力を与えることが分かる。

ただし、杭長が長くなれば沈下量杭径比が大きくなる傾向があり、長尺杭では支持杭であっても沈下量の検討が必要になることが多い<sup>10)</sup>。

現在、GMTOP工法等の荷重-沈下量曲線の推定方法<sup>11)</sup>に続いて、EX MEGATOP工法にも適用できる推定方法も作成中である<sup>12)</sup>。

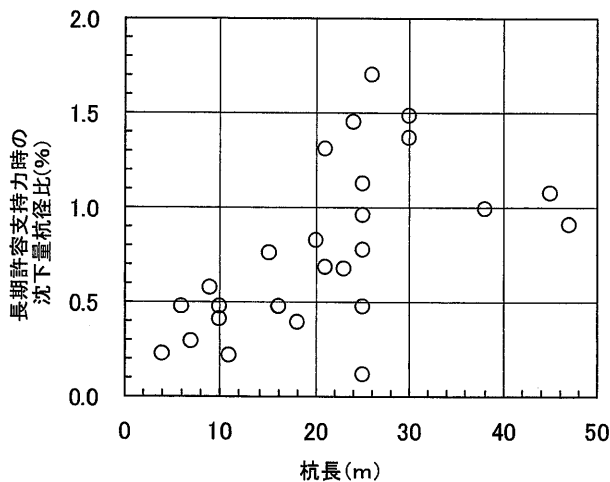


図-16 長期許容鉛直支持力時の  
杭頭沈下量杭径比と杭長の関係

## 8. まとめ

本報では、EX MEGATOP工法について、鉛直支持力を中心に紹介した。この工法の特徴をまとめると、以下のようになる。

- ①大きな鉛直支持力が得られる。
- ②摩擦杭から支持杭まで適用範囲が広い。
- ③使用できる杭材の種類が豊富なので、大きな軸力や水平力にも対応できる。
- ④拡大掘削部分の長さの調整や膨張型の採用によって、最適な周面摩擦力を選択できる。
- ⑤支持力機構に即した $\bar{N}$ の平均範囲により、不完全支持層に支持させても安全である。
- ⑥施工に用いる機材は汎用機なので、施工管理やメンテナンスが容易である。

今後も7.2節で述べた沈下量の推定方法を整備するなど、本工法の改良や改善に取り組んでいきたい。

### 【参考文献】

- 1) 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、2005.7
- 2) 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、2002.11
- 3) 地盤工学会基準：杭の鉛直載荷試験方法・同解説-第一回改訂版一、pp.61-104、2002.5.
- 4) 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、2005.7
- 5) 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、1987.4
- 6) 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、日本建築学会構造系論文報告集No.285、pp.51-62、1979.11
- 7) 小椋仁志：埋込み杭の先端平均N値の平均範囲に関する検討、日本建築学会大会（東北）学術講演梗概集構造B、pp.737-738、2000.9
- 8) 小椋仁志：杭の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
- 9) 小林勝巳・大西靖和：有効応力に基づく砂地盤における場所打ち杭の周面摩擦抵抗の評価、第36回地盤工学研究発表会、pp.1579-1580、2001.6
- 10) 日本建築学会：建築基礎構造設計例集、2004.2
- 11) 二見智子・小椋仁志：埋込み節杭のデータによる摩擦杭の荷重-沈下量関係推定法の提案、第44回地盤工学シンポジウム論文集、pp.127-132、1999.11
- 12) 伊藤淳志・小椋仁志・二見智子：埋込み節杭の摩擦応力-沈下量関係の近似曲線について、日本建築学会大会（北海道）学術講演梗概集構造B、pp.543-544、2004.8