

プレボーリング拡大根固め工法による 既製杭の引抜き抵抗

Pull-out Resistance of Precast Pile Installed by Root Enlarged and Solidified Prebored Pilling Method

小椋 仁志*1、本間 裕介*2、尾古健太郎*3、真鍋 雅夫*4、大島 章*5

1. はじめに

平成19年6月改正の建築基準法では、塔状比が4を超える建築物については、極限鉛直支持力と極限引抜き抵抗が、終局時に建築物に作用する押込み荷重と引抜き荷重を上回ることを確かめることが義務づけられた。また、地震時の短期引抜き力や、擁壁などに作用する長期引抜き力を検討することも増えている。しかし、押込み方向の支持力について国土交通大臣認定を受けた工法の場合、国交省告示第1113号第六では引抜き方向の支持力についても地盤の実況に応じて設定した支持力係数 κ 、 λ 、 μ を用いて算定できることが示されているにもかかわらず、これらを技術的に評価する性能評価は行われていない。このため、設計に際して必要になる引抜き抵抗の算定方法は設計者や建築確認機関によって異なっているのが現状である。

本報では、杭の引抜き抵抗（引抜き方向の鉛直支持力）の評価方法の考え方について検討する。また、今回、建築技術性能証明を取得した既製杭のプレボーリング拡大根固め工法（Hyper-MEGA工法。以下、本工法）の引抜き抵抗の評価方法について、その概要を紹介する。

2. 引抜き抵抗の算定方法の現状

国土交通大臣認定を受けた工法による杭の引抜き抵抗は、以下の方法によって算定するのが一般的である。

①杭の引抜き試験を行って求める。引抜き試験の方法は、

地盤工学会基準「杭の引抜き試験方法」によるのが一般的であるが、「鉛直交番載荷試験方法」や「先端載荷試験方法」によっても、引抜き抵抗は得られる。

②日本建築学会編「建築基礎構造設計指針（2001）」¹⁾に記載された式を用いる。この式は、載荷試験のデータをもとに、引抜き抵抗を押込み方向の周面摩擦力に対して、砂質地盤では2/3倍、粘性土地盤では同じ値としたものである。

③告示第1113号第五に定められた一般工法の許容引抜き抵抗の算定式を準用する。この算定式は、引抜き抵抗を砂質地盤、粘性土地盤ともに押込み方向の周面摩擦力0.8倍としたものである。なお、本告示に示されているのは許容支持力であるが、告示解説書では、極限支持力は短期許容支持力の3/2倍として算定することになっている²⁾。

④国土交通大臣認定式による周面摩擦力（押込み方向）に、③の低減率を乗じて求める。

⑤性能評価機関が行っている（任意）性能認証事業により引抜き抵抗に関する性能認証を取得した工法は、その認証された式によって求める。

以上のうち、設計時には④が比較的多いが、建築確認機関や適合性判定機関によっては①や③となることもある。

3. 杭の引抜き抵抗のメカニズム

一般に、引抜き抵抗は押込み時の周面摩擦力よりも小

*1 OGURA Hitoshi : ジャパンパイル(株)技術開発部、工博

*2 HONMA Yusuke : ジャパンパイル(株)基礎設計部、博士（工学）

*3 OKO Kentaro : ジャパンパイル(株)技術開発部

*4 MANABE Masao : 日本コンクリート工業(株)取締役

*5 OSHIMA Akira : 日本コンクリート工業(株)技術開発第三部

さくなる。これは次の2つの要因によるものとされている。

i) 上載圧効果：杭から地盤に伝播される鉛直応力が、押し込み時には地盤の上載圧を増加させるように作用するのに対し、引抜き時には逆に上載圧を減少させるように作用する。その結果、杭周面に作用する側圧（上載圧×側圧係数）も小さくなり、周面摩擦力も押し込み時よりも小さくなる。

ii) ポアソン比効果：杭を引き抜くと、杭体は伸びる。その際、ポアソン比の割合で杭体がわずかに細くなる。このため、杭周面に作用する側圧が小さくなり、周面摩擦力も押し込み時よりも小さくなる。

2つの要因のうち、ポアソン比効果はコンクリート系の杭の場合非常に小さいことを、平山が指摘している³⁾。このため、ここでは上載圧効果のみについて考える。砂地盤の場合、一般に杭の押し込み方向の周面摩擦応力度 f は次式で表される（ここでは、地下水位は考えない）。

$$f = \mu K \gamma Z \quad (1)$$

ここに μ ：摩擦係数 K ：側圧係数

γZ ：上載圧 (kN/m^2)

γ ：単位体積重量 (kN/m^3) Z ：深さ (m)

図-1は、本工法による杭の押し込み試験で得られた砂地盤の f と Z との関係⁴⁾である。深くなると f は大きくなる傾向は見られ、相関係数 r は0.652となる。 $r = 1$ にならないのは、 K が一定値ではなく、図-2⁵⁾のように深くなるほど小さくなる傾向があること等による。

いま、杭に f が作用した時に地盤に付加される鉛直応力を $\Delta \sigma_z$ とすると、押し込み時の上載圧は $\gamma Z + \Delta \sigma_z$ 、引抜き時の上載圧は $\gamma Z - \Delta \sigma_z$ となる。 μ や K は荷重の作用方向には影響されないとすると、押し込み時の周面摩擦力 f_p と引抜き時の周面摩擦力 f_t は (2) 及び (3) 式で表

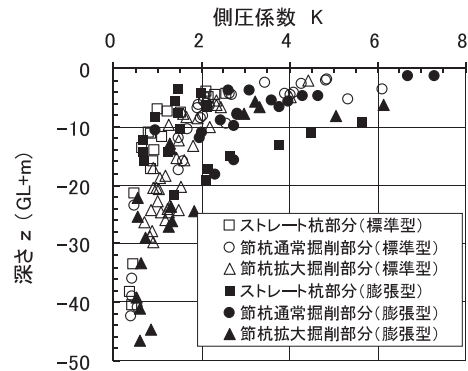


図-2 側圧係数 K の深さ分布（文献⁵⁾の図-11）

される。

$$f_p = \mu K (\gamma Z + \Delta \sigma_z) \quad (2)$$

$$f_t = \mu K (\gamma Z - \Delta \sigma_z) \quad (3)$$

したがって、 f_t の f_p に対する比は (4) 式になる。

$$f_t / f_p = (\gamma Z - \Delta \sigma_z) / (\gamma Z + \Delta \sigma_z) \quad (4)$$

$\Delta \sigma_z$ を定量的に求めることは難しいため、杭周に作用する f の a 倍 ($a = 0 \sim 1$) の $\Delta \sigma_z = a \times f$ と仮定する。図-3は、(4)式において、地盤の γ を 17 kN/m^3 とし、 f として図-1に示した f と深さ Z の関係の回帰直線 $f = 38.9 + 7.6Z$ から算定した値を用いて求めた f_t / f_p と深さ Z の関係である。

この図から、① a によって f_t / f_p が大きく異なること、② 深くなるほど f_t / f_p は大きくなること、③ $GL - 10 \text{ m}$ 以浅では深さの影響が大きいが、 $GL - 10 \text{ m}$ 以深では f_t / f_p はほぼ一定値になることなどが分かる。

図-4は、場所打ちコンクリート杭の押し込み試験と先端載荷試験による周面摩擦応力度を比較したものである⁶⁾。先端載荷試験は杭先端部に設置したジャッキで杭を押し

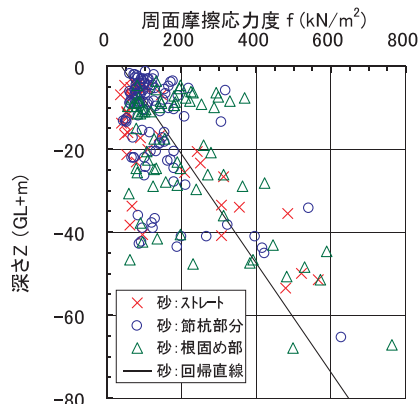


図-1 周面摩擦応力度 f ～深さ Z 関係（文献⁴⁾の図-6に加筆）

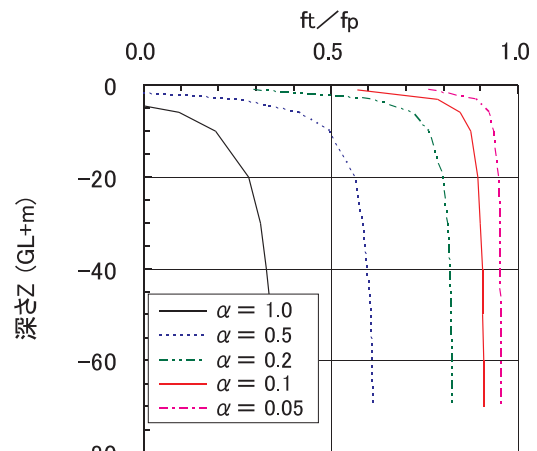


図-3 (4)式による f_t / f_p と深さ Z の関係

記号	押し込み試験		先端載荷試験	
	断面	深さ (GL-m)	断面	深さ (GL-m)
A	②～③	16.17～19.67	③～⑤	15.49～20.19
B	③～④	19.67～22.17	⑤～⑦	20.19～22.76
C	④～⑥	22.17～25.47	⑦～ジャッキ	22.76～25.33

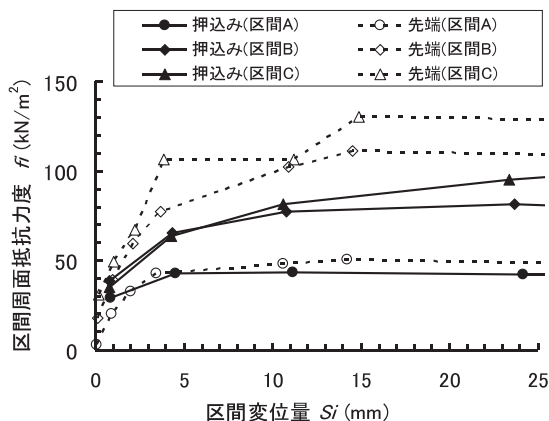


図-4 押し込み試験と先端載荷試験の周面摩擦応力度の比較
(文献⁶⁾の図-9)

上げるもので、ポアソン比効果の小さいコンクリート杭では、得られた周面摩擦力は向きが同じ f_t と同等になる。この論文では、 f_t は浅い位置では押し込み試験の周面摩擦力 f_p とはほぼ同じ値になっているが、深くなると f_p よりも大きくなっている。本論文は $f_t/f_p > 1$ の例ではあるが、深くなるほど f_t/f_p が大きくなる傾向は確認できる。

なお、粘性土地盤の場合には、周面摩擦力は地盤の粘着力が支配的になるため、上載圧や深さにはあまり影響されないものと考えられる。

4. 本工法の周面摩擦力（押し込み方向）

4.1 施工法の概要

本工法（Hyper-MEGA工法）は、拡大倍率を杭径のほ

ぼ1～2倍の範囲で任意の値に設定できることを最大の特徴とするプレボーリング拡大根固め工法である。拡大掘削する径や長さが多様で、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）と日本コンクリート工業(株)（以下、NC）が共同開発し、平成18年5月15日に国土交通大臣の認定を受けている（認定番号TACP-210～215）。

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、鋼管杭等のストレート杭（拡頭杭を含む）が適用できる。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。

本工法を適用できる地盤条件等は、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
- ②杭周地盤：砂質地盤（礫質地盤を含む）、粘土質地盤
- ③最大施工深さ：先端地盤が砂質・礫質地盤では68.5m（JP）・68.0m（NC）、粘土質地盤では60.0m。

施工手順を図-5に、主な特徴を以下に示す。

- 1) 掘削孔は、通常掘削部と拡大掘削部に分けられる。
- 2) 通常掘削部の径は、基準掘削径 D_s （根固め部に位置する節杭の節部径 $D_o + 50\text{mm}$ ）を原則とする。
- 3) 拡大掘削部の径 D_e は、 D_s に対して1～2倍の範囲内で任意に設定できる（ $D_e = \omega D_s$ 、 ω ：拡大比）。
- 4) 拡大掘削部の長さ L_e 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、任意に設定できる。
- 5) 拡大ヘッドは、逆転等により拡翼する機械式と、地上からの送油により拡翼する油圧式の2種類使用でき

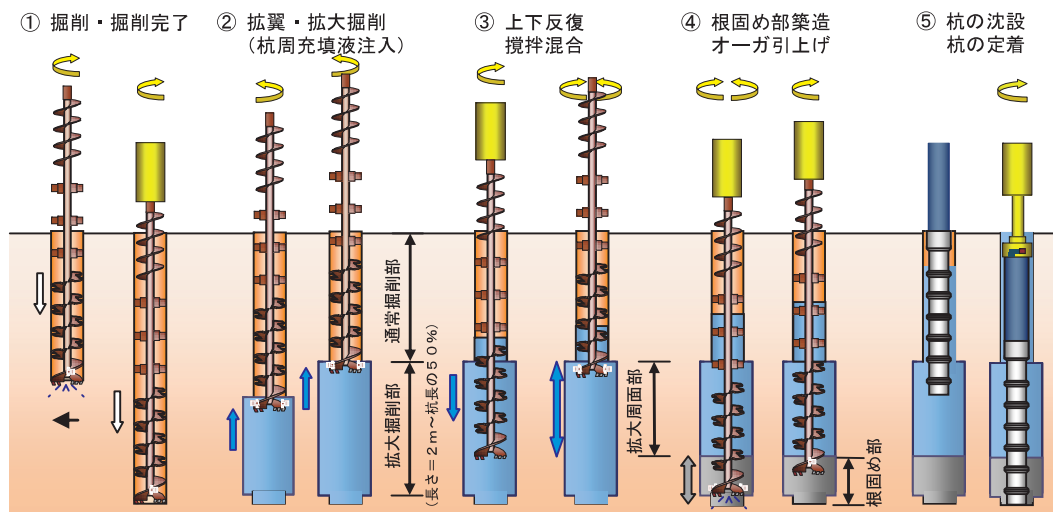


図-5 Hyper-MEGA工法の施工手順

る。

- 6) 拡大周面部は、所定の範囲でオーガーを上下反復することにより、杭周充填液と掘削土を混合攪拌してソイルセメント化する。L_eが短いときは通常掘削部の一部でも、これを行う。杭周充填液は、通常のセメントミルク（W/C=100%）のほかに、膨張材を加えたものもある。前者を標準型、後者を膨張型と呼んでいる。
- 7) 根固め部は、掘削底より上方に長さL_g（L_gは2mとD_eの大きい方の値）の範囲において、所定の強度の根固め液を注入しながら、拡翼状態で上下反復を繰り返して築造する（以上は先端地盤が砂質・礫質地盤の場合で、粘土質地盤の場合は少し異なる）。
- 8) 杭先端は原則として掘削底に定着させる。

4.2 周面摩擦力（押込み方向）

プレボーリング工法杭の周面摩擦力は、①杭体－充填材間の摩擦力、②充填材内のせん断耐力、③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。本工法では、②の充填材内のせん断耐力では決まらないように、杭周充填液の強度を設定している。

本工法の支持力式を検討するために、押込み試験と先端載荷試験の静的載荷試験を地盤工学会基準（2002）に準拠して、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。載荷試験杭に取り付けたひずみ計の測定値から周面摩擦応力度を算定し、これを地盤定数と関係づけることによって(5)及び(6)式の支持力式を作成した。なお、詳細は文献⁷⁾を参照されたい。

$$\text{砂質土} \quad F_s = f_s L_s D \pi \quad (\text{kN}) \quad (5)$$

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

$$\text{粘性土} \quad F_c = f_c L_c D \pi \quad (\text{kN}) \quad (6)$$

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

ここに、

F_s：砂質地盤の周面摩擦力（kN）

f_s：砂質地盤の周面摩擦応力度
（kN/m²）

L_s：杭が砂質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）

β：砂質地盤の周面摩擦係数

N_s：砂質地盤の平均N値

F_c：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）

γ：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）

ストレート杭の場合、杭体と充填材との間ですべりが生じることがあると考えられることから、周面摩擦力は杭径に比例する形の式とする。f_sの算定に用いるβについては、標準型は図-6に示す33個のデータからβ=5.0と、膨張型は33個のデータからβ=8.0となる。また、f_cの算定に用いるγについては、標準型は図-7に示す26個のデータからγ=0.7と、膨張型は27個のデータからγ=0.9となる。

節杭の場合は、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が考えられない。したがって、節杭の周面摩擦力は充填材と地盤との間の摩擦力で決まり、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、節杭の周面摩擦力は、節部径D_oではなく掘削径（ここではωD_o）に比例する形の式とする。すなわち、β、γの算定式にωが入ることになる。f_sの算定に用いるβについては、標準型は図-8に示す33個のデータからβN_s=(30+5.5N_s)ωを満たすβと、膨張型は51個のデータからβ=9.5ωとなる。また、f_cの算定に用いるγについては、標準型は図-9に示す33個のデータからγq_u=(20+0.5q_u)ωを満たすγと、膨張型は38個のデータからγ=1.0ωとなる。ただし、通常掘削部分の範囲にある節杭部分は、ω=1としてf_sやf_cを算定する。

なお、以上の算定式の適用範囲は、載荷試験データの範囲をもとに、砂質地盤の場合はN_sが1以上、粘性土地盤の場合はq_uが10kN/m²以上である。また、N_sが30を超えときはN_s=30として、q_uが200kN/m²を超えときはq_u=200kN/m²として、f_sやf_cを算定する。

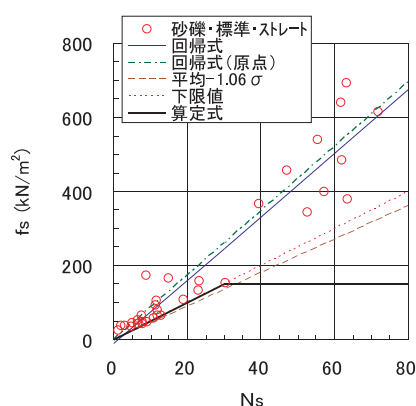


図-6 f_s～N_s 関係（ストレート杭）

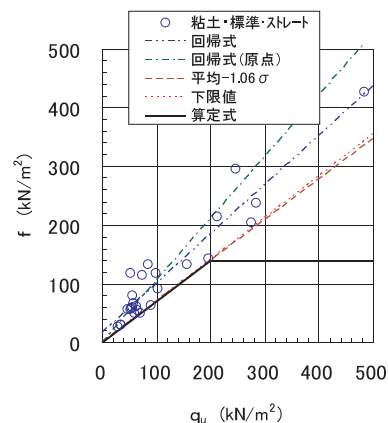


図-7 f_c～q_u 関係（ストレート杭）

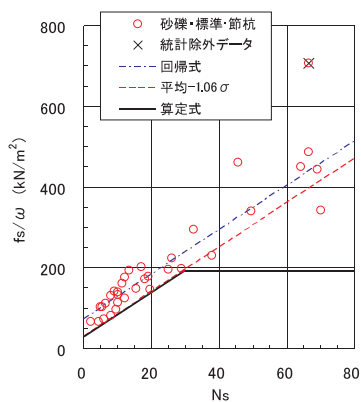


図-8 $f_s/\omega \sim N_s$ 関係（節杭）

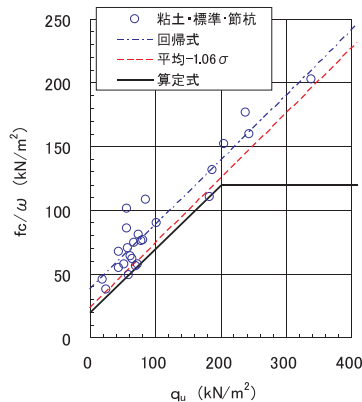


図-9 $f_c/\omega \sim q_u$ 関係（節杭）

5. 押込み方向と引抜き方向の比較载荷試験

引抜き抵抗は、第2章で述べた建築基礎構造設計指針や告示1113号のように、押込み方向の周面摩擦力に対する割合で評価するのが合理的と考えられる。そこで、今回、押込み方向と引抜き方向を比較した鉛直载荷試験を多数行って、その結果から、4.2節で示した押込み方向の β 、 γ に対する比（低減率）を検討し、本工法の引抜き方向の支持力算定式を作成することとした。

押込み試験と引抜き試験は、両者を比較できるように同じ条件（地盤、杭種（ストレート杭、節杭）、杭径、杭周充填材）の杭に対して、表-1に示す全国4ヶ所の地盤で2対ずつ地盤工学会基準にしたがって行っている。また、ひずみ計を同じ位置に設置し、同じ区間の周面摩擦力を測定した。8件の引抜き試験に用いた杭の杭径は $\phi 400 \sim \phi 1200$ （節杭は $\phi 4440 \sim 300 \sim \phi 1200 \sim 1000$ ）、杭長（施工長）はGL-4 ~ 10 m、拡大比は1.0 ~ 2.0 、杭周充填材は標準型と膨張型と、最大施工長さを除いて前章で述べた認定の範囲を満たしている。試験に用いた杭は、ひび

表-1 载荷試験の一覧表

記号	工事場所	载荷方向	節杭の杭径 (mm)	ストレート杭の杭径 (mm)	標準型／膨張型	拡大比 ω	施工長 (GL-m)
Y1V	加東市	押込み	1200-1000	—	標準型	1.0	10
Y1T	加東市	引抜き	1200-1000	—	標準型	1.0	10
Y2V	加東市	押込み	440-300(下2m)	300(上8m)	標準型	2.0	10
Y2T	加東市	引抜き	440-300(下2m)	300(上9m)	標準型	2.0	10
S1V	愛西市	押込み	500-400	—	標準型	1.23	10
S1T	愛西市	引抜き	500-400	—	標準型	1.23	10
S2V	愛西市	押込み	—	500	標準型	1.23	4
S2T	愛西市	引抜き	—	500	標準型	1.23	4
K1V	川越市	押込み	440-300	—	標準型	2.0	10
K1T	川越市	引抜き	440-300	—	標準型	2.0	10
K2V	川越市	押込み	—	450	膨張型	1.0	(23)
K2T	川越市	引抜き	—	450	膨張型	1.0	10
T1V	富里市	押込み	—	1200	標準型	1.0	7.5
T1T	富里市	引抜き	—	1200	標準型	1.0	7.5
T2V	富里市	押込み	—	1200	膨張型	1.0	7.5
T2T	富里市	引抜き	—	1200	膨張型	1.0	7.5

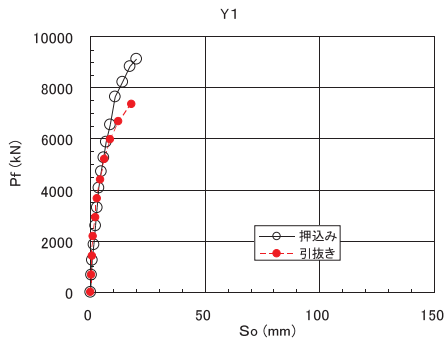
割れが発生しないように、原則としてSC杭を用いている（節杭はSC杭に鋼製の節部を溶接）。杭先端部分にも根固め液ではなく杭周充填液を注入している。

一方、表-1に示した押込み試験には、4.2節で示した押込み方向の β 、 γ の算定にも用いた試験も含まれている。新たに行った試験では反力装置の容量を低減するために、杭先端部分にも根固め液ではなく杭周充填液を注入して先端支持力を低減している。また、先端抵抗が生じないようにした治具を取り付けた試験杭もある。

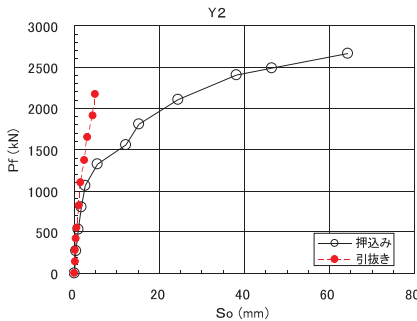
図-10(a)～(h)は、同じ場所で行った押込み試験と引抜き試験によって得られた周面摩擦力Pf

～杭頭変位量Soを比較したものである。Pfは、杭頭荷重から、杭先端荷重（ストレート杭では杭先端に最も近いひずみゲージ位置の軸力、節杭の場合は最下端節部下位置位置での軸力）を差し引いて求めている。図-10では、(b)を除いて引抜き時のPfが押込み時よりも小さくなっており、第3章で述べたことが確認できる。

次に、杭に取り付けたひずみ計の値から各断面の軸方向力を求め、各区間の軸力差をその区間の杭周面積Aiで除して、区間周面摩擦応力度fiを算定する。Aiの計算に用いる杭径は、節杭（拡張節杭を含む）の場合は節部径Do、ストレート杭の場合は杭径Dである。なお、区



(a) Y1：加東市 $\phi 1200 \sim 1000$ (10m)



(b) Y2：加東市 $\phi 440 \sim 300$ (2m) + $\phi 300$ (8m)

図-10 周面摩擦抵抗～杭頭変位量関係の比較

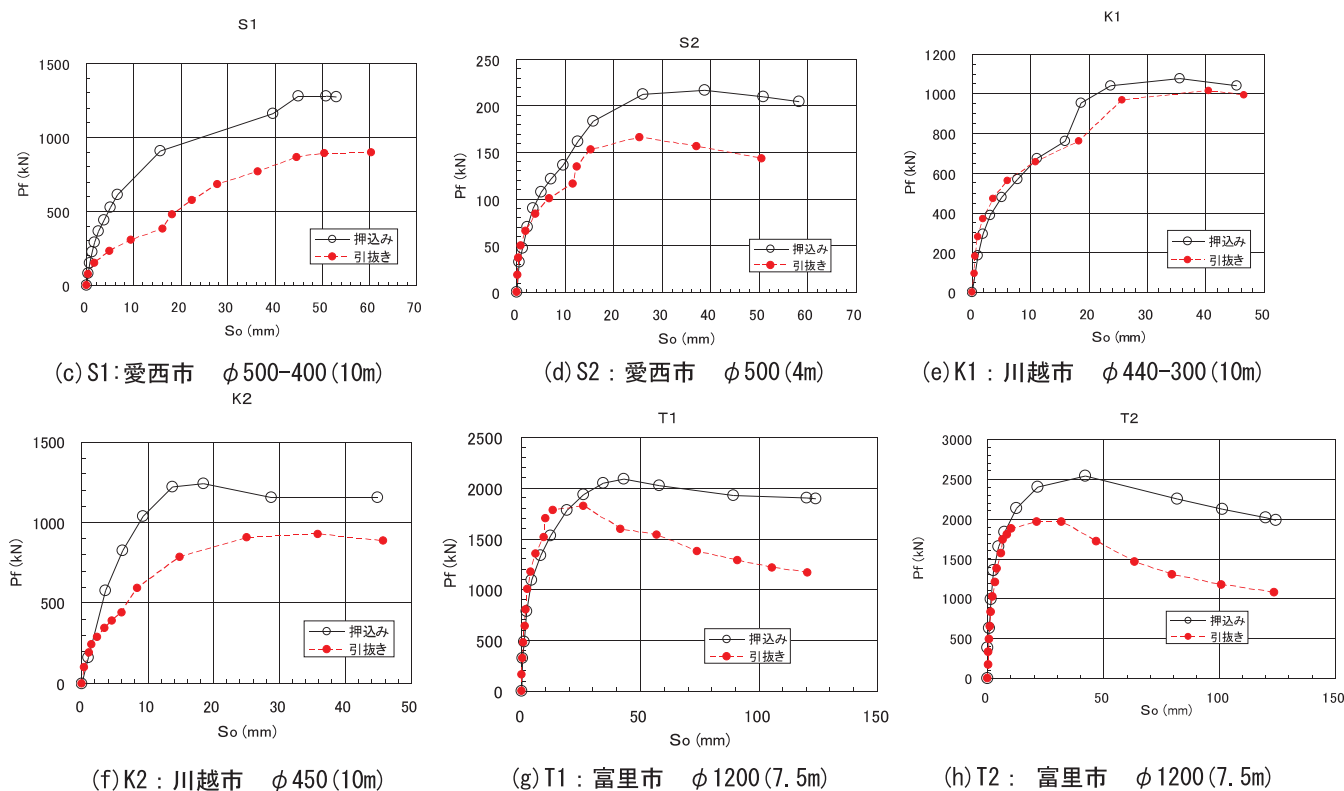


図-10 周面摩擦抵抗～杭頭変位量関係の比較

間に通常掘削部から拡大掘削部が変わる部分を含む場合は、その部分の引抜き抵抗には支圧抵抗も作用しているものと考えられる。しかし、試験データには他区間と顕著な差は見られなかった。これは、杭周充填材の強度が低いことから、支圧抵抗は小さいためであろう。したがって、拡大掘削部が変わる部分を含む区間も他区間と同様に扱っている。図-11に、 f_i と区間平均変位量 S_i の関係の一例を示す。

得られた f_i の値から、押込み方向の f_i に対する引抜

き方向の f_i を検討する。 f_i には、図-10の各図に示した P_f が、先端変位量が杭径の1/10までの範囲で最大になった時点（第2限界抵抗力）での値を採用している。各区間の f_i の最大値を採用する考え方もあるが、それらの合計が杭全体の P_f を上回ることもあることから、ここでは参考値にとどめることとした。なお、杭周充填液を膨張型とした節杭のデータがないことから、比較する β 、 γ には標準型の値を用いている。

6. 砂質地盤の引抜き方向の周面摩擦応力度

第5章で得られた f_i のうち周辺地盤が砂質土の32組のデータについて、押込み方向と引抜き方向の周面摩擦応力度を対比して、引抜き方向の周面摩擦応力度を検討する。図-12は、 f_{st} （砂質土の引抜き方向の f_i ）と押込み方向の f_i の相関図である。両者の比 η （引抜き／押込み）は0.342～2.464の範囲（平均0.859）となっている。また、参考として、各区間の f_i の最大値で検討すると、 η は0.469～1.496の範囲（平均0.819）となる。図-13は、 f_{st} と4.2節で述べた標準型の β から算定した周面摩擦応力度の相関図である。両者の比は、0.806～2.334の範囲（平均1.215）となった。

これらの結果から、砂質地盤における引抜き方向の周

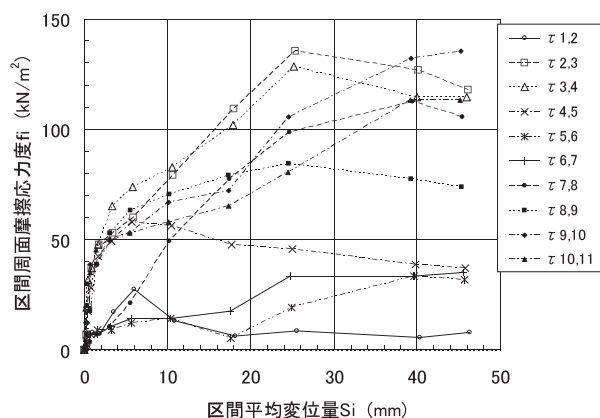
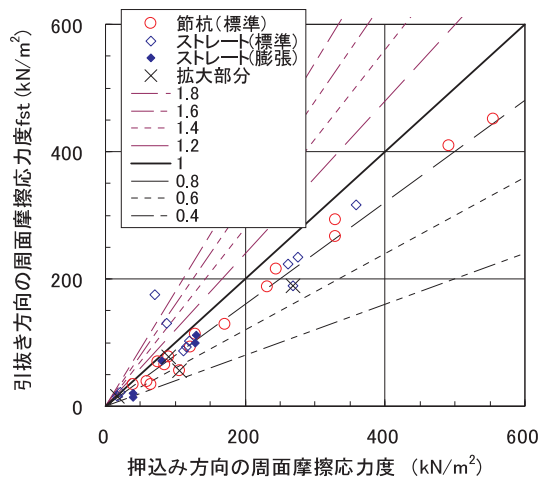
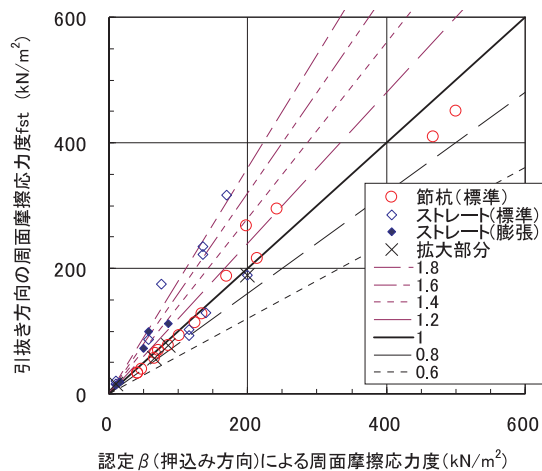


図-11 ひずみ計各区間の周面摩擦応力度～変位量関係 (K1T: 川越市 φ440-300 (10m) 引抜き試験)

図-12 f_{st} と押し込み方向の周面摩擦応力度の相関図図-13 f_{st} と β による周面摩擦応力度との相関図

面摩擦力 F_{st} は、(7)式で算定するのが妥当と考えられる。

$$F_{st} = 0.8 \beta N_s L_s \psi \quad (7)$$

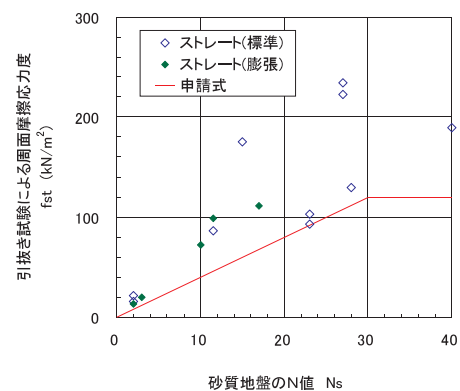
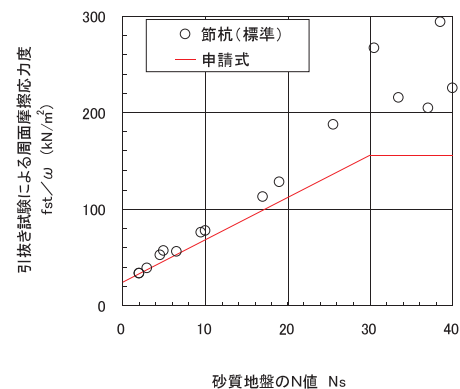
(記号は(5)式と同じ)

係数の0.8は、 η の平均値0.859を参考にしつつ、安全側の算定式になるように、 f_{st} と β による周面摩擦応力度の比の最小値0.806から設定したものである。

図-14はストレート杭の f_{st} と、図-15は節杭の f_{st}/ω と、杭周地盤のN値 N_s との関係である。 f_{st} や f_{st}/ω のデータはいずれも算定式を上回っていることから、(7)式は安全側の値を与える算定式であることが分かる。

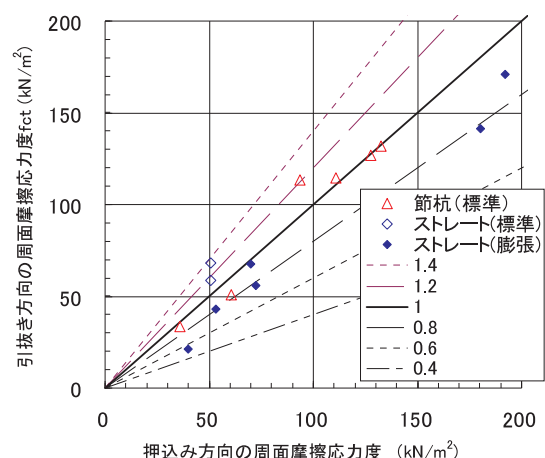
7. 粘土質地盤の引抜き方向の周面摩擦応力度

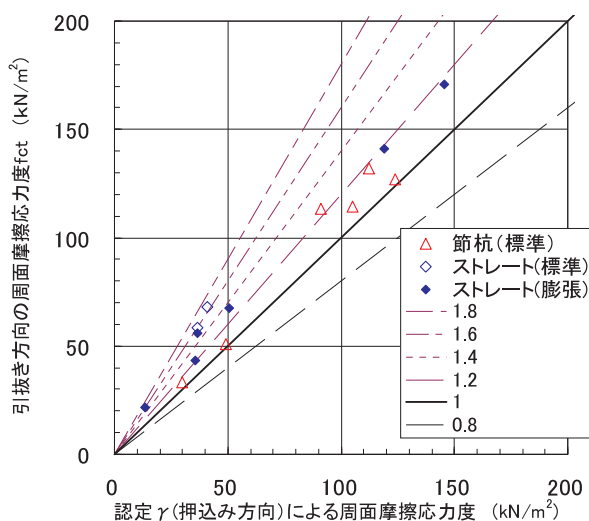
第5章で得られた f_i のうち周辺地盤が粘土質地盤の14組のデータについて、押し込み方向と引抜き方向の周面摩擦応力度を対比して、引抜き方向の周面摩擦応力度を検討する。図-16は、 f_{ct} (粘性土の引抜き方向の f_i)と押し込み方向の f_i の相関図である。両者の比 η は0.537～

図-14 $f_{st} \sim N_s$ 関係 (ストレート杭)図-15 $f_{st}/\omega \sim N_s$ 関係 (節杭)

1.342の範囲(平均0.947)となっている。また、参考として、各区間の周面摩擦応力度の最大値で検討すると、 f_t/f_p は0.680～1.343の範囲(平均0.953)となる。これらの値は砂質地盤よりも大きく、周面摩擦力の多くを粘着力に依存する粘土質地盤の場合は、砂質地盤よりも上載圧の減少の影響が小さいことが分かる。

図-17は、 f_{ct} と4.2節で述べた標準型の γ から算定した周面摩擦応力度の相関図である。両者の比は、1.022～

図-16 f_{ct} と押し込み方向の周面摩擦応力度の相関図

図-17 f_{ct} と γ による周面摩擦応力度の相関図

1.665の範囲（平均1.282）と、前者は後者を上回っている。

これらの結果から、粘土質地盤における引抜き方向の周面摩擦係数 F_{ct} は、(8)式で算定するのが妥当と考えられる。

$$F_{ct} = 0.9 \gamma q_u L c \psi \quad (\text{kN}) \quad (8)$$

(記号は(6)式と同じ)

係数の0.9は、 f_{ct} と γ による周面摩擦応力度の比の最小値は1.022であるが、 η の平均値が1を下回る0.947であることを考えて、安全側の算定式になるように決めたものである。

図-18はストレート杭の f_{ct} と、図-19は節杭の f_{ct}/ω と、杭周地盤の一軸圧縮強さ q_u との関係である。 f_{ct} や f_{ct}/ω のデータはいずれも算定式を上回っており、(8)式は安全側値を与える算定式であることが分かる。

8. 本工法による杭の引抜き方向の鉛直支持力

以上述べたことを基にして、本工法による杭の引抜き方向の鉛直支持力の算定方法に関して、(財)日本建築総合試験所より建築技術性能証明を取得した。その算定式を以下にまとめる。

8.1 引抜き方向の極限支持力

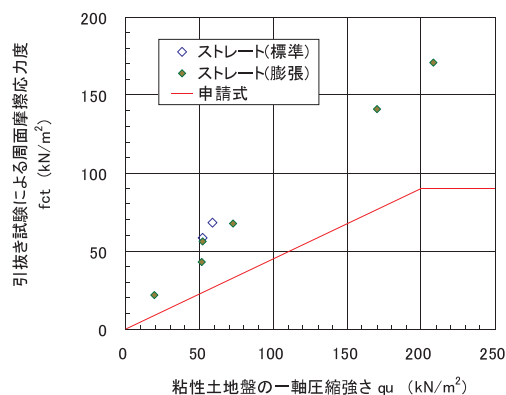
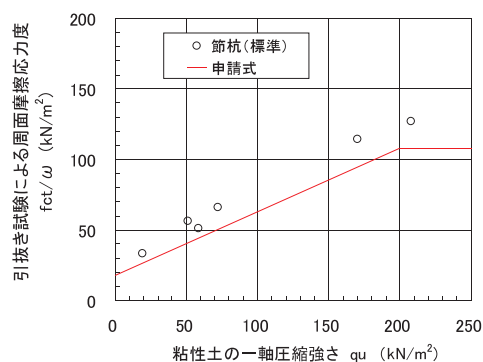
引抜き方向の極限支持力 R_{tu} は(9)式で算定する。ただし、建築基準法で定められた杭材料の基準強度より定まる引抜き方向の支持力を上回らないこととする。

$$R_{tu} = (0.8 \beta N_s L_s + 0.9 \gamma q_u L c) \psi + W_p \quad (\text{kN}) \quad (9)$$

ここに、

β ：砂質地盤における周面摩擦係数

ただし、膨張型の場合でも、下記の β を用いる。

図-18 $f_{ct} \sim q_u$ 関係 (ストレート杭)図-19 $f_{ct}/\omega \sim q_u$ 関係 (節杭)

①ストレート杭（拡頭杭を含む）の部分

$$\beta = 5.0$$

②節杭（拡頭節杭を含む）の部分

$$\beta N_s = (30 + 5.5 N_s) \omega \text{ を満たす } \beta$$

ω ：拡大比 $\omega = D_e / D_s$ ($1 \leq \omega \leq 2$)

ただし、通常掘削部の範囲は $\omega = 1$ として β を求める。

D_e ：拡大掘削径 (m)

D_s ：基準掘削径 $D_s = D_o + 50 \text{ mm}$

D_o ：根固め部に位置する節杭の節部外径 (m)

N_s ：基礎杭の周囲の地盤のうち砂質地盤の平均 N 値

ただし、 N_s は1以上とし、 $N_s > 30$ は $N_s = 30$ とする。（ N_s の算定に用いる N 値の上限は100）

L_s ：基礎杭がそ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)

γ ：粘土質地盤における周面摩擦係数

ただし、膨張型の場合でも、下記の γ を用いる。

①ストレート杭（拡頭杭を含む）の部分

$$\gamma = 0.7$$

②節杭（拡頭節杭を含む）の部分

$$\gamma q_u = (20 + 0.5 q_u) \omega \text{ を満たす } \gamma$$

ただし、通常掘削部の範囲は $\omega = 1$ として γ を求める。

q_u ：基礎杭の周囲の地盤のうち粘土質地盤の一軸圧縮強さの平均値 (kN/m²)

ただし、 q_u は10kN/m²以上とし、 $q_u > 200$ kN/m²は $q_u = 200$ kN/m²とする。

L_c ：基礎杭がそ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)

ψ ：基礎杭の周囲の有効長さ $\psi = \pi D$ (D：杭径、ただし、節杭の場合は節部の外径とする) (m)

W_p ：杭の有効自重 (kN)

なお、杭先端から拡大掘削部下端の範囲(拡大掘削を行わない場合は、杭先端から上方に0.4mの範囲)は、 L_s と L_c に算入しない。

8.2 算定式の妥当性

算定式により求めた引抜き方向の極限支持力 P_{tc} と、引抜き試験で得られた極限支持力 P_{tt} の相関図を図-20に示す。すべての載荷試験で P_{tt} は P_{tc} を上回っており、両者の比の平均値は1.41、両者の平均値の比では1.36となっている。このことから、算定式は安全な引抜き方向の鉛直支持力を与える式であることが確認できる。

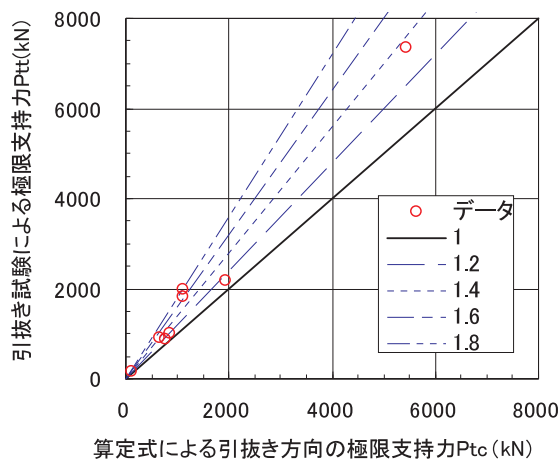


図-20 引抜き抵抗の計算値と試験値の相関図

8.3 引抜き方向の許容支持力

地盤から定まる引抜き方向の許容支持力 R_{ta} は、極限支持力との関係を告示1113号第五にならって、(10)及び(11)式により算定する。

長期許容引抜き支持力 (kN)

$$R_{ta} = 1/3 \times (0.8 \beta N_s L_s + 0.9 \gamma q_u L_c) \psi + W_p \quad (10)$$

ただし、 L_c には $q_u < 50$ kN/m²の軟弱粘土質地盤

など地盤のクリープの影響が大きいと考えられる範囲は算入しない。

短期許容引抜き支持力 (kN)

$$R_{ta} = 2/3 \times (0.8 \beta N_s L_s + 0.9 \gamma q_u L_c) \psi + W_p \quad (11)$$

建築基準法で定められた杭材料の許容応力度より定まる引抜き方向の支持力を超えないこととする。

8.4 適用する杭長の検討

表-1に示したように引抜き試験に用いた杭の最大施工深さは10mである。一方、8.1節と8.3節で示した算定式は、4.1節で述べた最大施工深さの68.5m(先端が粘性土の場合は60m)までの杭に適用する。これは、第3章で示したように、砂質土の場合、引抜き抵抗と押込み方向の周面摩擦力との比 f_t/f_p は、深くなるほど大きくなる(1に近づく)ため、安全側と考えられるためである。

図-21は、押込み試験による周面摩擦力に対する引抜き試験による周面摩擦力の比と、深さとの関係である。この図では、深くなるほど比は1に近づいていることが分かる。

図-22は、図-3に図-21のデータを併記したものである。この図から実測データに比較的近いのは $\alpha = 0.1$ 程度であることが分かる。すなわち、杭に作用した周面摩擦力の1割程度が地盤に鉛直応力として付加されると推測される。この場合、 f_t/f_p はGL-1~10mでは0.5~0.88、GL-10m以深では0.9~0.92となっている。このことから、 f_t/f_p が0.9以下になるGL-0~10mの地盤での載荷試験結果から決められた係数(0.8)を、 f_t/f_p が0.9以上になるGL-10~68.5mの地盤に適用するのは安全側であることが確認できる。

粘性土地盤の場合は、前述のように周面摩擦力は粘着力で決まることが多いため、上載圧や深さには砂地盤ほ

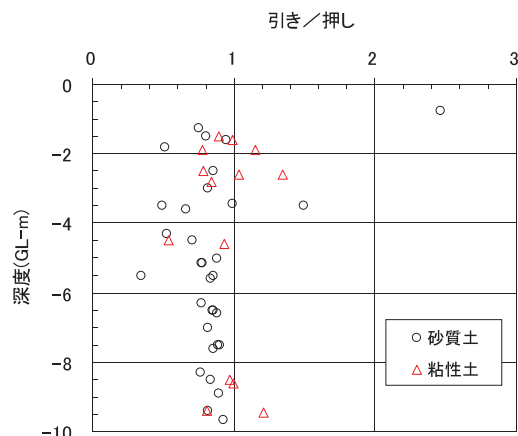


図-21 引抜きと押込み時の f_t の比と深さの関係

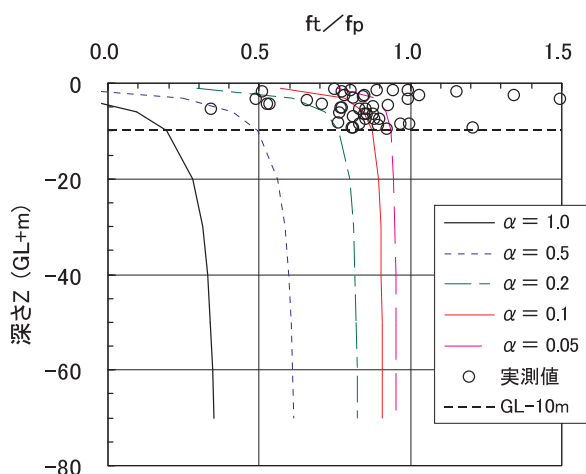


図-22 $f_t/f_p \sim z$ 関係
(図-3に図-21のデータを加えたもの)

ど依存しない。したがって、載荷試験から決められた係数 (0.9) を、深い地盤に適用しても差し支えない。

以上より、施工深さの最大値に関しては、浅い地盤で得られた係数を深い地盤に適用するのは安全側であり、設計上問題ないものと判断される。

一方、施工深さの最小値に関しては、今回得られた係数をより浅い施工深さの杭に適用するのは危険側になるおそれがある。したがって、引抜き試験で確かめられた最小施工深さである $GL-4m$ を、適用する施工深さの最小値とする。また、杭の全長も、引抜き試験で確かめられた $4m$ を最小値とする。

9. 杭材料強度より定まる引抜き抵抗

前章で示した算定式は地盤から定まる引抜き抵抗であって、設計では別途杭の杭材料強度より定まる引抜き抵抗を算定して、両者の小さい方の値を採用することになる。後者の算定方法の一例としてPHC杭の場合を示す。

杭材料強度より定まる極限引抜き抵抗 P_{tu}

$$P_{tu} = \sigma_u \times A_p$$

ここに、 σ_u ：PC鋼材の引張り破断強度

A_p ：PC鋼材の断面積

杭材料強度より定まる許容引抜き抵抗 P_{ta}

$$P_{ta} = (\sigma_e + f_t) \times A_e$$

ここに、 σ_e ：有効プレストレス

f_t ：許容引張り応力度

A_e ：杭の換算断面積

8.1節と8.3節に示した算定式を用いて地盤から定まる引抜き抵抗を求めた場合、既製コンクリート杭では杭材料強度より定まる引抜き抵抗の方が小さくなることが大半である。

これは、構成される杭材の引っ張り強度のうち最も小さい値を採用することも一因である。たとえば、下杭にPHC節杭を用い、中杭にPRC杭、上杭にSC杭を用いた場合は、引っ張り強度が最も小さいPHC節杭の値を「杭材料強度より定まる引抜き抵抗」とすることが多い。しかし、杭頭から作用する引抜き力は下杭の部分では非常に小さくなっており、下杭であるPHC節杭に杭頭と同等の引抜き力が作用するわけではない。したがって、これは不合理な設計方法と言えよう。実際に作用する引抜き力の深度分布を求め、杭体の引張り強度がその値以上になるような設計方法の確立が望まれる。

10. おわりに

本報では、最近、設計で検討することが多くなった杭の引抜き抵抗の評価方法について、(財)日本建築総合試験所の建築技術性能証明を得た算定方法を中心に述べた。

押込み方向の鉛直支持力に比べて、引抜き抵抗に関する研究は少ない。また、試験時に杭体にひび割れが入ることなどから、引抜き試験データの蓄積も少ない。また、本報で述べた押込み方向の支持力との関係や地盤定数との関係については数例の報告が見られるものの、残留引抜き抵抗の評価方法、鉛直交番荷重や動的荷重が作用した時の挙動などは、ほとんど検討されていない。今後、杭の引抜き抵抗に関しても多く研究されることを期待したい。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp.238-249，2001.10.
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課他監修：2007年版建築物の構造関係技術基準解説書，pp.405，全国官報販売協同組合，2007.8.
- 3) 平山英喜：鉛直荷重による杭のボアソン比効果，土木学会第48回年次学術講演会，pp.756-757，1993.9.
- 4) 小椋仁志・小松吾郎・千種信之：プレボーリング拡大根固め工法で施工されたストレート杭と節杭の周面抵抗に関する検討，第43回地盤工学研究発表会，pp.1235-1236，2008.7.
- 5) 小椋仁志・須見光二・後庵満丸・菅一雅・小松吾郎：EXMAGATOP工法の鉛直支持力ープレボーリング拡大根固め工法ー，GBRC，Vol.30，No.2，pp.21-30，(財)日本建築総合試験所，2005.4.
- 6) 小椋仁志・吉福司・山田耕三・掛川誠一・岸田英明：同一地盤で押込み試験と比較した場所打ち杭の先端載荷試験，基礎工，pp.37-40，総合土木研究所，2002.8.
- 7) 小椋仁志・小松吾郎・真鍋雅夫・大島章・千種信之・細田豊・須見光二・三村哲弘：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，GBRC，Vol.32，No.1，pp.10-21，(財)日本建築総合試験所，2007.1.