

# 薄層支持杭の支持力特性に関する研究

工務部 設計課 大志万 和也  
同 部 同 課 中 林 正 司  
同 部 同 課 浜 田 信 彦

## 要 約

大阪湾南部地盤のように粘土層と薄い砂礫層が互層状態をなす箇所に支持杭を採用する場合、支持層が薄いために通常の支持杭と異なる設計法を用いる必要が生じる。

このような薄層支持杭について、南伸部 2 期の脇浜工区の鉛直載荷試験結果を用いた数値解析を行うことにより、その支持力機構・支持力特性を明らかにした。また、有効層厚比（杭先端以深の支持層厚と杭径の比）の値に応じて先端支持力度  $gd$  を低減する補正係数： $\alpha$  を導入し、薄層支持杭の支持力設計法についての提案を行った。

## まえがき

湾岸線（南伸部 2 期）の位置する大阪湾南部地盤は、粘土層と薄い砂礫層が複雑な互層をなし、明確な支持層とみなされる厚い砂礫層が少ない。このような支持層の薄い地盤（薄層）に杭基礎を採用する場合、その支持力機構や支持力特性については不明な点が多く、合理的な設計法が確立されていないのが現状である。

本論文では、まず、湾岸線脇浜工区で行われた薄層（支持層厚：1.75m）支持の場所打ち杭（ $\phi$  1,200）の鉛直載荷試験をシミュレーション解析により再現し、薄層支持杭の支持力評価に対する数値解析手法の有効性を示す。

薄層の先端支持力度について、従来用いられてきた考え方を紹介するとともに、その具体的な評価方法について検討を行う。

最後に、薄層支持の特性を示す“薄層支持杭”

を前述の数値解析結果を用いて定義を行い、その具体的な設計法（支持力推定式）について提案を行う。すなわち、杭先端以深の支持層厚（有効層厚： $H$ ）と杭径（ $D$ ）との比を有効層厚比（ $H/D$ ）と称し、 $H/D \leq 3$  を薄層支持杭と定義し、この  $H/D$  に応じて先端支持力度の値を低減するというものである。

## 1. シミュレーション解析の要約

### 1-1 解析モデルと解析手法

解析モデルは現場での鉛直載荷試験結果<sup>3)</sup>を忠実に再現できるよう、砂礫と砂については主として中井・松岡によって提案された  $tij$ -sand model<sup>4)</sup> を、また粘土は松井・阿部による弾塑性モデル<sup>5)</sup> を用い、図-1 のように設定した。 $tig$ -sandmodel のパラメーターは主として  $N$  値から決定されている。松井・阿部モデルのパラメー

ターは主として一軸圧縮強度、物理特性などから決定されている。また、杭と地盤は不連続性を考慮できるように、ジョイント要素を配置した。

解析は、弾塑性軸対称多次元圧密有限要素法を用いている。地盤モデルのメッシュ分割は、杭先端での支持力機構と支持力特性を評価しやすいように、杭先端部において細かい要素分割を行っている。

## 1-2 解析結果

### 1-2-1 荷重と沈下量・杭体軸力の関係

図-2に杭頭荷重と沈下量の関係、図-3に杭先端荷重と杭先端沈下量の関係について、それぞれ解析結果と実測結果（鉛直載荷試験時の計測結果）を示す。解析値と実測値とを比較すると両者は非常によく一致している。

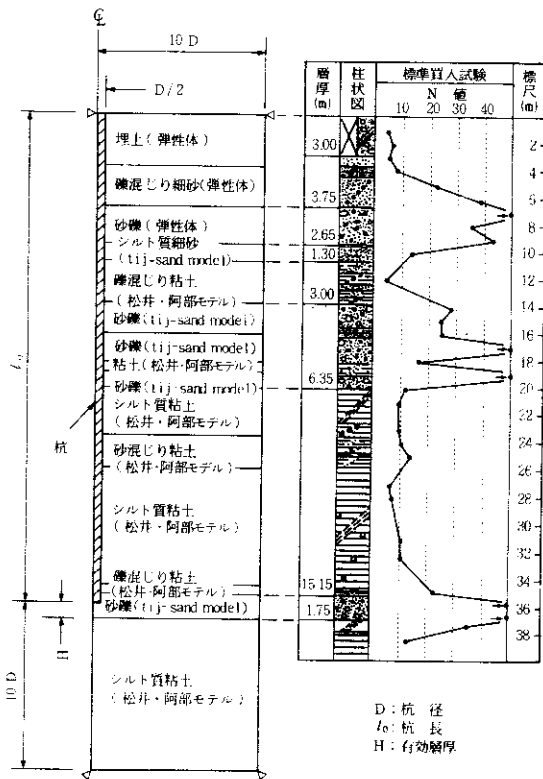


図-1 解析モデル

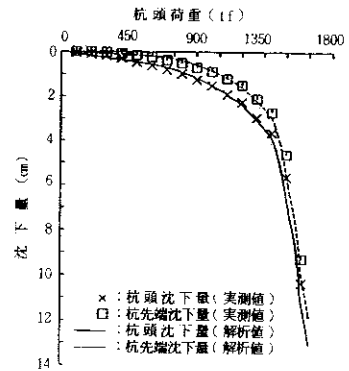


図-2 杭頭荷重と沈下量の関係

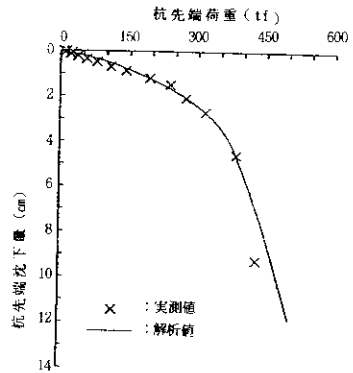


図-3 杭先端荷重と杭先端沈下量の関係

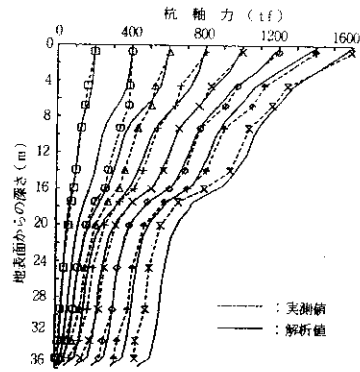


図-4 杭の軸力分布

図-4に各荷重段階における杭体軸力の深さ方向分布を示す。解析値と実測値は概ね一致しており、これは解析において地盤の構成が忠実に表現できたこと、杭の周面摩擦力の評価が正確に行えたことを示している。

### 1-2-2 杭先端の支持機構

図-5は杭先端付近の地盤の破壊域の分布を示している。まず、杭頭荷重約800tonfで支持層において杭の根入れ部分を取り囲むように破壊域が生じる。これは、杭先端部における応力集中と沈下が地盤の引き込みを誘ったためと考えられる。また、杭頭荷重の増加とともに、破壊域は杭の外周に沿って上下方向に拡大している。杭頭荷重1,100tonf（降伏支持力）時に、下位粘土層に局部破壊が発生しており、その破壊域の分布形状は荷重の増加とともに圧力球根状の拡大を示している。杭頭荷重が約1,450tonfになった時、破壊域は支持層

を貫通し、下位粘土層の破壊域まで到達している。

図-6は、杭先端付近の地盤の鉛直方向の垂直応力 $\sigma_z$ の分布を示している。杭頭荷重約800tonfでは、 $\sigma_z$ は凹形の分布形状を示し、剛性基礎版に対するBoussinesqの接地圧分布に近い形状となる。いま、支持層中央部の $\sigma_z$ （■印）に着目すると、杭頭荷重の増加に伴ってその分布形状はなだらかな水平分布から台形分布、凹形分布と変化している。特に、杭頭荷重約1,300tonfにおいて $\sigma_z$ は杭緑端の鉛直下方において減少する現象が見られる。これは、地盤の破壊域の分布（図-5）と密接な対応を示しており、最終的に支持層内の杭緑端の

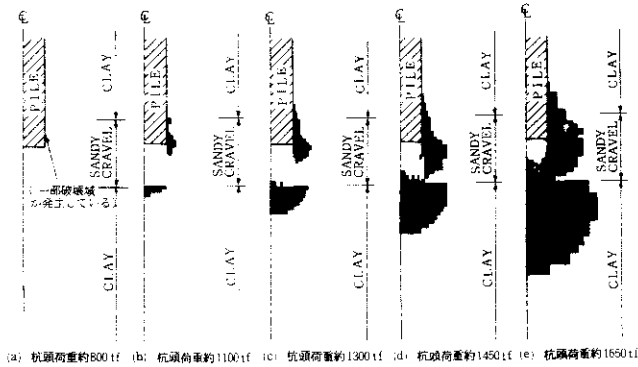


図-5 杭先端付近の地盤の破壊域の分布  
 (■：地盤の破壊域を示す)

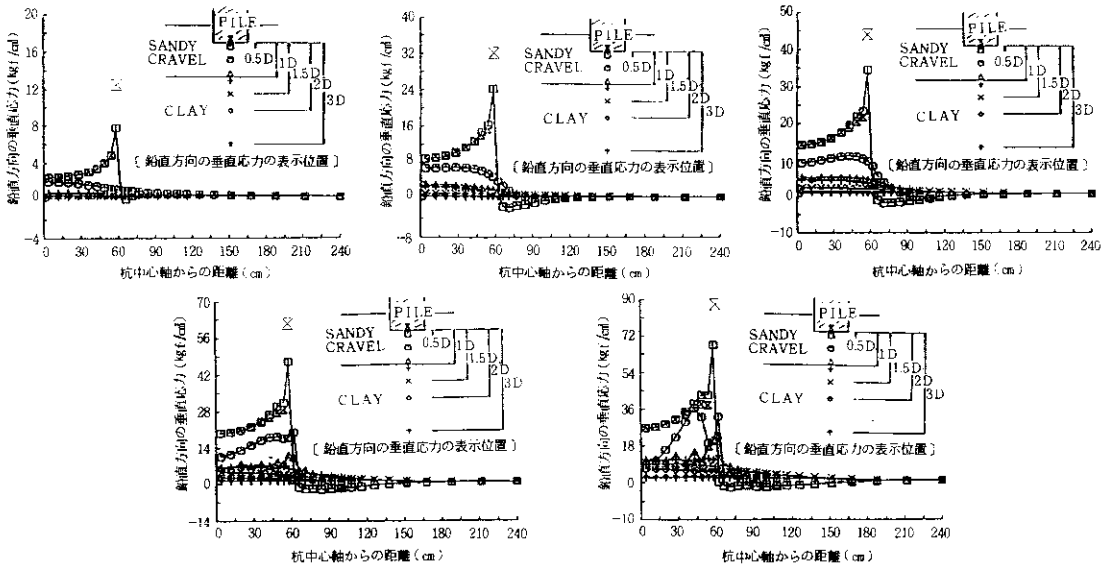


図-6 杭先端付近の地盤の鉛直方向垂直応力

垂直応力が極限に達し、支持層内の支持機能が発揮できなくなり、地盤の降伏に至っていると考えられる。

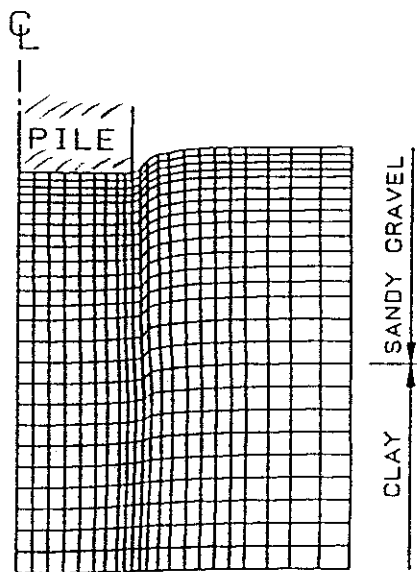


図-7 杭先端付近の地盤の変形

図-7は、解析の最終段階における杭先端付近の地盤変形を示す。支持層は、杭によって押し抜かれたような変形を示しており、特に杭縁端下方の要素は単純せん断を受けたような変形を示している。支持層と粘土層の境界部分では、粘土層の側方変位が生じている。これは載荷時間が短いため、粘土層が非排水条件下で体積変化を伴わなかったためと考えられる。

以上から、杭先端付近の地盤にはパンチング(押し抜きせん断)破壊が生じているものと考えられる。

## 2. 薄層の先端支持度の検討<sup>6)</sup>

### 2-1 他機関の設計の考え方

薄層支持杭の支持力と沈下に対する規定について他機関の設計基準を調査した。その要点は次の通りである。

① 国鉄建造物設計標準解説/基礎構造物(土木学会:1986)

① 先端支持力度について単杭と群杭では荷重の分散を変えて評価している。群杭では通常よく用いられる $\theta=30^\circ$ であるが、単杭の場合安全をみて $\theta=17^\circ$ としている(杭先端より分散)。

② 支持力算定上の下位粘土層の支持面積として、群杭の場合荷重の偏心傾斜を考慮した有効面積としている。

③ 下位粘土層の圧密沈下を検討する場合、荷重の分散を周面摩擦力を有する土層の上面と杭先端の下方1/3の位置を始点とし、単杭・群杭とも $\theta=30^\circ$ としている。ただし、群杭については荷重の偏心傾斜の影響を考慮している。

④ 薄層への根入れについては特に規定していない。通常の杭と同じとすると最低根入れ深さは1.0mとなる。

② 道路橋示方書・同解説/IV下部構造編(日本道路協会:1990)

支持力と沈下の検討のいずれの場合も、群杭についてのみ規定しており、支持層上縁より $\theta=30^\circ$ としている。

③ 建築基礎構造設計指針(日本建築学会:1988)

薄層支持杭という概念はみられず、“中間砂層で支持された摩擦杭”という取扱いで、群杭の圧密沈下に対して荷重分散を杭先端より $\theta=30^\circ$ としている。

## 2-2 薄層の先端支持力度の評価法

### 2-2-1 下位粘土層の支持力

薄層支持の問題は、上位砂層(薄層)・下位粘土層の二層系地盤の載荷問題に帰結する。下位粘土層の破壊に着目すると、載荷幅に比べて支持層厚が大きければ「ひろがり破壊」、逆に支持層厚が相対的に小さいければ「パンチング破壊」が生じやすいとされている。<sup>7)</sup>

いま、下位粘土層の極限支持力 $R_c$ が式(1)で与えられるとする。

$$R_c = 3 \cdot q_u \cdot A' \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $q_u$  下位粘土層の一軸圧縮強度

$A'$  : 薄層での分散(分散角:  $\theta$ )を考慮した下位粘土層天端における仮想支持面積

式(1)から想定されるように、下位粘土層の支持力は、薄層の有効層厚(杭先端下の支持層厚)  $H$  と分散角  $\theta$  との関係が問題になる。

### 2-2-2 基準化のための検討

ここでは、脇浜工区の載荷物試験結果、シミュレーション解析および当公団での既往の実績より、薄層支持杭の先端支持力度の検討を行う。

ここで、有効層厚  $H$  と杭径  $D$  の比  $H/D$  を有効

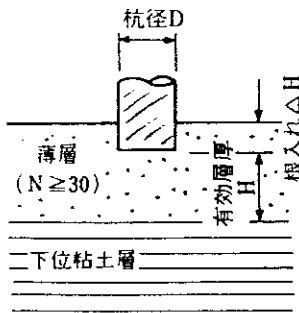


図-8 有効層厚

層厚比で称し、検討上の指標として用いる(図-8)。

#### (1) $H/D=1$ の場合

有効層厚比  $H/D=1$  の支持力特性は、脇浜工区の結果を参考にすることができる。

図-6に示したように、載荷荷重の増加に伴う地中応力度  $\sigma_z$  の増加は杭の底面部分だけで周辺地盤には応力が伝播しない、いわゆるパンチング破壊を呈している。したがって、基準においても  $H/D=1$  の場合、薄層支持杭の破壊モードはパンチング破壊を想定する。

#### (2) 薄層の影響を無視してよい有効層厚

有効層厚がどの程度以上であれば薄層の影響が無視できるのかを調べるため、有効層厚比を変えてパラメトリックスタディを行った。解析モデル

・解析手法は脇浜工区のを基本に、有効層厚比:  $H/D=0$  (粘土層支持の場合), 1, 2, 3, 5,  $\infty$  (支持層が完全な場合) の6ケースについて解析を行った。

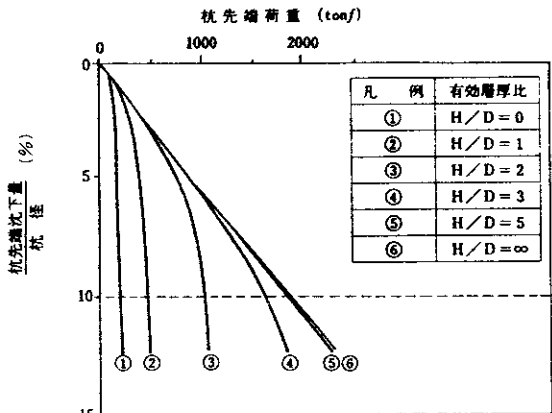


図-9 FEMによる杭先端荷重と沈下量の関係

図-9に、すべての解析ケースの杭先端荷重と杭先端沈下量の関係を示す。これより、杭径の10%沈下量と有効層厚比  $H/D$  の関係は、 $H/D=3$  までは  $H/D$  に比例して杭先端荷重が増加するのに対して、 $H/D > 3$  ではほとんど増加しない傾向を示す。これは  $H/D \geq 3$  に対しては薄層の影響を無視できることを示すものであり、 $H/D=3$  を薄層支持杭の上限とした。

## 3. 薄層支持杭の設計法

前項の検討により、 $H/D \leq 3$  を薄層支持杭として定義し、以下にその鉛直支持力を算出する場合の設計法について紹介する。<sup>8)・9)</sup>

### 3-1 支持力推定式

1本の杭の軸方向許容押込み支持力  $R_a$  は、通常の場合打ち杭と同じ下記の推定式(2)を用いて算出するものとする。<sup>10)</sup>

$$R_a = \frac{\gamma}{n} (R_u - W_s) + W_s - W \dots\dots\dots(2)$$

ここに、

- $R_0$  : 杭頭における杭の軸方向許容押込み支持力
- $n$  : 杭の種類、載荷時の種類によって決まる安全率
- $\gamma$  : 極限支持力推定法の相違による安全率の補正係数
- $R_u$  : 地盤から決まる杭の極限支持力
- $W_s$  : 杭で置換えられる部分の土の有効重量
- $W$  : 杭および杭内部の土の有効重量

### 3-2 先端支持力度

式(2)における $R_0$ は、式(3)により算出する。

$$R_0 = \alpha \cdot q_d \cdot A + U \sum l_i f_i \dots \dots (3)$$

ここに、

- $\alpha$  : 薄層の程度を考慮した支持力度の補正係数
- $q_d$  : 杭先端で支持する単位面積あたりの極限支持力度
- $A$  : 杭先端面積
- $U$  : 杭の周長
- $l_i$  : 周面摩擦力を考慮する層の層厚、原則として洪積層の範囲とする。
- $f_i$  : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度

式(3)に示すように、杭の先端支持力度 ( $q_d'$ )

表-1 先端支持力度

先端土質	$q_d$ (tf/m <sup>2</sup> )
砂礫層* (N値 $\geq 30$ )	500
砂層 (N値 $\geq 30$ )	250

(\*大阪層群砂層を含む)

は通常用いる先端支持力 $q_d$ (表-1)に薄層の程度を考慮した支持力度の補正係数 $\alpha$ を乗じて低減するものとする。 $\alpha$ は有効層厚比 $H/D$ と支持層直下の粘土層の一軸圧縮強度 $q_u$ によって決まる補正係数であり、支持層が砂礫層の場合は図-10、

砂層の場合は図-11により求めるものとする。

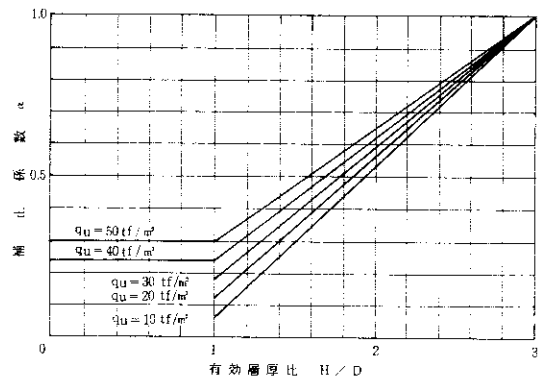


図-10 支持層が砂礫層の場合の補正係数 $\alpha$

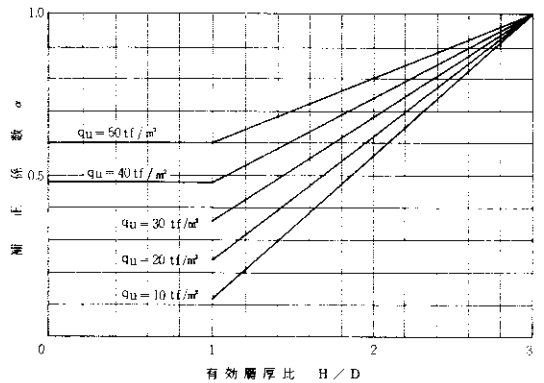


図-11 支持層が砂の場合の補正係数 $\alpha$

ここで、図-10、11の $\alpha$ の設定方法は、次の考え方に基づいている。

- ① 1章の解析結果より、 $H/D \leq 1$ の場合の薄層支持杭の破壊モードはパンチング破壊を想定することができ、その極限支持力は支持層下位の粘土層により設定される(式(1)参照)。
- ② 2-2-2のパラメトリック解析により、 $H/D \geq 3$ の場合、薄層の影響は無視できる。
- ③  $1 < H/D < 3$ の中間領域に関しては、破壊モードなど今後の研究成果を待たねばならない事項が残されているが、設計上の便宜を考え、 $H/D = 1$ で期待できる支持力と $H/D = 3$ で期待できる支持力を線形配分させて求めるものとしている。

適用に際しては、薄層支持杭は支持杭としての設計を考えているため、下位粘土層の $q_u$ が低い場合はある程度以上の有効層厚比を確保する必要があること、下位粘土層の $q_u$ が $40\text{tonf}/\text{m}^2$ (N値20)未満の場合は、道路橋示方書でいう良質な支持層の値を考慮し、有効層厚比 $H/D$ を1以上確保しうる範囲で薄層支持杭の採用を考えることなどに留意する必要がある。

### 3-3 今後の課題

今後は、現場計測、数値解析の両面から、下記の項目をさらに検討してゆくことが望まれる。

- ①  $1 < H/D < 3$  の中間領域について、薄層支持杭の支持力特性、地盤の破壊モードの検討
- ② 薄層支持杭の支持力算定時の荷重分散の考え方と沈下検討時の荷重分散の考え方
- ③ 下位粘土層の強度が低い場合の薄層支持杭としての適用限界

## あ と が き

薄層支持杭の支持力機構や支持力特性について現場載荷試験結果を反映した数値解析により検討を行い、薄層支持杭の具体的設計法について提案を行った。

末尾になりましたが、本解析の実施を行っていただいた大阪大学工学部 松井保教授をはじめ、薄層支持杭の検討に関して熱心に御討議いただいた技術審議会基礎構造分科会(主査:京都大学工学部 柴田徹教授)の各委員に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 阪神高速道路公団、(助)災害科学研究所: 杭基礎の薄層支持力特性に関する研究報告書、平成2年3月
- 2) 松井、小田、中林、下山: 「杭基礎の薄層支持機構に関するシミュレーション解析」第35回土質工学シンポジウム発表論文集、平成2年11月
- 3) 阪神高速道路公団: 「薄層支持杭の載荷試験結果検討 南伸部2期脇浜工区」技術審議会基礎構造分科会資料、平成1年3月
- 4) 例えば、中井、藤井: 「力学量 $t_{ij}$ を用いた砂の弾塑性構成式の特徴とその適用法」第21回土質工学研究発表会概要集、昭和61年6月
- 5) Matui, T., Abe, N.: "Multi-Dimensional Elasto-Plastic Consolidation Analysis by Finite Element Method", Soils and Foundations Vol. 21 No.1, 1981
- 6) 阪神高速道路公団: 「薄層支持杭の特性に関する報告書」技術審議会基礎構造分科会資料、平成2年3月
- 7) 山口柏樹: 「深い基礎の支持層厚さの評価法」第21回土質工学研究発表会概要集、昭和61年6月
- 8) 阪神高速道路公団: 設計基準第2部構造物設計基準(橋梁編)、平成2年6月
- 9) 阪神高速道路公団: 場所打ち杭の支持力設計要領、平成2年6月
- 10) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV下部構造編、平成2年2月