

# 場所打杭の鉛直載荷試験結果の評価と設計への適用

工務部 設計課 吉川 紀  
同部 同課 古池 正宏

## 要 約

場所打杭支持力の合理的設計のため、鉛直載荷試験を各路線毎に実施してきた。現在8ヶ所の結果が得られたので、支持力評価の観点から取りまとめた。その結果より、阪神地盤における支持力機構の特色について明らかにするとともに、費用のかかる載荷試験をより有効に生かすため、載荷試験結果を用いた実設計への適用手段を検討し、設計支持力公式を提案した。さらに、信頼性理論に基づく提案式については、ケーススタディを示し、今後の展開に期待することとした。

## まえがき

本文は、阪神高速道路公団において実施された既往の場所打杭の鉛直載荷試験結果をとりまとめ、阪神地盤の支持力特性について考察するとともに、載荷試験結果を実設計に適用する場合の手法について検討したものである。

載荷試験の結果は、現在設計支持力の確認に用いられることが多いが、本来の意義としては次のように考えられる。

阪神地盤は、超軟弱地盤で先端支持力に大きく依存しなければならない地盤から、全層洪積層の砂・粘土の互層より構成される地盤まで、著しく変化に富んでいる。その結果、同じ地域内であっても周面摩擦力や先端支持力の大きさと割合が異なっており、近年 当公団の建設地域の拡大によりこの傾向が激しくなっている。

したがって、単に道路橋示方書にもとづいて、標準的な設計をするよりも各路線毎に、合理的かつ経済的な杭の設計を行うことが望ましいものであり、このために鉛直載荷試験を実施して、設計データを確認することが必要となる。

当公団では、昭和55年度、安治川橋梁の杭設計時に場所打杭の載荷試験をはじめて実施し、昭和60年度の設計基準の改定に際し、上記の主旨により載荷試験の実施を規定したものである。

## 1. 鉛直載荷試験の実施状況

### 1-1 試験実施状況

これまで公団が実施した場所打杭の鉛直載荷試験の一覧を表-1および図-1に示す。62年8月現在、計8本で、杭径は $\phi 1.2\text{m}$ ～ $\phi 2.0\text{m}$ 、杭長は13m～45mである。杭の施工法は、安治川杭のリバース工法以外は、全てベント工法である。

試験方法は、いずれも土質工学会のB法によって行っている。杭体沈下量は、全ての杭で杭頭（ダイヤルゲージ方式）と先端（ロッド方式）部において測定している。さらに、杭中間部において沈下量を測定している例もある。また、鉄筋計による杭体ひずみは1断面当り2～4箇所、深さ方向には、一般に10断面以上測定している。

表-1 鉛直載荷試験実施一覧表

| 記号 | 路線名      | 杭径                 | 杭長    | 施工方法   | 実施年 | 杭名称  |
|----|----------|--------------------|-------|--------|-----|------|
| A  | 湾岸線3期    | $\phi 2.0\text{m}$ | 38.1m | リバース工法 | 55年 | 安治川杭 |
| B  | 大阪東大阪線   | 1.5                | 26.0  | ベント工法  | 57年 | 長田杭  |
| C  | 大阪港線     | 1.5                | 30.5  | 〃      | 58年 | 九条杭  |
| D  | 泉北線      | 1.5                | 20.0  | 〃      | 59年 | 杉本杭  |
| E  | 湾岸線南伸部   | 1.2                | 23.5  | 〃      | 60年 | 高砂杭  |
| F  | 湾岸線4期    | 1.5                | 44.9  | 〃      | 60年 | 桜島杭  |
| G  | 大阪池田線延伸部 | 1.5                | 12.84 | 〃      | 62年 | 池田杭  |
| H  | 湾岸兵庫4期   | 1.5                | 40.9  | 〃      | 62年 | 深江杭  |

表-2 載荷試験結果表

(単位:tf,mm)

| 記号 | 試験杭  | 最大荷重 | 沈下量 | 残留沈下量        | 弾性もどり量      | クリープ試験     |
|----|------|------|-----|--------------|-------------|------------|
| A  | 安治川杭 | 3200 | 177 | 156<br>(88%) | 21<br>(12%) | 800t, 7日間  |
| B  | 長田杭  | 1000 | 35  | 27<br>(77%)  | 8<br>(23%)  | —          |
| C  | 九条杭  | 1000 | 48  | 40<br>(83%)  | 8<br>(17%)  | —          |
| D  | 杉本杭  | 1800 | 262 | 240<br>(92%) | 22<br>(8%)  | 600t, 14日間 |
| E  | 高砂杭  | 1700 | 200 | 181<br>(91%) | 19<br>(9%)  | 400t, 12時間 |
| F  | 桜島杭  | 1990 | 52  | 37<br>(71%)  | 15<br>(29%) | 500t, 12時間 |
| G  | 池田杭  | 1400 | 55  | 46<br>(84%)  | 9<br>(16%)  | 450t, 12時間 |
| H  | 深江杭  | 1900 | 127 | 114<br>(90%) | 13<br>(10%) | —          |

表-2に載荷試験結果を示す。最大載荷々重は1000～3200tfであり、地盤の性状から決まる極限支持力に対して、ほぼ極限状態から降伏支持力程度までさまざまな荷重レベルとなっている。今後は、できるだけ極限支持力をめざした荷重レベルまでの載荷が望まれる。

### 1-2 地質状況

各試験杭地点の地質条件を以下に略記する。地質構成および杭根入れ状況を図-2に示す。

#### 1-2-1 安治川杭

本杭は大阪平野の南、大阪湾に流入する安治川河口に位置する。上部洪積層中には段丘礫層が含まれ、最上部のものは「天満層」と呼ばれる。

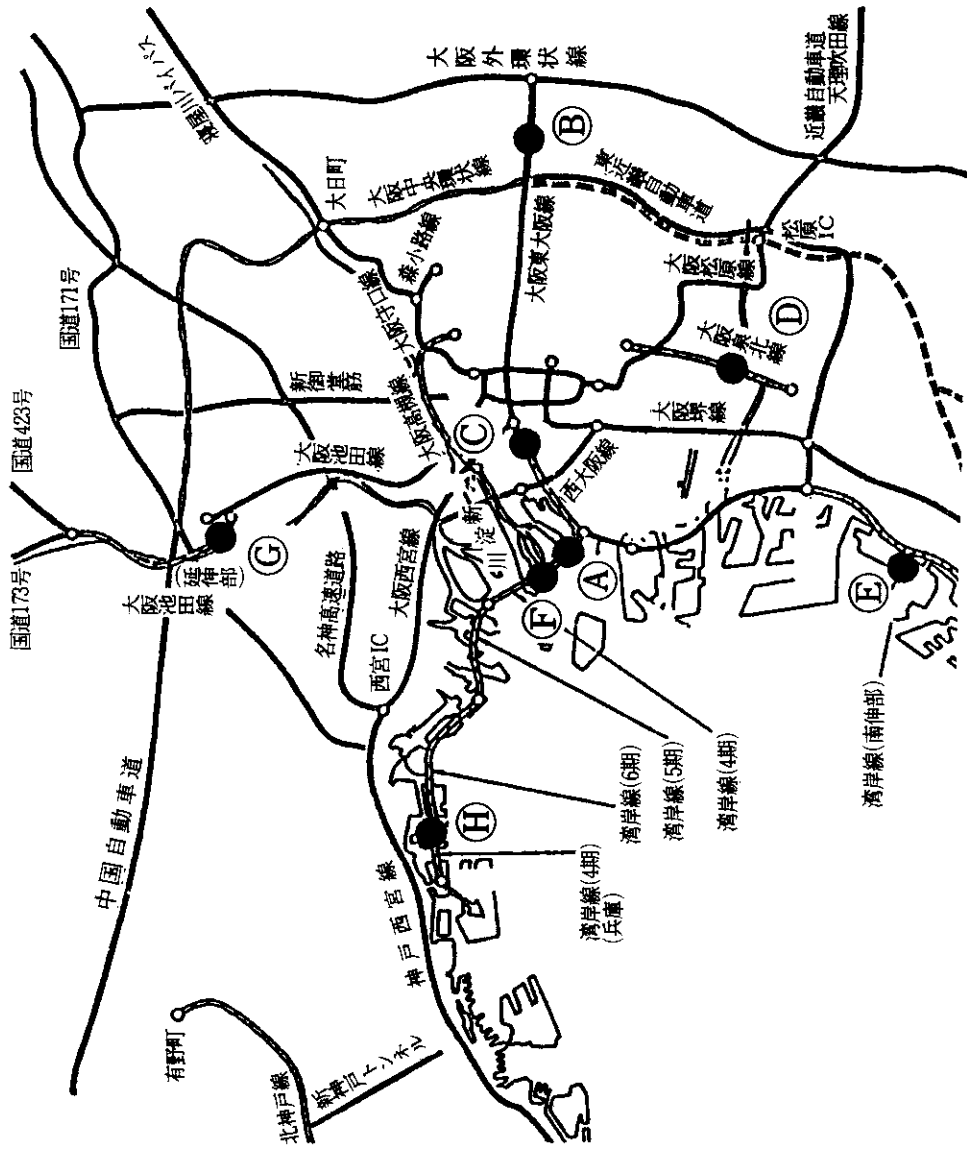
この杭は天満層（第1砂礫層）を支持層としている。この杭の特色である杭周面積の90%を占める沖積層は、軟弱な礫、砂、粘土から構成されており、大阪平野に広く分布している。試験地点はこれを海底とする海域を埋立造成されたものである。

#### 1-2-2 長田杭

本杭の位置する東大阪市周辺は、旧大和川の氾濫域であって、沖積世初期には上町台地の東側に広がる大阪湾内海であった地域である。江戸時代には湿地帯であったとされ、当地周辺は極軟弱な鋭敏粘土（東大阪鋭敏粘土）が厚く堆積する劣悪地盤である。この粘土層が長田杭周面積の60%を占める。杭の下半部は粘性土および砂質土の洪積互層よりなっている。

#### 1-2-3 九条杭

本杭は位置的にも地質的にも安治川杭に近似しており、沖積層が杭周面積の80%を占める。杭先端はN $\geq$ 40程度の洪積砂層にとどまっておらず、その下部の礫混り砂層には至っていない。



图一 載荷試験実施位置図

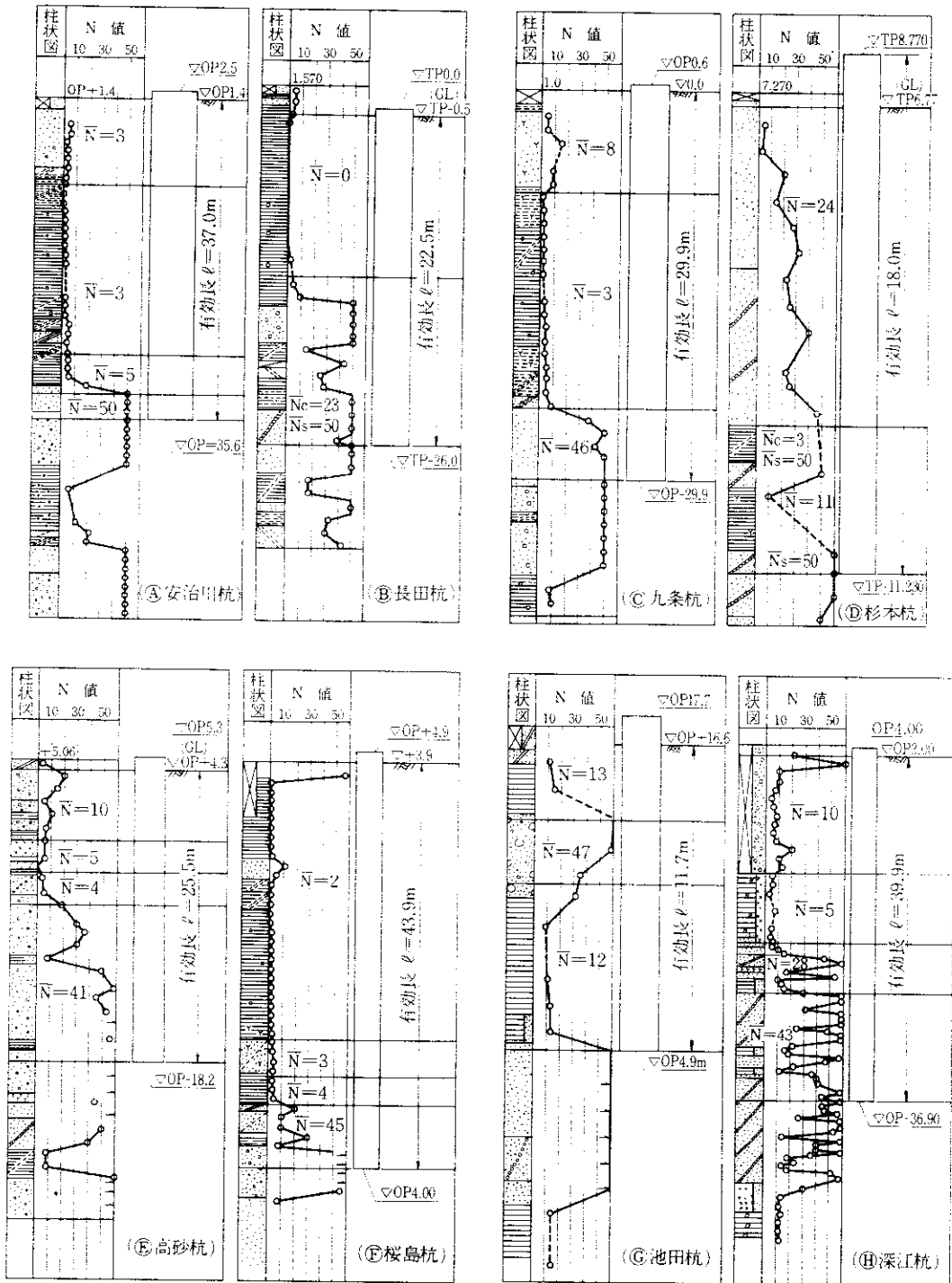


図-2 地層構成および根入れ図

### 1-2-4 杉本杭

本杭は上町台地の西端に位置しており、杭周面は沖積層は存在せず、上半部が上部洪積層、下半部が大阪層群より構成される地層にとどまっている。

上部洪積層は、上層から下層へとシルト混り砂から礫混り砂へと変化している。大阪層群は、粘性土と砂質土の互層をなし杭先端部の地層は礫混り砂層である。

### 1-2-5 高砂杭

本杭は泉北臨海工業地域の一画に位置している。人工地盤より下層は、軟弱な粘土層とゆるい砂質土より構成される沖積層、それより深い部分は硬質な粘土層（段丘層）が分布する。全体的に杭周面は砂質系地盤が卓越し、杭先端は洪積砂礫層を支持層としている。

### 1-2-6 桜島杭

安治川杭と近接しており、安治川の河口付近に位置し、地層構成も安治川杭と類似している。

### 1-2-7 池田杭

本杭は大阪平野の北部、猪名川氾濫原野である猪名川低地に位置している。地質構成は上部から沖積層、新期洪積層の段丘層、古期洪積層の大阪層群となっている。沖積層は粘性土を主体とし、段丘層は砂礫層、大阪層群は主に砂礫・砂・粘土とそれらの互層から構成されている。

### 1-2-8 深江杭

本地点は大阪盆地西端の埋立地に位置する。地表面から-15mまでが盛土、-29mまでが沖積層、それ以深が洪積層となっている。洪積層は礫混り砂と粘土の互層で形成され、非常に複雑な地層構成となっている。

各杭の地盤状況を概説したが、図-3に杭先端付近支持層の粒度組成を示す。先端地盤は洪積砂礫層(Dg)、洪積砂層(Ds)、および大阪層群(Os)の3種類の地層に分類される。また、表-3には、周面と先端の土層構成を示す。

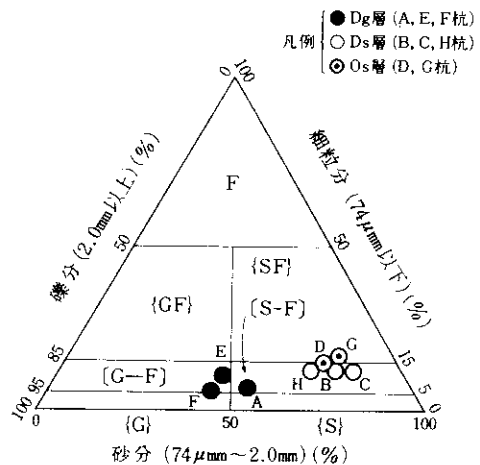


図-3 杭先端土質三角座標 (日本統一土質分類)

表-3 地盤構成比率

|    |            | A<br>安治川杭 | B<br>長田杭    | C<br>九条杭 | D<br>杉本杭   | E<br>高砂杭 | F<br>桜島杭 | G<br>池田杭 | H<br>深江杭    |
|----|------------|-----------|-------------|----------|------------|----------|----------|----------|-------------|
| 杭  | 径 (m)      | φ 2.0     | φ 1.5       | φ 1.5    | φ 1.5      | φ 1.2    | φ 1.5    | φ 1.5    | φ 1.5       |
| 周面 | 沖積/洪積 (%)  | 89/11     | 57/43       | 82/18    | 0/100      | 43/57    | 84/16    | 24/76    | 69/31       |
|    | 砂系/粘土系 (%) | 33/67     | 24/76       | 44/56    | 78/22      | 87/13    | 28/72    | 29/71    | 76/24       |
| 先端 | 土質         | 砂レキ (Dg)  | レキ混り粗砂 (Ds) | 中砂 (Ds)  | レキ混り砂 (Os) | 砂レキ (Dg) | 砂レキ (Dg) | 砂 (Os)   | 砂レキ混り砂 (Ds) |
|    | N値         | 50以上      | 50以上        | 40以上     | 60以上       | 60以上     | 60以上     | 60以上     | 50以上        |

## 2. 載荷試験結果の整理

### 2-1 場所打杭の荷重・沈下特性

一般に杭の杭頭荷重 $P_0$ ～沈下 $S_0$ 挙動は、図-4に示すように2種類のタイプの曲線に代表される。局所（または進行性）せん断破壊的挙動を示す曲線(a)は、場合打杭や埋込杭、全般せん断破壊的性状を示す曲線(b)は、主として打込杭に多いとされている。しかし、 $P_0$ ～ $S_0$ 挙動は杭径、杭長、土性のほか施工法など多くの諸因子に影響され、同じ場所打杭であっても相対的に曲線(a)に近似されるものから曲線(b)に近いものまでさまざまである。

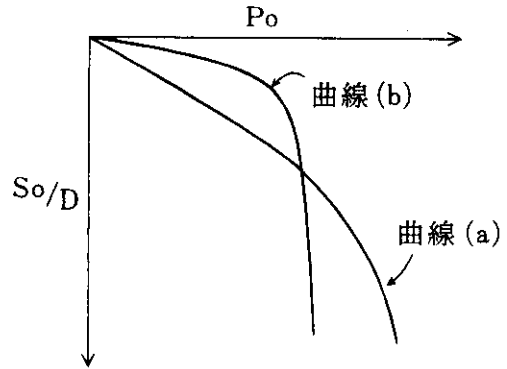


図-4 荷重 $P_0$ ～沈下 $S_0/D$ 模式図

表-4 支持力判定法

| 降伏支持力 $R_y$                         | 極限支持力 $R_u$       |
|-------------------------------------|-------------------|
| $\log P \sim \log S$ 法              | Van der Veen 法    |
| $S \sim \log t$ 法                   | $S \sim \log P$ 法 |
| $\Delta S / \Delta \log t \sim P$ 法 | 沈下量が杭径の10%時       |
| $S_r = 30\text{mm}$ or<br>杭径の2.5%時  | ワイブル分布曲線式         |
| $S_r = 20\text{mm}$ 時               | —                 |
| $S/D = 4\%$ or<br>$S_r/D = 2\%$ 時   | —                 |
| ワイブル分布曲線式                           | —                 |

### 2-2 鉛直支持力の判定

#### 2-2-1 判定手法

載荷試験の結果から極限または降伏支持力を判定する方法は、従来から多くの方法が提案されている（表-4参照）これらの方法には荷重、沈下軸のスケールのとり方や個人差によって、相当のバラツキを有するものもあり、特にVan der Veenの方法にその傾向が強い。したがって、ここでは支持力の判定を式(1)に示すワイブル分布曲線を用いた方法によることとし、人為的な判定誤差を排除することとした。この方法によって判定される極限支持力は基本的にはVan der Veenの方法と同じであり、また降伏支持力も従来の $\log P_0$ ～

$\log S_0$ 法などと同じ程度の値が得られることが宇都らによって確認されている<sup>9)</sup>。

$$P_0 = R_u [1 - \exp\{-S_0 / \delta_s\}^m] \dots\dots(1)$$

ここで

$P_0$  : 杭頭荷重

$R_u$  : 極限支持力

$S_0$  : 杭頭沈下量

$\delta_s$  : 基準沈下量

$m$  : 変位指数 ( $m > 0$ )

$\delta_s$ は降伏支持力 $R_y$ に対応する沈下量と定義されるが、このことより、式(1)は、降伏支持力 $R_y$ が

$$R_y = R_u (1 - e^{-1}) \approx 0.63 R_u$$

と一義的に決定される特性がある。

#### 2-2-2 ワイブル分布曲線による判定特性

実測された $P_0$ ～ $S_0$ データの個数の大小および $m$ 値が支持力判定値におよぼす影響を図-5(D杭で説明)に示す。

この図から、測定点数の増加、すなわち載荷レベルをあげるに従い、また、 $m=1$ より最適 $m$ 値を用いる方が支持力が高くなる傾向にあることがわかる。特に、載荷レベルをあげることは、先端抵抗が沈下量の増大に伴い抵抗力を増加させるメカニズムに依存しているものと考えられる。

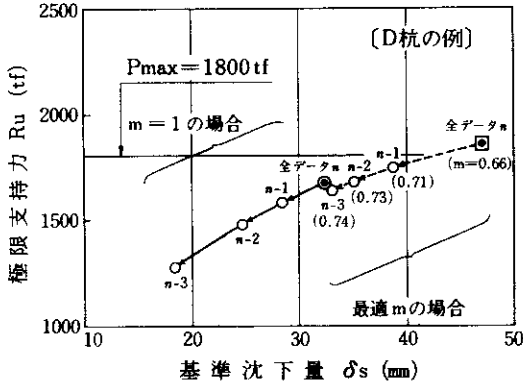


図-5 極限支持力と基準沈下量の関係 (杭頭)

表-5 支持力と沈下量 (杭頭)

|              | A    | B    | C    | D    | E    | F    | G    | H    |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 降伏 $R_y^*$   | 2250 | 670  | 840  | 1170 | 1050 | 1780 | 1250 | 1210 |
| 沈下量          | 8.2  | 0.9  | 3.0  | 4.5  | 2.4  | 3.9  | 4.1  | 1.4  |
| 最大 $P_{max}$ | 3200 | 1000 | 1000 | 1800 | 1700 | 1990 | 1400 | 1900 |
| 沈下量          | 17.7 | 3.5  | 4.8  | 34.2 | 20.0 | 5.2  | 5.5  | 12.7 |
| 極限 $R_u^*$   | 3560 | 1050 | 1330 | 1860 | 1660 | 2690 | 1980 | 1910 |

(単位: tf, cm) (注) \*印は、ワイブル支持力(最適  $m$  値)  
沈下量はその支持力時の実際の沈下量を採用

### 2-2-3 判定結果

表-4 に示す判定値を用いて、式(1)の極限支持力の比較を図-6 に示す。試験杭によってさまざまであるが、既往の値に比べてワイブル分布曲線式による判定値は、同程度かやや大きく評価される傾向にある。

表-5 に各試験杭の支持力(極限および降伏支持力)と沈下量を算定した。以下の記述にはこれらの値を基本として用いる。

## 3. 場所打杭の支持力特性

### 3-1 杭頭・先端の荷重・沈下特性

杭頭および先端の荷重～沈下曲線を図-7 に示す。実測値をプロットし、式(1)による近似曲線を実線で示している。これらの曲線は、杭径・杭長や載荷レベル等が異なるので荷重・沈下挙動の比較が難しいので正規化したものを図-8 に示す。正規化された曲線群は、図-4 の(a), (b) のようにおおむね2つのグループに区分することができる。

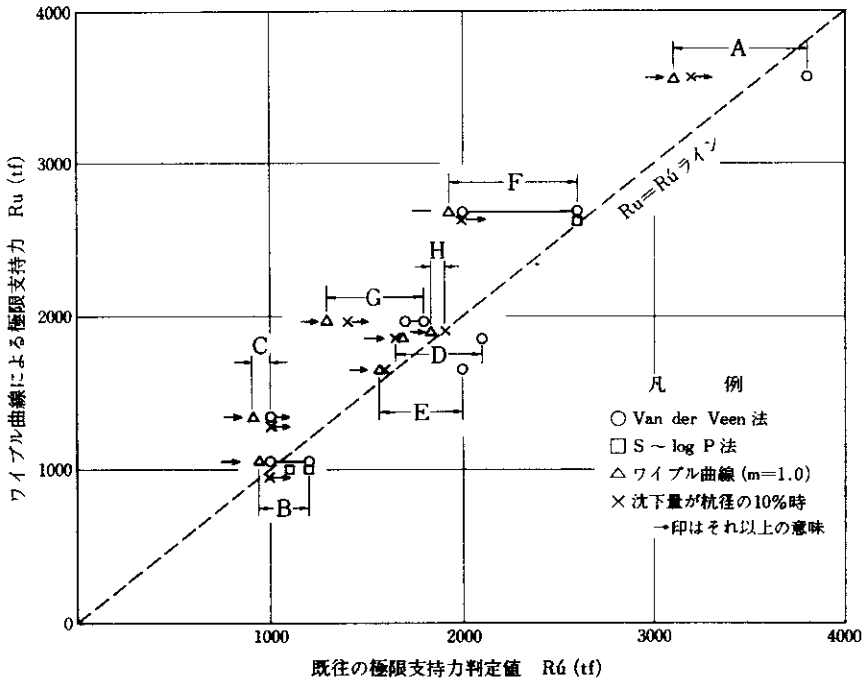


図-6 ワイブル  $R_u$  値と既往の  $R_u$  値の関係

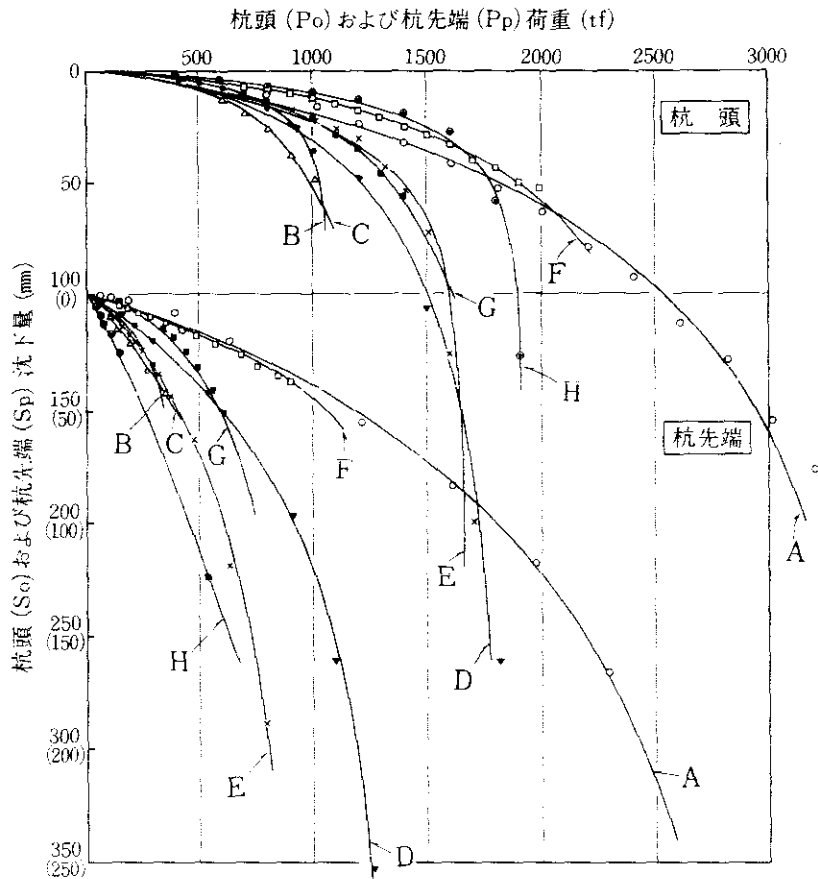


図-7 ワイブル分布による近似曲線

曲線(a)群においては、沈下レベルが10%の時に荷重レベル ( $P_0/R_u$ ) は90%程度、一方、降伏荷重レベル ( $P_0/R_u=60\%$ ) での沈下は2~4%程度、許容支持力レベル ( $P_0/R_u=1/3$ ) では2%以下となっている。一方、曲線(b)群では、降伏、許容荷重レベルでの沈下は1%以下程度と小さい。

### 3-2 周面摩擦力

試験杭一本当りの杭の全周面積で代表させた  $\tau$  ~  $\bar{s}$  曲線 ( $\bar{s}$  は対数表示) を図-9 に示す。

周面摩擦力発現の特色として、全ケースとも最大周面摩擦応力度  $\tau_{max}$  は、杭頭が降伏後生じており、摩擦力がピークになって杭頭降伏となるわけでないといえる。また、 $\tau_{max}$  のあと沈下量の増加に伴い周面摩擦力は、必ずしも一定とならず徐々に低下する傾向がみられる。降伏  $R_y$  時の  $\tau$  は、 $\bar{s}=10\sim100\text{mm}$  と広範囲の沈下レベルで発生しているのに対し、ピーク値  $\tau_{max}$  は30~50mm(リバース杭を除く)と比較的まとまった範囲で発生している。



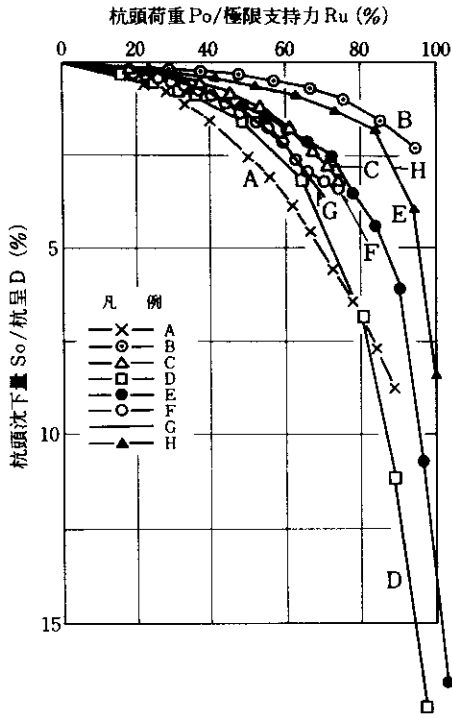


図-8 Po/Ru ~ So/D 曲線 (PoおよびSo実測値)

### 3-3 先端支持力

杭先端支持力には、“伝達”支持力と“固有”支持力が存在する。“伝達”支持力とは、杭頭支持力の判定で決まる極限支持力から、その時の周面摩擦力を差引いた、すなわち先端に伝達される軸力をいう。一方、“固有”支持力は、杭先端での荷重 $S_p$ の関係より判定される支持力をいう。道路橋示方書下部構造編（以下「道示」という。）で提示されている先端支持力は伝達支持力を意味している。

図-10に、伝達および固有支持力の大きさを基準沈下量（杭頭および杭先端でのP-S関係にて定まる降伏支持力時の沈下量）との関係で示す。

この図からF、G杭を除くと概ね両者の極限支持力は同程度であるが、基準沈下量が著しく異なっていることがわかる。

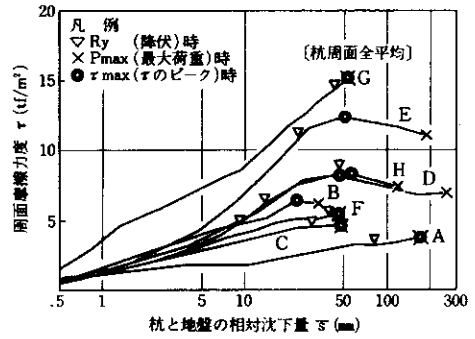


図-9 周面摩擦力度  $\tau$  ~ 相対沈下量  $s$  曲線

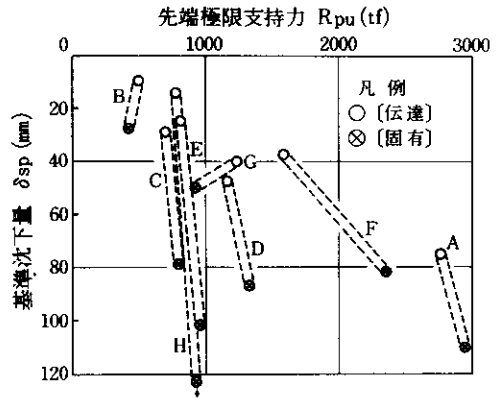


図-10 Rpu ~  $\delta sp$  関係

### 3-4 先端伝達率と支持力の発現

図-11に荷重（ここでは $P_0/R_u$ で表示する）と先端への荷重伝達率の関係を示す。極限 $R_u$ 時に伝達率は30~75%の範囲にあるが、杭周面地盤が軟弱で先端抵抗に期待している安治川杭と反対に、比較的良質な地盤で根入れの長い深江杭とが両極端の値を示している。

図-12は杭先端伝達率と先端支持力度の関係を示すもので、先端地質をパラメータとして、道示データもあわせて示している。データの種別にかかわらず先端への伝達率が大きくなると先端支持力度も大きくなる傾向（本来、両者は直接的な関係はない）がみられる。また、道示の場所打杭の先端支持力は $q_d = 300 \text{ tf/m}^2$ と規定されており、

この時の伝達率は30~40%である<sup>2)</sup>のに対して、先端支持力度は300~900tf/m<sup>2</sup>、伝達率が40%以上と大きな値を示しているのが特徴である。

しかしながら、先端部の土質が洪積砂層の3例については、いずれも300~400tf/m<sup>2</sup>と他の地質の場合より小さな値を示している点に留意しなければならない。

なお、先端支持力度と杭頭基準沈下量との相関を図-13に示すが、設計時の事前調査から得られる何らかのパラメータとの相関は得にくく、先端支持力度の合理的な推定法は今後の検討課題であるといえる。

## 4. 設計支持力の設定

### 4-1 支持力に関する基本的な問題

1本の杭の載荷試験を実施するためには多大な費用と時間を要する。したがって、載荷試験の結果を有効に生かす必要があり、現状のように（建設工程上やむを得ないとは言え）載荷試験結果を単に設計支持力の確認だけにとどめておくことは著しく不経済なことである。当該路線の合理的な設計支持力の設定と、見直しに反映されることが

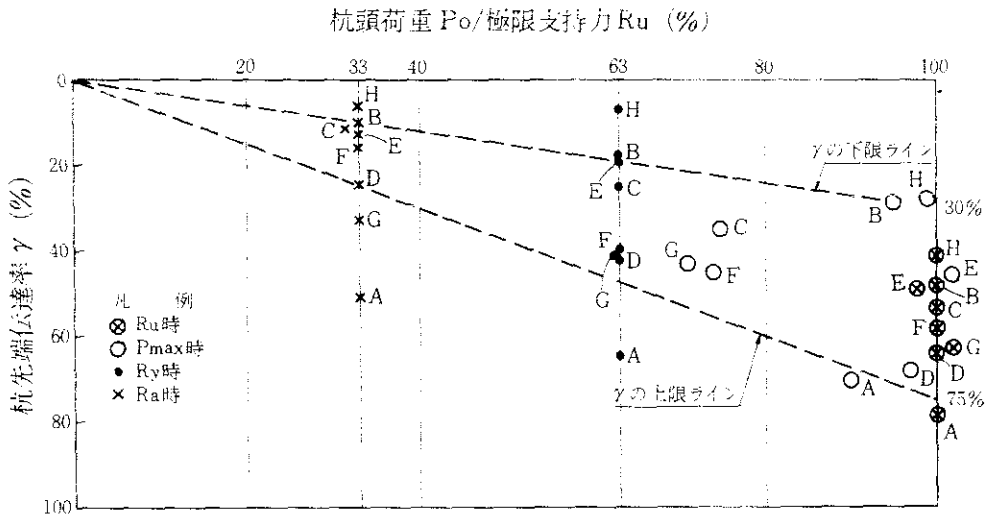


図-11 Po/Ru ~  $\gamma$  関係

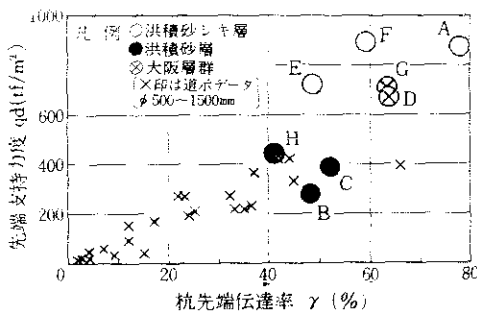


図-12 杭先端伝達率  $\gamma$  ~ 先端支持力度  $q$  関係

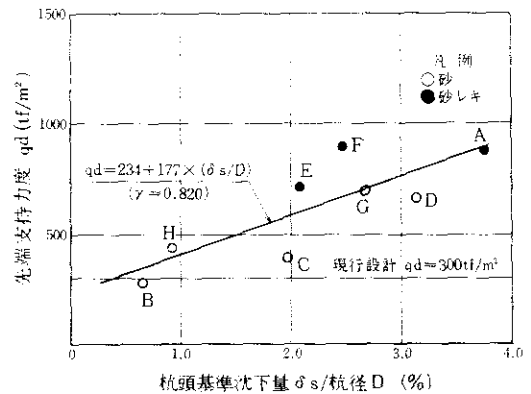


図-13  $\delta s/D$  ~  $q_d$  関係

望まれる（当然、諸データは今後の建設に蓄積されねばならない）。そのために、載荷試験結果の設計支持力への適用手順・手法を確立することが必要である。

この他、設計支持力の設定に関する問題として、以下の3点を指摘したい。

(1) 慣用的に杭頭支持力に上限値を設定している。この考え方が一般化している理由として、

1) 通常、載荷試験が短期試験であるのに対して実構造では長期載荷状態にあること、

2) 杭長が長くなったり、周面摩擦力度が大きな値の場合は、支持力の信頼性が低下するとの認識があること、

3) 施工性の相違等があげられる。

現在の所、公団の設計基準では、上限値を設定していないが、この考え方にどう対応するかさらに検討が必要であろう。

(2) 公団の設計基準では、沖積層の周面支持力を無視している。この理由として、

1) 長期載荷重時の支持力の低下、

2) 地盤の圧密沈下による負の摩擦力、

3) 地震時の液状化などの他、地盤物性の評価と関連して沖積層の信頼性が低いことがあげられる。

(3) 最近のテーマとしては、南伸部2期にみられる薄層支持層に対応する杭設計を行うにあたって、支持層ならびにその下層の粘土層の合理的支持力をいかに評価するかが課題となっている。

#### 4-2 載荷試験結果の杭設計への適用手法

前項で最初に示した問題点の解決策の1例として以下の手法が考えられる。

(1) 載荷試験結果に基づいて、周面摩擦力度、先端支持力度を求め、設計支持力公式を導入するにあたって、①個々の路線、同一地層・地盤に適用できる公式を導く方法と ②個々のデータを集積した結果を統計的に処理し、阪神地盤全体に適用できる支持力公式を導く方法とがある。

(2) 広くデータを収集し、荷重、土質性状、施工性等のバラツキを考慮したうえ、支持力値の安全性に目標値を設定した支持力公式を導入しておき、

当該地盤における載荷試験の結果に基づいて当初設定した支持力を見直し修正する方法も考えられる。

### 5. 載荷試験結果を用いた支持力算定 (その1)

#### 5-1 路線(地盤)別支持力公式の導入

泉北線では、道路と鉄道との一体施工区間があり、この区間に適合した杭設計を統一的行うために載荷試験(杉本杭)を実施して式(2)を導入したので、事例として紹介する。

$$Q=Q_p+Q_f=q_d \cdot A+U \sum f_i \cdot l_i \cdots \cdots \text{式(2)}$$

ここで

Q : 地盤から決まる杭の極限支持力

Q<sub>p</sub> : 基準先端支持力

Q<sub>f</sub> : 最大周面摩擦力

$$q_d=12N(\leq 600tf/m^2)$$

N : 先端地盤のN値

f : 最大周面摩擦力度

f = 0.3N' ( ≤ 12tf/m<sup>2</sup> ) ; 砂質土の場合

f = 0.4N' ( ≤ 6tf/m<sup>2</sup> ) ; 粘性土の場合

N' : 土層のN値

杉本杭と同様に下部構造設計に適用しうる設計データをうる目的で載荷試験された杭は、安治川杭のみで、他の6例は設計支持力の確認のためのみの載荷試験となっている。

#### 5-2 阪神地盤支持力公式の導入

過去に実施した8本の載荷試験結果より、阪神地盤全体に適用しうる支持力公式を導いて、今後の杭の支持力設計に用いることが可能かどうかを検討した。

周面摩擦力度についての集計結果を、表-6および図-14に示す。先端極限支持力度は、図-11の結果から、上部洪積砂層、上部洪積砂礫層および下部洪積層の2種類に区分して整理した結果を表-7に示す。この提案値と道示との対照を図-15に示す。道示により推定する場合、実測値と比

表-6 統計処理結果

| 項目             |                 | Pmax時              | Ry時  | Ru時  |   |
|----------------|-----------------|--------------------|------|------|---|
| 杭<br>周<br>面    | (粘土系)           | サンプル数 n            | 9    | 9    | — |
|                | Ac層             | 平均値 $\bar{\alpha}$ | 1.74 | 1.60 | — |
|                |                 | 変動係数 $V\alpha$     | 0.70 | 0.66 | — |
|                | (砂質系)           | n                  | 14   | 14   | — |
|                | As層<br>+<br>Ds層 | $\bar{\alpha}$     | 0.58 | 0.43 | — |
|                |                 | $V\alpha$          | 1.42 | 1.04 | — |
|                | As層<br>のみ       | n                  | 7    | 7    | — |
|                |                 | $\bar{\alpha}$     | 0.84 | 0.56 | — |
|                |                 | $V\alpha$          | 1.36 | 1.13 | — |
|                | Ds層<br>のみ       | n                  | 7    | 7    | — |
| $\bar{\alpha}$ |                 | 0.33               | 0.30 | —    |   |
| $V\alpha$      |                 | 0.39               | 0.20 | —    |   |
| 杭<br>先端        | サンプル数 n         | —                  | —    | 8    |   |
|                | 平均値 (%)         | —                  | —    | 57   |   |

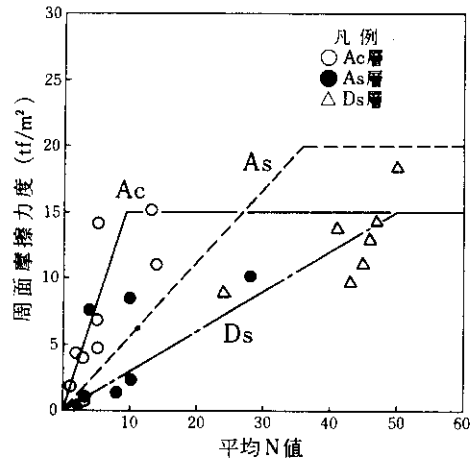


図-14 f~N値関係 (Ry時)

べて平均値に近くなるとともに、バラツキも若干小さくなり、道示なみの精度を確保することが可能と考えられる。

また、建設省土木研究所のデータを用い整理・分析した値(例えば、 $\bar{x}=0.99$ ,  $V_x=0.48$ )<sup>9)</sup>よりもバラツキが少ないのは、阪神間に特定された地盤でのデータであるためと考えられる。

## 6. 載荷試験結果を用いた支持力算定 (その2)

### 6-1 検討手法

ここで述べる方法を「目標安全性指標を用いた方法」と称することとし、図-16に設計支持力の設定に至までの手順を示す。この手法は前述の方法と同様、ある限定された路線・地盤のみに適用

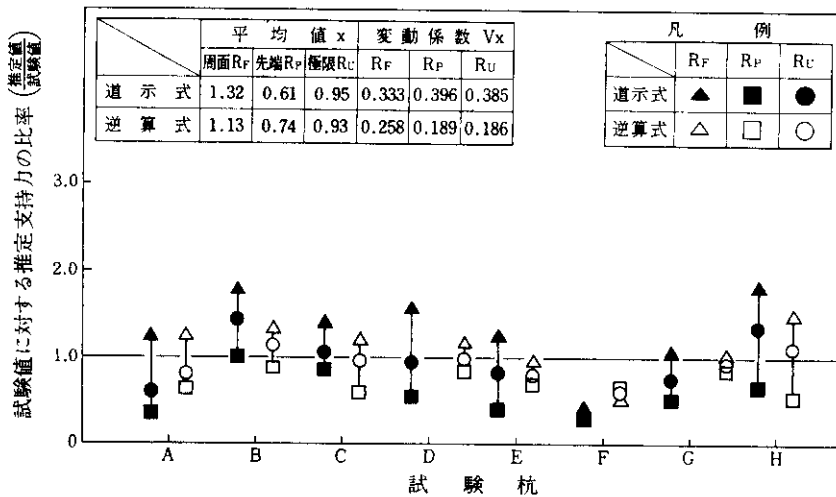


図-15 支持力の推定精度

表-7 f およびqdの推定

|   |                      | 道示式   | 逆算式                                    |
|---|----------------------|---|--|
| 固面摩擦<br>力度<br>f<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | Ac層                  | N 値   | N (≦ 15tf/m <sup>2</sup> )             |
|   | As層                  | $\frac{N}{2}$   | $\frac{N}{2}$ (≦ 20tf/m <sup>2</sup> ) |
|   | Dc層                  | N   | N (≦ 15tf/m <sup>2</sup> )             |
|   | Ds層                  | $\frac{N}{2}$   | $\frac{N}{2}$ (≦ 20tf/m <sup>2</sup> ) |
| 先端支持力度<br>qd (tf/m <sup>2</sup> )       | 300tf/m <sup>2</sup> | 砂 系 : 250 tf/m <sup>2</sup><br>礫 大阪層群 : 500 tf/m <sup>2</sup> |  |

すべきもので、あらかじめ設定された現行支持力(例えば、道示による設計支持力)を載荷試験結果に基づいて補正することを基本としている。

6-2 支持力算定に用いる補正係数

図-16中の補正係数 $\gamma$ は、ある目標とする安全性指標 $\beta_T$ が設定(これにより目標とする破壊確率が定まる)されると、現行の支持力推定式と実際との差を考慮して、所定の安全性を確保するために推定値を補正するものである。補正係数 $\gamma$ は式(3)で表わされる。

$$\gamma = \frac{n \cdot \bar{p}}{\exp(\beta_T \cdot \sqrt{V_R^2 + V_S^2})} = \gamma_{\bar{p}=1} \cdot \bar{p} \dots (3)$$

ここで

$$\gamma : \text{補正係数}$$

$$R_a = \frac{\gamma}{n} \cdot R_u \dots (4)$$

n : 安全率

$$\bar{p} = R_{ut}/R_{uc}$$

R<sub>ut</sub> : 載荷試験による極限支持力

R<sub>uc</sub> : 推定式(一般には道示式)による極限支持力

$\beta_T$  : 目標安全性指標

$V_R, V_S$  : 支持力と荷重に関する変動係数

$$V_R^2 = V_P^2 + 2V_N^2$$

$V_P$  :  $P(=R_{ut}/R_{uc})$ の変動係数,

$$V_P=0.4 \text{とする}$$

$V_N$  : 地盤強度(例ばN値)の変動係数

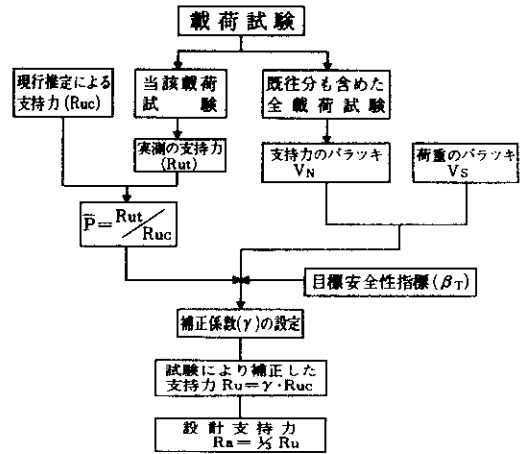


図-16 検討手順

$$V_S = 0.15 \text{とする}$$

図-17に、補正係数 $\gamma_{\bar{p}=1}$ が $V_P$ および $\beta_T$ に対する変化を示す。

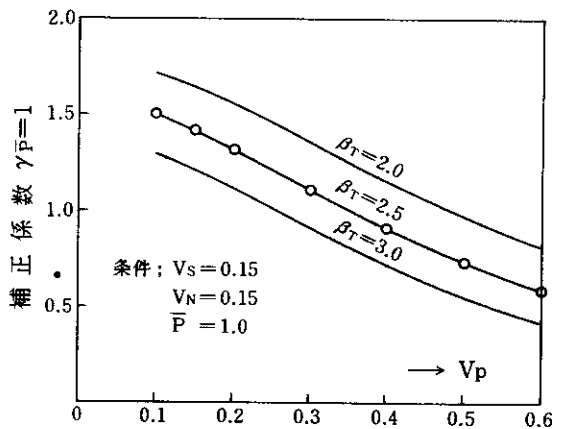


図-17  $V_P \sim \gamma_{\bar{p}=1}$  関係

6-3 設計への適用に関する試算

安全性指標を指数とした設計支持力評価手法を用いて、池田線(延伸部)と湾岸兵庫4期に適用した。これらの設計区間におけるN値の変動係数は、0.15程度であったので、この値を式(3)に導入した。

### 6-3-1 池田線(延伸部)の場合

図-18は、載荷試験結果と計算支持力(先端極限支持力を、300tf/m<sup>2</sup>と650tf/m<sup>2</sup>とした2ケース)との比較であり、杭頭における実測極限支持力と計算極限支持力の比 $\bar{P}$ (式(3)参照)を図中に示す。この $\bar{P}$ を用い、試みに設定した目標安全性指標を $\beta_r=2.5$ とし、補正係数 $\gamma$ を求め、式(4)により算出した支持力と、現行手法による支持力との

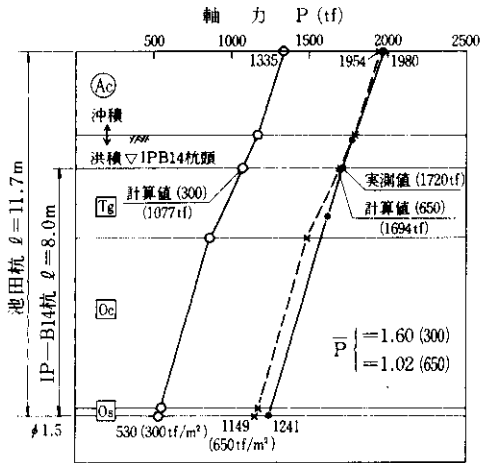


図-18 実測Ruと計算Ruとの比較(池田杭)

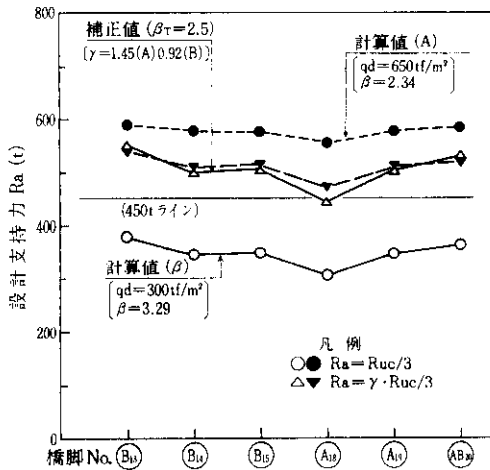


図-19 各地点の設計支持力Ra(大阪池田線)

の比較を図-19に示す。同図には、先端極限支持力度の2ケースに対する支持力の $\beta$ 値を示す。この杭では、図-18に示されるように、周面摩擦力を実測値=計算値と考え $\beta_r=2.5$ に対する先端極限支持力度を逆算すると550tf/m<sup>2</sup>となる。なお、図-19中の450tf/本は、実施設計での杭頭支持力の上限值である。

### 6-3-2 湾岸兵庫4期の場合

図-20に載荷試験による実測値と現行手法による計算値を示す。図-18と比較して周面摩擦力の発現が計算値どおりでなく、また、沖積層の周面摩擦力が計算上無視されているために計算値が実測値を下まわる。

この工区での計算支持力と、本手法の支持力との比較を図-21に示す。 $\beta_r=2.5$ の時の補正係数は0.76、許容支持力400tf/本となり、現行手法の許容支持力を下まわる。したがって、この手法の主旨(安全率を場所にかかわらず一定にする)を満足するためには、計算支持力を割引きして、再設計することが必要となろう。

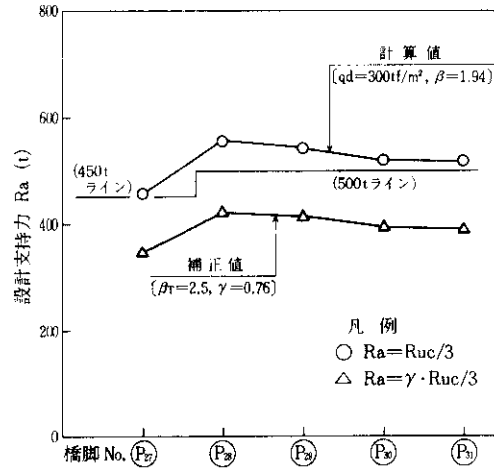
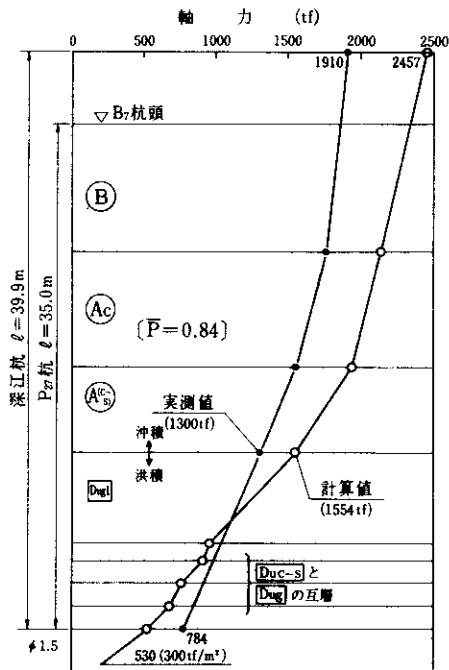


図-20 各地点の設計支持力Ra(湾岸兵庫4期の場合)



図一21 実測Ruと計算Ruとの比較（深江杭）

### あとがき

本文では、公団での既往の載荷試験結果を整理し、阪神地盤における場所打杭の支持力機構を考察するとともに、その成果を設計支持力の設定・確認に反映される手法を検討した。

検討結果の整理にかえて、これらの検討を通じて得られた今後の検討課題をとりまとめあとがきとする。

#### (1) 先端支持力機構の解明

先端支持地盤の土質特性との関連で、先端支持力度を把握し、合理的な先端極限支持力度を推定する必要がある。

#### (2) 極限支持力の沈下量による規定

慣用的に載荷試験の極限支持力として、杭頭沈下量が杭径の10%時の杭頭荷重を用いる設計手法がとられている。

この報告ではこの点を考慮していないが、この

規定を適用すると杭頭極限支持力はここで提示した支持力の90%程度に低下することとなる。今後の動向を見守る必要がある。

#### (3) 試験結果を反映した設計支持力の設定

阪神地盤での支持力推定は、道示式のレベルより精度のあるものであるが、さらにデータを蓄積する必要がある。

また、ここで提案した手法（ $\beta_r$ を用いた支持力の推定）については、仮定条件や前提条件についてのコンセンサスを確立することや実設計への適用を通じてのキャリブレーションが必要であろう。

今後、路線の延伸に伴い、地層構成や支持層位置など新しい地盤に場所打杭の施工が計画されることとなる。薄層支持杭や摩擦杭もその1つである。また、道路橋示方書では杭基礎の安全率を3に統合する方向にあるが、阪神地盤における支持力・沈下特性を把握してこれらの適用を考えるべきである。このため、載荷試験による支持力機構を確認するとともに、この成果を設計支持力の設定に生かすこと、さらには、載荷試験と並行して実施しうる地質調査方法の開発・適用を進めていくことが重要である。

### 参考文献

- 1) 塩井・宇都・冬木・近藤・桜井：杭の荷重—変位曲線の非線形回帰結果による支持力の—評価方，第23回土質工学シンポジウム（昭和53年）
- 2) 阪神高速道路公団：場所打杭の支持力検討業務報告書（昭和60年3月）
- 3) 山田・松本・江見・大志万：基礎構造物の設計における安全性評価，橋梁と基礎（83—5）
- 4) 土木学会：国鉄建造物設計基準、基礎構造物・坑圧構造物（昭和61年3月）