

## 軸方向押込み力に対する杭の支持特性に関する研究

## A STUDY ON VERTICAL BEARING CHARACTERISTICS OF PILES

岡原美知夫\*・中谷昌一\*\*・田口敬二\*\*\*・松井謙二\*\*\*\*

By Michio OKAHARA, Shouichi NAKATANI, Keiji TAGUCHI and Kenji MATSUI

This paper attempts to propose the formulas for estimating vertical spring constants of the pile top under a condition named the elastic limit state as well as to grasp quantitatively this limit state against the vertical force of a single pile.

On the basis of a new definition of the ultimate bearing capacity through the settlement level (settlement of the pile top/diameter of pile), we present an equation for predicting the ultimate bearing capacity which is applicable irrespectively of the supporting system of piles.

Then, evaluation of safety factors for the ultimate limit state is made by considering accuracy in this equation.

Keywords: pile, in-situ loading test, spring constant, safety factor

## 1. 序

現行の道路橋示方書<sup>1)</sup> (1990, 日本道路協会) (以降、道示と略称する) に規定されている設計法は、いわゆる許容応力度設計法とよばれるものである。

周知のように、カナダ、オンタリオ州道路橋設計規準<sup>2)</sup> (1983) が上部構造から基礎構造まで完全な限界状態設計法に基づく設計規準で、運用されてからすでに10余年の実績を有するほか、他の西欧諸国の規準も部分的にしろ、限界状態設計法 (または荷重抵抗係数設計法<sup>3)</sup>) を導入している例が多い。わが国においてもコンクリート標準示方書 (1986, 土木学会) 制定を契機として、さまざまな規準類の設計体系が新しい設計法に移行するすう勢にある。

道示に関しても将来、限界状態設計法の正式な導入が予定されており、基礎構造の分野に関しても、たとえば「道路橋下部構造の限界状態設計法に関する調査研究委員会」(国土開発技術研究センター) により本格的な研

究が鋭意進められている<sup>4)</sup>。わが国の場合、下部構造物の規模が地震時により決定されるという諸外国に例をみない特殊な荷重環境にあるところから、わが国固有の設計法の策定が期待されているところである。

さて、基礎の設計においてどのような限界状態を設定するかについては今後の研究に待たねばならないが、いずれにしても現行道示の規定の背景となっている設計思想を理解しておく必要がある。杭のような弾性体基礎の安定設計は、支持力に対して十分安全であるとともに、有害な残留変位を生じないよう所定の許容変位量を越えてはならないことを基本としている。すなわち、現行道示では杭を線形ばね定数に置換して解析を行い、得られる変位および杭頭反力を基礎が弾性的な挙動をする範囲内に抑える設計がなされている。

本文は、道路橋基礎の限界状態設計法に対応した設計規準の策定へ向けて、単杭の軸方向挙動について、その可逆性がおおむね保証される限界の状態 (弾性限界状態) における杭頭ばね定数の評価および終局限界状態における杭の極限支持力の推定精度の向上のため、軸方向押込み力に対する杭の支持特性について研究したものである。

まず2. では本研究に用いた杭の鉛直載荷試験データの内訳を示す。3. では上記の理由から  $\log P \sim \log S$  法

\* 正会員 建設省土木研究所基礎研究室室長  
(〒305 つくば市大字旭1)

\*\* 正会員 建設省土木研究所基礎研究室研究員 (同上)

\*\*\* 正会員 建設省土木研究所基礎研究室 (同上)

\*\*\*\* 正会員 (株) 建設技術研究所福岡支社技術第2部  
(〒810 福岡市中央区渡辺通2-1-10)

により得られた降伏点の沈下量に着目した杭頭における軸方向ばね定数に関して検討する。従来の道示における軸方向ばね定数の規定は、安定計算における変位法の導入に伴い杭頭沈下量が1cmに相当する割線勾配として定義されてきた。しかし、近年杭径も大口径化し、多種多様な施工法が開発・利用されてきている現状では基準とする沈下量を固定する理由が必ずしも明確ではなくなってきた。ここでは施工法・支持形式別の杭の荷重-沈下関係を整理し、その沈下性状を把握する。次いで鋼管杭（以降、SPPと略称する）と場所打ち杭（同CCP）に着目して降伏点における支持力（以降、降伏支持力という。降伏荷重と同意）と沈下量の根入れ比依存性を考察し、新しいばね定数の推定式を提案する。4. では、SPPとCCPを対象として杭の極限支持力を周面摩擦力と先端支持力に区別して、より推定精度の高い支持力推定式を検討する。

現行道示によれば支持形式によって杭は支持杭と摩擦杭に分類され、後者の場合先端支持力は安全側の配慮として無視される。しかし、支持力の安全余裕度が杭先端地盤の $N$ 値によって不連続となり不都合である。したがって、ここでは支持形式によらず先端支持力を考慮するものとする。本節では、また従来の安全率に代わる新しい安全係数の概念を設定し、新しい支持力式の安全係数値についても考察する。最後に、5. において本研究の結論と今後の課題についてまとめる。

なお、本文において用いる記号の定義は次に示すとおりである。

- $R_0$ ：杭頭荷重,  $S_0$ ：杭頭沈下量,  $R_u$ ：極限支持力
- $R_y$ ：降伏支持力,  $S_y$ ：降伏沈下量,  $R_y$ 時の杭頭沈下量,  $m$ ：変位係数
- $l$ ：杭長,  $D$ ：杭径
- $R_m$ ：試験時の最大荷重
- $S_{0m}, S_{0m}/D$ ： $R_m$ 時の杭頭沈下量, 沈下量杭径比
- $R_{u10}$ ：杭頭沈下量  $S_0$ が杭径の10%に達するときの杭頭荷重  $R_0$ 。
- $R_{u10}^*$ ：式(1)(3.(1)参照)により推定した  $R_{u10}$
- 先端  $N$  値：SPPは、杭先端より上方  $4D$  および下方  $1D$  の範囲の平均の  $N$  値。CCPでは杭先端位置の  $N$  値。
- $P_m$ ：最大荷重  $R_m$  時の杭先端への伝達荷重
- $S_m, S_m/D$ ： $P_m$  時の先端沈下量, 沈下量杭径比
- $P_p$ ：杭頭  $R_{u10}$  時の杭先端への伝達荷重
- $S_p, S_p/D$ ： $P_p$  時の先端沈下量, 沈下量杭径比
- $P_{u10}^*$ ：杭先端の荷重-沈下関係より式(1)による先端沈下量が杭径の10%時の杭先端への伝達荷重

表—1 載荷試験データの内訳

支持形式	施工法	略称	一次選定データ			二次選定データ		
			データ数	$R_{u10}$ 有りデータ	$R_y$ のみデータ	データ数	$R_{u10}$ 有りデータ	$R_y$ のみデータ
支	打込み鋼管杭	SPP	59	17	42	34	15	19
	打込みPC・PHC杭	PC・PHC	24	0	24	8	0	8
	場所打ち杭	CCP	39	14	25	19	8	11
杭	中掘り鋼管杭	中掘りSPP	20	16	4	15	14	1
	中掘りPC・PHC杭	中掘りPC	23	12	11	13	10	3
	小計		165	59	106	89	47	42
摩擦杭	打込み鋼管杭	SPP	29	5	24	16	4	12
	打込みPC・PHC杭	PC・PHC	15	2	13	9	2	7
	場所打ち杭	CCP	20	11	9	14	10	4
	小計		64	18	46	39	16	23
合計			229	77	152	128	63	65

## 2. 載荷試験データ

土木研究所が各地方建設局、都道府県および道路4公団等の関係機関から収集した杭の鉛直載荷試験の全データ数は520件にのぼるが、データ選定の結果、表—1に示すように解析の対象として採用したデータは一次選定データ229件、二次選定データ128件である。一次選定データにおいては、 $N$ 値や  $R_y$  が不明確で解析不能なデータを除いており、二次選定においては降伏点を越えて十分載荷され、ワイブル分布曲線により近似できるデータを抽出したものである。

極限支持力の判定は、「荷重-沈下曲線が沈下量の軸にほぼ平行とみなされている荷重<sup>5)</sup>」とされているが実際の  $R_0 \sim S_0$  曲線からの判定はなかなか難しく、これまでに種々の具体的な提案<sup>6)</sup>がなされている。ここでは他の関係機関の規準でも採用<sup>7),8)</sup>されている「杭径の10%沈下時の荷重」を採用することとし、この定義による極限支持力を  $R_{u10}$  と表示している。

これらの載荷試験は、 $R_u$ まで載荷された例と、 $R_y$ 程度まで載荷された例の2種類に大別され、前者は後者の半分程度にすぎない。実測の杭頭荷重-沈下量曲線より  $R_{u10}$  の得られるデータを「 $R_{u10}$ 有データ」、 $R_y$ のみ判定されるデータを「 $R_y$ のみデータ」と区別している。また支持杭と摩擦杭の区分は現行道示の判定に準拠し、いわゆる良質な支持層（砂質土では  $N$  値30以上、粘性土では20以上）に根入れされているか否かによった。

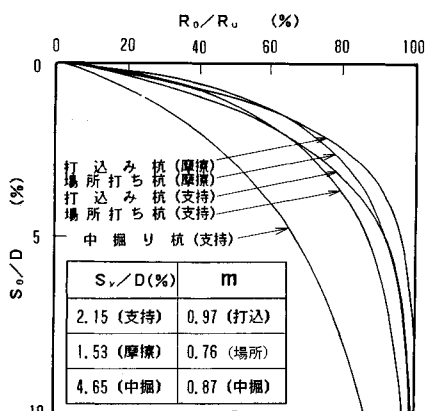
昭和60年度に土木研究所で実施した基礎形式選定手法調査<sup>9)</sup>結果と対比した結果、ここで収集されたデータは通常よく用いられている杭を代表するものと考えてさしつかえないことがわかった。ただし、中掘り杭工法による摩擦杭は、収集されたデータにおいては例がなかった。

以下、杭種は表中に示した略称を用いる。

## 3. 軸方向ばね定数の評価

### (1) 荷重-沈下特性

施工法・支持形式別に杭頭荷重-沈下関係がどのよう



図一  $R_u/R_a \sim S_v/D$  曲線

な特性を示すものか、宇都ら<sup>10)</sup>の提案しているワイブル分布曲線式を用いて調査する。ワイブル分布曲線式は、式(1)で表わされる。

$$R_u/R_a = 1 - \exp(- (S_v/S_v^m)) \dots \dots \dots (1)$$

表一に示す施工法の二次選定データを対象として各データの降伏沈下量の杭径比  $S_v/D$  および  $m$  について調査した。後述するように  $S_v/D$  は杭長によっても変化することが判明しているが、ここでは概略の傾向を調べるために施工法・支持形式別に平均値で比較する。

その結果、図一に示すように施工法・支持形式別におおむね5つの曲線群に分類できることができるようである。 $S_v/D$  は支持形式別に、支持杭が約2%、摩擦杭が約1.5%といった程度の差がある。中掘りPCや中掘りSPPといった中掘り工法は4.5%以上と、他の工種に比べて著しく大きい。

従来から指摘されている<sup>11)</sup>ように杭の支持機構はまず周面摩擦力が発現し、周面の塑性化ののちも先端抵抗は増加する。ここで降伏点は摩擦杭では周面摩擦力の降伏時に、また支持杭では周面の塑性化が始まる前後に該当することが多い。図一にもその傾向がうかがえる。また、中掘り杭のように周面抵抗が著しく小さく、先端支持力に期待する工法の沈下量は一般に大きくなるのがわかる。

$m$  は、SPP、CCP および中掘り杭に区別され、SPPでは1に近く、CCPが最も小さく中掘り杭はその中間にある。すなわちSPPに比べてCCPは降伏点以降の沈下量の増加に伴う杭頭荷重の増加割合が小さい傾向を有していることがわかる。

また図一からSPPやCCPでは杭径の10%の沈下を生じると  $R_u/R_a$  は95%以上であり、ほぼこの沈下レベルを生じた場合極限支持力が発現するとみなすことができる。中掘り杭の場合  $R_{ult}$  は真の極限支持力  $R_u$  の85%にすぎないことが図一よりわかる。

(2) 新しいばね定数の検討

杭頭における軸方向ばね定数  $K_v$  (単位  $tf/m$ , 以降  $K_v$  と略称する) は、 $R_u/S_v$  で定義されるが、図一からわかるように、非線形の沈下量依存性を示す。したがって線形解析を基本とする変位法にあっては、基準となる沈下量を設定する必要がある。周知のように、従来の道示では基準沈下量として1cmを想定していた。これは水平方向の地盤反力係数 ( $k$  値) の場合の基準値も同様であって、この背景では“この程度の変位に着目しておけば、十分杭は弾性範囲にあり、おおむねその挙動も実際に近似し得る”との見解によるものであった。しかし、杭も大口径化、長尺化し、その施工法も多種多様化してきた現在、基準値の見直しが望まれていた。加えて、限界状態対応の設計法では  $K_v$  によりモデル化する限界状態が“弾性限界状態”に相当するとすれば、基準値は  $R_u \sim S_v$  曲線における降伏点、すなわち軸方向挙動の可逆性がおおむね保証される限界の状態に着目するのが妥当であろう。よって、新しい  $K_v$  として降伏沈下量  $S_v$  時の割線勾配と定義することとし、表一に示す一次選定データに基づき、その推定式を検討することとした。

従来から道示における  $K_v$  は式(2)で与えられる。

$$K_v = a \cdot \frac{A_p E_p}{l} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $a$ : 施工法別に杭の根入れ比 ( $l/D$ ) から決まる係数

$A_p$ : 杭の純断面積

$E_p$ : 杭体の弾性係数

$a$  は慣用的に  $a = \alpha(l/D) + \beta$  の式で表現されており、今回の調査でもこの形に準拠することとした。 $K_v$  の調査とは、この係数  $a$  の推定式を作ること (すなわち  $\alpha, \beta$  を決定すること) であり、載荷試験データによる実測  $K_v$  から式(3)による逆算  $a$  と  $l/D$  の直線回帰より決定される。

$$\text{逆算 } a = \text{実測 } K_v / \frac{A_p E_p}{l} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $E_p$  は最新の試験データより杭種別に  $2.1 \times 10^5$  (SPP),  $3.3 \times 10^5$  (PC),  $4.0 \times 10^5$  (PHC) および  $2.7 \times 10^5$  (CCP) ( $kgf/cm^2$ ) を採用している。また、式(3)におけるSPPの  $A_p$  では腐食代は考慮していない。

表二に  $K_v$  の係数  $a$  の式を示す。表中には以前の  $\delta = 1$  cm に着目したときの係数  $a$  を参考までに備考欄に

表二 係数  $a$  の推定式

施工法	データ数	$a = \alpha(l/D) + \beta$	相関係数	備考 (5%生変式 $\delta = 1$ cm)	標準偏差
SPP	42	$0.014(l/D) + 0.78$	56%	$0.027(l/D) + 0.20$	0.46
PC・PHC	30	$0.013(l/D) + 0.61$	50%	$0.041(l/D) - 0.27$	0.46
CCP	42	$0.031(l/D) - 0.15$	75%	$0.022(l/D) - 0.05$	0.25
中掘りSPP	20	$0.009(l/D) + 0.39$	62%	$0.016(l/D) + 0.57$	0.28
中掘りPC	22	$0.011(l/D) + 0.36$	74%	$0.016(l/D) + 0.11$	0.25

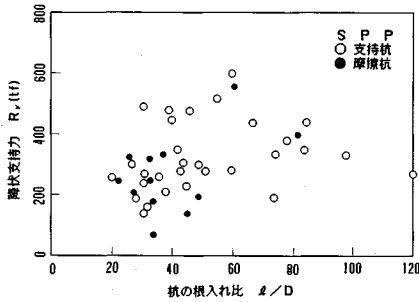


図-2 降伏支持力  $R_v$  と根入れ比  $l/D$  (SPP)

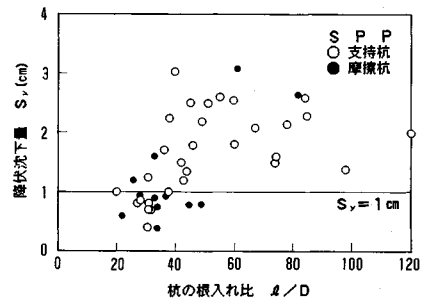


図-4 降伏沈下量  $S_v$  と根入れ比  $l/D$  (SPP)

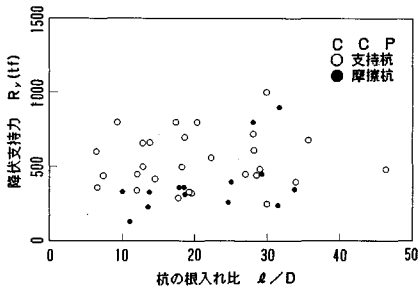


図-3 降伏支持力  $R_v$  と根入れ比  $l/D$  (CCP)

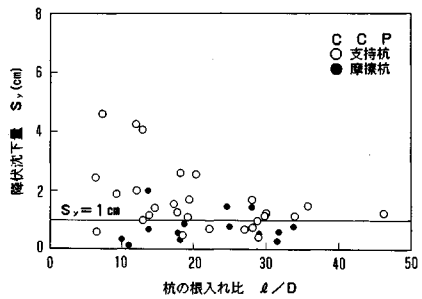


図-5 降伏沈下量  $S_v$  と根入れ比  $l/D$  (CCP)

併記した。

ここで係数  $a$  の勾配  $\alpha$  および切片  $\beta$  が  $K_v \sim l/D$  関係に及ぼす影響についてふれておく。

$a = \alpha(l/D) + \beta$  を式 (2) に代入して、式 (4) が得られる。

$$K_v = a \frac{A_p E_p}{l} = \left\{ \alpha \frac{l}{D} + \beta \right\} \frac{A_p E_p}{l} \\ = \alpha \cdot \frac{\pi D E_p}{4} + \beta \cdot \frac{A_p E_p}{l} \dots \dots \dots (4)$$

杭径が同じであれば、式 (4) の右辺第 1 項は定数項となり、右辺第 2 項が杭長  $l$  の増加とともに減少する変数項である。したがって、 $\beta=0$  の場合は  $K_v$  は  $l/D$  によらず一定となる。 $\beta$  が正の場合、 $K_v$  は第 2 項の効果により  $l/D$  の増加とともに減少する曲線を示し、逆に負の場合 (CCP が唯一の例) は増加する曲線となる。

この  $K_v \sim l/D$  曲線の特性を念頭に入れて、SPP と CCP を対象に  $l/D$  との関連で沈下特性を以下に考察する。

降伏支持力  $R_v$  と  $l/D$  の関係を支持形式をパラメータとして図-2, 3 に示す。 $R_v$  は SPP では 600 tf 以下、CCP では 1000 tf 以下であり、支持杭に比べて摩擦杭の支持力がやや小さいようである。 $R_v$  と  $l/D$  の関係は CCP では全く無関係であり、 $R_v$  の大小は杭径に依存していることがわかっている。SPP では  $R_v$  は  $l/D$  に比例して増加する傾向がうかがえる。

図-4, 5 に降伏沈下量  $S_v$  と  $l/D$  の関係を示す。

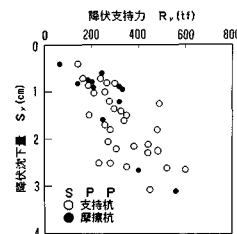


図-6 降伏支持力  $R_v$  と沈下量  $S_v$  (SPP)

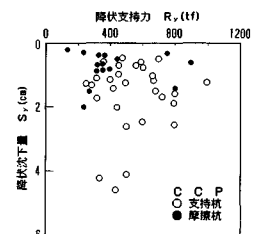


図-7 降伏支持力  $R_v$  と沈下量  $S_v$  (CCP)

SPP の場合、図-4 に示されるように  $S_v$  もまた  $l/D$  に比例して増加する傾向を示す。したがって図-6 に示すように  $R_v \sim S_v$  関係において両者に強い比例関係がみられ、 $R_v$  (または  $S_v$ ) が小さな (大きな) 領域では  $l/D$  の小さな (大きな) 杭が大部分を占めること、大きな  $R_v$  を得るためには、より大きな  $S_v$  を必要としていることがわかる。摩擦杭のデータが少ないので明確にはいえないが、 $l/D$  が 60 および 80 付近のデータを尊重すれば、支持形式の差はみられないことになる。

一方、CCP の場合、図-5 から  $l/D$  が小さくなるに従い  $S_v$  は大きくなる傾向がうかがえる。特に  $S_v$  が大きい  $l/D=20$  以下の領域の 5 件のデータを調べてみると、いずれも周面地盤が比較的軟弱で、支持力を先端に期待する度合いの大きな杭であることがわかっている。したがって、降伏支持力と判定されるには、先端支持力の発現までに大きな沈下を必要とすると解釈される。また、摩擦杭にのみ着目すれば、 $S_v$  は  $l/D$  とは無関係に

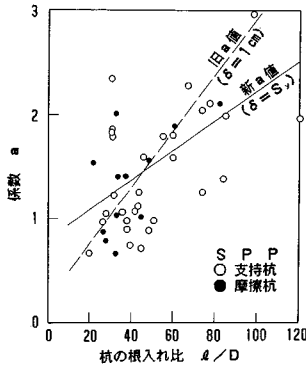


図-8 係数  $\alpha$  と根入れ比  $l/D$  (SPP)

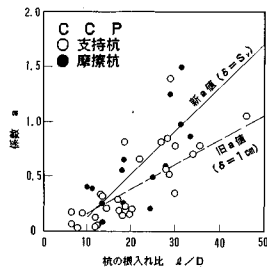


図-9 係数  $\alpha$  と根入れ比  $l/D$  (CCP)

ほぼ一定のようにもみえる。CCP の  $R_v \sim S_v$  関係を図-7 に示す。SPP (図-6) と異なり、両者の相関はみられず、 $R_v$  が大きい (小さい) といって必ずしも  $S_v$  が大きい (小さい) とは限らない。

なお、ここでは支持形式の差の  $K_v$  に及ぼす影響は少ないと判断して、 $K_v$  検討における支持形式による区別は特に行わないこととした。

各データの逆算  $\alpha$  と  $l/D$  の関係をプロットし、新旧の係数  $\alpha$  の計算式を図-8, 9 に比較した。SPP の場合、 $l/D$  により、新旧の係数  $\alpha$  の逆転がみられるが、CCP では全体的に新  $\alpha$  値が  $\delta=1\text{cm}$  で求められる旧  $\alpha$  値よりも大きい結果が得られる。図-5 の  $S_v \sim l/D$  関係からみると、 $l/D$  が 10 前後で  $S_v$  が 1cm よりも大きくなる例がみられるが、それ以外の範囲では、 $S_v$  が 1cm を下回る点もかなり多く、一方  $R_v$  は  $l/D$  による傾向がみられないことから予測された結果である。

実際の  $K_v$  の分布に対して、上記の推定式による計算  $K_v$  がどのような曲線を描くものか、 $l/D$  との関係を図-10, 11 に整理した。計算  $K_v$  は杭の径や肉厚によって変化するので、ここでは試験データの諸元を考慮して複数の  $K_v$  曲線を図示した。

SPP の実測  $K_v$  は、おおむね肉厚  $t=9\sim 15\text{mm}$  の計算による  $K_v$  曲線の範囲にあるが、実測の  $t$  は必ずしも計算上の曲線には対応していない。 $K_v$  曲線によると、 $l/D$  が 20 以下において急激に大きくなっているが、こ

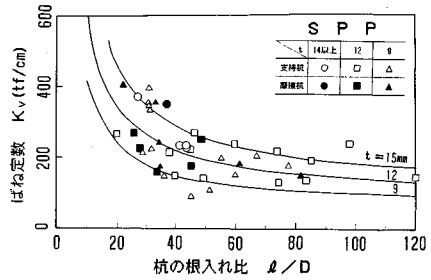


図-10 ばね定数  $K_v$  と根入れ比  $l/D$  (SPP)

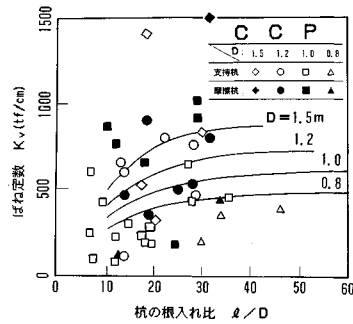


図-11 ばね定数  $K_v$  と根入れ比  $l/D$  (CCP)

の付近には実測データがなく、今後のデータの蓄積が望まれる。

一方、CCP は実測  $K_v$  と  $l/D$  がどのような関係にあるのか、SPP に比べて不明確である。 $K_v$  曲線は係数  $\alpha$  の切片  $\beta$  が負号であるため、 $l/D$  に比例して増加する曲線となるが、実測  $K_v$  の分布はややその傾向がうかがえるにすぎず、杭径による差も認められない。

これは CCP の場合、杭の剛性 ( $A_p \cdot E_p$ ) が大きく  $\alpha$  の推定精度が著しくよくないと、 $K_v$  の推定精度が向上しないことによっている。 $l/D$  を用いた推定法の見直しも含めて推定精度の向上が今後の課題の 1 つである。

#### 4. 軸方向支持力の評価

##### (1) 支持力・沈下一覧

本節ではデータ数の充実している SPP と CCP を対象として、終局限界状態において問題となる杭の軸方向極限支持力に関連する課題について検討する。

表-3, 4 に杭種ごとに杭頭と先端に分けて支持力と沈下特性を一覧表に整理した。これらのデータは、表-1 に示す一次選定データのうち、杭体の深さ方向の軸力分布が精度よく測定されたデータを選定したものである。ここで、杭先端の支持力とは、厳密には最下点ゲージ位置 (おおむね杭先端から 50~100cm 上) での軸力に相当するものである。

杭頭における極限支持力としては、実測の  $R_{u10}$  が得られている場合はその値とし、得られていないとき (す

なわち  $S_{0m}/D < 10\%$  ) には、 $R_{u10}^*$  をこれにあてる (表中の○印の項)。

杭先端の支持力は、表中に採用値として○印で表示してあるが、次の要項により決定したものである。

- ① 杭頭での  $R_{u10}$  がある場合は、そのときの杭先端

表一3 支持力と沈下諸元 (SPP)

形式	D (mm)	L (m)	D/L	杭		頭		先		端				
				$R_u$ (tf)	$S_{0m}/D$ (%)	$R_{u10}$ (tf)	$R_{u10}$ (tf)	$P_u$ (tf)	$S_{0m}/D$ (%)	$P_u$ (tf)	$S_{0m}/D$ (%)	$P_{u10}$ (tf)		
支	800	31.7	33.8	643	4.0	—	○ 816	50以上	○ 135	3.1	—	—	×	
	600	17.0	28.3	240	2.8	—	○ 272	#	126	1.7	—	—	○ 130	
	406	30.0	73.9	440	21.2	○ 460	—	#	138	15.5	○ 117	5.4	—	
	914	27.0	28.5	1300	25.1	○ 1069	—	—	#	789	23.0	○ 495	8.5	—
	813	46.0	56.8	700	5.4	—	○ 775	#	○ 150	—	—	—	×	
	600	46.0	76.7	520	6.3	—	○ 595	#	○ 120	—	—	—	×	
	600	18.7	31.2	350	12.2	○ 345	—	60以上	59	8.8	○ 59	8.8	—	
	813	35.4	43.6	500	3.9	—	○ 667	33	37	1.3	—	—	○ 38	
	600	23.0	38.3	330	17.8	○ 301	—	40	192	16.1	○ 152	8.6	—	
	600	27.0	45.0	420	3.4	—	○ 615	50以上	117	0.6	—	—	○ 112	
持	813	22.0	27.1	490	10.4	○ 486	—	45	228	9.4	○ 224	9.0	—	
	813	27.0	33.2	565	2.6	—	○ 611	40	292	1.1	—	—	○ 275	
	1500	58.0	38.7	1300	2.9	—	○ 1460	60以上	130	1.3	—	—	○ 373	
	1000	58.2	58.2	1000	4.3	—	○ 1304	#	210	1.3	—	—	○ 229	
	406	14.0	34.4	105	7.9	—	○ 115	110	10	1.8	—	—	○ 13	
	800	20.5	25.5	500	9.6	○ 500	—	20	90	—	—	—	×	
	813	30.7	37.8	585	5.4	—	○ 835	119	30	2.2	—	—	○ 30	
	813	23.2	28.5	305	4.4	—	○ 352	110	21	2.4	—	—	○ 22	
	600	20.0	33.3	300	4.2	—	○ 332	15	27	3.1	—	—	○ 28	
	600	28.0	46.7	400	2.4	—	○ 560	119	18	0.9	—	—	○ 18	
端	800	50.5	63.1	600	4.4	—	○ 666	119	80	0.8	—	—	×	
	600	50.5	84.2	470	5.8	—	○ 593	119	28	1.8	—	—	×	
	813	27.0	33.2	420	2.1	—	○ 566	110	89	0.7	—	—	×	
	813	18.0	22.1	420	2.8	—	○ 457	20	99	1.8	—	—	○ 101	
	813	36.0	44.3	300	1.7	—	○ 334	119	24	1.0	—	—	×	
	1500	69.0	46.0	1500	3.3	—	○ 1067	119	60	1.2	—	—	○ 59	

( ) 内は粘性土地盤

表一4 支持力と沈下諸元 (CCP)

形式	D (mm)	L (m)	D/L	杭		頭		先		端			
				$R_u$ (tf)	$S_{0m}/D$ (%)	$R_{u10}$ (tf)	$R_{u10}$ (tf)	$P_u$ (tf)	$S_{0m}/D$ (%)	$P_u$ (tf)	$S_{0m}/D$ (%)	$P_{u10}$ (tf)	
支	1500	26.0	17.3	1900	2.3	—	○ 1653	50以上	289	2.1	—	—	○ 422
	1500	30.5	20.3	1000	3.2	—	○ 1237	#	○ 350	2.6	—	—	×
	1500	20.0	13.3	1550	22.8	○ 1607	—	60以上	1235	16.9	○ 1038	9.6	—
	1200	23.5	19.6	1700	16.7	○ 1560	—	50以上	787	15.8	○ 590	8.7	—
	1500	44.9	29.9	1930	3.5	—	○ 2504	#	894	2.6	—	—	○ 302
	1000	51.2	51.2	1050	3.4	—	○ 1159	#	○ 966	0.9	—	—	×
	2000	38.0	19.0	3200	8.8	—	○ 3185	#	2280	8.4	—	—	○ 2423
	1200	15.3	12.8	680	5.7	—	○ 1135	#	○ 120	—	—	—	×
	1500	40.0	26.7	2600	32.1	○ 2000	—	45	○ 190	—	—	—	×
	1200	34.4	28.7	910	7.1	—	○ 858	40	323	6.5	—	—	○ 370
持	1200	33.9	28.3	930	5.2	—	○ 912	35	○ 273	4.7	—	—	×
	1270	28.2	22.2	1230	10.9	○ 1200	—	45	380	10.6	○ 310	9.7	—
	1230	16.5	13.8	1000	5.8	—	○ 1032	35	○ 260	5.6	—	—	×
	1000	12.0	12.0	440	15.0	○ 380	—	35	○ 240	—	—	—	×
	1500	23.2	15.4	1500	10.4	○ 1470	—	30	○ 600	—	—	—	×
	1280	16.5	13.8	1000	5.8	—	○ 965	33	○ 342	5.6	—	—	×
	1200	37.9	31.5	800	7.8	—	○ 784	110	○ 211	7.3	—	—	○ 262
	1500	47.6	31.7	1200	1.5	—	○ 1206	110	○ 55	0.9	—	—	×
	1200	23.5	19.6	550	5.8	—	○ 618	110	81	4.6	—	—	○ 85
	1200	31.0	25.8	750	5.2	—	○ 773	119	○ 97	4.7	—	—	×
端	1200	33.7	28.1	1050	5.7	—	○ 1048	119	○ 79	5.3	—	—	×
	1000	27.0	27.0	680	1.2	—	○ 973	15	35	0.9	—	—	○ 47
	1000	18.0	18.0	680	6.4	—	○ 682	20	○ 167	6.0	—	—	×
	2000	40.0	20.0	4000	10.2	○ 4000	—	25	○ 1388	—	—	—	×
	800	27.0	33.8	440	25.1	○ 430	—	110	120	24.4	○ 83	9.0	—
	1200	16.5	13.8	480	2.2	—	○ 493	15	○ 50	—	—	—	×
	1016	25.0	24.5	480	25.5	○ 380	—	110	200	25.3	○ 87	9.5	—
	800	10.9	13.6	400	13.8	○ 340	—	20	115	10.7	○ 101	9.6	—
	1000	18.9	18.9	600	7.4	—	○ 621	25	○ 175	7.1	—	—	×
	1000	13.0	13.0	560	11.0	○ 525	—	20	250	10.0	○ 211	8.8	—
杭	1000	31.0	31.0	580	6.0	—	○ 697	119	○ 105	3.7	—	—	×
	1016	25.0	24.6	480	25.5	○ 392	—	9	209	25.3	○ 90	9.8	—

( ) 内は粘性土地盤

への伝達荷重  $P_0$

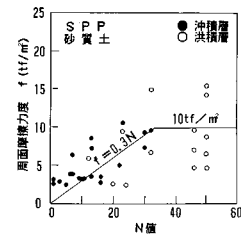
- ② ①が得られていない場合は、式(1)による  $P_{u10}^*$
- ③ ②が困難な場合は、実測の最大値  $P_m$

したがって先端支持力としては、①~③のどの値によるかによって精度が多少異なり、表の先端沈下量杭径比から推察されるように、①と② (平均  $S_{0m}/D > 8\sim 9\%$ ) では支持力に大差ないが、③ (平均  $S_{0m}/D = 3\sim 5\%$ ) では先端支持力を小さめに評価していることが予想される。なお、表一3, 4において「-」は実測値が得られていないか、ワイブル分布曲線式による解析を行っていない場合、「×」はワイブル分布曲線式の解析において解が得られない場合を表わす。

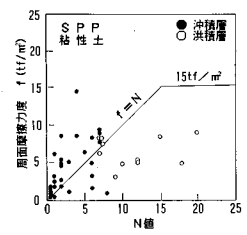
(2) 周面摩擦力と先端支持力

まず周面摩擦力  $f$  と  $N$  値の関係について述べる。周面摩擦力の推定法に関しては、土質工学的方法<sup>2)</sup> など数多くの式が提案されているが、わが国の実情に照らし合わせてみた場合、 $N$  値 (または粘着力  $C$ ) から推定してもある程度の精度が期待できるとの報告がある<sup>12)</sup>、図一12~15に杭種・土質別に  $f$  と  $N$  値の相関を調べた結果を示す。ここでは  $f$  は各地層の周面摩擦力  $\tau$  ~ 杭と地盤の相対沈下量  $S$  曲線においてピークを有するもの、または  $\tau$  が収束しているとみなし得るデータのみを採用し、その最大値を  $f$  とした。ただし、実際に得られた  $f$  は、 $\tau$  ~  $S$  曲線が後者の傾向を示したものが多く、 $S_{0m}/D$  が  $2\sim 3\%$  程度においては顕著な  $\tau$  の低下はみられない。図には地質調査報告書に基づく地質区分 (沖積層、洪積層) を表示している。

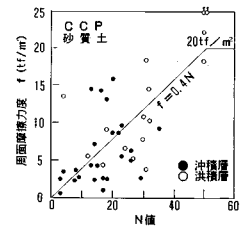
全体的にばらつきが大きいのが、沖積層に比べて洪積層



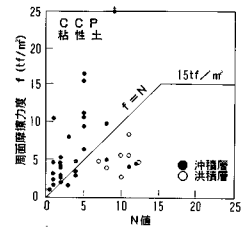
図一12 周面摩擦力  $f$  と  $N$  値 (SPP・砂質土)



図一13 周面摩擦力  $f$  と  $N$  値 (SPP・粘性土)



図一14 周面摩擦力  $f$  と  $N$  値 (CCP・砂質土)



図一15 周面摩擦力  $f$  と  $N$  値 (CCP・粘性土)

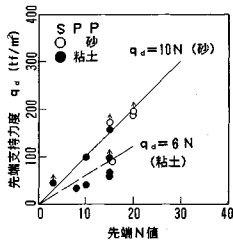


図-16 先端支持力度  $q_a$  と先端  $N$  値 (SPP)

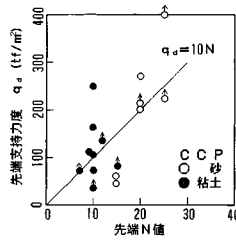


図-17 先端支持力度  $q_a$  と先端  $N$  値 (CCP)

の  $f$  と  $N$  値依存性が小さいことや、砂質土の場合現行道示 ( $f=0.2N$  (SPP),  $0.5N$  (CCP)) に比べて杭種による違いが少なくなっている傾向がみられる。

これらの実測値より、4. (3) での支持力計算のための  $f \sim N$  値は、図中の太線に示す関係式とした。  $f$  の上限値については、道示や関係機関の規準類を参考に設定した。ただし、図-13, 15 からわかるように、粘土層の場合、今回対象としたデータからは  $f$  の上限値として  $15 \text{ tf/m}^2$  とすることに対し、過大評価との疑問が残る。

次に先端支持力について述べる。現行道示によれば、良質な支持層に根入れされているか否かで支持形式を区分し、摩擦杭の場合、安全側の配慮として先端支持力を無視する。しかしうまでもなく、実際の杭の挙動が良質な支持層を境界として飛躍するわけではない。著者らは、支持力比  $P$  (実測支持力  $R_i$  / 計算支持力  $R_n$ ) の平均値  $P$  と変動係数  $V_p$  を考慮した「補正係数  $\gamma$ 」という概念により施工法・支持形式別の調査を行った<sup>13)</sup>。この結果によれば、支持形式によって明らかに安全性に有意差があることが判明している。この理由の1つとして、摩擦杭における先端支持力の無視があると考えている。著者らは、基礎の設計に限界状態設計法を導入する際には、支持力推定式はあくまでも平均値を推定するものを設定し、その推定式のもつ推定精度を考慮して安全係数を定めたいと考えている。したがって、以降の検討においては支持形式により支持力推定式を区別することはなく、摩擦杭の先端支持力も考慮するものとする。

摩擦杭を対象として杭種別に先端支持力度  $q_a$  と先端  $N$  値の関係を図-16, 17 に示す。図中の矢印は、表-3, 4 において  $q_a$  として、 $P_m$  値を採用した事例を示す。  $q_a$  として  $P_p$  または  $P_{u10}^*$  を採用した事例では、 $P_p \sim S_p$  曲線から判断して杭先端における極限支持力とみなせることがわかっている。

おおむね先端  $N$  値に比例して先端支持力度  $q_a$  も増加している傾向が明らかである。図に示すように、SPP は先端地盤の土質別に異なり、CCP では土質によらず同一の  $q_a \sim$  先端  $N$  値関係が直線回帰される。4. (3) での推定式としては、図中の太線で示す設計  $q_a = 10N$

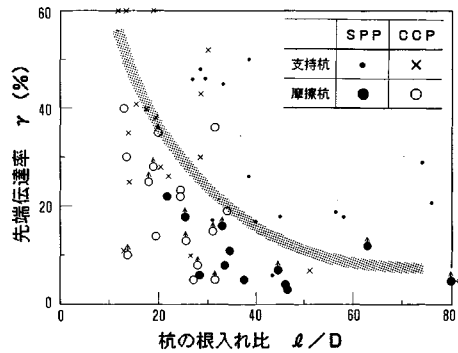


図-18 先端伝達率  $\gamma$  と根入れ比  $l/D$

(CCP および SPP の砂・砂礫層)、 $6N$  (SPP の粘土層) を仮定する。

支持杭に比べて摩擦杭は杭長が短くなる分経済的であり、さらに地盤沈下地帯では支持杭よりも不同沈下が少なく優れている場合がある<sup>14)</sup>。しかし、これらはいずれも長尺摩擦杭の例であって、極端に短い杭では杭先端以深の粘土層の圧密沈下を助長するおそれがあることが指摘<sup>15)</sup>されている。図-18 は杭種、支持形式別に先端伝達率  $\gamma$  (先端支持力/杭頭での極限支持力) と  $l/D$  の関係をプロットしたものである。おおむね  $l/D$  の増加とともに  $\gamma$  は減少する傾向がみられるが、支持杭の場合、 $\gamma$  が大きいことがわかる。

いずれにしろ、短い杭になるほど摩擦杭といえども先端支持力に期待する度合いが大きくなり、その支持機構は支持杭に近くなることがこの図から推察される。したがって摩擦杭の過大な沈下といった不測の事態を極力防止するためには、先端支持力に過大な期待をかけない配慮が必要であろう。現行道示によれば、“支持杭と同一の安全率を採用できる摩擦杭”の採用条件として、

- ① 地盤沈下地帯における適用の制限
- ② 杭根入れ比が 25 程度以上
- ③ 杭全長の 1/3 の過圧密地盤への根入れ

が規定されている。ここで条件②は、図-18 において  $\gamma$  を 30% 以下とすることを目標として設定されたものであることがわかる。

### (3) 安全係数の検討

周知のように、限界状態設計法では不確実性が種々の変動要因ごとに分類され、それぞれに対して安全係数が設けられており、従来のようにすべての不確実性を包括した安全率という概念はなくなる。したがって終局時の支持力に対してその不確実性を考慮して、どの程度の安全係数を考えておくべきかの判断が求められる。

一般的にみて、支持力推定上の不確実性として地盤強度のばらつき、および支持力式の推定精度の 2 つが大きいことが指摘できよう。

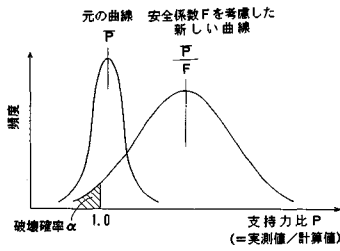


図-19 安全係数 F の概念図

海外規準<sup>2)</sup>にみられるように、支持力を土質工学的手法による場合は、その式に入力する地盤定数のばらつきの評価が重要な問題となる。しかし、わが国のように支持力式が半経験的手法による場合、地盤定数（たとえば N 値）のばらつきは、支持力式作成の過程に含まれていると考えられる。すなわち、支持力式の推定精度の中にすでに地盤の不確実性の影響が含まれていると解釈することができよう。したがって、ここでの安全係数の検討にあたっては、支持力式の推定精度にのみ着目することとした。また、現行道示に規定されている支持力式は、施工法別に独立して順次整備されてきた経緯もあり、必ずしも施工法別に同一レベルの支持力安全性を有していないことが補正係数値より判明している<sup>13)</sup>。安全係数はこの点も配慮されるべきである。

ここで採用する安全係数は、式（5）に示す形として用いることとし、

$$R_{uf} = F_f \cdot R_f + F_p \cdot R_p \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 $R_{uf}$ ：杭の設計極限支持力

$R_f (R_p)$ ：周面摩擦力（先端支持力）

$F_f (F_p)$ ： $R_f (R_p)$  に関する安全係数（ $\leq 1$ ）

その定義の概念図を図-19に示す。横軸は支持力比 P を表わし、 $P=1.0$ において実測支持力と計算値が一致する。 $P < 1.0$ が破壊領域となるが、この領域の大きさ（破壊確率  $\alpha$  で表わす）については、荷重のばらつきを考慮した構造物の安全性の目標値が設定されなければ決められない。したがって、ここでは  $\alpha$  をパラメータ扱いとする。この安全係数の考え方によれば、破壊確率を一定にすることにより、杭の施工法にかかわらず、安全性を同一のレベルとすることが可能となる。

安全係数の算定は、以下の要領による。

- ① 新しい支持力比  $P_N$  の確率密度曲線において、1 以下になる確率が  $\alpha$  となるように、
- ② 元の支持力比 P の確率密度曲線を、安全係数 F を用いて①を満足する曲線になるようにする。すなわち、 $\bar{P}_N = \bar{P}/F$
- ③ ここで、安全係数を考慮する前後で支持力比 P、 $P_N$  の変動係数 ( $V_P, V_{PN}$ ) は変わらないものと仮定する。
- ④ したがって、安全係数 F は次式で求められる。

表-5 支持力比 P の基本統計量

杭種	データ数	周面摩擦力		先端支持力		支持力式 (単位: tf/m <sup>2</sup> )	
		$\bar{P}$	$V_p$ (%)	$\bar{P}$	$V_p$ (%)		
SPP	26	1.19	37	1.08	53	$f = 0.3N (\leq 10)$ (砂) $= N (\leq 15)$ (粘土) $q_a = 10N (\leq 400)$ (砂) $= 6N (\leq 120)$ (粘土)	
	支持杭	14	1.17	36	1.03		53
	摩擦杭	12	1.21	39	1.13		54
CCP	32	1.04	41	1.09	58	$f = 0.4N (\leq 20)$ (砂) $= N (\leq 15)$ (粘土) $q_a = 10N (\leq 300)$ (砂および粘土)	
	支持杭	16	1.07	46	1.12		63
	摩擦杭	16	1.01	36	1.06		54

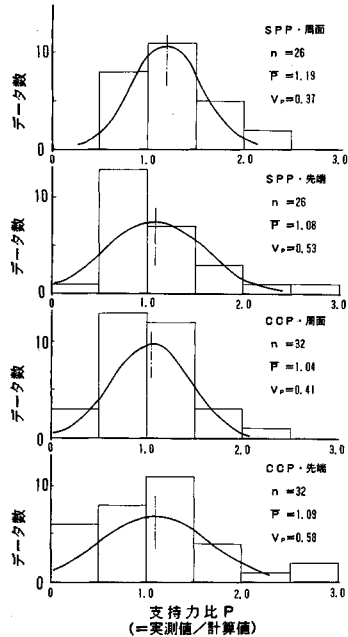


図-20 支持力比 P のヒストグラム

$$\bar{P}_N = 1 + \beta \cdot S_{PN} = 1 + \beta \cdot V_P \cdot \bar{P}_N$$

$$\therefore \bar{P}_N = (1 - \beta \cdot V_P)^{-1}$$

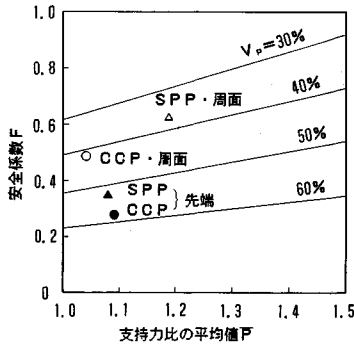
$$\therefore F = \bar{P} / \bar{P}_N = (1 - \beta \cdot V_P) \cdot \bar{P} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $S_{PN}$  は新しい支持力比  $P_N$  の標準偏差、 $\beta$  は破壊確率  $\alpha$  によって決まる係数（たとえば正規分布に関して  $\alpha=5\%$  のとき 1.64、 $10\%$  のとき 1.28）である。したがって、安全係数は式（6）からわかるように、支持力比 P の統計量（平均値  $\bar{P}$  と変動係数  $V_P$ ）がわかれば、破壊確率  $\alpha$  に応じて定まることになる。

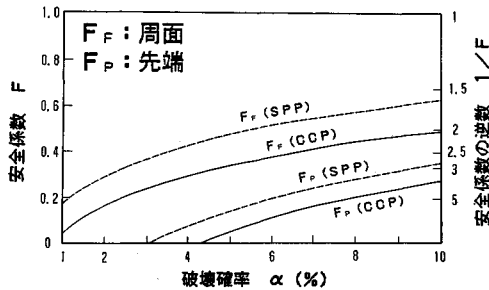
表-5 に安全係数の検討に用いる支持力式と、そのときの支持力比 P の基本統計量を示す。ここでは支持力を周面と先端に分離してそれぞれの支持力の推定精度を求めている。参考までに支持形式による内訳も併記する。

ここで特に先端支持力の推定式についてふれておく。CCP の場合は、N 値 30 において支持杭と摩擦杭の支持力が一致する。しかし、SPP では 4. (2) に述べた支持力式と現行の支持杭の支持力式とはすりつかない (N 値 30 において、支持杭の場合  $q_a = 30N$ 、摩擦杭





図—21 支持力比の平均値・変動係数と安全係数の関係



図—22 破壊確率  $\alpha$  と安全係数  $F$

の場合  $q_a=10 N$ ) が、ここでは特に摩擦杭に対して表—5に示したような新しい式によった。SPP 摩擦杭の場合、先端閉塞効果や先端  $N$  値の評価など不明確な点も残されているが、反面、沈下量による制限を設けた新しい極限支持力の考え方によった場合、現行の先端支持力式も見直しが必要と考えられる<sup>16)</sup>。

図—20には杭種、周面・先端ごとに表—5に示した式によったときの支持力比  $P$  のヒストグラムを示す。 $\chi^2$  検定によれば、(a)~(c)は正規分布または対数正規分布(有意水準5%)に適合するが、(d)はわずか適合していない。ここでは全ケース、正規分布に適合するものとして以下の検討を進める。

前記のように安全係数  $F$  は、支持力比の平均値  $\bar{P}$  と変動係数  $V_p$  に依存するが、 $\alpha=10\%$  を例にとって、両者の  $F$  に及ぼす影響を図—21に示す。 $V_p$  を10%低減する(支持力式のばらつきを減少させる)ことは、 $\bar{P}$  を1.0から1.3程度に上げる(計算上の支持力を実際に対し意図的に過小評価する)効果が読み取れる。

図—22に杭種、周面・先端別に破壊確率  $\alpha$  と安全係数  $F$  の関係を示す。破壊確率  $\alpha$  を小さくするためには、推定式による支持力値(式(5)の  $R_f, R_p$ )をより小さくする必要があるため、安全係数  $F$  は小さくなる。その低減の度合いは式(6)からわかるように、 $V_p$  および  $\bar{P}$  に依存しており、ある破壊確率  $\alpha$  のとき  $F$  は0となる。

表—6 安全係数一覧表 ( $\alpha=10\%$  時)

	周面摩擦力の安全係数			周面摩擦力の安全係数		
	$F_f$	支持杭	摩擦杭	$F_o$	支持杭	摩擦杭
S P P	0.63	0.63	0.61	0.35	0.33	0.35
(1/F)	(1.6)	(1.6)	(1.7)	(2.9)	(3.0)	(2.9)
C C P	0.49	0.44	0.54	0.28	0.22	0.33
(1/F)	(2.0)	(2.3)	(1.8)	(3.6)	(4.5)	(3.0)

表—5で示した支持力式によれば、杭種ではSPPの安全係数はCCPに比べて0.75(先端)~1.25(周面)程度大きく、周面摩擦力と先端支持力の安全係数を比較すると、後者が前者の半分程度である。

仮に、 $\alpha=10\%$  時の安全係数を表—6に示し、図—21にその位置を表示した。限界状態設計法では安全率  $n$  に代わるものとして、基本的に荷重係数  $\gamma (\geq 1)$  と抵抗係数(ここでいう安全係数)  $F (\leq 1)$  が導入される。ここで現行設計法とのすりつけを考えた場合、1つの試みとして  $n=3, \gamma=1.25$  を仮定すると  $F$  は  $\gamma/n=1.25/3=0.42$  (逆数を取り、安全率相当として2.4)が得られる<sup>17)</sup>。この値を表—6の安全係数と比較すれば、周面摩擦力に関しては十分満足しているが、先端支持力については支持力式を改良する余地が残されていることがわかる。

### 5. 結論と今後の課題

本文では、基礎の設計への限界状態設計法の導入へ向けた第一段階として、多数の載荷試験データに基づき調査し、あわせてこれらに対応した単杭の軸方向ばね定数、および軸方向支持力と安全係数について検討した。本研究に関する結論と今後の課題を以下にまとめる。

(1) 打込み杭および場所打ち杭に関しては支持形式によらず、杭径の10%の沈下を生ずると、 $R_o/R_u$ は平均的に95%以上であり、ほぼこの沈下を生じた場合極限支持力が発現するとみなすことができる。また、中掘り杭や短尺杭のように先端支持力による荷重の負担割合が大きい場合、同沈下における  $R_o/R_u$  は低下する傾向にあることがわかった。

(2)  $S_w$  を杭の軸方向の弾性挙動を保証する限界の変位と考え、軸方向ばね定数を設定するための基準となる沈下量を  $S_w$  とし、軸方向ばね定数  $K_o$  の算定式を提案した。

(3) SPPの場合  $K_o$  は  $l/D$  の増加とともに小さくなるのに対し、CCPでは逆の傾向を示すことが明らかになったが、本来  $K_o$  は杭周面・先端の地盤の種類や強度等により変化するものである。今後の課題として、ばねの評価を支持力式と同様、周面と先端に区別し、地盤の種類や強度に応じて設定するなどして推定精度をあげ

る手法の開発が必要である。

(4) 摩擦杭であっても先端支持力を考慮して、支持杭と同程度の支持力安全性を確保できる支持力式を提案することができた。ただし、先端支持力の推定精度の向上、特に SPP の場合、摩擦杭から支持杭にスムーズに支持力を連続させる支持力式の確立が望まれる。

(5) 支持力式の推定精度に基づく安全係数  $F$  を破壊確率  $\alpha$  との関係で調査した。本来、安全係数は安全性の目標値や荷重係数が設定されなければ決まらないが、 $\alpha$  をパラメータ化することにより独自に調査できる利点を有する。今後より一層の充実をはかりたい。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1990年。
- 2) Ministry of Transportation and Communications, Ontario : Ontario Highway Bridge Design Code and Commentary, 1983.
- 3) The American Association of State Highway and Transportation Officials : Standard Specifications for Highway Bridges, 1983.
- 4) (財) 国土開発技術研究センター：道路橋下部構造の限界状態設計法に関する調査研究報告書，平成元年3月。
- 5) 土質工学会：クイの鉛直載荷試験基準・同解説，pp.76～83, 1972.
- 6) たとえば，松尾・菅井・金：鋼管杭の極限支持力推定法に関する研究，土木学会論文集，第406号，pp.253～262, 1989年6月。
- 7) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説／基礎構造物・抗土圧構造物，pp.195, 1986.
- 8) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，pp.223～225, 1988.
- 9) 建設省土木研究所：構造物基礎の形式選定，第40回建設省技術研究会，pp.1～149, 昭和61年10月。
- 10) たとえば，宇都・冬木・桜井：杭の載荷試験結果の整理方法，基礎工，pp.21～30, 1982年9月。
- 11) たとえば，土質工学会：杭基礎の設計法とその解説，pp.815, 1985.
- 12) 宇都・岡原・池田・前田・松井：摩擦杭の支持力特性と信頼性，pp.17～22, 第32回土質工学シンポジウム，昭和62年度。
- 13) 篠原・岡原・中谷・田口・松井：Safety Analysis on the Vertical Bearing Capacity of Piles, 1st International Geotechnical Seminar (Ghent), 1986.6.
- 14) 阪口：粘性土地盤中に打設した摩擦杭に関する一考察，土と基礎，pp.19～24, 1982年2月。
- 15) 大崎：摩擦ぐいについての考察，日本建築学会大会学術梗概集，pp.605～606, 1968年10月。
- 16) 岡原・中谷：低振動・低騒音工法による杭の支持力，基礎工，pp.24～30, 1988年10月。
- 17) Meyerhof : Safety Factors and Limits States Analysis in Geotechnical Engineering, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 21, pp.1～7, 1984.

(1990.1.9・受付)