

杭 基 礎

駒 田 敬 一*

ま え が き

深い基礎に杭基礎とケーソン基礎があるが、機械化施工、急速施工に優れた杭基礎の方が圧倒的に多く使用されている。杭の種類には、鋼杭、RC杭、PC杭、場所打ち杭等各種のものがあり、杭径の種類も多い。また、施工に伴う騒音・振動公害対策とも関係して、施工法も多種多様である。

構造物の規模が大型化し、かつ多様化する傾向にかんがみ、基礎も大型化と多様化の一途をたどっている。これに従って技術的に不明確ないくつかの問題が露呈されてきた。基礎は複雑な性質を有する地盤に接する構造物であるため、基礎と地盤との力学的なかわりが格別に難しい。また、施工にあたっては、地盤の性質の変化が関係し、問題をさらに複雑にする。基礎の大型化と多様化の傾向がこれに拍車をかけている。

以下に杭基礎の設計・施工に関係するいくつかの土の問題を取り上げて、現状での問題点を述べたいと思う。

1. 地 盤 条 件

(1) 地盤条件は設計者が決めるもの

構造物を設計する際に、まず設計条件を設定する必要があるが、基礎構造は、上部構造に比べて、設計条件の一つとして地盤条件が関係する点で異なる。もちろん、上部構造といえども地盤沈下等の影響は形式選定、構造解析に関係はするが、これは支点的条件として関係するのであって、地盤条件としてではない。基礎工学の特徴は、基礎の設計において地盤条件がきわめて重要な役割をはたし、設計者はこの地盤条件を地盤調査の結果に基づいて、自らの手で決めなければならない点にあるといえる。地盤を構成する材料は、軟弱地盤から岩まで広い範囲にわたり、鋼やコンクリートなどの構造材料と比較して、その力学的性質の広がり幅が圧倒的に大きい。例として表-1に各種材料の強度特性と変形特性の大略の値を示すが、基礎の設計者が対象とする地盤の力

表-1 材料の力学的特性の概略値

特性 材料	強度特性		変形特性	
	一軸強さ (kg/cm ²)	A≐ 最大値 最小値	弾性係数 (kg/cm ²) (変形係数)	B≐ 最大値 最小値
鋼	3 400~15 000	4~5	2.1×10 ⁶	1
コンクリート	150~700	4~5	1.5×10 ⁵ ~5.0×10 ⁵	3~4
地	粘 土	0.1~10	100	5~500
	粘 着 力 C=0.02~0.6 砂質土 内部摩擦角 20~30		30	300~3 000
盤	軟 岩	10~100	10	500~5 000

学的数値の代表値として、どの値を設定するかによって基礎構造の寸法等が左右されることとなり、その影響は大きい。

杭基礎の設計に関係する地盤条件としては、杭の支持力、杭の周面摩擦力、横方向地盤反力係数、地盤の流動化の問題等が考えられるが、これらの諸条件の決定のためには、地盤調査結果を単に公式類にあてはめるのではなく、対象とする地盤、または類似の地盤における現場測定、載荷試験の結果等が得られれば、これらを十分に参考にすることが必要である。また、近くに既存の構造物があれば、その構造物の状態、基礎の形式、寸法、設計条件等を十分参考にすることが望ましい。設計にあたってインプットする地盤条件は、これらの結果を総括したものでなければならない。しかしながら、このようにして決められた地盤条件であっても、最終的な設計結果を総合的に検討して、もし設計結果に不都合があれば、もう一度地盤条件の再検討にまで、設計をフィードバックすることが必要である。一般には、なかなかこのようには行われなくて、設計が一本道で完了するケースが多いように思われる。

最近、構造物の自動設計が行われるが、例えば地盤の支持力については、 N 値なり c, ϕ の適用による、いくつかの公式の平均値とか最小値とかでプログラムに組み込まれていることがある。地盤の問題をこのように機械的に扱うのは、基礎工学としては邪道であると考える。昭和 48 年度建設省土木研究所で作成したケーソン基礎の自動設計プログラムでは、直接に地盤支持力や横方向地盤反力係数等でインプットし、設計者が事前に地盤条件を決める方式をとっている。この場合、設計者は、上部

* 正会員 建設省土木研究所 構造橋梁部基礎研究室長

構造の規模、機能、重要度を踏まえて総合的に判断することとなる。N 値等により機械的に扱うのでは、設計施工を含めて構造物全体を見通した技術的判断の入る余地が全くなくなってしまふ。

(2) 杭の支持力

杭が支持力を発揮する機構は複雑で、まだ解明されていないが、実用上は杭の極限支持力は周面摩擦力と先端支持力の和として計算される。わが国では、砂層における深い基礎の支持力理論に基づき、N 値から杭の支持力を求める次の Meyerhof の式が広く紹介されている。

$$R_u = 40 N A_p + \frac{1}{5} \bar{N}_s A_s + \frac{1}{2} \bar{N}_c A_c \dots\dots\dots (1)$$

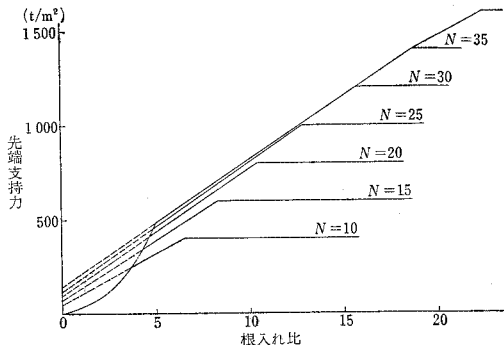
ここに

- R_u : 杭の極限支持力 (t)
- N : 杭先端地盤の N 値
- A_p : 杭先端面積 (m²)
- \bar{N}_s : 先端までの砂層の N 値の平均値
- A_s : 杭先端までの砂層と接する杭の周面積 (m²)
- \bar{N}_c : 杭先端までの粘性土層の N 値の平均値
- A_c : 杭先端までの粘性土層と接する杭の周面積 (m²)

現状では、土質試験結果から杭の支持力を正確に推定することはできないので、必要に応じてしばしば載荷試験が行われるのが実状である。この際、単に杭頭での支持力—沈下曲線を求めるだけでなく、周面摩擦力と先端支持力とを分離して測定することが多い。現在わが国では、鋼管杭、コンクリート杭、場所打ち杭が多く用いられており、とくに水平抵抗力の大きい大径杭の使用が増大しているが、このために大径杭の支持力について新しい課題が登場することとなった。

土木研究所においては、大小の径の杭の支持力に関する約 220 例の載荷試験結果を解析し、杭の先端支持力および周面摩擦力について大略次のような結果を得た。

鋼管杭の閉塞効果は、径 60 cm 程度まではよく発揮され、Meyerhof の式 (1) は、比較的合うと考えてよ



図—1 鋼管杭の先端支持力を求める図

表—2 杭の周面摩擦力と先端支持力

区分	周面支持力	先端支持力
鋼管杭	●砂質土 $\tau = N/5 \text{ t/m}^2$ ($\tau \leq 10 \text{ t/m}^2$)	● $40 \cdot N \cdot A$ ($N \leq 40$)
	●粘性土 $\tau = c$ または $N \text{ t/m}^2$ ($\tau \leq 10 \text{ t/m}^2$)	●根入れ効果 ●先端閉塞効果
場所打ち杭	●砂質土 $\tau = N/2 \text{ t/m}^2$ ($\tau \leq 10 \text{ t/m}^2$)	● $40 \cdot N \cdot A$ (砂 $N \leq 40$) (砂礫 $N = 40$)
	●粘性土 $\tau = c/2$ または $N/2 \text{ t/m}^2$ ($\tau \leq 5 \text{ t/m}^2$)	●根入れ効果
P C 杭	●砂質土 $\tau = N/5 \text{ t/m}^2$ ($\tau \leq 10 \text{ t/m}^2$)	● $40 \cdot N \cdot A$ ($N \leq 40$)
	●粘性土 $\tau = c$ または N ($\tau = 10 \text{ t/m}^2$)	●根入れ効果

い。しかし、杭径がそれ以上になると先端部の閉塞効果が十分に発揮されず、支持力が落ちることがわかった。とくに径 1.0 m 以上の大径杭では、この傾向が著しいので注意を要する。図—1¹⁾ は、鋼管杭の支持力を求める図で、図中の曲線および勾配部は支持層への根入れの不足により先端閉塞が不十分な段階での杭の支持力を示すものである。この関係は、先端閉塞に関する室内模型実験の結果と若干の理論的考察から得られたもので、先端支持力は、杭の支持層への貫入の度合(貫入量/杭径)で表わされている。また、表—2²⁾ は、杭の先端支持力と周面摩擦力を杭の種別に解析して得られた結果で図—1 と並んで、現在日本道路協会で改訂中の「道路橋下部構造設計指針・杭基礎の設計篇」において提案しようとしているものである。杭の支持力の正確な値は、載荷試験によらないと不明であるが、載荷試験を行わない場合には、表—2 によるほか、類似地盤での載荷試験結果をあわせて活用することが望ましい。

杭は種別およびその施工法の差によって、支持力が全然異なる。大径 P C 杭は、無騒音無振動工法とも関係して、中掘工法がとられることが多いが、土木学会の指針(案)³⁾では、先端支持力を発揮させるためには 500 回以上打撃することとしており、底打ちコンクリート工法、先端グラウト工法等は、先端閉塞工法であるが、孔底のスライムの処理等の施工上の問題があるので、所定の支持力が発揮されるまでに地盤によっては、かなりの沈下があるとしている。後者の場合、先端支持力に関しては場所打ち杭と同程度として扱われている。場所打ち杭の支持力については、すでに多くの議論がなされたが、施工上の不確定要素を見込んで、最大値を押える方法が一般にとられている。

(3) 負の周面摩擦力

一般に杭に作用する上部構造からの荷重は、杭の周面摩擦力と先端支持力で支持されるが、杭が圧密沈下を生じつつある軟弱地盤に根入れされている場合、杭は地盤

との間に相対的なずれをひき起し、杭は逆に周面地盤から下向きに押込み力を受ける。これが、負の周面摩擦力 (Negative skin friction) である。

負の周面摩擦力は、要するに根入れ層の沈下によって生じる現象であるから、埋立地、盛土、支持層から地下水を汲み上げる場合などに一般的に見られる。地盤沈下が生じているところでも、支持層以下の地盤深部が沈下する場合には関係はない。

負の周面摩擦力は、杭の施工後、上部構造からの荷重以外の余分の負担を杭に加えるので、杭の断面力の不足、杭の過大な沈下、不等沈下に基づく杭頭部の破壊、最悪の場合には上部構造の破壊をもたらす。したがって杭の根入れ層の沈下が予想される箇所では、負の周面摩擦力に対する検討を加えておく必要がある。

負の周面摩擦力の生ずる杭では、力のつり合いから、周面摩擦力が負から正に変わる点が存在する。これが中立点と呼ばれるもので、一般には杭長の 0.7~0.8 の深度にあるといわれており、土質工学会が行った実物大の試験⁴⁾では 0.73~0.78 の位置に分布した。また、負の周面摩擦力の大きさとしては、いくつかの現場試験の結果、杭周辺地盤の $qu/2$ が発揮されることが確認されている。盛土等により地盤改良効果が生じる場合、当初の $qu/2$ 以上の値になることは当然である。

一般に、支持力の算定の際には、安全側の配慮により周面摩擦力を過小に評価する傾向があり、これはこの限りにおいては正しいが、負の周面摩擦力の評価の際には同じ取扱いをするのは危険側の結果を得ることになる。既出の表-2 からもこのことはいえる。すなわち、 N 値を用いた場合、鋼管杭と PC 杭では、粘性土に対して $\tau = N/(t/m^2)$ となり、現在の慣用である $\tau = N/2(t/m^2)$ (式 (1) による) より大きい。また、場所打ち杭については、砂質土に対しては $\tau = N/2(t/m^2)$ で、慣用の $\tau = N/5(t/m^2)$ (式 (1) による) より大きい。 N 値より粘土の粘着力を推定する方法が広く行われているが、負の周面摩擦力の場合 N 値の適用を誤ると危険である。

杭の支持力と負の周面摩擦力とは相互に依存関係にあって、負の周面摩擦力は杭が完全支持杭であるほど大きく、逆に、杭が不完全支持杭で沈下し易い場合には小さい。負の周面摩擦力の発生原因が杭と地盤との間の相対的なずれであることを考えれば、このことは明らかである。したがって、負の周面摩擦力に対処する方法は、上部構造の規模、機能、重要度などによって変わらうるので、基礎の設計の基本方針にかかわることである。上部構造、周辺地盤との関連を考えて柔軟に対処することが必要である。例えば、橋台では盛土荷重による沈下によって基礎杭には負の周面摩擦力が作用することとなるが、完全支持杭を採用すれば裏込めの沈下により大きな

段差がつくが、橋台がある程度沈下する構造であれば、路面の平滑の確保の点からも望ましい。しかし、これについては、耐震設計との関係も含めて今後研究すべき課題であると考えている。また、上部構造の寸法が大きき、負の周面摩擦力に基づく不等沈下を避けたい場合、完全支持杭にして、負の周面摩擦力に耐える構造とするか、負の周面摩擦力を軽減する工法をとるかのいずれかである。後者の場合は、杭周面に摩擦減小効果を有する材料を塗布するか、または群杭の場合には外周を構成する杭のみに大きな負の周面摩擦が作用するので、本杭の外側に捨て杭を施工する方法が考えられる。

負の周面摩擦力は土質力学的には興味深いテーマであるが、構造物の設計においてのこれの取扱いは、設計の基本方針とも関係して、実務的に処理できる場合も多いのでないかと考えている。

(4) 横方向地盤反力係数

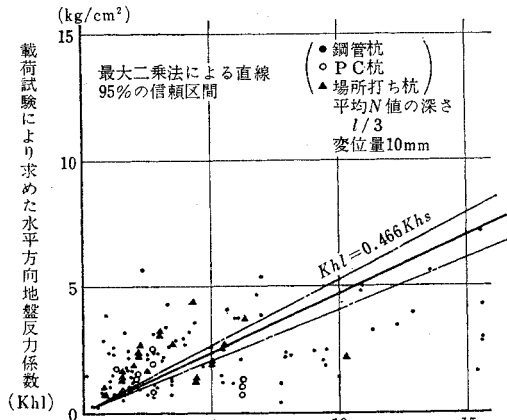
水平力を受ける杭の設計法で最も広く用いられているのは、弾性床上的のはりの理論を適用した Chang の方法であろう。この方法によれば、水平力を受ける 1 本の杭の変位、応力等の基本的数値が簡単に算出でき、しかもわかりやすく設計の見通しが得やすい等の利点がある。

地盤の荷重-変形特性は一般には非線形であるうえ、杭のようなたわみ易い構造体を介して載荷された場合には、土は上から順次逐次破壊を起してゆくので、明確な降伏点は定めがたい。そこで設計では、上述の弾性床上的のはりの理論により、地表面での許容変位量と杭体の許容応力度から水平抵抗力を定めている。この場合、地盤は当然非線形であるので、基準となる地表面変位量を定め、これに対する見掛けの地盤反力係数を用いることになる。設計に用いる基準変位量は、上部構造の性質によって変わるべきものであるが、道路橋の場合、常時 1.0 cm、地震時 1.5 cm 程度のものが最も頻度が高い。

地盤を弾性体であると仮定すれば、弾性解により明らかに、地盤反力係数 ($k_H = \text{荷重強さ} / \text{変位量}$) は基礎幅を分母にもつ関数となる。土木研究所で実施した径 30, 60, 90, 120 cm の円形載荷板による水平載荷試験で、径 30 cm の載荷板に対する k_H を k_{30} と、他の径に対する値を k_{30} との比で示すと、地盤反力係数 (k_H) は載荷幅 (D) の $3/4$ 乗に逆比例することがわかった⁹⁾。すなわち次式となる。

$$\frac{k_H}{k_{30}} = \left(\frac{D}{30} \right)^{-3/4}$$

「道路橋下部構造設計指針・ケーソン基礎の設計篇」⁹⁾では、基本的にはこの関係を用いて地盤反力係数を推定することとしている。この関係を用いて求めた横方向地盤反力係数と杭の水平載荷試験結果から、逆算した横方



計算により求めた水平方向地盤反力係数 (K_{hs})

図-2 水平方向地盤反力係数の関係

向地盤反力係数との関係を、約 150 例の載荷試験について整理したものが図-2⁷⁾である。この場合、載荷幅には杭径をとり、横方向地盤反力係数は、杭長の上側の 1/3 の地盤から求めた。図の直線の勾配から考えて、杭の設計においては、ケーソン基礎の設計に用いる横方向地盤反力係数の 1/2 をとればよいものと考えられる。

(5) 地盤の流動化

振動を受ける砂が、加速度に応じて流動化する現象は以前より室内実験により知られており、また、地震時の被害調査結果からも、地震時に流動化する砂質土層の存在が知られていたが、このような現象が最も劇的な形でわれわれの意識の前に出現したのは 1964 年の新潟地震においてであった。

砂の地震時の流動化現象は、一般に次のように説明される。すなわち、飽和したゆるい砂層が地震動を受けるとき、土粒子が互いにゆり込められて、土粒子間の間げき水圧が順次上昇することにより有効応力の減少をひき起し、砂層がせん断強度を大幅に失うことをいう。

新潟地震では、砂層の流動化により建設まもない昭和 大橋が落橋したが、この経験にかんがみ、砂層の流動化に関する多くの研究が行われた。「道路橋耐震設計指針」⁸⁾では、地盤の流動化の判定基準として「流動化する砂質土層」の規定を設け、これに該当する地盤は耐震設計上支持力を無視する土層として取扱うこととしている。すなわち、規定の骨子は、深さ 10 m 以内の飽和砂質土層で、 N 値が 10 以下、均等係数が 6 以下、かつ 20% 粒径 D_{20} が 0.04~0.5 mm の区間のもを流動化するとし、また D_{20} が、0.004~0.04 mm または 0.5~1.2 mm の範囲の場合は注意を要することとしている。流動化に関する研究はまだ歴史が浅く、流動化の予測は複雑な地震現象のためもあり難しい。既往の資料がある場合

にはこれを参照すべきである。流動化し易い砂層の地盤図作成作業も土木研究所で開始したので、いずれその成案が提案されるであろう。

2. 軟弱地盤上の橋台の移動問題

最近、軟弱地盤上の橋台など偏載荷重を受ける深い基礎を有する構造物の水平移動現象がしばしば聞かれる。このため、橋台では、桁とパラペットが衝突したり、桁の架設ができなかったりすることになる。また、堰の本体を締切りの一部に使用したため、堰軸の方向に数 cm 変位し、ゲートで修正した例もある。

このような偏載荷重を受ける構造物の水平移動の現象は、広く知られている割には、これに対する調査・研究が不十分であるように思われる。従来は、構造物の規模は必ずしも大きくなく、施工速度も比較的緩慢であった。また、極端な深い軟弱地盤に構造物が築造されることもまれであった。しかし最近では、構造物は大型化し、多様化したため、以前には考えられなかったような軟弱地盤に構造物が築造されるようになり、かつ施工速度も急激に早くなったので、上述のような構造物の水平移動の問題が頻発するようになったと思われる。偏載荷重による構造物の水平移動の現象は、まだほとんど解明されておらず、設計・施工面での技術的知識、経験も十分ではない。建設省では技術研究会の指定課題⁹⁾に取上げ調査中であるが、このような水平移動が生じるのは、われわれの知識の不足からくる設計面での配慮の不足によるのではないかと考えている。

一般に、杭基礎の設計では、設計基準面から上に作用する土圧、水圧などを考慮し、盛土などの偏載荷重によって設計基準面下に発生する水平方向の土圧は、考えていない。もし、地盤が軟弱地盤でなければ、地盤の耐力で盛土などの偏載荷重を支持し、地盤の側方移動を起さないが、地盤が軟弱地盤である場合には、側方移動をひき起し、杭に大きな水平力を作用させることになる。この限界は、上載する偏載荷重の大きさと地盤の強度との関係で決まるのではないかと考えられる。また、円弧すべり計算(杭などの構造材料は計算から除外する)によりどの程度の安全率があれば、側方移動をしないかの検討から、ある傾向がつかめるのではないかと考えている。

軟弱地盤の強度が足りない場合には、偏載荷重を支持し得ないので、杭打ち、サンドコンパクションパイルの施工、プレローディングの採用、またはその他の改良を行う必要がある。側方移動の問題の現象の解明とならんで、このような対策工法もあわせて研究する必要がある。現在の時点では、まだ確立した設計方法がないので注意喚起のみにしか行えないので残念であるが、技術研

究会の最終年度（昭和 50 年）には、設計方法の基本的考え方は出せるだろうと考えている。

なお、参考までに昭和 48 年度の実態調査結果の概略を示すと、橋台の水平移動は 21 例みられ、内容は杭基礎 15、ケーソン基礎 5、その他 1 であり、杭基礎の報告が多かった。地盤の性質別では、 N 値が 10 程度以下で発生しているものが多かった。今後は移動したものの定量的解析により、順次現象の説明が可能となろう。

3. 仮締切工の問題

昭和 44 年 4 月 1 日、新四ッ木橋の橋脚仮締切工事中に、リングビームからなる仮締切が破壊するという事故が発生した。杭基礎を施工する場合、フーチングの施工に伴い仮締切による水替えの必要があるが、水深の大きい場合、軟弱地盤等においては、技術的に難しい問題が多い。仮締切工は一般に基礎形式の選定にも大きな関係を有する。建設省では、事故発生後直ちに事故調査委員会を設け事故原因の解明にあたったが、昭和 45 年 7 月に出された調査報告書¹⁰⁾を受けて 8 月に事務次官名で次の内容の通達を出した。すなわち、① 軟弱地盤における仮締切工の設計・施工には格段の配慮を行うこと、② 深い水中の締切工には一重締切を採用しないこと、③ 当分の間リングビーム工法は深い水中、軟弱地盤における工事には採用しないこと、とした。

また、これを受けて同時に技術参事官通達を出し、各種仮締切工の施工にあたっての留意点を指示した。すなわち、⑧ 締切矢板のたわみによる内側の粘土が長期荷重に対する破壊ひずみを越えないこと、⑨ 仮締切内側地盤の抵抗力の減少に伴う腹起し作用力の増大、締切矢板の回転ならびに破壊に対し配慮すること、⑩ リングビームなど細長部材においては、面内および面外座屈について検討すること、⑪ 深い水中の仮締切に一重締切工を用いないこと、⑫ 二重締切工においても上の留意点を考慮すること、とした。

参考文献

- 1) 日本道路協会：日本道路協会橋梁委員会下部構造分科会・委員会資料，昭和 48 年 10 月。
- 2) 同上。
- 3) 土木学会：遠心力大径プレストレスト コンクリート杭設計施工指針（案），昭和 47 年 11 月。
- 4) 土質工学会：鋼ぐい，昭和 44 年 9 月。
- 5) 建設省土木研究所：地盤反力係数とその載荷幅による補正，土木研究所資料第 299 号，昭和 42 年 7 月。
- 6) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針 ケーソン基礎の設計編，昭和 45 年 3 月。
- 7) 日本道路協会：道路橋に関する地区講習会資料，昭和 49 年 1 月。
- 8) 日本道路協会：道路橋耐震設計指針・同解説，昭和 47 年 4 月。
- 9) 建設省土木研究所：偏載荷重による構造物の水平移動に関する調査，昭和 48 年 11 月。
- 10) 新四ッ木橋事故調査技術委員会：同委員会報告書，昭和 45 年 6 月。

図解 土木講座 コンクリートの知識

小谷 昇／井田敏行／小平恵一／細田 力共著
★B5・1300円

本書は斯界では珍しい 2 色刷の漫画を用い、視覚教育をねらって、説明図版、表を豊富に用い短文と画で簡潔なまとめを心がけた画期的な本。高校、大学の副読本、あるいは初級技術者の参考書として好適。
〔主要内容〕 1、コンクリートの材料〈セメント／骨材と水／混和材料〉 2、コンクリートの性質〈コンクリートの特徴／まだ固らないコンクリート／硬化したコンクリート〉 3、コンクリートの配合〈配合の表わし方／配合の計算／配合の決定／検査〉 4、レデーミクストコンクリート〈生コンのあらまし／製造と運搬／品質〉

技報堂

東京・港・赤坂 1-3-6
TEL・(03)585-0166／振替・東京10

土木用語辞典

土木学会監修 編集委員会編 B6・5,500円

土木工学通論

八十島義之助／奥村敏恵他著 A5・1,200円

土木材料実験

編集委員長 国分正胤 A5・1,500円

コンクリート工学演習

監修 村田二郎 A5・1,200円 コンクリート技士・受験参考書

建設機械概要 《全改訂版》

河野正吉／笠原 宏／芳野重正共著 A5・800円

土木施工学

飯吉精一著 B5・1,500円