

長 尺 摩 擦 杭

Long Friction Pile

岸 田 英 明 (きしだ ひであき)

東京工業大学教授 大学院総合理工学研究科

1. ま え が き

杭基礎を分類する方法としては、(1)杭体の材料(木杭, コンクリート杭, 鋼杭), (2)杭の施工法(打込み杭, 埋込み杭, 場所打ちコンクリート杭), (3)杭の支持力機構(摩擦杭と支持杭)が代表的なものであり, このほかにも杭の機能(斜め杭, 水平抵抗杭, 引抜き抵抗杭)などがある。

杭体の材料による分類には問題はあまりないが, それでも鋼管の中にコンクリートを打設した杭などは材料だけで単純に分類することには無理がある。施工法についても同じであり, 杭の施工による地盤の変化に重点をおいて考えれば, 打込み杭でも先端閉塞のコンクリート杭と先端が開いているパイプの鋼管杭とでは地盤を締め固める程度が異なる。また埋込み杭や場所打ちコンクリート杭でも地盤をゆるめる度合いは施工法の種類によって微妙な違いを生ずる。

今回の小特集は長尺摩擦杭がテーマであるが, 長尺摩擦杭も普通の杭と同じ方法で十分に設計が可能である。

杭を摩擦杭と支持杭とに分類することは, 以前から常識とされており, 両者で設計法が異なると誤解している人が多い。しかし, 軟弱地盤に建設された構造物を支持する杭にとって一番重要なことは, 杭頭部に作用する鉛直荷重がどのように地盤に伝達されるかということ, すなわち荷重の伝達機構を解明することであり, これを基本に考えれば摩擦杭も支持杭も同じ方法で設計できる。

2. 杭基礎の荷重伝達

杭を通じて荷重が地盤に伝達される時に検討する項目は, (イ)「力の釣合い条件」と(ロ)「変形の適合条件」

である。これまでは(イ)のみを考えて杭を単純に摩擦杭と支持杭とに分類してきた。しかし(ロ)を考えると, 硬い地盤に支持されている支持杭でも杭頭部に作用する鉛直荷重の値によっては周面摩擦力だけで(イ)を満足し, 杭の先端部には荷重が伝達していない場合が多い。筆者は¹⁾杭を寸法によって分類することを提案したが, 施工機械の進歩により杭の直径が3.0 m, 長さが60mという巨大な杭が容易に施工可能な現在では, 杭の分類も多くの観点から検討する必要がある。

最近では木杭は全く使われていないが, 1955年(昭和30年)頃までは木杭が高層建物の杭に使われており, 現存する建物では丸ビル, 日比谷公会堂, 新丸ビルなどは木杭で支持されており, 直径(末口)約18 cm, 長さは15m程度の木杭が使われている。これらの建物は現在でも正常な状態で使用されており, 問題となるような不同沈下やその他の障害は全く生じていない。この場合, 杭基礎は基礎スラブの下に多数の杭を配置する設計(最近では Piled Raft Foundation と呼ばれている杭とべた基礎の併用)であり, 柱を1本の大口徑杭で支持する最近の設計とは全く異なった設計である。これらの実例に見られるように摩擦杭でも十分に高層建物を支持することは可能であり, 支持杭が摩擦杭より良い杭であるということは全く根拠がない。大事なことは地盤条件と建物の規模に対して適切な杭基礎を設計することである。

3. 地盤沈下と杭

地盤が沈下している場所で, 地盤沈下をしない硬い支持層まで杭を施工して完全な支持杭にすれば, 建物は沈下しない。しかし建物は地表面より浮き上がり, そのために建物が完成した後で, 玄関に階段

総 説

をつけなければ建物に入れないということになる。最近では取り壊されたが東京の丸の内から日比谷にかけての多数の建物に40cm~60cm程度の浮き上がりが生じ、玄関に階段を取りつけるだけでなく、給排水管やガス管等の維持管理にも非常に苦勞した実例がある。この場合、杭にはネガティブフリクション(負の摩擦力)が発生するが、前述の地区においてはネガティブフリクションによる建物の被害は認められず、建物の浮き上がりによる被害が顕著であった。

埋立地盤や軟弱地盤で地盤沈下が大きな値を示す場所では、ネガティブフリクションによる被害も無視できない。ネガティブフリクションに関しては鋼杭を使った実測結果の発表²⁾がある。また長尺支持杭で支持された3階建鉄筋コンクリート造の建物が完成してから2年たらずで最大約16cmの不同沈下を生じ、完成してから4年後に建物を取り壊すという被害³⁾を契機として、ネガティブフリクションは杭基礎の設計における重要な課題の一つとなった。

地盤沈下をする場所に支持杭を使った場合、「力の釣合い条件」だけを考慮して設計すれば、建物が地表面に浮き上がるかまたは杭が沈下して建物に不同沈下を生ずることになり、いずれにしても建物に被害が生ずる。理想的な設計は地盤沈下と一緒に建物

が沈下し、地盤と建物との間には相対沈下が生じないことである。これは「力の釣合い条件」だけでなく「変形の適合条件」も満足させることが必要であり、これが長尺摩擦杭の一つの特徴である。この考え方は大崎⁴⁾が提案し、「従来の支持杭基礎を剛構造とすれば、このような摩擦杭基礎は、一種の柔構造と称することができよう」と述べている。

4. 杭基礎の沈下と安全率

これからの杭基礎においては「変形の適合条件」を検討することが重要である。載荷試験で杭体の軸力を測定すると、杭の周面摩擦力は沈下量が非常に小さな値で最大値に達するが、杭の先端支持力は沈下量が非常に大きな値にならないと最大値に達しない。図-1は、この関係を模式化したものであり、建築基礎構造設計指針⁵⁾では杭の沈下量が杭の直径の10%の値に等しくなった時の荷重を基準支持力として杭の極限支持力としている。

「力の釣合い」だけを考えると、杭の支持力は(1)および(2)式で与えられる。

$$R_u = R_p + R_f \dots \dots \dots (1)$$

$$R_u / F = R_a = \frac{R_p}{F} + \frac{R_f}{F} \dots \dots \dots (2)$$

- R_u : 極限支持力
- R_p : 極限先端支持力
- R_f : 極限周面摩擦力
- R_a : 許容支持力
- F : 安全率

図-1で(1)式の杭の極限支持力 R_u 、極限先端支持力 R_p 、極限周面摩擦力 R_f は、B'C、B'B、B'Gで示されている。(2)式の安全率として3を考えれば許容支持力 R_a はD'Dで表される。これに対応する周面摩擦力と先端支持力は、それぞれの極限值(B'GとB'B)を3で除したE'F、F'Fではなく、D'LとD'Mである。

(2)式で安全率を3とすると、周面摩擦力はOE'の沈下、先端支持力はOF'の沈下を生ずることになり、実際に生じている沈下OD'と異なることになる。

「変形の適合条件」を考えると、設計荷重(D'D)が作用している時の沈下O'D'に対応する周面摩擦力はD'M、先端支持力はD'Lである。安全率は

$$F = \frac{B'C}{DD'}, \quad F_p = \frac{D'L}{B'B}, \quad F_f = \frac{D'M}{B'G}$$

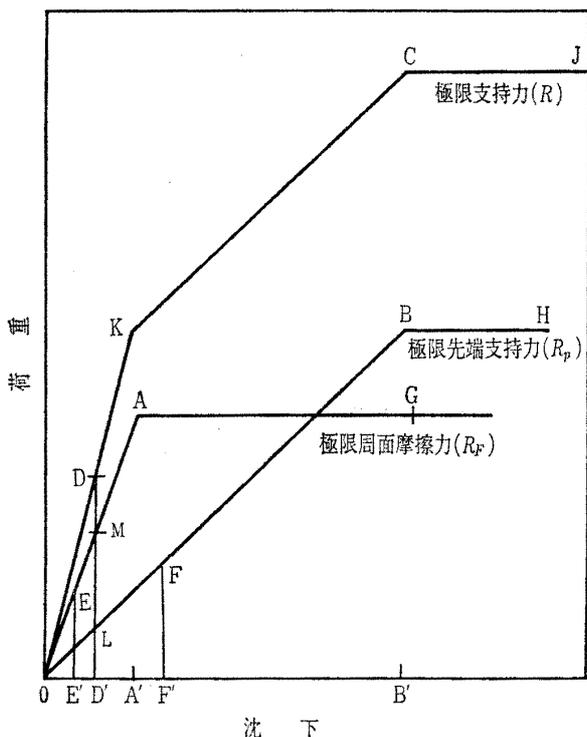


図-1 杭の荷重-沈下曲線の模式図

となり、

一般的には(2)式の代わりに(3)式が与えられる。

$$\frac{R_u}{F} = \frac{R_p}{F_p} + \frac{R_F}{F_F} \dots\dots\dots(3)$$

F_p と F_F は杭の先端と周面に作用している荷重の割合を意味するから、安全率というよりも荷重係数と考えてもよい。(1)式と(3)式とを連立方程式として R_u と F について解くと、これまで使われていた安全率は(4)式で与えられる。

$$F = \frac{F_F \cdot F_p \left(1 + \frac{R_F}{R_p}\right)}{F_F + F_p \frac{R_F}{R_p}} \dots\dots\dots(4)$$

(4)式はこれまで使われていた“総合的”安全率であり、 F を 3 にしても、 F_p と F_F は 3 にはならない。

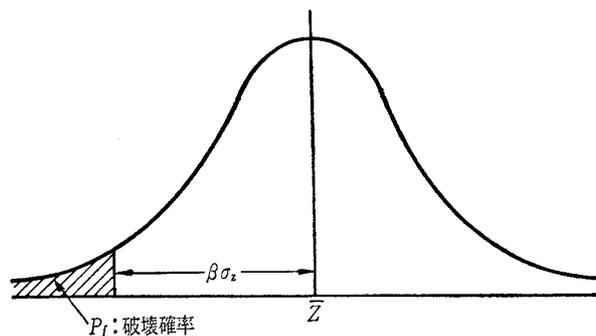
大口径場所打ちコンクリート杭で直径の10%の値を R_p とする場合、極限周面摩擦力が生じてから極限先端支持力が生じるまでには非常に大きな沈下量を必要とするので、 $F_p > F_F$ となる点に注意する必要がある。このことから「変形の適合条件」がいかに重要であるかがわかる。

Skempton⁶⁾ (スケンプトン) はロンドン粘土に施工された拡底杭 (人間が杭の中に入って先端のスライムを除去し、人間が先端支持地盤を直接に目で見て確認した杭) について拡底の直径が 1.8m 以下の場合、 $F=2.5$ または $F_F=1.5$ 、 $F_p=3.0$ を提案している。拡底の直径が 1.8m 以上の場合には長期許容支持力は杭頭の沈下量で決まり、杭頭沈下量が 1.25 cm に達した時の荷重を長期許容支持力としている。

5. 杭基礎の限界状態設計法

このように杭基礎の設計においては、長期設計荷重時における杭の挙動 (限界状態設計法における使用限界状態) が非常に重要な問題となる。多数の杭の載荷試験結果を見ると、長期設計荷重が杭頭部に作用している時には杭周面の摩擦力が荷重と釣り合っており、杭先端部までは荷重が伝達されていない。杭先端部の支持力が重要になるのはネガティブフリクションが発生するか、短期設計荷重が大きな値となり杭先端部分まで荷重が伝達される時である。

限界状態設計法における終局限界状態 (杭の極限支持力) を考える時には、杭の施工による支持力のばらつきを考慮して、破壊確率の値が等しくなるよ



$$F = \frac{\bar{Z}}{\beta \sigma_z} = \frac{1}{1 - \beta(\sigma_z/\bar{Z})}$$

- F : 安全率
- \bar{Z} : 支持力の平均値
- σ_z : 支持力の標準偏差
- β : 破壊確率を決めるための値
- σ_z/\bar{Z} : 変動係数

図-2 杭の支持力のばらつきと破壊確率

うに極限支持力に対する安全率を決めることが必要である。このことは極限支持力のばらつきの値が小さな施工法や工事現場では安全率の値を小さくしてもよいことを意味する。すなわち、限界状態設計法は安全率を一定の値で設計する現在の設計法に比べて、はるかに合理的な方法である。

既製杭を打撃工法で施工する工事現場では、すべての杭について最終打撃貫入量を測定すれば極限支持力のばらつきを推定することが可能であり、打込み杭の支持力の変動係数の実測値として約0.15という値が報告されている⁷⁾。埋込み杭や場所打ちコンクリート杭ではすべての杭の支持力を現場で推定することは現状では不可能であり、最近では波動応力理論による検討が行われているが注1)、これはまだ研究段階であり実用化されるまでには完成していない。山肩⁸⁾ は場所打ちコンクリート杭の極限先端荷重と杭先端地盤平均N値の関係を統計的に検討し、変動係数として約0.38という値を求めている。長尺摩

表-1 安全率とばらつき

$\beta=2.0 \quad P_f=0.023$		$\beta=3.0 \quad P_f=0.001$	
σ_z/\bar{Z}	F	σ_z/\bar{Z}	F
0.1	1.25	0.1	1.43
0.2	1.67	0.2	2.50
0.3	2.50	0.3	10.0

注 1) 「杭の打ち込み性および波動理論の杭への応用に関するシンポジウム」発表論文集：平成元年1月，土質工学会

総 説

表—2 安全率と柱を支持する杭の本数

		安 全 率 (F)			
		杭	1	2	4
$\beta=2.0$	σ_z/\bar{Z}				
	0.1	1.25	1.16	1.11	1.07
	0.2	1.67	1.39	1.25	1.15
$\beta=3.0$	0.3	2.50	1.75	1.43	1.25
	0.1	1.43	1.27	1.18	1.11
	0.2	2.50	1.75	1.43	1.25
	0.3	10.0	2.70	1.82	1.43

$$\text{安全率 } F=1/[1-\beta(\sigma_z/\bar{Z})]$$

N本の杭支持力の平均値： \bar{Z}

標準偏差： σ_z

柱を1本の杭で支持する場合

支持力の平均値： \bar{Z}

標準偏差： σ_z

柱をn本の杭で支持する場合

支持力の平均値： \bar{Z}

n本の杭のグループの標準偏差： $\sigma_{nz} = \frac{\sigma_z}{\sqrt{n}}$

擦杭を合理的に設計するためには、工事現場において施工された杭の支持力のばらつきを実測する方法を確立することが最も重要な課題である。

図—2は杭の支持力のばらつきを正規分布と仮定した時の破壊確率と安全率の関係を示したものである。破壊確率を同じ値にするためには、ばらつきのある大きな施工法や工事現場では変動係数(σ_z/\bar{Z})が大きな値となり、安全率として大きな値を採用することの必要性が表—1より明らかに認められる。

柱を1本の杭と複数の杭とで支持する場合、破壊確率を同じ値にすると、支持力のばらつきが同じであれば柱を支持する杭の本数が多いほど安全率は小さな値を採用してよい。表—2は支持力のばらつきが正規分布で確率密度変数が独立であると仮定した時の計算結果である。柱を1本の巨大な支持杭で支持する設計よりは、柱を多数の杭で支持する長尺摩擦杭の設計のほうが安全率として小さな値を採用してよいことを表—2は示している。

6. 結 論

杭の支持力機構を単純に摩擦杭と支持杭とに分類することは「力の釣合い」のみを考えた非合理的な方法である。

杭の支持力機構が杭の周面摩擦力と杭の先端支持力とから成り立っていることは明らかであるが、両者が最大値に達するまでの変形は全く異なっており、「変形の適合条件」を考えることが必要である。

杭の支持力は施工法や地盤条件によってばらつきが異なる。長尺摩擦杭を合理的に設計するためには、これらの要因をすべて考慮して検討する方法、具体的には「限界状態設計法」を積極的に採用することが必要である。

参 考 文 献

- 1) 岸田英明：クイの支持力についての考え方—単グイの地盤支持力—、土と基礎、Vol.22, No.8, pp.5~11, 1974.
- 2) 遠藤正明：ネガティブフリクション、鋼グイ—鋼グイ研究委員会報告—、土質基礎工学ライブラリー6、土質工学会、pp.257~316, 1969.
- 3) 井上嘉信：チュウ積層が厚い軟弱地盤での負の摩擦力とクイの設計、土と基礎、Vol.22, No.8, pp.21~28, 1974.
- 4) 大崎順彦：摩擦ぐいについての一考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.605~606, 1968.
- 5) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、pp.223~224, 1988.
- 6) Skempton, A.W.: Summing up, Large Bored Piles, Proceedings of the Symposium organized by the Institution of Civil Engineers and the Reinforced Concrete Association, pp.155~157, 1966.
- 7) 岸田英明：杭打ち工事における品質管理、日本建築学会論文報告集、第69号、pp.773~776, 1961.
- 8) 山肩邦男、ほか：場所打ちコンクリート杭の極限先端荷重および先端荷重～先端沈下量特性に関する統計的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第423号、pp.137~146, 1991.

(原稿受理 1991.10.21)