

基礎工 (IV)

杭基礎 (1)

白石俊多*

1. 序 言

杭基礎の支持作用、支持力判定方法などの基本的な考え方は、すでに本講座 [II]-2, 基礎地盤¹⁾において述べられ、また杭基礎の設計施工の方法の包括的な説明はハンドブック、参考書等多くの文献があるので、ここでは以上のような基本的資料を補足する意味で、土と杭の相互作用の関係を述べ、設計施工上とくに注意すべき問題を重点的に説明するにとどめる。

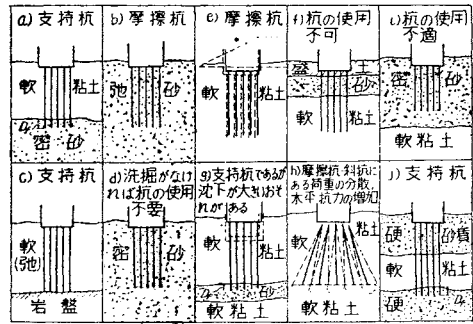
杭は軟かい地盤上に重い構造物を支える場合、古今東西をとわず広く用いられる、便利で経済的な基礎型式である。しかし、杭基礎には沈下、変状、振動などの弊害が生じた例が少なくなく、とくに軟弱な粘性土中の摩擦杭にその例が多い。これらの例を検討すると、杭の支持力または沈下量の予測を誤つたか、あるいは杭の水平抗力を過大評価したものが多く、なかには、基礎地盤の状況をよく確かめていないため、はじめから杭の用い方を誤つたものもある。このような誤りが沈下、変状等の悪い結果をきたしやすい原因は、杭が施工上、支持強度上、能率的な基礎型式である反面、井筒などのマッシュなものにくらべて、段違いに大きい応力を杭材および基礎地盤の一部に与える型式であつて抵抗力の余裕が小さいことにある。従つて杭基礎を用いる場合には基礎地盤を綿密に調査し、適正な設計および入念な施工を行い、できるだけ安全なものとしなければならない。

2. 調査および試験

1) 杭の支持力を判定するには、支持力表その他の経験的な資料もあるが、何はともあれ基礎地盤の状況を調べておく必要がある。例えば硬軟の地層の配列状況を知らないと 図-1 d), f), i) のように誤つた杭の用い方をしかねない。

基礎地盤の調査の方法は、本講座 [II]-2¹⁾ その他に述べてあるが、sounding の方法のうちでは標準貫入試

図-1 杭基礎の使用法の例



験を併用したボーリングによるものがわが国では実用化しつつある。英国では円錐形先端を有する外径 4-1/2"~16" の二重鉄管の模型杭を地中に打込み、これに載荷して支持杭の先端支持力と、杭周摩擦とを分離して測定する方法を基準化²⁾しているが、摩擦杭および支持杭の杭周摩擦については、こねかえした粘性土の単軸圧縮試験により求めた粘着力の値を用いるよう指示している。

図-1 e)~i) のような基礎地盤では、杭先端より下方にある軟粘土の乱されない試料を薄肉サンプラーにより採取して圧密試験を行うこと、その他の方法により沈下量の予測を行うことが必要であり、また a), c), e), g) h) のような場合には杭周摩擦を知るために、粘性土であつたら上述の方法で土の粘着力を求めておく必要がある。この場合粘土のクリープの影響などを考え、こねかえした土の粘着力を用いることは妥当であろう。

2) 杭の引抜試験により杭周摩擦を求める方法もあるが、ある実験³⁾によると、押し込む場合の方が引き抜く場合より杭周摩擦が大きくてたといわれ、杭のテーバーの影響が考えられることもある。また粘性土では引抜速度が大きいと、きわめて徐々に引抜いた場合より、はるかに大きい杭周摩擦の値をうるようである。粘性土中のノーテーバーの杭では水荷重とテコを用いてきわめて徐々に引抜くことが望ましいが、相当高度の試験技術を要する。

砂質土は地下水面下から乱されない試料を採ることがきわめて困難であり、試験技術のむづかしい三軸圧縮試験を用いても、土の原位置の状態におけるせん断強度を正しく求めることが困難である。その上、杭周の水平土圧の大きさも推定によるほかはないから、水平土圧の大小により変化する杭周摩擦をせん断試験の結果から求めても、標準貫入試験の打撃数から換算する方法をとつても信頼度が大差がない。従つていまのところ標準貫入試験の結果から推定するのが実用的である。

3) 杭の載荷試験は最も確実な支持力判定方法と考えられているが、図-1 e)~i) のような場合には 1本の杭について短時間の載荷試験をしても、その結果はあまりあてにならない。1本の杭について相当の長時間(数

* 正員 国鉄鉄道技術研究所 土質研究室
 1) 最上武雄：基礎地盤，土木学会誌 41-12, 昭.31-12.
 2) Civil Engineering Code of Practice No.4, Foundations, The Institute of Civil Engineers, 1954.
 Mansur-Kaufman, Pile Tests, Old River, La.
 3) Journal of Soil Mechanics, ASCE, Oct. 1956

日～数週間)にわたる載荷試験を行つても、杭が地盤中に貫入はじめる極限支持力を求めることはできるが、実基礎の杭群の沈下の予測はできない。これは群杭作用(group effect)があるためである。従つてこのようなときには、杭先下の粘土の圧密特性を調べて杭群の沈下を検討する等、特別の吟味を加える必要がある(後述 3. c) 参照)。

図-1 a), b) のような支持杭でも荷重後時間が経過すると杭周摩擦が減少し、杭先端の支持層(支持層中の杭の貫入部分も含めて)の負担が増大し、この間若干の沈下がおこることが実験的に確かめられている。この原因は杭周摩擦を通じて伝えられた力が杭を包む土の圧密沈下を促し、土の沈下が進行して杭の沈下量に近づくときと杭周に接する土のせん断ヒズミはだんだん小さくなり、土の応力および杭周摩擦も消滅してゆくからである。

この関係は 図-1 j) のように、地層が上から硬一軟一硬の配置であるときでも同様である。要するに圧密されやすい土を貫いて、比較的硬い支持層に達している杭が死荷重その他の長期荷重をうけた場合は、支持層貫入部分 D_f の杭周摩擦 F_{Df} および先端面の支持力 R_p だけの有効であると考え、支持層上面より上にある軟弱土の杭周摩擦を無視した方が安全である。とくに粘土層の圧密による地盤沈下のおこっているところでは、負の杭周摩擦(Negative Friction)が作用する。負の杭周摩擦力は、粘土のクリープを考えると、比較的下さい値であると思われるが、図-1 j) のような場合、上の砂層から作用する負の摩擦力は相当大きいから注意を要する。従つて、支持杭では杭の先端部の支持力($R_p + F_{Df}$)を分離して測定できるような試験方法⁴⁾が望ましい。

杭先端部の支持力を分離して測れないときは、支持杭であつても同一の大きさの試験荷重を十分長い時間持続すべきである。例えば想定設計荷重の 1/2, 3/4, 1, 1-1/4, 1-1/2, 1-3/4, 2 倍というように荷重を増してゆく場合(この間 2 段ごとぐらいに荷重を 0 に戻す)各段階ごとの 2 時間内の沈下量が測定精度(ダイヤルゲージを用いる場合 1/100 mm が普通)以下になるまで同一荷重を継続し、最大荷重においては、降伏沈下(同一荷重で沈下が際限なく増すこと)がおこらないかぎり 1~2 日間の沈下が測定精度以下になるまで荷重を継続することが望ましい。

交通荷重など急速に大きく増減する活荷重の影響をみるためには死荷重相当分をあらかじめ載荷したのち、活荷重分の急速くり返し載荷を行うことも一方法である。急変する活荷重にたいしては、支持杭でも相当な大きさの杭周摩擦が有効であるはずである。

杭の載荷試験実施にあたり最も注意すべきことは、

- a) 載荷設備を十分に安定で堅固なものとし、杭に片荷がかかつたり危害を生じたりしないようにする。
- b) 載荷重の支点はアンカーに用いる杭の位置をできるだけ試験杭から離して、試験杭に影響を与えないようにする。
- c) 沈下測定のためビーム等の基準線の支点は、試験杭、および載荷重の支点またはアンカー杭からできるかぎり離し(2.5~5 m)、基準線が荷重の影響で動くことのないようにする。

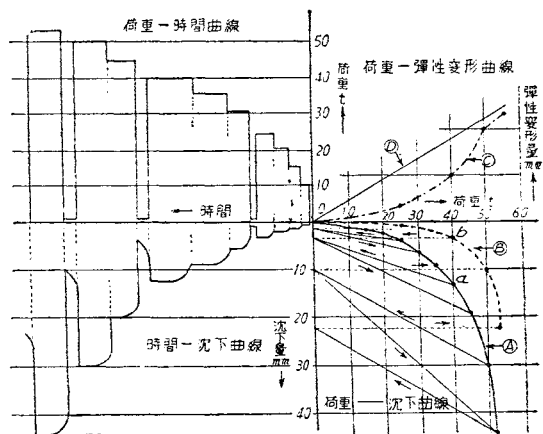
等のことであるが、従来このような点を十分に考慮しなかつた例が多いから特に注意したい。

載荷試験の結果うる荷重-沈下曲線(図-2)から、許容支持力を求めるには、

- i) 杭頭の沈下曲線または塑性沈下(荷重を 0 に戻したときの反発量=弾性変形量、を差し引いた永久沈下)の曲線の急曲する点(a または b)の荷重÷安全率。
- ii) 杭頭の沈下量または塑性沈下量の許容限度の荷重。
- iii) 荷重 1 t 当りの杭頭沈下の増加量の許容限度(例えば 0.25 mm)に達したときの荷重÷安全率。
- iv) 杭頭の沈下曲線の勾配が、弾性変形曲線の勾配の 4 倍となる荷重÷安全率。

等いろいろなり方がある。普通、i), ii) のうちいずれか小さい方をとるが、降伏点(a または b)を選ぶのに曲線の曲り始めをとるか中頃をとるかで差を生ずる。i) の代りに iv) を用いればこのようなことがなくてよい。しかし小直径の長い杭であると、弾性変形曲線の勾配が大きいため、iv) による場合、支持力を過大評価するおそれがある。iii) は降伏点を見出すのに便利な方法であるが、支持力がきわめて大きい杭では沈下が過大になるおそれがあるから同時に ii) の吟味をすべきである。

図-2 杭載荷試験記録



- Ⓐ 全沈下曲線
- Ⓑ 塑性変形曲線
- Ⓒ 弾性変形曲線
- Ⓓ 理論弾性変形曲線 $\delta = \frac{RL}{AE}$

4) 菅原 操: 基礎杭の載荷試験についての一考察, 土と基礎, 20 号, 昭. 32-4 (発表予定)

前述したように荷重持続時間の長短により杭の支持作用が異なるので、一時的荷重の加わる場合（短期荷重）にたいしては、i) の安全率を低くし（例えば地震にたいして¹⁾）、ii) の許容沈下を大きく（例えば 15 mm）考えるが、長期荷重にたいしては短期荷重の場合の許容支持力をさらに安全率（例えば 2）で除するなど荷重時間の影響を考慮することは合理的である。

しかし一時的荷重であつても交通荷重のようにくり返し回数の多いものにたいしては、安全率を低くとりすぎると沈下が累積するおそれがあるほか、支持杭でも若干の群杭効果による沈下の増大が考えられるから、安全率を増し（例えば 2~3）、許容沈下の制限を厳しくする（例えば 6~3 mm）必要がある。沈下の影響を嫌う不特定構造物の場合、上の考慮が特に肝要である。

一般に杭の許容支持力の判定にあつては、このように構造物および荷重の性質も考慮すべきで、試験あるいは計算の結果だけから一律に決めるべきものではない。

4) 試験杭または実杭について杭打試験を行い、杭打公式（動力学公式）を用いて支持力を判定する方法が広く行われているが、杭打公式だけから支持力を即断することはきわめて危険なことである。杭打公式は杭の打込時の貫入抵抗を求める式であるが、実荷重は一般に継続時間の長い静的荷重も含んでいる。荷重時間の長短により杭の支持作用が異なることは前にも述べたが、打込力は非常に短い時間、作用する荷重と考えられる。とくに杭が粘性土で包まれているときの杭打時の貫入抵抗は、静的支持力をはるかに上廻るものと考えられるが、一方杭打の衝撃によつて杭を包む土はかく乱され強度が低下する影響もあるので、両者の影響が相殺するという偶然が起らなければ動的、静的の両支持力は一致しない。また杭打時みだされた粘性土は時日とともに強度を回復する作用があり、一定時間（例えば 24 時間）置いた後に打ち直すと貫入抵抗が増大していることがしばしばある。

安定な砂質地盤であつて、杭を包む土が主として砂質土である場合には、動的、静的の両支持力が比較的良好一致するといわれるが、重量の小さい落錘を用い、大きい落下高による打込みを行うと、荷重伝達時間のきわめて短い衝撃になるので、やはり過大な支持力をうる。実杭の施工施率を向上するためにも必要なことであるが、落錘または単働気錘の落下高は 1.4 m 程度以下とし、それでもなお打止めの一打当たり 2.5 mm 以上の貫入量をうるほど十分に重い錘を用いるべきである。この場合、杭重量 W_p を錘重量 W で除した値は、木杭の場合 1/2 以上、鉄筋コンクリート杭で 2/5 以上、鋼杭はキャップの有無により異なるが 1/3~1/4 以上であることが望ましく、複働気錘を用いる場合でも 1/4 以上はほしい。なお鉄筋コンクリート杭では杭長 30 cm 当りの

重量の 30 倍以上の重さの錘が望ましい²⁾といわれる。

アメリカの土木学会で発表した杭打試験の統計⁵⁾をみると、砂質土において気錘を用いた場合、Hiley, Redtenbacker, Pacific Coast 等の Hiley 型の杭打公式による支持力は載荷試験により求めた支持力に近い値を示すが、砂質土でも落錘を用いたものにはばらつきが多い。粘性土では単働気錘を用いた場合において、Hiley 式によつたものでも、載荷試験による支持力の 26~195%と大幅にばらつき、概して杭打試験によるものの方が小さ目（平均 70~80%）である。Hiley 式より精度の低い Engineering News 式（Wellington 式）などでは、このばらつきが 50~630%と極端であつて、杭打公式による平均値は過大（約 200%）である。

Hiley 式の形は R を極限貫入抵抗とする場合、次のとおりである。

$$R = \frac{\eta e_f h W}{S + C/2} \quad (t)$$

ここに e_f : 杭打機の機械摩擦係数（ウインチ巻上式落錘; 0.80, 単働気錘; 0.90）、 W : 錘の重量 (t)、 S : 杭の貫入量 (cm)（落錘では最終 5 打、気錘では最終 20 打の平均）、 C : キャップ、杭、土などの打込時の弾性変形量 = 打込時の杭頭の反発量 (cm)、 η : 打撃効率で次の式により計算する。

$$W > eW_p \text{ の場合 } \quad \eta = \frac{W + e^2 W_p}{W + W_p}$$

$$W < eW_p \text{ の場合 } \quad \eta = \frac{W + e^2 W_p}{W + W_p} - \left(\frac{W - eW_p}{W + W_p} \right)^2$$

ただし e : 反発係数【木杭; 0~0.25（複働気錘の場合 0.4）、コンクリート杭; 0.25~0.4（複働気錘の場合 0.4）、鋼杭; 0.4（複働気錘の場合 0.5）】、 W_p : 杭の重量 (t)

Hiley 式は機械摩擦、衝撃および杭や土の弾性変形によるエネルギー損失をすべて考慮しているが、これらの諸損失の一部を適当に仮定するかまたは無視したものに Redtenbacker, Pacific Coast, Terzaghi, Eng. News, その他のさまざまな杭打公式があり、最も単純な形は、諸損失をすべて無視した Sander 式

$$R = \frac{hW}{S} \dots\dots\dots \text{である。}$$

諸損失の一部または全部を無視したものが過大な R を与え、杭打機や杭および土の条件により大きいばらつきを示すのは当然である。

5) 載荷試験から杭の許容支持力を求める場合の安全率の選び方は前に述べたが、英国土木学会の規準では杭打公式（Hiley 式）をも含めて一般の場合 表-1 に示

5) カッコ内の数値は日本建築学会「建築基礎構造設計基準」による。

6) Pile Foundation and Pile Structures, Bull. 27, ASCE, 1946

す安全率を用いるように定めている。ただし、沈下および不等沈下をきらう構造物の場合、大なる衝撃や活荷重のくり返しのある場合、主として杭周摩擦により支持される大きい杭群で単杭の試験から判定する場合、土の性質が経時的に劣化するおそれのある場合、長期持続する荷重をうける摩擦杭の場合等においては、表-1の値より大きい安全率を考慮する必要がある。

なお、Eng. News 式では安全率を 6, Sander 式では 8 というように大きい値を用いている。(次号完結)

表-1 安全率の値

| 支持層種別 | 支持力判定方法 (杭打公式は Hiley 式) | | |
|-------|-------------------------|------------------------|--------------------|
| | 載荷試験 | 杭打公式 (打直しても抵抗の変らないうとき) | 杭打公式 (打直して抵抗が変るとき) |
| 岩 | — | $\frac{1}{2}$ | — |
| 砂質土 | $\frac{1}{2} \sim 2$ | 2 | $\frac{1}{2}$ |
| 硬い粘性土 | $\frac{1}{2} \sim 2$ | 2 | $\frac{1}{2}$ 以上 |
| 軟い粘性土 | $\frac{1}{2} \sim 2$ | 適用不可 | 適用不可 |

書 評

真田 秀吉 著 明治前日本土木史

日 本 学 術
振 興 会 刊

本書は明治前日本科学史の一部として刊行されたもので、土木の各分野について古代より明治に至るまでを逐次述べてある。

河川、運河、砂防、農業工学、港湾、道路（橋梁を含む）、築城、水道、測量、土木行政および施工法など 12 編を内容としており、道路、港湾など単に技術的問題のみならず、完成後の運営方法にまでふれている。明治以前とうたつてはあるが、明治以後、第 2 次大戦直前に至るまでも 1 編を独立させ、ごく簡単な記述はしてある。

江戸時代は新しいだけに資料も豊富で、記述が詳細なのは当然であるが、さかのぼって記紀の時代より古文書を頼りに、かなり豊富な史実が掲載されているのは意外であり、土木事業の歴史がいかに古く、また人間の衣食住の生活にいかに密接な関

係があつたか、さらにわれわれの大先輩が実に多くの偉業をなしたげたかに驚くのである。

過去の話であり、用語などもいくらか現代ばなれしているのはやむを得ないとして、少し落着いて目を通すと興味つきないものがある。江戸時代、隅田川にかかつていた吾妻橋が有料橋としていかに運営されたかは、今日東洋一を誇る西海橋と同じ問題を含んでいるし、四国の満濃池の高さ 20 m におよぶアースダムが文武天皇治世以来長年の間、いかに災害と闘つてきたかなど、読んでいると他人事とは思えない。

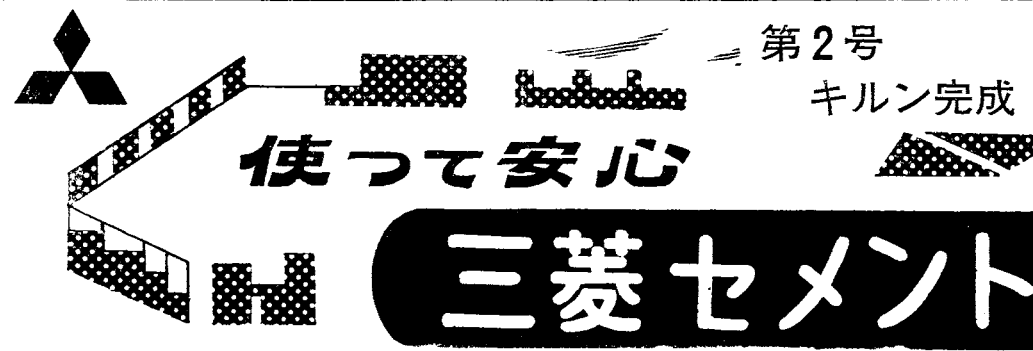
このように本書は、日本の土木史の貴重な史実を述べてあると同時に、断片的な逸話にも事欠かないので資料としても、また読み物としてもよいであろう。ただ最近出版されている一部の歴史書に見られるよう

な、ともすれば限られた観点でその内容解釈の筋が通りすぎているといった傾向、それは全然ない一方、史実が単に並べてあるといった傾向もなくはないが、この書の刊行の目的と経過からすれば当然であろう。

さきに同会編さんになる明治以前日本土木史の大部(頁数)の刊行(昭 11)があり、その要録と(とはいつも註釈、引用文献などほとんど整理されて若い人にも非常に読みやすくなっている)と見られる本書の出版が今回行われたのであるが、第 2 次大戦にまたがり、あらゆる障害を克服し著述された著者の労苦の、なみなみならぬものであることをここにお察しする。

本書を現代にいかに有意義に生かすかが、それに酬ゆる唯一の途である。

著者：学会名誉員・前会長・工博 A 5 判 554 ページ、定価 950 円、上製函入、昭.31.5 発行。丸善発売。



第 2 号
キルン完成!

使つて安心

三菱セメント

本 社 東京都千代田区丸の内 1 の 4 (新丸ビル) 電話 (27) 1341-9・1441-9
 工 場 福岡県八幡市黒崎 (電話) 八幡 3750-2
 営業所 大 阪 ・ 広 島 ・ 福 岡