

基 礎 工 [V]

4. 杭 基 礎 (2)

白 石 俊 多*

3. 杭基礎の設計と静力学公式

設計の仕事の順序は：

1) 調査試験等の資料をもととして、経済的な事情も考慮し、常識上、経験上妥当と思われる均衡のよい基礎の形を画き、2) この形にたいして与えられた荷重をあてて支持力その他強度上の吟味を行い、安全性を検討し、3) 必要な修正を行つて最終的な形を決め設計図面を作製するというように initial sketch→final drawing と変化する過程をたどる。まず全体のあらましの形を決めてから順次細部を決めていくのがよい。この順序を逆にして、すべての細部を先に決めてから組立てていくと不自然な形をつくるおそれが多い。

前項 1) に述べたところが事実上、設計の適否、良悪を決定する基本であるが、これは設計者の能力に負うところが多く、筆紙につくしがたいものがある。しかし杭基礎では、設計のあらましの形を決定するための先決問題は、杭先端の深さの選定—杭の支持層の選定にある。この意味において、次に述べるところの静力学公式は有利な吟味方法でもあるが、またあらましの寸法の決定のためにも有用な資料である。また、杭の支持作用を理解するためにも一見の価値がある。

静力学公式とは、土および杭材料の力学的性質荷重の関係から杭の支持力を求める計算式である。以下、静力学公式がどのようにして作られてあるかを述べる。

荷重下の杭基礎が安全であるためには、次の3条件が必要である。

- a) 柱材の圧縮応力度が許容値をこえない。
- b) 杭先が地盤中に貫入しない：杭先、杭周において土のせん断降伏がおこる限度にたいして相当の安全率がある。
- c) 杭先下の支持層中に杭から分布した圧力が、支持層

の許容圧力(許容地耐力)をこえない。また支持層以下にある軟層の圧密沈下が、沈下の許容限度をこえない。

a) に関連して問題となるのは、杭の座屈強度であるが、Cummings 等の研究によると全体が地盤中にある杭の支持力は、杭材の長柱としての強度に左右されることはない⁷⁾ といわれ問題はないが、打込みの途中または完成後地上に突出している部分に打込力または荷重が作用する場合に対しては、突出部の横方向支持条件に応じて、長柱としての検算を必要とする。この場合、長柱の有効長の下端は、地表部土質の硬軟に応じ、突出部長さの 1/10~1/2 だけ地表面下に入るものとし、とくに地表部がきわめて流動的なヘドロのようなものである場合は、これを水と同様に扱うのが安全である。なお、流水圧、風圧等の水平力が突出部に作用する場合は、これらを考慮しなければならない。打込時の杭材の応力度を求めるには、荷重として杭打公式(Hiley型)の R を用いるのが普通であるが、長柱であるかないかを別として、杭頭の衝撃から最大応力度 $\max \sigma$ を求める近似式²⁾ に、

$$\max \sigma = \frac{R}{A} \left(\frac{2}{\sqrt{7}} - 1 \right) \quad A: \text{杭の断面積 がある。}$$

静力学公式の条件の関係を吟味するものに、Terzaghi⁸⁾、星埜⁹⁾、Taky¹⁰⁾、Dörr 等の式がある。これらの式の基本形は、

$$Q = \pi r^2 q + 2 \pi r f D_f \quad \text{である。}$$

- ここに Q : 杭の極限支持力、 r : 杭の平均半径
- q : 先端面の極限地耐力、 f : 杭周摩擦力度
- D_f : 支持層中の杭の根入り長さ

許容支持力は上記の Q を適当な安全率で除して求める。

上式で D_f を杭の全長とせず「支持層中の根入り」深さとした理由は 2.3) に述べたように荷重の大部分を支持層が負担するからである。

図—1 b) d) e) のような摩擦杭にかぎり杭の全長が支持層中にあるから、杭長を D_f と考えてよい。

上式の第1項は先端支持力を、第2項は杭周摩擦力をあらわす。Terzaghi の q の値は本講座 [II] 2. に述べられたものである。星埜式、Taky 式の q はそれぞれ次のとおりである。

星埜式 $q = c \eta_c + r D \eta_t + 2 r r \eta_d$

Taky 式 $q = r D \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi}$

ここに η_c, η_t, η_d 等の係数は杭先の土の内部摩擦角の函数、 D : 杭先端の地表面からの深さ、 ϕ : 土の内部摩擦角、 r : 土の単位重量。

Dörr 式は各種の参考書にみられるので、ここでは述べない。 f の値は、粘土では粘着力(こねかえした粘土のものをとればよいとされている)、砂質土では、

$$f = r z K \tan \phi \quad \text{とするのが普通である。}$$

ここに z : 地表面からの深さ、 K : 土圧係数。

* 正員 国鉄鉄道技術研究所 土質研究室
 7) A. E. Cummings: Pile Foundations. Proc. Purdue Conf. Soil Mech., Sept, 1940
 8) K. Terzaghi & R. B. Peck: Soil Mechanics in Engineering Practice, 1948
 9) 土木学会編: 最新土質工学, 1950
 10) 第II回国際土質工学会報, vol. 1, 1953

K の値は、主働、受働両土圧値の中間の値をとり、施工の方法その他の条件により異なるものであるが、実験的¹¹⁾には0.31~1.56というような値が報ぜられている。

静力学公式の条件c)を吟味するものにW.C. Dunhamが粘土中の杭にたいする近似的実用的な方法¹²⁾を述べている。また、J.W. Dunhamは、主として標準貫入試験の結果を用いてb), c)の二条件を吟味する実用的な方法¹³⁾を提案している。両Dunhamの方法はいずれも相当大胆な仮定を含んだ近似的なものであるが、杭群に適用して群杭作用を含む支持力を近似的に計算できる点に特長がある。例えばJ.W. Dunhamの方法をみると、b)の条件の吟味方法は、上記のTerzaghiと同様な取扱いをするが、c)の条件を次式で吟味することにして

$$\frac{Q_a}{\pi r^2 + 1.811 r D_f} = p_m \leq q_a$$

$$\text{または } Q_a \leq q_a (\pi r^2 + 1.811 r D_f)$$

ここに Q_a : 杭1本当りの許容支持力, q_a : (標準貫入試験の打撃数 N から求めた) 杭先の地盤の許容地耐力度 $\cong 1.22 N$ (t/m²), p_m : 計算上の杭先下の許容最大鉛直圧力度。

なお $p_m \leq q_a$ であつても、群杭作用を考えると、杭先端における杭間隔を s とするとき、 $s^2 \geq \frac{Q_a}{q_a}$ であれば Q_a を許容支持力としてよいが $s^2 < \frac{Q_a}{q_a}$ のときは、 $Q_a' = q_a s^2$ を杭1本当りの許容支持力とする。従つて、 q_a の小さい場合、杭間隔 s を大きくするほど、杭群の支持力が大きくなる計算になる。

しかし、過大な杭間隔を用いることは、實際上不利であつて、普通は $s \cong 3.5 d$ (d : 杭の直径) 程度が限度である。一般に、多数の短小杭を用いたり、大きい杭間隔を選んだりするよりも、少数の長大杭を、より堅実な支持層に達せしめる方が安全であり、かつ有利である場合が多い。

なお、図-1 h) のように斜杭を用いて、杭先端における杭間隔を増すことはきわめて有利であると考えられる。

上の計算では、群杭作用を杭先端の地盤の地耐力と杭間隔の関係だけから考えているが、群杭作用はこのような関係以外の要素を含むものである。例えば図-1【e)~i)】のように、杭先端より下方に圧密しやすい粘土層のある場合には、粘土の圧密沈下を考慮する必要がある。粘土の圧密沈下量を予測計算するには、圧密試験のデータ(圧縮指数または圧縮率)、ボーリングのデータ(とくに正確に測定した粘土層厚)等の実測値を求め、さらに粘土層内の応力分布を求めなければならない。

この場合、粘土層内の鉛直圧力分布を求めるには、上記の p_m を杭先端を通る平面上の等分布荷重とみなし、

フーチング基礎の場合と同様に p_m による分布圧力を近似的に求めてよい。 p_m の分布面積は、杭群の外周を包む面積をとり、例えば ns^2 (n : 杭の本数) の値とする。なお、建物のように多数の柱(杭群)が比較的小間隔で配置される場合、杭群相互の分布圧力の重複が考えられることも、フーチング基礎の場合と同様である。

上に紹介した各種の静力学公式を用いる場合、常に念頭に入れておくべきことは:

- a) 計算上の諸仮定は必ずしも杭の実際の支持条件と一致しない。杭の支持作用とくに杭周摩擦のおこり方は、土質や施工の条件等により相当に変化するものであり、未解明の問題も含んでいる。
- b) 計算に用いる諸係数、とくに土の性質をあらわすものは、試験誤差その他の理由により常に正しいものではない。

等のことである。設計者はその当面する個々の場合について、土質その他の条件をよく考え、これらの条件によく適した吟味方法を用いるべきであつて、公式の価値を過信し、一律な機械的な取扱いをすることはつしむべきである。また、静力学公式による吟味に重大な疑点があるときは載荷試験その他、支持力を実測する方法もあわせて用いるべきである。とくに図-1 e)~i) のような悪い土質条件の場合には、載荷試験と静力学公式の併用が望ましい。

4. 杭の水平抗力と斜杭

1) 杭の性質として、水平力にたいする抵抗の弱いことは杭基礎の大きな弱点と考えられる。在来の設計慣習で、フーチング、井筒等の基礎では滑動および転倒にたいする安定について厳密な吟味をしているにもかかわらず、杭基礎については転倒モーメントによる杭頭荷重の増大は計算上考慮するが、滑動力(水平力)にたいする杭の抵抗を十分に吟味しないのは誤りである。とくに、重機械基礎、橋台、橋脚等の基礎で水平抗力の弱いものは、動揺、変状等の害を招きやすいから注意を要する。

外国の示方書の例をみると、杭1本当りの水平力の許容値を決め(例えば0.454 t)¹⁴⁾、水平荷重試験により杭の水平抗力を確かめた場合を除いては上の制限に従うように指示しているものがある。なお斜杭はその軸方向許容支持力の水平分力を上の許容値に加算してよいとされている。

水平荷重試験による許容水平力の決め方は、杭頭の水平変位が一定量(例えば4.75 mm)¹⁴⁾ になつたときの

- 11) C.I. Mansur & R.I. Kaufman: Pile Tests, Low-Sill Structure, Old River, La. Journal of Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, Vol. 82, Oct., 1956
- 12) C.W. Dunham: Foundations of Structures, McGraw-Hill Civil Eng. Series, 1950
- 13) J.W. Dunham: Bearing Capacity of Pile Foundation, Proc. ASCE, Vol. 80, Jan. 1954
- 14) Foundation Code of New York City

水平力を安全率 (例えば2)¹⁵⁾ で除した値を用いるのが普通である。

杭1本当りの許容水平力は、杭の剛性 [ヤング率 (E) × 断面2次モーメント (I)], 土質, 単杭, 群杭の別, 杭頭と基礎底面との固定度等の条件によつて異なるが 0.45~6.0 t の範囲にあるのが普通で, とくに杭頭付近の土質が軟かい弱小な杭では 0.45 t 以下の場合もありうる。

水平荷重試験における杭頭の水平変位量は, 載荷試験における杭頭沈下と同様に, 動的, 一時的に荷重をかけた場合では小さく, 静的, 長期的にかけた場合では大きい。しかし試験には静的荷重を用いるのが普通である。従つて動的な影響をとくにくわしく調べたいときは, 杭群を含む供試基礎について振動試験その他の動的な力をかける試験をすることが望ましい。

静的な水平荷重試験の方法は, 荷重の加え方も変位の測り方も大体において載荷試験と同様であつて, 縦を横にしただけの違いであるが, 荷重は小さくすみ, 時間も短い (一荷重段階当り数分~数十分間)。設備も簡単であるから, 必要であるときは骨身を惜しまずに実施することが望ましい。

全長が地盤中にある杭の頭に水平荷重をかけた場合, 杭材の抗曲抵抗と杭の側面の土圧反力により荷重に抵抗する。前者は杭の剛性 (EI) に関係があるが, 実験や理論計算の結果¹⁵⁾をみると杭の剛性の大小による影響は比較的小さく, 杭頭下 1~2 m の深さの範囲の土質の硬軟が杭の水平抗力の決定的要素であるようである。すなわち, 水平力の大部分は杭頭下約 2 m の間において土圧として地盤に伝えられ, 杭の剛性によつて深部の地盤に伝えられる力はきわめて小さい。杭の大きさによつて多少は異なるが, 最大土圧および杭材の最大曲げモーメントのおこる深さはそれぞれ杭頭下 0.3~0.45 m, 0.6~1.35 m であつて, 地下約 6 m 以深では土圧, 曲げモーメントともに事実上 0 である。杭長が約 6 m 以上あるとき杭の長短は, その水平抗力と関係がない。

従つて杭基礎の水平抗力を大きくしたいときは, 斜杭の使用, 杭頭の固定度の増大なども有利な方法であるが, 基礎底面 (杭頭) をなるべく土質のよい深さに設けることも考えるべきであり, とくに必要があれば基礎底面下 1~2 m の範囲の地盤改良 (例えば薬液注入, 振動による compaction 等) も考えることである。

理論式を用いて, 杭の水平抗力を求めることもできるが, 土質に関する係数 (地盤反力係数 k) の測定が困難なので, 精密な式を用いてもよい精度は期待できない。近似的な式には次に示す弾性支承上にある半無限長のハリの式がある。

$$\text{杭の水平変位 } \delta_h = \frac{2 P_h \lambda}{k} e^{-\lambda x} \cos(\lambda x)$$

$$\text{杭頭では } \delta_{h0} = \frac{2 P_h \lambda}{k}$$

$$\text{曲げモーメント } M = -\frac{P_h}{\lambda} e^{-\lambda x} \sin(\lambda x)$$

$$\text{せん断力 } Q = -P_h e^{-\lambda x} \{\cos(\lambda x) - \sin(\lambda x)\}$$

ここに $\lambda = \sqrt{\frac{k}{4EI}}$, x : 深さの方向の座標。

k の大略の値を次に示す (単位 kg/cm^3)。

非常に軟かいシルトまたは粘土	0.3~1.5
軟かいシルトまたは粘土	1.5~3.0
しつかりしている粘土	3.0~15
かたい粘土	15 以上
砂	3.0~9.0

ただし上式は δ_h のきわめて小さい範囲にしかあてはまらない。

なお杭基礎は水平力にたいしても群作用があつて, 杭群中の1本当りの水平抗力は一般に単杭のものより小さい。例えば1列だけよりなる杭群と, 数列の杭からなる杭群とに, 列に直角な方向の同じ水平力をかけた場合, 結局水平力の大半をうけとるのは1列だけに接する地盤であるから, 前者と後者の間に大なる差異がない。従つて杭1本当りの水平抗力は, 後者の方が小さい。

2) 斜杭の使用は杭基礎の水平抗力を増すために最も有効な方法であると考えられ, 欧米では斜杭を使用した例が多い。実験的にも, 斜杭による水平抗力の増加は確かめられ, 斜杭の混用率 (斜杭本数/全本数), 配列方法等によつて異なるが, 斜角 20° のものを混用した群杭の試験によると, 杭群の水平抗力を斜杭を用いないものの 1.2 倍 (混用率 25~33%)~2.7 倍 (混用率 100%) に増すことができた¹⁵⁾といわれる。試験の結果, 水平力と同方向に傾く斜杭を用いたものの水平抗力の増え方が大きかつたが, このような斜杭は, 構造物重量のため杭の側面に予圧が作用して, 側面の抵抗土圧を有効に利用した結果と考えられる。いずれにしても斜杭の傾きの方向が前後いずれの向きであつても, 水平抗力増加ができることは間違いなく 図-1 h) に示したような配置が最も有利なようである。

5. 杭打施工上の注意

紙数にかぎりがあるので, 杭の施工法全般について述べることはできないが, 施工上注意すべき要点を述べてみると:

- 1) 錘はできるだけ重いものを用い, 2.4) 抗打試験に述べた程度のもを用い, 落下高をできるだけ低くとるべきである。重い錘と, 低い落下高による方が, 施工能率がよく, 杭頭の衝撃による応力が小さいはずである。
- 2) 杭はできるだけ1本ものを用い, 継ぎ杭の使用を避

15) Symposium on Lateral Loading Tests on Piles, ASTM, 1954

ける。やむを得ず継ぎ杭を用いるときは、継ぎ目の強度が中間部におとらないような設計とし、継ぎ目を入念に仕上げる必要がある。継ぎ目の施工が不良で、杭に折れ目ができると、わづかな角度であつても、致命的な結果を招く。

- 3) 杭頭は、鋼杭の場合は別として、一般に杭輪、キャップ等で防護する必要がある。杭頭または防護材が破損すると打撃効率が低下するから常に完全な状態に保つ。
- 4) 杭長と打止め深さの関係は微妙である。所定の打止めに達しないのももちろんよくないが、打込みすぎることにもまたかえつていけない。とくに施工後の切断による杭長の調節が困難な鉄筋コンクリート杭では、調査、設計を入念に行い、適当な長さの杭を準備する必要がある。
- 5) 設計の位置および打込方向を正しく保ち、打込力が偏心しないよう極力注意する。
- 6) 1本の杭を打ち終るまで、打込作業を中断してはいけない。打込中断によつて抵抗が増す場合、作業能率が低下し、かつ打止めの判定を誤まるおそれがある。

7) 打込時、杭頭や錘のはね返りが大きく、打込みの進行が悪い場合は、錘が軽すぎるか、または杭先が埋木、転石等の異物につかえたか、杭材が破損したか、いずれにしてもよくない現象であるから、適当な善後処置を講ずる。このような Hard driving を無理押しに進めるのは禁物である。

以上、言いたらないことは多々あるが、杭基礎は材料、施工法ともに多種多様であり、細かいところはそれぞれ異なる注意を要する応用の技術であつて、現場技術者の創意、工夫にまつところが多い。

基礎工講座の完了について

今回をもつて5回にわたつた基礎工の講座を無事終了することになりました。御多忙のところ御執筆載いた著者の方々に、会員を代表して紙上より厚く御礼申し上げます。

次回は来月号より溶接に関するものを4回の予定で連載の予定ですから御期待願います。

なお講座について御希望があれば編集部までどうぞ御注文下さい。

会 員 欄

改めたい習慣について

正 員 齋 藤 昇

2月号の会員欄を見て非常に嬉しかった。それは習慣というものは人間の批判力をマヒさせるようだが、その習慣に疑いをもち、建設的意見を述べたことは、同じ土木技術者として誇つてもよいからです。

そこで私も、二、三いろいろな本より教えられた、改善した方がよいと思われる習慣について分類しながら例をあげ、皆様のご批判を仰ぎたい次第です(カッコ内は参考文献)。

(1) 始め無批判、無計画に使用されたもの 2月号所載の“数字の区切り方”はこのよい例です(中村清二「物理実験者の心得」芝 亀吉「単位の話」等)。

それから“掛算の方法”について、つまり一番先に知りたいはずの数字が一番最後に求められるというムジエンに不合理をみいだします(小倉金之助「近代日本の数学」)。

(2) 始め誤つて使用されたもの この例に野球のいわゆる “A(ア

ルファー)”づきがあります。これは年末手当などの+アルファの語源でもあるようです。ところがこのAなる記号は始めて使つた人がxのクズシ字を見誤つてαと読んだため、ごく最近まで当然のように使用されていましたが、近いうちにXなる記号に統一されるもようです(某新聞)。

(3) 便宜上不合理を承知で、または知らずに使用しているもの トーナメント試合における、2位以下の順位決定がよい例です。このことはトーナメントの原理より不合理なことは明らかでしょう。(吉田洋一「一対一」)。

(4) 数学用語に従つた方がよいと思われるもの この例として反曲点と彎曲点の問題、図心と重心の問題、行と列の区別の問題があります。これらは工学関係の先生が原語から直接に独自の訳語なり、用法なりをとつたために生じた問題のよう

です。その一つの証明としては昭和10年度の某大学工学部の試験問題の中で反曲点なる用語が使われ、数学雑誌の問題解説にいわく「反曲点トイウ言葉ニハ受験生が大分面喰ッたらシイガ、……コレハ工学部ノ先生少シ不親切。」と評しております(高数研究一卷一号)。

また、図心と重心を区別しなくてもよいと思います。高等学校では積分の応用のところで、線分の重心、平面図形の重心として教えているはずですから……(某数学参考書)。

つぎに行と列の区別について、数学者はすべて横を行としています。工学の本では大体縦を行と呼ぶようです(多数のため略)。

以上気づいた点を書いてみました。このような例はまだたくさんあると思いますが、結局習慣を改善するということになると個人の力は真に無力で、土木学会のような指導力をもつところにして、始めてできることだと思います。

(筆者:国有鉄道施設局特殊設計室勤務)