

設計における土質定数の考え方

5. 杭基礎の設計に関する土質定数の求め方

しお い ゆき たけ
塩 井 幸 武*

もり しげ りゅう ま
森 重 龍 馬**

5.7.2 N 値以外の原位置試験から求める土質定数

5.7.2.1 静的コーン貫入試験

この試験の代表的なものにダッチコーンがある。この測定は標準貫入試験よりも簡易で測定値の信頼度も高いが貫入力が弱く中間砂層などを貫くことが難しい。よって、杭基礎では支持層や中間砂層の深さの確認、水平変位量や周面摩擦支持力に関連する土質定数を求める場合の標準貫入試験の補足として利用することが多い。

土質定数の判定はコーンの貫入抵抗 q_c と N 値との関係を求め、 N 値を仲介として行うことが多い。このためには、標準貫入試験と同一の地点で測定して q_c と N 値との関係を定めるがよい。図—5.23は q_c と N 値との一般的な関係を示す例である。

5.7.2.2 平板载荷試験

この試験は土の定数を求めるための基本的な試験の一つである。しかし、この試験は対象とする地盤までの掘削が必要のため、杭基礎に必要な深い層の試験は困難である。したがって、杭基礎では地表付近の土質定数が問題となる水平変位量などに関する定数の判定に用いられる。

試験は直径 30 cm の円、又は一辺 30 cm の正方形の剛性板に载荷するのが普通である。試験法については土質工学会、土質調査法などに示してある。

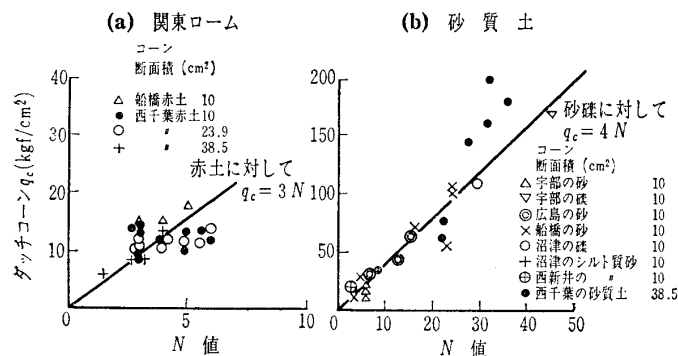
地盤の変形係数 E_0 は「国鉄基礎標準」の例で示せば次の計算式により求められる。

$$E_0 = 13 \cdot P \cdot I_p \cdot \Delta \delta \quad \text{.....(5.3)}$$

ここに E_0 : 地盤の変形係数 (kgf/cm²)

P : 载荷荷重強度 (kgf/cm²)

I_p : 形状係数 (正方形: 0.88, 円形: 0.79)



図—5.23 ダッチコーンの q_c 値と N 値との関係(三木)

*建設省 土木研究所

**日本鉄道建設公団 調査役

$\Delta \delta$: 载荷試験の繰返し荷重に対する変位量 (cm)

13: 30 cm の载荷板に関する換算幅 (cm)

$\Delta \delta$ は図—5.24に示す荷重—沈下曲線の $\delta_1 - \delta_2$ とする。

5.7.2.3 ボーリング孔内における液圧による試験

この試験法にはプレシオメータ, L.L.T. 土研式などがあるが基本的には同一と見なされるものである。

この試験は地盤条件や深さなどにより限定されないのが杭のような深い基礎には応用範囲の広い試験法である。

現在では杭基礎などに用いる E_0 の判定に主用されている。 E_0 の判定には次式を用いる (図—5.25参照)。

$$E_0 = (1 + \nu) \cdot r_m \cdot K_0 \quad \text{.....(5.4)}$$

ここに E_0 : 地盤の変形係数 (kgf/cm²)

ν : ポアソン比

K_0 : この試験に対する地盤反力係数で式 (5.5) による

$$r_m = (r_0 - r_y) / 2 \quad \text{(cm)}$$

$$K_0 = (p_0 - p_y) / (r_0 - r_y) \quad \text{.....(5.5)}$$

ここに p_0 : 静止土圧 (kgf/cm²)

p_y : 降伏土圧 (kgf/cm²)

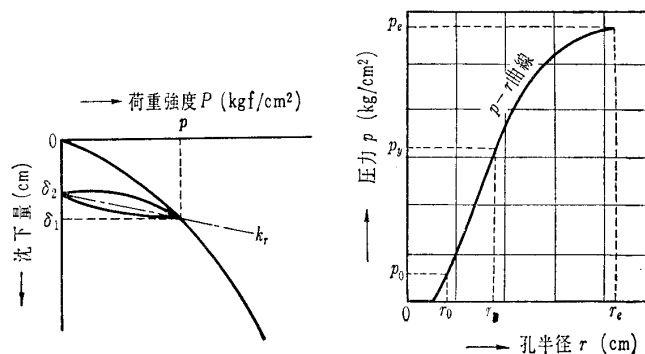
r_0 : p_0 における孔の半径 (cm)

r_y : p_y における孔の半径 (cm)

粘着力 c , 内部摩擦角 ϕ など支持力に関する土の定数を p_y , 及び破壊圧 p_c などから判定することもできるが余り一般的でないので省略する。

5.7.3 土質試験から求める土質定数

杭基礎に関する土質試験は主として乱さない試料が採取できる粘性土に対して行われる。また、普通の方法では乱された試料しか採取できない砂質土に対しては、粒度分布、単位体積重量など N 値からの判定の困難な定数を求めるために行われる。内部摩擦角やせん断ばね係数など N 値から



図—5.24 平板载荷試験の E_0 の判定

図—5.25 $p-r$ 曲線

講 座

表—5.5 乱されない試料から求められる土質定数と、その試験方法

土 質 定 数	試 験 方 法	備 考
粘 着 力 c	一軸 or 三軸圧縮試験	鉛直支持力
内 部 摩 擦 角 ϕ	三軸圧縮 or 直接せん断試験	"
湿潤単位体積重量 γ_t	単位体積重量試験	鉛直支持力
乾燥単位体積重量 γ_d		
*変 形 係 数 E_0	一軸 or 三軸圧縮試験	水平、鉛直沈下量、杭応力
*間 隙 比 e	圧密試験	圧密沈下量
*圧 密 係 数 c_v		

の判定の信頼度の低い定数を求めるために補足的に行われることもある。

乱されない試料の採取できる粘性土では、杭基礎の設計に関する土質定数はほとんど土質試験から求めることができる。この場合の主なる土質定数と試験方法は表—5.5に示すとおりである。

これらの試験はいずれも杭基礎のみに関する特殊なものではない。しかし、表中の*印で示すものは杭基礎の設計に特に関係が深く、指針などにも試験値の判定やその適用について示されているので、*印のものについてのみ若干の記述を行うことにする。

5.7.3.1 地盤の変形係数 E_0

E_0 は表—5.5 に示すように、乱されない試料の一軸、又は三軸圧縮試験から求められる。この場合の判定は次による。

一軸試験の場合 $E_0 = q_u / 2 \cdot 1 / \epsilon$ (5.6)

三軸試験の場合 $E_0 = (\sigma_1 - \sigma_2)_{\max} / 2 \cdot 1 / \epsilon'$ (5.7)

ここに E_0 : 地盤の変形係数 (kgf/cm²)

q_u : 一軸圧縮強度 (kgf/cm²)

ϵ : q_u の 1/2 に対応するひずみ

σ_1 : 最大主応力度 (kgf/cm²)

σ_2 : 最小主応力度 (kgf/cm²)

ϵ' : $(\sigma_1 - \sigma_2)_{\max}$ の 1/2 に対応するひずみ

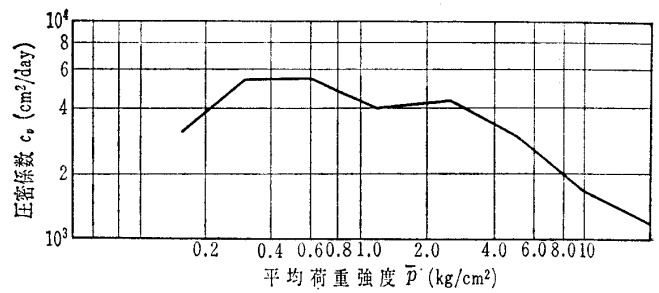
5.7.3.2 圧密係数 c_v 、及び間隙比 e

支持層の下層に弱い粘性土層のある不完全支持杭、粘性土層中の摩擦杭などの圧密沈下量や沈下速度などの判定に用いるもので、載荷試験や N 値からは判定の困難な定数である。

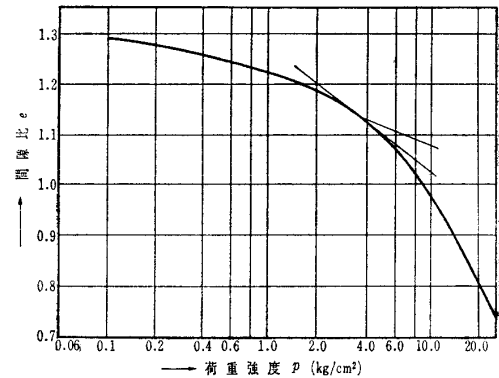
c_v 、及び e はいずれも荷重強度 p と関連して定まるもので、図—5.26、図—5.27の例のように、 $\log c_v - \log p$ 曲線、 $e - \log p$ 曲線として表される。

5.7.4 杭基礎の条件などに関連して定まる土質定数

杭基礎の設計では、5.7.3に示す土のみの条件で定まる土の固有の定数も重要であるが、更に、杭の形状、寸法、配置などの杭基礎の条件、杭に働く荷重の大きさ、載荷時間、載荷速度などの荷重条件、その他の条件が互いに関連して定まる土の性状に関する定数の判定が必要である。



図—5.26 $\log c_v - \log p$ 曲線の例



図—5.27 $e - \log p$ 曲 線

杭基礎の条件などのような土以外の諸条件が関連して定まる定数を土の定数とするのは厳密には疑義があるかもしれない。しかし、この総合的に定まる土の定数こそ杭基礎の設計において検討を要する主眼点となるものである。

5.7.4.1 水平方向地盤反力係数 k_h

k_h は杭の水平変位量や応力度の算定に必要な重要な定数で、 E_0 に杭径その他の要因を考えて定める。

E_0 から k_h を求めるには、いろいろの方法が提唱されているがその主なる例は次のとおりである。

「道路杭指針」では杭の水平変位量 1 cm のときの水平方向地盤反力係数 k_{h0} を次式により算定する。

$$k_{h0} = \alpha E_0 D^{-\frac{3}{4}} \text{(5.8)}$$

設計する杭の水平変位量が δ cm の場合の k_h 値は k_{h0} から次式により求める。

$$k_h = k_{h0} \cdot \delta^{-\frac{1}{2}} \text{(5.9)}$$

式(5.8)、(5.9)において

k_{h0} : 水平変位量 1 cm の場合の水平方向地盤反力係数 (kgf/cm³)

k_h : 水平変位量 δ cm の場合の水平方向地盤反力係数 (kgf/cm³)

α : E_0 の求め方に対応する係数 (表—5.6 による)

E_0 : 地盤の変形係数 (kgf/cm²)

D : 杭の直径 (cm)

δ : 杭頂部の水平変位量 (cm)

「国鉄基礎標準」では次式による。

$$k_h = 0.4 \alpha' \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot B^{-\frac{3}{4}} \text{(5.10)}$$

ここに α' : 杭の形状に対する係数 (円の場合 1.2)

α : E_0 の求め方に対応する係数 (表—5.7 による)

表—5.6 E_0 と α の 関 係

地盤の変形係数 E_0 (kgf/cm ²)	α
ボーリング孔内で測定した地盤の変形係数	0.8
一軸又は三軸圧縮試験から求めた変形係数	0.8
標準貫入試験の N 値より $E_0=28N$ で推定した変形係数	0.2

表—5.7 E_0 の算定方法及び荷重条件に対する補正係数

* E_0 の算定方法	α	
	常 時 荷 重	一時荷重及び地震荷重
平 板 載 荷 試 験	1	2
ボーリング孔内載荷試験	4	8
三 軸 圧 縮 試 験	4	8
一 軸 圧 縮 試 験	4	8
標 準 貫 入 試 験	1	2
経 験 値	1	2

*特殊な地盤条件の場合には、荷重条件に応じて補正しなければならない。

**地震荷重ということに注意を要す。地震時に作用する荷重のうち、地震によって一時的に作用する荷重を対象とする。

B : 杭の前面の換算幅で $\sqrt{A_n}$ とする

その他の記号は式 (5.8) と同じ

A_n は水平変位に関係する基礎前面積で、杭の場合には杭径 D に第1不動点までの杭長 l_0 を乗じた値 $A_n=D \cdot l_0$ となる。

式 (5.10) では、水平変位量の大きさに対する補正は行われていない。しかし、「国鉄基礎標準」83において、前述した図—5.16に示すように、杭頂部付近の水平方向地盤反力度 $p_h=k_h \cdot \delta$ が弾性域（一般に受働土圧力度以内と考える）を越える部分の反力は無視することになっている。

これにより、 δ が大きくなれば k_h を小さくしたのと同じような結果となってくる。この方法では、荷重や k_h が同一でも、杭頂部の根入深さや杭の変形の形状によって δ などが異なることになる。

5.7.4.2 鉛直方向地盤反力係数 k_v

杭のように断面が小さくて深い基礎では、鉛直方向の設計荷重程度には主として杭の周面のせん断ばね係数 k_r が関係し、杭先端の k_v は余り関係しないとの説もある。

しかし、ネガティブフリクションのため周面摩擦支持力が荷重となる場合、中間層に弱い粘性土層があり常時荷重に対する支持力が余り期待できない場合、短い深礎や群杭など周面積に対する底面積の比が大きい場合などの沈下量の判定には k_v を求める必要がある。

このような場合の k_v の算定には次のような方法がある。

「国鉄基礎標準」34, (1), (e), (i)において

$$k_v=0.4\alpha \cdot E_0 \cdot B^{-\frac{3}{4}} \quad \text{.....(5.11)}$$

ここに、 k_v : 鉛直方向地盤反力係数

B : 基礎底面の換算幅で $\sqrt{A_n}$ とする

その他の記号は式 (5.10) と同じ

「道路杭指針」では鉛直方向地盤反力係数 k_v と後述のせん断ばね係数 k_r とを合わせて、次式で軸方向ばね定数を与えている。

$$K_V=a \cdot A_P \cdot E_P/l \quad \text{.....(5.12)}$$

ここに、 K_V : 杭の軸方向ばね定数 (kgf/cm)

A_P : 杭の純断面積 (cm²)

E : 杭のく体の弾性係数 (kgf/cm²)

l : 杭長 (cm)

係数 a は理論的に求める方法もあるが基礎的データが不足するので載荷試験例を収集整理して次式によることとしている（道路杭指針 3.1.4 解説参照）。

$$\left. \begin{array}{l} \text{鋼管杭} \quad a=0.027(l/D)+0.20 \\ \text{PC 杭} \quad a=0.041(l/D)-0.27 \\ \text{場所打ち杭} \quad a=0.022(l/D)-0.05 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{ただし} \\ (l/D) \geq 10 \end{array} \quad \text{.....(5.13)}$$

ここに、 l : 杭長 D : 杭径

5.7.4.3 せん断ばね係数 k_r

杭の周面に働く k_r の判定法について明示されたものはないが、直接基礎などの底面の水平荷重に対する k_r については示されたものがある。底面に働く k_r と周面に働く k_r とは同一とはいえないが、一応の目安とすることはできよう。道路橋下部構造設計指針ケーソン基礎の設計編（以下「道路ケーソン指針」という）4.3, (1), (c), 「国鉄基礎標準」34, (1), (e), (ii)において次のように示されている。

$$k_r=\lambda \cdot k_v \quad \text{.....(5.14)}$$

ここに、 k_r : せん断ばね係数 (kgf/cm³)

λ : 係数（一般に 1/3~1/4）

k_v : 前項で求めた鉛直方向地盤反力係数 (kgf/cm³)

5.7.4.4 周面摩擦力度 f

杭に対する周面摩擦力度 f を N 値、粘着力 c 、一軸圧縮強度 q_u などから、判定することが行われている。

表—5.8 は「道路杭指針」、表—5.9 は「国鉄基礎標準」の例である。表—5.8 は多くの載荷試験データから定められたもので、表—5.9 は主として土質試験データをも

表—5.8 周面摩擦力度（「道路杭指針」による）

(単位: tf/m²)

杭の種類	既 製 杭	場 所 打 ち 杭
地盤の種類		
砂 質 土	$N/5$ (≤ 10)	$N/2$ (≤ 12)
粘 性 土	c 又は N	$c/2$ 又は $N/2$ (≤ 12)

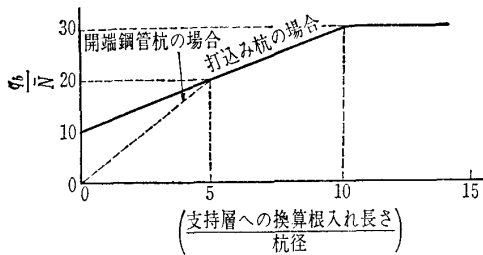
表—5.9 周面摩擦力度（「国鉄、基礎標準」による）

(単位: tf/m²)

	打 込 み 杭 場 所 打 ち 杭	差 込 み 杭	ネガティブフリ クシオン
砂 質 土	$\gamma \cdot l_s \cdot K_0 \cdot \tan \delta$	$\gamma \cdot l_s \cdot K_a \cdot \tan \delta$	$\gamma \cdot l_s \cdot K_0 \cdot \tan \delta$
粘 性 土	$q_u/3 \leq 5$	$q_u/4 \leq 3$	$q_u/2$

(注) l_s : 考えている点の有効深さ (m) γ : l_s 区間の土の平均有効重量
 K_0 : 静止土圧係数（一般に 0.5） K_a : 主動土圧係数 (tf/m²)
 δ : 杭と土との摩擦角 q_u : 一軸圧縮強度 (tf/m²)
 （一般には $\frac{2}{3}\phi$, 群杭では ϕ ）

講 座



図—5.28 杭先端地盤の極限支持力度 (q_b) の算定図

とに力学的な検討によったものである。

5.7.4.5 先端支持力度 q_b

砂質土層における杭の q_b は、一定の条件に適合する場合には、 N 値から直接求めることができる。

「道路杭指針」の例では q_b は図—5.28により求める。

図における \bar{N} は次式による。

$$\bar{N} = (N_1 + \bar{N}_2) / 2 \quad (5.15)$$

ここに、 \bar{N} : 杭の先端地盤における設計用 N 値

N_1 : 杭先端における N 値

\bar{N}_2 : 杭先端から上側 $4D$ の範囲の平均 N 値

支持層への換算根入れ深さは、支持層の区分が明らかでない場合は、 \bar{N} と地盤の N 値の分布線の交点の上側と下側の面積が同一となる深さ以下とする (図—5.29参照)。

場所打ち杭の q_b は表—5.10による。

〔注〕図—5.28による q_b の判定については現在再検討が行われており、54年度で修正されるかも知れない。

「国鉄基礎標準」69の例では次による。

先端の開そくした完全支持杭の場合、砂質土層では杭長が杭径の10倍以上あれば式 (5.16) により、粘性土層では式 (5.17) 程度と考える。

$$Q_b = 30\bar{N} \cdot A_p \quad (5.16)$$

$$q_b = 3q_u \quad (5.17)$$

ここに、 Q_b : 杭の先端の鉛直極限支持力 (tf)

A_p : 杭先端の断面積 (m^2)

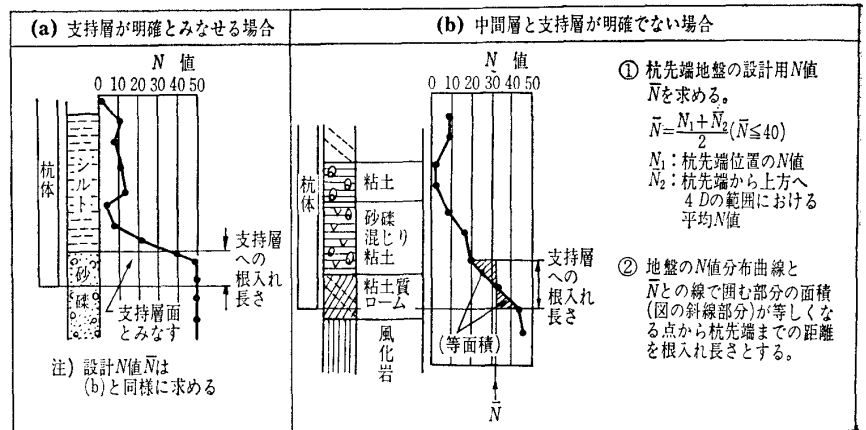
q_b : 杭の先端の鉛直極限支持力度 (tf/ m^2)

q_u : 一軸圧縮強度 (tf/ m^2)

表—5.10 場所打ち杭の先端極限支持力度 q_b の推定表

地盤の種別	地盤の状態	先端極限支持力度 q_b (tf/ m^2)
砂礫層	$N \geq 50$	750
	$50 > N \geq 40$	525
	$40 > N \geq 30$	300
砂層	$N \geq 30$	300
硬質粘土		$3q_u$

〔注〕砂礫層と砂層の区分は綿密な土質調査結果に基づいて慎重に行うのがよい。また礫混じり砂層は砂層とみなすのが望ましい。 N は実測 N 値、 q_u は一軸圧縮強度



図—5.29 支持層への換算根入れ長

\bar{N} : Q_b の算定に用いる N 値で式 (5.18) による

$$\bar{N} = (N_1 + N_2) / 2 \quad (5.18)$$

ここに、 N_1 : 杭の先端地盤の N 値

N_2 : 杭の先端から杭径の4倍以内の平均の N 値
式 (5.16) の $30\bar{N}$ の値は原則として、砂層の場合 1000、砂礫層の場合 1500 をもって限度とする。

「国鉄基礎標準」では杭の q_b , Q_b に対して、5.5.2.1 2)項に示すような考えもあって打込み杭も場所打ち杭も極限支持力は同一となっている。しかし後述するように沈下量、及び沈下量のばらつき率には差があるので、構造物条件その他を考慮してこれらに対応することが定められている。

5.7.4.6 群杭、又は短い杭の先端鉛直極限支持力

群杭を 5.8.1.1 に示す仮想基礎として扱う場合、杭長が杭径に対して小さく、5.7.4.5 に示す条件に適合しない場合などが対象になる。

この場合は、一般に、直接基礎やケーソン基礎の鉛直極限支持力を求めるテルツァーギの考え方による計算式が用いられている (「道路杭指針」3.5.1.解説(1)「道路ケーソン指針」3.2.1 (2), 「国鉄基礎標準」72, 参照)。

これらは、いずれも土の内部摩擦角 ϕ , 粘着力 c , 単位体積重量 γ などの土質定数を用いるが、これらは N 値、又は土質試験から求められるものである。

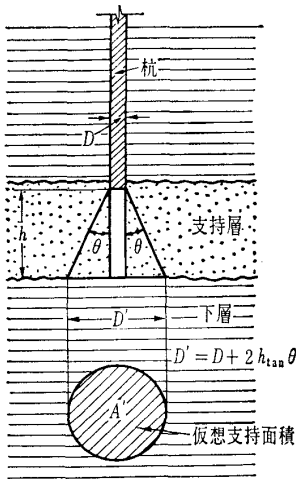
5.8 杭基礎の設計における土質定数の適用

原位置試験や土質試験から求めた土質定数により、杭基礎の支持力や変位量などを算定する場合、載荷試験による諸データを補正する場合などには、地盤条件、杭基礎条件、荷重条件などに対応して、これらの土質定数を適切に用いなければならない。

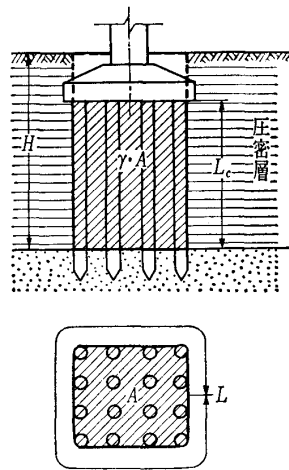
杭基礎の設計においては、各地層の土質定数を定めるだけでなく、これらを上記の諸条件に応じて補正し組み合わせることが重要である。杭に対する土質定数はこれらの条件に対応して変わることを認識しておく必要がある。

5.8.1 杭基礎の鉛直極限支持力 Q_u

Q_u は杭の先端支持力 Q_b と周面摩擦支持力 Q_f とから



図—5.30 不完全支持杭の下層の 図—5.31 群杭の仮想基礎
支持面積



なる。地盤条件などに対応する Q_b , Q_f 及び Q_u についての検討を行う。

5.8.1.1 不完全支持杭の先端極限支持力 Q_b

完全支持杭では Q_b は、5.7.4.5により特別の検討は要しないが、不完全支持杭では下層の弱い層に対しても検討しなければならない。

下層の支持力は、図—5.30に示すように、杭先端から分散角 θ (一般には30度)により拡大された仮想載荷面 A' を下層の上面に設定し、 A' に対する下層の鉛直極限支持力 Q_b' を、5.7.4.6に示すところにより算定する。支持層の Q_b と下層の Q_b' のうち小さい方が不完全支持杭の鉛直極限支持力となる。この場合、単杭では杭先端断面積、群杭では図—5.31に示すように、杭群の外側を結ぶケーソン状の仮想基礎の底面積を基準とする。

5.8.1.2 中間層の条件と周面摩擦支持力 Q_f

Q_f に関する中間層の条件については、単杭も群杭も原則的には同一である。しかし、単杭では杭と土との摩擦支持力を考え、群杭では図—5.31に示す仮想基礎の外周の土と土との摩擦支持力を考える。このため、摩擦力度 f は単杭の砂質土に対する表—5.9における $\delta=2/3 \cdot \phi$ 、粘性土に対する $f=qu/3$ に対し、群杭では砂質土の $\delta=\phi$ 、粘性土の $f=qu/2$ としてよいといわれる。

中間層の条件によっては、 Q_f を期待できない場合、あるいは支持力ではなく荷重として考えなければならない場合がある。その主なる条件は次のとおりである。

① 地震時に液状化する層、及びその上層の地震時の支持力は期待できない。

地震時に液状化する層の判定には、若干異なった説もあるが、「国鉄基礎標準」34. (2), (b)の例によれば次のとおりである。

現地盤面からの深さが10mよりも浅い飽和砂質土層で、標準貫入試験の N 値が10以下、均等係数が6以下でかつ粒

径加積曲線の D_{20} が $0.04 \sim 0.5 \text{ mm}$ の区間にあるもの、及び現地盤面からの深さが3mよりも浅い粘性土層及びシルト質土層で、一軸圧縮試験又は原位置試験により推定される圧縮強度が 0.2 kgf/cm^2 以下のもの。

② 弱い粘性土層の常時荷重に対する支持力は期待できない。

この場合の弱い粘性土は、「国鉄基礎標準」34. (2), (a)では、一軸圧縮強度が 0.25 kgf/cm^2 以下のものである。

③ 圧密沈下を生じる層、及びその上層の Q_f の大部分は、構造物の設置時の高さを確保しようとする場合、杭く体の応力の検討を行う場合には、ネガティブフリクション n_f として扱わなければならない。

地下水位の低下、地表上の盛土などにより粘性土層に圧密沈下が生ずると、その層の大部分 (厳密には地盤沈下量と杭の沈下量とが一致する中立点より上側)と、その上層の Q_f は支持力ではなく、 n_f として杭を沈下させる力となる。

載荷試験では設計荷重に対する沈下量が数mmに過ぎない杭基礎が、地盤沈下による n_f のために、10 cm 以上も沈下して構造物に大変状を生じさせた例もあるので十分な検討が必要である。

車両などの一時荷重には、 n_f の働いている場合でも、 Q_f は n_f が解放されるかたちで有効に働くことが確かめられている (図—5.14参照)。

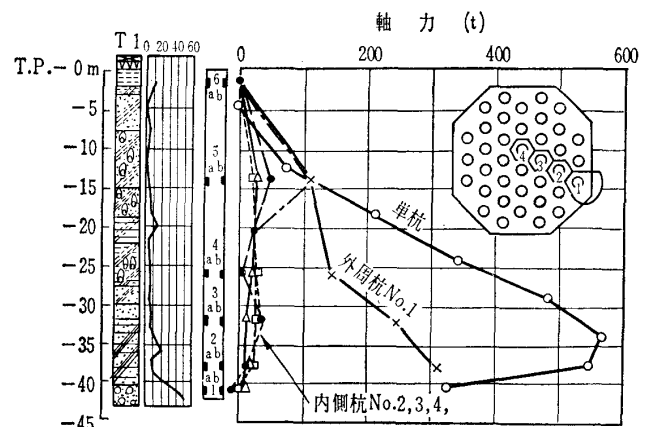
また、構造物が地盤の沈下とともに下がっても支障のないように、応力上、機能上の配慮が行われている場合には、許容鉛直支持力の判定には n_f を無視することもできる。

5.8.1.3 ネガティブフリクション n_f

n_f は完全支持杭のように沈下量の小さいものほど中立点が低くなり n_f が大きくなる。また、群杭では単杭よりも n_f は著しく小さくなる。図—5.32は n_f の実測の一例で完全支持杭の単杭と群杭の n_f の比較を示すものである。

群杭の n_f の計算法として、「道路杭指針」に次のものが示されている (図—5.33参照)。

① 図—5.33に示す仮想基礎を考え、この基礎に対する n_f を計算する。



図—5.32 群杭と単杭のネガティブフリクション

講 座

$$R_{nf}=(L \cdot H \cdot S+A \cdot \gamma \cdot L_c) / n \quad \cdots \cdots \cdots(5.19)$$

ここに、 R_{nf} : 群杭中の杭1本当たりの n_f (tf)

L : 杭群の外周長 (m)

H : 地表面から圧密層下端までの深さ (m)

S : 土の平均せん断抵抗 (tf/m²)

A : 杭群の底面積 (m²)

γ : 圧密層の土の平均単位体積重量 (tf/m³)

L_c : 圧密層中の杭の長さ (m)

n : 杭の本数

② n_f を次式に示す半径 r の土柱から杭を除いた重量と考える。ただし、土柱の重なる部分は低減する (図-5.34参照)。

$$r=(D \cdot \bar{f} \gamma+D^2 / 4)^{\frac{1}{2}} \quad \cdots \cdots \cdots(5.20)$$

ここに、 r : 土柱の半径 (m)

D : 杭の直径 (m)

\bar{f} : 杭と土の平均摩擦力度 (tf/m²)

γ : 土の単位体積重量 (tf/m³)

5.8.2 杭基礎の沈下量と鉛直ばね係数 K_v

杭基礎の沈下量や K_v の判定は、载荷試験、又は近似した条件の载荷試験データによるのが原則である。しかし、粘性土層の圧密に関係する沈下量や地震時の土の液状化による沈下量などは、原位置試験、又は土質試験に基づく土質定数から判定しなければならない。

5.8.2.1 圧密沈下量の判定

不完全支持杭、摩擦、支持杭では常時荷重に対する圧密沈下量が問題となることが多い。

圧密沈下量の算定は圧密層 H の中央 $H/2$ における杭の分布荷重強度 $4p$ を考え、5.7.3.1 2)項による $\log c_v$ - $\log p$ 曲線、 e - $\log p$ 曲線を用いて行う。

$4p$ の算定は不完全支持杭では杭の先端 a-a から、摩擦支持杭では杭の先端から杭長 l の $1/3$ 上側の b-b から、それぞれ分散角 θ (一般には30度) で分布するものとして行う (図-5.35参照)。

最終圧密沈下量 S_v は次により算定する。

$$S_v=\sum[(e_1-e_2) / (1+e_1)] \cdot \Delta H \quad \cdots \cdots \cdots(5.21)$$

ここに、 S_v : 最終圧密沈下量 (m)

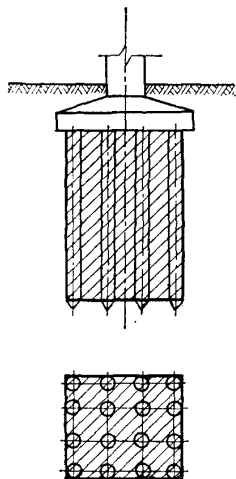


図-5.33 群杭に働くネガティブフリクションの計算①

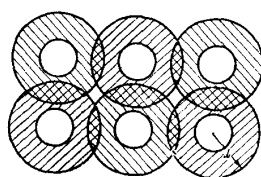


図-5.34 群杭に働くネガティブフリクションの計算②

ΔH : 各圧密層の厚さ (m)

e_1 : 各層の初期間隙比

e_2 : 各層の最終間隙比

杭基礎の S_v 計算においては、 e_1 は考える位置 ㉑-㉑における有効土かぶり荷重強度 $p_0=r \cdot l_0$ に対応し、 e_2 は p_0 に杭基礎の荷重分布強度 $4p$ を加えた荷重強度 $p_e=p_0+4p$ に対応する間隙比で、それぞれ、 e - $\log p$ 曲線から求める。

杭基礎に荷重を载荷して t 日における圧密沈下量 S_t は次により算定する。

$$S_t=\sum S_v \cdot U_t / 100 \quad \cdots \cdots \cdots(5.22)$$

ここに、 S_t : t 日後の杭の圧密沈下量 (m)

S_v : 杭の最終圧密沈下量 (m)

U_t : t 日後の圧密度 (%)

U_t は式 (8.5) から求める T と、図-5.36 に示す T - U 曲線とにより算定する。

$$\left. \begin{aligned} T &=t \cdot c_v / D^2 \\ c_v &=[\sum \Delta H_i \cdot \sum(\Delta H_i \cdot \sqrt{C_{vi}})]^2 \end{aligned} \right\} \quad \cdots \cdots \cdots(5.23)$$

ここに、 T : 時間係数

c_v : 圧密係数、 $(p_0+p_e)/2$ に対する値(m²/日)

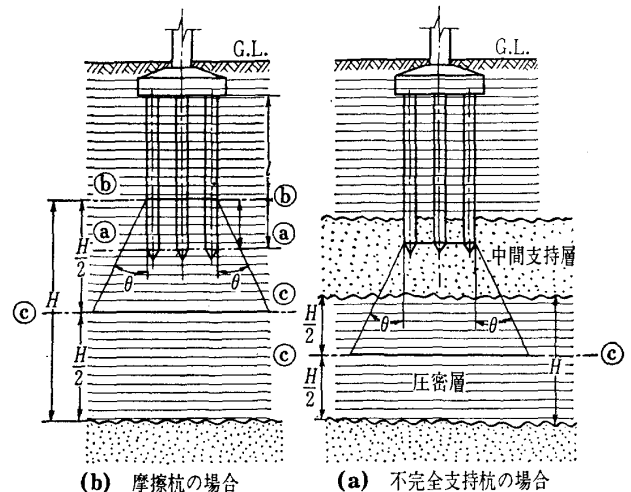


図-5.35 圧密沈下量の計算

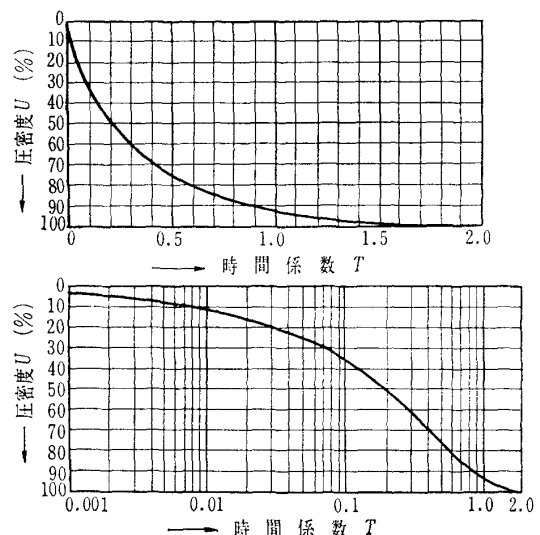
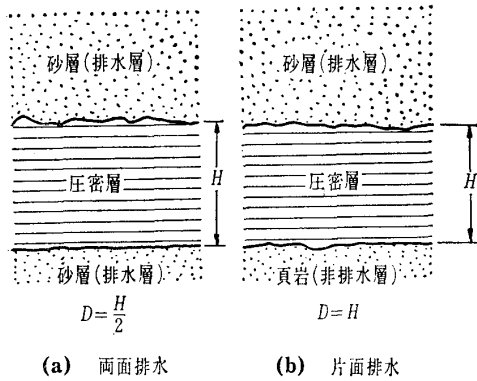


図-5.36 圧密度-時間係数曲線 (T - U 曲線)



図—5.37 最大脱水距離 D

t : 載荷後の日数(日)

D : 最大脱水距離(m)

ΔH_i : i 区分層の厚さ(m)

c_{vi} : i 区分層の圧密係数 ($\text{m}^2/\text{日}$)

最大脱水距離 D は、図—5.37(a)に示す両面排水の場合は $H/2$, (b)に示す片面排水の場合は H とする。

5.8.2.2 鉛直ばね係数 K_v , 変動係数 α

杭基礎の沈下量やフーチングや杭の応力の算定には、杭の K_v が必要である。 K_v は載荷試験による P - S 曲線、又は土質定数から求めた沈下量 S と荷重 P とから $K_v = P/S$ として求めることができる。

群杭のフーチングや杭の応力、不静定構造物の基礎の不同沈下による応力の算定には、 K_v のほかに各杭、又は各基礎の K_v の変動量が問題となる。応力に及ぼす影響は K_v の大きさよりも K_v の変動のほうが大きいことが多い。

K_v の変動は杭の施工法、地盤条件などによって異なり現在ではまだ十分なデータが整っていないが、定性的には一応次のように考えられる。

- ①打込み杭よりも場所打ち杭の変動が大きい。
- ②対象とする杭本数が多いほど相対的に変動は少なくなる。
- ③完全支持杭よりも摩擦支持杭や不完全支持杭の変動が少ない。
- ④地盤沈下があると変動量が大きくなる。

「国鉄基礎標準」65. 解説においては前記の考え方により、杭基礎における K_v の変動を次のようにとることを示している。

杭の K_v の変動係数 α を表—5.11 のように考える。

対象とする杭の本数 n が多い場合には、次式による β を用い表—5.11 の α を減少させる。

$$\beta = [1 + (\alpha - 1)] / \sqrt{n} \quad \dots\dots\dots (5.24)$$

ここに、 β : n 本の杭に対する変動係数

α : 表—5.11 に示す変動係数

n : 対象とする断面、又は基礎に対する杭の本数

5.8.2.3 地盤沈下と杭基礎の沈下量

地盤沈下のある場合の杭基礎の沈下量の判定は特に慎重に行う必要がある。

表—5.11 杭の鉛直ばね係数 K_v の変動係数 α

杭の種類	K_v の変動係数 α		
	摩擦杭	不完全支持杭	完全支持杭
打込み杭	—	—	1.3
ベノト杭	—	1.3	1.5
リバース杭	—	1.3	1.5
アースドリル杭	1.3	1.5	2.0

完全支持杭でも地盤沈下があると、 Q_f の大部分が杭を沈下させる荷重にかわるために相当量の沈下を生ずる。この場合、群杭では図—5.38 に示すように外縁の杭が内側の杭よりも大きく沈下しようとする。杭頂部をフーチングに定着しない杭では、杭頂部がフーチングから離れている例もある。また、杭と地表面との沈下差だけフーチングは地表から浮き上がり、杭頂部付近には図に示すような空隙部を生ずる。このため、構造物の振動の増大、地表上の接続構造物との取り付け部の変状などが生ずる。

関連する基礎の杭本数が異なると n_f の大きさが異なってくるため、基礎間に大きい不同沈下が生じ構造物を破損させることもある。

摩擦杭や不完全支持杭では地盤沈下があると杭が地盤とともに沈下する量が多くなる。このため、設置時の高さに対する沈下量が大きくなるので、常時荷重に対する沈下量の検討などが必要となる。しかし、地盤に対する沈下差は小さく、不同沈下量や杭頂部の空隙の発生も少ない。

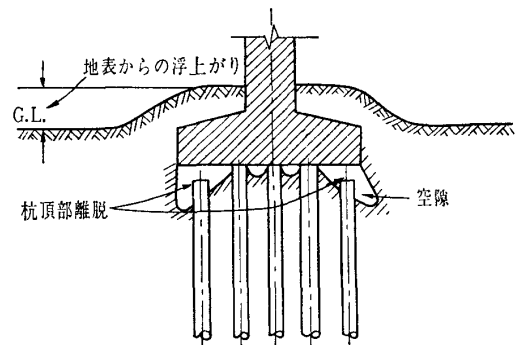
地盤沈下に伴う杭基礎の沈下量の判定は、5.7.3, 5.7.4 項に示す土質定数により行うことはできるが、十分な信頼度があるとはいえない。よって、既往の実例その他についても十分に調査のうえ総合的に判定する必要がある。

5.8.3 杭基礎の水平変位量 δ_h 及びく体応力

杭基礎の δ_h やく体応力は原位置試験や土質試験から求めた水平方向地盤反力係数 k_h から算定することができる。

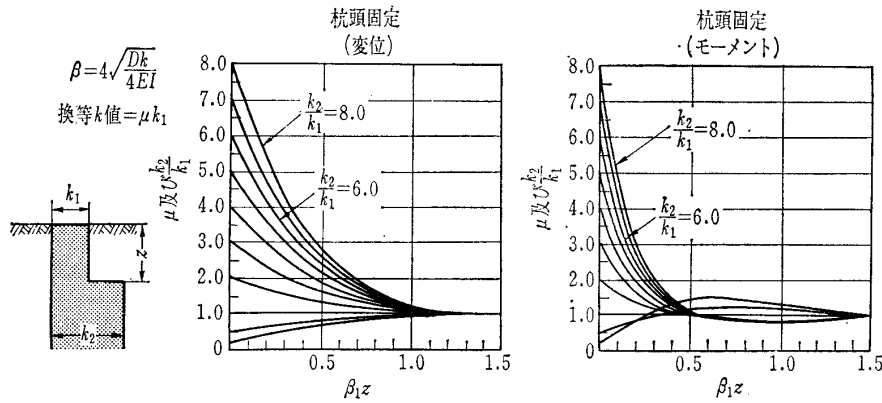
しかし、載荷試験による逆算 k_h よりも信頼度が低いので、 δ_h やく体応力が特に問題となる場合には、可能な限り載荷試験を行うのがよい。

k_h から杭基礎の δ_h やく体応力を求める場合に問題と



図—5.38 地盤沈下のある場合の完全支持杭基礎

講座



図—5.39 二層地盤の換算 k 値

なるのは、群杭に対する補正、地盤が不均一な場合の k_n の判定、水平方向の地盤変位のある場合などである。

5.8.3.1 群杭に関する補正

群杭の各杭に対する k_n は杭の中心間隔が一定値よりも小さいと単杭に対する k_n よりも小さくなる。しかし、実用上は杭の中心間隔が杭径の2.5～3倍程度以上あれば、その減少量は特に問題とするほどではないといわれている。更に、打込み杭では群杭による地盤の締固め効果なども考えられるので単杭の k_n をそのまま用いられることが多い。

しかし、場所打ち杭などの地盤の締固め効果の期待できない杭で間隔の狭い場合には、 k_n をある程度減少させるのがよいであろう。

k_n の減少量の判定にはいろいろの方法が提唱されているが「道路杭指針」3.5.2.解説によれば次のとおりである。この場合 $L < 2.5D$ とする。

$$u = 1 - 0.2(2.5 - L/D) \dots \dots \dots (5.25)$$

ここに、 u : k_n の補正係数 D : 杭の直径(m)

L : 杭の中心間隔(m)

5.8.3.2 換算 k_n 値

杭基礎の δ_n などの計算では深さ方向に地盤が異なる場合にも、 k_n が深さ方向に均一であるとして計算する式を用いることが多い。この場合には各層の地層条件に忠実な k_n を与えて計算した値と同一の値となるような換算 k_n を用いる必要がある。図—5.39はこのための図表で、地層が2層のものである。図の(a)は δ_n 、(b)はく体の曲げモーメント M の計算に用いるものである。

5.8.3.3 水平方向の地盤変位

軟弱地盤や斜面では、盛土や切取り、地震振動などにより地盤が水平方向に変位することがある(図—5.40参照)。

このような場合には杭基礎に大きい水平変位や応力が発生する。したがって、地盤変位の有無や大きさについては慎重に検討する必要がある。

地盤変位について本稿で詳述する余裕はないが、一応の目安として、軟弱地盤においては安定係数 $N_s = rh/c$ が3以上、斜面では円弧すべりに対する安全率1.5以下では、

地震時などにはある程度の変位の生ずるおそれがある。また、安全率1.1

以下、 $N_s > 5$ の場合は大きい変位が発生するおそれが多い。よって、このような場合には杭の設置を避けるが、地盤強化などにより地盤の安定を確保する必要があろう。

5.9 おわりに

杭基礎の設計に関する土質定数の検討に当たって感ずることは、自然の力によって構成される地盤の性状の複雑さと、杭基礎や荷重の条件による土質定数の変化とである。

例えば、同一条件の地盤でも地盤沈下が始まれば、それまで支持力として働いていた土がたちまち荷重にかわる。しかし、その荷重の大きさは完全支持杭と摩擦杭、群杭と単杭、あるいは群杭の外側杭と内側杭とで大きく異なり、更に、常時荷重には荷重となっても一時荷重には支持力として働くことになる。

設計に当たっては、地盤が杭基礎に及ぼすこれらの特性を十分に認識のうえ、地盤条件に適合した最も合理的な構造物と杭基礎とになるように努めなければならない。

本稿がこれらのための一助ともなれば幸甚である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針，同解説—くい基礎の設計篇，昭51.8
- 2) " " " " 直接基礎の設計篇，昭43.3
- 3) " " " " ケーソン基礎設計篇，昭45.3
- 4) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説，基礎構造物及び杭土圧構造物，昭49.6
- 5) 土質工学会：土質調査法
- 6) 土質工学会：土質工学ハンドブック，p.290，昭40.11
- 7) 日本国有鉄道東京第三工務局：ネガティブフリクション測定ならびに載荷試験報告書，昭47.3

(原稿受理 1979. 8. 7)