

寄稿文



ネガティブフリクションの功罪 ～盛土下の杭への応力集中と問題点～

拓北地下開発株式会社
技術士（建設部門） 佐田 頼 光

1. はじめに

さきごろ、古い堤防遺跡でかつて打設された木杭群が発見され、テレビの画面に写し出されていた。発掘調査の場所は忘れてしまったが、堤防の基部から掘り出された木杭の残滓に、思わず「杭網工法」が重なり、遥かなる昔日の先人達の労苦と熱情が偲ばれたのであった。

現在、盛土等を支えるための軟弱地盤対策工は、構造的なパイルスラブ工法から排水促進のための砂杭工法まで広範囲に亘る。その効果・機能は設置地盤の性状、杭種および上載盛土の規模等によって多様であり、杭自体の強度が増大するにしたがい杭に対する応力集中を適切に評価して設計諸元を合理的に決定することが重要になるのであろう。

軟弱地盤に設置される杭の種類として、既成杭(高強度杭)、混合処理杭、排水砂杭を考えた場合、同一諸元における盛土荷重の集中は、上述の順に大→小となる。

軟弱地盤に設置された杭の直上と素地における盛土荷重による反力度をそれぞれ P_p と P_c で表す時、応力分担比 (n) は、 $n = P_p / P_c$ で示される。いくつかの施工現場において、土圧計による P_p と P_c の実測値から n を求め改良率 (α) との関係を示せば図1となる。このデータには、 n に影響を与えるであろう盛土の性質や規模、地盤の性状さらには設置杭の強度等が反映されていないので大雑把な傾向を知るに止めなければならないが、いずれの種類の杭に対しても応力の集中が起ることは確かなようである。

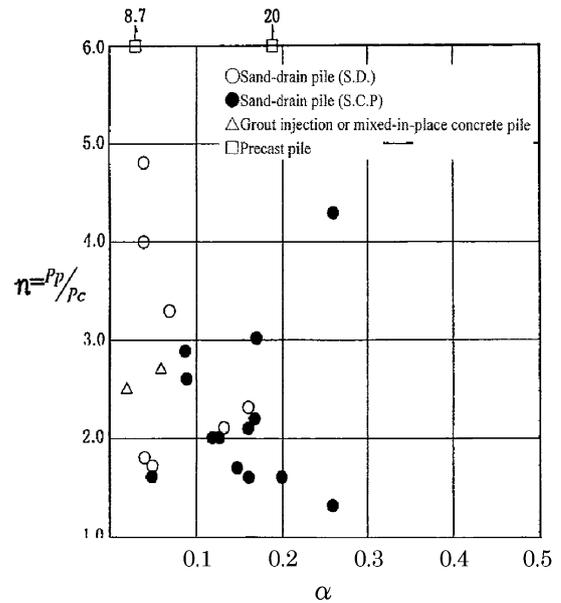


図-1 n の測定値

筆者は当小論文の執筆に当り、畏敬するS技術士に相談したところ「技術士のなかには年代的に数式の展開に拒絶反応を示すグループとそうでない人々が混在するので、あまり数式はいじらない方が良い」という教示を得た。それに従い数式の展開は最小限に抑えた積りである。以下、負の摩擦力の光と陰について述べたいと思う。

2. 杭直上部へ負の摩擦力の導入

杭への応力集中を考える場合の基本事項は、杭直上部と周辺素地との盛土体の相対的変位の状態である。図2に示すように両者間で不等沈下 ($S_p < S_c$) が発生することにより、杭直上部の円筒体に負の摩擦力 (Q_f) が作用すると考える。この状態において、杭の支持力が高い場合、負の摩擦力による増加応力は持続し、大きな応力集中が起るが、杭の支持力が

低い場合は、杭は地盤と一体となって沈下し、杭の極限支持力と均衡した応力集中が起ると考えられる。したがって以下では、杭の沈下を無視した場合と杭と地盤が一体となって沈下する場合に限定して議論を進めよう。

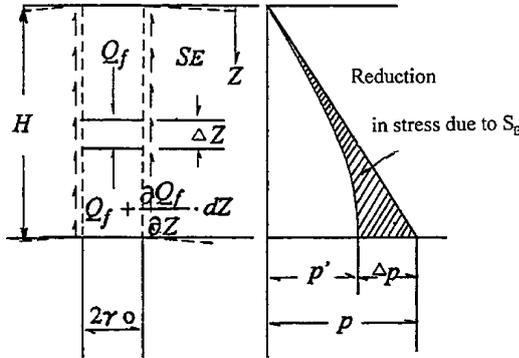


図-2

まず、前者の場合、負の摩擦力度 (S_E) の大きさは、盛土荷重度 (p) に関連しており、不等沈下面では S_E による持ち上げ効果によって p が減小し、これがさらに Q_f に影響を与えることを考慮して若干の代数的操作を必要とする。

3. 既成杭の場合

Coulomb-Mohr の極限応力条件を適用して S_E を求め、 Q_f を得る。

$$S_E = \frac{1 - \sin^2 \phi_b}{1 + \sin^2 \phi_b} \cdot \tan \phi_b \cdot p' \quad (1)$$

$$Q_f = 2\pi r_0 \frac{1 - \sin^2 \phi_b}{1 + \sin^2 \phi_b} \cdot \tan \phi_b \left\{ \int_0^H p \cdot dz - \int_0^H \Delta p \cdot dz \right\} + 2\pi r_0 \int_0^H C_b \cdot dz \quad (2)$$

(粘着力の項)

一方、 S_E による p の減小分 Δp は、 $Q_f / (d^2 - \pi r_0^2)$ と考えることができるから、 $\Delta p = Q_f / (1 - \alpha) d^2$ となり (2) 式の積分項は以下のように整理される。

$$\left. \begin{aligned} \int_0^H \Delta p \cdot dz &\doteq \frac{1}{3} \Delta p \cdot H = \frac{Q_f \cdot H}{3(1 - \alpha) d^2} \\ \int_0^H p \cdot dz &= \frac{1}{2} r_t \cdot H^2 \\ \int_0^H C_b \cdot dz &= C_b \cdot H \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、

$$2\pi r_0 = 2(\alpha \cdot \pi)^{\frac{1}{2}} \cdot d, \quad \frac{1 - \sin^2 \phi_b}{1 + \sin^2 \phi_b} \cdot \tan \phi_b = \eta$$

とおけば、(2) 式は (4) 式となる。

$$Q_f = 2(\alpha \pi)^{\frac{1}{2}} \cdot d \cdot \eta \left\{ \frac{1}{2} r_t \cdot H^2 - \frac{Q_f \cdot H}{3(1 - \alpha) d^2} + \frac{C_b \cdot H}{\eta} \right\} \quad (4)$$

$$Q_f \left\{ 1 + \frac{2(\alpha \pi)^{\frac{1}{2}} \eta H}{3(1 - \alpha) d} \right\} = 2(\alpha \pi)^{\frac{1}{2}} \eta d \left(\frac{1}{2} p H + \frac{C_b \cdot H}{\eta} \right) \quad (5)$$

Q_f による杭への増加応力 (p_{fp}) は $Q_f / \alpha \cdot d^2$ であるから (5) 式は (6) 式で示される。

$$p_f = \frac{3(1 - \alpha) (\pi / \alpha)^{\frac{1}{2}} p \left(1 + \frac{2C_b}{\eta p} \right) \frac{H}{d}}{3(1 - \alpha) + 2(\alpha \pi)^{\frac{1}{2}} \eta \cdot \frac{H}{d}} \quad (6)$$

杭への全応力 $p_p = p + p_{fp}$ であるから応力集中係数 (I_p) は、 $I_p = p_p / p = 1 + p_{fp} / p$ で示される。

一方、素地部で減小する応力 (p_{fc}) は $Q_f / (1 - \alpha) d^2$ であるから

$$p_{fc} = \frac{3(\alpha \pi)^{\frac{1}{2}} \eta \cdot p \left(1 + \frac{2C_b}{\eta p} \right) \frac{H}{d}}{3(1 - \alpha) + 2(\alpha \pi)^{\frac{1}{2}} \eta \cdot \frac{H}{d}} \quad (7)$$

素地部での全応力 (p_c) は、 $p_c = p - p_{fc}$ となり、応力減小係数 (I_c) は、 $I_c = p_c / p = 1 - p_{fc} / p$ で示される。

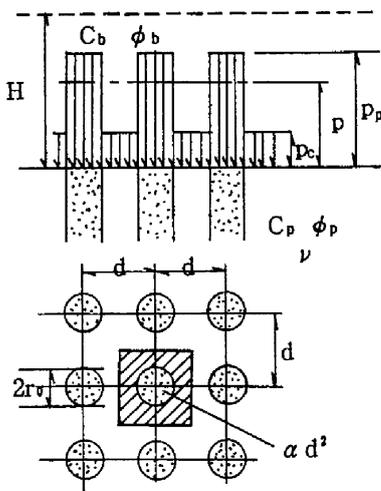
(6)、(7) 式は、 $(\alpha \pi)^{\frac{1}{2}} \eta \cdot H / d = B$ 、 $C_b / \eta p = x$ で置換することにより極めて単純な形式で表わすことができる。表 1 には以下に検討を進める地盤改良砂杭に対する結果とともに総括表として示した。

杭への応力集中という複雑な現象に関してこのような単純化の妥当性には疑問も残るが、少なくとも今の段階では、こうした検討からでも解決の糸口を見出そうという意図に立つものである。

表-1 盛土下の杭の応力集中に関する総括表

項 目 \ 杭の種類	既 成 杭	地盤改良杭 (1)	地盤改良杭 (2) (拘束複合杭)
杭自体の圧縮強度	杭材の圧縮強度	(地盤と一体で圧縮) $q_1 = N_c \cdot C_p + N_q \cdot p$	(地盤と一体で圧縮) $q_2 = q_1 + N_c \frac{p_t}{2r_0} \sqrt{N_{\phi p}}$
杭応力集中係数 $I_p = \frac{p_p}{p}$	$1 + \left\{ \frac{\left(\frac{1}{\alpha} - 1\right)(1+2x)B}{1 - \alpha + \frac{2}{3}B} \right\}$	$\frac{q_1}{p}$	$\frac{q_2}{p}$
素地応力減少係数 $I_c = \frac{p_c}{p}$	$1 - \left\{ \frac{B(1+2x)}{1 - \alpha + \frac{2}{3}B} \right\}$	$\frac{1 - (\alpha \cdot I_p)}{1 - \alpha}$	$\frac{1 - (\alpha \cdot I_p)}{1 - \alpha}$
応力分担比 $n = \frac{p_p}{p_c}$	$1 + \frac{B(1+2x)}{\alpha \left\{ 1 - \alpha - B \left(\frac{1}{3} + 2x \right) \right\}}$	$\frac{1 - \alpha}{(I_p)^{-1} - \alpha}$	$\frac{1 - \alpha}{(I_p)^{-1} - \alpha}$

記号説明・補助式等



$$\alpha = \left(\frac{r_0}{d} \right)^2 \cdot \pi \quad (a)$$

$$N_c = \frac{2(1-\alpha)\sqrt{N_{\phi p}}}{1 + \alpha(\eta_c \cdot N_{\phi p} - 1)} \quad (g)$$

$$\eta = \frac{1 - \sin^2 \phi_b}{1 + \sin^2 \phi_b} \cdot \tan \phi_b \quad (b)$$

$$N_q = \frac{\eta_c \sqrt{N_{\phi p}}}{2(1-\alpha)} \cdot N_c \quad (h)$$

$$B = (\alpha \pi)^{\frac{1}{2}} \cdot \eta \cdot \frac{H}{d} \quad (c)$$

p_t : 杭拘束材単位長当りの引張力 (t/m)

ν : 地盤のポアソン比

$$x = \frac{C_b}{\eta \cdot p} \quad (d)$$

$$N_{\phi p} = \frac{1 + \sin \phi_p}{1 - \sin \phi_p} \quad (e)$$

$$\eta_c = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (f)$$

$$p_p \cdot \alpha + (1 - \alpha) p_c = p$$

4. 地盤改良杭の場合

杭が地盤と一体で沈下する場合は、杭自体と地盤との相互作用による塑性強度 (q_p) に対して応力集中が発生するのであろう。軟弱地盤中に設置された改良杭の塑性圧縮強度 (q_p) は図3の三軸応力状態を想定して(8)式で示される。

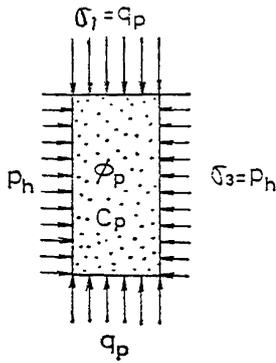


図-3

$$q_p = \frac{2 \cdot \cos \phi_p}{1 - \sin \phi_p} \cdot C_p + \frac{1 + \sin \phi_p}{1 - \sin \phi_p} \cdot p_h \quad (8)$$

ここに、

$$p_h = K_a \cdot p_c = \frac{\nu}{1 - \nu} p_c, \quad \frac{1 + \sin \phi_p}{1 - \sin \phi_p} = N_{\phi_p}$$

ν : 地盤のポアソン比

一方、 q_p は $q_p \cdot \alpha \cdot d^2 + p_c(1 - \alpha) d^2 = p \cdot d^2$ なる条件から(9)式で定義される。

$$q_p = 2\sqrt{N_{\phi_p}} \cdot C_p + N_{\phi_p} \cdot \eta_c \left(\frac{p - \alpha q_p}{1 - \alpha} \right) \quad (9)$$

結局(8)式は、(10)式のように整理される。

$$q_p = N_c \cdot C_p + N_q \cdot p \quad (10)$$

ここに、

$$N_c = \frac{2(1 - \alpha)\sqrt{N_{\phi_p}}}{1 + \alpha(\eta_c \cdot N_{\phi_p} - 1)}$$

$$N_q = \frac{\eta_c \cdot \sqrt{N_{\phi_p}}}{2(1 - \alpha)} \cdot N_c$$

$$\eta_c = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

応力集中および減小係数 (I_p, I_c) は、それぞれ(11)式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} I_p &= N_c \cdot \left(\frac{C_p}{p} \right) + N_q \\ I_c &= \frac{1 - \alpha I_p}{1 - \alpha} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

以上の検討結果(表-1)にもとづく諸値の傾向を伺うことにする。

図4は盛土材の摩擦角 $\phi_b = 30^\circ$ の場合の既成杭打設に対する改良率 (α) と応力集中係数 (I_p) の関係を示したものである。 I_p は当然ながら α の増加に応じて減小するが盛土厚 (H) の増加に対しては増加する。また、地盤改良砂杭の場合は、図5および図6に示されるように、経験的な応力分担比 $n = 2 \sim 3$ の値は、杭自体の内部摩擦角 (ϕ_p) が $30 \sim 40^\circ$ に対応するものであることが読みとれる。

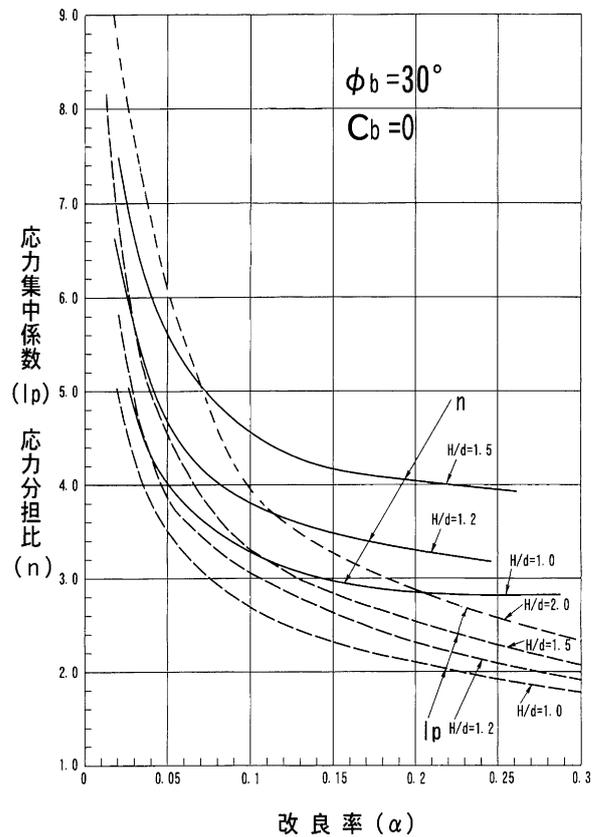


図-4 既成杭に対する $\alpha \sim I_p, n$

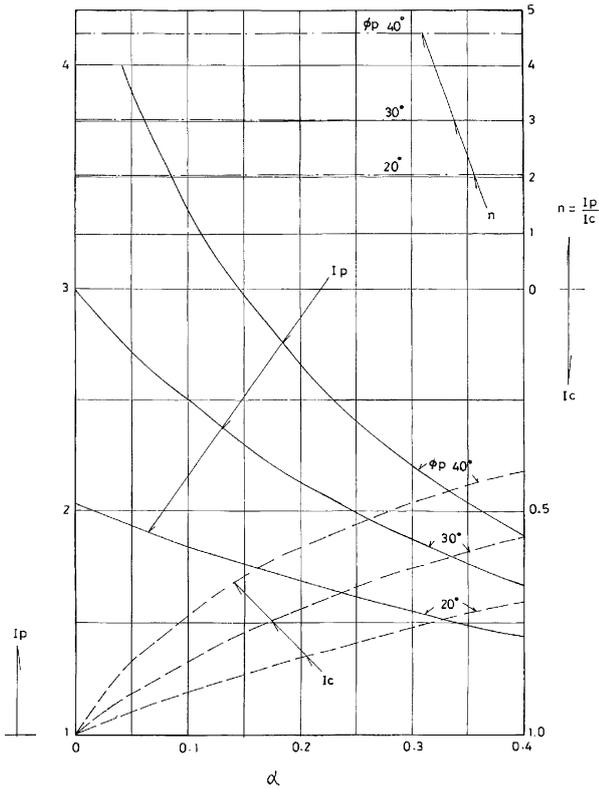


図-5 地盤改良杭に対する
 $\alpha \sim I_p, I_c, n (C_p=0, \nu=0.5)$

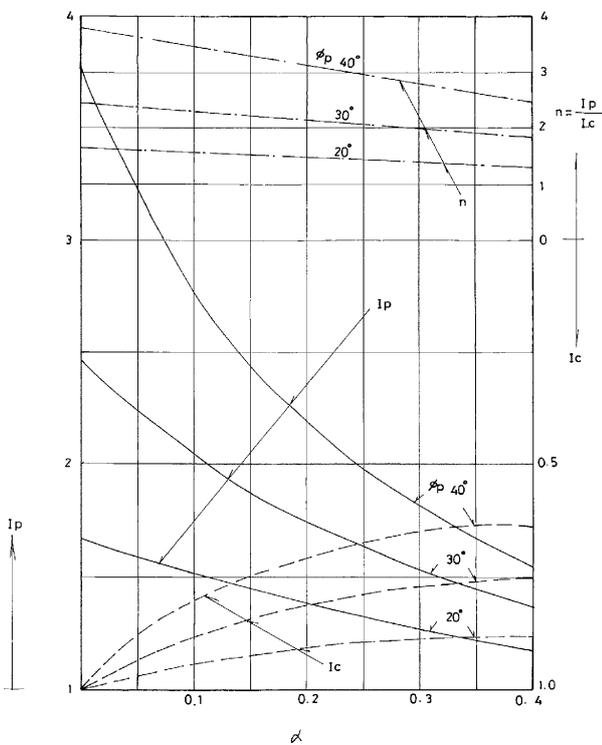


図-6 地盤改良杭に対する
 $\alpha \sim I_p, I_c, n (C_p=0, \nu=0.45)$

5. 負の摩擦力と地盤強度

1～4の事項は、応力集中と負の摩擦力を論じたもので、同現象の働きについて、いわば光の部分を見て来た訳である。以下では、同現象の影の部分に当る地盤強度との関係を実測データをもとに考察してみよう。図7は1976年(昭和51年)に素地部で実施したCPTによる q_c 値と1980年(昭和55年)と1982年(昭和58年)の実測 q_c 値を比較したものである。杭の打設は1979年(昭和54年)5月に始まっており、それより4年経過後に実測されたことになる。これによれば、点線と実線で示した q_c 値の分布傾向には明らかな強度低下が読み取れる。この要因は、木杭周辺部に作用した負の摩擦力(Q_f)が周辺土のもたれ合いを誘発して有効土被り圧(p)の低減を招いたことによるものと思われる。

軟弱地盤の中に既存杭等の強度の高い杭を打設した場合、こうした特異な現象が発生するので施工に当っては十分な注意が必要となる。

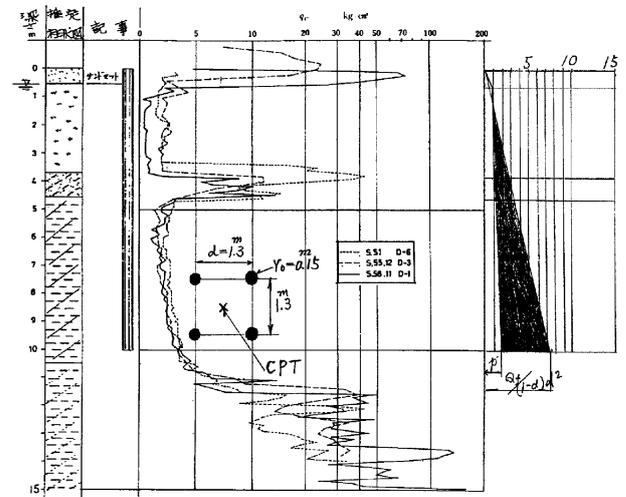


図-7 施工前および施工後のコーン貫入抵抗値

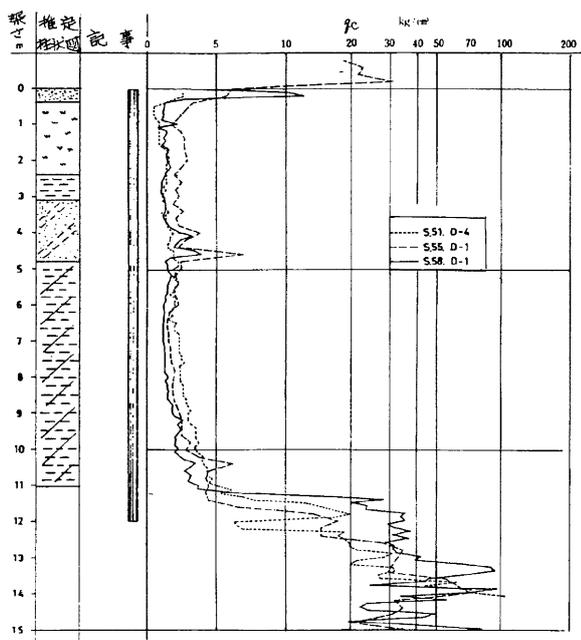


図-8 施工前および施工後のコーン貫入抵抗値

6. おわりに

泥炭地盤の対策工を検討する上でのバイブル的存在である「泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル」(独立行政法人北海道開発土木研究所監修)では、「北海道

開発の歴史は、泥炭性軟弱地盤との闘いの歴史であった」と述べている。

超軟弱で圧縮量の大きい泥炭地盤の盛土対策工を検討するに際して、既成杭の打設や改良杭の設置に当り、複合地盤としての杭への「応力集中」が検討される。

同マニュアルによれば、バーチカルドレーン工法の砂杭に対して応力分担比 $n = 3$ 程度とされている。サンドコンパクションパイル工法の砂杭に対しては $n = 2 \sim 5$ (平均 3.0)、固結工法の生石灰パイルについては $n = 0.40 \sim 0.70$ (代表値 0.65)。混合処理工法については、 $n = 10 \sim 20$ としている。混合処理杭の場合は、改良部と原地盤の体積圧縮係数の比 m_v/m_{vr} と圧密降伏応力比 p/p_c の実験結果を適用して n を求めるとしており、いずれのケースもその根拠にやや不透明感があることは否めない。

問題は、盛土の特性が全く考慮されていない点にあるように思われる。こうした現状に鑑み、本小文で一応の提案を試みた積りである。諸兄の御意見、御叱正を期待したい。