

技術報告

軟岩に打ち込まれた鋼杭の動的支持力機構に関する考察

奥山ボーリング場 佐々木川 小高 吉樹 松橋 順俊 一則

1. はじめに

打ち込み杭のトラブルの一つに杭が打ち止まらない現象がある。トラブル事例集¹⁾にはその原因として調査数量の不足、支持地盤の傾斜等、いわゆる支持層の「誤認」がその主な理由として紹介されており、事実そのような例も多いと考えられる。しかし本事例はN ≥ 50 を示す堆積軟岩を支持対象とする打ち込み鋼管杭が支持層中に6~7m貫入（試験杭）したいわゆる打ち止まらない杭の事例であり、上記のような誤認とは性格が異なる。打ち込み鋼管内部にチェックボーリングを行った結果をもとに杭の動的支持力機構について考察したものである。

2. 地形・地質

報告事例の場所は、丘陵地に程近い平野部で一帯は低平な水田が広がっている。河川も大きく蛇行を繰り返していることから、軟弱な粘性土が表層を覆っていることが容易に類推できる。この地点の代表的地質は図-1に示すように、粘性土と軟岩であり、軟岩は新第三紀鮮新世のシルト岩である。シルト岩上位に薄い基底礫が認められる部分もある。

尚、シルト岩は軟岩パックチューブで採取できる硬さを有している。コアは殆ど無層理塊状にあるため棒状に採取される。

3. 打ち込み状況

基礎形式選定の経過については本報告の主眼でないため触れないが、本箇所の基礎形式は $\phi 400\sim 500\text{mm}$ の鋼管 ($t=9\text{mm}$) 打ち込み杭が選定され支持岩盤に1m程度打ち込む計画であった。

本杭に先立ち2箇所試験杭が打ち込まれた(N0.27,N0.52)。杭打ち機は、油圧ハンマー、ハンマー重量7tである。

ハンマー重量が、杭径に較べて過大傾向にあるが、落下高を調整（杭体応力 < 鋼材許容応力）しているため特に問題はないと考えられる。

尚、杭N0.27,52とも $\phi 500\text{mm}$ であり鉛直方向設計許容支持力は43.7,50.1,60.4,62.5t/本の4タイプのうち60.4t/本である。

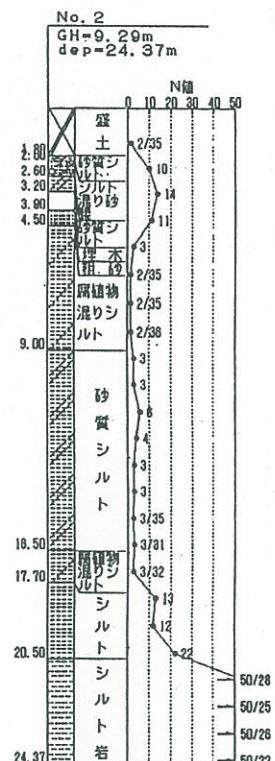


図-1
調査地の柱状図

4. 杭内部チェックボーリング

N0.27およびN0.52杭内にチェックボーリングを実施した。N0.27杭を例にボーリング結果を図-3に示す。

着岩深度はG L - 15.6mで杭貫入状況に一致する。着岩後のコアは棒状に採取（写真-1）されており、N値は40～⁵⁰/21～30であり図-1の結果と符号する。

即ち、以下のことが判明した。

- 杭体の内外で着岩差がない。
- 杭内のコアの状況観察から、岩が破碎された形跡はない。
- 杭は着岩後、約7m貫入している。

以上のことから、杭は杭先端周辺部分のみ破壊しながら、岩体をそっくりくり抜いて貫入していることが判る。つまり、先端閉塞効果は殆ど効果は殆ど発生していない状況にあることを示している。

尚、チェックボーリング採取コアの圧縮強度は $q_u = 7 \sim 12 \text{Kgf/cm}^2$ であった。

5. 考察

本事例における問題点は $N \geq 50$ の岩盤に何故6～7mも杭が貫入するのかという点につきるものと考えられる。

杭の先端が閉塞されていないことに着目し、杭打設時の杭体応力と標準貫入試験時応力の対比、杭貫入時の動的支持力機構等について考察する。

地質構成より、シルト岩層までは貫入障害となるような部分が認められない。従って、シルト岩に達するまでは杭先端までほぼ等しい応力が伝達されていると考えられる。

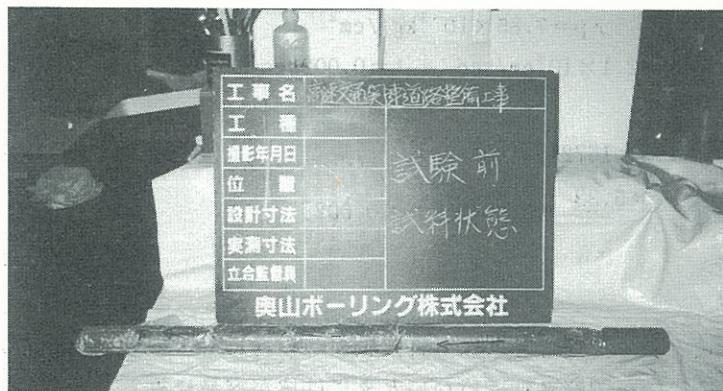


写真-1 棒状に採取されるシルト岩

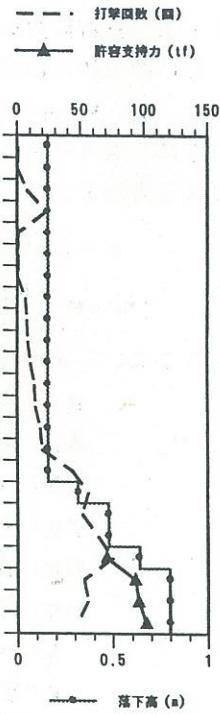


図-2
N027杭打記録

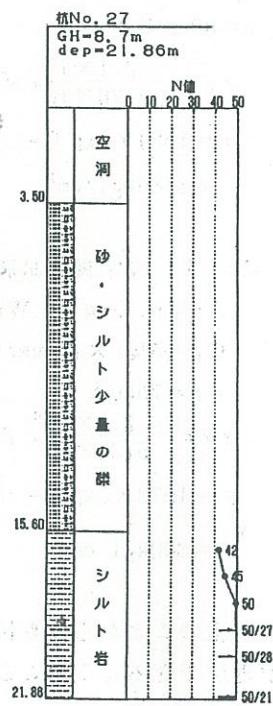


図-3
N027
チェックボーリング柱状図

5・1 杭打設時の応力

長い弾性棒に剛体が衝突した際の剛体の慣性力と弾性棒の抵抗力のつり合いにより導かれた、St·Venantの解を基本とし杭頭部の打撃応力をより実用的に算定するため宇都·冬木らはハンマーから杭先端までの境界条件を考慮して式-1を提案している。（波動理論による方法）。

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left[- \frac{\gamma p}{Wh} \frac{Ap}{Cp} \cdot t \right] \quad \text{式-1}^{(2)}$$

$$\sigma_0 = \frac{Ep}{Cp} \sqrt{2gh}$$

ここに、 σ : 最大打撃応力 (kgf/cm^2)

σ_0 : 鋼体ハンマーによって杭の打撃面に生じる応力の最大値 (kgf/cm^2)

Ap : 杭の断面積 (cm^2)

Wh : ハンマー重量 (kgf)

γp : 杭の単位体積重量 (kgf/cm^3)

Cp : 杭体の弾性波速度 (cm/sec)

Ep : 杭の縦弾性係数 (kgf/cm^2)

t : ハンマー打撃後の経過時間 (sec)

g : 重力加速度 (980cm/sec^2)

h : ハンマーの落下高さ (cm)

φ500mm 鋼管 $Ap = 138.8\text{cm}^2$ $Wh = 7000\text{kgf}$ $\gamma p = 7.85 \times 10^{-3}\text{kgf/cm}^2$

$Cp = 5120 \times 10^2 \text{cm/sec}$ $Ep = 2.1 \times 10^6 \text{cm/sec}$ $t = 0.002\text{sec}$

$h = 80\text{cm}$ より

$$\sigma_0 = \frac{2.1 \times 10^6}{5120 \times 10^2} \sqrt{2 \times 980 \times 80} = 1624\text{kgf/cm}^2$$

$$\sigma = 1624 \times \exp \left[- \frac{7.85 \times 10^{-3} \times 138.8}{7000} \times 5120 \times 10^2 \times 0.002 \right]$$

$$= 1385\text{kgf/cm}^2$$

5・2 標準貫入試験時の応力

$Ap = 5.33\text{cm}^2$ $Wh = 63.5\text{kgf}$ $\gamma p = 7.85 \times 10^{-3}\text{kgf/cm}^2$

$Cp = 5120 \times 10^2 \text{cm/sec}$ $Ep = 2.1 \times 10^6 \text{cm/sec}$ $t = 0.002\text{sec}$

$h = 75\text{cm}$ より

$$\sigma_0 = \frac{2.1 \times 10^6}{5120 \times 10^2} \sqrt{2 \times 980 \times 75} = 1572\text{kgf/cm}^2$$

$$\sigma = 1572 \times \exp \left[- \frac{7.85 \times 10^{-3} \times 5.33}{63.5} \times 5120 \times 10^2 \times 0.002 \right]$$

$$= 800\text{kgf/cm}^2$$

以上のことから鋼管杭打ち込み時の打撃応力は標準貫入試験時の約1.7倍に達することが理解できる。このことから杭先端が閉塞されていないときには杭が容易に貫入するものと考えられる。

5・3 支持力機構

杭先端が閉塞されない条件では、杭の支持力機構は、式-2のように表すことができる

$$P_u = R_F + R_p + R_{F1} \quad \text{式-2}^3)$$

ここに P_u : 開端杭に作用する荷重 (tf)

R_F : 杭の外周面摩擦力 (tf)

R_p : 開端杭の先端肉厚部の支持力 (tf)

R_{F1} : 開端杭内部に詰まった土による

摩擦力 (tf)

P_u を動的支持力公式で求めた R_u とおけば、 $R_u = R_F + R_p + R_{F1}$ となる。打ち込み時には杭先端外側にフリクションカッターを取付けていることから動的貫入状態では R_F は無視できると考えられる。

フリクションカッターと鋼管の先端肉厚部の面積 $A_p = 282.7 \text{cm}^2$ コアの圧縮強度 $q_u = 7 \sim 12 \text{kgf/cm}^2$ より、
 $q_u = 7 \text{kgf/cm}^2$ とすれば周面摩擦力度 $f = c = \frac{1}{2}$
 $q_u = 3.5 \text{kgf/cm}^2$ 、連続基礎支持力係数 $\alpha = 1.0$ より、
 $R_p = A_p (\alpha \cdot C \cdot N_c) = 282.7 \times 1.0 \times 3.5 \times 5.3 = 5244 \text{kgf} = 5.2 \text{tf}$ となる。

一方、 R_{F1} はシルト岩層への貫入状況に応じて、以下のようにになる（杭内径 $d = 48.2 \text{cm} \rightarrow U = 151.4 \text{cm}$ ）。 $R_{F1} = U \sum L_i f$

表-1 貫入状況に応じた R_{F1}

貫入長 $L_i (\text{m})$	1	2	3	4	5	6	7
周面摩擦力 $R_{F1} (\text{tf})$	53	106	159	212	265	318	371

R_p は無視できる値であるから本事例の支持力機構は、杭内面の周面摩擦力であると結論するにいたった。即ち $R_u = R_{F1}$ である。

許容支持力 $R_a = \frac{1}{3} R_u = \frac{1}{3} R_{F1}$ とすれば動的支持力公式によって求まる許容支持力（図-2）に一致することが判る。尚、本杭の打ち込み結果にも表-1が適用できた。

6. 問題点

杭内部に詰まった土及び岩の内部圧力の上昇は結局杭先端支持力となるが、いわゆるクサビ効果による先端支持力の発言とは機構が違うように感じられる。

また、本考察には次の問題点があると考えられる。

① 杭外周の動的周面摩擦力は無視できるのか。

② 杭内に入った土及び岩による内部圧力と周面摩擦力との関係が明らかでない。

③ ②の理由により本考察で用いた動的周面摩擦力度 $f = \frac{1}{2} q_u$ で良いのか。

この他、標準貫入試験サンプラーは内径に比べて肉厚であるため先端閉塞状態になっている可能性があり、そのことが軟岩の実測 N 値から求める実杭の先端支持力への期待と現実にギャップを生じている⁴⁾ ことも考えられる。本事例のような現場では杭先端閉塞を図り、先端支持力の向上と支持層への根入れを最小限にとどめる対応が必要と考える。

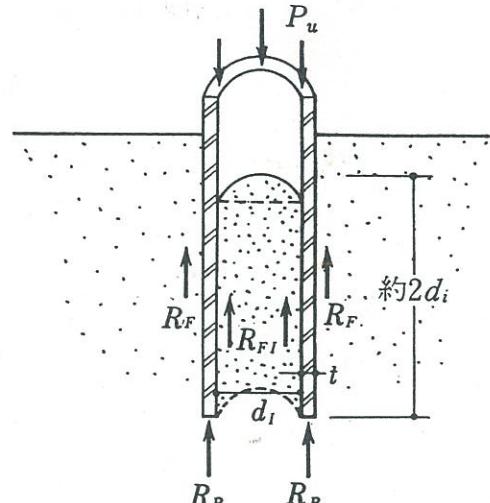


図-4 開端杭に作用する鉛直荷重と支持力

参考文献

- 1) 杭基礎のトラブルとその対策 土質工学会
- 2) 杭基礎の調査設計から施工まで 土質工学会
- 3) 建築基礎構造設計指針 建築学会
- 4) N値及びC・ ϕ - 考え方と利用法(第3章) 地盤工学会

