

複合地盤杭の押込み試験による周面摩擦力の検証

北海道開発土木研究所 正会員 ○富澤 幸一
 ジャパンパイル（株） 正会員 小嶋 英治

1. はじめに

軟弱地盤に施工する杭周辺に主に深層混合処理工による複合地盤を形成し、地盤改良後の増加せん断強度を杭水平抵抗に反映する複合地盤杭工法を研究¹⁾してきた。本工法は北海道内の泥炭性軟弱地盤で多くの施工実績をもち、杭諸元が水平抵抗で決定する条件では大幅な建設コスト縮減が可能な合理的手法となる。この際、複合地盤杭の周面摩擦力は水平抵抗と同様に改良体強度から設定するが、現場条件により負の周面摩擦力(N_f)の発現が懸念される。そのため、複合地盤杭において改良体内での杭周面摩擦力確認を目的に実現場で杭押込み試験を実施した。本報では、その成果に基づき複合地盤杭の鉛直支持機構について検証した。

2. 複合地盤杭の設計法

2-1. 地盤改良範囲の設定

杭の水平抵抗は作用力に対する釣り合い状態の地盤反力であり、水平方向に圧縮された地盤は極限平衡状態を保つと考えられる。このため、杭の水平抵抗の範囲として土の破壊角で表わされる受働土圧の領域を設定することができる。そこで、複合地盤杭の水平抵抗の影響領域すなわち地盤改良の必要範囲は、杭の特性長 $1/\beta$ から受働土圧の作用勾配 $\theta=(45^\circ+\phi/2)$ (ϕ :土のせん断抵抗角)で立ち上げた領域とする(図-1)。

2-2. 複合地盤のせん断強度

複合地盤のせん断強度は、改良柱体と原地盤せん断強度を改良率 ap で合成し(1)式で算定される²⁾。本工法は $ap=78.5\%$ 以上の接円を基本とする。

$$C = C_p \cdot ap + \alpha s \cdot C_o (1 - ap) \quad \dots (1) \quad C_p = qup/2, \quad C_o = quo/2, \quad ap = Ap/A$$

ここに、 C :複合地盤のせん断強度(kN/m^2)、 C_p :改良柱のせん断強度(kN/m^2)、 C_o :原地盤のせん断強度(kN/m^2)、 αs :破壊ひずみ低減率、 qup :改良柱体の一軸圧縮強度(kN/m^2)、 quo :原地盤の一軸圧縮強度(kN/m^2)、 Ap :改良柱体の断面積(m^2)、 A :改良柱体一本当りの分布面積(m^2)である。この結果、設計において複合地盤杭の水平地盤反力係数 k 値は、改良体をあくまでも(複合)地盤として扱うことで、複合地盤のせん断強度 C から算定される変形係数 E (粘性土地盤)より設定される³⁾。また、改良体内の杭周面摩擦力 f についても同様に、改良する原地盤が粘性土系であれば、 $f=C_p=qup/2$ としそれに改良率 ap で換算し設計時に設定する。

複合地盤杭工法において、設計・動的水平地盤反力および改良範囲の設定の妥当性については、実杭の水平載荷試験・遠心力模型実験・FEM解析により実証的に検証してきた。今回、実現場において複合地盤杭の押込み試験を実施し、改良体内の杭周面摩擦力および鉛直支持機構を確認した。

3. 現場概要

押込み試験を実施した現場は、複合地盤杭工法を採用した北海道開発局管内 一般国道 337 号 蕨代跨道橋 A-2 橋台である。橋台基礎杭として、杭径 $\phi 1200\text{mm}$ 、杭長 $L=48.5\text{m}$ 、杭本数 $N=18$ 本の場所打ち杭を採用している。現場地盤柱状を図-2に示したが、泥炭性軟弱地盤が深く介在している。杭周辺の地盤改良は深さ 9m まで深層混合処理工法(DJM工法)で施工した。深層混合処理工は改良率 $ap=78.5\%$ の接円施工とし、改良柱の設計一軸圧縮強度 $qup=200\text{kN/m}^2$ とした。この結果、設計 qup から設定させる改良体内の場所打ち杭の最大周面摩擦力度 f_l は、 $f_l=78.5\text{kN/m}^2$ ($f_l=C$, 原地盤強度を考慮せず $C=0.785 \times 200\text{kN/m}^2/2$)である。

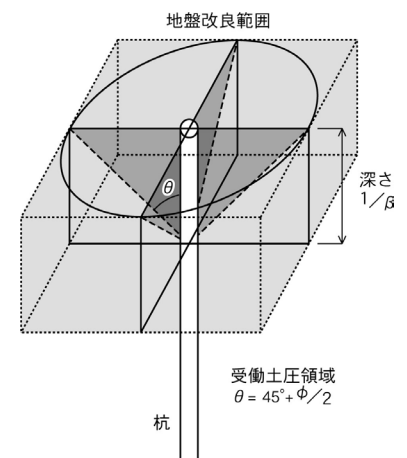


図-1 複合地盤杭工法

杭、複合地盤、押込み試験、支持力、周面摩擦力

062-8602 北海道札幌市平岸1条3丁目1番34号 TEL 011-841-1709(365) FAX 011-841-7333

また、場所打ち杭は、改良柱強度発現を確認した後改良体を破壊することの無いよう全回転式オールケーシング工法で施工した。

4. 杭押し込み試験

杭押し込み試験は、周辺杭を反力とし油圧ジャッキで荷重制御する地盤工学基準⁴⁾に準拠した反力載荷法とした。載荷方式は計画最大荷重 $P_{max}=10720\text{kN}$ までの1サイクル段階載荷法とした。押し込み試験は、場所打ち杭の4週強度の確認後に実施した。場所打ち杭の鉄筋には、押し込み試験の各載荷時の杭軸力を測定するため、地層境界の深さ方向の概ね等間隔に鉄筋計（8点）を設置した。押し込み試験の結果得られた、載荷重 $\text{Log}P \sim$ 杭頭沈下量 $\text{Log}S$ の関係を図-3に示す。載荷重に対する杭頭沈下量 S は、最大荷重に至ってもほぼ直線的な傾向を示し、 $S_{max} \approx 4\text{mm}$ 程度と過小値である。また、図-4に各載荷重段階の杭軸力分布を示した。図によれば、改良体内で非常に大きな杭周面摩擦力が発現していることが分かる。

5. 複合地盤杭の改良体周面摩擦力および鉛直支持機構

押し込み試験の載荷重 $P \sim$ 杭頭沈下量 S の関係で明確な変曲点が見られないことから、宇都の指数式を用いて杭極限支持力 Ru' を推定した。その結果、杭設計極限支持力 $Ru=10262\text{kN}$ に対し、約3倍の実測杭極限支持力 $Ru'=30787\text{kN}$ と判定された。計画最大荷重 $P_{max}=10720\text{kN}$ に対する改良体内の杭周面摩擦力度 f_2 は、杭頭軸力 P_0 と改良体下端軸力 P_1 の関係から $f_2=280.5\text{kN/m}^2$ ($f_2=(P_0-P_1)/\text{杭周長}U \cdot \text{区間長}L$) と判定される。ただし、実現場の改良柱4週の一軸圧縮強度 σ_{28} は下限値管理をしたため設計 q_{up} に対し大きく平均値で $\overline{q_{up}}=865\text{kN/m}^2$ であり、この値から算定される杭周面摩擦力度 f_3 は $f_3=340.0\text{kN/m}^2$ となる。試験杭軸力の増加傾向を考慮すれば、改良体の杭最大周面摩擦力度は $f_3=340.0\text{kN/m}^2$ がほぼ妥当値と判断される。その結果、実測 f_3 は設計 f_1 に対し約4倍 ($f_3=340.0\text{kN/m}^2 / f_1=78.5\text{kN/m}^2$) 大きな値となるが、改良体の杭周面摩擦力を一軸圧縮強度 q_{up} から設定する手法は妥当と考えられる。

実測値を用いて(2)式により、負の周面摩擦力(NF)の再判定をおこなった³⁾。

$$Ra=1/1.5(Ru'-Ws)+Ws-(NF+W) \quad (2)$$

ここに、 Ws :杭有効重量(kN), W :中立点より下方の杭の換算土重量

(kN)である。その結果、中立点より上の改良体周面摩擦は過大であるが実測杭極限支持力 Ru' が大きいいため、 NF を考慮した杭許容支持力 $Ra=4158\text{kN}$ となり、常時の杭頭実反力(常時 $P_{max}=3182\text{kN}$) を確保した。

また、仮に改良体が杭に下向きの荷重として作用した場合、杭周面摩擦力度 f_3 が非常に大きいことから改良体の沈下の懸念はないと判断される(改良体内の杭周面摩擦力(杭18本) $F=206946\text{kN}=f_3 \cdot \text{改良深さ}L \cdot \text{杭周長}U \cdot \text{杭本数}18 \text{本} > \text{改良体総重量}71604\text{kN}=\text{長さ}13\text{m} \times \text{幅}34\text{m} \times \text{深さ}9\text{m} \times \text{単重}18\text{kN/m}^3$)。

押し込み試験の実施成果から、複合地盤杭の周面摩擦力および当該現場の杭支持機構の安定性が検証された。今後、橋台施工の各段階における杭軸力を長期計測し、 NF の発現について確認していく考えである。

参考文献 1).富澤幸一：複合地盤杭の合理的設計法の現場活用について 土木学会土木建設技術シンポジウム 2004,平成16年7月 2).(財)土木研究センター：深層混合処理工法設計・施工マニュアル 平成11年6月 3).日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編,平成14年3月 4).地盤工学基準：杭の鉛直載荷試験方法・同解説一第1回改訂版、平成14年5月

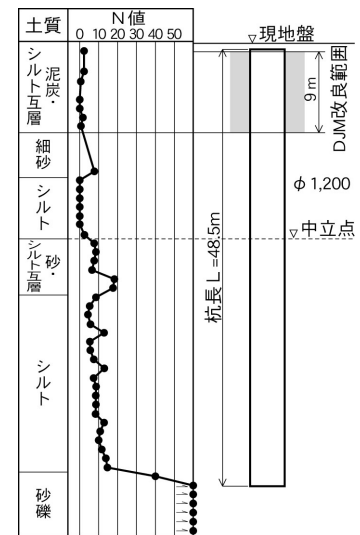


図-2 現場地盤柱状

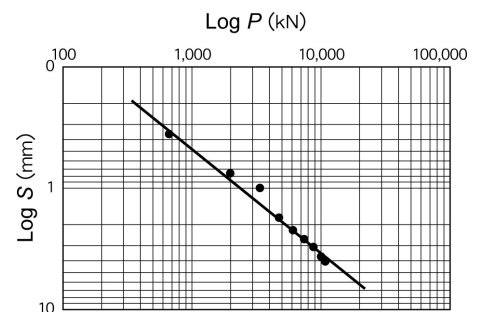


図-3 載荷重 $\text{Log}P \sim$ 杭頭沈下量 $\text{Log}S$

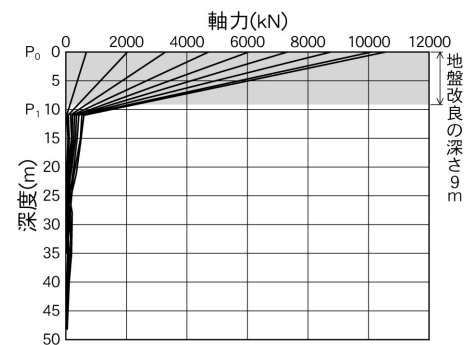


図-4 押し込み試験の杭軸力分布