

軟弱地盤における複合地盤杭の設計

北海道開発局 札幌開発建設部 千歳道路事務所 工事課 細矢 武司

1. はじめに

軟弱地盤中の杭頭部周辺に深層混合処理工法による複合地盤を形成し、改良した増加地盤強度を杭の水平抵抗に反映させる設計法を検討した。以下、複合地盤中に施工する杭を複合地盤杭¹⁾と呼ぶこととする。本手法は、杭諸元が水平抵抗で決定する軟弱地盤の現場条件では、建設コストの縮減が可能となる合理的な設計法である。

本論文では、北海道の泥炭性軟弱地盤の橋梁基礎に採用した複合地盤杭工法の設計法の実用性について報告する。複合地盤杭設計法の妥当性は、静的には実杭の水平載荷試験、耐震性は応答変位法によって検証した。

2. 複合地盤杭の設計手法

2.1 複合地盤の基本的考え方

複合地盤杭工法の基本的な設計法を示す。杭頭部周辺に施工する深層混合処理工法は、セメント系の安定材を所要の深さまで強制混合することで改良柱を造成し、柱体間の原地盤と合わせて複合地盤を形成するものである²⁾。その際、複合地盤のせん断強度 C は、改良柱体と原地盤の改良率 ap で合成され、(1)式で算定される。

$$C = C_p \cdot ap + s \cdot C_o (1 - ap) \quad [C_p = qup/2, C_o = quo/2, ap = A_p/A] \quad (1)$$

ここに、 C ：複合地盤のせん断強度(kN/m²)、 C_p ：改良柱のせん断強度(kN/m²)、 C_o ：原地盤のせん断強度(kN/m²)、 s ：破壊ひずみ低減率、 ap ：地盤改良率、 qup ：改良柱体の一軸圧縮強度(kN/m²)、 quo ：原地盤の一軸圧縮強度(kN/m²)、 A_p ：改良柱体の断面積(m²)、 A ：改良柱体一本当りの分布面積(m²)である。

2.2 複合地盤杭の水平地盤反力

深層混合処理工法で軟弱地盤中に形成された改良柱体の変形係数 E_p は、一軸圧縮強度 qup と比例関係(粘性土 $E_p=100qup$)にある。これに加えて、改良柱体のせん断強度 C_p と一軸圧縮強度 qup の関係(粘性土 $C_p=qup/2$)から、改良柱体の変形係数 E_p とせん断強度の関係($E_p=200C_p$)が推定できる。そのため、複合地盤杭設計で用いる変形係数 E_c についても複合地盤のせん断強度 C を求める際の考え方が適用でき(2)式で整理される。

$$E_c = E_p \cdot ap + s \cdot E_o (1 - ap) \quad (2)$$

ここに、 E_c ：複合地盤の変形係数(kN/m³)、 E_p ：改良柱体の変形係数(kN/m³)、 E_o ：原地盤の変形係数(kN/m³)である。その結果、複合地盤杭の水平方向地盤反力係数 k 値は複合地盤の変形係数 E_c から(3)式³⁾で算定される。

$$k = (\alpha \cdot E_c / 0.3) \cdot [(D / \alpha) \cdot (1 / 0.3)]^{-3/4} \quad (3)$$

ここに、 k ：複合地盤杭の水平地盤反力係数(kN/m³)、 E_c ：複合地盤の変形係数(kN/m³)、 α ：水平地盤反力推定係数、 D ：杭径(m)、 β ：特性値⁴⁾ $(kD)/4EI$ (m⁻¹)、 E ：杭のヤング係数(kN/m²)、 I ：杭の断面二次モーメント(m⁴)である。ただし、杭の特性値 β は杭変位量により変化するため、基準変位量³⁾ (杭径1%)に対する値とする。

2.3 杭水平抵抗の影響範囲と必要改良領域

複合地盤杭工法の必要改良領域を設定する。杭の水平抵抗は作用力に対し釣合い状態にある地盤反力であり、水平方向に圧縮された地盤土圧は極限平衡状態を保つと考えられる⁴⁾。そのため、複合地盤杭の水平抵抗の影響範囲すなわち地盤改良の必要領域を図-1に示す杭の特性長 $1/\beta$ 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3次元の四角形状とする。このときのせん断抵抗角 θ は、深層混合処理工法の配合強度や改良される地盤の性状により異なるため、改良範囲の設定は地盤改良前の原地盤のせん断抵抗角より決定する。

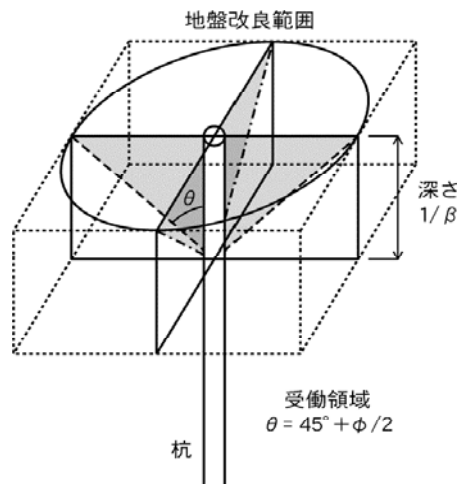


図-1 複合地盤杭の水平抵抗範囲

3. 複合地盤杭工法の現場採用事例

北海道において複合地盤杭工法を用いた橋梁は、北海道開発局 札幌開発建設部管内道央圏連絡道路 篠津川橋 (橋長 $L=57.6\text{m}$) である。当該土質柱状は、深さ約 40m の洪積砂質土支持層まで $N=0 \sim 10$ 程度の泥炭層および沖積粘性土層が深く連続する泥炭性軟弱地盤である。

当該橋梁において、A1・A2 橋台基礎で設定した設計法に従い複合地盤杭工法を採用した。図-2に、複合地盤杭工法 (深層混合処理工+場所打ち杭) の設計ケースを従来工法 (EPS+鋼管杭) の設計ケースと対比して示した。

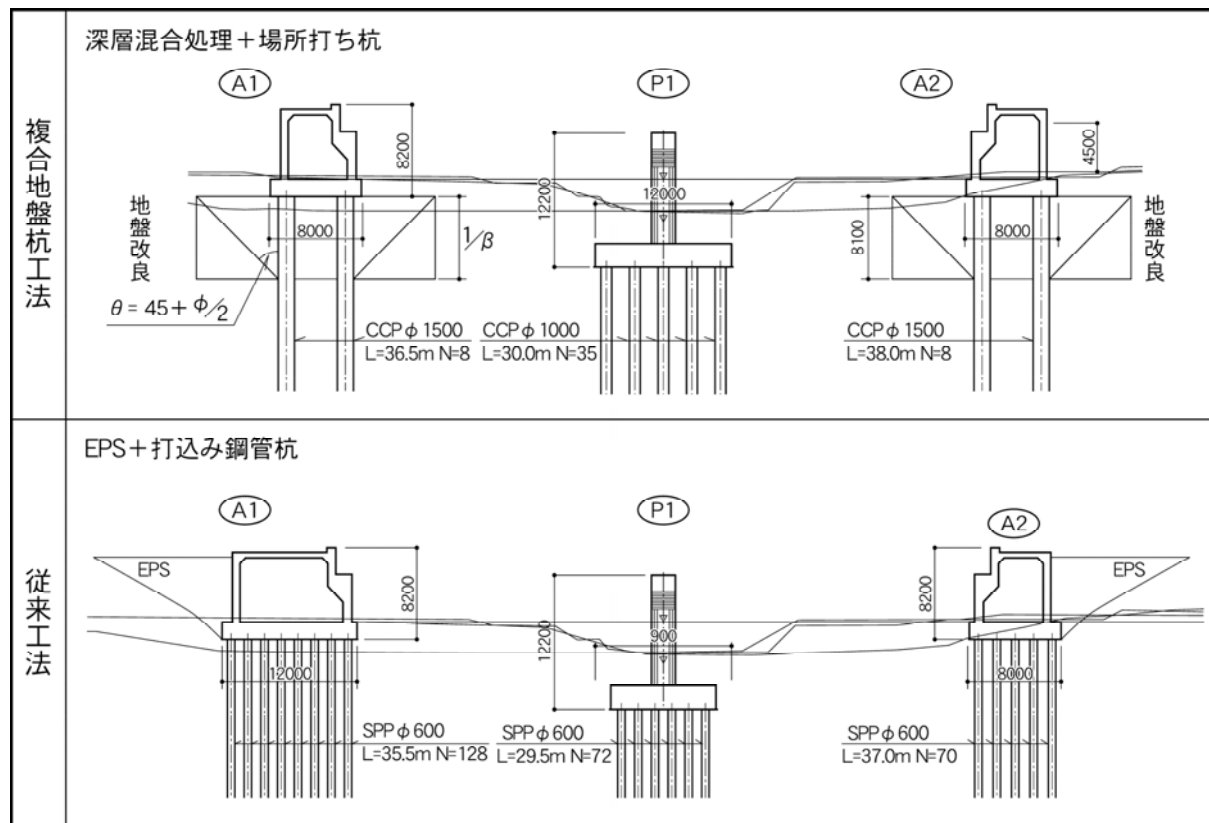


図-2 複合地盤杭工法と従来工法の基礎形式の検討

その結果、本橋梁に複合地盤杭工法を採用することで、従来工法に対し杭本数を少なくし、躯体の縮小化が可能なことから、総計で約 20 % (工事費 5000 万円) の建設コスト縮減効果が得られた。

4 . 現場杭水平載荷試験の検証

複合地盤杭設計法の妥当性を検証するため、同工法を採用した篠津川橋 A1 橋台場所打ち杭 (1500mm, 杭長 L=37.0m) において杭水平載荷試験を実施した。試験法は、地盤工学会基準⁵⁾に準拠した荷重制御による多サイクル方式の静的正負交番載荷法とした。複合地盤杭の設計地盤変形係数 E_o は、改良柱の設計基準強度 $qu=200\text{kN/m}^2$ および改良率 78.5% から $E_o=15700\text{kN/m}^2$ である。この E_o は換算 N 値=22 程度に相当し、設計水平地盤反力係数 K 値 $=81400\text{kN/m}^3$ に設定される。

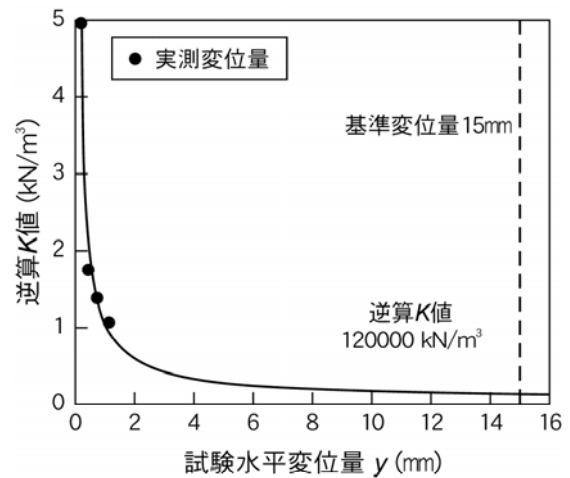


図 - 3 試験水平変位量 y ~ 逆算 K 値の関係

水平載荷試験の水平荷重 H ~ 杭変位量 y 関係から、(4) 式で示した線形弾性地盤反力法³⁾により算定した各変位レベルの水平地盤反力係数 K 値 (逆算 K 値) を図 - 3 に示した。

$$y = H \cdot [(1 + \frac{h}{D})^3 + 1/2] / (3EI) \quad (4)$$

ここに、 h : 突出長 (mm)、 y : 杭変位量 (mm)、 H : 水平荷重 (N)、 D : 杭径 (mm)、 E : 杭ヤング係数 (N/mm^2)、 I : 杭断面二次モーメント (mm^4) である。実測値以上の杭変位量は指数曲線から判定した。試算の結果、水平載荷試験による杭径 1% 基準変位量に相当する実測水平地盤反力係数 KI 値は、設計 K 値に対し約 1.5 倍 (実測値 $KI=120000\text{kN/m}^3$ / 設計 K 値 $=81400\text{kN/m}^3$) の $KI=120000\text{kN/m}^3$ と算定された。この実測水平地盤反力係数 KI 値を変位法 (レベル 1 震度法) 計算にフィードバックし、基礎全体の安定性を照査した。この結果、地盤反力が比較的大きく確保されたため、橋台基礎杭の応力・反力・変位とも設計値に対し安全側となり、橋台の安定が確認された。この実杭の水平載荷試験結果により、複合地盤杭設計法の静的レベルにおける妥当性が概ね検証されたものとする。

5 . 複合地盤杭の耐震性評価

複合地盤杭工法では、杭頭部の改良体が未改良原地盤に対して強度の大きい人工地盤となるため、震度法以外に地盤変形を考慮した応答変位法解析⁶⁾による杭の耐震性の検討を実施した。その際、地震時の杭周辺の地盤変形に伴う、強度差をもつ複合地盤と原地盤の境界部およびそれ以深の杭応力に注目した。

応答変位法解析の入力地震動は、レベル 2 タイプ (兵庫県南部地震記録) の地震動より求めた。また、せん断弾性波速度 V_s は、地盤種別の M 値から換算し設定した。解析の結果得られた、地盤の最大応答変位時に発現する A 1 橋台前杭および後杭の最大曲げモーメント分布を図 - 4 に示す。杭体曲げモーメントは、改良体内では拘束され過小値で

あるが、深さ約17m 位置で比較的大きな曲げモーメントが杭に発現した。この値は、ひびわれ曲げモーメントを超えるものであるが、降伏および終局曲げモーメント以下である。そのため、場所打ち杭の耐震強度は鉄筋量や断面変化位置の検討により確保した。当該現場での耐震性の検証より、複合地盤杭の地震時の杭応力は概ね問題ないと考えられた。ただし、対象とする地震動レベルや地盤条件によっては地中部の杭応力増加の懸念があることから、同工法を採用する場合、現場条件に応じた詳細な耐震性の照査が必要と考えられる。

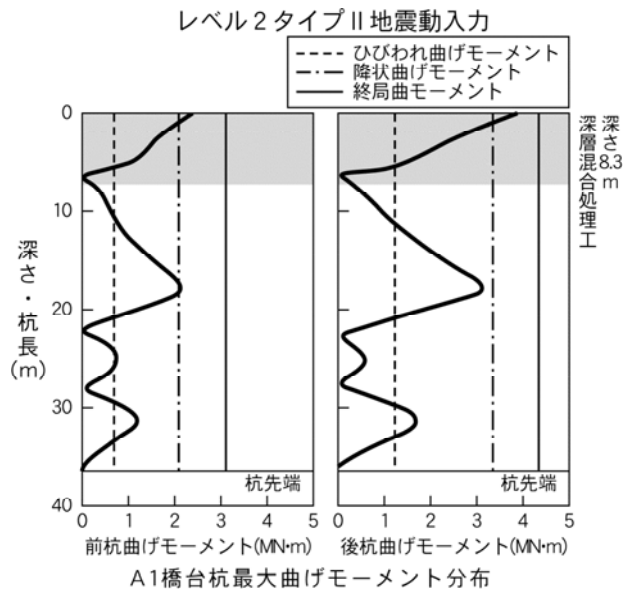


図 - 4 応答変位法による杭曲げモーメント分布

6 . 結論

本報では軟弱地盤における複合地盤杭の設計法の考え方を示し、静的・動的レベルの設計法の妥当性および実用性を検討した。検証結果より、以下の知見が得られた。

軟弱地盤中の杭頭部周辺に深層混合処理工法による複合地盤を形成し、改良した増加地盤強度を杭の水平抵抗に反映させる複合地盤杭工法は、杭諸元が水平抵抗で決定する現場条件では建設コスト縮減が可能な合理的設計法である。

複合地盤杭設計法は、現行設計法に則り、地盤改良範囲を杭特性長 $1/$ から受働土圧の作用勾配 $= (45^\circ + \quad / 2)$ で立ち上げた 3 次元の四角形状領域とし、杭水平地盤反力は改良強度のせん断強度 C から改良率 ap で換算し設定される。

複合地盤杭の水平地盤反力は、実杭の水平載荷試験の検討より、静的レベルにおける設定した設計法の妥当性が検証された。

複合地盤杭の応答変位法による検討の結果、地震時の杭体応力は地中部で増加傾向を示したが降伏値以下であり耐震性は概ね問題ない。ただし、現場条件に応じて地震時の照査を行い、杭の耐震性を確保させる必要がある。

一連の検討の結果、複合地盤杭工法の有用性が確認された。今後、現場試験や数値解析のデータ蓄積から、現場条件に応じた合理的な手法として補完していく考えである。

参考文献

- 1). 富澤幸一・西川純一：改良地盤中に施工した複合地盤杭の実用設計法、第 5 回地盤改良シンポジウム 2002.11.
- 2). (財) 土木研究センター：陸上工事における深層混合処理工法 設計・施工マニュアル、pp.48-148,1999.
- 3). (社) 日本道路協会：道路橋示方書 下部構造編、pp.254-397,2002.
- 4). 山口柏樹：最上編 土質力学、pp.868-870,1969.
- 5). (社) 地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説、pp.21-34,1993.
- 6). (社) 日本道路協会：道路橋示方書 耐震設計編、pp.48-118,2002.