

# 複合地盤杭工法の実用的設計法 —大きな建設コスト縮減の新技术・新工法—

(独)土木研究所 寒地土木研究所 寒地地盤チーム 富澤幸一

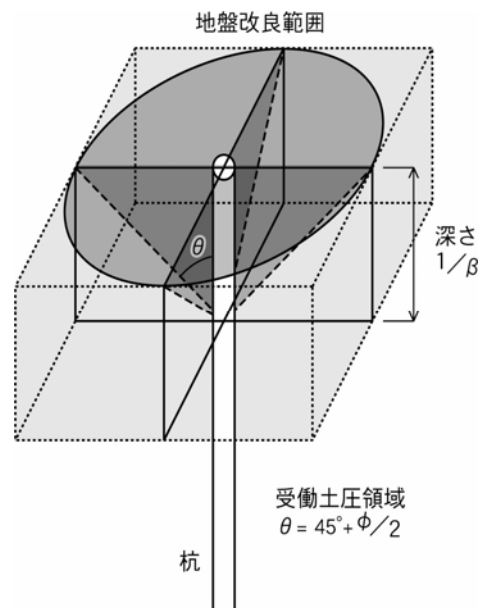
## 1、はじめに

軟弱地盤や液状化が想定される地盤に施工する杭の頭部周辺を、深層混合処理工法・サンドコンパクションパイル工法・載荷重工法などで地盤改良し、改良後の地盤強度を主に水平抵抗として反映する合理的な設計法を検討し実用化した<sup>1), 2)</sup>。本工法は一般的な地盤改良工法<sup>3), 4)</sup>と杭基礎を組み合わせた工法で、複合地盤杭工法と呼ぶ。本工法は杭諸元が水平抵抗で決定する現場条件で採用することで、杭本数・躯体を縮小できることから大きなコスト縮減が得られる。本工法では、改良地盤中の杭の水平抵抗の影響範囲すなわち必要な地盤改良領域を地盤工学の理論に基づいて設定する。本設計法の妥当性は、実橋を対象とした現場の杭の水平載荷試験から検証した。なお、耐震性の検証は参考文献 1), 2)による。

## 2、改良地盤中の杭の水平抵抗の評価法

### 2.1、地盤改良範囲の設定

杭の水平抵抗は、水平地盤反力度の最大値を作用力に対する釣り合い状態の極限抵抗として扱えば、前面地盤が水平方向に圧縮され水平土圧が増大して極限平衡状態を保つと考えられる<sup>5)</sup>。そのため、杭に水平力が作用した場合の前面地盤の水平抵抗の範囲は、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。つまり、杭頭に水平作用力を受けた地盤中の杭の水平挙動は、杭の水平抵抗の関与深さである特性長  $1/\beta$  から前面の受働土圧領域内の地盤性状に支配される。そのため本工法では、改良地盤による杭の水平抵抗の影響範囲は、深さ  $1/\beta$  から受働破壊すべり面勾配  $\theta=(45^\circ+\phi/2)$  ( $\phi$ : 土の内部摩擦角) で立ち上げた逆円すい体の領域とする。



その結果、地盤改良範囲は Fig.1 に示すように上記逆円すい体領域を覆うような四角体が設定される。その際、改良範囲の設定手法は単杭と群杭で同様である。また、杭とフーチングの結合部は原則として杭頭剛結合とすることから、結合の固定度合による改良範囲に変化はない。

### 2.2、水平地盤反力の設定

杭の水平抵抗は、地盤の変形係数  $E$  から(1)式<sup>6)</sup>で算定される水平地盤反力係数  $k$  より決定される。そのため、改良地盤に施工される杭の設計では地盤改良により増加したせん断

Fig.1 杭の水平抵抗の3次元影響範囲

強度  $S$  の効果を地盤変形係数  $E$  の増加の割合として評価する。

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

ここに、 $k$  : 杭の水平地盤反力係数(kN/m<sup>3</sup>)、 $E$  : 改良地盤の変形係数(kN/m<sup>2</sup>)、 $\alpha$  : 水平地盤反力推定係数、 $D$  : 杭径 (m)、 $\beta$  : 杭の特性値  ${}^4\sqrt{(kD)/4EyI}$  (m<sup>-1</sup>)、 $Ey$  : 杭のヤング係数(kN/m<sup>2</sup>)、 $I$  : 杭の断面二次モーメント(m<sup>4</sup>)である。

地盤変形係数  $E$  の算定手法は、深層混合処理工法およびサンドコンパクションパイル工法により杭の周辺に複合地盤を形成する方法では、改良率  $a_p$  に従い改良地盤せん断強度  $S$  が設定されることから、その増加分  $\Delta S$  を変形係数  $E$  に変換し設定する<sup>3),4)</sup>。また、載荷重工法についても同様に、圧密に伴う  $\Delta S$  を地盤改良により増加した変形係数  $\Delta E$  と同等比として評価する。その結果、地盤改良工法別の増加した地盤変形係数  $E$  を杭の水平抵抗として反映することで、未改良の原地盤の変形係数を用いるよりもより実態に近い大きな改良地盤の杭の水平地盤反力を設定することが可能となる。

### 3、複合地盤杭工法の有用性

同一現場条件における複合地盤杭の基礎形式と無対策の従来工法の形式を対比させた Fig.2 に示した。従来工法の形式では、軟弱地盤に対する杭の水平抵抗を確保するため、橋台背面に盛土軽減などの特殊な工法を施さない限り、非現実的な杭本数  $n=14 \times 5=70$  本を必要とし大規模となる。これに対して、複合地盤杭工法では、場所打ち杭の周辺の地盤改良により杭の水平抵抗が確保されるため、杭径は 1m から 1.2m に変化するものの、杭本数を  $n=3 \times 4=12$  本と少なくし橋台躯体を小さくすることが可能となる。その結果、このモデル現場では複合地盤杭工法を採用することで、建設コストが従来工法形式:複合地盤杭工法形式=1:0.55 となり、45%(約 9,000 万円)の大幅な建設コスト削減効果が得られている。

複合地盤杭工法は、他の多くの軟弱地盤や液状化地盤の橋梁予備設計のシミュレーションでも同工法を採用することで概ね 20~50%の大きな建設コスト削減効果が可能な有用性が確認されている。

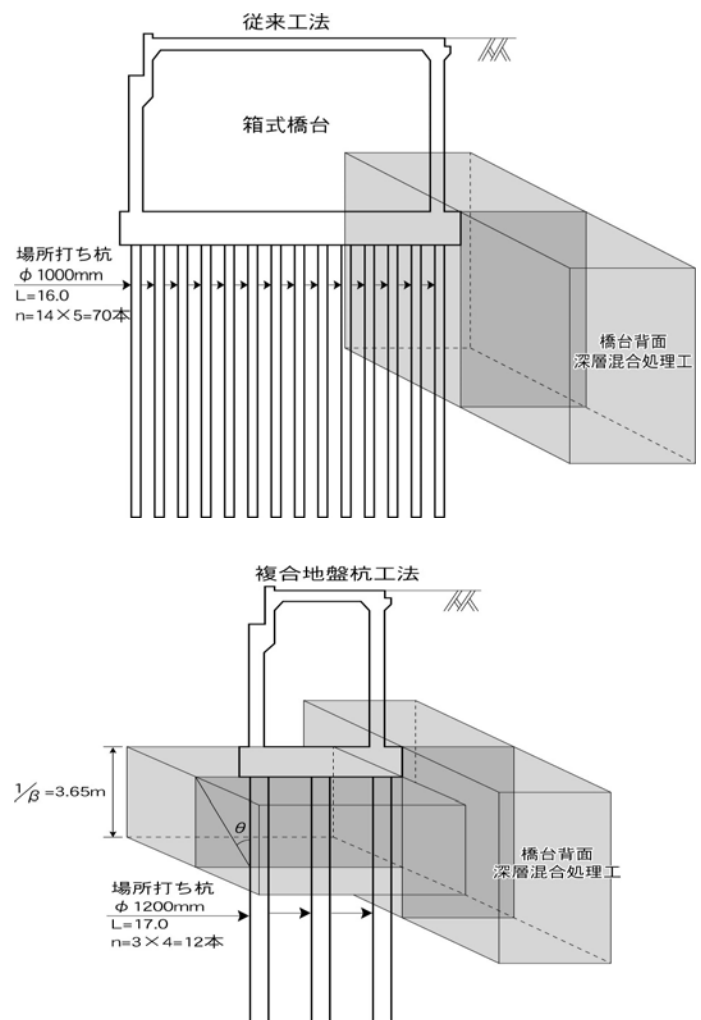


Fig. 2 従来工法と複合地盤杭工法の杭基礎形式の比較

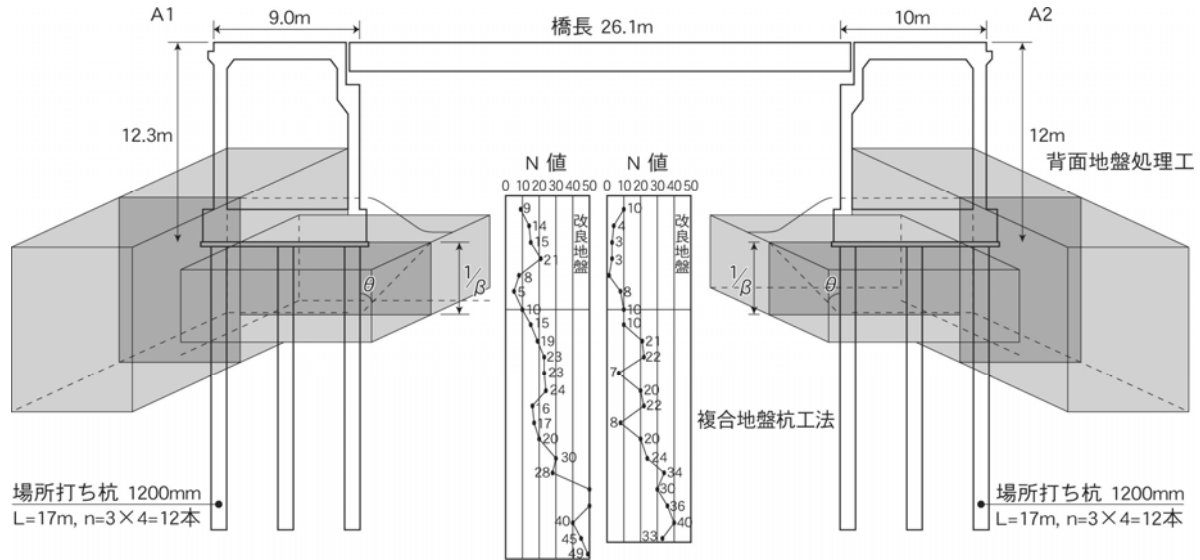


Fig. 3 複合地盤杭工法を採用した橋梁

#### 4、現場杭水平載荷試験による設計法の実検証

複合地盤杭工法の水平地盤反力係数  $k$  の直接的検証を目的に、橋台基礎杭で水平載荷試験を実施した事例を示す。対象現場は軟弱地盤中に施工された箱式橋台の場所打ち杭基礎である。場所打ち杭の諸元は、杭径  $\phi$  1200mm、杭長  $L=17\text{m}$  である。橋台の場所打ち杭の周辺には、橋台背面のすべり安定・側方流動対策工法の地盤改良と同じ様に、改良柱体の設計一軸圧縮強度  $q_{up}=200\text{kN/m}^2$ 、改良率  $a_p=78.5\%$  の深層混合処理工法を施工した。地盤改良の範囲は、Fig.1 の設定に従い液状化対象層を含む軟弱地盤全層の深さ  $1/\beta=3.65\text{m}$  から杭周囲に受働土圧の作用勾配  $\theta=(45^\circ+\phi/2)$  で立ち上げた 3 次元の四角体の範囲とした。Fig.3 に橋梁一般図を示す。

水平載荷試験方式は、日本地盤工学会基準に準拠した多サイクル方式による荷重制御法とした。載荷方法は、試験杭と反力杭の間にロードセル・油圧ジャッキ・載荷筒を設置し、杭頭変位量が杭径 1%(12mm)程度に至るまで一方向に静的に載荷した。試験杭には曲げ応力測定のため、主鉄筋 2 断面の表面に深さ方向の一定間隔で鉄筋ひずみゲージを設置した。原地盤値  $k_0$  は、 $N \leq 5$  以下の原地盤の変形係数  $E_0$  より  $k_0=9.3\text{MN/m}^3$  である。複合地盤杭の設計値  $k$  は、改良柱体の設計一軸圧縮強度  $q_{up}=200\text{kN/m}^2$ 、改良率  $a_p=78.5\%$  として式(1)より  $k=47.8\text{MN/m}^3$  と算定される。ただし、改良柱体の施工

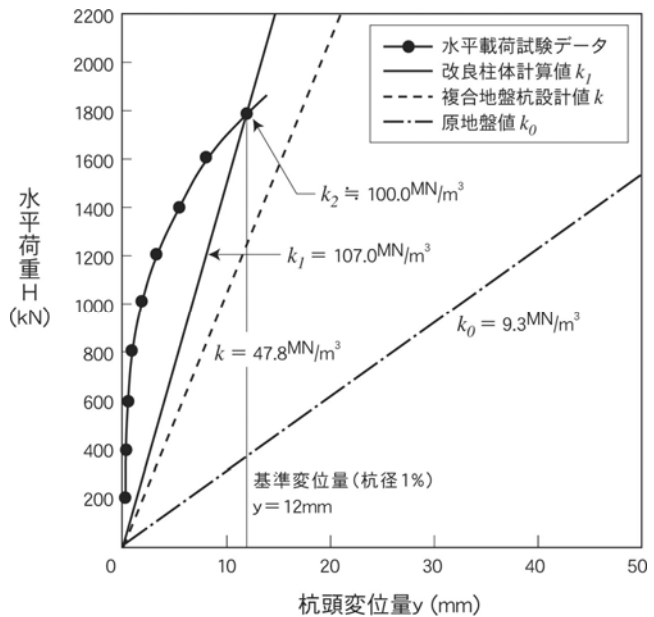


Fig. 4 水平荷重  $H$  と杭頭変位量  $y$  の関係

後材令 28 日の一軸圧縮強度は深さ  $1/\beta$  の平均値で  $q_{up}=408\text{kN/m}^2$  であり、計算値  $k_1$  は  $k$  に対し約 2 倍の  $k_1=107.0\text{MN/m}^3$  が得られた。水平載荷試験の実測値  $k_2$  は、水平荷重  $H$  と杭頭変位量  $y$  の割線勾配の関係より、式(2)に示す林—Chang 式<sup>6)</sup>の線形弾性地盤反力法を用い、杭径 1%の基準変位量  $y=12\text{mm}$  に対応する  $k_2 \doteq 100\text{MN/m}^3$  を得た。

$$y = [e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x)] / 2EI \beta^3 \quad (2)$$

ここに、 $C_1, C_2, C_3, C_4$  : 積分定数、 $x$  : 深さ位置(m) を表す。

Fig.4 に、現場杭水平載荷試験の結果得られた実測の水平荷重  $H$  と杭頭変位量  $y$  の関係および  $k_0, k, k_1, k_2$  を用いて式(6)で算定した直線分布の  $H \sim y$  の関係を示した。その結果、水平載荷試験の実測値  $k_2 \doteq 100\text{MN/m}^3$  は、提案した設計法である計算値  $k_1=107.0\text{MN/m}^3$  に基準変位量相当で一致した。また、複合地盤実測値  $k_1$  を用いて線形弾性地盤反力法で算定した計算曲げ応力についても実測値に対してほぼ合致した。

以上の実杭の現場水平載荷試験の成果は、複合地盤杭工法の提案設計法の妥当性を示しているものと考えられる。

## 5、結論

杭頭部周辺を地盤改良しせん断強度の増加を図る複合地盤杭工法を提案し、一連の検討の結果以下の結論を得た。建設コストの有効活用に向け、同工法の今後の活用が望まれる。

- 1) 複合地盤杭の水平抵抗の影響範囲すなわち必要な改良地盤領域は、工学的な考察より杭特性長  $1/\beta$  の深さから受働土圧の作用勾配  $\theta = (45^\circ + \phi/2)$  で立ち上げた四角体の範囲を設定する。それは、単杭と群杭および杭頭剛結合の固定条件で同様である。
- 2) 複合地盤杭の水平抵抗は、種々の地盤改良工法により増加した改良地盤のせん断強度  $S$  を変形係数  $E$  に変換し水平地盤反力係数  $k$  を設定する。
- 3) 複合地盤杭工法は、杭の諸元が水平抵抗で決定される軟弱地盤や液状化地盤の現場では従来工法に比べて 20~50%の大きな建設コスト縮減効果が得られる有用な工法である。
- 4) 複合地盤杭工法の設計法の妥当性は、実橋を対象とした現場の杭水平載荷試験結果に対する線形弾性地盤反力法から実証された。

## 参考文献

- 1) 富澤幸一, 西川純一 : 深層混合処理工法により形成した複合地盤における杭設計手法, 土木学会論文集 No.799/III-72, 183-193, 2005.
- 2) K.Tomisawa, J.Nishikawa : A design method concerning horizontal resistance of piles constructed in improved ground, 16<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, September 12-16, 2005.
- 3) (独)北海道開発土木研究所 : 泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル, p.71-pp.129. 2002.
- 4) (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.
- 5) 例えば, 松尾稔・富永眞生 : 土圧, pp.20-126, 鹿島出版会, 1980.
- 6) (社)日本道路協会 : 道路橋示方書 IV下部構造編, pp.348-465, 2002.