

複合地盤杭工法の設計施工要領

－大幅なコスト縮減を達成!!－

富澤 幸一* 西本 聡**

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橋梁基礎杭の周辺に、深層混合処理工法などによる複合地盤を形成し、地盤改良により増加したせん断強度を主に杭の水平抵抗として反映する複合地盤杭工法を実用化した。地盤改良後の増加強度を用いて構造物基礎を設計する同様な手法は、従来から種々提案されているものの設計法は確立されていない。そこで、一連の研究による工学的な考察から、複合地盤杭工法を独自の合理的設計法として体系化した。工法の妥当性については、現場実杭試験・遠心力模型実験・静的および動的有限要素解析により検証した^{1), 2), 3)}。その結果、複合地盤杭工法は、特に北海道の特殊土である泥炭性軟弱地盤で実用化することで、建設コスト縮減の有効性が非常に大きいことが確認された。そこで、本技術資料では本工法の実現場への適用に向け、基本的な設計施工法を概ね要領化して示す。なお、設計施工法を決めるに至った検証過程の詳細については、本編では特に示さないため参考文献^{1), 2), 3)}を参照されたい。

2. 設計法

2-1. 基本的な考え方

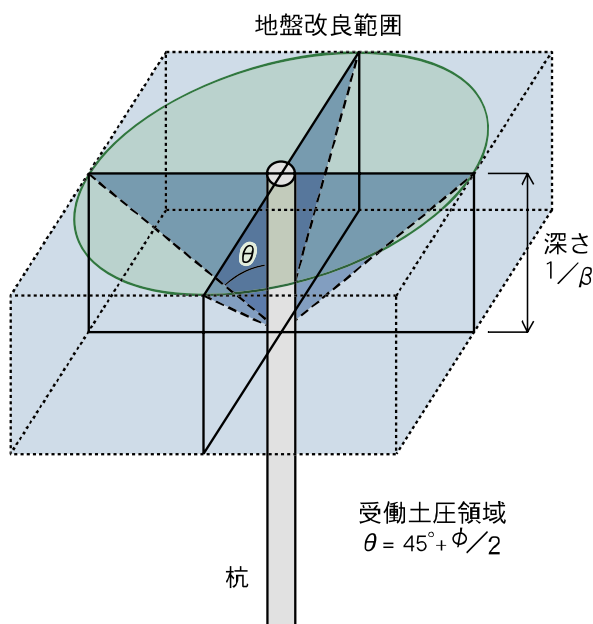
複合地盤杭工法は、一般的な地盤改良工と杭基礎を組み合わせた工法である。杭周辺の地盤改良工法は、盛土部や橋台背面で沈下抑止やすべり安定のために実施される載荷重工法（プレロード工法・真空圧密工法など）・深層混合処理工法（DJM・CDMなど）・サンドコンパクション工法（以下SCP）など、一般的に実績のある全ての地盤改良工法^{4), 5)}を対象とする。深層混合処理工法やSCPでは、改良率に従い地中部に改良柱体を施工し原地盤との複合地盤を形成する。載荷重工法は圧密により現地盤のせん断強度の増加を図る工法であるため複合地盤とはならないが、杭周辺を地盤改良し増加強度を杭設計法に反映する全ての手法

を複合地盤杭工法と総称する。

このうち最も大きな改良強度が期待される工法が深層混合処理工法であるが、改良柱体の設計基準強度は一般的に $q_{up}=200 \sim 500 \text{ kN/m}^2$ 程度である。これはせん断強度に換算して未改良の粘性土系地盤のその約100倍程度と考えられる。これに対して改良体内に施工する杭の剛性は、場所打ち杭の標準基準強度で $2.5 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ 、鋼管杭では $2.0 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ であり、原地盤および改良柱体に対して極めて大きい。また、改良柱体は必ずしも均質ではなく強度のばらつきがみられることが多い。このため、種々の工法で杭周辺に施工された改良地盤は、杭と一体の構造物と考えるのは適当ではなく、あくまでも地盤（複合地盤）として扱うことを前提とする。

2-2. 杭水平抵抗と必要地盤改良範囲

杭の水平抵抗は、作用力に対し釣り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は極限平衡状態を保つ⁶⁾。このため、杭に水平力が作用した場合の水平抵抗の範囲として、土の極限状態時の崩壊到達範囲である、くさび状の破壊角で表される受働土圧⁷⁾の領域が設定される。そこで、複合地盤杭の水平抵抗の影響領域すなわち必要な地盤改良範囲を、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）で立ち上げた逆円錐形の領域とする。ただし、複合地盤の性状は、改良される原地盤の強度によりばらつき設計時に地盤改良後のせん断抵抗角 ϕ を的確に評価することが困難であるため、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設定する。一般には、軟弱地盤ではせん断抵抗角 $\phi \approx 0$ として扱われる。この領域は図-1に示すように逆円錐形となるが、実際の施工ではこのような形状の地盤改良は難しいため、地盤改良の範囲は対象領域を含む四角状とする。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、杭頭結合の固定条件による改良範囲の変化はない。



図－１ 複合地盤杭の水平抵抗範囲

2－3. 水平地盤反力の設定法

杭の水平抵抗は、地盤の変形係数 E を用い、(1) 式⁸⁾で算定される水平方向地盤反力係数 k で決定する。そのため、改良地盤に施工される杭の設計では、増加した地盤せん断強度 C の効果を地盤の変形係数 E の増加の度合として評価する必要がある。

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

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

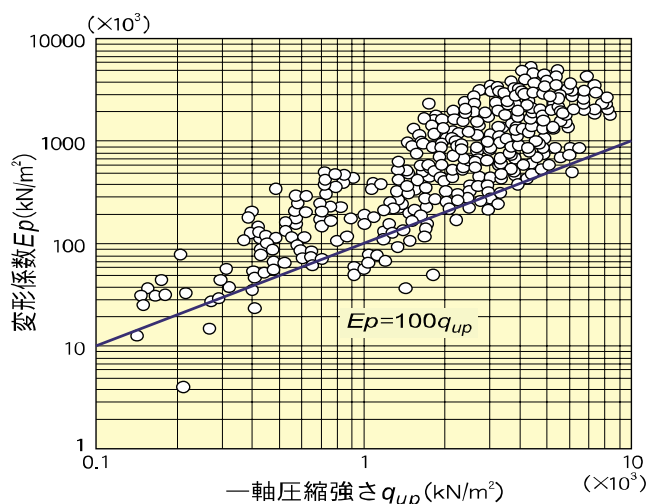
以下に、代表的な地盤改良工法別の地盤改良で増加した地盤の変形係数地盤 E の算定手法を示す。

(1) 深層混合処理工法

深層混合処理工法で改良柱体を施工し複合地盤を形成した場合、複合地盤のせん断強度 C は原地盤強度と改良柱体の強度を改良率に従い合成した (2) 式^{4), 5)}で算定される。

$$\begin{aligned} C &= C_p \cdot a_p + \alpha_s \cdot C_o (1 - a_p) \\ C_p &= q_{up}/2, \quad C_o = q_{uo}/2, \quad a_p = A_p/A \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 C ：複合地盤のせん断強度 (kN/m^2)、 C_p ：改良柱体のせん断強度 (kN/m^2)、 C_o ：原地盤のせん断



図－２ 改良体圧縮強度と変形係数（粘性土）⁵⁾ に加筆

強度 (kN/m^2)、 α_s ：破壊ひずみ低減率、 a_p ：地盤改良率、 q_{up} ：改良柱体一軸圧縮強度 (kN/m^2)、 q_{uo} ：原地盤一軸圧縮強度 (kN/m^2)、 A_p ：改良柱体断面積 (m^2)、 A ：改良柱体一本当たりの分布面積 (m^2) である。改良柱体のせん断強度 C_p は、(2) 式に示すように改良柱体の一軸圧縮強度 q_{up} と $C_p = q_{up}/2$ の関係にある。また、改良柱体の一軸圧縮強度 q_{up} と変形係数 E_p は、例えばセメント系固化工材で粘性土系地盤を改良した場合に $E_p = 100 q_{up}$ の関係式⁵⁾ (図－２) など、改良する原地盤の性状別に比例的な関係を示すことが知られている。

そのため、複合地盤の変形係数 E は、せん断強度 C の比と同等と考えることができる。提案する設計法では、それらの関係に基づき複合地盤の変形係数 E を複合地盤のせん断強度 C と同様に扱うこととする。その結果、複合地盤の変形係数 E は (3) 式で示すように改良率 a_p で合成した改良柱体の変形係数 E_p と原地盤の変形係数 E_o の和で算定される。

$$E = E_p \cdot a_p + \alpha_s \cdot E_o (1 - a_p) \quad (3)$$

ここに、 E ：複合地盤の変形係数 (kN/m^2)、 E_p ：改良柱体の変形係数 (kN/m^2)、 E_o ：原地盤の変形係数 (kN/m^2) である。

(2) 載荷重工法

プレロードや近年施工例が多い真空圧密工法などの載荷重工法は、圧密後の地盤せん断強度 C は (4) 式⁵⁾により算定される。

$$C=C_o+\Delta C=C_o+m \cdot \Delta P \cdot U \quad (4)$$

ここに、 C ：圧密地盤のせん断強度（ kN/m^2 ）、 C_o ：原地盤の非排水せん断強度（ kN/m^2 ）、 ΔC ：圧密による増加地盤せん断強度（ kN/m^2 ）、 m ：強度増加率、 ΔP ：地盤内増加応力（ kN/m^2 ）、 U ：圧密度（%）である。

圧密による ΔC を地盤改良により増加した変形係数 ΔE と同等比と評価すれば、改良地盤全体の地盤変形係数 E の算定が可能となる。つまり、(4)式が E の算定式に変換される。その結果、設計時に圧密後の地盤変形係数を概ね設定することが可能となる。

ただし、設計値は強度増加率の設定などにより大きく変化するため、同工区内で試験施工を実施し、孔内水平載荷試験で設計値を照査することが望ましい。

(3) SCP 工法

SCPによる地盤改良では、複合地盤中の杭の水平方向地盤反力係数 k は(5)式^{3), 4)}で砂杭の改良率 a_s に従い直接的に算定される。

$$k=k_s \cdot a_s+k_c \cdot (1-a_s) \quad (5)$$

ここに、 k ：複合地盤の杭の水平方向地盤反力係数（ kN/m^3 ）、 k_s ：砂杭で改良した杭水平方向地盤反力係数（ kN/m^3 ）、 k_c ：砂杭間の原地盤の杭水平方向地盤反力係数（ kN/m^3 ）である。 k_s および k_c は、標準貫入試験の N 値または孔内水平載荷試験による地盤変形係数 E から算定する。SCP工法による砂杭の N 値は概ね10～15程度とされている。

上記手法により、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、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。

なお、前述したように実杭試験などによる同工法の設計施工法の妥当性の検証は参考文献^{1), 2), 3)}による。

3. 施工法

3-1. 施工手順

複合地盤杭工法の現場における施工手順は、まず杭施工位置に地盤改良を施しその後杭を施工する。その際特に、深層混処理工法の場合では、改良柱体が所要強度を発現した後に改良柱体を破壊することの無いように全周回転式掘削機で所定長掘削し、場所打ち杭および鋼管杭（中掘り・プレボーリング）などの既成

杭の施工を行う。また、深層混合処理工法の改良率 a_p は盛土の安定対策で用いられる場合は実績では $a_p=30 \sim 50\%$ 程度^{3), 4)}であるが、複合地盤杭工法では改良地盤中の群杭の平均的な水平地盤反力を確保するため改良率 $a_p=78.5\%$ 以上の接円を適用範囲とする。

複合地盤杭工法は橋梁・擁壁・カルバートなど種々の基礎で活用が可能である。ただし、橋梁基礎で用いる場合は橋台設計で採用することとし、橋脚箇所では、河川内では地盤改良が困難なことや予想される煩雑な動的挙動の理由から現段階では採用しない。また、橋台基礎で採用する場合は、すべり安定・沈下抑止対策として橋台背面で実施する地盤改良工法と連動して実施するのが、施工性と経済性から望ましい。ただし、その際に杭周辺に施工する改良体が橋台背面の改良体の沈下に伴い変状することのないよう、各々の改良体を施工上切り離すよう配慮する。

3-2. 杭周面摩擦力

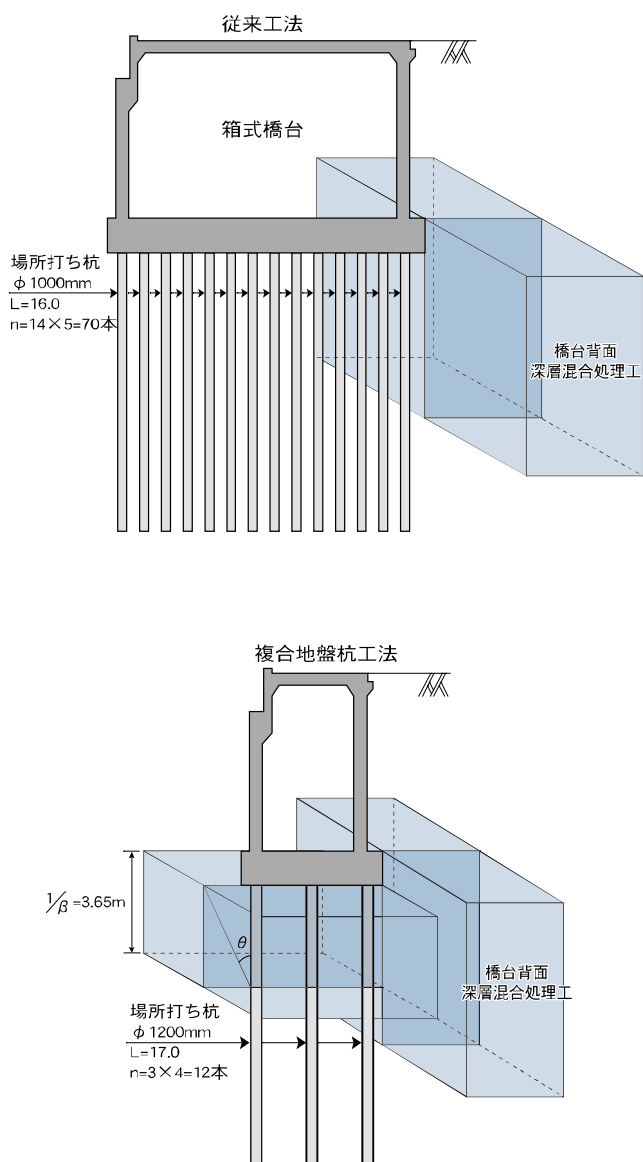
杭の鉛直支持力は、道路橋示方書⁸⁾に従い改良地盤内の杭周面摩擦力度 f を原地盤が粘性土系地盤であればせん断強度 C より $f=C$ とし、砂質土系地盤であれば N 値から換算し設定する。その設定の妥当性は、実現場の複合地盤杭工法の押込み試験より概ね検証されている⁹⁾。

杭周辺の地盤改良の深さは軟弱地盤・液状化地盤全層を対象に行うことが望ましいが、深さ $1/\beta$ 以下に軟弱層が残る場合には必要に応じて負の周面摩擦力 Nf の照査を行う。

4. 耐震設計法

複合地盤杭の耐震性は、動的2次元有限要素解析および動的遠心模型実験より検証した^{1), 2), 3)}。その結果、耐震上地盤改良範囲は境界に弱層を残すことなく軟弱層全体を対象とすることが望ましいが、一般的な地盤改良深さの設定では現場への実用化において問題ない結果が得られている。

そのため、複合地盤杭工法の地震時設計は、レベル1地震動は震度法、レベル2地震動は地震時保有水平耐力法の一般手法を基本とする¹⁰⁾。ただし、多層系など特殊な地盤性状や地震動レベルが不明瞭な現場条件では、設計時に動的応答解析を実施し複合地盤杭の耐震性を照査する必要がある¹¹⁾。



図－3 従来工法と複合地盤杭工法の形式比較

5. 有用性（建設コスト縮減）

建設コストの有効活用を図るため、複合地盤杭工法を採用した実施事例を示す。対象現場は、北海道開発局管内の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。

同一設計条件における複合地盤杭工法の基礎形式と無対策の従来工法の形式を対比させ図－3に示す。

従来工法の形式では、軟弱地盤の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、橋台の場所打ち杭周辺に

は、橋台背面のすべり安定および側方流動対策工法として実施したと同様に改良柱体の一軸圧縮強度 $q_{up}=200\text{kN/m}^2$ 、改良率 $a_p=78.5\%$ の深層混合処理工法（CDM 工法⁴⁾）を施工している。地盤改良の範囲は、図－1の設定に従い軟弱地盤全層に相当する深さ $1/\beta=3.65\text{m}$ から杭周囲に受働土圧の作用勾配 $\theta=(45^\circ + \phi/2)$ で決められる立方体の範囲としている。その結果、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。この現場では複合地盤杭工法を採用することで、杭周辺の地盤改良費を含めても橋台の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、約45%の大幅な建設コスト縮減効果が得られている。

複合地盤杭工法では、採用する地盤改良工法については水平抵抗の増加効果と地盤改良費から検討し選定する必要がある。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は、複合地盤杭工法を採用することで概ね20～50%の大きな建設コスト縮減効果が可能な結果が得られている。

6. 設計施工要領

複合地盤杭工法の実用的な設計施工要領は以下の10項目に整理される。

基本事項

(1) 複合地盤杭工法は一般的な地盤改良と杭基礎を組み合わせた工法である。複合地盤杭工法は、軟弱地盤・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。同工法の採否は現場条件に応じて構造物予備設計で検討する。

(2) 複合地盤杭工法の杭周辺の改良体は杭一体の構造物ではなく、あくまでも（複合）地盤として扱う。

設計法

(3) 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せん断強度 C および変形係数 E より水平地盤反力として算定する。設定した設計値は、実現場調査で照査することが望ましい。

(4) 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 $\theta = (45^\circ + \phi/2)$ で立ち上げた四角状の範囲を設定する。それは、単杭・群杭および杭頭結合法により変化しない。

- (5) 複合地盤杭の鉛直支持力は、改良地盤内の杭周面摩擦力度 f を原地盤が粘性土系地盤ではせん断強度 C より $f=C$ とし、砂質土系地盤では N 値から換算し設定する。地盤改良部以深に軟弱層が残る現場条件では、必要に応じ負の周面摩擦力を照査する。
- (6) 提案した複合地盤杭設計法の妥当性は、実杭水平載荷試験・遠心力模型実験・有限要素解析解析から検証されている^{1), 2), 3)}。本工法を採用した現場では、杭水平載荷試験を実施し設計地盤反力を検証すべきである。

耐震設計法

- (7) 複合地盤杭の耐震性は、動的2次元有限要素解析より一般的な改良深さでは現場への実用化において問題はない。そのため、複合地盤杭工法の地震時設計は、レベル1地震動は震度法、レベル2地震動は地震時保有水平耐力法の一般手法を基本とする。ただし、基礎の動的挙動が特殊な条件では動的応答解析により境界部の杭耐震性を照査する必要がある。

施工法

- (8) 複合地盤杭工法は地盤改良後の増加強度を杭設計に反映する工法であるため、改良体を破壊することがないように地盤改良後に所定の方法により場所打ち杭および鋼管杭（中掘り、プレボーリング）などの既成杭を施工する。
- (9) 複合地盤杭工法を橋梁で採用する場合には橋台基礎で採用し、（短周期化の懸念があり）耐震性が煩雑となる橋脚では現時点では用いない。橋台基礎で用いる場合には多径間の橋梁でも問題はない。
- (10) 複合地盤杭工法を覆道・擁壁・カルバートなどの橋梁以外の構造物基礎で採用する場合には、橋梁設計施工法に準じることとする。

7. おわりに

建設コスト有効活用の新工法・新技術として複合地盤杭工法を要領化し本技術資料に示した。複合地盤杭工法は、現在まで設計中も含め10現場程度の採用に至っている。

今後、複合地盤杭の耐震設計法マニュアルを策定する予定である。

同工法が現場条件に応じて活用されることで、基礎構造物設計施工法の一助となれば幸いである。

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, pp.183-193, 2005
- 2) Tomisawa, K. and Nishikawa, J.: *A Design Method Concerning Horizontal Resistance of Piles Constructed in Improved Ground*, 16 ICSMCE (第16回国際地盤工学会議), 2005.9
- 3) 富澤幸一、西本聡、三浦清一：複合地盤杭工法の実用的設計施工法、第49回北海道開発局技術研究発表会, 2006
- 4) (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, 2002.3
- 5) (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
- 6) 例えば、横山幸満：くい構造物の計算法と計算例 pp.15-140, 山海堂, 1985
- 7) 例えば、松尾稔・富永眞生：土圧, pp.20-126, 鹿島出版会, 1980
- 8) (社) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅳ下部構造編 pp.348-433, 2002
- 9) 富澤幸一：複合地盤杭の押込み試験による周面摩擦力の検証, 第60回土木学会年次学術報告会Ⅲ-262, 2005
- 10) (社) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅴ耐震設計編 pp.48-118, 2002
- 11) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, pp.21-34, 1993



富澤 幸一 *

寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ
寒地地盤チーム
主任研究員
技術士（建設・総合）



西本 聡 **

寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ
寒地地盤チーム
上席研究員
技術士（建設・総合）