

複合地盤に施工する杭工法の静的および動的設計法

土木研究所 寒地土木研究所 国際会員 富澤幸一
土木研究所 寒地土木研究所 国際会員 西本 聡
北海道大学大学院 工学研究科 国際会員 三浦清一

1. はじめに

軟弱地盤中に杭基礎を設計した場合、許容水平変位量（道路橋では通常 15mm）を確保するために多くの杭本数を必要とし基礎が大規模化する。そこで、軟弱地盤を克服する杭工法として、杭周辺に主に深層混合処理工法による複合地盤を形成し、増加したせん断強度を杭の水平抵抗として反映する合理的な設計法^{1), 2)}を研究開発した。この複合地盤に杭を施工する工法を複合地盤杭工法と称する。同工法を現場条件に応じて活用することで大きな建設コスト縮減が可能となる。また、杭の耐震補強工法としても有用と考えられる。同様な手法³⁾は従来から種々提案されているものの、設計法が体系化されているとは言い難い。

本研究では、杭周辺の複合地盤の改良領域および増加したせん断強度に対する杭の水平地盤反力の設定法を工学的評価から静的設計法として策定した。この静的設計法の妥当性は、実杭の数件の現場水平載荷試験により実証的に確認した。ただし、複合地盤は原地盤に対し剛性の大きい人工地盤となることから、複合地盤の改良深さ、改良幅、改良強度を変化させた動的非線形有限要素法解析によるパラメータスタディで地震動レベルに応じた杭の耐震性能を考察し、同工法の動的設計法を検討した。その結果、同工法の耐震照査フロー（案）を導いた。

2. 複合地盤杭工法の静的設計法

複合地盤における杭の基本的な静的設計法を以下に整理した。

(1) 複合地盤の改良領域の設定

杭周辺の複合地盤の改良領域は、土の極限状態の釣り合いを考慮することで受働破壊の範囲が設定される⁴⁾。つまり、必要な地盤改良領域を杭の水平抵抗の影響範囲とすれば、杭特性長 $1/\beta$ (Characteristics length) の深さから受働すべり面の勾配 $\theta = (45^\circ + \phi/2)$ (ϕ : 土のせん断抵抗角) で立ち上げた逆円錐形を含む 3 次元の四角形を杭周辺に設定することができる (図-1)。これは、モール・クーロンの破壊基準や極限地盤反力法 (Broms⁵⁾, Reeseら⁶⁾) を工学的根拠とする。この際、改良範囲は原地盤強度すなわち現況に対して設定する。

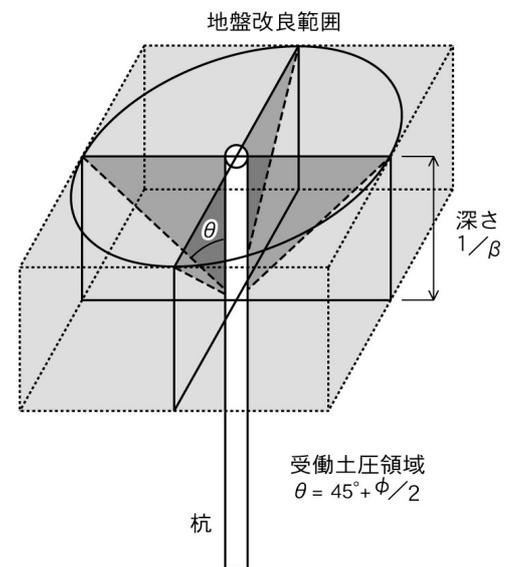


図-1 杭周辺の複合地盤領域

(2) 杭の水平地盤反力の算定手法

杭周辺に複合地盤を形成する複合地盤杭工法では、複合地盤は杭との剛性や力学特性の違いなどから杭と一体の構造物ではなく、あくまでも地盤として扱うことを前提とする。その結果、杭の水平抵抗は作用荷重に対する水平地盤反力として評価される。その際、弾性地盤反力法では複合地盤中の杭の水平地盤反力係数 k は、複合地盤の変形係数 E から (1) 式⁷⁾より算定される。

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

ここに、 k ：杭の水平地盤反力係数（ kN/m^3 ）、 E ：複合地盤の変形係数（ kN/m^2 ）、 α ：水平地盤反力推定係数、 D ：杭径（ m ）、 β ：杭特性値（ m^{-1} ） $\beta = \sqrt[4]{(kD)/4E_y I}$ 、 $E_y I$ ：杭の曲げ剛性（ $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ ）である。

一方、深層混合処理工法で複合地盤を形成する場合、所要強度の改良柱体を地盤内に施工する。その際、複合地盤のせん断強度 S は、改良柱体の強度 S_p と原地盤の強度 S_0 を改良率 a_p に従い合成した (2) 式⁸⁾で算定される。

$$S = S_p \cdot a_p + \alpha_s \cdot S_0 (1 - a_p) \quad S_p = q_{up} / 2, \quad S_0 = q_{u0} / 2, \quad a_p = A_p / A \quad (2)$$

ここに、 S ：複合地盤のせん断強度（ kN/m^2 ）、 S_p ：改良柱体のせん断強度（ kN/m^2 ）、 α_s ：破壊ひずみに対する原地盤強度の低減率、 S_0 ：原地盤のせん断強度（ kN/m^2 ）、 a_p ：地盤改良率（%）、 q_{up} ：改良柱体の一軸圧縮強度（ kN/m^2 ）、 q_{u0} ：原地盤の一軸圧縮強度（ kN/m^2 ）、 A_p ：改良柱体の断面積（ m^2 ）、 A ：改良柱体一本当たりの分布面積（ m^2 ）である。なお、複合地盤の改良柱体の一軸圧縮強度 q_{up} は、一般的な設計基準強度で $q_{up}=200 \sim 500 \text{kN/m}^2$ 程度である。複合地盤中の杭の水平地盤反力を適正に設定するためには、地盤改良により増加した地盤のせん断強度 S の効果を変形係数 E の増加の割合として評価する必要がある。改良柱体のせん断強度 S_p は、(2) 式に示すように改良柱体の一軸圧縮強度 q_{up} と $S_p=q_{up}/2$ 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 は比例的な関係にあることが広く知られており、例えば、粘性土系地盤を地盤改良した場合に $E_p=100q_{up}$ の関係式が提案されている⁸⁾。つまり、複合地盤の変形係数 E はせん断強度 S の増加と同等に扱うことが可能と考えられる。その結果、複合地盤の変形係数 E は、(3) 式に示すように改良柱体の変形係数 E_p と原地盤の変形係数 E_0 を改良率 a_p で合成した和によって算定することができる。

$$E = E_p \cdot a_p + \alpha_s \cdot E_0 (1 - a_p) \quad (3)$$

ここに、 E_p ：改良柱体の変形係数（ kN/m^2 ）、 E_0 ：原地盤の変形係数（ kN/m^2 ）である。この増加せん断強度を考慮した変形係数 E を用い (1) 式より複合地盤の水平地盤反力係数 k を設定することで、静的荷重に対し、未改良の原地盤よりも大きな杭の水平抵抗が確保される。

なお、杭周辺に施工する地盤改良工が他の圧密工法やサンドコンパクション工法などの場合でも、増加したせん断強度から水平地盤反力係数 k に設定し、杭の水平抵抗に反映する手法は同様である。

3. 建設コスト縮減の効果

杭周辺に複合地盤を形成する複合地盤杭工法を実現場に適用した建設コスト縮減効果の事例を示す。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

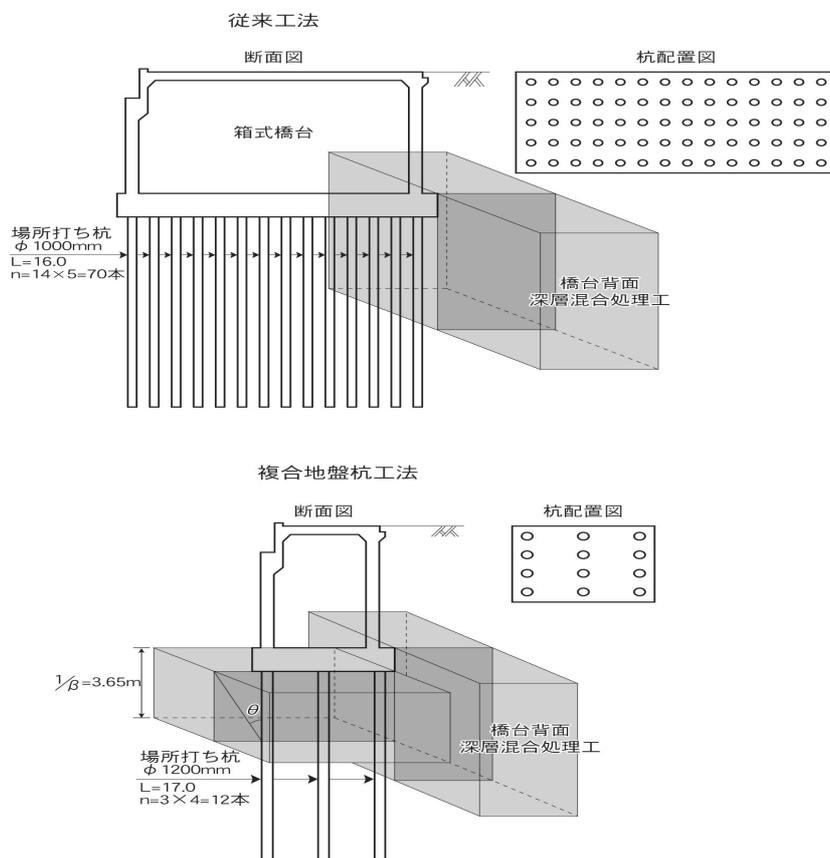


図-2 従来工法と複合地盤杭工法の比較

基礎である。杭周辺には、橋台背面のすべり安定・側方流動対策として実施したと同様に、スラリー系機械攪拌工による深層混合処理工法を施工している⁸⁾。地盤改良の領域は、静的設計法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 $\theta=(45^\circ+\phi/2)$ で設定される四角形の範囲とした。複合地盤下面は $N=10$ 程度の砂層地盤と接する。

現場の同一設計条件における、無対策の従来工法と複合地盤杭工法の基礎形式を対比し、図-2 に示した。従来工法の形式では、軟弱地盤に対する杭の許容水平変位量を確保するため、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、杭周辺に複合地盤を形成する工法では、複合地盤の効果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縮小することが可能となる。その結果、この現場では大幅な建設コストの縮減効果が得られている。

複合地盤杭工法は、北海道内の泥炭性軟弱地盤を対象に現在まで 15 現場（設計中も含む）で適用されているが、同工法を採用することで建設コストを現場条件に応じて 10~45%程度縮減できることが確認されている。

4. 実杭の水平載荷試験による設計検証

静的設計法の妥当性を検証するため、同工法を採用した実杭で水平載荷試験を実施した一事例を示す。対象現場は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 $D=1200\text{mm}$ 、杭長 $L=17\text{m}$ であり、杭周辺には深さ $1/\beta$ を基準とした領域に、設計一軸圧縮強度が $q_{up}=200\text{kN/m}^2$ 、改良率が接円 $a_p=78.5\%$ の深層混合処理工を施している。水平載荷試験の方式は、地盤工学会基準に準拠した多サイクル方式の荷重制御法とした。載荷方法は、試験杭と反力杭の間に油圧ジャッキ、ロードセル、載荷筒を設置し、一方向に静的に載荷した。

原地盤の杭の水平地盤反力係数 k_0 は、 $N=5$ 以下の原地盤の変形係数 E_0 より $k_0=9.3\text{MN/m}^3$ と小さい。これに対し、設計水平地盤反力係数 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) ~ (3) 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 $q_{up}=408\text{kN/m}^2$ であったことから、計算水平地盤反力係数 k_1 は k に対し約 2 倍の $k_1=107.0\text{MN/m}^3$ である。水平載荷試験の実測水平地盤反力係数 k_2 は、水平荷重 H と杭頭変位量 y の関係から、式 (4) に示す弾性地盤反力法により、杭径 1% の基準変位量 $y=12\text{mm}$ に対応する $k_2=100\text{MN/m}^3$ を得た。

$$y = [e^{\beta x} (C_1 \cos \beta_x + C_2 \sin \beta_x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta_x + C_4 \sin \beta_x)] / 2E_y I \beta^3 \quad (4)$$

ここに、 C_1, C_2, C_3, C_4 : 積分定数、 x : 深さ位置 (m) を表す。その結果、水平載荷試験の実測値 $k_2=100\text{MN/m}^3$ は基本設計手法による計算水平地盤反力係数 $k_1=107.0\text{MN/m}^3$ に概ね一致した (図-3)。

以上より、改良領域を有限とし、複合地盤のせん断強度から水平地盤反力を設定する静的設計法の妥当性が検証されたものとする。同工法における実杭の水平載荷試験は数件実施しており、いずれも設計値を確保した安全性を有している。

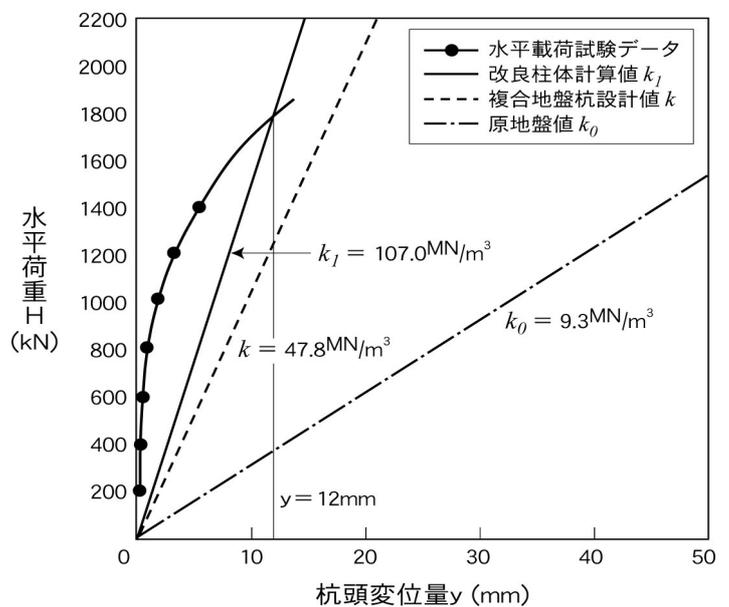


図-3 杭水平載荷試験の水平荷重 H と杭変位量 y

5. 動的設計法

(1) 耐震性能の評価

杭周辺に複合地盤を形成する複合地盤杭工法は、前記したように静的設計法では成立するが、課題となるのは杭頭部にアンバランスな人工地盤を形成することによる杭の耐震性能と考えられる。つまり、複合地盤が静的荷重に対する基本設計法と同様に、地震時に杭に対し反力体の効果を発揮するかを見極める必要がある。

先に、遠心場加振実験および動的有限要素法（等価線形法）で複合地盤中の杭の動的挙動を検証した⁹⁾。その結果、杭周辺の複合地盤により地震時に杭変位および杭ひずみを一定量抑制する効果が確認されている。このことは、同工法が杭の耐震補強工法としても有効であることを示している。ただし、強度差をもつ複合地盤と未改良地盤の境界条件に留意する必要があることなどが明らかとなった。

(2) 動的非線形有限要素法によるパラメトリックスタディ

複合地盤における杭の耐震性能を詳細に検討するため、複合地盤の改良深さ、改良幅、改良強度を種々に変化させた動的非線形有限要素法解析によるパラメトリックスタディを実施した。現場モデルは、検討成果の共通性を考慮し、実際に複合地盤杭工法を採用した軟弱地盤上の橋台基礎とした。杭は場所打ち杭（杭径 $D=1200\text{mm}$ 、杭長 $L=13\text{m}$ 、杭列 $n=3\times 5=15$ 本）を選定している。杭周辺には深層混合処理工法による複合地盤を形成している。複合地盤の改良範囲は基本設計手法に従い、改良深さを杭特性長 $1/\beta=7.0\text{m}$ とし、改良幅は地盤のせん断抵抗角 $\phi=0$ より受働土圧領域に相当する改良幅 $=7.0\text{m}$ とした。複合地盤の改良率は接円の $a_p=78.5\%$ 、改良柱体の一軸圧縮強度は $q_{up}=400\text{kN/m}^2$ である。パラメトリックスタディは、複合地盤の改良強度を $q_{up}=400\text{kN/m}^2$ を基準値に 200kN/m^2 と 800kN/m^2 に変化させ、改良範囲については杭特性長 $1/\beta$ を基準とし改良深さを $0.5/\beta$ と $1.5/\beta$ 、改良幅の受働土圧領域を 0.5 倍と 1.5 倍としたケースで解析した。レベル1地震動とレベル2地震動を対象に、それぞれ28ケースの全56ケースの解析を行った¹⁰⁾。

動的非線形有限要素法解析では、事前に未改良地盤で3次元解析と奥行き幅を種々変化させた2次元解析を実施し杭挙動を対比した。その結果、以降のパラメトリックスタディは杭の並進、回転応答および変形状の相関が概ね一致したフーチング幅を奥行きとする2次元動的非線形有限要素法解析によった。

解析モデルでは、コンクリート標準示方書に従い杭と地盤の両者に非線形性を考慮した構成則を用いた。全応力解析とし、地盤要素の偏差応力-偏差ひずみ関係に対し履歴減衰則を適用した¹¹⁾。

解析の結果、遠心場加振実験の結果と同様に、複合地盤を杭周辺に施すことで、複合地盤無しの場合に対し

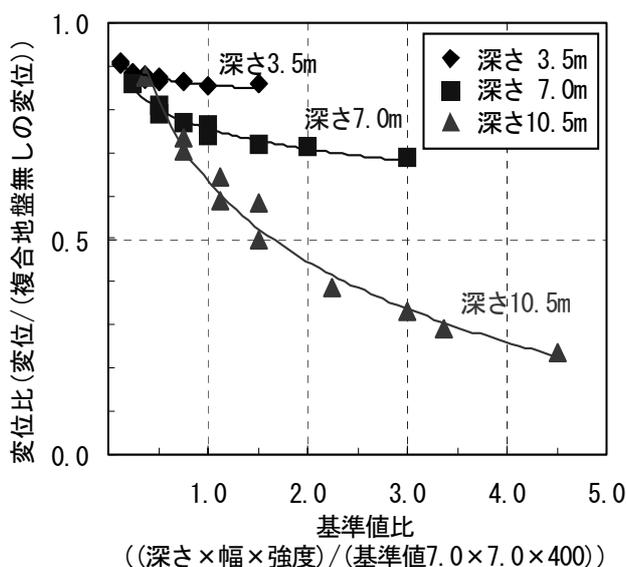


図-4 基準値比と変位比（レベル2地震動）

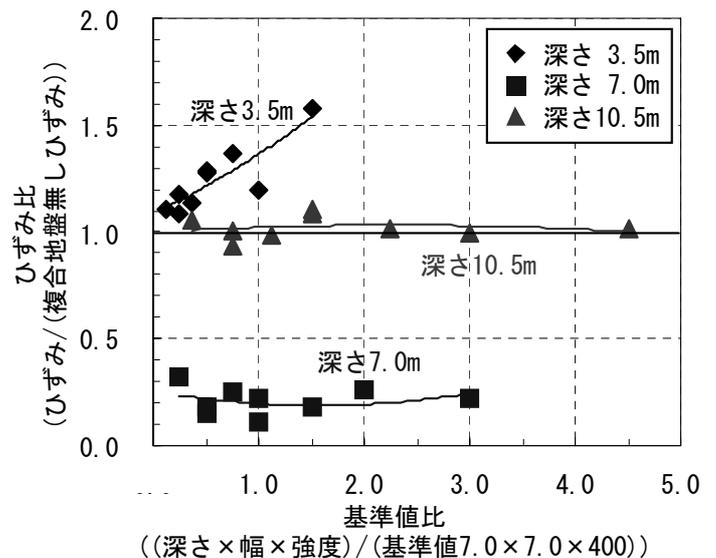


図-5 基準値比と境界面杭ひずみ（レベル2地震動）

地震時の杭変位、杭ひずみ、地盤変形が抑制され耐震性が向上する傾向が確認された。その際、レベル 1 地震動では杭の非線形化が生じないのに対し、レベル 2 地震動では全体の変形が顕著となった¹²⁾。

複合地盤の改良深さ、改良幅、改良強度の 3 つのパラメータが杭の動的力学挙動に与える影響を相互に検討するため、3 つの積（深さ×幅×強度）をそれぞれの基準値の積（基準深さ 7.0m×基準幅 7.0m×基準強度 400kN/m²）で除した値を基準値比として、以下に検討した¹³⁾。この際、基準値比の増加はパラメータの増加を意味する。

代表的結果として、基準値比と複合地盤の有無の変位比の関係を改良深さ別に整理した。この結果、改良深さと杭変位には一定の相関が認められた。レベル 1 地震動では同一の基準値比では改良深さによらず概ね同一の変位比となった。それに対し、図-4 に示すようにレベル 2 地震動では改良深さと相関性が強く、同一の基準値比でも改良深さによって変位比が大きく異なる傾向を示している。なお、改良幅と改良強度で同様な整理をした場合、それぞれの増加により杭変位が微減するが明瞭な傾向は認められていない。

次に、複合地盤と未改良地盤の境界面の杭ひずみの発現に注目した。その結果、等価線形法の検討結果と同様に、境界部で杭のせん断力が卓越する傾向が認められたが、その値は杭頭部以下で許容応力内であった。レベル 2 地震動における改良深さ別の基準値比と杭ひずみの関係を図-5 に示した。図によれば、ひずみ比は改良深さと明瞭な相関が認められる。この際、改良深さが浅い場合は、境界面の杭ひずみを必ずしも減少させることは出来ないことを示唆している。ただし、改良深さが深い場合は複合地盤無しの場合と大きな差異は無く、また、改良深さ 1/β の場合で杭ひずみは大きく減少する結果である。これは、杭が複合地盤全体の変形モードの影響を強く受けるためと推察される。

(3) 耐震照査フロー

動的非線形有限要素法解析の結果、複合地盤中の杭の動的力学挙動は、パラメータ（改良深さ、改良幅、改良強度）の変化、特に改良深さに大きな影響を受け、複合地盤全体の変形特性に支配されると考えられた。そのため一連の考察より、複合地盤杭工法の動的設計法として、図-6 に示す耐震照査フロー（案）を提案する。

すなわち、複合地盤のパラメータは 1/β を基準とするものの、杭の耐震性能については、震度法、地震時水平保有耐力照査法¹⁰⁾の静的解析のみでなく、動的解析法を主体とし詳細に照査することとする。本フロー（案）に従った設計を行うことで、同工法における杭の耐震照査法が成立するものとする。

6. 結論

本研究から得られた知見は、概ね以下のように要約される。

(1) 軟弱地盤を克服する一工法として、杭周辺に複合地盤を形成し、増加したせん断強度を杭の水平抵抗として反映する設計法を研究開発した。この複合地盤杭工法を現場条件に応じて活用することで 10~45% の大きな建設コスト縮減が可能である。

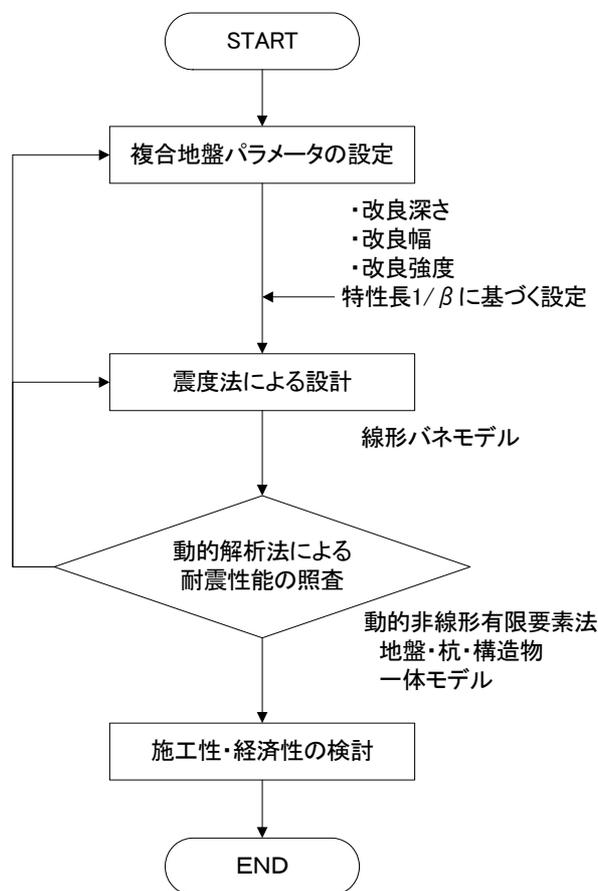


図-6 複合地盤杭の耐震照査フロー

- (2)実杭の現場水平載荷試験より、複合地盤中の杭の水平地盤反力を改良後の増加せん断強度から設定し、改良範囲を深さ $1/\beta$ から受働すべり面の勾配 $\theta = (45^\circ + \phi/2)$ で立ち上げた領域とする静的設計法の妥当性を確認した。
- (3)レベル 1 およびレベル 2 地震動を用いた動的非線形有限要素法解析から、杭周辺に複合地盤を形成することで地震時の杭変位、杭ひずみ、地盤変形が抑制される効果を確認した。また、パラメータスタディの結果、杭の動的力学挙動に改良深さが大きく影響することが明らかとなった。ただし、境界面の杭ひずみは複合地盤全体の変形モードの影響を受けるなど挙動は煩雑となる。そのため、複合地盤中の杭の動的設計法として、震度法、地震時保有水平耐力照査法の静的解析以外に、動的解析法が有効と考えられた。

7. おわりに

本論文では、建設コスト削減のための軟弱地盤対策工の杭工法として、橋台や橋脚基礎の杭周辺に複合地盤を形成する複合地盤杭工法を紹介し、その静的設計法の妥当性および有用性の検証、さらに動的設計法を検討した。その結果、地震動レベルに応じた動的非線形有限要素法解析の成果より同工法の動的設計法として耐震照査フロー（案）を導いた。

杭設計施工法において、同工法を合理的な軟弱地盤対策工さらに耐震補強工法の一つとして要領化させることで、今後、実現場に有効活用されていくものとする。

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) Kouichi Tomisawa and Jun'ichi Nishikawa : A design method concerning horizontal resistance of piles constructed in improved ground, *16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.2187-2192, 2005.
- 3) 例えば、前田良刀・緒方辰男・除光黎・平井卓：地盤改良複合基礎の開発とその支持力特性、土木学会論文集 Vol.868, VI-52, pp.91-107, 2001.
- 4) 例えば、赤井浩一：土質力学、pp.124-149, 1997.
- 5) Broms, B. B. : Lateral resistance of piles in cohesive soils, *Proc., ASCE*, Vol. 90, SM(3), pp.27-63, 1964.
- 6) Reese, L. C., Cox, W. R. and Koop, F. D. : Analysis of laterally loaded pile in sand, *Proc., Offshore Technology Conference*, Houston, TX, OTC2080, 1974.
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書 IV 下部構造編, pp.348-433, 2002.
- 8) 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.
- 9) Kouichi Tomisawa and Seiichi Miura : Mechanical behavior of pile foundation constructed in composite ground and its evaluation, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.5, 2007.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.4-118, 2002.
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書耐震性能照査編, pp.107-112, 2002.
- 12) 富澤幸一、三浦清一：改良地盤における杭の耐震性能の検討、構造工学論文集 Vol.53A, pp.1149-1156, 2007.
- 13) 富澤幸一、三浦清一、渡辺忠明：複合地盤の改良範囲および改良強度が杭の地震時挙動に及ぼす影響、土木学会論文集、Vol.53, No.1 / C, pp.183-193, 2007.