複合地盤における杭の耐震性能の評価法[†]

富澤 幸一* 三浦 清一**

Method of Evaluating the Seismic Performance of Piles in Composite Ground

by

Koichi TOMISAWA* and Seiichi MIURA**

As a foundation engineering technique to deal with soft ground, a rational design method involving the formation of composite ground around piles (mainly using the deep mixing method) and reflecting the increased shear strength as the horizontal resistance of piles was studied and developed. The result of combining piles and composite ground is referred to as the composite ground pile foundation. The scope of improvement for composite ground around piles is set as a range raised to the working gradient of passive earth pressure from a characteristic length of $1/\beta$ according to engineering theory. The horizontal resistance of piles is designed by converting the shear strength of composite ground into the modulus of deformation and using the elastic subgrade reaction method. The validity of the design method was confirmed empirically through an on-site horizontal loading test using actual piles. In addition, the dynamic mechanical behavior of piles and composite ground with this method in response to large-scale earthquake motion was verified through a centrifugal excitation test. The results confirmed that piles and composite ground maintained their soundness and displayed the required subgrade reaction under earthquake conditions. Dynamic nonlinear finite element analysis was also conducted on an actual site with this method as a model to confirm that pile displacement and strain were controlled and that the seismic performance of the foundation was improved by forming composite ground around piles. As it was possible to summarize basic data on the validity of this method, plans are now under way to develop guidelines for its effective use on actual sites.

Key words : Pile, Soil improvement, Load test, Centrifuge model test, Coefficient of subgrade reaction, Earthquake resistance

1 緒言

軟弱地盤を克服する基礎の工法として、杭周辺に主に固結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設計法に反映する合理的な手法^{1), 2)}を研究開発した。杭と複合地盤を組み合わせる本工法を複合地盤杭基礎と称する。本工法は、杭諸元が水平抵抗で決定する現場条件では約10～45%の大きな建設コスト縮減が可能な合理的手法となる。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を工学的検討から設定する。¹⁾その設計手法の妥当性は、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。²⁾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、本報では、大規模地震動に対する杭の動的挙動や複合地盤の健全性を遠心力加振実験で検証した。また、現行設計法³⁾である震度法・地震時保有水平耐力法、さらに動的非線形有限要素法解析により杭の耐震性能を照査した。

2 複合地盤杭基礎の静的設計法

2・1 複合地盤の設定領域

杭周辺の複合地盤の領域は、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、必要な地盤改良の領域を杭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次元範囲を設定することができる (Fig. 1)。これは、モール・クーロンの破壊基準や極限地盤反力法 (例えば、Broms,⁵⁾ Reese ら⁶⁾) を工学的根拠とする。

Fig. 1 Design range of composite ground around piles.

[†] 原稿受理 平成 21 年 4 月 30 日 Received Apr. 30, 2009 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

* (独)土木研究所寒地土木研究所 〒062-8602 札幌市豊平区平岸一条, CERL, PWRI, Toyohira-ku, Sapporo, 062-8602

** 北海道大学大学院工学研究科 〒060-8628 札幌市北区北十三条西, Graduate School of Eng., Hokkaido Univ., Kita-ku, Sapporo, 060-8628

2・2 杭の水平地盤反力の算定法

杭周辺に複合地盤を形成する複合地盤杭基礎では、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設計上の前提とする。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 から式 (1)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 ：水平地盤反力係数推定に用いる係数、 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。なお、水平地盤反力係数の推定係数 α の設定法は土質試験や現場調査法別で異なるが、現行設計では地震時/常時 = 2 の関係とされている。⁷⁾

一方、固結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 に従い合成した式 (2)⁸⁾で算定される。

$$S = S_p \cdot a_p + \alpha_s \cdot S_0 (1 - a_p) \quad (2)$$

$$S_p = q_{up}/2, \quad S_0 = q_{u0}/2, \quad a_p = A_p/A$$

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。この際の低減率 α_s は概ね $1/2 \sim 1/3$ 程度でその影響は小さいことから実務では考慮しないのが通常である。なお、複合地盤の改良柱体は接円以上の施工とし、一軸圧縮強度 q_{up} は一般的な設計基準強度である $q_{up} = 200 \sim 500 \text{kN/m}^2$ とする。

複合地盤杭基礎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、式 (2) 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 の増加と同等と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、式 (3) 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、式 (1) 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。

3 実杭の水平載荷試験

複合地盤杭基礎の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。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⁹⁾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、 $N \approx 5$ 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 の関係を考慮し、式 (4) に示す弾性地盤反力法の算定式により、杭径 1% の基準変位量 $y = 12 \text{mm}$ 相当に対応する $k_2 \approx 100 \text{MN/m}^3$ を得た。

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

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 $k_2 \approx 100 \text{MN/m}^3$ は静的設計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 (Fig. 2)。

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複合地盤杭基礎の静的設計法の妥当性が検証されたものとする。この際、杭と改良柱体の接合も微小変形内で問題ないことが分かった。

Fig. 2 Horizontal load H and pile displacement y of the horizontal pile loading test.

本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。¹⁾

4 遠心力加振動実験

複合地盤基礎の耐震性をより詳細に検討するため遠心力加振実験で検証した。実験では大規模地震動に対する杭挙動や複合地盤の健全性に注目した。

4・1 実験概要

遠心力模型実験は、Fig. 3に示す1/50の縮小模型を用い50Gの遠心加速度場における複合地盤杭基礎の静的水平載荷実験および動的加振実験とした。模型杭は外径10mm、厚さ0.2mm、杭長400mmのスチール製パイプとした。原地盤は、泥炭地盤を想定して乾燥重量比1:1のピートモスとカオリン粘土の混合材料で、初期含水比 $W = 300\%$ の飽和地盤を作成した。杭周辺の改良柱体は

(a) Static horizontal loading test

(b) Dynamic excitation test

Fig. 3 Configuration of the centrifuge model test and instrument arrangement.

接円配置 (改良率 $a_p = 78.5\%$) の複合地盤とし、所定の軸圧縮強度 $q_{up} = 200\text{kN/m}^2$ の改良柱体を事前に養生し、原地盤に挿入して複合地盤を形成した。加振実験は、レベル2相当の高レベル大規模地震動¹⁰⁾を想定し実物換算最大振幅約800galの正弦波を入力波形とした。

4・2 実験結果

4・2・1 静的水平載荷実験 原地盤 (泥炭地盤) と改良柱体を設置した複合地盤において、杭の静的水平載荷実験を実施した。実験から得られた載荷曲線の初期接線勾配 (P/Δ) とそれぞれの地盤弾性係数 E を Table 1 に示す。地盤弾性係数 E は、原地盤はベンダーエレメント試験¹¹⁾より算定し、複合地盤は式 (3) より改良柱体と原地盤を改良率 a_p で合成し算定した。Table 1 によれば、原地盤に対して、複合地盤の水平抵抗に相当する P/Δ と地盤弾性係数が約5～7倍程度大きくなっていることが分る。これより前記した実杭の水平載荷試験結果と同様に、複合地盤の杭に対する反力効果が確認された。同時に、地盤の水平抵抗が地盤剛性に支配されることが明らかとなった。

一方、レベル2地震動加振後の複合地盤杭基礎の静的水平載荷実験を行った結果、水平地盤反力係数を表す載荷曲線の初期接線勾配 (P/Δ) が800kN/mとなり、レベル2地震動の加振履歴により1割程度減少する結果となった。これは、加振履歴により杭周辺の改良柱体と原地盤に生じた緩みによるものと考えられる。

4・2・2 動的加振実験による杭応答特性 複合地盤に設置した杭に対してレベル2相当の高レベル地震動による加振を行う前後に、入力周波数を変化させた微小レベル地震動 (実物換算加速度振幅20gal) による加振を行い、加速度に対するそれぞれの杭の伝達関数を求めその応答特性を確認した (Fig. 4)。その結果、高レベル地震動による加振を行う前に得られた杭の固有周波数が0.85Hzであるのに対して、高レベル地震動による加振後の杭の固有周波数が0.75Hzとなり、杭周囲部の複合地盤の剛性が大きく変化しないことが確認された。

4・2・3 高レベル地震動加振 レベル2相当の高レベル地震動による加振前後の杭周辺の複合地盤の状況を Fig. 5 に示した。写真および解体前後の検証により、大規模加振に対し杭の特異な変形や改良柱体の損傷はなく健全であることを確認した。そのため、高レベル地震動に対し杭および改良柱体は問題なく、地震後も本工法では所要の地盤反力が発揮されるものと考えられる。

Table 1 Value found by the static horizontal loading test P/Δ .

experiment case	P/Δ (kN/m)	elastic modulus of the ground E (kN/m ²)	remarks
original ground	130	$E=3420$	bender element test
composite ground	870	$E=16440$	(3)eq.
ratio	6.7	4.8	composite ground / original ground

Fig. 4 Variation in the response and transfer function of piles before and after high-level excitation.

(a) Before excitation

(b) After excitation

Fig. 5 Status of composite ground before and after excitation with high-level earthquake motion (800gal) (Tangent circle arrangement of improved columns).

さらに、大規模地震における改良体の健全性を確認するため、全面改良による複合地盤を対象に高レベル地震動による加振実験を行った。入力地震動は、実物換算加速度振幅 1500gal 相当の正弦波とし、連続して5回の加振を行った。その結果、接円配置の結果と同様に加振前後の杭と改良体に大きな変状はなく、現実には発生する確率が極めて低い高レベル地震動を連続加振しても、改良体は健全性を確保することが検証された。

5 動的解析による耐震性能評価

杭周辺に複合地盤を形成する複合地盤杭基礎は、静的設計法では成立するが、課題となるのは杭頭部に部分的な人工地盤を形成することによる動的な耐震性能の評価と考えられる。

そこで、まず本工法を採用した実現場の橋台で、道路橋示方書³⁾に準じ、レベル1地震動を震度法、レベル2地震動を地震時保有水平耐力法により杭を設計した。現場モデルの基礎は、場所打ち杭（杭径 $D = 1200\text{mm}$ 、杭長 $L = 13\text{m}$ 、杭配列 $n = 3 \times 5 = 15$ 本）を用いている。杭周辺には深層混合処理工法による複合地盤を形成した。複合地盤の領域は静的設計法に従い、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 7.0m 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。その結果、道路橋の現行耐震設計の一般的な手法である静的設計法において、複合地盤中の杭はレベル1およびレベル2地震動において支持機構上問題ないことが確認された。¹²⁾

次に、複合地盤が静的設計法と同様に動的解析において、杭に対し反力体の効果を発揮するかを見極めるため、同現場をモデルに、レベル1地震動とレベル2地震動を用いた2次元動的的非線形有限要素法解析を実施し耐震性を照査した。検討モデルは現行耐震設計の静的設計法を実施した現場とした。

解析モデルでは、杭と地盤の両者に非線形性を考慮した構成則を用いた。¹³⁾地盤は全応力解析とし、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。^{14), 15)}また、入力地震動として時刻歴加速度波形のうち、Fig. 6 (a), (b)に示すレベル1およびレベル2の2種類の地震動を用いた。¹⁶⁾

解析では、複合地盤の有無による杭の耐震性能に注目した。Fig. 7 (a), (b)に解析の結果得られた、複合地盤無し・有りのレベル1・レベル2の地震動におけるフーチングの水平変位の時刻歴解析値を示した。この際の変位は杭下端に対するフーチング下面中心の相対変位であり、正が前面側への変位、負が背面側への変位を表す。その結果、レベル1地震動で複合地盤無しの前面側最大変位 21.7mm が改良後は5割の 11.1mm まで減少した。また、レベル2地震動で複合地盤無しの橋台前面側最大変位 172.9mm に対し、改良後は7割程度の 127.6mm に減少している。なお、背面側変位は橋台背面土圧の影響のため減少はしていない。

次に、2次元動的的非線形有限要素法解析で得られたレベル2地震動における複合地盤無しと有りの場合の杭に発生する最大曲げモーメント M と最大せん断力 S の深さ方向分布を Fig. 8, 9に示した。対象としたのは前面側の杭である。図によれば、杭曲げモーメント M は、複合地盤無しで杭頭値 $M = 0.18\text{kN} \cdot \text{m}$ であるのに対し、複合地盤有りでは $M = 0.05\text{kN} \cdot \text{m}$ となり3割程度に減少した。

同様に、せん断力 S も複合地盤無しで杭頭値 $S = 450\text{kN}$ であるのに対し、複合地盤有りでは $S = 120\text{kN}$ と $1/3$ 程度

(a) Acceleration time history of Level 1 earthquake motion

(b) Acceleration time history of Level 2 earthquake motion

Fig. 6 Acceleration time history waveform of input earthquake motion (× is the maximum value of acceleration).

(a) Level 1 earthquake motion

(b) Level 2 earthquake motion

Fig. 7 Time history response of displacement.

Fig. 8 Bending moment of piles.

Fig. 9 Shear strength of piles.

となった。この際、複合地盤有りでは改良境界面でせん断力 S が増加しているが、これは複合地盤無しの杭頭値と同程度で問題ない。

以上の2次元動的非線形有限要素法解析の結果、複合地盤を杭周辺に形成することで、静的設計法と同様に、複合地盤を施さない場合に対して、地震時の杭変位、杭ひずみが抑制され耐震性能が大きく向上することが検証された。¹⁷⁾ これらの耐震性能の検討結果から、複合地盤杭基礎の耐震設計法として、震度法、地震保有水平耐力照査法による従来の静的解析以外に、より詳細な非線形有限要素法などの動的解析が有効と考えられた。

6 ま と め

本論文では、杭周辺に複合地盤を形成する複合地盤杭基礎の静的設計法を策定し、震度法および地震時保有水平耐力法による耐震設計を実施した後、耐震性能を遠心力加振実験および動的非線形有限要素法解析で照査した。一連の検討から得られた知見は、概ね以下のように要約される。

(1) 複合地盤杭基礎の静的設計法は、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。この杭の水平地盤反力の設定法の妥

当性は、実杭の現場水平載荷試験および遠心力模型実験で検証された。また、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、工学的根拠より適正な必要範囲が設定される。

(2) 遠心力加振実験の結果、高レベル地震動 (800gal, 1500gal) に対して、改良柱体が接円配置および全改良の複合地盤杭基礎では、杭の特異な変形や改良体が損傷することはなく健全であることが検証された。また、高レベル加振前後の微小レベル地震動 (実物換算加速度振幅 20gal) による杭の応答特性の検討の結果、杭周囲の複合地盤の剛性が大きく変化することなく、十分な耐震性が確保されていると考えられる。

(3) 複合地盤杭基礎は、現行設計の一般的手法である静的設計法 (震度法および地震時保有水平耐力法も含む) より、地震時の支持機構は問題ないことが検証された。また、複合地盤杭基礎の耐震性能の照査法には、動的応答解析が有効と考えられ、2次元動的非線形有限要素法解析の結果、静的設計法と同様に、複合地盤を施さない場合に対して地震時の杭変位、杭ひずみが抑制され耐震性能が向上することが確認された。

7 おわりに

杭と地盤改良を併用する複合地盤杭基礎の静的設計法を踏まえ、遠心力加振実験を実施し、大規模地震に対して杭および複合地盤の改良体は健全であることを確認した。また、複合地盤中の杭の耐震性能の評価として、動的非線形有限要素法解析を実施した結果、杭は耐震上問題なく、地震力に対して耐震性能が向上した。

今後、これらの基礎資料に基づき試験データをさらに補完し、複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドラインを策定することで、本工法を合理的手法の新技術として実現場に有効活用させていく考えである。

参 考 文 献

- 1) K. Tomisawasa and J. Nishikawa, "A Pile Design Method in Composite Ground Formed by Deep Mixing Method", Journal of the Geotechnical Engineering, JSCE, No.799 / III-72, pp.183-193 (2005).
- 2) K. Tomisawa and S. Miura, "Mechanical behavior of pile foundation constructed in composite ground and its evaluation", Soils and Foundations, Vol.47, No.5 (2007).
- 3) Japan Road Association, "Specifications for Highway Bridges and Instruction Manual - V. Seismic Design", pp.4-118 (2002).
- 4) K. Akai, Soil Mechanics, pp.124-149 (1997).
- 5) B. B. Broms, "Lateral resistance of piles in cohesive soils", Proceedings., ASCE, Vol.90, SM(3), pp.27-63 (1964).
- 6) L. C. Reese, W. R. Cox and F. D. Koop, "Analysis of laterally loaded pile in sand", Proc., Offshore Technology Conference, Houston, TX, OTC2080 (1974).
- 7) Japan Road Association, "Specifications for Highway Bridges - IV. Substructures", pp.348-433 (2002).
- 8) Public Works Research Center, "Deep Mixing Method in Works on Land-Design and Construction Manual", pp.48-148 (1999).
- 9) Japanese Geotechnical Society, "Japanese Geotechnical Society Standards-Method of horizontal loading test of piles and instruction manual", pp.21-52 (1983).
- 10) Railway Technical Research Institute, "Design Standards for Railway Structures and Commentary (Seismic Design)", pp.43-48 (1993).
- 11) T. Kawaguchi, T. Mitachi, S. Shibuya and Y. Sano, "Evaluation of Elastic Shear Modulus G in Laboratory Bender Element Test", Journal of the Geotechnical Engineering, JSCE, No.694/III-57, pp.195-207 (2001).
- 12) K. Tomisawa, S. Miura, T. Watanabe and L. LI, "Earthquake resistance of pile foundations in composite ground through nonlinear numerical analysis", Proceedings of the 29th Japan Society of Civil Engineers Earthquake Engineering Symposium, CD-ROM (2007).
- 13) A. Shawky and K. Maekawa, "Computational Approach to Path-dependent Nonlinear RC/Soil Interactions", Journal of the Geotechnical Engineering, JSCE, No.532/V-30, pp.197-207 (1996).
- 14) H. Okamura and K. Maekawa, "Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete" (1991) Gihodo Shuppan.
- 15) Y. Ohsaki, "Some Notes on Masing's law and non-linear response of soil deposits, Journal of the faculty of engineering", The university of Tokyo (B), Vol.XXXV, No.4, pp.513-536 (1980).
- 16) Japan Society of Civil Engineers, "JSCE Guidelines for Concrete (5)", pp.107-112 (2002).
- 17) K. Tomisawa and S. Miura, "Evaluation of mechanical behavior of the pile foundation in composite ground and verification of its seismic performance", Journal of Structural Engineering, Vol.53A, pp.1149-1156 (2007).