

# 複合地盤の基底条件における杭の耐震性能評価法

富澤 幸一<sup>1</sup>・西本 聡<sup>2</sup>・三浦 清一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>土木研究所 寒地土木研究所 寒地地盤チーム  
(〒062-8602 札幌市豊平区平岸一条三丁目1-34)

E-mail: ko-tomsw@ceri.go.jp

<sup>2</sup>土木研究所 寒地土木研究所 寒地地盤チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸一条三丁目1-34)

E-mail: nishimoto@ceri.go.jp

<sup>3</sup>北海道大学大学院 工学研究科 教授 (〒060-8628 札幌市北区北十三条西八丁目)

E-mail: s-miura@eng.hokudai.ac.jp

軟弱地盤中の杭の水平抵抗の増加を図るため杭周辺に複合地盤を形成する工法において、同工法の耐震設計法の確立に向け、複合地盤の基底層の地盤条件が杭の耐震性能に及ぼす影響を解析的に検討した。一連の2次元非線形有限要素法解析の結果、静的荷重に対すると同様に杭周辺の複合地盤の拘束効果により、レベル1およびレベル2地震動において杭頭変位量が25～30%程度低減され、耐震性能が向上することが確認された。また、杭に対する複合地盤の改良深さは工学的に杭特性長 $1/\beta$ が基本となるが、地震時保有水平耐力法の適応性および地震時に効果的に杭変形を抑制することが可能な複合地盤の基底条件は、概ね砂質土で $N$ 値=15以上、粘性土で $N$ 値=8～10であることが確認された。

**Key Words :** piles, ground improvement, dynamic finite element method, seismic design

## 1. はじめに

軟弱地盤や液状化地盤に施工する杭の頭部周辺に主に固結工法による複合地盤を形成する手法を研究し実用化した<sup>1), 2)</sup>。杭と地盤改良を併用する本工法を複合地盤杭基礎工法と仮称する。本工法では、複合地盤の増加したせん断強度を杭の水平抵抗に反映させることで杭本数・下部工躯体を縮小させ、建設コスト縮減が可能となる。

本工法の静的荷重に対する設計法では、工学的な検討に基づき、杭周辺の複合地盤の改良範囲および改良強度が設定される。すなわち、杭の水平地盤反力を複合地盤の増加したせん断強度  $S$  から算定し、必要な複合地盤領域を杭特性長  $1/\beta$  を指標に杭の水平抵抗の及ぶ範囲に設定する。この設計手法の妥当性は、現場における実杭の静的水平載荷試験および有限要素法による数値解析、さらに遠心力模型実験により検証している<sup>1), 2)</sup>。

一方、同工法の耐震設計法は、地震動レベルや地盤条件に応じた杭および複合地盤の挙動を詳細に照査する必要があるため、動的有限要素法などによる厳密な解析を行うことが望ましい。ただし、同工法の実用化を促進するため、現行の道路橋示方書<sup>3), 4)</sup>に準じた地震時保有水平耐力法の適応性を確認することが求められる。そこで本報では、複合地盤杭基礎

工法の耐震設計法の確立に向け、杭周辺の複合地盤の有無および複合地盤の種々の基底条件別で地震時保有水平耐力法および2次元非線形有限要素法解析を実施し、同工法の耐震性能の評価手法について検討した。

## 2. 複合地盤における杭の静的設計法

まずはじめに、既往の研究で策定した<sup>1), 2)</sup>、静的荷重に対する複合地盤杭基礎工法の基本的な設計法の考え方を以下に整理して示す。

### (1) 杭周辺の複合地盤領域の設定法

杭周辺の複合地盤の改良範囲は、土の極限状態の釣り合いを考慮することで受働破壊の領域が設定される<sup>5)</sup>。つまり、必要な改良範囲を杭水平抵抗の影響領域と考えれば、杭特性長  $1/\beta$  (*Characteristics length*) から受働すべり面の勾配  $\theta = (45^\circ + \phi/2)$  ( $\phi$ : 土のせん断抵抗角)で立ち上げた逆円錐形を含む図-1に示す四角形を設定することができる。これは、モール・クーロンの破壊基準や極限地盤反力法 (Broms<sup>6)</sup>, Reeseら<sup>7)</sup>)を工学的根拠とする。その際、この工法では複合地盤中の杭は群杭としての平均的な水平地盤反力を確保するため、改良率  $a_p$  は接円の78.5%以上を適用範囲とするのが望ましい。

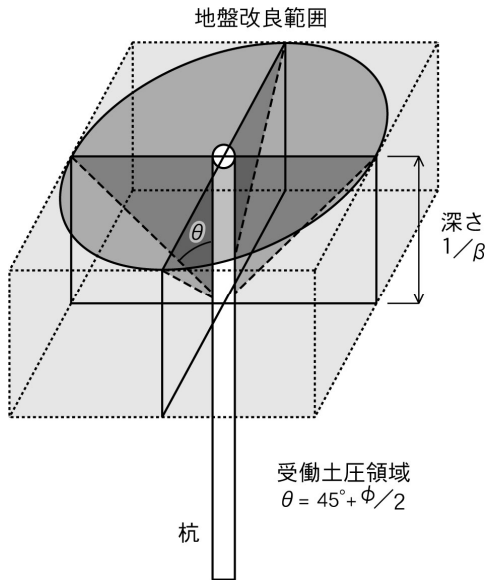


図-1 杭周辺の地盤改良領域

## (2) 杭水平抵抗の設計法

杭周辺を地盤改良する複合地盤杭工法では、複合地盤は杭との剛性の違いやそのバラツキおよび力学特性の差異から杭と一体の構造物ではなく、あくまでも（複合）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扱うことで杭の諸元や地盤性状に応じて式(1)<sup>4)</sup>で算定される。つまり、弾性地盤反力法では杭の水平抵抗の設計は水平地盤反力係数 $k$ により設定される。その結果、式(1)より、複合地盤に施工する杭の水平地盤反力係数 $k$ は、複合地盤の変形係数 $E$ により算定することができる。

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

ここに、 $k$ ：杭の水平地盤反力係数(kN/m<sup>3</sup>)、 $E$ ：複合地盤の変形係数(kN/m<sup>2</sup>)、 $\alpha$ ：水平地盤反力推定に用いる係数、 $D$ ：杭径(m)、 $\beta$ ：杭特性値(m<sup>-1</sup>)である。

一方、固結工法で地盤改良を行う場合、所要強度の改良柱を杭周辺に打設して複合地盤を形成する。その際、複合地盤のせん断強度 $S$ は改良柱体の強度 $S_p$ と原地盤強度 $S_0$ を改良率 $a_p$ に従い合成した式(2)<sup>8),9)</sup>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<sup>2</sup>)、 $S_p$ ：改良柱体のせん断強度(kN/m<sup>2</sup>)、 $\alpha_s$ ：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、 $a_p$ ：地盤改良率、 $q_{up}$ ：改良柱体の一軸圧縮強度(kN/m<sup>2</sup>)、 $q_{u0}$ ：原地盤の一軸圧縮強度(kN/m<sup>2</sup>)、 $A_p$ ：改良柱体断

面積(m<sup>2</sup>)、 $A$ ：改良柱体一本当りの分布面積(m<sup>2</sup>)である。深層混合処理工法では改良柱体の一軸圧縮強度 $q_{up}$ は、一般的に設計基準強度で $q_{up}=200 \sim 500 \text{ kN/m}^2$ 程度としている。

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 $E$ の増加の度合として評価する必要がある。固結工法では、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、粘性土系地盤を改良した場合に $E_p=100q_{up}$ <sup>8)</sup>の関係式が提案されている。

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でき、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が可能と考えられる。

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

ここに、 $E_p$ ：改良柱体の変形係数(kN/m<sup>2</sup>)、 $E_0$ ：原地盤の変形係数(kN/m<sup>2</sup>)である。

この手法より、複合地盤の増加したせん断強度を杭の水平地盤反力として反映することで、静的荷重に対してより大きな杭の水平抵抗が確保される。

ただし、本設計法は静的荷重においては成立するが、地震時の杭挙動は複合地盤全体の変形モードに支配され则认为られる。そのため、同工法の耐震設計法の成立に向け、複合地盤中の杭の耐震性能すなわち複合地盤の地震時の反力効果および複合地盤と基底の未改良地盤の適正な境界条件について、地震時保有水平耐力法と2次元非線形有限要素法解析の対比より解析的に検証した。

## 3. 耐震性能の検討モデル

### (1) 実現場モデルと検討ケース

複合地盤中の杭の耐震性能の検討を実施した現場モデルは、実際に杭周辺に複合地盤杭基礎工法を採用した軟弱地盤上の橋台基礎とした。

橋台基礎の構造図および地盤条件を図-2に示す。橋台位置の地盤柱状は、上層部5.0mに液状化が想定されるゆるい砂層、下層部約5.0mに軟弱なシルトが介在し、支持層を深さ12.5m以深の頁岩基盤としている。杭は場所打ち杭(杭径 $D=1200 \text{ mm}$ 、杭長 $L=13 \text{ m}$ 、杭配列 $n=3 \times 5=15$ 本)を選定している。杭周辺には深層混合処理工法(CDMセメントスラリー系)<sup>8)</sup>による複合地盤を形成している。複合地盤の改良範囲については前節の静的設計法に従い、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 $\phi=0$ とし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 $a_p=78.5\%$ 、改良体の一軸圧縮強度 $q_{up}=300 \text{ kN/m}^2$ である。この設計法による複合地盤中の杭水平地盤反力係数 $k$ は、未改良の原地盤に対し50

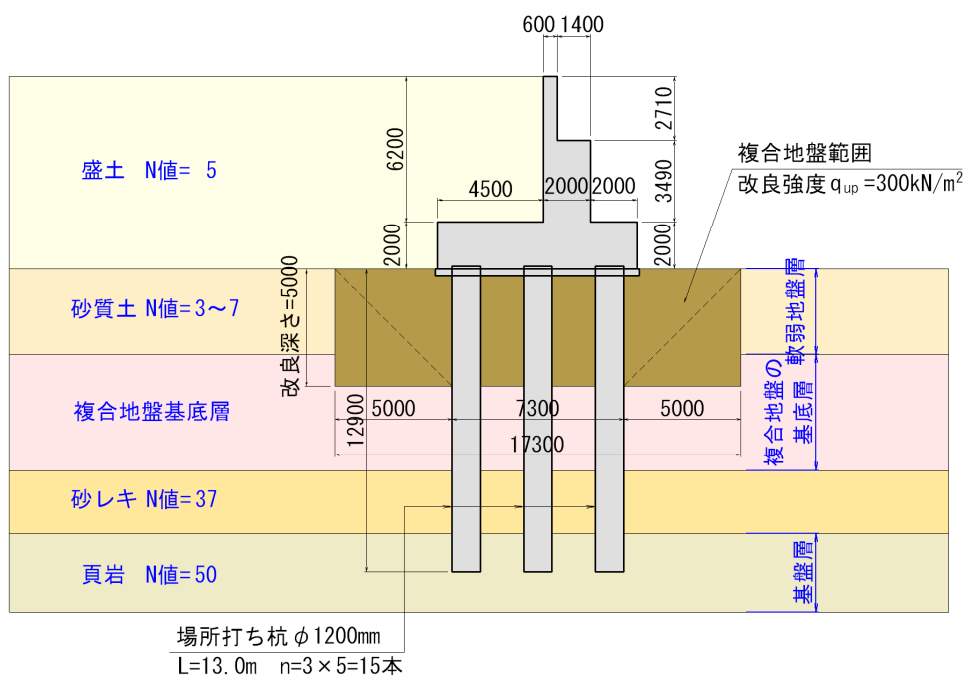
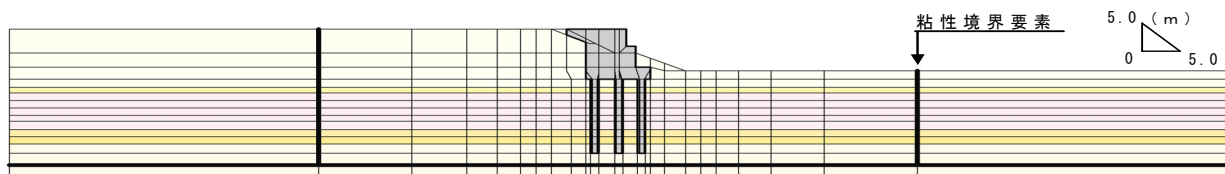
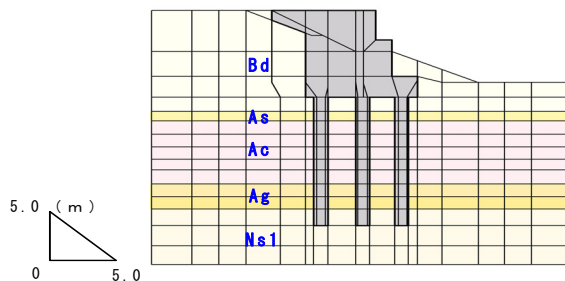


表-1 検討ケース

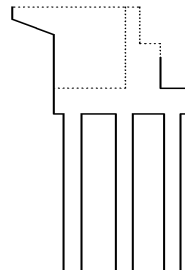
※全ケースに対して複合地盤の有リ無しの場合の検討を行う



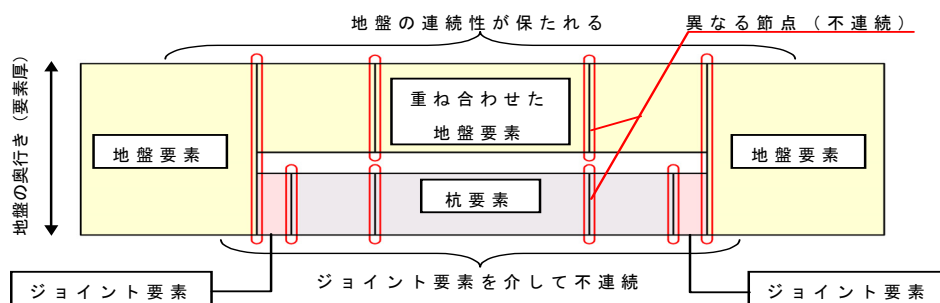
(a) 2次元モデル全体図



(b) 橋台近傍拡大



(c) ジョイント要素



(d) 杭要素と地盤要素の重ね合わせ概念

図-3 2次元非線形有限要素モデル

また、同様のジョイント要素を用い構造物要素モデルと地盤の間の接触・剥離も考慮した（図-3(c)）。図-3(d)は解析モデルの杭近傍を平面的に表した模式図である。断面内の杭と地盤の不連続性をジョイント要素で再現するとともに、同一座標上に配置した異なる節点を構成節点として杭と地盤の要素を重ね合わせた。そうすることで、奥行き方向の杭と地盤の不連続性を擬似的に再現した。なお、橋台躯体は杭要素に支持されている。

地震動による杭や地盤の地震時挙動を精度良く推定するため、杭と地盤の両者に非線形性を考慮した構成則を用いた。杭体 RC 要素に岡村・前川ら<sup>14)</sup>、<sup>15)</sup>による RC の履歴依存型非線形材料構成則を適用した。本構成則には非直交多方向固定ひび割れモデルや鉄筋の座屈モデルなど、鉄筋コンクリートの強非線形領域における適用性も検証されている。これにより、杭部材ではせん断変形が卓越するケースも十分想定されるが、ひび割れ発生以降のせん断変形に対しても評価することが可能となる。また、周囲からの拘束圧に基づく RC の拘束効果も表すことができ、本モデルのように RC 部材が地盤要素に取り囲まれている場合には、周囲からの圧力に基づく拘束効果が考慮される。RC 要素に入力する材料特性値は、コンクリートの設計圧縮強度  $f'_c = 24 \text{ N/mm}^2$ 、引張強度  $f_t = 1.914 \text{ N/mm}^2$ 、鉄筋の設計降伏強度  $f_y = 345 \text{ N/mm}^2$

とした<sup>16)</sup>。フーチングや橋台部分は線形弾性体としてモデル化した。

2次元非線形有限要素法に用いた地盤物性値の単位体積重量  $\rho$ 、変形係数  $E_0$ 、ポアソン比  $\nu$ 、せん断弾性波速度  $V_s$  を地盤調査や力学試験で算定した一般値とした。

また、粘性境界要素は地盤物性値から、式(4)および式(5)で定めた粘性係数  $\mu$  より設定した。

$$\mu_N = \rho \cdot V_p = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} V_s \quad (4)$$

$$\mu_s = \rho \cdot V_s \quad (5)$$

橋台・杭-地盤間のジョイント要素は、引張およびせん断剛性をゼロ（すなわち周面摩擦を無視したことと等価）とし、閉合方向に対しては高い圧縮剛性を与え地盤要素と RC 要素が重ならないように考慮した。なお、杭先端に位置するジョイント要素に限り、杭が  $N$  値=50 の基盤に根入れされているために、要素の開閉方向に高い引張剛性も与え橋台の水平応答に伴う杭の引抜けが生じないように配慮した。

2次元動的非線形有限要素法解析を行う際に考慮する減衰特性は、コンクリート標準示方書<sup>16)</sup>に基づき、材料構成則における履歴減衰のみとした。モデル

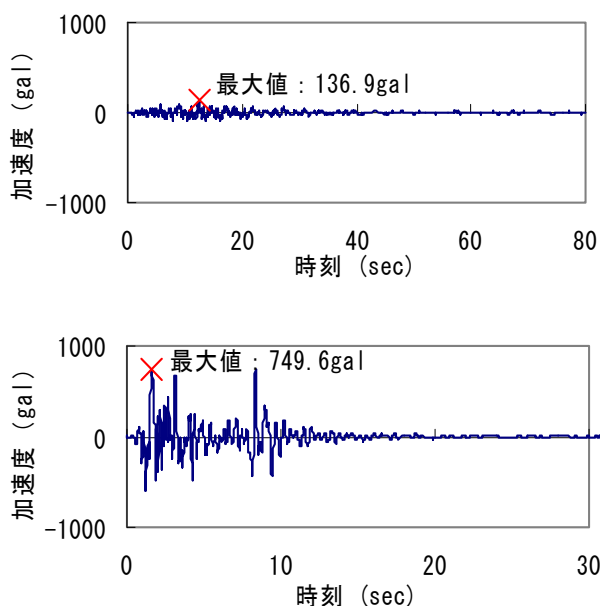


図-4 入力地震動の時刻歴加速度波形

底面・側面に配置した粘性境界要素の逸散減衰を除き、その他の粘性減衰は考慮しない。これは、杭-地盤系の減衰性状を定量的に評価して解析条件に設定することが困難であることから、安全側の応答値を得るよう配慮したためである。

本検討は全応力で解析し地盤要素の偏差応力-偏差ひずみ関係に Ohsaki モデル<sup>17)</sup>の履歴則を適用した。せん断弾性係数  $G_0$  およびせん断強度  $S_u$  は、地盤柱状と標準貫入試験結果から以下の式(6)、式(7)を用いて設定した<sup>17)</sup>。

$$G_0 = 11.76 N^{0.8} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} S_u &= G_0 / 1100 & (\text{砂質土}) \\ &= G_0 / 600 & (\text{粘性土}) \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 $N$ ：標準貫入試験から得られる  $N$  値である。なお、体積変形成分については線形弾性とし繰返しせん断変形に起因するダイレイタンスは考慮されていない。また、変動する拘束圧縮力の変動幅は小さいものとし、拘束圧変動に伴うせん断強度の変化は考慮しない。

境界条件はモデル最下端の節点を全て拘束とし、粘性境界要素外側の自由地盤要素の節点を水平ローラー（鉛直方向自由度を拘束）とした。本解析では、各要素に相応の単位体積質量を与えるがモデル全体の鉛直方向の重力加速度を無視し、橋台自重および桁反力は集中荷重として別途取り扱う。事前に橋台のみの自重解析を行い、得られた杭軸力の初期分担を節点荷重に変換して杭頭部に作用させた。また、桁反力は支承位置節点に集中荷重として作用させ、同じ質量を有する薄い要素を支承位置に貼り付けた。

2次元動的的非線形有限要素法解析における地震波はモデル最底面に基盤波形（2E波）を橋軸方向に入力した。ここでは、土木学会コンクリート標準示方

書耐震性能照査編<sup>16)</sup>における地震動波形を適用した。本地震波は既往の観測記録の加速度応答スペクトルに基づき、距離減衰式を用いて断層直上のスペクトルに変換し、かつ断層の破壊過程を考慮して設定した位相特性の加速度時刻歴波形である。したがって、多様な地震特性を内在する波形であることから、解析効率も勘案しこの1波のみに限定して解析を行うこととした。ただし、地震動の強さによる影響も検討するため、レベル1地震動およびレベル2地震動波形を使用した。レベル1とレベル2地震動の原波を図-4に示す。動的解析に際し、波形の主要動部分（12秒間）を取り出して、Newmarkの $\beta$ 法（ $\beta=0.36$ ）による直接積分を行った。時間刻みは0.01秒である。

## 4. 解析結果

### (1) 地震時保有水平耐力法の適応条件

自然地盤において地震時保有水平耐力法と2次元静的非線形有限要素法解析で得られた杭の水平変位 $\delta$ と水平荷重 $P$ の関係を基底層の地盤条件別に整理し、図-5に示した。ここで、水平荷重は上部工・下部工および背面土の慣性力と地震時土圧の総計であり、杭基礎の水平変位は上部工慣性力作用位置での値である。また、図中には地震時保有水平耐力法における基礎降伏時と応答塑性率3の点を記入している。応答塑性率は、道路橋示方書における橋台基礎の許容塑性率3に対応するものである<sup>3)</sup>。

図によれば、地震時保有水平耐力法による結果は、土質区分や $N$ 値などのパラメータによる差異は比較的小さく、いずれの条件でも概ね同等な関係にある。これに対して、2次元静的非線形有限要素法解析の結果は、パラメータによる差が明確に現れている。また、地震時保有水平耐力法の荷重 $P$ が2次元静的非線形有限要素法解析の荷重の50%程度下方に位置しており、同一の水平変位に対する水平荷重は、地震時保有水平耐力法が2次元静的非線形有限要素法成果の50%程度となっている。すなわち、地震時保有水平耐力法による解析は、2次元静的非線形有限要素法解析よりも大きく安全側の結果を与えており、本モデルの場合は地震時保有水平耐力法で橋台基礎を耐震設計をすることで静的有限要素法の場合よりも安全結果となった。

図-6には、杭周辺に複合地盤が存在する複合地盤杭の解析で得られた杭基礎の水平変位と水平荷重の関係を示した。その他の条件は、図-5と同様である。地震時保有水平耐力法による結果は、パラメータによる差異がほとんど見受けられず、いずれの条件でもほぼ同一の曲線となった。このことは、地震時保有水平耐力法解析では、杭の水平変位に支配的な深度方向の領域が複合地盤の領域内に収まるため、その基底土層の地盤条件に影響されないためと推察される。

これに反して2次元静的非線形有限要素法解析は、自然地盤に比べて複合地盤の場合の方が、パラメー

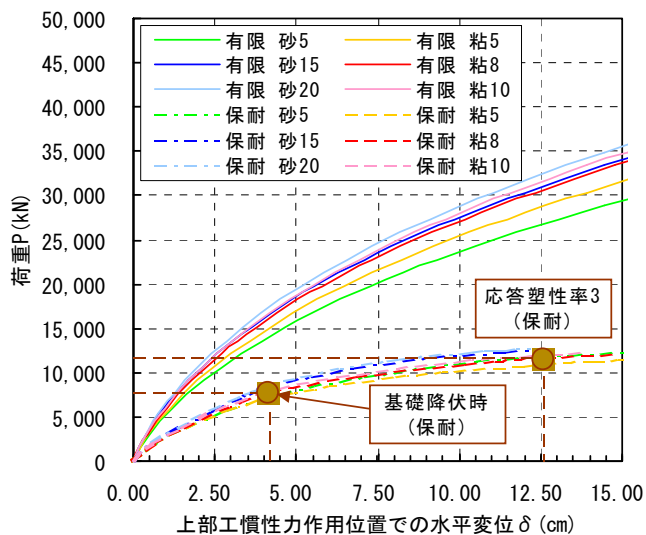


図-5 荷重-変位関係(自然地盤)

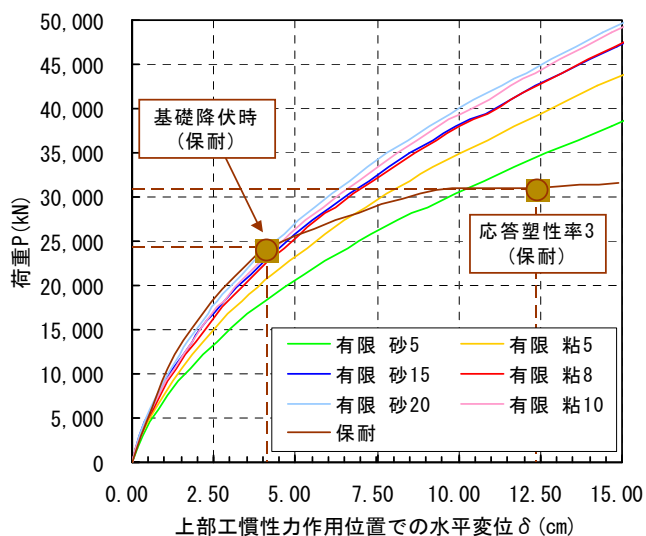


図-6 荷重-変位関係(複合地盤)

タによる差が大きくなっている。つまり、複合地盤内では自然地盤の杭挙動と異なり、複合地盤の基底の地盤条件により解析結果に大きな差異が生じ、かつ地震時保有水平耐力法の解析ではこの差異が評価されない可能性があることを示唆している。したがって、複合地盤杭基礎の耐震設計法は、工法の特長性に配慮した手法を適用することが必要と考えられる。図-6によれば、2次元静的非線形有限要素法解析のうち砂質土の $N=5$ 、粘性土の $N=5$ では明らかに地震時保有水平耐力法の結果を下回る曲線が発現している。よって、この地盤条件においては、地震時保有水平耐力法による耐震性の構造解析を適用することは好ましくない。また、他のパラメータでは、基礎降伏時までの変位において、地震時保有水平耐力法結果をやや下回っているがほぼ同様の曲線となっており、基礎降伏の以降は地震時保有水平耐力法の値を上回る結果となっている。すなわち、本工法において複合地盤の基底地盤が概ね砂質土で $N=15$ 以上、粘性土で $N=8$ 以上が、道路橋における地震時保有水平耐力法の適応条件と考えられる。

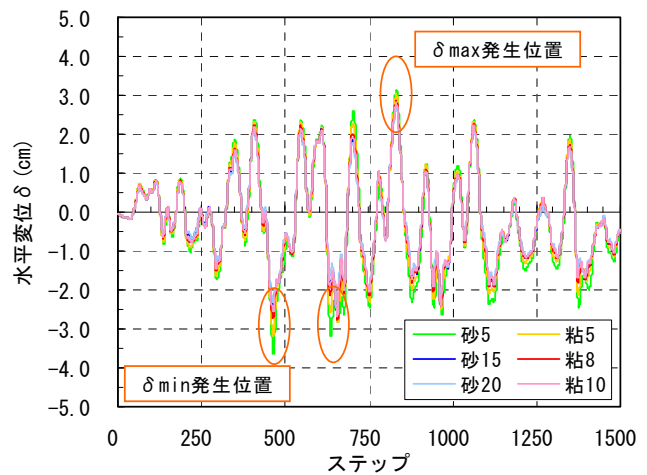


図-7 自然地盤内の杭の動的挙動 (レベル1地震時)

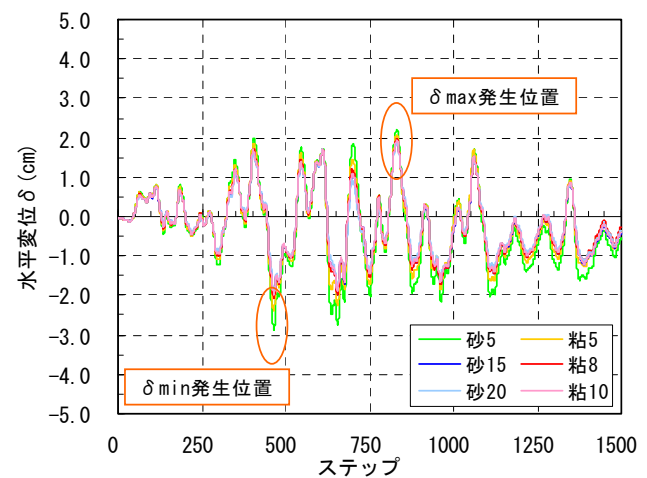


図-8 複合地盤内の杭の動的挙動 (レベル1地震時)

## (2) 2次元動的非線形有限要素法解析による耐震性

複合地盤が無い状態の自然地盤と杭周辺に複合地盤がある状態のケースで、レベル1地震動における2次元動的非線形有限要素法解析で得られた杭基礎の挙動をそれぞれ図-7、図-8に示した。水平変位は上部工慣性力作用位置で杭の変位で、正が前面側、負が背面側への値を表す。

図-7によれば、自然地盤における杭基礎の水平変位が正側で2.7~3.2cm、負側で-2.6~-3.7cmと20~40%の変動が発生している。この変動は基底土層の $N$ 値と相関があり、 $N$ 値が小さいほど変位量が大きくなっている。図-8は複合地盤における杭の水平変位で、正側1.9~2.2cm、負側-1.9~-2.9cmである。変動の範囲は20~50%で自然地盤とほぼ同様で、基底土層の $N$ 値との相関も同様である。また、両図の対比から複合地盤があるケースで自然地盤に対し杭の水平変位が総じて70%程度に大きく減少している。これは静的荷重に対すると同様に、複合地盤の反力効果で杭の耐震性が向上したためと考えられる。

図-9、図-10には、同様に2次元動的非線形有限要素法解析で得られたレベル2地震動における杭の挙

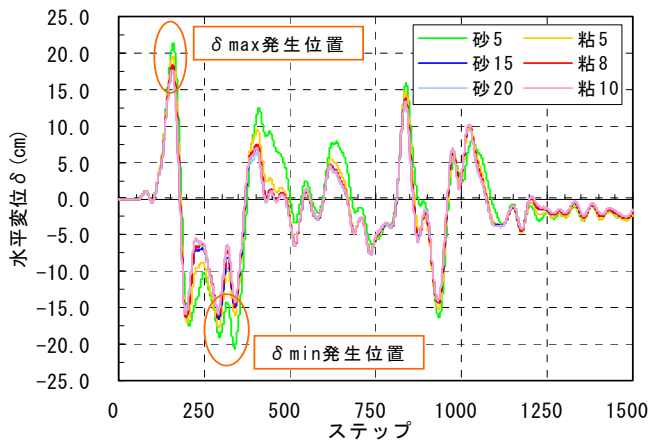


図-9 自然地盤内の杭挙動 (レベル2地震時)

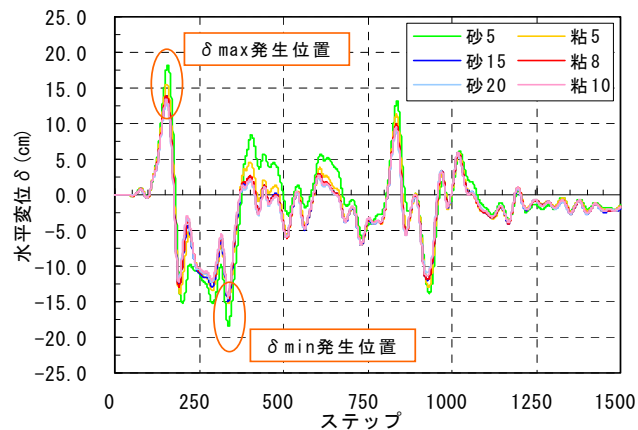


図-10 複合地盤内の杭挙動 (レベル2地震時)

動を示す。図-9より、レベル2地震動において自然地盤での杭の水平変位が正側で17～21cm、負側で-16～-21cmと20～30%の差が発生していることが分かる。また、図-10は複合地盤における杭の水平変位の状態を示しており、正側13～18cm、負側-14～-19cmとその変動範囲は40%程度である。これらの現象はレベル1地震動の場合と同様であり、また基底土層のN値との相関性も概ね同様である。また、複合地盤内の杭の拘束効果はレベル1地震動に比べて減少量がやや小さいが、杭基礎の変位が自然地盤の75～85%程度に減少していることが分かる<sup>18)</sup>。

### (3) 耐震効果の基底条件

杭周辺に複合地盤を形成する複合地盤杭基礎工法の自然地盤に対する耐震性能の向上効果を確認するため、図-11および図-12に、自然地盤における杭基礎の最大水平変位と複合地盤における杭基礎の最大水平変位の比率を基底土層のN値の関係で整理した。図-11はレベル1地震動、図-12はレベル2地震動における砂質土と粘性土に区分した関係である。

図-11によれば、基底土層の地盤条件による複合地盤の耐震効果の差異はなく、水平変位の比率がほぼ70%で一定になっていることが分かる。そのため、同工法では、レベル1地震動において複合地盤基底土層の地盤条件に関係なく、一定に耐震性が向上するものと推察される。

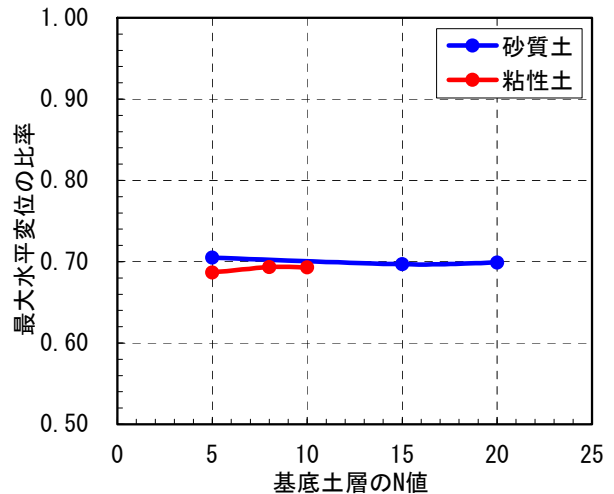


図-11 最大水平変位の比率 (レベル1地震動)  
(複合地盤/自然地盤)

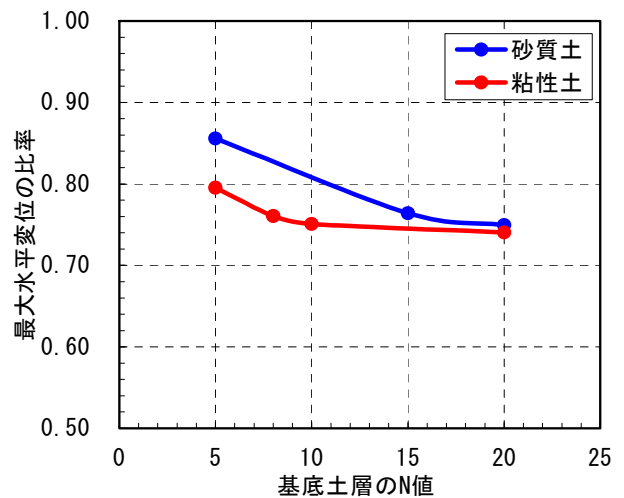


図-12 最大水平変位の比率 (レベル2地震動)  
(複合地盤/自然地盤)

ただし、図-12では基底土層の地盤条件により複合地盤の耐震効果に違いが発生しており、ほぼ砂質土N=15、粘性土N=8ないし10を境界として杭の水平変位の比率が75%程度に収束している。したがって、レベル2相当の大規模地震動に対しては、複合地盤の耐震効果が発揮される基底地盤条件は、概ね砂質土N=15以上、粘性土N=8～10以上を設定することが妥当と考えられる。

## 5. まとめ

杭周辺に複合地盤を形成する工法において、同工法の耐震設計法の確立に向け一連の解析を実施した。実現場をモデルに複合地盤の基底条件を変化させた地震時保有水平耐力法および2次元静的・動的的非線形有限要素法解析から概ね以下の知見が得られた。

- 1)地震時保有水平耐力法の適応可能な複合地盤の基底条件は、概ね砂質土でN値=15以上、粘性土でN値=8以上である。
- 2)2次元動的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反力効果が発揮され、杭

の耐震性が向上することが確認された。本解析では杭変位は、レベル1地震動で70%程度、レベル2地震動では75～85%程度減少した。

- 3) 2次元動的非線形有限要素法解析から、杭の最大変位に注目した耐震性向上の複合地盤の基底条件は、概ね砂質土で $N$ 値=15以上、粘性土で $N$ 値=8～10程度と考えられた。

本解析成果および今後のデータ補完により、複合地盤杭基礎工法を行政支援のための基礎の一工法として、耐震設計法の確立に資する考えである。

## 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, *16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.2187-2192, 2005.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, pp.48-228, 2002.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, pp.348-465, 2002.
- 5) 例えば, 赤井浩一: 土質力学, pp.124-149, 1997.
- 6) Broms, B. B. : Lateral resistance of piles in cohesive soils, *Proc., ASCE*, Vol. 90, SM(3), pp.27-63, 1964.
- 7) 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.
- 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) 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, pp.95-129, 2004.
- 10) 石原哲哉, 三浦房紀: 構造物一杭一地盤系の相互作用解析における3次元解析と2次元解析との比較, 土木学会論文集, No.501 / I-29, pp.123-131, 1994.
- 11) 黒澤到, 福武毅芳, 藤川智, 大槻明, 宇野壽郎: 二次元および三次元液状化解析の比較による杭・構造物系のモデル化の検討, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1351-1356, 1994.
- 12) 杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集 土木学会地震工学委員会 杭基礎耐震設計研究小委員会, 2001.
- 13) Maki, T., Tsuchiya, S., Watanabe, T. and Maekawa, K. : 3次元動解と2次元動解の比較 *Seismic Response Analysis of Pile Foundation using Finite Element Method, Proceedings of the 2nd Japan-Greece Workshop on Seismic Design, Observation and Retrofit of Foundations*, pp.409-416, 2007.
- 14) 岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 15) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, London, 2003.
- 16) 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.
- 17) Ohsaki, Y. : 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.
- 18) 富澤幸一, 三浦清一, 渡辺忠朋: 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C, Vol.164, No.1, pp.127-143, 2008.

## Seismic Performance Evaluation at Composite Ground Boundaries

In order to establish a seismic design method, an analytical study was conducted on the influence of boundary conditions at the base of composite ground formed around piles to increase their horizontal resistance in soft ground. The results of a series of two-dimensional nonlinear finite element analysis confirmed that pile displacement was reduced by 25 to 30% and seismic performance was improved under Level 1 and 2 seismic motion due to the constraint effect of composite ground around piles (similar to the results of static loading). While the basic depth for improvement in composite ground is the characteristic pile length ( $1/\beta$ ), it was verified that an  $N$  value of 15 or larger for sandy soil and 8 to 10 for cohesive soil was necessary as a base condition for composite ground to ensure the adaptability of the ultimate earthquake resistance method and the mitigation of pile deformation during earthquakes.