

複合地盤杭基礎工法における地盤条件別の耐震性能照查手法

Performance-based seismic design of pile foundations in composite ground according to ground condition

北武コンサルタント株式会社
北武コンサルタント株式会社
北武コンサルタント株式会社
土木研究所寒地土木研究所
土木研究所寒地土木研究所

○正 員 佐々木徹也 (Tetsuya Sasaki)
正 員 清水 均 (Hitoshi Simizu)
正 員 渡邊忠朋 (Tadatomo Watanabe)
正 員 西本 聡 (Satoshi Nishimoto)
正 員 富澤幸一 (Kouichi Tomisawa)

1. はじめに

軟弱地盤や液状化が想定される地盤中に施工する杭の周辺に地盤改良を施す杭基礎工法(以下、複合地盤杭基礎工法と称する)が提案され、北海道内において実用化されている^{1), 2)}。この工法は、地盤改良により形成した複合地盤のせん断強度を杭の水平抵抗として反映する合理的工法で、増加した水平抵抗により杭本数や躯体を縮小することが可能となり、大きな建設コスト縮減を図ることができる工法である。

同工法の適用にあたり、地震動レベルや地盤条件に応じた地震時挙動を照査する必要があるため、地震時における基礎の構造解析は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と考えられる。一方、実用化をより促進するため、現行の道路橋示方書^{3) 4)}に準じて地震時保有水平耐力法による耐震性能の照査を適用し、設計の簡略化を図ることが求められている。そこで本検討では、地盤条件別の複合地盤杭基礎工法における耐震性能照査法を検討するため、各種の地盤条件下において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、両手法による耐震性能の評価結果の相違を検証した。

2. 検討条件

2.1 検討ケース

複合地盤の基底となる土層の条件が杭基礎の地震時挙動に及ぼす影響を確認するため、基底層のN値及び土質区分をパラメータとして検討を実施した。また、地震時保有水平耐力法と有限要素法解析結果の相関を確認する意味で複合地盤を形成していない場合も検討し、この結果を基本として複合地盤の解析結果を評価することとした。なお、地震時保有水平耐力法は道路橋示方書に準じる手法とし、2次元非線形有限要素法解析は、静的解析と動的解析を実施した。

2.2 構造モデル

検討に用いたモデルは実際に複合地盤杭基礎工法が採用された橋台基礎とした。本橋台は、上部にN値3~7程度の比較的軟弱な砂層が存在し、その対策として複合地盤杭基礎工法が採用された。

杭は頁岩基盤に支持された場所打ち杭(杭径φ1200mm、杭長L=13m、杭配列n=3×5=15本)である。複合地盤は、深層混合処理工法により形成され、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。橋台基礎の構造図および地盤条件を図-1に示す。

表-1 検討ケース

	CASE名	解析手法	基底層	
			土質区分	N値
静的解析	保耐：砂5	地震時保有水平耐力法	砂質土	5
	保耐：粘15			15
	保耐：粘20			20
	保耐：粘5		粘性土	5
	保耐：粘15			15
	保耐：粘20			20
	FEM：砂5	2次元非線形有限要素法解析	砂質土	5
	FEM：粘15			15
	FEM：粘20			20
	FEM：粘5		粘性土	5
	FEM：粘15			15
	FEM：粘20			20
動的解析	FEM：砂5-L1	2次元非線形有限要素法解析(レベル1地震動)	砂質土	5
	FEM：粘15-L1			15
	FEM：粘20-L1			20
	FEM：粘5-L1		粘性土	5
	FEM：粘8-L1			8
	FEM：粘10-L1			10
	FEM：砂5-L2	2次元非線形有限要素法解析(レベル2地震動)	砂質土	5
	FEM：粘15-L2			15
	FEM：粘20-L2			20
	FEM：粘5-L2		粘性土	5
	FEM：粘8-L2			8
	FEM：粘10-L2			10

※全ケースに対して複合地盤の有りの無しの場合の検討を行う

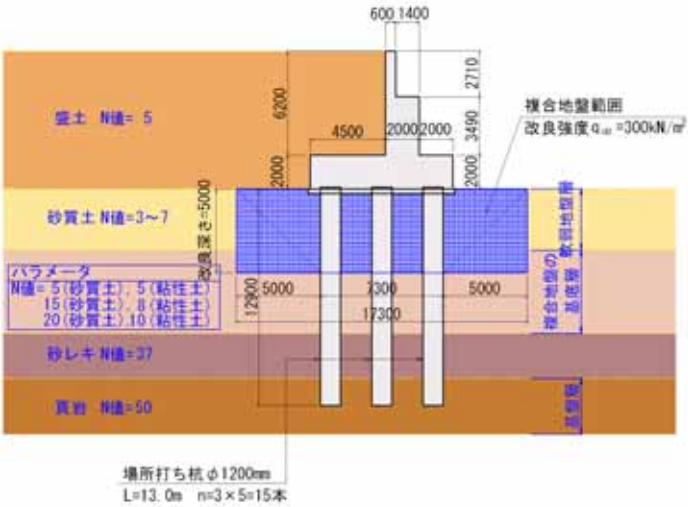


図-1 橋台基礎構造図及び地盤条件

2.3 解析モデル

(1)地震時保有水平耐力法

地震時保有水平耐力法による静的解析は、道路橋示方書・同解説IV下部構造編およびV耐震設計編の規定によるものとする。

(2)2次元有限要素法解析

2次元有限要素法モデルとしては、平板要素を用いた(図-2)。なお、本検討の2次元解析モデルでは事前に3次元解析を実施し、それらの相関性からフーチング幅を奥行きとして設定した^{5), 6)}。杭体および地盤は非線形材料構成則を適用し⁷⁾、フーチング、橋台は弾性要素とした。円形断面を有する杭部材は、断面二次モーメント I がほぼ等しくなる矩形断面に置換した。構造物と地盤の境界面には全てジョイント要素を配置した⁷⁾。フーチング幅に設定した奥行き方向の不連続性は、ジョイント要素で地盤と接続した。なお、動的解析の際には、底面及び側方境界には粘性境界要素を設けた。杭体のRC要素には、岡村・前川ら^{8), 9)}が開発した鉄筋コンクリートの履歴依存型非線形構成則を適用した。地盤要素は、その偏差応力-ひずみ関係において Osaki モデル¹⁰⁾を適用し、静水圧成分は線形弾性とした。

地盤物性値として、原地盤および複合地盤の単位体積重量 γ 、変形係数 E 、ポアソン比 ν 、せん断弾性係数 G 、せん断強度 S_u 、せん断弾性波速度 V_s を設定した。

2.4 入力地震動

複合地盤杭の動的挙動は入力する地震動の規模によって改良体の影響が異なることが考えられるため、入力地震動として時刻歴加速度波形のうち、レベル1およびレベル2の2種類の地震動を用いた。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¹¹⁾における地震動波形を適用した。

3. 解析結果

3.1 静的解析

図-3は、自然地盤における杭基礎の水平荷重と水平変位の関係を表している。地震時保有水平耐力法(以下、保耐法と称する)と静的な2次元有限要素法(以下静的FEMと称する)による解析結果を併記している。ここで、水平荷重は、上部工、下部工及び背面土の慣性力と地震時土圧の総計を意味し、水平変位は上部工慣性力作用位置での値である。また、図中には保耐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3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。図によれば、保耐法による結果は、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と言える。これに対して、静的有限要素法解析の結果は、パラメータによる差がより明確に現れている。これは、静的有限要素法が保耐法に比較して精度の高い解析を行っているためと考えられる。また、保耐法の関係曲線が静的有限要素法の関係曲線の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、保耐法が静的有限要素法の50%程度となっている。すなわち、保耐法による解析は、静的FEMによる解析よりも50%程度安全側の結果を与えており、本モデルの場合は保耐法により橋台基礎を設

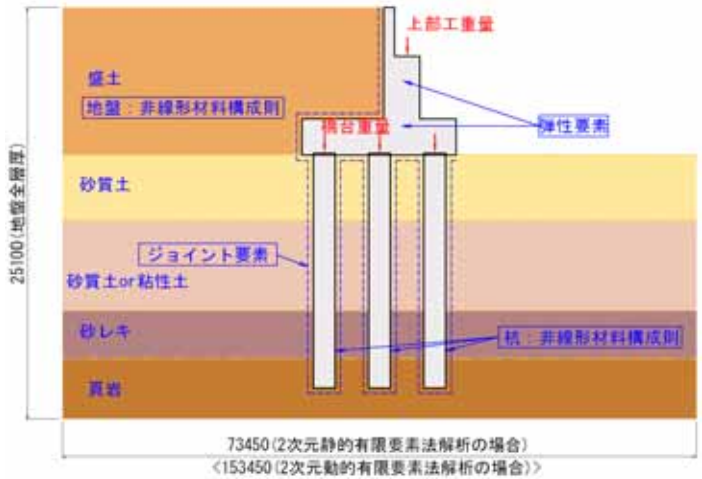


図-2 有限要素法解析モデル図

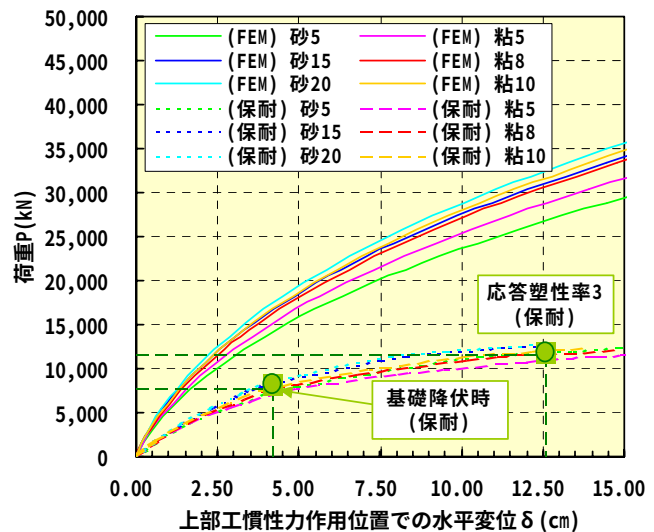


図-3 荷重-変位関係(自然地盤)

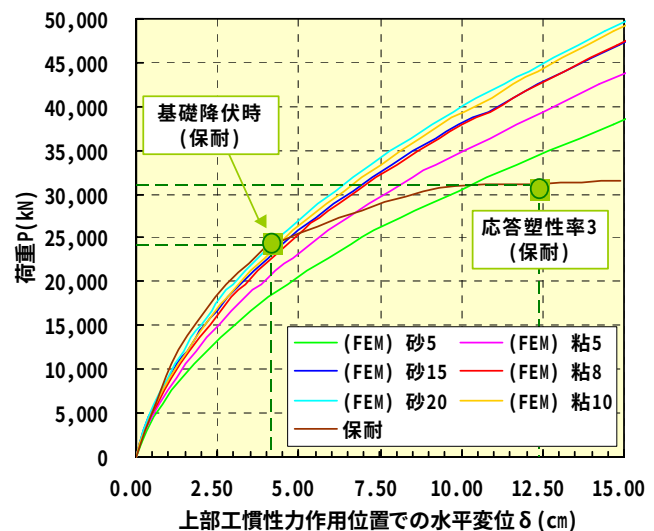


図-4 荷重-変位関係(複合地盤)

計することで静的有限要素法による場合よりも安全側の結果が得られるものと考えられる。

図-4は、複合地盤における杭基礎の水平荷重と水平変位の関係を表しており、その他の条件は図-3と同様である。保耐法による結果は、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関

係となった。これは、保耐法による解析では、杭基礎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。

これに反して静的有限要素法の場合には、自然地盤に比べて複合地盤の場合の方が、パラメータによる差が大きくなっている。このことは、複合地盤杭基礎は自然地盤上の杭基礎と異なり、複合地盤基底土層の地盤条件により解析結果に大きな差異が生じ、かつ道路橋示方書による保耐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、複合地盤杭基礎の解析には、その構造的な特殊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-4によれば、静的有限要素法解析のうち砂質土の $N=5$ 、粘性土の $N=5$ については、明らかに保耐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、保耐法による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、保耐法をやや下回っているがほぼ同様の曲線となっており、降伏以降は保耐を上回る結果となっている。すなわち、砂質土の $N=15$ 以上、粘性土の $N=8$ 以上の地盤条件では、保耐法による解析を適用して問題ないものと考えられる。

3.2 動的解析

(1) 水平変位

図-5、図-6に自然地盤および複合地盤における、レベル1地震動に対する動的な2次元有限要素法(以下動的FEMと称する)による上部工慣性力作用位置で水平変位

の解析結果を示す。水平変位の正が前面側、負が背面側への値を表す。また、図-7、図-8はレベル2地震動に対する解析結果である。

図-5によれば、自然地盤における水平変位が正側で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-6は複合地盤における水平変位で、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、変位量は複合地盤の補強効果により、自然地盤の70%程度に減少している。

図-7では、レベル2地震動における自然地盤の水平変位が正側で17~21cm、負側で-16~-21cmであり、20~30%の差が発生している。この差はレベル1地震動の場合と同様であり、また基底土層の N 値との相関関係も同様である。図-8は複合地盤における水平変位で、正側13~18cm、負側-14~-19cmである。変動の範囲は40%程度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、自然地盤の75~85%程度に減少しているが、レベル1地震動に比べて減少量がやや小さい。レベル2地震動に対する複合地盤の補強効果は、レベル1地震動より小さい結果である。

図-5~図-8より、動的有限要素法解析結果では、基底土層の N 値と水平変位に相関があり、その度合いは地震動や複合地盤の有無に関わらず、概ね同様であった。ただし、自然地盤に対する複合地盤の補強効果は、レベル2地震動の方がレベル1に比べてやや低い結果であった。

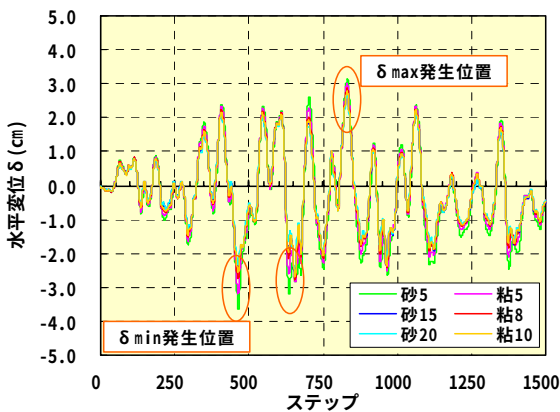


図-5 変位波形 (自然地盤：レベル1地震時)

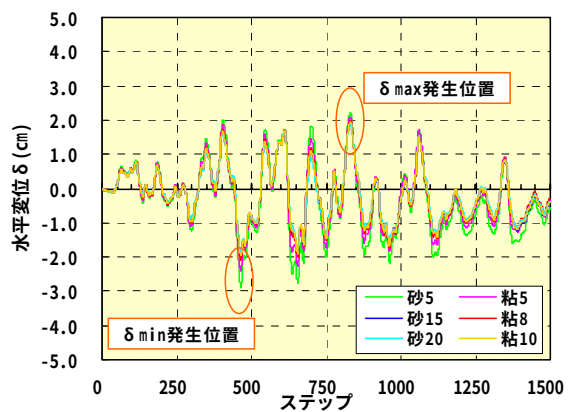


図-6 変位波形 (複合地盤：レベル1地震時)

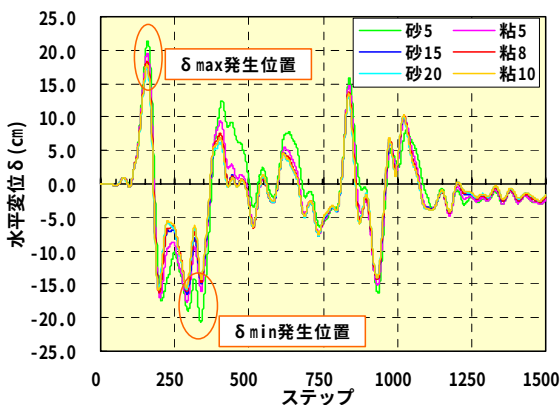


図-7 変位波形 (自然地盤：レベル2地震時)

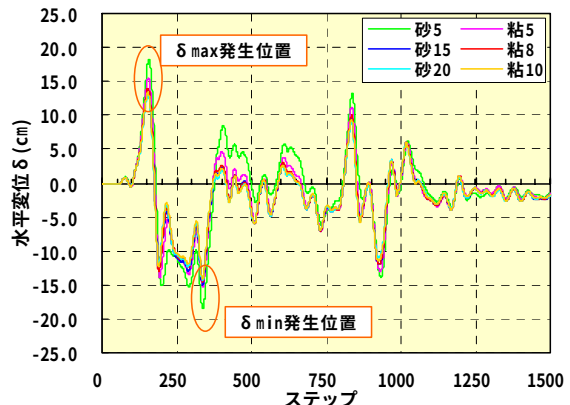


図-8 変位波形 (複合地盤：レベル2地震時)

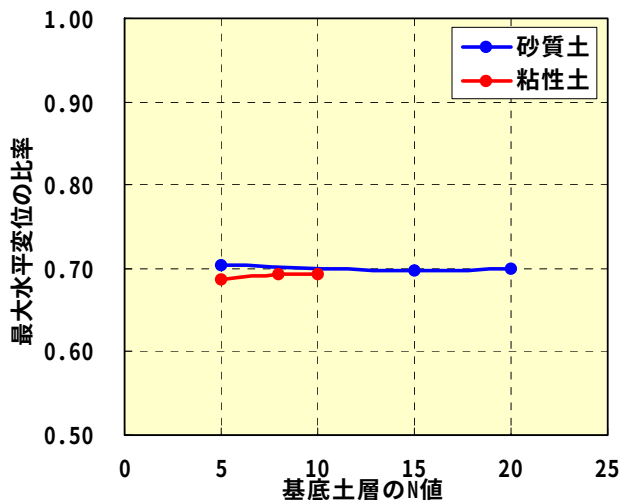


図-9 最大水平変位の比率(レベル1地震動)
(複合地盤/自然地盤)

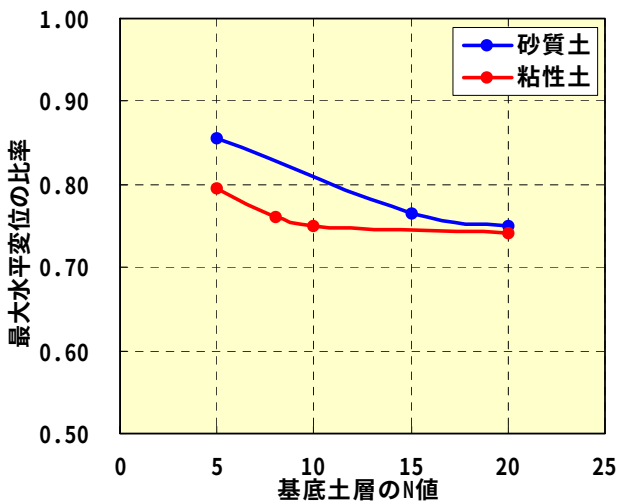


図-10 最大水平変位の比率(レベル2地震動)
(複合地盤/自然地盤)

(2)複合地盤の耐震効果

自然地盤に対する複合地盤の耐震効果を確認するため、図-9、図-10に自然地盤の水平変位に対する複合地盤の水平変位を整理した。図-9は、レベル1地震動における水平変位の比率で、基底土層の条件ごとにプロットし砂質土と粘性土に区分して整理したものである。自然地盤および複合地盤における水平変位は、正側の最大値を採用した。また、図-10は同様にレベル2地震動における水平変位の比率を整理したものである。

図-9では、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%で一定している。よって、レベル1地震動においては、複合地盤基底土層の地盤条件による影響はなく、一定の耐震性が発揮されるものと推察される。

図-11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、砂質土 $N=15$ 以上、粘性土 $N=8$ 内し10以上で、水平変位の比率が75%程度に収束している。したがって、動的有限要素法解析によれば、複合地盤の耐震効果が基底土層の地盤条件に関わらず一定して期待できる条件として、概ね砂質土 $N=15$ 以上、

粘性土 $N=8$ 以上を設定することが可能である。

4. まとめ

本検討では、複合地盤杭基礎工法に関して、地盤条件別に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、以下の知見を得た。

- 1) 複合地盤の基底土層が砂質土 $N=15$ 以上、粘性土 $N=8$ 以上の地盤条件では、地震時保有水平耐力法による解析を適用して問題ない。
- 2) 複合地盤の耐震効果が基底土層の地盤条件に関わらず一定して期待できる条件として、概ね砂質土 $N=15$ 以上、粘性土 $N=8$ 以上が設定される。

謝辞

本報の検討は「複合地盤杭基礎の設計施工法に関する技術検討会」における研究の一環として実施したものである。同検討会の委員(北海道大学大学院 三浦 清一教授、京都大学産学官連携センター 木村 亮教授、(株)不動テトラ 深田 久氏、同 井戸口 清孝氏、(株)土木技術コンサルタント 吉田 紘一氏、同 村田 良英氏、ジャパンパイル(株) 小椋 仁志氏、同 小嶋 英治氏および本報の共同執筆者)に御指導頂いたことを付記し、各位に謝意を表す。

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., Nishikawa, J : A design method concerning horizontal resistance of piles constructed in improved ground, 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, September 12-16, CD Rom 2h, pp.2187-2192, 2005.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，pp.348-432，2002
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，pp.4-133，2002
- 5) 石原哲哉，三浦房紀：構造物－杭－地盤系の相土木学会論文集，No.501 / I -29, pp.123-131, 1994.
- 6) 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。
- 7) Ashraf Shawky, 前川宏一：経路依存性を考慮したRC／地盤系の非線形相互作用に対する計算力学的アプローチ，土木学会論文集，No.532 / V -30, pp.197-207, 1996.
- 8) 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。
- 9) Maekawa, K, Pimanmas, A. and Okamura, H. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London, 2003.
- 10) 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.
- 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。