

杭の水平剛性確保のための格子状浅層地盤改良工法



佐野 大作*

伊勢本昇昭*

概 要

杭基礎の地震時の水平剛性を確保するため、杭の水平剛性に大きく影響を及ぼすエリアに限定した合理的な地盤改良工法を考案し、実施した。本工法は杭が配置された通り芯を格子状に地盤改良するもので、改良土量の削減、工期短縮、さらには、固化剤(添加剤)の使用量および施工重機の稼働にともなう軽油量も削減可能で、環境負荷の低減に貢献できる。

本報では、上記地盤改良工法の実施にあたり検討した内容と実施結果について報告する。

Grid-shaped shallow soil stabilization to increase lateral resistance of piles

Daisaku SANO*
Noriaki ISEMOTO*

In the case of soft ground, even if a building is supported in a pile foundation, lateral displacement of pile head and pile head moment grows big by seismic lateral load. Therefore, we devised Grid-shaped shallow soil stabilization method to increase lateral resistance of a pile foundation and carried it out. This method with reducing the soil stabilization area can contribute to reducing quantity of digging soil, to shorting work periods, and to reducing influence on environment.

It is reported about an effect of the rationalized soil stabilization method and evaluation process.

* 戸田建設(株) 技術研究所

* Technical Research Institute, Toda Corp.

杭の水平剛性確保のための格子状浅層地盤改良工法

佐野 大作*
伊勢本昇昭*

1. はじめに

杭頭部付近が軟弱地盤の場合、地震時に杭頭部に大きな曲げや水平変位が発生する。従来、このような場合の対策として、耐力や靱性の大きなSC杭などを採用する方法、もしくは、杭頭部付近の地盤に対する浅層・深層混合処理工法による地盤改良対策が行われている。

当工事は、JR新横浜駅近くに位置した病院の新築工事である。敷地周辺は、ホテル・事務所および建設中のマンションに接しており、都市部の狭い敷地に建つ高層建物である。

当該建設現場の敷地は、表層から非常に軟弱なシルト層が堆積しているため、建物は杭基礎（支持杭）で設計されている。そのため、建物の鉛直荷重に対する支持力は満足しているものの、地震時における水平力に対しては剛性が不足しており、杭頭部に過大な変形が発生する。

そこで、地震時における杭の水平剛性を確保し、杭頭変位を抑止する目的で、表層部に地盤改良を実施することとした。その際、杭が配置された通り芯を格子状に浅層混合処理工法により地盤改良することによって杭頭変位および曲げ応力を低減する、合理的な地盤改良工法について検討した。

本報告では、上記地盤改良工法の検討内容、および実施結果について報告する。

2. 建物・地盤概要

2.1 建物概要



図-1 建物完成パース

構造規模	本体	地上RC造
階数	地上	8階
建築面積	987.69m ²	(298.77坪)
延床面積	7,475.13m ²	(2,261.23坪)
最高高さ	33.5m	

根切深さ	2.31m (一部8.13m) (常水位 GL-1.01~1.49m)
基礎構造	支持杭基礎
工期	平成17年6月~平成18年7月

2.2 地盤概要

図-2に敷地地盤の地層構成およびN値分布を示す。同図より、表層がN値5程度の埋土層で、その下はGL-16m付近までN値0の軟弱なシルト層が堆積し、GL-17m~20m以深にN値50以上の支持層(土丹層)が存在する。また、ボーリングと同時に行った孔内水平載荷試験の結果によると、深度4.8mの位置で変形係数E=0.58MN/m²、深度7.9mの位置でE=0.92MN/m²であった。

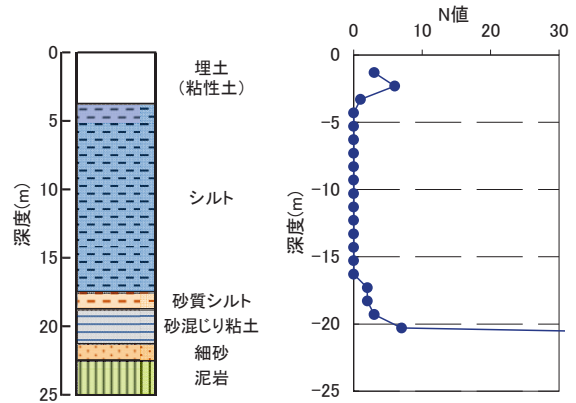


図-2 地盤概要

2.3 基礎構造

基礎構造は、GL-17~20m以深に堆積するN値50以上の土丹層を支持地盤とした支持杭基礎で、杭径70cm~90cm、杭長14m~20mの高支持力杭(プレボーリング拡大根固め工法)を採用している。杭は上杭と下杭の2本で構成されており、前述した通り、上杭は耐震性を考慮した鋼管巻きSC杭を使用している。表-1、2に杭の仕様と杭材の諸元、図-3に杭伏図を示す。

なお、SC杭は鋼管巻きコンクリート杭、A~C種杭はPHC杭の杭種をそれぞれ表している。

表-1 杭仕様一覧

杭記号	杭径(mm)		杭長(m)	杭の構成	
	軸径	先端径		上杭	下杭
A01	700	900	17	SC杭 6m	C種杭 11m
A02	700	900	19	SC杭 6m	C種杭 13m
A03	700	900	20	SC杭 7m	C種杭 13m
A04	800	1000	17	SC杭 6m	B種杭 11m
A05	800	1000	19	SC杭 6m	B種杭 13m
A06	800	1000	14	SC杭 6m	C種杭 8m
A07	800	1000	20	SC杭 7m	B種杭 13m
A08	900	1100	19	SC杭 6m	A種杭 13m
A09	900	1100	20	SC杭 7m	A種杭 13m

*戸田建設(株) 技術研究所

表-2 杭材諸元一覧

杭種	杭種 鋼管厚 (mm)	杭径 (軸径) (mm)	コンクリート 断面積 (cm ²)	換算 断面積 (cm ⁴)	換算断面二次 モーメント (cm ⁴)	有効プレ ストレス (N/mm ²)	ヤング係 数 (N/mm ²)
PHC杭	C種	700	1858	1988	9.186E+05	10	4.00E+04
PHC杭	B種	800	2359	2484	1.545E+06	8	4.00E+04
PHC杭	C種	800	2352	2512	1.531E+06	10	4.00E+04
PHC杭	A種	900	2924	3001	2.336E+06	4	4.00E+04
SC杭	19	700	1478	3401	1.748E+06	-	4.00E+04
SC杭	16	800	1990	3835	2.567E+06	-	4.00E+04
SC杭	19	800	1918	4123	2.778E+06	-	4.00E+04
SC杭	16	900	2496	4576	3.883E+06	-	4.00E+04

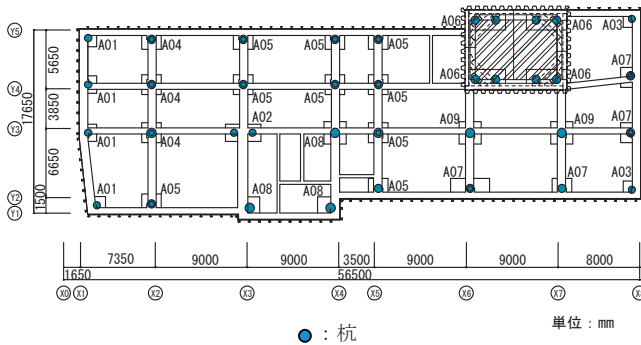


図-3 杭伏図

3. 地盤改良工法

3.1 改良効果に関する影響評価

格子状の浅層地盤改良を行うにあたり、改良地盤の剛性、改良深さ、改良幅と改良効果の関係についてそれぞれ検討し、より合理的な改良仕様を決定した。以下に、検討内容について示す。

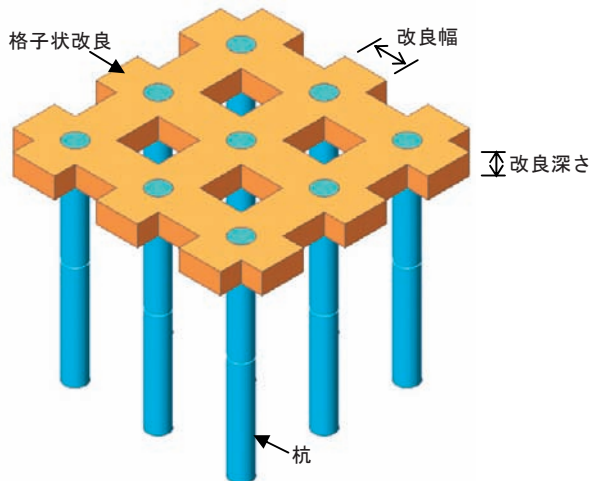


図-4 改良範囲の検討

①改良深さの検討

改良深さは、代表的な杭について、図-5に示すモデルで解析を行い、最適な改良深さの検討を行った。

モデルは、梁材に置換した杭に地盤反力を考慮した地盤ばね¹⁾を深度方向に10cm間隔で取り付け、このばねの剛性を改良地盤の深さに合わせて段階的に変化させた。原地盤の剛性は孔内水平載荷試験や一軸圧縮試験の結果から設定し、改良地盤の地盤剛性は原地盤に対して

それぞれ10倍、20倍、30倍と仮定した。杭頭部に単位水平荷重を作用させ、改良深さごとに杭頭変位量 δ を算出した。図-6に、杭頭変位量 δ を原地盤の時の杭頭変位量 δ_0 で基準化した結果を示す。同図より、改良深さHを $H=1.0D$ (D :杭径)としても、原地盤に対しての変位抑止効果は大きく、変位量を50%以下に低減可能であることがわかる。また、改良地盤の剛性が高いほどその効果は大きい。しかし、改良地盤の剛性にかかわらず、改良深さが杭径の4倍を超えると($H \geq 4.0D$)、ほとんど変位抑止効果が変わらないことも確認できる。

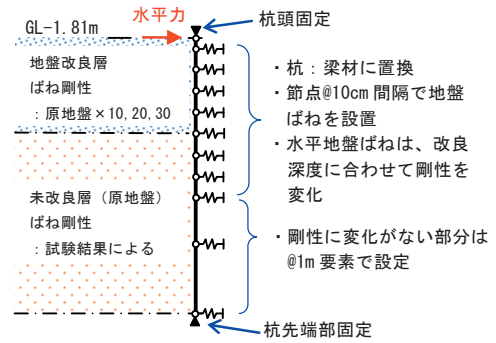


図-5 杭(梁材)-地盤ばねモデル

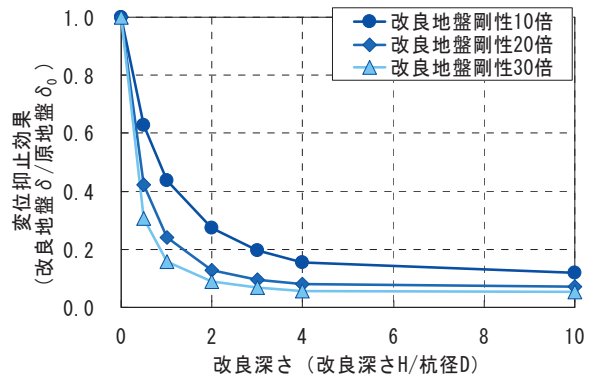


図-6 改良深さと変位抑止効果の関係

②改良幅の検討

格子状の地盤改良幅の検討には、格子状の改良形状による影響が考慮できるように、図-7に示した3DFEMモデルを用いた。解析モデルは、基礎伏図(図-3参照)より、最長杭間距離が9mであったことから9m×9mの範囲でモデル化し、0.5m間隔で要素分割を行い、杭を中央に配置した。改良深さは $H=1.0D$ として、格子状改良幅に合わせ改良地盤部分の要素剛性を原地盤の20倍および40倍とし、杭頭部に単位荷重を与えた時の杭頭水平変位量を改良幅ごとに算出した。図-8に格子状改良幅と変位抑止効果の関係を示す。なお、同図の縦軸は原地盤の場合の杭頭変位量 δ_0 で基準化した値を示す。

同図より、改良幅によって変位抑止効果は変化するものの、改良幅を拓げることによる抑止効果の増加割合は比較的鈍く、改良幅を杭径の2倍とした場合($W=2.0D$)と杭径の9倍とした場合($W=9.0D$:全面改良)で、30~40%程度の差であった。経済性、施工性などを考慮すれば、同図中に示した通り、改良幅は $H=2.0D \sim 4.0D$ が最適範囲と考えられる。

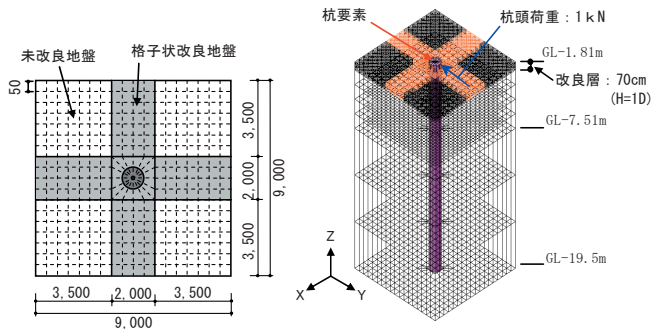


図-7 FEM 解析モデル

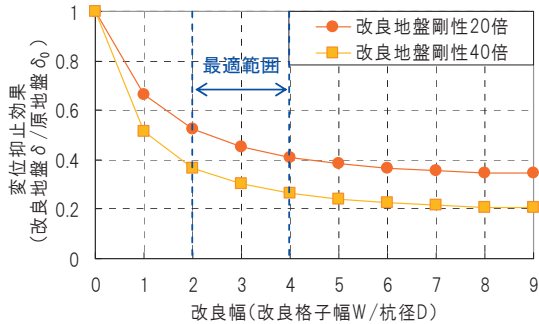


図-8 格子状改良幅と変位抑止効果

3.2 改良仕様の検討

①格子状改良範囲とその効果の確認

3.1の検討結果から、合理性を考慮して改良範囲を、改良深さ $H=1.0D$ 、改良幅 $W=2.0D$ と設定し、改良地盤の地盤剛性を原地盤の20倍(改良地盤の変形係数: $E_g=11.5\text{MN/m}^2$)と仮定した場合の地震時に生じる杭頭変位、曲げモーメント分布をそれぞれ算出した。計算は図-9に示した基礎梁-杭-地盤系解析モデルを用いた。杭・基礎梁を線形要素でモデル化し、各杭には地盤反力を考慮した水平地盤ばねを取り付け、ラフトは剛床仮定として、このラフトに水平力を作用させた。また、外周部には山留め材(H鋼)も配置し、杭同様に水平地盤ばねを考慮した。ここに、地盤ばねの剛性は、図-5と同様に、原位試験の結果をもとに算定し、改良地盤の地盤ばねは、以下の方法で、格子状の改良形状を考慮したばね剛性を設定した。

②等価剛性および杭体応力・変形の検討

改良地盤のばね剛性は、図-10に示すように、格子状改良地盤と格子間の原地盤(未改良地盤)を等価な剛性の地盤として評価することで算定した。

算定には図-7に示したFEMモデルを用いて、格子状改良時の杭頭変位量と同等な水平剛性を有する等価な地盤の変形係数を算出した。図-11に算出結果を示す。同図より、等価な改良地盤の変形係数は約 6MN/m^2 であった。

上記の設定条件にて算出された、杭の変位分布および曲げモーメント分布図のうち、杭径700mm、杭長17mの杭について、図-12に結果を示す。同図より、格子状地盤改良工法では原地盤に対して杭頭変位を約56%、杭頭曲げモーメントを約47%低減可能であることが確認された。

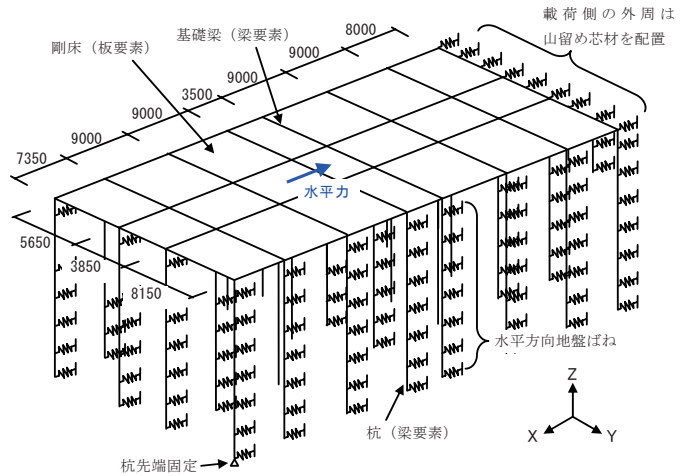


図-9 3次元解析モデル

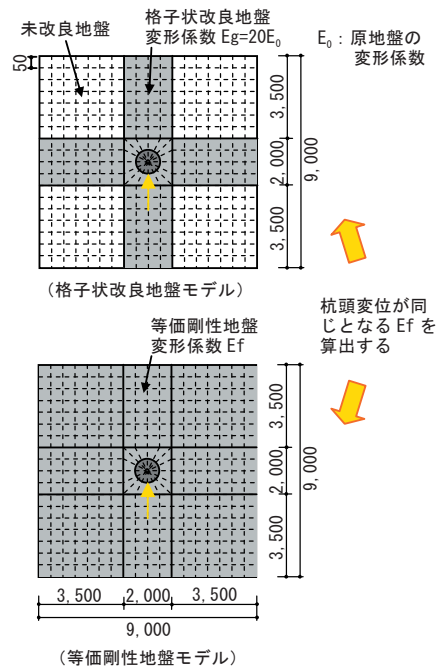


図-10 等価剛性の算定

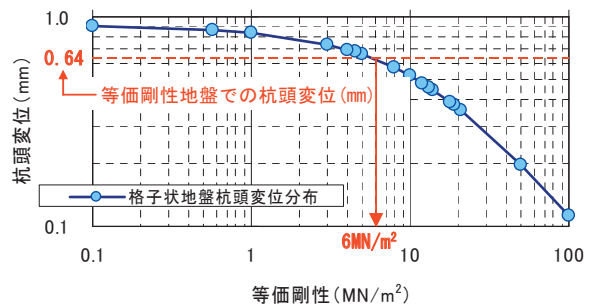


図-11 格子状改良地盤と等価剛性地盤の変形係数の関係

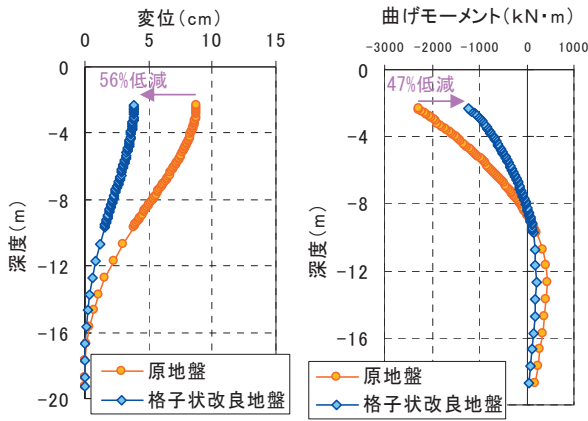


図-12 原地盤と格子状改良地盤の結果比較

以上の検討より決定した地盤改良範囲を図-13に示す。改良幅は杭径の2倍以上(2m)確保し、改良深さは70cm(約1.0D)とした。また、改良地盤の変形係数が原地盤の20倍以上を確保できるように、固化材の添加量を管理することとした。

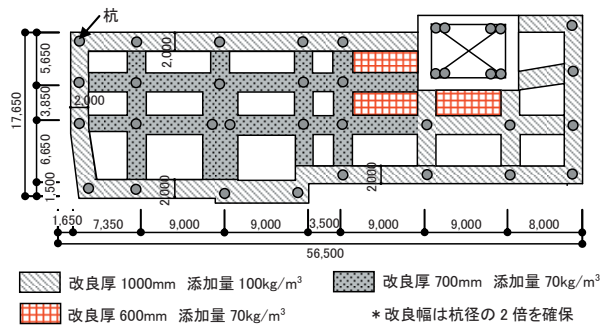


図-13 格子状地盤改良範囲

4. 施工および品質管理

4.1 施工方法

地盤改良は、セメント系固化材(高炉セメントB種)を用いた浅層混合処理工法とし、表-3に示す条件で図-14の通り実施した。

また、改良方法は、バックホウを用いた攪拌工法とし、山留め壁近傍は掘削にともなう変位防止を兼用して、トレンチャー型攪拌混合機を使用し、深さ1mまで改良した。

表-3 施工条件

工程順	施工時期	施工範囲	施工目的
① トレンチャー工法	杭工事完了後	外周部(山留め沿い)および敷地の東側の一部幅2m、深さ1m	地震時における基礎部分の水平変位量の抑止(本設工事) 山留め壁の変位抑止対策(仮設工事)
② バックホウによる攪拌工法	トレンチャー工事完了後	杭が配置された通り芯を格子状に幅2m、深さ70cm	地震時における基礎部分の水平変位量の抑止(本設工事)

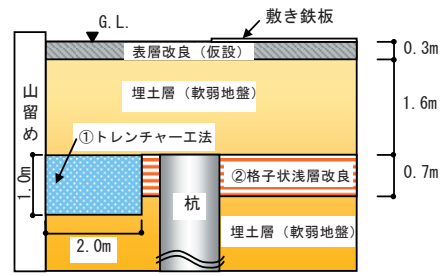


図-14 施工改良範囲(断面図)



写真-1 トレンチャー施工状況(山留め周辺)

4.2 品質管理試験

施工後に改良地盤の品質検査として、一軸圧縮試験と急速平板載荷試験を実施し、改良地盤の設計定数の確認を行った。一軸圧縮試験は、改良地盤部分から試料を採取して実施した。また、急速平板載荷試験は、試験が簡易であることから、敷地内全30ヵ所にて実施・測定した。なお、次工程の関係および雨天の影響で急速平板載荷試験は28日材令以前に実施したため、測定場所によって養生期間が異なっている。そこで、各測定場所でも得られた値と施工日から測定日までの養生期間から、過去の文献²⁾を参考に、28日材令時の変形係数 Evd_{28} を推定した。表-4に過去の研究結果より得られているセメント系固化材(高炉セメントB種)を使用した地盤改良の強度発現関係を示す。

試験結果より、一軸圧縮試験では設計基準強度を満足する結果が得られていた。一方、急速平板載荷試験より得られた変形係数 Evd_{28} は、平均値は 45.9MN/m^2 であったが、幾分、値にばらつきがみられた。これは、バックホウを用いた施工方法や施工日および試験日前後の雨の影響などが考えられる。ただし、これらばらつきの変動を考慮しても改良地盤の変形係数は目標値 11.5MN/m^2 (原地盤の20倍以上)を十分上回る結果であった。

表-4 変形係数 Evd_{28} (28日材令)の推定法

養生期間(日)	28日推定 Evd (MN/m^2)
1~6	測定 Evd 値 $\times 2.6$ 倍
7~14	測定 Evd 値 $\times (1.1\sim 1.2)$ 倍
15日以降	測定 Evd 値を使用



写真-2 急速平板载荷試験実施状況

5. 格子状改良効果の確認

品質管理試験で得られた結果をもとに、格子状改良効果の確認を行った。

前述したように、改良地盤の変形係数 Evd_{28} のばらつきを考慮し、格子状改良地盤の変形係数は平均値から1/2標準偏差を引いた値 29.8MN/m^2 を採用した。

解析方法は、3章と同様で、図-7に示した3DFEMモデルにより改良地盤の等価な変形係数を算出し、図-9に示した基礎梁-杭-地盤系解析モデルを用いて、地震時水平力が作用した場合の杭頭変位と曲げモーメントをそれぞれ算出した。

図-15に算出した格子状改良地盤と等価剛性地盤の変形係数の関係を示す。同図より、等価な改良地盤の変形係数は 13MN/m^2 であった。

解析結果より、図-9中のY軸方向に水平加力した場合に、変位、曲げモーメントとも最大値を示したため、図-16にY軸方向加力時の杭の変位分布および曲げモーメント分布をそれぞれ示す。なお、同図は、杭径700mm、杭長17mのものを示している。

同図a)より、格子状改良地盤の場合の杭頭変位は約2.0cmであり、原地盤の場合の8.8cmに対しては約77%低減できている。また、同図b)より、杭頭部の曲げモーメントも、原地盤の $2290\text{kN}\cdot\text{m}$ に対して、 $749\text{kN}\cdot\text{m}$ と約67%の低減が可能であった。

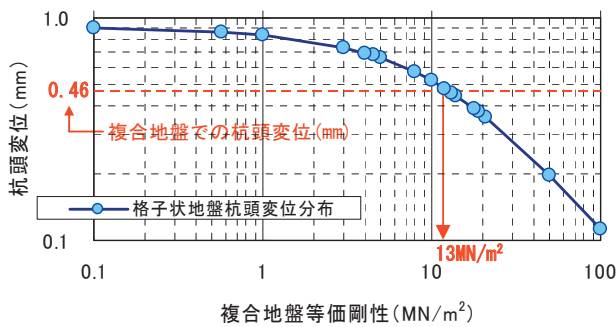


図-15 格子状改良地盤と等価剛性地盤の変形係数の関係
(改良地盤の変形係数を 29.8MN/m^2 とした場合)

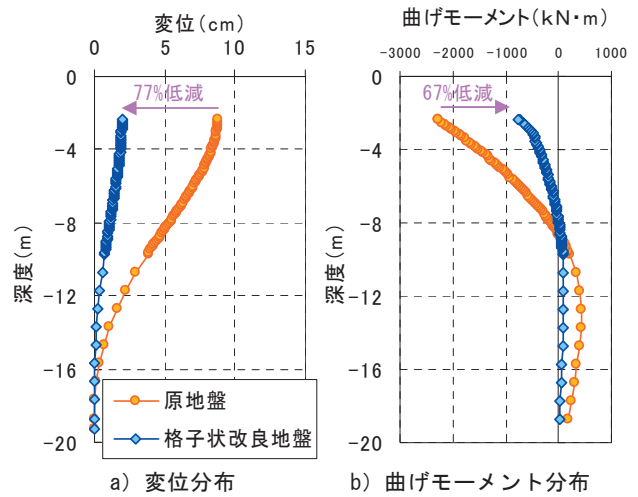


図-16 原地盤と格子状改良地盤の結果比較

6. まとめ

地震時の杭頭水平変位の抑止を目的とし、改良範囲を格子状に限定した合理的な浅層地盤改良工法を実施した。適切な改良深度、改良幅を選定することで、十分な低減効果が合理的に得られることが確認できた。

また、今回は工程の関係で、主に変位の抑止効果为目的としたが、設計時から検討し、その結果を杭の設計に反映すれば、変形だけでなく応力の低減によりSC杭の鋼管厚の低減、もしくはSC杭からC種杭への変更なども考えられ、より経済的な設計が可能で工法であると考えられる。また、本工法は現在、特許出願中であり、今後の展開も期待される。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針 2001
- 2) 属 寛、落合英俊、安福規之、大嶺聖：重錘落下式変形係数測定装置を用いたセメント安定処理土の変形・強度特性の評価、土木学会論文集、No.701/Ⅲ-58、pp.283-292、2002.