

格子状地盤改良工法による基礎構造の合理化



佐野 大作*

伊勢本昇昭*

金子 治*

概 要

当該建設敷地は河川に面した護岸地帯で、表層から液状化の可能性のある沖積砂層を含んだ軟弱地盤が堆積しているため、杭基礎によって支持力は確保できるが、地震時の杭頭変位量および杭頭曲げモーメントが過大となる。そのため、地震時における杭の変形・応力、および液状化・側方流動対策を考慮した基礎構造の設計が必要であった。

そこで、掘削時の止水用として敷地外周部に打設するソイルセメント柱列壁の施工重機を転用し、杭が配置された通り芯に沿って格子状にソイルセメント壁を配置する格子状地盤改良工法を提案し、実施した。当初、表層部を地盤改良し、一部の液状化層および軟弱層は耐震性の高い鋼管巻き既製コンクリート杭（SC杭）で抵抗する計画であったが、本工法を採用することで、杭体応力が低減可能であり、杭の仕様をC種のPHC杭に変更可能であった。また、地盤改良に伴う施工重機の搬出入作業の削減および施工工程の短縮から環境負荷低減にも寄与可能であった。

The grid shaped improved ground by soil mixing wall

Daisaku SANO*

Noriaki ISEMOTO*

Osamu KANEKO*

In the case of the soft ground or the liquefied ground, excessive displacement and stress occur on the pile head at the seismic load. Therefore, the design of building foundations that considered pile head stress and pile displacement during earthquakes is needed.

In that site, we proposed the grid shaped improved ground method to construct a soil mixing wall in the shape of a grid along the guide-line with the machine of soil mixing wall to use as cut-off wall and carried it out.

As a result, it was shown that pile head stress and pile displacement during earthquakes decreasingly compared it in the case of the original ground.

In this paper, the evaluation method and the experiment result of the grid shaped improved ground method is reported.

* 戸田建設(株) 技術研究所

* Technical Research Institute, Toda Corp.

格子状地盤改良工法による基礎構造の合理化

佐野 大作*
伊勢本昇昭*
金子 治*

1. はじめに

軟弱地盤で杭基礎（支持杭）を採用する場合、鉛直支持力は確保できるが、地震時に杭の変形および杭体に生じる応力（特に、杭頭部）が過大となる。特に、液状化地盤においては、地盤自体の耐力が喪失するか、あるいは減少するため、杭の水平剛性が著しく低下する可能性がある。一般に、このような場合は、液状化層もしくは表層地盤を改良し杭の水平剛性を確保する、あるいは地震時に杭体に生じる応力に抵抗可能な耐震性の高い鋼管巻き既製杭（以下、SC杭と称す）を採用する、などの対策が講じられる。

当該建設敷地は河川に面した護岸地域であり、敷地地盤は、表層から比較的軟弱な層が堆積している。特に表層からGL-5.0m付近までは液状化の可能性のある沖積砂層が存在する。そのため、建物はGL-10~15m以深に堆積する砂層を支持層とした杭基礎で支持されるが、地震時における杭の応力・変形、および液状化とそれともなう側方流動対策を考慮した検討が必要であった。

本件では、当初、地震時の杭頭変位量と上部構造物および外溝やインフラ設備との関係を確認した上で、表層地盤を地盤改良し、一部の液状化層はSC杭にて抵抗する計画であった。しかしこの場合、SC杭のコストが高いことおよび地盤改良にともなう施工重機が別途必要であることから、経済性および工程面での検討が必要であった。

そこで、掘削時の止水用として敷地外周部に打設する計画となっていたソイルセメント柱列壁の施工重機を転用し、杭の通り芯に沿って格子状にソイルセメント柱列壁を配置する格子状地盤改良工法を提案した。

本報では、上記のような基礎構造の合理化を実現す

るために検討・実施したソイルセメント柱列壁（以下、SWと称す）を用いた格子状地盤改良工法の評価法と原位置での水平載荷試験結果について述べる。

2. 建物・地盤概要

■建物概要

構造形式 RC造 地上5階

基礎形式 杭基礎（プレボーリング拡大根固め工法）

杭長：10~19m、杭径：600~1,000mm

■地盤構成

図-1に代表的なN値分布および地層構成を示す。当該敷地はGL-10m付近まで比較的軟弱な層が堆積し、以深のGL-10~15m付近から比較的硬質な洪積砂質地盤が出現する。杭はこの洪積砂層を支持地盤とし、エリアごとに支持層上端深度の違いが認められたため、支持層深度にあわせて杭長を調整した。

表層からGL-5.0m以浅の沖積砂層について液状化判定による液状化の程度は、中地震に対して軽微~小、大地震に対して小~中であった。また、同図中には孔内水平載荷試験結果とN値を基に算定し、杭の設計に用いた各層ごとの変形係数も示した。ただし、

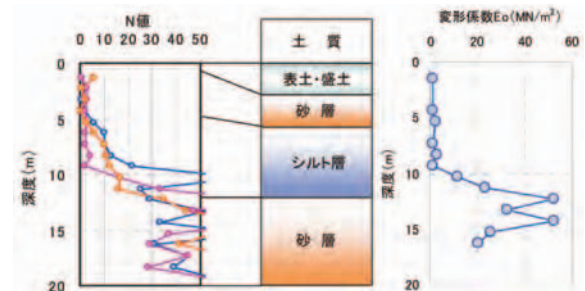


図-1 地盤概要

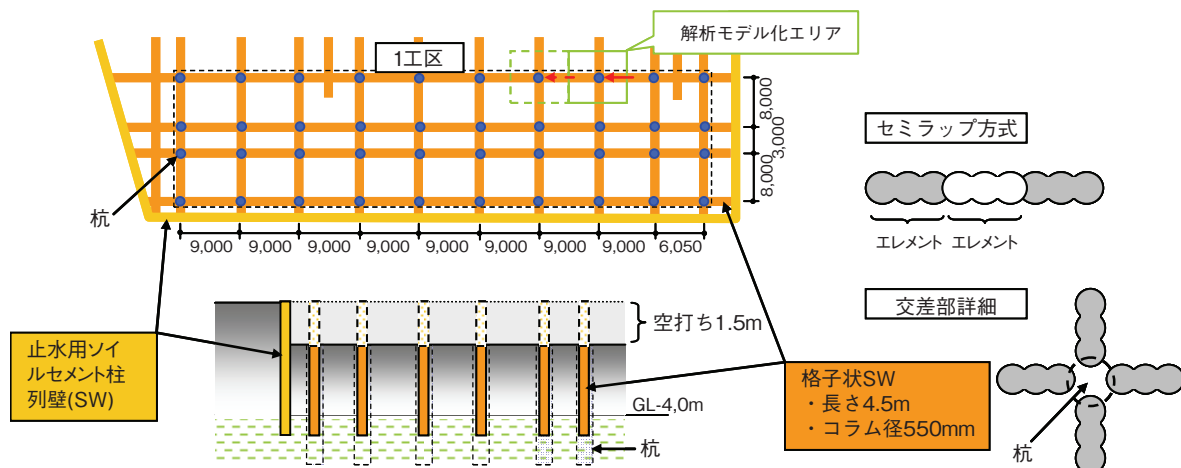


図-2 地盤改良計画図

* 戸田建設(株) 技術研究所

杭の設計時には安全側を考慮し、格子状改良壁による液状化抑止効果については期待しないこととして、地盤剛性を低減して評価している。

■基礎構造の設計

図-2に、杭伏せおよび地盤改良計画図の一部を示す。敷地が河川に隣接しており地下水位が高いことから、敷地外周部をSWで囲い、不透水層であるシルト層に根入れすることで、根切り時のドライワークを可能とする計画とした。

前述したとおり、地震時の杭頭部の応力・変形を抑制する目的で、止水用のSW施工機を転用して無芯のSWを格子状に配置した。杭は、前記格子状改良によって杭頭部の応力・変形の低減が可能であることから、SC杭からPHC杭(C種)に変更し、コストダウンを図った。また、SW施工機を転用することで、別途施工重機の搬出入作業を削減し、コストおよび工期の縮減を可能とした。

3. 格子状地盤改良工法の評価

3.1 解析モデル

SWによる格子状改良効果を評価するために、3次元FEMモデルを用いて解析的な検討を行った。建築規模が比較的大きく、建物全体をモデル化することが困難であったため、図-2中に示したように、支配面積(9m×8m)を考慮した単杭モデルを用いて連続した杭と改良体(SW)を表現した。図-3に単杭による解析モデルを示す。地盤と杭は線形8節点要素とし、杭を中央に配置した。杭全体および格子状に配置したSWを再現できるように、単杭解析モデルでは境界条件に関して、側面は法線方向の変位を拘束、前面および背面は逆対称条件を考慮して鉛直変位のみを拘束した。前記単杭解析モデルに関しては、図-4に示すとおり、杭と改良体を連続して配置した解析モデル(モデルA)と比較し、単杭解析モデル(モデルB)でも、モデルAの中央に配置した杭と同等の結果が

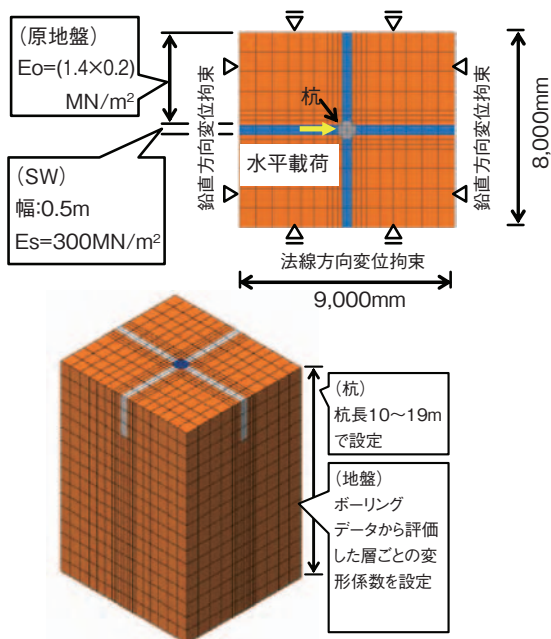


図-3 単杭解析モデル

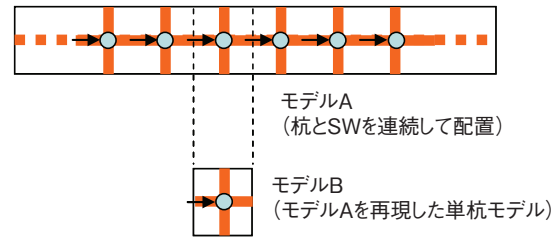


図-4 解析モデルの確認

得られることを確認している。また、杭背面側のSWについては、安全側を考慮して引張りに抵抗しないように、杭の変形にともなって杭と地盤節点が剥離するようにモデル化した。

表-1に、SWと杭の諸元を示す。SWの変形係数は圧縮強度の設計値 $qu = 0.5N/mm^2$ より、ソイルミキシングウォール設計施工指針¹⁾(以下、SW指針と称す)を参考に、変形係数 $Es = 300MN/m^2$ を採用した。

表-1 SWと杭の諸元

(SW 諸元)		(杭諸元)	
圧縮強度 qu	$0.5N/mm^2$	F_c	$105N/mm^2$
変形係数 Es	$300MN/m^2$	変形係数 Es	$40,000N/mm^2$
有効幅	500mm	杭径	600~1,000mm
打設長さ	3.0m(GL-1.5~4.5m)	杭長	10m

3.2 改良効果の評価

格子状に配置したSWの改良効果について、現行の杭の水平支持力に関する設計手法を適用するためには、SWと原地盤の複合的な地盤剛性を評価する必要がある。そこで、以下の手順で等価となる一様な改良地盤の剛性を求めることで評価することとした。

【等価剛性の算定手順】

- ①格子状壁先端までの地盤(厚さ3m)を一様な剛性(変形係数) E_0 としたモデルA(図-5参照)に対して、杭頭に単位荷重(1kN)を載荷した場合の杭頭変位 δ_0 を算出する。
- ②格子状改良地盤を仮定したモデルB(図-5参照)に対して、同様に単位荷重(1kN)を載荷した場合の杭頭変位 δ_s を算出する。
- ③モデルAの改良層の変形係数 E_0 を変化させ、 $\delta_0 = \delta_s$ なる E_0 を、格子状壁による改良効果を考慮した場合の等価な地盤剛性とする。

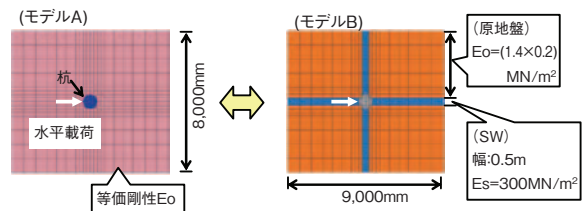


図-5 解析モデル(等価剛性の評価; 平面図)

図-6に、前記の手法による等価剛性の算出結果を示す。格子状SWが配置された改良地盤と等価な一様地盤の地盤剛性は約 $9.7MN/m^2$ となった。そこで、図-7に示す現行の設計法²⁾に準拠した梁-ばねモデルにて、得られた等価剛性 $9.7MN/m^2$ から格子状改良

層のばね値を算定し、杭の変形・応力を求めた。改良層（深度方向）で一様な地盤剛性を用いているため、杭の曲げモーメントやせん断力分布については若干の違いが生じることも考えられるが、杭頭に最大値が発生する杭頭固定条件の場合には、設計上の問題はほとんどないと考えられる。

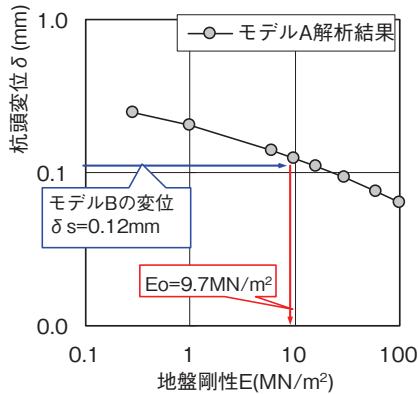


図-6 等価地盤剛性（変形係数）の算出結果

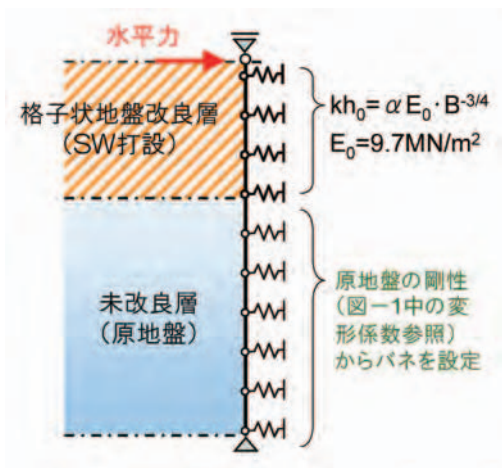


図-7 杭の設計用解析モデル（梁-ばねモデル）

今回は、単杭による梁-ばねモデルの解析結果が建物全体をモデル化したときの結果と差がないことを確認する目的で、図-8に示す、基礎-杭-地盤モデルを用いての検討も行った。杭-地盤は図-7と同じく梁-水平ばねモデルとし、線材に置換した基礎梁で杭頭部を接続した。基礎梁で囲まれたスラブ部分は十分な剛性があるとして、剛床として扱い、この剛床に水平力を作用させた。

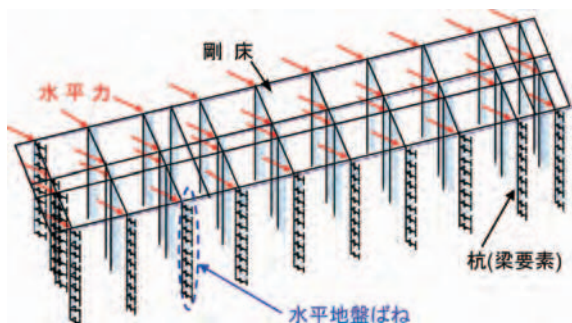


図-8 基礎-杭-地盤 解析モデル

解析結果から、単杭モデルの場合と同様の結果が得られたため、図-9に単杭モデルより算出した解析結果のうち、杭径900mm、杭長15mの杭について、本工法を採用した場合と原地盤の場合（格子状改良なし）の変形および曲げモーメント算定結果を示す。

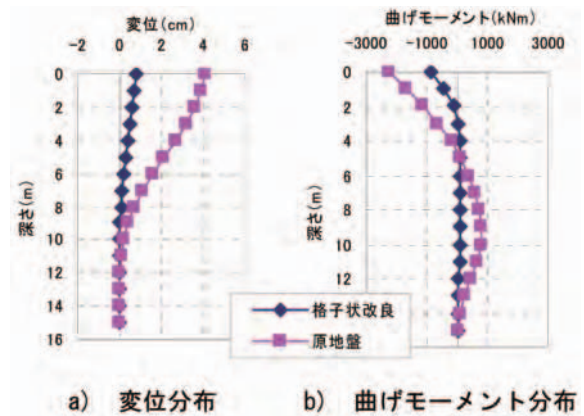


図-9 杭の変形・曲げモーメント算定結果

同図より、格子状に配置したSWの改良効果により、原地盤の場合に対して杭頭変位を約20%に、杭頭曲げモーメントを約40%に低減可能であることが確認された。

4. 水平載荷試験

4.1 載荷試験の概要

本工法を実施するにあたって、改良効果を確認するために、施工後に原位置における静的水平載荷試験を実施した。

試験は格子状に配置されたSWの交点に位置する本設杭（以下、改良杭と称す）と、比較用として改良していない原地盤部分に設置した試験杭（以下、比較杭と称す）を用いて実施した。本載荷試験では、比較杭に対する改良杭の水平剛性（水平地盤反力係数）の増加割合を確認することを目的としているため、同径の杭を対象とした相反載荷方式を採用した。また、改良効果が得られにくい可能性が示唆されたことから、相反載荷による杭の配置の関係も考慮し、載荷方向が格子に対して45度方向となるよう載荷を実施した。

図-10に載荷試験の杭の配置と概要を示す。杭間隔はお互いに影響を及ぼさないよう杭径Dの5倍(5D)以上の距離を確保した。載荷は、お互いの杭頭部をPC鋼棒で連結し、油圧ジャッキを用いて水平方向に載荷（引張り）した。計測項目は、ロードセルによる載荷荷重、変位計による杭頭水平変位量、およびひずみゲージによる杭体ひずみである。試験は、本設杭（改良杭）への影響を考慮して、地盤工学会基準「杭の水平載荷試験方法」³⁾に準拠し、1サイクル12段階の一方方向載荷方式で実施した。SWと杭の仕様は表-1に示したとおりであり、載荷試験では杭径800mm、杭長12mの杭を用いた。

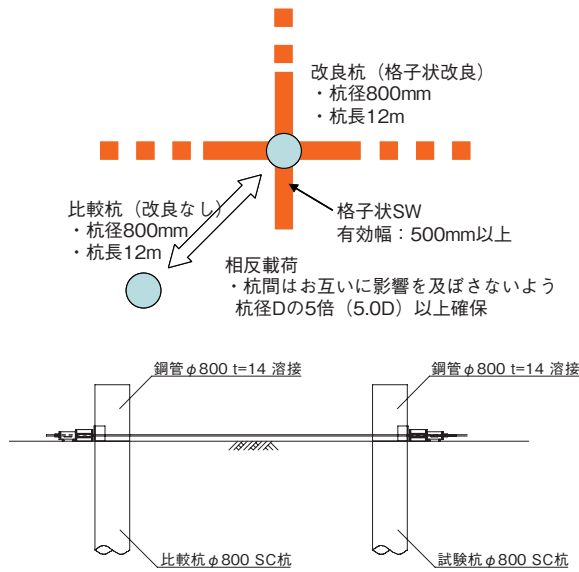


図-10 水平载荷試験の概要

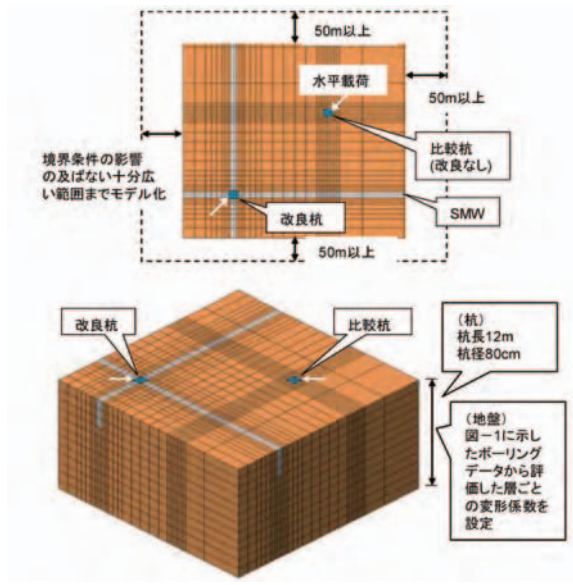


図-11 水平载荷試験解析モデル

4.2 施工概要

SWの施工はφ550mmの5軸の施工重機を用いてセミラップ方式にて行い、有効ラップ幅として500mmが確保できるよう管理した。SWの圧縮強度の設計値は $q_u = 0.5\text{N/mm}^2$ とし、所定の工区6箇所(各3本)よりソイルセメント試料を採取し、圧縮強度試験を実施して管理した。

施工は、SWを先行し、SWの交差部に杭を施工した。杭施工時にはオーガの芯ずれによってプレボーリング孔の傾斜等が生じないように、直交する2方向から建て入れ精度の確認を行うとともに、一部、事前にガイドとなるプレ削孔を行うなどの対策を行った。

4.3 シミュレーション解析

3章と同様に、3次元FEMモデルを用いて、本水平载荷試験のシミュレーション解析を行った。図-11に解析モデルを示す。载荷試験と同様に、改良杭と比較杭をお互いの影響が及ばない距離を確保して45度方向に配置した。地盤は境界条件の影響が及ばない範囲までをモデル化し、SWは改良杭を中心に直交する2方向にそれぞれ地盤側面境界まで連続的に配置した。水平荷重は杭頭部にそれぞれ単位荷重として100kNを载荷した。境界条件は、地盤底面・杭先端を固定とし、地盤側面はフリーとした。また、杭背面は変形にともなって地盤もしくはSWと剥離するようモデル化している。

ここで、オーバーフローしたSWの採取試料による圧縮試験結果ではすべて $q_u = 1.0\text{N/mm}^2$ を超える強度が得られていたが、解析にあたっては原位置攪拌による強度低下などを考慮し、設計値 $q_u = 0.5\text{N/mm}^2$ を採用した。ただし、変形係数 E_s は安全側を考慮して、SW指針の下限値 $E_s = 350 \times q_u$ より算定した $E_s = 175\text{MN/m}^2$ を採用した。

表-2に、解析結果より得られた改良杭と比較杭の杭頭変位量をそれぞれ示す。同表より、比較杭の杭頭変位量は改良杭に比べて約2.7倍大きく、格子状改良

表-2 シミュレーション解析結果

	杭頭変位量 (mm)	
	45度载荷	通り芯方向载荷
改良杭	4.7	5.1
比較杭	12.9	13.0
変位低減率	63%	60%
水平剛性比 (比較杭/改良杭)	2.7	2.5

とすることで、杭頭変位を比較杭の約63%に低減できることが確認できる。また、同表には、通り芯方向に载荷した場合の解析結果も示した。解析モデルの精度によって若干の違いがみられるものの、両者ともほぼ同様の結果を示していることから、载荷方向にかかわらず、改良効果が得られることが確認できた。

4.4 载荷試験結果および考察

水平载荷試験の結果から得られた改良杭と比較杭の荷重-変位関係を、図-12に示す。変位量が10mmのときの荷重を比較すると、比較杭が約250kNであるのに対して、改良杭は650kNと約2.6倍の値を示している。载荷試験は荷重制御方式で行ったが、前述したシミュレーション解析が弾性解析であることから、比較杭に対する改良杭の変位低減効果はおおむね一致していると思われる。

また、同図中には、参考として水平地盤反力係数²⁾を $kh = 45, 60, 80\text{MN/m}^3$ とそれぞれ仮定して算定した荷重-変位関係を示しているが、 $kh = 60\text{MN/m}^3$ の場合に改良杭の結果とほぼ一致していることが確認できる。

そこで、図-12の荷重-変位関係から杭頭自由としてChang式²⁾を用いて地盤反力係数 kh を逆算した。図-13に、逆算した地盤反力係数 kh と地表面変位 δ_0 の関係を示す。同図より、変位量10mm時の比較杭の基準水平地盤反力係数 $kho^{2)}$ が 19.6MN/m^3 であるのに対して、改良杭の場合は $kho = 55.5\text{MN/m}^3$

であり、約 2.8 倍の水平剛性を有していることが確認できる。

また、単杭解析モデルにて算定した等価剛性 $E_0 = 9.7\text{MN/m}^2$ から算定した基準水平地盤反力係数 $k_{h0} = 29.0\text{MN/m}^3$ (杭径 800mm の場合) と比較しても、改良杭は十分に高い水平剛性を有していることがわかる。以上の解析結果を表-3 にまとめて示す。

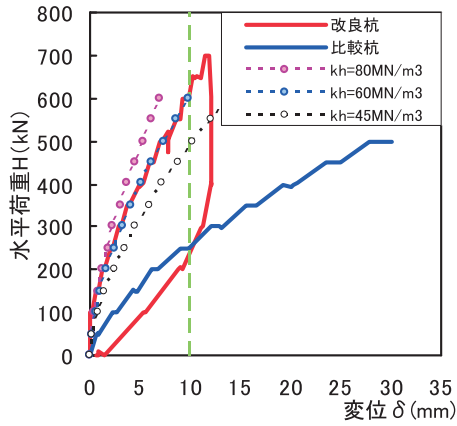


図-12 荷重-変位関係の比較

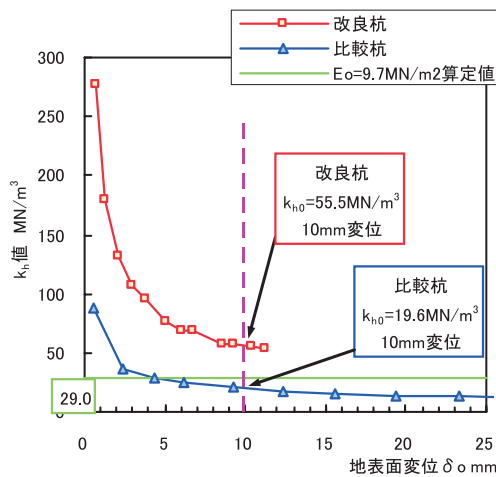


図-13 k_h 値-地表面変位 δ の関係の比較

表-3 試験結果一覧

	本設杭 (格子状)	試験杭 (改良なし)
最大荷重 P_{max}	700 kN	500 kN
最大変位 δ_{max}	11.9 mm	29.3 mm
試験結果による基準水平地盤反力係数 k_{h0}	55.5 MN/m^3	19.6 MN/m^3
等価剛性 E_0 より評価した基準水平地盤反力係数 k_{h0}	29.0 MN/m^3	-

次に、計測ひずみより算定した曲げモーメント分布、および試験結果から逆算した k_h 値より Chang 式を用いて算定した曲げモーメント分布の比較を図-14 に示す (荷重は 200kN の場合)。同図より、比較杭および改良杭とも算定値と計測値がおおむね一致した結果を示している。また、比較杭に対して改良杭は、最大モーメントで約 3 割低減されていることがわかる。

以上の試験結果およびシミュレーション解析結果より、比較的改良効果が得られにくいと思われた 45 度

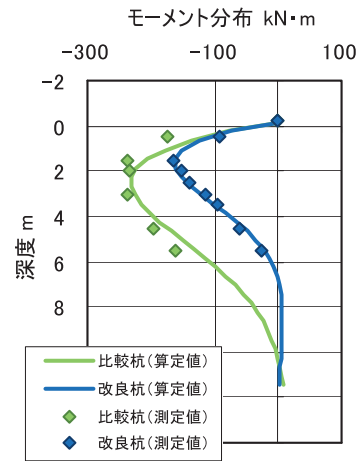


図-14 曲げモーメント分布の比較

方向荷荷の場合にも、通り芯方向とほぼ同等の改良効果を確認することができ、本件においては、格子状改良とすることで原地盤の約 2.5 倍程度の杭の水平剛性を確保できることが確認できた。

5. まとめ

当該敷地地盤のように、表層部に液状化の可能性のある軟弱地盤が堆積している場合に、地震時の杭頭変位・応力を抑止する目的で、SW による格子状地盤改良工法を提案し、実施した。その結果、杭の仕様を当初計画されていた SC 杭から PHC 杭 (C 種) に変更するとともに、基礎梁せいの低減や掘削土量の削減を可能とする基礎構造の大幅な合理化が可能となった。

また、当該工事では、止水のための SW (無芯) を建物外周部に配置する計画であったため、同じ施工機械を転用することで、地盤改良のための別途施工機械を必要とせず、工期・コストの縮減が可能であった。

原位置における水平荷荷試験を実施したところ、所定の改良効果が得られていることが確認できた。

現在、工法自体の標準化の目的で、評定機関による技術認定を取得するための共同研究活動を行っており、今後、基礎構造の合理化工法として、展開していく計画である。

【参考文献】

- 1) 日本材料学会：ソイルミキシングウォール (SMW) 設計施工指針 (改訂版), 2002
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, 2001
- 3) 地盤工学会：杭の水平荷荷試験方法・同解説, 1983