

格子状地盤改良杭 (Head Lock Pile) 工法の開発

その1 工法の概要および載荷試験による性能確認



伊勢本昇昭 *1

保井 美敏 *1 金子 治 *1
佐野 大作 *1 成田 修英 *1

概 要

近年、既製杭の高支持力化にともない、鉛直支持力は満足されても、地震時の水平抵抗によって杭の仕様（杭本数、杭径等）が決定される場合も多くみられる。特に、杭頭部に軟弱地盤が厚く堆積している場合は、地震時の慣性力により杭頭部に過大な曲げ応力および変形が生じるため、十分な耐力や変形性能を有する杭基礎が要求される。このような場合、単に曲げ剛性や靱性の高い杭材（拡頭杭、外殻鋼管付きコンクリート杭など）を用いる方法や、杭周辺の軟弱地盤を改良することで杭の水平剛性を増大させる方法などが実施、研究されている。また、このように杭の水平抵抗力の増加を目的とした地盤改良形式も多様化し、杭周辺地盤を改良して堅固な層に改良地盤下端を着底させるものから、表層地盤だけを改良する方法、更には、特に液状化対策を目的として杭を囲むように格子状に改良体を配置する方法などが開発されてきている。

このようなことから、筆者らは、液状化層や沖積粘性土層のような軟弱地盤において、合理的に地震時の杭の水平剛性を確保する目的で、杭の通り芯に沿って表層地盤を格子状あるいは杭頭部を十字型に地盤改良する格子状地盤改良杭 (Head Lock Pile) 工法を開発した。本報では、工法の概要および工法開発のために実施した一連の施工試験、水平載荷試験について報告する。

Development of Head Lock Pile System

Part1 Outline of Head Lock Pile System and Confirmation of its Performance

Noriaki ISEMOTO*1

Mitoshi YASUI*1

Osamu KANEKO*1

Daisaku SANO*1

Nobuhide NARITA*1

In recent years, as the bearing capacity of precast concrete pile grows, there is often what lateral resistance is a more important factor in a design of pile foundations than vertical bearing capacity in determining the pile number, pile diameter, etc. In particular, when piles installed through soft soil, pile foundations are required that has sufficient ductility capacity and loading capacity because excessive bending stress and deflection are caused by the inertia force at the time of the earthquake. In this case method to increase the lateral resistance of pile foundations is to improve the ground around the pile foundations.

Authors have been developing grid or cross-shaped hardened soil around pile head by a deep or shallow mixing method (Head Lock Pile System).

This paper is about outline of Head Lock Pile System and a series of execution test and horizontal load test of pile so that we may develop this system.

*1 技術研究所

*1 Technical Research Institute

格子状地盤改良杭 (Head Lock Pile) 工法の開発

その1 工法の概要および載荷試験による性能確認

伊勢本昇昭*¹ 保井 美敏*¹
 金子 治*¹ 佐野 大作*¹
 成田 修英*¹

1. はじめに

表層部に沖積粘性土層や液状化層などの軟弱地盤が堆積している場合、地震時の慣性力により、杭頭部に過大な曲げモーメントや変形が生じる。そこで、杭頭部の地盤を杭が配置された通り芯に沿って格子状に、あるいは杭頭部を十字型に地盤改良することにより、杭頭部の曲げ応力や変形を抑止する、格子状地盤改良杭 (Head Lock Pile) 工法を開発した。

杭基礎の設計では、杭頭に作用する上部構造からの慣性力による地震時荷重に対して、杭の曲げ剛性および地盤の水平地盤反力係数から決定される杭の水平抵抗力が、設計用限界値を確保できるように計画される¹⁾。そのため、杭の水平抵抗増大のために地盤改良を行う場合には、水平地盤反力係数の増大が目的となる。

本工法では、格子状もしくは十字型の改良体とその周辺地盤からなる複合地盤が相互に抵抗するため、改良体の影響を3次元的に考慮して水平地盤反力係数を設定する必要がある。また、改良地盤下端面を堅固な地盤に支持させない浮き型形式を基本としているため、杭の水平抵抗力は改良地盤全体の水平変位量に影響を受ける²⁾。そこで、本工法の設計法の確立のため、原位置における水平載荷試験を実施した。

本報 (その1) では、本工法の概要と一連の性能確認のための水平載荷試験について報告し、次報 (その2) において、本工法の設計法および解析による検討結果を報告する。

2. 工法概要

図-1に、本工法の改良形式の概念図を示す。表層部分を板状に改良する表層型とある程度の深さまでを壁状に改良する深層型の改良方法があり、それぞれ浅層混合処理工法 (以下、浅層改良と呼ぶ) およびソイルセメント柱列壁工法 (以下、SMWと呼ぶ) を用いて施工する。杭は埋込み工法による既製コンクリート杭を対象とし、格子状の交点部分に配置する。原則として、杭間を改良体で連結する (以下、グリッドタイプと呼ぶ) が、杭間スパンが大きく途中で切り離れた場合でも十分効果が得られる場合には、同図に示すパトレス状の形式 (以下、クロスタイプと呼ぶ) も対象とする。

浅層改良には、粉体あるいはスラリー状の固化材を対象土と混合攪拌する原位置混合方式、および事前に固化材と混合攪拌した改良土を所定の位置に投入する

事前混合方式があり、地盤条件や施工条件によって使い分ける。SMWは無芯で、単軸および多軸の施工機械を用いて施工する。特に、杭間を連結させたグリッドタイプは、壁状改良体の拘束効果によって液状化抑止効果も期待できるため、液状化地盤に適している。

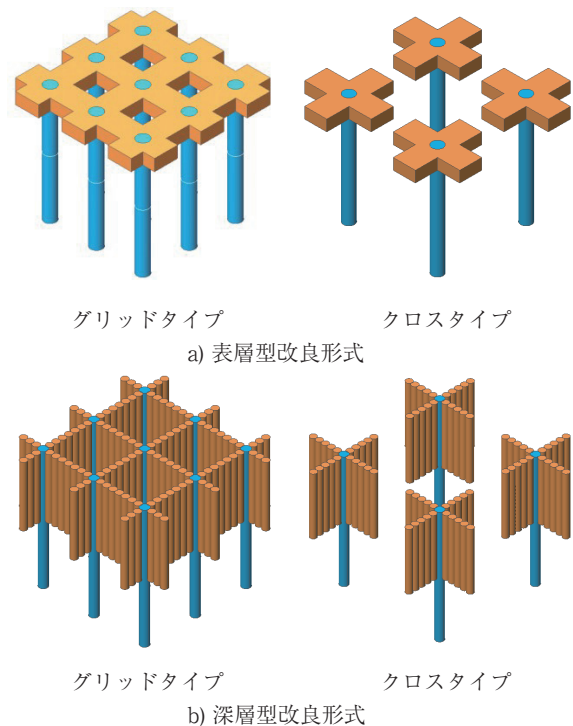


図-1 Head Lock Pile 改良形式概要図

3. 水平載荷試験概要

前述したように、本工法は格子状改良地盤の交点部分に杭を配置することが特徴である。表層の軟弱地盤全てを改良する場合に対して、地盤改良に掛かるコストを削減し、杭の水平抵抗増大に効果的な範囲として格子状形式に地盤改良する。つまり、水平地盤反力係数が全面改良と比較してどの程度低下し、原地盤に対してどの程度増加するかが重要となる。

試験では、改良体で連続的に連結された杭の載荷試験を行うことが困難であるため、こちらは解析的検討によって確認・評価するとし (その2参照)、単杭を対象とした原位置での実大水平載荷試験により、主に水平地盤反力係数の増加およびそれにとまなう杭頭変位と曲げモーメントの低減効果について確認する。

*¹ 技術研究所

表-1 水平載荷試験ケースの一覧

| No. | 改良工法 | 改良径改良幅 (mm) | 改良長さ (mm) | 改良深さ (mm) | 杭径 (mm) | 載荷方向 | 試験目的 | 最大荷重 (kN) |
|-----|------|-------------|--------------------|-----------|---------|------|-------------------|-----------|
| n | なし | - | - | - | 600 | - | 改良なしの挙動の把握 | 480 |
| d-1 | SMW | φ 650 | @450 × 10 | 5,000 | 600 | 通り芯 | 基本形 (SMW) の挙動の把握 | 720 |
| d-2 | SMW | φ 650 | @450 × 15 | 5,000 | 600 | 通り芯 | 改良長さの影響 | 800 |
| d-3 | SMW | φ 650 | @450 × 10 (2方向) | 5,000 | 600 | 45度 | 載荷方向の影響 | 560 |
| d-4 | SMW | φ 650 | @450 × 10 | 5,000 | 1,000 | 通り芯 | 杭径の影響 | 880 |
| s-1 | 浅層 | 1,200 | 5,000 | 900 | 600 | 通り芯 | 基本形 (浅層改良) の挙動の把握 | 560 |
| s-2 | 浅層 | 1,200 | 7,500 | 900 | 600 | 通り芯 | 改良長さの影響 | 440 |
| s-3 | 浅層 | 1,200 | 5,000 (2方向) | 900 | 600 | 45度 | 載荷方向の影響 | 440 |

3.1 載荷試験計画

表-1に載荷試験ケースを一覧して示す。載荷試験ケースは、改良なし (No.n) : 1ケース、SMW : 4ケース (No.d-1 ~ d-4)、浅層改良 : 3ケース (No.s-1 ~ s-3) の合計8ケースである。表より、試験パラメータは、載荷方向前方の改良体の長さ (SMW : No.d-1とNo.d-2、浅層改良 : Nos-1とNos-2)、載荷方向 (通り芯方向、45度方向)、杭径 (SMW : 600mmと1000mm) とした。

3.2 地盤概要

図-2に試験ヤードの土質柱状図を示す。同図には、地層構成の平面的なバラツキを確認するためにヤード内4ヵ所で行った動的コーン貫入試験結果のN_d値を合わせて示す。N_d値はN値と良く対応しており、比較的バラツキの少ない結果となっている。表層からGL-2mまでは埋土で、その下層GL-2~7m付近にはN値2~3の軟弱な有機質シルト層が堆積している。試験時は埋土を1m掘り下げて、試験GL = 原地盤GL-1mとして載荷試験を行った。また、GL-1~-2mの埋土層では地盤改良施工時に一部で廃棄物が確認されており、特に、埋土層が改良対象層になる浅層改良において、所定の強度や剛性が確保されていないケースも判明している。

3.3 試験体概要と施工計画

図-3に代表的な試験ケースの概要図を示す。深層型は、削孔径650mmの5軸の施工機を用い、改良深度は試験GL-5mまでとした。孔心ピッチは450mmで、エレメントのラップ部分および杭との取り合い部分の有効幅が469mm以上確保できるように配置、管

理した。浅層改良は、所定量のセメントスラリーを原位置で攪拌混合する工法を採用し、改良幅は1200mm (2D、D : 杭径)、改良深度は900mm (1.5D) とした。浅層改良における改良幅と改良深度は改良効果から設定している⁴⁾。また、杭は計測用のひずみゲージを貼付けることから、外殻鋼管付きコンクリート杭 (以下、SC杭と呼ぶ) を用い、プレボーリング工法により施工した。杭長は10mで、載荷試験のために試験GLより90cm突出させた。

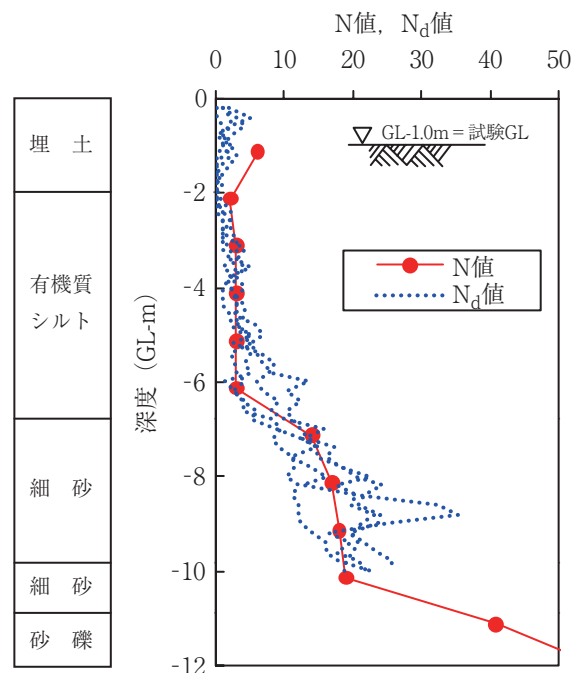


図-2 試験ヤードの土質柱状図

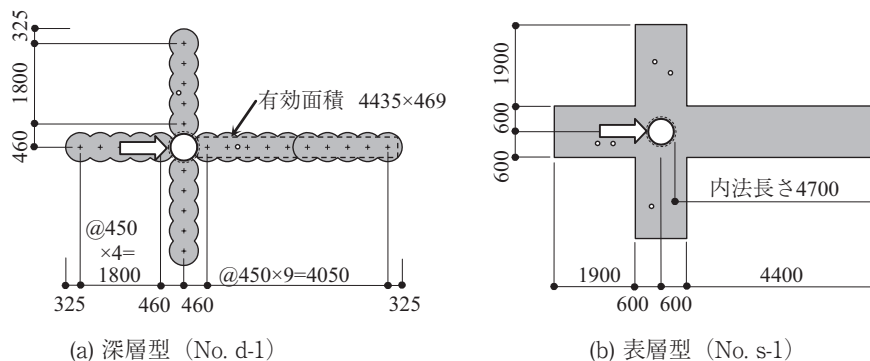


図-3 基本ケースでの改良体・杭の配置

施工手順は、改良体の施工を先行し、後から改良体の交点に杭を施工した。深層型の場合は、杭施工時の削孔精度（芯ずれ、傾きなど）、施工性を考慮して、あらかじめ改良体交点部分を空けて、杭と改良体の取り合い部分で有効幅（杭と改良体の接触幅）469mmが確保できるように杭芯から距離を取った位置に改良体を配置した。

表-2に、施工後に測定した杭頭部における芯ずれを一覧して示す。施工時の管理基準値を100mmに設定したが、いずれも管理値以内におさまる結果となっている。また、改良体と杭の取り合い部分における相対ずれは、すべて100mm以内におさまっているものの、杭と改良体の接合位置で有効幅469mmを確保できないものもあった（No.d-1：429mm、No.d-2：426mm）。

SMW および浅層改良の配合条件は、設計基準強度（SMW：0.50N/mm²、浅層改良：0.48N/mm²）に対して、現地から採取した改良対象土を用いた室内配合試験を実施して決定した⁵⁾。

3.4 荷重および計測計画

水平荷重試験は、地盤工学会基準⁶⁾に準拠し、1サイクル方式で1方向に段階荷重した。荷重位置は試験GL + 400mmである。表-3に計測項目、点数、計測位置を一覧して示す。また、図-4に代表的な杭のひずみゲージ貼付け位置と地表面変位の計測位置図を示す。

4. 試験結果

4.1 杭頭荷重-杭頭水平変位関係

図-5に、水平荷重試験で得られた杭頭荷重-杭頭水平変位関係を示す。杭頭荷重Pは保持時間3分後（No.d-1のみ2分後）のロードセルによる水平荷重の実測値、杭頭変位δは試験GL + 400mmと+800mmレベルで計測した変位計の実測値から外挿した地表面（試験GL）の水平変位である。

深層型の場合は、すべてのケースで改良なしのケースと比べて杭の水平抵抗力が増大している。杭径が異なるNo.d-4を除くと、他のケース（No.d-1、2、3）は荷重初期段階ではほぼ同様の挙動を示しており、本工法においては、改良長さおよび荷重方向による改良効果（杭の水平剛性増大効果）の明らかな違いは認められない。改良長の長いNo.d-2の結果がNo.d-1を下回っているのは、前述した改良体の品質や施工精度の影響

表-2 杭の芯ずれ一覧 単位 (mm)

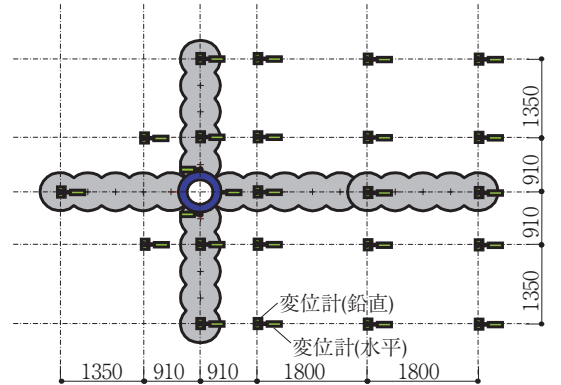
| | n | d-1 | d-2 | d-3 | d-4 | s-1 | s-2 | s-3 |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| X方向 | 45 | 33 | 55 | 20 | 5 | 35 | 9 | 30 |
| Y方向 | 50 | 10 | 30 | 30 | 5 | 20 | 20 | 20 |

表-3 計測項目一覧

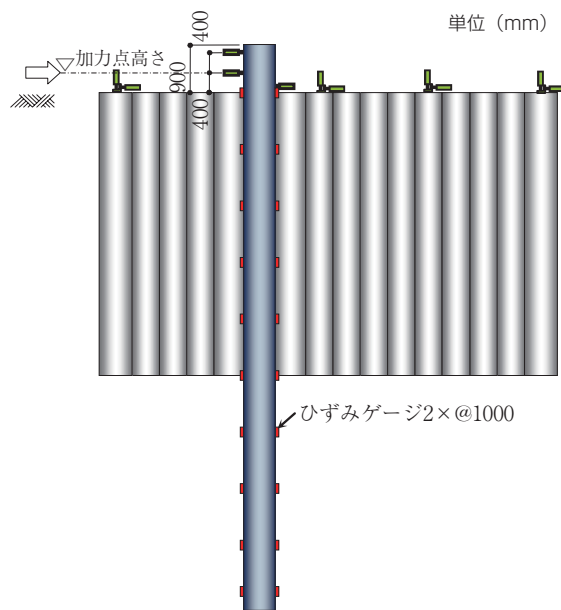
| 計測項目 | 計器 | 点数 | 位置 |
|-------------------|--------|--------------|------------------|
| 杭頭荷重 | ロードセル | 1 | 地表面+400mm |
| 杭頭変位 | 変位計 | 2×2カ所 | 地表面+400mm |
| 杭体ひずみ | ひずみゲージ | 2×10断面 | 地表から@1,000mm |
| 地表面変位 (地盤・改良体) | 変位計 | 鉛直 22, 水平 22 | n, d-1, d-4, s-1 |
| | | 鉛直 27, 水平 27 | d-2, s-2 |
| | | 鉛直 19, 水平 38 | d-3, s-3 |

と思われる。

表層型の場合はNo.s-1で明確な改良効果が確認できるが、No.s-2、3ではNo.nと比べて想定されるような改良効果がみられず、No.s-2の結果がNo.s-1の結果よりも小さい。また改良有りのNo.s-3の結果と改良なしのNo.nの結果に差が認められない。これは、前述したとおり、改良体の品質や施工精度の影響で、特に改良対象層が埋土層のみの浅層改良の場合はその影響が顕著であったものと思われる。



a) 平面図



b) 断面図

図-4 地表面変位、杭ひずみゲージ計測位置

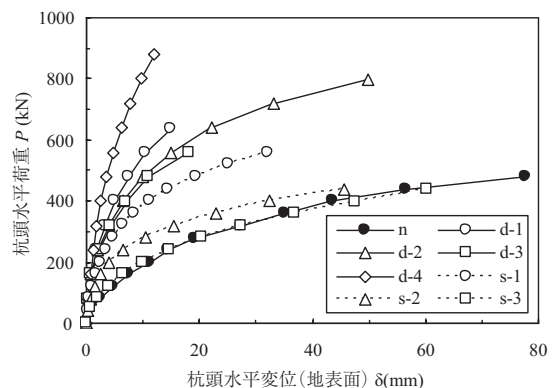


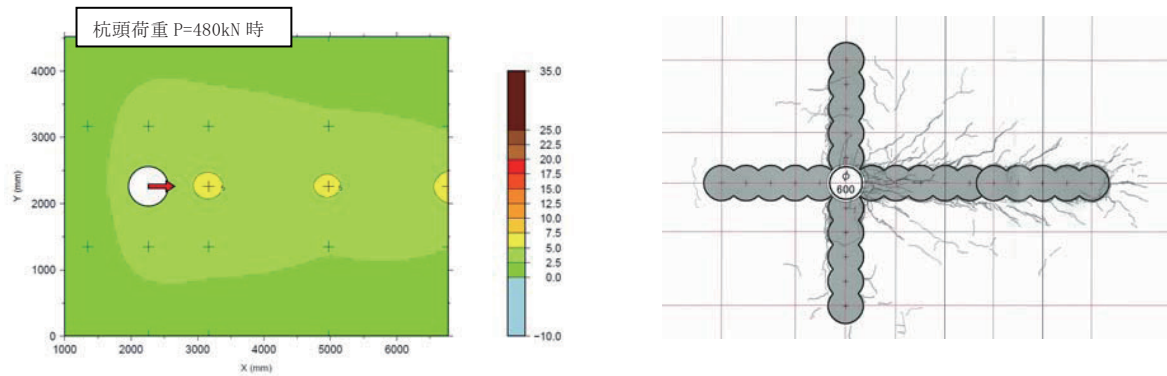
図-5 杭頭荷重-水平変位関係

4.2 地表面地盤の変位とひび割れ状況

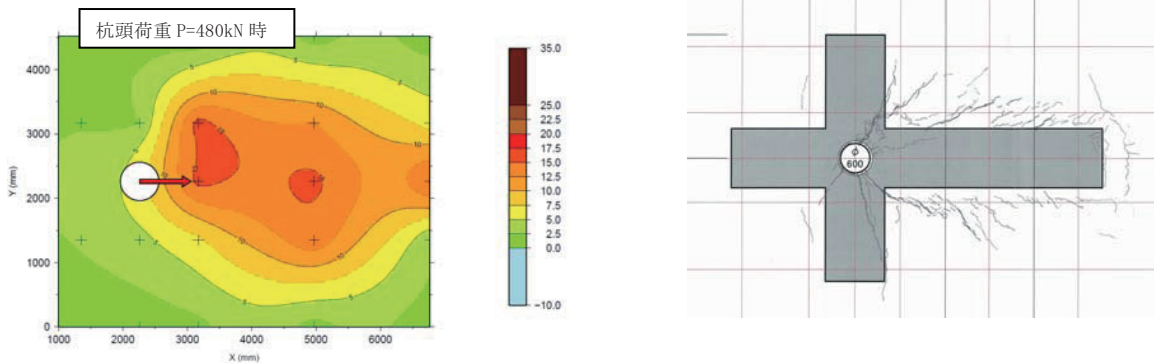
図-5より、改良効果が明確に確認できたNo.d-1とNo.s-1およびNo.nの地表面水平変位分布と、最終ひび割れ状況を図-6に示す。水平変位分布は変位計による測定値に基づいて補間して作成したコンター図である。載荷試験は荷重制御方式としたため、同荷重段階時（No.d-1、No.s-1:480kN、No.n:440kN（最大））の結果を採用した。変位コンター図より改良体を配置することで、載荷前面側の地盤の水平変位が抑止されていることが確認できる。また、No.nの場合は杭前面近傍部で局所的に地盤の水平変位が生じており、影響範囲は杭径Dの3~4倍（3D~4D）程度である。No.s-1の場合は、No.nと比べて変位の影響範囲が拡大し、杭前面側6D~7D程度の範囲まで地盤が変位している。これは、杭径の2倍の幅の改良体を表層部に配置したため、見かけ上杭頭部の杭径が増加したような抵抗を示したと思われる⁷⁾。また、改良体内で変位

分布が異なっていることから、杭と改良体が一体となって剛体的に変形したのではなく、杭と改良体および改良体と周辺地盤が相対的に挙動したと考えられる³⁾。一方、No.d-1の場合は、No.s-1と同様に、変位の影響範囲が広がっているが、変位分布形状がNo.s-1およびNo.nとは幾分異なっており、改良体内で変位量にあまり差が認められない。これは、表層改良よりも原地盤に対する剛性比が高く、杭径とほぼ同等の改良幅である改良体（SMW）を壁状に配置しているため、杭前面側の改良体が杭と一体となって剛体的に挙動したものと思われる。

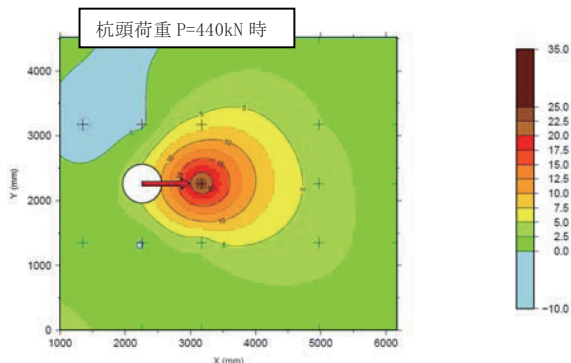
No.d-1はP=720kN時に杭前面側の改良体に局所的な圧縮による通り芯方向のひび割れが生じ、杭変位が増大したため加力を中止した。試験後に改良体側面を掘り出して観察したところ、斜めせん断ひび割れが改良体の先端部にまで達していることが確認された。No.s-1は杭から改良体の隅角部へ向うひび割れの幅が



a) No. d-1 地表面水平変位分布とひび割れ状況



b) No. s-1 地表面水平変位分布とひび割れ状況



c) No. n 地表面水平変位分布

図-6 地表面水平変位分布と最終ひび割れ状況

拡大したが、大きな荷重低下はみられなかった。

4.3 水平地盤反力係数 k_h の逆算

荷重-変位 (地表面) 関係から Chang 式 (「杭が地上に突出している場合」の「杭頭自由」条件) を用いて水平地盤反力係数 k_h 値を逆算した結果を図-7に、基準変位 1cm 時の荷重を補間して逆算した k_{h0} 値 = k_{h0} 値の比較を表-4に示す。ここで、杭体の弾性係数は表-5に示す遠心供試体の圧縮試験による実測値を用い、算定にあたっては杭体のひび割れによる剛性低下を考慮している。杭頭 (地表面) 変位 1cm 時の水平地盤反力係数 k_{h0} 値は、SMW の場合は改良体のないケースに対して約 4~5 倍、浅層改良の場合は、No. s-3 を除き約 2~3 倍に増加していることが確認できる。

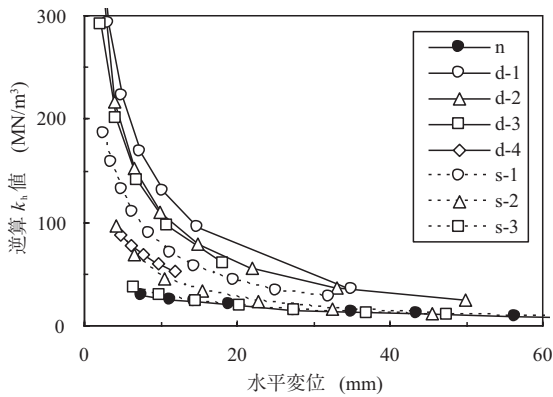


図-7 荷重-変位関係より逆算した水平地盤反力係数 k_h

表-4 基準変位時の水平地盤反力係数 k_{h0}

| No. | n | d-1 | d-2 | d-3 | d-4 | s-1 | s-2 | s-3 |
|------------------|------|-------|-------|-------|----------------|------|------|------|
| 杭径 (mm) | 600 | 600 | 600 | 600 | 1,000 | 600 | 600 | 600 |
| P (kN) | 187 | 550 | 481 | 461 | 812 | 382 | 275 | 201 |
| k_{h0} (MN/m³) | 26.2 | 134.3 | 109.9 | 103.1 | 58.9 | 77.8 | 47.4 | 29.3 |
| n との比 | - | 5.12 | 4.19 | 3.93 | 2.24 (3.73) | 2.96 | 1.80 | 1.12 |

* k_{h0} が杭径に比例するとして正規化した場合の比

表-5 杭体の材料試験結果

| 試験ケース | コンクリート | | 鋼材 | |
|-------|------------|--------|------------|---------|
| | σ_c | E_c | σ_t | E_s |
| n | 106 | 39,300 | - | - |
| d-1 | 100 | 39,400 | - | - |
| d-2 | 108 | 40,000 | - | - |
| d-3 | 102 | 39,300 | - | - |
| d-4 | 107 | 40,200 | 387 | 209,300 |
| s-1 | 103 | 38,900 | - | - |
| s-2 | 100 | 39,100 | 532 | 204,400 |
| s-3 | 105 | 39,400 | - | - |

σ_c : 圧縮強度 E_c, E_s : 弾性係数 σ_t : 引張り強度 (単位: N/mm²)

4.4 杭体の曲げモーメントおよび変位

杭体に貼付けたひずみゲージにより測定されたひずみ (保持時間 3 分後) から、杭の曲げモーメントを算定した。荷重 240kN および 400kN 時における各杭の曲げモーメント分布の比較を図-8に示す。なお、縦軸の深度は試験 GL (地表面) を 0m として表記している。深層型の No.d-1~d-3 は、改良体のない No.n

に対して杭の最大曲げモーメントが、荷重 240kN 時で約 35~48% (最大値の比率)、荷重 400kN 時で約 30~38% に低減されており、低減効果も各ケースともおおよそ同等である。一方、表層型の場合は、No. s-1 では荷重 240kN 時で約 70%、荷重 400kN 時では約 69% に曲げモーメントが低減されているが、No. s-2 および Nos-3 ではあまり低減効果がみられない。これは、前述した改良体の品質のばらつきによる影響と思われる。しかし、No. s-1 については、深層型の場合と比べて、最大曲げモーメント深度および分布形状が異なるもののほぼ同等の改良効果が得られている。

測定されたひずみを基に算定した曲率・変形角から、杭先端の変位を 0 として導いた杭の水平変位の深度分布を図-9に示す。ここでは、図-8と同様の荷重時の結果を示している。なお、同図には杭径を $\phi 1000$ mm とした No.d-4 の水平変位分布も参考までに示している。深層型の No.d-1~d-3 の地表面変位は No.n の 1/6 以下、表層型の No. s-1 の変位は約 1/4 に低減されている。

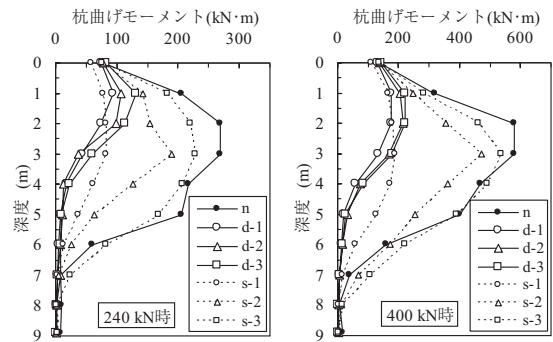


図-8 杭体の曲げモーメント分布

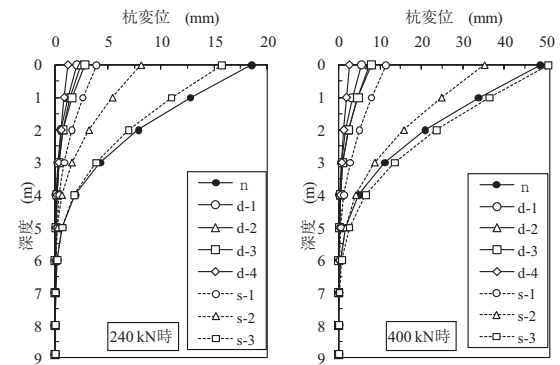


図-9 杭体の水平変位分布

5. シミュレーション解析

3次元 FEM を用いて、一連の水平載荷試験のシミュレーション解析を行った。また、FEM 解析の結果を基に、3次元的に評価した水平地盤反力係数を用いた梁-ばねモデルによる比較計算を行った。なお、水平地盤反力係数の評価方法および梁-ばねモデルによる解法の詳細については (その2) を参照されたい。

5.1 解析ケースと各種条件

解析ケースを表-6に示す。水平載荷試験で明確な改良効果が得られたNo.d-1～d-3、No.s-1および改良無しのNo.nについて行った。

原地盤の変形係数 E_0 を表-7に示す。試験GL-2mの表層部は急速平板載荷試験の値、試験GL-2m以深はN値から推定した弾性波速度より動的ヤング率を計算し、それを20～50%の範囲まで低減した値を参考に、改良無しのNo.nの試験結果からFEMモデルで同定している。

改良体の変形係数Eを表-8に示す。表層部分は急速平板載荷試験の値、試験GL-2m以深はコアボーリングにて採取した供試体の一軸圧縮試験結果より E_{50} の値を採用した。

また、杭の諸元およびM- ϕ 関係を図-10に示す。FEM解析では杭材を弾性とし、梁-ばねモデルでは非線形性を考慮した。

表-6 解析ケース

| ケース | 杭径 杭長 | 地盤改良体 | | | 加力方向 |
|-----|-----------------------|---------|--------|---------|-------|
| | | 深さ Z(m) | 幅 D(m) | 長さ L(m) | |
| n | | - | - | - | - |
| d-1 | 杭径 600mm | 5.0 | 0.6 | 4.50 | 通り芯方向 |
| d-2 | 杭長 (加力点から) 9.5m | | | 6.75 | |
| d-3 | | | | 4.50 | |
| s-1 | | 0.9 | 1.2 | 5.00 | 通り芯方向 |

表-7 原地盤の変形係数

| 試験 GL- (m) | 土質 | 変形係数 E_0 (MN/m ²) |
|---------------|-----|------------------------------------|
| 0.0～2.0 | 埋土 | 7 |
| ～6.0 | シルト | 30 |
| ～8.0 | 細砂 | 100 |
| ～9.1 | | 150 |

表-8 地盤改良体の変形係数

a) 深層型改良体

| 試験 GL- (m) | 変形係数 E (MN/m ²) | 剛性比 E/ E_0 |
|---------------|--------------------------------|-----------------|
| 0.0～2.0 | 140 | 20倍 |
| ～5.0 | 570 | 19倍 |

b) 表層型改良体

| 試験 GL- (m) | 変形係数 E (MN/m ²) | 剛性比 E/ E_0 |
|---------------|--------------------------------|-----------------|
| 0.0～0.9 | 95 | 14倍 |

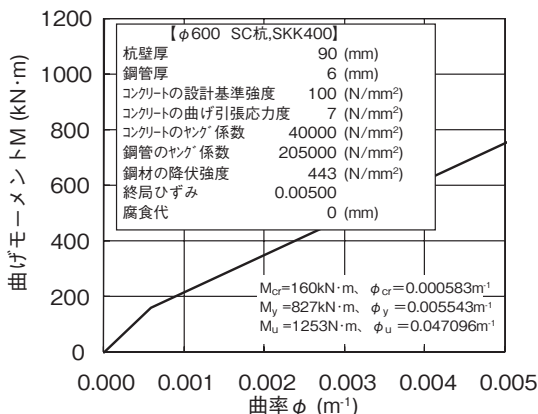


図-10 杭の諸元とM- ϕ 関係

5.2 解析モデル

(1) FEMモデル

代表として、No.d-1の解析モデルを図-11に示す。地盤および改良体は3次元のソリッド要素とし、周辺地盤は境界部の影響を受けないように載荷前面側は杭芯より79m(杭径の約131倍)、その他の方向は杭芯より21m(杭径の約35倍)までをモデル化している。杭はビーム要素とし、杭径の効果は中空円筒および線形結合条件(杭節点と近傍地盤節点を同変位とする条件)で表現した。地盤は杭先端深度(試験GL-9.1m)までをモデル化し、底面境界条件はピン支持(変位拘束)とした。

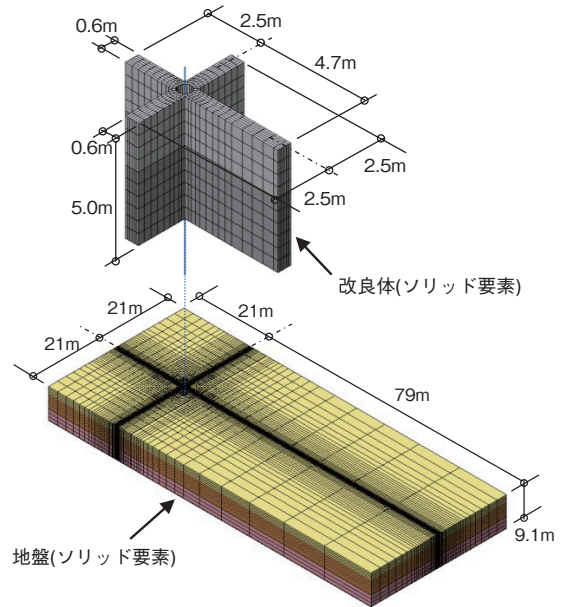


図-11 FEM解析モデル(No.d-1)

(2) 梁-ばねモデル

図-12に解析で用いた梁-ばねモデルを示す。試験条件に合わせて杭頭自由、杭先端ピン支持とした。地盤ばねは水平地盤反力係数 k_h から設定し、以下の式により地盤の非線形性を考慮している¹⁾。

$$k_h = k_{h0} \times y^{-0.5} \quad (y \geq 0.1\text{cm}) \quad (1)$$

ここに、基準変位時の水平地盤反力係数 k_{h0} は、原地盤の変形係数がNo.nの試験結果からFEMを用いて同定した値であることから、成層地盤モデルの解析結果を基に以下の式より算定した。成層地盤モデルとは、図-11に示したFEMモデルにて改良深さに相当する範囲の表層地盤を水平に一樣な地盤とし、改良体と原地盤からなる複合地盤と等価な変形係数を採用したモデルである(その2参照)。

$$k_{h0i} = R_i / \{(\delta_{pi} - \delta_{si}) \cdot (B \cdot \Delta L_i)\} \quad (2)$$

$$k_{h0i} = a_i \cdot E_{0eqi} \cdot B^{-3/4} \quad (3)$$

ここに、

k_{h0i} : 基準水平地盤反力係数 (kN/m³)

- R_i : FEMモデルの各杭節点 (i) における地盤反力 (kN)
- δ_{si} : 地盤の水平変位 (m)
- δ_{pi} : 杭水平変位 (m)
- B : 杭径 (m)
- ΔL_i : 杭負担長さ (m)
- a_i : 比例定数
- E_{0eqi} : 格子状複合地盤と等価な成層地盤剛性 (kN/m²)

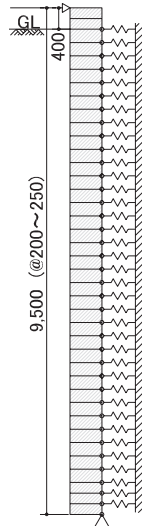


図-12 梁-ばねモデル

5.3 解析結果

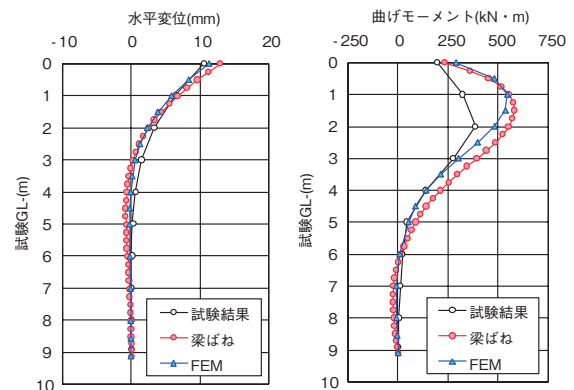
FEMモデルによる解析結果より得られた、等価地盤剛性 E_{0eq} および基準変位 1cm 時の水平地盤反力係数 k_{h0} の値を表-9に示す。等価地盤剛性 E_{0eq} はいずれのケースでも約 45MN/m² である。格子状改良体を配置することで、改良体と原地盤を複合地盤ととらえた場合、原地盤の地盤剛性 ($E_0 = 7MN/m^2$) に対して約 6~7 倍の地盤剛性が得られている。また、原地盤の水平地盤反力係数に対する改良地盤の比は、深層型の場合、いずれのケースでも試験 GL ~ -2m で 5~6 倍、試験 GL ~ -2~-5m では 2.5 倍となった。表層型の場合は、試験 GL ~ -0.9m で 4~5 倍であった。

次に、図-13にFEMモデルと梁-ばねモデルおよび試験結果より得られたNo.d-1とNo.d-3の杭の変位分布および曲げモーメント分布の比較を示す。変位分布はNo.d-1およびNo.d-3とも、解析結果と試験結果は比較的良好に合っており、杭頭変位量もほぼ一致している。一方、曲げモーメント分布は、FEMモデルと梁-ばねモデルの結果は比較的一致しているものの、試験結果と比べると最大値およびその発生深度に少し差がみられる。これは、深層型の場合は施工管理上深度方向で異なった試験法を用いて改良体の変形係数を評価したことによる影響ではないかと思われる。

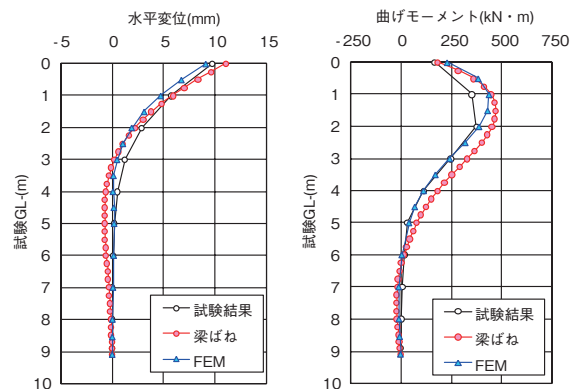
以上より、荷重方向に関わらず、FEMモデルを用いて3次元的に評価した水平地盤反力係数を用いることで、梁-ばねモデルを用いてFEM解析結果および試験結果を表現することが可能であると考えられる。

表-9 等価剛性 E_{0eq} と水平地盤反力係数 k_{h0} の算定結果

| ケース | 試験 GL- (m) | E_{0eq} (MN/m ²) | k_{h0} (kN/m ³) |
|-----|------------|--------------------------------|-------------------------------|
| n | 0.0 ~ 2.0 | — | 13,000 |
| | ~ 5.0 | — | 55,000 |
| d-1 | 0.0 ~ 2.0 | 45 | 79,000 |
| | ~ 5.0 | 83 | 145,000 |
| d-2 | 0.0 ~ 2.0 | 48 | 81,000 |
| | ~ 5.0 | 87 | 146,000 |
| d-3 | 0.0 ~ 2.0 | 45 | 72,000 |
| | ~ 5.0 | 83 | 132,000 |
| s-1 | 0.0 ~ 0.9 | 45 | 65,000 |



a) No.d-1 (P=575kN, 通り芯方向荷重)



b) No.d-3 (P=461kN, 45度方向荷重)

図-13 変位・曲げモーメント分布の比較

6. まとめ

格子状地盤改良杭 (Head Lock Pile) 工法に対する原位置水平荷重試験を実施し、以下の知見が得られた。

- (1) 杭周りに格子状改良体を配置することで、原地盤に対して水平地盤反力係数が増大し、杭体の曲げモーメントおよび杭頭変位の低減効果が認められた。
- (2) 試験結果から Chang 式を用いて逆算した杭頭 (地表面) 変位 1cm 時の基準水平地盤反力係数 k_{h0} 値は、原地盤に対して、深層型の場合は約 4~5 倍、表層型の場合は約 2~3 倍に増大した。
- (3) 試験は改良体を連結しないクロスタイプで実施したが、改良長さおよび荷重方向の違いによる改良効果の明確な違いは認められなかった。

- (4) 表層型の場合は、杭と改良体および改良体と周辺地盤が相対的に挙動していた。また、(2)の結果より、杭径よりも幅の大きい改良体を配置することで、水平地盤反力係数 k_h ×(杭径D×2～3倍)程度の抵抗が得られたと考えられる。
- (5) 深層型の場合は表層型と異なり、杭と改良体が一体となって挙動していた。そのため、連続的に配置するグリッドタイプの場合は背面側の杭と改良体の変形による影響を受けると考えられる。
- (6) FEMモデルによる試験シミュレーション解析では、試験結果とほぼ同様の結果を得た。また、3次元のFEM解析結果から算出した水平地盤反力係数を用いることで、梁-ばねモデルで試験結果が評価可能であることを確認した。
- (7) 3次元FEMを用いた多層地盤によるシミュレーション解析の結果、改良体と原地盤を複合地盤ととらえた場合の等価剛性は、原地盤の地盤剛性に対して、表層型の場合は4～5倍、深層型の場合は試験GL～-2mで5～6倍、試験GL-2～-5mで2.5倍であった。
- (8) 本試験では、深層型と表層型で改良体の抵抗機構が異なることを確認できたが、地震時の改良地盤変位の影響を確認するには至らなかった。ただし、既往の研究⁸⁾では浮き型改良の場合は着底型と比べて上部構造および地表面に生じる加速度を低減

する効果が高いとの報告もあり、今後動的な実験・解析などによる検討も必要と考える。

謝辞

本研究は、安藤建設、西松建設、間組、ジェコス、成幸利根、トーヨーアサノ、三谷セキサンとの共同研究として実施したものである。関係各位に深謝します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001
- 2) 日本建築学会：建築基礎のための地盤改良設計指針案，2006
- 3) 本間裕介，富永晃司，小椋仁志，永井及：鉄鋼スラグによる改良地盤中の水平抵抗増大効果確認実験，第49回地盤工学シンポジウム，2004
- 4) 佐野大作，伊勢本昇昭：杭の水平剛性確保のための合理的な地盤改良工法，日本建築学会学術講演梗概集（九州），2007
- 5) 日本建築センター：改訂版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針，2002
- 6) 土質工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説，1983
- 7) 濱田純次，土屋富男，加倉井正昭，山下清，河合栄作，桑原文夫：表層地盤改良を施した杭の水平載荷実験，第36回地盤工学研究発表会（徳島），2001
- 8) 宮島正悟，北詰昌樹，飯田清：固化処理工法による単杭の地震時水平抵抗の増大効果，港湾空港技術研究所資料，No.1048

