

格子状地盤改良杭 (Head Lock Pile) 工法の開発

その2 設計手法の概要

金子 治^{*1}

伊勢本昇昭^{*1} 保井 美敏^{*1}
佐野 大作^{*1} 成田 修英^{*1}
田口 智也^{*1}

概 要

(その1) に引き続き、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ために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) 工法について、設計法の概要、試設計について報告する。

一般に、水平力に対する杭の設計のための応力解析手法としては、杭を梁、地盤をばねとしたモデル (梁-ばねモデル) が用いられる。しかしながら、Head Lock Pile 工法による改良深さの範囲では格子状の改良体とその周辺地盤からなる複合地盤となることから、改良体の影響を適切に評価できるように改良体および周辺地盤をモデル化した3次元 FEM 解析を用いて地盤ばねを算定し、ここから求まる水平地盤反力係数を梁-ばねモデルに適用して杭の応力解析を行う。

この設計手順の妥当性および本工法の改良効果、適用範囲については、(その1) に示した水平載荷試験と並行して、条件を変えたさまざまな解析による検証を行って確認している。さらに、この設計手順を用いてモデル建物に対する試設計を行って、本工法による合理化の効果について確認した。

Development of Head Lock Pile System

Part 2 Outline of Design Procedure

Osamu KANEKO^{*1} Noriaki ISEMOTO^{*1}
Mitoshi YASUI^{*1} Daisaku SANO^{*1}
Nobuhide NARITA^{*1} Tomoya TAGUCHI^{*1}

Next to Part 1, this paper introduces the outline of a design procedure a the case study of the Head Lock Pile System consisted of grid or cross-shaped hardened soil around the pile head by a deep or shallow mixing method. Piles reinforced by this System are able to keep lateral stiffness during earthquakes even in soft ground like a liquefiable sand layer or alluvial clay deposit.

In usual design procedure of piles for horizontal loading, so-called 'a Beam-Spring Model' composed by piles converted to beams and soils converted to springs is employed. Because the piles and the soils treated by the Head Rock Pile System has 3-dimensional characteristics, the influence of characteristics of treated soils must be included properly by 3-dimensional Finite Element Method in estimation of the value of springs (coefficient of horizontal subgrade reaction) in a design procedure using 'a Beam-Spring Model' to calculate stresses of piles of this System for horizontal loading.

The propriety of devising design procedure and the applicable range of this System is confirmed by various analytical investigations using 3-dimnshional Finite Element Method in parallel with the horizontal load tests shown in part 1. Finally, we confirm the advantage of this System through the case study applying this design procedure to a model building.

*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2 設計手法の概要

金子 治^{*1} 伊勢本昇昭^{*1}
 保井 美敏^{*1} 佐野 大作^{*1}
 成田 修英^{*1} 田口 智也^{*1}

1. はじめに

一般に、水平力に対する杭の設計のための応力解析手法としては、杭を梁、地盤をばねとしたモデル（梁-ばねモデル）が用いられる。しかしながら、Head Lock Pile 工法による改良深さの範囲では格子状の改良体とその周辺地盤からなる複合地盤となることから、梁-ばねモデルで応力解析を行うためには、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。

そこで、本工法の開発にあたって、(その1)に示した実験による検証に加えて、各種解析を実施し、改良体の影響を適切に評価できるように改良体および周辺地盤をモデル化した3次元FEM解析¹⁻³⁾を用いて地盤ばねを算定し、ここから求まる水平地盤反力係数を梁-ばねモデルに適用して杭の応力解析を行う手法を構築した。本報(その2)では、設計の手順およびこれらの解析結果を示すとともに試設計について報告する。

2. 設計の考え方

2.1 設計方法のフロー

本工法の水平力に対する設計方法のフローを図-1に示す。本工法では、杭の水平力に対する一般的な設計方法である梁-ばねモデルを用いて設計することを基本とする。ただし、本工法は改良深さの範囲では格子状の改良体とその周辺地盤からなる複合地盤となることから、改良深さ部分の地盤ばね値（水平地盤反力係数）を評価するために、設計条件（地盤調査結果、杭径、改良体寸法、改良体の設計用変形係数）に基づ

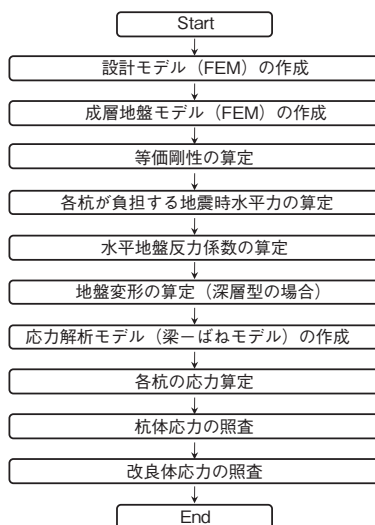


図-1 水平力に対する設計の手順

いて、杭を中心としたスパンの1/2の範囲で杭、地盤、改良体を切り出してモデル化した3次元FEM解析を用いる。広い範囲で複数の杭・改良体・連続する地盤を切り出してモデル化することの妥当性については3.に示す解析により確認している。

解析モデルは改良体の形状をそのままモデル化した設計モデルで梁-ばねモデルに対応するよう水平に変形係数が一様とした成層地盤モデルの2種類で、深層型と表層型でモデル化方法は同一であるが、改良体が壁状と板状で形状が異なることを荷重方向の地盤の境界条件により考慮している。これらを用いた水平地盤反力係数の評価手順を以下に示す。

2.2 設計モデルの作成

設計モデルは図-2に示すようにスパン中央を境界とし、地盤、改良体はソリッド要素、杭は梁要素として杭径の大きさを考慮できる連結要素¹⁾を前面側に用いるか、あるいはソリッド要素として地盤との境界面にジョイント要素を設置してモデル化している。材料特性はすべて弾性とする。地盤のモデル化深さおよび杭先端条件については杭、支持地盤の特性に応じて適切にモデル化する。

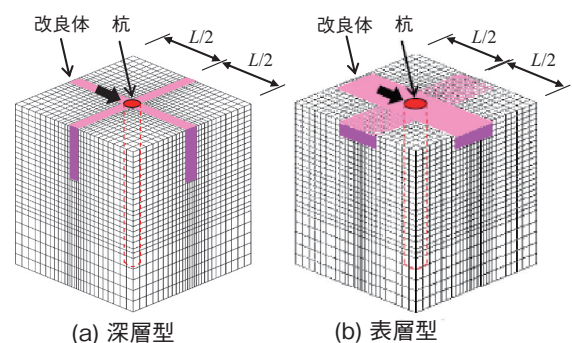


図-2 Head Lock Pile 工法の設計モデル

境界条件は、いずれの改良形式でも側面は荷重直交方向の変位を拘束、底面は固定とする。深層型については改良体を介した杭間の相互作用が無視できないと判断し、杭が連続して無限に連なる条件となるよう荷重前面・背面地盤の鉛直変位を拘束する（水平ローラー境界）。

表層型では多層地盤に対する一般的な設計法に準じて杭間の相互作用を考慮せず、荷重背面地盤はフリー、荷重前面地盤は水平変位を拘束してモデル化範囲の改良体・地盤のみを考慮する。

*1 技術研究所

2.3 成層地盤モデルによる等価剛性の決定

続いて、設計モデルと同じ形状で、梁-ばねモデルに対応した水平に一樣な変形係数としたモデル（以下、成層地盤モデル）を作成する。

成層地盤モデルを用いて任意の荷重を杭頭に加えて、改良深さ分の変形係数を変動させ、設計モデルと杭頭水平変位量が等しくなるような変形係数（以下、等価剛性）（図-3）を求める。

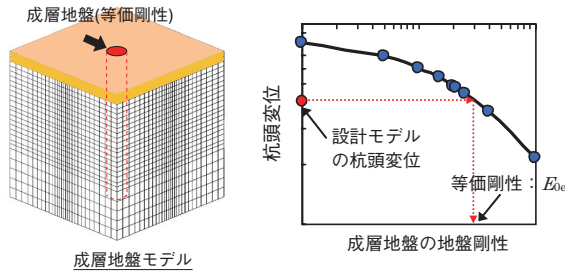


図-3 等価剛性の決定方法

2.4 水平地盤反力係数の算定

等価剛性の成層地盤モデルに任意の荷重 P を与えて得られる杭のせん断力分布、杭と地盤の相対変位分布から基準変位時（地盤弾性）の水平地盤反力係数 k_{ho} を以下により算出する。

成層地盤モデルにより、深さ Z_i の上下の杭要素の平均せん断力の差分 ($Q_i - Q_{i-1}$)、すなわち地盤反力 R_i と杭と地盤の相対変位 ($\delta_{pi} - \delta_{si}$) が得られるので、ここから地盤ばね値 K_{hoi} を (1) 式で、水平地盤反力係数 k_{hoi} を (2) 式で導く。

$$K_{hoi} = R_i / (\delta_{pi} - \delta_{si}) \text{ (kN/m)} \quad \text{式 (1)}$$

$$k_{hoi} = K_{hoi} / (B \cdot \Delta z_i) = R_i / \{(\delta_{pi} - \delta_{si}) \cdot (B \cdot \Delta z_i)\} \text{ (kN/m}^3\text{)} \quad \text{式 (2)}$$

ここで、 B : 杭径、 Δz_i : 杭の区間長

梁-ばねモデルは、杭の設計に一般に用いられている Winkler ばねモデルを用い、地盤は原則として、杭体は設計条件に応じて、それぞれの非線形性を考慮する。

2.5 深層型で連結されている場合の影響評価

前述のとおり深層型の場合は、杭-杭間を壁状の改良体で連結しているため、杭同士の相互作用の影響が無視できないと判断し、杭が連続して無限に連なるような境界条件とした。さらに、梁-ばねモデルではこの影響を考慮するために、等価剛性の成層地盤モデルまたは設計モデルを用いた3次元 FEM 解析により、

杭頭に水平力 P を与えた時の境界部の各深さの平均水平地盤変位（以下、等価地盤変位。図-4 参照）を求め、この変位を加えることとした。設計時にはこの等価地盤変位による杭応力と杭頭水平力による杭応力は単純累加する。

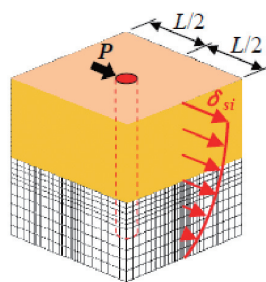


図-4 等価地盤変位

3. 設計モデルの妥当性の検証のための解析

本工法では水平地盤反力係数算定のため、杭間スパンの1/2の範囲で切り出した設計モデルおよび成層地盤モデルを用いる。その妥当性を検証するため、深層型については実際の建築物を模擬した杭が連続するモデル（以下、連続モデル）の解析を実施し、同条件の設計モデルとの比較を行った。

深層型では、設計モデル、成層地盤モデルの境界条件を連続条件として改良体を介した相互作用の影響を考慮するが、図-5に示した連続モデルとの比較によりその妥当性を検証する。連続モデルの地盤は5m × 3層の深さ15mである。杭間のスパンは6mで加力方向に5スパン連続し、その前後に杭配置区間の2倍弱の地盤（53m）を設け、前後の境界条件を自由境界とした（全長136m）。加力直交方向は6mスパンの半分までとし、側面の面外方向の変位を拘束した。また対称性を考慮し、1/2モデルとした。改良体は深層型を模擬して、改良幅0.6m、改良深さ10mとした。杭は既製杭（PHC杭：ヤング率 $E = 40,000 \text{ MN/m}^2$ ）を想定した梁要素（杭径：0.6m、杭長：15m）とし、杭径分の前面地盤は同一自由度で連結し、杭後面の地盤とは連結していない。杭頭条件は回転拘束、杭先端はピン支持とした。

設計モデルは、杭を中央にして4方向に1/2スパン分（3m）をモデル化し、改良体を4方向に配置した。

原地盤の変形係数を表-1に、改良体の諸元を表-2に示す。加力は杭頭に1cmの強制変位を与えて、両者の比較を行った。設計モデルおよび連続モデル（中央の杭A,B）の解析結果を図-6に示すが、曲げモーメント、水平変位分布ともにおおむね一致した。

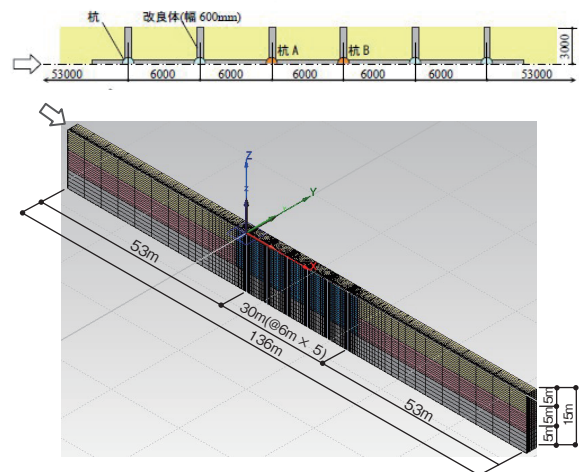


図-5 連続モデル

表-1 原地盤物性

深さ (m)	変形係数 (MN/m ²)
0 ~ 5	0.5
5 ~ 10	2.0
10 ~ 15	10.0

表-2 SMW 諸元

改良深さ (m)	10
改良幅 (m)	0.6
変形係数 (MN/m ²)	350
ポアソン比	0.25

以上から、設計モデルを用いることが妥当であると判断した。

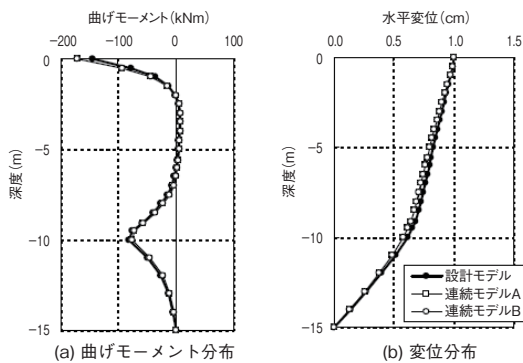


図-6 解析結果

4. 改良効果、適用範囲に関する解析的検討

本工法の改良効果、適用範囲を把握するため、改良深さ、改良長（スパン長）、表層型については改良幅および改良体の変形係数、深層型については等価剛性をパラメータにした解析を実施した。いずれの検討も杭径は0.6m、杭長は表層型では10m、深層型では15mとしている。また、杭頭は固定条件とした。

①改良深さの影響

図-7に表層型の、図-8に深層型の解析結果を示す。表層型では改良深さが杭径の1倍以上になっても杭頭曲げモーメントはほとんど変わらないが、2倍を超える範囲では若干モーメントの増加があった。杭頭変位は3倍程度までは低減する傾向がみられた。一方、深層型では、杭頭曲げモーメントは改良深さ3m程度で収束傾向がみられるが、杭頭変位は10mを超えても低減する。

②改良幅の影響（表層型）

図-9に解析結果を示す。改良幅が杭径の2倍までの範囲では改良幅の増加により低減効果がみられるが、それ以上の範囲では杭頭曲げモーメント、杭頭変位共にほとんど一定の値となる。

③改良長（スパン）の影響

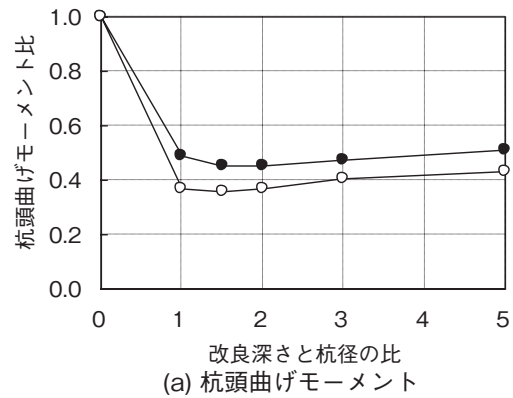
図-10に表層型の、図-11に深層型の解析結果を示す。表層型、深層型共に通常想定されるスパンの範囲（6～10m程度）では杭頭曲げモーメントはほとんど変わらないことを確認した。

④改良体と原地盤の変形係数の比の影響

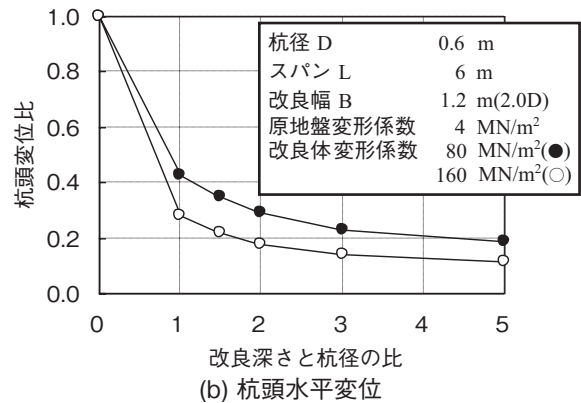
図-12に表層型の、図-13に深層型の解析結果を示す。改良形式によらず表層型では改良体の変形係数・等価剛性が大きくなると杭頭曲げモーメントおよび杭頭変位は小さくなるが、深層型では、改良体の変形係数が大きくなると地中部、特に改良体と下部地盤との境界部で発生する曲げモーメントが増大する傾向がみられた。

⑤改良体の地震時挙動に関する検討

地震時に改良体が杭の挙動に及ぼす影響について動的解析を行った。図-14に改良地盤における応答変位の時刻歴を示す。解析結果によると、改良体は周辺地盤と同位相で挙動しており、大きな差は生じないことが確認された。

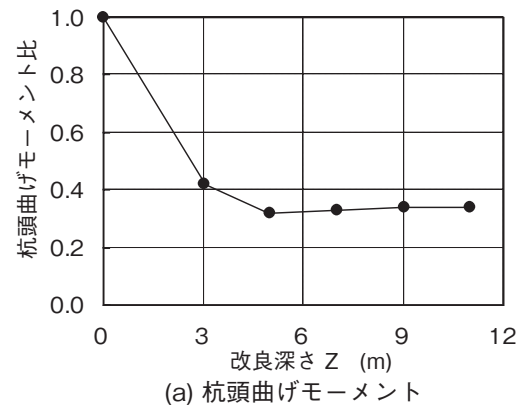


(a) 杭頭曲げモーメント

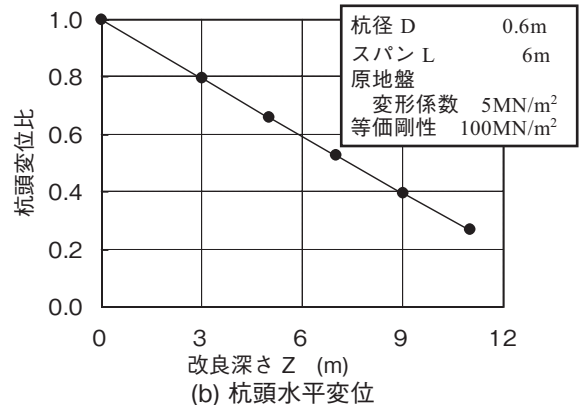


(b) 杭頭水平変位

図-7 表層型における改良深さの影響



(a) 杭頭曲げモーメント



(b) 杭頭水平変位

図-8 深層型における改良深さの影響

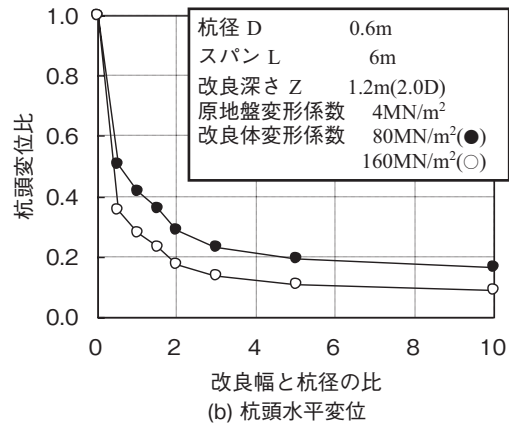
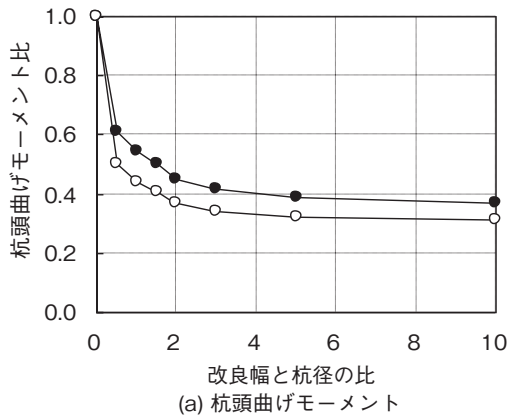


図-9 表層型における改良幅の影響

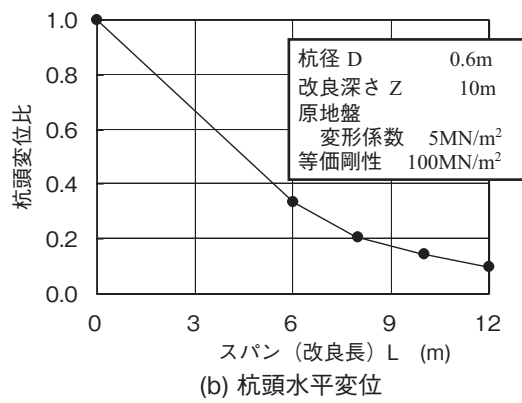
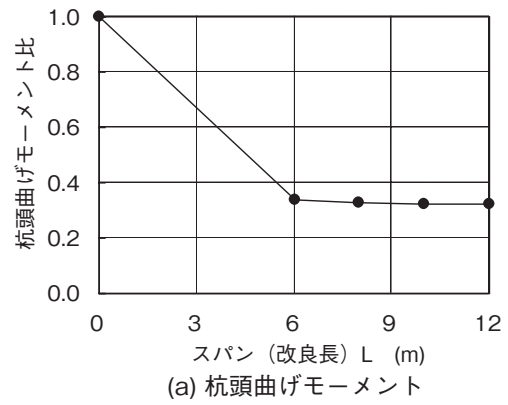


図-11 深層型における改良長の影響

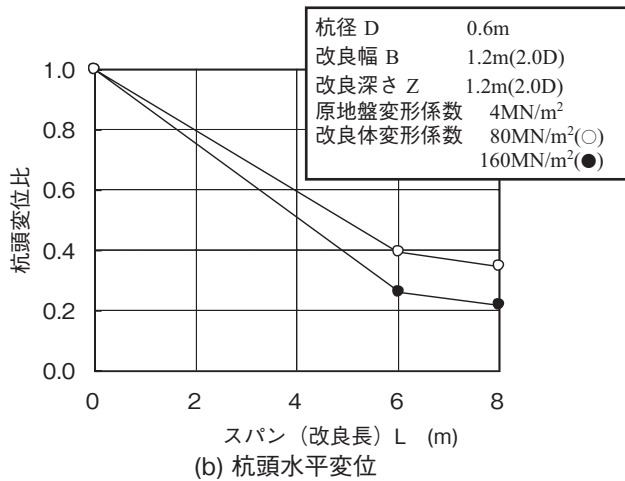
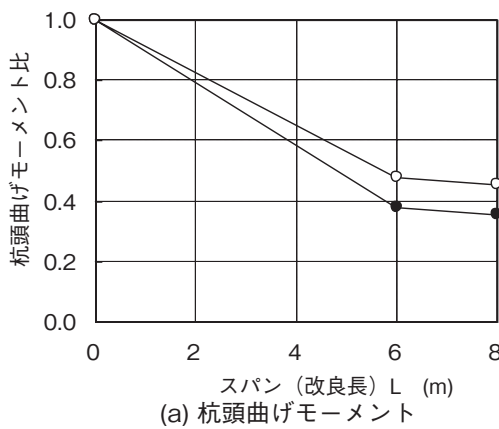


図-10 表層型における改良長の影響

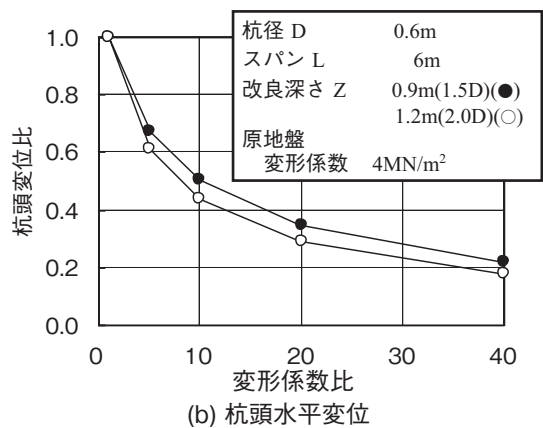
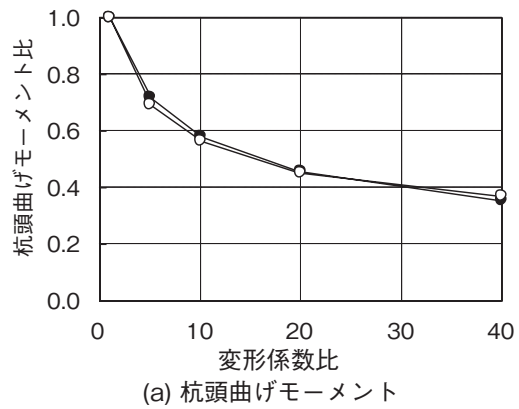


図-12 表層型における変形係数比の影響

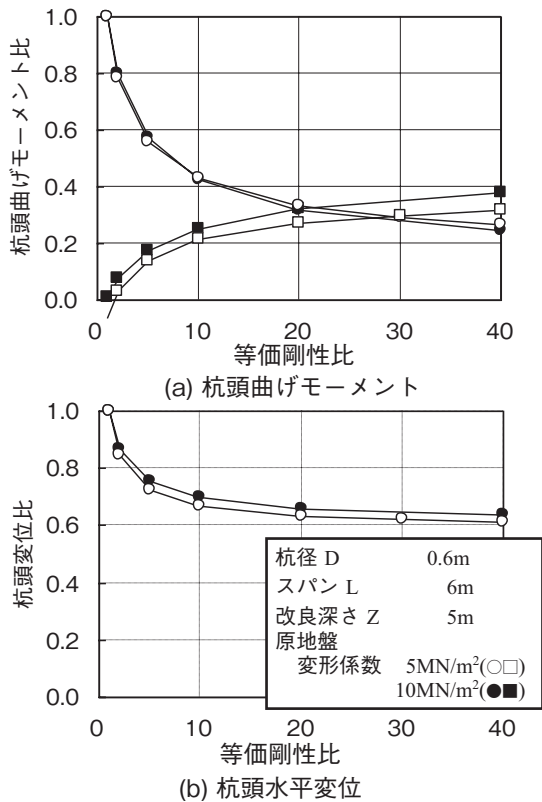


図-13 深層型における等価剛性比の影響

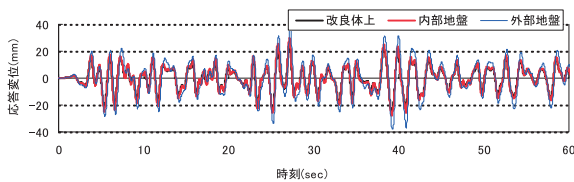


図-14 改良地盤における応答変位の比較

5. 試設計

本工法を用いたモデル建物に対する試設計結果を以下に紹介する。地盤は図-15に示すように、表層が平均N値2.5程度の粘性土地盤、支持層深さはGL-14mを想定している。

建物条件を以下に示す。

- 地上3階地下なしのRC造
- 平面寸法 3×3スパン 24×19m (建築面積456m²)

地盤改良工法は浅層混合処理工法による表層型Head Lock Pile工法を適用した。改良体の仕様は幅1.4m(杭径の2倍)、深さ1.4m、Fc=400kN/m²である。図-16に地盤改良計画図を示す。

この建物・地盤に対してHead Lock Pile工法を適用した場合と適用しない場合(未改良)の杭のモー

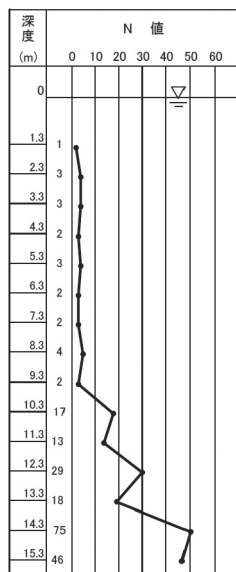


図-15 想定地盤

メントおよび変位分布の比較を図-17に示す。同図より杭頭水平変位は約20%、杭頭曲げモーメントは約60%低減していることがわかる。

この応力解析結果に基づいて断面設計を行った結果を表-3に示す。杭頭曲げモーメントの低減により杭径は200mm細くすることができた。なお、ここでは杭径低減を優先したために、鋼管の削減は最低限にとどまっている。あわせて、杭の曲げ戻しによる応力が低減されるため基礎梁の断面寸法、配筋量も小さくすることができた。

以上の結果、表-3に示したように、Head Lock Pile工法を用いることで未改良に対しておおむね基礎工事費の13%のコストダウンが図れた。

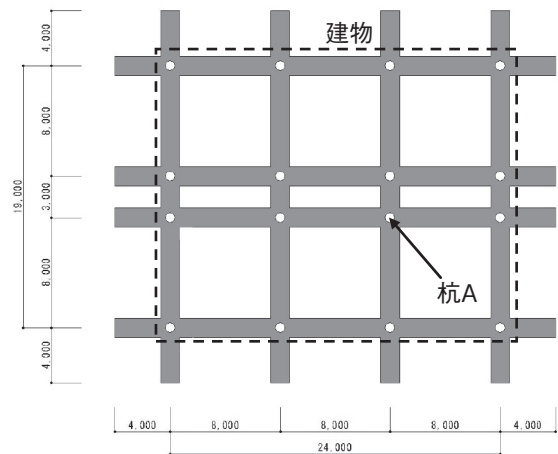


図-16 地盤改良計画図

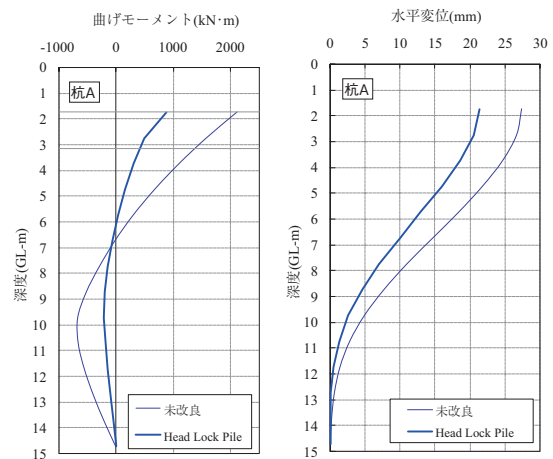


図-17 改良効果

表-3 杭・基礎梁断面およびコストの比較

		未改良	Head Lock Pile
杭種		SC杭 t=9mm	SC杭 t=8mm
杭径 (mm)		900	700
基礎梁断面 (mm)		700×2200	500×1800
配筋	端部	上端筋	7-D29
		下端筋	10-D29
		スターラップ	D13@200
	中央	上端筋	5-D29
	下端筋	10-D29	
	スターラップ	D13@200	
コスト (未改良を100)		100	87

6. まとめ

本報告では、格子状地盤改良杭 (Head Lock Pile) 工法に対する設計法の概要およびその適用範囲について述べた。以下に知見をまとめる。

- (1) 本工法を用いた杭の水平力に対する設計において、3次元 FEM 解析に基づいて水平地盤反力係数を評価した上で、一般的に杭の設計に用いられる梁-ばねモデルを適用する方法を示した。
- (2) 杭を中心としたスパンの 1/2 の範囲で杭、地盤、改良体をモデル化した設計モデルが、本工法の設計に適用できることを確認した。
- (3) 表層型の適用範囲として、改良幅を杭径の 2 倍以上、改良深さが杭径の 1 倍以上 2 倍以下、深層型では改良深さを 3m 以上とすることで、一定の改良効果を確保できる。
- (4) 表層型に試設計の結果、Head Lock Pile 工法を用いることで杭径および基礎梁の断面寸法を小さくすることができ、未改良に対して約 13% のコストダウンとなった。

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) 前田良刀, 緒方辰男, 徐光黎, 平井卓: 地盤改良複合杭基礎の開発とその支持力特性, 土木学会論文集, No.686, VI -52, pp.91-107, 2001
- 2) 本間裕介, 富永晃司: 水平力を受ける鉄鋼スラグ浅層改良杭に関する一解析法-現場実験結果との比較-, 日本建築学会学術講演梗概集 B-1, pp.617-618, 2007
- 3) 河野真美, 駒場勝美, 乃村和浩, 平井卓, 土屋富男, 山下清: 地盤改良複合杭の水平載荷試験, 土木学会年次学術講演会Ⅲ, pp.864-865, 1999

