

水平力を負担する既存杭の活用方法

勝 二 理 智 藤 森 健 史

Reuse Methods of Existing Piles Subjected to Lateral Load

Michito Shoji Takeshi Fujimori

Abstract

In general, it is necessary to draw out and dispose existing piles when replacing a building. Drawing out of the piles generates much construction waste and CO₂. It is important to reuse existing piles for promoting a recycling-oriented society. Reuse methods of piles are categorized as follows; (a) The piles are connected to a mat slab directly. (b) The piles are connected to a raft with some kind of pile head connection. (c) The soil is improved shallowly between the piles and the raft. This paper presents an analytical study of the seismic properties of those methods. The major findings are summarized as follows; 1) In case of (a) (b), the rigidity of existing pile heads may be lower than the rigidity assumed in seismic design, New piles may be excessively loaded laterally. Both piles are loaded reasonably by setting an appropriate rigidity of the pile heads. 2) In case of (c), both piles are loaded reasonably by setting an appropriate strength and depth of improved soil.

概 要

建物の建替え時に、既存杭は基本的に撤去する必要がある。しかし、既存杭を引抜き撤去するには、多大なエネルギーを必要とし、大量の廃棄物やCO₂を排出することになる。このため、既存杭を有効に活用することは、循環型社会を構築する上で大変重要である。このような背景より、本論文では既存杭の活用方法として、(a)マツトスラブ一体化構法、(b)杭頭支承構法、(c)ソイルセメント構法の3つを挙げ、水平力を負担できるこれらの構法の耐震性に係る特性についての検討を行った。その結果、(a),(b)について、杭頭施工法等に起因して既存杭頭固定度が低下し、それに伴う新設杭の応力負担増を想定する必要があるが、各杭の杭頭固定度をバランス良くすることで合理的に設計できることを示した。(c)について、地盤改良に伴う既存杭の応力負担により新設杭の負担応力を減らせること、地盤改良強度や深さを調整することで各杭の応力負担を合理化できることを明らかにした。

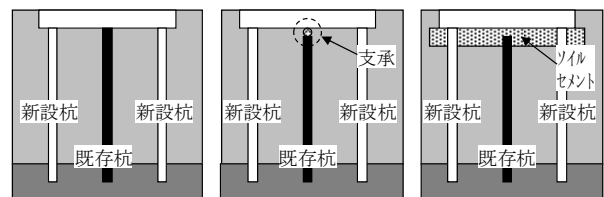
1. はじめに

従来、建物の建替え時に、既存杭は基本的に撤去することが必要である。既存杭を引抜き撤去することは、地盤の緩みにより周辺建物に影響を及ぼす可能性がある。また、撤去にあたり多大なエネルギーを必要とし、大量の廃棄物やCO₂を排出するため、「持続可能な社会」の実現に向けては、既存杭の有効活用が重要な要素になると考えられる。ここで、建物の建替え時に、既存杭を再利用できれば、上記の問題を解決でき環境負荷の低減に寄与するだけでなく、工期短縮・ローコスト化等の効果も期待でき、メリットが大きい。

ところが現状では、既存杭の健全性に対する評価の難しさ、設計・行政手続きの煩雑化等が障害となり、既存杭が広く活用される状況には至っていない。また、既存杭が活用されるとしても、水平力に対する評価が難しいため、鉛直力のみを負担させる方法が主流となっている。このような背景より、本論文では、より一層の既存杭活用の拡大のために、主に水平力を負担する既存杭の活用方法を示し、その効果や特性、傾向を明らかにした。

2. 既存杭の活用方法

既存杭の活用方法として、例えばFig.1に示す方法が考えられる。既存杭の性能が新設杭と同等であれば、新設杭と既存杭の杭頭をマツトスラブで一体化する方法(マツトスラブ一体化構法)が採用できる。既存杭の水平抵抗力が不足する場合には、杭頭支承を設け、負担するせん断力や曲げモーメントを低減する方法(杭頭支承構法)がある。また、既存杭の性能や配置等の制約から、既存杭と新築基礎の直接接合が困難な場合、それらを杭頭付近のソイルセメントを介して接合する非接触型の方法(ソイルセメント構法)も考えられる。3, 4章では、これらの構法の耐震性に係る特性を把握するために行った解析検討の結果、および各構法の効果や傾向について報告する。



(a)マツトスラブ一体化構法 (b)杭頭支承構法 (c)ソイルセメント構法

Fig. 1 既存杭の活用方法の一例

Reuse Methods of Existing Piles

3. マットスラブ一体化構法と杭頭支承構法

本章では、マットスラブ一体化構法と杭頭支承構法を用いた場合の、耐震性に係る特性について検討する。一般に、既存杭の位置は新築建物の柱位置と一致しないため、応力伝達のばらつきを許容する目的で、マットスラブを採用することが多い。マットスラブで一体化する場合、既存杭頭は剛接合されていると設計ではみなされるが、実際には既存杭の杭頭施工法や杭と柱位置とのずれ等に起因して、杭頭固定度が低下すると考えられる。

施工法別の杭頭固定度に関する既往の文献^{1,2}を整理し、Fig.2に示す。これより、地震時の転倒モーメントに起因する、軸力増加による杭頭固定度の増加傾向がうかがえるものの、ほとんどの条件で杭頭固定度は1を下回り、杭頭剛接合とみなせないことが確認できる。これより、マットスラブ一体化構法においては、既存杭頭固定度の影響評価が重要と考えられるため、はじめにこの影響に関する検討を実施した。

3.1 検討条件と解析モデル

検討は、第2種地盤に建つ一般的な5階建て事務所ビルを撤去し、10階建て事務所ビルを新築するケースを想定して行った。解析手法は2次元/3次元有限要素法による逐次非線形解析とした。解析モデルをFig.3, 4に示す。地盤側方および底面には粘性境界を設定した。

解析ケースをTable1に示す。ここで、解体撤去した5階建て建物の杭基礎が既存杭として残置されるものとする。Case1は、既存杭を再利用せず新設杭を打設する場合

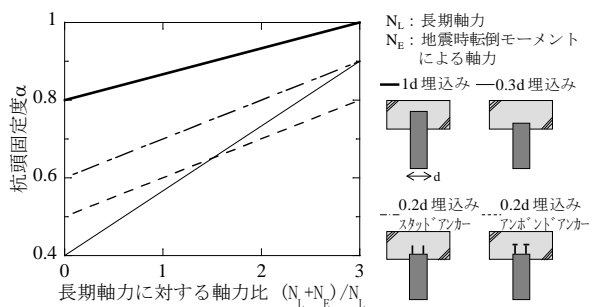
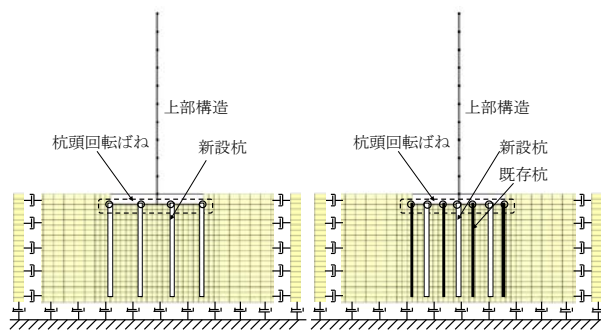


Table 1 解析ケース
Analysis Cases

解析ケース		(a) Case1 既存杭非活用時	(b) Case2 既存杭活用時
新設杭	杭種	場所打ちRC杭 φ 1500×24	場所打ちRC杭 φ 1500×12
	杭頭条件	剛接合	剛接合
既存杭	杭種		場所打ちRC杭 φ 1100×24
	杭頭条件		固定度α=1~0 (剛~ピン)

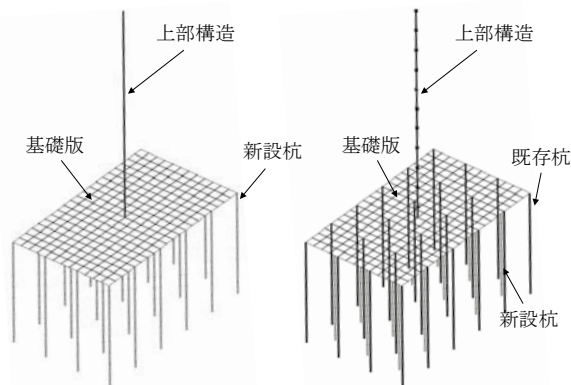
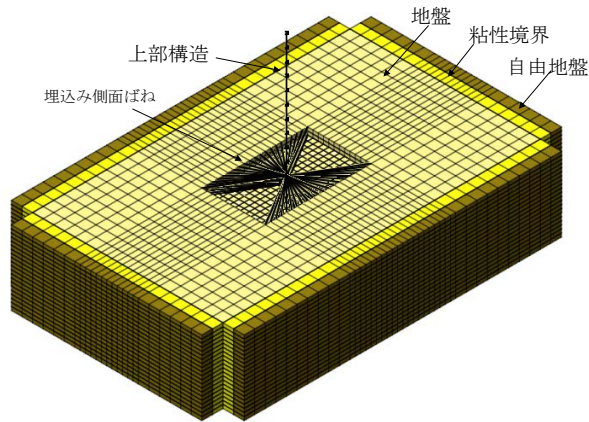
で、新設杭24本(φ 1500)を4×6の方形配置としている。Case2は、既存杭を再利用し支持力の不足分だけ新設杭を打設する場合で、既存杭24本(φ 1100, 4×6方形配置)の杭列間に、新設杭12本(φ 1500)を3×4の方形に配置するものとしている。両ケースとも基礎の埋込み深さは2mである。

上部構造は等価せん断型の多質点モデルとし、平面18m×30m、階高3.5m、単位面積重量1.2t(基礎1.5t)、復元力特性Normal Tri Linear型、剛性低下率 $\alpha_x, \alpha_y=0.25, 0.01$ 、降伏点荷重 Q_y /ひび割れ荷重 $Q_c=3$ 、降伏時せん断変形角



(a) Case1 (b) Case2

Fig. 3 2次元FEM解析モデル
2-Dimensional Finite Element Model



(a) Case1 (b) Case2

Fig. 4 3次元FEM解析モデル
3-Dimensional Finite Element Model

$\gamma=1/200$ とした。i階のせん断剛性 k_i は A_i 分布より、一次固有周期 $T=0.8\text{sec}$ となるよう、以下の式(1), (2)で設定した。

$$k_i = \frac{k_n A_i (n-i+1)}{A_n} \quad (1)$$

$$A_i = 1 + \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha_i}} - \alpha_i \right) \times \frac{2T}{1+3T}, \quad \alpha_i = \frac{w(n-i+1)}{wn} \quad (2)$$

ここで、 w ：各階重量、 n ：階数(=10)。減衰は剛性比例型とし、基礎固定モデルの一次固有振動数に対して減衰定数3%とした。

地盤は、2次元解析では平面ひずみ要素、3次元解析ではソリッド要素でモデル化した。設定した地盤物性をTable2, ひずみ依存特性($G/G_0-\gamma, h-\gamma$)をFig.5に示す。地盤の初期せん断剛性 G_0 は拘束圧を考慮し、拘束圧の0.5乗に比例するものとした^{3,4)}。ただし表層付近における V_s の最小値は80m/sとした。等価 V_{se} , h_e を求めるために行った、逐次非線形解析に用いた修正R-Oモデル^{5, 6)}を以下の式(3)~(5)に示す。

$$\frac{G}{G_0} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{G}{G_0} \frac{\gamma}{\gamma_{ref}} \right)^{\beta-1} \right\} = 1 \quad (3)$$

$$\alpha = 2^{\beta-1}, \quad \beta = \frac{2 + \pi h_{max}}{2 - \pi h_{max}} \quad (4)$$

$$h = h_{max} \left(1 - \frac{G}{G_0} \right) \quad (5)$$

Table 2 地盤物性
Material Properties of Soil

GL(m)	$\rho(t/m^3)$	$V_s(m/s)$	$V_{se}(m/s)$	h_e
~4	1.6	平均150	56	0.163
~8			65	0.187
~12			78	0.180
~16			94	0.167
~20			108	0.155
-20~	1.8	350	350	0.020

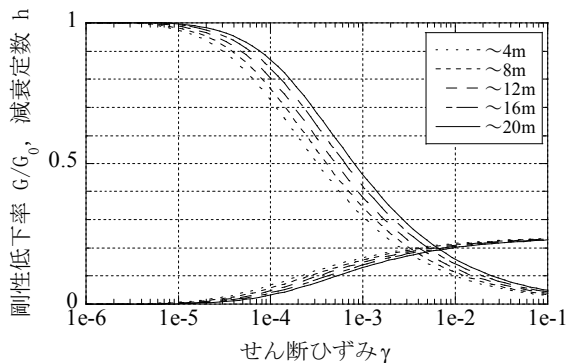


Fig. 5 地盤のひずみ依存特性 ($G/G_0-\gamma, h-\gamma$)
Dynamic Deformation Properties of Soil

ここでパラメータは、規準ひずみ $\gamma_{eff}=10^{-3.1} \sim 10^{-3.5}$, 最大減衰定数 $h_{max}=3/(4\pi)$ とし、拘束圧を考慮して、ひずみ依存特性($G/G_0-\gamma, h-\gamma$)を4m毎に設定した。減衰はRayleigh減衰として、一次・二次固有振動数でTable2の h_e の値となるよう設定した。

杭は場所打ちRC杭を想定し、線形の梁要素でモデル化した。杭頭と基礎版の節点間に回転ばねを配し、剛接合時は回転剛性を無限大、ピン接合時は回転剛性をゼロとした。半剛接合時は基礎指針⁷⁾を参照し、杭頭固定度 α に応じた回転剛性 K_θ を以下の式(6), (7)で設定した。

$$\alpha = K_\theta / (EI\beta + K_\theta) \quad (6)$$

$$\beta = [k_h B / (4EI)]^{1/4} \quad (7)$$

ここで、 E ：杭の弾性係数、 I ：杭の断面2次モーメント、 k_h ：水平地盤反力係数、 B ：杭径。

基礎版は埋込み底面に設定し、2次元解析時は線形の梁要素、3次元解析時は線形のシェル要素でモデル化した。剛性は他の要素に比べ、十分大きい値を設定した。また、建物節点と埋込み側面の地盤節点を軸ばねで接続し、埋込み側面からの入力も考慮した。

Fig.6に示す入力地震動は、建設省告示1461号で規定されている、工学的基盤上で極めて稀に発生する地震動の加速度応答スペクトルに適合させた乱数位相波とした。

3.2 既存杭頭固定度と耐震性

本節では、既存杭頭固定度 α の低下が杭応力に及ぼす影響を分析する。既存杭活用時(Case2)の杭の曲げモーメント分布を既存杭非活用時(Case1)と比較して、Fig.7, 8に示す。なお曲げモーメントは杭一本あたりの値である。2次元解析と3次元解析の結果に、大きな違いはない。既存杭頭を剛接合にした場合、新設杭の曲げモーメントは既存杭非活用時とほとんど変わらず、杭の終局曲げモーメント M_u を下回る。一方、既存杭の杭頭固定度が小さくなるにつれて、新設杭頭部の曲げモーメントは大きくなり、 M_u を上回る場合もある。このことは、設計時の想定通りの既存杭頭固定度が得られていない場合、新設杭に想定以上の応力が生じ、クライテリアを満足しなくなるおそれがあることを示唆している。

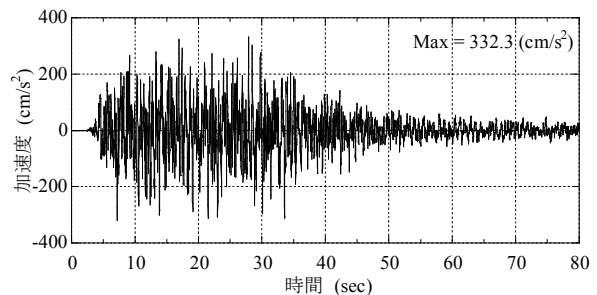


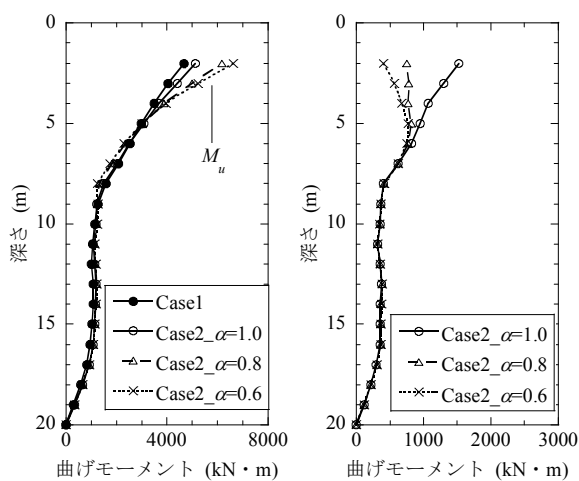
Fig. 6 入力地震動
Input Earthquake Motion

また、水平力負担を期待して、既存杭頭をピン接合にすると、新設杭の曲げモーメントや既存杭深部の曲げモーメントが過大となる不都合が生じる。これらを鑑みると、既存杭と新設杭の杭頭固定度を考慮して、既存杭と新設杭の負担する曲げモーメントをバランス良く配分することが必要になるため、次節では、その方法について検討を行う。

3.3 杭頭支承構法と耐震性

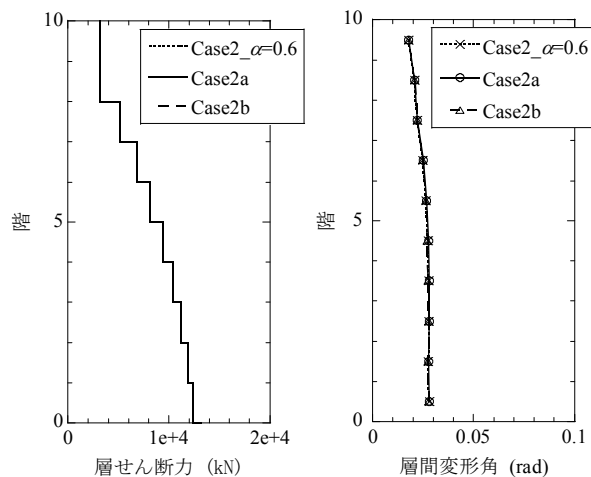
本節では、既存杭頭固定度の低下を念頭に置いて、杭頭支承構法により新設杭頭固定度を適切に設定することで、合理的な既存杭活用を行う方法について検討する。新設杭頭固定度の調整は、杭頭回転ばね剛性の減少で表現し、新設杭本数の増加は、杭をモデル化した梁要素の断面定数の増加で表現する。

既存杭頭固定度が0.6に低下する場合を想定し、新設杭頭固定度を0.9に調整した場合(Case2a)の結果として、建物の層せん断力および層間変形角をFig.9, 杭の曲げモーメント分布をFig.10に示す。比較のため、新設杭頭固定度の調整を行わず、クライテリアを満たすために新設杭本数を12本から18本に増やした場合(Case2b), 杭頭固定度の調整も杭本数増も行わない場合(Case2_α=0.6)を併せて示す。ここでは、3次元FEM解析結果を示している。これらの結果より、建物応答は新設杭頭固定度を調整してもほとんど変わらないが、新設杭頭部の曲げモーメントは杭頭固定度の調整により M_u を下回ることを確認できる。一方、既存杭の曲げモーメントは、新設杭頭固定度を調整してもそれほど変わらない。

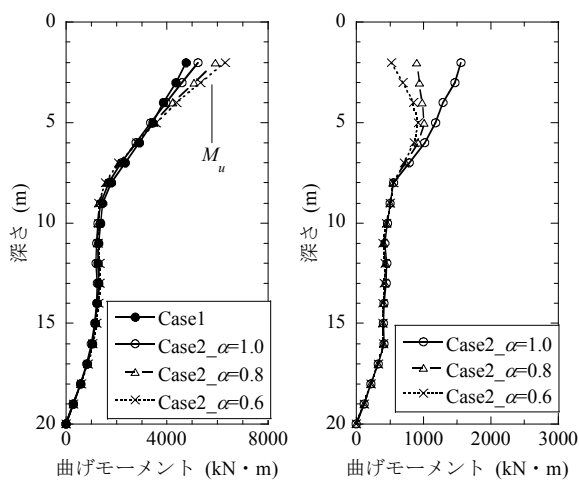


(a) 新設杭 (b) 既存杭
Fig. 7 杭の最大曲げモーメント分布
(2次元FEM解析結果, 既存杭頭固定度低下の影響)
Bending Moment Distributions (2-D FEM)

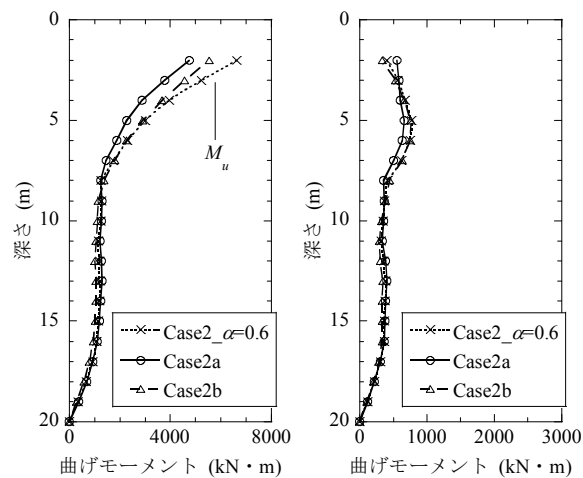
Case2_α=0.6: 杭頭固定度の調整, 杭本数増を行わない場合
Case2a: 新設杭頭固定度を調整した場合
Case2b: 新設杭本数を増やした場合(新設杭頭剛接合)



(a) 層せん断力 (b) 層間変形角
Fig. 9 建物応答最大値分布(新設杭頭固定度の影響)
Seismic Response for Superstructure



(a) 新設杭 (b) 既存杭
Fig. 8 杭の最大曲げモーメント分布
(3次元FEM解析結果, 既存杭頭固定度低下の影響)
Bending Moment Distributions (3-D FEM)



(a) 新設杭 (b) 既存杭
Fig. 10 杭の最大曲げモーメント分布(新設杭頭固定度の影響)
Bending Moment Distributions

4. ソイルセメント構法

本章では、ソイルセメント構法を用いた場合の、耐震性に係る特性について検討する。既存杭を活用するにあたり、既存杭の性能や配置、計画上の制約から、新築基礎への直接接合が困難な場合がある。また、3章で示したマットスラブ一体化構法を用いると、既存杭が負担する応力が過大となり、杭性能にそぐわない場合も想定される。筆者らは文献8において、このような場合、杭頭付近をソイルセメントで地盤改良することにより、合理的に既存杭を活用できることを実験的・解析的に示しており、ソイルセメント構法は有効であると考えられる。本章では、この方法を用いて既存杭を活用する場合の適切な条件と効果について検討する。

4.1 検討条件と解析モデル

検討に用いた解析モデルをFig.11, 解析ケースをTable3に示す。このCase3では、既存杭頭は新築基礎と直接接合しておらず、杭頭付近のソイルセメントを介して既存杭と新築基礎を一体化している。ソイルセメントは平面ひずみ要素でモデル化し弾性とした。せん断波速度 V_{si} については、Fig.12に示す一軸圧縮強度 q_u との関係を述べた既往の研究⁹⁾を参照し、 $\rho=1.7t/m^3$ として決定した。ここで、ソイルセメントの等価剛性については、材料非線性を考慮して、 V_{si} より求まる初期剛性の1/2を採用した。これ以外の解析条件は3章と同様である。

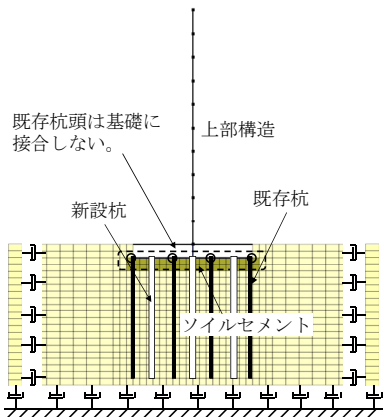


Fig. 11 2次元FEM解析モデル(ソイルセメント活用時, Case3)
2-Dimensional Finite Element Model

Table 3 解析ケース (Case3)
Analysis Cases

新設杭	杭種	場所打ちRC杭 $\phi 1500 \times 12$
	杭頭条件	剛接合
既存杭	杭種	場所打ちRC杭 $\phi 1100 \times 24$
	杭頭条件	基礎に接合しない
ソイルセメント	地盤改良強度 q_u	0.2, 0.5, 1.0 N/mm ² ($V_{si}=290, 390, 480$ m/s)
	地盤改良深さ H	1, 2, 3m (GL-2~-3, -2~-4, -2~-5m)

4.2 地盤改良強度に関する検討

はじめに、適切な地盤改良強度について検討するために、地盤改良深さを一定にして地盤改良強度を変化させた解析を行った。得られた杭の曲げモーメント分布をFig.13, せん断力分布をFig.14に示す。ここで地盤改良深

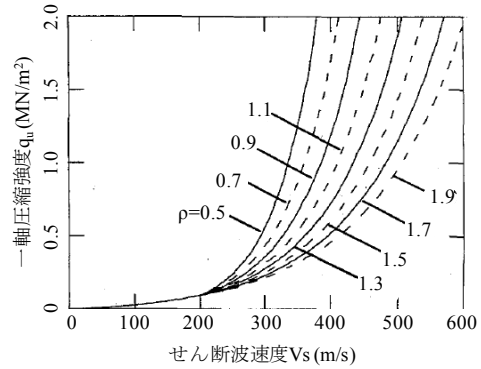


Fig. 12 ソイルセメントの V_{si} と q_u の関係⁹⁾
Relation between V_{si} and q_u of Cemented Soil

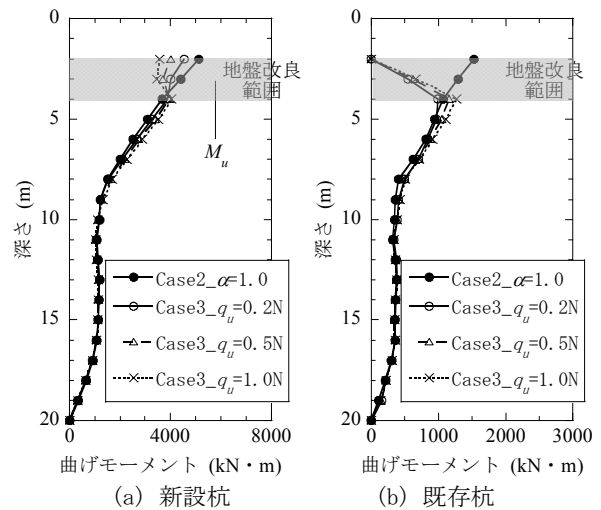


Fig. 13 杭の最大曲げモーメント分布(改良強度による比較)
Bending Moment Distributions

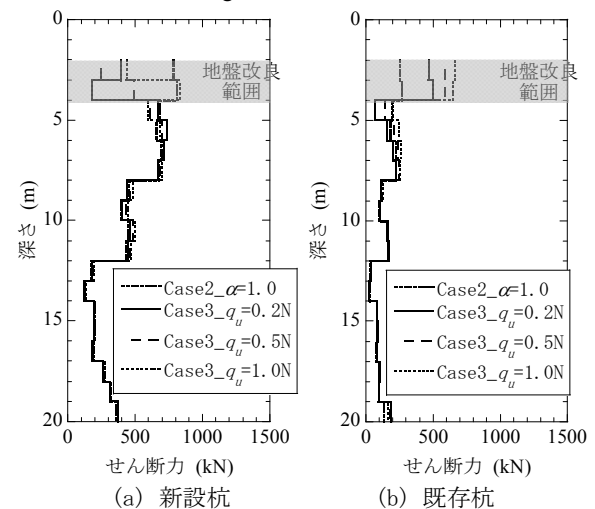


Fig. 14 杭の最大せん断力分布(改良強度による比較)
Shear Force Distributions

さは基礎下面の深さ2mから深さ4mまでの2mとした。比較のため、既存杭頭を基礎スラブに剛接合した場合 (Case2_α=1.0)の結果を併せて示す。地盤改良により新設杭の最大曲げモーメント発生位置は杭頭から深さ4mに深くなり、負担曲げモーメントの最大値も剛接合時より小さくなる。また、地盤改良強度を大きくすると新設杭頭に生じる曲げモーメントは小さくなるが、深さ4m位置の曲げモーメントはやや大きくなる。これらより、杭頭部の曲げモーメントがソイルセメント内で深さ方向に平均化される、最適な地盤改良強度があると推察できる。

また、杭のせん断力について、地盤改良強度が大きくなるにつれて、既存杭の負担せん断力は大きくなる。一方、新設杭の負担せん断力は、地盤改良強度が大きくなると、ソイルセメント以深では小さくなるが、ソイルセメント内では大きくなる場合もある。これは、地盤改良強度が大きくなるにつれて、既存杭が応力を負担するため新設杭の負担応力が小さくなる場合もあれば、一方で、地盤改良によって杭への入力が増加する場合もあるためと思われる。なお、本検討では前述した通り、ソイルセメントの等価剛性として初期剛性の1/2を与えているが、杭-ソイルセメント間の剥離や滑りの影響を考慮すると等価剛性はより小さくなり、地盤改良強度はそれに応じてより大きくする必要があると考えられる。

4.3 地盤改良深さに関する検討

次に、適切な地盤改良深さについて検討するために、地盤改良強度を一定にして地盤改良深さを変化させた解析を行った。得られた杭の曲げモーメント分布をFig.15、せん断力分布をFig.16に示す。ここで地盤改良強度は0.5N/mm²とした。地盤改良深さが浅いと、新設杭の負担曲げモーメント及び負担せん断力は剛接合時より大きくなっており、十分に地盤改良深さを確保しないと既存杭への水平力伝達を期待できないと考えられる。

5. まとめ

主に水平力を負担する既存杭の活用方法として、(a)マットスラブ一体化構法、(b)杭頭支承構法、(c)ソイルセメント構法の3つを挙げ、これらの構法の耐震性に係る特性について、2次元/3次元有限要素法を用いて検討した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) マットスラブ一体化構法を用いた場合、既存杭の杭頭施工法や柱位置とのずれ等に起因して、既存杭頭固定度が低下し、それに伴う新設杭の応力負担増を想定する必要がある。
- 2) その場合、杭頭支承構法を用いて、既存杭と新設杭の杭頭固定度をバランス良く配分することで、新設杭本数を増加させることなくクライテリアを満足できる。

- 3) ソイルセメント構法については、地盤改良に伴う既存杭の応力負担による新設杭の応力負担減を期待できるとともに、地盤改良強度や深さを適切に設定することで、既存杭および新設杭の応力負担を合理化できる可能性がある。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部摩擦杭設計技術委員会：摩擦杭の設計—考え方と課題—, 日本建築学会近畿支部, pp.127~159, (2003)
- 2) 杉村義広, 他：高強度プレストレストコンクリート杭とフーチング接合部の回転拘束度および破壊耐力に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.373, pp.111~120, (1987)
- 3) 石原研而：土質動力学の基礎, 鹿島研究会, (1976)

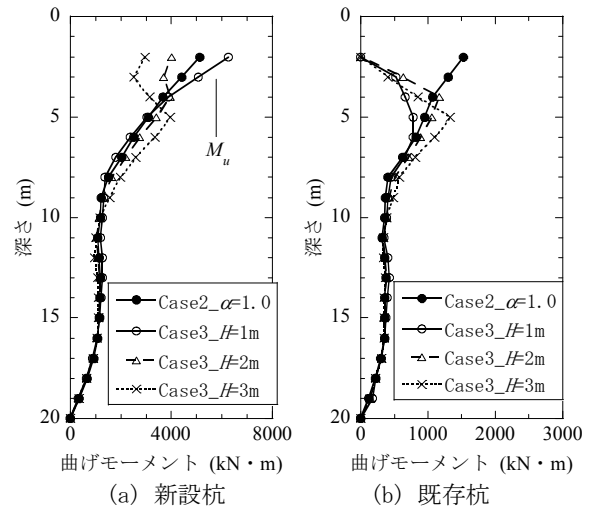


Fig. 15 杭の最大曲げモーメント分布 (改良深さによる比較)
Bending Moment Distributions

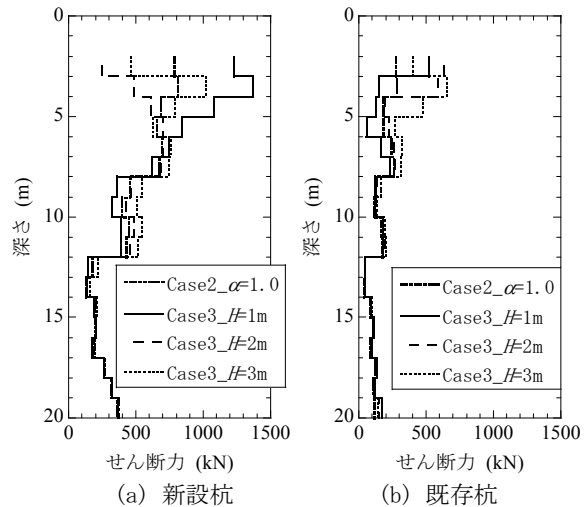


Fig. 16 杭のせん断力分布 (改良深さによる比較)
Shear Force Distributions

- 4) Silver, M. L. and Seed, H. B. : Deformation characteristics of sands under cyclic loading, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol.97, No.8, pp.1081~1098, (1971)
- 5) Jennings, P. C. : Periodic Response of a General Yielding Structure, ASCE, Vol.90, No.EM2, pp.131-166, (1946)
- 6) 龍岡文夫, 他 : 砂のランダム繰り返し入力に対する応力-ひずみ関係のモデル化について(I), 生産研究, (1978)
- 7) 日本建築学会 : 建築基礎構造設計指針, (2001)
- 8) 勝二理智, 他 : 既存・新設複合杭基礎の水平抵抗機構に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.644, pp.1751~1758, (2009)
- 9) 浅香美治, 他 : セメント系改良土のせん断波速度～一軸圧縮強さ関係に乾燥密度が及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, B-1, pp.755~756, (2005)