

補強材を設けた杭基礎の支持力特性とその解析

名古屋工業大学 正会員 檜尾 正也
 名古屋工業大学 正会員 中井 照夫
 川崎重工業(株) 正会員 西村 智
 三菱重工業(株) 学生員 西尾 彰人
 名古屋工業大学 学生員 與那覇 翔子

1. はじめに

送電鉄塔等の比較的大きく軽い上部構造物の設計では押し込み抵抗だけでなく引き抜き抵抗も考慮する必要がある。現在、押し込み抵抗の増加に対しては杭基礎を用いるのが一般的であり、引き抜き抵抗を増加させる方法としては杭にロックボルト状の補強材を取り付けた補強型基礎¹⁾がある。既往の研究^{1),2)}ではこの補強型基礎に注目し効果的な補強材の設置角度について、2次元モデル試験および有限要素解析を行い、効果的な補強材の設置角度を検証した^{2),3)}。そこで本研究では、補強材の設置位置や角度を変えた2次元および3次元モデル試験を行い、モデル実験にあわせた2次元,3次元有限要素解析を行い、補強材の設置位置や設置角度による補強効果について検討した。

2. モデル試験および有限要素解析の概要

図1,図2に2次元および3次元モデル試験装置の概略図を示す。2次元モデル試験では長さ5cm、直径1.6mmと3.0mmのアルミ棒を重量比3:2で混合したアルミ棒積層体($\gamma=20.4\text{kN/m}^3$)を幅80cm、深さ50cmに積んだ地盤を用いて実験を行った。一方、3次元モデル試験では直径2.0mmと3.0mmのアルミナボールを重量比1:1で混合したアルミナボール積

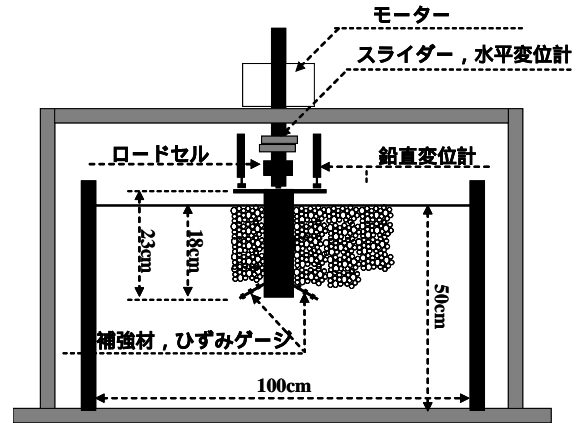


図1 2次元モデル試験機

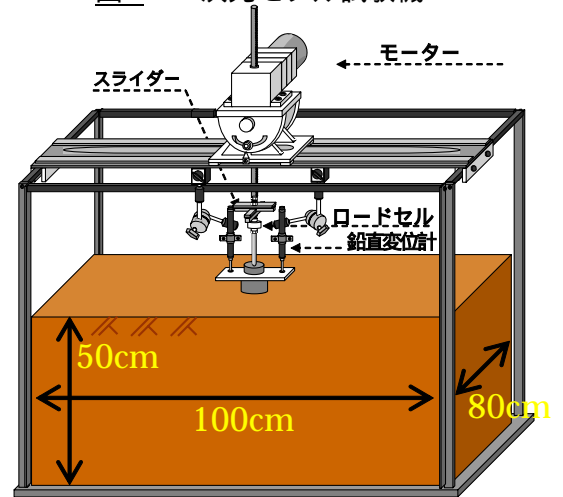


図2 3次元モデル試験機

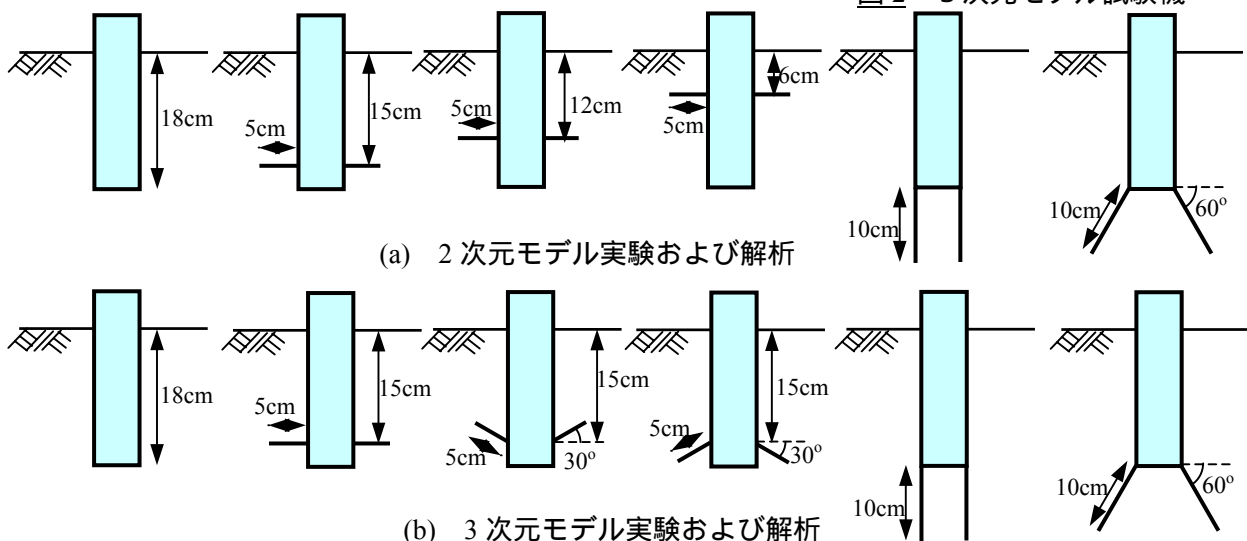


図3 基礎の補強パターン

Bearing capacity for reinforced pile foundation and its numerical analyses.

M. Hinokio, T. Nakai (Nagoya Institute of Technology), T. Nishimura, A. Nishio and S. Yonaha

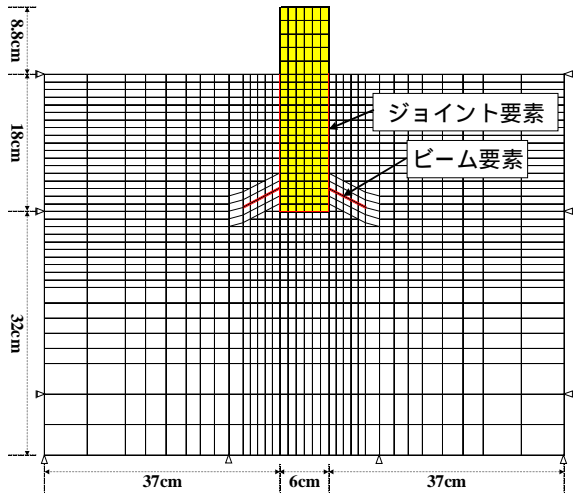


図4 解析メッシュの一例(2次元)層体($\gamma=22.3\text{kN/m}^3$)を幅100cm、深さ50cm、奥行き80cmに積んだ地盤を用いて実験を行った。モーターにより一定のスピードで引き抜き変位を与え、先端に取り付けたロードセルにより荷重を計測している。補強材は3.0mmと0.1mmの厚さのアルミ板を用い、設置位置および設置角度は図3に示す通りである。補強材の長さは施工上の問題から杭径と杭の設置位置や設置角度によって決まるため、杭底部設置での補強材の長さが長くなっている。2次元モデル試験では補強なし、杭側方に補強材位置を変えて水平に設置した3通りと杭底部に角度を変えて設置した2通りの6パターンに対して、軟らかい補強材(厚さ0.1mm)を用いて鉛直引き抜きと傾斜引き抜き(傾斜角は 30°)の2パターンで行った。3次元モデル試験では補強なし、杭側方に設置方向を変えて設置した3通りと杭底部に角度を変えて設置した2通りの6パターンに対して鉛直引き抜き載荷を行った。

有限要素解析はモデル試験と同じスケールで行い、構成モデルとして *subloading tij model*⁴⁾を、要素にはアイソパラメトリック要素を、補強材にはビーム要素を用いている。また2次元解析では杭と地盤および補強材と地盤の間はジョイント要素を用いることによって構造物と地盤の摩擦を考慮した。ジョイント要素の摩擦角は摩擦試験の結果から基礎と地盤の間で

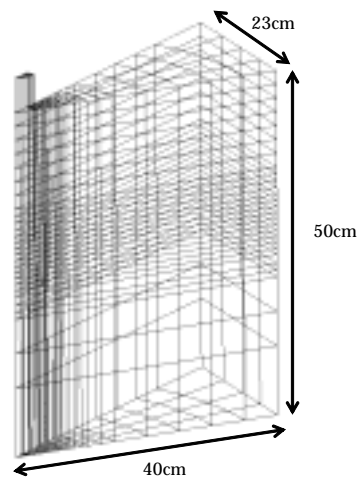


図5 解析メッシュ(3次元)

表1 解析に用いた材料パラメータ

(a)地盤材料パラメータ

λ	0.008
κ	0.004
N	0.3
$R_{CS}=(\sigma_1/\sigma_3)_{CS(comp.)}$	1.8
β	1.2
ν	0.2
a_{AF}, a_{IC}	1300

(b)補強材のパラメータ

	Flexible	Stiff
EI (kNm ²)	2.93×10^{-8}	7.91×10^{-4}
EA (kN)	3.52×10	1.06×10^3

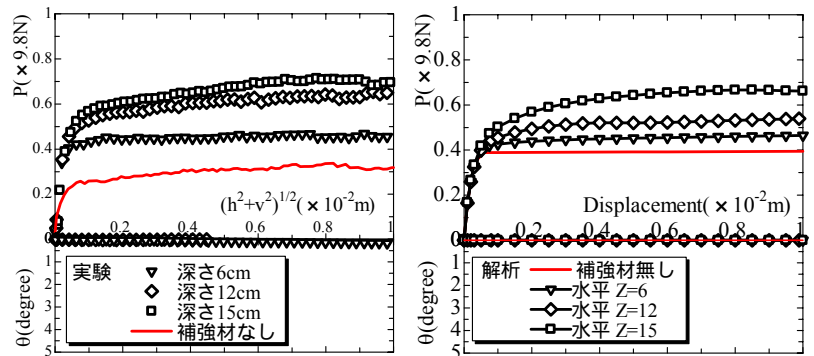


図6 荷重～変位～回転角関係(鉛直引き抜き)(基礎側部・水平設置)

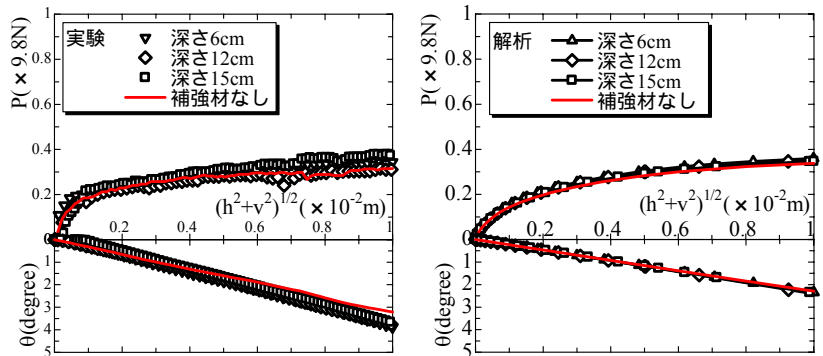


図7 荷重～変位～回転角関係(傾斜 30° 引き抜き)(基礎側部・水平設置)

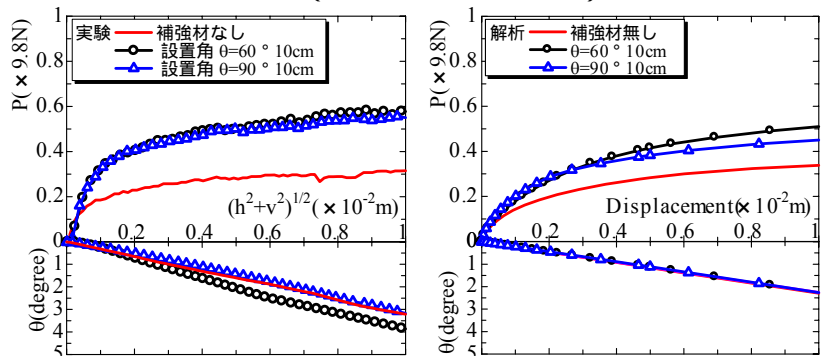


図8 荷重～変位～回転角関係(鉛直引き抜き)(基礎底部・下向き設置)

$\delta=14^\circ$ 、補強材と地盤の間で $\delta=20^\circ$ とした。これら解析で用いた材料パラメータを表1に示す。図4、図5に2次元および3次元解析に用いた有限要素のメッシュの一例を示す。3次元解析は荷重方向が鉛直で軸対称状態であることより、基礎を中心にした1/12断面を解析地盤として行った。

3. 2次元モデル試験と解析の結果

図6~9に荷重~変位~回転角関係を示す。縦軸に抵抗力を示す荷重を、横軸は水平変位と鉛直変位の2乗和の平方根をとって整理した。設置深さの違いに注目すると、図6に示す鉛直引き抜きでは設置深さが深いほど大きな抵抗力を発揮するが、図7に示す傾斜引き抜きになると深くに設置しても補強効果はほとんど無いことがわかった。

一方、基礎底端部に設置した場合、鉛直引き抜きに対してはもとより、傾斜引き抜きでも、補強材の無いものに比べ約2倍の大きな抵抗力を発揮した。また解析結果も定性的にも定量的にも実験結果を表現できている。この補強のメカニズムを考察するため、図10に補強材の軸力分布図(縦軸に引っ張りを正にとった軸力、横軸に基礎からの距離をとって整理)と図11にせん断ひずみ分布を示す。図10から杭底部に設置した場合では傾斜引き抜き時に杭の右側の補強材に大きな引っ張り軸力が生じており、これによって補強効果が得られていることがわかる。これは鉛直引き抜き時の軸力がそれほど大きくない事から

もわかるように、引っ張り軸力が作用する方向へ補強材を設置することが効果的といえる。図11から、傾斜引き抜きでは基礎が引き抜かれると、基礎全体が左側に押し込まれる格好となり基礎の両側の地盤で大きく変形が生じているのがわかる。また、杭の右側地盤では主働状態となるため土圧が減少する。したがってこの変形している領域に補強材を設置した場合では、十分な拘束圧が作用しないため引っ張り補強材として機能しないと考えられる。これに対し基礎底部に設置した場合、補強材の設置されている地盤は傾斜引き抜きによる変形の影響を受けず、拘束圧も十分保たれる。この結果、補強材に作用する拘束圧は減少しないため大きな摩擦抵抗が発揮され、補強材に大きな引っ張り軸力が生じることとなる。

4. 3次元モデル試験と解析の結果

図12、図13に実験及び解析で得られた荷重~変位関係を示す。2次元の結果同様に縦軸に抵抗力を意味する

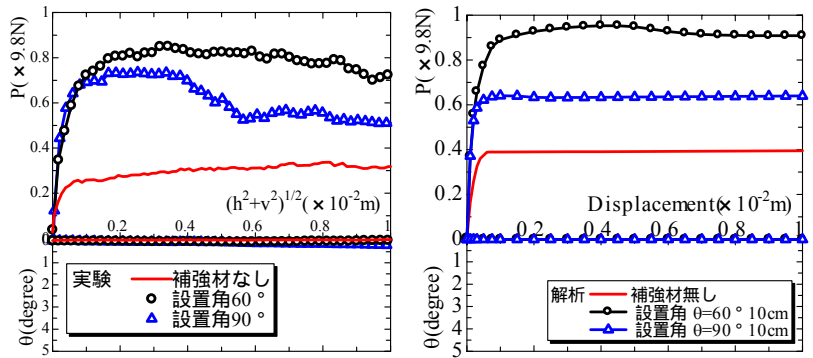
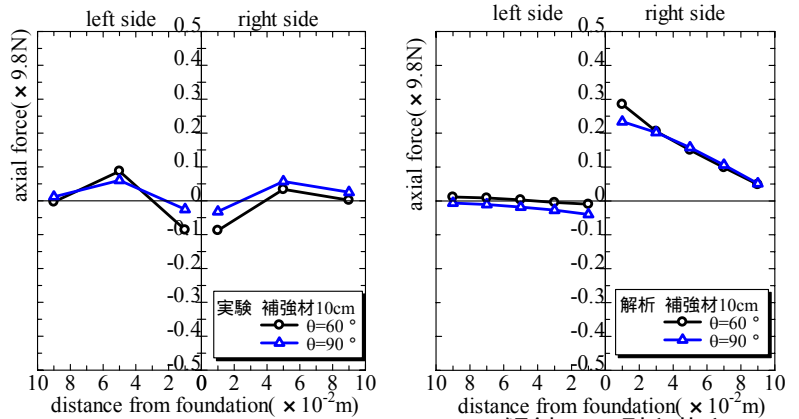


図9 荷重~変位~回転角関係(傾斜30°引き抜き)
(基礎底部・下向き設置)



(a) 鉛直引き抜き (b) 傾斜30°引き抜き

図10 補強材の軸力分布(2次元解析)

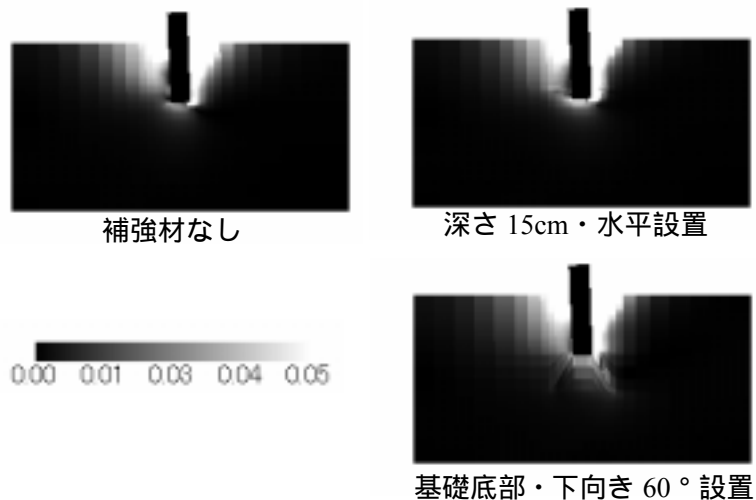


図11 せん断ひずみ分布(2次元解析・傾斜30°引き抜き)

荷重を、横軸に変位をとって整理した。
 図 12 は杭側面および杭底部にやわらかい補強材を設けた場合、図 13 は杭側面に硬い補強材を設けた場合の結果である。補強材の設置向きの違いでは、補強材が硬い場合もやわらかい場合も下向き、水平、上向きの順に大きな抵抗力を示し、どの方向に設置しても補強効果が得られている。特に硬い補強材の場合には補強効果が大きく、下向き設置の場合では補強材がない場合に比べ 3 倍以上の引き抜き抵抗力を発揮する。解析では最終的な抵抗力を得られていないが、実験と同様の傾向が得られており、その抵抗力の値もおおむね実験値を表現できている。また、以前に行った 2 次元条件下での結果²⁾と同様の結果となっている。補強材を基礎底部に設置した場合、下向き 60° 設置で補強材がない場合に比べ引き抜き荷重が約 5 倍と、検討した設置パターンの中で最も大きな補強効果を発揮している。また、引き抜き変位の小さい段階で大きな抵抗力を発揮し、その後、抵抗力が大きく減少していく結果となっている。解析結果においても、基礎底部設置の時に最も大きな抵抗力が発揮されており、設置向きによる抵抗力の違いを表現できていた。3 次元解析にはジョイント要素を

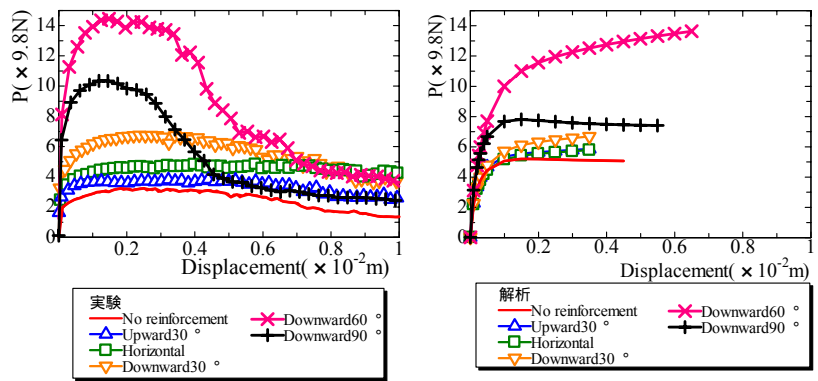


図 12 荷重～変位関係 (3次元解析・軟らかい補強材)

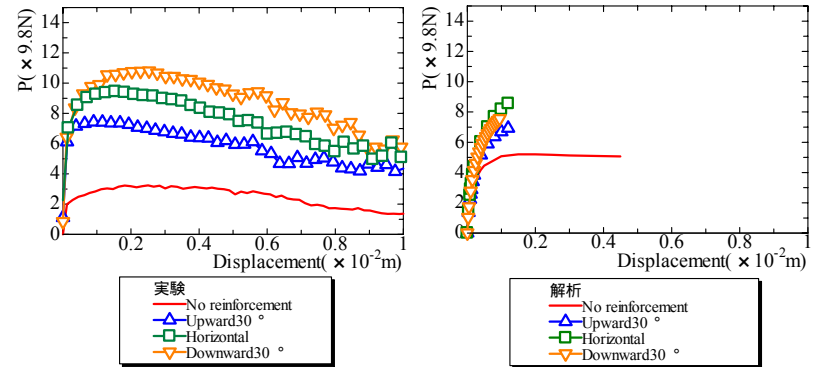


図 13 荷重～変位関係 (3次元解析・硬い補強材)

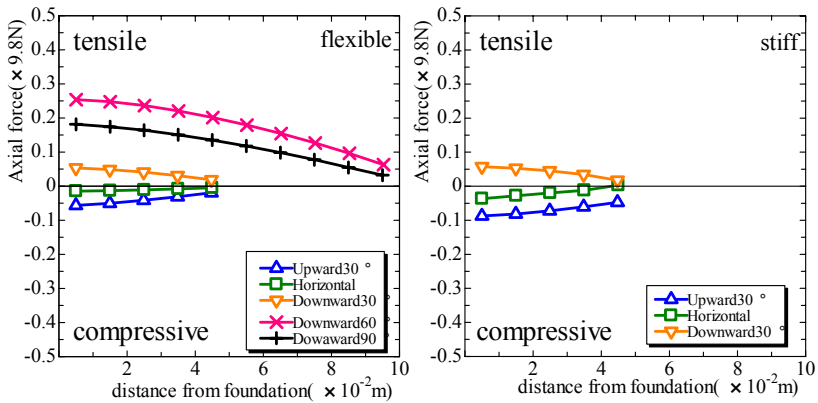


図 14 軸力分布図 (3次元解析)

設けておらず基礎や補強材と地盤との間の摩擦挙動が表現されていないため、解析値は全体的に実験結果を過大評価する結果となった。

次に、補強材に発生する軸力および曲げモーメント分布の解析結果を図 14、図 15 に示す。ここで、補強材が軟らかい場合に曲げモーメントはほとんど生じないため、やわらかい補強材の曲げモーメント分布は省略する。これらの図から、補強効果の大きかった底部設置や側部下向き設置では補強材に大きな引っ張り軸力が発生していることから、補強材に引っ張り軸力が作用する方向への設置が有効であることが分かる。また、剛な補強材の場合では引っ張り軸力だけでなく、補強材の曲げ抵抗によっても補強効果が得られることが分かる。また曲げ補強材として機能する場合でも、下向きまたは水平設置が効果的である。補強材の剛性や設置方法の違いによる補強効果のメカニズムを調べるため解析地盤の偏差ひずみ分布を図 16 に示す。この図から杭周面と補強材周辺でひずみが集中していることが分かる。また(b)と(c)の比較によって補強材の剛性が大

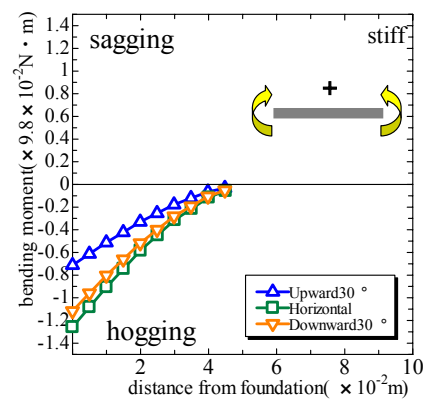


図 15 曲げモーメント分布

剛な補強材の場合では引っ張り軸力だけでなく、補強材の曲げ抵抗によっても補強効果が得られることが分かる。また曲げ補強材として機能する場合でも、下向きまたは水平設置が効果的である。補強材の剛性や設置方法の違いによる補強効果のメカニズムを調べるため解析地盤の偏差ひずみ分布を図 16 に示す。この図から杭周面と補強材周辺でひずみが集中していることが分かる。また(b)と(c)の比較によって補強材の剛性が大

きいほうが補強材周辺地盤の偏差ひずみの分布は若干範囲が大きくなっている。また(d)の底部設置の場合でも地盤の深い(拘束応力の大きい)所まで補強材が設置されているため、より大きな摩擦力が働くことから補強効果が大きいことが理解できる。これらの補強メカニズムは2次元での結果と同じである。また、底部設置の場合のように大きく抵抗力が減少する理由として、補強材と地盤の間で摩擦抵抗が働いている間は、周辺地盤でせん断抵抗が働き地盤全体で大きな抵抗力が生じるが、静止摩擦力を超えた引っ張り力が作用すると、補強材と地盤との間で滑りが生じ、補強材だけが引き抜かれ、補強効果が減少すると考えられる。しかしながら、変位の大きいところでは抵抗力は減少するものの変位が小さい所では抵抗力は最大値を得ており、引き抜き抵抗としては十分有用であるといえる。

5.3 次元モデル試験と軸対称解析の比較

軸対象解析では補強材は平面となり傘のように補強材の断面積が広がっていく。したがって、軸対象条件で同じ弾性係数を用いると補強材先端にいくほど剛性が大きくなる。そこで、補強材の断面積の変化を考慮して弾性係数を変える事で実際の補強材剛性と合わせた解析を行った。

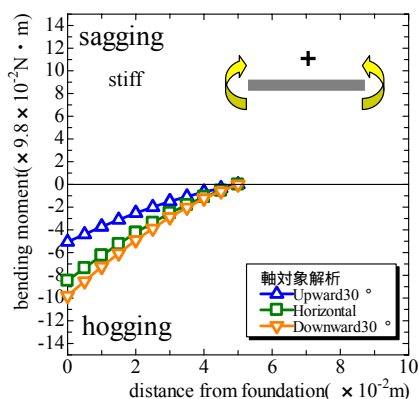


図19 曲げモーメント分布(軸対象解析)

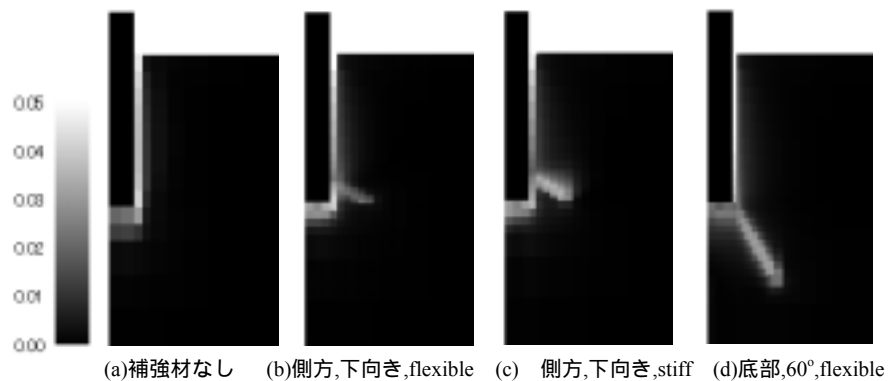


図16 偏差ひずみ分布(引き抜き変位1mm時)

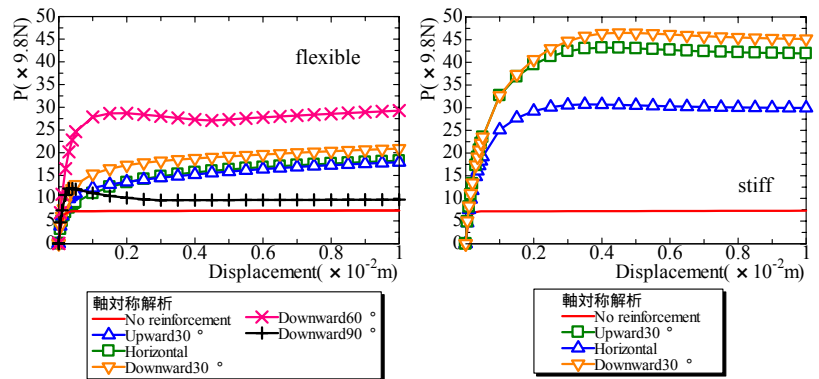


図17 荷重～変位関係(軸対象解析)

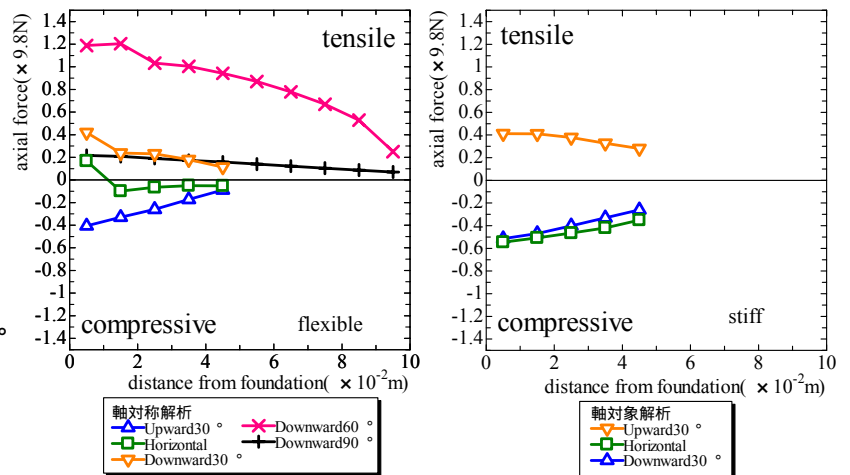


図18 軸力分布図(軸対象解析)

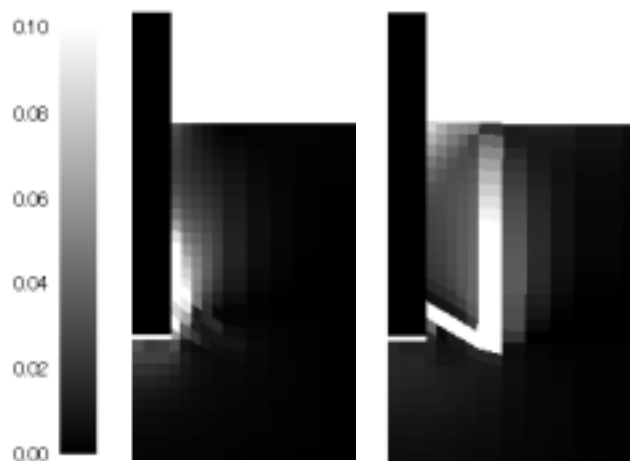


図20 偏差ひずみ分布(軸対象解析)

図 17 に軸対称解析の荷重～変位関係を、図 18,19 に補強材断面の軸力分布、モーメント分布を、図 20 にせん断ひずみ分布図を示す。荷重～変位関係の荷重は 3 次元解析と比較するため、2 倍した全断面での結果としている。また、補強材の断面力は 1radian 分の値を示している。図 17 から、軸対称解析でも設置向きの違いでは、下向き設置で最も大きな抵抗力を發揮した。基礎底部下向き 60° 設置は側部に設置するものより大きな抵抗力を示し、実験結果と同じ結果になったが、この結果は 3 次元実験および解析結果とは異なり、引き抜き抵抗をかなり過大評価している事が分かる。なお、軸対象条件では、軟らかい補強材を底部に設置するよりも剛な補強材を側部に設置したほうが引き抜き抵抗力は大きくなった。

図 18,19 から、補強材に生じる軸力や曲げモーメントを見ても 3 次元解析に比べ大きな値となっている。このことから、軸対象解析では補強材の間隔を考慮して補強材の剛性を変化させたとしても、本来 3 次元の特性を妥当に評価できないことがわかる。また、図 20 に示す偏差ひずみ分布からも分かるように、補強材の剛性が大きい場合は補強材周辺の地盤を全体的に持ち上げることになるため引き抜き抵抗を過大評価する。これは剛な補強材を傘状に連続的に設置していることになるため、実際の補強材の配置と大きく異なることによる。軸対象条件での解析結果は支持力を過大評価するが、補強材の設置方向や設置位置による補強効果の傾向は 3 次元実験や解析と同じとなっている。したがって、軸対象条件では引き抜き抵抗力は異なるが、補強材の剛性を 3 次元状態に近づくように換算するだけでなく、解析条件の違いでの換算を行ってやれば、実際の引き抜き特性を表現することができる可能性がある。

8. 結論

- ・ 地盤材料の特性を適切に表現したモデルを用いることで 3 次元解析は 3 次元モデル試験の結果を妥当に表現可能である。
- ・ 基礎側方に設置した場合は補強材を深い位置に設置しても、傾斜引き抜きには抵抗力は發揮されない。しかし、基礎底部に設置した場合、鉛直・傾斜方向どちらの引き抜きに対しても、抵抗力を發揮した。
- ・ 3 次元応力条件下でも、設置向きの違いでは下向き設置が最も抵抗力を發揮。また、基礎底部に斜め下向きに設置した時に最も大きな抵抗力を發揮した。
- ・ 補強効果は地盤と補強材の摩擦によって部材に引っ張り軸力が生じる方向に設置すると効果的である。また、同じ設置方法でも補強材剛性が大きい場合、周辺地盤へ与える影響が大きいので、引き抜き抵抗は大きくなる。
- ・ 軸対象条件で解析を行う場合には、引き抜き抵抗力を過大評価してしまう。しかし、補強材剛性等の条件にあわせた換算を適切に行えば、実際の 3 次元特性を表現できる可能性がある。

参考文献

- 1) Matsuo, M. and Ueno, M.: Development of ground reinforcing type foundation., *Proc. 12th ICSMFE 2*, 1205-1208., 1989.
- 2) 西尾・中井・檜尾・西村・室谷, 補強型深礎基礎の変形・支持力特性—2次元および3次元解析とモデル試験, 第15回中部地盤工学シンポジウム, p.87-90, 2003
- 3) 西尾・中井・檜尾・西村・室谷, 補強材の設置位置が異なる杭基礎の支持力実験と解析, 39回地盤工学研究発表会, 1503-1504, 2004
- 4) T. Nakai & M. Hinokio, A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters., *S&F*, vol. 44(2), 53-70 2004