

粘土および砂地盤における杭の水平载荷実験の解析

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
 東京電力(株) 正会員 佐藤 博
 清水建設(株) 正会員 鈴木 誠

1.はじめに

現在、杭基礎は最も一般的に用いられている基礎の1つである。基礎には鉛直荷重だけでなく水平方向からの荷重が作用することがあり、このような荷重を受ける杭基礎の設計を行う上で支持力やその変形の算定は最も重要なことである。また、実際の杭基礎の挙動は周辺地盤との相互作用により基礎の支持力や変形また周辺地盤への影響が大きく異なってくる。このことから経済的かつ安全な基礎を建設するためには、設計の段階において数値解析による正確な変形予測が必要となってくる。本研究では、粘性土地盤および砂地盤中で水平荷重を受ける単杭について、杭頭条件や長さを変えた杭の水平支持に関する現場実験¹⁾をシミュレートした数値解析を行い、杭頭条件や長さの違いによる杭の横抵抗及び周辺地盤への影響を粘土地盤での検討²⁾だけでなく砂地盤も合わせて、解析的に検討を行った。

2.解析の概要

解析は有限要素法による3次元解析であり、解析に用いた有限要素メッシュは現場実験¹⁾のスケールに概略を合わせて Fig.1 のように分割した。杭の大きさは一辺が 70cm の正方形断面とし、x 方向(紙面で右方向)に 36.7m、y 方向(奥行き方向)には 12m、z 方向(深さ方向)に 15m の半断面とする。解析では杭頭に x 方向(Fig.1 で右向き方向)に水平変位を与えることによって、水平荷重を受ける杭の横抵抗問題をシミュレートしている。解析パターンは粘土・砂地盤について杭長が 6m と 12m の 2 種類それぞれに対し杭頭の回転が自由である場合と回転が固定されている場合の 2 通りについての合計 8 通りの解析を行った。ここで、Fig.1 に示すメッシュ図は長杭(杭長が 12m)でのものである。解析には杭体として、張らによる弾性のトリリニアハイ

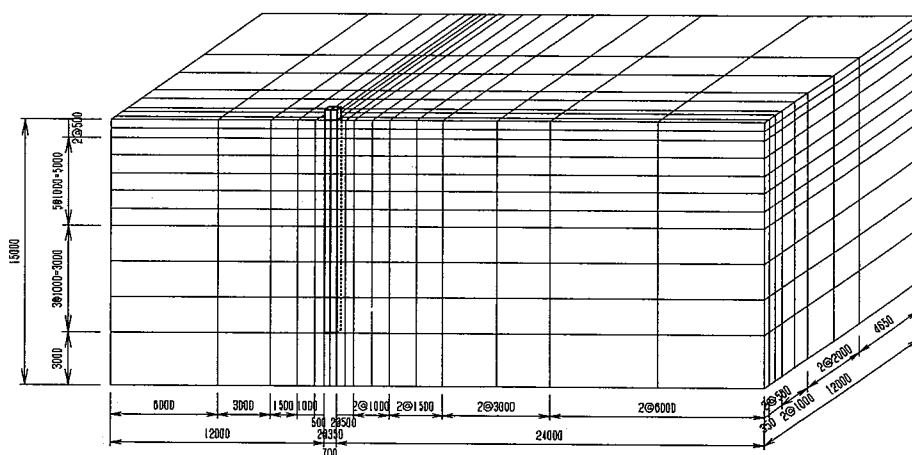


Fig.1 有限要素メッシュ(長杭)

Table.1 土質パラメータ

	粘土地盤	砂地盤
λ	0.192	0.07
κ	0.0068	0.006
N	1.25	1.0
$R_{CS}=(\sigma_1/\sigma_3)_{CS(comp.)}$	3.55	3.5
β	1.5	1.2
a_{AF}	500	50
a_{IC}	500	500

Analyses of Pile behavior under horizontal loading in clayey and sandy ground.

M. Hinokio, T. Nakai (Nagoya Institute of Technology)

, H. Sato(Tokyo Electric Power Company) and M. Suzuki(Shimizu Corp.)

ブリッドモデル³⁾を用い、地盤材料として密度や拘束応力の影響を考慮した弾塑性モデル(subloading t_{ij} model)^{4,5)}を用いた。解析の粘土地盤は GL=-2m までは盛土、GL=-2~-12m はシルト、GL=-12m からは固結シルトの 3 層に分かれ、砂地盤は GL=-1m まではシルト、GL=-1m からは細砂の 2 層に分かれている。粘土地盤、砂地盤それぞれに用いた土質パラメータを Table.1 に示す。この土質パラメータは対象地盤から採取した試料を用いて行った三軸圧縮試験と標準圧密試験の結果から算定した(Fig.2, Fig.3 参照)。これらの図から構成モデルは正規圧密状態だけでなく過圧密状態での粘土の挙動、また、密度の異なる砂の応力~ひずみ関係を適切に表現していることがわかる。また、解析粘土地盤の初期過圧密比分布、砂地盤の間隙比分布は実地盤のデータを参考にして、砂地盤では自重圧密、粘土地盤は自重圧密に更に 5tf/m² のプレロードを作用させて作成した。Fig.4 に粘土地盤の過圧密比分布の実測値と解析地盤の分布を示す。同様に、Fig.5 に砂地盤での間隙比分布の実測値と解析値を示す。実地盤の地下水位は GL=-1m であるが飽和度が高いことから解析地盤はすべて飽和地盤としている。また実験時の荷重速度(約 0.07mm/min)と透水係数を考慮して粘土地盤では水~土連成解析を、砂地盤は完全排水条件下で行った。

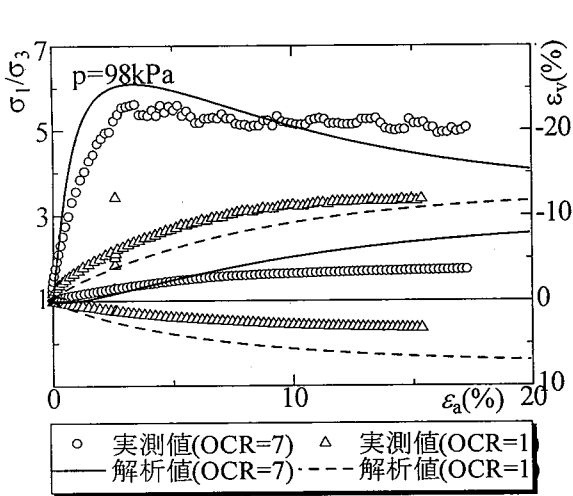


Fig.2 粘土地盤の応力~ひずみ関係

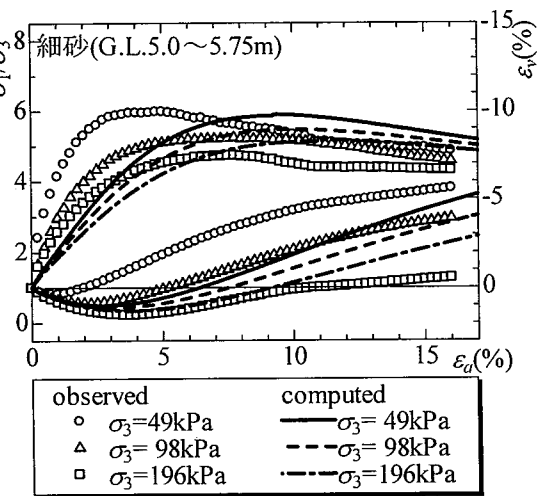


Fig.3 砂地盤の応力~ひずみ関係

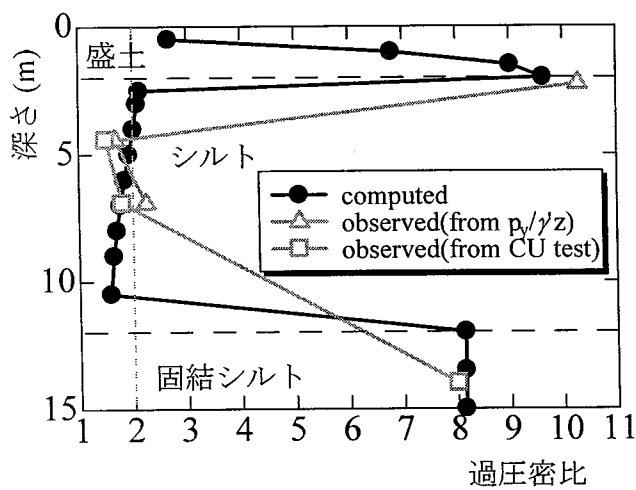


Fig.4 粘土地盤の過圧密比分布

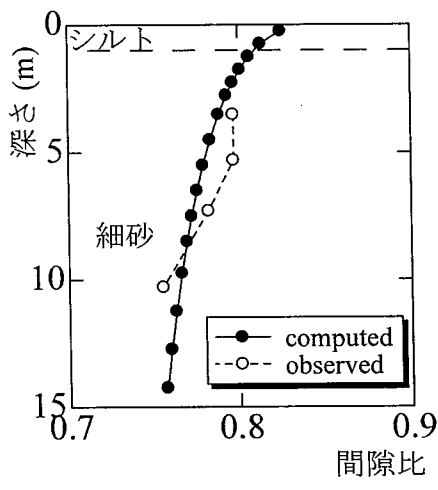


Fig.5 砂地盤の間隙比分布

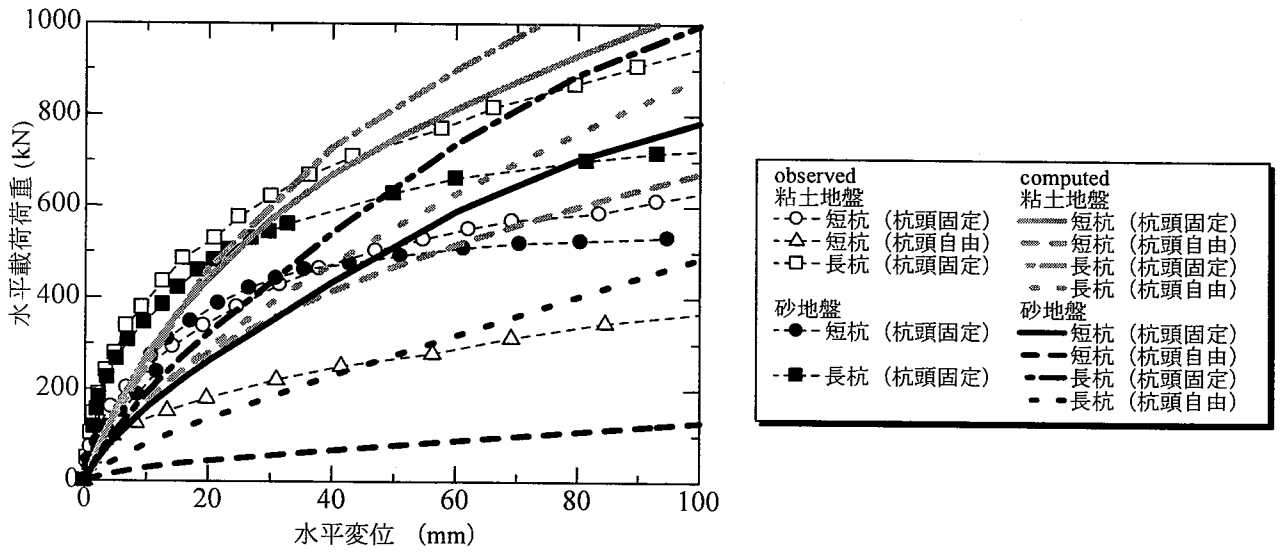


Fig. 6 水平載荷重～杭頭水平変位関係

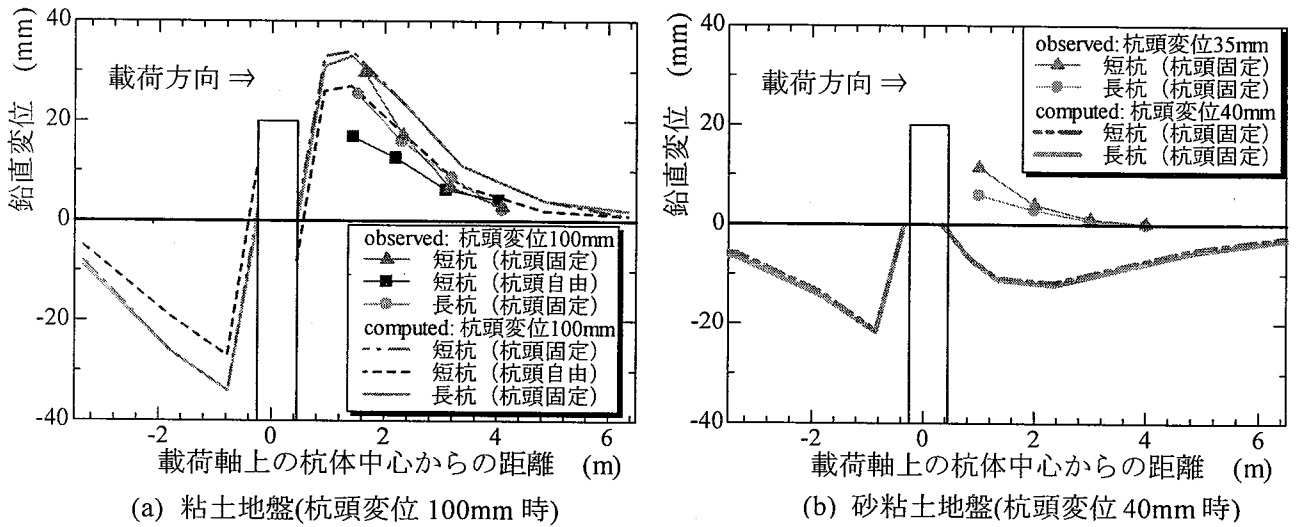


Fig. 7 杭体中心軸上の地表面沈下形状

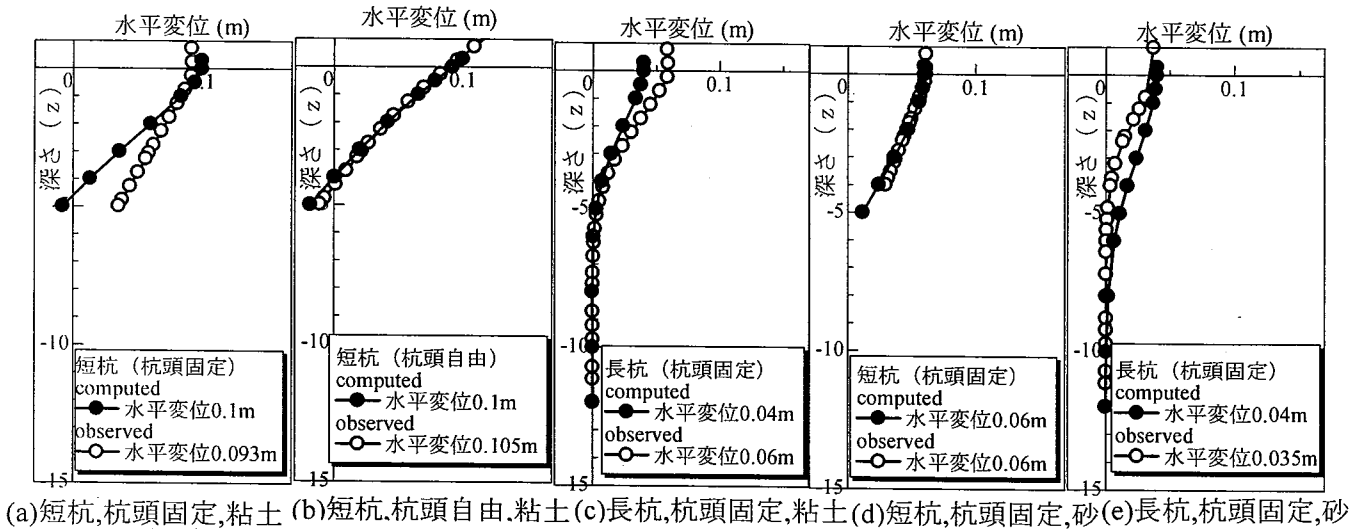
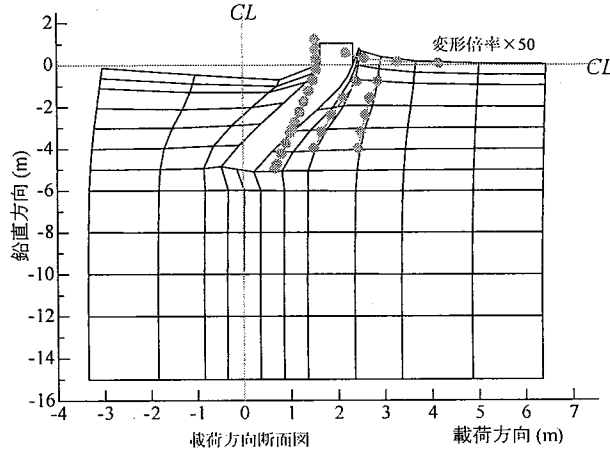
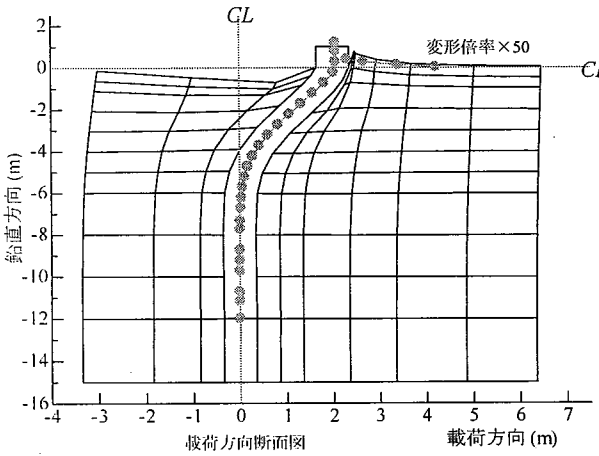
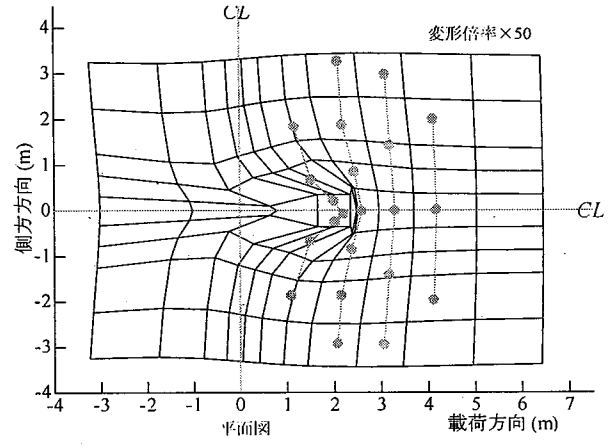
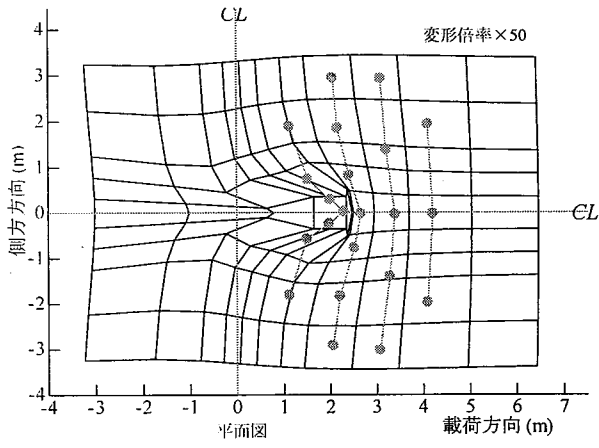


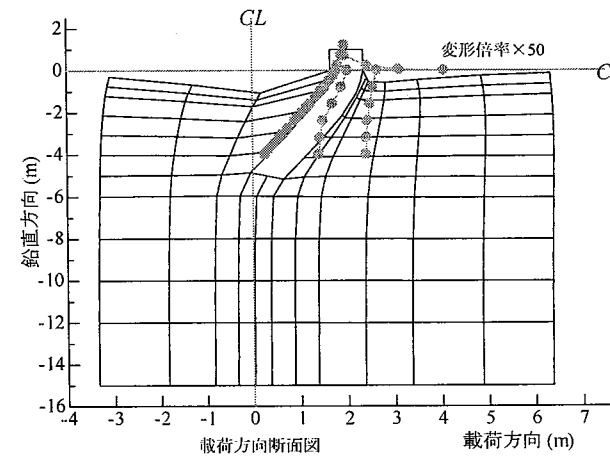
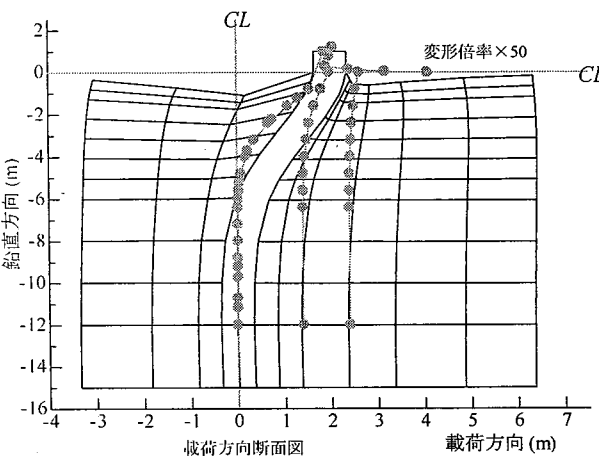
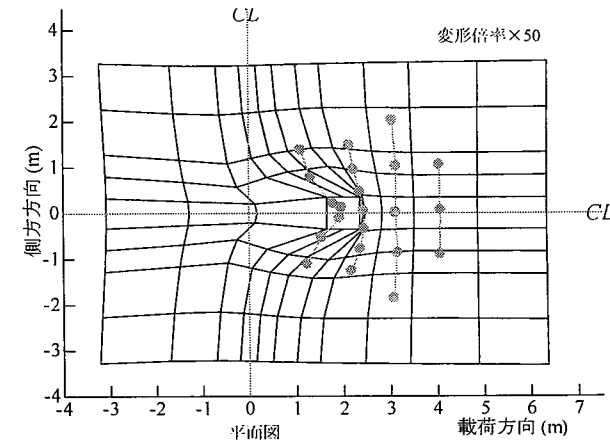
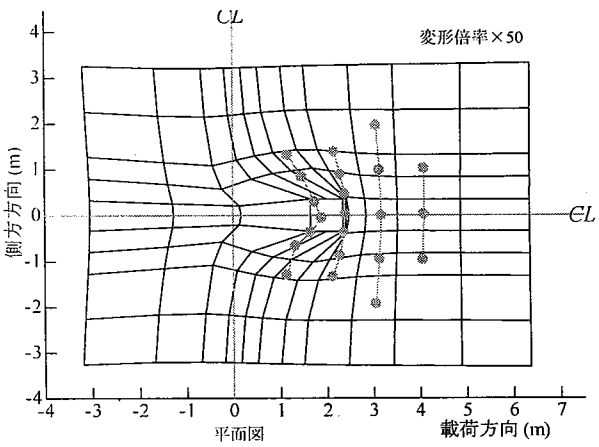
Fig. 8 杭体の変形形状の実測結果と解析結果



(a)長杭

(b)短杭

Fig.9 地盤の変形図 (粘土地盤,杭頭固定,杭頭水平変位 400mm 時)



(a)長杭

(b)短杭

Fig.10 地盤の変形図 (砂地盤,杭頭固定,杭頭水平変位 400mm 時)

3.解析値の比較と考察

Fig.6 に水平載荷重～杭頭水平変位関係の実測結果と解析結果の比較を示す。なお粘土地盤の長杭の杭頭回転自由条件、砂地盤での短杭・長杭の杭頭回転自由条件での実験は行われていないため解析結果のみを示す。この図から解析値は実測される杭の荷重～変位関係の差異をよく説明しており、それぞれの地盤で長杭の杭頭回転固定条件の場合に杭の横抵抗が最も大きくなる事がわかる。さらに、杭を長くするよりも杭頭の回転を固定したほうが横抵抗には効果があると言える。また粘土地盤と砂地盤を比較すると実験・解析ともに粘土地盤の支持力の方が大きいことが分かる。なお、これらの解析ではトリリニアモデルを用いることによって杭体の剛性の低下を表現しているが、杭体と地盤のすべりを考慮していないために、支持力は大きくなりつづけ最終的な杭の横抵抗の極限值までは得られてない。

Fig.7 に杭中心軸上の地表面沈下形状の実測結果と解析結果を示す。この図から杭長が長く、杭頭が自由のほうが地表面沈下は若干小さいが、影響範囲への影響は少ないと考えられる。粘土地盤では非排水条件に近い状態で杭体前面の地盤がせん断されるため、より鉛直方向に膨張することから地表面が盛り上がりと考えられる。解析値はこのような実測値とよく対応している。しかし、砂地盤の杭体

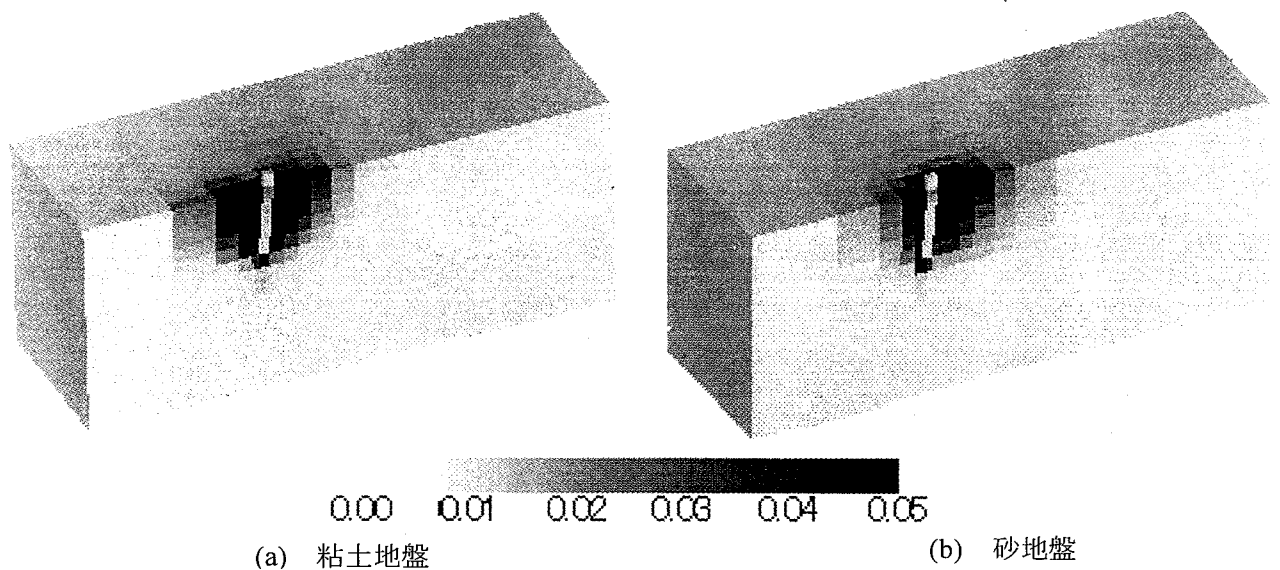


Fig.11 地盤の偏差ひずみ分布 (短杭,杭頭固定,杭頭水平変位 400mm 時)

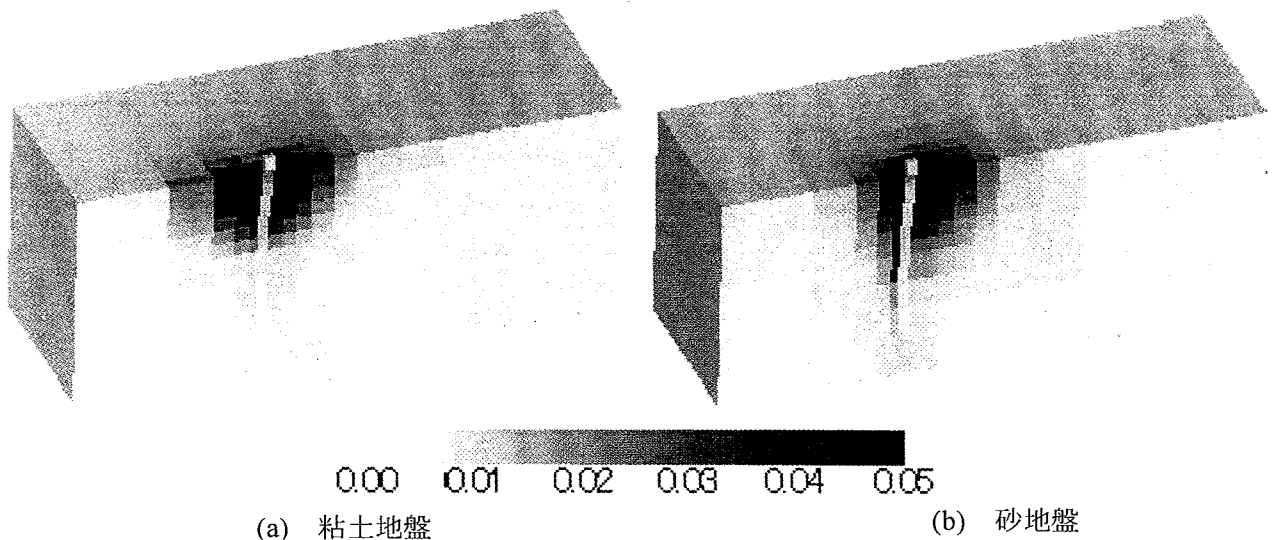


Fig.12 地盤の偏差ひずみ分布 (長杭,杭頭固定,杭頭水平変位 400mm 時)

前面において実測結果は盛り上がっているが、解析では沈下している。これは砂地盤の地盤表層がシルトであり、このシルトが非排水に近い条件でせん断されるため盛り上がったと考えられる。

Fig.8 に杭体の変形形状の実測結果と解析結果の比較を示す。(a),(b),(d)図より短杭では杭体が倒れるように変位しているが、(c),(e)図より長杭では杭全体が大きくたわんでいることがわかる。このような実測値の傾向を解析値はよく表現している。また粘土地盤・砂地盤で杭体の変形形状の違いはほとんどみられない。

Fig.9(粘土地盤)および Fig.10(砂地盤)に地盤の変形形状図を示す。この図は杭頭固定条件で杭頭変位を 40mm 与えたときのものである。実測結果はプロットで解析結果はメッシュで示し、地盤の変形が分かるように変位を 50 倍にして図示してある。ただし、粘土地盤の長杭では地盤変形の深度分布の実測データがないため杭体変形のみを示す。この図から地表面で変位を見ると粘土地盤のほうが広範囲にわたって変形しており、同じ杭頭変位を与えたとしても周辺地盤への影響は粘土地盤の方が大きいと考えられる。また、深さによる変形の違いを見ても、粘土地盤のほうが深いところにまで変形が及んでいることが分かる。

Fig.11, Fig.12 は杭頭固定条件で杭頭に大きな変位を与えた場合の解析の偏差ひずみ分布である。(a)図に粘土地盤、(b)図に砂地盤での杭頭変位 400mm での解析結果を示している。粘土地盤と砂地盤を比較すると、杭体前面地盤では砂地盤のほうが影響範囲は若干小さい。しかし、杭体背面地盤ではその違いが顕著にみられ、深さ方向への影響については杭近傍では砂地盤のほうが大きい、地表面での影響範囲は粘土地盤のほうが大きいことがわかる。したがって、Fig.6 で示したように粘土地盤の支持力のほうが大きいことも粘土地盤の方の影響範囲が大きいことから理解できる。このような地盤材料の特性の違いによる地盤の変形への影響を有限要素解析により妥当に表現できた。

4.結論

水平荷重を受ける杭の水平横抵問題において、杭長・杭頭の拘束条件・地盤材料の違いが支持力、周辺地盤の変形および杭の変形にどのような差異をおよぼすかを実験・解析両面から検討した。その結果、支持力の増大には杭頭固定が効果的である。周辺地盤への影響は粘土地盤のほうが大きい。地盤および杭の材料特性を評価した解析結果は定量的にも実測結果とよく対応しており、実際地盤の状態を適切に評価することで精度の良い変形予測ができることを示した。

参考文献

- 1) 東京電力(株) 電力技術研究所報告書, 2001
- 2) 檜尾正也 他: 水平荷重を受ける杭の現場試験とその解析, 第 37 回地盤工学研究発表会, 発表講演集, vol.2, pp.1467-1468, 2002
- 3) Feng Zhang et al. : Mechanical Behavior of Pile Foundations Subjected to Cyclic Lateral Loading up to The Ultimate State., Soils and Foundations, Vol.40, No.5, pp.1-17, 2000
- 4) 中井照夫 他: 正規・過圧密土の等方硬化モデル, 第 37 回地盤工学研究発表会, 発表講演集, vol.1, pp.379-380, 2002
- 5) T. Nakai & M. Hinokio : An isotropic hardening model for normally and over consolidated soils with t_{ij} -concept and subloading surface concept, proc. of IWS-Calgary, pp.3-16, 2002