

剛塑性有限要素法を用いた遠心模型実験の数値解析と逆算土質定数の考察

防災設計工学研究室 安部 敏幸

指導教官 大塚 悟

1. 研究の目的

剛塑性有限要素法による地盤の極限支持力解析は内部摩擦角の影響を大きく受ける．そのため内部摩擦角の設定は難しい問題である．そこで本研究では既往の実験結果を剛塑性有限要素法を用いて数値シミュレーションすることで、実地盤での強度定数の算定方法を見出すことを目的としている．

2. 豊浦砂の特性

本研究は豊浦砂(以下砂)を用いた地盤の極限支持力を求めるものである．内部摩擦角に影響を与える砂の特性として、異方性、進行性破壊、応力依存性が挙げられる．これらの特性により、本来、実地盤の内部摩擦角は一定ではない．しかし本研究では慣用設計のため、砂地盤の内部摩擦角は一定とした．

3. RPFEM による遠心模型実験の逆解析

岡村らによって行われた豊浦砂地盤上の円形基礎・帯基礎の遠心模型実験結果を RPFEM で解くことによって、砂地盤の強度定数を逆解析により求める．円形基礎と帯基礎、それぞれ異なる基礎幅について解くことにより、内部摩擦角と基礎幅 B の関係を調べた．もう一つの強度定数である粘着力はゼロとすると解析が不安定となるため、粘着力は $c=0.1\text{kPa}$ とした．またダイレタンシー角は龍岡によって報告された $\alpha = -30^\circ$ の関係式から求めている．解析条件は円形基礎は軸対称条件で、帯基礎は平面ひずみ条件であり、いずれも自重を考慮している．図 1 に逆解析の結果を示す．

図 1 より円形基礎の場合 $0.03\text{m} \sim 0.06\text{m}$ の小さい基礎幅では $\phi = 36.0^\circ$ のとき、基礎幅 0.9m では $\phi = 35.0^\circ$ のとき、 $1.2\text{m} \sim 2.264\text{m}$ の大きい基礎幅では $\phi = 34.5^\circ$ のときに RPFEM と実験値はよく一致し、基礎幅の増加に伴って ϕ は減少していることがわかる．これは豊浦砂の特性である内部摩擦角の応力依存性に寄るものであると考えられる．

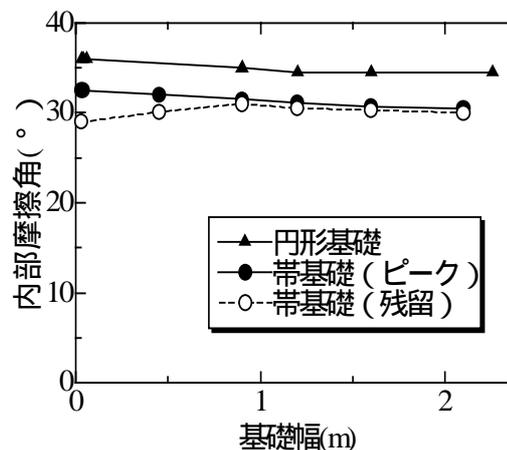


図 1 逆解析による $B - \phi$ の関係

帯基礎はピークと残留の差が明確であったので、ピークと残留それぞれについて逆解析を行った．図 1 より、ピーク時は ϕ が $30.5^\circ \sim 32.5^\circ$ のとき RPFEM と実験値は一致している．円形基礎と比較すると ϕ は全体的に約 4° 小さくなっている．円形基礎のときと同様、基礎幅の増加に伴って ϕ は減少しており、応力依存性の傾向が見られる．

残留時の実験値と一致する ϕ は、ピーク時に比べ全体的に下がっている．その値は 30° 前後であり、 $\alpha = -30^\circ$ の関係を用いるとダイレタンシー角はほぼゼロとなる．残留時のダイレタンシー角はゼロであることが一般的に知られているので、本解析では妥当な値をとらえていると言える．

4. 複合地盤における数値シミュレーション

3. の逆解析の結果より円形基礎の基礎幅が大きいレベルでの豊浦砂の内部摩擦角を 34.5° とした．ここではこの $\phi = 34.5^\circ$ 、 $\alpha = 4.5^\circ$ を用いて、砂地盤および砂層の下に粘土層を有する複合地盤について数値シミュレーションを行い、岡村らによって行われた遠心模型試験との比較検討を行った．はじめに砂地盤について検討する．

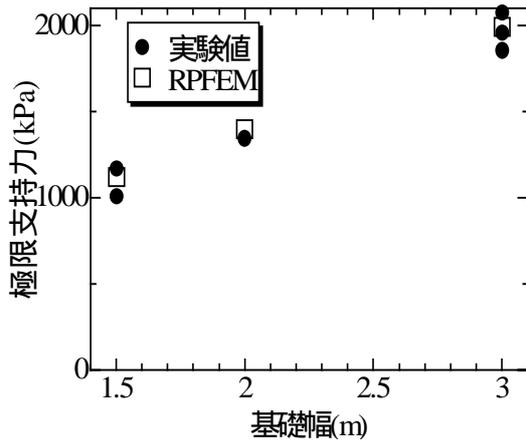


図2 砂地盤の遠心実験とRPFEMの比較

図2に砂地盤の遠心実験とRPFEMを比較したものを示す。図より、解析値と実験値は概ね一致しており、良好な解析結果が得られた。

豊浦砂から成る砂地盤の極限支持力について良好な解析結果を得たことから、図3に示すような上層に砂層、下層に粘土層から成る複合地盤の遠心模型試験の数値シミュレーションを実施した。その結果を図4に示す。

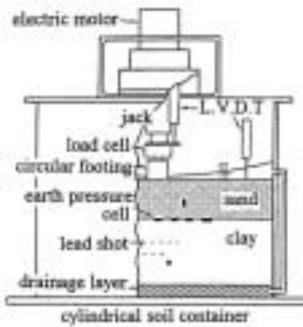


図3 複合地盤の実験概要

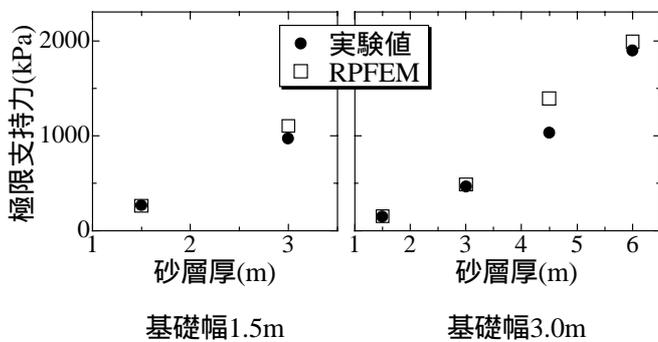


図4 複合地盤の遠心実験とRPFEMの比較

図4から、基礎幅3.0mの砂層厚4.5mについては実験値と解析解の一致は得られなかったが、その他のケースは全て一致している。よって、支持力への影響要因の多い砂地盤及び、慣用解析では求めることが難しい複合地盤において剛塑性有限要素法の適用性が確認された。

5.三次元数値シミュレーション

これまでで二次元支持力問題におけるRPFEMの適用性及び有用性が確認された。ここでは三次元に拡張する。モデルとなる基礎の形状は小さいものである。3.の逆解析の結果より小さい基礎幅では $\phi=36.0^\circ$ で解析を行うとRPFEMと実験値はよく一致することが得られた。従ってここでも $\phi=36.0^\circ$ で解析を行い、赤津らによって行われた正方形基礎の支持力実験と比較・検討を行った。基礎形状は3cm×3cm, 5cm×5cm, 10cm×10cmの3つである。

$\phi=36.0^\circ$ で解析を行った結果、基礎形状5cm×5cmは実験値とよく一致したが、基礎形状3cm×3cm, 10cm×10cmについては若干誤差が見られた。そこでこの2つについては逆解析をおこなった。その結果を表1に示す。

表1 正方形基礎の逆解析結果

基礎形状 (cm×cm)	($^\circ$)	極限支持力(kPa)	
	$d= -30^\circ$	RPFEM	実験値
3×3	36.5	127	137
5×5	36.0	163	157
10×10	35.5	235	245

表1より二次元解析のとき同様、基礎形状が大きくなるにつれ実験値と一致する ϕ の減少が見られた。また、実験値と一致する ϕ の値は 36° 前後であり、逆解析で求めた値に近い結果となった。

6.豊浦砂の特性を考慮した ϕ の算定

これまで内部摩擦角一定として解析を行い、良好な結果が得られた。よって、ここでは要素試験で得られる ϕ を支持力解析に適用できるようにするため、要素試験の ϕ と逆解析の ϕ を比較し、 ϕ の修正係数を提案した。

図5に龍岡によって行われた要素試験から得られ

た内部摩擦角と間隙比・拘束圧の関係を示したものを示す。今回解析との比較に用いた実験の砂地盤は $e=0.65$ であり、**図5** から内部摩擦角は拘束圧によって $40^\circ \sim 45^\circ$ である。一方、逆解析によって求めた内部摩擦角は円形基礎(軸対称条件)では $34.5^\circ \sim 36.0^\circ$ であり、帯基礎(平面ひずみ条件)では $30.5^\circ \sim 32.5^\circ$ である。要素試験の と比較するとかなり低い値となっており、この差は異方性および進行性破壊、応力依存性の影響によると考えられる。従って、異方性および進行性破壊、応力依存性の影響を考慮した の修正係数として と を提案した。

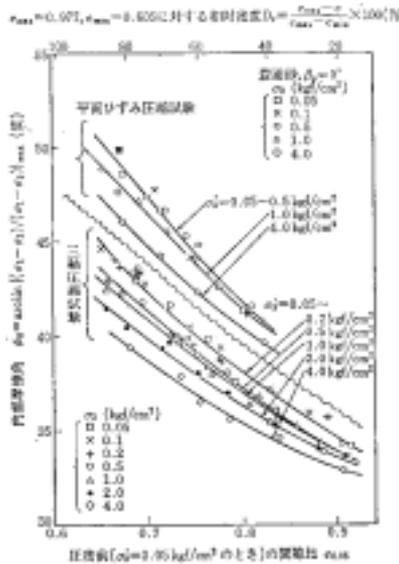


図5 要素試験による豊浦砂の

まず異方性および進行性破壊と応力依存性の影響を取り入れる前の値として、初期内部摩擦角 ϕ_0 を要素試験から求める。 ϕ_0 は基礎幅 0.03m のときの極限支持力を拘束圧に代用して、**図5** から読み取った。**表2** に解析条件ごとの初期内部摩擦角を読み取ったものをまとめる。

表2 初期内部摩擦角

解析条件	逆解析による $B=0.03m$ ($^\circ$)	極限支持力	ϕ_0 ($^\circ$)
		(kgf/cm^2)	
軸対称	36.0	0.78	43.0
平面ひずみ	32.5	1.34	42.0

表2 から基礎幅 0.03m の逆解析から求めた $B=0.03m$ は ϕ_0 よりかなり低いことがわかる。基礎幅 0.03m のとき応力レベルは非常に小さいことからこの差は異方性および進行性破壊による影響だと考え

られる。よって、式(6-1)に示す $B=0.03m$ と ϕ_0 との比を異方性・進行性破壊による内部摩擦角の修正係数と定義した。

$$= \frac{B=0.03m}{\phi_0} \quad (6-1)$$

式(6-1)から異方性・進行性破壊による修正係数を求めたものを**表3**にまとめる。軸対称条件が 0.83、平面ひずみ条件が 0.76 であり、平面ひずみの方が異方性・進行性破壊による影響が大きい。龍岡は三軸、平面ひずみ圧縮試験を行い、異方性および進行性破壊による の減少の影響は平面ひずみの方が大きく、減少の割合もこの程度であると報告している。従って、逆解析から算出した異方性・進行性破壊による の修正係数 は妥当な値であると言える。

表3 異方性・進行性破壊による修正係数

解析条件	逆解析による $B=0.03m$ ($^\circ$)	ϕ_0 ($^\circ$)	修正係数
軸対称	36.0	43.0	0.83
平面ひずみ	32.5	42.0	0.76

逆解析の結果、基礎幅の増加に伴い実験値と一致する内部摩擦角は減少した。これは応力依存性の影響であると考えられる。そこで式(6-2)に示す、基礎幅 Bm のときの逆解析によって求めた内部摩擦角 B と、基礎幅 0.03m のときの逆解析によって求めた内部摩擦角 $B=0.03m$ との比を応力依存性による内部摩擦角の修正係数と定義した。

$$B = \frac{B}{B=0.03m} \quad (6-2)$$

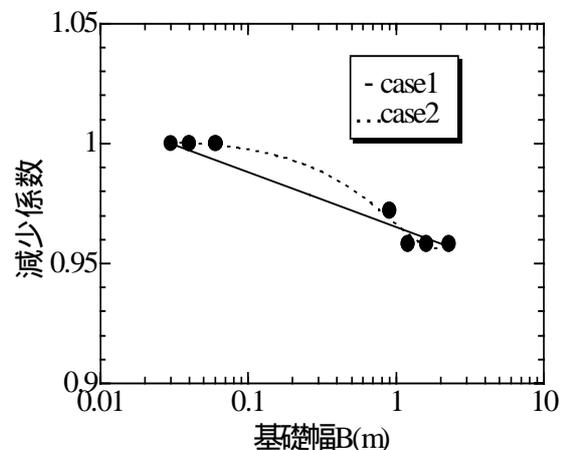


図6 軸対称条件における B と の関係

式(6-2)より，円形基礎の各基礎幅ごとの q_{ult} を計算したものを図6にまとめる．図6から B と q_{ult} の関係式を導いた．関係式を式(6-3)～(6-6)に示す．関係式の case1 は対数近似，case2 は多項式(2次)近似したものである．

基礎幅 B と修正係数 α の関係式：軸対称条件

$$\text{case1: } \alpha = 0.965 - 0.010 \log B \quad (B > 0.03\text{m}) \quad (6-3)$$

$$\text{case2: } \alpha = 1.002 - 0.048B + 0.013B^2 \quad (B > 0.03\text{m}) \quad (6-4)$$

基礎幅 B と修正係数 α の関係式：平面ひずみ条件

$$\text{case1: } \alpha = 0.958 - 0.012 \log B \quad (B > 0.03\text{m}) \quad (6-5)$$

$$\text{case2: } \alpha = 1.002 - 0.045B + 0.007B^2 \quad (B > 0.03\text{m}) \quad (6-6)$$

提案した異方性・進行性破壊と応力依存性による修正係数 α の適用性を確認するため，間隙比から初期内部摩擦角を求め，それに修正係数 α をかけて各基礎幅ごとの内部摩擦角を算定し，その値を用いて数値解析を行い，実験結果と比較した．間隙比を変えたケースで確認したかったが，実験データが入手できなかったため，逆解析にも使用した岡村らによって得られた実験データと比較した．その結果を図7，図8に示す．

図7，図8から修正係数 α から算出した内部摩擦角を用いた数値解析の結果は実験値に近い値をとらえていると言える．特に case2 の方は精度はかなり高い．よって内部摩擦角の修正係数 α の適用性は確認できた．

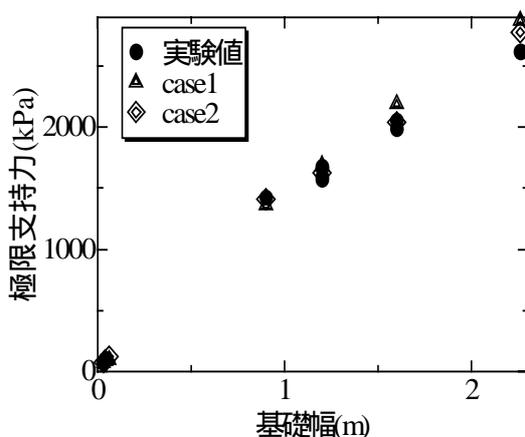


図7 軸対称条件における解析結果

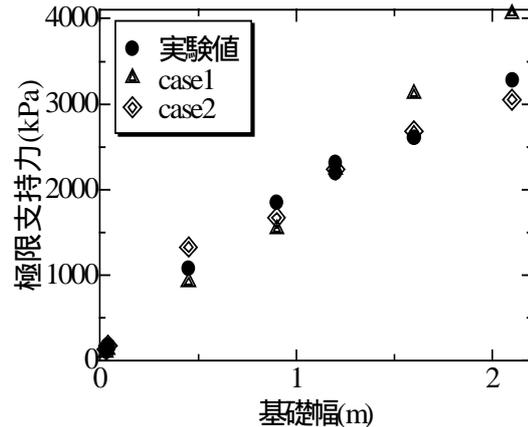


図8 平面ひずみ条件における解析結果

7. 結論

本研究で得られた結論を箇条書きにする．

- 1) 逆解析によって求めた $\phi = 34.5^\circ$ を用いて砂地盤及び複合地盤の遠心模型実験を数値シミュレーションした結果 実験値と RPFEM はよく一致した．これは逆算の有効性を示している．
- 2) 三次元シミュレーションの場合も二次元の時同様，基礎形状が大きくなるにつれて実験値と一致する ϕ が減少するという結果が得られた． ϕ の値は 36.0° 前後であり，逆解析で得た値とほぼ同程度であった．
- 3) 要素試験の ϕ を支持力解析に適用するため，逆解析の結果から， α の修正係数 α を求め，それを用いて求めた q_{ult} で数値解析を行ったところ，実験値とよく合った．従って α の修正係数の適用性が確認された．
- 4) 間隙比が異なるケースでの遠心模型実験と比較・検討し，今回提案した修正係数の適用性を確認することが今後の課題である．

参考文献

- 1) 地盤工学会地盤工学ハンドブック編集委員会：地盤工学ハンドブック，地盤工学会，pp86-87，1999
- 2) Okamura M・Takemura J・Kimura T：Centrifuge model tests on bearing capacity and deformation of sand layer overlying clay，Soils and Foundations，Vol.37，No.1，pp73-88，1997
- 3) 岡村未対・竹村次朗・木村 孟：砂地盤における円形及び帯基礎の支持力に関する研究，土木学会論文集，No.463/ -22，pp85-94，1993