

基礎の形状・寸法を考慮した地盤の支持力に関する研究

防災設計工学研究室 熊谷 智樹

指導教官 大塚 悟

1. 研究背景

基礎の設計はこれまで模型試験による経験式を用いて行われてきたが、より高度な安全性、経済性の追求から合理的な設計が求められている。そのためには模型試験による経験的な方法に加えて数値解析などの手法を補完する検討が必要である。本研究は模型試験による経験的な方法だけでなく、数値解析との相互補完により支持力の合理的評価を目的とする。

基礎の支持力は本来三次元問題であり、その支持力解析には精緻な三次元解析が求められる。さらに、三次元解析では解析速度が重要な問題である。本研究ではペナルティ法を用いた剛塑性有限要素法による三次元支持力解析プログラムの開発を行った。

2. 剛塑性有限要素法の支持力評価への適用性

剛塑性有限要素法の適用性の検討として、遠心模型試験(Okamura et al, 1998)の数値シミュレーションを行った。実験では試料に豊浦砂を用いており、豊浦砂は応力依存性、強度異方性、間隙比によりせん断抵抗角が変化するため、それらを考慮した強度定数を用いて解析を実施した。定数の具体的算出法は修士論文(熊谷, 2002)に示す。図-1 に砂質地盤の遠心実験と解析結果を示す。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。

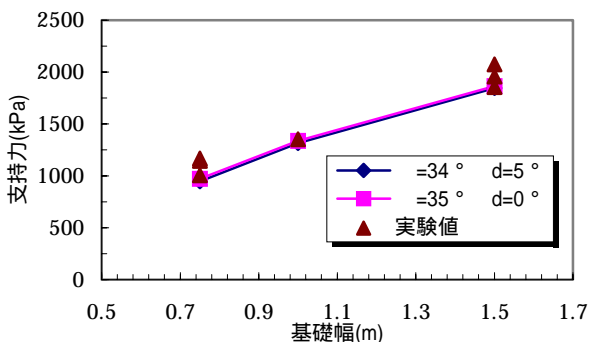


図-1 砂質地盤の遠心実験と解析結果

豊浦砂から成る砂質地盤の支持力について良好な解析

結果を得たことから、上層に砂層(豊浦砂)、下層に粘土層から成る互層地盤の遠心模型試験(Okamura et al, 1998)の数値シミュレーションを実施した。図-2 に互層地盤の遠心実験と解析結果を示す。図より、Case3 については実験値と解析解の一致は得られなかったが、その他のケースは一致しており、良好な解が得られている。よって、支持力への影響要因の多い砂層地盤及び、慣用解析では求めることが難しい互層地盤において剛塑性有限要素法の適用性が確認された。

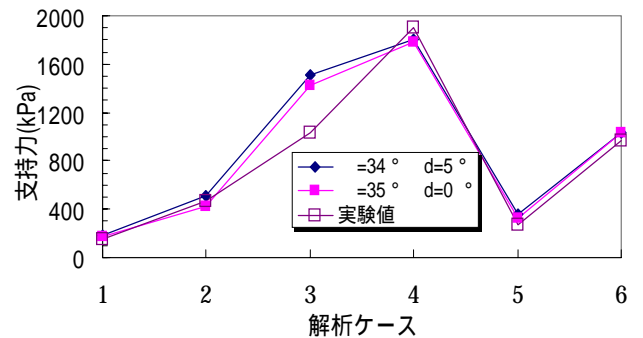


図-2 互層地盤の遠心実験と解析結果

3. 三次元解析のための演算の高速化

三次元解析では解析速度が重要な問題となる。剛塑性有限要素法(RPFEM)による解析ではラグランジュ法とペナルティ法の二つの手法により解析が行われてきた(松岡ら)。ラグランジュ法は未知数が変位速度、平均応力、荷重係数(支持力)の3つであり、釣合い式と体積に関する制約条件式、荷重に関する制約条件式を連立して解くことにより解を得るが、ペナルティ法では未知数が変位速度のみとなる。極限支持力についてもペナルティ法を用いて算出する点に本手法の特徴があり、これによって全体剛性マトリクス的大幅な縮小化と帯行列化が可能となり計算の高速化に寄与している。表-1 に両手法による解析結果を示す。表より、両手法による解の差は約3.5%程度である。今回の解析メッシュは1000要素程度であるが、メッシュを細分化することで解の精度はさらに向上する。以上からペナルティ法はラグランジュ法に比べ解析速度が速く、精度もほぼ同程度であり三次元解析に有用であ

ることが確認された．以下にペナルティ法を用いた三次元 RPFEM を用いて解析を行った．

表-1 非関連流れ則における解析アルゴリズムの比較

ϕ	ϕ_d	支持力(kPa)		解の差(%)
		Lagrange	Penalty	$ L-P /L$
30	0	1486.6	1479.2	0.50
	5	1644.5	1684.4	2.43
	10	1785.1	1757.3	3.56
	20	1965.6	1916.3	2.51
	30	2025.3	1953.9	3.53

4. 基礎形状による支持力の差異

基礎の三次元支持力においては基礎形状の及ぼす支持力への影響が,形状係数として求められている．しかし,この係数は数少ない実験を基に求められているために,信頼度について高いとは言えない．三次元の支持力公式には一般にテルツァギの支持力式を拡張したものが用いられ(山口, 1984), 式(1)で表される．

$$q_f = \frac{Q}{BL} = cN_c s_c + p_0 N_q s_q + \frac{\gamma_t B}{2} N_\gamma s_\gamma \quad (1)$$

ここに形状係数は以下のように表される．

$$s_q = 1 + \frac{B}{L} \tan \phi$$

$$s_c = 1 + 0.2 \frac{B}{L}$$

$$s_\gamma = 1 - \alpha \frac{B}{L}, \quad \alpha = 0.3 \sim 0.4$$

しかし,テルツァギの支持力式は多くの仮定に基づいており,その仮定に問題のあることが日下部(1990)をはじめ多くの研究者により報告されている．また三次元支持力を求めるための形状係数についても算出法に問題を内包しており,式(1)の信頼性については未だ課題が多いと言える．

開発したプログラムを用いて基礎形状による極限支持力の差異について検討すると共に,式(1)との比較も行った．図-3 に有限要素メッシュを表-2 に解析結果を示す．表中の は平面ひずみ条件による解析である．

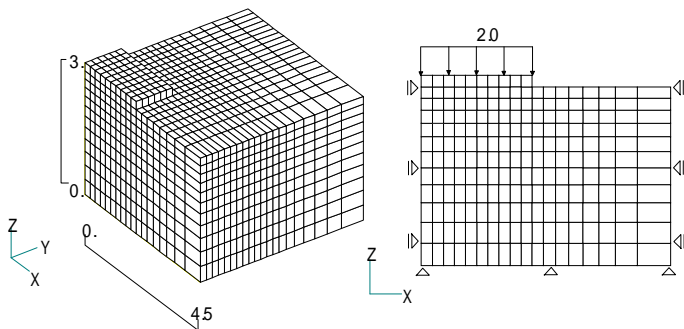


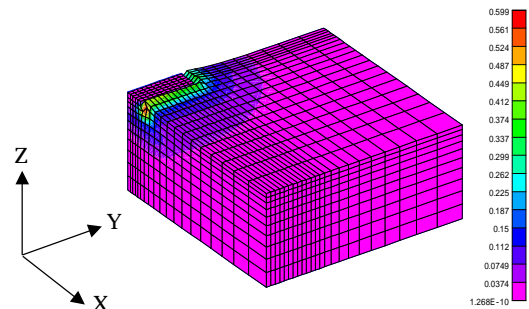
図-3 有限要素メッシュ(単位:m)

表-2 解析結果

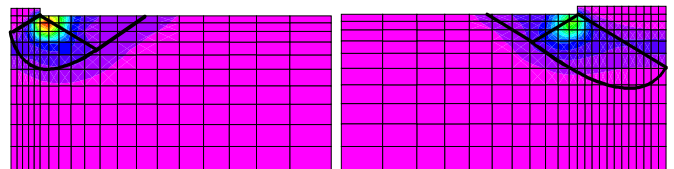
	L(m)	B(m)	支持力(kPa)	
			RPFEM	山口
=10°	1	2	121.8	110.9
	2	2	131.8	128.8
	4	2	140.2	130.0
	6	2	145.1	130.4
		2	137.5	131.2
=20°	1	2	258.8	247.0
	2	2	295.0	303.9
	4	2	335.6	331.2
	6	2	357.8	340.3
		2	362.0	358.5
=30°	1	2	607.2	682.3
	2	2	718.8	888.0
	4	2	878.2	1033.6
	6	2	987.5	1082.1
		2	1138.8	1179.1

表より 式(1)は RPFEM と比較してせん断抵抗角 10° では安全側, 20° ではほぼ同程度, 30° では危険側の解を与えている．この原因として山口の支持力式は二次元の破壊形態を用いて三次元の形状係数を決定していることが挙げられる．一般に二次元と三次元では破壊形態が異なることが遠心実験の考察から日下部(1990)により報告されている．

図-4 は本解析で得られたひずみ速度分布図(破壊形態)である．



(a) 全体図



(b) xz 平面図

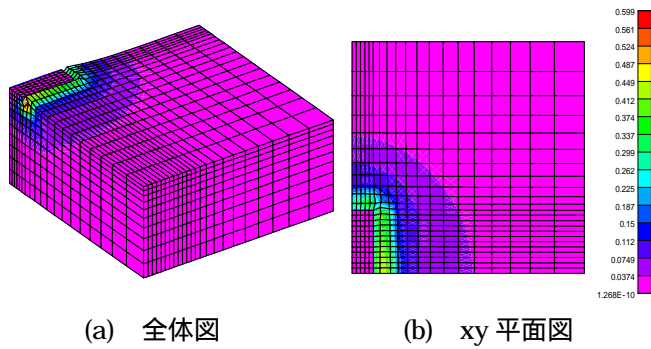
(c) yz 平面図

図-4 三次元の破壊形態と断面形状

図中の太線は式(1)における二次元の破壊形態(すべり線)の仮定である．図より, xz 平面と yz 平面において主動楔の深さが異なっていることがわかる．これは, 三次

元の破壊形態に二次元の破壊形態の仮定を用いた場合，xz 平面と yz 平面のすべり線の対応が得られないことを示している．二次元の破壊形態を三次元の破壊形態に拡張して適用することは適切でないと考えられる．

図-5 に基礎形状 $L=6m$ ， $B=2m$ のときのひずみ速度分布図を示す．図より長方形基礎の場合は，基礎の長辺の方向に大きく，短辺の方向に小さい楕円形状の破壊形態が生じている．実際現象でも長方形の基礎では辺の長い方にすべり線が発達することが日下部(1990)により報告されていることから，本解析は実際現象に沿った破壊形態が得られており，合理的な解が得られていると考えられる．



(a) 全体図 (b) xy 平面図
図-5 長方形基礎の破壊形状

本解析で得られた結果を平面ひずみ条件からの支持力変化率で表すと図-6 が得られる．支持力変化率は各支持力を平面ひずみの支持力で除したものである．得られた結果には対数関係が認められる． L/B による支持力の変化に影響を及ぼす要因として自重の大きさや基礎幅の変化に対する検討が必要であるが二次元解析の検討より，その影響は小さいと考えられる．

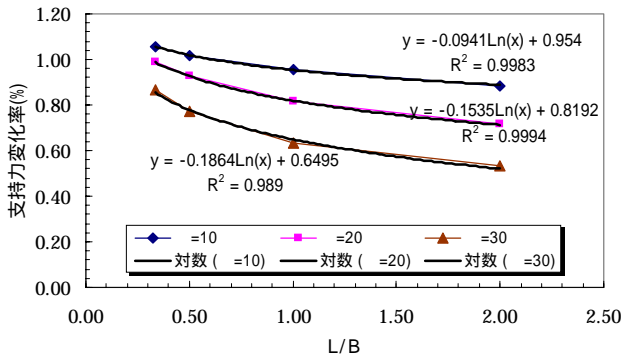
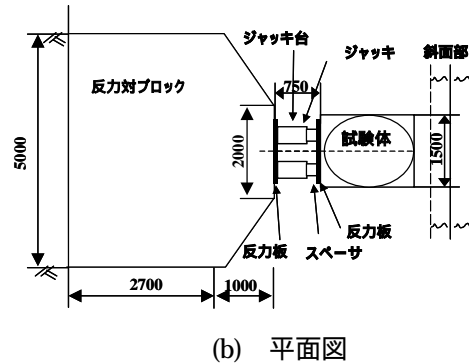
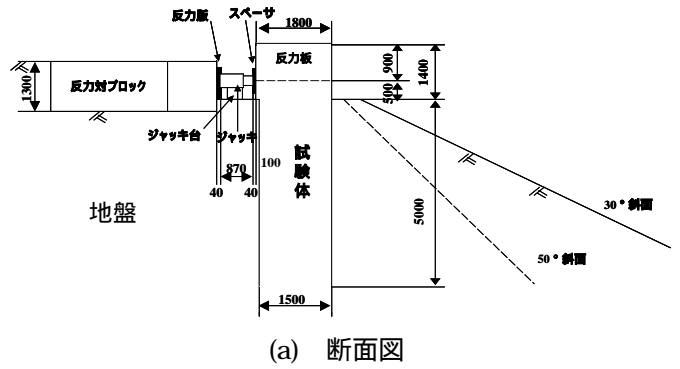


図-6 基礎形状による支持力変化

5. 斜面上深礎基礎の水平耐力

斜面上の深礎基礎に対する実規模水平載荷試験が以下の要領で行われている．



(a) 断面図 (b) 平面図
図-7 試験概要図

ここでは実験結果と開発した三次元支持力解析プログラムを用いて数値シミュレーションを実施し，適用性の検討を行う．地盤の強度定数は内部摩擦角 $\phi = 23.8^\circ$ ，粘着力 $c = 46kPa$ である．水平耐力は試験より $6272 kN$ が報告されている．図-8 に示す有限要素メッシュは図-7 の試験詳細図をもとに作成した．

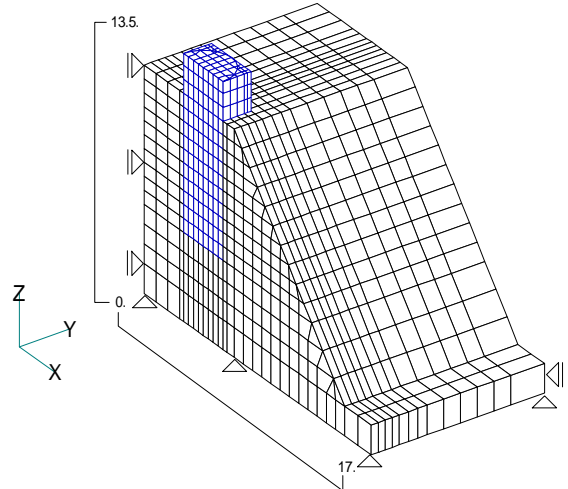


図-8 有限要素メッシュ

解析結果を以下に示す．解析から得た支持力は実験値に比べ非常に大きな値となった．また，得られた破壊形態には斜面部にひずみの発生は認められない．本来基礎の背面では基礎と地盤の剥離が生じるが，本解析では引張強度を考慮していないために実際の崩壊機構と異なり

水平耐力が非常に大きくなったと考えられる。

表-3 実験結果及び解析結果(kN)

	実験値	RPFEM
U 現場	6272	20266

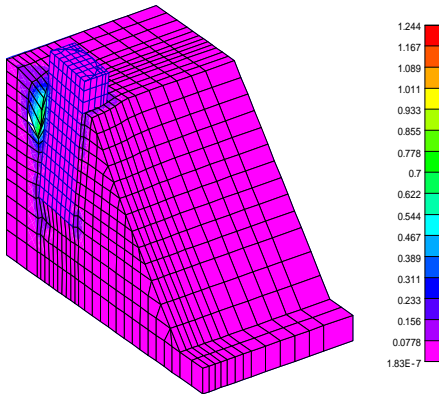


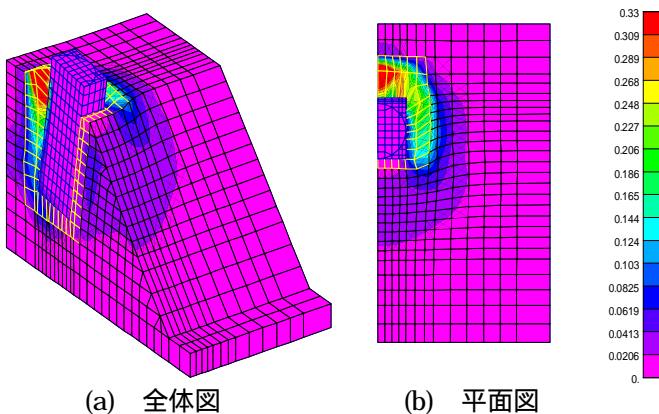
図-9 斜面上深礎基礎のひずみ速度分布図

そこで、引張域の設定による支持力評価の妥当性について二次元解析を用いて検討した。引張域の強度定数は粘着力が小さく、大きなダイレイタンシー角を持つものとし、せん断抵抗角 $\phi' = 2\phi$ 、ダイレイタンシー角 $\phi'_d = 2\phi$ 、粘着力 $c' = c/10$ と設定した。

その結果、基礎周面に基礎と地盤間に引張力が作用する際に上記の地盤定数を設定するように変更して解析を実施すると表-4のように実験結果と近い値が得られた。図-10 は斜面上深礎基礎のひずみ速度分布図を示している。

表-4 実験結果及び解析結果(kN)

	実験値	解析解
U 現場	6272	7867



(a) 全体図 (b) 平面図
図-10 引張域を考慮したひずみ速度分布図

図より、特に基礎背面部、側面部にて大きなひずみが発生していることがわかる。実際の岩盤斜面の破壊は基礎背面では引張によるクラックが生じ、基礎側面部ではせん断によるクラックが生じる。よって、引張域を考慮

した解析から得られたひずみ分布は実際現象に比較的良好に対応するものであると考えられる。この結果から、引張域を考慮することにより実際現象に沿った解析が可能であることが分かる。また、引張域にはダイレイタンシーの影響が大きい。

6. 結論

本研究で得られた結論を箇条書きにする。

- (1) 豊浦砂の遠心模型試験結果の数値解析を実施した。せん断抵抗角の応力依存性を解析に取り入れると、基礎寸法による支持力への寸法効果を表現できるが、現実的な基礎構造物の寸法であれば、せん断抵抗角を一定とする手法でも十分な精度の支持力評価を行うことができた。
- (2) 剛塑性有限要素法ではペナルティ法の利用により、大幅な高速化が実現される。精度は2~4%の誤差の範囲となる。Liu らによる高速化のための安定化マトリクスについても検討をしたが効果的ではない。
- (3) 三次元解析を用いて基礎形状による支持力の差異について評価した。既存の安定解析法では事前に破壊形態を求める必要がある。剛塑性有限要素法では破壊形態が解析の結果として定められるが、模型試験等による破壊形態とよく一致しており、優れた解析結果が得られた。
- (4) 斜面上の基礎の支持力問題は三次元的評価が不可欠である。過去に行われた実規模水平載荷試験の数値解析を実施した。地盤定数の設定にまだ問題が残されるが、支持力及び破壊形態についてはほぼ表現できており、適用性について確認した。

参考文献

- 1) Okamura, M., Takemura, J. and Kimura, T.: "Bearing capacity predictions of sand overlying clay based on limit equilibrium methods", Soils and foundation, Vol.38, No.1, pp181-194, Mar.1998
- 2) 山口柏樹:土質力学, 技報堂, pp.257-265, 1984.
- 3) 日下部治:支持力入門, 地盤工学会, pp.22-25, 73-78, 1990.
- 4) 松岡真也ら: "ペナルティ法によるRPFEMと基礎の支持力解析への応用", 第36回地盤工学研究発表会論文集, 2001.
- 5) 熊谷智樹: "基礎の形状・寸法を考慮した地盤の支持力に関する研究", 2002