

III-176

フーチング荷重下の粒状体のすべり解析

東北大学 学生員 渡部 秀貴

東北大学 正 員 岸野 佑次

1. まえがき

表-1 解析に用いた定数

フーチング基礎を設置する場合に必要な地耐力の推定には、支持力理論が用いられる。本文は、この理論の適合性ならびに変形局所化の微視的機構を調べるために、粒状体モデルを用いたシミュレーション解析による検討を行なったものである。解析モデルには粒状要素法¹⁾を用い、フーチング荷重によるすべり解析結果と支持力理論を比較するとともに粒子間接触剛性に基づく固有値解析を行ない、すべりに伴う微視的変形機構について考察した。

2. 解析方法

1) 粒状要素法による解析について

今回用いたモデルは、図-1に示すように側方（図中の記号B1、B3）および底面B2を拘束した領域に粒子をパッキングしたものをを用いた。領域上端にはその一部に載荷板B4を設けるとともに、残りの部分には定荷重を与えるための3つの押さえ板B5、B6、B7を配置した。B1の境界を左右対称の中心軸と見なすことができれば、この領域は全領域の右半分を取り扱っていることになる。対称性を保つために、B4の載荷板（変位制御）には鉛直方向の平行移動の自由度のみを与えることとした。また、B1と粒子との摩擦係数は0とした。解析に用いた諸定数を表-1に示す。

2) 固有値解析について

固有値解析に用いる剛性行列は、粒子間および粒子境界間に設けた法線方向および接線方向ばねに基づくものであり、各粒子の変位および回転の3自由度に対応させて構成されている。粒子間のすべりや、不安定な接触数の粒子の処理については参考文献²⁾を参照のこと。その際、変位ベクトル分布と固有モードとの相関の度合いを調べるために、式(1)に示した固有モード係数を算定し、絶対値最大の固有モード係数に対応するモードと変位ベクトル分布の比較を行なった。

$$\alpha_i = \frac{v \cdot e_i}{\|e_i\|} \quad (v \cdot v = 1) \quad \begin{matrix} \alpha_i: \text{固有モード係数} \\ v: \text{変位ベクトル} \\ \tilde{e}_i: \text{固有ベクトル} \end{matrix} \quad (1)$$

3. 解析結果と考察

1) 支持力理論との比較

図-2に、Terzaghiの支持力理論における塑性過渡領域およびすべり線を示す。b)の場合の地耐力 Q および図の H_1 、 H_2 は、式(2)により与えられる³⁾。前節において説明したシミュレーションにより得られた荷重-沈下量曲線を図-3に示す。図中の点A、B、Cは、固有値解析を行なったステップである。図-4、5、6に点A、B、Cの直後の載荷ステップにおける粒子の変位ベクトルの分布を示した。図-2に示されるように、一般に、基礎底面の状態に応じて、荷重の伝達の模様が異なり、地盤内のすべり線の様子、および地耐力の大きさが違ってくるのが知られている。ここで、本解析より得られた結果を見ると、図-4は、図-2a)の基礎底面が滑らかな場合に類似のす

底辺の長さ	14.6 cm
変位載荷板およびサーチャージ載荷板の長さ	14.6 / 4 cm
粒子総数	284 個
粒径	1.0, 0.7, 0.5, 0.32, 0.2 cm
単位重量	0.0025 kg/cm ³
ばね定数	
法線方向	1000 kgf/cm
接線方向	700 kgf/cm
摩擦係数	
粒子間	tan 35°
粒子通常境界間	tan 35°
粒子左境界間	tan 0°
変位増分	0.001 cm / step
総ステップ数	500 steps

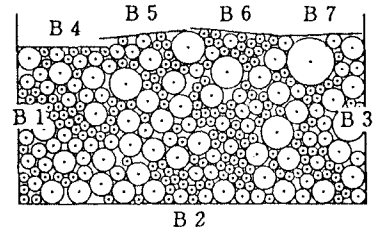
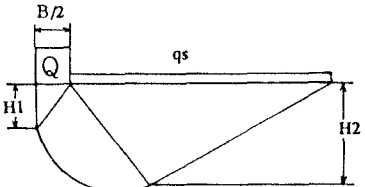


図-1 粒状体モデル



a) 基礎底面が滑らかな場合



b) 基礎底面が粗な場合

図-2 支持力理論によるすべり線

$$\frac{Q}{B} = \frac{\gamma L}{2} BN_{\gamma} + cN_c + q_s N_q \quad (2)$$

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{B}{2} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \\ H_2 &= \frac{B}{2} e^{\frac{\pi}{2} \tan \phi} \end{aligned} \quad \begin{aligned} N_{\gamma} &= \frac{1}{1 - \sin \phi} e^{\left(\frac{3}{2}\pi - \phi\right) \tan \phi} \\ N_c &= (N_{\gamma} - 1) \cot \phi \\ N_q &= (N_{\gamma} - 1) \tan(1.4\phi) \end{aligned}$$

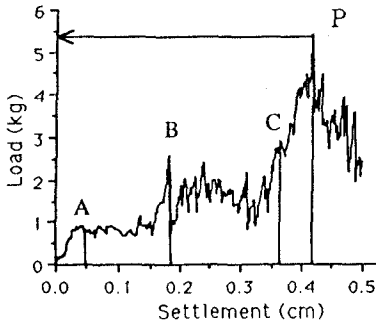


図-3 荷重-沈下量曲線

表-3 点Cにおける固有モード係数

モードNo.	固有値	固有モード係数	累積係数
モード1	.000	.041	.041
2	.000	.025	.048
3	.000	-.069	.084
4	.000	-.010	.085
5	.000	-.020	.087
1.4	.056	-.114	.337
Q1.5	.123	Q .647	.729
1.6	.208	-.276	.780
1.7	.436	.388	.871
1.8	.714	-.116	.879

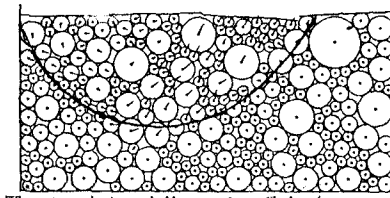


図-4 点Aの変位ベクトル分布 (X150)

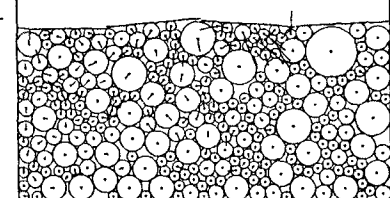


図-5 点Bの変位ベクトル分布 (X20)

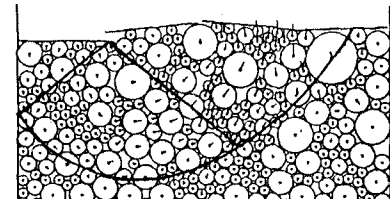
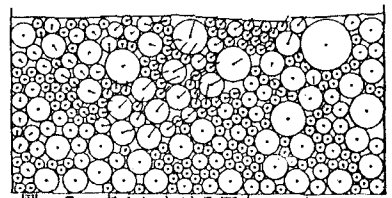
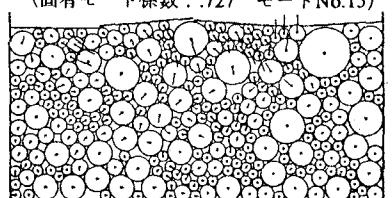
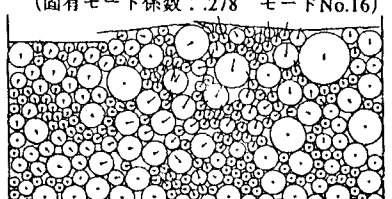


図-6 点Cの変位ベクトル分布 (X100)

図-7 点Aにおける固有モード
(固有モード係数: .727 モードNo.15)図-8 点Bにおける固有モード
(固有モード係数: .278 モードNo.16)図-9 点Cにおける固有モード
(固有モード係数: .647 モードNo.15)

べり線の形状となっている。これは、載荷板下方の粒子群がまだ安定的状態に達していないために、底面における摩擦が十分に発揮されていないためと考えられる。その後、図-5のような内部パッキング構造の変化を伴う過渡期を経て、図-6の安定的なすべりのステージへ移行している。このステージは、図-2b)の底面が粗な場合のすべり線と非常に類似した状態となっている。そこで、図-3中のP点において図-6同様のすべり線を想定し、得られたH1、H2、Qの値と、内部摩擦角を $\phi=35^\circ$ とし粘着力を0として求めた支持力理論による値の比較を表-2に示した。同表を見る限り、両者は良く合っている結果となっている。

2) 固有値解析の結果と考察

図-3の点A、B、Cにおいて行なった剛性行列の固有値解析より得られた各々の固有モード係数（点Cにおける係数表を表-3に示す）が最も大きいモードを図-7、8、9に示す。図-4と7、5と8、6と9を比較するとそれぞれかなり類似しており、固有モード係数の算定は、実際に生じる変位ベクトル場を支配する変形モードを見いだすのに有効であると考えられる。図中に示されているように固有モードの次数はいずれも比較的低次である。このように、すべりに伴う変位モードが、粒子間ばね定数との比が極めて小さな固有値に対応する固有モードに支配されるという性質は重要であると考えられる。

4. あとがき

フーチング荷重を受ける粒状体について、シミュレーション解析を行ない、すべり線の形状や地耐力が支持力理論と良く合う結果を得た。また、固有値解析に関しては、著者らの提案している固有モード係数に基づく方法が、変形を支配するモードを見いだすことなど、変形局所化の微視的考察を行なう上で有効であることがわかった。

<参考文献>

- 1) 岸野佑次：新しいシミュレーション法を用いた粒状体の準静的挙動の解析、土木学会論文集 Vol.406/3-11, pp.97-106(1989)
- 2) 松井淳、岸野佑次：粒状体における変形局所化の微視力学的解析、東北支部講演会、PP346-347(1992)
- 3) 石原研而：土質力学、pp.255-271、丸善(1988)

表-2 支持力理論および本解析の結果

	Q(kg)	H1(cm)	H2(cm)
Terzaghiの式	6.40	5.50	10.3
本解析の結果	5.42	6.65	8.86