

基礎の剛性と地盤内応力・変形の FLEM 解析

鳥取大学大学院（現 なんば技研）○ 窪津 達也

鳥取大学 木山 英郎 藤村 尚 西村 強

1. はじめに 基礎構造物の設計を行うには、接地圧分布や地盤内にどのような応力分布が生じるか知っておく必要がある。接地圧分布は基礎の剛性、土の種類により異なるが、弾性理論や塑性理論がこれらの変化に対して、基本的でかつ重要な解を提供してくれることは言うまでもない。しかし、応力分布は基礎底面の摩擦、地盤の強度や変形特性にも影響を受けるとされており、これらのことを考慮して、接地圧分布や地盤応力分布を知るには、数値解析法も一つ的手段となる。本研究では、押し込み時の基礎の剛性と底面の摩擦条件の変化が、地盤内応力分布や変形に関連するのかが数値解析によって検討した。特に、今回の解析では降伏に伴って、比較的大きな変形が生ずる基礎端部の挙動を表現するため、大変形まで解析可能な流動要素法（FLEM）¹⁾を採用した。また地盤—基礎の接触状態（摩擦の条件）の変化は、個別要素法の接触モデルを用いて表現した。

2. 解析法の概要 FLEM の概要はすでに報告しているので、本文ではその概要と導入した降伏条件等についてのみ触れておく。FLEM は時刻 t での運動方程式を時間増分 Δt について差分近似し、加速度を未知数とした陽形式の逐次解法である。

$$\{M\}\{\ddot{u}\} = \{R\} - \{{}^{t-\Delta t}F\} - \{\eta\}\{\dot{u}\} \quad (1)$$

ここに、 $\{R\}$ ：時刻 t の外力ベクトル、 $\{{}^{t-\Delta t}F\}$ ：時刻 $t - \Delta t$ の内部等価節点力ベクトル、 $\{M\}$ ：質量マトリックス、 $\{\ddot{u}\}$ ：時刻 t の加速度ベクトル、 $\{\eta\}$ ：減衰マトリックス、 $\{\dot{u}\}$ ：時刻 $t - \Delta t$ の速度ベクトル
内部の等価節点力 $\{F\}$ は以下に示す式から求められる。まず、増分ひずみ $\{\Delta \varepsilon\}$ は、変位・ひずみマトリックス $[B]$ と増分変位ベクトル $\{\Delta u\} = \{u\} - \{{}^{t-\Delta t}u\}$ から次のようになる。

$$\{\Delta \varepsilon\} = [B]\{\Delta u\} \quad (2)$$

本研究では、Drucker-Prager 型降伏条件²⁾： $f(\sigma) = I_1/3 + J_2^{1/2}(\cos\theta - \sin\theta \sin\phi/\sqrt{3})$ 、 I_1 ：応力の第一不変量、 J_2 ：偏差応力の第二不変量と関連流動則により、増分型の構成式を導入している。また時刻 t において要素内応力が塑性状態に達したとき、次のように定義される係数 r を用いて応力増分は $f=0$ を満足するように修正する過程を設けている。

$$r = (\sigma - \sigma_Y) / (\sigma_e - {}^{t-\Delta t}\sigma) \quad (3) \quad \Delta^t \sigma = (1-r)\Delta^t \sigma_e \quad (4)$$

ここに、 σ_e ：応力の弾性成分、 σ_Y ：降伏応力。節点力および応力は次のように更新する。

$$\{F\} = \{{}^{t-\Delta t}F\} + \int_V [B]\{\Delta^t \sigma\} d(vol) \quad (5) \quad \{\sigma\} = \{{}^{t-\Delta t}\sigma\} + \{\Delta \sigma\} \quad (6)$$

式(1)より、時刻 t における加速度ベクトルが求まれば、これを時間増分 Δt について積分し、変位増分ベクトル $\{\Delta u\}$ と速度ベクトル $\{\dot{u}\}$ を求め、式(1)～(6)により、節点力および応力が更新される。この過程を繰り返せば、与えられた条件のもとでの変形が表現される。

3. 解析手順の概要 図-1 に解析モデルを示す。辺 AC を地表面とする高さ 5L、深さ 5L (L=10m) の地盤を与える。陰影部要素は押し込み時の緩衝材をイメージした基礎である。辺 DE に強制変位を与え、基礎を沈下させて、その時の辺 DE の沈下量 S として解析を行なう。陰影部要素のヤング率を E 、地盤要素のヤング率 E_r とすると、剛体基礎 ($E/E_r=100$)、弾性体基礎 ($E/E_r=1$) の 2 種類、さらにそれぞれ底面 (辺 AB) が粗い場合「底面 (粗)」と滑らかな場合「底面 (滑)」について解析した。ここで底面 (粗) は、地表面と基礎底面が一体であるから基礎要素、地盤要素を FLEM 要素で解析する。底面 (滑) の場合は、両者間でず

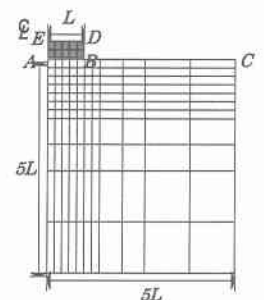


図 1 解析モデル

れが生じるため基礎要素を剛体とし、バネやダッシュポットなどで、地盤に DEM 接触させる。地盤部に担当する要素にはヤング率 $E_r=1000\text{tf/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.4$ 、密度 $\rho=1.6\text{tf/m}^3$ となる値を与え、強度定数を変化させて、表-1 の 2 例を解析した。強度定数のみが異なる。それぞれの強度定数は表-1 に示す。

表-1 強度定数

	CASE1	CASE2
粘着力 $c(\text{tf/m}^2)$	20	0
内部摩擦角 ϕ	0	30

4. 解析結果と考察 結果の一例として、図-2、図-3、図-4、図-5（底面（粗））は E/E_r の違いの影響をみるために行なった、荷重－沈下曲線、最大せん断ひずみ図である。図-2,3 の縦軸は基礎底面が地表面に与える単位幅当たりの荷重 Q (tf/m)、横軸は基礎幅 $2L$ に対する沈下量 S の割合を%で示したものである。これらの図から、CASE1、CASE2 共に、弾性体基礎より剛体基礎の荷重が大きいことがわかる。また図-4、5 を見ると、剛体基礎、弾性体基礎共に、基礎底面端部から左下に向かって、最大せん断ひずみの広がりが見られる。なお底面が滑らかな場合の結果は発表時に示す。

(参考文献)

- 1)木山 英郎：土木学会論文集 No.439,III-17,1991,12
- 2)山田 嘉昭：塑性・粘塑性,培風館,pp76～pp104

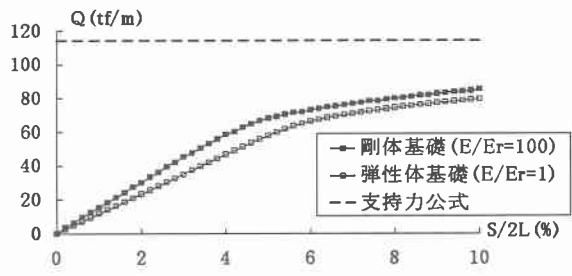


図-2 荷重－沈下曲線(CASE1)

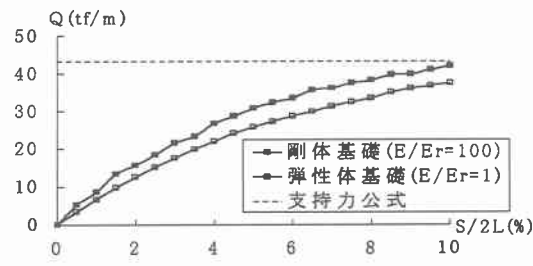
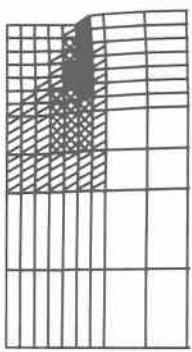
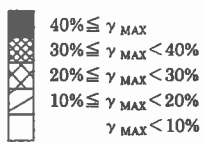
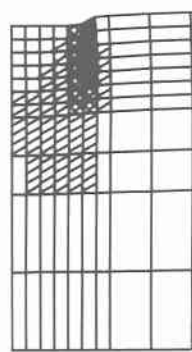


図-3 荷重－沈下曲線(CASE2)

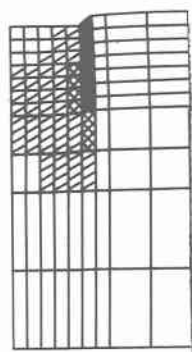


剛体基礎

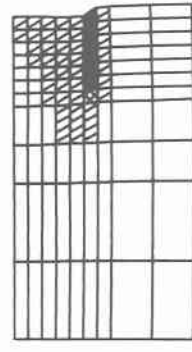


弾性体基礎

図-4 最大せん断ひずみ図 (CASE1、 $S/2L=10\%$)



剛体基礎



弾性体基礎

図-5 最大せん断ひずみ図 (CASE2、 $S/2L=10\%$)