

III-263 主応力方向の回転によるひずみを考慮した地盤の有限要素解析

名古屋港管理組合 正員○鈴木 康之, 名古屋工業大学 正員 松岡 元
名古屋工業大学 学生員 村田 卓則, 大府市 正員 深谷 育治

近年、地盤や土構造物の応力・変形解析に有限要素法がよく用いられているが、解析にあたり土の応力～ひずみ特性を的確に評価した構成式を導入することが重要である。今回は、すでに提案している主応力方向の回転の影響を考慮できる一般座標表示の土の構成式に基づいて、モデル砂地盤に等分布荷重が載荷されたときの地盤内の応力・変形状態の解析を行い、主応力方向の回転が地盤内の応力・変形に及ぼす影響について検討した。

1. 主応力方向の回転の影響を考慮した一般座標表示の土の構成式

提案モデルは、降伏条件を応力比(ϕ_{mo} :動員されている内部摩擦角)、主応力方向の回転角(α)、および平均主応力(σ_m)としており、一般面上のせん断ひずみ増分を①せん断($d\phi_{mo}$)によるせん断ひずみ増分: $d\gamma_{xy}^s$ 、②主応力方向回転($d\alpha$)によるせん断ひずみ増分: $d\gamma_{xy}^r$ 、③異方圧密($d\sigma_m$)によるせん断ひずみ増分: $d\gamma_{xy}^{ac}$ としてそれぞれ定めている。なお、②の $d\gamma_{xy}^r$ においては、 σ_1 と $d\epsilon_1$ の方向に角度 δ ($=30^\circ$)のズレが生じることを考慮している。そして、上記の $d\gamma_{xy}^s, d\gamma_{xy}^r, d\gamma_{xy}^{ac}$ と応力比～ひずみ増分比関係(flow ruleに対応)を組み合わせることで、それぞれの垂直ひずみ増分 $d\epsilon_x, d\epsilon_y$ を求める。最後に、④等方圧密($d\sigma_m$)によるひずみ増分: $d\epsilon_x^{ic}=d\epsilon_y^{ic}$ を加える。したがって全ひずみ増分は、次式により与えられる。

$$d\epsilon = d\epsilon^s + d\epsilon^r + d\epsilon^{ac} + d\epsilon^{ic} \quad (1)$$

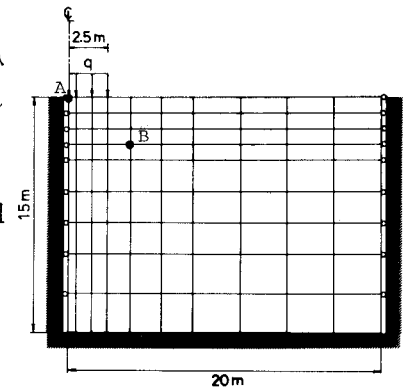


図-1 解析に用いたモデル地盤のメッシュ図

そして、 $d\phi_{mo}, d\alpha, d\sigma_m$ はいずれも一般応力増分($d\sigma_x, d\sigma_y, d\tau_{xy}$)で式示されるので、次式のような一般座標表示の土の構成式の定式化が可能となる。表-1 豊浦砂の土質パラメーター

$$\{d\epsilon_x, d\epsilon_y, d\gamma_{xy}\}^T = [D]^{-1} \cdot \{d\sigma_x, d\sigma_y, d\tau_{xy}\}^T \quad (2)$$

なお、上式は弾性ひずみを考えていないが、 $d\gamma_{xy}^r$ において σ_1 と $d\epsilon_1$ の方向に δ のズレを考慮しているので、逆マトリックス[D]を計算することができる。

2. 有限要素法による支持力解析

図-1は解析に用いたモデル地盤のメッシュ図を示しており、平面ひずみ条件下の深さ15m、荷重中心軸からの距離20mの地盤とし、90個の四角形要素に分割している。境界条件は、底面で完全固定、両側面で鉛直方向のみを移動可能とし、載荷部底面と地表の境界面では水平方向も移動可能としている。また載荷重は半幅2.5mの等分布荷重とした。解析に用いた土質パラメーターは、表-1に示す豊浦砂のものを用いている。なお、初期の応力状態は、砂の単位体積重量 $\gamma_t = 1.6 \text{ tf/m}^3$ として、鉛直応力を $\gamma_t \cdot Z$ 、水平応力を $K_0 \cdot \gamma_t \cdot Z$ ($K_0 = 0.5$)としている。図-2は、等分布荷重 $q = 468.5 \text{ tf/m}^2$ のときの各要素の主応力方向の大きさを示したものであり、載荷重によって主応力方向が大きく回転しているのがみられる。したがって、主応力方向の回転の影響を適切に評価できる土の構成式が重要となる。すでに行っ

ϕ	42°
$C_c / (1 + e_0)$	0.9%
$C_s / (1 + e_0)$	0.5%
λ	1.1
μ	0.2
k_s	0.33%

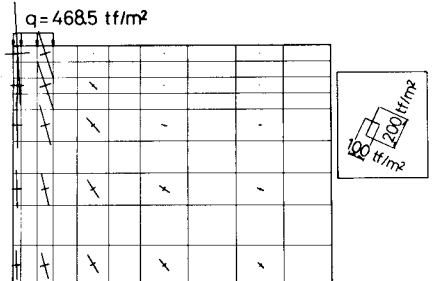


図-2 各要素の主応力方向の回転の状態

た主応力方向回転試験によれば、ダイレイタンスーや主軸のズレ δ （ $\approx 30^\circ$ ）が認められているが、提案するモデルはこのような土特有の性質を考慮できる形になっている。一方、通常の弾塑性理論に基づく構成式では、主応力方向の回転によるひずみは、弾性式により評価されるので、ダイレイタンスー特性や主軸のズレは表現することができない。図-3は、等分布荷重 q が 268.5 tf/m^2 のときの沈下量および側方変位量の解析結果で、実線が主応力方向回転の寄与率が100%のものを、破線が50%、一点鎖線が10%、点線が5%をそれぞれ表している。回転の寄与率とは、提案するモデルの(1)式の $d\epsilon^r$ （主応力方向の回転によるひずみ増分）をそのまま用いるときを100%とし、50%では $d\epsilon^r$ を0.5倍に、10%では0.1倍に、5%では0.05倍にすることを意味している。この図から、沈下量、側方変位量に対して主応力方向の回転による影響がかなり大きいことがわかり、特に側方変位量については、回転の影響をほとんど考慮しない場合（5%）は、回転の影響を考慮する場合（100%）の半分程度で、その違いが顕著である。図-4は、最大沈下量（図-1の節点A）と最大側方変位量（図-1の節点B）の関係を示している。この図からも、主応力方向の回転の影響を考慮する場合としない場合とでは変形モードが少し異なり、回転を考慮したものの方が同じ沈下量に対して側方へのはらみ出しが大きくなっている。図-5(a)～(d)は、載荷重 q が 468.5 tf/m^2 のときの主応力方向の回転の寄与率を100%、50%、10%、5%とした場合の安全率（ $F.S. = \tan \phi / \tan \phi_{m0}$ ）分布図を示している。これらの図より回転の寄与率が高いものは、安全率の低い領域が横方向に広がっているが、回転の寄与率が低いものは、同じ荷重レベルでも側方変位量が小さいために（図-3参照）、横方向への安全率の低下はみられない。

以上のように、主応力方向の回転の影響を考慮しない場合は、回転の影響を考慮する場合に比べて、沈下量、側方変位量は小さく、安全率は大きく評価することになるので、主応力方向回転の影響の適切な評価は重要な問題である。なお、通常の弾塑性構成式ではその弾性式によって主応力方向の回転の影響を算定することになるが、前述のように弾性式では土特有の性質を表現することができず、また弾性定数の決め方によって解析結果は大きく影響されるようである。

参考文献

- 1) 松岡・岩田・樺原(1986): Proc. of 2nd Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, Ghent, pp. 67-78.
- 2) 松岡・香川・中井(1977): 土木学会論文報告集, 第266号, pp. 95-105.

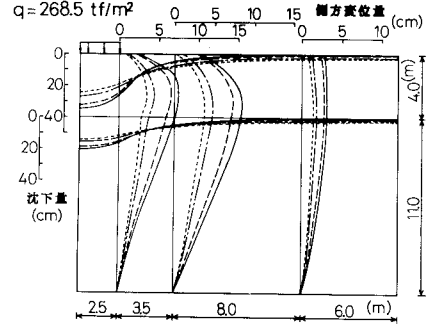


図-3 沈下量と側方変位量の解析結果

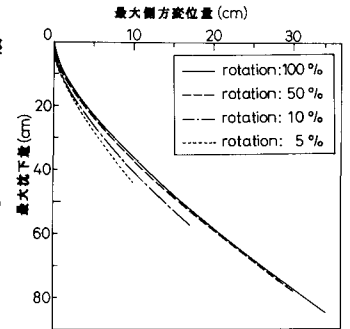


図-4 最大沈下量（節点A）～最大側方変位量（節点B）関係の解析結果

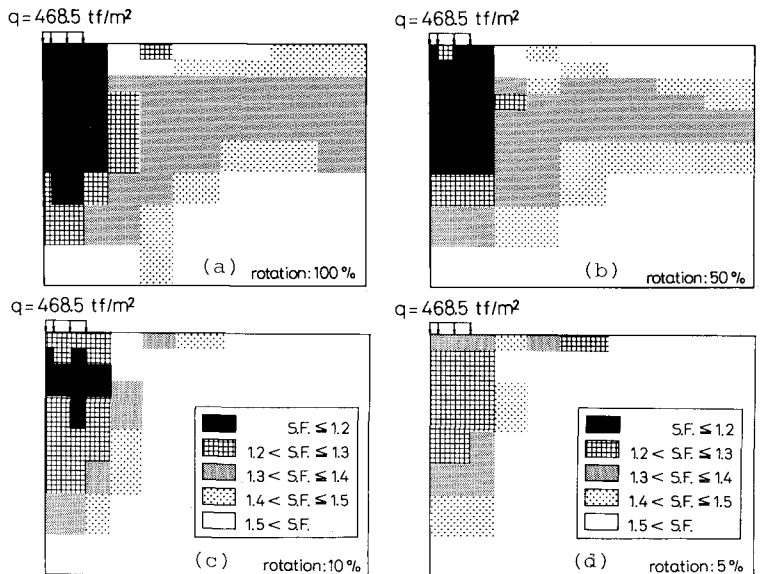


図-5 主応力方向回転の寄与率を変化させた場合の安全率分布の解析結果