

名古屋工業大学 正員 松岡 元

既報の複合滑動面の概念に基づいた異方性土のせん断時および圧縮時の応力・ひずみ関係式^{2),2)}に、弾性ひずみ成分を加えて異方性土のための構成式を定式化するとともに、その構成式を用いて土要素がせん断や異方圧縮を受けた場合、および堆積地盤のような異方性地盤が局所載荷を受けた場合の有限要素解析を行なった。これらの解析結果は要素試験結果や模型実験結果を定性的によく説明するものであったので報告する。

1. 平面ひずみ条件下の異方性土の構成式

有限要素解析への適用を考慮して平面ひずみ条件下の異方性土の応力・ひずみ関係の式を試みる。まず、一般に土のひずみ増分 $\{d\epsilon_{ij}\}$ はせん断による塑性ひずみ増分 $\{d\epsilon_{ij}^s\}$ （応力比の変化によって生じるひずみ増分）、圧縮による塑性ひずみ増分 $\{d\epsilon_{ij}^c\}$ （平均主応力 σ_m の変化によって生じるひずみ増分）および弾性ひずみ増分 $\{d\epsilon_{ij}^e\}$ の和によって表わされると考える³⁾。

$$\{d\epsilon_{ij}\} = \{d\epsilon_{ij}^s\} + \{d\epsilon_{ij}^c\} + \{d\epsilon_{ij}^e\} \quad \text{----- (1)}$$

平面ひずみ条件下では3主応力間の3個の滑動面(Mobilized Plane)のうち、近似的に最大・最小主応力間の1個の滑動面が支配的であると考えれば³⁾、 $\{d\epsilon_{ij}^s\}$ 、 $\{d\epsilon_{ij}^c\}$ はその滑動面上のせん断ひずみ増分と垂直ひずみ増分を介して統一的に表現される。 $\{d\epsilon_{ij}^e\}$ は膨張指数 C_s と弾性式を用いて表わされる³⁾。

さて、構造異方性の表現方法を2次元の場合について図-1を参照して説明する。基本的な考え方は、せん断変形と強度については堆積面と滑動面のなす角度 ψ' によって、圧縮変形については堆積面と最大主応力面のなす角度 δ によって規定するということである。すなわち、具体的にはせん断によるひずみ増分中の土質パラメータ γ_0 および破壊時のせん断・垂直応力比 $(\tau/\sigma_n)_f = \tan \phi$ を ψ' の直線関数として、軸方向圧縮指数 C_A （等方圧縮時の軸ひずみと $\log_{10} \sigma_m$ 関係の直線勾配に定義する）および静止土圧係数 K_0 を δ の直線関数として次式のように定めた^{1),2)}。

$$\gamma_0 = \frac{\gamma_{0H} - \gamma_{0V}}{(45^\circ - \frac{\phi_H}{2}) - (45^\circ + \frac{\phi_V}{2})} \cdot \left\{ \psi' - (45^\circ + \frac{\phi_V}{2}) \right\} + \gamma_{0V} \quad \text{----- (2)}$$

$$\tan \phi = \frac{\tan \phi_H - \tan \phi_V}{(45^\circ - \frac{\phi_H}{2}) - (45^\circ + \frac{\phi_V}{2})} \cdot \left\{ \psi' - (45^\circ + \frac{\phi_V}{2}) \right\} + \tan \phi_V \quad \text{----- (3)}$$

$$C_A = \frac{C_{AH} - C_{AV}}{90^\circ} \cdot \delta + C_{AV} \quad \text{---- (4)}, \quad K_0 = \frac{K_{0H} - K_{0V}}{90^\circ} \cdot \delta + K_{0V} \quad \text{---- (5)}$$

ここで、式(2)は水平堆積($\delta = 0^\circ$)の場合の $\gamma_0 = \gamma_{0V}$ 、 $\psi' = 45^\circ + \frac{\phi_V}{2}$ 、鉛直堆積($\delta = 90^\circ$)の場合の $\gamma_0 = \gamma_{0H}$ 、 $\psi' = 45^\circ - \frac{\phi_H}{2}$ なる2点を通る直線を意味する。なお、滑動面の角度は ϕ_{mo} を破壊時の ϕ ($\delta = 0^\circ$ のとき $\phi = \phi_V$ 、 $\delta = 90^\circ$ のとき $\phi = \phi_H$)によって代表させて定めている。同様に、式(3)は $\delta = 0^\circ$ の場合 $\tan \phi = \tan \phi_V$ 、 $\psi' = 45^\circ + \frac{\phi_V}{2}$ 、 $\delta = 90^\circ$ の場合 $\tan \phi = \tan \phi_H$ 、 $\psi' = 45^\circ - \frac{\phi_H}{2}$ なる2点を通る直線である。式(2)、(3)は ψ' が大きい程粒子のガリ合せがよいので、変形しに

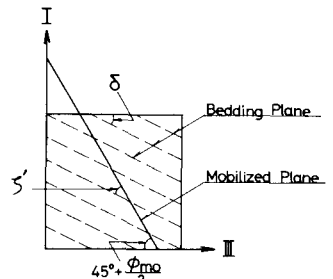


図-1 主応力面と堆積面と滑動面の関係。

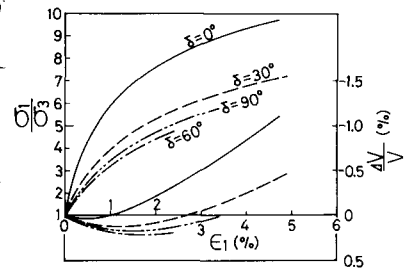


図-2 平面ひずみ条件下の異方性土のせん断試験の有限要素解析結果。

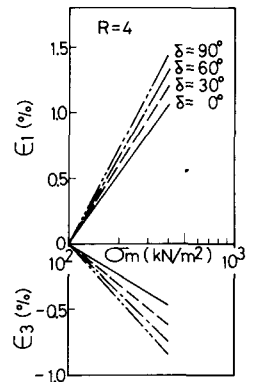


図-3 平面ひずみ条件下の異方性土の異方圧縮試験の有限要素解析結果。

くく (γ_0 : 小), 強度が大きいことを意味している。また式(4), (5)は, $\delta = 0^\circ$ のときの $C_A = C_{AV}$, $K_0 = K_{0V}$, $\delta = 90^\circ$ のときの $C_A = C_{AH}$, $K_0 = K_{0H}$ として定めたものである。以上の式(2)~(5)に基づけば, 堆積面と主応力面が一致しない場合でも滑動面上の応力・ひずみ関係式を介して異方性土のための $\{d\epsilon_{ij}^s\}$, $\{d\epsilon_{ij}^c\}$ を規定する³⁾ことができ, 等方性土の場合と同様に式(1)に従って有限要素法による弾塑性解析が可能となる。なお, 本解析では前述したように近似的に中間主応力の影響を無視している。

2. 異方性土と異方性地盤の有限要素解析

図-2, 3 は, 以上のような特性を有する異方性土の構成式に基づいて, まず平面ひずみ条件下の土要素のせん断試験 ($\sigma_m = 196 \text{ kN/m}^2$) と異方圧密試験 (主応力比 $R=4$) を有限要素解析した結果を示している。これらの解析結果は既報の実測値^{1), 2)}の傾向をよく説明している。次に, 図-4, 5 は 水平堆積地盤および鉛直堆積地盤 (半幅 40m, 深さ 30m) 上に局部載荷 (載荷半幅 4m) した場合の解析結果の中から安全率 (F.S.) の分布を示したものである (F.S. $\equiv$ 式(3)の $\tan\phi/\tan\phi_{mo}$)。

この定義による F.S. は 等方性地盤の破壊ゾーン³⁾の予知に有効であることが検証されているが, これらの図より水平堆積地盤の方が鉛直堆積地盤より F.S. の低いゾーンが側方へ広がるのがみられる。なお, 鉛直堆積地盤において F.S. の低いゾーンが下部へ延びるのは, 堆積面と滑動面の方向がほぼ一致して ($\gamma' \approx 0$) 強度が小さくなるためと考えられる。その他, 水平堆積地盤の方が支持力が大きく, 沈下量・側方変位量が共に小さい傾向も解析される (データ省略)。写真-1, 2 は 偏平アルミ棒 (楕円形断面にプレスする前の径 5.9mm) の混合体の支持力実験中の重ね撮り写真であるが, 水平堆積の場合のスベリゾーンの方が側方に広がっているのがみられる。上記の傾向は実際の砂についての模型実験でも認められる⁴⁾。

なお, 以上の解析に用いたパラメータは次の通りである。 $\lambda=1.4$, $\mu=0.23$, $\mu'=0.48$, $\gamma_{0V}=0.06\%$, $\gamma_{0H}=0.24\%$, $C_d=0.07\%$, $\sigma_{mi}=196 \text{ kN/m}^2$, $C_{AV}=0.46\%$, $C_{AH}=0.58\%$, $0.5C_s/(1+e_0)=0.27\%$, $K_{0V}=0.37$, $K_{0H}=0.48$, $\phi_V=54.5^\circ$, $\phi_H=44.7^\circ$ 。

謝辞 有益な助言をいただいた本学 中井照夫講師, アルミ棒の支持力実験を手伝っていただいた 卒業生 (現・飛島建設) 桑田龍吾氏に謝意を表す。

文献 1) 松岡 (1980): 第35回土木学会年次講演会, Ⅲ-6, PP.11-12.

2) 松岡・増田・三木 (1981): 第16回土質工学研究発表会, (発表予定).

3) 松岡・香川・中井 (1977): 土木学会論文報告集, 第266号, PP.95-105.

4) 木村・山口・斎藤・田部・司代 (1978): 第13回土質工学研究発表会, 193, PP.769-772.

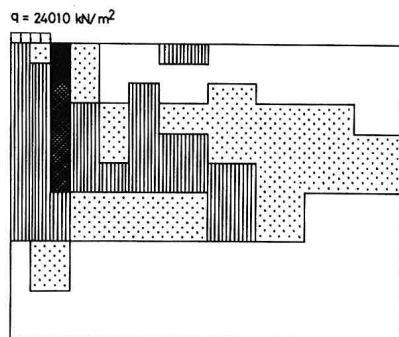


図-4 局部載荷を受けた水平堆積地盤の安全率分布。

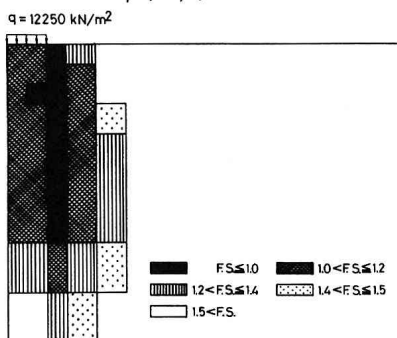


図-5 局部載荷を受けた鉛直堆積地盤の安全率分布。

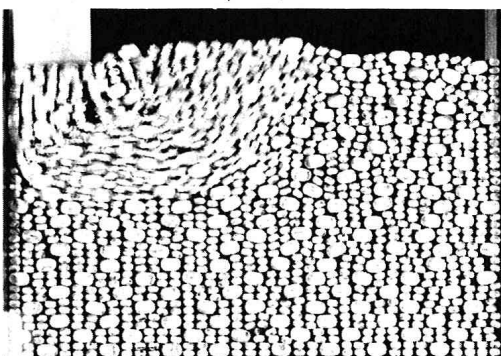


写真-1 偏平アルミ棒混合体の局部・荷実験(水平堆積)

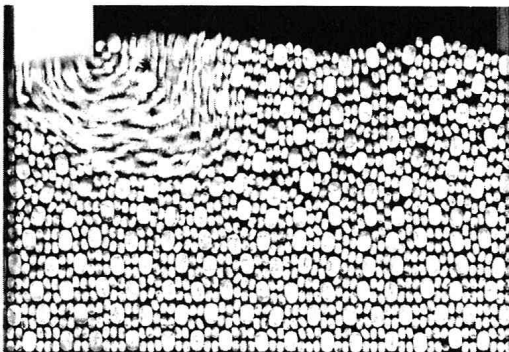


写真-2 同上 (鉛直堆積) [載荷幅: 4cm
地盤寸法: 24cm×15cm]