

はじめに 現地盤において、土は一般に層状に堆積しており、その強度、変形挙動に積層異方性がみられる。本文は、座標変換を用いて行った異方性を有する土の強度特性の解析方法といくつかの解析結果を示したものである。

異方圧密土の強度特性の解析方法 図1に示したように、土の有効応力テンソル(σ^{ij})の参照座標(x^i)の基底ベクトルを(g_i)とする。また、土の異方性の主軸方向(積層方向及びこれと直角方向)に一致するように(g_i)を回転した座標($x^{i'}$)の基底ベクトルを($g_{i'}$)、この座標系を参照する応力テンソルを($\sigma^{i'j'}$)とする。さらに、図-1(b)に示したように、($g_{i'}$)と方向が同じで、土の異方性の度合に応じてその大きさを变化させた座標系($x^{i''}$)の基底ベクトルを($g_{i''}$)、これを参照する応力テンソルを($\sigma^{i''j''}$)とする。これらの各基底ベクトル間の関係を式(1)のように表わす。ただし、これらの変換係数の間には、 $t_{i'}^{i''} = \delta_{i'}^{i''}$ 、 $t_{i'}^{i''} t_{j'}^{j''} = \delta_{j'}^{j''}$ 、 $t_{i''}^{i'} = \delta_{i''}^{i'}$ 、 $t_{i''}^{i'} t_{j''}^{j'} = \delta_{j''}^{j'}$ の関係がある。このとき、各応力テンソルの間には、式(2)の関係が成立する。したがって、応力テンソル(σ^{ij})と($\sigma^{i''j''}$)の関係を式(3)のように表わすと、各変換係数の間には、 $t_{i''}^{i'} = t_{i''}^{i'} t_{i'}^{i'}$ 、 $t_{i''}^{i''} = t_{i''}^{i''} t_{i''}^{i''}$ の関係がある。

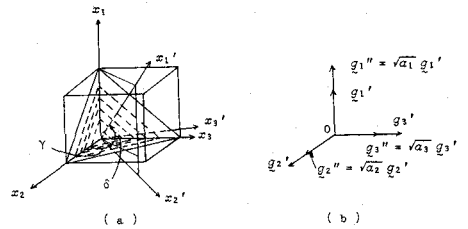


図-1 参照座標の変換

つぎに、これらの座標系がいずれもデカルト座標である場合を考える。図-1(a)に示したように、 x_1 軸と x_1', x_2' 軸は同一平面内にあるとし、この面と x_2 軸のなす角を γ とする。また、 x_2, x_3 軸で作る面と x_1 軸のなす角を δ とする。このとき、変換係数 ($t_{i'}^{i''}$) は式(4)のように表わされる。一方、基底ベクトル($g_{i'}$)と($g_{i''}$) の関係を式(5)のように表わす(図-1(b)参照)。ただし、 a_i ($i = 1, 2, 3$) は異方性の度合を表わす係数である。式(4)、(5)を用いると、変換係数($t_{i''}^{i'}$)は ($t_{i''}^{i'} = (t_{i''}^{i''}) (t_{i''}^{i'}) = (t_{i''}^{i''})^{-1} \cdot (t_{i''}^{i'})$) の関係より求めることができる。ここで、2回の座標変換を受けた応力テンソル($\sigma^{i''j''}$)が異方圧密土の破壊基準を満足するとき、異方圧密土は破壊するものと仮定する。異方圧密土の破壊基準として、松岡、中井¹⁾の基準式(6)を用いる。式中、 I_1'', I_2'', I_3'' は応力テンソル($\sigma^{i''j''}$) の第1次、第2次、第3次不変量であり、 ϕ'' は三軸圧縮または伸張下での仮想異方圧密土の内部摩擦角である。

つぎに、積層異方性土($a_2 = a_3$) の場合の軸対称応力条件下での強度を求める。供試体の応力対称軸を x_3 軸に一致させてとるとき、三軸圧縮下及び伸張下

$$\left. \begin{aligned} g_{i'} &= t_{i'}^{i''} g_{i''}, & g_{i''} &= t_{i''}^{i'} g_{i'} \\ g_{i''} &= t_{i''}^{i'} g_{i'}, & g_{i'} &= t_{i'}^{i''} g_{i''} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma^{i'j'} &= \sigma^{i''j''} t_{i''}^{i'} t_{j''}^{j'}, & \sigma^{i''j''} &= \sigma^{i'j'} t_{i'}^{i''} t_{j'}^{j''} \\ \sigma^{i'j'} &= \sigma^{i''j''} t_{i''}^{i'} t_{j''}^{j'}, & \sigma^{i''j''} &= \sigma^{i'j'} t_{i'}^{i''} t_{j'}^{j''} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\sigma^{i'j'} = \sigma^{i''j''} t_{i''}^{i'} t_{j''}^{j'}, \quad \sigma^{i''j''} = \sigma^{i'j'} t_{i'}^{i''} t_{j'}^{j''} \quad (3)$$

$$(t_{i''}^{i'}) = \begin{bmatrix} \sin \delta & \cos \gamma \cos \delta & \sin \gamma \cos \delta \\ -\cos \delta & \cos \gamma \sin \delta & \sin \gamma \sin \delta \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$g_{1''} = \sqrt{a_1} g_{1'}, \quad g_{2''} = \sqrt{a_2} g_{2'}, \quad g_{3''} = \sqrt{a_3} g_{3'} \quad (5)$$

$$I_1'' I_2'' / I_3'' = 9 (X''^2 + 1), \quad X'' = \frac{2\sqrt{2}}{3} \tan \phi'' \quad (6)$$

$$R_C = (-B + \sqrt{D}) / (2 A_C), \quad R_E = (-B + \sqrt{D}) / (2 A_E) \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} A_C &= (\sin^2 \delta / \alpha + \cos^2 \delta) \cdot (\alpha \cdot \cos^2 \delta + \sin^2 \delta + 1) \\ A_E &= (\alpha \cdot \sin^2 \delta + \cos^2 \delta) \cdot (\cos^2 \delta / \alpha + \sin^2 \delta + 1) \\ B &= -(9X^2 + 4) + (\alpha + \frac{1}{\alpha} - 2) \cos^2 \delta (1 + 2 \sin^2 \delta) \\ D &= 9 X^2 (9 X^2 + 8) + (\alpha + \frac{1}{\alpha} - 2)^2 \cos^4 \delta \\ &\quad + 2 (\alpha + \frac{1}{\alpha} - 2) \cos^2 \delta \{ 3 - 9 (X^2 + 1) \\ &\quad \cdot (1 + 2 \sin^2 \delta) \}, \quad \alpha = a_1/a_3 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$R_C = \alpha R'', \quad R_E = R'' / \alpha, \quad R_C / R_E = \alpha^2 \quad (9)$$

の破壊時の応力比 $R_C (= (\sigma_x/\sigma_z)_f)$ 及び $R_E (= (\sigma_z/\sigma_x)_f)$ は式(7)、(8)で表わされる。式中、 $\alpha = a_1/a_3$ である。 R_C または R_E は α , δ , X'' (または ϕ'') の関数として表わされている。特に、式(7)、(8)において、 $\delta = 90^\circ$ (図-5(a)参照) のとき、式(9)を得る。式中、 R'' は仮想等方圧密土の破壊時の応力比である。

計算結果と考察 以下の計算は、積層異方性土 ($a_2 = a_3$) を対象として計算を行い、異方性パラメータとして $\alpha (= a_1/a_3)$ を用いた。図-2に、このような異方圧密土の3主応力下での破壊時の応力状態を π 面上で示している。図-3は応力ベクトルの π 面上での偏角 θ が 15° と 30° の場合の破壊時の応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ と δ の関係である。同図(b)の応力条件は、異方圧密土の標準的な平面ひずみ試験に対応している。

つぎに、軸対称応力条件下での計算結果を示す。図-4(a)、(b)は、それぞれ三軸圧縮下 ($\sigma_x > \sigma_y = \sigma_z$) 及び三軸伸張下 ($\sigma_x < \sigma_y = \sigma_z$) での応力比 $\eta_C (= (R_C - 1)/(2R_C + 1))$ 及び $\eta_E (= (R_E - 1)/(1 + 2R_E))$ を原点からの距離とし、 δ を偏角として、両者の関係を極座標表示で示している。 $\alpha = 1$ の場合は等方土の場合である。

図-5(a)、(b)は、同じ軸対称応力条件下で、 $\gamma = 90^\circ$ と 0° の場合の破壊時の応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ と異方性の度合 α との関係を示している。図-5(a)の関係は式(9)によるものである。式(9)の分母式において $\alpha = R''$ のとき、土は等方応力状態 $R_E = 1$ で破壊することになるから、 $\alpha < R''$ なることが必要である。この図において、 $\delta = 90^\circ$ のとき、 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ は三軸圧縮及び伸張ともに α の増加とともに単調に変化するが、 $\delta = 0^\circ$ の場合、三軸伸張下において、 α のある値で、 $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ は最大値を持つ。

参考文献 1) 松岡、中井 (1974)、土木学会論文報告集、第282号、pp. 59~70。

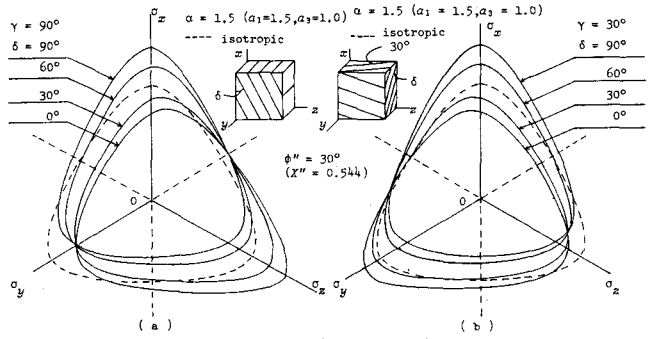


図-2 3主応力下での破壊時の応力状態 (a) $\gamma = 90^\circ$, (b) $\gamma = 30^\circ$

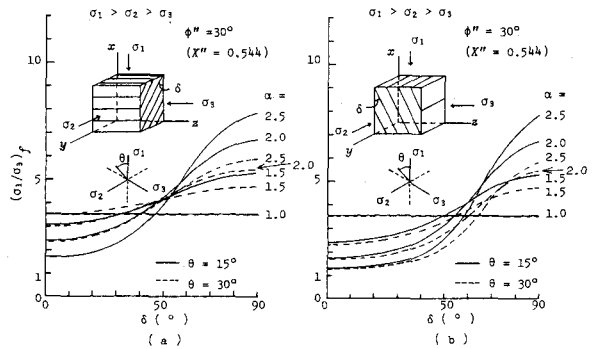


図-3 $\theta = 15^\circ, 30^\circ$ における $(\sigma_1/\sigma_3)_f$ と δ の関係

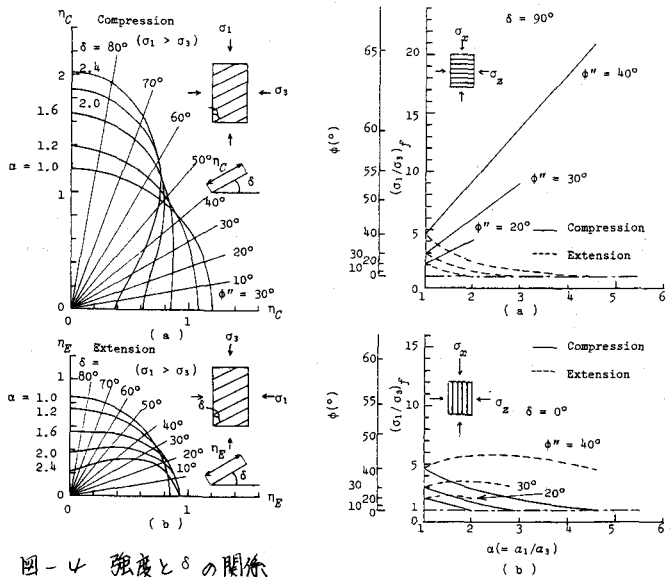


図-4 強度と δ の関係

(a) 三軸圧縮、(b) 三軸伸張

図-5 強度に及ぼす α の影響