

福山大学 工学部 正員 ○ 西原 晃
 金沢大学 工学部 正員 太田 秀樹
 福山大学 工学部 正員 平川 修治

1. まえがき

支持力, 安定解析では平面変形という実際の地盤の挙動に近く, すべり面上の強度を直接測定できる直接せん断試験が有効である. また異方圧密地盤上の盛土の短期安定解析では, 直接せん断試験から得られる非排水せん断強度を用いるのが望ましい(太田・深川・西原, 土木学会論文集, 第346号, 1984). このように直接せん断試験が有用であるにもかかわらず, これまであまり用いられなかった理由は, 主応力などの応力状態が明確でないことと, 非排水試験では有効応力を測定するために特別な試験機あるいは方法を用いなければならないことであろう. そこで本報告では, 直接せん断試験の一つである一面せん断試験を取り上げ, 通常行われている非排水試験(急速せん断試験)から破壊時の有効応力状態ならびに有効応力にもとづく内部摩擦角を求める方法について考察した.

2. 一面せん断試験における有効応力状態

一面せん断試験はせん断方向に垂直な側方の変位が拘束されているから, 一種の平面ひずみ試験と考えることができる. 図1に示すように水平方向に x 軸, 鉛直方向に z 軸ととり, 紙面に垂直な y 軸方向の変位が拘束されているような平面ひずみ状態を考える. このような平面ひずみ状態での非排水せん断強度と最大主応力方向の関係は次式で与えられる(西原・太田・畠, 第15回土質工学会, 1980).

$$\frac{C_u}{p'_o} = \frac{M \exp(-\Lambda)}{\sqrt{3} (\cosh \beta - \sinh \beta \cos 2\theta)} \quad (1)$$

ここで, p' は平均有効主応力(添字 o は圧密終了時の値を示す)であり,

$$C_u = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3), \quad M = \frac{3 \sin \phi'}{6 \sin \phi'}, \quad \Lambda = 1 - \frac{C_s}{C_c}, \quad \beta = \frac{\sqrt{3} \Lambda \eta_o}{2M}, \quad \eta_o = \frac{3(1-K_o)}{1+2K_o},$$

である. また, すべり線の理論を用いると, せん断面の方向と最大主応力方向の関係は,

$$\cos 2\theta = \tanh \beta \cos^2 2\Phi + \sin 2\Phi \sqrt{1 - \tanh^2 \beta \cos^2 2\Phi} \quad (2)$$

で与えられる(畠・太田・西原, 第17回土質工学会, 1982; 図1参照).

一面せん断試験では $\Phi = \pi/2$ であるから, 式(2)より,

$$\cos 2\theta = \tanh \beta \quad (3)$$

となる. これを式(1)に代入すれば,

$$\frac{C_u}{p'_o} = \frac{1}{\sqrt{3}} M \exp(-\Lambda) \cosh \beta \quad (4)$$

が得られる. 一方, 平面ひずみ状態における破壊条件は次のように表される(山下・西原・太田・畠, 第16回土質工学会, 1981).

$$\left(\frac{\sigma'_z - \sigma'_x}{p'} \right)^2 + \left(\frac{2\tau_{zx}}{p'_o} \right)^2 = \left(\frac{2C_u}{p} \right)^2 = \left(\frac{2M}{\sqrt{3}} \right)^2 \quad (5)$$

式(4), (5)より, 破壊時の平均有効主応力は次式で与えられる.

$$\frac{p'}{p'_o} = \exp(-\Lambda) \cosh \beta \quad (6)$$

山下・西原・太田・畠(第16回土質工学会, 1981)によれば, 平面ひずみ試験における中間主応力は次式で与えられる.

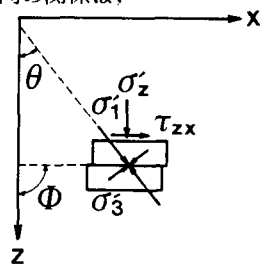


図1 一面せん断試験の応力状態

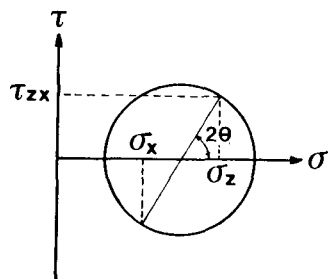


図2 モールの応力円

$$\sigma'_y = \frac{K_0}{1+K_0} (\sigma'_x + \sigma'_z) \quad (7)$$

したがって、

$$p' = \frac{1}{3} (\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z) = \frac{1+2K_0}{3(1+K_0)} (\sigma'_x + \sigma'_z)$$

であり、また図2より、 $\sigma'_x = \sigma'_z - 2\tau_{zx} / \tan 2\theta$ であるから、平均有効主応力は

$$p' = \frac{2(1+2K_0)}{3(1+K_0)} (\sigma'_z - \frac{2\tau_{zx}}{\tan 2\theta}) \quad (8)$$

と表される。また圧密終了時の平均有効主応力は $p'_0 = (1+2K_0)\sigma'_{z0}/3$ であるから、式(8)より、

$$\frac{p'}{p'_0} = \frac{2}{1+K_0} \left(\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} - \frac{1}{\tan 2\theta} \frac{2\tau_{zx}}{\sigma'_{z0}} \right) \quad (9)$$

したがって、式(3),(6),(9)より、破壊時の有効垂直応力は次のように表される。

$$\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} = \frac{1+K_0}{2} \exp(-\Lambda) \cosh \beta + \sinh \beta \frac{\tau_{zx}}{\sigma'_{z0}} \quad (10)$$

図3は一面せん断試験における破壊時のモールの応力円と応力経路を表している。実線が有効応力、点線が全応力である。通常的一面せん断試験は垂直応力 σ'_z 一定でせん断が行われるから全応力経路は $I \rightarrow F$ となる。一方、有効応力経路は $I \rightarrow F'$ のようになり、 $\sigma'_{z0} - \sigma'_z$ がせん断中に発生した間隙水圧を表す。図3より、破壊時の最大、最小主応力および有効内部摩擦角は次のように求められる。

$$\left. \frac{\sigma'_1/\sigma'_{z0}}{\sigma'_3/\sigma'_{z0}} \right\} = \frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} \pm \frac{\tau_{zx}}{\sigma'_{z0} \tan 2\theta} = \frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}} \pm \frac{\tau_{zx}}{\sigma'_{z0}} \sinh \beta \quad (11)$$

$$\phi'_s = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_{zx}/\sigma'_{z0}}{\sigma'_z/\sigma'_{z0}} \right) \quad (12)$$

表1はいくつかの粘土に対して非排水一面せん断試験（等体積一面せん断試験）を行い、破壊時の有効垂直応力と内部摩擦角を測定した結果と、式(10),(11),(12)を用いて計算した結果を比較したものである。なお、計算にあたっては、軽部の式（第20回土質工学シンポジウム, 1975）, $M = \Lambda/0.75$ を用いて M を求めている。破壊時の有効垂直応力 σ'_z/σ'_{z0} に関しては実験値と計算値はほぼ対応しているが、内部摩擦角は計算値の方が実験値より1割程度大きい。計算には、土質定数として K_0, Λ が必要である。 Λ は圧密試験から容易に求めることができるが、 K_0 を測定することは容易ではない。そこで、塑性指数 PI から Massarsch の式（7th Eur. Conf. Soil Mech., Vol. 2, 1979）,

$$K_0 = 0.44 + 0.42PI/100$$

表1 破壊時における有効応力と内部摩擦角

を用いて K_0 を求め、内部摩擦角を計算した結果も表1に示してある。計算結果は実験結果より若干大きめの値になるが、本報告の方法により通常の急速一面せん断試験から非排水強度だけでなく、有効応力にもとづく内部摩擦角もある程度推定できよう。

試料	PI	Λ	Ko	$\frac{\tau_{zy}}{\sigma'_{z0}}$	実験値		計 算 値					
					$\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}}$	$\phi's$	$\frac{\sigma'_z}{\sigma'_{z0}}$	$\phi's$	σ_1	σ_3	$\phi's^*$	
有明粘土	53	0.90	0.46	0.215	0.46	24.7	0.42	27.3	0.56	0.09	28.7	
福井粘土	46	0.84	0.49	0.257	0.52	26.1	0.45	29.8	0.63	0.07	31.1	
笠岡粘土	97	0.94	0.84	0.300	0.42	34.7	0.39	37.7	0.66	0.06	37.7	
西宮粘土	51	0.90	0.54	0.288	0.48	31.0	0.43	34.0	0.63	0.03	35.1	
南港粘土	51	0.88	0.50	0.266	0.46	29.3	0.44	31.4	0.62	0.05	32.6	
日立粘土	41	0.88	0.52	0.234	0.46	27.2	0.42	29.1	0.58	0.09	29.8	

* $K_0 = 0.44 + 0.42PI/100$