

Ⅲ-200

等体積一面せん断強度の問題点

金沢大学大学院 学生員 ○森川 嘉之, 古田 康裕, 加藤 直継
前田建設(株) 正員 阿野 達行
金沢大学工学部 正員 太田 秀樹

1. はじめに

これまで土質力学では, 土の破壊の説明に剛塑性体の理論を用いてきた。しかし, この理論は, 強度やすべり面の議論において, 論理的整合性に欠けていることがわかってきた¹⁾。そこで, まず古典的な剛塑性体の理論を振り返り, その論理的不整合を指摘する。ついで, 関口・太田モデルを用いて, 強度や破壊時の応力状態について理論的な考察を行う。

2. 古典的な破壊の理論

土の破壊の理論は全応力理論である。釣合い式に全応力の破壊条件を代入して議論が展開される。全応力理論の場合の破壊条件式は, $\tau_f = \pm c$ で表される。これを σ - τ 空間に表すと図1のようになる。図1には塑性ひずみ増分ベクトルも併せて記してある。今, 非排水条件下での破壊を考えているから, 体積ひずみ成分(dv^p)はゼロである。よって, 塑性増分ベクトルは破壊条件に直交する。関連流動則が成り立つのである。古典的な破壊理論はこのような形で展開される。

有効応力を用いて同様の議論を行うと破壊条件は $\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi'$ となる。塑性ひずみ増分ベクトルは, 全応力理論と同様に, dv^p がゼロとなる。塑性ひずみ増分が, 応力の破壊条件に無関係に決まることから, 非関連流動則の導入が必要となる。しかし, 全応力表示の釣合い式と有効応力表示の破壊条件式だけでは, 一般的な理論体系を組み立てることができない。

Mohr の応力円と $\tau_f = \pm c$ の接点が, 破壊条件を満足する応力状態を与える。全応力理論の場合図1より, 接点の応力状態は, 主応力面に対して 45° 傾いた面上の応力状態であることがわかる。古典的破壊理論(全応力理論)では, この面をすべり面としている。従って, すべり面は主応力面から 45° 傾くことになる。有効応力理論を用いた場合は, すべり面が主応力面から $45^\circ + \phi'/2$ 傾くことになる。

しかし, これらの理論展開には少々無理がある。というのは, 45° 面もしくは $45^\circ + \phi'/2$ 面上の応力が破壊

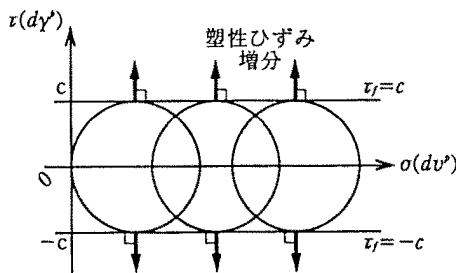


図1 全応力理論

条件を満たすことと, 土がすべるということは別の現象だからである。すべり面はひずみ増分の特性線として考えるべきであるが, 釣合い式に破壊条件式を代入して得られるのは応力の特性線である。二つの特性線は, 異方性材料などに関しては一致しない³⁾。次節では, 材料の異方性を考慮したモデルを用いて理論的な考察を行う。

3. 非排水直接せん断強度

非排水直接せん断のせん断強度は, 非排水条件式と破壊条件式とを連立させて求められる²⁾。関口・太田モデルを用いると, 図2のような非排水直接せん断の非排水条件と破壊条件を連立させると, 破壊時の強度が次のように求められる。

$$\tau_{eff} = \frac{1+2K_0}{3\sqrt{3}} M \exp(-\Lambda) \sigma'_0 \quad (1)$$

ただし, $\sigma'_f = \exp(-\Lambda) \sigma'_0$ である。

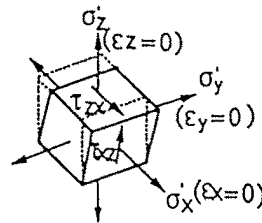


図2 非排水直接せん断のモデル化

(1)式よりせん断に伴う主応力の回転も求めることができる。図3は, 直接せん断による最大有効主応力の回転を求めたものである。図より, 等方圧密された材料の場合には, せん断開始直後から, 最大有効主応力面は水平から 45° 回転し, せん断中一定となっている。一方, 異方圧密された材料の場合, 最大有効主応力面は, せん断に伴って回転し, $30 \sim 40^\circ$ の範囲に落ちつくことがわかる。関口・太田モデルによると, 破壊時の最大有効主応力の回転角 θ は, 次のようになる。

$$2\theta = \tan^{-1} \frac{2M}{3\sqrt{\eta_0}} \quad (2)$$

ここに, $\eta_0 = 3(1-K_0)/(1+2K_0)$ である。これを σ - τ 空間に表したのが図4である。異方圧密材料の場合の破壊点が, 全応力理論, 有効応力理論の破壊条件式上にないことがわかる。破壊時の応力状態から得られる有効摩擦角 ϕ'_{sar} は, (1)式より, 次のようになる。

$$\tan \phi'_{sar} = \left(\frac{\tau_{eff}}{\sigma'_f} \right)_f = \frac{1+2K_0}{3\sqrt{3}} M \quad (3)$$

ここに挙げた結果は, 特に異方圧密材料の計算結果に関して, 前述した古典的な破壊理論やすべり面の方

向と全く相いれないものとなった。

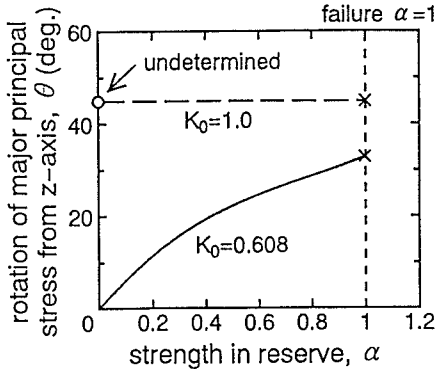


図3 非排水直接せん断中の主応力の回転

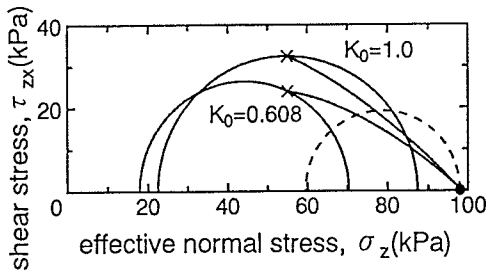


図4 非排水直接せん断試験の有効応力経路

4. 実験的検証

前節の理論的推論が、古典的な破壊理論と異なった結果となったため、一連の実験を行い試験結果と理論値とを比較してみた。今回は非排水直接せん断試験として、等体積一面せん断試験を選んだ。実験には、日本各地から取り寄せた粘土を、正規圧密領域まで圧密した供試体を用いた。図5が実験から得られた有効応力経路である。圧密圧力で正規化した強度を塑性指数に対してプロットしたのが図6である。理論値よりかなり大きな強度が得られたが、よく似た傾向が見られた。図7は有効応力経路から ϕ' パラメータをもとめる方法を表したものである。実験結果からの ϕ' パラメータの求め方については、決め手がない。そこで、今回は ϕ'_{max} と ϕ'_{peak} を求めてみた。図8にその結果を示す。理論値とよく似た傾向にあることがわかる。

以上に示したように、実験値と理論値はよく似た傾向をもっていた。速度補正を施すか、極めてゆっくりせん断すれば、両者はかなり近づくものと思われる。

5. まとめ

一面せん断試験に関する考察を進めるにつれ、理論的な推論と、従来の土質力学のせん断強度やすべり面に関する説明にとの間に大きなずれがあることがわかってきた。このずれの原因は、粘土が地盤内で受ける異方的な圧密履歴にある。

参考文献 1)太田他(1995)、直接型せん断試験の方法と適

用に関するシンポジウム発表論文集, pp.147-154. 2)太田他(1994)、第39回土質工学シンポジウム平成6年度発表論文集, pp.187-194. 3)西原(1986)、京大学位論文

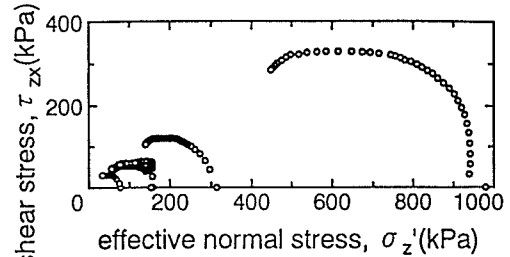


図5 等体積一面せん断試験による有効応力経路

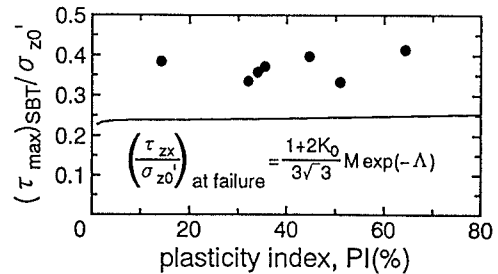


図6 等体積一面せん断強度

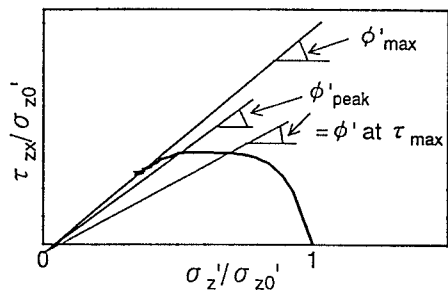


図7 ϕ' パラメータの定義

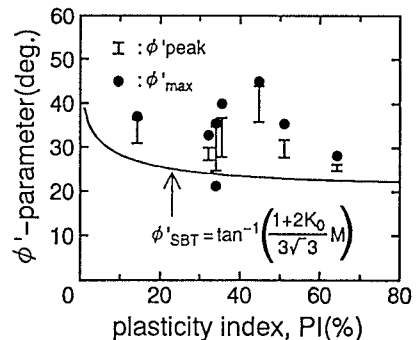


図8 等体積一面せん断試験による ϕ' パラメータの定義