さまざまな地盤材料の三次元的な強度特性

鹿島建設㈱ 技術研究所 土質・地盤環境グループ 正会員 〇斉藤 潤

首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科 正会員 吉嶺 充俊

1. 背景

地盤材料は多種多様であり非常に複雑な特性を持つため、構造解析手法の発展に比べ材料物性の解明が遅れ ているといえる。たとえば、地盤や土構造物の破壊予測では構造解析がいくら精緻であってもそこで用いる地 盤材料要素の破壊基準が正確に現実を反映していなければ適切な結果は得られない。

これまでにさまざまな破壊基準が提案されているが、その多くはクーロンの破壊基準を基礎としている。土 が破壊する瞬間に、ある「面」に作用する直応力成分σとその面に作用する最大せん断応力成分τの間には線型 関係があり、τ=Rσ+Cが成り立つというのがクーロンの破壊基準である。ここで、R は摩擦係数、C は粘着 力である。このクーロン基準を適用する際に、基準面(すなわちσとτが作用している面)の3次元的な方向を どのように考えるのかが問題となるが、既往の破壊基準では破壊基準面が特定の方向に固定されていたり、方 向設定の自由度に欠けていたりするために実際の破壊を適切に表現することができない場合がある。そこで本 研究では柔軟に基準面の3次元方向を設定できる新たな破壊モデルを提案するとともに、多様な地盤材料の中 空ねじりせん断試験を行い、実験で観察された3次元的な破壊応力条件に提案モデルを適用してみた。

2. 実験方法

2.1.実験材料

(1) 黄土

中国大陸に広く分布する黄土は蜂の巣のような特異な土粒子構造や粒子間接着力を有しており、一度この 構造が乱れると急激に強度が小さくなる性質を持つ。本研究ではこの特異な土粒子構造を乱さないよう、中 国の西安市内でブロックサンプリングした不飽和不撹乱試料(*D*₅₀=0.015mm、*FC*=82%、*CC*=30%、自然含 水比約 12%)を中空円筒供試体(外径 7cm、内径 3cm、高さ 7cm)に整形した後、温度 23℃、湿度 100% のデシケータ内に 2 週間以上放置することにより含水比を 11%に調整したものを用いた。

(2) 豊浦砂とセメントの混合材料

不撹乱試料では供試体によって密度のバラつきが大きいという問題がある。また、試料輸送時のケーシン グの都合上、供試体のサイズが小さく、実験精度にも問題がある。そこで、黄土と同様に粒子間粘着力を持 つ人工材料として豊浦砂と普通ポルトランドセメントの混合材料(砂:セメント:水=30:1:3)を乾燥密度が 1.35g/cm³になるように中空モールド内で突きかためて供試体(外径 10cm、内径 6cm、高さ 20cm)を作成 した後、室温において湿度 100%のデシケータ内で7日間養生した。

2.2.せん断過程

中空ねじりせん断試験機を用い、排水・排気条件(間隙空気圧ゼロ)のもとで、最大主応力方向一定(45°)、 中間主応力係数一定(*b*=0~0.75)、平均主応力一定(*p*=50~100kPa)条件でのせん断試験を行った。ね じりせん断荷重は一定速度で増加させ、上記の応力条件を正確に載荷するために、供試体に作用する外側面 拘束圧、内側面拘束圧、および鉛直圧をねじりせん断荷重に応じてコンピュータ制御した。ここで用いた試 験装置では不飽和供試体の体積変化を測定することはできないが、せん断過程での供試体体積変化は無視で きると仮定して供試体寸法をリアルタイムで計測し、それに基づいて応力とひずみを計算した。

キーワード クーロンの破壊基準、3次元応力、黄土、砂、セメント

3. 実験結果

図 1、2 に $p=\sigma_{oct}=100$ kPa での正八面体面に関するひずみ(γ_{oct})ーせん断応力(τ_{oct})曲線を示した。この実験結果 から、中間主応力係数は破壊時の τ_{oct} に影響を及ぼすことが明らかであり、これらの地盤材料にはフォン・ミーゼス基準($\tau_{oct}=R\sigma_{oct}+C$)は適用できないことがわかる。図 3、4 に p=100kPa での破壊応力を π 平面上に示したが、トレスカ基準やモール・クーロン基準も中間主応力の影響を適切に表すことができないことがわかる。

4. 実験結果のモデルシミュレーション

4. 1. 提案モデル

主応力 σ_i 方向に対する破壊基準面の方向余弦を s_i とすれば、クーロン破壊基準は $\tau = R\sigma + C$ 、 $\sigma = \Sigma s_i^2 \sigma_i$ 、 $\tau = (\Sigma s_i^2 \sigma_i^2 - \sigma^2)^{1/2}$ と表される。ここで材料が等方であることを前提として、 $s_i/s_j = \{(R\sigma_j + C)/(R\sigma_i + C)\}^{k/2}$ と置くことを提案する¹⁾²⁾。kは基準面の方向パラメータであり、k = 0のときフォン・ミーゼス基準、k = 1のとき松岡・中井基準に一致し、kが大きくなるにつれて π 平面上の破壊基準の形状は真円から正三角形に近づく。

4.2.実験結果のシミュレーション

実験から得られた破壊時の主応力データ σ_i に対して $\tau \ge \sigma$ の線形相関係数 r^2 が最大になるように提案モデルの強度定数 *k*, *R*, *C*を決定し、表1に示した。また、ここで同定されたパラメータを用いた提案モデル破壊条件を実験データとあわせて図 3、4の π 平面上にプロットしてあるが、おおむね良好に実験結果をシミュレートしていることがわかる。

4.3.多様な地盤材料のモデルパラメータ

さらにさまざまな地盤材料の強度特性を把握するために、本研究で実施した2種類の土質材料に加えて、 他の研究者によって実施された研究成果を引用し、岩石材料2種類³⁾、砂材料4種類⁴⁾⁵⁶、飽和および不 飽和粘土質シルト⁷⁾、セメント混合比の大きな砂2種類⁸⁾、合計12種類の多様な材料の3次元強度試験結 果について提案モデル定数の同定を行い、表1にあわせて示した。ただし、砂材料については粘着力ゼロを 仮定し、摩擦比の標準偏差が最小となるようにモデルパラメータを同定した¹⁾²⁾。図面でのモデルと実験値 の比較プロットは省略するが、相関係数は十分に1に近く、または*R*の標準偏差は*R*に比べて十分に小さ いことからわかるように、いずれの材料についても良好なシミュレーション結果を得ていると言える。

5. 提案モデルの3つの強度パラメータの相関

今回提案した新たな破壊モデルは3つのパラメータ k, R, C から成り立っている。ここで、もし破壊基準面の方向パラメータ k を摩擦比 R と粘着力 C の関数として表すことができれば、中間主応力係数が一定の実験(たとえば三軸圧縮試験)だけでモデルパラメータをすべて決定でき、3 次元破壊応力条件が簡易にわかることになるので便利である。そこで、本研究で検討した 12 種類の材料の k、R、C の相関を調べたところ、図 5、6 に示すように、どちらかというと R や C が大きいほど k が大きいような傾向を見ることができたが、明確な相関を得るにはには至らなかった。

6. 結論

固着した比較的強固な粒子構造を有する不撹乱黄土と砂・セメント混合試料について、その3次元応力のも とでの破壊応力条件を中空ねじりせん断試験によって実験的に明らかにした。また、クーロンの破壊基準につ いて、その破壊基準面の方向をパラメータとすることにより3次元に拡張し、実験結果に適用したところ、実 験で観察された3次元破壊応力条件を良好に表現することができた。さらに既往の研究から引用したデータ含 めて合計12種類の地盤材料に提案した破壊基準を適用することにより、提案した破壊基準は軟弱な土質材料 から硬質の岩石材料までの非常に広範な地盤材料の3次元的な破壊応力条件を適切に表現できることを確認 した。

本研究での提案モデルは材料の等方性を仮定している。今後は材料の強度異方性を取り入れた破壊基準を考察していくことが必要であろう。





図3 π平面上での破壊応力条件 (黄土、*p*=100kPa)



図4 π平面上での破壊応力条件 (砂・セメント混合材料、*p*=100kPa)

表 1	さまざまな地盤材料の強度定数一覧
2	

	甘淮西士白 4	麻橱 医粉 D		τとσの相関係数, r ²
	举华 画力问, K	庠惊休致,K	柏相力, C(KPa)	または <i>R</i> の標準偏差, SD
黄土	0.64	0. 47	62	$r^2 = 0.934$
砂セメント混合材料	0. 77	0.52	25	$r^2 = 0.942$
苦灰岩 3)	0.80	0. 57	98 × 10 ³	$r^2 = 0.981$
粗面岩 3)	0.85	0.53	43×10^{3}	$r^2 = 0.949$
密なモントレー砂 ⁴⁾	0. 62	1.12	0	SD = 0.030
緩いモントレー砂 ⁴⁾	0. 47	0.73	0	SD = 0.038
富士川砂 5)	0.50	0.52	0	SD = 0.026
豊浦砂(残留状態) ⁶⁾	0. 29	0.58	0	SD = 0.022
飽和米山粘性土 ⁷⁾	0. 74	0.65	9	$r^2 = 0.984$
不飽和米山粘性土 7)	0. 40	0.90	25	$r^2 = 0.984$
砂セメント混合材料 1 ⁸⁾	0. 70	0.80	198	$r^2 = 0.996$
砂セメント混合材料 2 ^{.8}	0.90	0.70	203	$r^2 = 0.986$



参考文献

- Yoshimine, M. (2006) 3-D Coulomb's failure criterion for various geomaterials, Geomechanics II: Testing, Modeling, and Simulation, ASCE Geotechnical Special Publication No.156, pp.71-86.
- 2) Yoshimine, M. (2006) Generalized Coulomb's Criterion for 3-dimensional stress conditions, M., Soils and Foundations, Vol.46, No.2, pp.259-266.
- 3) Mogi K. (2007) Experimental rock mechanics. Geomechanics Research Series, Taylor & Francis. Vol.3
- Lade, P.V. and Duncan, J.M. (1973) Cubical triaxial tests on cohesionless soil, Soil Mechanics and Foundations Division. Journal of ASCE, Vol. 99, No. SM10, pp. 793-812.
- 5) Yamada, Y. (1979) Deformation characteristics of loose sand under three- dimensional stress conditions, Doctor of Engineering Thesis, University of Tokyo.
- Yoshimine, M. (1996) Undrained Flow Deformation of Saturated Sand under Monotonic Loading Conditions, Doctor of Engineering Thesis, University of Tokyo.
- Toyota, H., Nakamura, K., and Sramoon, W. (2004) Failure criterion of unsaturated soil considering tensile stress under three-dimensional stress conditions, Soils and Foundations, Vol. 44, No. 5, pp.1-13.
- 8) Matsuoka, H. and Sun, D. (1995) Extension of Spatially Mobilized Plane (SMP) to frictional and cohesive materials and its application to cemented sands, Soils and Foundations, Vol. 35, No. 4, pp.63-72.