

各種応力状態における飽和粘性土のせん断強度特性について

平 間 邦 興 鳥 井 原 誠
山 本 彰

Strength Characteristics of Saturated Cohesive Soil in Various Stressed States

Kunioki Hirama Makoto Toriihara
Akira Yamamoto

Abstract

Generally, the stressed state of ground is assumed to be under triaxial compression. However, strength parameters used in stability analyses of ground have been determined by axisymmetric triaxial tests. In the study reported in this paper, axisymmetric triaxial tests and torsional tests, which belong to a kind of triaxial test, were carried out in order to determine the influence of the stressed state on strength parameters. As a result, the curved failure surface in the principal stress space is expressed as a smooth convex surface circumscribing the Mohr-Coulomb hexagon at any section. Consequently, the Mohr-Coulomb criterion obtained by axisymmetric triaxial testing gives a conservative estimate in stability analysis of actual ground. However, there is a possibility that the strength increase ratio obtained by axisymmetric triaxial testing will give an unsound estimate.

概 要

地盤の安定性を論ずる場合、実際の地盤は多軸応力状態にあるにもかかわらず、安定解析に用いられる強度定数は軸対称の三軸圧縮試験から得られた値を用いることが多い。そこで、この報告は多軸応力状態と軸対称の三軸応力状態にある土の強度特性の相関関係について検討することを目的とし、多軸試験の一つである中空ネジリせん断試験と軸対称三軸試験を行った。その結果、主応力空間上に描かれる破壊曲面は軸対称三軸圧縮試験から求められたモール・クーロンの破壊基準に外接する滑らかな凸曲面により表わされる。したがって、軸対称三軸圧縮試験によって求められたモール・クーロンの破壊基準は原地盤に対して安全側の評価を与える。しかし、軸対称三軸圧縮試験により求められた強度増加率は掘削問題に対して危険側の評価を与える可能性がある。

1. はじめに

地盤上に構造物を建設する場合、その構造物の安定性は地盤の強度特性に大きく左右される。したがって、その設計時の安定性評価にあたっては、地盤の強度特性を適確に把握しておく必要がある。

ところで、地盤を構成する土は応力状態の違いによって異なる強度特性を示すことが知られている。したがって、地盤上の構造物の安定性を評価する場合には、原地盤の応力・ひずみ状態により近い解析モデルを用いるとともに、その状態をできるだけ忠実に再現できる要素試験を用いる必要がある。しかし、現実には、原地盤の応

力・ひずみ状態を解析上、平面ひずみ状態にあると仮定することが多く、また、解析に用いる強度特性も軸対称の三軸圧縮試験から求めるのが一般的である。したがって、種々の応力・ひずみ状態にある土の強度特性の相関関係について検討を加えておくことは、室内試験結果の解釈および原地盤の安定性の評価を行なう上で非常に有効であると考えられる。

この研究は、多軸試験機の一つである中空ネジリせん断試験機を用いて後述する単純せん断・平面ひずみ試験および軸対称三軸試験機を用いて圧縮・伸張試験を行ない、応力状態が強度特性に与える影響について検討を加えている。

2. 試料と試験方法

試料は、東京湾において採集された粘性土であり、 $2,000\ \mu\text{m}$ のふるいを用いて調整した後、 $0.5\ \text{kgf/cm}^2$ の荷重で約1箇月間圧密を行なったものである。また、その物理的性質は表-1に示してある。

土粒子の比重	Gs	2.708
液性限界	WL %	39.0
塑性限界	WP %	18.6
塑性指数	Ip	20.4
砂	分 %	12.0
シルト	分 %	45.0
粘土	分 %	43.0
自然含水比	Wn %	62.4

表-1 試料の物理的性質

この研究に用いた中空ネジリせん断試験機は、通常の単純せん断試験機と違って、せん断中に生じるすべての応力を知ることができ

る。図-1は、ネジリせん断中における応力状態の概念図を示しており、微小要素の図で明らかのようにせん断中に生じる主軸 (σ_1, σ_3) の回転によって試料は3主応力の異なる単純せん断型の変形をしている。この研究では、軸方向の荷重と変位に対する拘束条件の違いにより次の2種類の試験を行なった。

2.1. 軸方向変位拘束試験

飽和粘性土を非排水状態でせん断すると等体積せん断試験となるが、この時、軸方向変位をゼロとすると、体積一定の条件より半径方向の変位もゼロとなる。このことを図-1の微小要素で考えると、軸方向変位拘束試験は半径方向のひずみのない平面ひずみ単純せん断試験となっていることが明らかである。以後、この試験方法を平面ひずみ試験と呼ぶこととする。

2.2. 軸荷重一定試験

2.1.に述べた平面ひずみ試験に対し、この試験方法は軸方向変位を拘束しないという点から、通常の非排水単純せん断試験に対応するものである。以後、この試験方法を単純せん断試験と呼ぶこととする。

単純せん断試験および平面ひずみ試験は、拘束圧1.0, 2.0, 4.0 kgf/cm^2 で約20時間等方圧密した後、せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}=0.176\ \%/min$ で非排水せん断を行なった。また、軸対称三軸圧縮試験と伸張試験は、拘束圧1.0, 4.0 kgf/cm^2 で約20時間圧密した後、それぞれ軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_1=0.088\ \%/min$ で非排水試験を行なった。

3. 試験結果と考察

図-2は、単純せん断試験と平面ひずみ試験で得られた有効垂直応力 σ_n' 、せん断応力 τ 、間げき水圧 u —せん断ひずみ r の関係を示している。この図から、平面ひずみ試験で得られたせん断応力は、すべての拘束圧下にお

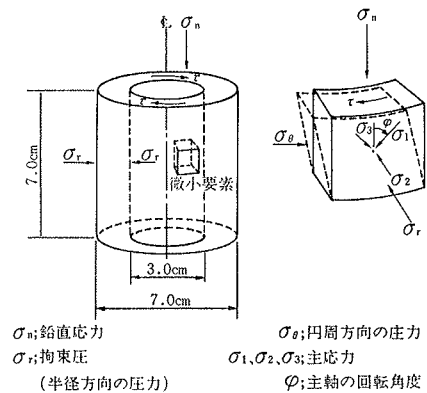


図-1 ネジリせん断中における応力状態の概念図

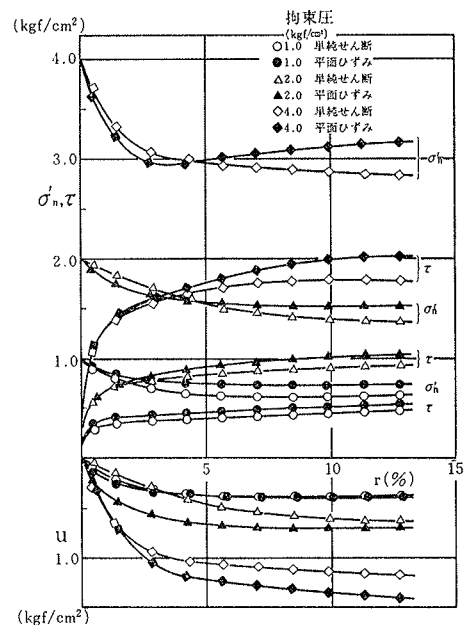


図-2 $\sigma_n', \tau, u-r$ 関係

いて、単純せん断試験におけるせん断応力よりも高くなっていることがわかる。これは、平面ひずみ試験の場合には軸方向の変位が拘束されているために土のダイレイタンス特性によって軸方向拘束圧が増大したものと考えられる。このことは、拘束圧2.0, 4.0 kgf/cm^2 のせん断ひずみの小さい時 ($r < 4.5\%$) を除いて、全般的に平面ひずみ試験の方が単純せん断試験の場合より、有効垂直応力が大きくなっていることから明らかである。また、過剰間げき水圧についても、平面ひずみ試験の方が単純せん断試験の場合よりも大きな値を示している。

図-3、図-4は主軸の回転を考慮して平面ひずみ試験と単純せん断試験中に生じる三つの有効主応力増分 $\Delta\sigma_1', \Delta\sigma_2', \Delta\sigma_3'$ を示したものである。いずれの試験においても、最小主応力増分は試験開始後、急激に低下し、その後一定値に漸近している。それに対して、最大主応力増分はせん断ひずみ初期においてピークを持ち、その後、平面ひずみ試験ではその値があまり低下せず、せん

断ひずみの増大とともに漸増する傾向を示しているが、単純せん断試験では低下した後、一定値に収束している。

図-5は、図-3、図-4の結果から主応力を求め、 b 値 $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ を計算したものである。単純せん断試験の場合にはせん断中 b 値 $=0.5$ と一定であるのに対して、平面ひずみ試験の場合にはせん断ひずみ4.5%の前後で $b < 0.5$ から $b > 0.5$ に変化していることがわかる。

図-6は平面ひずみ試験、単純せん断試験、軸対称三軸圧縮試験と伸張試験の応力径路を、八面体せん断応力 τ_{oct} -八面体有効垂直応力 σ_{oct}' 軸上に示したものである。なお、 τ_{oct} 、 σ_{oct}' は、圧密時の八面体垂直応力 $(\sigma_{oct}')_c$ により正規化している。この図から、試験中の有効応力径路はHenkel¹⁾、柴田²⁾らの試験結果と同様に、試験中の応力状態によらず $\tau_{oct}-\sigma_{oct}'$ 面上でほぼ一致しており、このことは土の降伏関数が τ_{oct} の関数として表現されることを示唆している。しかし、それぞれの試験の終期の値は、試験中の応力状態により異なる値を示しており、このことは土の破壊基準が単に τ_{oct} のみの関数によって表現できないことを示している。

図-7、図-8は平面ひずみ試験、単純せん断試験において、最大せん断応力が生じる時の3主応力から求めたモールの応力円を描いたものである。さらに、図-9の(a)はそれぞれの試験により得られた内部摩擦角 ϕ' (有効応力に基づいて求められる内部摩擦角)を示している。この図から、単純せん断試験、平面ひずみ試験によって得られた ϕ' は軸対称三軸圧縮試験と伸張試験で得られた ϕ' よりもやや大きな値を示している。したがって、軸対称三軸圧縮試験によって得られた ϕ' の値を強度定数として地盤の安定解析に用いることは、原地盤に対して安全側の評価を与えることになる。また、軸対称三軸伸張試験によって得られた ϕ' は軸対称三軸圧縮試験から得られた ϕ' とほぼ同じ値を示しており、Parry³⁾らの

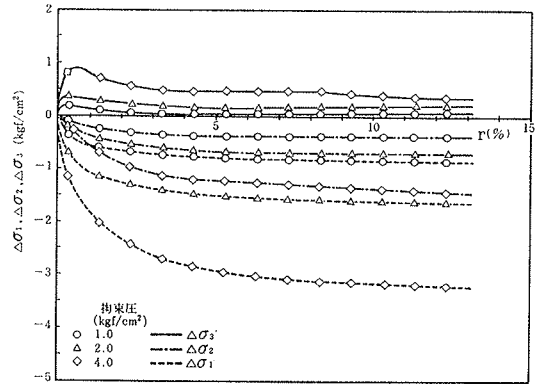


図-4 ネジリせん断中における有効主応力増分(単純せん断試験)

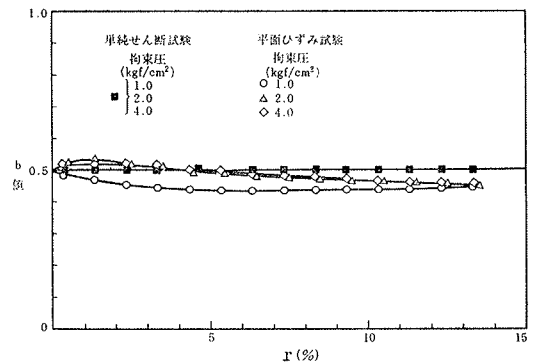


図-5 b 値- γ 関係

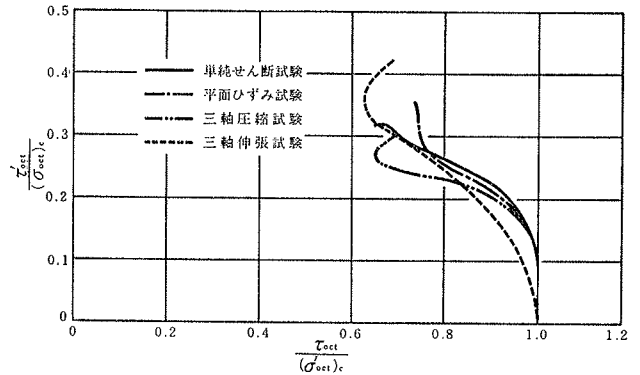


図-6 有効応力径路

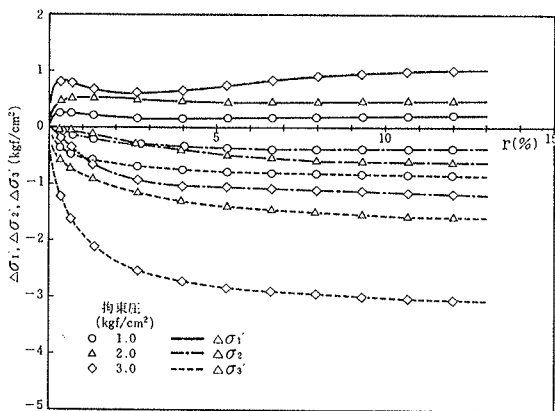


図-3 ネジリせん断中における有効主応力増分(平面ひずみ試験)

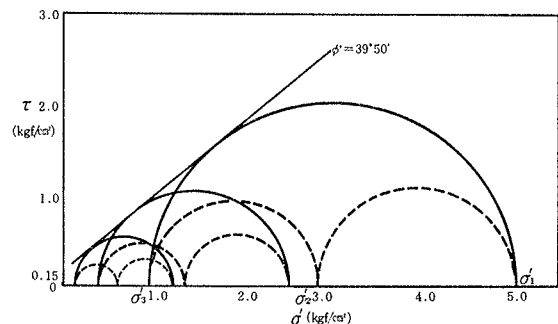


図-7 モールの応力円(平面ひずみ)

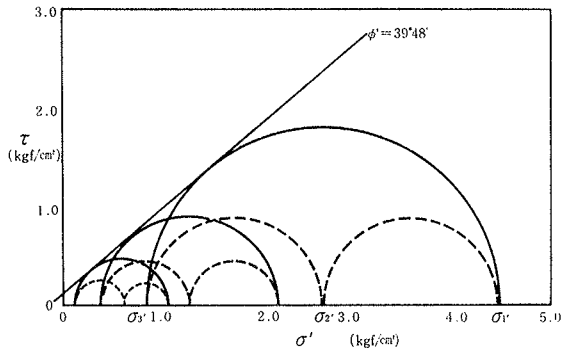


図-8 モールの応力円 (単純せん断)

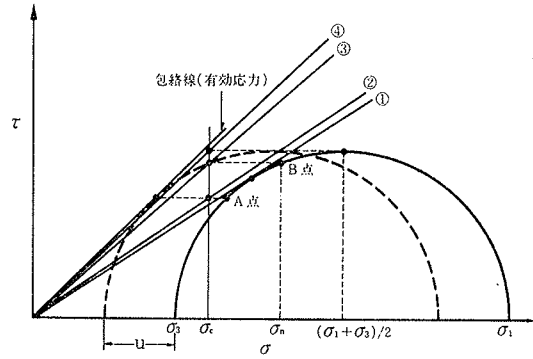


図-10 強度増加率の求め方

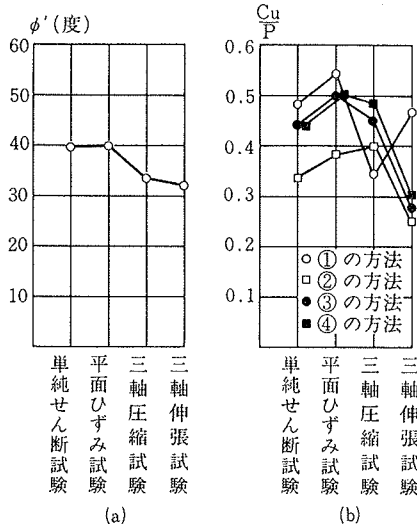


図-9 各種試験から求められた強度定数(a)内部摩擦角 φ'(b)強度増加率 Cu/P

結論と一致する結果となっている。

次に、強度増加率 Cu/P について検討を行なう。モールの応力円から強度増加率を求める方法には、土質工学会発行の「土質試験法」⁴⁾ によれば次の4種類の求め方がある(図-10)。

- (1) モール円の包絡線を引く。
- (2) モール円上のすべり面を表わす点Aのせん断応力を初期拘束圧 σ_e の真上に持ってきて、これを連ねた線を引く。この方法を用いる場合、すべり面を求めることが困難なため、この報告では有効応力に基づくモールの応力円と包絡線との接点をA点として用いた。
- (3) モール円で平均応力 σ_m の真上の点Bを σ_e の真上に持ってきて、これを連ねて線を引く。
- (4) モール円の頂点の縦距、すなわち $q_u/2$ を σ_e の真上にとり、これを連ねて線を引く。

これらの手法で求めた各試験方法での強度増加率は図-9の(b)に示す。この図から、それぞれの強度増加率は試験方法やその値の求め方により大きなばらつきを示しているのが明らかである。特に、軸対称三軸伸張試験により得られた Cu/P の値は(1)の方法により得られた値

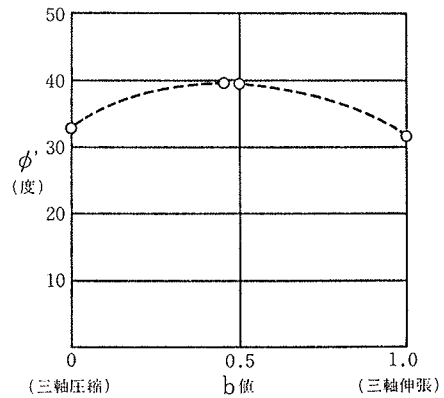


図-11 φ'-b 値の関係

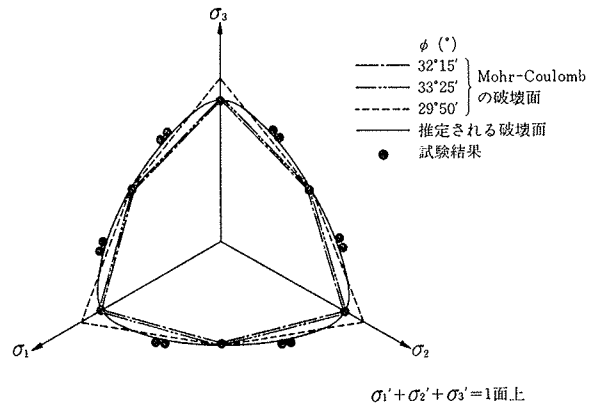


図-12 主応力空間上での破壊点と破壊面

を除くと、他の試験に比べ特に小さな値となっている。したがって、掘削時の安定性など地盤に伸張側の応力状態が発生するような現場の問題に軸対称三軸圧縮試験による Cu/P を適用することは危険側の予測を与える可能性がある。

次に、中間主応力が φ' と破壊基準に及ぼす影響について検討する。中間主応力が土質材料の降伏基準、破壊基準に大きな係わりを持つことは従来より知られており、塑性論を論ずる場合の重要なパラメーターとなると考えられている⁵⁾。そこで、中間主応力の影響を評価するために b 値-φ' の関係をプロットすると図-11のようにな

る。この図から、 b 値が0.5（単純せん断試験，平面ひずみ試験）の付近で ϕ' の値はピークとなり， $b = 0$ （軸対称三軸圧縮試験）と $b = 1$ （軸対称三軸伸張試験）で ϕ' の値はほぼ等しい値を示している。この b 値- ϕ' 関係は Sutherland⁶⁾，Ramamirthy⁷⁾らの試験結果とよく一致している。また，図-12はそれぞれの応力状態のもとで行なわれた試験結果を $\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3' = 1$ の面上にプロットしたものであり，同時に，各試験で得られた ϕ' を用いたモール・クーロンの破壊曲および試験結果から推定される破壊曲面を示している。この図より，軸対称三軸圧縮試験と伸張試験から得られた破壊点は同一のモール・クーロンの破壊面上に存在し，単純せん断試験と平面ひずみ試験から得られた破壊点は軸対称三軸圧縮・伸張試験から得られたモール・クーロンの破壊面より外側に存在している。したがって，軸対称三軸圧縮試験から得られたモール・クーロンの基準を平面ひずみ状態と想定される地盤の安定解析に適用することは安全側の解析をしていることになる。さらに，Drucker⁸⁾の仮説（normality-rule）から破壊面が主応力空間上で凸面によって示されると仮定すると，軸対称三軸圧縮試験から得られたモール・クーロンの破壊基準は，平面ひずみ状態にかかわらず，すべての応力状態に対して最も安全側の評価を与えることになる。次に，図-13は金属および粒状体あるいは粘着力を有しない土について提案されている破壊基準を模式的に描いたものである。この図より，図-12に示した試験結果から推定される破壊曲面は松岡⁹⁾の提案した破壊曲面に近いようである。また，Lade-Duncan¹⁰⁾の破壊基準は伸張側でやや危険側の評価を与えると考えられる。さらに，Mises，Tresca の破壊基準は，全応力状態において危険側の評価を与えるものと考えられ，逆にモール・クーロンの破壊基準は安全側の評価を与えると考えられる。

4. おわりに

この研究では，正規圧密粘土に対して，単純せん断，平面ひずみ，軸対称三軸圧縮，軸対称三軸伸張の各応力状態におけるせん断試験を実施した。その結果，応力状態が降伏と破壊に大きな影響を与えることが確認できた。今後は，さらに，より原地盤の圧密状態に近いと考えられている K_0 圧密粘土に対する検討を行なう必要がある。

参考文献

1) Henkel, D. J. and N. H. Wade: Plane Strain Tests on Saturated Remoulded Clay, Proc. ASCE,

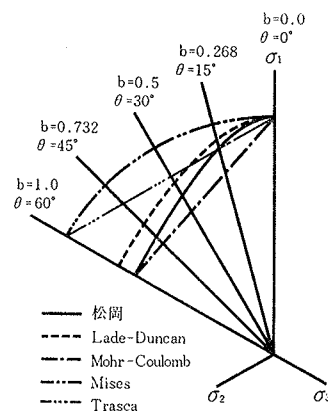


図-13 正八面体上で表わした五つの破壊基準¹¹⁾

Vol. 92, No. SM6, (1966), pp. 67~80

- 2) Shibata, T. and D. Karube: Influence of the Variation of the Intermediate Principal Stress on the Mechanical Properties of Normally Consolidated Clays, Proc. 6th Int. Conf. SMFE, Vol. 1, (1965), pp. 359~363
- 3) Parry, R. H. G.: Triaxial Compression and Extension Tests on Remoulded Saturated Clay, Geotechnique, Vol. 10, No. 4, (1960), pp. 166~180
- 4) 土質工学会編: 土質試験法
- 5) 桜井春輔: 地中構造物の力学的挙動に関する基礎的研究, 名古屋大学博士論文, (1975)
- 6) Sutherland, H. B. and Mesdary, M. S.: The Influence of the Intermediate Principal Stress on Strength of Sand, Proc. 7th ICSMFE, Vol. 1-1, (1974), pp. 49~50
- 7) Ramamirthy, T. and Rawat, P. C.: Shear Strength of Sand under General Stress System, Proc. 8th ICSMFE, Vol. 1-2, (1973), pp. 339~342
- 8) Drucker, D. C.: A more fundamental approach to plastic stress-strain relations, Proc. 1st U. S. National Congress of Applied Mechanics, (1951), pp. 487~491
- 9) 中井, 松岡: 3主応力下の土のせん断挙動に関する統一的解釈, 土木学会論文報告集, No. 303, (1980), pp. 65~77
- 10) Lade, P. V. and Duncan, J. M.: Elastoplastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil, Proc. ASCE, Vol. 101, No. GT10, (1975), pp. 1037~1053
- 11) 足立, 龍岡: 新体系土木工学(土の力学Ⅲ), 技報堂