

Ⅲ-A56

破壊状態に着目した固結力を有する粘土の構成式

九州大学大学院○学 笠間清伸 学 森嶋武宏
九州大学大学院 工学部 落合英俊 正 安福規之

1.はじめに 軟岩、固結土及び人工処理土は土粒子間に固結力を有する材料であり、この固結力の存在が力学特性をより複雑にしている。著者らは、このような固結力を有する材料の強度・変形特性を明らかにし、固結力を考慮した構成式を導くことは極めて意義があるという立場から、固結力を有する材料の破壊状態及び固結効果を考慮した内部消散エネルギー式を基に固結力を有する材料の構成式を提案している¹⁾²⁾。本文では、土粒子間の固結力を変化させた4種の人工処理粘土を対象に一連の非排水三軸試験を行い、固結力を有する粘土の破壊状態の概念を示すとともに固結力を有する粘土の構成式の有効性を検討している。

2.固結力を有する粘土の構成式

2.1 固結力を有する粘土の破壊状態 固結力を有する粘土が破壊する場合、固結力を持たない粘土に比べ固結効果によって存在できる応力空間は拡大し、それに伴って強度が大きくなると考えられる。そこで、固結力を有する粘土の p - q 空間および e - $\ln p$ 空間における破壊状態を図1に示している。なお、 $p^* = p + p_r$ で定義し、 p_r は固結力を表すパラメーターである。図のように、固結力を持つ粘土の p - q 空間における破壊状態は固結力を持たない粘土の破壊状態に平行で固結力の効果 p_r の分だけ左側にシフトすると考える。さらに、 e - $\ln p$ 空間における破壊状態は固結効果 p_r の分だけ右側に移動することにより勾配が大きくなり、より圧縮性の大きい材料に変化することを意味している。各応力空間における破壊状態は以下の式で表すことができる。

$$q = M(p + p_r) \quad (1) : e = \Gamma^* - \lambda^* \ln(p + p_r) \quad (2)$$

2.2 消散エネルギー式について 著者らは、消散エネルギー式として次式を提案している³⁾。

$$dW_{in} = p \sqrt{(dv^p)^2 + X dv^p de^p + (M de^p)^2} \quad (3)$$

この中で、第2項の“ $X dv^p de^p$ ”は塑性体積ひずみとせん断ひずみのカップリングを表す項であり、せん断過程でのダイレイタンスの発現の仕方や程度を決定する土の材料特性を表す項として考えている。特に、 $X = (M - \eta)$ 及び $X = 0$ の時の内部消散エネルギー式を以下に示す。

$$dW_{in} = p M de^p \quad (4) : dW_{in} = p \sqrt{(dv^p)^2 + (M de^p)^2} \quad (5)$$

式(4)(5)はそれぞれカムクレイモデル、修正カムクレイモデルの内部消散エネルギー式を表現しており、式(3)がより一般性のある内部消散エネルギー式であることを示している。

さらに、式(3)に固結力の成分 p_r を導入したエネルギー消散式として、次式を仮定する。

$$dW_{in} = p^* \sqrt{(dv^p)^2 + X dv^p de^p + (M de^p)^2} - p_r dv^p \quad (5)$$

ただし、 $p^* = p + p_r$ である。

この式は、等方圧密($q=0, de^p=0$)の状態を考えた場合、

$$dW_{in} = p^* dv^p - p_r dv^p = p dv^p \quad (6)$$

となり、等方圧密時には固結力によるエネルギー消散の効果はない。

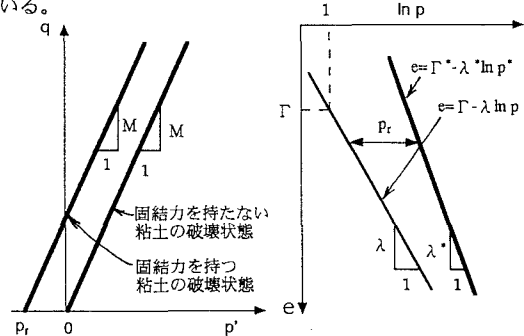


図1 固結力を有する粘土の破壊状態

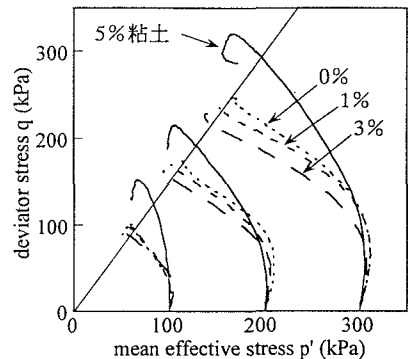


図2 固結力を有する粘土の応力経路

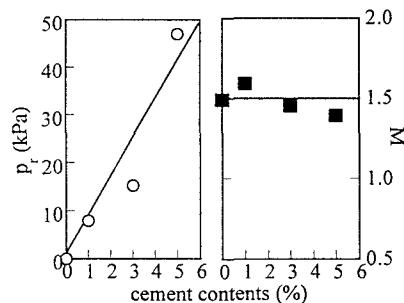


図3 破壊状態線の勾配と切片

粘土,セメント,固結力,破壊状態,構成式,非排水せん断特性

〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 Tel. 092-642-3286 Fax. 092-642-3285

また、限界状態($q/p^*=M, dv^p=0$)の場合

$$dW_{in} = p_f^* M de^p = (p_f + p_r) M de^p = q_f de^p \quad (7)$$

となり、固結力がエネルギー消散の中に含まれる。従って、この場合せん断過程で固結力がエネルギー消費に大きく寄与することを示す。また、この式は $p_r=0$ の時式 (3) と一致することは明らかである。一つの例として $X=0$ とし、関連する流れ則に基づく非排水応力経路は以下の式で評価できる。

$$p^*/p_0 = \left(1 + (q/p^*)^2 / M^2 \right)^{\frac{\lambda-\kappa}{\lambda}} \quad (8)$$

ただし、 p_0 は先行圧密応力である。

3. 人工処理粘土による検証

3.1 供試体および試験方法 本研究では、土粒子間の固結力の程度を定量的に変化させるために、ポルトランドセメントを有明粘土の乾燥重量に対してそれぞれ 0.1, 3 及び 5% 混合した試料を供試体として用いている。詳しい試料作成方法及び実験方法は参考文献 1) を参照されたい。なお、本文ではセメント混合量に合わせて、それぞれの粘土を 0% 粘土、1% 粘土、3% 粘土及び 5% 粘土として略して表現する。

3.2 p - q 及び e - $\ln p$ 空間における破壊状態 図2に試験により得られた p - q 空間における応力経路を示している。図中の破壊状態を結んだ線の傾きは、0% 粘土の応力経路を基準として求めたものである。1~5% 粘土の応力経路はこの線を超えて破壊状態に至っている。ここで、固結力を有する粘土の p - q 空間での破壊状態線の傾き M と p 軸との交点 p_r を求めセメント量との関係を示したのが図3である。破壊状態線の傾きは混合するセメント量によらずほぼ一定であるが、セメント量と p_r の値は良く対応している。次に、図4に e - $\ln p$ 空間における破壊状態を示している。これより、固結力を有する粘土の破壊状態線は直線で表すことができ、固結効果が大きくなるほどその勾配が大きくなることがわかる。以上の実験的な考察は、図1に示した破壊状態の考え方が固結力を有する材料に対して有効であることを示している。

3.3 人工処理粘土の非排水せん断特性 提案した固結力を有する粘土の構成式の有効性を検証するために、式 (8) 及び表1に示す実験により得られた材料定数を用いて拘束圧 294kPa での非排水せん断時の最大軸差応力 q_f と応力比 η_f をプロットしたのが図5である。実測値の最大軸差応力 q_f がセメント混合量 3% までは減少し 5% になると急激に増加するという傾向と応力比 η_f がセメント混合量とともに増加するという傾向を p_r を導入した構成式はうまく表現している。次に、非排水せん断時の最大軸差応力 q_f を間隙比 e に対してプロットしたのが図6である。人工処理粘土の最大軸差応力がセメント量と拘束圧に大きく依存し、セメント量の増加に伴って増加するという実測値の傾向を提案した構成式はうまく表現している。

4. まとめ 本研究により得られた結論を以下に示す。1) e - $\ln p$ 空間における破壊状態は直線で表すことができ、固結効果に応じて勾配が大きくなる。2) p - q 空間における破壊状態を結んだ線は固結効果の分だけ左側に移動すると仮定することができ、固結力を有する材料の非排水せん断特性の評価において固結力を表すパラメータの導入は有効である。

表1 材料定数

	標準圧密試験		p_r を導入	
	λ	κ	p_r (kPa)	M
0% 粘土	0.273	0.040	0	1.49
1% 粘土	0.314	0.037	8	1.49
3% 粘土	0.371	0.021	15	1.49
5% 粘土	0.509	0.015	47	1.49

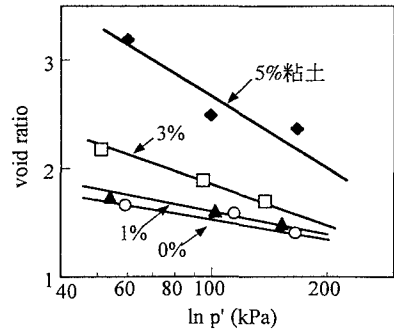


図4 e - $\ln p$ 空間における破壊状態

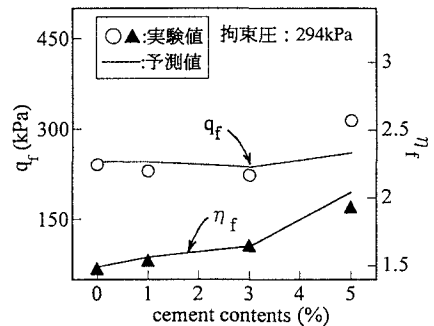


図5 破壊時の軸差応力と応力比

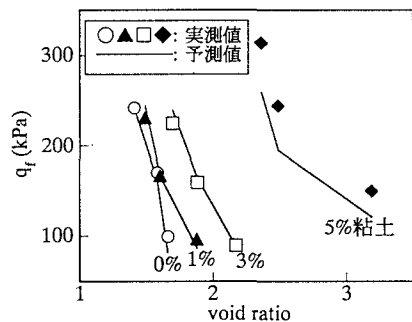


図6 破壊時の間隙比と軸差応力

【参考文献】

- 1) 富永ら (1996): 限界状態に着目した人工固結粘土の非排水せん断特性, 「第51回年次学術講演会講演概要集」, III-A73, pp.146-147. 2) Kasama, K. et. al., (1997): Experimental and Theoretical Study on the Mechanical Properties of Lightly Cemented Clay, China-Japan Joint Symposium on Recent Development of Theory & Practice in Geotechnology, pp.81-86. 3) Yasufuku, N. et. al., (1997): The dissipated energy equation of lightly cemented clay in relation to the critical state model, 9th IACMAG'97, Vol.2, pp.917-922.