

固結力に着目した粘土のストレスダイレイタンスー関係

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

1.はじめに 近年、生活基盤の拡大にともなって、自然堆積土や軟岩からなる地下空間の利用や人工処理土を用いた人工島や埋立地の開発が行われている。これら自然堆積土、軟岩およびセメント安定処理された人工処理土は、土粒子間が化学的作用により固結した地盤材料である。この固結力を有する地盤材料は固結力の増加により、剛性、降伏応力及びせん断強度が増加し、応力ひずみ関係が明確なピークを示す等の特性を有する¹⁾。また、比較的セメント量の少ない人工処理土では、拘束圧の影響を受けて強度・変形特性が変化するため、従来の改良地盤の設計で用いられているような一軸圧縮強さのみの評価では不十分である。

そこで、著者らは、このような固結力を有する地盤材料の強度・変形特性を簡明なモデルを用いて評価し、セメント改良地盤の変形挙動の予測に用いることを考えている²⁾。本文では、少ないパラメーターで構成される Cam-Clay モデルに固結力の成分を導入し、一連の室内実験結果を比較することによりその固結力項の導入の有用性を検討している。

2.固結力を考慮した内部消散エネルギー式

Cambridge グループは、1) e (間隙比) $-\ln p'$ (平均有効応力) 線形関係、2) 土の内部消散エネルギー式の仮定、3) 関連流れ則及び 4) 限界状態の概念の導入等により Cam-Clay モデルを導いている³⁾。以下は、内部消散エネルギー式に着目して考察を進める。Cam-Clay モデルの内部消散エネルギー式は次式で与えられる。

$$dW_{in} = p' M d\epsilon^p \quad (1)$$

ここで、 $d\epsilon^p$: 塑性せん断ひずみ増分、 dv^p : 塑性体積ひずみ増分、 M : 限界状態時の応力比、 p' : 平均有効応力である。この Cam-Clay モデルの内部消散エネルギー式は、限界状態 ($dv^p=0, q=Mp'$) における消散エネルギー式が、そこに至るまでのせん断全過程で成立するとしたものである。

次に、土粒子間に固結力が存在する場合を考えると、土粒子同士の摩擦として消散されるエネルギーだけでなく固結成分に対してなされるエネルギーがあるはずである。そこで、固結力を有する土の内部消散エネルギー式として次式を提案した。

$$dW_{in} = p' M d\epsilon^p + c_r d\epsilon^p \quad (2)$$

つまり、Cam-Clay モデルの内部消散エネルギーの第 1 項に加えて、固結力に関する項を加えた。この固結力に関する項はせん断変形によりエネルギー消散が起こるものとし、第 2 項の c_r を固結力の大きさを反映したパラメーターと考えた。このとき、Cam-Clay モデルで言うストレスダイレ

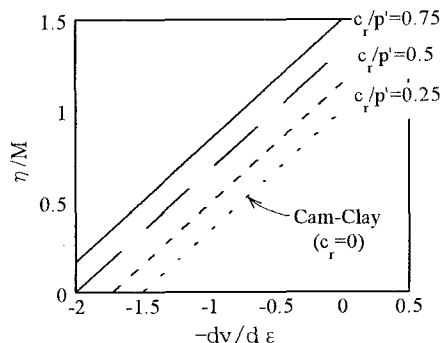


図1 提案式によるstress-dilatancy関係

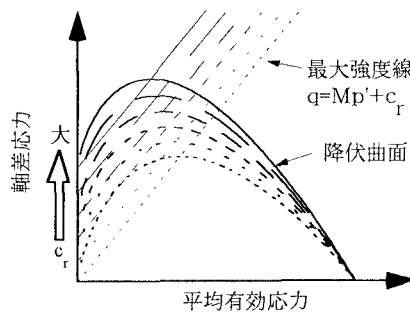


図2 降伏曲面と最大強度線

イタンスー関係を導くと次式のようにになる。

$$\frac{dv^p}{d\epsilon^p} = M - \eta + \frac{c_r}{p'} \quad (3)$$

式(3)は応力比 η だけでなく平均有効応力 p' と c_r を含むことから、拘束圧と c_r に依存したストレスダイレイタンスー関係を示すことがわかる。そこで、式(3)に基づき固結力を考慮したときのス

トレスダイレイタンスー関係を示したのが図 1 である。 c_r/p' が一定の時はトレスダイレイタンスー関係は傾き 1 の直線となり c_r/p' の大きさにより平行に移動する。また、一定の c_r を有し変形にともなう p' が増加する場合は、 c_r/p' が小さくなりトレスダイレイタンスー関係は Cam-Clay モデルのものに徐々に一致していくという特性を有する。続いて、直交則を仮定し降伏関数を求めたのが次式である。

$$f = \eta + M \ln \frac{p}{p_0} - c_r \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{p_0} \right) \quad (4)$$

ここで、 $c_r=0$ とすると式(4)は Cam-Clay モデルの降伏関数に一致する。図 2 には p' - q 空間における降伏曲面及び最大強度線を示す。この図より c_r を導入した降伏曲面は q 軸方向に拡大し、それとともない弾性挙動を示す領域が大きくなることがわかる。次に最大強度線に着目すると、Cam-Clay モデルの最大強度線が原点を通るのに対して、 c_r を導入したときの最大強度線はとその大きさの分だけ上方に平行移動する。つまり、内部消散エネルギー式に導入した c_r の値は p' - q 空間における最大強度線の切片の値として現れ、最大強度線は次式のように表される。

$$q_t = p' M + c_r \quad (5)$$

3.人工固結粘土による検証 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 0~10%混合した試料を供試体として用いている。詳しい作成方法は参考文献 4)を参照されたい。セメント混合量 0~5%の人工固結粘土を用いて p' 一定試験 (98kPa)を行って求めたトレスダイレイタンスー関係を図 3 に示す。セメント量によらずトレスダイレイタンスー関係はほぼ傾き 1 の直線であり、セメント混合量の増加により平行移動している。また、図中には式(3)を用いたトレスダイレイタンスー関係も示している。次にセメント混合量 0~10%を用いた圧密非排水三軸圧縮試験による p' - q 空間における最大強度線を示したのが図 4 である。この図より、人工固結粘土の最大強度線はセメント混合量 0%のものに平行でセメント混合量の増加により平行移動していることがわかる。以上の実験的な考察は固結

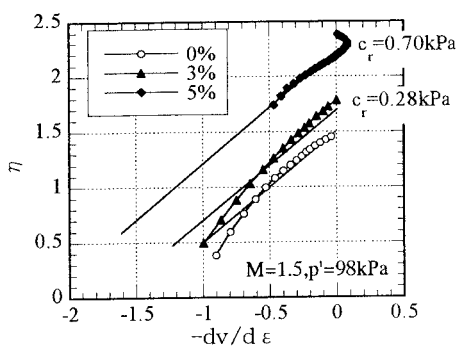


図3 stress-dilatancy関係 (実験結果)

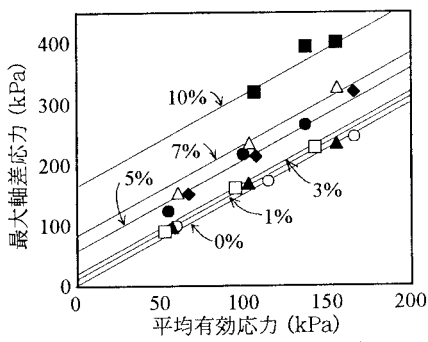


図4 p' - q 空間における最大強度

効果を導入した内部消散エネルギー式によるトレスダイレイタンスー関係及び最大強度線にうまく対応している。したがって、固結力を有する材料の内部消散エネルギー式には固結力に対応したエネルギー成分が存在し、変形が生じる場合には固結力に対してのエネルギーが消散されている。

4.まとめ 本文では、固結力を有する場合の土の内部消散エネルギー式の提案を行いその特性を示すとともに実験結果と比較しその有効性を検証した。得られた結果をまとめると以下のようなものである。固結力を有する材料は外力による変形を受けた際に、摩擦によるエネルギー消散だけでなく固結力に依存した成分を含む。したがって、固結力を有する材料の内部消散エネルギー式を考える場合、固結効果を反映する項を導入すべきである。

【参考文献】 1) Leroueil, S. & Vaughan, P. R. 1990: The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks, *Geotechnique* 40, No.3 : 467-488. 2) Kasama, K., Ochiai, H. & Yasufuku, N. 1998: A constitutive model of cemented geomaterials based on critical state concept, *Proc. 13th Southeast Asian Geotechnical Conference*, 337-342. 3) Schofield, A. N. & Wroth, C. P. 1968: *Critical state soil mechanics*, McGraw-Hill Book Company, New York. 4) 森嶋武宏, 落合英俊, 安福規之, 笠間清伸: 粘土の降伏曲面に与える固結力の評価, 「平成 10 年度土木学会西部支部研究発表会」, (投稿中)