

粘土の降伏曲面に与える固結力の評価

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

1. はじめに

軟岩、自然堆積粘土、セメント安定処理土は土粒子間に固結力を有する材料である。近年、これら固結力を有する材料で構成された地盤を対象とした地下開発やウォーターフロント開発が活発に行われている。特にセメント安定処理は、軟弱地盤の改良、廃棄物の有効利用などの観点から今後幅広く用いられることが期待される。そこで著者らは、そのような固結力を有する地盤材料の力学特性を定量的に把握することを目的とした研究を行っている¹⁾。本文では固結力を有する粘土の降伏曲面の考え方を提案し、人工的に固結力の程度を変化させた人工固結粘土を用いて圧密非排水三軸圧縮(CU)試験を行うことによりその有効性を検討している。

2. 固結力を考慮した降伏曲面

弾塑性理論に基づき土の構成式を構築する場合、外力による土の消散エネルギー式を考える必要がある。本文では粘土の特性を比較的簡明に表現できる Cam Clay モデルを基礎として理論式を提案している。通常摩擦材料として土を考える場合には、土粒子同士の摩擦によって生じる消散エネルギーのみの評価を行えばよいが、人工固結粘土を考える場合、摩擦によっ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を考慮する必要がある。そこで(1)に示すような内部消散エネルギー式を考えた。

$$dW_{in} = p' M de^p + c_f d\epsilon^p \quad (1) \quad p': \text{平均有効応力}, q: \text{軸差応力}, M: \text{最大強度線の勾配}$$

c_f : 固結力パラメータ, $d\epsilon^p$: 塑性せん断ひずみ

ここで直交則の仮定を用いることによって(2)の降伏曲面の式を得ることができる。

$$f = q + p' M \ln \frac{p'}{p_0} - c_f \left(1 - \frac{p'}{p_0} \right) \quad (2) \quad p_0: \text{圧密降伏応力}$$

この式は図1に示すような形状になる。図は M , p_0 一定で固結力パラメータ c_f だけを変化させたものである。図において最大強度線は縦軸 q の切片 c_f を有し、この勾配 M は c_f が増加しても一定で表現されている。ただし、ここでの最大強度線は軽い過圧密、および正規圧密状態におけるものである。

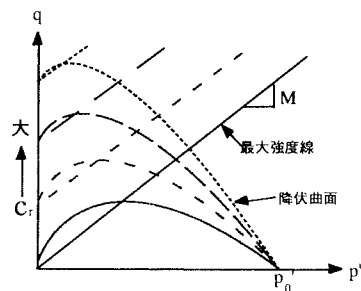


図1 降伏曲面と最大強度線

3. 実験結果に基づく固結力の評価

3.1. 人工固結粘土の作製方法

本研究において用いた試料は、425 μm ふるいを通させた有明粘土 ($\rho_s = 2.609 \text{ Mg/m}^3$, $W_L = 86.5\%$, $I_p = 51.3$) である。人工固結粘土を作製する際に、セメント量は粘土の乾燥重量に対して 0, 1, 3, 5, 7, 10% となるようにした。供試体の作製手順は、試料に所定の添加率となるようにポルトランドセメントをスラリー状にして加え、液性限界の2倍の含水比となるように調整した後、セメント量が 0, 1, 3% の供試体は自立が困難であるため、0.5 kgf/cm^2 の圧力をかけて作製した。また、セメント量 5% の供試体も同様の手順で作製した。この先行圧密の打ち切り時間はセメント 0% 試料を基準とした 3 t 法により決定し、全て 11 日間とした。その後、35 日間含水比を一定に保った状態で養生を行った。また、セメント量 5, 7, 10% の供試体については自立が可能であるため、モールドを用いて供試体を作製した。モールドを用いると初期間隙比を一定にそろえることができる。その後 28 日間養生を行った。養生が終了した後、人工固結粘土のせん断特性を把握するために CU 試験を行った。

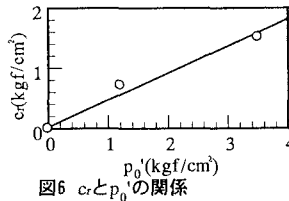
3.2. 人工固結粘土の降伏曲面

図2は p' - q 空間におけるセメント量ごとの最大強度線を整理したものである。図中には、先行圧密して作製した供試体とモールドを用いて作製した供試体の最大強度線の両方を示している。この図より供試体の作製方法によらず最大強度線は同じ勾配をもつことがわかる。したがって、セメント量が増加するにつれて最大強度線は上側に平行にシフトしていくと考えることができる。これは固結力の増加を意味しており、図1の結果と一致している。そこで、図2の縦軸 q の切片を c_r として考えることにより固結力パラメータとしてうまく特性を表現できる。以上よりセメント0%~10%粘土の平均をとって $M=1.50$ を得た。次に、図3に等方圧密で得られた e - $\ln p'$ 関係を示す。この図から、セメント0%~5%粘土については今回行った拘束圧下(1, 2, 3 kgf/cm²)では、すべて正規圧密状態であることがわかる。7%粘土については、拘束圧1 kgf/cm² では弾性域にあり、2, 3 kgf/cm² になると正規圧密状態にあることがわかる。10%粘土については、すべての拘束圧下において弾性域にあることがわかる。このことから、セメント量の増加と共に p_0' は増加することがわかる。以上のようにして M と c_r の決定を行い、適切な p_0' を与えて初期の降伏曲面を求めた。

図4は10%粘土について(2)式の理論式を用いて求めた初期の降伏曲面である。図中には非排水せん断時の応力経路も示している。図において理論式から求めた降伏曲面内においては、実験から得られた応力経路は p' 一定で q が変化している、つまり弾性的に変化しているとみることができる。したがって、セメント量の増加により、初期の降伏曲面は p' 軸と q 軸の両方に拡大していると考えられる。

以上より、図5に示すようにセメント量の増加と共に固結力 c_r が増加するだけでなく、 p_0' も増加していくという考え方をを用いると固結力を有する地盤材料の特性をうまく表現することができる。図6は、セメント0, 7, 10%粘土の c_r と p_0' の関係を示したものである。この c_r と p_0' の間には一義的な関係があることがわかる。

この c_r および p_0' の指標を把握することにより初期の降伏曲面および最大強度を推定することは可能であると考えられる。



4. 結論

本文における結論を以下に示す。

- 1) p' - q 空間における最大強度線の勾配 M は、固結力の増加に関わらず一定である。
- 2) 固結力の増加と共に固結力パラメータ c_r および p_0' は増加する。
- 3) 固結力の増加に伴う c_r および p_0' の指標を評価することにより、初期の降伏曲面および最大強度を推定することは可能である。

【参考文献】1) 笠間ら(1998) 限界状態に着目した人工処理粘土の固結力の評価 土木学会西部支部研究発表会

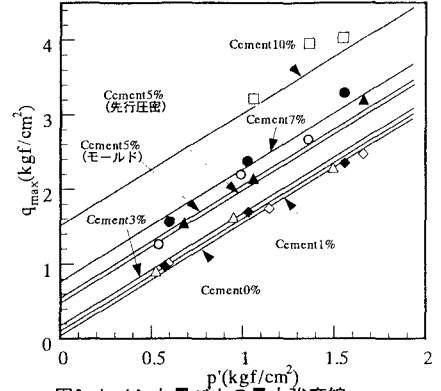


図2 セメント量ごとの最大強度線

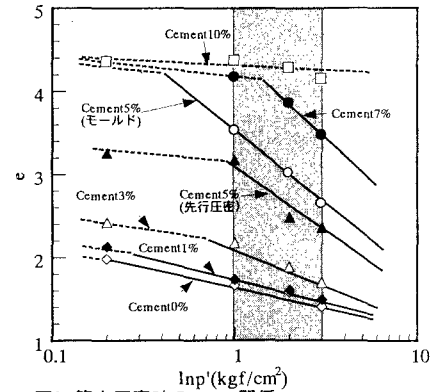


図3 等方圧密時の e - $\ln p'$ 関係

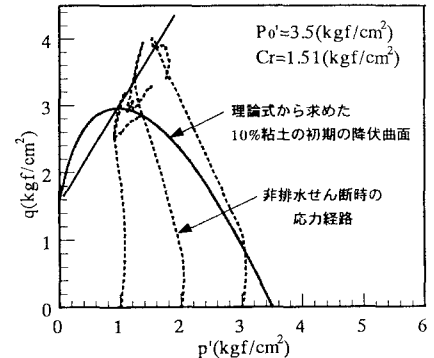


図4 10%粘土の初期の降伏曲面

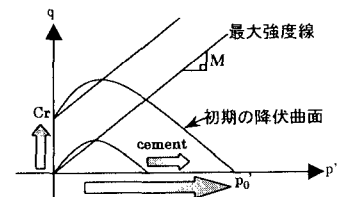


図5 固結力による初期の降伏曲面の拡大