

名古屋大学工学部 正会員 浅岡 顕
 名古屋大学大学院 学生会員 ○中野 正樹
 名古屋大学大学院 学生会員 小高 猛司

1. はじめに

破壊した後の土の挙動に関する従来の研究の中で、N. G. I. では¹⁾繰り返し荷重を受けた正規圧密粘土は、破壊状態に至ったとしても排水履歴を含むことによって、静的せん断強さは増加し、次の繰り返し荷重に対しても抵抗力が増加する、と報告している。また八木らは²⁾、三軸圧縮試験で10%の軸ひずみを与えた後、再圧密した供試体に対し非排水三軸圧縮試験を行った結果、ひずみ履歴を与えない試料より強度が大きくなることを示している。

そこで本研究では「破壊後挙動」のメカニズムを知るため、三軸試験を行った。試験方法は繰り返した正規圧密粘土を非排水せん断して破壊し、破壊直後軸変位を固定したまま境界を排水状態にして、24時間後再度排水コックを閉めて非排水せん断するというものである。研究の前半は、この実験の詳細を、特に破壊後の体積変化、その後の強度上昇などを、示す。また後半では、せん断過程を剛塑性有限要素法を用いた変形解析により、破壊後の排水（圧密）過程を微小変形弾性圧密解析によりこの「破壊後挙動」をシミュレートする。

2. 応力制御三軸圧縮試験による破壊後挙動³⁾

(1) 土試料とその調整方法

実験に用いた土試料は、「川崎粘土」で、神奈川県川崎市の川崎港の海底より港研が採取したものである。物理指数、さらに標準圧密試験より得られた圧縮・膨潤指数 λ 、 κ および圧密圧力 $\sigma_{vo}=3.2\text{kgf/cm}^2$ での透水係数 k を表2.1に示す。試料は $425\mu\text{m}$ のフルイにかけ、その通過分をスラ

表2.1 物理指数および標準圧密試験結果

G_s	2.737	λ	0.135
w_L (%)	50.5	κ	0.016
w_p (%)	24.7	k (cm/sec)	3.7×10^{-8}
I_p (%)	25.8		

リー状になるよう48時間繰り返す。その間含水比が約100%になるように蒸留水を加えて調節している。繰り返し終了後、真空ポンプを使って70mmHgの負圧で24時間脱気を行う。そして鉛直圧密圧力 2.0kgf/cm^2 、両面排水で1週間予備圧密する。以上のように調整された試料を直径3.5cm、高さ8.0cmの円筒供試体に成形する。

(2) 試験方法および結果

まず三軸供試体を圧密圧力 $p_o'=3.0\text{kgf/cm}^2$ （セル圧 5.0kgf/cm^2 、背圧 2.0kgf/cm^2 ）で24時間等方圧密する。そしてセル圧一定のもと、載荷速度 $\dot{q}=1.0 \times 10^{-3}\text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ で非排水せん断を破壊するまで行う。破壊直後、軸変位を固定して排水コックを開け供試体両端の境界の排水を許す。24時間後、排水コックを閉じ再び非排水せん断を同じ載荷速度で行うというものである。

試験結果として、(a)軸差応力-軸ひずみ、(b)間隙水圧-軸ひずみ、(c)排水量-排水時間、(d)軸差応力-排水時間、(e)軸差応力-平均有効応力（有効応力パス）関係を図2.1(a)~(e)に示す。まず図2.1(a)において、1回目のせん断開始直後（軸ひずみ $0 \sim 0.5\%$ ）、軸ひずみ ε_1 とともに軸差応力 q は直線的に上昇する。その後、軸ひずみ ε_1 が約5%になるまでは、上に凸の曲線を描く。軸ひずみが約5%から約11%までの q は直線的に上昇し続け、 ε_1 が約12.5%で破壊に至る。応力制御試験での破壊の定義は困難であるが、ここではせん断とともに増加する軸ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_1$ が急激に増加した時としている。そして1回目のせん断強度 q_{max1} は 3.30kgf/cm^2 であった。この時の変形の仕方は「ピア樽型」に変形し、卓越したせん断面は観察できず破壊に至っ

ている。また、この非排水せん断中の間隙水圧は供試体底部より測定しているが、図2.1(b)に示すとおりで、せん断開始直後は急激に間隙水圧が上昇し、その後もせん断とともに増加する。最大間隙水圧 u_{max1} は2.22 kgf/cm²となった。破壊直後、軸変位を固定して排水コックを開けると、破壊していても供試体内から排水が起り、軸差応力は時間とともに減少してゆく。排水過程の排水量と軸差応力の緩和の様子を、log tを横軸にとって図2.1(c)、図2.1(d)に示す。2つの曲線の形はともに上に凸である部分と下に凸である部分とからなり、その変曲点の時間がほぼ一致している。排水を許してから24時間後、再び排水コックを閉じ2回目の非排水せん断を行う。軸差応力-軸ひずみ関係は軸差応力 q が緩和した最下点 q_{min} から急激に立ち上がり、1回目のせん断強度 q_{max1} よりも大きな最大値 q_{max2} を示し、その傾きも1回目よりも大きくなる。また、間隙水圧は、2回目の破壊において最大間隙水圧 u_{max2} を示す。試験全体の有効応力パスを図2.1(e)に示す。破壊時の応力状態は1回目も2回目も原点を通る1本の直線上にのる。また2回目のパスは垂直に上昇し弾性的な挙動に似ている。ここで注目すべき値は強度比であり、破壊後のせん断強度は1回目のせん断強度の1.73倍にもなった。これは、1回目の非排水せん断によって正の過剰間隙水圧が発生し、それによつたとえ破壊していても排水が起り、比体積が減少し2回目のせん断強度が増加するためである。

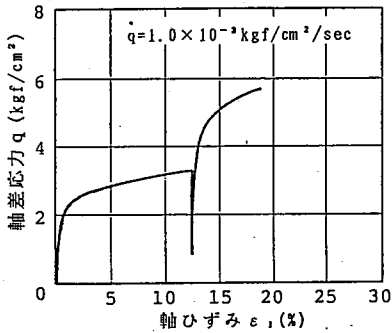


図2.1(a) 軸差応力-軸ひずみ関係

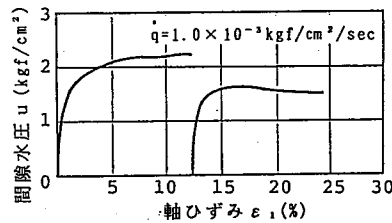


図2.1(b) 間隙水圧-軸ひずみ関係

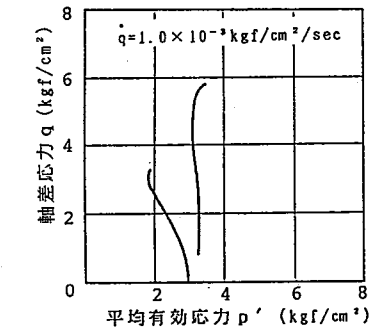


図2.1(e) 有効応力パス

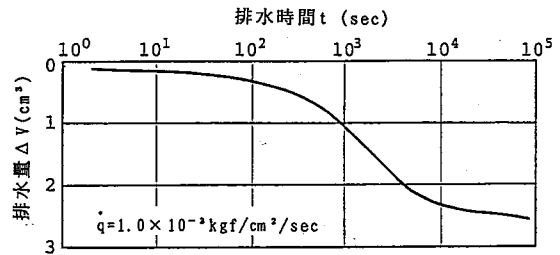


図2.1(c) 排水量-排水時間関係

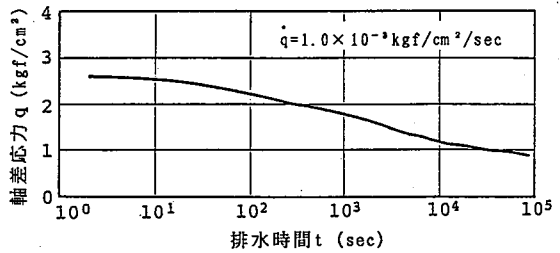


図2.1(d) 軸差応力-排水時間関係

表2.2 試験結果

載荷速度	(kgf/cm ² /sec)	1.0×10^{-3}
1回目強度	q_{max1} (kgf/cm ²)	3.30
1回目最大間隙水圧	u_{max1} (kgf/cm ²)	2.22
排水後軸差応力	q_{min} (kgf/cm ²)	0.78
排水量	ΔV (cm ³)	2.45
2回目強度	q_{max2} (kgf/cm ²)	5.70
2回目最大間隙水圧	u_{max2} (kgf/cm ²)	1.66
強度比	q_{max2}/q_{max1}	1.73
最大間隙水圧の比	u_{max2}/u_{max1}	0.74

3. 破壊後挙動実験の数値シミュレーション⁴⁾

2章で説明した「破壊後挙動」実験を次の3つの過程に分けて解析を行う。第1過程:正規圧密粘土が1回目の破壊に至るまでの過程。第2過程:軸変位固定下で破壊に伴い発生した過剰間隙水圧が完全に消散するまでの過程。第3過程:排水(圧密)後の供試体の2回目の非排水せん断過程。以上の3過程を具体的に以下のように解析する。

(1)第1過程:正規圧密粘土が1回目の破壊に至るまでの過程

実験では荷重速度が $\dot{q}=1.0 \times 10^{-3} \text{kgf/cm}^2/\text{sec}$ であり比較的大きいため、供試体内で水のマイグレーションはほとんど起こらないとして、全要素で非圧縮を仮定する剛塑性解析に適すると判断した。三軸供試体を強度定数 $q_{r0}=2.56 \text{kgf/cm}^2$ ($q_{r0}=\sqrt{3/2}\sigma_o$; σ_o はMises定数)を持つような均質Mises体として軸対称条件で剛塑性変形解析を行う。図3.1に第1過程の解析に用いる有限要素メッシュを示す。メッシュは供試体の1/4のモデルを表し、上端部を固定しての荷重を想定して、変位速度境界条件(上端の節点の変位速度を $\dot{u}_y=1.0$, $\dot{u}_x=0.0 \text{cm/sec}$ と設定する)で解析する。剛塑性変形解析では変形に伴いメッシュの更新を逐次行っていくが、本解析ではこの作業は、解析の結果得られる変位速度場に微小ステップ

$\Delta t=0.1 \text{sec}$ をかけることにより1微小ステップを軸ひずみで1.0cmおきに、すなわち軸ひずみにして2.5%おきに行う。軸ひずみ2.5%ごとという粗い間隔でも等体積条件は十分満足した。最後に間隙水圧の算出であるが、全応力つり合い解析に間隙水圧の場を連成させるために土-水連成式が必要となる。連成式はカムクレイモデルの非排水条件式 $p_{r0}' = p_o' \exp(-(1-\kappa/\lambda))$ を用いた。ここで λ は表2.1に示す標準圧密試験から、 p_o' は実験条件から $p_o=3.0 \text{kgf/cm}^2$ で与えられているので、 M, κ を強度定数 q_{r0} と $q_{r0}=M \cdot p_{r0}'$ の関係を満たすように与える必要がある。表3.1に第1過程の解析で用いた主なパラメータを挙げる。破壊時平均有効応力 p_{r0}' が連成つり合いを解いて求まると、破壊時過剰間隙水圧は要素ごとの全応力 p_{r0} を用いて $u_{r0} = p_{r0} - p_{r0}'$ で求まる。

解析結果として軸差応力-軸ひずみ関係を図3.2に示す。軸ひずみ2.5%おきに剛塑性解析を行うと、各ひずみで求められる軸差応力の値が一定の割合で増加するのがわかる。弾塑性パラメータ、強度定数は全く変えていないため、この解析値を結んだ直線の勾配は、2.5%おきのメッシュの更新つまり供試体がピア樽状に変形していく幾何形状の変化(geometry change)の効果のみを表している。また、これらの直線の勾配は実験で得られた応力~ひずみ曲線の直線部分(軸ひずみが約5%から11%付近までの部分)の勾配と等しくなっている。図3.3に実験での破壊時(軸ひずみ12.5%)の供試体内過剰間隙水圧分布を示す。過剰間隙水圧は極めて不均質に分布しており、不連続な千鳥状の分布形状になっている。

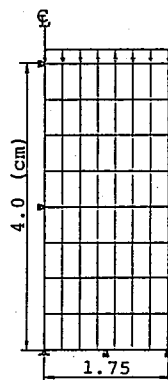


図3.1 有限要素メッシュ

表3.1 解析に用いたパラメータ(第1過程)

q_{r0}	2.56(kgf/cm ²)
λ	0.135
κ	0.088
M	1.2
p_o'	3.0(kgf/cm ²)

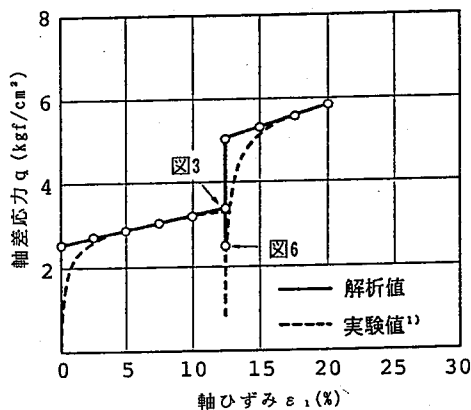


図3.2 軸差応力-軸ひずみ関係

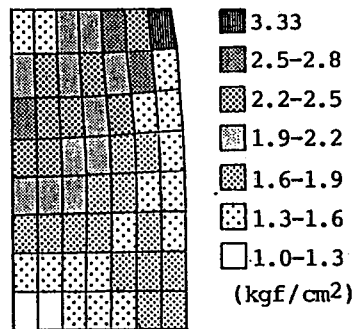


図3.3 破壊時過剰間隙水圧分布

(2)第2過程:軸変位固定下で破壊に伴い発生した過剰間隙水圧が完全に消散するまでの過程

第1過程で得られた過剰間隙水圧分布を初期値として、軸変位を固定したまま上端排水として過剰間隙水

圧が完全に消散するまで弾性圧密解析を行う。弾性定数(Laneの定数)は実験で得られた排水量 ΔV (表1参照)に一致するように与えたものである。また透水係数 k は標準圧密試験より得た(表2.1)。これらをまとめて表3.2に示す。メッシュは第1過程の最終ステップでの変形したものを用いる。解析の結果、各要素での比体積の変化 Δv_v が求められる。

表3.2 解析に用いたパラメータ(第2過程)

ΔV	2.45(ml)
v_0	1.883
$\bar{\lambda}$	34.24(kgf/cm ²)
$\bar{\mu}$	17.12(kgf/cm ²)
k	3.7×10^{-8} (cm/sec)

図3.4, 3.5はそれぞれ解析で得られた排水量および軸差応力の経時変化を示す。排水量の経時変化は弾性圧密解析により実験値をうまく説明している。しかし排水後の軸差応力 $q_{m.t.}$ は実験と解析でそれぞれ1.03、2.52kgf/cm²となっており、弾性圧密では軸差応力緩和の方はうまく説明できない。図3.6は圧密終了後の供試体内の比体積の分布図である。第1過程での過剰間隙水圧の分布を反映して非常に不均質になっている。

(3)第3過程：排水(圧密)後の2回目の非排水せん断過程

再び剛塑性変形解析によって再載荷をシミュレートする。その際各要素ごとに体積が変化しているために強度定数を各要素ごとに変更する。カムクレイモデルにおいて比体積が Δv_v 変化した場合、その要素の強度定数 $q_{r.}$ はもとの強度定数 $q_{r.0}$ を用いて次式で決定される。

$$q_{r.} = q_{r.0} \cdot \exp(\Delta v_v / \lambda) \quad (1)$$

結局この各要素の強度定数 $q_{r.}$ を用いて、不均質Mises体についての剛塑性解析を行う。なお、メッシュは第2過程の圧密後のものを用い、それ以後の変形に伴うメッシュの更新は軸ひずみ2.5%おきとする。

不均質な比体積をもつ各要素に対し、式(1)によって強度定数を与え直して剛塑性解析した結果、図3.2のように強度は上昇し1回目の破壊強度よりも大きくなり、実験値と一致する。また、図3.6に示す強度定数の分布で第1過程と同様に2.5%おきにメッシュの更新のみをして解析すると、解析値は実験で得られる応力~ひずみ関係に接近していく。応力~ひずみ曲線の勾配が第1過程より第3過程の方が大きい、解析値も全く同様の傾向を示している。

4. 考察

第1過程の解析より、軸ひずみの増加に従い軸差応力が上昇し続けるのは、粘土自身はcritical stateにあって物性は何も変わらないにも関わらず供試体の形状が変化(geometry change)していくために起こる現象であるといえる。第3過程での勾配が第1過程より大きくなる原因は強度定数が全体的に大きくなるからばかりではなく、供試体全体で強度が不均質になっている効果がかかりの要因をしめていることを別途確かめている。

5. 参考文献 1)N. G. I. (1975): Research project, repeated loading of clay: summary and interpretation of test results. Report 74037-9, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway. 2)八木則男、一本英三郎、榎明潔(1989): 一軸圧縮強度と非排水三軸強度の比較検討, 土木学会第44回年次学術講演会 pp. 454-455 3)中野正樹、浅岡頭(1992): 繰り返し正規圧密粘性土の非排水せん断後の強度回復に関する三軸圧縮試験, 第27回土質工学研究発表会 pp. 649-652. 4)小高猛司、浅岡頭(1992): 達成極限解析による飽和粘土の破壊後挙動実験のシミュレーション, 第27回土質工学研究発表会 pp. 657-658.

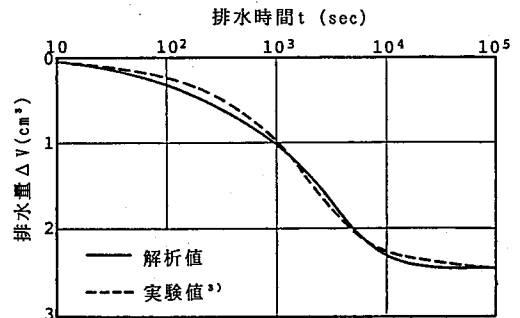


図3.4 排水量の経時変化

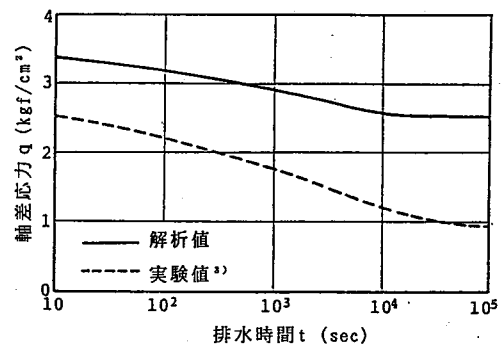


図3.5 軸差応力の経時変化

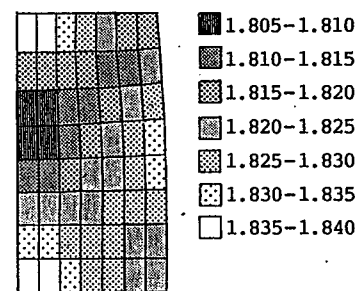


図3.6 圧密後の比体積分布