

過圧密粘土の進行性破壊の実験と解析

名古屋大学工学部 (正) 浅岡 顕・中野正樹・野田利弘
 名古屋大学大学院 (学) 金田一広

1. はじめに

強くせん断されている超過圧密粘土が吸水を受けたときに示す進行性破壊の様子を、3軸試験機を用いた実験および下負荷面¹⁾リカムクレイモデルを用いた水～土連成有限変形計算²⁾によって調べた。

実験では繰り返した川崎粘土から等方圧密、除荷によって作った過圧密比 18 の超過圧密粘土供試体を用いた。この供試体に(1)境界非排水条件下で載荷した後、(2)荷重系を一定に保ちながら排水コックを開けるこの2種類の過程を与えると、供試体は(2)の過程で吸水を伴って軸ひずみ速度が増減³⁾し、「滑っては止まり」を繰り返して破壊した(進行性破壊)。

計算ではこの様子を上下・軸対称と平面ひずみの2種類の条件を仮定して行ったが、後者の条件の場合、実験と同様の現象を観察した。

2. 排水条件下での載荷重一定放置試験に見られる進行性破壊

図1の軸差応力～軸ひずみ関係において○印は、過圧密粘土供試体(直径3.5cm×高さ8cm)に側圧98kPa、軸ひずみ速度0.0035%/minで十分にゆっくりと載荷した定率ひずみ制御排水試験の結果を示す。この排水試験で得られた排水強度を参考に本章では、はじめに(1)この供試体の排水強度より大きい荷重まで荷重制御の非排水条件下で載荷し、次に(2)この荷重を一定に保つと同時に排水コックを開けて、供試体の吸排水条件下での挙動を調べた(●印)。ここで非排水時の載荷速度は3.68kPa/sec(3.75×10⁻²kgf/cm²/sec)、一定荷重は725.2kPa(7.4kgf/cm²)、側圧98kPaとした。この様子を図2～図5に示す。供試体は約5時間吸水を伴い

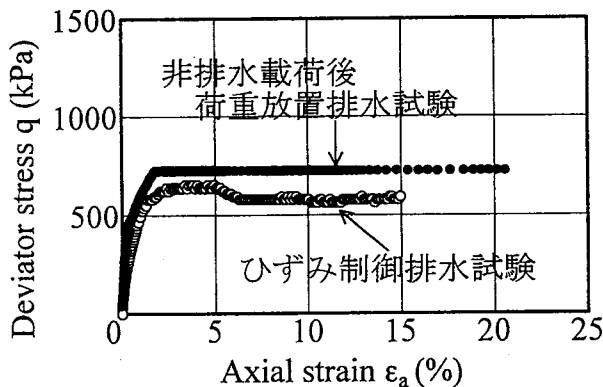


図1 軸差応力～軸ひずみ関係

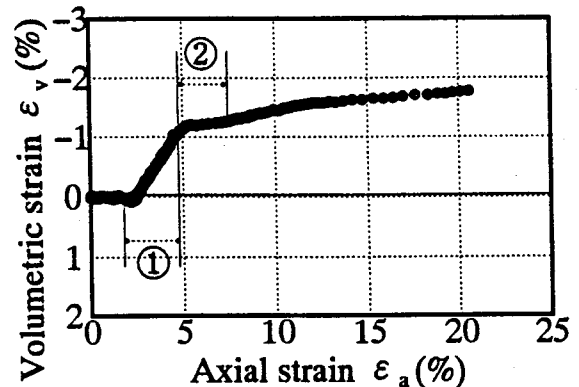


図2 体積ひずみ～軸ひずみ関係

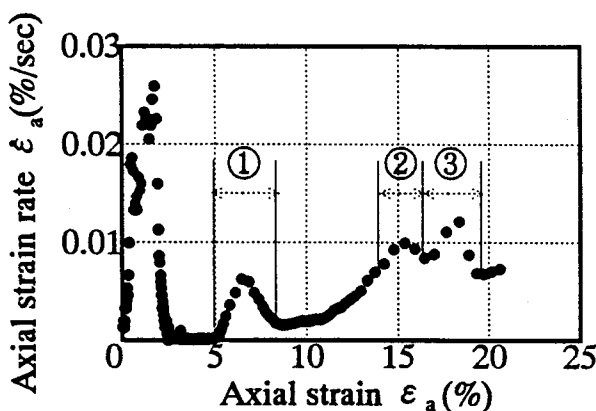


図3 軸ひずみ速度～軸ひずみ関係

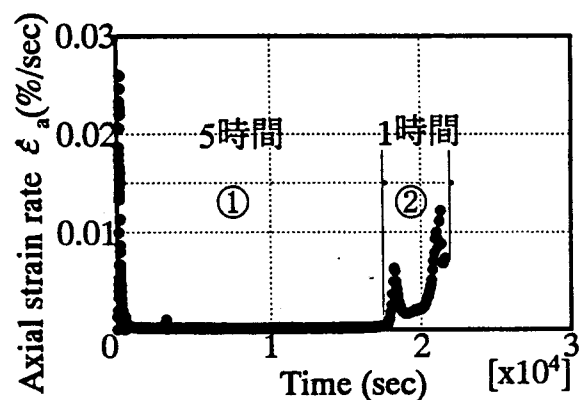


図4 軸ひずみ速度の経時変化

Progressive failure due to swelling of heavily overconsolidated specimen, Experiment and its Simulation : Asaoka, A., Nakano, M., Noda, T. and Kaneda, K. (Nagoya University)

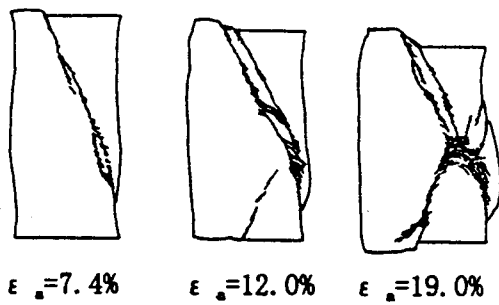


図5 供試体の変形/破壊のスケッチ

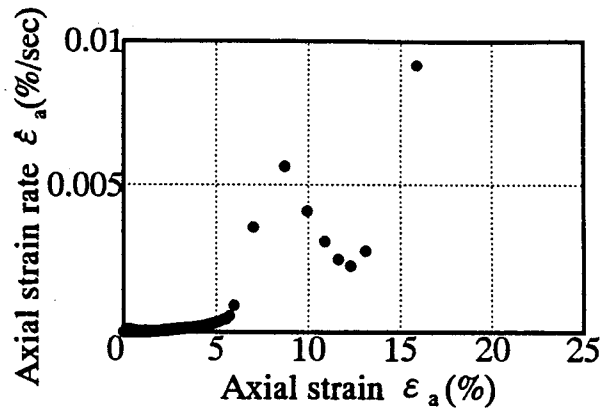


図6 単調排水せん断の軸ひずみ速度の変化

つつわずかに軸ひずみが増え続けたが、その後約1時間の間に軸ひずみ速度の増減を3回繰り返し、いわば「滑っては止まり、また滑っては止まり」しながら破壊に至った。

一定荷重下で排水条件にすると、はじめわずかに供試体から排水するが、その後徐々に吸水してゆく(図2①)。軸ひずみ5%に達するまではほぼ一定の小さな軸ひずみ速度(図4①)と吸水速度で、実に約5時間(正確には18140秒)もの時間を要した。軸ひずみが5%あたりになると、供試体にせん断帯が発生し、7%にかけて成長した(図5)。軸ひずみ6%付近では、軸ひずみ速度が急激に増え、その後衰え、1回目の極大値0.0063%/secを示した(図3①)。吸水速度はこの頃から大きくなる。図2②に示すように、1回目の極大値の直前ではほとんど吸水していないが、その後吸水を再開する。その後軸ひずみが増加するとともにわずかながら吸水するが、軸ひずみ12%あたりから2番目のせん断帯が最初のせん断帯と交差するように発生する(図5)。同時に軸ひずみ速度は増え始め、軸ひずみ15%あたりで2回目の極大値0.010%/secを迎え(図3②)、さらに18%あたりで3回目の極大値0.012%/secを示す(図3③)。図4②より3回の軸ひずみ速度の増減を示し破壊するまでにわずかに1時間でしかない。

以上は、荷重系を一定にした場合について、供試体が軸ひずみ速度を増減しながら破壊に至る現象が観察されたのであるが、実は載荷速度の遅い過圧密粘土の荷重制御排水3軸圧縮試験でも得られていた(図6)。

また、図1の○印でわかる排水強度よりも下側の荷重で放置した場合は、吸水量は少なく、破壊には至らなかった。

3. 計算条件と計算方法

2. で示した実験を有限要素計算で解析するために、①上下・軸対称条件を仮定した1/4断面供試体(横1.75cm×高さ4cm,境界条件も含め図7)と、②全断面の平面ひずみ供試体(横12cm×縦36cm,上下端に摩擦有、図省略)を用い、上記と同じ(1)と(2)の載荷過程を与えた。ここで、剛摩擦有りのペダスタルを介して供試体に荷重を伝達する荷重制御の計算方法の詳細は文献4)に示すが、供試体上端が常に水平に保たれ、しかも摩擦があるようにこの境界面の節点の速度場に制約条件を課し、中心軸に鉛直から下向きに集中荷重を与えて計算した。計算に用いた定数は上記の室内試験から得られたものを参考に決めた(表1)。

圧縮指数 λ	0.131
膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.016
限界状態定数 M	1.53
ポアソン比 ν	0.3
先行圧密圧力 p'_0 (kPa)	1764
比体積 at p'_0	1.59
過圧密比	18
下負荷係数 $\nu_2^{(1)}$	10
透水係数 k (cm/sec)	3.7×10^{-8}

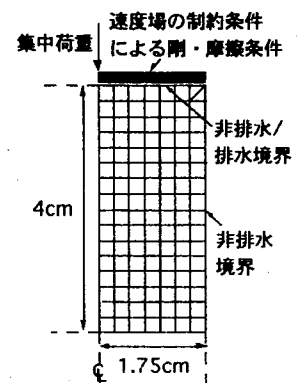


図7 有限要素メッシュ (軸対称条件)

4. 計算結果

①軸対称条件下での挙動: 4種類の荷重を選んで載荷した(荷重速度はいずれも 6.6×10^{-2} kPa/sec)。その大きさと荷重一定放置後吸水終了までの時間を合わせて表2に示した。図8~図12に供試体を「エレメント」と見なして整理した見かけの挙動を示す。図8と図9にはひずみ制御排水試験の計算結果も

case	一定荷重 (kPa)	吸水時間 (min)
1	1120	1140
2	840	1944
3	686	2230
4	560	480

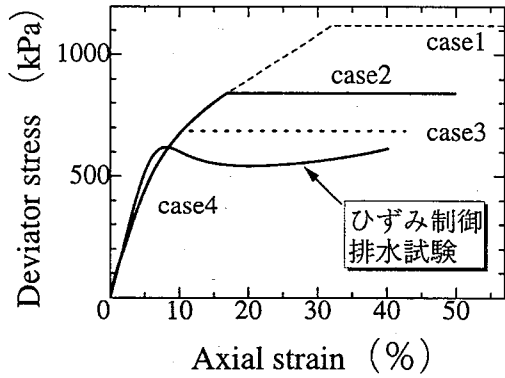


図8 軸差応力～軸ひずみ関係

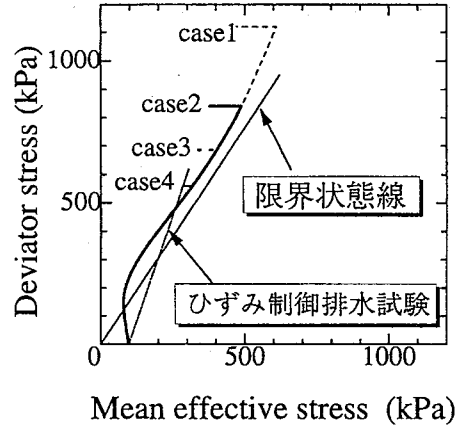


図9 有効応力経路

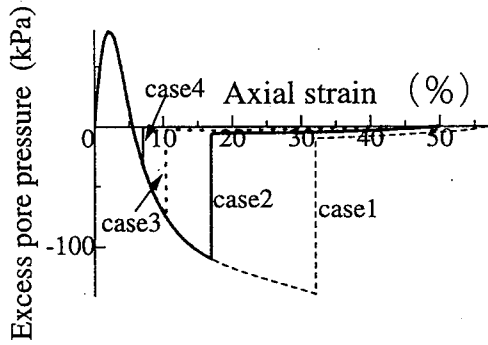


図10 過剰水圧～軸ひずみ関係

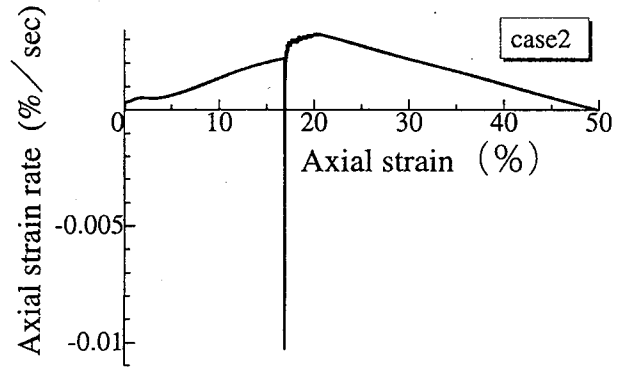


図12 軸ひずみ速度～軸ひずみ関係

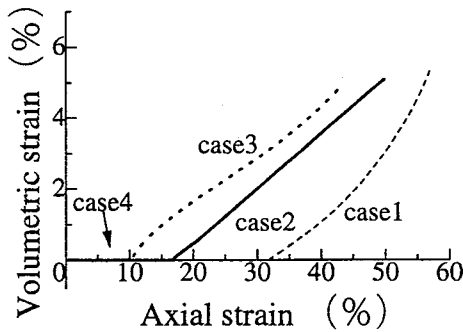


図11 体積ひずみ～軸ひずみ関係

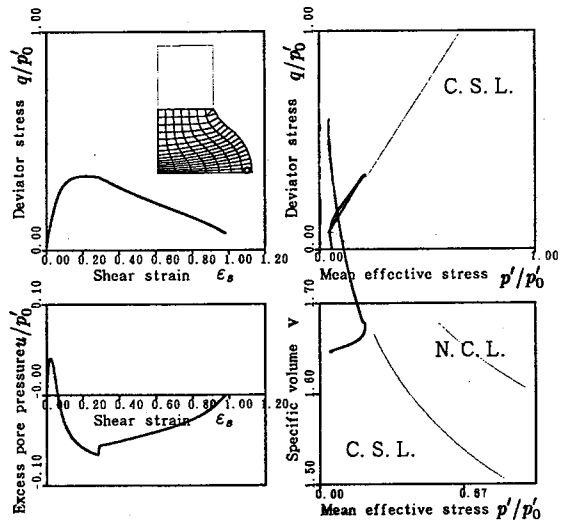


図13 内部の典型的な要素の挙動(吸水軟化)

示すが、この試験の排水強度（「残留状態」）よりやや上で荷重を一定に放置すると、供試体は吸水に伴い（図10）軸ひずみが進行し、供試体上端部の要素の平均過剰水圧はすぐにはゼロにならない。また、図12に case2 の、試験全体を通しての軸ひずみ～軸ひずみ速度関係を示すが、荷重を一定に放置すると一瞬軸ひずみが逆向きに進行し、再度反転して(1)の非排水載荷時よりも早く軸ひずみが進んだ。一瞬逆向きに軸ひずみが進むのは供試体内部で部分的に弾性状態になっている時に吸水膨張するからで、その後弾性状態の要素も進行的に塑性化してゆき、軸ひずみが反転したときには全体が塑性化(吸水軟化)した。図13に case2 の供試体側方中央部の要素の挙動を示す。大きく吸水軟化している。しかし、この場合上記の実験における荷重放置後の軸ひずみ速度の増減は観察されなかった。

②平面ひずみ条件下での挙動： 図14と図15に供試体の見かけの挙動を示す（非排水載荷の荷重速度は58.6kPa/sec）。この場合は荷重を一定に放置した時点で、上（下）端境界の要素の平均過剰水圧がまだ正であったため、一旦排水した後吸水する。荷重放置後すぐに負の過剰水圧に転じ、また軸ひずみが約35%を越えたところで負の過剰水圧が発達・減衰し、実験と同様に軸ひずみ速度が増減した（図15）。この負の

過剰水圧の発達時の有限要素メッシュ図を図 16 に示すが、せん断面の進展とともに負の過剰水圧が発達したことが分かる。図 17 と図 18 にはそれぞれ供試体内部でもっともせん断ひずみが局所化した部分とそうでない要素（それぞれ図 16 の点 A, B）の挙動を示すが、図 17 では吸水軟化が大きく生じている。

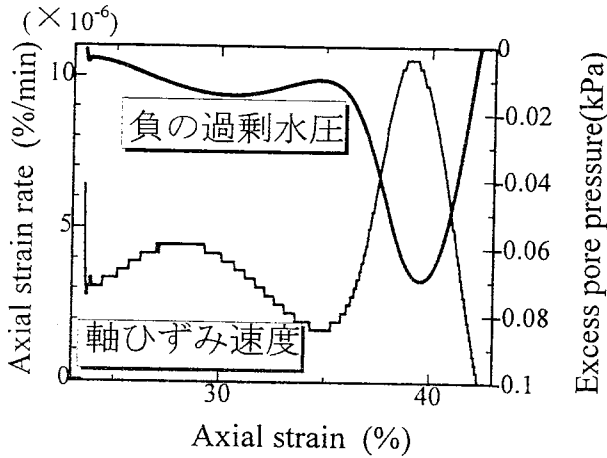


図 14 軸差応力～体積ひずみ～軸ひずみ関係

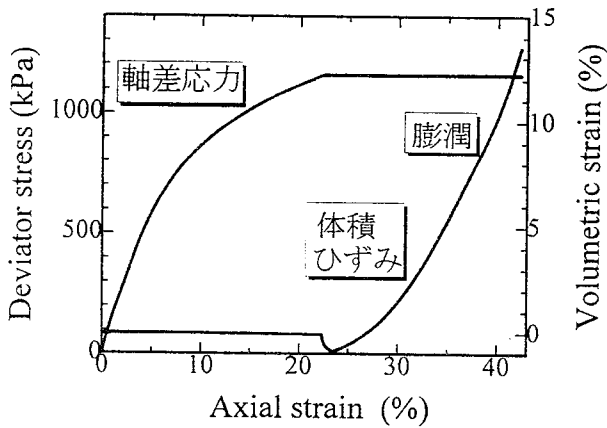
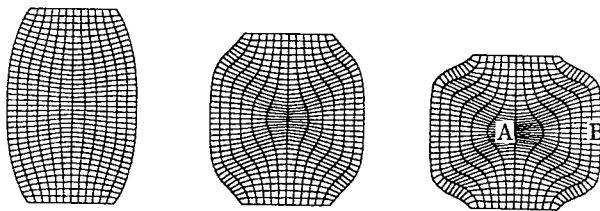


図 15 軸ひずみ速度～過剰水圧～軸ひずみ関係



軸ひずみ 27% 軸ひずみ 35% 軸ひずみ 42%

図 16 供試体の変形の推移

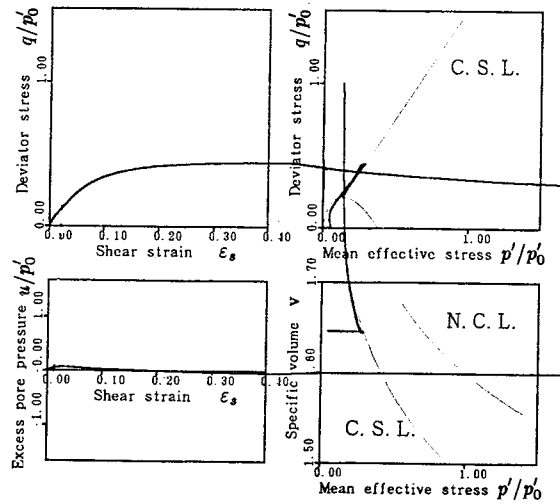


図 17 局所化部分(中央付近)の要素の挙動

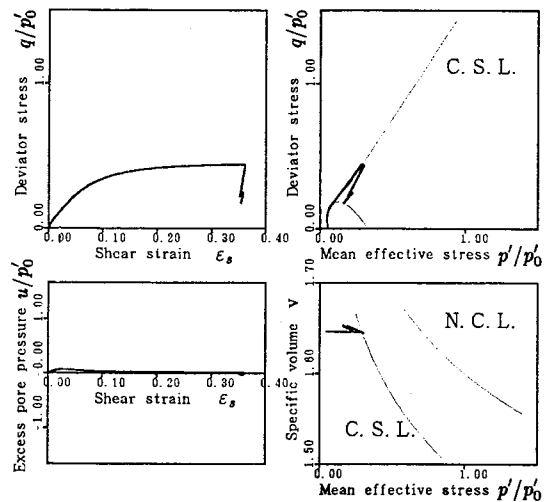


図 18 局所化部分以外の要素の挙動

5. おわりに

供試体が吸水を受け続ける過程で、内部にはせん断ひずみが局所化した部分がまず現れる。この部分でのせん断ひずみの発達とともに負の過剰水圧が発達するが、ダルシー則に従って間隙水が供給され、せん断ひずみがさらに局所化する。このような局所化付近での負の過剰水圧の発生と間隙水の供給の繰り返しによって、供試体全体の挙動が大きく支配され、実験でも供試体は「滑っては止まる」挙動を繰り返したものと考えられる。

参考文献 (1) Hashiguchi, K. (1989) : Subloading surface model in unconventional plasticity, Int. J. Solids & Struct. (2) Asaoka, A. et al. (1996) : Soil-water coupled behaviour of heavily overconsolidated clay near/by critical state, S&F, to appear. (3) Ter-Stepanian, G. (1977) : Equations of long-term creep of a clay during shear, Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., Tokyo. (4) 浅岡ら (1996) : 速度場に制約条件を与えて得られる荷重/変位境界条件とその応用、第 31 回地盤工学研究発表会。