

PDF issue: 2025-07-09

過圧密粘土の吸水軟化による正規圧密粘土化現象の 検証

安原, 昇平

吉富,力

河井, 克之

飯塚, 敦

(Citation) 神戸大学都市安全研究センター研究報告,17:49-60

(Issue Date) 2013-03

(Resource Type) departmental bulletin paper

(Version) Version of Record

(JaLCDOI) https://doi.org/10.24546/81011408

(URL) https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011408



過圧密粘土の吸水軟化による正規圧密粘土化現象の検証

Verification of argillic normally consolidated to rely on softening

due to water absorption of overconsolidated clay

安原 昇平¹⁾ Syohei Yasuhara 吉富 カ²⁾ Tikara Yoshitomi 河井 克之³⁾ Katsuyuki Kawai 飯塚 敦⁴⁾ Atsushi Iizuka

概要:2009 年 8 月 13 日, 駿河湾沖を震源とした地震により, 東名高速・牧ノ原 SA 付近の盛土が崩壊した. 盛土 崩壊の原因として,考えられるのが盛土本体内部への間隙水浸入による構造劣化である. しかしながら,本来, 盛土は D 値管理の下で高度に締め固められており,透水性が極めて小さいため,通常の状態では水の浸入と構造 劣化が起こるとは考え難い. 牧ノ原での盛土崩壊は,そのような常識を覆すものであった.

牧ノ原に見られるような低透水性の締固め土構造物は、単調な一方向荷重の下では、高剛性、高強度を発揮しう るが、繰り返しせん断によって、局所的なダイレタンシー膨張により間隙負圧が発生し、締固め土内部への間隙 水の浸入による正規粘土化メカニズムが予見される.このような材料力学的な局所挙動は、従来全く気付かれて いなかった現象であり、過圧密粘土のせん断特性の把握は急務であると考えられる.

よって、本研究では、スマート三軸試験装置による三軸繰り返し非排水せん断試験および吸水試験から過圧密粘 土の正規圧密粘土化現象の把握を含めた繰り返しせん断特性の検証を行っていく.さらに、スマート三軸試験装 置による各種試験の実測値と有限要素解析による理論値から、過圧密粘土の繰り返しせん断特性についてさらな る考察を深めていく.

キーワード:正規粘土化現象 三軸繰り返しせん断試験 吸水軟化 有限要素解析

1. はじめに

2009 年 8 月 13 日, 駿河湾沖を震源としてマグニチュード 6.5 の地震が発生した. この地震によって, 東名高速・ 牧ノ原 SA 付近の上り線の高速道路盛土が高さ約 28m, 長さ約 80m, 延長約 40m にわたり崩壊した¹⁾. このよう な牧ノ原での盛土崩壊は, 従来の常識を覆すものであり, 原因の究明が急務である. この崩壊の原因として, 一 つの仮説が考えられる. 「盛土本体内部への雨水侵入により, 盛土構造物が局所的に正規圧密粘土化を発現し, 強 度が低下, 地震動に耐えられず盛土崩壊が引き起こされた」というものである. しかしながら, 本来, 盛土は D 値管理の下で高度に締め固められており, 透水性が極めて小さいため, 通常の状態では水の浸入や構造劣化が起 こるとは考え難い.

この要因として、以下のメカニズムが予見される、牧ノ原に見られるような低透水性の締固め土構造物は、単

調な一方向荷重の下では、高剛性、高強度を発揮しうるが、繰り返しせん断によって、局所的なダイレタンシー 膨張により間隙負圧が発生し、締固め土内部への間隙水の浸入を促し、正規圧密粘土化に至ったというものであ る(図-1.1). 高速道路盛土の場合、不等沈下や盛土基盤の沈下などによって、せん断荷重履歴を受け、局所的な ダイレタンシー膨張が発現し、間隙水の浸入による道路盛土の局所劣化が引き起こされる可能性が十分にある. 実際、牧ノ原地区の盛土構造物は沢を埋めるなど水の集まりやすい地

天体、(ス) からとの 単二体 と 物に かと この な こ への 来 よ う (す) から
形条件に 造成 された 背景に 加え、 台風 9 号の影響により 震災前日には
連続雨量が 55mm、 地震当日には連続 13mm の降雨量があった。

過圧密盛土は良質な地盤上に善良な施工管理で構築され,水の浸 入がなければ,建設後,強度が増すと考えられている.しかしながら, 今回の地震では建設当時は健全であった盛土材が劣化していたこと が判明している.もし,盛土崩壊の仮説が正しければ,このような材 料力学的な局所挙動は,従来全く気付かれていなかった現象であり, 経年劣化が懸念される盛土は全国で 2000 箇所に上ると言われている. これらのことからも「牧ノ原盛土は間隙水侵入による局所的な正規圧 密粘土化に起因し崩壊した」という仮説の検証が急務であると考えら れる.



過圧密状態

正規圧密状態

図-1.1 正規圧密粘土化メカニズム

本研究では、スマート三軸試験装置を用いて、「牧ノ原盛土は間隙水侵入による局所的な正規圧密粘土化に起因し 崩壊した」という仮説の正否を検証していくことを目的とする.また、同時に過圧密粘土の繰り返しせん断特性 の把握を進めていく.三軸繰り返し非排水せん断試験から、高速道路盛土の不等沈下や盛土基盤の沈下によるせ ん断荷重履歴の再現を行い、ダイレタンシー膨張による間隙負圧の発生等、繰り返しせん断による過圧密粘土の せん断特性を把握する.また、間隙負圧が発生し、粘土内部への間隙水の浸入を促す状態で、吸水試験を行うこ とにより過圧密粘土の降伏応力の変化から正規圧密粘土化の検証を行う.さらに、有限要素解析による理論値と スマート三軸試験装置による各種試験の実測値を比較することにより、過圧密粘土の吸水による正規圧密粘土化 および過圧密粘土の繰り返しせん断特性についてさらなる検討ならびに考察を行う.

2. 試験装置

2.1 スマート三軸試験装置

本研究で使用した三軸試験装置(スマート三軸試験装置)は、デジタル制御による高精度・高分解能リニアア クチュエーターを用い、Alan.W.Bishop, D.J.Henkel が使用した装置²⁾を参考にして、小林・中山・太田により開発 された、三軸セル、側圧載荷機構、背圧載荷機構等の主要構成要素が極めてシンプルな三軸試験装置である. この試験装置は、要求される精度、安定性を確保するために信頼性の高い荷重計・圧力計・変位計が使用され、 軸圧 σ_a 、側圧 σ_r , 間隙水圧 u を自由に制御できる.また、本研究では使用していないが、間隙空気圧載荷機構を 組み込むことで、間隙空気圧を制御することもできるため、不飽和土を対象とした三軸試験も可能な装置である. σ_a 、 σ_r 、uの制御はリニアアクチュエータ応用機器により行い、試験プロセスの設定や制御は PC 及び PLC(Programmable Logic Controller)により行うことで、試験装置操作の経験や熟練を必要としない装置となってい る.スマート三軸試験装置の概略図を図-2.1 に示す.



図-2.1 スマート三軸試験装置の概略図

2.2 試験手順

スマート三軸試験装置を用いて,以下の手順で試験を行った.

(1) 試験前準備

端面ろ紙,側面ろ紙,ポーラスストーンを浸水脱気しておく.

間隙水圧ポンプ及び側圧ポンプをマニュアル運転により昇降させることで、シリンダー内および各ポンプと三 軸試験装置をつなぐシンフレックスチューブ内を全て脱気水で満たし、間隙水圧および側圧の原点を設定する.

(2) 供試体の設置

下から、ポーラスストーン→ナイロンメッシュ→供試体→ナイロンメッシュ→ポーラスストーンの順に積み上 げ、側面ろ紙を巻き、メンブレンをかぶせる. 慎重に供試体をペデスタル上に設置し、供試体設置過程 (PC 操作) により、キャップを供試体に設置させる. 供試体の上部及び下部のメンブレンを O リングにより、キャップ及び ペデスタルに固定する.

(3) 耐圧セルの設置

耐圧セルの上盤及び下盤の O リングに粘土などが付着していないことを確認した後, 耐圧セルをゆっくりとか ぶせ, ネジで固定する. セル上部の空気孔を閉じた後, 三軸セル給排水ポンプを用いてセル水を入れ, セル内を 完全に水で満たす.

(4) 予圧密

載荷初期における供試体の安定性を高め、かつ気泡の混入による間隙水圧測定の誤差を小さくするため、試験の開始前に小さい圧力で予圧密を行う。

(5) 供試体の飽和

①背圧変位制御

背圧ポンプが上昇し,供試体下端から上端へ通水が行われる. 2cc/minの通水速度で 10cc 以上通水する.

②背圧減圧制御

供試体に二重負圧を与えながら通水することで,供試体の飽和度を高める.ここで,二重負圧とは,供試体 に負圧を与えると同時に有効応力が一定となるようにセル内も負圧にする制御である.間隙水圧-40kPa,有効応 力 10kPa の制御を行いながら,デガッサを経由して脱気された脱気水を供試体下部から供給し,供試体上部に 排水する.また,背圧減圧制御を行うと背圧ポンプ内に空気が入るため,通水終了後にマニュアル運転により 背圧ポンプ内の空気を外部に排出する.

③背圧載荷

供試体に背圧を与え、供試体内の気泡を潰して供試体の飽和度を高める. 有効応力 10kPa の制御を行いなが ら、背圧 100kPa を載荷する.

(6) B値計測

側圧を 10kPa 載荷し、1 分後に除荷する. 載荷した際の 10kPa の側圧の変動に対して、間隙水圧がどれだけ変動 したかをコンピュータ内で計算され、B 値が算出される.

(7) 等方圧密

過圧密粘土は表-2.1 に示す圧密圧力で7段階目まで段階載荷を行った後,11段階目まで段階除荷し,11段階目 終了後にせん断過程に入る.11段階目まで段階除荷した供試体は圧密先行応力が800kPa,現応力が100kPaとな り、OCR=8.0の過圧密粘土である.

み-2.1 圧出に力(過圧出相工)											
段階	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
p'(kPa)	20	40	80	160	320	640	800	640	320	160	100

表-2.1 圧密圧力(過圧密粘土)

圧密時間は、3t法に基づき、確実に1次圧密が終了している時間を決定した(土田(1983))³⁾. 以下に3t法による圧密時間の決定手順を記述する.

①横軸に圧密時間 t の対数 logt, 縦軸に圧縮量をとり, グラフを描画する.

②グラフの最急勾配線(maximum grade line)と横軸の交点を t_r とする.

③ 3*t*_rから最急勾配線の平行線を引き、グラフとの交点における圧密時間 *t*_E を、確実に1次圧密が終了している 圧密時間とする.

(8) 圧縮せん断

圧密終了時の圧密圧力を拘束圧として、軸ひずみ速度 0.05%/min として最大軸ひずみ 15%までせん断を行う. 軸ひずみが 15%に達すると、制御により自動的にせん断が終了する.本試験装置の三軸繰り返し非排水せん断試 験は、三軸非排水せん断試験と同様の制御を繰り返すことで行う.圧密終了時の圧密圧力を拘束圧として、軸ひ ずみ速度 0.05%/min として、過圧密比に対応した軸ひずみを入力し、圧縮せん断を行う.その後、再び圧縮せん 断時の軸ひずみを入力し、伸張せん断を行う.これを繰り返すことにより片振幅の繰り返しせん断試験とする (9)吸水

本試験に用いるスマート三軸試験装置では背圧ポンプによって常に背圧 =100kPa の圧が載荷される仕組みには なっていない.つまり、供試体の上下に繋がる排水バルブを開けることで、吸水をすることができない.そこで、 本試験では背圧ポンプを再び上昇させ、元の背圧 =100kPa をかけることで吸水とした.吸水中は側圧一定とし、 吸水に伴い、軸圧のみ変化することができるようになっている.

3. 試料

本研究の各種三軸圧縮試験には、全てカオリンクレーから作製された供試体を使用する. 試料の基礎的物性を 把握するため、密度試験、液性・塑性限界試験、粒度試験を行った. その結果、カオリンクレーの土粒子密度は $\rho_s = 2.71(g/cm^3)$ 、液性限界、塑性限界、塑性指数はそれぞれ $w_p = 44.2\%$, $w_L = 26.9\%$, $I_p = 17.3$ と求められた.

4. 過圧密粘土の繰り返しせん断特性

本章では、スマート三軸試験装置を用いて、過圧密粘土の三軸繰り返し非排水せん断試験、さまざまな条件下 における吸水試験、三軸繰り返し非排水せん断試験および吸水試験における正規粘土化現象の検証を行い、過圧 密粘土の繰り返しせん断特性を把握することを目的とする.

4.1 三軸繰り返し非排水せん断試験

スマート三軸試験装置を用いて、過圧密粘土の三軸繰り返し非排水せん断試験を行う. 本試験により、過圧密粘土の繰り返しせん断特性を、せん断挙動や過剰間隙水圧の発現から考察していく. さらに、次章で行う吸水試験について、本試験結果より吸水を行うタイミングも決定する.

(1) 試験結果

① *p'*-*q* 図から,繰り返しせん断により有効平均主応力と軸差応力が減少しており,10回目圧縮せん断後には,限 界状態線に非常に接近していることがわかる.また,伸張せん断の影響により,2回目以降の圧縮せん断は1回目 圧縮せん断の有効応力経路と違い,軸差応力が-140kPa 付近から始まっていることがわかる.

② $\varepsilon_a - q$ 図から,繰り返しせん断により徐々に軸差応力が低下していることがわかる.軸差応力低下の傾向として,繰り返し回数 1~4回目までは徐々に減少しているが,繰り返し 5回目以降は低下が滞り,同等の値に落ち着いている.

③ $\varepsilon_a - u$ 図から、1回目圧縮せん断後には間隙負圧が発生しているのに対し、2回目以降の圧縮せん断後では、正の間隙水圧に変わっていることがわかる.しかし、伸張せん断後においては、繰り返しせん断により間隙負圧が徐々に消散しているものの、9回目伸張せん断後においても未だ大きく間隙負圧が発生している.

④ ε_a - q / p'図(補正後)からは、OCR=8.0 の過圧密粘土は共に1回目圧縮せん断では緩やかな挙動を示しているのに対し、2回目以降の圧縮せん断では直線的な挙動になっていることがわかる.また、軸ひずみをもう少し大きな値に変更し、せん断を続けると仮定した場合、繰り返しせん断回数が多い過圧密粘土が最終的な 値も大きくなることが想定される.つまり、繰り返しせん断による軸差応力の低下は有効主応力の低下による見かけ上の低下であり、過圧密粘土は繰り返しせん断により、強度が大きくなっていくと推測される.



図-4.1 OCR=8.0 の過圧密粘土

(2) 吸水試験における吸水タイミングの決定

次章で行う吸水試験は、供試体が間隙負圧を発生している状態で行う必要性がある.本試験結果より OCR=8.0 の過圧密粘土は、圧縮せん断後について一回目圧縮せん断後でのみ過剰間隙負圧が発生することがわかった.また、伸張せん断後においては常に間隙負圧が発生していることがわかる.つまり、圧縮せん断後と伸張せん断後 の両方で吸水試験が可能である.よって、次章では三軸繰り返し非排水せん断試験における1回目圧縮せん断後 と、任意で決定した2回目伸張せん断後と5回目伸張後において、吸水試験を行うこととする.

4.2 さまざまな条件下における吸水試験

本試験では、三軸繰り返し非排水せん断試験の圧縮せん断後及び伸張せん断後における吸水試験を行う.吸水 のタイミングは、間隙負圧が発生している1回目圧縮せん断後・2回目伸張せん断後・5回目伸張せん断後に行う こととする.吸水試験により、吸水中の有効応力の変化を捉り、吸水による力学的変化を読み取る.また、吸水 後に再び繰り返しせん断を行い、通常の三軸繰り返し非排水せん断試験の試験結果との比較を行うことにより、 吸水による強度変化を確認することを目的とする.

(1) 試験結果

まず,吸水中の変化について以下に示す.

①圧縮せん断後吸水過程の *p'-q* 図から,吸水に伴い平均有効主応力と軸差応力が共に有効応力経路に沿って減少 していることがわかる.初期は軸差応力一定で平均有効主応力が減少しているのに対し,平均有効主応力が 30kPa 程度減少すると,徐々に軸差応力も減少を始めている.これは,吸水による間隙水圧の変化に影響している可能 性が大きい.

②伸張せん断後吸水過程の p'-q 比較図から,吸水中に平均有効主応力は減少,軸差応力が増加していることがわ かる.平均有効主応力の減少は吸水による負の過剰間隙水圧の消散に起因していると考えられ,軸差応力の増加 については有効拘束圧の変化量に対して,有効軸圧の変化量が少ないためと推測される.また,吸水後の軸差 応力が、通常の圧縮せん断の軸差応力より低い値となっており、有効応力経路は大きく限界状態線に近づいていることがわかる.





続いて、軸差応力 を平均有効主応力 で除すことにより、 $\varepsilon_a - q/p'$ 図から平均有効応力の減少に依存しない軸 差応力の低下について考察する.

①圧縮せん断後吸水試験の $\varepsilon_a - q/p'$ 比較図(補正後)から,試験結果は通常の2回目圧縮せん断と同様の挙動を示していることがわかる.また,軸ひずみをもう少し大きな値に変更し,せん断を続けると仮定した場合,試験結果と通常の2回目圧縮せん断の最終的な値は同値に落ち着くことが想定される.つまり,圧縮せん断後における吸水により強度低下は起きていないと考えられる.

②伸張せん断後吸水試験の $\varepsilon_a - q/p'$ 比較図(補正後)から,吸水後の $\varepsilon_a - q/p'$ 関係が吸水なしの $\varepsilon_a - q/p'$ 関係 より僅かに大きくなっていることがわかる.しかし,軸ひずみをもう少し大きな値に変更し,せん断を続けたと 仮定した場合,吸水なしの 値がいずれ吸水後の 値に到達すると推測される.つまり,吸水による軸差応力の低下は平均有効主応力の減少に伴った見かけ上の低下であると考えられ,吸水によって強度は変化しないと判断で きる.



 \mathbb{Z} -4.3 $\varepsilon_a - q/p' \mathbb{Z}$

4.3 過圧密粘土の正規粘土化現象の検証

本章では、三軸繰り返し非排水せん断試験後および吸水試験後に段階載荷による等方圧密試験を行う.これらの試験結果から、降伏応力の変化を把握し、繰り返しせん断および吸水により過圧密粘土の正規圧密粘土化現象 が発現しているのかを定量的に検証する.

(1) 試験条件

試験は 2.2 試験手順に基づいて行う.まず,OCR=8.0 の過圧密粘土の三軸繰り返し非排水せん断試験を行う. 三軸繰り返し非排水せん断試験は繰り返し回数を2回と5回とし,それぞれ2回目伸張せん断時と5回目伸張せん断時の軸差応力 0kPa の時点で伸張せん断を終了し,続けて段階載荷による等方圧密試験を行う.吸水試験後の 等方圧密試験では,三軸繰り返し非排水せん断試験を繰り返し回数2回と5回で行い,それぞれ2回目伸張せん 断後と5回目伸張せん断後に吸水を行う.吸水後,表-4.1の圧密圧力で段階載荷による等方圧密試験を行った.

表-4.1 圧密圧力

段階	1	2	3	4	5
<i>p</i> '(kPa)	100	160	320	640	800

(2) 試験結果

三軸繰り返し非排水せん断試験後の等方圧密試験により過圧密状態から再び徐々に正規圧密状態に推移してい くことがわかる.しかし、どちらも初期等方圧密過程の曲線と同様に正規圧密直線には達していない.三軸繰り 返し非排水せん断試験後の等方圧密試験の圧密圧力の最大荷重を上げれば、正規圧密直線まで達することも可能 であると考えられるが、セルの耐圧が1000kPaであるため、圧密圧力の増加は不可能である.また、これらの試 験結果より繰り返し回数による挙動の違いは見られない.また、三軸繰り返し非排水せん断試験および吸水後の 等方圧密試験により過圧密状態から再び徐々に正規圧密状態に推移していくことがわかる.しかし、どちらも初 期等方圧密過程の曲線と同様に正規圧密直線の傾きには達していない.



図-4.4 e-logp'曲線

また,供試体作製時の予圧密から算定した正規圧密直線の圧縮指数と初期等方圧密過程における圧縮指数,三 軸繰り返し非排水せん断試験および吸水後の等方圧密試験の圧縮指数を表-4.2 に示す.圧縮指数は,段階載荷荷重 の最大荷重とその一段階前の荷重における間隙比 と平均有効主応力 の傾きから算定を行っている.

吸水	繰り返し	工綻坮粉	正規圧密	初期	せん断後	圧縮
22小	回数	/二、小旧1日女	直線	等方圧密	等方圧密	指数比
なし	2 回	C_{c}	0.364	0.300	0.152	0.50
なし	5 回	C_{c}	0.358	0.243	0.123	0.50
あり	2 回	C_{c}	0.356	0.275	0.155	0.56
あり	5 回	C_c	0.359	0.270	0.164	0.61

表-4.2 圧縮指数一覧

表-4.2 の圧縮指数一覧からもわかるように、三軸繰り返し非排水せん断試験後の等方圧密試験結果と比較すると、 三軸繰り返し非排水せん断試験後に吸水を行うと僅かではあるが圧縮指数は大きくなっていることがわかる. つ まり、吸水により僅かではあるが、強度が弱くなっていると考えられる. しかし、圧縮指数は正規圧密直線の圧 縮指数には全く達していない. このことから、過圧密粘土は繰り返しせん断後の吸水により正規圧密粘土化は発 現しないと考えられる.

5. 有限要素解析による過圧密粘土の繰り返しせん断特性の検証

本章では、有限要素解析 DACSAR-M を用いて、過圧密粘土の三軸繰り返し非排水せん断試験(本論文第4章参 照)、さまざまな条件下における吸水試験(本論文第4章参照)による過圧密粘土の強度変化の検証を行う.三軸 非排水せん断試験の解析結果を各実験結果にフィッティングすることにより、降伏応力の変動を把握し、過圧密 粘土の繰り返しせん断や吸水による強度変化について考察を行う.以下に、解析条件、解析結果について述べる.

(1) 解析条件

軸対象条件で三軸試験に用いる円柱供試体を再現する.また,幅 25mm,高さ 100mmの解析領域を1要素で表す. 1つの要素は4つの節点からなっており、全節点数は4である.

また、解析の流れを以下に示す.

①初期に背圧 100kPa に相当する水頭を与える.

②入カパラメータ(表-5.1)の降伏応力 と現応力 を変更し,三軸非排水せん断試験を行う.三軸非排水せん断試 験では,ひずみ速度 0.05%/min,最大軸ひずみ 2.0%(1回目圧縮せん断においては,最大軸ひずみ 15.0%も行う) に相当する変位を解析領域の上端節点に一様に与え,実験結果の三軸繰り返し非排水せん断試験と同条件で解析 を行う.

③降伏応力 をフィッティングパラメータとし、解析結果の $\varepsilon_a - q$ 関係を実験結果の $\varepsilon_a - q$ 関係にフィッティング することで、実験結果における降伏応力を推定する.詳しいフィッティング方法は以降に示す.

(2) 境界条件

境界条件については以下の条件を仮定した(図-5.1). 非排水せん断を行うため、変位境界については、一様変形を許容しない条件で行う. 上端及び下端の右端節点の垂直方向の変位を固定することで、軸ひずみを与えた際に 実際の三軸試験に類似した変形モードを示すことが予想される. 水理条件について、上下端及び左右端に番号を振り分けている.水理条件を以下に示 す.



①非排水境界, ②非排水境界, ③非排水境界, ④非排水境界

図-5.1 境界条件

(3) フィッティングパラメータ

以下に解析に必要となる入力パラメータをまとめる.実験に基づいて算出したパラメータを使用している.下 負荷面のフィッティングパラメータ は等方圧密試験の再現により決定した値を用いている.

D	Λ	М	<i>v</i> '	k_x / γ_w	k _y /γ _w				
0.047	0.886	1.35	0.330	1.32E-06	1.32E-06				
σ'_{v0}	K ₀	σ'_{vi}	K _i						
Х	1.000	Y	1.000						
λ	e ₀	λ_k	m						
0.156	1.097	0.000	0.700						

表-5.1 入力パラメータ

本章では、表-5.1の入力パラメーター覧における降伏応力の値を変更した解析結果を実験結果にフィッティン グすることにより、降伏応力の変動を把握し、繰り返しせん断や吸水による過圧密粘土の強度変化について考察 を行う.表-5.1の入力パラメーター覧の降伏応力の値 X がフィッティングする値である.現応力の値 Y は、実 験結果の *p'-q* 図における軸差応力 0kPa 時の平均主応力の値とする(図-5.2 参照).また、解析の入力パラメータ の降伏応力 σ'_{v0} は単位(tf)であるのに対して、実験による実測値は単位 (kPa)である.よって、実験結果と解析結 果のフィッティンググラフにおいて、入力パラメータの降伏応力は単位修正を行い、降伏応力 *p_c* (kPa)として記 載している.



(4) 評価方法

過圧密粘土の三軸繰り返し非排水せん断試験及び吸水試験について、解析結果のフィッティングを行った.しかし、1回目圧縮せん断と2回目圧縮せん断以降及び吸水試験では、 $\varepsilon_a - q$ 図の挙動の違いから、解析と実験のフィッティング結果の評価方法が異なる.よって、以下に1回目圧縮せん断と2回目圧縮せん断以降及び吸水試験の評価方法を示す.

・1回目圧縮せん断の評価方法

フィッティング例として、OCR=8.0 の過圧密粘土の三軸繰り返し非排水せん断試験の 1 回目圧縮せん断の実験 結果と解析結果の軸ひずみ 2.0%での結果比較を図-5.3(a)に示す. また、OCR=8.0 の過圧密粘土の三軸非排水せん 断実験結果と解析結果の軸ひずみ 15.0%での結果比較を図-5.3 (b)に示す.

図-5.3(a)から, 軸ひずみ 2.0%において 値が 2646kPa の解析結果と実験結果が一致していることがわかる. しかし, 軸ひずみ 2.0%における到達点までの挙動は大きく異なっている. 一方で,図-5.3(b)では,軸ひずみ 15.0%におい て 値が 803kPa の解析結果と実験結果が一致している. このことから,実験結果と解析結果が軸ひずみ 5.0%前後 までは違う挙動を示すということが推測される. つまり,軸ひずみ 2.0%における p_c値が必ずしも正しい結果であ るとは言えないことがわかる. 過圧密粘土の三軸非排水せん断試験において,軸ひずみ 15.0%を破壊と定義し,せ ん断試験が行われていることから,1回目圧縮せん断では軸ひずみ 15.0%での p_c値が軸ひずみ 2.0%での p_c値より 正確であると推測し,軸ひずみ 15.0%の p_c値を解析値とする.

・2回目圧縮せん断以降及び吸水試験の評価方法

フィッティング例として、OCR=8.0 の過圧密粘土の三軸繰り返し非排水せん断試験の 2 回目圧縮せん断の軸ひずみ補正後の 2 回目圧縮せん断の実験結果と解析結果の結果比較を図-5.3(c)に示す. 図-5.3(c)から, p_c 値が 1519kPa で解析結果と実験結果が一致していることがわかる. 1 回目圧縮せん断の p_c 値が 803kPa の解析結果と比較すると, p_c 値は約 2 倍に増加していることがわかるが、2 回目圧縮せん断以降は、軸ひずみ 15.0%での判断ができないため、この結果を p_c 値として決定する.



図-5.3 非排水せん断

(2) 解析結果

解析結果の評価方法の違いから, OCR=8.0 の過圧密粘土の三軸繰り返し非排水せん断試験における1回目圧縮 せん断と2回目圧縮せん断以降のフィッティング結果は別に示す.以下に, 解析値と実測値とのフィッティング 結果を示す.

•1回目圧縮せん断のフィッティング結果

三軸繰り返し非排水せん断試験の1回目圧縮せん断の解析によるフィッティング結果からOCR=8.0とOCR=16.0の過圧密粘土の *p_c* 値を表-5.2 に示す.

等方圧密過程では,段階載荷により圧密圧力を 800kPa まで載荷しているため,降伏応力は 800kPa ということに なる.よって,解析によるフィッティング結果から OCR=8.0 の過圧密粘土については,1回目圧縮せん断により 強度が変化していないと言える.

表-5.2	<i>p_c</i> 值
OCR	p_c (kPa)
8.0	803

•2回目圧縮せん断以降のフィッティング結果

三軸繰り返し非排水せん断試験の 2回目圧縮せん断以降の解析によるフィッティング結果から、繰り返しせん 断回数と p_c 値の変化を図-5.4に示す. また, OCR=8.0の過圧密粘土の繰り返しせん断回数と p_c 値を表-5.3に示す. p_c 値の変化から、三軸繰り返し非排水せん断試験の 2回目以降の強度変化を考察する.

OCR=8.0 の過圧密粘土の繰り返しせん断回数と *p_c* 値関係から,2回目圧縮せん断から8回目圧縮せん断では強度が一定であることがわかる。しかし、8回目圧縮せん断から9回目圧縮せん断で強度が増加し、2回目から8回目の傾向と大きく外れていることがわかる。繰り返しせん断中に何らかの問題が起きた可能性がある。しかし、OCR=8.0 の過圧密粘土については、繰り返しせん断による強度の変化はあまり見られなかった。



図-5.4 繰り返しせん断回数と pc 関係

表-5.3 繰り返しせん断回数と pc 関係

繰り返し回数	2	3	4	5	6	7	8	9	10
p_c (kPa)	1519	1637	1646	1676	1666	1656	1695	2293	1901

・圧縮せん断後における吸水試験

本解析では吸水をしていない通常の三軸繰り返し非排水せん断試験の2回目圧縮せん断と吸水後の2回目圧縮 せん断について、それぞれ p_c値のフィッティングを行い、試験結果を比較することにより吸水による強度変化を 検証することとする. 図-5.5(a)と図-5.5(b)から,通常の2回目圧縮せん断と吸水後の2回目圧縮せん断は共に p_c値が1519kPaで解析結 果と実験結果が一致していることがわかる.つまり,三軸繰り返し非排水せん断試験の1回目圧縮せん断後の吸 水により強度変化はしていないと判断できる.



図-5.5 実験と解析の2回目圧縮せん断比較

・伸張せん断後における吸水試験

本解析では、2回目伸張せん断後の吸水試験においては、2回目圧縮せん断と吸水後の3回目圧縮せん断について 解析により p_c 値のフィッティングを行い、5回目伸張せん断後の吸水試験では、5回目圧縮せん断と吸水後の6 回目圧縮せん断について解析により p_c 値のフィッティングを行うことで、吸水前と吸水後の p_c 値を読み取り強度 変化を検証する.

これらの解析結果から、吸水により強度が増加しているということがわかる.また、 *p*_c 値の増分について、2 回目伸張せん断後における吸水試験は 値が約 1.3 倍になっているのに対し、5 回目伸張せん断後における吸水試 験は 値が約 1.7 倍になっていることから、繰り返しせん断を多く重ねた後に吸水を行った場合に、より強度が増 す傾向が見られる.



6. 結論

本研究からは、実測値と解析値に違いが見られたが、吸水による強度低下は見られず、過圧密粘土の正規圧密 粘土化現象は発現しなかったといえる.これらのことから、「牧ノ原盛土は間隙水侵入による局所的な正規圧密粘 土化に起因し崩壊した」という仮説は、間違っていると判断できる.一方で、過圧密粘土の繰り返しせん断特性 については、繰り返しせん断により、実測値から僅かに強度が大きくなっていると推測されるが、解析値での降 伏応力の変化から、非常に小さな強度変化であると推測される. 参考文献

- 1) 高木宗男, 横田聖哉, 菅浩一, 安田進, 太田秀樹: 名牧之原地区における盛土のり面災害の実態, 第 55 回地 盤工学シンポジウム論文集, pp.193-196, 2010.3
- 2) Alan.W.Bishop and D.J.Henkel: THE MEASUREMENT OF SOIL PROPERTIES IN THE TRIAXIAL TEST, Edward Arnold (PUBLISHERS) LTD, 1957.
- 3) 土田孝: 乱さない海成粘土の正規圧密状態におけるせん断特性について, 港湾技研試料, No.444, pp.3-28.1983.3.

著者:1) 安原昇平,東京急行電鉄株式会社;2) 吉富力,神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻;3) 河井克 之,都市安全研究センター,准教授;4) 飯塚敦,都市安全研究センター,教授

Verification of argillic normally consolidated to rely on softening due to water absorption of overconsolidated clay

Syohei Yasuhara Tikara Yoshitomi Katsuyuki Kawai Atsuki Iizuka

Abstract

August 13th, 2009, Embankment near Makinohara SA in Tomei freeway has collapsed because the earthquake had occurred. The cause of the collapse of the embankment was that structural deterioration had been caused by pore water penetration to the interior of the main embankment. However, permeability is extremely low because the embankment has been highly compacted under compaction control by D-value. Therefore, intrusion of water and structural deterioration is unlikely to happen under normal conditions. Collapse of embankment in Makinohara overturns the common sense like that.

Compacted embankment of low permeability are high rigidity, high strength under unidirectional loading monotonous. But, it is supposed that compacted embankment is weak by cyclic shear. Water is intruded to embankment, because negative excess pore water pressure is partially generated by cyclic shear. Such local mechanical behavior is a phenomenon that has not been noticed at all conventional. It is considered to be very important understanding of cyclic shear properties of overconsolidated clay.

In this study, verify cyclic shear properties of overconsolidated clay by cyclic triaxial shear test and swelling test. Furthermore, by comparing the theoretical value of the various tests and the measured value of the finite element analysis, we deepen the discussion about cyclic shear properties of overconsolidated clay.