

K₀圧密粘土の三軸繰返し圧密挙動Triaxial Consolidation Behavior of K₀-Consolidated Clay under Cyclic Loading

森脇 武夫 Takeo MORIWAKI (広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻)
 奥宮 英治 Eiji OKUMIYA (中央復建コンサルタント(株)総合第二部港湾設計室)
 斉藤 正己 Masami SAITOH (大阪市港湾局企画振興部計画課第一計画係)

三次元的な繰返し荷重を受ける粘性土地盤の圧密挙動を解明するため、年代効果を有している自然粘土と類似の力学特性を持つ高温養生再圧密粘土試料と通常の室温再圧密粘土試料を用いて三軸繰返し圧密試験を実施した。また、現場と室内実験での圧密履歴を近づけるために、繰返し荷重を載荷する前の予圧密をK₀圧密で行うとともに、所定の期間、繰返し圧密を行った後に非排水圧縮試験を行い、繰返し圧密前後での強度変化についても検討した。その結果、粘土の骨格構造が発達した高温養生再圧密粘土試料と室温再圧密粘土試料の繰返し圧密挙動には一致しない点が多々あるとともに、繰返し圧密に伴う強度増加にも両試料で違いのあることが明らかとなった。

キーワード：繰返し圧密，K₀圧密粘土，高温再圧密，温度効果，三軸試験 (IGC: D05)

1. まえがき

「繰返し圧密」現象の代表的なものに、軟弱地盤上に建設された低盛土道路の交通荷重による長期にわたる沈下現象^{1)・2)}や、消雪用水や農業用水の汲み上げによる地下水位の季節的変動に伴う沖積平野の沈下現象^{3)・4)}などがある。両者には周期の違いがあるものの、共に周期的な荷重のもとでの沈下現象であり、繰返し圧密と呼ばれている。

繰返し荷重を受ける粘土地盤の圧密沈下は、一定荷重を受ける場合と比較すると、有効応力の増加に伴う一次圧密的な沈下のみならず、有効応力の変化が定常状態に達した後の二次圧密的な残留沈下が極めて大きいという特徴を持っている。これは、繰返し圧密においては載荷に伴う排水圧縮と除荷に伴う吸水膨張とが交互に繰返され、粘土の骨格構造が一定荷重を受ける場合と比較してより乱されるためと考えられている⁵⁾。

このような繰返し圧密現象を解明するため、数多くの事例調査、実験的研究、および解析的研究が行われ、繰返し圧密による沈下量を予測する方法がいくつか提案されているが^{6)~8)}、繰返し圧密挙動が本質的に解明されているとは言い難い。すなわち、これらの予測法の適用できる範囲が限られているとともに、各研究機関で行われた繰返し圧密試験結果が機関ごとに異なっている場合もある。特に、実験室内で行われた繰返し圧密試験結果と実際の現場での挙動は定性的にも一致しない場合が多い。この原因として、繰返し荷重の大きさ、周期、波形などの試験条件の違いが考えられるが、それ以外に試験に用いた試料と原地盤の自然粘土の力学特性が異なっていることが大きな要因として挙げられる。

すなわち、繰返し圧密が問題となる多くの現場では一次元状態で長期間圧密され、セメンテーションと二次圧

密によって年代効果を有する自然粘土に繰返し荷重が作用しているが、実験室内で通常行われる三軸繰返し圧密試験では、試料のばらつきを避けるために実験室内で再構成し、短期間再圧密して作成された粘土試料を用い、それを三軸セル内で等方圧密した後、繰返し荷重を作用させている。このように、繰返し荷重を受ける前の圧密履歴が大きく異なるため、現場と室内実験での繰返し圧密挙動に違いが生じたと思われる。

そこで本研究では、まず自然粘土が有する年代効果を再現できるとされる高温養生再圧密粘土試料（以下、高温試料）を作成し、通常用いられている室温再圧密粘土試料（以下、室温試料）との力学特性の違いを示す。その後、高温試料と室温試料を用いて三軸繰返し圧密試験を行い、両試料の繰返し圧密挙動の違いを明らかにするとともに、この結果より通常の室温試料を用いた繰返し圧密試験によって年代効果を有する自然粘土地盤の繰返し圧密挙動を把握する際の問題点を明らかにする。また本研究では、現場と室内実験における圧密履歴を近づけるために繰返し荷重を載荷する前の予圧密にK₀圧密を採用するとともに、所定の期間、繰返し圧密を行った後に非排水圧縮試験を行い、繰返し圧密前後での強度変化についても検討した。

なお、本研究は一次元的に圧密された地盤に三次元的な繰返し荷重が作用した場合を対象としている。この場合には、荷重の作用と同時に非排水せん断変形が起こり、その後、圧密に伴う体積変形が生じる。K₀圧密後の三軸繰返し圧密試験はこの現象を模擬したものであるが、厳密にこの現象を再現したものではない。すなわち、実地盤では水平方向の変形に伴って水平方向の応力も変化するが、本実験では水平方向応力に対応する側方応力（セル圧）は一定に保たれている。また、排水方向も実

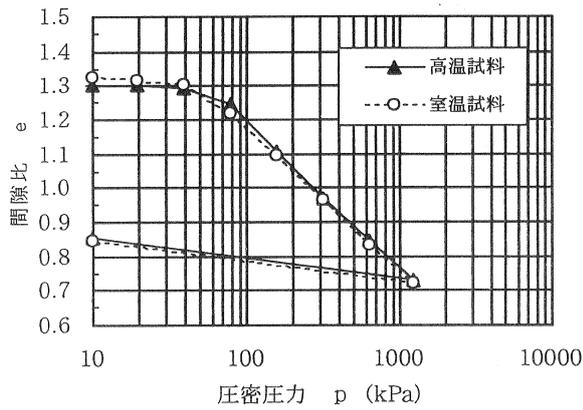


図-1 標準圧密試験の $e \sim \log p$ 関係

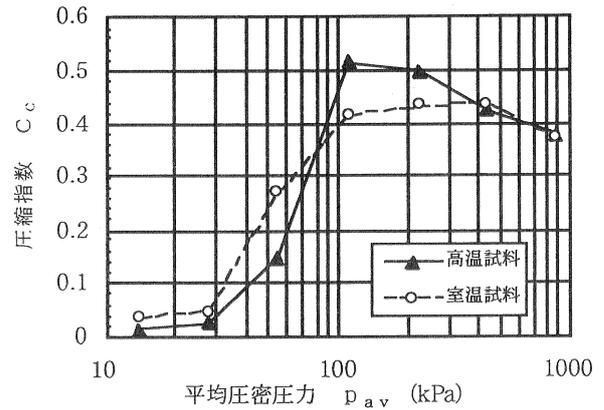


図-2 標準圧密試験の圧密応力と C_c の関係

験では円柱供試体の外向き水平放射流れであり、無改良の実地盤で生じる鉛直流れまたはバーチカルドレーン打設地盤で生じる内向き水平放射流れではない。このように K_0 圧密三軸繰返し圧密試験は、実地盤の挙動を忠実に再現したものではなく、実験で観測される供試体の軸ひずみと実地盤の地表面沈下量は直接対応していない。しかし、本実験で観測される挙動は三次元的な繰返し荷重が作用した粘土地盤の変形メカニズムを反映したものであるため、本実験から得られる結果を用いて三次元的な繰返し荷重が作用する飽和粘土地盤の繰返し圧密挙動を考察する。

2. 高温養生再圧密粘土の力学特性

2.1 試料および再圧密方法

自然粘土の持つ年代効果を実験室内で短期間に再現する方法のひとつに、攪乱再構成粘土を高温環境下で再圧密する方法、いわゆる高温再圧密方法がある。この高温再圧密方法には、粘土をスラリー状態から高温にして再圧密する方法⁹⁾と、室温で再圧密した粘土の二次圧密期間を高温で養生する方法¹⁰⁾との二通りが提案されている。いずれの方法が粘土の年代効果の再現に適しているかは現在のところ明らかにされておらず今後の課題であるが、本研究では圧密期間の設定など比較的作業の容易な後者の方法、すなわち高温養生方法を用いて自然粘土と類似した力学特性を持つ粘土試料を作成する。

試験に用いた試料は岡山県倉敷市運動公園建設用地で採取した沖積粘土（通称、倉敷粘土）である。倉敷粘土の物理的性質は、液性限界 $w_L = 52.4\%$ 、塑性限界 $w_p = 26.8\%$ 、塑性指数 $I_p = 25.6$ 、土粒子の密度 $\rho_s = 2.673 \text{ g/cm}^3$ である。この粘土を $425 \mu\text{m}$ フルイに通して貝殻等を取り除き、含水比を液性限界の約2倍に調整した後、約24時間真空脱気を行った。脱気を終えたスラリーを直径24cm、高さ40cm、肉厚12mmのステンレススチール製の再圧密セルに投入し、24時間の自重圧密を行った。その後、復動式ペロフラムシリンダーによって鉛直圧密圧力を $9.8 \rightarrow 19.6 \rightarrow 29.4 \rightarrow 49.0 \text{ kPa}$ と段階的に載荷

し、両面排水条件のもとで一次的に再圧密した。途中段階での圧密期間はすべて24時間とし、最終段階では3t法によって一次圧密の終了時期を便宜的に決定した。そして、一次圧密が終了した時点から、再圧密セルを恒温水槽に入れ、温度を 20°C と 70°C の一定に保ち、4日間養生した。以後、 20°C で養生した試料を室温試料、 70°C で養生した試料を高温試料と呼ぶ。高温試料は養生が終了したら室温（約 20°C ）に戻し、室温試料はそのまま再圧密セルから取り出し、恒温室（ 20°C ）で含水比が変化しないように保存した。

2.2 再圧密粘土の力学特性

a) 標準圧密試験

図-1は標準圧密試験で得られた高温試料と室温試料の代表的な $e \sim \log p$ 曲線を示したものである。高温試料は、試料作成時に高温養生によって二次圧密が促進されているために、初期間隙比が室温試料に比べて小さくなっているが、試料作成時の圧密圧力（49kPa）を過ぎると逆転し、高温試料の間隙比が室温試料より大きくなっている。そのため、この図より三笠法によって求めた室温試料の圧密降伏応力は $p_c \approx 51 \text{ kPa}$ と試料作成時の圧密圧力（49kPa）にほぼ等しいが、高温試料の圧密圧力は $p_c \approx 75 \text{ kPa}$ となり、高温養生によって圧密降伏応力が1.5倍程度増加していることがわかる。その後、正規圧密領域における高温試料の $e \sim \log p$ 曲線は、多くの不攪乱自然粘土で見られる下に凸な曲線となっている。室温試料でもその傾向は若干認められるが、高温試料に比べて過圧密領域から正規圧密領域へ滑らかに移行している。その様子を表したものが図-2であり、各圧密圧力間の $e \sim \log p$ 曲線の傾きを圧縮指数 C_c とし、平均圧密圧力 $p_{av} = \sqrt{p_{i-1} \cdot p_i}$ に対してプロットしている。この図から、従来から指摘されているように⁹⁾、高温試料の $e \sim \log p$ 曲線の傾きは試料作成時の圧密圧力（49kPa）を越えたところから急激に増加し明瞭なピークを示すのに対して、室温試料の $e \sim \log p$ 曲線の傾きは試料作成時の圧密圧力（49kPa）を越えるとほぼ一定

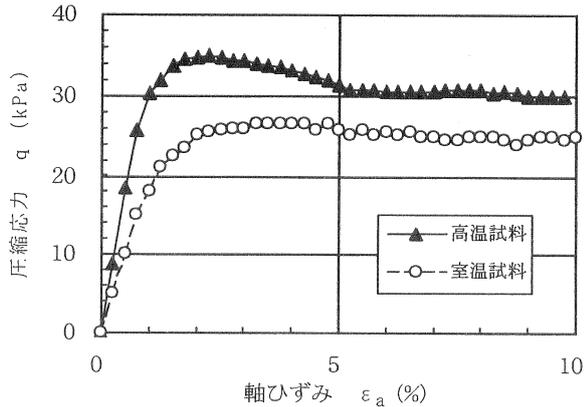


図-3 一軸圧縮試験の応力～ひずみ関係

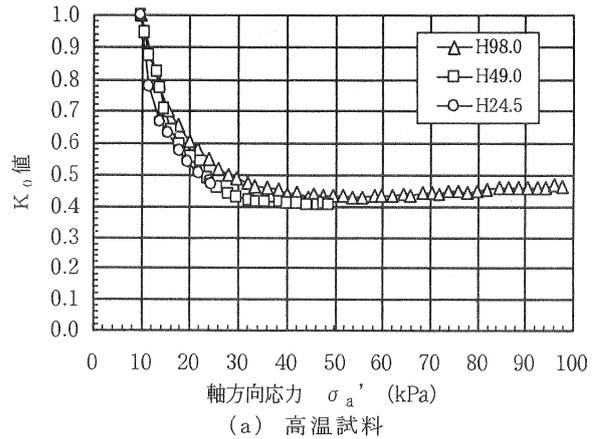
値になっていることがわかる。また、図-1および図-2より、圧密圧力が試料作成時の圧密圧力(49kPa)より3～4倍程度以上大きくなると高温試料と室温試料の $e \sim \log p$ 曲線はほぼ一致している。これは、高温養生時に形成された粘土の骨格構造が大きな応力を受けて破壊され、室温試料との差がなくなったためと考えられる。

b) 一軸圧縮試験

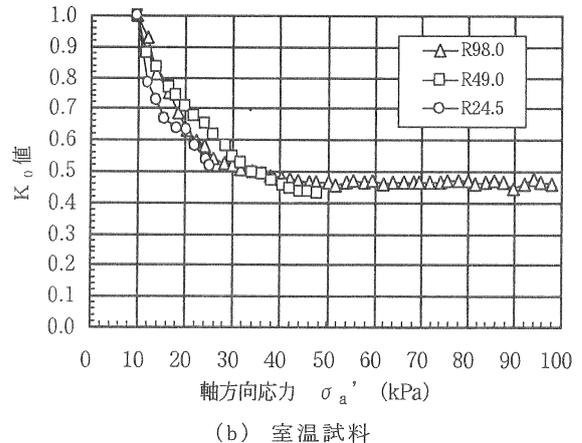
一軸圧縮試験で得られた高温試料と室温試料の代表的な応力～ひずみ曲線を図-3に示す。この図において、室温試料では明確な破壊ひずみが現れず、ひずみが約3%以上で圧縮応力がほぼ一定となっている。一方、高温試料では、ひずみが約2%で圧縮応力が明確なピークを示し、その後、大幅な強度低下が生じている。そして、ピーク時の圧縮強度、すなわち一軸圧縮強度は、高温試料の方が1.3倍程度大きくなるとともに、残留強度も約1.2倍程度大きくなっている。これは、高温試料は室温試料に比べて高温養生によってセメンテーションなどの電気・化学的な結合力が増加するだけでなく、二次圧密が加速され間隙比の減少がより大きくなっているために、電気・化学的な結合力によってより強固となっていた粘土の骨格構造が圧縮応力の増加によって破壊された後も、高温試料の間隙比は室温試料より小さいために高温試料の残留強度が大きくなったと考えられる。

c) K₀圧密非排水(CK₀U)三軸圧縮試験

K₀圧密が可能な三軸試験装置¹¹⁾を用いて、高温試料と室温試料の両試料に対してK₀圧密非排水三軸圧縮試験(以後、CK₀U試験)を行った。K₀圧密は、直径35mm、高さ85mmを標準とする円柱形供試体を周面排水条件下で、まず9.8kPaの等方応力で予圧密を行った後、軸圧を4.0kPa/hrの一定速度で漸増載荷し、そのときの供試体の体積変化と軸変位を1秒ごとに測定して半径方向ひずみを算出し、半径方向ひずみが0.005%以上変化しないようにコンピューターを介した電気/空気圧変換器によってセル圧を制御して行った。なお、本試験では供試体周面に巻き付けたドレーンペーパー自身からの排水量を補正して供試体の体積変化を算出している。最終軸



(a) 高温試料



(b) 室温試料

図-4 K₀値と圧密圧力の関係

圧密応力は24.5, 49.0, および98.0kPaの3種類であり、軸方向応力がこの値に達し、間隙水圧が消散するのを待って、供試体を非排水状態にし、その後セル圧を一定に保って軸ひずみ速度0.1%/minで軸ひずみが15%に達するまで圧縮した。

図-4はK₀圧密中の高温試料と室温試料のK₀値の変化を示したものである。本試験では前述したように9.8kPaの等方応力で予圧密しているためK₀圧密開始時のK₀値は1.0である。その後、軸方向応力の増加とともにK₀値は急激に減少し、最終的には高温試料と室温試料の両方ともK₀=0.45に落ち着いている。この図において98.0kPaまで圧密した場合をもう少し詳細に比較すると、室温試料ではK₀値は単調に減少し、試料作成時の圧密圧力(49kPa)付近からK₀=0.45となり、その後一定を保っているが、高温試料のK₀値は試料作成時の圧密圧力(49kPa)を過ぎた付近で最小値を取り、その後若干増加し、最終的にはK₀=0.45となっている。これは、高温試料では高温養生によって形成された粘土の骨格構造がK₀圧密時の軸方向応力に抵抗するため、同じ軸方向応力を支えるのに必要な半径方向応力が室温試料より小さくてすむ、すなわちK₀値が小さくなったものと思われる。

図-5はK₀圧密後の非排水せん断過程における高温試

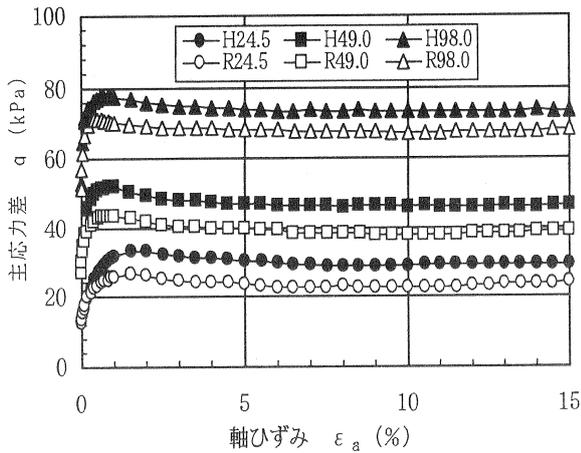


図-5 C K₀U試験の応力～ひずみ関係

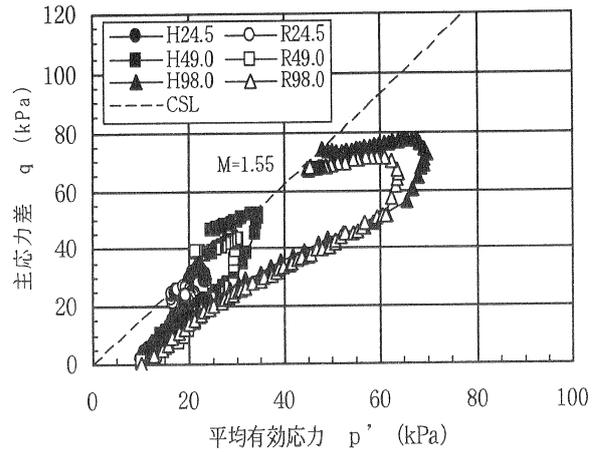


図-6 C K₀U試験の応力経路

料と室温試料の主応力差～軸ひずみ曲線を比較したものである。この図から、各圧密圧力における同一軸ひずみに対する主応力差は高温試料の方が大きくなっていること、その度合いは圧密圧力が大きくなるほど小さくなるものの試料作成時の2倍の圧密圧力(98.0kPa)まで圧密した場合でも依然として高温試料の強度が大きいことがわかる。なお、同様な方法で作成した高温試料と室温試料に対する等方圧密非排水三軸圧縮試験では、試料作成時の2倍の圧密圧力(98.0kPa)で等方圧密した場合の応力～ひずみ曲線は高温試料と室温試料でほぼ一致していた^{1,2)}。これは、三軸試験における圧密形式が試料作成時の圧密形式と異なる等方圧密の場合、高温養生によって形成された粒子構造が等方圧密によって比較的破壊され易く、試料作成時の2倍の圧密圧力まで圧密された場合には高温試料の粒子構造は破壊され室温試料のそれに近づくが、三軸試験における圧密形式が試料作成時の圧密形式と一致するK₀圧密の場合には高温養生によって形成された粒子構造が比較的破壊され難く、試料作成時の2倍の圧密圧力までK₀圧密されても高温養生時に形成された粒子構造がある程度残るためと考えられる。

一方、応力～ひずみ曲線の形はいずれもひずみ軟化型であり、軟化の程度は圧密圧力が小さいほど顕著である。また、主応力差が最大となる時の軸ひずみ、すなわち破壊ひずみは、高温試料と室温試料でほとんど差がなく、かつ圧密圧力が49.0kPaと98.0kPaでもほぼ等しいが、圧密圧力が24.5kPaでは他の圧密圧力のものに比べて若干大きくなっている。これは、図-4で示すように圧密圧力が49.0kPaと98.0kPaではK₀値が0.40～0.45程度でほぼ等しいが、圧密圧力が24.5kPaではK₀値がそれより大きく、非排水せん断を開始する時の試料が等方応力状態により近いいため、破壊ひずみが大きくなったと考えられる。

図-6は、K₀圧密過程およびその後の非排水せん断過程における高温試料と室温試料の有効応力経路を比較したものである。K₀圧密過程では前述したように高温試

料の主応力差が若干大きい(K₀値が小さい)ところのあるものの、高温試料と室温試料の応力経路はほぼ一致している。しかし、非排水せん断過程では同一主応力差に対する平均有効応力は高温試料の方が大きく、高温試料の方が間隙水圧の発生量が小さいことがわかる。また、高温試料と室温試料とも、圧密圧力が49.0kPaと98.0kPaの場合は非排水せん断過程に間隙水圧が増加し続けるという正規圧密粘土の挙動を示すが、圧密圧力が24.5kPaの場合は両試料とも間隙水圧が途中から減少するという過圧密粘土の挙動を示している。さらに、限界状態線(CSL)の傾きは、ばらつきはあるものの試料の作成方法によらず高温試料と室温試料でほぼ一致しており、M=1.55と見なすことができる。

3. K₀圧密後の三軸繰返し圧密試験

3.1 試験方法

前述の高温試料と室温試料を用いて、K₀圧密三軸繰返し圧密試験を実施した。まず、それぞれの試料から直径35mm、高さ85mmを標準とする円柱形供試体を成形し、スリットを付けたドレーン用のろ紙を二重に巻き付けた。その上に厚さ0.2mmのゴムスリーブを被せ、三軸セルにセットした。なお、供試体の上下端面には摩擦の影響を軽減させるためにシリコングリースを塗布したゴムメンブレンを置いた。

K₀圧密三軸繰返し圧密試験装置は、通常のK₀圧密非排水三軸圧縮試験装置^{1,3)}と類似のものであり、三軸セル、軸圧載荷装置、セル圧載荷装置、背圧載荷装置、軸荷重・軸変位・排水量・間隙水圧の測定装置、および軸圧・セル圧制御兼データ収録用コンピューターから構成されている。軸圧は、コンピューターで制御される電気/空気圧変換器によって調整された空気圧を復動式ペロフラムシリンダーに供給することによって与え、セル圧は同様に電気/空気圧変換器によって調整された空気圧を脱気水の水圧に変換して与えた。

試験は、まず供試体を軸圧密圧力が24.5、49.0および

表-1 荷重条件

圧密圧力 (kPa)	24.5		49.0		98.0		
養生条件	高温	室温	高温	室温	高温	室温	
圧密後の間隙比	1.297	1.316	1.259	1.240	1.196	1.160	
Δq_{max} (kPa)	20.3	13.8	22.7	16.3	24.5	20.0	
Δq_{cyc} (kPa)	R=30%	6.1	4.1	6.8	4.9	7.4	6.0
	R=60%	12.2	8.2	13.6	9.8	14.7	12.0

98.0kPaに達するまでK₀圧密した。この過程では前述のCK₀U三軸圧縮試験と同様に周面排水条件下で、まず9.8kPaの等方応力で予圧密を行った後、軸圧を4.0kPa/hrの一定速度で漸増载荷し、そのときの半径方向ひずみが0.005%以上変化しないようにセル圧を制御した。

軸圧が最終圧密圧力に達し、間隙水圧が消散した後、次の要領で三軸繰返し圧密試験を行った。すなわち、排水条件をそのまま周面排水条件とし、セル圧をK₀圧密の最終値のまま一定に保ち、軸圧はK₀圧密の最終値が最小値となり、全振幅が所定の繰返し応力増分 Δq_{cyc} となるような片振幅の正弦波で载荷した。

繰返し応力増分 Δq_{cyc} は、式(1)と(2)で示すように両試料に対してCK₀U三軸圧縮試験で得られた各圧密圧力での最大主応力差増分 Δq_{max} を基準強度とし、これに荷重強度率Rを乗じたものであり、荷重強度率Rは30%と60%とした。

$$\Delta q_{max} = q_{max} - q_0 \quad (1)$$

$$\Delta q_{cyc} = R \cdot \Delta q_{max} \quad (2)$$

ここに、 Δq_{max} はCK₀U三軸圧縮試験における最大主応力差増分、 q_{max} はCK₀U三軸圧縮試験で得られた最大主応力差、 q_0 はCK₀U三軸圧縮試験におけるK₀圧密終了時の主応力差、 Δq_{cyc} は繰返し応力増分、Rは荷重強度率（本試験では30%と60%）で、最大主応力差増分 Δq_{max} と繰返し応力増分 Δq_{cyc} は表-1に示すとおりである。なお、本試験の载荷周期は60秒で、過去の研究結果^{1,2)}と比較するために設定した値であり、現場における特定の現象を想定したものではない。なお、この周期は圧密の形態が異なるため単純に比較できないが、H²則に基づいて排水距離だけから見ると、厚さ10mの両面排水の粘土層が一次的に繰返し圧密される場合の周期14日に相当する。

また、本研究では三軸繰返し圧密試験だけでなく、繰返し応力増分 Δq_{cyc} と等しい定荷重を载荷する一定载荷三軸圧密試験（排水クリープ試験）も行った。さらに、三軸繰返し圧密試験および一定载荷三軸圧密試験を

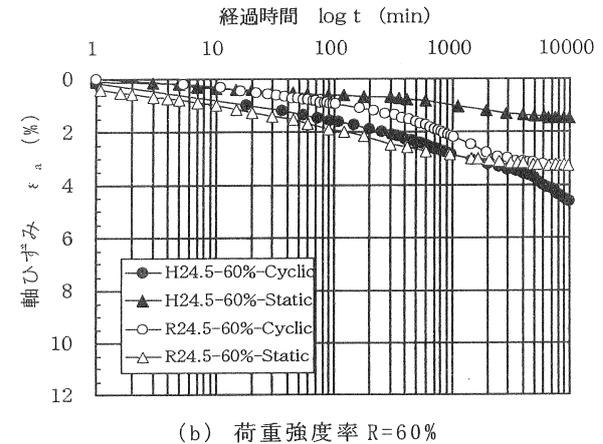
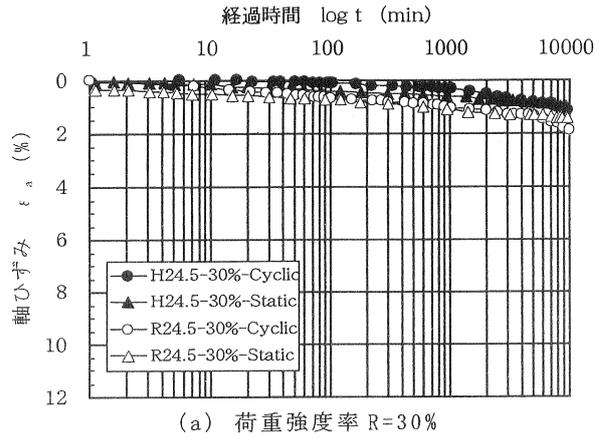


図-7 軸ひずみ～時間関係（圧密圧力 24.5kPa）

10,000分まで行った後、供試体を非排水状態にし、圧縮試験を行った。このときの軸ひずみ速度はCK₀U三軸圧縮試験と同じ0.1%/minとし、CK₀U三軸圧縮試験における圧縮強度と比較することによって繰返し圧密による強度変化についても検討した。なお、全ての試験は196.0kPaの背圧を負荷して行った。

3.2 試験結果と考察

a) 軸ひずみ～時間関係

軸圧密圧力を24.5、49.0、および98.0kPaまでK₀圧密した高温試料と室温試料に、荷重強度率が30%と60%の繰返し荷重および一定荷重を载荷して三軸圧密を行った場合の軸ひずみと時間の関係を図-7～9に示す。このうち、図-7は軸圧密圧力が24.5kPaの場合であり、新たな繰返し荷重および一定荷重が载荷される前の状態は過圧密比が2の過圧密状態にあり、さらに表-1に示す荷重が新たに载荷されても試料作成時の圧密圧力（49.0kPa）を越えないため、载荷後の挙動も過圧密領域での圧密挙動となる。この図において荷重が比較的小さい場合（図-7a）は、すべての実験条件において発生する軸ひずみが小さく、軸ひずみ～時間関係もほぼ一致していると言えるが、詳細に見ると高温試料の軸ひずみが室温試料より若干小さい傾向が読み取れる。これは、高温試料にお

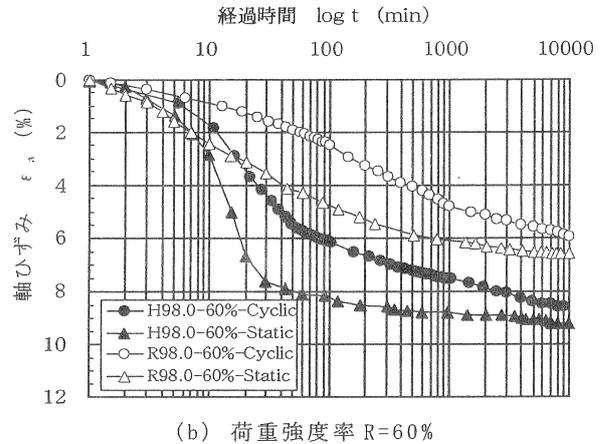
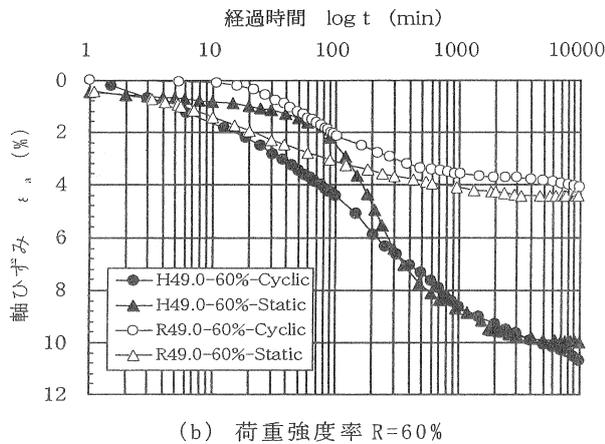
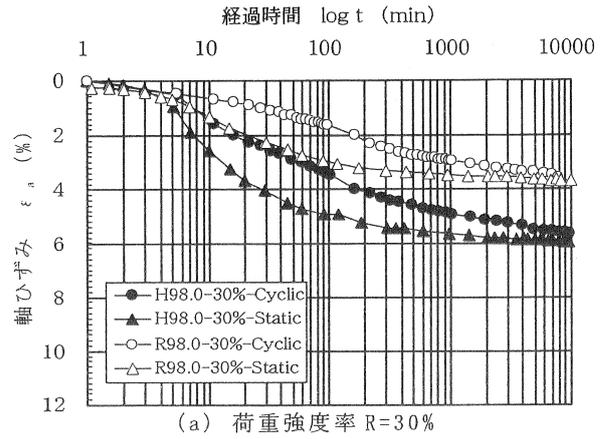
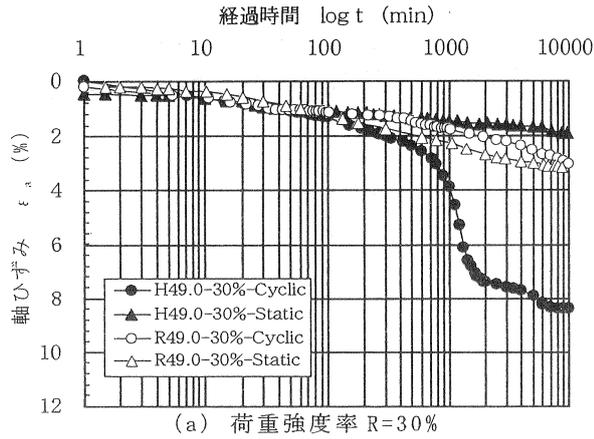


図-8 軸ひずみ～時間関係 (圧密圧力 49.0kPa)

図-9 軸ひずみ～時間関係 (圧密圧力 98.0kPa)

いては図-3および図-5に示したように試料作成時の高温養生によって形成された粘土の骨格構造が室温試料より強固なためと思われる。一方、荷重が比較的大きな場合(図-7b)は、繰返し荷重と一定荷重で違いが現れている。すなわち、室温試料においては繰返し荷重の場合に圧密の進行が遅いものの最終的な軸ひずみは載荷形式に依らずほぼ一致し、軸ひずみはある一定値に収束する傾向がある。しかし、高温試料においては繰返し荷重と一定荷重で最終的な軸ひずみが大きく異なり、一定荷重の場合は最終的な軸ひずみは室温試料より小さくなり一定値に収束する傾向があるが、繰返し荷重の場合は最終的な軸ひずみが室温試料より大きくなるとともに一定値に収束する傾向が認められない。これは、過圧密領域であっても比較的大きな荷重が作用すると、一定荷重の場合はそうでもないが、繰返し荷重の場合は試料作成時の高温養生によって形成された強固な粒子構造が徐々に破壊されて行くことを示している。

図-8は、試料作成時と同じ軸圧密圧力(49.0kPa)まで K_0 圧密した場合である。この場合の室温試料と高温試料の圧密降伏応力は前述したようにそれぞれ51kPaと75kPaと評価されるため、圧密降伏応力の面から見ると表-1の荷重が載荷された場合、室温試料はすべて正規圧密領域での挙動となるが、高温試料は依然として過圧密

領域での挙動となる。この図において荷重が比較的小さい場合(図-8a)、室温試料の軸ひずみ～時間関係は繰返し荷重の場合に圧密の進行が遅いものの最終的な軸ひずみは載荷形式に依らずほぼ一致し、軸ひずみはある一定値に収束している。しかし、高温試料の軸ひずみ～時間関係は繰返し荷重と一定荷重で大きく異なっている。すなわち、一定荷重が載荷されたときの軸ひずみは室温試料より小さくなるが、繰返し荷重が載荷されたときの軸ひずみは圧密途中で急増し室温試料よりかなり大きくなっている。これは、前述したように試料作成時の高温養生によって形成された強固な粒子構造が一定荷重の場合にはあまり破壊されないが、繰返し荷重の場合には破壊されることを示している。

また、荷重が比較的大きな場合(図-8b)、室温試料の軸ひずみ～時間関係は荷重の大きさに応じて軸ひずみが大きくなるものの図-8aと同様に最終的な軸ひずみは繰返し荷重と一定荷重でほぼ等しくなっている。一方、高温試料の軸ひずみ～時間関係は図-8aと異なり、一定荷重においても圧密途中から軸ひずみが急増し、最終的な軸ひずみは繰返し荷重と一定荷重でほぼ等しくなっている。これは、荷重がある程度大きくなると、一定荷重によっても高温試料の粒子構造が破壊されるためと考えられる。なお、高温試料の最終的な軸ひずみが室温試料

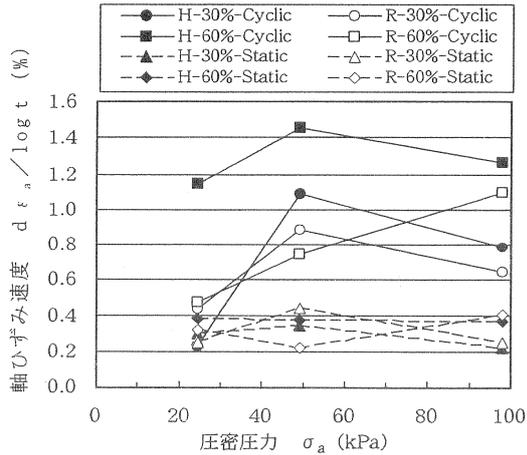
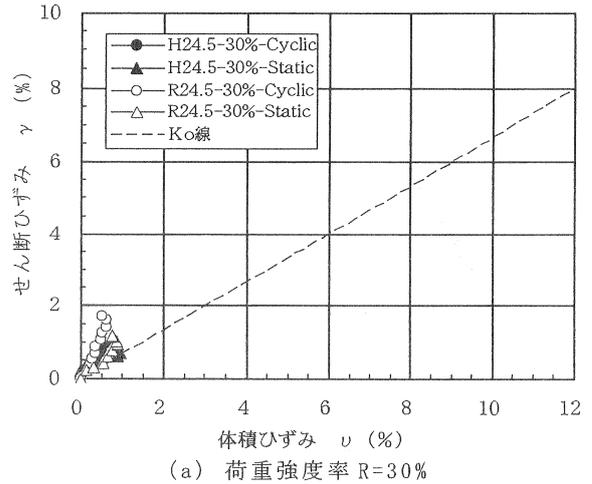


図-10 圧密後半部分の軸ひずみ速度

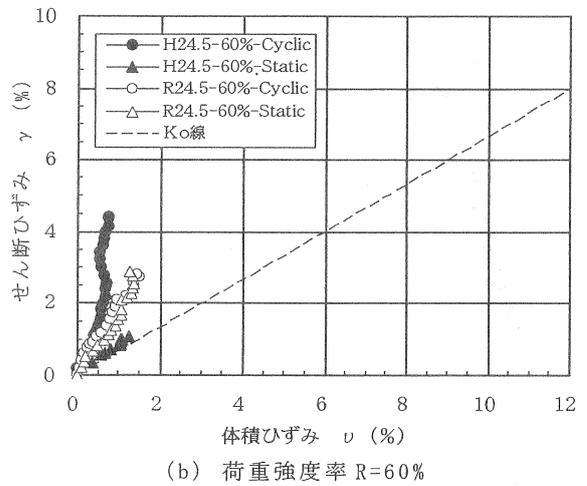
より大きくなるのは試料作成時の高温養生によって形成された強固な粒子構造がK₀圧密の際に抵抗するため表-1に示すようにK₀圧密後の間隙比は高温試料の方が大きくなっているが、比較的大きな荷重が新たに載荷されると残存していた高位な粒子構造が破壊されるためと考えられる。

図-9は、試料作成時の圧密圧力の2倍までK₀圧密した場合であり、K₀圧密終了段階で両試料とも正規圧密状態となっている。この場合は、新たに載荷される荷重の大きさによって発生する軸ひずみの値そのものは異なるが、試料の違いおよび荷重強度率の違いに依らず軸ひずみ～時間関係はほぼ同様な傾向を示している。すなわち、両試料の両荷重強度率とも、一定荷重を載荷した場合には軸ひずみが圧密初期に急増し、その後一定値に収束するが、繰返し荷重を載荷した場合には軸ひずみは徐々に増加し、10,000分経過時には一定荷重より小さいものの増加速度は一定荷重より大きく、さらに時間が経過すると繰返し荷重による軸ひずみの方が一定荷重より大きくなる傾向が認められる。また、高温試料と室温試料の軸ひずみの値を比較すると、荷重強度率の違いに依らず高温試料の軸ひずみが大きくなっている。これは、前述したように高温試料では試料作成時の2倍の圧密圧力までK₀圧密されても高温養生時に形成された粒子構造がある程度残り、粒子構造は室温試料に比べて高位な状態となっており、これが三次元的な変形が許される状態で載荷される新たな荷重によって破壊されるためと考えられる。

なお、等方圧密後の三軸繰返し圧密試験^{1,2)}では、荷重が非排水強度に近い場合に室温試料の軸ひずみが高温試料より大きくなり、荷重が比較的小さい場合や非排水強度より大きい場合には高温試料と室温試料の軸ひずみ～時間関係にあまり違いは表れず、本試験と異なる結果となっていた。これは、三軸繰返し圧密試験における圧密形式が試料作成時の圧密形式と異なる場合には高温養生によって形成された粒子構造が破壊され易いため、試



(a) 荷重強度率 R=30%



(b) 荷重強度率 R=60%

図-11 ひずみ経路 (圧密圧力 24.5kPa)

料作成時の圧密形式と異なる等方圧密によって予圧密された高温試料の粒子構造はK₀圧密された場合に比べて室温試料のそれに近づいていたためと考えられる。

図-10は、図-7～9に示した軸ひずみ～時間 (対数) 関係における圧密終期の傾き (軸ひずみ速度 = $d\epsilon_a / d \log t$) を示したものである。この図から、一定荷重が作用した場合の軸ひずみ速度は、試料作成時の養生温度、K₀圧密時の圧密圧力、および三軸圧密時の荷重強度率の違いに依らずほぼ0.2～0.4%の比較的狭い範囲にあることがわかる。なお、一定荷重を載荷した一次元圧密における二次圧密係数 ($C_a = d e / d \log t$) は高温試料と室温試料とも0.0050～0.0075の範囲にあり、この値から二次圧密領域での軸ひずみ速度 ($d\epsilon_a / d \log t$) を求めると0.2～0.3%となり、上記の値とほぼ一致している。一方、繰返し荷重が作用した場合の軸ひずみ速度には、試料作成時の養生温度、K₀圧密時の圧密圧力、および三軸圧密時の荷重強度率の影響が現れている。すなわち、過圧密領域での挙動となる圧密圧力が24.5kPaの場合、高温試料に比較的大きな繰返し荷重が作用した場合以外は一定荷重が作用した場合とほぼ同じ軸ひずみ速度となっているが、高温試料に比較的大きな

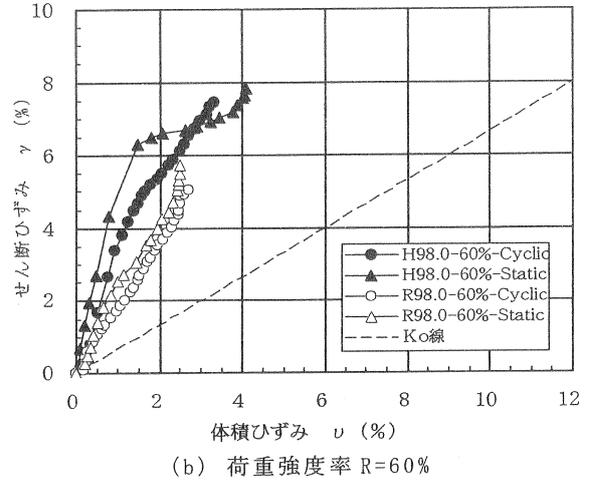
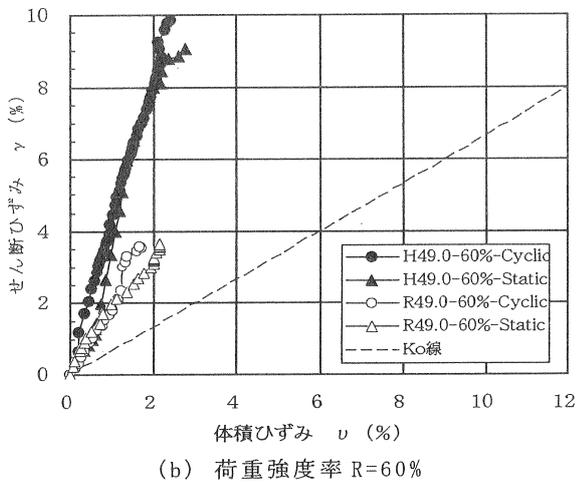
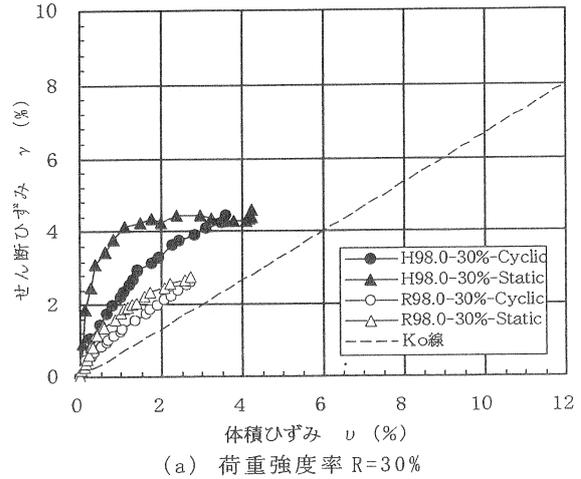
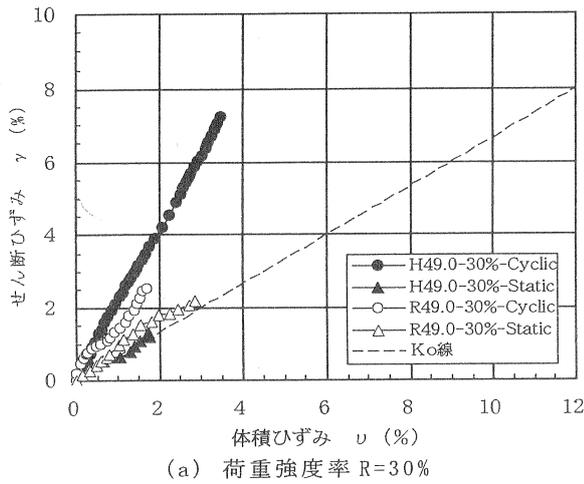


図-12 ひずみ経路 (圧密圧力 49.5kPa)

図-13 ひずみ経路 (圧密圧力 98.0kPa)

繰返し荷重が作用した場合の軸ひずみ速度は、それらの値より3~5倍大きくなっている。また、圧密圧力が49.0kPaと98.0kPaの場合、繰返し荷重が作用した場合の軸ひずみ速度は、同じ条件で一定荷重が作用した場合に比べて3~4倍程度大きな値となり、荷重強度率が同じであるなら室温試料より高温試料が大きくなり、養生温度が同じであるなら荷重強度率とともに大きくなる傾向が読み取れる。さらに、圧密圧力が49.0kPaと98.0kPaの場合を比較すると、前者の場合が後者の場合より小さくなっており、これは完全な正規圧密領域より圧密降伏応力付近での残留沈下速度が大きいことを示している。盛土道路における供用開始後の交通荷重による沈下は、大きな盛土荷重によって完全に正規圧密状態となった場合より圧密降伏応力付近で交通荷重が作用する低盛土道路の場合に大きくなることが報告されている²⁾が、上記の軸ひずみ速度の違いがこの一因になっていると思われる。

b) ひずみ経路

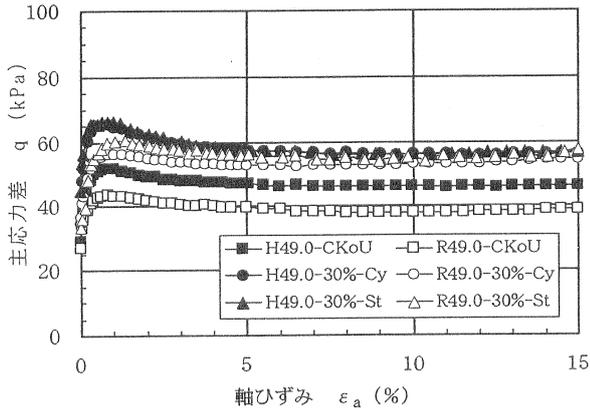
図-11~13は、高温試料と室温試料に繰返し荷重と一定荷重が載荷された場合のせん断ひずみと体積ひずみの関係、すなわちひずみ経路を圧密応力ごとに示したもの

である。なお、本論文では体積ひずみ ν とせん断ひずみ γ を次のように定義している。

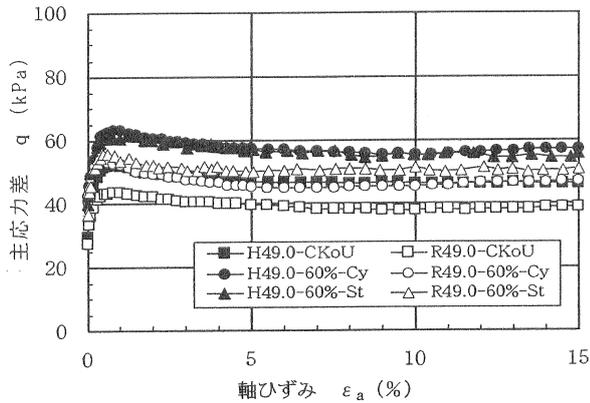
$$\nu = \epsilon_a + 2 \cdot \epsilon_r \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{2}{3}(\epsilon_a - \epsilon_r) = \epsilon_a - \frac{1}{3}\nu \quad (4)$$

ここに、 ϵ_a と ϵ_r はそれぞれ供試体の軸ひずみと半径方向ひずみである。また、これらの図で原点を通る傾き2/3の直線は K_0 変形条件を表しており、この線から上側の経路では非排水せん断変形が生じていることを表している。これらの図から、多少のばらつきはあるものの室温試料のひずみ経路は、圧密圧力と荷重強度率が同じであれば載荷形式(繰返し荷重か一定荷重か)の違いに依らずほぼ同じ経路を辿っていることがわかる。一方、高温試料のひずみ経路は載荷形式の違いによる影響を受け、過圧密領域(図-11)では繰返し荷重の場合が一定荷重の場合よりせん断ひずみがすべての過程で大きくなっているが、正規圧密領域(図-13)では逆に一定荷重の場合が繰返し荷重の場合よりせん断ひずみが圧密途中で大きくなっている。これは、試料作成時の高温養生

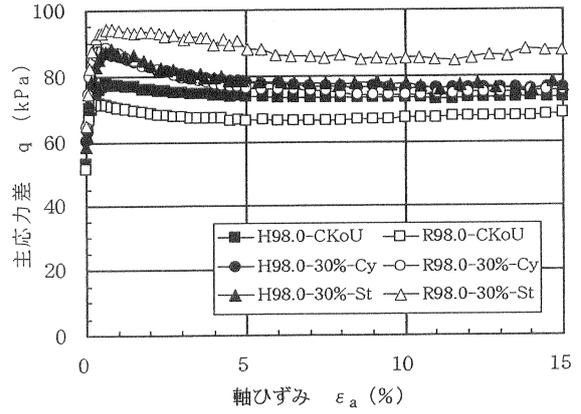


(a) 荷重強度率 R=30%

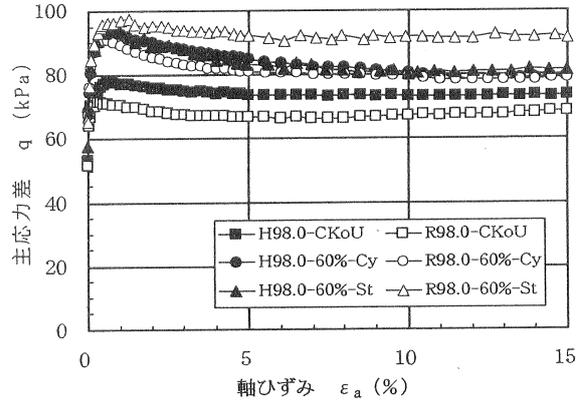


(b) 荷重強度率 R=60%

図-14 載荷後の非排水強度
(圧密圧力 49.0 kPa)



(a) 荷重強度率 R=30%



(b) 荷重強度率 R=60%

図-15 載荷後の非排水強度
(圧密圧力 98.0 kPa)

によって形成された強固な粒子構造が過圧密領域では比較的残存しており、これが一定荷重に対しては抵抗するが、攪乱効果の大きな繰返し荷重では破壊され、せん断ひずみが大きくなったと考えられる。一方、正規圧密領域では高温養生によって形成された粒子構造の大部分がその後のK₀圧密によって破壊され、残存している粒子構造も新たな荷重に対して変形し易くなっていると考えられるため、荷重が継続して作用している一定荷重の場合に圧密初期の非排水せん断変形が大きくなったと考えられる。

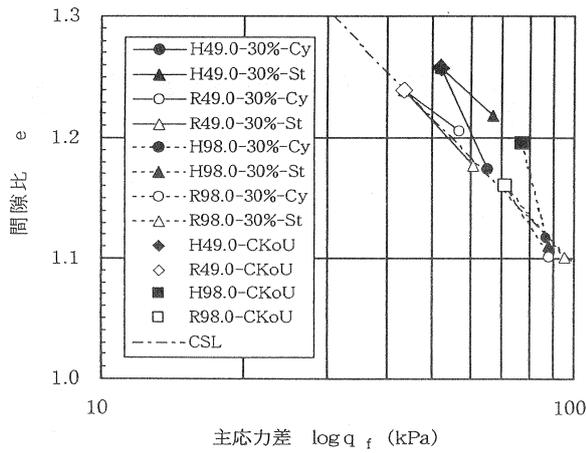
また、圧密圧力が同じ場合には、高温試料と室温試料ともに荷重強度率の大きい方がひずみ経路の傾きが大きい、すなわちせん断ひずみの発生量が大きいことがわかる。これは、実際の地盤に三次元的な荷重が載荷されたときに荷重の増加によって起こる沈下量の増加には、圧密による体積変形より非排水せん断変形の方が大きく寄与していることを示している。

なお、等方圧密後に繰返し荷重が載荷された三軸繰返し圧密試験では、載荷直後に大きな非排水せん断ひずみが発生するものの、その後、時間の経過とともに体積ひずみが卓越し、K₀線を越えて半径方向にも圧縮されていた^{1,2)}。しかし、K₀圧密後に繰返し荷重および一定

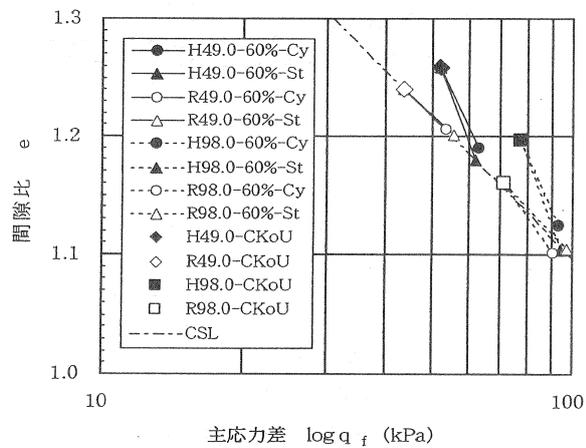
荷重が載荷された本試験では、図-11~13に示したようにひずみ経路はK₀線を越えることはなく、すべての場合において半径方向に膨張している。これは、本試験では新たな荷重が載荷される時点(K₀圧密後)で、既に比較的大きな初期せん断応力が作用しているためと考えられる。これは、K₀圧密状態となっている実際の地盤に三次元荷重が載荷された場合には、等方圧密後の三軸試験によって予想されるほど間隙比が減少しないため、圧密初期に強度増加があまり期待できないことを示している。

c) 繰返し圧密後の非排水せん断強度

図-14と15は、繰返し荷重および一定荷重による三軸圧密を10,000分行った後、供試体を非排水条件にして軸ひずみ速度0.1%/minで三軸圧縮試験を行った場合の主応力差と軸ひずみの関係を、繰返し荷重および一定荷重による三軸圧密を行う前のものと比較して示したものである。これらの図から、繰返し荷重および一定荷重が作用することによって生じる強度増加(CK₀U強度との差)は、高温試料より室温試料の方が大きいことがわかる。また、高温試料の応力~ひずみ曲線は載荷形式の違いに依らずほぼ一致しているが、室温試料の応力~ひずみ曲線は載荷形式の違いによる影響を受け、繰返し荷重



(a) 荷重強度率 R=30%



(b) 荷重強度率 R=60%

図-16 破壊時の間隙比と主応力差の関係

の場合は一定荷重の場合より強度が小さく、かつピーク後の強度低下も大きいことがわかる。

なお、粘土の強度は、圧密圧力だけでなく間隙比の大きさにも強く依存するため、圧密圧力ごとに示した図-14と15だけからその大きさを単純に評価できない。そこで、非排水三軸圧縮試験における破壊時の間隙比と主応力差の関係を示したものが図-16である。この図における一点鎖線は、粘土の挙動がCam-clayモデルに従うと仮定した場合の破壊時の主応力差と間隙比の関係、すなわち限界状態線 (CSL) で、室温試料に対して圧密圧力49.0kPaで行ったCK₀U試験で得られた点 (図中の◇印) を通り、傾きが圧縮指数 ($C_c=0.43$) と等しくなるように引いたものである。この図から、室温試料に対するCK₀U試験の破壊点は圧密圧力が異なっても同じ限界状態線上にあることがわかる。また、室温試料に繰返し荷重および一定荷重が作用した後の破壊点は、圧密圧力、荷重強度率、および載荷形式の違いに係わらず同じ限界状態線上に位置しているおり、室温試料の破壊点は一本の限界状態線で評価できることがわかる。一方、高温試料に対するCK₀U試験の破壊点はいずれも限界状態線より右側にあり、室温試料に比べて同じ間隙比に

おける強度が大きくなっていることがわかる。これは、試料作成時の高温養生によって形成された強固な粒子構造がK₀圧密後も残存していたためと考えられる。そして、高温試料に繰返し荷重および一定荷重が作用した後の破壊点は、圧密圧力が49.0kPaで荷重強度率30%の一定荷重が作用した場合に依然として限界状態線より右側にあるが、それ以外はすべて限界状態線上に位置している。これは、圧密圧力が小さい場合にはK₀圧密後に高温養生によって形成された強固な粒子構造が比較的多く残存しており、それが比較的小さな一定荷重の場合には破壊されずに残存するが、それ以外の場合は図-12と13で示したように非排水せん断変形を伴う新たな三次元荷重によって破壊されたためと考えられる。

4. まとめ

本研究では、飽和粘土の繰返し圧密挙動に及ぼす圧密履歴の影響を明らかにすることを主目的として、高温養生再圧密粘土試料と通常の室温再圧密粘土試料を用いて三軸繰返し圧密試験を実施し、試料作成時の養生温度の違いによる影響を調べるとともに、繰返し荷重を載荷する前の予圧密をK₀圧密で行い、過去に実施した等方圧密後の三軸繰返し圧密試験結果と比較した。その結果、得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 圧密非排水三軸圧縮試験において、試料作成時の2倍の圧密圧力まで等方圧密した場合の応力~ひずみ曲線は高温試料と室温試料でほぼ一致していたが、K₀圧密した場合の応力~ひずみ曲線は高温試料と室温試料で異なり、高温試料の強度が大きくなる。
- (2) 等方圧密後の三軸繰返し圧密試験では、荷重が非排水強度に近い場合に室温試料の軸ひずみが高温試料より大きくなり、それ以外の場合は高温試料と室温試料の軸ひずみ~時間関係はほぼ一致していたが、K₀圧密後の三軸繰返し圧密試験で室温試料の軸ひずみが高温試料より大きくなるのは圧密圧力が圧密降伏応力より小さく、かつ荷重も比較的小さい場合だけであり、それ以外の場合は高温試料の軸ひずみが室温試料より大きくなる。
- (3) 等方圧密後に繰返し荷重が載荷された場合のひずみ経路は、載荷直後に大きな非排水せん断ひずみが発生するものの、その後、時間の経過とともに体積ひずみが卓越し、K₀線を越えて半径方向にも圧縮されていたが、K₀圧密後に繰返し荷重が載荷されたときのひずみ経路はK₀線を越えることはなく半径方向に膨張し続ける。
- (4) 室温試料の破壊点は、圧密圧力、荷重強度率、および載荷形式の違いに係わらず一本の限界状態線で評価できる。しかし、高温試料におけるCK₀U試験の破壊点は室温試料の限界状態線と一致せず、室温試料に比べて同じ間隙比における強度が大きくなっている。また、高温試料に繰返し荷重および一定荷

重が作用した後の破壊点は、圧密圧力が圧密降伏応力以下で比較的小さな一定荷重が作用した場合には依然として室温試料の限界状態線と一致しないが、繰返し荷重が作用する場合や圧密圧力が圧密降伏応力より大きい場合は室温試料の限界状態線と一致する。

以上で示したように、飽和粘土の三軸繰返し圧密挙動は、試験に供する試料が高温試料か室温試料かで異なるとともに、繰返し荷重を載荷する前の圧密形式が等方圧密かK₀圧密かでも大きく異なることが明らかとなった。そのため、粒子構造の発達している自然粘土地盤に三次元的な繰返し荷重が作用する場合の繰返し圧密挙動を攪乱再圧密粘土を用いて調べる際には高温試料の使用が不可欠であるが、高温試料および不攪乱自然粘土を用いる場合でも繰返し荷重を載荷する前の圧密形式はK₀圧密とする必要がある。

謝辞

本研究を進めるに当たり、貴重なご助言をいただいた佐々木康教授（広島大学工学部）、加納誠二助手（同）、実験及びデータ整理に多大なご助力をいただいた山本博技官（同）、梅原健氏（鳥取県土木部）、川城憲司氏（榊きんでん）に深く感謝します。

参考文献

- 1) Yamanouchi, T. and Yasuhara, K. : Settlement of clay subgrades after opening to traffic, Proc. of 2nd Australia and New Zealand Conference on Geomechanics, Vol.1, pp.114-119, 1972.
- 2) 久楽勝行, 三木博史 : 軟弱地盤上の低盛土道路の沈下挙動とその対策, 第26回土質工学シンポジウム, pp.23-30, 1981.
- 3) 三浦哲彦, 飯盛喜代春, 坂井晃・陶野郁雄 : 佐賀平野における揚水に伴う地盤沈下と地下水水質への影響, 土と基礎, 第34巻, 第11号, pp.13-18, 1986.
- 4) 新潟県環境保健部公害対策課 : 南魚沼地区の地盤沈下 (13), 1989.
- 5) 吉国洋 : 繰返し圧密現象, 講座「土の繰返し圧密」, 土と基礎, 第39巻, 第6号, pp.102-108, 1991.
- 6) 松田博, 坂井晃, 林重徳, 梅崎健夫, 森脇武夫, 安原一哉 : 繰返し圧密の統一試験とその解析に関する報告, 繰返し応力を受ける地盤の変形に関するシンポジウム発表論文集, pp.1-6, 1990.
- 7) Hyodo, M., Yasuhara, K. and Hirao K. : Prediction of clay behaviour in undrained and partially drained cyclic triaxial tests, Soils and Foundations, Vol.32, No.4, pp.117-127, 1992.
- 8) 森脇武夫, 齊藤正巳, 川城憲司, 吉国洋 : 飽和粘土の一次元繰返し圧密挙動と弾粘性圧密理論に基づく数値解析, 土木学会第54回 年次学術講演会講演概要集, 第3部 (A), pp.374-375, 1999.
- 9) 土田孝, 小林正樹, 水上純一, 田中正典 : 高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現, 港湾技術研究所報告, 第28巻, 第1号, pp.121-147, 1989.
- 10) Moriwaki, T., Yashima, K. and Nago, M. : Shear deformation characteristics of Hiroshima clay cured at high temperature, Proc. of the International Symposium on Prefailure Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol.1, 119-124, 1994.
- 11) 戸能実, 吉国洋, 森脇武夫 : K₀圧密三軸試験システムの開発, 第45回平成5年度土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp.356-357, 1993.
- 12) 森脇武夫, 吉国洋, 永井大海, 名合牧人 : 高温再圧密粘土の三軸繰返し圧密挙動, 土木学会論文集, No.463/III-22, pp.55-63, 1993.
- 13) 地盤工学会 : 土のK₀試験非排水三軸圧縮試験方法, 新規制定地盤工学会基準・同解説, pp.9-31, 1996.