

高温再圧密粘土の三軸繰返し圧密挙動

森脇武夫*・吉国 洋**・永井大海***・
名合牧人****

本論文では、まず高温で再圧密した粘土試料が年代効果を有する不攪乱自然粘土と類似の力学特性を持つことを示した。その後、高温再圧密粘土と通常の室温再圧密粘土を用いた三軸繰返し圧密試験を行い、両者の違いを検討した。その結果、両者の繰返し圧密挙動には一致しない点が多々あることが明かとなり、高温再圧密粘土に類似した自然粘土の繰返し圧密挙動を通常の室温再圧密粘土を用いて調べることに問題点を指摘した。

Keywords : clay, temperature effect, consolidation, triaxial test, cyclic load

1. ま え が き

繰返し荷重を受ける粘性土地盤の圧密挙動は、荷重が静的に作用する場合と大きく異なることが報告されている。その代表的なものに、軟弱粘土地盤上に建設された低盛土道路が長期にわたって異常沈下した例^{1),2)}や、新潟、濃尾、佐賀などの沖積平野で季節的な地盤沈下が長期にわたって継続している例³⁾⁻⁵⁾などがある。前者は交通荷重に、後者は地下水の季節的な汲み上げにその原因が求められている。両者は周期に違いがあるものの、共に周期的荷重のもとでの圧密沈下現象であり、総称して「繰返し圧密」と呼ばれている。定荷重の圧密とこの「繰返し圧密」とで大きく異なる点は、前者では通常、粘土層の全ての部分で圧密(排水圧縮)が生じ、変形も常に一定方向に生じているのに対して、後者では膨張(吸水膨張)している部分と圧密(排水圧縮)している部分が並存するとともに⁶⁾、変形方向も周期的に変わり、土の骨組み構造が大きく攪乱されることである。これが繰返し圧密現象をより複雑なものにしている。

このような繰返し圧密現象を解明するために、これまでに数多くの研究が行われ、最近では土質工学会に「土の繰返し圧密研究委員会」が組織され盛んに研究が進められてきた。その結果、繰返し圧密の特異な現象を説明するための解析モデルもいくつか提案されているが、現状は粘性土の繰返し圧密特性そのものが解明されているとは言い難い。すなわち、これまでの研究を眺めてみると、定荷重の圧密に比べて繰返し圧密の沈下が、当初から大きいと報告しているものもあれば⁷⁾、途中で逆転するもの⁸⁾、最後まで小さいとするものまである⁹⁾。さらに、

実験室で行った繰返し圧密試験結果と実際の現場での挙動が、定性的にも一致しない場合も多い。これらの原因として、載荷周期、載荷波形など、様々な試験条件の違いが考えられるが、実験に用いた試料と実際の粘土で力学特性が異なっていることもその一因として挙げられる。

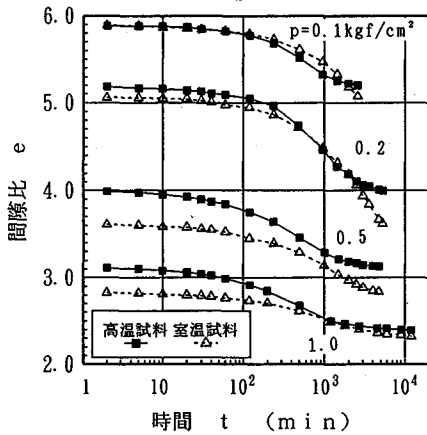
すなわち、自然地盤の繰返し圧密挙動を把握するためには、不攪乱自然粘土を用いて繰返し圧密試験を行う必要があるが、自然粘土試料では試料のばらつきが大きく、さらに試験に使用できる試料の量にも限界があるため、十分な精度で再現性のある試験を行うことができない。そこで通常は、現場から採取してきた多量の試料を均一な試料となるように室内で粒度や含水比等の調整を行い、スラリーから再圧密して試験に用いている。しかし、室温で作成した通常の攪乱再圧密粘土試料は、圧密時間が短く、シキソトロピー、あるいはセメンテーション作用も十分に発揮されていないため、粘土の骨組み構造が発達せず、自然粘土が有している年代効果を再現しているとは言い難い。事実、年代効果のために不攪乱自然粘土と攪乱再圧密粘土の力学特性は大きく異なることが、Mesri and Godlewski¹⁰⁾、Jamiolkowski¹¹⁾らによって報告されている。これらの指摘は、荷重が単調に増加する場合についてであるが、荷重が繰返して作用する場合には粘土の骨組み構造が乱され易いため、年代効果の有無が粘土の力学特性にもっと重大な影響を及ぼすと考えられる。そこで、攪乱再圧密粘土で年代効果を再現するために、化学的添加物をスラリーに混合して再圧密する方法¹²⁾がしばしば行われてきたが、添加物を加えることによって粘土の力学特性が本質的に変化し、いわば違う種類の粘土になっているのではないかとの疑問が残る。このような問題を避け、容易に年代効果を再現する方法として、スラリーから高温で再圧密して試料を作成する方法が土田ら¹³⁾によって提案され、その有効性が指摘され

* 正会員 工博 広島大学助手 工学部第四類
(〒724 東広島市鏡山1丁目4-1)

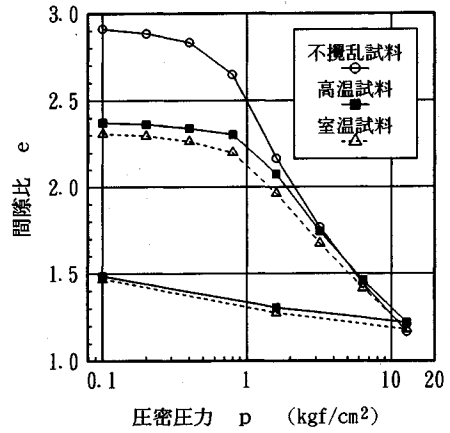
** 正会員 工博 広島大学教授 工学部第四類

*** 正会員 工修 五洋建設(株) 技術研究所

**** 正会員 工修 大成建設(株) 土木設計部



図一 再圧密中の間隙比の経時変化



図二 $e \sim \log p$ 曲線

ている^{14)~16)}。

そこで本研究では、まず高温で再圧密した粘土試料が年代効果を有する自然粘土と類似の力学特性を持つことを示す。その後、高温再圧密粘土と通常の室温再圧密粘土を用いて三軸繰返し圧密試験を行い、両者の違いを明らかにする。そして、その結果から通常の室温再圧密粘土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ための問題点を明らかにする。

2. 高温再圧密粘土の力学特性

(1) 試料および再圧密方法

試験に用いた試料は広島市佐伯区五日市沖の広島湾から採取した沖積粘土で、通称「広島粘土」と呼ばれているものである。広島粘土の物理的性質は、液性限界 $w_L = 116.5\%$ 、塑性限界 $w_p = 45.4\%$ 、塑性指数 $I_p = 71.1\%$ 、土粒子の比重 $G_s = 2.623$ である。この粘土から供試体を作るための再圧密の方法は次のとおりである。まず、採取した粘土を液性限界の約2倍の含水比 ($w = 240\%$) で十分攪乱し、スラリーとした後、 $420\mu\text{m}$ フルイを通して貝殻等を取り除いた。その後、約24時間脱気を行い、再圧密セルに投入し、両面排水条件で一次的に再圧密した。再圧密セルは、直径24 cm、高さ40 cm、肉厚12 mmのステンレス製で、復動式ペロフラムシリンダーによって鉛直圧密圧力を載荷できるようになっている。再圧密は、まず24時間室温で自重圧密させた後、 $0.1 \rightarrow 0.2 \rightarrow 0.5 \rightarrow 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の鉛直圧密圧力で段階的に圧密した。このとき再圧密セルを恒温水槽に入れ、温度を 20°C と 70°C の一定に保った。以後、前者を室温(再圧密)試料、後者を高温(再圧密)試料と呼ぶ。各段階での圧密の打ち切り時期は、高温試料に3t法を適用して決定し、室温試料は高温試料と同じ時間で打ち切った。

図一に各再圧密段階での高温試料と室温試料の時間

表一 再圧密粘土の圧密降伏応力と間隙比

	p_c (kgf/cm ²)	e_o
高温試料	1.05 1.10 1.17	2.391 2.424 2.455
	平均 1.11	平均 2.423
室温試料	0.91 0.94 0.99	2.319 2.349 2.377
	平均 0.95	平均 2.348

～沈下曲線を間隙比の経時変化を用いて示す。なお、この図では共に室温で24時間行った自重圧密段階での間隙比の減少過程 ($\Delta e = 0.40$) を省略している。この図から、各段階での沈下量(間隙比の減少量)は、圧密圧力が小さい段階 ($p = 0.1$ と 0.2 kgf/cm^2) では室温試料の方が大きい、圧密圧力が大きくなる ($p = 0.5$ と 1.0 kgf/cm^2) と高温試料の方が大きくなっていることがわかる。そして、両者の間隙比は、圧密圧力が $p = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の最終状態でほぼ等しくなるが、わずかに高温試料の方が大きくなっている。これと同様な結果は、土田ら¹⁶⁾によっても報告されており、高温状態ではシキントロピーやセメンテーションなどの化学的作用が促進され、より高位な粒子構造が形成されるためだと考えられる。また、圧密速度は全ての段階で高温試料の方が速く、圧密圧力が小さな段階 ($p = 0.1$ と 0.2 kgf/cm^2) での室温試料は、高温試料に対して3t法で求めた圧密の打ち切り時点においても未だ一次圧密過程と見なせる状態であった。

(2) 再圧密粘土の力学特性

a) 標準圧密試験

図二は、前述の再圧密方法で作成した高温試料と室温試料の標準圧密試験で得られた $e \sim \log p$ 曲線と不攪乱試料のそれを比較したものである。なお、高温試料、室温試料ともそれぞれ3個の標準圧密試験を行っているが、高温試料の $e \sim \log p$ 曲線は全て室温試料より右上に位置した。図二に示したのはそのうちの典型的なも

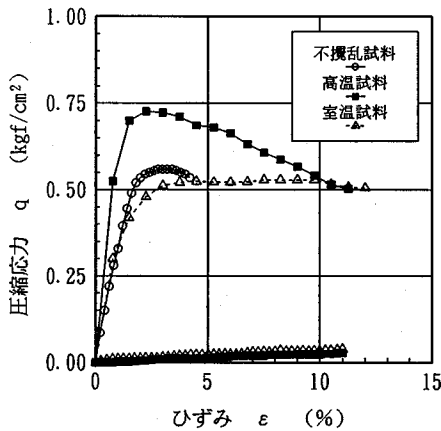


図-3 一軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線

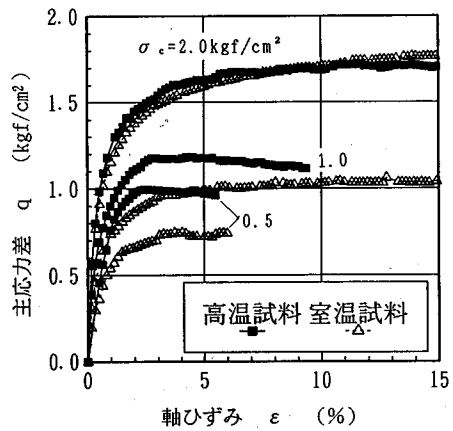


図-4 CU三軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線

のである。また、不攪乱試料は再圧密試料の採取地点の近傍からシンウォールサンプラーによって採取したもので、採取深度はG.L.14.00m～14.65m(土被り圧は約0.61kgf/cm²)、圧密降伏応力は $p_c=0.69$ kgf/cm²であった。本来、この図で比較する不攪乱試料としては、その土被り圧が再圧密圧力($p_0=1.0$ kgf/cm²)と等しいものを選ぶのが望ましいが、それに対応する深度での標準圧密試験が行われていなかったため、ここでは圧密降伏応力が再圧密圧力に最も近い採取深度の結果を掲載した。この図において、室温試料の $e\sim\log p$ 曲線は圧密降伏応力と再圧密圧力がほぼ一致するとともに、圧密降伏応力より大きいところではほぼ直線となっている。しかし、高温試料の $e\sim\log p$ 曲線は、年代効果を有する不攪乱粘土で見られるような圧密降伏応力付近での飛び出し現象が認められる。表-1はキャサグランデ法によって求めた圧密降伏応力 p_c と初期間隙比 e_0 を示したものであり、高温試料の圧密降伏応力は室温試料および再圧密圧力より大きくなっていることがわかる。また、初期間隙比(再圧密後の間隙比)は前述したようにわずかではあるが高温試料の方が室温試料より大きくなっている。しかし、圧密圧力がある程度(この図では3.2～6.4kgf/cm²以上)大きくなると、 $e\sim\log p$ 曲線は再圧密方法や攪乱試料・不攪乱試料にかかわらずほぼ一本の直線となる。

b) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験で得られた高温試料、室温試料および不攪乱試料の応力～ひずみ曲線を図-3に示す。なお、この図に示した不攪乱試料の結果は、前述の $e\sim\log p$ 曲線で示した採取深度の試料に対するものである。この図において、室温試料では明瞭な破壊ひずみが現れず、ひずみが約4%以上で圧縮応力がほぼ一定となっているが、高温試料ではひずみが2～3%で圧縮応力がピークに達し、その後大幅な強度低下が生じている。ピーク時

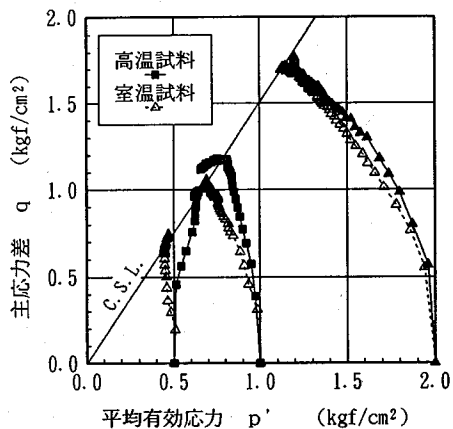


図-5 CU三軸圧縮試験の有効応力経路

の圧縮強度、すなわち一軸圧縮強度は、高温試料の方が約1.4倍ほど大きくなっているが、残留強度はほぼ等しいか、あるいは逆に高温試料の方が小さくなる傾向が現われている。不攪乱試料は前述したように再圧密試料より圧密圧力が小さかったものと推定されるため、高温試料ほどの一軸圧縮強度は得られていないが、それでも室温試料より大きな一軸圧縮強度を示している。また、不攪乱試料と高温試料の破壊ひずみはほぼ等しくなっている。

c) CU三軸圧縮試験

高温試料と室温試料に対する圧密非排水(CU)三軸圧縮試験で得られた応力～ひずみ曲線と有効応力経路をそれぞれ図-4と図-5に示す。なお、CU三軸圧縮試験は、土質工学会基準JSFT523-1990に基づき、それぞれ圧密圧力 $\sigma_c=0.5, 1.0, \text{および} 2.0$ kgf/cm²で等方圧密したのち、軸ひずみ速度0.1%/minで行った。

図-4から室温試料の応力～ひずみ曲線はひずみ硬化型となり、硬化の程度は圧密圧力が大きいほど顕著であるが、高温試料の応力～ひずみ曲線はひずみ軟化型にな

り、軟化の程度は圧密圧力が小さいほど顕著であることがわかる。また、同じ軸ひずみに対する主応力差は高温試料の方が大きく、その度合は圧密圧力が小さいほど大きい。しかし、圧密圧力が大きくなるとその差は次第に小さくなり、再圧密時の2倍の圧力 ($\sigma_c=2.0\text{kgf/cm}^2$) で圧密されたとき的高温試料と室温試料の応力～ひずみ曲線はほぼ一致している。詳細に見れば、主応力差は軸ひずみが小さいうちは高温試料の方が大きく、軸ひずみが大きくなると逆に室温試料の方が大きくなっている。これらのことから、高温再圧密によって室温試料より強固な粒子構造が形成され、それが三軸試験の等方圧密によって破壊され室温試料のそれに近づくが、三軸試験の圧密圧力が再圧密時のそれより小さな場合には再圧密時に形成された粒子構造がそれほど破壊されずに残るものと考えられる。また、圧密圧力がある程度大きくなっても、ひずみの小さい範囲では高温再圧密時に形成された強固な粒子構造の影響が幾分残っているものと考えられる。

図—5の有効応力経路からも同様な現象が読み取れる。すなわち、圧密圧力が大きな場合の高温試料と室温試料の有効応力経路はほぼ一致するが、圧密圧力が小さな場合では両者に違いが見られる。そして、圧密圧力が小さな場合の高温試料の有効応力経路は室温試料に比べてせん断初期に平均有効応力があまり変化しておらず、ダイレイタンスーを示さない弾性体の挙動に近いものとなっている。しかし、限界状態線の傾きは、再圧密方法に依らず一定とみなせ、この図では $M=1.5$ と読み取れる。

以上の結果と土田ら¹⁰⁾の結果などを併せて考えれば、高温試料は不攪乱自然粘土の力学特性を比較的忠実に再現していると考えられる。

3. 三軸繰返し圧密試験

(1) 試験方法

2. (1)で示した方法で作成した室温試料と高温試料を用いて、三軸繰返し圧密試験を行った。まず、それぞれの試料から直径5 cm、高さ12.5 cmの円柱形供試体を成形し、スリットを付けたペーパードレーン用のろ紙を二重に巻きつけた。その上に、厚さ0.2 mmのゴムスリーブを被せ、三軸圧力室にセットした。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ている。

三軸繰返し圧密試験に用いた装置は、通常の繰返し非排水三軸試験装置と同じものであり、三軸圧力室、セル圧・背圧供給装置、軸荷重装置、および荷重・変位・排水量・間隙水圧の測定・記録装置から構成されている。軸荷重は、電気一油圧サーボ方式で載荷され、ピストンロッドに取り付けられたロードセルでその値を測定

した。セル圧は、レギュレーター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、まず供試体を試料作成時の鉛直圧密圧力と同じ 1.0kgf/cm^2 の圧密圧力で24時間等方圧密した後、セル圧をそのまま保って、所定の主応力差を正弦波の完全片振りを与え、そのときの圧密挙動を観察した。本試験で与えた主応力差の最大値はそれぞれ $\sigma_d=0.8, 1.0, \text{および} 1.2\text{kgf/cm}^2$ の3ケースである。なお圧密圧力 $\sigma_c=1.0\text{kgf/cm}^2$ で等方圧密した広島粘土の静的非排水三軸圧縮強度は、図—4に示すように高温再圧密試料で 1.20kgf/cm^2 、室温再圧密試料で 1.05kgf/cm^2 である。

また、本試験の載荷周期は30秒と60秒で、両者に大きな違いはないものの、周期の違いによる挙動の差を定性的に評価できるものと考えた。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、排水距離だけから見ると厚さ10 mの粘土層(両面排水)が一次的に繰返し圧密される場合で、それぞれ周期14日と28日に相当する。

繰返し圧密中の諸量の測定は、主応力差が最大とゼロになるときに行い、供試体からの排水量はペーパードレーンを介してビューレットで、軸方向変位はダイヤルゲージで、供試体底面中央部の間隙水圧はひずみゲージタイプの水圧計で測定した。なお試験はすべて 0.5kgf/cm^2 のバックプレッシャーのもとで行った。

(2) 試験結果と考察

a) 繰返し圧密時の軸ひずみ～時間関係

図—6～図—8は、周期60秒でそれぞれの繰返し主応力差に対する軸ひずみと時間の関係を示したものである。図には主応力差が最大とゼロになるときの値が、それぞれ載荷時と除荷時として示してある。この図より、繰返し主応力差が $\sigma_d=0.8\text{kgf/cm}^2$ の場合には高温試料と室温試料の軸ひずみ挙動にあまり違いは認められないが、 $\sigma_d=1.0\text{kgf/cm}^2$ になると室温試料の軸ひずみが高温試料より大きくなっている(特に圧密前半部)ことがわかる。さらに繰返し主応力差が大きくなり $\sigma_d=1.2\text{kgf/cm}^2$ になると、圧密終期部を除いて両者に違いはそれほど認められなくなる。

これは図—4に示したCU三軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線からわかるように、圧密圧力 $\sigma_c=1.0\text{kgf/cm}^2$ で的高温試料と室温試料の応力～ひずみ曲線は主応力差が $\sigma_d=0.8\text{kgf/cm}^2$ 程度まではほとんど一致し、ほぼ同じ剛性を示しているため、繰返し圧密の場合にも繰返し主応力差がこれ以下では軸ひずみ挙動に違いが現れなかったものと思われる。しかし、CU三軸圧縮試験において主応力差が $\sigma_d=1.0\text{kgf/cm}^2$ のときの軸ひずみは高温試料と室温試料でそれぞれ約1%と約5%と大きく異なっている。そのため、繰返し圧密の場合にも、繰返し主応力差が $\sigma_d=1.0\text{kgf/cm}^2$ のときはこれと同様な傾向

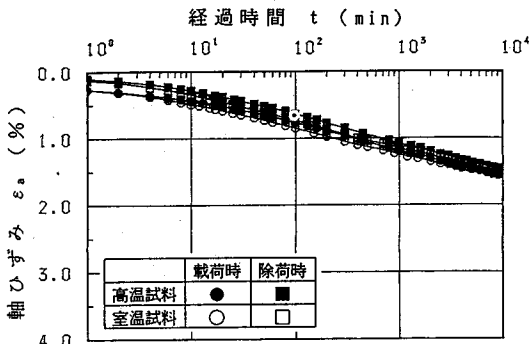


図-6 軸ひずみ～時間関係 ($\sigma_d=0.8 \text{ kgf/cm}^2$)

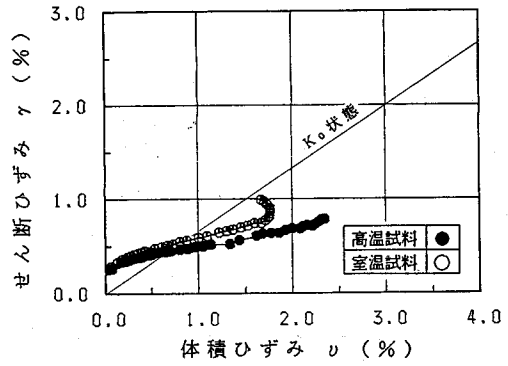


図-9 ひずみ経路 ($\sigma_d=0.8 \text{ kgf/cm}^2$)

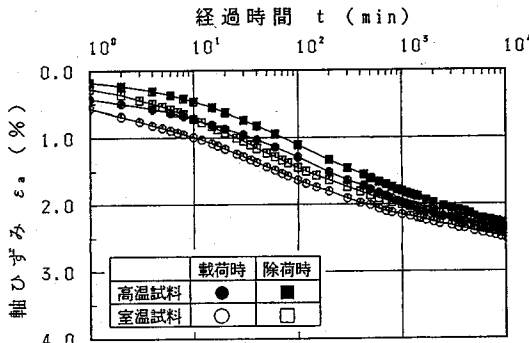


図-7 軸ひずみ～時間関係 ($\sigma_d=1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

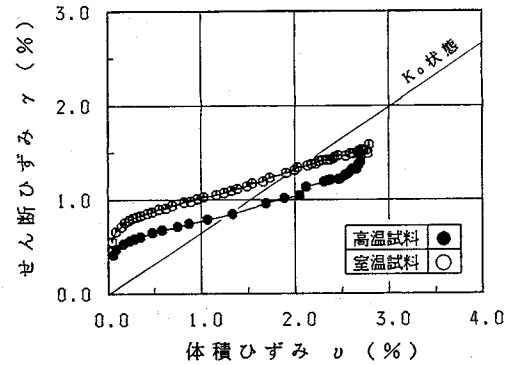


図-10 ひずみ経路 ($\sigma_d=1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

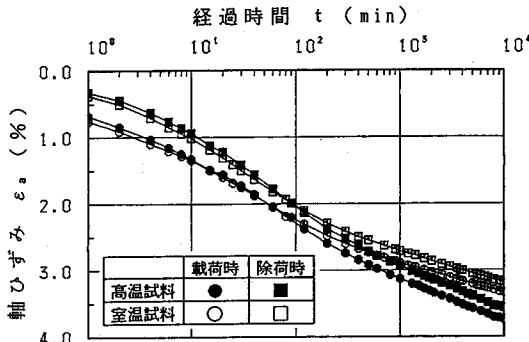


図-8 軸ひずみ～時間関係 ($\sigma_d=1.2 \text{ kgf/cm}^2$)

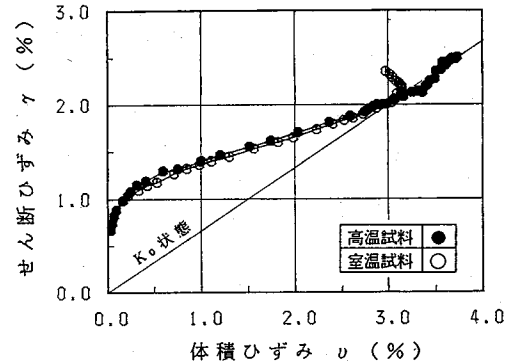


図-11 ひずみ経路 ($\sigma_d=1.2 \text{ kgf/cm}^2$)

が現れ、室温試料の軸ひずみが高温試料より大きくなったものと考えられる。一方、CU三軸圧縮試験では主応力差 $\sigma_d=1.2 \text{ kgf/cm}^2$ は、高温試料と室温試料とともに静的非排水強度より大きな主応力差である。したがって、繰返し圧密においてこのような静的非排水強度以上の主応力差が動的に載荷された場合には両者に違いがあまり現れないと考えられる。

また、圧密終期の沈下速度は荷重が大きくなるほど高温試料の方が速くなっている。この部分は有効応力の増加に伴うひずみより荷重の繰返しによる乱れに伴うひずみが卓越する領域と考えられるため、構造の発達した高温試料の方が繰返しの効果が顕著に表れたものと考えら

れる。

b) 繰返し圧密時のひずみ経路

図-9～図-11は、周期60秒で繰返し主応力差が異なる場合の載荷時のせん断ひずみと体積ひずみとの関係、すなわちひずみ経路を示したものである。なお、本研究では体積ひずみ ν とせん断ひずみ γ を次のように定義している。

$$\nu = \epsilon_a + 2 \cdot \epsilon_r \dots \dots \dots (1)$$

$$\gamma = \frac{2}{3} (\epsilon_a - \epsilon_r) \dots \dots \dots (2. a)$$

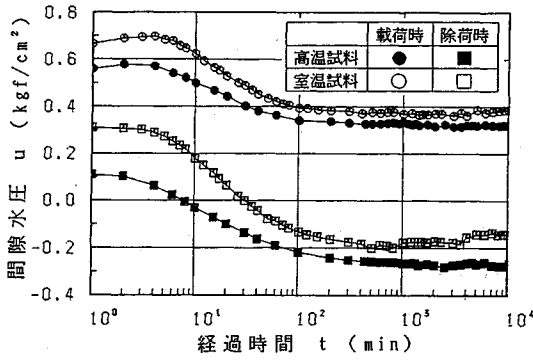


図-12 間隙水圧～時間関係 ($\sigma_d=0.8 \text{ kgf/cm}^2$)

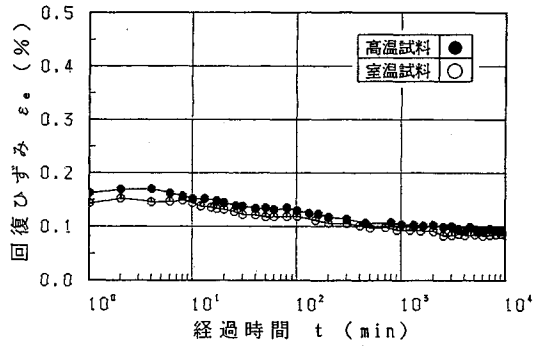


図-15 回復ひずみ～時間関係 ($\sigma_d=0.8 \text{ kgf/cm}^2$)

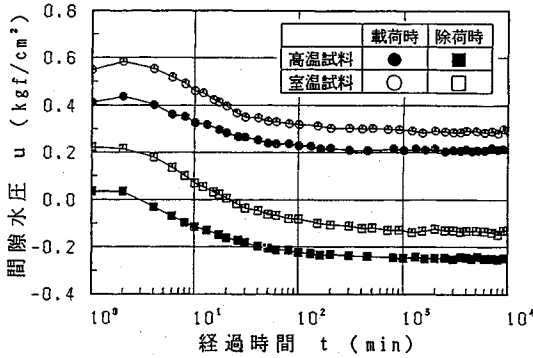


図-13 間隙水圧～時間関係 ($\sigma_d=1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

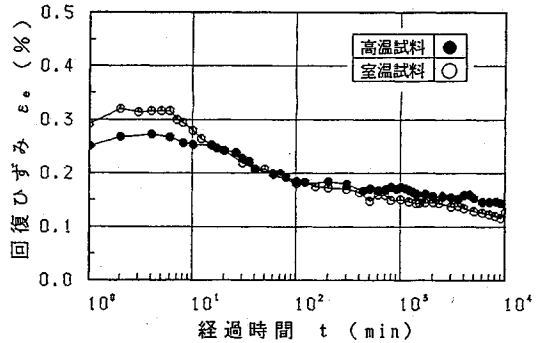


図-16 回復ひずみ～時間関係 ($\sigma_d=1.0 \text{ kgf/cm}^2$)

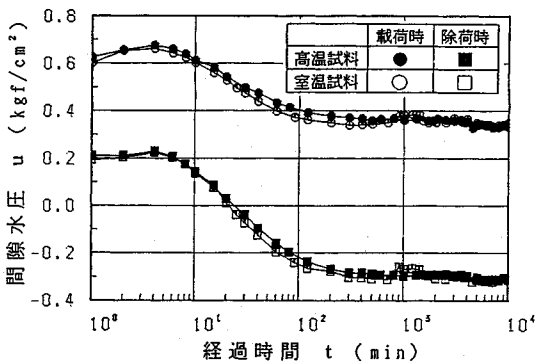


図-14 間隙水圧～時間関係 ($\sigma_d=1.2 \text{ kgf/cm}^2$)

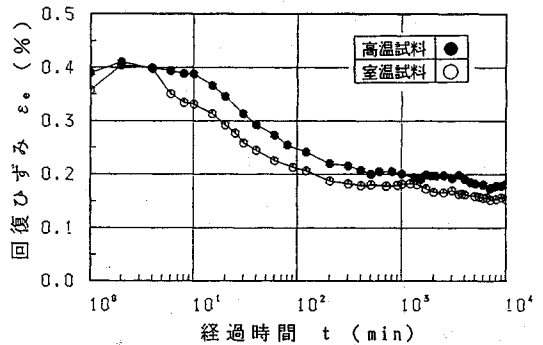


図-17 回復ひずみ～時間関係 ($\sigma_d=1.2 \text{ kgf/cm}^2$)

$$= \varepsilon_a - \frac{1}{3} \nu \dots \dots \dots (2. b)$$

ここに、 ε_a と ε_r はそれぞれ供試体の平均軸ひずみと平均半径方向ひずみである。したがって、これらの図では、原点を通る傾き2/3の直線が K_0 変形条件を表わしている。これらの図から、載荷直後では非排水状態でせん断ひずみだけが発生し、その量は室温試料の方が大きく、なおかつ主応力差とともに大きくなっていることがわかる。その後、時間の経過とともに体積ひずみが発生するが、ひずみ経路はほぼ直線的に推移している。このとき

のひずみ経路の傾きは前述の K_0 変形条件の傾きより小さく、体積ひずみの方が卓越している。これは、供試体が半径方向にも圧縮されていることを示している。このときのひずみ経路の傾きは主応力差とともに大きくなっているが、高温試料と室温試料の違いはほとんど認められなかった。また、主応力差が大きい場合の圧密終期では、ひずみ経路の傾きが2/3より大きくなっているため、破壊に近づいていると考えられる。ただし、主応力差が $\sigma_d=0.8$ と 1.2 kgf/cm^2 の室温試料において圧密終期に体積ひずみが減少しているが、この現象が本質的なものであるのか実験上の不備によるものであるのかは明らかにならなかった。なお、実験上の不備としては、排水経

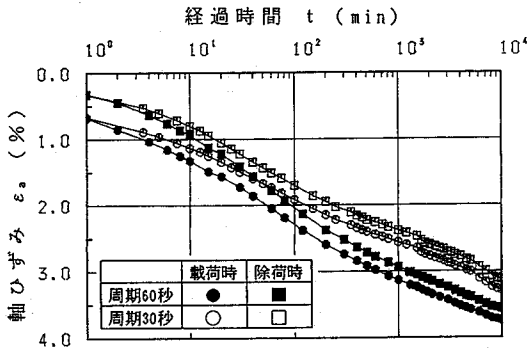


図-18 軸ひずみ挙動に及ぼす載荷周期の影響

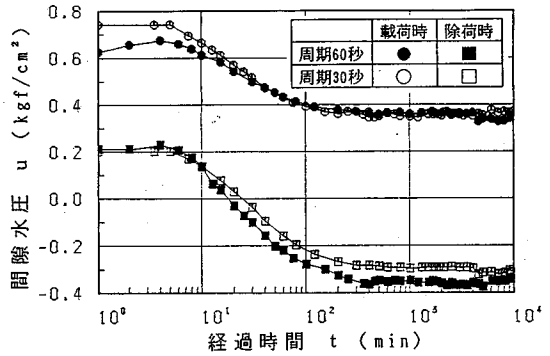


図-20 間隙水圧挙動に及ぼす載荷周期の影響

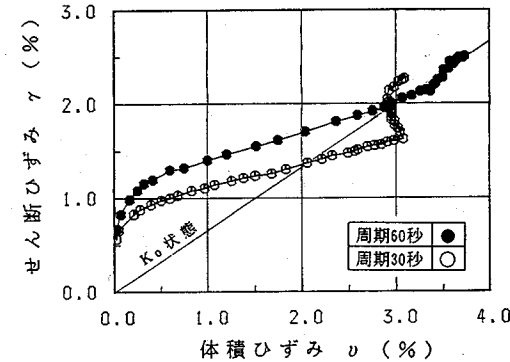


図-19 ひずみ経路に及ぼす載荷周期の影響

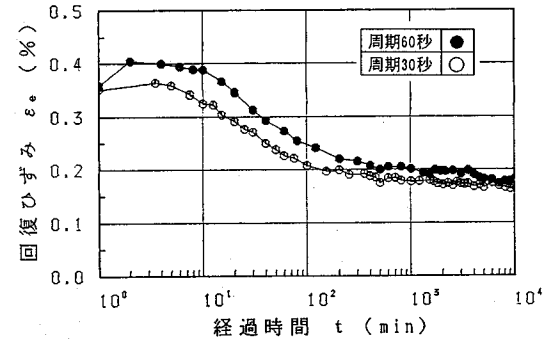


図-21 回復ひずみに及ぼす載荷周期の影響

路からの水漏れ等が考えられるが、その流出速度は極めて小さいため、ビューレットの水位が低下するだけで前述した軸ひずみや後述する間隙水圧挙動にはほとんど影響を及ぼしていないと考える。

c) 繰返し圧密時の間隙水圧挙動

図-12～図-14は、周期60秒で繰返し主応力差を変えたときの間隙水圧と時間の関係を示したものである。主応力差が大きくなると高温試料と室温試料の差は見られなくなるが、主応力差が小さい場合には室温試料の間隙水圧の発生量が高温試料より大きいことがわかる。このことは、図-5に示したCU三軸圧縮試験の有効応力経路からもわかるように、主応力差が $\sigma_d=0.8$ と 1.0 kgf/cm^2 付近での間隙水圧の発生量は室温試料の方が大きくなっており、ほぼ非排水状態と見なせる圧密初期ではこれと同じ挙動を示し、室温試料の間隙水圧が大きくなったものと考えられる。また、繰返し主応力差が $\sigma_d=1.2 \text{ kgf/cm}^2$ のときは、軸ひずみ挙動に関する考察でも述べたように、この主応力差は室温試料と高温試料とともに静的非排水強度以上の主応力差であるため、両者に違いが現れなかったものと思われる。

また、圧密終期においては、載荷時と除荷時の間隙水圧はそれぞれほぼ一定となり、その絶対値もほぼ等しくなっている。繰返し圧密では時間が経過すると、載荷時

と除荷時の間隙水圧の絶対値は等しくなり、平衡状態に達すると考えられている¹⁷⁾。本研究での載荷時と除荷時の間隙水圧の絶対値を詳細に比較すれば、若干正の間隙水圧の値の方が大きい、未だ平衡状態には達していないと思われる。荷重が静的に作用した場合の間隙水圧は100分以上経過するとほぼ完全に消散していることを考え合わせると、繰返し圧密は有効応力の面で定荷重の圧密より遅れるということが出来る。

d) 回復ひずみ

図-15～図-17は、周期60秒で繰返し圧密中の回復ひずみ ϵ_e の経時変化を示したものである。なお、本研究では回復ひずみ ϵ_e を次のように定義している。

$$\epsilon_e = \epsilon_{a,max} - \epsilon_{a,min} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $\epsilon_{a,max}$ と $\epsilon_{a,min}$ はそれぞれある1回の載荷・除荷サイクルにおいて主応力差が最大と最小(ゼロ)になる時の軸ひずみである。回復ひずみは、載荷直後が最大であり、その後次第に減少し、一定値に落ちつく傾向にある。これは、圧密の進行にともなって間隙比が減少し、変形抵抗が増大するため、同じ主応力差に対する1回の載荷・除荷で生じるひずみは次第に小さくなったものと考えられる。一方、同じ経過時間における回復ひずみは主応力差の増加とともに線形的に増加せず、より大きな回復ひずみが生じている。これは、間隙比が同じ場

合には主応力差が増加すると変形抵抗が減少することを示している。

また、高温試料と室温試料の回復ひずみを比較すると、わずかではあるが高温試料の方が室温試料より大きくなっている。これは、高温試料では、再圧密時の高温によってシキソトロピーやセメンテーション作用等が促進され、弾性成分の多い構造が形成されたことを物語っている。

e) 載荷周期の影響

図一18は、高温試料の軸ひずみ～時間関係に及ぼす載荷周期の影響を比較したものである。この図から、圧密前半では、室温試料に対する多くの実験で得られているように¹⁸⁾、載荷周期の短い方の軸ひずみが小さくなるが、圧密後半の二次圧密部分では、周期の短い方の軸ひずみの蓄積速度が大きくなっていることがわかる。これも、前述したような繰返しに伴う粘土の骨組み構造の乱れの影響で、同じ時間内では繰返し回数の多くなる載荷周期の短い方が攪乱の影響をより強く受けるためと考えられる。

図一19は、高温試料の載荷周期によるひずみ経路の違いを比較したものである。この図から、載荷直後のせん断ひずみはほぼ等しいが、それ以後のせん断ひずみは載荷周期の短い方が小さくなっていることがわかる。これは、載荷周期の短いものほど1サイクルにおける載荷速度が大きいため、応力～ひずみ関係に及ぼす速度効果によって同じ主応力差に対して生じるせん断ひずみは載荷周期の短いものほど小さくなったと考えられる。また、載荷周期が30 secの試料で圧密終期に体積ひずみがいったん減少しているが、この現象が本質的なものであるかどうかは、前述したように明らかにできなかった。

図一20は、高温試料の間隙水圧と時間の関係に及ぼす載荷周期の影響を調べたものであるが、載荷周期の違いによる顕著な差は見られなかった。ただし、圧密終期における載荷時と除荷時の間隙水圧を比較すると、わずかではあるが載荷周期の短い方の除荷時の間隙水圧の絶対値が小さくなっている。このことは、間隙水圧挙動の項で述べたような理由によって、載荷周期の短いものほど圧密が遅れていることを表している。

図一21は載荷周期によって高温試料の回復ひずみがどのように変化するかを調べたものであり、載荷周期の短い方の回復ひずみが小さくなっていることがわかる。これは、前述したような応力～ひずみ関係に及ぼす速度効果によって、載荷周期の短いものほど同じ主応力差に対する変形抵抗が大きくなり、回復ひずみが小さくなったものと考えられる。

4. 結 論

本研究で得られた主な結論を列挙すれば、以下のとお

りである。

(1) 高温再圧密粘土は年代効果を有する不攪乱自然粘土の力学特性を比較的忠実に再現しているため、繰返し圧密試験のように粘土の骨組み構造の乱れが重要な要因となる試験では、高温再圧密粘土の使用が有効である。

(2) 三軸繰返し圧密試験において、比較的小さい荷重と静的非排水強度以上の荷重を載荷した場合には、高温再圧密試料と室温再圧密試料の軸ひずみ挙動にあまり差が表れないが、静的非排水強度に近い荷重を載荷した場合には室温再圧密試料の軸ひずみが高温再圧密試料より大きくなる。

(3) 三軸繰返し圧密試験では、載荷直後に非排水状態でせん断ひずみだけが発生する。そして、その量は高温再圧密試料の方が室温再圧密試料より小さい。その後、体積ひずみが発生し、ひずみ経路はほぼ直線となる。このときのひずみ経路は、 K_0 変形条件より等方的であり、供試体は半径方向にも圧縮される。また、ひずみ経路の傾きは、高温再圧密試料と室温再圧密試料でほぼ等しく、主応力差の増加とともに大きくなる。

(4) 三軸繰返し圧密試験における間隙水圧は、繰返し主応力差が静的非排水強度より大きくなると高温再圧密試料と室温再圧密試料で差はなくなるが、荷重が静的非排水強度より小さい場合には室温再圧密試料の方でより大きな間隙水圧が発生する。また、定荷重の圧密では間隙水圧が十分消散するような時間が経過しても、繰返し圧密では平衡状態に達しておらず、圧密の進行が遅い。

(5) 繰返し圧密中の回復ひずみは、高温再圧密試料の方が一般的に大きくなる。また、回復ひずみは間隙比が減少すると小さくなるが、同じ間隙比では主応力差の増大とともに大きくなる。

(6) 載荷周期の短いものほど、回復ひずみと圧密初期の軸ひずみは小さくなるが、圧密終期の軸ひずみの蓄積速度は大きくなる。間隙水圧に及ぼす載荷周期の影響は、あまり明瞭でないが、載荷周期の短いものほど圧密の進行が遅れ気味である。

以上で示したように、高温再圧密粘土と室温再圧密粘土の繰返し圧密挙動には一致しない点が多々ある。これは高温再圧密試料では室温再圧密試料に比べて粘土の骨組み構造が発達しているためと考えられる。したがって、構造の発達している自然粘土の繰返し圧密挙動、特に静的非排水強度に近い繰返し荷重が作用する場合の挙動を攪乱再圧密粘土を用いて調べる際には、高温再圧密試料の利用が不可欠である。

参 考 文 献

- 1) Yamanouchi, T. and Yasuhara, K. : Settlement of clay subgrades after opening to traffic, Proc. 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) 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.
 - 4) 東海三県地盤沈下調査会編：濃尾平野の地盤沈下と地下水，名古屋大学出版会，1985.
 - 5) 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，Vol. 34, No. 11, pp. 13-18, 1986.
 - 6) 吉国 洋：繰返し圧密現象，土と基礎，講座「土の繰返し圧密」，Vol. 39, No. 6, pp. 102-108, 1991.
 - 7) 木下効志・巻内勝彦・石川敏博：繰返し荷重による粘土の圧密特性，土木学会第40回年次学術講演会，pp. 569-570, 1985.
 - 8) 落合英俊・林 重徳・坂井 晃・青柳隆浩：繰返し等方応力を受ける飽和粘土の圧密特性，九州大学工学集報，Vol. 58, No. 4, pp. 499-505, 1985.
 - 9) 陶野郁雄・桑原文雄：繰返し圧密試験における応力増分比と時間の及ぼす影響，第18回土質工学研究発表会，pp. 201-204, 1983.
 - 10) Mesri, G. and Godlewski, P.M. : Time and Stress-Compressibility Interrelationship, Proc. ASCE, Vol. 103, No. GT5, pp. 417-430, 1977.
 - 11) Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, T.T. and Lancelotta, R. : New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils, SOA Report, Proc. XI ICSMFE, Vol. 1, pp. 57-153, 1985.
 - 12) 上 俊二・藤原東雄・安原一哉：長時間圧密履歴を受けた粘土の圧密・せん断特性，第23回土質工学研究発表会，pp. 291-292, 1988.
 - 13) 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，港湾技術研究所研報告，第28巻，第1号，pp. 121-147, 1989.
 - 14) 清水正喜・藤原忠広・岩成敏介：高温再圧密粘土の一軸圧縮挙動一有効応力による考察一，第25回土質工学研究発表会，pp. 631-632, 1990.
 - 15) 足立格一郎・斉藤重治・中島武道・天野暢之・鈴木孝一：高温再圧密が東京下町粘土に与える影響，第25回土質工学研究発表会，pp. 645-646, 1990.
 - 16) Tsuchida, T., Kobayashi, M. and Mizukami, J. : Effect of Aging of Marine Clay and its Duplication by High Temperature Consolidation, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 4, pp. 133-147, 1991.
 - 17) 森脇武夫・吉国 洋：繰返し圧密試験の有限要素法解析，第26回土質工学研究発表会，pp. 301-302, 1991.
 - 18) 藤原東雄・林 重徳：飽和粘性土の繰返し圧密特性，土と基礎，講座「土の繰返し圧密」，Vol. 39, No. 11, pp. 99-106, 1991.

(1992. 4. 3 受付)

BEHAVIOR OF SATURATED CLAY RECONSOLIDATED AT HIGH TEMPERATURE IN CYCLIC TRIAXIAL CONSOLIDATION TESTS

Takeo MORIWAKI, Hiroshi YOSHIKUNI, Oumi NAGAI and Makito NAGO

This paper firstly confirmed the previous findings that the mechanical characteristics of reconstituted clay samples consolidated at a high temperature were similar to those of the undisturbed natural clay samples which have undergone aging, under monotonic loading conditions. A question still remains whether this statement can apply to cyclic loading conditions. A series of cyclic triaxial consolidation tests was then carried out for both high temperature reconsolidation samples and room temperature reconsolidation samples.

As the results, it was found that there are some differences in the consolidation behavior of both samples under the cyclic loading which implies that the consolidation behavior of the natural aged clay under the cyclic loading could not be directly predicted from that of the room temperature reconsolidation samples.