

軟弱粘土の二次圧密挙動に与える応力履歴の影響

The Effects of Stress History on the Secondary Compression Behavior of Soft Clay

池上 慎司* (Shinji Ikegami)

吉國 洋** (Hiroshi Yoshikuni)

粘土の圧密理論を構築する際、骨格構造の応力～ひずみ～時間関係のレオロジー的一義性の有無が問題となる。本研究では、問題を一次元圧密に限定し標準圧密試験装置を用いた長期圧密試験を行い、除荷履歴・長期圧密履歴・有効応力増加速度等の応力履歴が粘土のレオロジー挙動である二次圧密挙動にどのような影響を与えるか実験的に検討した。

その結果、正規圧密状態である場合、同一の有効応力下での $e \sim \log t$ 関係は応力履歴に関係無くユニーク曲線で表わせる事が明らかになった。また、除荷により骨格構造の変化を受けた過圧密粘土についても履歴の影響の残る過渡的状态はあるが、荷重増分に伴う圧縮および遅延圧縮の進行に伴い正規圧密粘土の圧密曲線に一致することが分かった。この時、間隙比について整理した圧密曲線はIsotacheするが、ひずみで整理した場合は初期条件次第でIsotacheしたりしなかったりする。つまり、粘土の骨格構造はひずみではなく間隙比に対してレオロジー的一義性が認めらる。

キーワード／圧密、圧縮、レオロジー、クリープ、応力履歴、二次圧密 (IGC: D 5)

1. まえがき

周知のように現場の圧密沈下は室内圧密試験の挙動を拡大投影することによって予測される。当然の事ながら、採用される圧密理論ないし考え方によって拡大投影された予測圧密曲線の性状は異なる。図-1に標準圧密試験(試料厚 H_s)における圧密曲線を厚さ H の粘土層に拡大投影された3種の予測圧密曲線を示す。

同図における予測圧密曲線(A)はTerzaghi理論の単純適用圧密曲線である。その考え方は、標準圧密試験において発生したのと同量の一次圧密ひずみが現場の圧密においても発生し、二次圧密過程を含めた全圧密過程が標準圧密試験のそのの $(H/H_s)^2$ 倍だけ遅延するとしたものである。

予測圧密曲線(C)は慣用設計法による予測曲線であって、Terzaghi理論を一部修正して適用している。その考え方は、現場における一次圧密ひずみ量が標準圧密試験における1440minのひずみ量に等しく、かつ一次圧密過程がほぼ $(H/H_s)^2$ 倍遅延し、二次圧密過程は一次圧密比によって決まる $(H/H_s)^2$ よりも小さい遅延になるとしている。

予測圧密曲線(B)は、Suklje¹⁾の主張する圧密曲線で、現場の二次圧密過程は標準圧密試験のそれと一致し遅延しない。この状況をSukljeは"Isotache"と呼んだ。そして、Sukljeの主張が確かならば、圧密曲線(A)お

*広島大学工学部第四類 助手、**同 教授

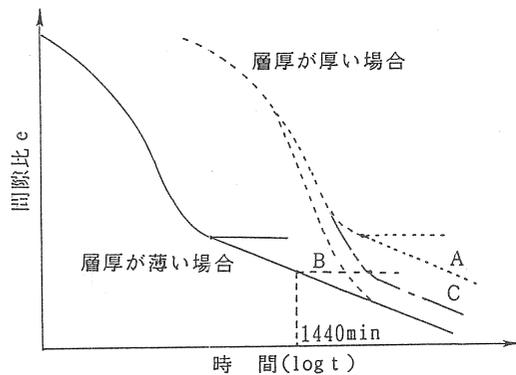


図-1 層厚の異なる粘土層の圧密曲線

よび(C)による予測は、圧密沈下量を過小に推定することになるので、この問題は大きな論争に発展した。

網干ら²⁾は、厚さ2 cmから100 cmまでの粘土試料に対する圧密試験を行い、試料厚の増加とともに一次圧密量は増加するものの、それらの二次圧密過程が標準圧密試験のそれに一致しないことを示した。これは、現場の二次圧密過程にも一定の遅延があることを示しており、予測圧密曲線(C)を支持することになる。

これに対し、Mesri³⁾は、多くの現場観測データをもとに、現場の圧密過程として圧密曲線(B)は論外で、圧密曲線(C)でもなく、圧密曲線(A)が最も適切であると強く主張している。

一方、今井⁴⁾は弾粘塑性の立場から、室内と現場の二次圧密過程が一致するか否かは、粘土の初期状態によって決まり、初期状態が同一なら、二次圧密過程も同一になると主張している。

このように"Isotache"議論には今日もなお様々な意見がある。確かに網干らの一連の圧密試験結果は試験室と現場を結ぶ有力な情報であり、Mesriの提示する現場データは議論の存在を認めないくらい強力な情報であるが、何故そうなるのかは明らかではない。その意味において、"Isotache"議論が十分に落着いているとは言い難い。

そこで、"Isotache"議論を深めるためには、問題を整理しなければならない。慣用圧密解析法が線形圧密理論であるTerzaghi理論に基礎を置いているため、Suklje、網干らからMesriに至るまで、応力や変形が増分て議論されている。今の問題は二次圧密という変形の時間依存性に根源を持つ寸法効果の議論であるから、増分による議論は適切ではない。そこには、純粋に粘土のレオロジーの問題と粘土層厚の増加に伴う幾何学的問題がある。最大の幾何学的問題は、載荷に伴う有効応力と自重による有効応力の割合は実験室と現場では大きく異なる事であり、深度ともに有効応力の増加率が減少するという形で現実の問題に関係している。一方、最大のレオロジー的問題は粘土の履歴の問題で、そこには有効応力の強度履歴と時間履歴がある。実験室における圧密は必ず除荷再載荷の履歴を持つものに対し、現場の圧密は除荷履歴を持つ場合と持たない場合があり、一般に両者の有効応力の強度履歴は同一ではない。また、問題にしている圧密過程において、実験室と現場では、有効応力の時間履歴が相違する。すなわち、試験室では有効応力が急速に増加して最終有効応力強度に達するのに対し、現場では深度によって差はあるけれど平均的に見て極めて緩慢に増加する。

元来、"Isotache"問題の発端はこの時間履歴にあり、本研究も粘土の時間履歴特性の解明を主目的とするとともに、幾何学的問題として浮上した有効応力の増加率が二次圧密特性に与える影響についても、有効応力強度履歴に含まれる問題として併せて検討した。

尚、純粋に粘土のレオロジー特性を求めるためには、模型試験でなく要素試験によらねばならない。しかし、圧密現象では、有効応力や間隙水圧分布の存在を排除できないので、完全な要素試験は不可能であり、試料厚を小さくすることで、要素試験に準ずる試験とした。具体的には一次元の圧密試験機を使って行われたが、その過渡領域である一次圧密過程に興味はなく、有効応力がほぼ一定になったと考えられる二次圧密過程に着目して検討している。

2. 試料および試験方法

2.1 使用した試料

試験に使用した試料は、広島湾五日市沖より採取した通称広島粘土を室内で練り返し再圧密したもので、物理的特性は表-1の通りである。

表-1 試料の物理的特性

| 液性限界 w _l (%) | 塑性限界 w _s (%) | 塑性指数 I _p (%) | 比重 G _s |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|
| 116.5 | 45.4 | 71.1 | 2.623 |

2.2 試験方法

標準圧密試験装置を用い試験1~4の圧密試験を行った。各試験の載荷ステップは表-2、3および図-2、3に示す通りである。

尚、初期状態を調整するため予備圧密状態を各試験シリーズとも24時間とした。

以下、各試験の詳細を述べる。

表-2 応力経路(試験1)

| case | 予圧密 | 本 試 験 |
|------|-------|---|
| 1-1 | | →3.2 |
| 1-2 | | →0.8 →3.2 |
| 1-3 | 0.2 | →0.6 →1.8 →3.2 |
| 1-4 | (24h) | →0.4 →0.8 →1.6 →3.2 |
| 1-5 | | →0.3 →0.4 →0.6 →0.8 →1.2 →1.6 →2.4 →3.2 |

(単位 kgf/cm²)

2.2.1 試験1

試験1は初期荷重 (0.2 kgf/cm²) から最終荷重 (3.2 kgf/cm²) に至るまでの段階数が異なる5ケースで構成されており、中間荷重段階の荷重期間を24時間に統一しているため、段階数の少ないケースほど短い時間で最終荷重に達する。おしなべて平均的に考えると、有効応力の増加速度は段階数が少ないケースほど大きいので、これらのケースは層厚の小さい粘土層の有効応力の増加過程に相当している。逆に、段階数の多いケースは、層厚の大きい場合に相当することになる。

表-3 応力経路 (試験2)

| case | 予圧密 | 本 試 験 |
|------|--------------|-----------------------------------|
| 2-1 | 0.2 (24h) | (15min cycle) |
| 2-2 | | (1hour cycle) |
| 2-3 | | →0.4 →0.8 →1.6 →3.2 (6hour cycle) |
| 2-4 | | (1 day cycle) |
| 2-5 | | (1week cycle) |

(単位 kgf/cm²)

2.2.2 試験2

試験2は、荷重段階数を4段階に統一し、各段階の荷重期間が異なる5ケースで構成されている。試験1と同様に、各段階の荷重期間の短いケースほど最終荷重に達するまでの時間が短いため、試験期間中の平均的な有効応力の増加速度は大きくなる。よって、試験1同様有効応力の増加速度という観点で見ると、荷重期間の短いケースは層厚の小さい場合に相当する。

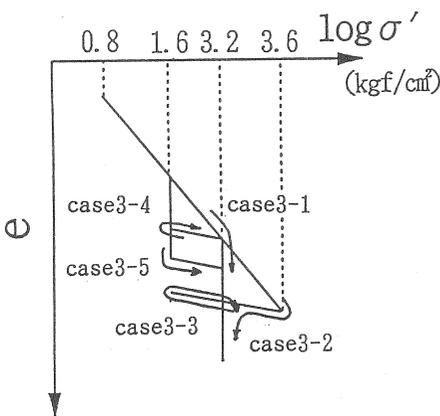


図-2 応力経路模式図 (試験3)

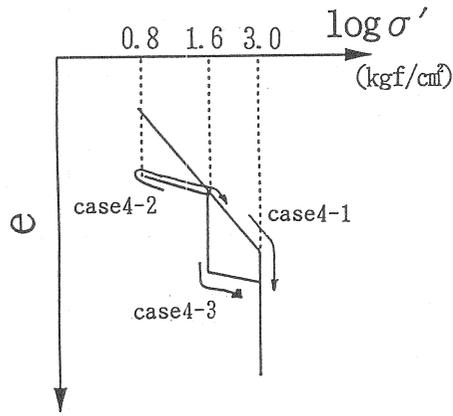


図-3 応力経路模式図 (試験4)

2.2.3 試験3

試験3は、図-2に示すように、予圧密荷重 0.8 kgf/cm² から最終荷重 3.2 kgf/cm² に到達するまでの応力履歴の異なる5つのケースで構成されている。case3-1では予圧密荷重から最終荷重まで荷重を増加率 $\Delta p / p_0 = 1$ で単調に増加させ、常に正規圧密状態のまま最終荷重に到達させ放置した。case3-2では、一旦3.6 kgf/cm² まで先行圧密した後、3.2 kgf/cm² まで除荷し放置した。case3-3では、3-2同様に3.6 kgf/cm² まで先行圧密した後、1.6 kgf/cm² まで除荷し、その後3.2 kgf/cm² まで再載荷し放置した。case3-4では3.2 kgf/cm² から一旦1.6 kgf/cm² まで除荷し、再び3.2 kgf/cm² を載荷し放置した。case3-2, 3, 4の3ケースはcase3-1と比較することによって除荷履歴の二次圧密挙動への影響を検討する。また、case3-5では長期圧密履歴の影響を調べるために、最終荷重 3.2 kgf/cm² を載荷する前に1.6 kgf/cm² で約1ヶ月の長期圧密の後3.2 kgf/cm² を載荷した。

2.2.4 試験4

試験4では、図-3に示すように、予圧密荷重 0.8 kgf/cm² から最終荷重 3.0 kgf/cm² に達するまでの荷重履歴を

変えて、除荷履歴および長期圧密履歴の二次圧密挙動に与える影響を調べた。case4-1は、case3-1同様に 3.0kgf/cm^2 まで載荷し長期間圧密挙動を観察した。case4-2は最終荷重の一段階前である 1.6kgf/cm^2 から一旦 0.8kgf/cm^2 まで除荷し、その後再び 3.0kgf/cm^2 まで段階載荷する。

以上のように全試験シリーズとも所定の荷重に達した後は、長期間にわたり圧密沈下を観測し、各ケースの沈下曲線の形状・位置関係等を調べ、様々な応力履歴が粘土の圧密・圧縮特性に与える影響について検討する。

尚、本試験の試験1、および試験2は層厚の異なる粘土層の要素試験に近いと考えている。

3. 応力時間履歴がレオロジー挙動に与える影響

3.1 有効応力増加速度の影響

3.1.1 圧縮曲線への影響

まず載荷期間の圧縮曲線に及ぼす影響について考察する。これについてはCrawford⁹⁾の実験が有名である(図-4)。この結果より彼は、圧密降伏応力はある状態の粘土に対して唯一のものではなく、載荷期間によって変わり、圧縮曲線は載荷期間が長くなると下方に移動することを指摘している。このことは、Taylor⁹⁾も指摘しており、Bjerrum⁷⁾モデルの発想もここから出発している。

図-5に試験2より得られた $e \sim \log p$ 関係を示す。各ケースの $e \sim \log p$ 曲線は、載荷期間が長くなるにつれてほぼ平行に下方に移動した形になっており、Crawfordの実験と同じ結果となっている。また、各曲線から得られる圧密降伏応力もCrawfordの指摘のように載荷期間の短いケースほど大きくなる。

さらにひずみ速度に注目する。今回行った段階載荷の圧密試験では、単一の荷重下における二次圧密過程では、時間の対数にほぼ比例してクリープ速度が小さくなる。したがって、試験1では載荷期間を24時間で統一してあるため、 $e \sim \log p$ 関係にプロットされる点の、クリープ速度はほぼ等しい。これに対し試験2では、 $e \sim \log p$ 関係にプロットされた点は、載荷期間の長いケースほどクリープ速度は小さい。つまり、クリープ速度の小さい点を結んだ圧縮曲線ほど下方に位置する。これは、近年注目されている定ひずみ速度圧密試験におけるひずみ速度の異なる圧縮曲線と同様の傾向である⁸⁾。

以上のことより、標準圧密試験の二次圧密過程のようにある有効応力のもとで単純クリープ状態にある粘土の間隙比は、クリープ状態に入る前の載荷速度や有効応力増加速度に関係無く、そのときのクリープ速度に応じて $e \sim \sigma$ 平面上の位置が決まる。つまり、粘土の圧縮曲線の位置・形状は、ある有効応力のもとで選んだ時点群のクリープひずみ速度により決まる事が分かる。

3.1.2 圧密曲線への影響

図-6に試験1の結果より得られた各ケースの間隙比 e と全荷重段階を通過しての経過時間の関係を示す。図からも分かるように、荷重増加率の大きいケースは、短時間で有効応力が増えるため圧密沈下量も早い時期から大きく出ており、圧密曲線は荷重増加率の小さいケースのそれよりも下側に位置している。これはちょうど、図-

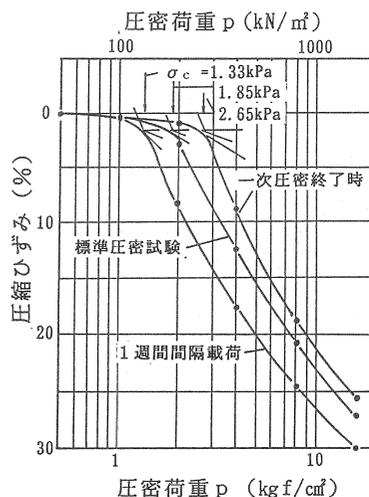


図-4 圧縮曲線に及ぼす載荷時間の影響 (Crawford⁹⁾より)

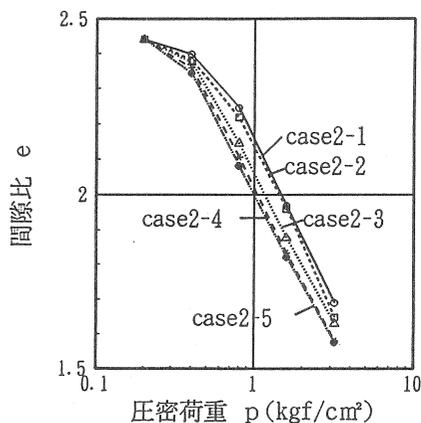


図-5 $e \sim \log p$ 関係 (試験2)

1の層厚の異なる粘土層の圧密曲線の位置関係と同じである。

次に、各ケースが所定の荷重 (3.2 kgf/cm^2) に達し、有効応力が一定となつてからのクリープ沈下に注目する。各ケースの $e \sim \log t$ 曲線は、荷重増加率に関わらず一本の線に乗ってきている。つまり、Isotacheしているわけである。このことから、有効応力一定のもとでは、荷重増加率や有効応力増加速度に関係なく間隙比 e と時間 t の関係は唯一の線に収れんする。

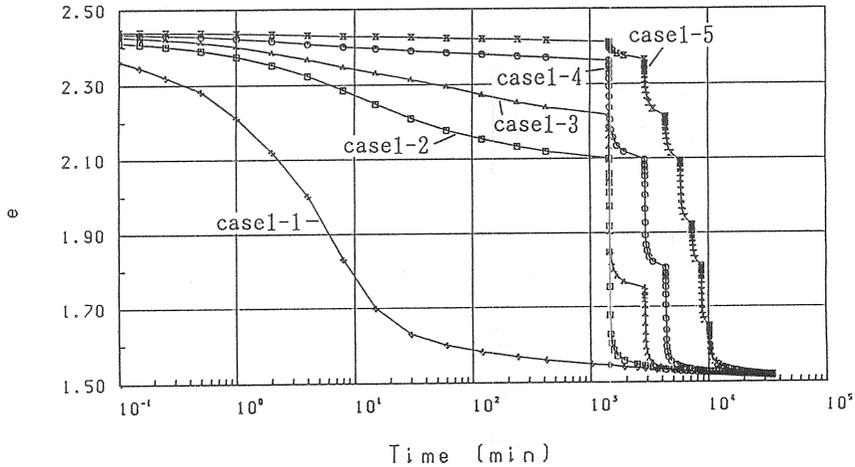


図-6 試験開始時からの $e \sim \log t$ 関係 (試験1)

次に、試験2の結果より得られた各ケースの $e \sim \log t$ 関係を図-7に示す。試験2では、各ケースの荷重段階数は同じで、荷重期間が異なっている。したがって、荷重期間の短いケースほど有効応力の増加速度は大きい。また、試験1の結果同様 $e \sim \log t$ 曲線は下側になっている。また、所定の荷重 (3.2 kgf/cm^2) に達してからのクリープ沈下についても、多少の誤差はあるものの試験1の結果同様、ほぼ一本の線に乗ってきている。

また、圧密荷重 3.2 kgf/cm^2 に限らず、各荷重段階で長期間圧密させた場合にも、各ケースの $e \sim \log t$ 曲線は、図中の点線のように一本の線に乗ってくるものと予想できる。

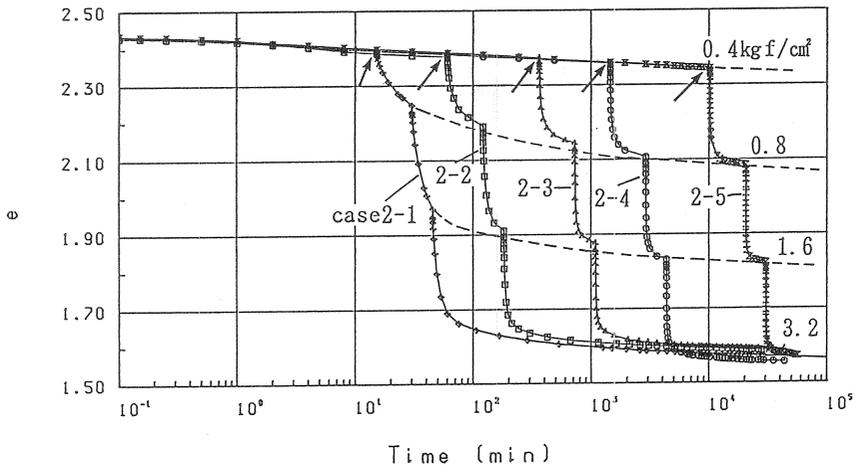
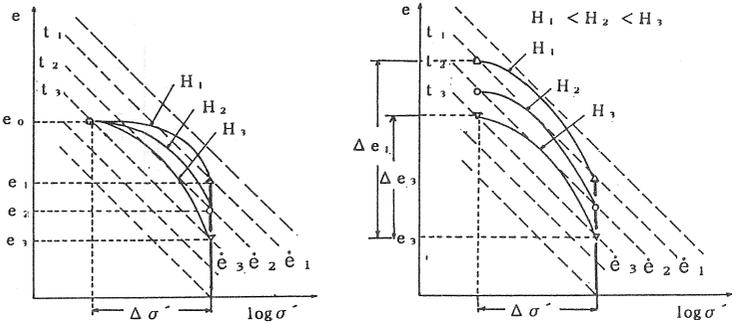


図-7 試験開始時からの $e \sim \log t$ 関係 (試験2)

このように試験1、試験2の結果より一定有効応力のもとでクリープ状態に入ると間隙比と時間との間には特定の関係があり、同一の変形条件下で粘土の骨格構造にレオロジー的一義性を認めることができる。そのメカニズムは、後に4.1で議論する図-13に見られるように、小さな間隙比の減少がクリープひずみ速度の指數的減少をもたらすところにある。

3.1.3 初期条件についての検討

網干らの実験をはじめとして、これまでの寸法効果に関する研究は、実際に供試体の寸法を変えたり、分割型の圧密試験装置で連結する圧密装置の数を変えることにより、層厚を変化させている。そのため、供試体内部には間隙比の分布が生じ、試験結果の整理は間隙比ではなく、ひずみもしくは間隙比の変化量で行われる。このような場合、注意しなければならないのは、



(a) 初期条件が同一の場合 (b) 初期条件が異なる場合

図-8 初期条件の影響

載荷直前の状態つまり初期条件によって圧密曲線の位置関係は変化するということである。

今、自重や間隙水圧分布の違いを無視して層厚の異なる粘土層の圧密曲線を考える。図-8(a)は二次圧密を十分に生じ初期間隙比がほぼ等しいような場合の状態経路である。このように初期条件が等しい場合には、間隙比、間隙比の変化量のいずれで整理しても、間隙水圧の消散する時間が層厚に応じて変化するだけで、その後のクリープ過程(太線上の過程)では、同一の時間もしくは間隙比の変化速度に対する間隙比および間隙比の変化量は等しいため、圧密曲線はIsotacheする。しかし、一次圧密終了後に直ちに載荷していきような場合では層厚によって一次圧密終了時の間隙比つまり次ステップの初期間隙比は異なる。そのため図-8(b)のように同一の時間もしくは間隙比の変化速度に対する間隙比は等しくなるが、間隙比の変化量は異なる。例えば、図に示すように載荷後 t_3 ほど経過した時点で、層厚 H_1 並びに層厚 H_3 の粘土層は両者とも平均的に間隙比 e_3 、間隙比の変化速度 \dot{e}_3 を持つ。つまり、間隙比で整理すればIsotacheする。しかし、このときの間隙比の変化量は層厚 H_1 のものは Δe_1 、一方層厚 H_3 のものは Δe_3 と異なるため、圧密曲線は初期間隙比の差だけずれてIsotacheしない。

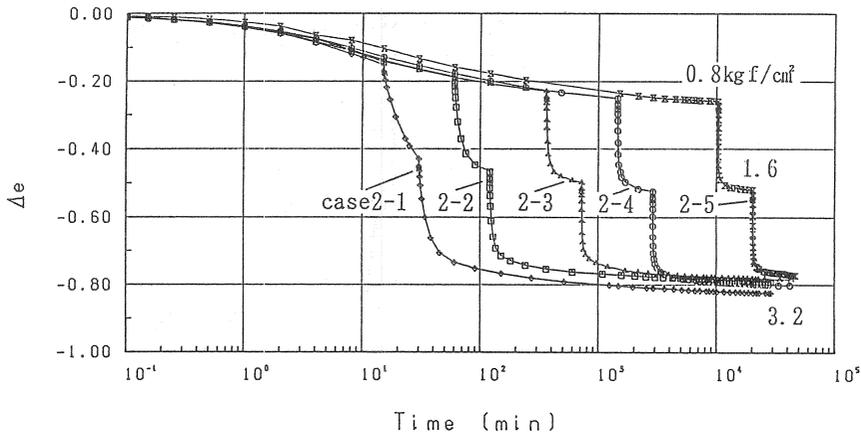


図-9 初期条件の異なる $\Delta e \sim \log t$ 関係 (試験2)

図-9は、図-7中の矢印の点を初期状態として間隙比の変化量で整理し直した圧密曲線である。図-7の矢印の点はそれぞれのケースの荷重 0.4 kg f/cm^2 の最終状態を示している。試験2では、荷重期間を $15 \text{ min} \sim 1 \text{ week}$ と変えているため、各ケースの矢印で示した点つまり、初期間隙比はその間に受けた二次圧密量だけ差がある。そのため、先に述べたように図-9は間隙比の変化量で整理しているためクリープ沈下過程は、初期間隙比の差だけずれ荷重期間の長いケースは上側になっている。

このように、ひずみや間隙比の変化量で整理した場合には、条件によってIsotacheしたりそうでなかったりするが、圧密曲線を間隙比で描けばIsotacheすることが分かる。

4. 応力強度履歴がレオロジー挙動に与える影響

4.1 除荷履歴の影響

一般に除荷の履歴を持つ過圧密粘土は、正規圧密粘土に比べて圧縮性が小さいとされており、二次圧密についてもその代表的指標である二次圧密係数 C_α ($\Delta e / \Delta \log t$) が小さくなるとされている⁹⁾。また、除荷を受けた粘土は、単調圧縮によって生成された骨格構造が変化していることが予想されるため、レオロジー挙動への除荷の影響は有効応力の強度履歴のみではなく骨格構造の変化をも考慮する必要がある。

以下、試験3、4のうち除荷履歴を受けたケースと正規圧密状態のケースの圧密挙動を比較し、除荷履歴の影響を検討する。

図-10に試験3より得られた試験開始時からの $e \sim \log t$ 関係を示す。図-2に示したように試験3では、case 3-2, 3-3, 3-4の3ケースが除荷履歴を受けている。このうちクリープ荷重 (3.2 kg f/cm^2) において過圧密状態となるのは、case3-2、3-3の2ケースでcase3-4は、除荷前の先行荷重とクリープ荷重が同一である。図からも分かるように、case3-4については単調に段階荷重されたcase3-1と最終荷重で有効応力が一定となった後は、圧密曲線がほぼ1本に乗っている。これに対し、過圧密状態であるcase3-2、3-3は、先行圧密により他のケースに比べて間隙比が小さく、二次圧密曲線の勾配も幾分小さい。ただ、その曲線は二次圧密の進行に伴い正規圧密のそれに近づいている。これは、除荷膨潤により変化した骨格構造がひずみの進行とともに単調圧縮の場合の骨格構造に回帰しているものと推定される。

ここで、最終荷重における二次圧密過程をクローズアップし、さらに時間の原点の取り方による圧密曲線の形状変化を避けるために最終荷重における $e \sim \log t$ 関係を図-11に示す。尚、この図は $e \sim \log t$ 関係と対比し易

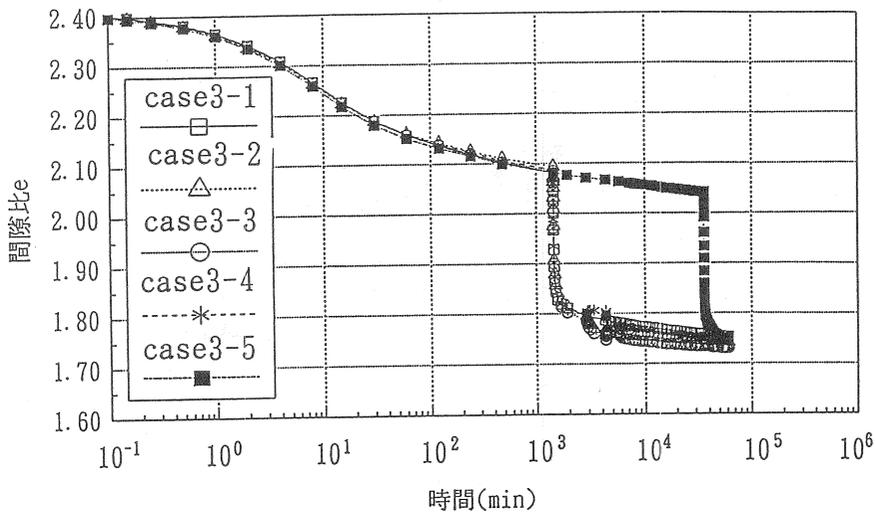


図-10 試験開始時からの $e \sim \log t$ 関係 (試験3)

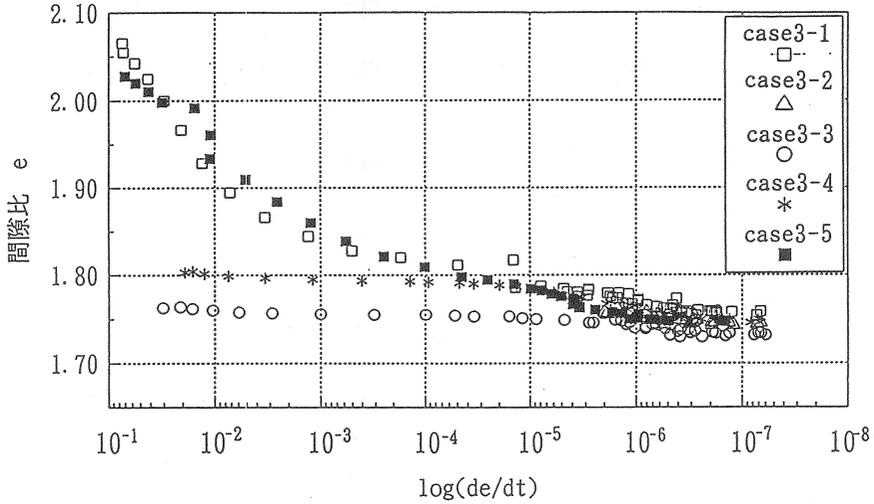


図-11 最終荷重における $e \sim \log \dot{e}$ 関係 (試験 3)

いように、横軸の \dot{e} は右方向へ減少するように整理している。また、case3-2については最終段階初期の除荷に伴う膨張過程は表示せず、再沈下過程に入ってからデータのみをプロットした。case3-4では、最終荷重が除荷後の再載荷過程であるため、二次圧密過程初期には除荷履歴の影響が残り、 $e \sim \log \dot{e}$ 線の勾配がcase3-1のそれに比べて緩やかである。しかし、二次圧密の進行に伴い除荷履歴の影響は薄れ、 $\dot{e} = 10^{-5}$ 付近から勾配は徐々に急になる。さらに、case3-1と同一の間隙比を持つ過程では、両者(case3-1, 3-4)の $e \sim \log \dot{e}$ 曲線はほぼ一致している。一方、過圧密状態にあるcase3-3については、試験期間中では一致しないものの、case3-4と同様に $\dot{e} = 10^{-5}$ 付近から $e \sim \log \dot{e}$ 曲線の勾配が徐々に大きくなりながら、case3-1のそれに近づいており、さらに時間が経過すれば両者は一致するものと推測できる。また、case3-2についても再沈下過程の $e \sim \log \dot{e}$ 関係は、case3-1のそれに次第に近づいており、除荷履歴の影響がクリープの進行とともに消失しているのが分かる。

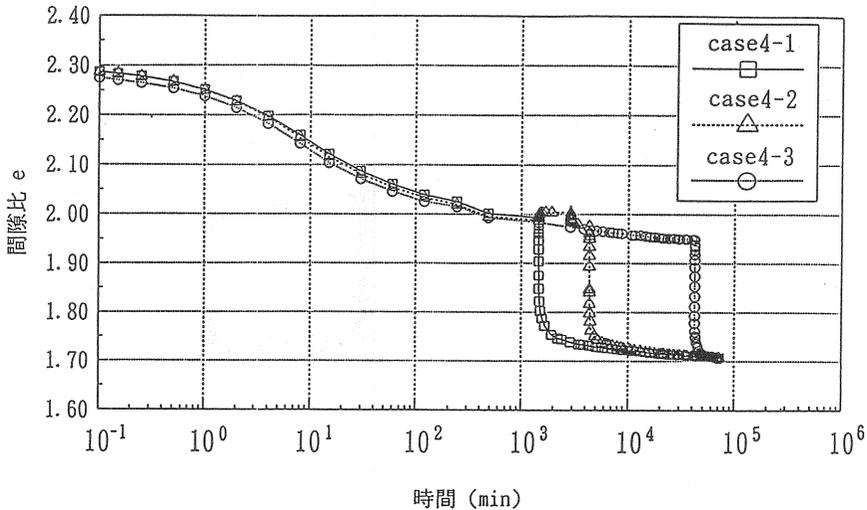


図-12 試験開始時からの $e \sim \log t$ 関係 (試験 4)

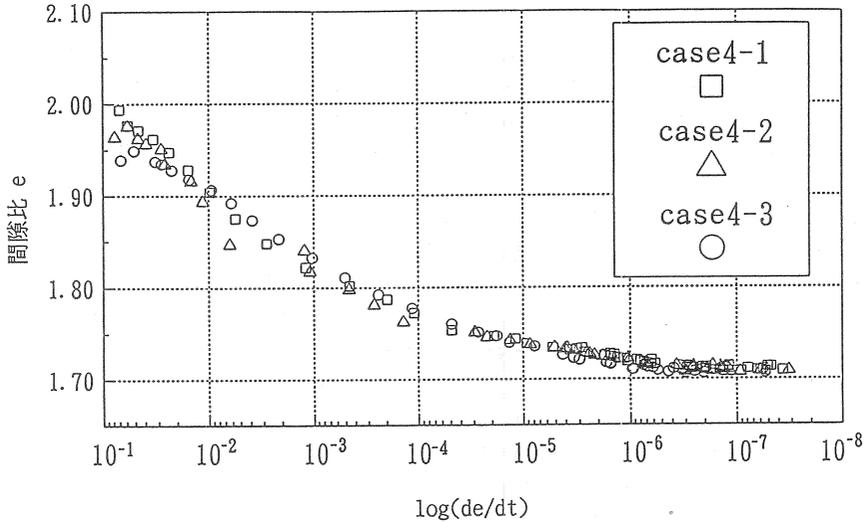


図-13 最終荷重における $e \sim \log \dot{e}$ 関係 (試験4)

つぎに、試験4の結果をもとに試験開始時を時間の原点にした $e \sim \log t$ 曲線を図-12に、最終荷重段階の $e \sim \log \dot{e}$ 曲線を図-13に示す。図-12から分かるようにcase4-2は途中除荷により膨張しているが、その後の再載荷された最終荷重の二次圧密過程ではcase4-1の $e \sim \log t$ 曲線に一致している。図-13は、除荷過程を持つケースと持たないケースで構成されている試験4の最終荷重段階における一次圧密過程から二次圧密過程までの $e \sim \log \dot{e}$ 曲線である。同図には除荷履歴の影響がほとんど認められず、各ケースとも一次圧密過程から二次圧密過程まで同じ挙動を示している。case4-2の場合、除荷履歴は受けているものの最終荷重において除荷直前の先行荷重の2倍の圧密荷重が載荷されているため除荷履歴の影響は、消滅したものと考えられる。

以上のように、除荷履歴を受けた粘土の二次圧密挙動は、除荷膨潤に伴う骨格構造の変化の影響が残る過渡的な状態は認められるものの、再載荷により再び正規圧密状態になった場合、除荷膨潤に伴うその影響はほとんど消滅する。また、過圧密状態の場合においても、ある程度のクリープひずみが進行すれば、膨潤に伴う影響は消滅し、正規圧密粘土と同一の二次圧密挙動を示す。つまり、このような状態にある過圧密粘土の $e \sim \log \dot{e}$ 曲線は正規圧密粘土の $e \sim \log \dot{e}$ 曲線の延長線上にある。

5. 長期圧密履歴のレオロジー挙動に与える影響

Bjerrum⁷²⁾によると、長期間遅延圧密を受けた粘土は、骨格構造が圧縮を伴いながら徐々に抵抗力のある形に変化する。このときの粘土の挙動は過圧密粘土と同様であるため、このような粘土を擬似過圧密粘土と呼ぶ。

擬似過圧密粘土は、除荷により過圧密となった粘土のように攪乱を受けていないため、正規圧密粘土の挙動と比較することにより、応力径路のレオロジー挙動に与える影響をより明確に検討できる。また、長期圧密履歴を持つということは、ある荷重区間で考えると平均的な有効応力増加速度が極端に小さい場合と等価である。

今回行った試験では、case3-5およびcase4-3が最終荷重を載荷する直前に約1ヶ月の長期圧密を受けている。図-10、12の両図を見ても分かるように、case3-5およびcase4-3は最終荷重直前の長期圧密でかなりの二次圧密沈下を生じており、最終荷重載荷時の間隙比はそれぞれcase3-1、case4-1とは異なっている。それにもかかわらず、有効応力一定となった二次圧密過程では、両ケースの $e \sim \log t$ 曲線は、正規圧密粘土の曲線にisotacheしている。また、 $e \sim \log \dot{e}$ 関係についても同様で両ケースの $e \sim \log \dot{e}$ 関係はそれぞれcase3-1, 4-1のそれにisotacheしている。したがって、粘土のレオロジー的挙動への長期圧密履歴の影響は無いと考えられる。

ただ、実際の地盤においては、時間スケールが実験室のそれよりもはるかに大きく、地盤中の有機質分等も多い。したがって、実地盤における長期圧密では室内実験では現れないような続成作用による強度増加も考えられる。しかし、これについては影響する因子が多く、かつ現象が複雑であるので本研究では考慮に入れない。

7. 結 論

本研究は、標準圧密試験装置を用いて様々な応力履歴を与えた試料に対し長期圧密試験を行ない、圧密・圧縮特性に及ぼす応力履歴の影響を調べた。その結果より、粘土の骨格構造のレオロジーの一義性並びに圧密曲線の Isotache について検討した。得られた結論は次のとおりである。

- (1) 正規圧密状態の場合、有効応力が一定のもとでは、応力履歴に関係無く $e \sim \log \dot{\epsilon}$ 関係はユニークな曲線で表せる。
- (2) 過圧密状態の場合、有効応力が一定のもとでは二次圧密過程初期において除荷膨潤に伴う骨格構造の変化の影響の残る過渡的状态があるものの、最終的には過圧密粘土の $e \sim \log \dot{\epsilon}$ 曲線は正規圧密粘土のユニークな $e \sim \log \dot{\epsilon}$ 曲線に一致する。
- (3) ある有効応力のもとで二次圧密が進行中の粘土の間隙比は、クリープ速度によって一義的に決定される。
- (4) 厚さの異なる二つの粘土層の圧密曲線は、それがひずみで表されている場合、初期状態が同一なら Isotache するが、初期状態が異なれば Isotache しない。しかし、圧密曲線が間隙比で表されている場合、初期状態が異なっても Isotache となる。ただこれは、粘土層の自重を無視した議論であって、粘土層の厚さが異なる場合、必然的に有効応力の大きさが異なるので Isotache は存在しない。
- (5) 除荷履歴の影響は、新たな荷重増分による圧縮によって消滅する以外に、遅延圧縮によっても消滅する。

謝 辞

末筆ながら本研究をまとめるにあたって、実験実施、図面作成等にわたり献身的に協力いただいた平尾隆行（広島大学大学院）、炭田英俊（日本工管株）の両氏に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Suklje(1957): "The Analysis of the Consolidation Process by the Isotaches Methods", Proc. 4th ICSMF E, London, Vol. 1, pp. 200-206
- 2) 網千寿夫、松田博(1981): 粘土の二次圧密と沈下解析、土質工学会誌「土と基礎」、Vol. 29, No. 3, pp. 19-24
- 3) Mesri, G. and Choi, Y. K. (1985): "Settlement Analysis of Embankments on Soft Clay", Proc. ASCE, Vol. 111, No. GT4, pp. 441-464
- 4) Imai, G. (1989): "Unified Theory of One-dimensional Consolidation with Creep", Proc. 12th. ICSMFE, Vol. 1, pp. 57-60
- 5) Crawford, C. B. (1964): "Interpretation of Consolidation Test", Proc. ASCE, Vol. 90, No. SM5, pp. 87
- 6) Taylor, D. W. (1948): "Fundamentals of Soil Mechanics", John Wiley and Sons, Inc., New York, N. Y.
- 7) Bjerrum, L. (1967): "Engineering geology of Norwegian normally-Consolidated marine clays as related to settlement of Buildings", Geotechnique, Vol. 17, pp. 83-117
- 8) 例えば Leroueil, S., Kabbaj, F., Tavenas, F. and Bouchard, R. (1985): "Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays", Geotechnique, Vol. 35, No. 2, pp. 159-180
- 9) 安川郁雄、嘉門雅史(1987): 粘性土の二次圧密における荷重条件の影響、土木学会論文報告集、Vol. 27, No. 2, pp. 93-106