

緩衝材の圧密特性

1997年2月

動力炉・核燃料開発事業団
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 33

動力炉・核燃料開発事業団 東海事業所

技術開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel
Development Corporation 4-33, Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki,
319-11, Japan)

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)1997

緩衝材の圧密特性

実施責任者 石川博久*、石黒勝彦*
報告者 並河 努*、菅野 毅*

要旨

人工バリアシステムを構成する緩衝材ベントナイトには、オーバーパックの自重や腐食膨張、周辺岩盤のクリープ変形などにより、長期的な外力が作用すると予測されている。緩衝材の力学的安定性を評価するためには、これら外力に対する緩衝材の力学的変形挙動を明らかにする必要がある。

本報告書は緩衝材ベントナイトの力学特性試験の一環として行なわれた、飽和した圧縮ベントナイトの1次元圧密試験についてまとめたものである。試験では、ベントナイト試料クニゲルV1 (100%) を乾燥密度 ρ_d が 1.6g/cm^3 及び 1.8g/cm^3 になるように圧縮成型し飽和させた供試体を用いた。試験は高圧圧密試験装置を用いて行い、飽和した供試体に膨潤応力から 19.6MPa の圧密応力を8段階で載荷した。 19.6MPa まで載荷後は、4段階で膨潤応力相当まで除荷し、再び 19.6MPa まで4段階で載荷した。

試験結果より、各載荷stepでの圧密沈下量と経過時間の関係 ($\Delta d - \log t$ 関係) が得られた。2次圧密と見られる圧密の後半を除き、圧縮ベントナイトの $\Delta d - \log t$ 関係は Terzaghi の圧密理論でほぼ表現できることが明かとなった。また、各載荷stepの結果より間隙比-圧密応力の関係 ($e - \log p$ 関係) が得られた。 $e - \log p$ 関係において、圧密降伏応力 p_c' は初期の膨潤応力より大きな値となり、圧密降伏応力 p_c' 以上の範囲において $e - \log p$ 関係はほぼ直線となった。除荷、再載荷過程において、 $e - \log p$ 関係は非線形関係となり、リバウンド量も大きな値となった。 $e - \log p$ 関係より求めた圧縮指数 C_c と膨潤指数 C_s は、初期乾燥密度により異なり、初期乾燥密度が 1.6g/cm^3 の供試体では $C_c=0.27$ 、 $C_s=0.18$ となり、初期乾燥密度が 1.8g/cm^3 の供試体では $C_c=0.21$ 、 $C_s=0.11$ となった。また、圧密試験より得られた透水係数は、透水試験より得られた結果³⁾ に比較し妥当な値であった。

*環境技術開発部 地層処分開発室

目次

1. はじめに	1
2. 試験手法	
2.1 試験概要	2
2.2 試験条件	5
2.3 試験手順	7
3. 試験結果1 試験No.1 ($\rho_d=1.6g/cm^3$)	
3.1 圧縮成型結果	8
3.2 膨潤応力	9
3.3 圧密試験結果	11
4. 試験結果2 試験No.2 ($\rho_d=1.8g/cm^3$)	
4.1 圧縮成型結果	20
4.2 膨潤応力	21
4.3 圧密試験結果	23
5. 考察	
5.1 圧密理論解と試験結果の比較	32
5.2 $e - \log p$ 関係 (間隙比-圧密応力関係)	42
5.3 透水係数	46
6. まとめ	48
謝辞	48
参考文献	49

1. はじめに

現在までのところ、高レベル廃棄物の地層処分における緩衝材として、圧縮ベントナイトが有望な候補材料と考えられている。緩衝材には止水性、核種吸着性、力学安定性などの性能が要求されており、圧縮ベントナイトについて、これらの性能を定量的に評価するために、動燃事業団では各種のベントナイトに関する基本特性試験を行ってきた。

人工バリアシステムにおける緩衝材には、オーバーパックの自重及び腐食膨張、周辺岩盤のクリープ変形などにより、長期的な外力が作用すると予測されている。緩衝材の力学的安定性に関する性能評価には、これらの外力に対する緩衝材の変形挙動を明らかにする必要がある。緩衝材として用いるベントナイトのような粘土材料の力学的変形挙動を調べる試験には、圧密試験や3軸試験などの要素試験があり¹⁾、動燃事業団においても、これまでに緩衝材の3軸試験(UU試験)などが行われている²⁾。

本報告書は緩衝材ベントナイトの力学特性試験の一環として行われた、飽和圧縮ベントナイトの1次元圧密試験についてまとめたものである。圧密試験は飽和した粘土材料の圧縮特性を調べる試験で、試験結果として一定応力載荷状態における圧密沈下量-時間関係($\Delta d - \log t$ 関係)や間隙比-圧密応力関係($e - \log p$ 関係)等が得られる。本試験ではベントナイト試料にクニゲルV1(100%)を用いた。試験方法、試験手順に関しては、地盤工学会の土質試験の基準¹⁾に従ったが、実際に想定される外力及びベントナイトの特性等を踏まえて、載荷応力や載荷時間等に関して変更を行った。

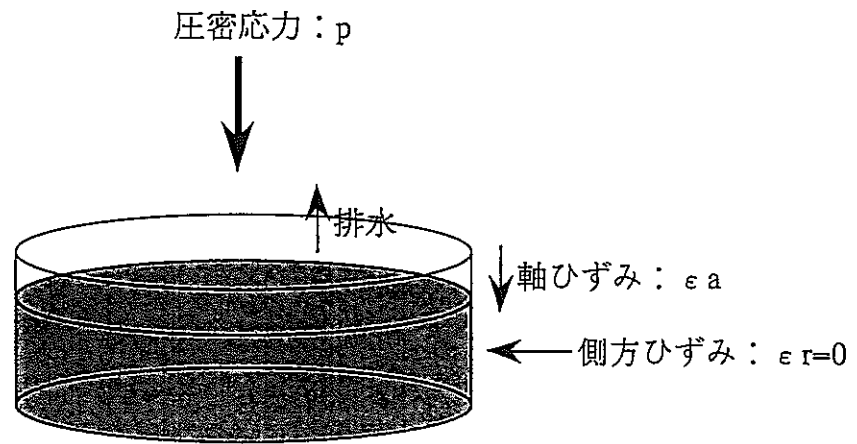
2. 試験手法

2.1 試験概要

1次元圧密試験は、側方変位を0とした条件下で試料の圧縮－膨潤変形挙動を調べる試験である。1次元圧密試験の概念図を図2-1に示す。試験では側方変位を拘束した試料に段階的に荷重を載荷し、その変位を計測する。試験結果としては、試料の体積変形と圧密応力の関係が得られる。今回の試験では飽和ベントナイト試料に最大圧密応力19.6MPaを負荷した後、膨潤応力程度まで除荷及び再載荷を行ない、応力履歴の違いによる飽和ベントナイト試料の圧縮－膨潤特性も調べている。

試験は地盤工学会の土質試験基準¹⁾に基づいて行なったが、実際に想定される外力及びベントナイトの特性等を踏まえ、載荷応力や載荷時間等に関しては変更を行なった。今回は圧縮成型時の初期乾燥密度 ρ_d が異なる2つのケース ($\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$ 、 1.8g/cm^3) の試験を行った。各ケースでは3つの供試体に対し同条件で試験を行ない、試験結果のばらつきも調べている。

1次元圧密試験装置の概略断面図を図2-2に示す。また、今回用いた試験装置の外観を写真2-1に示す。



$\epsilon_a=v$ (体積ひずみ) より $v-p$ 関係および $e-\log p$ を明らかにする。

図2-1 1次元圧密試験概念図

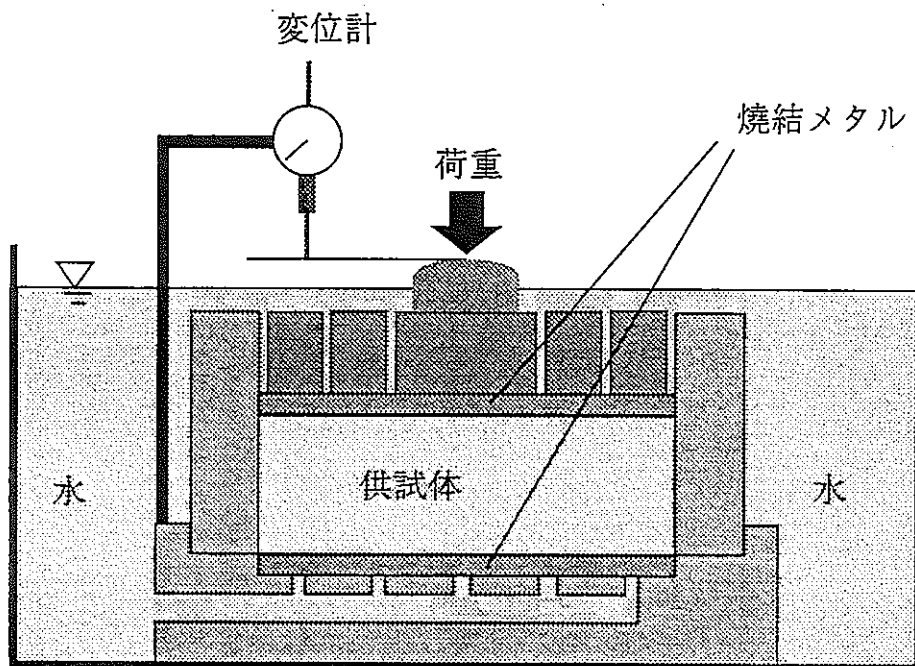


図2-2 試験装置概略断面図

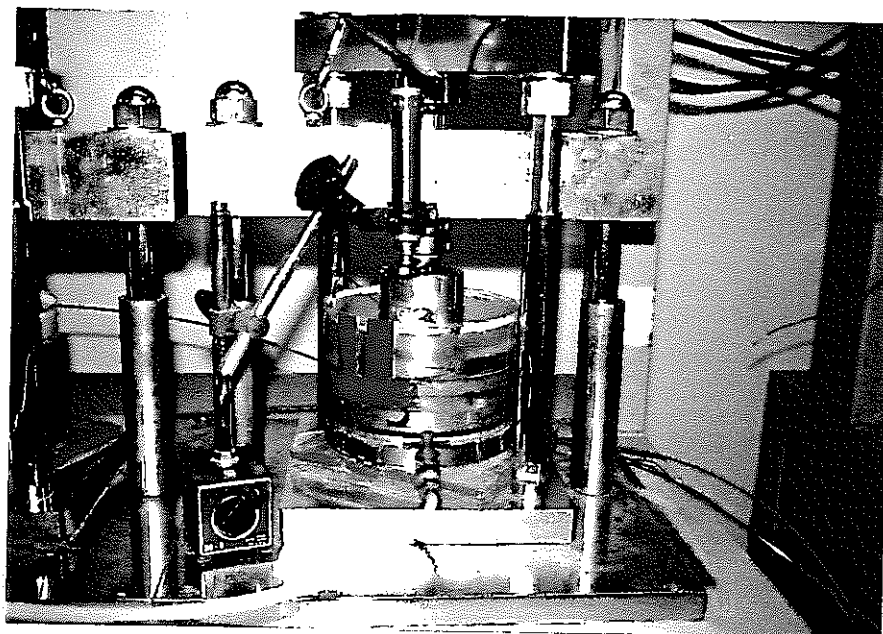


写真2-1 圧密試験装置の外観

2.2 試験条件

本試験では試料にクニゲルV1（100%）を用いた。所定の初期含水比のクニゲルV1を側方拘束条件で圧縮成型した後、体積拘束条件で給水し飽和供試体を作成した。供試体の寸法は高さ $H=20\text{mm}$ 、直径 $\phi=60\text{mm}$ である。各試験の試験No.、初期乾燥密度、圧縮成型時含水比を表2-1にそれぞれ示す。供試体の初期乾燥密度が 1.6g/cm^3 、 1.8g/cm^3 の2ケースの試験を行い、それぞれのケースでは3つの供試体に対し同条件で試験を行った。

圧密は1次元圧密で、载荷は膨潤応力を初期条件とし 19.6MPa まで8段階で行い、その後、初期膨潤応力相当まで4段階で除荷し、再び 19.6MPa まで载荷した。各stepでの軸方向の载荷応力を表2-2-1、表2-2-2に示す。各stepの载荷応力是对数軸上で载荷応力の間隔が等しくなるように決定した。载荷時における計測項目は、軸方向の変位量である。また、試験は温度が 24°C の恒温室内で行なわれた。

表2-1 各試験ケースの初期乾燥密度と初期含水比

試験No.	No.1	No.2
初期乾燥密度（成型時）	1.6g/cm^3	1.8g/cm^3
供試体数	3	3
含水比（成型時）	5.7%	5.9%

注) 初期乾燥密 1.6g/cm^3 、 1.8g/cm^3 は目標値、実際の供試体の初期乾燥密度については表3-1（試験No.1）、表4-1（試験No.2）参照のこと

表2-2-1 各stepの載荷応力 試験No.1 (初期乾燥密度 $\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$)

載荷過程

載荷step	初期	step1	step2	step3	step4	step5	step6	step7	step8
載荷応力[MPa]	膨潤応力	0.98	1.57	2.45	3.63	5.59	8.53	12.9	19.6

除荷過程

載荷step	step u1	step u2	step u3	step u4
載荷応力[MPa]	8.53	3.63	1.57	0.64

再載荷過程

載荷step	step r1	step r2	step r3	step r4
載荷応力[MPa]	1.57	3.63	8.53	19.6

注) 除荷過程の0.64MPaは初期膨潤応力を参考に決定した。

表2-2-2 各stepの載荷応力 試験No.2 (初期乾燥密度 $\rho_d=1.8\text{g/cm}^3$)

載荷過程

載荷step	初期	step1	step2	step3	step4	step5	step6	step7	step8
載荷応力[MPa]	膨潤応力	3.51	4.49	5.73	7.33	9.37	12.0	15.3	19.6

除荷過程

載荷step	step u1	step u2	step u3	step u4
載荷応力[MPa]	12.0	7.33	4.49	2.74

再載荷過程

載荷step	step r1	step r2	step r3	step r4
載荷応力[MPa]	4.49	7.33	12.0	19.6

注) 除荷過程の2.74MPaは初期膨潤応力を参考に決定した。

2.3 試験手順

試験手順を以下に示す。試験No.1、試験No.2とも3供試体に対し全て同条件で試験を行なった。

- (1) 所定の含水比のベントナイトを、圧縮成型後の供試体の乾燥密度が所定の乾燥密度となるよう、側方拘束条件下において一定速度で圧縮成型する。
- (2) 変形を拘束した状態で、供試体に給水し、膨潤応力を測定する。
- (3) 膨潤応力の経時変化より、供試体が飽和したかどうか確認する。
- (4) 飽和確認後、膨潤応力を解放せず、1次元圧密試験を開始する。
- (5) 供試体に8stepで19.6MPaまで載荷を行なう。各stepにおいて供試体の軸変位の経時変化を計測する。各載荷stepでの圧密終了の確認は3t法¹⁾により行なう。
- (6) 19.6MPaより圧密試験開始時の膨潤応力付近まで4stepで除荷を行なう。
- (7) 再び19.6MPaまで4stepで載荷を行なう。
- (8) 試験終了後供試体を取り出し、乾燥させ乾燥重量を計測する。

3. 試験結果 1 試験No.1 ($\rho_d=1.6\text{g/cm}^3$)

3.1 圧縮成型結果

粉末状のクニゲルV1を一定速度 (1mm/min) で圧縮成型することにより、圧密試験に用いる供試体を作成した。圧縮成型時の含水比は5.7%である。3供試体それぞれの圧縮成型時における圧縮成型応力 (軸方向圧縮応力) - 間隙比関係を図3-1に示す。3供試体の圧縮応力-間隙比の関係はほぼ同じであり、載荷時において軸応力の対数と間隙比がほぼ線形関係となっている。

それぞれの供試体の最大成型圧と、各供試体の乾燥重量、乾燥密度および間隙比を表3-1に示す。ただし、乾燥重量は、試験終了後に計測した値である。各供試体の試験前の乾燥密度は 1.56g/cm^3 から 1.58g/cm^3 となり、目標の乾燥密度 1.6g/cm^3 より若干小さな値となったが、この状態を初期状態とし圧密試験を行った。

表3-1 各供試体の最大成型圧と初期間隙比 試験No.1

供試体No.	1-a	1-b	1-c
最大成型圧[MPa]	10.9	11.5	11.8
乾燥重量[g]	89.21	87.98	88.90
乾燥密度[g/cm ³]	1.58	1.56	1.57
圧密前間隙比	0.712	0.726	0.717

注) 乾燥密度、間隙比の計算ではクニゲルV1の真比重を 2.7g/cm^3 とした。

3.2 膨潤応力

圧密を行なう前に、圧縮成型した供試体に給水を行ない飽和させた。その時それぞれの供試体の軸方向の荷重をロードセルにより測定した。給水開始後、各供試体には膨潤応力が発生した。各供試体に発生した膨潤応力の経時変化を図3-2に示す。図より、各供試体とも膨潤応力の発生の経時変化の特徴は同じで、給水直後から膨潤応力は上昇していき、ピークに達した後低下し、再び若干上昇しほぼ一定となっている。これまでに行なわれた膨潤応力測定試験においても、このような膨潤応力の経時変化が得られている³⁾。ただし、各試験とも同条件で圧縮成型したにもかかわらず、供試体1-cの結果が他の2つの供試体の結果と大きく異なっていることがわかる。この原因としては、装置特性により供試体への水の浸入の仕方に差があったことが考えられる。このような膨潤応力のばらつきの原因は明かでないが、これまでの膨潤応力測定試験でもばらつきは確認されている³⁾。今回の試験ではこのまま圧密試験に移行し、膨潤応力のばらつきが圧密特性にどのような影響があるか調べることにした。

給水後約600時間が経過した時点より、各供試体とも膨潤応力がほぼ一定となっており、約1000時間の時点で、供試体はほぼ飽和したと判断し、圧密試験に移行することとした。それぞれの供試体の最大膨潤応力及び定常時膨潤応力（圧密直前の膨潤応力のこと。以後膨潤応力とはこの値をさす。）を表3-2に示す。

表3-2 各供試体の膨潤応力 試験No.1

供試体No.	1-a	1-b	1-c
最大膨潤応力[MPa]	0.87	0.81	1.25
定常時膨潤応力[MPa]	0.65	0.62	0.53

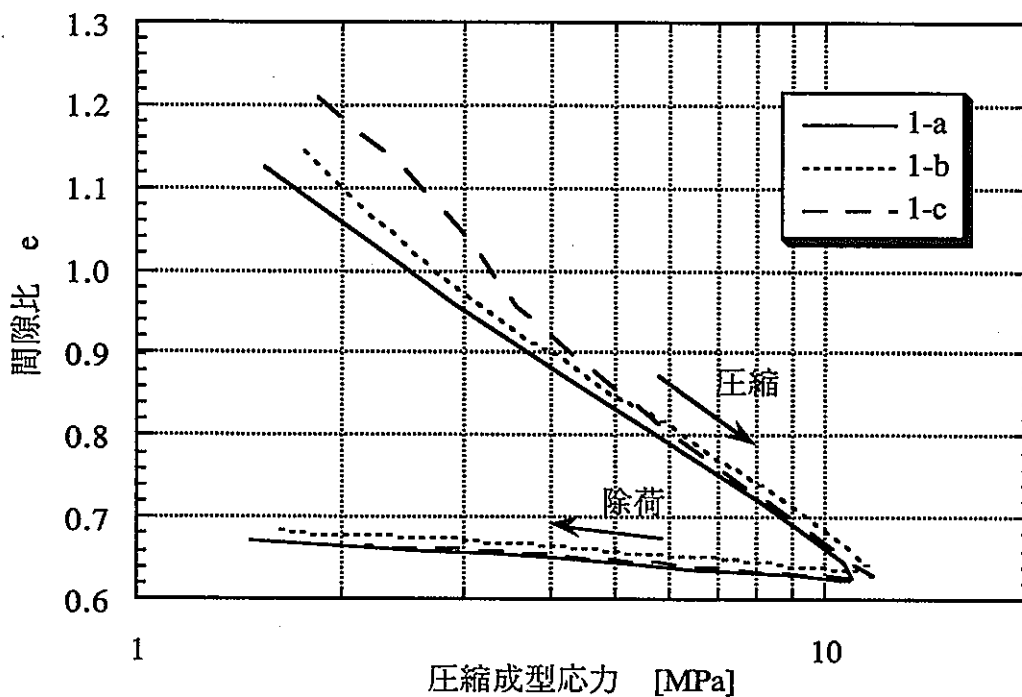


図 3-1 圧縮成型応力と間隙比の関係 試験No.1

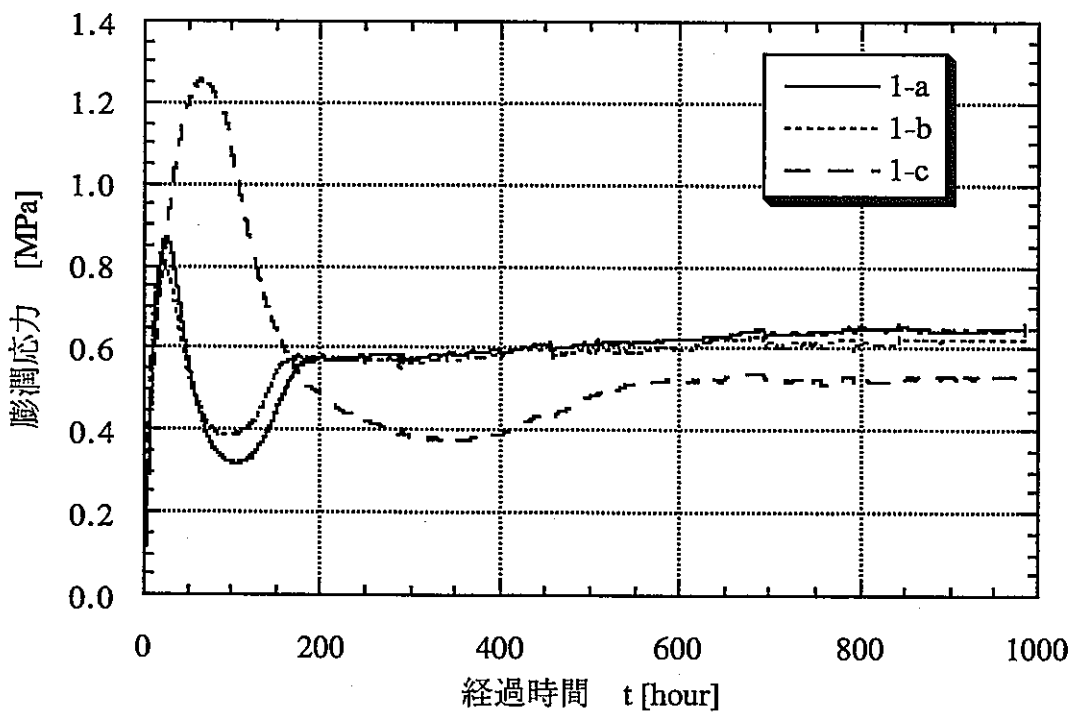


図3-2 膨潤応力の経時変化 試験No.1

3.3 圧密試験結果

(1) 載荷過程

圧密試験では、膨潤応力から19.6MPaまで8stepに分けて軸方向に圧密応力を載荷した。各stepでの圧密終了は3t法により確認した。各stepに要した載荷軸応力と載荷時間を表3-3に示す。1stepの載荷期間は約3日間から約2週間である。

各荷重stepでの供試体の沈下量の経時変化（時間軸は対数軸としている）を図3-3-1から図3-3-8にそれぞれ示す。step1(0.98MPa)では供試体はほとんど変形していないが、それ以降のstepでは、各stepとも圧密沈下量－時間関係（ $\Delta d - \log p$ 関係）の傾向はほぼ同じであり、一般の粘土の圧密現象と同様な圧密沈下量－時間関係となっていることがわかる¹⁾。圧密の前半では1次圧密が生じ、1次圧密が終了した後も2次圧密に相当すると考えられる経過時間の対数にほぼ比例する沈下が認められる。ただし、2次圧密についての議論を行うには、今回の試験では各stepでの載荷時間が短いと考えられる。2次圧密の詳細な検討を行うには、載荷時間のより長い圧密試験を行う必要があるといえる。1次圧密に対してはTerzaghiの圧密理論との比較という観点で、5章で詳しく考察する。

供試体間の差であるが、各stepで3供試体の結果はほぼ同じ結果となっていることがわかる。若干の試験結果のバラツキは試験装置の微妙な違いや、供試体と容器側面に発生する摩擦の違いなどによると考えられる。また、3.2章の図3-2の膨潤応力の経時変化において、供試体1-cのみ他の2供試体に比較して異なる結果となっていたが、本圧密試験の結果に3者の著しい違いは認められなかった。このことより、初期含水比などについて同条件で圧縮成型された試料ならば、圧密前の膨潤応力の経時変化の違いが圧密特性に与える影響は小さいと考えられる。

表3-3 各載荷stepの載荷応力と載荷時間（試験No.1 載荷過程）

載荷step	step1	step2	step3	step4	step5	step6	step7	step8
載荷応力 [MPa]	0.98	1.57	2.45	3.63	5.59	8.53	12.9	19.6
載荷時間 [hour]	72	164	189	174	161	279	270	329

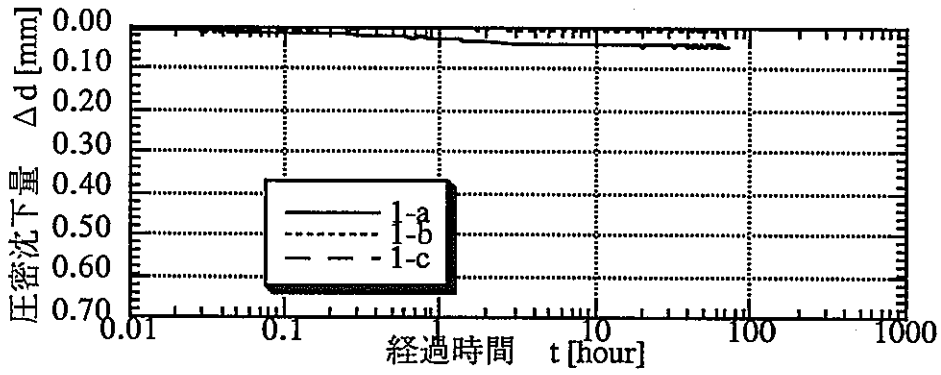


図3-3-1 試験No.1結果 荷重 step1 (膨潤応力→0.98MPa)
圧密沈下量-時間関係 (Δd - log t 関係)

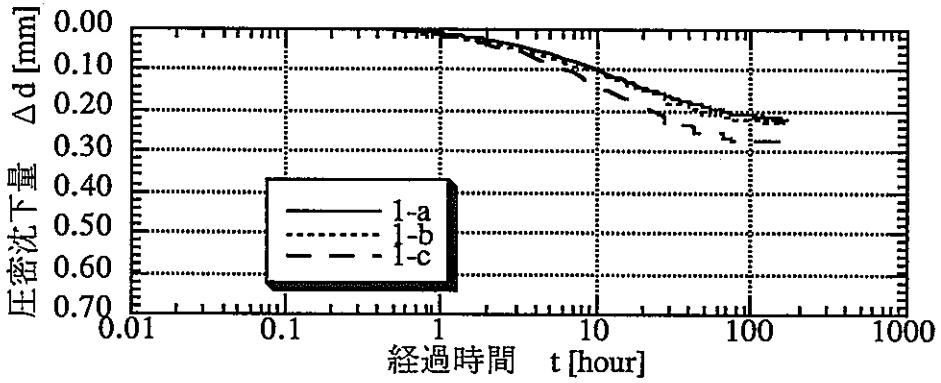


図3-3-2 試験No.1結果 荷重 step2 (0.98MPa→1.57MPa)
圧密沈下量-時間関係 (Δd - log t 関係)

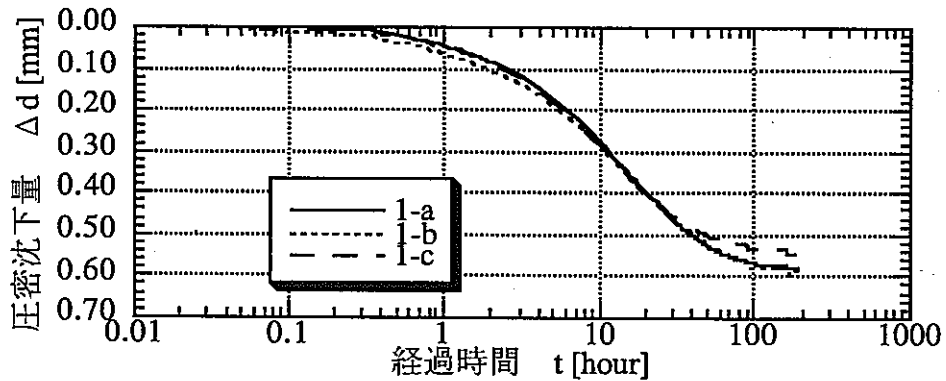


図3-3-3 試験No.1結果 荷重 step3 (1.57MPa→2.45MPa)
圧密沈下量-時間関係 (Δd - log t 関係)

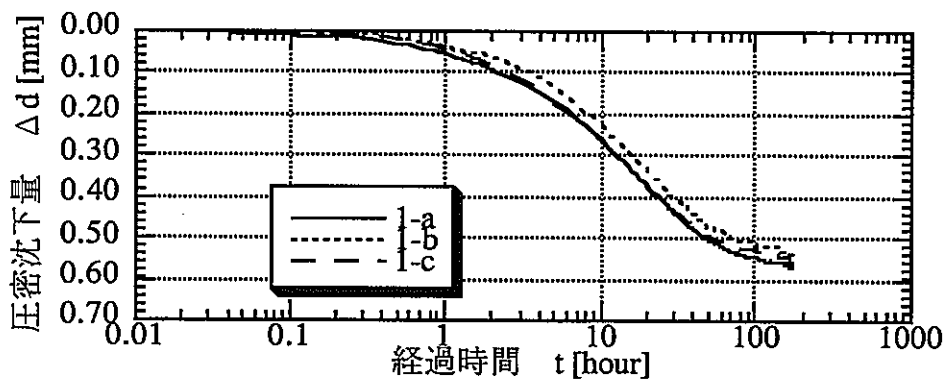


図3-3-4 試験No.1結果 載荷 step4 (2.45MPa→3.63MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

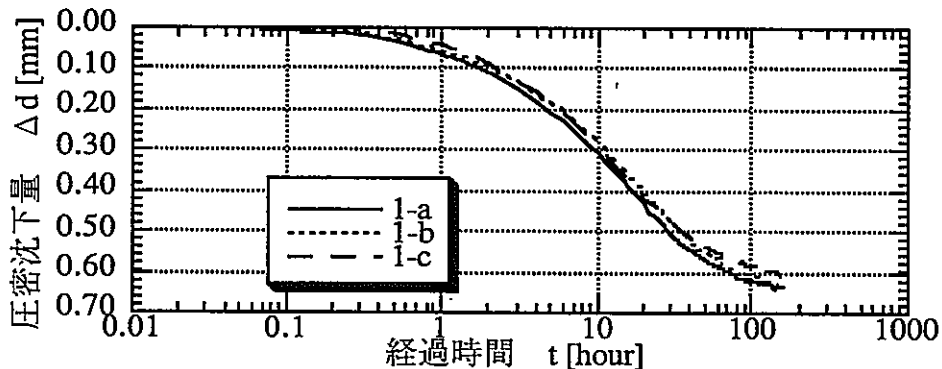


図3-3-5 試験No.1結果 載荷 step5 (3.63MPa→5.59MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

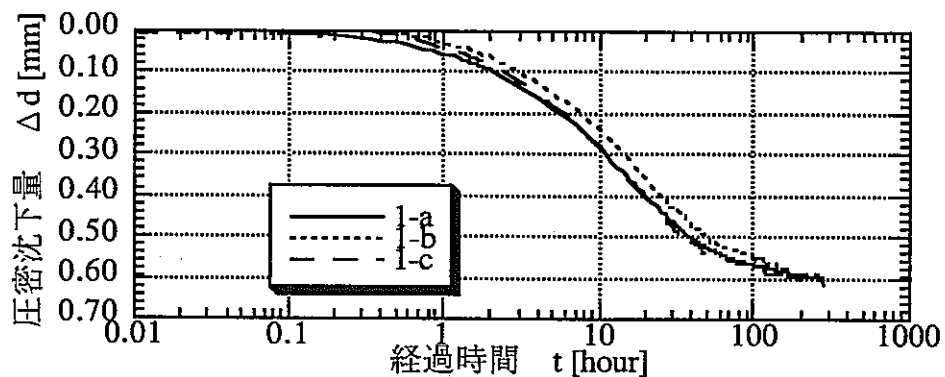


図3-3-6 試験No.1結果 載荷 step6 (5.59MPa→8.53MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

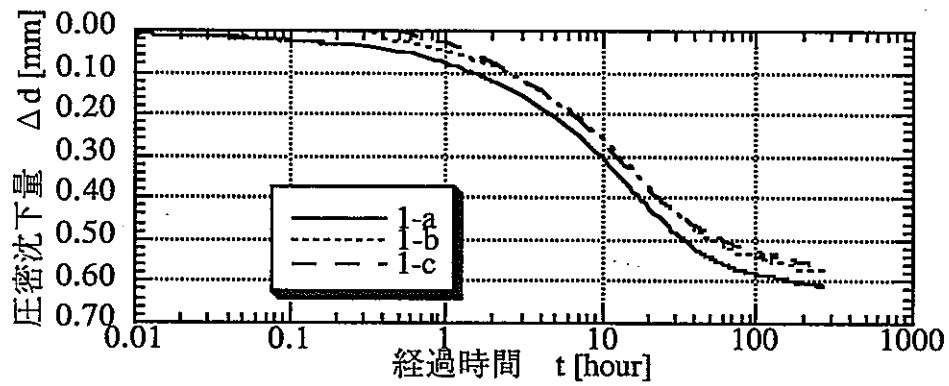


図3-3-7 試験No.1結果 載荷 step7 (8.53MPa→12.9MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

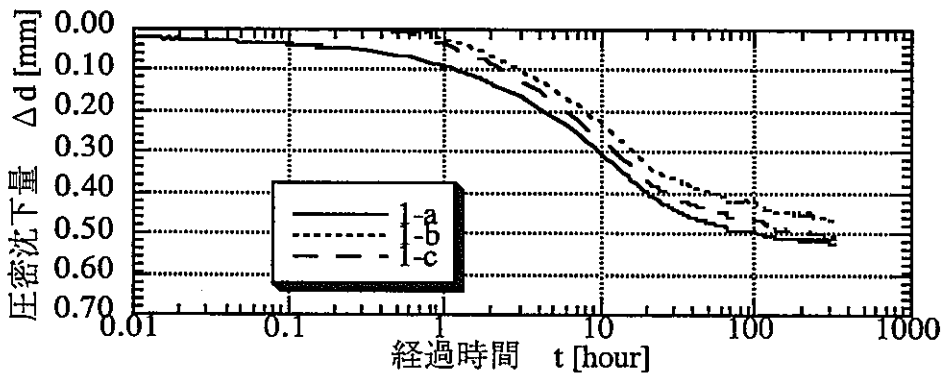


図3-3-8 試験No.1結果 載荷 step8 (12.9MPa→19.6MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

(2) 除荷過程

供試体に19.6MPaまで圧密応力を載荷した後、4stepに分けてもとの膨潤応力にほぼ等しい0.64MPaまで除荷を行った。各stepでの載荷軸応力と除荷時間を表3-4に示す。

各stepでの圧密沈下量（リバウンド量）－時間関係（ $\Delta d - \log t$ 関係）を図3-4-1から図3-4-4にそれぞれ示す。各除荷過程におけるリバウンド量－時間関係は、定性的に同じ傾向を示しており、前述の載荷過程における関係の変形量のプラスとマイナスを逆にしたのと同じような関係を示している。ただし各step間でリバウンド量は大きく異なっており、除荷stepが大きくなるにつれリバウンド量は大きくなっていることがわかる。

表3-4 各載荷stepの載荷応力と載荷時間（試験No.1 除荷過程）

載荷step	step u1	step u2	step u3	step u4
載荷応力 [MPa]	8.53	3.63	1.57	0.64
除荷時間 [hour]	240	341	645	902

(3) 再載荷過程

膨潤応力まで除荷した後に、再び19.6MPaまで4stepに分けて再載荷を行った。各stepでの載荷軸応力と載荷時間を表3-5に示す。

各stepでの変形量－時間関係を図3-5-1から図3-5-4に示す。各stepにおける変形量－時間関係は、定性的に同じ傾向を示しており、載荷過程における関係と同様の傾向を示している。ただし、1次圧密終了後の2次圧密と考えられる部分の沈下量は、載荷過程に比較して若干小さくなっていることがわかる。

表3-5 各載荷stepの載荷時間（試験No.1 再載荷過程）

載荷step	step r1	step r2	step r3	step r4
載荷応力 [MPa]	1.57	3.63	8.53	19.6
載荷時間 [hour]	582	347	406	405

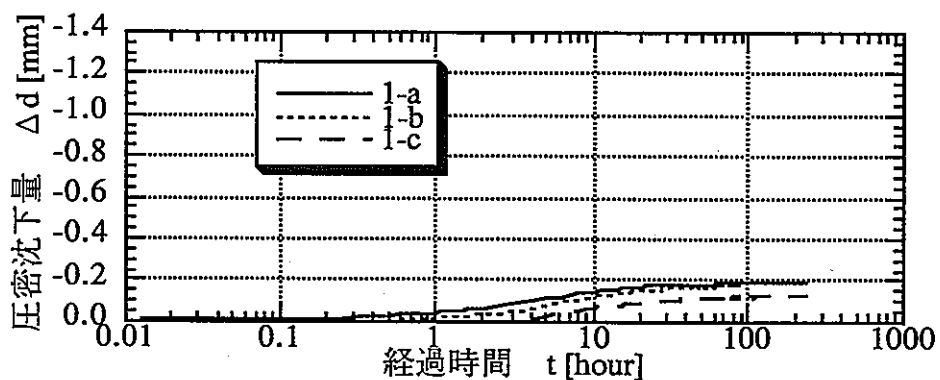


図3-4-1 試験No.1結果 除荷 step u1 (19.6MPa→8.53MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

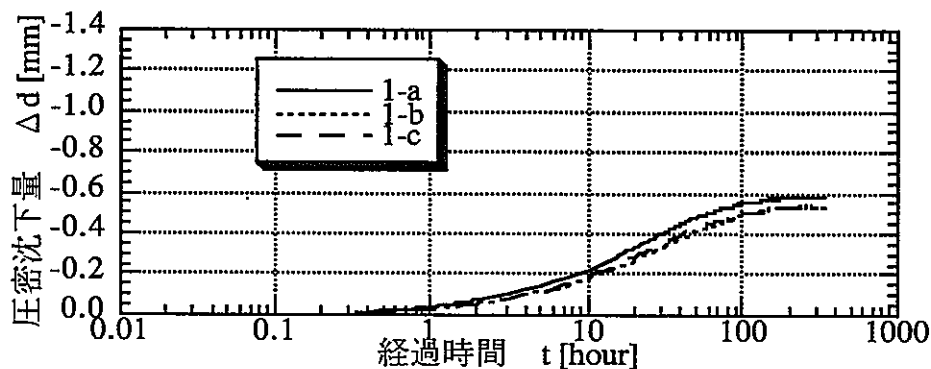


図3-4-2 試験No.1結果 除荷 step u2 (8.53MPa→3.63MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

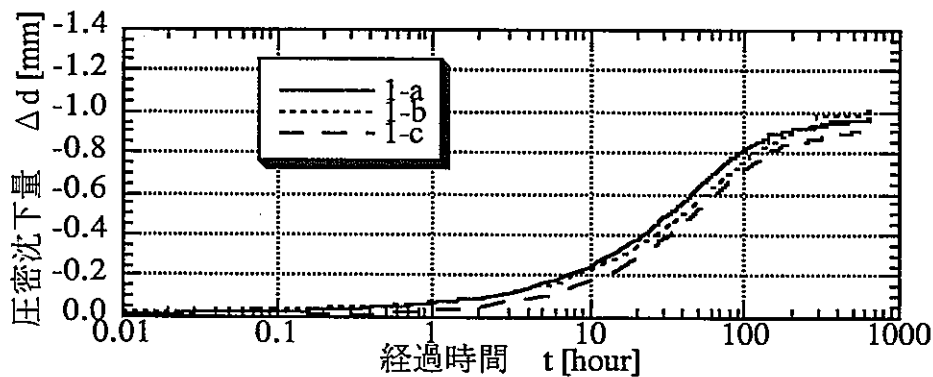


図3-4-3 試験No.1結果 除荷 step u3 (3.63MPa→1.57MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

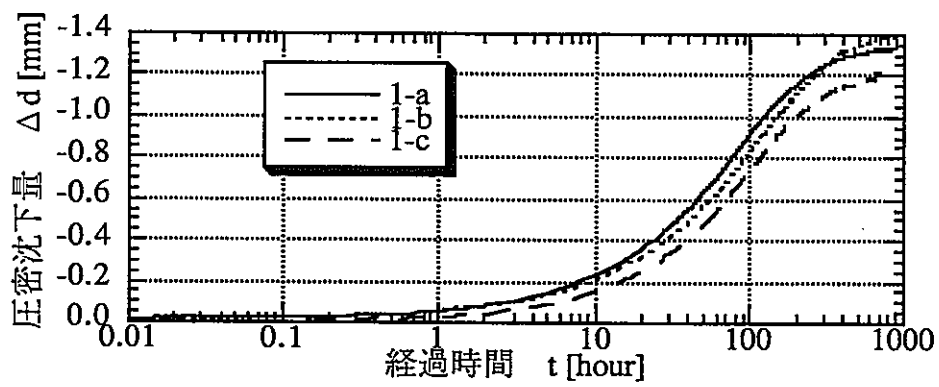


図3-4-4 試験No.1結果 除荷 step u4 (1.57MPa→0.64MPa)
圧密沈下量-時間関係 (Δd - log t 関係)

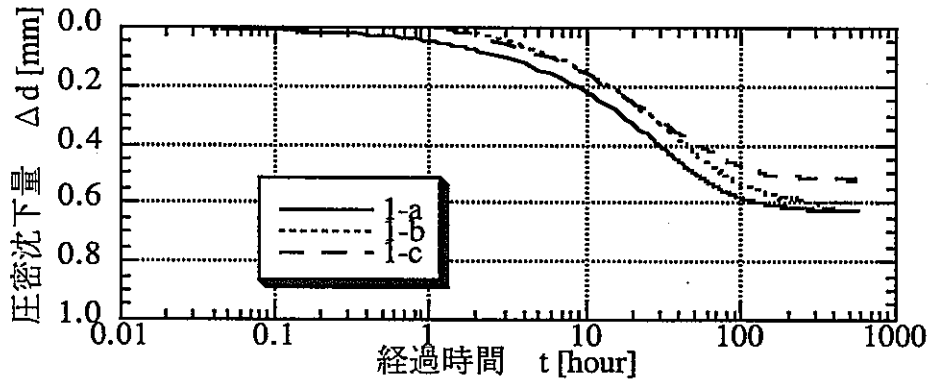


図3-5-1 試験No.1結果 再載荷 step r1 (0.64MPa→1.57MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

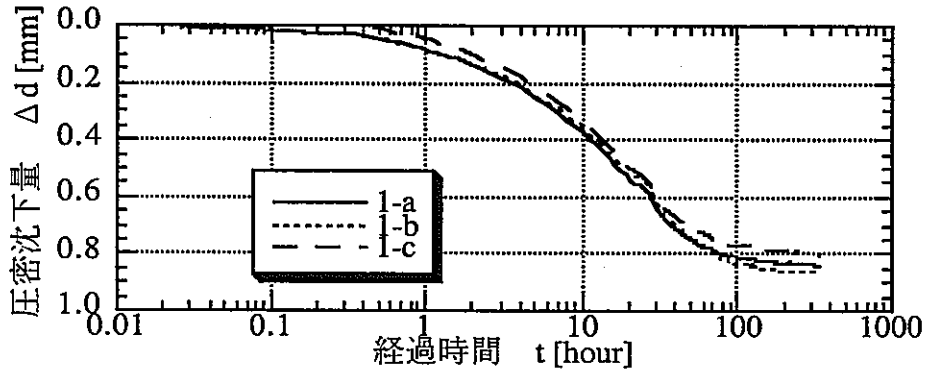


図3-5-2 試験No.1結果 再載荷 step r2 (1.57MPa→3.63MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

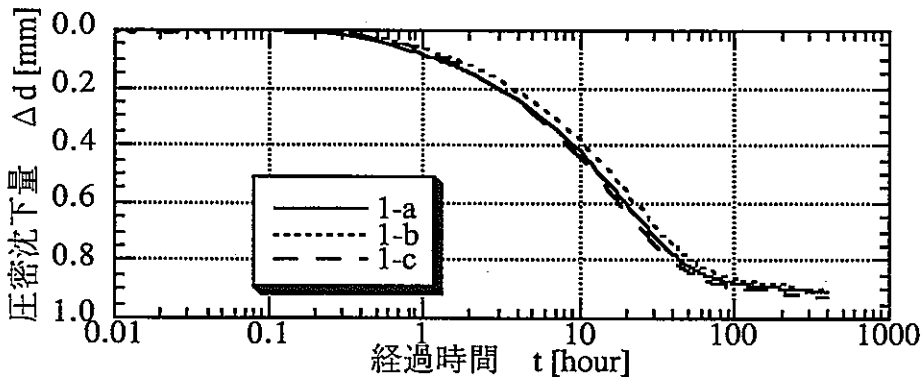


図3-5-3 試験No.1結果 再載荷 step r3 (3.63MPa→8.53MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

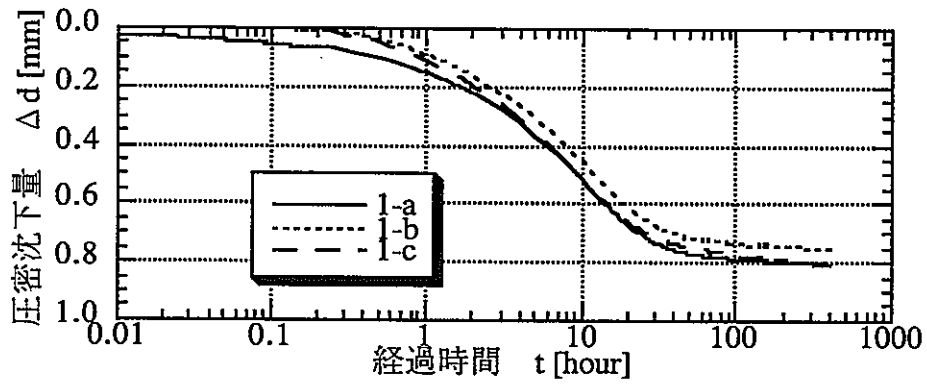


図3-5-4 試験No.1結果 再載荷 step r4 (8.53MPa→19.6MPa)
圧密沈下量-時間関係 (Δd - log t 関係)

4. 試験結果 2 試験No. 2 ($\rho \approx 1.8\text{g/cm}^3$)

4.1 圧縮成型結果

3章で述べた試験No.1と同様に、粉末状のクニゲルV1を一定速度（1mm/min）で圧縮成型することにより、圧密試験に用いる供試体を作成した。圧縮成型時の含水比は5.9%である。3供試体それぞれの圧縮成型時における軸方向圧縮応力-間隙比関係を図4-1に示す。3供試体の圧縮応力-間隙比の関係はほぼ同じであり、載荷時において軸応力の対数と間隙比がほぼ線形関係となっている。

それぞれの供試体の最大成型圧と、各供試体の乾燥重量、乾燥密度および間隙比を表4-1に示す。ただし、乾燥重量は、試験終了後に計測した値である。各供試体の試験前の乾燥密度は 1.76g/cm^3 となり、目標の乾燥密度 1.8g/cm^3 より若干小さな値となったが、これを初期状態として試験を行った。

表4-1 各供試体の最大成型圧と初期間隙比（試験No.2）

供試体No.	2-a	2-b	2-c
最大成型圧[MP]	28.5	29.2	29.0
乾燥重量[g]	99.70	98.78	99.38
乾燥密度[g/cm ³]	1.76	1.76	1.76
圧密前間隙比	0.53	0.53	0.53

注) 乾燥密度、間隙比の計算ではクニゲルV1の真比重を 2.7g/cm^3 とした。

4.2 膨潤応力

3章で述べた試験No.1と同様の方法で供試体を飽和させた。各供試体に発生した膨潤応力の経時変化を図4-2に示す。本結果も試験No.1と同様な傾向を示しており、給水直後から膨潤応力は上昇していき、ピークに達した後若干低下し、再び上昇しほぼ一定となっている。ただし初期ピーク時の膨潤応力の発生の仕方が試験No.1の結果とは異なり、その後の応力に比較し試験No.1の結果ほど大きくないことがわかる。そして、供試体2-a、2-bでは定常時の応力が最大膨潤応力となっている。また、本ケースにおいても、供試体2-cの結果が他の2つの供試体の結果と大きく異なっていることがわかる。先に述べたが、装置特性等がこのような差異の原因と考えられる。

給水後約500時間が経過した時点より、各供試体とも膨潤応力がほぼ一定となっており、約1400時間の時点で、供試体はほぼ飽和したと判断し、圧密試験に移行することとした。それぞれの供試体の最大膨潤応力及び定常時膨潤応力（圧密直前の膨潤応力のこと。以後膨潤応力とはこの応力をさす。）を表4-2に示す。

表4-2 各供試体の膨潤応力（試験No.2）

供試体No.	2-a	2-b	2-c
最大膨潤応力[MPa]	2.62	2.72	2.96
定常時膨潤応力[MPa]	2.62	2.72	2.60

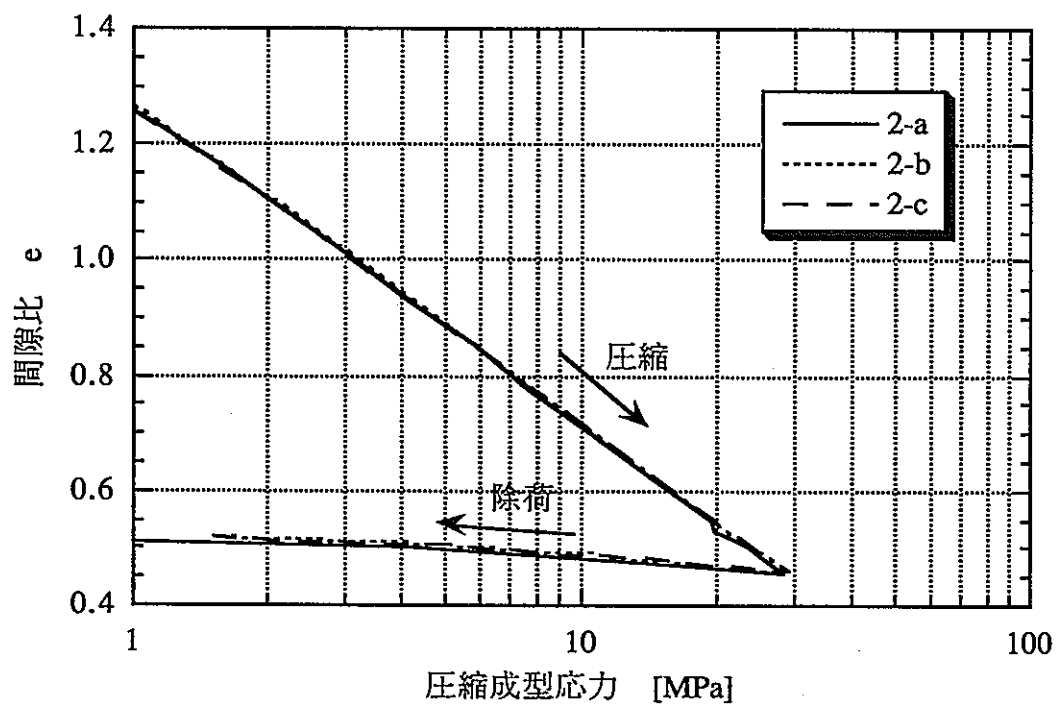


図4-1 圧縮成型応力と間隙比の関係 試験No.2

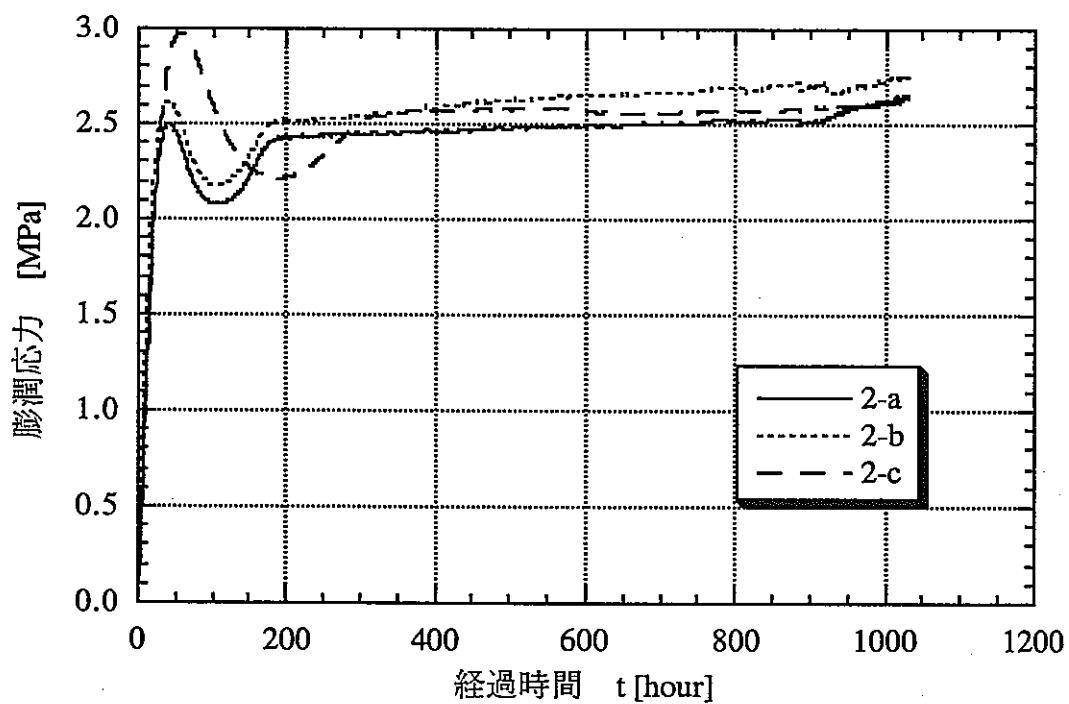


図4-2 膨潤応力の経時変化 試験No.2

4.3 圧密試験結果

(1) 載荷過程

圧密試験では19.6MPaまで8stepに分けて軸方向に圧密応力を載荷した。各stepでの圧密終了は3t法により確認した。各stepに要した載荷軸応力と載荷時間を表4-3に示す。

各荷重stepでの供試体の圧密沈下量の経時変化 ($\Delta d - \log t$ 関係) を図4-3-1から図4-3-8にそれぞれ示す。step1、step2では供試体はほとんど圧密変形していないが、それ以降のstepでは、試験No.1の結果と同様に各stepとも圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log p$ 関係) の傾向はほぼ同じであり、一般の粘土の圧密現象と同様な圧密沈下量-時間関係となっていることがわかる¹⁾。圧密の前半では1次圧密が生じ、1次圧密が終了した後も2次圧密に相当すると考えられる経過時間の対数にほぼ比例する沈下が認められる。この試験No.2の結果における1次圧密に対する議論も5章の考察で詳しく行う。

供試体間の差であるが、各stepで3供試体の結果はほぼ同じ結果となっていることがわかる。若干の差異は試験装置の微妙な違いや、供試体と容器側面に発生する摩擦の違いなどによる、試験結果のバラツキであると考えられる。また、4.2章の図4-2の膨潤応力の経時変化において、供試体1-cのみ他の2供試体に比較して大きく異なっていたが、本圧密試験の結果に3者の著しい違いは認められなかった。このことより、本試験結果からも圧縮成型時の含水比と乾燥密度がほぼ等しければ、圧密前の膨潤応力の経時変化の違いが圧密特性に与える影響は小さいことがわかる。

表4-3 各載荷stepの載荷応力と載荷時間 (試験No.2 載荷過程)

載荷step	step1	step2	step3	step4	step5	step6	step7	step8
載荷応力 [MPa]	3.51	4.49	5.73	7.33	9.37	12.0	15.3	19.6
載荷時間 [hour]	123	379	523	479	650	531	471	535

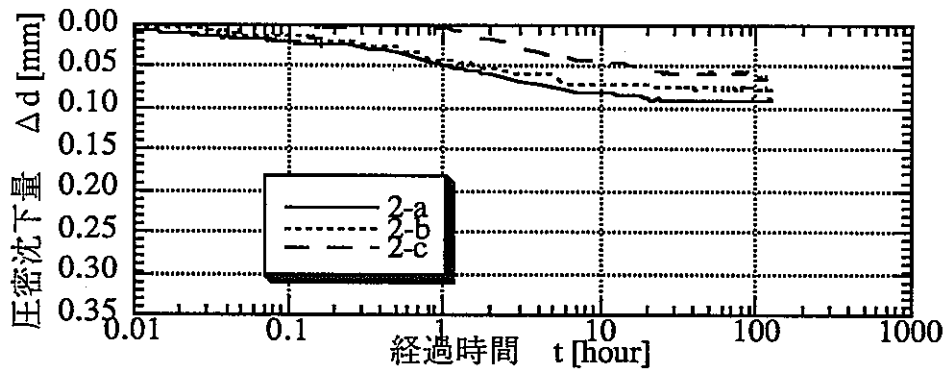


図4-3-1 試験No.2結果 載荷 step1 (膨潤応力→3.51MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

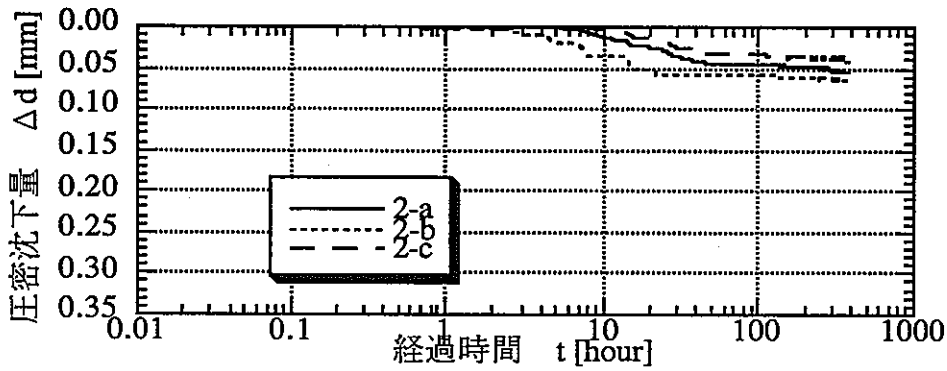


図4-3-2 試験No.2結果 載荷 step2 (3.51MPa→4.49MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

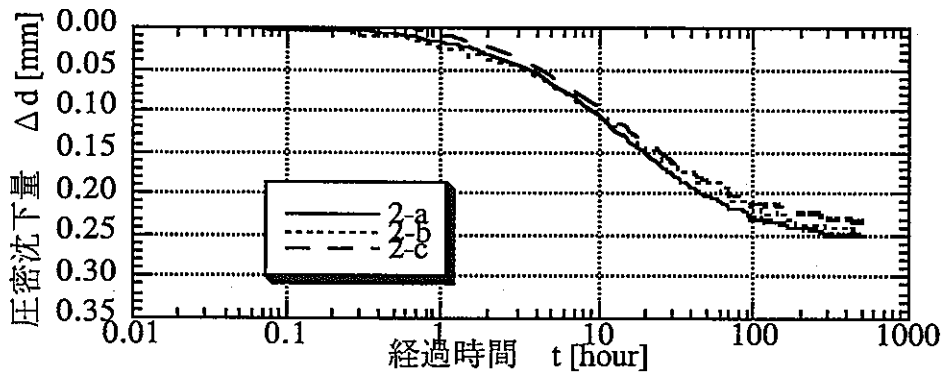


図4-3-3 試験No.2結果 載荷 step3 (4.49MPa→5.73MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

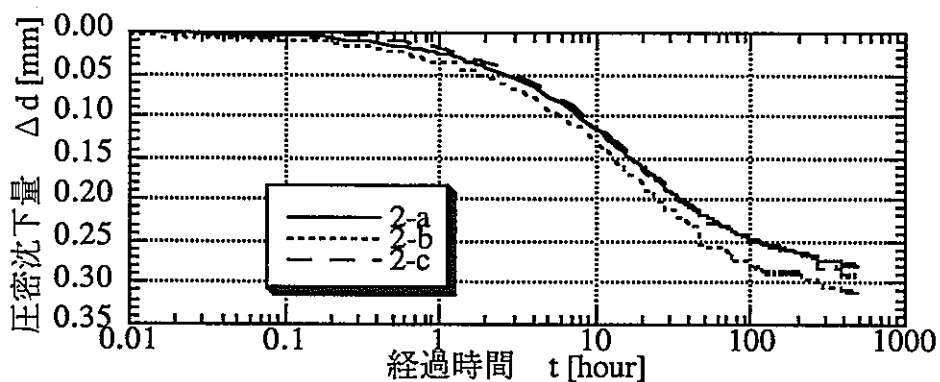


図4-3-4 試験No.2結果 載荷 step4 (5.73MPa→7.33MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

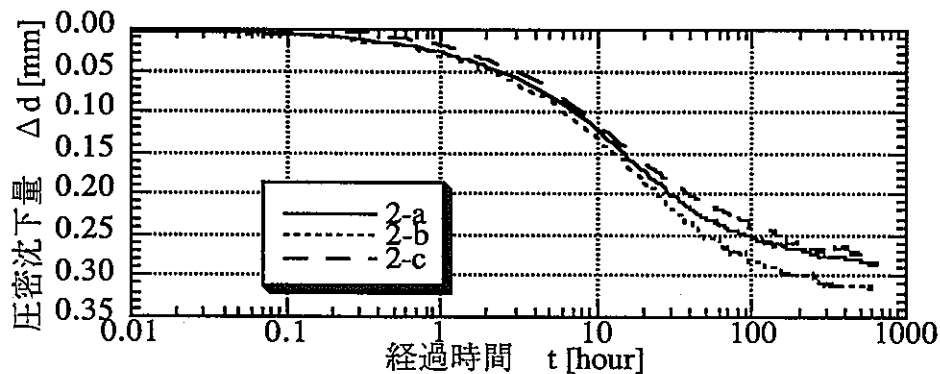


図4-3-5 試験No.2結果 載荷 step5 (7.33MPa→9.37MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

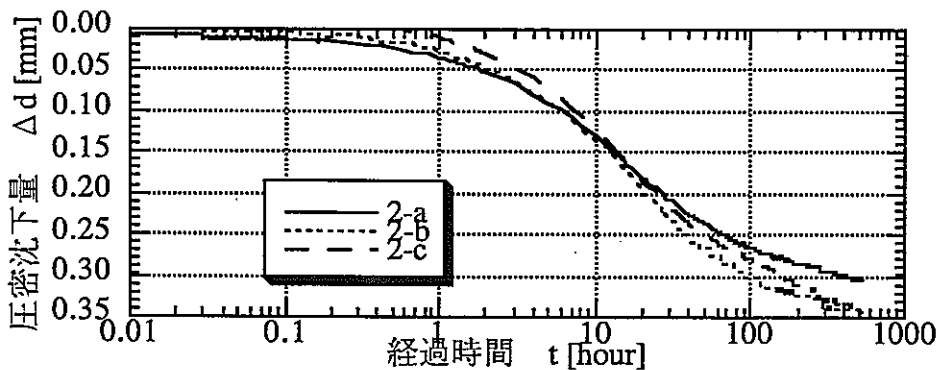


図4-3-6 試験No.2結果 載荷 step6 (9.37MPa→12.0MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

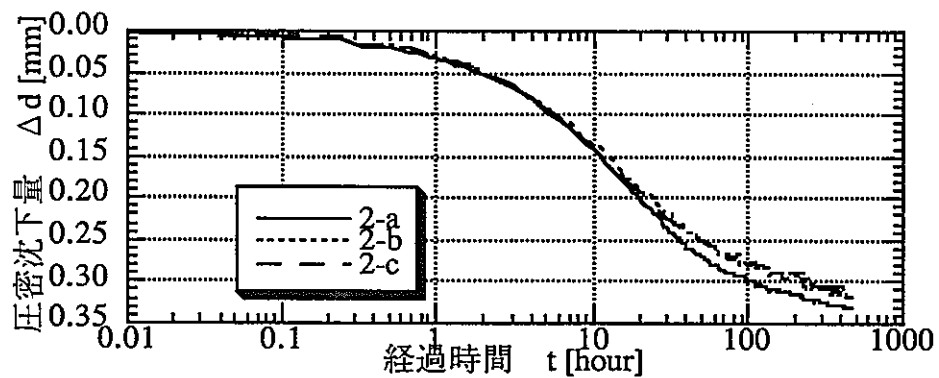


図4-3-7 試験No.2結果 載荷 step7 (12.0MPa→15.3MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

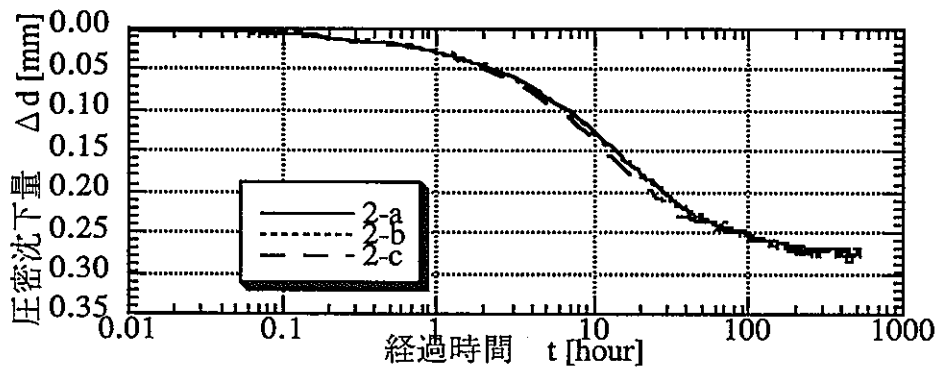


図4-3-8 試験No.2結果 載荷 step8 (15.3MPa→19.6MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

(2) 除荷過程

供試体に19.6MPaまで圧密応力を載荷した後、4stepに分けてもとの膨潤応力にはほぼ等しい2.74MPaまで除荷を行った。各stepでの載荷軸応力と除荷時間を表4-4に示す。

各stepでの圧密沈下量（リバウンド量）－時間関係（ $\Delta d - \log t$ 関係）を図4-4-1から図4-4-4にそれぞれ示す。本試験結果も試験No.1と同じ傾向を示している。各除荷過程における圧密沈下量（リバウンド量）－時間関係は、定性的に同じ傾向を示しており、載荷過程における関係の圧密沈下量の経時変化のプラスとマイナスを逆にしたものと同じような関係を示している。また、試験No.1の結果と同様に、各step間でリバウンド量の値は大きく異なっており、除荷stepが大きくなるにつれリバウンド量は大きくなっていることがわかる。

表4-4 各載荷stepの載荷応力と載荷時間（試験No.2 除荷過程）

載荷step	step u1	step u2	step u3	step u4
載荷応力 [MPa]	12.0	7.33	4.49	2.74
除荷時間 [hour]	335	409	528	902

(3) 再載荷過程

膨潤応力まで除荷した後に、再び19.6MPaまで4stepに分けて再載荷を行った。各stepでの載荷軸応力と載荷時間を表4-5に示す。

各stepでの圧密沈下量－時間関係（ $\Delta d - \log t$ 関係）を図4-5-1から図4-5-4に示す。本試験結果も試験No.1と同じ傾向を示している。各stepにおける変形量－時間関係は、定性的に同じ傾向を示しており、載荷過程における関係と同じような関係を示している。そして、1次圧密の後には、若干ではあるが2次圧密も認められる。

表4-5 各載荷stepの載荷時間（試験No.2 再載荷過程）

載荷step	step r1	step r2	step r3	step r4
載荷応力 [MPa]	4.49	7.33	12.0	19.6
載荷時間 [hour]	485	449	655	449

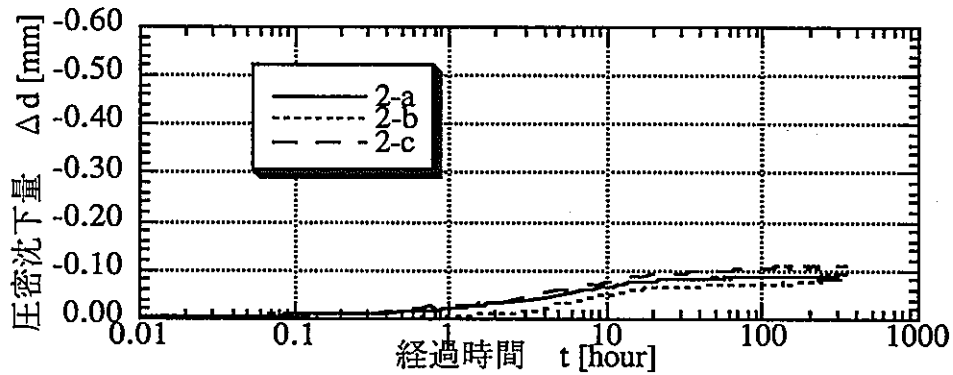


図4-4-1 試験No.2結果 除荷 step u1 (19.6MPa→12.0MPa)
 圧密沈下量-時間関係 (Δd - log t 関係)

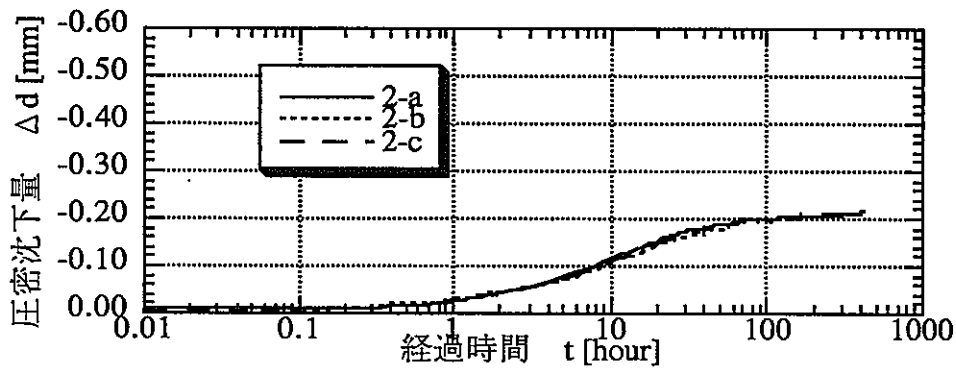


図4-4-2 試験No.2結果 除荷 step u2 (12.0MPa→7.33MPa)
 圧密沈下量-時間関係 (Δd - log t 関係)

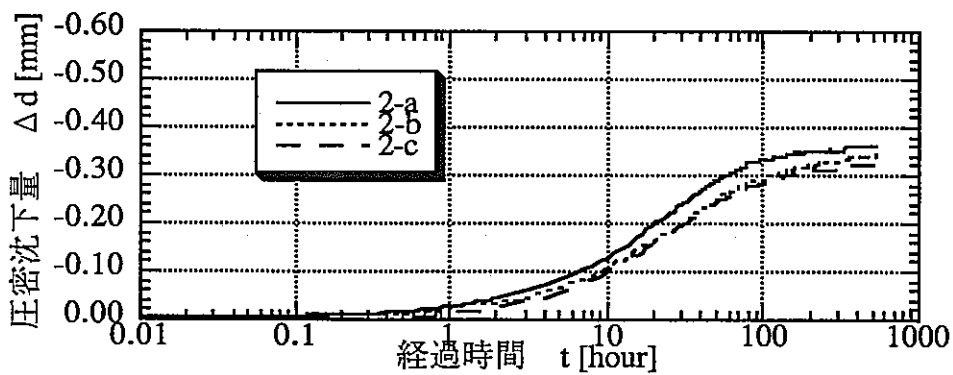


図4-4-3 試験No.2結果 除荷 step u3 (7.33MPa→4.49MPa)
 圧密沈下量-時間関係 (Δd - log t 関係)

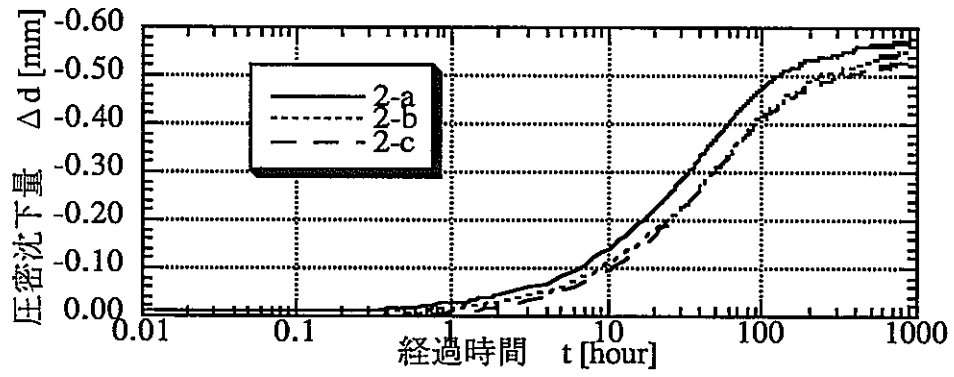


図4-4-4 試験No.2結果 除荷 step u4 (4.49MPa→2.74MPa)
圧密沈下量-時間関係 (Δd - log t 関係)

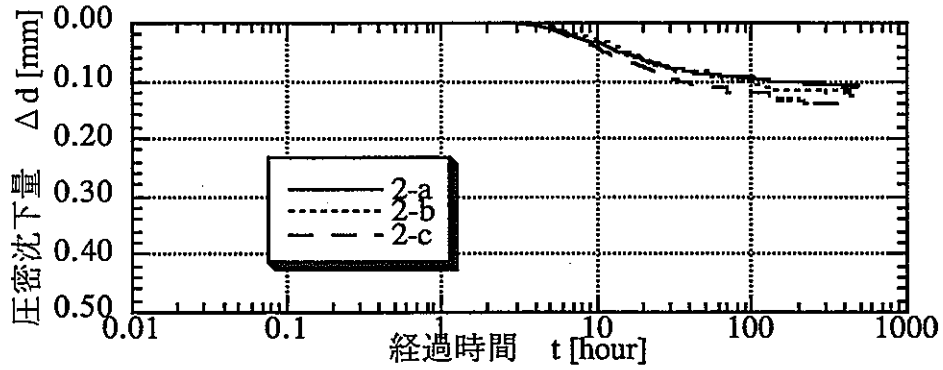


図4-5-1 試験No.2結果 再載荷 step r1 (2.74MPa→4.49MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

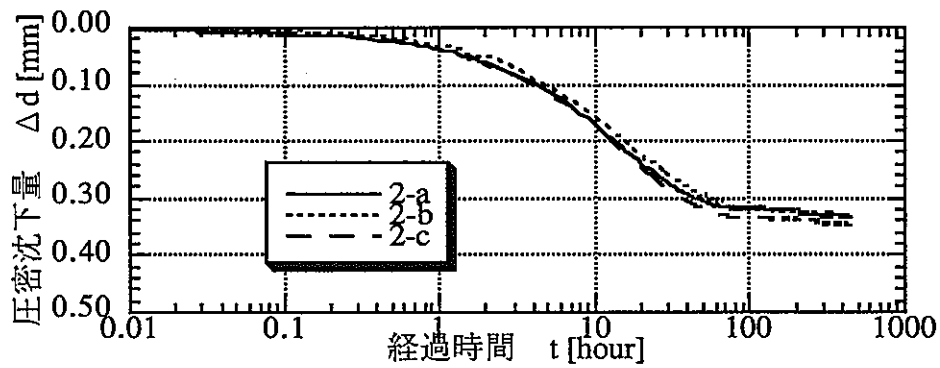


図4-5-2 試験No.2結果 再載荷 step r2 (4.49MPa→7.33MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

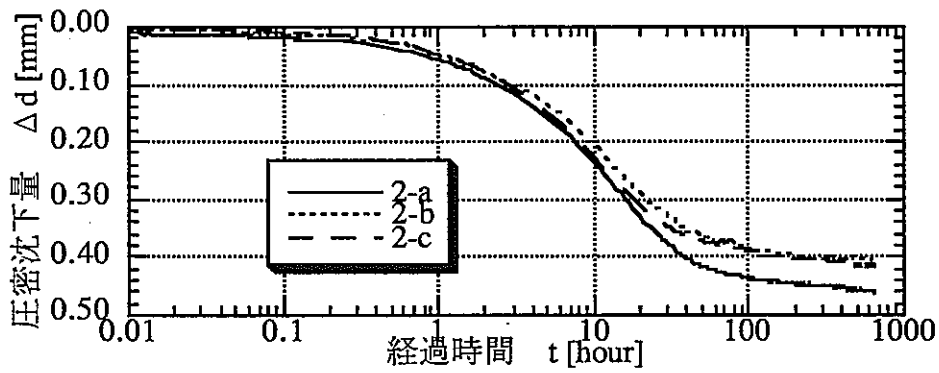


図4-5-3 試験No.2結果 再載荷 step r3 (7.33MPa→12.0MPa)
 圧密沈下量-時間関係 ($\Delta d - \log t$ 関係)

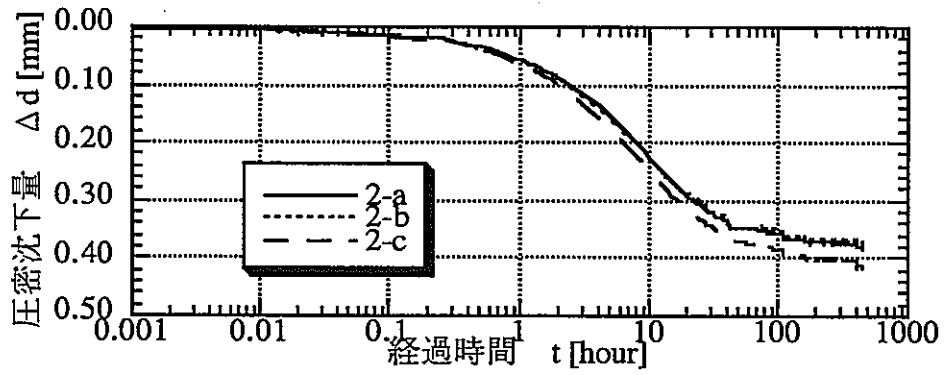


図4-5-4 試験No.2結果 再載荷 step r4 (12.0MPa→19.6MPa)
圧密沈下量-時間関係 (Δd - log t 関係)

5. 考察

5.1 圧密理論解と試験結果の比較

(1) 載荷過程

圧密時における圧密沈下量－時間関係（ $\Delta d - \log t$ 関係）に関して、Terzaghiの圧密理論解と試験結果の比較を行う。今回の試験のような1次元圧密条件でのTerzaghiの圧密理論方程式は以下のようなになる⁴⁾。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5-1)$$

- u : 間隙水圧
 t : 時間
 C_v : 圧密係数
 z : 排水面からの距離

排水距離が H と仮定した境界条件で、(5-1)式を解くと圧密沈下量と経過時間の関係は次式で表現することができる⁴⁾。

$$d = d_{100} \left\{ 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{\lambda_n} \cdot \exp\left(-\frac{\lambda_n \cdot c_v \cdot t}{H^2}\right) \right\}$$

$$\lambda_n = \left(\frac{2n+1}{2} \cdot \pi \right)^2 \quad (5-2)$$

- d : 沈下量
 d_{100} : 圧密度100%の時の沈下量
 H : 排水距離

圧密沈下量と経過時間の関係（ $\Delta d - \log t$ 関係）について、(5-2)式より得られる理論解と試験結果の比較を行う。比較には、試験No.1のstep4での供試体1-aの結果と、試験No.2のstep4での供試体2-aの結果を用いる。Terzaghiの圧密理論解の計算には(5-2)式中の圧密係数 C_v の値が必要となるが、ここではTaylor法（ \sqrt{t} 法）により各試験結果の圧密係数 C_v の値を決定する⁴⁾。

両試験結果の圧密沈下量と \sqrt{t} （時間）の関係（ $\Delta d - \sqrt{t}$ 関係）を図5-1-1、図5-1-2に示す。 $\Delta d - \sqrt{t}$ 関係において、圧密理論解は圧密初期（圧密度 $U < 53\%$ ）の部分で原点を通る直線となる⁴⁾。両試験結果では図5-1-1、図5-1-2に示すように、圧密初期において $d - \sqrt{t}$ 関係は圧密理論どおりほぼ直線となっていることがわかる。しかし、その直線は原点より若干右方向にずれている。これは荷重載荷初期において、理論解に比較して試験では供試体の沈下が遅れて発生していることを示している。供試体からの排水が排水面の焼結メタルを通過するのに時間がかかることが原因の1つと推測されるが、今回

の試験から明らかな原因はわからなかった。

試験結果における載荷初期の沈下の遅れの原因は明らかでないが、この沈下の遅れを補正した場合のTerzaghiの圧密理論解と試験結果との比較を行なう。図5-1-1、図5-1-2に示す $\Delta d-\sqrt{t}$ 関係において圧密初期の直線部分を延長し、 $\Delta d=0$ 軸との交点を求めると1-aでは $\sqrt{t}=0.36$ 、2-aでは $\sqrt{t}=0.32$ となる。これを初期補正值とし、この点を通り試験結果の初期部分とラップする直線1を引き、この傾きの1/1.15倍の直線2を引く。直線2と試験結果の $\Delta d-\sqrt{t}$ 関係の交点が圧密度90%の位置となる。図5-1-1、図5-1-2より、圧密度90%の時点のそれぞれの圧密沈下量 Δd_{90} と、その値より計算した Δd_{100} を表5-1にそれぞれ示す。また、その時の経過時間は、図から得られる \sqrt{t}_{90} から初期補正值を引き、2乗することにより得られる。 \sqrt{t}_{90} 及び補正後の t_{90} を表5-1に示す。次に、補正後の t_{90} の値より(5-2)式中の C_v/H^2 を次式により求めることができる。

$$\frac{C_v}{H^2} = \frac{0.848}{t_{90}} \quad (5-3)$$

それぞれの C_v/H^2 は表5-1に示す値となった。

これらの値を(5-2)式に代入し求めた圧密理論解と試験結果を $\Delta d-\log t$ 関係で比較したものを図5-2-1、図5-2-2に示す。図より、圧密の後半を除いて、理論解と試験結果はよく一致していることがわかる。また、圧密の後半において試験結果の沈下量が理論値より大きくなっているのは、一般の粘土の圧密挙動にも見られる2次圧密が原因であると考えられる。通常の圧密現象において上記圧密理論で表現できる圧密現象を1次圧密、それ以後の圧密現象を2次圧密と呼んでいる。2次圧密はクリープに起因する挙動で上記の圧密理論では表現できない挙動である。

以上のことより、試験における載荷直後の沈下の遅れを補正すると、通常の粘土と同様に1次圧密の範囲において、ペントナイトの圧密挙動は(5-1)式で表わされるTerzaghiの圧密理論で表現可能であることがわかる。

表5-1 理論解の計算に用いた値

	Δd_{90} [mm]	Δd_{100} [mm]	\sqrt{t}_{90}	補正 t_{90} [h]	C_v/H^2
試験No.1 step4 1-a	0.49	0.54	6.65	39.6	0.0214
試験No.2 step4 2-a	0.22	0.24	6.90	43.3	0.0196

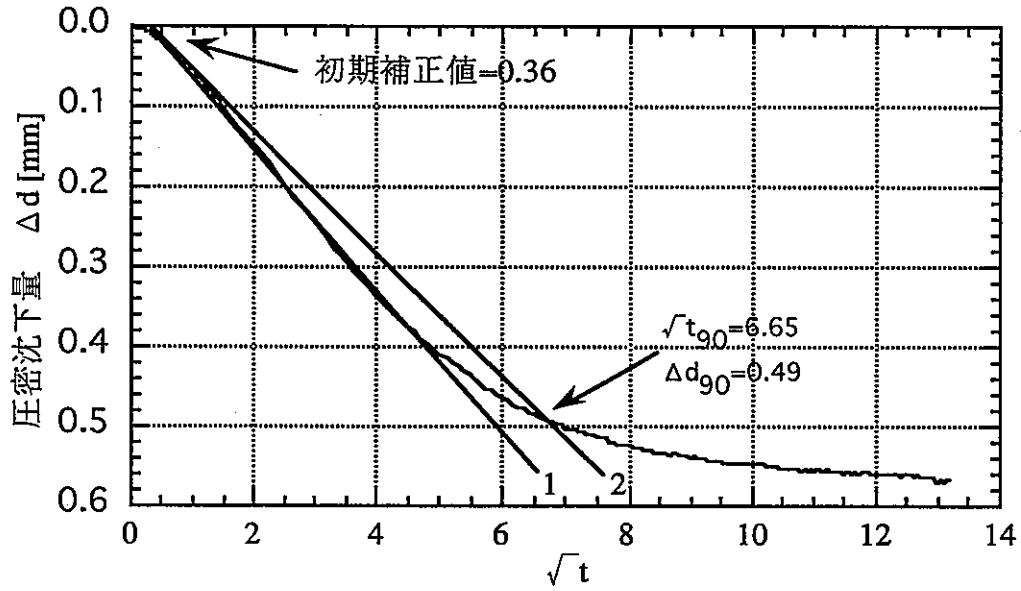


図5-1-1 $\Delta d - \sqrt{t}$ 関係
試験No.1 載荷 step4 1-a

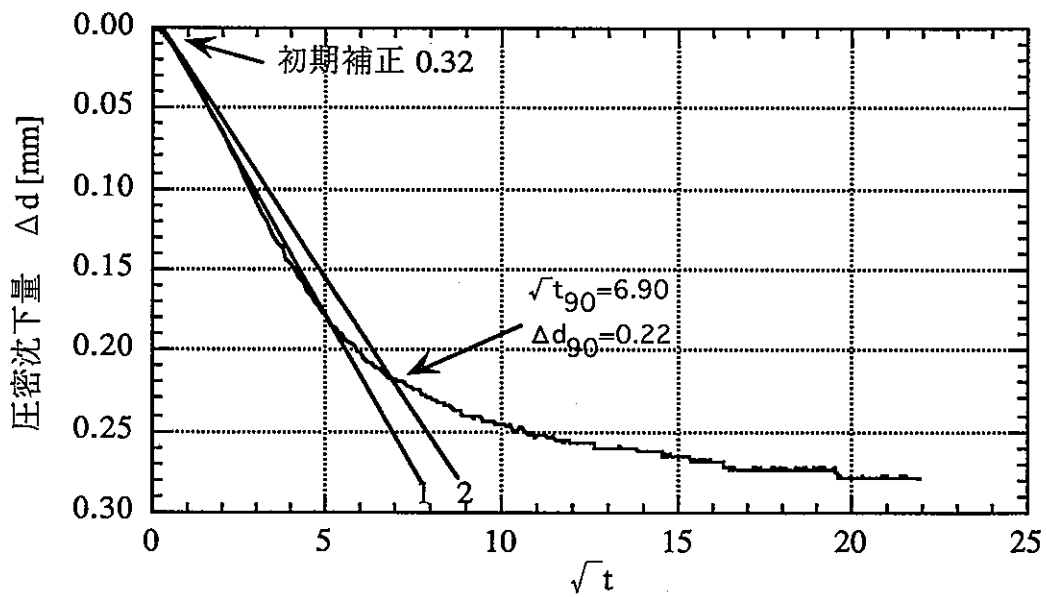


図5-1-2 $\Delta d - \sqrt{t}$ 関係
試験No.2 載荷 step4 2-a

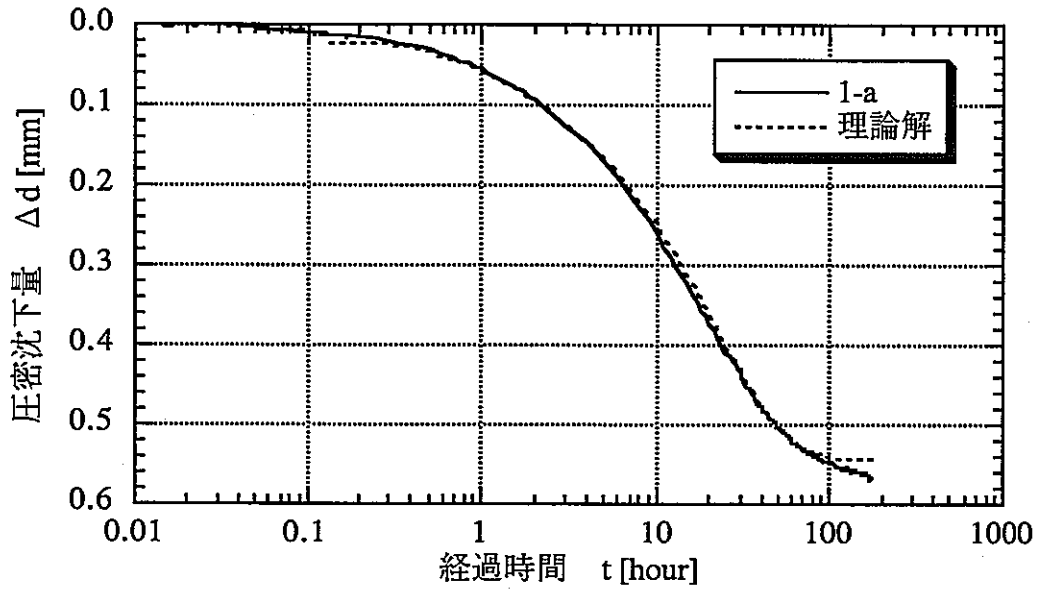


図5-2-1 試験結果とTerzaghiの理論解の比較 $\Delta d - \log t$ 関係
試験No.1 載荷 step4 1-a

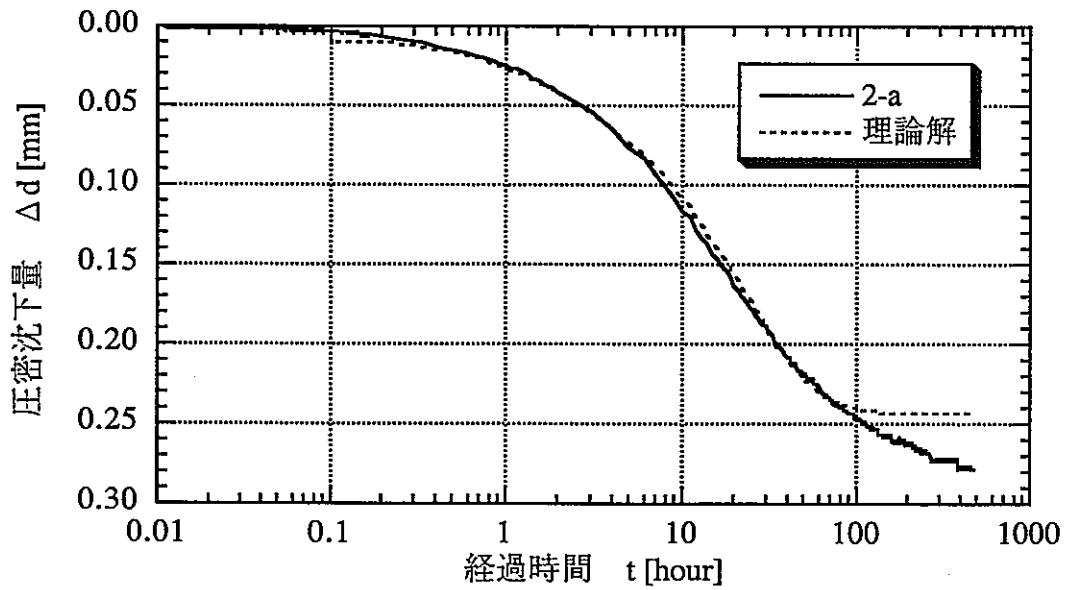


図5-2-2 試験結果とTerzaghiの理論解の比較 $\Delta d - \log t$ 関係
試験No.2 載荷 step4 2-a

(2) 除荷過程

除荷過程での圧密沈下量（リバウンド量）－時間関係（ $\Delta d \log t$ 関係）が上記圧密理論で表現できるかどうか調べるため、(1)で行ったのと同様の手法で試験結果と圧密理論の比較を行った。比較には試験No.1、除荷step u3の供試体1-aの試験結果と、試験No.2、除荷step u3の供試体2-aの試験結果を用いた。

それぞれの試験結果の $d-\sqrt{t}$ 関係を図5-3-1、図5-3-2に示す。除荷時の $d-\sqrt{t}$ 関係は載荷時の $d-\sqrt{t}$ 関係のプラスとマイナスを逆にした形となっており、圧密初期の部分では $d-\sqrt{t}$ 関係はほぼ直線となっている。また除荷時においても、その直線部分は原点とは交わっておらず、若干右方向にずれている。(1)と同様に初期補正值を求めると、1-aでは $\sqrt{t}=0.40$ 、2-aでは $\sqrt{t}=0.43$ となった。また、圧密初期部分の直線1の傾きより1/1.15倍の直線2を引き、この直線2と各試験での $d-\sqrt{t}$ 関係との交点を求めると、圧密90%の時点での Δd と \sqrt{t} が求まる。両試験の Δd_{90} と \sqrt{t}_{90} を表5-2に示す。また、この値と初期補正值を用いて計算した Δd_{100} と補正 t_{90} も併せて表5-2に示す。そして、表中の補正 t_{90} を(5-3)式に代入することにより、表5-2に示す C_v/H^2 の値が得られる。

表5-2に示す Δd_{100} と C_v/H^2 の値を(5-2)式に代入し求めた圧密理論解と試験結果を $\Delta d-\log t$ 関係で比較したものを図5-4-1、図5-4-2に示す。図より、圧密全般にわたり理論解と試験結果はよく一致していることがわかる。特に、(1)載荷過程で見られた圧密後半部分での両者の違いが、除荷時においては小さくなっていることがわかる。このことより、除荷過程においては、載荷過程に見られる2次圧密挙動の量が小さくなっているといえる。

以上のことより、試験における荷重除荷直後の沈下の遅れを補正すると、ベントナイトの除荷時の膨張変形挙動も(5-1)式で表わされる圧密理論で表現できることがわかる。

表5-2 理論解の計算に用いた値

	$\Delta d_{90}[\text{mm}]$	$\Delta d_{100}[\text{mm}]$	\sqrt{t}_{90}	補正 $t_{90}[\text{h}]$	C_v/H^2
試験No.1 step u3 1-a	-0.86	-0.95	11.1	114.5	0.00741
試験No.2 step u3 2-a	-0.31	-0.34	8.01	57.5	0.0148

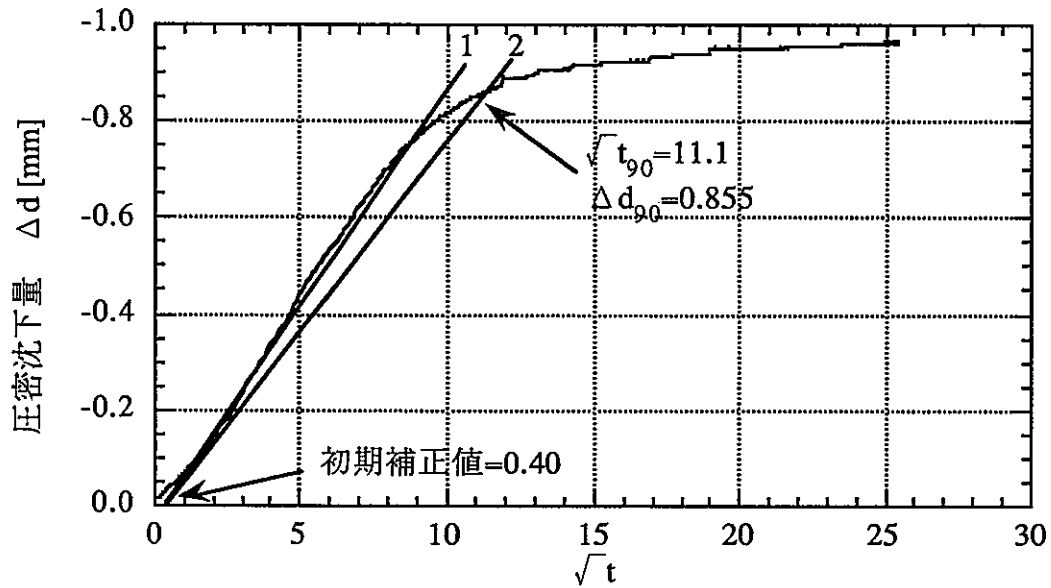


図5-3-1 $\Delta d - \sqrt{t}$ 関係
試験No.1 除荷 step u3 1-a

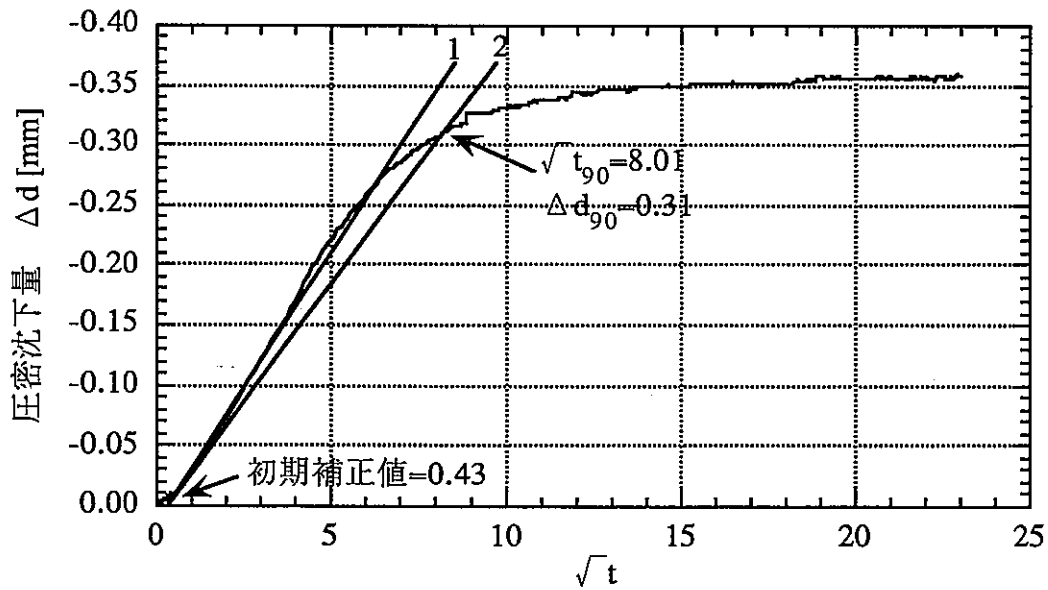


図5-3-2 $\Delta d - \sqrt{t}$ 関係
試験No.2 除荷 step u3 2-a

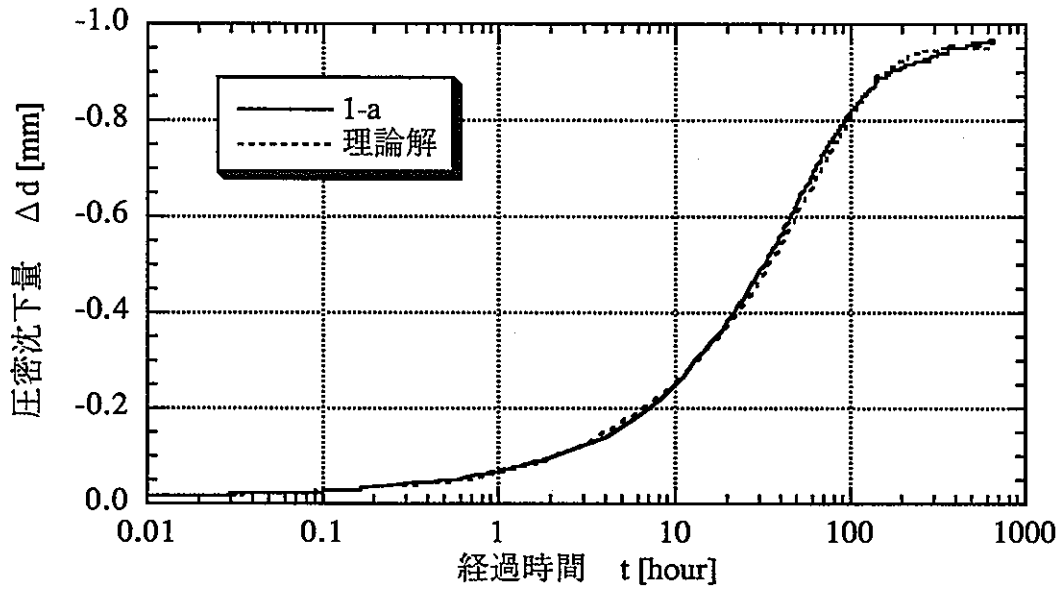


図5-4-1 試験結果とTerzaghiの理論解の比較 $\Delta d - \log t$ 関係
試験No.1 除荷 step u3 1-a

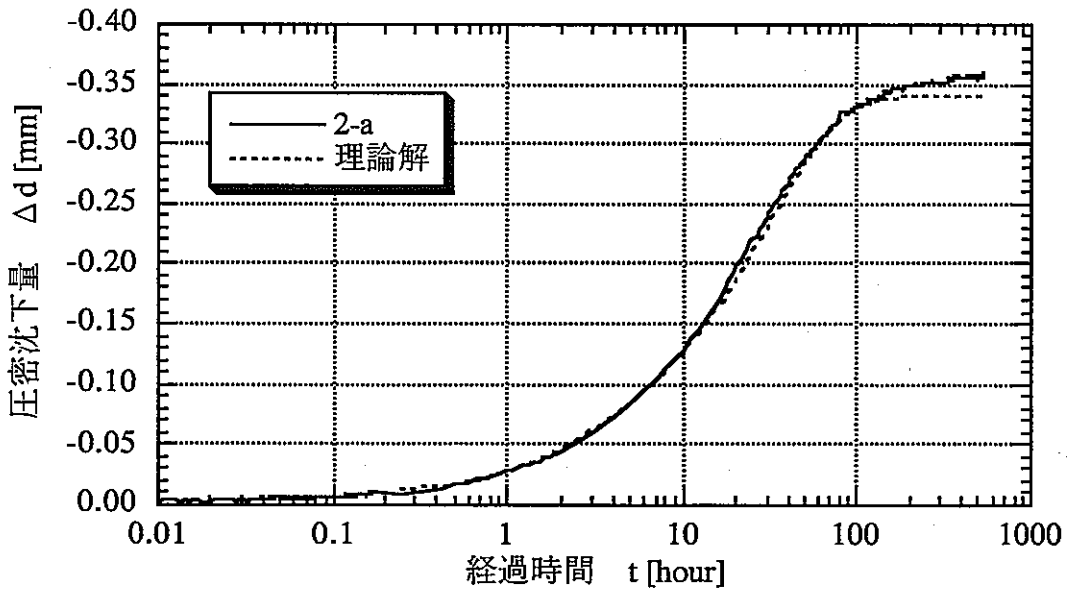


図5-4-2 試験結果とTerzaghiの理論解の比較 $\Delta d - \log t$ 関係
試験No.2 除荷 step u3 2-a

(3) 再載荷過程

再載荷過程での圧密沈下量－時間関係（ $\Delta d - \log t$ 関係）が(5-1)式で示す圧密理論で表現できるかどうか調べるため、(1)で行ったのと同様の手法で試験結果と圧密理論の比較を行った。比較には試験No.1、再載荷step r3の供試体1-aの試験結果と、試験No.2、再載荷step r3の供試体2-aの試験結果を用いた。

それぞれの試験結果の $d - \sqrt{t}$ 関係を図5-5-1、図5-5-2に示す。再載荷時の $d - \sqrt{t}$ 関係も、圧密初期の部分ではほぼ直線となっていることがわかる。また供試体1-aでは、その直線部分は原点とは交わっておらず、若干右方向にずれている。しかしながら、供試体2-aでは、直線は原点と交わっており、初期補正の必要がないことがわかる。それぞれの初期補正值は、1-aでは $\sqrt{t} = 0.39$ 、2-aでは $\sqrt{t} = 0$ となった。

次に、直線1の傾きの1/1.15倍である直線2と試験結果の交点より両試験の Δd_{90} と \sqrt{t}_{90} を求めると表5-3に示す値となった。この値と初期補正值を用いて計算した Δd_{100} と補正 t_{90} も併せて表5-3に示す。そして、表中の補正 t_{90} を(5-3)式に代入することにより、表5-3に示す C_v/H^2 の値を得た。

表5-3に示す Δd_{100} と C_v/H^2 の値を(5-2)式に代入し求めた圧密理論解と試験結果を $\Delta d - \log t$ 関係で比較したものを図5-6-1、図5-6-2に示す。図より、圧密全般にわたり理論解と試験結果はよく一致していることがわかる。また、除荷過程と同様に再載荷過程でも、(1)載荷過程で見られた圧密後半部分での両者の違いが小さくなっていることがわかる。再載荷過程においては、載荷過程に見られる2次圧密挙動の量が小さくなっているといえる。

以上のことより、試験における荷重載荷直後の沈下の遅れを補正すると、ベントナイトの再載荷時の圧密変形挙動も(5-1)式で表わされるTerzaghiの圧密理論でほぼ表現できることがわかる。

表5-3 理論解の計算に用いた値

	$\Delta d_{90}[\text{mm}]$	$\Delta d_{100}[\text{mm}]$	\sqrt{t}_{90}	補正 $t_{90}[\text{h}]$	C_v/H^2
試験No.1 step r3 1-a	0.81	0.90	6.73	40.2	0.0211
試験No.2 step r3 2-a	0.41	0.45	6.31	39.8	0.0213

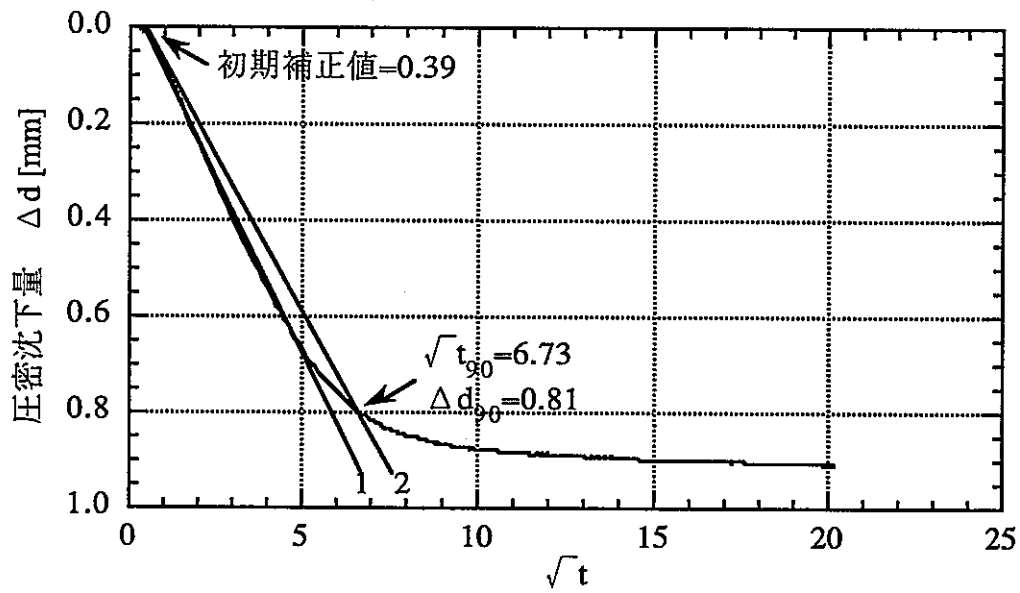


図5-5-1 $\Delta d - \sqrt{t}$ 関係
試験No.1 再載荷 step r3 1-a

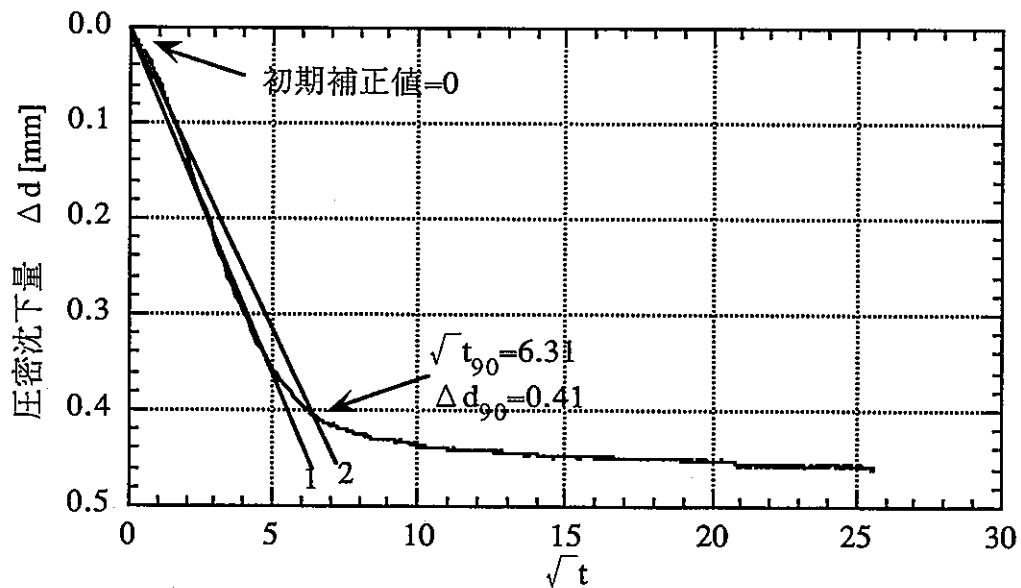


図5-5-2 $\Delta d - \sqrt{t}$ 関係
試験No.2 再載荷 step r3 2-a

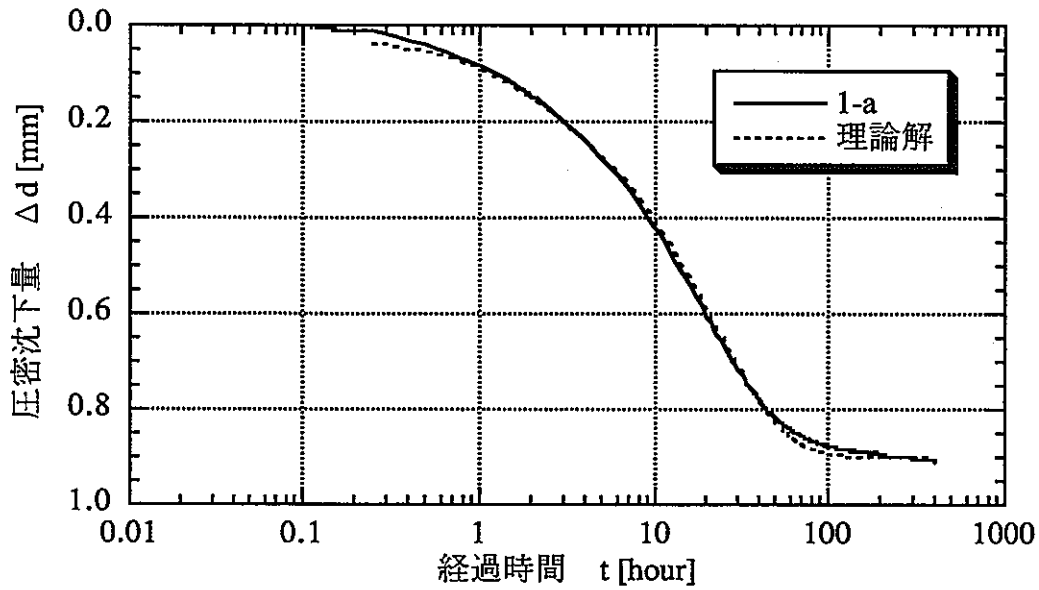


図5-6-1 試験結果とTerzaghiの理論解の比較 $\Delta d - \log t$ 関係
試験No.1 再載荷 step r3 1-a

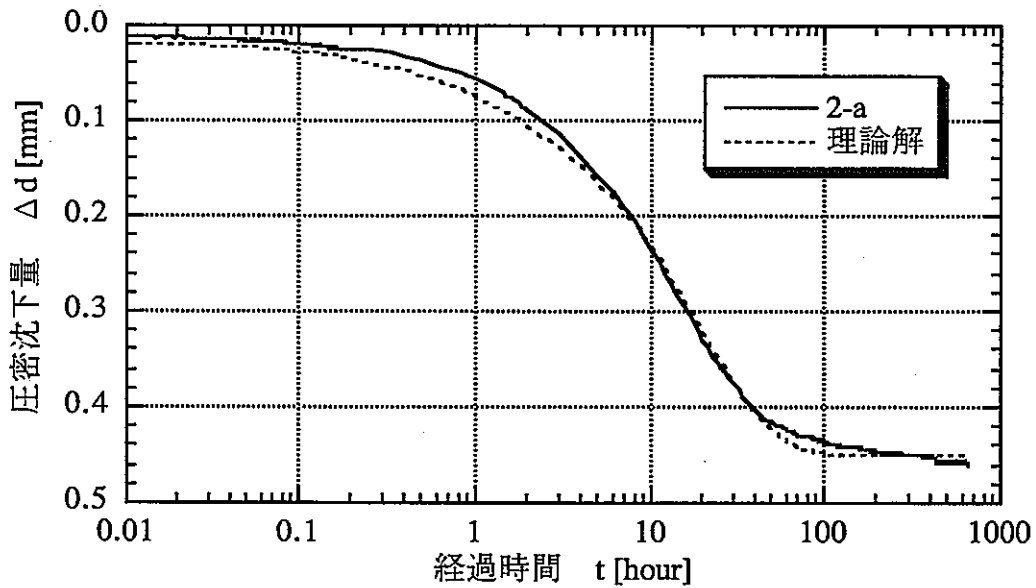


図5-6-2 試験結果とTerzaghiの理論解の比較 $\Delta d - \log t$ 関係
試験No.2 再載荷 step r3 2-a

5.2 e-log p 関係 (間隙比-圧密応力関係)

3章 (試験No.1) および4章 (試験No.2) で述べた試験結果を、e-log p 関係にまとめたものを図5-7-1、図5-7-2に示す。また両試験の供試体1-aと供試体2-aの結果について比較したものを図5-8に示す。両試験とも3供試体間に若干のばらつきはあるが、ほぼ同じe-log p 関係となっている。特に載荷過程では、両試験とも3供試体のe-log p関係はほぼ同じとなっている。3章、4章で述べたように、給水段階において供試体1-c(No.1)、2-c(No.2)の膨潤応力の経時変化が、他の供試体のそれに比べ大きく異なっていたが、e-log p 関係においてその影響は見られなかった。このことより、初期の含水比や乾燥密度が同じであれば、膨潤応力発生の際時変化の違いが圧密挙動のe-log p 関係に与える影響は小さいといえる。

両試験とも、載荷過程のstep3からstep8までe-log p 関係はほぼ直線関係となっている。この直線は正規圧密線 (処女圧縮曲線) に相当するものと考えられる。また、図5-8より、1-aと2-aの正規圧密線は一致していないことがわかる。このことは、圧縮成型時の乾燥密度が異なると、飽和後の圧密特性におけるe-log p 関係において、正規圧密線が若干異なることを意味している。

載荷過程での後半の直線部分を正規圧密線とし、各試験での圧密降伏応力 p_c' をCasgrandeの方法で求めた。3供試体の圧密降伏応力 p_c' を平均した値を表5-4に示す。両試験の圧密降伏応力 p_c' は、圧密開始時の各膨潤応力より若干大きな値となっており、本試験の供試体は圧密初期の段階では過圧密状態にあったことがわかる。各供試体の過圧密比OCRは、試験No.1の供試体でOCR=2.3-2.9で、試験No.2の供試体ではOCR=1.8-1.9であった。このことは、不飽和状態で圧縮成型され、体積拘束条件下で給水され飽和した圧縮ベントナイトの初期状態は過圧密状態にあることを意味している。

図には圧縮成型時の最大成型圧を併せて示している。図より、乾燥時の成型圧は、飽和後の圧密降伏応力 p_c' に比べかなり大きいことがわかる。圧縮成型時の最大成型圧はベントナイトの含水比により大きく変化することが知られている³⁾。また、その含水比及び成型圧により膨潤応力も変化すると考えられる。今回はすべての供試体をほぼ同一含水比で圧縮成型したため、含水比の影響は明らかにできなかった。圧縮成型時の含水比、成型圧、膨潤応力、圧密降伏応力 p_c' のそれぞれの関係を明らかにするには、圧縮成型時の含水比の異なる供試体を用いた試験を行う必要があると考えられる。

除荷、再載荷における挙動であるが、両試験ともe-log p 関係はヒステリシスな関係となっていることがわかる。このような除荷、再載荷のヒステリシス挙動は、一般の粘土の1次元圧密試験にも認められる挙動である。本試験は1次元圧密で圧密応力を軸方向応力としたため、静止土圧係数 K_0 の非線形的な挙動の影響が⁴⁾、このようにヒステリシスとなった原因のひとつと考えられる。

両試験の結果を参考にして、図5-7-1、図5-7-2の図中に引いた直線の傾きより求めた圧縮指数 C_c 及び膨潤指数 C_s を表5-4に示す。圧縮指数 C_c 及び膨潤指数 C_s とも試験No.1と試験No.2とで異なる値となった。これは、圧縮成型時の乾燥密度が異なると、圧縮指数 C_c 及び膨潤指数 C_s の値が異なることを意味する。ただし、膨潤指数 C_s に関しては、

除荷及び再載荷時の e - $\log p$ 関係が著しい非線形性を示すため、どこの傾きを取るかで、膨潤指数 C_s は大きく異なる。図5-8に示すように、除荷時における試験No.1と試験No.2の e - $\log p$ 関係はほぼ重なっており、どこまで除荷するかの違いが膨潤指数 C_s の違いにつながっているともいえる。膨潤指数 C_s については非線形性等の問題も踏まえて、今後検討していく必要があると考えられる。

表5-4 圧密降伏応力、圧縮指数、膨潤指数

試験No.	No.1 ($\rho_d=1.6g/cm^3$)	No.2 ($\rho_d=1.8g/cm^3$)
圧密降伏応力 p_c' [MPa]	1.5	4.7
圧縮指数 C_c	0.27	0.21
膨潤指数 C_s	0.18	0.11

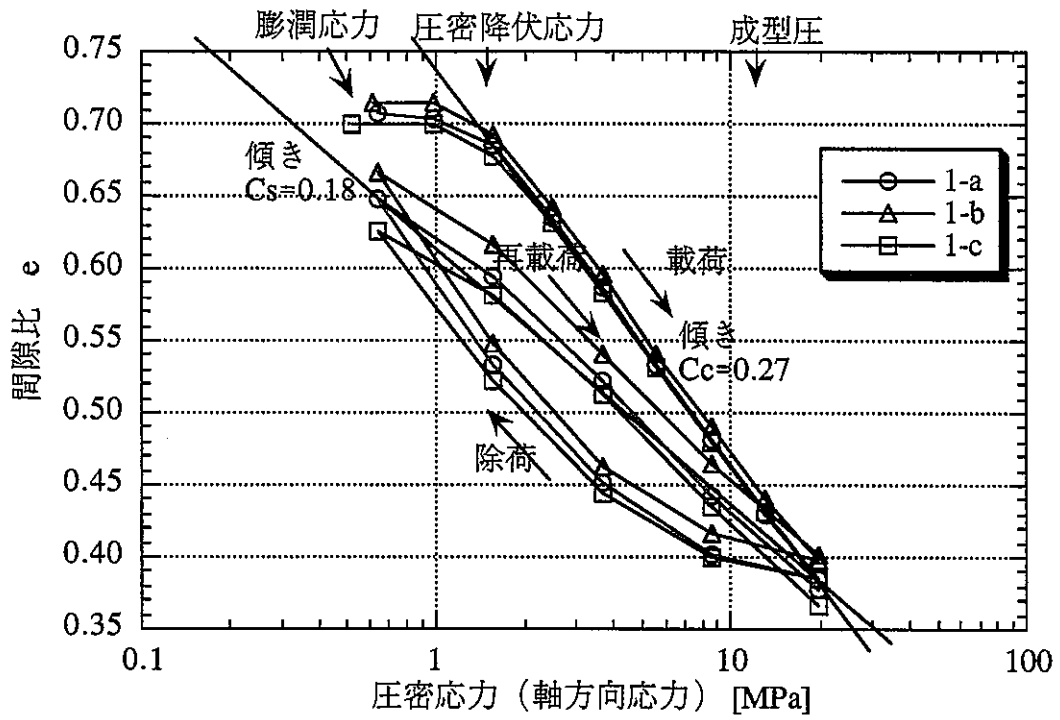


図5-7-1 e-log p 関係 試験No.1

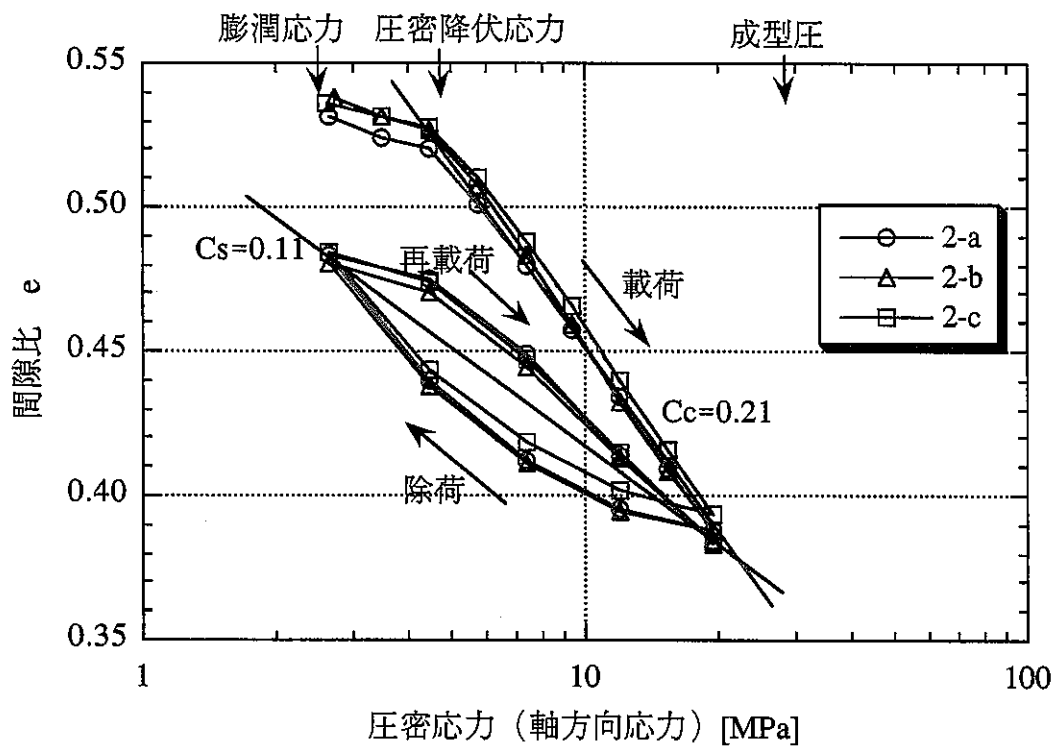


図5-7-2 e-log p 関係 試験No.2

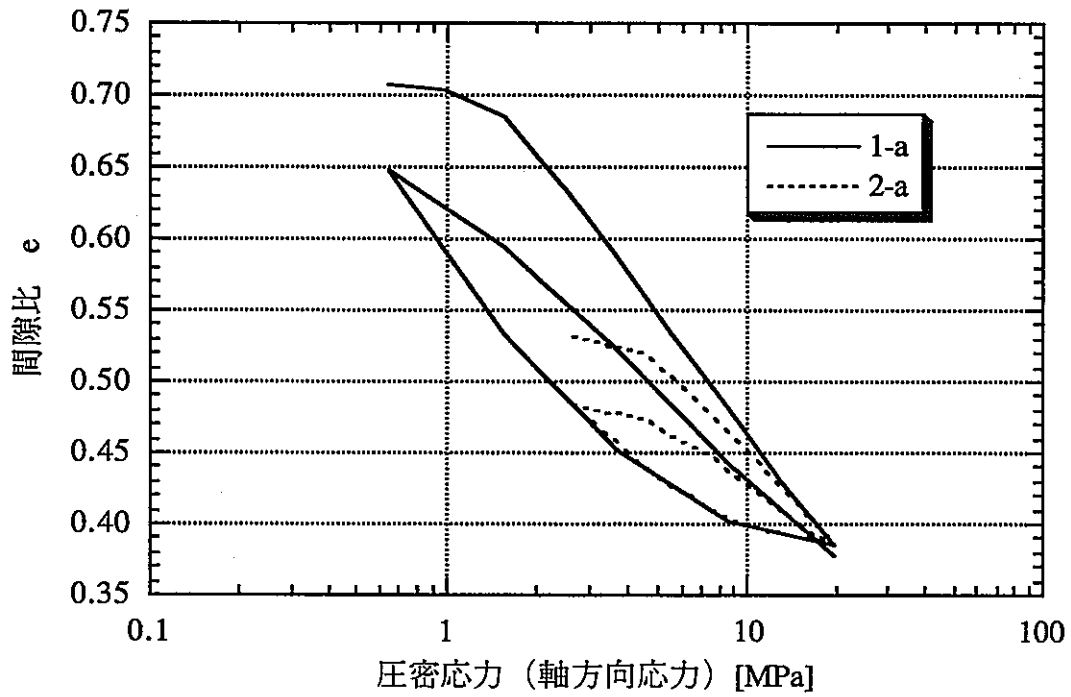


図5-8 e-log p 関係 まとめ
試験No.1(1-a)と試験No.2(2-a)の比較

5.3 透水係数

試験No.1の供試体1-aと試験No.2の供試体2-aの圧密試験結果より、各stepでの透水係数を計算した。透水係数は、5.1章で述べたTaylor法を用い、 $d-\sqrt{t}$ 関係より得られる圧密係数 C_v より次式により計算した。

$$k = C_v \cdot \gamma_w \cdot m_v \quad (5-4)$$

k : 透水係数

γ_w : 水の単位体積重量

m_v : 体積圧縮係数

ここで、体積圧縮係数 m_v は、 $d-\sqrt{t}$ 関係より得られる d_{100} より軸ひずみ増分 $\Delta \epsilon_a$ を算出し、次式により計算した。

$$m_v = \frac{\Delta \epsilon_a}{\Delta \sigma_a} \quad (5-5)$$

$\Delta \epsilon_a$: 軸ひずみ増分

$\Delta \sigma_a$: 軸応力増分

(5-4)により計算した各step（載荷過程step1、step2を除く）での乾燥密度と透水係数の関係を図5-9に示す。図には透水試験で得られた結果も併せて示している³⁾。圧密試験より得られた乾燥密度と透水係数の関係は透水試験の結果と同じ傾向を示しており、乾燥密度と透水係数の対数はほぼ直線関係となっているのがわかる。ただし、圧密試験で得られた透水係数の値が、透水試験の結果に比較して小さくなっている。この違いは、両試験装置の違いや、圧密試験結果よりTaylor法を用いて圧密係数 C_v と圧密沈下量 d_{100} を計算する際の誤差などに原因があると考えられる。また、図から分かるように透水試験結果においても同一乾燥密度間で透水係数がばらついている。これらの点を考慮すると、本圧密試験で得られた透水係数は、透水試験結果と比較してほぼ妥当な結果となっているといえる。

圧密試験結果より計算される載荷過程、除荷過程、再載荷過程の乾燥密度と透水係数の関係は、試験No.1 (1-a)、試験No.2 (2-a)とも除荷過程の透水係数が若干小さくなっているが、3者ともほぼ等しい結果となっていることがわかる。このことより、圧縮ベントナイトの透水係数の変化は乾燥密度のみに依存し、載荷や除荷などの応力状態や応力履歴の影響をあまり受けないということがいえる。

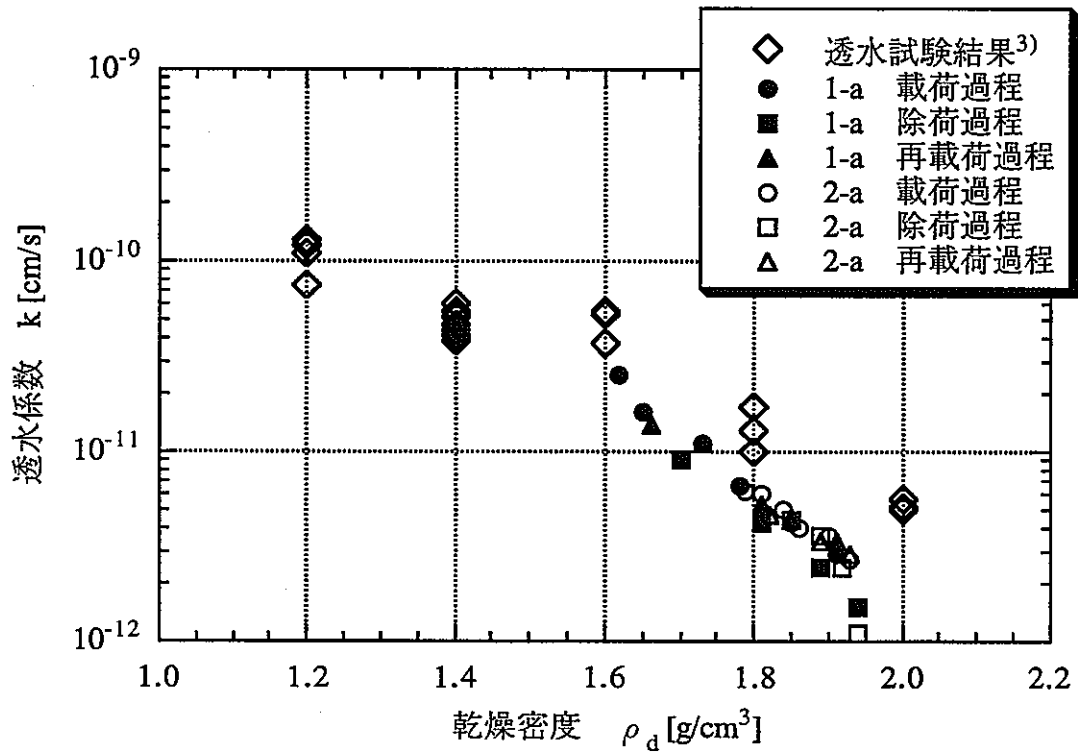


図5-9 圧密試験結果より計算した透水係数
試験No.1 1-a、試験No.2 2-a

6. まとめ

2種類の乾燥密度に圧縮成型したベントナイトの1次元圧密試験を行い、以下のことがわかった。

- (1) 載荷過程における飽和ベントナイトの圧密沈下量と時間の対数の関係 ($\Delta d - \log t$ 関係) は、一般の粘土の圧密挙動と同様の傾向を示した。1次圧密部分と考えられる圧密前半の $\Delta d - \log t$ 関係は、載荷初期の沈下の遅れを補正すると、Terzaghiの圧密理論によりほぼ表現できることがわかった。また、圧密後半においては2次圧密と見られる挙動が観察された。
- (2) 除荷過程、再載荷過程における $\Delta d - \log t$ 関係も、載荷初期の補正を行えば Terzaghiの圧密理論でほぼ表現できることが明らかとなった。
- (3) 飽和ベントナイトの $e - \log p$ 関係は、除荷時におけるリバウンド量は大きいものの、一般の粘土のそれと定性的に同じ傾向を示した。載荷過程の圧密降伏応力 p_c' 以降においては、 $e - \log p$ 関係はほぼ直線関係となった。また、除荷過程、再載荷過程においては $e - \log p$ 関係は非線形となった。
- (4) $e - \log p$ 関係の傾きである圧縮指数 C_c と膨潤指数 C_s は、圧縮成型時の乾燥密度により若干異なる値となった。試験No.1 ($\rho_d = 1.6 \text{g/cm}^3$) では $C_c = 0.27$ 、 $C_s = 0.18$ で、試験No.2 ($\rho_d = 1.8 \text{g/cm}^3$) では $C_c = 0.21$ 、 $C_s = 0.11$ となった。
- (5) $e - \log p$ 関係において、圧密降伏応力 p_c' は膨潤応力より大きな値となった。このことより、不飽和状態で圧縮成型した後に、体積拘束条件下で飽和させた供試体の初期状態は過圧密状態であることがわかった。また、圧縮成型時の最大成型圧は圧密降伏応力 p_c' より1オーダー大きな値となった。
- (6) 圧縮成型時の含水比及び圧縮成型圧がほぼ同じであれば、給水時の膨潤応力の経時変化の違いが、圧密挙動に与える影響は小さいことがわかった。
- (7) 圧密結果より得られた透水係数と乾燥密度の関係は、透水試験により得られた結果³⁾に比較し妥当なものであった。また、載荷過程もしくは除荷過程などの載荷状態や、応力履歴が透水係数に与える影響は小さいことがわかった。

謝辞

本試験の実施にあたり、長期間にわたり(株)東京ソイルリサーチの阿部秋男氏及び根本晃氏の御協力を得た。ここに感謝の意を記します。

参考文献

- 1) 土質工学会：土質試験の方法と解説 1990
- 2) 藤田朝雄、五月女敦、原啓二：緩衝材の力学試験 PNC TN8410 92-170 1992
- 3) 鈴木英明、柴田雅博、山形順二、広瀬郁郎、寺門一馬：緩衝材の特性試験（1）、
PNC TN8410 92-057 1992
- 4) 足立紀尚、龍岡文夫：新体系土木工学18 土の力学(3)-圧密・せん断・動的解析
- 1981
- 5) 動力炉・核燃料開発事業団：高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書（平成3年度）PNC TN 1410 92-081 1992