

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

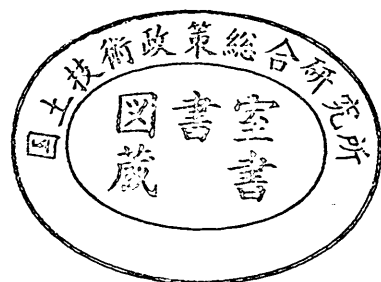
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 28

NO. 1

MAR. 1989

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第28巻 第1号 (Vol. 28, No. 1), 1989年3月 (Mar. 1989)

目 次 (CONTENTS)

1. 波による汀線付近の水位上昇量
——波崎海洋研究施設における現地観測——
.....加藤一正・柳嶋慎一・磯上知良・村上裕幸..... 3
(Wave Set-up near the Shoreline ——Field Observation at HORF——
.....Kazumasa KATOH, Shin-ichi YANAGISHIMA, Tomoyoshi ISOGAMI
and Hiroyuki MURAKAMI)
2. 円形回転水路による底泥の巻き上がりと沈降に関する実験的研究
.....村上和男・菅沼史典・佐々木均.....43
(Experimental Investigation on Erosion and Deposition of Fine
Cohesive Sediments in an Annular Rotating Channel
.....Kazuo MURAKAMI, Fuminori SUGANUMA and Hitoshi SASAKI)
3. 航空機荷重作用下における空港埋設管の挙動
.....深海正彦・佐藤勝久・小林正樹.....77
(Behaviour of Buried Pipes under Loading of Aircraft
.....Masahiko FUKAMI, Katsuhisa SATO and Masaki KOBAYASHI)
4. 高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現
.....土田 孝・小林正樹・水上純一・田中政典... 121
(Duplication of Aged Clay by Consolidating Clay Slurry at
High Temperature
.....Takashi TSUCHIDA, Masaki KOBAYASHI, Jun-ichi MIZUKAMI
and Masanori TANAKA)
5. 覆砂工法における砂層探査装置に関する実験
.....木原純孝・白井一洋・篠原丈人... 149
(Experiments on Ultrasonic Sand Layer Profiler System in
Capping Constructions
.....Sumitaka KIHARA, Kazuhiro SHIRAI and Taketo SHINOHARA)

4. 高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現

土田 孝*・小林正樹**・水上純一***・田中政典****

要 旨

本研究は自然地盤の年代効果が粘性土の力学特性に及ぼす影響について調べたものである。港湾地域の海成粘土を用いた一連の室内試験の結果、次のような結論を得た。

- (1) 年代効果を有する粘性土は、圧縮指数と二次圧縮指数が圧密降伏圧力の付近でピークを示す。年代効果の無い室内再圧密試料の場合は正規圧密領域での圧縮指数と二次圧縮指数はほぼ一定である。
- (2) 自然粘土の年代効果を表わす指標として、標準圧密試験の結果から求められる圧縮指数比 r_c が有効であると考えられる。
- (3) 圧縮指数比 r_c は、深度とともに増加する傾向を示す。わが国の海成沖積粘土の r_c は1.0~3.0であり、年代効果による構造が顕著に見られるとされているカナダ東部の粘土に比べると小さい。大阪湾の洪積粘性土の r_c は最大6.0の場合もあり、全体として沖積粘土よりも大きい r_c を示す。
- (4) 75℃の高温でスラリーから再圧密した粘土試料の力学特性は、年代効果をもつと考えられる自然粘土の特性に近いことが圧密試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験の結果から確かめられた。このことから、高温で再圧密することは、年代効果を実験室で比較的容易に再現する手段として有効である。
- (5) 圧縮指数比は粘土のセメンテーション作用の大きさを表す指数であると考えられる。高温で圧密した粘土が自然粘土に類似した力学特性を示すのは圧密中のセメンテーションが促進されたからであると推定される。

キーワード：粘性土，温度効果，過圧密，二次圧密，圧縮，圧密，時間効果，

* 土質部主任研究官（海洋土質担当）
** 土質部土性研究室長
*** 土質部土性研究室
**** 土質部地盤調査研究室

4. Duplication of aged clay by consolidating clay slurry at high temperature

Takashi TSUCHIDA*

Masaki KOBAYASHI**

Jun-ichi MIZUKAMI***

Masanori TANAKA****

Synopsis

In this report, after studying the effect of aging on the mechanical properties of marine clays, a simple yet effective procedure for duplicating natural clay structure is proposed. The conclusions of the study are summarized as follows:

- 1) The compression index C_c and the secondary compression index C_α of natural aged clays have peak values when the consolidation pressure is nearly equal to the consolidation yield stress.
- 2) The compression index ratio r_c , which is newly introduced in this study, is a good index to represent the aging effect of natural clay.
- 3) The r_c of Japanese alluvial clays ranges from 1.0 to 3.0, which is smaller than that of East Canadian clays. The diluvial clays in Osaka Bay have larger r_c than alluvial clays.
- 4) By consolidating clay slurry at high temperature, we can produce reconsolidated clay whose mechanical properties simulate those of lightly aged clay; both compression and shear behavior of high temperature sample are similar to those of aged clay.
- 5) The procedure proposed in this paper seems to be useful for carrying out laboratory soil tests and model tests when one intends to simulate the behavior of natural clay by using reconstituted clay.

Key Words: clay, temperature effect, overconsolidation, secondary consolidation, compression, consolidation, time effect

* Senior Research Engineer, Geotechnical Engineering Division

** Chief of Soil Mechanics Laboratory, Geotechnical Engineering Division

*** Member of Soil Mechanics Laboratory, Geotechnical Engineering Division

**** Member of Geotechnical Survey Laboratory, Geotechnical Engineering Division

目 次

要 旨	121
1. はじめに	125
2. 年代効果を有する粘土の力学特性に関する既往の研究	125
3. わが国の港湾地域における自然海成粘土と再圧密粘土の力学特性の比較	129
3.1 圧密特性	129
3.2 せん断特性	134
4. 高温再圧密法による試料の作成方法	139
4.1 試料の作成方法	140
4.2 高温圧密粘土の物理試験結果	141
5. 高温で再圧密された粘土の力学特性	141
5.1 圧密試験結果	141
5.2 一軸圧縮試験結果	142
5.3 三軸圧縮試験結果	143
6. 考 察	145
7. 結 論	146
8. あとがき	147
参 考 文 献	147

1. はじめに

粘性土の力学特性は土質力学においてもっとも重要なテーマのひとつである。この研究には、自然粘土における試験結果のばらつきの影響を避けるために、しばしば調整後再圧密した粘土が用いられている。現在の土質力学の主な理論体系は、室内で調整し再圧密した粘性土による精密な力学試験の結果によって構築されてきたと考えられる。しかしながら、自然地盤の粘土の力学特性が、実験室内で調整し再圧密した粘土と異なっていることが、近年知られてきた。これらの差異は、自然地盤が非常に長時間にわたって形成され、その間の二次圧密やセメンテーションなどいわゆる年代効果によるためとされている。これらの年代効果の影響は、堆積年代の長い洪積粘土の場合に顕著であるが、沖積粘土の場合も再圧密粘土と異なった力学特性を示している。自然地盤の挙動を土質力学の理論によって精度よく予測するためには、年代効果の影響を定量的に評価することが必要である。

年代効果は乱さない自然粘土試料によって調べることができるが、一般に乱さない粘土試料はばらつきが大きく、また試料の量にも限界があるために十分に再現性のある試験を行なうことが困難である。したがって、室内の管理した条件のもとで年代効果をもつ自然粘土と同等の試料を作成できるならば、年代効果の定量的な評価のために非常に有効であると考えられる。また、近年普及が著しい遠心載荷実験のような模型試験においては、実験の再現性を確保するために再圧密した粘土地盤がよく用いられている。しかし、再圧密粘土が自然粘土の力学特性と異なっていることから、模型実験における変形や破壊のモードが実際の地盤での挙動と異なったものになっていると考えられる。精度の高い模型実験を行うためには、自然粘土と同様の力学特性を示す模型地盤が必要であり、年代効果を室内で簡単に再現する実験方法の開発が望まれている。

従来、粘土の構造を室内で再現する方法としては化学的添加物を混合する方法が試みられてきたが、筆者らは本報告でスラリー状の粘土試料を高温で再圧密するという単純な方法を提案する。この方法は、高い温度によって粘土鉱物の化学作用を促進することをねらったものである。

本報告では、まず既往の文献調査と一連の室内試験の結果から年代効果を有する自然粘土と再圧密粘土の力学特性を比較した。次に、わが国の港湾地域における海成粘土の年代効果を定量的に評価することを試み、年代効

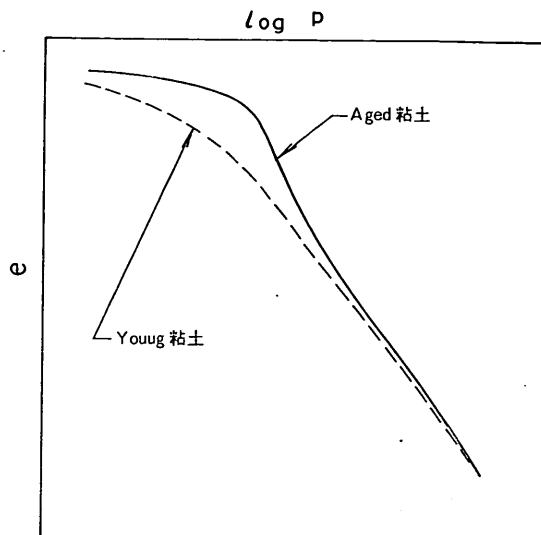


図-1 長期間圧密された粘土と圧密時間の短い粘土の e - $\log p$ 曲線の比較

果によって構造化が進んだと報告されている海外の粘土と比較した。最後に、筆者らが新たに開発した高温再圧密法によって、室内で簡単に年代効果を持つ粘土試料を作成することができることを示す。

2. 年代効果を有する粘土の力学特性に関する既往の研究

図-1は、堆積年代が古く長期間圧密された粘土と圧密時間の比較的短い粘土の間隙比～圧力の関係を模式的に示したものである。図のように堆積年代の古い粘土 (aged 粘土) の場合は e - $\log p$ 曲線は明瞭な曲がりをもち正規圧密領域の圧縮曲線は下に凸となっている。このような傾向は、自然粘土の乱さない試料の圧密試験結果で多くみられるものである。これに対して室内で再圧密された粘土のように堆積年代の若い粘土 (young 粘土) の場合は、圧密降伏圧力付近においても緩やかな e - $\log p$ 関係を示している。さらに、年代効果を持つ粘性土の特徴は、正規圧密地盤においても圧密降伏圧力が土被り圧よりも大きい、いわゆる「見かけの過圧密」あるいは「擬似過圧密」と呼ばれる現象を示すことである。これは、現在の土被り圧以上の圧密圧力を過去に経験したことのない粘土地盤においても圧密試験を行うと土被り圧以上の圧密降伏圧力が求められるもので、自然粘土にしばしばみられる特徴である。

このように、堆積年代の古さが粘性土の力学特性に大きな影響を持っていることを最初にはっきりと指摘した

のはペーラムである。ペーラムは、年代効果を有する粘土地盤が堆積年代の若い粘土地盤と異なる圧縮特性を持っていることを示し、ノルウェーの軟弱地盤上の建築物の沈下解析に成功した¹⁾。さらにペーラムは安定解析の問題においても正規圧密地盤を若い (young) 地盤と年代を経た (aged) 地盤とに分けて取り扱うことを最初に提案した²⁾。

1985年の国際土質基礎工学会で現場および室内の土質試験法に関する総括報告を行った Jamiolkowski らは、粘性土が過去の応力履歴と関係の無い見かけの過圧密を示す原因を3つに分類しそれぞれについて次のようにコメントしている³⁾。

- ①乾燥収縮：蒸発あるいは凍結によるもので、地表面近くの土で主に見られる。
- ②二次圧密：長期の二次圧密によるもの。

③セメンテーション：カーボナイト、シリカなどによる自然の固結、およびイオン交換、シキソトロピーなどの原因で生じる。あまり解明されておらず認識が難しい。

これらの分類によると、海底に堆積して過去に地表面近くに上昇した履歴の無いと考えられるわが国の沖積粘土の場合、堆積年代が古いことによる見かけの過圧密は、主に二次圧密とセメンテーションによって生じると考えられる。

自然粘土と再圧密粘土が異なった圧縮特性を示すことは、一次元圧密試験の結果からも明らかになっている。Mesri と Godlewski は粘土の一次元圧縮特性を詳細に調べている⁴⁾。図-2(a) は、Mesri らの論文の中から引用したもので、年代効果が大きいとされているカナダ東部の Leda 粘土の圧密試験結果である。また、図-2(b)

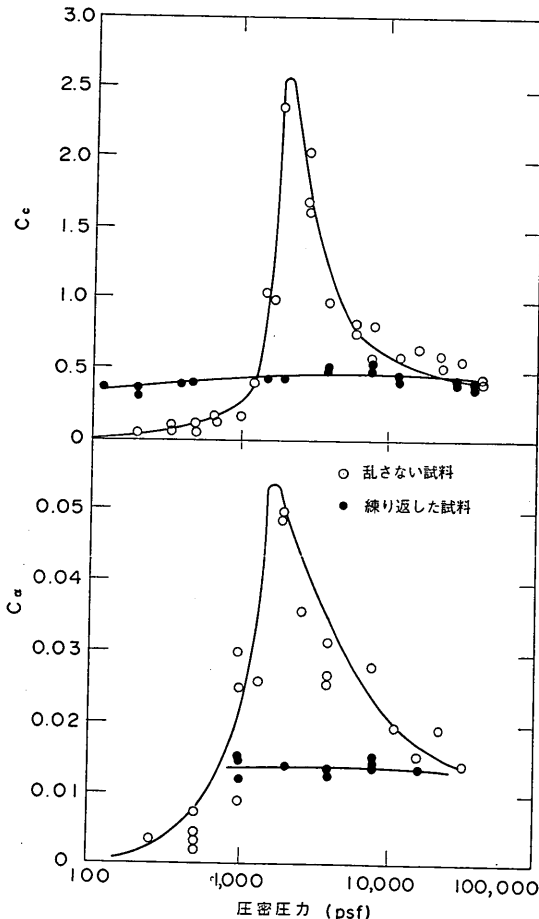


図-2 (a) C_c , C_a と圧密圧力の関係 (Leda 粘土)

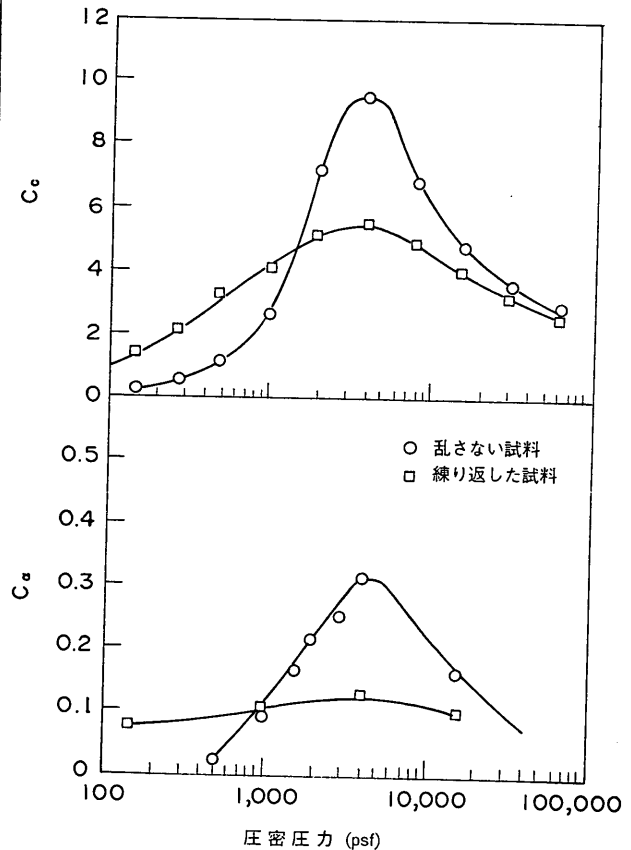


図-2 (b) C_c , C_a と圧密圧力の関係 (メキシコシチー粘土)

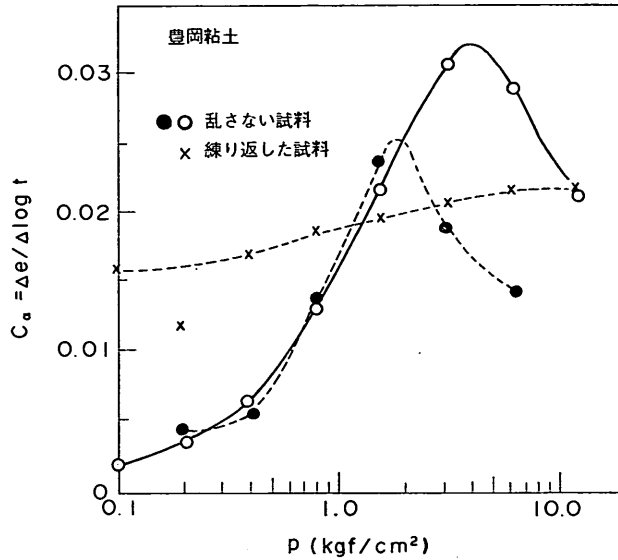


図-3 C_{α} と圧密圧力の関係 (豊岡粘土)

は軟弱地盤が厚く堆積していることで有名なメキシコシチーの粘土の圧密試験結果である。これらの図では、乱さない粘土試料と練り返した後の粘土試料について、次式で定義される圧縮指数 C_c と二次圧縮指数 C_{α} をそれぞれの圧密圧力ごとに求めている。

$$C_c = \Delta e / \log p \quad (1)$$

$$C_{\alpha} = \Delta e / \log t \quad (2)$$

ここに Δe は間隙比の変化であり、 p は圧密圧力、 t は各圧力段階における一次圧密終了後の経過時間である。

図のように乱さない粘土の場合、圧密降伏圧力 p_c の付近で、 C_c と C_{α} は明瞭なピークを示し、圧密圧力が p_c よりも大きくなるに従って顕著に減少する。これに対して練り返された粘土では C_c と C_{α} は圧密圧力 p とともに徐々に増加しているものの、ほぼ一定であり、乱さない粘土の圧縮特性とはっきり異なっている。

わが国の粘土の二次圧縮指数 C_{α} に関して、同様の結果が安川・嘉門によっても報告されている³⁾。図-3 は安川らが豊岡粘土 (塑性指数25) を用いて、乱さない自然試料と練り返した試料の C_{α} と圧密圧力の関係を比較したものである。図のように、乱さない試料では C_{α} は p_c の2倍付近で明瞭なピークを示すのに対して、練り返した試料では $\log p$ の増加と共にやや増加する傾向を示すが、全体としてはほぼ一定といっていよい。

年代効果を持つ自然粘土と室内再圧密粘土の違いは、せん断時の強度、変形特性においてどのように現われるだろうか。Jamiolkowski らはセメンテーションを中心

とした年代効果をもっともよく調べられている例としてカナダ東部の粘土を取り上げ、そのせん断特性を再圧密粘土と比較している³⁾。

図-4 は Lefebvre らが行ったカナダ東部の James Bay B-6 海成粘土の圧密試験結果を Jamiolkowski らが再整理したものである³⁾。図-4 をみると、James Bay B-6 海成粘土においても図-2, 3 にみられるように圧密圧力が p_c を越えると圧縮性が增大している傾向がある。図-5 (a) は、同じ粘土の K_0 圧密非排水三軸圧縮試験 (CK₀U

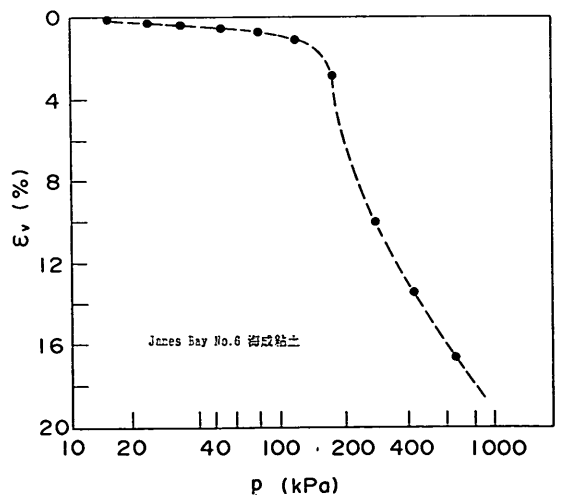


図-4 $e-\log p$ 曲線 (James Bay B-6 海成粘土)

三軸試験)の結果を種々の圧密比 σ'_{vc}/p_c について示したもので、ここに σ'_{vc} は軸方向圧密圧力、 p_c は圧密降伏圧力である。また、軸差応力 $q(=\sigma_1-\sigma_3)$ は p_c によって正規化されている。図-5(a)をみると、圧密比 σ'_{vc}/p_c が1よりも小さい過圧密応力状態の場合では、0.3~0.4%の軸ひずみで軸差応力がピークに達しその後急激に強度が低下している。一方、 σ'_{vc}/p_c が1以上になり正規圧密状態まで圧密すると、ピーク時の強度が低下するとともにその後の強度の低下がそれほど顕著でなくなる。図-5(b)は、同じ試験における有効応力経路である。図中の $\phi=35^\circ$ に相当する限界状態線は、これらの粘土が大ひずみ状態で応力比が落ち着いたときの状態から求めたものであり、図中の点は軸差応力がピークに達したときの有効応力状態を示している。図をみると、過圧密状態でせん断した場合に軸差応力がピークに達する時の有効応力状態は限界状態線の上部にある、すなわち降伏曲面は限界状態線の外に位置している。一方、正規圧密領域まで圧密した場合は限界状態線を越える応力状態に

はならず降伏曲面は限界状態線の下にあるが、これは室内で練り返した粘土試料と同様の傾向である。このようにせん断においても自然粘土と室内で正規圧密された粘土の間にはっきりとした相違が認められる。Jamiołkowski らはこれを、堆積中にセメンテーションによって形成された構造によって自然粘土は限界状態線の外側にユニークな降伏曲面をもち、正規圧密状態まで圧密されることによってそれらが破壊されて室内再圧密試料と同様の降伏曲面を持つようになる、と説明している。

半沢は、多くの粘性土の室内試験および実際の破壊事例の解析にもとづいて、年代効果を有する自然粘土地盤が応力解除による過圧密粘土と非常に異なる力学特性を持つことを示した⁶⁾。これらの結果にもとづいて、年代効果による見かけの過圧密を応力解除による過圧密と結果的に同一視して自然地盤の強度評価を行なうSHANSEP法⁷⁾の考え方を批判し、年代効果を応力履歴による過圧密と区別して考慮することの重要性を強調している⁶⁾。

このように、自然粘土において年代効果が地盤の力学特性に大きな影響を及ぼすことが明らかになりつつあるが、その定量的な評価方法は必ずしも解明されていない

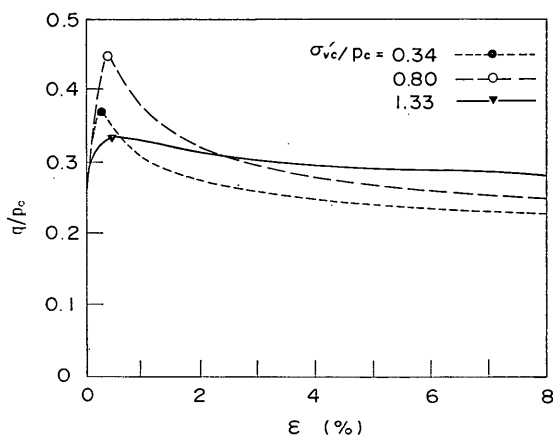


図-5 (a) 応力ひずみ曲線

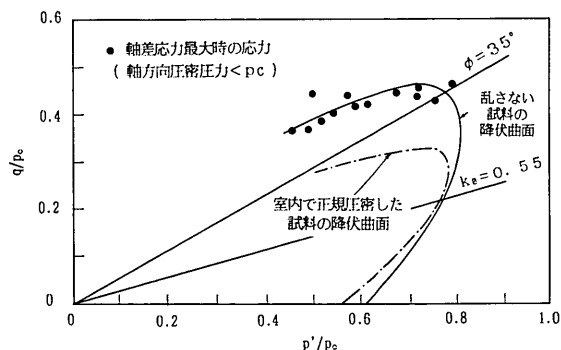
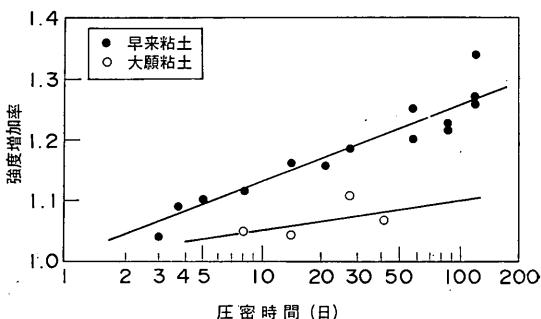
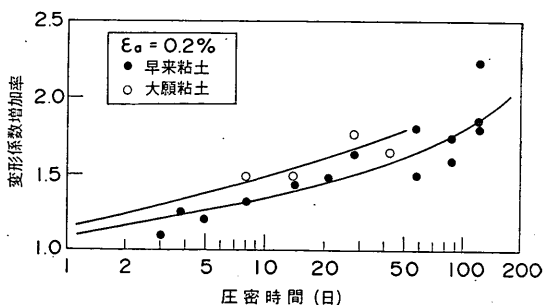


図-5 (b) 有効応力経路


 図-6 (a) 強度増加率と圧密時間の関係 (三田地⁸⁾ らによる)

 図-6 (b) 変形係数増加率と圧密時間の関係 (三田地⁸⁾ らによる)

い。これは、地質学的な考察によって堆積環境や年代など対象となる地盤の形成過程を概略推定することが可能であるものの、地盤の強度や変形特性の定量的な評価に用いることができるほど十分な精度で推定することが困難であるためである。また、年代効果の解明を妨げているもうひとつの原因は、実験室内で自然粘土のような年代効果を持つ試料を作成することができないことであると考えられる。自然粘土を用いた実験では、試料の不均一性のために十分再現性のある実験が困難である。年代効果を室内で再現することができるならばその定量的な評価のための研究が容易になると考えられる。

三田地・藤原は、三軸試験装置を用いて粘性土を最長120日間まで K_0 圧密し、圧密時間によって粘性土のせん断特性がどのように変化するかを報告している⁹⁾。三田地らによると、図-6のように圧密時間が長くなるとともに非排水圧縮時の強度と変形係数が大きくなり、年代効果を有する自然粘土と類似した力学特性を示すことが報告されている。三田地らのように室内で長期間圧密することは年代効果を再現する直接的な方法であるが、実験に非常に長期間を要するとともに、三軸試験の場合は特殊な実験技術を要するなどの問題がある。

年代効果が粘土鉱物の物理化学的性質に基づくものであることに着目して化学的添加物を混合して、年代効果による構造を再現しようとする方法も試みられている。嘉門・長尾⁹⁾、嘉門・佐野・陶¹⁰⁾は、カオリン粘土にセメント系固化材料あるいはメタケイ酸ナトリウム（水ガラス）を調整した材料を与えることによって人工的にセメンテーション効果を与え、土粒子の構造観察と物理特性および二次圧縮挙動との関連性を考察している。嘉門らによるとセメンテーションが発達することによって間隙比の変化が無いにもかかわらず強度は大きくなり、鋭敏比が非常に高くなることが報告されている。しかし、このような方法で人工的に与えられるセメンテーションの効果と自然粘土の力学特性における年代効果との定量的な関連についてはまだ明らかになっていないようである。

3. わが国の港湾地域における自然海成粘土と室内再圧密粘土の力学特性の比較

ここでは、わが国の港湾地域から採取された乱さなない粘土試料とそれらを練り返して再圧密した試料の力学特性を比較し年代効果の影響をみることにする。

3.1 圧密特性

図-7は、練り返し再圧密した東京湾大黒粘土、錦海湾粘土を用いて、標準圧密試験を行った時の $e-\log p$ 曲線

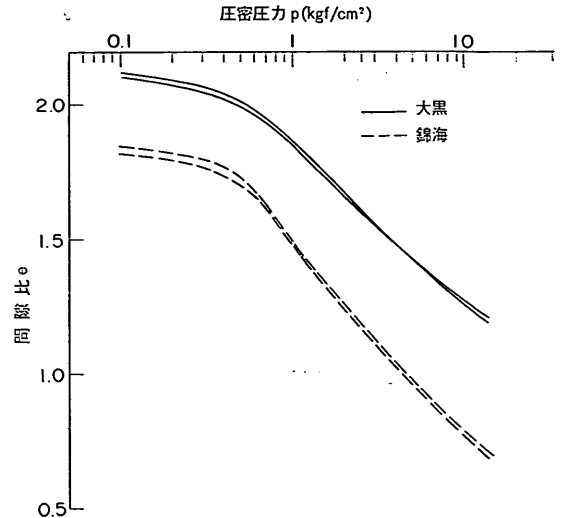


図-7 $e-\log p$ 曲線（再圧密東京湾大黒粘土、再圧密錦海湾粘土）

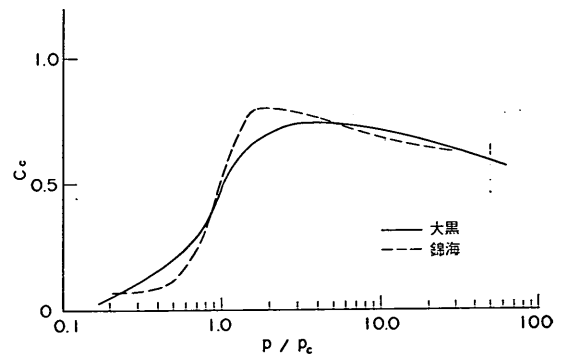


図-8 C_c と圧密圧力の関係（再圧密東京湾大黒粘土、再圧密錦海湾粘土）

表-1 試料の物理試験結果（再圧密粘土）

	横浜大黒粘土	錦海湾粘土
粘土分(%)	45	71
シルト(%)	51	29
砂分(%)	4	0
塑性限界(%)	32	42
液性限界(%)	78	118
塑性指数	46	76

ある。それぞれの粘土の粒度と主な物理試験結果を表-1に示した。図-2と同様に、図-7に示す $e-\log p$ 曲線から圧密圧力ごとに圧縮指数 C_c を求めると図-8のようにな

った。なお、圧密圧力は各粘土の圧密降伏圧力 p_c で正規化して示している。図のように正規圧密領域 ($p > p_c$) での C_c は p_c の 1~2 倍付近でやや大きい。全体としてその変化はあまり大きくなく 図-2(a), (b) に示した、繰り返した試料の場合と同様の傾向である。

次に、図-9(a), (b) に東京湾大黒粘土、錦海湾海成粘土および霞ヶ浦湖底粘土の乱さない試料の圧密試験から求めた代表的な e - $\log p$ 曲線を示した。図-10 は、

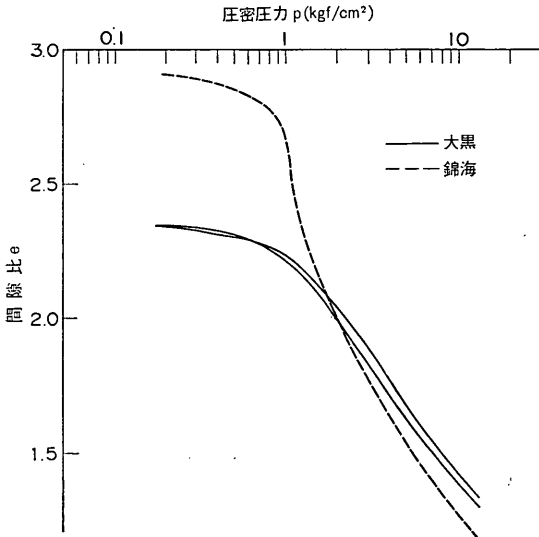


図-9 (a) e - $\log p$ 曲線 (東京湾大黒粘土と錦海湾粘土)

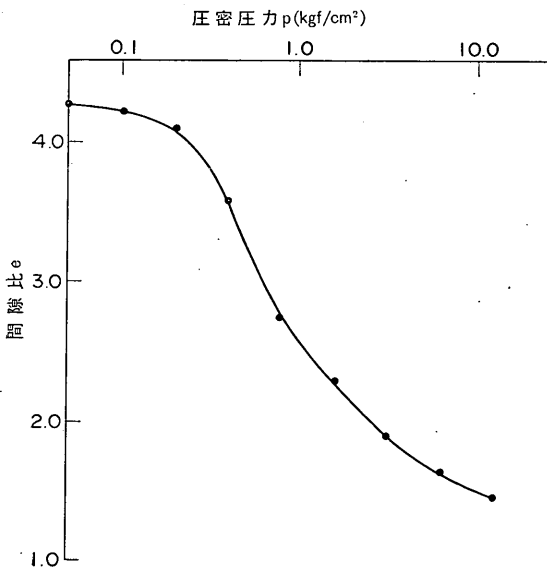


図-9 (b) e - $\log p$ 曲線 (霞ヶ浦粘土)

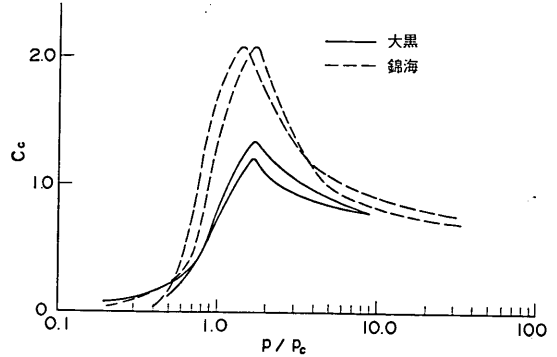


図-10 C_c と圧密圧力の関係 (自然粘土)

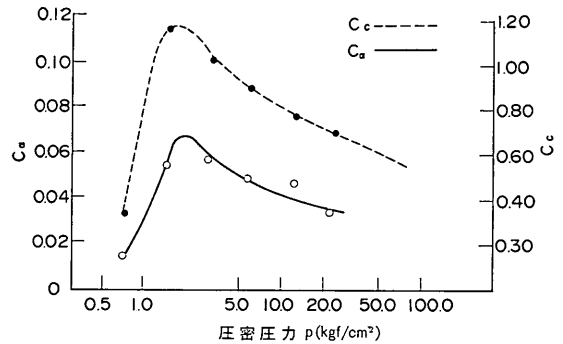


図-11 C_c と圧密圧力の関係 (石井らによる¹¹⁾)

図-9(a)(b)より各圧密圧力ごとの C_c を求めて示したものである。図-10 をみると、ほとんどの粘土において C_c は圧密降伏圧力の 1~2 倍の付近で最も大きく、その後圧密圧力が大きくなるとともに徐々に低下する傾向を示している。図-8、図-10 において $p/p_c > 1$ である正規圧密領域の C_c を比べると、 C_c の変化が少ない再圧密粘土よりも乱さない自然粘土の場合は p_c の付近で明瞭なピークを示している。これらの結果は、図-2で示した Mesri らの試験結果と同様であるといえる。

自然粘土の二次圧縮指数 C_α については、石井らが大阪湾泉州沖の粘土について調べた例がある¹¹⁾。図-11 は石井らが求めた C_c および C_α と圧密圧力の関係であるが、Mesri らが指摘したように圧密圧力によって C_c と C_α が変化するものの C_α/C_c 比はほぼ一定の関係にあり、正規圧密領域の C_α も C_c と同様に圧密降伏圧力の 1~2 倍の圧密圧力のときにピーク値を示している。

以上のように、わが国の港湾地域海成粘土についても、自然試料と再圧密試料について図-2や図-3に示した既往の研究の結果と同様の傾向がみられた。すなわち、

自然粘土では p_c の付近で C_e と C_a がピーク値を示すのに対して、繰り返し再圧密粘土では正規圧密領域の C_e 、 C_a はほぼ一定である。ここでは、これらの違いが二次圧密やセメンテーションなど自然粘土のもつ年代効果によると考え、新たに次のようなパラメータ r_c を定義して圧縮指数比 (compression index ratio) と呼ぶことにする。

$$r_c = C_{emax} / C_e^* \quad (3)$$

ここに C_{emax} は $e-\log p$ 曲線における C_e の最大値であり C_e^* は C_e が最大値を示す圧密圧力の5倍の圧密圧力での C_e である。 C_e^* を C_e が最大の時の圧密圧力の「5倍」としたのは、通常実施される圧密試験の圧力の範囲を考慮した便宜的なものであるが、 r_c は、正規圧密領域における圧縮性の変化の大きさを示す指標である。

図-8 と 図-10 の $e-\log p$ 曲線を用いて今回用いた再圧密粘土と自然粘土の r_c を計算するとそれぞれ次のようになった。

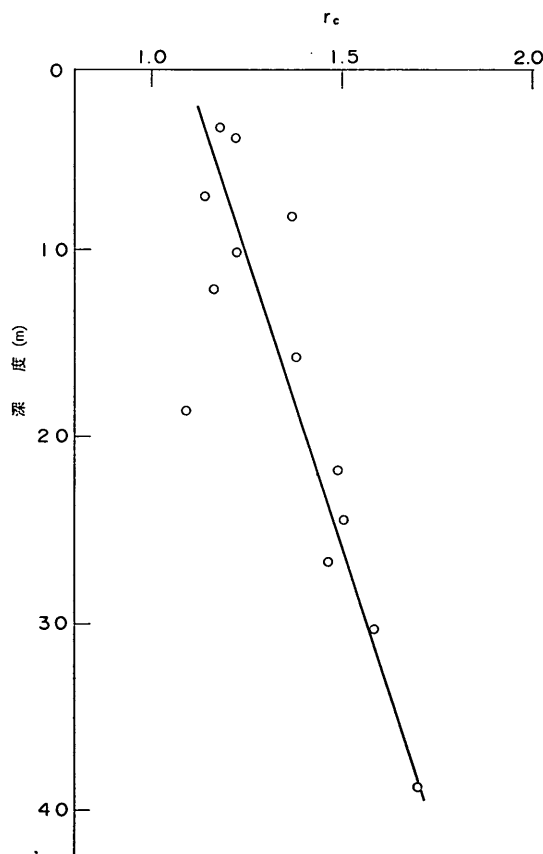


図-12 深度と r_c の関係 (東京湾大黒粘土)

$$\left. \begin{array}{l} r_c = 1.0 \sim 1.2 \quad (\text{再圧密粘土}) \\ r_c = 1.2 \sim 3.0 \quad (\text{自然粘土}) \end{array} \right\} (4)$$

なお、ここでは個人誤差を取り除くため $e-\log p$ 曲線を各圧密圧力での間隙比と圧密圧力の関係を満足するスプライン曲線として決定し、機械的に r_c を計算した。(4) 式のように再圧密粘土と自然粘土の r_c には大きな違いがみられた。したがって、 r_c は再圧密粘土と自然粘土の違いを表現する指数として用いることができると考えられる。

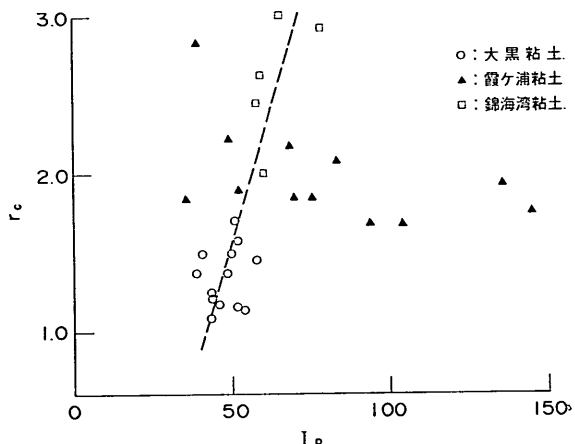


図-13 (a) r_c と塑性指数の関係

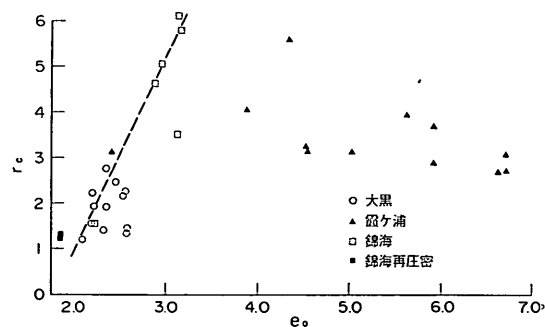


図-13 (b) r_c と初期間隙比の関係

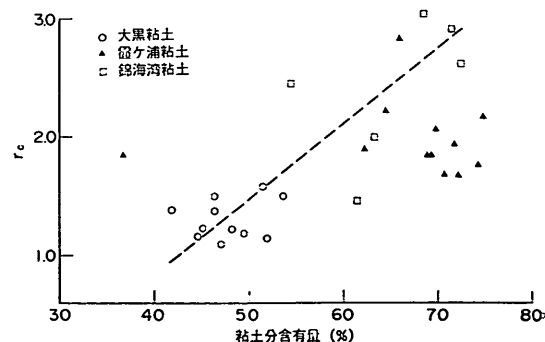


図-13 (c) r_c と粘土分含有量の関係

図-12は、東京湾大黒粘土の1つのボーリング孔の圧密試験結果から圧縮指数比 r_c と深度の関係をもとめたものである。図をみると r_c は、ほぼ深度とともに増加する傾向がみられた。

図-13(a)(b)(c)は、それぞれ r_c と塑性指数 I_p 、初期間隙比 e_0 、粘土分含有量 f_c との相関をみたもので

ある。図のように、霞ヶ浦粘土と東京湾大黒粘土、錦海湾粘土とははっきり異なった傾向を示している。霞ヶ浦粘土は初期間隙比が非常に大きく r_c は I_p 、 e_0 、 f_c のいずれともあまり相関が見られない。これに対して東京湾大黒粘土と錦海湾粘土については比較的はっきりした相関がうかがえた。すなわち、これらの2つの粘土では r_c が塑性指数が高いほど、また初期間隙比が大きいほど、さらに粘土分含有量が大きいほど大きい。このように、霞ヶ浦粘土と東京湾大黒粘土および錦海湾粘土とにおいて r_c と他の物理定数との相関性に相違が見られた原因としては、霞ヶ浦粘土が淡水湖に堆積した粘土であり、東京湾大黒粘土と錦海湾粘土が海成粘土であることが考えられるが、今後さらに各種の粘土についてのデータを収集する必要があると考えられる。

大阪湾の海底地盤は洪積粘土が非常に大きな深度までほぼ連続的に堆積していることが知られている。同一の海底地盤において圧縮指数比が深度によってどのように変化するかを調べるため、大阪湾泉州沖で採取した乱さ

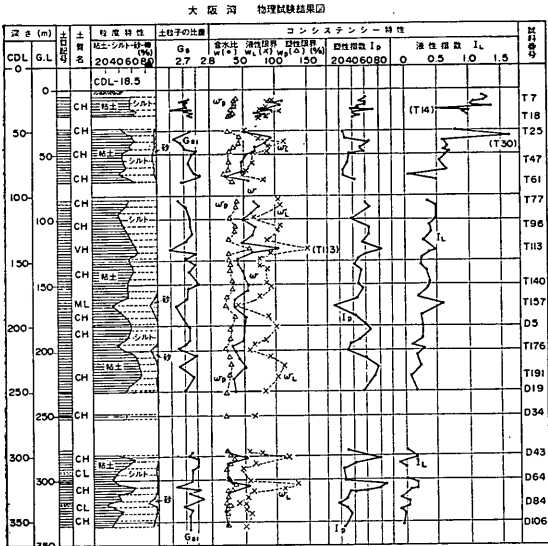


図-14 (a) 物理試験結果(大阪湾泉州沖粘土)

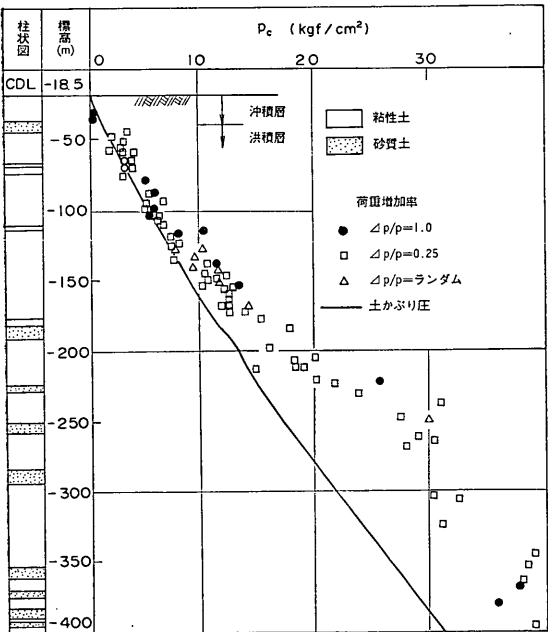


図-14 (b) 深度と p_c の関係

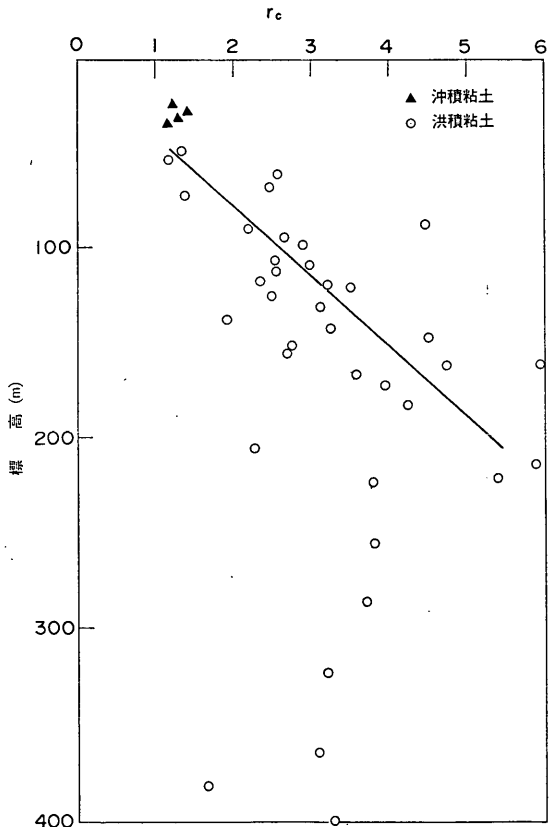


図-15 圧縮指数比 r_c と深度の関係

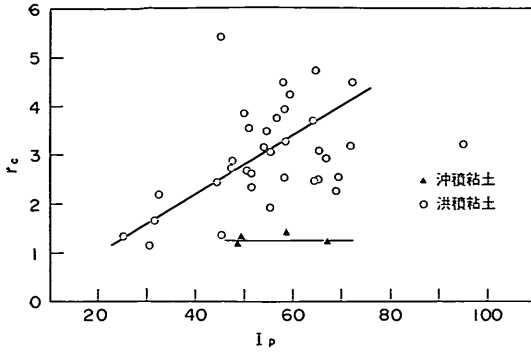


図-16 (a) r_c と塑性指数の関係(大阪湾粘土)

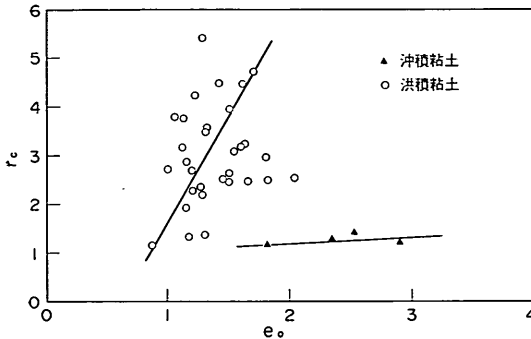


図-16 (b) r_c と初期間隙比の関係(大阪湾粘土)

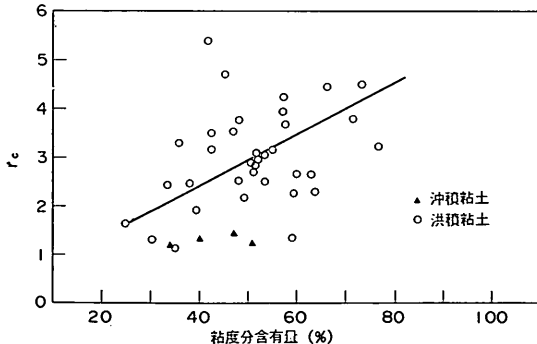


図-16 (c) r_c と粘土含有量の関係(大阪湾粘土)

ない試料の標準圧密試験結果における r_c を調べた。

この地盤の主な物理試験結果と、標準圧密試験から求めた圧密降伏圧力 p_c は、図-14(a)(b)に示すとおりである。図のようにこの地点は、水深が20mで、海底面から深度約20mまでは沖積粘土、それ以降は砂レキ層と洪積粘土の互層となって深度400mまで続いている。また、いずれの深度においても粘性土の p_c は土被り圧 p_0 よりもやや大きく過圧密比 p_c/p_0 は1.0~1.5の範囲にある。

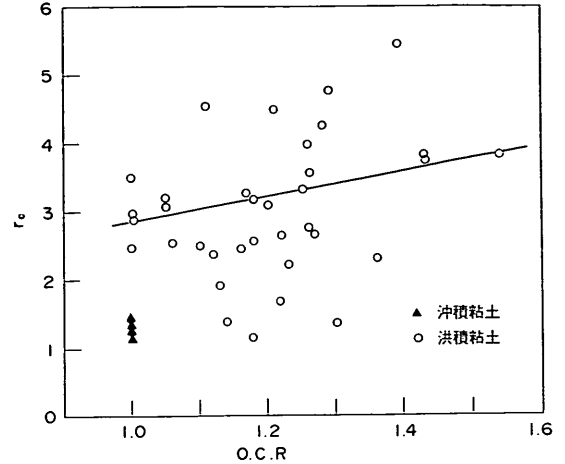


図-17 r_c と過圧密比の関係(大阪湾粘土)

図-15は、圧縮指数比 r_c と深度の関係である。図のように深度約200mまでをみると r_c は深度とともに増加する傾向があり、沖積層では1.1~1.3であるが洪積層では1.3~6.0となっている。深い層ほど堆積年代が古いことを考えると、図-12と図-15のように r_c が深度と共に増加していることは r_c が年代効果を表す指標であるという仮定を支持するものであると考えられる。なお、深度が200m以上になると r_c の増加傾向は見られないが、これは200m以深では粘性土の塑性が低下していることによると推定される。

図-16(a)(b)(c)は、それぞれ塑性指数 I_p 、初期間隙比 e_0 、粘土分含有量 f_c と圧縮指数比 r_c との関係を示したものである。図のように洪積粘土についてみると r_c は、 I_p 、 e_0 、 f_c に対してはほぼ図-13の東京湾大黒粘土、錦海湾粘土と同様の傾向がみられ、 r_c は塑性指数、初期間隙比、粘土分含有量と正の相関を示している。 r_c が年代効果を表わす指標であって、かつこの地盤の過圧密が年代効果による擬似過圧密であると仮定すれば、 r_c と過圧密比との間に相関があると考えられる。図-17には、 r_c と過圧密比 OCR の関係を示した。図-17をみるとほぼ r_c と OCR にゆるやかな正の相関が認められた。

今回調べたわが国の粘土試料の r_c はこれまで国際的に発表されている粘土地盤と比べるとどのように位置づけられるであろうか。比較のため2章で引用した海外の粘土について r_c を求めわが国の粘性土と比較すると次のようになる。

$r_c = 1.1 \sim 3.0$ (深度30mまでの日本の沖積粘土)

$r_c = 1.1 \sim 6.0$ (大阪湾洪積粘土)

$r_c = 3.2$ (メキシコシラー粘土)

$r_c = 6.0$ (Leda 粘土) $r_c = 4.2$ (James Bay B-6 海成粘土)

これらを見ると、わが国の海成粘土では大阪湾の洪積粘土の r_c が最も大きくカナダ東部の Leda 粘土や James Bay B-6 海成粘土と同程度の r_c をもっている。しかし、通常の建設工事で問題となる沖積粘土は r_c が 3 以下でありカナダ東部の粘土に比べるとその年代効果はあまり大きくないと考えられる。

3.2 セン断特性

ここまでは、圧密試験によって得られた $e-\log p$ 関係をもとに、主として本報告で新たに定義したパラメータである圧縮指数比 r_c に着目して年代効果の評価を試みた。次にせん断特性において自然試料と再圧密試料の違いを調べ r_c の適用性を検討する。

(1) 三軸試験結果

大阪湾沖積粘土を十分に練り返し、 2.0 kgf/cm^2 で一次的に再圧密した試料を用いて等方圧密後非排水三軸試験を行った結果を示す。なお、この試料の圧縮指数比を標準圧密試験の結果から求めると $r_c = 1.15$ であった。図-18、図-19 にそれぞれ応力～ひずみの関係と有効応力径路を示した。なお、軸差応力および平均圧密圧力は圧密降伏圧力 p_c (この場合は再圧密圧力 2.0 kgf/cm^2) で正規化している。また、図中の数字は p_c で正規化した圧密圧力 σ'_c/p_c である。なお、 σ'_c/p_c は過圧密比の逆数であり、 $\sigma'_c/p_c < 1.0$ のときは過圧密状態、 $\sigma'_c/p_c > 1.0$ のときは正規圧密状態である。

次に乱さない大阪湾沖積および洪積粘土について行った等方圧密三軸試験の結果を同様に図-20(a)～(d)、図-21(a)～(d) に示す。なお乱さない粘土の場合は p_c として標準圧密試験から求めた値を用いている。また、図中にはそれぞれの粘土について標準圧密試験結果から求めた r_c をあわせて示している。

図-18と図-20、図-19と図-21において正規化された圧密圧力 σ'_c/p_c が等しい供試体の力学特性を比較すると次のような違いがみられる。

まず、再圧密試料の場合はいずれの圧密圧力においても応力～ひずみ曲線のピーク時のひずみは 6 % 以上となっており、強度のピークはあまり明確でない。これに対して、自然粘土では沖積粘土、洪積粘土のいずれも過圧密領域 ($\sigma'_c/p_c < 1$) での破壊ひずみが小さくなっている。さらに過圧密領域での有効応力径路をみると、再圧密試料ではいずれの過圧密比においても非排水応力径路はほぼ $\phi' = 32^\circ$ に対応する限界状態線付近に収れんする傾向であるのに対して、乱さない粘土の場合は軸差応力がピークに達する時の有効応力状態は限界状態線を越え

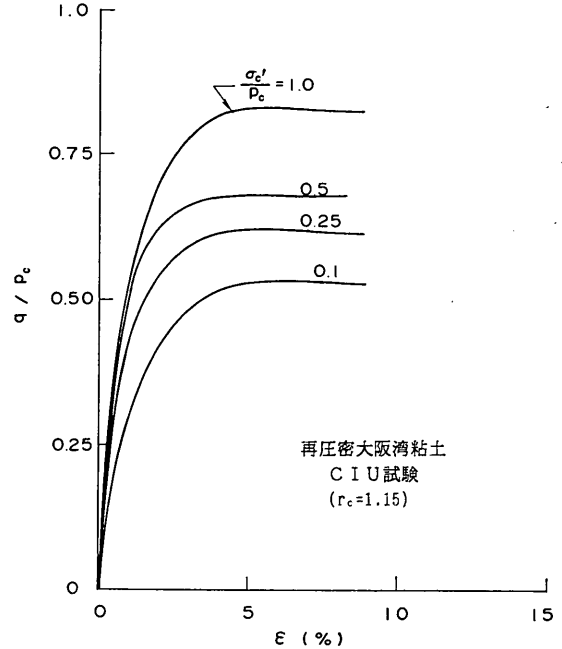


図-18 応力とひずみの関係 (再圧密大阪湾粘土)

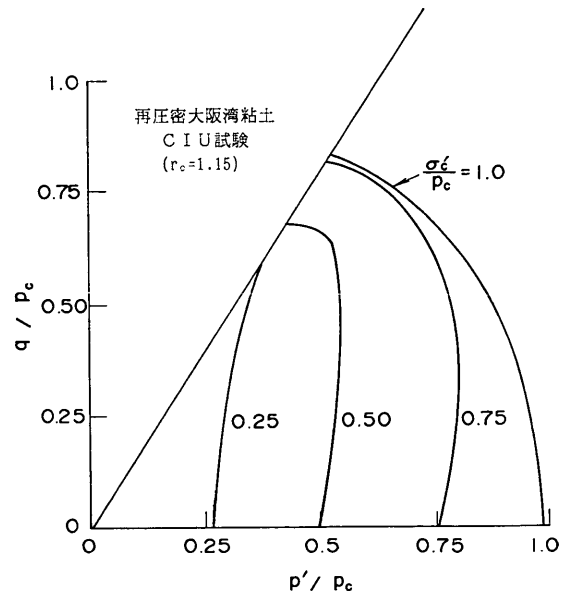


図-19 有効応力径路 (再圧密大阪湾粘土)

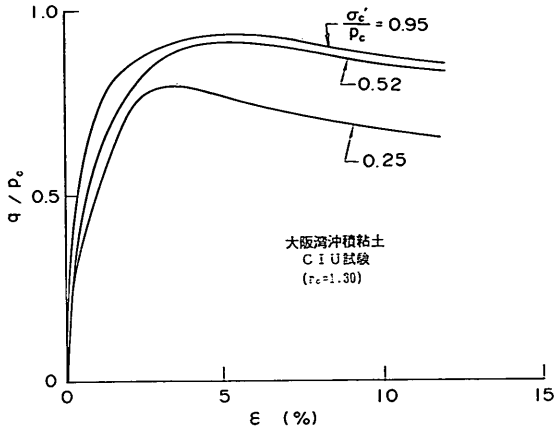


図-20 (a) 応力とひずみの関係
(大阪湾冲積粘土, $r_c=1.3$)

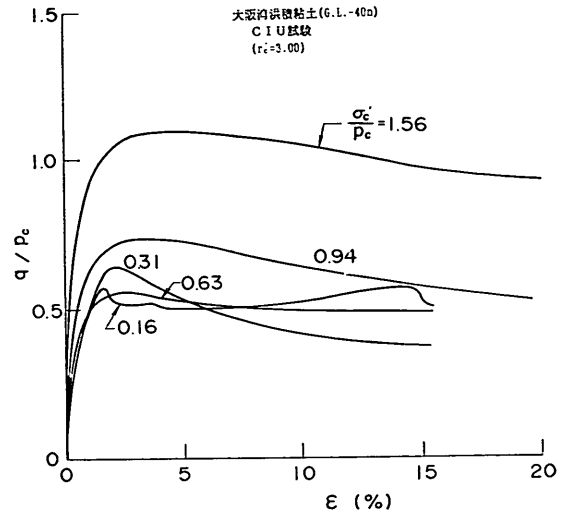


図-20 (c) 応力とひずみの関係
(大阪湾洪積粘土, $r_c=3.0$)

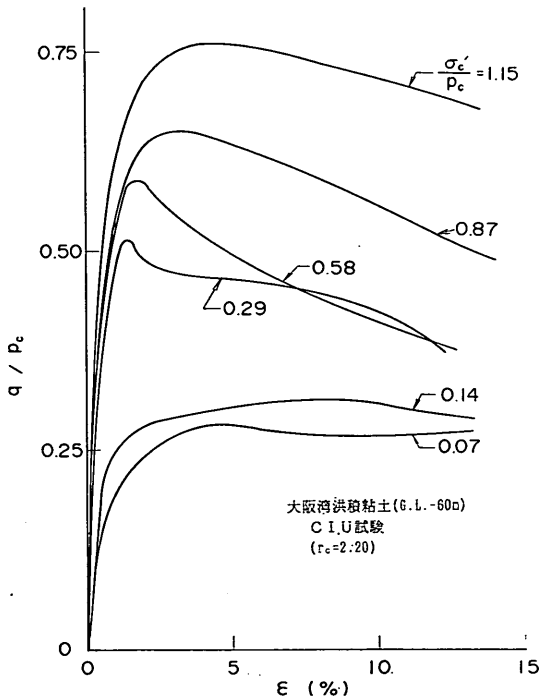


図-20 (b) 応力とひずみの関係
(大阪湾洪積粘土, $r_c=2.2$)

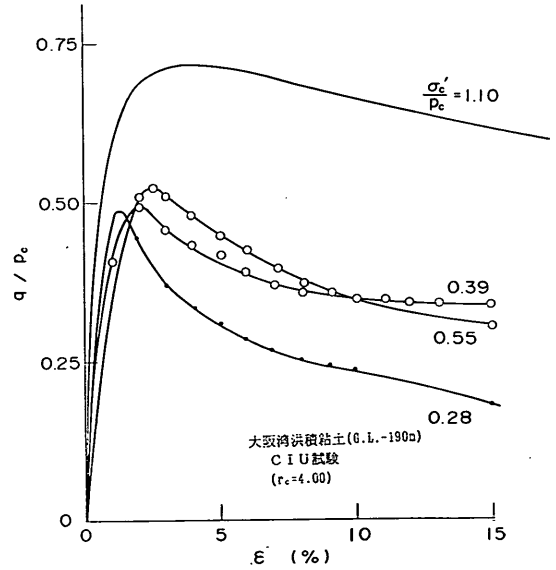


図-20 (d) 応力とひずみの関係
(大阪湾洪積粘土, $r_c=4.0$)

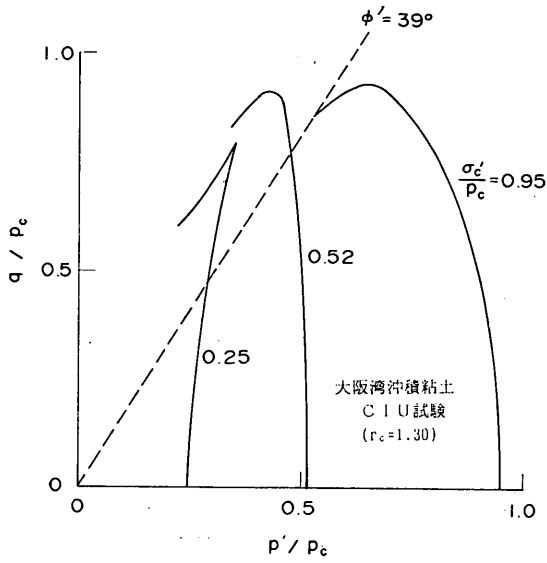


図-21 (a) 有効応力径路
(大阪湾沖積粘土, $r_c=1.3$)

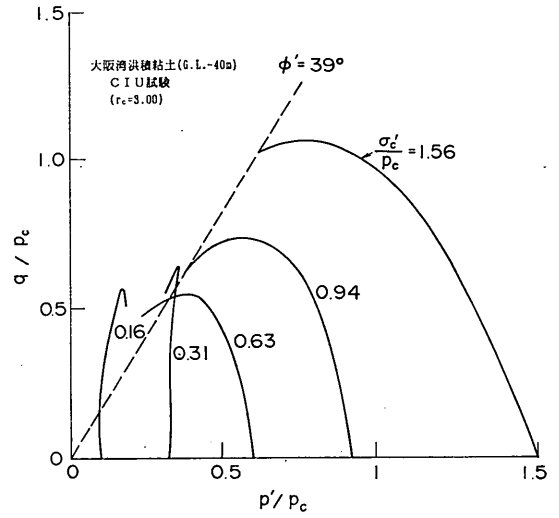


図-21 (c) 有効応力径路
(大阪湾洪積粘土, $r_c=3.0$)

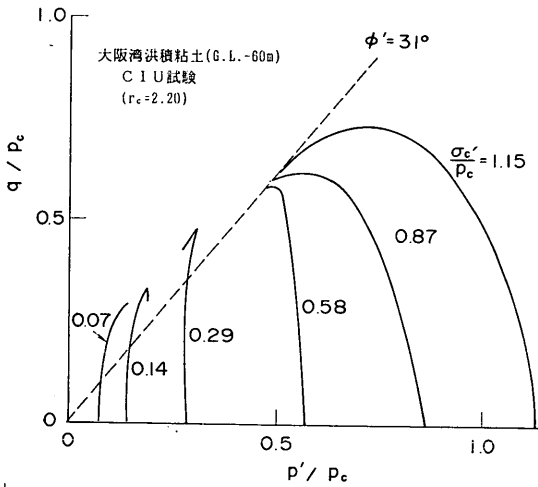


図-21 (b) 有効応力径路
(大阪湾洪積粘土, $r_c=2.2$)

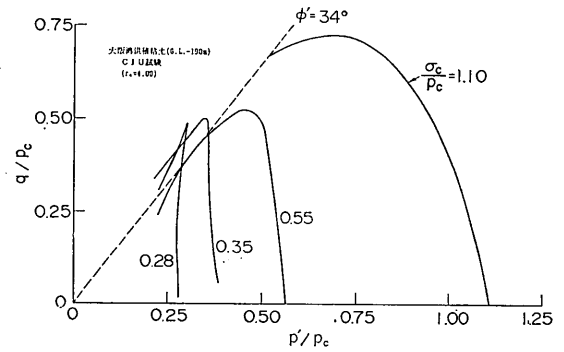


図-21 (d) 有効応力径路
(大阪湾洪積粘土, $r_c=4.0$)

ている。

このような自然粘土のせん断特性は、いずれも図-5で Jamiolkowski らがカナダ東部の粘土の試験結果を用いて示したものと程度の差はあるものの同様の傾向を示している。そこで年代効果をもつ自然粘土の特徴として「過圧密領域での破壊ひずみが小さくピーク後の強度の低下が著しい。」

という点に特に注目してみる。過圧密比が $2 (\sigma'_c/p_c = 0.5)$ 付近の試験結果を用いて次のような定数 s_r を計算した。

$$s_r = (\text{ひずみが10\%のときの強度}) / (\text{ピーク強度}) \quad (6)$$

図-22は、各圧縮指数比 r_c に対してピーク時のひずみ ϵ_f と s_r の関係を示したものである。図のように r_c が大きいほど ϵ_f と s_r が小さく、ピーク後の強度の低下が顕著であることを示している。

以上の結果をみると圧縮指数比 r_c はせん断において年代効果のおおよその大きさを示す指数となっているといえる。

(2) 応力比一定圧密試験

応力比一定試験は三軸試験装置によって供試体の軸方向有効圧力 σ'_a と側方向有効圧力 σ'_i を一定の比で保ったまま圧密する試験である。東京湾粘土の再圧密試料と乱さない自然試料を用いて応力比一定試験を行った結果を比較した。用いた試料は東京湾大黒粘土と東京湾洪積粘土である。洪積粘土は深度40mの海底から採取された乱さない粘土で図-23に標準圧密試験の結果を、表-2に物理試験結果を示す。図-23より圧縮指数比 r_c を計算すると1.8であった。

図-24(a)(c)はそれぞれ洪積粘土、再圧密沖積粘土の、応力比 $k = \sigma'_i/\sigma'_a$ が 0.4, 0.5 であるときの軸方向圧密圧力と軸ひずみの関係である。また、図-24(b)(d)はそれぞれ洪積粘土、再圧密沖積粘土の、平均圧密圧力 p' と体積ひずみ ϵ_v の関係である。図のようにそれぞれの応力比について圧力がある値以上になるとひずみが急増する傾向がある。このときを降伏点と呼び、標

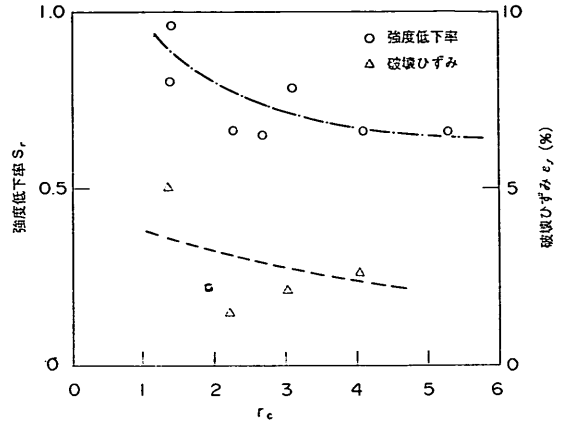


図-22 r_c と破壊ひずみ、強度低下率 s_r の関係

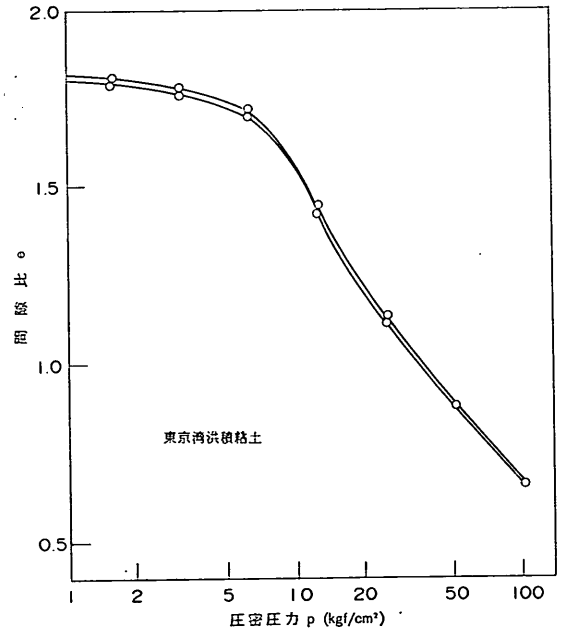


図-23 東京湾洪積粘土の e - $\log p$ 曲線

表-2 試料の物理試験結果 (東京湾洪積粘土)

粘土分 (%)	55
シルト (%)	43
砂分 (%)	2
塑性限界 (%)	32
液性限界 (%)	84
塑性指数	52

準圧密試験の e - $\log p$ 曲線の場合と同様の方法で各応力比ごとに降伏点での圧力を求めることができる。図をみると、再圧密沖積粘土の場合は降伏点はあまりはっきりとは現われない。これに対して洪積粘土の場合はどの応力比についても降伏応力をはっきりと認められる。

図-24(a)~(d)からそれぞれの応力比ごとの降伏点における圧力を求め、軸差応力~平均圧密圧力の面上にプロットすると図-25に示すような降伏曲面が得られる。

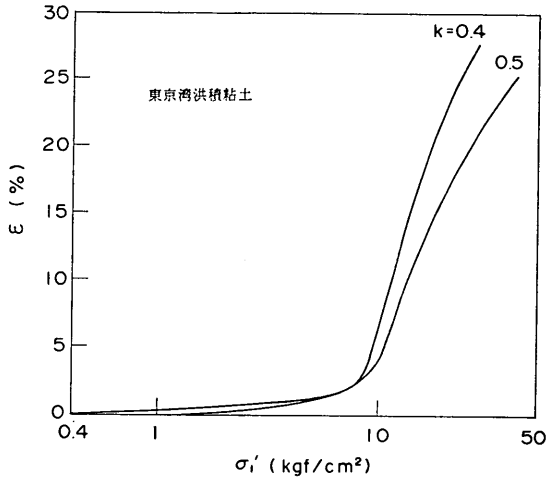


図-24 (a) 軸方向圧密圧力と軸ひずみの関係
(東京湾洪積粘土, $k=0.4, 0.5$)

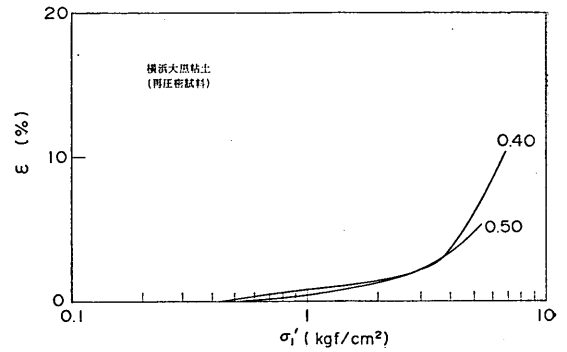


図-24 (c) 軸方向圧密圧力と軸ひずみの関係
(再圧密試料, $k=0.4, 0.5$)

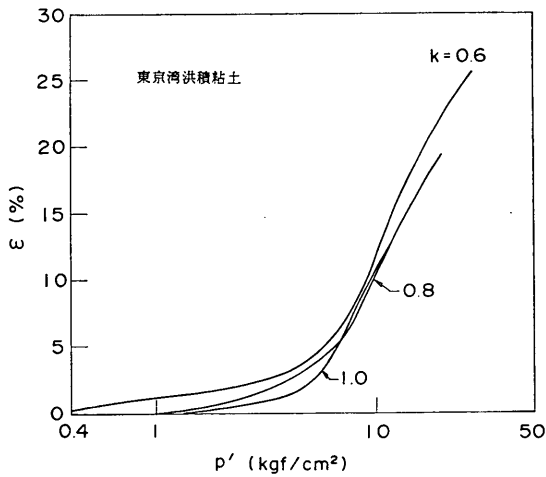


図-24 (b) 平均圧密圧力と体積ひずみの関係
(東京湾洪積粘土, $k=0.6, 0.8, 1.0$)

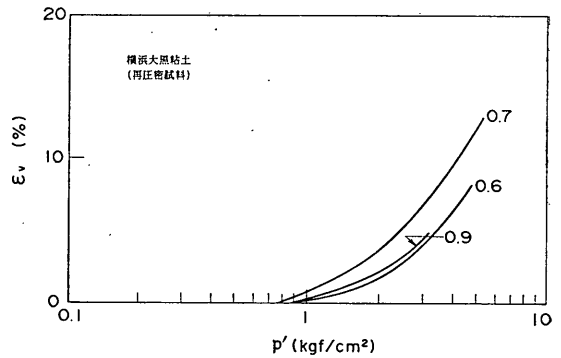


図-24 (d) 平均圧密圧力と体積ひずみの関係
(再圧密試料, $k=0.6, 0.7, 0.9$)

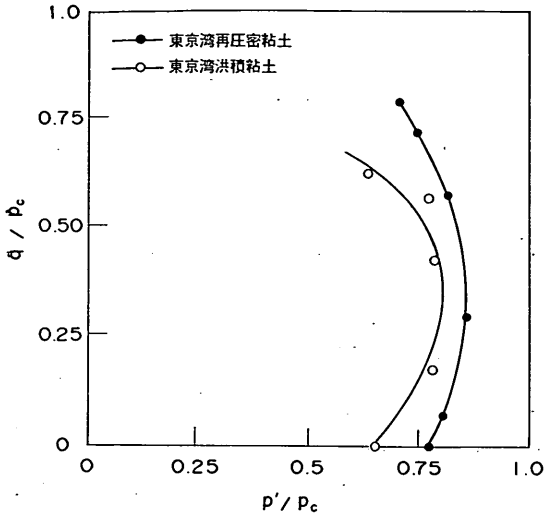


図-25 降伏曲面

図のように降伏曲面の形状においても再圧密粘土と乱さない粘土には相違がみられる。

4. 高温再圧密法による試料の作成方法

2.で述べたように飽和した粘性土の力学特性における年代効果は、主に長期圧密によるセメンテーションと二次圧密であると考えられる。この中でセメンテーションは粘土鉱物の物理化学的な作用によるものである。一般に化学反応は温度を上げることによって促進されるので、粘性土を高温で圧密するならばセメンテーション作用を促進できると予想される。また、二次圧密についても温度が高い場合、促進されるという実験結果が報告さ

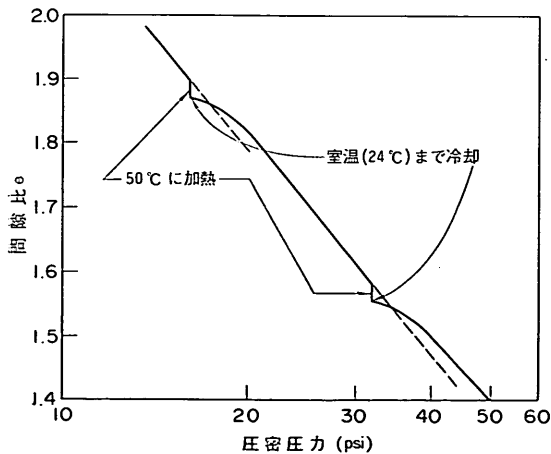


図-26 温度変化の影響 (Mitchell による¹²⁾)

れている。図-26は Mitchell によるが¹²⁾、二次圧密中に温度を増加することによって、沈下量が増加することが示されている。以上の考察から、本研究では年代効果を室内で促進する方法として、高温でスラリー状の粘土試料を再圧密する方法を新たに考案した¹³⁾。

4.1 試料の作成方法

実験に用いた粘土は、乱した横浜大黒粘土である。試

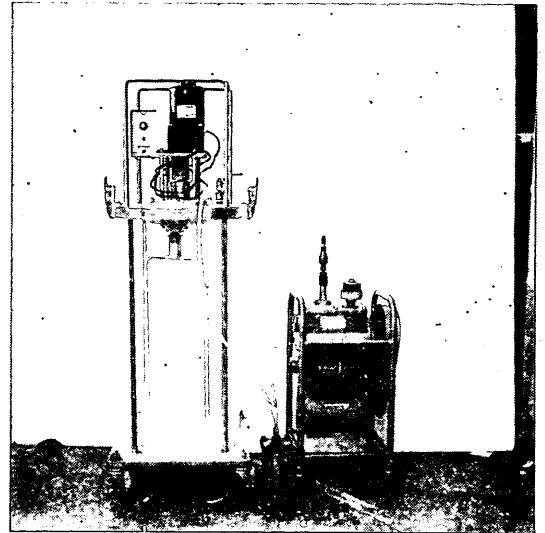


写真-1 粘土試料の練り返し機

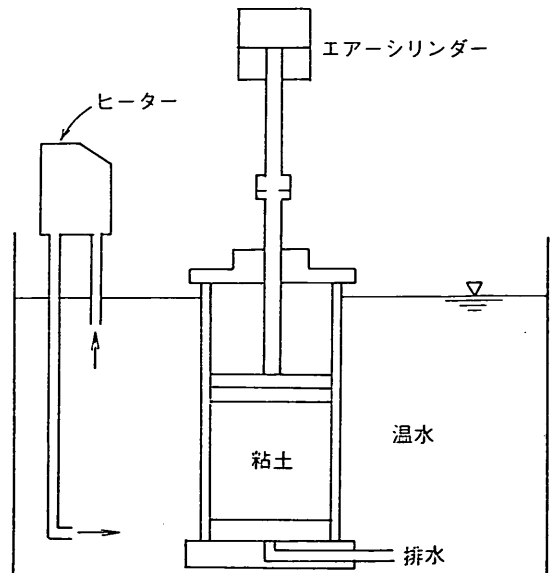


図-27 高温再圧密装置

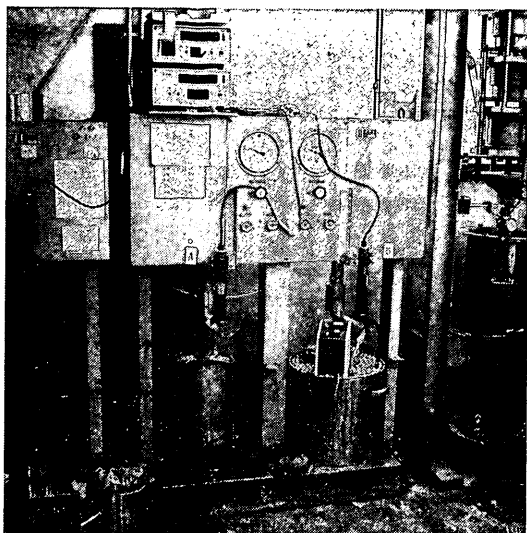


写真-2 高温再圧密装置

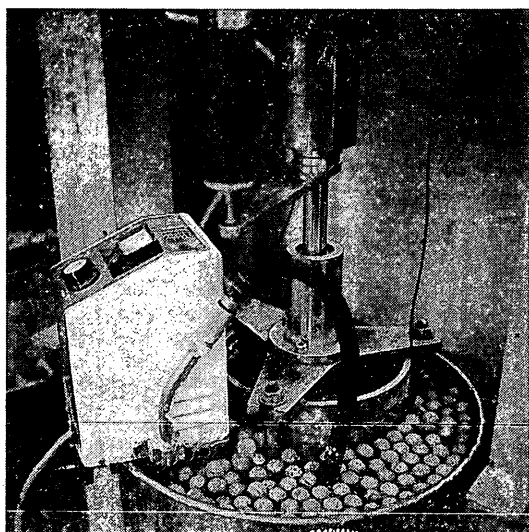


写真-3 高温で圧密中の圧密容器と水槽

料の分類特性と物理試験結果は表-1に示したとおりである。試料は、含水比が200%になるように調整し、写真-1に示す練り返し機を用いて48時間以上完全に練り返した。なお、練り返し中は気泡の混入を防ぐために真空ポンプで脱気している。

練り返されたスラリーは直径20cmの再圧密容器で一次的に圧密されている。試料を入れた再圧密容器を水槽の中に入れ、水槽内の水は電熱器によって75℃を保つようにコントロールした。図-27および写真-2に試験に用いた高温再圧密装置を示す。写真-3は、圧密中の圧密

容器と水槽であるが、水面には蒸発を防止するためにプラスチックボールを多数浮かべている。

試料は載荷版を加えた状態で圧密し、その後空圧シリンダーによって4段階(0.1kgf/cm², 0.2kgf/cm², 0.4kgf/cm², 1.00kgf/cm²)の圧密圧力を加えた。各圧密段階毎に時間～沈下関係から一次圧密終了を確認した後次の段階に進んでいるが、通常は一段階ごとに5～10日を要した。最終段階の圧密が終了した後、除荷して試料を再圧密容器から取り出し室温で保存した。また、比較のために全く同じ試料を同様の圧密装置、載荷条件で室温(25℃)で再圧密した。

高温で圧密中は粘土容器内の3箇所温度を測定した。図-28(a)(b)(c)に温度の測定位置と圧密中の温度変化を示した。図中で温度が一時的に低下しているのは水槽内に水を補給したことによるものである。図のように圧密容器内では温度差はみられず、圧密期間中はほぼ74±1℃に保たれている。

4.2 高温圧密粘土の物理試験結果

図-29は、高温(75℃)および室温(25℃)におけ

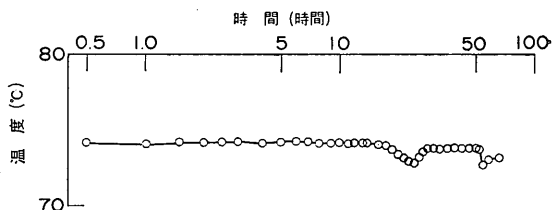


図-28 (a) 圧密中の温度変化 (容器上部)

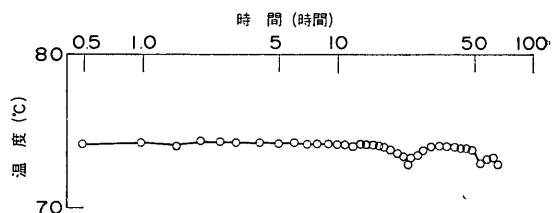


図-28 (b) 圧密中の温度低下 (容器中部)

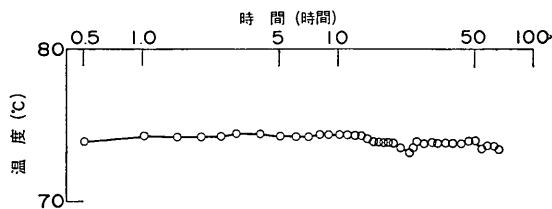


図-28 (c) 圧密中の温度変化 (容器下部)

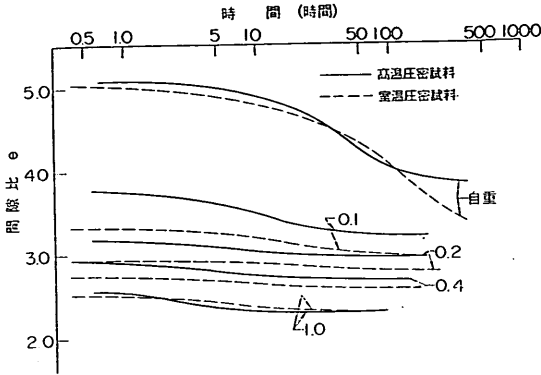


図-29 時間沈下曲線

る、各圧密段階での代表的な時間沈下曲線 (間隙比 e で表してある) を比較したものである。図をみると、載荷版だけの重さによる圧密過程では高温および室温の試料の圧密曲線ははっきりと異なっている。すなわち、高温圧密の場合には一次圧密は早期に (約120時間) 終了し、このときの間隙比は3.85であった。一方室温圧密の場合は一次圧密の終了に400時間を要しこのときの間隙比は3.20であった。しかしながら、このような初期の圧密段階での圧密速度と最終間隙比の違いは圧密段階が進行するにつれて徐々に小さくなり、最終圧密段階での両者の間隙比はそれぞれ2.20、2.25とほとんど差が見られなかった。

表-3は、今回試験した試料の供試体の含水比の一覧を示したものである。今回の試験では3回供試体の作成を行ったがそれらをいっしょにして示してある。図のように圧密後の含水比は高温圧密の試料室温圧密の試料のいずれも76~87%であった。

表-4は高温圧密試料と室温圧密試料の物理試験結果を

表-3 含水比の比較

	25℃	75℃
パッチ 1	77.2	76.5
	77.9	78.9
	76.5	77.0
パッチ 2	86.2	86.9
	86.7	85.8
	87.4	86.8
パッチ 3	74.9	79.7
	75.4	81.1
平均	80.3	81.6

表-4 高温圧密粘土と室温圧密粘土の物理試験結果の比較

	室温再圧密	高温再圧密
粘土分 (%)	45	45
シルト (%)	51	51
砂分 (%)	4	4
塑性限界 (%)	32	33
液性限界 (%)	78	80
塑性指数	46	47

比較したものである。表のように両者の物理試験結果にはほとんど差が見られなかった。

5. 高温で再圧密された粘土の力学特性

5.1 圧密試験結果

高温圧密試料と室温圧密試料を用いて標準圧密試験を行った。ただし二次圧縮特性を調べるために荷重は各段階とも2日間載荷している。図-30は両試料の $e-\log p$ 曲線を示したものである。比較のためほぼ同様の圧密降伏圧力をもつ乱さない東京湾沖積粘土の結果をあわせて示している。

図-30をみると室温で圧密した粘土と高温で圧密した粘土との間には明らかに違いがみられ、高温で圧密した粘土は自然粘土によく類似している。すなわち、数千年前に堆積した沖積粘土の $e-\log p$ 曲線がスラリーを高温で圧密することによってほぼ再現できていることがわかる。このことは、高温で圧密することが、沖積粘土のように比較的小さな年代効果を室内で再現することに有効

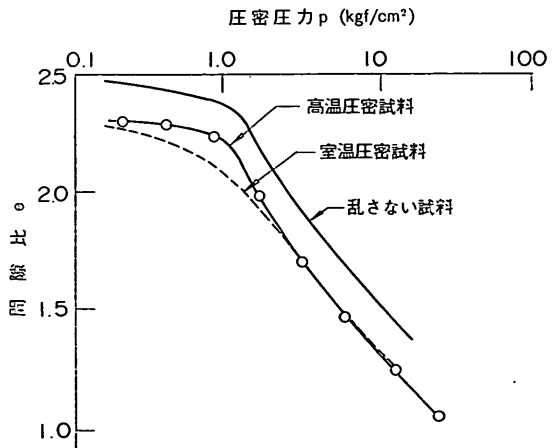


図-30 $e-\log p$ 曲線の比較

であることを示していると考えられる。

表-5は今回3回作成した高温圧密試料と室温圧密試料の圧密降伏圧力 p_c を比較したものである。図のように高温圧密試料の p_c は、室温圧密粘土の p_c よりも約0.15～0.20kgf/cm² 大きくなっており、これは高温圧密による見かけの過圧密効果によるものであると考えられる。

圧密降伏圧力 p_c で正規化した圧密圧力に対して、圧縮指数 C_c と二次圧縮指数 C_α を図-31(a), (b)に示した。図のように高温で圧密した試料では C_c と C_α は p_c の近傍で明瞭なピークを示す。これに対して室温で圧密

表-5 圧密降伏圧力の比較
(バッチ1)

	25℃	75℃
	0.86kgf/cm ²	0.93
	0.76	0.97
	0.86	1.02
平 均	0.79	0.97

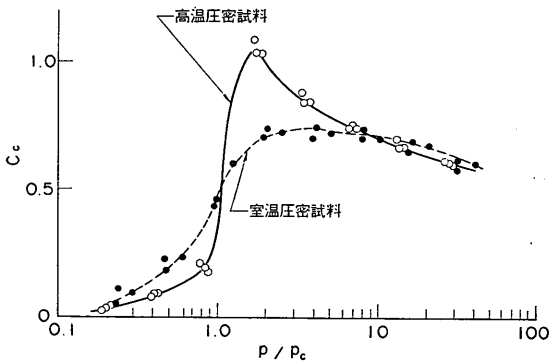


図-31 (a) 圧密圧力と C_c の関係

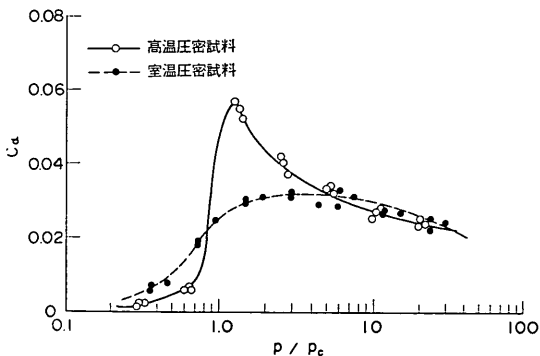


図-31 (b) 圧密圧力と C_α の関係

した試料の場合は正規圧密後の C_c および C_α はほぼ一定である。これらの結果と 図-2, 図-10を比較するならば高温で再圧密した試料が年代効果をもつ自然粘土と類似していることがあきらかである。

(3)式で定義した圧縮指数比 r_c を高温圧密試料と室温圧密試料について求めると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} r_c &= 1.0 \sim 1.1 && \text{(室温圧密試料)} \\ r_c &= 1.9 \sim 2.1 && \text{(高温圧密試料)} \end{aligned} \right\} (6)$$

このように高温圧密によって粘土試料の r_c は約2.0まで増加させることができるが、式(5)で示したようにわが国の自然沖積粘土の r_c がおおむね1.1～3.0であることを考えるならば高温再圧密法によって作られた粘土試料は、自然沖積粘土にほぼ等しい圧縮指数比をもっているといつてよい。

5.2 一軸圧縮試験結果

図-32は、高温で圧密した試料と室温で再圧密した試料の一軸圧縮試験における応力～ひずみ曲線である。図には比較のため東京湾沖積粘土の応力ひずみ曲線の例を示した。

図のように、室温で圧密した試料では破壊ひずみが4～7%であり軸差応力がピークに達した後あまり強度低下が見られないのに対して、高温で圧密された試料の場合は破壊ひずみが2～3%と小さく、その後はっきりした強度低下がみられる。図より高温で圧密された粘土の応力ひずみ曲線が、自然沖積粘土の応力ひずみ曲線により近いことが明かである。

図-33は、破壊ひずみ ϵ_f と q_u の関係を比較したものである。図より室温圧密試料の破壊ひずみが自然粘土に比べかなり大きいのに対して、高温で再圧密した試料の

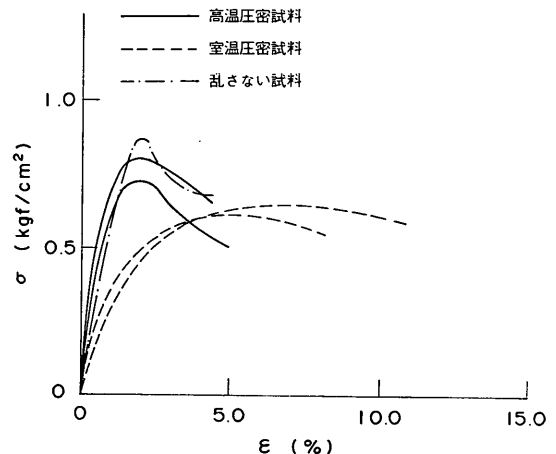


図-32 一軸圧縮試験における応力ひずみ曲線の比較

破壊ひずみはほぼ自然粘土と同様であることが確かめられる。表-6は一軸圧縮強度を比較したものである。図のように、高温圧密試料の q_u' の平均値 \bar{q}_u' と室温圧密粘土の q_u の平均値 \bar{q}_u はほぼ

$$\bar{q}_u' = 1.13 \bar{q}_u \quad (7)$$

の関係がみられた。

高温で圧密した試料と室温で圧密した試料とでは鋭敏比 s_e においても顕著な差がみられる。高温で圧密した試料では $s_e = 18$ であるが、室温で再圧密した試料の場合は $s_e = 7$ であった。海成粘土の鋭敏比は通常15~20とされており、高温で再圧密した試料の鋭敏化は自然粘土に近いといえる。

以上、一軸圧縮試験の結果からも高温で圧密した試料

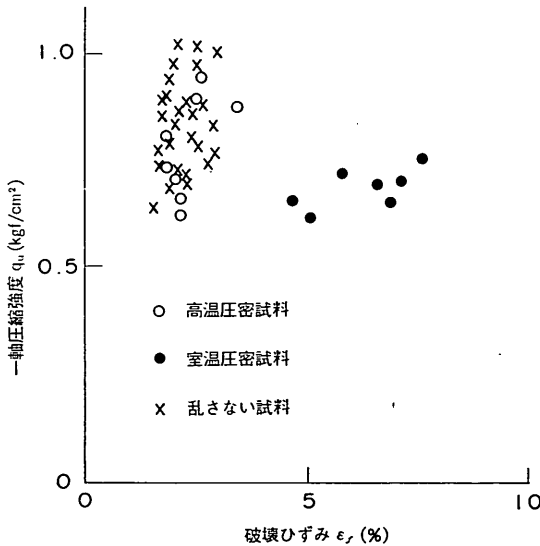


図-33 破壊ひずみと q_u の関係

表-6 q_u の比較
(パッチ 1 および 2)

	25℃	75℃
0.64kgf/cm ²	0.81	
0.62	0.74	
0.61	0.62	
0.65	0.67	
0.65	0.70	
0.69	0.73	
0.69	0.81	
0.72	0.87	
0.74	0.90	
平均	0.67	0.76

は室温で圧密した場合よりも年代効果をもつ自然粘土により近い特性を示すことがわかった。

5.3 三軸圧縮試験結果

図-34 は、等方圧密三軸圧縮試験の応力ひずみ関係を比較したものである。図のように高温圧密粘土は、室温圧密粘土に比べて変形係数が大きく破壊ひずみが小さい。また、図-35は両者の応力経路を比較して示したが、高温圧密粘土の応力経路は室温圧密粘土に比べ直線的である。これらの違いは3章で述べた自然粘土と再圧密粘

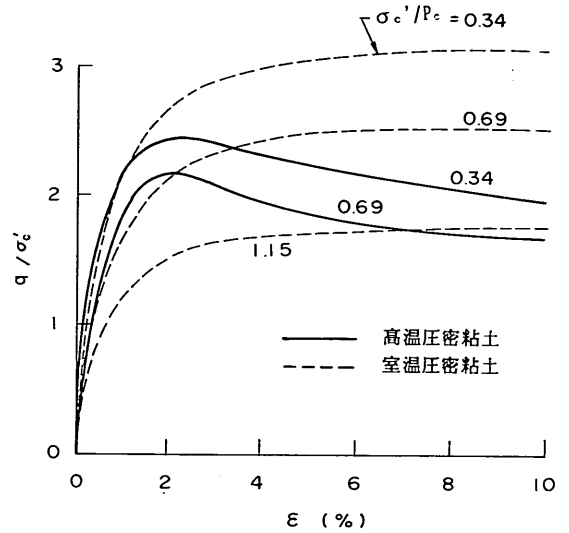


図-34 応力ひずみ曲線 (等方圧密三軸圧縮試験)

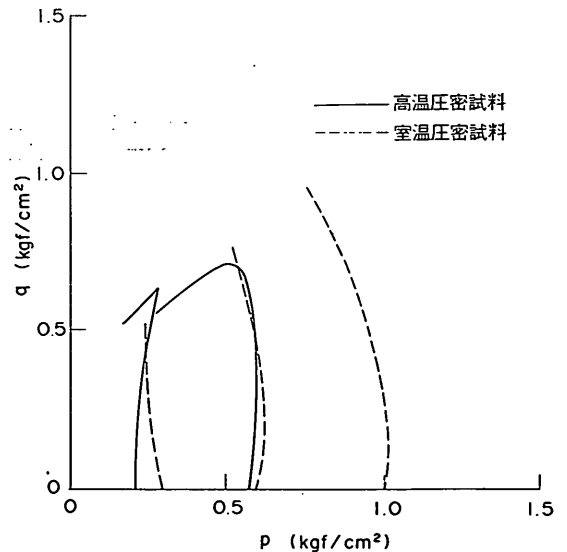


図-35 有効応力経路 (等方圧密三軸圧縮試験)

土との違いに対応している。

図-36は、自動 K_0 圧密三軸試験機によって試料を軸圧が 1.0kgf/cm^2 になるまで K_0 圧密しその後には圧縮したときの軸差応力とひずみの関係を示したものであり、図-37はこのときの有効応力経路である。ただしここでは K_0 値を 0.5 であると仮定して応力制御によって圧密している。図-36, 37においても図-34, 35と同様の傾向が見られる。

次に両試料を用いて応力比一定試験を行なった結果を示す。実験は、軸方向圧密圧力 σ_a' と側方圧密圧力 σ_t' が一定の比となり平均圧密圧力が4日間で 4kgf/cm^2 にな

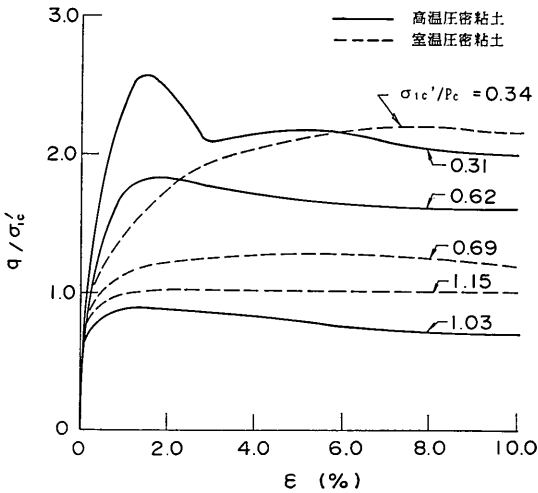


図-36 応力ひずみ曲線の比較

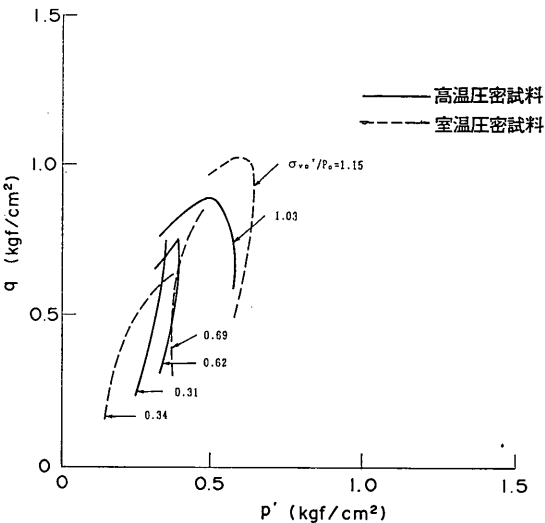


図-37 有効応力経路の比較

るように連続的に制御して行った。図-38は応力比 $k = \sigma'_t / \sigma'_a$ を $0.35, 0.5$ にそれぞれ設定して一定の速度で増加したときの軸方向ひずみ ϵ_1 と軸方向圧密圧力の関係を示したものである。また、図-39(a), (b)は、それぞれ高温圧密試料と室温圧密試料において応力比が $0.4, 0.5, 0.7, 0.9$ のときの体積ひずみ ϵ_v と平均圧密圧力 $p' = (\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3) / 3$ の関係を示したものである。図をみる

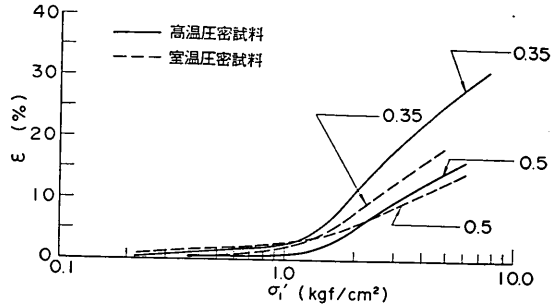


図-38 軸方向圧密圧力と軸ひずみの関係 ($k = 0.35, 0.5$)

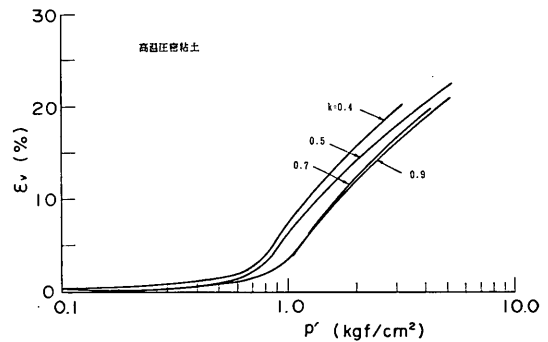


図-39 (a) 体積ひずみと平均圧密圧力の関係 (高温圧密試料)

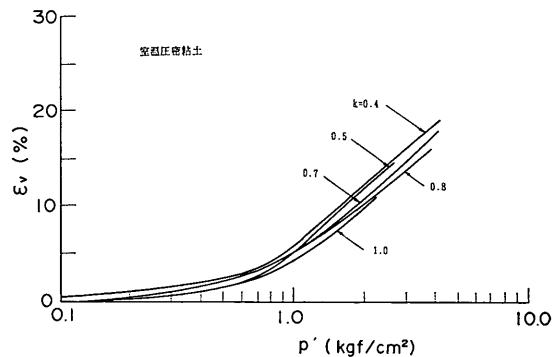


図-39 (b) 体積ひずみと平均圧密圧力の関係 (室温圧密試料)

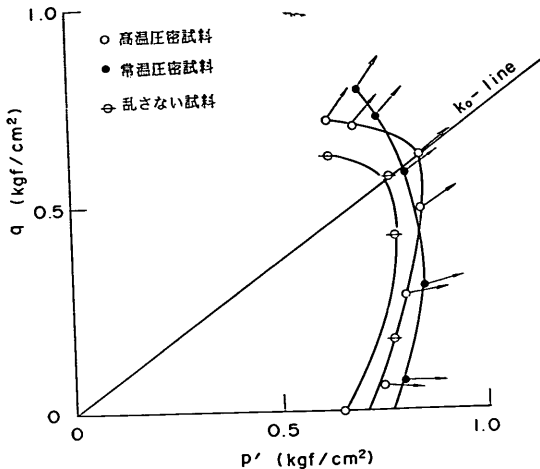


図-40 降伏曲面

と、高温圧密粘土の場合は各応力比で降伏点が明瞭に現れている。これに対して室温圧密粘土の場合は降伏点あまり明確でなく、特に応力比が1に近い場合は非常に求めにくい。これらの結果は図-24に示した東京湾洪積粘土と再圧密沖積粘土の応力比一定試験の結果とほぼ対応している。

図-38, 39よりそれぞれの応力比における降伏点を求め、軸差応力-平均主応力面上に降伏曲面を示した(図-40)。比較のため図-25で示した乱さない粘土の降伏曲面も併せて示したが、図をみると高温圧密粘土の降伏曲面の形状は年代効果を持つ自然粘土の降伏曲面と類似していることがわかる。

6. 考察

これまでの実験結果をまとめると、自然粘土と再圧密粘土とは異なった圧密特性、せん断特性を示すことがわかった。また、これらの違いを表す指数として標準圧密試験結果から求められる圧縮指数比 r_c が有効であることが明らかになった。さらに、高温で圧密した試料は乱さない自然粘土試料と同様に r_c が大きくなり、圧密試験結果、一軸圧縮試験結果、三軸試験結果のいずれにおいても室温で圧密した試料より自然試料に近い挙動を示すことが実験的に明らかになった。このことは、高温再圧密によって自然粘土の年代効果を室内で簡便に再現できる可能性を示すものである。

ところで、圧縮指数比 r_c が自然粘土と室温再圧密粘土とで異なっている原因について簡単に考察してみる。

ベラムは二次圧密による見かけの過圧密効果を次の

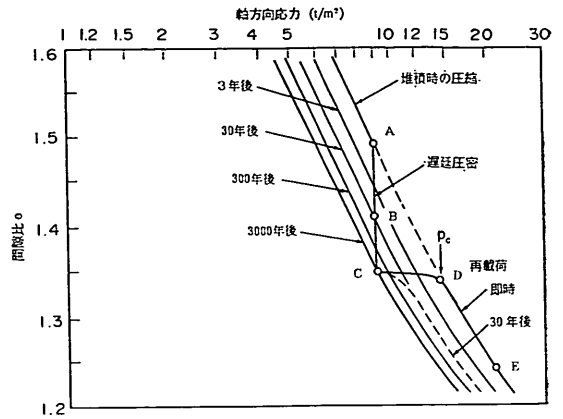


図-41 二次圧密による擬似過圧密効果

ように説明した¹⁾。図-41に示すように粘土には圧密時間によって固有に定まる $e-\log p$ 曲線が存在すると仮定すると、圧密時間が大きくなるとともに二次圧密によって対応する $e-\log p$ 曲線は下方にシフトする。たとえば、図中のA点で最初に堆積した粘土は二次圧密の進行によって徐々にB, C点に移動する。このような試料を採取して標準圧密試験をおこなうと標準圧密試験の圧密時間は各圧力段階で通常1日であるので、結果としてC—D—Eで示されるような $e-\log p$ 曲線が得られる。このような試料は、本来正規圧密粘土であるにもかかわらずCDに相当する見かけの過圧密圧力を示すことになる。ベラムは以上のような考え方によって軟弱な Drammen 粘土地盤にべた基礎によって建設された建物の長期的な沈下を説明している。

一方、ベラムは、同じ論文で見かけの過圧密がセメンテーションによっても生じることを図-42のような模式図で示した。図のようにセメンテーションによって粒子間の化学的な固結作用が進行する場合は、二次圧密による効果以上に p_c が増大し、この結果 p_c はもともと

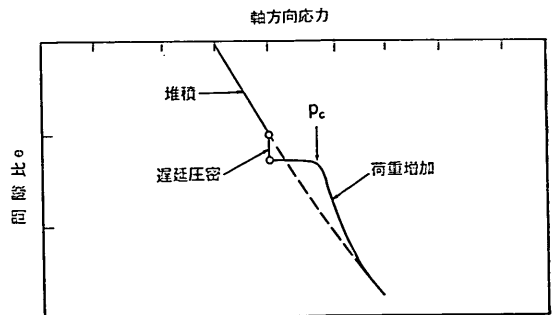


図-42 セメンテーションが $e-\log p$ 曲線におよぼす影響

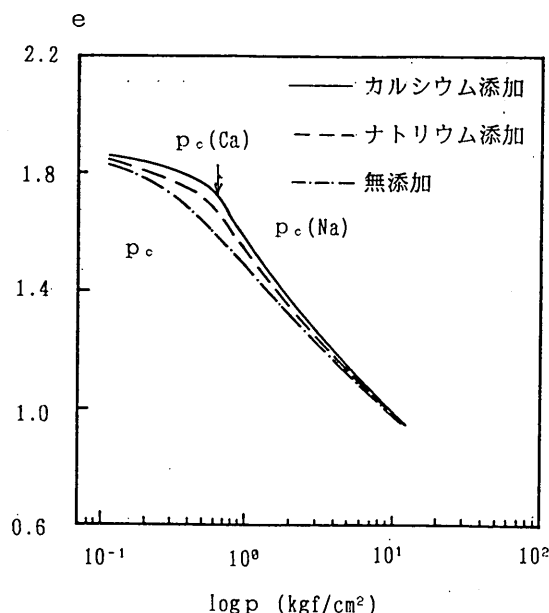


図-43 人工的に与えたセメンテーションによる e - $\log p$ 曲線の変化 (嘉門・長尾による⁹⁾)

の e - $\log p$ 曲線の右上部に飛び出す。このため、圧密圧力が p_c を越えた時に圧縮性が非常に大きくなり、圧密圧力が p_c よりも大きくなるとセメンテーションの影響は徐々に減少してもとの e - $\log p$ 曲線に漸近する。

セメンテーションのこのような特性は嘉門・長尾らの実験結果でも見られている⁹⁾。図-43は、嘉門らがカルシウムとナトリウムをわずかに粘土試料に混合して人工的にセメンテーション効果を加えた再圧密粘土および無添加の再圧密粘土の e - $\log p$ 曲線である。図のようにベラムが図-42で示した模式図と同様の傾向が認められる。

このように二次圧密とセメンテーションの影響を比較すると、二次圧密の進行によって正規圧密領域での e - $\log p$ 関係は平行移動するのみであり圧縮指数比はあまり変化しないと考えられる。これに対してセメンテーションの場合は、圧密圧力が p_c を越えた直後の圧縮性の増大とよく対応している。以上の考察にもとづくと、高温で圧密することによって粘土の力学特性が変化し自然粘土に近くなるのは、主として高温での圧密中に試料のセメンテーション作用が促進されるためであると推定される。

今回の一連の実験結果にもとづき、図-42と図-41の二次圧密の影響を組み合わせ模式的に表したのが図-44である。図のようにセメンテーションの効果によって、 e -

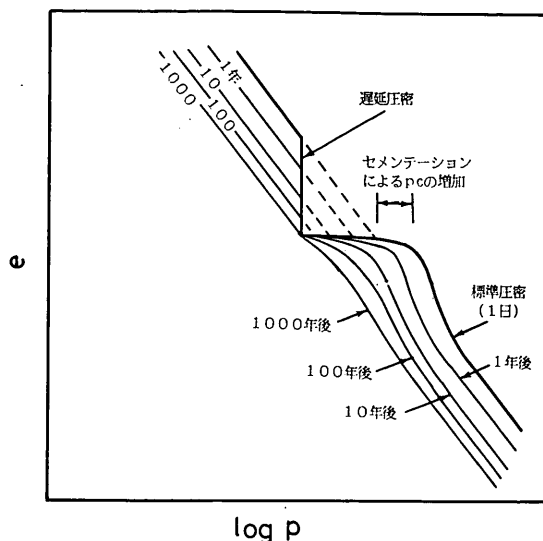


図-44 セメンテーション作用を受けた粘性土の e - $\log p$ 曲線の模式図

$\log p$ 曲線は p_c 付近で外側に膨れ p_c を越えた直後の圧密圧力での圧縮性が大きくなる。二次圧密の進行とともに e - $\log p$ 曲線は下にシフトするが、 p_c 付近での間隙比の飛び出しは、この付近の二次圧縮指数が圧縮指数に対応して大きいことから徐々に緩やかになると考えられる。図-44より、圧縮指数比 r_c の意味が明確になる。セメンテーションが大きくなるほど p_c は e - $\log p$ 曲線から飛び出すため r_c が大きくなる、すなわち r_c は粘土のセメンテーションの程度を表す指数であるといえることができる。

7. 結 論

本研究は自然地盤の年代効果が粘性土の力学特性に及ぼす影響について調べたものである。港湾地域の高成粘土を用いた一連の室内試験の結果、次のような結論を得た。

- (1)年代効果を有する粘性土は、圧縮指数と二次圧縮指数が圧密降伏圧力の付近でピークを示す。年代効果の無い室内再圧密試料の場合は正規圧密領域での圧縮指数と二次圧縮指数はほぼ一定である。
- (2)自然粘土の年代効果を表わす指標として、標準圧密試験の結果から求められる圧縮指数比 r_c が有効であると考えられる。
- (3)圧縮指数比 r_c は、深度とともに増加する傾向を示す。わが国の海成沖積粘土の r_c は1.0~3.0であり、年代効果による構造が顕著に見られるとされて

いるカナダ東部の粘土に比べると小さい。大阪湾の洪積粘性土の r_c は最大6.0の場合もあり、全体として沖積粘土よりも大きい r_c を示す。

(4)75°Cの高温でスラリーから再圧密した粘土試料の力学特性は年代効果をもつと考えられる自然粘土の特性に近いことが圧密試験、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験の結果から確かめられた。このことから、高温で再圧密することは、年代効果を実験室で比較的容易に再現する手段として有力である。

(5)圧縮指数比は粘土のセメンテーション作用の大きさを表す指数であると考えられる。高温で圧密した粘土が自然粘土に類似した力学特性を示すのは圧密中のセメンテーションが促進されたからであると推定される。

8. あとがき

「理論がどの程度実際の問題に適用できるのか」という問いは、土質工学が生まれたときから常に技術者と研究者の間で繰り返されてきた。実際の地盤の挙動が理論から予測されるものと必ずしも一致しないことは、現在でもしばしば指摘されていることである。この不一致の原因としては、地盤自体の複雑性や不均一性など種々の要因が考えられるが、筆者らは自然地盤のもつ年代効果がこれまで十分解明されていないことも大きいと考えている。

本研究は、自然粘土と室内で再圧密した粘土の力学特性の違いを定量的に評価することを試みたものである。残念ながら本研究の内容は、現在のところ設計などの実務に直接結びつくものではない。しかし、今回の成果は実務に携わる技術者にとっても自然粘土の力学挙動の理解に役立つと考えている。今後は各種の粘土を用いた実験データを蓄積し、自然粘土の有する年代効果の影響を設計手法や設計定数の選択に結びつける方向で研究を進めたいと考えている。

おわりに、今回用いた土質試験の多くは前土性研究室 研修生平良聡氏（錦沖繩技術コンサルタント）によって実施されたものである。労を惜しまぬ同氏のご協力に深く感謝したい。

また、今回用いた標準圧密試験の結果は、長期間にわたって土性研究室小川富美子技官によってまとめられていたものの一部である。試験と解析にあたっては川口浩氏（応用地質株式会社）と今岡靖氏（復建調査設計株式

会社）の協力を得た。さらに、本報告を取りまとめるにあたって梅原靖文次長と西村隆夫土質部長から貴重なご討議をいただいた。ここに記して、各位に深く感謝の意を表します。

(1988年11月30日受付)

参 考 文 献

- 1) Bjerrum, L. (1967): Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings, *Geotechnique*, Vol. 17.
- 2) Bjerrum, L.(1973): Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays. State-of-the-Art Report, Session 4, Proc. 8th ICSMFE, Moscow, Vol. 3.
- 3) Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, T. T. and Lancellota, R.(1985): New developments in field and laboratory testing of soils, SOA Report, Proc. of XI ICSMFE, San Francisco.
- 4) Mesri, G and Godlewski, P.M.(1977): Time and stress-compressibility interrelationship, *JGEE, ASCE*, GT5.
- 5) 安川郁夫・嘉門雅史(1987): 粘性土の二次圧密における荷重条件の影響, 土質工学論文報告集, Vol.27, No. 2, pp. 93-106
- 6) 半沢秀郎・岸田隆夫(1982): 非排水強度決定法が安全率に及ぼす影響, 土と基礎, 30巻9号
- 7) Ladd, C. C. and Foott, R. (1974): New design procedure for stability of soft clays, *JGED, ASCE*, Vol. 100, No. GT7, pp. 763-786.
- 8) 三田地利之・藤原幸彦 (1987): Undrained shear behavior of clays undergoing long-term anisotropic consolidation, *Soils and Foundation*, Vol. 27, No. 4, pp. 45-61.
- 9) 嘉門雅史・長尾毅 (1986): 人工的にセメンテーションを与えた粘性土の土質工学的性質について, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp. 389-390.
- 10) 嘉門雅史・佐野郁雄・陶秀珍 (1987): 人工的に粒子間にセメンテーションを与えたカオリン粘土の物理化学的特性, 土木学会第42回年次学術講演会概要集 pp. 302-303.
- 11) 石井一郎・小川富美子・善功企 (1984): 大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質(その2) 物理的性質・圧密特性・透水性, 港湾技研資料 No. 498.
- 12) Mitchell(1967): *Foundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons, Inc', pp. 282.
- 13) 土田孝・水上純一・小林正樹・平良聡(1988): 高温で再圧密した海成粘土の力学特性, 第23回土質工学研究発表会, 宮崎, pp. 515-516.