

上部大阪洪積粘土の力学特性と構造変化

八嶋厚¹・重松宏明²・岡二三生³・長屋淳一⁴

¹正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 工修 岐阜大学技術官 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

³正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 工修 (財) 大阪土質試験所 (〒550-0005 大阪市西区立売堀4-3-2)

ブロックサンプリングによって採取した良質な大阪洪積粘土試料を用いて、一連の室内実験（標準・等方圧密試験、CIU・CID試験）を実施した。これらの実験結果から、標準圧密などの限られた応力経路のみではなく、せん断過程を含む幅広い応力経路での変形・強度・降伏特性を把握した。また、今まで概念的にのみ捉えていた粘土の微視的構造を走査型電子顕微鏡(SEM)を用いることにより可視化し、年代効果によって発達したリンク構造と力学特性が密接に関連していることを理解した。

Key Words: Pleistocene marine clay, undisturbed sample, laboratory test, microstructure, particle fabric, SEM

1. はじめに

近年、関西国際空港やポートアイランド2期工事などのウォーターフロント開発に伴い、大阪湾海底地盤に関する研究は、数多く報告されている。その中でも上部大阪洪積粘土層(Ma12)の工学的性質に関する研究は、関西国際空港の沈下問題をはじめ、いくつか報告されている。Ma12は、第四紀更新世の最終氷河期に堆積した海成粘土で、堅固な地盤と考えられてきた。

中瀬ら^①は、Ma12について、関西国際空港第1期埋立の沈下予測を行い、実測沈下の大きさと速さが予測沈下を大きく上まわることを明らかにした。赤井ら^{②, ③}は、大阪湾に厚く堆積する洪積粘土のボーリング試料を用いて多くの標準圧密試験を行い、“洪積粘土は長い年月の自然堆積圧密(遅延圧密)によって、擬似的な過圧密特性を有することになり、その圧縮性は圧密降伏応力を過ぎた付近で急激に大きくなる”ということを明らかにした。

粘性土の力学特性に年代効果が大きく影響していることを最初に指摘したのはBjerrumである。Bjerrum^④は、Fig.1(a)に示すように、年代効果を有する粘性土と堆積年代の若い粘性土とでは圧縮性が大きく異なることを示し、年代効果における見かけの過圧密(擬似的な過圧密)は、二次圧密と粒子間の固結作用(bonding)によって生じることを示した。その後、自然堆積状態の粘土の圧縮特性に及ぼす年代効果の

影響についての研究は、国内・国外で活発に行われるようになった。土田ら^{⑤, ⑥}は、スラリー状にした粘土を高温再圧密することにより年代効果を人工的に発現させることに成功している。嘉門ら^⑦は、カルシウムとナトリウムをわずかに粘土試料に混入して、人工的にセメントーションを発生させた。

今後、ペイエリア開発および大深度地下開発が積極的に進められる現状においては、標準圧密試験などの限られた応力経路のみの圧縮・降伏特性だけではなく、複雑なせん断過程を含む幅広い応力経路での変形・強度・降伏特性の把握が必要不可欠である。本研究では、不攪乱の大坂洪積粘土を用いて、自然粘土の年代効果および構造変化が力学特性に及ぼす影響について検討した。Fig.1(b)に本研究のフローを示す。

室内実験によって自然粘土の力学特性を詳細に検討するためには、高品質の試料を用いることが大切である。筆者らは、まず最初に、本研究の実験試料であるブロックサンプリングによって採取された洪積粘土と従来から用いられているデニソン型サンプラーによって採取された洪積粘土の実験結果を比較し、サンプリング手法の違いによる試料の品質評価を行った。

次に、Ma12の降伏特性を把握するために、過圧密領域において一連の室内実験を行い、降伏曲面を求めた。ここでいう降伏曲面は、弾塑性理論で明確に定義されている弾性限界曲面ではなく、ひずみが急

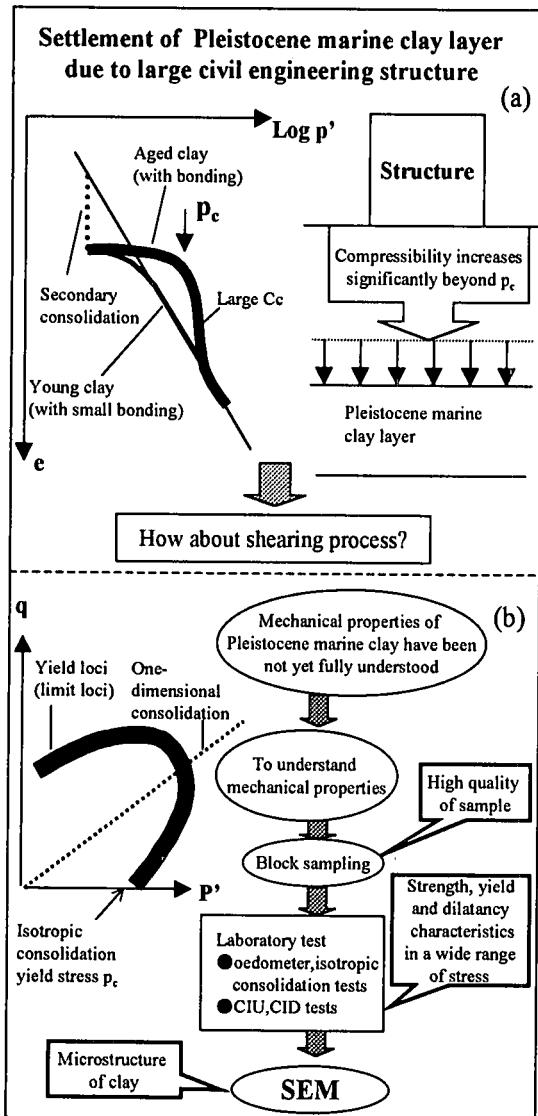


Fig.1 Research flow in this study, (a)problem with respect to the settlement of Pleistocene marine clay and (b)details of research flow.

激に増加する応力の包絡面をもって降伏曲面と定義している。詳しくは3.で述べる。また、Ma12のせん断過程における変形・強度・ダイレイタンシー特性を把握するために、圧密降伏応力をはるかに越える大きな圧力で人為的に粘土の構造を変化させた試料とスラリー状から再圧密して作成した練り返し再圧密試料を用いて室内実験を行った。つまり、自然状態での過圧密粘土、大きな応力履歴を受けた過圧密

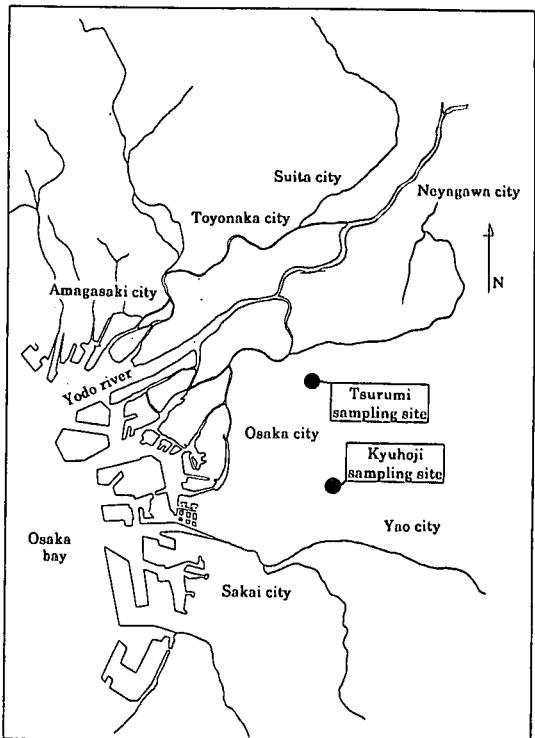


Fig.2 Sampling sites for Osaka Upper-Most Pleistocene marine clay.

粘土、実験室内で人工的に作成した過圧密粘土の3種の過圧密粘土の挙動の違いを詳細に検討した。

最後に、巨視的な力学特性のみならず、実験に用いた3種のMa12過圧密粘土（不擾乱粘土、大きな応力履歴を受けた過圧密粘土、実験室内で人工的に作成した過圧密粘土）の構造を把握するために走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて、その微視的構造を観察的に捉え、微視的な立場からも検討した。

2. 実験試料

(1) 品質の評価

従来から、洪積粘土の採取方法として、デニソン型サンプラーを用いる場合が多く、Ma12もほとんどがデニソン型サンプラーによって採取されている。デニソン型サンプラーは、外管と内管の2重管になっており、地盤に内管を圧入する際、その摩擦によってまわりの地盤が変形するため、サンプリング時に試料の乱れを引き起こし、試料の品質としてはあまり良くないものもあると考えられる。

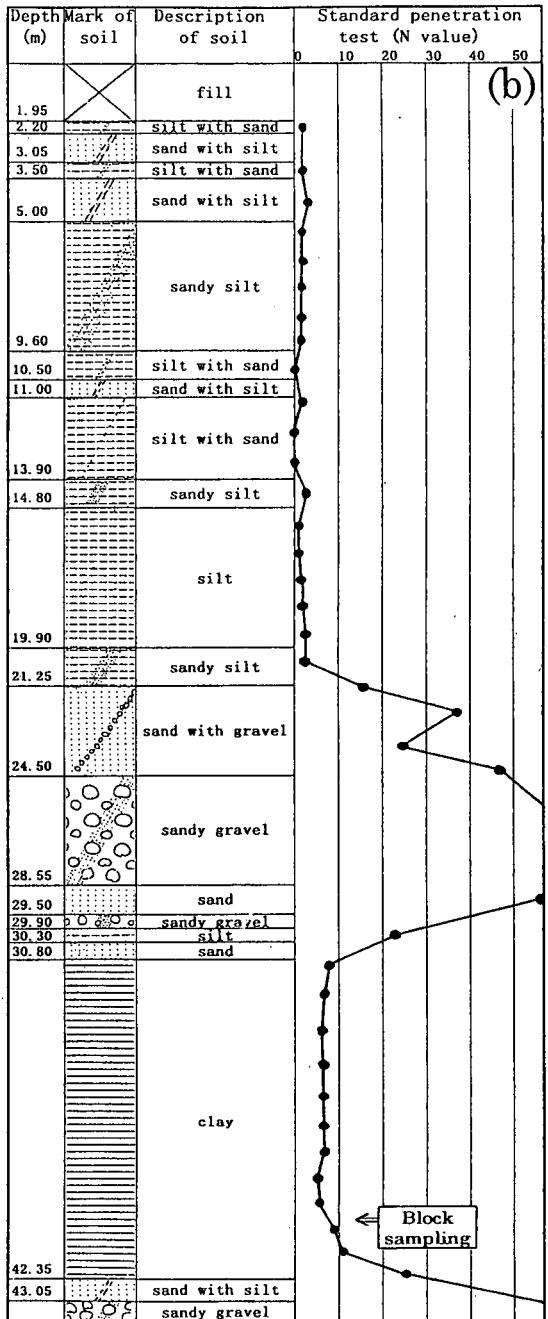
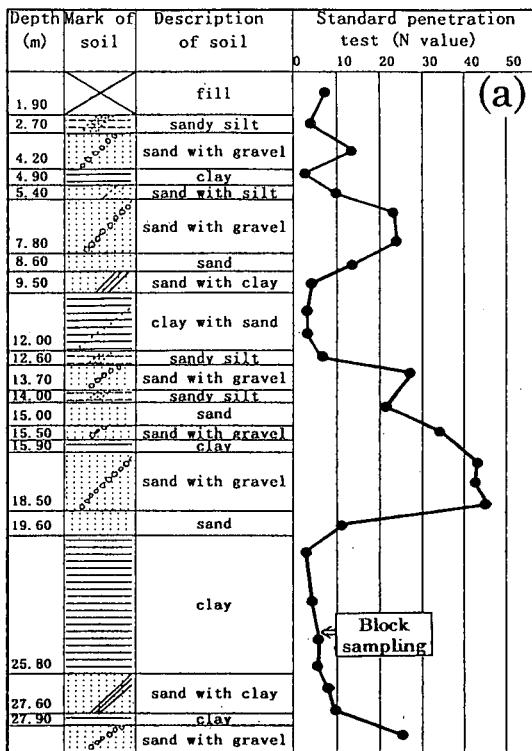


Fig.3 Soil boring logs of (a) Kyuhoji Pleistocene marine clay and (b) Tsurumi Pleistocene marine clay.

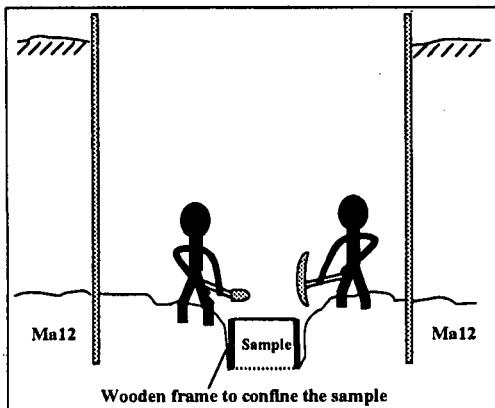


Fig.4 Block sampling technique.

本研究では、サンプリングに伴う乱れを最小限に抑えるために、大阪府八尾市西久宝寺久宝寺緑地公園地内および大阪市鶴見緑地公園地内（寝屋川北部地下河川古川調節池立坑）において、ブロックサン

プリングを実施し、Ma12 層粘土を採取した。前者を久宝寺洪積粘土、後者を鶴見洪積粘土とよぶ。Fig.2 に試料採取地点を、Fig.3 に両者の土質柱状図、Fig.4 にブロックサンプリングの実施方法を示した。Fig.4 からわかるように、木枠で粘土サンプルを拘束し、

Table 1 Index and physical properties of Osaka Pleistocene marine clays.

	Kyuhoji	Tsurumi
sampling depth (m)	G.L.-23.5	G.L.-40.0
effective overburden pressure (kPa)	190	284
pre-consolidation pressure (kPa) (isotropic consolidation test)	333 ~ 343	580
pre-consolidation pressure (kPa) (oedometer test)	412	725
compression index C_c	0.753	1.168
swelling index C_s	0.064	0.060
unconfined compressive strength (kPa) q_u	160 ~ 240	225 ~ 490
density ρ_s (g/cm ³)	2.69	2.72
natural water content (%) w_n	56.9	61.6
liquid limit (%) w_L	78.3	94.5
plasticity limit (%) w_P	28.2	35.0
liquidity index I_L	0.57	0.45
plasticity index (%) I_P	50.1	59.5
activity A_s	0.86	1.08
clay fraction (%)	70.0	67.9
silt fraction (%)	27.0	30.7
sand fraction (%)	3.0	1.4

シャベルなどで地盤の周囲を掘って採取するため、摩擦などによる乱れが少なく、非常に高品質な試料を得ることが出来ると考えられる。Table 1 には、久宝寺・鶴見洪積粘土の物理特性を示している。Table 1 の有効土かぶり圧（久宝寺：190kPa, 鶴見：284kPa）と標準圧密試験で得られた圧密降伏応力（久宝寺：412kPa, 鶴見：725kPa）より、粘土試料の過圧密比は、久宝寺洪積粘土が 2.2、鶴見洪積粘土が 2.6 であり、両者は、過圧密比 2 以上の過圧密状態にあることがわかる。

サンプリング手法の違いによる試料の品質を評価するために、一連の等方圧密非排水三軸圧縮 (CIU) 試験を行った。試料の乱れの程度は、非排水強度の低下によってある程度定性的に評価できることがわかっている。その結果をデニソン型サンプラーによつて採取された大阪湾泉州沖の 4 カ所の Ma12 試料の CIU 試験結果（土田ら⁹が実施したもの）とともに Fig.5 に示す。図の縦軸は、破壊時軸差応力の 2 分の 1 ($q/2$) を圧密応力 (σ_c') で除したものであり、強度増加率に対応するものである。横軸は圧密応力 σ_c' を標準圧密試験で得られた圧密降伏応力 p_c で除したものであり、過圧密比の逆数となっている。

図中の破線は、土田ら⁹が実施した採取場所・採取

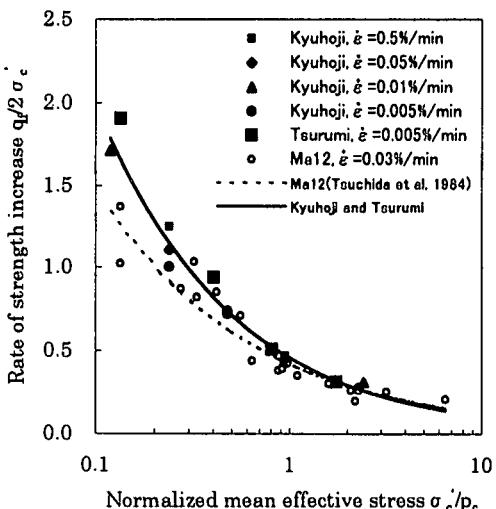


Fig.5 Rate of strength increase with respect to the normalized mean effective stress for Osaka Pleistocene marine clays.

深度の異なる Ma12 試料の試験結果を最小二乗法により近似した曲線であり、実線は、筆者らが実施した久宝寺・鶴見洪積粘土の試験結果を最小二乗法により近似した曲線である。図より、過圧密比が大きいほど強度増加率は大きな値を示していることがわかる。土田らの実施したせん断試験のひずみ速度は 0.03%/min に統一されている。一方、本研究において採用したひずみ速度は 0.005~0.5%/min と幅広い。粘土においては、ひずみ速度が大きくなるほど強度も大きくなる傾向が知られている。したがって、久宝寺洪積粘土について、0.05, 0.5%/min のひずみ速度で実施されたせん断強度は、土田らの実験結果に比べて大きくなることは十分予想される。図からその傾向は容易に見ることができる。一方、土田らの実施した試験より遅いひずみ速度の試験結果についても、やはり強度増加率は、土田らの与えるデータより高位に位置しており、ブロックサンプリングで採取された試料の品質が、少なくともデニソン型サンプラーで採取された平均的な Ma12 試料の品質よりも上位に位置することがわかる。この傾向は、とくに重過圧密領域（横軸の値が 1 よりかなり小さい領域に対応する）で顕著であり、正規圧密領域においては、品質の差異はほとんどなくなる。本研究では、品質のよい洪積粘土試料を用いて、以下の一連の室内実験を行った。

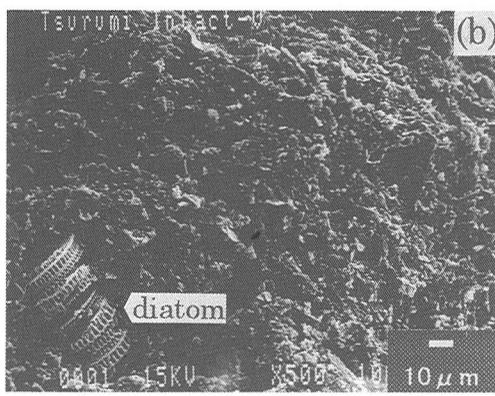
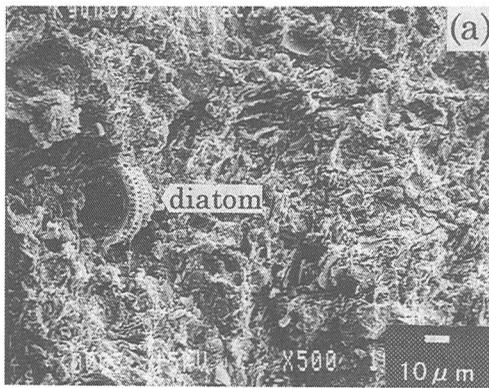


Photo.1 SEM micrographs of (a) Kyuhoji Pleistocene marine clay and (b) Tsurumi Pleistocene marine clay.

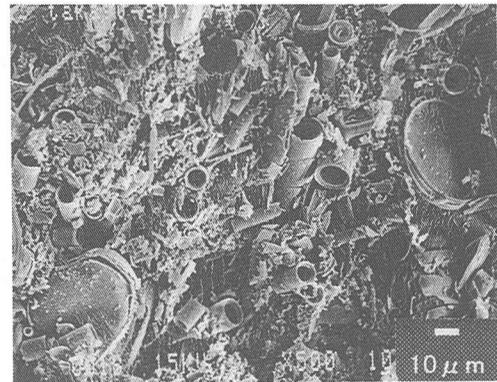


Photo.2 SEM micrograph of Pleistocene sediment with fresh-water diatoms sampled in Gifu Prefecture.

は、この珪藻遺骸の含有量の差が一因であろう¹⁰⁾。

Photo.2 は、岐阜県北部に広く分布する第四紀更新世に堆積した珪藻土の鉛直断面の電子顕微鏡写真を示している。写真より、土粒子があまり含まれておらず、ほとんどが淡水性珪藻遺骸で構成されていることがわかる。**Fig.6** は、久宝寺・鶴見洪積粘土および **Photo.2** に示した珪藻土の等方圧密試験結果である。一般に、珪藻は数十～数百 μm の単細胞藻類で、多くの水を含んでいる。**Fig.7** は、珪藻土を $420 \mu\text{m}$ のふるいで裏ごしを 1 回、3 回および 5 回行った後の液性限界試験結果である。図から、何回も裏ごしすると、珪藻殻が破壊され、珪藻遺骸の内部に含まれる間隙水が多く排出され、液性限界が減少していく。つまり、珪藻殻は外力によって物理的に破壊されやすいことがわかる。したがって、ほとんどが珪藻遺骸で占められている珪藻土は、初期間隙比および降伏点を過ぎてからの圧縮性が非常に大きく、圧縮指数 C_c は久宝寺・鶴見洪積粘土と比べて、2 倍以上の大きな値を示している。また、同じ Ma12においても、鶴見洪積粘土は、久宝寺洪積粘土よりも珪藻遺骸が多く含まれているため、 C_c が大きな値を示している。田中ら¹⁰⁾が指摘しているように、大阪湾の洪積粘土中に存在する珪藻遺骸の含有量は、粘土の圧縮性を大きく支配しており、今後、大阪洪積粘土の力学モデルを構築するにあたっては珪藻遺骸が力学特性に及ぼす影響の定量化が課題となろう。

3. 上部大阪洪積粘土の降伏特性

Ma12 の降伏曲面を求めるために、標準圧密試験、

(2) 硅藻

実験に用いた試料中には、多くの微細な単細胞藻類(硅藻)の遺骸が沈積しているのを電子顕微鏡写真によって確認した(**Photo.1**)。(a)が久宝寺洪積粘土で(b)が鶴見洪積粘土の鉛直断面の電子顕微鏡写真である。直径約 $50 \mu\text{m}$ の珪藻遺骸の内部に含まれる間隙水¹⁰⁾によって、両洪積粘土とともに自然含水比が高くなっている。また、写真(a)と(b)に見られるのは同じ種類の珪藻遺骸で、両洪積粘土中に多く確認されたことから、久宝寺・鶴見洪積粘土は、同じような環境のもとで堆積したことが推測される。珪藻遺骸は、鶴見洪積粘土の方が久宝寺洪積粘土よりも多く存在していることをたくさんの電子顕微鏡写真から確認した。鶴見洪積粘土の有効土かぶり圧が久宝寺洪積粘土の有効土かぶり圧よりもかなり大きいにもかかわらず、鶴見洪積粘土の自然含水比が大きいの

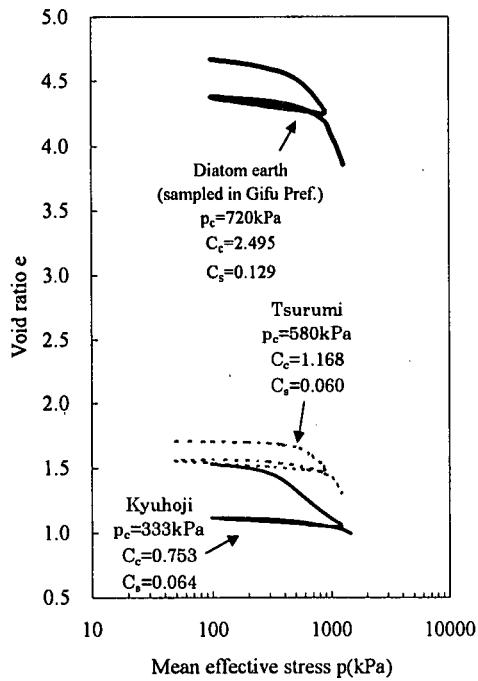


Fig.6 Experimental results of isotropic consolidation tests on Osaka Pleistocene marine clays and Gifu Pleistocene diatom earth.

等方圧密試験、等方圧密非排水三軸圧縮(CIU)試験および等方圧密排水三軸圧縮(CID)試験を実施した。ここでいう降伏曲面は、弾塑性理論で明確に定義されている狭義の弾性限界曲面ではなく、ひずみが急激に増加する応力の包絡面をもって降伏曲面と定義している。したがって、求められた降伏曲面の内側でも小さな塑性ひずみは生じていることに注意しておく必要がある。広義の降伏曲面、つまり、工学的に意味のある限界曲面である。ひずみ速度として、CIU試験においては、 $0.005\sim0.01\%/\text{min}$ を、CID試験においては、標準圧密試験結果から得られた透水係数を考慮して、 $0.0007\%/\text{min}$ (=1.0%/day)を採用した。

Fig.8は、久宝寺・鶴見洪積粘土の標準・等方圧密試験、CIU・CID試験の結果から得られた降伏曲面(限界曲面)である。なお、一連の実験において、ひずみが急激に増加し始める境界を求ることはしばしば困難である。本研究では、等方応力-体積ひずみ関係、軸差応力-軸ひずみ関係における最大曲率点をCasagrande法により求め、その点を降伏点(限界点)と仮定した。ただし、重過圧密領域での軸差

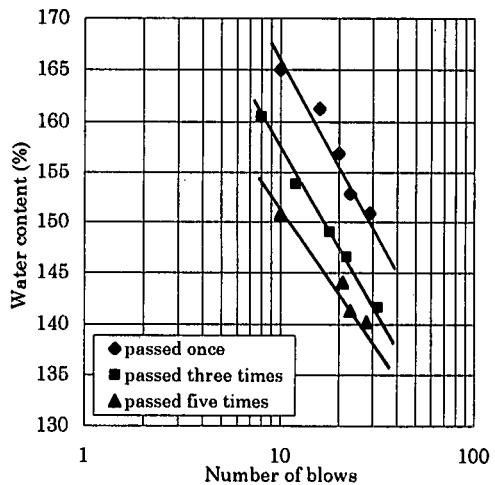


Fig.7 Liquid limit chart for the fine contents of diatom earth passed through $420 \mu\text{m}$ sieve by a putty knife.

応力-軸差ひずみ関係については、ピーク強度までほぼ直線的に応力-ひずみ関係が立ち上がるため、Casagrande法により降伏点を求めることが困難である。したがって、応力のピーク点を降伏点と仮定した。降伏曲面がある幅をもっているのは、せん断過程におけるひずみ速度の違いによって、降伏応力が変化するためである。つまり、ひずみ速度が大きくなるにしたがって、降伏曲面は外側に膨らむ。Fig.8より、久宝寺・鶴見洪積粘土の降伏曲面の形状は、類似している。両洪積粘土は、地盤の応力状態に依存した異方的な形状を有していることがわかる。

Fig.9は、筆者らが既に求めた日本を代表する沖積粘土(八郎潟、有明、御幣島、鶴見の各粘土)の降伏曲面(この降伏曲面も本研究と同様、ひずみが急激に増加する応力の包絡面)を示す¹⁰⁾、洪積粘土と比較した。縦軸と横軸は、それぞれ等方圧密試験から求まる降伏応力で正規化してある。Fig.9より、沖積粘土と洪積粘土の降伏曲面の形状は、試料採取地点によってばらつきがあるものの、地盤の応力状態に依存した異方的な形状を有していることがわかる。

4. せん断過程における力学特性と構造変化

(1) 不搅乱試料の力学挙動

Fig.10は鶴見洪積粘土、Fig.11は久宝寺洪積粘土のひずみ速度 $0.005\%/\text{min}$ 、過圧密比1.0から5.9におけるCIU試験の結果である。ここでは、等方圧密降伏

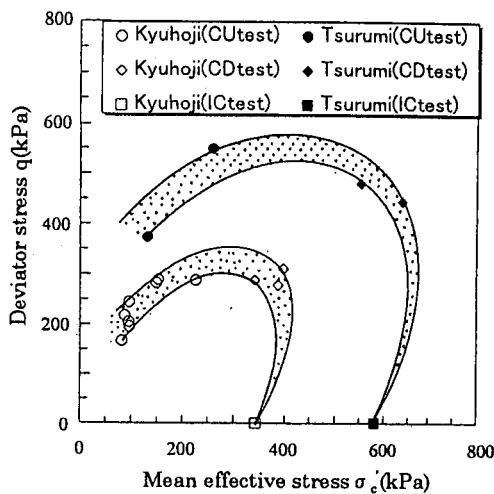


Fig.8 Limit loci of Osaka Pleistocene marine clays.

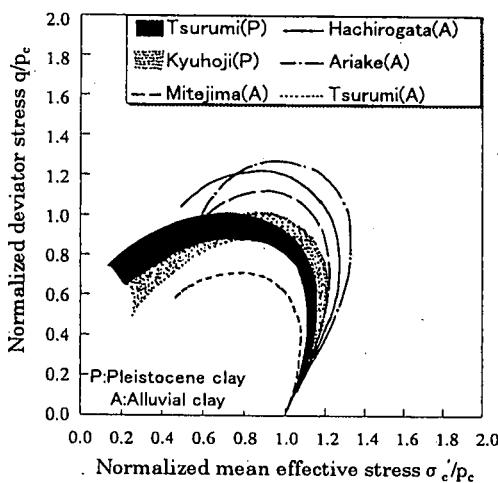


Fig.9 Normalized limit loci of Japanese clays with respect to the isotropic pre-consolidation pressure.

応力（鶴見洪積粘土：580kPa, 久宝寺洪積粘土：343kPa）を基準にして過圧密比を決定している。したがって、過圧密比 1.0 は、初期の等方圧密降伏応力を再圧密していることを意味する。

Fig.10 の応力-ひずみ関係から、どの過圧密比においてもピーク点が明確に表れ、非常に脆性的な挙動を示していることがわかる。重過圧密領域（過圧密比 5.9）から正規圧密領域（過圧密比 1.0）に向かう

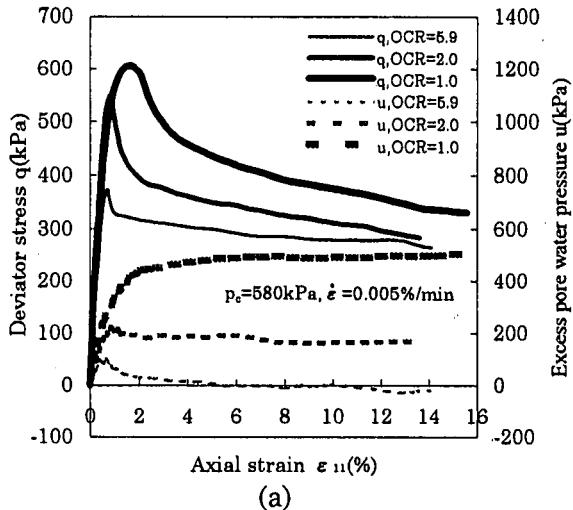
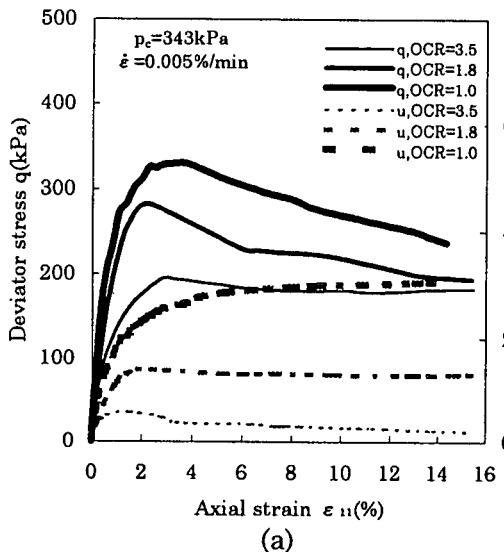
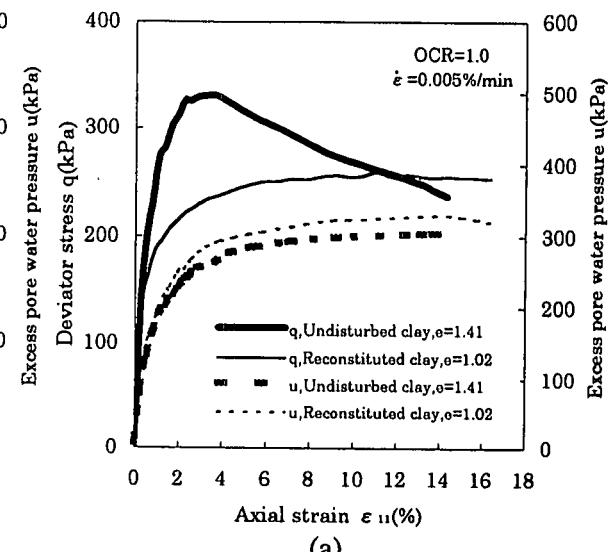


Fig.10 Experimental results on undisturbed Tsurumi Pleistocene marine clay, (a)stress - strain relations, pore water pressure - strain relations and (b)effective stress paths.

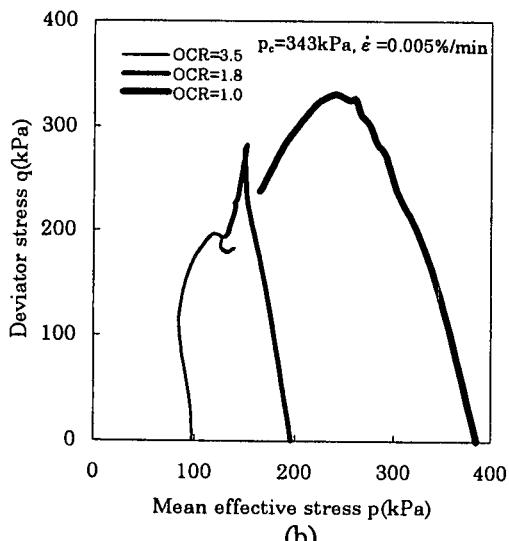
にしたがって、ピーク強度は大きくなっている。また、過圧密比 1.0 の間隙水圧の発生量は、他の過圧密比 2.0 および過圧密比 5.9 と比べて非常に大きいことがわかる。Fig.10 の有効応力経路から、正規圧密領域においては、大きな負のダイレイタンシーを、重過圧密領域においては、正のダイレイタンシーを示し、ひずみ軟化を伴いながら最後には残留強度に至ることがわかる。



(a)

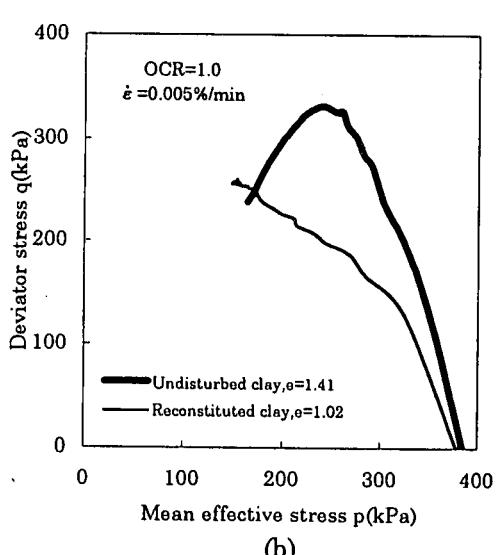


(a)



(b)

Fig. 11 Experimental results on undisturbed Kyuhoji Pleistocene marine clay, (a)stress - strain relations, pore water pressure - strain relations and (b)effective stress paths.

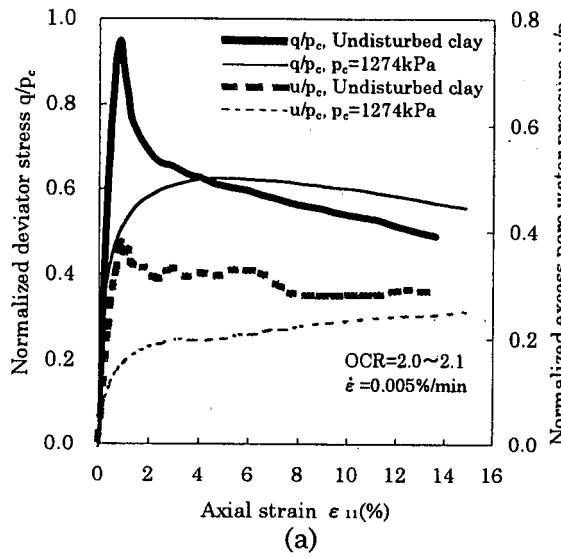


(b)

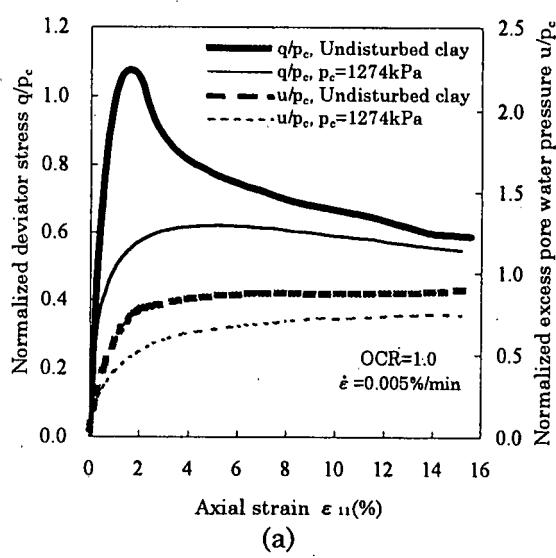
Fig. 12 Experimental results on normally consolidated undisturbed and reconstituted Kyuhoji Pleistocene marine clay, (a)stress - strain relations, pore water pressure - strain relations and (b)effective stress paths.

Fig. 11 に久宝寺洪積粘土の応力-ひずみ関係と有効応力経路を示す。鶴見洪積粘土と同じようにひずみ硬化-軟化型の応力-ひずみ関係を示している。しかし、両洪積粘土の応力-ひずみ関係を詳細に比較すると、すべての過圧密比において、鶴見洪積粘土は久宝寺洪積粘土と比べて、ピーク点を過ぎてからのひずみ軟化の程度が大きく、より脆性的な挙動を示すことが理解できる。前述 Fig. 6 の $e-\log p$ 曲線

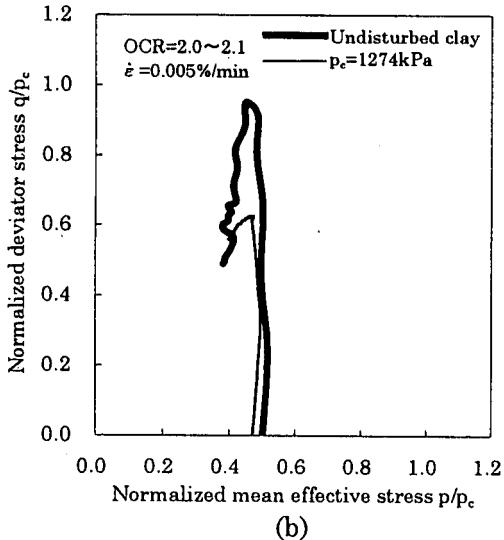
に示す珪藻土の C_e が非常に大きいことから、珪藻遺骸の含有量がひずみ軟化の程度に大きく関与していることが予想される。鶴見洪積粘土は久宝寺洪積粘土に比べて多くの珪藻遺骸を含んでおり、これがひずみ軟化過程における挙動の違いの一因と考えられる。



(a)

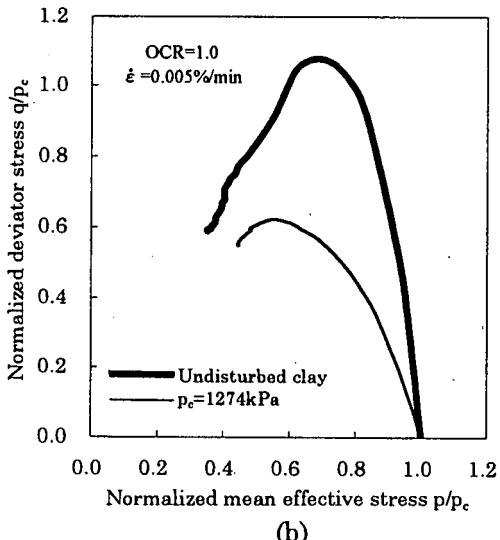


(a)



(b)

Fig.13 Experimental results on over consolidated undisturbed sample and sample with high stress history (Tsurumi Pleistocene marine clay), (a)stress - strain relations, pore water pressure - strain relations and (b)effective stress paths.



(b)

Fig.14 Experimental results on normally consolidated undisturbed sample and sample with high stress history (Tsurumi Pleistocene marine clay), (a)stress - strain relations, pore water pressure - strain relations and (b)effective stress paths.

(2) 不攪乱試料と練り返し再圧密試料の挙動の差異

沖積粘土のような若い粘土は、粒子間結合力が小さく、骨格構造も非常に弱い。これに対して洪積粘土は、第四紀更新世に堆積し、二次圧密によって bonding が発達し、過圧密状態となっている。実験室

では洪積粘土のような強固な骨格構造を人工的に再現することは非常に困難である。本研究においては、bonding の消失が粘土の力学特性にどのような影響を与えるのかを検討するために、不攪乱試料と練り返し再圧密試料（以後、再圧密試料とよぶ）のそれぞれを用いた CIU 試験を実施した。

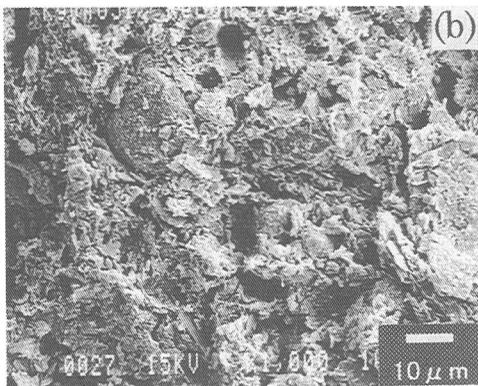
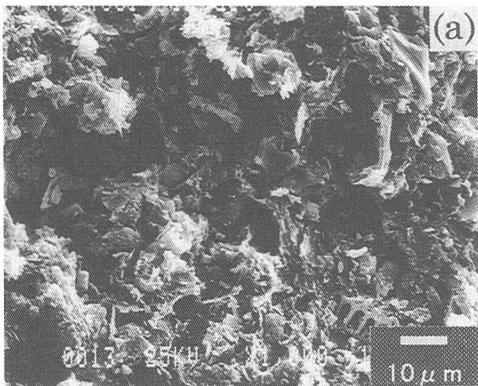


Photo.3 SEM micrographs of Kyuhoji Pleistocene marine clay,
(a)undisturbed sample and (b)reconstituted sample.

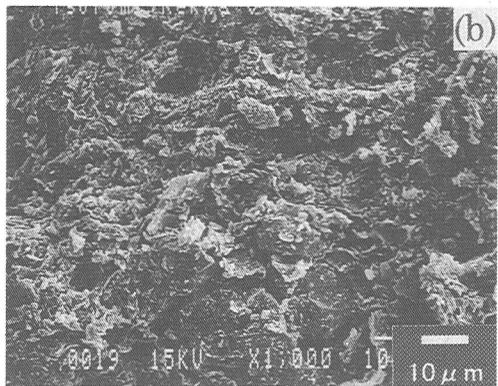
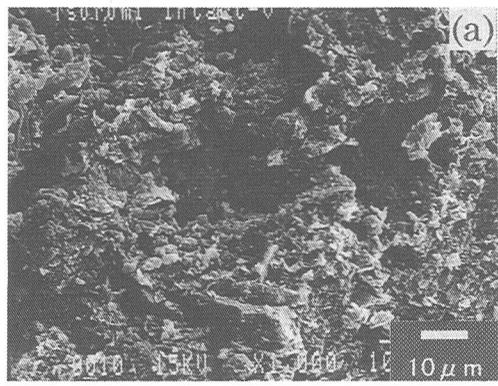


Photo.4 SEM micrographs of Tsurumi Pleistocene marine clay,
(a)undisturbed sample and (b)sample with high stress
history.

再圧密試料の作成方法は、久宝寺洪積粘土中に含まれている貝殻をすべて取り去り、脱気水を混ぜて液性限界の2倍の含水比(=約150%)で10日間攪乱した。その後、2mmのふるいで不純物を取り去り、圧密容器に入れて段階的に約100kPaまで圧密した。

Photo.3に不攪乱試料および再圧密試料の鉛直断面の電子顕微鏡写真を、**Fig.15(a)(b)**にそれらの概念図を示す。**Photo.3(a)**に示した不攪乱試料(間隙比 $e=1.50$)には、数十 μm まで及ぶ大きな間隙が存在し、大きな版状の土粒子が数多く見られる。また、概念図**Fig.15(a)**に示した版状土粒子相互の連結(リンク)が容易に確認できる^{12), 13)}。一方、**Photo.3(b)**に示した再圧密試料(間隙比 $e=1.38$)においては間隙の大きさは高々10 μm 程度までであり、不攪乱試料に見られた大きな版状土粒子は見られない。また、概念図**Fig.15(b)**に示したように、小さい土粒子が集合してアグリゲーションを形成しており、練り返し過程でリ

ンクが破断され、間隙が小さくなっている。**Fig.12**は、久宝寺洪積粘土の不攪乱試料と再圧密試料のCIU試験結果を示している。久宝寺洪積粘土の等方圧密による圧密降伏応力は340kPa程度であるが、これより若干大きい392kPaで不攪乱試料および再圧密試料を等方圧密した後、ひずみ速度0.005%/minで非排水せん断試験を実施した。図中の間隙比 e の値は圧密終了後のものである。応力-ひずみ関係より、不攪乱試料については、ピーク強度に達した後、ひずみ軟化挙動を示し、最終的に残留状態に達する。このひずみ軟化過程で大きな過剰間隙水圧が発生しており、**Photo.3(a)**および概念図**Fig.15(a)**で示したようにリンクが切断・破壊されていくことが理解できる。一方、再圧密試料はせん断開始以前の状態において既にリンク構造が破壊されているため、最終破壊状態に至るまでせん断応力は増え続け、ひずみ軟

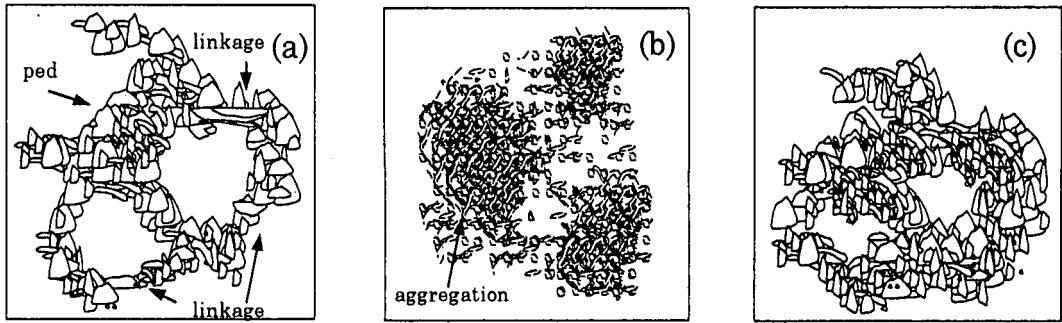


Fig.15 Schematic representation of clay structure, (a)undisturbed sample, (b)reconstituted sample and (c)sample with high stress history.

化挙動を示さず、非常に延性的な挙動を示す。ダイレイタンシー特性については、再圧密試料は、同じ軸差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)において、不攪乱試料よりも大きな負のダイレイタンシーを示す。

以上のことから、洪積粘土は年代効果によって発生した bonding により、自然状態においては Photo.3(a)および概念図 Fig.15(a)のようなリンクによって囲まれた大きな間隙構造を有しているが、せん断によってひとたびこのリンクが破壊されると、非常に大きな間隙水圧の発生をともなって脆的に破壊することがわかる。これに対して再圧密試料は、練り返し過程においてリンク構造が完全に破壊 (Fig.15(b)) されるため、粒子間の摩擦のみで強度が発揮され、ひずみ硬化挙動が支配的となる。また、せん断開始前の間隙比 e は、練り返し再圧密試料の方が不攪乱試料よりも小さいにも関わらず、最大軸差応力は、不攪乱試料の方が 30%ほど大きな値を示している。したがって、間隙比が同じ状態での粘土を考えれば、強度の差はさらに大きくなるものと思われる¹⁴⁾。

(3) 大きな圧密応力履歴がせん断特性に及ぼす影響

埋立などによって圧密降伏応力よりも大きな圧密応力履歴を受けた洪積粘土は、せん断過程においてどのように挙動するのであろうか。この問題を解決するために、鶴見洪積粘土（等方圧密による圧密降伏応力が 580kPa）を用いて以下の実験を行った。有効土かぶり圧とほぼ同じ応力 (294kPa) で圧密された供試体 ($OCR=2$) と、圧密降伏応力の 2 倍以上の圧密応力 (1274kPa) で圧密した後、やはり $OCR=2$ まで膨潤させた供試体について非排水せん断試験を行った。

両供試体の鉛直断面の顕微鏡写真を Photo.4 に示し、大きな圧密応力履歴を作用させた試料の概念図を Fig.15(c) に示す。Photo.4(a) に示した不攪乱試料の間隙比は $e=1.69$ であり、Photo.4(b) に示した 1274kPa まで圧密した試料の間隙比は $e=1.28$ であった。Photo.4(a)から理解できるように、不攪乱試料の間隙は 20~30 μm に及んでいるが、Photo.4(b) および概念図 Fig.15(c) に示したように、大きな圧密応力を作用させた試料では、間隙のまわりのリンクがかなり破壊され、間隙が小さくなっていることがわかる。しかしながら、版状の土粒子は存在しており、再圧密試料 (Photo.3(b), 概念図 Fig.15(b)) のようにリンクが完全に破壊され土の構造がまったく違うものとなってしまったわけではない。

不攪乱試料と大きな圧密応力を作用させた試料の実験結果を、それぞれの等方圧密降伏応力で正規化したものとして Fig.13 (過圧密比 2.0 の場合) に示す。応力-ひずみ関係から、有効土かぶり圧で圧密した供試体 (不攪乱試料) は、ピーク強度に達した後、急激な強度低下を示している。一方、大きな圧密応力を受けた供試体は、同じ過圧密比であるにもかかわらず、かなり延性的な挙動をしていることがわかる。しかし、Photo.4(b) および概念図 Fig.15(c) より、リンク構造が完全に破壊しているわけではないので、若干のひずみ軟化挙動が見うけられる。

Fig.14 は、鶴見洪積粘土の不攪乱試料と大きな圧密応力を作用させた試料 (1274kPa) の過圧密比 1.0 における CIU 試験の結果で、Fig.13 と同じように縦軸を等方圧密降伏応力で正規化した。両者の圧密終了時の間隙比は、不攪乱試料が 1.64 で、1274kPa まで圧密した試料が 1.20 である。過圧密比 2.0 の場合と同じように、大きな圧密応力を作用させた試料は、

ひずみ硬化を示すひずみの領域が大きく、不攪乱試料と比べて明確なピーク点が表れず、非常に延性的な挙動を示している。有効応力経路については、構造が変化した粘土は、不攪乱試料よりも間隙比が小さいにも関わらず、ピーク強度に達するまでは、大きな過剰間隙水圧が発生している。ピーク強度を過ぎたあたりから不攪乱試料の間隙水圧の発生が大きくなり、残留状態においてはほぼ同じ間隙水圧が発生している。

以上のことから、埋立などによって圧密降伏応力よりも大きな応力で圧密された洪積粘土は、年代効果による bonding 等によって発達したリンク構造（概念図 Fig.15(a)）が部分的に破壊（概念図 Fig.15(c)）され、かなり延性的な挙動を示すようになることがわかった。しかし、練り返し再圧密試料のようにほぼ完全にリンク構造が破壊（概念図 Fig.15(b)）されるわけではないことも明らかとなった。

5. 結論

本研究で得られた主な結論は、以下のとおりである。

① 実験試料の品質比較のため、ブロックサンプリングによって採取された試料（ブロックサンプル）と、従来のデニソン型サンプラーによって採取された試料（デニソンサンプル）を用いた三軸圧縮試験を比較した。その結果、ブロックサンプルは、従来のデニソンサンプルに比べて乱れが少なく、高品質であることがわかった。ただし、実験にデニソンサンプルを用いる場合、その応力レベルが圧密降伏応力を越えるような大きな応力領域であれば、せん断強度に影響は少ない。また、両サンプルの乱れの程度の差は、重過圧密領域に向かうにしたがって大きくなることから、圧密降伏応力近傍もしくはそれ以下の応力レベルにおいて実験を行う際は、ブロックサンプルを用いるのが望ましい。

② 久宝寺・鶴見洪積粘土内部には、同じ種類の珪藻遺骸が存在する。この存在が自然含水比および降伏後の圧縮性に深く関わっている。

③ 久宝寺・鶴見洪積粘土の降伏曲面（限界曲面）の形状は、地盤の応力状態に依存した異方的な構造を有している。

④ 練り返し再圧密試料においては年代効果による bonding により発達した土の構造がほぼ破壊され、せん断過程において延性的挙動を示すことがわかった。実験室において人工的に作成した試料では、洪積粘土のリンク構造とそれに囲まれた大きな間隙構造の再現は難しい。練り返し再圧密粘土は土の構造

が異なるため、粒子間の摩擦のみで強度が発揮され、ひずみ硬化挙動が支配的となる。したがって、土の構造が大きく変化する練り返し再圧密粘土で自然地盤の原位置における強度を評価することは、実地盤のせん断強度を過小評価する可能性がある。

⑤ 圧密降伏応力よりも大きな応力で圧密すれば、洪積粘土の発達したリンク構造が部分的に破壊され、せん断過程において挙動がかなり延性的になることがわかった。土の構造が変化した粘土試料は、不攪乱試料よりも間隙比が小さいにも関わらず、ピーク強度に至る前に大きな過剰間隙水圧が発生することがわかった。

⑥ 不攪乱洪積粘土のせん断時の挙動は非常に脆性的で、ピーク強度を超えてせん断を継続すると、土の構造の変化とともに急激な強度低下を示すことがわかった。

本研究では、上部大阪洪積粘土(Ma12)について、自然状態での過圧密、圧密降伏応力よりも大きな応力履歴を受けた過圧密、実験室内で人工的に作成した過圧密粘土の3種の過圧密粘土の力学特性の違いについて詳細に検討した。年代効果によって発達したリンク構造等のミクロな情報と、応力-ひずみ関係等のマクロな情報が密接に関連していることが明らかとなった。今後、洪積粘土の力学特性をモデル化していく上で、これらの実験成果が一助になれば幸いである。

謝辞：走査型電子顕微鏡を用いた粘土の構造撮影に当たって、京都大学防災研究所嘉門雅史教授、勝見 武助手および井 真宏研究員の多大な協力を得ました。また、顕微鏡操作の基本的知識を御示していただきただけのみならず、撮影された写真について有意義な議論も数多く頂きました。ここに、記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 中瀬明男：関西国際空港の沈下問題、土木学会論文集、第454号／III-20, pp.1~9, 1992.
- 2) 赤井浩一、佐野郁雄：大阪上部洪積層粘土の長期圧密特性、土と基礎、29巻、3号、pp.43~47, 1981.
- 3) Akai, K., Kamon, M., Sano, I. and Soga, K.: Long-term consolidation characteristics of dilluvial clay in Osaka Bay, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.4, pp.61~74, 1991.
- 4) 赤井浩一：大阪湾海底地盤の土質工学的諸問題、土木学会論文集、第463号／III-22, pp.1~14, 1993.
- 5) Bjerrum, L.: Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of

- buildings, *Geotechnique*, Vol.17, No.2, pp.81～118, 1967.
- 6) 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.
 - 7) 土田 孝, 小林正樹, 水上純一, 田中政典 : 高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現, 港湾技術研究報告, 28巻, 1号, pp.121～147, 1989.
 - 8) 嘉門雅史, 長尾 肇 : 人工的にセメント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学術講演集, pp.389～390, 1986.
 - 9) 土田 孝, 菊池喜昭, 中島謙二郎, 小林正樹 : 大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質(その3) 静的せん断特性, 港湾技研資料, No.498, pp.87～114, 1984.
 - 10) 田中洋行, Locat,J. : 塑性指数に関する再考察, 土と基礎, Vol.46, No.4, pp.9～12, 1998.
 - 11) Adachi, T., Oka, F., Hirata, T., Hashimoto, T., Nagaya, J., Mimura, M. and Pradhan, T.B.S. : Stress-strain behavior and yielding characteristics of Eastern Osaka clay, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.3, pp.1～13, 1995.
 - 12) 鬼塚克忠, 根上武仁 : 有明粘土の乱さない試料および再圧密試料の微視的土構造, 土と基礎, Vol.46, No.4, pp.17～20, 1998.
 - 13) 立石義孝, 鬼塚克忠, 廣澤茂, 根上武仁 : 珪藻土の微視的構造と力学特性, 土木学会論文集, 第 610 号／III-45, pp.19～29, 1998.
 - 14) 亀井健史・常田 亮 : 不攪乱試料と練返し再圧密試料の非排水せん断特性の比較, 土木学会論文集, 第 469 号／III-23, pp.135～138, 1993.

(1998. 8. 10 受付)

MECHANICAL BEHAVIOR AND MICRO-STRUCTURE OF OSAKA UPPER-MOST PLEISTOCENE MARINE CLAY

Atsushi YASHIMA, Hiroaki SHIGEMATSU, Fusao OKA and Jun-ichi NAGAYA

This paper studies an importance of yielding characteristic and an effect of the microstructure on mechanical behavior of Osaka Upper-Most Pleistocene marine clay. Clay samples undertaken by the block-sampling technique are found to have higher quality than Pleistocene clay samples obtained by the tube-sampling technique. The following conclusions are obtained from the present study: 1.Yielding properties of Osaka Pleistocene marine clays from the two sites are anisotropic. 2.The Pleistocene marine clay has a linkage structure with significant bonding, which induces more brittle behavior, higher compressive strength and higher stiffness than the disturbed and reconstituted samples.