

岐阜県奥美濃地方に分布する珪藻土の 工学的性質と切取のり面安定

重松宏明¹・八嶋厚²・西尾宗雄³・坂保共⁴・畑中信吾⁵

¹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)

²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)

³正会員 日本道路公団北陸支社富山管理事務所 (〒939-8214 富山市黒崎 439)

⁴日本道路公団中部支社岐阜工事事務所 (〒500-8384 岐阜市藪田南 1-2-3 ヲビスタビル)

⁵大日本土木株式会社 海外事業部 (〒162-8410 東京都新宿区市谷田町 2-35)

岐阜県奥美濃地方に分布する珪藻土は、その工学的特殊性によって、しばしば難工事を引き起こす。当該地域による今後の円滑な地域開発もしくは地盤防災のためには、珪藻土の工学的性質を明確にしておくかなければならない。そこで本研究においては、まずブロックサンプリングによって採取した良質な珪藻土試料を用いて、一連の室内実験を実施し、珪藻土のスレーキング特性、コンシステンシー特性、降伏特性、せん断過程における変形・強度・ダイレイタンス特性および変形・強度の異方性を明らかにした。また、SEM 観察によって試料の微細構造を可視化し、珪藻土の特異性を把握した。さらに、珪藻土の工学的性質に基づいて、切取のり面安定化対策を詳細に検討した。

Key Words: diatomaceous earth, undisturbed sample, laboratory test, slaking, consistency, SEM, slope stability

1. 緒言

珪藻土 (diatomaceous earth) とは、珪藻の死後に体内の有機成分が腐敗・分解して、珪殻のみが水底に沈積した堆積土をいう。珪藻は、0.01~1mm の大きさの単細胞藻類で、淡水域から海水域にわたる様々な環境に生息しており、珪酸体よりなる丈夫な殻をもつため、化石として水域に堆積する。また、珪藻がそれぞれ特定の生息環境をもつことから、珪藻遺骸 (化石) は古環境復元の指標として用いられることが多い¹⁾。珪藻土の特徴は、自然含水比が液性限界よりも高いことが多いため、人為的攪乱によって土が容易に流動化しやすい性質をもっていることである。また、圧密降伏後の圧縮性も非常に大きく、天候の変化などによる乾湿の繰返しによって簡単に劣化する²⁾。例えば **Photo.1** は、岐阜県奥美濃地方に分布する珪藻土地盤の機械化施工によるトラフィカビリティーの低下を表している。トラフィカビリティーの低下は、土質材料の繰返しせん断による強度低下、荷重重による沈下等によって引き起こされる。現在、土木工事に伴う珪藻土地盤の不安定化は大変大きな問題となっている。しかしながら、

珪藻土に関する報告は、粘性土と比較して極端に少ない。以下に、珪藻土および珪藻質軟岩について、系統だてて実施されてきた研究例を紹介しておく。

立石^{3),4)}は、第三紀鮮新世後期から第四紀更新世初期にかけて、大分県杵築地方の湖水底に堆積した淡水性の珪藻土 (等方圧密降伏応力: 1,893kPa, 土粒子の密度: 2.07g/cm³, 自然含水比: 137~169%, 初期間隙比: 3.20) を用いて、水浸試験、一軸圧縮・一面せん断・圧裂引張り試験、等方圧密試験および等方圧密非排水三軸圧縮 (CU) 試験 (拘束圧: 49~8,336kPa) を実施した。また、CU 試験後の供試体を用いて、水銀圧入型ポロシメーターによる細孔分布測定試験を実施し、珪藻土の構造特性と力学挙動の関係を調べた。さらに、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察を実施し、円筒形 (細孔) と仮定した土の間隙径をマイクロポア (0.001mm 以下)、メソポア (0.001~0.01mm) およびマクロポア (0.01mm 以上) に分類し、破壊に至る構造モデルを提案した。結果を要約すると、

①珪藻土の間隙は、珪藻遺骸と珪藻遺骸の相互間によるメソポアと珪藻遺骸自身の微細孔のマイクロポアにより構成され、粘性土にみられるマクロポアは

ほとんど存在しない。

②乾燥した珪藻土を水に浸すと勢いよく水を吸収し、層理に沿ってはく離して著しいスレーキング現象を生じる。

③ポロシメーターで得られる間隙比と圧密応力との関係は、等方圧密曲線と高い相関を示す。

④CU試験の結果、力学挙動は拘束圧に依存し、過圧密領域では脆性的な挙動を、正規圧密領域では延性的な挙動を示す。また、正規圧密領域において、過剰間隙水圧の上昇が著しい。

⑤拘束圧が増大することにより、珪藻遺骸は徐々に破碎され、遺骸自身のマイクロポアの減少がメゾポアの減少より顕著になる。

一方、前川⁹⁾は、第三紀中新世後期に能登半島珠洲市飯塚に堆積した海成の珪藻質軟岩（等方圧密降伏応力：2,646kPa、土粒子の密度：2.20～2.26 g/cm³、自然含水比：109～127%、初期間隙比：2.49～2.71）を用いて、一軸圧縮・圧裂引張試験、等方圧密試験、K₀圧密試験（三軸セルにて側方変位を制御）、CU試験（拘束圧：490～6,860kPa）、等方圧密排水三軸圧縮（CD）試験などを実施した。これらの実験結果から得た結論を要約すると、

①未風化状態における珪藻質軟岩は、セメンテーションの発達により、非常に多孔質な材料であるにも関わらず、強固である。

②CU試験の挙動は、拘束圧に依存し、典型的な過圧密・正規圧密粘土の挙動に類似する。また、せん断中の過剰間隙水圧の発生状況は、最大主応力差時よりも残留応力時で上回っている。

③過圧密領域内におけるCD試験の応力-ひずみ関係には、明瞭な降伏点が存在し、初期降伏曲面の形状は、Roscoeらが提案した“Cam-clayモデル”の降伏関数に近似できる。

④珪藻質軟岩の一軸圧縮強度は、供試体を切り出した方向に関係なく一定であるが、変形係数 E_{50} は堆積面と平行に切り出した供試体のものが最も大きくなる。

⑤K₀圧密試験による珪藻質軟岩の挙動は、降伏前の弾性領域では軸応力（鉛直方向）の変位のみが卓越し、降伏点を境にして側圧方向（水平方向）の応力が急激に増加する。

⑥珪藻質軟岩の乾湿繰返し作用に伴う強度・変形特性を定量的に調べるために、あらかじめ供試体に乾燥の度合（乾燥過程における含水比：25%～100%）を変えて乾湿繰返しを与えて一軸圧縮・圧裂引張試験を実施した。その結果、乾湿繰返しを受けた供試体の膨潤後の強度・変形特性が、乾湿繰返し中の乾燥度合に依存することが明らかとなった。



Photo.1 Decline of trafficability in diatomaceous earth.

⑦供試体に切断面を与えて、CD試験を実施した結果、珪藻質軟岩の降伏応力が切断面の角度と拘束圧に依存することを明らかにした。

筆者らは、1997年7月、東海北陸自動車道高鷲インターチェンジ工事（日本道路公団名古屋建設局白鳥工事事務所管内（当時））中に現れた珪藻土（以後、高鷲珪藻土とよぶ）の切取り面が崩壊したのを機に、珪藻土に関する研究を精力的に行ってきた。本研究で取り上げる高鷲珪藻土は、阿多岐層に含まれ、岐阜県奥美濃地方に広く分布しており、第三紀鮮新世後期から第四紀更新世初期にかけて湖水底に沈積した湖成堆積土である。本論文においては、立石と前川の成果を十分に踏まえた上で、高鷲珪藻土の工学的性質を詳細に検討した。以下に、現状の問題点およびこれらを解決するための研究フローを述べる。

珪藻土地盤ののり面は、天候の変化などによる乾湿の繰返しによって簡単に劣化する。では、珪藻土はどの程度の乾燥で劣化するのだろうか？この問題を解決するために、珪藻土試料の乾燥度合を少しずつ変化させて水浸試験を実施し、珪藻土のスレーキング特性を詳細に検討した。

Photo.1に示したように、珪藻土は外的作用によって容易に流動化しやすい性質をもっている。半液体状となった珪藻土中の珪藻遺骸はどの程度破壊されているのだろうか？また、その破壊の程度が珪藻土のコンシステンシーにどのような影響を及ぼすのだろうか？そこで、0.42mmの標準網ふるいで珪藻土を何回か繰返し裏ごしして、珪藻遺骸の破壊の程度を人為的に変化させた。これらの試料を用いて、

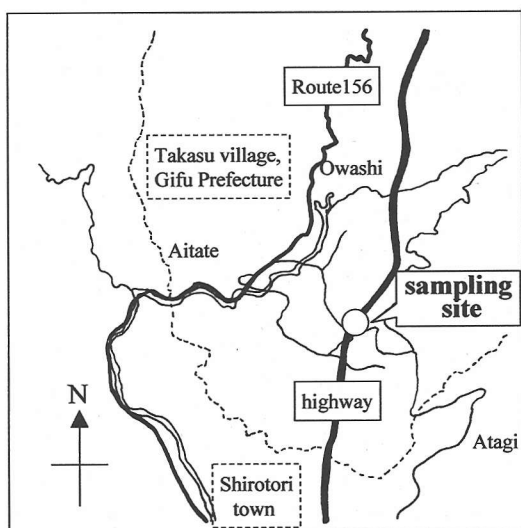


Fig.1 Sampling site for Takasu diatom earth.

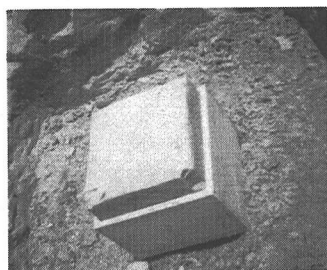


Photo.2 Block sampling technique.

液性限界試験を実施し、珪藻遺骸の破壊の程度とコンシステンシーの関係を明らかにした。

珪藻土はかつて水域が存在したあらゆる地域に分布しているため、その工学的性質は、地域の堆積環境に大きく依存している。実験に用いた試料が、過去、どのような履歴を受けているのかは、原位置の有効土被り圧と圧密降伏応力の比（過圧密比）を求めることによって、ある程度判断することができる。一般に、自然堆積土の力学特性は、過圧密領域と正規圧密領域のそれぞれの領域に区分して検討される。標準・等方圧密試験で求めた圧密降伏応力は、限られた応力経路のもとでの情報である。したがって、実地盤の力学挙動を再現できる“構成式”を提案するためには、降伏曲面を確立しなければならない。立石は、大分県玖珠地方の珪藻土を用いて、幅広い応力領域でCU試験を実施したが、珪藻土の降伏特性は検討していない。筆者らは、高鷲珪藻土の初期降伏曲面を求めるために、ブロックサンプリングに

よって採取した高品質の珪藻土試料を用いて、等方圧密試験、CU試験およびCD試験を実施した。なお、各実験で得られた降伏点の求め方は、3.（1）で詳述する。

前川は、珪藻土が長い年月にわたってセメンテーション作用を受け、やがて軟岩になることを、“降伏曲面の形状の推移”という形で推測した。筆者らは、珪藻土と珪藻質軟岩の降伏曲面を比較することによって、それらを確認した。また、高鷲珪藻土のせん断過程における強度・変形・ダイレイタンス特性を把握するために、初期の圧密降伏応力をはるかに越える大きな圧力で等方圧密した後、非排水せん断試験を実施した。つまり、不攪乱状態での珪藻土と大きな応力履歴を与えた珪藻土の挙動の違いを詳細に検討した。

前川は、珪藻質軟岩の一軸圧縮強度が供試体の切り出し方向に関係なく一定であることを明らかにした。筆者らは、珪藻土についても同様の傾向を示すのかどうかを確認するために、前川と同じ方法で一軸圧縮試験を実施し、珪藻土の強度・変形の異方特性を検討した。

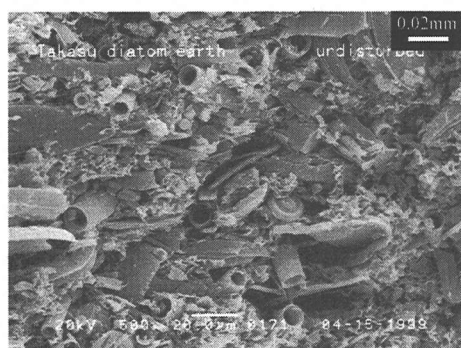
最後に、東海北陸自動車道高鷲インターチェンジ工事中に崩壊した切取り面の安定化を図るために、現地において、3つの対策工（抑止杭、表面保護工および排水工）を計画した。これらは、高鷲珪藻土の工学的性質に基づいて考え出された。4.（2）に対策工の是非について詳述する。

2. 高鷲珪藻土の物理特性

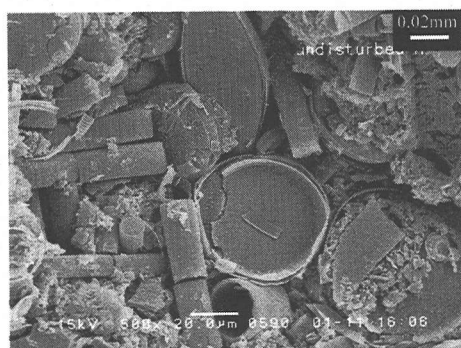
（1）実験試料

自然堆積土の力学挙動を実験室で再現するためには、極力乱れの少ない高品質の試料を用いる必要がある⁹⁾。筆者らは、高品質（不攪乱）試料を得るために、切取り面の崩壊位置近傍においてブロックサンプリングを実施した。Fig.1に試料採取地点を、Photo.2にブロックサンプリングの実施方法を示す。写真からわかるように、木枠で試料を拘束し、シャベルなどで地盤の周囲を掘って採取するため、サンプラー貫入に伴う摩擦・せん断などによる乱れが少なくと考えられる。

Photo.3は、不攪乱状態における高鷲珪藻土の鉛直断面（Photo.3(a)）および水平断面（Photo.3(b)）の電子顕微鏡写真を示している。写真より、土中には、直径0.01mm以下の筒状および直径約0.05mm程度の皿状の珪藻遺骸が多く含まれており、その間を微細な土粒子が占めている。また、写真から、珪



(a) Vertical section



(b) Horizontal section

Photo.3 SEM micrographs of intact sample of Takasu diatomaceous earth.

藻遺骸の堆積方向は、遺骸の重なり方からも容易に理解できる。例えば、皿状の遺骸は皿を積み上げたように堆積している。珪藻遺骸の堆積方向が、珪藻土の変形および強度特性にどのような影響を及ぼすのかはあまり知られていない。Table 1 に高鷲珪藻土の力学・物理特性をまとめた。Fig.2 に等方圧密試験の結果を示す。等方圧密降伏応力は 720kPa と求まった。図より、初期間隙比 (4.6~4.7) が、粘性土に比べてはるかに大きく、圧縮指数 C_c は 3 近くあり、降伏点を過ぎてからの圧縮性が非常に大きいことがわかる。また、採取した試料は地表面に近いので、有効土かぶり圧は 10kPa ほどしかない。しかし、圧密降伏応力が非常に大きいことから、高鷲珪藻土は超過圧密状態といえる。土粒子の密度試験 (地盤工学会試験法⁷⁾にて実施)の結果から、珪藻遺骸を含んだ土粒子の密度は 2.27g/cm^3 と一般の土粒子の密度 (2.65g/cm^3 程度) よりも小さい。

(2) スレーキング特性

高鷲珪藻土のスレーキング特性を把握するために

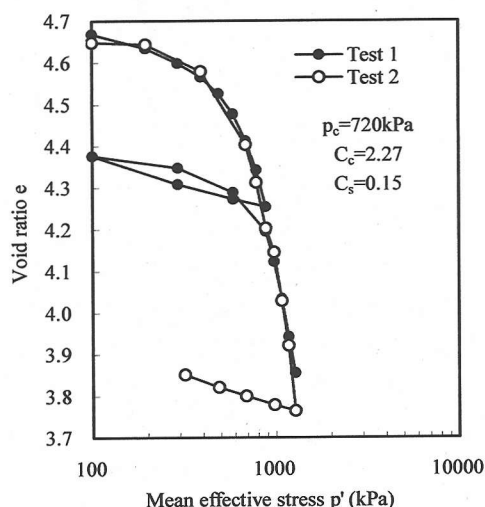


Fig.2 Experimental results of isotropic consolidation test on Takasu diatomaceous earth.

Table 1 Index and physical properties of Takasu diatomaceous earth.

unconfined compressive strength (kPa)	271 ~ 384
pre-consolidation pressure (kPa) (isotropic consolidation test)	720
pre-consolidation pressure (kPa) (oedometer test)	820
compression index C_c	2.27
swelling index C_s	0.15
density $\rho_s (\text{g/cm}^3)$	2.27
natural water content $w_n (\%)$	185 ~ 205
liquid limit $w_L (\%)$ (passed once through 0.42mm sieve)	153

水浸試験を行った。本研究で実施した水浸試験は、軟岩材料で実施するスレーキング試験方法⁸⁾とは異なり、自然含水比状態 ($w = 176.9\%$)、部分乾燥状態 ($w = 170.6\%, 168.2\%, 158.7\%, 132.5\%$) および気乾状態 ($w = 4.2\%$) の 6 つの試料について実施した。

最初に、ブロックサンプリングによって採取した試料 (自然含水比状態) を立方体 (約 $15\text{mm} \times 15\text{mm} \times 15\text{mm}$) に成形する。なお、試料は、1 回の水浸試験に対して、水浸用と含水比測定用の 2 つを用意しなければならないので、全体として 12 個の試料が必要である。成形した試料は、自然含水比状態のものを除いて軽くサランラップに包み、恒温槽でゆっくり乾燥させる。乾燥させる時間を変化させるこ

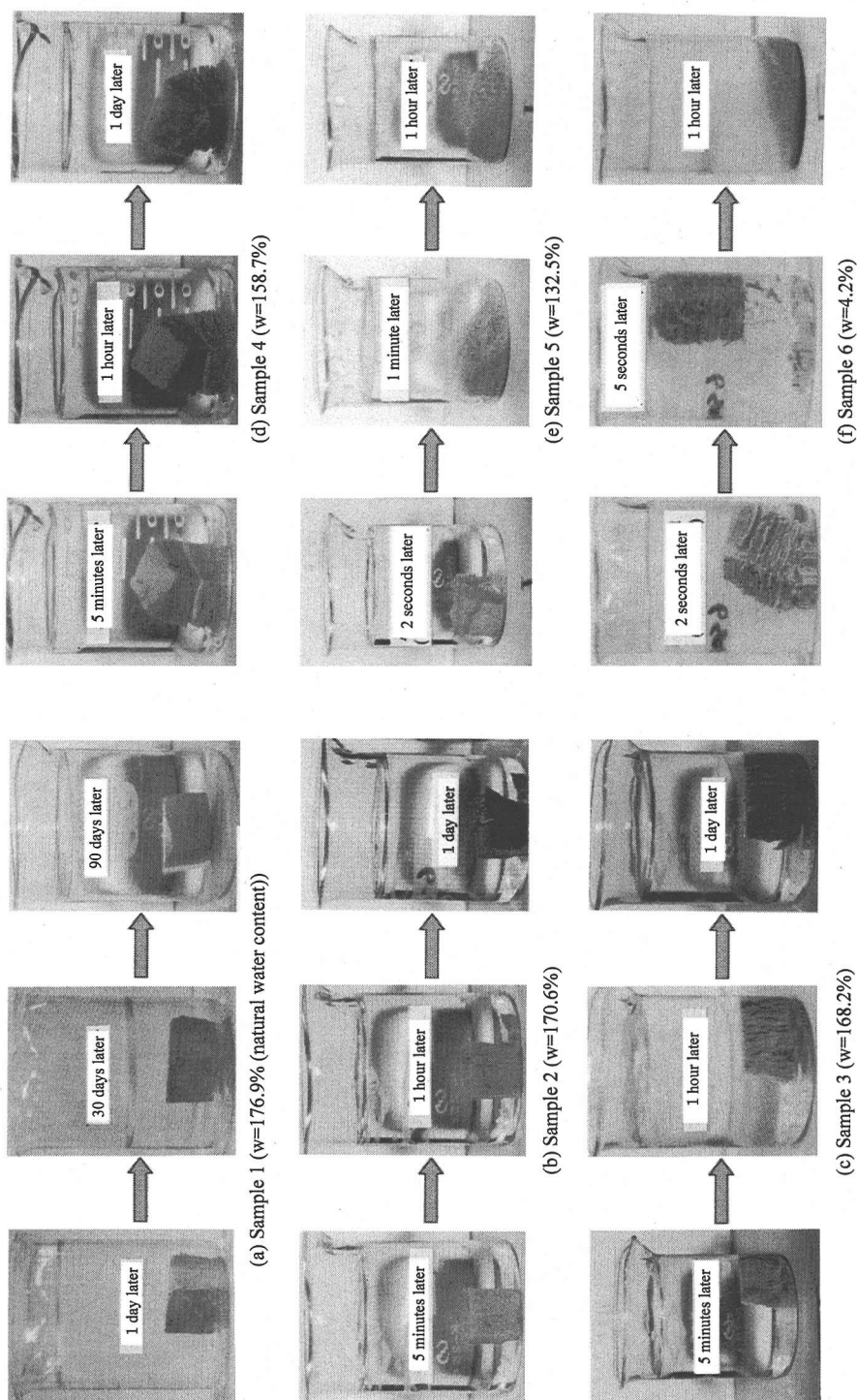


Photo.4 Slaking properties of Takasu diatomaceous earth and effect of water content.

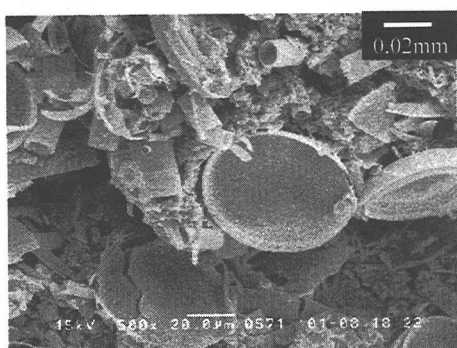


Photo.5 SEM micrograph of exfoliation surface of Takasu diatomaceous earth after soaking test.

とによって、部分乾燥試料（4 つ）および気乾試料（1 つ）が作成される。なお、部分乾燥試料については、表面に近づくほど乾燥しており、試料全体としては、含水比が一定ではない。次に、作成した試料を脱気水を満たしたビーカーに入れて、水浸開始直後、1 分後、5 分後、30 分後、1 時間後、1 日後、10 日後・・・と供試体が徐々に細粒化する様子を観察（写真撮影）する。各試料の含水比の測定は、水浸開始時に行う。

Photo.4 に試験結果を示す。自然含水比状態の試料（Photo.4(a)）では、水浸させてから 90 日経っても供試体の表面が僅かに崩れるのみで際だった変化はみられない。部分乾燥状態の試料（Photo.4(b)～(e)）については、試料が徐々に細粒化していく様子が観察できる。また、水浸させてから 5 分後、1 時間後および 1 日後のスレーキング現象を比較すると、含水比が低くなるにつれて試料の細粒化が早くなることがわかる。さらに、試料のスレーキング状況を注意深く観察すると、薄いカード状が重なった状態、つまり、はく離した状態になっている。はく離面を SEM 観察したものが Photo.5 である。写真より、はく離面は Photo.3(b)で示した不攪乱試料の水平断面に類似しており、珪藻遺骸はほとんど破壊されていないことがわかる。気乾状態（Photo.4(f)）については、水浸させた瞬間にクラックが入り、数十秒後には細粒化することがわかる。これらの観察から、高鷲珪藻土の乾湿は著しくスレーキングを進行させることが理解できる。つまり、天候の変化（晴天後の降雨）などによる乾湿の繰り返しが、切取のり面の表層を著しく劣化させていると考えられる。

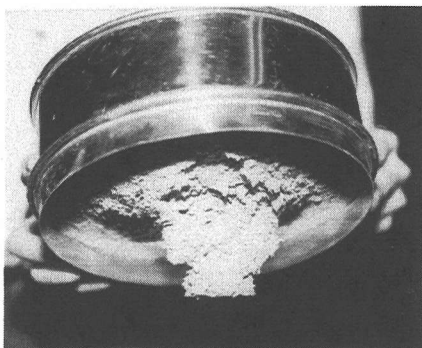
(3) コンシステンシー

珪藻遺骸内部には、多くの水が含まれているので、

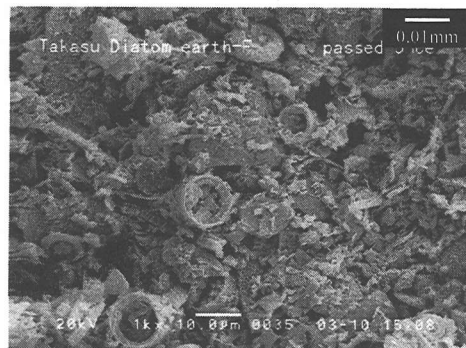
珪藻土は、攪乱する（繰り返す）と、珪藻遺骸内部の水が外に出て、半液体状に変化する。しかし、珪藻そのものが完全に破壊されることはない。例えば、液性限界試験などで用いられる 0.42mm の標準網ふるいで 1 回裏ごしした試料（Photo.6(a)）の電子顕微鏡写真を Photo.6(b)に示す。写真より、多くの珪藻は殻の破片が所々に散らばっているものの、筒状の形を保っている。また、試料を攪乱することによって、健全な珪藻遺骸間を占めていた微細な土粒子や破碎した遺骸などが遺骸内部に入り込んでいるのがわかる。

高鷲珪藻土のコンシステンシーを把握するために、液性限界試験を実施した。通常、液性限界試験に用いる試料は、地盤工学会試験法⁹⁾の中に記した“土質試験のための乱した土の試料調整”に基づいて作成される。本研究では、試料内の珪藻を人為的に破壊させ、それがコンシステンシーにどのような影響を及ぼすのかを検討するために、以下のような方法で試料調整を行った。最初に、0.42mm の標準網ふるいをを用いて、1 回（Photo.6(a)）、3 回、および 5 回と繰り返し裏ごしした。また、珪藻遺骸を完全に破壊するために、高鷲珪藻土を空気乾燥させた後、すり鉢にてすりつぶした（Photo.7(a)）。なお、珪藻土は自然含水比が非常に高く、液性限界試験には不向きであったため、裏ごしした試料については、徐々に空気乾燥させて含水比を調整した。Photo.7(b)は、空気乾燥後にすり鉢にてすりつぶした高鷲珪藻土の電子顕微鏡写真である。写真より、珪藻遺骸は完全に破壊されているのがわかる。

Fig.3 に液性限界試験結果を示す。図より、高鷲珪藻土の自然含水比（185～205%）は液性限界よりも高くなっている。液性限界は裏ごし 1 回の場合では 153%、3 回では 145%、5 回では 141%、そしてすりつぶした状態では 120%であった。なお、すりつぶした試料の液性限界試験については、含水比が低くなるほど、黄銅皿に入れた試料の溝切りが困難になるため、落下回数が少ない場合（ある一定以上の水を含んだ状態）のみで行うことができなかった。これらのことから、珪藻土の液性限界は、珪藻遺骸内部の水を含んだ状態の値を示しており、何回も裏ごしすることによって、珪藻遺骸は徐々に破壊し、それに伴って遺骸内部の水が少しずつ外に出て液性限界が低下する。珪藻遺骸をすりつぶしてしまうと、破碎した珪藻遺骸は水を全く保持することができないため、液性限界はさらに低下するものと考えられる。また、裏ごし回数を増やすほど若干ではあるが曲線の傾斜が緩やかになっている。これは少しの含水比の変化によって珪藻土のコンシステン



(a) Passing diatomaceous earth through 0.42mm sieve once

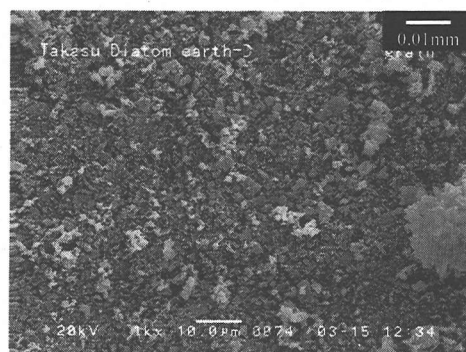


(b) SEM micrograph

Photo.6 Takasu diatomaceous earth passed once through 0.42mm sieve.



(a) Grinding diatomaceous earth into powder



(b) SEM micrograph

Photo.7 Takasu diatomaceous earth ground into powder.

シーが変化することを示している。これらの結果から、強固な珪藻地盤は、土木工事などの機械的攪乱によって、珪藻遺骸間を占めていた微細な土粒子や破碎した遺骸などが遺骸内部に入り込み、その分だけ水が外部に押し出され、超軟弱地盤に変化する。また、珪藻遺骸が徐々に破壊されることにより、珪藻土の液性限界は低下し、容易に流動化しやすい状態になることも理解できる。このことが実際の切取り面の斜面表層における崩壊の一因と考えられる。

3. 高鷲珪藻土の力学特性

(1) 降伏特性

高鷲珪藻土の初期降伏曲面を求めるために、等方圧密試験、 $\overline{CU}$ 試験および $\overline{CD}$ 試験を実施した。なお、実験には“2.(1)実験試料”で示した試料 (Table 1) を用いた。本研究でいう降伏曲面とは、弾塑性論で定義されている弾性領域と塑性領域の境界面 (弾性限界曲面) ではなく、ひずみが急激に増

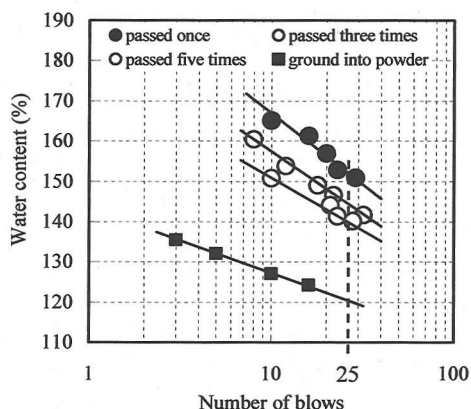


Fig.3 Liquid limit chart for the fine contents of Takasu diatomaceous earth passed through 0.42mm sieve by putty knife.

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、初期降伏曲面の内側でも若干の塑

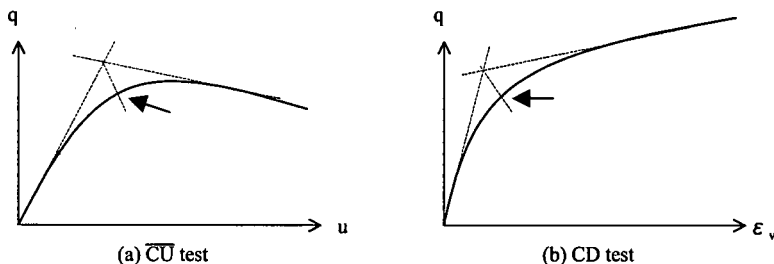


Fig.4 Determination of yielding point.

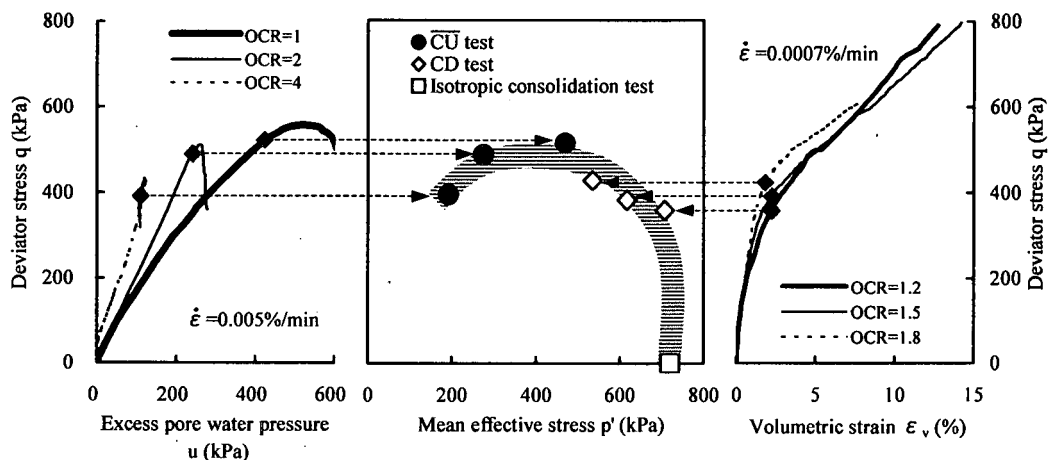
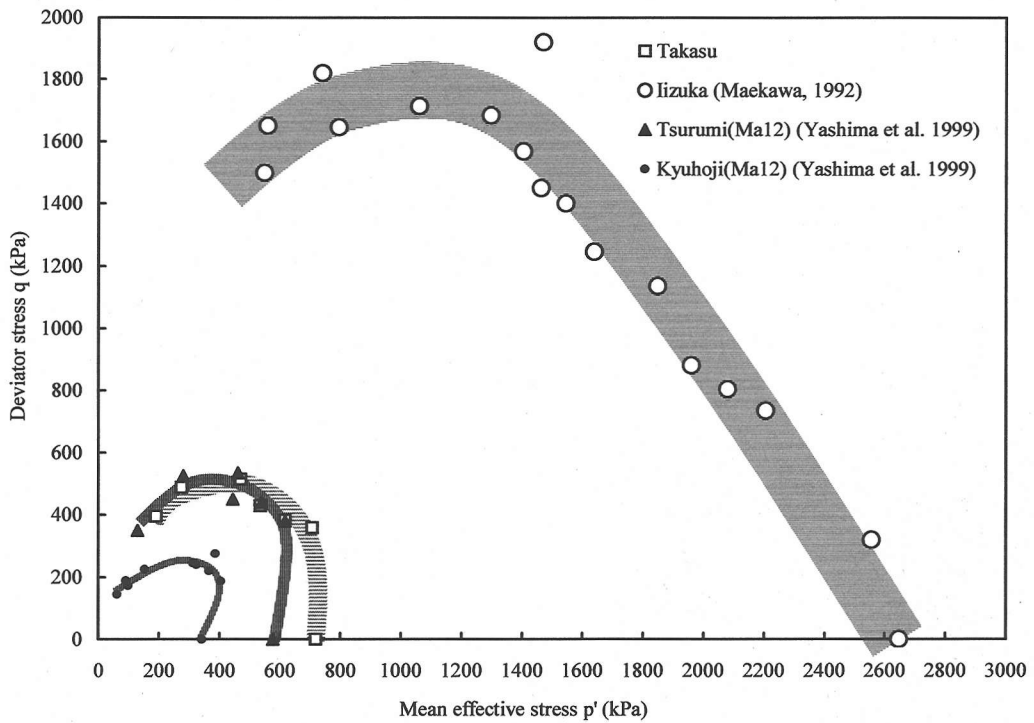


Fig.5 Limit locus of Takasu diatomaceous earth.

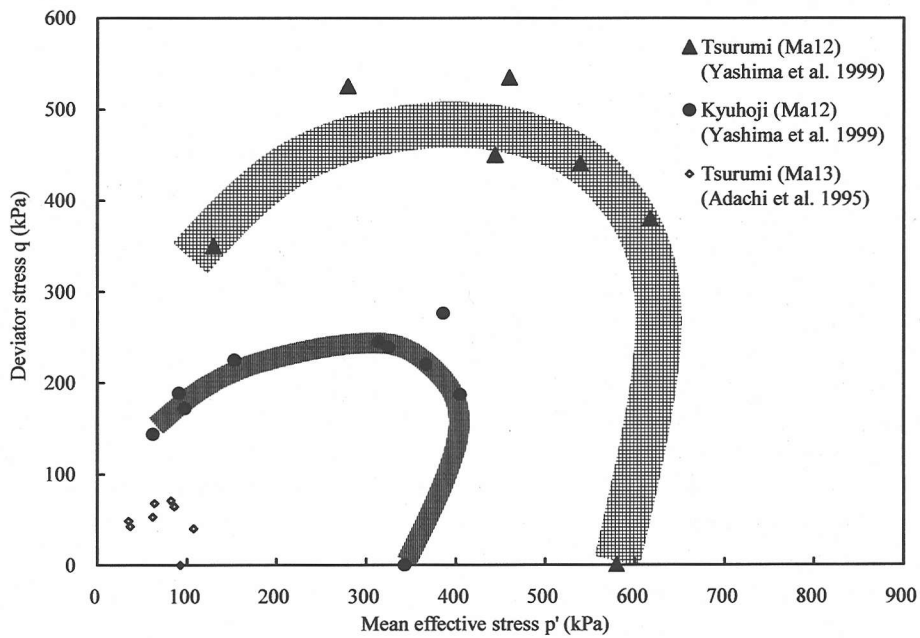
性ひずみが発生していることに注意しなければならない。本研究においては、 $\overline{CU}$ 試験の軸差応力-過剰間隙水圧関係および CD 試験の軸差応力-体積ひずみ関係における最大曲率点 (Fig.4 に示すように、過剰間隙水圧もしくは体積ひずみの急増点前後の曲線を 2 つの直線に近似し、その交点の内角二等分線が曲線と交わる点) を降伏点 (限界点) と定義した。なお、ひずみ速度として、 $\overline{CU}$ 試験においては、0.005%/min を、CD 試験においては、標準圧密試験結果から得られた透水係数 (約 1.2×10^{-8} cm/sec) を考慮して、0.0007%/min (=1.0%/day) と決定した。

Fig.5 は、高鷺珪藻土の初期降伏曲面 (限界曲面) である。図の降伏点に対応するひずみ量については、 $\overline{CU}$ 試験が 1.3~2.0%, CD 試験が 1.9~2.2% である。Fig.6 は筆者らが既に求めた大阪沖積粘土¹⁰⁾ (Ma13)、大阪洪積粘土⁹⁾ (Ma12) および前川が求めた珪藻質軟岩⁵⁾の初期降伏曲面を表している。なお、Ma13、Ma12 および珪藻質軟岩の降伏点は高鷺珪藻土と同じ方法で求めている。Fig.6 より、Ma13 および Ma12 の方が高鷺珪藻土よりも降伏特性の異质性が強いことがわかる。

前川⁵⁾は、拘束圧を変えて、珪藻質軟岩の CD 試験を実施し、降伏点を集約して初期降伏曲面を求め、“珪藻質軟岩の降伏曲面の形状が Roscoe らが提案した Cam clay モデルの降伏関数に近似できる”ことを明らかにした (Fig.6)。また、これらの実験事実から、前川⁵⁾は、Fig.7 に示すような長時間にわたる降伏曲面の形状の変化を推測した。つまり、“堆積当初の珪藻質軟岩は、粘性土と同様な応力履歴に依存した降伏曲面 (I) を示す。その後、大きな載荷・除荷を受けないまま、長い年月にわたるセメンテーション作用によって土の構造が徐々に発達し、降伏曲面は (II) から (III) へと推移する”。Ma13 は第四紀完新世 (約 6000 年前)、Ma12 は第四紀更新世後期 (約 7~10 万年前)、高鷺珪藻土は第三紀鮮新世後期から第四紀更新世初期 (約 200 万年前)、珪藻質軟岩は第三紀中新世後期 (約 1300 万年前) の間に堆積した。これらの地盤材料を Fig.7 に示す降伏曲面 (I) (II) (III) に照らし合わせて考えると、Ma13 および Ma12 が降伏曲面 (I) に、高鷺珪藻土が降伏曲面 (II) に、珪藻質軟岩が降伏曲面 (III) に相当する。



(a) Takasu diatomaceous earth, Iizuka diatomaceous soft rock and Osaka Pleistocene clays (Ma12)



(b) Osaka Pleistocene clays (Ma12) and Osaka alluvial clay (Ma13) (enlarged from Fig.6(a))

Fig.6 Limit loci of natural sedimentary soils from Tertiary period to Quarternary period.

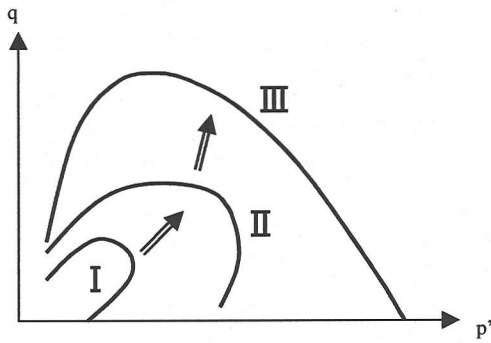


Fig.7 Expected change in limit locus with respect to sedimentation period.

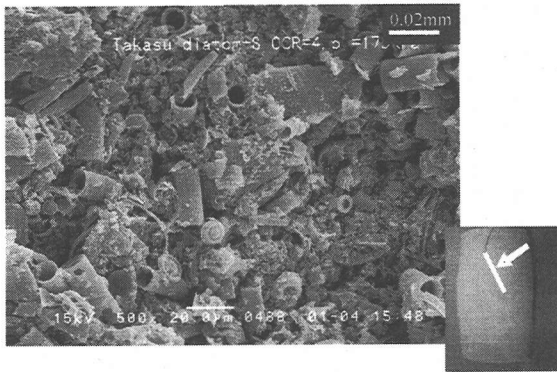


Photo.8 SEM micrograph of shear band after $\overline{CU}$ test.

(2) せん断過程における力学特性

a) 不攪乱試料の力学挙動

自然堆積土の変形・強度・ダイレイタンス特性は、過圧密と正規圧密領域に区分し、それぞれの応力領域において議論されることが多い。Fig.8 は不攪乱の高鷲珪藻土を用いて実施した過圧密比 1.0, 2.0, 4.0 の $\overline{CU}$ 試験の結果である。ここでの過圧密比は、等方圧密降伏応力 (720kPa) を基準にして決定しており、せん断試験を開始する前の圧密応力は、過圧密比 1.0 の場合が 720kPa で、同じく過圧密比 2.0 の場合は 360kPa, 過圧密比 4.0 の場合は 180kPa である。Fig.8(a)の応力-ひずみ関係から、重過圧密領域 (過圧密比 4.0) から正規圧密領域 (過圧密比 1.0) に向かうにしたがって、ピーク強度は大きくなっており、どの過圧密比においても、ひずみ硬化-軟化型の脆性的な挙動を示している。Fig.8(b)の間隙水圧-ひずみ関係から、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 4.0 と比べて非常に大きく、ひずみ軟化時においても、過剰間隙水圧は上昇し、軸差応力を大きく上回っている。

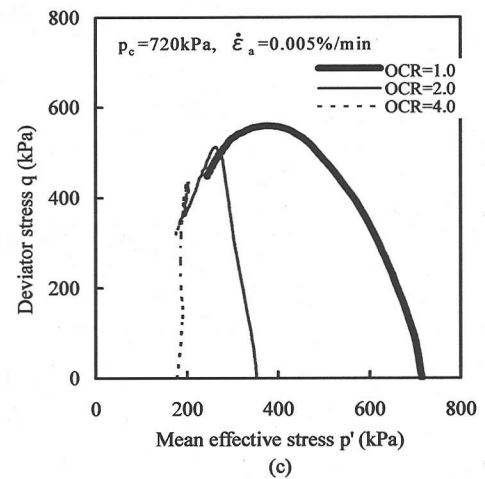
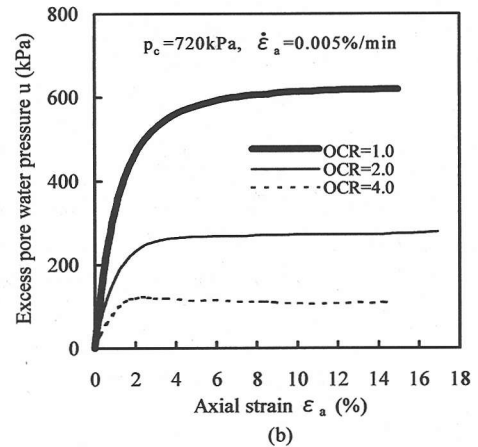
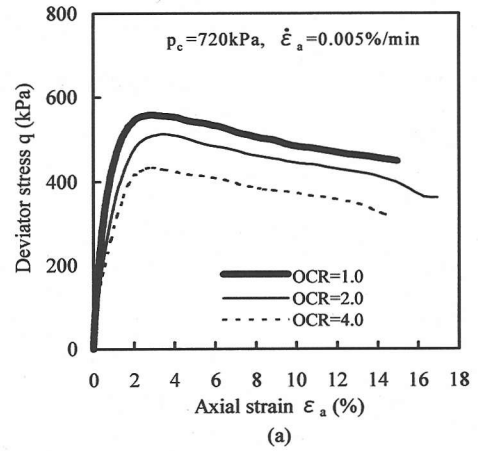


Fig.8 Experimental results of undisturbed Takasu diatomaceous earth, (a) stress - strain relations, (b) pore water pressure - strain relations and (c) effective stress paths.

Fig.8(c)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スーを、重過圧密領域においては、やや正のダイレイタンスーを示していることがわかる。せん断は、ひずみ 15%を過ぎた時点で終了しているため、完全には残留強度には至っていない。Photo.8 は過圧密比 4.0 における CU 試験によって生じた shear band の電子顕微鏡写真である。なお、写真は shear band の法線方向（写真右下参照）から撮影した。写真より、shear band 中の珪藻遺骸は、部分的に破壊されているものの、多くは筒状の形を保っている。また、Photo.3 の不攪乱試料と比べると、shear band 中の珪藻遺骸の周りには、細かい微粒子が多く付着しており、0.42mm の標準網ふるいで 1 回裏ごしした試料 (Photo.6(b)) に非常に類似している。このことから、せん断過程において、shear band 周辺では、せん断が進むにつれて、裏ごしに近いような激しい攪乱が生じているものと考えられる。

b) 大きな圧密応力履歴が力学特性に及ぼす影響

圧密降伏応力よりも大きな圧密応力履歴を受けた珪藻土（以後、応力履歴試料とよぶ）は、せん断過程においてどのような挙動をするのだろうか？ この問題を解決するために、以下のような方法で CU 試験を実施した。等方圧密降伏応力（720kPa）の 2 倍近くの大きな応力（1274kPa）で圧密した供試体（過圧密比 1.0）と圧密した後、319kPa まで膨潤させた供試体（過圧密比 4.0）について非排水せん断試験を行った。Fig.9 は、過圧密比 1.0 における応力履歴試料の CU 試験結果で、比較のため、不攪乱試料の結果も併記してある。軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$)、過剰間隙水圧 u および平均有効応力 ($(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$) をそれぞれの等方圧密降伏応力（不攪乱試料：720kPa、応力履歴試料：1274kPa）で正規化した。Fig.9(a)の応力-ひずみ関係より、応力履歴試料と不攪乱試料を比較すると、両者は、ともにひずみ硬化-軟化型の挙動を示している。また、Fig.9(b)の間隙水圧-ひずみ関係より、両試料の間隙水圧はまったく同じような挙動を示し、Fig.9(c)の有効応力経路より、応力履歴試料はせん断過程において、不攪乱試料よりも大きな負のダイレイタンスーを示し、最後には critical state に至る。

Fig.10 は、過圧密比 4.0 における応力履歴試料の CU 試験結果である。Fig.9（過圧密比 1.0）と同じように、軸差応力および平均有効応力をそれぞれの等方圧密降伏応力で正規化した。Fig.10(a)の応力-ひずみ関係から、応力履歴試料はピーク点を過ぎてからのひずみ軟化傾向が不攪乱試料に比べて顕著ではない。過剰間隙水圧-ひずみ関係（Fig.10(b)）に

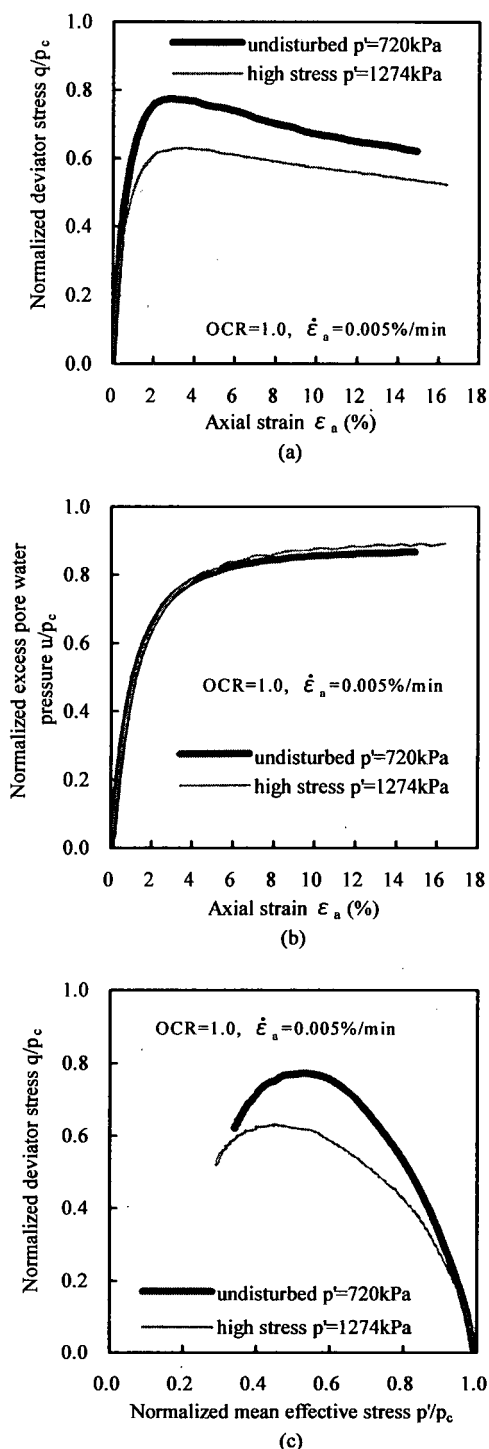


Fig.9 Experimental results of Takasu diatomaceous earth on normally consolidated undisturbed and sample with high stress history, (a) stress - strain relations, (b) pore water pressure - strain relations and (c) effective stress paths.

おいては、両者は全く違う挙動を示している。応力履歴試料の過剰間隙水圧は、軸差応力がピーク点を過ぎてからも、しばらく単調増加を続ける。Fig.10(c)の有効応力径路から、応力履歴試料は、初期の段階においては不攪乱試料よりもやや大きな正のダイレイタシーを示しているが、ピーク点を過ぎてcritical stateに近づくにつれ、両者のダイレイタシーの大きさはほぼ等しくなる。

粘性土の場合、圧密降伏応力よりも大きな応力で圧密すれば、構造が部分的に破壊され、せん断過程において、延性的な挙動を示す⁹⁾。これに対して、珪藻土の場合は、若干延性的な性質を示すものの不攪乱試料に類似したひずみ硬化-軟化型の挙動を示す。これらの実験事実から推測すれば、珪藻土内に無数に存在する珪藻遺骸自身も1つの構造体といえる。珪藻遺骸は土質材料の粒径から判断すると、シルトに相当する。これらの構造体がbonding作用によってリンク構造を形成し、長期間にわたってセメンテーション作用を受ければ、非常に強固な材料となる。つまり、圧密降伏応力の2倍程度の応力では、珪藻遺骸と遺骸の隙間を狭めるのみで、遺骸自身の構造は破壊されずに残ると考えられる。

(3) 変形・強度の異方性

高嵩珪藻土の変形および強度の異方性を把握するために、堆積面に対して鉛直方向($\theta = 0^\circ$)、斜め方向($\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$)および水平方向($\theta = 90^\circ$)に圧縮方向を変化させて、一軸圧縮試験を実施した。ひずみ速度は1.0%/minである。なお、筆者らはサンプリングの際、Photo.9に示すように、高嵩珪藻土が地表面に対して、ほぼ水平に堆積していることを確認している。Fig.11に一軸圧縮試験の結果をまとめた。Fig.11(f)より、一軸圧縮強度 q_0 を比較すると、ばらつきはあるものの、各圧縮方向に対してほぼ同じ強度をもつことがわかる。破壊ひずみ ϵ_f (Fig.11(g))については、斜め方向($\theta = 30^\circ$)に圧縮した場合が最も小さく、圧縮方向が水平になるにしたがって ϵ_f が大きくなる。また、変形係数 E_{50}

(Fig.11(h))については、鉛直方向に圧縮した場合が最も大きく、次いで $\theta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ と水平方向に圧縮するにしたがって徐々に小さくなる。これらの結果から、高嵩珪藻土の強度に異方性はないが、変形については異方性をもっていることがわかる。また、立石¹¹⁾も筆者と同じようにブロックサンプリング試料の切り出し方向を変えた供試体(地表面に対して鉛直・水平方向)を用いて一面せん断・一軸圧縮試験を実施し、“供試体の方向依存性による珪藻土の構造の影響は、一軸圧縮試験にお

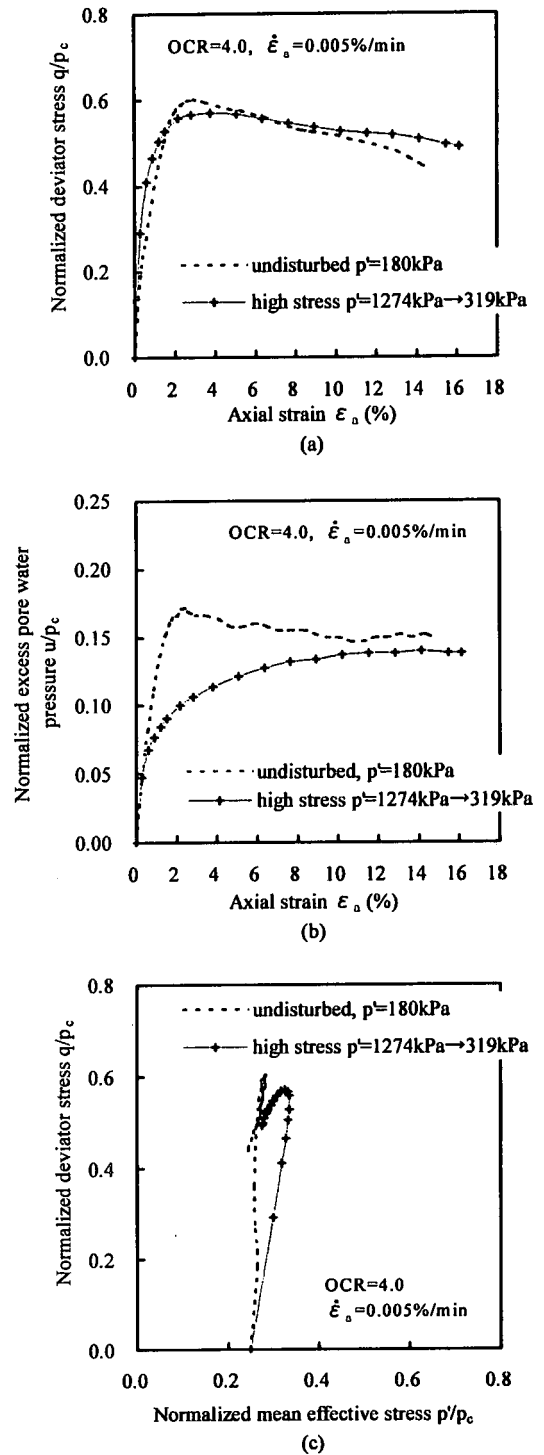


Fig.10 Experimental results of Takasu diatomaceous earth on over consolidated undisturbed and sample with high stress history, (a) stress - strain relations, (b) pore water pressure - strain relations and (c) effective stress paths.

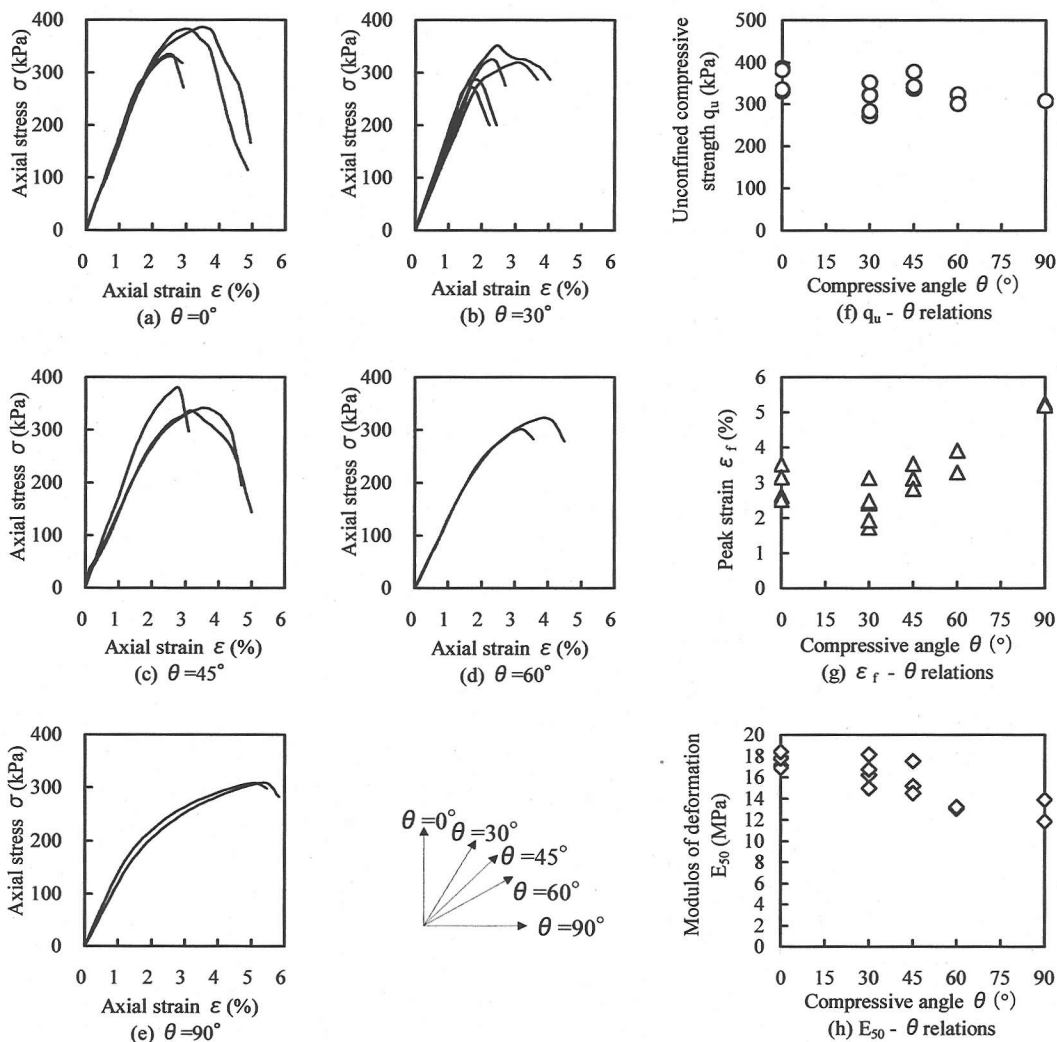


Fig.11 Experimental results of unconfined compression tests in different compressive angle.

いて q_u よりも E_{50} に、一面せん断試験では ϕ より c の影響が認められる”ことを述べている。珪藻質軟岩の変形係数 E_{50} は水平方向に大きな値を示すのに対し、高鷲珪藻土は鉛直方向に大きな値を示している。これらの原因として、不攪乱珪藻土の電子顕微鏡写真 (Photo.3) に示すような珪藻遺骸 (筒状および皿状) の堆積方向が影響していると考えられる。

4. 切取のり面の安定化対策

(1) 斜面安定解析

Fig.12 に、切取のり面崩壊の断面図を表す。図中の weak layer とは、スウェーデン式サウンディング

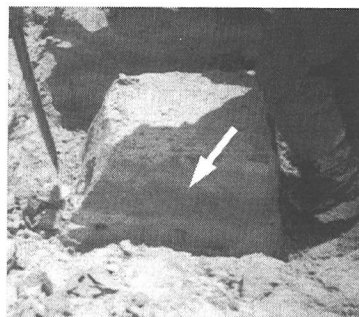


Photo.9 Deposit layer of Takasu diatomaceous earth.

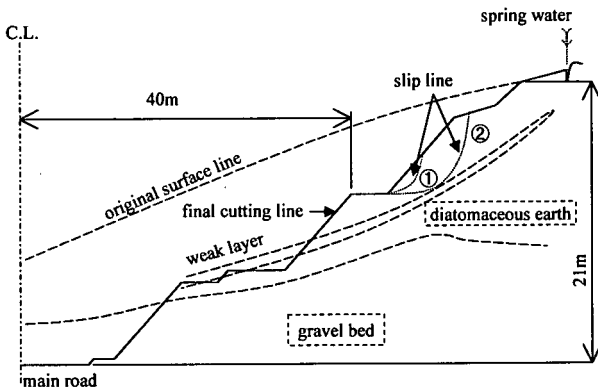


Fig.12 Slip line in the cut slope at road construction site.

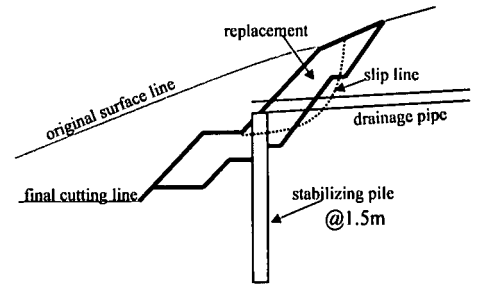


Fig.13 Slope profile with three countermeasures; drainage pipes, stabilizing piles and surface replacement by the improved soil.

の際、ロッドの回転前に自沈した部分の層を表している。斜面上部の滑落層と weak layer の存在より、過去に大きな地盤変状が発生したと考えられる。

“2. 高鷲珪藻土の物理特性”のところで、珪藻土は土木工事などの機械的攪乱によって、珪藻遺骸内部の水が少しずつ外に押し出され、超軟弱化することを述べた。したがって、斜面内の weak layer の存在はすべり破壊を引き起こす大きな要因の1つである。また、のり面崩壊は、図に示すように、最初のにり面下部の表層(①)にクラックが発生し、その後、のり面上部(②)から円弧すべりに近い形状で崩壊した。

実際に崩壊したすべり面を用いて、Fellenius の簡便分割法により斜面安定解析を行った。解析におけるすべり面(円弧)は、地表面にみられたクラックから斜面の先端を結ぶように斜面先崩壊を想定して決定した。安定解析に用いた強度定数は、3. (3)で示した一軸圧縮試験結果より得られた最も大きな q_u (384kPa) と最も小さな q_u (271kPa) の非排水せん断強度 c_u ($= q_u/2$) を粘着力 c とした。安定解析の結果、安全率は 12~16 であった。したがって、珪藻土地盤が乱れない均一材料と想定した場合、あらゆる圧縮方向に対して安全率は大きく、安全率のみで判断すると、のり面が崩壊するとは考えにくい。また、CU 試験からも不攪乱状態における珪藻土の強度が十分に大きいことがわかっている。しかし、Fig.12 に示すように、掘削に伴う過度な乱れやすべり面(②)の一部が weak layer 上にあるとすれば、安全率が著しく低下して崩壊することが予想される。

その後の調査で、のり面の上方に滑落部が存在し、所々に水が湧き出ていることが判明した。つまり、のり面内にはいくつかの水みちが存在し、雨季の断

続的な降雨がその水みちを通して、のり面内部(すべり面に相当する場所)にまで浸透し、その結果、過剰間隙水圧が局所的に上昇してせん断強度を著しく低下させたのではないかと考えられる。

(2) 対策工の検討

切取のり面の崩壊を引き起こす要因は、斜面自体の自重、切取による応力解放、降雨浸透などによって外部から付加されるのり面内部の過剰間隙水圧の上昇および weak layer の存在などである。また、前述の実験結果から、機械的攪乱による珪藻土の流動化や表層の乾湿繰り返しによる劣化も崩壊の要因の1つである。

現地では、珪藻土の特異性と のり面安定を考慮して、3つの対策工(抑止杭、表層保護工、排水工)が計画された(Fig.13 参照)。1つ目は、斜面の自重に対抗し、かつ weak layer によるすべり破壊に抵抗するために、“抑止杭”が施工された。2つ目は、珪藻土が僅かな乾燥でもスレーキングする性質(2. (2) 参照)をもっていることから、生石灰-セメント混合材を用いた“安定処理土”をのり面表層に被覆した。Photo.10 は、安定処理土の電子顕微鏡写真である。写真より、Photo.3 にみられるような珪藻遺骸の形状はほとんど残っていない。この撮影断面においては、生石灰-セメント混合材が珪藻を覆っているため、珪藻遺骸はほとんど写らない。

安定処理土を表層に被覆するのみでは、のり面背後にある珪藻地盤に間隙水が蓄積し、それに伴って過剰間隙水圧が局所的に上昇してせん断強度を低下させる危険性がある。そこで3つ目の対策工として、のり面内部の過剰間隙水圧を消散させるために、“排水パイプの設置”が別途計画された。最適な排水パイプ長を求めるために、崩壊のり面に隣接する

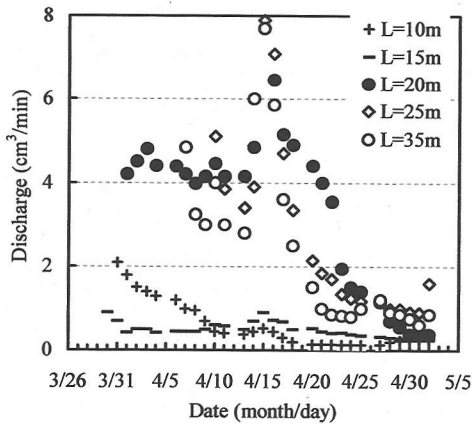


Fig.14 Time histories of discharge from drainage pipes with different length.

斜面において試験施工が実施された。有孔管を用いた排水パイプの長さを 10 m から 35 m に変化させて排水量の経時変化を観測した。その結果を Fig.14 に示す。この図より、10 m と 15 m の長さでは排水機能が十分ではなく、長さが 20 m 以上では排水量に大きな差がないことがわかった。これは、排水パイプがのり面内に存在する何本かの水みちを貫いたためと考えられる。20 m の排水パイプでのり面内部の排水機能が十分に確保できることから、当該斜面においても有孔管を用いた 20 m の排水パイプ孔が施工された。抑止杭、表層保護工、排水工、さらには表層の植生工を実施した結果、当該斜面は計画通り切り下がり、安定を保っている。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

①自然含水比状態（不攪乱試料）の珪藻土を水浸させても供試体が崩壊することはほとんどない。しかし、表面を僅かでも乾燥させると、珪藻土は時間とともにスレーキングし、乾燥の度合が大きくなるにしたがって、試料にクラックが入り、気乾状態に近い珪藻土は、水浸直後に著しいスレーキング現象が発生する。これらのことから、施工中は珪藻地盤の表層を乾燥させない対策が必要である。

②高鷲珪藻土は、裏ごし回数が多くなるほど、土中の珪藻遺骸が徐々に破壊され、液性限界が低下する。つまり、人為的な外力によって超軟弱な性質に変化する。これらの性質を考慮して、工事期間中のトラフィカビリティーを確保しなければならない。

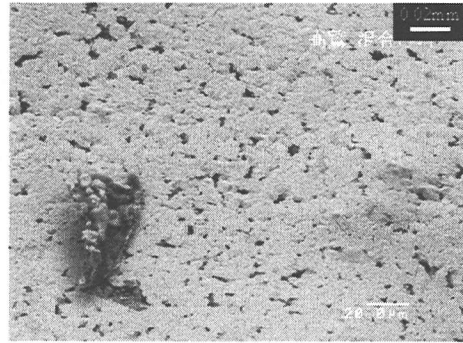


Photo.10 SEM micrograph of improved soil.

③高鷲珪藻土、Ma13 および Ma12 の初期降伏曲面は、ともに異方的な形状を有しているが、Ma13、Ma12 の方が高鷲珪藻土よりも異方性が強い。また、前川が降伏曲面の形状の変化を推測したように、Ma13、Ma12、高鷲珪藻土および珪藻質軟岩は、セメンテーション作用による構造の発達の過程で、異方的な形状から等方的な形状に変化することが予想できる。

④不攪乱試料を用いた高鷲珪藻土の $\bar{C}U$ 試験の応力-ひずみ関係は、拘束圧に依存する。また、すべての過圧密比において、ひずみ硬化-軟化型の挙動を示しており、正規圧密領域においては、大きな負のダイレイタンスーを、重過圧密領域においては、やや正のダイレイタンスーを示している。つまり、粘性土と同じような挙動をする。また、 $\bar{C}U$ 試験後にみられる shear band では、せん断が進むにつれて、裏ごしに近いような激しい攪乱が生じている。

⑤珪藻土は粘性土と違って、圧密降伏応力を越えるような応力領域においても、ひずみ硬化-軟化型の挙動を示す。なぜなら、珪藻遺骸自身も 1 つの構造体であり、圧密降伏応力の 2 倍程度の応力では遺骸と遺骸の間を狭めるのみで、その構造は破壊されることはない。

⑥高鷲珪藻土の強度に異方性はないが、変形については異方性をもっている。しかし、珪藻質軟岩の変形係数 E_{50} は水平方向に大きな値を示すのに対し、高鷲珪藻土は鉛直方向に大きな値を示している。

⑦一軸圧縮試験から得られた強度定数を用いて、斜面安定解析を行ったところ、当該地点には大きな安全率 (12~16) が見込まれていた。このことから、珪藻土地盤が乱れのない均一材料と想定した場合、のり面が崩壊するとは考えにくい。しかし、すべり面の一部が weak layer 上にあるとすれば、安全率が著しく低下して崩壊することが容易に理解できる。

また、断続的な降雨がのり面内に存在する水みちを通して浸透し、その結果、過剰間隙水圧が上昇してせん断強度が低下したことも崩壊の一因と考えられる。

⑧多くの室内実験によって得られた高鷲珪藻土の特性を考慮した結果、選択された対策工は、抑止杭、表面保護工、排水工である。これらの対策工の結果、当該斜面は安定に施工を完了した。

謝辞：本研究をまとめるに当たって、九州産業大学奥園誠之教授から切取のり面安定化対策について、金沢工業大学前川晴義助教授から珪藻質軟岩のセメンテーション作用と力学特性に関して貴重なアドバイスを頂きました。また、一連の室内実験を実施するに当たり、岐阜大学大学院博士前期課程北園和正君他、元岐阜大学学部生の方々に、多大な協力を得ました。なお、本研究は平成10年度文部省科学研究費補助金（奨励研究（B）No.10919053）の補助を受けました。末筆ながら、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小杉正人：珪藻の環境指標種群の設定と古環境復源への応用，第四紀研究(The Quaternary Research)，Vol.27，No.1，pp.1-20，1988。
- 2) Yashima, A., Shigematsu, H., Okuzono, S. and Nishio, M.: Case study of a cut slope failure in diatomaceous earth, IS-SHIKOKU'99, Proceeding of International Symposium on Slope Stability Engineering, pp.977-982, 1999.
- 3) 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。
- 4) 立石義孝：珪藻土の工学的特性と切土斜面表層の安定に関する研究，佐賀大学学位申請論文，1997。
- 5) 前川晴義：軟質泥岩の力学的特性とその適用に関する研究，京都大学学位申請論文，1992。
- 6) 八嶋 厚，重松宏明，岡二三生，長屋淳一：上部大阪洪積粘土の力学特性と構造変化，土木学会論文集，第 624 号／III-47，pp.217-229，1999。
- 7) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説，pp.43-48，1994。
- 8) (社)土木学会：軟岩の調査・試験の指針(案)，pp.64-72，1991。
- 9) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説，乱した試料の調整，pp.21-30，1994。
- 10) 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。
- 11) 立石義孝，鬼塚克忠，落合英俊，林重徳：大分県地方における珪藻土の工学的特性，土と基礎，Vol.42，No.5，pp.47-52，1994。

(2000. 8. 28 受付)

GEOTECHNICAL PROPERTIES OF DIATOMACEOUS EARTH IN NORTHERN Gifu PREFECTURE AND CUT SLOPE STABILITY

Hiroaki SHIGEMATSU, Atsushi YASHIMA, Muneo NISHIO, Yasutomo SAKA and Shingo HATANAKA

The aim of this paper is to study the geotechnical properties of diatomaceous earth and its influence on a cut slope. In general, diatomaceous earth is extremely sensitive to small disturbance due to its much higher natural water content and compression index than those of other natural clays. The following conclusions are obtained from the present study: 1. The soil structure of diatomaceous earth can be easily destroyed by dry-wet cycle. 2. The liquid limit of diatomaceous earth is found to be lowered by disturbance. 3. Yielding properties of Takasu diatomaceous earth is less anisotropic than alluvial and Pleistocene clays. 4. Mechanical behavior of Takasu diatomaceous earth is similar to that of Osaka Pleistocene clays in terms of stress - strain - dilatancy characteristic. 5. Based on the experimental results, countermeasures against cut slope failure were suggested.