

スレーキングで破碎した泥岩の締固め特性

COMPACTION PROPERTIES OF CRUSHED MUDSTONE PRODUCED BY SLAKING

山口晴幸*・黒島一郎**・福田 誠***

By Hareyuki YAMAGUCHI, Ichirou KUROSHIMA and Makoto FUKUDA

In this investigation, clastic samples of mudstone produced by in-situ slaking and crushed samples obtained from sound blocks of mudstones which were not affected by the effect of slaking were used, and the compaction properties of crushed mudstones were investigated. The compaction tests were carried out under various conditions. After compaction tests, grain size analyses were performed and the states of grain crushing during compaction were investigated. In order to estimate the compaction effect, compression and CBR tests were also performed on compacted samples. It was reported that the compaction properties of crushed mudstones were influenced considerably by compaction condition, effect of submergence and initial gradation of sample. In particular, as the submerged samples show remarkable grain crushing during compaction, they have large value of dry density.

Keywords: CBR, compaction test, clastic mudstone, dry density, gradation, grain crushing, slaking, submergence

1. はじめに

堆積軟岩に分類される泥岩は構成土粒子鉱物が固結途上の状態で土粒子構造を形成しているため、土と岩石の中間的な力学特性を示すといわれている。一般に、泥岩の岩塊は乾湿効果の履歴を受けることによって、岩塊自身が破碎して細片化するスレーキング現象を示すことは周知のことである^{1)~4)}。原位置でスレーキングによって細片化した泥岩の岩片は比較的大きな粒径に至るまで広範囲にわたり、土構造物の設計・施工等に必要土質パラメーター等の選定には粗粒材料としての評価手法が要求される。非破碎性の堅固な岩塊を対象とした粗粒材料についてのせん断特性および締固め特性等に関する力学的特性やその試験方法についてはかなり詳細に研究されてきている^{5),6)}。しかし、岩塊自身の強度が低く、特に、水浸作用によって吸水性を示す泥岩塊は小さな付加応力の載荷によっても容易に破碎し脆弱化する特性を有している。そのため、スレーキングで破碎した泥岩の岩片を

地盤材料として活用する際には、締固めや変形過程での付加応力下で生じる岩片の破碎特性について考察することが要求される。だが、破碎性粗粒材料を対象としてその力学的特性と構成岩片の破碎特性との関連について詳細に論じた研究はきわめて少ない。

著者らは、日本各地に広く分布している脆弱な泥岩の支持地盤材料としての工学的適用性や活性性等について検討するために、第三紀泥岩を対象として各種の土質工学的性質に関する基本的事項の解明を試みてきた^{2),7)~23)}。たとえば、低温から高温の温度範囲にわたる各種の温度条件下でのスレーキング試験結果から、泥岩のスレーキング現象を引き起こす主要な因子や岩塊の細片化に伴う鉱物組成や生じた岩片の空隙構造等に関する物性の変化等について論じてきた。また、泥岩の高拘束圧力(拘束圧力の範囲が0~1900 kgf/cm²)下での変形・強度特性やスレーキングして細片化するまでには至らないが吸水性の高い泥岩の乾湿効果によるせん断強さの著しい変化等について報告してきた。さらに、原位置でスレーキング作用を受けてすでに破碎している岩片試料を対象として、一次元応力下での大型圧縮・圧密試験と三軸圧縮せん断試験を実施し、スレーキングによって生じた脆弱な岩片試料の圧縮沈下やせん断特性に及ぼす初期粒度や飽和度等の試料条件や水浸作用の影響等について

* 正会員 工博 防衛大学校助教授 土木工学教室
(〒239 横須賀市走水 1-10-20)

** 正会員 三井建設(株)技術研究所主任研究員
(〒271-01 流山市駒木 518-1)

*** 正会員 工博 三井建設(株)技術研究所主席研究員
(同上)

沈下およびせん断変形過程で生じる構成岩片の破碎特性との関連から考察を試みてきた。

本研究はこのような範疇に位置しており、本成果は脆弱な材料の典型例である泥岩の土質工学的性質を広範囲にわたって究明する途上の1つの成果である。ここでは、原位置でスレーキング作用を受けてすでに細片化している泥岩の岩片試料を主に対象として、脆弱な泥岩の締固め地盤材料としての適用性に関する基本的事項について室内試験結果に基づいて検討している。特に、気乾燥、湿潤、水浸（飽和）された含水比状態の異なる岩片を各種の粒径範囲に区分して、種々の締固めエネルギー条件下で一連の締固め試験を実施し、泥岩の岩片試料についての基本的な締固め特性について、特に、締固め過程で生じる構成岩片の破碎特性に及ぼす試料の含水比状態や初期粒度の影響を調べるという観点から実験的に考察を加えた。また、圧縮沈下試験とCBR試験を実施し締固めた岩片試料の沈下・強度特性と試料の初期粒度等との関連について検討した。

2. 試料と実験方法

(1) 泥岩試料

神奈川県横須賀市郊外に分布する新第三紀泥岩地帯から、写真-1に示すように、原位置ですでにスレーキング作用を受けて細片化した泥岩試料を採取し、ふるい分け試験によって各種の粒径範囲に区分した。スレーキング作用で生じた泥岩の岩片試料（スレーキング試料）は大気と接する地表面付近に存在し、採取時には原位置でほぼ気乾燥状態（岩片の含水比が約3~5%）にあった。また、スレーキング試料と健岩試料との締固め特性の相違について検討するために、比較的スレーキングの進展していない場所でスレーキングした泥岩層の部分を掘削し表層下約0.5~0.7mの深さから、スレーキング作用をほとんど受けていない泥岩塊を採取し、機械的に粉碎して種々の粒径範囲にふるい調製して実験試料（機械的破碎試料）とした。未スレーキング岩塊の含水比は約30~35%で、岩塊の間隙は飽和に近い状態（飽和度約90~95%）にあった。表-1には、泥岩試料の代表的物理特性を示している。また、図-1は、泥岩試料の岩片を用いて測定したX線回折結果を示したもので、泥岩試料の主な含有鉱物は石英（Qz）、カリ長



写真-1 原位置での泥岩のスレーキング状況

石（K-F）、斜長石（Pe）、イライト（I）、クロライト（Ch）、カルサイト（Ca）、クリストバライト（Cr）からなっている。なお、エチレングリコール（EG）処理した同試料の結果から、スレーキング現象を引き起こすことに密接に関与しているといわれている主要な粘土鉱物の1つであるモンモリロナイト（Mo）の存在も確認している。著者らは対象とした泥岩塊の乾湿履歴に伴う細片化過程において、鉱物組成にはほとんど変化はみられないが^{13),20)}、結晶水の含有量度合を示す強熱減量値が漸次低下し、細片化に伴って岩片の空隙体積も減少し、岩片自身の土粒子構造が質的にもかなり変化していることを明らかにしている^{21),22)}。また、対象とした地域の泥岩の岩塊は乾湿効果によってせん断強さがかなり変化する^{7),8),22)}。未スレーキング岩塊を用いて作製した供試体では、採取時における飽和度が約90~95%と飽和に近い状態にあったことから、水浸中の吸水に伴う含水比の増加は数パーセントであった。しかし、十分に水浸した後の一軸圧縮強さは、採取時の含水比状態での供試体のその約10~30%の低下を示した。図-2は採取時の含水比状態での供試体と水浸、気乾燥（温度20°C）、炉乾燥（温度110°C）した供試体についての一軸圧縮試験

表-1 泥岩試料の物理的特性

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.58
液性限界 L.L.(%)	65.8
塑性限界 P.L.(%)	32.7
強熱減量 Li(%)	12.8

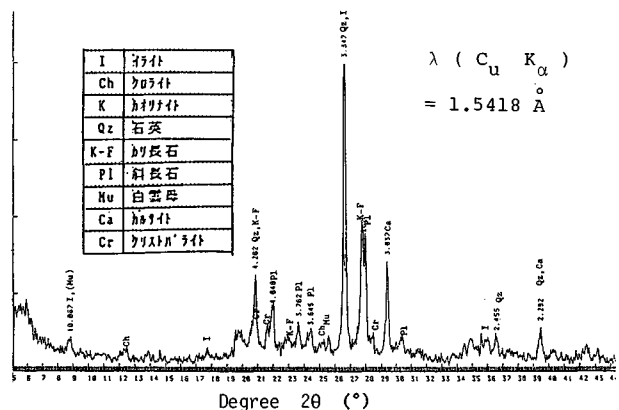
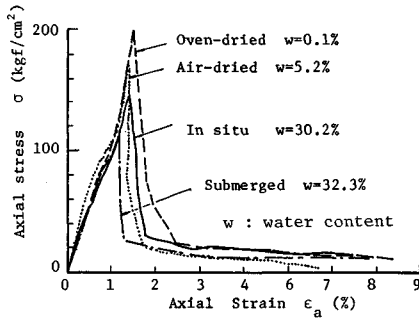


図-1 泥岩試料の鉱物組成



図—2 泥岩の一軸圧縮試験での応力-ひずみ曲線

表—2 気乾燥試料での締固め条件

気乾燥試料	粒径範囲 D (mm)	ランマー重量 W (kgf)	締固め条件 (層数, 突固め回数)
スレーキング試料	2.00~4.76	3.63 2.36 1.05	(3,10), (3,25), (3,55)
	4.76~9.52	3.04 2.36 1.05	(3,10), (3,25), (3,55)

注: モールド内径100mm, 落下高さ300mm

表—3 湿潤試料での締固め条件

湿潤試料	粒径範囲 D (mm)	締固め条件 (層数, 突固め回数)
スレーキング試料	2~4.76	(3,25)
	4.76~9.52	(3,10), (3,25), (3,55)
	9.52~19.1	(3,10), (3,25), (3,55)

注: モールド内径150mm, ランマー重量4.5kgf, 落下高さ450mm

での応力-ひずみ曲線の代表的な例を示したものである。乾湿効果によって細片化するまでには至らなくても、用いた泥岩の健岩試料は含水比状態によって一軸圧縮強さがかなり変化することが理解できる。一方、スレーキング試料では、採取時にほぼ気乾燥状態にあり水浸時の吸水過程で岩塊が著しく破碎を生じたため一軸圧縮試験用の供試体を作製することができなく、水浸時の圧縮強さは求められなかった。

(2) 締固め試験

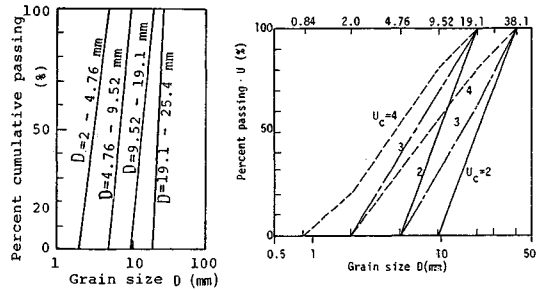
a) 気乾燥試料 原位置で細片化した気乾燥状態(含水比約3~5%)にあるスレーキング試料において、岩片の粒径(D)が $D=2\sim 4.76$ mm と $D=4.76\sim 9.52$ mm の2種類の粒径範囲にふるい調製した試料について、表—2に示すように、内径100mmの締固めモールドを用い、ランマーの落下高さを300mmに固定して、ランマー重量と突固め回数をそれぞれ変えて一連の締固め試験を実施した。

b) 湿潤試料 気乾燥状態にあるスレーキング試料を約1か月間水槽で水浸し飽和状態に達した岩片(含水比約30~35%)を再び気乾燥状態で放置し、気乾燥から飽和状態の範囲で岩片の含水比を種々に調製した湿潤

表—4 水浸試料での締固め条件

水浸(飽和)試料	最大粒径 D_{max} (mm)	均等係数 U_c	締固め条件 (層数, 突固め回数)
機械的破碎試料 (未スレーキング試料)	19.1	2,3,4	(3,17), (3,42), (3,92)
	38.1		
スレーキング試料	19.1	2,3,4	(3,17), (3,42), (3,92)
	38.1		

注: モールド内径150mm, ランマー重量4.5kgf, 落下高さ450mm



(a) 気乾燥と湿潤試料

(b) 水浸試料

図—3 締固め試験試料の構成岩片の粒度分布

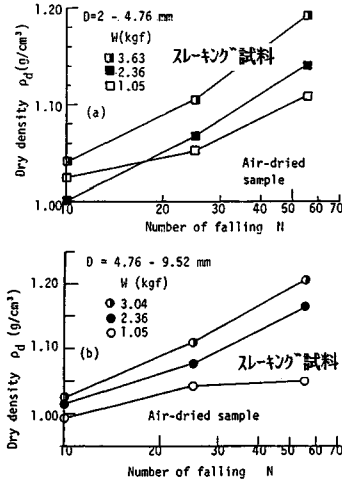
試料を用いた。表—3に示すように、粒径範囲の異なる3種類の湿潤試料について、内径150mmのCBRモールドを用いランマー重量4.5kgf, 落下高さ450mmに固定して、一連の締固め試験を実施した。なお、当初、気乾燥状態で粒度調製を実施しているため、湿潤試料作製のための水浸あるいは水浸後の気乾燥過程において、スレーキングによる岩片の破碎が再度生じ細片化の進展がみられる場合もあった。そこで、細片化による試料の粒径範囲の変化を防ぐために、各含水比状態での岩片は再度所定のふるいで調製しながらモールドに充填された。湿潤試料作製時の細片化現象は、対象とした粒径範囲(D)では、主に、 $D=9.52\sim 19.1$ mmの粗い試料で多少認められたが、細かい岩片からなる試料では水浸と気乾燥過程で岩片の破碎はほとんど観察されなかった。

c) 水浸試料 基岩から掘削採取した未スレーキング岩塊を粉砕してふるい調製した機械的破碎試料(未スレーキング試料)とスレーキング試料とを用いた。表—4に示すように、約1か月の水浸期間で飽和状態に達した岩片を水中でふるい分けし、最大粒径(D_{max})が19.1mmと38.1mmでそれぞれ均等係数(U_c)が2, 3, 4に調製して水浸(飽和)試料を作製した。両水浸試料について、湿潤試料の場合と同様に、内径150mmのCBRモールドを用いランマー重量4.5kgf, 落下高さ450mmに固定して、種々の突固め回数で締固め試験を実施した。

上述の気乾燥と湿潤試料の粒度分布を図—3(a)に、また図—3(b)には水浸試料のそれを示している。なお、締固め試験はすべて非繰返し法で行い、試験後、含水比および質量の測定に加え、締固め過程で生じた構成岩片の破碎状況を調べるためにふるい分け試験を実施した。

表—5 沈下試験の試料条件と沈下後の破砕率

図18での 試料番号	粒径範囲 D(mm)	突固め条件 (層数,突固め回数)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	破砕率 R(%)	
				圧縮試験前	圧縮試験後
No.1 ●	9.52~19.1	(3,25)	1.090	31.4	34.4
No.4 ○		(5,55)	1.277	58.3	69.2
No.2 ▲	4.76~9.52	(3,25)	1.081	24.3	27.8
No.5 △		(5,55)	1.234	51.8	54.6
No.3 ■	2~4.76	(3,25)	1.068	15.7	17.3
No.6 □		(5,55)	1.214	35.8	37.3



図—4 乾燥密度と突固め回数との関係 (気乾燥試料)

また、締固め供試体の沈下・強度特性を調べるための試験を行った。表—5 (表中の破砕率については4.で述べる) に示すように、CBR モールドを用いて水浸した3種類の粒径範囲(D)のスレーキング試料をそれぞれ3層25回と5層55回で突固めた後、試料上端面に5kgfの通水用の荷重板を載荷して、締固め試料の水浸時の沈下特性を調べた。さらに、表—4に示した試料条件下で締固めたスレーキング試料と機械的破砕試料についてCBR試験を実施し、締固め試料のCBR値から締固め度と試料の初期粒度等との関連について考察した。

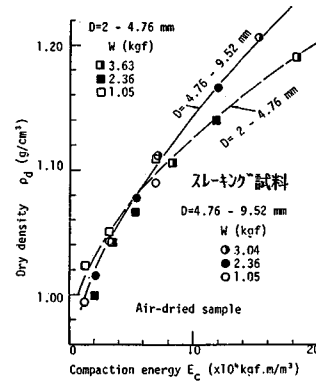
3. 締固め特性

(1) 気乾燥試料の締固め特性

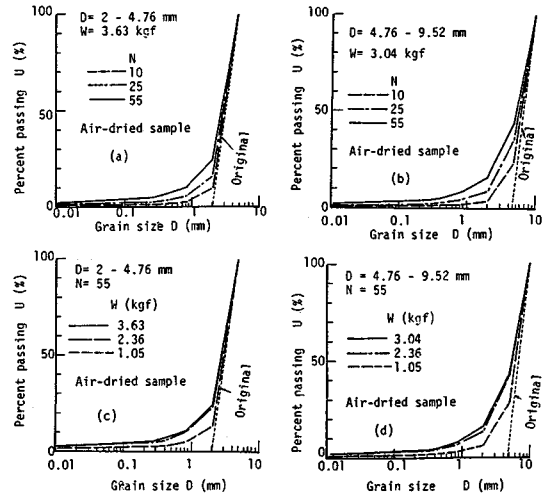
原位置でスレーキング作用を受け細片化した気乾燥状態にある表—2に示す粒径範囲 $D=2\sim 4.76$ mm と $D=4.76\sim 9.52$ mm のスレーキング試料について、内径100mmモールドを用い3層充填としてランマー重量と突固め回数を各種に組み合わせて非繰返し法で実施した締固め試験結果を図—4～図—7に示す。締固めエネルギー(E_c)は次式で示すプロクターの式で算定した²⁴⁾。

$$E_c = \frac{W \cdot H \cdot N \cdot N_e}{V} \quad (\text{kgf} \cdot \text{m} / \text{m}^3) \dots \dots \dots (1)$$

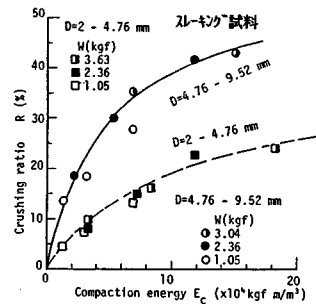
ここで、 W はランマー重量(kgf)、 H はランマーの落下高さ(m)、 N は層当たりの突固め回数、 N_e は層数、



図—5 乾燥密度と締固めエネルギーとの関係 (気乾燥試料)



図—6 締固め後の構成岩片の粒度分布 (気乾燥試料)



図—7 破砕率と締固めエネルギーとの関係 (気乾燥試料)

V はモールドの容量(m^3)である。ランマー重量(W)をパラメーターとして締固め後の供試体の乾燥密度(ρ_d)と突固め回数(N)との関係を図—4に示す。突固め回数が増すほど乾燥密度は当然増大するが、乾燥密度と突固め回数との関係はランマー重量によってかなり異なっている。しかし、乾燥密度(ρ_d)を上式で算定した締固めエネルギー(E_c)との関係で整理すると、図—5に示すよう

に、両粒径範囲 (D) の試料において同一締固めエネルギーでの乾燥密度はランマー重量 (W) によらずほぼ一致し、各粒径範囲の試料での乾燥密度と締固めエネルギーとの間にはほぼ一義的な関係が存在していることがわかる。また同図から、締固めエネルギーの低い領域 ($E_c < 8 \times 10^4 \text{ kgf} \cdot \text{m}^3$) での $\rho_d \sim E_c$ 関係は両粒径範囲でほぼ一致するが、締固めエネルギーの高い $E_c > 8 \times 10^4 \text{ kgf} \cdot \text{m}^3$ 領域では、粒径範囲の大きな $D = 4.76 \sim 9.52 \text{ mm}$ 試料において同一締固めエネルギーでの乾燥密度は多少大きくなるのがわかる。これは図—6と図—7に示すように、締固め過程で生じる構成岩片の破碎度合と密接に関連している。図—6は締固め後の破碎状況を岩片の粒度分布の推移で、また、図—7は破碎率 (R) を締固めエネルギー (E_c) との関係で表示したものである。なお、破碎率 (R) は次式で定義した。

$$R = \frac{f_{\min}}{f} \times 100 \quad (\%) \dots\dots\dots (2)$$

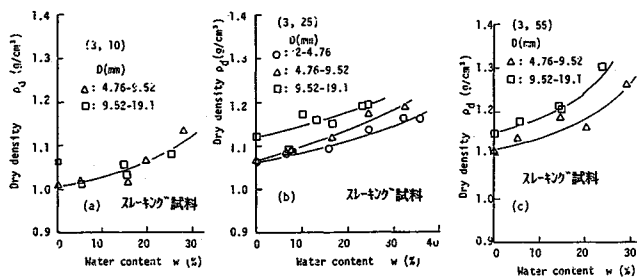
ここで、 f は締固め後の試料の全質量 (kg) で、 f_{\min} は締固めた後に生じた岩片において締固め前の岩片の最小粒径より小さな粒径の岩片の質量 (kg) である。これらの図から明らかなように、スレーキング作用を受けた泥岩試料は締固め過程で著しい岩片の破碎を生じていることがわかる。すなわち、締固めエネルギーが大きいほど、しかも初期粒径範囲の大きな試料 ($D = 4.76 \sim 9.52 \text{ mm}$) ほど締固め後の構成岩片の粒度分布曲線と破碎率に大きな変化がみられ、岩片が顕著に破碎を生じていることがわかる。このため、図—5で示したように、締固めエネルギーの高い領域では破碎によって生じた粒径の小さな岩片群の形成により大きな乾燥密度が得られたものと考えられる。

(2) 湿潤試料の締固め特性

表—3に示した3種類の粒径範囲 (D) の湿潤状態にあるスレーキング試料について、直径 150 mm の CBR モールドと重量 4.5 kgf のランマーを用いて落下高さを 450 mm に固定し、3層 10回、25回、55回の締固め条件下で得られた試料の乾燥密度 (ρ_d) と含水比 (w) との関係を図—8(a)~(c) に示す。これらの図から明らかなよ

うに、構成岩片が気乾燥から飽和状態に対応する含水比範囲にあるスレーキング試料の締固め曲線には、ある含水比状態で乾燥密度が最大となる山形の形状は認められず、いずれの粒径範囲の試料および締固め条件においても、乾燥密度は含水比の増加に伴って増大する傾向にある。突固め回数の多い場合には、当然、乾燥密度は大きくなり、しかも、粒径範囲の大きな試料ほど同一突固め回数での乾燥密度の増加がより期待できる。上述したように、岩片内が飽和となっている含水比範囲までの各締固め条件下で得られた本実験結果では、いずれも最適含水比よりも乾燥側の締固め曲線が得られていると考えられる。すなわち、締固め時に岩片が破碎する脆弱な材料の場合 (後述する図—9~図—11 参照) には、岩片の破碎が生じるたびにあたかも低含水比の試料を混入したようになり、締固め曲線が乾燥側に大幅に移行していると解釈されることと、また、締固めエネルギーが岩片の破碎のために消費され締固めに関与する正味の締固めエネルギーが減少していると考えられることからである。なお、湿潤側までの締固め曲線を得るためには、さらに、高い含水比状態までの試験を実施する必要がある。しかし、破碎性岩片試料では締固め時に遊離水が出るため岩片間の水分が締固めに関与しているか否かを確認する必要があり、試験は非常に難しい。

図—9と図—10は湿潤試料での含水比 (w) の増加に伴う締固め後の破碎状況を示したもので、図—9は粒度分布曲線の推移で、また図—10は破碎率 (R) を含水比との関係で整理したものである。各粒径範囲 (D) の試料において、締固め過程での構成岩片の破碎状況は試料の含水比状態によって大きく左右され、含水比の高い試料ほど顕著な破碎性を示すといえる。このように、試料の含水比状態によって構成岩片の破碎状況が異なるのは泥岩の吸水効果による岩片自身の脆弱化によるものと考えられる。そのため、含水比が高く岩片が飽和 (含水比が約 30~35%) に近い湿潤試料ほど締固め過程での破碎性に富み、細粒化した岩片群の形成によって締固め曲線が乾燥側に移行し、図—8で示したように含水比の増加に伴い乾燥密度の増加が計られるものと推察できる。この



図—8 乾燥密度と含水比との関係に及ぼす初期粒度の影響 (湿潤試料)

締固め過程での破碎状況は、同一含水比の試料では、当然、突固め回数が増加するほど顕著となり (図—10(b) と (c) 参照)、しかも、粒径範囲 (D) の異なる湿潤試料についての同一締固め条件 (3層, 25回) 下での結果を比較した図—11によれば、粒径の大きな粗い岩片から構成された試料ほど大きな破碎率 (R) を示す傾向がみられる。

(3) 水浸試料の締固め特性

ここでは、表—4で示したように、原位置

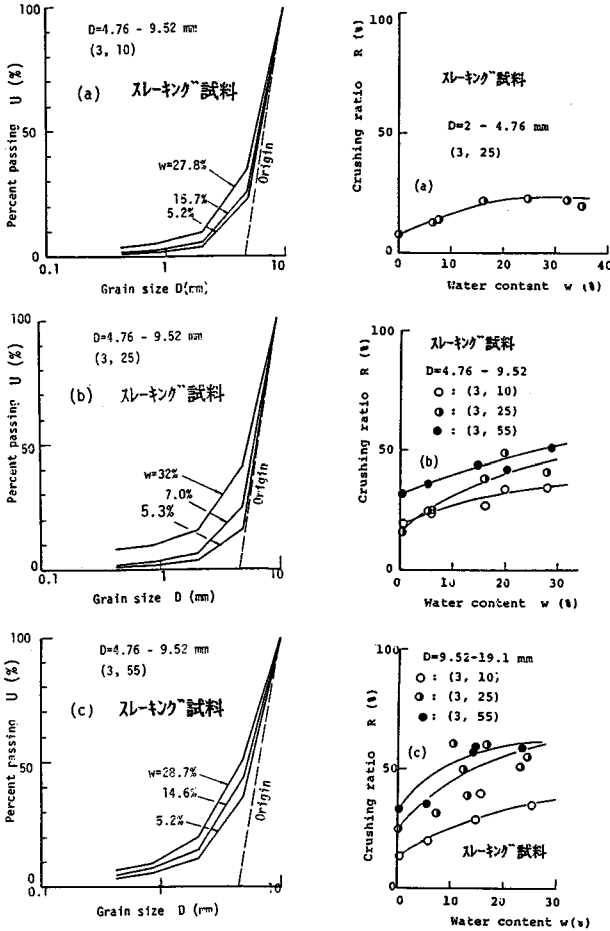


図-9 含水比状態の異なる試料間の締固め後の粒度分布の比較 (湿潤試料)

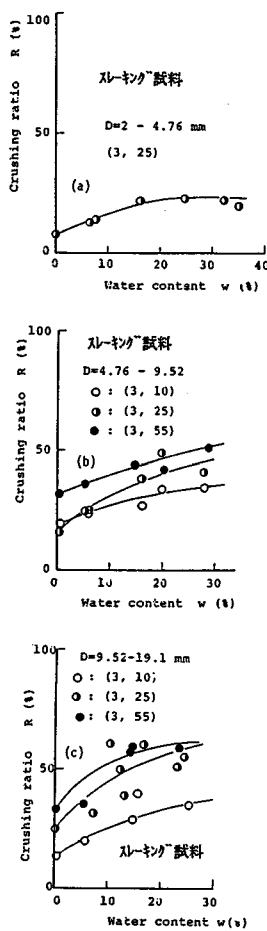


図-10 突固め回数の異なる試料間での構成岩片の破碎状況の比較 (湿潤試料)

でスレーキング作用を受け細片化した試料 (スレーキング試料) と基岩から掘削採取した未スレーキング岩塊を機械的に粉碎した試料 (機械的破碎試料) とをそれぞれ約1か月間水浸し、空隙が十分に飽和された岩片からなる両水浸試料をそれぞれ最大粒径 (D_{max}) が19.1 mmと38.1 mmで均等係数 (U_c) が2, 3, 4となるように粒度調整した試料を用いた (図-3(b) 参照)。水浸試料では、湿潤試料の場合と同様の締固め試験装置 (モールド径150 mm, ランマー重量4.5 kgf, 落下高さ450 mm) を使用し、すべて3層充填で突固め回数をそれぞれ17, 42, 92とした。

最大粒径 (D_{max}) が19.1 mmと38.1 mmの場合の均等係数 (U_c) の異なるスレーキング試料と機械的破碎試料との両水浸試料 (含水比が約30~35%) について、締固め後の乾燥密度 (ρ_d) を締固め条件 (層数, 突固め回数) をパラメーターとして均等係数 (U_c) との関係でプロッ

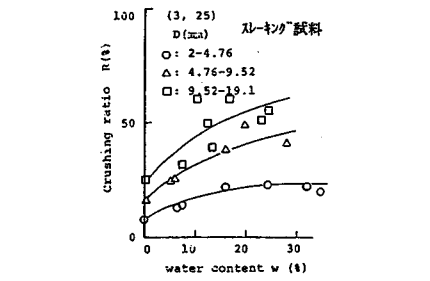


図-11 初期粒度の異なる試料間での破碎状況の比較 (湿潤試料)

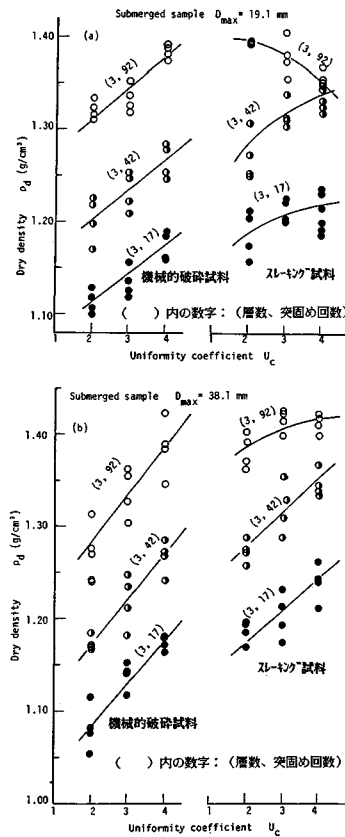


図-12 乾燥密度と均等係数との関係 (水浸試料)

としたのが図-12(a)と(b)である。締固め後の構成岩片の破碎状況を、締固め条件と初期粒度および試料状態で区分して、図-13~図-16には粒度分布曲線で、また図-17には破碎率 (R) と締固めエネルギー (E_c) との関係で表示してある。最大粒径の異なる両水浸試料において、締固め後の試料の乾燥密度 (ρ_d) は突固め回数の増大に伴って増加する傾向を示すが、本研究で対象とした泥岩試料では、同一突固め回数での乾燥密度 (ρ_d) の値はいずれの均等係数の場合においても、機械的破碎試料

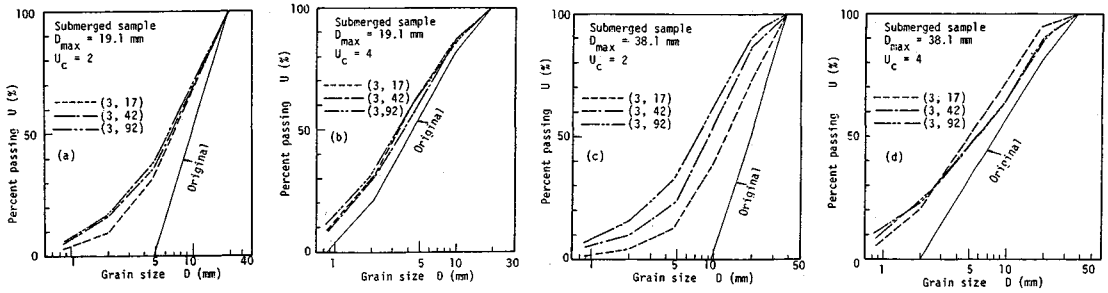


図-13 水浸試料の締めめ後の粒度分布の変化 (スレーキング試料, 突固め回数の相違)

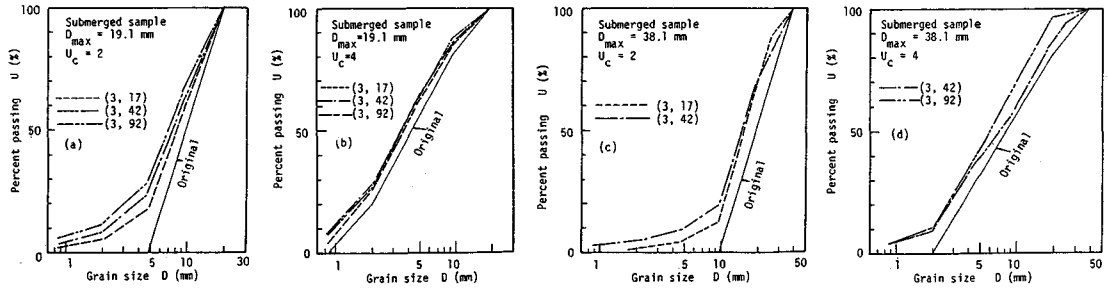


図-14 水浸試料の締めめ後の粒度分布の変化 (機械的破碎試料, 突固め回数の相違)

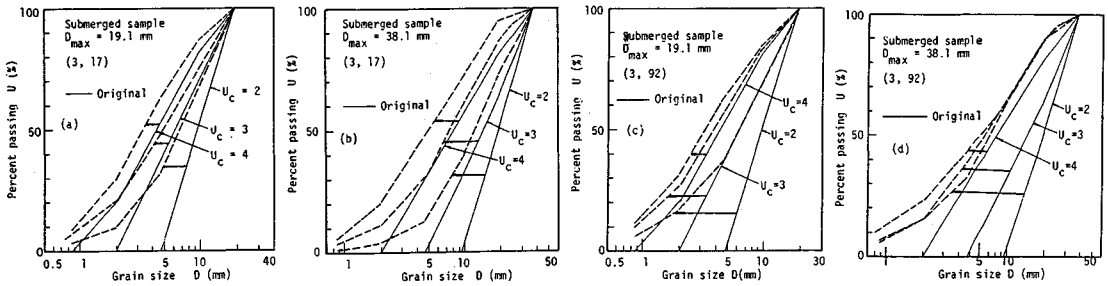


図-15 水浸試料の締めめ後の粒度分布の変化 (スレーキング試料, 均等係数の相違)

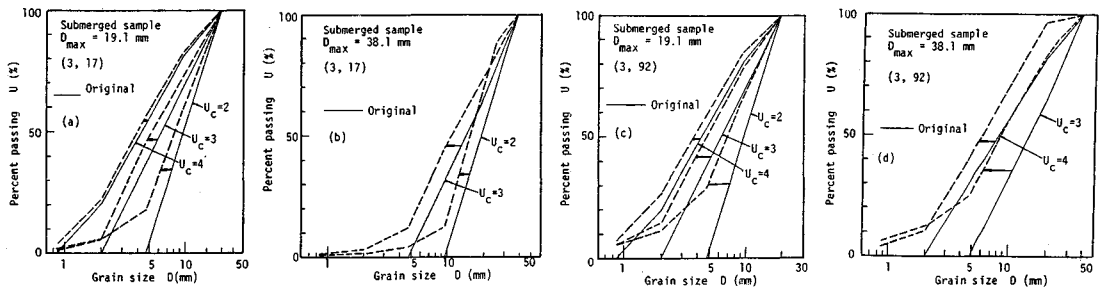
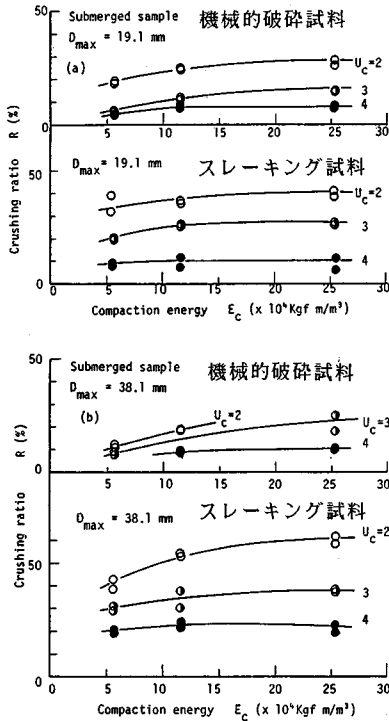


図-16 水浸試料の締めめ後の粒度分布の変化 (機械的破碎試料, 均等係数の相違)

に比較してスレーキング試料で大きくなっている。これは、両試料での締めめ後の粒度分布 (図-13と図-14あるいは図-15と図-16参照) と破碎率 (図-17参照) の比較から明らかなように、いずれの初期粒度の試料においても、機械的破碎試料に比較してスレーキング試料の構成岩片は破碎性に富み、締めめ時の破碎によって、

細かい岩片に富んだ粒径分布へと試料の粒度が変化することに起因していると考えられる。また、いずれにしても、締めめ後の乾燥密度 (ρ_d) は、図-12に示したように、均等係数 (U_c) にかかり依存していることがわかる。すなわち、 U_c が1から4と均一な粒度から良い粒度に至るに従って同一突固め回数での乾燥密度は、機械的破碎



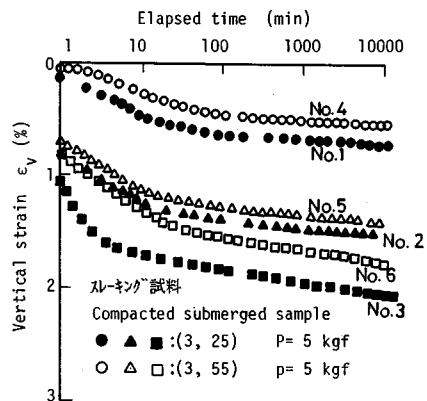
図一七 破砕率と締固めエネルギーとの関係（水浸試料）

試料の場合、 U_c とほぼ比例的に増加する傾向にある。しかし、スレーキング試料の場合には、均等係数の大きな試料が必ずしも大きな乾燥密度を示すとはいえない。3層92回での結果からみられるように、 $D_{max} = 38.1$ mmの試料では乾燥密度は均等係数にあまり左右されない結果を示し、また、 $D_{max} = 19.1$ mmの試料では均等係数が大きくなると逆に低い乾燥密度を示している。このような傾向は、オーバーコンパクションによるものと推察され、含水比の高い水浸されたスレーキング試料ほど、締固めエネルギーが練返し作用として働き乾燥密度の低下を引き起こしやすいと考えられる。このように、試料の初期粒度や両試料間で締固め特性が異なるのは、特に、水浸試料では、締固め過程で生じる構成岩片の破砕の難易性とより密接に関連している。スレーキング作用で生じた細片化した岩片は未スレーキング岩塊の健岩から得た岩片に比較して、岩片自身はかなり劣化していると考えられ、上述したように、いずれの初期粒度の試料においても締固め過程での岩片の破砕性に富んでいることが図一13～図一17より明らかである。また、図一15と図一16に示すように、均等係数(U_c)の大きな試料では締固め後の粒度分布曲線の左方への移動が少なく、締固め過程での岩片の破砕が比較的抑えられる傾向にある。特に、この傾向は機械的破砕試料の場合において明瞭に認められる。これに対して、最大粒径(D_{max})が

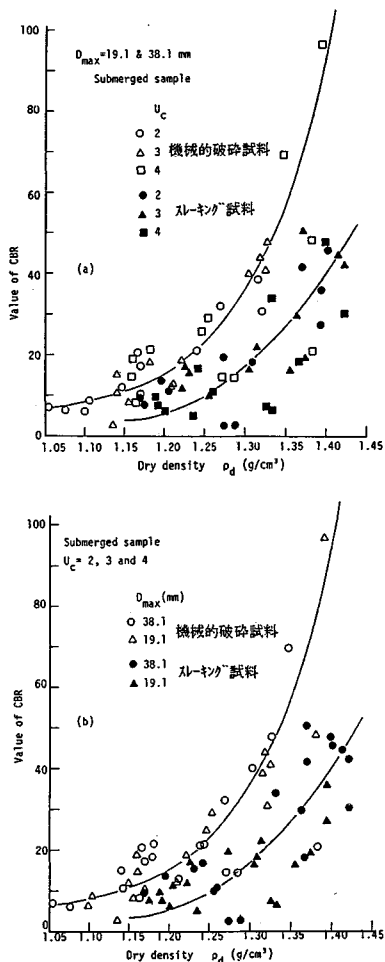
38.1 mmのスレーキング試料では、図一13(d)と15(d)でみられるように、締固め後の粒度分布曲線に初期粒度の相違や締固めエネルギーの大小の影響がほとんど認められず、締固め後の各粒度分布曲線は互いにほぼ一致している。なお、締固め後の破砕状況を図一17で示した破砕率(R)と締固めエネルギー(E_c)との関係でみると、スレーキング試料は機械的破砕試料に比較して破砕性に富み、しかも、最大粒径(D_{max})が大きく均等係数(U_c)の小さな均一な粒度の試料ほど構成岩片の破砕の生じやすいことが容易に理解できる。

4. 締固め試料の沈下およびCBR特性

水浸されたスレーキング試料を用い表一5で示した試験条件で締固めた後、水浸し、5 kgfの一定荷重下での水浸過程における鉛直方向の沈下をひずみ(ϵ_v)で表示し時間の対数($\log t$)に対してプロットしたのが図一18である。表一5中に示すように、高いエネルギーで締固められた試料では締固め後の乾燥密度(ρ_d)が大きいため、各粒径範囲の試料で $\epsilon_v \sim \log t$ 曲線は上方に位置し沈下量は低減するが、初期粒度の相違が沈下特性に明瞭に現われることがわかる。すなわち、初期粒径範囲(D)の大きな試料ほど締固め過程で生じる破砕性に富み破砕率(R)も大きく、締固め後の乾燥密度(ρ_d)も大きくなるため、一定荷重下での沈下量が低減する傾向にある。表一5をみると締固め後に比較して沈下後(荷重載荷後約10000分)の破砕率(R)は1.5% (No.6の試料)から最大で10.9% (No.4の試料)の増加を示している。この程度の荷重(鉛直応力に換算して約0.028 kgf/cm²)下で生じる破砕は締固め時に若干の構造破壊を受けた岩片の部分が圧縮沈下に伴って部分的に破砕するためと推察されるが、本実験結果では、沈下に伴う破砕率(R)の増加割合と粒径範囲(D)の間には明瞭な傾向は認められない。しかし、上述したように、粒径の大きな岩片



図一18 締固め試料の沈下性状（水浸試料）

図一十九 締固め試料の CBR と ρ_d との関係 (水浸試料)

を締固めた試料 (No.1 と 4) ほど、一定荷重下での沈下量が減少する傾向を示していることから、No.1 と 4 の試料 ($D = 9.52 \sim 19.1$ mm) では他の粒径範囲の試料に比較して、一定荷重下で生じる岩片の細粒化が沈下に寄与している効果が大きいと考えられる。著者らは本実験で用いたスレーキング試料についての一次元圧縮試験結果から、岩片の破碎が卓越し始める圧縮応力 (一般に、破壊圧とよばれ粘土等の圧密降伏応力に相当する) は初期粒度、初期間隙比、初期含水比等によって影響を受け、特に、岩片の含水比状態に大きく依存し、気乾燥試料ではおおむね $2 \sim 3$ kgf/cm² であるが、吸水して脆弱化した水浸試料ではその $1/10 \sim 1/5$ となり、それより高い圧縮応力領域では、沈下量の大部分が構成岩片の破碎に起因して生じていることを指摘している^{[18], [21]}。

一方、図一十九(a) と (b) は、水浸した岩片を用いて締固めたスレーキング試料と機械的破碎試料との CBR 値を乾燥密度 (ρ_d) との関係でプロットしたものである。

両図から、多少のばらつきは認められるが乾燥密度 (ρ_d) の増大に伴って CBR 値はかなり増加する傾向にある。しかし、同一乾燥密度に対応するスレーキング試料での CBR 値のプロットは機械的破碎試料でのそれに比較しておおむね下方に位置し、スレーキング作用を受けて細片化した試料の CBR 値はかなり低いことがわかる。なお、最大粒径 (D_{max}) や均等係数 (U_c) に関する試料の初期粒度の相違は CBR 値に明瞭な影響を及ぼしておらず、同一乾燥密度では互いにほぼ等しい CBR 値を示す傾向にある。

5. まとめ

本試験結果で示したように、スレーキングによって細片化した泥岩の岩片は締固めによって著しく破碎を生じ締固め時の密度を推定する際には岩片の破碎状況を評価することが重要となる。特に、水浸過程での吸水効果やスレーキングで生じた岩片がどの程度堅固であるかということは締固め時の構成岩片の破碎割合と密接に関連し、スレーキングによって細片化した泥岩を盛土や路床・路盤等の締固め地盤材料として活用する際に重要な問題となる。下記に本研究で得られた結果を要約する。

(1) 本研究で対象としたスレーキングで細片化した泥岩の乾燥、湿潤、水浸試料についての一連の締固め試験結果から、構成岩片内の間隙が飽和状態にある水浸試料は締固め時の破碎性に最も富み、岩片の破碎効果によって高い乾燥密度が得られる。

(2) スレーキングで細片化した泥岩の締固め時の破碎状況は締固めエネルギーと試料の含水比状態のみならず、試料の最大粒径や均等係数に関する初期粒度にかなり依存し、最大粒径が大きく、しかも、均一な粒度配合の試料において顕著となる。

(3) スレーキングによって細片化した岩片と健岩から成る岩片で構成された両試料 (スレーキング試料と機械的破碎試料) 間では、締固め特性と締固め時の岩片の破碎状況はかなり異なる。同一締固めエネルギーで岩片の破碎性に富むスレーキング試料の方が機械的破碎試料よりも高い乾燥密度が得られる。しかし、同一乾燥密度で締固められた両試料間での CBR 値にはかなりの相違が認められ、スレーキング試料に比較して機械的破碎試料の CBR 値はかなり大きくなる。

(4) スレーキング試料の CBR 値は締固め後の密度と構成岩片の劣化状態に依存するが、締固め時の初期粒度 (最大粒径と均等係数) の影響はほとんど認められなかった。しかし、水浸過程における締固め試料の一定荷重下での沈下性状は試料の初期粒度の影響を受け、小さな粒径範囲にある試料ほど締固め後の乾燥密度が小さくなるため大きな圧縮性を示す。

最後に、著者らは脆弱な泥岩の支持地盤材料としての工学的活用性の観点から、まず、その土質工学的性質に関する基本的事項を広範囲にわたって究明することを試みてきている^{2), 7)~23)}。本報告はその成果の1つであり、これまでの一連の成果とあいまって泥岩の土質工学的性質を解釈する際の一助となるであろう。しかし、泥岩の岩片試料の締固め特性に重点を置いた本報告は室内試験結果に基づいたものである。室内試験では、用いるモールドの寸法や、モールドの寸法と対象となる岩片の大きさ等の試験条件に限りがある。また、本研究では突固め方法も重錘落下法によっている。そのため、現場で対象とする岩塊の大きさや締固め方法における相違等によって、特に、泥岩のような脆弱な破砕性材料の現場での締固め性状は制約された試験条件下での室内試験結果から得られるそれとかなり異なることが予想される。そこで、室内試験から得られた成果を直接現場に反映することにはかなりの問題があると考えられる。現在、かなり粗い泥岩塊からなる脆弱な材料の締固めと締固めた地盤の沈下や安定性等に関する現場試験を計画している。今後、締固めに関する本成果や圧縮沈下および変形・強度特性に関する著者らの既存の成果を活用し、現場試験結果との対応を試み、泥岩のような破砕性材料の室内試験で採用すべき試料の相似粒度の問題、現場での締固め条件を選定する際の室内試験の手法やその結果の適用方法等の問題について検討する予定である。

参 考 文 献

- 1) 小島圭二・齊藤保佑：軟岩の膨張・スレーキング特性(その1), 応用地質, Vol. 25, No. 1, pp. 10~22, 1984.
- 2) 山口晴幸・吉田廣太郎・黒島一郎・福田 誠：新第三紀泥岩のスレーキング現象, 土と基礎, Vol. 37, No. 4, pp. 5~10, 1989.
- 3) 島 博保・今川史朗：スレーキング材(ぜい弱材)の圧縮沈下と対応策, 土と基礎, Vol. 28, No. 7, pp. 45~52, 1980.
- 4) 佐藤 巖・武田敏彦・赤石 勝：スレーキング材料による盛土の圧縮沈下特性, 土木学会第16回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 222~223, 1989.
- 5) 土質工学会編：ロックフィル材料の試験と設計強度, 1982.
- 6) 土質工学会編：粗粒材料の変形と強度, 1986.
- 7) 山口晴幸・吉田廣太郎：泥岩のスレーキングとせん断特性, 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 91~96, 1987.
- 8) Yamaguchi, H., Yoshida, K., Kuroshima, I. and Fukuda, M.: Slaking and shear properties of mudstone, ISRM, Rock Mechanics and Power Plants, Vol. 1, pp. 133~144, 1988.
- 9) 黒島一郎・山口晴幸・廣田成男・福田 誠：泥岩粗粒材の圧縮・せん断特性, 第23回土質工学研究発表会講演集, pp. 627~630, 1988.
- 10) 桜田良治・山口晴幸・吉田廣太郎・黒島一郎・福田 誠：堆積泥岩の工学的性質について, 第23回土質工学研究発表会講演集, pp. 1129~1132, 1988.
- 11) 黒島一郎・山口晴幸・福田 誠：泥岩粗粒材の圧縮沈下特性, 第43回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 368~369, 1988.
- 12) 山口晴幸・黒島一郎・福田 誠：第三紀泥岩の空隙分布, 土と基礎, Vol. 36, No. 12, pp. 55~60, 1988.
- 13) 山口晴幸・中山美佐緒・黒島一郎・福田 誠：スレーキングで生じた泥岩の鉱物組成, 土木学会第16回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 192~193, 1989.
- 14) 黒島一郎・福田 誠・山口晴幸：砕屑泥岩の締固め特性, 土木学会第16回関東支部技術研究発表会講演概要集, pp. 198~199, 1989.
- 15) 黒島一郎・福田 誠・山口晴幸・豊田 真：スレーキングで生じた泥岩粗粒材の締固め特性, 第24回土質工学研究発表会講演集, pp. 1801~1804, 1989.
- 16) 山口晴幸・豊田 真・黒島一郎・福田 誠：砕屑泥岩の締固め特性(第2報), 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 288~289, 1989.
- 17) 山口晴幸・豊田 真・桜田良治・黒島一郎：砕屑泥岩の圧密沈下特性, 第3部, pp. 400~401, 1989.
- 18) 山口晴幸・豊田 真・福田 誠・黒島一郎：砕屑泥岩の圧縮特性におよぼす水浸および粒径の影響, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, 第3部, pp. 402~403, 1989.
- 19) 山口晴幸・日比野忠史：各種地盤材料の毛管および不飽和浸透特性, 土と基礎, Vol. 37, No. 6, pp. 49~55, 1989.
- 20) 山口晴幸・吉田廣太郎・黒島一郎・福田 誠：泥岩のスレーキング特性, 土木学会論文集, 第406号/Ⅲ-11, pp. 17~26, 1989.
- 21) 森 洋一・高田義泰・山口晴幸・木暮敬二：泥岩のスレーキングと圧縮特性, 第18回日本道路会議一般論文集, pp. 160~161, 1989.
- 22) 山口晴幸・廣田成男・黒島一郎・福田 誠：第三紀泥岩の高拘束圧力下での非排水せん断特性, 土と基礎, Vol. 37, No. 11, pp. 5~11, 1989.
- 23) 山口晴幸・吉田廣太郎・黒島一郎・福田 誠：スレーキングによって破砕した第三紀泥岩の三軸せん断特性, 土と基礎, Vol. 38, No. 1, pp. 59~66, 1989.
- 24) 土質工学会編：土質試験法(第2回改訂版), 第5編, 第1章 締固め試験, 1979.

(1989.5.8・受付)