

舞鶴市に分布する泥岩性材料の圧縮特性

加登文学¹・森尾敏²・堤哲平³

要旨:舞鶴市には粘土質の泥岩性の土が広く分布している.この土は掘削や切土工事に伴い頻繁に発生し,泥岩が強風化した状態であるため,降雨等の浸水により細粒化を生じやすいという特徴がある.本研究では,乾湿繰り返し試験と単粒子破砕試験を実施して舞鶴市に分布する泥岩性材料の細粒化特性を明らかにするとともに,建設材料として用いた際の圧縮特性について,一次元圧縮試験を実施して検討した.その結果,泥岩性材料は乾燥状態に比べ浸水状態では,浸水による団粒構造の崩壊や単粒子破砕強度の低下により,沈下量が大きくなり,圧縮降伏応力が小さくなることが明らかとなった.

キーワード:泥岩性材料,圧縮,スレーキング,粒子破砕

1. はじめに

舞鶴市には泥岩を母材とした粘土質の土が広く分布している.この土は降雨等による浸水の影響で細粒化しやすいことが知られている.細粒化の進んだ泥岩は粘土化してしまうために強度が極端に低くなり,台風や梅雨時期の大量の降雨により地すべり,斜面崩壊を起こす要因となる.舞鶴市においても過去の豪雨において泥岩の風化層と考えられる箇所でも多くの表層崩壊が生じている¹⁾.

一方,泥岩性の土は細粒化に起因した沈下やせん断破壊を引き起こすおそれがあるため,建設材料としては適さないとされている²⁾.しかしながら,近年の土不足や環境問題の深刻化をうけて,泥岩性材料のような建設工事に適さない建設発生土も積極的に再利用することが求められている.舞鶴市では,掘削や切土工事において上述した泥岩性材料に遭遇する機会が多く,これらの処理が課題となっている.

泥岩性材料を盛土や埋戻し等に使用する上で力学特性を知っておくことが重要である.これまでに複数の研究者^{2),3),4),5)}により泥岩性材料の建設材料としての適用性が調べられており,主に浸水による泥岩のスレーキングに着目した検討がなされ,泥岩性材料の長期にわたる圧縮沈下が指摘されている.

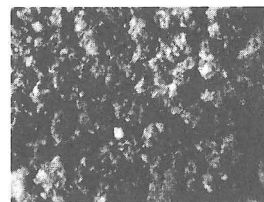
一方,スレーキングと同様に土粒子が細粒化する現象には応力作用による粒子破砕がある.粒子破砕は砂の圧縮特性と密接に関係^{6),7)}しており,乾燥した状態でも粒子破砕に起因したクリープ的な沈下挙動を生じる^{8),9)}ことも確認されている.そこで本研究では,スレーキングおよび粒子破砕による土粒子の細

粒化に着目して,舞鶴市に分布する泥岩性材料の圧縮特性を明らかにする.

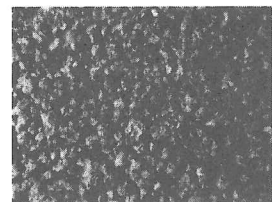
2. 実験に用いた試料

2. 1 試料の概要

本研究では京都府舞鶴市周辺で採取された2種類の土と比較材料として建設工事に用いられることが多いまさ土(宮津市産)を用いて実験を行った.**Photo.1(a)**に示す土は,赤褐色で細粒分を多く含み,土粒子は指でつまむ程度で簡単に崩れるほど脆弱である.実験に用いた試料は由良川沿いの斜面崩壊現場から採取したが,地質図¹⁰⁾によると,赤色系褐色土に分類され,舞鶴市の東西の市街地を取り囲むように分布している.泥岩を母材とした強風化状態の土である.以下,この土をB土と呼ぶ.**Photo.1(b)**の土は舞鶴市加佐地区で採取された山土であり,灰色がかった薄茶色で,B土と同様に泥岩を母材とした細粒分を多く含んだ土である.以下,この土をK土と呼ぶ.これら2試料を総称して泥岩性材料と呼ぶ.



(a) B-soil



(b) K-soil

Photo.1 Microscopic image of mudstone material

2. 2 試料の一次性質

Table1 に試料の一次性質値を示す.また,**Fig.1** に塑性図,**Fig.2** に粒径加積曲線を示す.これらの結果から以下のことが考察される.

1 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 講師

2 舞鶴工業高等専門学校 建設システム工学科 教授

3 舞鶴工業高等専門学校専攻科 建設・生産システム工学専攻 2年 学生

Table1 Physical and chemical properties

	ρ_s (g/cm ³)	e_{min}	e_{max}	w_L	I_p	Li (%)
B土	2.586	1.602	2.383	64.0	29.4	9.55
K土	2.577	1.013	1.704	38.0	15.5	6.68
まさ土	2.589	0.621	1.107	NP	NP	-

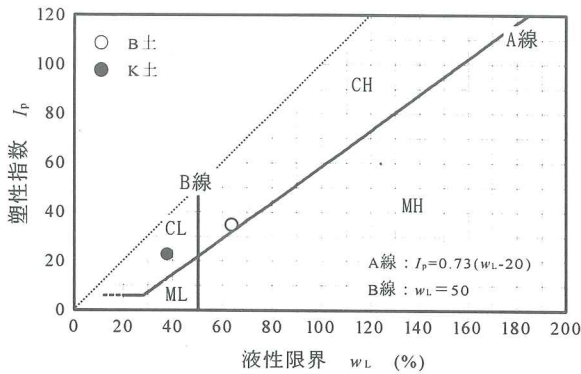


Fig.1 Plasticity chart

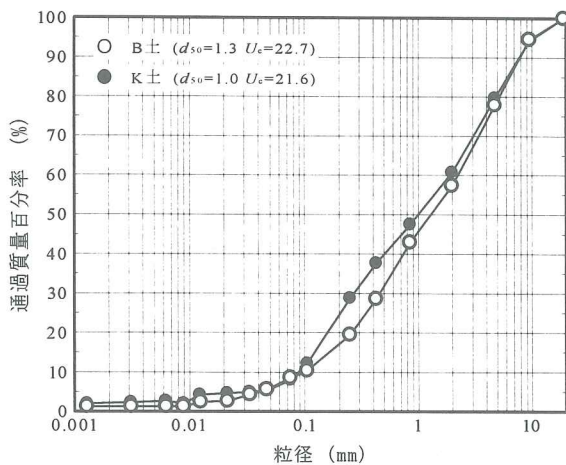


Fig.2 Grain size distribution curve

土粒子密度はいずれも 2.6 程度であり、その値から基本的には岩石の風化物を主成分とする残積土といえる。

粒度試験結果から、泥岩性材料の粒度分布はほぼ等しく、粒径幅の広い土である。しかしながら、いずれの土も、土粒子は指で強くつまむ程度で崩れることや、顕微鏡写真から見て取れるように小さい粒子が団粒化していることなどから、粒子破碎や浸水によるスレーキングなどによって細粒化が進行し、粒度分布が変化しやすい土といえる。なお、ここで示した粒度分布は試料採取時のものであり、次章に示す各実験では粒度調整した試料を用いている。

液性限界・塑性限界試験は 425 μ m ふるいを通過した試料に対して行った。塑性図から判断すると、B

土は高液性限界の粘土に分類され、圧縮性が高いことが示唆される。K土は低液性限界の粘土に分類され、圧縮性はB土に比べて低いことが示唆される。

次に、最大・最小間隙比試験の結果を見てみると、泥岩性材料の最小間隙比 e_{min} は 1 を超えており、さらに B 土の最大間隙比 e_{max} は 2.38 と大きな値となっており、このことから圧縮性の高さが示唆される。

強熱減量 L_i から B 土は K 土に比べて有機質成分を多く含んでいることが推察される。この有機質成分は塑性指数や間隙比の値に関係していると考えられる。

3. 泥岩性材料の細粒化特性

3.1 浸水による土粒子の細粒化の観察

泥岩性材料は浸水により細粒化することが知られている。Photo.2 は舞鶴市周辺に分布する泥岩性材料 (B 土, K 土) とまさ土の土粒子を浸水させ、細粒化の過程を顕微鏡で観察した結果である。細粒化後の写真は、浸水開始から約 5 分後に撮影された。比較として用いたまさ土は、粒子のまわりに付着した細粒分が洗い落とされているだけであるが、泥岩性材料は土粒子がバラバラに細粒化している。このような浸水による細粒化現象は B 土, K 土いずれも、観察した土粒子の半数程度で確認された。

そこで、舞鶴市の泥岩性材料について、乾湿繰り返し試験と単粒子破碎試験¹¹⁾の2種類の試験によって細粒化特性を調べた。

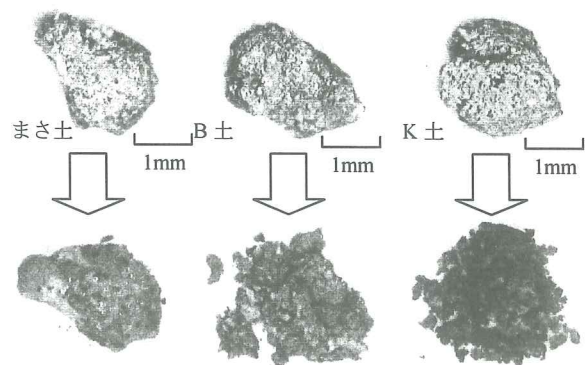


Photo.2 Observation of slaking

3.2 乾湿繰り返しによる細粒化特性

B 土, K 土, まさ土の 3 試料を用いて、乾湿繰り返し試験を行い、それぞれの細粒化特性を調べた。試験方法は、以下のとおりである。

- ① 75 μ m で軽くふるい分けた乾燥状態の試料を準備する。
- ② 乱した土の試料調整方法により試料を 200g

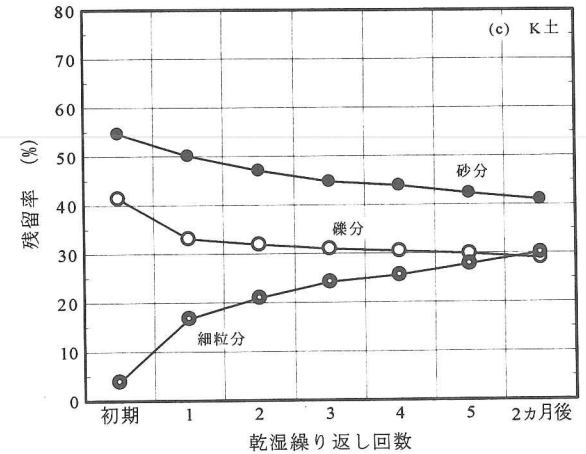
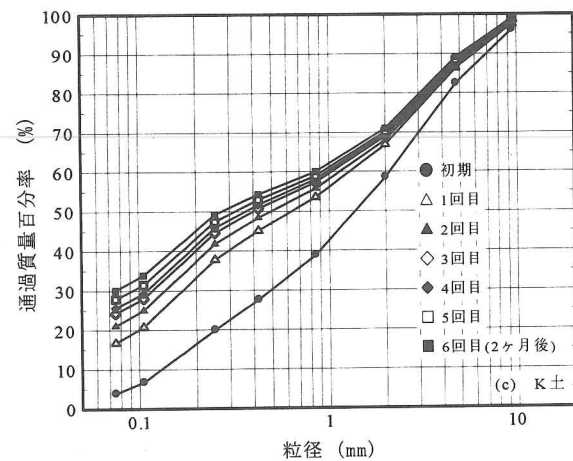
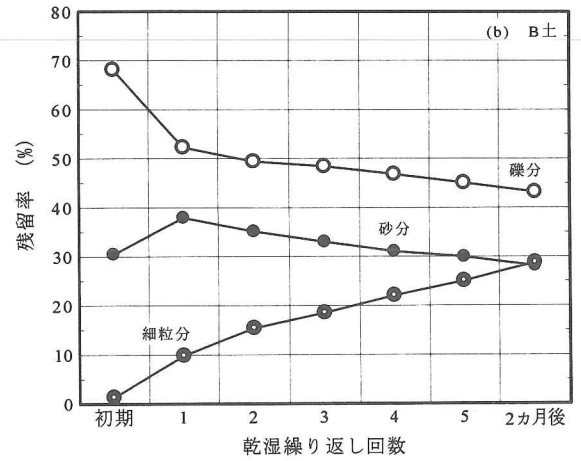
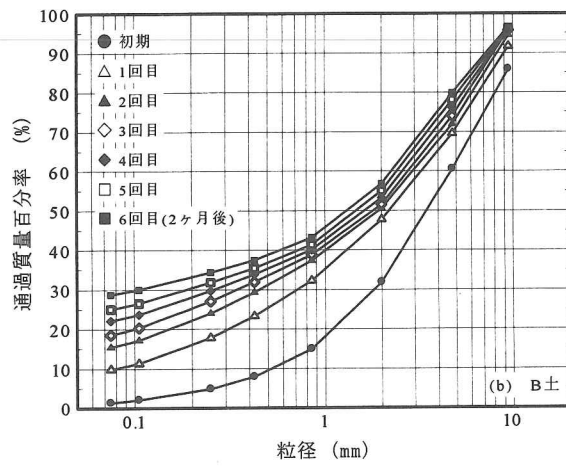
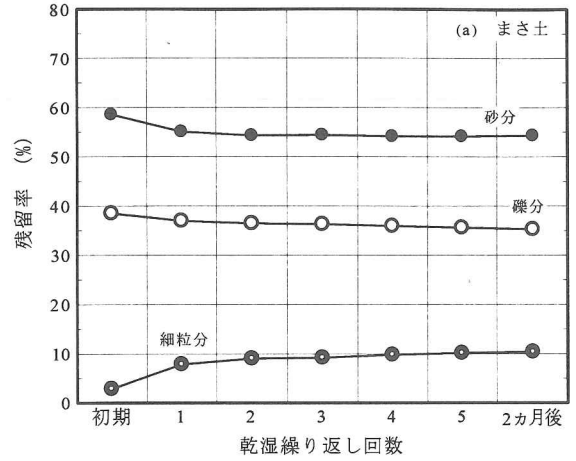
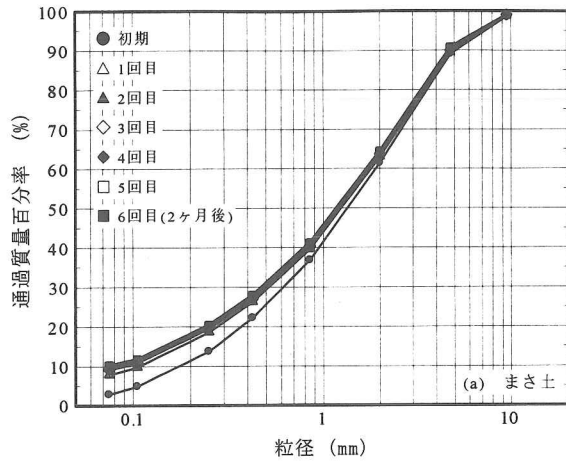


Fig.3 Change in grading curve due to drying and wetting cycle

Fig.4 Change in residual grain rate

程度取り分け, 75 μ m~9.5mm の標準ふるいで粒度試験を行い, これを初期粒度分布とする。

- ③ 75 μ m のふるい上で水洗いし, 細粒分を取り除き, 恒温炉乾燥(110 \pm 5 $^{\circ}$ C)を約 24 時間行う。
- ④ 乾燥試料に対してふるい分けを実施し, 粒度分

布を調べる。

- ⑤ ③・④を 5 回繰り返した後, 2 ヶ月間浸水させた後, 24 時間炉乾燥を行い, 粒度分布を調べる。

Fig.3 は乾湿繰り返し試験に伴う(a)まさ土, (b)B土, (c)K土の粒径加積曲線の変化である。Fig.4 は残留率の変化を礫分(2mm以上), 砂分(75 μ m

～2mm), および細粒分 (75 μ m 通過) ごとにまとめたものである。

粒径加積曲線を見ると, まさ土は水洗い後一回目で粒径加積曲線が少し上方に変化した。これは, 粒子のまわりに付着していた細粒分が洗い流されたためと考えられる。しかしながら, 2 回目以降はあまり変化がみられない。それに対し, B 土, K 土は乾湿繰り返し回数の増加に伴って, 各粒径での通過百分率が増え, 粒径加積曲線の上方への変化が継続してみられる。これは, 乾湿繰り返しによって土粒子の細粒化が進行していることを意味している。

Fig.4 の残留率の変化をみてみると, まさ土は粒径加積曲線同様, 変化はあまりみられない。泥岩性材料では, B 土は礫分, 砂分が減少し, 細粒分が増加している。礫分と砂分の残留率低下の程度がほぼ等しいことから, 粒径に関係なく均等に細粒化が進行していると考えられる。一方 K 土は, 粒径 2mm 以上の礫の変化が B 土に比べ少なく, 砂分の減少率が高いことがわかる。

3.3 単粒子破碎試験¹¹⁾

土粒子の細粒化現象には, 浸水による細粒化 (スレーキング現象) とともに荷重载荷による細粒化, いわゆる粒子破碎現象がある。土粒子の破碎は乾燥した砂の圧縮性と密接な関連があり, 特に単粒子破碎強度と一次元圧縮状態の降伏応力とは強い相関があることが知られている⁷⁾。そこで, 本研究では乾燥状態と浸水状態の土粒子に対して単粒子破碎試験を行い, 泥岩性材料の単粒子破碎強度とそれに与える浸水の影響について考察する。

単粒子破碎試験は平らな剛板に挟まれた単一の土粒子に対して荷重を加えて行われた。実験に用いた土粒子は各試料の 2mm および 4mm ふるいに残留したもので, 乾燥状態と一日浸水させた状態の 2 パターンで試験を実施した。

試験結果から最大荷重 $F_f(N)$ を粒子径 $d_0(mm)$ の 2 乗で除したものを次式¹¹⁾のように最大破碎強度 σ_f (MPa) と定義する。

$$\sigma_f = \frac{F_f}{d_0^2} \quad (1)$$

Fig.5 に最大破碎強度 σ_f と粒径 d_0 の関係を示す。図中の直線はシリカ砂に対する実験結果¹²⁾から得られた近似線である。図より, いずれの試料も, 粒径が小さいほど単粒子破碎強度は高くなるというシリカ砂と同様の傾向がみられた。また, 泥岩性材料である B 土, K 土の単粒子破碎強度は同じ粒径のシリカ砂と比べて 10 分の 1 以下であり, 土粒子が脆弱なことで知られるまさ土よりも低い値となった。浸水による影響をみてみると, まさ土は浸水の影響はほとんど見られないが, B 土, K 土は浸水によって破

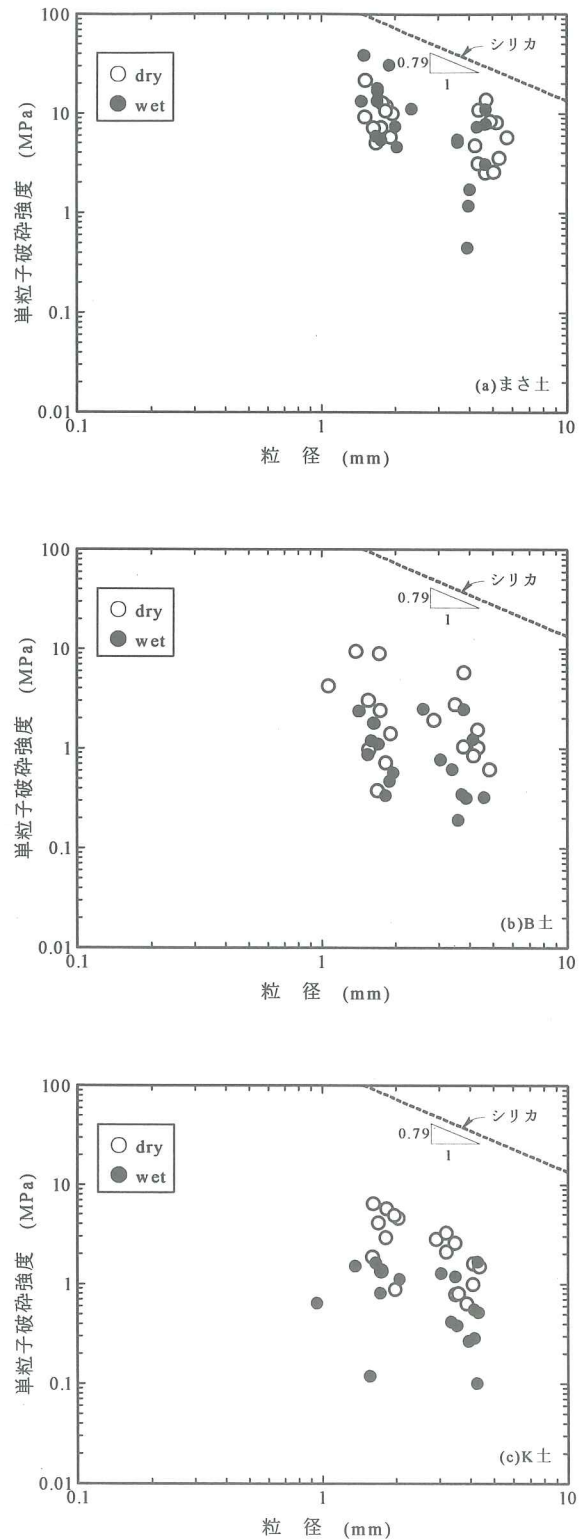


Fig.5 Relationship between single particle crushing strength and grain size

碎強度が低下する傾向がみられた。

Fig.6 は泥岩性材料の 2mm および 4mm ふるい残留粒子の単粒子破碎強度の平均値をプロットしたものである。これらの結果から得られる粒径と単粒子破碎強度の関係は, 乾燥状態では Fig.5 に

示すシリカの結果と同じ勾配で近似できるといえる。また、浸水状態の結果は乾燥状態に比べて勾配は小さいが、B土、K土とも同じ勾配で近似できる結果となった。

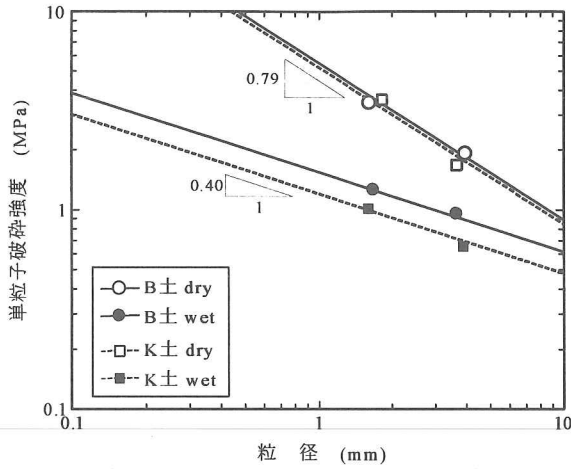


Fig.6 Effect of grain size on single crushing strength

4. 舞鶴市周辺に分布する泥岩性材料の圧縮特性

4. 1 一次元圧縮特性

泥岩性材料の圧縮特性について調べるために一次元圧縮試験を実施した。実験は標準圧密試験の試験方法¹³⁾にて、礫分を取り除いた各試料の乾燥状態と浸水状態の供試体に対して実施した。供試体は相対密度80%以上を目標に作製した。また、泥岩粒子が完全に細粒化した状態を想定して、粒径75 μ m以下にすり潰した試料による浸水状態での試験も実施した。

一次元圧縮試験の結果をFig.7およびFig.8に表す。Fig.7は間隙比と鉛直応力との関係、Fig.8は圧縮指数 C_c' と鉛直応力 σ_v との関係を示したグラフである。ここで、 C_c' は e - $\log \sigma_v$ 曲線の各ステップ間の傾きであり、式(2)で算出される。 C_c' はその応力域における圧縮性を表しており、値が大きいほど圧縮性が高いことを表している。

$$C_c' = \frac{e_{i-1} - e_i}{\log \frac{(\sigma_v)_i}{(\sigma_v)_{i-1}}} \quad (2)$$

ここで、 e_i は第*i*ステップの载荷終了後の間隙比、 σ_{vi} は第*i*ステップの载荷圧力である。

まず乾燥状態の結果を比べると、Fig.7の e - $\log \sigma_v$ 曲線より、実験を行った応力範囲での間隙比の変化量は泥岩性材料のB土が0.5程度、K土が0.3程度と、まさ土の0.2程度に比べて大きいことがわかる。密詰め状態での応力の増加に伴う間隙比の変化は、主に粒子破碎によるものであり、泥岩性材料の単粒子破碎強度の低さに対応した結果といえる。また、

Fig.8より、いずれの試料も乾燥状態では実験を行った範囲において圧縮指数 C_c' が増え続けており、圧縮性が増加していることがわかる。 C_c' の値を比較すると、いずれの応力段階においてもB土が最も大きな値を示しており、B土の圧縮性が高いことがわかる。

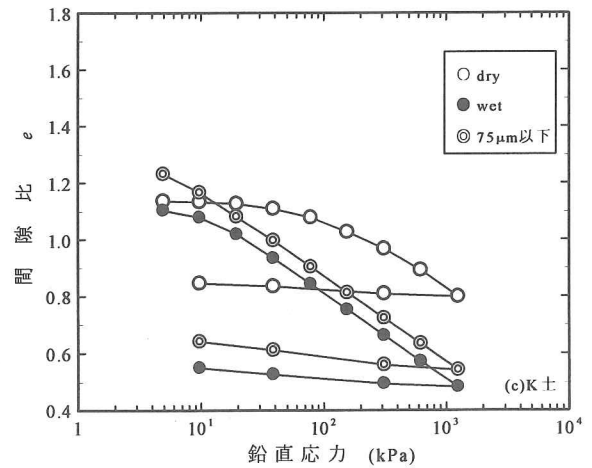
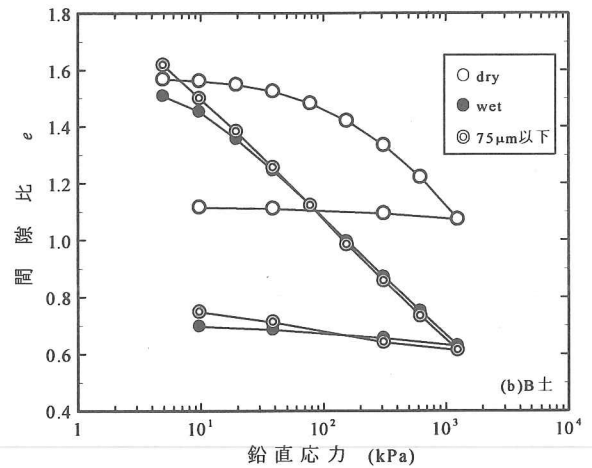
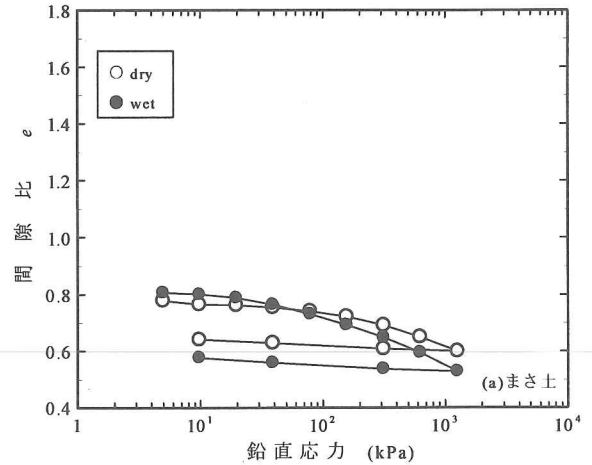


Fig.7 e - $\log \sigma_v$ curve of K-soil

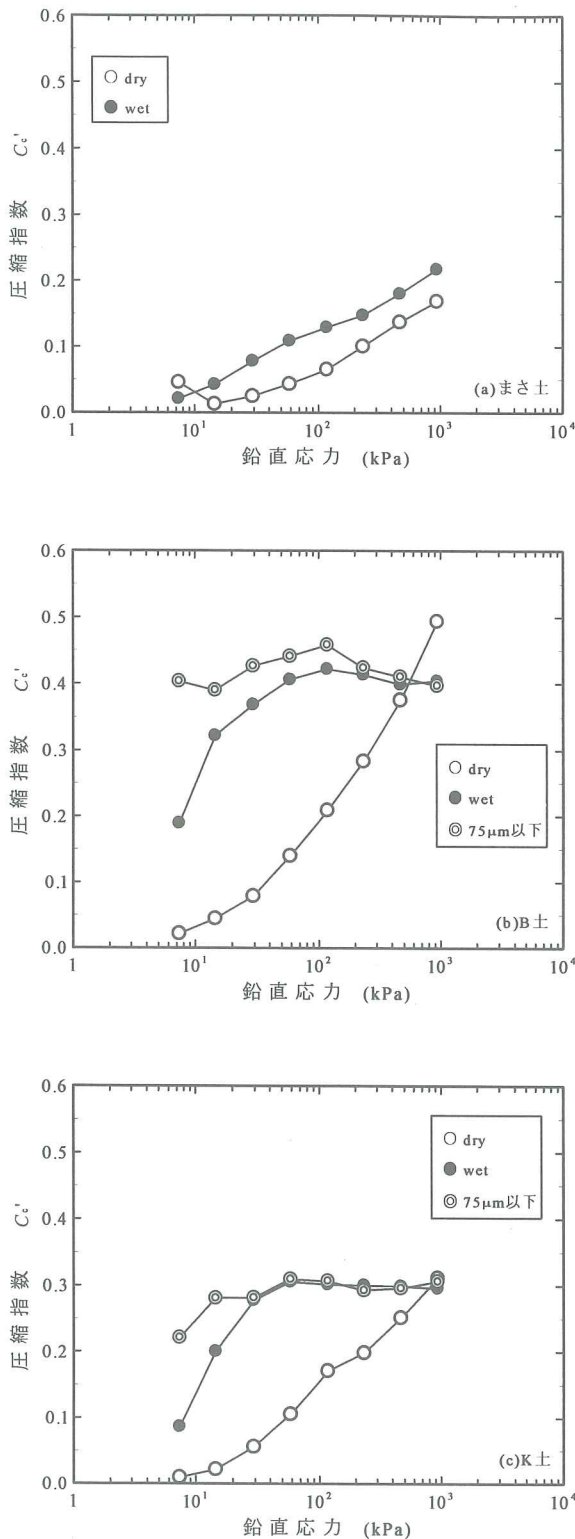


Fig.8 Variation of compression index during one-dimensional compression

次に、浸水状態の結果について考察する。まさ土は乾燥状態に比べて浸水状態の結果は若干間隙比の変化量が大きく、圧縮指数も少し高い値となっている。一方、泥岩性材料のB土、K土は、乾燥状態と浸水状態の結果に大きな差がみられる。浸水状態の

$e-\log\sigma_v$ 曲線は早い荷重段階から直線的に間隙比が減少しており、まさ土に比べて間隙比の変化が非常に大きくなっている。これは、泥岩性材料の土粒子が浸水により細粒化を生じたためといえる。つまり細粒化することで供試体内での土粒子の再配置が容易となったと考えられる。また、 $e-\log\sigma_v$ 曲線が直線になったことで、圧縮指数の値はほぼ一定となっている。そして、B土は圧縮指数が約0.4とK土の0.3程度に比べて大きく、乾燥状態と同様に圧縮性が高いことがわかる。

B土、K土の75 μ m以下にすり潰した浸水状態の結果をみてみると、実験を行った応力範囲での $e-\log\sigma_v$ 曲線はほぼ直線である。すり潰した状態で浸水させているため、土粒子間の構造は形成されておらず、正規圧密状態であったと考えられる。これらの結果と浸水状態の結果を比較すると、 $e-\log\sigma_v$ 曲線ではB土、K土とも初期間隙比、初期勾配は異なるが、3番目の荷重ステップ(応力 $\sigma_v=19.6$ kPa)以降の勾配が等しくなっている。圧縮指数と鉛直応力との関係を見ると、浸水状態とすり潰した状態の圧縮指数は、3ステップ以降若干の誤差はあるが一定になっている。これらのことから、泥岩性材料の浸水状態での結果は、初期段階では僅かに土粒子間の構造が残っていたが、応力の増加とともにその構造はすぐに崩壊し、正規圧密状態に移行したと考えられる。これは土粒子強度が浸水により低下するという単粒子破碎試験の結果と関係しているといえる。

4. 2 一次元圧縮特性と単粒子破碎特性との関連性

泥岩性材料の圧縮特性に及ぼす粒子破碎の影響について検討するために、一次元圧縮試験から得られる圧縮降伏応力と単粒子破碎強度の関連性についてまとめる。ここで、圧縮降伏応力は式(2)で求められる圧縮指数 C_c が0.3に至ったときの鉛直応力 $(\sigma_v)_{C_c=0.3}$ とした。 $(\sigma_v)_{C_c=0.3}$ はキャサグランデ法による降伏応力にはほぼ一致することが調べられている。また、単粒子破碎強度は粒径に依存するため、平均粒径の単粒子破碎強度を代表値として用いる。平均粒径の単粒子破碎強度はFig.6に示す粒径と単粒子破碎強度の関係から近似式を求めて算出した。

以上のように求められた泥岩性材料の圧縮降伏応力と、平均粒径の単粒子破碎強度の関係をFig.9に示す。図中には平均粒径0.2~1.5mmの9種類の乾燥砂に対する実験結果⁷⁾を同時に示している。また、本研究で用いたまさ土については一次元圧縮試験の結果、実験を行った応力範囲では圧縮指数が0.3に至らなかったため表示されていない。

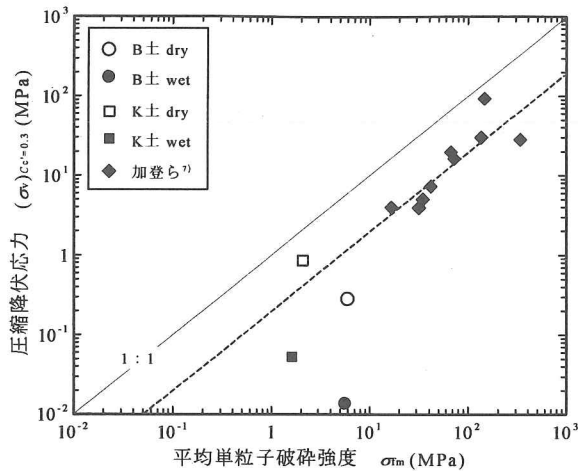


Fig.9 Relationships between One dimensional compression yield stress and single particle crushing strength

図より、乾燥状態の B 土、K 土の一次元圧縮降伏応力 $(\sigma_v)_{Cc=0.3}$ と単粒子破砕強度の関係は、既往の研究結果⁷⁾の延長線上にほぼ位置しており、泥岩性材料においても粒子破砕と圧縮特性に強い相関があるというこれまでの研究結果を支持する結果となった。しかし、浸水状態の結果をみると、乾燥状態の結果のラインより下方向に離れており、単粒子破砕強度に対応する一次元圧縮降伏応力が低いことがわかる。これは一次元圧縮試験中の供試体内の土粒子に作用する応力の伝達状況に変化が生じたためと考えられる。単粒子破砕強度に比べて降伏応力が小さいということは、供試体内で荷重を受け持つ土粒子が少ないためと考えられる。浸水によって、土粒子の細粒化や細粒分の構造の崩壊が生じるため、荷重を受け持つ土粒子の割合が減少したと考えられる。そのため、一部の土粒子に荷重が集中してしまい粒子破砕が起こり、降伏応力が減少したと考察される。

4. 3 時間沈下特性

泥岩のスレーキング現象は時間とともに進行していくことが知られている。そこで、舞鶴市周辺に分布する泥岩性材料の沈下時間について検討する。**Fig.10** は一次元圧縮試験の最終荷段階 ($\sigma_v=1256$ kPa) における時間と鉛直ひずみとの関係である。図より、B 土、K 土ともに同様の傾向が確認される。すなわち; i) 荷重直後の圧縮ひずみは乾燥状態が最も大きい、最終的な鉛直ひずみ量は最も小さいこと、ii) 75 μ m 以下にすり潰した状態は他の状態に比べて同程度の鉛直ひずみの発生に時間を要すること、iii) 同程度の鉛直ひずみが生じた後の浸水状態とすり潰し状態の挙動はほぼ一致すること、などが見てとれる。また、K 土の乾燥状態では鉛直ひずみの発生はほぼ収束しているといえるが、その他の結果で

は、わずかながら鉛直ひずみの発生が継続しており、長期にわたる沈下の継続が示唆される。このクリープ的なひずみの進行の要因としては、供試体内においてスレーキングや粒子破砕による土粒子の細粒化と再配置が繰り返し起こっていることが考えられる。

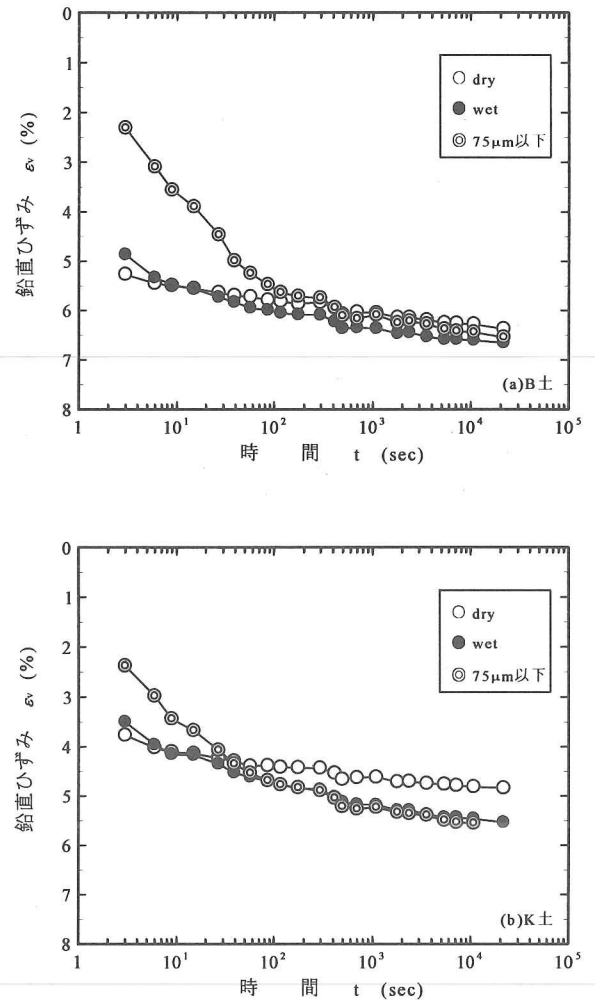


Fig.10 Time dependency of vertical strain

5. まとめ

本研究では、スレーキングおよび粒子破砕による土粒子の細粒化に着目して、舞鶴市に分布する泥岩性材料の圧縮特性について検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 泥岩性材料は乾湿の繰り返しにより、砂分や礫分の土粒子が細粒化し細粒分の割合が増加する。
- 2) 泥岩性材料の単粒子破砕強度はシリカやまさ土に比べて低く、浸水によりさらに強度が低下する。
- 3) 泥岩性材料の圧縮特性について、浸水状態では、スレーキングや細粒分構造の崩壊により、乾燥状態では存在する過圧密領域が消失し、低い応力域から正規圧密挙動を示す。

- 4) 一次元圧縮降伏応力と単粒子破砕強度との関係は、乾燥状態では既往の研究結果の範疇であるが、浸水状態では単粒子破砕強度に比べて降伏応力が低くなる結果となった。浸水によるスレーキングや細粒分構造の崩壊が、荷重を受け持つ土粒子の割合を減少させ、一部の土粒子に荷重が集中してしまい粒子破砕が起こり、降伏応力が減少したと考察される。
- 5) 泥岩性材料の時間沈下特性については、浸水状態であっても載荷直後の即時的な沈下が大きいことが明らかとなり、わずかではあるが長期にわたる沈下の継続が示唆された。

参考文献

- 1) 小田和広, 加登文学, 森尾敏: 第5章 舞鶴地区の被害事例, 平成16年度台風23号による関西圏地盤災害緊急調査報告書, 地盤工学会, 平成16年度台風23号関西圏地盤災害緊急調査団, pp.149-162, 2005.
- 2) 松尾 稔: 飽和した常滑泥岩の吸水軟化現象に関する基礎的考察と地盤工学の課題, 第40回地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.1-26, 1990
- 3) 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, No.406 / III-11, pp.17-26, 1989.
- 4) 黒島一郎, 山口晴幸: 泥岩粗粒材の一次元圧縮下での沈下特性, 堆積軟岩による盛土の工学的諸問題に関するシンポジウム発表論文集, pp.183-188, 1995.
- 5) 三嶋信雄, 星野克之, 横田聖哉, 似内徹, 深澤明雄: スレーキング性材料の強度特性, 堆積軟岩による盛土の工学的諸問題に関するシンポジウム発表論文集, pp.229-236, 1995.
- 6) 三浦哲彦・山内豊聡: 高い等方圧力を受ける砂の圧縮特性について, 土木学会論文集, No.203, pp.45-52, 1972.
- 7) 加登文学, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一: 破砕性材料の粒子特性と一次元圧縮特性, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.343-355, 2002.
- 8) Takei, M., Kusakabe, O. and Hayashi, T.: Time-dependent behavior of crushable materials in one-dimensional compression tests, *Soil and Foundations*, Vol.41, No.1, pp.97-121, 2001.
- 9) 新城俊也: 一次元圧縮下における破砕性砂の時間依存性, 第35回地盤工学研究発表会概要集, No.1, pp.899-900, 2000.
- 10) 京都府: 1/50,000 土地分類基本調査(地形分類図)「舞鶴・丹後由良」(1987,1988)
- 11) 加登文学, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一: 地盤材料の単粒子破砕特性, 土木学会論文集, No.673 / III-54, pp.189-194, 2001.
- 12) Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo, M., Hyde, A.F.L. and Murata, H.: One Dimensional Compression Behaviour of Uniformly Graded Sand related to Single Particle Crushing Strength, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.2, pp.39-51, 2001.
- 13) 社団法人地盤工学会: 土質試験の方法と解説(第一回改訂版), 2000.

(2007.11.9 受付)

COMPRESSION PROPERTIES OF MUDSTONE MATERIALS IN MAIZURU AREA

Yoshinori KATO, Satoshi MORIO and Teppei Tsutsumi

ABSTRACT: In this study, compression properties of mudstone soils distributing in Maizuru city were investigated focusing on disintegration features of soil particles. Slaking tests and single particle crushing tests were carried out in order to know the disintegration characteristics of the mudstone soils. And compression behaviors of the mudstone soil under saturated condition and dry condition were obtained from one-dimensional compression tests. As a result, it was clarified that due to the collapse of soil structure and the decrease of single particle crushing strength caused by submergence, the compression yield stress becomes lower and large settlement occurs.

Key Words: Mudstone material, Compression, Slaking, Particle crushing