

盛土材料としての泥岩岩砕の力学特性

前川晴義¹・亀井健史²・高橋丈夫³・松田哲夫⁴・和泉 聡⁵

¹正会員 博士 (工学) 金沢工業大学教授 環境系 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

²正会員 工博 島根大学助教授 総合理工学部 (〒690-8504 島根県松江市西川津町 1060)

³修士 (工学) 技研測量設計株式会社 建設コンサルタント部 技師 (〒371-0031 群馬県前橋市下小出町 1-15-3)

⁴正会員 工修 日本道路公団 北陸支社 金沢技術事務所 所長 (〒920-0365 石川県金沢市神野町東 170)

⁵正会員 日本道路公団 九州支社 建設第一課長 (〒810-0001 福岡県福岡市中央区天神 1-4-2 エルサー 10F)

泥岩岩砕を盛土材料として利用する場合は、締固め状態やその後の環境条件を考慮に入れた評価が重要になる。本論文は、新潟県内のトンネル施工現場から掘削排出された泥岩に対して締固め試験や強度試験を行い、締固めた泥岩岩砕の力学特性を調べたものである。ここでは、盛土材料として現実的な課題になる締固め後の水浸条件や劣化・スレーキングに伴う強度への影響を、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験を行うことにより明らかにしている。また、締固めた泥岩を水浸させた後の破壊規準は、ここで定義した締固め降伏応力によって過圧密と正規圧密領域に区分することが可能であり、締固め降伏応力は乾燥密度で評価できることを示した。

Key Words : mudstone, banking material, compaction, strength, immersion, slaking

1. まえがき

近年、山岳地域におけるトンネル工事や道路工事などの増加に伴い、泥岩などの脆弱な材料が大量に発生し、その残土処理が重要な問題になっている。残土を活用する一方法として、泥岩を使った高盛土の施工事例が増えているが、固結力が小さい泥岩を盛土材料として利用する場合は、締固める際の破砕や水浸、スレーキングなどによる強度の低下や沈下の影響¹⁾が問題になる。堆積軟岩の盛土材料としての問題点・設計方法などに関しては、地盤工学会誌「土と基礎」の「講座：盛土材料としての堆積軟岩の諸問題と盛土事例」²⁾で詳細に記述されている。

トンネルや切土からの掘削残土を盛土材料に利用する場合、以下のような諸事項が締固め土の強度・変形特性に影響を及ぼすことが予想される。

- 1) 掘削に関して
 - a. 掘削前の岩自体の状態 (土盛り厚さ, 含水状態, クラックなどの不連続面の状況)
 - b. 岩砕の大きさや粒度分布
 - c. 掘削から盛土材料として利用するまでの岩砕の管理状態および期間
- 2) 盛土施工に関して
 - a. 岩砕の状況 (乾燥状態など)
 - b. 給水状況や施工時の転圧エネルギーによる岩砕の破砕状況
 - c. 締固め状態 (密度, 粒度分布, 含水状態)

3) 施工後に関して

- a. 降雨や地下水面の上昇に伴う水浸の影響
- b. 乾湿繰返しに伴う劣化やスレーキングの影響

4) 盛土基礎に関して

- a. 盛土地盤の応力状態 (拘束圧など)
- b. 長期レベルでの安定性
- c. 路体としての力学特性の評価方法

日本道路公団では、高速道路の盛土に脆弱岩を用いる場合は、空気間隙率で施工管理³⁾を行っている。また、村上⁴⁾は、空気間隙率が軟岩材料の盛立に対する力学的安定性を保証する締固め度の指標として、評価できることを指摘している。

路体を地盤として適正に評価しようとする、締固めた地盤の強度・変形特性を明らかにする必要がある。本論文では、劣化やスレーキングを起こしやすい泥岩を用いて、上記の含水状態に伴う締固め特性、施工後の降雨や地下水面の上昇に伴う水浸の影響、盛土材料に利用するまでの岩砕の乾燥度合と水浸に伴う劣化やスレーキングの影響を一軸圧縮試験および三軸圧縮試験で調べ、こ

れらが強度特性に及ぼす影響を明らかにする。また、締固め作業は、締固め地盤の強度の増加を図ると同時に、過圧密な状態に改良することにもなる。ここでは、締固め土の水浸後の過圧密と正規圧密状態を区分する応力として、締固め降伏応力を定義し、これが乾燥密度から評価できることを示す。

2. 母材の特性と供試体の作製

(1) 母材の特性

実験に使用した泥岩は、北陸自動車道の新潟県内の能生トンネルの施工現場から掘削排出したもので、第三紀中新世後期の寺泊層に属している⁹⁾。ブロックで採取した試料は、ビニール袋に入れて保管した。

表-1 に示した母材の物理的諸性質からは、間隙比が非常に小さく高密度な材料であることがわかる。破碎前の泥岩母材の強度・変形特性に関しては、三軸圧縮試験を中心とした実験を既に行っている⁹⁾。例えば、側圧 $\sigma_r = 49\text{kPa}$ の排水せん断試験の応力～ひずみ曲線の結果は、典型的なひずみ硬化、軟化型のパターンを示し、また、最大主応力差 q_{max} は、3.3MPaであった。このように本泥岩は比較的高い強度を有する材料であるが、一旦、乾燥・水浸作用を受けると、原形を留めない状態にまで崩壊し、日本道路公団基準の「岩のスレーキング率試験方法」⁷⁾の結果は、1 サイクルでスレーキング率が100%であった。

(2) 試料の作製と管理方法

試料は、ブロック試料を木槌で破碎し、9.52mmのフルイを通過したものを、四分器で一供試体に分けた。ところで、締固めによって供試体を作製する場合、試料の最大粒径は、供試体の直径に対して規定されている⁸⁾。第6章の「締固めに伴う材料特性の変化」でも述べるが、本泥岩の場合は、締固め過程における細粒化や、水浸を想定した給水によって短時間に岩片の軟質化や粘土化が起きるため、締固め前の試料の粒径が強度特性に及ぼす影響は小さくなると考えて、ここでの最大粒径を決めた。

残土を盛土材料として利用する場合、施工までの間の材料の乾燥は避けられない。固結力の低い泥岩材料の乾燥・湿潤の繰返し作用による劣化の状態は、乾燥過程の乾燥の度合に影響を受けることを明らかにしている⁹⁾。ここでは、試料の乾燥状態と水浸後の強度の基礎的な関係を調べるために、初期の含水状態を変えた試料を用いて実験を行った。具体的には、採取時の状態に近い状態の未乾燥の試料を試料A、乾燥が少し進行したブロックを破碎し、ビニール袋に包んで約1年間保管したものを試料B、さらに自然乾燥させたものを試料Cとした。試料の管理状態および締固めに使用した岩砕の粒度分布は、

表-1 泥岩母材の物理的諸性質

土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)	2.735
湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	2.172
乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	1.887
含水比 w (%)	15.72
間隙比 e_n	0.449
飽和度 S_r (%)	91.91

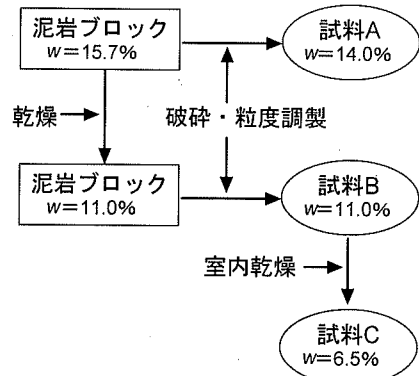


図-1 試料の管理状態

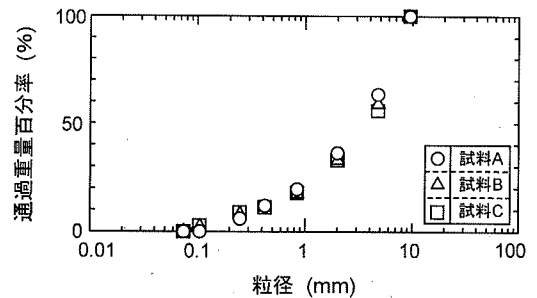


図-2 各試料の粒度分布

図-1, 2 に示している。

含水比の調整のための給水を行うと、水分は岩片内部にも吸水され劣化が始まり、その後の繰返しによって細粒径の岩片は粘土化する。次の締固め過程では、岩片の細粒化と繰返しによって粘土化が一段と進行し、特に、Wet 側の締固めは、粘土化した材料の含水状態が高くなる。供試体の内部には、母材に近いもの、母材が軟質化したもの、粘土化したものが混在しており、供試体の強度は軟弱な材料の影響を受ける。水浸条件や試料が乾燥条件を受けると、劣化やスレーキングが助長され、軟質化と粘土化が著しくなると考えられる。そこで本実験では上記の根拠と要素試験という観点から、供試体の含水比は供試体全体の水分量と土粒子の質量から求めた。

3. 実験方法

(1) 締固め方法と供試体の作製

通常の締固め試験の容器には、直径 10cm または 15cm のモールドを使用するが、ここでは締固めたものをそのままの状態強度試験を行うために、内径 50mm の縦割モールドを使用した。

締固め用の試料は、目標の含水比になるように蒸留水を試料に加え、攪拌時間や締固めまでの放置時間を一定にした。含水状態を調整した試料は、層数の 5 個に分け、一層当たり 11.0kg の試作の鋼製ランマーを 5 cm の高さから 4 回自由落下させて、高さ約 100mm の供試体を作製した。締固めエネルギーは「突固めによる土の締固め試験方法 (JISA 1210) 呼び名 A」に一致させており、試料は非繰返し法とした¹⁰⁾。なお、縦割モールドの底面と内面には、供試体の付着を防ぐために、OHP 用シートを貼り付け、鋼製ランマーの先端部の寸法は、OHP 用シートの厚さを考慮して、直径 48.7mm とした。このようにして作製した締固め供試体を用いて、以下の一軸および三軸圧縮試験を行った。

(2) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は、1.0mm/min の軸圧縮速度で最大圧縮応力が確認できる軸ひずみ $\epsilon_f = 3.5 \sim 8\%$ まで行った。

(3) 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験は、非水浸状態 (タイプ I) と、供試体内に強制的に給水した後にせん断をする水浸状態 (タイプ II) の二つの方法で行った。

a) 非水浸状態 (タイプ I)

タイプ I は、締固め直後の路体内を想定しており、締固めた供試体に所定の側圧を与え、非水浸状態で圧縮試験を行った。具体的な実験の手順は以下の通りである。

上記の(1)の方法で作製した供試体の両端面には、厚さ 10mm のポーラスメタルを置き、厚さ 0.5mm のゴムスリーブを装着した。また、キャップおよびペダスタルとゴムスリーブの間からセル液が供試体に流入するのを防ぐために、それぞれの箇所 3本の Oリングを用いて密封した。

三軸セル内にセットした供試体には、まず供試体の上下部の排水用のバルブを開放した状態で所定の側圧 (等方圧) を 1 時間与えた。この側圧の負荷による供試体高さの変化を調べ、供試体は等方的に変形したと仮定して、体積変化量を算出した。せん断は、排水用のバルブを閉じて、0.1mm/min の軸圧縮速度で軸ひずみ $\epsilon_f = 12\%$ まで行った。

b) 水浸状態 (タイプ II)

締固め後の水浸を想定したタイプ II の実験は、以下の

表-2 側圧の負荷手順 ($\sigma_r = 98 \text{ kPa}$ の場合)

セル圧 (kPa)	背圧 (kPa)	負荷時間 (min)
196	98*	1440
294	196*	1440
392	294**	2880

背圧の欄の*は供試体の下端面より給水し、上端面から空気を排出した。**は供試体の上下端面より給水した。

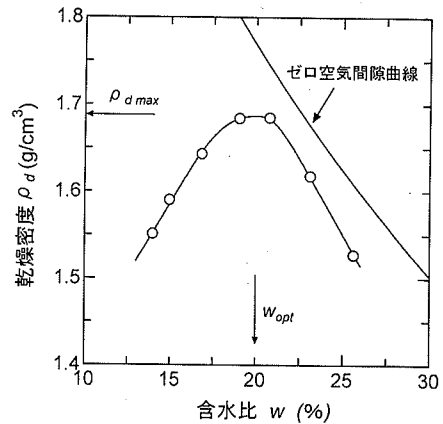


図-3 締固め曲線 (試料 A)

方法で行った。供試体のセットの方法は、タイプ I と同じようにした。供試体内部への給水は、背圧を負荷する要領で、背圧槽→ペダスタル→ポーラスメタルを介して供試体の底面から、供試体からの排水および排気は、供試体の上面から、ポーラスメタル→キャップを通して行った。

供試体への圧力の負荷は、まず供試体上部から排気を許容した状態で供試体に 49kPa の等方圧を 60 分間与えた。表-2 には、側圧 σ_r が 98kPa の圧力の負荷手順を示しているが、セル圧が 294kPa の段階までは、背圧を供試体の下端面から与えており、供試体には不均一な側圧を負荷していることになる。この影響を解消するために、セル圧が 392kPa の時の背圧は、供試体の両端面に 294kPa を与えた。なお、試験後に調べた供試体内部の含水状態からは、ほぼ均一な給水が行われたことが確認できた。15、17%の含水比で締固めた供試体の水浸後の飽和度は、約 90%であったが、最適含水比付近で締固めた供試体の飽和度は、95%を超えていた。

このような方法で水浸状態にした供試体に対し、ここでは水浸直後の強度特性を明らかにするために、非排水条件のもとで 0.1mm/min の軸圧縮速度で軸ひずみ

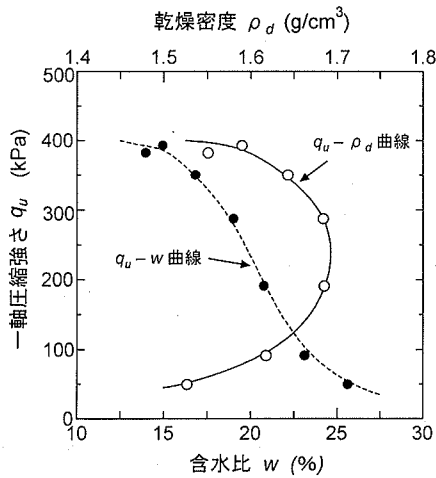


図-4 締め固め土の一軸圧縮強さと含水比、乾燥密度の関係

$\varepsilon_a=12\%$ までせん断試験を行った。

4. 試料Aの締め固め特性

(1) 締め固め特性

図-3は、自然状態に近い含水比のブロックを破碎した試料Aの締め固め曲線を示す。締め固め曲線は、最適含水比 $w_{opt}=20\%$ を境に、Dry側とWet側の領域が明確に区分でき、それぞれの領域の締め固め曲線は、ほぼ対称な形状である。ここでの最大乾燥密度 $\rho_{d\ max}=1.69\text{g/cm}^3$ は、母材の高密度な特性を反映している(表-1を参照)。なお、軟質な泥岩を締め固めると、非破壊性の砂質材料などと異なり、岩片には細粒化や軟質化、粘土化が発生し、その結果含水比の変化に対応して乾燥密度は大きく変化する。このため、締め固め時の含水状態は、乾燥密度に大きな影響を与える。

(2) 一軸圧縮特性

一軸圧縮試験は、所定の含水比に準備した試料に対して複数個の供試体を作製し、各含水比から得られた試験結果をその前後の含水比から得られた試験結果と比較検討することにより代表的な結果とした。

図-4は、図-3の締め固め試験の供試体で行った一軸圧縮試験の一軸圧縮強さ q_u と含水比 w の関係を示している。 $w=13\sim 26\%$ の間の一軸圧縮強さ q_u は、 $400\sim 40\text{kPa}$ の範囲で変化しており、最適含水比の $\pm 3\%$ の含水状態における q_u 値の変動幅が大きい。また、一軸圧縮強さ q_u と乾燥密度 ρ_d の関係は、締め固め曲線のように、最適含水比付近を境にした対称な曲線で整理できる。

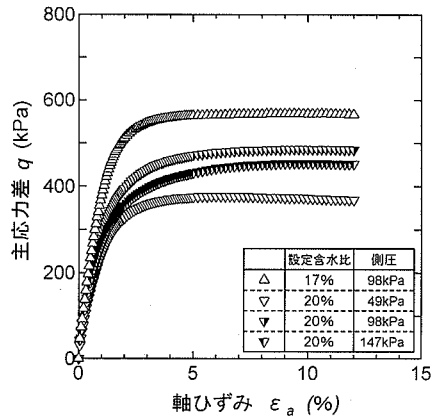


図-5 タイプIにおける主応力差と軸ひずみの関係

例えば、乾燥密度が $\rho_d=1.60\text{g/cm}^3$ の場合、Dry側とWet側の一軸圧縮強さ q_u は、 390kPa と 90kPa になり、4.3倍の開きが生じる。このような強度の違いには、供試体内部の乾燥密度や含水状態および飽和状態によるメニスカス作用¹¹⁾の変化以外に、前項で指摘した締め固めにおける短時間の岩片の細粒化や軟質化、さらには、練返しによる粘性化の影響が考えられる。

(3) 三軸圧縮特性

締め固め土の力学特性を調べる方法としては、CBR試験や一軸圧縮試験が実施されている。強度試験の一つであるCBR試験は、実験過程において供試体に水浸条件を与えている。このため、実験結果のCBR値には、水浸の影響が加味されるが、CBR値から直接強度値を評価することはできない。また、強度を調べるには、一軸圧縮試験が便利であるが、破碎した試料を締め固めて作製した供試体は、水浸すると壊れるケースが多く、このような供試体の場合は、試験自体が実施できない。

ここでは供試体に水浸条件を与え、さらに強度試験も可能にする方法として、三軸圧縮試験装置を用いて実験を行った¹²⁾。この方法は、供試体に側圧を負荷することで、供試体内部に水浸状態を想定した給水ができ、さらに強度試験も可能にする。

以下の三軸圧縮試験用に作製した供試体の締め固め時の含水比は、締め固め曲線の結果から、含水比 $w=15, 17, 20, 25\%$ とし、ここでは設定含水比と呼んでいる。

a) 非水浸状態 (タイプI)

図-5は、設定含水比17%、20%の含水条件で締め固めた供試体に、49、98、147kPaの3種類の側圧条件を与えた場合の主応力差 $q (= \sigma_a - \sigma_r)$ と軸ひずみ ε_a の関係を

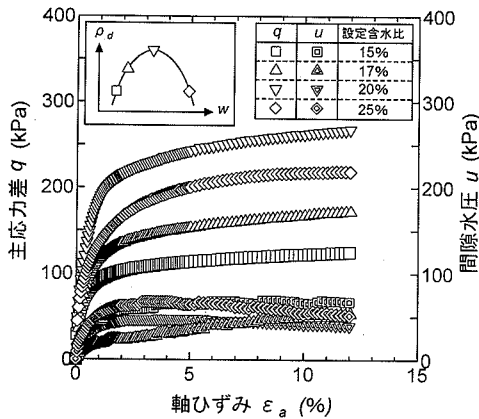


図-6 含水状態を変えて締固めた場合の主応力差、間隙水圧と軸ひずみの関係 ($\sigma_v = 98\text{kPa}$)

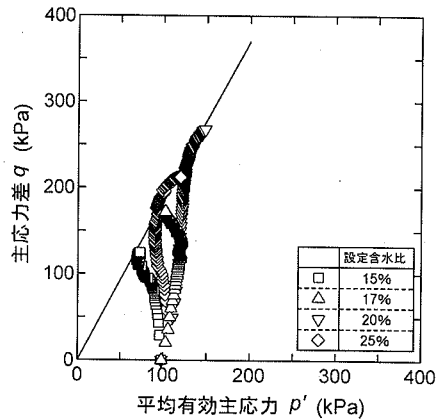


図-7 含水状態を変えて締固めた場合の有効応力径路 ($\sigma_v = 98\text{kPa}$)

示す。せん断初期の応力～ひずみ曲線は、側圧の大きさに関係なく、同じような立ち上がりの傾向となる。その後の応力～ひずみ曲線は、 $\varepsilon_a=2\%$ 付近から変曲が始まり、 $\varepsilon_a=5\%$ 以降の主応力差は、ほぼ一定の値になる。最適含水比の $w=20\%$ で締固めた供試体の一軸圧縮強さ q_u は、約 250kPa (図-4 を参照) であったが、同一含水比で締固めた場合の最大主応力差は、 $380\sim 480\text{kPa}$ に上昇している。このような強度増加は、側圧の存在以外に、供試体内部の空気のパ排出に伴う高密度化の影響が考えられる。なお、設定含水比 20% の場合、側圧条件 98kPa の強度が、 147kPa のそれを上回っているが、これは締固め状態の違いによる異なる構造の影響によるものと推測される。

b) 水浸状態 (タイプII)

ここでは、締固め条件と水浸に伴う強度変化の関係を明らかにする。図-6 は、最適含水比をまたぐ $15, 17, 20, 25\%$ の設定含水比で作製した供試体に側圧 $\sigma_v = 98\text{kPa}$ (セル圧: 392kPa , 背圧: 294kPa) を与えて給水させた後、非排水条件でせん断試験を行った主応力差 q 、間隙水圧 u ～軸ひずみ ε_a の結果を示す。応力～ひずみ曲線および最大主応力差の結果は、供試体作製時の締固め状態の影響を強く反映している。すなわち、せん断初期の立ち上がりの状況は、設定含水比 $20, 25, 17, 15\%$ の順で顕著であり、最大主応力差の値もまた、この順序に一致する。特に興味深いのは、設定含水比 15% と 25% で締固めた供試体の乾燥密度には大差がないにも関わらず、応力～ひずみ曲線と最大主応力差の結果が異なっていることである。これには、Dry 側と Wet 側の締固めた土の構造の違いや、水浸後の圧密による乾燥密度の変化の影響が考えられ、いわゆる施工現場で指摘されている Wet 側での締固めた土の安定した構造や乾燥密度の変化が少ない点からの優位性を裏付けている。

前出の一軸圧縮強さは、低い含水条件で締固めた供試体ほど高い値を示した。しかしながら、三軸圧縮試験から求めた水浸後の強度 (=最大主応力差) は、最適含水比で締固めたものが最も高い値になっている。これは、飽和状態になることで、乾燥密度に依存した強度特性を発揮することを示している。また、吉田ほか¹³⁾が指摘しているように、理想的な締固めを行うと比較的安定した骨格構造が形成され¹⁴⁾、水浸作用に対して岩片の強度低下や細粒化が起きにくくなるのが原因していると考えている。

間隙水圧 u と軸ひずみ ε_a の関係は、せん断初期の立ち上がりが著しく、 $q \sim \varepsilon_a$ 曲線と同様、軸ひずみ $\varepsilon_a=2\%$ 付近で変曲する。軸ひずみ $\varepsilon_a=12\%$ 時点の間隙水圧の発生量は、最大主応力差の大きい供試体の方が小さく、また、乾燥密度が小さい供試体ほど大きい値を示している。特に、Dry 側と Wet 側で間隙水圧の発生状況に違いが認められるが、これは、 $q \sim \varepsilon_a$ の関係と同様、構造などの違いが、影響したと考えられる。

図-7 は、主応力差 q と平均有効主応力 $p' (= (\sigma_a + 2\sigma_v) / 3)$ 域に 4 供試体の有効応力径路を示している。せん断初期の 4 供試体の有効応力径路は、鉛直方向に向かって立ち上がり、その後、Dry 側で締固めた供試体は、間隙水圧の増加によって左側に移動する。これに対し、設定含水比 $20, 25\%$ で締固めた供試体の有効応力径路は、過圧密土のような挙動を継続している。有効応力径路は、締固め条件による乾燥密度や構造の相違¹⁴⁾によって異なるが、最大主応力差を集約した破壊規準線は、結果的に図中に示す原点を通る一本の直線で整理できた。

最適含水比で締固めた供試体の側圧条件と強度特性の関係を調べるために、側圧 $\sigma_v = 49, 98, 147\text{kPa}$ でせん断試験を行った。図-8 には、主応力差 q 、間隙水圧 u と軸

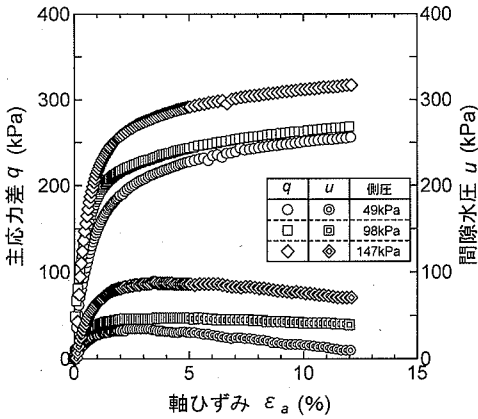


図-8 最適含水比で締固めた場合の主応力差、
間隙水圧と軸ひずみの関係

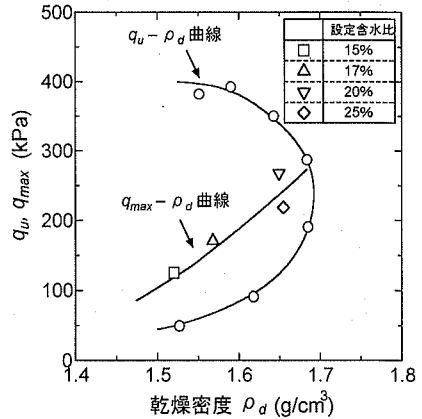


図-10 一軸圧縮強さ、最大主応力と乾燥密度の関係

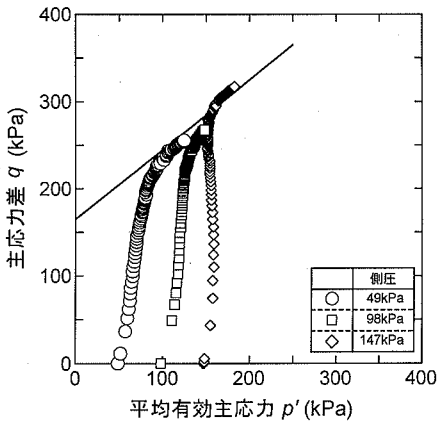


図-9 最適含水比で締固めた場合の有効応力経路

ひずみ ϵ_a の関係を示している。主応力差 $q \sim$ 軸ひずみ ϵ_a 曲線は、側圧の大きい条件の方が、せん断初期の立ち上りが顕著である。その後の3者は、 $\epsilon_a=1\%$ 付近で変曲した後、主応力差の増加が緩やかに継続する。

一方の間隙水圧は、側圧条件の大きい方がせん断初期の発生量は大きくなっている。また、最大間隙水圧になる軸ひずみは、最大主応力差の時点よりも大きく、その後の間隙水圧は、軸ひずみの増大に伴い低下している。

図-9に示した3供試体の有効応力経路は、強度に対して十分に小さい側圧条件を与えているため、過圧密比が2~3程度の過圧密土でみられるような挙動を呈す。 $\sigma_r=147\text{kPa}$ の最大主応力差の値は、他の側圧条件の結果に比べると若干大きい。最大主応力差を集約した破壊規準線は、典型的な過圧密状態の結果に類似している。ここでは過圧密状態を考慮して側圧の大きさを決定したが、

側圧を高くしていくと、供試体は正規圧密的な状態に変化することになる。

次に、締固めた不飽和状態の土が、水浸によって飽和に近い状態になった場合の強度特性の変化を、一軸圧縮試験と三軸圧縮試験の結果で説明する。

図-10は、図-4の一軸圧縮強さ q_u の結果と、側圧 $\sigma_r=98\text{kPa}$ の三軸圧縮試験の最大主応力差 q_{max} の結果を乾燥密度 ρ_d で比較している。まず、一軸圧縮強さ q_u と乾燥密度 ρ_d の関係に着目すると、 q_u は不飽和領域では ρ_d の増加に伴って減少し、その後飽和領域に近づくに伴って ρ_d は低下し、その結果 q_u も減少していく。また、前述したように同じ乾燥密度で二つの強度が存在していたが、飽和状態に近い供試体で行った三軸圧縮試験の最大主応力差 q_{max} と乾燥密度 ρ_d の関係は、唯一的になっている。この関係は、不飽和状態から飽和状態への変化によって、メニスカス作用が低下し、乾燥密度に依存した強度特性に変化したためと考えられる。

また、Dry側では、水浸による強度低下が著しいが、Wet側では、側圧の存在が強度に反映している。なお、同じ設定含水比20%で側圧98kPaの非水浸のタイプIの結果と比べると、水浸によって q_{max} は、480kPaから270kPaに低下することが分かる。

5. 試料の乾燥の影響

降雨や地下水の変動によって、乾燥と湿潤状態を繰返し受ける箇所の地盤は、強度への影響を明らかにしておく必要がある。乾湿繰返し作用によって起きる劣化やスレーキング現象は、そのメカニズムに不明な点が多く、実体は明らかになっていない。しかしながら、軟質な泥

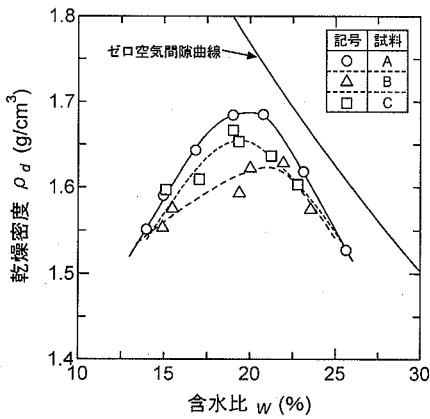


図-11 各種試料の締固め曲線

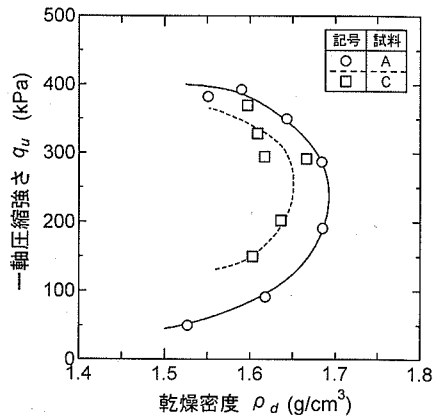


図-13 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係(試料C)

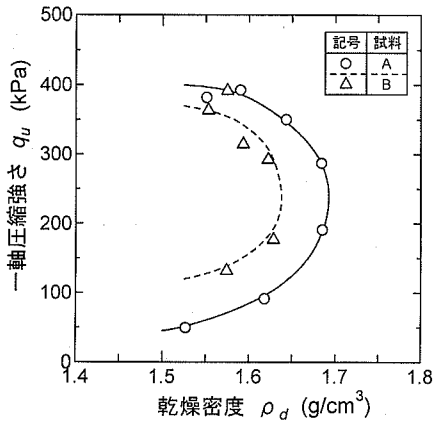


図-12 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係(試料B)

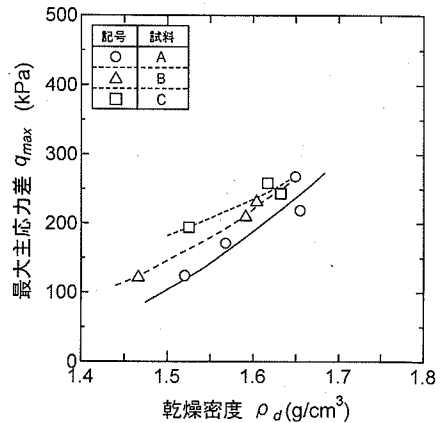


図-14 各種試料における最大主応力差と乾燥密度の関係

岩材料を盛土材料に使用するのであれば、劣化やスレーキングが起きることを前提に対応すべきである。

ここでは、試料が締固め前に受けた乾燥の度合と、水浸に伴う強度特性の変化の関係を調べるために、図-1に示したように2種類の乾燥条件を変えた試料(試料B, C)を用いて、試料Aと同様な方法で供試体を作製し、実験を行った。なお、試料Aの初期含水比 $w_0=14.0\%$ に対し、試料B, Cは、それぞれ 11.0% 、 6.5% まで自然乾燥させた。

図-11には、乾燥条件を与えた試料B, Cと乾燥条件を与えなかった試料A(図-3を参照)の締固め曲線を示している。まず、試料BとCを比較すると、締固め前の試料の含水比が小さいCの最適含水比が小さく、また、最大乾燥密度は大きくなっていることがわかる。しかしながら、3試料の結果を比較すると、 $w=20\%$ 付近の試料B, Cの締固め状態が悪く、乾燥を受けた試料が小さな最大

乾燥密度を示す。この原因として、乾燥した試料では、乾燥条件を与えなかった試料と比較して、含水比の調整のための給水や締固めによって岩片の細粒化が進むため、高い乾燥密度が得られなかったものと考えられる。

図-12, 13の試料B, Cの一軸圧縮強さ q_u と乾燥密度 ρ_d の関係は、併記した試料Aと同じように最大乾燥密度を境にDry側とWet側に区分した曲線で整理できる。試料B, Cの $q_u \sim \rho_d$ 曲線は、試料Aのその内側に位置しており、最大乾燥密度の低下と同時に、Dry側とWet側との強度の差は小さくなる。

試料の乾燥に伴う一軸圧縮強さと乾燥密度の関係の変化は、図-11の締固め曲線と併せてみると理解しやすい。乾燥条件を与えた試料B, Cを最適含水比よりも相当低い含水状態で締固めた場合は、未乾燥の試料Aを締固めたものと比べると、乾燥密度および一軸圧縮強さが共に

小さくなっている。締固め時の含水比を増大すると、試料B、Cの乾燥密度は、試料Aのそれと比べて低いが、一軸圧縮強さの増加割合は大きくなり、最適含水比付近で締固めた両試料の一軸圧縮強さは、ほぼ等しい値になる。最適含水比よりもさらに高い含水条件で締固めると、両者の乾燥密度は近似するものの、試料B、Cの方の一軸圧縮強さは高くなり、含水比が高くなるに従い、試料Aと試料B、Cの強度差は大きくなっている。このような最適含水比を境としたユニークな特性の背景には、乾燥を受けた試料の方がWet側での締固めによって、岩片の細粒化の進行と、構造の安定性が高くなる¹⁴⁾ことが原因していると考えている。

当初は乾燥度合の大きい試料の方が、給水による劣化が著しく、強度低下の度合も大きくなると予想していたが、試料Bと試料Cの一軸圧縮試験の結果からは、大きな相違が確認できなかった。

乾燥を受けた試料で作製した供試体の水浸後の強度特性を調べるために、試料B、Cで設定含水比を変えた締固め供試体を作製し、試料Aと同様に、側圧 $\sigma_r' = 98\text{kPa}$ のもとでの水浸条件を与えたタイプIIの実験を行った。

図-14には、各試料のタイプIIの最大主応力差 q_{max} と乾燥密度 ρ_d の結果を示している。乾燥条件を与えた試料Bおよび試料Cの結果は、試料Aと同様に、乾燥密度が大きくなるに従い、最大主応力差 q_{max} は増大し、3試料は漸近している。また、試料に与えた乾燥条件の違いに注目すると、乾燥度合の大きい試料Cの $q_{max} \sim \rho_d$ 曲線が上位に位置している。これは乾燥度合が大きい試料の方が、締固めや水浸によって、細粒化が進行したことが原因していると考えている。

6. 締固め土の力学特性の評価方法

締固め特性を議論する場合は、試料への給水と繰り返し過程、締固め過程、水浸過程、せん断過程における粒度組成の変化を明らかにする必要がある。本泥岩では、それぞれの過程において、岩片の細粒化以外に、軟質化、粘土化が起きる。また、粒度を調べるためのふるい分けの作業中においても、人為的な岩片の細粒化および軟質な岩片の粘土化が避けられないため、ここでは粒度試験を行っていないが、試料Cの水浸後の供試体を手でほぐしながら水洗いをした結果、全質量の90%以上が75 μm のふるい目を通じた。

松尾¹⁵⁾は、泥岩のスレーキングを正規圧密状態に移行する現象として捉えており、これには、体積変化が伴うことを指摘している。スレーキングによる体積変化は、拘束圧によって抑制できる。つまり、スレーキングが起きても拘束圧によって体積膨張が生じなければ過圧密状

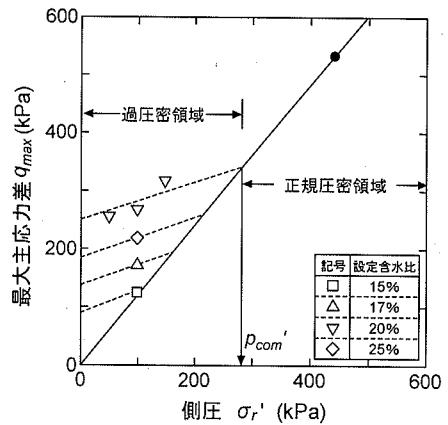


図-15 締固め条件の相違に伴う最大主応力差と側圧の関係

態が維持でき、また、乾燥密度に依存した強度の確保が可能になる。締固めの際の試料の細粒化や水浸による細粒化や軟質化後も、安定した強度を確保するためには、高い密度になるように締固めることが重要になる。

締固め作業は、強度増加以外に、過圧密状態の地盤に改善することが目的になる。以下では、水浸によって飽和状態になった後の過圧密状態の評価方法について述べる¹⁶⁾。

さてこれまで締固め土の力学特性に関して、太田ほか¹⁷⁾は、粘性土を任意の方法で締固めた場合の先行圧縮応力と等体積せん断強度が、乾燥密度・含水比で推測できることを指摘している。また、梶ほか¹⁸⁾は、水浸後の体積変化から強度低下を予想している。両者のユニークな点は、締固め土を過圧密と正規圧密状態から捉えていることである。

そこで著者らは、まず締固め土の水浸後の破壊規準に注目した。図-15には、各種の設定含水比で締固めた試料Aの水浸後の結果をもとに過圧密と正規圧密状態に区分する方法を示す。図中の▽印は、最適含水比20%で締固めた供試体の最大主応力差と三種類の異なる側圧条件から得られた結果をプロットしている。これらを集約した破線は、図-9でも指摘したように、過圧密状態の破壊規準線であり、正規圧密状態の破壊規準が分かれば、両状態を区分する応力を明らかにできる。

正規圧密状態に関しては、十分な実験を行っていないが、試料の乾燥や締固め状態の違いが正規圧密状態の破壊規準に及ぼす影響は、過圧密状態のそれと比べて小さいと考えられる。ここでは、正規圧密状態における破壊規準線を明らかにするために、初期含水比 $w=8.3\%$ の試料を含水比 $w=20\%$ に調整して締固めた供試体で実験を行った。載荷方法は、表-2に準じてセル圧(392kPa)と

背圧 (294kPa) を与え、その後、セル圧を 736kPa に増圧し、24 時間圧密を行った後、非排水せん断試験を実施した。図-15 中の●印は、実験結果の最大主応力差を示している。●印と原点を結んだ実線が、正規圧密状態の破壊規準であると仮定し、過圧密状態の破壊規準線との交点の側圧値を締固め降伏応力 p_{com} と定義する。いかえれば、 p_{com} は圧密試験における圧密降伏応力に対応する値と考える。このことにより、泥岩で締固められた地盤も一般の地盤の安定問題と同様に議論することが可能となる。具体的には、最適含水比で締固めた水浸後の締固め降伏応力 p_{com} として、280kPa が求まる。なお、正規圧密状態の内部摩擦角は、 $\phi = 37.3^\circ$ ($c = 0$ と仮定) であった。

正規圧密領域の破壊規準線は、締固め条件に関係なく一本の直線で表現できると考えると、最適含水比以外の設定含水比で締固めた場合の p_{com} 値が求まる。設定含水比 15, 17, 25% は、それぞれ一条件の実験しか行っていないため、過圧密領域の破壊規準線を決めることはできないが、摩擦成分が変化しないと仮定すると、図中のような破壊規準線が引け、各設定含水比に対する p_{com} 値を求めることができる。

ところで、仮に締固め状態を含水比で評価することが可能となれば、施工の際にあらかじめ構築する締固め地盤の応力状態を知ることができる。このことは工学的に有意義であるが、強度特性を評価する場合には、乾燥密度を指標として用いるのが一般的である。そこで乾燥密度と締固め降伏応力 p_{com} との関係を図-16 に示す。この結果、例えば、盛土高さによる土被り圧に対して、過圧密状態を維持するために必要な締固め降伏応力を乾燥密度で決めることが可能になる。

ここでは、軟質な泥岩の締固め特性を含水状態の相違や悪条件の水浸を想定して多くの予備実験と本実験を行ったが、締固め過程における供試体の作製過程(木槌による軟岩の破碎や 9.52mm のフルイわけ等)が、強度試験結果にはある程度のバラツキが認められた。しかしながら、その範囲は小さかった。また、締固め曲線は極めて良好な結果が得られており、その結果からも本作製過程から得られた供試体の圧縮試験結果は、工学的には信頼性が高いものとする。今後は、実験対象の泥岩の種類を多くし、盛土材料としての適性が簡単に判断できる指標づくりを目指す予定にしている。

7. まとめ

劣化やスレーキングが起きやすい泥岩を用いて、盛土材料の力学特性を調べるための実験を行った。ここでの研究成果は以下のとおりである。

- 1) 締固め土の一軸圧縮強さと乾燥密度の関係は、締固

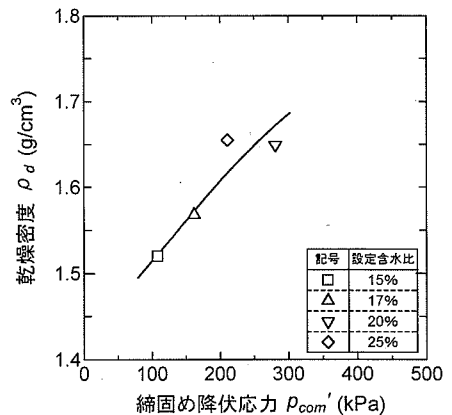


図-16 乾燥密度と締固め降伏応力の関係

め曲線のように、最大乾燥密度を境にして Dry 側と Wet 側に区分され、同一乾燥密度でもメニスカス効果や岩片の細粒化、軟質化、粘土化によって、強度は大きく変化する。

- 2) 1) の結果は、水浸によって飽和状態に近づくとき、メニスカス効果は低下し、強度と乾燥密度の間は、唯一的な関係へと移行することが、三軸圧縮試験の結果から明らかになった。
- 3) 最適含水比で締固めた場合の強度は、水浸や乾湿作用に対して安定していることが明らかになったが、自然含水比の状態で締固める場合は、乾燥密度を高めることが大切になる。
- 4) 水浸後の締固め土の強度特性は、過圧密と正規圧密状態に区分でき、この区分箇所の応力を、ここでは締固め降伏応力と定義した。
- 5) 水浸後の締固め土の過圧密状態の判断に必要な締固め降伏応力は、乾燥密度で評価できることが明らかになった。

謝辞：本研究に対して、貴重な助言を頂いた日本道路公団北陸支社金沢技術事務所の職員の方々、また、実験に協力を得た金沢工業大学および島根大学の卒業生の諸君に対し、心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 島 博保, 今川史郎: スレーキング材料(せい弱岩)の圧縮沈下と対策, 土と基礎, Vol.28, No.7, pp.45-52, 1980.
- 2) 地盤工学会編: 講座; 盛土材料としての堆積軟岩の諸問題と盛土事例, 土と基礎, Vol.43, No.11-Vol.44, No.12, 1995-1996.
- 3) 日本道路公団: 設計要領 第1集 土工, pp.2-22-2-23, 1998.
- 4) 村上幸利: 締固めた軟岩材料の力学的安定に及ぼす岩の性質と締固め度の影響, 土木学会論文集, No.511/III-30,

- pp.109-116, 1995.
- 5) 新潟県：新潟県地質図説明書，pp.30-38, 1989.
 - 6) 前川晴義，和泉 聡：高密度泥岩の力学特性とその問題点，第34回地盤工学研究発表会講演集，pp.65-66, 1999.
 - 7) 日本道路公団：日本道路公団試験方法，pp.281-282, 2001.
 - 8) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説—第一回改訂版—，地盤工学会，pp.252-255, 2000.
 - 9) Maekawa, H. and Miyakita, K. : Effect of repetition of drying and wetting on mechanical characteristics of a diatomaceous mudstone, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.2, pp.117-133, 1991.
 - 10) 前出8), p.443, 2000.
 - 11) 嘉門雅史，浅川美利：土の力学(1)—土の分類・物理化学的性質—，技報堂出版，pp.116-117, 1988.
 - 12) 前川晴義，宮北 啓：乾燥した珪藻泥岩の湿潤時における吸水膨張と強度低下の関係，土木学会論文集，No.680/III-55, pp.295-300, 2001.
 - 13) 吉田信之，細川浩一，江南和彦：締固め泥岩岩砕の圧縮性及びせん断強度に及ぼす水浸作用の影響について，神戸大学都市安全研究センター研究報告，第4号，pp.69-77, 2000.
 - 14) Lambe, T. W.: Structure on compacted clay, *American Society of Civil Engineers*, Vol.84, No.SM2, pp.1-34, 1958.
 - 15) 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力学の課題，地盤工学会，第40回地盤工学シンポジウム発表論文集，pp.1-26, 1995.
 - 16) 前川晴義，高橋丈夫，亀井健史，和泉 聡，北川勝明：泥岩岩砕を盛土材に利用するための力学特性の評価，第37回地盤工学研究発表会講演集，pp.611-612, 2002.
 - 17) 太田秀樹，伊藤雅夫，石黒 健，米谷 敏：締固められた粘性土の先行圧縮応力と強度の推定，土木学会論文集，No.436/III-16, pp.27-36, 1991.
 - 18) 畠 昭治郎，建山和由，藤本直昭：水浸時挙動を考慮した土の締固め施工基準の決定方法について，土木学会論文集，No.302/III-7, pp.227-235, 1987.

(2003. 4. 7 受付)

MECHANICAL PROPERTIES OF MUDSTONE AS BANKING MATERIAL

Haruyoshi MAEKAWA, Takeshi KAMEI, Takeo TAKAHASHI,
Tetsuo MATSUDA and Satoshi IZUMI

This paper describes the effective utilization of mudstones as a banking material. Mudstones are produced in abundance from construction work. Compaction tests, unconfined compression tests and triaxial compression tests were performed on mudstone to investigate the effects of inundation and slaking after compaction on mechanical properties of compacted mudstone. It is found that the failure envelope after inundation of compacted mudstones may be divided into normally consolidated and over-consolidated states using the compaction yield stress. In addition, the compaction yield stress can be readily evaluated from the dry density of mudstones.