

乾湿繰り返し作用を受ける泥岩の強度特性

磯 杏奈¹・森井俊広^{2*}

(平成15年12月29日受付)

要約 新潟県中越地域に分布する新第三紀鮮新世の泥岩を対象に、含水状態と圧縮強さの関係、ならびに乾燥と湿潤化の繰り返しにともなう圧縮強さの変化を調べ、軟弱化の特性を検討した。圧縮強さは、立方体状の供試体を用いた一軸圧縮試験により測定した。対象とした泥岩はシルト岩に分類され、極端に乾燥させた状態では普通ポルトランドセメントと同程度の圧縮強さをもつ。また、飽和状態でも5MN/m²以上の圧縮強さがあり、CM級の岩盤等級に相当する強度をもつ。泥岩供試体の含水状態や乾湿繰り返し回数の変えた室内試験より、次の点を明らかにした。1) 泥岩の圧縮強さは、水分状態によって大きく変化し、含水比が低下し乾燥状態になるにつれて圧縮強さが増加する。2) 乾燥と湿潤化の繰り返し作用を受けると、圧縮強さが低下する。特に1回目の繰り返し過程で、圧縮強さの低下が最も大きくなり、乾燥後に湿度が高い状態に放置されるだけで、著しく軟弱化することが分かった。したがって、泥岩層の基礎工事などでは、掘削後の泥岩を風雨にさらさないだけでなく、湿度も考慮して管理することが重要になると考えられる。3) 乾燥と湿潤化の繰り返しにともなう圧縮強さの低下割合は、4回の繰り返し過程の範囲では、乾燥と湿潤化の程度の違いにほとんど影響を受けなかった。泥岩が軟弱化する性質は、泥岩を構成する粘土鉱物の種類に支配される。このため、今後の重要な検討課題として、粘土鉱物の判定が必要になってくると考えられる。

キーワード：泥岩、圧縮強さ、乾湿繰り返し、水分状態、一軸圧縮試験

はじめに

軟岩は、土よりも硬く、一般的な概念の岩石と呼ぶには軟らかい、土と岩の中間的性質の地質材料である。自然に分布する新鮮な泥岩は、構造物の良好な支持基盤になる。泥岩の一軸圧縮強さは一般に0.1~10MN/m²程度であり、たとえばフィルダムの基礎地盤に要求される一軸圧縮強さが約0.3MN/m²であることより、力学的見地からは、泥岩はダムの基礎地盤を構成するなど構造物の地盤として用いることが十分可能である。しかし、泥岩は、水分状態とその履歴によって極度に軟弱化する。このため、構造物の基礎掘削工事などで施工上の扱いが難しくなる。本研究では、新第三紀鮮新世の泥岩を対象に、水分状態が泥岩の圧縮強さに及ぼす影響、ならびに乾燥と湿潤化の繰り返し作用を受けた場合の圧縮強さの変化を調べ、泥岩のもつ軟弱化の特性を検討する。具体的には、基盤支持力を直接確認できる一軸圧縮試験を実施し、泥岩の含水比と圧縮強さの関係、ならびに乾湿繰り返しにともなう圧縮強さの変化を調べた。

泥岩について

泥岩は、シルトまたは粘土が水の作用により浸食、運搬され、海や湖底などで堆積、固結した水成の堆積碎屑岩である¹⁾。主として新生代第三紀の中新世から鮮新世、および一部第四紀の洪積世に堆積して形成された。粒径によってシルト岩と粘土岩に分類される。泥岩は、土砂と岩の中間的な物理・力学的性質を示し、固結度、粒度、粘土鉱物などにより、その性質は大きく異なる。特に、固結度の差は堆積後の続成作用に起因して生じたもので、泥岩の基本的性質を決定する大きな要素となっている。一般に自然含水比は5~50%と幅広く、その一軸圧縮強さは、先述したように、0.1~10MN/m²程度を示す²⁾。

泥岩を含む新第三紀層は、日本列島に広範囲にわたって分布している。特にグリーンタフ地域ではその発達が顕著である。グリーンタフ地域は、新第三紀の時代に活発な火山活動によって多量の火山噴出物が堆積した

¹群馬県農政部(前新潟大学農学部生産環境科学科)

²新潟大学農学部

*代表著者：morii@agr.niigata-u.ac.jp

地域の総称であり、その呼称が示すように、緑色に変色した多量の火山噴出物を含むとともに、砂岩、泥岩とその互層から構成される。新第三紀の地層は厚いところで数千～1万mにも達するといわれている^{1, 3)}。

泥岩からなる地層は、一般には構造物の良好な支持地盤になることが多く、土木、建築などの工事対象として通常はそれほど問題とはならない。むしろ構造物基礎の支持地盤として、あるいは一時的ではあっても安定性の高い材料として利用されることが多い。しかし、泥岩の性質のうち、応力開放による吸水膨張とスレーキングに原因して、きわめて不安定な材料になりうる¹⁾。多くの土木、建築工事の設計・施工では、泥岩のこの2つの性質に対して細心の注意が必要とされる。

泥岩は、その大部分が過圧密状態にある。つまり過去に、現在の上載荷重(土かぶり圧)よりも大きな圧密降伏応力を受けているのが普通である。このような泥岩を吸水状態においたまま上載荷重を除去すると、著しく膨張し間隙比が増加して軟弱化する。この性質を、応力開放による吸水膨張といい、その時に生じる膨張を制限すると反作用として大きな膨張圧が生じることになる。応力開放による吸水膨張は、泥岩のもつ固有の水分保持力に支配されるといわれ、水分保持力の大きなものほど吸水膨張が著しいと考えられている。一方、乾燥させた泥岩を水に浸けると、水分を吸水し泥状化する。この現象をスレーキングと呼ぶ。乾燥していない自然状態の泥岩を水に浸してもこのような現象は起こらないことから、スレーキングが生じるときの重要なポイントは、乾燥であるといえる。図1は、本研究で用いた泥岩を空气中で数ヶ月にわたって乾燥させ、それを水に浸けて1日が経過した時点での様子である。何ら外力を加えていないにもかかわらず、水浸しただけで、スレーキングによって亀裂が入り泥状化し、まさに泥土のようになっている。ただし、泥岩の種類によってスレーキングの起き方には大きな差がある。極端な場合は、図1のように乾燥と浸水を1回経験しただけでヘドロ状になってしまう泥岩があるが、10回以上の乾燥・吸水を繰り返してもヘアクラック程度しか入らないものもある。Terzaghiによると、不飽和または乾燥した土に水が吸い込まれる際に、毛管中の空気が圧縮され土塊に引張り応力が生じ、同時に粘土鉱物の吸水膨張が起き、これらが相乗して結合力が低下した結果、スレーキングが生じると説明されている¹⁾。これに対し仲野⁴⁾は、由比泥岩を用いて真空中と大気圧中でのスレーキング現象の違いを調べるとともに、水の他にアルコールなどを用いた浸漬実験により、スレーキングが水素結合による一種の化学的溶解現象であるとの説明を提起している。



(a) 浸漬前の泥岩

図1 空气中で完全に乾燥させた泥岩の浸漬後のスレーキング

試験方法

1. 試料の採取と供試体の作製

新潟県中越地域に分布する新第三紀鮮新世の泥岩を対象とした。表土を剥ぎ取って基盤より掘削した土塊を、大きさ50cmから80cmくらいの持ち運べるサイズに割ったのち、乾燥を防ぐためにビニール袋で包んで搬

出した。

水分状態および乾湿繰り返しにともなう泥岩の圧縮強さは、セメントの強さ試験用の圧縮強さ試験機を用いた一軸圧縮試験により測定した。供試体は直方体状とし、地盤工学会による土の一軸圧縮試験⁹⁾に用いられる供試体の断面積に合わせて、断面3cm平方、高さ6cmとした。現地より搬入した土塊をハンマーで小片に割ったのち、鋸マルト製の小型切断機ミニ・ラボカッターで所定の供試体寸法に切断・整形した。直方体状の供試体への切り出しでは、図2に示すように、自然状態で泥岩が垂直応力を受けていた方向に供試体の高さを取るようにした。同図の右側にある塊状泥岩のマーカを記入している面が自然状態での上面になり、左側にある供試体はこの面に垂直になるようにして切り出している。泥岩を扱う際に特に注意しなければならない点は乾燥を防ぐことである。このため、作製した供試体は、図3に示すように、切断後すぐに湿潤ボックスに入れて保管した。ここで湿潤ボックスは、市販の工具箱に水を張り、観賞魚水槽用のオートヒーターで水温を20℃に保って蒸発水分でボックス内を湿潤状態に保つようにした容器である。



図2 塊状泥岩(右側)からの供試体(左側)の切り出し



図3 湿潤ボックス内での供試体の保管状況(水滴の付着を防ぐためビニールシートで被覆)

2. 物理試験

採取した泥岩の物理的性質を調べるため、地盤工学会の土質試験法⁶⁾に準じて、土の含水比試験、土粒子の密度試験、および土の粒度試験を実施した。含水比試験では、自然状態に近い水分量を求めるため、採取した岩塊の中心部分を用いるようにした。

3. 含水比調整試験と乾湿繰り返し試験

水分状態が泥岩の圧縮強さに及ぼす影響、つまり含水比と圧縮強さの関係を調べるために、含水比調整試験を行った。また、乾燥と湿潤化の繰り返し作用を受けた場合の圧縮強さの変化を、乾湿繰り返し試験を実施して調べた。

まず、含水比と圧縮強さの関係を調べるための含水比調整試験では、供試体を①無調整、②空气中乾燥、③炉乾燥、および④浸水の状態にし、含水比を4水準に調整した。ここで、①は、供試体を作製したあと湿潤ボックスに入れた状態をさし、含水比を調整する特別な操作を加えていない。試料となる泥岩は、採取から時間が経過し、供試体作製時に水に濡れるなどしており、完璧な自然状態とはいえないため、ここでは無調整と呼ぶことにした。②では、後述するように採取泥岩の自然含水比が約16%であったことから、空气中で含水比が8%になるまで乾燥させた。含水比は、供試体の質量を定期的に測定して確認した。なお、供試体を空气中に放置している間、株式会社ティアンドデイ社製の Thermo Recorder TR-72S を用いて、空気中の温度および湿度を毎日5分間測定した。③では、供試体を約24時間にわたって温度 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ で炉乾燥させた。④では、供試体を20日間水に浸けておき、高い含水比になるように調整した。供試体は、切り出し直後の乾燥していない状態で浸水しているため、スレーキングは生じていない。圧縮試験は、供試体を水中から取り出して、水分を軽く拭きとってから行った。なお、浸水中は、水温を1日1回ほぼ同じ時間帯に測定した。上記①では基準となるため6本、②から④では3本ずつ、計15本の供試体を準備した。それぞれ質量と供試体寸法を測ったのち含水比の調整作業に入り、圧縮試験直前にも供試体の質量を測定した。また圧縮試験後には、破碎供試体を炉乾燥し含水比を測定した。これらの一連の測定は、次の乾湿繰り返し試験でも同じとした。

次に乾湿繰り返し試験では、湿潤状態から乾燥状態そして再び湿潤状態へ戻るサイクルを乾湿繰り返しの1回として、乾湿繰り返し数1回、2回、3回および4回を経た後の供試体の圧縮強さを測定した。供試体は、空气中での乾燥と炉乾燥の2通りの方法で乾燥させた。前者では、上述の含水比調整試験の②と同じように、空气中で供試体の含水比が8%になるまで乾燥させたのち、湿潤ボックスの中で7日間保管して湿潤状態に戻した。湿潤期間を日数で設定したのは、試験期間に制限があったためである。湿潤ボックスに保管している間も、供試体の質量を定期的に測定し、質量とそれより計算される含水比の増加を確認した。一方、炉乾燥による方法では、上述の③と同じように、温度 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ の炉乾燥器内で約24時間乾燥させたのち、湿潤ボックスの中で10日間保管して湿潤状態に戻した。供試体は、各繰り返し数あたり3本とし、計24本を準備した。なお、空气中での乾燥による方法で、すべての供試体が同時に含水比8%にならない場合には、供試体の半数が含水比8%になった時点で乾燥を終了させた。

圧縮強さは、先述したように、セメントの強さ試験用の圧縮強さ試験機を用いた一軸圧縮試験により測定した。供試体の断面積が 9 cm^2 であることから、セメントの強さ試験⁷⁾に準じて、加圧板への載荷速度は約 265 N/s に設定した。

試験結果と考察

1. 泥岩の物理的性質

土の含水比試験、土粒子の密度試験および土の粒度試験からえられた泥岩の物理的性質を表1にまとめる。含水比は、採取した塊状泥岩の中心部の自然状態に近い小片を割り出して、測定している。土の粒度試験からえられた粒径加積曲線は図4に示すとおりである。土粒子の約75%がシルト分で構成されており、採取した泥岩はシルト岩に分類される。

表1 泥岩の物理的性質

物理的性質	試験値
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.677
採取時の湿潤密度 (g/cm ³)	2.131
採取時の乾燥密度 (g/cm ³)	1.830
採取時の含水比 (%)	16.4
採取時の飽和度 (%)	95.0
間隙比	0.463
粒度による分類	シルト岩

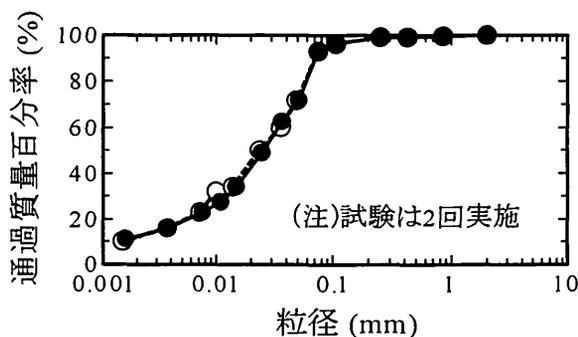


図4 泥岩の粒径加積曲線

2. 含水比と圧縮強さの関係

含水比調整試験よりえられた泥岩の含水比と圧縮強さの関係を図5にまとめる。全体的な傾向として、泥岩の圧縮強さは水分状態によって大きく変化し、含水比が低下し乾燥するほど圧縮強さが増加してくるのがわかる。20日間の浸水によって達成された飽和状態の含水比は約17%であり、この状態と乾燥状態での圧縮強さには約9倍の差が生じている。ただし、圧縮破壊の状況は、図6に示すように、乾燥状態や浸水飽和状態などで特に目立った違いはみられない。

図5より、炉乾燥による乾燥状態では圧縮強さは約40MN/m²となっており、普通ポルトランドセメントの材齢28日における規格値とほぼ同じ圧縮強さをもつことが分かる。一般に、約5MN/m²以上の圧縮強さをもつ岩盤はCM級に分類される。同図より、飽和状態の場合でも5MN/m²以上の圧縮強さをもつことから、本研究で対象とした泥岩は、圧縮強さのみに着目すると、CM級に分類されることが確認できる。また、無調整の自然状態に近い泥岩では、その圧縮強さは13MN/m²程度であると考えられる。先に述べたように、浸水状態の圧縮強さは、浸水期間を20日間に設定した場合の結果である。さらに長期にわたって浸水を続けた場合は、軟弱化により、圧縮強さのみ低下していくと考えられる。

3. 乾湿繰り返しにともなう圧縮強さの変化

図7に、乾湿繰り返し試験によりえられた、乾燥と湿潤化の繰り返しにともなう泥岩の圧縮強さの変化をまとめる。同図には、比較のため、含水比調整試験でえられた無調整、空气中乾燥および炉乾燥の供試体の圧縮強さも併記した。図8には、4回の乾湿繰り返し過程における3本の供試体の含水比変化を示した。いずれも定期的な供試体の質量測定から算出したもので、空気中での乾燥では約8%から10%の範囲、炉乾燥による方法では0%から8%の範囲で含水比が変動した。

図7より、泥岩の圧縮強さは、乾燥と湿潤化の繰り返しにより低下することがわかる。乾湿繰り返しにとも

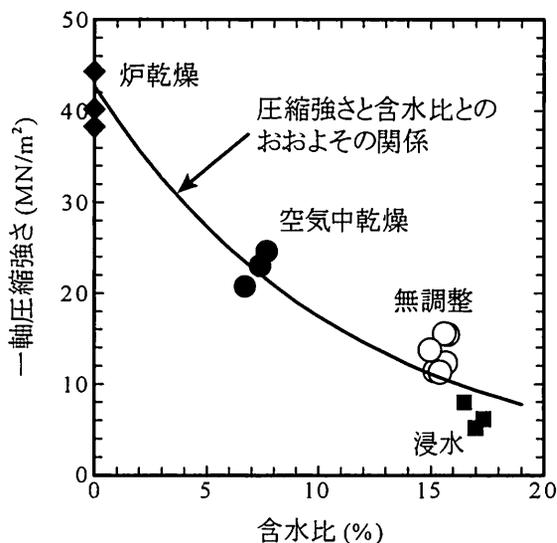
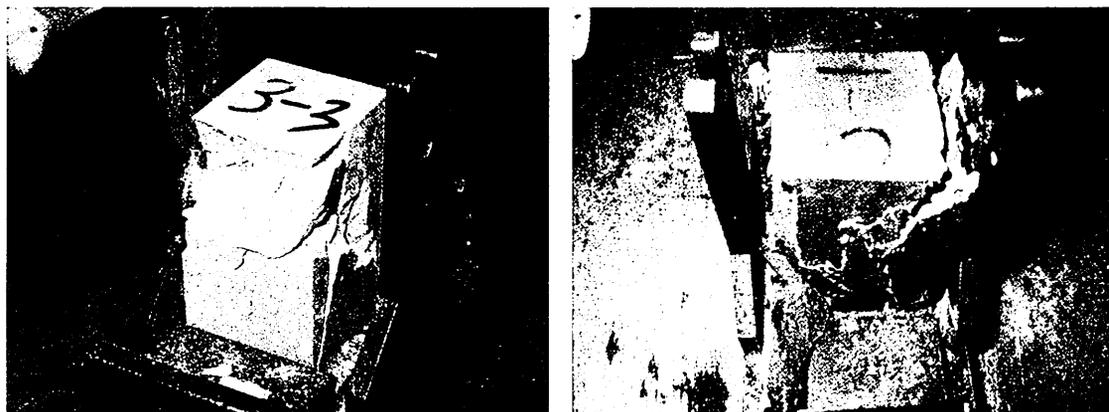


図5 含水比調整試験よりえられた泥岩の含水比と圧縮強さの関係



(a) 炉乾燥供試体

(b) 浸水供試体

図6 供試体の一軸圧縮破壊状況(含水比調整試験による)

なう圧縮強さの低下量は、第1回目でも最大になっており、たとえば、炉乾燥のように極端な乾燥を受けたのちに1度湿潤を経験するだけで、炉乾燥のみを受けた場合に比べて、圧縮強さは半分以下に低下している。また空気中での比較的緩やかな乾燥と湿潤を受ける場合でも、空気中での乾燥のみを受けた場合に比べて約20%の強度低下が生じている。これらのことから、本研究で対象とした泥岩は、いったん乾燥してから、湿度の高い状態に放置されると、圧縮強さが著しく低下する性質をもつことが確認できる。その後は、低下量は小さいものの、乾燥と湿潤化の繰り返しにより圧縮強さはほぼ一定に低下していく。したがって、構造物の基礎工事などでは、掘削後の泥岩を風雨にさらさないだけでなく、湿度も考慮して管理することが重要になると考えられる。図7から、乾湿繰り返しにもなう圧縮強さの低下は、図8に示す2%や8%程度の含水比の変化といった乾燥と湿潤化の度合いにはあまり左右されず、何らかの形でいったん乾燥とそれにつづく湿潤化が起きると、圧縮強さの低下が引き起こされるようである。ただし、長期にわたって乾燥と湿潤化の繰り返しを受

ける場合には、乾湿の度合いによって差が生じることも考えられる。

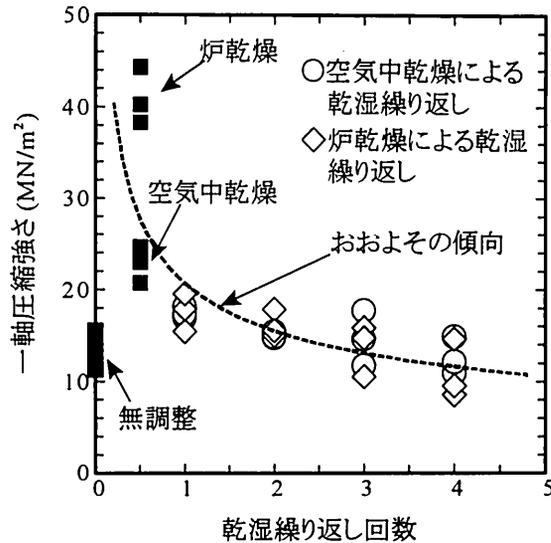
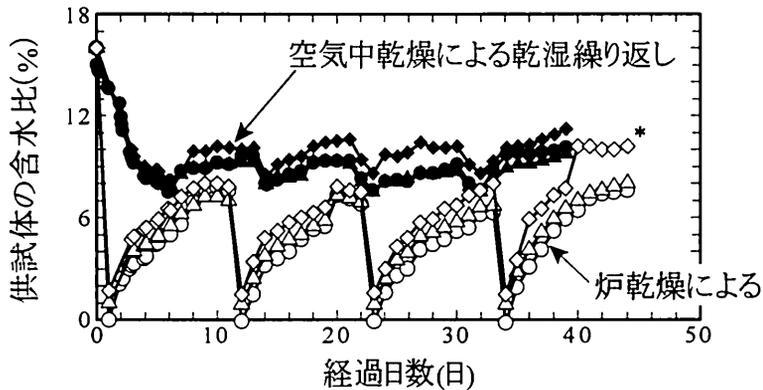


図7 乾湿繰り返し試験よりえられた乾燥と湿潤化の繰り返しにともなう圧縮強さの変化



[注]* 湿潤ボックス内で水滴がかかったため高い含水比となった。

図8 乾湿繰り返し過程における供試体の含水比の変化

ま と め

新潟県中越地域に分布する新第三紀鮮新世の泥岩を対象に、含水状態と圧縮強さの関係、ならびに乾燥と湿潤化の繰り返しにともなう圧縮強さの変化を調べ、軟弱化の特性を検討した。圧縮強さは、直方体状の供試体を用いた一軸圧縮試験により測定した。対象とした泥岩はシルト岩に分類され、極端に乾燥させた状態では普通ポルトランドセメントと同程度の圧縮強さをもつ。また、飽和状態でも5 MN/m²以上の圧縮強さがあり、CM級の岩盤等級に相当する強度をもつ。泥岩供試体の含水状態や乾湿繰り返しの回数を変えた室内試験より、以下の点が明らかとなった。

(1) 泥岩の圧縮強さは、水分状態によって大きく変化し、含水比が低下し乾燥状態になるにつれて圧縮強さが

増加する。

- (2) 乾燥と湿潤化の繰り返し作用を受けると、圧縮強さが低下する。特に1回目の繰り返し過程で、圧縮強さの低下が最も大きくなり、乾燥後に湿度が高い状態に放置されるだけで、著しく軟弱化することが分かった。したがって、泥岩層の基礎工事などでは、掘削後の泥岩を風雨にさらさないだけでなく、湿度も考慮して管理することが重要になると考えられる。
- (3) 乾燥と湿潤化の繰り返しにともなう圧縮強さの低下割合は、今回の4回の繰り返し過程の範囲では、乾燥と湿潤化の程度の違いにほとんど影響を受けなかった。

泥岩が軟弱化する性質は、泥岩を構成する粘土鉱物の種類に支配される。このため、上記でえられた泥岩の性質に関する知見を具体的に土木工事の設計と施工に活かしていくためには、粘土鉱物の判定が必要になってくると考えられる。今後の重要な検討課題としたい。

泥岩の採取ならびに物理試験の実施にあたり、新潟大学大学院自然科学研究科の大懸重樹氏、新潟大学農学部生産環境科学科の高村まり恵さん、光尾健氏、青木朋佳さん、浅見聡一氏、および上澤友希氏から多大なご協力をいただいた。また採取した塊状泥岩からの供試体の切り出しに際しては、新潟大学理学部地質科学科の新川公教授から小型切断機を快く提供していただいた。ここに記して、これらの方々に深謝を表したい。

参考文献

1. 土質工学会(編). 1974. 日本の特殊土, 土質基礎工学ライブラリー10, 土質工学会, 東京. PP. 314- 342.
2. 土質工学会(編). 1988. 土質工学ハンドブック, 土質工学会, 東京. PP. 416- 419.
3. 土質工学会(編). 1987. 堆積軟岩の工学的性質とその応用, 土質基礎工学ライブラリー30, 土質工学会, 東京. PP. 37- 42.
4. 仲野良紀. 1964. 由比地スベリ母岩(泥岩)の軟弱化と物性の変化について(その1) - 軟弱化のメカニズムについて-. 土と基礎, 12(11): 27- 33.
5. 地盤工学会(編). 2000. 土質試験 - 基本と手引き -, 地盤工学会, 東京. PP. 151- 158.
6. 地盤工学会(編). 2000. 土質試験 - 基本と手引き -, 地盤工学会, 東京. PP. 17- 38.
7. 土木学会(編). 2001. 土木材料実験指導書, 平成13年改訂版, 土木学会, 東京. PP. 18- 24.

Strength Property of Mudstone Deteriorated by Drying Process Followed by Wetting

Anna ISO¹ and Toshihiro MORII^{2*}

(Received Dec. 29, 2003)

Summary

A series of uniaxial compression tests were conducted to investigate effects of water content and drying process followed by wetting on the strength of the mudstone collected from the middle area of Niigata, Japan. The mudstone had been formed geologically during the Neogene Period. The intact mudstone was excavated by a backhoe from the rock formation, and collected into the laboratory. The mudstone collected is classified into siltstone based on a grain size analysis of soil, and its compressive strength measured at the completely dried condition is almost same as Portland cement. Following remarks are concluded from the laboratory tests:

- 1) The compressive strength of the mudstone collected is strongly affected by its water content. By comparing the strength of the test specimens intact, dried in air, dried in an oven box and immersed in water, it is found that the compressive strength of the mudstone increases with its water content decreasing.
- 2) The compressive strength of the mudstone is deteriorated by repeat of drying process followed by wetting. The drying process followed by wetting was repeated four times, with the result of the largest decrease in strength of the mudstone during the first attack of wetting after drying.
- 3) Degree of the deterioration in the compressive strength of the mudstone does not depend on the difference of water content between drying and wetting processes. Some change in the water content caused by the drying process followed by the wetting is thought to be an important trigger which deteriorates the strength of the mudstone.

The degree as well as the process of deterioration in strength of the mudstone may be affected by the type and the content of clay mineral such as montmorillonite, illite and kaolinite included in it. The laboratory investigation based on a clay mineral analysis of mudstone should be conducted for better understanding of its mechanical properties.

Key words: Mudstone, Compressive strength, Drying process followed by wetting, Water content, Uniaxial compression test of soil

¹ Department of Agriculture, Gunma Prefecture, Japan. Formerly, Faculty of Agriculture, Niigata University, Japan.

² Faculty of Agriculture, Niigata University

* Corresponding author: morii@agr.niigata-u.ac.jp