

# 変形安定性からみた泥岩材料の 締固め基準の検討

村上幸利<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 山梨大学教授 大学院医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail:mura@yamanashi.ac.jp

山梨県峡南地域に堆積した泥岩を盛土材料として締固めた場合について、その水浸に伴う圧縮変形特性をこれまで追究してきたが、本研究ではその結果を踏まえて、経済性や施工性を考慮した締固め基準を検討した。その結果、臨界空気間隙率を締固め基準として採用することが合理的であることを示した。また、臨界空気間隙率は、泥岩のスレーキング性と破砕性に関連した指標あるいは吸水率との間に一定の関係をもつことから、その関係を利用することによって、締固め基準である臨界空気間隙率を比較的簡単な方法でもって評価できることを提案し、検証した。

*Key Words* : compaction, criterion, mudstone, settlement, slaking, submergence, water absorptio

## 1. はじめに

今日、建設工事現場においては、自然環境の保全を重視し、工事に伴う環境への負荷を出来る限り軽減しようとする考え方が定着しつつある。このため、資源の有効利用と工事コストの削減への取組みと相俟って、土工で切り取られた岩石が脆弱岩や軟岩と呼ばれるものであっても、それを盛立て材として利用する事例が多い。このような状況のなかにあつて、日本国土の約3分の1の面積を占めるグリーンタフ地域での工事では泥岩を扱う機会が多いが、これを不要物として処分するのではなく、盛土材料として用いようとする試みが進んでいる<sup>1)~4)</sup>。しかし一般に、泥岩は固結力が弱く、不安定に変質しやすい性質を有しているために、盛土材料としての利用にあたっては、これらの特質から派生する工学上の問題の解決が不可欠であるとされている<sup>5)</sup>。

泥岩は、乾燥湿潤状態の繰返しを受けると、その粒子結合が漸次、破壊され、細粒化するという、いわゆるスレーキングと呼ばれる性質を有している。このため、実際に泥岩を盛土材料として利用する際、締固めが不十分な場合には、スレーキングの影響を受けやすく、盛土構造物において継続的かつ長期的な沈下・変形が生じたり、

支持力低下が引き起こされたりする。また反面、泥岩は吸水膨張する性質を有するものが多いため、過度の締固めが行われた場合には、吸水による膨潤の程度がスレーキングに伴う圧縮の程度より相対的に勝り、土被り圧の小さい盛土表面においては膨張を表すことさえある。したがって、盛土構造物の施工時においては、このような問題を未然に防止できるような締固め基準が必要とされる。日本道路公団の設計要領では、スレーキングを起こす材料に対する締固め基準として、岩のスレーキング性や破砕性の大きさの違いによらず空気間隙率を15%以下にすることとしているが<sup>6), 7)</sup>、泥岩材料に限定しての締固め基準はこれまでに明らかにされていない。

本報では、山梨県の峡南地域に堆積した泥岩を一定の粒度(粒径=19~37.5mm)に調整し、それを締固め材料とした場合について、その締固めの程度、上載荷重の大きさ、乾燥湿潤の繰返しの程度、および泥岩の物理的性質等に注目しながら、締固めた泥岩の水浸に伴って生じる圧縮沈下および膨張を含めた変形特性について検討する。さらに、その水浸変形特性に基づき、経済性と施工性を考慮した泥岩の締固め基準のあり方について考察し、泥岩の物理的性質との関係に注目しながら、その締固め基準の評価方法を提案し、検証する。

## 2. 締固めた泥岩材料の水浸変形に影響する因子

締固めた泥岩材料の水浸変形に影響を及ぼす主な因子として、材料とする岩石の性質（スレーキング性、破碎性、吸水性、含有粘土鉱物の種類など）と粒度、締固め後の空気間隙量、上載荷重、乾燥・湿潤の繰返しの程度、の5つの要因が挙げられる。これに対して、これまでの実験的研究から明らかになっていることは、次のとおりである。

- 1) 岩の性質であるスレーキング性と破碎性および吸水性は、水浸時での圧縮ひずみの大きさに強く関わる。破碎性が小さくてスレーキング性が大きい泥岩材料では、水浸に起因する圧縮ひずみが多い。反対に、破碎性が大きくてスレーキング性の小さい材料では、水浸による圧縮ひずみは小さい<sup>8),10)</sup>。また、吸水性が高い材料ほど、水浸に伴って生じる圧縮ひずみが締固め後での空気間隙量の程度によって大きく影響される<sup>11)</sup>。
- 2) 泥岩材料の粒度が水浸変形特性に及ぼす影響は小さいが、泥岩材料の水浸時での圧縮性に強く影響を及ぼす。すなわち、粒度の粗い材料ほど、水浸時の圧縮ひずみは大きくなる<sup>8),10)</sup>。
- 3) 締固め後における泥岩材料の空気間隙量は、水浸によるひずみ量に大きく影響する。空気間隙量が大きいほど、水浸に伴って生じる圧縮ひずみは大きくなる。しかし、ある空気間隙量以下では、その圧縮ひずみはほとんど一定であり、空気間隙量と水浸時での圧縮ひずみの両者には、1本の折れ線で表せるような関係が見られる<sup>8)~10)</sup>。
- 4) 上載荷重が水浸時の圧縮ひずみに及ぼす影響は大きく、上載荷重が大きいほど、その圧縮ひずみも増大する<sup>8)</sup>。
- 5) 締固め後での乾燥湿潤の繰返しの回数が水浸時の圧縮ひずみに及ぼす影響は大きい。回数が多いほど、その後における水浸による圧縮量が小さくなり、膨張を示すことさえある。これには水浸時の粒度変化や泥岩粒子の膨潤性が強く影響していると考えられる<sup>10)</sup>。

以上のことから、一定の粒度をもつ、ある泥岩材料を盛立てた場合、所定の乾燥湿潤の繰返しが与えられる条件下においては、水浸時の圧縮ひずみ  $\epsilon$  は、 $\epsilon = f(p, v_a)$  と表せる。ここに、 $p$  は上載荷重、 $v_a$  は空気間隙率である。よって、 $-\kappa \leq \epsilon \leq \kappa$  ( $\kappa$ : 許容ひずみ) とするような  $v_a = g(p)$  が求まるはずである。この  $g(p)$  がまさしく締固め基準になりうる。

しかし、上記の因子が締固めた泥岩の水浸変形に及ぼす影響について逐次解明し、それに基づいて締固めの基準を検討しようとしても、問題の取扱いを複雑化させるだけであって、有効な方法であるとは言い難い。土工事での経済性を考慮するならば、実際の施工では、泥岩材料を自然含水比または最適含水比付近で締固めて、水浸

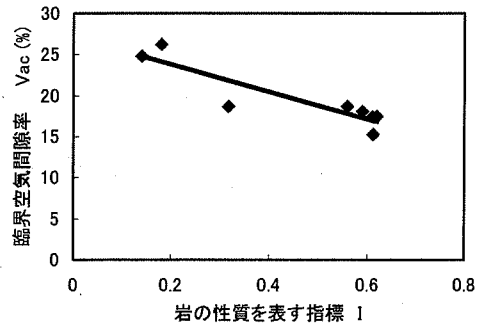


図-1 岩の性質を表す指標と臨界空気間隙率の関係

変形の程度を最小にする上限の空気間隙量に近づけようとする管理方法を探ることが賢明である。このような工学的取扱いにおいて「臨界空気間隙率」に注目することは有意義であろう。これまでの研究において、臨界空気間隙率は上載荷重あるいは乾燥湿潤の繰返し回数によってほとんど変化しないこと、泥岩材料のある限定された粒度（粒径=4.75~37.5mm）の範囲においては粒度によってあまり変動しないことが分かっている<sup>8),10)</sup>。このことをより詳細に調べると、材料の粒度と上載荷重の増加、乾燥湿潤の繰返し回数の減少とともに臨界空気間隙率の若干の低下が見られることを知る。したがって、設計・施工上で安全サイドの締固め基準を設定しようとする場合は、泥岩試料の粒径と上載圧力を大きめに、乾燥湿潤の繰返し回数を少なめにした条件下で水浸沈下試験を行い、臨界空気間隙率を求めて、これを締固め基準として取り扱うのが良い。なお、臨界空気間隙率とは、締固めた泥岩が乾燥湿潤の繰返しを受けた後で水浸によって生じる圧縮ひずみは締固め時のある空気間隙率を境にしてその変化率を大きく変えるが、この臨界に当たる空気間隙率のことである（図-5を参照）。上記のことをより具体的に明示すれば、これまでの実験的研究の成果によって、たとえば乾燥湿潤の繰返し回数として2回、上載荷重として49kPa、試料の粒度として19~37.5mmの条件を設定し、水浸沈下試験を行えば良いと考える<sup>11)</sup>。

しかし、泥岩は含有粘土鉱物、生成年代や続成過程の違いなどから多岐にわたった種々のものがあり、その岩の性質は個々に異なる。盛土材料とする泥岩を試料として、それぞれ水浸沈下試験を実施すれば、締固め基準としての臨界空気間隙率が求まる。しかし、それは正統な方法であるが、非常に面倒な作業となる。このため、泥岩の性質（スレーキング性、破碎性、吸水性、等）を指標化して、水浸による圧縮ひずみが許容値以内（たとえば、盛土の表層3mが乾燥湿潤の繰返しの影響を受けると

仮定して、RC構造物の独立基礎の許容沈下量 3cm 程度を考えると<sup>12)</sup>、ひずみ 1% 以内)に収まる臨界空気間隙率との関係を求めておけるならば、面倒な乾燥湿潤の繰返し作業や水浸沈下試験を行わずとも岩の物理試験のみから締固め基準としての臨界空気間隙率を評価できることになり、これは工学的にみて好都合であると考え。

### 3. 臨界空気間隙率の簡便な評価方法

まず、泥岩の性質に注目して、それと前述した条件下(乾燥湿潤の繰返し回数: 2回, 上載荷重: 49kPa, 試料の粒度: 19~37.5mm)での水浸沈下試験から求めた限界空気間隙率の関係をまとめると、図-1および図-2のようになる。これらは、山梨県峡南地域のうち特に富士川流域で採取した泥岩試料についてのものである。もちろん、他の地域の泥岩については、これらの関係は定量的には異なってくることが十分に推測できる。しかし、その特性が大きく異なることは考えられず、基本的な考え方を論じるうえにおいて、これらの図に基づいて特に問題はないと考える。まず、図-1は、岩の性質であるスレーキング性と破砕性に関する指標  $I (=S/100 \cdot (1-H/100))$  と臨界空気間隙率の関係を表す。ここに、 $H$ はスレーキング率、 $S$ は破砕率を表し、それぞれスレーキング性と破砕性の程度を示す。その求め方については、別の論文に詳しく説明してあるので、参照願いたい<sup>8)</sup>。これをみると、両者には、ほぼ一義的な直線関係があることが分かる。これはすでに他の論文でも紹介しているところのものであるが<sup>8),10)</sup>、この関係では指標  $I$  が大きい泥岩ほど臨界空気間隙率の値が低くなっている。臨界空気間隙率は、締固めた泥岩の水浸に伴って発生する変形沈下に関して、泥岩材料の締固め密度でみたときの変形抵抗の度合いを表す。すなわち、臨界空気間隙率が大きいほど、小さな締固め密度でも変形抵抗が大きいことを表し、材料として変形の安定性が高いことを意味する。当然、逆に指標  $I$  が大きい、すなわち臨界空気間隙率が小さい泥岩は、材料として水浸変形に対する安定性が低いことになる。このことは、締固めた泥岩塊において乾燥湿潤の繰返しの過程で生じる圧縮ひずみと指標  $I$  がほぼ直線的な正の関係にあるとするこれまでの実験結果によっても傍証される<sup>10)</sup>。

次に、泥岩の性質のひとつである吸水性に注目する。その物理量である吸水率は、泥岩自体の多孔性の程度やフィッシャーなど微小な潜在クラックの存在の程度を表し、岩としての不安定要素の大きさを指標する。なお、吸水率の求め方については、岩石試験の解説書に詳記されているので参考願いたい<sup>13)</sup>。吸水率は、泥岩を形成する粘土鉱物の種類によって大きく変わるが、さらにそれが有

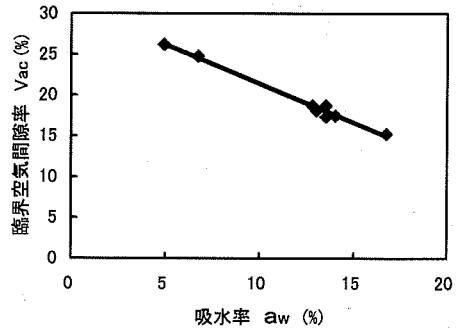


図-2 吸水率と臨界空気間隙率の関係

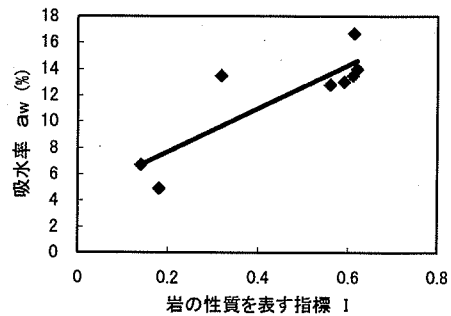


図-3 岩の性質を表す指標と吸水率の関係

効間隙率と強い直線関係にあることが知られている<sup>14)</sup>。これは、物理的に考えて当然のことであろうが、岩の種類に関係なく成立することは興味深いところである。図-2は、泥岩の吸水率とそれを締固めた試料の水浸沈下試験から求めた臨界空気間隙率の関係である。吸水率が高い泥岩ほど、臨界空気間隙率が低いことが分かる。すなわち、前述の考察を受けて考えるならば、吸水性の高い不安定な要素をもつ泥岩材料は、臨界空気間隙率は小さく、材料として水浸変形の安定性が低いことが言える。なお、ここでは図示していないが、ある吸水率以上では臨界空気間隙率がほぼ一定の値に収まるようである。

以上のように、ある一定の地域に分布する泥岩を対象として、泥岩の性質を2つの物理的指標で表し、それらと臨界空気間隙率の関係が得られた。これらの関係を用いることにより、地質学的にみて同じ地域に堆積する他の泥岩について、そのスレーキング率、破砕率および吸水率さえ求めておけば、この泥岩の臨界空気間隙率を間接的に評価することが可能であり、これを締固めの基準値として用いることによって施工管理ができることになる。なお、同じ泥岩試料であっても、それぞれの物理的

指標から評価される臨界空気間隙率は相異なることが考えられるので、工学的には、そのうちの小さいほうを締固め基準として用いるのが良い。すなわち、空気間隙率  $v_a$  (%) は、水の密度を  $\rho_w$  とすれば、

$$v_a = 100 \times \{1 - \rho_d \cdot (1/\rho_s + w/100\rho_w)\}$$

の関係があるので、盛土施工時において、泥岩材料の土粒子密度  $\rho_s$  と締固め時の含水比  $w$  (%) (=自然含水比) が求まっているならば、締固めるべき乾燥密度  $\rho_d$  が設定できるわけである。これより、通常の締固めにおける密度管理をそのまま行えば良いことになる。

参考までに、指標 I と吸水率  $a_w$  の関係を図-3 に示しておく。指標 I が大きい泥岩ほど、吸水率が高めになる傾向が認められる。また図-4 に示されるように、臨界空気間隙率で締固めた場合において、乾燥湿潤の繰返しを 2 回与えた後での水浸による圧縮ひずみが、本研究で用いた泥岩試料において、ほぼ 1% 以内に収まることを付言しておく。

#### 4. 評価方法の検証

上述した評価方法の考え方で、締固め基準の設定が可能かどうかを検証するために、これまで実験用試料として使用したことがない泥岩について物理試験と水浸沈下試験を行い、上記の評価方法および水浸沈下試験から臨界空気間隙率をそれぞれ求め、その比較検討を行った。

実験に使用した泥岩試料のうち 2 つは、山梨県西八代郡上九一色村地内の御坂山地に当たる場所および南都留郡身延町内における波木井川流域の露頭部から採取したものである。地質学的には、それぞれ今から約 2000 万年前に堆積・生成した「西八代層群-ノ瀬累層」相当および今から約 800 万年前の「富士川層群身延累層」相当のものである。なお、前者の泥岩試料の採取場所は、図-1~4 の関係図を作成したときに用いた 8 種類の泥岩試料の採取地点からみて、北東方に直線距離で約 16km 離れた位置にある。試料の物理的性質は表-1 のとおりである。数値からみて、試料は典型的な新第三系泥岩である。これらを以下、高萩泥岩および身延泥岩と称する。

高萩泥岩について、スレーキング率と破碎率から、岩の性質を指標する I を求めると、0.590 である。これより、図-1 を用いて臨界空気間隙率を評価すると、 $v_{ac} = 17.7\%$  を得る。一方、吸水率が 12.8% であることから、図-2 より  $v_{ac} = 17.8\%$  が求まる。2 つの評価方法によって、同値の臨界空気間隙率が得られたことになる。

この評価法の妥当性を検証するために、所定の粒度 (19~37.5mm) に調整した高萩泥岩試料の水浸沈下試験 (試

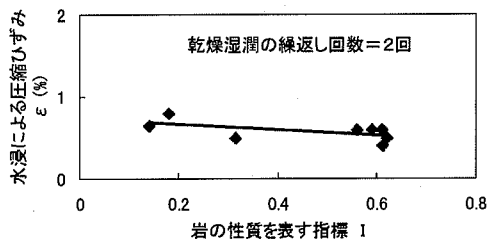


図-4 岩の性質を表す指標と水浸による圧縮ひずみの関係

表-1 高萩泥岩試料の基本的性質

試料名	高萩泥岩	身延泥岩
自然含水比 (%)	6.5~11.3	10.3~13.5
真比重	2.75	2.70
スレーキング率 (%)	99.2	100.0
破碎率 (%)	40.5	47.1
吸水率 (%)	12.8	13.9
最適含水比 (%)	14.0	14.5

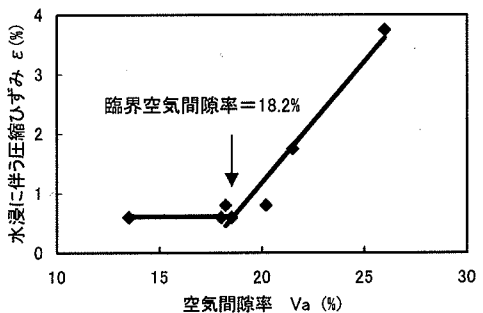


図-5 空気間隙率と水浸に伴う圧縮ひずみの関係

験条件=乾燥湿潤の繰返し回数: 2 回, 上載荷重: 49 kPa) を実施して、空気間隙率と水浸に伴って生じる圧縮ひずみの関係を求めた。その結果が図-5 である。これより、この泥岩の臨界空気間隙率が 18.2% であることが分かる。また、身延泥岩試料についてもスレーキング率と破碎率を用いて  $v_{ac} = 18.3\%$ 、吸水率を用いて  $v_{ac} = 17.4\%$  が求められたが、水浸沈下試験から得られた臨界

空気間隙率は16.9%であった。すなわち、これまでに説明したように、泥岩試料の物理的性質と臨界空気間隙率の関係を用いた比較的簡単な方法でもって、締固め基準として利用できる臨界空気間隙率をかなりの精度で評価できることが分かる。これは、場所が異なっても、地質的にはほぼ同じ範疇に入る泥岩を対象とする場合は、かなり有効な評価方法になると考えられる。実際、他の幾つかの試料についても同様な検討を行ったところ、両者の臨界空気間隙率の差異として最大3%程度がみられることもあるが、かなりの精度でもって評価が可能であることを確認できている。

## 5. まとめ

本報では、泥岩材料の締固め基準として、臨界空気間隙率が有効であることを示し、岩の性質であるスレーキング性、破砕性および吸水性の大きさから、その臨界空気間隙率を評価できる簡易な方法を提案した。以下に要点を纏めると、

- 1) 泥岩材料の締固め基準として、臨界空気間隙率が工学的にみて有効である。
- 2) 臨界空気間隙率は、上載荷重、材料の粒度、乾燥湿潤の繰返しの程度によって、ほとんど影響されず、個々の泥岩材料によってほぼ固有の値をとる。
- 3) 地質学的に近い関係の泥岩材料では、岩の性質を表す指標Iと吸水率 $a_w$ はそれぞれ臨界空気間隙率と一定の関係をもつので、そのような岩の物理量を測定することにより、間接的に臨界空気間隙率を評価できる。
- 4) 検証実験を行った結果、上記の臨界空気間隙率の評価方法がかなりの精度をもつことが分かった。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会：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、1995。

- 2) 山口晴幸, 大山英治, 黒島一郎, 中岡時春：講座・盛土材料としての堆積軟岩の諸特性と盛土事例 5. 堆積軟岩を用いた宅地造成盛土(その1), 土と基礎, 第44巻, 第5号, pp. 63-68, 1996。
- 3) 丸山修：講座・盛土材料としての堆積軟岩の諸特性と盛土事例 7. 堆積軟岩を用いた鉄道盛土, 土と基礎, 第44巻, 第9号, pp. 53-58, 1996。
- 4) 大山英治, 谷茂, 豊田光雄, 延山政之：講座・盛土材料としての堆積軟岩の諸特性と盛土事例 8. 堆積軟岩を用いたフィルダム, 土と基礎, 第44巻, 第10号, pp. 49-54, 1996。
- 5) 藤田武彦, 山中敏和, 石黒昌信, 中里誠司：南紀新空港造成高盛土における水浸沈下について, 土木学会論文集, No. 575/III-40, pp. 231-242, 1997。
- 6) 島博保, 今川史郎：スレーキング材料(せい弱岩)の圧縮沈下と対応策, 土と基礎, 第28巻, 第7号, pp. 45-52, 1980。
- 7) 日本道路公団：設計要領第一集, 土工編, pp. 58-62, 1999。
- 8) 村上幸利：締固めた軟岩材料の力学的安定性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。
- 9) 村上幸利：締固めた泥岩材料の水浸沈下特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 589/III-42, pp. 287-294, 1998。
- 10) 村上幸利：締固めた泥岩の堆積年代と物理的性質とスレーキングに起因する圧縮特性の関係, 土木学会論文集, No. 680/III-55, pp. 225-231, 2001。
- 11) 清水謙太郎, 村上幸利：締固めた泥岩材料の水浸時の変形特性とそれに基づく締固め基準の検討, 第29回土木学会関東支部技術研究発表会講演集, pp. 508-509, 2002。
- 12) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針(第2版), pp. 153-154, 2001。
- 13) 地盤工学会：岩の調査と試験, pp. 381-382, 1989。
- 14) 村上幸利：岩石材料の物理的性質とスレーキング性の関係および既存のスレーキング試験の有用性, 土と基礎, 第48巻, 第2号, pp. 5-8, 2000。

(2003. 11. 18 受付)

## EXAMINATION OF COMPACTION CRITERION ON MUDSTONE MATERIALS FROM VIEW-POINT OF DEFORMATION STABILITY

Yukitoshi MURAKAMI

The compaction criterion of mudstone materials is examined based upon some experimental results of the deformation characteristics due to submergence. It is shown that the critical air-porosity is reasonable to be adapted as the criterion. Moreover, since there exist certain relations between the critical air-porosity and the material properties such as slaking, breakage and water absorption of mudstone, the critical air-porosity can be easily estimated by using the relationships.