泥質岩の含水による強度変化

田 中 芳 則[※]

The Effect of Moisture Content on the Strength Change of the Mudstone

by Yoshinori Tanaka

Abstract

Many uniaxial and diametrical compression tests have been performed by consecutively decreasing the moisture in the tertiary mudstone, the most typical of the "Nangan", and the relation between the moisture content and the strength of the mudstone was examined. As a result of the test, it was found that the relation might be classified as coming under a change which systematically corresponds with the specified grouping system and its progress in the lithification process. Moreover, since the internal friction angle is constant for the most part in the moisture content, it can be said that the cohesion giving the constituent grains the strength to bring about the change in the mudstone, has the greater influence on the strength change.

1. まえがき

岩石の強度が含水比の増減につれて変化することは従来からよく知られている。軟岩においては特にこの傾向が強く土木工事での施工上、あるいは室内での実験においてもその影響を無視するわけにはいかない。この点で今までたんに“風乾試料の強度”というように表現されていたものは、きわめてあいまいなものと云わねばならない。

※ 東洋大学工学部土木工学科

1968年4月11日受理

岩石強度と含水比との関係についての報告はこれまでもいくつか発表されている。例えば、渋谷（1964）は新潟県古宇座川地氾り地の泥岩について実験を行っており、また仲野（1964）は由比地氾り地の泥岩について風化進行過程での含水比の影響を考察している。さらに谷津（1964）は含水比による大巾な強度の変化は軟岩の特徴であると述べている。吉田、吉中（1966）は明石層及び神戸層の広汎な工学的研究の中で砂岩、泥岩における含水比の影響を指摘している。

しかし未だ軟岩だけに限っても岩質によりどのような差異があるかは明らかでない。そこで本報告では各地から採取した第3紀泥質岩9種について一軸圧縮及び引っ張り試験を行い、岩質と対比させながら含水比との関係を考えてみた。試験ケ数が少ないものもあってやや推定的な部分もあるが一応の傾向を得ることができた。

最近、国土の開発にともなって土木工事の範囲もひろがり従来以上に軟岩地域に遭遇する機会が多くなっている。合理的、経済的な設計と施工を行うためにそれらの性質を熟知すべきことはもちろんであるが、その際に本文が少しでも役に立つようなことがあれば幸いである。

2. 強度試験とその結果

(1) 試験方法

試料は風化のない新鮮なものを得るため、各地のトンネル工事現場、採石場、宅地造成現場等から採取した。採取にあたっては測定結果のバラツキがなるべく少なくなるよう同一岩塊から切り欠くべく配慮した。試料は直ちにパラフィン塗装またはビニール袋に入れるなどして始めの湿潤状態を保つようにした。使用した試料の採取地その他主な物理的性質を表-1に示す。

表-1 使用試料の採取地と物理的性質

試料記号	採取地	地層時代	岩質	比重	間ゲキ比	乾燥単位 体積重量	湿潤単位 体積重量
On-1	秩父市 大野原	第3紀 中新世	シルト岩	2.707	0.22	2.22 gr/cm^3	2.43 gr/cm^3
On-2	〃	〃	〃	2.688	0.23	2.18	2.36
Ur-1	北陸本線 浦本トンネル	鮮新世	泥岩	2.708	0.94	1.40	1.89
Ur-2	〃	中新世	シルト岩	2.669	0.54	1.73	2.09
Na	北陸本線 長浜トンネル	鮮新世	泥岩	2.658	1.01	1.32	1.83
Ko	北陸本線 木浦トンネル	中新世	シルト岩	2.689	0.53	1.76	2.12
Sc	いわき市 内郷	漸新世	頁岩	2.690	0.49	1.80	2.15
Mi	三浦半島 久里浜	中新世	シルト質泥岩	2.630	0.85	1.42	1.89
Ta	東松山市 高坂	〃	〃	2.581	1.05	1.26	1.77

(以下、試料名は試料記号により略示する)

強度試験用試料は内部までできるだけ一様な含水状態であることが望ましいので小径の円筒形に成形した。成形は25mm ϕ （一部引っ張り試験で50mm ϕ 使用）コアカッターを使用し、圧縮試験では長さを径の

図一 1 応力—歪曲線例 (On-2)

図-2 応力-歪曲線例 (Sc)

2倍に、引っ張り試験では圧裂法によることにして1～1/2倍にした。

成形の際に水を使用するので試料の外表面はぬれて不安定な含水状態になっており、また、全試料を同一の条件下で試験すべきであるので成形試料は数日間浸水させて完全飽和した後、乾燥過程において試験を行うことにした。乾燥は恒湿箱中で1～3ヶ月間ゆっくりと乾燥させ次にデシケータ中で乾燥、最後に炉乾燥を行い各乾燥過程において試験を行った。

強度試験は最大容量20tのアムスラー型試験機を使用した。圧縮試験においては1～3 kg/cm²/secの速度で荷重を加え、軸方向変位をダイヤルゲージにて測定し、また破壊強度をもって最大強度とした。引っ張り試験では圧裂強度をもって引っ張り強度とした。

強度試験後、含水比の測定を行い、また一部の試料からスライドセクションを作製して顕微鏡観察を行った。

(2) 応力-歪曲線

測定結果のうちいくつかの例を図-1～3に示す。曲線型は1般に下方に凸になるが含水比によりその傾向が異なる。

(3) 含水比-強度曲線

9種の試料について圧縮強度及び圧裂引っ張り強度と含水比との関係を半対数紙上で図示すると図-4～8のようになる。圧縮強度、引っ張り強度共にほぼ同じような傾向が認められ飽和含水比付近を除けば曲線は含水比W=10%付近を境にして2つの直線的関係に分割されるよう

図-3 応力-歪曲線例 (Ur-1)

図-4 含水比-強度曲線 (一軸圧縮強度)

図-5 含水比-強度曲線 (一軸圧縮強度)

図-6 含水比-強度曲線（一軸圧縮強度）

図-7 含水比-強度曲線（圧裂引張り強度）

図-8 含水比-強度曲線（圧裂引張り強度）

である。

(4) 含水比-静弾性係数曲線

応力-歪曲線から静弾性係数を算出するにはいくつかの方法があるけれども、ここでは応力-歪曲線上における中間付近直線部の接線勾配をもって静弾性係数とした。これにより含水比と静弾性係数との関係につき数例を示すと図-9～11のようになって含水比-強度曲線と同じような傾向が認められる。

(5) 強度と静弾性係数の関係

上記のように定義した静弾性係数と強度の関係例を図-12～14に示した。経験的に知られているように両者間には直線的な相関関係が成立する。

3. 考 察

(1) 含水比-強度曲線の型

含水比と強度の関係はけっして同一ではなく、また24時間炉乾時の最大圧縮強度も飽和時最小圧縮強

図-9 含水比—静弾性係数曲線例 (On-2)

図-10 含水比—静弾性係数曲線例 (Sc)

図-11 含水比—静弾性係数曲線例 (Ur-1)

図-12 強度と静弾性係数の関係例 (On-2)

図-13 強度と静弾性係数の関係例 (Sc)

度の3.2倍 (Ur-1) から22.9倍 (Ko) までと範囲が広い (表-2)。

しかし半対数紙上では前述したようにW=10%付近を境にして折線となることでは傾向が一致している (但し、飽和含水比付近の部分は除く)。従って、その前後ではそれぞれの部分に対し次の関係が成立する。

$$\log p = \log a + n(\log e) w$$

すなわち

$$p = ae^{nw}$$

ここに a, n: 定数

p : 圧縮または圧裂引っ張り強度

w : 含水比

この関係は沖積粘土などでも報告されている。

さて、今回使用した試料では上記の関係は大きく分けて3大別されるように思われる (図-15(a)-(c))。

すなわち、低含水比では勾配が緩く高含水比において急激に強度が低下する型 (A型)、低含水比及び飽和含水比付近にて勾配が急であるのに対し中程度含水比では

やや緩やかになる型 (B型)、中程度含水比主要部分がほとんど水平になる型 (C型) とに分けられる。試料 On-1, On-2 は A型に、Ur-2, Ko, Sc は B型に、Ta, Ur-1, Mi, Na は C型に属すると考えられる

これらの型を生ずる機構は泥質岩を構成する鉱物、特に粘土鉱物の種類によっても幾分相異なるであろうけれども、今回はその1つの手段として顕微鏡観察により 1/40 mm 以上の粗粒鉱物の占める割合を算出し (表-3)、間ゲキ比と組み合わせて考察してみた。

この粗粒率と間ゲキ比の座標に各試料の測定値を分類型式別に記入したものが図-16である。図から明らかなように間ゲキ比が小さくなるにつれて含水比-強度関係の型はC型からB型さらにA型へと変化している。粗粒率別では試料の不足もあってかあまりはっきりした傾向は見られないようである。同一粗粒率で考えれば間ゲキ比が小さくなるのは石化あるいは固化の進行とみなせるので上述の関係を換言すれば泥質岩においては石化 (固化) するにつれてC型からA型へと移行してゆくと云える。

図-14 強度と静弾性係数の関係例 (Ur-1

表-2 泥質岩の乾燥時最大圧縮強度 σ_{max} と飽和時最小圧縮強度 σ_{min} の比

試料	σ_{max}	σ_{min}	$\sigma_{max} / \sigma_{min}$	$\sigma_{min} / \sigma_{max}$	※ W max
On-1	450 $\frac{kg}{cm^2}$	92 $\frac{kg}{cm^2}$	0.20	4.9	8.8%
On-2	604	78	0.13	7.7	9.9
Ur-1	45	14	0.31	3.2	34.5
Ur-2	302	31	0.10	9.7	20.8
Na	126	36	0.29	3.5	38.3
Ko	※(520)	23	0.04	22.9	20.6
Sc	524	77	0.15	6.8	20.4
Mi	353	34	0.10	10.4	34.2
Ta	197	58	0.29	3.4	42.9

※ W max : 飽和時含水比

() は引っ張り強度より推算

図-15 含水比—強度曲線の型

表-3 1/10mm以上の粗粒鉱物の占める場合

On - 1	32.0 %
Ur - 1	10.7
Ur - 2	30.5
Na	4.4
Ko	20.2
Sc	3.5
Mi	9.6
Ta	21.4

図-16 石化による含水比—強度曲線型式の移行
(□ A型, △ B型, ○ C型)

(2) 含水による強度変化の機構

泥質岩中の水分は結晶水（化合水）、吸着水、自由水に大別される。吸着水はさらに自由水的に泥質岩を構成する結晶粒子あるいは粘土層格子の間隙に毛管現象によって保持される弱結合の層間自由水と層格子間隙に規則正しく強固に結びついた層間結合水とに分けられ相互に漸移しつつ自由水→層間自由水→層間結合水→結晶水の順に水分子と構成粒子あるいは層格子との結合力が強くなる。このうち温度110℃の炉乾燥程度までの乾燥過程に関与する水分は自由水と吸着水である。

含水比と強度の関係はこれら含有水の賦存状態によって左右される。飽和含水比付近では自由水が過剰に取り込まれて構成粒子間の間隙は押し広げられ水は催滑剤的な作用をするものと考えられ強度は低下するに到る。もちろんこの際には間隙水圧が働らくことによる強度低下もある程度考えられる。今回の実験において飽和含水比付近に認められた急激な強度低下はこれら両者の複合作用と思われる。さらに乾燥するにつれて強度は弱結合の層間自由水により支配され、これが含水比—強度関係の主要部分を占める。風乾過程の最終段階ではW=10%前後からその傾向が異なるようになり含水比による強度変化は次の段階に移行している。風乾による最終含水比は外的条件により異なるであろうが冬期乾燥期にて4～6%であった。乾燥の最終過程では短時間の炉乾をも含んで行われ層間自由水は完全に失われて層

間結合水相互の強い結合力によって強度が支配されるようになり層間自由水逸散過程とは異なった傾向を持つ。

含水による強度変化の機構は粘土周辺水分子の水素結合力（仲野（1964））あるいは岩石内部にあるひびわれ表面の分子力（Fedá（1967））によって物理化学的な面での説明がされているけれどもいずれも吸着水の挙動が根本的なものであり軟岩ではこれが特に顕著である。

先に述べたように全過程は主として間ゲキ比によりいくつかの異なった型に大別されたが、これは吸着水結合以外の別の結合形式をも含んでいることを暗示する。すなわち間ゲキ比が小さくなるにつれて構成粒子は互いに接近して直接接触するようになり、また珪酸分、石灰分などが滲み込んで粒子相互を膠着し全体として1つのフレームを構成するようになる場合がある。A型の O_{n-1} などはこの影響が顕著にあらわれた例と考えられる。この例では低含水比領域においてこのようなフレームが荷重を支え含水比の影響は小さくなっていると思われる。

含水比—強度関係とその型式の移行はこれらの要素を全て含んで複雑な系を構成しているものと思われる今後、より精細な研究が必要である。

(3) 含水比と内部摩擦角の関係

圧裂引っ張り強度の含水比との関係は圧縮強度のそれとほぼ同一の傾向を持つようである（但し、データの少ないA、B型泥質岩は除く）。従って、圧縮強度を σ 、圧裂引っ張り強度を σ_t とすれば各含水比区間において

$$\sigma = a e^{n w}$$

$$\sigma = b e^{n w} \quad (a, b, n \text{ は定数})$$

であるから

$$\frac{\sigma}{\sigma_t} = \frac{a}{b} = \text{定数}$$

となり σ と σ_t は含水比の変化にかかわらず直線関係を持つ。両者をモールの応力円にとり両円の接線を破壊包絡線にとってみると、この傾斜は含水比変化とは無関係に一定である。すなわち内部摩擦角は乾燥過程を通じてほとんど一定とみなされることになり強度の含水比による変化は土の粘着力に相等する構成粒子相互の凝集力によって大きく左右されるものと考えられる。この点でも(2)で述べた泥質岩における含水比の影響の本質が矛盾なく適合できることが理解される。

4. 実際問題への応用

大地を構成する土や岩は土木工事の最も根本的な対象である。

土木技術者の云う地山、地盤あるいは岩盤は土や岩が種々多数の地質的要因に従って複雑にからみ合いながら配置されたものである。このうち“地山”は断層、褶曲等の大きな地質構造要素と各種の岩石を包含した最も大きな土木施工単位であり、一方“地盤”あるいは“岩盤”は多くの場合土木構造物

と密着し、小断層、小褶曲、層理、節理等小規模の構造を含んだ比較的小範囲の単位と考えることができる。さらに個々の岩片はこれらの最小単位であってその分布、賦存状態がより大きな単位の性格を決定する。軟岩では一般に地質時代が新しいせいもあって個々の岩片の持つ意味は非常に大きい。地山や岩盤を施工の対象とする際に通常、強度や変形性が主要な問題になることを考えれば、軟岩における含水の影響はけっして無視されるべきものではない。

この立場に基づき実際問題への応用の1つとしてトンネル掘削の際の地圧を考えてみる。

軟岩深部地山にトンネルを掘削すると周囲の地山内応力は変化しトンネル内室に近い地山は弛緩して塑性領域を形成し支保に荷重が加わるようになる。これとともに地山内部から浸潤してきた水はこの傾向をさらに増長させて塑性領域を拡大させると云われている。

ここに非常に深いトンネル掘削の際の地山内部からの水による含水比増加の果たす役割を考えてみると強度低下の型によってそのあらわれ方が多少異なるものと考えられる。例えば前節においてC型と分類した泥質岩は最大強度自体が小さいので、たとえ初期含水比が小さくともトンネル掘削により容易に破碎塑性化して掘削当初から大きな地圧が作用するようになり、さらに生じたひび割れ沿いに浸入した水による強度低下の影響が加わるようになる。この場合、水の影響は2次的な要素とみなされる。

次にA型、B型のものでは一般に初期強度が大きいので破碎塑性化はほとんどないあるいは小範囲にとどまって初期地圧は小さくなるが、水がまわってくるにつれて大巾に強度を低下し地山内応力以下になれば順次破碎塑性化が進行することになり含水比増加と地圧の関係は密接である。

軟岩深部地山中のトンネル地圧についてはまだ不明な点が多く、多数の要因についてそれぞれ細かく検討するのも大切なことと思われるがとりわけ地山強度はその中でも最重要の要素であるから地圧対策の面においても水の影響を特に考える必要がある。

5. まとめ

軟岩の含水による強度変化を検討するために最も代表的な軟岩である第3紀泥質岩9種につき、以上一軸圧縮強度及び圧裂引っ張り強度とについて測定した結果、次のようなことが云える。

(1) 圧縮強度、圧裂引っ張り強度及び静弾性係数（直線部接線勾配）は含水比変化に対してほぼ同一の傾向を有し、半対数紙上では $W=10\%$ 付近を境にして異なる直線部に分割される。

(2) 以上の関係は泥質岩の石化が進行するにつれて変化し相互に漸移するいくつかの型（今回はA, B, C 3つの型に分けた）に分類される。

(3) 内部摩擦角はC型泥質岩に関する限り含水比によってほとんど変化せず、含水比の強度に及ぼす影響は構成粒子相互の凝集力の変化にあると考えられる。

この報告は各試料の初期条件を同一にするために飽和の状態から乾燥する過程において行った試験結果に基づいているので湿潤過程での結果とは幾分異なることも予想され今後の検討が望まれる。

末尾ながら本文をまとめるにあたり終始適切な御助言を頂いた東洋大学桑原弥寿雄教授に深く感謝す

る次第である。

参 考 文 献

- (1) 渋谷長美 (1964) : 含水による岩石の強度及び荷重の関連, 第19回土木学会年次学術講演会講演概要, pp 78。
- (2) 仲野良紀 (1964) : 第三紀地スベリ母岩 (泥岩) の軟弱化と物性の変化について, 第19回土木学会年次学術講演会講演概要, pp 79。
- (3) 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2), 土と基礎, Vol. 12, No.12, pp 3—8。
- (4) 谷津栄寿 (1964) : 岩盤の吸水膨脹について, 岩の力学国内シンポジウム講演集, pp 145—154。
- (5) 吉田敏, 吉中竜之進 (1966) : 明石層および神戸層の工学的性質について, 土木研究所報告, No.129 pp 34—37。
- (6) 江淵藤彦, 山内勤, 河野静夫 (1959) , 水分が石灰の圧縮強さに及ぼす影響, 九州大学生産科学研究報告, 第25号, pp 1—15。
- (7) 国鉄岐阜工事局糸魚川出張所 (1967) : 北陸本線糸魚川直江津間線路増設工事概要。
- (8) 糟谷憲司, 斎藤和雄 (1965) : 軟質砂岩類試料の変形に関する試験結果について, 電力技術研究所報告, No.65059, pp 2—8。
- (9) 須藤俊男 (1959) : 粘土鉱物, pp 124—130。
- (10) 赤井浩一, 柴田徹 (1955) : 粘土の含水量変化にともなう沖積層強度の推移について, 土木学会誌, Vol. 40, No.10, pp 51—56。
- (11) 林正夫 (1967) : 第1回国際岩盤力学会議の報告, 第2回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp 189。
- (12) 土木学会 (1966) : 土木技術者のための岩盤力学, pp 125—142。
- (13) 高橋彦治 (1963) : 湧水と地圧, pp 119—123。
- (14) 加内俊二, 桑原弥寿雄 (1963) : トンネル施工法