

(69) 人工軟岩の力学特性

— 強度特性に及ぼすモンモリロナイト含有量と含水比の影響 —

(財) 鉄道総合技術研究所 櫻井 孝

(財) 鉄道総合技術研究所 朝倉俊弘

○(財) 鉄道総合技術研究所 小島芳之

応用地質 (株) 高橋昭教

Strength Characteristics of Artificial Soft Rocks

— Effect of Montmorillonite Content and Water Content on Strength Characteristics —

Takashi SAKURAI, Toshihiro ASAKURA, Yoshiyuki KOJIMA,

Railway Technical Research Institute

Akinori TAKAHASHI, OYO Corporation

Abstract

This paper describes the effect of montmorillonite content and water content on strength characteristics of artificial soft rocks in a study aimed at establishing a reasonable method to evaluate muddy soft rocks.

The results are summarized as follows :

- 1) When a rock mass contains large quantities of montmorillonite, its strength varies with water content.
- 2) The more montmorillonite the rock mass contains, the more largely its strength lowers as water content increases.
- 3) For evaluating muddy soft rocks, it is important to check water contents against "transition water content" as well as their montmorillonite contents.

1. まえがき

新第三紀の泥質軟岩で構成される地山中にトンネルを掘削すると、しばしば強大な膨張性地圧が発生する。このような地山において、掘削に伴うせん断領域での吸水に伴う強度低下の有無・程度を事前に予測するための指標として、モンモリロナイト含有量と自然含水比の組み合わせによる評価の有効性が、掘削時の地山挙動との関連から統計的に確かめられている¹⁾。一方、破碎質な泥質軟岩の岩盤強度を評価する方法を検討するため、泥質軟岩を乾燥粉碎した粉末試料に水を加えて練り混ぜ、これをシリンダー内で加圧整形して円柱供試体とした「人工軟岩」を用いた力学試験を行ってきた^{2) 3)}。

本報告は、泥質軟岩地山の合理的評価法の確立を目的としており、泥質軟岩を原試料とした人工軟岩の一軸圧縮試験、三軸圧縮試験結果を基に、その強度特性に及ぼすモンモリロナイト含有量と含水比の影響について検討した結果を報告するものである。

2. 試験に用いた試料及び人工軟岩の作成方法

2.1 試験に用いた試料

試験に用いた試料は、グリーンタフ地域内の新第三紀中新世～第四紀洪積世前期の泥岩で、トンネル切羽またはボーリングコアから採取した。試料数は10試料で、原試料の地質年代、地層名、物性・力学試験値等

表-1 原試料の採取地点と物性・力学試験結果

トンネル名	塩 嶺	鍋 立 山				能 生	信 濃 川			門ノ沢	第二白坂
試料名	EN	NA1	NA2	NA3	NA4	NU	SH1	SH2	SH3	KA	S2
地 質 時 代	新第三紀 中新世	新第三紀中新世				新第三紀 中新世	第四紀洪積世前期			新第三紀 中新世	新第三紀 中新世
地 層 名	三沢泥岩層	椎 谷 層				名立層	小 国 層			門ノ沢層	
岩 石 名	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	シルト岩	泥岩	泥岩	砂質泥岩	泥岩
密 度 (g/cm^3)	—	2.1	—	—	—	—	—	1.93	1.88	2.25	—
自然含水比 (%)	—	30.0	24.8	24.5	25.6	—	—	29.7	34.6	13.4	—
一軸圧縮強度 (MPa)	—	—	—	—	—	—	—	6.56	3.25	—	—
静弾性係数 (MPa)	—	—	—	—	—	—	—	852	277	—	—
粒度 粘土分 (%)	24.0	14.0	—	48.0	49.0	38.0	18.0	43.0	52.0	7.0	30.0
組成 サイ分 (%)	19.4	35.5	—	49.0	50.0	45.0	80.5	57.0	48.0	19.0	66.0
液性限界 (%)	—	—	—	99.2	112.8	—	—	48.4	52.4	—	32.6
塑性指数 (%)	34.9	65.2	—	74.6	87.4	67.6	30.8	19.2	21.0	35.8	14.4
浸水崩壊度	—	—	—	—	D	—	—	A	B	—	—
モンモリロナイト含有量 (%)	20-25	20-25	20-25	20-25	30-35	15-20	15-20	<5	5-10	10-15	—

*1: ブロックサンプルが極度に泥滓化しているため不攪乱試料の作成ができなかった。

は、表-1に示す通りである。

モンモリロナイト含有量の定量は、 CaCl_2 溶液中で攪拌し、交換性陽イオンをCaイオンに交換した試料について、X線回折法により含有量を求める方法によった⁴⁾。ここでは、測定精度を考慮して5%の幅で表示している。粒度試験は、乳鉢で軽くときほぐした後、珪酸ナトリウム溶液を分散剤に用いて行った。

2.2 人工軟岩の作成方法

人工軟岩は、図-1に示す手順²⁾にしたがって作成した。シリンダー内で加圧整形する時の載荷荷重及び載荷時間については、載荷荷重10~200kN、載荷時間 5分~ 1時間の範囲内では、人工軟岩の力学値は概ね一定となり、この範囲で作成すれば人工軟岩の飽和度はいずれも概ね100%に達することが確認されており³⁾、ここでは、載荷荷重50kN、載荷時間 5分とした。

供試体の含水比（設定含水比 w_{n1} ）は、15, 20, 25, 30, 35%の内、適宜定めた。それらの含水比毎に、一軸圧縮試験及び三軸圧縮試験（原則として封圧 $\sigma_3 = 0.2, 0.5, 1.0$ MPa の3種類）用に 4ピース作成した。

3. 試験結果

3.1 一軸圧縮試験結果

図-2は、一軸圧縮試験によるピーク強度と、試験終了後に測定した含水比（試験後含水比 w_{n2} ）の関係を各試料別に示したものである。図-2より、対数表示したピーク強度は、含水比の増加に伴い試料毎に直線的に低下することが分かる。また、各試料別に見ると、強度は各々異なっており、各々固有の強度特性を持っている。これは、鉱物組成、粒度組成、粒形等の相違によるものと思われるが、表-1の物性値と比較して顕著な傾向を把握す

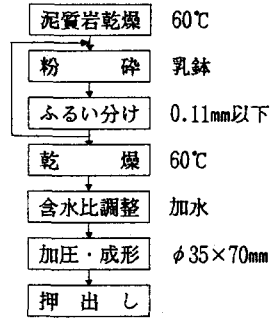


図-1 作成手順

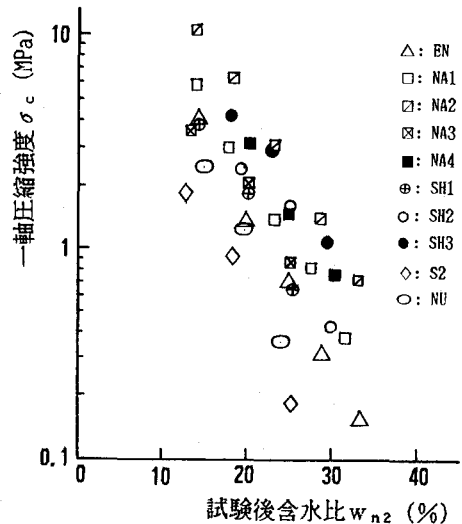


図-2 一軸圧縮強度と試験後含水比

ることができなかった。特に、モンモリロナイト含有量との相関性は認められない。

なお、一軸圧縮試験による残留強度は、ピーク強度発現後のせん断面の入り方により一気に破断することがあり、適正な残留強度を得ることはできないと考えられる。

3.2 三軸圧縮試験結果

三軸圧縮試験は、非圧密非排水条件で、0.5%/分の歪み制御により行った³⁾。

三軸圧縮試験による応力-歪み曲線の例を図-3に示す。図-3より、①含水比の増加に伴い、脆性的な破壊から延性的な破壊に順次移行し、強度が低下すること、②封圧の増加に伴い、脆性的な破壊から延性的な破壊に順次移行し、強度が増加すること、が分かる。なお、歪み硬化状態においてはピーク強度は消失し、残留強度のみが存在するものと見なして、以下の分析を行った。

各試料で設定含水比毎に作成したモールクーロンの破壊包絡線から粘着力 c 、及び内部摩擦角 ϕ を求めたが、封圧のケース数が少ないこともあってバラツキが大きくなり、比較検討することができなかった。

そこで、詳細な検討を行うため、主応力差 σ_c (MPa) の対数を目的変数とした下式による重回帰分析を各試料別に、残留強度、ピーク強度毎に実施した。

$$\log \sigma_c = \beta_0 + \beta_1 w_{n2} + \beta_2 \sigma_3$$

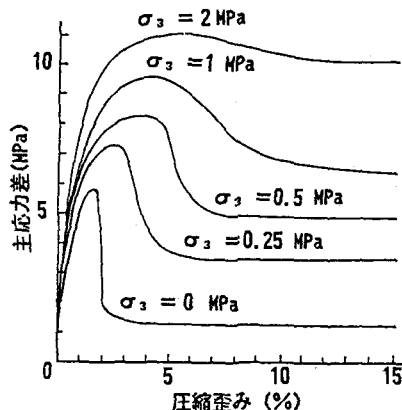
ここに、 w_{n2} : 試験後含水比 (%)

σ_3 : 封圧 (MPa)

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$: 係数

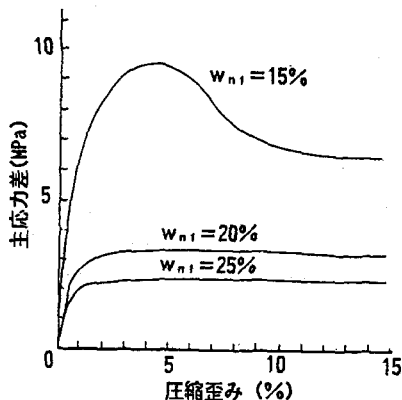
その結果をまとめて、表-2に示す。重相関係数は概ね0.9以上で、良い相関を示している。

設定含水比 $w_{n1}=15\%$



(a) 設定含水比一定 (封圧変化) の場合

封圧 $\sigma_3 = 1$ MPa



(b) 封圧一定 (設定含水比変化) の場合
図-3 応力-歪み線図の例 (NA1)

表-2 重回帰分析結果

	残 留 強 度				ピ ー ク 強 度				遷 移 点	
	β_0	β_1	β_2	R	β_0	β_1	β_2	R	a	b
塩 嶺 (EN)	1.02	-0.0525	0.410	0.97	1.44	-0.0673	0.287	0.96	-8.31	28.4
鍋立山 (NA1)	0.996	-0.0391	0.236	0.92	1.46	-0.0564	0.177	0.93	-3.41	26.6
能 生 (NU)	0.704	-0.0355	0.425	0.99	1.14	-0.0508	0.298	0.96	-8.30	28.8
信濃川 (SH1)	0.741	-0.0267	0.368	0.98	1.24	-0.0437	0.241	0.98	-7.47	29.4
門ノ沢 (KA)	0.241	-0.0039	0.510	0.91	1.15	-0.0269	0.170	0.84	-14.8	39.3
第二白坂 (S2)	0.885	-0.0383	0.575	0.93	1.04	-0.0434	0.521	0.93	-10.6	31.0
鍋立山 (NA3)	0.939	-0.0296	0.604	0.94	1.82	-0.0552	0.300	0.98	-11.9	34.3
鍋立山 (NA2)	0.833	-0.0348	0.406	0.96	1.42	-0.0520	0.250	0.98	-9.07	34.1
鍋立山 (NA4)	0.928	-0.0303	0.599	0.97	1.54	-0.0511	0.457	0.99	-6.8	29.3
信濃川 (SH3)	0.484	-0.0211	1.071	0.85	1.53	-0.0474	0.519	0.95	-21.0	39.9

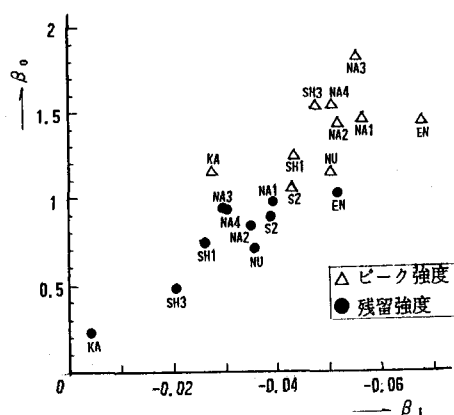


図-4 β_0 と β_1 の関係

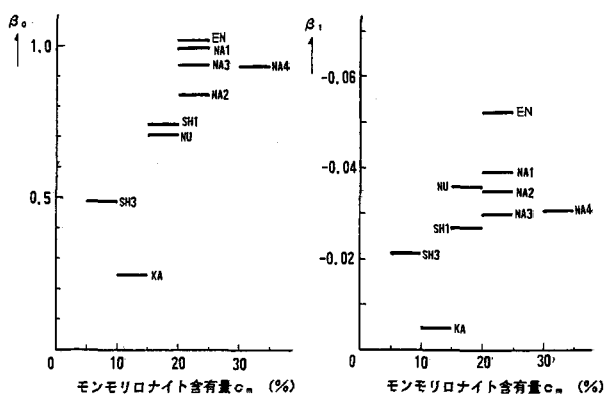


図-5 モンモリロナイト含有量と残留強度の β_0, β_1 との関係

ピーク強度、残留強度各々の β_0 と β_1 の関係は、図-4に示すように、特に残留強度について強い正の相関 ($r=0.88$) が認められる。これは、 β_0 、即ち含水比 0%、封圧 0 MPa のときの仮想的残留強度が大きいもののほど、含水比の増加に対する強度低下が著しいことを示している。また、各試料のモンモリロナイト含有量と残留強度の β_0 及び β_1 との関係を図-5に示す。図-5より、モンモリロナイト含有量が多い試料ほど、仮想的残留強度が大きく、また、ばらつきがあるが含水比の増加に対する強度低下も大きい傾向にあることが分かる。

次に、表-2に示した結果から、 $\log \sigma_c$ と w_n の関係について σ_3 別に描くと、図-6の例に示すようになる。即ち、ピーク強度、残留強度の近似曲線は、ある含水比で交わる。そこで、ある封圧 σ_3 のもとでピーク強度=残留強度となるときの含水比 w_n を、

$$w_n = a \sigma_3 + b$$

と表した時、 w_n を遷移含水比と定義する³⁾。遷移含水比とは、ある封圧での三軸試験においてピーク強度が消失し、延性的な破壊形態に移行するところの含水比である。表-2には、上式の a 、 b の値も示した。係数 b 即ち $\sigma_3 = 0$ MPa のときの遷移含水比は、25~40%の範囲にあり、これを岩種によって区分すると、

- ・ w_n が大きいもの (35 %以上): KA, SH3
- ・ w_n が小さいもの (30 %未満): EN, NA1, NU, SH1, NA4 となる。

図-7は、モンモリロナイト含有量と遷移含水比の関係について整理したものである。図-7より、モンモリロナイト含有量が多いものは遷移含水比が小さい、即ち、含水比がより小さい段階で延性的な破壊形態に移行する傾向が強いことを示している。

一方、図-7に示すように、係数 a 、即ち封圧の遷移

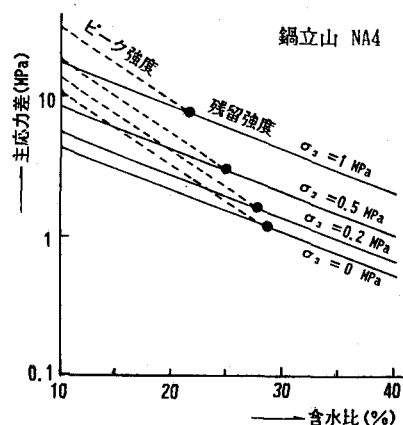


図-6 重回帰分析による $\log \sigma_c$ と w_n の関係の例

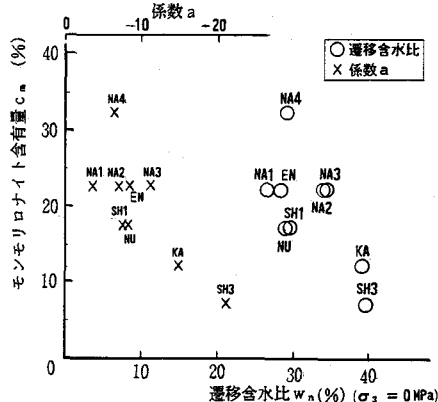


図-7 モンモリロナイト含有量と遷移含水比の関係

含水比に対する寄与度は、モンモリロナイト含有量の少ない試料であるKA、SH3 が際立って大きく、モンモリロナイト含有量の多い試料では小さい傾向にある。即ち、封圧を加えると、モンモリロナイト含有量が少ないものほど遷移含水比の低下の度合いが大きい。

以上を整理すると、次のようになる。

- ① モンモリロナイト含有量が多い試料ほど、含水比 0 %、封圧 0 MPa のときの仮想的残留強度 (β_0) が大きい、含水比の増加に伴う残留強度の低下の度合い (β_1) は大きい。
- ② モンモリロナイト含有量が多い試料ほど、一軸状態では含水比がより小さい段階 (25~30%程度) で延性的な破壊を示すようになる。一方、封圧を加えた場合、封圧の増加に伴い延性的な破壊形態に移行する含水比は低下するが、モンモリロナイト含有量が多いほど、その低下の度合いは小さい。

4. 考察及びまとめ

泥質軟岩を用いた人工軟岩による一軸圧縮試験、三軸圧縮試験を行い、強度特性に及ぼすモンモリロナイト含有量と含水比の影響について検討した。図-8は、この検討結果を基にして、モンモリロナイト含有量と自然含水比の関係図上に、泥質岩で構成される地山の強度特性を模式的に示したものである。図中に示す遷移含水比の想定曲線を境界として、領域Ⅰは脆性的な破壊挙動を示す範囲で、領域Ⅱは延性的な破壊挙動を示す範囲である。

図-8のAとBの関係で示されるように、モンモリロナイト含有量の少ない地山では、自然含水比が少ない場合 (A) は健全な地山で、含水比が増大してBに至った場合でも、地山強度はそれほど著しく低下しない。またこの場合領域Ⅱに至ることは稀であると考えられる。

一方、図-8のCとDの関係で示されるように、モンモリロナイト含有量の多い地山でも、自然含水比が少ない場合 (C) は、Aと同様に健全な地山と考えることができる。しかし、含水比が多くなると地山強度は急激に低下し、領域Ⅱに移行する (D)。モンモリロナイト含有量の多い場合は吸水能力も大きいので容易に含水比が増大するため、例えばこのような泥質地山でトンネル掘削により塑性化する可能性の高い場合は、掘削により周辺地山はCからDに移行して強度低下を起こし、膨張性地圧が発生するであろう。

以上より、次のようにまとめられる。

- ① モンモリロナイト含有量が多い場合であっても、自然含水比の多少により地山強度は異なる。
- ② モンモリロナイト含有量が多いほど含水比の増加に伴う強度低下は著しい。
- ③ 泥質軟岩の評価に当たっては、モンモリロナイト含有量のみでなく、自然含水比が遷移含水比に比較してどの程度であるかを問題とする必要がある。

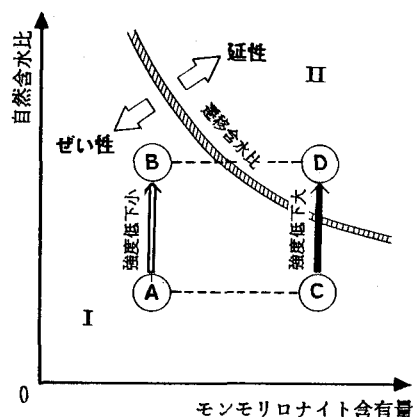


図-8 泥質岩の強度特性の模式図

【参考文献】

- 1) 小島、朝倉、吉川：NATMのための膨張性泥質岩の地山分類、鉄道総研報告 Vol.3, No.5, 1988.5
- 2) 櫻井、高橋：人工泥岩の一軸圧縮試験、第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp61-64、1985.2
- 3) 櫻井、高橋：人工軟岩の三軸圧縮試験、第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp221-225、1986.2
- 4) 櫻井、立松、水野：膨張性粘土鉱物の簡易定量法の研究、鉄道技術研究報告、No.1312、1986.2