

泥質軟岩の含水比変化がロックボルトの付着力に与える影響

西金 佑一郎* 浦越 拓野* 嶋本 敬介** 今泉 光智哲**

Effect of Change in Water Content of Soft Mudstone on Bond Strength of Rock Bolts

Yuichiro NISHIKANE Takuya URAKOSHI Keisuke SHIMAMOTO Michiaki IMAIZUMI

In this study, the authors of this paper devised a testing method for evaluating the bond strength between rock and an anchoring material for holding a rock bolt at a laboratory using boring cores. Furthermore, the authors examined the effect of the change in water content of Neogene mudstone on the bond strength by conducting this test after changing the water content of rock samples. As the results of the examination, we make it clear that the bond strength of the rock sample decreases when the water content of the rock sample is decreased and subsequently increased.

キーワード：泥質軟岩，ロックボルト付着力，含水比，ボーリング，押抜試験

1. はじめに

泥質軟岩の強度は含水比や乾燥・吸水によって変化することが知られており，特にスレーキング（乾燥・吸水による細粒化などの状態変化）が生じると，強度が著しく低下する^{1) 2) 3)}。このような泥質軟岩の含水比の変化は，切土やトンネル周辺地山の強度を低下させ，のり面の崩壊やトンネルの変形等の一因となる場合がある^{4) 5)}。そのため，泥質軟岩地山における切土やトンネルの長期的な安定性を確保するためには，含水比の変化に伴う地山の強度低下の程度を適切に評価し，必要な対策を実施することが必要となる。

泥質軟岩の含水比の変化は，地山の対策工の効果に対して影響を及ぼす可能性がある。例えば，切土やトンネルを対象とした地山の対策工として，ロックボルトを地山に定着させ，主にロックボルト軸方向の引張抵抗によって地山の変位を抑制する方法がある^{6) 7)}。その際には，地山とロックボルト定着材（モルタル）との間に十分な周面摩擦抵抗が確保されていることが必要となる。時間経過に伴う地山の含水比の変化によって地山の強度が低下した場合，地山とロックボルト定着材との間の周面摩擦抵抗（以下，RB 付着力）も低下することが想定される。しかし，このような経時的な地山の含水比の変化が RB 付着力に及ぼす影響については，現状では対策工の設計に十分には取り入れられていない。泥質軟岩の含水比の変化が RB 付着力に及ぼす影響を明らかにできれば，水の影響を加味したロックボルトの効果をより効率的に評価することが可能となる。

そこで本研究では，泥質軟岩地山におけるトンネルの

斜坑を対象に，ボーリング調査によって底盤下の地山の状態を確認するとともに，ボーリングコアを用いた岩石試験・分析を行った。また，ボーリング孔を用いた水位測定を行うとともに，ロックボルトを打設して引抜試験を実施し，原位置での RB 付着力を把握した。さらに，ボーリングコアを用いた室内試験によって RB 付着力を評価できる方法を考案し，この方法を用いて泥質軟岩の含水比の変化が RB 付着力に及ぼす影響について検討した。

2. 対象とした地山とその性状に関する試験

2.1 ボーリング調査

過去のトンネルの変状事例では，新第三紀の泥岩地山において盤ぶくれ等の発生が多く報告されている^{例えは8)}。そこで本研究では，新第三紀の泥岩地山に建設されたトンネルの斜坑の底盤において図1に示すように下向きボーリングを4本（A孔～D孔）削孔した。なお，ボーリングを実施した箇所におけるトンネルの土被りは約200mである。削孔方法は，清水掘りによるオールコアボーリングとした。削孔長はA孔から順に1.7m，2.2m，2.8m，3.2mであり，削孔径はいずれも66mm，得られたコアの直径は約50mmである。

いずれの削孔箇所においても深さ0～1mがインバートコンクリートであり，それ以深は泥岩が主体であった。泥岩のコアには数cm～10cm程度の間隔で割れ目が認められ，深さ1～1.4m程度の浅部のコアは特に軟質もしくは岩片状を呈する区間が多い。

採取したボーリングコアは，乾燥による含水比の変化を防ぐため，コア観察を行った後に速やかにラップで包装し，コア箱に保管して試験室まで運搬した。その後，泥岩のコアを長さ25mm程度に切断し，4章で詳述する押抜試験用の岩石試料を作製した。

* 防災技術研究部 地質研究室

** 構造物技術研究部 トンネル研究室

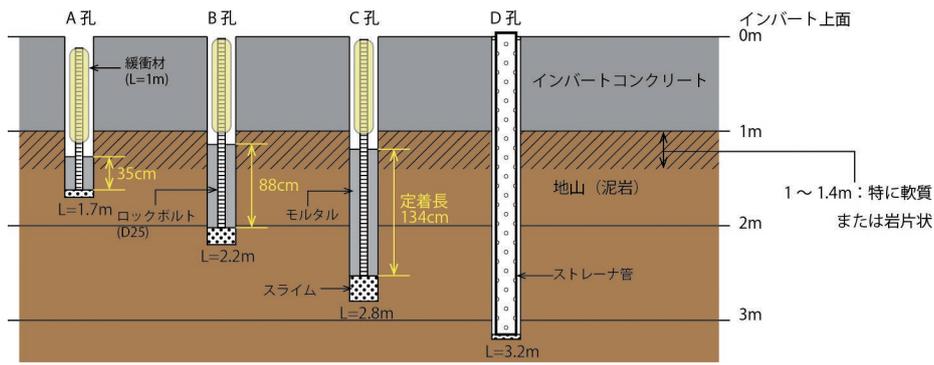


図1 ポーリングおよび引抜試験用ロックボルトの模式断面図

2.2 粉末 X 線回折分析

泥岩のコアの比較的浅部（C孔 1.25～1.28m）および比較的深部（D孔 2.38～2.40m）の試料を用いて、粉末 X 線回折法による鉱物組成分析を行った。その結果、両試料より粘土鉱物であるスメクタイトが検出されたことから、スメクタイトの定量分析を実施した。これらの分析結果を表1に整理する。両試料の鉱物組成およびスメクタイト含有量には、顕著な違いは認められない。

表1 粉末 X 線回折分析の結果

試料		C孔 1.25～1.28m	D孔 2.38～2.40m
組成鉱物の 相対的 な含有量	石英	多量	多量
	長石類	少量	少量
	雲母類	少量	少量
	緑泥石類	わずか	わずか
	ガラス	わずか	非検出
	黄鉄鉱	少量	少量
	スメクタイト	少量	中量
スメクタイト含有量(%)		10	17

2.3 スレーキング試験

泥岩のコアの比較的浅部（C孔 1.25～1.28m）および比較的深部（D孔 2.38～2.40m）の試料を用い、スレーキング試験を実施した。なお、試験方法は地盤工学会基準「岩石のスレーキング試験方法」¹⁾に準じた。C孔の試料は、浸水から4時間後までは表面の割れ目が発達するとともに膨張が進行し、その後は膨張が止まった。D孔の試料は、浸水直後から細片化が進行したが、浸水30分後以降はほとんど変化が見られなかった。浸水前および浸水24時間後の両試料の写真を図2に示す。両試料とも浸水24時間後には全体的に細片化しており、スレーキング指数（浸水24時間後のスレーキング区分）は5段階で2番目に高い3に該当する。

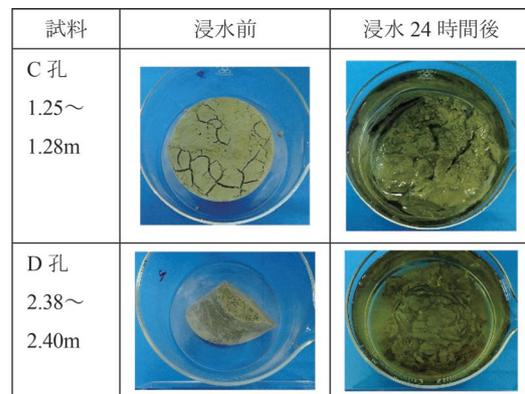


図2 スレーキング試験

2.4 孔内水位測定

2.4.1 測定方法

当該箇所における地山の水位を把握するため、D孔にストレーナ管を挿入し、水位観測孔を設置した。孔内の水位は、孔内の深さ1.5mの位置に設置した絶対圧式水位計の測定値から、斜坑内に設置した気圧計の測定値を差し引くことで求めた。水位測定は2020年11月から翌年7月にかけて実施し、30分に1回の間隔でデータを取得した。

2.4.2 測定結果

水位測定を開始した2020年11月時点において、水位観測孔の孔口から地下水が湧出していることが確認されており、見かけ上の孔内水位はインバート上面の高さ（0m）であった。その後の孔内水位の測定値は、測定期間中ほぼ一定であった（図3）。また、2021年7月および2021年11月に現地を確認した際も、水位観測孔の孔口から地下水が湧出している状況であった。これらの結果から、本測定期間における孔内水位は底盤よりも高い位置にあることがわかる。なお、水位観測孔の孔口を立ち上げて水位を実測した結果、2021年7月の調査時の水位はインバート上面より約4cm上方に、2021年11月の調査時の水位はインバート上面より約8cm上方に位置していた。

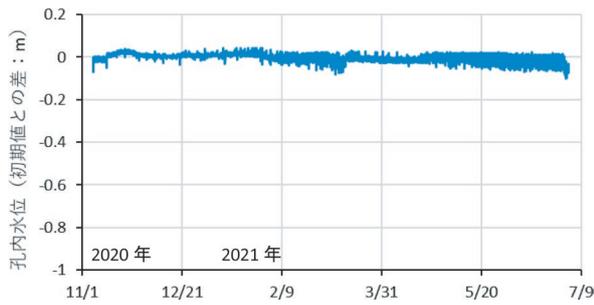


図3 孔内水位の測定変化

3. RB 付着力に関する原位置試験

3.1 引抜試験

3.1.1 試験方法

当該泥岩地山における原位置でのRB付着力を把握するため、今回掘削したボーリング孔のうち3本（A～C孔）にロックボルト（異形棒鋼D25）を打設した。ロックボルト定着材のモルタルは早強ボルトランドセメントを使用し、W/C比50%とした。打設1週間後に1回目の引抜試験を実施し、時間経過に伴うRB付着力の変化を把握するため、約1年後に2回目の引抜試験を実施した。

A, B, C孔のロックボルトと地山との定着長は、それぞれ35cm, 88cm, 134cmである（図1）。なお、RB付着力は引抜試験で得られた最大荷重を定着面積で割ることで求めた。

3.1.2 試験結果

引抜試験の結果を図4に示す。各孔とも、1回目と2回目の試験で得られたRB付着力に大きな変化は認められなかった。また、ロックボルトの定着長が長いボーリング孔ほど、RB付着力が大きいという結果が得られた。特に、削孔長が最も短いA孔のRB付着力は、B孔やC孔のRB付着力に対して1桁小さい値であった。なお、削孔長が最も長いC孔では、2度の試験とも付着切れの前に鋼材の許容引張応力に達したため、その時点で引抜試験を中断した。試験を中断させた時点の引抜荷重より、C孔のRB付着力は0.54MPa以上と計算される。

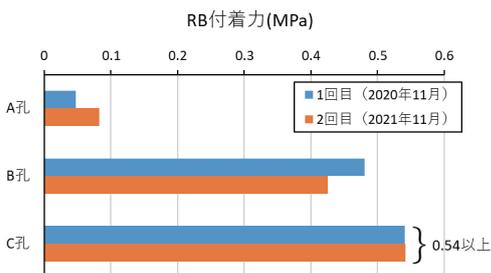


図4 引抜試験の結果

4. RB 付着力に関する室内試験

4.1 押抜試験

ボーリングコアを用いた室内試験によりRB付着力を評価する方法を検討した。3章で紹介したように、引抜試験によって原位置でのRB付着力を評価する場合は、ロックボルト定着材とその周囲の地山の間で付着切れが生じるまでの引張荷重を求める。

今回、室内試験によってRB付着力を評価する方法として、ボーリングコアの側面に引抜試験と同じ配合のモルタルを打設し、モルタル硬化後にコア部分のみを押し抜くことで付着切れを生じさせる方法を考案した。具体的な方法は次のとおりである。

- (1) ボーリングコアを長さ25mm程度に切断した円柱形の岩石試料を作製する。
- (2) 岩石試料の径より大きい円孔を底面に有する鋼製の型枠を用意する。
- (3) 型枠底面の円孔を粘土で閉塞させ、その上面に岩石試料を配置する。
- (4) 型枠内にモルタルを流し込み、岩石試料の側面がモルタルと接する状態とする。
- (5) 型枠をラップで覆い、常温で約2週間静置させ、モルタルを硬化させる。
- (6) モルタル硬化後、ラップと粘土を取り外した供試体（図5）を変位制御が可能な載荷試験機に図6のようにセットする。
- (7) 岩石試料の上面に1mm/minの変位速度で載荷し、

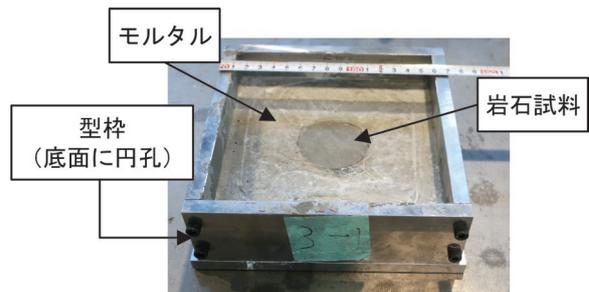


図5 押抜試験の供試体⁹⁾

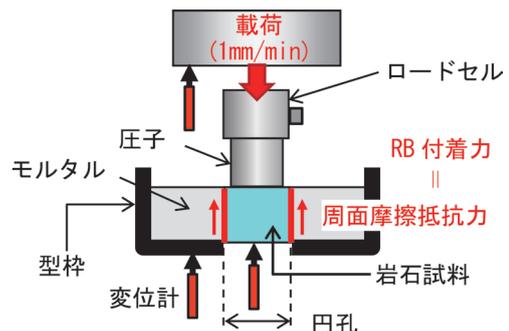


図6 押抜試験の模式図⁹⁾

岩石試料とモルタルとの付着切れが発生するまで岩石試料を型枠の下に押し抜く。

(8) 試験時の最大荷重を、岩石試料とモルタルとの付着面積で割ることによりRB付着力を求める。

今回考案したこの試験方法を、本稿では「押抜試験」と称する。

4.2 含水比の変化を与えた押抜試験

4.2.1 試験方法

本研究で実際に実施した押抜試験および押抜試験後の岩石試料を用いた試験の手順を図7のフローに示す。

今回考案した押抜試験を実施するにあたり、モルタルを打設する前の岩石試料を異なる含水状態に養生しておくことで、含水比の変化がRB付着力に及ぼす影響を検討できると考えた。そこで本研究では、モルタルを打設する前の岩石試料を、表2に示す4つの条件のうちいずれかで養生した。なお、条件1は2.3節のスレーキング試験において岩石試料に与えた養生条件と同じ条件である。

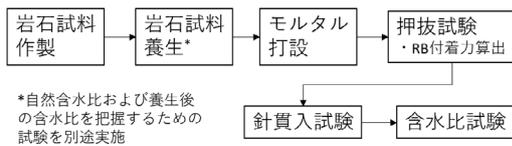


図7 含水比の変化を与えた押抜試験の手順

表2 モルタル打設前の岩石試料の養生条件

養生条件	養生環境	養生時間	備考
条件1	40℃炉乾燥	48時間	スレーキング試験と同じ
条件2	風乾	1週間	
条件3	自然含水比	-	
条件4	浸水(常温)	1週間	

これらの養生によって含水比がどの程度変化するのかを把握するため、押抜試験用の岩石試料とは別にボーリングコアから取り出した岩片を用いて、自然含水比(条件3)および条件1、条件2および条件4で養生した後の含水比を測定した。なお、試験方法は地盤工学会基準「岩石の含水比試験方法」¹⁰⁾に準拠した。養生条件ごとの岩石の含水比を表3に整理する。含水比試験の結果、自然含水比と浸水後の含水比(条件4)は同程度であった。また、条件1での養生によって含水比は自然含水比の1割程度まで低下することが分かった。

2章に記したボーリングコアから作製した押抜試験用の岩石試料は計11個である。各岩石試料の採取位置と養生条件を表4に整理する。

表3 養生条件ごとの含水比

養生条件	試験数	養生後の含水比または自然含水比(%)
条件1	3	1.9
条件2	3	5.5
条件3	9	19.9 (自然含水比)
条件4	3	20.2

4.1節に記載した方法により押抜試験を実施し、各試料のRB付着力を求めた。また、強度に関する物性値を得るために、押抜試験後の岩石試料に対して針貫入試験を実施し、針貫入勾配を測定した。針貫入試験では、岩石試料の上面および下面の複数箇所に軟岩ペネトロ計の針を貫入させた。ただし、押抜試験によって岩石試料が砕けてしまった場合は、比較的大きい岩片を対象に針貫入試験を実施した。

表4 押抜試験の岩石試料の採取位置と養生条件

養生条件	試料番号	コア	深さ(m)
条件1	1-1	D孔	1.775~1.800
	1-2	C孔	1.400~1.425
	1-3	C孔	2.375~2.400
条件2	2-1	D孔	2.725~2.750
	2-2	C孔	1.775~1.800
条件3	3-1	D孔	1.475~1.500
	3-2	C孔	1.150~1.175
	3-3	C孔	2.175~2.200
条件4	4-1	D孔	2.275~2.300
	4-2	C孔	1.500~1.525
	4-3	C孔	2.775~2.800

4.2.2 試験結果

押抜試験で得られたRB付着力と、針貫入試験で得られた針貫入勾配の結果を図8に整理する。この図より、モルタル打設前に乾燥させた試料(条件1および条件2で養生した試料)は、乾燥させていない試料(条件3および条件4で養生した試料)よりもRB付着力が小さく、針貫入勾配も小さい傾向が認められる。ただし、RB付着力と針貫入勾配の大小関係は必ずしも一致しておらず、例えば地山浅部(深さ1.2m)のコアから作製した試料3-2の針貫入勾配は比較的大きいが、同じ試料のRB付着力は比較的小さい。

4.3 押抜試験後の含水比試験

押抜試験および針貫入試験を実施した際の岩石試料の

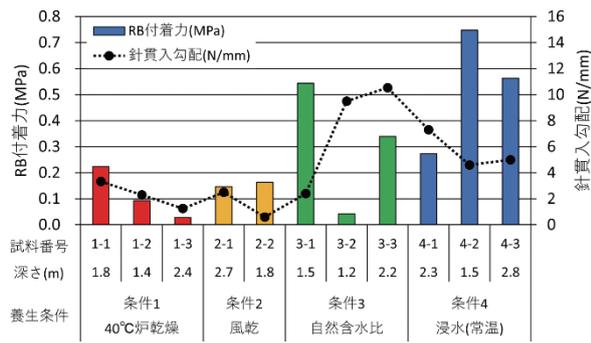


図8 押抜試験および針貫入試験の結果

含水比を把握するため、試験終了後の各供試体から速やかに岩石試料を取り出し、その一部の岩片を用いて含水比を測定した。その結果を図9に示す。乾燥の履歴を与えた条件も含め、試験後の含水比は全ての条件で自然含水比と同程度の20%前後となっていた。ただし、同じ養生条件の岩石試料であっても、比較的含水比が小さい試料も含まれる（例えば試料4-1）。試験後に供試体から取り出した岩石試料はいくつかの岩片に分かれており、含水比を測定したのは岩石試料の一部の岩片であることから、押抜試験後の岩石試料は局所的に乾燥していた可能性がある。

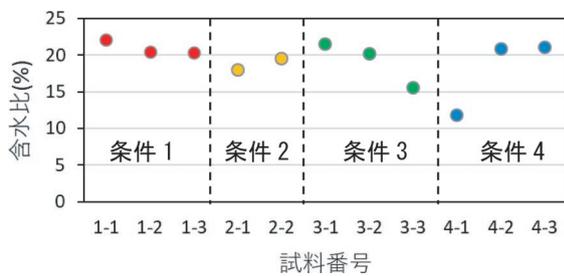


図9 押抜試験後の含水比

5. 考察

5.1 押抜試験に関する検討

5.1.1 押抜試験の妥当性の検討

1回目の引抜試験で得られたRB付着力と、押抜試験のうち自然含水比（条件3）の岩石試料のRB付着力を図10に比較する。引抜試験の結果については、各孔での試験区間の深さ（ロックボルトと地山との定着深さ）とその深さで得られたRB付着力をバーで図示した。押抜試験の結果については、各岩石試料を採取した深さとRB付着力をプロットで図示した。

この図より、最も浅いA孔での引抜試験で得られたRB付着力は、最も浅い位置から得られた試料3-2の押抜試験でのRB付着力と同程度であることが分かる。ま

た、B孔およびC孔のRB付着力は、試料3-1のRB付着力と試料3-3のRB付着力の間の値を示す。

このように、今回考案した押抜試験で得られたRB付着力は原位置での引抜試験で得られたRB付着力と同程度であることから、押抜試験の方法および試験結果は妥当であると考えられる。

地山浅部の泥岩は特に軟質または岩片状を呈していたため、RB付着力が小さかったと推定される。なお、浅部と深部の試料では粉末X線回折分析の結果に顕著な違いが見られなかった（表1）ことから、このRB付着力および岩質の違いは鉱物組成やスメクタイト含有量の違いによるものではないと考えられる。

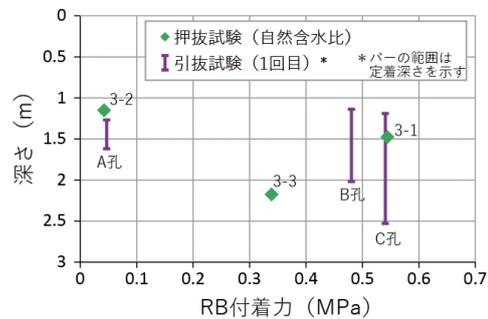


図10 RB付着力と深さとの関係

5.1.2 押抜試験の活用方法

前項より、室内での押抜試験は原位置での引抜試験の代用方法として活用できると考えられる。ただし、押抜試験と引抜試験では岩石とモルタルとの付着面積が大きく異なるため、押抜試験で得られるRB付着力が局所的に大きいまたは小さい値となることも考えられる。そこで、押抜試験の結果から原位置でのRB付着力を推定する場合には、以下の手順で評価することを提案する。

- (1) ボーリングコアを観察し、深さによるコアの性状の違いを把握する。
- (2) 性状の異なるコア（ここでは、風化部と新鮮部に分けられたとする）の区間長をそれぞれ求める。
- (3) 風化部と新鮮部のコアの平均的な箇所を取り出し、押抜試験用の岩石試料を作製する。可能であれば、風化部と新鮮部でそれぞれ3個程度の岩石試料を作製する。
- (4) 押抜試験を実施し、RB付着力を求める。
- (5) 風化部のコア長を L_w 、新鮮部のコア長を L_f 、風化部のRB付着力の平均値を S_w 、新鮮部のRB付着力の平均値を S_f 、コアの掘削径を ϕ とし、原位置でのRB付着力 R を式(1)で評価する。

$$R = \pi\phi(S_w L_w + S_f L_f) \quad (1)$$

5.2 含水比の変化がRB付着力に及ぼす影響の検討

4.2.2項に記した通り、押抜試験においてモルタル打設前に乾燥させた岩石試料のRB付着力は、乾燥させなかった試料に比べて小さい傾向があった。含水比の変化がRB付着力に及ぼす影響について検討するため、今回の押抜試験を通じて岩石試料の含水比がどのように変化したかを考察する。

岩石試料の自然含水比および養生後の含水比（表3）ならびに試験後の含水比（図9）の結果をもとに、岩石試料の含水比の変化のイメージを図11に示す。岩石試料を作製した時点では、各試料はほぼ飽和状態であったと考えられる。条件1および条件2で養生した試料はモルタル打設前に含水比が低下し、モルタルを打設すると岩石試料がモルタルに含まれる水分を吸水することにより、再び飽和状態かそれに近い状態まで含水比が上昇したと推定される。一方、条件3および条件4で養生した試料は、モルタル打設前の養生およびモルタル打設の過程において、ほぼ飽和状態のままであったと考えられる。また、いずれの岩石試料もモルタル打設後にラップを被せていたため、乾燥による含水比の低下はほとんど生じなかったと考えられる。

条件1および条件2で養生した試料は、押抜試験を実施する前に含水比の低下と上昇を経験している。このような含水比の変化を経験することによって岩石が劣化し、RB付着力が低下したと推定される。なお、スレーキングしやすい泥岩を用いて一軸圧縮試験を実施した既往研究¹¹⁾では、自然含水比の岩石試料を浸水させても一軸圧縮強さは低下しないが、一度乾燥させた後に浸水させた試料は著しく一軸圧縮強さが低下するという結果が得られており、本研究ではそれと整合する結果が得られた。

ところで、孔内水位測定および含水比試験の結果（図3、表3）から、当該斜坑の底盤下の地山は常時飽和しており、含水比の変化が生じていないと推測される。さらに、引抜試験で得られたRB付着力が1回目と2回目の試験で同程度であったこと（図4）を踏まえると、地山の含水比が一定に保たれる場合は、RB付着力は大きく変化しないと考えられる。今回の調査では、地山の水

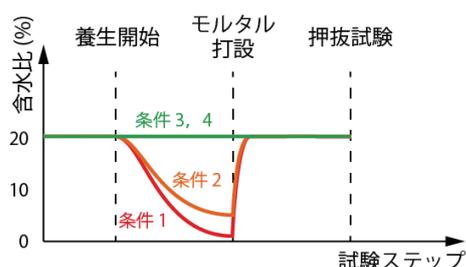


図11 岩石試料の含水比の変化のイメージ

位が変化した場合に原位置でのRB付着力が低下するかどうかを確認することはできなかった。これを確認できれば、本研究における押抜試験の結果の妥当性が補強されると期待されるが、これについては今後の課題である。

6. まとめ

スレーキング特性を有する泥質軟岩の試料を用いて押抜試験を実施した結果、原位置での引抜試験と同程度のRB付着力が得られた。これより、押抜試験の方法および得られたRB付着力は妥当であると考えられる。

また、泥質軟岩の含水比の変化がRB付着力に与える影響を検討するため、岩石試料の含水状態を変化させたのちに押抜試験を実施した。その結果、含水比の低下と上昇を経験した試料では、RB付着力が小さくなることが分かった。

含水比の変化がRB付着力に及ぼす影響を考慮することは、ロックボルトによる地山補強工の適切な設計を行う上で重要であると考えられる。

文献

- 1) 地盤工学会 室内試験規格・基準委員会：地盤材料試験の方法と解説，公益社団法人地盤工学会，pp.285-308，2009
- 2) 土木学会岩盤力学委員会編：軟岩—調査・設計・施工の基本と事例一，社団法人土木学会，pp.1-6，1984
- 3) 土質工学会編：堆積軟岩の工学的性質とその応用，土質工学会，pp.60-68，1987
- 4) 田窪裕一，大岸敏正，奥村隆文，門田圭司：スレーキングによる泥岩法面の崩壊事例，技術フォーラム2012，全国地質調査業協会連合会，ID: 55，2012
- 5) 加藤文啓，齊藤正起，藤原浩一，菊山浩喜：道東自動車道大夕張トンネルにおける変状現象に関する解析的検討，第51回地盤工学会研究発表会，No.0736，2016
- 6) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：切土補強土工法設計・施工要領，2007
- 7) 土木学会 トンネル工学委員会編：トンネル標準設計方書[山岳工法編]・同解説，公益社団法人土木学会，pp.88-96，2016
- 8) 小林寛明，下津達也，上野光，渡辺和之，嶋本敬介，朝倉俊弘：長期的な盤ぶくれに対するインバート構造の抑制効果に関する基礎的研究，土木学会論文集F1，Vol.72，No.3，pp.I_96-I_107，2016
- 9) 西金佑一郎，嶋本敬介，浦越拓野，今泉光智哲：新第三紀泥岩の含水比の変化がロックボルトの付着力に与える影響，土木学会第76回年次学術講演会，III-191，2021
- 10) 地盤工学会 室内試験規格・基準委員会：地盤材料試験の方法と解説，公益社団法人地盤工学会，pp.108-113，2009
- 11) 嶋本敬介，川越健，野城一栄，小林寛明，磯谷篤実：含水比変化に着目した山岳トンネルの盤ぶくれメカニズムの推察，土木学会論文集F1，Vol.76，No.1，pp.34-48，2020