

変位制御型ロックボルトに適した 強度抑制型モルタルの開発

黒川 紗季¹・小泉 悠²・岡田 侑子³
松本 修治⁴・田中 祐介⁵・古城 誠⁶

¹正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: kurokaws@kajima.com

²正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: koizumyu@kajima.com

³正会員 鹿島建設株式会社 東京土木支店 (〒224-0842 神奈川県横浜市栄区飯島町 28-6)
E-mail: okadyuko@kajima.com

⁴正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給二丁目 19-1)
E-mail: matsushu@kajima.com

⁵株式会社ケー・エフ・シー 技術部 (〒347-0010 埼玉県加須市大桑一丁目 19)
E-mail: tanaka.yusuke@kfc-net.co.jp

⁶正会員 株式会社トクヤマ セメント開発グループ (〒299-0368 千葉県袖ケ浦南袖 10)
E-mail: m-kojo@tokuyama.co.jp

海外の大土被りトンネルや鉱山では、地山の変形を許容することで支保に作用する地圧を軽減させる、可縮型の支保部材が採用される事例がある。しかし、地山の変形を無制限に許容する場合、地山を必要以上に緩め、変位を増大させる可能性がある。そこで著者らは、地山の変位を制御できる新たなロックボルトの開発を、主にロックボルトの構造の検討により進めてきた。一方、本ロックボルトを有効に機能させるためには、定着材（モルタル）の一軸圧縮強さが 25N/mm^2 程度以下に抑制される必要があった。そこで、これら開発すべきモルタルの要求仕様を整理し、ミキサおよび連続ミキサ付きポンプ練り（以下、混合機練り）によりモルタルの配合を検討した。そして、配合選定したモルタルを用いて引抜き試験を実施した結果について報告する。

Key Words: rock bolt, mortar, compressive strength, water-cement ratio, pull-out test

1. はじめに

大土被り・高地圧が予想される山岳トンネルの施工において、国内では地山の変形を抑制すべく、剛性の高い支保を二重、三重に建て込む多重支保工の適用が検討される。一方、海外では、地山の変形をある程度許容することで、支保に発生する応力を低減させる可縮型の支保部材が適用される事例が認められる¹⁾。可縮型の支保部材の概要を図-1に示す。

国内でも、今後、多重支保工では対処が困難な大土被り地山を想定した支保の検討を進める必要がある。ただし、海外で適用される支保部材は、地山の変形を一様に許容するものが多く、地山を必要以上に緩め、変位を増大させる可能性がある。そこで筆者らは、地山の変形を

許容するのではなく、変位を制御できる変位制御型ロックボルトの開発を進めてきた²⁾。

これまで、主にロックボルトの構造の検討に関する開発を進めてきたが、変位制御機能を有効に発揮させるた

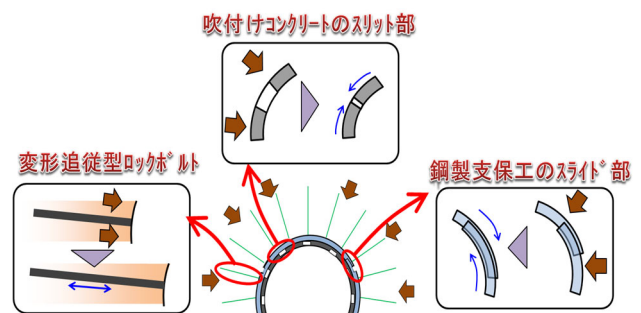


図-1 可縮型の支保部材の概要

めには、使用する定着材（モルタル）の強度特性も考慮する必要があった。そこで、変位制御型ロックボルトに適したモルタルの配合を検討したので、ここに報告する。

2. 変位制御型ロックボルトの開発概要および残された課題

(1) 変位制御型ロックボルトの概要²⁾

主に海外の鉱山で使用される可縮特性を持つロックボルトを輸入し、引抜き試験によりそのメカニズムと性能を確認した。鋼製の母材の伸びにより、地山の変形に追従するロックボルトであり、ある荷重に達すると、抵抗力を保ちながら変位するバイリニアな引抜き挙動が示された。しかし、これでは地山の変形を抑制できず、地山を必要以上に緩めてしまうことが懸念される。そこで、地山の状態に応じて、変位量を任意に制御できる変位制御型ロックボルトの開発に着手した。これによる引抜きメカニズムはトリリニアな挙動を示し、地山に応じた適切な変位量を制御することができる（図-3）。

開発した変位制御型ロックボルトのプロトタイプを写真-1に示す。本ロックボルトは、ネジ部とアンカー、およびリングで構成される。図-4に示す通り、各部材それぞれが引抜き荷重に対して抵抗する仕組みである。これにより得られる荷重－変位曲線は、①ネジ部とモルタルの付着による初期抵抗区間、②アンカーがモルタルを圧潰しながら移動する変位制御区間、③アンカーがリングに当たり、一体となって抵抗する最終抵抗区間からなるトリリニアな挙動を示す（図-5）。ここで、変位制御型ロックボルトの構造のうち、アンカーとリング間の距離を本ロックボルトで制御される変位量となり、この距離を打設時に調節することで変位量を任意に制御できる。また、ネジ長を変えることで、初期抵抗力を調整することも可能である。

(2) 定着材の要求性能

開発した変位制御型ロックボルトの性能を確認するため、試験体を作製し、引抜き試験を行った。ここで、使用した定着材は通常のドライモルタルであり、材齢により強度を調節することができる。目標とするトリリニアカーブのうち中間抵抗区間は、ボルトがモルタルを破壊しながら変形するため、モルタルの強度が過度に高い場合、変形しないことが懸念される。そこで、モルタルの一軸圧縮強度を変えて、結果の比較を行った（図-6）。

作製した試験体は、トンネルのパターンボルトとしてよく用いられる全長3,000mmとし、変位量となるリング～アンカー間距離を30mmとした。また、モルタル強度

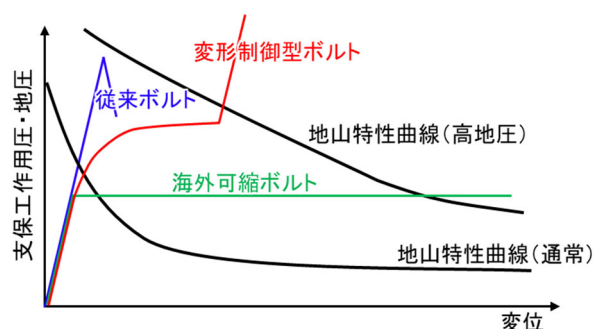


図-3 変位制御型支保工のイメージ



写真-1 開発した変位制御型ロックボルト

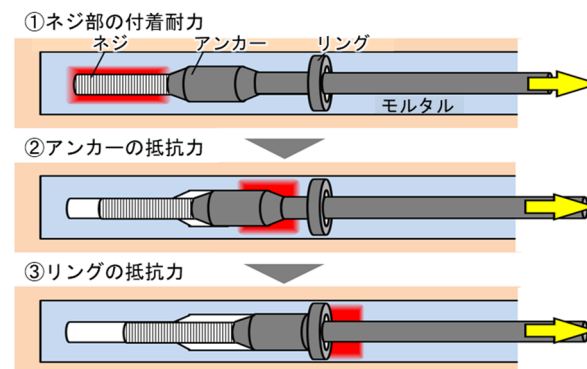


図-4 変位制御型ロックボルトの引抜き時のメカニズム

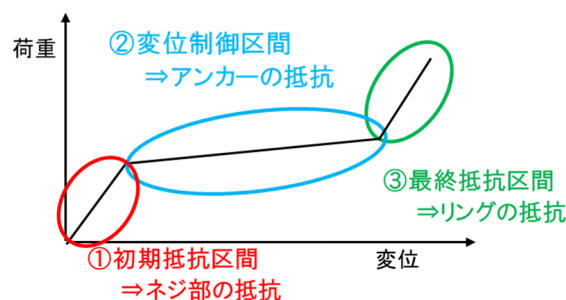


図-5 変位制御型ロックボルトのトリリニア挙動

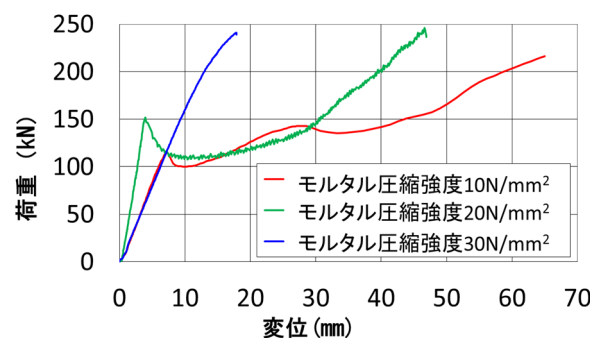


図-6 変位制御型ロックボルトの引抜き試験結果

表-1 変位制御型ロックボルトに適したモルタルの要求仕様

	項目	管理項目	試験方法	要求仕様	設定した具体的な要求仕様
1	変形制御機能の発揮	一軸圧縮強さ (材齢28日)	JIS A1108	スリーブ部がモルタルを圧潰できる程度に軟らかく、ロックボルトとして変形制御機能を発揮する	材齢28日で25MPaを超過しない
2	現場作業性	材料特性	—	現場での作業性を考慮し、プレミックスされている	混和剤も含めて全て粉体材料である
3	フレッシュ性状	フロー値 (15打)	JIS R5201	既存の連続練りポンプで練り混ぜ、圧送、充填が可能。適度な粘性があり、上向きにロックボルトを挿入してもボルトが抜け落ちない	現行の基準 ³⁾ と同程度のフロー値を示す ※ 高速道路株式会社 150±20mm
4	初期の変形抑制	一軸圧縮強さ (材齢1日)	JIS A1108	初期から地山の変形抑制効果を発現する	現行の基準 ³⁾ に極力近い ※ 鉄道・運輸機構 $\sigma_{3day} \geq 10\text{N/mm}^2$ 高速道路株式会社 $\sigma_{1day} \geq 10\text{N/mm}^2$

は 10～30N/mm² の間で調整した。これらの結果より、10N/mm²、20N/mm² では想定するトリリニアな挙動を示したが、30N/mm² では荷重に抵抗するばかりで、変形しない結果が得られた。したがって、変位制御型ロックボルトを有効に機能させるためには、定着材の長期的な強度が 20～30N/mm² の範囲にとどまる必要があることがわかった。

3. 強度抑制型モルタルの開発

前章で示した引抜き試験の結果を踏まえ、変位制御型ロックボルトに適した強度抑制型モルタルの開発に着手した。開発するモルタルに対し、設定した要求仕様を表-1に示す。これらの仕様を満たすモルタルを開発すべく、表-2に示す3ステップで検討を進めた。

(1) ステップ1：使用材料の選定

早期に強度を発現させ、中～長期の強度増加を抑制するため、普通ポルトランドセメントではなく、早強ポルトランドセメントを使用し、硬化促進剤としてケイ酸塩化合物を添加することとした。そして、要求仕様を満たす強度が得られるよう、水セメント比（以下W/C）を主要なパラメータとして増減させる方針とした。また、適切なフレッシュ性状を確保するため、混和材として石灰石微粉末を加え、水粉体比 40～50%程度を維持することとした。また、流動性を付与する減水剤を混和した。以上の全ての材料は粉体とし、現場での施工性に関する要求仕様を満たせるようにした。

(2) ステップ2：水セメント比をパラメータとした配合試験

水セメント比を 80～160%の範囲で 10%ずつ変化させながら、ミキサによる練混ぜを行った（写真-2）。そして、練混ぜ直後のフロー値（写真-3）および材齢 1 日、

表-2 強度抑制型モルタルの開発ステップ

Step	実施項目
1	セメント種別および混和材、減水剤、硬化促進剤の選定
2	水セメント比(W/C)をパラメータとした配合試験 (評価項目：一軸圧縮強度、フロー値)
3	連続練りポンプを用いたロックボルト打設試験 (評価項目：一軸圧縮強度、フロー値、ロックボルト上向き挿入試験)



写真-2 ミキサによる練り混ぜ試験状況



写真-3 フロー試験状況

7日、28日での一軸圧縮強さを測定した。はじめに、一軸圧縮試験の結果を図-7に示す。一軸圧縮強さとW/Cの間には、負の相関が認められ、W/C100%以下のケースでは、材齢7日での一軸圧縮強さが25N/mm²を超過した。そこで、材齢28日での試験は実施せず、W/C120%以上について、材齢28日での一軸圧縮試験を実施した。その結果、W/C120%での材齢28日の一軸圧縮強さは28.5N/mm²となり25N/mm²を超え、W/C140%以上で25N/mm²を下回った。

次に、モルタルのフレッシュ性状を表すフロー値の結果を図-8に示す。0打フロー値は、W/Cによらず、100～110mmの範囲でほぼ一定の値が示された。これに対し、15打フロー値はW/Cとともに増加し、W/C130%以上で、現行の基準値150mm±20mmの上限値を上回った。

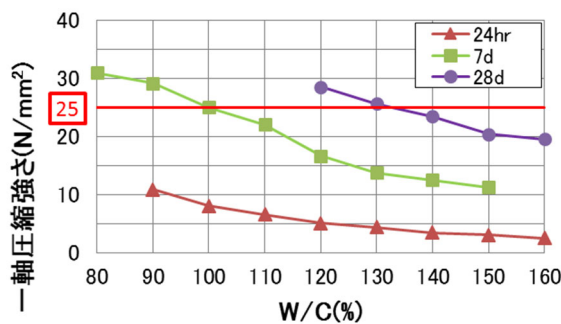


図-7 一軸圧縮強さとW/Cの関係

(3) ステップ3：混合機による試験練りとロックボルト上向き打設試験

実際の施工で使用する混合機を用いて試験練りを実施した。試験配合はW/C120%とW/C160%の2ケースとした。W/C120%は、ステップ2で材齢28日の一軸圧縮強さが25N/mm²を上回ったものの、ミキサと混合機とで、練り混ぜた供試体の結果に差異が生じる可能性も考慮し、選定した。なお、ステップ2からステップ3へ移行する過程で、中～長期強度を抑制するため、配合からシリカフュームを除去する等の若干の配合修正を行った。ただし、以降でミキサ練りと混合機練りについて、練混ぜ直後のフロー値および各材齢での一軸圧縮強さを対比するが、ここでの両者の配合は同一である。

はじめに一軸圧縮試験の結果を図-9に示す。W/C120%

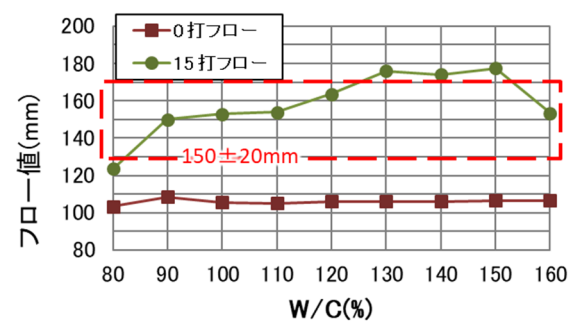
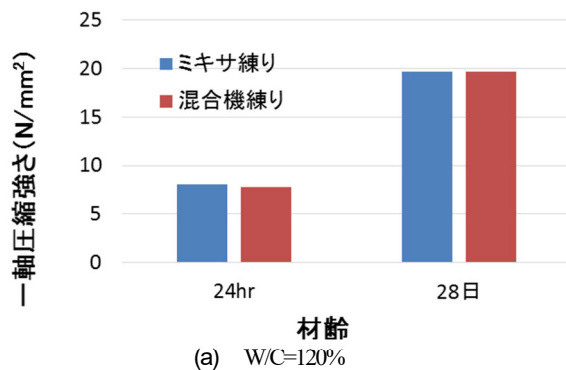
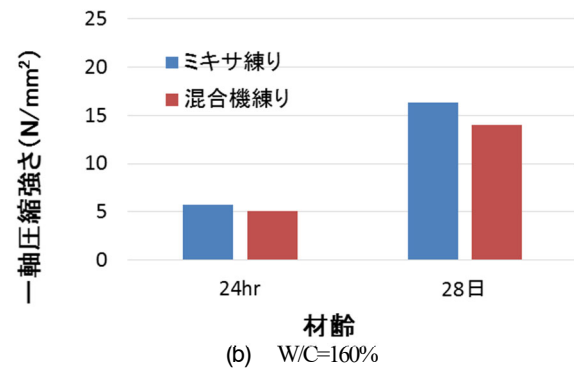


図-8 フロー値とW/Cの関係



(a) W/C=120%



(b) W/C=160%

図-9 一軸圧縮強さに関するミキサ練りと混合機練りの比較

表-3 一軸圧縮試験結果

W/C	項目	一軸圧縮強さ(N/mm ²)			
		24時間		28日	
		ミキサ練り	連続ポンプ練り	ミキサ練り	連続ポンプ練り
120%	1	8.1	7.8	19.3	19.6
	2	8.0	7.6	20.1	19.3
	3	-	7.9	-	20.1
	平均値	8.1	7.8	19.7	19.7
	変動係数	(0.01)	0.03	(0.03)	0.03
160%	1	5.8	5.0	16.2	14.1
	2	5.7	4.6	16.5	13.8
	3	-	5.5	-	14.2
	平均値	5.8	5.0	16.4	14.0
	変動係数	(0.01)	0.13	(0.01)	0.02

※()はn=2の変動係数

では、ミキサ練りと混合機練りで強度発現にほぼ差異がないことが分かった。W/C160%では、混合機練りでの28日材齢の一軸圧縮強さがミキサ練りに比較して、14%小さくなった。また、混合機練りでは各材齢3体ずつ一軸圧縮試験を行った。その結果、表-3に示す通り変動係数は室内試験と同程度の値を示し、ばらつきが少ないことを確認した。

次に、モルタルフロー試験の結果を図-10に示す。W/C120%、W/C160%ともに、0打フローに関しては、ミキサ練りと混合機練りでほぼ差異は無かった。一方、15打フローに関しては、混合機練りの値が約10%上昇し、性状の変化が大きくなることが分かった。さらに、混合機で練り混ぜたモルタルを、上向きのロックボルト孔を模擬した塩ビ管（内径 50mm・長さ 1,000mm）内に充填した（写真-4）。W/C120%、W/C160%ともに、充填時、モルタルが塩ビ管内から落下することは無かった。しかし、ロックボルト（径 24mm）を挿入することで、W/C160%のモルタルは塩ビ管内からロックボルトとともに落下した。W/C120%のモルタルは、落下せず、ロックボルトを保持した。

以上、ミキサ練りと混合機練りとで、練混ぜ直後のフレッシュ性状および強度に顕著な差異は認められなかった。ステップ2検討時から修正した配合のもと、W/C120%の材齢28日強度は19.7N/mm²であり、要求仕様で設定した25N/mm²を下回った。W/C120%のモルタルの15打フロー値は190mmと、現行の基準をやや上回ったが、一方で、上向きに挿入されたロックボルトを保持する適度な粘性が示された。以上より、W/C120%の配合で引抜き試験用の試験体を製作し、引抜き試験を実施することとした。

4. 配合選定したモルタルによる変位制御型 ロックボルトの引抜き試験

前章にて示したように、3ステップを経て配合検討したW/C120%のモルタルが、事前に設定した要求性能を全て満たした。そこで、W/C120%のモルタルを用いて引抜き試験用の供試体を作製し、変位制御型ロックボルトの機能が発揮されるか評価するため、引抜き試験を実施した。変位制御型ロックボルトの全長は3,000mmで、引抜き挙動の初期抵抗区間に影響するネジ長を205mm、変位制御量にあたるアンカー〜リング間距離を100mmとした。混合機を用いてW/C120%のモルタルを練り混ぜ、鋼管（内径 50mm、長さ 3,000mm）に先充填した後、ロックボルトを人力で挿入し、引抜き試験体を作製した（写真-5）。

各材齢での引抜き試験の結果を図-11に示す。いずれ

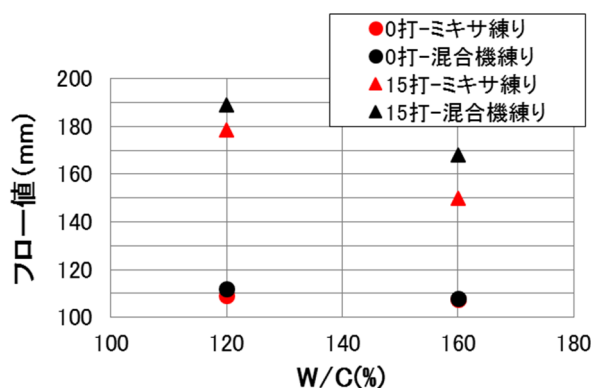


図-10 フロー値に関するミキサ練りと混合機練りの比較



写真-4 ロックボルト上向き打設状況



写真-5 引抜き試験状況

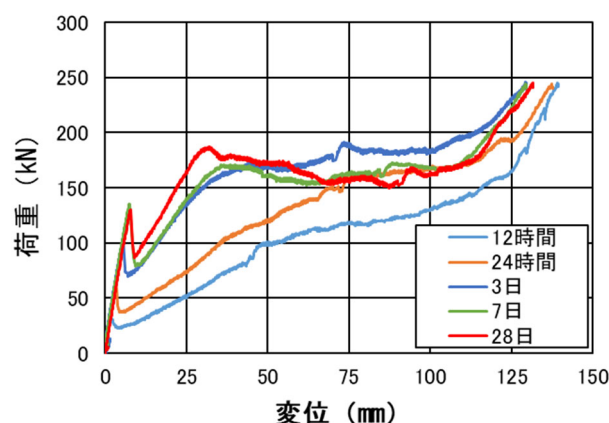


図-11 引抜き試験における荷重と変位の関係

の材齢においても、はじめにネジ部の付着による初期抵抗区間が見られ、その後、付着切れとともに引抜き荷重が低下した。付着切れが生じる荷重は、材齢とともに増加しており、妥当な結果であると言える。次に、変位制

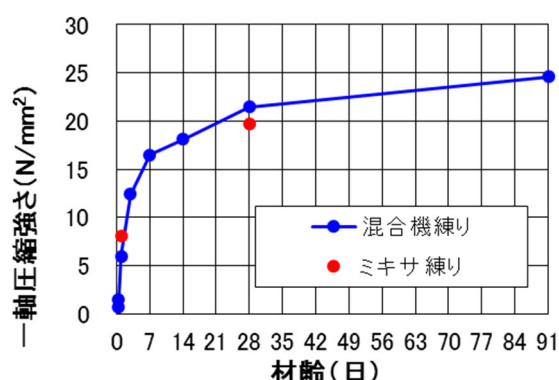


図-12 一軸圧縮強さと材齢の関係

御区間に入り、材齢 12 時間および 1 日の試験体の変位と荷重は滑らかに上昇する。これに対し、材齢 3 日以降の試験体では、変位が約 30mm に達した際に、引抜き荷重の上昇がほぼ収まり、以降、変位が約 110mm に達するまでの間で、引抜き荷重の変化は小さかった。この差は、材齢 12 時間および 1 日の場合、アンカー部により延性的にモルタルが圧潰されるが、材齢 3 日以降の場合、モルタルの硬化により圧潰が初期に脆性的に生じたためと考えられる。変位が約 110mm に達した後、再度荷重の上昇が始まり、アンカー部がリングに接触して最終抵抗区間に入ったと推察される。設定した変位制御量 100mm に対し、最終抵抗区間の開始変位は約 110mm であり、同程度であった。

また、引抜き試験体の作製時に、一軸圧縮試験用の供試体を作製し、改めて、各材齢での一軸圧縮強さを測定した（図-12）。材齢 28 日での一軸圧縮強さは 21.5N/mm² であり、前章ステップ 3 で得た一軸圧縮強さ 19.7N/mm² を上回ったが、当初に設定した要求仕様である 25N/mm² を下回る結果となった。さらに、材齢 91 日での一軸圧縮強さは 24.6N/mm² であり、材齢 28 日～91 日にかけて約 14% の強度上昇が認められるものの、25N/mm² を下回った。

5. おわりに

本報では、これまで開発を進めてきた変位制御型ロックボルトを概説し、本ボルトの変位制御機能を有効に発揮させるため、モルタルの強度を抑制する必要があるこ

とを示した。そして、一軸圧縮強さ等、開発するモルタルの要求仕様を設定し、ミキサ練りから実際のトンネル現場で使用される混合機練りへとステップを踏みながら、モルタルの配合検討を行った。そして、W/C120% の配合で引抜き試験体を作製し、引抜き試験を実施した結果、変位制御型ロックボルトの所定の機能が有効に発揮されることを確認した。得られた知見を以下に示す。

配合検討結果について：

- ・ モルタルの一軸圧縮強さと W/C の間には、負の相関が認められた。W/C によって一軸圧縮強さの調整が可能であると言える。
- ・ ミキサによる練混ぜと混合機による練混ぜとで、各材齢での一軸圧縮強さに関し、W/C120% の配合では有意な差が認められなかった。一方、W/C160% の配合では、混合機練りにすることで強度の低下が生じた。

引抜き試験結果について：

- ・ 初期抵抗区間のピーク強度は、モルタルの材齢に応じて増大した。
- ・ 変位制御区間の荷重－変位関係は、材齢 1 日以内と、材齢 3 日以上とで挙動に差異が認められた。
- ・ 最終抵抗区間に到達する変位は、設定したアンカー～リング間距離と同程度であった。したがって、打設前の距離の調節により、任意のトリリニアカーブを設定することが可能である。

今後は得られた結果をもとに数値解析を用いてより詳細な検討を進め、地山条件に応じた最適な初期抵抗力や変位制御量について具体的に検討する予定である。

参考文献

- 1) Kalman Kovari : Design Methods with Yielding Support in Squeezing and Swelling Rocks, Proc. of World Tunnel Congress 2009, p.10, 2009.
- 2) 岡田侑子, 岩野圭太, 伊達健介, 横田泰宏, 小泉悠 : 山岳トンネルにおける変形制御型支保の適用検討と開発, 第 45 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.97-102, 2017.
- 3) ジェオフロンテ研究会 ロックボルト WG : 山岳トンネルにおけるロックボルトの施工技術資料, pp.80-84, 2011.

(2019. 8. 9 受付)

STUDY OF LOW STRENGTH MORTAR FOR DEFORMATION-CONTROLLED ROCK BOLT

Saki KUROKAWA, Yu KOIZUMI, Yuko OKADA, Shuji MATSUMOTO
Yusuke TANAKA and Makoto KOJO

Yielding support system is adopted for a tunnel excavation under high overburden pressure in some countries while conventional rigid support system is applied in Japan. This system can reduce the stress generated along the tunnel supports. For example, yielding rock bolt uses deformable steel materials and avoid tunnel failure in Europe. However, the yielding support system has an issue that only allow high deformation letting the ground plastic more than necessary. Therefore, the authors have been searching for a new concept of "deformation-controlled support system." This system can control the rock displacement and deformation-controlled rock bolt have been developed by previous studies. However, the bonding material for this deformation-controlled rock bolt needs to be low strength in the long term. In this paper, the low strength mortar which make the deformation-controlled rock bolt work effectively is developed. In addition, this low strength mortar evaluated by pull-out test and is verified its performance.