

山岳トンネル用耐酸性セメント系支保材料の開発

ーロックボルト定着材および吹付けコンクリートー

Developing Acid-Resistant Cementitious Support Materials for Mountain Tunnels

- Rock Bolt Fixing Materials and Sprayed Concrete -

廣中哲也* 倉田桂政** 岩崎 光***

要 旨

強酸性湧水が発生する山岳トンネルでは、ロックボルト定着材や吹付けコンクリートのセメント系支保材料の酸劣化による機能の低下が問題となっている。本報では、耐酸性に優れたロックボルト定着材および吹付けコンクリートの開発を目的に、セメントの一部をシリカフェームと高炉スラグ微粉末で置換した混合セメントを用いたロックボルト定着材および吹付けコンクリートの基本物性試験と試験施工を実施した。その結果、山岳トンネル用セメント系支保材料の実用可能な初期強度発現性、優れた耐酸性および従来と同等以上の施工性を確認した。これにより、強酸性湧水による腐食環境下におけるセメント系支保材料の機能確保が期待できる。

キーワード：山岳トンネル、耐酸性、支保材料、ロックボルト定着材、吹付けコンクリート

1. まえがき

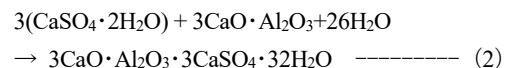
強酸性湧水が発生する山岳トンネルでは、ロックボルト定着材や吹付けコンクリートのセメント系支保材料の劣化による機能の低下が問題となっている。しかし、耐酸性を有する山岳トンネル用セメント系支保材料は開発されておらず、酸劣化への対策が課題となっている。コンクリートの耐酸性を向上するには、セメント量をできるだけ少なくして、セメントと水との水和反応で生成される水酸化カルシウム量を少なくすることが有効である²⁾³⁾。そこで、「セメント使用量を減らすために混和材を混合すること」、「混和材のポゾラン反応性や潜在水硬性によって水酸化カルシウムを消費させ、かつ強度の確保も可能にすること」に着目して、セメントの半分をシリカフェームと高炉スラグ微粉末で置換した混合セメント（以後、耐酸性セメント）を用いたロックボルト定着材および吹付けコンクリートを開発した。

本報では、耐酸性セメントを用いたロックボルト定着材および吹付けコンクリート（以後、耐酸性ロックボルト定着材、耐酸性吹付けコンクリート）の基本物性試験と試験施工の結果から、実用可能な初期強度発現性、優れた耐酸性および従来と同等以上の施工性について報告する。

2. 酸による劣化と既存技術の活用

2.1 酸による劣化概要

酸による代表的な劣化例として、コンクリートの硫酸劣化を以下に示す。硫酸とコンクリートの間に起こる主な化学反応は、式(1)に示すセメントの水和反応で生成するコンクリート中のアルカリ硬化主成分である水酸化カルシウム(Ca(OH)₂)と硫酸との反応によって、二水石膏(CaSO₄・2H₂O)が生成される。その後、二水石膏は式(2)に示すように、セメント中のアルミン酸三カルシウム(3CaO・Al₂O₃)と反応し、エトリンガイト(3CaO・Al₂O₃・3CaSO₄・32H₂O)を生成する。これにより、二水石膏生成に伴う脆弱化、エトリンガイト生成に伴う膨張による結合力の消失、剥落等が発生する。



したがって、必要な強度を確保可能な範囲で、酸と反応する水酸化カルシウム等のセメント水和物の生成量を減らすために、セメント量を減らすことがコンクリートの耐酸性向上対策の一つとなる。

* 技術研究所土木研究グループ ** 西日本支社土木技術部 *** 土木本部技術部

2.2 既存技術の活用

既存技術の調査結果から、耐酸性に優れたセメント系材料に、米倉らが発明した耐酸性セメントを活用することとした⁴⁾。この耐酸性セメントは、質量比でポルトランドセメントまたは高炉セメント45~50%と、ポゾラン反応性を有し材齢7日程度までの初期強度を発現するシリカフェーム25~30%と、潜在水硬性を有し材齢3日以降の中長期強度を発現する高炉スラグ微粉末20~25%からなり、その合計が100%となることを特徴としている。このセメントの構成は、普通ポルトランドセメントまたは高炉セメントの使用量を半分に減らして、酸と反応して劣化する水酸化カルシウム生成量を減らすことで耐酸性を向上させることを目的としている。また、シリカフェームのポゾラン反応性と高炉スラグ微粉末の潜在水硬性は、水酸化カルシウムを消費して強度発現することから、耐酸性をさらに向上させることができる。なお、ポゾラン反応性とは、シリカ質とアルミナ(Al₂O₃)を主な組成とするポゾラン(シリカフェーム、フライアッシュ等)が水酸化カルシウムや、水と反応して化合物を生成する硬化現象、潜在水硬性とは、水酸化カルシウムの持つアルカリの刺激作用によって高炉スラグ微粉末が水と反応して化合物を生成する硬化現象である。

本開発では、耐酸性ロックボルト定着材および耐酸性吹付けコンクリートに用いる耐酸性セメントの混合率を、米倉らが発明した範囲内のポルトランドセメント50%、シリカフェーム25%および高炉スラグ微粉末25%の一定とした。

3. 耐酸性ロックボルト定着材

3.1 基本物性試験

a. 試験概要

ロックボルト定着材は、支保部材である鋼棒等のロックボルトを地山に固定する際、十分な定着力を確保するために、トンネル壁面から地山内部に穿孔された孔内のロックボルトと地山との間を充填する材料である。耐酸性ロックボルト定着材の配合を選定するため、フレッシュ性状および耐酸性等の硬化性状を評価する基本物性試験を実施した⁵⁾。

表-1に、各試験ケースの使用材料および配合を示す。ここでは、耐酸性セメントに用いるポルトランドセメントの種類、水結合材比および砂結合材比をパラメータとした。結合材は、ポルトランドセメント、シリカフェームおよび高炉スラグ微粉末の混合物とした。表-2に、基本物性試験時の測定項目および目標値を示す。練混ぜは、容量50Lパン型強制練ミキサーで行い、フロー試験、圧縮強度試験および5%濃度硫酸水溶液による質量変化試験を実施した。なお、ロックボルト定着材の耐酸性に関する品質規格値は定められていないため、フロー値お

よび材齢1日圧縮強度については、「NEXCOトンネル施工管理要領」のロックボルト定着材の規定値⁶⁾、耐酸性の質量変化率については、「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル(以後、下水道防食マニュアル)」の規格値⁷⁾を目標値とした。

b. 試験結果

図-1に、耐酸性ロックボルト定着材のセメント種類・水結合材比と材齢1日圧縮強度を示す。材齢1日圧縮強度の目標値10N/mm²以上を満足する水結合材比は、耐酸性セメントに早強ポルトランドセメントを使用した配合で40~45%、普通ポルトランドセメントを使用した配合で40%であった。また、砂結合材比が一定の場合、水結合材比が大きいくほどセメント量が少なくなり、耐酸性が向上した。これらの結果から、普通ポルトランドセメント使用配合より水結合材比の大きい範囲で材齢1日圧縮強度を満足している早強ポルトランドセメント使用配合を耐酸性ロックボルト定着材の標準配合とした。

図-2に、5%濃度硫酸水溶液中の浸漬による耐酸性

表-1 各試験ケースの使用材料および配合

No	水結合材比 W/B (%)	空気量 (%)	砂結合材比 S/B	単位量(kg/m ³)					Ad Bx (%)
				W	結合材 B			S	
					C	SF	BFS		
1	40.0	5.0	1.50	286	357	179	179	1072	0.9
2,6	40.0	5.0	1.75	267	333	167	167	1167	1.0
3	40.0	5.0	2.00	250	312	156	156	1249	1.1
4,7	42.5	5.0	1.75	278	328	164	164	1146	0.9
5,8	45.0	5.0	1.75	290	322	161	161	1127	0.8

比較用(従来品) 一般の市販品:ロックボルト用プレミックスモルタル

【使用材料】
 水(W) : 水道水
 セメント(C) : No.1~5_早強ポルトランドセメント、密度3.14g/cm³、比表面積4700cm²/g
 No.6~8_普通ポルトランドセメント、密度3.16g/cm³、比表面積3270cm²/g
 シリカフェーム(SF) : ノルウェー産、密度2.23g/cm³、比表面積22.5m²/g
 高炉スラグ微粉末(BFS) : 密度2.91g/cm³、比表面積4340cm²/g
 細骨材(S) : 土佐産細砂、純粋密度2.62g/cm³、粗粒率2.15、吸水率1.48%
 混和剤(Ad) : 粉体高性減水剤、アリアルスルホン酸系化合物

表-2 基本物性試験時の測定項目および目標値

項目	目標値	試験方法
フロー値	150±20mm	JIS R 5201「セメントの物理強度試験」 ・温度条件20±2°C
圧縮強度	材齢1日 10 N/mm ²	JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験」 ・温度条件20±2°C、封かん養生
耐酸性	質量変化率 ±10%	下水道マニュアル(5%濃度硫酸水溶液に28日間浸漬した場合) ・温度条件20±2°C:材齢1日脱型、材齢28日まで水中養生、その後28日間の硫酸水溶液浸漬

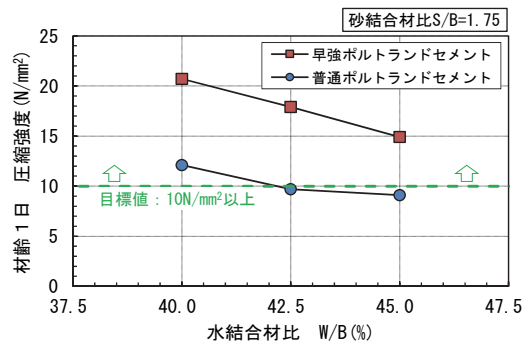


図-1 セメント種類・水結合材比と材齢1日圧縮強度

ロックボルト定着材の質量変化率を示す。耐酸性ロックボルト定着材の質量は、従来品が30%以上減少するのに対して、ほとんど変化しておらず、質量変化率の目標値±10%以内を満足した。また、従来品は、硫酸劣化によりセメント硬化体が剥落して質量減少しているのに対して、耐酸性ロックボルト定着材は、硫酸浸漬により質量増加していることから、酸による腐食環境下における支保機能低下を防止できると考えられる。

3.2 実トンネル試験施工

a. 試験概要

耐酸性ロックボルト定着材の施工性および定着性能等の品質を評価するために、山岳トンネル工事での試験施工を実施した。表-3に、試験施工条件および測定項目を示す。耐酸性ロックボルト定着材には、基本物性試験結果を基に決めた表-1の配合 No.4 を使用した。測定項目は、定着材のフロー値、材齢 1 日圧縮強度およびロックボルトの引抜き耐力とし、各目標値は、「NEXCO トンネル施工管理要領」の規定値とした。

図-3に、ロックボルトの試験施工位置図を示す。施工手順は、まず削孔機により上半断面1スパン分のアーチ部に直径45mmで長さ3mの挿入孔を削孔する。次に、図-4に示す連続混合式圧送装置を用いて、定着材を混練、圧送し、その孔に充填した後、ロックボルトを挿入した。また、施工本数は天端部1本、アーチ肩部2本、側壁部2本とし、施工位置は本設のロックボルトの位置からリング方向に50cm程度離して増打ち施工した。

b. 試験結果

写真-1に、耐酸性ロックボルト定着材の充填状況、写真-2に、ロックボルトの挿入状況を示す。トンネル側壁部～アーチ肩部～天端部までの5か所でロックボルトを施工した。天端部の上向き施工においても定着材の垂れ落ちやロックボルトの抜出し等の不具合はなく、通常と同様の施工ができることを確認した。

表-4に、耐酸性ロックボルト定着材の試験施工結果を示す。定着材のフロー値は、圧送前後で152mmと同じ値を示し、目標値150±20mmを満足した。また、圧送による定着材の流動性の変動が小さいことから、安定

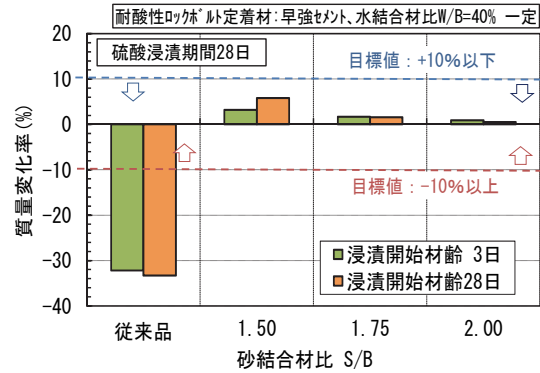


図-2 5%濃度硫酸水溶液による質量変化率

表-3 試験施工条件および測定項目

区分	項目	仕様・目標値・試験方法ほか
試験条件	定着材の配合	表-1のNo.4 配合
	地山の性状	地山等級CII(風化していない、比較的新鮮な硬岩)
	施工方法	定着材の充填後、ロックボルトの挿入
	施工方向と本数	天端部1本、アーチ肩部2本、側壁部2本
	施工位置	通常のロックボルト位置からリング方向に50cm程度離れた位置(図-3参照)
	削孔径と定着長	直径45mm、長さL=3m
測定項目	ロックボルト	ねじり棒鋼:直径24mm、長さL=3m ねじ部降伏荷重180kN
	フロー値	150±20mm, JIS R 5201「セメントの物理試験方法」 ・温度条件:トンネル坑内14℃
	材齢1日圧縮強度	10N/mm ² , JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験」 ・温度条件:トンネル坑内14℃, 封かん養生
	ロックボルト引抜き耐力	施工後3日150kN, JGS 3731-2005「NEXCO試験法条件」 ロックボルトの引抜き試験方法 ・温度条件:トンネル坑内13~15℃

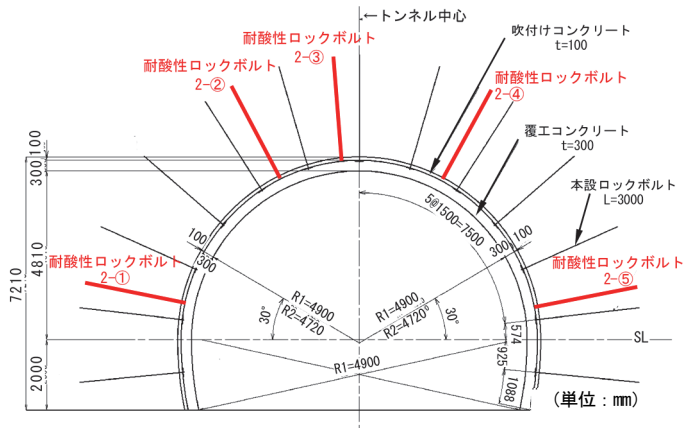


図-3 ロックボルトの試験施工位置図



写真-1 定着材の充填 写真-2 ロックボルトの挿入

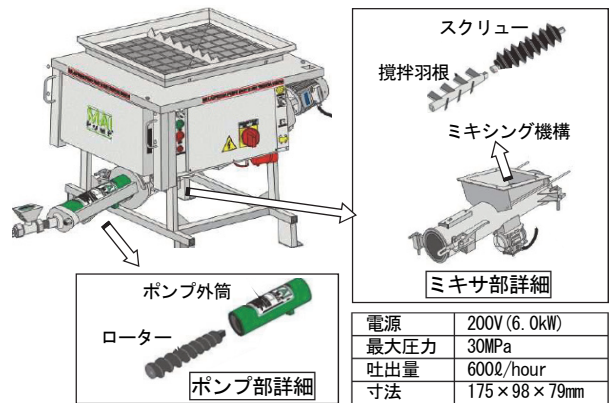


図-4 ロックボルト定着材の連続混合式圧送装置

した施工性および定着性能を確保できると考えられる。また、圧縮強度は、材齢1日で18N/mm²、材齢28日で57.4N/mm²となり、地山の早期支保を目的とした材齢1日の目標値10N/mm²以上を満足できた。

図-5に、ロックボルトの引抜き試験結果を示す。トンネル天端部、アーチ肩部および側壁部の5か所すべての施工位置において、ロックボルトの荷重-変位曲線は、ほぼ線形な関係を示し、引抜き耐力の目標値150kNを満足しており、所定の定着効果が得られた。

4. 耐酸性吹付けコンクリート

4.1 基本物性試験

a. 試験概要

吹付けコンクリートは、掘削直後の地山を早期に支保する目的で使用されるので、吹付け後の硬化を促進させる必要がある。そのため、吹付け噴射される直前のコンクリート（以後、ベースコンクリート）に、急結剤を混合し、吹き付ける。まず、耐酸性吹付けコンクリートの配合および急結剤量を決定するために、フレッシュ性状および強度発現性を評価する基本物性試験を実施した。

表-5に、基本物性試験および試験施工の使用材料と配合区分を示す。耐酸性セメントを用いた耐酸性配合と比較用の普通ポルトランドセメントを用いた従来配合の各配合区分に対して、水結合材比、混和剤・急結剤の種類および単位結合材量に対する急結剤の添加率（以後、急結剤添加率）をパラメータとして試験を実施した。混和剤については、耐酸性配合で標準形と保持形を、急結剤については、従来配合で従来形、耐酸性配合で人体に対する刺激成分の発生量が少ない低刺激形を使用した。

表-6に、基本物性試験時の測定項目および試験方法を示す。ベースコンクリートを生コン工場で製造し、現場まで運搬、荷卸しを行って、吹付け時に急結剤を混合する。そのため、ベースコンクリートのスランプ保持性能および急結剤添加後の強度発現性に着目して、耐酸性セメントを用いたベースコンクリートのスランプの経時変化試験およびコンクリート配合から粗骨材を除いたモルタルに急結剤を添加した試料の貫入抵抗による凝結試験を実施した。空気量については、「ベースコンクリートを圧縮空気ですりこむこと」、「吹付け噴射すること」から、圧送性や強度発現性に影響しないため、測定項目としていない。なお、空気量は、「NEXCO トンネル施工管理要領」でも管理項目となっていない。ベースコンクリートは、容量10L 拡散混合式ミキサを用いて90秒間練り混ぜて製造した。また、急結剤添加のモルタルは、容量2L モルタルミキサを用いて、先にモルタルを60秒間練り混ぜた後、急結剤を投入して10秒間練り混ぜて製造した。

表-4 耐酸性ロックボルト定着材の試験施工結果

項目	測定値	目標値	
フロー値 (mm)	圧送前	152 (152×152)	150±20 mm
	圧送後	152 (154×150)	
圧縮強度 (N/mm ²)	材齢 1日	18.0	10 N/mm ²
	材齢 28日	57.4	18 N/mm ²

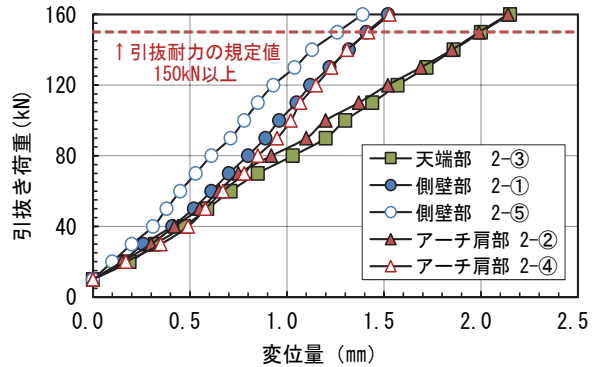


図-5 ロックボルトの引抜き試験結果

表-5 基本物性試験および試験施工の使用材料と配合区分

試験区分	配合区分	水結合材比 W/B (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					Ad B× (%) (種類)	粉じん低減剤 B× (%) (種類)	急結剤 B× (%) (種類)	
					W	結合材 C	B SF	BFS	S				G
基本物性試験	耐酸1	60	3.0	60	216	180	90	90	985	674	1.2 (Ad1, Ad2)	-	7.9 (CA2)
	耐酸2	50	3.0	60	200	160	100	100	988	676	1.7 (Ad1, Ad2)	-	7.9 (CA2)
	従来1	60	3.0	60	216	360	-	-	1002	686	-	-	7 (CA1)
	従来2	50	3.0	60	200	400	-	-	1007	689	-	-	7 (CA1)
試験施工	耐酸	60	3.0	60	216	180	90	90	985	674	1.9 (Ad2)	-	9 (CA2)
	耐酸低減	60	3.0	60	216	180	90	90	985	674	1.9 (Ad2)	1.0	9 (CA2)
	従来低減	60	3.0	60	216	360	-	-	1002	686	-	1.0	7 (CA1)

【使用材料】
 水(W) : 水道水
 セメント(C) : 普通ポルトランドセメント、密度 3.15g/cm³、比表面積 3220cm²/g
 シリカフェーム(SF) : ノルウェー産、密度 2.23g/cm³、比表面積 22.5m²/g
 高炉スラグ微粉末(BFS) : 密度 2.89g/cm³、比表面積 4310cm²/g
 結合材(B) : C+SF+BFS
 細骨材(S) : 姫川産川砂、密度 2.61g/cm³、粗粒率 2.72、吸水率 1.99%
 粗骨材(G) : 糸魚川産砕石、最大骨材寸法 13mm、密度 2.68g/cm³、吸水率 1.09%
 混和剤 標準形(Ad1) : 高性能減水剤、ポリエチレングリコール系化合物、密度 1.05g/cm³
 混和剤 保持形(Ad2) : 高性能減水剤、スランプ保持成分調整品、密度 1.05g/cm³
 粉じん低減剤 : 水溶性高分子系、白灰色粉末、密度 2.40g/cm³
 急結剤 従来形(CA1) : カルシウムアルミネート系化合物、粉体、密度 2.73g/cm³
 急結剤 低刺激形(CA2) : カルシウムアルミネート系化合物、粉体、密度 2.68g/cm³

表-6 基本物性試験時の測定項目および試験方法

項目	目標値・試験方法
スランプ値	JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」 ・目標値：荷卸し時 16±2.0 cm、経時後 10cm 以上 ・温度条件：20±2°C ・測定時間：練混ぜ直後、20分後、40分後
貫入抵抗値 (凝結時間)	JSCE-D 102「吹付けコンクリート(モルタル)用急結剤品質規格(案)」：附属書3「急結剤を添加したモルタルの貫入抵抗による凝結時間測定方法」 ・温度条件：20±2°C

b. 試験結果

図-6に、高性能減水剤の種類によるベースコンクリートのスランプの経時変化を示す。耐酸性セメントを用いた場合、標準形高性能減水剤ではスランプの低下が速くなっており、ベースコンクリートの運搬・圧送時間の確保が困難と考えられる。一方、保持形高性能減水剤を用いた結果では、練混ぜからの経過時間40分でスランプの低下を抑えられることが確認でき、ベースコンクリートの運搬・圧送時間を確保することが可能となる。

図-7に、表-5の粗骨材を除いたモルタルでの従来配合と耐酸性配合の凝結試験結果を示す。水結合材比が小さく、急結剤添加率が高いほど、貫入抵抗値の発現は速くなっている。また、従来配合の急結剤標準添加率7%の貫入抵抗値以上を示す耐酸性配合の急結剤添加率は、水結合材比50%で7%、水結合材比60%で9%となった。これにより、地山の早期支保を目的として、従来配合と同等以上の早期に強度発現が得られる耐酸性配合は、水結合材比50~60%で急結剤添加率を9%とすればよいことが分かった。

4.2 模擬トンネル試験施工

a. 試験概要

耐酸性吹付けコンクリートの強度特性、耐酸性および施工性を評価するために、実機を用いた模擬トンネルでの試験施工を実施した。表-5に示すように、基本物性試験の結果をもとに、耐酸性吹付けコンクリート配合（以後、耐酸性配合）は水結合材比60%、急結剤添加率9%とし、比較用に粉じん低減剤を使用した従来吹付けコンクリート配合（以後、従来低減配合）と粉じん低減剤を使用した耐酸性吹付けコンクリート配合（以後、耐酸性低減配合）の3種類の配合を用いた。なお、耐酸性配合と耐酸性低減配合の混和剤の種類は、保持形高性能減水剤とし、添加率を基本物性試験時より増やして1.9%とした。

表-7に、使用設備と吹付け条件、図-8に、吹付け設備を示す。1配合あたり1.5m³のベースコンクリートを生コン工場で製造し、アジテータ車により模擬トンネル実験場まで15分で運搬して、図-9に示す断面積20.5m²、延長20mの模擬トンネルの壁面に、山岳トンネル工事で使用されている吹付け設備を用いて吹き付けた。

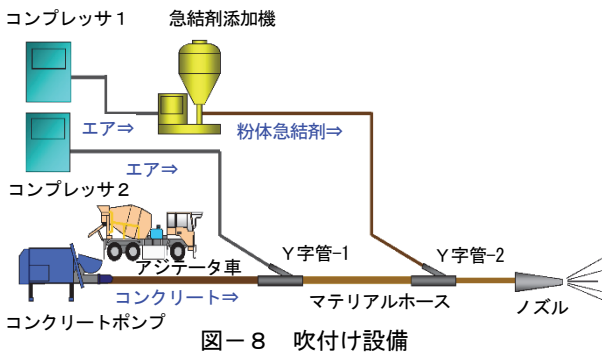
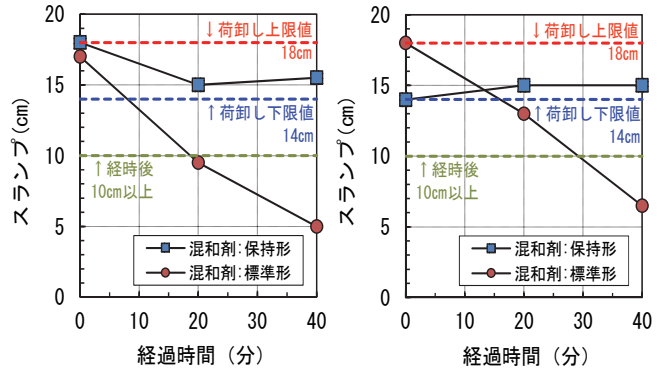
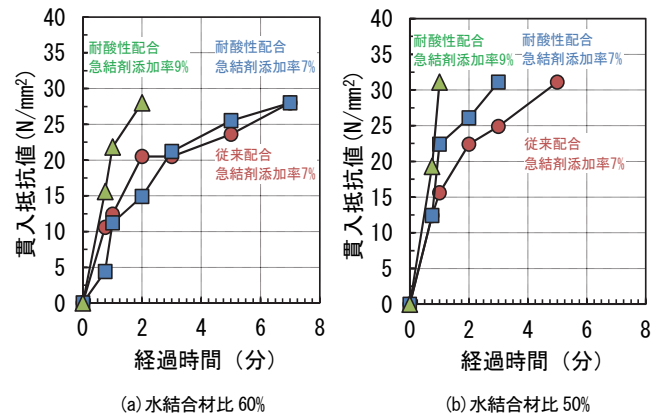


図-8 吹付け設備



(a) 耐酸性配合1:水結合材比60% (b) 耐酸性配合2:水結合材比50%

図-6 ベースコンクリートのスランプの経時変化



(a) 水結合材比60% (b) 水結合材比50%

図-7 従来配合と耐酸性配合の凝結試験結果

表-7 使用設備と吹付け条件

種類	仕様	吹付け条件
生コン工場ミキサ	強制2軸型、最大容量2.5m ³	1.5m ³ /バッチ
模擬トンネル	断面積20.5m ² 内空幅5.3m、高さ4.4m 延長20m	-
吹付け機	ブーム長3.0m 最大吹付け高さ7.9m 最大吹付け幅10.19m	空気量5.0m ³ /min
急結剤添加装置	粉末圧送能力8kg/min	空気量3.8m ³ /min
コンクリートポンプ	定置式エンジンタイプ 油圧2ピストン式 理論吐出量14~26m ³ /h	圧送量10m ³ /h
コンプレッサ	100PS級エンジン式2台	-

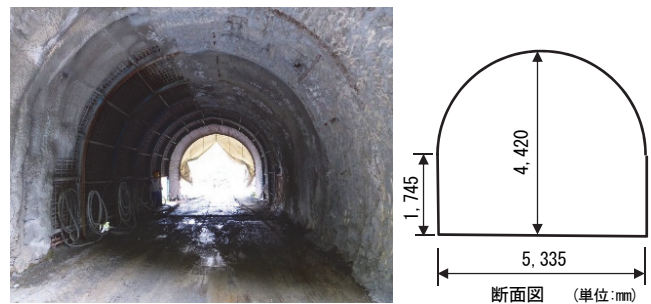


図-9 模擬トンネル (断面積20.5m² 延長20m)

表-8に、模擬トンネル施工時の測定項目および目標値を示す。地山支保のための強度特性に着目して、土木学会コンクリート標準示方書規準編⁸⁾(以後、土木学会規準)の引抜き方法による吹付けコンクリートの初期強度試験(以後、プリアウト試験)、コア採取による圧縮強度試験および酸性岩盤からの酸性湧水に対する耐酸性に着目して、「下水道防食技術マニュアル」の5%濃度硫酸水溶液による質量変化試験を実施した。また、実機を用いた施工性に着目して、土木学会規準の吹付けコンクリートのはね返り試験および吹付けコンクリートの粉じん濃度測定を実施した。なお、強度特性の目標値は、「NEXCO トンネル施工管理要領」の規定値、耐酸性の目標値は、「下水道防食マニュアル」の規格値とした。

b. 試験結果

図-10に、実機を用いた吹付けコンクリートのプリアウト試験による引抜き強度、図-11に、吹付けコンクリートのコア試験体による圧縮強度を示す。図-10より、吹付けコンクリートの材齢1日の引抜き強度は、従来低減配合、耐酸性配合、耐酸性低減配合の順で大きくなり、耐酸性の2配合は、目標値 5N/mm²に対して1.7~1.9倍の値を示し、地山の早期支保を目的とした初期強度の発現性を確保できた。また、耐酸性2配合の材齢3時間の引抜き強度は、従来低減配合に対して0.7倍と小さい値を示している。これは、耐酸性セメントを用いた配合の場合、急結反応に使用される普通ポルトランドセメント量が、従来低減配合の半分程度と少ないことに起因しているが、材齢1日の引抜き強度が目標値を大きく上回っていることから実用上問題ないと判断できる。

図-11より、耐酸性2配合の材齢7日のコア圧縮強度は、従来低減配合 26.0N/mm²に対して0.75倍程度と小さく、耐酸性2配合の材齢28日のコア圧縮強度は、従来低減配合 37.8N/mm²に対して1.2倍と大きくなっており、材齢28日の目標値 18N/mm²を十分に満足した。これにより、耐酸性セメント中のシリカフェュームのポゾラン反応性と高炉スラグ微粉末の潜在水硬性の反応速度は、セメントの水和反応に比べて遅く、長期強度発現性は大きくなること分かった。

図-12に、吹付けコンクリートのコア試験体の5%濃度硫酸水溶液による質量変化率を示す。耐酸性2配合の硫酸浸漬期間28日の質量変化率は、-1.96~-1.62%で目標値±10%を満足し、従来低減配合に対して0.21~0.25倍と小さくなった。これにより、耐酸性セメントを使用することで、質量変化率が大幅に向上することが確認できた。

写真-3に、模擬トンネルにおける耐酸性吹付けコンクリートの吹付け状況を示す。学識経験者、山岳トンネル施工経験者および建設・材料メーカー技術者を合わせて10名による吹付け性状の目視・指触評価を行った。その結果、ノズル吐出後の白いスジ発生による混合不良、

表-8 模擬トンネル施工時の測定項目および目標値

測定項目		目標値	試験方法
スランブ値		16±2.0cm	JIS A 1101「コンクリートのスランブ試験方法」 ・温度条件：模擬トンネル坑内10℃ ・測定時期：練混ぜ直後
硬化特性	引抜き強度	材齢1日 5 N/mm ²	JSCE-F 561「吹付けコンクリート(モルタル)の圧縮強度供試体の作り方」 JSCE-G 561「引抜き方法による吹付けコンクリートの初期強度試験方法」 ・材齢3時間まで20℃現場気中養生 ・材齢1日まで20℃気中養生
	コア圧縮強度	材齢28日 18 N/mm ²	JSCE-F 561「吹付けコンクリート(モルタル)の圧縮強度供試体の作り方」 JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮試験方法」 ・材齢3日まで20℃気中養生 ・材齢3日でコア採取後、材齢28日まで20℃水中養生
耐酸性	質量変化率	±10%	下水道マニュアル(5%濃度硫酸水溶液に28日間浸漬した場合) ・材齢5日まで20℃気中養生 ・材齢5日でコア採取後、材齢28日まで20℃水中養生、その後28日間の硫酸水溶液浸漬
施工性	はね返り率	-	JSCE-F 563「吹付けコンクリート(モルタル)のはね返り率試験方法(案)」
	粉じん濃度	-	JSCE-F 564「吹付けコンクリート(モルタル)の粉じん濃度方法」

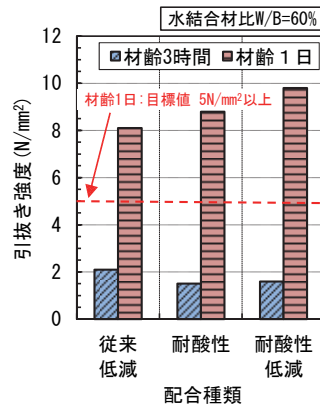


図-10 引抜き強度

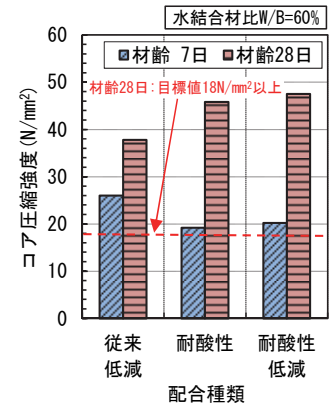


図-11 コア圧縮強度

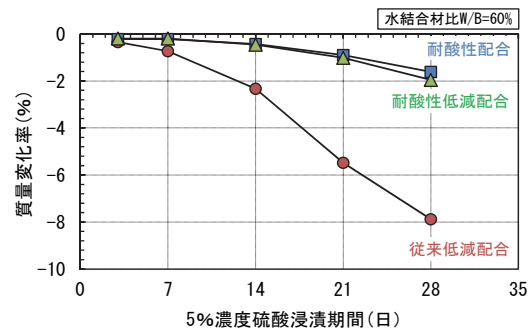


図-12 5%濃度硫酸水溶液による質量変化



写真-3 模擬トンネル吹付け状況

ノズル先端からのたれ、吹付け面の急結不良および吹付け面のまくられ、はね返り、たれ等の付着不良は発生せず、従来の吹付け設備と方法により、従来と同等の吹付け施工が可能であることを確認した。

図-13 に、吹き付けたコンクリート量と急結剤量の合計に対するはね返った材料の質量率（以後、はね返り率）、図-14 に、吹付け位置から 5m 地点のデジタル粉じん計による粉じん濃度を示す。図-13 より、耐酸性 2 配合のはね返り率は、従来低減配合に対して、0.75～0.81 倍と小さな値を示しており、耐酸性セメントを使用することで、トンネル施工における吹付け材料のロスを低減できる。図-14 より、吹付け中の粉じん濃度は、従来低減配合、耐酸性配合、耐酸性低減配合の順に小さくなっており、耐酸性セメントを使用することで、トンネル施工における坑内環境を改善できる。これらは、耐酸性セメントに使用しているシリカフュームが、セメントの比表面積に比べて 50～60 倍の粒径の超微粒子であるため、フレッシュ時のコンクリートの粘性を高めたことに起因すると考えられる。

5. まとめ

耐酸性に優れたロックボルト定着材および吹付けコンクリートの開発を目的に、耐酸性セメントを用いた基本物性試験および試験施工を実施し、以下の結果を得た。

- i. 地山の早期支保を目的とした材齢 1 日圧縮強度で 10N/mm² 以上の初期強度発現性、5%硫酸水溶液の質量変化率で従来品の 1/10 程度の優れた耐酸性を有する耐酸性ロックボルト定着材が得られた
- ii. 耐酸性ロックボルト定着材の山岳トンネル工事試験施工により、定着材のたれ落ちやロックボルトの抜け出しのない、従来と同様の施工性およびロックボルト引抜き耐力を満足する定着性能を確認した
- iii. 地山の早期支保を目的とした材齢 1 日引抜き強度で 5N/mm² 以上の初期強度発現性、5%硫酸水溶液の質量変化率で従来配合の 1/4 程度の優れた耐酸性を有する耐酸性吹付けコンクリートが得られた
- iv. 耐酸性吹付けコンクリートの模擬トンネル試験施工により、混合、急結および付着不良のない従来と同等の施工性を確認し、粉体急結剤を使用した場合ははね返り率の減少による材料ロスの低減および粉じん濃度の減少による坑内環境の改善が可能である

6. あとがき

強酸性湧水による腐食環境下における山岳トンネルのセメント系支保材料として使用するために、初期強度発

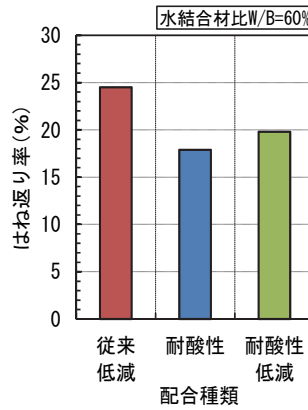


図-13 はね返り率

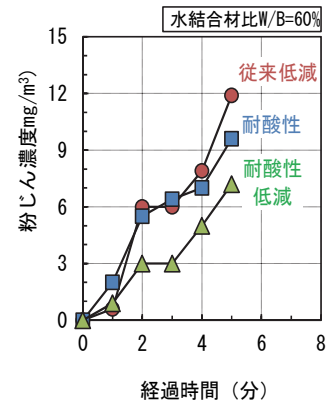


図-14 粉じん濃度

現性を保持し、優れた耐酸性と施工性を有するロックボルト定着材および吹付けコンクリートを開発した。これにより、酸性湧水に対して、これまで対策されていなかった地山側のセメント系支保材料の耐酸性を向上させたことで、支保機能の確保が期待できる。今後は、酸性湧水の腐食を受けるトンネルの超寿命化の一助となるように、本材料の普及展開に努め、施工実績を増やしたい。なお、耐酸性ロックボルト定着材については、米倉亜州夫 広島大学名誉教授、(株)ケー・エフ・シーと、耐酸性吹付けコンクリートについては、米倉亜州夫 広島大学名誉教授、デンカ(株)と共同開発した。

【参考文献】

- 1) 伊藤光宏、上野博務、谷川 学、「酸性水の湧出するトンネルの長期耐久性に配慮した設計・施工」、トンネルと地下、Vol.51、No.12、pp.19-30、2020.12
- 2) 米倉亜州夫、「下水道用耐硫酸性コンクリートの開発」、電力土木、No.329、pp.3-8、2007.5
- 3) 若杉 哲、米倉亜州夫、伊藤秀敏、沼田晋一、「高炉フュームによる耐硫酸性モルタルの開発研究」、Cement Science and Concrete Technology、No.57、pp.91-96、2003
- 4) 米倉亜州夫、伊藤秀敏、山本修照、「耐酸性セメント組成物及びそれを配合した耐酸性モルタル又はコンクリート」、特許第 5924612 号、2016.4.28
- 5) 米倉亜州夫、廣中哲也、倉田桂政、松尾 勉、田中祐介、「耐酸性セメントを用いたロックボルト定着材の基本物性および試験施工」、土木学会第 74 回年次学術講演会、VI-924、2019.9
- 6) 東日本・中日本・西日本高速道路、「トンネル施工管理要領」、高速道路総合技術研究所、2020.7
- 7) 日本下水道事業団、「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル」、下水道事業支援センター、2017.12
- 8) 土木学会、「2018年制定コンクリート標準示方書〔標準編〕土木学会規準および関連規準」、2018.10