

論文 急結剤の種類および添加量が吹付けコンクリートの品質に及ぼす影響

石井芳文*1・駒田憲司*2・川口和義*3・牛島 栄*4

要旨：吹付けコンクリートの品質はその施工方法や使用材料に左右されやすく、場所打ちコンクリートに比較して強度や耐久性の面で劣ることが指摘されている。本研究では、吹付けコンクリートの品質に大きな影響を及ぼすと考えられる急結剤の種類および添加量を変化させ、その硬化性状および耐久性について検討を行った。実験の結果、急結剤の種類や添加量が、吹付けコンクリートのリバウンド、締固め等の施工性に影響を及ぼし、それに伴う空隙特性がコンクリートの品質に大きな影響を及ぼすことが確認された。

キーワード：吹付けコンクリート、急結剤、リバウンド率、強度、耐久性

1. はじめに

これまで山岳トンネルにおいて地山の一次支保に広く使用されてきた吹付けコンクリートは、二次覆工が施工されるまでの仮設構造物として扱われてきたため、品質のばらつきが大きく耐久性も劣る場合が多かった。

近年、吹付けコンクリートを永久覆工とする考え方が検討され始め、吹付けコンクリートの品質を向上させるための研究が各方面でなされている。しかし、吹付けコンクリートは、施工機械、施工条件およびノズルマンの技術等によってその品質が大きく変動するため、再現性が疑わしく、別々の機会に行われた実験結果を横並びに評価することは危険である。

本論では、機械、施工条件およびノズルマンを同一として、急結剤の種類と添加量を変化させ、吹付けコンクリートの硬化性状および耐久性について評価を行い、それぞれの品質に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

2. 1 使用材料およびコンクリート配合

コンクリートの使用材料および配合を表-1、表-2に示す。急結剤添加前のベースコンクリートのスランプは12~16cm、空気量は4.5±1.5%を目標とした。急結剤は表-3に示す3種類を使用した。国内で汎用されているセメント鉱物系(カルシウムアルミネート系)の他に、高強度吹付けコンクリート用に使用され始めたカルシウムサルフォアルミネート系、アルカリ骨材反応対策や作業環境を改善するため、近年海外で使用され始めたアルカリ度の低い(pH2

表-1 使用材料

材 料	種 類
セメント	普通ポルランドセメント 比重 3.16
細骨材	震ヶ浦産陸砂, 表乾比重 2.59, 粗粒率 2.60
粗骨材	筑波産 6号砕石, 表乾比重 2.68, Gmax15mm
混和剤	AE 減水剤 (リクニソルホン酸系)

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad
50	60	200	400	977	674	4.0

表-3 使用急結剤

記号	成分・物性
AF	鉱物系(アルカリフリー)pH4, かさ比重 1.00
CA	カルシウムアルミネート系, 真比重 2.80
CSA	カルシウムサルフォアルミネート系, 真比重 2.68

*1 (株) 青木建設研究所材料研究室主任研究員 (正会員)

*2 (株) 青木建設研究所材料研究研究員

*3 (株) 青木建設研究所材料研究研究員 (正会員)

*4 (株) 青木建設研究所材料研究室長 工博 (正会員)

～4)アルカリフリーと称される粉体急結剤3種類を選定した。

2. 2 吹付け方法

SCHWING社のBP300RE吹付け機械(ピストンポンプ圧送式)と粉体急結剤供給装置(空気圧送式)を用い、1回当たり約0.6m³のコンクリートを6m³/hrの設定速度で連続した吹付けを行った。

2. 3 実験方法

実験は吹付け状態が安定してから開始することとし、各試験体を作製後にリバウンド試験を実施した。急結剤は標準的な添加量(AF系とCA系急結剤はC×8%, CSA系急結剤はC×10%)とその前後±2%の3水準を目標に吹付け実験を行った。また、実験中はクレーンで急結剤供給装置を吊り上げ、その重量をロードセルにより計測し、急結剤の実際の添加量を測定した。

(1) リバウンド試験

リバウンド試験は、幅2m、高さ1mの鉛直鋼製壁面にノズルを水平として厚さ20cmを目標に吹付けを行い、跳ね返ったコンクリート重量と壁面に付着したコンクリート重量を計量し、リバウンド率を算出した。

(2) 物性試験

フレッシュコンクリートについては、スランプ、空気量、コンクリート温度の測定を実施した。硬化コンクリートについては、圧縮強度、単位容積質量、空隙率、気泡分布の測定を行った。

材齢3時間および6時間の初期圧縮強度はJSCE-G561に準拠したプルアウト試験により算出し、材齢7日、28日の中長期圧縮強度は、JSCE-G502に準拠してφ50×100mmのコア供試体を採取し、JISA1108に準拠した圧縮強度試験により測定を行った。なお、プルアウト試験体およびコア供試体は吹付け終了後20℃、60%RHの気中養生とし、コア供試体は、5日後ボーリングコアを抜き取り、20℃標準水中養生を実施した。また、急結剤を含まないベース

コンクリートを用いてφ50×100mmの管理用供試体を作製し、コア供試体と同様な養生条件を施し、材齢28日に圧縮強度試験を実施した。単位容積質量の測定は材齢28日の圧縮強度試験体を用いて実施した。気泡分布測定は吹付けパネルからφ100×200mmのコア供試体を採取してその中央断面について、気泡組織測定装置と画像解析処理装置を用いて行った。空隙率測定は気泡分布測定に使用した供試体を用いてASTM C642に準じて行った。

(3) 耐久性試験

JSCE-G502に準じて下面を解放した100×100×400mmの型枠にコンクリートを吹付け、翌日脱型後、吹付け面の凹凸をカットし整形を行い、凍結融解試験および促進中性化試験を実施した。凍結融解試験は、JSCE-G501に準拠して300サイクルの凍結融解を実施し、相対動弾性係数および重量減少率の測定を行った。促進中性化試験は、温度20℃、湿度60%、CO₂濃度5%環境下に13週間放置してフェノールフタレイン1%エタノール溶液を用いて表面からの中性化深さを測定した。

3. 実験結果および考察

急結剤添加量の設定は、実験前にキャリブレーションを行ったものの、吹付け実験開始時には目標とする添加量が得られなかった。このため、最初に実施したCA系急結剤を用いた試験のみが急結剤添加量4水準のデータを得る結果となった。また、CSA系急結剤のC×12%添加については、マテリアルホース内で閉塞を生じデータが得られなかった。

3. 1 リバウンド試験

フレッシュコンクリートの物性試験とリバウンド試験の結果および急結剤添加量の実測値を表-4に示す。AF系急結剤を用いた場合は、急結剤添加量が多くなるに従ってリバウンド率は減少しているが、同じAF系急結剤でも液体急結剤を使用した場合りと比べると2倍以上のリバウンド率を示した。また、CA系急結剤を

用いた場合は、急結剤添加量が多くなるに従ってリバウンド率は増加する傾向を示した。

このようにAF系とCA系急結剤で使用量によりリバウンド率の増減傾向に差が生じるのは、急結剤の急結性能によるものと思われる。

3. 2 硬化物性試験

図-1および図-2に各種急結剤を用いた吹付けコンクリートの初期材齢時および中長期材齢時の圧縮強度試験結果を示す。また、図-3に急結剤添加量の違いによる材齢28日コア供試体の単位容積質量と圧縮強度の関係を同時に比較したものを示す。

3時間および6時間後の初期材齢時強度を比較すると、最も強度発現が遅れるものがAF系急結剤を使用した場合であり、CSA系急結剤を使用した場合は、3時間以降の強度の伸びが顕著であることが認められる。また、CSA系急結剤を使用した場合は、材齢28日強度がベースコンクリート強度を上回っており、高強度吹付けコンクリートには有効となることが認められる。CSA系以外の急結剤では、添加量が多くなると中長期材齢の圧縮強度が低下する傾向も認められるが、この時は単位容積質量の低下も認められており、急結剤の多量添加がコンク

表-4 コンクリートフレッシュ性状およびリバウンド試験結果

急結剤種類	急結剤添加量 (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	リバウンド率 (%)
AF	6.4	13.5	6.0	26	24.3
	8.4	12.5	6.2	26.5	21.9
	10.2	12.0	5.9	26.5	18.4
CA	2.5	15.0	6.0	24.5	16.0
	6.7	16.5	5.1	25.0	20.3
	8.5	12.0	5.7	26.0	18.1
CSA	11.9	15.0	5.4	26.5	26.2
	6.9	16.5	6.5	24.5	24.3
	9.8	16.5	6.5	24.5	-

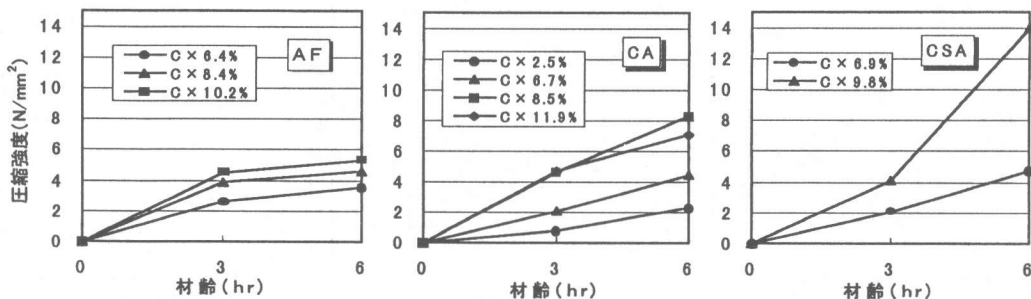


図-1 圧縮強度試験 (初期材齢)

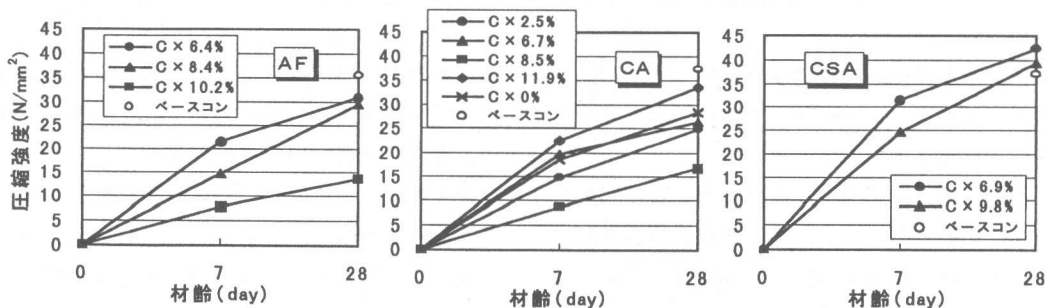


図-2 圧縮強度試験 (中長期材齢)

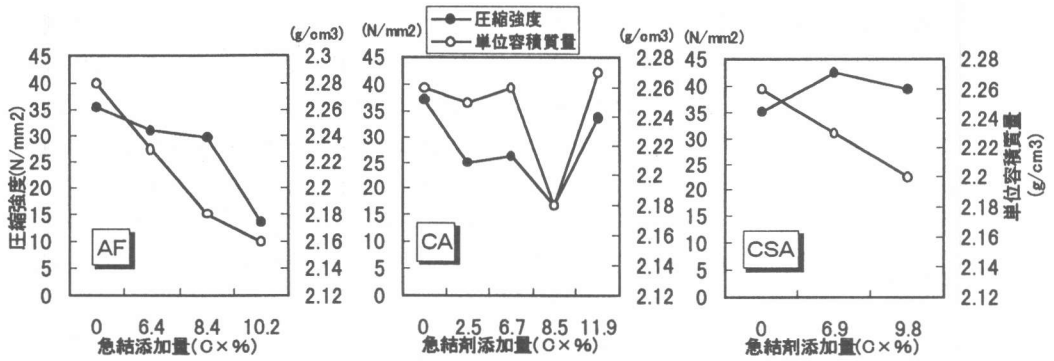


図-3 急結剤添加量の違いによる単位容積質量と圧縮強度の関係

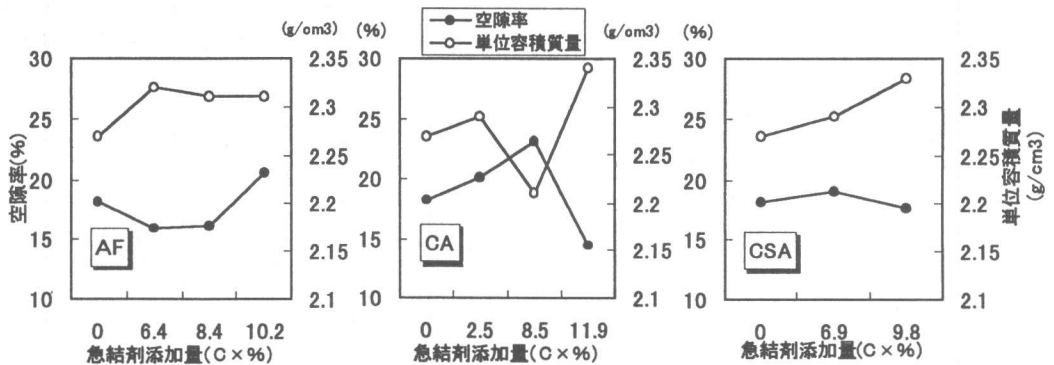


図-4 急結剤添加量の違いによる単位容積質量と空隙率の関係

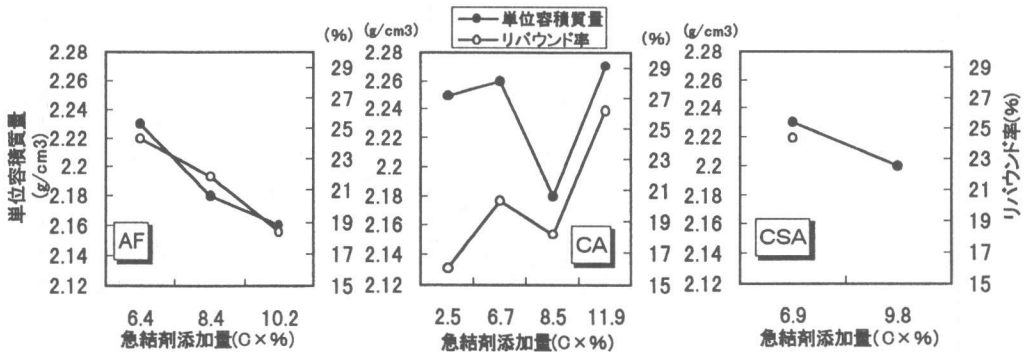


図-5 急結剤添加量の違いによる単位容積質量とリバウンド率の関係

リートの水和反応を阻害するといった直接的な原因ではなく、コンクリート内に気泡を巻き込み易くなるのが原因と思われる。

各急結剤毎に空隙率と単位容積質量の関係を同時に比較し図-4に示す。単位容積質量が小さい場合は空隙率が大きく、気泡を多く巻き込んでいることが供試体の外観観察からも伺われ

る。また、リバウンド率と単位容積質量を同時に比較し図-5に示す。図より、リバウンド率が大きい場合は、単位容積質量が大きく、リバウンド率が小さい場合は単位容積質量が小さくなる傾向が伺える。つまり、リバウンド率が多い吹付けコンクリートは、強い吹付け圧で吹き付けられるため、十分な締固めがなされ、単位

容積質量，圧縮強度とも大きくなっているものと思われる。

気泡分布測定結果の内，CA系とCSA系の急結剤を使用した場合の比較を図-6に示す。CA系の急結剤を使用した場合（AF系を使用した場合も同様な気泡分布を示す）に比べて，CSA系の急結剤を使用した場合は50 μm 以上の比較的大きな気泡が少ない。これは，カル

シウムサルフォアルミネートとセメントが反応してエトリンガイトが生成されることにより，気泡が充填されているためと考えられる。CSA系の急結剤を使用した場合，強度の増加が他の急結剤を使用した場合より高くなるのは，このことも影響していると思われる。

3.3 耐久性試験

図-7に急結剤種類と急結剤添加量を変化さ

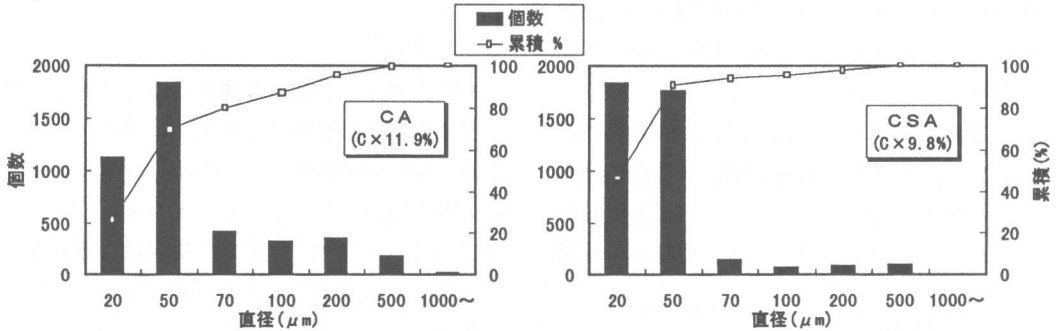


図-6 気泡分布測定結果

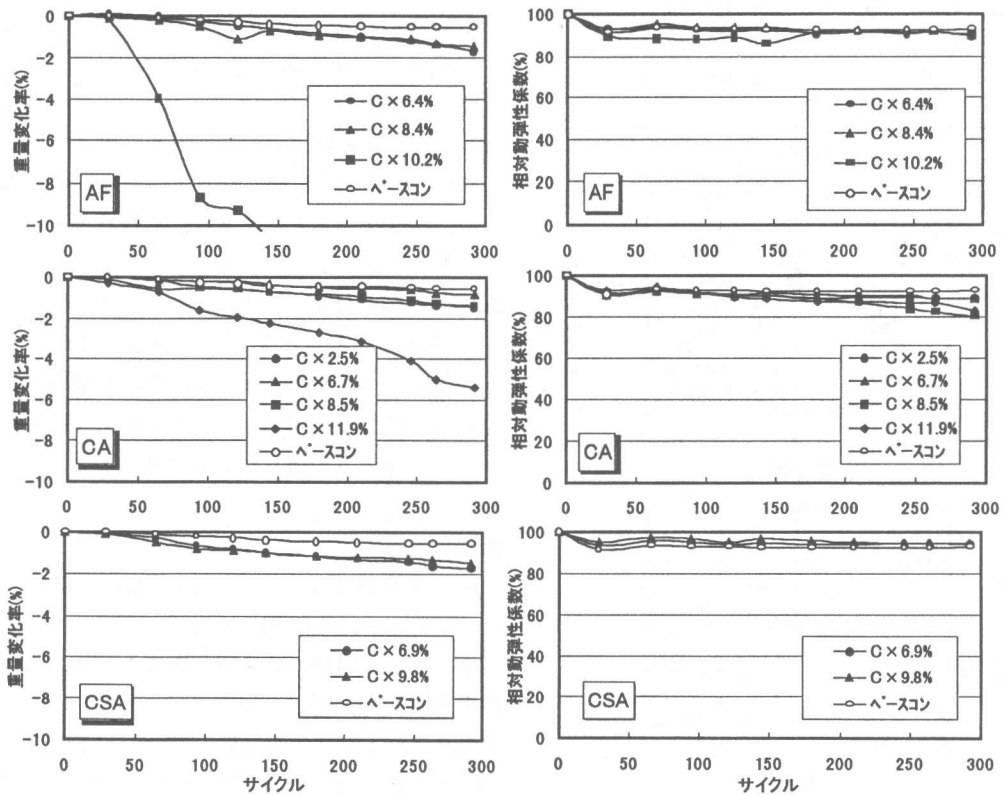


図-7 凍結融解試験結果

せた吹付けコンクリートの凍結融解試験結果を示す。一部急結剤が層状に存在した部分でコンクリートが剥落し、大きな重量減少が認められたが、300 サイクル経過時点で各水準とも相対動弾性係数は80%以上を確保しており、十分な耐凍害性を有していることがわかった。つまり、ベースコンクリートの水セメント比が小さく、適当なAE剤により十分なエントレインドエアが連行されていれば、急結剤の種類および添加量によらず、耐凍害性を有する吹付けコンクリートが得られることがわかった。

図-8に促進中性化4週、8週、13週経過時の中性化深さの測定結果を示す。13週経過後の中性化深さから判断すると、CA系を使用した場合は、ベースコンクリートより中性化の進行

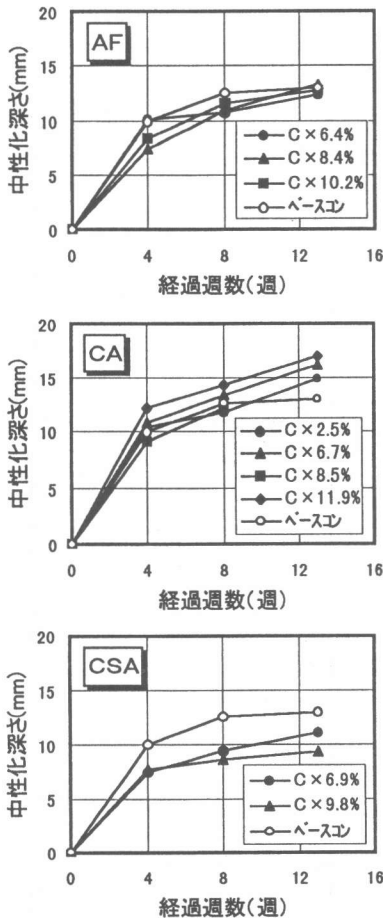


図-8 中性化深さ測定結果

が早かったが、AF系を使用した場合はベースコンクリートと同等、CSA系を使用した場合は、ベースコンクリートより中性化の進行が遅い結果となった。CSA系の急結剤を使用した場合は、圧縮強度および気泡分布測定結果等からもわかるように、コンクリート組織が緻密化するため、他の急結剤を使用した場合よりも中性化の進行が遅くなったものと思われる。

4. まとめ

本報告では、急結剤の種類と添加量がリバウンドに及ぼす影響や硬化性状および耐久性等の品質に及ぼす影響について確認を行った。

本実験の範囲より得られた結果を以下に示す。

- (1)リバウンド率は、急結剤の種類による影響よりも、その添加量による影響が大きく、急結剤特性に大きく左右されるものと考えられる。
- (2)CSA系の急結剤を使用した場合、中長期強度の伸びが他の急結剤を使用した場合よりも大きく、ベースコンクリートより緻密で高強度を有する吹付けコンクリートを得られることがわかった。

また、急結剤種類や添加量が吹付けコンクリートの施工性に影響を及ぼすことに起因して、吹付けコンクリートの空隙特性が左右されやすいことがわかった。

- (3)水セメント比が小さく、適当なAE剤により十分なエントレインドエアが連行されたコンクリートを用いれば、急結剤の種類および添加量に関わらず、耐凍害性を有する吹付けコンクリートが得られることが判った。

謝辞

本実験を行うにあたりご協力頂いた(株)ジェー・フェック、電気化学工業(株)、日本シーカ(株)、(株)ポゾリスに感謝の意を表します。

参考文献

- 1)酒井ほか：高性能吹付けコンクリートシステムを用いた施工実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.1435-1440，1997