

各種急結剤と吹付けモルタルの特性 に関する基礎的研究

寺村 悟¹・岩崎 昌浩²・平野 健吉³・笹川 幸男⁴・中川 浩二⁵

¹正会員 電気化学工業(株) 青海工場 セメント・特混研究所 (〒949-0393 新潟県西頸城郡青海町 2209)

²電気化学工業(株) 青海工場 セメント・特混研究所 (〒949-0393 新潟県西頸城郡青海町 2209)

³電気化学工業(株) 特殊混和材事業部 (〒100-0006 東京都千代田区有楽町 1-4-1)

⁴正会員 電気化学工業(株) 青海工場 特殊混和材部 (〒949-0393 新潟県西頸城郡青海町 2209)

⁵正会員 工博 山口大学 工学部 社会建設工学科 教授 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

近年、トンネル用吹付けコンクリートの要求品質は、粉塵、リバウンドの低減、強度や靱性改善、耐久性等上など多種多様化してきている。既往の報告では、これらの品質特性に起因する急結剤を総合的に評価しているとは言い難く、急結剤の選定や配合設計の基礎資料となるべき報告は少ない。

本研究では、各種の吹付けコンクリート用急結剤の特性を明らかとし、急結剤の添加量や水セメント比が吹付けコンクリートの基礎的特性である急結性と圧縮強度の発現性に及ぼす影響について検討した。その結果、吹付けコンクリートの配合設計ガイドラインに必要な各種急結剤の添加量や水セメント比を選定するための基礎資料となるべき事項が得られた。

Key Words : mortar for shotcrete, accelerator, soluble inorganic, calcium aluminate, calcium sulfo-aluminate, setting time, initial strength, dry and wet method

1. はじめに

わが国のトンネル用吹付けコンクリートは、NATMの導入から、まず無機塩系(IO)液体急結剤を用いた乾式工法に始まる。そして、粉末状のセメント鉱物系(CA)急結剤¹⁾の開発、吹付け機械および急結剤添加機等の設備装置の開発・実用化が、種々のトンネル工法の開発と伴ってトンネル工事の施工性および安全性を一段と向上させた。しかし、わが国は多種多様な地質を有しており、トンネル工事においては、種々の地山変状や湧水等に応じたトンネル支保部材の品質・機能を検討し、対応策を講じなければならない。このことは、近年のトンネルの大断面化やそれに伴う扁平化等に対しても同様に、トンネル工事を円滑に且つ迅速に進めるために重要な課題となると考える。

一方、トンネル支保部材としての吹付けコンクリートの品質は、一般に強度管理値 材齢 1日・5N/mm²、材齢 28日・18N/mm²とするものである。そのペースコ

ンクリート配合のほとんどは、単位セメント量を340～400kg/m³とし、水セメント比は乾式工法の場合40～50%、湿式工法では60%前後である²⁾。

このような配合が主流となっているのは、圧送性を含めた施工性や硬化後の強度性状が妥当と判断されているからである。

大断面トンネルへの対応策の一つに高強度吹付けコンクリートが挙げられる。これは、掘削直後の地山を早期に安定化させること、高強度化によって吹付け厚さの薄肉化を図ることを目的とするものである。さらに、欧米の例にみられるシングルシェル^{3),4)}への取り組みとして、防水性等の耐久性能に関する評価・検討^{5),6),7)}が行われている。

以上のように、吹付けコンクリートに託される課題は、粉塵・リバウンド、高強度、耐久性にあるが、吹付けコンクリート用急結剤の添加が長期強度や耐久性の低下を引き起こす⁸⁾ことなどの問題点が残されている。その原因の一端は、急結剤の作用や機能がいまだ明らかとなっていないことにあると考える。

したがって、本研究は、各種の急結剤や配合条件となる水セメント比が吹付けコンクリートの基礎的性状に及ぼす影響を明らかとすることにより、吹付けコンクリートの配合設計ガイドラインに必要となる基礎資料を提供しようとするものである。

2. 吹付けコンクリートの現状と課題

トンネル工事においても経済性はもとより社会的要求を反映して、吹付けコンクリートに望まれる品質も多種多様化し、材料損失(リバウンド)低減^{9),10)}、吹付けコンクリートの機能向上による支保軽減¹¹⁾、粉塵発生をさらに低下させた施工環境の向上と耐久性向上¹²⁾等を目的とする研究開発が盛んに行われるようになってきた。

これらの研究は、特定若しくは数種の急結剤および混和材を用いた特定の目的に対する効果および評価判断にとどまり、吹付けコンクリートの基本性状に基づいて総合的に論じるものではない。ここで、急結剤の特性を踏まえて、目的に応じた効果的な選択手法に関する課題が残される。

吹付けコンクリートの強度や耐久性向上、改善を目指した報告^{10),13)}においても、急結剤の種類やそれらの添加量による影響を検討・評価しているが、一定のW/Cにおける評価にとどまり、配合の主要因となるW/Cの変化によるそれらの効果が明らかとなっていない。また、W/C等による急結性状への影響はモルタルの凝結性状によって評価されているが、コンクリートの強度発現性状については長期強度発現を主眼としており、トンネル用吹付けコンクリートに必要とされる吹付け直後の強度発現性については未解明である。さらに、吹付け工法の違いによって、急結剤の種類や添加量が吹付けコンクリートの基礎的性状である凝結や強度発現に及ぼす影響については、まだ明らかではない。

吹付けコンクリートの品質や耐久性の研究に際して、各種急結剤自体の特性を把握すること、それらの添加量における凝結および強度発現性状を把握することが重要であり、不可欠と考えるが、これらに関する報告は少なく^{14),15)}、また、十分であるとはいえない。

一般に急結剤は、性能上、自己硬化性を有するセメント鉱物系急結剤とそれを有しない無機塩系液体急結剤が用いられている。自己硬化性を有する急結剤は、それ自体の水和反応とセメントとの初期反応によって、吹付けコンクリートの初期強度を発現させるため、配合条件である水セメント比に影響を強く受けるものと考えられる。

表-1 実験に用いる材料

名称	種類・産地	品質
セメント	普通	比重=3.15
	ポルトランドセメント	比表面積=3260cm ² /g
細骨材	新潟県 姫川産 川砂	比重=2.60, F.M=2.89, 吸水率=2.00
練混ぜ水	水道水	
減水剤	ポリカルボン酸系	比重=1.05
急結剤	無機塩系 (IO)	アルミン酸アルカリ塩 、炭酸アルカリ塩
	セメント鉱物系 (CA)	カルシウムアルミネート
	セメント鉱物系 (CSA)	カルシウムサルフォアルミネート

一方、自己硬化性の無い急結剤では、セメントとの反応作用からのみ凝結と強度発現が生じ、その促進度合は、同様に水セメント比や温度条件により異なってくる。当然の如く、このような作用機構は急結剤の成分やその量によって左右されるものであり、このような視点から種々の吹付けコンクリートの急結力や強度発現が検討された例はない。特に、本研究の対象となるセメント鉱物系急結剤のうち、筆者らにより開発されたカルシウムサルフォアルミネートを成分とするCSA系急結剤は、他の急結剤に比べて吹付けコンクリートの圧縮強度を損なわず、硬化後の強度増進性を向上する目的に開発された材料であるが、実用上の効果的な適用範囲を把握するには、その基本的な特性について明らかとすることが必要である。

そこで、本研究では、各種の急結剤が吹付けコンクリートの凝結と強度発現性におよぼす影響を、まず、急結剤自体のもつ特性を評価し、吹付け工法による違いを想定した練混ぜ方法の影響を明らかとして、湿式吹付けを対象に要因となる添加量、水セメント比について検討する。これらの検討から、実用上の吹付けコンクリート配合設計に必要な急結剤選定やW/Cの選定に関わる基礎資料を提供するものである。

3. 使用材料

本研究に用いる材料を表-1に示す。

本研究の対象とする急結剤は、無機塩系液体急結剤 (IO系)、セメント鉱物系粉末急結剤のCA系およびCSA系の3種類とした。

無機塩系急結剤は、初期のNATM施工での乾式吹付け工法で主に用いられた材料であり、K⁺、Na⁺のアルミン酸アルカリ塩や炭酸アルカリ塩を主成分としている。材料形態は、現在では水溶液化された状態で供給されるものがほとんどであり、溶液中に占める成分の固形分量は40~50%の範囲にあり、成分の

表-2 急結剤の自己硬化特性実験条件

条件項目	条件・内容	備考
環境温度	20±3℃	
急結剤種類	CA系急結剤 CSA系急結剤	セメント鉱物系急結剤
水急結剤比 (W/Ac)	0.3, 0.4, 0.5, 0.6	練混ぜ材; JIS R 5201
圧縮強度	材齢 10分, 1,3時間, 1日	試験方法; JIS R 5201 供試体寸法; 4×4×16cm (n=4)

の特性から強アルカリ性 (pH=13~14) を呈する急結剤である。

セメント鉱物系急結剤は、我が国独自に吹付けコンクリート用に開発された材料である。特長は、自己硬化性とセメントとの反応促進作用との相乗効果によって吹付け直後の初期強度を向上させる急結剤である。主成分は、CA系急結剤はCaO-Al₂O₃からなる鉱物を、CSA系急結剤はCaO-SO₃-Al₂O₃として、いずれもセメントと同様な粉末の無機成分から成る。また、これらの急結剤は、単独、若しくは、無機塩系急結剤成分との合成によって反応性を改良して用いられている。アルカリ性については無機塩系急結剤よりも低く、現状のトンネル工事の多くで、このセメント鉱物系急結剤が用いられている。

吹付けモルタルの基礎的性状評価に用いるセメントは、普通ポルトランドセメントを、また、細骨材は、新潟県姫川産川砂とした。さらに、水セメント比の減少による流動性（フロー）調整のため、ポリカルボン酸系に属する減水剤を適時用いた。

4. 急結剤の自己硬化特性

(1) 概要

急結剤自体の硬化性状が吹付けモルタルの初期強度に及ぼす作用を検討する基礎資料を得るため、急結剤自体の自己硬化特性について検討する。

ここで、急結剤の硬化性状は急激な反応であるため、通常の凝結試験を行うことは困難である。したがって、自己硬化特性を評価する手段として、材齢1日までの圧縮強度測定により強度発現性を検討した。

IO系急結剤は自己硬化特性を持たないため実験から除外し、検討対象の急結剤として、セメント鉱物系急結剤のCA系、CSA系の急結剤を用いた。

(2) 実験計画

a) 実験配合および実験項目

自己硬化特性の検討は、表-2に示す実験条件により行った。

表-3 自己硬化特性の実験結果

急結剤種類	W/Ac (%)	圧縮強度 (N/mm ²)			
		10分	1時間	3時間	1日
CA系	0.3	瞬結のため、型詰め不能			
	0.4	1.03	1.09	1.30	1.43
	0.5	0.62	0.96	1.23	1.37
	0.6	0.24	0.68	0.75	1.30
CSA系	0.3	0.00	1.03	5.40	39.3
	0.4	0.00	0.75	4.78	30.8
	0.5	0.00	0.31	3.14	26.8
	0.6	0.00	0.14	2.39	10.9

セメント鉱物系急結剤の反応速度は、セメントと同様、水急結剤比 (W/Ac) によっても異なると考えられるため、ここでは水急結剤比と強度特性との関係から評価することとした。また、実験条件の W/Ac は、実際の吹付けに用いられる水セメント比が概ね 0.50~0.65 の範囲であり、高強度等の検討においては 0.37 とした報告も有るため、本実験ではこれらの条件を包含する範囲として W/Ac を 0.3~0.6 と選定した。

b) 実験方法

練混ぜは、JIS R 5201 に記載される機械練り用練混ぜ機を用い、所定量の水にミキサーを低速回転させながら急結剤を投入し、投入完了後、高速回転により 15 秒間練混ぜを行った。

強度試験は、JIS R 5201 の圧縮強さ試験に準拠して行い、接水直後からの初期性状を検討するため、10分、1,3,24時間の4材齢とした。測定材齢は、実施で求められる吹付けコンクリートの初期強度と対比して設定した。すなわち、測定材齢10分には、吹付け直後に地山に付着して吹付けコンクリートが自立できる強度が求められ、測定材齢1時間では、概ね吹付け終了時点にあり吹付けコンクリートがアーチ構造を保持できる強度が要求される。さらに、測定材齢3時間においては、吹付け開始から次の発破ならびに機械掘削が開始される時点で、そのアーチ構造がそれらの衝撃や振動に耐える強度を、材齢1日に至っては、主に地山の変形抑制が期待されこれに対応する強度が求められることから、測定材齢を設定した。また、強度測定は1供試体につき2箇所測定し、各材齢の測定結果は、2供試体を用いてn=4の試験結果を平均した。

(3) 実験結果および考察

CA系およびCSA系急結剤の水急結剤比と自己硬化性実験の結果を表-3に示す。また、図-1に材齢に伴う水急結剤比別の強度発現性状を示す。

測定では、CA系急結剤の水急結剤比(W/Ac=0.3)の配合条件では凝結が著しく、練混ぜ途中で硬化して

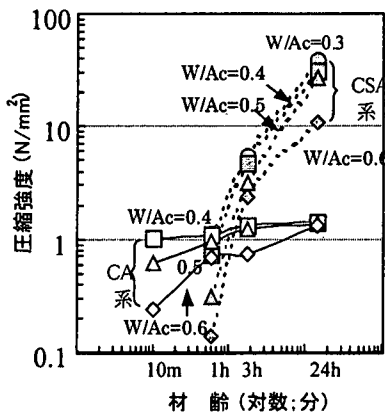


図-1 CA系, CSA系急結剤の
材齢とW/Ac別強度発現性状 (20±3℃)

強度測定が不可能であったため図から除外した。

実験結果から各々の急結剤の自己硬化特性について、次のことが言える。

CA系急結剤は材齢10分までに急激な強度発現を示す。材齢3時間までは、W/Acに依存する緩やかな強度増加を示し、材齢1日での強度はW/Acに関係なく収束することが認められる。

CSA系急結剤では、材齢10分において強度発現はなく急結剤自体の硬化は認められない。強度発現が認められる材齢1時間以降材齢1日までは、W/Acおよび材齢経過に伴う強度発現が顕著に現れている。

CSA系およびCA系の強度発現性を比べると、材齢1時間まではCSA系の強度発現がCA系に比べ低く、材齢3時間になると、CA系に比べて3~4倍程度の圧縮強度を発現してCSA系が逆に高くなる。材齢1日に至っては、CSA系急結剤の圧縮強度は、CA系の約10~20倍程度の圧縮強度となる。すなわち、CA系はCSA系に比べて接水直後の急激な強度発現を示し、CSA系はCA系に比べて硬化以降の強度発現性が著しく、また、W/Acによる影響を強く受ける。

以上のことから、吹付けコンクリートにCA系急結剤を用いた場合には吹付け直後の初期強度を向上させることが、また、CSA系急結剤を用いた場合には吹付け後の材齢経過に伴う強度発現を向上させる結果となることが推測できる。

5. 乾湿練混ぜ方法が吹付けモルタルの基本性状に及ぼす影響

(1) 概要

急結剤を添加した吹付けモルタルの急結性や強度発現性に及ぼす要因として、乾湿の吹付け工法によ

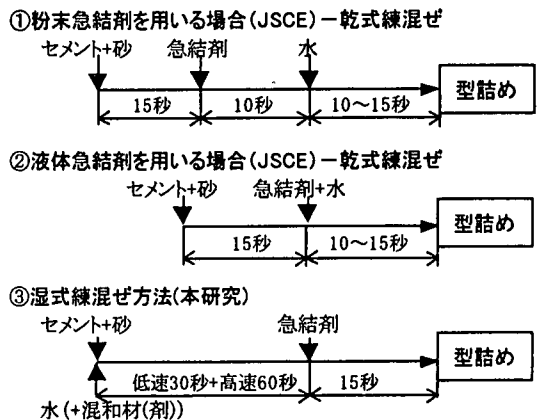


図-2 乾式練混ぜ(土木学会基準)と湿式練混ぜ方法

る影響が考えられる。ここでは、それぞれの急結剤(10系, CA系, CSA系)の添加量毎に、乾湿の吹付け工法を想定した練混ぜ方法が、吹付けモルタルの基礎的特性に及ぼす影響について検討する。また、環境温度による影響についても検討する。

(2) 実験計画

a) 乾湿練混ぜ方法

乾式吹付け工法を想定した試験法として、土木学会標準のJSCE-D102が適用できるものとする。この基準では、用いる急結剤の状態(粉末, 液体)により練混ぜ方法が分けられている。

粉末急結剤の場合は、セメントや骨材の混合物中に急結剤を事前に添加した後に水を投入し混合する。液体急結剤の場合には、水と急結剤を同時に添加混合して吹付けモルタルの諸性状を評価する方法である。湿式吹付け工法を想定した練混ぜ法に関する規定はなく、筆者らが知る限り、これまで室内でのモルタル・コンクリート性状評価で種々考案、検討されている^{9), 11), 13)}。

本試験に用いる湿式練混ぜ法は、まずセメント、骨材および水を混合した後、急結剤を添加する。そして、急結剤を添加した後の混合時間は、急結反応に影響を及ぼすと考えられるため、乾式練混ぜ法による場合と同一時間とした。練混ぜミキサーは、JIS R 5201に記載されるモルタルミキサーを用いて行った。

本実験の乾湿の練混ぜ方法の手順を図-2に示す。

b) 実験配合

実験条件を表-4に示す。実験では、凝結性状や強度発現に影響を及ぼす水セメント比(W/C)およびセメント砂比(C/S)を一定とした。

実験配合は、土木学会基準のJSCE-D102「吹付け

表-4 乾湿練混ぜ方法の試験条件

急結剤		環境温度 (°C)	試験項目
種類	添加量		
CA系	5,7 %	10,20,30	凝結性状 強度性状 (初期, 圧縮)
CSA系	7,10,15 %	20	
IO系	5,7,9 %	20	

コンクリート用急結剤品質管理方法(案)」に準拠し、C/S=1/3とするモルタルとした。また、W/Cについては同基準案ではW/C=0.5とされるが、練混ぜを行った結果、流動性がほとんど得られなかった。したがって、湿式吹付け工法における吹付けコンクリートの流動性を考慮し、適度の流動性(フロー:180~200mm)を有するW/C=0.55により行った。

(3) 実験項目

a) 凝結性状試験

凝結時間の測定方法は、土木学会基準「吹付けコンクリート用急結剤品質規格(案)」(JSCE-D102) 附属書「貫入抵抗によるモルタルの凝結時間測定方法」に準じ、練混ぜ時の急結剤添加直後からの経過時間45秒、1,2,3,5,7,10分に卓上式プロクター貫入抵抗器を用いて測定する。但し、供試体は、角柱供試体4×4×16cm用型枠の中仕切りを取り除いた17.6×4×16cmとした。

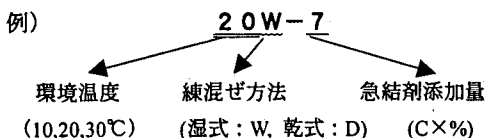
b) 強度性状試験

強度性状は、JSCE-D102の4.5項「モルタルの圧縮強度試験」に従い、供試体寸法4×4×16cmの角柱試験体を用いて行った。試験材齢は、材齢1,3,6,12時間、1,7,28日とした。養生は、各試験温度条件下の恒温室内で保管、材齢1日以降は水中養生とした。

(4) 実験結果

a) 凝結性状に及ぼす急結剤の影響

乾湿練混ぜ方法が吹付けモルタルの凝結性状に及ぼす影響について、各種の急結剤を用いて行った実験結果を図-3に整理した。図中に示す実験条件の記号は、次の通りである。



IO系急結剤では、各々の添加量で乾式練混ぜを行った場合が湿式練混ぜに比べ、測定時間毎の貫入抵抗値が高く、凝結性が強いことが認められる。

初期段階の凝結性状をみると、IO系の乾式練混ぜ

の添加量5%と湿式練混ぜの添加量9%とではほぼ凝結性状が一致する。このことは、IO系急結剤では急結剤とセメントとの反応によって凝結促進を引き起こすため、乾式練混ぜ方法ではセメント粒子と直接的に接する状態となる。一方、湿式練混ぜ方法では、セメント粒子周囲には練混ぜ水による被膜が生じていると考えられ、乾式法と比べて急結剤との反応に遅れが生じると考えられる。

CA系急結剤では、乾式練混ぜ方法による凝結促進性が著しく、7%添加条件では練混ぜ後の試験体型詰め中に硬化し測定できない状態であった。これに比べて5%添加では測定可能であった。この性状は、IO系急結剤と同様に、乾式練混ぜを行ったものが湿式練混ぜより著しく凝結性を促進させる結果である。ここで、IO系急結剤と異なる点は、同一添加量で比較した場合に、始発(3.5N/mm²)から終結(28N/mm²)に至る時間が短く、速いことである。

CSA系急結剤での凝結性状は、CA系と同様に、乾式練混ぜの方が湿式より初期貫入抵抗値が高く、鋭敏な凝結性状を示す。凝結性状と添加量との関係から、乾式練混ぜにおけるCSA系10%とCA系5%、また、湿式においては、CSA系15%およびCA系7%との凝結性状がほぼ一致すると考えられる。したがって、W/C=0.55の条件で同様な凝結性状を得るには、CSA系はCA系に比べ5~8%程度の添加量の増加が必要となる。さらに、乾湿練混ぜ方法による添加量差も約5%となる。

b) 凝結性状に及ぼす環境温度の影響

環境温度条件が凝結に及ぼす影響について、CA系急結剤を用いて検討した。ここで、練り混ぜ直後の貫入抵抗値と終結時間の結果を図-4に示す。

乾湿のいずれの練混ぜ方法においても、環境温度が高くなると凝結が促進することが認められる。20°C、30°C温度条件で凝結性状が同程度と考えられるのは、乾式練混ぜ方法のCA系5%添加条件のものと湿式練混ぜによるCA系7%の添加条件によるものである。乾湿の練混ぜ方法による急結剤添加量の差分は、CA系では2%程度であるのに対し、IO系が4%程度となると推定される。

c) 強度性状

図-5に、材齢1時間から材齢28日における各々の急結剤を用いた吹付けモルタルの乾湿練混ぜ方法での同一材齢における強度比較を示す。

実験結果から、初期の比較的低強度域では、湿式練混ぜ方法に比べ乾式練混ぜ方法による圧縮強度が高いことが認められる。およそ2.0N/mm²以上の圧縮強度になると、いずれの急結剤を用いた場合にも練混ぜ方法の違いによる圧縮強度の有意差はない。

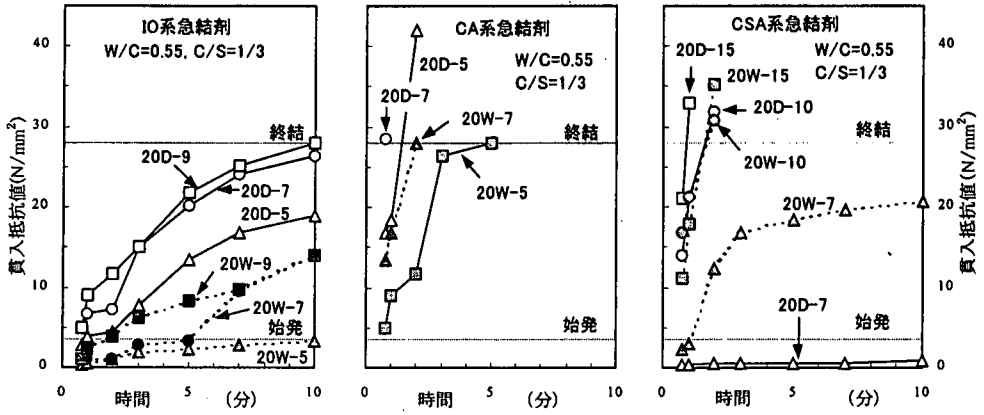


図-3 各種急結剤を用いた吹付けモルタルの練混ぜ方法と凝結性状

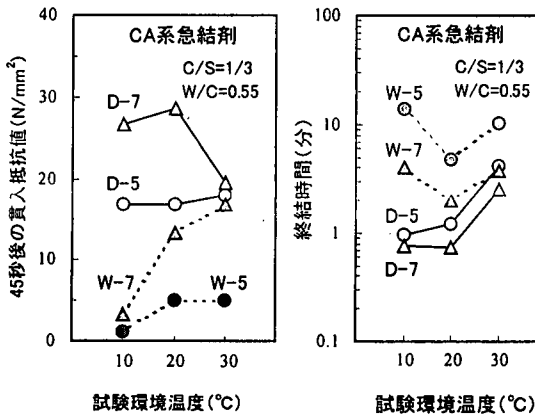


図-4 練混ぜ方法と温度別凝結性状 (CA系急結剤)

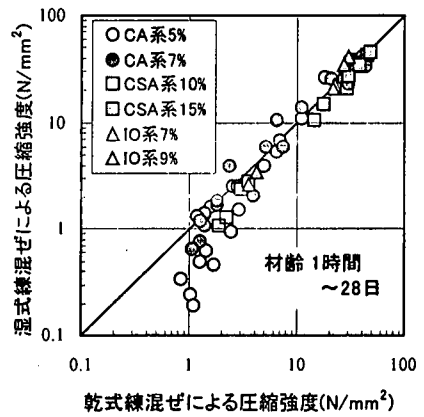


図-5 吹付けモルタルの練混ぜ方法と強度性状

(5) 考察

乾湿練混ぜ方法の相違点は、急結剤の添加時期と添加されるとき急結反応に起因するセメント-急結剤-水の状態が異なっていると考えられる。すなわち、乾式練混ぜ方法ではセメントと急結剤とが同時に水とが反応する状態にあり、湿式練混ぜ方法ではセメントと水が反応した後に急結剤が添加される。

このことから考えられることは、湿式練混ぜ方法では、水とセメントが予め混合されることで、セメントに含まれる石膏等の凝結調整成分がセメント粒子表面を被覆し、その後添加される急結剤との反応を抑制して、乾式と比べた凝結性の遅れを生じさせていると考えられる。このように、セメント-急結剤-水の間で生じる水和反応性の違いが、凝結性状や強度発現性状に影響を及ぼしているものと考えられる。

以上のことから、吹付けモルタルの基礎的性状を適正に評価するには、対象とする吹付け工法での水や急結剤の添加時期が重要なポイントとなる。

6. 各種急結剤を添加した吹付けモルタルの基本特性

(1) 目的

本項では、水セメント比を主たる要因として、各々成分の異なる急結剤 (IO系, CA系, CSA系) の添加量が吹付けモルタルの基礎的特性に及ぼす影響について検討する。ここでは、特に、IO系急結剤は実施工において、湿式と乾式吹付け工法での急結特性に大きな差があるため、本項では湿式練り混ぜ方法による検討を行うこととした。

(2) 実験計画

a) 実験配合と項目

急結剤の種類、添加量とW/Cを要因として表-5に示す実験計画とした。但し、W/Cの低い配合条件では、フロー一定となるモルタルの流動性を確保す

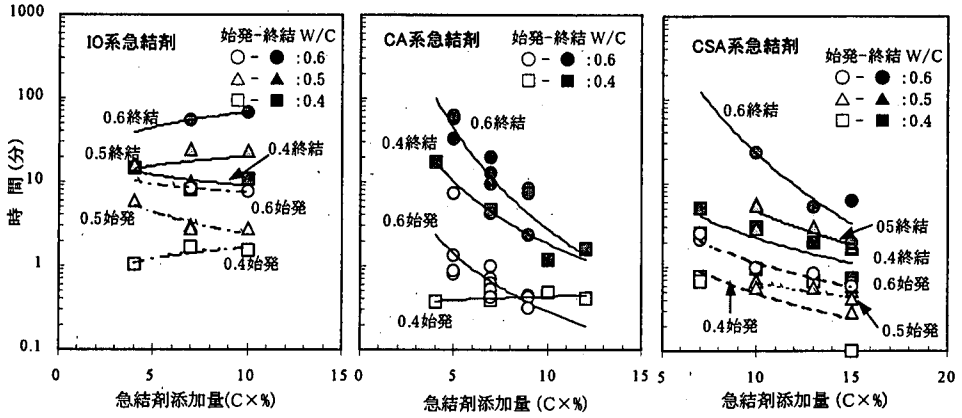


図-6 各種急結剤の添加量と凝結性状

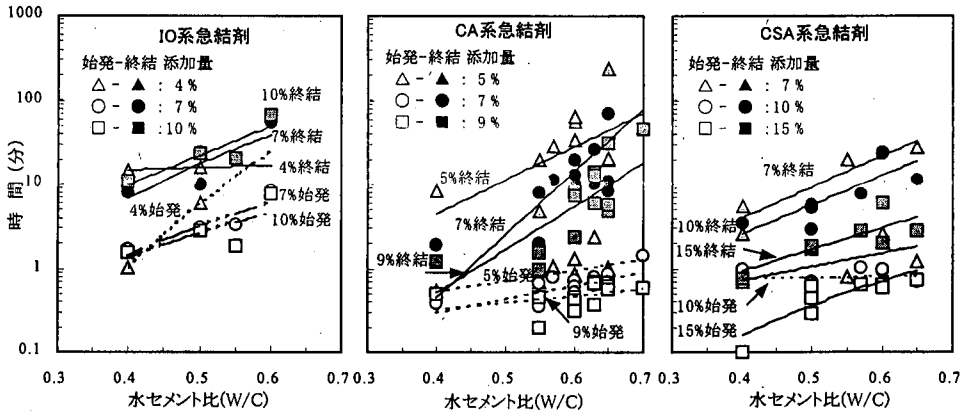


図-7 各種急結剤の水セメント比における凝結性状

表-5 急結剤の吹付けモルタル基礎特性試験

条件\項目		凝結	初期強度	圧縮強度
試験温度		20 ± 3 °C		
急結剤 添加量	IO系	4~10%	7%	7%
	CA系	5~12%		
	CSA系	7~15%	7,10%	10%
水セメント比		0.40~0.70	0.40~0.65	

るため、既往の報告や過去の実績から、ポリカルボン酸系の高性能減水剤を用いた。

実験では、吹付けモルタルの基礎的特性とする凝結性状、材齢1日迄の初期強度と材齢7、28日での圧縮強度を測定してその発現性を、さらに急結剤を添加しない標準供試体の圧縮強度との比較を行って検討した。

凝結性状試験は、第5項と同様に土木学会基準 JSCE-D102の「貫入抵抗によるモルタルの凝結時間測定方法」に準じ、貫入抵抗値が 3.5N/mm²に達する

始発時間、28N/mm²に達する終結時間を測定した。

また、圧縮強度試験は、同基準 JSCE-D102の「モルタルの圧縮強度試験」に従って測定した。

(3) 凝結特性および考察

図-6に3種(IO系, CA系, CSA系)の急結剤の添加量と凝結の始発時間(貫入抵抗値, 3.5N/mm²)と終結時間(貫入抵抗値, 28N/mm²)の関係を示す。図-7には急結剤の各添加量における W/C と凝結性状の各時間との関係を示す。各図には、急結剤毎の添加量と W/C による凝結特性を考察するため、始発、終結時間の測定結果の回帰曲線を挿入した。なお、終結時間が測定材齢の10分以上となる条件では、それぞれの測定材齢と貫入抵抗値との回帰曲線から凝結時間を推定してプロットした。

a) IO系急結剤の凝結性状について

図-6より、IO系急結剤の添加量4~10%の範囲での始発・終結時間は、各々の W/C においても変化は

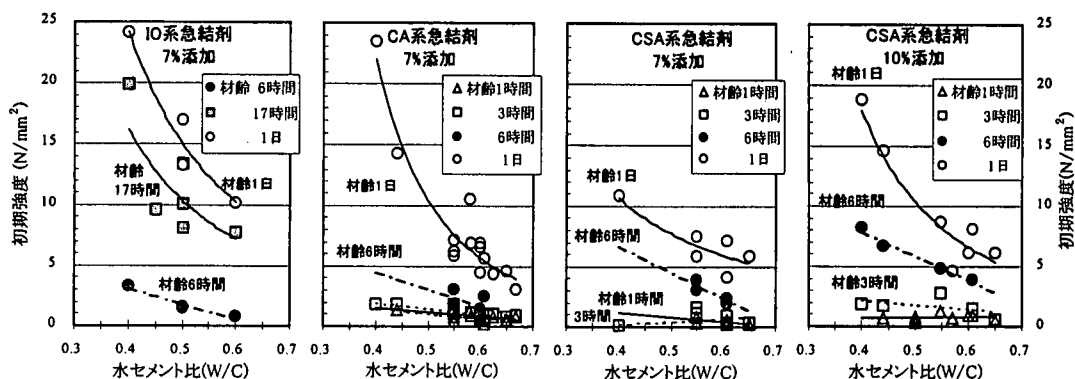


図-8 各種急結剤添加量における水セメント比と初期強度発現性状

少なく、添加量の増加に伴う凝結促進性は認められない。

W/Cの凝結促進効果は、図-7のW/Cと凝結性状との関係にみられるように、W/Cの減少に伴って始発・終結時間が短くなり、W/C=0.4の条件になると添加量に関わらず同程度となっている。

ここで、添加量7、10%ではW/Cの減少と始発・終結時間との関係がほぼ一致することから、添加量を7%から10%とすることによる凝結促進効果は少ないと考えられる。IO系急結剤の添加量が7%以上となると、急結剤の水分がモルタルの実質上のW/Cを高くし、凝結促進性を抑制していることが影響しているものと考えられる。したがって、IO系急結剤の凝結促進効果のある添加量は4~7%であると考えられる。

b) CA系急結剤の凝結性状について

CA系急結剤の始発・終結時間は、終結時間が添加量の増加に伴って短くなるのに対し、始発時間では、W/C=0.6で同様な効果が認められるものの、W/C=0.4においては、各添加量ともほぼ同一始発時間となってその効果がほとんど認められない。

W/Cと始発・終結時間との関係では、W/Cの減少に伴い短くなり、特に、終結を短くして、始発時間と終結時間との差を短くしている。始発時間では、急結剤添加量5,7,9%の場合をみても、W/Cの減少による始発時間の促進効果は終結時間と比べ小さい。これは、CA系急結剤が添加直後からの急速に反応して始発状態に至ると考えられる。この状態は、自己硬化特性の状態と一致する性状である。また、W/Cの影響は始発よりはむしろ終結に影響すると考えられる。

c) CSA系急結剤の凝結性状について

CSA系急結剤の添加量増加により、CA系急結剤と同様に、始発および終結時間は短くなる。また、W/C

の減少に伴って、始発から終結に至る時間が短くなるのも、他の急結剤と同一の傾向が認められる。

CSA系急結剤の凝結状態の始発・終結への作用は、CSA系急結剤の自己硬化特性に見られるように、接水直後では急結剤自体には硬化性を示さないことから判断して、主にセメントとの反応によって生じた結果と考えられる。

ここで、CSA系急結剤添加量10%と同程度の凝結性状を示すのは、CA系急結剤5~7%、IO系急結剤では添加量7%あるいはそれ以上であると考えられる。これらの結果から、急結剤の添加量に伴う凝結促進効果は、CA系およびCSA系急結剤の自己硬化特性に影響を受けているものと考えられる。さらに、吹付けモルタルのW/Cの減少に伴う凝結促進効果は、W/Cの減少によるセメントの反応成分であるCa²⁺イオン濃度が上昇することで、セメントと急結剤との反応は促進され凝結促進を促すものと考えられる。

(4) 初期強度発現性状および考察

図-8に材齢1日までの若材齢における3種の急結剤を用いた水セメント比と初期強度の関係を示す。

ここで、IO系急結剤の材齢1~3時間において初期強度が得られなかった。このことは、湿式練混ぜ方法による影響と考えられ、先に述べたようにセメント中の凝結調整剤等が作用し急結剤の反応性を背手いる遅らせていると考えられる。したがって、IO系急結剤では初期強度発現が確認された材齢6時間、および、材齢17時間で測定した結果を示すこととした。また、図中には各々の材齢毎に、W/Cと初期強度との関係を示す回帰曲線を挿入した。以下に、初期強度性状に及ぼす各種の急結剤の特長を示す。

a) IO系急結剤の初期強度性状について

IO系急結剤の添加量7%では、材齢3時間における初期強度発現は弱く、いずれのW/Cでも測定でき

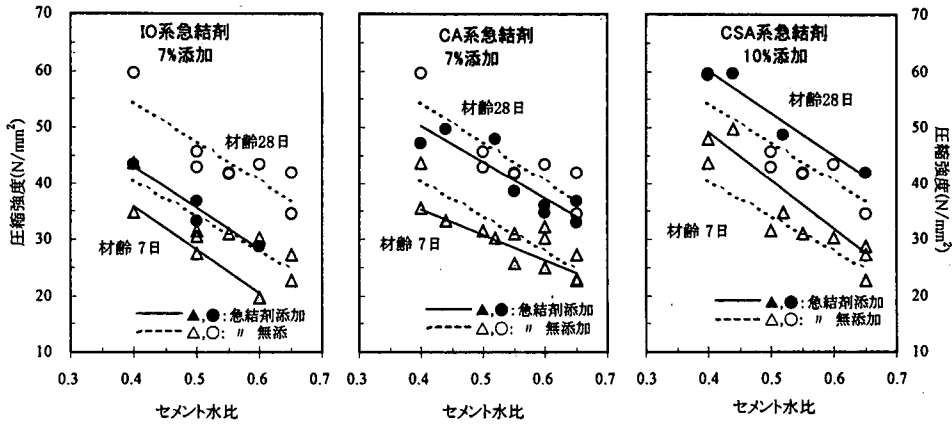


図-9 各種急結剤の水セメント比と圧縮強度性状

なかった。材齢6時間、17時間および1日では、W/Cの減少によって初期強度の向上が認められる。これらの理由として考えられるのは、自己硬化特性を持たないことと、湿式練り混ぜ方法を用いることにより、セメントに含まれる凝結調整成分によってセメントと接触した直後の反応が弱められたためと考えられる。また、初期強度発現のある材齢6時間以降では、セメントの水和に伴って強度発現が生ずるものと考えられる。

b) CA系急結剤の初期強度性状について

CA系では、材齢1時間から強度発現が認められ、材齢が増加するに従い、W/Cの減少に伴う初期強度の増加がIO系と同様に認められる。材齢6時間におけるW/Cの減少による初期強度発現は、IO系に比べ高く、自己硬化特性が少なからず作用しているものと考えられる。

c) CSA系急結剤の初期強度性状について

CSA系急結剤の添加量7%および10%において、CA系と同様に材齢1時間から初期強度発現が認められる。また、CSA系の添加量7%の材齢1~3時間における初期強度は、CA系と比べ若干低い。CSA系の添加量を10%とすることにより同程度の初期強度性状となる。

材齢6時間では、W/Cの減少に伴う初期強度発現は、IO系およびCA系急結剤に比べても高く、この傾向は、CSA系の7%、10%の添加量においても認められる。これは、材齢経過に伴うCSA系の自己強度発現性状が、CA系のそれに比べて高いことから推察される。しかし、材齢1日になると、CSA系7%の場合における初期強度発現は小さく、添加量10%になると、IO系およびCA系の添加量7%の場合と同様な初期強度性状となることが確認された。

初期強度性状について、CA系およびCSA系急結

剤を総合的に評価すると次のようなことが言える。

材齢1~3時間の初期強度発現は、自己強度発現性のあるCA系およびCSA系急結剤が高く、吹付けモルタルのW/C=0.4~0.6ではほぼ1~3N/mm²の範囲に分布する。

材齢6時間では、急結剤とセメントとの反応による強度発現とともに、急結剤の自己硬化特性が相乗的に寄与し、初期強度発現に現われる。

材齢1日では、急結剤の自己硬化特性による影響が認められず急結剤種類によらない。ここでは、吹付けモルタルのW/Cにより強度が発現すると考えられる。また、W/Cの減少による初期強度発現性は、材齢増加に伴って向上する。

(5) 圧縮強度発現性状および考察

各種急結剤を添加した材齢7、28日のW/Cと圧縮強度の関係を図-9に示す。図中には、それぞれの急結剤種類毎の強度特性を比較するため、各材齢毎に回帰曲線と急結剤を添加していないベースモルタルの結果を同様に示す。

材齢7,28日における圧縮強度は、IO系、CA系およびCSA系急結剤のいずれの急結剤を添加した場合においても、W/Cの減少に伴う圧縮強度の向上が認められる。また、各材齢におけるW/Cの減少による圧縮強度の増分とベースモルタルの増分とは、ほぼ同一傾向である。しかしながら、各材齢での吹付けモルタルの圧縮強度とベースモルタルのそれとの対比を行うと、IO系の添加量7%では0.7~0.8倍であり、ベースモルタルの材齢7日の圧縮強度と吹付けモルタルの材齢28日がほぼ同程度となる。

CA系の添加量7%では、ベースモルタルの圧縮強度に対して0.8~0.9倍で、IO系に比べて圧縮強度発現は高くなるが、CSA系の添加量10%では約1.2倍

表-6 吹付けモルタルの基礎的性状における各種急結剤の作用特性

		IO系急結剤	CA系急結剤	CSA系急結剤
凝結性状	添加量との関係	添加量に伴う凝結促進は弱い。7%以上の添加量では、凝結促進作用は少ない。	添加量に伴う凝結促進は最も強い。また、他の急結剤と同程度の凝結性状を得る添加量は、最も少ない。	添加量に伴う凝結促進はIO系より強く、CA系に比べ弱い。また、CA系と同程度の凝結性状を得る添加量は、+3~5%である。
	W/Cとの関係	W/Cの減少が凝結を促進させる効果がみられる。CA系やCSA系と比べ、始発・終結時間は遅い。	W/Cの減少が凝結を促進させる効果はみられる。その効果は始発よりはむしろ終結に影響する。	W/Cの減少が凝結を促進させる効果はみられる。その効果は始発よりはむしろ終結に影響する。
初期強度 材齢1日迄		材齢3時間までの初期強度発現は弱い。強度発現以降にW/Cの減少に伴う強度向上が見られ、材齢1日では他の急結剤と同程度の初期強度発現性を示す。	W/Cの減少による初期強度増加は、材齢1~3時間で少ない。また、材齢6時間より材齢1日までの材齢経過に伴って強度増加量は高い。	W/Cの減少による初期強度増加作用は、材齢1~3時間では少ない。材齢6時間での強度増加量は他の急結剤と比べ最も高い。W/Cの高い場合においても初期強度の発現に富む。
圧縮強度 材齢7, 28日		W/Cの減少に伴って強度増進。ベースモルタルに対する圧縮強度比は、0.7~0.8倍程度。	W/Cの減少に伴って強度増進。ベースモルタルに対する圧縮強度比は、0.8~0.9倍程度。	W/Cの減少に伴って強度増進。ベースモルタルに対する圧縮強度比は、約1.2倍程度。
作用機能		セメントと接触後の水和反応時に偽凝結を生じさせる作用と考えられる。強度発現作用はW/Cの減少による強度発現に依存するが、水溶液の水分と急結剤成分による抑制作用を併せもつ。	自己硬化特性が凝結の促進作用と、材齢3時間までの初期強度発現性に寄与する。材齢3時間までの初期強度発現は、W/Cの減少に伴って増進。また、それ以降の材齢ではW/Cが強度発現に影響する。	CA系と同様に、自己硬化特性とW/Cの相乗効果による強度増進が認められる。ここで、CSA系はCA系に比べ、材齢6時間以降の強度発現が高く、材齢28日に至っても継続し、圧縮強度を増加させる。

を示し、逆にベースモルタルの材齢7日、28日での圧縮強度を上廻る結果である。したがって、自己硬化特性のあるCA系およびCSA系急結剤は、IO系急結剤に比べて材齢7、28日の圧縮強度性状を改善し、圧縮強度発現の程度には、それぞれの急結剤成分が影響すると考えられる。

(6) 各種急結剤を添加した吹付けモルタルの基礎的性状に関するまとめ

各々の急結剤を添加した湿式吹付けモルタルの凝結性状、初期強度、および圧縮強度に関する実験結果から、各種急結剤のそれら性状における作用特性を表-6に整理した。

7. おわりに

本論文により、急結剤の成分の違いや添加量が、水セメント比の条件によって、吹付けモルタルの基礎的性状に及ぼす影響を明らかにすることができた。

しかしながら、実験結果からも伺えるように、特に急結剤は、凝結性状や圧縮強度発現の主要材料であるセメントに比べ単位量が少なく、本研究の要因と考えた添加方法、温度、更に添加量や水セメント比の他、材料的な要因に左右され易い。特に、化学的な反応を伴う性状であるため、セメントの鉱物組成や急結剤中の成分組成等の要因が考えられる。したがって、今後、長期の圧縮強度や耐久性の確保の

観点から、更に品質向上を図るためには、種々の急結剤の添加量が初期強度や圧縮強度に与える影響について検討する必要があると考える。

本研究の吹付けモルタルの実験結果から、それぞれの急結剤を用いる場合の添加量や、配合上の水セメント比の考慮すべき事項を以下に示す。

- 吹付けコンクリートの配合設計は、急結剤による影響を考慮して行う必要がある。特に、急結剤の種類とその添加量は、凝結性状、初期強度の発現性、圧縮強度に影響を及ぼす。
- 吹付けコンクリートの初期強度は、急結剤の種類とその添加量、水セメント比ならびに環境温度が大きく影響する。また、同量の急結剤使用において、乾式吹付け方法では、湿式吹付け工法に比べて初期強度が高くなる。
- 吹付けコンクリートに高強度が求められる場合には、急結剤の種類と添加量が圧縮強度に与える影響が大きいため、十分な検討が必要である。水セメント比が凝結促進性や初期強度発現に影響を及ぼすため、それらを考慮し、適正な急結剤添加量を選定することが必要である。
- 乾式および湿式吹付け工法に見られる急結剤の添加時期の違いが、吹付けコンクリートの基礎的性状に影響を及ぼすことを考慮する必要がある。ここで、吹付け工法の違いを想定したモルタルの検討評価から、湿式練混ぜ法での急結剤添加量は、

乾式練混ぜ法と比較した凝結性状試験から、IO系急結剤では4%、CA系では2%、CSA系では3~5%程度それぞれ多くなる。

参考文献

- 1) 中川晃次, 平野健吉: 急結剤, セメント・コンクリート, No. 427, pp95-100, 1982. 9
- 2) トンネルの吹付けコンクリート, 日本トンネル技術協会, 1997. 2.
- 3) Morgan, D. R.: New Developments in shotcrete for Repairs and Rehabilitations, CANMET, Ottawa, Canada, pp699-739, 1992
- 4) Lukas, W., Kusterle, W. and Pichler, W.: INNOVATIONS IN SHOTCRETE TECHNOLOGY, Shotcrete Underground Support VII, pp155-164, 1995
- 5) 杉山律, 長沢教夫, 喜多達夫, 福留和人: 各種材料を用いた高強度吹付けコンクリートの諸物性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, pp1423-1428; Vol. 19, No. 1, 1997.
- 6) 原田耕司, 松井健一, 手塚裕紀, 佐伯好治: 高耐久吹付けコンクリートの研究・開発, コンクリート工学年次論文報告集, pp1013-1018, Vol. 17, No. 1, 1995.
- 7) 岩附宏行, 浅野利彦, 小林清三, 木村勝利: 吹付けコンクリートの耐久性に関する考察, 電力と土木, No. 183, 1983. 3.
- 8) 平間昭信, 藤本晃生, 原田進, 岩城圭介: 高強度吹付けコンクリートの品質変動について, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, V-71, pp142-143, 1995. 9.
- 9) 鬼頭誠, 末永充弘, 弘中義昭, 伊藤伸一郎: シリカフェームを添加した吹付けコンクリートの性能, 土木学会「シリカフェームを用いたコンクリート」に関するシボゾウム講演論文報告集, pp145-152, 1993
- 10) 酒井芳文, 駒田憲司, 川口和義, 牛島栄: 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, コンクリート工学年次論文報告集, pp1159-1164, Vol. 20, No. 2, 1998.
- 11) 長次教夫, 石川敏博, 岡田正男, 福留和人: 高強度・高品質吹付けコンクリートを用いた大断面トンネルの試験施工, 土木学会第28回岩盤力学シボゾウム講演論文集, pp13-pp17, 1997. 1.
- 12) 酒井芳文, 木村正孝, 藤村満夫, 牛島栄: 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, pp1435-1440, Vol. 19, No. 1, 1997
- 13) 橋大介: 使用材料および配合が吹付けコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学論文集, pp61-72, 第8巻第2号, 1997. 7.
- 14) 赤坂雄司, 上馬場靖, 中村敏夫: 吹付けコンクリート用急結剤に関する実験的研究, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, VI-122, pp266-267, 1992. 9.
- 15) 平間昭信, 松尾勝弥, 田中斉, 野口和幸: 急結剤を添加したモルタルの凝結性状に関する基礎的実験, 土木学会第51回年次学術講演会, V-236, pp472-473, 1996. 9.

(1999. 1. 5 受付)

A STUDY ON THE PROPERTIES OF VARIOUS ACCELERATORS AND MORTAR FOR SHOTCRETE

Satoru TERAMURA, Masahiro IWASAKI, Kenkichi HIRANO,

Yukio SASAGAWA and Koji NAKAGAWA

Evaluation of accelerators, based on calcium sulfo-aluminate, on calcium aluminate, and on soluble inorganic is carried out. Quick setting property and strength development of mortar with the accelerators are examined by type and content of accelerator, water to cement ratio and temperature. Concerning the evaluation of quick setting, comparison is made on wet method and dry method. The use of an accelerator based on calcium sulfo-aluminate is found to achieve high strength development and show no disadvantage in long term strength development.