

アルカリフリー液体急結剤の日本での適用について

Application OF FLUID ALKALI-FREE liquid accelerator IN TUNNEL CONSTRUCTION PROJECTS IN JAPAN

大窪克己¹⁾・片寄 学²⁾・小川直司³⁾・山本和義⁴⁾・野村洋人⁵⁾

Katumi OOKUBO, Manabu KATAYOSE, Naoji OGAWA, Kazuyoshi YAMAMOTO, Hirito NOMURA

In Japan, alkali-free liquid accelerator have been added to shotcrete only for testing purposes. This is because the quick setting ingredients used in Japanese cement are different from those used in European cement. This paper describes the process by which alkali-free liquid accelerator became commercially practical for use in shotcrete made with Japanese cement.

Key Words : tunnel, shotcrete, accelerator, strength, dust measurements, rebound loss measurements

1. はじめに

近年、じん肺に関する訴訟が多くなってきており、トンネル坑内の作業環境に対して2000年12月に厚生労働省より、「ずい道等建設工事における粉じん対策に関するガイドライン」が、さらに2001年2月に国土交通省より、「トンネル工事の粉じん発生作業に関する衛生管理マニュアル」が出された。このように、トンネル坑内の環境改善は社会的使命となっている。

第二東名高速道路静岡第三トンネルは両坑口が深い谷となっているため、図-1に示すように本坑中央部付近へ作業坑（上り勾配最大12%、高低差約60m）を取付け、本坑上下線の掘削を行う。よって、発生した汚染空気は坑内に滞留し易くなっている。また、現場周辺には茶畑が広がっており、トンネルの換気による影響を与えないため、発生粉じんの低減に努める必要があった。

当現場ではトンネル坑内の環境改善にあたり、特に人体に影響を与える吹付けコンクリートに着目した。吹付けコンクリートの発生粉じんを低減する手段の一つであるアルカリフリー液体急結剤は、従来のセメント鉱物急結剤よりも低粉じん、低リバウンドを実現で

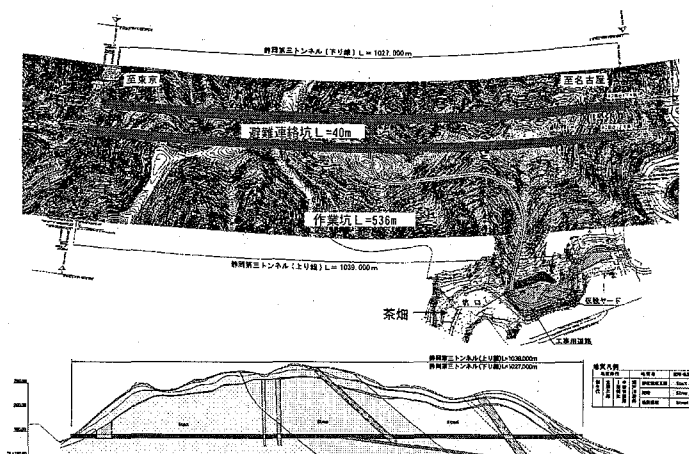


図-1 平面図，縦断面

表-1 セメントの成分

Mineral composition		Japan		Europe
		Normal	High early	Normal
C ₃ S	%	50	60	60~65
C ₂ S	%	25	15	10~15
C ₃ A	%	7	11	7~11
C ₃ AF	%	3	8	8

- 1) 正会員 日本道路公団 技術部
- 2) 正会員 日本道路公団 静岡建設局 静岡工事事務所
- 3) 正会員 清水建設(株) 名古屋支店 静岡土木営業所
- 4) 正会員 清水建設(株) 土木事業本部 技術第2部
- 5) 正会員 清水建設(株) 名古屋支店 静岡土木営業所

きるとされている。しかし、表-1に示すように日本製のセメントは欧州製のセメントより C_3S や C_3A 等の早強成分が少ないため、自硬性のない液体急結剤では初期強度の発現に問題が残る、それまでは試験施工の域にあった。そこで、従来の粉体急結剤及びスラリー急結剤、アルカリフリー液体急結剤を用いて配合を変えながら初期強度や粉じん量、リバウンド量を測定し、所定の強度と良好な坑内環境を満足できる配合や混和剤を選定する試験施工を行った。その結果、第二東名高速道路静岡第三トンネルにおいて、液体急結剤を添加した吹付コンクリートを実用化するに至った。

2. 比較試験

(1) 配合および基準値

配合については、第二東名高速道路の仕様にある、セメント量 450kg/m^3 程度で、表-2に示す設計基準強度を満足するものとした。また、表-3、4に使用材料及び試験配合を示す。

なお、No. 1 は現場で既に使用していた配合で急結剤は粉体である。

(2) 試験結果

① 粉じん測定結果

次ページの図-2に粉じん測定結果を示す。測定は切羽から 50 m の位置で 3 点測定し平均した値を相対評価したものである。換

気は $1200\text{m}^3/\text{min}$ である。この結果より液体急結剤を使用した方が粉体急結剤、スラリー急結剤よりも粉じん量が少ないと言える。配合 No. 6 に至っては粉体配合の粉じん量に対して 1/3 まで低減されている。

表-2 設計基準強度

種 別	3 時間強度	1 日強度	28 日強度
高強度吹付コンクリート	2 N/mm^2	10 N/mm^2	36 N/mm^2

表-3 使用材料一覧表

材 料	材料種類及び産地等	密度 (g/cm^3)
普通セメント	住友大阪普通ポルトランドセメント	3.15
早強セメント	住友大阪早強ポルトランドセメント	3.13
水	地下水	1.00
細骨材	大井川水系坂部産 粗粒率 2.90	2.58
粗骨材	大井川水系坂部産 最大寸法 10mm	2.60
混和剤	高性能減水剤 A	No. 1~4 および No. 7, 8 に使用
	高性能減水剤 B	No. 5, 6 に使用
	急結助剤	No. 7, 8 に使用
急結剤	ナミック T-10	粉体急結剤：カルシウム・サルフォ・アルミネート系
	液体 A	液体急結剤：水溶性アルミニウム塩
	液体 B	液体急結剤：改質アルミニウム合成物
	スラリー	スラリー急結剤：カルシウム・サルフォ・アルミネート系

表-4 試験配合一覧表

配合 No.	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m^3)	C (kg/m^3)	S (kg/m^3)	G (kg/m^3)	急結剤 添加量	混和剤 添加量	備考
1	18±2	45.0	65	202	450 (N)	1047	569	10.0	1.20	粉体
2	18±2	42.2 (46.7)	65	190	450 (N)	1068	580	9.0	1.90	液体 A
3	18±2	42.2 (46.7)	65	190	450 (H)	1067	579	9.0	1.90	
4	18±2	40.0 (44.5)	65	200	500 (N)	1025	556	9.0	1.90	
5	18±2	40.0 (44.3)	65	180	450 (N)	1085	589	8.5	2.10	液体 B
6	20±2	37.0 (40.3)	65	185	500 (N)	1022	570	8.5	2.10	
7	18±2	42.0 (50.0)	60	189	450 (N)	988	664	10.0	2.10	スラリー
8	20±2	40.0 (48.0)	65	200	500 (N)	1025	556	10.0	2.10	

1) 水セメント比の括弧内の値は液体急結剤添加後、2) 添加量は (C×%)、3) 配合 No. 7, 8 は混和剤 2 種類

②リバウンド測定結果

図-3にリバウンド測定結果を示す。配合 No. 5を除く全ての配合で粉体配合よりリバウンド量が少ないことが確認された。比率としては粉体配合より60~85%程度低減した。なお、配合 No. 5のリバウンドが大きくなった理由は、スランプロスが大きく凝結が既に開始していたと想定出来る。

③ 強度試験結果

図-4~6にかけて強度試験結果を示す。材令3時間強度については、粉体急結剤、スラリー急結剤を用いた配合においては基準値を上回ったが、液体急結剤の方はNo. 5を除く全ての配合で基準値を満たさなかった。

材令24時間強度については、液体急結剤を用いた配合のNo. 2と4について基準値を満たさなかった。つまり、液体急結剤は現配合では初期強度の発現に問題があることが分かった。

材令28日強度については、No. 6の配合のコア試験結果を除きコア、モールド共に基準値を上回った。No. 6の配合が下回った原因については、コア密度が低かったためであると考えられる。

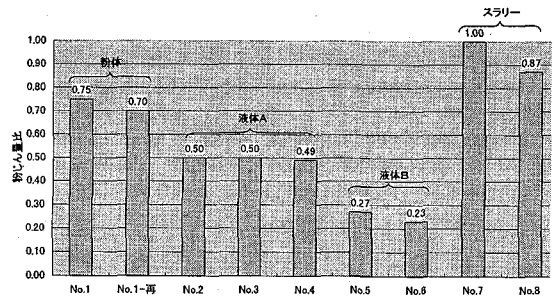


図-2 粉じん測定結果

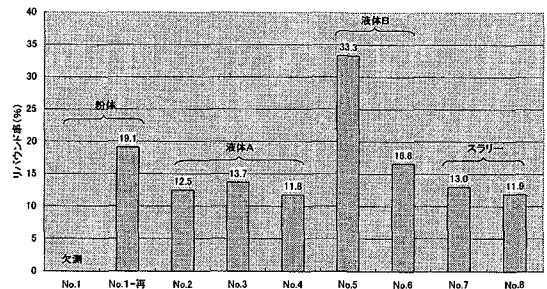


図-3 リバウンド測定結果

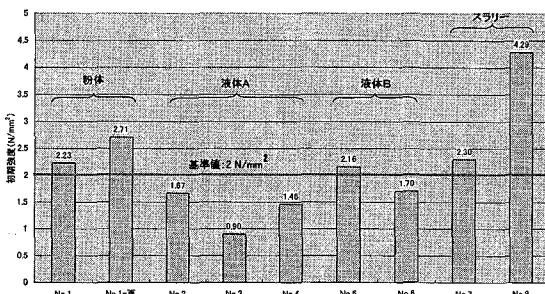


図-4 材令3時間強度結果

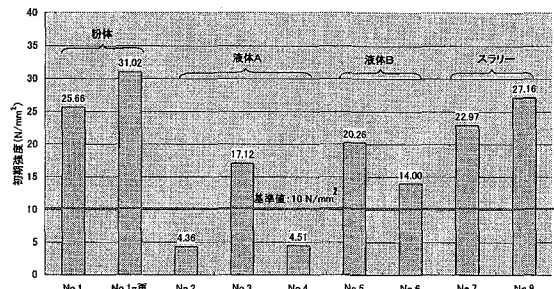


図-5 材令24時間強度結果

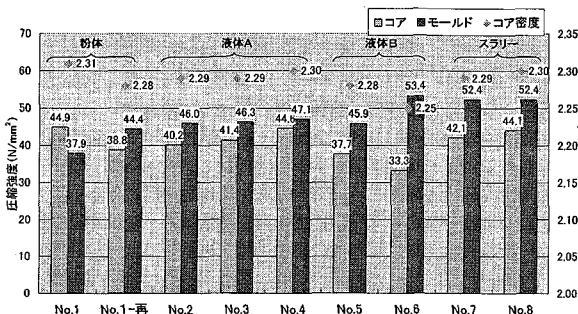


図-6 材令28日強度結果

3. 追加試験

比較試験の結果から、アルカリフリー液体急結剤は粉じんやリバウンドに良好な結果をもたらすが、初期強度については基準値を満足しないことが判明した。

試験結果から液体急結剤としては改質アルミニウム化合物（液体B）を、高性能減水剤としてポリグリコールエステル誘導体（高性能減水剤A）を選定し初期強度を確保するため、配合のトライアルを行った。表-5に示すように、No. 1-1~No. 4については単位セメント量を一定とし、単位水量の減少と急結剤の添

加率を増加した。その結果、

表-6に示すように、強度・施工性とも満足する結果は得られなかった。そこで、単位水量を極限の180kg/m³、セメント量を480kg/m³にすることで、3時間強度をほぼ満足する結果が得られた。

4. 夏季配合

表-5 試験配合一覧表

配合	W/C (%)	s/a (%)	(kg/m ³)				急結剤 (%)	混和剤 (%)
			W	C	S	G		
No. 1-1	42.2(46.2)	65	190	450	1068	580	8.0	1.9
No. 1-2	42.2(46.5)	65	190	450	1068	580	8.5	1.9
No. 2-1	41.1(45.4)	65	185	450	1075	584	8.5	1.9
No. 2-2	41.1(45.6)	65	185	450	1075	584	9.0	1.9
No. 2-3	41.1(45.9)	65	185	450	1075	584	9.5	1.9
No. 3	41.6(46.1)	65	187	450	1073	583	9.0	1.6
No. 4	40.0(44.5)	60	180	450	1002	673	9.0	1.6
No. 5	37.5(41.7)	60	180	480	987	663	9.0	1.8
夏季配合	38.9(43.4)	57.5	175	450	968	720	9.0	1.8

表-6 追加試験結果

配合については表-5に示すように、単位セメント量を480kg/m³から450kg/m³と30kg少なくするため、水セメント比が小さくなることを考慮して、細骨材率を2.5%小さい57.5%とし、単位水量を5kg少ない175kg/m³とすることにより水セメント比の低下を少なくした。

その結果、フレッシュコンクリートについては、細骨材率が小さくなったことにより

り現行配合と比べると粗骨材が若干多いように感じられるものの、フレッシュ性状としては良好であった。また、粗骨材が多い分、吹付けコンクリートのはね返り率は少し多いように見受けられるが、付着性や初期強度、28日強度などについては単位セメント量480kgと比較しても、ほぼ同等であった。

5. 粉じん低減剤との比較試験

(1) 配合

液体急結剤を用いた配合、粉体急結剤を用いた従来の高強度吹付けコンクリートおよびこれに粉じん低減剤を使用した配合の計3種類について粉じん低減効果、強度発現特性の比較検証を行なった。表-7にその配合を示す。

表-7 配合一覧表

配合種別	水セメント比	細骨材率	単位量 (kg/m ³)						急結剤
	W/C	s/a	水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤	粉じん低減剤	
	(%)	(%)	W	C	S	G	C×%	C×%	
高強度	45.0	59.1	203	450	952	663	C×0.6	—	C×10
高強度+低減剤	45.0	59.1	203	450	952	663	C×0.7	C×0.08	C×10
液体急結剤	37.5※1	60.0	180	480	987	663	C×1.4	—	C×9.5

注) ※1：アルカリフリー液体急結剤に含まれる水を考慮した水セメント比は42.3%となる

(2) 粉じん測定

① 測定方法

図-7に粉じん濃度測定の配置図を示す。今回の試験は、材料のみによる粉じん低減効果を把握するために、換気を停止させて換気の影響を排除した条件下で粉じん量の測定を行なった。また、高強度配合および液体急結剤を用いた配合については、現状把握の観点から換気を稼働させた状態についても測定した。

② 換気停止時の粉じん濃度

図-8に換気停止時における粉じん濃度測定結果を示す。なお、図中の破線は、50m地点における粉じん濃度目標値（ $3\text{mg}/\text{m}^3$ ）である。粉じん低減剤や液体急結剤を用いた配合は、10m地点以外では吹付け作業位置からの距離による差異がなく、粉じんの低減効果が認められる。なお、10m左側が異常に高いのは、吹付けシステムに装備されているコンプレッサから排出される熱風の位置が、測定地点の近傍であったことが要因の一つとして考えられる。

③ 換気稼働時の粉じん濃度

図-9に換気稼働時における粉じん濃度測定結果を示す。換気を稼働させることにより、高強度配合では粉じん濃度の高い傾向が顕著である。また、液体急結剤の配合は高強度配合に比べて、粉じん濃度が半分程度の値であることが確認できた。

(3) 強度特性

① 試験方法

試験方法を表-8に示す。試験は、各配合で2回ずつ行った。なお、供試体は箱型枠に吹付けたものをサンプリングしたものであるため、実施工の吹付けコンクリートとの強度発現の違いを把握するために現位置試験結果との比較も行った。

② 材令3時間における強度

材令3時間までの強度発現を図-10に

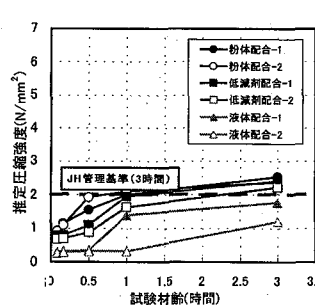


図-10 材令3時間における強度

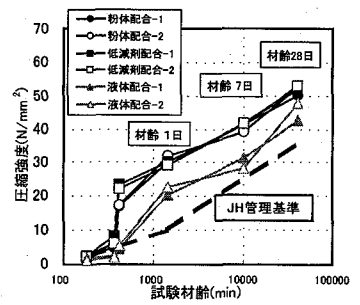


図-11 長期強度

③ 長期強度

長期強度の強度発現を図-11に示す。いずれの配合とも基準強度を十分満足している。

④ 供試体と原位置との比較

供試体と原位置での比較については、材令3時間および1日とも顕著な傾向は認められなかった。液体急結剤の配合の3時間強度については供試体では基準強度を若干下回ったのに対し、原位置では3時間の基準強度を満足

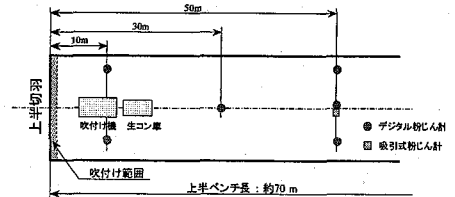


図-7 粉じん濃度測定の配置図

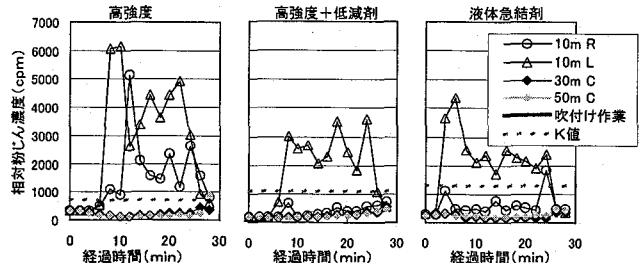


図-8 粉じん濃度測定結果（換気停止時）

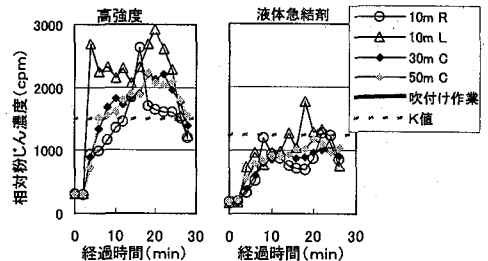


図-9 粉じん濃度測定結果（換気稼働時）

表-8 試験方法

試験種別	材令	試験方法	養生条件
初期強度(針入)	5,10,30min	ASTM C403に準拠	坑内養生(気中養生)
初期強度(ピン貫入)	1,3,6,12,24hr	JHS 726	坑内養生(気中養生)
長期強度試験	7日,28日	JIS A 1107準拠 試験体採取:JSCE-F 561	標準水中養生

する結果となった。これは、養生温度が原位置（切羽）の方が高い環境温度であったためと考えられる。

6. 施工実績

(1) 粉じんについて

実施工における粉じん測定結果を図-12に示す。粉体急結剤による施工時より、液体急結剤の方が粉じん濃度が低いことが分かる。液体急結剤による施工時では、おおむね $2\text{mg}/\text{m}^3$ 以下であり、目標値である $3\text{mg}/\text{m}^3$ を満足する結果となった。

(2) 強度について

① 3時間強度および超初期強度

実施工における3時間強度結果を図-13に示す。粉体急結剤による施工時の方が、ばらつきはあるものの高い強度を示している。液体急結剤は $2.1\sim 2.4\text{N}/\text{mm}^2$ と粉体急結剤よりは低い値を示しているものの安定した結果となった。これは、液体急結剤に自硬性がないため、その強度がコンクリート自体の強度発現に起因するためであると考えられる。また、季節による変動は大きく見受けられないが、コンクリート温度の高い夏場では、超初期における強度の立ち上がりは若干早い。

② 1日強度

実施工における1日強度結果を図-14に示す。1日強度については、急結剤の違いによる大きな差異は認められず、そのばらつきは大きい。これは、急激に強度の立ち上がるポイントが違うためであると考えられる。

③ 28日強度

実施工における28日強度結果を図-15に示す。施工前半においてはばらつきが大きい、後半においては $40\sim 43\text{N}/\text{mm}^2$ と安定する結果となった。

7. まとめ

液体急結剤は、低粉じん・低リバウンドを実現でき、坑内環境の改善に大きく役立つと考えられる。しかし、液体急結剤を使用しても、吹付け時の圧送エア量の管理は重要である。また、ベースコンクリートの管理、冬季における液体急結剤の温度管理等も重要である。

上記の管理のもと、作業坑（ 42m^2 ）のうち約200mおよび本坑（ 180m^2 ）の全線2000m以上に渡り、液体急結剤を用いて掘削を完了した。今後この実績を基に、液体急結剤が多くの現場に水平展開されることを期待する。

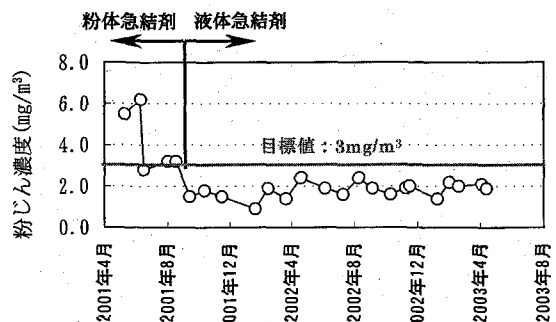


図-12 粉じん測定結果

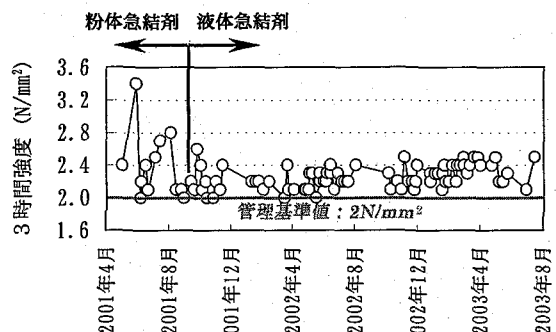


図-13 3時間強度結果

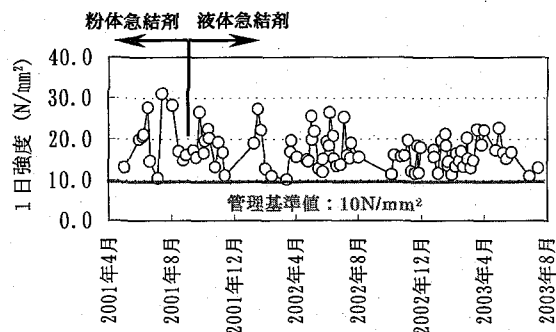


図-14 1日強度結果

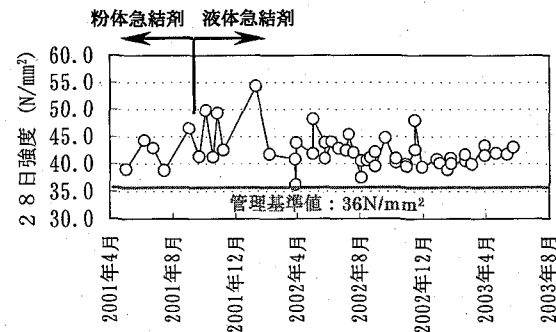


図-15 28日強度結果