

セメント水ガラス注入材の 凝固時間の制御に関する研究

秋田 勝次¹・岩崎 武²・西村 直樹³

¹正会員 鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 新幹線部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)
E-mail:k.akita@jr-tt.go.jp

² 鉄道・運輸機構 北陸新幹線建設局 (〒380-0936 長野県長野市大字中御所字岡田45-1)

³正会員 鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 新幹線部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

セメント水ガラス注入材は、日本に注入工法が導入された初期の段階から中心的な注入材料として広く使用されてきたが、セメントスラリーの濃度(W/C)で調整する以外にゲルタイムをコントロールすることが難しいという欠点を有していた。ゲルタイムを長くしようとするセメントスラリーのW/Cを大きくする必要があり、グラウト強度の低下を招くこととなる。このことが近年、セメント水ガラス注入材の使用が少ない一因ともなっている。今回、ゲルタイムを自由にコントロール可能な遅延剤について、リン酸塩が有効であり、グラウト強度も十分保持されていることを確認し、現位置においても遅延剤の注入試験を実施した結果、セメント水ガラス注入材の凝固時間の制御に関する良好な知見が得られたのでここに報告する。

Key Words : retarder for cement-water glass grout, gel time control and prolongation, phosphate

1. まえがき

セメント水ガラス注入材は、日本において注入工法が使用され始めた1950年代初期の段階から材料の品質の良さ、施工性および経済性、更には環境性から注入工法の中心的な注入材料として多岐に渡り多量に使用されてきた。なかでも青函トンネルの建設を契機として、種々のセメント側および水ガラス側の因子の変化によるグラウト特性が検討され、ブレン値 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ の微粉末で高炉スラグを多く添加した高炉コロイドセメントを用いたセメント水ガラス注入材の開発¹⁾により耐久性も良質となり、一段と広範囲に使用されることとなった。

しかしながらセメント水ガラス注入材は、ゲルタイムのコントロールが、水ガラスのモル比や高炉スラグの添加量等で可能ではあるものの、材料手配が煩雑で施工時の対応が難しく、主にセメントスラリーの濃度(W/C)を調整する方法がとられてきた。実際の注入施工ではW/Cの大きいもの(ゲルタイムの長いもの)から注入を開始し、注入状況によりW/Cの小さいもの(ゲルタイムの短いもの)へ変更する方法がとられている。セメント水ガラス注入材は、ゲルタイムが短いために注入圧が上昇し易く、W/Cの大きい(セメントスラリーを薄めにする)配合の適用が多く発生し、結果的にグラウトの品質を低下させなければならないこととなる。最近ではこのこと

も一因となり、セメント水ガラス注入材の使用が、必ずしも多くない実態となっている。

セメント水ガラス注入材は、強度とゲルタイムの関係が相反するため(ゲルタイムを伸ばす方向においては強度が低下する傾向)、強度等の品質を保持しながら適切なゲルタイムの管理が可能な遅延剤の開発は、重要な課題であった。また、最近では、二重管ダブルパッカー方式の注入の適用が多くなり、ゲルタイムの長さは、単管注入での数分オーダーのものから変わって10分以上のものを要求されることが多くなり、数十分にも達する凝固時間のコントロールも可能な遅延剤の開発が望まれていた。

しかしながら、セメント水ガラス注入材の場合、他の注入材料と異なり適切な遅延剤がなかなか得られずにいたが、遅延剤としてリン酸塩が極めて効果的であることを青函トンネル注入材料開発委員会(昭和50年度)において示唆され、試験を実施している。(青函トンネルにおいてはリン酸塩の耐海水性に関する検討を実施していないため、リン酸塩を使用した遅延剤の実施工には至っていない。)そのなかでリン酸ナトリウムが有効なことが判明しており、その成果を整理・検討し、現位置で遅延剤を使用したセメント水ガラス注入材の注入試験を実施した。その結果、セメント水ガラス注入材の凝固時間の制御に関し良い知見が得られたのでここに報告する。

2. セメント水ガラス注入材の特性と施工

セメント水ガラス注入材の特性を示す材料試験としては、青函トンネル建設時に広範に行われ、青函トンネル注入材料開発研究報告書²⁾（昭和47年3月31日～昭和51年31日）としてまとめられている。そのなかで、実験計画法にのっとり実施された試験から、主要な特性を示すと次のとおりである。

(1) セメント水ガラス注入材の特性

水ガラスのモル比を4水準、セメントミルクのW/Cを3水準、水ガラスのセメントミルクに対する混合比（容積比）を3水準とり、セメント水ガラス注入材のゲルタイムと圧縮強度について試験した。

a) 因子と水準

セメントの種類

セメントは日鐵セメント社製

普通ポルトランド、高炉(B種)、高炉コロイド

水ガラスは日本化学工業社製（粘度80CP）

水ガラスのモル比（M.R；水ガラスの主成分である $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ の分子比）

A1=1.7, A2=2.2, A3=2.7, A4=3.2の4水準

セメントミルクのW/C

B1=100%, B2=150%, B3=200%の3水準

水ガラスのセメントミルクに対する混合比（容積比）

C1=0.6, C2=0.8, C3=1.0の3水準

ゲルタイムと圧縮強度（ホモゲル強度）を特性値とし、圧縮強度試験用の供試体は $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の3本とし、材齢は3日、*7日、28日、91日、182日、365日とした。なお、ゲルタイムの測定方法についてであるが、所定量のセメントをポリビーカーにとり、所定量の水を加えて30秒間混合し、これに所定量の水ガラスを加えて攪拌し、流動性がなくなった時点で、水ガラスを加えた時点からの経過時間をゲルタイムとする。ゲルタイムは3回測定しその平均を採用する。

（※高炉コロイドセメントは微粒子セメントであり、初期強度が高いという特性を確認するため材齢7日を一部実施した。）

b) 試験結果と考察

ゲルタイムについては、図-1のとおりである。モル比の影響は、高炉コロイドセメント、普通ポルトランドセメント及び高炉(B種)セメントのどのセメントの場合も同様に、モル比が小さくなるとゲルタイムは長くなる。

セメントミルクのW/Cの影響は、セメントの種類にかかわらず同様であり、W/Cが大きくなるとゲルタイムは長くなり、W/Cが小さくなるとゲルタイムは短くなる。

水ガラスのセメントミルクに対する混合比の影響は、

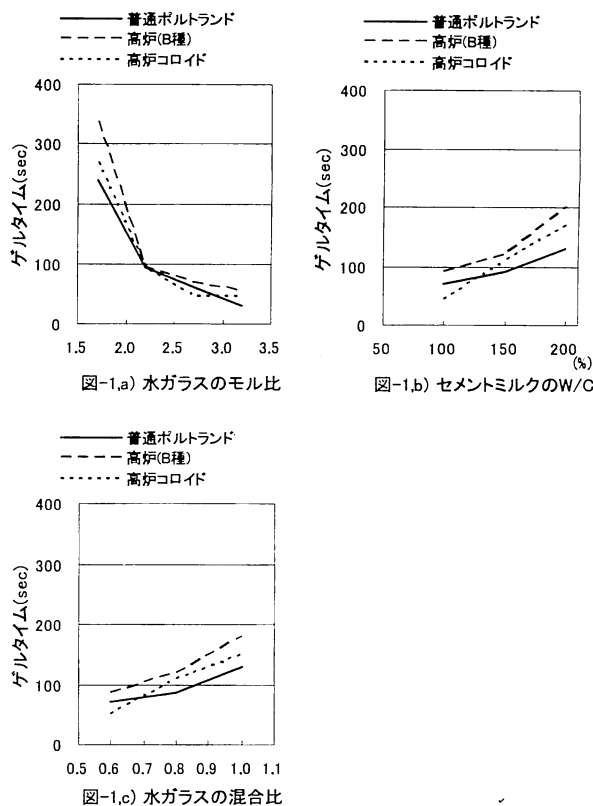


図-1 因子A～Cによるゲルタイムの変化

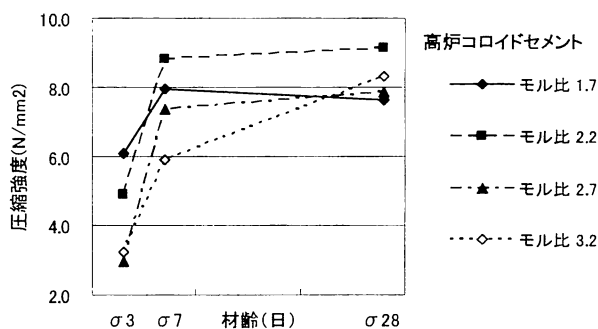


図-2 水ガラスのモル比と圧縮強度

セメントの種類にかかわらず混合比が小さくなるとゲルタイムは短くなる。

圧縮強度試験の結果は、図-2, 3, 4のとおりである。図-2に高炉コロイドセメントのモル比と圧縮強度について示すが、材齢3日～28日におけるセメント水ガラス注入材の圧縮強度は、水ガラスのモル比の影響を受け、モル比の小さいほうが強度は大きくなる。しかし、モル比1.7の場合のみ材齢3日は他に比べ高いものの、材齢7日でピークとなり、材齢28日では強度が多少低下している。

図-3に示すように、圧縮強度はW/Cの影響が大きく、W/Cが小さいと強度は大きく、W/Cが大きいと強度は小さくなる。また、混合比が低下すると強度は大きくなる。

図-4は、高炉コロイドセメント、普通ポルトランドセ

メントおよび高炉セメント(B種)を用いたセメント水ガラス注入材を淡水中で養生した場合の圧縮強度の総平均を比較図示したものである。セメントの種類で大きな違いはなく、概ね同程度の強度を示しているが、材齢1年で比較すると、高炉スラグが添加された高炉コロイドセメントと高炉セメント(B種)の長期材齢は大きい。

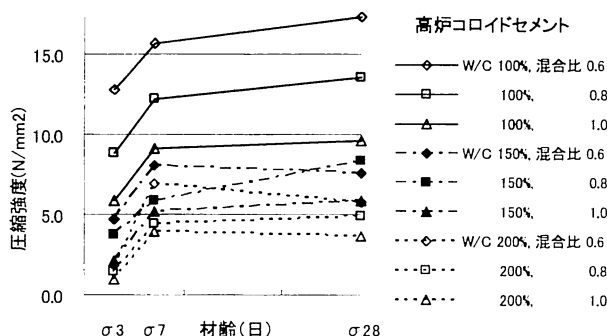


図-3 セメントミルクのW/Cと水ガラスの混合比と圧縮強度

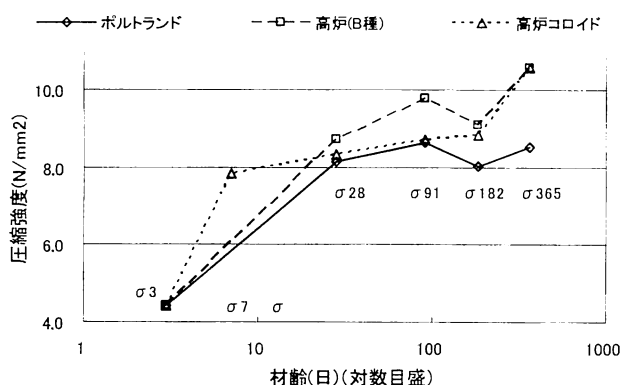


図-4 各種セメントを用いた圧縮強度

(2) セメント水ガラス注入材の施工

青函トンネル工事では、海底トンネルの止水・補強という特殊条件下のグラウト施工に適合し、かつ耐海水性の大きいグラウトを開発するため、セメント水ガラス注入材のこれらの特性を把握し、高炉スラグを55%混入し耐海水性を向上させた高炉コロイドセメントを用い、ブレーン値 $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ 、モル比2.2の水ガラス(粘度 80CP)と組み合わせた注入材を開発し、実施工に適用している。

青函トンネルの注入施工³⁾にあたっては、図-5に示すように湧水量と注入の初期圧の関係からセメントスラリーの注入開始濃度(W/C)を300%あるいは200%と定め、注入対象地山の透水の状況から注入濃度を上げていく方式をとっている。このように高压湧水下のセメント水ガラス注入材は、ゲルタイムのやや長いものから短いものへ可変させるのが一般的であるが、このことは、適切な遅延剤がないこと等のためにセメントスラリーの濃度を変える以外に適度にゲルタイムをコントロールできないと

いうセメント水ガラス注入材の特性からきている。

このため、強度等の品質を保持しながらゲルタイムの管理が可能な遅延剤の開発は、セメント水ガラス注入材において重要な課題であった。本研究においては、まず淡水下において遅延剤の効果が十分であり、その品質も問題ないものが開発可能かという点について検討を進めるものとしたため、耐海水性については今回扱っていない。

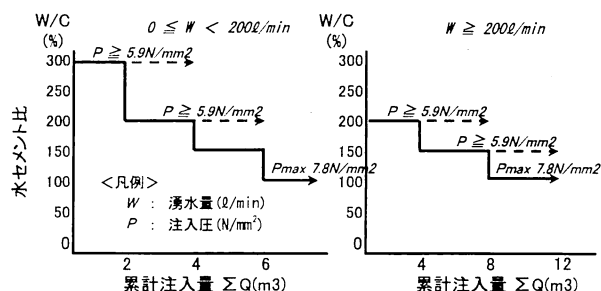


図-5 注入圧の変更パターン(青函トンネルの例)

3. セメント水ガラス注入材の遅延剤開発

(1) 適合する遅延剤

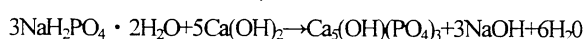
コンクリートの硬化に際し、リン酸塩系材料等が難溶性のカルシウム塩を形成してセメント粒子を被覆し、水和反応を遅らせる効果を発揮するという知見⁴⁾から、セメント水ガラス注入材に遅延効果の可能性があると考えられた無機系混和材料について、予備試験を実施した。

その結果、グルコン酸やホウ酸ナトリウムについては効果がなく、リン酸系のリン酸アンモニウムやリン酸カリウムは効果が小さく、リン酸ナトリウム系のうちリン酸3ナトリウムよりもリン酸1ナトリウムおよびリン酸2ナトリウムが大きな遅延効果があることが判明した。

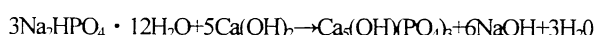
リン酸ナトリウム系は、食品添加物としても使用されているものであり、安全性の高いものであるという利点もあわせて持っている。ここでは、リン酸ナトリウムのなかで、特に著しい効果があったリン酸1ナトリウムおよびリン酸2ナトリウムに着目して、セメント水ガラス注入材の遅延剤としての効果について述べる。

リン酸1ナトリウムおよびリン酸2ナトリウムの遅延効果⁵⁾については下記のとおりセメントスラリーと反応し、ハイドロキシアパタイト($\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$)が生成され、未反応のセメント粒子を被覆することで、水和反応が遅れると考えられている。

リン酸1ナトリウムでは、



リン酸2ナトリウムでは、



(2) 遅延剤（リン酸塩）を添加してゲルタイム、強度の影響を調べる試験

セメント水ガラス注入材の遅延剤として、ゲルタイムを所要の範囲で変えることができ、しかも適切な強度を保持することができるかどうかについて、リン酸1ナトリウム、2ナトリウムを用いて次の試験を行った。なお、リン酸ナトリウムには多くの水和化合物が存在するが、すべて無水換算して試験を実施している。

a) 試験内容

水ガラスのモル比 2.2, 3.2 (粘度80cP)

W/C 100%, 200%

混合比 1.0 水温 20℃

セメント 普通ポルトランド

添加剤 リン酸1ナトリウム(2水塩), リン酸2ナトリウム(12水塩)

添加量(%) (セメント重量に対して) (無水換算)

水ガラス2.2については, 0.0, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0

水ガラス3.2については, 0.0, 0.7, 1.5, 1.75, 2.0

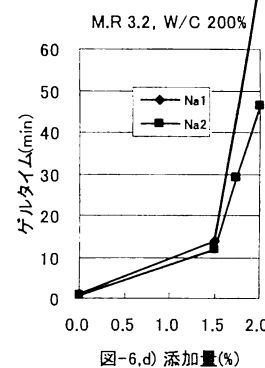
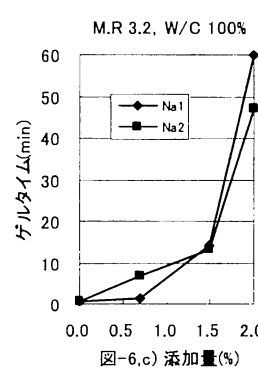
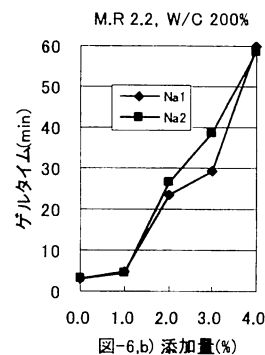
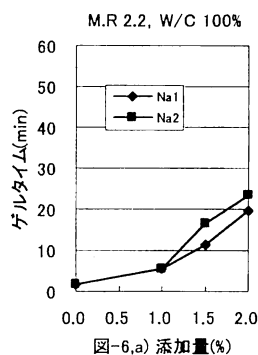
(最大で60分程度のゲルタイムを得るべく予備試験を実施して確認した結果, 水ガラス2.2と3.2で添加量を変更している。)

ゲルタイムと圧縮強度を特性値とし, 供試体はφ5×10cmを3本, 材齢は淡水養生で28日, 91日, 182日とした。結晶のリン酸ナトリウムを水で溶解してからセメントに入れ, セメントスラリーをつくり水ガラスと混合する。

b) 試験結果と考察

セメント水ガラス注入材は, 水ガラスの粘度が80cP, 普通セメントのW/C が100~200%の場合でグラウト粘度は10~20cPという特性を有し, ゲル化するまで低粘性で流動性は変化しない。注入材はゲル化することで急激に粘性が変化して固結するものであり, ゲルタイムが長い, すなわち低粘性の状態が長く継続することは注入量の確保に重要な要素であることから, ゲルタイムに着目した。

ゲルタイムの試験結果は, 図-6のとおりである。モル比2.2の水ガラスに添加した場合, リン酸1ナトリウム、2ナトリウムどちらもW/C100%, 200%ともに1.0%添加まではゲルタイムの伸びは少ないが, 1.0%を過ぎると急激に伸び始め添加量2%では20分以上となる。遅延剤の効果はW/C100%および200%も同様な傾向を示すが, 一部実施した200%の4.0%添加の場合, ゲルタイムは60分にも達する。モル比3.2の水ガラスに添加した場合, W/C100%, 200%に対して, リン酸1ナトリウム、2ナトリウムとも1.5%添加まではゲルタイムは徐々に伸びるが, 1.5%以上になると急激に伸び, 特に1ナトリウムでは2.0%添加付近で60分以上になる。

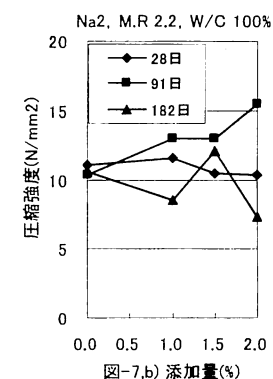
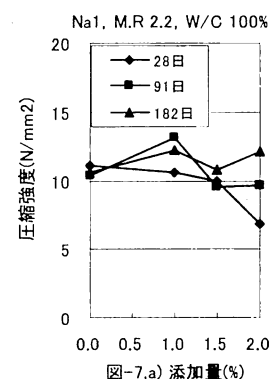


(※ 図中の記号は, Na1: リン酸1ナトリウム, Na2: リン酸2ナトリウム, M.R.: モル比)

図-6 添加量とゲルタイムの変化 (普通ポルトランドセメント)

圧縮強度は, リン酸1ナトリウム, リン酸2ナトリウムどちらを添加した場合でも, 無添加のものと同様に材齢28日, 91日と養生日数の経過につれて, バラつきはあるが概ね強度が増加しており, また, 添加量が多くなるにしたがい数値のバラつきがみられ, 強度は材齢によっては低下したり変動はあるものの, 概ね無添加のものと変わらない傾向にある。

材齢182日においてもバラつきはあるが概ね強度低下はみられず, モル比2.2, W/C200%などでは添加しない場合よりも多少増加傾向にある。他のものについてもバラつきはあるが概ね無添加のものと同等かそれ以上の強度を示しており, 遅延剤添加による有意な影響はみられない。



(※ 図中の記号は, Na1: リン酸1ナトリウム, Na2: リン酸2ナトリウム, M.R.: モル比)

図-7 添加量と圧縮強度 (普通ポルトランドセメント)

W/C 100% (一部の試験で200%) 混合比 1.0
セメント 高炉コロイドセメント

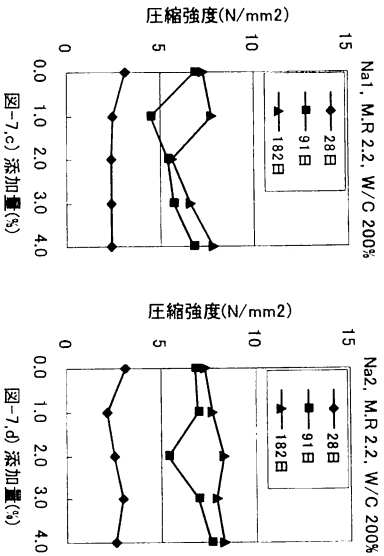


図-7.c) 添加量(%)

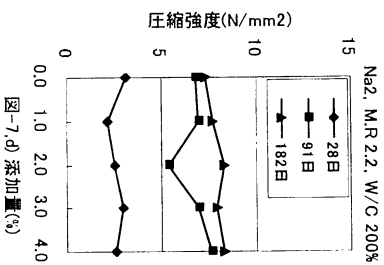


図-7.d) 添加量(%)

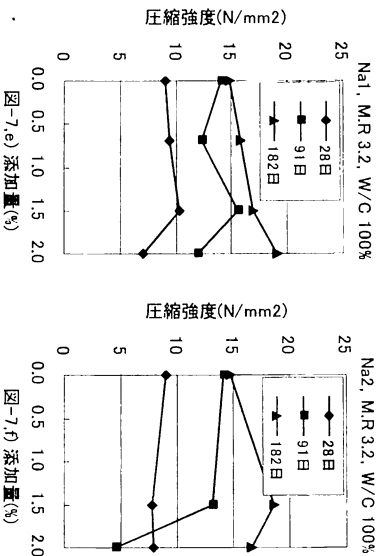


図-7.e) 添加量(%)

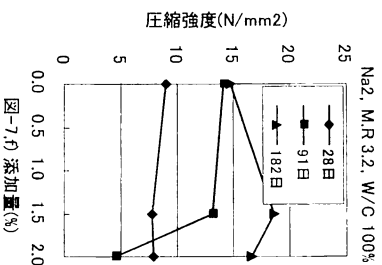


図-7.f) 添加量(%)

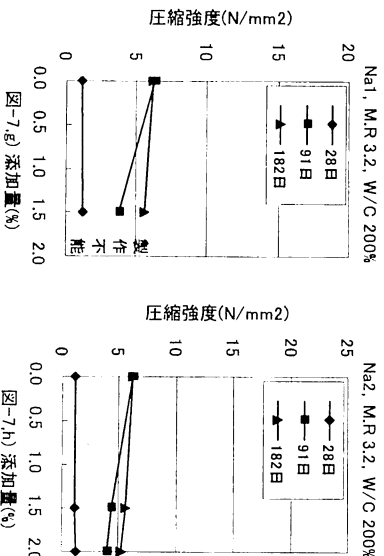


図-7.g) 添加量(%)

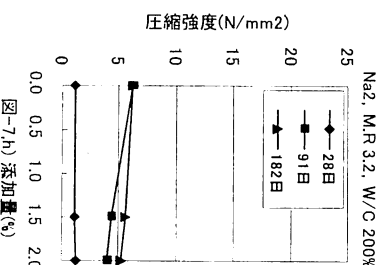


図-7.h) 添加量(%)

(※ 図中の記号は、Na1:リン酸ナトリウム、Na2:リン酸ナトリウム、M.R:モル比
図-7(続き) 添加量と圧縮強度 (普通ポルトランドセメント)

4. 実用化に向けたリン酸2ナトリウムの基礎試験

セメント水ガラス注入材の遅延剤としてリン酸ナトリウムの効果が認められたが、実用化に際し、リン酸2ナトリウムについてさらに、ブレーン値が $6,000\text{cm}^2/\text{g}$ と高く、高炉スラグを55%添加し耐久性の高い高炉コロイドセメントを主に用いて、次の配合条件で種々の基礎試験を行った。

水ガラスのモル比2.2(粘度80CP)

(i) セメントスラリーと結晶の遅延剤を同時混合した場合のゲルタイム

セメント重量に対して1%(無水換算)のリン酸2ナトリウム(水塩)の結晶をセメントと同時に水の中で混合し、攪拌時間によるゲルタイムの変化を調べた。

攪拌時間を20分、40分、60分、80分、120分と設定し、セメントスラリーを汲み取り、水ガラスを加えてゲルタイムを測定する。攪拌機は往復反転式とした。その結果を表-1に示す。

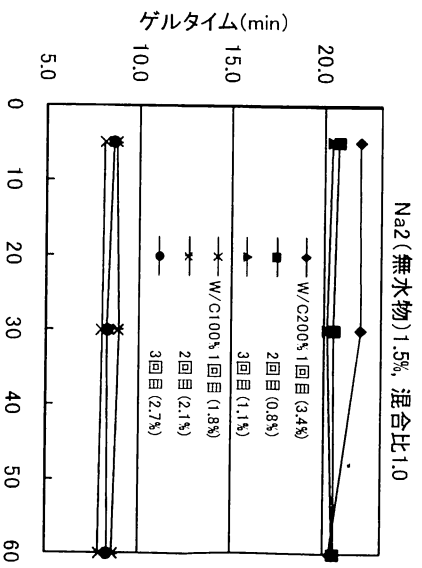
表-1 セメントスラリーの攪拌時間とゲルタイム

攪拌方法	攪拌時間 (min)	ゲルタイム(min,sec)				
		1回目	2回目	3回目	平均	
遅延剤とセメントを同時混入	0	1'26"	1'20"	1'24"	1'23"	
	20	1'46"	1'40"	1'44"	1'43"	
	40	1'50"	1'45"	1'54"	1'50"	
	60	1'58"	1'59"	1'56"	1'58"	
	80	2'03"	2'05"	2'03"	2'04"	
遅延剤を溶解後、セメントを混入	120	2'15"	2'16"	2'15"	2'15"	
	0	4'35"	4'29"	4'25"	4'30"	

試験の結果、遅延剤を水で溶解してからセメントを入れたゲルタイム(4'30")に比べ小さく、半分以下のゲルタイムとなっている。

(2) 遅延剤水溶液にセメントを混合した場合の安定性

30 入り容器の中にリン酸2ナトリウムを溶解させた遅延剤水溶液を入れ、攪拌しながらセメントを徐々に仕込み、セメントスラリー状になった状態から、攪拌時間を5分、30分、60分の時にスラリーを汲み取り（この時、攪拌機は停止しない）水ガラスと混合しゲルタイムを測定した。



(※ 変動係数は3回のゲルタイムの平均値に対する変動を示す。)
図-8 セメントスラリー攪拌時間とゲルタイム

仕込みごとに攪拌時間を5分、30分、60分について各3点ずつ試験を実施した。試験は1日に1回ずつ3日にわたって行い、その結果を図-8に示す。

試験によるばらつきと攪拌時間によるばらつきは共に変動係数が5%以内に収まっており、安定したゲルタイムとなっている。

(3) 攪拌機の違いによる溶解時間

リン酸2ナトリウム無水物と7水塩を用いて、攪拌機の種類による溶解時間の違いについて試験を行った。溶解時間の計測は、攪拌機を回転させながらの計測のため、分単位で確認するものとした。その結果を表-2に示す。

遅延剤 リン酸2ナトリウム(無水物, 7水塩)

表-2 攪拌機の種類と溶解時間

攪拌機の種類	リン酸2ナトリウム	溶解量(%)	溶解時間
往復反転式	無水物	1.0	5分
	7水塩	1.0	2分
回転式	無水物	1.0	8分
	7水塩	1.0	4分

温度は20±1℃、溶解水は200ml、繰返し回数は3回

(4) 遅延剤水溶液の安定性

リン酸2ナトリウム7水塩(1.5%無水換算)の水溶液をつくり、1週間放置させてゲルタイムを測定した。その結果を図-9に示す。

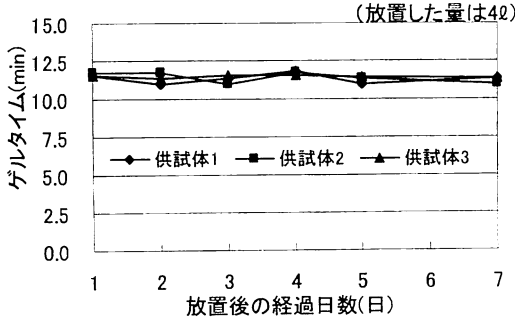


図-9 放置後の経過日数とゲルタイム

リン酸2ナトリウムは、ゲルタイムが安定しており、品質は十分確保できるが、図-10に示すとおりリン酸1ナトリウムと比べ溶解度⁹⁾が低いので、現場施工にあたっては、溶解度を考慮した使用を考える必要がある。

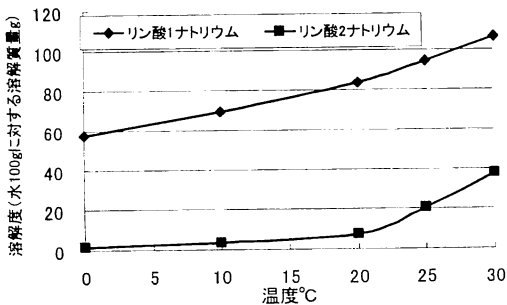


図-10 リン酸1ナトリウム、リン酸2ナトリウムの溶解度⁹⁾

(5) 考察

a) セメントスラリーと結晶のリン酸2ナトリウムを同時混合した場合においては、結晶が溶解しにくく遅延効果が十分発現せず、攪拌時間を120分に延ばしても遅延効果は小さい。

b) 遅延剤水溶液にセメントを混合した場合の遅延効果は、5分、30分、60分のどの攪拌時間においても変動係数が小さく安定しており、3日間にわたり試験した結果も安定した遅延効果が得られている。

c) 攪拌機の違いによる溶解時間は、回転式より往復反転式の機械のほうが溶解時間は概ね半分で済むが、無水物と含水塩では大きな差があり、無水物を現場で溶解させるには手間がかかることが推察される。また、無水物は水分を吸収し固化しやすいのでトンネル内での保存にも問題となる可能性があり、含水塩を使用したほうが望ましい。

d) リン酸2ナトリウム水溶液を1週間放置させ試験した結果では、1日目から7日目まで1週間経過してもゲルタイムの変動は小さく安定している。また、図-10に示すように、リン酸2ナトリウムの溶解度はリン酸1ナトリウムの溶解度に比べ低いので、遅延剤水溶液として現場で使用する場合には、溶解度に留意する必要がある。

5. 実用化に向けたリン酸1ナトリウムの基礎試験

図-10に示すようにリン酸1ナトリウムは溶解度が高く遅延剤水溶液としての活用方法もあるため、その実用化について次の配合条件で試験を行った。

水ガラスのモル比2.2、一部3.2(粘度80CP)

W/C 100%, 混合比 1.0

セメント 高炉コロイドセメント(一部試験で、普通ポルトランド、高炉(A種)、高炉(B種))

遅延剤 リン酸1ナトリウム30%水溶液(無水換算)

リン酸1ナトリウム(2水塩)30%水溶液(無水換算)を作り、必要な量だけピペットに採り、水と混合してからセメントを投入し、セメントスラリー状になってから水ガラスを加えてゲルタイムを測定する。

(1) 遅延剤水溶液にセメントを配合した場合の安定性

30 入りの容器の中にリン酸1ナトリウム30%水溶液を2%入れ、往復反転式の攪拌機を用いて水と混合してからセメントを投入し、セメントスラリー状になってから所定の攪拌時間になったらセメントスラリーを汲み取り、水ガラスを加えてゲルタイムを測定する。汲み取り中は攪拌機を停止しない。汲み取り時間は、0分、5分、15分、

30分、60分と設定した。その結果を表-3に示す。

表-3 セメントスラリーの攪拌時間とゲルタイム

攪拌時間	0分	5分	15分	30分	60分
ゲルタイム	3'24"	3'24"	3'22"	3'31"	3'24"
変動係数	1.2%	2.5%	1.0%	1.5%	1.6%

溶液濃度30%、セメントスラリー量に対し2%、温度25℃、
ゲルタイムは3回の平均値、変動係数は3回のゲルタイム
の平均値に対する変動を示す

混合水に作製済みのリン酸1ナトリウム30%水溶液を入れ、セメントを混合した場合のゲルタイムは、リン酸2ナトリウムと同様、攪拌直後(0分)から5分、15分、30分、60分とも安定した遅延効果が得られた。

(2) 遅延剤水溶液の添加方法の違いによる遅延効果

リン酸1ナトリウム30%水溶液とセメントとの添加方法について下記のとおり方法①～③を設定し、添加方法の違いによるゲルタイムの相違を調べる試験を行った。

添加方法

- ①セメントスラリーにリン酸1ナトリウム30%水溶液を添加する
- ②リン酸1ナトリウム30%水溶液を水に添加後、セメントを加える
- ③リン酸1ナトリウム30%水溶液を水に添加後、その液をセメントに入れる

表-4 添加方法によるゲルタイムの差

添加方法	溶液	セメント スラリー量 に対し	ゲルタイム	変動係数
方法①	濃度30% 温度20℃	3%	4'09"	5.1%
方法②			10'08"	1.3%
方法③			9'44"	3.5%

ゲルタイムは3回の平均値、変動係数は3回のゲルタイムの平均値に対する変動を示す

遅延剤水溶液の添加方法の違いによる試験結果は、表-4のとおりである。リン酸1ナトリウム30%水溶液をセメントスラリーに直接添加すると、ゲルタイムの遅延効果は小さい(方法①)。リン酸1ナトリウム30%水溶液を水に添加後にセメントを加える方法(方法②)と、リン酸1ナトリウム30%水溶液を水に添加後、その液をセメントに入れる方法(方法③)のどちらも遅延効果が安定して得られた。現場施工を考えると、方法②が現実的であると考えられる。

(3) セメントの種類による遅延効果

前項(2)の方法②により、セメントの種類(高炉コロイド、普通ポルトランド、高炉(A種)、高炉(B種))の違いによるゲルタイムの試験を行った。

表-5 セメントの種類とゲルタイム

溶液濃度	30%	高炉 コロイド	普通 ポルトランド	高炉(A種)	高炉(B種)
溶液温度	20℃				
セメントスラリー量 に対し2%	ゲルタイム	3'24"	3'18"	5'16"	5'19"
	変動係数	1.2%	3.9%	6.7%	5.1%
セメントスラリー量 に対し3%	ゲルタイム	10'08"	9'33"	11'18"	14'08"
	変動係数	1.3%	3.8%	1.6%	7.0%

ゲルタイムは3回の平均値、変動係数は3回のゲルタイムの平均値に対する変動を示す

その結果、表-5のとおりセメントの種類によるゲルタイムの遅延効果について、普通ポルトランド、高炉コロイド、高炉(A種)、高炉(B種)の順に効果が大きいことを確認した。

(4) 考察

リン酸1ナトリウム30%水溶液を用いて種々の試験を行った結果、次のことが明らかとなった。

a)遅延剤を添加したセメントスラリーは表-3から攪拌時間が1時間経過しても安定したゲルタイムの遅延効果が得られることを確認した。

b)遅延剤水溶液をセメントスラリーに直接添加した場合、遅延剤水溶液を水に添加する方法と比べてゲルタイムが短くなり遅延効果が小さい。これは遅延剤水溶液とセメントが局部的にしか反応しないためと考えられる。

c)セメントの種類によるゲルタイムの遅延効果について、普通ポルトランド、高炉コロイド、高炉(A種)、高炉(B種)の順に効果が大きいことを確認した。

W/C100%、混合比1.0の条件下においてゲルタイムを3～10分程度に遅延させるために必要なリン酸1ナトリウム30%水溶液は、セメントの種類により多少の違いはあるが、セメントスラリー量に対し2～3%であり、溶解時間も不要なので実用化に適切と考えられる。

6. 遅延剤を使用した現位置試験

平成 19 年に北陸新幹線飯山トンネル(板倉)工事において切羽が土砂流出した箇所の復旧注入として、二重管ダブルパッカー方式により遅延剤を使用したセメント水ガラス注入材の試験施工を行った。

(1) 試験内容

調査ボーリングの結果から土砂流出した当トンネル切羽付近には断層帯が複数確認されており、地山の一体固結改良が必要と考えられた。トンネル外周 16.8m(3R)から 22.4m(4R)の範囲については、ゆるみ地盤を地山程度の強度まで改良することを目的に固結後の強度が高い懸濁型薬液によるゆるみ地盤の粗詰め注入が必要であると判断された。

そこで粗詰め注入に使用する注入材について表-6に示すようなセメント水ガラス注入材について試験注入を行った。計画注入量は、トンネル外周 3R から 4R の注入範囲に対し注入率 20% (1,400ℓ /1 ステップ;30cm) を目標とした。二重管ダブルパッカー方式での注入によりグラウトの品質を確保するため、ステップ注入を実施した。1 ステップ長を 30cm と設定し、手前からステップ番号をつけて施工管理を行った。最終注入圧は、土砂流出箇

所への注入であることから漏水圧の 3 倍程度である 4N/mm^2 を目安として考慮し、入念な施工が可能となるよう単位注入量等を管理するものとした。

配合は、一軸圧縮強度で $q_u=1.5, 5.0\text{N/mm}^2$ 相当の W/C =300、167%の 2 パターンと、この配合に遅延剤を使用しゲルタイムを 9 分、10 分程度に延ばした 4 配合とした。遅延剤としては、本試験では溶解しやすいリン酸 1 ナトリウム(2 水塩)を使用した。

表-6 セメント水ガラス注入材の配合(1 m^3 当り)

注入材	A 液			B 液		W/C	σ_{28} 圧縮 強度	ゲル タイム
	高炉 セメント (白種)	水	遅延剤	水ガラス (モル比 3.2)	水			
	(kg)	(L)	(kg)	(L)	(L)			
①	250	418	—	250	250	167	5.0	1.5
①'	250	418	2.25	250	250			9.0
②	150	450	—	250	250	300	1.5	2.5
②'	150	450	1.3	250	250			10.0

試験位置は図-11 に示すように試験注入用の No. 1 孔、No. 2 孔でゆるみ地盤の粗詰め注入を必要とする区間を含むトンネル外周 2R から 4R の範囲とした。注入材は No. 1 孔では先端から 14m 区間について①の注入材、No. 2 孔については、先端から 15m 区間に対して、②の注入材を使用することとし、注入圧の上昇により注入不能となった場合について、その後は遅延剤を加えた配合 (①→①'、②→②') を使用することとした。

試験孔の注入は、試験注入範囲(14, 15m 区間)について手前から 30cm ずつを 1 ステップとしてステップ番号をつけて、実施した。

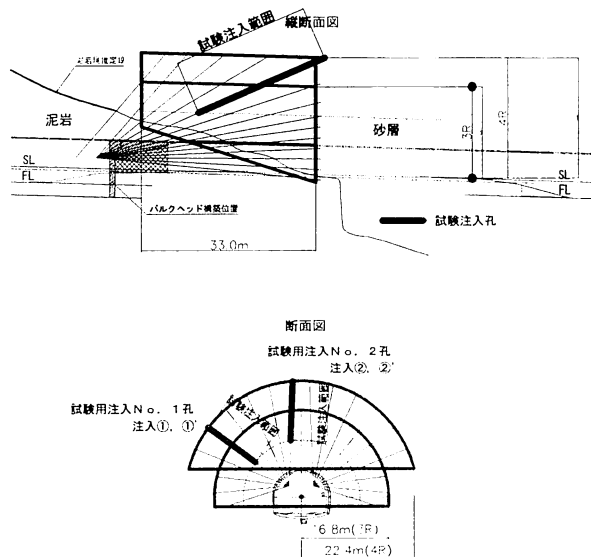


図-11 試験位置図

(2) 試験結果

試験結果は No. 1 孔の①注入では、図-12 に示すように 4, 5 ステップで注入圧が上昇し計画注入量 (注入率 20%) を実施できなかったため、6 ステップで遅延剤を加えた①'を注入した。その結果、注入圧が下降し計画量の注入を実施することができた。

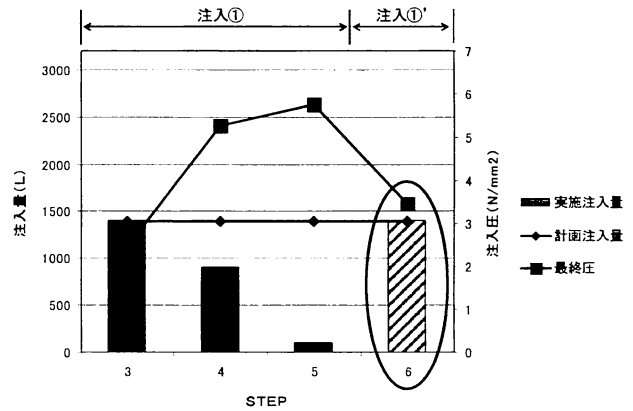


図-12 No. 1 孔(注入①, ①')の注入結果: 3~6 ステップ

左縦軸: ステップ当り注入量 (L) (1 ステップは 30cm)

右縦軸: 注入圧 (N/mm 2)

横軸: ステップ番号 (丸囲みは遅延剤の効果)

No. 2 孔の②については、図-13 に示すように 6, 7, 8 ステップと注入圧の上昇がみられ 8 ステップで計画量を大きく下回ったため、9, 10 ステップで遅延剤を加えた②'を注入した。9 ステップでは 8 ステップの影響を受けたためか注入圧に変化は無く高い状態であったが、10 ステップでは注入圧は下降し計画量を上回る注入が可能となった。

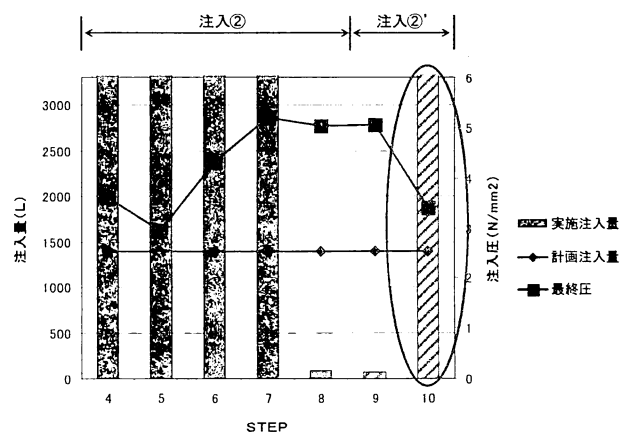


図-13 No. 2 孔(注入②, ②')の注入結果: 4~10 ステップ

左縦軸: ステップ当り注入量 (L) (1 ステップは 30cm)

右縦軸: 注入圧 (N/mm 2)

横軸: ステップ番号 (丸囲みは遅延剤の効果)

(3) 考察

本試験では、ゆるみ地盤の注入材料としてセメント水ガラス注入材のW/Cとゲルタイムを変更した配合の材料について注入量の比較を行った。その結果、次のことが明らかとなった。

ゲルタイムが1.5分の①配合は、ステップ毎で早期に注入量が低下し注入圧が上昇したが、遅延剤を使用したゲルタイムが9.0分の①' 配合では計画注入量を十分に満足し最終注入圧も低下した。

ゲルタイムが2.5分の②配合は、ステップ毎の注入で当初計画注入量を満足していたが、数ステップ後には注入圧が高くなり、注入できない状態となった一方、遅延剤を使用した②' の配合に変えることで計画注入量を確保することができた。

注入時に高圧となる原因としては、セメント水ガラス注入材の粘度上昇または固結強度が高いことに起因する部分が大きく、遅延剤を使用することによるゲルタイムの延長は、注入材の粘度を抑制し、初期強度の発現も抑えられることから計画注入量の確保に良い影響を与えているものと考えられる。

よって、セメント水ガラス注入材は遅延剤を使用しゲルタイムを制御することで、注入量の広範な制御が十分可能であると推定できる。

7. まとめ

(1) 遅延剤として、リン酸ナトリウムを使用することでセメント水ガラス注入材のゲルタイムは数分から1時間以上という広範囲にコントロールが可能である。

セメント水ガラス注入材は、モル比を小さくしたり、水ガラスのセメントスラリーに対する混合比を大きくすることでゲルタイムを延ばすことは可能であるものの、配合にもよるが5分以上確保することは難しい。このため、所要の注入量を入れようとするとセメントスラリーの濃度を薄くさせゲルタイムを延ばす必要があるため、グラウト強度が低下する。しかし、遅延剤としてリン酸ナトリウムを少量使用することで、ゲルタイムを大きく設定可能である。

(2) 圧縮強度については、遅延剤を添加しない場合と比べ、遅延剤の添加量、配合条件および材齢によってバラつきはあるものの、概ね無添加のものと変わらない傾向にある。

(3) ゲルタイムを30分～1時間でも設定することが可能であるため、注入方式が二重管ダブルパッカー方式の場合や1ショット注入の場合においても施工可能であると考えられ、高品質の注入材料の確保が期待される。

(4) リン酸1ナトリウム、リン酸2ナトリウムは、と

もに遅延効果大きい。しかし、表-2に示すように現場では回転式のみキサーが多用されており、添加量が少ない場合には溶解時間について問題はないものの、現場使用においてゲルタイムを30分以上必要とする際の添加量(セメントスラリー量に対し3%以上)を溶解する場合には、結晶品を溶解するのに手間どることが考えられるため、溶液タイプとしたほうが望ましい。

溶液タイプとする場合、リン酸2ナトリウムは溶解度が低いため、リン酸1ナトリウムのほうが溶液添加としては実用性が高い。

(5) トンネルの現位置で注入施工試験を実施した結果、遅延剤を使用しないセメント水ガラス注入材に比べ、遅延剤を使用した場合、より低圧で問題なく注入可能であった。懸濁型材料のセメント水ガラス注入材ではあるが、二重管ダブルパッカー方式の注入で順調に施工できることが確認できた。

8. おわりに

セメント水ガラス注入材の遅延剤については、昭和50年当時、青函トンネル注入材料開発委員会において検証がなされていたが、より深度化し現位置での施工を実施するまでに至らずにいた。今回、飯山トンネルの板倉工区において現位置試験を実施する機会が得られた。試験施工にあたっては、大林組の松原外喜雄 板倉作業所長 およびライト工業株式会社には、多大なるご協力をいただきました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本鉄道建設公団青函建設局：青函トンネル技術論 第3編注入，1989
- 2) 日本鉄道施設協会・日本鉄道建設公団青函建設局：青函トンネル注入材料委員会報告書，1972.3～1976.3
- 3) 青函トンネル技術のすべて～技術各論（注入），鉄道界図書出版株式会社，1986
- 4) 笠井芳夫，小林正几：セメントコンクリート用混和材料，技術書院，1986.5
- 5) 高橋泰弘，吉田佳子，秦野正人：下水汚泥焼却灰からのリン酸カルシウムとしてのリン回収実験，第12回廃棄物学会研究発表会論文概要集，2001
- 6) 岩波理化学辞典：岩波書店，1985.2
- 7) 化学便覧基礎編 改定3版：丸善株式会社，1988.1

Examination on retarder for cement-water glass grout

Katsuji AKITA, Takeshi IWASAKI and Naoki NISHIMURA

Cement-water glass grout, widely used as grout material since a grout method was introduced into Japan, has disadvantage with viewpoint of restriction of method of the gel time control, only executed by adjusting concentration(w/c) of cement slurry. In the case that longer gel time is required, increase of w/c of grout is necessary, which leads to the decrease of compressive strength. Because of the disadvantage, recently cement-water glass grout has not been often used.

This paper examines the method of gel time control of cement-water glass grout with using phosphate retarder. As a result of laboratory test and site examination, it is cleared that phosphate can be well applied for cement-water glass grout as retarder: gel time can be controlled by using phosphate retarder, and the sufficient strength of solidified soil remained one year after grouting.