論文　早期交通開放を目指した舗装用コンクリートのフレッシュ性状および初期強度に関する研究

長川　善彦[*1]・武田　宇浦[*2]・岡本　享久[*3]・須藤　裕司[*4]

要旨：コンクリート舗装では長期養生が必要となることが，普及への最大の弊害となっている。そこで，コンクリート・モルタルにおいて早期強度を得つつ，良好な作業時間を確保できる混和剤の開発を行なった。その方法として，新型硬化促進剤と，主成分の異なる減水剤を組み合わせ，練混ぜ直後から 30 分後のモルタルフロー，スランプの測定，練混ぜから 12 時間後に各種強度試験を行なった。その結果，本研究で用いた新型硬化促進剤と，ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤とメラミン系高性能減水剤を混合して使用することで，作業性・強度発現性をともに確保できることが明らかとなった。

キーワード：コンクリート舗装，早期強度，可使時間，硬化促進剤，減水剤

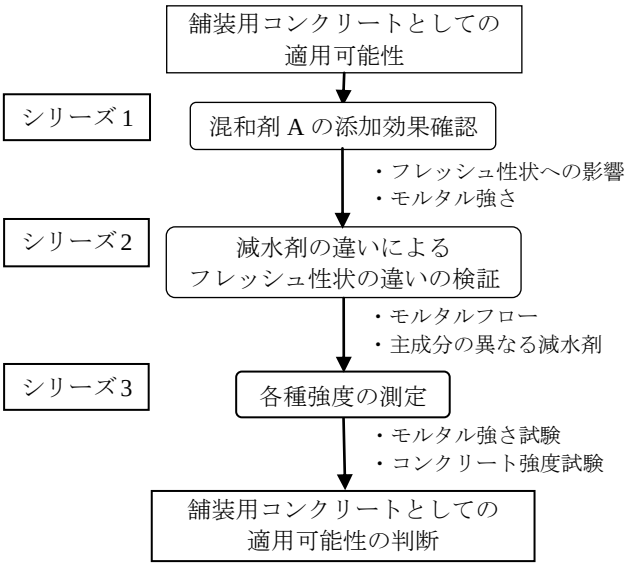
1. はじめに

コンクリートの早期強度発現を必要とする場合の一例として，コンクリート舗装が挙げられる。コンクリート舗装はアスファルト舗装に比べて耐久性に優れ，日本でも一部の地域では交差点などに多く採用されている。しかし，通常のコンクリートでは交通可能となる強度に達するまでに 24 時間以上の時間を要する。このため，アスファルト舗装と比較して長期養生が必要となり，コンクリート舗装の普及の最大の弊害となっている。また，超速硬セメントのように数時間で目標強度を得られるものもあるが，コストが非常にかかることが難点である。そこで，比較的安価で，早期強度を得られるコンクリートの開発が求められている。

本研究では，新型硬化促進剤（亜硝酸塩 30%水溶液。以下，混和剤 A とする）と減水剤などのコンクリート用混和剤を組み合わせ，より早期に目標強度を得ることのできる新型コンクリート用硬化促進剤の開発を行なった。**図-1** に本研究のフローを示す。混和剤 A と，主成分の異なる 5 種類の減水剤を組み合わせ，練混ぜ後のフレッシュ性状の確認，圧縮強度および曲げ強度試験を行なった。それにより，混和剤 A と減水剤の最適な組み合わせを明らかにした。

また，本研究での目標強度は，一般的なコンクリート舗装で必要となる設計強度（曲げ強度）4.5N/mm^2 に，交通解放が可能となる 70%を乗じ，さらに安全係数として 1.2 を乗じ 3.7N/mm^2 以上とした。

以上から，混和剤 A がコンクリート舗装などの早期強度を必要とするコンクリート用の混和剤として適用できるか判断を行なった。



図－1　研究フローチャート

2. シリーズ 1　混和剤 A の添加効果の確認

2.1 混和剤 A の硬化促進性能評価 1

(1) 試験概要

混和剤 A を用いることにより得られる硬化促進効果，混和剤 A 添加量の増加により生じる強度の相違を比較するため，モルタル強さ試験を行なった。供試体は JIS R 5201 の規定に準じて作製し，モルタル曲げ強さおよび圧縮強さの測定を行なった。ここでは，モルタルを型枠に打込んだ後，恒温恒湿室（20±1℃，RH=90%）で養生し，練混ぜ水投入 24 時間後のモルタル曲げ強さおよび圧縮強さの測定を行なった。

*1 長川善彦　立命館大学大学院　創造理工学専攻（正会員）
*2 武田宇浦　立命館大学　理工学部助手　博士（工学）（正会員）
*3 岡本享久　立命館大学　理工学部環境システム工学科教授　工博（正会員）
*4 須藤裕司　日産化学工業株式会社　化学品事業本部　機能材料事業部　特殊材料部　博士（工学）（正会員）

(2) 使用材料および配合

使用材料は，セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm^3）を使用し，細骨材には標準砂を用いた。**表－1** にモルタルの配合を示す。W/C=50%とし，混和剤 A の添加量は，セメント質量に対して 0%，10%，16.7%，23.3%，30%とした。混和剤 A は亜硝酸塩 30%水溶液であるため，実際の成分の添加量はそれぞれ 0%，3%，5%，7%，9%となっている。

ここでは，混和剤 A によるモルタルのフレッシュ性状への影響を確認するため，減水剤などによるフローおよび空気量の調節は行なわなかった。

(3) 実験結果

表－2 に練混ぜ開始から 24 時間後に測定したモルタルの圧縮強さおよび曲げ強さ試験結果を示す。

混和剤 A 添加量を 10.0%とすることで，添加量 0%のときよりも，曲げ強さおよび圧縮強さ共に大きくなった。その後，混和剤 A 添加量の増加に伴い，圧縮強さの変化は見られなかったが，曲げ強さは低下したため，混和剤 A の添加効果は確認できなかった。

混和剤 A 添加量の増加に伴いモルタルの流動性が低下し，特に，添加量 23.3，30.0%のときには練混ぜ途中から硬化が始まった。このため，モルタルを型枠に打込む際，均一な締固めが出来ず，供試体に打込み層ができてしまった。モルタル強さの測定の際，この打込み層から破壊が進んだ。

2.2 混和剤 A の硬化促進性能評価 2

(1) 試験概要

2.1 では，混和剤 A の添加量が増えるにつれて流動性が大きく低下した。

そこで，減水剤を使用し混和剤 A の添加量が増加しても，各配合のフローを 180±20mm となるように調節した。ここでは，練り上がり時にフローを測定し，材齢 12 時間のモルタルについて曲げおよび圧縮強さ試験を行なった。供試体の作製方法および養生方法は 2.1 と同様である。

(2) 使用材料および配合

使用材料は，セメントには普通ポルトランドセメントを使用し，細骨材には標準砂を用いた。減水剤として，メラミン系高性能減水剤（以下，メラミン系減水剤 1 とする）を使用した。

表－3 に配合を示す。混和剤 A の添加量は，セメントに対して 0%，10%，15%，20%，25%とした。

(3) 実験結果

表－4 に練混ぜ開始から 12 時間後のモルタル圧縮強さおよび曲げ強さ試験結果を示す。

混和剤 A 添加量の増加に伴い，圧縮強さが増加する傾向がみられた。しかし，曲げ強さは，混和剤 A 添加量 15.0%までは強さの増加が観察されたが，それ以降は変化が見られなかった。これは，混和剤 A 添加量の増加に伴う発熱により供試体に微小なクラックが生じ，曲げ強さにその影響が顕著に現れたと推測される。

表－1　モルタル配合表（シリーズ 1-1）

No.	水 (g)	セメント (g)	細骨材 (g)	混和剤 A (C×%)
1-1-A	225	450	1350	0
1-1-B				10.0
1-1-C				16.7
1-1-D				23.3
1-1-E				30.0

表－2　モルタルの圧縮および曲げ強さ試験

No.	曲げ強さ (N/mm^2)	圧縮強さ (N/mm^2)
1-1-A	2.88	9.85
1-1-B	4.66	15.4
1-1-C	4.17	(14.9)*
1-1-D	3.69	16.1
1-1-E	3.24	(16.0)*

*試験結果にばらつきがあったため参考値とする

（24 時間強さ）

表－3　モルタル配合表（シリーズ 1-2）

No.	水 (g)	セメント (g)	細骨材 (g)	混和剤 A (C×%)	メラミン系減水剤 1 (C×%)
1-2-A	225	450	1350	0	0
1-2-B				10	1.5
1-2-C				15	3
1-2-D				20	8
1-2-E				25	12

表－4　モルタルの曲げおよび圧縮強さ試験結果

No.	曲げ強さ (N/mm^2)	圧縮強さ (N/mm^2)
1-2-A	1.25	3.75
1-2-B	2.39	6.9
1-2-C	2.65	8.3
1-2-D	2.67	10.1
1-2-E	2.92	12.6

（12 時間強さ）

3. シリーズ 2　減水剤の主成分の違いによるフレッシュ性状への影響

3.1 流動性確保についての検討

(1) 試験概要

主成分の異なる減水剤を数種類選定し，混和剤 A と組み合わせて実験を行なった。

比較方法はモルタルフローを 200±20mm とし，練混ぜ直後，15 分後，30 分後にモルタルフローの測定を行なった。練りあがったモルタルは恒温恒湿室（20±1℃，RH=90%）に保管し，測定する直前に練り返してモルタルフローの測定を行なった。

(2) 使用材料および配合

使用材料は，セメントには普通ポルトランドセメントを使用し，細骨材には標準砂を用いた。(1) ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤（以下，ポリカル系減水剤とする），(2) メラミン系減水剤 1，(3) メラミン系高性能減水剤（以下，メラミン系減水剤 2 とする），(4) リグニンスルホン酸とオキシカルボン酸の複合減水剤（以下，リグニン系減水剤とする），(5) ポリオール複合体の 5 種類と，(1) と (2) および (1) と (3) を併用した減水剤で比較を行なった。(1) は，ポリカル系減水剤の中でも比較的遅延性の少ないものである。(2) は，メラミン系減水剤をアミドスルホン酸で変性したものである。(3) は，通常のメラミン系減水剤である。(4) および (5) は，遅延性の非常に高いタイプの減水剤である。

配合については，**表－5** のとおりである。混和剤 A 添加量を 0%，10%，15%とした。また，上記のとおりモルタルフローを 200±20mm となるように減水剤の量を調節した。2 つの減水剤を混合したものについては，ポリカル系減水剤添加量を一定とし，メラミン系減水剤 1 および 2 の添加量を，モルタルフローが 200±20mm となるように調節した。

(3) 実験結果

表－6 に各配合のフローを示す。(1) ポリカル系減水剤，(4) リグニン系減水剤，(5) ポリオール複合体の減水剤のみを用いた 2-B，2-E，2-I，2-J のうち 2-E，2-I，2-J では，練混ぜから 30 分後には硬化が進み，測定不可能となった。使用した減水剤の違いによって，フレッシュ性状に大きく違いがあることが分かった。

しかし，ポリカル系減水剤とメラミン系減水剤 1 を用いた 2-F の配合では，混和剤 A 添加量が 15%で，練混ぜから 30 分経過しても，170mm 近くのモルタルフローを確保することができた。ポリカル系減水剤とメラミン系減水剤を併用したものでは，ポリカル系減水剤を単体で使用するよりも添加量が増えてしまうが，メラミン系減水剤を単体で用いるよりも添加量を減らせることが分かった。

通常，ポリカル系減水剤とメラミン系減水剤を併用すると減水性能が極端に低下するため用いられることはないが，今回の実験からはこの 2 種類の減水剤を併用することで可使時間が確保できた。

表－6　モルタルフロー（シリーズ 2）

No.	直後 *(mm)*	15 分後 *(mm)*	30 分後 *(mm)*
2-A	198	181	169
2-B	194	169	157
2-C	212	205	187
2-D	209	189	146
2-E	216	-	-
2-F	205	191	167
2-G	214	208	183
2-H	218	197	196
2-I	184	155	-
2-J	187	155	-

表－5　モルタル配合表（シリーズ 2）

No.	水セメント比 *W/C*	水 *W*	セメント *C*	細骨材 *S*	混和剤 *A*	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	(%)	*(g)*			*(C×%)*					
2-A	50	225	450	1350	0	0.1	0	0	0	0
2-B					10	0.4	0	0	0	0
2-C						0	1.5	0	0	0
2-D						0.6	0.1	0	0	0
2-E					15	0.6	0	0	0	0
2-F						0.8	0.8	0	0	0
2-G					10	0.6	0	0.1	0	0
2-H						0.6	0	0.8	0	0
2-I					15	0	0	0	1.3	0
2-J						0	0	0	0	0.8

4. シリーズ３　強度についての検討

4.1 モルタルによる各種強度試験

(1) 試験概要

3.のシリーズ 2 の結果より，ポリカル系減水剤のみを使用すれば，初期のモルタルフローは少量で目標値を満足することができた。しかし，硬化が即座に進んでしまい，作業時間を確保できない問題がある。メラミン系減水剤のみを用いれば，初期のフローを得るには減水剤を多量に添加しなければならないが，作業時間の確保という面ではポリカル系減水剤よりも優れている。2 つの減水剤を併用したものは，3.でも述べたとおり，同等のモルタルフローを確保するためには，ポリカル系減水剤の添加量が増加するが，作業時間の確保はポリカル系減水剤を単体で用いる場合よりも良好である。

そこで，混和剤 A と組み合わせ，ポリカル系減水剤のみを用いた場合と，ポリカル系減水剤とメラミン系減水剤を併用したモルタルにおいて，曲げ･圧縮強さおよび，練混ぜ直後，15 分後，30 分後のモルタルフローの測定を行なった。モルタル試験における目標強さもコンクリート舗装での目標値である曲げ強度 3.7N/mm^2 以上と同様とした。また，各種強さ試験の測定は養生 12 時間で測定を行なった。2 種類の減水剤を併用した場合の W/C=40%のときのみ 24 時間後の強さ測定も行なった。

(2) 使用材料および配合

使用材料は，セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は，混和剤 A の亜硝酸塩分 30%を細骨材と置換するため，砕砂（密度 : 2.62g/cm^3）を用いた。減水剤には，ポリカル系減水剤のみと，ポリカル系減水剤とメラミン系減水剤を併せたものを使用した。

表－7 に配合を示す。著者らの研究 [1)]から，W/C=35%程度にすることにより，目標強度が得られることがわかっている。そこで，W/C=35，40%とした。混和剤 A 添加量はポリカル系減水剤のみを使用したものについては 0%，10%とした。ポリカル系減水剤とメラミン系減水剤を併用したものについては混和剤 A 添加量を 0%, 10%, 15%とした。

表－7　示方配合（シリーズ 3）

No.	*W/C*	単位量 *(kg/m^3)*			*(セメント×%)*		
	(%)	水	セメント	細骨材	混和剤 A	ポリカル系	メラミン系
3-A	35	249	710	1315	0	0.8	0
3-B					10	1.3	0
3-C	40	249	621	1388	0	0.8	0
3-D					10	1.3	0
3-E	35	258	736	1271	0	0.8	0
3-F					10	3.0	2.0
3-G					15	3.0	3.0
3-H	40	257	644	1353	0	0.7	0
3-I					10	1.5	0.8
3-J					15	2.5	2.0

表－8　曲げ・圧縮強さおよびモルタルフロー（シリーズ 3）

No.	強さ *(N/mm^2)*				フロー *(mm)*		
	曲げ		圧縮				
	12hr	*24hr*	*12hr*	*24hr*	練混ぜ直後	*15min*	*30min*
3-A	2.05		5.1.0		194	-	-
3-B	2.81		9.70		168	-	-
3-C	1.60		4.02		176	-	-
3-D	1.61		4.56		168	-	-
3-E	2.25		7.40		182	155	133
3-F	2.88		8.22		169	-	-
3-G	4.89		15.3		136	-	-
3-H	1.78	4.46	5.29	16.2	193	181	174
3-I	3.07	5.14	9.10	16.7	193	185	167
3-J	3.97	5.87	12.2	22.0	173	-	-

(3) 実験結果

表－8 にモルタルの曲げ強さ・圧縮強さおよびモルタルフローの測定結果を示す。

曲げ強さ 3.7N/mm^2 以上を満足したものは 2 種類あり，どちらも 2 種類の減水剤を併用し，混和剤 A 添加量を 15%としたものであった(3-G, 3-J)。しかし，これらは減水剤の量を調節しても練混ぜ直後のフローを確保することが難しく，練混ぜ後 15 分においてもモルタルフローを測定することは不可能であった。

全ての配合条件の中で，目標の強度に近く，ある程度の作業時間も確保することが出来たのは，W/C=40%，混和剤 A 添加量 10%，2 種類の減水剤を併用したものである(3-I)。図－2，図－3 に W/C=40%，2 種類の減水剤を併用した場合の曲げおよび圧縮強さについて示す（3-H, 3-I,3-J）。おおよそ，混和剤 A を 10%添加したものでは，無混入のものに比べ，目標強度に達するまで約 5 時間早くなっていることが分かる。

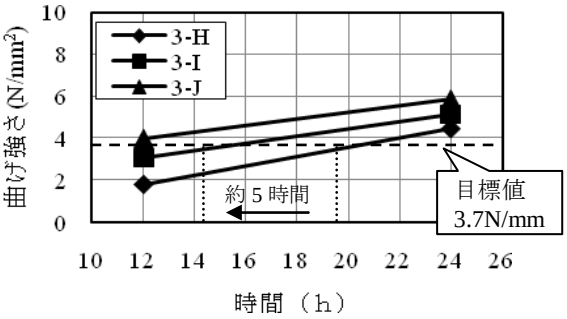
また，ポリカル系減水剤のみで練混ぜを行なったものについては，少量の添加量で練混ぜ直後のフローは目標値を満足したが，15 分後にはどれも硬化していまい，フローを測定することが出来なかった。

よって，混和剤 A と，ポリカル系減水剤とメラミン系減水剤を併用する有効性があるということが証明された。

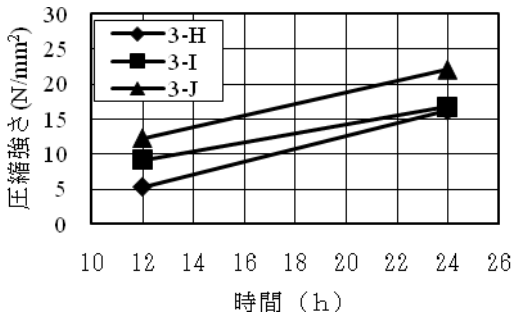
4.2 コンクリートによる各種強度試験

(1) 試験概要

4.1 において，混和剤 A を用いた場合，W/C=40%とし，混和剤 A 添加量を 10%，ポリカル減水剤とメラミン系減水剤を併用したものが，可使時間を確保しつつ目標強度に近いものが得られた。そこで，この 2 種類の減水剤を併せて使用し，コンクリートにおいて曲げ強度，圧縮強度，スランプ試験を行なった。



図－2　曲げ強さ



図－3　圧縮強さ

(2) 使用材料および配合

使用材料は，セメントには普通ポルトランドセメントを使用し，細骨材には砕砂(密度：2.62g/cm^3)，粗骨材には砕石(密度 2.67 g/cm^3)を用いた。減水剤には 4.1 で使用したものと同様のものを用いた。

配合については表－9 のとおりである。目標スランプは 10±2cm とし，減水剤で調節を行なったが，混和剤 A を添加したものについては減水剤のみで調節を行なうことが困難であったため，単位水量を変化させた。粗骨材は 1150kg/m^3 で一定とした。

表－9　示方配合

No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)							
			水	セメント	細骨材	粗骨材		混和剤 A	ポリカル系減水剤	メラミン系減水剤
			W	*C*	*S*	*G*		*A*	*ADp*	*ADm*
						5-13	13-20			
40-0	40	38.8	150	375	722	575	575	0	4.24	0
40-10		37.1	161	402	671	575	575	40.2	8.05	6.04
40-15		37.1	161	402	671	575	575	60.3	8.05	6.04

表－10　曲げ・圧縮強度およびスランプ経時変化

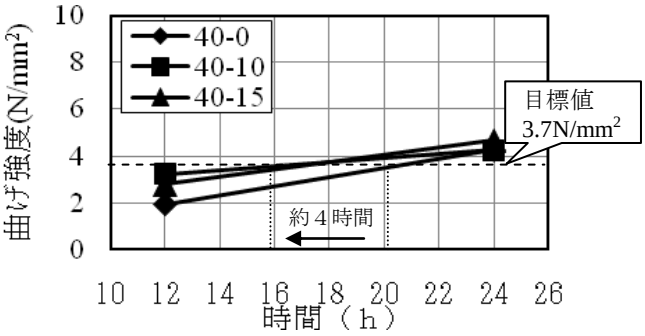
No.	強度(*N/mm*^{2})				スランプ（*cm*）		
	曲げ		圧縮				
	12hr	*24hr*	*12hr*	*24hr*	練混ぜ直後	*30min*	*60min*
40-0	1.94	4.24	7.92	15.2	10.5	1.5	0
40-10	2.77	4.65	13.2	24.0	11.0	4.5	1.5
40-15	3.23	4.26	13.8	23.3	6.0	測定不能	

(3) 実験結果

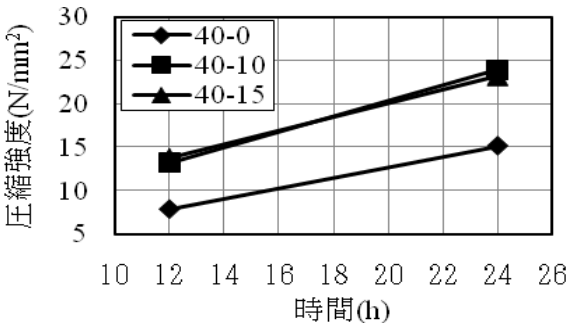
表－10，図－4 および図－5 にコンクリートの曲げ・圧縮強度およびスランプ試験の測定結果を示す。

練混ぜ後 12 時間で曲げ強度の目標値を満足するものはなかった。また，24 時間では全ての配合条件において目標強度を得ることができた。しかし，ポリカル系減水剤とメラミン系減水剤を併用することにより，両者の使用量は増加するが，図－4 からも分かるように，混和剤 A を添加したものでは，添加していないものに比べ，約 4 時間早く目標曲げ強度を満足していると思われる。圧縮強度についても，混和剤 A を添加したものは，添加していないものに比べ，強度が 1.5 倍程度向上した。また，スランプ保持の点においても，混和剤 A 添加量 0%，ポリカル系減水剤のみを使用したものに比べ，2 種類の混和剤を併用し，混和剤 A 添加量 10%の方が，スランプ保持時間が長くなるという結果が得られた。

以上の結果より，コンクリートにおいても，混和剤 A を用いた場合，ポリカル系減水剤とメラミン系減水剤を併用したものが強度面，スランプ保持面でも良いという結果が得られた。



図－4　曲げ強度



図－5　圧縮強度

5. まとめ

新型の硬化促進剤を用いて，モルタルおよびコンクリート供試体を作製し，各種試験を行なって得られた結果を以下にまとめる。

(1)混和剤 A を添加すると，添加量の増加に伴い早強性も増す。

(2)混和剤 A と減水剤を組みあわせた時，主成分の違いによってフレッシュ性状にかなりの違いが表れる。メラミン系減水剤を用いることにより，可使時間を確保することができた。

(3)混和剤 A と，ポリカル系減水剤とメラミン系減水剤を組み合わせたとき，どちらも単体で使用する際に比べ，同じモルタルフローおよびスランプを得るためには使用量が増加してしまう。

(4)モルタルにおいて，混和剤 A と，ポリカル系減水剤とメラミン系減水剤を使用することで，混和剤 A を添加していないものに比べ，約 5 時間早く曲げ強度の目標値を達成することができた。また，コンクリートにおいても混和剤 A を添加したものは，無添加のものに比べて，約 4 時間早く曲げ強度の目標値を満足することができた。

通常のモルタル，コンクリートでは，ポリカル系減水剤とメラミン系減水剤を併用すると，両者を単体で用いた場合よりも減水性能が低下するため用いられることはない。しかし，混和剤 A とポリカル系減水剤とメラミン系減水剤の 3 種類を併せて使用することにより，初期のモルタルフローおよびスランプの確保，また可使時間の確保，そして強度確保の 3 つの点で他の減水剤よりも満足のいく結果となった。

今後の課題としては，短期強度だけでなく，長期的な強度試験や凍結融解試験など，耐久性の面からの考察を行いたい。また，混和剤 A とメラミン系減水剤を使用した場合，なぜポリカル系減水剤を用いた場合よりも可使時間を確保することができるのか，化学的なメカニズムを解明することも行なっていきたい。

参考文献

1) 長川善彦ほか：モルタル試験による硬化促進剤の舗装用コンクリートへの適用可能性の評価，土木学会関西支部年次学術講演会，V-4，2008
2) 笠井芳夫，坂井悦郎：新セメント・コンクリート用混和材量，技術書院，2007
3) 児島孝之：コンクリート混和材料ハンドブック，エヌ・ティー・エス，2004
4) 友澤史記ほか，：コンクリート混和剤技術，シーエムシー出版，2006

謝辞

本研究を行なうにあたり，BASF ポゾリス株式会社大川裕氏，太田晃氏に，多大なるご協力を頂きました。また，社団法人セメント協会研究所吉本徹氏から様々なご助言をいただきました。ここに記し，感謝の意を表します。