

論文 ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を用いた場合のペースト - モルタル - コンクリートの流動性の相関関係

小津 博*1・山田 一夫*2・矢野 眞弓*3

要旨：ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を添加したコンクリートの流動性を予測できるモルタル試験法を提案するために、ペースト - モルタル - コンクリートの流動性の相関関係について検討した。流動性の相関は、異なる種類の細骨材を用いた場合に低下していた。また、骨材の有無によるセメントの練混ぜ効率の相違も影響すると推測された。コンクリートと同じ細骨材を使用すれば、モルタルフローはコンクリートスランプと高い相関を示し、モルタルによりコンクリートの流動性を評価することが可能であると考えられた。

キーワード：流動性，相関，ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤，微粒分，練混ぜ効率

1. はじめに

コンクリートの単位水量は、乾燥収縮等の耐久性を考慮し、平成 11 年版土木学会コンクリート標準仕様書 [施工編] では一般に $175\text{kg}/\text{m}^3$ 以下、建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 では $185\text{kg}/\text{m}^3$ 以下が望ましいとされている。しかし、近年は良質な骨材が入手できなくなっており、従来の AE 減水剤では所定の流動性の確保と単位水量規制の両立が困難であるため、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤(以下、PC)の使用が拡大している。また、高強度コンクリートの製造量の増加もあり、今後、PC の使用量はさらに多くなると想定される。

PC を使用したコンクリートは、セメントや骨材などの使用材料の種類、配合、環境条件等により流動性が異なる。今後は、混合セメントや碎石を含めて使用材料が多様化し、コンクリートの配合設計のための試験練りの実施機会が増加すると思われる。しかし、コンクリートによる試験は、多大な労力を要するので、簡易的にモルタルまたはペーストによりコンクリートの流動性が評価できることが望まれる。

筆者らは前報¹⁾にて、ナフタレンスルホン酸

系減水剤(以下、NS)を使用したコンクリートの流動性を予測するために、モルタルやペーストによる簡易流動性試験結果とコンクリートの流動性試験結果の相関を調査した。その結果、モルタルフローとコンクリートスランプの相関には、配合の骨材容積比²⁾、粉体および細骨材の粒度分布や形状³⁾、粉体と細骨材の干渉⁴⁾といった既知の要因に加えて、細骨材の吸水状態の相違が影響していた。そのため、同じ細骨材を使用し、材料の投入順序も同じにすれば、コンクリートスランプとモルタルフローの相関は高く、モルタルによりコンクリートの流動性を評価できると考えられた¹⁾。

しかし、PC は粒子の分散やセメントとの相互作用のメカニズムが NS と異なることが報告されている⁵⁾。そこで、本研究では、簡易試験によりコンクリートの流動性を予測する方法の提案を目的に、PC を使用したペースト - モルタル - コンクリートの各配合間での流動性の相関を解析した。特に、最新の減水剤作用機構に関する知識を加え、各種試験方法間において流動性やその経時変化が異なる原因について考察した。

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所セメント化学グループ 理修 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所セメント化学グループ 主席研究員 工博 (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所セメント化学グループ

2. 実験方法

2.1 検討の流れ

検討は前報¹⁾と同様に図 - 1 に示すような階層構造を想定し、各々の階層間の相関をセメントのみを変えて順次確認することで、コンクリート - モルタル - ペースト間の流動性の相関に影響を与える要因を探ることとした。

本研究で用いたコンクリートの場合、1のコンクリートスランプ(以下、CS)とウェットスクリーニング(以下、WS)モルタルフロー(以下、MF)の相関は高く、直線関係が確認されている^{1,6)}。そこで、1 - 2間では、コンクリートとモルタルの粗骨材の有無による機械的な練混ぜ効率の影響を想定し、コンクリートもしくはWSモルタルと砕砂モルタルにより検討した。2 - 3間では、細骨材種類の相違の影響を想定し、3 - 4間では、NSで大きな影響が確認された骨材表面水の相違を想定した。練混ぜ水を添加する前にセメントと骨材を混合すると、骨材上の表面水によりセメントは部分的に水和する。この水和反応がPCの作用に影響すると想定されるので、絶乾状態および砕砂の吸水率に相当する水を予め添加した湿潤状態の標準砂(以下、湿潤標準砂)を用いたモルタルにより検討した。4 - 5間では、MFがペーストフロー(以下、PF)に依存するかどうかを調べた。

2.2 材料

セメントは表 - 1 に示す6種の普通ポルトランドセメントを使用した。粗骨材は砕石(北九州市産、密度 2.83kg/l、粗粒率 6.64、吸水率 0.43%、最大寸法 20mm)を使用した。また、細骨材は砕砂(北九州市産、密度 2.69kg/l、粗

1. コンクリートスランプ (WSモルタルフロー)
(A 練混ぜ効率の影響)
2. 砕砂モルタルフロー
(B 細骨材の違いによる影響)
3. 湿潤標準砂モルタルフロー (砕砂の表面水を模擬)
(C 骨材表面水の影響)
4. 標準砂モルタルフロー
(D 細骨材の存在による影響)
5. ペーストフロー

図 - 1 試験の階層構造に関する概念図
() は考慮する作用因子

粒率 2.88、吸水率 1.60%) および JIS R 5201 に準拠した標準砂(密度 2.64 kg/l 粗粒率 2.44、吸水率 0.20%未満)を使用した。湿潤標準砂は、1350g に対して、予め砕砂の吸水率 1.60%に相当する水 21.6g を添加し、ホバートミキサにて 30 秒間練り混ぜて作製した。PC は分子構造中にスルホン基、カルボキシル基、およびポリエチレングリコールを有するものを使用した。

2.3 配合

コンクリート配合を表 - 2 に示す。コンクリートの配合は、水セメント比を 37.5%とし、スランプ 8cm 前後を目標とした。

モルタル配合を表 - 3 に示す。配合はコンクリートのモルタル部分の流動性を再現することを想定し、基本的にコンクリート配合から粗骨材を除いたものとした。標準砂モルタルはセメント砂容積比が砕砂モルタルと等しくなるようにした。ただし、湿潤標準砂モルタルの水セメント比は材料分離をせず、適度なフローが得られるように設定した。

ペースト配合を表 - 4 に示す。配合は、材料分離を生じない水セメント比とした。

表 - 1 使用したセメントのキャラクター

セメント	比表面積 (cm ² /g)	化学成分 (%)										
		ig.loss	Insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	f.CaO
A	3490	1.23	0.13	21.60	5.65	2.95	63.71	1.41	2.02	0.43	0.44	0.8
B	3140	2.22	0.06	21.11	4.87	2.81	64.07	1.05	2.08	0.27	0.46	0.5
C	3260	2.04	0.13	20.82	4.97	2.75	64.57	1.65	1.94	0.35	0.42	0.4
D	3640	0.44	0.08	21.84	5.54	2.97	63.12	2.78	2.01	0.40	0.40	0.9
E	3350	1.92	0.18	20.92	4.38	2.74	64.63	2.24	2.13	0.11	0.43	0.6
F	3470	1.99	1.19	20.64	5.06	2.76	63.55	1.66	1.85	0.16	0.49	0.5

2.4 練混ぜ方法および流動性測定法

コンクリートは、容量 50 L のパン型強制練りミキサにより約 30L を練り混ぜた。材料は粗骨材、細骨材 (1/2)、セメント、細骨材 (1/2) の順に投入し、空練り 15 秒間、水および PC を投入し、さらに 120 秒間練り混ぜた。スランプ試験は JIS A 1101 に準拠した。試験したコンクリートは良好な状態であり、モルタル部分の流動性 (フロー) によりスランプが決定されるような配合である。従って、コンクリートの流動性の指標としてスランプを用いることは妥当であると考えた。

モルタルの練混ぜは、ホバートミキサを使用した。コンクリートと同様に細骨材およびセメントを 30 秒間空練りし、水および PC を投入し低速で 60 秒間練り混ぜ、掻き落し後、さらに高速で 180 秒間練り混ぜた。モルタルの流動性は JIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準拠したミニスランプコーン (上端内径 50mm、下端内径 100mm、高さ 150mm) によるフローにて測定した。CS は自重のみが作用するので、MF の測定も条件をそろえて加振は行わなかった。また、ミニスランプコーンの使用は JIS A 5201 のフローコーンに比べて、フローの変化量が大きく、CS との比較に適している^{1,6)}。

ペーストは、ホバートミキサを使用し、セメントに水および PC を投入し、低速で 60 秒間練り混ぜ、掻き落し後、さらに高速で 180 秒間練り混ぜた。流動性は、JASS 15M103 に準拠し、直径 50 mm、高さ 51 mm のパイプによるフローにて測定した。

3. 結果と考察

3.1 流動性試験結果の相関関係

(1) 練混ぜ直後

図 - 2 に CS と各種 MF の関係を示す。砕砂 MF に対する CS の寄与率は 0.78 と高い相関を示したが、湿潤標準砂 MF では、寄与率が 0.40 と低くなった。また、図 - 3 に砕砂 MF と標準砂または湿潤標準砂 MF の関係を示す。湿潤標

表 - 2 コンクリートの配合

空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	PC
2 >	37.5	43	400	150	825	1150	0.80%

表 - 3 モルタルの配合

細骨材の種類	W/C (%)	配合量 (g)			
		セメント	水	細骨材	PC
砕砂	37.5	667	250	1375	0.80%
標準砂	37.5	667	250	1350	0.80%
湿潤標準砂	35.8	667	239	1350	0.80%

湿潤標準砂の水は予め添加した水 21.6 g を含む

表 - 4 ペーストの配合

W/C (%)	配合量 (g)		
	セメント	水	PC
30	667	200	0.8%

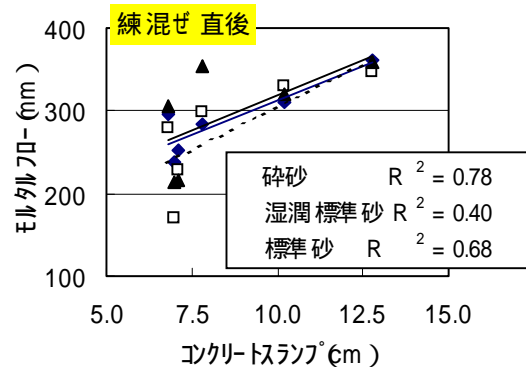


図 - 2 CS と各種 MF の関係

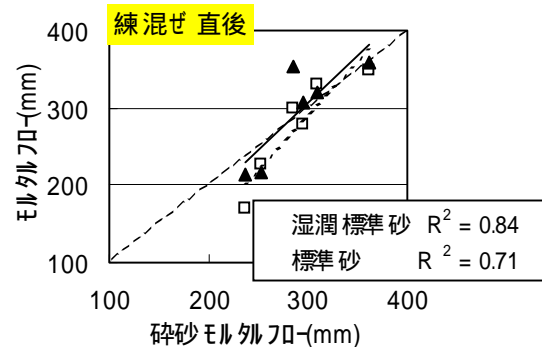


図 - 3 砕砂 MF と各種 MF の関係

準砂 MF に対する砕砂 MF の寄与率は 0.84 で相関が高かった。図 - 1 で言うと 1 - 2 間および 2 - 3 間の相関は高いが、1 - 3 間では相関が低かった (図 - 9 参照)。流動性やその序列は粒度分布の異なる骨材と粉体のさまざまな組合せにより固相全体の実積率が変化し、影響を受けるとされる⁴⁾。1 - 3 間で相関が低い理由は、細骨材の種類が異なり系全体の粒度分布が異なることと、コンクリートとモルタルの練混ぜ効率

の相違(3.2(2)項参照)が影響したことも一因と考えられる。

図-4にPFと各種MFの関係を示す。PCではNSと異なり、PFはいずれのMFに対しても寄与率が0.8以上であり、高い相関を示した。

次に、NSの場合に各種配合間の流動性の相関を低下させる原因となった骨材の表面水の影響に着目する。図-3に示したように、PCを使用した場合には、練混ぜ直後はいずれの試験方法を用いても大きな相違がなく、砕砂MFの標準砂MFに対する寄与率は0.71、湿潤標準砂MFには0.84と高い相関を示した。PCでは、湿潤標準砂モルタルで所定のフローを得るための水セメント比は標準砂モルタルより約2%低下と若干量であり、NSに比べて減水剤の後添加効果が小さいため⁵⁾、MFの相関は細骨材の吸水状態には大きな影響を受けなかったものと考えられる。

以上より、練混ぜ直後においては、細骨材種類の相違が流動性の相関に影響していた。

(2) 経時変化

PCは流動性の経時変化も重要であるので、材齢2時間についても評価した。CSとWSMFは一定の相関を示すことが判明している¹⁾ので、WSMFと各種MFの関係を検討した。

図-5に材齢2時間におけるWSMFと各種MFの関係を示す。WSMFは同じ細骨材を用いた砕砂MFに対する寄与率が0.78と相関が高かった。しかし、標準砂MFに対する寄与率は0.14と低かった。また、WSMFは、砕砂MFより50mm以上低い値を示したが、これは練混ぜ効率の影響(3.2(2)項参照)と、粗骨材に付着したセメントペーストがWSでは全量を回収することができず、ペースト量が減少したことが影響したと考えられる。

図-6に標準砂MFと砕砂MFの関係の経時変化を示す。砕砂MFに対する標準砂MFの寄与率は練混ぜ直後では0.71であったが、材齢2時間では0.37と低下した。また、フローロスは砕砂モルタルの方が大きく、細骨材種類により

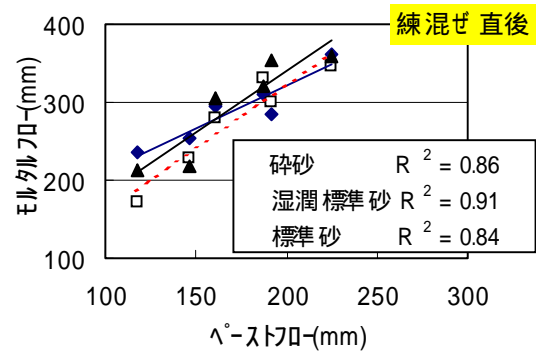


図-4 PFと各種MFの関係

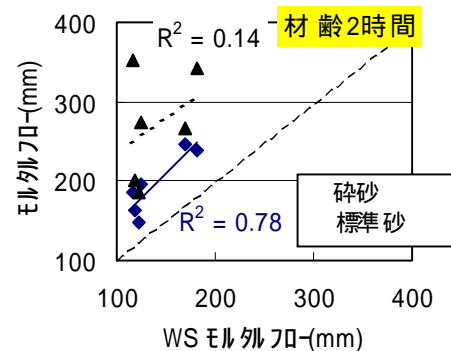


図-5 WSMFと各種MFの関係

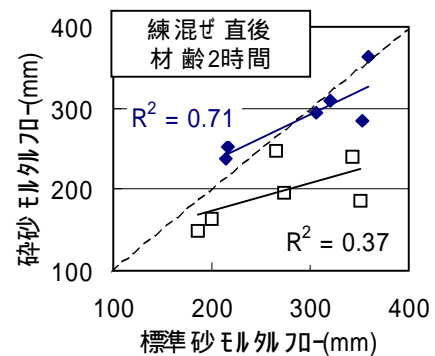


図-6 砕砂および標準砂MFの関係の経時変化

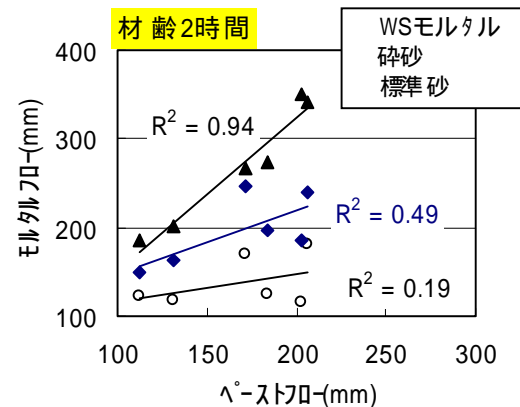


図-7 PFと各種MFの関係

流動性低下の大小が異なり、経時的に流動性の相関も失われることが確認された。

図 - 7 に PF と各種 MF の関係を示す。材齢 2 時間においても PF の標準砂 MF に対する寄与率は 0.94 と相関が高かったが、WS MF および砕砂 MF に対する寄与率は、それぞれ、0.19 および 0.49 と相関が低くなった。これは、図 - 6 で確認されたように砕砂と標準砂の間で相関が低いことが寄与しているためと思われる。

以上より、経時変化においては、細骨材種類の相違が重要であった。次節でその作用機構について考察する。

3.2 相関関係に影響する因子の作用機構

(1) 減水剤の吸着

PC の流動性保持性能は、液相中に残存する減水剤が時間の経過とともにセメント水和物表面に吸着することで作用すると考えられている。しかし、PC は粘土に特異的に吸着されるため、微粒分に粘土を含む細骨材を用いると、液相に残存する量が少なくなる。従って、経時的にセメント水和生成物へ吸着する減水剤が不足し、流動性の保持ができなくなる⁷⁾。一方、NS はセメントに対して 80% 以上の高い吸着率を示し⁸⁾、骨材に対する NS の吸着は無視できる範囲であるので流動性に及ぼす影響は小さかった¹⁾。

そこで細骨材の PC 添加量に対する吸着率を、モルタル配合からセメントを取り除いた配合で 3 分間の振とうを行い、全有機炭素計により求めた。その結果、標準砂に対しては添加した PC の 4% が吸着し、砕砂では 23% (NS では 12%) であった。砕砂の BET 比表面積は $1.25\text{m}^2/\text{g}$ であり、標準砂の $0.07\text{m}^2/\text{g}$ より大きく、X 線回折

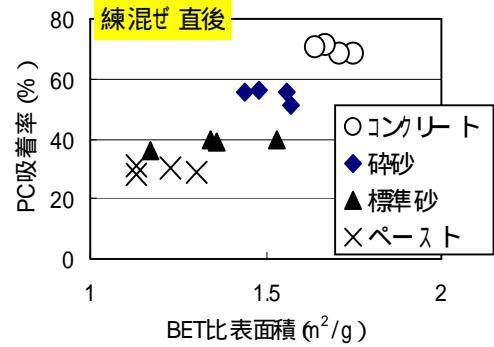


図 - 8 ペースト部分の BET 比表面積と PC 吸着率の関係

試験より砕砂にはモンモリロナイト系の粘土が確認され、粘土が PC の吸着に関与しているものと思われる⁷⁾。

図 - 8 に各配合 (セメント A, C, E, F) における、 $75\mu\text{m}$ のふるいにより採取したペースト部分 (細骨材の微粒分を含む) の BET 比表面積と PC 吸着率の関係を示す。モルタルについて比べると、砕砂モルタルは標準砂モルタルより PC 吸着率が 15~20% 高く、これは相当部分が砕砂に吸着していることを示唆している。そのため、経時的に砕砂モルタルは液相中の PC が不足するためフローロスが大きくなり、さらに、微粒分の影響はセメントによって異なり、材齢 2 時間の 2-3 間の相関もなくなったと考えられる (図 - 9 参照)。また、粘土を含有する場合には、粘土分と水、もしくは PC の接触順序により流動性が変化すること⁹⁾が報告されており、材料の投入順序にも注意を払う必要がある。なお、同配合でセメントにより BET 比表面積が異なるが PC 吸着率が変動しない理由

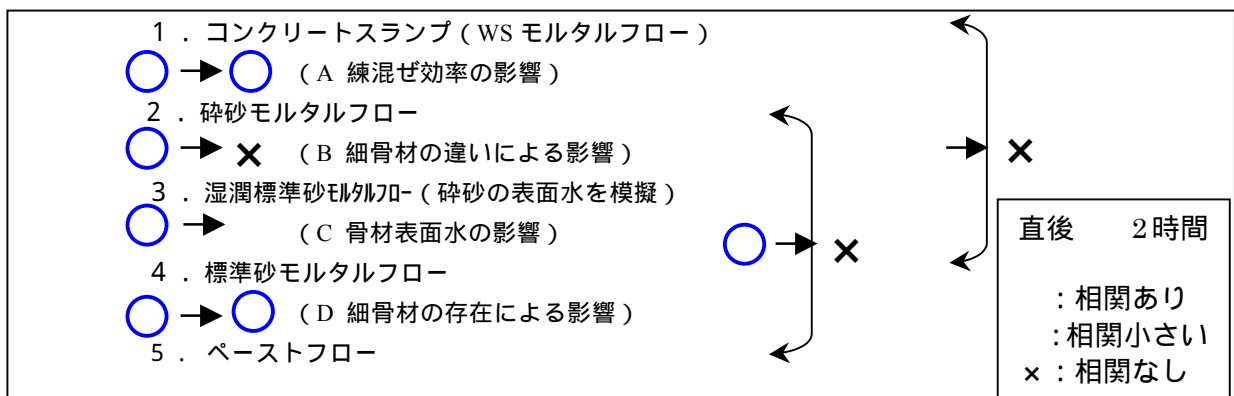


図 - 9 各種試験結果間の相関

は、液相の硫酸イオン濃度の影響も受けたため⁵⁾と考えられる。

(2) 練混ぜ効率

コンクリートと砕砂モルタル、もしくは標準砂モルタルとペーストのように練混ぜ性能が異なっても、経時変化の傾向には余り影響がない結果(3.1(2)項参照)となった。しかし、図-8で示したように、BET比表面積はコンクリート>砕砂モルタル>標準砂モルタル>ペーストの順に大きく、PC吸着率も影響を受けていた。コンクリートと砕砂モルタル、もしくは標準砂モルタルとペーストの間では細骨材の微粒分の影響が一定と考えられるが、BET比表面積は異なっており、練混ぜ効率の相違が影響したと考えられる。PC吸着率はBET比表面積が大きいほど高い傾向があり、微粒分の効果と同様に、練混ぜ効率もフローロスや流動性の相関に影響を及ぼしているものと推定される。

4. モルタルによる流動性試験方法

以上の結果から、PCを用いたコンクリートの流動性をモルタル試験により予測することは可能であり、その試験では、以下の点に留意する必要がある。

- (1) 骨材の微粒分や粒度分布の影響を避けるためにコンクリートと同じ細骨材を用いる。
- (2) 骨材の表面水をそろえる。
- (3) コンクリートの練混ぜ方法に合わせてセメントと細骨材は空練りを行うかなどの練混ぜ手順を統一する。

(2)については、本研究では、影響はなかったが、PCの種類によってはNSと同様に大きな後添加効果が存在する場合もある¹⁰⁾ために追記した。

5. まとめ

PCを用いたペースト-モルタル-コンクリートによる流動性の相関について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 練混ぜ直後では、細骨材種類の相違により流動性の相関が低下し、系全体の粒度分布の

相違が影響している可能性が考えられた。

- (2) 経時変化では、細骨材の微粒分および練混ぜ効率の相違により生じるペースト部分のBET比表面積の差がPCの吸着挙動に影響を及ぼし、流動性の相関が低下していた。
- (3) 使用する細骨材と材料投入順序が同じならば、コンクリートスランプとモルタルフローには直線関係があり、モルタルによる簡易的な試験でコンクリートの流動性を予測することが可能であると考えられた。
- (4) 使用する細骨材により、流動性の序列が変動するので、標準砂やある特定の砂を用いたモルタルでセメントやPCを統一的に評価することはできないと考えられる。

参考文献

- 1) 小津博ほか：セメントの違いによるペースト-モルタル-コンクリートの流動性の相関関係、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 23, No. 2, pp. 283-288, 2001
- 2) 小澤一雅, 永元直樹：モルタル特性とコンクリートの自己充填性、セメントコンクリート論文集, No. 49, pp. 832-837, 1995
- 3) 枝松良展ほか：モルタルフロー値に及ぼす粉体特性の影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp. 77-82, 1994
- 4) 宇智田俊一郎ほか：モルタルの流動性及び強度発現に及ぼすセメントの粒度分布と骨材の種類の影響、セメントコンクリート論文集, No. 45, pp. 98-103, 1991
- 5) 羽原俊祐, 山田一夫：コンクリートにおけるセメントと有機混和剤との組み合わせによる相性問題、秩父小野田研究報告, No. 49, pp. 171-179, 1998
- 6) 榎田佳寛ほか：モルタルによる高性能減水剤コンクリートのスランプ低下の評価、セメント技術年報, No. 43, pp. 140-143, 1988
- 7) 小川彰一, 中村秀三：各種砂を用いたモルタル流動性に及ぼす含有微粉分の影響、第54回セメント技術大会講演要旨, pp. 100-101, 2000
- 8) 山田一夫ほか：ナフタレン系混和剤を添加したセメントペーストの流動性に及ぼすセメントの鮮度(風化度)の影響、セメントコンクリート論文集, No. 52, pp. 130-137, 1998
- 9) 中村秀三, 小川彰一：砂の状態が流動性に与える影響、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 2, pp. 181-186, 1999
- 10) 山田一夫ほか：硫酸イオンにより分散性能が高まるポリカルボン酸系減水剤、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 23, No. 2, pp. 79-84, 2001