

論文 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

小津博^{*1}・山田一夫^{*2}・矢野眞弓^{*3}・鳥居南康一^{*4}

要旨:コンクリートの流動性をモルタルのような簡易試験により評価するために、市販のセメントを用いて、ペースト・モルタル・コンクリートの流動性の相関関係を解析した。ナフタレンスルホン酸系減水剤を用いた試験の結果、各種流動性試験間の相関は細骨材種類が異なる場合や細骨材の吸水状態が異なる場合に低下していた。モルタルの流動性試験結果は使用する細骨材がコンクリートと同じであれば、コンクリートの流動性試験結果と相関が高く、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, ナフタレンスルホン酸系減水剤, 細骨材, 表面水, 粒度分布

1. はじめに

近年、現場作業省力化のために、充填性やポンプ圧送性が良好である流動性の高いコンクリートが求められている。一方、平成 11 年版土木学会コンクリート標準仕様書〔施工編〕ではコンクリートの単位水量は一般に $175\text{kg}/\text{m}^3$ 以下とするのが望ましいとされている。さらに良質な骨材が入手できなくなっており、良好な流動性が得られにくくなっている。そのため、今後、高性能 (AE) 減水剤の使用が多くなると想定される。

こうした材料の多様化に伴い、コンクリートの配合設計には試験練りを実施しなければならない機会が増加するものと予想できる。しかし、コンクリート試験は多大な労力を要し、試験水準も限られる。そこで、モルタルやペーストによる簡易的な方法が望まれることになり、その重要性がより高まってくると思われる。

現在、実施されている流動性の評価方法としては JIS R 5201「セメントの物理試験方法」のモルタルフローによるセメントの流動性試験方法、JASS 15M103-3.5「セルフレベリング材の品

質評価方法」などがあり、減水剤の性能評価などに用いられている。しかし、コンクリートの流動性とこれらの簡易的方法による流動性の相関は必ずしも高くない。

一方で、これまでに、モルタルによるコンクリートの流動性予測が試みられており、その有用性が確認されている場合もある。大塩らは使用材料が同じ時、コンクリートのスランプ値とモルタルのミニスランプ値に高い相関があることを示した¹⁾。一方、小澤らはハイパフォーマンスコンクリートについて、モルタルの使用材料の種類や骨材容積比が異なれば、コンクリートのフレッシュ性状と一致しないと示した²⁾。モルタルの流動性は粉体および細骨材の粒度分布や形状、粉体と細骨材の干渉により影響を受けると報告されており^{3, 4, 5)}、使用する粉体や細骨材の特性を定量化し、その配合からモルタルやコンクリートの流動性評価に結び付けようとする試みもある⁶⁾。

本報告では、11 種類の市販のセメントを用い、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調べた。さらに前述の

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所第一研究部セメント化学グループ 理修(正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所第一研究部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) 中央研究所第一研究部セメント化学グループ

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所第一研究部セメント・コンクリート技術センター技術グループ 工修(正会員)

既往の研究や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が異なる原因について考察し、コンクリートの流動性を評価する適切かつ簡易的な方法のための指針を見出すことを目的とした。

2. 実験方法

2.1 検討の流れ

検討は図-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影響を与える要因を探ることとした。1-2間では、コンクリートおよびウェットスクリーニング（以下 WS）モルタルを用いて、コンクリートスランブがモルタルの流動性に依存するかどうかを調べた。2-3間では、コンクリートとモルタルの練混ぜ方法の相違や粗骨材の有無による機械的な練混ぜ効率の影響について調べた。3-4間では、細骨材の相違の影響を調べた。4-5間では、同種の絶乾状態および表乾状態の細骨材を用いたモルタルにより、骨材表面水の影響について調べた。5-6間では、モルタルの流動性がペーストに依存するかどうかを調べた。

2.2 材料

セメントは11種類の普通ポルトランドセメントを使用した。セメントのキャラクターを表-1に示す。粗骨材は碎石（北九州市門司区産、密度 2.83kg/l、粗粒率 6.64、吸水率 0.43%、

- | |
|-----------------------------|
| 1. コンクリートスランブ |
| ↓ (① コンクリートとモルタルの流動性の対応) |
| 2. ウェットスクリーニングモルタルフロー |
| ↓ (② 練混ぜ効率の影響) |
| 3. 砕砂モルタルフロー |
| ↓ (③ 細骨材の違いによる影響) |
| 4. 表乾標準砂モルタルフロー (砕砂の表面水を模擬) |
| ↓ (④ 骨材表面水の影響) |
| 5. 標準砂モルタルフロー |
| ↓ (⑤ 細骨材の存在による影響) |
| 6. 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

最大寸法 20mm) を使用した。また、細骨材は砕砂（北九州市小倉南区産、密度 2.69kg/l、粗粒率 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 0.40%）を使用した。表乾標準砂はあらかじめ砕砂の吸水率 1.60% に相当する水 21.6 g を添加し、ホバートミキサにて 30 秒間練混ぜたものである。

2.3 配合

コンクリート配合を表-2に示す。減水剤毎に現実的なコンクリート配合（スランブ 8cm）を想定し、リグニンスルホン酸系減水剤（以下 LS）を用いたものは水セメント比を 60%、ナフタレンスルホン酸系減水剤（以下 NS）およびポリカルボン酸系減水剤（以下 PC）を用いたものは 37.5% 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	3350	1.92	0.18	20.92	4.38	2.74	64.63	2.24	2.13	0.11	0.43	0.6
B	3490	1.23	0.13	21.60	5.65	2.95	63.71	1.41	2.02	0.43	0.44	0.8
C	3290	1.44	0.09	21.47	4.58	2.94	65.10	1.24	1.96	0.30	0.53	0.3
D	3650	2.29	0.13	20.96	4.75	2.92	64.52	1.25	1.94	0.33	0.46	0.8
E	3140	2.22	0.06	21.11	4.87	2.81	64.07	1.05	2.08	0.27	0.46	0.5
F	3470	1.99	1.19	20.64	5.06	2.76	63.55	1.66	1.85	0.16	0.49	0.5
G	3180	2.17	0.21	20.39	4.99	2.98	65.22	0.87	2.22	0.34	0.47	0.6
H	3350	2.46	0.17	20.42	5.30	2.92	64.88	0.94	2.03	0.30	0.35	0.7
I	3390	2.42	0.65	20.33	5.00	3.01	63.56	1.28	2.06	0.37	0.49	0.7
J	3390	2.20	0.23	20.84	5.00	2.64	64.80	1.26	1.84	0.21	0.43	0.8
K	3540	1.70	0.23	21.14	5.13	3.05	64.80	1.10	2.07	0.36	0.37	0.9

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、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。材料分離を生じると流動性の測定が困難であるので、材料分離を生じない水セメント比とした。

2.4 練混ぜ方法および流動性測定法

コンクリートの練混ぜは、容量 50 L のパン型強制練りミキサーを使用した。練混ぜ量は 30 L である。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、水および混和剤を投入し 120 秒間練混ぜた。スランプ試験は JIS A 1101 に準拠した。

モルタルの練混ぜは、ホバートミキサーを使用した。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、水および混和剤を投入し低速 60 秒間、掻き落し後高速 180 秒間練混ぜた。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 50 mm、下端内径 100 mm、高さ 150 mm）により引き抜きフローを測定した。コンクリートスランプは自重のみが作用するものであるため、条件をそろえるためにモルタルでも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 モルタルフローコーンに比べて、フローの変化量が大きく、コンクリートスランプとの比較に適している⁷⁾。

ペーストの練混ぜは、ホバートミキサーを使用した。セメントに水および混和剤を投入し低速 60 秒間、掻き落し後高速 180 秒間練混ぜた。流動性試験は JASS 15M103 に準拠し、直径 50 mm、高さ 51 mm のパイプにより引き抜きフロ

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	減水剤
LS	2>	60.0	45	300	180	875	1125	0.25%
PC	2>	37.5	43	400	150	825	1150	0.80%
NS	2>	37.5	43	400	150	825	1150	1.20%

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	減水剤
砕砂	50	667	334	1375	—
標準砂	45	667	300	1350	—
砕砂	37.5	667	250	1375	1.2%
標準砂	37.5	667	250	1350	1.2%
表乾標準砂	32.5	667	217	1372	1.2%

※ 表乾標準砂の細骨材は表面水 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	減水剤
45	667	300	—
30	667	200	1.2%

ーを測定した。

3. 砂、セメントおよび減水剤の相互作用

3.1 減水剤無添加の場合に異なる細骨材を使用したモルタルの流動性およびその相関

減水剤と骨材との相互作用の影響を除くために、減水剤無添加のモルタルについて検討した。図-2 に砕砂および標準砂モルタルフローの関係を示す。

標準砂モルタルでは水セメント比 45% で 190 ~ 225mm のモルタルフローであるのに対して、砕砂モルタルでは同 50% で 190 ~ 215mm であり、標準砂モルタルの方が流動性は高かった。また、流動性に相関はなく、異なるセメントを使用したモルタルの流動性の序列は骨材によって変わっていた。すなわち、セメントの流動性を考える場合、減水剤無添加の系においても、組合せる砂次第で相対的に流動性が良くなったり悪くなったりする可能性があり、セメントと細骨材を合わせたモルタルの系全体の粒度分布や粒形を考慮する必要があることを示唆している。

3.2 各種減水剤を用いたコンクリートの流動性

図-3に各種減水剤を使用した場合に、スランプ 8cm を得るために必要なコンクリートの単位水量を示す。LS配合の標準偏差は $1.5\text{kg}/\text{cm}^3$ 、PC配合は $2.1\text{kg}/\text{cm}^3$ 、NS配合は $4.2\text{kg}/\text{cm}^3$ であり、単位水量の変動は $\text{NS} > \text{PC} > \text{LS}$ の順に大きかった。LSがNSやPCに比べてセメントの違いによる流動性の差が小さいことは、LSの減水効果が小さく、水セメント比が大きい配合のために減水剤とセメントの相互作用がはっきり現れなかったことによると思われる。

このことより、以下では最も変動の大きいナフタレンスルホン酸系減水剤を用いた場合についての流動性相関について検討を行った。

3.3 減水剤の細骨材への吸着

減水剤が細骨材へ吸着されることでその効力が変化することが指摘されている⁸⁾。そこで、表-3に示したモルタルの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、細骨材に対するNSの吸着を全有機炭素計により評価した。吸着割合は、標準砂では1.2%、砕砂では12.1%であった。砕砂のBET比表面積は $1.25\text{m}^2/\text{g}$ と微粉分を多く含み、標準砂の $0.07\text{m}^2/\text{g}$ より大きいため、吸着量が多かったと考えられる。砕砂モルタルでは、減水剤が細骨材へ吸着し減水効果を小さくする可能性が考えられるが、NSはセメントに対して80%以上の高い吸着率を示す⁹⁾ことを考えると、骨材に対するNSの吸着は無視できる範囲と考えられる。

4. 各種流動性試験結果間の相関関係

以下に図-1の階層間の相関について述べる。

4.1 コンクリート-ウエットスクリーニング (WS) モルタルの相関

コンクリートとモルタルの流動性相関について、PCを使用したコンクリートにより検討した。コンクリートスランプとコンクリートを目

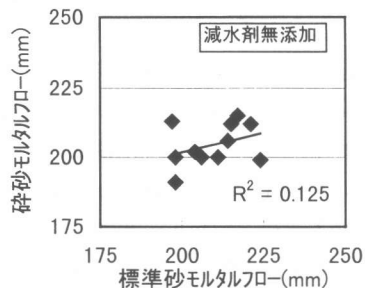


図-2 砂の違いによるモルタルフローの関係

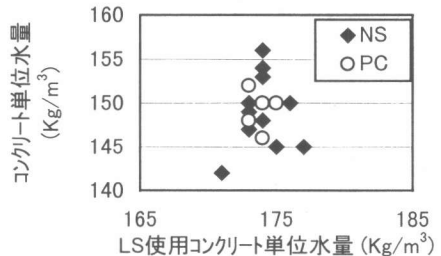


図-3 各種減水剤を用いた場合のコンクリート単位水量

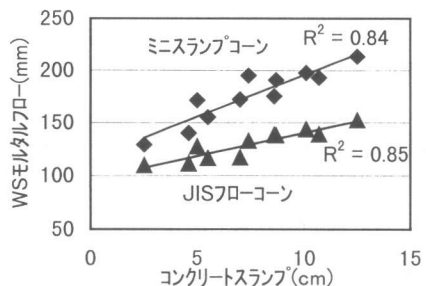


図-4 コンクリートスランプとWSモルタルフローの関係

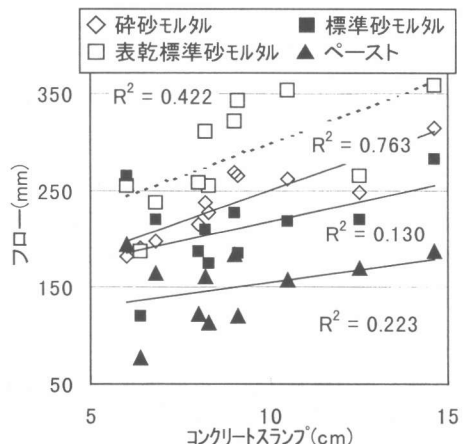


図-5 コンクリートスランプと各種流動性試験結果の関係

開き 5 mm のふるいで WS したモルタルのフローの関係を図-4に示す。参考に JIS A 5201 モルタルフローコーンによる結果も示す。

コンクリートスランブと WS モルタルフローの寄与率（相関係数の 2 乗）は 0.84 と高かった。よって、図-1に示した①の相関関係は満足しており、検討したコンクリートはその流動性がモルタルの流動性に依存していることから、モルタルによりコンクリートの流動性を予測することが可能⁷⁾であることを示している。

4. 2 ペースト-モルタル-コンクリートの流動性の相関

図-5にコンクリートスランブと各種流動性試験結果の関係を示す。コンクリートスランブと砕砂モルタルフローの寄与率は 0.76 と高い値を示した。コンクリートスランブに対して標準砂および表乾標準砂モルタルフロー、ペーストフローの寄与率はそれぞれ 0.42, 0.13, 0.22 と低かった。また、図-6に示すように砕砂および表乾標準砂モルタルフローの寄与率は 0.76 であり相関が見られた。図-7にペーストフローと各モルタルフローの関係を示す。ペーストフローに対して標準砂モルタルフローの寄与率は 0.90 と高いが、砕砂および表乾標準砂モルタルフローでは相関がなかった。

図-1の相関関係で考えれば、1-3間の相関は保たれており（図-8参照）、同一の砂を使用すれば、粗骨材の有無およびそれにより生じる練混ぜ効率の違いはセメントの違いによる流動性の序列に大きな影響を及ぼさないものと考えられる。また、本実験では3-4間で砂の種類が違っても相関は保たれていたが、一般的には減水剤を使用しない場合にあったように、モルタルのセメントと細骨材を合計した固相全体の実績率が両者の粒度分布の相互関係により変化し、モルタルの流動性の序列が変化することも多い⁵⁾。本実験でも1-4間になると粗骨材の有無と細骨材の違いの影響が組み合わさることで、相関は低下したと思われる。また、図

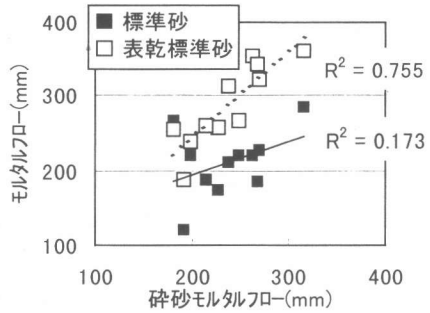


図-6 砂の吸水状態の影響

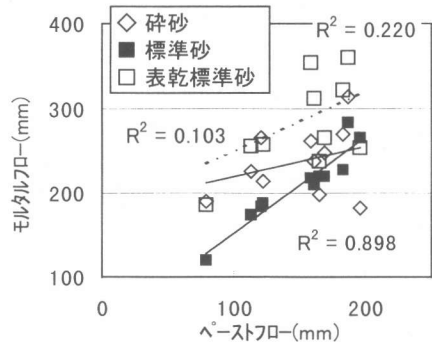


図-7 ペーストフローと各種モルタルフローの関係

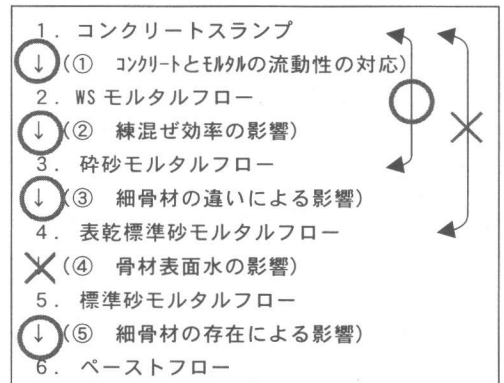


図-8 NSを用いた場合の流動性に関する要因の階層構造：() は考慮する作用因子

図-7によると5-6間の相関は保たれ、細骨材の有無による影響はほとんど見られなかったが、4-6間では相関がなく、4-5間に相違が生じていると考えられた。

4. 3 砂の表面水の影響

4-5間の相違を検証するために、図-6に砕砂と標準砂および表乾標準砂モルタルフロー

の関係を示す。砕砂モルタルに対して標準砂モルタルは奇与率が 0.17 と低い値を示したが、表乾標準砂モルタルでは 0.76 となり、細骨材の吸水状態を等しくすることにより相関が高くなった。NS は練り水と同時に添加の前添加と練混ぜ後の後添加では減水効果が大きく異なり、その影響の度合いもセメントの違いにより変化する¹⁰⁾。表乾状態の細骨材とセメントを空練りした場合、セメントが水と接触することで軽微な後添加効果が現れたと推定される。そのため、セメントが NS を含んだ練混ぜ水と急激に接触するペーストおよび標準砂モルタルフローの相関は高かったと考えられる。このように、NS を用いた場合には流動性に影響を及ぼす主な細骨材の性質の 1 つとして、細骨材の吸水状態の相違が挙げることができる。

また、本実験によるモルタルの練混ぜではセメントと骨材を空練りしているため、JIS R 5201 のようにセメントと練混ぜ水を先に練り混ぜる方法では流動性が異なってくる。そのため、材料の投入順序も流動性に影響を及ぼす大きな要素の一つである⁸⁾。

5. モルタルによる流動性試験方法

以上の結果から、NS を用いたコンクリートの流動性試験を代用する簡易的なモルタルによる試験では、以下の点に留意しなければならない。

- (1) 骨材の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こと。
- (2) 骨材の表面水をそろえること。
- (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こと。

セメント単体、もしくは減水剤と組合せて流動性を評価する場合には、粒度分布等の品質が安定し、減水剤と骨材との相性を考慮して微粉分を含まない砂、例えば標準砂を使用したモルタルとすることが好ましい。また、必要に応じて表乾状態にするかもしくは一次水を投入する

ことも考慮すべきである。

6. まとめ

NS 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) 減水剤の使用の有無によらず、流動性は使用する細骨材とセメントの組合せにより変化する。これは系全体の粒度分布構成が影響している可能性を考慮することができる。
- (2) NS を用いた場合、セメントと砂が最初に接触する練混ぜ方法では細骨材の吸水状態が流動性に影響する。
- (3) 使用する細骨材が表面水を含めて同じであり、材料の練混ぜ順序を考慮すれば、コンクリートとモルタルの相関関係は高く、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。

参考文献

- 1) 大塩明ほか：モルタルを用いたコンクリートの性状評価について、小野田研究報告、Vol. 36, No. 111, pp. 17-34, 1984
- 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) 山口昇三ほか：モルタルフロー値に及ぼす細骨材特性の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16, No. 1, pp. 83-88, 1994
- 5) 内川浩ほか：まだ固まらないセメントペースト、モルタル及びコンクリートの流動性に及ぼすセメントの粉末度及び粒子組成の影響、セメントコンクリート論文集、No. 43, pp. 42-47, 1989
- 6) 枝松良展ほか：モルタルの変形性を表す細骨材の材料特性の定量化、土木学会論文集、No. 538/V-31, pp. 37-46, 1996.5
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 服部健一ほか：流動化コンクリートについて、セメント技術年報、No. 16, pp. 254-258, 1976