

論文 高流動コンクリートの流動性能に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響

山内 聡^{*1}・出光 隆^{*2}・山崎 竹博^{*3}・河野 公平^{*4}

要旨：高流動コンクリートの流動性は骨材やセメントの他，化学混和剤等の特性が影響するため配合上の不確定要素が多い。一般に，ペーストの流動性は水粉体容積比と減水剤添加率から推定できる。¹⁾また，使用材料の性質が一定の場合にはモルタルの流動性はペーストの流動性とペースト細骨材容積比から推定できる。²⁾そこで，本研究ではコンクリートの流動性はモルタルの流動性とモルタル粗骨材容積比から推定できると仮定し，コンクリートのスランブフローを配合条件から推定する方法について検討した。その結果，本実験の使用材料では，コンクリートのスランブフロー面積比を配合条件から推定可能な関数が誘導できることがわかった。

キーワード：高流動コンクリート，流動性，フロー面積比，高性能 AE 減水剤

1. はじめに

高流動コンクリートの流動性は使用材料の特性と配合等に大きく影響されるため決定した配合について実際にコンクリートを練り混ぜ，各種自己充填性試験によって性能を確認することが必要である。一般に，コンクリートの流動性はスランブフロー試験で評価され，これまでの研究からモルタルの流動性は水粉体容積比，減水剤添加率とペースト細骨材容積比から推定できることが分かっている。さらにコンクリートの流動性をモルタルの流動性とモルタル粗骨材容積比から推定することを試みた。ペースト・モルタル・コンクリートの各流動性に及ぼす使用実績の高い高性能 AE 減水剤の影響を定量化することにより高流動コンクリートの流動性を理論的に推定することが可能となる。本研究では，ペースト及びモルタルの流動性について既報の研究概要を述べ，第3節からそれらの関係を拡張したコンクリートの流動性推定式について実験的に検討を行った。

2. 高性能 AE 減水剤を使用した

ペースト及びモルタルの流動特性

ペースト及びモルタル層に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響については既に報告しているのので，さらにモルタルとコンクリートの流動性の関係を評価する指標について必要な概要を述べる。本論文では以後の文章中便宜上，高性能 AE 減水剤を減水剤*と記す。一般に，ペーストを用いたフロー試験においてペーストフロー面積比(Γ_p)と水粉体容積比(V_w/V_b)の関係は減水

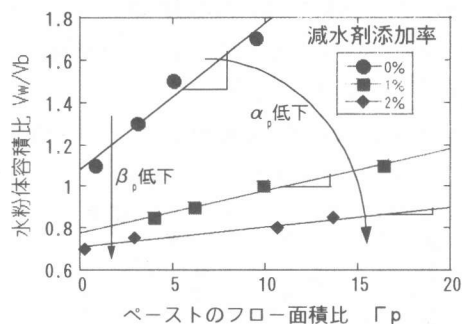


図-1 ペーストフロー面積比と水粉体容積比の関係²⁾

*1 九州工業大学大学院 工学研究科設計生産工学専攻 (正会員)

*2 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 工博 (正会員)

*3 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 工博 (正会員)

*4 九州工業大学大学院 工学研究科設計生産工学専攻

剤*添加率を変えても、図-1 に示すようにほぼ直線関係であると仮定できる。¹⁾²⁾その直線の切片及び傾きをそれぞれ拘束水比 β_p 、単位フロー水比 α_p とすれば、直線は式 (1) のように表され、減水剤*の影響評価式は式 (2) のようになる。¹⁾

$$\Gamma_p = \frac{(V_w/V_b) - \beta_p}{\alpha_p} \tag{1}$$

Γ_p : ペーストのフロー面積比

$$\Gamma_p = \frac{(V_m/V_b) - 1.08\{1 - 0.45\log_e(1 + SP/B)\}}{0.07\{1 - 0.90\log_e(1 + SP/B)\}} \tag{2}$$

(1.5 > SP/B の場合)

既報の論文¹⁾で使用したモルタルのフロー試験結果は表-1 のとおりであった。同結果から、減水剤*添加率が高流動モルタルの流動性状に与える影響は図-2 に示すペーストとモルタルのフロー面積比の関係から式 (3) のように表される。図-2 よりペーストフロー面積が 0 での縦軸の切片 $C_{(SP/B, V_p/V_s)}$ と傾き $I_{(SP/B)}$ を求めることにより式 (4) のように表される。

式 (4) を用いて算出したモルタルのフロー面積比の推定値と実験値は図-3 のように示される。モルタルフロー面積比が 1 から 10 程度で近似できることから相関性が高く、モルタルのフロー面積比は水粉体比、減水剤*添加率、ペースト細骨材容積比を配合要因として理論的に推定できることが分かる。²⁾

$$\Gamma_m = C_{(SP/B, V_p/V_s)} + I_{(SP/B)} \times \Gamma_p \tag{3}$$

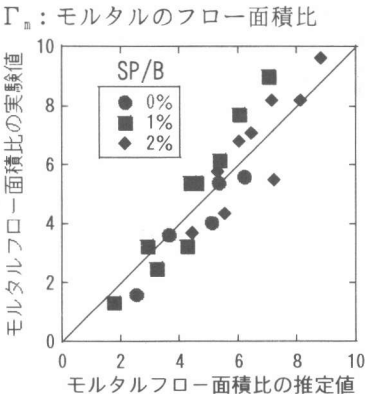


図-3 モルタルフロー面積比の推定値と実験値の比較

表-1 モルタルのフロー試験結果

SP/B	V_w/V_b	Γ_p	V_p/V_s	Γ_m
0	1.625	7.8	1.5	5.4
			1.2	3.62
	1.92	11.9	1	1.59
			1.2	5.6
1	0.85	4.8	1	4.02
			1.5	5.4
	0.91	8.4	1.2	3.24
			1	1.31
			1.5	7.7
			1.2	5.4
	0.95	10.9	1	2.46
			1.5	8.99
2	0.725	0.3	1.2	6.16
			1	3.22
	0.8	9.8	1.5	5.5
			1.2	4.34
			1	3.67
			1.5	8.18
	0.85	20.5	1.2	7.07
			1	5.76
			1.5	9.63
			1.2	8.18
			1	6.81

SP/B : 減水剤添加率 V_w/V_b : 水粉体比

Γ_p : ペーストフロー面積比

V_p/V_s : ペースト細骨材容積比

Γ_m : モルタルフロー面積比

	SP/B	V_p/V_s	Γ_m
○	0	1.5	$\Gamma_m = 0.49 + 0.63 \Gamma_p$
□		1.2	$\Gamma_m = -0.12 + 0.48 \Gamma_p$
◇		1.0	$\Gamma_m = -3.00 + 0.59 \Gamma_p$
●	1	1.5	$\Gamma_m = 2.63 + 0.59 \Gamma_p$
■		1.2	$\Gamma_m = 0.97 + 0.49 \Gamma_p$
◆		1.0	$\Gamma_m = -0.18 + 0.31 \Gamma_p$
⊕	2	1.5	$\Gamma_m = 5.69 + 0.20 \Gamma_p$
⊗		1.2	$\Gamma_m = 4.60 + 0.19 \Gamma_p$
◇		1.0	$\Gamma_m = 3.84 + 0.16 \Gamma_p$

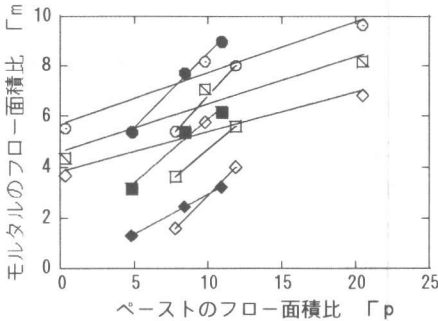


図-2 モルタルとペーストのフロー面積比の関係

$$\Gamma_m = \{-7.801 + 1.245(SP/B) + 0.775(SP/B)^2 + 5.61(V_p/V_s)\} + \{0.607 - 0.2(SP/B)\} \times \left[\frac{(V_w/V_b) - 1.08\{1 - 0.45\log_e(1 + SP/B)\}}{0.07\{1 - 0.899\log_e(1 + SP/B)\}} \right] \tag{4}$$



図-4 コンクリートの練り混ぜ方法

3. コンクリートの流動性

に関する実験概要

3.1 使用材料

コンクリートの流動性に関する実験には、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ，比表面積 $3220\text{cm}^2/\text{g}$ ），細骨材（海砂，密度 2.55g/cm^3 ，粗粒率 2.94，実積率 55.9），粗骨材（碎石，密度 2.77g/cm^3 ，粗粒率 6.44，実積率 60.0），高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）を使用した。使用材料は実験前日から 24 時間 20°C 一定に調整して用いた。

3.2 スランブフロー試験

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサ（容量 0.055m^3 ）を使用した。使用材料の投入は図-4 の要領で行ない、スランブフローは練り上がり直後に測定した。フローの最大径とそれに直角方向の値からフロー面積比 Γ を式（5）

$$\Gamma = \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 - 1 \quad (5)$$

f ：フローの平均値（mm）

f_0 ：フローコーンの底面直径（mm）

から算出した。

3.3 実験に用いるモルタルの流動性

一般に、高流動コンクリートのスランブフロー値は 50cm 以上である。これに対応するモルタルのフロー値が 250～300mm 程度であれば十分高流動コンクリートの目標スランブフローは達成できる。今回使用したモルタルの流動特性は、既報の論文¹⁾で理論的に算出できることが分かっている。すなわち、モルタルのフロー面積比に与える減水剤*の影響は式（4）のように評価されているので、ここではモルタル量と粗骨材量を変化させコンクリートに及ぼす減水剤

表-2 コンクリートのフロー試験結果

SP/B	V _w /V _b	V _p /V _s	Γ_m	V _m /V _g	Γ_c
1	0.850	1.5	5.40	4.0	10.2
				2.3	7.9
				1.5	3.2
		1.2	3.24	4.0	6.9
				2.3	4.5
				1.5	0.1
	0.910	1.0	1.31	4.0	2.3
				4.0	13.6
				2.3	9.7
		1.5	7.70	1.5	7.0
				4.0	10.5
				2.3	4.4
2	0.725	1.5	5.50	4.0	13.2
				2.3	12.3
				1.5	9.5
		1.2	4.34	4.0	12.8
				2.3	10.5
				1.5	6.6
	0.800	1.0	3.67	4.0	9.6
				2.3	6.1
				1.5	2.1
		1.5	8.18	4.0	16.3
				2.3	14.2
				4.0	16.0
		1.2	7.07	2.3	13.1
				1.5	10.3
				4.0	13.4
		1.0	5.76	2.3	12.3
				1.5	8.6

V_m/V_g：モルタル粗骨材比

Γ_c ：スランブフロー面積比

*の影響を検討した。

4. 実験結果

4.1 コンクリートの流動性

減水剤*添加率が高流動コンクリートの流動性状に及ぼす影響を調べる目的で、減水剤*添加率（SP/B）を 1.0, 2.0% とし、モルタル粗骨材容積比（V_m/V_g）を 4.0, 2.3, 1.5 とした場合のスランブフロー値を測定した。このとき、モルタルのペースト細骨材容積比は減水剤*添加率ごとに適切なモルタルフロー面積比（ Γ_m ）が得られるよう予備実験から定めた値とした。それらのペースト・モルタル・コンクリートに関する

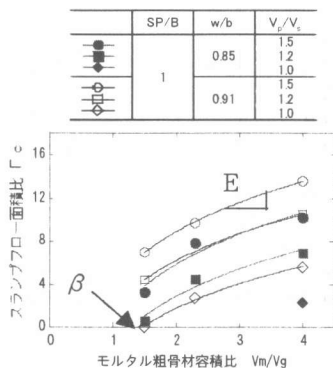
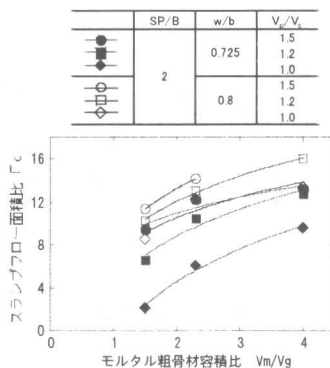


図-5 モルタル粗骨材容積比とスランプフロー面積比の関係

るフロー試験結果を表-2 に示す。モルタル粗骨材容積比とスランプフロー面積比との関係を各減水剤*添加率ごとに図-5 に示す。図-5 からモルタル量が増加するとスランプフロー面積比は緩やかに増加していくことが分かる。モルタルと同様、この関数とフロー面積比が0となるモルタル粗骨材容積比を拘束モルタル比 (β) と定義し、コンクリートのモルタル量をモルタル粗骨材容積比0から少しずつ増やしていくとき初めて流動変形を生じる点を意味している。また傾きは単位フローモルタル比 (E_c) と定義し、フロー面積比を単位量だけ増加させるのに必要なモルタル量の意味している。ここで、拘束モルタル比はペースト細骨材容積比が大きいほど、減水剤添加率が多いほど小さくなる傾向がある。しかしながら単位フローモルタル比は減水剤添加率 1%ではペースト細骨材容積比が大きいほど小さくなる傾向すなわちペースト量が多いほど流動性が高いのに対して、減水剤添加率 2%では水粉体容積比=0.725 のペーストを使用したコンクリートにおいてはペースト細骨材容積比が大きいほど小さくなる傾向を示している。これは、ペーストの降伏値が高く流動性が低いいため逆にペースト量が多いとコンクリートの流動性が低くなることを表している。また、ペースト流動性が低くてもモルタルにおいてある程度流動性があればコンクリートの場合でも十分な流動性を得ることができる。よって、コンクリートの流動性はペーストの流動性、ペースト量、細骨材量、粗骨材量という流動特性と配合



	SP/B	V _m /V _g	Γ _c
●	1	4.0	Γ _c =1.5+1.67Γ _m
		2.3	Γ _c =-1.36+1.73Γ _m
		1.5	Γ _c =-5.45+1.71Γ _m
○	2	4.0	Γ _c =8.14+1.02Γ _m
		2.3	Γ _c =6.63+0.97Γ _m
		1.5	Γ _c =2.26+1.15Γ _m

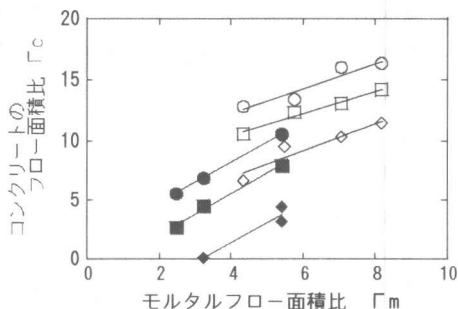


図-6 コンクリートとモルタルのフロー面積比の比較

$$\Gamma_c = C_{(SP/B, V_m/V_g)} + I_{(SP/B, V_m/V_g)} \times \Gamma_m \quad (6)$$

要因で決まることが判る。

4.2 コンクリートとモルタルの流動性

コンクリートとモルタルの流動性を比較するため一定の流動性を有するモルタルに粗骨材を加えてコンクリートのフロー面積比を求めた。両者のフロー面積比の関係を図-6 に示す。両者の関係はモルタルの相対フロー面積比が8程度以下でモルタルが材料分離しないので、式(6)の関数で示されると仮定した。この時 SP/B の配合が異なるごとに両者の関係はほぼ直線関係にある。同図のモルタルフロー面積比が0である縦軸の切片 $C_{(SP/B, V_m/V_g)}$ は図-7 に示すように減水剤添加率ごとに直線として表される。さらにその傾き $I_{(SP/B)}$ は減水剤添加率が増すと小さ

くなるのでその影響を図-9に示した。減水剤添加率と傾き $I_{(SP/B)}$ との関係は直線と仮定すれば、任意の配合におけるコンクリートのフロー面積比は式(6)のような関数で算出が可能となる。

4.3 コンクリートフロー面積比算定式の係数

式(6)の切片 $C_{(SP/B, Vm/Vg)}$ 、傾き $I_{(SP/B)}$ を求めるため、図-6のモルタルとコンクリートのフロー面積比の関係を回帰式で表した。同式の縦軸の切片と傾きを表-2に示した。同表から切片の値とモルタル粗骨材比の関係を求め図-7とした。図中の減水剤*添加率ごとの各直線は、一定の傾きを持つとすれば、式(7)のように表される。式中の $C_{(SP/B, 0)}$ はモルタル粗骨材容積比が0の点、すなわち、粗骨材のみの仮想のフロー面積比を示すものである。図-6から各直線の切片 $C_{(SP/B, Vm/Vg)}$ は回帰式を求めたところ式(8)、(9)のように表された。回帰式で得られた $C_{(SP/B, 0)}$ の値と減水剤*添加率との関係を図-8に示す。同図から各減水剤*添加率を考慮した $C_{(SP/B, 0)}$ の値は式(10)のように表される。よって、式(10)を式(6)に代入することにより各減水剤*添加率における $C_{(SP/B, Vm/Vg)}$ は式(11)のように表される。このとき表-2及び図-7から、 $C_{(SP/B, 0)}$ の負の値が大きくなるにつれて、モルタル粗骨材容積比の変化によるコンクリートのフロー面積比の増分は既報の論文¹⁾で示すモルタルフロー面積比の増分よりも卓越していくことを示している。

次に、図-6に示すモルタルとコンクリートのフロー面積比を表す直線の傾きについて考察する。図から各直線は減水剤*添加率ごとに傾きを変える。減水剤*添加率が同じ場合にはモルタル粗骨材容積率の変化に対してほぼ平行となることが判る。減水剤*添加率ごとの傾きの平均は図-9のようになり式(12)で示される。これはモルタルフロー面積比が単位量だけ変化したときにスランプフロー面積比が変化する割合を表すものである。ペースト細骨材比を増加させてモルタルフロー面積を大きくする場合は減水剤*を多く使用したモルタルでは、減水剤*添

表-2 切片と傾き

SP/B	Vm/Vg	切片	傾き
1	4	1.5	1.67
	2.3	-1.36	1.73
	1.5	5.45	1.71
2	4	8.14	1.02
	2.3	6.63	0.93
	1.5	2.26	1.15

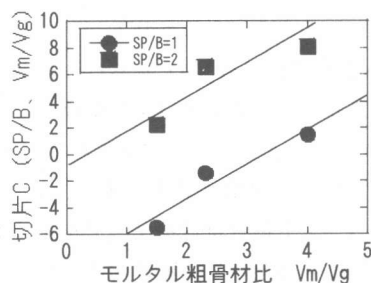


図-7 切片とモルタル粗骨材比の関係

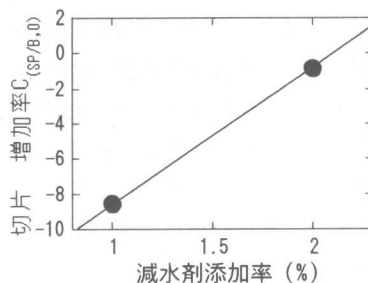


図-8 切片増加率と減水剤添加率の関係

$$C_{(SP/B, Vm/Vg)} = C_{(SP/B, 0)} + 2.12(Vm/Vg) \quad (7)$$

$$C_{(1, Vm/Vg)} = -0.80 + 2.12(Vm/Vg) \quad (8)$$

$$C_{(2, Vm/Vg)} = -8.55 + 2.12(Vm/Vg) \quad (9)$$

$$C_{(SP/B, 0)} = -16.30 + 7.75(SP/B) \quad (10)$$

$$C_{(SP/B, Vm/Vg)} = -16.30 + 7.75(SP/B) + 2.12(Vm/Vg) \quad (11)$$

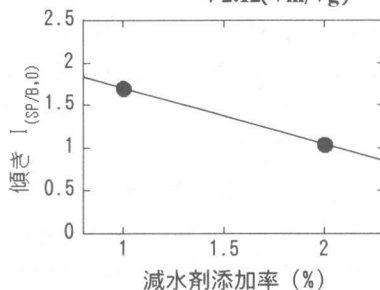


図-9 傾きと減水剤添加率の関係

$$I_{(SP/B)} = 2.37 - 0.67(SP/B) \quad (12)$$

加率が小さいモルタルに比べて必要なペースト量が減少する。また減水剤*添加率を大きくしたモルタルを用いたコンクリートでは、モルタルフロー面積比が増加してもそれに伴うスランブフローの増加は小さくなる。式 (11), (12), (3) を式 (6) に代入すると図-8 に示す各直線は式 (13) のように計算される。

式 (6) の Γ_m は式 (4) からペースト細骨材比と減水剤*添加率 (SP/B) の関数として与えられ、また Γ_m は Γ_p より推定できることから、スランブフロー面積比は水粉体比、減水剤*添加率、ペースト細骨材容積比、モルタル粗骨材容積比を配合要因として推定することができる。

このようにして得られた、式 (13) によるスランブフロー値推定値と実験値の比較を図-10 に示す。わずかな相異はあるが、式 (13) に十分近似できることがわかる。両者間の相違についてははばらつきの他に、図-8, 図-9 において直線と仮定したことによると思われる。この関係式については、今後詳細な実験により、更に検討を行う予定である。

5. まとめ

本研究では、高流動コンクリートの配合設計に関連して、モルタルの流動性からコンクリートの流動性を推定する方法を実験的に検討した。その結果から明らかになった点を以下に示す。

- 1) モルタル量が増加するとスランブフロー面積比は緩やかに増加していく。
- 2) モルタルとコンクリートのフロー面積比の関係は粗骨材の仮想フロー面積比を縦座標の切片 $C_{(SP/B, V_m/V_g)}$ とし、減水剤添加率から定まる傾き $I_{(SP/B)}$ を用いて式 (6) のような直線関係で定まる。
- 3) スランブフロー面積比を算定する式 (6) にモルタルのフロー面積比を与える式 (4) を代入すれば任意の配合の高流動コンクリートのフロー面積比を算出することが可能である。
- 4) スランブフロー面積比は式 (13) で表されるように水粉体比、減水剤*添加率、ペースト細

$$\Gamma_C = \left\{ -16.30 + 7.75(SP/B) + 2.12(V_m/V_g) + \{2.37 - 0.67(SP/B)\} \times \left[\{-7.801 + 1.245(SP/B) + 0.775(SP/B)^2 + 5.61(V_p/V_g) + \{0.607 - 0.2(SP/B)\} \right] \times \left[\frac{(V_w/V_b) - 1.08\{1 - 0.45 \log_e(1 + SP/B)\}}{0.07\{1 - 0.90 \log_e(1 + SP/B)\}} \right] \right\} \quad (13)$$

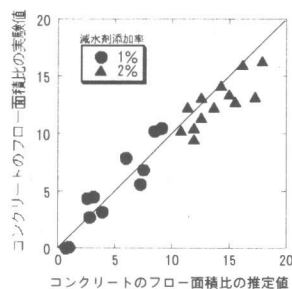


図-10 コンクリートのフロー面積比の

推定値と実験値の比較

骨材容積比、モルタル粗骨材容積比を配合要因として推定することができる。

本研究では細骨材・粗骨材の性質を一定にして実験を行ったため、より汎用的なコンクリートの流動性の推定に当たっては、式 (11) に骨材の性質 (実積率、粗粒率等) やコンクリートの温度、粉体及び減水剤の種類による特性を定量的に取り入れる必要があり、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 藏重 勲, 出光 隆, 山崎 竹博, 渡辺 明: ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を添加したペーストの流動性, セメント・コンクリート論文集 NO.52 pp.230-234, 1998
- 2) 俵 道和, 出光 隆, 山崎 竹博, 渡辺 明: ペースト及びモルタルの流動性に及ぼす高性能 AE 減水剤の影響評価, コンクリート工学年次論文報告集 vol.21 No.2 pp.517-522 1999
- 3) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版 (1993)
- 4) 枝広良展, 下川浩史, 岡村甫: 粉体の特性とペーストのフロー値との関係, 土木学会論文集, NO.544/V-32, pp.65-75, 1996