

論文 高流動コンクリートの流動性能に及ぼす細骨材粗粒率の影響

三船 慎治*1・出光 隆*2・山崎 竹博*3

要旨：高流動コンクリートの流動性は配合の他，使用材料の特性が影響する。材料特性が一定の場合には，ペーストの流動性は水粉体容積比と減水剤添加率（SP/B）を変数とするフロー面積比の関数で定式化できる。また，モルタルの流動性関数はペーストのフロー面積比関数とペースト細骨材容積比から推定でき，コンクリートの流動性関数はモルタルの流動性関数とモルタル粗骨材容積比から推定できる。本研究では既報のコンクリートの流動性関数に細骨材粗粒率（F.M.）の影響を組み込むことを検討した。その結果，細骨材の変化に伴う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，細骨材粗粒率

1. はじめに

高流動コンクリートの流動性はペーストの流動特性に基づき，使用する細骨材，粗骨材の配合と材料特性に大きく影響される。高流動コンクリートの配合と流動性の関係を考察する場合，使用する粉体の特性及び配合を考慮したペーストの流動性を求める必要がある。ペーストの流動性は水粉体容積比と高性能 AE 減水剤（以下減水剤と記す）の配合とペーストフロー面積比の関係から求めた拘束水比，単位フロー水比によって表現することができる。これらのペーストに材料特性が一定の細骨材を加えたモルタルのフロー値はペーストのフロー値とペースト細骨材容積比（ V_p/V_s ）及びモルタルフロー値の関係から求めることができる。^{1)~5)}さらに，モルタルに材料特性が一定の粗骨材を加えたコンクリートのスランブフロー値は，モルタルのフロー値とモルタル粗骨材容積比との関係から関数化することが可能である。^{2), 3)}本研究では，これらの配合とフロー値を表す基本関数に F.M. が異なる細骨材を用いた場合のコンクリートのスランブフロー値への影響を考察する。

2. 高流動コンクリートの流動性推定式

同一材料を用いた種々の配合の高流動コンクリートの流動性をペーストのフロー面積比，モルタルのフロー面積比，コンクリートのスランブフロー面積比を用いて表せば以下ようになる。フロー面積比とは，モルタル及びコンクリートの流動性を表す一指標で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 (1) から算出した。

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

f : フローの平均値 (mm)

f_0 : フローコーンの底面直径 (mm)

2. 1 ペーストの流動特性

使用したセメント，減水剤に関するペーストの水粉体容積比（ V_w/V_b ）とペーストのフロー面積比の関係は図-1のように表される。ペーストを用いたフロー試験においてペーストのフロー面積比（ Γ_p ）と水粉体容積比（ V_w/V_b ）の関係は減水剤添加率を変えても，図-1に示すように

*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）

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(2)のように表される。

$$\Gamma_p = \frac{(V_w/V_b) - \beta_p}{\alpha_p} \quad (2)$$

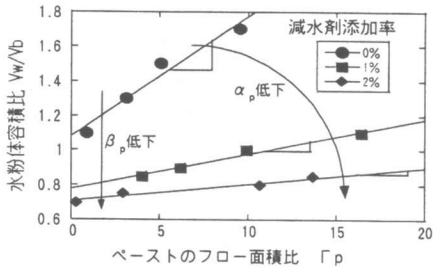


図-1 ベーストフロー面積比と水粉体容積比の関係

2.2 モルタルの流動性

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。¹⁾同結果から, 減水剤添加率がモルタルの流動性状に与える影響は図-2に示す Γ_p とモルタルのフロー面積比(Γ_m)の関係から式(3)のように表される。

図-2より Γ_p が0となる縦軸の切片 $C_{(SP/B, Vp/Vs)}$ と傾き $I_{(SP/B)}$ を求めることで推定式が得られる。

$$\Gamma_m = C_{(SP/B, Vp/Vs)} + I_{(SP/B)} \times \Gamma_p \quad (3)$$

Γ_m : モルタルのフロー面積比

式(3)を用い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。 Γ_m の範囲は1から10程度まで近似できることから実用上のモルタルのフロー面積比 Γ_m は, 水粉体比, 減水剤添加率, ベースト細骨材容積比(V_p/V_s)を配合要因として理論的に推定できることが分かる。²⁾

3. 実験概要

実験は, 細骨材, 減水剤添加量などの配合条件を変え, 流動性をフロー面積比で評価した。モルタル及びコンクリートの流動性に関する実験

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	1.59
1	0.85	4.8	1.2	5.6
			1	4.02
			1.5	5.4
1	0.91	8.4	1.2	3.24
			1	1.31
			1.5	7.7
2	0.85	20.5	1.2	5.4
			1	2.46
			1.5	8.99
2	0.95	10.9	1.2	6.16
			1	3.22
			1.5	5.5
2	0.725	0.3	1.2	4.34
			1	3.67
			1.5	8.18
2	0.8	9.8	1.2	7.07
			1	5.76
			1.5	9.63
2	0.85	20.5	1.2	8.18
			1	6.81
			1.5	8.18

	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	$\Gamma_m = 3.84 + 0.16 \Gamma_p$

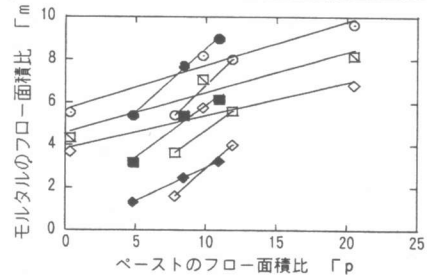


図-2 モルタルとベーストのフロー面積比の関係

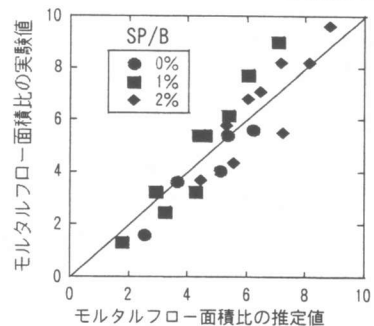


図-3 モルタルのフロー面積比の推定値と実験値の比較

には, 普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3 , 比表面積 $3220\text{cm}^2/\text{g}$)を用いた。また, モルタルの実験に用いた細骨材は土木学会

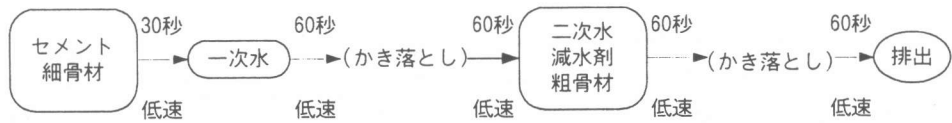


図-4 コンクリートの練り混ぜ方法

標準砂をふるい分けし、F.M.の違いによる影響を検討するため微粒分(0.15mm以下)を取り除き、所要のF.M.が得られるように配合し使用した。また、コンクリートにおいては、ふるい分けを行いF.M.を調節するのは困難であるので微粒分を含む試験砂微粒、細骨材A、細骨材Bを使用した。それぞれの細骨材の特性値を表-2に示す。また、粗骨材(碎石、密度2.64g/cm³、粗粒率6.89、実積率59.2)、高性能AE減水剤には、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℃一定に調整して用いた。

コンクリートの練混ぜは、二軸強制練りミキサ(容量0.055m³)を使用した。使用材料の投入は図-4の要領で行い、スランブフローは練り上がり直後に測定した。

表-2 細骨材の特性値

細骨材	乾燥比量	含水比	吸水率(%)	実積率(%)	粗粒率(F.M.)	残留質量百分率(%)							
						4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15		
試験砂						61.7	2.9	0.1	5.9	32.8	59.7	89.4	99.4
試験砂①	2.56	2.60	1.46			60.9	2.7	0.0	3.0	25.4	52.8	85.6	100.0
試験砂②						61.9	2.9	0.1	5.9	32.8	59.5	89.1	100.0
試験砂③						62.3	3.1	0.2	10.2	40.2	66.0	90.4	100.0
細骨材A	2.55	2.58	1.29	64.0	2.0	1.5	5.6	15.6	31.2	52.9	93.5		
細骨材B	2.53	2.57	1.46	62.0	2.7	0.3	22.8	22.8	54.7	84.8	98.5		

4 実験結果

4.1 モルタルの流動性とF.M.の関係

F.M.がモルタルの流動性に及ぼす影響を調べる目的で、粒度の異なる細骨材を用いてモルタルのフロー値を測定した。これらのフロー試験結果を表-3に示す。表-3の結果からVp/VsとΓmの関係を示せば図-5のようになる。同図の関係はF.M.、減水剤*添加率SP/Bごとに变化する直線関係で表される。モルタルのフロー面積比0軸との切片はベスト量を増やした際、初めて流動変形を起こすベスト細骨材容積比を意味しており、これを拘束ベスト比βmとする。傾きはフロー面積比を単位量だけ増

表-3 モルタルフロー試験結果

F. M.	SP/B	Vw/Vb	Vp/Vs	Γm	
2.26	0.0	1.89	0.9	0.46	
		2.11	2.21	0.9	1.50
		1.89	1.0	2.31	
		2.21	1.0	3.75	
		1.89	1.1	3.69	
	2.21	1.1	5.20		
	1.0	1.07	0.9	2.37	
		1.17	0.9	2.61	
		1.07	1.0	2.94	
		1.17	1.0	4.48	
		1.07	1.1	4.13	
	2.0	1.17	1.1	6.32	
		0.85	0.9	1.98	
		0.91	0.9	2.90	
		0.85	1.0	3.04	
0.91		1.0	4.34		
2.87	0.0	0.85	1.1	4.95	
		0.91	1.1	6.43	
		1.89	0.9	1.19	
		2.21	0.9	2.42	
		1.89	1.0	2.74	
	1.0	2.21	1.0	4.09	
		1.89	1.1	3.73	
		2.21	1.1	5.76	
		1.07	0.9	3.64	
		1.17	0.9	3.69	
		1.07	1.0	4.13	
		1.17	1.0	4.88	
		1.07	1.1	6.08	
		1.17	1.1	6.76	
		0.85	0.9	3.80	
2.0	0.91	0.9	4.71		
	0.85	1.0	5.03		
	0.91	1.0	5.73		
	0.85	1.1	6.43		
	0.91	1.1	7.04		
3.07	0.0	1.89	0.9	1.89	
		2.21	0.9	3.84	
		1.89	1.0	3.69	
		2.21	1.0	4.83	
		1.89	1.1	4.45	
	1.0	2.21	1.1	6.29	
		1.07	0.9	4.20	
		1.17	0.9	4.83	
		1.07	1.0	5.84	
		1.17	1.0	7.04	
		1.07	1.1	6.78	
		1.17	1.1	7.01	
		0.85	0.9	5.28	
		0.91	0.9	5.94	
		0.85	1.0	5.94	
2.0	0.91	1.0	6.81		
	0.85	1.1	7.04		
	0.91	1.1	7.44		

加させるのに必要なペースト細骨材容積比を意味しており、これを単位フローペースト比 α_m と定義する。この時、 V_p/V_s と Γ_m の関係は式 (4) のようになり、係数 β_m 、 α_m は減水剤添加率と F. M. ごとに異なる。

$$V_p/V_s = \beta_m + \alpha_m \times \Gamma_m \quad (4)$$

しかしながら、減水剤を使用したモルタルでは、これら β_m 、 α_m そのものが見かけ上変化する流動性を表すことが困難となる。よって、細骨材特性、減水剤添加率に伴う両係数の変化を実験的に検討した。その結果 F. M. が大きくなるごとに、また減水剤添加率が増えるごとに β_m は低下し、 α_m は増加する。それらの関係は図 6 のようになり、各 F. M. ごとに減水剤が 0 となる切片の値 $\beta_{0(F.M.)}$ 、 $\alpha_{0(F.M.)}$ を基準として β_m の低下率 $\Delta\beta$ 、 α_m の増加率 $\Delta\alpha$ とすると β_m 、 α_m は式(5)・(6)のように表される。

$$\beta_m = \beta_{0(F.M.)} (1 - \Delta\beta) \quad (5)$$

$$\alpha_m = \alpha_{0(F.M.)} (1 + \Delta\alpha) \quad (6)$$

実験結果を代入すると、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\alpha$ の関係は図 7 のように表され、図中の曲線を減水剤分散効果が SP/B の増加にしたがって指数的に増加すると仮定し、式(7)・(8)に近似した。

$$\Delta\beta = A_{(F.M.)} (e^{SP/B} - 1) \quad (7)$$

$$\Delta\alpha = B_{(F.M.)} (e^{SP/B} + 1) \quad (8)$$

ここで式(5)・(6)・(7)・(8)に表される係数 $\beta_{0(F.M.)}$ 、 $\alpha_{0(F.M.)}$ 、 $A_{(F.M.)}$ 、 $B_{(F.M.)}$ は F. M. の違いにより変化する値である。よって Γ_m は直線関係式(4)に式(5)・(6)・(7)・(8)を代入することにより減水剤添加率、細骨材 F. M. を考慮した関係式(9)が得られる。

$$\Gamma_m = \frac{(V_p/V_s) - \beta_0(F.M.) \{1 - A_{(F.M.)} (e^{SP/B} - 1)\}}{\alpha_0(F.M.) \{1 + B_{(F.M.)} (e^{SP/B} + 1)\}} \quad (9)$$

式 (9) から得られた推定値と実験値の比較を図-8 に示す。また、図-8 の実験値より $\beta_{0(F.M.)}$ 、 $\alpha_{0(F.M.)}$ 、 $A_{(F.M.)}$ 、 $B_{(F.M.)}$ と F. M. の関係を求めると式 (10)・(11)・(12)・(13) が得られる。

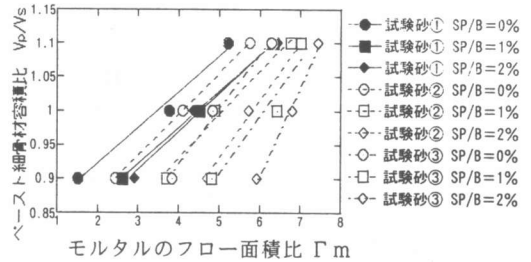


図-5 b ペースト細骨材比 V_p/V_s と

モルタルのフロー面積比の関係

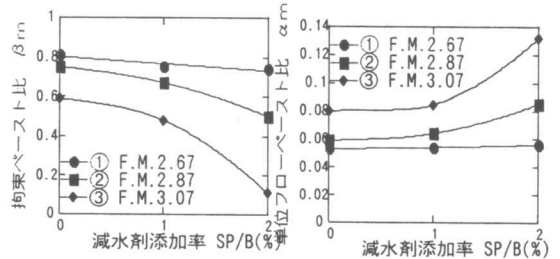


図-6 β_m 、 α_m と減水剤添加率の関係

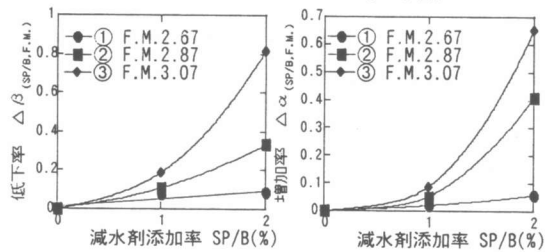


図-7 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\alpha$ と減水剤添加率の関係

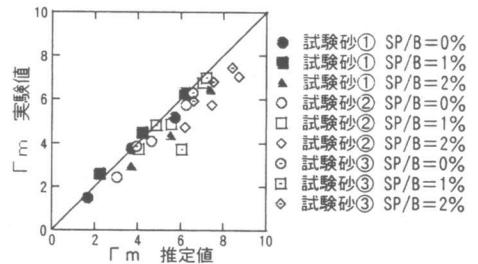


図-8 モルタルのフロー面積比の

実験値と推定値の比較

$$A = -0.578 + 0.225 F.M. \quad (10)$$

$$B = -0.349 + 0.137 F.M. \quad (11)$$

$$\beta_0 = 2.29 - 0.55 F.M. \quad (12)$$

$$\alpha_0 = -0.13 + 0.06 F.M. \quad (13)$$

式(9)に代入すると、F. M. を考慮したモルタルのフロー面積比が式(14)から得られる。

$$\Gamma_m = \frac{V_p/V_s - (0.84 - 0.028F.M.) \times \{1 - (0.052 + 0.010F.M.) \times (e^{SP/B} - 1)\}}{(-0.017 + 0.027F.M.) \times \{1 + (-0.324 + 0.162F.M.) \times (e^{SP/B} - 1)\}} \quad (14)$$

4.2 コンクリートの流動性

図9にコンクリートのフロー面積比 Γ_c とモルタルのフロー面積比 Γ_m の関係を示す。 Γ_c と Γ_m の関係には切片 C 、傾き I を用いて式(15)のように表される。

$$\Gamma_c = C + I\Gamma_m \quad (15)$$

図9より F.M. の変化、また減水剤添加率の変化により切片 C 、傾き I は影響を受ける。その関係は図10で表され、それぞれの切片を $C_{0(F.M.)}$ 、 $I_{0(F.M.)}$ を基準とし切片増加率 ΔC 、傾き低下率 ΔI とすると切片 C 、傾き I は式(16)、(17)で表される。

$$C = C_{0(F.M.)}(1 + \Delta C) \quad (16)$$

$$I = I_{0(F.M.)}(1 + \Delta I) \quad (17)$$

切片増加率 ΔC 、傾き低下率 ΔI の関係を図11に示す。ここで図中の曲線は減水剤の分散効果が SP/B の増加のにしたがって指数的に増加すると仮定したもので、式(18)、(19)に示す指数関数で表される。

$$\Delta C = X_{(F.M.)}(e^{SP/B} - 1) \quad (18)$$

$$\Delta I = Y_{(F.M.)}(e^{SP/B} - 1) \quad (19)$$

Γ_c は式(15)に式(16)、(17)を代入して得られる式(20)から減水剤添加率、細骨材 F.M. を考慮した計算が可能となる。

$$\Gamma_c = C_0 \{1 + X_{(F.M.)}(e^{SP/B} - 1) + I_0 \{1 - Y_{(F.M.)}(e^{SP/B} - 1)\}\} \quad (20)$$

式(20)から得られた推定値と実験値の比較を図12に示す。また、実験値より $\beta_{0(F.M.)}$ 、 $\alpha_{0(F.M.)}$ 、 $A_{(F.M.)}$ 、 $B_{(F.M.)}$ を算定すると式(21)・(22)・(23)が得られる。

$$X = -2.567 + 1.606F.M. \quad (21)$$

$$Y = 1.448 - 0.501F.M. \quad (22)$$

$$C_0 = 0.152 + 0.280F.M. \quad (23)$$

表-4 コンクリートのフロー値

F. M.	SP/B	V _w /V _b	V _p /V _s	Γ_m	V _m /V _g	Γ_c
2.0	0.0	1.58	1.0	0.40	3.0	1.6
		1.89	1.0	1.82	3.0	3.5
		2.21	1.0	3.39	3.0	5.6
		2.52	1.0	4.83	3.0	7.1
	1.0	1.01	1.0	0.11	3.0	1.0
		1.07	1.0	0.80	3.0	3.1
		1.17	1.0	2.06	3.0	6.1
		1.26	1.0	3.56	3.0	7.7
	2.0	0.79	1.0	0.09	3.0	6.4
		0.85	1.0	1.07	3.0	7.0
		0.91	1.0	1.77	3.0	7.9
		1.01	1.0	3.24	3.0	9.8
2.7	0.0	1.58	1.0	1.51	3.0	2.1
		1.89	1.0	3.24	3.0	4.0
		2.21	1.0	4.50	3.0	6.3
		2.52	1.0	6.16	3.0	8.1
	1.0	1.01	1.0	1.91	3.0	5.1
		1.07	1.0	3.10	3.0	6.5
		1.17	1.0	4.71	3.0	8.3
		1.26	1.0	5.81	3.0	9.0
	2.0	0.79	1.0	3.54	3.0	10.1
		0.85	1.0	4.31	3.0	11.5
		0.91	1.0	6.29	3.0	11.9
		1.01	1.0	7.27	3.0	12.2
2.9	0.0	1.58	1.0	1.09	3.0	2.5
		1.89	1.0	2.69	3.0	4.7
		2.21	1.0	3.84	3.0	8.2
		2.52	1.0	5.33	3.0	8.5
	1.0	1.01	1.0	2.06	3.0	7.8
		1.07	1.0	2.96	3.0	8.9
		1.17	1.0	3.86	3.0	11.0
		1.26	1.0	4.88	3.0	11.9
	2.0	0.79	1.0	1.00	3.0	12.3
		0.85	1.0	4.22	3.0	14.8
		0.91	1.0	5.63	3.0	15.3
		1.01	1.0	6.48	3.0	16.2

$$I_0 = 0.658 + 0.286F.M. \quad (24)$$

これらを式(9)代入すると式(25)が得られる。

$$\Gamma_c = \frac{(0.152 + 0.280F.M.) \cdot \{1 + (-2.567 + 1.606F.M.) \cdot (e^{SP/B} - 1)\} + (0.152 + 0.280F.M.) \cdot \{1 - (-2.567 + 1.606F.M.) \cdot (e^{SP/B} - 1)\} \times \frac{V_p/V_s - (0.84 - 0.028F.M.) \times \{1 - (0.052 + 0.010F.M.) \times (e^{SP/B} - 1)\}}{(-0.017 + 0.027F.M.) \times \{1 + (-0.324 + 0.162F.M.) \times (e^{SP/B} - 1)\}}}{(-0.017 + 0.027F.M.) \times \{1 + (-0.324 + 0.162F.M.) \times (e^{SP/B} - 1)\}} \quad (25)$$

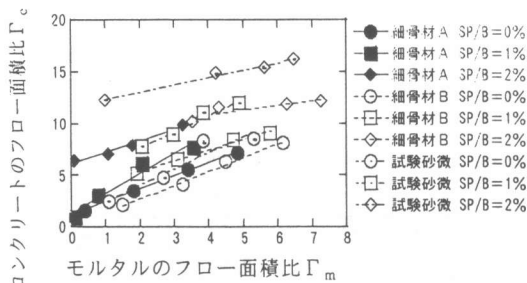


図-9 コンクリートとモルタルのフロー面積比の関係

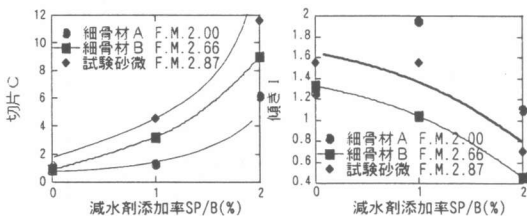


図-10 切片C, 傾き I と減水剤添加率の関係

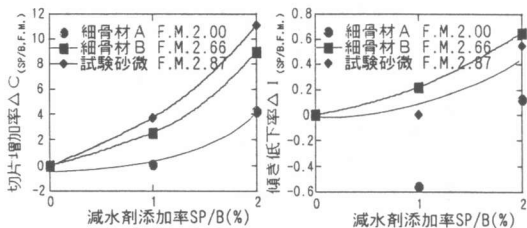


図-11 ΔC, ΔI と減水剤添加率の関係

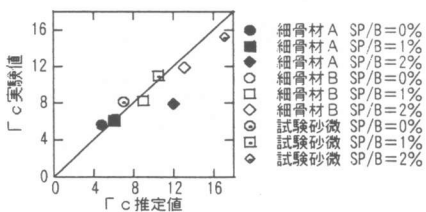


図-12 コンクリートのスランプフロー面積比 実験値と推定値の比較

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、細骨材 F.M. の違い考慮に入れ、流動性推定式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) 図-5 より、同一ペースト細骨材容積比のモルタルでは、F.M. が小さくなるにつれてモルタルの流動性は低下する。
- 2) X 座標をモルタルのフロー面積比、y 座標

をペースト細骨材容積比とするとその関係は切片を拘束ペースト比 β_m 、傾きを単位フローペースト比 α_m とする直線関係で表される。

3) モルタルのフロー面積比とペースト細骨材容積比の関係は、実用的には減水剤添加率、細骨材 F.M. ごとに異なった直線群で回帰できる。

4) 任意の配合のモルタルのフロー面積比は、3) で求めた直線群を関数化することによって式(14)のように関数化できる。

5) モルタルのフロー面積比とコンクリートのスランプフロー面積比は、減水剤添加率と細骨材 F.M. から定まる直線関係で表される。

6) F.M. を考慮したモルタルのフロー面積比の算定式をコンクリートのスランプフロー面積比推定式に代入することにより任意の配合のコンクリートのスランプフロー面積比を推定することが可能となる。

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) 山内 聡, 出光 隆, 山崎 竹博: 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, コンクリート工学年次論文報告集 vol.22 No.2 pp.853-858 2000
- 4) 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)
- 5) 枝松良展, 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