

[55] 無機質系混和材を用いた現場打ち高強度コンクリートの実験的研究

正会員 ○高野俊夫 (鹿島建設 建築本部)
 正会員 柿崎正義 (鹿島建設技術研究所)
 正会員 岡本公夫 (鹿島建設技術研究所)

I はじめに 本実験は施工性を向上させ経済的で高品質な高強度コンクリートを開発するため、高強度用混和材並びに流動化剤を添加した現場打ち高強度コンクリートのワーカビリティ（流動性、分離性）、凝結性状の基本的性質とコンクリート計画調合における留意点を明らかにしたものである。

II 実験計画

1 実験項目と方法 表1に実験項目と方法を示す。このうちのVF試験はワーカビリティの一つの尺度としてコンクリートが振動を受けて型わく、鉄筋の間を通過していく際の流動性や骨材の分離傾向を測定するために用いた。コンクリートの流動性と骨材の分離性の定義は以下のとおりである。

a) 振動によるコンクリートの流動性 (F値) コンクリートをシリンダーに満たした後(図1)、振動機を運転し、C層にコンクリートが満たされるまで振動させる。その時点までの振動時間を“流動性F値(単位、秒)”と規定する。

b) 振動によりコンクリートが障害物の間を流動する際の骨材の分離性 (S値) 上記a)によって振動を止めた時点でシリンダー内に残っているコンクリートの嵩(嵩が高いとモルタルの流出が多く、粗骨材が分離して残っていることになる)を測定し、その嵩の高さの値を“分離性S値(単位、cm)”と規定する。

2 実験内容と調合 実験は表2の要因と水準を実験計画法によりL₂₇の直交配列表に割り付けて行った調合はベースコンクリートのスランプが8±1.5cm、流動化コンクリートの空気量が4±1%得られるように試し練りを行って決定した。図2にL₂₇の線点図を示す。

3 使用材料 表3に使用材料を示す。

4 練りまぜ方法 練りまぜは空練り(1~2回転、セメント+細骨材+混和材(フライアッシュ、アルミ系鉱物))→(水+A E剤+高強度用混和材)→混和材(シリカフェームの場合)→練りまぜ(30秒)→粗骨材→練りまぜ(45秒)の順とし、コンクリートを流動化するには流動化剤を投入して45秒練りまぜた。シリカフェームはスラリー状で使用し、ミキサは100ℓ、強制攪拌型を用いた。

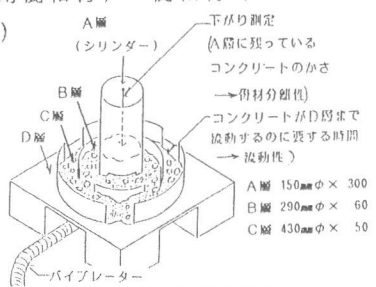


図1 VF試験装置

表1 実験項目と方法

実験項目	方 法	内 容
スランプ	JIS A 1101	○スランプ (cm) ○フロー (cm×cm) ○ワーカビリティ目視
VF試験	土木学会 R C示方書 昭和44年版	○振動式コンシステンシーメータを使用する ○シリンダー内の高さ (mm) ○C層にコンクリートいきわたる時間 (秒) ○骨材分離目視
凝結時間試験	JIS A 6204 付属書 1	始究-終結 (分)

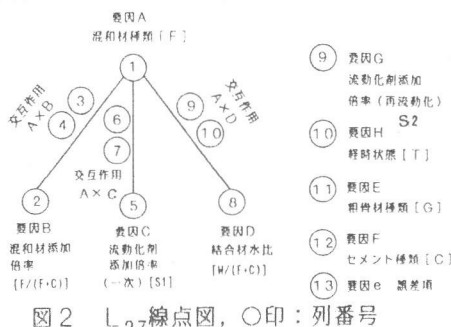


図2 L₂₇線点図, ○印: 列番号

表3 使用材料

セメント	種類	材料	比 率
セメント	CH	早強ポルトランドセメント	比 率 3.14
	CN	普通ポルトランドセメント	比 率 3.16
	CF	フライアッシュセメントA種	比 率 3.05
細骨材	GR	大井川産川砂	比 率 2.61、粗粒率 2.90
		大井川産川砂利	最大寸法25mm、比 率 2.65 (粗粒率 6.90)
	GC	青 柳 産 砂 石	最大寸法20mm、比 率 2.64 (粗粒率 6.81)
		人工軽骨材	最大寸法15mm、比 率 1.67 (粗粒率 6.34)
混和材	FA	アルミ系鉱物	比 率 2.95
	FS	シリカフェーム	比 率 2.23
	FF	フライアッシュ	比 率 2.24
流 和	A E 剤	アルキルアルシルホン酸塩を主成分とする	
	高強度用減水剤	高級合芳香族スルホン酸塩を主成分とする	
剤	流動化剤	ナフタリンスルホン酸塩を主成分とする	

表2 要因と水準

要 因	水 準			
	1	2	3	
混和材	アルミ系鉱物FA	シリカフェームFS	フライアッシュFF	
F	添加倍率	× 0.4	× 1 *1	× 1.6
水結合材比	$\frac{W}{F+C} (\%)$	29	35	45
セメント種類	C	早強ポルトランドセメントCH	普通ポルトランドセメントCN	フライアッシュA種セメントCF
粗骨材種類	G	川砂利 GR	砕 石 GC	人工軽骨材 GL
流動化剤	流動化	× 0.5	× 1 *2	× 1.5
添加倍率	再流動化	× 0.5	× 1 *2	× 1.5
60分経時状態		静 置	攪 拌	

*1 基準添加率-アルミ系鉱物の場合、結合材 (F+C) の 2.5%
 シリカフェーム、フライアッシュの場合、結合材の12.5%

*2 基準添加率-結合材 100kg当たり 500cc (原液)

III 実験結果及び考察

1 まだ固まらないコンクリートの性質

(1) 流動化によるスランプの増加 表4にスランプ増加の分散分析表を、図3に有意水準1%で有意と判定された要因の水

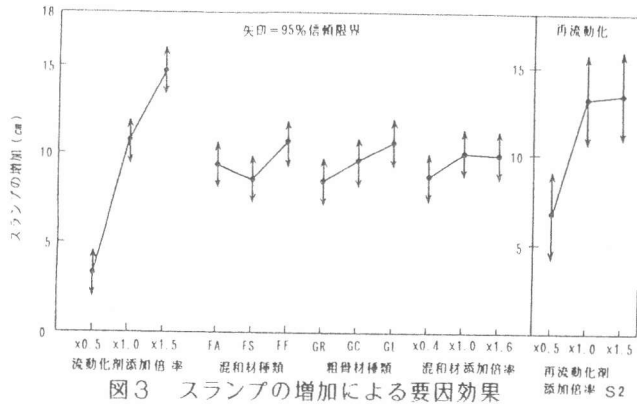


図3 スランプの増加による要因効果

準とスランプ増加との関係を示す。これより、スランプの伸びは流動化剤の添加倍率が多くなるほど大きくなり、再流動化のスランプの伸びは添加倍率(×0.4~×1.6)の平均で約15%増加している。又、流動化剤基準量(500cc/(F+C)=100Kg/m³)当りのスランプの伸びは平均8.9cm、再流動化時で平均11.9cmとなり、スランプ1cmを増大させるための平均使用量は、結合材(F+C)100Kg/m³当り、それぞれ55cc、42ccとなる。流動化剤の使用は高強度用混和材を用いたコンクリートでもスランプの伸びを大きくするのに非常に効果があるといえる。

(2) 経時によるスランプ低下 表5にスランプ残存率の分散分析表を、図4に有意水準5%で有意と判定された要因の水準とスランプ残存率(図中に示す)との関係を示す。この結果、スランプ残存率は混和材種類、粗骨材種類、流動化剤添加倍率、セメント種類が有意となった。混和材種類によるスランプ低下はシリカフェームが最も小さく、フライアッシュ、アルミ系鉱物の順で大きくなっている。又、スランプ低下は流動化剤添加倍率が多いほど小さくなる傾向を示した。

(3) 振動によるコンクリートの流動性

ベースコンクリート、流動化コンクリート、経時変化、再流動化時におけるVF試験のF値とスランプとの間には相関関係があり、全調査の結果を曲線に当てはめると式(1)の指数関数表わされる。

$$F = a e^{-bs} \quad (1) \quad F: F \text{ 値 (秒)}, S: \text{スランプ (cm)}$$

図5に水結合材比W/(F+C)35%、普通セメントコンクリートの組合せによる混和材別スランプとF値との工程平均の推定を示す。分散分析表は紙面の都合上割愛する。(以下同様)

これより、振動によるコンクリートの流動性はスランプに大きく影響され、混和材種類が異なるとその性状も大きく異なる。F値とスランプの相関性は流動化時や経時変化の場合も得られる。一方、フライアッシュとアルミ系鉱物の流動性は、混和材の添加倍率が大きくなるにつれて良くなるのに対して、シリカフェームは添加倍率が大きくなると流動性が悪くなっている。さらに、スランプが20cmを超える範囲の流動性は混和材種類による差が認められないが、スランプが小さくなるにつれて大きな差が生じている。

図5にコンクリートの流動性による基準設定レベルを示す。この結果、各種混和材のコンクリートが混和材を用いないコンクリートスランプ18cmと同じ流動性のスランプを得るには、混和材の添加倍率×1.6

表4(1) スランプ増加の分散分析表

要因	平方和 S	自由度 φ	分散 V	分散比 F ₀	寄与率 ρ(%)
A 混和材 F	38.35	2	19.18	25.92 **	2.6
B F/(F+C)	20.08	2	10.04	13.56 **	1.3
AxB (1x2)	39.47	4	9.87	13.34 **	2.6
C 流動化剤 S1	1238.52	2	619.26	836.8 **	87.4
AxC (1x5)	20.77	4	5.19	7.01 **	1.3
D W/(F+C)	4.36	2	2.18	2.95	
AxD (1x8)	3.60	4	0.9	1.22	
E 粗骨材 G	44.78	2	22.39	30.26 **	3.1
F セメント C	4.08	2	2.04	2.76	
e ⁻ 誤差 e	21.32	29	0.74	1.00	
TOTAL	1414.01	53			

$$F(2, 29; 0.01) = 5.42 \quad F(2, 29; 0.05) = 3.33$$

$$F(4, 29; 0.01) = 4.04 \quad F(4, 29; 0.05) = 2.70$$

**1%で有意

表4(2) 再流動化コンクリートのスランプ増加

要因	平方和 S	自由度 φ	分散 V	分散比 F ₀	寄与率 ρ(%)
C 流動化剤 S1	120.13	2	60.06	7.48 **	18.4
H 経時状態 T	26.74	1	26.74	3.33	
G 流動化剤 S2	258.08	2	129.04	16.07 **	42.7
e ⁻ 誤差 e	160.59	20	8.03	1.00	
TOTAL	565.54	25			

$$F(2, 20; 0.01) = 5.85 \quad F(2, 20; 0.05) = 3.49$$

$$F(1, 20; 0.01) = 8.10 \quad F(1, 20; 0.05) = 4.35$$

**1%で有意

F₀の値が小さいと誤差 e⁻ にアールして推定した

表5 スランプ残存率の分散分析表

要因	平方和 S	自由度 φ	分散 V	分散比 F ₀	寄与率 ρ(%)
A 混和材 F	0.14	2	0.07	7.00 *	13.9
B F/(F+C)	0.04	2	0.02	2.00	
C 流動化剤 S1	0.13	2	0.07	7.00 *	12.7
AxC (1x5)	0.10	4	0.03	3.00	
D W/(F+C)	0.07	2	0.04	4.00	
E 粗骨材 G	0.14	2	0.07	7.00 *	13.9
F セメント C	0.11	2	0.06	6.00 *	10.4
e ⁻ 誤差 e	0.13	9	0.01	1.00	
TOTAL	0.86	25			

$$F(2, 9; 0.01) = 8.02 \quad F(4, 9; 0.01) = 6.42$$

$$F(2, 9; 0.05) = 4.26 \quad F(4, 9; 0.05) = 3.63$$

アールング済 *5%で有意

F₀の値が小さいと誤差 e⁻ にアールして推定した

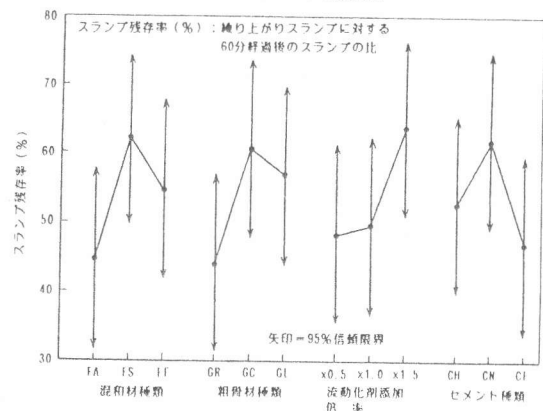


図4 スランプ残存率の要因効果

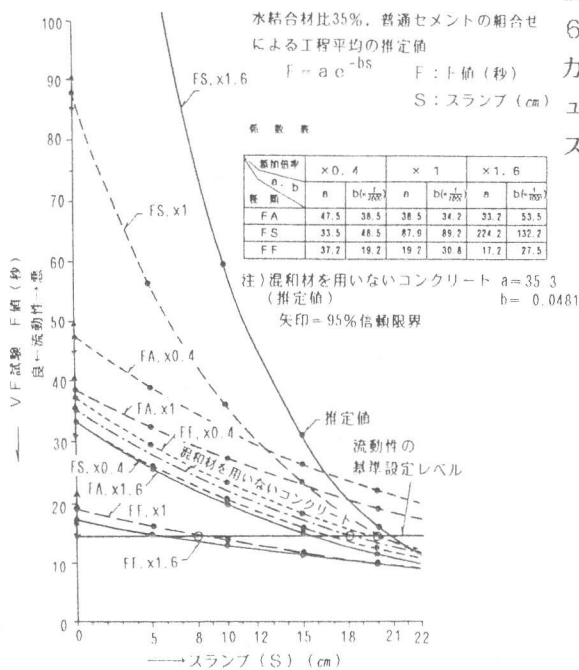


図5 VF試験のF値とスラップとの関係

倍のとき、シリカフュームが約21cm、フライアッシュが約6cm、アルミ系鉱物が約16cmとなる。したがって、一定能力の振動機でコンクリートを締固める場合、フライアッシュは低スラップでも十分充填できるが、シリカフュームはスラップを大きくして打込み、締固める必要がある。

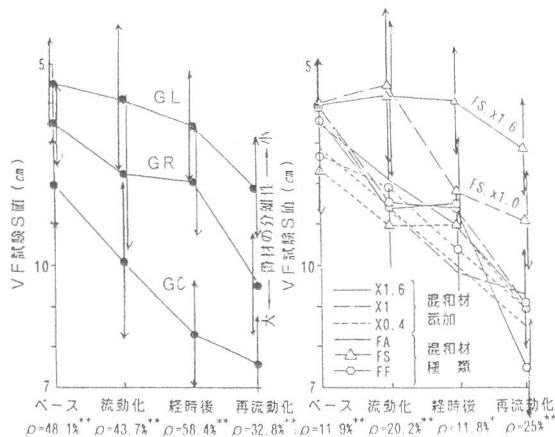


図-6 骨材の分離性の変化

(4) 振動によりコンクリートが障害物の間を流動する際の粗骨材の分離性

コンシステンシーメーター (図1) の流出孔の寸法はA層が75mm×60mm、C層、D層が90mm×50mmであり、JASS 5の鉄筋相互のあき等の状況からも実際の施工上あり得る障害物間隔である。図6にベースコンクリートから再流動化コンクリートまでの各経時におけるVF試験のS値 (骨材の分離性の変化) を示す。これより、人工軽量骨材 (GL) は骨材の粒径が小さく、形状が丸いために分離性が小さい。これに対して、碎石 (GC) は、形状が角ばっているために流出孔でブリッジを形成し、モルタル分が流出して分離性が大きくなる。又混和材種類は経時による骨材の分離性に大きな影響を与え、とくにフライアッシュとアルミ系鉱物は骨材の分離性が大きくなるので、流動化や経時をなるべく少なくし、骨材の分離性の増大に注意する必要がある。これに対して、シリカフュームは上記の混和材よりも骨材の分離性が小さいことがわかる。

(5) 凝結時間 図7に有意水準1%で有意と判定された要因の水準と凝結時間との関係を示す。これより、凝結時間は始発で平均8.3時間、終結で平均10.2時間であり、流動化剤添加倍率、セメント種類による影響が大きい。流動化剤の製品仕様では凝結遅延性はないとされているが、凝結時間は流動化剤添加倍率に比例して遅延する傾向があり、流動化剤500cc/(F+C)=100kg/㎡当り始発、終結とも約2.6時間遅延している。これは高強度用減水剤と流動化剤の添加量が過剰になったためと思われる。セメント種類では、普通セメントの凝結時間を基準にすると、早強セメントが早く、フライアッシュセメントが遅くなっている。

さらに、混和材種類でみると、シリカフュームとアルミ系鉱物の始発時間はほぼ同じであるが、終結時間はシリカフュームの方がやや早い。一方、フライアッシュの凝結時間は、上記の混和材よりも遅くなる傾向を示した。又、混和材を用いない普通セメントコンクリートの凝結時間の始発は6時間、終結は8時間程度であるので、本実験の凝結時間は全般に遅い傾向にあり、冬期の床コンクリートの表面仕上げに注意する必要がある。

2 調合計画

(1) 単位水量 図8にスラップ8cmを得るのに必要

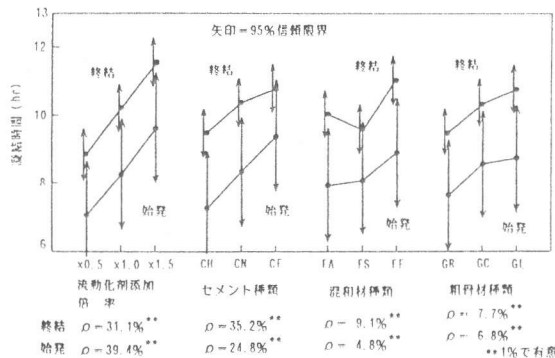


図-7 凝結時間の要因効果

な単位水量の要因効果で有意水準1%で有意と判定された要因の水準と単位水量との関係を示す。この結果、単位水量は混和材種類による影響が最も大きく、スランプ8cmを得るのに、シリカフュームで約180kg/m³、アルミ系鉱物で約155kg/m³、フライアッシュで約145kg/m³となる。シリカフュームの単位水量がフライアッシュより多いのは、シリカフュームの遊離炭素が約50%大きいこと、比表面積が88.3倍であることによるものと思われる。アルミ鉱物については検討中である。又、混和材種類と混和材添加倍率の交互作用も1%で有意と認められた。早強セメントは高強度用減水剤の使用量を、普通セメント、フライアッシュセメントよりも多くしたにも拘らず単位水量が多く必要となる。フライアッシュセメントA種の単位水量は普通セメントより4%少なく、通常の調合時の補正值と一致している。又、碎石の単位水量は、川砂利のそれより約8%多く必要となるが、これは通常の調合時の補正值内にある。人工軽量骨材は碎石とほぼ同じ単位水量を必要とする。

(2) 細骨材率 有意水準5%で有意と判定された要因は、水結合材比とセメント種類である。細骨材率と結合材水比(F+C)/Wとの関係は次式で表わされる。

$$s/a = -5.1 \left(\frac{F+C}{W} \right) + 51.8(\%)$$

セメント種類では普通セメントコンクリートの細骨材率を基準にすると、早強セメントが-2%、フライアッシュセメントが+2%にする必要がある。

(3) A E 剤量 図9に有意水準1%で有意と判定された要因の水準とA E 剤量との関係を示す。これより、A E 剤量は混和材種類による影響が最も大きく、とくにシリカフュームの影響が大きく、次いで混和材添加倍率、水結合材比が1%有意であった。又、混和材種類と混和材添加倍率の交互作用は、5%で有意となった。同一空気量を得るのに必要なA E 剤量は、いずれの混和材も混和材添加倍率が増すにつれて増加する。練りませ時にA E 剤とシリカフュームやフライアッシュを混合すると、遊離炭素がA E 剤に吸着してA E 剤の使用量が増加する。そのため、練りませ時には材料の投入順序に注意する。さらに、A E 剤量は水結合材比が小さくなるにつれてほぼ直線的に増加するようである。

IV まとめ これらの実験結果から、以下のことがわかった。

1. コンクリートの流動性はスランプに大きく影響され、混和材種類によってその性状も大きく異なる。
2. F値とスランプの相関関係は流動化時及び経時変化でも得られる。
3. フライアッシュとアルミ系鉱物の流動性は混和材添加倍率が大きくなるにつれて良くなるのに対して、シリカフュームは添加倍率が大きくなると悪くなるようである。
4. 混和材種類は経時による骨材の分離性に大きな影響を与え、とくにフライアッシュとアルミ系鉱物は骨材の分離性が大きく、シリカフュームは上記の混和材より骨材の分離性が小さい。
5. 凝結時間は流動化剤添加倍率に比例して遅延する傾向がある。
6. 本実験のコンクリートの凝結時間は全般に遅い傾向にあり、冬期の床コンクリートの表面仕上げに注意する。
7. セメント種類、骨材種類による単位水量の補正值は、通常の調合時の補正值と一致している。
8. 細骨材率と結合材水比との関係は式(2)で表わされる。
9. 同一空気量を得るのに必要なA E 剤量は、いずれの混和材も混和材添加倍率が増すにつれて増加するようである。

謝辞 本実験の実施に当りましては、日曹マスタービルダース株式会社、吉越、児玉、御所窪、西条各氏のご協力を得ましたことをここに感謝致します。

参考文献 1) V.M.Malhotra and G.G. Carrette: Concrete International, Vol. 5, No. 5, May, 1983, 2) 大浜嘉彦他一名: 第六回コンクリート工学年次講演会論文集, 1981, 3) 大槻光雄他三名: セメントコンクリート, No. 443, Jan., 1984, 4) 関 慎吾他一名: 第六回コンクリート工学年次講演会論文集1984

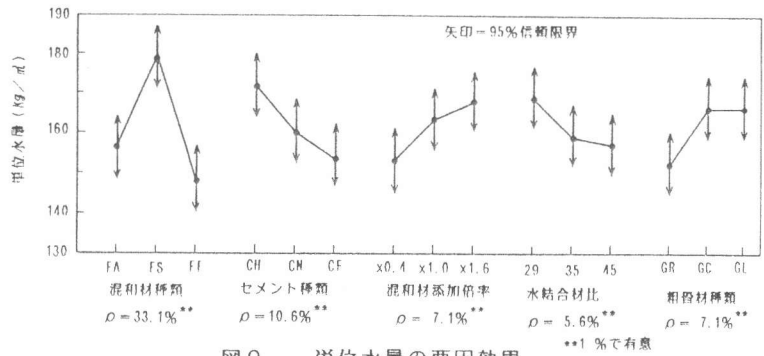


図8 単位水量の要因効果

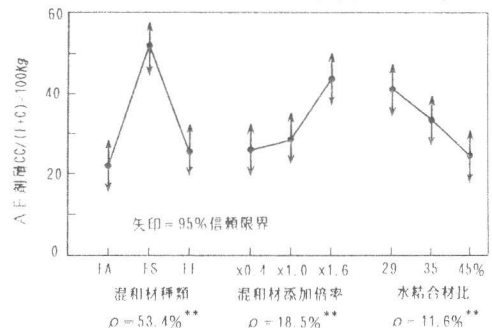


図9 A E 剤量の要因効果