

報 告

[1004] 高流動性コンクリートの壁式構造物への適用に関する実験

山口憲司*¹・竹内博幸*²・岩井隆彰*³・原田健二*⁴

1. まえがき

近年では、締固めを不要とするコンクリートについて実施工を含め多数の報告がなされておりその進展には目をみはるものがある。しかし、この種のコンクリートは、その性能評価に様々な方法が用いられており、配合設計においても多くの報告がなされている。

そこで著者らは、この種のコンクリートの重要な性質である流動性、材料分離抵抗性を、モルタルの状態で検討し、その結果に基づいて配合の最適化を行うという手法を用いて、自己充填性を有する高流動性コンクリートを開発した。本稿は、この高流動性コンクリートを壁状の実構造物へ適用することを最終目標として行われた予備実験、室内実験および実大施工実験から構成される一連の実験について報告するものである。

2. 実験の概要

2. 1 実験の構成

(1) 予備実験

流動性、材料分離抵抗性に寄与する混和材として、高炉スラグ微粉末、フライアッシュに着目し、これらを高性能A E減水剤と組み合わせてモルタル試験を行うことにより、所要性能を有するコンクリートのモルタル性状を把握するため、以下の項目について検討した。

- ①高炉スラグ微粉末の粉末度による影響
- ②結合材混合比による影響
- ③高性能A E減水剤の種類および使用量による影響

(2) 室内実験

予備実験より得られた結果に基づき、室内でのコンクリートの練り混ぜ実験を行い、最適配合を把握するために以下の項目についてその性状の検討を行った。また、得られたコンクリートの各種物性を把握した。

- ①水結合材比(W/B)による影響
- ②細骨材ペースト容積比(s/p)による影響
- ③粗骨材モルタル容積比(G/M)による影響

(3) 実大施工実験

実機での製造、実車運搬および実大規模での打設を行い、室内実験により得られた高流動性コンクリートの製造および施工を実証するとともに、構造体コンクリートとしての性状および施工性を把握した。

2. 2 使用材料

各実験に使用した材料の種類および品質を表-1に示す。

* 1	五洋建設(株)	技術研究所	第一研究開発室	(正会員)
* 2	同	上		(正会員)
* 3	同	上		
* 4	ポゾリス物産(株)			

表-1 使用材料

使用材料	種 類	物性および成分	適用実験		
			予備	室内	実証
セメント	普通ポルトランドセメント (N社製)	比重3.15 比表面積3,300cm ² /g	○	○	○
細骨材	上河内産川砂	表乾比重2.61 吸水率1.78% 粗粒率2.84	○	○	○
粗骨材	葛生産硬質砂岩系5号碎石 20~13mm	〃 2.66 〃 0.40% 〃 7.06	○	○	○
	〃 6号碎石 13~5mm	〃 2.68 〃 0.48% 〃 5.91	○	○	○
混和材	高炉スラグ微粉末 6000ﾌﾟﾚｰﾝ (S社製)	比重2.89 比表面積6,120cm ² /g	○	○	○
	〃 8000 〃	〃 2.90 〃 8,150 〃	○		
	〃 10000 〃	〃 2.90 〃 10,160 〃	○		
	フライアッシュ (D社製)	比重2.24 比表面積3,115cm ² /g	○	○	○
混和剤	高性能AE減水剤 (T社製) SP1	ポリカルボン酸系 比重1.00	○		
	〃 〃 SP2	〃 〃 1.07	○		
	〃 (P社製) SP3	〃 〃 1.05	○	○	○
	〃 〃 SP4	〃 〃 1.05	○	○	
	〃 (K社製) SP5	〃 〃 1.06	○		
	消泡剤 (P社製)				○

3. 予備実験

3. 1 実施概要

予備実験における条件を表-2に示す。モルタルの製造は、結合材と細骨材を15秒間空練りした後、水と混和剤を添加して240秒間練り混ぜて行った。モルタルフローはJIS R 5201に規定されているフローコーンにより測定し、粘度は回転円筒式粘度計 (R社製:ローター回転数62.5rpm 誤差±10%:W120×B200×H50mm, ローターサイズφ20×H60mm)により測定した。

表-2 実験条件 (予備実験)

実験項目	W/B (%)	s/p ¹⁾	結合材混合比 (%)			Sg比表面積 (cm ² /g)	混和剤種類	備考	練混ぜ条件
			C ²⁾	Sg ³⁾	FA ⁴⁾				
①	30	0.8	35	55	10	10000	SP5	混和剤添加率 B×0.9%	実験環境 温度20℃ 相対湿度60%
						8000			
						6000			
②	30	0.8	30	70	0	6000	SP3	混和剤添加率 B×1.0%	使用ミキサ 縦型強制練りミキサ (容量30 l)
			30	60	10				
			30	50	20				
			30	40	30				
③	30	0.8	30	60	10	6000	SP1	目標フロー値 25±2.0 cm	練り混ぜ時間 空練り 15秒 モルタル練り 240秒
							SP2		
							SP3		
							SP4		
							SP5		

注] 1)細骨材ベースト容積比 (細骨材容積/ベースト容積)

2)C:セメント 3)Sg:高炉スラグ微粉末 4)FA:フライアッシュ

3. 2 実験結果

高炉スラグ微粉末の粉末度の相違によるモルタルの性状を把握するために、水結合材比と混和剤添加率を一定にし、粉末度を三段階に変化させてそのフロー値を測定した。練り上がりの目標フロー値はスランプフロー60~65cmの高流動性コンクリートから採取したモルタル実験より25±2.0cmとした。その結果を図-1に示す。これより粉末度が小さいものほど、初期のフロー値が大きくなる傾向にあり、6000ﾌﾟﾚｰﾝ級のものが分離をしない範囲で、最も

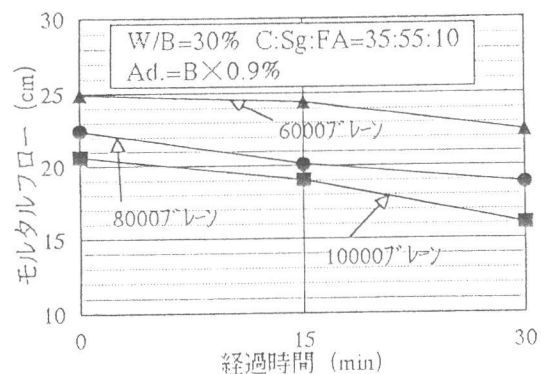


図-1 粉末度とモルタルフローの関係

大きなフロー値を示すことが確認された。また、時間の経過によるフロー値の低下はどのブレン級についてもほぼ同程度であることが確認された。

図-2に混和材混合比の相違によるモルタルのフロー値と粘度の関係を示す。高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの混合比の上限はJIS規格よりそれぞれ70%, 30%とした。フライアッシュの混合比が大きくなるに従い、流動性が増大する一方、粘性は減少する傾向にある。よってフライアッシュの混合比は、モルタルフローの設定値の範囲内で、かつ粘性が強く分離抵抗性が保持されていると考えられる10%とし、モルタルフローは高性能AE減水剤により調整することとした。図-3に高性能AE減水剤の種類の相違によるモルタルフロー値の経時変化を示す。その経時変化を比較すると、同一フローにおいて添加量が他の高性能AE減水剤より多くなるP社製のSP3, SP4がフローのロスが小さいという結果が得られた。

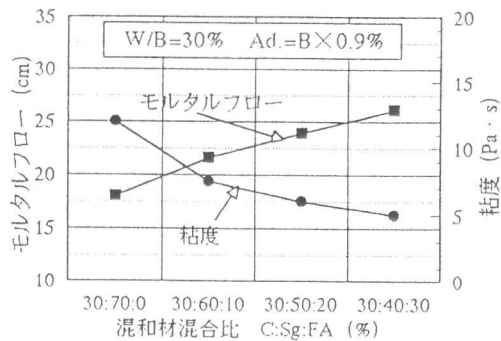


図-2 混和材混合比と流動性および粘性の関係

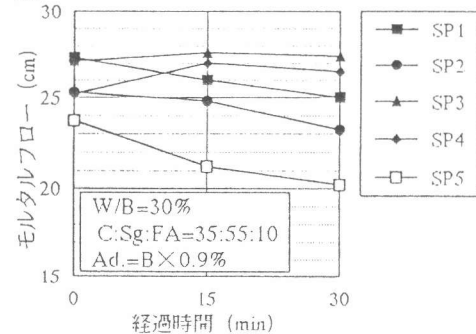


図-3 高性能AE減水剤の種類と流動性の関係

4. 室内実験

4. 1 実施概要

最適配合を把握するための室内実験の条件を表-3に示す。練り上がりの目標値はスランプフロー65±5cm, 空気量4.5%とした。

表-3 実験条件 (室内実験)

実験項目	混和剤種類	W/B (%)	W (kg/m3)	s/a (%)	s/p ¹⁾	G/M ²⁾	結合材混合比 C: S g:FA	実験条件
①	SP3	28.5	161	52.0	0.80	0.41	30:60:10	実験環境 温度20℃：相対湿度60% 練り混ぜ 水平2軸強制 練りミキ(容量100l) 練り混ぜ量55l 練り混ぜ時間 空練り→モル練り→コン練り 15秒 60秒 90秒
		30.0	164					
		32.5	172					
②	SP3	30.0	164	52.0	0.80	0.41		
				52.8	0.85			
				53.6	0.90			
③	SP4	30.0	165	51.4	0.80	0.41		
				50.8		0.43		
				49.7		0.45		

注) 1) 細骨材ペースト容積比 (細骨材容積/ペースト容積)
2) 粗骨材モルタル容積比 (粗骨材容積/モルタル容積)

ここで、著者らは図-4に示すボックス充填試験装置を用いることによってコンクリートの自己充填性能を評価した。これは水中不分離性コンクリートの充填性試験装置を参考にしており、障害物として開口部にD13の鉄筋を取り付けたものである。評価は仕切板を取り外した後の2層のコンクリートの高さの差で表わし、その目標値は、同時に行った高密度配筋充填性試験¹⁾との比較により5cm以内とした。

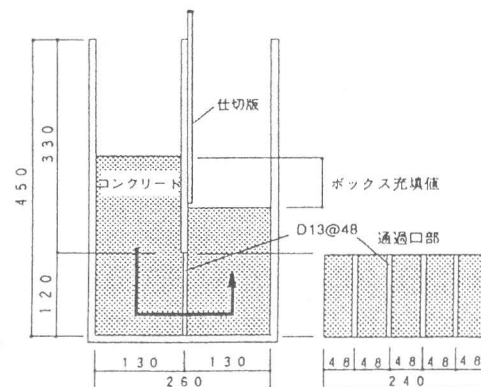


図-4 ボックス充填試験装置

4. 2 実験結果

図-5に、水結合材比（W/B）とボックス充填試験値の関係を示す。図-5よりW/C=30%と比較して、W/B=27.5%ではスランプフローが同程度であるにもかかわらず、充填性がやや低下している。また、W/B=32.5%ではスランプフローが若干小さくなるとともに、充填性も大きく低下する傾向にある。これらより判断し、水結合材比をW/B=30%と決定した。

図-6に細骨材ペースト容積比（s/p）とボックス充填試験値の関係を示す。同じ水結合材比（W/B=30%）および粗骨材モルタル容積比（G/M=0.41）の場合、s/pが大きくなるに従い、充填性が低下する傾向にある。これは、モルタル中の細骨材の割合が大きくなるとモルタルの変形性能が低下するためと考えられ、この結果よりs/pを0.8と決定した。

図-7に粗骨材モルタル容積比（G/M）とボックス充填試験値の関係を示す。これよりG/Mが増加するに従い、充填性は低下する。これはコンクリート中の粗骨材の割合が増すと粗骨材の相互のかみ合いによりコンクリートの変形性能が低下するためと考えられる。そこでG/Mはボックス充填試験値が最も小さくなる0.41と決定した。

以上の結果より得られた基本配合およびその配合によるコンクリートの圧縮強度を表-4に示す。

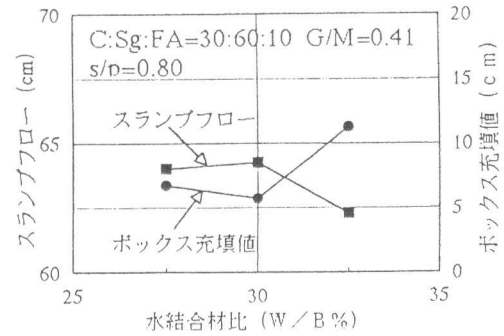


図-5 W/Bとボックス充填試験値の関係

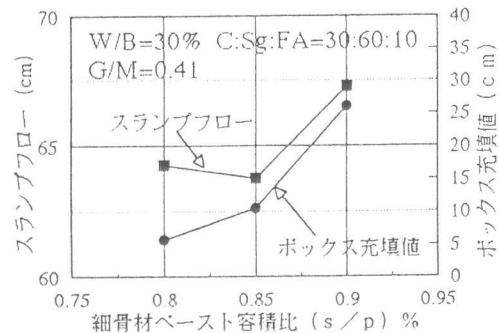


図-6 s/pとボックス充填試験値の関係

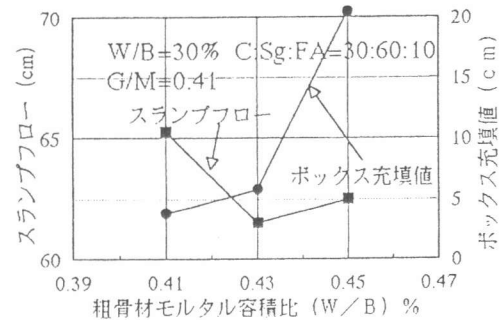


図-7 G/Mとボックス充填試験値の関係

表-4 基本配合および圧縮強度

基本配合								フレッシュコンクリート試験結果					圧縮強度 ²⁾ (kgf/cm ²)			
W/B (%)	単位水量 (kg/m ³)	s/a (%)	s/p	G/M	結合材配合比 C:Sg:FA	使用混和剤	混和剤添加率 (結合材%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	ボックス充填値 (cm)	練り混ぜ時間(秒)		σ 3	σ 7	σ 28	σ 91
30	165	51.4	0.8	4.1	30:60:10	SP4	1.45	26.2 64×64	3.6	2.5	15-90-60 ¹⁾		439	549	781	939

注] 1)空練りーモルタル練りーコンクリート練り 2)養生条件:標準養生

5. 実大施工実験

5. 1 実施概要

室内実験で得られた基本配合に基づき、実機での試し練りおよび実車（アジテータトラック）運搬実験を行った。その結果、実車運搬によるスランプフローの経時変化は混和剤SP3でも十分に目標値をクリアすることができ、良好なワーカビリティを得ることができた。よって、実大打設実験についても混和剤SP3を使用することにした。空気量については、室内実験に比べかな

り大きい値を示したので、消泡剤により調整することとした。

図-8に実大打設実験における試験体を示す。試験体は実施工予定の壁式構造物の一部を切出した形状となっている。

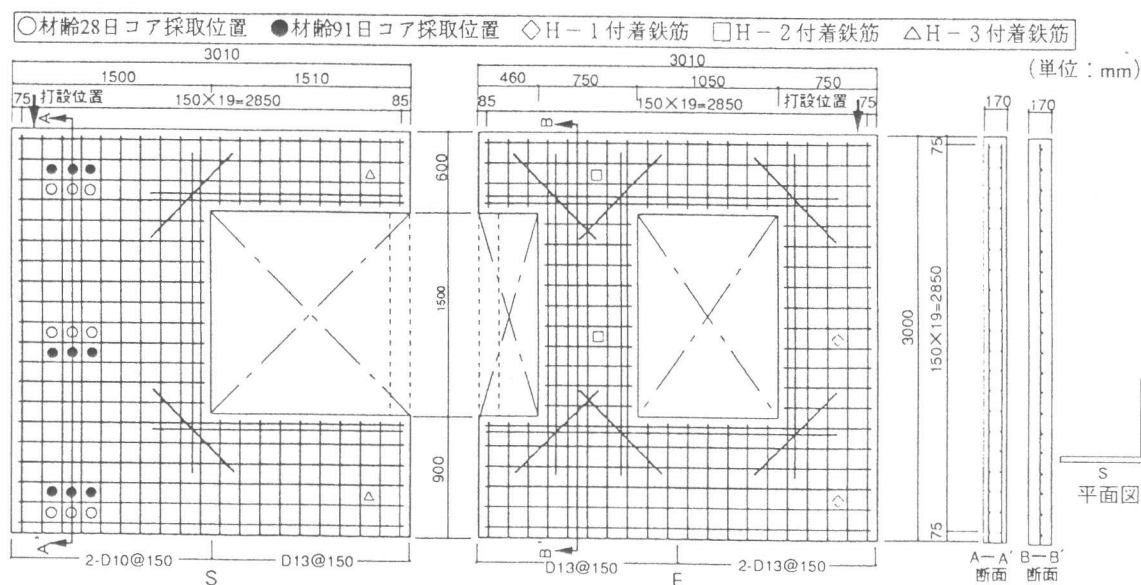


図-8 試験体形状

5. 2 実験結果

実大打設実験における実験結果を表-5および表-6に示す。

表-5 配合およびフレッシュコンクリート試験結果

実車 No.	配 合						フレッシュコンクリート試験結果						練り混ぜ 時間(秒) ²⁾ 空・モル・コン
	W/B (%)	単位 水量 W (kg/m ³)	s/a (%)	使 用 混和剤	混和剤 添加率 (結合材%)	空気量 調整剤 (結合材%)	出荷時			荷卸し時			
							スランブ スランブフロー (cm)	空気量 (%)	流動 ¹⁾ 時間 (秒)	スランブ スランブフロー (cm)	空気量 (%)	流動 時間 (秒)	
①	30	165	51.4	SP3	1.45	消泡剤 0.002	26.6 67.5-67.5	6.2	37	26.5 75-75	6.9	65	15-90-90
②							26.8 66.5-66.5	5.9	38	27 73.5-73.5	6.3	90	

注] 1)スランブ測定時スランブコーン引き上げからスランブフローが完全に停止するまでの時間を測定する。

2)空練り-モルタル練り-コンクリート練り

表-6 各種硬化コンクリートの特性

圧縮強度(kgf/cm ²)							粗骨材面積率			乾燥収縮率 ×10 ⁻⁴ (3カ月)	耐久性 指数 (300サイクル)	断熱温度 上昇量 (℃)
材齢 (日)	標準 養生	現場 ¹⁾ 水中	現場 ²⁾ 封かん	コア供試体			(%)					
				上	中	下	上	中	下			
28	744	649	582	714	729	760	34.3	34.9	41.4	3.43	104	46.38
91	856	747	728	700	781	816						

注] 1)現場水中: 現場水中養生 2) 現場封かん: 現場封かん養生 3) 練上がり温度20.5℃の場合

荷卸し時(経時30分)のスランブフローが出荷時よりも約7cm伸びており、フロー端部には粗骨材が中央部に比較してやや少ない状態であった。これは混和剤の経時的な発効特性によるものと考えられるが、今後アジテータ車での運搬によるコンクリートの性状について検討する必要がある。打設はポンプ車により、試験体の一方の端部から行い、コンクリートが試験体高さの半分程度まで充填された後に、もう一方の端部より試験体天端まで打設を行った。本コンクリートの流動性は良好で、試験体の一方の端部から他方の端部まですみやかにコンクリートが流動していることが型枠に組込まれた透明型枠により確認できた。また、充填性も良好で、打設位置下部に

若干空気を巻き込んだ形跡があったが、開口部周辺等は十分に充填されているのが確認された。仕上げ不陸調整については、打込み位置を適宜移動することにより行った。

図-9に打設直後のコンクリートの側圧分布を示す。高流動性コンクリートは高い流動性のため普通コンクリートより大きな側圧がかかることが報告されている²⁾。図-9によると試験体底面付近では液圧よりやや低減しているが、その他の位置では側圧はほぼ液圧に近いことがわかる。

図-10は試験体から採取したコア供試体の材齢28および91日の高さ方向の圧縮強度である。試験体下部の方が上部より圧縮強度が大きいことがわかる。これは本コンクリートが設定よりもやや軟らかめであったため粗骨材が下方に偏ったこと、および自重圧力による締固め作用によるものと考えられる。また、同試験体から採取したコア供試体の表面積中の粗骨材の表面積の比率を表-6に示す。これによると試験体の下方の粗骨材が実施配合の単位量より多い傾向にある。

図-11は試験体に取り付けた水平鉄筋(D16mm異形鉄筋,定着長8/3D)の材齢28日における高さ方向の最大付着強度である。圧縮強度と同様、付着強度も試験体上部に向かって小さくなる傾向にある。しかし、どの測定値も付着割裂強度の推定値($\tau_u = 0.05 \sigma_c + 150$ (kgf/cm²)³⁾ コア供試体の平均圧縮強度 $\sigma_c = 734$ kgf/cm²)を上回っており、締固めを行わなくても十分充填されていることがわかる。

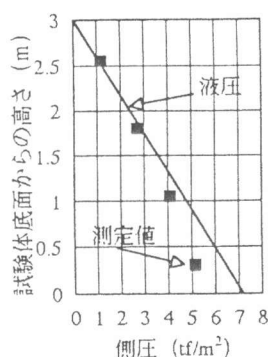


図-9 側圧分布

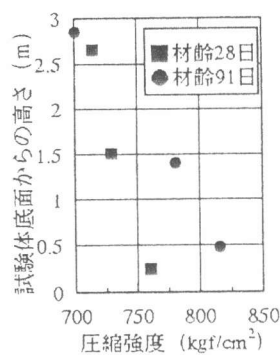


図-10 圧縮強度分布

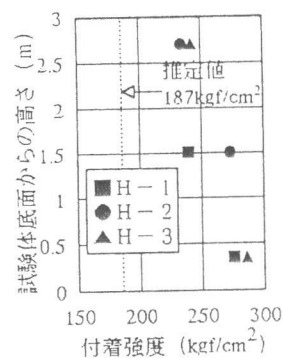


図-11 付着強度分布

6. まとめ

本研究は、3成分系の高流動性コンクリートの配合設定から実大構造物への打設実験を行い、施工性の確認を検討したものである。ここで得られた結果を以下に示す。

- (1) 室内実験において、配合検討を行うにあたりスランプフローとボックス試験の相関性を利用することによってコンクリート性状の管理を行うことができ、配合決定手法に大きく役立つものと思われる。
- (2) 実機で製造したコンクリートを実構造物を模した壁状の実大試験体に締固めを行わずに打設したところ試験体の隅々まで充填されていることが確認できた。また、粗骨材分布にやや偏在が認められるものの、構造物の表面および内部には有害な欠点は見受けられず、充填性は良好であった。

[参考文献]

- 1) 小澤一雅・岡村甫・坂田昇：締固め不要コンクリートの充填性評価のためのロート試験，超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集，日本コンクリート工学協会，1993.5
- 2) 岡村甫・前川宏一・小澤一雅：ハイパーフォーマンスコンクリート，技報堂出版，1993
- 3) 佐々木仁 他：超硬度コンクリートの付着特性に関する実験的研究（割裂き破壊における引き抜き型付着試験），日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp.347～348,1989.10.