

論文

[1034] 早強性を有する高流動コンクリートに関する研究

左東有次*1、添田政司*2、大和竹史*3、徳光卓*1

1. はじめに

PC工場で製造されるプレテンション方式のPC製品は、部材断面が小さく、鋼材が密に配置されているため、コンクリートの締固め作業に多大の労力を必要としている。

近年、岡村等により提案された「ハイパフォーマンスコンクリート」[1]に代表される高流動コンクリートは、振動締固めを必要とせず高い品質を得ることが可能である。これらをPC工場で使用することは、製造の合理化、製品の品質化および騒音や振動に対する労働環境の改善等と、その効果は大きいと考えられる。しかしながら、プレテンション用のコンクリートには、工場の生産性の観点から早期強度が要求され、常圧蒸気養生が行われているが、既往の研究に常圧蒸気養生を行う場合の早期強度に着目したものは少ないようである[2][3]。

本研究は、まず、フレッシュな状態における流動性、充填性および材料分離抵抗性に優れた骨材量の検討を行った後、プレテンション用のコンクリートを対象とした早強性を有する高流動コンクリートの配合について、結合材の種類に着目し配合の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 配合選定の手順

本研究で行った高流動コンクリートの配合選定の手順を図-1に示す。高流動コンクリートの配合設計に関しては、岡村らが著した「ハイパフォーマンスコンクリート」で提唱されている方法がある。

しかしながら、本研究では、早強性を有する高流動コンクリートの配合の選定を目的としたため、早期の強度発現に影響が大きいと考えられる結合材の種類を選定を重視した。そのため、結合材固有の最適な水セメント比の検討は行わず、プレテンション用のコンクリートの配合実績に基づき、水セメント比を30~35%の範囲に設定した。

フレッシュコンクリートの性状は、スランプフロー試験、U型充填試験[4]により管理し、硬化コンクリートの性状は、圧縮強度試験により管理した。それぞれの目標値を表-1に示す。プレテンション製品では一般的に材令1日でプレストレスの導入を行うため、材令1日の圧縮強度の目標値は350kgf/cm²以上とした。

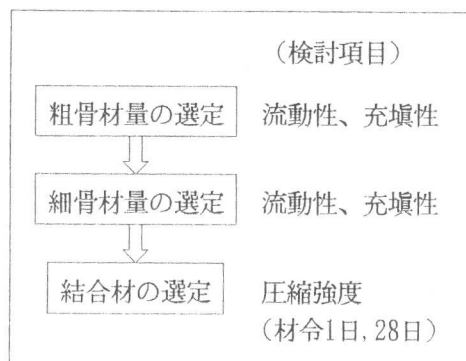


図-1 配合選定の手順

表-1 目標値

項目	設定値
圧縮強度 (材令1日)*1	350kgf/cm ² 以上
圧縮強度 (材令28日)	500kgf/cm ² 以上
スランプフロー	55~70cm
U型充填試験落差[H]*2	5cm以下

*1 : 常圧蒸気養生

*2 : 図-2

*1 (株)富士ピー・エス 本店技術部開発課 (正会員)
 *2 福岡大学助手、工学部土木工学科 (正会員)
 *3 福岡大学教授、工学部土木工学科、工博 (正会員)

2.2 使用材料

実験に用いた結合材、骨材は表-2に示す通りである。

細骨材の山砂は、珪砂が緩く固まった砂岩を粉砕して採取したものであり、形状が丸みをおびている。混和剤は、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用いた。

表-2 材料特性

種別	記号	比重	比表面積 (cm^2/g)	粗粒率	吸水率 (%)	実積率 (%)	
結合材	普通ポルトランドセメント	NP	3.15	3260	—	—	
	早強ポルトランドセメント	HP	3.14	4530	—	—	
	中庸熱ポルトランドセメント	MP	3.20	3200	—	—	
	高炉スラグ微粉末	BS	2.91	3780	—	—	
骨材	細骨材(山砂)	S	2.57	—	3.05	1.84	64.2
	粗骨材 (碎石:Gmax=20mm)	G	2.82	—	6.64	1.25	56.3

2.3 コンクリートの練混ぜ、供試体作製および養生方法

練混ぜ方法は、結合材、細骨材に対して30秒間空練りを行い、1次水(全量の90%)を投入し90秒間練った後、粗骨材と混和剤を含む残りの2次水を投入し、さらに90秒間練り混ぜた。練混ぜは、50ℓ練りの2軸強制練りミキサーを使用した。圧縮強度試験用の供試体は、 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用い、突き固めを行わずに採取した。

養生は一般のプレテンション製品と同様に常圧蒸気養生を行った。養生方法は、プログラム蒸気養生槽により、前置き 20°C を3時間、昇温勾配 $20^\circ\text{C}/\text{時間}$ 、温度保持 65°C を3時間、降温勾配 $5^\circ\text{C}/\text{時間}$ の蒸気養生を行い、その後、試験材令まで 20°C の水中で養生した。

2.4 試験項目および試験方法

(1) スランプフロー試験

流動性の評価方法は、土木学会規準「コンクリートのスランプフロー試験方法(案)」(JSCE-1990)に規定されている試験方法に準拠したスランプフロー試験により行った。

(2) 充填性試験

本試験は、鉄筋が密に配置された部材中に、締固めを行わなくても充填が可能であるか否かを判定することが目的である。

試験は図-1に示すように、中央部に純間隔35mmで配置された鉄筋(13mm異形棒鋼)による障害部を設けたU型充填試験装置[4]により行った。試験の手順は、中央部のゲートを締めた状態で片側にコンクリート試料を詰め、ゲートを一気に開け、投入側と障害部通過後の出口側のコンクリートの落差Hを測定した。本実験では、落差5cm以下を充填性の目標とした。また、材料分離の有無については、洗い試験により障害部通過後の粗骨材量を測定し、設計粗骨材量と比較した。ここで、(通過後の粗骨材量)/(設計粗骨材量)を分離指数と定義した。

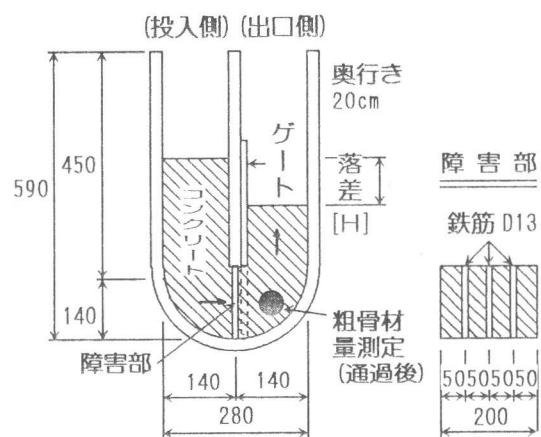


図-2 U型充填試験装置

(3) 圧縮強度試験

供試体の端面処理は研磨機を用いて行い、JIS A 1108に準じて圧縮強度試験を行った。試験材令は、蒸気養生後の1日及び28日とした。

3. 実験結果および考察

3. 1 最適粗骨材量の選定

表-3 最適粗骨材量の選定における配合および試験結果

結合材の種類	目標空気量 (%)	W/C (%)	Vw/Vc (%)	s/a (%)	Vg/Vglim (%)	Vs/Vslim (%)	単位量 (kg/m³)				試験結果			
							C	W	S	G	混和剤 (C×%)	スランプフロー (cm)	U型充填落差H (cm)	空気量 (%)
早強セメント	2.0	31.8	100	54.2	48	68	617	195	820	761	2.2	62.0	2.0	1.6
				50.7	53		592	188	786	840		64.5	3.0	1.2
				47.4	58		567	179	756	922		52.5	12.0	1.6
				44.3	63		542	171	725	1001		48.5	33.0	1.6
普通セメント	2.0	33.3	105	54.8	47	68	605	202	825	747	1.7	61.5	2.0	2.7
				51.3	52		580	194	794	826		59.0	5.0	2.8
				48.0	57		558	186	761	905		49.5	15.0	3.0
				44.9	62		532	178	730	984		41.5	充填不可	2.1

本研究では、コンクリート中のセメント量、水量を抑えるために、流動性と充填性が共に良好な最大骨材量を最適骨材量と考えた。

配合の選定に先立ち、 $Vg/Vglim=50\sim55\%$ 、 $Vs/Vslim=60\sim74\%$ の12種類の配合について予備試験を行い、その結果をもとに最適骨材量の選定を行った。

最適粗骨材量を選定するため、表-3に示す単位粗骨材量を変化させた4種類の配合について、スランプフロー試験および充填性試験を実施した。結合材は早強セメントと普通セメントの2種類を使用した。モルタルの粘性の影響をできるだけなくすため、同一結合材間のモルタル部の配合比率は同じにした。

なお、本研究では骨材量を選定するにあたり、 Vw/Vc 、 $Vg/Vglim$ 、 $Vs/Vslim$ 等を用いた。ここで、 Vw/Vc は水セメント容積比、 $Vg/Vglim$ は相対粗骨材容積比、 $Vglim$ は実積率に相当する粗骨材容積、 $Vs/Vslim$ はモルタル中の相対細骨材容積比、 $Vslim$ はコンクリート1m³中のモルタル分に対する実積率に相当する細骨材容積を表す。

$Vg/Vglim$ とスランプフローおよび充填性試験の落差Hの関係を図-3に示す。これらの図より、早強セメントと普通セメントで若干スランプフローが異なるが、どちらの結合材についても、 $Vg/Vglim$ が大きくなるにしたがってスランプフローは小さくなり、特に、 $Vg/Vglim=52\sim53\%$ より大きくなると、その傾向は顕著になる。

また、充填性試験については、 $Vg/Vglim$ が大きくなるほど落差Hが大きくなり、特に、 $Vg/Vglim=52\sim53\%$ より大きいときその傾向が著しい。これらのことは、粗骨材量が多くなると骨材同士の噛み合いを生じるため、流動性が低

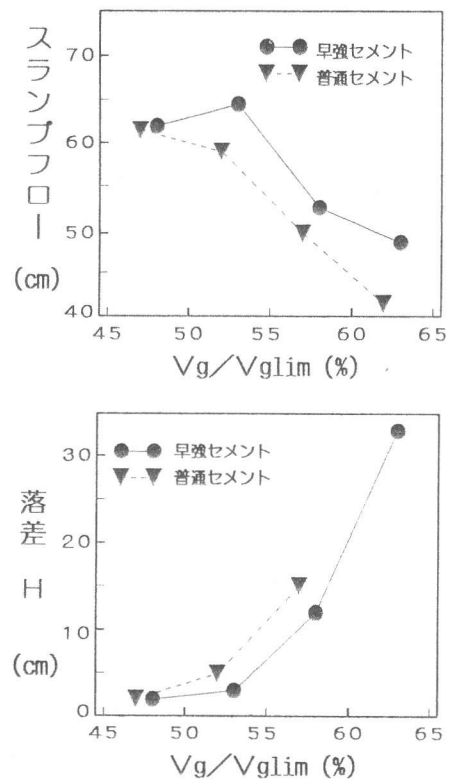


図-3 $Vg/Vglim$ とスランプフロー、U型充填性試験落差の関係

下したり、障害部で閉塞したりすることが原因であると考えられる。

以上より、スランプフローが55cm以上、落差Hが5cm以下の目標値を満足するコンクリートの最適粗骨材量は、 $V_g/V_{glim}=52\sim 53\%$ つまり単位粗骨材容積量=293~298 kg/m^3 程度が妥当であると考えられる。なお、 $V_g/V_{glim}=52\%$ では分離指数が1.08、 $V_g/V_{glim}=53\%$ では分離指数が1.05と、設計粗骨材量と障害部通過後の粗骨材量の差はほとんど認められず、また、実験時の観察でも材料分離は見られなかったため、材料分離はほとんど生じていないと判断した。

表-4 最適細骨材量の選定における配合および試験結果

結合材の種類	目標空気量 (%)	W/C (%)	V _w /V _c (%)	s/a (%)	V _g /V _{glim} (%)	V _s /V _{slim} (%)	単位量 (kg/m ³)				試験結果			
							C	W	S	G	混和剤 (C×%)	スランプフロー (cm)	U型充填落差H (cm)	空気量 (%)
早強セメント	2.0	31.8	100	47.5	53	60	649	206	694	840	2.2	70以上 ^{*1}	2.0	0.7
				49.1		64	621	197	740			68.5	1.0	1.2
				50.7		68	592	188	786			64.5	3.0	1.6
				52.1		72	564	179	833			42.5	21.0	1.3
普通セメント	2.0	33.3	105	48.1	52	60	636	213	699	826	1.7	70以上 ^{*1}	1.0	1.9
				49.7		64	611	203	745			67.5	4.0	2.0
				51.3		68	580	194	794			59.0	5.0	2.8
				52.7		72	554	184	840			40.5	16.0	3.9

*1：試験装置の関係で、スランプフローは70cmまでしか測定できなかった。

3.2 最適細骨材量の選定

最適粗骨材量に対する最適細骨材量を選定するため、表-4に示す単位細骨材量を変化させた4種類の配合について、スランプフロー試験および充填性試験を行った。

結合材は早強セメントと普通セメントの2種類を使用した。

V_s/V_{slim}とスランプフローおよび充填性試験の落差Hの関係を図-4に示す。これらの図より、早強セメント、普通セメントのどちらについても、V_s/V_{slim}が大きくなるにしたがってスランプフローが小さくなり、特に、V_s/V_{slim}=68%より大きくなるとその傾向は顕著である。

また、充填性試験については、V_s/V_{slim}が大きくなるにしたがって落差Hも大きくなり、特に、V_s/V_{slim}=68%より大きいときその傾向が著しい。これらのことは、細骨材量が多くなると細骨材同士が噛み合うため、モルタルの流動性の低下によりコンクリートも流動性が悪くなるため、充填性が低下したものと考えられる。

これらの結果より、スランプフローが55cm以上、落差Hが5cm以下の目標値を満足するコンクリートの最適細骨材量はV_s/V_{slim}=68%つまり単位細骨材容積量=306~309

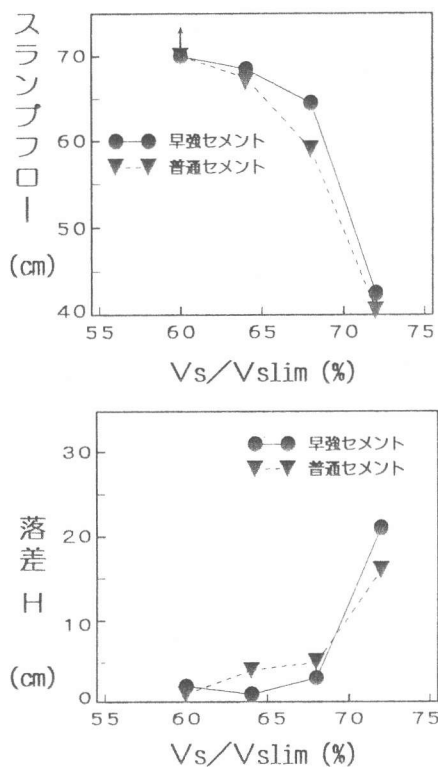


図-4 V_s/V_{slim}とスランプフロー、U型充填性試験落差の関係

Q/m^3 程度が妥当であると考えられる。なお、 $V_s/V_{slim}=68\%$ では分離指数が1.05~1.08と、設計粗骨材量と障害部通過後の粗骨材量の差はほとんど認められず、また、実験時の観察でも材料分離は見られなかったため、材料分離はほとんど生じていないと判断した。

表-5 結合材の選定における配合および試験結果

結合材の種類	目標空気量 (%)	W/P (%)	V _w /V _p (%)	s/a (%)	V _g /V _{glim} (%)	V _s /V _{slim} (%)	単位量 (kg/m ³)						試験結果		
							結合材 P		W	S	G	混和剤 (P×%)	スラッグ ¹⁾ (cm)	U型充填 落差H (cm)	空気量 (%)
							C	BS							
HP	2.0	35.0	110	50.7	53	68	564	—	197	786	840	2.1	62.0	未測定	0.8
NP		33.5	105				576	—	193			1.7	59.0	5.0	2.8
MP		32.9	105				586	—	193			1.7	55.0	未測定	1.3
HP+BS		33.0	100				296	273 ^{*1}	188			1.6	59.5	3.0	1.8

*1: 容積比 50%

3.3 結合材の選定

早強性を有する高流動コンクリートに適した結合材の選定を行うため、表-5に示すように結合材の種類を変化させた4種類の配合について、圧縮強度試験を実施した。結合材は早強セメント、普通セメント、中庸熱セメント、早強セメントと高炉スラグ(50%置換)を併用した2成分系の4種類について検討した。高流動コンクリートの材令1日と材令28日の圧縮強度試験の結果を図-5に示す。

図より、材令28日の圧縮強度は、いずれの結合材とも目標値の500kgf/cm²以上を満足しているが、材令1日の圧縮強度は中庸熱セメントを用いた配合では、目標値350kgf/cm²に達していないことがわかる。

経済性、耐久性を考えた場合、セメント単味よりも二成分系の結合材を用いた方が有利であるため、早強セメントと高炉スラグを併用した結合材の検討を行った。

高炉スラグの置換率と材令1日と28日の圧縮強度の関係を図-6に示す。単位水量、単位細骨材量、単位粗骨材量は一定とした。

図より、高炉スラグの置換率が大きいほど、材令1日の圧縮強度の発現は小さくなることが認められた。特に、高炉スラグの置換率を60%より大きくすると、材令1日強度は目標値の350kgf/cm²に達していなかった。一方、材令28日の圧縮強度については、高炉スラグの置換率による差は顕著に認められなかった。以上の結果より、材令1日で圧縮強度350kgf/

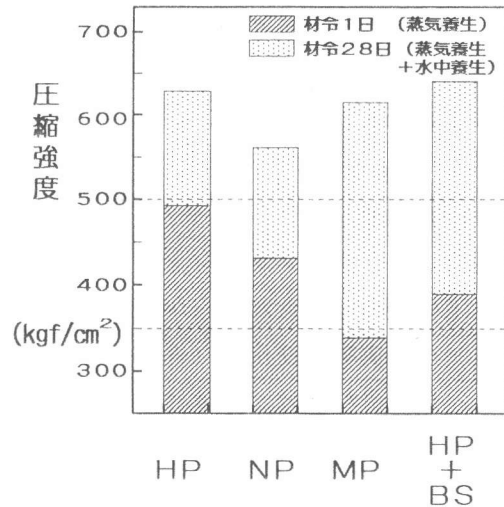


図-5 各種結合材と圧縮強度の関係

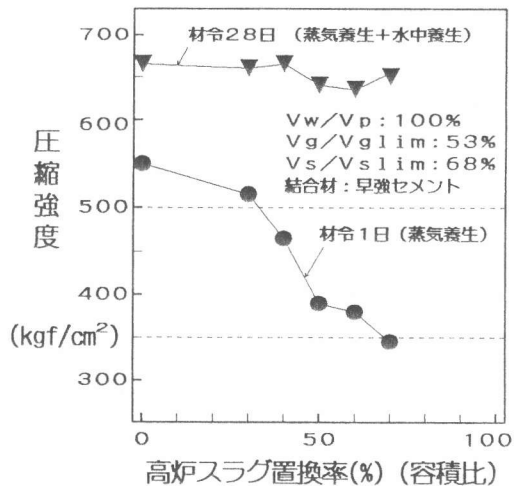


図-6 高炉スラグ置換率と圧縮強度の関係

cm²以上の強度発現が可能な高炉スラグの最大置換率は60%程度と考えられる。

ここで、高炉スラグの置換率と混和剤の添加率の関係を図-7に示す。配合は、単位水量、単位細骨材量、単位粗骨材量を一定とし、混和材の添加量を調整してスランプフローをほぼ同一にした。

高炉スラグの置換率が60%以下については、置換率を大きくすると、同じ流動性を得るための混和剤の添加率が少なくなることがわかる。これは、高炉スラグを添加することでコンクリートの粘性が低下し、流動性が良くなったものと考えられる。

これらの結果より、早強セメントと高炉スラグを併用した結合材を用いる方が、早強セメントのみを用いるよりも、初期強度は若干低下するが、良好な流動性を得るための水量や混和剤量が少なくなると判断される。

したがって、早強性を必要とするプレテンション用高流動コンクリートの結合材として、早強セメントと高炉スラグの併用は有効であると考えられる。しかしながら、今回行った実験は空気をほとんど連行せず、早強性を重視したため、今後は耐久性の中の耐凍害性などに関する検討を行う予定である。

4. まとめ

早強性を有するプレテンション用コンクリートの配合について検討した結果、本研究の範囲内で以下のようなことが明らかになった。

- (1) 今回実験で使用した骨材では、流動性と充填性の目標値を満足する高流動コンクリートの最適骨材量は、粗骨材が $V_g/V_{glim}=52\sim 53\%$ （単位容積量 $293\sim 298\text{ }l/m^3$ ）、細骨材が $V_s/V_{slim}=68\%$ （単位容積量 $306\sim 309\text{ }l/m^3$ ）程度が適当であった。
- (2) 上記の骨材量の範囲では、分離指数は $1.05\sim 1.08$ と材料分離はほとんど認められなかった。
- (3) 常圧蒸気養生後の材令1日強度は、早強セメント、普通セメント、早強セメントと高炉スラグ併用（置換率50%）の場合には、目標の圧縮強度 $350\text{ }kgf/cm^2$ を確保することが可能であった。
- (4) 早強セメントと高炉スラグを60%程度併用した場合でも、常圧蒸気養生後の材令1日で目標の圧縮強度の $350\text{ }kgf/cm^2$ を十分に確保することが可能であった。

謝辞：実験を行うにあたり(株)ポゾリス物産 浅野氏、日本セメント(株) 松中氏のご協力をいただきました。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 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
- [2] 今井昌文・手塚正道・片桐修一・長谷川明義：締固め不要コンクリートを用いたプレテンション桁の製造に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、14-1、pp. 85-90、1992
- [3] 横田和直・松岡康訓・大友健・坂本淳：高強度および早強性を有する超流動コンクリートに関する研究、超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp. 91-96、1993. 5
- [4] 新藤竹文・松岡康訓・S. Tangtermsirikul・坂本淳：超流動コンクリートの基礎物性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、13-1、pp. 179-184、1991

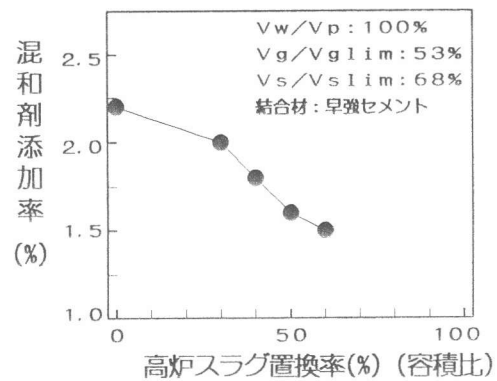


図-7 高炉スラグ置換率と混和剤の添加率の関係