

報告 低熱ポルトランドセメントを用いた高強度・高流動コンクリートの諸特性

佐藤文則^{*1}・城国省二^{*2}・佐々木 満^{*3}・中島良光^{*4}

要旨：ビーライト含有量の異なる高ビーライト系セメントを用いて設計基準強度 60N/mm^2 および 100N/mm^2 の高強度・高流動コンクリートの配合検討を行い、フレッシュ性状、強度特性、収縮特性、凍結融解抵抗性を調査した。その結果、自己充填性をコンクリートに付与するためには、適切な水粉体容積比を選定することが重要であり、使用するセメントや強度レベルによって充填性能が異なることが確認された。また、強度レベルにより収縮特性は大きく異なり、凍害に対して十分耐久的であることが確認された。

キーワード：高強度、高流動、水粉体容積比、高ビーライト系セメント

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化および老朽化が顕在化するに伴い、我が国の既存コンクリート構造物の維持管理費用は増加の一途をたどっているのが現状である。したがって、今後新設される公共構造物は、供用期間が出来るだけ長くなるように、十分な耐久性や安全性を保有していくことが重要となる。このような観点に立ちコンクリートに付与すべき性能を考えた場合、自己充填性を有する高強度・高流動コンクリートの積極的な利用が、先の要求を満たすための有力な手段として考えられる。そこで、本報では、設計基準強度で 60N/mm^2 および 100N/mm^2 の自己充填型の高強度・高流動コンクリートを対象に配合検討を行い、その結果得られたフレッシュ性状および硬化後の強度特性、収縮特性、凍結融解抵抗性の基礎的な物性について報告するものである。なお、本報告は、S.Q.C 構造物開発・普及協会の耐震部会活動の一環として行ったものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用した材料の品質を表-1 に示す。こ

の種のコンクリートは、高強度・高流動コンクリートを前提としているため、単位粉体量が多くなり自己収縮量や発熱量が大きくなることが予測される。そこで、本検討ではビーライト含有量の高い低熱ポルトランドセメント(LPC)を用いることとした。なお、設計基準強度 100N/mm^2 では、強度発現性を考慮して LPC に対してビーライト含有量が少ない高ビーライト系セメント (LHC:低熱ポルトランドセメントの水和熱の規格値外) にシリカフューム(比重:2.2,

表-1 材料の品質

高ビーライト系セメント						
記号	比重	比表面積 (cm^2/g)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)
LPC	3.21	3460	29	55	2	8
LHC	3.20	4190	35	46	3	9
LPC:60N/mm ² 用						LHC:100N/mm ² 用
骨材						
	種別	産地	粗粒率	表乾比重	吸水率	実績率 (%)
細骨材	陸砂	大里村	2.82	2.60	2.1	-
	碎砂	皆野町	2.59	2.62	1.9	-
粗骨材	碎石 20mm	皆野町 硬質砂岩	-	2.67	0.8	58.8
高性能 AE 減水剤						
記号	主成分					
SP1(60N/mm ² 用)	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体					
SP2(100N/mm ² 用)						

*1 前田建設工業(株)技術研究所研究第1グループ主任(正会員)

*2 秩父小野田(株)中央研究所セメントコンクリート技術センター グループリーダー(正会員)

*3 (株)ポゾリス物産東京支店混和剤営業第2グループ課長代理(正会員)

*4 前田建設工業(株)技術研究所研究第1グループ主任工修(正会員)

比表面積 : 200000cm²/g, SiO₂ : 90.95%) を内割りで 10%置換することとした。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合は、単位水量および単位粗骨材量を各々 165kg/m³, 0.300m³/m³の値で基本的に固定し水結合材比を変化させた。スランプフローおよび空気量の値は、練混ぜ終了後30分で管理することとした。スランプフローの目標値は 60±5cm に、空気量の目標値は 60N/mm²の場合には 5.5±0.5%, 100N/mm²の場合には 2±0.5% および 3±0.5% の 2 水準に設定し、高性能AE減水剤、空気量調整剤の添加量で調整した。なお、コンクリートの配合強度は、設計基準強度(材齢 56 日) 60N/mm², 100N/mm² の強度レベルに対して各々 72N/mm², 120N/mm² に設定した。表-2にコンクリートの配合を示す。

2.3 実験方法

コンクリートの練混ぜは、50Lの強制二軸ミキサにより行い、設計基準強度毎に図-1に示す練混ぜ手順に従って実施した。フレッシュコンクリートの試験は、スランプフロー試験、空気量試験を練混ぜ終了後60分まで測定した。また、コンクリートの充填性を評価するため、土木学会「自己充填型の高流動コンクリートの試験方法

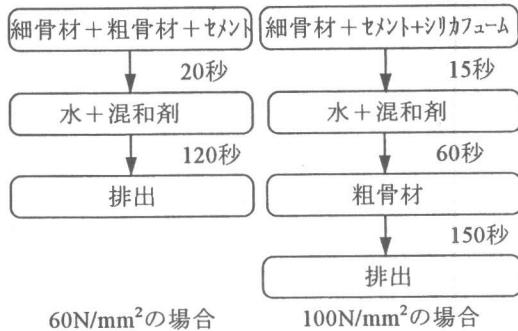


図-1 練混ぜ手順

(案)」に準拠して、充填装置(U型容器、障害条件S1)を用いた間隙通過試験を行った。加えてVF試験によるコンクリートの下がり値も測定した。コンクリートの強度特性は、標準養生を行い材齢7, 28, 56, 91日で圧縮強度試験とヤング係数の測定を行った。また、凍結融解試験、乾燥収縮試験は、所要の充填性と配合強度を満足できる配合を選定し実施した。試験方法は、各々 JIS A 6204およびJIS A 1129に準拠した。

3. 結果および考察

3.1 コンクリートの充填性能

試験結果一覧を表-3に示す。また、水粉体容積比とU型充填高さの関係を図-2に、水粉体容

表-2 コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	水粉体容積比	ペースト細骨材容積比	粗骨材容積量 (L)	水結合材比	細骨材率	単位量(kg/m ³)						
								水	セメント	シリカフューム	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤 B×%	空気量調整剤
60	60±5	5.5±0.5	0.96	1.09	300	30	50.7	165	550	-	806	801	1.5	2.5A
			1.06	0.99		33	51.9		500		846		1.4	1.5A
			1.16	0.91		36	52.9		458		880		1.65	1.5A
			1.25	0.85		39	53.7		423		909		1.7	1.25A
100	60±5	2±0.5	0.61	1.77	300	20	45.0	165	743	83	642	801	3.60	1.0T
				1.89			43.5				601	801	3.45	1.0A
				1.36			45.0				642	761	3.40	1.0A
				1.23			50.0				594	66	782	801
		3±0.5	0.77	1.23	300		48.7	25			744	801	3.40	0.7A
				1.33			50.0				782	761	3.30	0.7A
				1.23			50.0							

(注)B:結合材重量 空気量調整剤 B×(A)×0.003%, B×(T)×0.002% (消泡剤)

表-3 試験結果一覧

水結合材比(%)	目標空気量(%)	粗骨材容積(L)	試験結果												
			スランプフロー(cm)			空気量(%)			500mmフロー到達時間(秒)			U型充填高さ(cm)		VF下がり値(cm)	
0分	30分後	60分後	0分	30分後	60分後	0分	30分後	60分後	0分	30分後	0分	30分後	0分	30分後	
30	5.5	300	61.3	62.8	59.5	5.0	5.1	5.1	6.5	8.5	10.0	34.3	35.6	22.0	15.5
			63.0	63.3	63.5	5.0	5.2	5.0	6.0	7.5	8.0	35.3	35.3	23.0	19.0
			58.3	62.5	58.5	5.5	5.4	5.5	6.0	6.0	8.0	33.9	26.0	6.0	4.0
			59.8	61.0	-	5.6	5.6	-	6.5	7.0	-	27.8	-	6.0	-
20	2.0	300	60.0	57.5	51.0	1.8	1.8	-	10.7	19.3	57.6	-	33.2	-	14.0
			68.5	67.0	-	4.5	2.6	-	6.3	8.0	-	-	25.3	-	7.5
			285	61.0	59.0	59.5	5.5	3.2	-	10.8	17.9	18.2	-	24.7	-
25	2.0	300	63.5	64.0	61.0	1.8	1.7	-	8.0	8.7	12.9	-	34.2	-	22.5
			64.5	63.0	-	3.7	3.0	-	5.8	8.9	-	-	28.5	-	7.0
			285	58.5	58.5	55.0	5.3	3.5	-	7.4	11.2	12.2	-	30.1	-

積比と VF 下がり値の関係を図-3 に示す。設計基準強度 $60N/mm^2$ を対象とした配合は、ビーライト含有量 55% の低熱ポルトランドセメント(LPC)であり、この場合、水粉体容積比 1.06 以下に設定しないと、30cm 以上の充填高さを得られていない。この傾向は、VF 下がり値でも同様であり、水粉体容積比 1.06 を境として、VF 下がり値が急激に小さくなっている。すなわち、LPC セメントを単味で用いた場合には、コンクリートに自己充填性を付与するには、水セメント比で 33% に相当する粉体量にする必要があることが分かる。また、LHC セメントとシリカフュームを用いた $100N/mm^2$ を対象とした配合では、水粉体容積比を小さくすると、逆にコンクリートの充填性能が劣る結果となっている。枝松らの研究によれば、水粉体容積比と充填高さとの関係は、最適水粉体容積比が存在し、使用する粉体の粒度分布、粒子径、粒子形状の相違によって最適水粉体容積比と自己充填性能が異なるとしており、今回の実験でもその傾向が現れている¹⁾。また、 $100N/mm^2$ を対象とした配合では、空気量の設定を変化させている。今回の実験では、空気量の相違によって充填性能が大きく異なり、空気量が少ない場合に良い充填性を示している。

3.2 コンクリートの流動性

図-4 に $60N/mm^2$ 、図-5 に $100N/mm^2$ コンクリー

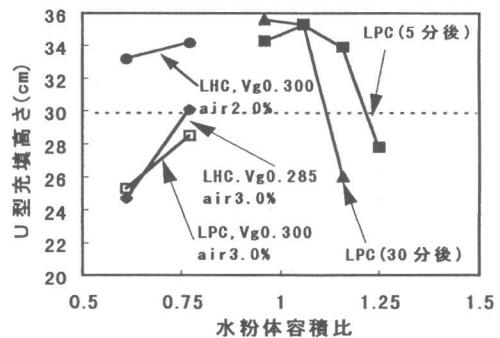


図-2 水粉体容積比と U 型充填高さの関係

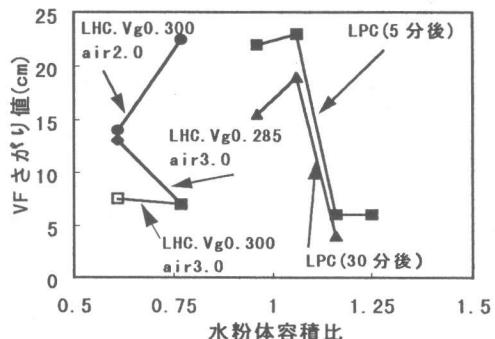


図-3 水粉体容積比と VF 下がり値の関係

トのスランプフローおよび 500mm フロー到達時間の経時変化を示す。これよりスランプフローは、いずれの配合においても 30 分後の目標値 60 ± 5 cm を満足する結果となっている。しかしながら、スランプフ

の保持性能は、水結合材比が20%と極端に粉体量が多い場合に若干劣る傾向が認められる。500mm到達時間は、同一のセメント種類で比較すれば水結合材比が小さい程、その値が大きくなり、見かけの塑性粘度が増加していると思われる。また、経時的に塑性粘度も増加する傾向が認められる。特に水結合材比20%の場合に顕著であり他の配合に比較して著しく高い塑性粘度を有していると考えられる。

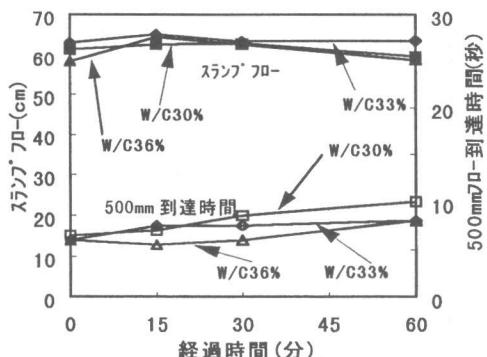


図-4 流動性能の経時変化 ($60\text{N}/\text{mm}^2$)

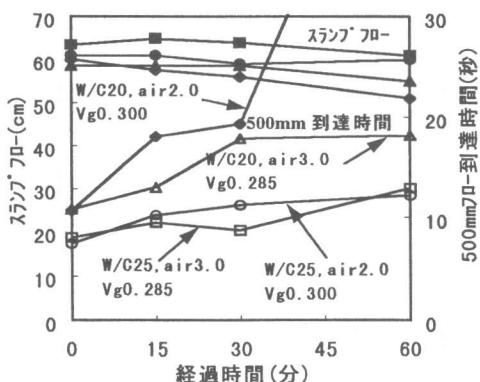


図-5 流動性能の経時変化 ($100\text{N}/\text{mm}^2$)

3.3 コンクリートの強度特性

図-6に $60\text{N}/\text{mm}^2$ を対象とした配合のセメント水比と圧縮強度の関係を示す。材齢56日におけるセメント水比の関係は、式(1)の通りであり、これより配合強度 $72\text{N}/\text{mm}^2$ を満足する水セメント比は、37.5%となる。

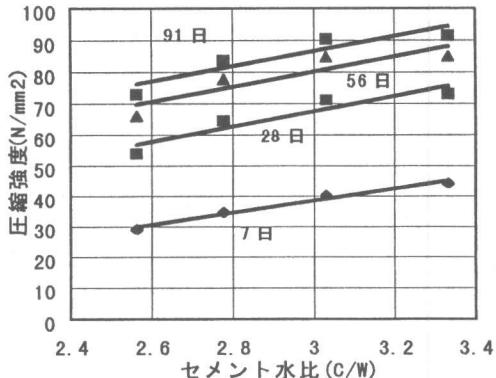


図-6 セメント水比と圧縮強度の関係 ($60\text{N}/\text{mm}^2$)

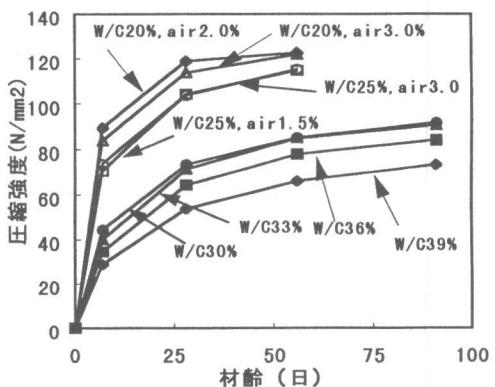


図-7 圧縮強度と材齢の関係

$$\sigma_{c(56)} = 23.915(C/W) + 8.3149 \quad (1)$$

したがって、LPCセメント単味で自己充填性を付与するために、今回の配合試験では粉体量が $500\text{kg}/\text{m}^3$ 以上必要となり、その結果、水結合材比が33%に決定される。したがって、材齢56日で約 $80\text{N}/\text{mm}^2$ の圧縮強度が発現し配合強度に対して $8\text{N}/\text{mm}^2$ 上回ることになる。また、水セメント比33%以下になると材齢28日以上の長期材齢では強度発現が若干頭打ちになる傾向が認められる。

図-7に圧縮強度と材齢の関係を示す。水結合材比を20%とした場合に、材齢56日で配合強度 $120\text{N}/\text{mm}^2$ を満足している。また、 $100\text{N}/\text{mm}^2$ レベルの高強度域では、圧縮強度に対して混入した空気量の影響が表れている。高強度域の配合設計を行う場合には、耐久性上必要な空気量よ

り圧縮強度が決定される場合もあり、適切な空気量を十分検討する必要があるものと思われる。また、本実験において材齢 56 日では、空気量の相違による明確な強度差は認められなかつたが、これはペーストの強度特性より使用した粗骨材の強度特性に支配されたものと思われる。圧縮強度試験後の破壊面の目視観察でも粗骨材の破碎が確認された。

図-8 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。これより 72N/mm^2 よび 120N/mm^2 の圧縮強度では、静弾性係数は、各々 $3.0 \times 10^4\text{N/mm}^2$, $4.0 \times 10^4\text{N/mm}^2$ となっている。また、今回の結果は NEW RC 評価式に比べて $0.5 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 程度小さい値を示している。これは、コンクリートに自己充填性を付与するために粗骨材容量を 300L/m^3 としており通常のコンクリートに比べてモルタル量が多いことに起因しているものと思われる。

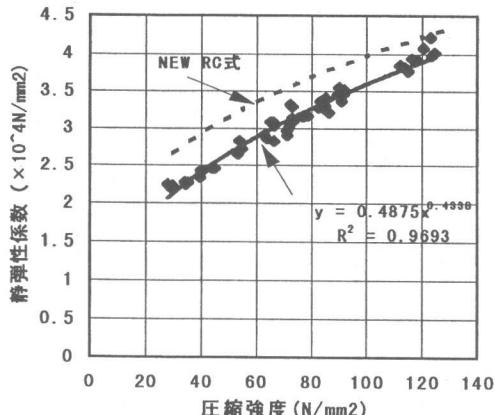


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.4 凍結融解抵抗性

図-9 に凍結融解試験結果を示す。いずれの配合においても、300サイクル終了後の相対動弾性係数は、100%以上となっており、耐凍害性に優れていることが分かる。特に LPCセメントを用いた W/C=33%、空気量 5.2% の配合では、凍結融解サイクルで約 600 回まで相対動弾性係数が、100%以上であることを確認している。また、 100N/mm^2

を対象としたコンクリートでは、空気量が 1.8% と少なくとも一般的には十分な凍結融解抵抗性を示している。これは、低水セメント比で、かつシリカフュームを使用しているため、細孔構造が密密になり、コンクリート硬化体の細孔組織中の凍結水の割合が少なくなったことに起因していると考えられる。

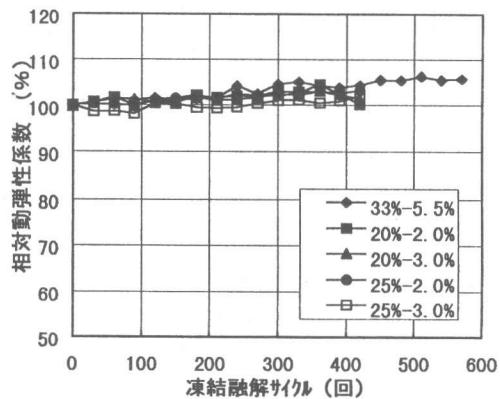


図-9 凍結融解試験結果

ただし、上記に示した事項は、凍結融解性能を相対的に比較したに留まっている。今後、このようなコンクリートをコンクリート構造物の超寿命化と言った観点より用いる場合には、実験室レベルの環境と実環境との関係を明確にする必要がある。例えば、洪、鎌田らの研究によれば、札幌に代表される危険度 3 の箇所では、夏期における乾燥の影響を考慮した場合、年凍結融解回数は、ASTM-A 法に相当する凍結融解回数で 6 回としており²⁾、今回の 60N/mm^2 コンクリートは、耐用年数を 100 年以上補償したことになる。ただし、それ以上の耐用年数を補償するには凍結融解試験サイクルが不足していることになる。また、石井らの研究では、NON-AE コンクリートの耐凍害性を細孔組織の観点より考察し、最低温度と破壊サイクルとの関係は、任意の水セメント毎に定式化できるとしており、耐用年数の試算手法として重要な知見を示している³⁾。AE コンクリートへの拡張が望まれるところである。

3.5 収縮特性

図-10に乾燥収縮試験結果を、図-11に乾燥収縮ひずみと重量変化率の関係を示す。水結合材比（強度レベル）に関わらず乾燥収縮ひずみ履歴は、ほぼ同じとなっており、乾燥期間26週で約 800×10^{-6} と相当大きな値を示している。この値は、自己収縮と乾燥収縮ひずみの両者の影響を考慮した土木学会標準示方書式による値より 150×10^{-6} 程度大きな値であり、高強度域での評価式の適合性が今後の課題となると考えられる。また、水分逸散量に対する乾燥収縮ひずみの応答は大きく異なっており、細孔組織が緻密と考えられるコンクリートほど、水分逸散量に対する乾燥収縮ひずみが大きくなっている。これは、粉体量が多いことによる自己収縮の影響も考えられるが、下村らが示したように、毛管力に起因する応力は式(2)で表現され、液状水が存在する最大細孔半径が小さいことに大きく起因していると思われる⁴⁾。

$$\sigma_s = A_s \frac{2\gamma}{r_s} \quad (2)$$

σ_s ：毛管力に起因する応力(Pa)

A_s ：毛管力の作用面積の影響を表す係数

γ ：液体の表面張力(N/m)

r_s ：液状水が存在する最大細孔半径(m)

4.まとめ

本試験で得られた主な知見は以下の通りである。

- (1)自己充填型の高強度・高流動コンクリートでは、使用する粉体種類、強度レベルにより充填性能が異なる。粉体種類をLPC単味とした場合、設計基準強度 60N/mm^2 を対象とした配合では、充填性能より必要な粉体量が決定されるため、 80N/mm^2 の圧縮強度を保有する結果となった。
- (2)普通コンクリートと比較して高強度・高流動コンクリートの凍結融解抵抗性は、同等以上と判断される。しかし、乾燥収縮試験では、相当大きな収縮量を示した。今後、ひび割れ抵抗性の観点より検討する必要があると思われる。
- (3)超寿命化といった観点より、このようなコン

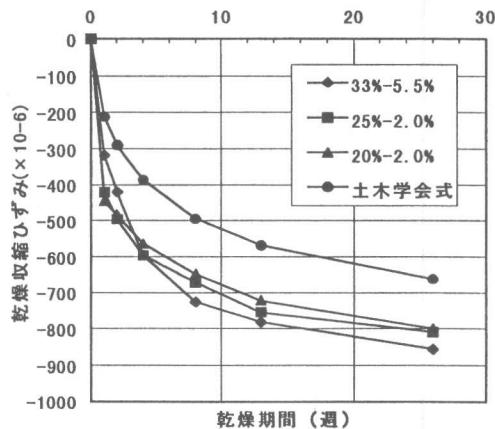


図-10 乾燥収縮試験結果

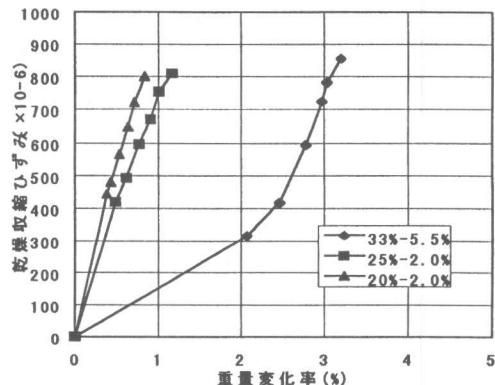


図-11 乾燥収縮ひずみと重量変化率の関係

クリートの優位性を評価するためには、耐用年数の算出手法などの適切な評価手法が必要となる。

参考文献

- 1)枝松良展ほか：粉体特性とコンクリートの充填性,自己充填コンクリートセミナー,土木学会,pp.17-24,1997.5
- 2)洪悦郎ほか：コンクリートの耐凍害性におよぼす環境条件の影響,日本建築学会北海道支部研究報告集 No.62,pp13-16,1989
- 3)石井清：長期現地暴露試験に基づくダムコンクリートの耐凍害性に関する研究,東京大学学位論文,1997
- 4)下村匠：細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル,東京大学学位論文,1993