

(156) 石灰石微粉末を用いた高強度・高流動コンクリートの耐久性

(株)ピー・エス 技術研究所 正会員 ○長井 健雄
 東北大学 大学院 教授 正会員 三浦 尚

1. まえがき

筆者らは、高強度($\sigma_{ck}=68.6\text{MPa}$)の薄肉PC工場製品を効率よく製造できる、縦打ち型枠と高流動コンクリートを用いた製造方法(縦打ち方法)の実用化を目指すために、早強ポルトランドセメントに石灰石微粉末(Ls:ブレン値 $7310\text{ cm}^2/\text{g}$)を15~20%添加すると同時に、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤と増粘剤(天然多糖類ポリマー、 β -グルカン)溶液を用いた高流動コンクリートを開発してきた¹⁾。高流動コンクリートの耐久性、特に、凍結融解抵抗性については、蒸気養生したコンクリートに関する報告は少ない。また、耐海水性についても、国内では、Lsを用いたコンクリートに関する研究はごく僅かである。

本報告は、石灰石微粉末や β -グルカン増粘剤の添加による高流動コンクリートの耐久性に及ぼす影響を調べるために、凍結融解抵抗性試験および耐硫酸塩性(耐海水性)試験を行い、現状PC工場製品用コンクリートとの比較検討を行ったものである

2. 試験に使用する材料

各種試験のコンクリート使用材料は表-1に示す通りである。特に、 β -グルカン増粘剤の添加については、粉体添加ではなく、筆者らが考案した利用性のよい溶液添加(アルカリ性溶液に溶解してから添加する手法¹⁾)によった。

表-1 使用材料の品質

種類	記号	特性・主成分
セメント	C	早強ポルトランドセメント(比重:3.14)
混和材	Ls	石灰石微粉末 (比重:2.73、ブレン値:7310 cm^2/g)
細骨材	S	砕砂(熊本県玉名郡産) (比重:2.96、吸水率:1.75%、F.M.:2.73)
粗骨材	G	砕石(熊本県鹿北産)、粗骨材最大寸法:15mm (比重:3.03、吸水率:0.45%、F.M.:6.45)
高性能AE減水剤	Ad	ポリカルボン酸系(SP-N)
増粘剤		天然多糖類ポリマー(β -G)溶液

3. 凍結融解抵抗性試験

3.1 試験計画

筆者らが開発してきた高流動コンクリートは、石灰石微粉末(LS)や天然多糖類ポリマー(β -グルカン)を用いたことに特徴がある。そこで本研究では、石灰石微粉末や β -グルカンの添加による影響、蒸気養生後の養生条件(14日水中養生と14日空中養生)の影響、また空気量の違いによる影響などを調べることにし、表-2に示す4配合について、凍結融解抵抗性試験を行った。使用したコンクリートのフレッシュ時の物性は表-2に示した通りである。なお、表中の高性能AE減水剤添加率はセメントと石灰石微粉末との合計量に対する%で、T50は50cmフロー到達時間である。また、コンクリート供試体の蒸気養生条件は、前置き時間を3時間とし、最高温度60°Cを4時間保持する条件で行った。

表-2 凍結融解抵抗性試験用コンクリート配合およびフレッシュ時の物性

配合	コンクリート配合										フレッシュ時の物性		
	W/C (%)	空気量 s/a (%)			単 位 量 (kg/m ³)				混和剤 SP-N (%)	増粘剤 β -G (g/m ³)	スランプ フロー (cm)	T50 (秒)	空気量 (%)
		(%)	(%)	(%)	W	C	Ls	S					
現状PC	31.9	4.5	40.5	161	505	—	735	1146	1.5	—	スランプ 5.0 5.0		4.7 4.7
高流動1	37.6	4.5	50.1	190	505	100	815	860	1.8	150	63.5 62.0		4.8 4.9
高流動2	37.6	4.5	53.1	190	505	—	921	860	1.8	150	61.5 61.0	9.5 11.1	4.4 4.5
高流動3	37.6	2.0	52.1	190	505	100	887	860	1.8	150	61.0 62.5	13.2 11.5	2.8 2.8

凍結融解抵抗性試験は、土木学会規準 J S C E - G 5 0 1 - 1 9 8 6 「コンクリートの凍結融解試験方法」によって行った。試験サイクルは30サイクル毎300サイクルまでとした。試験体は角柱供試体(10×10×40cm)を用いた。

3. 2 試験結果および考察

蒸気養生後の養生条件によって試験開始時(材齢14日)の圧縮強度は、水中養生で58.7~70.4 MPa, 気中養生で50.9~66.8 MPaとなっており、10%前後の強度差を生じた(表-3参照)。また、気中養生したものよりも、水中養生したものの方が、やや大きな動弾性係数を示した。凍結融解試験結果を図示すれば、図-1のようになった。300サイクルの凍結融解試験を受けても、いずれのコンクリートも凍結融解に対する抵抗性は良好であった。水中養生供試体よりも気中養生供試体の方が相対動弾性係数が多少増大した結果となったが、これは、気中養生供試体は試験開始後において、水和反応が新たに進行しつつあったためと推測される。

また、気中養生の試験結果についてみれば、現在用いられている現状PC配合に比較しても、高流動1や高流動2は多少良い結果となって、石灰石微粉末やβ-グルカン増粘剤の添加は凍結融解抵抗性に関して、悪い影響を与えないことが確認された。300サイクルまでは高流動1と高流動3の結果は大差なく、空気量2%台でも十分な凍結融解抵抗性を示している。しかし、Non-AEコンクリートの場合、W/C=25%でも、あるサイクル数以上になると凍結融解抵抗性は急に低下するという研究報告²⁾もある。なお、コンクリート供試体の質量減少率はいずれの場合も、約0.1~0.6%の範囲であり、ほとんど質量変化はみられなかった。すなわち、凍結融解による劣化は認められなかった。300サイクル試験後の角柱供試体の外観も、特に異状などは見あたらなかった。

表-3 試験開始時測定結果(凍結融解試験)

配合	14日水中養生		14日気中養生	
	圧縮強度 (MPa)	動弾性係数 (10 ⁴ MPa)	圧縮強度 (MPa)	動弾性係数 (10 ⁴ MPa)
現状PC	70.4	5.35	66.8	5.29
高流動1	66.4	4.64	61.4	4.45
高流動2	58.7	4.82	50.9	4.41
高流動3	69.5	4.96	64.3	4.58

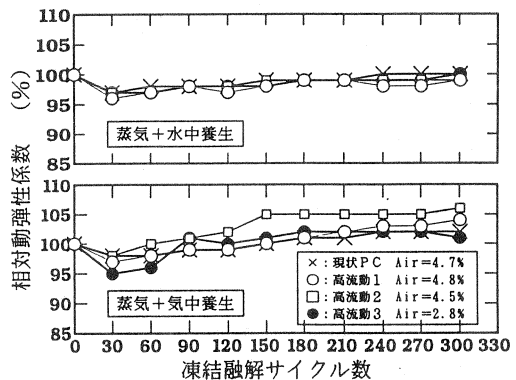


図-1 凍結融解試験結果

4. 耐硫酸塩性試験

4. 1 試験計画

本研究において、石灰石微粉末を早強ポルトランドセメントの外割として15~20% (粉体内割として、13~17%) 使用している。ヨーロッパの大多数の国々においては、石灰石粉は混合セメントの混和材として、単味あるいは他の混和材と併用する形で用いられている。そして、その使用量の限度は国によって異なるが、Ls単味の場合、セメントの内割で10%~25%となっている。また、フランスの規格によれば、海洋環境の場合、石灰石粉量は10%以下としている。一方、Baron, P. J.の研究³⁾における2年間海水浸漬試験結果では、Ls使用量20%の混合セメントは普通セメントと同程度の耐海水性能を示すとおり、また、Piasta, J.ほか⁴⁾、およびSchmidt, M.⁵⁾の研究における石灰石粉を13~25%添加した混合セメントを用いたペースト、モルタルあるいはコンクリートの硫酸塩溶液(4.5~10%溶液)浸漬試験結果では、圧縮強度や曲げ強度は無添加のものよりも増進するとしている。そして、これは、カルシウムカルボアルミネートの生成によって、エトリンガイトの生成を制限したためとされている。我が国における

石灰石微粉末を用いたコンクリートの耐海水性(耐硫酸塩性)に関する実験データはごく僅か(例えば、阪田ほかの研究⁶⁾)で、国内のセメント規格には、未だ石灰石微粉末を添加した混合セメントの規格は無い。なお、国内では本四架橋などの海洋構造物工事において、石灰石粉を多量(内割で37%程度)添加したコンクリートが施工された実績がある。

本研究では、耐海水性の検討として、0.15%Na₂SO₄溶液浸漬試験(米国開拓局法)および10%Na₂SO₄溶液浸漬試験を行った。0.15%Na₂SO₄溶液浸漬試験では、米国開拓局の判定基準(供試体が0.15%以上の膨張を示すとき、組織がゆるみ質量が15%減少したとき、あるいは動弾性係数が40%以上減少したときコンクリートは破壊したと判断する。)を十分満足していたので、ここでは、後者の浸漬試験について述べる。供試体の養生条件は蒸気養生後14日間気中養生とした。なお供試体コンクリートの配合は表-4に示す4配合とした。また、使用したコンクリートのフレッシュ時の物性も同表に示した。

表-4 耐硫酸塩性試験用コンクリート配合およびフレッシュ時の物性

配合	コンクリート配合										フレッシュ時の物性		
	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					混和剤 SP-N (%)	増粘剤 β-G (g/m ³)	スランプ フロー (cm)	T50 (秒)	空気量 (%)
				W	C	LS	S	G					
現状PC	31.9	4.5	40.5	161	505	—	758	1146	2.0	—	スランプ 12.0	—	4.3
高流動100	36.6	4.5	50.0	185	505	100	817	869	2.0	150	55.0	9.7	4.5
高流動200	46.3	4.5	50.0	185	400	200	841	866	2.0	150	56.0	17.6	4.9
高流動300	61.7	4.5	50.0	185	300	300	857	854	2.0	150	53.5	11.5	4.6

供試体はφ10×20cm円柱供試体と10×10×40cm角柱供試体を用いた。14日間気中養生後、円柱供試体は縦振動の一次共鳴振動数、質量および長さを、角柱供試体はたわみ振動の一次共鳴振動数、質量および長さを測定した。粉末硫酸ナトリウム10%溶液に28日、56日および105日まで浸漬後、それぞれの供試体を取り出して各種測定を行い、その後、それぞれ圧縮強度試験や曲げ強度試験を行った。なお、高流動100配合についてのみ、水中浸漬試験も同時に実施し、同様な各種測定を行った。

4.2 試験結果および考察

試験開始時の圧縮強度は48.2~72.8MPaの範囲であった。曲げ強度は6.43~8.43MPaの範囲で、それぞれの圧縮強度の(1/7~1/11)であった(表-5参照)。

表-5 試験開始時測定結果(耐硫酸塩性試験)

配合	円柱供試体				角柱供試体			
	圧縮強度 (MPa)	動弾性係数 (10 ⁻⁴ MPa)			曲げ強度 (MPa)	動弾性係数 (10 ⁻⁴ MPa)		
現状PC	72.8	5.12	5.07	5.12	8.43	5.23	5.15	5.28
高流動100	72.7	4.63	4.62	4.66	6.94	4.50	4.56	4.58
高流動200	59.2	4.06	4.13	4.12	6.43	4.18	4.12	4.24
高流動300	48.2	3.81	3.85	3.88	6.48	3.87	3.85	3.86
高流動100水	72.7	4.64	4.62	4.76	6.94	4.52	4.57	4.65

相対動弾性係数及び各種強度比の結果を図示すれば、図-2と図-3の通りになる。まず、相対動弾性係数の変化については、円柱供試体も、角柱供試体も、ほぼ同様な傾向を示し、浸漬後105日では約6~15%の増大となったが、阪田ほか⁶⁾の5%Na₂SO₄溶液繰返し浸漬試験結果でも同程度の増大が得られた。なお、圧縮強度も、曲げ強度も、同様な増大傾向が見られたが、全体として、曲げ強度の増大率は圧縮強度よりやや大きかった。なお、高流動100配合のコンクリートについて、水中浸漬と硫酸塩溶液浸漬との結果を見比べても、はっきりした差異は認められなかった。

以上の結果から、使用した材料の範囲では、10% Na_2SO_4 溶液に長期間浸漬しても、特に石灰石微粉末や β -グルカン増粘剤の添加による悪い影響は認められなかった。なお、長さ変化率や質量変化率は、いずれの配合もごく微小な値しか示さなかった。また、長期間に硫酸塩溶液に浸漬した供試体の外観を調べても、特に異状や劣化等は見あたらなかった。

5. まとめ

以上の試験結果により、次のことが言える。

- 1) 凍結融解抵抗性試験結果で、今回用いた配合では、高流動コンクリートは現状のPC配合と同様に抵抗性が良好で、石灰石微粉末や β -グルカン増粘剤の添加は、特に悪い影響を与えないことが確認された。
- 2) 水中養生供試体よりも気中養生供試体の方が、凍結融解試験中の相対動弾性係数が多少増大したが、これは、気中養生供試体は試験開始後において、水和反応が新たに進行しつつあったためと推測される。
- 3) 耐海水性の検討として行った0.15% Na_2SO_4 溶液浸漬試験は、米国開拓局の判定基準を十分満足した。さらに、10% Na_2SO_4 溶液に105日間浸漬しても、相対動弾性係数や圧縮強度も曲げ強度も増大傾向にあり、特に石灰石微粉末や β -グルカン増粘剤の添加による悪い影響は認められなかった。

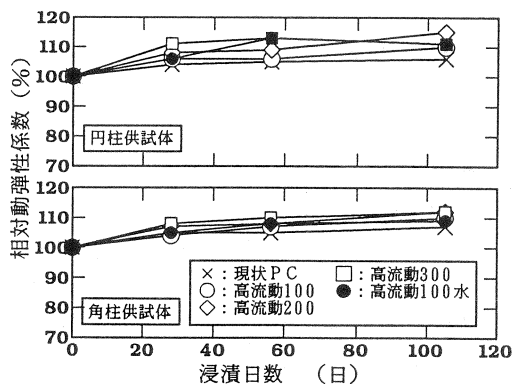


図-2 耐硫酸塩性試験結果(その1)

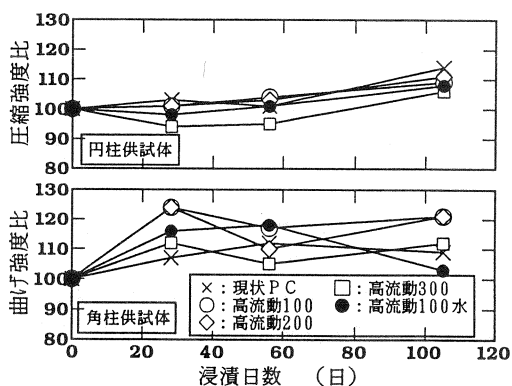


図-3 耐硫酸塩性試験結果(その2)

謝辞：本研究の実施にあたり、九州大学建設都市工学科松下博通教授より終始貴重な助言を賜った。また、各種試験の遂行にあたり三菱マテリアル(株)、(株)ポゾリス物産および(株)エヌエムビー 中央研究所の関係各位に多大な御協力を頂いた。謹んで感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 長井健雄, 小島利広, 松下博通, 三浦 尚: 高流動コンクリートの薄肉高強度PC工場製品への適用, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 255-260, 1995.
- 2) Miura, T. and Itabasi, H.: Effect of De-icing Salts on Frost Damage of High-Strength Concrete, Proc. International Conference on Concrete under Severe Conditions, Vol. 1, pp. 265-272, 1995.
- 3) Baron, P. J.: The durability of limestone composite cements in the context of the french specifications, Durability of concrete-Aspects of admixtures and industrial by-products -International seminar, pp. 115-122, 1986.
- 4) Piasta, J., Sawicz, Z., Piasta, W. G.: Durability of high alumina cement pastes with mineral additions in water sulfate environment, *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, pp. 103-113, 1989.
- 5) Schmidt, M.: Zement mit Zuhilfestoffen - Leistungsfähigkeit und Umweltentlastung (Teil 2), *Zement-Kalk-Gips*, Nr. 6, S. 296-301, 1992.
- 6) Sakata, K., Ayano, T.: Study on the durability of low heat highly flowable concrete incorporating urea, 4th International symposium on the utilization of high-strength/high-performance concrete, Paris, pp. 1333-1339, 1996.