

V-38

寒冷地における水中不分離性コンクリートの適用に関する一考察

北見工業大学大学院 ○学生会員 七 海 隆 之
 北見工業大学 フェロー 鮎 田 耕 一
 信越化学工業(株) 正 会 員 山 川 勉

1. はじめに

水溶性高分子を主成分とした混和剤を添加した水中不分離性コンクリートは、品質の高い水中コンクリートの施工が可能であることから、大型海洋構造物へも適用され、近年その施工実績は増大している。しかしながら、セルロース系の水中不分離性混和剤を添加したコンクリートは、消泡剤の影響によりAE剤の効果が小さく、耐凍害性が劣る場合があるといわれ寒冷地における施工では注意を要する。

このため筆者らはAE剤の代わりに空気を内包したプラスチック系の中空微小球(Expanded Plastic Micro-Spheres 以後、EPM)を添加することにより安定的に気泡を連行し耐凍害性を確保することを検討してきた¹⁾。その結果、EPMを結合材量に対して3.0%用いた場合には耐凍害性向上の効果があつたが、経済面を考慮してEPM量をそれより少なくした場合には耐凍害性は得られずコスト面で問題を残した。このことから、比表面積 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスの高炉スラグ微粉末との併用を検討した²⁾が、十分に耐凍害性を向上させるには至らなかった。

そこで本研究では、水中不分離性コンクリートの耐凍害性向上に効果があるとされている比表面積が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上の高炉スラグ微粉末³⁾を使用して、より少ないEPM量で耐凍害性が得られるかどうかを検討した。

2. 実験の内容

2.1 使用材料及び配合

表1に使用材料を示す。高炉スラグ微粉末は、比表面積が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスのもののほか比較のために $4000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスのものも用いた。EPMは、空気を内包したプラスチック球(主成分: ポリ塩化ビニリデン、密度: $36\text{kg}/\text{m}^3$ 、真比重: 0.02)であり、その粒径分布を画像解析システム⁴⁾を用いて測定した結果を図1に示す。平均粒径は $53\mu\text{m}$ であつた。また、水分はEPM内部には含まれていないが表面には付着しており、 105°C で一定質量になるまで乾燥して求めたEPMの付着率は81.4%であつた。

表2に配合を示す。単位結合材量に対してEPMは0.5、1.0%添加、高炉スラグ微粉末の分量は30、60%、水中不分離性混和剤の使用量は $2.3\text{kg}/\text{m}^3$ とした。流動化剤、AE減水剤の使用量は、スランプフローが $50\pm 3\text{cm}$ になるように定めた。なお、EPMの付着水量は単位水量に含めた。

2.2 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜには、容量50リットルの強制練りミキサを用いた。セメント、高炉スラグ微粉末、細骨材、粗骨材、水中不分離性混和剤を先に空練りし、練混ぜ水、AE減水剤、AE剤、EPMを加えて練り混ぜ、その後、流動化剤を加えてさらに練り混ぜた。

2.3 試験方法

(1) フレッシュコンクリート

A Consideration on Application of Antiwashout Underwater Concrete in Cold Regions
 by Takayuki NANAUMI, Koichi AYUTA, and Tsutomu YAMAKAWA

①空気量

JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法(空気室圧力方法)」に準拠して、練上がり直後の空気量を測定した。

②スランプフロー

土木学会規準「コンクリートのスランプフロー試験方法」に準拠して、スランプコーンを引き上げてから約5分後のスランプフローを測定した。

(2)硬化コンクリート

①耐凍害性

10×10×40 cmの角柱供試体を用い、試験開始材齢 28 日まで 20℃水中養生した後、土木学

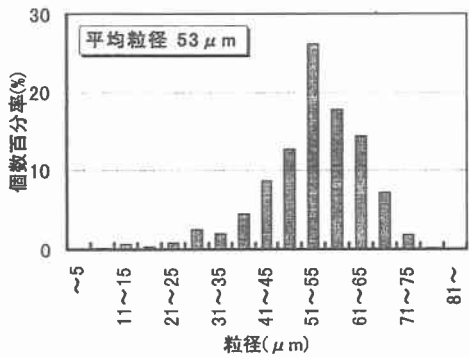


図1 EPMの粒径分布

表1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 比重：3.16、比表面積：3370cm ² /g
高炉スラグ微粉末	比重：2.90、比表面積：4580cm ² /g
	比重：2.91、比表面積：8320cm ² /g
細骨材	川砂 表乾比重：2.65、吸水率：1.87%、粗粒率：2.65
粗骨材	川砂利 最大寸法：25mm、表乾比重：2.65、吸水率：1.46%、粗粒率：6.99
EPM	主成分：ポリ塩化ビニリデン
水中不分離性混和剤	水溶性セルロースエーテル
流動化剤	高縮合トリアジン系化合物
A E減水剤	リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体
A E剤	天然樹脂脂酸塩

表2 配合

供試体名	EPM (C+B) %	高炉スラグ 微粉末		W/ (C+B) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)		水 (W)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	*1 (kg/m ³)	流動化 剤 (C+B) ×%	AE 減水 剤 (C+B) ×%	AE剤 (C+B) ×%													
		分量 B/(C+B) %	比表面積 (cm ² /g)			結合材																					
						セメント (C)	高炉スラグ 微粉末 (B)																				
EL-5-B30	0.5	30	4580	55	40	280	120	220	645	967	2.3	0.5	0.20	—													
EL-0-B30	1.0																										
EL-5-B60	0.5																										
EL-0-B60	1.0																										
EL-5-FB30	0.5	30	8320			280	120								220	645	967	2.3	0.5	0.20	0.021						
EL-5-FB30-AE	0.5																				—						
EL-0-FB30	1.0																				0.021						
EL-0-FB30-AE	1.0																				—						
EL-5-FB60	0.5	60				160	240														220	645	967	2.3	0.5	0.20	0.021
EL-5-FB60-AE	0.5																										—
EL-0-FB60	1.0																										—
EL-0-FB60-AE	1.0																										0.021

*1：水中不分離性混和剤

会規「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠し、水中における急速凍結融解試験を行い 300 サイクル終了後の質量減少率を求めた。また、ASTM C 666「Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing」に準じて凍結融解 300 サイクル終了後の耐久性指数を求めた。

②気泡組織

ASTM C 457「Standard Test Method for Micro-scopical Determination of Parameters of the Air Void System in Hardened Concrete」の修正ポイントカウント法に準拠して、画像解析システム⁴⁾を用い、空気量、気泡間隔係数、気泡の比表面積を測定した。

③圧縮強度

供試体の作製は、JIS A 1132「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠した。

圧縮強度は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験法」に準拠し、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用い、試験材齢まで20℃水中養生を行い、材齢28日に試験した。

④細孔構造

圧縮強度試験に用いた供試体のモルタル部分を2.5～5mmの大きさに粉碎し、アセトンによる洗浄、D-dry法で水和を停止させた後、水銀圧入式ポロシメータを用いて測定した。

3. 実験結果及び考察

フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの性状を表3に示す。

表3 実験結果

供試体名	フレッシュコンクリート		耐凍害性		硬化コンクリートの気泡組織			圧縮強度	細孔構造
	空気量 (%)	スランプ フロー (cm)	質量 減少率 (%)	耐久性 指数	空気量 (%)	気泡 間隔 係数 (μm)	比表面積 (cm^2/cm^3)	材齢 28日 (N/mm^2)	総細孔 容積 (mm^3/g)
EO.5-F30	4.0	50.5	-0.35	16	2.9	252	280	30.6	192.3
EL.0-F30	4.2	51.0	-0.25	73	3.7	234	256	28.1	169.1
EO.5-F60	5.1	51.0	-0.30	35	2.9	267	267	28.5	171.6
EL.0-F60	3.9	51.5	-0.18	78	3.7	245	254	26.9	173.8
EO.5-FB30	3.8	50.5	-0.59	32	3.1	274	242	29.4	118.7
EO.5-FB30-AE	4.6	49.0	-0.38	37	3.2	272	242	26.9	140.0
EL.0-FB30	4.7	49.5	-0.44	77	3.3	234	281	26.2	150.7
EL.0-FB30-AE	5.0	50.5	-0.12	79	3.7	232	268	27.7	126.6
EO.5-FB60	4.7	48.0	-0.52	44	2.9	274	256	37.4	154.3
EO.5-FB60-AE	5.2	50.0	-0.46	42	3.1	254	269	34.6	129.9
EL.0-FB60	4.9	50.0	-0.50	81	3.4	231	284	32.2	133.9
EL.0-FB60-AE	5.3	50.0	-0.40	84	3.9	223	274	32.0	134.4

図2にEPMを結合材量に対して1.0%添加した場合の高炉スラグ微粉末の比表面積と耐久性指数の関係を示す。高炉スラグ微粉末の分量にかかわらず、耐久性指数は比表面積 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いることで高くなった。特に、比表面積が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を分量で60%用いた場合、耐久性指数は80以上を示し耐凍害性は良好になった。

図3にEPMを結合材量に対して0.5%添加した場合の高炉スラグ微粉末の比表面積と耐久性指数の関係を示す。図2と同様に高炉スラグ微粉末の比表面積が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ の場合、 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ の場合と比較すると耐久性指数は高炉スラグ微粉末の分量にかかわらず高くなったものの、耐久性指数はすべて50以下を示し耐凍害性を確保することは困難であった。

図4にEPMを結合材量に対して1.0%添加し、比表面積 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を混合し

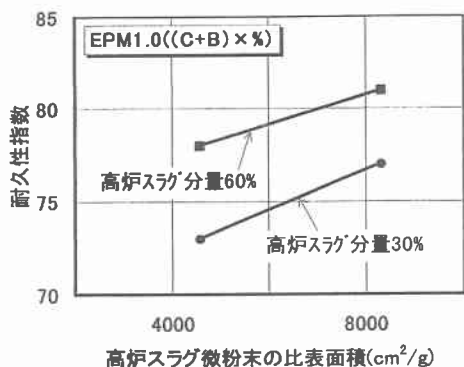


図2 高炉スラグ微粉末の比表面積と耐久性指数

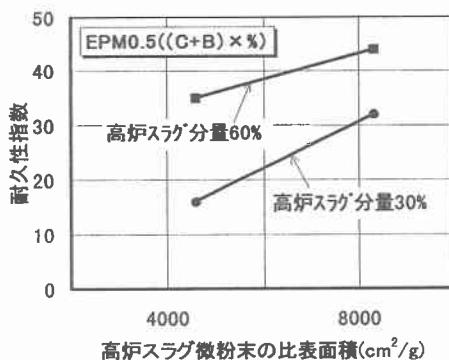


図3 高炉スラグ微粉末の比表面積と耐久性指数

た場合のA E剤添加の有無が凍結融解試験300サイクル終了後の耐久性指数に及ぼす影響を示す。耐久性指数は高炉スラグ微粉末の分量にかかわらず、A E剤を添加した場合に若干高くなった。

図5にEPMを結合材量に対して1.0%添加し、比表面積8000cm²/gの高炉スラグ微粉末を混合した場合のA E剤添加の有無が気泡間隔係数に及ぼす影響を示す。A E剤を添加することで、気泡間隔係数は小さくなっている。

図4、5の結果から、A E剤を添加することでセルロース系の水中不分離性混和剤を使用した場合でも気泡間隔係数が小さくなり、その結果、凍結融解300サイクル終了後の耐久性指数が高くなり、耐凍害性の改善に効果があることが確認できた。水中不分離性混和剤の消泡作用のためA E剤を添加しても気泡の安定的な連行に難があるものの、若干の気泡は消泡作用の影響を受けずに残留するものと考えられる。したがって、EPM添加量をできる限り抑えて耐凍害性を得るためには、A E剤の添加は有効であるといえる。

以上の結果から、EPMの添加量を結合材量に対して1.0%、比表面積8000cm²/gクラスの高炉スラグ微粉末を分量で60%混合して用いることにより耐凍害性が良好になり、さらにA E剤を添加することでその効果を大きくすることが可能であるといえる。

既往の研究によれば、コンクリートの耐凍害性は細孔中の水の凍結温度と細孔半径に相関があり⁵⁾、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの耐凍害性は、半径14~100nmの細孔中の水と密接な関係が

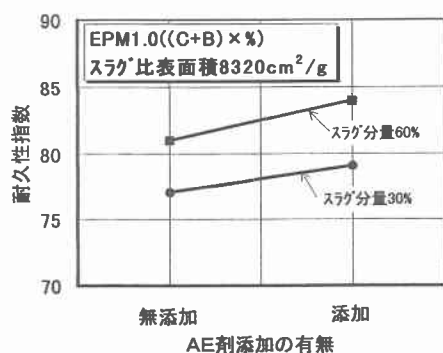


図4 AE剤添加の有無と耐久性指数

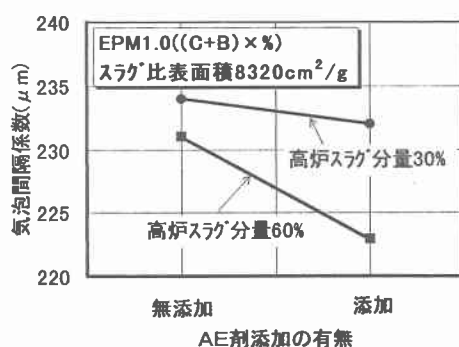


図5 AE剤添加の有無と気泡間隔係数

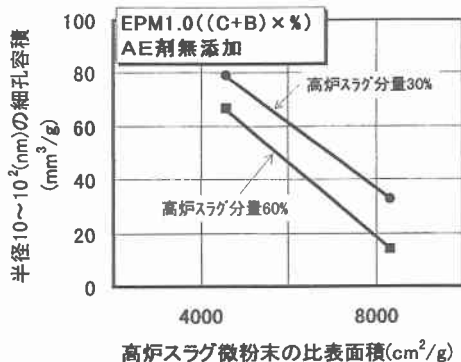


図6 高炉スラグ微粉末の比表面積と細孔容積

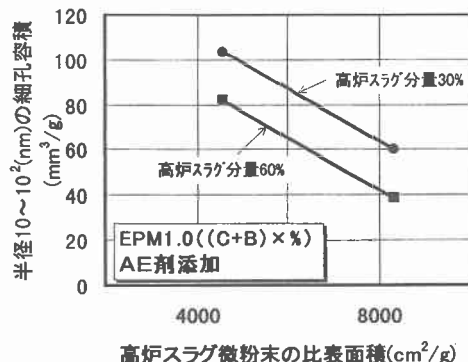


図7 高炉スラグ微粉末の比表面積と細孔容積

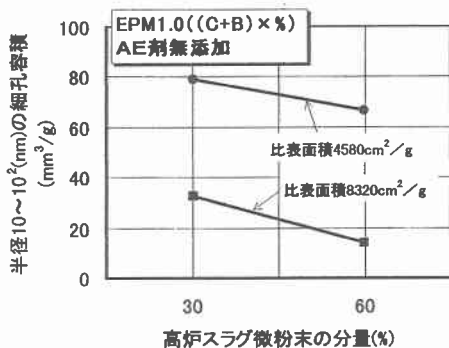


図8 高炉スラグ微粉末の分量と細孔容積

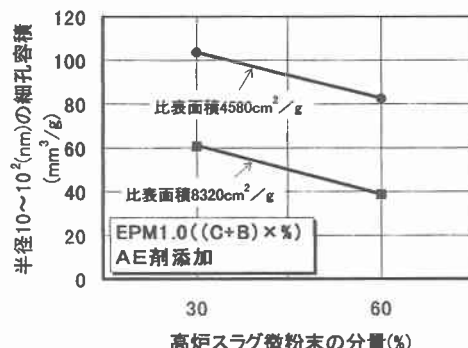


図9 高炉スラグ微粉末の分量と細孔容積

あると報告されている⁶⁾。そこで本研究では半径 10~10²nm の細孔容積に着目して検討をした。図 6、7 に高炉スラグ微粉末の比表面積が細孔構造に及ぼす影響、図 8、9 に高炉スラグ微粉末の分量が細孔構造に及ぼす影響を示す。図 6、7 によれば、比表面積が 8000cm²/g の高炉スラグ微粉末を用いた場合の細孔容積は、比表面積が 4000cm²/g の場合のそれと比べて少なくなっている。図 8、9 によれば、高炉スラグ微粉末を分量で 60%混合した場合、30%混合した場合に比べて細孔容積が少なくなっている。既往の研究⁵⁾によれば、コンクリート中の細孔の水が凍結すると融点降下が生じると報告されている。図 6~9 の結果から、比表面積 8000cm²/g の高炉スラグ微粉末を分量で 60%用いた場合、細孔容積が少なくなったため凍結可能水量が少なくなったこと、さらにその水が融点降下を引き起こし凍結しなかったと思われる。また、細孔容積が少なくなったことで、水の膨張圧による組織の損傷の程度が小さくなる効果をもたらしたと考えられる。

図 10 に高炉スラグ微粉末の比表面積と圧縮強度の関係について示す。EPM の添加量にかかわらず比表面積が 8000cm²/g クラスの高炉スラグ微粉末を分量で 60%混合した場合の材齢 28 日の圧縮強度は 32N/mm² 以上になった。図には示していないが AE 剤を併用した場合も同等の強度レベルを示した。既往の研究⁷⁾によれば、半径 50nm 付近の細孔は圧縮強度に関係が深いことが指摘されている。前述の細孔構造の結果から、比表面積 8000cm²/g の高炉スラグ微粉末を分量で 60%用いた場合、10~10²nm の細孔容積が少なくなっているため、強度の発現が良好になったと考えられる。一般に水中

不分離性コンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 程度であるが、場合によっては 30N/mm^2 以上が要求される⁸⁾ことから、比表面積が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を分量で 60% 混合することにより、所要の設計基準強度を十分に満たすことができるといえよう。

以上の結果から、比表面積が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を分量で 60% 混合して用いることで EPM を用いた水中不分離性コンクリート強度性状の改善を図ることが可能であることが明らかになった。

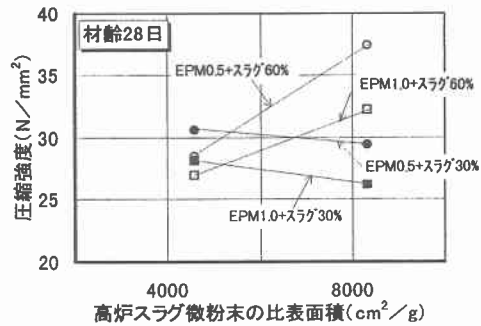


図10 高炉スラグ微粉末の比表面積と圧縮強度

4. 結論

本研究の範囲において EPM を用いた水中不分離性コンクリートの耐凍害性及び圧縮強度の結果をまとめると以下ようになる。

EPM の添加量を結合材量に対して 1.0%、比表面積 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ クラスの高炉スラグ微粉末を分量で 60% 混合して用いることにより耐凍害性が良好になるとともに、所要の設計基準強度を十分に満たす。また、この場合 AE 剤を添加することによりは耐久性指数を若干大きくすることができ、耐凍害性改善に有効であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 渡辺宏、堺孝司、鮎田耕一：中空微小球による水中不分離性コンクリートの耐凍害性改善効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16、No. 1、pp. 567-572 (1994)
- 2) 七海隆之、鮎田耕一、堺孝司、山川勉、桜井宏：中空微小球と高炉スラグ微粉末を併用したコンクリートの耐凍害性について、土木学会北海道支部論文報告集、第 53 号 (A) / V-13、pp. 506-511 (1997)
- 3) 福留和人、喜多達夫、宮野一也：高炉スラグ微粉末を混入した水中不分離性コンクリートの凍結融解抵抗性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12、No. 1、pp. 685-690 (1990)
- 4) 鮎田耕一、桜井宏、田辺寛一郎：硬化コンクリート気泡組織の照度差による画像解析、土木学会論文集、第 420 号 / V-13、pp. 81-86 (1990)
- 5) 鎌田英治、千歩修、田畑雅幸：コンクリートの耐凍害性に及ぼす細孔構造の役割についての統計的解析、日本建築会構造系論文集、第 487 号、pp. 1-9 (1996)
- 6) 三浦律彦、十河茂幸、芳賀孝成：超微細な高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの細孔分布と耐久性、土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集、pp. 182-183 (1990)
- 7) 井上和久、田中敏嗣、山下善秀：微粉砕高炉スラグを用いた混合セメントの水和特性、セメント・コンクリート論文集、No. 47、pp. 124-129 (1993)
- 8) 土木学会：水中不分離性コンクリート設計施工指針(案)、コンクリートライブラリー第 67 号、137-140 (1991)