

V-24

粉末度の異なる高炉スラグ微粉末を用いた中空微小球添加
水中不分離性コンクリートの耐凍害性

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
北海道開発局	正 会 員	堺 孝 司
信越化学工業(株)	正 会 員	山 川 勉

1. はじめに

水中不分離性混和剤を用いた水中コンクリートは、近年、規模の大きな構造物をはじめとしてその施工実績が増加しているが、寒冷地において施工するためにはその耐凍害性を検討しておく必要がある。コンクリートの耐凍害性を確保するために一般にはAE剤を使用するが、セルローズ系の中水分離性混和剤と併用した場合、空気の安定的な連行が困難となり、耐凍害性が損なわれることがあると報告されている¹⁾。このためAE剤の代わりに空気を内包したプラスチック系の特殊な中空微小球(Expanded Plastic Micro-Spheres 以後、EPM)を添加することが検討され、既往の研究^{2,3)}では、EPMを添加することで耐凍害性向上の効果があることが明らかにされている。しかしながら、圧縮強度とスケーリング抵抗性の低下を招くことから、筆者らはEPMと高炉スラグ微粉末の併用を検討した⁴⁾が、スケーリング抵抗性は大きくなったものの圧縮強度を改善させるには至らなかった。

そこで本研究では、初期強度の発現や耐凍害性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⁵⁾を使用し、EPMの添加量を少なくした配合で耐凍害性、強度性状の改善を図ることを検討した。

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、粉末度の異なる2種類(比表面積 4000 及び $8000\text{cm}^2/\text{g}$ クラス)を用いた。EPMの電子顕微鏡写真を写真1に示す。EPMは、写真で明らかなようにその径のほとんどが $50\mu\text{m}$ 程度以下である。また、EPM内部には水分が含まれていないが表面には水分が付着しており、 105°C で一定質量になるまで乾燥して求めたEPMの付着水率は 81.4% であった。

表2に配合を示す。EPMは単位結合材量に対して 0.5 、 1.0% 添加している。高炉スラグ微粉末の分量は単位結合材量に対して 30 、 60% とした。水中不分離性混和剤の使用量は $2.3\text{kg}/\text{m}^3$ 、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 練混ぜ及び養生

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ーを用いた。練混ぜ方法は、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→ 60 秒間空練り→練混ぜ水+AE減水剤+EPM→ 60 秒間練混ぜ→流動化剤→ 120 秒間練混ぜ、の手順で行った。供試体は、各試験材齢まで標準養生(20°C 水中)を行った。

2. 3 試験方法

(1) フレッシュコンクリート

Frost Resistance of Antiwashout Underwater Concrete Containing Expanded Plastic Micro-Spheres and Blast-Furnace Slag with Different Fineness

by Takayuki NANAUMI, Koichi AYUTA, Koji SAKAI, and Tsutomu YAMAKAWA

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

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）」と JIS A 1116「まだ固まらないコンクリートの単位容積重量試験方法及び空気量の重量による試験方法（重量方法）」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。

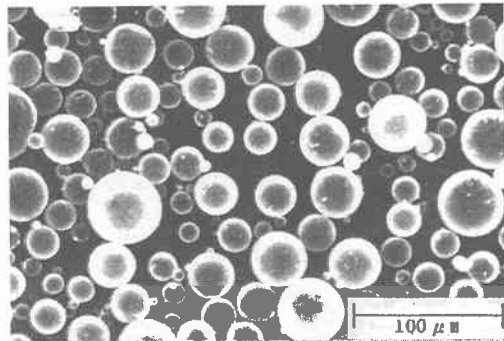


写真 1 EPMの電子顕微鏡写真

(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、試験開始材齢まで 20℃水中養生を行った後、土木学会規準「コンク

表 2 配合

供試体名	EPM (C+B)×%	高炉スラグ [※] 微粉末 分量 B/(C+B) (%)	高炉スラグ [※] 微粉末 比表面積 (cm ² /g)	W/(C+B) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						結合材		水 (W)	細 骨材 (S)	粗 骨材 (G)		
						セメント (C)	高炉スラグ 微粉末 (B)					
EO.5-B30	0.5	30	4580	55	40	280	120	220	645	967		
EI.0-B30	1.0											
EO.5-B60	0.5	60				160	240					
EI.0-B60	1.0											
EO.5-FB30	0.5	30	8320				280				120	
EI.0-FB30	1.0											
EO.5-FB60	0.5	60				160	240					
EI.0-FB60	1.0											

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耐凍害性を評価した。試験開始材齢は28日とした。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⁶⁾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、JISA 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、JISA 1108「コンクリートの圧縮強度試験法」に準拠し、 $\phi 10 \times 20$ 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

圧縮強度の測定で用いた試料のモルタル部分を2.5～5mmの大きさに粉砕し、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の性状、凍結融解試験、硬化コンクリートの気泡組織、圧縮強度試験及び細孔構造試験の結果を表3に示す。

図1、2にEPMを結合材量に対してそれぞれ1.0、0.5%添加した場合の高炉スラグ微粉末の粉末度が凍結融解300サイクル終了時の質量に及ぼす影響を示す。いずれの配合でもスケーリングは生じていなく、高炉スラグ微粉末の比表面積が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ の場合は $4000\text{cm}^2/\text{g}$ の場合と比較して質量が大きくなった。

図3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粉末度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4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粉末度と耐久性指数の関係を示す。図3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。しかしながら、この場合、耐久性指数は

表3 実験結果

供試体名	フレッシュコンクリート			凍結融解試験		硬化コンクリートの気泡組織			圧縮強度	細孔構造試験
	空気量(%)		スランブフロー （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 ）	（N/mm ² ）	
	重量方法	空気室 圧力方法							材齢 28日	総細孔容積 （mm ³ /g）
E0.5-B30	4.7	4.0	50.5	-0.35	16	2.9	252	280	30.6	192.3
E1.0-B30	5.7	4.2	51.0	-0.25	73	3.7	234	256	28.1	169.1
E0.5-B60	4.0	5.1	51.0	-0.30	35	2.9	267	267	28.5	171.6
E1.0-B60	4.8	3.9	51.5	-0.18	78	3.7	245	254	26.9	173.8
E0.5-FB30	7.5	3.8	50.5	-0.59	32	3.1	274	242	29.4	118.7
E1.0-FB30	5.3	4.7	49.5	-0.44	77	3.3	234	281	26.2	150.7
E0.5-FB60	4.9	4.7	48.0	-0.52	44	2.9	274	256	37.4	154.3
E1.0-FB60	5.9	4.9	50.0	-0.50	81	3.4	231	284	32.2	133.9

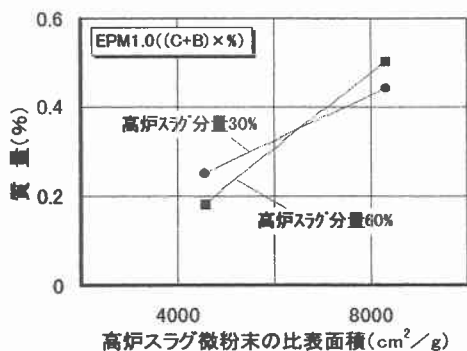


図1 高炉スラグ微粉末の粉末度と質量
(EPM1.0((C+B) × %))

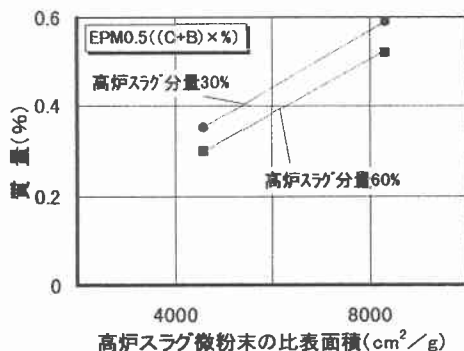


図2 高炉スラグ微粉末の粉末度と質量
(EPM0.5((C+B) × %))

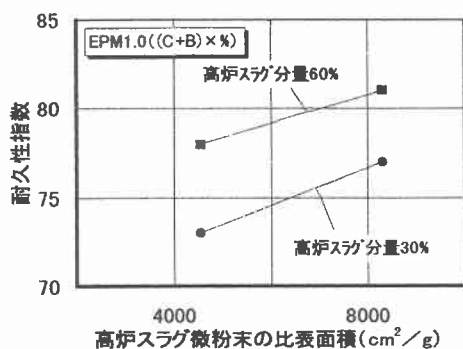


図3 高炉スラグ微粉末の粉末度と耐久性指数
(EPM1.0((C+B) × %))

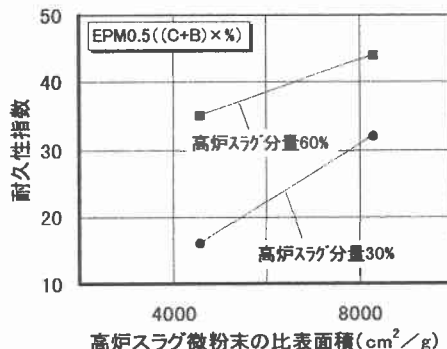


図4 高炉スラグ微粉末の粉末度と耐久性指数
(EPM0.5((C+B) × %))

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。

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、スケーリング抵抗性、耐凍害性を良好にすることが可能であることが明らかになった。

図5に高炉スラグ微粉末の粉末度と気泡間隔係数の関係について示す。EPMを結合材量に対して0.5%添加した場合、高炉スラグ微粉末の分量、比表面積にかかわらず気泡間隔係数は250μm以上を示している。一方、EPMを結合材量に対して1.0%添加した場合、高炉スラグ微粉末の分量、比表面積にかかわらず気泡間隔係数は230～245μm程度を示している。

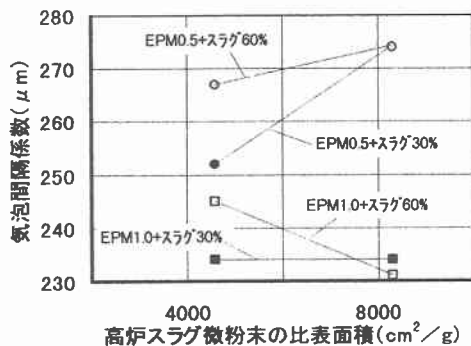


図5 高炉スラグ微粉末の粉末度と気泡間隔係数

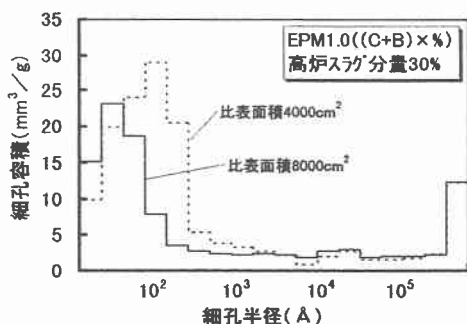


図6 高炉スラグ微粉末の粉末度と細孔構造
(EPM1.0((C+B)×%)、高炉スラグ分量30%)

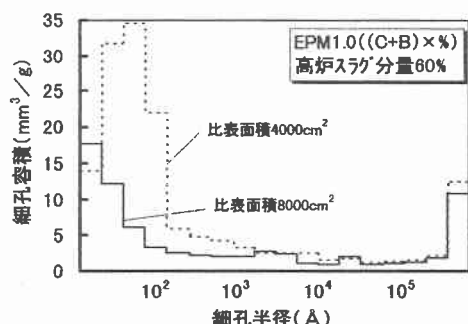


図7 高炉スラグ微粉末の粉末度と細孔構造
(EPM1.0((C+B)×%)、高炉スラグ分量60%)

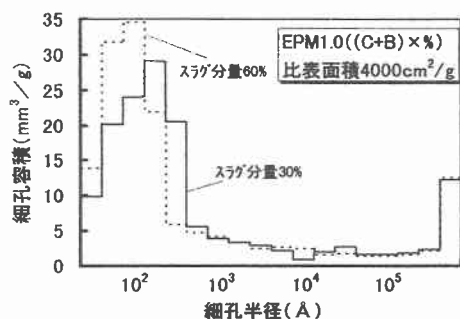


図8 高炉スラグ微粉末の粉末度と細孔構造
(EPM1.0((C+B)×%)、比表面積4000cm²/g)

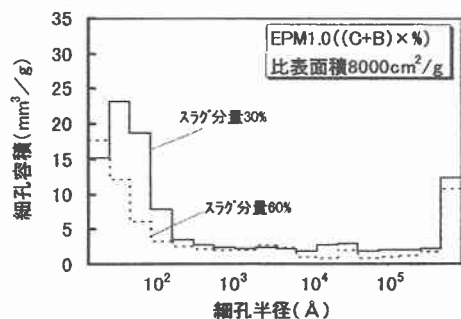


図9 高炉スラグ微粉末の粉末度と細孔構造
(EPM1.0((C+B)×%)、比表面積8000cm²/g)

このように、高炉スラグ微粉末の分量、比表面積にかかわらず、既往の研究結果⁴⁾と同様にEPMの添加量の増加に伴い気泡間隔係数の値が小さくなった。このことからEPMを結合材量に対して1.0%添加した場合のコンクリートの耐凍害性が高いのはEPMの添加量の増加に伴う気泡間隔の減少のためといえよう。

図6、7に高炉スラグ微粉末の粉末度の違い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の違いが細孔構造に及ぼす影響について示す。既往の研究⁷⁾によれば、コンクリートの凍害は細孔中の水の凍結温度と細孔半径に相関があり、細孔半径10²Å以上の細孔中に存在する水は、凍結融解試験の最低温度-18℃において凍結する可能性があり、耐凍害性に大きく関与することが報告されている。図6、7によれば、比表面積が8000cm²/gの場合は10²~10³Åの細孔半径の細孔容積が比表面積が4000cm²/gの場合と比べて少なくなっている。図8、9

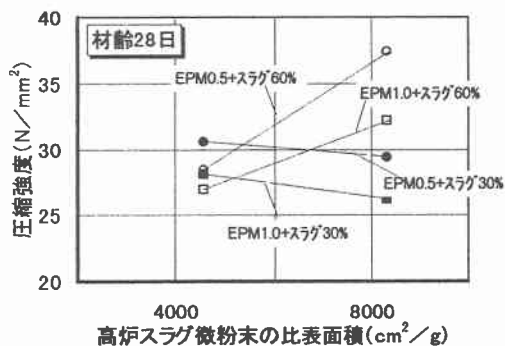


図10 高炉スラグ微粉末の粉末度と圧縮強度

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構造が緻密化している。

以上の結果から、比表面積 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を分量で 60%用いた場合の耐凍害性が高いのは、 $10^2\sim 10^3\text{\AA}$ の細孔半径の細孔容積が少なくなり凍結可能水量が減少したためと思われる。

図 10 に高炉スラグ微粉末の粉末度と圧縮強度の関係について示す。E PM の添加量にかかわらず比表面積 $8000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を分量で 30%混合した場合の圧縮強度は、比表面積 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を分量で 30%混合した場合に比べて若干低くなった。これに対して比表面積が $8000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を分量で 60%混合した場合の圧縮強度は、比表面積 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を分量で 30%混合した場合に比べて $5\sim 10\text{N}/\text{mm}^2$ 程度大きくなった。一般に水中不分離性コンクリートの設計基準強度は $24\text{N}/\text{mm}^2$ 程度であるが、場合によっては $30\text{N}/\text{mm}^2$ 以上が要求される⁹⁾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 E PM 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。

4. 結論

本研究の範囲において E PM 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になる。

- (1) E PM を単位結合材量に対して 1.0%添加し、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%混合すると耐凍害性は良好になる。これは高い粉末度の高炉スラグ微粉末が水中不分離性コンクリートの組織を緻密化するためであると考えられる。
- (2) E PM を単位結合材量に対して 0.5、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分量で 60%混合した場合の材齢 28 日の圧縮強度は $30\text{N}/\text{mm}^2$ を超えており、水中不分離性コンクリートとして所要の強度を確保している。

本研究は文部省科学研究費補助金（基盤(A)、試験(2)、課題番号 08555106)の交付を受けて行われたものである。

【参考文献】

- 1) 長合友造、山本泰彦：水中不分離性コンクリートの耐凍害性に関する基礎研究、水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集、pp. 167-174 (1990)
- 2) 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)
- 3) 七海隆之、鮎田耕一、桜井宏、猪狩平三郎：中空微小球を用いて空気を連行させた水中不分離性コンクリートの耐凍害性、土木学会北海道支部論文報告集、第 52 号(A)/V-10、pp. 548-553 (1996)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) 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)
- 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、pp. 137-140 (1991)