

V-9

耐凍害性向上のために中空微小球を用いたコンクリートの性状について

北見工業大学大学院 学生員 佐野 智之
北見工業大学工学部 正員 鮎田 耕一
北見工業大学工学部 正員 桜井 宏
北海道開発局開発土木研究所 正員 堺 孝司

1. はじめに

コンクリートの耐凍害性を確保するために一般にはA E剤が用いられているが、特殊な混和剤、例えば、セルロース系の増粘剤や水中不分離性混和剤と併用した場合、空気の安定的な連行が難しくなり、耐凍害性が損なわれる場合があることが報告されている。

セルロース系の増粘剤を使用した高流動コンクリートの耐凍害性の向上には、高炉スラグ微粉末の使用¹⁾、増粘剤の使用量の調整²⁾などが提案されている。また、水中不分離性混和剤を使用した水中不分離性コンクリートの耐凍害性を向上させるために、A E剤の代わりに特殊な中空微小球（Hollow Micro-Spheres 以後、HMS）をコンクリートに混合し、エントレインドエアに相当する気泡を物理的に混入させる方法が試みられている^{3) 4)}。

本研究では、HMSの耐凍害性に及ぼす効果を評価することを目的として、セルロース系の増粘剤を用いた高流動コンクリート並びに水中不分離性混和剤を用いた水中不分離性コンクリートにA E剤の代わりにHMSを用いた場合のコンクリートの諸性状について検討を行った。

2. 実験方法

2. 1 実験内容

(1) フレッシュコンクリートの性状

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（空気室圧力法）」に準拠して、練上がり直後の空気量を測定した。A E剤を用いた配合の空気量の目標値は $4.5 \pm 0.5\%$ である。HMSを用いた配合には空気量の目標値を設定しなかった。

②スランプフロー：土木学会標準「コンクリートのスランプフロー試験方法」に準拠して、練上がり直後のスランプフローを測定した。スランプフローの目標値は、高流動コンクリートで $60 \pm 10\text{cm}$ 、水中不分離性コンクリートで $50 \pm 5\text{cm}$ である。

(2) 硬化コンクリートの性状

①耐凍害性： $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を用い、材令14日まで 20°C 水中養生した後、材令14日から土木学会標準「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耐凍害性を評価した。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サイクル後の耐久性指数を求めた。

② 硬化コンクリートの気泡組織：ASTM C 457「Standard Test Method for Microscopical 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⁵⁾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：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、試験材令まで 20°C 水中養生を行い、材令14日、28日に試験した。

Freeze-Thaw Resistance and Strength of Concrete Containing Hollow Micro-Spheres
by Tomoyuki SANO, Koichi AYUTA, Hiroshi SAKURAI and Koji SAKAI

2. 2 使用材料及び配合

表-1に使用材料を示す。高性能減水剤は、それぞれ高流動コンクリート、水中不分離性コンクリート専用のものを使用した。HMSの電子顕微鏡写真を写真-1に示す。HMSは、空気を内包したプラスチック球であり、写真で明らかのように、その径のほとんどが50 μ m程度以下である。

表-2に配合を示す。高流動コンクリートの増粘剤、高性能減水剤の使用量は、スランプフローが60 $\pm$ 10cmとなるよう定め、水中不分離性コンクリートの水中不分離性混和剤、高性能減水剤、AE減水剤使用量は、スランプフローが50 $\pm$ 5cmとなるように定めた。HMSを使用していないSFC-AEと、AWUC-AEのAE剤使用量は空気量が4.5 $\pm$ 0.5%となるように定めた。

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：3360cm ² /g
細骨材	川砂 比重2.62、吸水率2.27%、粗粒率2.68
粗骨材	川砂利、最大寸法25mm 比重2.66、吸水率1.54%、粗粒率6.87
HMS	プラスチック球
増粘剤	水溶性セルロースエーテル
水中不分離性混和剤	水溶性セルロースエーテル
高性能減水剤	高縮合トリアジン系化合物
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体
AE剤	天然樹脂酸塩

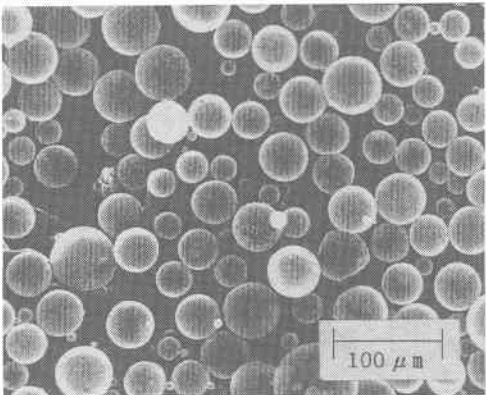


写真-1 HMS

表-2 配合

高流動コンクリート											
供 試 体 名	W/C	s/a	単位量 (kg／m ³)				増 粘 剤 (kg／m ³)	高性能 減水剤 (C×%)	A E 減水剤 (C×%)	A E 剤 (C×%)	H M S (C×%)
	(%)	(%)	C	W	S	G					
SFC-AE	50	45	350	175	842	1044	0.3	3.5	—	0.04	—
SFC-1.0										—	1.0
SFC-2.0										—	2.0
水中不分離性コンクリート											
供 試 体 名	W/C	s/a	単位量 (kg／m ³)				水中不分離性 混 和 剤 (kg／m ³)	高性能 減水剤 (C×%)	A E 減水剤 (C×%)	A E 剤 (C×%)	H M S (C×%)
	(%)	(%)	C	W	S	G					
AWUC-AE	55	45	375	206	742	921	2.0	4.0	0.20	0.02	—
AWUC-1.0										—	1.0
AWUC-2.0-1										—	3.0
AWUC-3.0-2								3.0		—	3.0
AWUC-6.0								2.0		—	6.0

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、気泡組織測定及び圧縮強度試験の結果を表-3に示す。スランプフローが目標値の範囲に入っていないAWUC-3.0-1は硬化コンクリートの性状の測定を行わなかった。

表－3 実験結果

供試体名	空気量	スランプ フロー	凍結融解試験*1		硬化コンクリートの気泡組織			圧縮強度	
			質量耐久性 減少率	指数	空気量	気泡間隔 係数	比表面積	(kgf/cm ²)	
	(%)	(cm)	(%)		(%)	(μ m)	(cm ² /cm ³)	材令	材令
高流動コンクリート									
SFC-AE	4.2	50.0	4.59	88	2.9	185	320	230	279
SFC-1.0	2.9	59.0	5.17	88	1.6	247	310	220	276
SFC-2.0	3.2	67.0	2.52	91	1.8	234	342	182	215
水中不分離性コンクリート									
AWUC-AE	4.3	53.0	(21.38)	1	2.6	232	317	227	262
AWUC-1.0	3.9	54.0	(15.77)	5	3.0	221	317	215	235
AWUC-3.0-1	4.4	56.0	—	—	—	—	—	—	—
AWUC-3.0-2	4.3	51.0	4.74	91	3.9	179	344	178	220
AWUC-6.0	4.5	50.0	0.25	100	4.3	177	335	116	151

*1: AWUC-AEは凍結融解回数52回で破壊、質量減少率は凍結融解回数52回終了時の値

AWUC-1.0は凍結融解回数143回で破壊、質量減少率は凍結融解回数143回終了時の値

その他の配合は凍結融解回数300回で試験終了、質量減少率は凍結融解回数300回終了時の値

3. 1 HMS使用量とスランプフロー

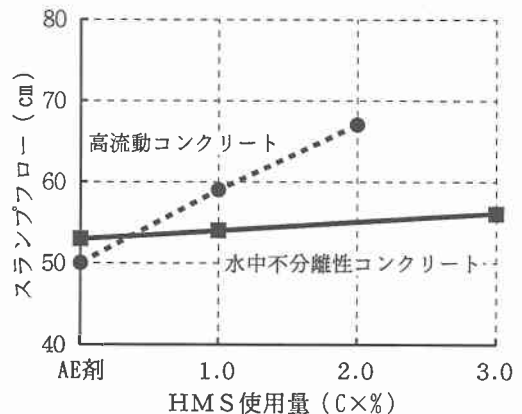
図－1にHMS使用量がスランプフローに与える影響を示す。高流動コンクリートの増粘剤、高性能減水剤、水中不分離性コンクリートの水中不分離性混和剤、高性能減水剤の使用量は、それぞれ一定である。高流動コンクリートでは、HMSの使用量が1.0 (C×%) 増加するごとに、スランプフローが9cm程度大きくなり、HMSによる流動性改善効果が認められた。これに対して、水中不分離性コンクリートでは、HMSの使用量を3.0 (C×%) としても、スランプフローは3cmほど増加するだけにとどまり、大きな変化は認められなかった。HMSによる高流動コンクリートの流動性改善効果は、HMSがエントレインドエアと同様なボールベアリングの効果を示したと考えられる。水中不分離性コンクリートのスランプフローがHMSを使用しても増加しなかった原因は、セメントペースト分の粘性が大きいためであると思われる。

3. 2 HMS使用量と耐凍害性

(1) 質量減少率

図－2にHMS使用量が質量減少率に与える影響を示す。水中不分離性コンクリートのAE剤を使用した配合とHMSを1.0 (C×%) 使用した配合の質量減少率の値は、破壊サイクル時(表－3 欄外参照)の値を示した。

高流動コンクリートでは、HMS使用量を1.0 (C×%) とした場合は、AE剤を使用した場合と質量減少率がほぼ同じであるが、HMS使用量を2.0 (C×%) とした場合にはAE剤を使用した場合よりも質量減少率が小さくなっており、凍結融解作用によるスケリングが抑えられている。



図－1 HMS使用量とスランプフロー

水中不分離性コンクリートでは、HMS使用量を増加させるにつれてスケーリング抵抗性が大きく改善され、HMS使用量を6.0 (C×%) とすると、質量の減少はほとんどなくなった。

以上の結果から、HMSは凍結融解作用に対するスケーリング抵抗性が大きく、特に、水中不分離性コンクリートには有効であることが明らかになった。

(2) 耐久性指数

図-3 にHMS使用量が耐久性指数に与える影響を示す。

高流動コンクリートでは、HMS使用量を 1.0 (C×%)、2.0 (C×%) とした場合と、AE 剤を使用した場合には耐久性指数にはほとんど差がなく、三者ともに高い耐久性を示した。

水中不分離性コンクリートでは、AE 剤を使用した場合には非常に低い耐久性指数を示したのに対し、HMS使用量を1.0 (C×%) から6.0 (C×%) に増加させるにつれ、耐久性指数が高くなり、HMS使用量を3.0 (C×%) 以上とすると、耐久性は飛躍的に改善された。

(1)、(2)の結果から、HMSを3.0 (C×%) 以上使用した場合、水中不分離性コンクリートの耐久性向上に大きな効果を示すことが明らかになった。

3. 3 HMS使用量と硬化コンクリートの気泡組織

(1) 空気量

図-4 にHMS使用量が、空気減少量に与える影響を示す。ここでの空気減少量は、フレッシュコンクリートの空気量から硬化コンクリートの空気量を差し引いたものである。

高流動コンクリートでは、HMSを使用した場合、AE 剤を使用した場合と比べ、空気減少量に変化は見られない。

水中不分離性コンクリートでは、HMS使用量が増加するにつれて、空気減少量は少なく、HMS使用量を3.0~6.0 (C×%) と増加すると、空気減少量は0.5ポイント以下となり、HMSを使用することで、空気量を硬化後まで安定して保っている。

(2) 気泡間隔係数

図-5 に、HMS使用量が気泡間隔係数に与える影響を示す。高流動コンクリートでは、HMS使用量と気泡間隔係数との間に一定の関係は認められない。水中不分離性コンクリートでは、HMS使用量

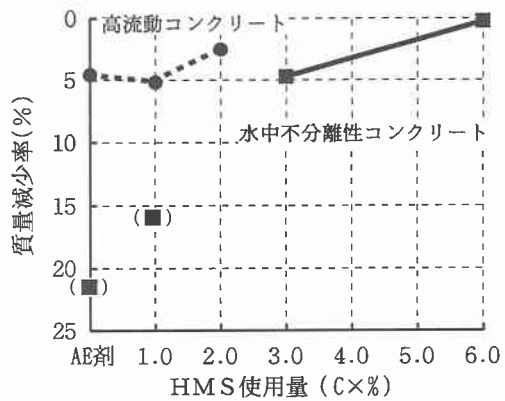


図-2 HMS使用量と質量減少率

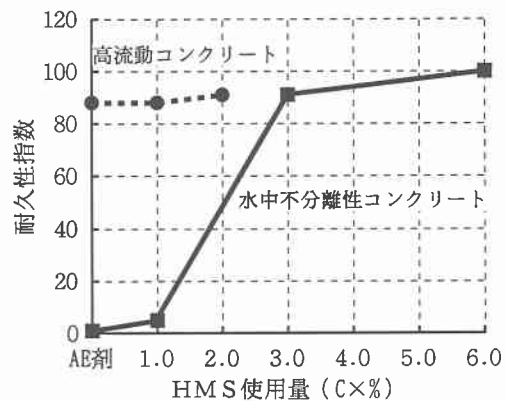


図-3 HMS使用量と耐久性指数

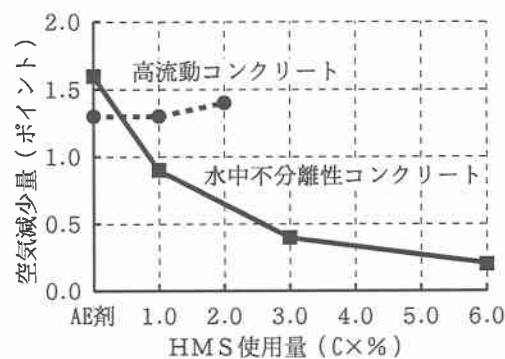


図-4 HMS使用量と空気減少量

が増加するに従い、気泡間隔係数は小さくなっている。

図-6に、気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。高流動コンクリートは気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ 以下の範囲でいずれも高い耐久性指数を示している。水中不分離性コンクリートは、気泡間隔係数が約 $180\mu\text{m}$ 以下であれば耐久性指数は $90\sim 100$ となるが、 $220\mu\text{m}$ 以上であると耐久性指数は非常に低くなっている。

以上の結果から、高流動コンクリートではHMSの使用の有無によって硬化コンクリートの気泡組織は変わらないが、水中不分離性コンクリートではHMS使用量が増すにつれてエアロスが少なく気泡間隔係数が小さくなることが明らかになった。この結果、HMS使用量を $3.0(\text{C}\times\%)$ 、 $6.0(\text{C}\times\%)$ とした水中不分離性コンクリートの耐凍害性が向上したものと考えられる。

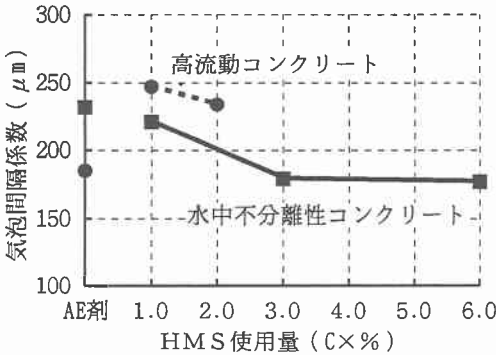


図-5 HMS使用量と気泡間隔係数

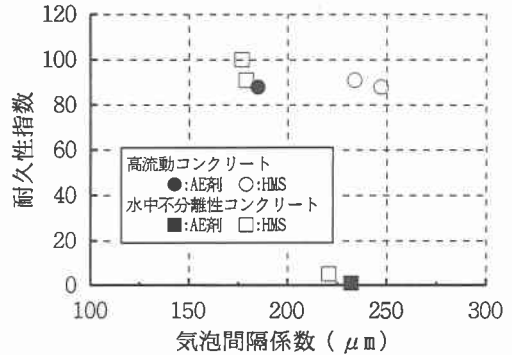


図-6 気泡間隔係数と耐凍害性

3. 4 硬化コンクリート中のHMS

写真-2は、凍結融解試験前のコンクリート中のHMSの電子顕微鏡写真である。写真で明らかなように、HMSは、硬化コンクリート中でも球形を保っており、練混ぜ時につぶれずに硬化コンクリート中に安定して存在している。写真-3は、凍結融解試験300サイクル終了後のコンクリート中の電子顕微鏡写真である。凍結融解試験前のHMSと比べると、完全な球体を保っているものは少なく、変形したり、破損したりしている。これは、凍結融解作用によって発生した水圧がHMSに作用したためと考えられる。HMSは中空であるので、膜が破壊された後にはエントレインドエアと同じ効果を発揮しているものと思われる。

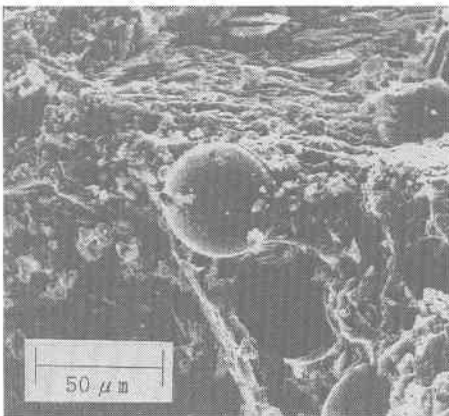


写真-2 硬化コンクリート中のHMS
(凍結融解試験前)

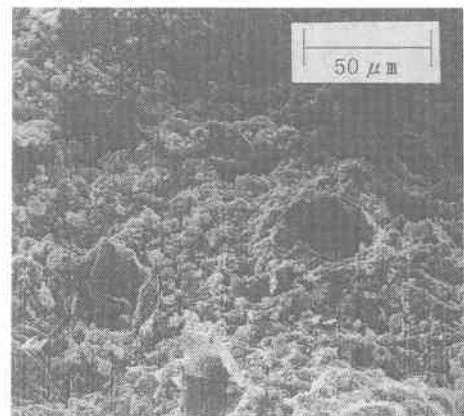


写真-3 硬化コンクリート中のHMS
(凍結融解試験後)

※写真は供試体名AWUC-6.0のものである。

3. 5 HMS 使用量と圧縮強度

図-7にHMS使用量が材令28日の圧縮強度に与える影響を示す。高流動コンクリートでは、HMS使用量が1.0 (C×%)程度であれば、AE剤を使用した場合と比べて圧縮強度はほとんど同じである。HMS使用量が、2.0 (C×%)になると、圧縮強度は、AE剤を使用した場合の約8割程度となっている。水中不分離性コンクリートでは、HMS使用量を増加すると圧縮強度は低下し、HMSの使用量が6.0 (C×%)では、圧縮強度はAE剤を使用した場合の約6割程度となっている。

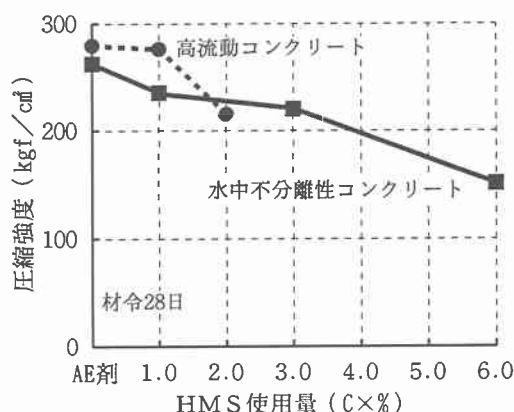


図-7 HMS 使用量と圧縮強度

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下ようになる。

(1) 高流動コンクリートでは、HMS使用量を増加すると、スランプフローが大きくなり、流動性改善効果が認められた。これに対し、水中不分離性コンクリートでは、HMS使用量を増加してもスランプフローに変化はなかった。

(2) 高流動コンクリートでは、HMSの使用量を2.0 (C×%) とすると、凍結融解作用によるスケーリングの発生を抑制する効果が認められた。水中不分離性コンクリートでは、HMS使用量を3.0 (C×%) 以上とすると、耐凍害性は飛躍的に向上した。

(3) 硬化コンクリート中のHMSは、凍結融解作用によって発生した水圧に対し変形、破損するが、中空的なため、破壊された後は、エントレインドエアと同様な効果を示すと考えられ、耐凍害性向上に有効な材料であると思われる。

(4) 高流動コンクリートの材令28日の圧縮強度は、HMS使用量を2.0 (C×%) とすると、AE剤を使用した場合の8割程度となった。水中不分離性コンクリートでは、HMS使用量を3.0 (C×%) とするとAE剤を使用した場合の8割程度、6.0 (C×%) とすると6割程度の圧縮強度となった。

以上の結果から、HMSをAE剤の代わりに用いると、高流動コンクリートのスケーリング抑制、水中不分離性コンクリートの耐凍害性向上にきわめて有効であることが明らかになった。しかし、HMS使用量を増加すると圧縮強度の発現が停滞するので、圧縮強度発現を損なわずに耐凍害性を向上させるために、今後は、HMSとAE剤を併用したコンクリートの諸性状について検討する予定である。

本研究の遂行にあたりご協力いただきました北見建設業協会、信越化学工業㈱、並びに北見工業大学工学部の猪狩平三郎氏に感謝申し上げます。なお、本研究は平成6年度文部省科学研究費補助金（一般研究C、課題番号0665041）の交付を受けて行ったものである。

【参考文献】

- 1) 鮎田耕一・桜井宏・須藤裕司・五十嵐力・佐々木元：高充てん性コンクリートの寒冷地への適用、寒地技術シンポジウム'91 講演論文集、pp. 517-521、1991. 10
- 2) 須藤裕司・鮎田耕一・佐原晴也・竹下治之：増粘剤を添加した高流動コンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 1、pp. 1003-1008、1992. 6
- 3) 渡辺宏・堺孝司：中空微小球を用いたコンクリートの耐凍害性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 1、pp. 899-904、1993. 6
- 4) 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. 6
- 5) 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. 8