

論文 高炉スラグ高含有セメントを用いた土木用コンクリートの実規模モデルによる施工性実験

尾口 佳丈^{*1}・坂田 昇^{*2}・三井 健郎^{*3}・玉木 伸二^{*4}

要旨:セメント・コンクリートのエネルギーと CO₂ の削減を目的とした高炉スラグ高含有セメントを用いた、スランプ 8cm 程度の土木用コンクリートを対象として、実規模モデルによる施工性実験を実施した。配合設計上の課題である中性化の抑制対策として、試製した混和剤にて単位水量を少なくした配合を選定して実験を行った結果、プラントの実機ミキサにより実用的な可使用時間を有するコンクリートを製造可能であること、市販の高炉セメント B 種を用いたコンクリートに比べて、ブリーディング量が少なくなる一方、パイプレータによる振動締固め性能が劣る傾向にあり、ワーカビリティの改善が必要であることが確認された。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, 高炉スラグ高含有セメント, ブリーディング, ワーカビリティ

1. はじめに

地球温暖化の問題に対応するため、国ごとに目標を定めて、CO₂ 削減対策が進められている。我が国の建設業界においても、CO₂ (CO₂ 原単位) 削減が求められているが、建設工事にかかわる CO₂ の排出量の大部分はセメントに由来するものであり、CO₂ 原単位の小さなコンクリート構造物を建設するにはセメントの CO₂ を削減することが必要である。

セメントの CO₂ を削減する有力な手段の一つとして高炉スラグ微粉末を利用することが挙げられる。高炉スラグ微粉末は製造過程において焼成が不要であり、原料からの CO₂ 排出も少ないため、高炉スラグ微粉末をセメントに混合したほぼ全量がセメントの CO₂ 削減に寄与する。したがって、高炉スラグ微粉末を多量に使用することによって、コンクリートの CO₂ 削減が可能になる。

高炉スラグ微粉末を多量に含有するセメントとして高炉セメント C 種等が知られているが、初期強度の発現が遅い、ブリーディング量が多い、自己収縮が大きい、中性化の進行が早いなどの課題¹⁾を有していることから、これらのセメントは現状でほとんど使用されていない。

近年、これらの課題に対し、高炉セメント中の無水石膏の割合を調整し、高炉セメント C 種の JIS 規格内で SO₃ 量を通常のセメントよりも高めて初期強度特性と収縮特性を改善させた比表面積 4,000cm²/g の高炉スラグ高含有セメント (以下、ECM) の研究がなされている^{2),3)}。

本論文では、このセメントのさらなる展開を図るために土木分野へ適用することを目的とし、実規模モデルによる施工性実験を行うことにより、ECM を用いた土木用コンクリートの施工性について検討した。

2. 土木用 ECM コンクリートの配合の概要

土木用コンクリートの配合として、一般的に用いられる水セメント比 55.0%、スランプ 8cm とし、市販の高炉セメント B 種 (以下、BB) を使用した配合 (以下、BB 配合) を比較対象とした。

ECM コンクリートの配合 (以下、ECM 配合) は、この BB 配合と同程度の性能を有していることを前提とし、事前に試験練りおよび各種試験を行って選定した。その結果、ECM 配合は、水セメント比 50.0%にて BB 配合と中性化抵抗性がほぼ同等以下となり、その水セメント比にて、圧縮強度、断熱温度上昇量、自己収縮等について、BB 配合と同程度の性能を有していることを確認している。

ECM および BB のセメントの化学成分を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。ここで、BB 配合は、施工性実験でコンクリートを製造したレディーミクストコンクリート工場で実績のある配合のうち、前述の条件に合うものを選出した。

ECM 配合は、BB 配合と比べて高炉スラグ微粉末の含有量を多くしているため、単位結合材量におけるセメントの絶対量が少なく、セメントと極初期に反応する水を少なくでき、単位水量を少なくできると考えた。そこで、配合設計においては、ECM 配合を BB 配合と同一の単位セメント量として、水セメント比が 50.0%になるように単位水量を定めた。ただし、実際に配合試験を行って確認したところ、この ECM 配合では所定のスランプ 8cm が得られなかったため、新たに ECM 用に試製した AE 減水剤を用いることとした⁴⁾。

*1 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ 研究員 修士 (工学) (正会員)

*2 鹿島建設 (株) 土木管理本部 土木技術部長 博士 (工学) (正会員)

*3 (株) 竹中工務店技術研究所 先端技術研究部長 博士 (工学) (正会員)

*4 竹本油脂 (株) 第三事業部 研究開発部 化学グループ マネージャー 修士 (工学)

表－1 セメントの化学成分

セメント	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	セメントの化学成分(%)										
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
ECM	2.98	4,000	28.13	10.90	1.22	49.12	4.62	3.60	0.27	0.30	0.48	0.07	0.23
BB	3.04	3,800	26.05	9.17	1.87	54.06	3.57	2.26	0.29	0.31	0.40	0.08	0.32

表－2 コンクリートの配合

セメント	W/C (%)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
				W	C	S1	S2	S3	G	混和剤
ECM	50.0	20	48.0	150	300	267	311	311	974	C×1.1%
BB	55.0	20	48.0	165	300	262	306	305	955	C×0.7%

※ ECMではAD-N, BBではADを使用(表－3参照)

2.1 使用材料

使用材料を表－3に示す。骨材はBB配合およびECM配合ともに、プラントにて実際に使用しているものとした。混和剤は、BB配合ではプラントで使用されている市販のAE減水剤とした。また、ECM配合では前述の理由から主成分は市販品と同等であるがECM用に新たに試製したAE減水剤とした。

3. 実規模モデルによる施工性実験の概要

実規模モデルによる施工性実験の試験体モデル概念を図－1に示す。本試験のモデルはボックスカルバートとし、ボックスカルバートの壁部材を抜き出した形とした。

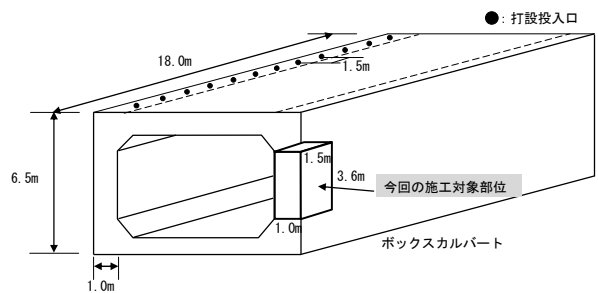
試験体モデルを図－2に示す。試験体は、ECM配合とBB配合の2体を作製し、配筋は主筋および配力筋ともにD13の150mmピッチとして、施工性やコンクリート表層の品質を比較した。打込み速度に関しては、一般的なボックスカルバートの施工方法を基にしており、1層の打上げ高さを50cmとして計7層にて打ち込むこととした。また、打込み速度として20~30m³/hを想定し、1層打ち込むごとに10分間空けることで時間あたりの打込み速度の調整を行った。なお、試験体の施工は12月に実施した。

側面型枠の1面に、アクリル製の透明型枠を使用することとし、随時、打込み状況を確認できるようにした。打込みは、0.5m³のコンクリートバケットを使用し、壁部材の頂部に受けホップを設けて、サニーホースを取り付けた。打込み設備の配置の状況を写真－1に示す。

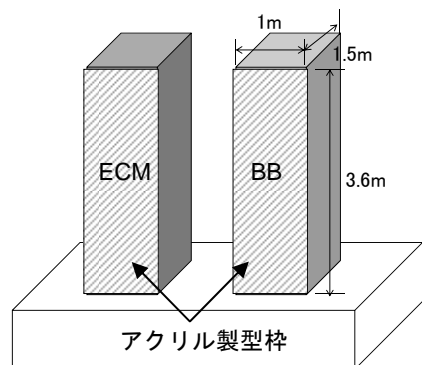
コンクリート製造は、レディーミクストコンクリート工場の実機にて実施し、最大練混ぜ容量が6.0m³の大型の強制二軸型ミキサ(IHI社製)にて、50秒間練り混ぜた。1回の練混ぜ量を2.0m³とし、2回に分けて練り混ぜ、合わせて4.0m³をトラックアジテータに積み込み運搬した。練り直後の品質試験は、2.0m³練り混ぜるごとに実施し、品質試験終了後にコンクリートを運搬することと

表－3 使用材料

項目	記号	種別
水	W	上水道水(密度; 1.00g/cm ³)
セメント	BB	高炉B種セメント(密度; 3.04g/cm ³)
	ECM	高炉スラグ高含有セメント(密度; 2.98g/cm ³)
細骨材	S1	東京都西多摩郡奥多摩産砕砂 表乾密度; 2.65g/cm ³ , 粗粒率; 3.00
	S2	千葉県市原市万田野産山砂 表乾密度; 2.58g/cm ³ , 粗粒率; 2.00
	S3	埼玉県秩父郡横瀬町産砕砂 表乾密度; 2.65g/cm ³ , 粗粒率; 3.00
粗骨材	G	東京都西多摩郡奥多摩産砕石 表乾密度; 2.66g/cm ³ , 実積率; 60.0%
混和剤	AD-N	試製品AE減水剤 (変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体)
	AD	市販品AE減水剤 (変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体)



図－1 試験体モデル概念図



図－2 試験体モデル

し、運搬時間は約 30 分であった。養生については、材齢 7 日まで型枠を残置し、その後、養生マットにて材齢 28 日まで湿潤養生を実施した。

3.1 フレッシュコンクリートの性状試験項目

フレッシュコンクリートの性状試験項目を表-4 に示す。スランブ試験と空気量試験は JIS A 1101, JIS A 1128 に準拠し、練り上がり直後、運搬後を 0 分とし、30 分経過後、60 分経過後について実施した。

充填性試験は、コンクリートのワーカビリティの確認を目的に実施した。土木学会規準および「コンクリートの施工性能の調査・検査システム研究委員会 (341 委員会) 委員会報告書」に記載されている「加振ボックス充てん試験」を参考⁵⁾に U 形充填試験装置を使用し、障害は R2 とした。試験方法として、U 形充填試験装置にコンクリートを充填させ、静置 60 秒後に仕切りゲートを開き、充填高さを測定した。充填高さ測定後にφ30mm の棒型パイプをを用い、30 秒まで 5 秒ずつ振動させ、振動による充填高さを測定し、流動性を確認した。

ブリーディング試験は、JIS A 1123 に準拠し、打込み場所にて施工性実験と同環境下で実施した。また、ブリーディング試験に用いる試料は、アジテータ車ごとに採取した。加圧ブリーディング試験は、土木学会規準に準拠して実施した。

3.2 施工性の確認項目

施工性の確認項目は、パイプレタによる締固め性状として、打上がり状況を目視で評価した。

3.3 試験体における打込み後の確認試験項目

試験体における確認試験項目を表-5 に示す。温度測定位置および表層透気試験測定位置を図-3 に示す。

温度測定のための熱電対は、ECM, BB とともに、下から 1.8m の位置に、それぞれ図-3 の平面図に示す中心および側面の 2 点に設置した。

表面透気試験は、図-3 の立面図に示す位置にて実施した。測定は幅 1.5m, 高さ 3.6m の一面のみ実施し、温度測定と同様に ECM, BB とともに同位置とした。

細孔径分布の測定に供する試料は表面透気試験にて実施した面の中心の列とし、下から 425mm, 1,550mm, 2,825mm の 3 か所とした。測定は、水銀圧入法にて実施した。

4. 試験結果および施工状況

4.1 フレッシュコンクリートの試験結果

(1) スランブおよび空気量

スランブ、空気量およびコンクリート温度の試験結果を表-6 に示す。また、1 台目の現場到着時および到着後 60 分経過の ECM と BB のスランブを写真-2 に示す。

表より、出荷時、現場到着時および到着後 60 分経過

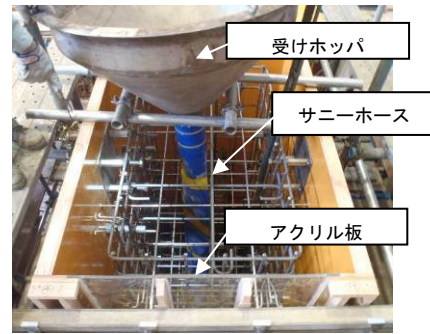


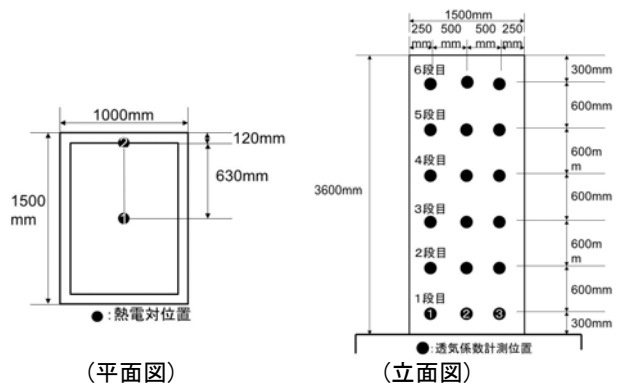
写真-1 打込み設備の配置状況

表-4 フレッシュコンクリートの性状試験項目

試験項目	規準	目標値	備考
スランブ試験	JIS A 1101	8.0cm	運搬後：0,30,60 分
空気量試験	JIS A 1128	4.5%	運搬後：0,30,60 分
充填性試験	—	—	U 形充填試験装置
ブリーディング試験	JIS A 1123	—	—
加圧ブリーディング試験	JSCE-F 502-2010	—	—

表-5 試験体における確認試験項目

試験項目	摘要	備考
コンクリートの表面状況	目視	材齢 7 日
温度測定	熱電対による	
表層透気試験	Torrent 法	
細孔径分布測定	水銀圧入法	



(a) 熱電対設置位置 (b) 表面透気試験位置

図-3 測定位置

のスランブを比較すると、ECM は BB より多少ではあるがスランブ低下が見られた。また、写真より、ECM の現着時のスランブは BB とほぼ同じであるが、目視では ECM の方がワーカビリティに劣るように見えた。

(2) 充填性

充填性試験結果を図-4 に示す。図より、ECM は 10 秒まで振動をかけた時の充填高さは BB と同程度であり、30 秒まで振動をかけると BB よりも充填高さは小さくなった。この充填性試験によって、スランブ試験の目視で ECM の方が BB に比べてワーカビリティが劣ると見え

たことが裏付けられた。

(3) ブリーディング

ブリーディング試験の結果を図-5に示す。図より、ECM配合はBB配合よりもブリーディング量が少ない結果となった。一般的に、ブリーディング量は高炉スラグ微粉末の置換率が多い方が多くなる傾向にあり、同一配合であれば、ECMの方がBBよりもブリーディング量が多くなる。しかし、今回の試験ではECM配合の方がBB配合に比べて、単位水量も 15kg/m^3 減じていることから、この影響が卓越しECMの方が、ブリーディング量が小さくなったものと考えられる。

(4) 加圧ブリーディング

加圧ブリーディング試験の結果を図-6に示す。図に「コンクリートのポンプ施工指針」⁶⁾に示される、良好な圧送性を示す範囲を併記する。ECM配合は、BB配合が初期の脱水量が多くなっているのに対して、良好な範囲に入っており、加圧ブリーディングに対して良好な性状を有していることが確認された。

一般に、高炉スラグ微粉末を多く混入したセメントを用いた場合、加圧ブリーディングが多くなることが考えられるが、今回のECM配合では、ECM用に試製したAE減水剤を用いることによって、単位水量を大幅に低減しており、このことが加圧ブリーディングを抑制したものと推察される。一方、BB配合は、初期の脱水量が多くなっており、標準曲線Bを若干ではあるが超えている。このことは、BBはECM同様にセメント単味に比べて保水性が小さく、今回用いたBB配合では、その特徴が表れたものと考えられる。

4.2 施工性の確認結果

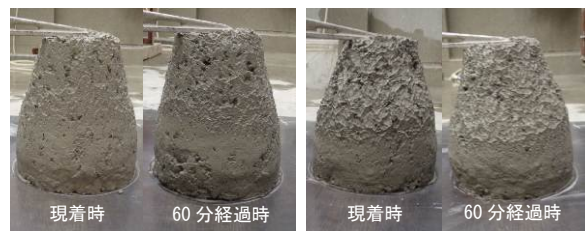
ECMおよびBBを用いたコンクリートの施工性を確認するため、側面のアクリル製の透明型枠からかぶり部へのコンクリートの打上がり状況を目視にて確認した。

その結果、写真-3に示すように、ECM配合はコンクリートの流動が鉄筋によって阻害され、かぶり部にコンクリートが落下し、その後のパイプレタによる振動により、充填された後に気泡が残る現象が確認された。

一方、BB配合はかぶり部のコンクリートが下から上に流動していくことが確認された。これは、ECM配合がBB配合に比べて、単位水量が少ないこと、セメントの種類の違いによることの両者が影響しているものと考えられる。「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)」⁷⁾に、同一スランブのコンクリートであっても、充填性能が使用材料やコンクリート配合によって異なることが示されており、今回の結果もそれによるものと考えられる。したがって、ECM配合については、施工性の改善が求められるとともに、パイプレタによる振動締めめをかぶり側にて入念に行うことが求められる

表-6 フレッシュ性状試験結果

試験項目	目標値	配合	アジテータ車	出荷	運搬後(分)		
					0	30	60
スランブ(cm)	8.0cm	ECM	1台目	10.0	8.0	8.5	7.0
			2台目	10.5	8.5	8.0	7.0
		BB	1台目	12.0	8.0	8.0	8.0
			2台目	10.0	10.0	9.5	—
空気量(%)	4.5%	ECM	1台目	4.6	4.8	5.3	4.8
			2台目	5.3	5.8	5.5	4.0
		BB	1台目	4.5	4.5	3.8	3.5
			2台目	4.1	3.3	3.7	—
コンクリート温度(°C)	—	ECM	1台目	12.0	12.8	13.4	13.1
			2台目	12.0	12.6	13.4	13.3
		BB	1台目	12.0	12.9	13.1	13.6
			2台目	12.0	12.5	13.1	—



(a) ECM (b) BB

写真-2 現着時および60分経過時のスランブ

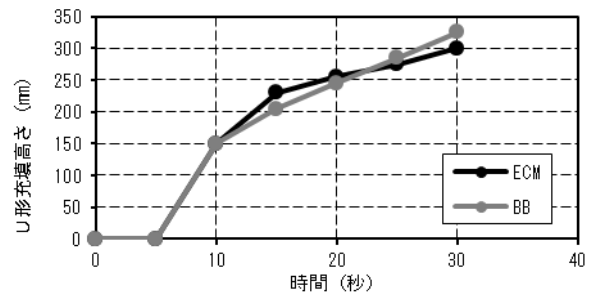


図-4 流動性試験結果

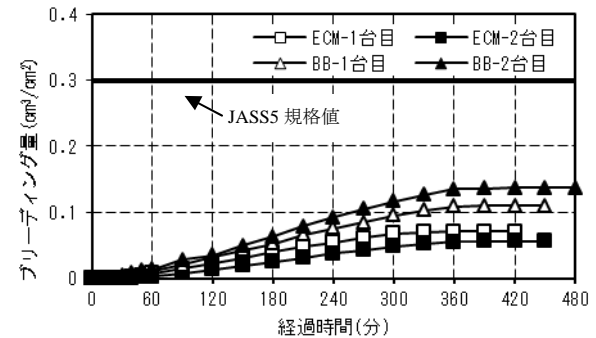


図-5 ブリーディング試験結果

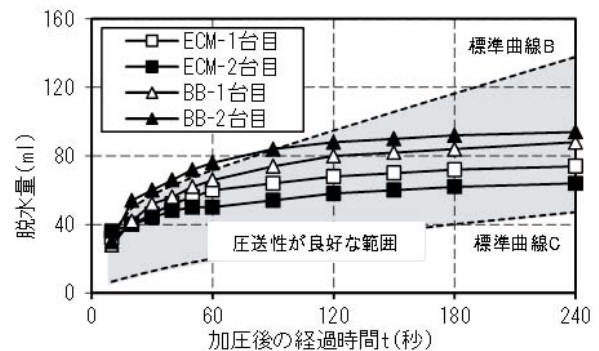
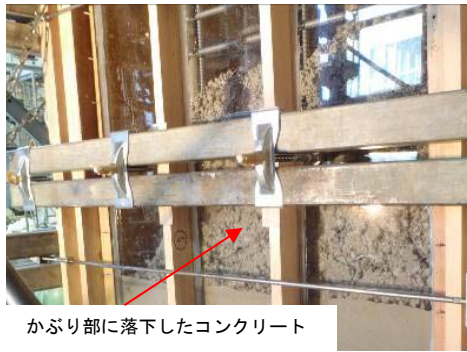


図-6 加圧ブリーディング試験結果



かぶり部に落下したコンクリート

(a) ECM (2層目)



(b) BB (2層目)

写真-3 打込み状況



表面気泡

(a) ECM (2層目)



(b) BB (2層目)

写真-4 コンクリート表面の状況

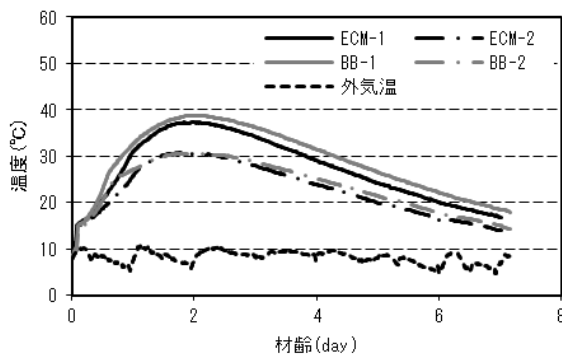


図-7 12月施工時からの温度測定結果

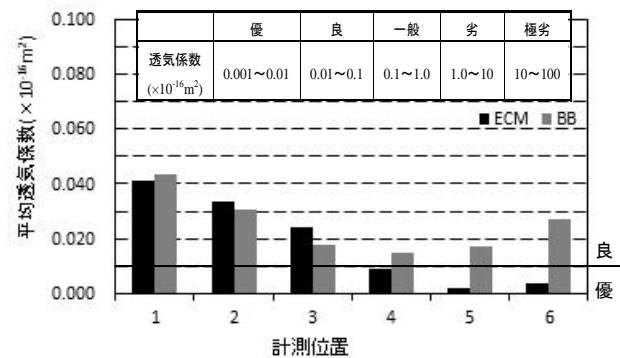


図-8 表面透気試験結果

ものと考えられる。

4.3 試験体における確認試験結果

(1) コンクリートの表面状況

写真-4に、試験体側面におけるコンクリート表面の状況を示す。ECM配合では、前述の打上げ状況で確認されたように、部分的に表面気泡が集中する箇所が確認された。これに対して、BB配合では、表面気泡はほとんどなく平滑であった。

(2) コンクリートの温度履歴

打込み時から脱型時までの熱電対による温度測定結果を図-7に示す。図より、ECM中心部の温度上昇量は、BBよりも3°C小さくなった。この結果は、これまでの研究⁸⁾の断熱温度上昇量を用いて温度解析した結果とほぼ同じになった。

(3) 表面透気性

脱型時点での表面透気試験にて得られた各段の平均透気係数を図-8に示す。報告⁹⁾によれば、表面透気試験により得られた透気係数は5段階評価で、「優」、「良」、「一般」、「劣」、「極劣」に区分される。図より、結果はすべて $0.001 \sim 0.01 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の透気性評価「優」および $0.01 \sim 0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の透気性評価「良」の範囲内であり、ECMの透気係数は上層に従い、「優」に近づく傾向であった。これは、打込みにおいてECMは、下層から上層に行くに従い、施工しやすく、十分な締固めが行われたためであると考えられる。

(4) 細孔径分布

細孔径分布の測定結果を図-9に示す。なお、測定は、表面気泡がない部分から採取した試料を用いた。図より、脱型初期における細孔径分布は各配合ともに高さ方向における違いは見られなかった。

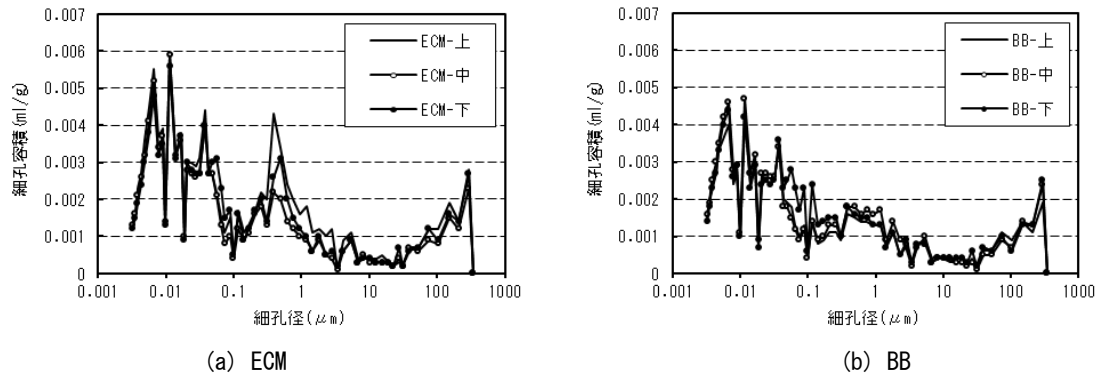


図-9 細孔径分布測定結果

また、ECMは、0.1~10 μm の細孔容積がBBよりも多くなった。これは、高炉スラグを高置換すると未反応の高炉スラグ微粉末による粗大な空隙が卓越するためである。ただし、十分な水中養生を行うことで潜在水硬性による反応が継続し0.1~10 μm の細孔容積のピークがシフトしていくことがこれまでに報告¹⁰⁾されており、この未反応の高炉スラグ微粉末による粗大な空隙は、潜在水硬性の発揮により徐々に充填されるものと推察される。

5. まとめ

比表面積 4,000 cm^2/g の ECM を用いた土木用コンクリートの実規模モデルによる施工性実験により、以下の知見を得た。

- 1) ECM 配合は、プラントの実機ミキサにより実用的な可使時間を有するコンクリートを製造可能である。
- 2) ECM 配合では、ECM 用に試製した AE 減水剤を用いること、単位水量を大幅に低減していることにより、BB 配合に比べてブリーディング量および加圧ブリーディング量が少なくなる。
- 3) ECM は単位水量を大幅に低減しているため、ワーカビリティが劣っており、バイブレータによる振動締固め性能が劣る傾向にあり、表面気泡や豆板の原因になるためワーカビリティの改善が必要である。
- 4) ECM 配合は、バイブレータによる振動締固めをかぶり部にて入念に行うことが重要である。
- 5) ECM 配合の細孔径分布は、BB 配合と同様に高さ方向における違いは見られなかったが、初期材齢の粗大な空隙を徐々に充填するための、十分な養生が必要である。

謝辞: 本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成による「省エネルギー革新技術開発事業/実用化開発/エネルギー・CO₂ ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステムの研究開発」の一環として実施した。共同研究者である東京工業大学 坂井悦郎教授をはじめ、(株)竹中工務店、鹿島建設(株)、(株)デイ・シー、日鉄住金高炉セメント(株)、太平洋セメン

ト(株)、日鉄住金セメント(株)および竹本油脂(株)の関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 檜垣 誠, 小池晶子, 守屋健一, 西祐宜: 高炉スラグ微粉末を大量に使用したコンクリートの経時安定性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.291-292, 2012.9
- 2) 和地正浩, 米澤敏男, 三井健郎, 井上和政: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの物性に及ぼす SO₃ の影響, コンクリート工学年次論文集, 33 巻, 1 号, pp.203-207, 2011
- 3) 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉渕清, 木之下光男, 釜野博臣: エネルギー・CO₂ ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, 48 巻, 9 号, pp.69-73, 2010.9
- 4) 黒田 萌, ほか: 高炉スラグ高含有セメントを用いた高強度コンクリートの基礎物性, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.857-858, 2012.9
- 5) 土木学会: コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究委員会(341 委員会)委員会報告書, pp.107-108, 2012
- 6) 土木学会: コンクリートのポンプ施工指針[2012 年版], p.26, 2012
- 7) 土木学会: 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案), pp.58-73, 2007
- 8) 二戸信和, 大澤友宏, 鯉渕清, 宮澤伸吾: 高炉セメントの発熱と収縮に及ぼすスラグ粉末度と SO₃ の影響, コンクリート工学年次論文集, 30 巻, 2 号, pp.121-126, 2008
- 9) R.J.Torrent : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Material and Structures, 25, pp.358-365, 1992
- 10) 郭度連, 國府勝郎, 李昌洙, 李奎東: 高炉スラグ粉末を用いたコンクリートの内部組織の形成に及ぼす置換率の影響, コンクリート工学年次論文集, 26 巻, 1 号, pp.783-788, 2004