

報告 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硬化性状の検討

井上 友^{*1}・橋本 学^{*2}・齊藤 和秀^{*3}・井上 和政^{*4}

要旨：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を対象として実大試験体を施工し、冬期および夏期における硬化性状の検討を行った。コンクリートのフレッシュ性状については、冬期、夏期ともにブリーディングに関してはほとんど生じないことを確認した。硬化性状について、供試体による比較では強度と積算温度に相関が認められ、試験体による比較では、スランブが冬期よりも大きい夏期配合において圧密効果により下層に従い強度が増進する傾向が認められた。また、透気試験、細孔径分布の結果より冬期、夏期配合ともに表層部において密実なコンクリートが施工されていることを確認した。

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、積算温度、透気係数、細孔径分布

1. はじめに

環境負荷低減の観点から、他の産業と同様に建設業界においても、CO₂排出量の削減が求められている。建設工事にかかわるものとして、セメント製造時に占める割合が多く、セメント製造の際に、いかにCO₂排出量を削減するかが課題となっている。セメント製造時の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の使用が考えられる。高炉スラグ微粉末は製鉄所の製造過程における副産物であり、焼成が不要なためセメントと置換することでCO₂削減に大きく寄与することができる。

現状では、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種などが知られているが、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種規格の範疇で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程度の高炉スラグ高含有セメント（以下、BC）の研究^{2),3)}がなされている。しかし、これらの研究は室内試験における検討段階であり、実大規模において強度をはじめとする硬化性状に関する検討はほとんど実施されていないのが現状である。そこで、本論文ではBCセメントのさらなる展開を図るために土木構造物を対象とし、実大規模の試験体を冬期および夏期において作製し、それぞれ硬化性状に関する比較・検討を行った。

2. コンクリートの配合および材料

土木用コンクリートの配合の前提条件として、一般的に用いられる水セメント比 55.0%、呼び強度 27（材齢 28 日）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。BC コンクリートの配合（以下、BC 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によって選定した。その結果、BC 配合では、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となり、圧縮強度、断熱温度上昇量、自己収縮等についても、BB 配合と同程度の性能を有していることを既往の実験にて確認した⁴⁾。

目標スランブの選定については、冬期は土木用コンクリートとして一般的な目標値であるスランブ 8cm とし、夏期については冬期のフレッシュ性状および振動締固めの状況、充填状況⁵⁾などの施工性を鑑みて、目標スランブを 8cm から 14cm に変更することとした。なお、夏期の目標スランブの値については、既往の実験結果⁶⁾よ

表－1 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)
	BC	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-N1	試製品 AE 減水剤(BC 用多機能タイプ、標準形、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-N2	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)

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

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 工修 (正会員)

*3 竹本油脂(株) 第三事業部 営業統括部 営業技術グループ シニアマネージャー (正会員)

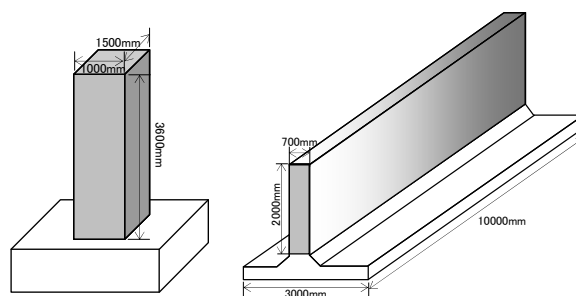
*4 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部門 グループリーダー 博(工) (正会員)

表－２ コンクリート配合

セメント	W/C (%)	目標 スランプ [*] (cm)	Gmax (mm)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
					W	C	S1	S2	S3	G	混和剤 C×% ^{*1}
BC (冬期配合)	50.0	8.0	20	48.0	150	300	267	311	311	974	1.1
BC (夏期配合)	50.0	14.0	20	48.0	150	300	267	311	311	974	1.45
BB	55.0	8.0	20	48.0	165	300	262	306	305	955	0.7

*1 BC 配合：AD-N1，BB 配合：AD-N2

り定めた。目標スランプを 8cm から 14cm に変更するにあたり、配合の単位量は変えずに、混和剤のみを調整することでそれぞれの目標スランプを満足するように定めた。表－１、表－２に使用材料およびコンクリートの配合を示す。骨材はプラントにおいて実際に使用しているものとし、BC 配合における混和剤は、主成分は市販品と同等であるが、BC 用に新たに試製した AE 減水剤を用いた⁷⁾。BB 配合はレディーミクストコンクリート工場の JIS 配合 27-8-20BB を選定し、水セメント比 55.0%、スランプ 8.0cm の配合とした。



図－１ 冬期試験体

図－２ 夏期試験体

表－３ 試験項目

項目	記号	摘要	備考
フレッシュ性状	スランプ試験	JIS A 1101	
	空気量試験	JIS A 1128	
	ブリーディング試験	JIS A 1123	
硬化性状	温度測定	熱電対による	材齢 28 日まで
	圧縮強度試験	JIS A 1108	材齢 7,28,91 日
	表層透気試験	Torrent 法	材齢 28,91 日
	細孔径分布測定	水銀圧入法	

3. 実験概要

3.1 試験体の概要

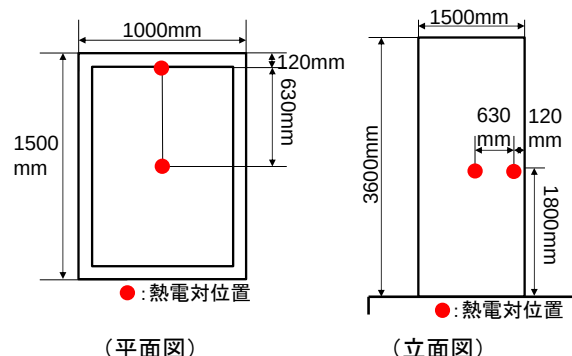
実規模試験体の形状を図－１および図－２に示す。本実験のモデルはボックスカルバートの壁部材を想定し、一部分を抜き出した形状とした。壁厚は 700～1,000mm とし、全長は冬期試験体において 1.5m、夏期試験体においては 10,000mm とした。冬期試験体の配筋は主筋および配力筋ともに D13 の 150mm ピッチとし、夏期試験体については主筋 D25、配力筋 D19 の 150mm ピッチとした。打込みは、冬期試験ではバケットによる打設とし、1 層あたり 50cm の計 7 層にて施工した。夏期試験では IHI 社製の 4t ポンプ車による打込みを行い 1 層あたり 50cm にて計 4 層とした。また試験体の施工時期として、冬期試験は 12 月中旬（打設当日の最高気温 10.1℃）に、夏期試験は 9 月中旬（打設当日の最高気温 31.7℃）に東京都内（調布市）の実験場にて行った。

3.2 試験項目

試験項目を表－３に示す。スランプは JIS A 1101 に、空気量は JIS A 1128 に従って、コンクリートは生コン車にて運搬を行い、現場到着時点で測定を行った。ブリーディング試験は JIS A 1123 に従って、打込み箇所にて実規模実験と同じ環境条件のもとで実施した。

熱電対による温度測定は、冬期試験体では図－３に示す底版から高さ 1800mm の位置に、中心および側面の 2 点に設置し、夏期試験体では図－４に示す高さ 1000mm の位置にて、中心および側面の 2 箇所にて測定した。

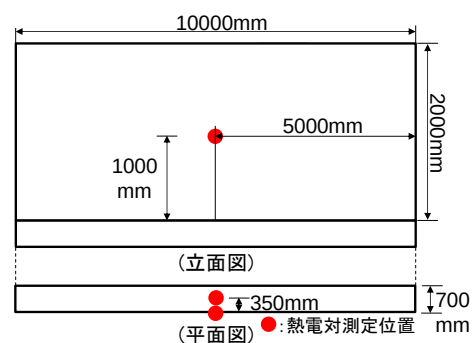
硬化性状試験（圧縮強度試験・透気試験・細孔径分布測定）の測定箇所を図－５および図－６に示す。圧縮強度試験は供試体および試験体から採取したコアを用いて JIS A 1108 に従って実施した。冬期では底版から 3 段



(平面図)

(立面図)

図－３ 熱電対設置位置(冬期)



(立面図)

(平面図)

図－４ 熱電対設置位置(夏期)

3 箇所の計 9 箇所を φ100mm で採取し、圧縮強度試験を行い各段の平均値を圧縮強度とした。夏期においては、躯体中心から鉛直下向きに φ100mm でコアを採取し、試

験体天端から高さが 200mm となるようにコアを切断した。これらのコア（計 8 本）に対し圧縮強度試験を実施した。表面透気試験はそれぞれ一面のみで実施し、冬期では底版から高さ 300mm の位置で、それ以降については高さ方向に 600mm ピッチで 6 段にて 3 段 6 箇所計 18 箇所を測定し、各段の平均値を透気係数とした。夏期については、底版から高さ 250mm の位置で、それ以降については高さ方向に 500mm ピッチで 4 段とし、各段 3 段 4 箇所計 12 箇所を測定し、各段の平均値を透気係数とした。細孔径分布測定も透気試験同様に、一面のみで実施し、冬期試験体は底版から高さ 425mm、1,550mm、2,825mm の 3 箇所から試料を採取した。夏期試験体は底版から高さ 250mm の位置で、それ以降については高さ方向に 500mm ピッチで 4 箇所から試料を採取した。測定方法として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

現場到着時点でのスランブおよび空気量の結果を表 4 に示す。スランブおよび空気量は規格値内であることを確認した後、施工を行った。また、写真 1 に現場到着時のスランブ試験の状況を示す。スランブ試験後のタンピングによって、定性的ではあるが適度な材料分離抵抗性を有していることを確認した。

(2) ブリーディング

ブリーディング試験の結果を図 7 に示す。夏期配合はブリーディング量が $0.02\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、冬期配合では $0.06\text{cm}^3/\text{cm}^2$ と JASS 5 で定められた規格値 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下に対して非常に少ない値であった。一般的に、高炉スラグの置換率が多くなるに従って、ブリーディング量が多くなる傾向が認められる⁸⁾が、今回選定した BC 配合は単位水量を $150\text{kg}/\text{m}^3$ と少なくし、かつ水セメント比を小さくしたことで、ブリーディングが少なくなったものと考えられる。また、打ち込み完了後の天端仕上げの際もブリーディングはほとんど生じておらず、硬化後についても沈降ひび割れが生じていないことから、本実験の範囲において、スラグ含有率が多いことによるブリーディングが問題となることはないものと判断された。

4.2 圧縮強度試験結果

(1) 供試体における強度試験結果

供試体における圧縮強度試験結果を図 8 に示す。標準水中養生の圧縮強度に関して、BC 配合と BB 配合では材齢 28 日強度で $47.1\text{N}/\text{mm}^2$ と $45.2\text{N}/\text{mm}^2$ となり、既往の研究⁴⁾が示すように同等の強度発現性状を有することを確認した。現場気中養生について、材齢 28 日時点の圧縮強度は、冬期について BC 配合と BB 配合の強度は同程度であるのに対して、夏期については BC 配合の強

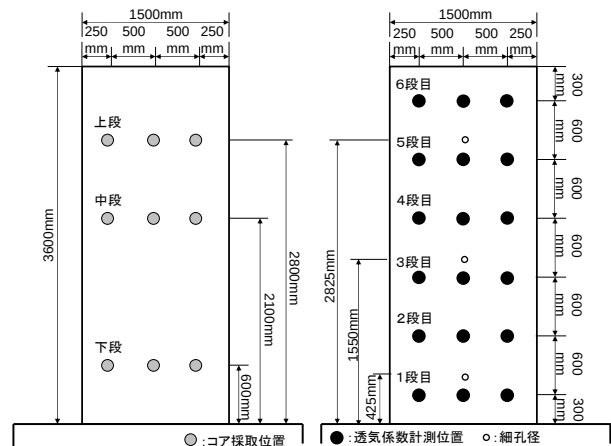


図 5 硬化性状試験位置（冬期）

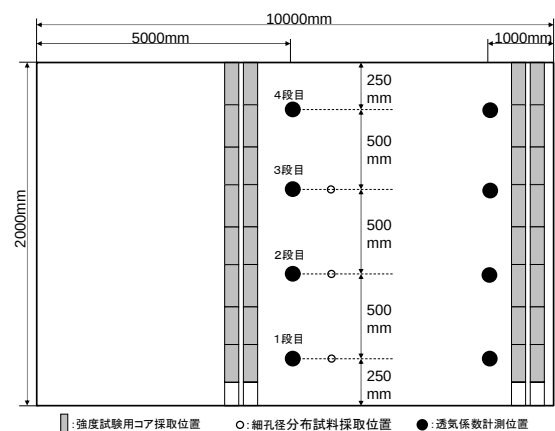


図 6 硬化性状試験位置（夏期）

表 4 フレッシュ性状試験結果

配合	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(℃)
冬期配合	8.0	4.8	12.8
夏期配合	15.0	6.0	27.2



(a) 冬期 (8cm) (b) 夏期 (15cm)
写真 1 スランブ試験の状況

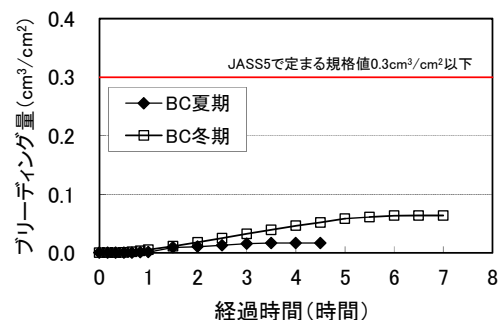


図 7 ブリーディング試験結果

度が大きくなる傾向が認められた。この理由として、一般的に高炉スラグ微粉末は温度依存性が高く、外気温が高いほど、潜在水硬性が活性化され水和熱が大きくなる傾向が認められ⁹⁾、BC 配合では、BB 配合と比較してスラグの含有率が多くなることで、温度依存性が高くなり、BC 配合の方が強度発現性が大きかったものと考えられる。夏期において、BC 配合および BB 配合ともに、材齢 28 日以降の強度発現が小さいことについては気中養生としたことで、周りからの十分な水分供給がなされなかったためと考えられる¹⁰⁾。

(2) 試験体コアにおける強度試験結果

材齢 28 日における試験体から採取したコアの圧縮強度を図-9 および図-10 に示す。冬期配合においては高さ方向における強度の違いは認められなかったが、夏期配合においては試験体下層になるに従って強度が増加する傾向が見られた。今回の検討では、試験体の形状、寸法、コア採取方向などの条件は異なるが、それらの影響よりもスランプの違いによる影響が卓越すると考えた。夏期配合ではスランプを 14cm としたことで充填性が向上し、下層部では圧密（型枠の側圧）によって、強度が増進するものと考えられ、その傾向はスランプが大きくなるにつれ、より顕著になるものと考えられる。また、図-11 および図-12 に示すコアの密度も冬期配合では、高さ方向による密度の違いが認められないのに対し、夏期配合では下層になるに従い、密度が増加する傾向が見られた。

夏期配合において高さ方向で密度が異なる理由に関して、粗骨材等の材料分離による影響が考えられたため、採取したコアに含まれる粗骨材量の比較を行った。比較方法として、採取したコアの 4 方向から写真を撮影し（写真-2）、画像処理によって粗骨材とモルタルを分離し、粗骨材の中で 5mm 以上の長さのものを粗骨材として定義した。そして、全体の面積から粗骨材の含まれる割合の平均値を粗骨材面積率として算出した。夏期配合における粗骨材面積率の結果を表-5 に示す。表より上段、中段、下段の粗骨材面積率に違いは認められず、材料分離は生じていないものと考えられる。

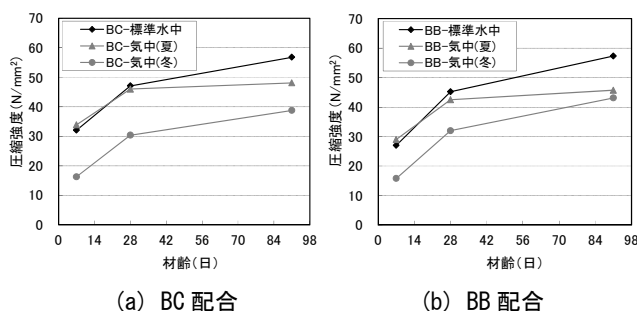


図-8 供試体における圧縮強度

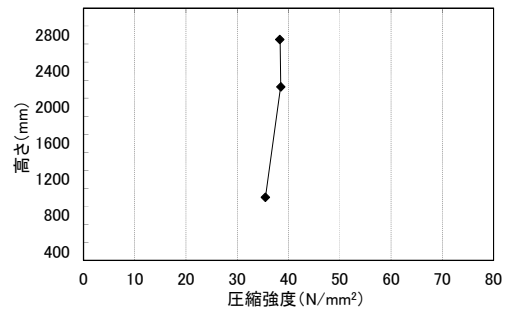


図-9 冬期におけるコア強度(材齢 28 日)

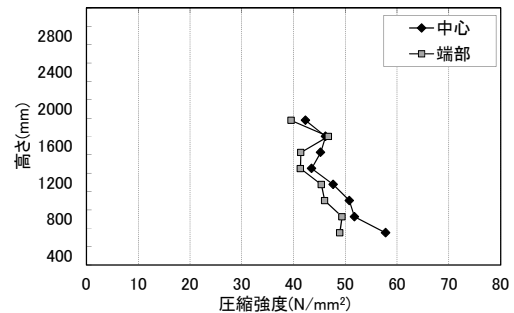


図-10 夏期におけるコア強度(材齢 28 日)

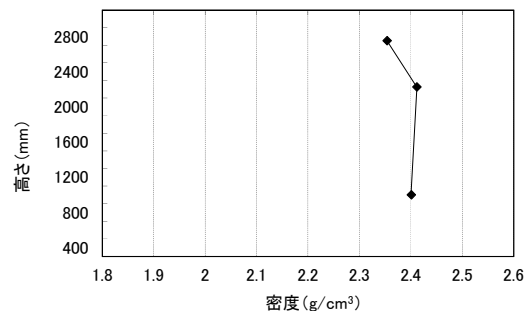


図-11 冬期におけるコアの密度

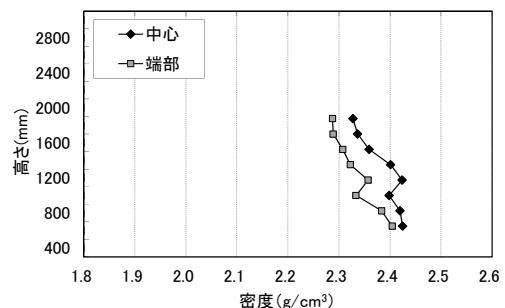


図-12 夏期におけるコアの密度



写真-2 コアの表面状況

表-5 粗骨材面積率結果

コア採取位置 ()内は高さ位置	粗骨材 面積率(%)
上段(1800)	26.6
中段(1000)	26.4
下段(400)	25.6

(3) 積算温度と圧縮強度の関係

BC 配合に関して積算温度と圧縮強度との関係を算出した。積算温度の算定は、図-13に示す温度測定結果をもとに、コア供試体は実規模試験体の温度測定結果より、気中供試体については外気温よりそれぞれ求めた。材齢 x 日における積算温度 M_x の算定には以下の式(1)により算出した。

$$M_x = \sum_{z=1}^x (\theta_z + 10) \quad (\theta_z: \text{日平均気温 } (^{\circ}\text{C})) \quad (1)$$

積算温度と圧縮強度の関係を図-14に示す。図より、圧縮強度と積算温度で相関が認められることから、BC 配合においても、積算温度と圧縮強度の関係に基づき、積算温度から圧縮強度を推定できるものと考えられる。

(4) 構造体強度補正值 ($_{28}S_{91}$ 値) 結果

BC 配合の構造体強度補正值 ($_{28}S_{91}$ 値) を表-6に示す。本実験の範囲では BC 配合の冬期の $_{28}S_{91}$ 値は-3.3、夏期の $_{28}S_{91}$ 値は2.7で、JASS 5で示される冬期 (13℃未満) および暑中期の BB の $_{28}S_{91}$ 値6を下回ることが確認された。

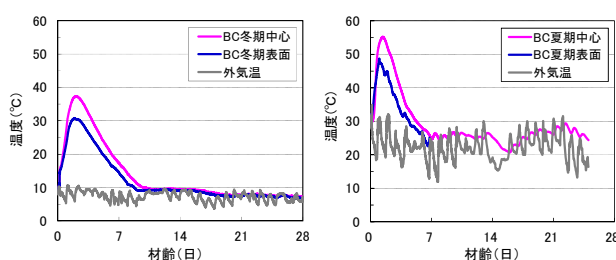
4.3 透気係数

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-15に示す。報告¹¹⁾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。冬期配合においては、透気係数が「良」の範囲であるのに対し、夏期配合では概ね「優」の範囲であった。この理由として、夏期配合では、材齢28日時点の強度発現性が大きく表層部が密実になっていることに加え、冬期配合の目標スランブ8cmに対し、夏期配合では14cmと大きいため、表層部の充填性がより良好であったことが影響しているものと考えられる。

4.5 細孔径分布

材齢28日における細孔径分布測定の結果を図-16に示す。高炉スラグ微粉末を使用した場合、未反応の高炉スラグ微粉末により1 μm 付近の粗大な空隙が卓越することが報告されており¹²⁾、この特徴は冬期配合、夏期配合ともに確認された。

また、図-17に測定箇所別の平均細孔径を示す。こ



(a) BC(冬期) (b) BC(夏期)

図-13 温度測定結果

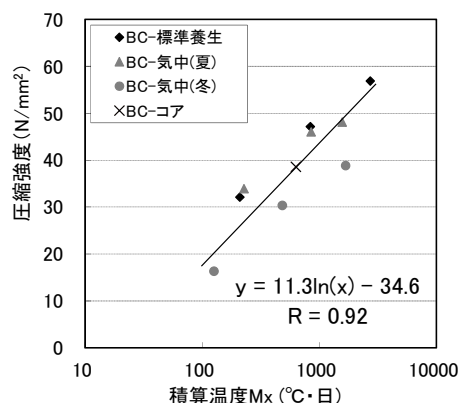


図-14 積算温度と圧縮強度の関係

表-6 構造体強度補正值 ($_{28}S_{91}$ 値)

種別	圧縮強度(N/mm ²)		$_{28}S_{91}$ 値 (N/mm ²)
	構造体強度	標準水中生	
冬期	46.4	43.1	-3.3
夏期	44.4	47.1	2.7

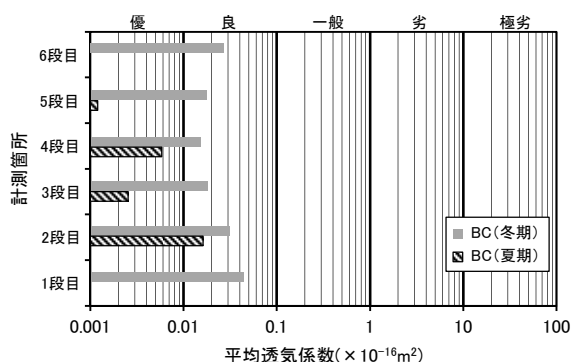
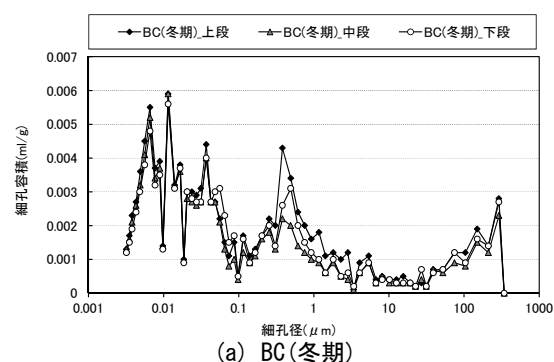
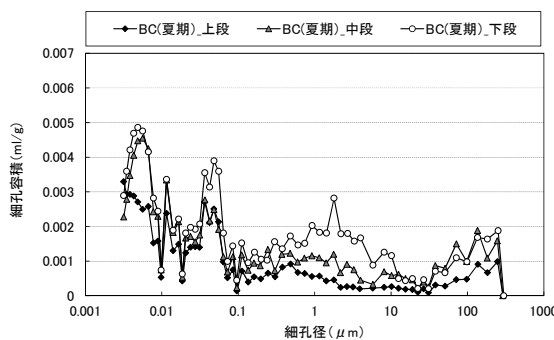


図-15 表面透気試験結果



(a) BC(冬期)



(b) BC(夏期)

図-16 細孔径分布

ここで、平均細孔径とは細孔の全容積を全表面積で除した値を4倍したものであり、図より、平均細孔径は冬期配合より夏期配合において小さくなる傾向が見られた。この理由として、夏期配合の方が材齢28日時点での強度発現性が大きく、より緻密化しているためと考えられる。また、平均細孔径の分布は表面透気試験の分布と同じ傾向を示しており、細孔構造と透気係数については既往の文献¹³⁾より相関があることが認められていることから、同様の結果が得られたものと考えられる。

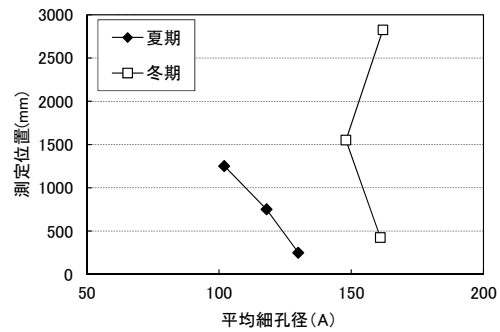


図-1.7 測定箇所別の平均細孔径

5. まとめ

BCを用いた土木用コンクリートの実大試験体による施工を冬期および夏期に実施し、以下の知見を得た。

- 1) ブリーディングに関しては、冬期および夏期ともに少なく、配合および施工上の問題とならないことが確認された。
- 2) BC配合の積算温度と圧縮強度の関係は良好な相関関係が得られることから、BC配合の強度は積算温度より算出できるものと考えられる。
- 3) 表層部については、冬期および夏期ともに充填性が高く、透気係数は冬期配合では「良」の範囲で、夏期配合については「優」の範囲であったことから、冬期および夏期ともに表層の状態は良好であったと考えられ、細孔構造からも同様の傾向が認められた。

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术開発事業/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) デイ・シイ、日鉄住金高炉セメント (株)、太平洋セメント (株) および日鉄住金セメント (株) と実施した。本研究に関わられた関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 近藤連一: セメント化学のシーズとニーズ, コンクリート工学, Vol.17, No.2, pp1~11, 1979
- 2) 和地正浩ほか: 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) 米澤敏男ほか: 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) 室野井敏之ほか: 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基礎物性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, pp.193-198, 2013.7
- 5) 尾口佳丈ほか: 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, コンクリート工学年次論文集 Vol.35, pp.115-120, 2013.7
- 6) 橋本学ほか: セメント種類の異なるスランブ 8cm のコンクリートのかぶり部の施工性評価に関する実験的検討, 土木学会, コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会 (341 委員会) 第2期委員会報告書, pp.III-55-III-60, 2013.11
- 7) 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
- 8) 山崎舞ほか: 高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍害性におよぼすブリーディングの影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.898-903, 2012
- 9) 森山ほか: 高炉スラグ微粉末コンクリートの配合及び強度発現性について, 高炉スラグ微粉末のコンクリート適用に関するシンポジウム, 土木学会, 1987
- 10) 米倉ほか: 高炉スラグ微粉末の使用がコンクリートの乾燥収縮およびクリープに及ぼす影響, 高炉スラグ微粉末のコンクリート適用に関するシンポジウム, 土木学会, 1987
- 11) 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
- 12) 郭度連ほか: 高炉スラグ微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, Vol.26, No.1, pp.783-788, 2004
- 13) 河野俊一ほか: セメント硬化体の細孔径の透気性による評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.745-750, 1998