

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熱特性および温度ひび割れに関する検討

室野井 敏之^{*1}・橋本 学^{*2}・坂田 昇^{*3}・黒田 萌^{*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土木用コンクリートを対象として、夏期および冬期において実施した模擬部材試験と簡易断熱容器を用いた室内試験によって熱特性に関する物性値を取得した。本検討で得られた断熱温度上昇特性、線膨張係数および圧縮強度をもとに壁状構造物を対象とした温度応力解析を実施した結果、高炉スラグ高含有セメントが温度ひび割れ抵抗性に一定の低減効果を有する可能性が示唆された。

キーワード: 高炉スラグ, 高炉スラグ高含有セメント, 断熱温度上昇特性, 線膨張係数, 温度応力解析

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 の削減を図る国際的な動きが加速しつつある。我が国においても様々な取組みがなされているが、建設分野に関連するものでは、セメント製造時のエネルギーと材料由来の CO₂ が国内 CO₂ 排出量の約4%とされており、これらを削減することが喫緊の課題と考えられる。

セメント由来の CO₂ を削減する手段の一つとして高炉スラグ微粉末の利用が挙げられる。高炉スラグ微粉末は製造プロセスで原料からの CO₂ 排出がないため、ポルトランドセメントに混合した高炉スラグ微粉末のほぼ全量が CO₂ 削減に寄与することになる。現在の建設工事では、高炉スラグ微粉末の含有率 40%程度の市販の高炉セメント B 種 (以下, BB と表記) が広く使用されているが、CO₂ の削減の観点から BB よりもさらに高炉スラグ微粉末の含有率を高めたセメントの使用が望まれる。しかし、高炉スラグ微粉末を多量に含有する高炉セメント C 種、高硫酸塩スラグセメント等は、ブリーディングが多い、初期強度が低い、収縮量 (自己収縮・乾燥収縮) が大きい、中性化が速く耐久性の確保が難しいなどの課題を有しており、現状ではほとんど使用されていない。

このような高炉スラグ高含有セメント特有の課題に対して、最近ではセメント中の SO₃ 量を通常のセメントよりも高めることや水セメント比を調整することにより改善する研究^{1), 2)}がなされている。

筆者らは SO₃ 量を高めた高炉スラグ高含有セメント (以下, BC と表記)³⁾の展開を目的に、土木用コンクリート配合を対象として、基礎物性の取得⁴⁾および実大部材による施工実験⁵⁾を実施し、BC の評価を行ってきた。

本論文は、それら評価の一環として、夏期および冬期に実施した模擬部材を用いた試験によって得られたデー

タと室内試験によって得られたデータをもとに、BC の熱特性および温度ひび割れについての評価を示すものである。

熱特性について、断熱温度上昇特性、線膨張係数および圧縮強度について評価を行った。また、温度ひび割れについて、熱特性の評価で得られた物性値を用いて、壁状構造物を対象とした温度応力解析を実施し温度ひび割れに対する評価を行った。

2. 土木用 BC コンクリートの配合

2.1 配合の概要

BC を用いた土木用コンクリートの配合選定において、一般的に用いられる水セメント比 55%、スランプ 8.0cm、市販の BB を使用した配合 (以下, BB 配合と表記) を比較対象とした。BC を用いたコンクリートの配合 (以下, BC 配合と表記) 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、事前の室内試験および各種物性取得試験⁴⁾から選定した。その結果、BC 配合は水セメント比 50%で BB 配合と中性化抵抗性および断熱温度上昇量が同等以下、圧縮強度および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。

BC 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、配合選定における室内試験では、BC 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%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 BC 配合では所定のスランプ 8.0cm が得られなかったため、新たに BC 用に試製

*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) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 修士 (工学) (正会員)

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

*4 竹本油脂 (株) 第三事業部 研究開発部 コンクリートグループ 研究員 工修 (正会員)

した AE 減水剤⁶⁾を用いることとした。

冬期に実施した模擬部材試験では、室内試験と同様に目標スランブを 8.0cm とした。夏期に実施した模擬部材試験では、環境負荷低減のため単位セメント量を冬期の施工実験と同じ 300kg/m³として、充填性の観点から良好な施工性が得られるように目標スランブを 14.0cm とした。スランブは、AE 減水剤の種類と添加量を調整し目標スランブを満たすようにした。

2.2 使用材料

BC および BB のセメントの化学成分を表-1、使用材料を表-2、コンクリートの配合を表-3 に示す。

BB 配合は、施工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。

ここで、本検討で使用する AE 減水剤 AD-N1 (標準形) および AD-N2 (遅延形) とは、市販品である AD と比較してスランブ保持性を高め、高炉スラグ微粉末を分散させる機能を有する BC 用に試製した混和剤である。冬期配合および室内試験では AD-N1 (標準形)、夏期配合では AD-N2 (遅延形) を用いることとした。

3. 熱特性試験概要

熱特性試験として、夏期および冬期に模擬部材を用いた試験と、室内試験を実施した。試験項目を表-4 に示す。試験は BC 配合および BB 配合について実施した。冬期においては、BC 配合のみ実施した。

夏期および冬期に実施した模擬部材を用いた試験では、発熱性状および線膨張係数を確認した。模擬部材の概要を図-1 に示す。模擬部材の施工は、夏期試験は 9 月中旬 (打設当日の最高気温 31.7℃) に、冬期試験は 12 月中旬 (打設当日の最高気温 10.1℃) に、東京都調布市内の実験場にて実施した。模擬部材には中心部に無応力容器および測温機能付きの埋込みひずみ計を設置し測定した。

室内試験では、20℃環境下において、断熱温度上昇特性、発熱性状の確認、線膨張係数および圧縮強度について試験を行った。このうち、発熱性状の確認については、図-2 に示す簡易断熱容器を用いた試験を行った。この簡易断熱容器は、直径 900mm×高さ 615mm の発泡ス

表-2 使用材料

項目	記号	種別
水	W	上水道水
セメント	BB	高炉セメント B 種 密度 ; 3.04g/cm ³
	BC	高炉スラグ高含有セメント スラグ含有率 ; 60~65% 密度 ; 2.98g/cm ³ SO ₃ 量 ; 3.60%
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	AE	AE 剤 樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤
	AD	AE 減水剤(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-N1 冬期 室内	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 夏期	AE 減水剤(BC 用多機能タイプ, 遅延形) (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)

表-4 試験項目

評価項目	摘要	夏期	冬期	室内
スランブ試験	JIS A 1101	○	○	○
空気量試験	JIS A 1128	○	○	○
断熱温度上昇特性	3.1 に記載			○
発熱性状の確認	3.2 に記載	○	○	○
線膨張係数	3.3 に記載	○	○	○
圧縮強度	JIS A 1108			○

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
BC	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-3 コンクリートの配合

セメント	W/C (%)	Gmax (mm)	目標スランブ (cm)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
					W	C	S1	S2	S3	G	混和剤
BC (夏期)	50.0	20	14.0±2.5	48.0	150	300	267	311	311	974	C×1.45%
BC (冬期)	50.0	20	8.0±2.5	48.0	150	300	267	311	311	974	C×1.1%
BC (室内)	50.0	20	8.0±2.5	48.0	150	300	267	311	311	974	C×1.1%
BB (夏期)	55.0	20	14.0±2.5	48.0	165	300	262	306	305	955	C×0.9%
BB (冬期)	55.0	20	8.0±2.5	48.0	165	300	262	306	305	955	C×0.7%
BB (室内)	55.0	20	8.0±2.5	48.0	165	300	262	306	305	955	C×0.7%

※ BC では AD-N1 または AD-N2, BB では AD を使用 (表-2 参照)

チロール製の円筒状容器であり，強度試験用のφ100mm×h200mmの供試体を10体，温度測定用のφ200mm×h200mmの供試体を1体養生できるものである。この簡易断熱容器を用いて，断熱養生下での，発熱性状の確認および強度特性の取得を行った。供試体（φ200mm×h200mm）の中心部に熱電対を埋め込み測定を行った。

3.1 断熱温度上昇特性の推定方法

断熱温度上昇試験は，断熱温度上昇量測定装置を用いて計測を行った。試験は，室内（環境温度20℃）で練混ぜ試験を実施したBC配合およびBB配合を対象とし，式(1)に示す断熱温度上昇式により評価することとした。

$$T = K\{1 - \exp(-\alpha t)\} \quad (1)$$

ここで，Kは終局断熱温度上昇量（℃），αは温度上昇速度に関する定数，tは材齢（日）

3.2 発熱性状の評価方法

夏期および冬期における施工実験，室内における簡易断熱試験の発熱性状の評価として，実測値と解析値を比較することとした。ここで解析値とは，三次元有限要素法による温度応力解析ソフトを用いて，温度解析を行い得られた値である。温度解析の入力値として，断熱温度上昇特性は，打込み温度20℃の条件で得られた断熱温度上昇式の終局断熱温度上昇量Kおよび温度上昇速度に関する定数αをもとに，セメント技術資料⁷⁾に示される打込み温度との関係と同様の傾向にあると仮定し，打込み温度による補正を行った値とした。その他，解析に用いた物性値を表-5，解析モデルを図-3，図-4に示す。

3.3 線膨張係数の測定方法

夏期および冬期に実施した模擬部材による試験では，打込み直後からの実ひずみと温度変化量から式(2)により線膨張係数を求めることとした。

$$\gamma = \varepsilon / \Delta t \quad (2)$$

ここで，γ：コンクリートの線膨張係数（×10⁻⁶/℃），ε：実ひずみ，Δt：温度差（℃）

室内試験では，以下に示す手順に従って線膨張係数を求めた。試験に用いた供試体の概要を図-5に示す。

- ① 容量20ℓのポリエチレン製容器に無応力容器および埋込みひずみ計を設置する。
- ② ポリエチレン製容器および無応力容器内にコンクリートを打ち込み，締固めを行う。
- ③ 20℃の環境下で28日間封かん養生を行う。
- ④ 28日間の養生後，ポリエチレン製容器を温度追従養生槽に入れ，供試体に温度履歴を与える。温度履歴は，供試体の温度が60℃となるまで上昇させ，その後20℃となるまで下降させる。温度変化の割合は，上昇・下降とも2℃/hとする。
- ⑤ 埋込みひずみ計からひずみと温度変化量を30分間隔

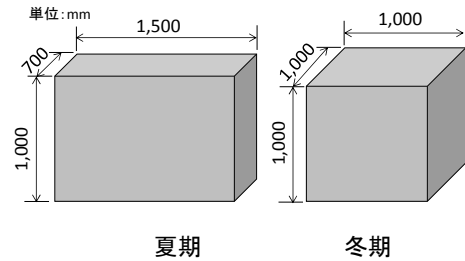


図-1 模擬部材の概要

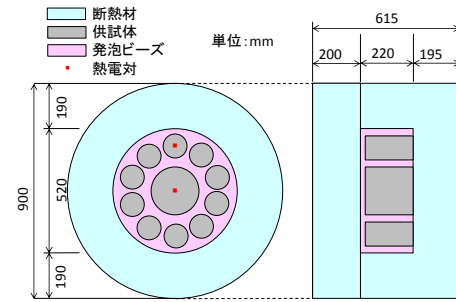


図-2 簡易断熱容器の概要

表-5 解析入力値

項目	種別	解析条件
熱伝導率 [W/m ² ℃]	コンクリート	2.7
	発泡ビーズ	0.05
	断熱材	0.027
比熱 [kJ/kg℃]	コンクリート	1.15
	発泡ビーズ	1.15
	断熱材	1.15
密度 [kg/m ³]	コンクリート	2400
	発泡ビーズ	12
	断熱材	11
表面熱伝達率 [W/m ² ℃]	模擬部材	上面：14 型枠面7日まで型枠：8 7日以降脱枠：14
		簡易断熱容器

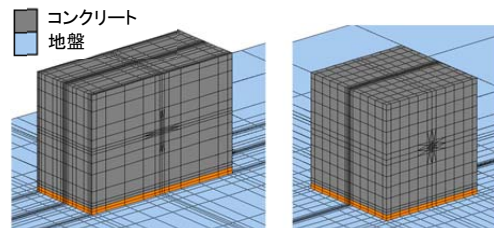


図-3 模擬部材解析モデル

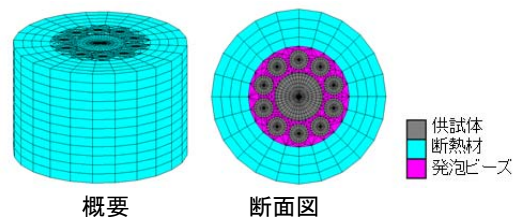


図-4 簡易断熱容器解析モデル

で測定し、式(2)により線膨張係数を求める。

3.4 圧縮強度試験

室内試験において圧縮強度試験を実施した。供試体の養生条件は、標準水中養生および簡易断熱容器内における断熱養生とし、試験材齢を標準水中養生では3日、7日、28日、断熱養生では28日とした。

また、BCの温度依存性を評価するため、積算温度を算出し、圧縮強度の評価の指標とした。積算温度Mの算出は以下に示す式(3)によって求めた。

$$M = \sum(\theta + 10)\Delta t \quad (3)$$

ここで、M：積算温度(°C・hour)、 θ ： Δt 中のコンクリート平均温度(°C)、 Δt ：時間(hour)

4. 熱特性試験結果

打込み温度、スランブおよび空気量の試験結果を表-6に示す。

4.1 断熱温度上昇特性

室内で練混ぜ試験を実施したBC配合およびBB配合の断熱温度上昇試験の結果を図-6に示す。

BC配合とBB配合を比較した場合、BC配合の終局温度は41.9°Cであり、BB配合(51.6°C)よりも10°C程度低い結果であった。これは、BCの方がBBよりもクリンカー量が少ないことが要因と考えられる。

4.2 発熱性状の評価

図-7および図-8に、断熱温度上昇試験で得られた終局断熱温度上昇量Kと温度上昇速度に関する定数 α の試験値を示す。また、打込み温度との関係がセメント技術資料⁷⁾に示される傾向にあると仮定し、推定した値も併記する。図-9～図-11に、夏期および冬期における施工実験、室内における簡易断熱試験の発熱性状の評価として、実測値と解析値の比較を示す。

夏期の比較においては、実測値と解析値の最高温度の差は、BC配合では6.5°C、BB配合では1.8°Cであり、BC配合の方が大きい傾向であった。また、BC配合とBB配合の最高温度を比較すると、ほぼ等しい値であった。これら原因は、高炉スラグ微粉末の特徴である温度依存性の高さに起因すると推察される。つまり、環境温度が高い条件下では、高炉スラグ微粉末の水和反応が活性化し発熱量が増えたものと考えられる。また、BC配合の方がBB配合よりも高炉スラグ微粉末の含有量が多いため、その影響がより顕著に表れたと推察される。冬期の比較においては、実測値と解析値の最高温度の差は、BCでは13.8°C、BBでは12.8°Cであり、BCおよびBBともに実測値よりも解析値の方が小さい傾向であった。この原因は、環境温度が低い条件下では、セメントおよび高炉スラグ微粉末の水和反応が遅いため、初期に反応した水

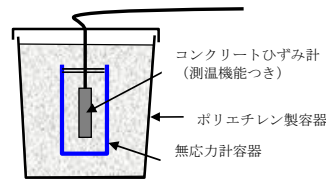


図-5 線膨張係数 供試体概要

表-6 フレッシュ性状試験 試験結果

試験項目	BC 配合			BB 配合		
	夏期	冬期	室内	夏期	冬期	室内
打込み温度(°C)	27.2	12.8	19.5	28.0	—	19.8
スランブ(cm)	15.0	8.0	8.0	12.0	—	9.0
空気量(%)	6.0	4.8	4.0	5.7	—	4.1

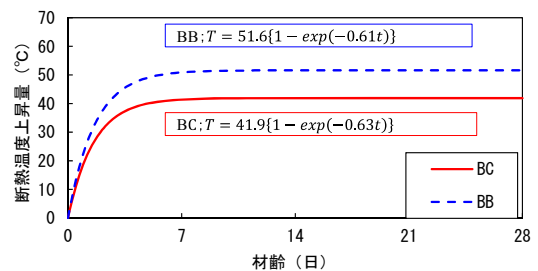


図-6 断熱温度上昇試験結果

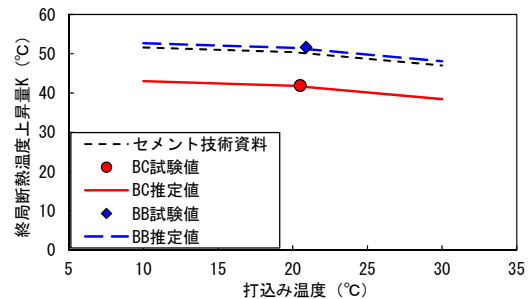


図-7 打込み温度と終局断熱温度上昇量Kの関係

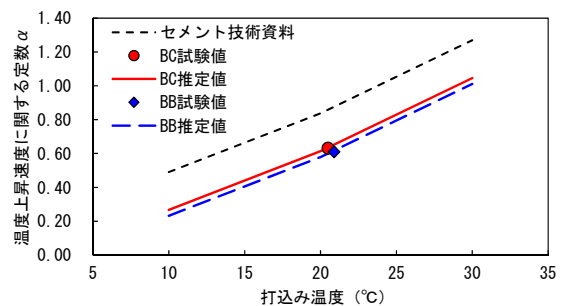


図-8 打込み温度と温度上昇速度に関する定数 α の関係

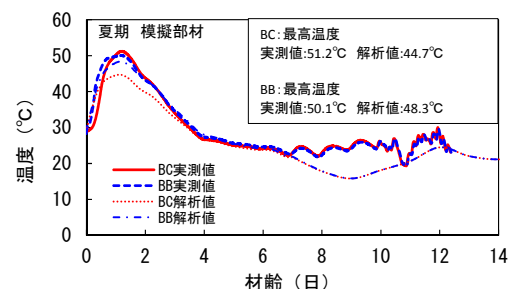


図-9 夏期 実測値と解析値の比較

和物によって水和反応を阻害されにくく、長期にわたり水和反応が継続されたためと推察される。

室内で実施した簡易断熱試験（環境温度 20℃）においては、実測値と解析値はほぼ等しい値であった。

これら結果を踏まえ、BC の断熱温度上昇特性に関する温度依存性について更に検討する必要があると考える。

4.3 線膨張係数

夏期および冬期における施工実験と室内試験より得られた線膨張係数を図-12 に示す。

夏期および冬期における施工実験より得られた線膨張係数は、コンクリートの水和熱による温度ひずみに加え、自己収縮ひずみや SO₃ による膨張ひずみの影響を含む見掛けの線膨張係数である。また、室内試験で得られた線膨張係数は、前述のとおり 28 日間封かん養生を行った後に温度変化を与えて得られたものである。

模擬部材試験と室内試験で得られた線膨張係数を比較すると、模擬部材試験で得られた方が比較的大きな値であった。BC と BB を比較すると、夏期の施工実験の場合では、BC の方が 1.00μ/℃程度大きな値であったが、室内試験の場合では、同程度であった。また、BC における夏期と冬期を比較すると、夏期の方がわずかに小さい値であった。

この結果について、既往の論文⁴⁾に示す自己収縮試験の結果より BC に含まれる SO₃ 量が BB と比較して多いため、若材齢時に生成されるエトリンガイトの量が BC の方が多いことに起因すると推察した。

4.4 圧縮強度試験

標準水中養生および簡易断熱養生を実施した供試体について、積算温度と圧縮強度の関係を図-13 に示す。

図-13 より、BC と BB を比較した場合、積算温度に対して、同程度の強度発現性であることが確認された。

5. BC の温度ひび割れに関する評価

5.1 温度応力解析概要

BC の温度ひび割れの検討として、本論文で用いた配合を対象に、熱特性試験から得られた断熱温度上昇特性、線膨張係数および圧縮強度を入力値とした。また、自己収縮および膨張ひずみの影響を考慮するため、今回対象とする配合と同じ配合で試験を行った既往の文献⁴⁾の自己収縮試験結果（BC ; 材齢 28 日 88.3μ, BB ; 材齢 28 日 92.0μ）を入力値とした。その他、解析に用いた入力値を表-7 に示す。解析モデルは、長さ 10m×幅 0.7m×高さ 2m の壁状構造物を対象とし、1/4 モデルとした。解析モデルを図-14 に示す。また、打設場所は都心部を想定し、打設時期は夏期（8 月打設）および冬期（1 月打設）の 2 水準とした。初期温度に関しては、打設時の外気温とした。ただし、夏期の打込み温度は、温度規制を行う

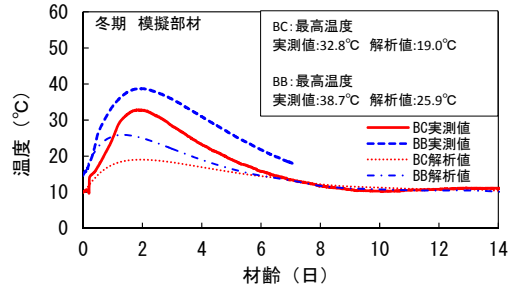


図-10 冬期 実測値と解析値の比較

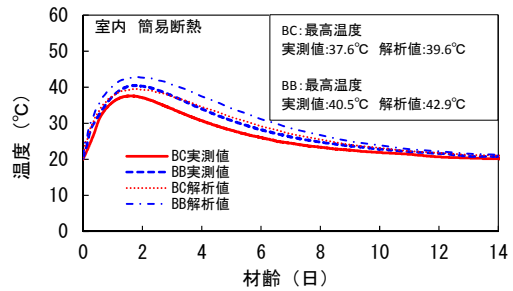


図-11 室内 実測値と解析値の比較

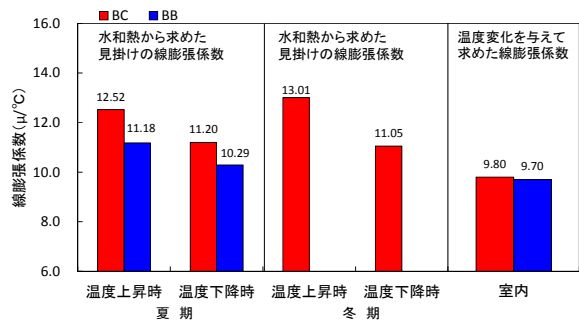


図-12 線膨張係数の比較

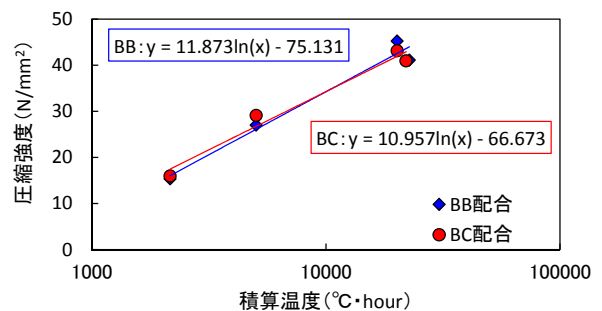


図-13 圧縮強度の比較

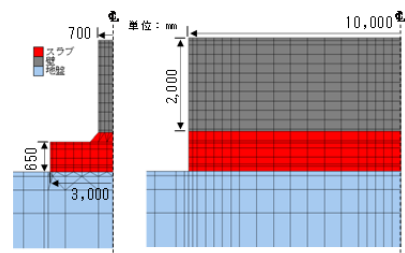


図-14 解析モデル

ことを想定し25℃の条件とした。

5.2 温度ひび割れに関する評価

ひび割れ指数の履歴図を図-15 および図-16 に示す。履歴図は壁部材の表面部および中心部を対象にひび割れ指数が最小となる要素について抽出した。

解析結果より BB 配合と BC 配合とで比較した場合、BC を用いることで一定の温度ひび割れ低減効果が確認できた。また、BC 配合において、夏期の表面部のひび割れ指数はコンクリート打設温度が 25℃の場合において、1.45 であり、ひび割れの発生をできる限り制限できる範囲であった。

表-7 温度応力解析入力値

項目	コンクリート		地盤
	夏期: 25.0℃	冬期: 6.1℃	
初期温度 (°C)	夏期: 25.0℃	冬期: 6.1℃	外気温
比熱 (kJ/kg・°C)	1.15		0.79
密度 (kg/m ³)	2400		2650
熱伝導率 (W/m°C)	2.85		3.45
静弾性係数 E (kN/mm ²)	E=6300 × f _c ^{0.45}		50.0
引張強度 f _t (N/mm ²)	f _t =0.13 × f _c ^{0.85}		1.96
表面熱伝達率 (W/m ² °C)	上面: 14 型枠面 7 日まで型枠: 8 7 日以降脱枠: 14		14
クリープ	ひび割れ制御指針 ⁸⁾ に準拠		
外気温	気象庁データ: 東京都 月平均気温		

6. まとめ

本論では以下に示す知見を得た。

- 1) BC の断熱温度上昇特性は、高炉スラグ微粉末を多量に用いていることから、打込み温度に対する温度依存性が大きい。
- 2) BC の線膨張係数は、SO₃ 量の含有量を高めているため、若材齢時に大きくなる傾向がある。水和反応が収束すると BC の線膨張係数は BB と同等となる。
- 3) 今回実施した都心部の夏期および冬期を想定した温度応力解析により、BC を用いることで通常の BB と比較して、一定の温度ひび割れ低減効果を期待できる可能性がある。

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・シイ、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。

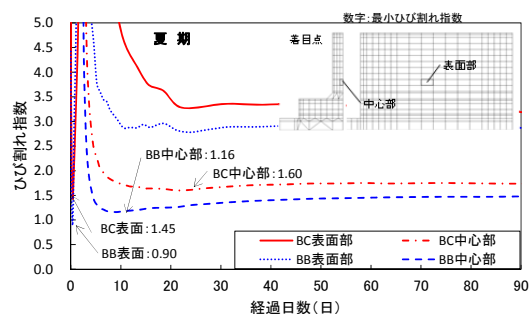


図-15 夏期 温度応力解析結果

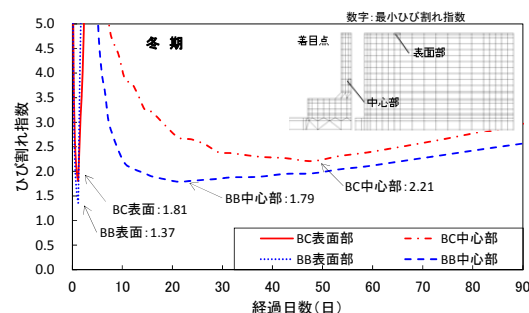


図-16 冬期 温度応力解析結果

参考文献

- 1) 金井亮ほか: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性 (その 2) SO₃ 量と水セメント比がフレッシュ性状と圧縮強度に及ぼす影響, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.207~208, 2011.8
- 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基礎物性 (その 3) SO₃ 量と水セメント比が自己収縮, 乾燥収縮, 中性化に及ぼす影響, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.207~208, 2011.8
- 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) 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梗概集, pp.857-858, 2012.9
- 7) 太平洋セメント(株): セメント総合技術資料 2013 年度版
- 8) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008