

# 報告 高炉スラグ高含有セメントを用いたマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する基礎検討

閑田 徹志\*1・稲葉 洋平\*2・石関 浩輔\*3・小島 正朗\*4

**要旨:** 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリート(BC コンクリート)は、環境負荷低減のため有効であるだけでなく、温度ひび割れ抵抗性にも優れることが期待される。本研究では、BC コンクリートの発熱特性、温度上昇量、温度下降に伴う収縮ひずみ、自己収縮を含む見かけの線膨張係数について実験的に検討するとともに、温度解析によりマスコンクリート部材の温度履歴の再現を試みる。検討の結果、BC コンクリートは温度上昇量、収縮ひずみ、見掛けの線膨張係数が小さく、温度ひび割れ抵抗性に優れることが明らかとなった。また、マスコンクリート部材の温度履歴は、FEM 解析により再現可能であるが、打込み温度の影響の反映に課題が残った。

**キーワード:** 高炉セメント, 高炉スラグ微粉末, 温度ひび割れ, 水和熱, 自己収縮, 線膨張係数

## 1. はじめに

コンクリート材料の環境負荷の多くは、セメント中のクリンカを起源とし、負荷低減にはクリンカ分を副産物混和材料で代替することが有効である<sup>1,2)</sup>。この混和材料としては、高炉スラグ微粉末が代表的で、クリンカを大量置換した結合材によるコンクリートの開発が活発である。しかし、これらコンクリートは、中性化速度が比較的早い為、土に接するなど外気に曝されない場合が多い、大断面のためかぶり厚さを大きくし易いなどの条件から、地下部材により適している。したがって、同コンクリートは、温度ひび割れ抑制にも優れた性能を有することが望ましい。

筆者らは、高炉スラグ高含有セメント（以下、BC セメント）を用いたコンクリート（以下、BC コンクリート）について研究を進めている。BC セメントは、高炉スラグ微粉末の大量使用にてクリンカ使用量を結合材全体の30%程度に抑制し、さらにSO<sub>3</sub>量をも高めることで初期強度と収縮特性の改善を目指した材料である<sup>3)</sup>。発熱量が小さいBCセメントの特徴から、BCコンクリートは温度ひび割れ抑制に優れることが期待できる。しかしマスコンクリート部材に用いたときの温度、ひずみ、応力の発現性状については必ずしも明らかとなっていない点が多い。

これらを受け、本研究では、BC コンクリートを建築用のマスコンクリート部材に適用することを想定し、温度ひび割れ抵抗性について明らかにする。本検討にあたり、実機製造したBCコンクリートを対象に、マスコンクリート部材の発熱特性、温度履歴、温度応力の発現に

ついて実験と解析により検討し、その優れた温度ひび割れ抵抗性を定量的に示すことを目指す。

## 2. 実験計画

### 2.1 実験要因と水準

表-1 に実験要因と水準を、また表-2 はその組み合わせを示す。第一の実験要因である施工時期として、夏期、標準期、冬期の3季節、第二の要因の呼び強度は27~40の3水準、第三のセメント種類としてBCに加え高炉セメントB種(以下BB)、中庸熱ポルトランドセメント(M)の3種類を設定する。表-2にあるように全体で7種類のコンクリートを対象とし、夏期施工ではBCに加えBBとMについて検討する。標準期施工では呼び強度の違い

表-1 実験要因と水準

実験要因		
施工時期	呼び強度	セメント種類
3水準(夏期, 標準期, 冬期)	3水準(27, 33, 40)	3水準(BC, BB, M)

表-2 実験要因の水準組合せ

記号	実験要因			W/B (%)	粗骨材種類	工場	打設日	実験項目			
	施工時期	呼び強度	セメント種類					フレッシュ・圧縮強度	断熱温度上昇試験	模擬部材実験	
S-E33	夏期	33	BC	42	石灰石 碎石	工場 A	8/22	○	-	○	
S-BB33			BB	43.5							
S-M33			M	46.5							
F-E40	標準期	40	BC	38	石灰石 碎石	工場 B	11/11	○	-	○	
F-E33				33							45
F-E27				27							55
W-E33	冬期	33		42		工場 A	1/18				

\*1 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産 Gr. グループ長 Ph.D (正会員)

\*2 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産 Gr. 主任研究員 修士(工学)

\*3 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産 Gr. 研究員 修士(工学) (正会員)

\*4 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部 主任研究員 修士(工学) (正会員)

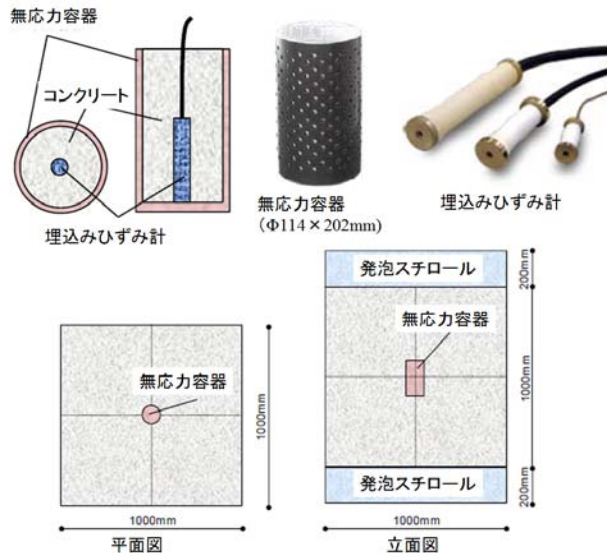


図-1 柱模擬部材実験の概要

による影響把握, また冬期施工は BC の呼び強度 33 のみとし, 他季節と比較して施工時期の違いが及ぼす影響について明らかとする。コンクリートは全て実機製造で, 東京都区内の A, B の 2 工場から出荷する。

## 2.2 材料および調査

使用する材料を表-3 に, また調査一覧を表-4 にまとめる。使用セメントの物性は表-5 のとおりである。BCセメントは, JIS R 5211 に定める高炉セメント C 種の規格を満足する。表-4 の調査は, スランプ 18cm, 空気量 4.5% の仕様で各呼び強度を満足するよう出荷工場での試し練りで定めてある。ただし, BB および M は出荷工場の標準配合である。

## 2.3 実験項目

実験項目は, 表-2 にあるフレッシュ・圧縮強度試験, 断熱温度上昇試験, 柱模擬部材実験である。フレッシュ試験は出荷時に実施し, 圧縮強度は材齢 28 日の標準養生強度で代表する。標準養生供試体は出荷時に採取する。

断熱温度上昇試験は, 打込み温度 20℃ を目標として BC コンクリートのみで実施し, S-E33 と同一の材料・調査を対象として, T 社製の断熱熱量計を用い文献4) に準拠して計測を行う。この試験は 20℃ 環境の試験室で練り混ぜた試料を用いて実施し, 模擬部材(S-E33)との打込み温度が異なることによる影響は後述のように別途補正する。BB と M の断熱温度上昇については文献5) (以下, AIJ マスコン指針) に示される断熱温度上昇量算定式(AIJ 式)により求め, 比較検討するものとする。

柱模擬部材実験では, すべてのコンクリート調査を対象に図-1 および写真-1 の柱模擬部材 (1 m 角) をそれぞれ 1 体ずつ製作し, 温度とひずみを計測する。模擬試験体の内部には, 無応力容器に収めたひずみ変換器(ひず



写真-1 実験で用いた柱模擬部材の例

表-3 コンクリート材料

項目	記号	種類	物性値	備考
セメント	C	BC(高炉セメントC種適合, 高炉スラグ微粉末4000プレーン)	密度 2.98g/cm <sup>3</sup>	-
		高炉セメントB種	密度 3.04g/cm <sup>3</sup>	-
		中庸熟ポルトランド	密度 3.21g/cm <sup>3</sup>	-
細骨材 <sup>*1</sup>	S1	山砂(千葉県産)	表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup>	A工場で使用
	S2	石灰石砕砂(栃木県産)	表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup>	
細骨材 <sup>*2</sup>	S1'	山砂(千葉県産)	表乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup>	B工場で使用
	S2'	砂岩砕砂(栃木県産)	表乾密度 2.63g/cm <sup>3</sup>	
粗骨材	G	石灰石砕石2005(埼玉県産)	表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup>	A工場BC用
	G'	砂岩砕石2005(栃木県産)	表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup>	Mに使用
	G''	石灰石砕石2005(北海道産)	表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup>	B工場で使用
混和剤	Ad	BCセメント用 高機能AE減水剤標準型(試作品1)	密度 1.08g/cm <sup>3</sup>	標準期・冬期に使用
		BCセメント用 高機能AE減水剤 遅延型(試作品2)	密度 1.09g/cm <sup>3</sup>	夏期BCに使用
		AE減水剤 遅延型I種	密度 1.09g/cm <sup>3</sup>	BB, MIに使用

\*1 質量比でS1:S2=5:5の混合使用, 混合密度2.62g/cm<sup>3</sup>  
 \*2 質量比でS1':S2'=3:1の混合使用, 混合密度2.62g/cm<sup>3</sup>

表-4 調査

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						混和剤 (対セメント質量比)
			水	セメント <sup>*1</sup>		細骨材1	細骨材2	粗骨材	
				クリンカ	BFS				
S-E33	42	44.0	178	136	288	366	366	962	0.90
S-BB33	43.5	42.6	186	248	180	281	421	974	0.80
S-M33	46.5	45.4	176	379	-	394	394	960	1.20
F-E40	38	39.2	185	156	331	467	155	996	0.65
F-E33	45	43.1	175	124	265	548	184	996	0.70
F-E27	55	46.4	166	97	205	626	208	996	0.75
W-E33	42	44.8	177	135	287	374	374	948	1.00

\*1 BB, BCの場合は, クリンカー起源分と高炉スラグ分(BFS)とに分けて表記

み計)および温度計を柱模擬部材中に埋設し, 打込み直後から測定を行う。

## 3. 実験結果

### 3.1 フレッシュ試験および圧縮強度試験の結果

コンクリートのフレッシュ結果および圧縮試験結果について表-6, 図-2 にそれぞれ示す。フレッシュ性状はスランプ 18±2.5cm, 空気量 5±1.5% の目標範囲内となった。空気量については打込みまでのロス 0.5% を見込んだ値である。図-2 の BC コンクリートの標準期の強度は, 通常のコンクリートと同様に C/W と線形関係にあ

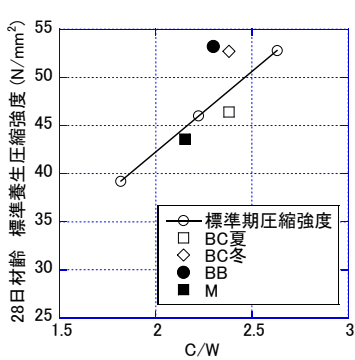


図-2 標準養生強度に及ぼす C/W の影響

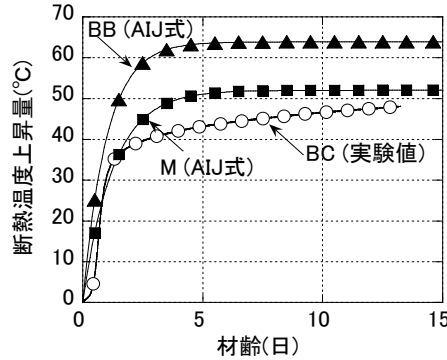


図-3 断熱温度上昇試験の結果

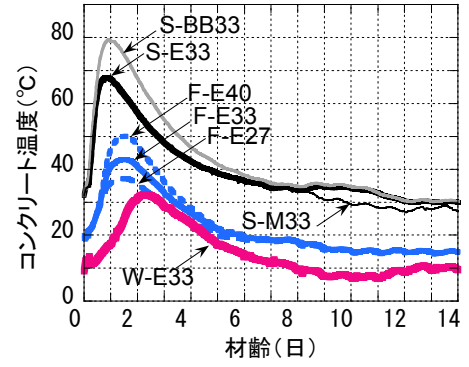


図-4 柱模擬部材の温度履歴

り, BC の夏期および M とほぼ同等の強度発現となった。冬期施工の BC と BB の強度はこれより高い結果となった。これらから, BC は打込み時期の外気温により標準養生強度が変動する可能性が示唆された。

### 3.2 断熱温度上昇試験の結果

S-E33 にて実施した断熱温度上昇試験の結果を図-3 に示す。図中には, AIJ 式による S-BB33, S-M33 の算定結果も併せて示している。BC の断熱温度上昇量の終局値は, BB に比べ 15°C 程度低く, M と同等である。

### 3.3 模擬部材実験の結果

模擬部材実験の結果を表-7 にまとめて示す。柱模擬部材の中心位置におけるコンクリート温度の経時変化を図-4 に, 各柱模擬部材の温度特性値の比較を図-5 に示

す。図-5 の夏期のデータを比較すると, BC(S-E33)は, BB(S-BB33)よりも最高温度, 温度上昇量とも 10°C 以上低く, M(S-M33)とは温度履歴がほとんど重なっている。この傾向は, 図-3 に示した断熱温度上昇と一致している。

図-6 は, 各柱模擬部材で計測されたひずみ挙動をまとめたものである。計測されたひずみ挙動は, 図-4 の温度変化に伴う温度ひずみと自己収縮ひずみの成分にて主として構成され, 各部材で大きく異なっている。図-7 は, ひずみ挙動を表す特性値として, 最大膨張ひずみ, 収縮ひずみ幅, 最小ひずみについて各部材の結果を比較したものである。最大膨張ひずみは, 最高温度に対応して膨張ひずみが最大となった時点で定義した。最小ひずみは, 最高温度からコンクリート温度が降下して最低とな

表-5 セメントの品質

品質	高炉スラグ高含有 (BC)		高炉B種 (BB)		中庶熱 (M)		
	試験成績	規格値 (JIS R 5211 C種)	試験成績	規格値 (JIS R 5211 B種)	試験成績	規格値 (JIS R 5211 B種)	
密度 (g/cm³)	2.98	-	3.04	-	3.21	-	
比表面積 (cm²/g)	4170	≥ 3300	3800	≥ 3000	3170	≥ 2500	
凝結 (h-min)	始発3-55 終結6-10	始発60min以上 終結10h以下	始発3-03 終結4-21	始発60min以上 終結10h以下	始発2-16 終結3-24	始発60min以上 終結10h以下	
安定性 (バット法)	良	良	良	良	良	良	
圧縮強度 (N/mm²)	材齢3日	≥ 7.5	21.6	≥ 10.0	21.5	≥ 7.5	
	材齢7日	≥ 15.0	37.1	≥ 17.5	30.8	≥ 15.0	
	材齢28日	≥ 40.0	64.6	≥ 42.5	56.1	≥ 32.5	
水和熱 (J/g)	材齢7日	-	-	-	272	≤ 290	
	材齢28日	-	-	-	322	≤ 340	
化学成分	酸化マグネシウム (%)	5.0	≤ 6.0	3.4	≤ 6.0	0.86	≤ 5.0
	三酸化硫黄 (%)	3.6	≤ 4.5	2.2	≤ 4.0	2.25	≤ 3.0
	強熱減量 (%)	0.3	≤ 5.0	1.3	≤ 5.0	0.66	-
	塩化物イオン (%)	0.006	-	0.011	-	0.014	≤ 0.02
錳物組成	けい酸三カルシウム (%)	-	-	-	-	0.011	≤ 50
	アルミン酸三カルシウム (%)	-	-	-	-	0.011	≤ 8

表-7 柱模擬部材実験の結果概要

試験体	温度計測				ひずみ計測		見掛けの線膨張係数 (μ/°C)
	平均外気温 (°C)	最高温度 (°C)	最高温度到達時間 (hr)	温度上昇量 (°C)	最大膨張ひずみ (μ)	収縮ひずみ (μ)	
S-E33	29.0	67.9	20.0	35.9	357	258	6.5
S-BB33	29.0	79.4	22.0	47.4	311	345	8.2
S-M33	28.3	67.6	20.1	35.6	386	363	9.2
F-E40	12.3	50.1	37.2	30.1	387	321	6.4
F-E33	12.3	42.9	33.6	23.9	353	276	7.3
F-E27	12.3	37.2	34.5	18.2	322	234	7.7
W-E33	6.0	32.3	54.7	23.3	362	190	5.9

表-6 フレッシュ試験および強度試験の結果

試験体	フレッシュ試験結果					標準養生28日材齢強度
	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	単位容積質量 (kg/L)	ブリーディング量 (cm³/cm²)	
S-E33	16.5	4.0	32	2.33	-	46.4
S-BB33	16.5	4.3	32	2.31	-	53.2
S-M33	19.5	6.1	32	2.26	0.05	43.6
F-E40	18.5	5.3	20	2.27	0.16	52.8
F-E33	20.5	4.9	19	2.28	0.20	46.0
F-E27	19.5	4.8	19	2.29	0.18	39.2
W-E33	19.5	4.6	9	2.32	-	52.7

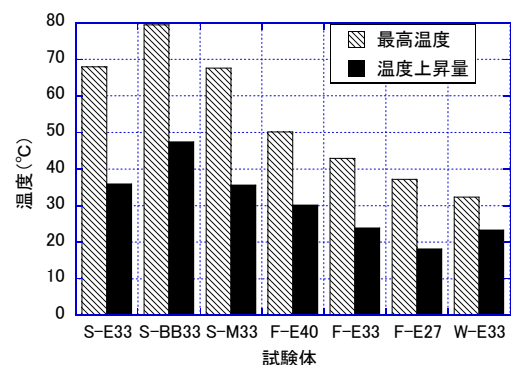
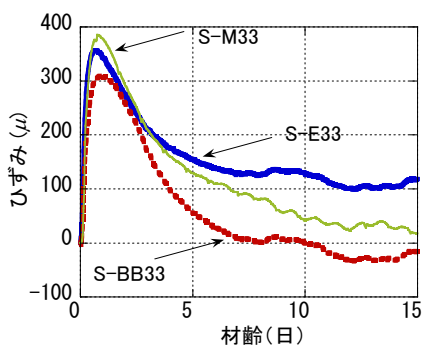
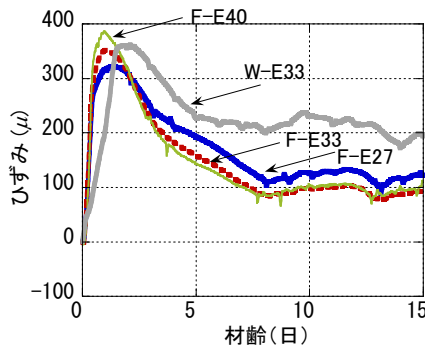


図-5 柱模擬部材の温度比較



(a) 夏期施工



(b) 標準期と冬期施工

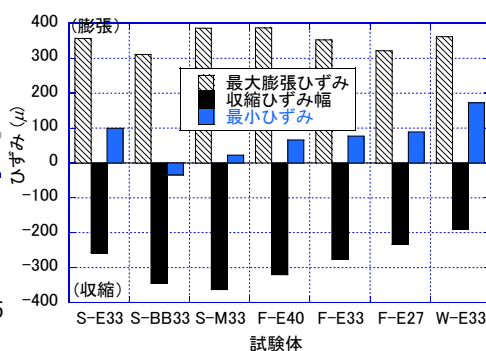
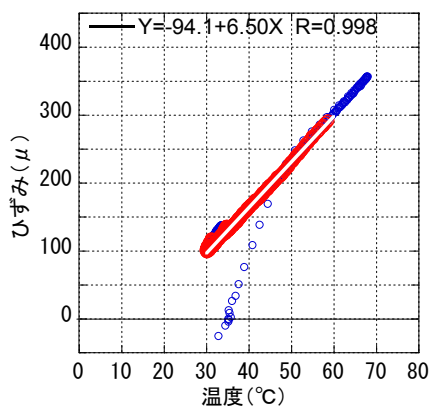
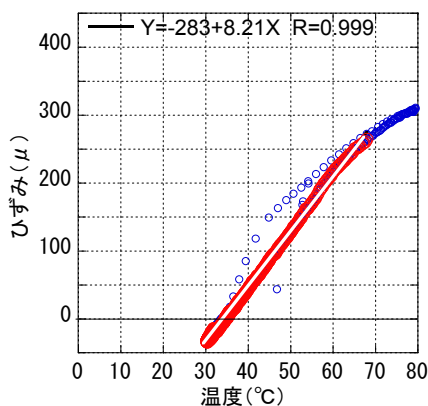


図-7 柱模擬部材のひずみ挙動の比較

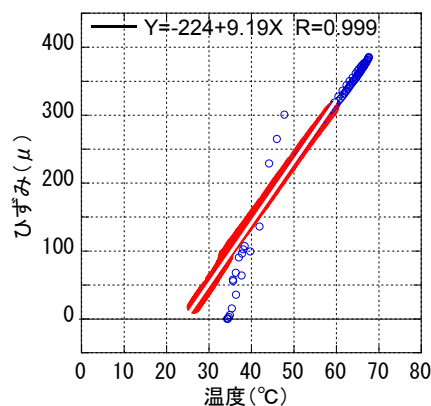
図-6 柱模擬部材のひずみ履歴



(a) S-E33



(b) S-BB



(c) S-M33

図-8 見かけの線膨張係数の同定結果例

った点のひずみである。収縮ひずみ幅は、最小ひずみと最大膨張ひずみの差で表した。収縮ひずみ幅に相当する変形が外部拘束されることで温度応力が発生することから、この値が小さいほど温度応力の発現が小さいと考えられ、BC コンクリートは、収縮ひずみ幅がBB, M より全体に小さく、温度応力が低く温度ひび割れ抵抗性に優れる傾向が予想される。

#### 4. 考察

##### 4.1 見掛けの線膨張係数

3.3 節に述べた模擬部材実験の温度とひずみの計測結果から、温度応力の発現に大きな影響を与える温度降下時の線膨張係数を同定した。前述のように、計測した図-6のひずみは、温度ひずみに加え自己収縮ひずみを含むので、ここで得られるのは、厳密な意味での線膨張係数 $\alpha$ でなく、次式に示す自己収縮の影響を含む見かけの線膨張係数 $\alpha'$ である。

$$\Delta \varepsilon_d = \Delta \varepsilon_{temp} + \Delta \varepsilon_{as} \approx \Delta T \times \alpha + \Delta \varepsilon_{as} \approx \alpha' \times \Delta T \quad (1)$$

ここに、 $\Delta \varepsilon_d$ は収縮ひずみの変化量、 $\Delta \varepsilon_{temp}$ は温度ひずみの変化量、 $\Delta \varepsilon_{as}$ は自己収縮ひずみの変化量、 $\Delta T$ は温度変

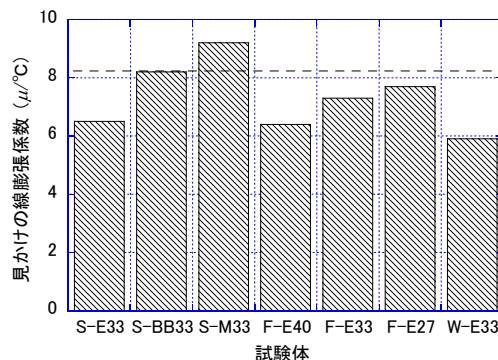


図-9 見掛けの線膨張係数の比較

化量(°C)である。 $\alpha'$ は、一定の温度降下に伴う収縮変形を支配し、温度応力の発現に大きな影響を与える。 $\alpha'$ が小さいコンクリートほど温度ひび割れ抵抗性が高くなる。同定に際しては、温度とひずみの関係に線形性が強まる最高温度に達してから24時間後以降の温度降下域で回帰した。

図-8に $\alpha'$ の同定結果例、また図-9には得られた結果をまとめて示す。これらからBBに比べBCコンクリートの $\alpha'$ は小さい傾向にあることがわかる。BBとBCに用いた粗骨材は異なるが同じ石灰岩であり、この相違による影響は支配的でないと考えた。高炉セメントコンクリ



ートの線膨張係数はポルトランドセメントコンクリートに比べ大きいことが報告されており<sup>6)</sup>、高炉スラグの混和率が大きくなるほどこの傾向が顕著になることも予想されたが、ここでは反対の結果となった。これは、自己収縮が一般に大きいとされるBBに比べ<sup>7)</sup>、BCコンクリートでは小さいことが一因と考えられる。これを示唆する現象として、図-5でBBに比べBCコンクリートの最高温度が低いにも関わらず図-7の最大膨張ひずみは大きい傾向を示していることが挙げられる。

#### 4.2 温度解析

コンクリートの断熱温度上昇曲線より柱模擬部材の温度履歴の解析を行った。解析は、3次元有限要素法によるマスコンクリート温度応力計算用の市販プログラムを用い、対象は呼び強度33のBC、BB、Mとした。解析条件は、表-8に示すように、主としてAIJマスコン指針に従って設定した。断熱温度上昇曲線は、F-E33については図-3の試験値、BBとMはAIJ式を用いた。S-E33とW-E33については、図-3の実験値をAIJ式(表-8)で $K$ と $\alpha$ について回帰した後、打込み温度の影響についてAIJ式マスコン指針のBB用温度補正值 $q$ (夏期1.409, 冬期0.565)を $\alpha$ に乗じて修正したものを使用した。

図-10は断熱温度上昇曲線の回帰と補正の結果である。BC試験値をAIJ回帰式は必ずしも精度よく再現しておらず、BCの断熱温度上昇曲線のモデル化が今後の課題である。

図-11は温度解析の結果である。断熱温度上昇の試験データを用いたF-E33では実験と解析はよい一致を示し

表-8 温度解析の条件

項目	入力値	備考	
外気温	実測値	—	
初期温度	実測値	—	
断熱温度上昇式	S-BB33 S-M33	AIJ式 $Q=K(1-e^{-\alpha t})$	AIJマスコン指針参照
	F-E33	断熱温度上昇試験値	—
	S-E33 W-E33	断熱温度上昇試験値をAIJ式で回帰、さらに $\alpha$ を補正	AIJマスコン指針参照
熱定数	比熱 (kJ/kg°C)	1.15	AIJマスコン指針参照
	熱伝導率 (W/m°C)	2.6	
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2400		
熱伝達率	上面 (W/m <sup>2</sup> h°C)	12.5	AIJマスコン指針参照
	側面 (合板) (W/m <sup>2</sup> h°C)	7	

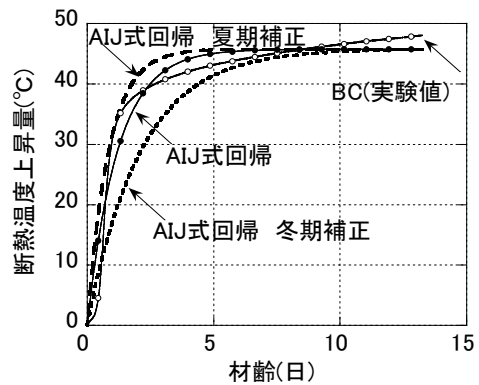


図-10 断熱温度上昇データの補正 (BC)

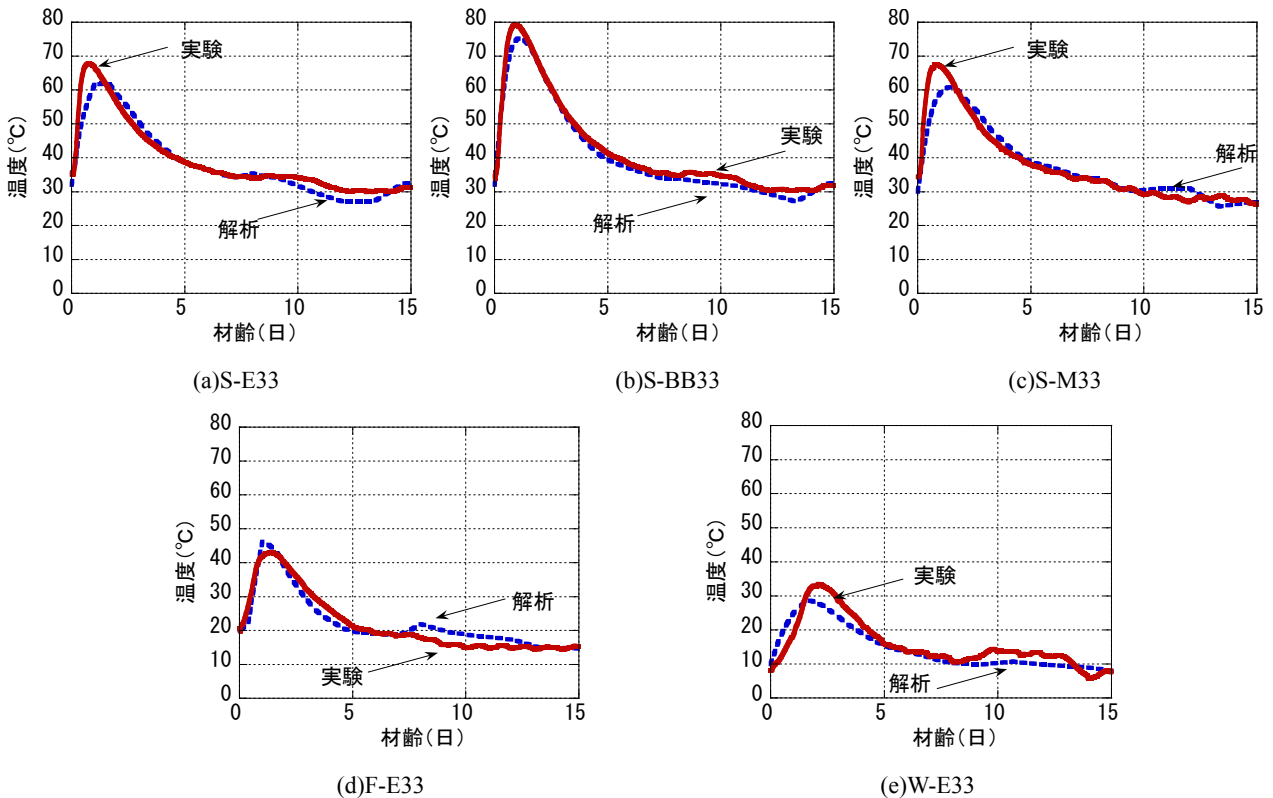


図-11 温度解析の結果

ているが、S-E33 および W-E33 では傾向が異なっている。また、図-12 は実験値と解析値に及ぼす平均外気温（柱模擬部材の打込み後 14 日間）の影響を表しており、実験値と解析値の差の絶対値は平均外気温によって異なり、高温となる夏期には BC と M で大きくなっている。

以上の結果によれば、BC コンクリートの柱模擬部材の温度解析は、断熱温度上昇試験のデータを直接用いた標準期の場合には精度よく温度履歴を再現しているが、夏期と冬期では温度上昇勾配や最高温度が再現できていない。これらの原因のひとつとして、図-10 に示した断熱温度上昇曲線のモデル化が不十分であることが考えられる。すなわち、標準期の断熱温度上昇曲線の立ち上がりの勾配が回帰式と差が大きく、この回帰式を元に打ち込み温度の影響を補正して実施した冬期と夏期の解析結果は、実験との乖離が大きくなった可能性が考えられる。

## 5. まとめ

本研究では、高炉スラグ高含有セメント(BC)によるマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性について実験的に検討し、次の結論を得た。

- (1) BC コンクリートを用いたマスコンクリート部材の水和発熱による最高温度、温度上昇量は、高炉 B 種セメント(BB)コンクリートより 10℃以上低く、中庸熱セメント(M)コンクリートと同等であった。
- (2) BC コンクリートによるマスコンクリート部材では、前記水和発熱が小さいことに加え、温度下降による収縮ひずみ幅が小さいため、温度ひび割れ抵抗性に優れることが予想される。
- (3) 見かけの線膨張係数は、温度応力の発現に大きな影響を与え、この値が小さいほど温度ひび割れ抵抗性が高くなる傾向となるが、BC コンクリートでは BB と比較して顕著に小さくなった。
- (4) BC コンクリートによるマスコンクリート部材の温度履歴に対する FEM 解析において、同条件で実施した断熱温度上昇の試験データを用いた標準期の場合には実験値とよく一致したが、夏期と冬期の条件では、打込み温度が異なる影響を AIJ マスコン指針に基づく補正だけでは精度よく反映できず、解析の精度に課題が残った。

**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

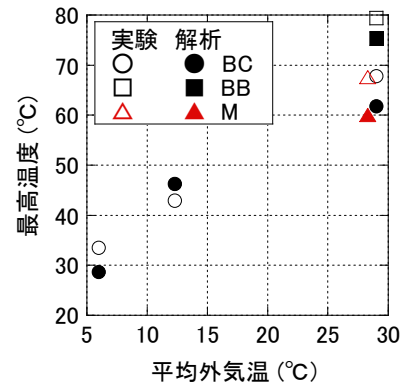


図-12 温度解析の精度

業/実用化開発/エネルギー・CO2 ミニマム (BC) 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) 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る。また、実験に際し、ご協力を賜ったアサノコンクリート (株)、上陽レミコン (株) の関係各位に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) コンクリート工学協会：環境時代におけるコンクリートイノベーションーコンクリート構造物の環境性能に関する研究委員会報告書，2008.8
- 2) コンクリート工学協会：混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告，2010.9
- 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，Vol. 48, No. 9, pp.69-73, 2010.6
- 4) 日本コンクリート工学協会：品質評価試験方法研究委員会報告書，pp.62-73, 1998.12
- 5) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説，2008.2
- 6) 細田暁ほか：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの力学特性に対する微視的溫度応力の影響，土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.549-561, 2007.10
- 7) 久保証則ほか：高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 19, No. 1, pp.763-768, 1997.6