

論文 中庸熱セメントを基材とするスラグ混和コンクリートの諸物性

東 洋輔^{*1}・森 寛晃^{*1}・三谷 裕二^{*1}・谷村 充^{*2}

要旨: 中庸熱ポルトランドセメントを基材とし、高炉スラグ微粉末の混和割合を B 種の範囲で高めたコンクリートについて、スラグの比表面積や混和割合が断熱温度上昇特性、力学特性および自己収縮特性等の諸物性に及ぼす影響を把握し、普通ポルトランドセメントを基材とする場合と比較検討した。マスコンクリート部材が受ける熱履歴下での物性値を用いて 3 次元 FEM 温度応力解析を行い、検討処方の温度ひび割れ抵抗性を評価した。その結果、中庸熱ポルトランドセメントを基材とすることにより、普通ポルトランドセメントを基材とする場合よりも温度ひび割れ抵抗性に優れた処方が得られる可能性が示された。

キーワード: 中庸熱ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、熱履歴、自己収縮ひずみ、温度応力解析

1. はじめに

近年、低炭素化社会の構築に向けた取組みの一環として、高炉スラグやフライアッシュなどの副産物を混和材として有効利用するセメント・コンクリートの研究開発が盛んに行われている。従来一般的に使用されてきた高炉セメント B 種以外に、JIS 品質規格内でスラグの比表面積や混和割合、化学成分等を調整した低発熱型高炉セメント^{1),2)}がある。スラグ混和割合を高めた高炉セメントは、マスコンクリート向けとしてダムや大型橋脚への適用実績があり、コンクリート諸物性の把握や温度ひび割れ抵抗性の評価が行われてきた^{例えは 3),4)}。ここ数年は、C 種相当の高炉スラグ高含有セメントについて、フレッシュ性状の確保や強度発現性の改善等を目的とする材料・配(調)合設計が種々検討され、実大部材レベルの施工実験も行われている^{例えは 5),6)}。

これまで低発熱型高炉セメントは、普通ポルトランドセメントを基材とした処方が多く、低発熱系のポルトランドセメントを基材として用いた検討例は少ない。

そこで本研究では、中庸熱ポルトランドセメントを基材とし、高炉スラグ微粉末の混和割合を変化させたコンクリートについて、スラグの比表面積や混和割合が断熱温度上昇特性、力学特性および自己収縮特性等の諸物性に及ぼす影響を把握し、普通ポルトランドセメントを基材とする場合と比較検討した。さらに、この種のセメントの適用先として、マスコンクリート部材を想定した熱履歴下での物性値を用いて 3 次元 FEM 温度応力解析を行い、温度ひび割れ抵抗性を評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料とセメント処方

使用材料を表-1 に、セメント処方を表-2 に示す。セメントは、市販の中庸熱ポルトランドセメント(以下、M と称する)および少量混合成分を含まない研究用の普

表-1 使用材料

種類	名称	記号	備考
セメント	中庸熱ポルトランドセメント	M	密度: 3.21g/cm ³ , SO ₃ =2.10%, 比表面積: 3210cm ² /g
	普通ポルトランドセメント(研究用)	N	密度: 3.16g/cm ³ , SO ₃ =2.05%, 比表面積: 3470cm ² /g
混和材	高炉スラグ微粉末 4000	B	密度: 2.91g/cm ³ , SO ₃ =0.26%, 比表面積: 4450cm ² /g
	高炉スラグ微粉末 3000	B (3000)	密度: 2.92g/cm ³ , SO ₃ =0.04%, 比表面積: 3410cm ² /g
	天然無水石こう	AH	密度: 2.83g/cm ³ , SO ₃ =54.4%, 比表面積: 3930cm ² /g
細骨材	掛川産陸砂	S	表乾密度: 2.59g/cm ³ , 吸水率: 1.50%
粗骨材	桜川産碎石2005	G	表乾密度: 2.83g/cm ³ , 吸水率: 0.66%
混和剤	AE減水剤	Ad1	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
	AE剤	Ad2	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

表-2 セメント処方

水準名	セメント種類	B比表面積 (cm ² /g)	結合材割合 (%)			全SO ₃ 量 (%)
			C	B	AH	
MB60	M	4450	35.9	60.0	4.1	3.00
MB(3000)60		3410	35.8	60.0	4.2	
MB45		4450	51.5	45.0	3.5	
MB(3000)45		3410	51.4	45.0	3.6	
NB60	N	4450	35.8	60.0	4.2	
NB(3000)60		3410	35.9	60.0	4.1	
NB45		4450	51.4	45.0	3.6	
NB(3000)45		3410	51.5	45.0	3.5	
M	M	-	100	-	-	2.10

通ポルトランドセメント(以下、N と称する)を、高炉スラグ微粉末は比表面積の異なる 2 種類(4000cm²/g 級と 3000cm²/g 級)を使用した。試験因子は基材セメント種類、高炉スラグ微粉末の比表面積および混和割合(45%と 60%)とした。スラグ混和処方は、いずれも結合材中の全 SO₃ 量が 3% になるよう無水石こう(以下、AH と称する)を添加した。なお、比較として、スラグを混和しない M 単味の試験を実施した。

2.2 コンクリート配(調)合

コンクリート配(調)合を表-3 に示す。全ての配(調)

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所第 2 研究部 TBC チーム 研究員 工修 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所第 2 研究部 CS チーム リーダー 工博 (正会員)

合で水結合材比を 50%，細骨材率を 45%とした。AE 減水剤使用量は $P \times 0.25\%$ (P は結合材量) に固定し、目標スランプ $12.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量 $4.5\% \pm 1.0\%$ になるよう、単位水量および AE 剤使用量で調整を行った。コンクリートの練混ぜは、強制練りミキサ (パン型、公称容量 55L) を用いて、室温 20°C 、相対湿度 80% の恒温室内で行った。

2.3 試験項目

(1) フレッシュ性状

スランプ、空気量、コンクリート温度の他、JIS A 1147「コンクリートの凝結試験方法」に準拠して、始発および終結時間を測定した。

(2) 断熱温度上昇特性

コンクリートの断熱温度上昇試験は、JCI-SQA3「コンクリートの断熱温度上昇試験方法(案)」に準拠して行い、打込み温度は 20°C 、測定期間は約 28 日間とした。コンクリート試料量は 35L とした。

(3) 強度特性

強度特性については、圧縮強度、静弾性係数および割裂引張強度を測定した。圧縮強度試験は JIS A 1108「コンクリートの圧縮試験方法」に、静弾性係数は JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に、割裂引張強度は JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠した。供試体寸法は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 、供試体数は各材齢で 3 本とした。

(4) 自己収縮特性

コンクリートの自己収縮ひずみ測定には、低弾性型(見かけの静弾性係数約 40N/mm^2) の埋込み型ひずみ計を使用した。供試体寸法は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 、供試体数は 2 本とした。型枠および供試体の作製は JCI-SAS2「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法(案)」を参考にした。なお、ひずみ算出の起点は凝結始発時とした。

2.4 養生方法

本検討では、マスコンクリート部材を想定した熱履歴下でのスラグ混和コンクリートの諸物性を把握することを主目的とした。

コンクリートに与えた熱履歴パターンは、各配(調)合で実測した断熱温度上昇特性を用いて 3 次元 FEM 温度解析を行い、壁部材(モデル: 高さ 4m、厚さ 2m および長さ 10m の壁部材を想定) 中心部の熱履歴として導出した。温度解析に用いた断熱温度上昇量以外の物性値は文献⁷⁾を参考とし、型枠および天端面の熱境界条件については、熱伝達率は材齢 7 日まで $8\text{W/m}^2\text{C}$ 、材齢 7 日以後は $14\text{W/m}^2\text{C}$ とし、外気温は 20°C 一定とした。

以下、2.3(3)および(4)の試験項目における養生方法を詳述する。力学特性では、コンクリート打込み後、直ち

表-3 コンクリートの配(調)合

配(調)合	単位量 (kg/m ³)						AE 減水剤 (P×%)	AE 剤 (P×%)	
	W	結合材 (P)				S			G
		C	B	B (3000)	AH				
MB60	156	M:112	187	—	13	810	1019	0.25	0.0055
MB(3000)60	156	M:112	—	187	13	811	1011		0.0030
MB45	158	M:163	142	—	11	810	1019		0.0050
MB(3000)45	156	M:160	—	140	11	814	1025		0.0040
NB60	158	N:113	190	—	13	808	1011		0.0055
NB(3000)60	157	N:113	—	188	13	810	1013		0.0040
NB45	160	N:165	144	—	11	805	1007		0.0050
NB(3000)45	158	N:163	—	142	11	809	1012		0.0040
M	158	M:316	—	—	—	808	1016		0.0025

※W/P=50%, s/a=45%とする。

表-4 フレッシュ性状の結果

配(調)合	SL (cm)	Air (%)	CT ($^\circ\text{C}$)	凝結時間	
				始発 (h-min)	終結 (h-min)
MB60	14.0	4.5	21.0	6-35	12-45
MB(3000)60	10.5	3.5	21.3	6-55	12-35
MB45	10.0	4.9	21.0	7-25	11-05
MB(3000)45	10.0	5.0	21.7	7-15	11-15
NB60	11.0	4.8	21.7	6-40	10-35
NB(3000)60	13.5	3.9	21.4	6-35	9-25
NB45	10.0	4.7	21.8	6-20	8-35
NB(3000)45	9.5	5.0	21.4	6-55	9-20
M	10.0	4.9	22.2	7-10	9-15

に供試体を恒温恒湿槽内に静置し、約 4 週間、所定の熱履歴を与えた。所定の材齢で供試体を取り出し、1~2 時間 20°C 恒温室内に静置してから脱型を行い、試験に供した。次に、コンクリートの自己収縮ひずみは、コンクリート打込み後、直ちに供試体を恒温恒湿槽内に静置し、約 3 週間、所定の熱履歴を与えた。槽内温度がほぼ 20°C になった時点で脱型し、封緘状態とするためにアルミテープを貼り付け、 20°C 恒温室内へ移動した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュ性状の結果を表-4 に示す。目標スランプおよび空気量を満足する単位水量は、 $156 \sim 160\text{kg/m}^3$ の範囲であった。スラグ混和処方(以下、MS 処方と称す)の凝結始発時間は、基材セメント種類によらず約 6~7 時間であったが、M を基材とするスラグ混和処方(以下、NS 処方と称す)の終結時間は、M よりも 2~3 時間遅延した。一方、N を基材とするスラグ混和処方(以下、NS 処方と称す)の終結時間は、MS 処方と比べて遅延は少ない傾向であった。いずれの処方でも、スラグ混和割合 60%の方が 45%より遅延する傾向であった。

3.2 断熱温度上昇特性

MS 処方および NS 処方の断熱温度上昇量を、それぞれ図-1 および図-2 に示す。MS 処方の断熱温度上昇量は、M を基準としてスラグ混和割合 60%では減少したが、混和割合 45%では逆に増加した。スラグ比表面積は 4000 級の方が 3000 級よりも断熱温度上昇量は大きかった。一方、NS 処方は断熱温度上昇速度が MS 処方よりも大きく、

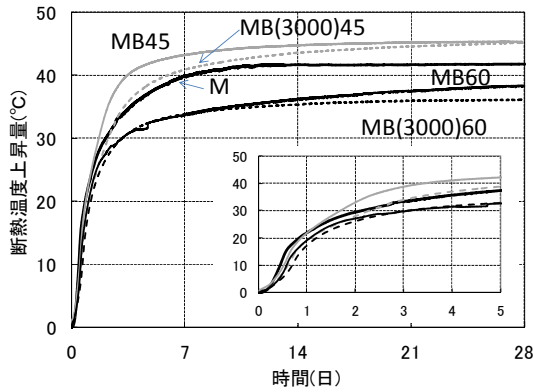


図-1 MS 処方の断熱温度上昇量

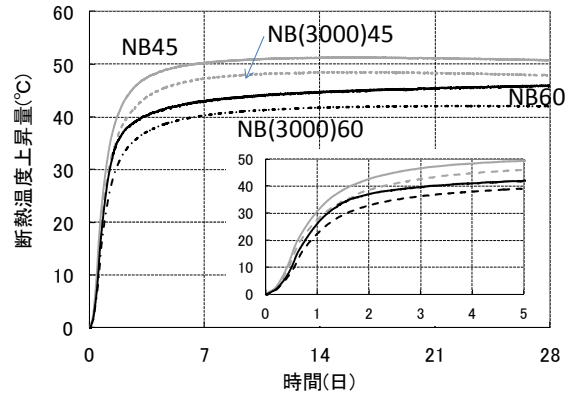


図-2 NS 処方の断熱温度上昇量

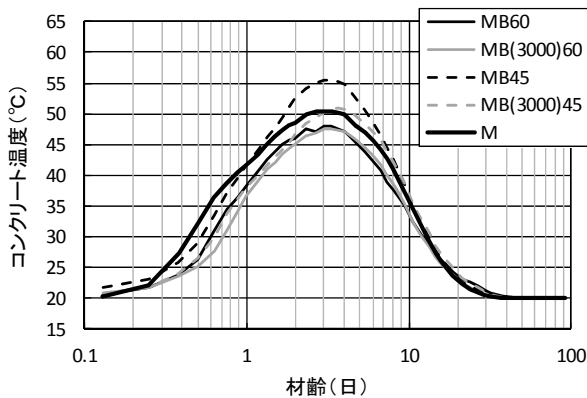


図-3 解析より算出した MS 処方の温度履歴

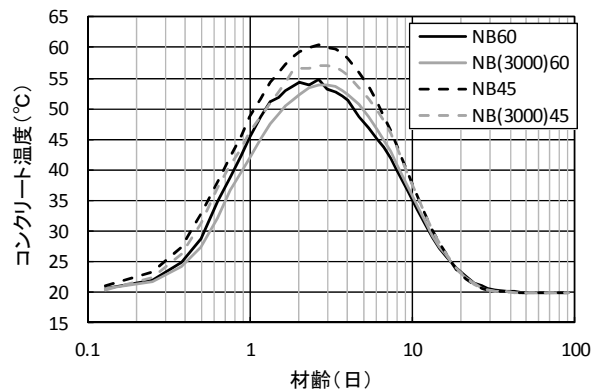


図-4 解析より算出した NS 処方の温度履歴

終局断熱温度上昇量も大きい。但し、スラグ混和の影響は概ね MS 処方と同じ傾向であった。

次に、3次元 FEM 温度解析により算出した熱履歴を、それぞれ図-3 および図-4 に示す。いずれの配(調)合においても、材齢 3 日付近で最高温度に達し、材齢 28 日付近で 20°C に収束した。

3.3 力学特性

20°C 環境下および熱履歴下のコンクリートの圧縮強度を、それぞれ図-5 および図-6 に示す。図-6 に示す強度比とは、(熱履歴下の圧縮強度) / (20°C 環境下の圧縮強度) を表し、熱履歴下の強度発現性を評価する指標として用いた。強度比を検討する材齢は 28 日とし、熱履歴を受ける場合は、式(1)に示す有効材齢で 28 日の時点とした。有効材齢 28 日の圧縮強度は、実測値を用いて最小二乗法により回帰した式(2)より求めた。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (1)$$

ここで、 t_e : 有効材齢 (日), Δt_i : ある一定のコンクリート温度が継続する期間 (日), $T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続するコンクリート温度 (°C), T_0 : 1°C

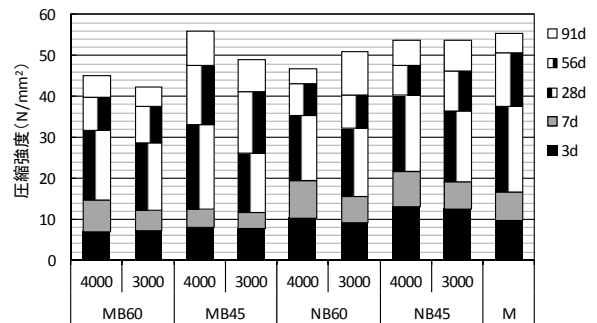


図-5 圧縮強度結果 (20°C環境)

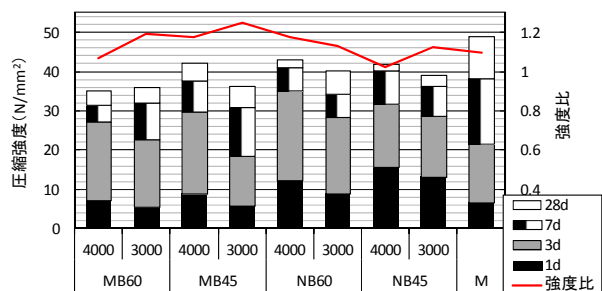


図-6 圧縮強度結果 (熱履歴)

$$f'_c(t_e) = \frac{t_e}{a + b(t_e)} \quad (2)$$

ここで、 $f'_c(t_e)$: 圧縮強度 (N/mm²)、 t_e : 有効材齢 (日)、
 a, b : セメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発現を表す係数

結果より、20°C環境下の圧縮強度について、M と MS 処方とを比べると、MS 処方の強度はスラグの比表面積や混和割合によらず M よりも低い結果となった。NS 処方の強度については、初期材齢において M とほぼ同等であり、長期材齢ではスラグの比表面積と混和割合が同一の MS 処方と比べて高い傾向があった。なお、MS 処方、NS 処方ともに、スラグ比表面積 4000 級の方が 3000 級より、混和割合 45%の方が 60%よりも材齢 28 日以降の圧縮強度が高い結果であった。

一方、図-6 に併記した強度比に着目すると、NS 処方よりも MS 処方が、また、スラグ比表面積としては 4000 級よりも 3000 級の方が強度比は高い傾向であった。これは、M の熱履歴下での強度発現がそもそも大きいこと、スラグ比表面積 3000 級の混和により、熱履歴の初期温度上昇勾配が小さいことが、強度発現の面で有利に作用したためと考えられる。なお、基材セメントおよびスラグ混和の影響に関しては、概ね、20°C環境下の結果と同じ傾向であった。

20°C環境下および熱履歴下の圧縮強度と静弾性係数の関係を図-7 に示す。図-7 では 20°C環境下における結果と熱履歴下における結果を併記したが、概ね同様な結果であった。熱履歴下で得られた圧縮強度と静弾性係数の関係式を式(3)に示す。

$$y = 6.85 x^{0.42} \quad (3)$$

ここで、 y : 静弾性係数 (kN/mm²)、 x : 圧縮強度 (N/mm²)

圧縮強度と割裂引張強度の関係 (20°C環境) を図-8 に、回帰して得られた両者の関係式を式(4)に示す。

$$y = 0.29 x^{0.66} \quad (4)$$

ここで、 y : 割裂引張強度 (N/mm²)、 x : 圧縮強度 (N/mm²)

3.4 収縮特性

20°C環境および熱履歴下の自己収縮ひずみの比較例 (NB60 および NB(3000)60) を図-9 に示す。温度ひずみの補正に用いた熱膨張係数は、文献⁷⁾を参考に、M は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、スラグ混和処方では $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ を用いた。

全てのスラグ混和処方では、材齢 1 日付近に膨張ひずみが生じた。これはエトリンガイト生成による硬化体の膨張の影響⁸⁾も含まれると考えられるが、初期硬化過程における熱膨張係数の時間依存性を考慮していないことも影響した可能性がある。より正確に若材齢時の熱膨張係数を把握する必要がある、今後の課題としたい。20°C環

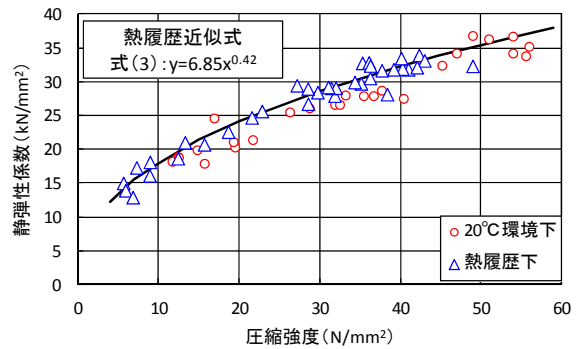


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

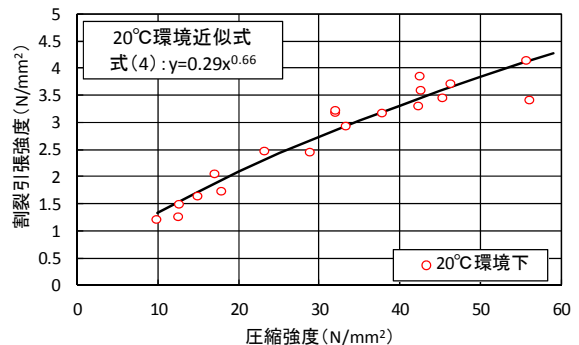


図-8 圧縮強度と割裂引張強度の関係 (20°C環境)

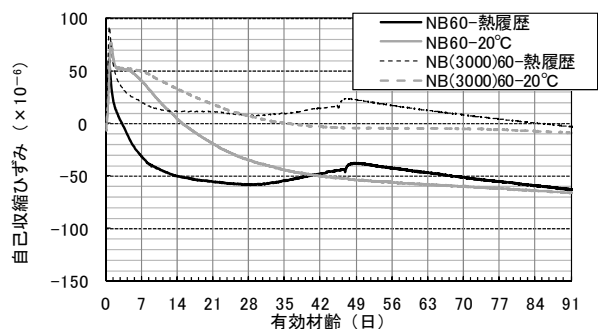


図-9 20°C環境と温度履歴の自己収縮ひずみ比較例

境の自己収縮は長期にわたり緩やかに続く傾向を示しているが、熱履歴を受けることで材齢初期の収縮ひずみが大きくなり、その後の変化は小さかった。但し、20°C環境と熱履歴下の有効材齢 91 日のひずみ値はほぼ同程度であった。

MS 処方および NS 処方の自己収縮ひずみを、それぞれ図-10 および図-11 に示す。MS 処方の中では、MB45 の自己収縮が最も大きく、それ以外の MS 処方は初期膨張の影響もあり、材齢 91 日の自己収縮ひずみはほぼ 0 となった。一方、NS 処方の中では、NB(3000)60 の自己収縮が最も小さく、それ以外の NS 処方は約 50×10^{-6} 程度となった。スラグ混和処方では、スラグ比表面積 4000 級よりも 3000 級の方が、混和割合 45%より 60%の方が自己収縮ひずみは小さい傾向であった。なお、材齢 35~

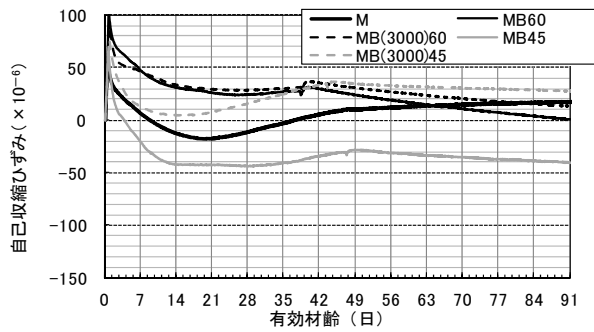


図-10 M, MS 処方の自己収縮ひずみ (温度履歴)

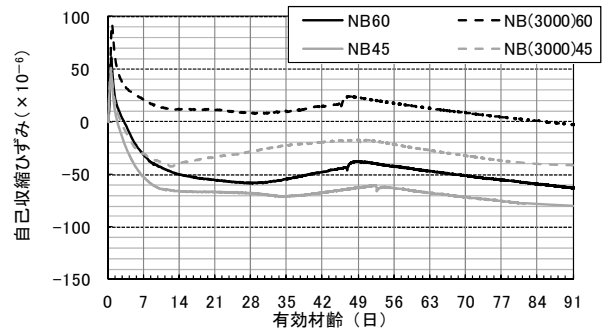


図-11 NS 処方の自己収縮ひずみ (温度履歴)

56日に見られる 10×10^{-6} 程度のひずみの変動は型枠脱型の影響である。

初期膨張の最大ひずみを起点として、その後、収縮ひずみが最大となるまでのひずみ変化量 (以下、ひずみ差と称す) を図-12に示す。スラグ混和処方のひずみ差は M よりも大きい、MS 処方のひずみ差は NS 処方よりも小さい傾向であった。スラグ比表面積としては 4000 級よりも 3000 級の方がひずみ差は小さい。スラグ混和割合の影響は明確に表れなかった。熱履歴下のひずみ差は、20℃環境と比較して、同程度か小さくなる傾向であった。

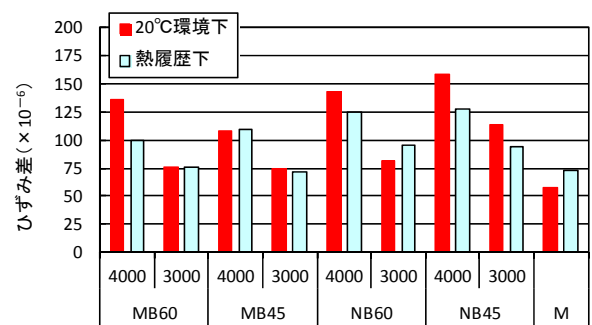


図-12 自己収縮のひずみ差

4.3 次元 FEM 温度応力解析によるひび割れ抵抗性評価

4.1 解析条件

3.3 および 3.4 に示す熱履歴下で取得した強度および自己収縮ひずみの特性値を用いて、3次元 FEM 温度応力解析ソフトにより最小温度ひび割れ指数を算出した。モデルは高さ 4m、厚さ 2m および長さ 10m の壁部材を想定して、図-13に示す 1/4 解析モデルとした。主な解析条件を表-5に示す。熱膨張係数は、3.4 の自己収縮ひずみ算出に用いた値と同一とし、クリープの取扱いは全配 (調) 合で同一とした。圧縮強度および静弾性係数は、熱履歴下のデータに基づく式(2)および式(3)を用いた。ただし、割裂引張強度は熱履歴下のデータが無いため、20℃環境での圧縮強度と割裂引張強度の関係式(4)を用いた。

4.2 解析結果および考察

得られた最小温度ひび割れ指数とその時の材齢との関係を図-14に示す。以下では、指数値および材齢に便宜上設けた閾値により、4つのグループ (A, B, C および D) に分類して考察を行う。グループ A に属する M は、他と比べて指数が大きく、検討した処方の中ではひび割れ抵抗性が高い。これは、温度上昇量が小さく温度応力の影響が小さいこと、自己収縮ひずみが小さいこと、圧縮強度が相対的に高いことが原因と考えられる。グループ B には MB45, NB45 および NB(3000)45 が属しており、比較的早期に指数が最小となり、かつ値もグループ A と比べて小さい。これらは何れもコンクリート最高温度が

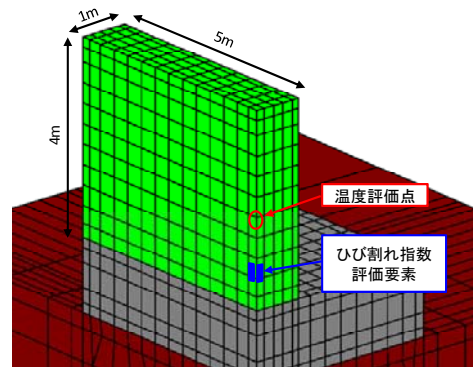


図-13 3次元 FEM 温度応力解析のモデル

表-5 解析条件一覧

条件	物性値
熱伝導率	2.7 W/m ² ℃
密度	2400 kg/m ³
比熱	1.15 kJ/kg℃
温度上昇	配合毎の実測値を入力。
初期温度	20 ℃
圧縮強度	式(2)による。
ヤング率	式(3) $y=6.85x^{0.42}$ による。
引張強度	式(4) $y=0.29x^{0.66}$ による。
ポアソン比	0.2
熱膨張係数	Mは $10 \times 10^{-6}/\text{℃}$ 。それ以外のスラグ混和処方は $12 \times 10^{-6}/\text{℃}$
クリープ構成則	ヤング係数の低減方法は、文献 ⁷⁾ による。
自己収縮	温度履歴下で測定した自己収縮ひずみと有効材齢の関係を入力。
熱境界	型枠・天端面: $0 \sim 7\text{d}=8\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 、7d以降 $=14\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ 。断面: 断熱

高い上に、自己収縮ひずみが他と比較して大きいもしくは早期に収縮側へ移行しており、強度に対する温度応力と外部拘束応力の総和が大きいものと推察される。

一方、グループ C および D は長期材齢において指数が

最小となることから、温度応力よりも自己収縮を主因とした外部拘束応力が卓越すると考えられる。グループ D に属する NB60 および NB(3000)60 は、グループ B と比べて圧縮強度が同程度であり、コンクリート最高温度は低い。しかしながら、自己収縮ひずみの進行がグループ A や C と比較して大きいために、グループ D の指数は低くなったと推察される。グループ C に属する MB60, MB(3000)60 および MB(3000)45 は、圧縮強度が相対的に小さいものの、コンクリート最高温度が低く、自己収縮ひずみおよびその進行速度が小さい。このため、グループ B よりも指数は高く、グループ A に次いでひび割れ抵抗性に優れる結果が得られたと考えられる。

本検討の範囲では、ひび割れ抵抗性の評価において指数が相対して低いグループ B および D には主に NS 処方 が属し、指数が相対して高いグループ A および C には MS 処方 が属した。以上により、M を基材とする MS 処方 は NS 処方 よりも優れたひび割れ抵抗性を有すると考えられる。

なお、本解析では、期間を通じて一定の熱膨張係数を用いたこと、クリープの取り扱いを処方によらず一定としたことなど、精緻さに課題が残されている。この点を含めてさらに検討を進め、総合的に評価を行いたいと考えている。

4. まとめ

本検討で得られた結果を以下にまとめて示す。

- (1) スラグ比表面積の影響として、強度発現は 4000 級の方が良好であった。断熱温度上昇量および自己収縮ひずみは 3000 級の方が小さい。
- (2) スラグ混和割合の影響として、45%の方が強度発現は良好であった。断熱温度上昇量は 60%の方が小さい。熱履歴下の自己収縮ひずみは、比表面積 4000 級において、混和割合 60%の方が小さい。
- (3) 基材セメントの影響では、N を基材とする NS 処方の方が強度発現は良いが、自己収縮ひずみと断熱温度上昇量は MS 処方の方が小さい。
- (4) 20℃環境に対する熱履歴下の強度比は、NS 処方よりも MS 処方の方が大きい。熱履歴下の自己収縮ひずみは材齢初期で大きくなるものの、長期的には 20℃環境とほぼ同等であった。
- (5) M を基材とし、比表面積 3000 級のスラグを混和した処方は、部材を想定した最高温度およびその履歴下における自己収縮ひずみが M と同程度になり、他のスラグ混和処方よりもひび割れ抵抗性に優れること

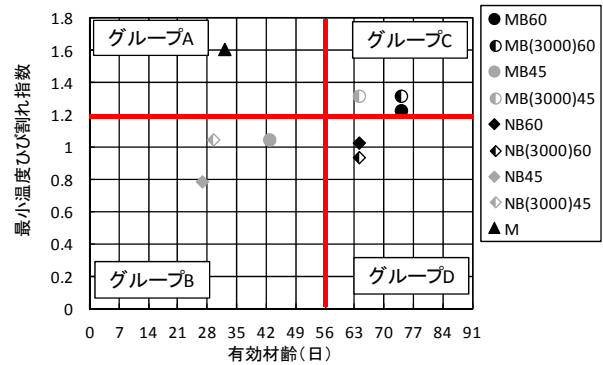


図-14 最小温度ひび割れ指数とその時の材齢との関係

が示された。

参考文献

- 1) 二戸信和, 鯉淵清, 大友健, 宮澤伸吾: 高炉セメントの特性を活かす低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの性能と実施工, セメント・コンクリート, No.722, pp.10-16, 2007.4
- 2) 檀康弘, 竹内一真, 伊与田岳史: 低発熱型高炉セメント B 種の歴史とその性能, セメント・コンクリート, No.733, pp.17-23, 2008.3
- 3) 曾根徳明, 山崎満雄, 古田誠剛: 低発熱型高炉セメントを用いたコンクリートの諸特性と温度ひび割れ抑止効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.827-832, 1991.6
- 4) 田畑美紀, 川里麻莉子, 佐藤友厚, 寺澤正人: 低熱高炉セメントの特性試験と温度ひび割れ抑制効果の解析的評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1301-1306, 2011
- 5) 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉淵清, 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, Vol.48, No.9, pp.69-73, 2010
- 6) 室野井敏之, 橋本学, 坂田昇, 黒田萌: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.142-147, 2014.6
- 7) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 日本コンクリート工学会, pp.46-56, 2008.11
- 8) 谷田貝敦, 二戸信和, 宮沢伸吾: 化学成分を調整した高炉セメント B 種の膨張・収縮挙動に及ぼす高炉スラグ微粉末の比表面積の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.523-528, 2013.6