

論文

[1159] 高炉スラグ微粉末を用いたマスコンクリートの温度応力低減効果

正会員○奥田隆之（岐阜大学大学院）  
 正会員 森本博昭（岐阜大学工業短期大学部）  
 正会員 小柳 洽（岐阜大学工学部）  
 正会員 小門 武（新日本製鐵（株））

1. はじめに

水和熱に起因する温度応力を低減する方法に、高炉スラグ微粉末混入セメントを用いる方法が考えられる。本研究は高炉スラグ微粉末混入セメントをマスコンクリートに用いた場合の温度応力低減効果に及ぼすスラグ置換率（単位結合材量に対する内割重量比）の影響を、マスコンクリート構造物モデルを対象として解析的に検討したものである。

2. 解析方法の概要

表-1 配合表

高炉スラグ微粉末混入コンクリートにおけるスラグ置換率は、50、85%の2種類とした。また、比較のためにスラグ無混入のコンクリートについても検討を行った。表-1に、これらのコンクリートの配合をまとめて示す。なお、この配合は単位結合材量を一定とし、スランブを12±1.5cmになるように決定した。

スラグ置換率 (%)	スラグ粉末度 (cm <sup>2</sup> /g)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg)	結合材 (kg)		骨材 (kg)		AE減水剤 (g)	調整剤 (g)
					OPC	スラグ	細骨	粗骨		
0	4000	59.3	45.0	166	280	-	824	1040	820	22.4
50	4000	57.1	45.0	160	140	140	825	1040	820	33.0
85	4000	56.4	45.0	158	42	238	826	1041	820	47.6

注) OPC: 普通ポルトランドセメント, AE減水剤: ポソリスNO. 70, 調整剤: NO. 303

コンクリートの断熱温度上昇特性は、式(1)に示すものを用いた。

$$Q = K [1 - \exp \{A (t - DI)^B\}] \dots (1)$$

ここで、Q; 断熱温度上昇量 (°C), t; 材令 (日)

K, A, B, DI; 実験定数

実験により求めた各コンクリートに対する式中の定数を表-2に示す。

表-2 断熱温度上昇評価式 (定数)

置換率	K	A	B	DI
0%	47.9	1.40	0.76	0.31
50%	47.4	0.69	1.20	0.16
85%	24.6	1.65	0.52	0.73

またコンクリートの圧縮強度は(2)式により、

-10°Cを基準とした積算温度の関数として評価した。引張強度, 弾性係数はそれぞれ(3), (4)式により、圧縮強度から算出した。

$$f_c = A_c + B_c \log (M) \dots (2)$$

ここで、f<sub>c</sub>; 圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>) M; 積算温度 (°C · hr)

A<sub>c</sub>, B<sub>c</sub>; 実験定数

$$f_t = A_t (f_c)^{B_t} \dots (3)$$

ここで、f<sub>t</sub>; 引張強度 (kgf/cm<sup>2</sup>) A<sub>t</sub>, B<sub>t</sub>; 実験定数

$$E = A_e (f_c)^{B_e} \dots (4)$$

ここで、E; 弾性係数 (kgf/cm<sup>2</sup>) A<sub>e</sub>, B<sub>e</sub>; 実験定数

表-3に(2)~(4)式中の定数の値を示す。

温度応力解析では、コンクリートのリラクセーションを考慮した。解析ではリラクセーション特性を式(5)に示す関数で評価した。式中の実験定数は載荷材令の関数として実験により決定した。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{A + C t}{A + t}$$

ここで、 $\sigma_i$  ; 初期導入応力 (kgf/cm<sup>2</sup>) ,  $\sigma_t$  ; 時刻 t での残留応力 (kgf/cm<sup>2</sup>)  
A, C ; 実験定数 t ; 載荷後の経過時間

各定数の算定式を表-4にまとめて示す。

表-4 リラクセーション関数 (定数算定式)

置換率	圧縮 A	圧縮 C	引張 A	引張 C
0 %		C=0.417Ln(t)-1.32 (t<72) =0.103Ln(t)+0.019 (72≤t<168) =0.083Ln(t)+0.121 (168≤t<504) =0.636 (504≤t)		
50 %	A=-3.98Ln(t)+31.9 (t<168) =10.917 (t≥168)	C=0.224Ln(t)-0.712 (t<72) =0.353Ln(t)-1.263 (72≤t<168) =0.083Ln(t)+0.121 (168≤t<504) =0.636 (504≤t)	A=0.165	=0.10Ln(t)+0.39 (t<72) =0.85 (t≥72)
85 %		C=0.170Ln(t)-0.541 (t<72) =0.357Ln(t)-1.34 (72≤t<168) =0.047Ln(t)+0.249 (168≤t<504) =0.541 (504≤t)		

t ; 載荷材令 (hour)

本研究では、以上のような高炉スラグ微粉末混入コンクリートの諸物性値をもとに、代表的なマスコンクリートの構造物である柱及びマットスラブの2種類の構造物モデルについて、二次元有限要素法を用いた温度解析及び温度応力解析を行った。図-1に構造物モデルの形状を示す。なお温度解析の考察は、柱モデルでは断面中心部、マットス

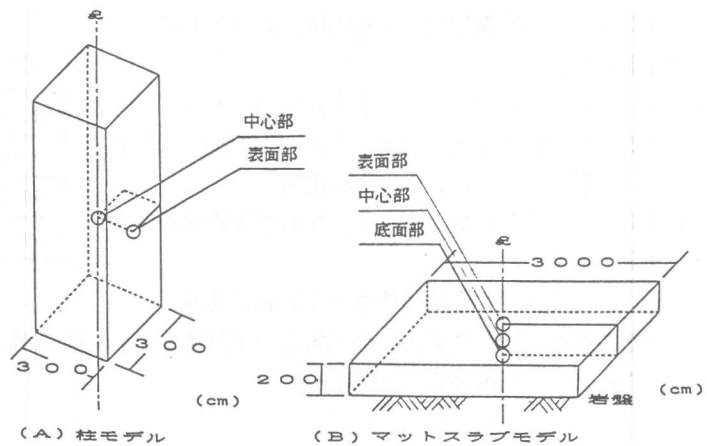


図-1 解析モデル

ラブモデルではスラブ断面中心部に着目した。応力解析の考察においては、柱モデルでは表面部及び中心部、マットスラブモデルについては、表面部、中心部及び岩盤に接する底面部に着目して、応力の低減効果について検討した。なお、マットスラブモデルの解析では岩盤の弾性係数を  $3 \times 10^4$  kgf/cm<sup>2</sup> とした。

### 3. 温度解析結果と考察

#### (1) 柱モデル

図-2に、柱モデルの断面中心部の温度上昇を示す。温度上昇がピークを示したときの材令、温度はスラグ置換率0%、50%及び85%でそれぞれ3日で64℃、4日で63℃、及び3日で42℃であった。置換率0%と比較して、置換率50%のものは、最大の温度上昇量は約1℃低く、またそれを示す材令が若干遅くなっている。これは置換率0%のものに比べ、約1日までの発熱率は小さいがそれ以降大きな発熱率を示すという置換率50%の発熱特性によるものと考えられる。一方、置換率85%の温度上昇量は全体的に小さい値を示し、温度上昇量で見ると、約50%低い値となった。

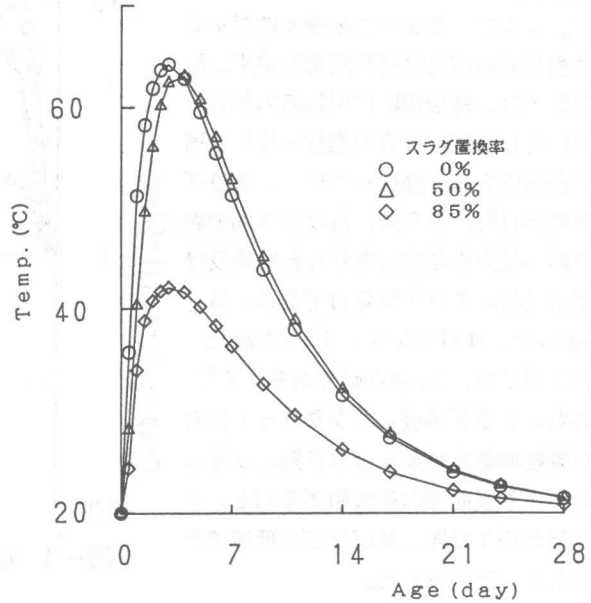


図-2 温度の経時変化(柱モデル, 中心部)

#### (2) マットスラブモデル

図-3に、マットスラブモデルの断面中心部での温度上昇を示す。これより、断面中心部で温度上昇が最大を示したときの材令、温度は、置換率0%、50%及び85%でそれぞれ2.5日で61℃、3日で60℃及び2.5日で41℃であった。

以上、各構造物モデルについての温度解析の結果、スラグ無混入コンクリート(スラグ置換率0%)に比べ置換率50%では、温度上昇量の低減はあまり期待できないがその最大温度発生時期を若干遅らせることができる。また、置換率を85%にすることにより、最大温度上昇量を約50%の低減できることなどが明らかになった。

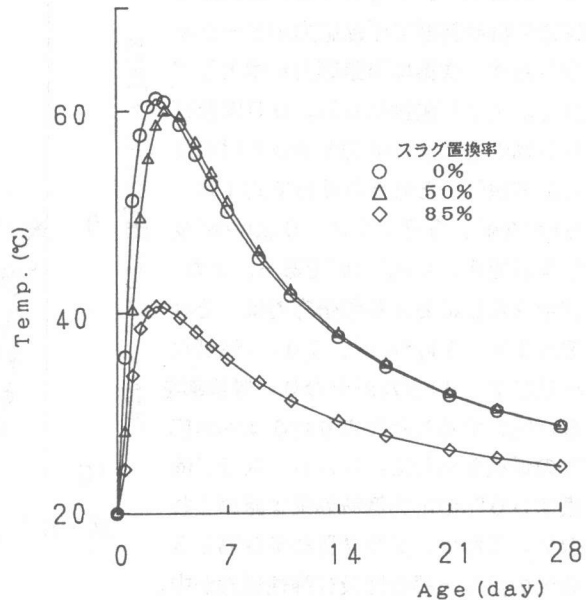


図-3 温度の経時変化(マットスラブモデル, 中心部)

#### 4. 温度応力解析結果と考察

##### (1) 柱モデル

図-4に、各スラグ置換率に対する柱表面部の応力の経時変化を示す。表面部では、材令初期に引張応力がピークに達した後、材令の進行に伴い次第に圧縮応力へと移行していく。スラグ置換率0%、50%、及び85%の表面部の最大引張応力を示した材令及び応力値は、それぞれ3日で29.8 kgf/cm<sup>2</sup>、4日で24.1 kgf/cm<sup>2</sup>及び3日で8.8 kgf/cm<sup>2</sup>である。すなわち、スラグ無混入コンクリートに対し置換率を50%及び85%とすることにより表面部の最大引張応力を、それぞれ約19%、及び70%低減できることが認められた。

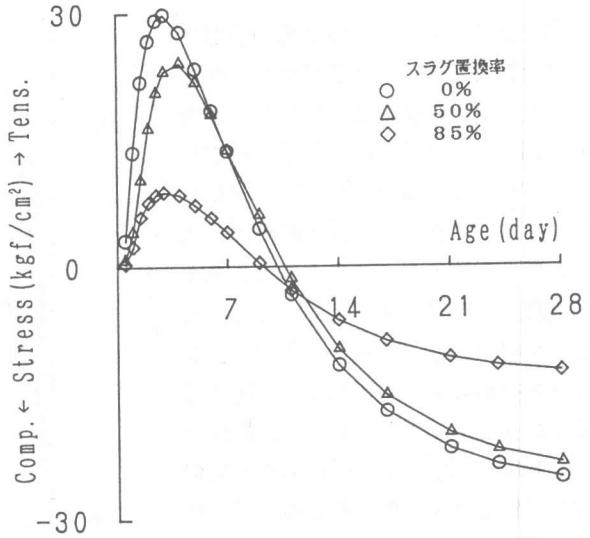


図-4 応力の経時変化 (柱モデル, 表面部)

次に、中心部での応力の経時変化を図-5に示す。中心部では、表面部とは逆に材令初期で圧縮応力がピークを示した後、次第に引張応力が增大して行く。スラグ置換率0%、50%及び85%の最大圧縮応力を示した材令及び応力値は、それぞれ4日で約13.5 kgf/cm<sup>2</sup>、5日で10.0 kgf/cm<sup>2</sup>及び4日で4.0 kgf/cm<sup>2</sup>である。また、材令28日における引張応力は、それぞれ13.1 kgf/cm<sup>2</sup>、14.5 kgf/cm<sup>2</sup>及び7.4 kgf/cm<sup>2</sup>となり、置換率を85%にすることにより約44%の応力の低減を示した。しかし、スラグ置換率50%の応力低減効果は認められない。これは、スラグ置換率0%と50%の温度上昇特性及び弾性係数が中、長期的には同程度になることに起因すると考えられる。

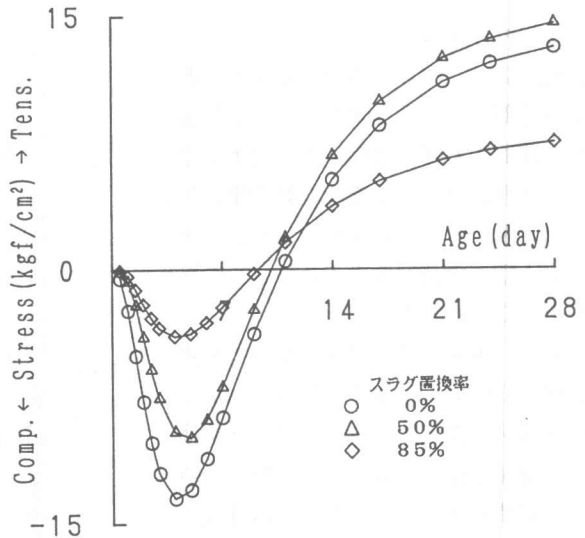


図-5 応力の経時変化 (柱モデル, 中心部)

(2) マットスラブモデル

図-6～図-8にマットスラブモデルの表面部、中心部及び底面部の応力解析結果を示す。

図-6から表面部では、各置換率とも材令1～3日付近まで圧縮を受けるが、その後急速に引張に転じる。最大引張応力を示した材令と応力値は、置換率0、50、85%でそれぞれ材令5日で7.7kgf/cm<sup>2</sup>、材令6日で2.2kgf/cm<sup>2</sup>及び材令6日で0.3kgf/cm<sup>2</sup>である。すなわち、置換率を50及び85%にすることにより表面部の応力は約71%及び96%の応力の低減を示した。

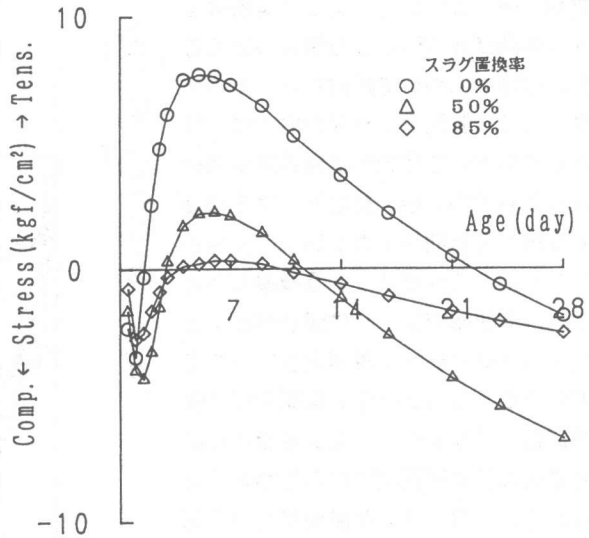


図-6 応力の経時変化 (マットスラブモデル, 表面部)

図-7に示すように、中心部では材令7日付近まで圧縮を受けるがその後引張に転じた。材令28日での引張応力は置換率0、50、85%で、それぞれ29.7kgf/cm<sup>2</sup>、24.5kgf/cm<sup>2</sup>及び13.7kgf/cm<sup>2</sup>となった。すなわち、スラグ置換率を50%及び85%にすることによる応力の低減率はそれぞれ、約18%及び54%である。

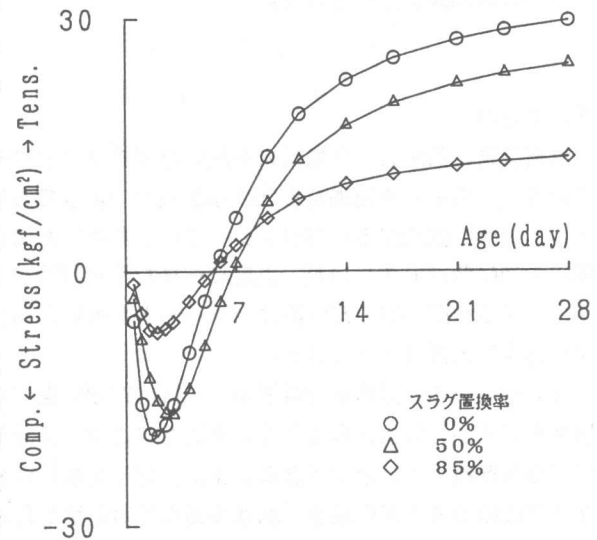


図-7 応力の経時変化 (マットスラブモデル, 中心部)

図-8に底面部での応力の経時変化を示す。底面部は、岩盤に拘束されることにより、材令21日付近まで圧縮を受け、低置換率のものほどその最大値は大きくなった。最大圧縮応力を示した材令及び応力値は、置換率0%、50%及び85%でそれぞれ7日で18.6kgf/cm<sup>2</sup>、7日で14.8kgf/cm<sup>2</sup>及び7日で6.3kgf/cm<sup>2</sup>であった。

以上、2種類のマスコングリート構造物モデルについて、スラグ置換率を50%及び85%とした場合の温度応力低減効果について検討した。その結果、スラグ置換率50%の場合、材令初期において応力の低減効果は認められるものの、中、長期的にはその効果はほとんど期待できないことが明らかとなった。これはスラグ置換率0%と比べ材令初期では、弾性係数が低くまたリラクセーション量が大きいため応力は小さくなるが、中、長期的には弾性係数、リラクセーション量ならびに発熱量などが同程度になるためと考えられる。一方、スラグ置換率を85%とした場合は、発熱量の減少、弾性係数の低下、ならびにリラクセーション量の増大などにより、全般的に大きな応力の低減効果が認められた。

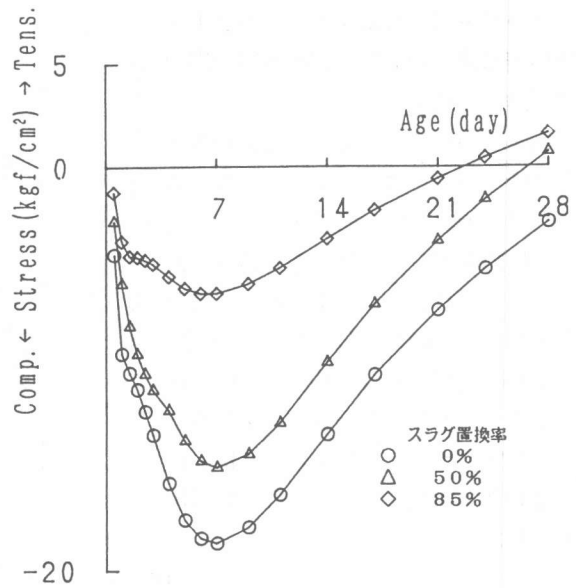


図-8 応力の経時変化(マットスラブモデル, 底面部)

### 5. まとめ

本研究は、高炉スラグ微粉末を用いたマスコングリートの温度応力低減効果を検討したものである。得られた結果をまとめると以下のものである。

(1) スラグ置換率50%のコンクリートを用いた場合、ブレンコンクリート比温度上昇量の低減は期待できないが、温度ピークを示す時期を1日程度遅らせることができる。

(2) スラグ置換率85%のコンクリートを用いた場合、ブレンコンクリートに比べ約50%程度温度上昇を低減できる。

(3) 柱モデルの温度応力解析から、材令初期に発生する表面部の最大引張応力を、スラグ置換率を50%、および85%にすることにより、スラグ無混入コンクリートに対し約19%及び70%低減することができる。また、材令28日における中心部での引張応力に対しては、スラグ置換率85%の場合、約44%の低減を示した。しかし、スラグ置換率50%の応力低減効果は認められなかった。

(4) マットスラブモデルの温度応力解析から、材令初期の表面部の最大引張応力は置換率を50, 85%にすることによりスラグ無混入コンクリートに対し、約71%及び96%の応力の低減を示した。また、材令28日における中心部での引張応力は、それぞれ約18%及び54%の低減を示した。

(5) スラグ置換率50%の場合、材令初期では応力低減効果は認められるが、中、長期的にはその効果はかなり小さくなる。スラグ置換率85%の場合、発熱量の減少、弾性係数の減少及びリラクセーション量の増大などにより、全般的に大きな応力低減効果が認められた。