

論文

[1143] 高炉スラグ微粉末混入コンクリートの温度ひびわれ抑制効果について

正会員○ 瀧瀬由雄 (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 (岐阜大学土木学科)

正会員 小門 武 (新日本製鐵)

1. はじめに

マスコンクリート構造物の温度ひびわれを抑制する方法の1つに低発熱性の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。本研究は強度発現性能改善および温度上昇抑制の2点において比較的可利と考えられる、粉末度 6000cm²/gの高炉スラグ微粉末 (以下スラグと記す) を、セメント重量に対して 70%置換したコンクリートの温度ひびわれ抑制効果を、有限要素法を用いた数値解析により検討したものである。

2. スラグコンクリートの強度発現特性および発熱特性

本研究で用いた粉末度6000cm²/gのスラグを70%置換したスラグコンクリートの特性を明らかにするため著者は、粉末度4000および6000cm²/gのスラグを70%置換したコンクリート、ならびに粉末度6000cm²/gのスラグを85%置換したものについて強度発現特性などについて検討を行っている。

[1]

図-1に、各スラグコンクリートの圧縮強度を示す。図から材令3日以降の圧縮強度について、粉末度6000cm²/g、置換率70%のスラグコンクリートの強度発現が特に著しいことが分かる。

図-2に粉末度6000cm²/g、置換率70%のスラグコンクリートと普通コンクリートの断熱温度上昇特性を示す。図から、普通およびスラグコンクリートの最終的な断熱温度上昇量はそれぞれ42℃および33℃で、スラグコンクリートの断熱温度上昇量は普通コンクリートに比べ9℃低くなっている。以上から、粉末度6000cm²/g、置換率

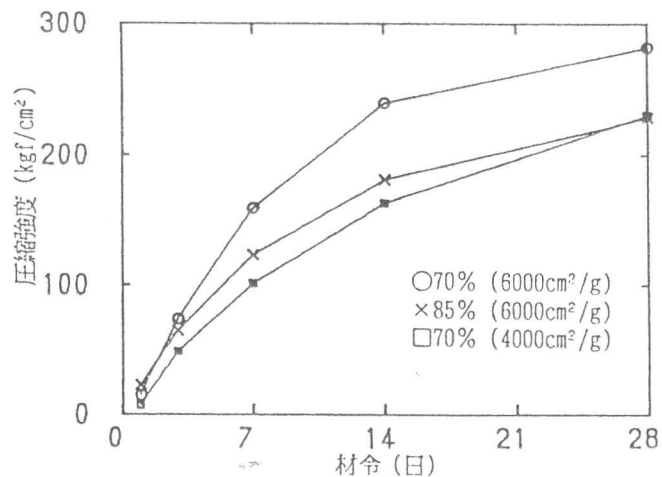


図-1 各スラグコンクリートの圧縮強度

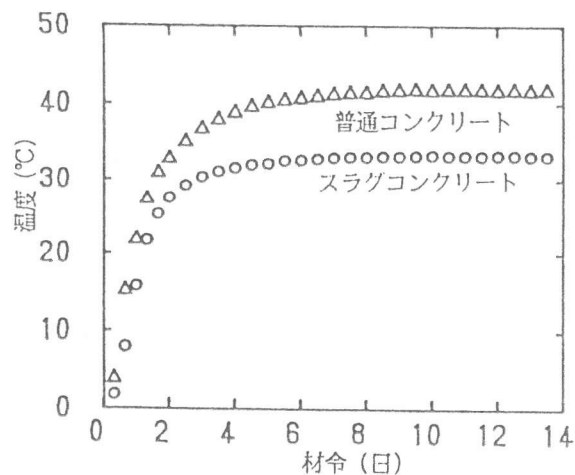


図-2 断熱温度上昇特性

70%のスラグコンクリートは、低発熱性を有しつつ、強度発現性能に比較的優れていることが確認できる。

3. 解析方法の概要

本研究では粉末度6000cm²/g、置換率70%のスラグコンクリート（以下スラグコンクリートと記す）の温度ひびわれ抑制効果について、普通セメントコンクリート（以下普通コンクリートと記す）との比較により検討した。表-1にコンクリートの配合を示す。なお、配合は単位結合材量を一定とし、スランブを12±1.5cmとなるように決定した。

表-1 配合(1立米あたり)

スラグ置換率	粉末度 cm ² /g	W/C %	s/a %	水 kg	セメント kg	スラグ kg	細骨材 kg	粗骨材 kg	A E減水剤 g	調整剤 g
0	—	59.3	45	166	280	—	824	1040	3280	2240
70	6000	58.6	45	164	84	196	820	1042	3280	1680

内部拘束の卓越する柱モデルおよび外部拘束の卓越する壁モデルの2種類のマスコンクリート構造物について、3次元有限要素法により温度ならびに温度応力解析を行った。柱の寸法は、長径7.5m、短径3.6mの断面で高さは12mである。壁の寸法は、高さ2.4m、厚さ1.5mの断面で長さは24mである。図-3にこれらの構造物モデルの要素分割図を示す。

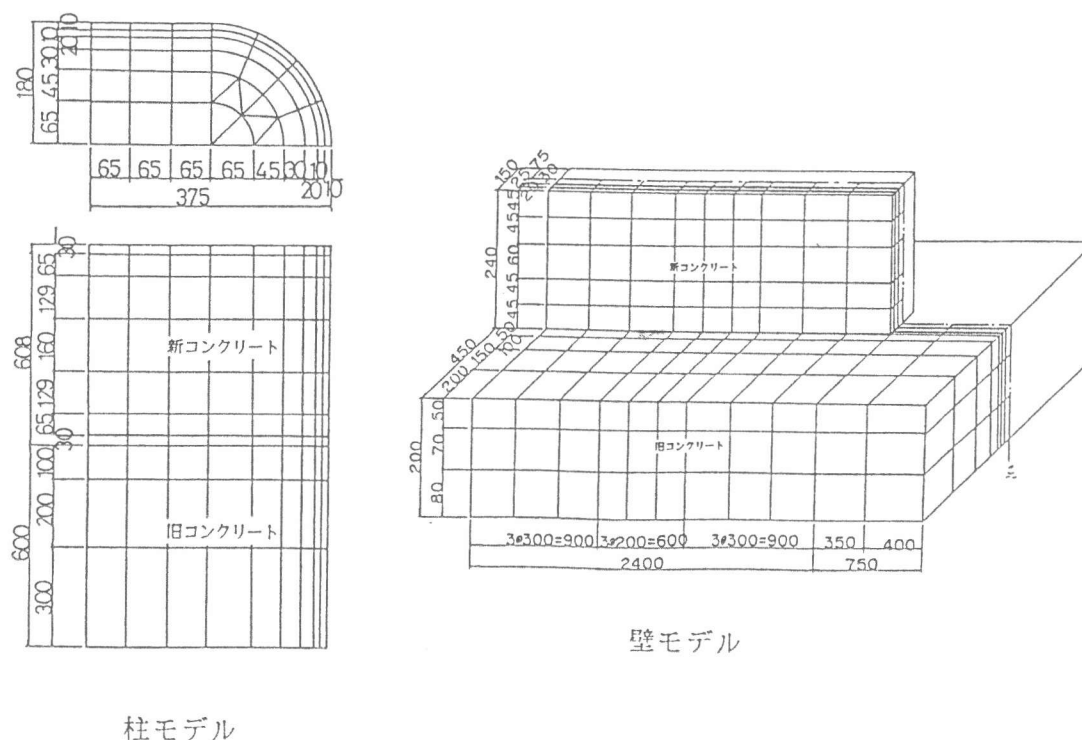


図-3 要素分割図

温度応力解析では、温度応力のリラクセーションを考慮した。温度応力のリラクセーションを考慮する場合、一般的には、クリープ関数によりコンクリートの構成式が記述されるが、本研究

では、著者らが提案しているリラクセーション関数を導入した温度応力解析手法を用いた。[2] また、コンクリートのリラクセーションは、圧縮応力下と引張応力下とはその特性が大きく異なることが明かとなっているので、本解析手法では応力の正負によるリラクセーション特性の相違が考慮されている。[3]コンクリートの断熱温度上昇特性、強度特性、弾性係数およびリラクセーション特性は実験により決定した。解析で用いたコンクリートの諸特性を図-4~7および表-2に示す。

表-2 解析定数

コンクリートの熱伝導率... 2.16kcal/m·h·°C 比熱... 0.24kcal/kg·°C 熱伝達率... 5.0kcal/m ² ·h·°C 型枠面の熱伝達率... 10.0kcal/m ² ·h·°C		外気温20°C (一定)			
断熱温度上昇特性 $Q = K [1 - \exp \{A(t - D1)^B\}]$ Q: 断熱温度上昇量(°C) t: 材令(日)	普通 スラグ	K 41.9 32.9	A 0.96 1.10	B 0.86 1.03	D1 0.22 0.40
圧縮強度 $f_c = A + B \log(M)$ f _c : 圧縮強度(kgf/cm ²) M: -10°C基準の積算温度(°C·hr)	普通 スラグ	Log(M) < 3.96 Log(M) ≥ 3.96 Log(M) < 3.88 Log(M) ≥ 3.88	A -531.6 -608.1 30.4	B 197.0 103.5 220.5 56.0	
引張強度 $f_t = A(f_c)^B$ f _t : 引張強度(kgf/cm ²)	普通 スラグ		A 0.25 0.17	B 0.80 0.86	
弾性係数 $E = A(f_c)^B$ E: 弾性係数(kgf/cm ²)	普通 スラグ		A 19420 19360	B 0.47 0.47	
リラクセーション特性 $\frac{\sigma_t}{\sigma_i} = \frac{A + Ct}{A + t}$ σ _t : t時間後の残留応力(kgf/cm ²) σ _i : 初期載荷応力(kgf/cm ²) f _c : 圧縮強度(kgf/cm ²)	圧縮リラクセーションの場合 A=17.96-0.045f _c (f _c < 200kgf/cm ²) =8.96 (f _c ≥ 200kgf/cm ²) C=0.20+0.0015f _c (f _c < 230kgf/cm ²) =0.43+0.0005f _c (f _c ≥ 230kgf/cm ²)	引張りリラクセーションの場合 A=0.22 C=0.70+0.015f _t (f _t < 10kgf/cm ²) =0.85 (f _t ≥ 10kgf/cm ²)			

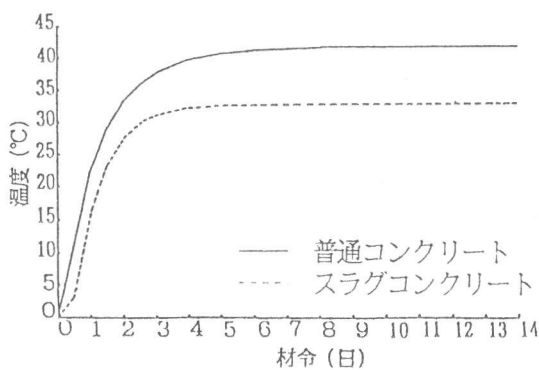


図-4 断熱温度上昇特性

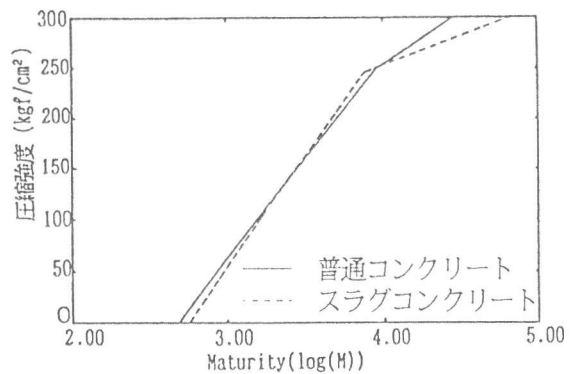


図-5 圧縮強度の発現性状

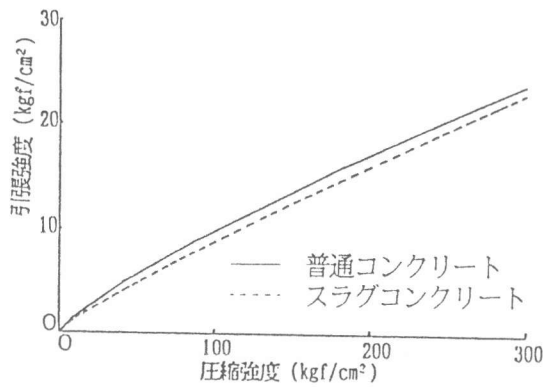


図-6 引張強度の発現性状

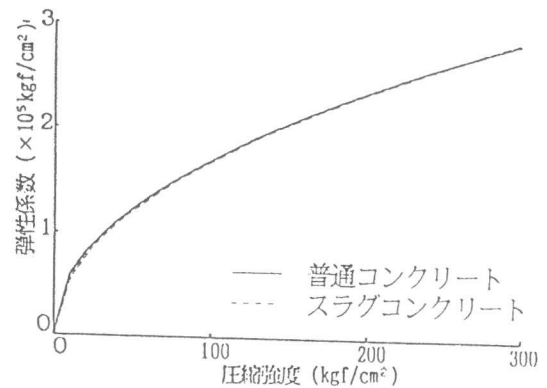


図-7 弾性係数の発現性状

4. 温度解析

a) 柱モデル

図-8に温度解析により得られた普通およびスラグコンクリートの柱中心部における温度の経時変化を示す。中心部の温度は材令3日から4日にかけてピークを示す。最高温度は普通コンクリートが58.4℃、スラグコンクリートは51.6℃である。スラグコンクリートの柱中心部における最高温度は、普通コンクリートに比較して約7℃低くなっており、スラグコンクリートの温度上昇抑制効果が認められる。

b) 壁モデル

図-9に壁中心部の温度の経時変化を示す。中心部において温度上昇がピークとなる材令は、両者とも1.5日でその時の温度は普通およびスラグコンクリートでそれぞれ49.6℃、および45.6℃である。壁においては、大断面の柱に比較してスラグコンクリートの温度上昇抑制効果は小さいものの、普通コンクリートに比して約4.0℃の温度上昇抑制効果が得られた。

5. 温度応力解析

a) 柱モデル

図-10に柱の表面部における応力の経時変化を示す。柱では、材令2~3日で表

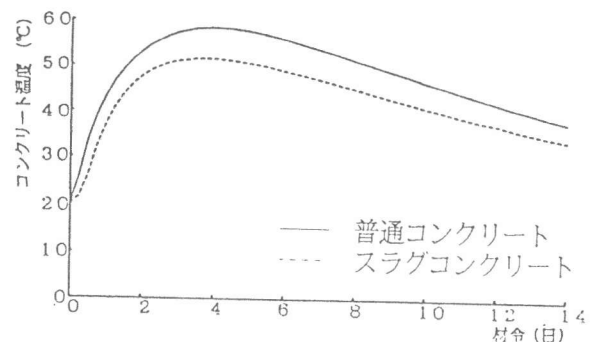


図-8 温度解析結果(柱中心部)

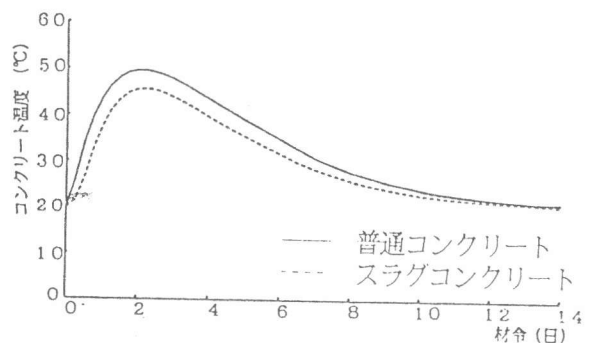


図-9 温度解析結果(壁中心部)

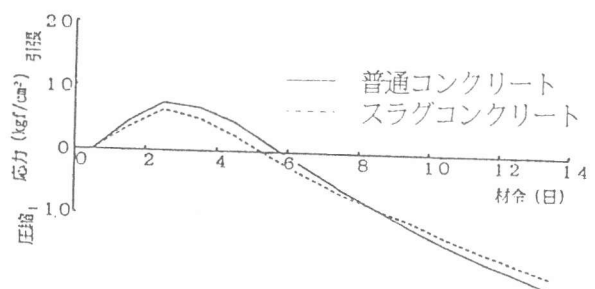


図-10 温度応力解析結果(柱表面部)

面部に最大引張応力が発生し、表面ひびわれの危険性が大きくなる。スラグコンクリートの応力増加は、発熱が緩やかなため、普通コンクリートに比べて小さくなっている。引張応力の最大値は普通およびスラグコンクリートでそれぞれ7.4および6.3kgf/cm²となる。すなわち、スラグコンクリートを用いた場合、普通コンクリートに比して全般的に15%程度温度応力を抑制することができる。材令5～6日になると、表面部応力は圧縮応力に転じる。図-11に表面部の温度ひびわれ指数の推移を示す。温度ひびわれ指数は、コンクリート打設後、次第に減少し、材令2日前後で最小となり表面ひびわれの危険性が最も大きくなる。材令2日を過ぎると、指数の値は次第に増加しひびわれの危険性は小さくなっていく。表面部の温度ひびわれ指数の最大値は、普通コンクリートの1.43に対して、スラグコンクリートは1.54と、約7%大きい値を示しており、スラグコンクリートの温度ひびわれ抑制効果が認められる。

b) 壁モデル

図-12に壁の中心部における応力の経時変化を示す。壁では材令3～4日以降引張応力が発生し、材令とともに増加していく。そして、材令14日でほぼ最大値に達する。最大引張応力は、普通およびスラグコンクリートでそれぞれ48.7、および41.2kgf/cm²となる。スラグコンクリートの最大引張応力は普通コンクリートに比べ15%程度小さくスラグコンクリートの温度応力低減効果が認められる。

図-13に壁モデルの中心部における温度ひびわれ指数の経時変化を示す。温度ひびわれ指数は、材令が進行するのにもない減少し、温度ひびわれ発生の危険性が大きくなっていく。スラグコンクリートの温度ひびわれ指数は普通コンクリートのそれに比べて全般的に小さい。材令9～10日で両者の差はほぼ一定になる。普通コンクリートとスラグコンクリートの温度ひびわれ指数の最小値は0.43、および0.48となった。すなわち、スラグコンクリートを用いた場合、温度ひびわれ

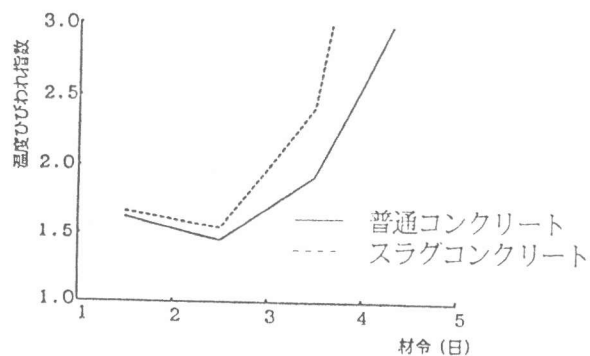


図-11 温度ひびわれ指数の推移 (柱表面部)

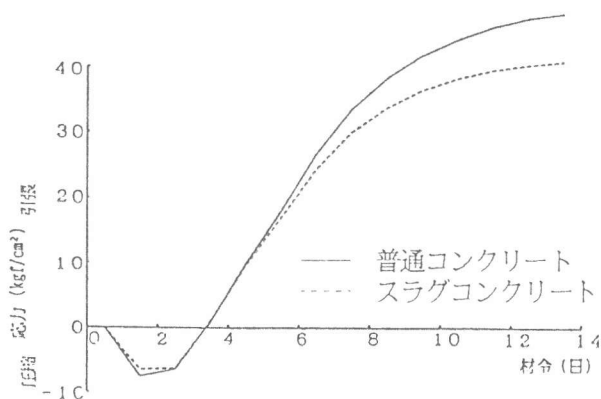


図-12 温度応力解析結果 (壁中心部)

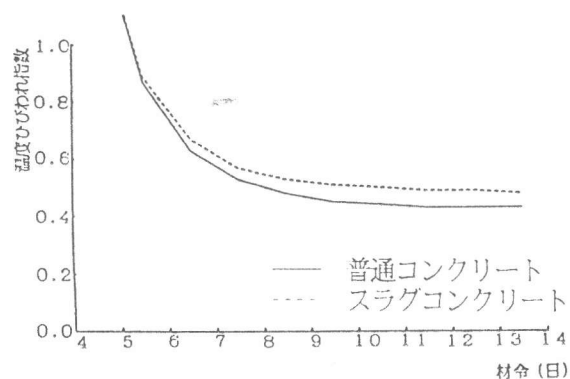


図-13 温度ひびわれ指数の推移 (壁中心部)

指数は 10%程度大きくすることができ、スラグコンクリートの温度ひびわれ抑制効果が確認できた。

6. スラグコンクリートの温度ひびわれ抑制

柱および壁構造物にスラグコンクリートを用いた場合、引張応力が約10%低減され、その結果温度ひびわれ指数が約7~10%程度大きくなることが明かとなった。しかし、柱の温度ひびわれ指数の最小値は、スラグコンクリートおよび普通コンクリートのいずれを用いた場合も1.5前後でひびわれの危険性は低く、一方、壁の温度ひびわれ指数の最小値は、いずれのセメントを用いても0.5前後でひびわれの危険性は高い結果となった。

このように、本研究で解析対象とした構造物では、温度ひびわれ抑制対策としてスラグコンクリートを用いることの意義が示されたとは言いがたい。しかしながら、前述のようにスラグコンクリートを用いることにより温度ひびわれ指数は7~10%程度大きくすることができる。従って、マスコンクリートにスラグコンクリートを用いる場合は、その使用効果を事前に十分調査し、スラグコンクリートの採用、不採用さらには他の対策との組合せなどについて検討する必要がある。また、スラグコンクリートについても、その低発熱性を損なうことなく強度発現性能をさらに改善する方策について今後検討していく必要がある。

7. まとめ

本研究は、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの温度ひびわれ低減効果を柱および壁構造物を例にとり検討したものである。得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) スラグコンクリートを用いることにより、柱および壁中心部の最高温度上昇を普通コンクリートに比して約10%低減させることができる。
- (2) スラグコンクリートを用いることにより、普通コンクリートに比して柱表面部に発生する引張応力を約15%低減させるとともに温度ひびわれ指数を約7%大きくすることができる。
- (3) スラグコンクリートを用いることにより、普通コンクリートに比して壁中心部に発生する引張応力を約15%低減させることができ、温度ひびわれ指数も約10%大きくすることができる。

参考文献

- 1) 横井ほか：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度ならびに変形特性について、セメント技術大会講演集(1991,5)
- 2) 森本、小柳：マスコンクリートの温度応力のリラクセーション解析に関する研究、土木学会論文集(1989)
- 3) 奥田ほか：若材令コンクリートの圧縮ならびに引張りリラクセーション特性について、コンクリート工学年次論文報告集(1989)