

論文 高炉スラグ微粉末混入セメントの発熱特性に及ぼす各種要因の把握

伊代田 岳史^{*1}・兼安 真司^{*2}・檀 康弘^{*3}

要旨：従来高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートは水和発熱の抑制効果が高いと言われてきたが、その特性は、高炉スラグ微粉末の性能や置換率、石膏添加量、周囲温度などにより影響されることが明らかとなってきた。そこで、本研究では高炉スラグ微粉末の発熱特性を確認するために、各種要因を変動させたモルタルを作製し、要因ごとの発熱特性を試製容器により把握することを目的とした。その結果、試製容器における測定の妥当性が確認でき、さらに低粉末度の高炉スラグ微粉末を用いることにより、またその含有量を高めることにより発熱は抑制可能であることが定量的に評価できた。

キーワード：高炉スラグ微粉末、発熱特性、強度発現、粉末度、置換率、石膏添加量

1. はじめに

大型のコンクリート構造物においては、セメントの水和発熱に起因する温度応力が働き、温度ひび割れの発生が懸念される。そのため各種断熱温度上昇試験により、コンクリート配合における断熱温度上昇式を策定し、温度応力プログラムなどでひび割れ発生に関する情報を入手するのが一般的な手法といえる。しかし、空気または水循環方式の断熱温度試験装置は非常に大がかりな装置であり、さらに試験には多くの日数が必要とされる。そのため従来から比較的簡易な試験装置を用いた簡易断熱試験が数多く実施され、その成果は数多い^{1),2),3)}。

しかし、現状ではプロジェクト毎に断熱試験を行い、材料特性を含めた正確な物性値を求める必要がある。そのため、セメントの材料設計においても数多くの試験データを必要とする。

従来、高炉スラグ微粉末を用いたセメントは発熱抑制効果があるとされ、古くから利用されてきており、高炉セメントの誕生からその歴史は1世紀以上にも及ぶ。溶鉱炉における鉄鋼生産過程で排出される熔融スラグを急冷して製造される高炉水砕スラグを乾燥粉碎しクリン

カー粉と混合することから、省エネルギーや環境負荷低減材料としての認識も高い。またさらに高耐久化の要望から、近年では高炉セメントの国内販売量がセメント全体の25%を超え、更なる汎用型セメントとしての利用が求められている。しかしその一方で、実際の建設現場などにおいては、汎用型の高炉セメントB種では温度ひび割れ発生が認められることもあり、発熱抑制効果が大きくないのではないかという見解もあり、高炉スラグ微粉末を発熱抑制目的で利用される頻度が少なくなりつつある。

そこで、本研究では高炉スラグ微粉末を用いたセメントの発熱特性を明確にするために、簡易的な断熱試験装置を用いて高炉セメント中の高炉スラグ微粉末に関する各種要因を変動させ、発熱抑制に影響のある要因を明確にすることを目的とした。高炉セメントにおける要求性能に応じたセメントの材料設計のためには、使用するクリンカー鉱物、スラグの品質、スラグやセメントの粉末度、スラグ置換率、石膏添加量などを変動することとなる。このような要因を変動させることで、高炉セメントは水セメント比や使用場所・使用時期に応じて様々に対

*1 新日鐵高炉セメント(株) 技術開発センター 博士(工学) (正会員)

*2 新日鐵高炉セメント(株) 技術開発センター マネージャー

*3 新日鐵高炉セメント(株) 技術開発センター グループリーダー (正会員)

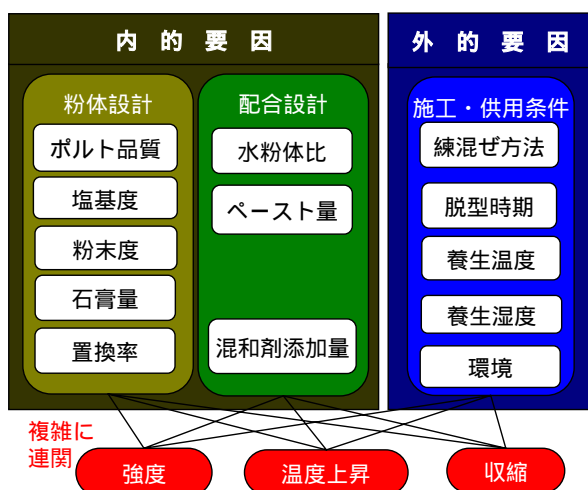


図 - 1 セメントの設計とセメント性能の関係

応可能なセメントの材料設計が可能である材料であると考え。そこで、本研究では各種要因の中から代表的なものを変動させ、発熱に対して影響を与える要因を明確化した。

2. 実験概要

2.1 各種要因と使用材料

- 前述したように高炉セメントの材料設計⁴⁾においては各種要因の組み合わせにより要求性能に対応したセメントの材料設計が可能であると考えられる。そこで図 - 1 に示した要因から本研究においては、以下の要因を変動させた。
- (1)スラグ粉砕方法：ボールミル，ローラーミル
 - (2)スラグ品質（塩基度）：1.73-1.91
 - (3)スラグの粉末度：2000-6000cm²/g
 - (4)スラグ置換率：0-85%
 - (5)石膏添加量：SO₃換算で 1-8%程度
 - (6)打ち込み・雰囲気温度：5,20,40

ここで、シリーズごとの材料要因の組み合わせを表 - 1 に示した。なお、使用したベース普通ポルトランドセメントは粉末度 3340cm²/g で、化学分析結果を表 - 2 に示した。またモルタルの基準配合は W/C=50% , S/C=3 , non-AE とし、細骨材は玄界灘産の海砂（2.58g/cm³ , F.M.2.72）を用いている。

2.2 試験概要

試験は試製した簡易熱特性試験装置を用い

表 - 1 材料要因の組み合わせ

	粉砕方式	塩基度	粉末度	置換率	石膏 (SO ₃)量
(1) 粉砕法	ボールローラー	1.89 程度	2000-6000	50%	無添加
(2) 塩基度	ボールローラー	1.73-1.91	4000程度	50%	無添加
(3) 粉末度	ローラー	1.89 程度	2000-4000	50%	2%
(4) 置換率	ローラー	1.91	4000程度	0-85%	2%
(5) 石膏量	ローラー	1.92	4000程度	50%	1-8%

表 - 2 ベースセメントの化学分析結果

(単位%)

ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂
1.52	20.35	5.83	2.95	63.92	1.72	0.36
MnO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	Total
0.15	1.96	0.29	0.32	0.19	0.012	99.6

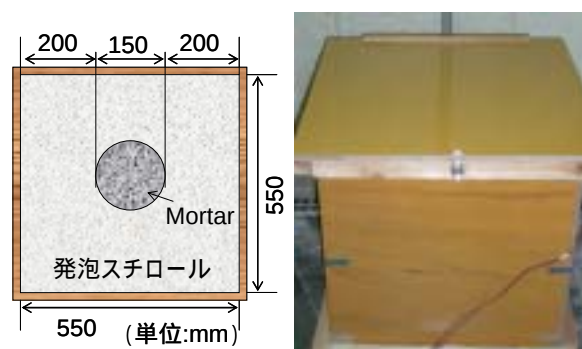


図 - 2 試製簡易熱特性試験装置の概要

た。試験装置は図 - 2 に示すとおりであり、周囲を 20cm の発泡スチロールで包含することで放熱をできるだけ遮断した。試験装置の中心に Φ15×20cm の既製型枠を埋め込み、モルタルを成型し、20cm 厚の発泡スチロール製の蓋をかぶせて木箱で覆った。測定は試験体の中心に熱

電対を埋め込みデータロガーにて 10 分間隔で継続的に行った。ここでこの装置は、一般的に市販されている空気や水循環式の断熱温度上昇試験器とは異なり、完全断熱が不可能であるため温度上昇時にも放熱作用が働き、さらにピークに達してからの放熱過程への移行は早い。そこで、条件を一定とするために試験は雰囲気温度（室温）20 に設定された試験室内で行っている。また、放熱作用が働くことから温度活性を受けにくいものと考えられる。しかし、実構造体を考慮した場合においては、放熱過程を含めた発熱作用を考慮することも有効であると考え、さらにセメントの材料設計を目的とした各種要因分析には有用であると考えたため、簡易的な熱特性試験装置を用いた試験とした。なお、試験は同一配合のモルタルで数回試験したところ、高い精度で再現性が認められたため、今回の検討の中では 1 回の試験結果を評価の対象としている。

2.3 定義

ここで、簡易熱試験における指標として図 - 3 に示す最高温度上昇量 [T_{max} ()], 上昇速度係数 [α_x (/day)] を用いて材料の特性評価を行う。なお、上昇速度を示す指標は式(1)のように定義する。

$$\text{上昇速度係数}(\alpha_x) = \frac{T_{2/3\max} - 2()}{t_{2/3m} - t_2} \quad \text{式(1)}$$

ここで、

- T_{max} : 最高上昇温度 ()
- $T_{2/3\max}$: 最高上昇温度の 2/3 ()
- t_m : 最高温度到達点 (日)
- $t_{2/3m}$: 最高上昇温度の 2/3 到達点 (日)
- t_2 : 上昇温度 2 到達点 (日)

2.4 断熱試験との関連性

今回使用した試製の簡易熱試験装置では放熱による熱損失があるため断熱温度上昇量を推定することが困難である。そこで、吉武らの研究⁵⁾を参考に今回利用した保温型枠の温度降下勾配（室温との温度差による放熱勾配）を硬

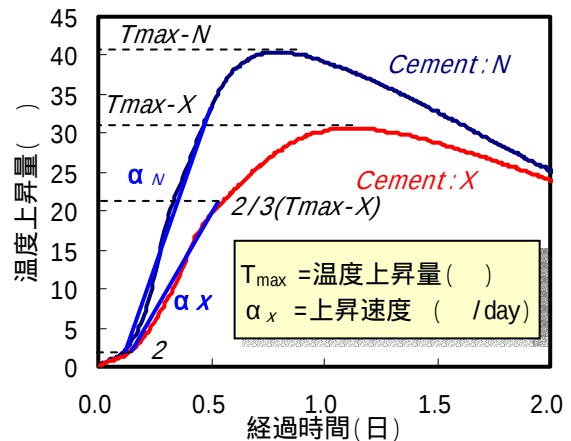


図 - 3 指標の定義と算出例

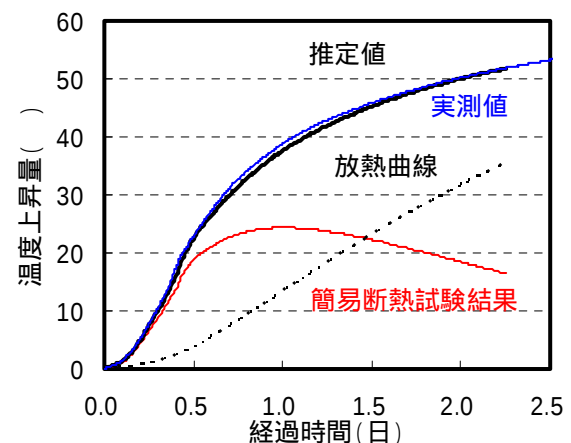


図 - 4 推定値と実測値

化したモルタルを用いて実験的に算出し、使用型枠の断熱性を評価した。算出した温度降下勾配から経時的な熱損失量を算出し積算することで放熱曲線を得た（図 - 4 参照）。得られた放熱曲線と実験で得られた温度上昇曲線の和を温度上昇推定曲線として算出した。さらに空気循環式の断熱試験装置に同一形状のモルタルを投入して断熱試験を行った試験結果と比較したところ非常に高い精度で推定可能であった。そこで、本研究では簡易熱試験装置で算出される T_{max} と α を指標として発熱特性を評価することとした。

3. 試験結果

3.1 各種要因別比較

(1) 粉砕方式の影響

図 - 5 は高炉水砕スラグの粉砕方式が試験用ボールミル，製品用ローラーミルによる微粉末の T_{max} ならびに α を示したものである。なお，粉体は置換率 50% で石膏無添加とし，粉末度は $2000 \sim 6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度まで変動させた。従来の文献⁶⁾によると，一般的にボールミルによる粉砕品はローラーミルによる粉砕品に比べて粒度分布形状がブロードになりやすく，初期強度発現性が高いことが知られている。この初期強度発現性と $6\mu\text{m}$ 以下の微粉との関係が高いこと⁶⁾から今回の検討においても， $6\mu\text{m}$ 以下の微粉量との相関で比較した。これより微粉量が多い粉体ほど発熱量が大きく，その速度も速いことが確認できた。さらにほぼ同等の粉末度や $6\mu\text{m}$ 以下の微粉量が同量としたスラグ微粉末においても，ボールミル粉砕品ほど発熱量が大きくなる傾向が認められその上昇速度も速くなり，粉砕されたスラグ微粉末の粒度分布や微粉末量が発熱性状に影響するといえる。

(2) 塩基度の影響

塩基度の異なる数種類の高炉水砕スラグを $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度に粉砕した微粉末を用いて置換率 50%，石膏無添加で成型したモルタルの結果を図 - 6 に示した。図は塩基度の相違による各指標(T_{max} , α)を表している。これより T_{max} ならびに α はおおむね塩基度の上昇とともに大きくなっていることがわかる。つまり，塩基度の増加に伴い反応が活性化しているといえる。しかしその影響は小さくなく，スラグの品質の差が発熱性状に与える影響は小さいものと考えられる。

(3) スラグ粉末度の影響

図 - 7 は粉末度の異なる微粉末を用いたモルタルの結果を示した。図のように高粉末度ほど発熱量が大きくなることが認められた。しかし発熱速度 α には上昇温度ほどの差が認められなかった。以上より若干のばらつきは認められ

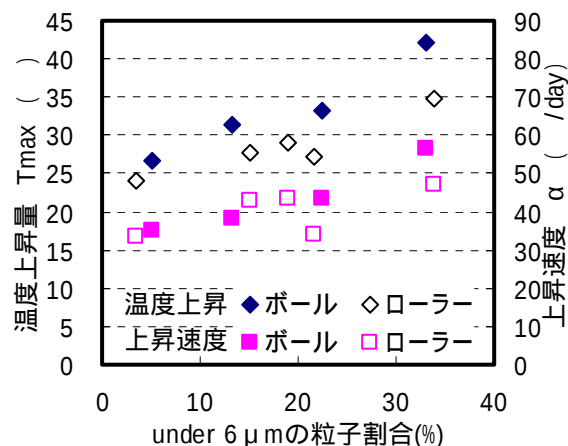


図 - 5 粉砕方式の影響

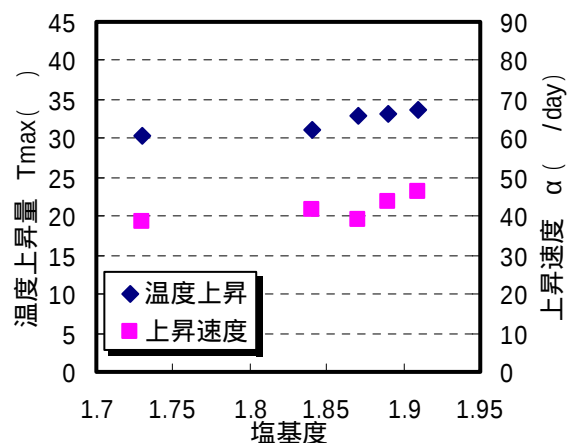


図 - 6 塩基度の影響

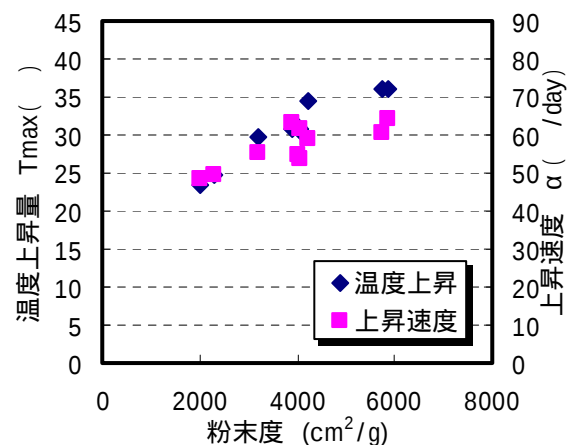


図 - 7 スラグ粉末度の影響

るものの，粉末度の上昇に伴い反応が活性化し，発熱しやすくなることが示唆され発熱抑制効果が低くなる傾向にあるといえる。

(4)スラグ置換率

図 - 8 は 4000cm²/g 程度に粉砕したスラグ微粉末を用いてスラグの置換率を変動させた結果を示した。なお、SO₃量がほぼ 2%程度になるように石膏量を調整している。これより、置換率が大きくなると T_{max}、α とともに減少し、発熱抑制効果が高くなることが認められる。さらに、置換率が 60%を越えたところで T_{max} 並びに α の関係直線の傾きが変化することから、60%以上のスラグ大量置換によりさらに大きな発熱抑制効果が認められることがわかる。

(5)石膏添加量

図 - 9 は 4000cm²/g のスラグ微粉末を置換率 50%としたセメントに石膏を添加し、セメント粉体中の SO₃ が 1～8%程度になるように調整したセメントの発熱性状を示したものである。ここで、石膏はスラグ微粉末に置換しており、ベースセメントの量は一定としている。これより、SO₃ が 1%(ベースセメントのみに石膏添加)で発熱抑制効果が高く、また SO₃ が 1-4%の間では各係数とも上昇を呈している。しかしその一方で、4%を卓越した SO₃ 量では T_{max} では変化が見られず、α は減少を呈した。このことより、発熱特性と強度発現を考慮した石膏の最適添加量でセメントの設計をする必要があると考える。

3.2 発熱性状と強度発現

これまで評価した各種要因別の試験ごとに測定した標準養生を施した材齢 7 日の圧縮強度と T_{max} ならびに α の関係を図 - 10 に示す。これより、SO₃ が高含有したものを除くと温度上昇量 (T_{max}) が大きいほど圧縮強度が大きい傾向が認められ、初期の水和反応による発熱がモルタル強度と大きな相関があることが認められた。また、上昇速度 (α) は一概に相関関係が認められないが、ベースセメント (N: 普通ポルトランドセメント) を用いたものと比較して高炉スラグ微粉末の混入により、上昇速度は遅延する傾向が認められた。このことは、高炉スラグ微粉末が上昇速度を抑制する役割を

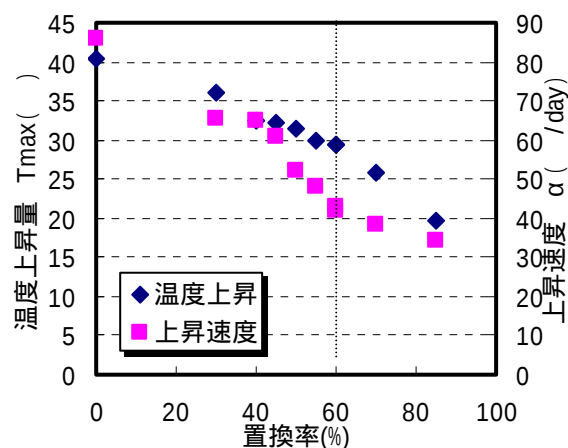


図 - 8 スラグ置換率の影響

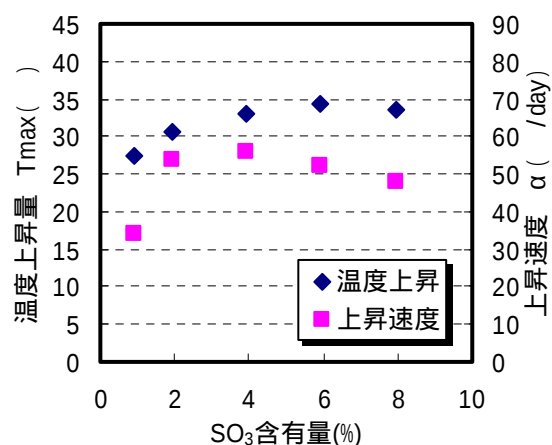


図 - 9 石膏添加量の影響

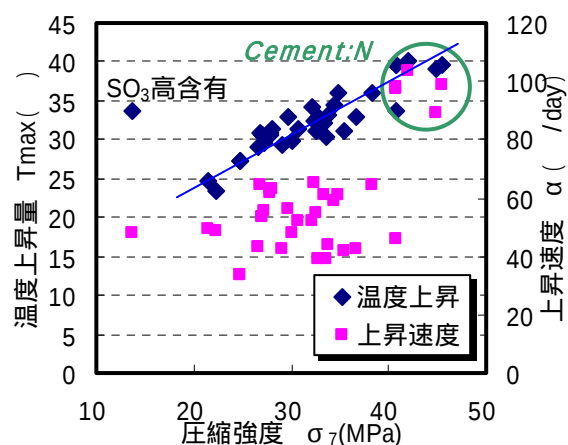


図 - 10 圧縮強度と各指標の関係

担っていることを示している。

3.3 打設温度や雰囲気温度による影響評価

高炉スラグ微粉末の温度依存性を評価する

ために、 SO_3 で 2% 含有した各種粉末度の高炉スラグ微粉末を置換率 50% ならびにベースセメントを用いて打ち込み温度と雰囲気温度を 5, 20, 40 で測定した T_{max} , α の結果を図 - 11, 12 に示した。この場合においても 2.4 で示したのと同様、簡易熱特性試験結果より断熱試験の結果が推定可能であった。いずれの指標も置換した高炉スラグ微粉末の粉末度が低いほど発熱の抑制効果が認められており、粉末度の影響が確認できる。また低温では高炉スラグの反応が遅延するため T_{max} は N と比較して小さくなるが、 α には大きな差が見られない。一方高温の場合、反応は活性化しており T_{max} においては N との差が小さくなるが、 α は大きく抑えられている。さらに $2000 \cdot 3300 \text{ cm}^2/\text{g}$ のように低粉末度であれば高温においても発熱抑制効果が認められた。このように高炉スラグ微粉末混入セメントでは打ち込み温度や雰囲気温度で反応活性に大きな影響があることが認められた。

4. まとめ

本研究によって得られた結果を示す。

- (1) 試製簡易断熱試験装置を用いた試験において、断熱材の特性を利用することで放熱過程を仮定すれば、断熱試験の推定が可能であることが示された。
- (2) 発熱は水和反応によるためベースセメントの変動の影響を受けると考えられるが、同一セメントを利用した場合でのスラグ微粉末に関する各種要因が発熱に及ぼす影響を既報との整合性を含め整理できた。
- (3) 高炉セメントの材料設計における基礎的なデータを収集したところ、低粉末度スラグ微粉末ならびに高置換により発熱抑制効果が高くなることが確認できた。

参考文献

- 1) 高木義廣, 金森茂生, 浜崎満: 簡易断熱モデルによる強度補正值 (S 値) の把握について, 第 12 回生コン技術大会研究発表論文集 pp.209-214, 2003

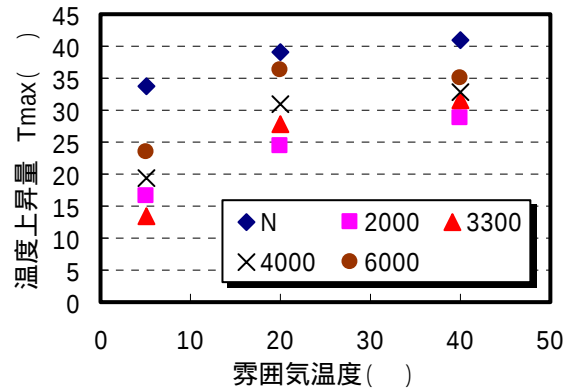


図 - 11 雰囲気温度と温度上昇量の関係

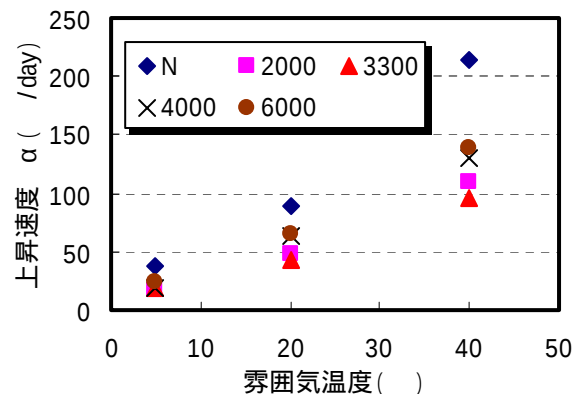


図 - 12 雰囲気温度と上昇速度の関係

- 2) 満木泰郎, 大場貴裕, 乙黒葉月, 溝淵利明: 簡易断熱温度上昇試験方法に関する一考察, マスコンクリートのひび割れ制御方法とその効果に関するシンポジウム (JCI-C66), pp13-20, 2005
- 3) 葛西康幸, 河野広隆, 渡辺博志: 簡易な断熱試験による高強度コンクリートの断熱温度上昇特性の推定に関する検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会, CD-ROM, pp.1167-1168, 2002
- 4) Anton K. Schindler and Kevin J. Folliard; Heat of Hydration Models for Cementitious Materials, ACI Material Journal, pp.24-33, January-February 2005
- 5) 吉武勇, 中村秀明, 谷本俊夫, 浜田純夫: 現場利用可能なマスコンクリートの簡易断熱温度上昇測定法の提案, 土木学会論文集 No.606/V-41, pp103-110, 1998
- 6) 瀬尾文一郎他: 粒度構成の異なる高炉水砕スラグ粉末を用いた高炉セメントの諸性質, セメント技術年報 40, pp.71-74, 1986