

## 報 告

## [1140] 超低発熱形セメントを用いたマスコンクリートの温度履歴

正会員○檀 康弘（新日鐵化学 高炉セメント技術センター）

正会員 近田孝夫（ 同上 ）

永浜一孝（ 同上 ）

正会員 富沢年道（ 同上 ）

## 1. まえがき

最近、構造物が大型化してきており、材料に対する要求も多様化してきている。マスコンクリート施工時には、温度ひびわれ発生の抑制が大きな課題となっており、種々の対策が検討されてきたが、未だ十分ではないようである。

高炉スラグ微粉末は、コンクリートの耐久性や水密性の改善に有効であるのみならず、水和熱の発生が少ないため温度ひびわれの発生防止にも有効な材料である。

著者らは、従来より高粉度の高炉スラグ微粉末を高置換領域で使用することで水和熱の発生をできるだけ抑えた2成分系の超低発熱形セメント（以下SLHCと称する）を用いて、その強度特性や発熱性状、フレッシュコンクリート性状等を確認する実験を行ってきた。<sup>[1]</sup> 今回、この2成分系のSLHCを用いて実際の構造物を施工し、温度履歴や強度特性を測定したので、ここに報告する。

また施工者の要請で、現場でマスコンクリートの温度応力の解析を行うため、比較的容易に断熱温度上昇の近似式を推定する方法についても検討した。

## 2. 実験

## 2. 1 使用材料

本試験で用いたSLHCは、粉度が $6000\text{cm}^2/\text{g}$  の高炉スラグ微粉末を普通ポルトランドセメントの85%置換したものである。また比較のため高炉セメントB種（以下BB）も用いた。セメントの化学成分と物理試験結果を表-1および表-2に示す。粗骨材は最大寸法20mmで比重2.70、粗粒率6.64の福岡県門司区産碎石を用い、細骨材は福岡県藍島産海砂と大島産海砂の混合砂で、比重2.56、粗粒率2.53である。混和剤は主成分がリグニンスルホン酸系の標準型AE減水剤を用いた。

## 2. 2 構造物の概要

施工場所は北九州市戸畠区化学工場内の埋立地である。構造物は長さ×幅×高さが $9.6 \times 9.6 \times 1.5\text{m}$ の設備基礎2基

であり、体積は1基 $138.24\text{m}^3$ である。

表-1 化学成分 (%)

	ig. loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
SLHC	0.6	31.0	12.8	0.9	45.4	5.6	2.0
BB	1.8	26.6	9.8	1.6	52.4	4.0	2.0

表-2 物理試験結果

セメント	比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	凝結試験			圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )				水和熱 (cal/g)	
			水量 (%)	始発 h-m	終結 h-m	3日	7日	28日	91日	7日	28日
SLHC	2.93	5780	32.0	3-30	5-45	139	229	366	435	34.9	43.3
BB	3.02	3850	29.7	2-34	3-47	132	220	427	570	61.8	80.1

形状寸法は図-1に示す。

### 2.3 コンクリートの配合

配合条件は設計基準強度 $210\text{kgf/cm}^2$ 、目標スランプ $12\pm 2\text{cm}$ 、目標空気量は $4\pm 1\%$ とした。なおBBは生コン工場の標準配合とし、SLHCの配合は同一の材料を用いて事前に配合試験を行い決定したため、単位セメント量、単位水量が異なる値となった。配合は表-3に示す。

### 2.4 施工要領

コンクリートの打ち込みは平成2年6月20日に行い、午前中にSLHC 1基、午後にBB 1基を打ち込んだ。天気は快晴で、気温は $29^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$ と高かった。

コンクリートは運搬時間10分以内の生コンプレントの、強制パン型ミキサで練り混ぜ、アジデータ車で現場に搬入し、ポンプ車にて施工した。構造物下面はあらかじめ均しコンクリートを施工してあり、木製の型枠を使用した。

養生はコンクリート打ち込み後、上面にマットを敷き、3~5cm湛水して行い、材令3日で脱型した。

### 2.5 試験項目

(1) フレッシュコンクリートの性状：スランプ、空気量、ブリージング率を測定した。

(2) 圧縮強度、引張強度および静弾性係数：実際に使用したコンクリートを用いて供試体を作成し、養生は現場水中養生および標準養生の2種類とした。また材令は1, 3, 7, 28, 91日とした。

(3) 構造物の内部温度の測定：構造物の内部温度は図-1に示すように、中心部鉛直方向に6点、水平方向に5点の計10点（測点①～⑩）の位置に熱電対を埋め込み、デジタル式の記録計にて7日間自動測定した。

(4) 断熱温度上昇：室内試験機による断熱温度上昇試験（以下室内断熱試験）は株マルイ製の空気循環式の試験機を用い、実際使用したコンクリートを室内に搬入して供試体を作成した。現場での断熱温度上昇試験（以下現場断熱試験）は、厚さ30cmの発泡スチロールを内張りした木製型枠内で $1\times 1\times 1\text{m}$ のコンクリートブロックを打ち込み、その中心温度を測定するもので打ち込み後7日間屋外に放置して温度を測定した。

(5) 脱型後の構造物による試験：脱型後の埋め戻しや施工上の理由からコアを採取できない

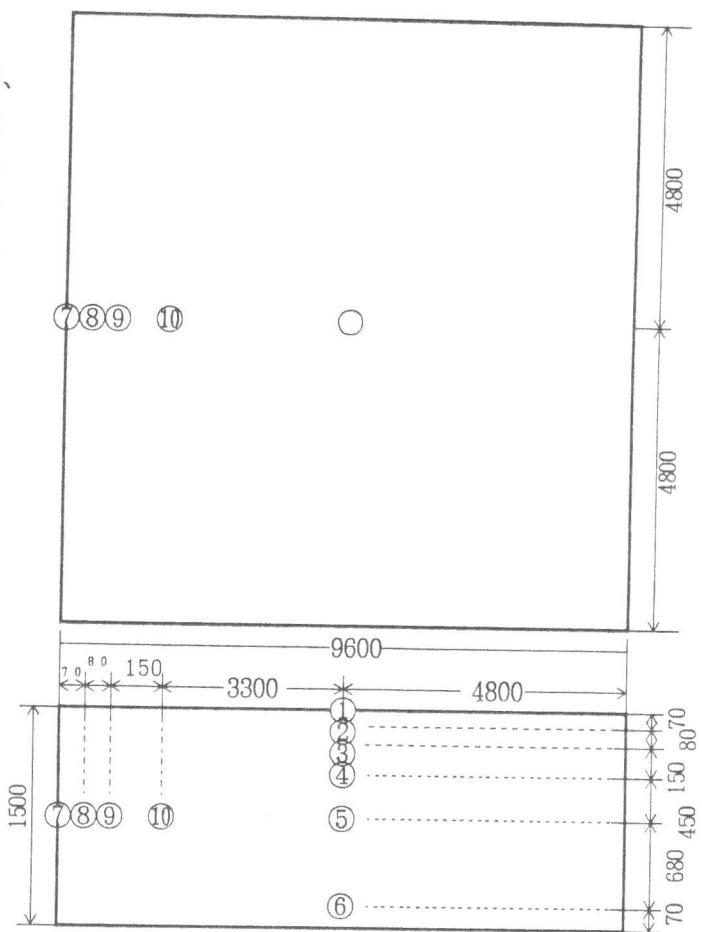


図-1 構造物形状および温度測定位置

表-3 コンクリートの配合

セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )				
			W	C	S	G	混和剤
SLHC	59.6	46.4	155	260	850	1037	C x 0.25%
BB	56.0	45.6	164	290	817	1026	C x 0.25%

ため、脱型後材令4日にシュミットハンマー試験を行い構造物の強度を推定した。打点は構造物側面の上部（上面より30cm）中部（同じく75cm）下部（同じく120cm）について行い、各部で20点測定した平均値とした。また構造物表面のひびわれや色について観察した。

（6）自然暴露試験：現場断熱試験終了後のコンクリートブロックを材令7日にて型枠および発泡スチロールを外して屋外に放置し、材令2カ月でコアによる試験（圧縮強度および静弾性係数）シュミットハンマーによる圧縮強度の推定（打点は側面）を行った。またブロックの表面に金属製のピンを打ち込み、これを基長として表面劣化（アブサンデン現象）深さの測定を開始した。さらにある程度材令が経過した時点で、生成水和物の確認、細孔径分布等の測定を行い、耐久性の確認を行う予定である。

セメント	スランプ (cm)	空気量 (%)	ブリージング率 (%)	打込み 温度 (%)
SLHC	10.5	3.0	2.12	27.0
BB	11.0	3.7	4.34	30.5

### 3. 実験結果 及び 考察

（1）フレッシュコンクリートの性状：表-4にフレッシュコンクリートの性状を示す。また図-2に経過時間とブリージング率の関係を示す。

SLHCはBBと比較すると空気量がやや小さくなつた。またブリージング率は、丸安等の報告[2]によると水セメント比が大きいと大きくなるとされているが、今回の実験ではSLHCはBBより水セメント比が大きいにもかかわらずブリージング率は約1/2であった。これまでの研究においてもスラグ粉末を用いると置換率や粉末度が大きくなるに従つて、その微粉末効果によりブリージング率は減少することが報告されている。

[3][4] 今回のSLHCでも既往の報告同様に、高炉スラグ微粉末の粉末度が  $6000\text{cm}^2/\text{g}$  と小さく、置換率が85%と大きいためにブリージング率は減少した。

（2）圧縮強度、引張強度および静弾性係数：

結果を表-5に示す。また材令と圧縮強度の関係を図-3に、圧縮強度と引張強度、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4、図-5に示す。

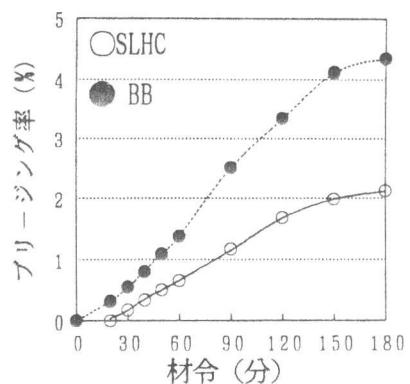


図-2 ブリージング率

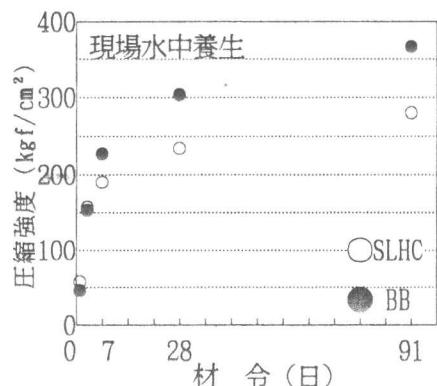


図-3 圧縮強度

表-5 圧縮強度、引張強度および静弾性係数試験結果

セメント	養生方法	圧縮強度 (kgf/cm²)					引張強度 (kgf/cm²)					静弾性係数( $\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ )				
		1日	3日	7日	28日	91日	1日	3日	7日	28日	91日	1日	3日	7日	28日	91日
SLHC	現場	57.5	157	190	234	280	6.55	11.7	19.6	23.0	23.9	1.55	2.63	2.99	3.13	3.42
	標準	----	114	178	244	295	----	10.4	15.2	22.4	28.1	----	2.06	2.68	3.26	3.45
BB	現場	45.5	153	227	303	366	4.50	12.9	20.8	30.4	31.5	1.07	2.15	2.72	3.45	3.66
	標準	----	113	195	308	399	----	9.91	15.9	24.7	30.1	----	1.89	2.48	3.25	3.69

材令1日の圧縮強度はSLHCがW/Cが大きいにもかかわらずBBを上回り、材令28日ではBBの強度増進が大きかった。これは打ち込み温度が30°C前後と比較的高く、また高粉末度の高炉スラグ微粉末を用いていることから、高炉スラグ微粉末の初期の反応が活性化し、材令1日で特に強度が大きくなつたと考えられる。いずれの場合も設計基準強度(210kgf/cm<sup>2</sup>)は十分に満足した。図-4より圧縮強度と引張強度の関係でSLHCとBBは同等であり、図-5より同一圧縮強度であれば静弾性係数はSLHCがやや大きかった。

(3) 構造物の内部温度の測定：構造物の中心位置(測点⑤)の温度履歴を図-6に示す。また中心位置(測点⑤)と上面部(測点①)の温度差を図-7に示す。

SLHCでは材令31時間で測点⑤の最高温度が50.5°Cであり、打ち込み温度が27.0°Cであるので温度上昇量は23.5°Cとなった。また同様にBBでは、46時間で65.1°Cが最高温度となり温度上昇量は34.6°Cとなった。BBにおいては単位セメント量30kg/m<sup>3</sup>大きくなると最終断熱温度上昇量が約3.9°C上昇するので[5]、これを差し引いても、SLHCを用いることによりBBよりも上昇温度が23%抑制されたことになる。また中心と上面の温度差は、SLHCでは材令45時間で最大17.7°Cで、BBは90時間で25.6°Cであった。

(4) 断熱温度上昇：図-8に室内断熱試験と現場断熱試験の結果を示す。

室内断熱試験結果から求めたSLHCの断熱温度上昇式を①式に示す。

$$Q = 23.2 (1 - e^{-1.786 t}) \dots \text{①}$$

SLHCの $\alpha$ 値は打ち込み温度が20°Cの場合0.84程度[6]であるが1.786と高くなつたのは、打ち込み温度が27.0°Cと高くなりセメントの水和とともにスラグの水和が初期においてかなり活性化したためと考えられる。

またSLHCについて現場断熱試験と室内断熱試験結果を比較すると、最大温度上昇量は22.7°C(36

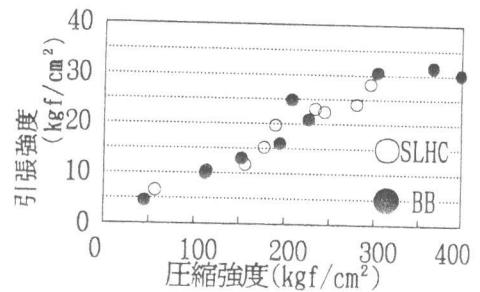


図-4 圧縮強度と引張強度の関係

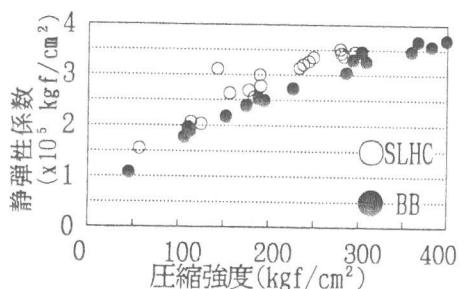


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

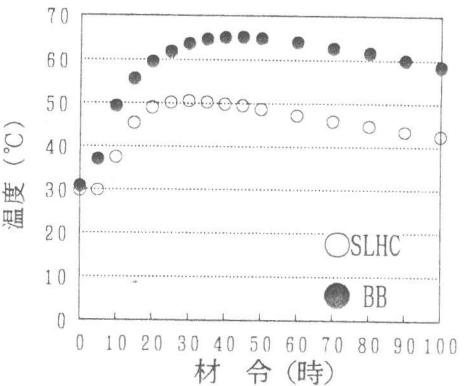


図-6 構造物中心温度の推移

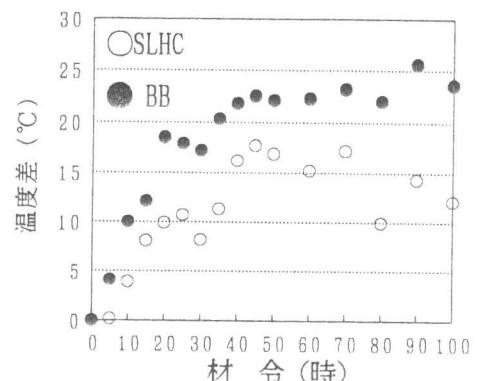


図-7 構造物中心と表面の温度差

時間) 23.2°C (120時間) とその差は小さく、特に温度上昇過程では同一の温度履歴を示した。今回の温度条件は、30°C程度と高温下であったが、低温時では現場断熱試験において放熱条件が厳しくなるため、両試験方法で差が大きくなると推察されるので、さらに試験を重ねることで現場断熱試験で室内断熱試験による断熱温度上昇式の推定が可能になると考えられる。

現場断熱試験結果をSLHCとBBで比較すると、SLHCが材令36時間で最高温度49.7°Cに達しているのに対しBBでは60時間で71.6°Cとなり、単位セメント量による差(3.9°C)を差し引いてもSLHCの方が約26%低下した。

SLHCは強度から推察して初期の水和がかなり活性化していると考えられるが、温度上昇速度においてはBBよりも緩やかである。SLHCは発現した強度に比して温度上昇の少ないことが特長であるが、例えば材令3日の断熱温度上昇量/圧縮強度の比でみると、SLHCが0.15であるのに対しBBは0.29であり約1/2となつた。

これらの結果に基づいてCP法(コンペニセイションプレイン法)[7]により温度ひびわれ指数の計算を行つた。その結果を図-9に示す。ただしコンクリートの表面温度は、外気温が最低になる午前4時前後の値を用いた。

図-9より材令3日まではSLHCとBBにおいてひびわれ指数に差は見られない。材令3日までは、SLHCはBBよりも温度上昇量が小さく、引張強度が大きいが同等であるにもかかわらず、ひびわれ指数に差が認められないのは、静弾性係数がBBよりもSLHCの方がかなり大きいため温度応力が大きく算出されたためと考えられる。SLHCの静弾性係数については今後さらに検討する予定である。材令4日以降では、BBは図-7に示すように中心温度と表面温度の差が材令3日を過ぎてもそれほど低下せずひびわれ指数が1.5程度で推移しているが、SLHCは3日以降温度差が小さくなりひびわれ指数は上昇(安全側)している。またSLHCの場合はひびわれ指数が最小値でも1.5以上あり、かなり安全である。

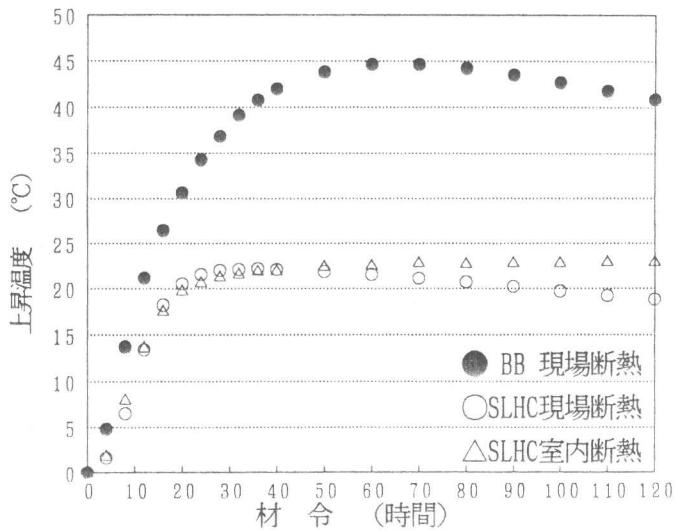


図-8 断熱温度上昇試験結果

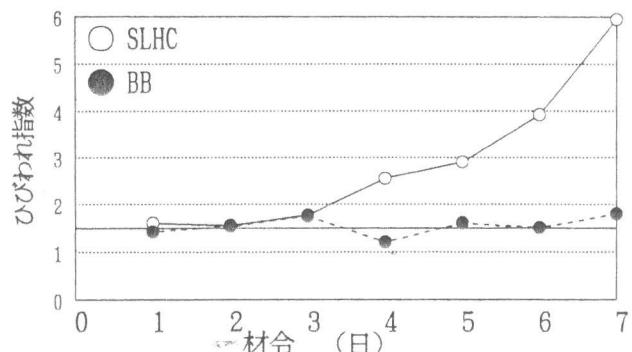


図-9 ひびわれ指數

表-6 構造物推定圧縮強度

セメント	上部	中部	下部
SLHC	192	167	189
BB	216	219	259

(kgf/cm<sup>2</sup>)

表-7 ブロックの試験結果(材令2カ月)

セメント	コア		シミュットハンマー 推定強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (x10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	
SLHC	286	2.755	275
BB	324	2.596	337

(5) 脱型後の構造物の観察：材令3日脱型後、構造物の側面（型枠面）を観察したが、BBは灰白色であったのに対して、SLHCはスラグの配合量が多いためスラグの特色である青色の程度が強かった。またどちらの構造物にもひびわれは認められなかった。材令4日のシュミットハンマーによる推定圧縮強度を表-6に示す。ただし試験日が脱型後1日経過しているためコンクリート表面は気乾状態であった。この結果を表-5の圧縮強度と比較すると、材令を考慮しても推定圧縮強度は供試体強度よりやや高めの値であった。

(6) 自然暴露試験：採取したコアの圧縮強度、静弾性係数、ならびにシュミットハンマー試験結果を表-7に示す。

材令2ヶ月のコアの圧縮強度と表-5および図-3に示した供試体による材令91日の圧縮強度試験結果を比較すると、SLHCでは圧縮強度はほぼ同等の値を示しているのに対し、静弾性係数は供試体のそれよりもやや小さくなかった。これは供試体とブロックの脱型時期や養生条件が異なることがその要因の一つであると考えられるが今後さらに検討する必要がある。シュミットハンマーによる推定圧縮強度は、コアの圧縮強度とほぼ一致した。

#### 4.まとめ

今回の実験によって以下のことが確認された。

(1) SLHCはBBと比較して、ブリージング率が約1/2であった。

(2) いずれのセメントを用いた場合も設計基準強度は十分に満足した。また材令1日の圧縮強度はSLHCがBBを上回った。

(3) 構造物内部の温度上昇履歴を測定した結果、中心部の最大温度上昇量がSLHCで23.5°C、BBで34.6°Cとなり、単位セメント量による差を差し引いても23%低減できた。

(4) SLHCは温度上昇速度、最大値ともBBよりかなり小さくなかった。材令3日の温度上昇量／圧縮強度の比で比べるとSLHCはBBの約1/2であった。

これらの結果より、高粉末度の高炉スラグ微粉末を85%置換した超低発熱形のセメントは温度ひびわれの抑制に効果があることが確認された。

#### 参考文献

- 1) 阪本好史 他：高スラグセメントの発熱性状に関する研究、セメントコンクリート論文集、No.43、pp268～273、1989
- 2) 丸安隆和 他：高炉セメントコンクリートの研究、東京大学生産技術研究所報告、Vol.15、No.4、1966.2
- 3) 遠藤裕悦 他：高炉スラグ微粉末がコンクリートの配合と強度におよぼす影響について、高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集、土木学会、pp73～80、1987.3
- 4) 今井益隆 他：高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの諸性質、高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集、土木学会、pp67～72、1987.3
- 5) マスコンクリート温度応力の計算方法とそのパソコンプログラム、日本コンクリート工学協会（マスコンクリートの温度応力研究委員会）、1985、p4
- 6) 山田勝彦：超低発熱-海中コンクリート・気中コンクリート、第249回コンクリート講演会テキスト、(社)セメント協会、1990、p23-34
- 7) マスコンクリートの温度応力計算用パソコンプログラム集、Version II、日本コンクリート工学協会（マスコンクリートの温度応力研究委員会）、1989