

## 報告 鉄鋼スラグ水和固化体のマスコンクリートへの適用

松永 久宏\*1・高野 良広\*2・網野 貴彦\*3・錦織 和紀郎\*4

**要旨:** 鉄鋼スラグ水和固化体の結合材（高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，アルカリ刺激材）の水和による温度ひび割れ検討のための基礎データを得るべく，モデルブロックの試験施工を行い，温度変化や発生ひずみ，発生応力などを計測した。その結果，コンクリートと比較して最高温度に達してからの温度降下速度がやや遅く，また温度上昇時における熱膨張係数が大きい特徴があることがわかった。一方，躯体内部の温度上昇量や発生応力は，一般的なコンクリートと同様に富配合のものが大きい。本施工試験の  $1.8 \times 1.8 \times 1.8\text{m}$  ( $5.8\text{m}^3$ ) 相当のマスコンクリートへは，温度ひび割れの問題を生じることなく施工可能なことがわかった。

**キーワード:** 鉄鋼スラグ水和固化体，マスコンクリート，リサイクル，製鋼スラグ，高炉スラグ微粉末

### 1. はじめに

環境への負荷が少ない循環型社会の形成を目的に，コンクリート分野においても再生骨材の利用技術開発<sup>1)2)</sup>，産業副産物である銅スラグを使用した高密度コンクリートの開発<sup>3)</sup>，フライアッシュの細骨材補充混和材としての利用<sup>4)</sup>などが行われている。一方，鉄鋼を生産する過程において大量に発生する鉄鋼スラグは，道路用路盤材やセメント原料への活用が進められてきた<sup>5)</sup>が，可能な限りのゼロ・エミッションを推進するためにも，さらなる有効利用方法の開発が必要となっている。

このような背景のもと，コンクリートの代替が可能な新しい固化体として，骨材に鉄鋼生産の製鋼工程で副産する製鋼スラグ，結合材に高炉スラグ微粉末を用いた環境調和型材料である鉄鋼スラグ水和固化体が開発された<sup>6)7)</sup>。鉄鋼スラグ水和固化体は，使用する材料の多くが副産物であることから，コンクリートの代替として使用すれば天然骨材の採取削減やセメント製造にともない発生する二酸化炭素の排出低減が可能となる<sup>8)</sup>。この鉄鋼スラグ水和固化体は，これまでに被覆ブロックなどの異型ブロック，捨石代替材などの港湾工事用材料として利用されている<sup>6)7)</sup>。

鉄鋼スラグ水和固化体の主な用途である異形ブロック，上部コンクリートなどの港湾構造物は，一般に無筋構造物が多く，施工段階で生じたひび割れが，構造物の安全性や耐久性に影響を及ぼすことがある。このうち，結合材の水和に起因するひび割れの抑止方法は，コンクリートの場合，温度解析によって算定される温度分布に基づく体積変化と自己収縮による体積変化を求め，これらを取り入れた応力解析によって算定されたコンクリートの応力によって有害なひび割れが発生しないこと

を確かめることにより行われる<sup>9)</sup>。

一方，鉄鋼スラグ水和固化体は，その構成材料が通常のコンクリートとは異なるため，結合材の水和に起因する応力による構造物への影響をコンクリートの知見を用いて検討することが妥当であるかが明らかでない。そこで，鉄鋼スラグ水和固化体のマスコンクリートへの適用を目的として，結合材の水和による温度ひび割れ検討のための基礎データを得ることとした。すなわち，モデルブロックの試験施工を行い，施工過程における内部温度変化や発生ひずみ，発生応力の変化などの計測により，鉄鋼スラグ水和固化体の特徴を評価し，マスコンクリートへの適用性について検討した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 試験体サイズと配合

試験体サイズは，コンクリートの知見を用いて検討した事前の温度応力解析の結果から，比較的大きな応力発生が期待できる  $1.8 \times 1.8 \times 1.8\text{m}$  ( $5.8\text{m}^3$ ) のマスコンクリート相当の無筋方塊ブロックとした。

鉄鋼スラグ水和固化体および比較のために用いた普通コンクリートの試験体の配合およびフレッシュ時の性状をそれぞれ表-1，表-2に示す。鉄鋼スラグ水和固化体の試験体Aと試験体Bは，製鋼スラグの産地の違いを比較するために，N，K製鉄所産の製鋼スラグを用い，ほぼ同配合（貧配合）となるようにした。試験体Cはアルカリ刺激材の影響を比較するために，試験体Bよりもアルカリ刺激材（普通ポルトランドセメント）の量を多くした（富配合）。なお，試験体Cは，材齢28日強度を試験体Bと同等程度とするために単位水量を多くした。そのため，高性能減水剤は使用しなかった。

\*1 JFEスチール(株) スチール研究所 (正会員)

\*2 新日本製鐵(株) 技術開発本部 環境・プロセス研究開発センター (正会員)

\*3 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター (正会員)

\*4 (株)不動テトラ ブロック環境事業本部 技術統轄部 (正会員)

表-1 鉄鋼スラグ水和固化体の配合およびフレッシュ時の性状

供試体名 材料・配合名	製鋼 スラグの 最大寸法 (mm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								フレッシュ時の性状		
		水	高炉スラグ 微粉末	アルカリ 刺激材	フライ アッシュ	K スラグ 0-5mm	K スラグ 5-20mm	N スラグ 0-25mm	高性能 減水剤 (g/m <sup>3</sup> )	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
		W	BP	NP	FA	SS-1	SS-2	SS-3	Ad			
試験体 A N スラグ貧配合	25	174	297	53	134	0	0	1880	1470	19.5	1.5	11.7
試験体 B K スラグ貧配合	20	174	297	53	134	940	995	0	2550	17.0	1.5	9.9
試験体 C K スラグ富配合	20	231	300	139	141	806	854	0	0	18.0	1.4	9.1

表-2 普通コンクリートの配合およびフレッシュ時の性状

供試体名 配合種別	粗骨材の 最大寸法 (mm)	水 セメント比 W/C	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							フレッシュ時の性状		
			水	セメント	細骨材 (1)	細骨材 (2)	粗骨材(1) 5-15mm	粗骨材(2) 15-25mm	AE 減水剤 (g/m <sup>3</sup> )	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
			W	BB	S-1	S-2	G-1	G-2	Ad			
試験体 D (21-8-20-BB)	20	58.5	169	289	559	247	493	493	2890	9.0	4.6	11.0

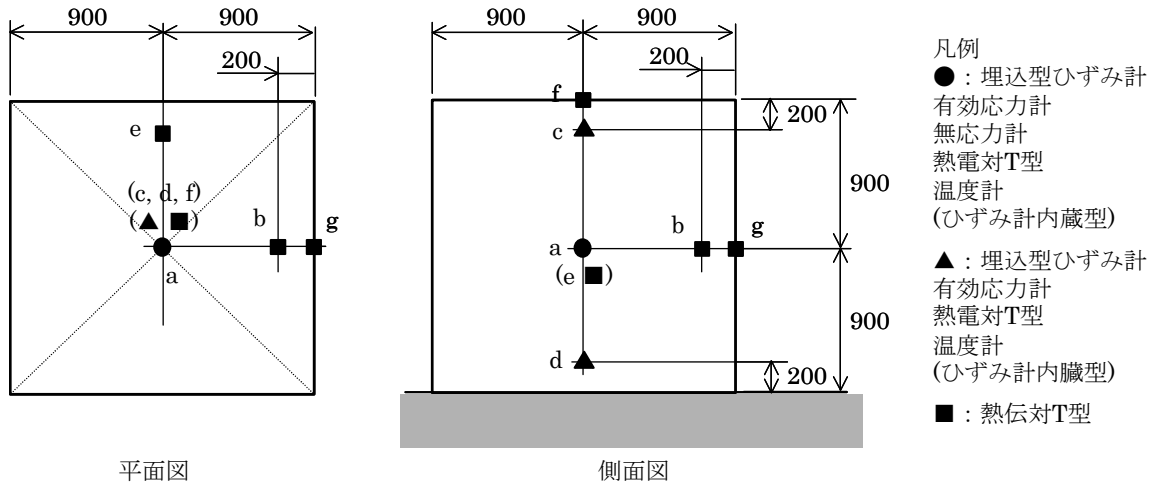


図-1 計測箇所

## 2.1 計測項目および方法

計測項目は、温度、ひずみ、応力、熱膨張係数とした。温度は熱電対、ひずみは埋め込み型ひずみ計、応力は有効応力計、熱膨張係数は無応力計により計測した。計測箇所を図-1に示す。

なお、試験体は無筋構造であるため、型枠組立に用いるセパレータ(φ12mm)と必要最小限の丸鋼(φ9mm)を組み合わせて架台を設け、計測器をその架台に結束バンドにより固定した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 内部温度

中心部 a と天端付近 c の躯体内部の温度変化をそれぞれ図-2、図-3に示す。温度上昇量および温度上昇速度を比較すると、試験体 D (普通コンクリート) が最も大きく、ついで試験体 C (K スラグ富配合) である。また、

製鋼スラグの産地が異なる鉄鋼スラグ水和固化体の貧配合である試験体 A と B では、温度上昇量および温度上昇速度にほとんど違いがない。このように、鉄鋼スラグ水和固化体内の比較では、製鋼スラグの産地の違いよりも、結合材の種類と量による影響が大きいと考えられる。

最も高温となる中心部と最も低温となる天端面の温度差は、中心部が最高温度となる材齢において、試験体 A が 12.0°C、B が 14.8°C、C が 19.8°C、D が 16.6°C となり、富配合である試験体 C が部材内の温度差が最も大きい結果となった。

一方、鉄鋼スラグ水和固化体は、最高温度に達してからの温度降下速度がコンクリートよりも遅い傾向が見られる。この理由として、今回の試験に用いられた鉄鋼スラグ水和固化体(約 2,600kg/m<sup>3</sup>)とコンクリート(約 2,300kg/m<sup>3</sup>)の単位体積質量の違いが熱拡散率に及ぼす

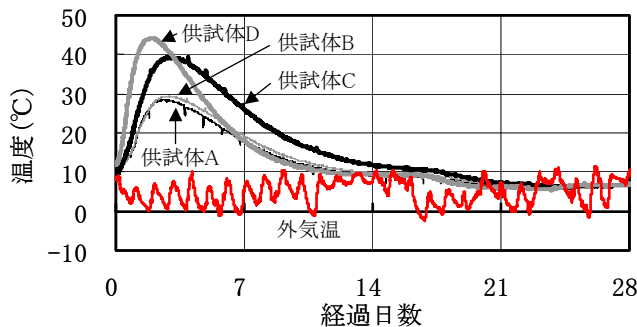


図-2 中心部の温度推移

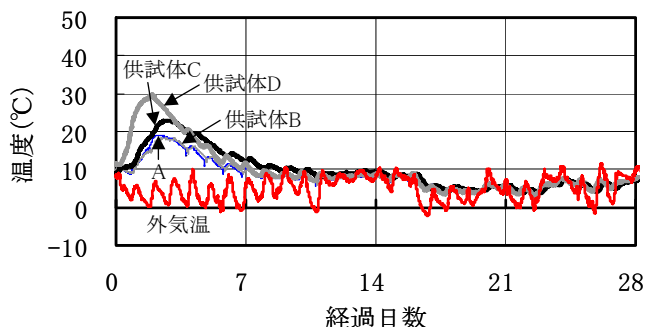


図-3 天端付近の温度推移

影響，比熱や熱伝導率などの違いの影響があげられる。鉄鋼スラグ水和固化体の温度解析を行うにあたっては，この影響を考慮する必要がある。

### 3.2 熱膨張係数

試験体 B（鉄鋼スラグ水和固化体）と D（普通コンクリート）の各供試体の中心部 a に設置した無応力計のひずみと温度の関係および両者の勾配から求めた熱膨張係数をそれぞれ図-4 および図-5 に示す。

図中において温度上昇時(1)は，打込み後初期（打込み後約 1 日間）に見られるもので，硬化開始前の温度応力に影響しない部分であり，それ以降の熱膨張係数が温度応力に影響する部分である。熱膨張係数の大きな特徴として，試験体 D の普通コンクリートは温度上昇時(2)と温度下降時の値がほぼ一致しているのに対し，試験体 B の鉄鋼スラグ水和固化体は両者が異なる点が挙げられる。この現象は，配合や製鋼スラグの産地が異なる試験体 A および C の鉄鋼スラグ水和固化体でも確認された。

小澤らは，コンクリートの熱膨張係数は若材齢時に大きくなることを指摘しているが，打込み 20 時間後には温度下降時と同じ安定した値に収束することを確認している<sup>10)</sup>。このことから，コンクリートの温度応力解析では熱膨張係数を一定値として扱うことが多いが，本試験のように打込み後初期に内部拘束ひび割れの発生が予想される構造物に鉄鋼スラグ水和固化体を適用する場合の温度応力解析には，温度上昇時と下降時で異なる熱膨張係数を考慮する必要があるものと考えられる。

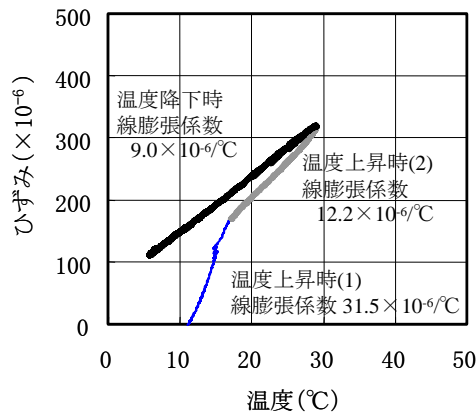


図-4 試験体Bのひずみと温度の関係

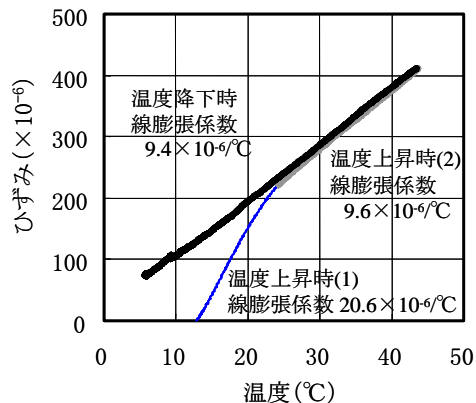


図-5 試験体Dのひずみと温度の関係

### 3.3 発生応力

有効応力計によって測定された発生応力の推移を図-6 および図-7 に示す。図の縦軸（応力）は正の値が引張応力，負の値が圧縮応力を表している。図-6 に示す中心部 a の応力は，コンクリートの場合，打込み初期に最も大きな圧縮応力を示したが，材齢 7 日以降では $-0.2 \sim 0.2 \text{ N/mm}^2$ の小さい応力範囲で推移した。鉄鋼スラグ水和固化体の場合，初期に発生する圧縮応力がコンクリートよりも小さいが，長期的にはそれより大きい引張応力が発生した。特に富配合の試験体 C では，打込み 28 日後の引張応力が  $0.8 \text{ N/mm}^2$  以上にまで達している。

図-7 に示す天端付近の応力は，いずれの試験体も材齢 7 日が経過するまでは  $0.2 \text{ N/mm}^2$  程度の微小な引張応力が発生している。しかし，それ以降は鉄鋼スラグ水和固化体では引張応力が消失し 0 付近で推移しているのに対し，コンクリートは時間の経過とともに圧縮応力が大きくなる傾向を示した。

### 3.4 発生ひずみ

中心部 a のひずみ計により計測したひずみの推移を図-8 に示す。なお，ひずみ計によるひずみは，温度変化の影響に加え，内部拘束や外部拘束など全ての要因が足し合わされた実際に生じるひずみを表している。

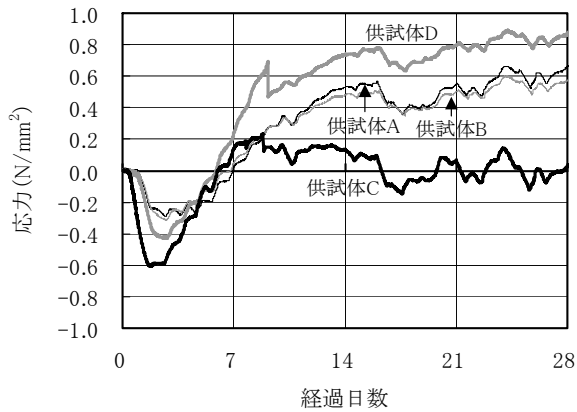


図-6 中心部 a の発生応力の推移

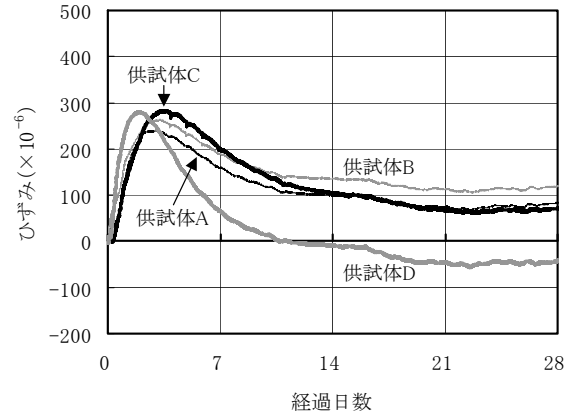


図-8 中心部 a のひずみの推移

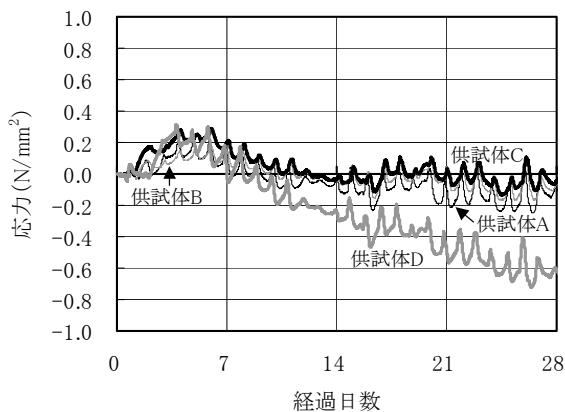


図-7 天端付近 c の発生応力の推移

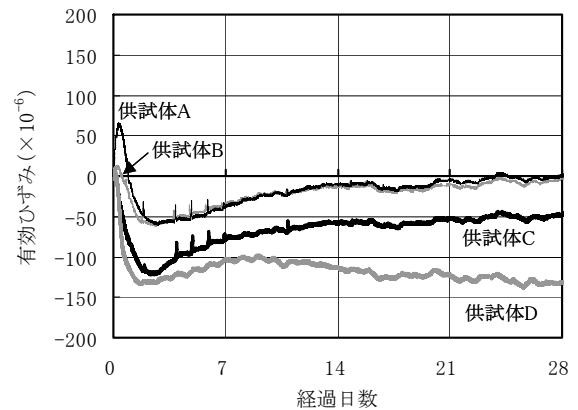


図-9 中心部 a の有効ひずみの推移

ひずみは、鉄鋼スラグ水和固化体の試験体 C (富配合) において最も大きくなっており、コンクリート試験体 D のひずみよりもやや大きい。この傾向は、図には示さなかったが、天端付近 c および地盤面付近 d においても同様であった。この原因としては、各試験体の外部拘束条件や環境条件などがほぼ同等なので、コンクリートと鉄鋼水和スラグ固化体では内部拘束の程度（ヤング係数の発現性やクリープ係数の違いなど）に違いがあることや、3.2 で述べた温度上昇時の熱膨張係数の違いによる影響などが考えられる。

応力に寄与するひずみ（有効ひずみ）は、拘束を受けず温度変化のみによって自由に変形するひずみ（無応力によるひずみ）と内部拘束や外部拘束、鉄筋などの拘束を受けた状態におけるひずみ（ひずみ計によるひずみ）との差として考えることができる。有効ひずみを中心部 a 点の無応力計とひずみ計の測定結果から整理した結果を図-9 に示す。鉄鋼スラグ水和固化体 A と B では打込み初期に一時的に有効ひずみが大きくなる状況が確認されたが、長期的にはこれらの試験体の有効ひずみはほぼ同じであり、材齢 2 日までは低下し、材齢 3 日から 14 日において増加し、14 日以降ではほぼ一定となった。この

挙動は、図-6 に示した発生応力の推移と一致している。

なお、コンクリート試験体 D については、鉄鋼スラグ水和固化体よりも温度上昇量が大きいにもかかわらず材齢 8 日目以降のひずみが 0 前後で推移したり、有効ひずみが減少傾向となったりする状況が確認されており、中心部で計測器の故障やひび割れなどの、何らかの異常が発生している可能性がある。

### 3.5 強度

標準養生および現場封緘養生試験体について、圧縮強度試験および割裂引張強度を行った。

コンクリートの強度発現は、養生過程における温度条件の影響を受けることが知られており、そのひとつとして、圧縮強度の推定式として、積算温度から圧縮強度を推定する式(1)、式(2)が知られている<sup>11)</sup>。

$$M = \int \beta'(\theta + 10) \quad (1)$$

$$\sigma_c = a \times \log M - b \quad (2)$$

ここに、 $M$ ：積算温度 ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$ ：温度は  $-10^{\circ}\text{C}$  基準)

$\beta'$ ：コンクリート温度  $\theta$  の補正項

(本検討では  $\beta' = 1$  とした)

$\theta$ ：コンクリート温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

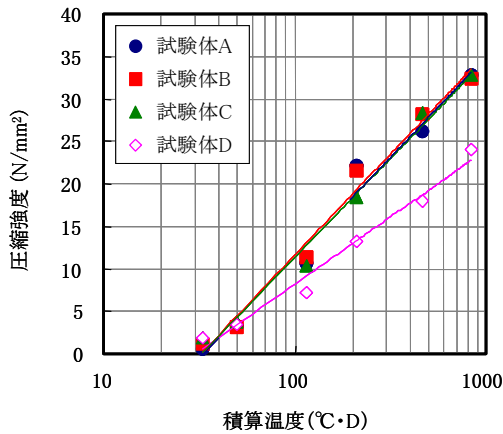


図-10 積算温度と圧縮強度の関係

$\sigma_c$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$a, b$  : 実験定数

そこで、現場封緘養生供試体の平均外気温を 6.5°C 一定の条件として、積算温度と圧縮強度の関係を求めた。積算温度と圧縮強度の関係を図-10 に示す。鉄鋼スラグ水和固化体の圧縮強度は、コンクリートと同様に式(1)から推定できることがわかる。

本実験の範囲では、鉄鋼スラグ水和固化体(試験体 A, B, C) の積算温度と強度の関係は、製鋼スラグの産地や単位アルカリ刺激材量によらずほぼ同じ値となっている。すなわち、近似式の実験定数 ( $a$ ,  $b$ ) がほぼ同じである。この実験定数は、コンクリートでは配合や結合材の種類などにより異なることが知られているため、鉄鋼水和スラグ固化体においても配合や使用材料が異なる場合には、圧縮強度を確認して適切に定数を設定する必要があると考えられるが、今後 N 数を積み重ねることで、一定の実験定数が導かれる可能性がある。

現場封緘養生供試体の圧縮強度と引張強度の関係を図-11 に示す。本実験の範囲では、鉄鋼スラグ水和固化体(試験体 A, B, C) およびコンクリート(試験体 D) の引張強度は、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕に示される関係式と近似した結果となった。一般に、コンクリートの温度応力解析検討では、コンクリート標準示方書〔施工編〕に示される若材齢時の引張強度の発現を重視した式が用いられるが、本結果から鉄鋼スラグ水和固化体では、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕に示される式により推定するのが妥当であると判断される。

### 3.6 ひび割れ指数

本試験施工では、いずれの試験体にもひび割れの発生が確認されなかったことから、ひび割れ指数が大きいことが推察される。そこで、図-6 および図-7 に示した発生応力、図-10 に示した積算温度と圧縮強度の関係、図-11 で推定した引張強度を用いて、ひび割れ指数を式(3)

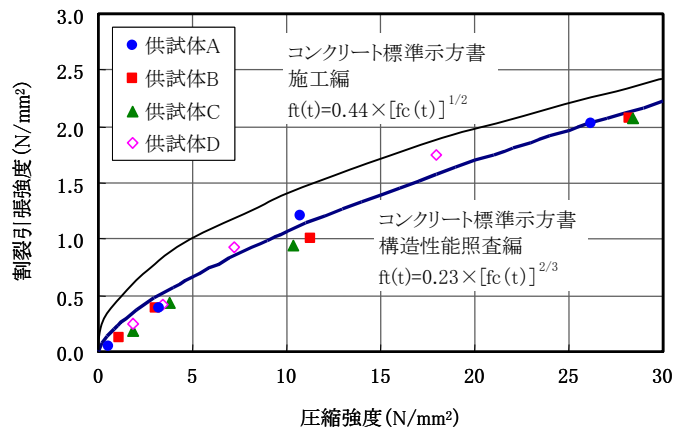


図-11 圧縮強度と引張強度の関係

により算出した。

$$I_{cr}(t) = f_t(t) / \sigma(t) \quad (3)$$

ここに、

$I_{cr}(t)$  : 材齢  $t$  日におけるひび割れ指数

$f(t)$  : 材齢  $t$  日における固化体の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma(t)$  : 材齢  $t$  日における固化体に発生する引張応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

ひび割れ指数の推移を図-12、図-13 に示す。なお、図-10 に示した積算温度と圧縮強度の関係式では、材齢 2 日程度まで強度発現しないことから、ひび割れ指数が 0 と計算されてしまう。そこで、材齢 2.3 日以降からプロットした。図-12 に示す中心部 a におけるひび割れ指数は、材齢 6 日から 8 日で急激に低下し、材齢 14 日以降では、試験体 A, B が約 4 で、試験体 C が約 3 で推移する。これは、図-6 に示したように、発生応力が材齢 6 日から 7 日前後において、圧縮から引張に変わるためである。ただし、試験体 D (コンクリート) については、材齢 9 日以降では発生応力が 0 前後で推移するため、ひび割れ指数が 16 以上となっている。なお、前述したように中心部で計測器の故障やひび割れなどの、何らかの異常が発生している可能性があることから、この現象が材料による影響であるとは言えない。図-13 に示す天端面付近のひび割れ指数は、いずれの試験体も図-7 に示した発生応力が最大となる材齢 4 日で最小値を示し、試験体 A では 5.5、試験体 B では 7.9、試験体 C では 4.5、試験体 D (コンクリート) では 4.2 である。なお、ひび割れ指数は、材齢 9 日以降ではすべての試験体で 16 以上である。

コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>では、ひび割れを防止したい場合には、参考値として、安全係数すなわちひび割れ指数を 1.75 以上とすればよいことが示されている。したがって、いずれの試験体においてもひび割れ発生の可能性は非常に小さいが、貧配合とすることにより、さらにひび割れ発生の可能性を小さくすることができる。また、

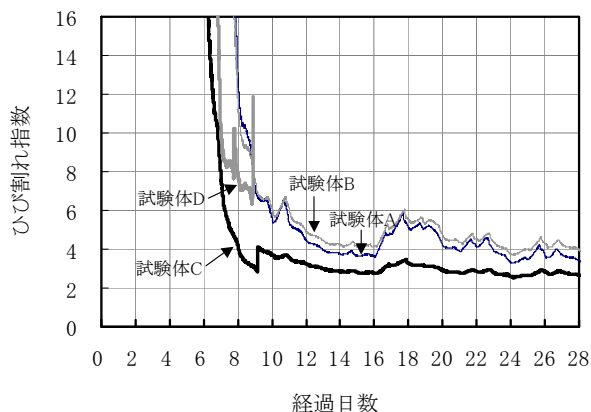


図-12 中心部 a のひび割れ指数の推移

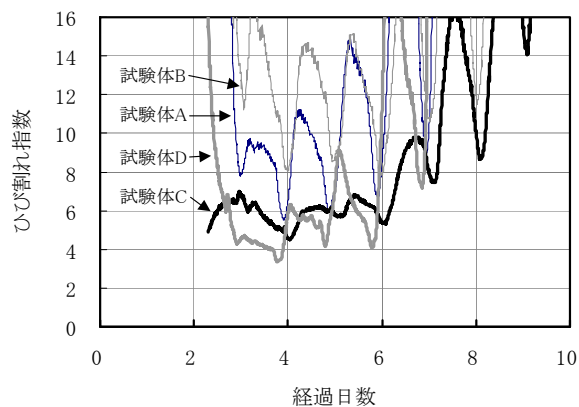


図-13 天端付近 c のひび割れ指数の推移

本検討で得られた大きな値のひび割れ指数は、本実験の試験体にひび割れの発生が確認されなかったことを裏付けており、コンクリートで用いられているひび割れ指数が鉄鋼スラグ水和固化体にも適用できることが確認された。

これらの結果より、鉄鋼スラグ水和固化体は、本実験の  $1.8 \times 1.8 \times 1.8\text{m}$  ( $5.8\text{m}^3$ ) 相当のマスコンクリートへは、結合材の水和による温度ひび割れ抑止の観点からは、適用可能であると言える。

#### 4. まとめ

鉄鋼スラグ水和固化体のモデルブロックの試験施工を行い、施工過程における温度や発生ひずみ、発生応力の変化などを計測して、以下の知見を得た。

- (1) 水和に伴う内部温度上昇量は、単位結合材量が少ないほど小さくなるが、製鋼スラグの産地による違いがほとんど見られなかった。
- (2) 最高温度に達してからの温度降下速度は、コンクリート試験体よりも遅い傾向が見られた。鉄鋼スラグ水和固化体の熱拡散率、比熱、熱伝導率が影響している可能性が考えられる。
- (3) 温度上昇時における熱膨張係数は、コンクリートに比べて大きい傾向が見られた。一方、温度降下時の熱膨張係数はコンクリートとほぼ同等であった。
- (4) 引張応力およびひずみは、躯体内部の温度上昇量が大きな富配合のものが最も大きな値となった。
- (5) 圧縮強度の発現性は、コンクリートと同様に積算温度から推定可能なことが確認された。
- (6) ひび割れ指数は、いずれの試験体においても大きく、結合材の水和による温度ひび割れ抑止の観点からは、本実験の  $1.8 \times 1.8 \times 1.8\text{m}$  ( $5.8\text{m}^3$ ) 相当のマスコンクリートへの適用が可能である。

なお、本研究は、(社)日本鉄鋼連盟が経済産業省補助

事業として実施した「スラグ利用に係る研究開発」の中で実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 立屋敷久志，島裕和，松本義弘，古賀康男：加熱すりもみ法により回収した高品質再生骨材コンクリートの性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.61-66，2001
- 2) 山崎順二，立松和彦：実機で製造した再生骨材コンクリートの強度および耐久性性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1563-1568，2004
- 3) 錦織和紀郎ほか：銅スラグ(CUS2.5)を用いたコンクリートの特性と施工例，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.127-132，2005
- 4) フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針(案)，土木学会四国支部，2003
- 5) 平成18年度鉄鋼スラグ生産・利用状況，鉄鋼スラグ協会，2007
- 6) 松永久宏，小菊史男，高木正人，谷敷多穂：鉄鋼スラグを利用した環境に優しい固化体の開発，コンクリート工学，Vol.41，No.4，pp.47-54，2003
- 7) 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル，(財)沿岸技術研究センター，2003
- 8) 松永久宏，高木正人，小菊史男：鉄鋼スラグ水和固化体の基本特性と海洋環境下における生物付着性，鉄と鋼，Vol.89，No.4，pp.454-460，2003
- 9) 【2002年制定】コンクリート標準示方書〔施工編〕，土木学会，pp.41-54，2002
- 10) 小澤満津雄ほか：非接触変位計による若材齢コンクリートの熱膨張係数の計測，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.1099-1104，2001
- 11) マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，(社)日本コンクリート工学協会，p.11，1985