U.D.C 691.322

電気炉酸化スラグ細骨材がコンクリートの性能に及ぼす影響 —その３　構造体強度補正値および温度ひび割れ抵抗性に関する検討—

古川　雄太*　　大岡　督尚*

要　約：　本研究は，急冷製造（風砕）される電気炉酸化スラグ細骨材を使用したコンクリートの構造体強度補正値および温度ひび割れ抵抗性について検討したものである。検討の結果，電気炉酸化スラグ細骨材の容積混合率 50%における構造体強度補正値は，JASS 5 に示される標準値と同等の値を示した。また，断熱温度上昇量は，同一単位セメント量において，一般的な細骨材を用いたコンクリートよりも小さい値であった。実験結果より算出した各種係数を用いて温度応力解析を行った結果，電気炉酸化スラグ細骨材を混合することで，温度ひび割れ抵抗性が高くなる傾向を示した。

ｷｰﾜｰﾄﾞ：　電気炉酸化スラグ細骨材，構造体強度補正値，断熱温度上昇特性，温度ひび割れ

目　次：

1. はじめに
2. 使用材料
3. 構造体強度補正値の検討
4. 温度ひび割れ抵抗性の検討
5. まとめ

1. はじめに

筆者らは，環境配慮型社会の実現に向けて，電気炉で鉄スクラップから鋼を製造する過程で発生する電気炉酸化スラグ細骨材（以下，EFS）に着目し，コンクリート用細骨材としての有効利用を検討してきた[1)]。その結果，研究の対象とした風砕で製造される EFS は，骨材形状が丸みを帯びていることに起因し，単位水量の低減が可能であり，これに付随して長さ変化や中性化深さも低減することを確認し，コンクリートの性能を向上させる材料としての可能性を示した。また，EFS を用いたコンクリートは，一般的な細骨材を用いたコンクリートと同様に，セメント水比と圧縮強度は比例関係であり，かつ，EFS の混合率を変えても圧縮強度に大きな変化が生じないことから，強度算定式を変えることなく，適用部材や使用目的に応じて EFS の混合率を自由に変化させることができる可能性を報告した。更に，EFS の混合率が大きくなるに伴い線膨張係数が小さくなる傾向を確認し，石灰岩砕石を使用したコンクリートと同様に，ひび割れが抑制される可能性について言及した。

一方，EFS を用いたコンクリートに関する構造体強度補正値や断熱温度上昇量については不十分な部分があり，構造体コンクリート強度の推定やマスコンクリート部材への適用などについては，更なるデータの蓄積および検討が必要であると考えられる。

そこで本論文では，EFS を用いたコンクリートの適用範囲を広げることを目的に，EFS が構造体強度補正値および温度ひび割れ抵抗性について与える影響について検討した結果について報告する。なお，本論文は既発表の文献 2）を再構成したものである。

2. 使用材料

表 1 に使用材料を示す。細骨材は，EFS，山砂，砂岩砕砂の 3 種類を使用した。EFS の化学成分を表 2 に示す。化学成分は JIS A 5011-4 の規定を満足している。粗骨材は，硬質砂岩砕石および石灰岩砕石を使用した（質量混合

表 1　使用材料

材料	種類・物性等
水	上水道水(W)【神奈川県】
セメント	普通ポルトランドセメント(C)【ρ:3.16g/cm^3】
細骨材	EFS【ρ:3.52g/cm^3，Q:0.36%，FM:3.27】
	山砂(MS)【ρ:2.63g/cm^3,Q:1.62%,FM:2.50】
	砂岩砕砂(CS)【ρ:2.64g/cm^3,Q:1.18%,FM:3.02】
粗骨材	硬質砂岩砕石(G1)【ρ:2.65g/cm^3,Q:0.59%,Gs:60.0%】
	石灰岩砕石(G2)【ρ:2.70g/cm^3,Q:0.57%,Gs:60.0%】
化学混和剤(Ad)	AE 減水剤(Ad1)【リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩】
	高性能 AE 減水剤(Ad2)【ポリカルボン酸系化合物】
	AE 剤【樹脂酸系界面活性剤】

ρ：密度(骨材は表乾状態)，Q：吸水率，FM：粗粒率，
Gs：実積率

表 2　EFS の化学成分

項目	JIS A 5011-4 の規定	試験値
酸化カルシウム(CaO として)%	40.0 以下	22.9
酸化マグネシウム(MgO)%	10.0 以下	7.5
全鉄(FeO として)%	50.0 以下	31.2
塩基度(CaO/SiO$_2$ として)	2.0 以下	1.8

＊技術研究所　構工法・材料グループ

率 50：50）。化学混和剤は，水セメント比に応じて AE 減水剤および高性能 AE 減水剤を選定して使用した。また，目標とする空気量が得られるように，AE 剤を使用した。

3. 構造体強度補正値の検討

3.1 実験の概要

EFS を用いたコンクリートの構造体強度補正値を把握するため，JASS 5 T-606：2018[3] に示されている，比較的断面の大きいコンクリート部材の中心部に近い温度履歴を与え，その部材の強度を推定することができる簡易断熱養生供試体による構造体コンクリート強度を用いて，構造体強度補正値を検討した。実験に使用した簡易断熱養生槽の概要を図 1 に示す。簡易断熱養生槽は，熱伝導率約 0.04 W/mK の断熱材で成型したものを使用し，試験体の周囲を発泡ビーズで充填することで，養生槽内の空気の対流が生じない構造とした。

実験の要因と水準を表 3 に示す。EFS の細骨材に対する容積混合率は 50% とし，水セメント比は 55%，45% および 35% の 3 水準とした。コンクリートの打込み時期は，標準期，夏期および冬期の 3 水準とし，それぞれの目標練上がりコンクリート温度は 20±2℃，30±2℃および 15±2℃とした。

（1） 調合

コンクリートの調合を表 4 に示す。調合記号は，水セメント比・EFS 容積混合率の順に示しており，例えば WC55-EFS50 は水セメント比 55%，EFS 容積混合率 50% であることを示している。目標スランプは，WC55-EFS50 は 18±2.5 cm，WC45-EFS50 および WC35-EFS50 は 21±2.0 cm とし，目標空気量はいずれも 4.5±1.5% とした。単位粗骨材かさ容積は，WC55-EFS50 は 590 l/m^3，その他は 570 l/m^3 とした。単位水量は，既往の検討[1] を基に，WC55-EFS50（AE 減水剤を使用）は 160 kg/m^3，その他（高性能 AE 減水剤を使用）は 150 kg/m^3 とした。

（2） 試験項目および方法

フレッシュ性状としてスランプ（JIS A 1101），空気量（JIS A 1123）およびコンクリート温度（JIS A 1156）の測定を行った。また，コンクリートの打込み後，コンクリート温度の温度履歴を測定した。硬化性状として，圧縮強度試験（JIS A 1108）を実施した。なお，養生方法は前述の簡易断熱養生および標準水中養生とした。簡易断熱養生は，材齢 7 日まで簡易断熱槽で養生し，以後は外気環境下で封かん養生とした。

3.2 試験結果および考察

3.2.1 フレッシュコンクリート

表 5 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。全ての打込み時期で目標値を満足し，かつ空気量は 4.5±0.5% と差が小さかったため，硬化性状に及ぼす影響は小さいと判断し，以後の考察ではこれらの影響を考慮しないこととした。図 2 にコンクリートの温度履歴の一例として，夏期の試験結果を示す。コンクリート温度は，単位セメント量に応じて異なる温度履歴を示し，最も単位セメント量が多

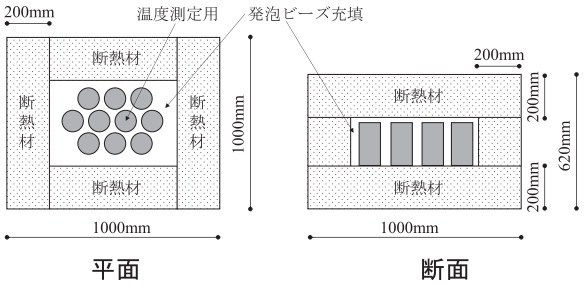

図 1 簡易断熱養生槽の概要

表 3 実験の要因と水準（構造体強度補正値の検討）

要因	水準
EFS 容積混合率	50%
水セメント比	55%，45%，35%
打込み時期	標準期，夏期，冬期

表 4 コンクリートの調合（構造体強度補正値の検討）

記号	s/a (%)	単位量(kg/m^3)						Ad (C×wt%)		
		W	C	EFS	MS	G1	G2	標準期	夏期	冬期
WC55-EFS50	49.6	160	291	614	459	474	474	1.20	1.25	1.20
WC45-EFS50	51.1	150	334	629	470	458	458	0.70	0.75	0.70
WC35-EFS50	48.9	150	429	576	430	458	458	0.70	0.80	0.70

＊Ad：WC55-EFS50 には Ad1，その他は Ad2 を使用

表 5 フレッシュコンクリートの試験結果（構造体強度補正値の検討）

記号	標準期	夏期	冬期
WC55-EFS50	19.0cm 4.2% 21℃	18.5cm 4.2% 31℃	18.5cm 4.5% 15℃
WC45-EFS50	22.0cm 4.1% 21℃	22.5cm 4.9% 31℃	23.0cm 4.5% 15℃
WC35-EFS50	22.5cm 4.9% 22℃	22.5cm 4.0% 32℃	22.0cm 4.1% 15℃

＊表内の上段はスランプ，中段は空気量，下段はコンクリート温度を示す

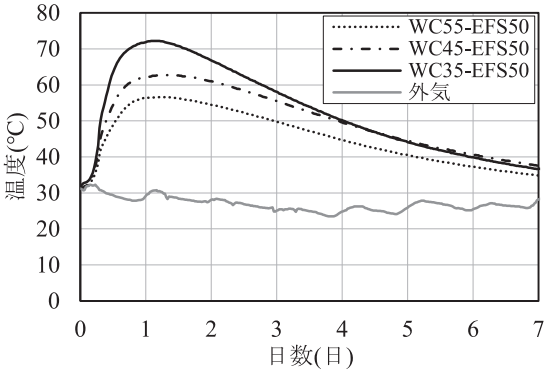

図 2 コンクリートの温度履歴の一例（夏期）

い WC35-EFS50 は最高温度約 70℃を示した。この結果から，各打込み時期および単位セメント量に応じて，比較的部材厚の大きい構造体と同様な温度履歴を与えることができたと判断した。

3.2.2 硬化性状

図 3 に標準水中養生供試体の圧縮強度試験結果を示す。標準水中養生したコンクリートは，打込み時期による強度発現性に大きな違いはなく，各材齢における圧縮強度は水セメント比ごとに同等の値であった。材齢 28 日圧縮強度をみても，打込み時期の違いが圧縮強度に大きな影響を及ぼしていることは確認できないため，打込み時期が異なっても同一の強度算定式で調合設計は可能であると考えられる。

図 4 に簡易断熱養生供試体の圧縮強度試験結果を示す。全体的な傾向として，水セメント比ごとに比較すると最高温度の低い冬期の圧縮強度が大きく，次いで標準期，夏期の順であった。これは一般的なコンクリートと同様な傾向であり，高温履歴を受けることで，長期的な強度増進が停滞した影響[4] であると考えられる。図 5 には，構造体強度補正値 $_{28}S_{91}$（簡易断熱養生供試体の材齢 91 日圧縮強度と標準水中養生供試体の材齢 28 日圧縮強度の差）の検討結果を示す。図中より，設計基準強度（以下，Fc）36 N/mm^2 以下の範囲（Fc 36 N/mm^2 + 1.73σ : σ = 0.1 × Fc）では，標準期は 3 N/mm^2 以下，夏期および冬期は 6 N/mm^2 以下の構造体強度補正値であることが示された。また，Fc 36 N/mm^2 を超え Fc 48 N/mm^2 以下の範囲（Fc 48 N/mm^2 + 1.73σ）では 9 N/mm^2 以下，Fc 48 N/mm^2 を超える範囲では 12 N/mm^2 以下の構造体強度補正値であり，EFS 容積混合率 50% における構造体強度補正値は，JASS 5[3] に示される一般的なコンクリートの標準値と同等の値であった。

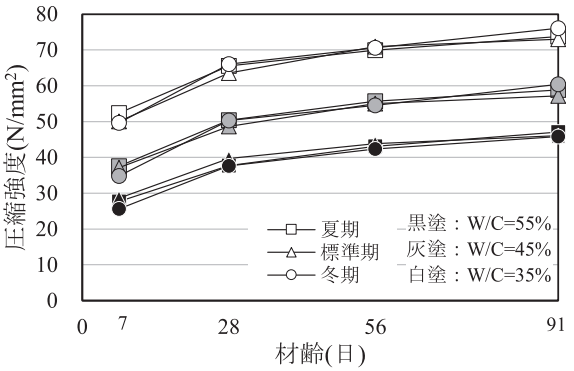

図 3　標準水中養生供試体の圧縮強度試験結果

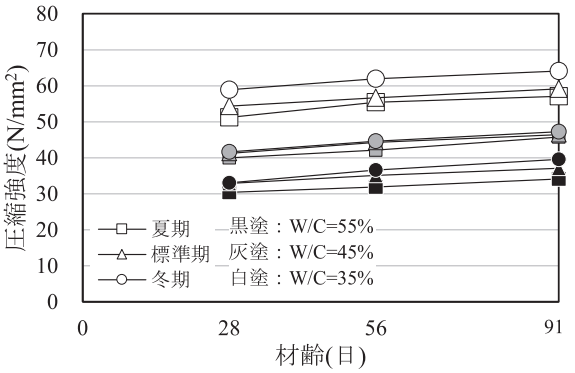

図 4　簡易断熱養生供試体の圧縮強度試験結果

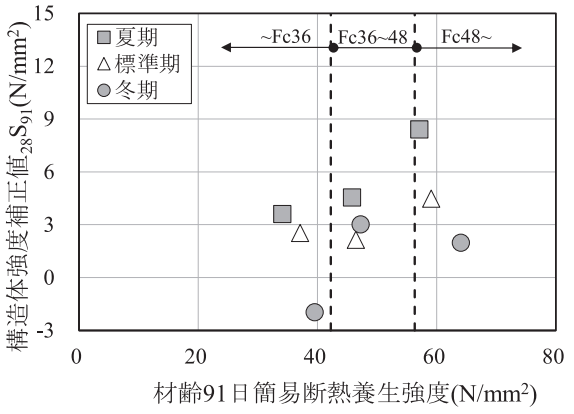

図 5　構造体強度補正値の検討結果

4. 温度ひび割れ抵抗性の検討

4.1 検討の概要

EFS を混合したコンクリートの温度ひび割れ抵抗性について検討を行うため，EFS 容積混合率 50% 以下を対象に，断熱温度上昇特性の把握および温度応力解析を行った。

断熱温度上昇量の検討における実験の要因と水準を表 6 に示す。EFS の容積混合率は 0%，30% および 50% の 3 水準とし，水セメント比は 45% の 1 水準とした。目標打込み温度（以下，打込み温度）は 10℃，20℃および 30℃の 3 水準とした（管理値は目標値 ± 2℃）。

（1） 調合

表 7 にコンクリートの調合を示す。目標スランプは 21 ± 2.0 cm，目標空気量は 4.5 ± 1.5% とした。単位粗骨材かさ容積は 570 l/m^3 とし，EFS の混合率に応じて単位水量を調整してスランプが同等となるように調整した。なお，打込み温度ごとに化学混和剤（Ad2）の添加量は一定にした。

表 6　実験の要因と水準（温度ひび割れ抵抗性の検討）

要因	水準
EFS 容積混合率	0%，30%，50%
水セメント比	45%
目標打込み温度	10℃，20℃，30℃

表 7　コンクリートの調合（温度ひび割れ抵抗性の検討）

記号	s/a (%)	単位量(kg/m^3)							Ad2 (C × wt%)		
		W	C	EFS	MS	CS	G1	G2	10℃	20℃	30℃
WC45-EFS0	47.9	175	389	0	414	416	458	458	0.70	0.70	0.75
WC45-EFS30	49.9	160	356	359	448	180	458	458	0.70	0.70	0.75
WC45-EFS50	51.1	150	334	629	470	0	458	458	0.70	0.70	0.75

（2） 試験項目および方法

試験は，スランプ（JIS A 1101），空気量（JIS A 1123）およびコンクリート温度（JIS A 1156）の測定を行った。また，断熱温度上昇量の測定は，文献[5]を参考にして容量30Lのコンクリートを用い，逆解析手法による最終断熱温度上昇量および温度上昇速度を表す係数を算出した。なお，断熱温度上昇量および温度上昇速度を表す係数を求めることで，式(1)に示すコンクートの発熱予測曲線から所定の材齢におけるコンクリート温度を予測することが可能になる。

$$Q(t)=K(1-e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

ここに，

t：材齢(日)

$Q(t)$：材齢t日までの断熱温度上昇量(℃)

K：最終断熱温度上昇量(℃)

α：温度上昇速度を表す係数

4.2 試験結果および考察

4.2.1 フレッシュ性状

表8にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。全てのコンクリートにおいて目標値を満足する結果であった。

4.2.2 断熱温度上昇量

図6に各コンクリートの最終断熱温度上昇量を示す。図中には，建築学会「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針・同解説」[6]（以下，マスコン指針）に示される，普通ポルトランドセメントを使用した最終断熱温度上昇量の計算値（20℃）を示している。ここでは，打込み温度20℃のコンクリートを中心に考察した。図6より，EFS容積混合率が0%のものはマスコン指針による計算値と同等の値であり，本検討の逆解析手法は精度よく最終断熱温度上昇量を算出できていると考えられる。また，単位セメント量が小さくなるに伴い，最終断熱温度上昇量は小さくなり，一般的なコンクリートと同様な傾向[6]を示した。しかし，混合率が大きくなるに伴い，マスコン指針による計算値と実験値の差が大きくなる傾向を示し，EFSを用いたコンクリートが一般的なコンクリートよりも同一単位セメント量では，最終断熱温度上昇量が小さくなる傾向であった。これは，EFSを混合したコンクリートは，混合率に応じて単位水量を小さくし，その容積を補うために単位細骨材量を大きくする調合設計を行っているため，コンクリートを発熱体（セメントペースト）と非発熱体（骨材）の複合体とした場合，発熱体に対する非発熱体の割合が増加することになり，この影響によって最終断熱温度上昇量が低減されたと推測される。よって，EFSを混合したコンクリートは，同一水セメント比または同一圧縮強度（呼び強度を指す）において，EFSの混合に応じて単位セメント量が小さくなることに加え，発熱体（セメントペースト）に対する非発熱体（骨材）の割合が増加する2要因によって，最終断熱温度上昇量が小さくなったと考えられる。しかしながら，EFSを用いることで変化する熱伝導率，熱拡散係数および比熱などを直接測定してはおらず，EFSがコンクリートの熱的性質へ与える影響については不明確な点が多く，今後の検討課題であるとともに，更なるデータの蓄積が必要であると考えられる。

図7に温度上昇速度を表す係数を示す。図中にはマスコン指針に示される普通ポルトランドセメントを使用したコ

表8 フレッシュコンクリートの試験結果
（温度ひび割れ抵抗性の検討）

記号	10℃	20℃	30℃
WC45-EFS0	22.5cm 4.5% 12℃	23.0cm 4.9% 22℃	23.0cm 4.6% 31℃
WC45-EFS30	23.0cm 4.1% 12℃	23.0cm 4.4% 21℃	22.5cm 4.8% 32℃
WC45-EFS50	21.5cm 4.0% 12℃	22.5cm 4.1% 22℃	22.0cm 4.4% 31℃

＊表内の上段はスランプ，中段は空気量，下段はコンクリート温度を示す

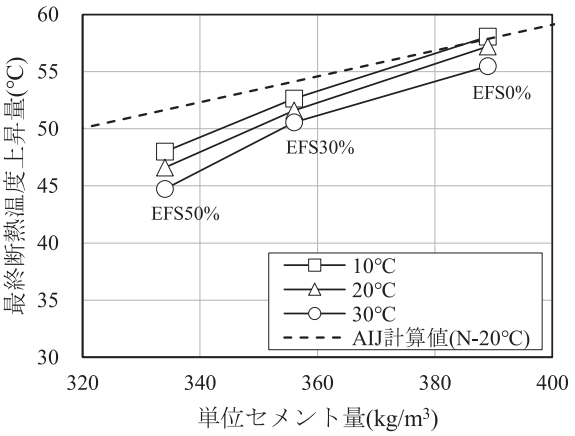

図6 断熱温度上昇量の試験結果

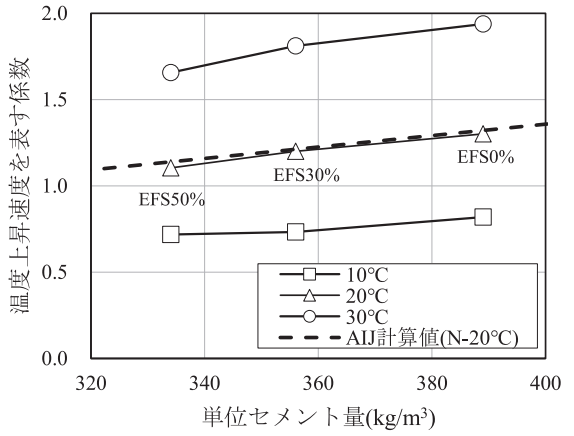

図7 温度上昇速度を表す係数の試験結果

ンクリートの計算値（20℃）を示している。図 7 からは，EFS を混合したコンクリートの温度上昇速度を表す係数は，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの単位セメント量との関係と同様であることが確認でき，EFS の混合が温度上昇速度を表す係数に与える影響は小さいと考えられる。これは，最終断熱温度上昇量とは異なり，温度上昇速度を表す係数に影響を及ぼす要因は，単位セメント量および化学混和剤の影響が支配的であるためと考えられる。なお，他の打込み温度においても，マスコン指針による計算値と実験値は同様な値であった。

4.2.3　温度ひび割れの解析的検討

図 8 に温度ひび割れの解析モデルを示す。厚み 1 m の基礎スラブ上に高さ 4 m，厚み 1.5 m の壁状部材を打ち込むと仮定して 2 次元 FEM 解析を実施した。基礎スラブと壁状部材の打込み間隔は 14 日間とし，壁状部材の側面の型枠は 2 日後に脱型すると仮定した。表 9 に解析条件を示す。最終断熱温度上昇量，温度上昇速度を表す係数および線膨張係数は，本検討結果および筆者らが検討 1) した実験値を用い，その他の係数はマスコン指針に準じ設定した。解析に使用したコンクリートは，表 7 に示す WC45-EFS0（EFS 容積混合率 0%）および WC45-EFS50（EFS 容積混合率 50%）とし，同一水セメント比における EFS 容積混合率が与える影響について検討した。

図 9 に温度解析による壁状部材の中央部のコンクリート温度を示す。WC45-EFS0 の最高温度は 74.0℃，WC45-EFS50 の最高温度は 63.5℃ であり，EFS を 50% 混合率することで，10.5℃ の温度抑制を示した。これは，前述の通り，EFS を混合することで最終断熱温度上昇量が小さくなることが影響しているためである。

図 10 に解析による壁状部材の温度ひび割れ指数を示す。表層部を比較すると，WC45-EFS0 の最小ひび割れ指数は 0.48，WC45-EFS50 の最小ひび割れ指数は 0.77 であり，EFS を混合することで最小ひび割れ指数が大きくなることが認められた。これは，EFS を使用することで，内部拘束によって生じるひび割れの抑制効果があることを示すものである。また，中央部を比較すると，WC45-EFS0 の最小ひび割れ指数は 0.71，WC45-EFS50 の最小ひび割れ指数は 1.09 であり，表層部と同様に，EFS を混合することで最小ひび割れ指数が大きくなることが認められた。すなわち，外部拘束によって生じるひび割れの抑制にも効果があることを示すものである。これらの要因は，EFS を混合することで最高温度が小さくなることに加え，EFS を混合することで線膨張係数が小さくなるため，温度ひずみが小さくなったためと考えられる。

以上より，本検討における解析条件においては，EFS を混合することで生じる温度上昇量の低減および線膨張係数の低減に起因し，内部拘束および外部拘束によって生じる温度ひび割れに対して高い抵抗性を示す傾向が認められ，マスコンクリート部材などで生じる温度ひび割れの抑制の可能性が示された。なお，前述の通り，本検討では EFS の混合率が大きくなるに伴い単位水量を低減して流動性が同等となるように調合設計を行っている。すなわち，各検討結果は EFS の混合による直接的な影響と単位水量の低減によってもたらされる材料構成の変化の 2 因子が大きく影響している。単位水量を変化させず化学混和剤などで流動性を調整した場合，本検討とは異なる結果が得られる可能性があることに留意する必要がある。

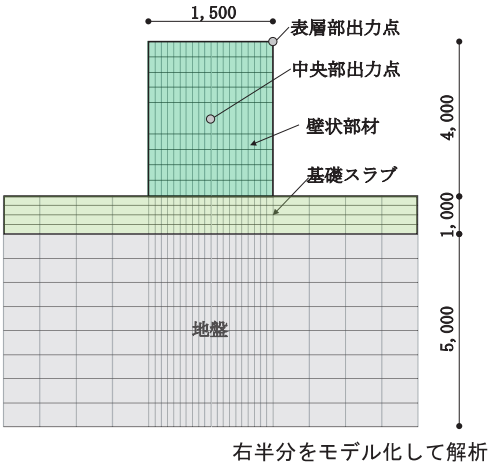

図 8　解析モデル（単位：mm）

表 9　温度ひび割れ抵抗性の解析に使用した物性値など

項目		設定値
温度	外気温	20℃一定
	打込み温度	20℃
熱物性値	最終断熱温度上昇量	EFS0：57.1℃*1 EFS50：46.7℃*1
	温度上昇速度を表す係数	EFS0：1.255*1 EFS50：1.108*1
	コンクリートの熱伝導率	3.2W/m℃[6]
	コンクリートの比熱	1.05kJ/kg℃[6]
	熱伝達率	8W/m²℃[6] (脱型までの期間) 14W/m²℃[6] (コンクリート露出)
	地盤の熱伝導率	1.70 W/m℃[6]
	地盤の比熱	1.40 kJ/kg℃[6]
線膨張係数	EFS0%	10.1μ/℃[1]
	EFS50%	8.0μ/℃[1]
外部拘束係数	基礎スラブ	R_N=0.20，R_{M1}=R_{M2}=1.00
	壁状部材	R_N=0.00，R_{M1}=R_{M2}=0.25
その他		マスコン指針[6]

＊1　本実験結果から算出

5. まとめ

EFS を混合したコンクリートの構造体強度補正値および温度ひび割れ抵抗性について検討した結果，以下の知見を得た。

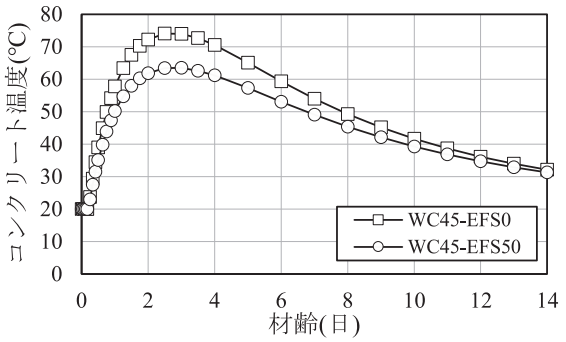

図 9　壁状部材の中央部のコンクリート温度

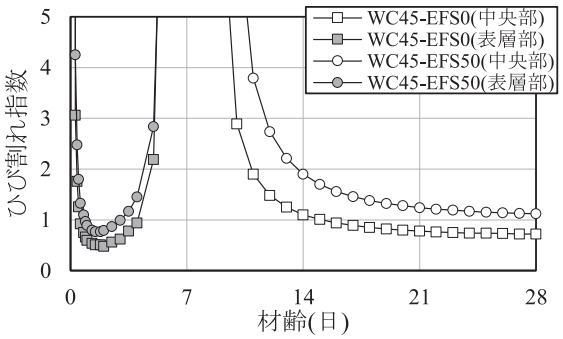

図 10　壁状部材の表層部の温度ひび割れ指数

（1） 本検討におけるコンクリート強度 30～60 N/mm^2 程度の範囲（EFS の容積混合率 50%）においては，構造体強度補正値は JASS 5 に示される一般的なコンクリートと同等の値であった。

（2） 本検討で使用した EFS を混合したコンクリートは，一般的なコンクリートに比べて最終断熱温度上昇量が小さくなる傾向を示した。

（3） 温度上昇速度を表す係数は，EFS を混合しても一般的なコンクリートと同等であった。

（4） 温度応力解析の結果，EFS を 50% 混合したコンクリートは，混合していないコンクリートに比べ温度ひび割れ抵抗性が高いことが示された。

謝　辞

本研究の実施にあたり，(株)星野産商に多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1）古川雄太・篠原佳代子・大岡督尚：電気炉酸化スラグ細骨材の混合率がコンクリートの諸性状に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 42, No. 1, pp. 29–34, 2020.7
2）古川雄太・大岡督尚：電気炉酸化スラグ細骨材を使用したコンクリートの構造体強度補正値および温度ひび割れ抵抗性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 44, No. 1, pp. 52–57, 2022
3）日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，pp. 739–740, 2018.7
4）桝田佳寛・佐藤幸恵・友澤史紀：高強度コンクリートの構造体中での強度発現性と調合強度，日本建築学会構造系論文集，No. 537, pp. 13–20, 2000.11
5）一般社団法人セメント協会：各種セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇量に関する研究，コンクリート専門委員会報告 F–59, pp. 42–53, 2014.3
6）日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針・同解説，2019.11

STUDY ON THE EFFECT OF ELECTRIC FURNACE OXIDIZED SLAG AGGREGATE ON PERFORMANCE IMPROVEMENT OF CONCRETE —PART 3. EXAMINATION OF STRUCTURE STRENGTH CORRECTION VALUE AND TEMPERATURE CRACK RESISTANCE—

Y. Furukawa, T. Oh-oka

This study investigated the structure strength correction value and temperature crack resistance of concrete using electric furnace oxidized slag fine aggregate that is rapidly cooled（wind crushed）. As a result, the structure strength correction value at the volume mixing ratio of 50% of the electric furnace oxidized slag fine aggregate showed the same value as the standard value shown in JASS 5. In addition, the amount of increase in adiabatic temperature was smaller than that of concrete using general fine aggregate in the same unit cement amount. As a result of temperature stress analysis using various coefficients calculated from the experimental results, it was shown that the temperature crack resistance tends to increase by using the electric furnace oxide slag fine aggregate.