

論文 鉄鋼スラグ水和固化体の変形特性に関する研究

赤本 淳^{*1}・藤井 隆史^{*2}・綾野 克紀^{*3}・阪田 憲次^{*4}

要旨：本論文は、鉄鋼スラグ水和固化体の圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮ひずみおよびクリープを、セメントコンクリートと比較し示したものである。鉄鋼スラグ水和固化体の骨材に用いる製鋼スラグは吸水率が高く多孔質であるため、乾燥収縮ひずみは大きく、最終値に達するまでの時間も長くなる。鉄鋼スラグ水和固化体のクリープ係数も、骨材に用いる製鋼スラグが砕石に比べ脆弱であるため、セメントコンクリートに比べて大きくなる。一方、鉄鋼スラグ水和固化体の静弾性係数は、セメントコンクリートとほぼ同程度となることを示す。

キーワード：鉄鋼スラグ水和固化体、クリープ、乾燥収縮ひずみ、製鋼スラグ

1. はじめに

本論文は、環境負荷低減が期待される鉄鋼スラグ水和固化体を、根固めブロックや割石等のブロックだけでなく、大型の消波ブロックや護岸壁等の構造物へも適用範囲を広げることを目的に、構造物の設計に必要な静弾性係数、乾燥収縮ひずみおよびクリープを調べ、セメントコンクリートとの比較を行ったものである。

鉄鋼スラグ水和固化体のクリープ係数は、骨材に用いる製鋼スラグが脆弱であるために、セメントコンクリートに比べて、若干大きくなること、また、静弾性係数は、セメントコンクリートと同程度であることを示す。さらに、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみは、骨材に用いる製鋼スラグの影響を大きく受け、吸水率の高い製鋼スラグを用いた場合ほど、乾燥収縮ひずみは大きくなることを示す。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

結合材には、JIS A 6206: 1997 に規定される高炉スラグ微粉末 4000 (密度: 2.89g/cm³) および JIS A 6201: 1999 に規定されるフライアッシュ II

種 (密度: 2.20g/cm³) を用いた。結合材の一部として用いるアルカリ刺激材には、石灰集塵微粉末 (密度: 3.14g/cm³, 平均粒径: 10μm) および普通ポルトランドセメント (密度: 3.15g/cm³, ブレーン値: 3,300 cm²/g) を用いた。細骨材には、製鋼スラグ細骨材 (密度: 3.06g/cm³, 吸水率: 7.67%), 高炉スラグ細骨材 (密度: 2.71g/cm³, 吸水率: 1.38%) を用い、粗骨材には、製鋼スラグ粗骨材 (密度: 3.18g/cm³, 吸水率: 4.50%) を用いた。本実験に使用した鉄鋼スラグ水和固化体の配合を **Table 1** に示す。Type-A は、普通ポルトランドセメントを全く用いない配合で、Type-B は、アルカリ刺激材として普通ポルトランドセメントを質量比で結合材の 15%用いた配合である。Type-C は、凍結融解抵抗性を高める目的で、普通ポルトランドセメントを結合材の 43.5%, 細骨材には高炉スラグ細骨材を用いた配合である。さらに、普通ポルトランドセメントを質量比で結合材の 10%, 20%, 30%, 40%および 50%用い、骨材に製鋼スラグを用いた鉄鋼スラグ水和固化体も用いた。また、**Table 2** に比較のために用いたセメントコンクリートの配合を示す。いずれのセメントコンクリートも、単位

*1 岡山大学大学院 環境学研究科資源循環学専攻 (正会員)

*2 岡山大学大学院 環境学研究科助教(COE) 工博 (正会員)

*3 岡山大学 廃棄物マネジメント研究センター准教授 工博 (正会員)

*4 岡山大学大学院 環境学研究科資源循環学専攻教授 工博 (正会員)

Table 1 Mixture proportion of steel-making slag concrete

Type	G _{max} (mm)	W/B* ¹ (%)	C/B* ² (%)	Air (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)							Admixture			
						W	Binder				S		G	HRWRA* ⁸ (kg/m ³)	AE* ⁹ (g/m ³)	DF* ¹⁰ (g/m ³)
							BF* ³	FA* ⁴	C	LD* ⁵	BFS* ⁶	SS* ⁷	SS* ⁷			
A	20	23.4	0.0	4.5	50.0	150	562	0	0	78	0	896	931	7.7	64.0	0.0
B		23.5	15.0				429	92	92	0						
C		24.9	43.5				170	170	262							
											794	0		10.3	403.2	12.8

*1 W/B: Water to binder ratio in weight *2 C/B: Cement to binder ratio in weight *3 BF: Ground granulate blast furnace slag

*4 FA: Fly ash *5 LD: Lime dust *6 BFS: Blast furnace slag sand *7 SS: Steel-making slag *8 HRWRA: High-range water reducing admixture

*9 AE: Air entraining agent *10 DF: Deforming agent

Table 2 Mixture proportion of cement concrete

Type	G _{max} (mm)	W/B ^{*1} (%)	C/B ^{*2} (%)	Air (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)					Admixture	
						W	Binder		S	G	HRWRA ^{*4} (kg/m ³)	AE ^{*5} (g/m ³)
							BF ^{*3}	C				
N01	20	23.4	10.0	4.5	50.0	150	575	64	755	802	9.0	19.2
N02		22.9	40.0				393	262			10.5	19.7
N03		22.3	70.0				202	471			12.1	20.2
N04		21.7	100.0				0	691			13.8	20.7

*1 W/B: Water to binder ratio in weight *2 C/B: Cement to binder ratio in weight *3 BF: Ground granulate blast furnace slag

*4 HRWRA: High-range water reducing admixture *5 AE: Air entraining agent

水量、細骨材率および結合材の体積を **Table 1** に示す鉄鋼スラグ水和固化体の配合と同じ条件にした。なお、本論文では、骨材に製鋼スラグを用いたものを鉄鋼スラグ水和固化体、川砂および砕石を用いたものをセメントコンクリートとよぶ。

2.2 試験方法

(1) 乾燥収縮ひずみ試験

試験には、100×100×400mm の角柱供試体を用い、コンタクトゲージ法によりひずみの測定を行った。供試体は、試験開始まで水中で養生を行った。なお、乾燥開始時材齢が1日のものは、脱型直後から測定を開始した。乾燥収縮ひずみ試験は、温度 20±2℃、相対湿度 65±5%の恒温恒湿度室内で行った。

(2) クリープ試験

試験には、100×100×380mm の角柱供試体を用い、PC 鋼棒による方法で載荷を行った。供試体は、材齢7日まで水中で養生した後、温度 20±2℃、相対湿度 65±5%の恒温恒湿度室内で養生し、材齢 14 日にプレストレス力の導入を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および静弾性係数

Fig. 1 は、鉄鋼スラグ水和固化体に用いたセメント量と圧縮強度の関係を示したものである。この図から、セメントの使用量の多いものほど、

圧縮強度が高いことが分かる。一方、**Fig. 2** は、セメントコンクリートに用いたセメント量と圧縮強度の関係を示したものである。セメントコンクリートにおいては、セメント量が結合材の40%以上の場合には、圧縮強度に及ぼすセメント量の影響は小さいことが分かる。鉄鋼スラグ水和固化体の圧縮強度は、材齢 427 日まで養生しても 60N/mm² 程度である。一方、セメントコンクリートは、セメント量が40%を超えたものは、材齢28日で90N/mm²程度の圧縮強度を発現している。鉄鋼スラグ水和固化体では、骨材に用いる製鋼スラグが多孔質で脆弱なため、川砂および砕石を用いるセメントコンクリートよりも、圧縮強度は低くなる。

Fig. 3は、材齢7日から91日の鉄鋼スラグ水和固化体の圧縮強度と静弾性係数の関係を示したものである。図中の黒塗りのデータは水中養生を行ったものを、白抜きのデータは蒸気養生を行ったものの結果を示したものである。図中の実線は、土木学会コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕¹⁾に示される圧縮強度と静弾性係数の関係である。また、図中の破線は、奥島らの提案する次式によって計算されたものである。

$$E_{1/3} = 1,430 \cdot \rho^{1.5} \cdot \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

ここに、 $E_{1/3}$ は静弾性係数(N/mm²)、 ρ はコンクリートの単位容積質量 (g/cm³)、 f'_c は圧縮強度

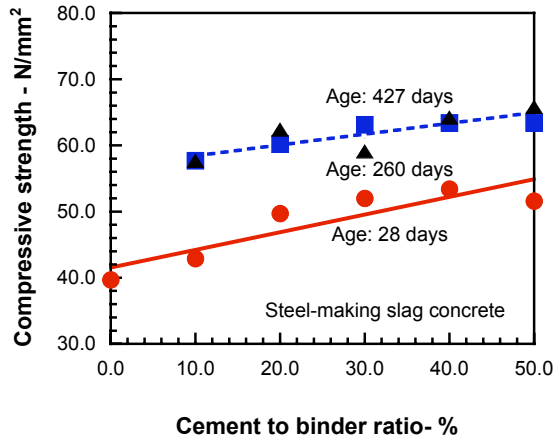


Fig. 1 Effect of cement on compressive strength of steel-making slag concrete

(N/mm²)である。コンクリートの静弾性係数は、式(1)で表されるように、コンクリートの単位容積質量が高いほど大きくなる。しかし、鉄鋼スラグ水和固化体の単位容積質量は約2.5～2.6 g/cm³と重いにも拘らず、鉄鋼スラグ水和固化体の静弾性係数は単位容積質量が2.3g/cm³であるセメントコンクリートとほぼ同程度である。

3.2 乾燥収縮ひずみ

Fig. 4 は、セメントコンクリートの乾燥収縮ひずみに、結合材に占めるセメントの割合が及ぼす影響を示したものである。この図から、結合材に占めるセメント量が多くなるほど、乾燥収縮ひずみは大きくなることが分かる。**Fig. 5** に、骨材に川砂および砕石を用いたセメントコンクリートの結合材に占めるセメント量と乾燥収縮ひずみの最終値の関係を示す。ただし、乾燥収縮ひずみの最終値は、乾燥収縮ひずみと乾燥期間の関係を土木学会コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕¹⁾に示される次式を用いて回帰し、求めたものである。

$$\varepsilon'_{ds}(t) = \frac{\varepsilon'_{ds\infty} \cdot t}{\beta + t} \quad (2)$$

ここに、 $\varepsilon'_{ds}(t)$ は乾燥期間 t における乾燥収縮ひずみで、 $\varepsilon'_{ds\infty}$ は、乾燥収縮ひずみの最終値で、 β は、乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項である。この図からも、結合材に占めるセメント量が多

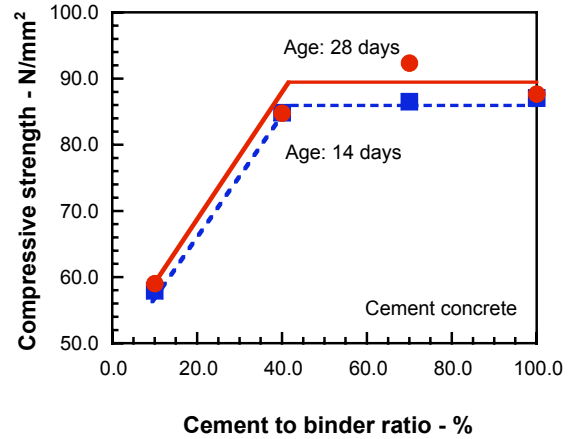


Fig. 2 Effect of cement on compressive strength of cement concrete

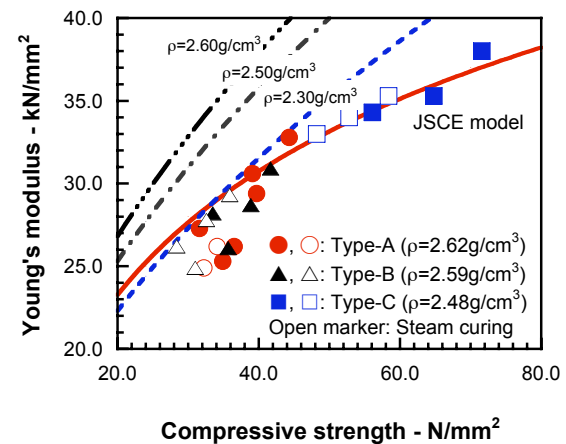


Fig. 3 Relationship between compressive strength and Young's modulus

くなると、セメントコンクリートの乾燥収縮ひずみは、大きくなることが分かる。

Fig. 6 は、鉄鋼スラグ水和固化体とセメントコンクリートの乾燥収縮ひずみを比較したものである。乾燥初期では、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみは、セメントコンクリートに比べて小さいのに対し、乾燥期間が100日を超える長期に至ると、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの方が、セメントコンクリートよりも大きくなる。さらに乾燥期間が長くなるにつれ、その差はより大きくなる。**Fig. 7** は、ロサンゼルス試験機によって、製鋼スラグの脆弱部を取り除き、吸水率を下げた製鋼スラグを骨材に用いた鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの最終値を示したものである。図の横軸は、製

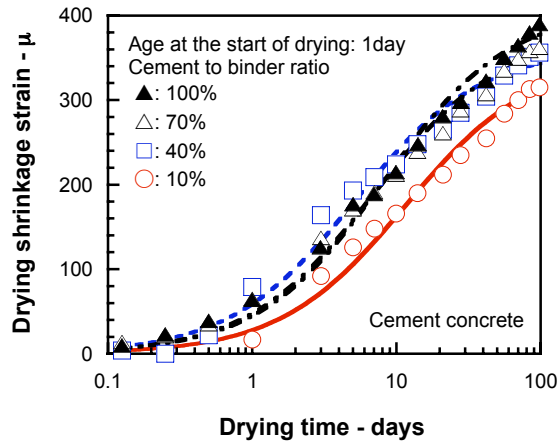


Fig. 4 Effect of cement on drying shrinkage strain of cement concrete

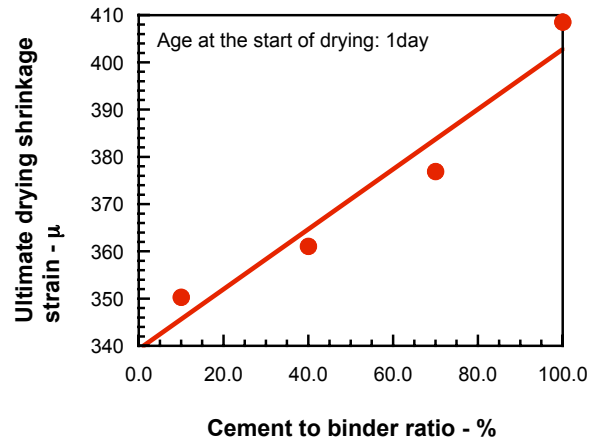


Fig. 5 Relationship between cement to binder ratio and ultimate drying shrinkage strain

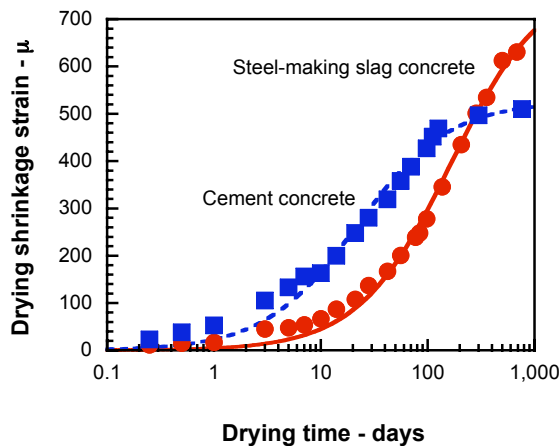


Fig. 6 Comparison of drying shrinkage strain of steel-making slag concrete and cement concrete

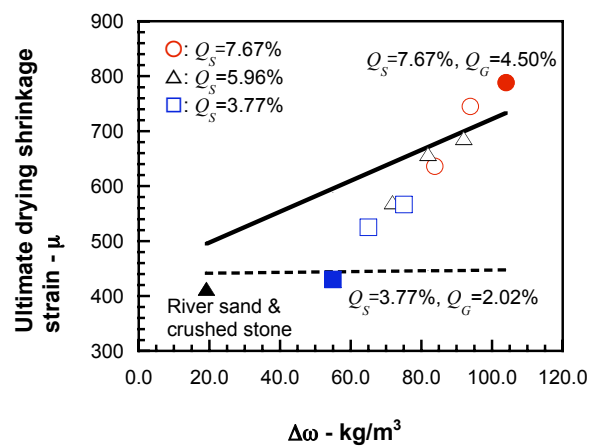


Fig. 7 Comparison of ultimate drying shrinkage strain of Experimental value and calculation value

鋼スラグ骨材中の水分量 $\Delta\omega$ を、縦軸は、乾燥収縮ひずみの最終値を示している。骨材中の水分量 $\Delta\omega(\text{kg/m}^3)$ は、次式により求めた値である。

$$\Delta\omega = \frac{S \cdot Q_s}{100 + Q_s} + \frac{G \cdot Q_G}{100 + Q_G} \quad (3)$$

ここに、 S は単位細骨材量(kg/m^3)、 Q_s は細骨材の吸水率(%), G は単位粗骨材量(kg/m^3)、 Q_G は粗骨材の吸水率(%)である。図中の■は、ロサンゼルス試験機によって吸水率を最も下げた製鋼スラグ骨材を用いた結果で、▲は、骨材に川砂および碎石を用いたセメントコンクリートの結果である。また、●は、通常の吸水率の製鋼スラグを骨材に用いた鉄鋼スラグ水和固化体の結果である。この図から明らかなように、製鋼スラグ

骨材の吸水率を下げ、骨材に含まれる水分量 $\Delta\omega$ を少なくすることで、乾燥収縮ひずみの最終値は小さくなることが分かる。Fig. 7中の破線は、土木学会コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕¹⁾に示される乾燥収縮ひずみの予測式を用いて、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの最終値を予測した結果である。また、Fig. 7中の実線は、土木学会コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕¹⁾に示される乾燥収縮ひずみの予測式中の単位水量 W の代わりに、骨材に含まれる水分量 $\Delta\omega$ を考慮した全水量($W + \Delta\omega$)を用いて鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの最終値を予測した結果である。ただし、Fig. 7中に示される実線および破線の計算には、Fig. 5に示した結合材の種類の影響を考慮し、セメントの

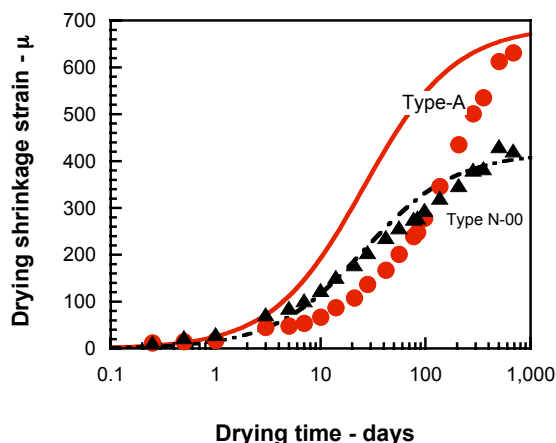


Fig. 8 Precision of a calculated value of dry shrinkage strain by arbitrary time

種類の影響を表す係数 α を、セメント結合材比の関数とした次式を用いて求めた。

$$\alpha = 11 \times (0.788 + 0.212 \cdot C/B) \quad (4)$$

この図から明らかなように、吸水率の高い製鋼スラグ骨材を用いた場合には、製鋼スラグに含まれる水分量 $\Delta\omega$ を考慮することで、予測値と実験値がよく一致することが分かる。

Fig. 8は、Type-Aの鉄鋼スラグ水和固化体およびセメントコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化の実験値を式(2)を用いて計算した結果である。図中の●および▲が実験値を、実線および破線が予測値を示している。ただし、Type-Aの鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの最終値の計算には、単位水量 W の代わりに全水量 $(W+\Delta\omega)$ を用いて求めている。この図から明らかなように、セメントコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化は、予測値とよく一致しているのに対し、Type-Aの鉄鋼スラグ水和固化体の結果は、とくに乾燥初期において予測値よりも小さいことが分かる。

Fig. 9に、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの経時変化の実験値を式(2)を用いて回帰し求めた β の値と、骨材中の水分量 $\Delta\omega$ の関係を示す。なお、図中の破線は、土木学会コンクリート標準示方書に示される単位水量 W に、骨材中に含まれる水分量 $\Delta\omega$ を加えた全水量 $(W+\Delta\omega)$ を用い

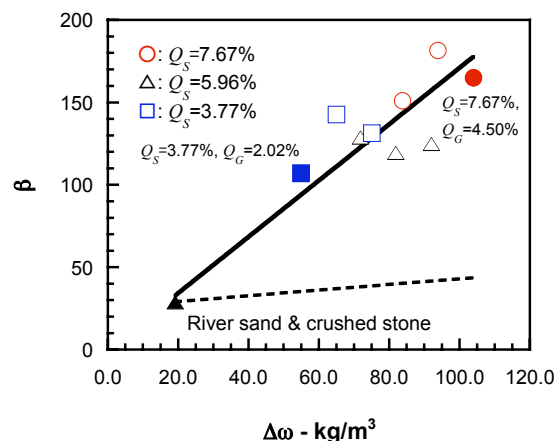


Fig. 9 Relationship between β and $\Delta\omega$

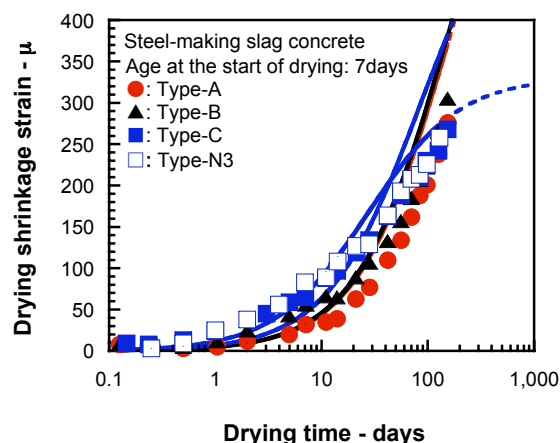


Fig. 10 Precision of prediction model to suggest in this paper

て β を計算した結果である。この図に示されるように、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの経時変化を表す β の値は非常に大きいことが分かる。Fig. 9中の実線は、式(5)を用いて計算した結果である。すなわち、土木学会コンクリート標準示方書に示される乾燥収縮ひずみの経時変化特性を示す項 β の予測式の右辺に、骨材中の水分量の影響を加えた式である。

$$\beta = \frac{4W\sqrt{V/S}}{100 + 0.7t_0} + 1.71 \cdot (\Delta\omega - 19.2) \quad (5)$$

Fig. 10 は、式(5)を用いて、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの経時変化を計算した結果を示したものである。図中の●、■および▲が実験値を、実線が予測値を示している。この

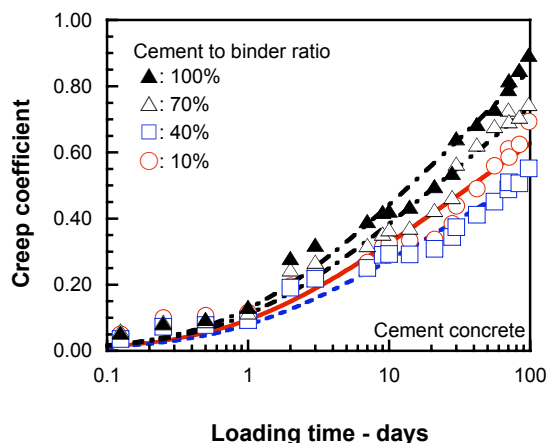


Fig. 11 Result of creep test of cement concrete

図から、鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみの経時変化はいずれの配合においても、予測値とよく一致していることが分かる。

3.3 クリープ係数

Fig. 11 は、セメントコンクリートのクリープ係数の経時変化に、結合材に占めるセメント量の割合が及ぼす影響を示したものである。この図から、結合材に占めるセメント量が多くなるほど、クリープ係数が大きくなることが分かる。これらの経時変化を式(6)を用いて回帰し得られる係数 A と結合材に占めるセメント量の関係を Fig. 12 に示す。

$$\phi = A \cdot \log(t + 1) \quad (6)$$

ただし、 ϕ はクリープ係数、 t は載荷期間(日)である。この図から、セメント量が少ないほどクリープ係数も小さくなり、セメント量が 40%以下であれば同程度であることが分かる。

Fig.13 は、鉄鋼スラグ水和固化体のクリープ係数の経時変化を示したものである。いずれの配合の鉄鋼スラグ水和固化体も、結合材に占めるセメント量は 40%以下であり、Fig. 12 に示されるように、この範囲のセメント量であれば、セメント量がクリープ係数に及ぼす影響は小さい。また、載荷期間 100 日では、鉄鋼スラグ水和固化体のクリープ係数はおよそ 0.8 であるのに対し、セメント結合材比 40%以下のセメントコンクリートはおよそ 0.55 である。鉄鋼スラグ

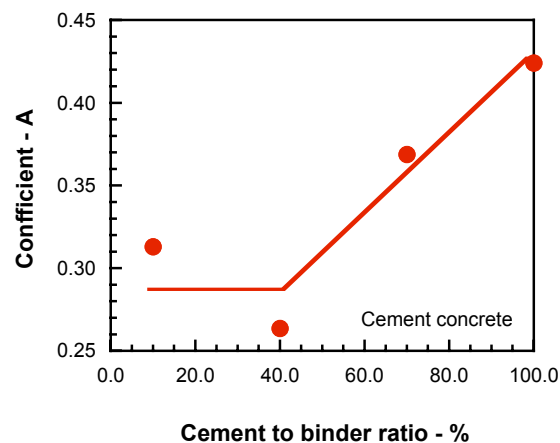


Fig. 12 Relationship between A and cement to binder ratio

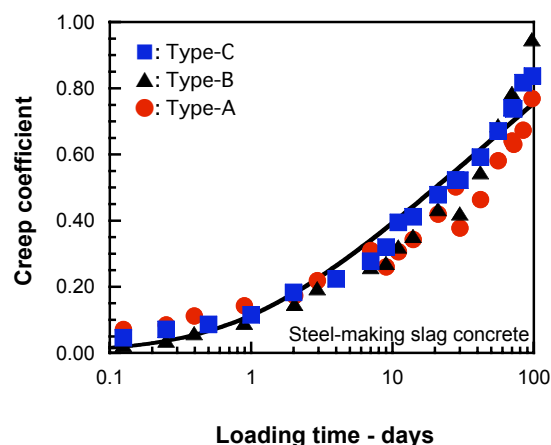


Fig. 13 Result of creep test of steel-making slag concrete

水和固化体のクリープ係数は、骨材に用いる製鋼スラグの影響で、セメントコンクリートに比べ、若干大きめの値になっていると考えられる。

4. まとめ

鉄鋼スラグ水和固化体の乾燥収縮ひずみは、セメントコンクリートに比べて大きく、さらに最終値に達するまで長い時間を要する。また、クリープ係数は、セメントコンクリートと比べて大きく、静弾性係数は、ほぼ同程度である。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，土木学会，pp. 28-34，2002. 3