

論文 緻密化した高炉徐冷スラグ粗骨材を用いたコンクリートの強度および変形特性に関する研究

白川 輝*1・藤井 隆史*2・高橋 克則*3・綾野 克紀*4

要旨: 通常の方法で製造された高炉徐冷スラグは、内部に多数の空隙が存在するため、粗骨材として用いると、コンクリートの圧縮強度および静弾性係数は小さくなり、乾燥収縮ひずみは大きくなる。しかし、高炉徐冷スラグ内部を緻密化し、表乾密度を大きく、吸水率を小さくした高炉徐冷スラグを粗骨材に用いたコンクリートは、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮ひずみにおいて、砂岩砕石を用いたものと同程度以上の性能になった。また、圧縮クリープにおいても、緻密化した高炉徐冷スラグ粗骨材を用いることで、砂岩砕石を用いたものと同程度に改善される。

キーワード: 高炉徐冷スラグ、緻密化、圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮ひずみ、クリープひずみ

1. はじめに

製鉄所の高炉で、鉄鉱石から銑鉄を取り出す工程で発生する副産物が高炉スラグである。高炉スラグは、毎年、年間約 2,400 万トンが国内で発生している¹⁾。高炉スラグは、熔融状態の高炉スラグを高圧水で急冷固化した高炉水砕スラグと、冷却ヤードで自然放冷と適度な散水によって冷却固化した高炉徐冷スラグに大別できる。高炉水砕スラグは、非晶質な砂状で、砂の代替材としてコンクリート用骨材に用いられるほか、微粉化したものがコンクリート用混和材や高炉セメントの原料に用いられるなど付加価値の高い利用がなされている。一方、高炉徐冷スラグは、結晶質な岩石状で、破碎され、主に路盤材等に利用されている。しかし、路盤材には、再生骨材、ごみ熔融スラグ等、他のリサイクル材料も利用されており、高炉徐冷スラグの新たな活用先を見出す必要がある。

排出される高炉スラグのうち、およそ 8 割は、付加価値の高い高炉水砕スラグに加工される。しかし、設備の点検等で、水砕処理が行えなかった場合等、残りの約 2 割程度が、高炉徐冷スラグとして発生する。高炉徐冷スラグは、JIS A 5011-1「コンクリート用スラグ骨材-第 1 部：高炉スラグ骨材」に規格化されており、コンクリートの粗骨材に用いることが認められている材料である²⁾。しかし、コンクリート用骨材としての高炉徐冷スラグの利用率は、発生量のわずか 6.5%程度と、ほとんど利用されていないのが現状である。高炉徐冷スラグは、スラグが凝固する過程で発生するガスが逃げ切れずにスラグ内部に残ってしまうため、空隙の多いものになってしまう。そのため、高炉徐冷スラグの絶乾密度は 2.2~2.6g/cm³程度と天然の骨材に比べて小さく、吸水率は 4~7%程度と

天然の骨材に比べて大きくなる。また、高炉徐冷スラグは、熔融状態のスラグを冷却ヤード等に放流する際の層厚や散水などによる冷却方法によって、密度や吸水率などの物理特性が変化するため、一定の範囲で、製鉄所間や製造ロット間のばらつきが存在する。

本研究は、高炉徐冷スラグを粗骨材に用いたコンクリートの圧縮強度、静弾性係数、乾燥収縮ひずみおよびクリープについて調べたものである。凝固条件を変え、内部の気孔を低減した緻密な高炉徐冷スラグ³⁾を用いることで、コンクリートの強度および変形特性が改善されることを示す。

2. 実験概要

2.1 使用材料

既報³⁾において、高炉徐冷スラグ中の気孔は、気孔率が高いほど径が大きく、数が少なくなることから、気孔率低減のためには、気孔の成長の抑制が必要であることを示している。また、高炉スラグの熱伝導度が小さいため、スラグ内部の冷却速度は遅いこと、スラグ内部の冷却速度を大きくするためには、凝固厚みを薄くすること

表-1 骨材の物性

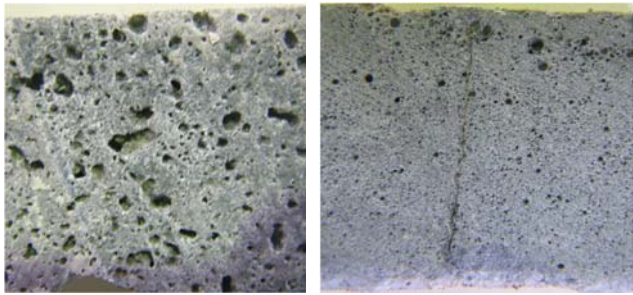
骨材の種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
砂岩砕砂	2.65	1.74	3.10
砂岩砕石	2.74	0.57	7.08
高炉徐冷スラグ粗骨材 N	2.56	6.14	6.48
高炉徐冷スラグ粗骨材 B	2.78	1.69	6.77
高炉徐冷スラグ粗骨材 A	2.85	0.66	6.74

*1 岡山大学大学院 環境生命科学研究科資源循環学専攻 (学生会員)

*2 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

*3 J F E スチール(株) スチール研究所スラグ・耐火物研究部 博士(工学)

*4 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻教授 博士(工学) (正会員)



(a)高炉徐冷スラグ N

(b)高炉徐冷スラグ B

写真-1 高炉徐冷スラグ骨材の断面

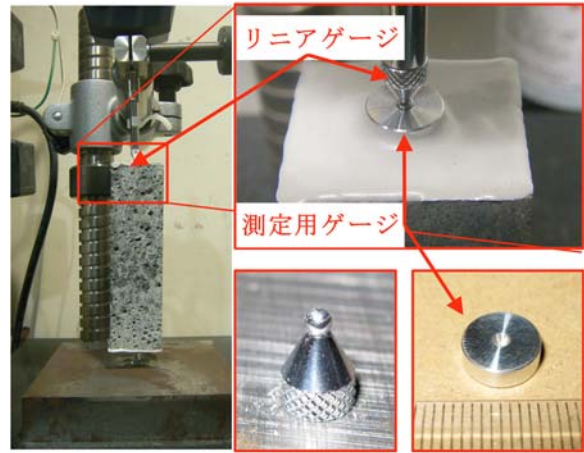


写真-2 骨材の長さ変化の測定

表-2 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)		
				W	C	S	G	Ad ₁	Ad ₂	AE 助剤
20	35	2.0	45.0	175	500	771	974	0.5	0.0	0.000
	60				292	850	1,074	0.0		
	25	4.5	39.0		700	576	932	0.0	0.8	0.006
	35				500	675	1,004			
	45				389	731	1,043			
	55				318	774	1,060			
	65				269	828	1,047			

Ad₁ : 高性能減水剤, Ad₂ : 高性能 AE 減水剤

が有効であること、平均冷却速度の増大により、高炉徐冷スラグの気孔率を低減することが可能であることを示している。本研究では、高炉徐冷スラグに、製鉄所で通常の冷却方法で製造された高炉徐冷スラグ粗骨材 N と通常よりも冷却速度を速めて緻密化した低吸水率の高炉徐冷スラグ粗骨材 A および B を用いた。実験に用いた骨材の表乾密度、吸水率および粗粒率を表-1 に示す。低吸水率の高炉徐冷スラグを製造する方法は、既報³⁾で示された鋳鋼製鋳型に熔融スラグを注入し、120 秒程度の短時間で 20~30mm の板状に凝固する方法を用いている。実験に用いた高炉徐冷スラグの断面を写真-1 に示す。通常の冷却方法で製造された高炉徐冷スラグ N には、内部に多数の空隙が確認できるのに対し、冷却速度を速めて製造された高炉徐冷スラグ B は、空隙が小さくなり、密実になっていることが分かる。高炉徐冷スラグ A は、冷却時の厚さの違いから、高炉徐冷スラグ B と比べ、表乾密度は大きく、吸水率は小さい、より密実なものとなっている。実験には砂岩砕石も用いた。セメントには、普通ポルトランドセメント (密度 : 3.15g/cm³, ブレーン

値 : 3,350cm²/g) を用い、細骨材には砂岩砕石を用いた。

2.2 コンクリートの配合

本実験に用いた砂岩砕石を用いたコンクリートの配合を表-2 に示す。高炉徐冷スラグ粗骨材を用いる場合には、粗骨材体積を一定とし、置換して用いた。通常の冷却方法で製造された高炉徐冷スラグ N と、種々の骨材との比較を行う実験では、微細気泡を連行しない水セメント比が 35% および 60% の配合を用いた。冷却速度を速めて製造された高炉徐冷スラグと砂岩砕石との比較を行う実験では、微細気泡を連行した水セメント比が 25% から 65% の配合を用いた。微細気泡を連行しない配合では、ポリカルボン酸系高性能減水剤を、微細気泡を連行する配合では、高性能 AE 減水剤および AE 助剤を用いた。いずれの配合も、単位水量は、175kg/m³ で一定とした。

2.3 圧縮強度および静弾性係数

骨材の圧縮強度試験には、25×25×50mm に切り出した角柱供試体を用いた。供試体の本数は、1 種類につき 3 本ずつである。

コンクリートの圧縮強度および静弾性係数の測定に

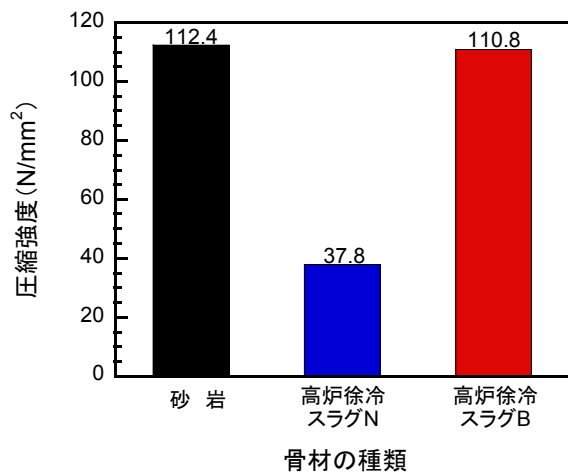


図-1 骨材の圧縮強度

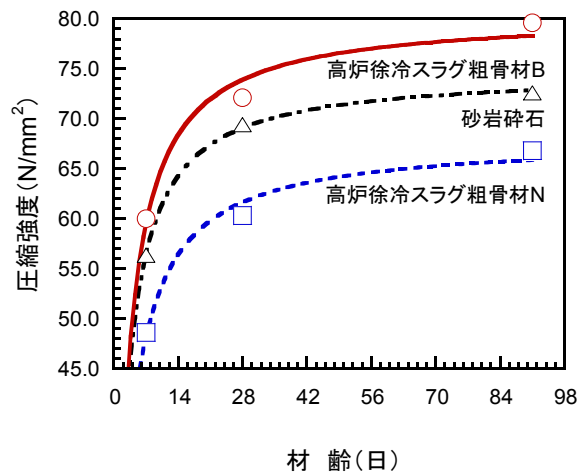


図-2 コンクリートの圧縮強度の経時変化 (W/C=35%)

は、 $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体を用いた。材齢 7 日、28 日および 91 日の試験日までそれぞれ水中養生を行った。圧縮強度および静弾性係数の試験は、それぞれ、JIS A 1108: 2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」および JIS A 1149: 2001「コンクリートの静弾性係数試験方法」に従って行った。なお、コンクリートのひずみの測定には、コンプレッソメータを用いた。コンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、3 本の供試体を用いて求めた。

2.3 乾燥収縮ひずみ

骨材の乾燥収縮ひずみ試験には、 $25 \times 25 \times 100$ mm に切り出した角柱供試体を用いた。供試体は、初期の含水量を一定にするために、成形後一週間水に浸漬し吸水させたのちに用いた。供試体の上面および底面の中心に、写真-2 に示すように測定用ゲージを貼り付けた。供試体の上面および底面はエポキシ樹脂を塗り、側面のみが乾燥する状態にして測定を行った。供試体の長さ変化の測定には、写真-2 に示すリニアゲージ（検長：100mm，最小目盛：5/10,000mm）を用いた。

コンクリートの乾燥収縮ひずみ測定には $100 \times 100 \times 400$ mm の角柱供試体を用いた。角柱供試体は脱型直後から材齢 7 日まで水中で養生を行った後、温度が $20 \pm 2^\circ\text{C}$ で、相対湿度が $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿度室内に設置し、試験を開始した。乾燥収縮ひずみの測定は、JIS A 1129-2: 2001 に示されるコンタクトゲージ法により、ホイットモア式ひずみ計（検長：250mm，最小目盛：1/1,000mm）を用いた。

2.4 圧縮クリープ

圧縮クリープひずみの測定には、中心に、荷重用の PC 鋼棒を通すため塩化ビニル管（外径 24mm，内径 20mm）が埋め込まれた $100 \times 100 \times 380$ mm の角柱供試体を用いた。供試体は、脱型直後から材齢 7 日まで水中養生を行い、その後は、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相対湿度が $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿度室内に設置した後、材齢 14 日で持続荷重の荷重を

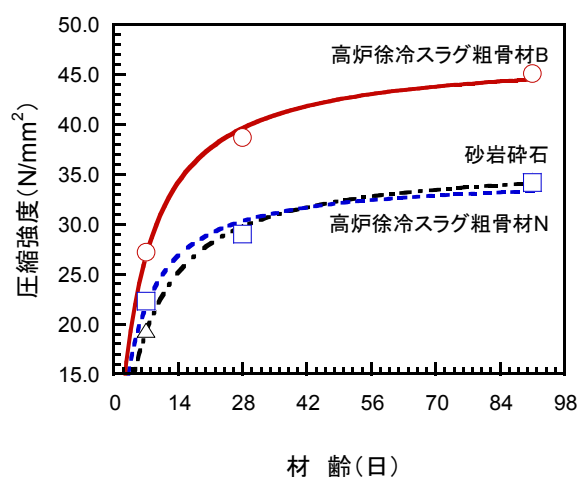


図-3 コンクリートの圧縮強度の経時変化 (W/C=60%)

行った。供試体への持続荷重の導入には、PC 鋼棒を用いた。各供試体には、初期荷重時の圧縮強度の 20% の応力を荷重した。なお、初荷重時圧縮強度は、クリープ測定用供試体と同じ条件で養生を行った、 $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体 3 本の平均圧縮強度とした。また、持続荷重の減退を補うために、初荷重後 2 日、9 日、30 日、72 日、128 日、182 日および 245 日に持続荷重の再導入を行った。長さ変化の測定には、ホイットモア式ひずみ計（検長：250mm，最小目盛：1/1,000mm）を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および静弾性係数

図-1 は、種々の骨材の圧縮強度を示したものである。この図より、通常の冷却方法で製造された高炉徐冷スラグ N は、砂岩と比較して、圧縮強度は小さいことが分かる。しかし、内部を緻密化した高炉徐冷スラグ B の圧縮強度は、砂岩と同程度まで改善されることが分かる。

図-2 は、高炉徐冷スラグ粗骨材を用いた水セメント比が 35% のコンクリートの圧縮強度を示したものである。

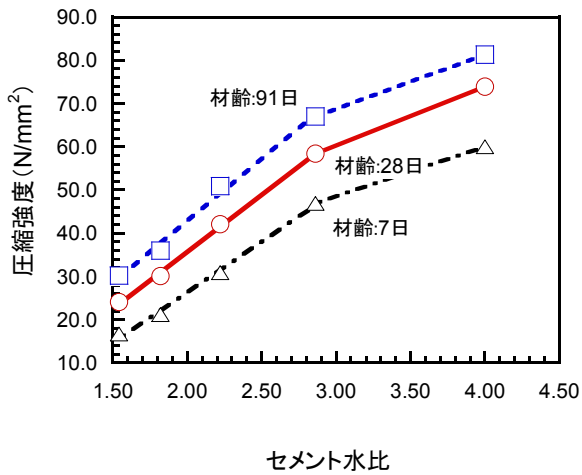


図-4 砂岩砕石を用いたコンクリートの圧縮強度とセメント水比の関係

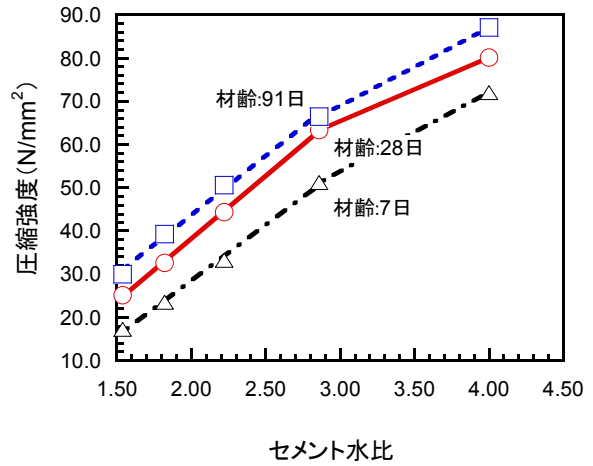


図-5 高炉徐冷スラグ粗骨材 B を用いたコンクリートの圧縮強度とセメント水比の関係

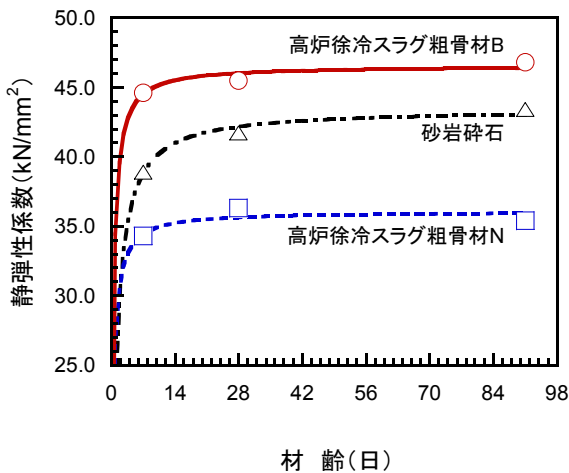


図-6 コンクリートの静弾性係数の経時変化 (W/C=35%)

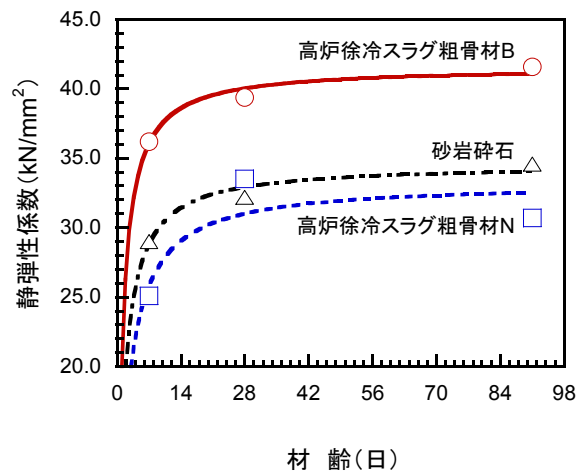


図-7 コンクリートの静弾性係数の経時変化 (W/C=60%)

図中の△、□および○は、それぞれ、粗骨材に砂岩砕石、高炉徐冷スラグ粗骨材 N および高炉徐冷スラグ粗骨材 B を用いた結果を示している。この図より、通常の冷却方法で製造された高炉徐冷スラグ N を粗骨材に用いたコンクリートの圧縮強度は、砂岩砕石を用いたものよりも小さいことが分かる。しかし、内部を緻密化した高炉徐冷スラグ B を粗骨材に用いることで、圧縮強度は大きくなることが分かる。また、図-3 は、高炉徐冷スラグを用いた水セメント比が 60% のコンクリートの圧縮強度を示したものである。水セメント比が 60% の場合、高炉徐冷スラグ N を粗骨材に用いたコンクリートの圧縮強度は、砂岩砕石を用いたものと同程度である。しかし、内部を緻密化した高炉徐冷スラグ B を粗骨材に用いることで、圧縮強度は大きくなることが分かる。

図-4 および図-5 は、それぞれ、粗骨材に砂岩砕石および高炉徐冷スラグ B を用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係を示したものである。図中の△、

○および□は、それぞれ、材齢 7 日、材齢 28 日および材齢 91 日での圧縮強度を示している。これらの図より、いずれの粗骨材を用いたものも、セメント水比と圧縮強度の関係は、水セメント比が 35% 以上(セメント水比が 2.85 以下)までは、ほぼ比例関係にあることが分かる。

図-6 および図-7 は、水セメント比が 35% および 60% のコンクリートの静弾性係数に与える粗骨材の種類の影響を示したものである。これらの図より、高炉徐冷スラグ N を粗骨材に用いたコンクリートの静弾性係数は、砂岩砕石を用いたものに比べて小さいことが分かる。一方で、高炉徐冷スラグ B を粗骨材に用いたコンクリートは、砂岩砕石を用いたものよりも大きくなっている。

図-8 は、種々の粗骨材を用いたコンクリートの圧縮強度と静弾性係数との関係を示したものである。この図より、通常の徐冷スラグおよび緻密化された高炉徐冷スラグ B を粗骨材に用いたコンクリートの同一圧縮強度における静弾性係数は、砂岩砕石を用いたものと同程度で

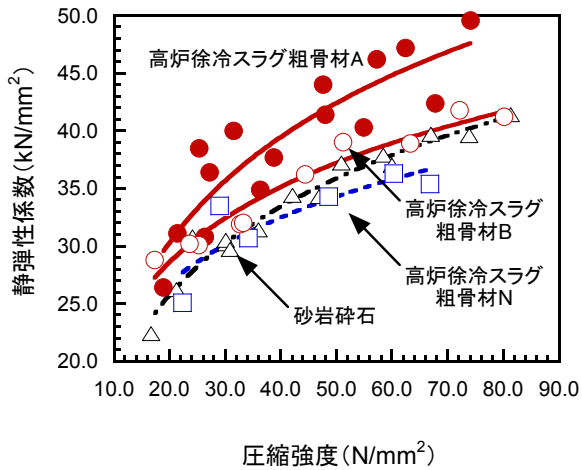


図-8 コンクリートの静弾性係数と圧縮強度の関係

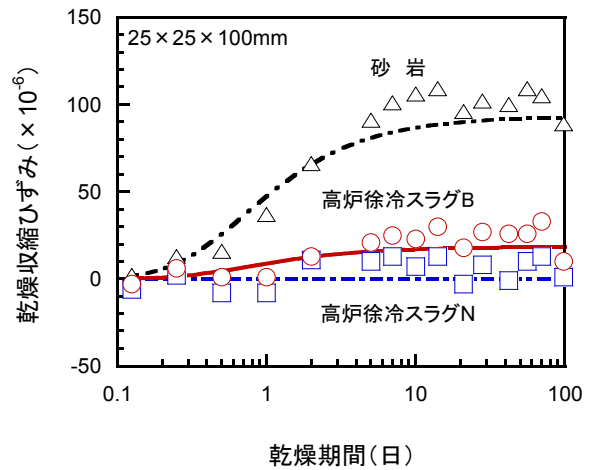


図-9 骨材の乾燥収縮ひずみの経時変化

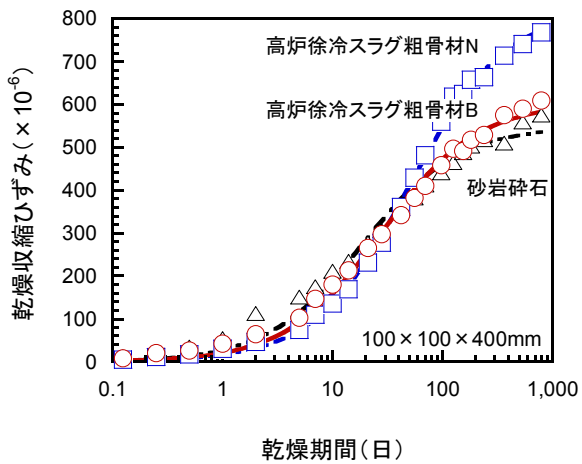


図-10 コンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化 (W/C=35%)

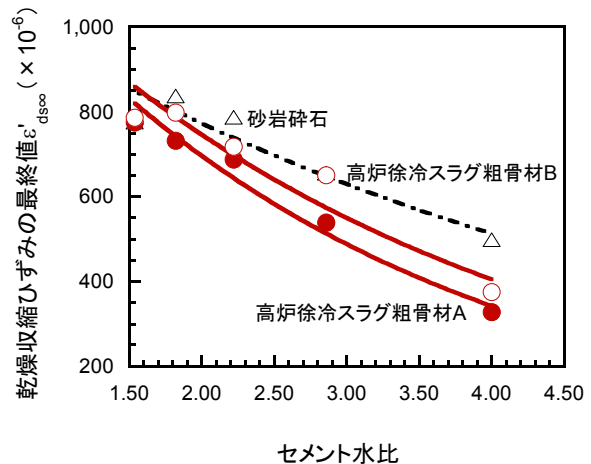


図-11 コンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値 $\varepsilon'_{ds\infty}$ とセメント水比の関係

あることが分かる。さらに密実な、吸水率を小さくした高炉徐冷スラグ A を粗骨材に用いた場合は、砂岩碎石を用いたものに比べて、同一圧縮強度における静弾性係数が大きくなることが分かる。

3.2 乾燥収縮ひずみ

図-9 は、25×25×100mm の供試体を用いて測定した骨材の乾燥収縮ひずみの経時変化を示したものである。図中の△、○および□は、それぞれ、砂岩、高炉徐冷スラグ B および高炉徐冷スラグ N の結果を示している。この図より、高炉徐冷スラグ B および高炉徐冷スラグ N の乾燥収縮ひずみは、砂岩に比べて小さいことが分かる。

図-10 は、種々の粗骨材を用いた水セメント比が 35% のコンクリートの乾燥収縮ひずみの経時変化を示したものである。図中の△、□および○は、それぞれ、粗骨材に砂岩碎石、高炉徐冷スラグ N および高炉徐冷スラグ B を用いた結果である。この図より、高炉徐冷スラグ N を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、乾燥期間が 40 日あたりまでは、砂岩碎石を用いたものよりも小さいの

に対し、乾燥期間が 40 日を過ぎたあたりから、砂岩碎石を用いたものより大きくなることが分かる。一方、緻密化した高炉徐冷スラグ B を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、砂岩碎石を用いたものと同程度になることが分かる。

図-11 は、種々の粗骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみの最終値 $\varepsilon'_{ds\infty}$ とセメント水比との関係を示したものである。乾燥収縮ひずみの最終値は、乾燥収縮ひずみの経時変化を式(1)に示す双曲線を用いて回帰によって求めた値である。

$$\varepsilon'_{ds}(t) = \frac{\varepsilon'_{ds\infty} \cdot t}{\beta + t} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon'_{ds}(t)$ は乾燥期間 t (日) における乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$) で、 $\varepsilon'_{ds\infty}$ は乾燥収縮ひずみの最終値 ($\times 10^{-6}$) で、 β は乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項である。この図より、セメント水比の小さいコンクリートは、粗骨材による影響は小さく、セメント水比が大きくなるにつれて粗骨材の影響が顕著に現れることが分かる。内部が

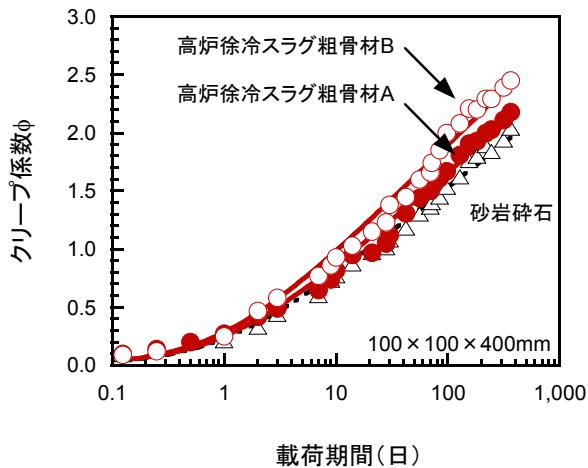


図-12 コンクリートのクリープ係数 ϕ の経時変化
(W/C=35%)

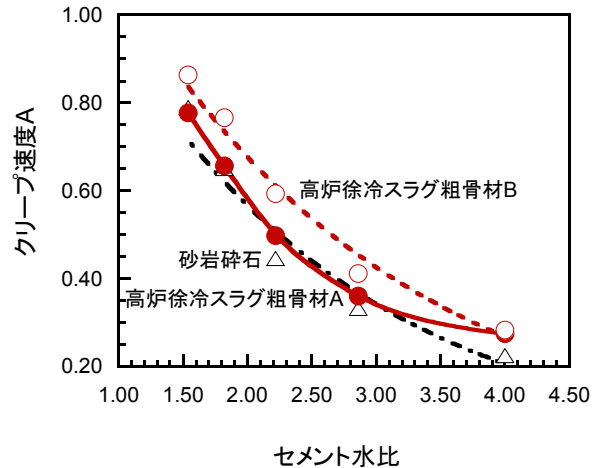


図-13 コンクリートのクリープ速度Aとセメント水比
の関係

緻密化された高炉徐冷スラグBを用いたコンクリートは、砂岩碎石を用いたコンクリートより乾燥収縮ひずみの最終値が小さいことが分かる。また、より密実な高炉徐冷スラグAを粗骨材に用いることで、乾燥収縮ひずみの最終値がより小さくなることが分かる。

3.3 圧縮クリープ

図-12は、種々の粗骨材を用いた水セメント比が35%のコンクリートのクリープ係数 ϕ の経時変化を示したものである。図中の Δ 、 \circ および \bullet は、それぞれ、粗骨材に砂岩碎石、高炉徐冷スラグBおよび高炉徐冷スラグAを用いた結果である。この図より、高炉徐冷スラグ粗骨材Bを用いたコンクリートのクリープ係数は、砂岩碎石を用いたコンクリートよりも大きくなることが分かる。一方、高炉徐冷スラグBよりも吸水率の小さい高炉徐冷スラグAを用いることで、砂岩碎石を用いたものに近くなることが分かる。

図-13は、種々の粗骨材を用いたコンクリートのクリープ速度Aとセメント水比の関係を示したものである。クリープ速度Aは、クリープ係数 ϕ の経時変化を、式(2)に示す対数式を用いて回帰によって求めた値である。

$$\phi = A \log_e(t' + 1) \quad (2)$$

ここに、 ϕ は載荷期間 t' (日)におけるクリープ係数で、Aはクリープ速度である。この図より、いずれのセメント水比においても、高炉徐冷スラグを粗骨材に用いたコンクリートのクリープ速度は砂岩碎石を用いたコンクリートよりも大きいことが分かる。しかし、より密実な高

炉徐冷スラグを用いれば、砂岩碎石を用いたものに近づく傾向にある。

4. まとめ

通常の高炉徐冷スラグを粗骨材として用いると、コンクリートの圧縮強度および静弾性係数は小さくなり、乾燥収縮ひずみは大きくなる。しかし、高炉徐冷スラグの内部を緻密化することで、骨材の密度は大きくなり、吸水率は小さく、また、骨材そのものの強度が大きくなる。それを粗骨材に用いたコンクリートは、砂岩碎石を用いたものと比べて、圧縮強度、静弾性係数は大きくなり、クリープも改善効果が確認された。また、乾燥収縮ひずみは、内部を緻密化した高炉徐冷スラグを粗骨材に用いれば、砂岩碎石を用いたものと同程度か小さくなる結果が確認された。

参考文献

- 1) 高炉スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報（平成25年度実績），2014
- 2) 依田彰彦：特殊な材料を使ったコンクリート（その15）III-4 高炉スラグ骨材，コンクリート工学，Vol.25，No.2，pp.77-83，1987.2
- 3) 當房博幸，宮本陽子，渡辺圭兒，桑山道弘，小澤達也，田中敏宏：粗骨材用高炉徐冷スラグの気孔率低減のための凝固条件，鉄と鋼，Vol.99，No.8，pp.532-541，2013.7