

論文 スラグ骨材を使用した高密度コンクリートの基礎的実験

五味 信治^{*1}・榊田 佳寛^{*2}

要旨：港湾構造物には波圧や揚圧に対処するため、質量の重い高密度コンクリートが要求される場合がある。一方、環境負荷抑制のため天然骨材の代替品としてスラグ骨材の実用化が進みつつある。ここでは、環境負荷抑制と高密度化対策として、産業副産物である銅スラグ細骨材と電気炉酸化スラグ粗骨材を使用した高密度コンクリートを検討した。そのコンクリート単位容積質量は 2.6~3.0t/m³ となる。実用的な配合として、スラグ骨材の置換率を 100% とした。この配合は実用化されていないため、実用に供することができるかについて実験し、配合調整と混和材や混和剤を検討することでスラグ骨材の持つ特異な性質を抑制できた。

キーワード：高密度コンクリート、銅スラグ細骨材、電気炉酸化スラグ粗骨材

1. はじめに

銅スラグは鉱石を溶解して銅を製錬する際に、鉱石の岩石成分と溶剤としての石灰石やけい石とが結合したものである。一般に多量の鉄分を含有して密度が大きく、表面がガラス質のため吸水率は小さいという特徴がある。銅スラグ細骨材(以下、CUS と称す)は、コンクリートに使用できる細骨材として、1997 年 8 月に JISA5011-3 に規格化されている。

電気炉酸化スラグ(以下、このスラグ粗骨材を EFG と称す)は、回収されたスクラップを電気炉で精錬し、鉄筋、形鋼等の素材としての粗鋼を製造する際に副産されるもので、製鋼過程の原料酸化期に排出される。EFG はコンクリートに使用できる骨材として、2003 年 6 月に JISA5011-4 に規格化されている。品質は CUS と同様な特徴を持つ。

これら両スラグの利用に関しては、密度が大きという特徴を活かし、港湾用のコンクリートブロックや砂防ダムなどへの用途が期待されており、コンクリートの性状に及ぼす影響が検討されてきた¹⁾。コンクリート製造上の実的な見地からは、細骨材あるいは粗骨材へのスラグ骨材の置換率が 100%であることが望ましい。しかし、この場合のコンクリートの性状に及ぼ

す影響にはブリーディングを始めとする特異な現象があり、置換率 50%程度までは使用例もあるが実績があまりないことから実際の工事にはほとんど採用されていない。

本研究は、コンクリート骨材におけるスラグ骨材の置換率を 100%とした場合、高密度コンクリートを配合調整と混和材や混和剤を検討することによって実用に供することが可能かどうかを実験的に検討したものである。

2. 実験

実験の要因と水準を表-1 に、使用した材料を表-2 に、配合例を表-3 に示す。

2.1 実験の概要

細骨材あるいは粗骨材へのスラグ骨材の置換率を 100%とした場合、このような高密度コンクリートの品質確認と使用の実用化に関しての可能性について実験を行った。ここでは、フレッシュ

表-1 実験要因と水準

要因	水準
水セメント比 (%)	50, 55, 60
CUS 置換率 (%)	30, 100*
EFG 置換率 (%)	100

注) *については粗骨材を天然砂利とした。

*1 りんかい日産建設(株) 技術研究所 所長 工博 (正会員)

*2 宇都宮大学 工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

表-2 使用材料

材料名	種類	特性・主成分
セメント	高炉セメント B 種	密度 3.05g/cm ³ ,比表面積 3770cm ² /g
細骨材	CUS 川砂	表乾密度 3.57g/cm ³ ,吸水率 0.42%,粗粒率 2.72 表乾密度 2.57g/cm ³ ,吸水率 2.77%,粗粒率 2.71
粗骨材	EFG 川砂利	表乾密度 3.60g/cm ³ ,吸水率 1.00%,粗粒率 6.60,最大寸法 40mm 表乾密度 2.66g/cm ³ ,吸水率 1.47%,粗粒率 6.66,最大寸法 40mm
混和材	炭酸カルシウム	密度 2.72 g/cm ³ ,比表面積 3160cm ² /g
混和剤	F(AE 減水剤) P(高性能 AE 減水剤)	リグニンスルホン酸系 ポリカルボン酸系

表-3 配合例（水セメント比 55%の場合）

水セメント比 (%)	s/a (%)	CUS置換率 (%)	EFG置換率 (%)	単位量(kg/m ³)							混和剤		空気量 (%)	
				水	セメント	炭酸カルシウム	細骨材		粗骨材		種類	(C×%)		
							CUS	川砂	EFG	川砂利				
55	45	100	0	138	251	0	0	844	0	1066	F	1.50	5.0	
				135	245	0	1180	0	0	1073		1.50		
				142	258	50	1133	0	0	1030		1.50		
				148	269	100	1088	0	0	989		1.50		
				152	276	150	1048	0	0	953		1.50		
				135	245	0	1180	0	0	1073		0.70		
				135	245	50	1150	0	0	1047		0.65		
				135	245	100	1121	0	0	1019		0.80		
	48	30	100	0	153	278	0	0	871	1321	0	P		0.70
					153	278	0	363	610	1321	0			0.70
					153	278	25	358	602	1304	0			0.75
					153	278	50	353	594	1287	0			0.75

注) F は標準の AE 減水剤, P は高性能 AE 減水剤を示し, その添加率はセメント量に対する百分率を示す。

コンクリートの性状, 単位水量, ブリーディング, 圧縮強度への影響, 置換率による単位容積質量の変化, 色調等について調査した。

スラグ骨材を使用したコンクリートは, スラグ表面がガラス質で粒度が単一であるためにブリーディングの問題が発生し, 凍結融解等の耐久性に影響するといわれている。この問題を抑制する方法としては, スラグ混合率を小さくする, 微粒分量を多くする, 高性能 AE 減水剤等を用いて単位水量を減じるなどの方法がある。ここでは抑制策として, 微粒分量として炭酸カルシウム(以下, Ca と称す)を加え, また単位水量を減じるために高性能 AE 減水剤を使用した。

2.2 使用材料および配合条件

高密度コンクリートの材料は, 環境への配慮からセメントは高炉セメント B 種を用い, 細骨材は CUS (佐賀産) と川砂 (九頭竜川産),

粗骨材は EFG (名古屋産) と川砂利 (九頭竜川産) で最大寸法は共に 40mm である。単位容積質量は, EFG が 2060 kg/m³, 川砂利が 1700kg/m³, 同実積率は 57.7%と 64.8%であった。混和材として Ca, 混和剤として AE 減水剤(以下, F と称す)と高性能 AE 減水剤(以下, P と称す)を使用した。

コンクリートの配合条件としては, 目標スランプを 8cm, 同空気量 5%, CUS の置換率を 30% および 100%, EFG の置換率を 100%, 目標単位容積質量を 2600 kg/m³以上, 水セメント比は 50, 55, 60 の 3 水準, 目標圧縮強度は 28 日材齢で 26N/mm²以上とした。

2.3 実験方法

目標スランプを 8cm, 同空気量 5%, 水セメント比は 55%, 同圧縮強度は 28 日材齢で 26N/mm²以上として天然骨材でベース配合を決定し, ベ

ース配合を基準にして CUS の置換率を 100% の場合について目標単位容積質量を 2600 kg/m^3 以上になるように配合した。また、ブリーディング抑制策として、混和剤の種類を 2 種類、Ca 添加量を 0, 50, 100, 150 kg/m^3 の 4 段階に分けて実験した。この中でワーカビリティが良く、かつブリーディング量の少ない配合を選定する。これらの結果を基に、CUS の置換率を 30%、EFG の置換率を 100% の場合についても同様な実験を行い、さらに水セメント比 50, 60% の場合についても同様な実験を行った。

2.4 試験項目および試験方法

表-4 に試験項目と試験方法を示す。スランブと空気量についてはフレッシュ時に試験を行い、スランブ $8 \pm 2.5 \text{ cm}$ 、空気量 $5 \pm 1.5\%$ の範囲に入るものを他の試験に供した。ブリーディングは JISA1123 に準じた。供試体は 28 日間標準水中養生した後、色調を比較し、単位容積質量を求め、圧縮強度試験に供した。

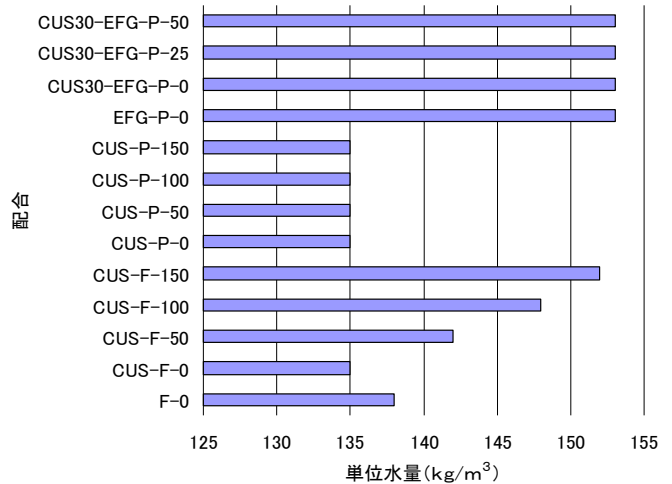
3. 実験結果と考察

3.1 単位水量への影響

図-1 に配合別の単位水量について示す。既往の研究では、置換率 CUS50%以上の配合で AE 減水剤を使用した場合、天然骨材と比較して単位水量が 5 kg/m^3 程度増加するという結果¹⁾がある。CUS100%置換の場合、増加する傾向は同様であるが、最も多い場合で 10 kg/m^3 ほど増加している。ブリーディング抑制のための Ca をセメントに対して外割で使用すると、所要の条件を満たすためには減水剤を増加させても限界があり、単位水量が使用量に応じて増加する。既往の研究では Ca を内割で使用しているため単位水量の増加が少ないと考えられる。このような現象を抑制するため高性能 AE 減水剤を使用すると Ca の使用量に影響されず単位水量を設定することができ、Ca の効果を確認できた。高性能 AE 減水剤を使用した場合、単位水量は CUS100%置換の配合では天然骨材の場合に比較して 3 kg/m^3 ほど低減でき、CUS を 30%・EFG

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	配合	試験方法
スランブ	全配合	JISA1128
空気量	全配合	JISA1102
ブリーディング	全配合	JISA1123
圧縮強度	代表配合	JISA1116
単位容積質量	代表配合	JISA1109
色調	3配合	供試体比較



注) CUS30 は銅スラグ置換率 30%、CUS・EFG は置換率 100%、F は AE 減水剤、P は高性能 AE 減水剤、末尾の数字は Ca の添加量 (kg/m^3) を示す。

図-1 各配合による単位水量の例 (W/C=55%)

を 100%置換したものについては 15 kg/m^3 ほど増加する結果となった。フレッシュコンクリートのワーカビリティは CUS を 30%・EFG を 100%置換したものが良好で、CUS100%置換の配合は単位水量が少ないため多少ばさついてワーカビリティに影響があるが実用には問題ないレベルであった。

3.2 ブリーディングへの影響

CUS の細骨材置換率 100%の実験ケースについて、ブリーディング量の変化を図-2 に示す。混和剤に AE 減水剤を使用した場合、天然骨材を使用したケースの約 5 倍のブリーディング量が発生している。既往の研究²⁾では約 3 倍という例がある。この要因としては、使用した天然骨材とスラグの材質的な相違が考えられる。例えば、スラグの表面はガラス質で滑らかであり、粒度が単一であること等が保水性を低下させている。また、Ca はブリーディング水の移動速度を抑制するた

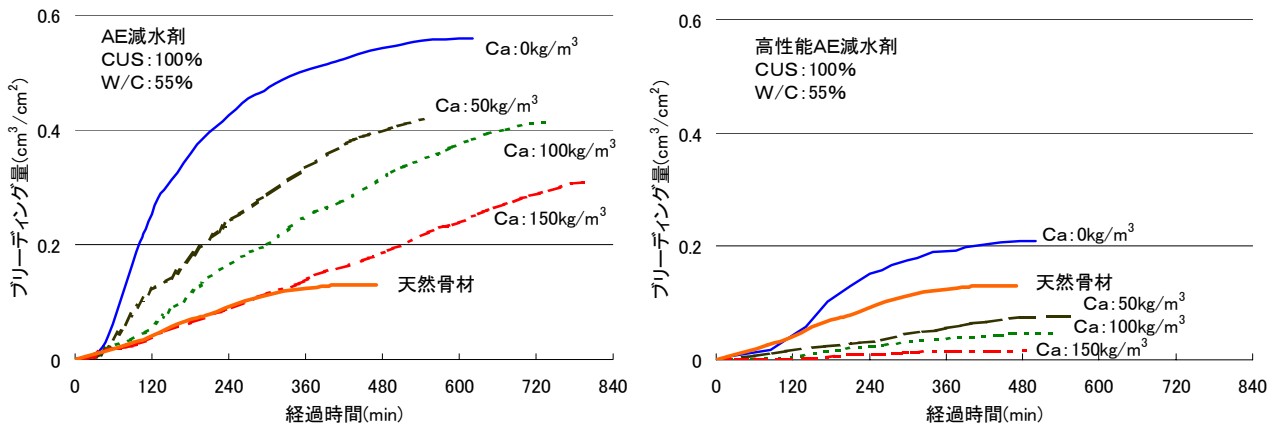


図-2 各混和剤における Ca 添加量のブリーディング量への影響(置換率 CUS 100%)

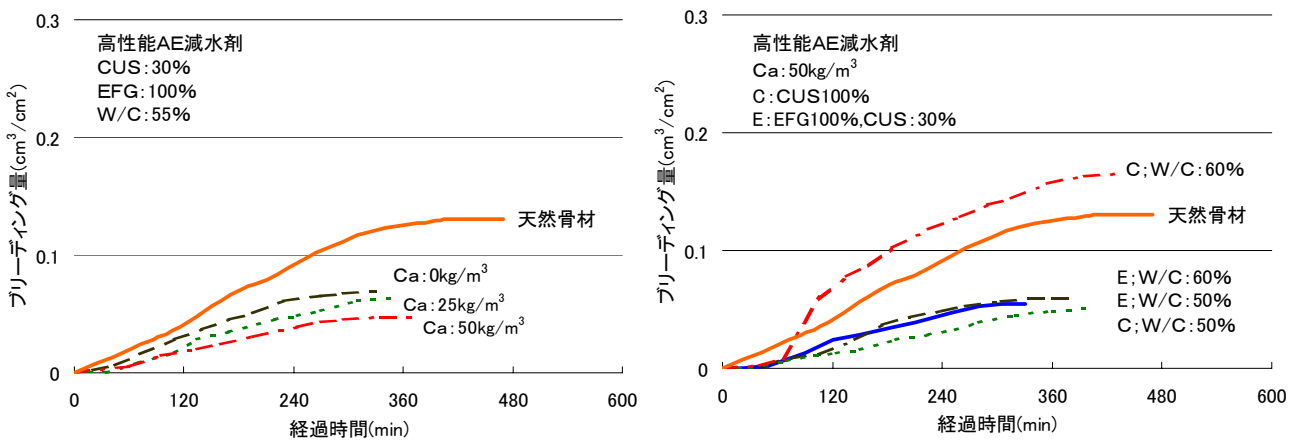


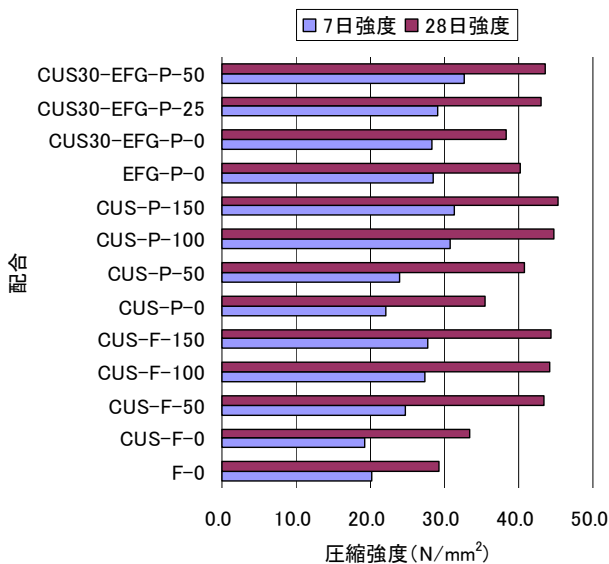
図-3 Ca 添加量および W/C の違いによるブリーディング量への影響(置換率 CUS 30%, EFG100%)

め効果は認められるが、最も多く添加したケースでも天然骨材を使用したケースの約 2 倍弱のブリーディング量が発生している。混和剤に高性能 AE 減水剤を使用した場合、単位水量を小さくすることができるので天然骨材を使用したケースよりもブリーディング量が上回ったのは Ca を加えない場合のみで、その他のケースについてはブリーディングの発生を抑制している効果が認められる。これらの結果から混和剤に高性能 AE 減水剤を使用するとブリーディング量は 1/3 に、混和材として Ca を添加すれば同量を 2/3 (50kg 添加の場合) 程度に抑制することが可能である。

次に、細骨材置換率 CUS30%、粗骨材置換率 EFG 100%、混和剤に高性能 AE 減水剤を使用したケースについて、ブリーディング量の変化を図-3 に示す。天然骨材を使用した配合よりも全て

の場合においてブリーディングの発生が抑制されている。Ca の添加量は、細骨材置換率 CUS100%の場合と比較すると 1/2 程度である。この結果から、混和剤に高性能 AE 減水剤を使用し、混和材として Ca を添加すれば、細骨材置換率 CUS100%の場合よりもブリーディングの発生を抑制することができる。

一方、高性能 AE 減水剤を使用し、Ca が 50kg/m³ の時、細骨材置換率 CUS100%の場合と細骨材置換率 CUS30%、粗骨材置換率 EFG100%の場合について水セメント比を 5%上下に変化させ、ブリーディング量を天然骨材使用の配合と比較した。細骨材置換率 CUS100%で水セメント比 60%の場合を除くと、天然骨材使用の配合よりもブリーディング量は少ない結果となっている。この結果から細骨材置換率 CUS100%の場



注) CUS30 は銅スラグ置換率 30%, CUS・EFG は置換率 100%, F は AE 減水剤, P は高性能 AE 減水剤, 末尾の数字は Ca の添加量(kg/m³)を示す。

図-4 各配合による圧縮強度 (W/C=55%)

合は水セメント比が 55%以下, その他の配合の場合は 60%の場合でも天然骨材使用の配合よりもブリーディングの発生を抑制することができると考えられる。良好な耐凍害性を得るためには W/C や空気量によっても異なるが, おおむね $0.6\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であれば問題ない³⁾とされているので, 今回調整した配合であれば天然骨材を使用した場合と同様に良好な耐凍害性が得られることを示している。

3.3 圧縮強度

水セメント比 55%における各配合の圧縮強度試験結果を図-4 に示す。CUS を 100%置換した場合の 7 日強度が天然骨材の場合よりもぐくわずか下回る結果になったが, 他の全ての配合において天然骨材の配合を上回る結果となっている。7 日強度よりも 28 日強度の方がより強度の増加が認められる結果となった。長期強度の増加が大きいことは既に報告されているが⁴⁾ 今回の結果も同様の傾向を示している。この要因は, 骨材にスラグを使用したため天然の砂利よりも骨材自体の強度が大きく, 骨材表面の凹凸が多いため表面積が大きくなりモルタルとの付着力が増加したためと考えら

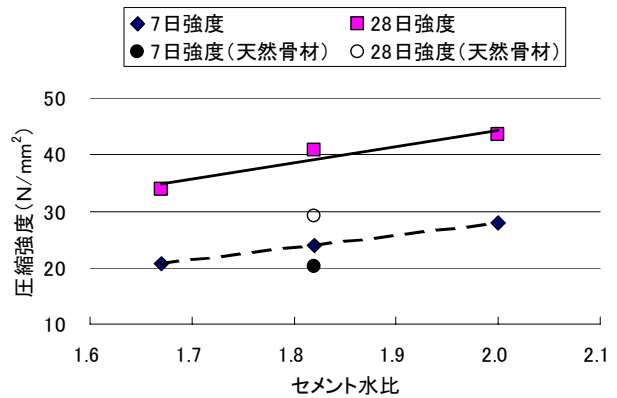


図-5 C/W と圧縮強度の関係 (CUS100%)

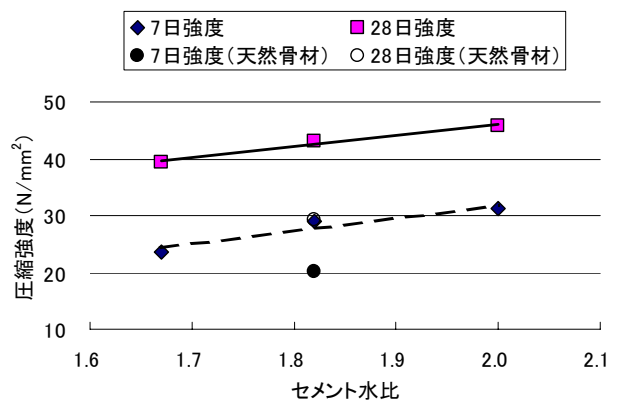


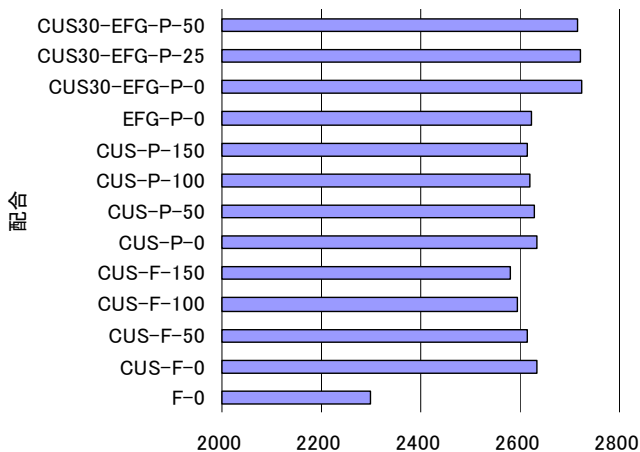
図-6 C/W と圧縮強度の関係 (CUS30%, EFG100%)

れる。混和剤, スラグ骨材の種類の違いによる強度への影響はほとんどないと考えてよい。目標強度は $26\text{N}/\text{mm}^2$ であるので強度条件は満たしている。

次に, セメント水比を 1.67, 1.82, 2.00 と変化させた場合の圧縮強度の影響について図-5, 6 に示す。セメント水比が大きくなるほど圧縮強度は増加する傾向にあり, その関係は一般のコンクリートと同様に直線回帰式で示される。7 日強度と 28 日強度の増加勾配はほぼ同様で, CUS100%置換の配合よりも CUS30%・EFG100%置換の配合の方が少し高い強度を示した。この要因は, 粗骨材に EFG を使用したため天然の砂利よりもモルタルとの付着力が増加したためと考えられる。

3.4 単位容積質量

単位容積質量の配合による変化を図-7 に示す。単位容積質量はスラグ骨材の密度が大きいため使用量が多くなるほど質量は大きくなる。単位容



注) CUS30は銅スラグ置換率 30%, CUS・EFGは置換率 100%, FはAE減水剤, Pは高性能AE減水剤, 末尾の数字はCaの添加量(kg/m³)を示す。

図-7 各配合における単位容積質量 (W/C=55%)

積質量は、水セメント比 55%において、CUS100%置換の配合は約 300kg/m³、CUS30%・EFG100%置換の配合では約 400kg/m³増加する。天然骨材を使用した場合、通常は細骨材率を大きくすると単位容積質量は小さくなるが、スラグ骨材を混入すると大きくなり、置換率を考慮して使用すればスラグ骨材は質量を必要とする構造物に適した材料である。

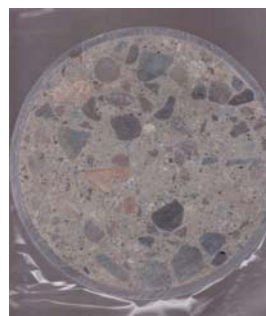
3.5 色調

CUSは黒色、EFGは黒灰色を呈しており、その明度は、天然骨材が 4.6 に対して CUSは 2.9、EFGは 3.9 である。コンクリートでは、天然骨材が 6.4 に対して CUS100%置換の配合で 5.4、CUS30%・EFG100%置換の配合で 6.0 である。色調は感性の問題でありスラグ利用の妨げにはならない。写真-1 に圧縮強度用供試体における断面部分の乾燥状態の比較写真を示す。

4. まとめ

置換率 100%のスラグ骨材を使用した高密度コンクリートを実用化するに当たり、本実験の範囲内では以下の知見を得た。

(1) 高性能 AE 減水剤や Ca を使用することで、CUS または EFG の骨材置換率 100%の高密度コンクリートを実用化することは可能である。



左横が天然骨材、左下が CUS100%、右下が CUS30%・EFG100%である。

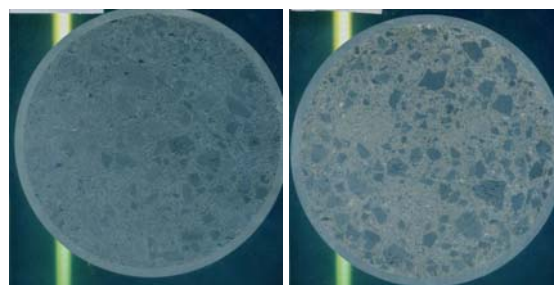


写真-1 色調比較写真

(2) 高密度コンクリートの単位容積質量は 2.6 ~ 3.0t/m³ である。

(3) ブリーディングは通常コンクリートの 5 倍程度になるが、高性能 AE 減水剤と炭酸カルシウムを抑制剤として使用すると通常コンクリートよりも少なくすることができた。

(4) 圧縮強度は長期強度が通常コンクリートの 1.4 倍程度と大きくなる。

参考文献

- 1) 仁木孟伯, 長滝重義他: 銅スラグ砂を使用したコンクリートの基礎的性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.399-404, 1995.7
- 2) 仁木孟伯, 長滝重義他: 銅スラグ砂コンクリート大型暴露試験体の施工とコンクリートの初期性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.399-404, 1996.7
- 3) スラグ細骨材コンクリート研究小委員会: 銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針, 土木学会, pp.58-61, 1998.2
- 4) 銅スラグ研究委員会: 銅スラグ砂を用いたコンクリート試験(STEP3), 日本鉱業協会, 1994.9