

論文 スラグ細骨材を用いたコンクリートのブリーディング制御方法の検討

古田敦史^{*1}・上野敦^{*2}・國府勝郎^{*3}・宇治公隆^{*4}

要旨：スラグ細骨材をコンクリートに有効利用するためには，これを用いたコンクリートの品質向上が必要である。本研究では，スラグ細骨材を用いたコンクリートのブリーディング抑制手法を明らかにすることを目的として，第一に，スラグ細・粗骨材の混合率が，コンクリートのブリーディングに及ぼす影響を明らかにした。そして，スラグ細骨材の密度によるモルタルのブリーディングへの影響を定量的に評価し，密度に応じた微粒分量，W/Cなどの調整方法を示した。最後に，コンクリートのブリーディングを抑制するため，細骨材の密度に応じて粒度分布を変化させること，W/Cなどを調整することの有効性を示した。

キーワード：スラグ細骨材，密度，ブリーディング，微粒分量

1. はじめに

近年，公共工事における環境負荷抑制のため，金属製錬の副産物であるスラグ細骨材を，コンクリート用骨材として積極的に使用することが求められている。しかし，スラグ細骨材の粒子密度は，通常の骨材よりも一般に大きく，コンクリートのブリーディングの増加が報告されている¹⁾。

コンクリートのブリーディングは，構造物の力学的性質および耐久性に著しい影響を及ぼす。スラグ細骨材を用いて，耐久的なコンクリート構造物を施工するためには，スラグ細骨材の粒子特性に応じた適切な粒度分布などを明らかにすることが重要である。

このような観点から，これまで著者らは，コンクリートのブリーディング制御のための基礎検討として，密度の異なるスラグ細骨材を対象として，粒子密度，粒子径および微粒分量がモルタルのブリーディング性状に及ぼす影響を検討してきた²⁾。

本研究は，スラグ細骨材を用いたコンクリートのブリーディングの抑制手法を明らかにすることを目的としたものである。はじめに，スラグ細・粗骨材の混合率を変化させたコンクリートのブリーディングを検討し，コンクリートのブリーディン

グに及ぼす細・粗骨材の影響を明らかにした。次に，モルタルを対象として，ブリーディングを抑制するための，3種類のスラグ細骨材の密度に応じた，微粒分量，W/Cなどを定量的に評価し，この結果得られたスラグ細骨材の密度に基づく，微粒分量や配合の調整によるコンクリートのブリーディングの抑制効果について検討した。

2. 本研究における基本的な考え方

ブリーディングは，使用材料の密度差によって生じる。モルタルにおいては，細骨材粒子がペースト中を沈降することによってブリーディングが生じると仮定すると，細骨材粒子の沈降を抑制することによって，モルタルのブリーディングを抑制できると考えられる。球形の細骨材粒子1個が無限遠のペースト中を沈降する際の運動方程式は式(1)のように表され，積分後の最終速度式(2)が0に近いほどブリーディングは抑制される³⁾。したがって，モルタルのブリーディング抑制のためには，細骨材粒子密度を小さくすること，粒子径を小さくすることおよびペーストの粘度を大きくすることが有効であるとわかる。実際のモルタル中の細骨材は，粒度分布を有する粒子の集合体であ

*1 大成建設(株) (正会員)

*2 東京都立大学大学院 工学研究科土木工学専攻助手 工博 (正会員)

*3 東京都立大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

*4 東京都立大学大学院 工学研究科土木工学専攻助教授 工博 (正会員)

り，粒子形状や粒子表面のテクスチャも様々である。したがって，式(1)を直接的にモルタルのブリーディング予測や評価に適用することは困難であるが，細骨材密度，粒子径およびペーストの粘度を指標として検討することが合理的である。

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_s \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_s g - 6\pi r \eta v - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{cp} g \quad (1)$$

$$v = \frac{2r^2 g (\rho_s - \rho_{cp})}{9\eta} \quad (2)$$

ここに， r ：細骨材の粒子半径 (m)， ρ_s ：細骨材密度 (kg/m³)， v ：細骨材粒子速度 (m/s)， t ：時間 (sec)， g ：重力加速度 (m/s²)， η ：ペーストの粘性係数 (Pa・s)， ρ_{cp} ：セメントペーストの密度 (kg/m³)

一方，スラグ細・粗骨材を用いたコンクリートのブリーディングについて，粗骨材による影響と比較して，細骨材による影響が顕著となることが示されている⁴⁾。このことは，容器中に充填されたコンクリート中での細骨材と粗骨材の沈降のしやすさが異なるためと考えられ，ブリーディング試験容器の寸法の影響や骨材粒子同志の干渉の程度が異なることによる影響と考えられる。このため，本研究では，はじめに，細骨材と粗骨材におけるスラグ骨材の混合率によるブリーディングへの影響を検討し，細骨材の特性に基づくブリーディング抑制対策を明らかにすることの重要性を確認することとした。

次に，式(2)に示したモデルに基づいて，細骨材の密度がブリーディングの支配的要因であると考え，細骨材の微粒分量，混合細骨材中のスラグ細骨材の最大径，増粘剤量およびW/Cがモルタルのブリーディングに及ぼす影響を評価することとした。そして，この評価から得られる，スラグ細骨材の密度に基づく，細骨材の微粒分量や配合調整によって，コンクリートのブリーディングが抑制できることを確認することとした。

3. 実験概要

3.1 使用材料

表 - 1 細骨材の物理的性質

種類	記号	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率* (%)	絶乾密度 (g/cm ³)
砂岩砕砂	CS	2.63	1.12	2.60
フェロニッケルスラグ細骨材	FNS	3.07	0.92	3.04
銅スラグ細骨材	CUS	3.49	0.15	3.48
電気炉酸化スラグ細骨材	EFS	3.68	0.33	3.67

*電気抵抗法(JSCE-C506)で計測

本研究では，密度の異なる細骨材および粗骨材を混合して使用することとなる。このため，細・粗骨材の粒度分布は体積基準で表し，それぞれを一定に調整して試験に供した。

セメントは密度3.16g/cm³の普通ポルトランドセメントを使用した。モルタルを対象とした検討では，細骨材は表 - 1 に示すとおり，基準とする細骨材として砂岩砕砂（記号：CS）を使用し，フェロニッケルスラグ細骨材（記号：FNS），銅スラグ細骨材（記号：CUS）および電気炉酸化スラグ細骨材（記号：EFS）を使用した。また，コンクリートを対象とした検討では，細骨材にCSおよびEFSを使用した。細骨材を置換する形で使用する微粒分にはフェロニッケルスラグ微粒分を使用した。フェロニッケルスラグ微粒分は，その全てが0.15mmふるいを通過するものであり，モルタルの検討では，密度 3.05g/cm³，ブレン比表面積 3190cm²/g のものを用い，コンクリートの検討では，密度 3.10g/cm³，ブレン比表面積約 3000cm²/g のものを使用した。

コンクリートの検討では，粗骨材は砂岩砕石（記号：CG）および電気炉酸化スラグ粗骨材（記号：EFG）を使用した。

3.2 モルタルおよびコンクリートの配合

(1) コンクリートの配合

コンクリートのブリーディングに対するスラグ細・粗骨材の混合率の影響に関する検討では，表 - 2 上段に示すとおり，W/Cを0.65，s/aを0.42とし，各骨材の混合率を表 - 3 に示すとおりとした。

一方で，4.2に示すモルタルを対象とした検討の結果から，EFSを用いたモルタルのブリーディングを砕砂を用いた場合と同等に抑制するためには，細骨材の微粒分置換率を12.4%とすること，W/Cを52.4%とすること，または増粘剤添加率を0.12%

表 - 2 コンクリートの示方配合

区分	配合名	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)									
						細骨材			粗骨材		混和剤		
				W	C	CS	EFS	FNF	CG	EFG	AE減水剤	助剤	増粘剤
混合率	砕砂砕石	65	42	160	246	792	0	0	1098	0	0.862	0.012	0
	EFS0EFG50	65	42	160	246	792	0	0	549	740	0.862	0.012	0
	EFS0EFG100	65	42	160	246	792	0	0	0	1481	0.862	0.005	0
	EFS50EFG0	65	42	160	246	396	557	0	1098	0	0.862	0.006	0
	EFS50EFG50	65	42	160	246	396	557	0	549	740	0.985	0.005	0
	EFS50EFG100	65	42	160	246	396	557	0	0	1481	1.108	0.005	0
	EFS100EFG0	65	42	160	246	0	1114	0	1098	0	1.231	0.000	0
	EFS100EFG50	65	42	160	246	0	1114	0	549	740	1.231	0.000	0
	EFS100EFG100	65	42	160	246	0	1114	0	0	1481	1.231	0.000	0
抑制対策	砕砂砕石	65	42	160	246	792	0	0	1098	0	0.862	0.012	0
	EFS砕石	65	42	160	246	0	1114	0	1098	0	1.231	0.000	0
	微粒分	65	42	160	246	0	976	115	1098	0	1.231	0.000	0
	最大径	65	42	160	246	744	67	0	1098	0	0.862	0.012	0
	増粘剤	65	42	160	246	0	1114	0	1098	0	1.231	0.000	0.192
	W/C	52.4	42	160	305	0	1085	0	1069	0	1.527	0.000	0

表 - 3 スラグ骨材の混合率

細骨材混合率(%)	粗骨材混合率(%)	記号
0	0	EFS0EFG0
50	0	EFS50EFG0
100	0	EFS100EFG0
0	50	EFS0EFG50
50	50	EFS50EFG50
100	50	EFS100EFG50
0	100	EFS0EFG100
50	100	EFS50EFG100
100	100	EFS100EFG100

とすることが有効とわかった。そして、EFS の最大径を0.15mmとして用いると、細骨材密度によるブリーディングへの影響が顕著とならないこともわかった。これらの条件に基づいて計算したコンクリートの配合は、表 - 2 下段に示すとおりとなり、これらのコンクリートを対象として、コンクリートにおけるブリーディングの抑制効果を確認することとした。

(2) モルタルの配合

砕砂を用いた基準配合は、ペースト / 細骨材体積比を1の一定とし、W/C を0.65 の一定とした。

スラグ細骨材の微粒分量に関する検討では、基準配合と同じ配合条件で、各スラグ細骨材を単体で使用し、スラグ細骨材をフェロニッケルスラグ微粒分で0、10および20%の置換率で体積置換した。

スラグ細骨材の最大径に関する検討は、基準配合と同じ配合条件で、細骨材の粒度を一定とした条件で、大きな粒径から順次CSで体積置換(スラグ細骨材のみ、5-2.5、5-1.2、5-0.6、5-0.3、5-0.15mmをCSで置換したもの)した混合細骨材を使用した。

増粘剤量に関する検討では、基準配合と同じ配合条件で、各スラグ細骨材を単体で使用し、セルロース系増粘剤を水の質量に対して、0、0.15および0.3%の割合で添加した。

W/C に関する検討では、各スラグ細骨材を単体で使用し、ペースト / 細骨材体積比を1の一定として、W/C を0.45、0.55および0.65に変化させた。

3.3 ブリーディング試験

コンクリートのブリーディング試験は JIS A

1123 によって行った。

モルタルのブリーディングは、JIS A 1123 に準拠し、ブリーディング測定容器として、JIS A 1104 に規定の細骨材用単位容積質量測定容器（容量：約2L）を使用し、試料の高さ120mmで測定した。

4. 結果および考察

4.1 スラグ骨材の混合率とコンクリートの

ブリーディング

スラグ細骨材の混合率が0%の時のスラグ粗骨材の混合率とブリーディング量の関係を図 - 1 に示す。また、スラグ粗骨材の混合率が0%の時のスラグ細骨材の混合率とブリーディング量の関係を図 - 2 に示す。これらのコンクリートの配合は、スラグ骨材の密度によるコンクリートのブリーディングへの影響を明確なものとするため、同一となっている。このため、スラグ細・粗骨材の混合率の増加にともなって、コンクリートのスランプは小さくなっている。

図 - 1 に示すとおり、細骨材が一定の下でスラグ粗骨材の混合率が増加しても、ブリーディング量はほとんど増加していない。しかし、図 - 2 に示すとおり、粗骨材が一定の下でスラグ細骨材の混合率を増加させると、ブリーディング量は顕著に増大する。すなわち、粗骨材よりも細骨材に密度の大きなスラグ骨材を用いた場合にコンクリートのブリーディングが顕著に増加することがわかる。したがって、スラグ骨材を用いたコンクリートのブリーディングを抑制するためには、スラグ細骨材の密度に基づいた対策を行うことが有効と

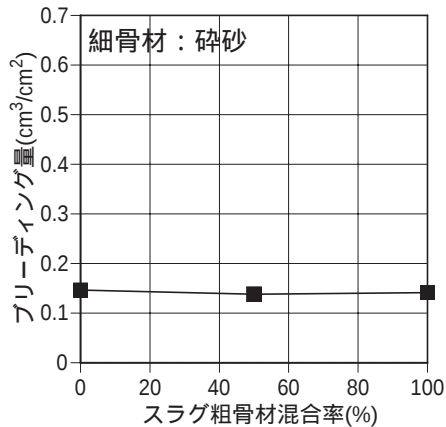


図 - 1 粗骨材混合率とブリーディング量

なること考えられる。

4.2 モルタルにおける検討

(1) 細骨材の微粒分置換率による影響

細骨材の微粒分置換率とモルタルの最大ブリーディング量の関係を図 - 3 に示す。両者の関係は細骨材の種類ごとに直線的となったため、置換率と最大ブリーディング量の関係を細骨材の種類ごとに最小自乗法で直線近似した。そして、砕砂を用いた基準モルタルと同等のブリーディング量となる微粒分置換率を、各スラグ細骨材ごとに計算した。

細骨材密度と砕砂を用いた基準モルタルと同等のブリーディング量とするための微粒分置換率の関係は、図 - 4 に示すとおりとなり、スラグ細骨材の密度の増加にともない、ブリーディングを抑制するための微粒分置換率は直線的に増加することがわかる。

図 - 4 の結果から、コンクリートのブリーディング抑制効果に関する検討では、使用する EFS の密度(3.70g/cm^3) に基づいて、微粒分置換率を 12.4% としてコンクリートを作製した。

(2) W/C による影響

W/C とモルタルの最大ブリーディング量の関係を図 - 5 に示す。両者の関係は、細骨材の種類ごとに直線的となったため、W/C と最大ブリーディング量の関係を、細骨材の種類ごとに最小自乗法で直線近似した。そして、砕砂を用いた基準モルタルと同等のブリーディング量となる W/C を各スラグ細骨材ごとに計算した。

細骨材密度と基準モルタルと同等のブリーディ

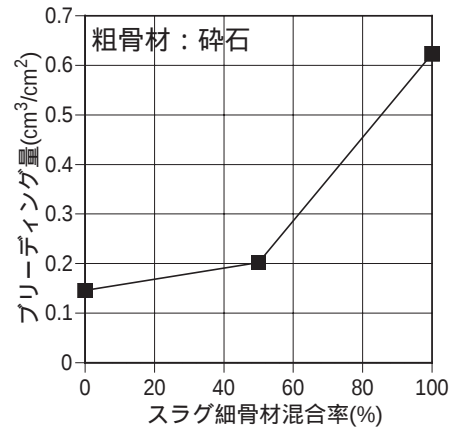


図 - 2 細骨材混合率とブリーディング量

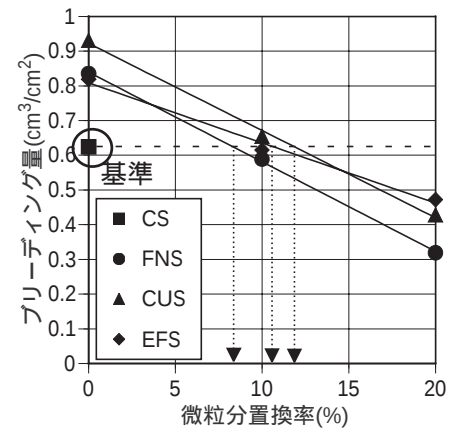


図 - 3 微粒分置換率とブリーディング量

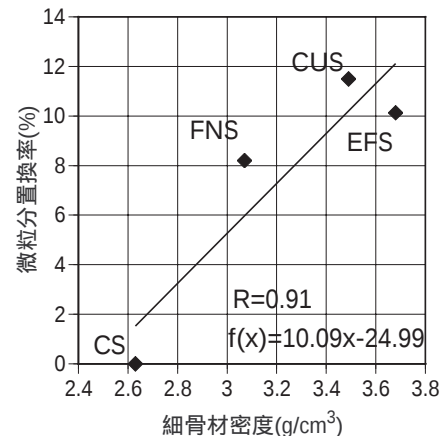


図 - 4 細骨材密度と微粒分置換率

ング量とするための W/C の関係は、図 - 6 のとおりとなる。本検討で使用した各スラグ細骨材の場合、密度の増大にともない、W/C を減少させることによって、ブリーディング量を、砕砂を用いた基準モルタルと同等に抑制できると考えられる。

図 - 6 の結果から、コンクリートのブリーディング抑制効果に関する検討では、使用する EFS の密度(3.70g/cm^3) に基づいて、W/C を 52.4% としてコンクリートを作製した。

(3) 増粘剤添加率による影響

増粘剤の添加率と最大ブリーディング量の関係を図 - 7 に示す。両者の関係は、細骨材の種類ごとに直線的となったため、増粘剤添加率と最大ブリーディング量の関係を、細骨材の種類ごとに最小自乗法で直線近似した。そして、砕砂を用いた基準モルタルと同等のブリーディング量となる増粘剤の添加率を細骨材ごとに計算した。

細骨材密度と基準モルタルと同等のブリーディング量とするための増粘剤の添加率の関係は、図 - 8 に示すとおりとなる。本検討で使用した各スラグ細骨材の場合、密度の増大にともない、増粘剤の添加率を増加させることによって、ブリーディング抑制できる。増粘剤によってブリーディング量を減少させることは、可能な限り少ない単位水量でモルタルやコンクリートが作製されている場合に、耐久性向上の観点から有効な方法となる。すなわち、少ない単位水量で流動性に富むコンクリートを作製するための細骨材の粒子形状に応じた粒度の調整⁵⁾などを行った上で、打設後の材料分離を低減することが適切となると考えられる。

図 - 8 の結果から、コンクリートにおける検討では、使用するEFSの密度(3.70g/cm³)に基づいて、増粘剤添加率を0.12%としてコンクリートを作製した。

(4) スラグ細骨材の粒度による影響

混合細骨材中のスラグ細骨材の最大径とモルタルの最大ブリーディング量の関係を、FNSの場合を例に示すと、図 - 9 のようになる。FNSの最大径が0.6mm以上となると、砕砂を用いた基準モルタルと比較して、ブリーディング量が顕著に大きくなっているが、0.6mm以上の粒径範囲においてスラグ細骨材の最大径が増大してもブリーディング量はほとんど変化しないことがわかる。また、FNSの最大径が0.3mm程度以下となると、ブリーディング量は砕砂を用いた基準モルタルと同等となることがわかる。他のスラグ細骨材についても同様の整理を行ったところ、混合細骨材中の最大径がCUSで0.3mm程度、EFSで0.15mm程度以下となると、細骨材密度によるブリーディングへの

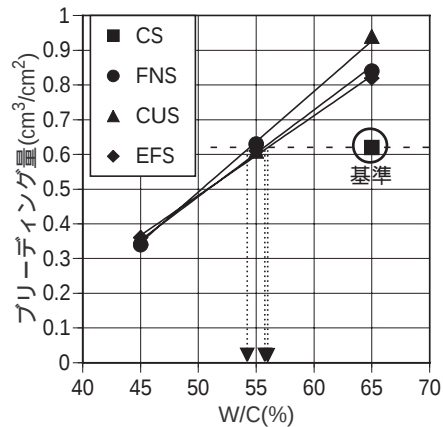


図 - 5 W/Cとブリーディング量

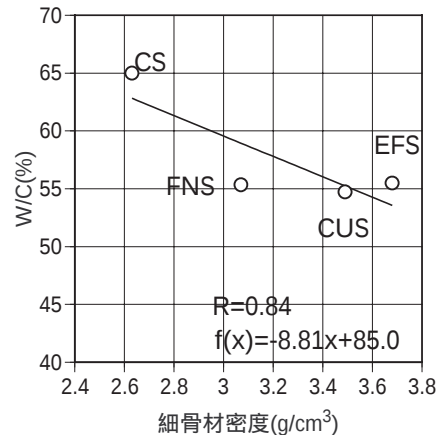


図 - 6 細骨材密度とW/C

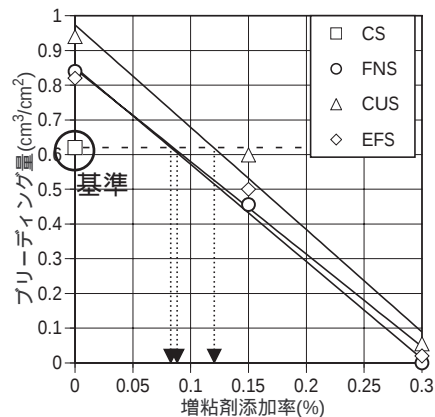


図 - 7 増粘剤添加率とブリーディング量

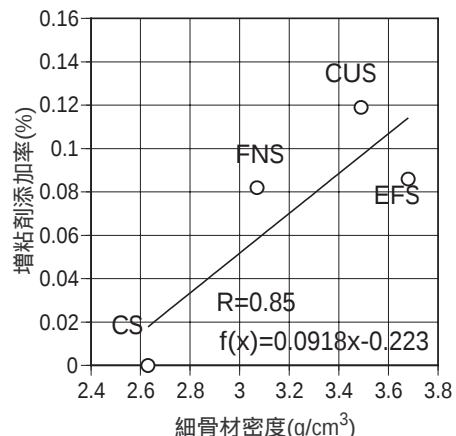


図 - 8 細骨材密度と増粘剤添加率

影響が顕著とならないことがわかった。式(2)に示したモデルでは、粒子径が大きいほどブリーディングが顕著となることが予想されるが、図 - 9 の現象は、細骨材の粒度分布を構成する各粒径ごとの体積による影響も受けているものと考えられる。

この結果から、コンクリートにおける検討では、EFS の混合細骨材中の最大径を 0.15mm とした配合についても試験することとした。

4.3 コンクリートのブリーディング抑制

前節で述べた EFS の密度に基づくブリーディングを抑制するための調整を行ったコンクリート、砕砂を用いたコンクリート(CSCG)およびEFSを用いて調整を行わないコンクリート(EFSCG)のブリーディング量の経時変化は図 - 10 のとおりである。細骨材に EFS を使用し、ブリーディング抑制のための調整を行わなかったコンクリート(EFSCG)の最大ブリーディング量は $0.71\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であり、細骨材にCSを使用した基準コンクリート(CSCG)の最大ブリーディング量($0.15\text{cm}^3/\text{cm}^2$)と比較して、約4.8倍となった。EFSをフェロニッケルスラグ微粒分で体積置換した場合の最大ブリーディング量は $0.49\text{cm}^3/\text{cm}^2$ となり、W/C を52.4%とした場合の最大ブリーディング量は $0.32\text{cm}^3/\text{cm}^2$ となった。増粘剤を0.12%添加した場合の最大ブリーディング量は $0.31\text{cm}^3/\text{cm}^2$ となり、混合細骨材中のEFSの最大径を0.15mm以下とした場合、最大ブリーディング量は $0.22\text{cm}^3/\text{cm}^2$ となった。この結果から、本検討で得たスラグ細骨材の密度に基づく、コンクリートブリーディング抑制のための調整が有効な方法であることを確認した。

4. まとめ

- (1) コンクリートのブリーディングは、粗骨材よりも細骨材にスラグ骨材を用いた場合に著しい。
- (2) モルタルの検討では、スラグ細骨材の微粒分量、W/C、増粘剤量および最大径によるブリーディングへの影響を定量的に評価することができた。
- (3) 本検討で提案したコンクリートのブリーディング抑制のための細骨材の粒度分布および配合の調整手法の有効性を明らかにした。

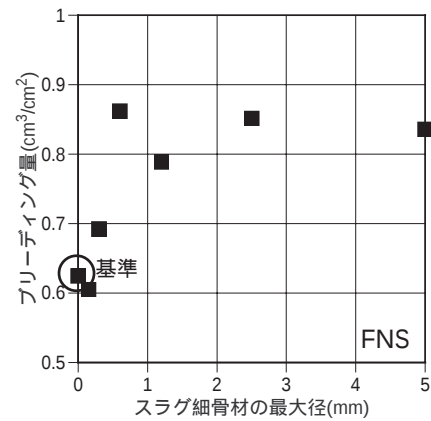


図 - 9 最大径とブリーディング量

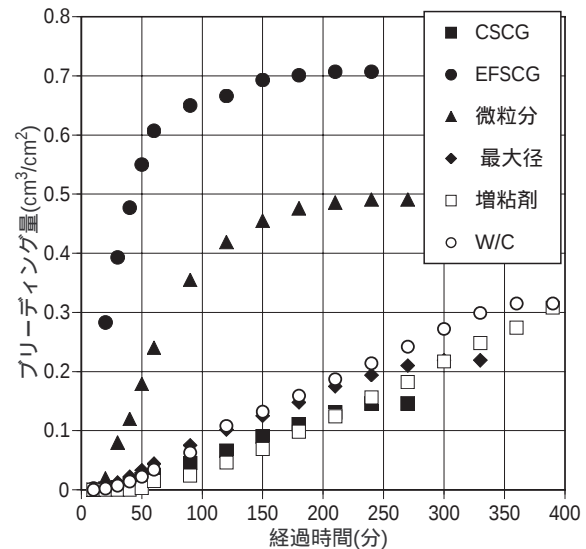


図 - 10 確認実験のブリーディング経時変化

謝辞 本検討は、科研費・若手研究(B)(課題番号：15760336)によって行ったものである。

参考文献

- 1) 戸川他：フェロニッケルスラグ細骨材コンクリートのブリーディングの低減と耐凍害性および水密性に関する研究，材料，vol.45，No.1，pp.101-109，1996
- 2) 古田他：スラグ細骨材を用いたコンクリートのブリーディング制御に関する基礎的検討，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.999-1000，2003
- 3) 岩崎訓明：コンクリートの特性，コンクリート・セミナー1，共立出版，pp.35-38，1975
- 4) 土木学会：電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針(案)，pp.85，2003
- 5) 上野他：細骨材の粒子特性がモルタルの流動性に及ぼす影響，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.495-496，2004