

# 論文 銅スラグ細骨材の微粒分の量および実積率がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響

黒岩 義仁\*1・高尾 昇\*2・佐々木 憲明\*3

**要旨：**資源の有効利用および骨材資源の枯渇化という観点から、銅スラグ細骨材の利用拡大が期待されている。しかし、銅スラグ細骨材を使用したコンクリートは、ブリーディング量が増大するといった課題がある。銅スラグ細骨材が普及するためにはブリーディングの抑制が不可欠であり、銅スラグ細骨材の粒度および粒子間に形成される空隙量がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響を調査した。その結果、コンクリートのブリーディング量は、銅スラグ細骨材中の 0.15mm 未満の微粒分の量および実積率と関係があり、これらを調整することで銅スラグ細骨材を単独使用してもブリーディング量を低減できることを明らかにした。

**キーワード：**銅スラグ細骨材, 微粒分, 粒度, 実積率, 単位水量, ブリーディング

## 1. はじめに

近年、地球温暖化、環境保全および資源の枯渇に対応するため、産業副産物をコンクリート用骨材として有効利用することが期待されている。金属を精錬する過程で副産されるスラグは、古くからコンクリート用骨材として検討され、現在4種類のスラグ骨材(高炉スラグ骨材、フェロニッケルスラグ骨材、銅スラグ骨材、電気炉酸化スラグ骨材)がJISに規定されている。しかし、いずれのスラグ骨材もコンクリート用骨材としての利用の実績は少なく、有効利用が進んでいないのが現状である。

銅スラグ細骨材は、銅の精錬時に副産され、年間約310万t発生している。銅スラグ細骨材は、密度が高くガラス質で角張っており、吸水率が小さいことが特徴である。銅スラグ細骨材をコンクリート用細骨材として使用した場合、コンクリートのブリーディングが増大するといった課題がある<sup>1), 2)</sup>。そのため、コンクリートへ使用する場合には他種の骨材と混合使用し、(社)土木学会および(社)日本建築学会の設計施工指針では、混合率が30%以下で使用することを推奨している<sup>3), 4)</sup>。

一般に、骨材の微粒分量および粒形がブリーディングに影響を与えるとされており、銅スラグ細骨材の粒度および粒子間に形成される空隙量を最適化すれば、コンクリートのブリーディングを抑制する可能性がある。現状、銅スラグ細骨材は、JIS A 5011-3「コンクリート用スラグ骨材-第3部:銅スラグ骨材」において、粒度により4種類に区分されているが、0.15mm 未満の粒度範囲は非常に広いものとなっている。

そこで本研究では、銅スラグ細骨材の粒子特性の中でも0.15mm 未満の微粒分に着目し、微粒分の量および実積率を調整した銅スラグ細骨材を用いて、これを細骨材

として単独使用したコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験フロー

本研究では、銅スラグ細骨材を使用したコンクリートのブリーディング抑制策として、以下の2つのシリーズにより進めた。

シリーズ1では、粒度に着目して、銅スラグ細骨材の0.15mm 未満の微粒分量とコンクリートのブリーディング量の関係を把握することとした。試験では、銅スラグ細骨材の0.15mm 未満の微粒分量を4水準に調整してコンクリートのブリーディングとの関係を調査した。シリーズ2では、粒子間に形成される空隙量に着目して、0.15mm 未満の微粒分に形成される空隙量がコンクリートのブリーディング量に及ぼす影響を調査した。試験では実積率を空隙量の指標とし、0.15mm 未満の微粒分について実積率を測定しコンクリートのブリーディング量との関係を調査した。さらに、シリーズ2では、コンクリートの配合面からの検討として、高性能 AE 減水剤を使用して単位水量を低減した場合のブリーディング抑制効果も調査した。

なお、シリーズ1およびシリーズ2ともに、銅スラグ細骨材の粒度は、JISに規定される2.5mm 銅スラグ細骨材(CUS2.5)の粒度範囲となるように調整した。

### 2.2 使用材料

#### (1) セメント、粗骨材および混和剤

使用材料を表-1に示す。セメントには高炉セメントB種を、粗骨材には硬質砂岩砕石2005を使用した。混和剤には、リグニンスルホン酸系AE減水剤およびポリカル

\*1 三菱マテリアル(株) セメント事業カンパニー 生産部 セメント研究所 (正会員)

\*2 三菱マテリアル(株) セメント事業カンパニー 生産部 セメント研究所 (正会員)

\*3 東海菱光(株) 名古屋工場 試験係 (非会員)

ボン酸系高性能AE減水剤を使用した。

## (2) 細骨材

使用した細骨材の種類および物性を表-2に、銅スラグ細骨材の粒度分布を図-1に示す。銅スラグ細骨材には、同一製錬所で製造された5-0.3mm銅スラグ細骨材(CUS5-0.3)、0.15mm未満の微粒分量および実積率が異なる4水準の2.5mm銅スラグ細骨材(CUS2.5①~④)およびショットブラスト材製造時に発生する銅スラグ微粉(CUS微粉)を使用した。なお、比較用には普通細骨材として福島県いわき産山砂を使用した。銅スラグ細骨材の表面乾燥飽水状態の判定は、CUS5-0.3の場合、JIS A 1110に規定される骨材表面の水膜を拭う方法で、CUS微粉の場合、JIS A 1109に規定されるフローコーンによる方法で行った。

0.15mm未満の銅スラグ微粒子の実積率は、容積0.4L(内径76mm、内高88mm)の容器を用い、試料を突き棒により締め固めて(3層各20回)測定した。

## 2.3 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-3に示す。試験では、コンクリートのスランブ、空気量のほか、単位容積質量、ブリーディング、凝結時間および圧縮強度(材齢7日、28日)を測定した。

## 3. 銅スラグ細骨材の微粒分量の影響(シリーズ1)

### 3.1 試験水準

細骨材の試験水準を表-4に示す。試験では、CUS2.5①(0.15mm未満の微粒分量：13%)の一部をCUS5-0.3(0.15mm未満の微粒分量：1%)およびCUS微粉(0.15mm未満の微粒分量：50%)で置換し、0.15mm未

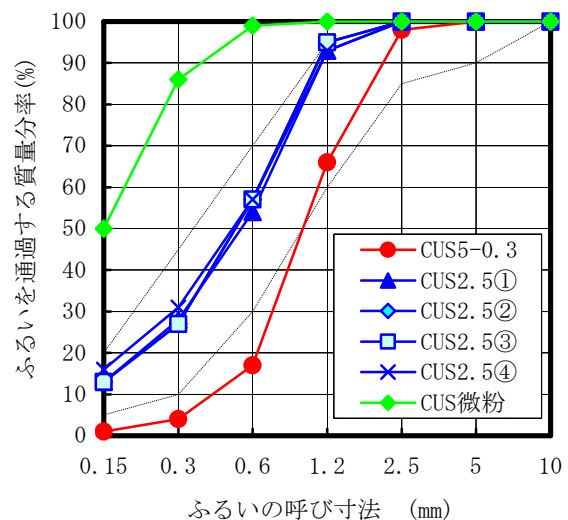


図-1 銅スラグ細骨材の粒度分布

表-1 使用材料

材料	記号	詳細
セメント	C	高炉セメントB種、密度：3.04g/cm <sup>3</sup> 、比表面積：3750cm <sup>2</sup> /g、45μm残：3.6%、90μm残：0.0%
細骨材	S	表-2参照
粗骨材	G	埼玉県両神産砕石 2005：表乾密度 2.72g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.61%、実積率 61.6%
混和剤	Ad	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤
	SP	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

表-2 細骨材の種類および物性

種類	記号	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粗粒率	0.15mm 未満の微粒分量	
						量 (%)	実積率 (%)
5-0.3mm 銅スラグ細骨材	CUS5-0.3	3.51	3.50	0.65	3.14	1	—
2.5mm 銅スラグ細骨材	CUS2.5①	3.54	3.53	0.35	2.12	13	51.1
	CUS2.5②	3.50	3.49	0.40	2.08	13	54.0
	CUS2.5③	3.54	3.53	0.49	2.08	15	48.6
	CUS2.5④	3.55	3.54	0.43	2.03	16	53.2
銅スラグ微粉	CUS 微粉	3.52	3.52	0.19	0.65	50	—
山砂	PS	2.61	2.58	1.26	2.57	4	—

表-3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101:2005「コンクリートのスランブ試験方法」
空気量	JIS A 1128:2005「フレッシュコンクリートの空気量の容積による試験方法」
単位容積質量	JIS A 1116:2005「フレッシュコンクリートの単位容積質量及び空気量の質量による試験方法」
ブリーディング	JIS A 1123:2003「コンクリートのブリーディング試験方法」
凝結時間	JIS A 1147:2007「コンクリートの凝結試験方法」
圧縮強度	JIS A 1108:2005「コンクリートの圧縮強度試験方法」

表-4 試験水準(シリーズ1:銅スラグ細骨材の微粒分量の影響)

No.	CUS2.5① 置換率(vol%)	CUS5-0.3 置換率(vol%)	CUS 微粉 置換率(vol%)	粗粒率	0.15mm 未満の微粒分	
					量(%)	実積率(%)
1	70	30	0	2.42	9	51.2
2	85	15	0	2.27	11	51.3
3	100	0	0	2.12	13	51.1
4	95	0	5	2.03	15	50.9

表-5 コンクリートの配合

No.	0.15mm 未満の微粒分		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						AD (C×%)	
	量(%)	実積率(%)			W	C	CUS2.5①	CUS5-0.3	CUS 微粉	PS		G
1	9	51.2	50	45	170	340	753	319	0	0	1007	0.25
2	11	51.3	50	45	173	346	906	158	0	0	998	0.25
3	13	51.1	50	45	175	350	1058	0	0	0	995	0.25
4	15	50.9	50	45	180	360	995	0	53	0	982	0.25
5	山砂(PS)		50	45	166	332	0	0	0	799	1017	0.25

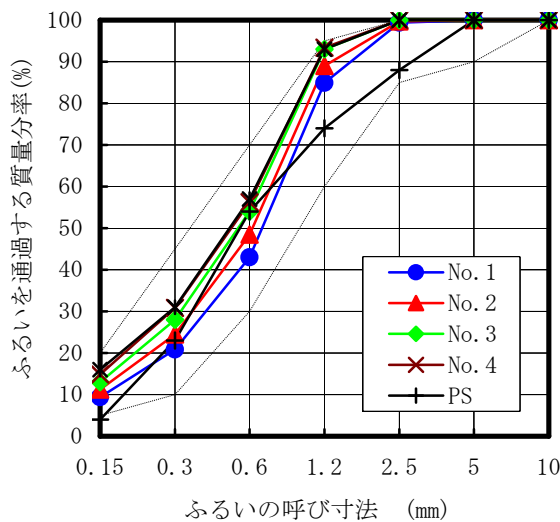


図-2 銅スラグ細骨材の粒度分布(シリーズ1)

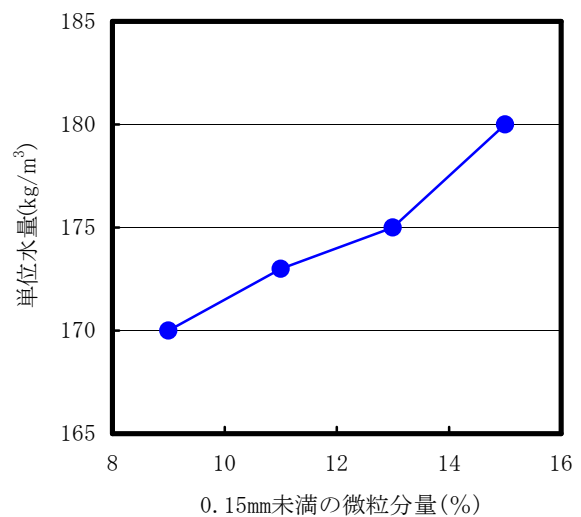


図-3 0.15mm 未満の微粒分量と単位水量の関係

満の微粒分量を 9, 11, 13, 15%に調整した。さらに、微粒分量の調整では銅スラグ細骨材の 0.15mm 未満の実積率がほぼ同等となるように各銅スラグ細骨材の割合を調整した。試験に用いた銅スラグ細骨材の粒度分布を図-2に示す。

### 3.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-5に示す。コンクリートの配合は、ケーソン式防波堤を想定し、単位容積質量を2500kg/m<sup>3</sup>以上とし、W/Cは50%、目標スランプは12.0±1.5cm、目標空気量は4.5±1.0%とした。

銅スラグ細骨材の0.15mm未満の微粒分量と目標スランプを得るためのコンクリート単位水量の関係を図-3に示す。銅スラグ細骨材の0.15mm未満の微粒分量が多いほど、コンクリートの単位水量は増加する傾向であった。特に、0.15mm未満の微粒分量が13%を超えると、その傾向が顕著となった。

### 3.3 コンクリートのフレッシュ性状

銅スラグ細骨材の0.15mm未満の微粒分量とブリーディング量および凝結時間の関係を図-4、図-5に示す。0.15mm未満の微粒分量が13%までは、微粒分量の増加に伴いコンクリートのブリーディング量が減少した。ただし、0.15mm未満の微粒分量が13%を超えると、ブリーディング量が増加した。これは、コンクリート中の水量と微粒分の粒子間に形成される空隙量との差が影響していると推察される。0.15mm未満の微粒分量が13%までは、微粒分の増加によりその差が小さくなり、ブリーディング量が低減したと考えられる。一方、0.15mm未満の微粒分量が13%を超えると、単位水量の増加および単位細骨材量の減少により、その差が大きくなったと考えられる。すなわち、粒度調整、特に0.15mm未満の微粒分量の増加に伴う微粒分に形成される空隙量の増加は、ブリーディング量の抑制効果はあるものの、その効果は一定の範囲

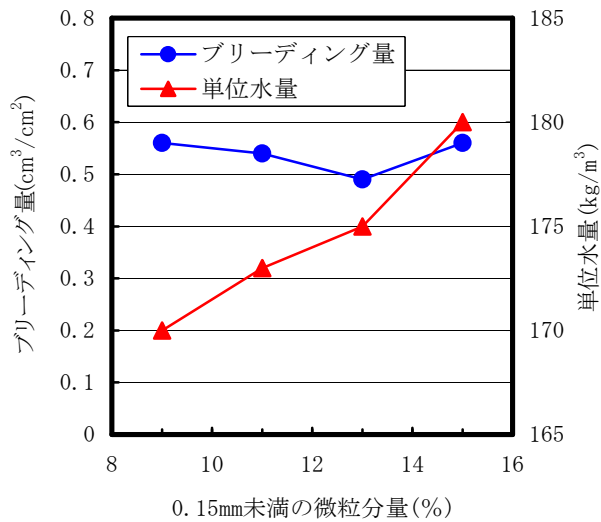


図-4 0.15mm未満の微粒分量とブリーディング量の関係

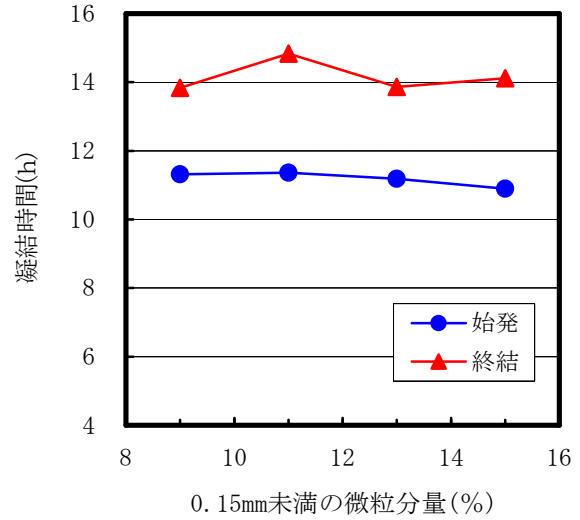


図-5 0.15mm未満の微粒分量と凝結時間量の関係

表-6 試験水準  
(シリーズ2:銅スラグ細骨材の実積率の影響)

No.	2.5mm 銅スラグ 細骨材の種類	CUS5-0.3 置換率 (vol%)	粗粒率	0.15mm未満 の 微粒分	
				量 (%)	実積 率(%)
1	CUS2.5①	15	2.27	11	51.3
2		0	2.12	13	51.1
3	CUS2.5②	0	2.08	13	54.0
4	CUS2.5③	25	2.34	11	48.5
5		10	2.18	13	48.5
6	CUS2.5④	35	2.41	11	53.0
7		20	2.25	13	53.0

に限られる結果であった。

なお、凝結時間は、0.15mm未満の微粒分量の違いにかかわらずほぼ同等であった。

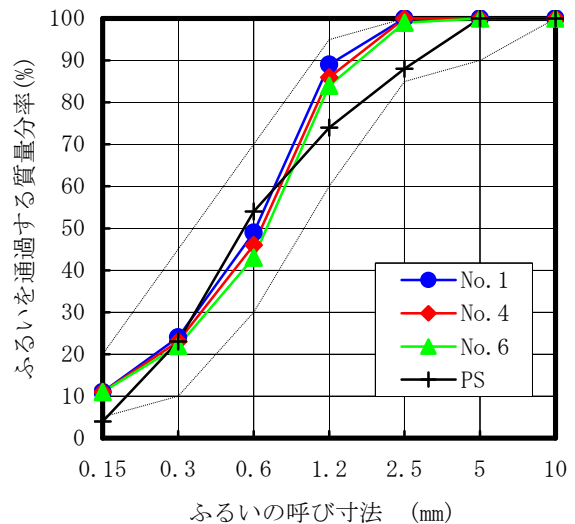
#### 4. 銅スラグ細骨材の実積率の影響(シリーズ2)

##### 4.1 試験水準

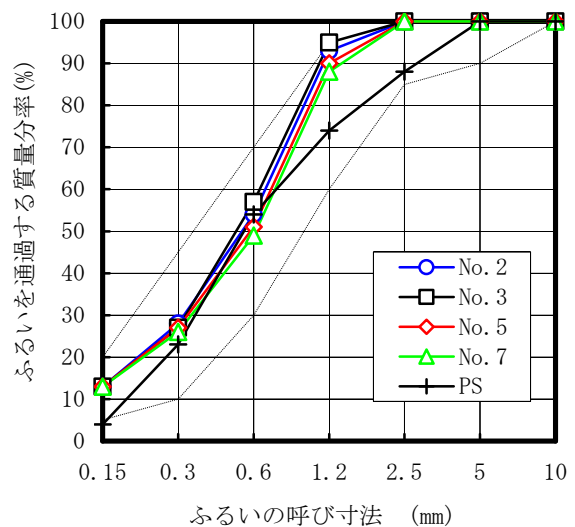
細骨材の試験水準を表-6に示す。試験では、0.15mm未満の実積率が異なる4水準の2.5mm銅スラグ細骨材(CUS2.5①③④)の一部を5-0.3mm銅スラグ細骨材で置換し、0.15mm未満の微粒分の実積率を変化させた。なお、0.15mm未満の微粒分量は11, 13%とした。試験に用いた銅スラグ細骨材の粒度分布を図-6に示す。なお、AE減水剤は0.15mm未満の微粒分量が13%の水準で、高性能AE減水剤は0.15mm未満の微粒分量が11, 13%の水準で使用した。

##### 4.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-7, 表-8に示す。コンクリートの配合は、3章と同様とし、単位容積質量を



(a) 0.15mm未満の微粒分量: 11%



(b) 0.15mm未満の微粒分量: 13%

図-6 銅スラグ細骨材の粒度分布

表-7 コンクリートの配合 (AE 減水剤使用)

No.	2.5mm 銅スラグ 細骨材の種類	0.15mm 未満の微粒分		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AD (C×%)
		量(%)	実積率(%)			W	C	CUS2.5	CUS5-0.3	G	
2	CUS2.5①	13	51.1	50	45	175	350	1058	0	995	0.25
3	CUS2.5②	13	54.0	50	45	172	344	1078	0	1001	0.25
5	CUS2.5③	13	48.5	50	45	175	350	960	105	995	0.25
7	CUS2.5④	13	53.0	50	45	175	350	848	211	995	0.25

表-8 コンクリートの配合 (高性能 AE 減水剤使用)

No.	2.5mm 銅スラグ 細骨材の種類	0.15mm 未満の微粒分		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					SP (C×%)
		量(%)	実積率(%)			W	C	CUS2.5	CUS5-0.3	G	
1	CUS2.5①	11	51.3	50	45	162	324	927	161	1025	0.50
2		13	51.1	50	45	162	324	1094	0	1025	0.55
3	CUS2.5②	13	54.0	50	45	162	324	1078	0	1025	0.50
4		11	48.5	50	45	162	324	828	270	1025	0.60
5	CUS2.5③	13	48.5	50	45	162	324	992	109	1025	0.60
6		11	53.0	50	45	162	324	714	379	1025	0.50
7	CUS2.5④	13	53.0	50	45	162	324	877	218	1025	0.60

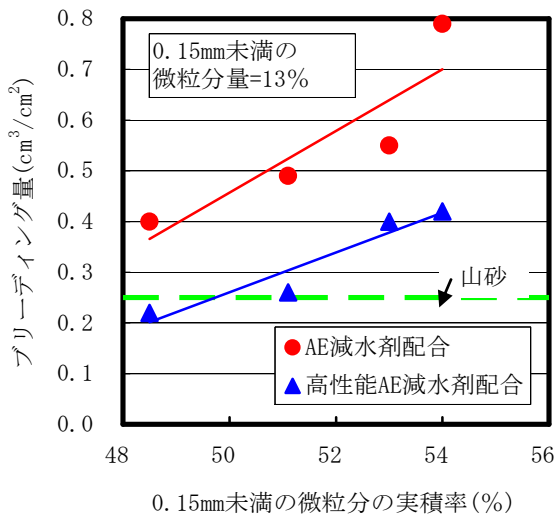


図-7 0.15mm 未満の微粒分の実積率とブリーディング量の関係(混和剤種類の影響)

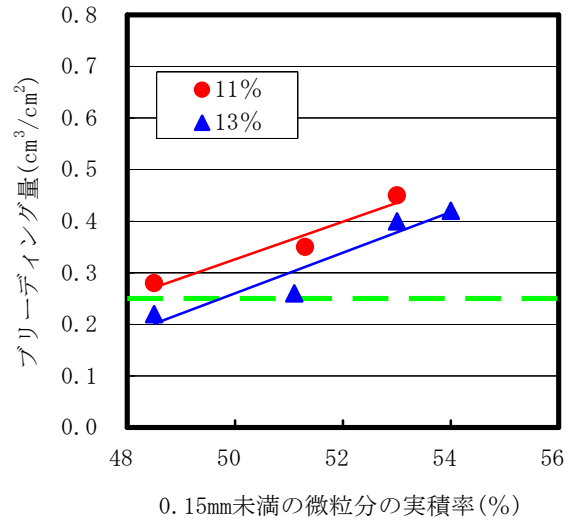


図-8 0.15mm 未満の微粒分の実積率とブリーディング量の関係(微粒分量の影響)

2500kg/m<sup>3</sup>以上, W/Cは50%, 目標スランプは12.0±1.5cm, 目標空気量は4.5±1.0%とした。混和剤に高性能AE減水剤を使用した場合, AE減水剤に比べて, 単位水量を10~13kg/m<sup>3</sup>低減できた。なお, 目標スランプを得るための単位水量および高性能AE減水剤添加量は, 0.15mm未満の微粒分の実積率の違いにかかわらずほぼ同等であった。

#### 4.3 コンクリートのフレッシュ性状

銅スラグ細骨材の0.15mm未満の微粒分の実積率とブリーディング量および凝結時間の関係を図-7~9に示す。銅スラグ細骨材の0.15mm未満の微粒分の実積率が大きくなるほどコンクリートのブリーディング量が多くなる傾向であり, 微粒分の実積率とブリーディング量は強い相関関係にあることが判明した。また, 0.15mm未満の実積率が同等の場合, 0.15mm未満の微粒分が多いほどブリーディング量が少なくなった。これは, 実積率が低く微粒分量が多いほど微粒分に形成される空隙量が大きくなり保水性能は向上するため, ブリーディングを抑制したものと考えられる。

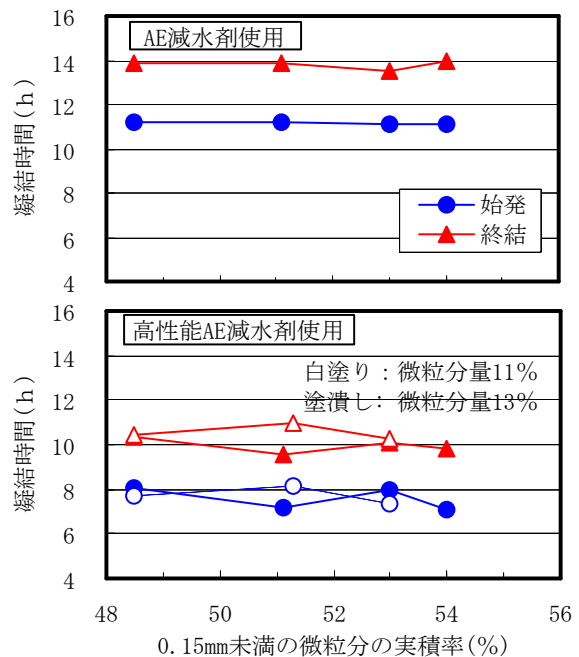


図-9 0.15mm 未満の実積率と凝結時間の関係

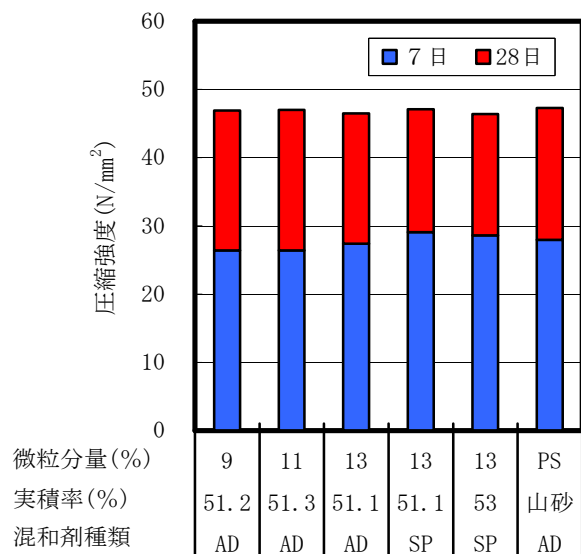


図-10 圧縮強度

さらに、混和剤に高性能AE減水剤を使用し、単位水量を減じた場合、ブリーディング量を山砂を使用したものとほぼ同等にまで低減できることが判った。

なお、凝結時間は、0.15mm未満の微粒分の実積率の違いにかかわらずほぼ同等であった。

#### 4.4 コンクリートの強度性状

コンクリートの圧縮強度を図-10に示す。圧縮強度は、0.15mm未満の微粒分量、実積率および混和剤種類にかかわらずほぼ同等であった。

#### 5. まとめ

銅スラグ細骨材の微粒分の量および実積率がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響を調査した。その結

果、以下の知見が得られた。

- (1) 銅スラグ細骨材の0.15mm未満の微粒分量の増量により微粒分に形成される空隙量が増加することで、コンクリートのブリーディングは低減する。ただし、微粒分量の増加による効果は、微粒分が一定量を超えると、単位水量の増加および単位細骨材量の減少によって相殺される。本実験範囲では、0.15mm未満の微粒分量が13%までは、微粒分量の増加による効果が卓越する。
- (2) 銅スラグ細骨材中の0.15mm未満の微粒分の実積率を小さくすることで、コンクリートのブリーディングは低減する。
- (3) 銅スラグ細骨材の0.15mm未満の量および実積率は、コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響はない。

#### 参考文献

- 1) 仁木孟伯, 長滝重義, 友沢史紀, 梶原敏孝:「銅スラグ砂を使用したコンクリートの基本的性状」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.399-404, 1995
- 2) 上野 敦, 辻本一志, 鈴木一雄, 宇治公隆:「銅スラグ細骨材による砕砂コンクリートのフレッシュ性状の改善」, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.133-138, 2009
- 3) (社)土木学会:「銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針」, pp.14-15, 1998
- 4) (社)日本建築学会:「銅スラグ細骨材を用いるコンクリートの設計施工指針(案)・同解説」, pp.61-62, 1998