

# 論文 銅スラグおよびフライアッシュを細骨材として用いたコンクリートのフレッシュ・硬化特性に関する研究

大河 芳賢\*1・塚 孝司\*2

**要旨:** 銅スラグの有効活用は、コンクリート分野において期待されているが、コンクリート用骨材として用いると多量のブリーディングが発生することが問題として知られている。近年では、ブリーディング抑制の観点から粒度調整された CUS2.5 が製造され、その利用に関する研究も多数報告されているが、CUS5-0.3 の利用に関する報告はほとんどない。そこで本研究では、主に CUS5-0.3 を用いたコンクリートのフレッシュ・硬化特性に関して検討を行った。その結果、置換率 20%程度までならばフライアッシュと併用することでブリーディングを抑制でき、コンクリート用細骨材として利用することができる可能性を明らかにした。

**キーワード:** 銅スラグ, ブリーディング, フライアッシュ, 圧縮強度, 長さ変化率, 中性化深さ

## 1. はじめに

銅スラグは、銅を製錬する際に副産物として発生する。日本では、現在 5ヶ所で銅スラグが生産され、2008年度の銅スラグ使用量は 255.9 万トンであり、そのうちコンクリート用骨材としての使用量は、15.2 万トンである。<sup>1)</sup> 銅スラグの主な使用用途は、セメント原料、サンドブラスト材および消波ブロックなどであるが、その有効利用が困難な状況になりつつある。

銅スラグは、コンクリート用骨材として利用するうえで、コンクリートの材料分離性状や骨材として密度が大きいなどの問題点が挙げられ、コンクリート用骨材として一般的に使用されてはいなかったが、1997年8月に銅スラグ細骨材が、JIS A 5011「コンクリート用スラグ骨材」の中に新たなコンクリート用細骨材として規格化された。一方、土木学会では、銅スラグ細骨材の JIS 化作業と並行して、銅スラグをコンクリートに用いるための検討を行い、1998年に指針を刊行した。<sup>2)</sup>

銅スラグ細骨材のコンクリートへの利用に関する検討は、これまで数多く報告<sup>3) 4) 5)</sup>されているが、銅スラグの粒径が主として 2.5mm 以下の範囲(以下、CUS2.5 と略記)で行われており、粒径が 5mm から 0.3mm (以下、CUS5-0.3 と略記)のものをを用いたものの検討はほとんどなされていない。上記指針における技術資料においても、主に CUS2.5 を用いたコンクリートに関する検討がほとんどである。

一般に銅スラグを、コンクリート用細骨材として用いると、ブリーディングが多量に発生することが既往の研究で報告されており、その改善策も重要な課題となっている。ブリーディングの抑制策の 1 つとして、フライア

ッシュの利用が、報告されている。<sup>6) 7)</sup> これらの研究においても用いた銅スラグは、CUS2.5 であった。

そこで本研究では、CUS5-0.3 および CUS2.5 をコンクリート用細骨材として用いた、コンクリートおよびフライアッシュの細骨材置換併用コンクリートのフレッシュ性状・硬化特性に関する広範な検討を行い、銅スラグのコンクリートへの利用範囲について考察した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

表 - 1 に、本研究で用いた使用材料を、図 - 1 に、砕砂、銅スラグおよびそれらを混合したものの粒度分布を示す。今回実験で用いた CUS5-0.3 は、連続製銅法により発生した熔融状態のスラグを、水で急冷・破碎したものである。CUS2.5 に関しては、CUS5-0.3 試料を 2.5mm 以下の試料になるようにふるい分けを行った後、ボールミルで粉碎し、粒度調整を行った。フライアッシュは、四国電力橋湾発電所で製造されたフライアッシュ JIS II 種灰を用いた。

図 - 1 に示すように、今回使用した砕砂の粒度分布は、JIS A 5005 の粒度範囲に納まっている。一方、CUS5-0.3 の場合、その粒度分布はこの JIS 規格を満たさない。本研究では、砕砂の一部を CUS5-0.3 で置換し、その割合を容積で 0%、10%、20%及び 30%の 4 種類とした。これらは JIS A 5005 の粒度範囲を満たしている。また、CUS2.5 の場合は、単独で JIS A 5005 を満たした。CUS2.5 については、砕砂の一部の置換を容積で 0%及び 10%の 2 種類とした。

### 2.2 コンクリートの製造および配合

コンクリートは、温度 20℃、湿度 60%の試験室で容量

\*1 香川大学大学院 工学研究科 安全システム建設工学専攻 (正会員)

\*2 香川大学 工学部 安全システム建設工学科 工博 (正会員)

表-1 使用材料

材料	種類	品質・主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.15 g/cm <sup>3</sup> 比表面積:3470 cm <sup>2</sup> /g 強熱減量:1.99 %
	砕砂	表乾密度:2.63 g/cm <sup>3</sup> 吸水率:2.10 % 実績率:62.8 % 微粒分量:1.30 % F.M.:2.89 岩種:花崗岩
細骨材	CUS5-0.3	表乾密度:3.61 g/cm <sup>3</sup> 吸水率:0.26 % 実績率:66.4 % 微粒分量:0.20 % F.M.:3.79
	CUS2.5	表乾密度:3.57 g/cm <sup>3</sup> 吸水率:0.87 % 実績率:62.7 % 微粒分量:4.92 % F.M.:2.65
	フライアッシュ (JIS II 種灰)	密度:2.27 g/cm <sup>3</sup> 比表面積:4270 cm <sup>2</sup> /g 強熱減量:2.58 %
粗骨材	1505砕石	表乾密度:2.54 g/cm <sup>3</sup> 吸水率:2.31 % 実績率:55.8 % F.M.:6.35 岩種:砂岩
	2015砕石	表乾密度:2.52 g/cm <sup>3</sup> 吸水率:1.28 % 実績率:58.6 % F.M.:7.39 岩種:砂岩
混和剤	AE減水剤	変性リグニンスルホン酸化合物
	高性能AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	AE剤	変性ロジジンサン化合物系陰イオン界面活性剤
	消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体

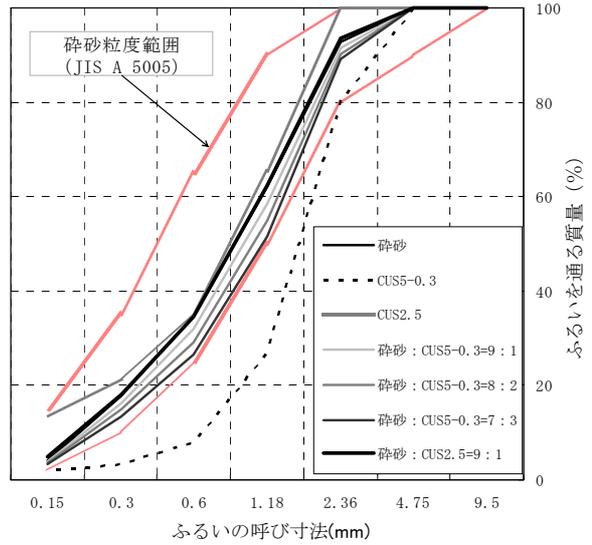


図-1 細骨材の粒度分布

100 リットルの強制二軸ミキサを用い、練混ぜ量を 65 リットルとして製造した。練混ぜは最初にセメント、細骨材および粗骨材を 30 秒間空練りし、次に水と混和剤を加えて 90 秒間練り混ぜた。

表-2 に、コンクリートの配合を示す。目標スランブおよび目標空気量の調整は、混和剤の種類および添加量によって行った。本研究におけるコンクリートの配合は、水セメント比を 45%、55%および 65%とし、細骨材として全量砕砂を用いたものと、細骨材容積の 10%、20%および 30%を CUS5-0.3 で置換したものと、CUS2.5 で 10%置換したものと、さらに細骨材容積の 5%および 10%をフライアッシュで置換し、CUS5-0.3 とフライアッシュの細骨材置換併用の計 17 配合で試験を行った。

2.3 試験項目および試験方法

(1) スランブ、空気量およびブリーディング試験

スランブ、空気量およびブリーディング試験は、それぞれ JIS A 1101, JIS A 1128 および JIS A 1123 に準拠して行った。なお、本研究では目標スランブおよび目標空気

量を、9±2.0cm および 4.5±1.0%とした。

(2) 圧縮強度試験

コンクリートの圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠して行った。コンクリートの圧縮強度試験に用いた供試体寸法はφ100×200mm の円柱供試体で、温度 20℃、湿度 60%の試験室でコンクリートを打設後、翌日型枠脱型し、水温 20℃の養生槽にて水中養生を行った。なお、試験材齢は、材齢 3 日、7 日、28 日および 91 日で行った。

(3) 長さ変化試験

コンクリートの長さ変化試験は、JIS A 1129-3 に準拠して行った。コンクリートの長さ変化試験に用いた供試体寸法は 100×100×400mm の角柱供試体で、温度 20℃、湿度 60%の試験室でコンクリートを打設後、翌日型枠脱型し、水温 20℃の養生槽にて水中養生を 28 日間行った後、温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿室で気中養生した。なお、試験は水中養生終了後 7 日、28 日、56 日および 91 日で行った。

(4) 促進中性化試験

表-2 コンクリートの配合およびフレッシュ性状

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	CUS 5-0.3 置換率 (%)	CUS2.5 置換率 (%)	FA 置換率 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						混和剤(C%)						
								W	C	S	CUS 5-0.3	CUS 2.5	FA	G		AE減水剤	高性能AE減水剤	AE剤	消泡剤	
														1505	2015					
20	10.8	45	5.2	0	0	0	46	170	378	805	0	0	0	453	456	-	1.00	0.40	-	
	8.5		4.3	10	0	0		170	378	724	110	0	0	0	453	456	-	0.60	0.20	-
	9.0		5.5	0	10	0		170	378	724	0	109	0	0	453	456	-	0.70	0.25	-
	7.0	5.0	0	0	0	170		309	831	0	0	0	0	467	471	1.20	-	0.10	-	
	7.4	4.4	10	0	0	170		309	748	114	0	0	0	467	471	1.20	-	0.05	-	
	7.0	5.0	20	0	0	170		309	665	228	0	0	0	467	471	1.30	-	0.03	-	
	8.9	5.1	30	0	0	170		309	582	342	0	0	0	467	471	1.30	-	0.10	0.20	
	7.2	5.0	0	10	0	170		309	748	0	113	0	0	467	471	1.20	-	0.10	-	
	9.5	3.8	10	0	0	170		309	706	114	0	36	467	471	0.70	-	0.20	-		
	11.0	4.9	10	0	10	170		309	665	114	0	72	467	471	0.50	-	0.65	-		
	8.0	4.5	20	0	5	170		309	623	228	0	36	467	471	0.80	-	0.25	-		
	7.7	5.0	0	20	0	170		309	582	228	0	72	467	471	0.80	-	0.60	-		
	9.0	4.1	30	0	5	170		309	540	342	0	36	467	471	0.80	-	0.15	-		
	10.5	4.9	30	0	10	170		309	499	342	0	72	467	471	0.90	-	0.50	-		
	8.8	5.6	0	0	0	170		262	849	0	0	0	478	481	1.40	-	0.10	-		
	8.7	5.7	10	0	0	170		262	764	117	0	0	478	481	-	1.20	0.25	-		
	8.8	4.9	0	10	0	170		262	764	0	115	0	478	481	1.00	-	0.10	-		

コンクリートの促進中性化試験は、JIS A 1152 および JIS A 1153 に準拠して行った。コンクリートの促進中性化試験に用いた供試体寸法は 100×100×400mm の角柱供試体で、温度 20℃、湿度 60%の試験室でコンクリートを打設後、翌日型枠脱型し、水温 20℃の養生槽にて 28 日間水中養生を行った後、温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿室で 28 日間気中養生した。その後、コンクリート打ち込み面、底面および両端面を、エポキシ樹脂でピンホールが発生しないようにシールし、促進中性化試験装置内に静置した。なお、中性化深さの測定は、促進中性化開始後 7 日、28 日、56 日および 91 日で行う予定であるが、本報では、試験開始 56 日までのデータを載せる。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フレッシュコンクリート

##### (1) AE 減水剤および高性能 AE 減水剤の添加量

図-2 に、本研究で用いた AE 減水剤および高性能 AE 減水剤の添加量を示す。水セメント比 45%の場合、AE 減水剤では所定のコンシステンシーが得られなかったため高性能 AE 減水剤を用いた。銅スラグを用いると混和剤添加量を低減することができた。これは、銅スラグの粒径が大きいことに起因すると考えられる。これは、CUS5-0.3 の方が CUS2.5 に比べて必要な混和剤が少なかったことから分かる。

水セメント比 55%の場合、CUS5-0.3 置換率が増加するに伴い AE 減水剤の添加量は増加した。CUS5-0.3 の置換率 10%では、無置換のものと同等の添加量であったが、置換率 20%および 30%では、CUS5-0.3 どうしおよび銅スラグと骨材とのかみ合わせによりコンシステンシーの低下が発生したことによると考えられる。CUS2.5 の置換率 10%の場合、そのフレッシュ性能は無置換のものと同程度変わらなかった。一方、フライアッシュを CUS5-0.3 と併用置換すると、置換率 10%において AE 減水剤添加量は減少した。これは、フライアッシュのボールベアリングメカニズムに起因する減水効果である。フライアッシュ 10%併用置換は、5%併用置換の場合と比べて、減水効果はより大きくなった。しかし、CUS5-0.3 を 20%および 30%置換した場合は、フライアッシュの置換率増加の効果はない。

水セメント比 65%では、CUS5-0.3 を 10%置換すると、コンクリート自体が荒々しくなり、所要のコンシステンシーが得られなかったため高性能 AE 減水剤を用いた。しかしながら、CUS2.5 を 10%置換した場合は、銅スラグ無置換のものよりも AE 減水剤を低減できた。これは、CUS2.5 が CUS5-0.3 に比べて微粒分が多いことに起因してコンシステンシーが改善されたためと考えられる。

##### (2) AE 剤および消泡剤添加量

図-3 に、本研究で用いた AE 剤および消泡剤の添加

量を示す。水セメント比 45%では、CUS5-0.3 および CUS2.5 を置換することで、いずれも AE 剤添加量を低減できた。

水セメント比 55%では、CUS5-0.3 の置換率増加に伴い著しく AE 剤の添加量が低減した。これらは、銅スラグを用いると巻き込み空気が多くなることを示すものである。CUS5-0.3 を 30%置換した場合には、空気量が著しく大きくなり、所定の空気量を大幅に超えた。そこで、この場合、所定の空気量に納めるために消泡剤を用いた。一方、CUS2.5 を 10%置換した場合の AE 剤添加量は無置換のものと同等であった。フライアッシュを CUS5-0.3 と併用置換すると、全体的に AE 剤添加量は増加したが、特にフライアッシュ置換率 10%の場合にはその添加量は著しく増加した。これは、フライアッシュの未燃焼炭素が混和剤を吸着したためであると考えられる。

水セメント比 65%では、CUS5-0.3 を 10%置換すると、AE 剤添加量は増加した。しかし、CUS2.5 を 10%置換した場合には、無置換のものに比べてほぼ同等になった。これは、銅スラグ利用による巻き込み空気の影響はほとんどなかったことを意味する。

##### (3) ブリーディング率

図-4 に、ブリーディング試験の結果を示す。水セメント比の影響については、水セメント比の増加に伴って

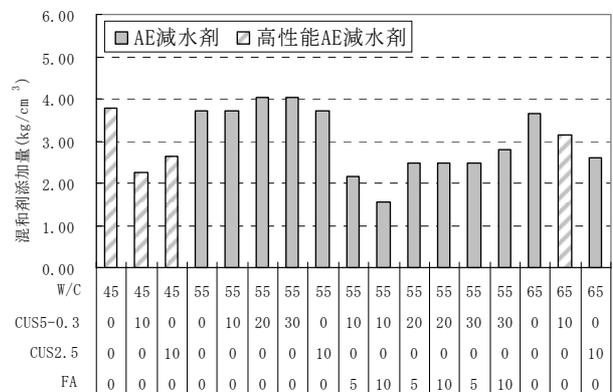


図-2 AE 減水剤および高性能 AE 減水剤添加量

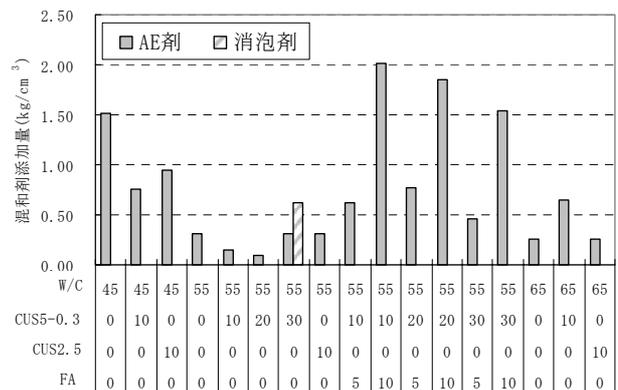


図-3 AE 剤および消泡剤添加量

ブリーディング率は増加する傾向がある。これは、セメント量が減少しコンクリートの保水性が低下したことが考えられる。

水セメント比 55%の場合、CUS5-0.3 のスラグ置換率の影響は、置換率の増加と共にブリーディング率は著しく増加した。これは、このスラグの微粒分が少ないこと、および表面がガラス質で保水性が低いことが起因していると考えられる。CUS2.5 を用いると CUS5-0.3 を用いた場合と比べ、ブリーディング率は減少した。これは、CUS2.5 は CUS5-0.3 に比べて微粒分が多いこと、および粒形が小さいことによる骨材全体の表面積が大きくなり保水性が高まったためと考えられる。CUS5-0.3 にフライアッシュを併用置換すると、ブリーディング率を低減させる。特に、フライアッシュを 10%置換した場合、この効果は顕著である。

水セメント比 65%の場合、ブリーディング率は非常に大きなものとなった。CUS5-0.3 を 10%置換した場合には、さらに増加した。しかしながら、CUS2.5 を 10%置換した場合、無置換のものに比べて小さくなった。これは、CUS2.5 の微粒分の効果によるものと考えられる。

### 3.2 硬化コンクリート

#### (1) 圧縮強度

図-5 に、コンクリートの圧縮強度試験の結果を示す。水セメント比の影響については、水セメント比の増加に伴ってコンクリートの圧縮強度は減少する。

水セメント比 45%の場合、CUS5-0.3 および CUS2.5 を 10%置換すると、材齢 28 日ではほぼ同等の強度発現となった。材齢 91 日では、CUS2.5 を用いたものが、最も大きな強度発現を示した。

水セメント比 55%の場合、CUS5-0.3 のスラグ置換率の影響は、いずれの置換率および材齢においてもその圧縮強度は、無置換のものに比べて小さくなる傾向となった。これらの結果は、既往の研究<sup>8)</sup>と符合する。これは、CUS5-0.3 を用いることでブリーディングが多量に発生し、それがスラグとセメントペーストとの界面の付着状態に悪影響を与えたと考えられる。また、CUS2.5 を 10%置換した場合の圧縮強度は、材齢 91 日において無置換の場合より大きなものとなった。これは、CUS2.5 が CUS5-0.3 に比べて微粒分が多いため、銅スラグとセメントペーストとの付着界面に与える悪影響より、微粒分による充填効果の影響が大きかったためと考えられる。フライアッシュを用いた場合は、材齢 28 日および 91 日ではフライアッシュ無置換のものに比べて、その強度発現は著しく大きくなっている。

水セメント比 65%の場合、CUS5-0.3 および CUS2.5 の混入はいずれの場合にも圧縮強度を低下させた。水セメント比 65%では、セメントペーストと骨材の付着界面は

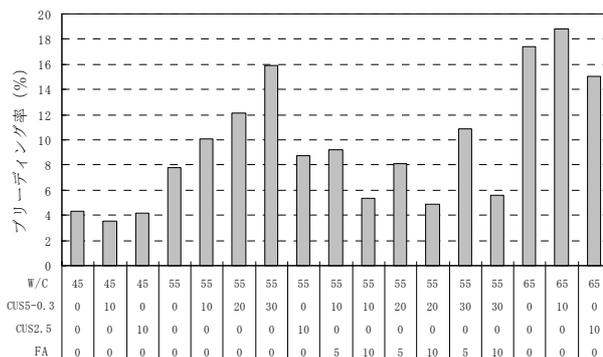


図-4 ブリーディング率

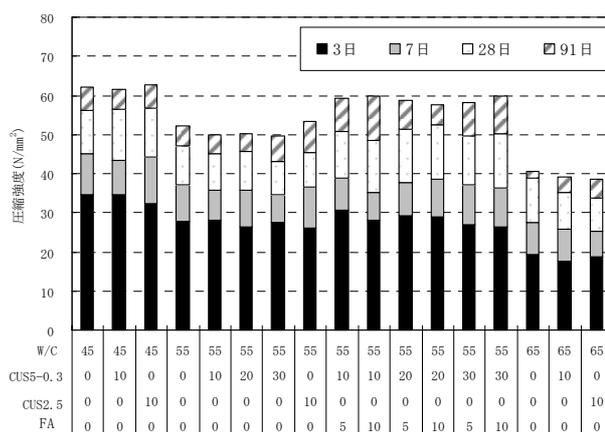


図-5 コンクリートの圧縮強度

元々弱い、銅スラグを置換することで、その付着をさらに弱体化させたと考えられる。

#### (2) 長さ変化率

図-6 に、コンクリートの長さ変化試験の結果を示す。銅スラグおよびフライアッシュを用いない場合における水セメント比の影響については、水セメント比 45%および 65%は同程度で、水セメント比 55%が最も長さ変化率が大きかった。これらの結果に対して、定量的な評価は難しいが、硬化ペーストの組織構造と水分逸散およびそれに伴う微小空隙内の引張張力の大小関係が複雑に影響した結果であると考えられる。

水セメント比 55%の場合、CUS5-0.3 のスラグ置換率の影響については、CUS5-0.3 を用いると無置換のものに比べて長さ変化率は小さくなった。これは、CUS5-0.3 を置換することでブリーディングが増加し、コンクリート中の水分量が減少したことが大きな原因であると考えられる。また、CUS2.5 を置換した場合の長さ変化率は、CUS5-0.3 の場合とほぼ同等ではあるが、材齢 91 日で若干 CUS5-0.3 を置換したものが、長さ変化率は小さくなる傾向となった。なお、銅スラグを用いた場合の水セメント比の違いによる長さ変化率の大小関係は、銅スラグを用いていない場合の水セメント比の影響と同じ傾向である。

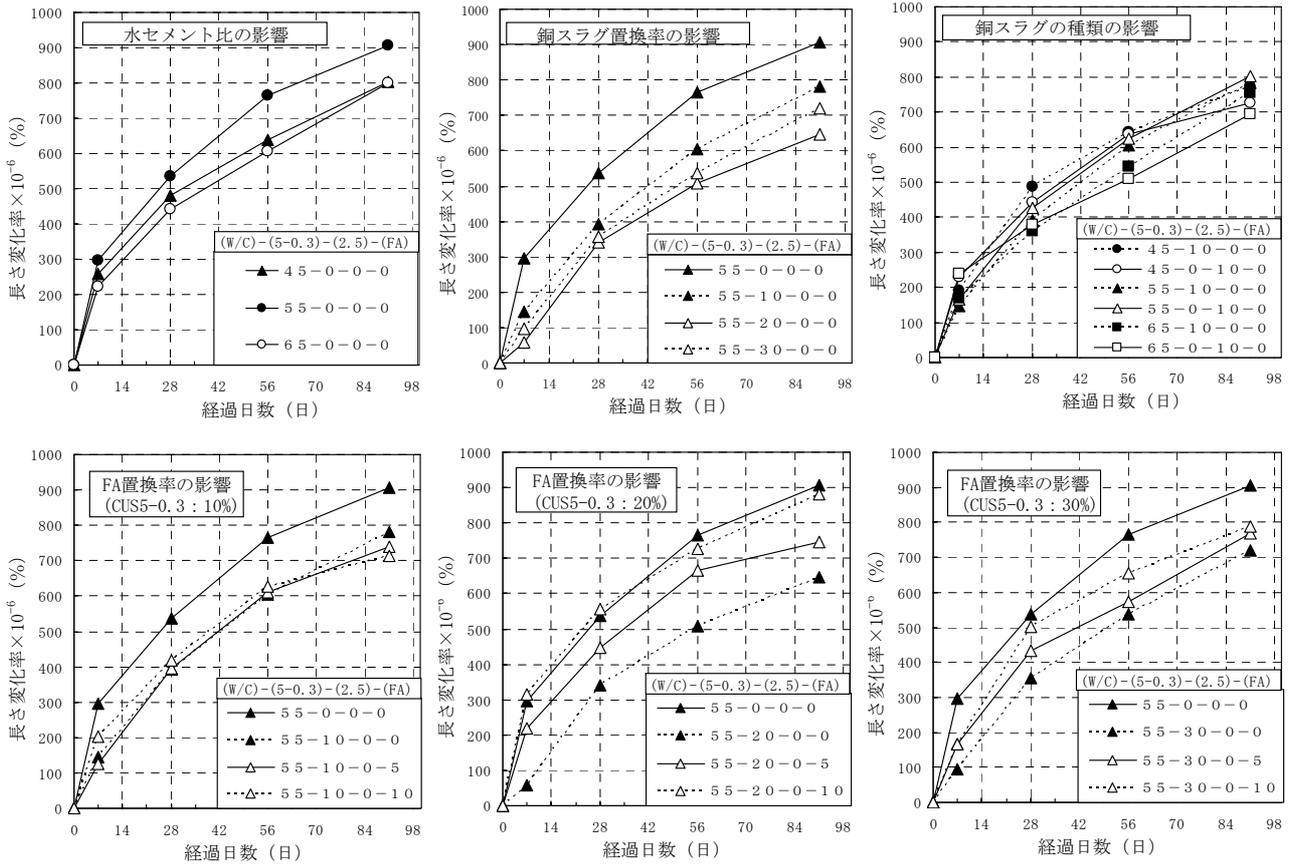


図-6 コンクリートの長さ変化率

フライアッシュを CUS5-0.3 と外割で併用置換した場合については、CUS5-0.3 置換率が 10%ではフライアッシュ併用による影響は見られない。CUS5-0.3 置換率が 20%および 30%では、フライアッシュ置換率の増加に伴い長さ変化率は増加した。これは、長期材齢におけるフライアッシュのポゾラン反応によりコンクリートが緻密化した状態における水分逸散が、乾燥収縮を増加させたと考えられる。

なお、本研究における乾燥収縮は全体的に大きなものとなっているが、これは用いた骨材に起因したものと思われる。このような骨材を用いる場合に、銅スラグの利用が、長さ変化を減少させる 1 つのツールとして機能する可能性がある。

### (3) 促進中性化深さ

図-7 に、コンクリートの促進中性化試験の結果を、図-8 に測定位置と中性化深さの関係を示す。図-8 より、コンクリート供試体上部と下部において、ブリーディングの影響が明確に現れていることが分かる。つまり、供試体上部がブリーディングにより組織構造が粗になり、結果として中性化深さが大きくなる。なお、供試体上部と下部でこの傾向が反対になっている部分を詳細に見たところ、骨材の存在により中性化深さが小さくなっていることを確認した。

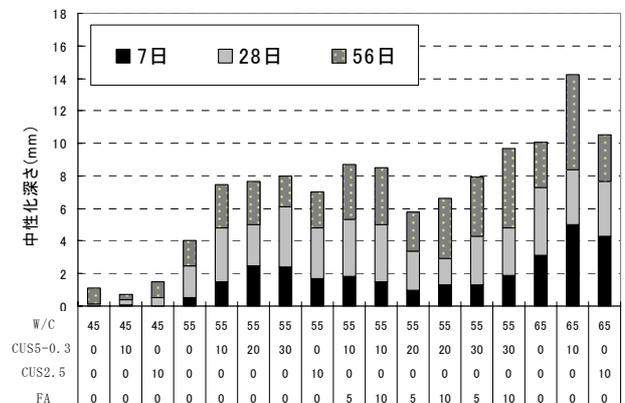


図-7 コンクリートの中性化深さ

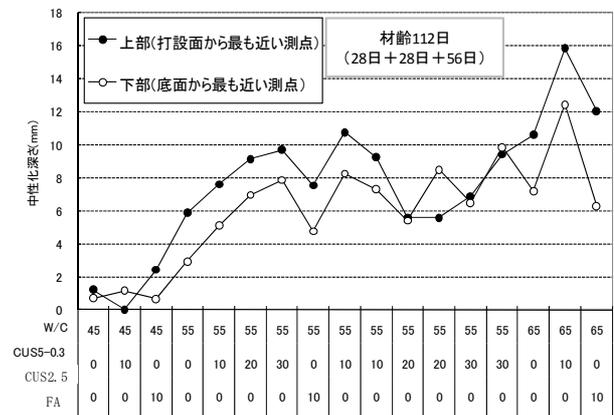


図-8 測定位置と中性化深さの関係

水セメント比の影響に関しては、水セメント比の増加に伴い中性化深さは増加している。

水セメント比 55%の場合、CUS5-0.3 のスラグ置換率の影響に関しては、CUS5-0.3 置換率増加に伴い中性化深さは増加している。

CUS5-0.3 および CUS2.5 の違いによる影響については、CUS2.5 を置換したもののほうが CUS5-0.3 を置換したものに比べて若干中性化深さは小さいが、それ程有意な差はないと言える。

フライアッシュを CUS5-0.3 と外割で併用置換した場合については、フライアッシュを置換すると初期材齢では、無置換のものに比べて中性化深さは小さいが、材齢 28 日以降で中性化深さは大きく増加した。また、CUS5-0.3 の置換率 10%では、フライアッシュ置換率の増加による影響は見られないが、CUS5-0.3 の置換率 20%では、フライアッシュ置換率の増加に伴って中性化深さは著しく増加している。CUS5-0.3 の置換率 30%の場合においては、この傾向がさらに顕著である。これは、フライアッシュ置換率の増加で、コンクリートの緻密化による中性化抑制効果よりも、ポズラン反応の活性化による水酸化カルシウムの消費量増加の影響が大きかったためと考えられる。

水セメント比 65%の場合、CUS5-0.3 を置換したもののほうが CUS2.5 を置換したものに比べて中性化深さは大きい。これは、CUS5-0.3 より CUS2.5 の微粒分が多いことで、コンクリートがより緻密であったためと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究の主な結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 本研究で用いた銅スラグ CUS5-0.3 および CUS2.5 は、単独で細骨材粒度範囲の JIS 規格を満たすことは難しいが、砕砂の一部に置き換えることによって JIS 規格を満たすことができる。
- 2) 水セメント比 55%の場合、銅スラグ CUS5-0.3 の置換率が増加すると、AE 減水剤添加量は増加する。しかし、フライアッシュを併用置換すると、全体的に AE 減水剤添加量は減少する。
- 3) 銅スラグを置換するとブリーディング率は増加する。特に、銅スラグ CUS5-0.3 を用いた場合の影響は顕著である。また、フライアッシュを併用置換することで、ブリーディングの抑制が可能となる。
- 4) 銅スラグ CUS5-0.3 を用いた場合の圧縮強度は、無置換のものよりも小さくなる。反対に、銅スラグ CUS2.5 置換では増加する。また、フライアッシュを併用させることで圧縮強度は増加する。
- 5) 銅スラグ CUS5-0.3 を置換すると長さ変化は減少する。

また、銅スラグ CUS5-0.5 を 20%および 30%置換した場合にフライアッシュを併用置換すると、フライアッシュ置換率の増加に伴って長さ変化は増加する。

- 6) 銅スラグ CUS5-0.3 の置換率の増加に伴って中性化深さは増加する。また、フライアッシュを併用置換すると、初期材齢では中性化深さは抑制できるが、長期材齢で中性化深さは増加する。

以上のことより、銅スラグ CUS5-0.3 はブリーディングの観点から単独で用いることは難しいが、フライアッシュとの併用であれば 20%程度の置換が可能であると思われる。しかし銅スラグは、用いる骨材との組み合わせや単位水量および細骨材率によりコンクリートの特性に異なる影響を及ぼすと考えられるため、今後はこれらの影響について検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会 (法) : コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書, 2010 年 7 月
- 2) 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, コンクリートライブラリー92
- 3) 錦織 和紀郎, 谷口 昇, 川西 政雄, 松田 節男 : 銅スラグ (CUS2.5) を用いたコンクリートの特性と施工例, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, 2005
- 4) 飛坂 基夫, 地頭菌 博, 藤田 康彦 : 銅スラグ細骨材を低混合率で使用したコンクリートの基礎的性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東) 1997 年 9 月
- 5) 真野 孝次, 飛坂 基夫, 池永 博威 : 銅スラグ骨材を用いたコンクリートの基礎的物性に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海) 1994 年 9 月
- 6) 加地 貴, 石井 光裕, 岩原 廣彦 : フライアッシュと銅スラグ細骨材を使用したコンクリートの性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004
- 7) 石丸 啓輔, 水口 裕之, 橋本 親典, 上田 隆雄 : 銅スラグおよび II 種フライアッシュを細骨材の一部に置換して用いたコンクリートの性状, [材料] (J.Soc.Mat.Sci.,Japan), Vol.54, No.8, pp.828-833, Aug.20 05
- 8) 藤原 敬也, 水越 睦視, 梅本 忠彦 : 四国産銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの基礎的性状, 土木学会四国支部概要集, V-32, 2010