

論文 銅スラグ細骨材を多量に用いたフライアッシュⅡ種併用コンクリートの基礎的性状

福上 大貴*1・水越 睦視*2

要旨：産業副産物の有効利用と骨材の枯渇問題の対策として、銅スラグ細骨材とフライアッシュを混合したコンクリートのフレッシュおよび硬化特性について検討した。その結果、容積で最大で細骨材全量の 80%に銅スラグ細骨材を用いて、残りの 20%に JIS Ⅱ種フライアッシュを使用すれば、CUS2.5 だけでなく粒度の粗い CUS5-0.3 を使用しても、コンクリートのフレッシュおよび強度特性は普通コンクリートと比べて同等であることがわかった。また、凍結融解抵抗性は、凍結開始までの養生期間を 28 日、空気量を 7.0%とすることで改善できることがわかった。

キーワード：銅スラグ細骨材，フライアッシュ，ブリーディング，凝結時間，圧縮強度，凍結融解抵抗性

1. はじめに

近年、骨材資源の枯渇、海砂の採取禁止により、瀬戸内海沿岸でも砕砂の使用が増加している。自然環境の保全を考えると、砕砂のみに依存せず、産業副産物を代替骨材として再利用することも考える必要がある¹⁾。

四国の瀬戸内海沿岸では、銅の精錬時に発生する副産物である銅スラグが多量に発生している。銅スラグ細骨材(以下、CUS)は銅スラグを水によって急冷し、粒度調整を施したもので、1997 年 8 月に 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」として規格化された。続いて 1998 年 2 月には土木学会より、「銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針」が発行された²⁾。CUS は密度が大きく、吸水率が小さいことから、CUS を多量に用いたコンクリートでは材料分離が生じ、ブリーディング量も増加する。この指針では、一般のコンクリートと同等の品質を得られる銅スラグ細骨材混合率(細骨材全量に対する CUS の容積百分率、以下、CUS 混合率)は 30%以下であるとしている²⁾。そこで、30%よりも高い混合率で CUS を使用することができれば、骨材枯渇問題の緩和にも大いに寄与できるものと考えられる。

また、四国地区の石炭火力発電所から産業副産物であるフライアッシュ(以下、FA)は毎年約 29 万トン発生している³⁾。CUS をできるだけ多量にコンクリート用細骨材として利用し、さらに FA も併用できれば、より効率的な産業副産物の有効利用ができる。

これまで、CUS、FA を使用したコンクリートのフレッシュおよび強度特性に関する検討は、数多く報告されているが^{4,5)}、CUS2.5 あるいは CUS5-0.3 のどちらか一方のみを使用した場合の検討や、CUS 混合率が低い範囲での検討がほとんどである。また、耐久性のうち、耐凍害性に関しても検討がなされているものの、土木学会 CUS

指針で定められた CUS 混合率 30%での検討であり、CUS 混合率が高い範囲での検討結果は乏しいといえる。

そこで、本研究では、CUS2.5 と CUS5-0.3 の 2 種類の CUS を用い、CUS を通常のコンクリート用細骨材に対して 50%から 100%といった高い混合率で使用し、ブリーディング抑制など、コンクリートの性状改善に FA を併用することで産業副産物を有効利用することを目的に実験を行った。最初に、CUS 混合率を変化させ、コンクリートのフレッシュおよび強度特性を把握した後、フライアッシュⅡ種を細骨材の一部として使用した場合のコンクリート性状の改善効果について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で使用した材料を表-1 に示す。本実験で使用した CUS は、JIS A 5011-3 に規定されている粒の大きさが 2.5mm 以下の CUS2.5 と 5mm～0.3mm の CUS5-0.3 の 2 種類である。なお、CUS2.5 は、同じ工場で製造されたロットの異なる CUS2.5-A と CUS2.5-B であるが、ふるい分け試験を行った結果、前者は 0.6mm 以下で JIS A 5011-3 の粒度範囲を満たさなかった。CUS の砕砂代替としての多量使用を考えているため、本実験で用いた細骨材のふるい分け試験の結果を JIS A 5005 の砕砂の粒度範囲と共に図-1 に示す。砕砂の粒度分布は、標準粒度内にあり、CUS2.5-B は砕砂より 0.6mm 以下が少ないが標準粒度内、CUS2.5-A は 0.6mm 以下が、CUS5-0.3 は 1.2mm 以下の微粒分が砕砂の標準粒度範囲を満たさず、CUS2.5-B、CUS2.5-A、CUS5-0.3 の順に微粒分が少ないといえる。また、FA は CUS の微粒分を補うための細骨材代替として使用することから、四国地区で最も多く発生し、容易に入手できる JIS A 6201 に適合するⅡ種を使用した。

*1 香川高等専門学校専攻科 創造工学専攻 (学生会員)

*2 香川高等専門学校 建設環境工学科教授 博(工) (正会員)

2.2 配合

ステップ 1, 2, 3 のコンクリートの配合をそれぞれ表-2, 3, 4 に示す。ステップ 1 の No.1 は細骨材に砕砂のみを用いた基本配合(以下、普通コンクリート(N))である。N の配合条件は、スランブ $12.0 \pm 1.0\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ とした。最適細骨材率は、N 配合の値を試験練りにより求めた後、その他の砕砂代替として CUS を用いたコンクリート(以下、CUS コンクリート)の配合については粗粒率の違いによる補正計算で求めた。また、空気量は助剤(AE 剤あるいは消泡剤)により調整した。ステップ 1 では基本配合と水セメント比(W/C)、単位水量、AE 減水剤の添加率を同じとして CUS の混合率のみを変化させた。

ステップ 2 は、CUS に FA を併用したコンクリート(以下、FA コンクリート)の配合である。ここでは、FA をセメント置換で使用せずに細骨材代替として使用した。つまり、FA を細骨材と考えることで微粒分の少ない CUS を減少させ、単位セメント量は N 配合と同じであるため、粉体量は増加し、その結果、水結合材比(W/B)は N 配合の W/C よりも小さくなる。この考えを基本に配合設計を実施することにより、CUS コンクリートのブリーディングを抑制するとともに、凝結遅延と初期強度の低下を改善することを期待した。CUS2.5 を使用した場合は、ステップ 1 の No.1, N 配合(目標スランブ 12.0cm)を基本とし、CUS および FA 混合率(細骨材全量に対する FA の容積百分率、以下 FA 混合率)が各種特性へ及ぼす影響を検討した。CUS5-0.3 を使用

した場合は、目標スランブを $8.0 \pm 1.0\text{cm}$ とし、AE 減水剤の添加率を小さくした配合におけるコンクリートのブリーディングおよび凝結特性について検討した。空気量はステップ 1 と同様に、 $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

ステップ 3 では、CUS5-0.3 を使用し、目標空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ と $7.0 \pm 1.5\%$ としたコンクリートの凍結融解試験を実施した。また、凍結開始までの 20°C 水中養生期間を 7 日と 28 日とし、水中養生期間が凍結融解抵抗性に与える影響についても検討した。

2.3 試験項目および試験方法

試験は、フレッシュ特性と硬化特性について検討した。試験項目および試験方法を表-5 に示す。なお、凍結融解試験はステップ 3 のみで実施した。

コンクリートの練混ぜには、二軸強制練りミキサを用い、セメント、細骨材、粗骨材、混和材を投入し、

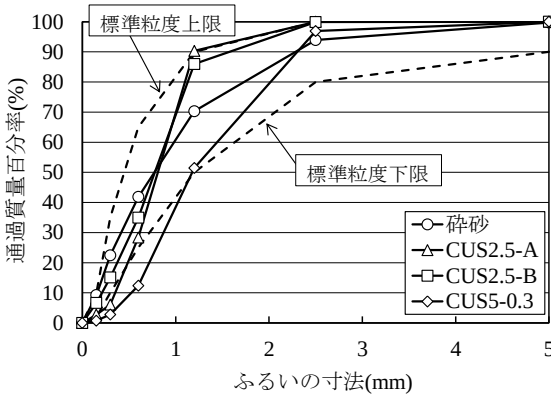


図-1 ふるい分け試験結果

表-1 使用材料

材料		物性等
セメント (C)		普通ポルトランドセメント、密度 $3.15\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3,340\text{cm}^2/\text{g}$
フライアッシュ (FA)		フライアッシュ II 種、密度 $2.25\text{g}/\text{cm}^3$ 、ブレン値 $3,290\text{cm}^2/\text{g}$ 、強熱減量 1.8%
砕砂 (S)		表乾密度 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ 、F.M. 2.63、吸水率 1.74%
銅スラグ	(CUS2.5-A)	表乾密度 $3.57\text{g}/\text{cm}^3$ 、F.M. 2.73、吸水率 0.37%
	(CUS2.5-B)	表乾密度 $3.51\text{g}/\text{cm}^3$ 、F.M. 2.57、吸水率 0.40%
	(CUS5-0.3)	表乾密度 $3.51\text{g}/\text{cm}^3$ 、F.M. 3.36、吸水率 0.68%
粗骨材 (G)		表乾密度 $2.62\text{g}/\text{cm}^3$ 、F.M. 6.75、吸水率 1.74%、最大寸法 20mm
混和剤	(AE減水剤)	ポリカルボン酸系AE減水剤
	(AE剤)	変性アルキルカルボン系AE剤
	(消泡剤)	ポリアルキレングリコール系消泡剤

表-2 示方配合(ステップ 1)

No.	W/C (%)	s/a (%)	CUS 混合率 (%)	単位量(kg/m ³)						C×(%)		空気量の 実測値 (%)
				W	C	S	CUS2.5-A	CUS5-0.3	G	AE減水剤	助剤	
1	55	44	0	165	300	795	-	-	1018	0.7	-	3.8
2		42	30	165	300	527	310	-	1061	0.7	0.003	3.3
3		42	50	165	300	378	518	-	1060	0.7	-	3.0
4		42	70	165	300	227	727	-	1058	0.7	0.003	5.6
5		42	100	165	300	-	1039	-	1055	0.7	0.006	3.0
6		42	30	165	300	523	-	303	1067	0.7	0.0015	5.6
7		42	50	165	300	373	-	504	1068	0.7	0.0015	4.5
8		44	70	165	300	239	-	753	1018	0.7	0.0006	4.8
9		45	100	165	300	-	-	1102	998	0.7	-	5.6

表-3 示方配合(ステップ2)

No.	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	CUS 混合率 (%)	FA 混合率 (%)	単位量(kg/m³)							C×(%)		空気量の 実測値 (%)
						W	C	FA	S	CUS2.5-B	CUS5-0.3	G	AE減水剤	助剤	
1	55	45	42	50	10	165	300	65	302	510	-	1060	0.7	0.012	5.1
2		38	42	50	20	165	300	131	227	510	-	1060	0.7	0.009	4.6
3		45	42	70	10	165	300	65	151	712	-	1061	0.7	0.003	3.9
4		38	42	70	20	165	300	130	75	712	-	1061	0.7	0.006	4.2
5		45	41	80	10	165	300	64	74	804	-	1070	0.7	0.006	3.8
6		38	41	80	20	165	300	129	-	804	-	1070	0.7	0.009	3.6
7		45	43	30	10	165	300	67	462	-	312	1045	0.35	0.006	3.9
8		45	43	50	10	165	300	68	313	-	528	1032	0.35	0.006	4.6
9		45	44	70	10	165	300	69	159	-	753	1018	0.35	0.006	5.3
10		37	45	80	20	165	300	141	-	-	882	998	0.35	0.009	3.0

表-4 示方配合(ステップ3)

No.	Air (%)	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	CUS 混合率 (%)	FA 混合率 (%)	単位量(kg/m ³)						C×(%) [*]		空気量の実測値 (%) [*]	水中養生期間 (日)
							W	C	FA	S	CUS5-0.3	G	AE減水剤	助剤		
1	4.5	55	-	44	0	0	165	300	-	795	-	1020	0.35	0.0015	5.4	7
2			-	42	30	0	165	300	-	531	307	1055	0.35	0.0015	4.8	
3			37	45	80	20	165	300	141	-	878	1001	0.35	0.009	4.9	
4			33	44	70	30	165	300	206	-	751	1020	0.35	0.021	3.1	
5	7	55	-	42	30	0	165	300	-	517	298	1024	0.35	0.0045(0.0045)	6.5(6.5)	7, 28
6			38	45	80	20	165	300	137	-	853	972	0.35	0.021(0.021)	7.5(7.0)	
7			33	44	70	30	165	300	200	-	730	990	0.35	0.039(0.09)	5.8(5.0)	

*)括弧内の数字は、水中養生期間28日とした場合の実験値

30 秒間の空練りを行った後、水と混和剤を投入し、90 秒間の本練りを行い、コンクリートを排出した。

3. 実験結果および考察

3.1 スランブ

ステップ 1, 2 のスランブ試験結果を図-2 に示す。ここで、AE 減水剤の添加率は、ステップ 1 の N および CUS コンクリート、ステップ 2 の CUS2.5 を用いた FA コンクリートでは、セメント質量の 0.7% であり、ステップ 2 の CUS5-0.3 を使用した FA コンクリートのみは、セメント質量の 0.35% である。ステップ 1 の CUS5-0.3 を使用した場合、スランブは CUS 混合率が大きくなるに伴い小さくなっている。CUS2.5 を使用した場合、CUS 混合率 50% および 70% と N とのスランブは同じ値となっている。これは、CUS 混合率 30% では生じなかった材料分離が CUS 混合率 50% 以上になると認められ、CUS 混合率 50% および 70% では試料が自立せず、やむなく崩れた試料の中心でスランブを測定したためである。したがって、CUS 混合率 50% 以上ではスランブ値は大きくなっているが、材料分離が生じなかった 30% に比べてワーカビリティは低下しており、土木学会 CUS 指針の CUS 混合率の上限値が 30% 程度であるという見解と一致している。また、CUS と FA を併用したステップ 2 の FA コンクリートに関して、CUS2.5 の混合率を 50%, 70%, 80% と大きくして多量に CUS を使用した場合でも、細骨材全量の容積に対し

表-5 試験項目および試験方法

	試験項目	試験方法
フレッシュ特性	スランブ	JIS A 1101
	空気量	JIS A 1128
	ブリーディング	JIS A 1123
	凝結時間	JIS A 1147
硬化特性	圧縮強度	JIS A 1108
	凍結融解	JIS A 1148(A法)

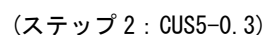
て 10% あるいは 20% を FA で置換することにより、FA コンクリートのスランブは N の 11.5cm に対して 16.5cm~22.0cm と増加し、流動性の向上が認められた。ただし、FA 混合率 10% と 20% ではスランブに顕著な差は認められなかった。目標スランブを 8.0cm とした CUS5-0.3 を使用した FA コンクリートは、AE 減水剤の添加率を N 配合および CUS2.5 の場合の半分の 0.35% と少なくしたため、やや硬いもののスランブ 8.0 ± 2.0cm の範囲内にあり、目視とタッピングによる変形状の確認よりワーカビリティは良好であると判断できた。このように高い混合率で CUS を用いたにもかかわらず良好なワーカビリティを確保できたのは単位セメント量を減らさずに細骨材の一部を FA で置換することにより、CUS で少なかった微粒分量を補うことができたためであると考えられる。

3.2 ブリーディング

ステップ 1 のブリーディング試験結果を図-3 に示す。図中の凡例において、例えば CUS2.5(30) は CUS2.5

ステップ2の CUS2.5を用いた FA コンクリートのブリーディング試験結果を図-4 に示す。FA 混合率を20%とした場合、CUS 混合率 50%, 70%, 80%の3配合の FA コンクリートのブリーディング量はいずれも N より小さく、FA 混合率を 10%とした場合でもブリーディング量は CUS 混合率 80%のとき $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ を超えたが、50%, 70%では下回っている。次に、CUS5-0.3を使用した場合のブリーディング試験結果を図-5 に示す。CUS コンクリートでは $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ を超えた CUS 混合率 30%, 50%でも FA 混合率 10%で N と同程度のブリーディング量になることがわかる。CUS 混合率 70%, FA 混合率 10%ではブリーディング量は $0.35\text{cm}^3/\text{cm}^2$, CUS 混合率 80%, FA 混合率 20%でも $0.31\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であったが、 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ は水密コンクリートに対するもので、一般コンクリートでは大きな問題にはならないと思われる。以上より、本実験で用いた JIS II 種の FA を容積で細骨材全量の 20%混合で CUS と併用すれば、CUS2.5, CUS5-0.3 ともに 80%の高混合率で多量に使用しても、施工品質に及ぼすブリーディングの影響は小さいと考えられる。

ステップ 1 の凝結試験結果を図-6 に示す。図中の点線は、始発と終結を示している。CUS の種類にかかわらず CUS 混合率の増加に伴い凝結時間が長くなっており、CUS 混合率が 70%以上になると、N と比較して CUS2.5 で 2~3 時間、CUS5-0.3 で 3~6 時間の凝結遅延が認められた。凝結遅延の原因としては、銅スラグ粒子の吸水性が他の材料に比べ低いため、セメントの水和反応が遅れることにより凝結遅延が生じるとの



報告⁵⁾や銅スラグに含まれる塩基性炭酸銅が凝結を遅延させるという報告がある⁷⁾。CUSの吸水率が小さいため、セメントペースト中の水量がN配合よりも多くなることも、凝結遅延の一因であると思われる。

ステップ2のFAコンクリートの凝結試験結果をCUS2.5とCUS5-0.3について各々図-7、図-8に示す。図-7より、CUS2.5の場合、FA混合率が大きくなるほど凝結が遅れる傾向にある。始発は、CUS混合率50%では、細骨材の20%をFAに置換することにより、Nに比べて4時間、FA無混和のCUS混合率50%と比較して2時間の遅延が認められる。これは、Nのスランプ11.5cmに対してFAコンクリートでは16.5cm~22.0cmと大きく、コンシステンシーの違いによるものと推察した。このままでは、コンクリートの凝結が遅くなり、CUSを多量に細骨材として使用したFAコンクリートでは実用化に際して課題が残る。

そこで、FA混和による凝結遅延の抑制を考えて、単位水量は一定でAE減水剤の添加率を低減し、目標スランプ8.0cmと小さくしたCUS5-0.3を用いたFAコンクリートの凝結試験を実施した。図-8より、スランプNと比較して最大で50分程度の凝結遅延であり、CUS混合率50%以上としたFAコンクリートでも凝結の遅延を抑制でき、普通コンクリートと同等の凝結特性を示していることがわかる。

3.4 圧縮強度

ステップ1, 2の圧縮強度試験結果を図-9に示す。CUS2.5の場合、Nと比較してCUS混合率50%までは材齢に関係なく圧縮強度の差はみられないが、CUS混合率が70%以上となると圧縮強度は低下した。これは、コンクリートの材料分離の影響であると考えられる。CUS5-0.3の場合、圧縮強度はCUS混合率が大きくなるに伴い低下し、特に材齢7日およびCUS混合率100%での強度低下が顕著である。しかし、長期の強度増進は比較的良好であることがわかる。ステップ2のFAコンクリートでは、FA混合率が大きいほど圧縮強度が増大している。これは、材齢7日、28日での強度増進はW/BをW/Cよりも低減したためであると考えられる。強度増進が材齢91日でさらに顕著になっているのは、W/Bの低減効果とFAのポズラン反応の相乗効果によるものと思われる。CUS混合率80%の場合、CUS2.5では、FA混合率10%で材齢28日、91日でNと同等以上の圧縮強度が得られる。しかし、CUS5-0.3では、材齢28日圧縮強度はCUS混合率70%、FA混合率10%ではNよりも小さく、CUS混合率80%でFA混合率を20%にするとNと同等となることがわかる。

3.5 凍結融解抵抗性

ステップ3において、目標空気量および凍結開始ま

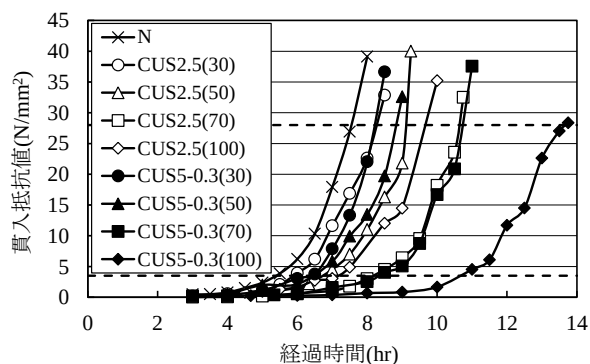


図-6 凝結試験結果(ステップ1)

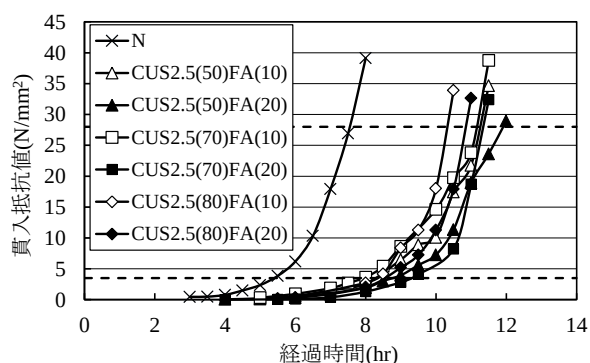


図-7 凝結試験結果(ステップ2 : CUS2.5)

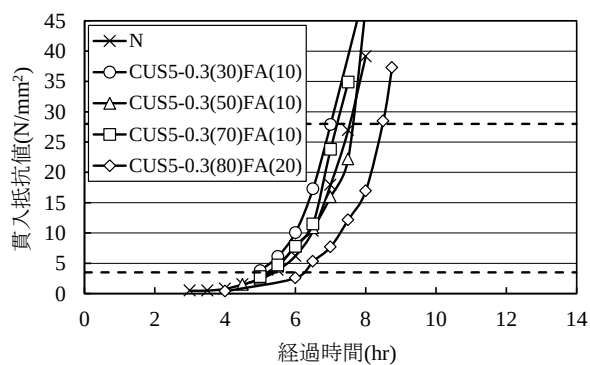


図-8 凝結試験結果(ステップ2 : CUS5-0.3)

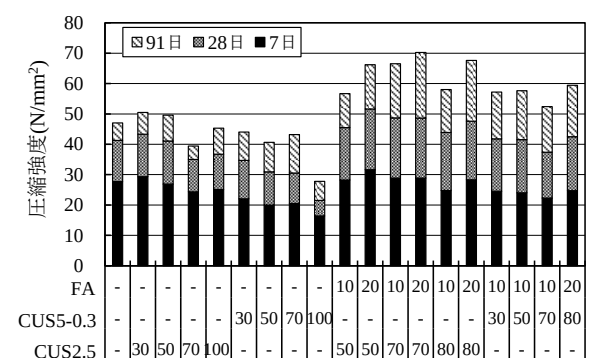


図-9 圧縮強度試験結果

での 20℃水中養生期間を変化させた場合の凍結融解試験結果を図-10、図-11 に示す。なお、JIS A 1148 では、相対動弾性係数が 60%以上であれば、そのコンクリートの耐凍害性は良好と判断される。そこで、本実験では、この基準を下回った時点で測定を打ち切った。図-10 より、目標空気量に関係なく、CUS を混入した全ての配合の相対動弾性係数は 60%を下回っていることがわかる。また、図-11 より、凍結開始前の水中養生期間を長くすることにより、凍結融解抵抗性は向上し、CUS 混合率 80%、FA 混合率 20%では、耐凍害性は良好であると判断できた。これは、セメントの水和反応、FA のポゾラン反応の進行により、組織が緻密となったことによるものと考えられる。

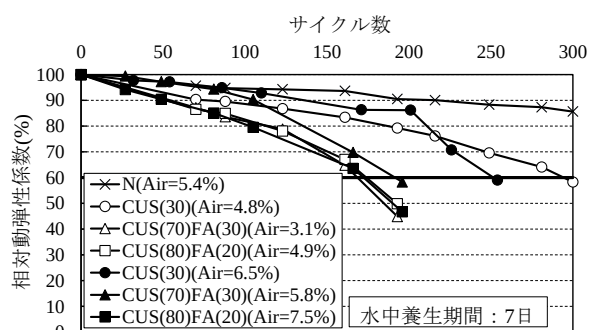


図-10 凍結融解試験結果(空気量の影響検討)

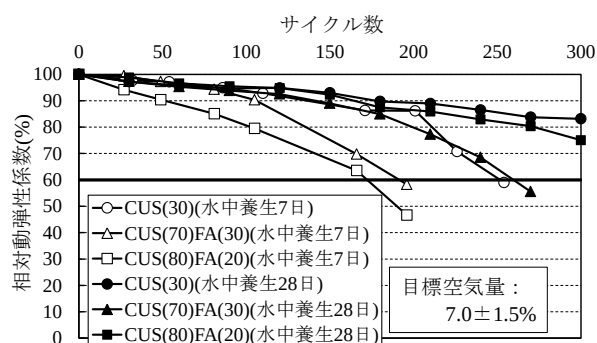


図-11 凍結融解試験結果(水中養生期間の影響検討)

4. まとめ

- (1) 銅スラグ細骨材混合率の増加に伴い、スランブは低下する。また、銅スラグ細骨材混合率が 50%以上と大きい場合でも、JIS II 種のフライアッシュを細骨材全量に対する容積混合率で 10%あるいは 20%混合すると、コンクリートの流動性は向上し、銅スラグ細骨材の種類に関係なく良好なワーカビリティが得られる。
- (2) コンクリートのブリーディング量を JASS5 の水密性コンクリートの上限値 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下とす

るためには、CUS2.5 で銅スラグ細骨材混合率 30%以内とする必要があり、CUS5-0.3 では混合率 30%でも満たすことができない。しかし、CUS2.5 では JIS II 種のフライアッシュを混合率 10%、CUS5-0.3 で 20%併用すれば、銅スラグ細骨材混合率 50%以上の高い混合率で銅スラグ細骨材を使用してもブリーディング量を $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度に抑制できる。

- (3) 銅スラグ細骨材混合率の増加に伴い、凝結時間が長くなり、フライアッシュを併用することで、さらに遅延する。しかし、銅スラグ細骨材を混合率 50%以上でフライアッシュを併用したコンクリートでも、AE 減水剤の添加率を小さくすれば、普通コンクリートと同等の凝結特性を示す。
- (4) 圧縮強度は、普通コンクリートと比較して混合率が大きくなると低下する傾向が顕著になる。CUS 混合率 80%でも、材齢 28 日強度は、CUS2.5 ではフライアッシュ混合率 10%で、CUS5-0.3 ではフライアッシュ混合率を 20%にすると普通コンクリートと同等となる。
- (5) CUS5-0.3 混合率 80%、フライアッシュ混合率 20%と、銅スラグ細骨材を多量に使用しても、凍結開始前の水中養生期間を 28 日、目標空気量を $7.0 \pm 1.5\%$ とすると、耐凍害性を確保できる。

参考文献

- 1) 綾野克紀:四国の骨材事情, コンクリート工学, Vol.46, No.5, pp.57-58, 2008
- 2) 土木学会:銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの指針, pp.1-2, 1998
- 3) 日本フライアッシュ協会:石灰灰ハンドブック, VI-pp.15-17, 2010
- 4) 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, pp.127-132, 2005
- 5) 石丸啓輔, 水口裕之, 橋本親典, 上田隆雄, 藤田和博, 近江正明: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, 2005
- 6) 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp.575~578, 2009
- 7) 綾野克紀, 阪田憲次:銅スラグの凝結遅延抑制方法に関する研究, 土木学会中国支部第 52 回研究発表会概要集, V-30, pp.627-628, 2000