論文　銅スラグ細骨材とフライアッシュを使用した乾燥収縮ひび割れ抑制コンクリートの開発

仲井　一平[*1]・高本　直樹[*2]・河合　慶有[*3]・氏家　勲[*4]

要旨：本研究は，銅スラグ細骨材の置換率及びフライアッシュの混和がコンクリートのフレッシュ性状，乾燥収縮ひずみ及びひび割れ抵抗性に及ぼす影響について検討した。その結果，20℃の曝露環境においては細骨材を銅スラグ細骨材に 60%以上置換することで乾燥収縮ひずみの明確な低減効果が確認された。また，銅スラグ細骨材の置換率を 60%した配合においてもフライアッシュを混和することで，フレッシュ性状を改善し，強度発現を考慮した収縮ひび割れ抵抗性に優れたコンクリートを製造できることが示された。

キーワード：乾燥収縮ひずみ，銅スラグ細骨材，フライアッシュ，ひび割れ抵抗性

1. はじめに

近年，良質な天然骨材の枯渇化に伴い，コンクリートの品質は砕石・砕砂などの骨材の物性に大きく依存しており，良質な骨材資源をいかにして確保し補填するのかは極めて重要な課題となっている。また，建設業界における自然環境の保全や資源の有効利用の観点から，産業副産物をコンクリート材料として利用することが推進されている。

四国の瀬戸内地方では，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 - 第三部：銅スラグ骨材」として規格化された。翌年の 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方針」が発行されている [1)]。一般的に CUS は密度が大きいため，CUS を多量に混合したコンクリートではブリーディング量の増大など材料分離を生じることで品質に悪影響を及ぼすといわれている。当該指針では，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 置換率）を 30%以下とすることを推奨している。一方，近年の施工実績や研究事例においては，銅スラグを 30%以上混合したコンクリートであっても品質や施工性に影響を及ぼさないことが報告されている [2)]。CUS を使用したコンクリートにおいては，吸水率の低い石灰石と同様にコンクリートの乾燥収縮を抑制する効果が報告されており，既往の研究では CUS 置換率が高いほど乾燥収縮ひずみの低減効果も大きくなるとされている。しかしながら，コンクリートに使用される骨材種類や組み合わせ等の配合条件及び曝露環境によって CUS がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は異なると考えられ，CUS 置換率と乾燥収縮ひずみの低減効果は明らかではない。

また，石炭火力発電により発生している産業副産物であるフライアッシュは，コンクリートのワーカビリティーの改善や長期強度の増進を伴う表層コンクリートの緻密化などに非常に有効な混和材料である。フライアッシュを混和したコンクリートでは，単位水量の低減や粉体量の増加によりブリーディング抑制効果が期待される [3)]。しかしながら，フライアッシュの混和方法や初期強度発現性によっては，材齢初期におけるコンクリート表面からの水分の逸散に伴う乾燥収縮により，ひび割れを生じる可能性も考えられる。

以上より，細骨材に銅スラグ細骨材を多量置換することで乾燥収縮ひずみを低減し，かつフライアッシュの混和によりフレッシュ性状及び材料分離性を改善し密実性に優れたコンクリートを製造できると考えられる。しかしながら，両者を混合したコンクリートにおいては，各材料の特性が複合的にコンクリートの品質に影響を及ぼすために，乾燥収縮によるひび割れ抵抗性については，各材料の個別の影響度を把握し，総合的に検討する必要があると考えられる。そこで本研究では，CUS 置換率及びフライアッシュの混和がフレッシュ性状，乾燥収縮ひずみ及びひび割れ抵抗性に及ぼす影響を把握することを目的とした。特に，CUS については 30%を超える混合がコンクリートの乾燥収縮ひずみの低減に及ぼす効果について検討した。また，フライアッシュの混和についてはブリーディングの抑制などのフレッシュ性状の改善効果及び初期強度発現性を考慮したひび割れ抵抗性について検討を行った。

*1　愛媛大学　工学部環境建設工学科　(学生会員)
*2　愛媛大学　大学院理工学研究科
*3　愛媛大学　大学院理工学研究科　助教　Ph.D.　(正会員)
*4　愛媛大学　大学院理工学研究科　教授　博(工)　(正会員)

表－1　タイプA　配合

配合	W/C(%)	W/B(%)	s/a(%)	単位量(kg/m^3)							C×%					
				W	C_1	CfFA	S_1	S_2	CUS	G_1	AE減水剤		AE剤		消泡剤	
											ステップ1	ステップ2, 3	ステップ1	ステップ2, 3	ステップ1	ステップ2, 3
A-0-175	60.0	60.0	48.5	175	292	0	438	447	0	938	0.80		0.30		0.00	
A-0-165	60.0	60.0	48.5	165	275	0	448	457	0	959	1.50	1.30	0.30	0.25	0.00	0.00
A-15	60.0	60.0	48.5	165	275	0	381	388	183	959	1.30		0.30		0.00	
A-30	60.0	60.0	48.5	165	275	0	314	320	366	959	1.50	1.00	0.40	0.15	0.00	0.00
A-45	60.0	60.0	48.5	165	275	0	246	251	549	959	1.30		0.35		0.00	
A-60	60.0	60.0	48.5	165	275	0	179	183	731	959	1.30	1.00	0.30	0.00	0.00	0.15
A-75	60.0	60.0	48.5	165	275	0	112	114	914	959	1.50		0.35		0.00	
A-90	60.0	60.0	48.5	165	275	0	45	46	1097	959	1.50	1.50	0.35	0.00	0.00	0.60
A-FA	65.6	52.5	48.5	165	251	63	435	443	0	931	1.40		0.50		0.00	
A-FACUS-60	65.6	52.5	48.5	165	251	63	166	169	731	931		0.50		0.35		0.00

表－2　タイプB　配合

配合	W/C(%)	W/B(%)	s/a(%)	単位量(kg/m^3)							C×%					
				W	C_1+C_2+C_3 (1:1:1)	CfFA	S_3	CUS	G_2	G_3	AE減水剤		AE剤		消泡剤	
											ステップ1	ステップ2, 3	ステップ1	ステップ2, 3	ステップ1	ステップ2, 3
B-0-175	60.0	60.0	48.5	175	292	0	880	0	473	466	1.00		0.30		0.00	
B-0-165	60.0	60.0	48.5	165	275	0	900	0	483	476	1.50	1.50	0.30	0.20	0.00	0.00
B-15	60.0	60.0	48.5	165	275	0	765	183	483	476	1.50		0.30		0.00	
B-30	60.0	60.0	48.5	165	275	0	630	366	483	476	1.50	1.00	0.15	0.15	0.00	0.00
B-45	60.0	60.0	48.5	165	275	0	495	549	483	476	1.40		0.05		0.00	
B-60	60.0	60.0	48.5	165	275	0	360	731	483	476	1.10	1.20	0.00	0.00	0.00	0.15
B-75	60.0	60.0	48.5	165	275	0	225	914	483	476	1.00		0.00		0.00	
B-90	60.0	60.0	48.5	165	275	0	90	1097	483	476	0.85	1.50	0.00	0.00	0.00	0.60
B-FACUS-30	65.6	52.5	48.5	165	251	63	604	366	469	462		0.30		0.40		0.00
B-FACUS-60	65.6	52.5	48.5	165	251	63	334	731	469	462		0.20		0.30		0.00

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究では骨材種類及びセメントの異なるタイプA及びタイプ B のコンクリートを用いた。**表－1** 及び**表－2** に配合を示す。また，**表－3** に各材料の物性値を示す。なお，タイプ A では細骨材 S_1，S_2 を体積比 1：1 の割合で使用し，タイプ B は粗骨材 G_2（5 号），G_3（6 号）を 1：1 の割合で使用した。銅スラグ細骨材は，CUS2.5 とし吸水率が約 0.04%のものを使用した。また，フライアッシュには未燃カーボン分を 1.0%以下とした CfFA を使用した。いずれのタイプのコンクリートにおいても，水結合材比を 60%，細骨材率を 48.5%と固定し，単位水量は 165kg/m^3 を基本とした。なお，フライアッシュを混和したコンクリートにおいては，材齢 28 日の圧縮強度に基づいて配合を調整した。またステップ 2 の配合では銅スラグ細骨材の置換率に応じて消泡剤を使用し空気量を調整した。

2.2　試験項目及び試験方法

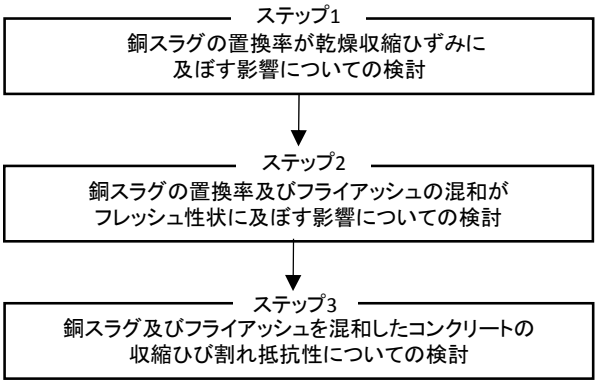
本研究の試験項目及び試験方法を**表－4** に示す。コンクリートの長さ測定はダイヤルゲージ法とコンタクトゲージ法により実施し，得られた長さ変化より乾燥収縮ひずみを算出した。コンタクトゲージの基長は 150mm とした。また，コンタクトゲージ法を用いた供試体は急速乾燥収縮試験法[4)]を採用し，40℃の環境試験槽に曝露し，室温 20℃の恒温室に 24 時間静置した後の長さを測定した。供試体は，打設後 1 日で脱型し，材齢 7 日まで水中養生とした。

表－3　材料の物性値

材料		物性等
C_1	太平洋セメント	普通ポルトランドセメント,密度3.16g/cm^3
C_2	住友大阪セメント	普通ポルトランドセメント,密度3.15g/cm^3
C_3	宇部三菱セメント	普通ポルトランドセメント,密度3.16g/cm^3
CfFA	高品質フライアッシュ	密度2.23g/cm^3, 強熱減量1.0%以下, 比表面積(ブレーン方法)約4200cm^2/g
CUS	銅スラグ細骨材 CUS2.5	表乾密度3.55g/cm^3, F.M.2.29, 吸水率0.04%
S_1	愛媛県東温市山之内産砕砂	表乾密度2.61g/cm^3, F.M.2.88, 吸水率1.06%
S_2	福岡県北九州市東谷鉱山産石灰石砕砂	表乾密度2.66g/cm^3, F.M.2.47, 吸水率0.58%
S_3	千葉県君津市法木産山砂	表乾密度2.62g/cm^3, F.M.2.51, 吸水率1.05%
G_1	愛媛県東温市山ノ内産砕石	表乾密度2.63g/cm^3, 吸水率1.15%
G_2	東京都青梅市成木産砕石5号	表乾密度2.65g/cm^3, 吸水率0.49%
G_3	東京都青梅市成木産砕石6号	表乾密度2.61g/cm^3, 吸水率0.66%

表－4　試験項目

試験項目	試験方法	試験環境
乾燥収縮測定試験	JIS A 1129-3	温度 20℃±1℃　湿度 60%±5%
	JIS A 1129-2	温度 40℃±1℃
ブリーディング試験	JIS A 1123	温度 20℃±1℃
スランプ試験	JIS A 1101	温度 20℃±1℃
空気量試験	JIS A 1128	温度 20℃±1℃
収縮ひび割れ試験	拘束供試体による	温度 20℃±1℃
圧縮強度試験	JIS A 1108	温度 20℃±1℃
静弾性係数試験	JIS A 1149	温度 20℃±1℃
割裂引張強度試験	JIS A 1113	温度 20℃±1℃

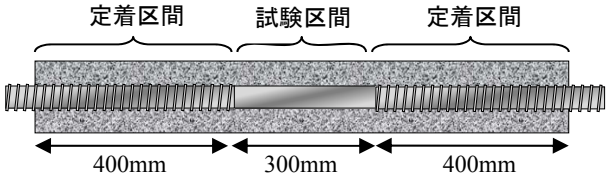


図－1　実験フロー

2.3　実験フロー

実験フローを**図－1** に示す。ステップ 1 の検討では，銅スラグ細骨材の置換率が硬化コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響について検討を行った。A-0-165 及び B-0-165 の配合を基準として銅スラグ細骨材を 0～90%まで 15%刻みで置換した。ステップ 2 の検討では，銅スラグ細骨材の置換率及びフライアッシュの混和がフレッシュ性状に及ぼす影響について検討した。A-0-165 及び B-0-165 の配合を基準として銅スラグ細骨材を 0～90%まで 30%刻みで置換した。また，ステップ 1 で乾燥収縮ひずみの低減効果が明確に認められた配合を用いてフライアッシュを混和した配合を作製した。得られた結果に基づいて，特に適切なブリーディング量となる銅スラグ細骨材の置換率及びフライアッシュを混和した配合について検討した。

ステップ 3 の検討では，銅スラグ細骨材及びフライアッシュを使用したコンクリートのひび割れ抵抗性について検討を行った。乾燥収縮ひずみはコンタクトゲージ法により測定した。なお，供試体は温度 20℃，相対湿度 60%の試験室に曝露した。また，銅スラグ細骨材の置換率及びフライアッシュの混和が硬化コンクリートの力学的特性に及ぼす影響について検討した。圧縮強度及び引張強度試験を円柱供試体により実施し，材齢初期の強度発現について検討した。なお，養生は試験材齢まで標準水中養生とした。さらに，拘束供試体を用いてひび割れ抵抗性試験を行った。試験は，日本コンクリート工学会で提案されている [5]コンクリートの収縮ひび割れ評価試験方法に準拠し，**図－2** に示すような供試体を作製した。拘束体である鉄筋は M32 のネジ節鉄筋の中央部の節を削り，厚さ 1mm のテフロンシートにより付着を除去したものを使用した。試験区間の中央部上下にひずみゲージを貼付し，ひずみの経時変化より拘束応力を算定した。供試体は各ケースで一体ずつ作製し，打設後 1 日で脱型し，材齢 7 日まで湿布養生とした。

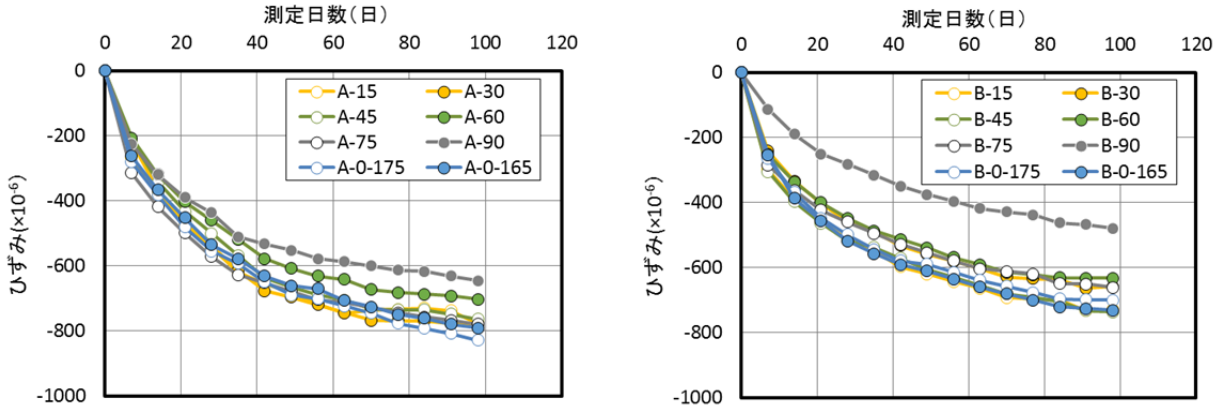


図－2　拘束供試体概要

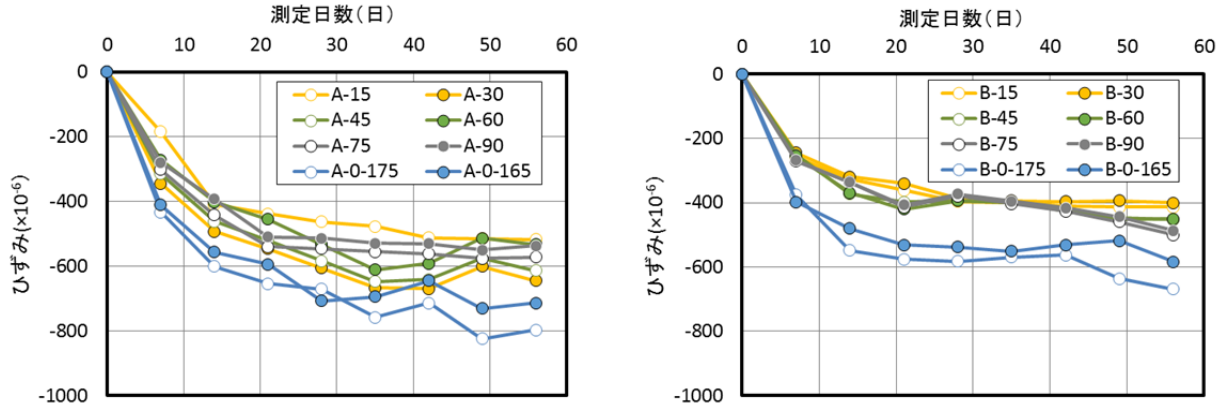
3.　結果及び考察

3.1　ステップ 1

図－3 にタイプ A 及び B シリーズのダイヤルゲージ法により測定した乾燥収縮ひずみの結果を示す。これらの図より，A-0-165 及び B-0-165 の供試体においては，試験



図－3　乾燥収縮ひずみ　ダイヤルゲージ法（左：タイプ A，右：タイプ B）

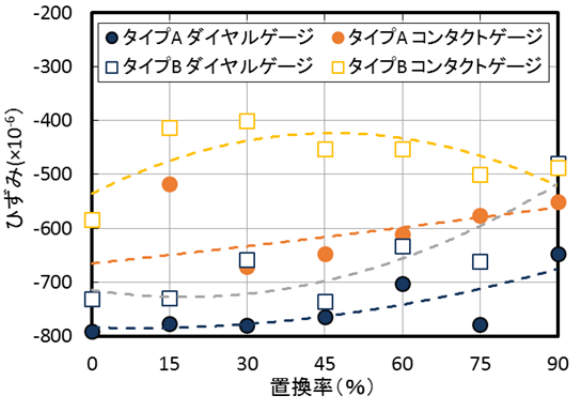


図－4　乾燥収縮ひずみ　コンタクトゲージ法（急速乾燥収縮試験法）（左：タイプ A，右：タイプ B）

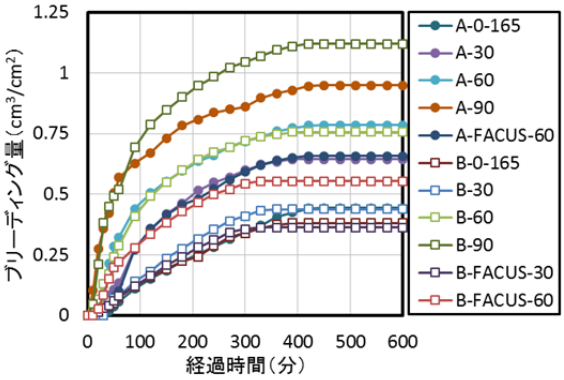
期間が 98 日の乾燥収縮ひずみがそれぞれ 790×10^{-6}，731×10^{-6} であり，単位水量175kg/m^3 の供試体における結果と同程度であることが認められる。一般的に，コンクリートの単位水量を少なくすることによる乾燥収縮ひずみの低減効果が知られているが，本研究の試験範囲においては両者に明確な差は認められない。次に銅スラグ細骨材を混入した配合の結果を見てみると，CUS を 60～90%の割合で置換した供試体において乾燥収縮ひずみの明確な低減効果が認められる。しかしながら，特にタイプ A シリーズにおいて CUS 置換率が 45%以下の供試体における乾燥収縮ひずみは銅スラグを混入していない供試体における結果と比較して大きな差は認められない。

図－4 にタイプ A 及び B シリーズのコンタクトゲージ法により測定した乾燥収縮ひずみの結果を示す。これらの図より，40℃環境に曝露した供試体においては，単位水量を 175kg/m^3 から 165kg/m^3 とすることで乾燥収縮ひずみの低減効果が明確に認められる。また細骨材の一部を CUS に置換したいずれの配合においても乾燥収縮ひずみの低減効果がみられ，20℃環境に曝露した供試体における結果と異なる傾向を示した。すなわち，40℃の曝露環境によりコンクリート表面からの水分の逸散が促進されることで比較的短期間で乾燥収縮ひずみに明確な差が現れたと考えられる。

図－5 に CUS 置換率と試験期間 98 日後の乾燥収縮ひずみの関係を示す。なお，表中の置換率 0%の単位水量は 165 kg/m^3 である。また，コンタクトゲージ法により算出したひずみは測定ごとのばらつきが大きいため，試験期間中に測定された最大ひずみとしている。この図より，20℃の曝露環境でダイヤルゲージ法により試験を行った供試体においては，CUS 置換率が高くなるに従い，乾燥収縮ひずみの低減効果が大きくなる傾向がみられた。特に，細骨材を 60%以上 CUS と置換することで，乾燥収縮ひずみの低減効果は顕著となることがわかった。また，40℃の曝露環境でコンタクトゲージ法により試験を行った供試体においては，置換率 15%の結果においても乾燥収縮ひずみの低減に有効であることが認められる。



図－5　CUS 置換率と乾燥収縮ひずみの関係



図－6　ブリーディング量

これらの結果より，一般的な室内環境において，銅スラグ細骨材を混入することによる乾燥収縮ひずみの高い低減効果を得るためには，施工実績の多い CUS 置換率 30%よりも高い置換率とする必要があると考えられる。

3.2 ステップ 2

ステップ 2 の検討では，CUS 置換率がフレッシュ性状に及ぼす影響について検討を行った。また，ステップ 1 における検討結果を踏まえて，タイプ A は CUS 置換率 60%，タイプ B は CUS 置換率 30%及び 60%の配合にセメント重量の 20%に相当する CfFA を混和し，フレッシュ性状の改善効果を検証した。

表－5 に空気量及びスランプ試験の結果を示す。いず

表－5　空気量及びスランプの結果

タイプA					タイプB				
配合	スランプ(cm)		空気量(%)		配合	スランプ(cm)		空気量(%)	
	ステップ1	ステップ2, 3	ステップ1	ステップ2, 3		ステップ1	ステップ2, 3	ステップ1	ステップ2, 3
A-0-175	7.5		3.0		B-0-175	8.0		4.5	
A-0-165	6.0	8.5	5.0	4.0	B-0-165	6.0	9.5	4.5	5.0
A-15	7.0		5.0		B-15	6.0		5.0	
A-30	9.0	6.5	5.0	4.5	B-30	6.5	7.5	4.5	4.0
A-45	8.0		–		B-45	8.0		4.0	
A-60	8.0	7.0	–	4.5	B-60	4.0	8.0	4.0	4.0
A-75	7.0		–		B-75	3.0		4.0	
A-90	8.5	5.0	–	5.0	B-90	2.5	7.0	5.0	4.5
A-FA	6.0		3.0		B-FACUS-30		8.5		3.5
A-FACUS-60		9.0		5.0	B-FACUS-60		8.5		3.0

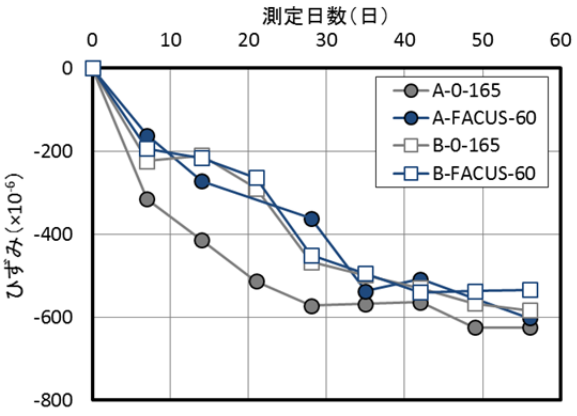
れのシリーズにおいても，試験練りの際に CUS の置換率が高くなるほど空気量が大きくなる傾向が見られたため，消泡剤を用いて空気量を調整した。また，フライアッシュを混和したコンクリートにおいては，主に AE 減水剤の使用量を調整することで消泡剤を使用することなく基準とした空気量及びスランプとなっている。

図－6 にブリーディング試験の結果を示す。タイプ A，B ともに CUS の置換率が高くなるほど試験終了時のブリーディング量は大きくなることが認められる。特に，CUS 置換率を 60%以上とした配合において測定されたブリーディング量は 0.75cm^3/cm^2 を超える値となった。これは密度が大きい CUS の細骨材に占める割合が大きくなるほど骨材重量が重くなるため材料分離性が高まり粉体に拘束されない自由水がコンクリート中を上昇したためと考えられる。これに対して，フライアッシュを混和し粉体量を調整したコンクリートにおいては，試験終了時のブリーディング量は，0.36～0.65cm^3/cm^2 であった。特に，細骨材の一部を銅スラグに 60%置換したコンクリートにおいては，フライアッシュを混和していないものと比較すると，約 25%のブリーディング抑制効果が見られた。しかしながら，いずれのケースにおいてもブリーディング量は既往の研究 [2)] において品質に問題の無い範囲とされている 0.5cm^3/cm^2 より大きいため，硬化後のコンクリート特性に及ぼす影響が懸念される。3.3 節では，銅スラグ細骨材及びフライアッシュを使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみについて，また強度発現を考慮したひび割れ抵抗性について検討する。

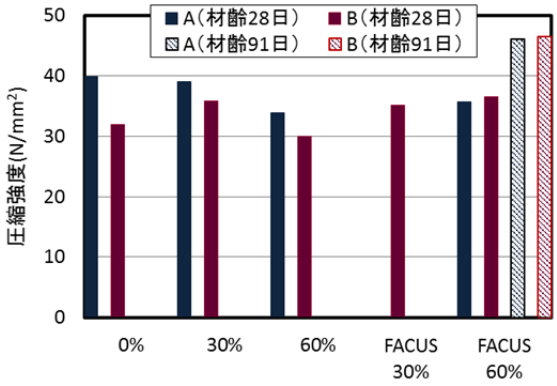
3.3 ステップ 3

図－7 に，ステップ 2 で検討した CUS 置換率 60%の配合にフライアッシュを混和した配合を用いて作製したコンクリート供試体の乾燥収縮ひずみの結果を示す。なお，試験は 2.2 節に記載した通りコンタクトゲージ法により，温度 20℃，相対湿度 60%の試験室で実施した。この図より，特にタイプ A シリーズにおいては，試験期間 56 日におけるコンタクトゲージにより測定された供試体表面の乾燥収縮ひずみが低減されていることが認められる。従って，ひび割れ抵抗性試験においては乾燥収縮ひずみの低減により拘束応力を緩和する効果が期待される。

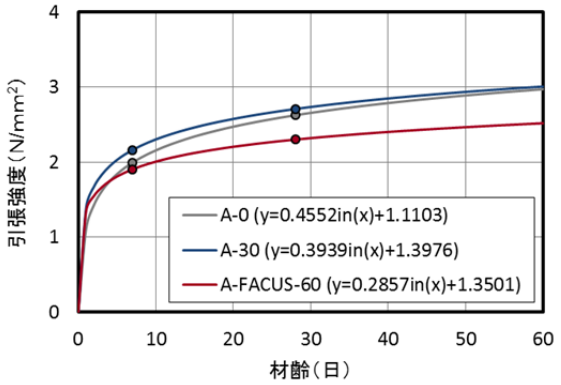
図－8 及び**図－9** に圧縮強度及び引張強度試験の結果を示す。これらのグラフより，特にタイプ A シリーズにおいては CUS 置換率が高くなるとともに圧縮強度は低下する傾向が見られた。しかしながら，FACUS の配合においては材齢 91 日における強度はポゾラン反応による長期強度増進により基準とした配合のコンクリートにおける材齢 28 日強度よりも大きいことが認められる。また，材齢 7，28 日に測定した引張強度の結果を見てみると，A-FACUS-60 の供試体における引張強度は，特に材齢 28



図－7　乾燥収縮ひずみ

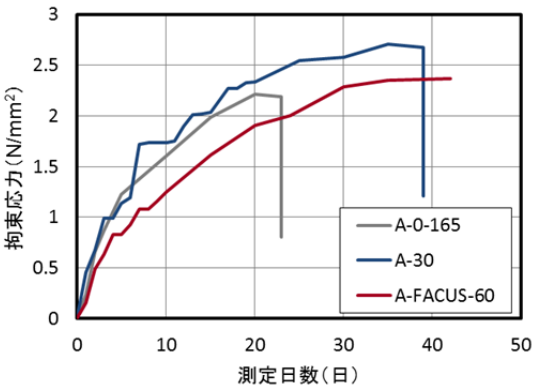


図－8　圧縮強度



図－9　引張強度

日において他のケースに比べてわずかに小さくなるようであった。銅スラグ細骨材を高置換率で使用したコンクリートにおいては 3.2 節で検討した通り，CUS 置換率が高くなるほどブリーディング量が多いためブリーディング水が粗骨材下部に留まることで脆弱な領域を形成し付着に影響を及ぼすと推察される。しかしながら，CUS 置換率が 60%の配合でもフライアッシュを混和したコンクリートにおいては，A-30 の配合におけるブリーディング量と同程度であったことから引張強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。また，得られた結果を用いて，後述するひび割れ抵抗性試験においてひび割れの発生が確認された経過日数における引張強度を対数近似により推定した。また，各供試体において測定された静弾性係数



図－10　拘束応力

は，A-0-165 及び A-30 は 31 kN/mm^2，また A-FACUS-60 では 33 kN/mm^2 であり，銅スラグ細骨材の置換率が高いほど大きくなることが確認されている。

図－10 に拘束供試体を用いて行ったひび割れ抵抗性試験の結果を示す。拘束応力は鉄筋に貼付けしたひずみゲージにより計測した鉄筋ひずみより鉄筋とコンクリートの断面の釣り合いに基づき算出した。この図より，鉄筋の拘束応力は，時間の経過とともに大きくなることが認められる。特に，A-0-165 及び A-30 における応力度は同程度となっていることから，これらの供試体において発生した乾燥収縮ひずみは同程度であると推察される。この結果は，3.1 節における 20℃環境の検討結果と合致している。また，A-FACUS-60 の供試体に埋設した鉄筋に発生した応力度は，15%程度小さい値となっている。これは，コンタクトゲージにより測定された供試体表面の自由収縮の測定値で見られた差と同様の結果となっており，コンクリートの乾燥収縮の低減により拘束応力が緩和されたためと考えられる。また，それぞれの供試体におけるひび割れの発生日数は，乾燥開始から A-0-165 は 23 日，A-30 は 39 日，そして A-FACUS-60 においては試験期間の範囲内においてひび割れの発生は確認されていない。各供試体におけるひび割れ発生時の拘束応力を引張強度の推定値で除したひび割れ抵抗性指数は，既往の研究 [6]の検討結果でひび割れが発生するとされている 0.7 より大きな値であることを確認した。なお，円柱供試体用いた引張強度試験により推定された初期強度発現は材齢 7 日以降を気中養生とした拘束供試体と異なることから，ひび割れ抵抗性指数はより高い値を示すと考えられる。また A-FACUS-60 の供試体においてはひび割れの発生が確認されていないことから乾燥収縮ひずみの低減による応力緩和の効果によりひび割れ抵抗性が向上したものと考えられる。

4. 結論

本研究は，銅スラグ細骨材の置換率及びフライアッシュの混和がコンクリートのフレッシュ性状，乾燥収縮ひずみ及び乾燥収縮によるひび割れ抵抗性に及ぼす影響を検討した。ステップ 1 における温度 20℃の曝露環境下においてダイヤルゲージ法により測定された乾燥収縮ひずみの結果より，骨材種類や組み合わせによって銅スラグ細骨材置換率が 30%以下の配合においては必ずしも収縮低減効果は得られないことがわかった。本研究では細骨材を銅スラグ細骨材に 60%置換することで，乾燥収縮ひずみの低減効果は顕著となることがわかった。また，細骨材を銅スラグ細骨材に 60%置換したコンクリートであっても，フライアッシュを混和することで，空気量，スランプ及びブリーディング量を含めたフレッシュ性状を改善することができ，さらに圧縮強度等の力学特性に及ぼす影響は小さいことがわかった。さらに，本研究により FACUS の乾燥収縮ひずみ低減効果により，初期強度発現を考慮したひび割れ抵抗性が改善されることが示された。

謝辞

本研究は，土木学会非鉄スラグ骨材コンクリート研究小委員会，新居浜市役所，住友金属鉱山，住友共同電力及びゼロテクノ四国から助成を頂いて実施したものである。ここに，深い謝意を表します。

参考文献

1) 土木学会：銅スラグ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，No.92，pp.71-76，1998
2) 川端雄一郎，岩波光保，加藤絵万，審良善和：銅スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの施工性と品質変化に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1541-1546，2010
3) 福上大貴，水越睦視，銅スラグ細骨材を大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，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1774-1779，2014
4) 井上裕貴，橋本親典，渡辺健，石丸啓輔：骨材の吸水率がコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.473-478，2011
5) 委員会報告　混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善委員会，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.23-34，2010
6) 金子宝似，今本啓一，清原地鶴，大和田紗織：高炉スラグを用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.520-525，2014