

論文 スラグ骨材を使用した高密度コンクリートのスラグ混合率の影響に関する実験

五味 信治^{*1}・梶田 佳寛^{*2}・井戸 康浩^{*3}・村上 拓也^{*4}

要旨：浮力の影響を受けるコンクリートには、質量の重い高密度コンクリートが効果的である。一方、枯渇化する骨材資源の節約と副産資源の有効活用から天然骨材の代替品としてスラグ骨材の実用化が進みつつある。環境負荷抑制と高密度化対策として、産業副産物である銅スラグ細骨材と電気炉酸化スラグ粗骨材を使用した高密度コンクリートを検討した。そのコンクリート単位容積質量は 2.6~3.0t/m³となる。実用的な配合として、スラグ粗骨材の混合率を 100%とし、配合計画への影響要因と銅スラグ細骨材の混合率がコンクリートの性状に及ぼす影響について実験的に検討した。

キーワード：高密度コンクリート, 銅スラグ, 電気炉酸化スラグ

1. はじめに

製鐵および非鉄金属の精錬工程等で発生するスラグは JIS A 5011「コンクリート用スラグ骨材」に 4 種類のスラグ骨材の品質が規定されている。これらの骨材は、グリーン購入法の特定調達品目の指定を受けている。4 種類のスラグ骨材の中で、銅スラグ細骨材(以下、CUS と称す)と電気炉酸化スラグ(以下、このスラグ粗骨材を EFG と称す)は、鉄分を含有して密度が大きく、絶乾密度で 3.0~4.0g/cm³程度で、吸水率は小さいという特徴がある。いずれも JIS 化から間がないのでコンクリート用骨材としての実績はわずかである。このような骨材は密度の大きさを生かして、水中で浮力の影響を受けるコンクリート、放射線の遮蔽コンクリート等に用いると効果的である。

これらの骨材を使用したコンクリート製造上の実用的な見地からは、骨材への混合率が 100%であることが望ましい。しかし、この場合のコンクリートの性状に及ぼす影響にはブリーディングを始めとする特異な現象があり、一般的には混合率 50%程度というのが現状で、しかも実

績があまりないことからほとんど採用されていない。ブリーディング現象等については既に前報¹⁾で報告済みであるので、本研究は、コンクリート配合計画におけるスラグ粗骨材の混合率が 100%とした場合、コンクリートの性状に及ぼす影響要因とスラグ細骨材の混合率の影響について実験的に検討したものである。

2. 実験

実験の要因と水準を表-1 に、使用した材料を表-2 に、配合例を表-3 に示す。

2.1 実験の概要

高密度コンクリートの実用化に関して、2 種類の実験を行った。実験ケース 1 では、配合への影

表-1 実験要因と水準

実験ケース 要 因	1	2
	水 準	
水セメント比	40, 50, 60	50
スランブ(cm)	8,12*,18*	8
CUS混合率 (%)	0*, 30	0,30,50,70,100
EFG混合率 (%)	0*, 100	100

注) *については水セメント比50%のみ

*1 りんかい日産建設(株) 技術研究所 工博 (正会員)

*2 宇都宮大学 工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学 大学院工学研究科

*4 宇都宮大学 工学部建設学科

表-2 使用材料

材料名	種類	品質・特性
セメント	高炉セメントB種	密度3.05g/cm ³ , 比表面積3710cm ² /g
細骨材	CUS 川砂(細目)	表乾密度3.54g/cm ³ , 吸水率0.34%, 粗粒率2.48
	川砂(粗目)	表乾密度2.48g/cm ³ , 吸水率4.12%, 粗粒率1.80(金津町蓮ヶ浦産) 表乾密度2.61g/cm ³ , 吸水率2.29%, 粗粒率2.86(九頭竜川下流域産)
粗骨材	EFG 川砂利	表乾密度3.59g/cm ³ , 吸水率1.38%, 粗粒率7.27, 最大寸法40mm 表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率1.77%, 粗粒率7.33, 最大寸法40mm(九頭竜川下流域)
混和材	炭酸カルシウム	密度2.72 g/cm ³ , 比表面積3160cm ² /g
混和剤	P(高性能AE減水剤)	ポリカルボン酸系

表-3 配合例

実験 ケース	配合 No.	水セメ ント比 (%)	スラン プ (cm)	s/a (%)	CUS混 合率 (%)	EFG混 合率 (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤 (C×%)	空気量 (%)	
							水	セメント	炭酸カ ルシウム	細骨材		粗骨材**			
										CUS	川砂*	EFG			川砂利
1	1	50	8	47	0	0	163	326	0	0	826	0	958	0.60	5.0
	2	40		45	30	100	163	408	50	306	518	1256	0	0.65	
	3	50		12			163	326	50	333	563	1262	0	0.60	
	4		170				340	50	327	553	1240	0	0.60		
	5		181	362			50	318	538	1205	0	0.60			
	6		60	8			49	163	272	50	356	603	1247	0	
2	7	50	8	47			0	100	163	326	50	0	805	1262	
	8				30	163	333		563			1262	0	0.60	
	9				50	163	555		402			1262	0	0.52	
	10				70	163	777		242			1262	0	0.45	
	11				100	163	75		1110			0	1262	0	

注1) 川砂*については、細目と粗目の比率は3:7で混合している。

注2) 粗骨材**については、40mmと25mmの比率はEFG 3:7、川砂利4:6で混合している。

響要因について、実験ケース2では、混合率がコンクリートの性状に及ぼす影響について実験を行った。配合への影響要因としては、フレッシュコンクリートのコンシステンシーに影響を及ぼす要因として、スランプと単位水量を検討し、硬化コンクリートに影響を及ぼす要因として、セメント水比およびスランプと圧縮強度、静弾性係数および割裂引張強度への影響等について調査した。混合率がコンクリートの性状に及ぼす影響については、粗骨材へのEFGの混合率を100%とし、CUSの混合率を変化させた場合の影響について検討を行った。硬化コンクリートに影響を及ぼす要因として、混合率と圧縮強度、静弾性係数、割裂引張強度、乾燥収縮、自己収縮および質量変化への影響等について調査した。

2.2 使用材料および配合条件

高密度コンクリートの材料は、環境への配慮からセメントは高炉セメントB種を用い、細骨

材はCUS(佐賀関産)と川砂(九頭竜川産)、粗骨材はEFG(名古屋産)と川砂利(九頭竜川産)で最大寸法は共に40mmである。単位容積質量は、EFGが2060kg/m³、川砂利が1700kg/m³、実積率は57.7%と64.8%であった。混和材として炭酸カルシウム、混和剤として高性能AE減水剤を使用した。

コンクリートの配合条件は、当面消波ブロック等に使用することを考慮し、その設計規準を基に設定した。目標圧縮強度は28日材齢で26N/mm²以上、単位容積質量を2600kg/m³以上、スランプを8cm、空気量を5%とし、CUSの混合率を0%~100%、EFGの混合率を100%、水セメント比は40、50、60%の3水準とした。

2.3 実験方法

実験ケース1では目標スランプを8cm、空気量を5%、水セメント比を50%として天然骨材でベース配合を決定した。次に、その単位水量を基準にして目標単位容積質量を2600kg/m³以

上になるように配合し、混合率を CUS は 30%, EFG は 100%とした。目標スランブは 8, 12, 18cm と変化させ、空気量 5%, 水セメント比も 40, 50, 60%と変化させた。実験ケース 2 では目標スランブを 8cm, 空気量 5%, 水セメント比は 50%, 細骨材率 47%とし、EFG の混合率を 100%で固定して CUS の混合率を 0, 30, 50, 70, 100%と変化させて実験した。

2.4 試験項目および試験方法

表-4 に試験項目と試験方法を示す。スランブと空気量についてはフレッシュ時に試験を行った。圧縮強度と静弾性係数は 28 日間水中養生した後、供試体質量により単位容積質量を求め、圧縮強度試験、割裂引張強度試験および静弾性係数試験に供した。

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	配合	試験方法
スランブ	全配合	JISA1101
空気量	全配合	JISA1116,1128
圧縮強度	全配合	JISA1108
引張強度	全配合	JISA1113
静弾性係数	全配合	JISA1149
乾燥収縮	No.1,7-11	JISA1129-1
自己収縮	No.1,7-11	JISA1129-1
単位容積質量	全配合	JISA1104

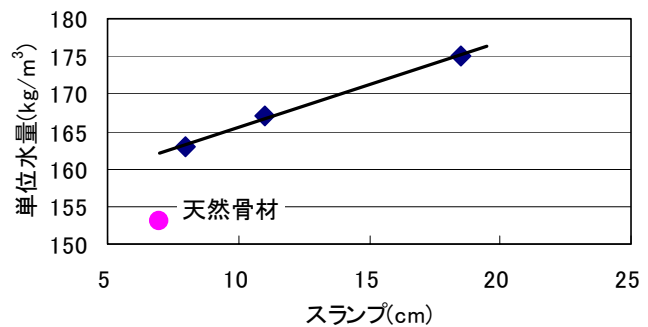


図-1 スランブと単位水量の関係 (W/C=50%)

3. 実験ケース 1 の結果と考察

3.1 スランブと単位水量の関係

同一水セメント比におけるスランブと単位水量の関係を図-1 に示す。スランブと単位水量の関係については、土木学会コンクリート標準示方書によれば、通常コンクリートの場合、単位水量が 150~175 kg/m³ 程度の時、単位水量が 1.2 %増すとスランブが 1cm 増加する直線の関係がある。今回の配合では、同様の関係が確認できたのでスランブと単位水量の関係は通常コンクリートと同様に扱ってよいと考えられる。

3.2 圧縮強度とスランブおよびセメント水比の関係

水セメント比 50%における各材齢の圧縮強度とスランブの関係を図-2 に示す。全ての配合において天然骨材の配合を上回る結果となっている。材齢 7~28 日までの強度増加に比較して、28~56 日までの強度増進が少なく、また、スランブが大きい方が強度は大きい傾向がある。この理由としては、スランブが大きいほど単位セメント量が増加するためと考えられる。スラグ骨材を使用したコンクリートの強度は、天然骨材を使用したコンクリートよりも大きいことは既に報告したが¹⁾ 今回の結果も同様の傾向を示

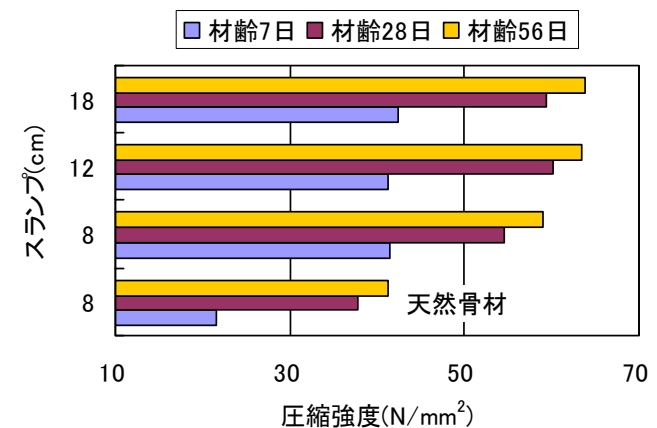


図-2 圧縮強度とスランブの関係

している。この要因は、骨材にスラグを使用したため天然の砂利よりも骨材自体の強度が大きく、骨材表面の凹凸が多いため表面積が大きくなりモルタルとの付着力が増加したためと考えられる。目標強度は 26N/mm² であるので強度条件は満たしている。

次に、セメント水比を 1.67, 2.00, 2.50 と変化させた場合の各材齢における圧縮強度への影響について図-3 に示す。セメント水比が大きくな

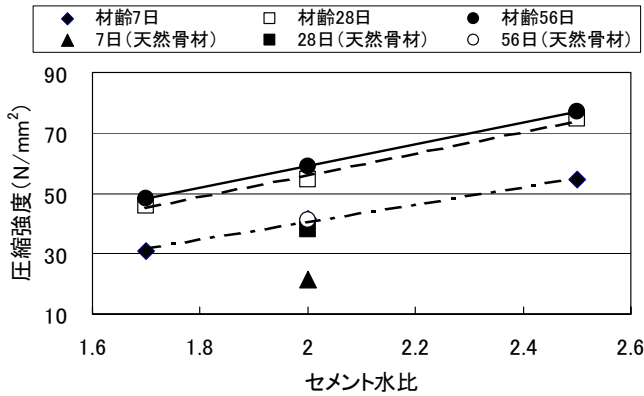


図-3 圧縮強度とセメント水比の関係

るほど圧縮強度は増加する傾向にあり，その関係は一般のコンクリートと同様に直線回帰式で示される。7日，28日および56日強度の増加勾配はほぼ同様で，天然骨材を使用した配合よりも高い強度を示している。この要因は，粗骨材にEFGを使用したため天然の砂利よりもモルタルとの付着力が増加したためと考えられる。

3.3 割裂引張強度への影響

圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-4に示す。コンクリートの引張強度は圧縮強度が40N/mm²程度までは，その1/10～1/13といわれている。代表的なものとして，土木学会コンクリート標準仕様書の設計値を併示した。友澤ら²⁾の調査では，圧縮強度が100N/mm²程度の高強度コンクリートになると，その比率は1/20に近づくといわれている。実験結果では，割裂引張強度は仕様書の設計値よりもわずかに高い値を示しているがその差は僅かであり，圧縮強度と割裂引張強度の関係については，普通コンクリートと同様に扱ってよいと考えられる。

3.4 静弾性係数への影響

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-5に示す。静弾性係数は割線弾性係数とすると，圧縮強度の平方根にほぼ比例し，比重が大きいほど大きくなる。単位容積質量はスラグ骨材の密度が大きいため使用量が多くなるほど質量は大きくなる。図にはNew RC式³⁾から得られた結果を併示した。New RC式を式(1)に示す。この式は，使用する骨材や混和材等で係数が異なる。スラグ骨材につい

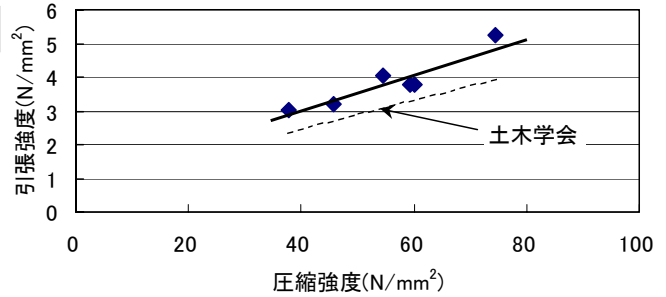


図-4 圧縮強度と割裂引張強度の関係

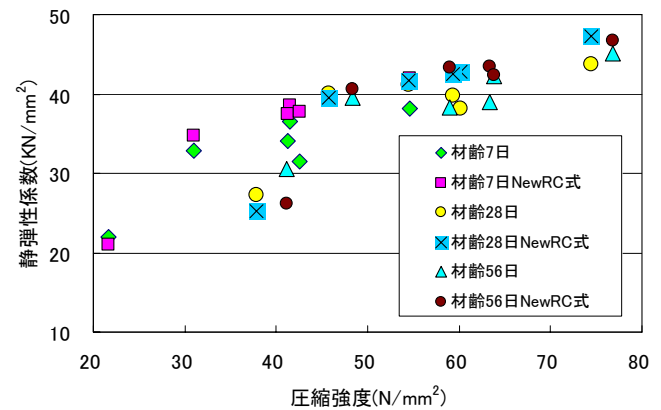


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

での資料が少ないため粗骨材の種類により定まる補正係数 k_1 を 1.0(その他の粗骨材)，混和材の種類により定まる補正係数 k_2 を 0.95(高炉スラグ微粉末)として計算した。

$$E = k_1 \times k_2 \times 33.5 \times \left(\frac{r}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^3 \quad (1)$$

ここに，

E ：静弾性係数(KN/mm²)

γ ：単位容積質量(t/m³)

σ_B ：圧縮強度(N/mm²)

k_1 ：粗骨材の種類により定まる補正係数

k_2 ：混和材の種類により定まる補正係数

スラグ骨材を使用すると密度が増加し圧縮強度は高くなる。その影響を考慮したNew RC式で実験結果は表現でき，設計に使用が可能であると考えられる。

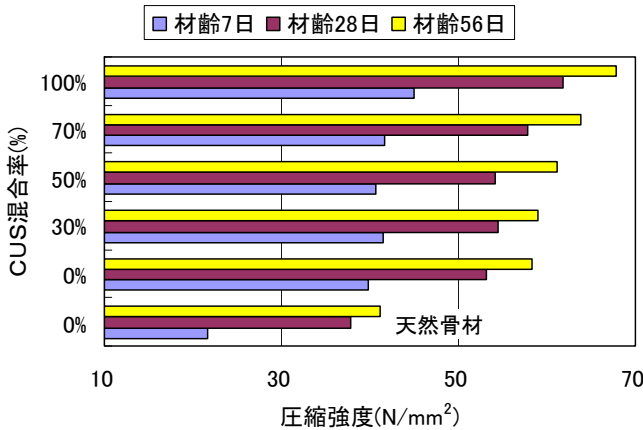


図-6 圧縮強度と CUS 混合率の関係

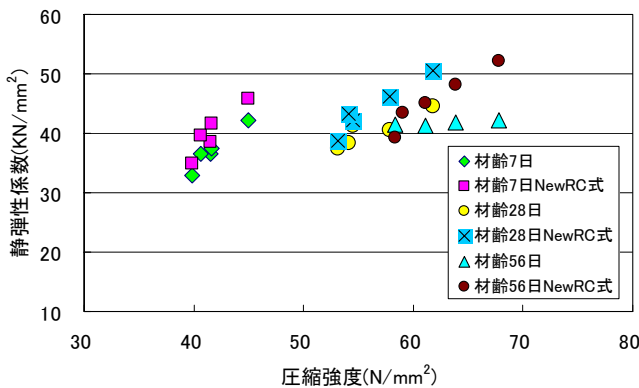


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

4. 実験ケース 2 の結果と考察

4.1 圧縮強度と CUS 混合率の関係

水セメント比 50%における各材齢の圧縮強度と CUS 混合率の関係を図-6 に示す。全ての配合において天然骨材の配合を上回る結果となり、材齢 7~28 日までの強度増加に比較して、28~56 日までの強度増進が少なく、また、CUS 混合率が大きい方が強度は大きい傾向がある。

4.2 圧縮強度と割裂引張強度の関係

圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-7 に示し、土木学会コンクリート標準示方書の設計値を併示した。割裂引張強度は CUS 混合率の増加に伴い、示方書の設計値よりも 1.5 倍となり大きくなる傾向を示した。この原因は CUS 混合率増加に伴い、骨材の凹凸による強度増進効果が考えられるが、今後の課題としたい。

4.3 圧縮強度と静弾性係数の関係

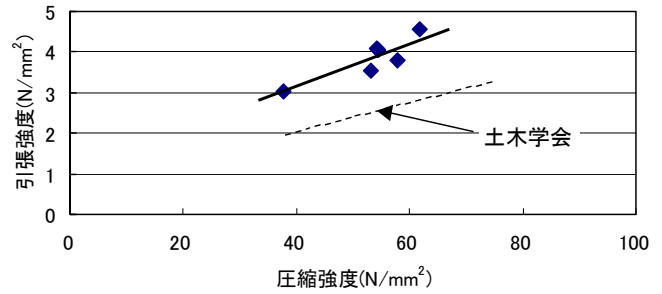


図-7 圧縮強度と割裂引張強度の関係

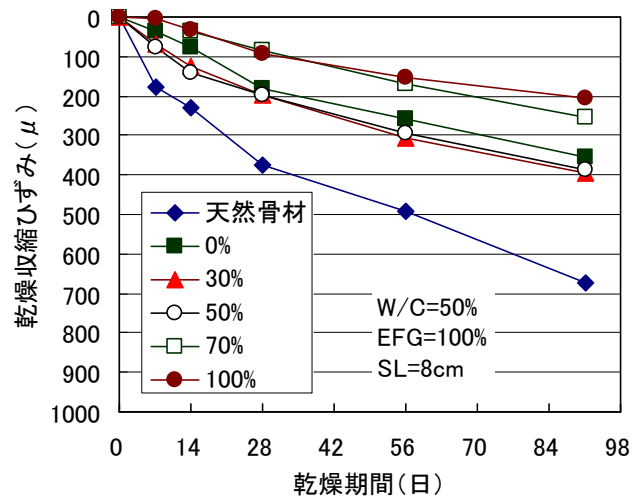


図-9 乾燥収縮と CUS 混合率の関係

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-8 に示す。図には New RC 式から得られた結果を併示した。計算は 3.4 と同様な方法で行っている。実験値は、CUS 混合率の増加に伴い密度が増加し圧縮強度は大きくなるが、静弾性係数は圧縮強度の増加に比例するほど大きくはならない。実験結果は、New RC 式で表現できると考えられる。

4.4 乾燥収縮と自己収縮への影響

乾燥収縮と自己収縮についての実験結果を図-9~12 に示す。EFG の混合率を 100% で固定して CUS の混合率を 0, 30, 50, 70, 100% と変化させた場合、乾燥収縮ひずみは混合率 50% までは天然骨材と比較すると 1/2 程度になり、混合率を増加させるとさらに小さくなる傾向があり 100% で 1/3 程度になる。この原因は、天然骨材より EFG の弾性係数が大きく収縮に抵抗することやブリーディング⁴⁾等が考えられる。自己収縮ひずみについては乾燥収縮ひずみの 1/10 程度の数値であ

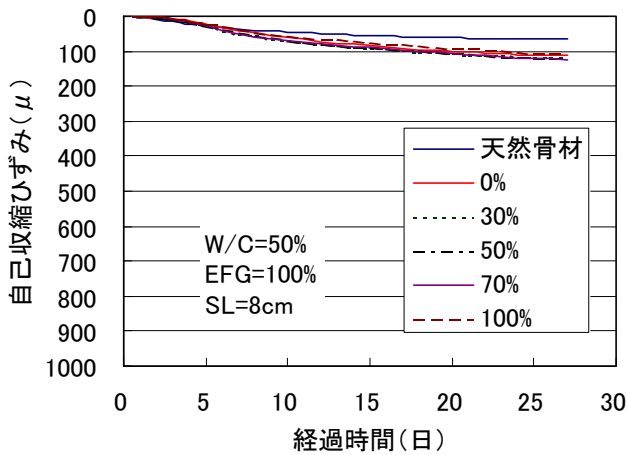


図-10 自己収縮ひずみと CUS 混合率の関係

るため普通コンクリートと同様の扱いでよいと考えられる。CUS の混合率が増加すると、質量減少率は小さくなり、乾燥収縮ひずみは傾きが大きくなる傾向がある。この原因はスラグを使用すると単位容積質量が大きくなり、質量変化の割合が小さくなったためと考えられる。

5. まとめ

スラグ骨材を使用した高密度コンクリートを実用化するに当たり、配合計画への影響要因とスラグ混合率がコンクリートの性状に及ぼす影響について本実験の範囲内では以下の知見を得た。

- (1) 骨材混合率 CUS30%, EFG 100%の場合、スランプと単位水量、圧縮強度とセメント水比、割裂引張強度、静弾性係数については普通コンクリートの性状と同様に考えてよい。
- (2) 骨材混合率 EFG 100%と固定し、CUS の混合率を変化させた場合、混合率の増加に伴って圧縮強度、割裂引張強度は増加するが静弾性係数については増加が見られなかった。
- (3) 静弾性係数は New RC 式で実験結果を表現でき、設計に使用が可能であると考えられる。
- (4) CUS 混合率が増加するほど質量減少率と乾燥収縮ひずみは小さくなり、自己収縮ひずみについては大きな差はなかった。

参考文献

- 1) 五味信治, 榊田佳寛: スラグ骨材を使用した

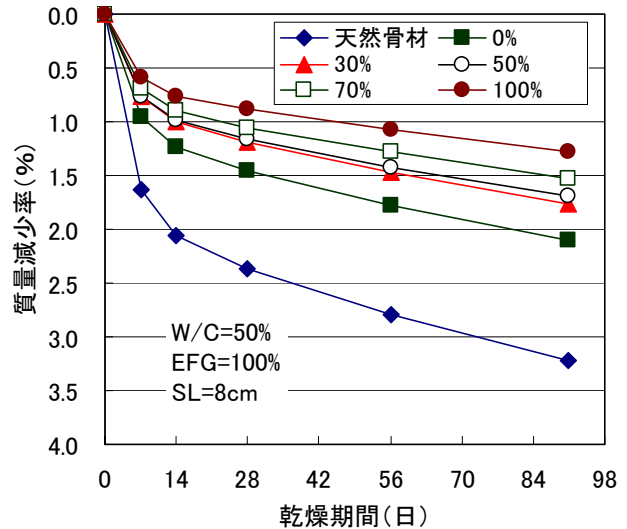


図-11 質量減少率と CUS 混合率の関係

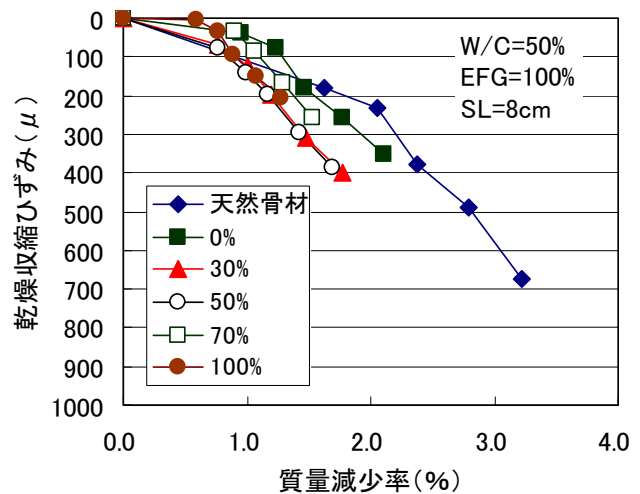


図-12 乾燥収縮ひずみと CUS 混合率の関係

高密度コンクリートの基礎的実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1417-1422, 2005.6

- 2) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, No.472, pp.11-16, 1995.6
- 3) (財) 国土開発技術研究センター: 平成4年度高強度コンクリート分科会報告書, pp.4-25-1~4-25-14, 1993.3
- 4) 井戸康浩, 五味信治他: スラグ骨材を使用した高密度コンクリートの研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.961-962, 2005.9