

# 論文 スラグ骨材を使用した高密度コンクリートの調合と諸性質に関する実験

五味 信治\*<sup>1</sup>・榊田 佳寛\*<sup>2</sup>・青沼 隆嗣\*<sup>3</sup>・佐藤 佳広\*<sup>4</sup>

**要旨**：スラグ骨材を使用した高密度コンクリートを施工したが、スラグ骨材の特異な性質から性能や品質等に課題が生じ、その解決のため実験を行った。骨材は粗骨材・細骨材共に 100%スラグで置換し、施工可能な性能を持つコンクリートの諸性質を調査するため、フライアッシュ混入率とセメント量および単位水量を変化させ、スランブ・空気量・単位容積質量・ブリーディング・強度・骨材分布および乾燥収縮について検討した。その結果、高密度コンクリートの成立には単位水量が 180kg/m<sup>3</sup> 未満であることが必要で、スランブは結合材量の影響を受けて状態が変化し、引張強度と乾燥収縮ひずみは小さいことが分かった。

**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、フライアッシュ、スランブ

## 1. はじめに

天然骨材の枯渇から、代替材料としてスラグ骨材の混合使用が進んでいる。一方、港湾構造物や高層建築物の基礎等には、質量の重い高密度コンクリートが要求される場合がある。このような背景から、天然骨材不足と高密度化対策として、銅スラグ細骨材(以下、CUS と称す)と電気炉酸化スラグ粗骨材(以下、EFG と称す)を使用した高密度コンクリートを検討してきた。ここでは、スラグ骨材の特異な性質を抑制し、施工可能な性能を持つコンクリートにするため、フライアッシュ(以下、FA と称す)を混入した場合のフレッシュ時と硬化時の諸性質について検討した。

CUS は鉱石を溶解して銅を製錬する際に、鉱石の岩石成分と溶剤としての石灰石やけい石とが結合したもので、銅 1 t 当り約 1.8 t のスラグが発生し、国内で約 200 万 t が製造されている。CUS 細骨材は、コンクリートに使用できる細骨材として、1997 年 8 月に JISA5011-3 に規格化されている。EFG は、回収されたスクラップを電気炉で精錬し、鉄筋、形鋼等の素材としての粗鋼を製造する際に副産されるもので、粗鋼 1 t 当り約 125kg が発生し、約 350 万 t が製造されている。EFG はコンクリートに使用できる骨材として、2003 年 6 月に JISA5011-4 に規格化されている。これらスラグの品質は、多量の鉄分を含有して密度が大きく、吸水率は小さいという特徴がある。

両スラグに関しては、密度が大きいという特徴を活かし、港湾用のコンクリートブロックや砂防ダム、および遮蔽コンクリートなどへの用途が期待されており、コンクリートの性状に及ぼす影響が検討されてきた<sup>1)</sup>。

コンクリート製造上の実用的な見地からは、スラグ骨材の置換率が 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、躯体工事において置換率 50%程度まで使用例<sup>2) 3)</sup>もあるが実績があまりないことから実際の工事にはほとんど採用されていない。

本研究は、コンクリート骨材におけるスラグ骨材の置換率を 100%とした場合、FA 混入量とセメント量および単位水量を変化させ、スランブ・空気量・単位容積質量・ブリーディング・強度・骨材分布および乾燥収縮等を用いて施工可能な性能を持つコンクリートのフレッシュ時と硬化時の諸性質について検討した。高密度コンクリートの実用化について、スラグ骨材の置換率やブリーディング等がコンクリートの性状に及ぼす影響については前報<sup>4)</sup>で報告している。

## 2. 実験

### 2.1 実験の概要

スラグ骨材の置換率を 100%とした高密度コンクリートは、ブリーディング現象や砂・砕石を用いた水セメン

表-1 実験の要因と水準

要因	実験ケース	Sシリーズ	Rシリーズ
		水準	
単位セメント量(kg/m <sup>3</sup> )		270,320,370	
FA(kg/m <sup>3</sup> )		100,150,200	
単位水量(kg/m <sup>3</sup> )		160,170,180	
目標スランブ(cm)		8, 15, 21	
AE減水剤(C×%) <sup>*</sup>		0.5,0.9,1.5	
粗骨材最大寸法(mm)		20(EFG)	20(天然)

注)記号\*については、単位セメント量320(kg/m<sup>3</sup>)、FA150(kg/m<sup>3</sup>)、単位水量170(kg/m<sup>3</sup>)の場合。

\*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 大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)

\*3 宇都宮大学 大学院 工学研究科生産情報工学専攻 工修

\*4 宇都宮大学 大学院 工学研究科博士前期課程地球環境デザイン学専攻

ト比が同じ普通コンクリートの1.4倍程度高強度になるなどの特異な性質を持つ。ブリーディング等の抑制やワーカビリティを確保するためFAを混入し、その時の諸

性質を検討した。

実験の要因と水準については、FA、セメント、単位水量、目標スランブおよびAE減水剤の添加率を3水準と

表-2 使用材料

材料名	種類	品質・特性
セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.05g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3730cm <sup>2</sup> /g
フライアッシュ	II種	密度2.29g/cm <sup>3</sup>
水	水道水	
細骨材	CUS	表乾密度3.53, 吸水率0.29%, 粗粒率3.70
	川砂(細目)	表乾密度2.59, 吸水率2.65%, 粗粒率2.46(荒川水系産)
	川砂(粗目)	表乾密度2.60, 吸水率2.00%, 粗粒率2.63(入間川水系産)
粗骨材	EFG	表乾密度3.54, 吸水率1.95%, 粗粒率2.74, 最大寸法20mm
	硬質砂岩碎石	表乾密度2.64, 吸水率1.03%, 粗粒率2.73, 最大寸法20mm(飯能産)
混和剤	AE剤	AE剤
	AE減水剤	リグニンスルホン酸系多機能型

注) 天然細骨材は細目と粗目を容積比で4:6で混合した。

表-3 調合

実験	記号*	水セメント比 (%)	水粉体比 (%)	目標スランブ (cm)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						混和剤 (C%)	空気量 (%)											
						水	セメント	FA	細骨材		粗骨材													
									CUS	細目**	粗目**			EFG	砕石									
S	S270-100-160	59	43	8	46	160	270	100	1061	—	—	1278	—	0.90										
	S270-150-160		38		150			984																
	S270-200-160		34		200			907																
	S320-100-160	38	100		1005																			
	S320-150-160	34	150		928																			
	S320-200-160	31	200		851																			
	S370-100-160	43	34	15	43	170	320	100	949	—	—	1278	—	0.90										
	S370-150-160		31		150			872																
	S370-200-160		28		200			795																
	S270-100-170	46	100		1026																			
	S270-150-170	40	150		949																			
	S270-200-170	36	200		872																			
	S320-100-170	53	40	21	43	180	320	100	970	—	—	1278	—	0.90										
	S320-150-170		36		150			893																
	S320-200-170		33		200			816																
	S370-100-170	36	100		914																			
	S370-150-170	33	150		837																			
	S370-200-170	30	200		760																			
	S270-100-180	67	49	21	44	180	270	100	991	—	—	1278	—	0.90										
	S270-150-180		43		150			914																
S270-200-180	38		200		836																			
S320-100-180	43	100	935																					
S320-150-180	38	150	857																					
S320-200-180	35	200	780																					
S370-100-180	49	38	21	41	180	370	100	879	—	—	1278	—	0.90											
S370-150-180		35		150			801																	
S370-200-180		32		200			724																	
R270-150-160	59	38		8			44	160						270	—	—	—	—	—	—	—			
R320-150-160	50	34					42															320	274	430
R370-150-160	43	31					41															370	259	405
R270-150-170	63	40	15	43	170	270	—	—	—	—	—	—	—											
R320-150-170	53	36		41										320	264	414								
R370-150-170	46	33		40										370	249	390								
R270-150-180	67	43	21	42	180	270	—	—	—	—	—	—	—											
R320-150-180	56	38		40										320	233	366								
R370-150-180	49	35		39										370	255	399								
R320-150-180	56	38	21	40	180	320	—	—	—	—	—	—	—											
R370-150-180	49	35		39										370	239	375								

注1) 記号\*については、S370-100-160において、先頭からSはスラグ、Rは普通コンクリート、セメント量、FAおよび単位水量を表している。

注2) 細目\*\*と粗目\*\*の比率は4:6で混合している。

した。また比較のために砂、砕石を用いた普通コンクリートも FA が  $150\text{kg/m}^3$  の場合について実験した。高密度コンクリートの材料は、セメントは普通ポルトランドセメントを用い、細骨材は CUS (佐賀県産) と川砂、粗骨材は EFG (名古屋産) と砕石である。混和剤には AE 減水剤を使用した。単位容積質量は、EFG が  $2,110\text{kg/m}^3$ 、砕石が  $1,536\text{kg/m}^3$ 、実積率は 60.7% と 60.9% であった。実験の要因と水準を表-1 に、使用した材料を表-2 に、調合を表-3 に示す。

また、硬化コンクリートについて、供試体は  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱状で、3 体ずつとした。乾燥収縮は  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  の供試体を 3 体とし、 $20^\circ\text{C}$ 、湿度 60% の条件で養生室にて保管する。コンクリート中の骨材の分布は内径 20cm、高さ 50cm のプラスチック管にコンクリートを打込み、硬化後に 3、10、20、30、40、47cm の高さで切断し、それぞれの骨材面積率を測定し、粗骨材量とした。

## 2.2 実験方法と試験項目および試験方法

コンクリートの練混ぜは、温度  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  の室内で、容量 50 l のパン型強制練ミキサーを用いて行い、1 回の練り混ぜ量は 40 l とした。練り混ぜ手順は、細骨材 1/2・セメント・細骨材 1/2 の順に投入し、空練りを 10 秒した後、水と混和剤を入れて 90 秒練混ぜて先練りし、その後、粗骨材を投入してさらに 90 秒練混ぜた。練混ぜ後排出し、各種試験に供した。表-4 に試験項目と試験方法を示す。EFG は除冷スラグで多孔質なため空気量を測定する場合には骨材修正係数を求めて補正している。実験で

表-4 試験項目と試験方法

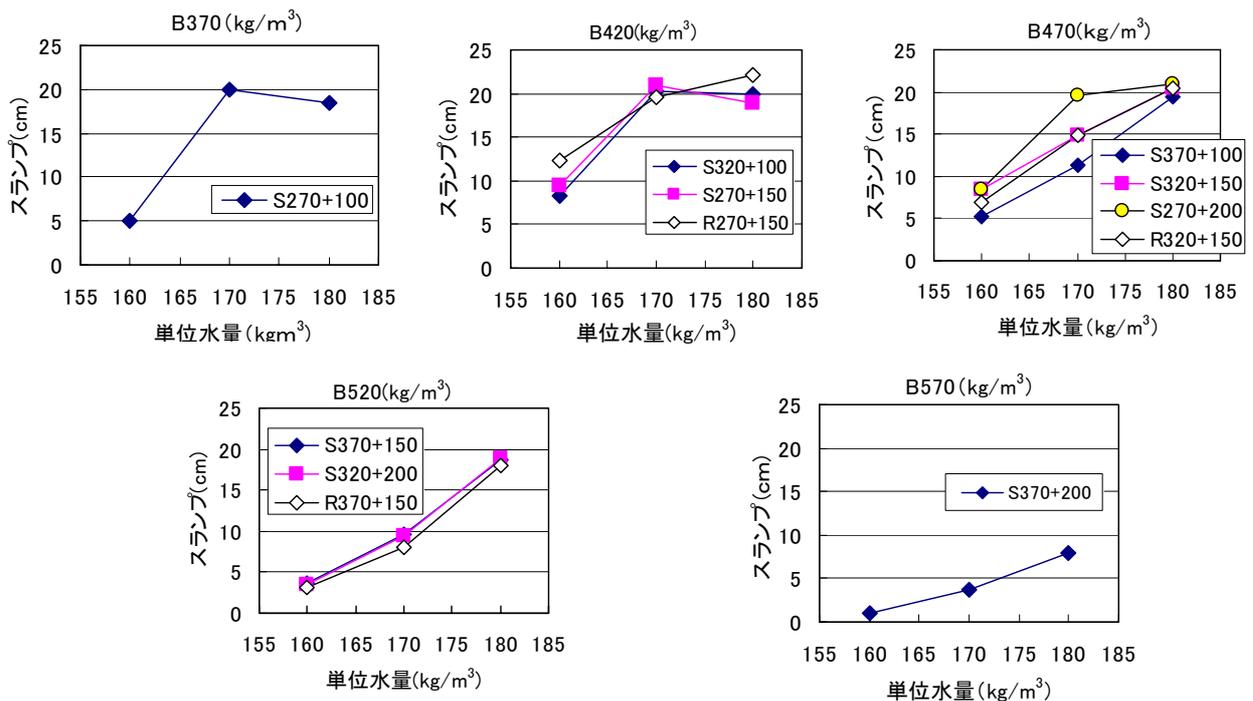
試験項目	試験方法	試験条件
スランブ	JIS A 1101	
空気量	JIS A 1128	圧力法
単位容積質量	JIS A 1104	
ブリーディング	JIS A 1123	
圧縮強度	JIS A 1108	
引張強度	JIS A 1113	
乾燥収縮	JISA1129-1	
骨材分離状況	骨材面積率	画像処理

の骨材修正係数は、1.5% であった。

## 3. フレッシュコンクリートの実験結果と考察

### 3.1 FA 混入量および単位水量とスランブの関係

FA 混入量および単位水量とスランブの関係を図-1 に示す。全体として、単位水量が多くなるとスランブが大きくなり、結合材量(セメント量+FA、以下、B と称す)が多いほどスランブが小さくなる傾向にある。これらの現象は B の量が影響していると考えられる。B が多い時、B520 はワーカビリティが良好でスランブが大きく良い状態にあるが、B570 では粘性が増加してスランブが小さくなっている。B が中程度では、B470 は骨材のかみ合いと粘性の影響による流動性とが不安定で、スランブが大きいものと小さいものがある。B470 では単位水量が  $170\text{kg/m}^3$  の場合、FA が多い方がスランブは大きく、FA の流動性への影響が認められる。スランブが小さいものは振動を与えると崩壊する。B が少ない時、B420 と B370 では、骨材のかみ合いが卓越して流動性が失われスラン



S はスラグ, R は普通コンクリート, 数字は左からセメント量, FA 量を表す。

図-1 FA 混入量および単位水量とスランブの関係

プは単位水量と比例関係になっていない。

単位水量が  $20\text{kg/m}^3$  増加したときのスランプの増加は、およそ  $10\sim 15\text{cm}$  であり、普通コンクリートの場合、単位水量が  $1.2\%$  増加するとスランプが  $1\text{cm}$  増加することに比べて、やや大きい傾向にある。

### 3.2 空気量

同一空気量とするための AE 剤の添加率を単位水量との関係で示したものが図-2 である。この図からスラグ骨材、天然骨材双方とも FA が多いほど AE 剤は吸着されるため添加率は増加している。

次に図-3 に単位容積質量から求めた空気量とエアメータによる空気量の実測値の関係を示す。スラグ骨材は多孔質で、骨材の内部にも空気を保持しており、骨材修正係数として  $1.5\%$  の補正をすると両者はほぼ一致した。

### 3.3 単位容積質量

フレッシュコンクリートの単位容積質量について、図-4 に調合から算出した計算値と実測値との関係を示す。実測値は計算値よりも大きい値を示している。この原因は、調合では空気量が  $5\%$  としていたのに対し、実際には  $2\sim 4\%$  となったためである。今回の実験では粘性を確保するために FA を用いているが、FA 対応の AE 剤を使用していないため空気が入りにくかったことが考えられる。

### 3.4 ブリーディング

図-5 にブリーディングの試験結果を示す。FA を  $150\text{kg}$  に固定した場合、ブリーディングは単位水量が増加すると増加する傾向にある。また、セメント量が増えると減少することがわかる。高密度コンクリートと普通コンクリートを比較すると同じ条件でも高密度コンクリートのほうが  $1.3\sim 1.9$  倍多くなっている。これは、CUS と EFG は表面がガラス質であり保水性能が低くなって

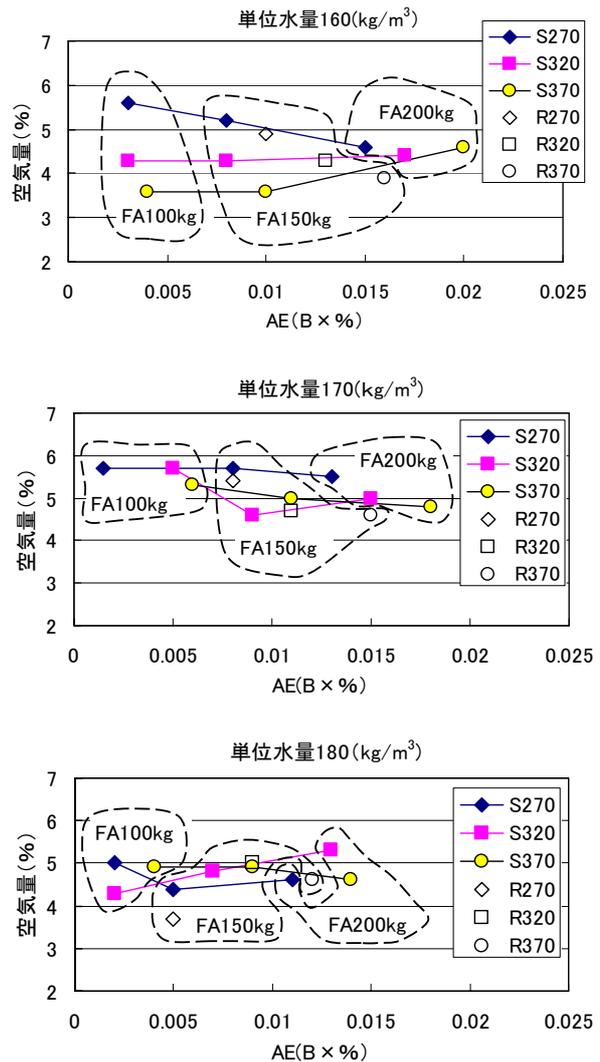


図-2 AE 剤の添加率と空気量との関係

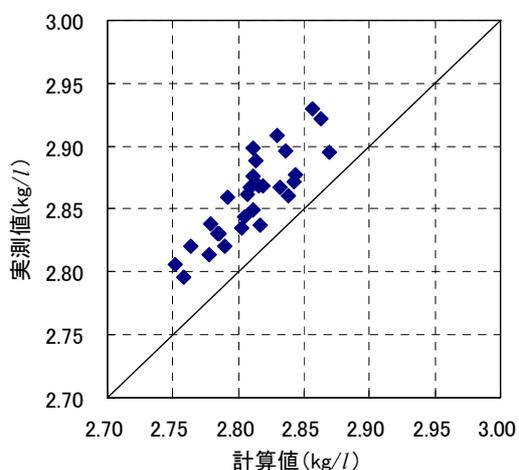


図-4 単位容積質量の計算値と実測値

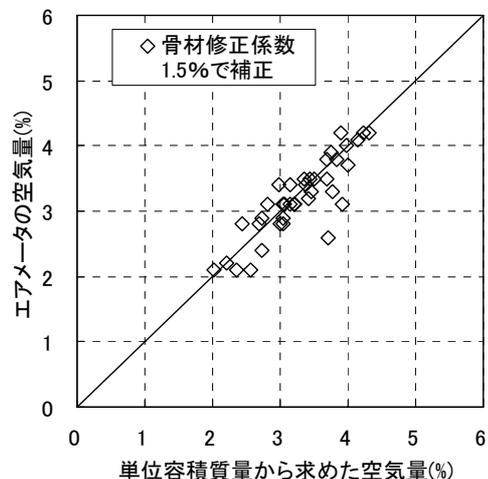


図-3 空気量の計算値と実測値

いるためであると考えられる。

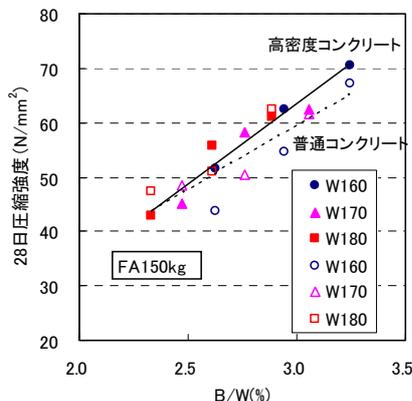
次に、良好な耐凍害性(耐久性指数 60 以上)を得るためには、ブリーディング量を  $0.6\text{cm}^3/\text{cm}^2$  以下に抑制する必要があるといわれている<sup>5)6)</sup>。スラグ骨材を 100%使用し、AE 減水剤を使用した場合、この条件を満たす調査は限られてくる。耐久性の観点から、単位水量が  $180\text{kg}/\text{m}^3$  を越えた調査は難しい。

#### 4. 硬化コンクリートの実験結果と考察

##### 4.1 圧縮強度とセメント水比・結合材水比の関係

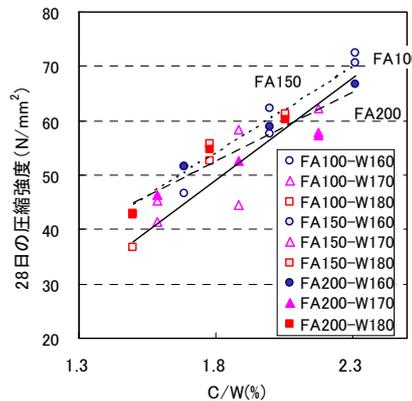
図-6 に、FA が  $150\text{kg}/\text{m}^3$  の場合の圧縮強度と結合材水比の関係を示す。図から、結合材水比が大きくなるほど圧縮強度は増加する傾向にあり、その関係は一般のコンクリートと同様にほぼ直線回帰式で表すことができる。圧縮強度は、結合材水比が 2.5 の近傍では普通コンクリートと近い値を示すが、2.5 以上になると普通コンクリートよりも高い値を示す。これらの性質は前回の実験<sup>4)</sup>でも同様であったが、FA を混入した場合でも、高密度コンクリートは普通コンクリートと比較すると、結合材水比が大きくなると、圧縮強度が大きくなる傾向にある。この原因としては、セメントペーストとスラグ骨材の化学反応や粗骨材表面の凹凸等による付着力の増加といわれている<sup>7)</sup>。

次に、高密度コンクリートの FA 量を 100, 150,  $200\text{kg}/\text{m}^3$  とした時のセメント水比・結合材水比と 28 日圧縮強度の関係を図-7 に示す。FA 量が変化してもセメント水比と圧縮強度の関係はほぼ一つの直線回帰式で表すことができるが、結合材水比と圧縮強度の関係は FA 量別に別々の直線関係となる。これは FA がポズラン反応を起こしておらず強度に寄与してないためと考えられる。ポズラン反応を考慮した長期の耐久設計基準強度は、FA II 種で置換率が 20%以上の場合、 $3\text{N}/\text{mm}^2$  の強度割り増し<sup>8)</sup>となっているが、28 日でその効果は期待できないようである。



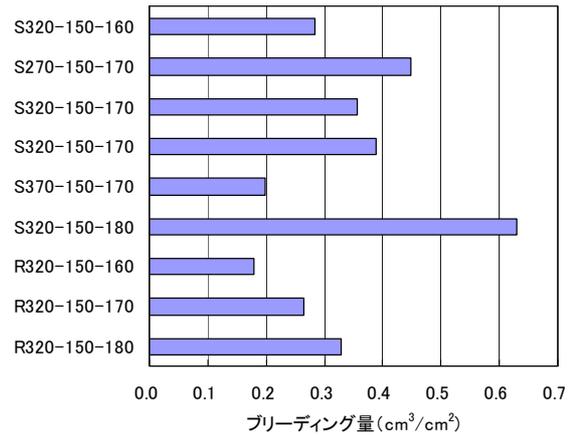
W の右側の数値は単位水量, 白抜きが天然骨材

図-6 圧縮強度と結合材水比の関係



W の右側の数値は単位水量

図-7 圧縮強度とセメント水比・結合材水比の関係



判例の S370-100-160 は、S はスラグ、R は普通コンクリート、セメント量、FA および単位水量を表している。

図-5 ブリーディング量

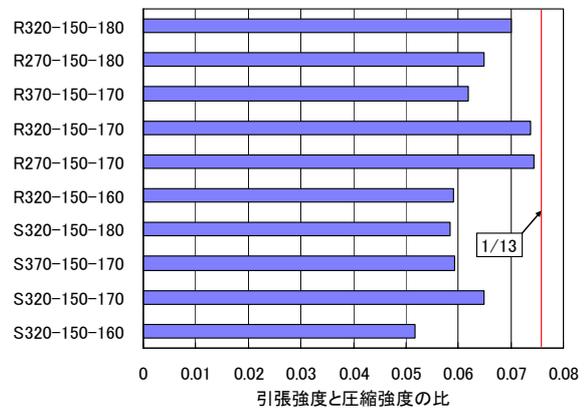
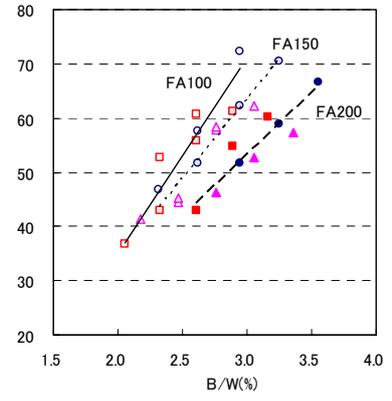


図-8 割裂引張強度と圧縮強度の比

##### 4.2 割裂引張強度と圧縮強度の関係

割裂引張強度と圧縮強度の比を図-8 に示す。コンクリートの引張強度は圧縮強度が  $40\text{N}/\text{mm}^2$  程度までは、その  $1/10 \sim 1/13$  といわれている。高密度コンクリートの引張強度は圧縮強度の  $1/15 \sim 1/20$ 、普通コンクリートの引張強度は  $1/13 \sim 1/18$  の範囲に入っており、高密度コンク



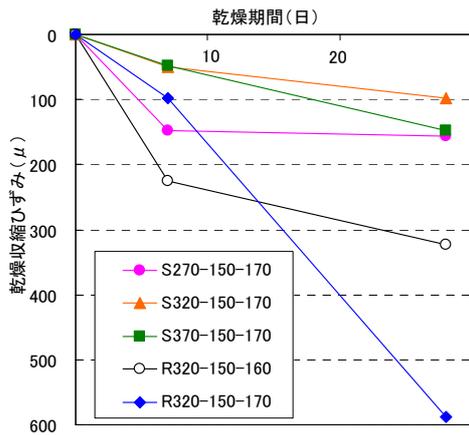


図-9 乾燥収縮ひずみ

リートの方がわずかであるが天然骨材より小さく、引張強度の圧縮強度に対する比率は天然骨材に比べて小さくなっている。この理由としてモルタルを構成する CUS の細骨材は、表面が平滑で、それが引張応力を受けた時に弱点になるためと考えられる。前回の実験でも同様の結果であったが、FA を混入しても結果は変化がなく、引張強度には寄与しないと考えられる。

#### 4.3 乾燥収縮

図-9 に乾燥収縮試験の結果を示す。乾燥収縮ひずみは高密度コンクリートの方が骨材の弾性係数が大きいので、小さくなる傾向にある。普通コンクリートと比較すると、乾燥収縮ひずみは約 1/3 程度である。

#### 4.4 粗骨材の分布

図-10 に粗骨材の分布の試験結果を示す。高さ 47cm では粗骨材量は少なく、高さ 3cm では多く、高さ 10~40cm では調合上の粗骨材よりやや多くなっている。また、高さ 47cm のところではスラグ骨材の量は砕石よりも 10%程度少なくなっている。これはスラグ骨材が非常に重いため、沈下量が大きく、最上部では粗骨材量が少なくなっていると考えられる。前回の実験<sup>4)</sup>では、スランプが 8cm で中間の 25cm の高さまで打設し、その後 50cm まで打設する工程だったため粗骨材が沈む現象は見られなかったが、今回のようにスランプが 21cm で、1回で 50cm まで打設するとスラグ骨材の沈降する現象が現れた。実際の施工では、フレッシュコンクリートの条件によって打設高さを考慮する必要がある。

### 5. まとめ

本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 高密度コンクリートのスランプは、結合材量の影響を受け、骨材のかみ合いと粘性の増減が大きな要素であり、FA 量は流動性に影響を与えている。
- (2) 空気量について、粗骨材の最大寸法が 20mm の時の

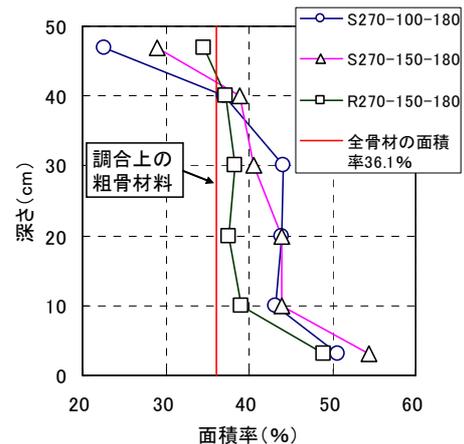


図-10 粗骨材の分布

骨材修正係数は 1.5%程度である。

- (3) 単位容積質量は、FA を混入した場合、空気が入りにくくなるため計算値よりも重くなる。
- (4) ブリーディング量について、耐久性の観点から単位水量が  $180\text{kg/m}^3$  を越えた調査は難しいと考えられる。
- (5) セメント水比と圧縮強度の関係はほぼ同一の直線に回帰できるが、結合材水比と圧縮強度の関係は FA 量別に別々の直線となるので FA は材齢 28 日圧縮強度に寄与していないと考えられる。
- (6) 引張強度と圧縮強度の比および乾燥収縮ひずみは高密度コンクリートの方が小さくなる傾向にある。
- (7) スラグ骨材の沈降について、打設高さ 50cm の場合、最上部の粗骨材は最下部の 1/2 であり、砕石の場合と比較しても 10%少ない結果となっている。

#### 参考文献

- 1) 仁木孟伯, 長滝重義他: 銅スラグ砂を使用したコンクリートの基礎的性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.399-404, 1995.7
- 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, pp.77-80, 1998.2
- 3) 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.115-118, 1998.3
- 4) 五味信治, 梶田佳寛他: スラグ骨材を使用した高密度コンクリートの配合に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.463-468, 2007.7
- 5) 上記文献 2), pp.58-60, 1998.2
- 6) 上記文献 3), pp.96-99, 1998.3
- 7) 依田彰彦: 特殊な材料を用いたコンクリート(その 15)高炉スラグ骨材, コンクリート工学, Vol.25, No.2, pp.77-83, 1987.2
- 8) 日本建築学会: フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説, pp.32-33, 2007.10