

# 論文 スラグ骨材を使用し施工可能な性能を持つ高密度コンクリートの調合条件に関する実験

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の施工可能な性能を持つコンクリートの範囲を検討した。諸性質の中で、耐久性はスラグ置換率と空気量およびブリーディングで、ワーカビリティはスランプで、圧縮強度は結合材水比との関係から検討した。その結果、高密度コンクリートの施工可能な性能は、水セメント比は55%以下、水粉体比は40%以下、単位水量は180kg/m<sup>3</sup>以下、単位セメント量は320kg/m<sup>3</sup>以上であることが必要で、ブリーディングの抑制とスランプの調節に炭酸カルシウムやフライアッシュを適時使用すると効果的であることが分かった。

**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、スランプ

## 1. はじめに

高層建築物や港湾構造物の基礎等には、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。一方、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。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。

CUS は銅を製錬する際に副産し、国内で約 200 万 t/年が製造され、コンクリート用細骨材として、1997 年 8 月に JISA5011-3 に規格化された。EFG は、スクラップを電気炉で精錬する際に副産し、約 350 万 t/年が製造され、コンクリート用骨材として、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。

これまで高密度コンクリートの性状に及ぼす影響として、ブリーディング現象を抑制し調合調整を行い、スラグ置換率によるフレッシュコンクリートと硬化コンクリートへの影響<sup>1)</sup>、ワーカビリティへの評価<sup>2)</sup>等を検討してきた。その結果、高密度コンクリートは、ブリーディング現象や天然骨材を用いた水セメント比が同じ普通コンクリートの 1.2~1.4 倍程度高強度になる<sup>1)</sup>などの特異な性質を持つことが分かっている。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高性能 AE 減水剤や炭酸カルシウム(以下、Ca と称す)を混入して実用的な調合を検討している。

本報では、これまでの結果を踏まえ、耐久性、ワーカビリティ、圧縮強度の観点から施工可能な性能を持つ高

密度コンクリートの標準的な調合について検討した。

## 2. 実験の概要

### 2.1 要因と水準

実験の要因と水準を表-1 に示す。耐久性の検討として、シリーズ 1 の 1-1 では、置換(混合)率の変化が耐久性に及ぼす影響を、1-2 では空気量の変化と凍結融解抵抗性の関係について調べ、シリーズ 2 では、置換率を 100%とし、水セメント比(以下、W/C と称す)と単位水量の変化がブリーディングに及ぼす影響について調べた。次に、ワーカビリティと圧縮強度の検討として、シリーズ 3 では、置換率を 100%とし、混和材にフライアッシュ(以下、FA と称す)を使用して、単位水量とスランプおよび結合材水比(以下、B/W と称す)と圧縮強度の関係について調べた。3-1 ではスラグ骨材、3-2 では天然骨材を対象とした。高密度コンクリートの材料は、シリーズ 1,2 では高炉セメント、シリーズ 3 で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。単位容積質量は、EFG が 2,110 kg/m<sup>3</sup>、砕石が 1,536kg/m<sup>3</sup>、実積率は 60.7%と 60.9%であった。使用した材料を表-2 に、調合を表-3 に示す。

また、コンクリートの調合条件は、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/mm<sup>2</sup>以上、単位容積質量を 2.60 t/m<sup>3</sup>以上とした。

### 2.2 実験方法と試験項目および試験方法

コンクリートの練り混ぜは、温度 20±1℃の室内で、容量 50 l のパン型強制練りミキサーを用いて行い、1 回の

\*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

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 秒練り混ぜて先練りし、その後、粗骨材を投入してさらに 90 秒練り混ぜた。練り混ぜ後排出し、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。骨材修正係数は、シリーズ 1 が 1.2%(CUS,EFG 共に 100%置換の場合)、シリーズ 2 が 1.3%、シリーズ 3 が 1.5%であった。

表-1 実験の要因と水準

要因	実験シリーズ		シリーズ2	シリーズ3	
	1-1	1-2		3-1(スラグ)	3-2(天然)
	水準				
水セメント比	50		35,42,50	43~67	
単位セメント量(kg/m <sup>3</sup> )	340,350,360	360	360,405,457	270,320,370	
FA(kg/m <sup>3</sup> )	-			100,150,200	150
Ca(kg/m <sup>3</sup> )	100	50	-	-	
単位水量(kg/m <sup>3</sup> )	170,175,180	180	160,170,180	160,170,180	
目標スランプ(cm)	8		15	8, 15, 21	
目標空気量 (%)	4.5	3.5,4.5,5.5,6.5	5.0	5.0	
CUS混合率 (%)	0,100	30	100	100	
EFG混合率 (%)	0,50,100	100	100	100	

注) シリーズ1 については、全ケースでスランプ8cmとなるまでの目標時間を60minとした。

表-2 使用材料

材料名	種類	記号	品質・特性
セメント	高炉セメントB種 (シリーズ1,2)	BB	密度3.04g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3800cm <sup>2</sup> /g
	普通ポルトランドセメント (シリーズ3)	N	密度3.05g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3730cm <sup>2</sup> /g
水	水道水		
細骨材	銅スラグ	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	電気炉酸化スラグ	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)
混和材	炭酸カルシウム (シリーズ1)	Ca	密度2.72 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3160cm <sup>2</sup> /g
	フライアッシュ II 種 (シリーズ3)	FA	密度2.29g/cm <sup>3</sup>
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 (1)

実験シリーズ	記号*	水セメント比 (%)	水粉体比 (%)	目標スランプ (cm)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )									混和剤 (C×%)	空気量 (%)	
						水	セメント	Ca	FA	細骨材			粗骨材				
										CUS	細目**	粗目**	EFG	碎石			
1-1	0-0-4.5	50	-	8	47	170	340	0	-	0	244	569	0	936	1.00	4.5	
	180					360	0	0		240	559	1241	0	1.00			
	175					350	100	1060		0	0	0	873	1.00			
	175					350	100	1060		0	0	611	437	1.00			
	175					350	100	1060		0	0	1221	0	1.00			
1-2	30-100-3.5	50	-	15	47	180	360	50	-	331	166	386	1269	0	1.00	3.5	
	323					162	377	1241		0	1.00	4.5					
	321					160	376	1231		0	1.00	5.5					
	316					158	368	1211		0	1.00	6.5					
	1067					988	867	1241		0	0.50						
2	50-180	50	-	15	47	360	-	-	1067	-	-	1241	-	5.0			
	42-180	42			180	429			988			1241					
	35-180	35			42	514			867			1276					
	50-170	50			47	340			1104			0			0.50		
	42-170	42			45	170			405			1029			1263	0	0.70
	35-170	35			43	486			935			0			0.70		
	50-160	50			47	320			1141			1285			0	0.60	
	42-160	42			46	160			381			1070			1285	0	0.90
	35-160	35			44	457			960			1320			0	1.35	

表-3 調合 (2)

実験シリーズ	記号*	水セメント比 (%)	水粉体比 (%)	目標スランプ (cm)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								混和剤 (C×%)	空気量 (%)																												
						水	セメント	Ca	FA	細骨材		粗骨材																															
										CUS	細目**	粗目**	EFG			碎石																											
3-1	S270-100-160	59	43	8	46	160	270		100	1061																																	
	S270-150-160		38		44												150	984																									
	S270-200-160		34		42												200	907																									
	S320-100-160	50	38		15												44	170	320		100	1005																					
	S320-150-160		34														42												150	928													
	S320-200-160		31														40												200	851													
	S370-100-160	43	34														21												43	180	370		100	949									
	S370-150-160		31																										41												150	872	
	S370-200-160		28	38		200	795																																				
	S270-100-170	63	46	15		45	170	270		100	1026																																
	S270-150-170		40			43																																				150	949
	S270-200-170		36		41	200												872																									
	S320-100-170	53	40		46	43												180	320		100	970																					
	S320-150-170		36			41																																					150
	S320-200-170		33			39											200													816													
	S370-100-170	46	36			49											42													180	370		100	914									
	S370-150-170		33														40																										
	S370-200-170		30	37			200	760																																			
	S270-100-180	67	49	56			44	180	270		100	991																															
	S270-150-180		43				42																																				
	S270-200-180		38		40		200											836																									
	S320-100-180	56	43		49		42											180	320		100	935																					
	S320-150-180		38				40																																				
	S320-200-180		35			38	200																							780													
S370-100-180	49	38	56			41	180																							370		100	879										
S370-150-180		35				39																																					150
S370-200-180		32		36		200		724																																			
R270-150-160	59	38		8		44		160	270																																		
R320-150-160	50	34				42			320																																		274
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											255	399																									
R370-150-180	49	35		39		370											239	375																									

注1) 記号\*については、シリーズ1で0-0.4.5)において先頭からCUS混合率、EFG混合率および目標空気量を表し、シリーズ2で50-180)において先頭から水セメント比、単位水量を表す。さらに、シリーズ3で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、シリーズ1では3:7、シリーズ3では4:6で混合している。

3. 実験結果と考察

3.1 耐久性とスラグ置換率および空気量

シリーズ 1-1 におけるスラグ置換率と各指標との関係を表-5 に示す。気泡間隔係数は CUS の増加とともに大きくなり、耐久性指数も低下している。気泡間隔係数の増加には EFG よりも CUS の寄与が大きいと考えられる。この原因は、同一空気量の場合 CUS の形状等に起因するエントラップドエアの増加と推察される。

コンクリート標準示方書では耐凍害性コンクリートの空気量として 4~7% を推奨している。シリーズ 1-2 における空気量と耐久性指数の関係を図-1 に示す。混合率が EFG100%、CUS30%、ブリーディング量を 0.6cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup> 以下に調整した場合、空気量の変化に耐久性指数は影響を受けない傾向がある。空気量が 3.7% 以上あれば耐久性指数は 80% 以上を確保できるので、普通コンクリートと同様に 4% 以上の空気量を確保すれば、所要の凍結融解抵抗性を得ることができる。

表-4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法	試験条件
スランプ	JIS A 1101	
空気量	JIS A 1128	圧力法
圧縮強度	JIS A 1108	
単位容積質量	JIS A 1104	
ブリーディング	JIS A 1123	
動弾性係数	JIS A 1127	たわみ振動
凍結融解試験	JIS A 1148	A法 (水中凍結融解法)
硬化コンクリートの空気量	ASTM C 457	リニアトラバース法
気泡間隔係数		

表-5 スラグ骨材置換率と各指標の関係

指標 置換率	気泡間隔係数	質量減少率	耐久性指数
	μm	%	%
CUS100%, EFG0%	270	2.2	90
CUS100%, EFG50%	203	2.1	92
CUS100%, EFG100%	255	1.5	90
CUS0%, EFG100%	177	1.3	98
CUS30%, EFG100%	182	1.2	95
CUS100%, EFG100%	255	1.5	90

また、既往の研究では、気泡数の増加に伴い凍結融解抵抗性が良好になると報告<sup>3)</sup>されている。すなわち、同

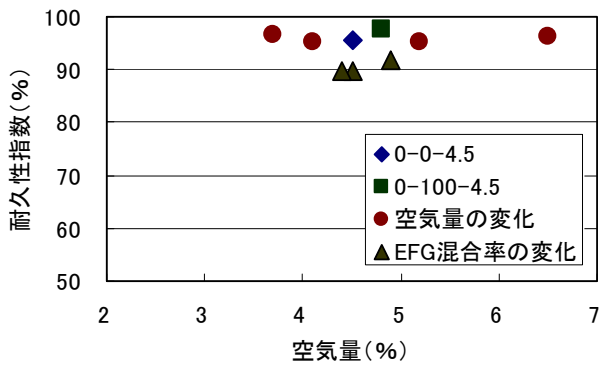


図-1 空気量と耐久性指数の関係

一空気量の場合、気泡間隔係数が小さいほど耐凍害性は向上する。気泡間隔係数と耐久性指数の関係を図-2に示す。気泡間隔係数が250~300 $\mu\text{m}$ 以下であれば耐久性指数が80%以上を確保している、普通コンクリートと同様に250~300 $\mu\text{m}$ 以下の気泡間隔係数を確保すれば、所要の凍結融解抵抗性を得ることができる。空気量と気泡間隔係数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。

### 3.2 耐久性とブリーディング

シリーズ2におけるブリーディングの試験結果を図-3に示す。単位水量とW/Cが小さくなるほど、ブリーディングが抑制される。また、W/Cが大きい場合はブリーディングが短時間で終了し、W/Cが小さい場合は長時間で終了する。この原因としては、CUSやEFGは表面がガラス質であるために、保水能力が小さく、コンクリートの保水能力自体も低下するが、W/Cが小さくなるとコンクリート中の粉体量は増えるので、自由水が少なくなり緻密性が増してブリーディングが抑制されると考えられる。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>4)5)</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 $180\text{kg}/\text{m}^3$ 以上、W/C42%を越えた調査は難しい。

### 3.3 ワーカービリティとスランプ

シリーズ3における単位水量とスランプの関係を図-4に示す。全体として、単位水量が多くなるとスランプが大きくなり、結合材量(セメント量+FA、以下、Bと称す)が多いほどスランプ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はワーカービリティが良好でスランプ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プ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、スランプが大きいものと小さいものがある。B470では単位水量が $170\text{kg}/\text{m}^3$ の場合、FAが多い方がスランプは大きく、FAの流動性への影響が認められる。スランプが小さい

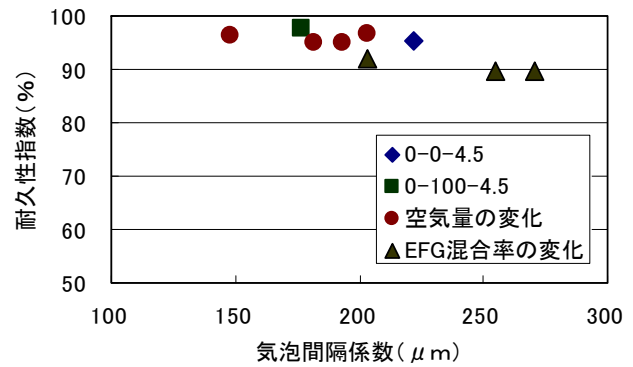
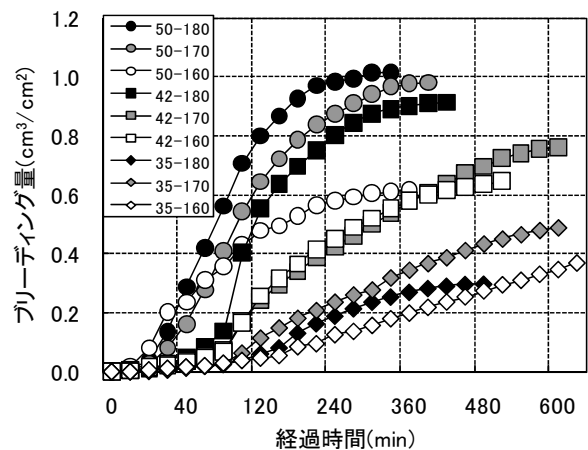


図-2 気泡間隔係数と耐久性指数の関係



注) 判例の50-180はW/Cと単位水量を示している。

図-3 ブリーディング量と経過時間の関係

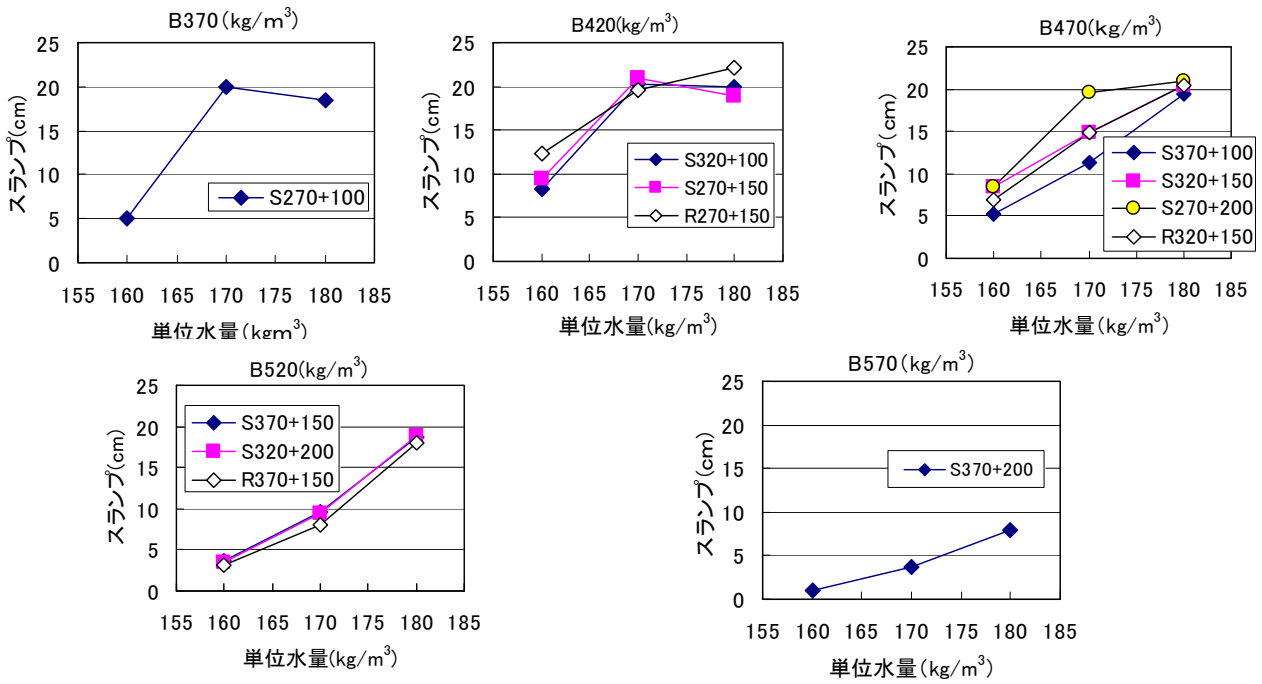
ものは振動を与えると崩壊する。Bが少ない時、B420とB370では、骨材のかみ合いが大きく影響し流動性が失われスランプは単位水量と比例関係になっていない。

単位水量が $20\text{kg}/\text{m}^3$ 増加したときのスランプの増加は、およそ10~15cm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1cm増加する<sup>6)</sup>ことに比べて、やや大きい傾向にあり、原因はスラグの質量が大きいためと考えられる。

### 3.4 圧縮強度とセメント水比

図-5に、シリーズ3におけるFAが $150\text{kg}/\text{m}^3$ の場合の結合材水比と圧縮強度の関係を示す。図から、B/Wが大きくなるほど圧縮強度は増加する傾向にあり、その関係は普通コンクリートと同様に直線回帰式で表すことができる。圧縮強度は、B/Wが2.5より増加するに従って、普通コンクリートよりも高い値を示すようになる。

次に、シリーズ3-1におけるFA量を100, 150,  $200\text{kg}/\text{m}^3$ とした時のセメント水比(以下、C/Wと称す)・B/Wと28日圧縮強度の関係を図-6に示す。FA量変化してもC/Wと圧縮強度の関係は近接した直線回帰式で表すことができるが、B/Wと圧縮強度の関係はFA量別に別々の直線関係となり、Bの増加が圧縮強度の増加に寄与していない。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



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-4 単位水量とスランプの関係

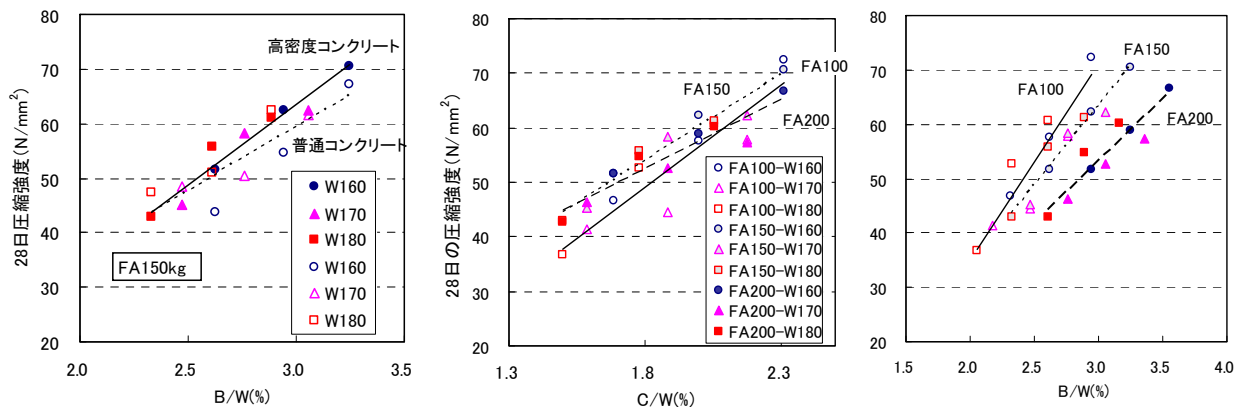
応を考慮した長期の耐久設計基準強度は、FA II種で置換率が20%以上の場合、 $3 \text{ N/mm}^2$ の強度割増し<sup>7)</sup>となっているが、28日でその効果は期待できないようである。圧縮強度が大きくなる原因としては、スラグ骨材の強度が大きいこと、セメントペーストとスラグ骨材の化学反応や粗骨材表面の凹凸等による付着力の増加といわれている<sup>3)</sup>。

#### 4. 目標とすべき標準調合

これまでの実験結果から、表-6に目標とするべき標準調合の例を示す。スラグ置換率と空気量に関する耐久性および結合水比と圧縮強度との関係は普通コンクリートと同様に扱ってよいと考えられる。調合選定にあたってはスラグ置換率100%のものを選び、その中から

スランプを評価方法として調査を選定した。スラグ骨材は表面がガラス質であり、保水性が悪く、普通コンクリートと違った挙動を示す。スランプ試験時のフレッシュコンクリートの状態は、ワーカブルな状態をスランプについて成立すると仮定すれば、この場合以外は、ワーカビリティが良好である可能性は低いため、標準調合からは除外することとした。また、粉体量が多すぎてスランプが5.5cm以下の場合もワーカビリティに悪影響を与えるので除外することとした。評価方法としてスランプを使用した時、スラグ骨材を使用した場合、別の基準を設定する必要があると考えられる。

また、材齢28日時単位容積質量を表-6の網掛けのケースで示している。実験に使用した普通コンクリートの単位容積質量は約 $2.30 \text{ t/m}^3$ 、高密度コンクリートのそれ



Wの右側の数値は単位水量、白抜きが天然骨材

図-5 結合材水比と圧縮強度の関係

Wの右側の数値は単位水量

図-6 セメント水比・結合材水比と圧縮強度の関係

表-6 目標とすべき標準調合の例

実験 シリー ズ	記号*	水セメ ント比 (%)	水粉 体比 (%)	スラン プ (cm)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								空気 量 (%)										
						水	セメント	Ca	FA	細骨材			粗骨材		単位容 積質量									
										CUS	細目	粗目	EFG			砕石								
2	35-160	35	—	15.5	44	160	457	—	—	960	—	—	1320	—	2957	3.6								
2	35-170			10.5	43	170	486			935			1263		2957	3.1								
2	35-180			11.0	42	180	514			867			1276		2900	3.9								
3-1	S370-100-160	43	34	5.2	43	160	370	—	100	949	—	—	1278	—	2930	3.6								
3-1	S370-100-170	46	36	11.3	42	170			150	837			—		—	—	—	2844	5.0					
3-1	S370-150-170		33	9.6	40				—	—								—	—	—	—	—	—	—
3-1	R370-150-170			8.0																				
3-1	S370-100-180	49	38	19.5	41	180			100	879			—		—	—	—	2862	4.9					
3-1	S370-150-180		35	18.7	39				—	—								—		—	—	—	—	—
3-1	R370-150-180			18.0																				
1-1	100-100-4.5**	50	39	7.5	47	175			350	100			—		1060	—	—	1221	—	2952	4.4			
1-1	0-0-4.5**		—	10.0	47	170			340	—			—		—	244	569	—	936	2316	3.9			
3-1	S320-150-160		34	8.5	42	160			320	—			150		928	—	—	1278	—	2896	4.3			
3-1	R320-150-160			7			—	259			405	—		950	2298									
3-1	S320-150-170			53			14.8	41			170	893		—	—	1278	—	2876	4.6					
3-1	R320-150-170		14.9		—	249	390					—		950	2266	4.7								
3-1	S320-200-170		56	33	9.6	39	180	200			816	—		—	1278	—	2830	5.0						
3-1	S320-150-180			38	20.5	40		—			150	857		—	—	—	950	2249	5.0					
3-1	R320-150-180				20.5							—		239	375	—	—	—	—	—				
3-1	S320-200-180			35	18.9	38		200			780	—		—	1278	—	2796	5.3						

注1) 記号\*については、シリーズ1で0-0-4.5において先頭からCUS混合率、EFG混合率および目標空気量を表し、シリーズ2で50-180において先頭から水セメント比、単位水量を表す。さらに、シリーズ3で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す。

注2) 記号\*\*は60min経過後の計測結果である。

注3) 天然骨材を使用したケースを比較例として網掛けで示した。

は約 2.85 t/m<sup>3</sup> である。

選定した調合は、水セメント比は 55%以下、水粉体比は 40%以下、単位水量は 180kg/m<sup>3</sup>以下、単位セメント量は 320kg/m<sup>3</sup>以上が必要で、ブリーディングの抑制とスランプの調節に Ca や FA を使用すると効果的である。

### 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) 圧縮強度とセメント水比の関係、空気量は普通コンクリートと同様に扱ってよい。
- (2) 圧縮強度は結合材水比が 2.8 以上で普通コンクリートの 1.2 倍程度になる。
- (3) 単位水量とスランプは比例関係にならないものが多い。施工性能を確保するためには比例関係にあるものを選定する。
- (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 180kg/m<sup>3</sup>を越えた調合は難しい。
- (5) 施工可能な性能を持つためには、水セメント比は 55%以下、水粉体比は 40%以下、単位水量は 180kg/m<sup>3</sup>以下、単位セメント量は 320kg/m<sup>3</sup>以上が必要である。

### 参考文献

- 1) 五味信治, 榊田佳寛他: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1571-1576, 2006.7
- 2) 五味信治, 榊田佳寛他: スラグ骨材を使用した高密度コンクリートの調合とその性質に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.433-438, 2008.7
- 3) 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
- 4) 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.58-60, 1998.2
- 5) 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.96-99, 1998.3
- 6) 村田二郎: コンクリート技術 100 講, 山海堂, pp.98-99, 1995.2
- 7) 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