

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その性質に関する実験

五味 信治*¹・榎田 佳寛*²・青沼 隆嗣*³・保坂 綱鎮*⁴

要旨：スラグ骨材を使用した高密度コンクリートを消波ブロックに適用したが、スラグ骨材の特異な性質からワーカビリティ等に課題が生じ、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範囲を調査するため、水セメント比と単位水量を変化させ、スランプ・ブリーディング・密度・強度およびモルタルのレオロジーについて検討した。その結果、高密度コンクリートの成立にはセメントペーストが 320l/m³以上であることが必要で、モルタルのレオロジー特性として、塑性粘度で 3~5Pa・s、降伏値で 4~8Pa 必要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、スランプ、モルタルのレオロジー

1. はじめに

環境問題などから良質な天然骨材が不足し、代替品としてスラグ骨材の混合使用が進みつつある。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。こうした背景から、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。

銅スラグ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 1t 当たり約 1.8t のスラグが発生し、国内で約 200 万 t が製造されている。一般に多量の鉄分を含有して比重が大きく、吸水率は小さいという特徴がある。銅スラグ細骨材は、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。電気炉酸化スラグは、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 1t 当たり約 125kg が発生し、約 350 万 t が製造されている。製鋼過程の原料酸化期に排出される電気炉酸化スラグと、還元期に排出される電気炉還元スラグがあるが、膨張性崩壊を生ずる遊離石灰と遊離マグネシアの含有量のほとんどない電気炉酸化スラグ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。品質は銅スラグと同様な性質を持つ。

これら両スラグの利用に関しては、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¹⁾。

コンクリート製造上の実用的な見地からは、細骨材、あるいは粗骨材への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、置換率 50%程度までは使用例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、高密度コンクリートの水セメント比(以下、W/C と称す)と単位水量を変化させ、スランプ・ブリーディング・密度・強度およびモルタルのレオロジー等を用いて施工可能な性能を持つコンクリートの範囲を検討した。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²⁾で報告している。

2. 実験

2.1 実験のフロー

スラグ骨材を 100%使用した時の基本的な性質を調べるため、実験 1 では、EFG の最大寸法 40mm、実験 2 では EFG の最大寸法 25mm として、W/C と単位水量を変化させ、施工可能な性能を持つコンクリートの調合条件を検討した。混和剤には AE 減水剤を使用した。単位水量に対する適正な添加率をみるために、最初に骨材として川砂、川砂利で実験を行い、これを実験 0 とし、目標スランプが 15cm となるように AE 減水剤の添加率を決

*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建設学専攻

めた。これを基に、フレッシュコンクリートの状態を見ながら高密度コンクリートの場合の添加率を調整した。その結果、W/Cが50%と42%の時はスランプが16cmとなり、W/Cが35%の時は10cmとなったため、実験では単位水量が160 kg/m³の時に、添加率を0.1~0.2%程度上げることとした。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。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(佐賀県産)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2,060 kg/m³、川砂利が1,700kg/m³、実積率は57.7%と64.8%であった。

コンクリートは、単位容積質量を3,000 kg/m³以上、空気量は5%を目標としたが、空気量についてはAE助剤の

表-1 実験の要因と水準

		水準		
		0	1	2
要因	実験			
	水セメント比 (%)	35, 42, 50		
	単位水量 (kg/m ³)	170	160,180	160,170,180
	粗骨材最大寸法(mm)	40(天然)	40(EFG)	25(EFG)

添加率で変化するものであり、今回はその調整を行わなかった。

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±1℃の室内で、容量50 lのパン型強制練ミキサを用いて行い、1回の練り混ぜ量は45 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、

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3730cm ² /g
水	水道水	
細骨材	CUS	表乾密度3.53g/cm ³ 、吸水率0.29%、粗粒率3.70
	川砂(細目)	表乾密度2.46g/cm ³ 、吸水率3.30%、粗粒率1.76(あわら市蓮ヶ浦産)
	川砂(粗目)	表乾密度2.57g/cm ³ 、吸水率1.86%、粗粒率3.10(九頭竜川下流域産)
粗骨材	EFG(25mm)	表乾密度3.55g/cm ³ 、吸水率0.95%、粗粒率6.83
	EFG(40mm)	表乾密度3.67g/cm ³ 、吸水率0.93%、粗粒率8.02
	川砂利(40mm)	表乾密度2.64g/cm ³ 、吸水率1.47%、粗粒率6.86(九頭竜川下流域産)
混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸系

注) 川砂は、細目と粗目を質量比で3:7で混合した。

表-3 調合

実験	水セメント比 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (C×%)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材				
						25mm		40mm		
0	50	46.2	170	340	783	-	950	0.50		
	42	44.4		405				0.70		
	35	42.0		486				0.70		
1	50	45.7	180	360	1046	-	1276	0.50		
	42	43.7		429					960	
	35	41.0		514					867	
	50	46.5	160	320	1119	-	1320	0.80		
	42	44.9		381					1049	
	35	42.7		457					960	
2	50	46.6	180	360	1067	1241	-	0.50		
	42	44.7		429		988	1241		-	
	35	42.1		514		867	1276		-	
	50	47.0	170	340	1104	1263	-	0.50		
	42	45.3		405			1029	-	0.70	
	35	42.9		486			935	-	0.70	
	50	47.4	160	320	1141	1285	-	0.60		
	42	45.8		381			1070	1285	-	0.90
	35	43.7		457			960	1320	-	1.35

表-4 試験項目と試験方法

試験項目	試験方法	試料
スランブ	JIS A 1101	フレッシュコンクリート
空気量	JIS A 1128	
ブリーディング	JIS A 1123	
フロー値	JIS R 5201	ウエットスクリーニングモルタル
降伏値, 塑性粘度	B型回転粘度計	
圧縮強度	JIS A 1108	硬化コンクリート
引張強度	JIS A 1113	
静弾性係数	JIS A 1149	

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。実験での骨材修正係数は、実験 1 で 1.6%, 実験 2 で 1.3%であった。また、高密度コンクリートのワーカビリティを評価するためにウエットスクリーニングしたモルタルを用いて、フロー値およびB型回転粘度計で降伏値・塑性粘度を測定した。

3. フレッシュコンクリートの実験結果と考察

3.1 スランブと単位水量の関係

図-1 にスランブと単位水量の関係を示す。図から、単位水量が 180kg/m^3 では、実験 1 と実験 2 とでは W/C が 50%の時は、ほぼ等しいスランブ(部分崩壊と崩壊)を示すのに対し、W/C が 35%, 42%では実験 1 の方が実験 2 よりも 3~6cm 大きく、良好な流動性を示した。また、単位水量が 170kg/m^3 の時、実験 2 では、W/C が 35%でスランブは 10.5cm, 42%で 16cm (崩壊)であったが W/C が 50%では 4cm で状態が全く異なり、骨材同士がかみ合って自立状態になっていた。さらに単位水量が 160kg/m^3 の時は、実験 1 の W/C が 35%の時のみ、硬練りながらワーカブルな状態であった。しかし、その他は

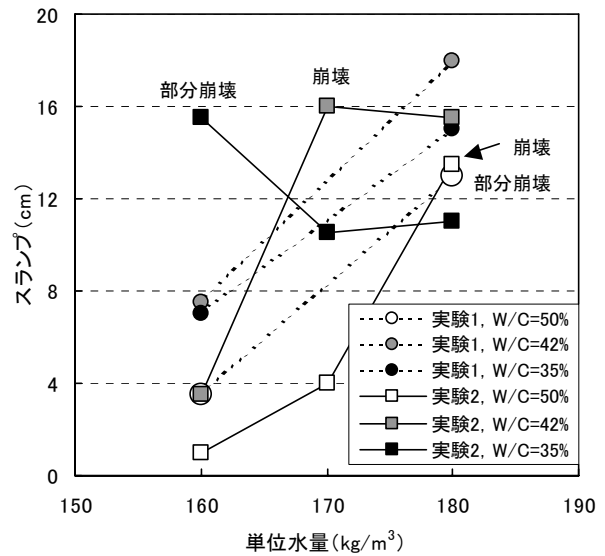


図-1 スランブと単位水量の関係

骨材同士がかみ合って、自立状態であった。単位水量が減少するとスランブも低下する傾向にあるが、実験 2 の単位水量が 170kg/m^3 , W/C が 42%の時と単位水量が 160kg/m^3 , W/C が 35%の時は崩壊と部分崩壊のため、見かけのスランブは増加している。

3.2 ワーカビリティの評価

銅スラグ細骨材は重くガラス質であり、保水性が悪く、普通コンクリートと違った挙動を示す。図-2 にフレッシュコンクリートのスランブ時の状態分類を、表-5 にスランブ試験時のフレッシュコンクリートの状態を分類したものを示す。スランブ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 (以下、スランブについて成立という)、最初はワーカブルであるが、粘性を失って部分的に崩壊する状態 (以下、部分崩壊)、粘性がなく崩壊する不安定な状態 (以下、崩壊)、自立している状態 (以下、自立) の 4 種類に分類できると考えられる。

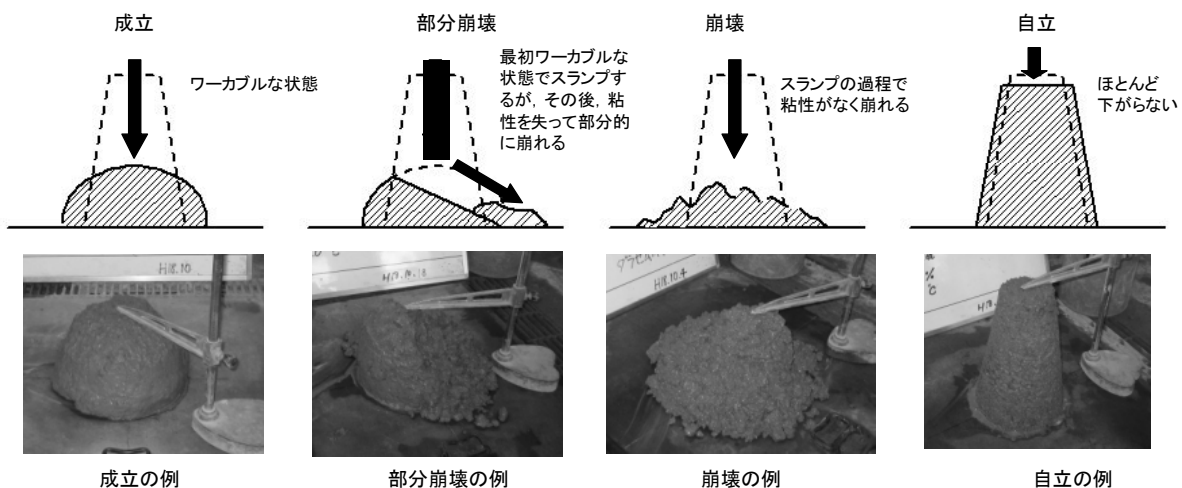


図-2 フレッシュコンクリートのスランブ時における状態分類

表-5 スランプ試験時の状態

実験	単位水量 (kg/m ³)	W/C(%)		
		50	42	35
1	180	部分崩壊	成立	成立
	160	自立	自立	成立
2	180	崩壊	成立	成立
	170	自立	崩壊	成立
	160	自立	自立	部分崩壊

表-5 から、単位水量が 160kg/m³ の時は、細骨材同士がかみ合っ、自立状態になるが、W/C の減少に伴って、実験 1 では成立、実験 2 では部分崩壊となっている。単位水量が 170kg/m³ になると自立→崩壊→成立という状態である。単位水量が 180kg/m³ の時には W/C が小さくなれば、ワーカブルな状態でスランプし成立する。単位水量の増加という観点からは、自立→部分崩壊→崩壊→成立という状態である。単位水量の増加と W/C の減少に伴って、自立→部分崩壊→崩壊→成立の順とおおむね推測される。

図-3 にワーカビリティーを評価するためにスランプとコンクリート中の単位ペースト容積の関係を示す。セメントペースト容積が 320 l/m³ を超えると成立状態、280 から 320 l/m³ の範囲で部分崩壊および崩壊などの不安定状態、280 l/m³ 以下の場合で自立状態であった。この結果から、良好なワーカビリティーを得るためには、コンクリート中に 320 l/m³ 以上のセメントペーストが必要であると考えられる。

3.3 ワーカビリティーとモルタルの関係

前節におけるスランプ時の 4 つの状態をウェットスクリーニングモルタルのレオロジー特性とスランプの関係から調べた。15 打フロー値については図-4 に、塑性粘度と降伏値については図-5 に示した。この図から、

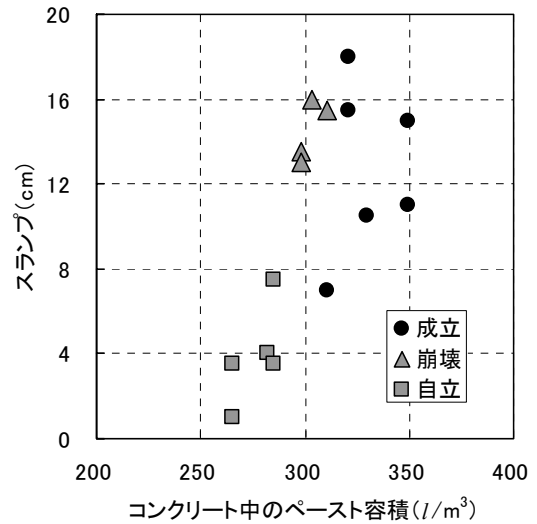


図-3 スランプと単位ペースト容積の関係

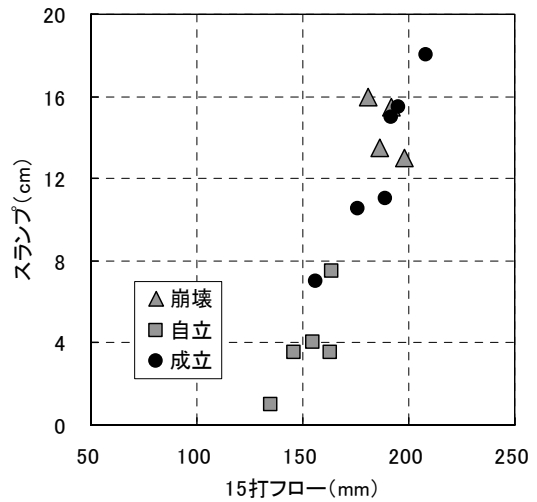


図-4 スランプと 15 打フロー値の関係

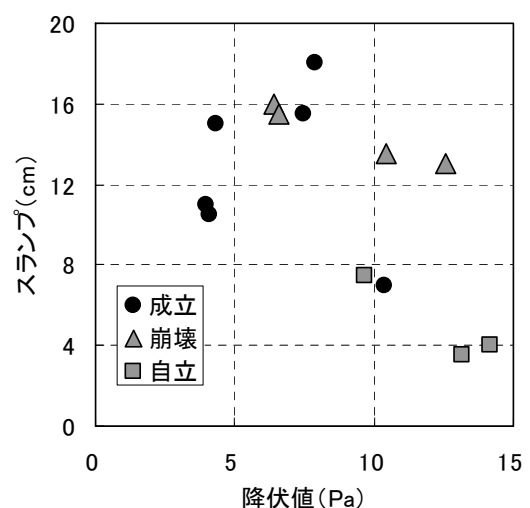
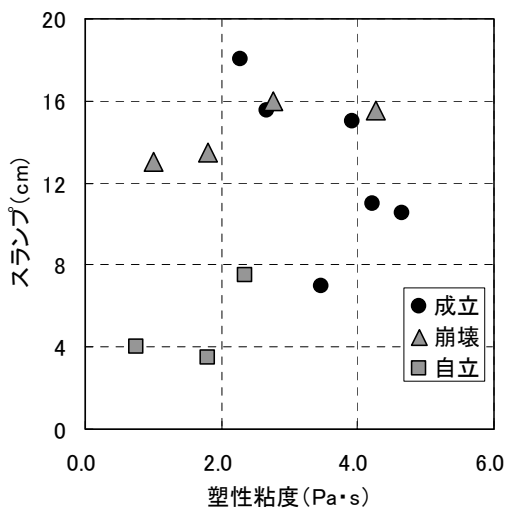
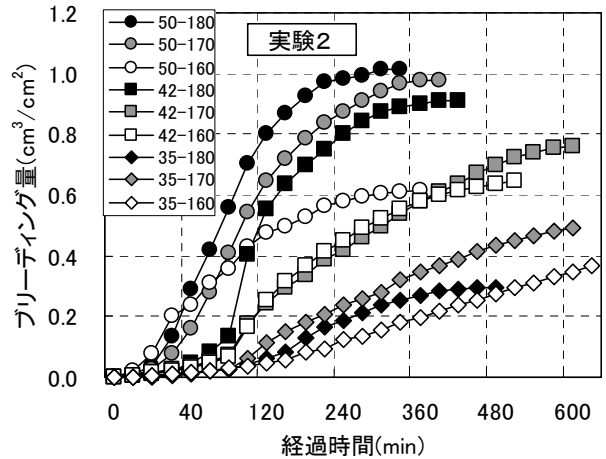
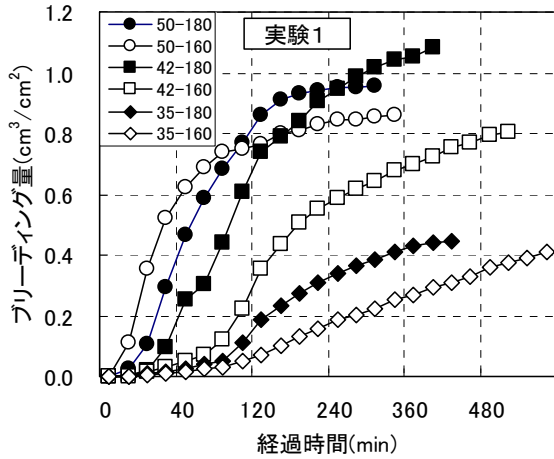


図-5 モルタルのレオロジー特性と良好なワーカビリティーの範囲



注) 判例の 50-180 は W/C と単位水量を示している。

図-6 ブリーディング量と経過時間の関係

良好なワーカビリティの範囲は、15 打フロー値が 170～210mm、塑性粘度が 3～5Pa・s、降伏値が 4～8Pa の範囲であることがわかった。但し、15 打フロー値と塑性粘度については、スランプの成立と崩壊の境界を区別するのが難しく、ペースト容積との関係も考えなければならないので今後の課題としたい。

3.4 ブリーディング

図-6 にブリーディング量と経過時間の関係を示す。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、ブリーディングが抑制されると考えられる。また、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。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。

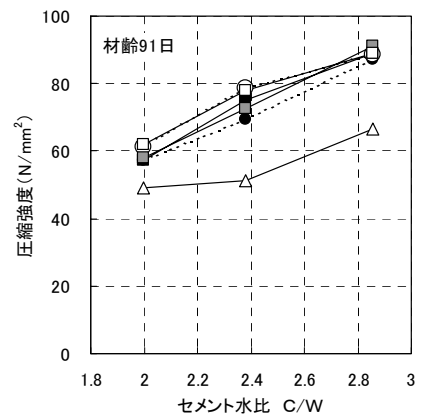
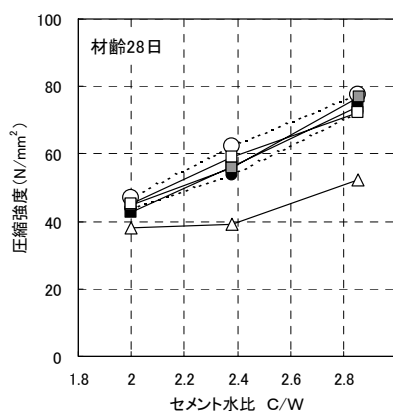
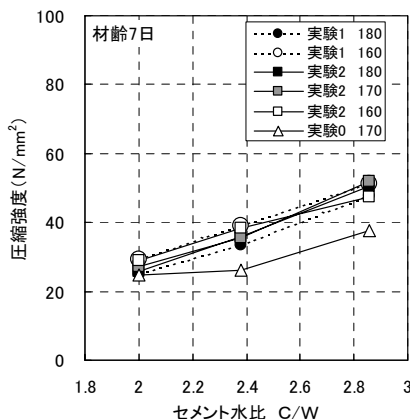
4. 硬化コンクリートの実験結果と考察

4.1 圧縮強度とセメント水比の関係

図-7 に圧縮強度とセメント水比の関係を示す。図から、セメント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、セメント水比が 2.0 の場合は普通コンクリートと近い値を示すが、いずれの材齢であっても普通コンクリートよりも高い値を示す。材齢 7 日では、1.1 倍程度、28 日以降では、1.5 倍程度普通コンクリートに比べて圧縮強度が高い。このことから強度増進は普通コンクリートよりも高いことがわかる。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骨材表面の凹凸等による付着力の増加³⁾といわれている。

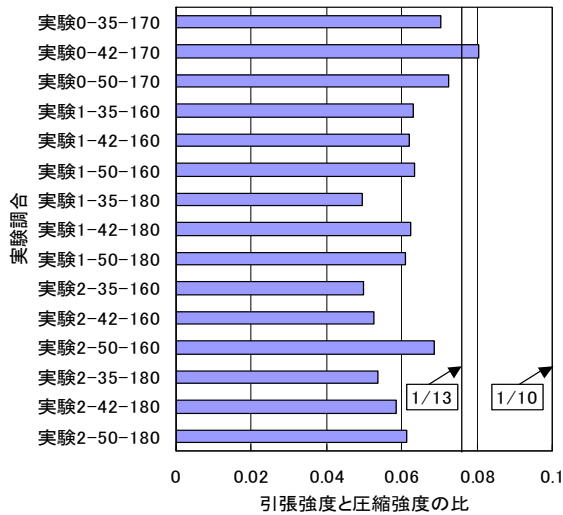
4.2 割裂引張強度と圧縮強度の関係

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



注) 判例の実験 1 180 は単位水量を示す。

図-7 圧縮強度とセメント水比の関係



注) 判例の 35-170 は W/C と単位水量を示す。

図-8 割裂引張強度と圧縮強度の比

の 1/10~1/13 といわれている。高密度コンク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ると考えられる。

4.3 静弾性係数と圧縮強度の関係

静弾性係数と圧縮強度の関係を図-9 に示す。図には New RC 式⁴⁾から得られた結果も示した。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。スラグ骨材について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

実験値は、EFG 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。前回の実験²⁾では、スラグ骨材を 70%まで置換した状態では、実験値を New RC 式で表現できたが、今回のように 100%置換した場合は New RC 式による計算値は 10~15%程度大きい値となる。これらへの対処としては補正係数 k_1 の数値を、スラグ骨材として提案すれば、実験結果は、New RC 式で表現できると考えられる。

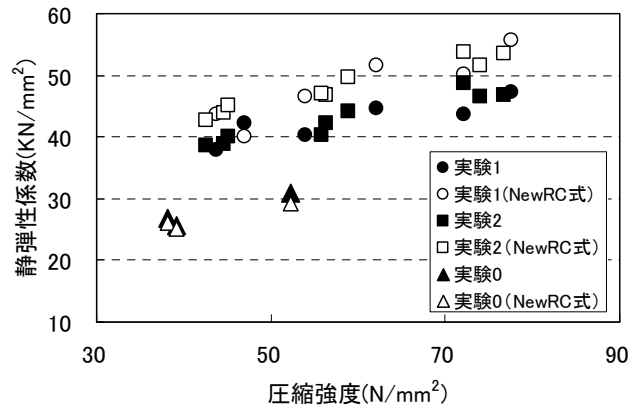


図-9 静弾性係数と圧縮強度の関係

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) CUS, EFG を骨材として 100%使用した場合の骨材修正係数は 1.3~1.6%程度である。
- (2) 高密度コンクリートでは、単位水量の増加、W/C の増加に伴って、自立→崩壊→部分崩壊→成立の順にフレッシュコンクリートの状態が変化する。
- (3) 高密度コンクリートを成立させるためには、セメントペーストが 320 l/m³ 以上必要である。
- (4) 良好なワーカビリティを得るためには、レオロジー特性として塑性粘度が 3~5Pa・s、降伏値が 4~8Pa 必要である。
- (5) W/C が小さいほどブリーディング水の排出時間が大きい。
- (6) 圧縮強度は、長期材齢下で普通コンクリートの 1.5 倍程度である。
- (7) 引張強度と圧縮強度の比は、天然骨材より小さくなる。
- (8) 静弾性係数を NewRC 式で予測するためには、スラグ骨材の補正係数 k_1 を提案する必要がある。

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) 五味信治, 榎田佳寛他：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
- 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) (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