

論文 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

五味 信治^{*1}・梶田 佳寛^{*2}・青沼 隆嗣^{*3}・村上 哲也^{*4}

要旨：環境負荷抑制と高密度化対策として、産業副産物である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使用した。スラグ骨材の特異な性質からスランプロス、混和剤およびその耐久性等に課題が生じ、解決のため実験を行った。主として銅スラグ細骨材を100%使用し電気炉酸化スラグ粗骨材の混合率による硬化コンクリートへの影響と空気量が凍結融解抵抗性に及ぼす影響について検討した。その結果、電気炉酸化スラグ粗骨材の混合率は長期圧縮強度や静弾性係数に影響を与えず、乾燥収縮や自己収縮は大きくなる傾向があった。また、空気量を4%以上確保すれば、所要の凍結融解抵抗性を得ることができた。

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、凍結融解抵抗性

1. はじめに

コンクリート用スラグ骨材には4種類のスラグ骨材が規定されている。この中で、銅スラグ細骨材（以下、CUSと称す）と電気炉酸化スラグ（以下、EFGと称す）は、両者共に多量の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化から数年ということでコンクリート用骨材としての実績はわずかである。

これらの骨材を使用したコンクリートには、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%程度までが現状で用いられ、しかも実績があまりないことからほとんど使用されていない。そこで、高密度とするためスラグ骨材の混合率を100%とし、実際の港湾構造物に適用した。その結果、スランプロスやEFGの混合率および耐凍害性等について課題が生じた。本研究は、高密度コンクリートの性能を向上するために、主としてスランプロスに対応する経時とEFGの混合率および耐凍害性がコンクリートの性状に及ぼす影響について実験

的に検討したものである。なお、ブリーディング現象等の基本的な物理的性状については、前報¹⁾で報告している。

2. 実験

2.1 実験の概要

高密度コンクリートに関して、2種類の実験を行った。実施工への対策として、いずれの実験もスランプロスの影響を考え、練り上がり60分後にスランプが8cmになるように調整し、粉体量を考慮して混和剤には多機能型のAE減水剤を使用した。実験ケース1では、CUSの混合率が100%の場合、EFG混合率がコンクリートの配合と基礎物性および耐凍害性に及ぼす影響について、実

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	50	
スランプ(cm)	8	
目標空気量	4.5	3.5,4.5,5.5,6.5
CUS混合率 (%)	0, 100	30
EFG混合率 (%)	0, 50, 100	100

注) 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。

*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 工修
 *4(財)建材試験センター 中央試験所

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3.04g/cm ³ , 比表面積3800cm ² /g
細骨材	CUS	表乾密度3.62g/cm ³ , 吸水率0.16%, 粗粒率3.64
	川砂 (細目)	表乾密度2.52g/cm ³ , 吸水率3.50%, 粗粒率1.83 (金津町蓮ヶ浦産)
	川砂 (粗目)	表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率2.46%, 粗粒率2.88 (九頭竜川下流域産)
粗骨材	EFG (2005)	表乾密度3.65g/cm ³ , 吸水率1.14%, 粗粒率6.78
	EFG (4020)	表乾密度3.71g/cm ³ , 吸水率0.990%, 粗粒率7.83
	川砂利 (20mm)	表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率1.32%, 粗粒率6.78 (九頭竜川下流域産)
	川砂利 (40mm)	表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率1.07%, 粗粒率7.93 (九頭竜川下流域産)
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	AE減水剤	リグニンスルホン酸系

表-3 配合例

記号*	水セメント比 (%)	スランブ (cm)	s/a (%)	CUS混合率 (%)	EFG混合率 (%)	目標空気量 (%)	単位量(kg/m ³)						混和剤 (C×%)	
							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
0-0-4.5	50	8	47	0	0	4.5	170	340	0	0	813	0	936	1.00
0-100-4.5					100		180	360	0	0	799	1241	0	1.00
100-0-4.5				100	0		175	350	100	1060	0	0	873	1.00
100-50-4.5					50		175	350	100	1060	0	611	437	1.00
100-100-4.5					100		175	350	100	1060	0	1221	0	1.00
30-100-3.5					50		8	47	30	100	3.5	180	360	50
30-100-4.5	4.5	323	539	1241		0					1.00			
30-100-5.5	5.5	321	535	1231		0					1.00			
30-100-6.5	6.5	316	527	1211		0					1.00			

注1) 記号*については、100-0-4.5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ている。

注2) 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3) 粗骨材***については、40mmと20mmの比率はEFG 3:7、川砂利4:6で混合している。

験ケース 2 では空気量の違いがコンクリートの基礎物性と耐凍害性に及ぼす影響について実験を行った。尚、CUS と EFG 共に 0%の配合は天然骨材を使用したもので、比較のため実施した。実験の要因と水準を表-1 に示す。

2.2 使用材料および配合条件

使用した材料を表-2 に、配合例を表-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 と川砂、粗骨材は EFG と川砂利で最大寸法は共に 40mm である。単位容積質量は、EFG が 2.06 t/m³、川砂利が 1.70 t/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 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 2.60 t/m³以上、スランブを練り上り 60 分経過後で 8cm、水セメ

ント比は 50%とし、混合率と空気量は表-3 に示す設定とした。

2.3 実験方法

コンクリートの練混ぜは、温度 20±1℃の室内で、容量 50l のパン型強制練ミキサを用いて行い、1 回の練混ぜ量は 45l とした。練混ぜ手順は、細骨材半分・セメント・細骨材半分・粗骨材の順に投入し、空練りを 15 秒行う。その後、水と混和剤を入れて 90 秒練り混ぜ後排出し、60 分静置して各種試験に供した。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骨材修正係数を求めている。

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮強度と EFG 混合率の関係

各材齢の圧縮強度と EFG 混合率の関係を図-1 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た。材齢 7 日では、EFG 混合率が大きい方が圧縮強度は大きい傾向がある

が、長期強度はほぼ同じ値となった。前報¹⁾で CUS 混合率を大きくした時、長期強度が大きくなったのとは異なる傾向がある。EFG の混合率は長期強度増進に CUS ほどは寄与しない傾向がある。

3.2 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-2 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示方書の設計値を示した。実験結果では、割裂引張強度は EFG 混合率の増加に伴い、示方書の設計値よりも高い値を示すがその差は僅かであり普通コンクリートと同等に扱ってよいと考えられる。強度増加の原因は、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²⁾といわれているが、今後の課題としたい。

3.3 圧縮強度と静弾性係数の関係

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-3 に示す。図には New RC 式³⁾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。

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

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

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法	試験条件
空気量	JIS A 1128	圧力法
圧縮強度	JIS A 1108	
引張強度	JIS A 1113	
静弾性係数	JIS A 1149	
乾燥収縮	JIS A 1129-1	
自己収縮	JIS A 1129-1	
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 気泡間隔係数	ASTM C 457	リニアトラバース法

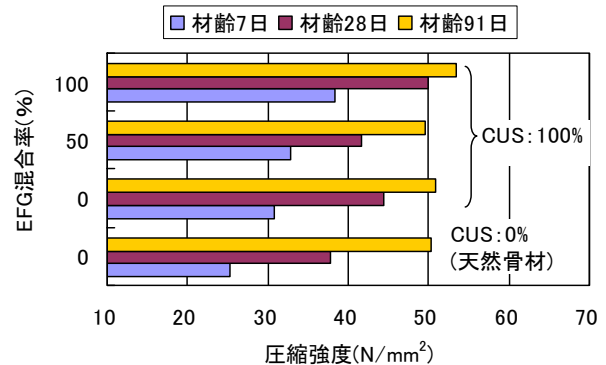


図-1 圧縮強度と EFG 混合率の関係 (W/C=50%)

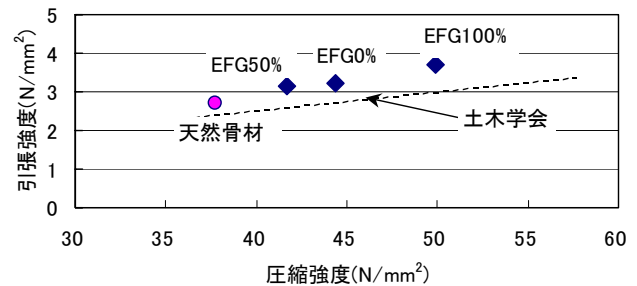


図-2 圧縮強度と割裂引張強度の関係

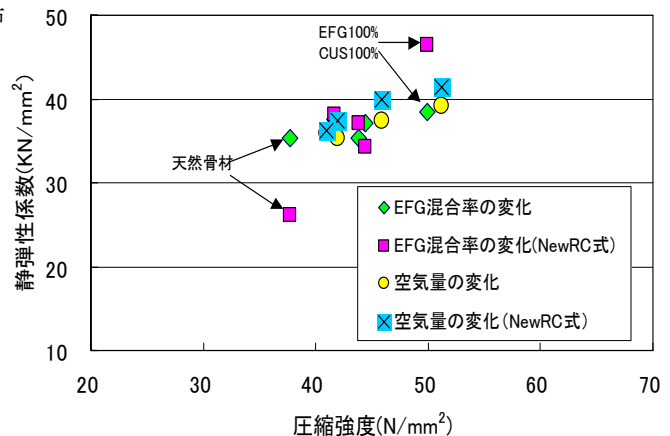


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

い。計算値は CUS, EFG を 100%使用した場合、実験値と乖離する傾向にあるが、その他の混合率では New RC 式で表現できると考えられる。

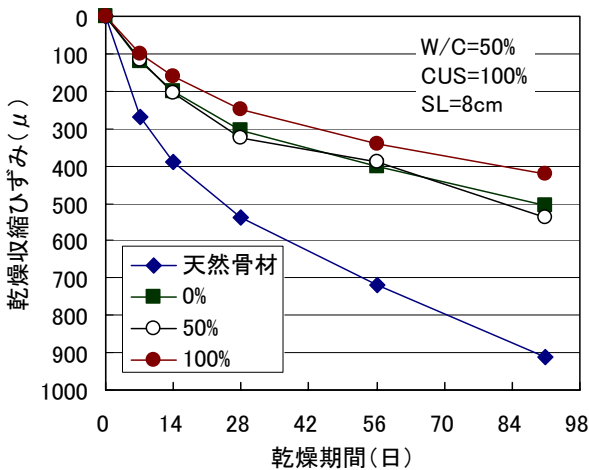


図-4 乾燥収縮と EFG 混合率の関係

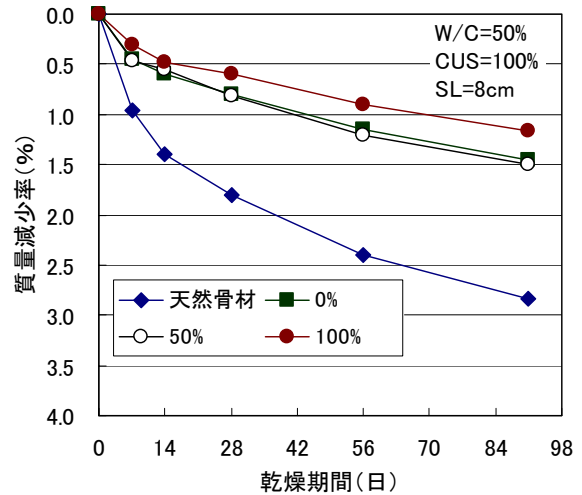


図-5 質量減少率と EFG 混合率の関係

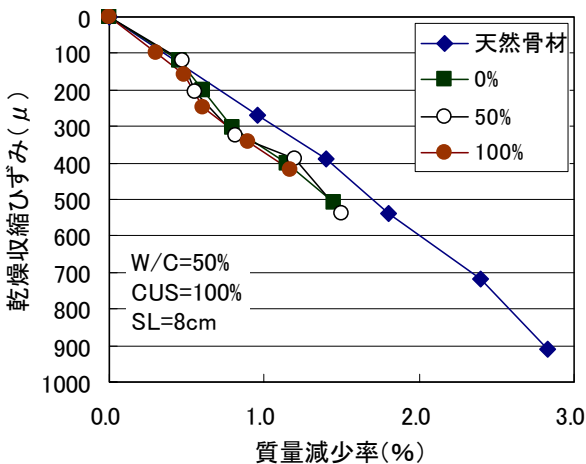


図-6 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

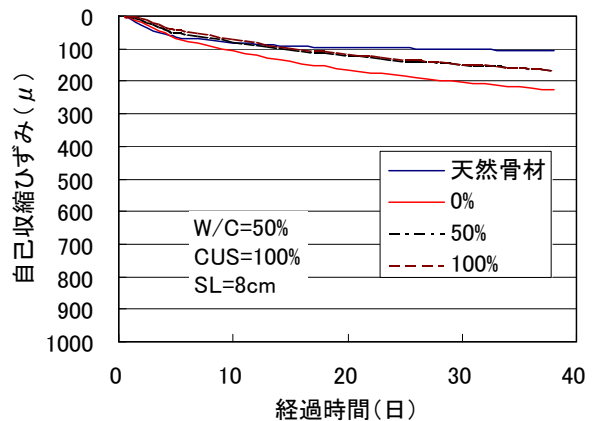


図-7 自己収縮ひずみと EFG 混合率の関係

また、空気量増加に伴い圧縮強度は低下するが、静弾性係数への影響は少ない結果となっている。

3.4 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-4~7に示す。CUSの混合率を100%で固定してEFGの混合率を0, 50, 100%と変化させた場合、乾燥収縮ひずみは天然骨材と比較すると1/2程度になり、混合率増加に伴いさらに小さくなる傾向がある。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等が考えられる。前報¹⁾のCUSの混合率を変化させた場合よりもEFGの混合率を変化させた場合の方が乾燥収縮ひずみは影響が小さい。

EFG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。

自己収縮ひずみについては乾燥収縮ひずみの1/5程度であり、前報¹⁾の場合より大きい傾向を示し、CUSの影響が考えられる。

3.5 凍結融解抵抗性とスラグ混合率の関係

凍結融解試験結果を図-8に示す。JIS A 1148によるコンクリートの凍結融解試験では、相対動弾性係数が60%以上であれば、一般にそのコンクリートの耐凍害性は良いと判断される。試験結果は最も低下したもので85%程度であるため耐凍害性については問題ないと考えられる。CUSとEFGの混合率を増加させると相対動弾性係数は低下する傾向がある。凍結融解作用に対しては、スラグ粗骨材の混合率が50%までの

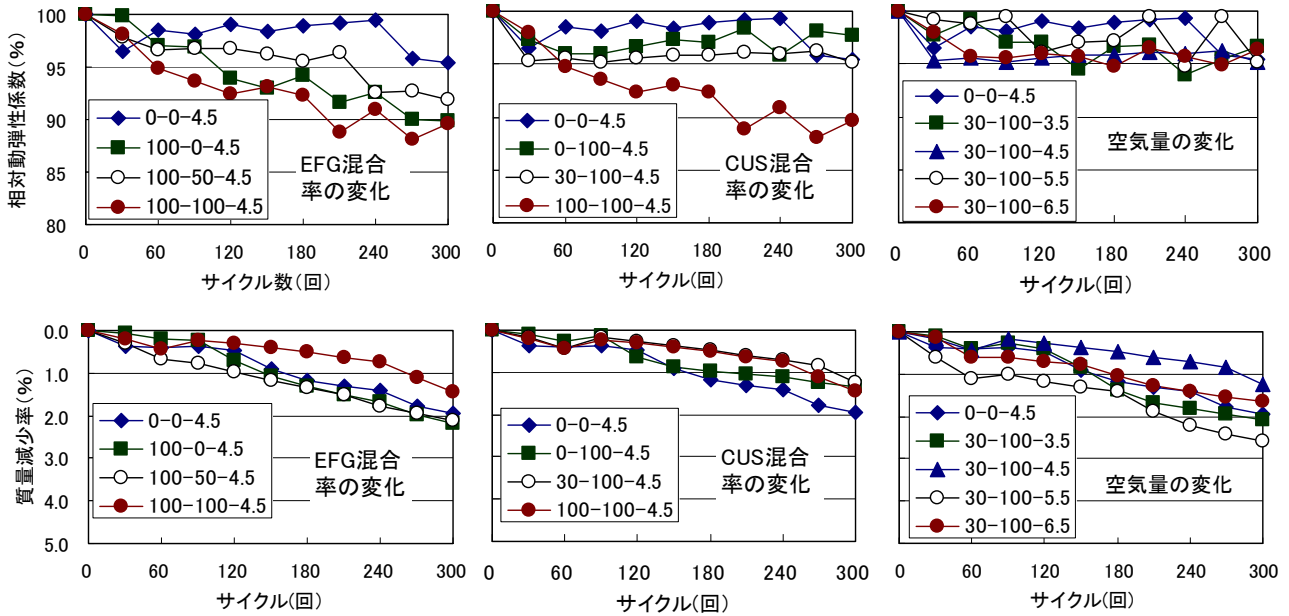


図-8 凍結融解試験結果

範囲であれば粗骨材混合による影響はないことが既往の研究⁴⁾から分かっている。実験結果からは、EFGよりもCUS混合率の増加が相対動弾性係数の低下に影響を及ぼしている。さらに、両者を混合した場合最も耐凍害性が劣る結果となっている。このことから、耐凍害性の場合混合率によって評価を行うことは困難であると考えられる。質量減少率については天然骨材と同等かそれより小さい値を示しているため、スラグ骨材の強度や密度が反映された結果と考えられる。

表-5 にスラグ骨材混合率と各指標との関係を示す。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。質量減少率はEFGの増加と共に低下する傾向を示している。

3.6 凍結融解抵抗性と空気量の関係

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。空気量と耐久性指数の関係を図-9に示す。

表-5 スラグ骨材混合率と各指標の関係

指標 混合条件	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

混合率がEFG100%、CUS30%、ブリーディング量を $0.6\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下に調整した実験ケース2の場合、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、一般の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。

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⁵⁾されている。すなわち、同一空気量の場合、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-10に示す。気泡間隔係数が250~300μm以下であれば耐久性指数が80%以上を確保しているため、一般のコンクリートと同様に250~300μm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

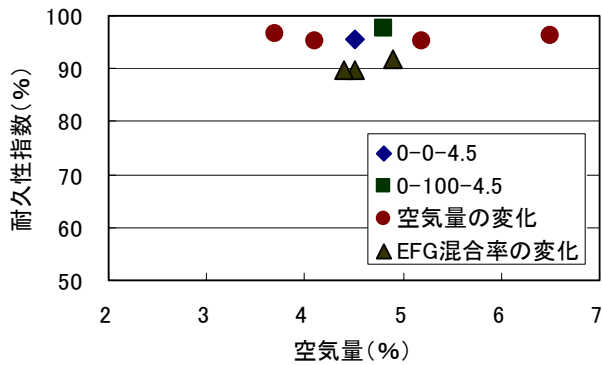


図-9 空気量と耐久性指数の関係

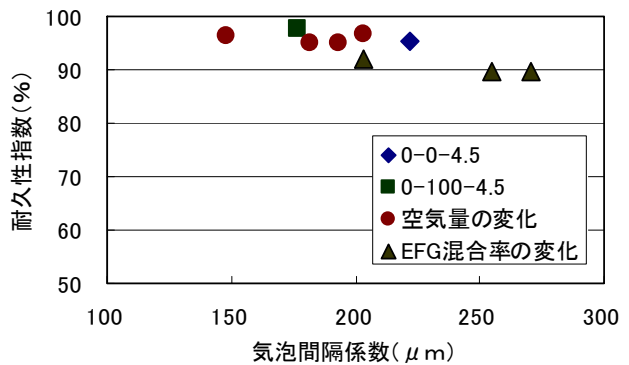


図-10 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

る。空気量と気泡間隔係数については一般のコンクリートと同様に扱ってよいと考えられる。図-11に空気量と気泡間隔係数の関係を示す。空気量の増加に伴い気泡間隔係数は減少する傾向にあり、今回の実験では、空気量4%以上で気泡間隔係数250~300 μ m以下を確保できている。

4. まとめ

銅スラグ細骨材を100%使用し電気炉酸化スラグ粗骨材の混合率による硬化コンクリートへの影響と空気量が凍結融解抵抗性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)粗骨材のEFG混合率は、長期圧縮強度に影響を及ぼさず、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)EFG、CUS共に100%の混合率の場合を除くと、静弾性係数はNew RC式で実験結果を表現できる。
- (3)EFGはCUSよりも混合率の増加に伴う質量減少率と乾燥収縮ひずみへの影響は少なく、自己収縮ひずみについては一般コンクリートと大きな差はなかった。
- (4)耐凍害性についてはEFGよりもCUSの影響が大きい。今回の配合は混合率を増加させると相対動弾性係数は低下する傾向があるが、凍結融解抵抗性は十分確保されていると考えられる。
- (5)空気量の増加による耐久性指数への影響は少ない。空気量と気泡間隔係数については一般コンクリートと同様な扱いでよいと考えられる。空気量4%以上で気泡間隔係数250~300 μ m以下を

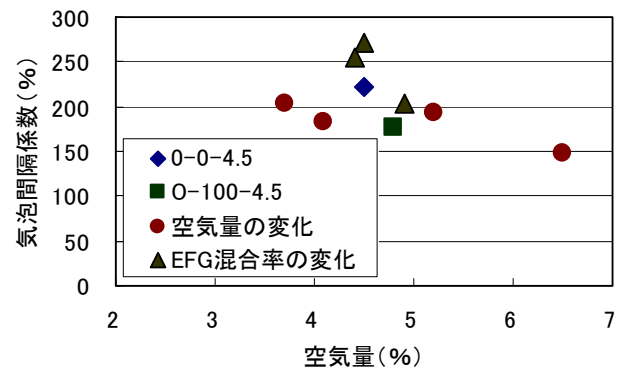


図-11 空気量と気泡間隔係数の関係

確保できる。

参考文献

- 1) 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) 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
- 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) 高野良広, 赤司有三他: コンクリート用高炉スラグ骨材の利用技術の近況, 新日鉄技報 376号, pp.45-50, 2002
- 5) Woods, H.: Durability of Concrete, American Concrete Institute Monograph 4, p.20, 1968