

論文 高炉スラグ細骨材と天然砂を混合した細骨材を用いたコンクリートの凍結融解に関する実験

上本 洋¹⁾・阿部 道彦²⁾・鹿毛 忠継³⁾・浅野 研一⁴⁾

要旨：本実験では、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性の改善と高強度コンクリートへの高炉スラグ細骨材の使用を目的とした研究の一環として、高炉スラグ細骨材と天然砂の混合砂を使用したコンクリートで凍結融解試験、ブリーディング試験および気泡組織の測定を行った。混合砂を使用したコンクリートは、普通強度において、相対動弾性係数がほぼ80%以上となった。これは、混合砂を使用することにより、微細な空気が多くなったことが原因として考えられる。また、高強度における混合砂を使用したコンクリートは、陸砂を使用したコンクリートと同程度の相対動弾性係数を示す結果となった。

キーワード：高炉スラグ細骨材, 混合率, ブリーディング, 凍結融解抵抗性, 気泡間隔係数, 耐久性指数

1. はじめに

近年、天然骨材の減少や採取規制、副産物の利用促進に伴い、スラグ骨材や再生骨材などがコンクリートに使用されてきている。スラグ細骨材の一つである高炉スラグ細骨材は、製鉄所において厳しく品質管理が行われ、製造される人工の砂である。有害な不純物は含まれておらず、品質も安定していて、コンクリート用骨材として、天然砂の代用として期待されている。しかしながら、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、日本建築学会の指針では、普通強度において使用が認められているが、高強度域については、使用が認められていない。また、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、エントラップトエアが入りやすく、同じ空気量では、天然砂を用いたコンクリートより凍結融解抵抗性が小さくなると言われている¹⁾。そのため本実験では、凍結融解抵抗性の改善を目的とした研究の一環として、天然砂と高炉スラグ細骨材をそれぞれ単独に使用したコンクリートおよび天然砂と高炉スラグ細骨材を混合した細骨材を

使用したコンクリートの特徴を把握するため、凍結融解抵抗性およびその他の性状について、比較検討を行った。

2. 実験概要

表-1に実験の要因と水準を、表-2に試験項目を示す。高炉スラグ細骨材(BFS)は、3つの工場の製品(H,R,B)を使用し、比較用の天然砂として陸砂(N)を使用した。目標空気量は、4.5%を中心に、3.5%、5.5%の3水準とした。高炉スラグ細骨材の混合率は、0%、25%、50%、100%の4水準とし、水セメント比は、30%、45%、55%、65%とした。また、試験項目は、圧縮強度試験、静弾性係数試験、促進中性化試験、凍結融解試験および凍結融解試験結果に影響を及ぼすと考えられているブリーディング試験と気泡間隔係数の測定とした。

3. 実験方法

3.1 使用材料

表-3に使用した細骨材の物性値、図-1に粒度分布を示す。セメントは、普通ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントを、それぞれ3銘柄等量混合(密度:3.16g/cm³, 比表面積:3320cm²/g;3.21g/cm³, 比表

表-1 実験の要因と水準

要因	水準	
	凍結融解	中性化
細骨材	大井川陸砂(N)	大井川陸砂(N) BFS(H)
	BFS(H)	
	BFS(R)	
	BFS(B)	
空気量	3.5%, 4.5%, 5.5%	4.5%
混合率 (高炉スラグ細骨材の割合)	0%, 25% 50%, 100%	0%, 50%, 100%
水セメント比	30%, 45% 55%, 65%	45%, 55%, 65%

表-2 試験項目

試験項目	試験材齢	備考
ブリーディング試験	—	JIS A 1123
圧縮強度試験	材齢 4 週	JIS A 1108
静弾性係数試験	材齢 4 週	JIS A 1149
促進中性化試験	25W まで	JIS A 1153
凍結融解試験	300 サイクル	JIS A 1148
気泡間隔係数	—	ASTM C 457

*1 工学院大学 工学研究科建築学専攻 (正会員)
 *2 工学院大学建築学部建築学科 教授・工博 (正会員)
 *3 独立行政法人 建築研究所 学術博士 (正会員)
 *4 株式会社 八洋コンサルタント技術部 (正会員)

面積：3210cm²/g)で使用する、粗骨材は、岩瀬産硬質砂岩
 砕石 2013 と 1305 の等量混合(絶乾密度：2.63g/cm³，表乾
 密度：2.65g/cm³，吸水率：0.71%，単位容積質量：1.599kg/L，
 実積率：60.8%)を使用した。混和剤は、普通コンクリー
 トにおいて、AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポ

リオールの複合体)、高強度コンクリートでは、高性能
 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)を使用し、

表-3 細骨材の物性値

細骨材 の 記号	絶乾 密度 (g/cm ³)	吸水 率 (%)	微粒 分量 (%)	単位 容積 質量 (kg/m ³)	実 積 率 (%)	粒形 判定 実積率 (%)	粗 粒 率 (%)	破 碎 値 (%)
N	2.55	2.09	-	1.73	67.8	-	2.85	4.3
H	2.59	1.88	2.20	1.51	58.3		2.66	22.0
R	2.57	1.81	1.60	1.45	56.4	51.8	2.28	22.2
B	2.79	0.26	4.6	1.53	54.8		2.58	25.6

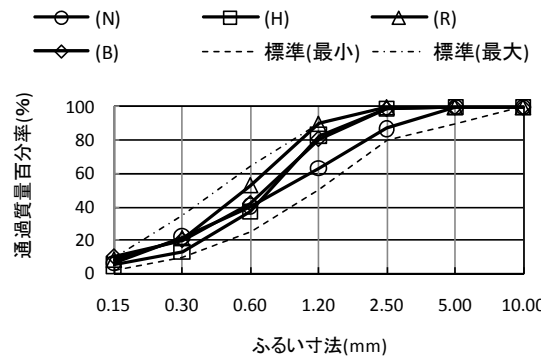


図-1 実験に用いた細骨材の粒度

表-4 調合とフレッシュ性状

通し 番号	種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (骨材は表乾) (kg/m ³)					混和剤* (C×%)	AE 助剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)	フレッシュ 性状		ブリー ディン グ	圧 縮 強 度	凍 結 融 解	気 泡 組 織	促 進 中 性 化	圧 縮 強 度 (N/mm ²)	ヤング 係数 (kN/mm ²)
				W	C	S						スランブ, スランブ フロー (cm)	空 気 量 (%)							
						陸 砂	BFS	G												
19	N100-55-4.5	55	48.0	176	320	845	0	934	0.25	0.0023	—	19.0	3.7	○	○	○	○	41.5	29.4	
1	N100-55-4.5	55	48.0	176	320	845	0	934	0.25	0.0020	—	19.5	3.9	○	○	○	○	41.0	29.7	
18	H25-55-4.5	55	47.0	180	327	632	192	943	0.25	0.0015	—	19.0	4.4	○	○	○	○	39.6	30.0	
14	H50-55-4.5	55	46.1	184	335	398	404	951	0.25	0.0010	—	19.5	4.1	○	○	○	○	39.1	31.3	
3	H50-55-4.5	55	46.1	184	335	398	404	951	0.25	0.0010	—	19.0	4.5	○	○	○	○	39.7	30.8	
13	H100-55-4.5	55	44.8	194	353	0	767	951	0.25	0.0010	—	19.0	4.5	○	○	○	○	37.1	31.6	
2	H100-55-4.5	55	43.6	196	356	0	743	967	0.25	—	—	19.0	4.7	○	○	○	○	35.5	31.9	
10	B50-55-4.5	55	45.5	188	342	390	420	951	0.25	0.0005	—	18.5	4.8	○	○	○	○	37.8	26.8	
11	R50-55-4.5	55	45.1	184	335	390	393	967	0.25	0.0015	—	18.5	4.6	○	○	○	○	38.4	29.1	
6	N100-45-4.5	45	46.2	176	391	787	0	934	0.25	0.0020	—	18.5	4.1	○	○	○	○	54.0	31.4	
17	H50-45-4.5	45	44.1	184	409	368	373	951	0.25	—	—	19.0	4.0	○	○	○	○	50.9	32.5	
9	H50-45-4.5	45	44.1	184	409	368	373	951	0.25	0.0010	—	19.5	4.0	○	○	○	○	51.0	33.1	
7	H100-45-4.5	45	42.5	188	418	0	713	967	0.25	0.0005	—	19.5	5.3	○	○	○	○	50.5	34.7	
4	N100-65-4.5	65	50.0	176	271	901	0	918	0.25	0.0025	—	18.0	4.1	○	○	○	○	30.8	27.8	
12	H50-65-4.5	65	48.0	186	286	424	430	934	0.25	0.0010	—	19.0	4.6	○	○	○	○	29.1	28.3	
8	H50-65-4.5	65	48.0	186	286	424	430	934	0.25	0.0010	—	19.0	4.3	○	○	○	○	30.2	29.0	
5	H100-65-4.5	65	45.9	196	302	0	804	951	0.25	—	—	14.5	5.3	○	○	○	○	26.2	27.9	
16	H50-55-5.5	55	46.3	176	320	402	408	951	0.25	0.0025	—	18.0	6.0	○	○	○	○	33.1	29.0	
15	H50-55-3.5	55	46.9	184	335	411	417	951	0.25	—	—	19.0	3.1	○	○	○	○	40.3	32.1	
20	N100-30-4.5	30	47.3	184	613	710	0	806	1.00	0.0010	—	64.0	5.1	○	○	○	○	81.6	31.5	
23	H25-30-4.5	30	47.4	181	603	543	177	814	1.00	0.0013	0.0005	60.0	4.4	○	○	○	○	83.6	34.5	
22	H50-30-4.5	30	46.8	181	603	355	360	822	1.00	0.0016	0.0010	63.0	4.3	○	○	○	○	79.2	34.2	
21	H100-30-4.5	30	46.0	180	600	0	710	838	1.00	0.0023	0.0020	60.0	5.1	○	○	○	○	67.6	35.3	
24	B50-30-4.5	30	46.6	182	607	352	379	822	1.00	0.0015	0.0010	57.0	4.3	○	○	○	○	84.6	34.2	
25	R50-30-4.5	30	45.6	182	607	344	347	838	1.00	0.0015	0.0010	59.5	4.8	○	○	○	○	78.8	33.7	
26	H50-30-5.5	30	45.5	183	610	337	342	822	1.00	0.0030	0.0010	66.0	5.4	○	○	○	○	74.0	33.7	
27	H50-30-3.5	30	48.1	179	597	373	379	822	1.00	—	0.0010	57.5	3.1	○	○	○	○	85.4	35.9	

* 普通強度のコンクリートでは AE 減水剤，高強度コンクリートでは高性能 AE 減水剤を使用した。

空気量の調整に消泡剤(ポリアルキレングリコール誘導体)および AE 助剤(変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)を使用した。

3.2 調合およびフレッシュ性状

表-4 にコンクリートの調合とフレッシュ性状を示す。単位水量は、目標空気量と目標スランプとなるように設定した。普通強度コンクリートは、混和剤の使用量を一定として空気量、スランプの調整を行うこととした。高強度コンクリートについても高性能 AE 減水剤の使用量を一定として、単位水量によりスランプフローを調整することとした。単位粗骨材かさ容積は、陸砂(N)、高炉スラグ細骨材(H)、(R)および(B)に対して、粗粒率を考慮し、普通強度コンクリートでは $0.580\text{m}^3/\text{m}^3 \sim 0.600\text{m}^3/\text{m}^3$ とし、高強度コンクリートでは、 $0.505\text{m}^3/\text{m}^3 \sim 0.520\text{m}^3/\text{m}^3$ とした。AE 減水剤の使用量は、普通強度コンクリートでは、セメント量 $\times 0.25\%$ と一定にし、高強度コンクリートでは、セメント量 $\times 1\%$ で、消泡剤および AE 助剤により空気量を目標値 $\pm 1\%$ となるように調整した。

3.3 試験方法

ブリーディング、圧縮強度、静弾性係数、促進中性化および凍結融解の各試験については、それぞれ当該 JIS に規定された方法で行った。また、角柱供試体で、4 週水中養生したものを中心部で約 20mm の幅でカットし、両面を平滑になるまで研磨した後、リニアトラバース法 (ASTM C457) に準じ、供試体の切断面 100mm \times 100mm を全長 2000mm \sim 2100mm でトラバースして気泡組織の測定を行った。

4. 実験結果とその考察

4.1 ブリーディング試験結果

図-2 にブリーディングの試験結果を示す。なお、以下の図表中の凡例記号は、細骨材の種類、混合率、水セメント比、空気量を示す。高炉スラグ細骨材のブリーディング量は、陸砂(N)に比べて高い値を示した。初期におけるブリーディング量は、天然砂と高炉スラグ細骨材を混

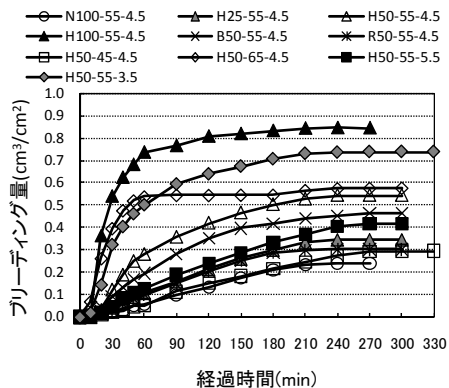


図-2 ブリーディング試験結果

合することによりかなり抑制することができ、最終的なブリーディング量も高炉スラグ細骨材のみ使用したコンクリートより小さい値となった。高炉スラグ細骨材のブリーディング量が多くなる原因は、高炉スラグ細骨材がガラス質²⁾であることに加えて、単位水量が多かったことに起因していると考えられる。天然砂と混合することにより、単位水量が減少し、ブリーディング量を抑制できたと考えられる。また、空気量が多くなるとブリーディングが小さくなり、高炉スラグ細骨材(H)を混合したものより、B、R を混合したものの方がブリーディング量が少なくなる結果となった。

4.2 圧縮強度および静弾性係数

図-3 にコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図-3 によると、普通強度コンクリートはいずれの空気量においても日本建築学会の RC 構造計算規準式の推定値($k_1=1.0$)をほぼ超える値となった。高強度コンクリートは、高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの方が陸砂(N)より高い静弾性係数を示す傾向が見られた。これは、高炉スラグ細骨材がガラス質で、応力レベルが小さい時は変形しにくく、ある応力レベルから破壊が進行しやすくなっているためと推測される。

4.3 促進中性化試験結果

図-4 に促進期間と中性化深さの関係を示す。図-5

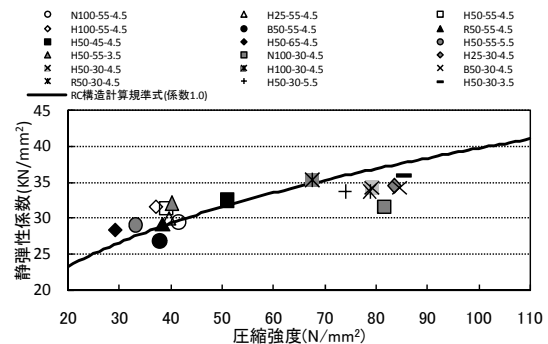


図-3 圧縮強度および静弾性係数試験結果

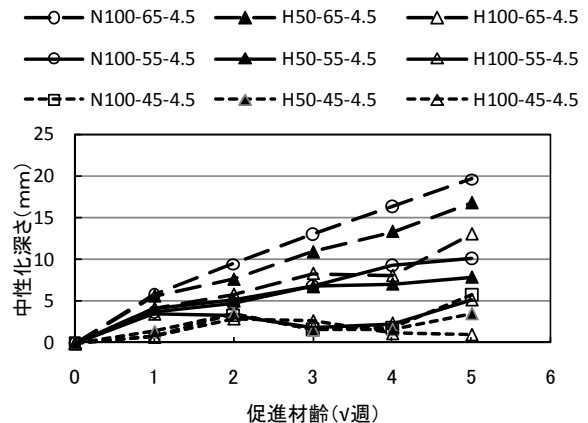


図-4 促進期間と中性化深さの関係

に各コンクリートの中性化速度係数を示す。図-4によると、陸砂(N)を使用したコンクリートの中性化深さは大きい値を示し、高炉スラグ細骨材の混合率が大きくなるにつれて、中性化深さは、小さい値を示した。また、図-5を見ると単位水量ごとの中性化速度係数は、陸砂(N)が最も高い値を示し、高炉スラグ細骨材(H)の混合率 50%、100%の順に小さくなった。この理由は明瞭ではないが、高炉スラグ細骨材は、潜在水硬性があるため、陸砂の場合と比べて骨材界面が緻密になったためと推測される³⁾。高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、中性化を抑制する効果が期待できる。

4.4 凍結融解試験結果

図-6 に普通強度コンクリートの凍結融解試験時のサイクル数と相対動弾性係数の関係を示し、図-7 にサイクル数と質量減少率の関係を示す。図-6によると全てのコンクリートが、300 サイクルで、ほぼ相対動弾性係数 80% 以上となった。B50-55-4.5 は、90 サイクルで一度相対動弾性係数が大きく下がったが、120 サイクルで、60 サイクルの値と同程度となった。このため、これは実験誤差と考え、問題ないと判断した。また、図-7によると、コンクリートの質量減少率は 1% 前後となった。細骨材の吸水率は、高炉スラグ細骨材(B)が最も小さかったが、凍結融解抵抗性にあまり影響は見られなかった。

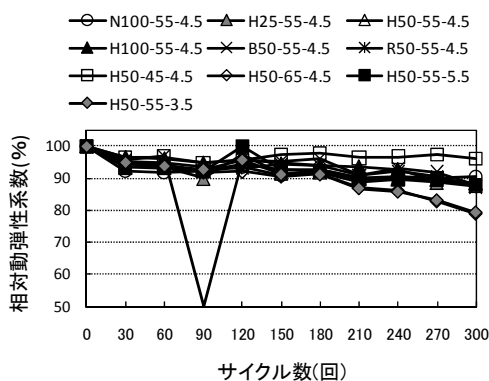


図-6 普通強度のサイクル数と相対動弾性係数の関係

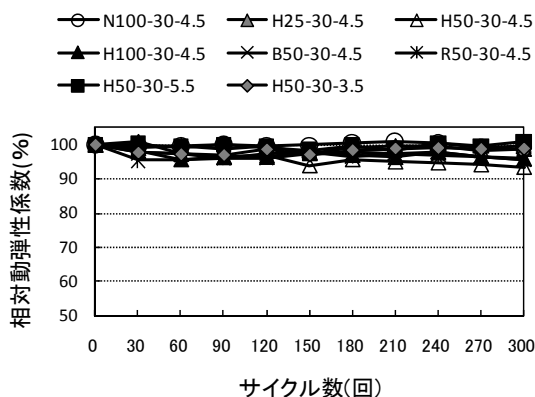


図-8 高強度のサイクル数と相対動弾性係数の関係

図-8 に高強度コンクリートの凍結融解試験時のサイクル数と相対動弾性係数の関係を示し、図-9 にサイクル数と質量減少率の関係を示す。図-8によると、300 サイクルで相対動弾性係数 90%を超える高い値を示した。また、図-9によると全てのコンクリートが300 サイクルで、質量減少率が 1% 未満と低い値を示した。

以上のことより、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、凍結融解抵抗性に、やや問題があるとされているが、今回の実験では、高炉スラグ細骨材を単独、あ

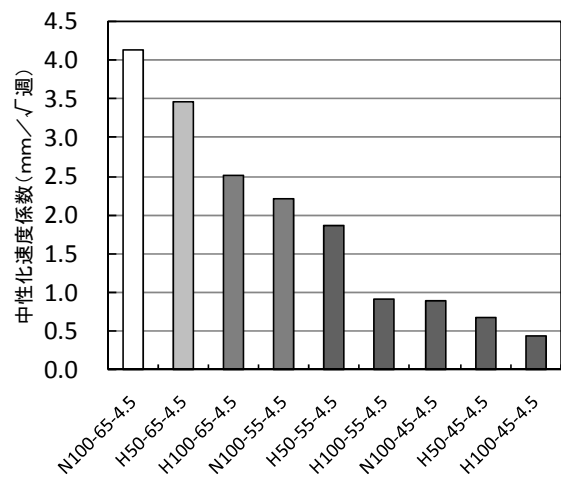


図-5 中性化速度係数

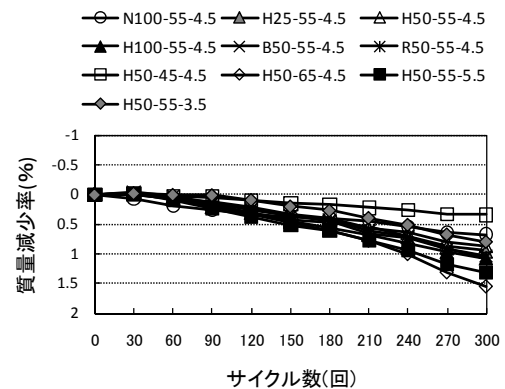


図-7 普通強度のサイクル数と質量減少率

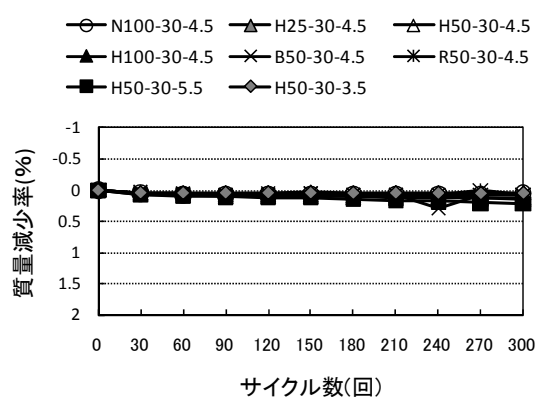


図-9 高強度のサイクル数と質量減少率

表-5 気泡組織の測定値とコンクリートの空気量, ブリーディングおよび耐久性指数

通し番号	記号	気泡個数	平均弦長 (μm)	平均気泡径 (μm)	気泡間隔係数 (μm)	硬化後空気量 (%)	フレッシュ時の空気量 (%)	ブリーディング量	耐久性指数
19	N100-55-4.5	461	171	256	233	3.8	4.3	0.24	90
18	H25-55-4.5	366	180	271	271	3.2	4.9	0.35	88
14	H50-55-4.5	353	243	364	327	4.2	5.1	0.54	88
13	H100-55-4.5	268	323	485	443	4.2	5.8	0.84	88
10	B50-55-4.5	459	252	378	229	5.6	6.1	0.46	88
11	R50-55-4.5	432	211	316	275	4.5	5.7	0.30	87
17	H50-45-4.5	442	214	322	285	4.6	5.0	0.29	96
12	H50-65-4.5	341	294	441	362	4.8	5.6	0.58	79
16	H50-55-5.5	394	245	367	306	4.7	7.2	0.42	88
15	H50-55-3.5	235	281	422	428	3.2	3.9	0.74	79
20	N100-30-4.5	515	171	256	253	4.4	5.8	—	99
23	H25-30-4.5	432	169	253	272	3.6	5.3	—	99
22	H50-30-4.5	554	198	297	266	5.4	5.3	—	93
21	H100-30-4.5	421	238	357	332	4.9	6.5	—	96
24	B50-30-4.5	604	176	264	240	5.2	5.5	—	96
25	R50-30-4.5	567	166	249	240	4.6	5.9	—	96
26	H50-30-5.5	634	162	243	224	5.1	6.5	—	101
27	H50-30-3.5	240	293	439	475	3.5	4.0	—	99

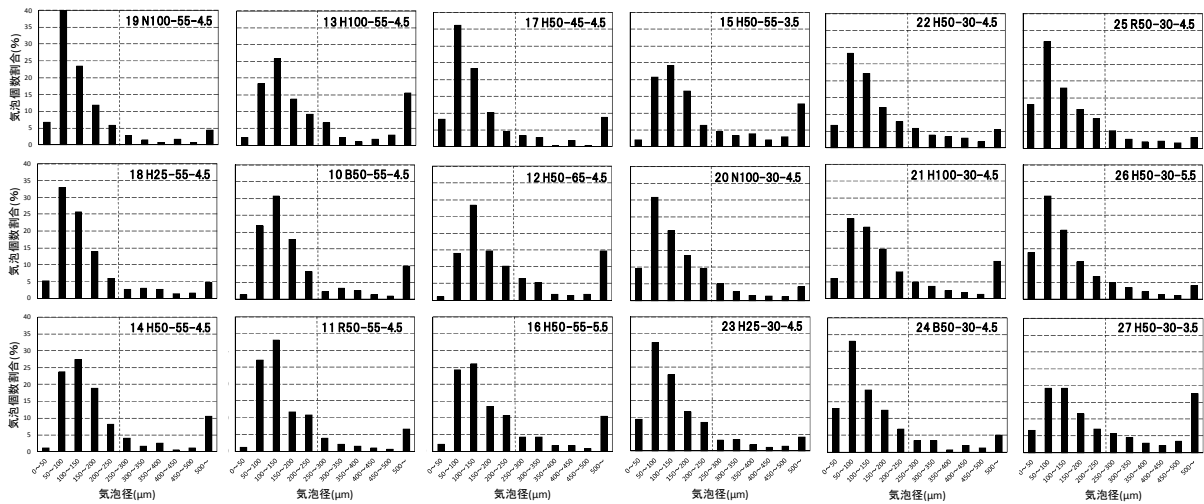


図-10 コンクリートの気泡個数の分布

横軸(気泡径) : 左端 0~50 μm, 右端 500 μm 以上, 縦軸(気泡個数割合) : 最小値 0%, 最大値 40%

るいは天然砂と混合して使用した場合のいずれも天然砂単独で使用した場合とあまりかわらなかった。よって、この原因を検証するために、気泡組織が凍結融解抵抗性に影響していると考え、以降でその検討を行った。

4.5 気泡組織と気泡間隔係数

表-5 に普通強度コンクリートの気泡組織の測定結果および気泡間隔係数を示し、図-10 に気泡個数の分布を示す。表-5 によると、H50-55-3.5, H50-65-4.5 がやや小さい耐久性指数を示したのは、それぞれ水セメント比が

高かったこと、空気量が少なかったことによると考えられる。また、気泡間隔係数は、H100-55-4.5, H50-55-3.5, H50-65-4.5 を除いて、350μm 以下となった。H100-55-4.5, H50-55-3.5, H-50-65-4.5 の気泡間隔係数が、比較的大きな値を示したのは、表-5 に示すように、ブリーディング量がそれぞれ、0.84cm³/cm², 0.74cm³/cm², 0.58cm³/cm² と多かったことにも起因していると考えられる。この傾向は、昨年度の報告⁴⁾でもみられ、理由は明確ではないが、関連性は否定できない。

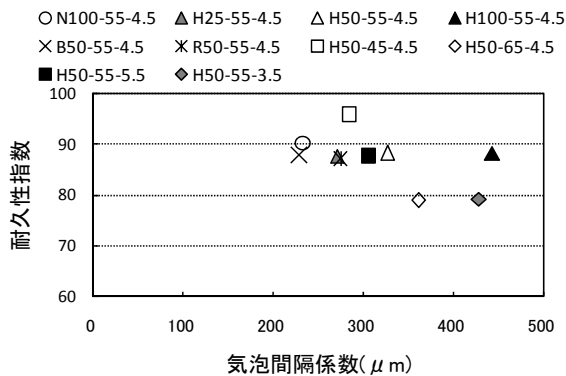


図-11 気泡間隔係数と耐久性指数の関係(普通強度)

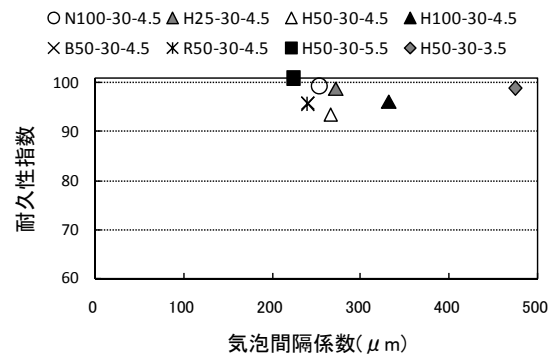


図-12 気泡間隔係数と耐久性指数の関係(高強度)

表-5 に高強度コンクリートの気泡組織の測定結果および気泡間隔係数を示し、図-10 に気泡個数を示す。表-6 によると H50-30-3.5 を除いて、気泡間隔係数は、ほぼ 350μm 以下の範囲に収まった。H50-30-3.5 の気泡間隔係数が著しく大きくなったのは、空気量が少なく、気泡個数が少なかったことが原因として考えられる。この傾向は昨年度の報告⁴⁾でもみられた。また、図-10 を見ても H50-30-3.5 を除いて、50~250μm の気泡個数が著しく多く、水セメント比が小さくなると良質な細かい気泡が多くなった。

4.6 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

図-11 に普通強度コンクリートの気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。図-11 によると、一般的に言われているような気泡間隔係数が大きくなると耐久性指数が小さくなるという傾向がみられなかった。H50-55-5.5 は、天然砂と高炉スラグ細骨材の混合率を 50%としたことにより、凍結融解抵抗性が改善され、気泡間隔係数の大きさに関係なく、高い耐久性指数を示したと考えられる。H100-55-4.5 は、高炉スラグ細骨材のみ使用しており、昨年度の結果⁴⁾では耐久性指数がかなり小さな値を示しており、この点については今後検討を進めていく予定である。

図-12 に高強度コンクリートの気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。図-12 によると、図-11 と同様に一般的に言われているような気泡間隔係数が大きくなると耐久性指数が大きくなるという傾向が見られなかった。H100-30-4.5 と H50-30-3.5 は、気泡間隔係数の割に、耐久性指数の値も大きくなった。これは、水セメント比が小さいことと、コンクリート内部の組織が緻密であることが原因として考えられる。また、上記以外のコンクリートについては、昨年度の結果⁴⁾と同様に、水セメント比が小さいことにより、ブリーディング量が少なくなり、気泡間隔係数および耐久性指数の値がよくなる傾向が見られた。

5. まとめ

高炉スラグ細骨材と天然砂を混合した細骨材を使用した普通強度のコンクリートは、300 サイクルで、ほぼ相対動弾性係数 80%以上となった。これは、高炉スラグ細骨材に天然砂を混合することによりコンクリート中に微細な気泡が多くなり、気泡間隔係数の値が改善されたためと考えられる。

高強度コンクリートでは、300 サイクルで相対動弾性係数 90%を超える高い値を示し、天然砂のみを使用したコンクリートと同程度の凍結融解抵抗性を示す結果となった。これは、水セメント比が小さいため、ブリーディング量が少なく、全体的に微細な空気泡が多かったことが原因として考えられる。

また、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、天然砂を使用したコンクリートよりも中性化しにくい結果となり、中性化を抑制する効果が期待できる。

謝辞

本実験は、日本建築学会高炉スラグ細骨材指針改定 WG の研究の一環および工学院大学総合研究所 UDM の課題の一つとして実施したもので、実験の実施に当たり鉄鋼スラグ協会ほか関係各位の協力を得ました。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高炉スラグ細骨材を用いるコンクリート施工指針・同解説，p.125, 1983
- 2) 日本建築学会：高炉スラグ細骨材を用いるコンクリート施工指針・同解説，p.27, 1983
- 3) 古川・石川他：石炭溶融水砕スラグのコンクリート用細骨材への利用に関する研究(その 13)，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.635-636, 2011
- 4) 上本・阿部・鹿毛・浅野：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.119-124, 2011