

論文 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

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を目的とした研究の一環として、比較用に天然砂を用いて、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。高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、水セメント比 55%において、全体的に低い相対動弾性係数を示す結果となった。これは、ブリーディング量が天然砂に比べて多かったことおよび微細な空気泡が少なかったことが原因として考えられる。一方で、水セメント比 30%における高炉スラグ細骨材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，空気量，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、まず、高炉スラグ細骨材を用い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、天然砂を用いたコンクリートの場合と比較検討を行った。

2. 実験概要

表-1 に実験の要因と水準、表-2 に試験項目を示す。

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

高炉スラグ細骨材は、2 つの工場の製品を使用した。目標空気量は、水セメント比 55%については、4.5%を中心に、3.5%、5.5%の 3 水準とし、水セメント比 30%については、3.5%を中心に、2.0%、5.0%の 3 水準とした。また、試験項目は、圧縮強度試験、静弾性係数試験、促進中性化試験と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を行った。

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(密度：

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
細骨材	大井川陸砂(N) 高炉スラグ細骨材(H) 高炉スラグ細骨材(R)
	3.5%, 4.5%, 5.5%(W/C55%)
	2.0%, 3.0%, 5.0%(W/C30%)
水セメント比	55%, 30%

表-3 細骨材の物性値

種類	表乾	絶乾	吸水	微粒	単位	実	粒形	粗
	密度	密度			容積			
	(g/cm ³)	(g/cm ³)	率	分量	質量	率	率(%)	率(%)
			(%)	(%)	(kg/m ³)	(%)		
N	2.60	2.55	2.09	-	1.73	67.8	-	2.85
H	2.69	2.67	0.67	1.70	1.51	56.6	48.7	2.57
R	2.58	2.52	2.45	2.30	1.50	59.3	49.2	2.38

*1 工学院大学 工学研究科建築学専攻 (正会員)
 *2 工学院大学工学部建築学科 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)

3.16g/cm³, 比表面積: 3270cm²/g)を使用し, 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, 水セメント比 50%では, AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体), 水セメント比 30%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, 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。水セメント比 55%については, 単位水量を空気量 4.5%のときに目標スランプが 18±1cm となるように設定し, 他の空気量のときは, 空気量 4.5%のときの単位水量の値とした。このためこの調合方法では, 高炉スラグ細骨材を使用した場合に目標空気量 3.5%でスランプが 12cm 程度とかなり小さくなり, 反対に目標空気量 5.5%では 20~21cm とやや大きくなった。水セメント比 30%については, いずれの高炉スラグ細骨材も単位水量を一定として高性能 AE 減水剤の使用量で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)および(R)に対して, 粗粒率を考慮し, それぞれ 0.58m³/m³, 0.60m³/m³, 0.62m³/m³とし, AE 減水剤の使用量は, 水セメント比 50%では, セメント質量(C)×0.25%と一定にし, 水セメント比 30%では, 陸砂(N)は, セメント質量×1.20%, 高炉スラグ細骨材(H)は, セメント使用量×1.40%, 高炉スラグ(R)は, セメント使用量×1.35%で, 空気量 3.5%のときのみセメント質量×1.30 とし, 消泡剤および AE 助剤により空気量を目標値±0.5%となるように調整した。

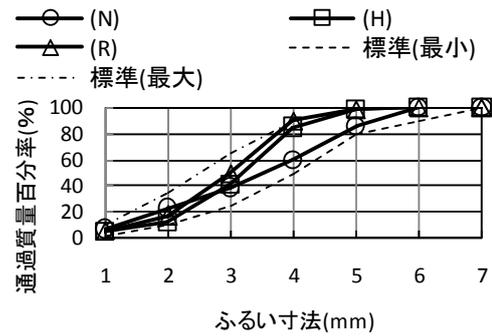


図-1 細骨材の粒度

表-4 調合とフレッシュ性状

種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量(絶乾) (kg/m ³)				混和剤* (C×%)	AE 助剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)	フレッシュ性状			
			W	C	S	G				スランプ (cm)	スランプ フロー (mm)	空気量 (%)	単位容積 質量(kg/m ³)
N-55-3.5	55	48.8	176	320	854	927	0.25	0.0015	0.0300	18.0	305	3.1	2308
N-55-4.5	55	48.0	176	320	829	927	0.25	0.0040	0.0300	18.5	335	4.4	2280
N-55-5.5	55	47.2	176	320	854	927	0.25	0.0055	0.0300	19.5	345	5.4	2259
H-55-3.5	55	44.4	196	357	753	959	0.25	0.0025	0.0300	12.0	-	3.5	2304
H-55-4.5	55	43.5	196	357	753	959	0.25	0.0055	0.0300	18.0	325	4.4	2282
H-55-5.5	55	42.6	196	357	726	959	0.25	0.0075	0.0300	21.0	355	5.2	2268
R-55-3.5	55	43.6	188	342	745	991	0.25	0.0025	0.0300	12.5	-	3.3	2272
R-55-4.5	55	42.7	188	342	719	991	0.25	0.0040	0.0300	17.5	290	4.3	2246
R-55-5.5	55	41.8	188	342	694	991	0.25	0.0065	0.0300	20.0	350	5.5	2214
N-30-2.0	30	50.2	180	600	780	800	1.20	-	0.0020	-	505	1.5	2386
N-30-3.5	30	48.9	180	600	742	800	1.20	0.0020	0.0020	-	530	3.0	2353
N-30-5.0	30	47.6	180	600	704	800	1.20	0.0030	0.0020	-	575	4.7	2315
H-30-2.0	30	46.0	192	640	712	831	1.40	-	0.0025	-	580	1.7	2399
H-30-3.5	30	44.6	192	640	681	831	1.40	0.0025	0.0025	-	615	3.5	2352
H-30-5.0	30	43.1	192	640	641	831	1.40	0.0035	0.0025	-	605	4.7	2325
R-30-2.0	30	43.9	192	640	658	863	1.35	-	0.0020	-	520	1.3	2380
R-30-3.5	30	42.5	192	640	620	863	1.30	0.0020	0.0020	-	590	3.6	2309
R-30-5.0	30	40.9	192	640	581	863	1.35	0.0030	0.0020	-	555	4.7	2299

* W/C=55%では AE 減水剤, W/C=30 では高性能 AE 減水剤を使用した。

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アトラバース法 (ASTM C457) に準じ、供試体の切断面 100mm×100mm を全長 2000mm~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。高炉スラグ細骨材(H)は、いずれの空気量においても、高炉スラグ細骨材(R)、陸砂(N)に比べて高い値を示した。また、初期におけるブリーディング量もかなり大きい値を示した。これらは、高炉スラグ細骨材がガラス質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。なお、ブリーディングに及ぼす空気量の違いは、あまり大きくなかった。

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、水セメント比 55% のコンクリートは、いずれの空気量においても RC 構造計算規準式の推定値($k_f=1.0$)を超える値となった。水セメント比 30% のコンクリートは、高炉スラグ細骨材(H,R)を用いたコンクリートの方が陸砂(N)より高い値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、図-5 に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、高炉スラグ細骨材(H,R)を使用したコンクリートより大きくなった。また、図-5 を見ると中性化速度係数の値は、陸砂(N)が最も高い値を示し、高炉スラグ細骨材(H)、高炉スラグ細骨材(R)の順番となっていた。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。

4.4 凍結融解試験結果

図-6 に水セメント比 55% 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 によると陸砂(N)は、空気量の大きい順に高い相対動弾性係数を示した。高炉スラグ細骨材は、R-55-5.5 を除いて、60 サイクル以内で測定不能となった。また、図-7 によると N-55-4.5、

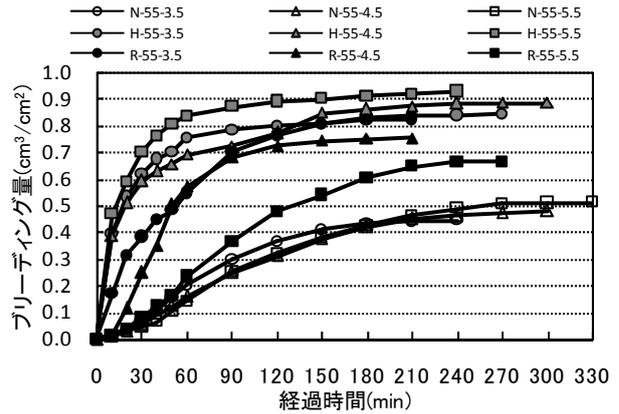


図-2 ブリーディング試験結果

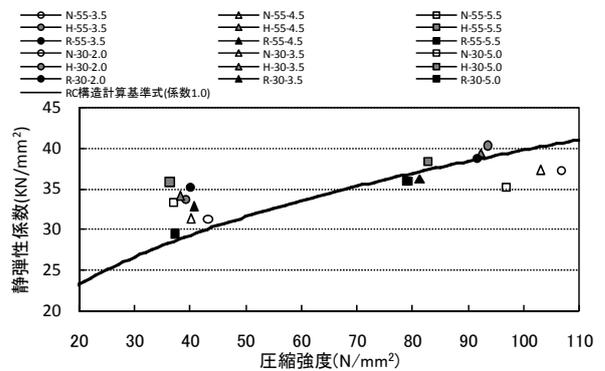


図-3 圧縮強度および静弾性係数試験結果

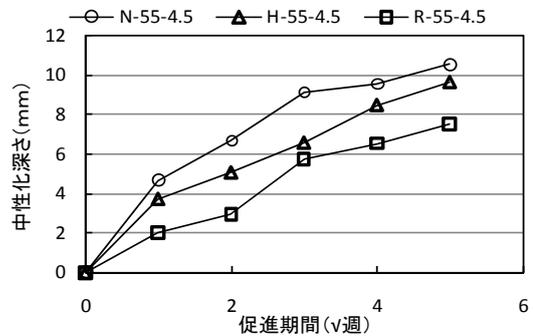


図-4 促進期間と中性化深さの関係

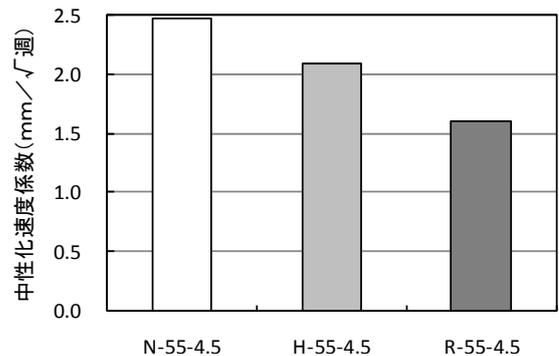


図-5 中性化速度係数

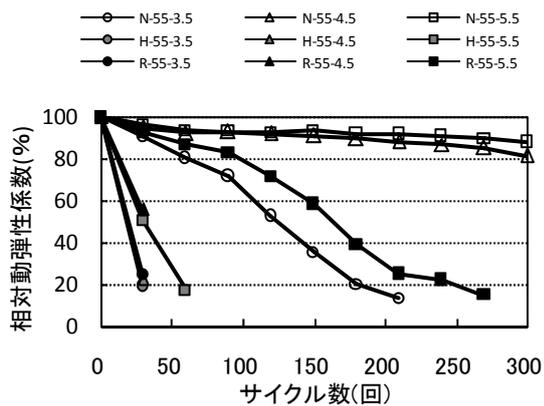


図-6 W/C=55のサイクル数と相対動弾性係数の関係

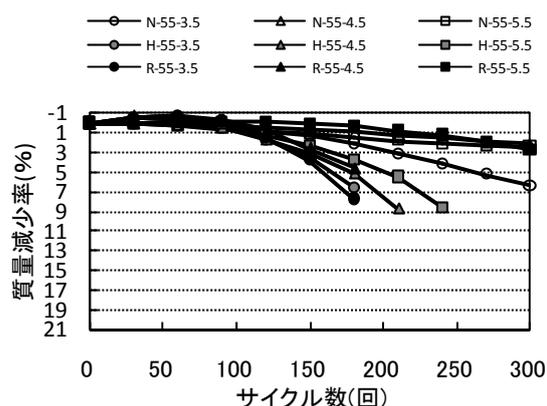


図-7 W/C=55のサイクル数と質量減少率

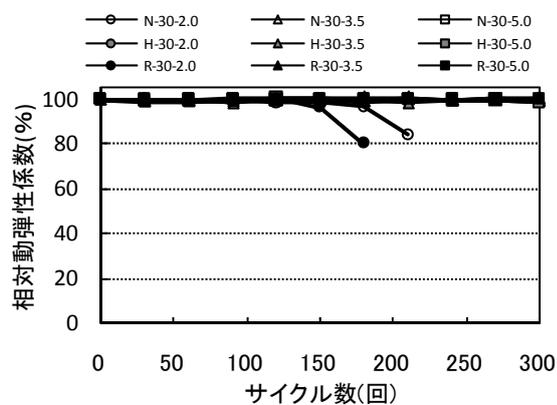


図-8 W/C=30のサイクル数と相対動弾性係数の関係

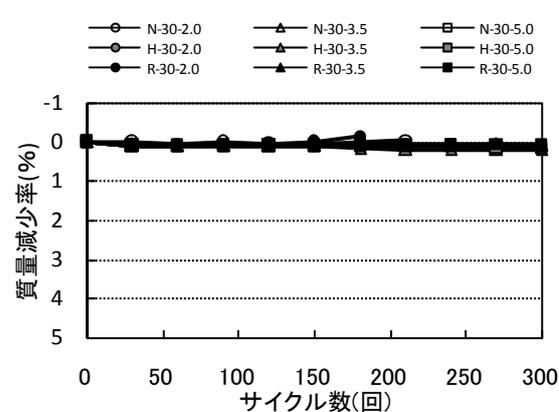


図-9 W/C=30のサイクル数と質量減少率

表-5 W/C=55の気泡組織の測定値とコンクリートの空気量およびブリーディング

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 (cm^3/cm^2)
N-55-4.5	345	302	454	364	5.1	4.4	0.48
N-55-3.5	189	409	602	560	3.7	3.1	0.44
N-55-5.5	421	286	429	325	5.8	5.4	0.51
H-55-4.5	198	457	685	615	4.4	4.4	0.89
H-55-3.5	83	649	973	1109	2.6	3.5	0.84
H-55-5.5	152	611	917	824	4.4	5.2	0.93
R-55-4.5	254	405	608	511	4.9	4.3	0.75
R-55-3.5	172	500	749	678	4.2	3.3	0.82
R-55-5.5	349	357	536	413	5.9	5.5	0.66

N-55-5.5, R-55-5.5は、質量減少率が約2%と低い値を示し、N-55-3.5の質量減少率は、やや高い値を示した。R-55-5.5を除いた高炉スラグ細骨材(H,R)は、180~240サイクルで質量減少率が8%前後となり、供試体が折損して測定不能となった。細骨材の吸水率は、高炉スラグ細骨材(H)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-8に水セメント比30%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、N-30-2.0とR-30-2.0を除いて、300サイクルで相対動弾性係数95%を超える高い値を示した。また、N-30-2.0とR-30-2.0は供試体の一つがそれぞれ210と180サイクルの時点で測定不能となった。また、図-9によるとN-30-2.0とR-30-2.0

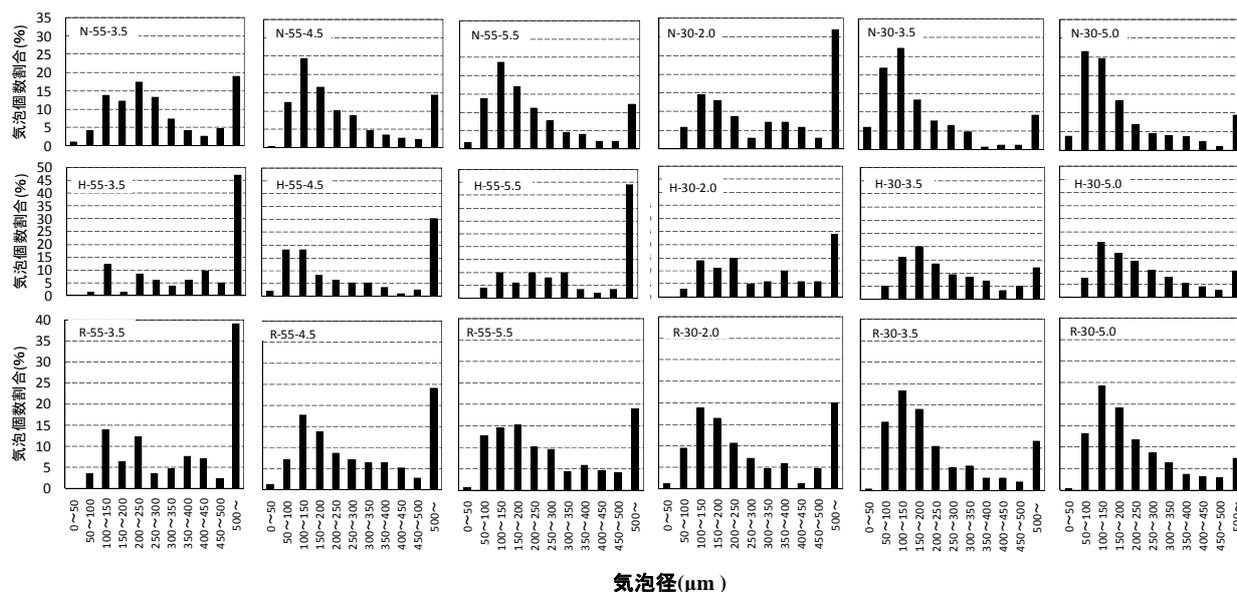


図-10 コンクリートの気泡個数(横軸：左端 0~50 μm, 右端 500 μm 以上)

表-6 W/C=30 の気泡組織の測定値とコンクリートの空気量および耐久性指数

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 (%)	耐久性指数
N-30-2.0	69	614	920	1261	2.0	1.5	53
N-30-3.5	247	213	319	393	2.6	3.0	100
N-30-5.0	445	237	355	321	5.2	4.7	100
H-30-2.0	100	400	600	865	1.9	1.7	100
H-30-3.5	200	351	527	591	3.5	3.5	99
H-30-5.0	383	277	416	390	5.2	4.7	99
R-30-2.0	85	351	526	855	1.5	1.3	52
R-30-3.5	417	251	376	353	5.1	3.6	100
R-30-5.0	457	250	375	337	5.6	4.7	100

を除いて、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、細骨材の種類ごとに空気量だけでなく、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 に水セメント比 55%の高炉スラグ細骨材および陸砂を用いた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 に水セメント比 55%の気泡個数を示す。表-5 によると、R-55-4.5 の気泡個数および気泡間隔係数は、N-55-4.5 と N-55-5.5 に近い値となった。R-55-5.5 を除く高炉スラグ(H)および高炉スラグ(R)の気泡間隔係数は、比較的大きな値を示した。これは、表-5 に示すように、ブリーディング量が多かったことにも起因していると考えられる。中でも、H-55-3.5 と

H-55-5.5 の気泡間隔係数が著しく大きくなった。これは、図-10 に示すように、500μm 以上の気泡個数が多かったことによると考えられる。

表-6 に水セメント比 30%の高炉スラグ細骨材および陸砂を用いた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 に水セメント比 30%の気泡個数を示す。表-6 によると空気量 2.0%の供試体と H-30-3.5 を除いて、気泡間隔係数は、300~400 μm 範囲に収まった。空気量 2.0 の供試体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、気泡個数少なかったことが原因として考えられる。また、図-10 を見ても空気量 2.0%の供試体を除いて、50~250 μm の気泡個数が多く、水セメント比が小さくなると細かい良質な気泡が多くなった。また、R-30-5.5 は、硬化後の空気量がフレッシュ時より 1.5%ほど多くなってしまった。この件に

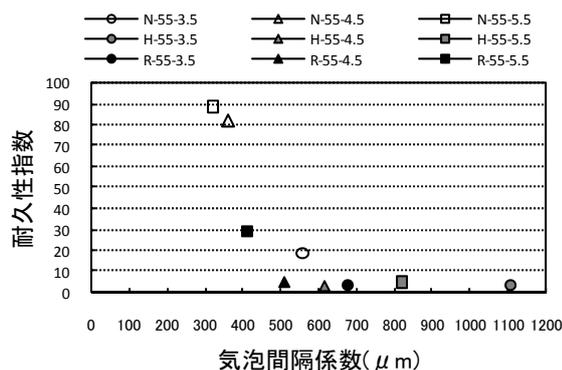


図-11 気泡間隔係数と耐久性指数の関係(W/C=55)

ついで、気泡の測定を再度行ったが、ほぼ同じ値を示した。よって、測定した供試体の部分に気泡が偏って分布してしまったと考えられ、特に問題ないと判断される。

4.6 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

図-11 に水セメント比 55%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に気泡間隔係数が大きくなると耐久性指数の値は小さくなる傾向が見られた。N-55-4.5 と N-55-5.5 は、高い値を示したが、高炉スラグ細骨材(H)および(R)の耐久性指数は、小さい値を示した。文献 2), 3)の気泡間隔係数と耐久性指数の関係によると、高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの気泡間隔係数は、480 μ m、耐久性指数は、44 となっている。文献 2), 3)で使用された高炉スラグ細骨材のブリーディング量は、0.59cm³/cm²と本研究で使用したスラグ細骨材よりも低い値を示している。ブリーディング量が少ないと耐久性指数の値が大きくなる傾向が見られる。この傾向は、本実験における R-55-5.5 の結果にも表れているといえる。

図-12 に水セメント比 30%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、一般的に言われているように気泡間隔係数が小さくなると耐久性指数の値は大きくなる傾向が見られた。H-30-2.0 と H-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、空気量が少ないことと、水セメント比が小さいことが原因として考えられる。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

水セメント比 55%の高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、全体的に陸砂を使用したコンクリートよりも低い凍結融解抵抗性を示す結果となった。これは、ブリーディング量が陸砂に比べて多かったことおよび微細な空気泡が少なかったことによると考えられる。今後の課題としてこれらの改善を検討する必要がある。

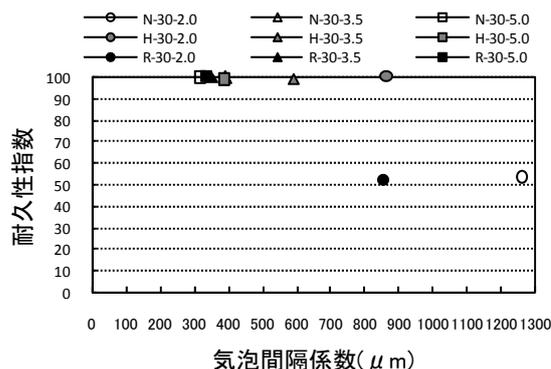


図-12 気泡間隔係数と耐久性指数の関係(W/C=30)

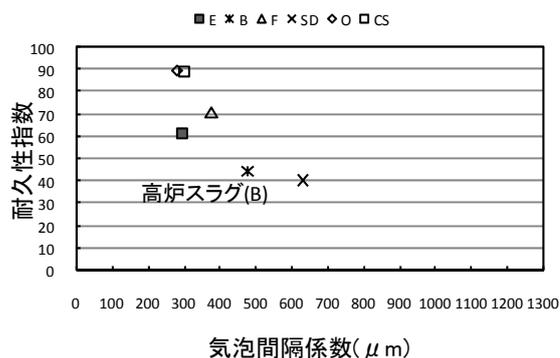


図-13 気泡間隔係数と耐久性指数の関係(文献 2))

一方で、水セメント比 30%の高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートは、目標空気量 2%を除いて陸砂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、陸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)上本・阿部・古川・石川：各種細骨材を使用したコンクリートの長期性状に関する研究，2009 年度日本建築学会関東支部研究報告集 I，No.1011, 2010.3
- 3)石川・古川・阿部・友澤：石炭溶融スラグを用いたコンクリートの長期性状と耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, 2010, pp.71-76, 2010