

論文 高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究

堤 嵩示^{*1}・吉野 公^{*2}・黒田 保^{*3}・吉澤 千秋^{*4}

要旨：高炉スラグ細骨材を使用したコンクリートについて凍結融解抵抗性試験を実施した結果、高炉スラグ細骨材置換率を80%以上とすると300サイクル到達前に、相対動弾性係数が60%以下となることがわかった。そこで、高炉スラグ細骨材置換率80%および100%について石灰石微粉末を添加し粉体量を増加させる対策を行った。その結果、凍結融解抵抗性が増加する傾向にあった。また、この場合においても300サイクル到達前に相対動弾性係数が60%を下回った配合について、空気量を5-7%確保させた場合では、300サイクルで相対動弾性係数が80%以上となり、凍結融解抵抗性が改善された。

キーワード：高炉スラグ細骨材、凍結融解抵抗性、石灰石微粉末

1. はじめに

近年、環境保全の観点から天然骨材の採取が禁止されるようになり、良質な骨材の入手が困難になってきている。このような状況から、天然骨材に頼らない骨材の使用が考えられており、その1つとして環境負荷低減性のある高炉スラグ細骨材が挙げられる。高炉スラグ細骨材は2002年にグリーン購入法の特定調達品目に指定され

たことで、その使用が強く勧められているが、多量に使用したとき単位水量やブリーディング量の増加が懸念されている。そのため、一般的に20-50%の範囲で普通細骨材と混合して使用されることが多く、コンクリート用細骨材として積極的に利用されていないのが現状である。

ブリーディング量が増加すると凍結融解抵抗性は低下すると報告されている¹⁾。この機構の考察として、ブリーディングによってAE助剤によって連行された気泡の合一あるいは破泡する可能性を示唆した報告がされている²⁾。そこで本研究では高炉スラグ細骨材を多量に使用することを目的に凍結融解抵抗性について検討した。

表-1 使用材料

種類	記号	概要
普通 ポルトランド セメント	C	密度：3.16(g/cm ³) 比表面積：3,340(cm ² /g)
石灰石微粉末	LSP	密度：2.68(g/cm ³) 比表面積：5,100(cm ² /g)
高炉スラグ 細骨材(K)	K1	表乾密度：2.72(g/cm ³) 絶乾密度：2.71(g/cm ³) 吸水率：0.34% F.M.：2.14 実積率：58.4% 微粒分量：6.6%
	K2	表乾密度：2.78(g/cm ³) 絶乾密度：2.76(g/cm ³) 吸水率：0.49% F.M.：2.20 実積率：59.3% 微粒分量：2.6%
	K3	表乾密度：2.76(g/cm ³) 絶乾密度：2.75(g/cm ³) 吸水率：0.41% F.M.：2.50 実積率：59.4% 微粒分量：2.5%
高炉スラグ 細骨材(F)	F1	表乾密度：2.77(g/cm ³) 絶乾密度：2.77(g/cm ³) 吸水率：0.35% F.M.：2.82 実積率：58.3% 微粒分量：3.4%
	F2	表乾密度：2.71(g/cm ³) 絶乾密度：2.70(g/cm ³) 吸水率：0.32% F.M.：2.42 実積率：56.6% 微粒分量：2.5%
	F3	表乾密度：2.72(g/cm ³) 絶乾密度：2.70(g/cm ³) 吸水率：0.53% F.M.：2.11 実積率：59.3% 微粒分量：3.1%
石灰石細骨材	L	表乾密度：2.67(g/cm ³) 絶乾密度：2.64(g/cm ³) 吸水率：1.06% F.M.：2.75 実積率：67.8% 微粒分量：7.9%
普通砕石	G	表乾密度：2.67(g/cm ³) 絶乾密度：2.65(g/cm ³) 吸水率：0.82% F.M.：6.62 実積率：60.0%
AE減水剤		リグニンスルホン酸 化合物系ポリカルボン酸エーテル
AE助剤		変形ロジン酸化化合物 陰イオン界面活性剤

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料の一覧を表-1に示す。本研究では破碎方法の違う2種類の産地(K, F)の高炉スラグ細骨材を使用し、搬入時期によって物理的性質に違いがあるため、産地の後に数字を付けることでそれらを区別している(例：K1)。Kの高炉スラグ細骨材はバーマック法によって軽破碎、整粒されており、遠心によって機械の内壁や

表-2 試験方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
ブリーディング	JIS A 1123
凍結融解	JIS A 1148
	供試体は幅×高さ×全長が10×10×40cmの角柱供試体で各配合3本作成する。30サイクル毎で測定を行い、凍結融解試験は300サイクルとなったとき終了とするが、それまでに相対動弾性係数が60%以下となったものはそのサイクルで終了する。

*1 鳥取大学大学院 工学研究科 (学生会員)

*2 鳥取大学大学院 工学研究科 准教授 工学博士 (正会員)

*3 鳥取大学大学院 工学研究科 教授 博士(工学) (正会員)

*4 JFE ミネラル(株) 製鉄関連事業部 主任部員 博士(工学) (正会員)

表-3 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤 (%)	AE助剤 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	BFS	L	G				
K1-40	55	46	165	300	348	510	1108	C×0.4	C×0.2	9.5	4.1
K1-60	55	46	173	315	511	335	983	C×0.4	C×0.2	6.5	3.6
K2-80	55	46	175	318	695	167	979	C×1.0	C×0.0	8.0	5.0
F1-40	55	44	160	291	342	493	1041	C×0.4	C×0.3	9.0	4.9
F1-60	55	44	164	298	510	327	1060	C×0.4	C×0.2	7.5	4.7
F2-80	55	44	180	336	633	156	992	C×1.0	C×0.0	9.0	4.4

粒同士がぶつかることで角が丸くなっている。Fの高炉スラグ細骨材はハンマークラッシャーによる整粒のため粒が角張っている。これら高炉スラグ細骨材は石灰石細骨材と置換することで使用している。また、AE減水剤には高機能タイプを使用している。

2.2 試験方法

フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの各試験の方法について表-2に示す。凍結融解試験はJIS A 1148のA法に基づいて行う。供試体は幅×高さ×全長が10×10×40cmの角柱供試体を用いて行い、JIS A 1132およびJIS A 1138に基づいて各配合で3本ずつ作製する。凍結融解の1サイクルは5℃から-18℃に下がり、再び5℃に上がるものとし、30サイクル毎で測定を行う。凍結融解試験はサイクル数の合計が300サイクルとなったとき終了とするが、それまでに相対動弾性係数が60%以下となったものはそのサイクルで終了する。試験中における測定は、試験槽から取り出した供試体の表面を軽くこすり、水洗い後表面の水をふき取って、速やかに供試体のたわみ振動の一次共鳴振動数および質量を測定する。測定後は速やかに供試体を試験槽内の元の位置に戻し、凍結行程を再開する。スケーリング量は凍結融解試験を開始する直前の供試体の質量を30サイクル毎の供試体の質量の差を表面積で割ったものとする。

3. 実験結果

3.1 置換率80%までの凍結融解抵抗性

配合の目標スランプ8.0±1.5cmで空気量4.5±1.5%である。水セメント比(W/C)は55%である。最適細骨材率(s/a)は単位水量一定で最もスランプが小さくなる細骨材率とし、Kで46%、Fで44%となった。AE減水剤の使用量は粉体量に対して下限を×0.4%、上限を×1.0%とした。また、高炉スラグ細骨材(BFS)は石灰石細骨材(L)と置換した。得られた配合を表-3に示す。なお、表-3のスランプおよび空気量は凍結融解試験用供試体を作製したときの実測値である。

KおよびFの2種類について、高炉スラグ細骨材の置換率を40%、60%、80%とした配合で凍結融解試験を行った。相対動弾性係数の結果について図-1に示す。図-1より、凍結融解抵抗性は置換率が増加すると低下し

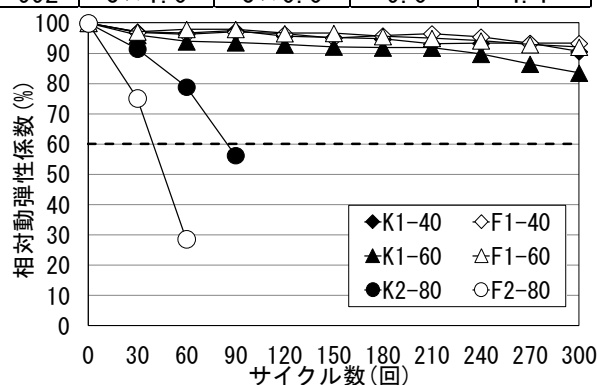


図-1 相対動弾性係数

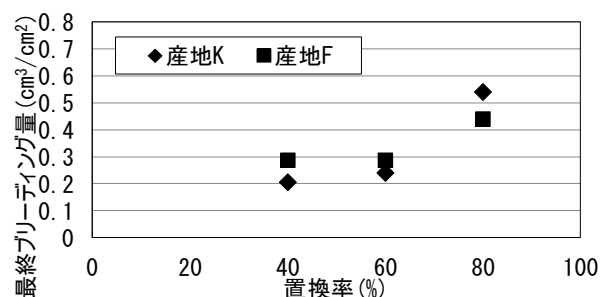


図-2 置換率と最終のブリーディング量

ており、どちらの産地でも置換率80%で相対動弾性係数は300サイクル到達前に60%以下となった。

また、ブリーディング量が増加すると凍結融解抵抗性は低下すると報告されている^{1)・2)}。このことから、各置換率における最終のブリーディング量について、図-2にまとめる。置換率が増加すると最終のブリーディング量は増加しており、ブリーディング量と相対動弾性係数の関係が報告されていることから^{1)・2)}、ブリーディングの増加が凍結融解抵抗性の低下の一因となっていると考えられる。また、置換率の増加によるブリーディングの増加は、ガラス質で保水性のない高炉スラグ細骨材が増加したこと、また高炉スラグ細骨材の使用量が増加したことで単位水量が増加したことが原因だと考えられる。

以上から、高炉スラグ細骨材を多量に使用することによる単位水量とブリーディング量の増加は明らかであり、特にブリーディング量については凍結融解抵抗性の低下の原因として考えられる。よって、高炉スラグ細骨材を置換率80%以上で使用する場合は、単位水量とブリーディング量について抑制が必要であると考えられる。

表-4 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						AE減水剤 (%)	AE助剤 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)
				W	C	LSP	BFS	L	G				
K2-80-P350	55	50	45	175	318	32	668	160	980	P×0.8	P×0.2	9.0	5.3
K2-80-P400	55	44	44	175	318	82	635	152	970	P×0.5	P×0.4	8.5	4.5
K2-80-P450	55	39	43	175	318	132	603	145	959	P×0.4	P×0.4	9.0	3.5
F2-80-P350	55	50	43	175	318	32	638	153	1016	P×0.9	P×0.0	7.5	5.8
F2-80-P400	55	43	42	170	309	91	595	147	1012	P×0.4	P×0.2	6.5	4.2
F2-80-P450	55	38	41	170	309	141	564	139	1000	P×0.4	P×0.4	7.5	4.7
K2-100-P350	55	53	46	185	336	14	842	0	949	P×1.0	P×0.0	8.5	4.9
K2-100-P400	55	44	44	175	318	82	794	0	970	P×1.0	P×0.0	8.5	4.4
K2-100-P450	55	38	43	170	309	141	759	0	966	P×0.8	P×0.0	8.5	3.7
F2-100-P350	55	51	43	180	327	23	773	0	1009	P×0.8	P×0.0	8.0	3.8
F2-100-P400	55	44	42	175	318	82	738	0	1005	P×0.9	P×0.0	9.5	4.9
F2-100-P450	55	38	41	170	309	141	705	0	1000	P×0.8	P×0.2	9.0	4.6

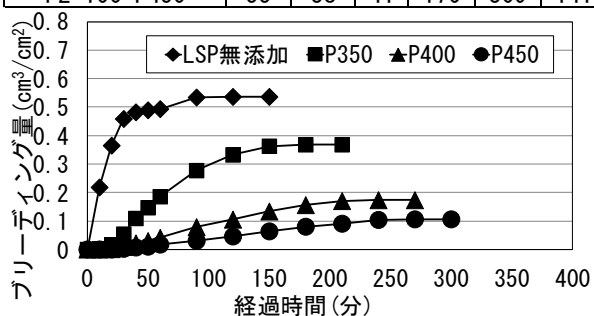


図-3 ブリーディング量(産地 K 置換率 80%)

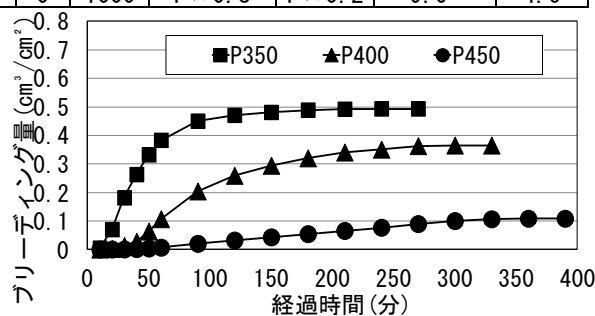


図-5 ブリーディング量(産地 K 置換率 100%)

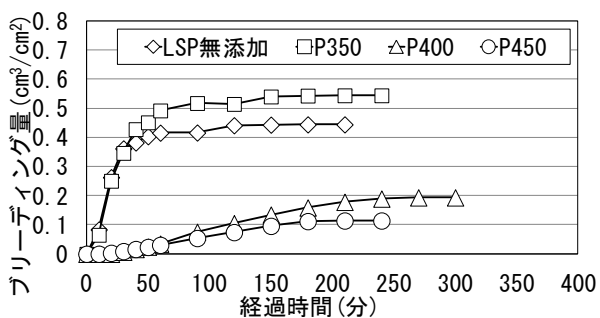


図-4 ブリーディング量(産地 F 置換率 80%)

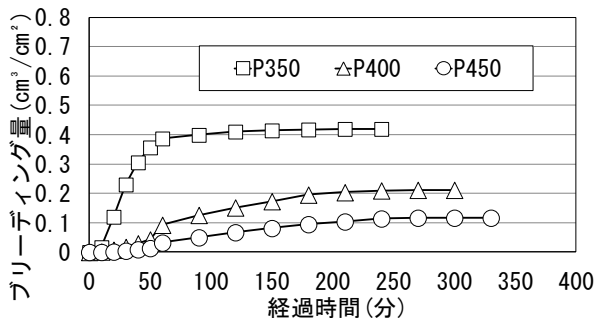


図-6 ブリーディング量(産地 F 置換率 100%)

3.2 石灰石微粉末を添加した配合

ブリーディング量を減少させる方法として粉体量を増加することが考えられる。高炉スラグ細骨材と同様に保水性のない焼却灰溶解スラグ骨材に対して石灰石微粉末を添加することによって、ブリーディング量および単位水量を抑制することが可能であるとの報告³⁾がある。そこで、本研究でも、石灰石微粉末を添加することで単位水量とブリーディング量の抑制を試みた。石灰石微粉末を添加した配合は、高炉スラグ細骨材の置換率80%および100%であり、その添加量は普通ポルトランドセメントの単位量と合わせて単位粉体量(P)として、石灰石微粉末無添加、350kg/m³、400kg/m³、450kg/m³となるようにした。また、配合における表記はそれぞれLSP無添加、P350、P400、P450とした。最適細骨材率(s/a)はW/Cを水粉体比(W/P)と置き換えることで石灰石微粉末無添加のW/C=55%からW/Pが5%減少するのに対してs/aを1%減少させた。

石灰石微粉末を添加した配合を表-4に示す。なお、表-4のスランブおよび空気量は凍結融解試験用供試体を作製したときの実測値である。また、これらの配合のブリーディング試験の結果について、置換率80%について、Kを図-3に、Fを図-4に示す。また、置換率100%について、Kを図-5に、Fを図-6に示す。表-4の配合から、単位粉体量が増加すると単位水量は減少する傾向にあった。また、ブリーディング量についても置換率80%および100%の両方で、単位粉体量の増加によるブリーディング量の抑制が確認された。よって、石灰石微粉末の添加による単位水量およびブリーディング量の抑制は可能だと考えられる。

これらの配合について凍結融解試験を行った。置換率80%の相対動弾性係数の結果を図-7に示す。凍結融解抵抗性について、石灰石微粉末を添加することで改善される傾向がみられた。

置換率100%についての凍結融解試験の結果について

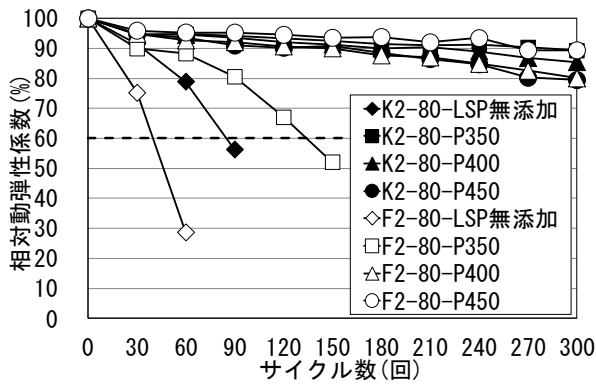


図-7 相対動弾性係数(置換率 80%)

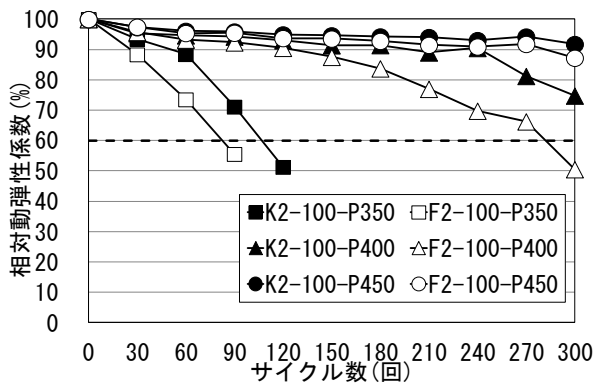


図-8 相対動弾性係数(置換率 100%)

相対動弾性係数を図-8 に示す。単位粉体量が多くなるほど凍結融解抵抗性は改善された。F2-100-P400 の配合については最終のブリーディング量が $0.2\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度であるが、相対動弾性係数は 300 サイクルで 60% を下回った。この結果について、今回使用した F はハンマークラッシュャーによる破碎であり、破碎方法の違いから同様の試験に使用した K より粒形が角張り、エントラップトエアが混入しやすかったため、凍結融解抵抗性を低下させたと考えられる。

スケーリング量について置換率 80% を図-9 に、置換率 100% を図-10 に示す。図-9 の結果から、300 サイクルに達した配合について、K では傾向は見られなかった。F では単位粉体量が増加することによってスケーリング量は減少した。また、LSP 無添加が石灰石微粉末を添加した配合よりスケーリング量が減少した。この理由については本研究では明らかにできなかった。図-10 では K、F の両方で大きな違いは見られなかった。相対動弾性係数と併せてその結果を見ると、相対動弾性係数の低下とスケーリング量との間に関係はないと考えられる。

置換率 40% および 60% も含め、最終の相対動弾性係数とブリーディング量について図-11 にまとめる。この図から、最終のブリーディング量が少ない配合であれば、相対動弾性係数は改善される傾向にあることがわかる。産地ごとに見ると、K はブリーディング量を $0.4\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度まで抑制することで相対動弾性係数 60% 以上を得る

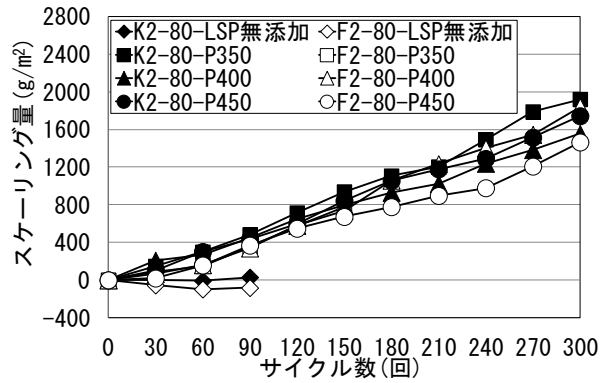


図-9 スケーリング量(置換率 80%)

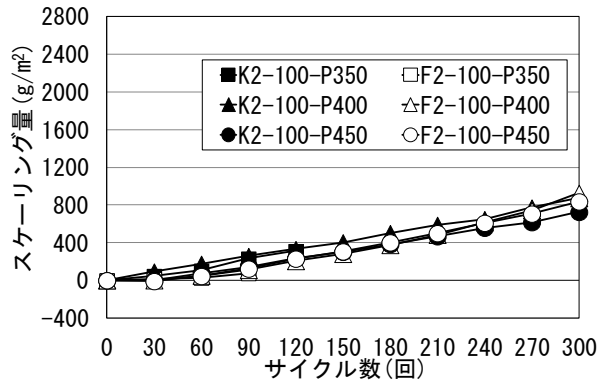


図-10 スケーリング量(置換率 100%)

ことができているが、F ではブリーディング量を $0.4\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 近くまで抑制しても相対動弾性係数は 60% 以上にならず、さらにブリーディング量を $0.2\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度であっても相対動弾性係数は 60% を下回る場合もある。このことから F ではブリーディング量とは別の要因が凍結融解抵抗性を低下させていると考えられ、これは整粒方法の違いから生じるエントラップトエアの混入量ではないかと推測する。

以上の結果から、単位粉体量の増加によってブリーディング量は低下する傾向にあり、これによって相対動弾性係数が増加する傾向を示すことから、石灰石微粉末の添加によるブリーディング量の抑制は凍結融解抵抗性の向上につながると考えられる。

置換率 80% と置換率 100% の凍結融解抵抗性を比較すると、同じ単位粉体量を使用したとき、置換率 100% の方が凍結融解抵抗性は低下する傾向にあった。これは、石灰石砕砂の使用の有無が原因だと考えられる。今回使用した石灰石砕砂の微粒分量は 7.9% であり、高炉スラグ細骨材の微粒分量はそれぞれ K で 2.6%、F で 2.5% であった。石灰石砕砂は高炉スラグ細骨材と比べ微粒分が多いことから、石灰石砕砂を使用したとき、供試体内の微粒分量が増加し、その一部が石灰石微粉末を添加した場合と同じ役割を果たしたからだと考えられる。また、スケーリング量については 300 サイクルに達した配合について、同じ粉体量で比較すると、置換率 80% の配合よ

表-5 コンクリートの配合

配合	W/C (%)	W/P (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						AE減水剤 (%)	AE助剤 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	LSP	BFS	L	G				
K3-80-LSP無添加	55	55	46	170	309	0	698	169	991	C×0.7	C×0.5	7.0	6.0
F3-80-LSP無添加	55	55	44	175	318	0	650	160	1016	C×0.5	C×0.4	9.5	5.0
K3-100-P350	55	55	46	185	336	14	836	0	949	P×0.8	P×0.3	9.0	5.5
F3-100-P350	55	50	43	175	318	32	781	0	1016	P×0.5	P×0.4	8.5	5.5
F3-100-P400	55	43	42	170	309	91	746	0	1012	P×0.4	P×0.7	8.5	5.4

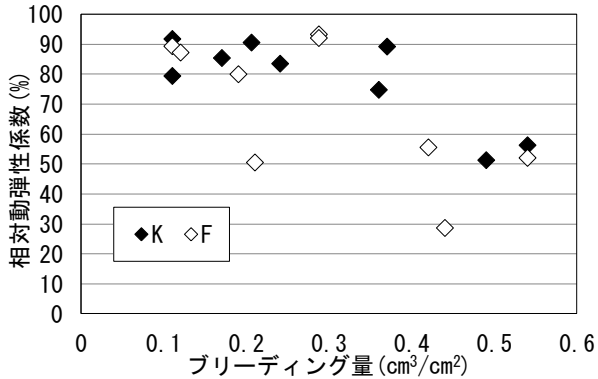


図-11 最終の相対動弾性係数とブリーディング量

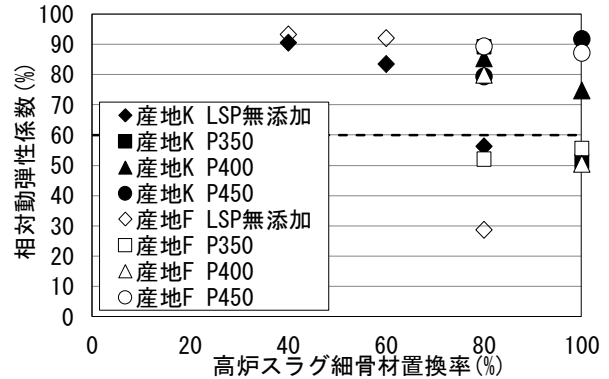


図-12 最終の相対動弾性係数と高炉スラグ細骨材置換率

り置換率 100%の配合の方が少ない結果となった。

置換率 80%と置換率 100%の配合について、KおよびFの凍結融解抵抗性を比較すると、Fの供試体の方が低下しやすい結果となった。特に置換率 80%の単位粉体量 350kg/m³、置換率 100%の単位粉体量 400kg/m³でKは相対動弾性係数 60%以上、Fは相対動弾性係数 60%以下となり最も差が見られた。この違いの原因として、整粒方法の違いが考えられる。Kはバーマック法によって丸みを帯びやすい整粒方法であったが、Fハンマークラッシャーによって角張った粒形になる。よって、この違いからFはエントラップトエアを混入しやすかった可能性がある。

これまでの最終の相対動弾性係数と置換率の結果を図-12に示す。この図から、置換率が増加することで凍結融解抵抗性は低下することがわかる。また、石灰石微粉末の添加による凍結融解抵抗性の改善が確認できる。しかし、一部の配合は相対動弾性係数が60%を下回ることから、これらについて凍結融解抵抗性の改善を行う。

3.3 空気量の調整による凍結融解抵抗性の改善

一般的にコンクリートは、微細な気泡が連行されることで凍結融解抵抗性は大きく改善するが、空気量を高めすぎても効果はなく、むしろ凍結融解抵抗性は低下することは既知⁴⁾のことである。そこで今回は、置換率 80%および 100%の配合のうち、相対動弾性係数が 60%以下になった配合を対象に AE 助剤の添加量を増加させることで、空気量を 5-7%で調整し、これによるエントレインドエアの増加によって、凍結融解抵抗性の改善を図った。ただし、対象となる配合のうち、F2-80-P350は空気量が 5.8%と既に多量の空気を含んでいたため除外した。空気量の調整を行った配合を表-5に示す。

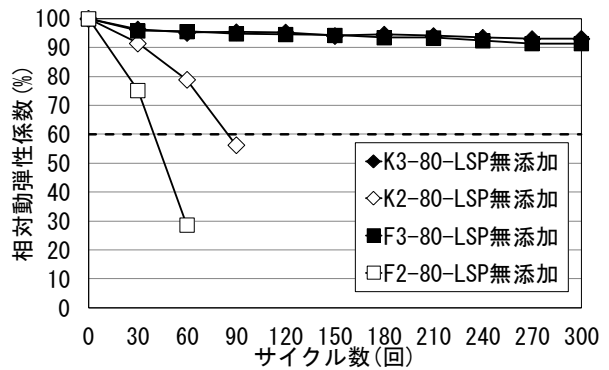


図-13 相対動弾性係数(置換率 80%)

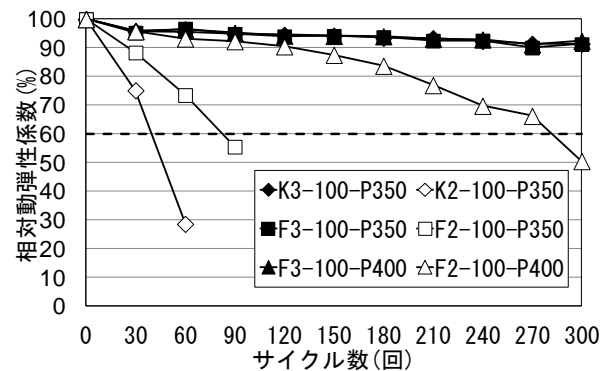


図-14 相対動弾性係数(置換率 100%)

凍結融解試験の結果について、空気量の調整を行っていない配合と併せて、置換率 80%の相対動弾性係数を図-13に示す。また、置換率 100%の相対動弾性係数を図-14に示す。なお、黒塗りの記号は空気量を 5-7%に調整したものを示す。相対動弾性係数の結果から、どの配合においても凍結融解抵抗性は著しく改善され、空気量の調整による効果が確認された。これらの配合についてブリーディング試験を行った。その結果についてKを図-15、Fを図-16に示す。これらの結果から、空気量

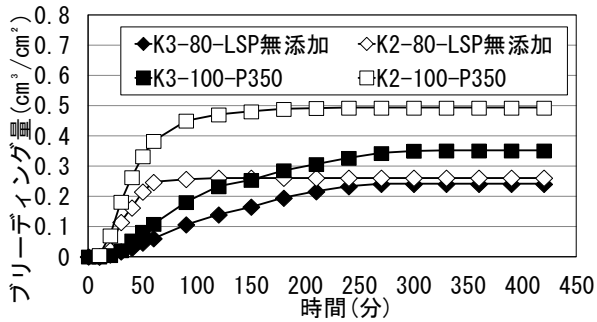


図-15 ブリーディング量(産地 K)

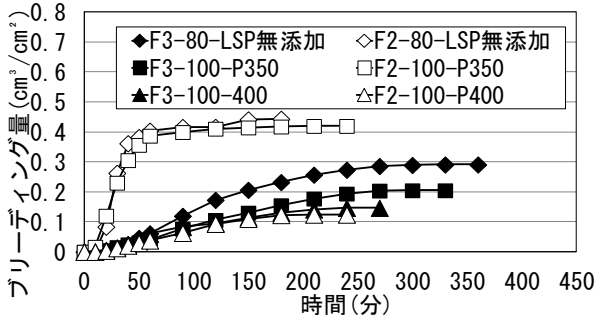


図-16 ブリーディング量(産地 F)

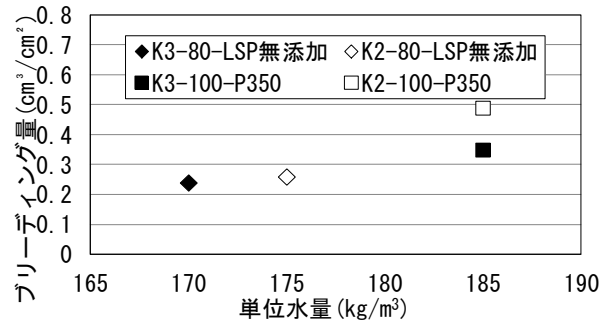


図-17 ブリーディング量と単位水量(産地 K)

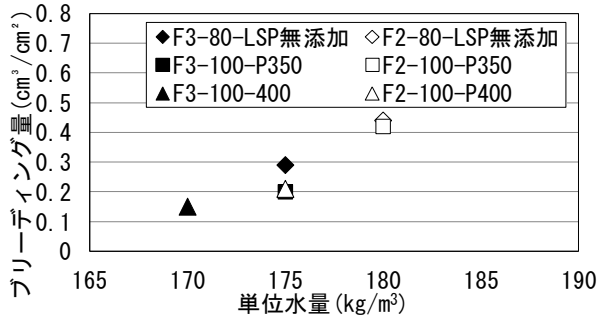


図-18 ブリーディング量と単位水量(産地 F)

を調整した場合、ブリーディング量は低下する傾向にあった。これは AE 助剤の添加によって微細な気泡が増加し、これにより、ボールベアリング効果が大きく表れたことで流動性が向上し、その結果、所定のスランプを得るために単位水量を減少させることができたからだと考えられる(図-17, 図-18)。以上から、空気量の調整によって、高炉スラグ細骨材を多量に使用した場合の諸問題の改善に効果があると考えられる。

4. まとめ

本研究の結果により以下のことが確認された。

- (1) 高炉スラグ細骨材の置換率が増加すると凍結融解抵抗性は低下した。これはブリーディング量の増加が大きき要因と考えられる。
- (2) 高炉スラグ細骨材の置換率 80%および 100%の配合について、石灰石微粉末の添加によって凍結融解抵抗性が改善される傾向があり、これはブリーディング量が抑制されたからだと考えられる。
- (3) 置換率 80%と置換率 100%で同じ粉体量で凍結融解抵抗性を比較すると、置換率 100%の方が低下しやすい傾向にあった。これは石灰石砕砂の使用の有無による差だと考えられる。
- (4) 置換率 80%で産地 F では粉体量の増加によってスケリング量は減少する傾向にあり、置換率 100%では産地による差はなかった。また、同じ粉体量で比較すると、置換率 80%より置換率 100%の方がスケリング量は少ない。

- (5) 相対動弾性係数が 60%以下の配合について、AE 助剤の添加量を増加させ、空気量を 5~7%に調整することで、凍結融解抵抗性は著しく改善された。また、空気量の調整によって単位水量が減少したためブリーディング量は低減される傾向にあった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、宇部三菱セメント(株)大西利勝氏に貴重なご助言をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 庄谷 政美, 杉田 修一, 月永 洋一: フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, 材料, Vol.43, No.491, pp.976-982, 1994
- 2) 坂田 昇, 菅俣 匠, 林 大介, 作樂 二郎: コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響に関する一考察, コンクリート工学論文集, 第23巻, 第2号, pp.59-69, 2012
- 3) 金子 泰治, 井上 正一, 吉野 公, 黒田 保: 石灰石微粉末による焼却灰溶融スラグを用いたコンクリートの品質改善, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.505-510, 2008
- 4) 西林 新蔵, 小林 治, 渡邊 史夫, 宮川 豊章 編集: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店 pp.618-622, 2009.10