

# 論文 粗骨材の品質および微粒分がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響

谷口 高志\*1・丁 上\*2・藤井 隆史\*3・綾野 克紀\*4

**要旨:** 本論文では、49種類の粗骨材を用いてコンクリートを作製し、粗骨材の品質および微粒分がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響の検討を行った。骨材表面に付着する微粒分を完全に除去した状態で用いた場合には、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が12%を超える堆積岩の砕石を用いたコンクリートでは、凍結融解抵抗性が低下する傾向が確認された。一方、JIS規格を満足する粗骨材であっても、粗骨材表面に微粒分が付着したままの状態で作製した場合には、凍結融解抵抗性が低下する可能性がある。

**キーワード:** 凍結融解抵抗性, 粗骨材, 岩石の種類, 安定性, 微粒分

## 1. はじめに

コンクリートの凍結融解抵抗性は、凍結融解作用に抵抗性のある良質な骨材を用い、AE剤により微細な気泡を連行することで確保できるといわれている。骨材は、体積でコンクリート中の6~7割を占め、その品質がコンクリートの品質に与える影響は小さくなく、凍結融解抵抗性に与える影響も大きい。コンクリートの凍結融解抵抗性には、骨材の種類や線膨張係数、吸水率、空隙構造が影響しているとの報告がある<sup>1)2)3)</sup>。骨材の凍結融解抵抗性は、硫酸ナトリウムによる安定性試験によって確認されている。硫酸ナトリウムによる安定性試験は、硫酸ナトリウムの結晶生成圧が水が凍結する際の膨張圧に見立てて、骨材の凍結融解抵抗性を確認する試験である。硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率の規格値は、JIS A 5308 附属書 A や JIS A 5005 で、粗骨材は12%以下とされている。硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率の大きい骨材を用いたコンクリートは、凍結融解抵抗性が低いとされているが、硫酸ナトリウムによる安定性試験は、試験結果のばらつきが大きく、コンクリートの凍結融解抵抗性と必ずしも一致しないとの調査結果もある<sup>4)</sup>。

2009年に天然骨材の不足を補う砕石および砕砂の生産を円滑化するために、JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」において、微粒分量の規定値がそれまでの1.0%以下から3.0%に、さらに粒形判定実積率が58%以上の場合は5.0%までに緩和された。微粒分量の規定値の緩和は、骨材製造時に発生する石粉の廃棄量を減らすために、製造者側からの強い要望で、微粒分量の変動の管理幅を設けることを条件に、コンクリートに影響を及ぼ

さない範囲で改訂が行われた<sup>5)</sup>。既報<sup>6)</sup>によれば、砕石や砕砂の製造時に発生する砕石粉は、使用に伴い単水量や細骨材率の調整は必要であるが、比較的広範囲のコンクリートに使用できる可能性があること、特に、水セメント比が大きく粉体量が少ない低スランプコンクリートへの利用が有効であること、また、水セメント比が60%で砕石粉の使用率10%までの範囲内であればコンクリートのフレッシュ性状、強度発現性および耐久性にほとんど悪影響を及ぼさず、ブリーディング量低減に効果があることを報告している。既報<sup>2)</sup>によれば、砕石粉は、空気を低下させる効果と耐凍害性を向上される効果があることを報告している。また、既報<sup>6)</sup>および<sup>7)</sup>で、砕石粉がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える効果を検証しているが、コンクリートの凍結融解抵抗性を向上させる効果があるとする報告している。

本論文では、49種類の粗骨材を用い、粗骨材以外の材料は同じ条件でコンクリートを作製し、粗骨材の品質がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響について検討を行った。コンクリートの凍結融解抵抗性と骨材の硫酸ナトリウムによる安定性試験の結果との関係、骨材表面に付着する微粒分の影響について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

#### (1) 粗骨材

実験に用いた粗骨材の物性を表-1に示す。実験には、46種類の砕石および3種類の川砂利を用いた。いずれの砕石および川砂利とも、絶乾密度、吸水率および微粒分量は、JIS A 5005 もしくは JIS A 5308 附属書 A の砂利の

\*1 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻 修(環境) (正会員)

\*2 岡山大学大学院 環境生命科学研究科社会基盤環境学専攻

\*3 岡山大学 学術研究院環境生命科学学域准教授 博(工) (正会員)

\*4 岡山大学 学術研究院環境生命科学学域教授 博(工) (正会員)

表-1 粗骨材の物性

No.	岩種	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性* (%)	微粒分量 (%)	No.	岩種	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性* (%)	微粒分量 (%)	
1	安山岩	2.66	0.83	1.1	0.4	26	砂岩	2.67	0.49	5.7	0.4	
2		2.71	0.40	3.6	0.4	27		2.67	0.46	3.2	0.7	
3		2.63	0.47	8.8	0.5	28		2.68	0.73	6.9	0.4	
4		2.70	0.46	6.6	0.4	29		2.69	0.84	7.2	0.8	
5		2.61	1.14	6.5	0.7	30		2.69	0.57	2.3	0.9	
6		2.62	0.56	10.1	0.4	31		2.54	2.23	18.6	3.0	
7		2.60	0.64	2.9	0.5	32		2.70	0.19	10.4	0.3	
8		2.88	0.68	2.2	0.8	33		2.70	0.24	5.5	0.7	
9		2.67	1.18	24.2	0.5	34		2.70	0.32	4.6	1.0	
10		2.72	0.84	11.1	0.6	35		2.59	0.97	3.7	1.5	
11		2.62	0.74	0.9	1.0	36		2.71	0.35	4.1	1.6	
12		2.72	1.51	6.1	1.0	37		2.72	0.51	2.5	1.2	
13		2.66	1.50	4.7	1.8	38		2.69	0.49	1.7	1.5	
14	流紋岩	2.50	2.44	12.6	1.2	39	2.72	0.34	2.0	1.9		
15		2.57	1.36	3.5	0.7	40	2.69	0.87	11.7	0.9		
16		5.60	0.76	6.3	0.5	41	粘板岩	2.64	1.11	20.4	0.5	
17	斑レイ岩	2.75	0.77	2.1	0.9	42		2.66	0.97	0.9	1.2	
18	閃緑岩	2.67	1.47	14.7	2.5	43	頁岩	2.71	0.62	10.8	1.0	
19	ヒン岩	2.62	1.02	6.5	0.3	44	凝灰岩	2.60	0.85	2.9	0.5	
20	堆積岩	砂岩	2.73	0.56	9.0	1.4		45	2.60	0.95	3.0	1.2
21			2.67	0.58	7.6	0.2	46	ホルンフェルス	2.73	0.44	0.9	0.8
22			2.65	0.69	8.1	0.6	47	川砂利	2.63	0.78	1.2	0.4
23			2.73	0.54	10.4	0.9	48		2.55	1.61	3.6	0.3
24			2.78	0.71	6.9	0.6	49		2.57	2.18	4.8	0.1
25	2.67	0.57	9.2	0.5								

\*硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率

表-2 コンクリートの配合 (No.1の碎石を用いた場合)

W/C (%)	空気量 (設計値) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (C×%)	
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤	AE 助剤
50.0	4.5±1.5	44.0	170	340	792	1 016	0.3	0.004

品質規格値を満足するものであった。一方で、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率は、一部の碎石で、JIS A 5005 の規格値である 12%よりも大きいものが含まれていた。なお、碎石の粒径の範囲は、No.6 のみ 5~15mm で、その他の碎石は 5~20mm である。また、川砂利の粒形の範囲は、5~25mm である。

(2) セメント、細骨材および混和剤

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm<sup>3</sup>，ブレン値：3 350cm<sup>2</sup>/g）を、細骨材は、表-1 に示す No.20 と同じ産地の硬質砂岩砕砂（表乾密度：2.66g/cm<sup>3</sup>，吸水率：1.57%，粗粒率：3.11）を用いた。混和剤には、リグニンスルホン酸化合物系 AE 減水剤および AE 助剤を用いた。

(3) 配合

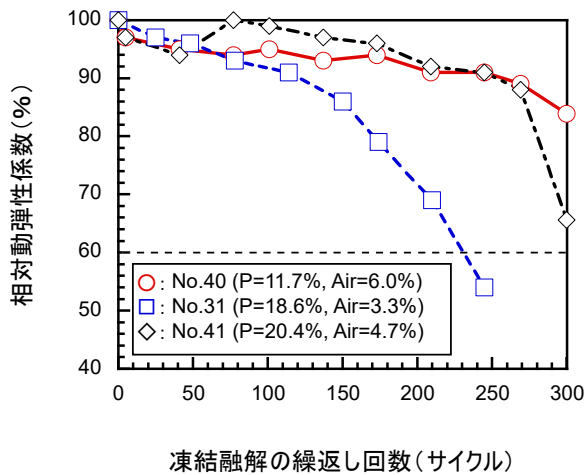
本実験に用いたコンクリートの配合を、表-1 中の No.1 の碎石を用いた場合で表-2 に示す。水セメント比が 50.0%，単位水量が 170kg/m<sup>3</sup>，細骨材率が 44.0%で

定の条件で配合を決定した。コンクリートの空気量が 4.5 ±1.5%になるように、AE 減水剤および AE 助剤を添加した。

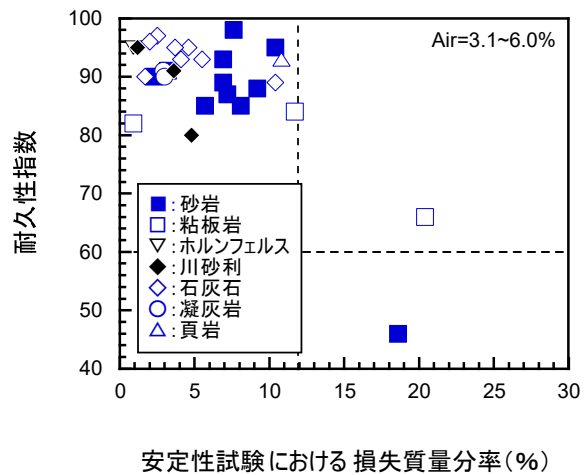
2.2 試験方法

(1) 粗骨材の状態および練混ぜ方法

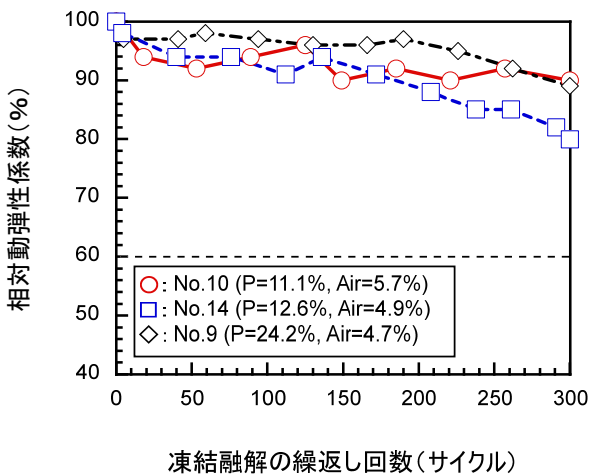
粗骨材そのものの品質の影響を確認する実験では、表-1 に示すすべての粗骨材を対象に、骨材表面に付着する微粒分の影響を除去するために、粗骨材表面の微粒分を水で洗い流した状態で使用した。粗骨材表面に付着する微粒分の影響を確認する実験では、表-1 に示す粗骨材のうち、「No.」に下線を付した 26 種類の粗骨材を対象に、製造工場等から入荷した粗骨材を洗浄等は行わず表面に微粒分が付着した状態のまま使用した。また、No.7, No.27, No.35 および No.45 の粗骨材では、微粒分の付着状態の影響を確認するため、あらかじめ粗骨材を練混ぜ水の一部と混ぜ合わせて、微粒分を練混ぜ水へ洗い落とした状態で用いる方法を行った。



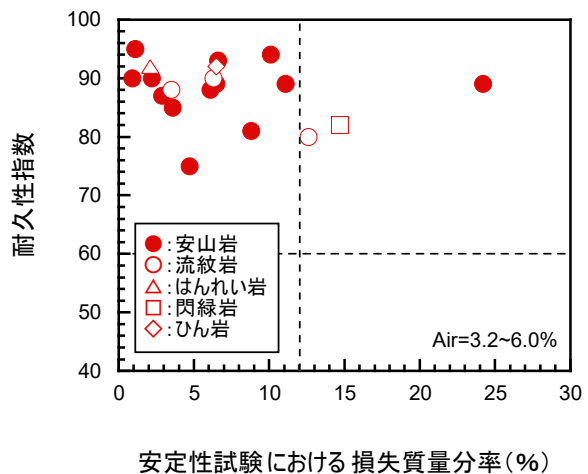
図一 堆積岩の碎石を洗い流して用いたコンクリートの凍結融解試験結果



図二 堆積岩の碎石を洗い流して用いたコンクリートの骨材の安定性と耐久性指数の関係



図三 火成岩の碎石を洗い流して用いたコンクリートの凍結融解試験結果



図四 火成岩の碎石を洗い流して用いたコンクリートの骨材の安定性と耐久性指数の関係

コンクリートの練混ぜには、強制練りパン型ミキサーを用いた。細骨材とセメントで 30 秒の空練りを行った後、練混ぜ水と混和剤を添加し 1 分 30 秒間練り混ぜ、粗骨材を加えた後、2 分間練り混ぜてからミキサーから排出し、練り舟でさらに練り返した後に試験に用いた。

### (2) 凍結融解試験方法

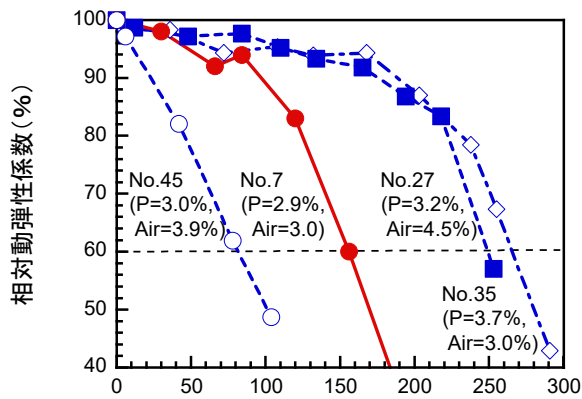
凍結融解試験は、100×100×400mm の角柱供試体を用いて、JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法」の水中凍結融解試験方法 (A 法) に準拠して行った。コンクリートを打込み後、18 時間型枠内で養生した後、脱型後から材齢 28 日まで 20±2℃ の水中で養生を行った後に試験を開始した。水中凍結融解試験の供試体容器内に入れる凍結水には、水道水を用いた。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 各種粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性

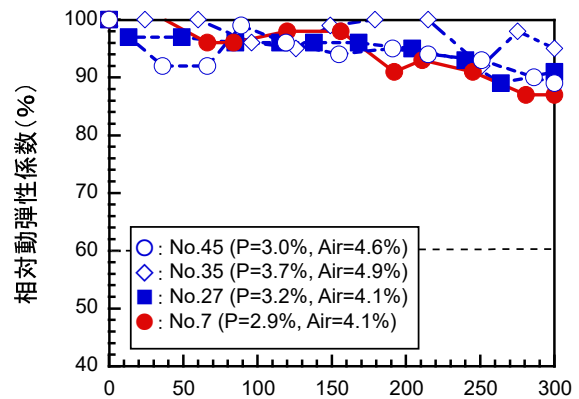
図一は、表一に示す堆積岩の碎石のうち、安定性

試験における損失質量分率が大きかった No.31, No.40 および No.41 の碎石を、粗骨材表面の微粒分を洗い流した状態で用いたコンクリートの凍結融解試験結果を示したものである。図中の Air は、練混ぜ直後のコンクリートの空気量を、P は、粗骨材の硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率である。JIS A 5005 の安定性試験における損失質量分率の規格値を満足する No.40 の碎石を用いたコンクリートでは、300 サイクルでの相対動弾性係数は 84% で、凍結融解抵抗性は確保されている。一方で、安定性試験における損失質量分率の規格値を上回っている No.31 の碎石では、245 サイクルで相対動弾性係数が 60% を下回った。また、No.41 の碎石では、269 サイクルでは相対動弾性係数が 88% であるが、300 サイクルでは相対動弾性係数が 66% まで低下している。図二は、図一で示したのものも含めて、表一に示す堆積岩の碎石および川砂利を、粗骨材表面の微粒分を洗い流した状態で用いたコンクリートの凍結融解の耐久性指数



凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図-5 微粒分が付着した状態の骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験結果



凍結融解の繰返し回数(サイクル)

図-6 微粒分を洗い流した状態の骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験結果

と、粗骨材の硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率の関係を示したものである。これらのコンクリートの練混ぜ直後の空気量は、3.1%から6.0%であった。本実験で用いた川砂利は、いずれも硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率は5%以下と小さいもので、それを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性も耐久性指数で80以上であった。堆積岩の砕石でも、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が、JIS A 5005の規格値である12%以下のものは、空気量が3.1%のものであっても、耐久性指数は82以上と十分な凍結融解抵抗性が得られた。一方で、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が12%を超えた堆積岩の砕石を用いたコンクリートでは、耐久性指数は66以下であった。堆積岩の砕石では、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率がJISの規格値である12%を超えたものはNo.31とNo.41で、練混ぜ直後の空気量が3.3%および4.7%であったが、耐久性指数は46および66である。堆積岩の砕石では、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率がJISの規格値である12%を超えると、凍結融解抵抗性が得られにくくなる。

図-3は、表-1に示す火成岩の砕石のうち、安定性試験における損失質量分率が大きかったNo.9、No.10およびNo.14の砕石を、粗骨材表面の微粒分を洗い流した状態で用いたコンクリートの凍結融解試験結果を示したものである。いずれの砕石を用いたものも、300サイクルで相対動弾性係数が80%以上であった。No.9およびNo.14の硫酸ナトリウムによる安定性試験における質量損失分率は、JIS A 5005の規格値である12%よりも大きい骨材であるが、安定性の規格は満足しないものでも、コンクリートの凍結融解抵抗性があることが分かる。図-4は、図-3で示したのものも含めて、表-1に示す火成

岩の砕石を粗骨材表面の微粒分を洗い流した状態で用いたコンクリートの凍結融解の耐久性指数と、粗骨材の硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率の関係を示したものである。これらのコンクリートの練混ぜ直後の空気量は、3.2%から6.0%であった。いずれの火成岩の砕石を用いたコンクリートでも、コンクリートの耐久性指数は、75以上と十分な凍結融解抵抗性が得られた。安定性試験における損失質量分率の大きいものであっても、コンクリートの耐久性指数は80を上回っており、硫酸ナトリウムによる安定性試験の結果との明確な関係は確認できなかった。既報4)では、80種類の粗骨材を用いて、硫酸ナトリウムによる安定性試験の結果とコンクリートの耐久性指数との関係を調べたが、耐久性指数の大小によらず、両者の間に良好な対応関係が見られなかったことが報告されている。また、既報8)では、簡易凍結融解試験による損失率が大きい骨材でも、コンクリートの耐久性指数は高いものがあつたことが報告されている。いずれの文献も、骨材の凍結融解抵抗性と、コンクリートの凍結融解抵抗性との間に明確な関係が確認されない骨材があることが報告されているが、本研究の実験結果からは、火成岩の砕石において、硫酸ナトリウムによる安定性試験結果と、コンクリートの凍結融解試験結果が一致しない結果となった。

### 3.2 粗骨材表面に付着する微粒分の影響

図-5は、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率がJIS A 5005の規格値である12%よりも小さいNo.7、No.27、No.35およびNo.45の粗骨材を、微粒分が粗骨材表面に付着した状態で用いたコンクリートの凍結融解試験の結果である。No.7は火成岩である安山岩で、No.27、No.35およびNo.45は、それぞれ、堆積岩に分類される砂岩、石灰岩および凝灰岩である。これらのコンクリートの空気量は、3.0%から4.5%の範囲で、AE

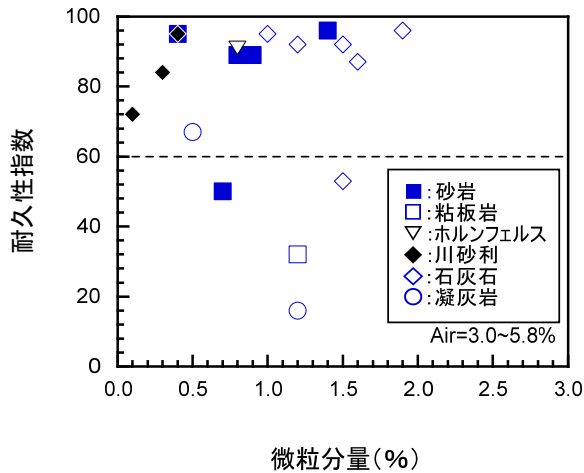


図-7 微粒分が付着した状態の骨材を用いたコンクリートの耐久性指数と微粒分量の関係(堆積岩碎石および川砂利の場合)

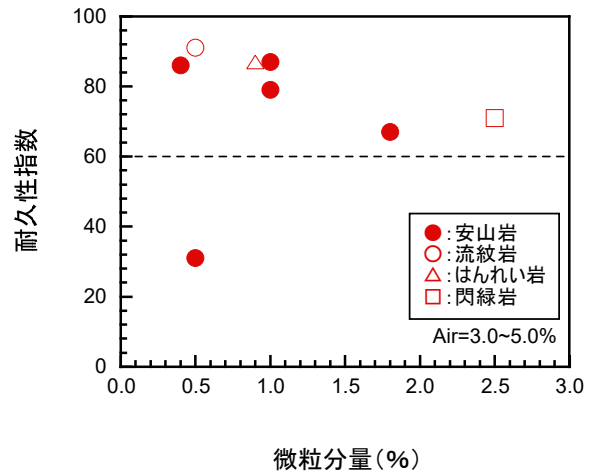


図-8 微粒分が付着した状態の骨材を用いたコンクリートの耐久性指数と微粒分量の関係(火成岩碎石の場合)

剤による空気は連行されていると考えられる。しかし、No.45が80サイクルで、No.7が160サイクルで、No.27が250サイクルで、No.35が270サイクルで、それぞれ、相対動弾性係数が60%を下回った。これらの粗骨材を、骨材表面に微粒分が付着した状態で用いた場合には、十分な凍結融解抵抗性が得られなかった。一方、図-6は、図-5と同じ粗骨材を、表面に付着した微粒分を洗い流した粗骨材を用いてコンクリートを作製し、凍結融解試験を行った結果である。いずれの碎石を用いたコンクリートも、300サイクルでの相対動弾性係数は85%以上あり、十分な凍結融解抵抗性を示している。したがって、図-5で十分な凍結融解抵抗性が得られなかったのは、粗骨材そのものの品質ではなく、粗骨材表面に付着する微粒分の影響と考えられる。

図-7は、図-5に示したNo.27、No.35およびNo.45を含む14種類の堆積岩の碎石と3種類の川砂利を、骨材表面に微粒分が付着した状態で用いたコンクリートの耐久性指数と骨材に付着した微粒分の関係を示したものである。堆積岩の碎石では、図-6に示したのものも含めて4種類の碎石を用いたコンクリートで耐久性指数が60を下回っている。なお、本実験で用いた3種類の川砂利は、付着している微粒分が少ないため、微粒分を洗い流さない状態でも、コンクリートの耐久性指数が60%を下回るものは確認できなかった。また、図-8は、図-5に示したNo.7を含む8種類の火成岩の碎石を、骨材表面に微粒分が付着した状態で用いたコンクリートの耐久性指数と骨材に付着した微粒分の関係を示したものである。図-5に示したNo.7以外の火成岩の碎石では、骨材表面に微粒分が付着した状態で用いても耐久性指数が60を下回るものはなかった。図-7および図-8で耐久性指数が60を下回ったものの微粒分量は、0.5~1.5%の範囲

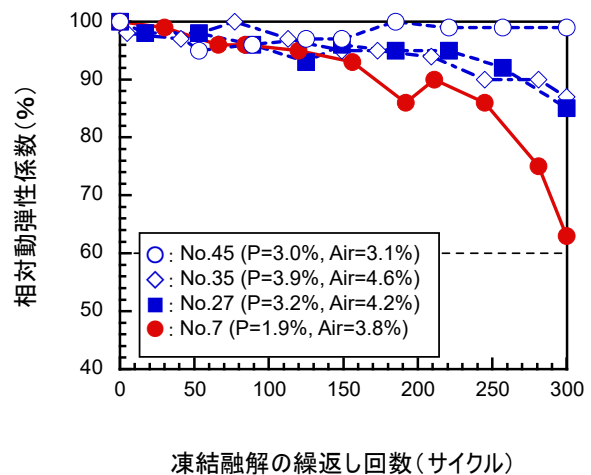


図-9 骨材をあらかじめ練混ぜ水で混合して練り混ぜたコンクリートの凍結融解試験結果

である。JIS A 5005の碎石の微粒分量の規格値は3.0%以下で、いずれの碎石もこの規格を満たしているものである。また、JIS A 5005の碎石の絶対密度、吸水率、安定性の規格値も満足したものである。微粒分量と耐久性指数の間に、明確な相関関係は確認できないが、微粒分が付着した状態では、凍結融解抵抗性が低下する可能性がある。粗骨材の表面の微粒分は、コンクリートの練混ぜ後も、骨材表面にとどまったままでコンクリートが硬化したことで骨材周辺に脆弱な部分が形成され、そこが起点となって凍結融解作用による劣化が生じたものと考えられる。

図-9は、図-5に示したのと同じ碎石を、あらかじめ練混ぜ水と混合し、微粒分が練混ぜ水と混ざった状態にして作製したコンクリートの凍結融解試験結果を示したものである。図-5に示すように微粒分を付着したままで練り混ぜたコンクリートでは、いずれの碎石も

300 サイクルまでに相対動弾性係数が 60%を下回っていたが、砕石をあらかじめ練混ぜ水と混合し、微粒分を骨材表面から分離した状態にしてコンクリートを作製することで、凍結融解抵抗性が改善していることが分かる。既往の研究では、砕石や砕砂を製造する際に発生する砕石粉は、コンクリートの凍結融解抵抗性を向上させる効果と空気量を低下させる効果があると報告されている<sup>2)</sup>。また、砕石粉を用いることで、気泡間隔係数が小さくなり、凍結融解抵抗性が向上する傾向にあることが報告されている<sup>6)</sup>。粗骨材表面に付着した微粒分は、そのものがコンクリートの凍結融解抵抗性を低下させる可能性は小さい。一方で、既報<sup>9)</sup>によれば、骨材表面には、セメントの水和反応で生じる水酸化カルシウムが集積し、脆弱な遷移帯が形成され、その遷移帯によってセメントペーストと骨材界面の接合強度を下げることから、凍結融解抵抗性を低下させると報告されている。粗骨材表面に微粒分が付着したままコンクリートが硬化した場合には、セメントペーストと骨材の接合強度がさらに小さくなり、コンクリートの凍結融解抵抗性を低下させる恐れがある。凍結融解抵抗性を確実に得るためには、骨材の凍結融解抵抗性に加えて、表面に付着する微粒分にも留意する必要があるといえる。

#### 4. まとめ

本実験で得られた知見を以下に示し、本論文のまとめとする。

- (1) 微粒分を完全に除去した状態で用いた場合、火成岩の砕石では、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率によらず、凍結融解抵抗性が得られた。一方、堆積岩の砕石では、硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率が12%を超えるものでは、凍結融解抵抗性が低下する傾向が確認された。
- (2) 硫酸ナトリウムによる安定性試験における損失質量分率や微粒分量が JIS の規格を満足する砕石であっても、微粒分が付着した状態でコンクリートを製造すると凍結融解抵抗性が低下することがある。

- (3) 凍結融解抵抗性を確実に得るためには、骨材の凍結融解抵抗性に加えて、表面に付着する微粒分にも留意する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 鎌田卓朗, 斉藤啓一, 富田修司, 藤原忠司: 骨材の吸水率がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 819-824, 1995. 6
- 2) 千歩修, 浜幸雄, 松村幸太郎, 袴谷秀幸: コンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材の線膨張係数と石粉の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 2, pp. 787-792, 2000. 6
- 3) 二宮祐希, 千歩修, 長谷川拓哉: 粗骨材の基礎政情がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1189-1194, 2009. 6
- 4) 土木研究所: 骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮に与える影響と評価試験法に関する研究, 土木研究所資料, 第 4199 号, 2011. 3
- 5) 友澤史紀, 辻幸和, 山本和成: 「JIS A 5005 (コンクリート用砕石及び砕砂)」の改正について, コンクリート工学, Vol. 47, No. 3, pp. 3-9, 2009. 3
- 6) 真野孝次, 辻幸和, 友澤史紀, 深松孝: 砕石粉を使用した砕石・砕砂コンクリートの性状, コンクリート工学, Vol. 46, No. 11, pp. 18-10, 2008. 11
- 7) 賀谷隆人, 長原雄一, 山本春行: 粒形改善砕砂の生産時に発生する石粉を混入したコンクリートの諸性状に関する実験的研究, 日本建築学会技術報告集, Vol. 16, No. 32, pp. 5-10, 2010. 2
- 8) 片平博, 渡辺博志, 山田宏: 粗骨材の耐凍害性評価指標の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 1072-1077, 2014. 6
- 9) 内川浩: セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート工学, Vol.33, No.9, pp.5-17, 1995.9