

論文 再生粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性

佐藤 靖彦^{*1}・佐々木慎一^{*2}・奥山 英俊^{*3}・今野 克幸^{*4}

要旨：再生粗骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性を実験的に明らかにした。すなわち、原コンクリートが non-AE コンクリートであっても再生コンクリートの平均吸水率を 3% 以下とすることで高い凍結融解抵抗性を確保できること、また、大きな収縮ひずみ（本実験では 750 μ 以上）を経験した後の凍結融解抵抗性は著しく低下することを明らかにした。

キーワード：再生粗骨材, 再生コンクリート, 平均吸水率, 凍結融解, 乾燥収縮

1. はじめに

周知のように、寒冷地では耐凍害性に優れたコンクリートが要求される。たとえリサイクル材を利用する場合であっても、自然環境はコンクリートの種類を区別して扱うことはない。

再生粗骨材を用いてコンクリートを製造する場合、吸水率の高い再生粗骨材、すなわち品質の悪い再生粗骨材のコンクリートへの利用を考えた場合、耐久性（特に耐凍害性）の確保の観点から何らかの配慮が必要となる。具体的な方法としては、付着モルタルを除去し粗骨材の品質を向上させること、もしくは普通粗骨材と混合利用する方法が考えられる。

本研究では、再生粗骨材と普通粗骨材を混合利用する場合には、両者の吸水率をそれぞれの混入率に応じて求めた粗骨材全体としての吸水率、つまり使用する粗骨材（以下「使用粗骨材」）の平均吸水率に着目し、凍結融解抵抗性に及ぼす、水セメント比の影響、養生条件の影響（水中養生と蒸気養生）、原コンクリート中の AE 剤の影響、凍結融解試験前に経験する乾燥収縮の影響を明らかにすることを目的に実施した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験で使用した再生粗骨材の吸水率と製造方

表-1 再生粗骨材の各種特性と製造方法

名称	AE 剤	原骨材	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	製造方法		
					ジョークラッシャ	アトリッションミル (●はロッドミル)	比重選別
RA1	有	A	2.54	2.90	○	●	○
RA2	有	B	2.50	4.60	○	-	-
RA3	有	B	2.57	6.17	○	○	-
RA4	有	C	2.47	5.90	○	-	-
RA5	有	C	2.58	4.48	○	○	-
RA6	有	C	2.65	2.92	○	○	-
RA7	無	C	2.48	6.19	○	-	-
RA8	無	C	2.58	4.47	○	○	-
RA9	無	C	2.64	2.88	○	○	○

1) A : 玉砂利 (表乾密度 2.56g/cm³, 吸水率 1.62%), B : 玉砂利 (表乾密度 2.70g/cm³, 吸水率 3.30%)
C : 玉砂利 (表乾密度 2.62g/cm³, 吸水率 1.12%)

*1 北海道大学大学院 工学研究科 助手 博士 (工) (正会員)

*2 北海道開発土木研究所 構造部材料研究室 (正会員)

*3 北海道電力株式会社 釧路支店 新得電力所土木課 修士 (工) (正会員)

*4 北海道工業大学 工学部社会基盤工学科 助教授 博士 (工) (正会員)

表-2 供試体諸元

グループ	平均吸水率 (%)	サブグループ	供試体名	試験内容		収縮ひずみ (μ)	W/C (%)	再生粗骨材 (吸水率 (%))	混合割合 (%)	
				凍結	凍結+乾燥				再生	普通
A	2.0	1	A-1-40s	×	○	781	40	-	0	100
			A-1-40w	○	×	-				
			A-1-50s	○	○	848	50			
			A-1-50w	○	○	1057				
			A-1-60s	×	○	866	60			
			A-1-60w	○	×	-				
B	2.5	1	B-1-40s	×	○	762	40	RA1 (2.9)	50	50
			B-1-40w	○	×	-				
			B-1-50s	○	○	752	50			
			B-1-50w	○	○	962				
			B-1-60s	×	○	876	60			
			B-1-60w	○	×	-				
C	2.9	1	C-1-40s	×	○	809	40	RA1 (2.9)	100	0
			C-1-40w	○	×	-				
			C-1-50s	○	○	933	50			
			C-1-50w	○	○	1066				
			C-1-60s	×	○	933	60			
			C-1-60w	○	×	-				
		2	C-2-40s	×	○	923	40	RA2 (4.6)	35	65
			C-2-40w	○	×	-				
			C-2-50s	○	○	981	50			
			C-2-50w	○	○	1152				
			C-2-60s	×	○	971	60			
			C-2-60w	○	×	-				
		3	C-3-40s	×	○	838	40	RA3 (6.2)	22	78
			C-3-40w	○	×	-				
			C-3-50s	○	○	923	50			
			C-3-50w	○	○	1085				
			C-3-60s	×	○	942	60			
			C-3-60w	○	×	-				
D	4.6	1	D-1-50s	○	○	1323	50	RA2 (4.6)	100	0
			D-1-50w	○	○	1076				
		2	D-2-50s	○	○	1247		RA3 (6.2)		
			D-2-50w	○	○	1085				
E	6.2	1	E-1-50s	○	○	1476	50	RA3 (6.2)	100	0
			E-1-50w	○	○	1161				
F	3.0	1	F-1-50s	○	×	-	50	RA6 (2.9)	100	0
		2	F-2-50s	○	×	-		RA5 (4.5)	39	61
		3	F-3-50s	○	×	-		RA4 (5.9)	25	75
G		1	G-1-50s	○	×	-	50	RA9 (2.9)	100	0
		2	G-2-50s	○	×	-		RA8 (4.5)	40	60
		3	G-3-50s	○	×	-		RA7 (6.2)	30	70

表-3 コンクリートの配合の一例

供試体名	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	再生 粗骨材 (kg/m ³)	普通 粗骨材 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	AE 減水剤 (cc/m ³)	空気 調整剤 (cc/m ³)	スランプ (cm)	空気量 (%)
C-1-50	320	160	988	0	824	800	4.8	11.0	4.6
C-2-50	320	160	376	699	820	800	4.8	12.0	4.9
C-3-50	320	160	239	846	819	800	4.8	10.5	4.7

法を表-1に示す。本研究では、品質の良い再生粗骨材を製造するために、アトリッションミルと比重選別ジグを用いている。

実験供試体は、7つのグループにより構成される(表-2)。グループAからGまでの結果を用いることにより、各種特性に及ぼす平均吸水率の影響ならびに凍結融解抵抗性に及ぼす原コンクリート中のAE剤の影響を明らかにできる。

グループAは、普通粗骨材のみを用いたものである。グループBは、普通粗骨材と再生粗骨材1を混合した粗骨材を用いたものである。グループCは3つのサブグループからなる。C-1は再生粗骨材1のみを、C-2は再生粗骨材2と普通粗骨材を、C-3は再生粗骨材3と普通粗骨材を用いたものであり、これらは使用粗骨材の平均吸水率が2.9%となるように、混合割合が決められている。グループDは2つのサブグループからなる。D-1は再生粗骨材2のみを、D-2は再生粗骨材3と普通粗骨材を用いたものであり、使用粗骨材の平均吸水率4.6%となるように混合割合が決められている。グループEは再生粗骨材3のみを用いたものである。グループFは3つのサブグループからなる。F-1は再生粗骨材6のみを、F-2は再生粗骨材5と普通粗骨材を、F-3は再生粗骨材4と普通粗骨材を用いたものであり、使用骨材の平均吸水率が3%となるように混合割合が決められている。グループGは3つのサブグループよりなる。G-1は再生粗骨材9のみを、G-2は再生粗骨材8と普通粗骨材を、G-3は再生粗骨材7と普通粗骨材を用いたものであり、使用粗骨材の平均吸水率が3%となるように混合割合が決められている。

再生コンクリートの配合の一例を表-3に示

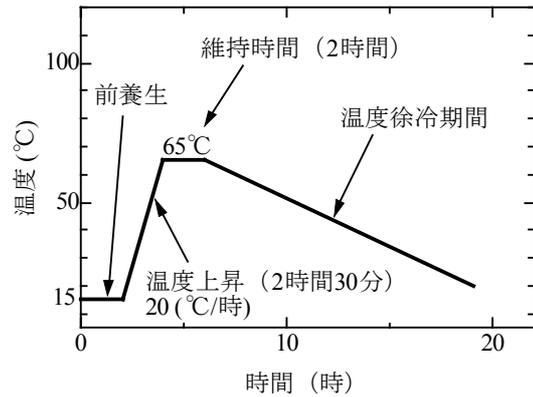


図-1 蒸気養生の温度履歴

す。全ての場合、圧縮強度の目標値を35MPaに設定した下で、骨材容積を一定とし所定のスランプ(10±2cm)が得られるように配合を決定している。なお、グループA,B,Cに関しては、水セメント比が40,50,60%であるものを用意した。一方、グループD,E,F,Gに関しては、水セメント比が50%のみ製造した。使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、普通粗骨材には、表乾密度2.87g/cm³、吸水率2.04%の砕石を、細骨材には表乾密度2.62g/cm³の沙流川産川砂を用いている。また、空気量は4から5%の範囲にあった。

本研究では、再生コンクリートの無筋コンクリート2次製品への利用を考えている。そこで、養生方法が各種特性に及ぼす影響を検討するために、水中養生とともに蒸気養生を行っている。蒸気養生の温度履歴を図-1に示す。

2.2 実験供試体及び実験方法

表-2に示される供試体は、所定の養生終了後、直ちに凍結融解試験に供されたものと、打設後、乾燥収縮試験を経験した後に凍結融解試験に供されたものからなる。なお、乾燥収縮試験の条

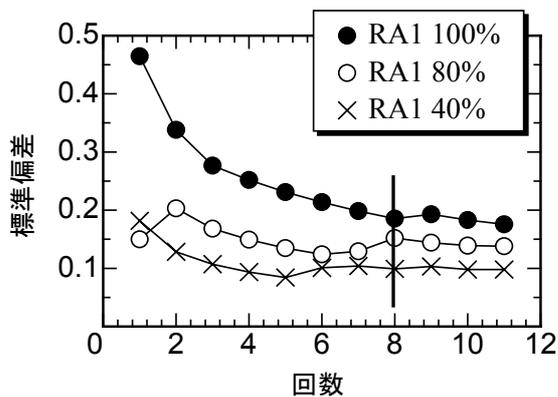


図-2 測定回数と標準偏差

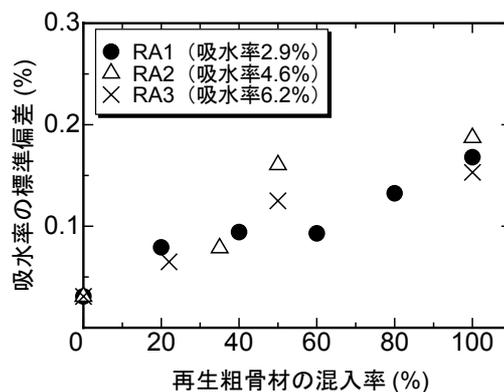
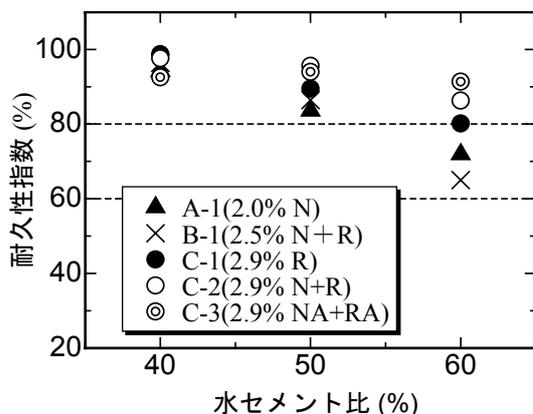
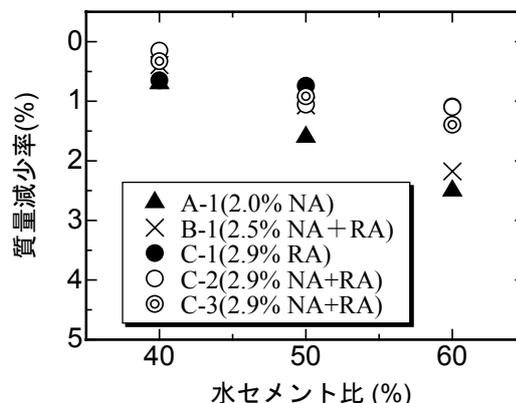


図-3 再生粗骨材混入率と吸水率の標準偏差



(a)耐久性指数



(b)質量減少率

図-4 水セメント比の影響

件は $20 \pm 1^\circ\text{C}$, $\text{RH}60 \pm 5\%$ であり、試験期間は 36 週間であった。

実験には、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の供試体が用いられている。凍結融解試験は、JIS A 1148 の水中凍結水中融解試験法に準じて行い、相対動弾性係数と質量を測定した。

2.3 吸水率の評価方法

本研究では、JIS に規定されている方法に基づき再生粗骨材及び混合した骨材の吸水率を定めた。その際、標準偏差は測定回数の増加とともに小さくなるものの、試験値の平均値からの差は、JIS で規定される精度 (0.03% 以下) を満たさなかった (図-2)。それゆえ、標準偏差が一定となったと考えられる 8 回までの平均値により吸水率を表すこととした。なお、混合した粗骨材の標準偏差は、再生粗骨材の混入率の影響を大きく受けるものであった (図-3)。

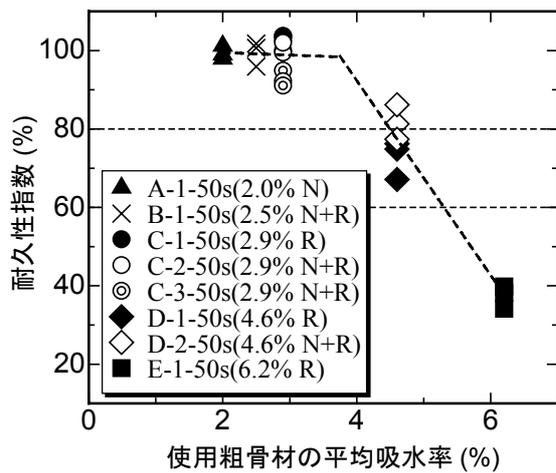
3. 実験結果および考察

3.1 水セメント比の影響

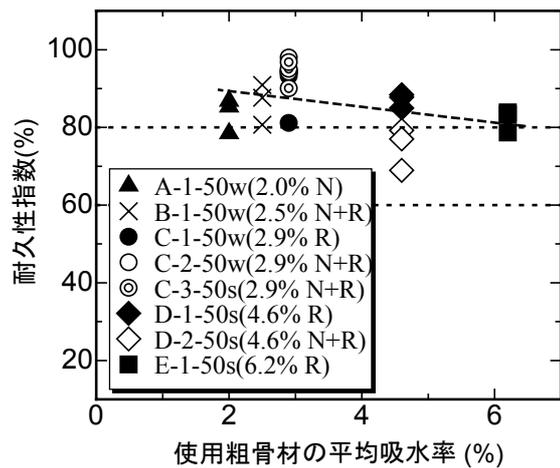
図-4 に耐久性指数と水セメント比との関係及び質量減少率と水セメント比との関係を示す。養生条件は水中養生である。水セメント比の増加に伴い耐久性指数は低下し、質量減少率は増加する傾向にある。使用粗骨材の平均吸水率と水セメント比の間には明確な傾向は見られなかったが、水セメント比が 50% 以下であれば、相対動弾性係数がほぼ 80% 以上、質量減少率が 2% 以下となっており、再生コンクリートの凍結融解抵抗性を確保には水セメント比を 50% 以上にすることが効果的であることが明らかである。このことは、蒸気養生の場合にも確認できた。

3.2 使用粗骨材の平均吸水率の影響

図-5 に水セメント比 50% の場合の相対動弾性

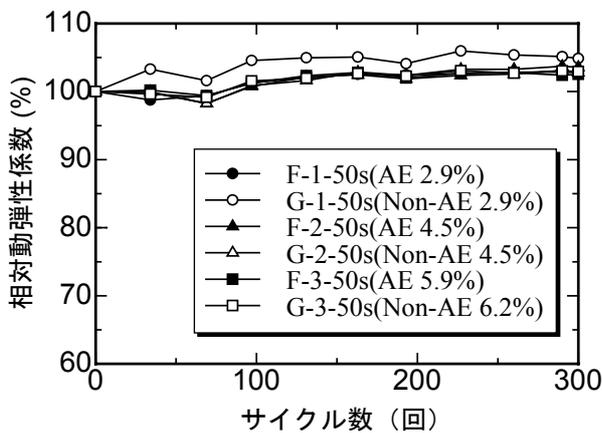


(a)蒸気養生

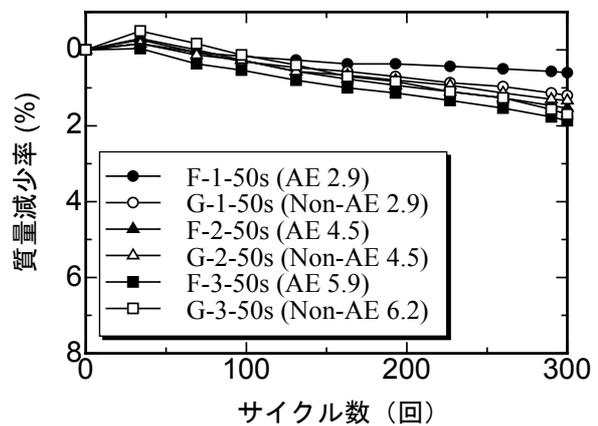


(b)水中養生

図-5 平均吸水率の影響



(a)相対動弾性係数



(b)質量減少率

図-6 原コンクリート中の AE 剤の影響

係数と使用粗骨材の吸水率の関係を養生条件別に示す。養生方法によらず、平均吸水率が 4% 以下であれば 80%以上の耐久性指数を確保できている。また、その範囲に対しては、蒸気養生の方が高い凍結融解抵抗性を有している。なお、図中の点線は最小 2 乗法による補完式を示す。

以上より、吸水率が 6%程度と品質の悪い再生粗骨材であっても普通粗骨材と混合利用し、平均吸水率が 4%程度以下にすることにより、高い凍結融解抵抗性が確保できると言える。

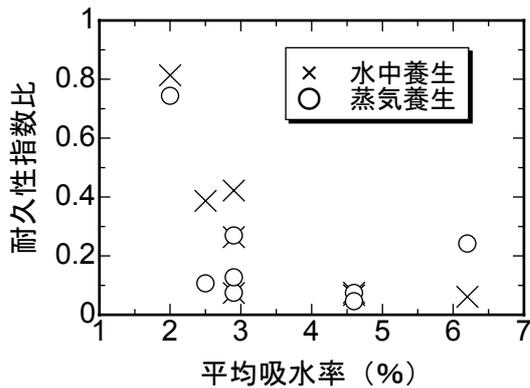
なお、平均吸水率が 6.2%で蒸気養生を行った場合、耐久性指数が著しく低下している。養生時にコンクリートの水分上昇に起因する脆弱な

モルタル層の形成が確認されており、この脆弱なモルタル層と品質の悪い再生粗骨材が共存することが凍結融解抵抗性の低下を引き起こしたものと考えられる。

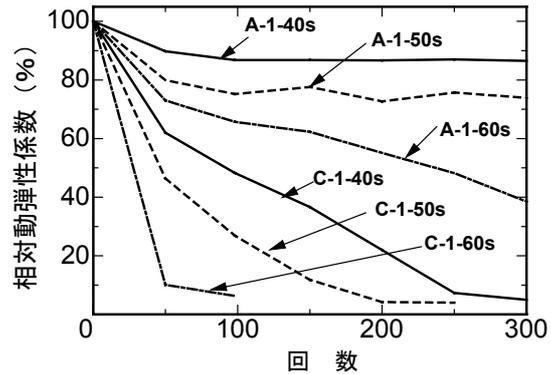
3.3 原コンクリートの AE 剤の影響

図-6 に相対動弾性係数とサイクル数との関係、及び質量減少率とサイクル数との関係を示す。原コンクリートが AE コンクリートであるグループ F と Non-AE コンクリートであるグループ G において差は見られない。

既往の研究によれば、原コンクリートが Non-AE コンクリートの場合、その原コンクリートより製造した再生粗骨材を用いたコンクリ



(a) 平均吸水率の影響



(b) 水セメント比の影響 (A-1 と C-1)

図-7 乾燥収縮ひずみが及ぼす影響

ートの相対動弾性係数が著しく低下する²⁾。しかし、本研究によれば、原コンクリートの AE 剤の有無に関わらず、蒸気養生を施した場合、使用粗骨材の平均吸水率が 3%以下にすることによって、高い凍結融解抵抗性を確保できる。

3.4 初期に経験する乾燥収縮の影響

図-7(a)は、凍結融解試験を行った場合の耐久性指数を乾燥収縮を経験しない場合の耐久性指数で除した値(耐久性指数比)と平均吸水率との関係を、図-7(b)は、A-1 と C-1 の水セメント比に着目した相対動弾性係数と凍結融解回数との関係を表している。

乾燥の程度が小さければ凍結融解抵抗性は向上³⁾することが指摘されている。しかし、本実験結果では、750 μ 以上の収縮ひずみを経験した後の耐久性指数は、平均吸水率の増加とともに急激にかつ著しく低下する傾向にある。

図-7(b)に示す A-1 と C-1 の乾燥の程度は両者でそれほど変わらないが(表-2 参照)、耐久性指数の低下割合が大きく異なる。すなわち、凍結融解抵抗性に及ぼす収縮の影響を収縮量(ひずみ)により表すことは難しい。凍結融解抵抗性に収縮が及ぼす影響の機構とその評価方法に関する検討は今後の課題としたい。

4. まとめ

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

(1) 吸水率が 6%程度と低品質の再生粗骨材で

あっても、普通粗骨材と混合利用し平均吸水率を 4%程度以下にすることにより、高い凍結融解抵抗性が確保できる。

(2) 平均吸水率が 3%以下であれば、原コンクリート中の AE 剤の有無が再生コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響は小さい。

(3) 本実験で対象とした乾燥収縮ひずみの範囲(750 μ 以上)では、平均吸水率の増加とともに凍結融解抵抗性が著しく低下する傾向にある。

謝辞

再生粗骨材の製造はアグロ技術の伊藤正澄氏に、供試体の作製は共和コンクリートの進藤邦雄氏、成田義昭氏に、乾燥収縮試験の実施に関しては北総研の桂修氏、松村宇氏に多大な助力を得た。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 村宇他, 湿式選別法による高品質再生細骨材の製造, Vol.25, No.1, コンクリート工学年次論文集, pp.1475-1480, 2003
- 2) 長瀧重義, ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発, 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究成果報告書, 2001
- 3) 田畑雅幸, コンクリートの凍害における環境条件の影響に関する研究, 北海道大学博士論文, 1986