

各種リサイクル材料を用いた コンクリートの初期凍害抵抗性 と低温強度増進性状

RESISTANCE TO FROST DAMAGE AT EARLY AGE AND STRENGTH DEVELOPMENT AT LOW-TEMPERATURE ON CONCRETE USING VARIOUS RECYCLING MATERIALS

三森敏司 — * 1 大楽隆男 — * 2
濱 幸雄 — * 3 千歩 修 — * 4

Toshiji MIMORI — * 1 Takao TAIRAKU — * 2
Yukio HAMA — * 3 Osamu SENBU — * 4

キーワード：
リサイクル材料, 養生, 初期凍害, 凍結融解, 強度増進, 積算温度

Keywords:
Recycling materials, Curing, Frost damage at early age, Freezing and
thawing, Strength development, Maturity

This paper reports the results of the experiment on resistance to frost damage at early age and strength development at low-temperature on concrete using various recycling materials. Results show compressive strength to prevent frost damage at early age can be set at 5N/mm², which is equal with normal concrete in any case. Low-temperature strength development of concrete using high-strength artificial aggregate, electric arc furnace oxidizing slag aggregate and normal eco cement is equal with normal concrete.

1. はじめに

寒冷期におけるコンクリートは、打ち込み後の初期凍害の防止と低温による強度増進の遅れが問題となり、これらに対する技術的な対応は建築学会「JASS5」¹⁾および「寒中コンクリート施工指針」²⁾に規定されている。

初期凍害の防止には、5N/mm²の圧縮強度が得られるまでコンクリートを凍結させないことが必要となる。一方、低温による強度増進の遅れに対しては、調合および養生による対応がなされている。なお、これらの寒冷地問題に関しては、骨材の違い、結合材の違いにかかわらず、強度増進の評価による。

近年、地球温暖化対策等への配慮は様々な分野で活発に取り組み、建築分野においても不可避なものとなり、廃棄物の減量を目的とした各種リサイクル材料が開発され、その活用が期待されている。

本研究では、各種リサイクル材料のうちフライアッシュを原料とした高強度人工骨材、電気炉酸化スラグ骨材、P S 灰造粒骨材、エコセメントを対象として、寒中コンクリートで考慮を要する技術的基本事項である初期凍害の防止と低温による強度発現の遅れに関して検討した。なお、本報は筆者らの既報⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾に追加実験を加えた報告である。

2. 各種リサイクル材料について

本研究で用いた各種リサイクル材料の概要を以下に示す。

高強度人工骨材 (F A 骨材) は、火力発電所から発生する副産物・廃棄物であるフライアッシュを原資とし、最近の電力消費量の増大に伴い大量に発生するフライアッシュの有効利用の一環として、軽

量で高強度な人工骨材として開発されたものである。

電気炉酸化スラグ骨材は、屑鉄から電気炉で各種鋼材を製造する際に副産され、骨材として使用可能な電気炉酸化スラグを徐冷または急冷したものである。

P S 灰造粒骨材は、製紙工場のパルプ製造工程、紙製造工程、古紙処理工程等から発生するペーパーラグ (P S) を焼却処理した際に発生する大量の P S 灰を有効利用することで処理費の抑制を図るために製造されたものである。

エコセメントは、都市ゴミ焼却灰や下水汚泥などの廃棄物の有効利用の一環として開発されたものである。

これらのリサイクル材料に関する寒冷地性能に関する報告は少なく、低温養生に関する報告⁴⁾⁵⁾があるのみである。

3. 実験概要

実験は大きく4つに分けて行った。実験計画を表1に示す。シリーズIではF A 骨材を粗骨材として、シリーズIIでは電気炉酸化スラグを細骨材として、シリーズIIIではP S 灰造粒骨材を粗骨材として、シリーズIVでは普通エコセメントを用いたコンクリートの寒冷地性能実験を行った。

3.1 使用材料

セメントはシリーズI~IVで普通ポルトランドセメント (N C) を、シリーズIVでは普通エコセメント (E C) を用いた。セメントの物理試験結果を表2に示す。

シリーズIの細骨材はコイトイ産陸砂を用い、粗骨材は尾幌産砕石 (N A) 、高強度人工骨材 (F A) の2種類を用いた。シリーズII

¹⁾ 釧路工業高等専門学校建築学科 准教授
(〒084-0916 釧路市大楽毛西2丁目32番1号)

²⁾ 釧路工業高等専門学校建築学科 名誉教授

³⁾ 室蘭工業大学工学部建設システム工学科 准教授・博士 (工学)

⁴⁾ 北海道大学大学院工学研究科建築材料科学研究室 教授・工博

⁵⁾ Assoc. Prof., Dept. of Arch., Kushiro National College of Technology

⁶⁾ Honorary Prof., Dept. of Arch., Kushiro National College of Technology

⁷⁾ Assoc. Prof., Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

⁸⁾ Prof., Laboratory of Building Materials, Hokkaido Univ., Dr. Eng.

表1 実験計画表

シリーズ	使用材料		コンクリートの条件	
I	セメント	普通ポルトランドセメント	水セメント比	30%, 55%
	細骨材	コイトイ産陸砂	スランブ スランブフロー	18cm(W/C=55%) 60cm(W/C=30%)
	粗骨材	NA(尾幌産碎石) FA(高強度人工骨材)	空気量(%)	4.5 ± 1.0
	混和剤	AE減水剤標準形(No.70) 高性能AE減水剤標準形(SP8SB-S) 空気量調整剤(MA775S)	練り上がり温度	20℃または5℃ (養生温度と同一)
II	セメント	普通ポルトランドセメント	水セメント比	35%, 55%
	細骨材	コイトイ産陸砂 電気炉酸化スラグ細骨材 ・スラグ細骨材混合率(% vol) W/C=55(%) ~ 0, 10, 20, 30 W/C=35(%) ~ 0, 10, 30	スランブ スランブフロー	18cm(W/C=55%) 55cm(W/C=35%)
	粗骨材	尾幌産碎石	空気量(%)	4.5 ± 1.0(55%) 3.5 ± 1.0(45%)
	混和剤	AE減水剤標準形(No.70) 高性能AE減水剤標準形(SP8SB-S) 空気量調整剤(MA101, MA775S)	練り上がり温度	20℃または5℃ (養生温度と同一)
III	セメント	普通ポルトランドセメント	水セメント比	45%, 55%
	細骨材	鶴居産山砂	スランブ	18cm
	粗骨材	N(尾幌産碎石) P S(P S灰造粒骨材)	空気量(%)	4.5 ± 1.0
	混和剤	AE減水剤標準形(No.70) 空気量調整剤(MA101)	練り上がり温度	20℃または5℃ (養生温度と同一)
IV	セメント	N(普通ポルトランドセメント) E(普通エコセメント)	水セメント比	45%, 55%
	細骨材	鶴居産山砂	スランブ	18cm
	粗骨材	尾幌産碎石	空気量(%)	4.5 ± 1.0
	混和剤	AE減水剤標準形(No.70) 空気量調整剤(MA101)	練り上がり温度	20℃または5℃ (養生温度と同一)

表2 セメントの物理試験結果

シリーズ	セメント種別	密度(g/cm³)	比表面積(cm²/g)	C,S(%)	C,S(%)	凝結時間(時-分)		圧縮強さ(N/mm²)		
						始発	終結	3日	7日	28日
I	NC	3.16	3160	-	-	2-10	3-20	31.0	43.5	60.0
II	NC	3.16	3150	-	-	2-20	3-40	29.0	45.3	62.2
III	NC	3.16	3360	-	-	2-05	3-31	31.2	44.3	61.5
IV	NC	3.16	3350	57	17	1-42	2-42	32.7	47.9	66.0
	EC	3.17	4190	59	5	2-37	4-06	31.7	44.2	54.2

表3 骨材の物理試験結果

シリーズ	骨材種別		表乾密度(g/cm³)	吸水率(%)	単位容積質量(kg/l)	実積率(%)	粗粒率
I	細骨材	陸砂	2.69	1.46	1.75	66.0	2.08
		粗骨材	NA	2.68	1.42	1.56	57.8
			FA	1.89	2.60	1.14	62.0
II	細骨材	陸砂	2.62	1.44	1.71	66.2	2.47
		スラグ	3.68	0.80	2.36	64.6	2.71
	粗骨材	碎石	2.69	1.27	1.57	59.0	6.75
III	細骨材	山砂	2.57	2.66	1.64	65.3	2.59
	粗骨材	N	2.67	1.57	1.54	58.6	6.60
		PS	1.48	65.1	0.49(絶乾)	-	6.50
IV	細骨材	山砂	2.54	2.26	1.64	65.3	2.63
	粗骨材	碎石	2.68	1.40	1.54	58.6	6.98

の粗骨材は尾幌産碎石(最大寸法20mm)を細骨材はコイトイ産陸砂および電気炉酸化スラグ細骨材を用い、電気炉酸化スラグ細骨材の混合率を0~30vol%とした。シリーズIIIの細骨材は鶴居産山砂を用い、粗骨材は尾幌産碎石とPS灰造粒骨材(最大寸法15mm)の2種を用いた。シリーズIVの細骨材は鶴居産山砂、粗骨材は尾幌産碎石を用いた。各骨材の物理試験結果を表3に示す。

混和剤はシリーズIの水セメント比55%ではAE減水剤標準形(No.70)、水セメント比30%では高性能AE減水剤標準形(SP8SB-S)を、シリーズIIでも同様に用い、シリーズIIIとIVではAE減水剤標準形を用い、必要に応じて空気量調整剤を使用した。

3.2 コンクリートの調査

コンクリートの調査は目標空気量(4.5 ± 1.0%)、目標スランブ

表4 コンクリートの調査

シリーズ	記号	W/C(%)	s/a(%)	単位水量(kg/m³)	絶対容積(1m³)			混和剤(C×%)		
					セメント	細骨材	粗骨材	AE	SP	
I	30NA	30	44.6	160	169	279	347	-	1.0	
	30FA				169	254	372	-	0.95	
	55NA				172	99	314	370	1.0	-
	55FA				167	96	295	397	1.0	-
II	35-	35	44.9	176	159	285	350	-	1.0	
	55-	55	44.9	180	104	301	370	1.2	-	
III	45N	45	41.0	178	125	267	385	1.2	-	
	45PS				125	267	385	1.0	-	
	55N	55	43.7	173	100	298	384	1.2	-	
	55PS				98	300	387	0.8	-	
IV	45N	45	41.0	178	125	267	385	1.2	-	
	45E				128	259	385	1.2	-	
	55N	55	43.5	173	100	297	385	1.2	-	
	55E				102	290	385	1.2	-	

表5 コンクリートの練り上がり性状

シリーズ	記号	目標練温(℃)	練り上がり性状					単位容積質量(kg/m³)	
			練温(℃)	スランブ(cm)	フロー(cm)	空気量(%)			
						圧力法	質量法		
I	30NA	20	22.5	-	40.0 × 39.0	5.3	5.4	2353	
		5	9.0	-	55.0 × 56.0	4.3	2.9	2413	
	30FA	20	20.5	-	43.0 × 41.0	3.4	0.6	2164	
		5	8.3	-	57.5 × 56.0	3.9	0.5	2167	
	55NA	20	19.0	18.6	-	5.2	2.8	2361	
		5	9.3	18.6	-	4.8	4.2	2329	
	55FA	20	18.5	19.3	-	6.9	3.6	2033	
		5	8.8	21.1	-	8.4	4.6	2012	
	II	35-0	20	22.5	-	575 × 550	2.6	2.3	2385
			5	5.5	-	280 × 285	3.9	4.8	2354
		35-10	20	22.5	-	595 × 605	2.2	1.7	2429
			5	4.9	-	300 × 290	4.0	4.2	2369
35-30		20	23.0	-	590 × 575	2.1	1.8	2490	
		5	8.0	-	365 × 360	4.0	4.3	2425	
55-0		20	22.0	20.8	-	3.9	3.8	2308	
		5	8.5	21.3	-	5.3	5.2	2274	
55-10		20	21.3	19.6	-	4.3	4.2	2329	
		5	8.0	21.3	-	4.7	5.7	2293	
55-20		20	20.5	19.7	-	4.6	4.2	2363	
		5	6.0	21.0	-	5.8	5.9	2321	
55-30	20	20.7	18.8	-	4.9	4.4	2388		
	5	5.0	22.0	-	5.7	5.6	2357		
III	45N	20	21.0	20.8	-	3.7	2.0	2342	
		5	6.0	22.7	-	5.2	3.5	2306	
	45PS	20	20.5	22.3	-	6.3	3.0	1850	
		5	7.5	23.5	-	5.4	3.7	1837	
	55N	20	21.0	20.1	-	4.7	3.5	2298	
		5	6.5	23.2	-	6.6	5.4	2254	
55PS	20	19.0	12.1	-	5.9	3.7	1830		
	5	7.0	19.6	-	7.5	4.7	1811		
IV	45N	20	21.0	20.1	-	3.0	1.5	2356	
		5	6.8	21.5	-	5.0	2.9	2320	
	45E	20	21.6	18.7	-	2.9	0.4	2377	
		5	6.0	20.4	-	4.7	3.1	2311	
	55N	20	18.8	18.9	-	3.8	2.1	2333	
		5	6.0	20.7	-	4.7	3.7	2294	
	55E	20	19.2	17.0	-	3.5	1.3	2346	
		5	5.7	20.6	-	4.9	2.8	2311	

表6 初期凍害試験の条件

	凍結融解条件	圧縮強度試験の材齢
前養生	5℃封かん養生圧縮強度5N/mm²をはさむ4材齢	凍結融解用供試体 ○凍結融解開始時 ○凍結融解終了後 ○後養生・材齢28日終了時 比較用供試体 ○20℃養生, 材齢28日
凍結融解	気中凍結水中融解6サイクル/日 凍結: -18℃, 2.5時間 融解: +5℃, 1.5時間	
後養生	20℃封かん養生・材齢28日まで	

表7 圧縮強度の測定材齢と積算温度(°D・D)

養生温度	30	90	210	420	840	1680	2730
20℃	1日	3日	7日	14日	28日	56日	91日
5℃	-	6日	14日	28日	56日	112日	182日

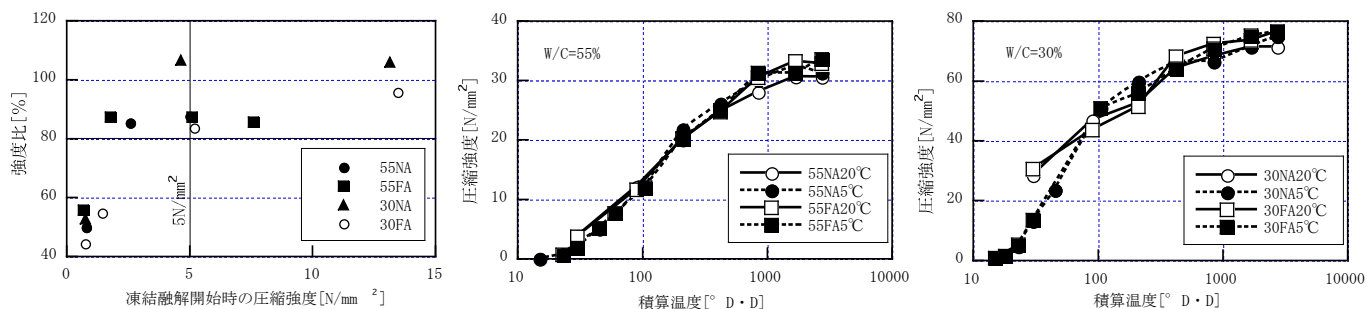


図1 高強度人工骨材を粗骨材として用いたコンクリートの初期凍害抵抗性と強度増進性状

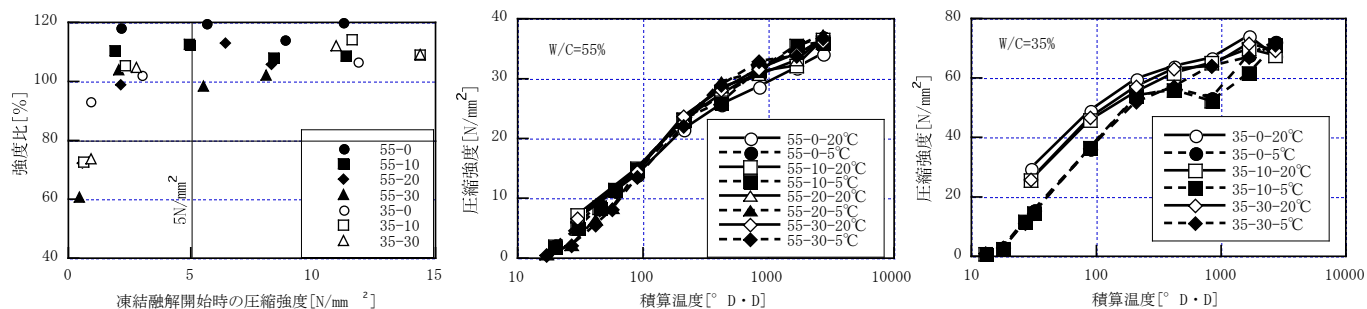


図2 電気炉酸化スラグ骨材を細骨材の一部として用いたコンクリートの初期凍害抵抗性と強度増進性状

(18cm)・スランブフロー (60cm) が得られように、練り上がり温度 20℃を基本調合として試し練りにより定めた。シリーズ I では水セメント比を 30%と 55%の 2 水準とし、単位粗骨材かさ容積を水セメント比 30%で 0.60m³/m³、55%で 0.64m³/m³、シリーズ II では水セメント比を 35%と 55%の 2 水準とし、スラグ混合率 0%を基本とし、シリーズ III と IV では水セメント比を 45%と 55%の 2 水準とした。コンクリートの調合を表 4 に練り上がり性状を表 5 に示す。

3.3 初期凍害試験

初期凍害試験の条件を表 6 に示す。供試体は φ 10 × 20cm の円柱供試体を用い、JIS A 1132 (コンクリートの強度試験用供試体の作り方) に準じて作製した。コンクリートの練り上がり温度を 5℃とし、所定の材齢まで 5℃封かん養生を行い、その後気中凍結水中融解 (+5 ~ -18℃) による 6 サイクルの凍結融解作用を与えた後、20℃で材齢 28 日まで封かん養生を行った。圧縮強度の測定は凍結融解開始時、終了時および材齢 28 日で行った。なお、この実験は金らと同様の方法²⁾³⁾で、初期凍害の評価法として極めて標準的な方法である。

3.4 低温強度増進性状に関する実験

低温強度増進性状に関する実験は、φ 10 × 20cm の円柱供試体を用い、練り上がり温度を 5℃、20℃として所定の材齢まで封かん養生を行った。圧縮強度試験の測定材齢は表 7 に示す 20℃養生の 7 材齢を基本とし、5℃養生では表 7 に示す 6 材齢に初期凍害抵抗性の前養生 4 材齢の圧縮強度を加えた 10 材齢とした。

4. 実験結果および考察

図 1 に F A 骨材を粗骨材として用いたコンクリートの初期凍害抵抗性と強度増進性状を示す。ここで、強度回復の程度は凍結融解を受けた供試体と受けない供試体の 840° D・D 時の強度比で表しており、凍結融解後の 20℃後養生による強度回復の程度によって初期凍害を受けたか否かを判定するもので、凍結融解後の後養生によって 80%以上強度回復した場合を概ね良好と判断した。N A 骨材および

F A 骨材を用いたコンクリートでは凍結開始時の強度が 5N/mm² 以上であれば 80%以上の強度回復が見られる。軽量コンクリートでは普通コンクリートよりも初期凍害防止のために空気量が 1%程度多く必要であるといわれているが²⁾³⁾、F A 骨材では空気量の割増は必要ないものと思われる。圧縮強度増進性状は N A 骨材および F A 骨材を用いたコンクリートで、水セメント比 30%の場合に積算温度 100° D・D 以下の若材齢時に、20℃養生の強度が 5℃の強度よりもかなり大きくなっている。また、20℃養生における圧縮強度は、水セメント比によらず F A 骨材と N A 骨材はほぼ同等である。なお、低温養生が強度増進に及ぼす影響は骨材による違いが見られなかった。

図 2 に電気炉酸化スラグ骨材を細骨材の一部として用いたコンクリートの初期凍害抵抗性と強度増進性状を示す。水セメント比および電気炉酸化スラグの混合率によらず、凍結融解開始時に 2 ~ 3N/mm² の圧縮強度であれば 90%以上の強度回復を示しており、初期凍害を受けていないと判断できる。このことから、電気炉酸化スラグ骨材の 30vol%までの範囲で混合した場合の初期凍害防止のために必要な圧縮強度は、普通コンクリートと同様に 5N/mm² と考えて良い。圧縮強度増進性状は電気炉酸化スラグ骨材の混合の有無によらず、5℃養生の場合には 20℃養生と比較して、初期強度が低く、長期強度が高くなる傾向が見られ、特に水セメント比 35%ではその差が顕著である。また、電気炉酸化スラグ細骨材の混合によって、初期強度が低く、長期強度が大きくなる傾向があるが、その差は養生温度による影響よりも小さい。

図 3 に P S 灰造粒骨材を粗骨材として用いたコンクリートの初期凍害抵抗性と強度増進性状を示す。水セメント比 45%では 3N/mm²、水セメント比 55%では 2N/mm² を超える圧縮強度であれば 90%以上の強度回復を示しており、初期凍害を受けていないと判断できる。従って、粗骨材に P S 灰造粒骨材を用いた場合の初期凍害防止のために必要な圧縮強度は、普通コンクリートと同様に 5N/mm² と考えて良い。P S 灰造粒骨材を用いたコンクリートの強度発現は、普通骨材に比

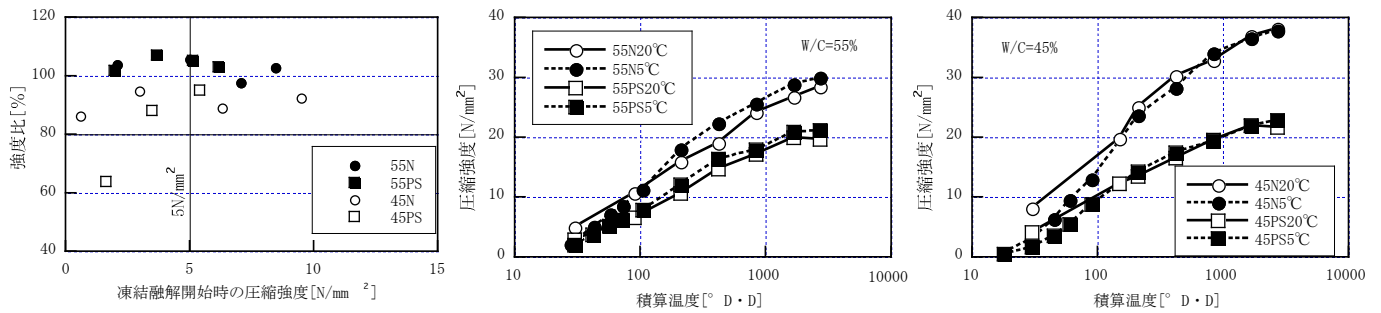


図3 PS灰造粒骨材を粗骨材として用いたコンクリートの初期凍害抵抗性と強度増進性状

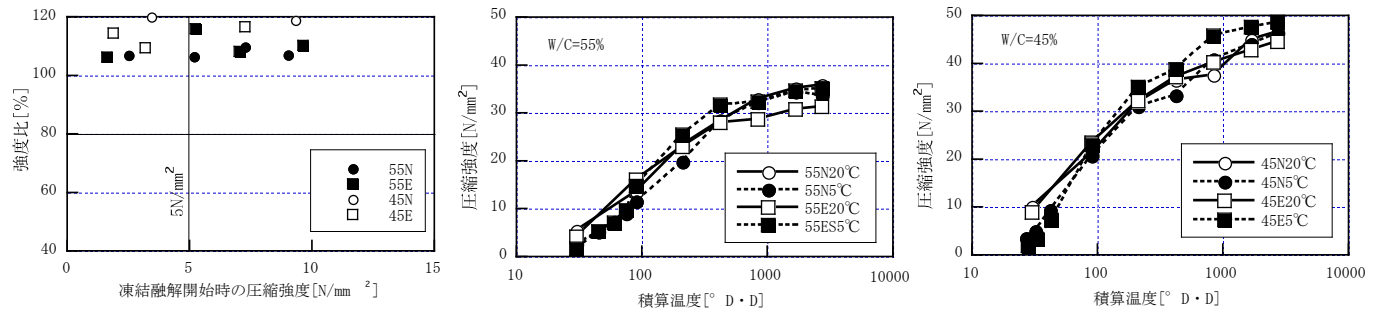


図4 普通エコセメントを用いたコンクリートの初期凍害抵抗性と強度増進性状

水セメント比 55% の 5℃ 養生で 67 ~ 73%、20℃ 養生で 59 ~ 77% であるのに対して、水セメント比 45% では 5℃ 養生で 57 ~ 68%、20℃ 養生で 50 ~ 62% と低い。これは P S 灰造粒骨材自身の圧壊強度に起因するものであるが、温度依存性は普通コンクリートと同等であった。なお、P S 灰造粒骨材を用いたコンクリートの材齢 28 日の比強度は約 11N/mm² と標準的な軽量コンクリートの値である 10N/mm² を満足していた。

図 4 に普通エコセメントを用いたコンクリートの初期凍害抵抗性と強度増進性状を示す。普通エコセメントを使用したコンクリートは水セメント比によらず、凍結融解開始時に 2 ~ 3N/mm² の圧縮強度であれば 100% 以上の強度回復を示しており、初期凍害を受けていないと判断できる。よって、普通エコセメントを用いたコンクリートの初期凍害防止のために必要な圧縮強度は、普通コンクリートと同様に 5N/mm² と考えて良い。普通エコセメントを用いたコンクリートは積算温度 210° D・D 時で 5℃ 養生の圧縮強度が 20℃ の圧縮強度を上回り、長期材齢ではその差が大きくなる傾向を示し、普通コンクリートとは異なる温度依存性を示した。

4. まとめ

4 種類のリサイクル材料を用いた各種コンクリートの初期凍害抵抗性と低温強度増進性状の検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 4 種類のリサイクル材料を用いたコンクリートの初期凍害防止のために必要な圧縮強度は、普通コンクリートと同等の 5N/mm² とすることができ、そのため空気量の割増も必要ない。
- (2) 高強度人工骨材、電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの強度増進性状は普通コンクリートと同等である。
- (3) P S 灰造粒骨材を粗骨材として用いたコンクリートの強度発現は普通コンクリートの 6 ~ 7 割程度であるが、温度依存性は同等である。

(4) 普通エコセメントを用いたコンクリートの強度増進性状は普通コンクリートと同等だが、温度依存性は普通コンクリートと異なる。

謝辞

高強度人工骨材と電気炉酸化スラグに関する研究は、日本建築学会の小委員会活動の一部として、P S 灰造粒骨材に関する研究は日本製紙 (株) 釧路工場との共同研究の一部として行ったものである。また、エコセメントに関する研究は、太平洋セメント (株) の協力を得た。記して、関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 建築工事標準仕様書・同解説 (JASS5) 鉄筋コンクリート工事, 日本建築学会, 2003
- 2) 寒中コンクリート施工指針・同解説, 日本建築学会, 1998
- 3) 金武漢他: コンクリートの初期凍害に及ぼす空気量の効果に関する研究 (第 1 報, 第 2 報), 日本建築学会論文報告集, No. 265, 266, 1979
- 4) 石田征男, 田中敏嗣, 木村正尚, 棚野博之, 鹿毛忠継, 濱崎仁: 環境負荷低減型セメントを使用したコンクリートの基本性能に関する実験的研究 (その 5 強度補正值に関する検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸) A-1, pp. 899 ~ 900, 2002. 8
- 5) 金子樹, 守屋健一, 玉井孝幸, 嵩英雄: エコセメントを用いたコンクリートの強度発現性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集 No. 615, pp. 1-6, 2007. 5
- 6) 浜幸雄, 三森敏司, 大楽隆男, 友澤史紀: 高強度人工骨材を用いたコンクリートの初期凍害抵抗性, 日本建築学会学術講演梗概集 A, pp. 315 ~ 316, 2001. 9
- 7) 浜幸雄, 田畑雅幸, 三森敏司, 大楽隆男: 電気炉酸化スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する研究 その 4 寒冷地性能に関する実験, 日本建築学会学術講演梗概集 A, pp. 419 ~ 420, 2003. 9
- 8) 芦田圭介, 三森敏司, 大楽隆男, 濱幸雄: PS 灰造粒品を用いたコンクリートの初期凍害抵抗性と低温強度増進, 日本建築学会北海道支部研究報告集 No. 79, pp. 5 ~ 8, 2006. 7
- 9) 三森敏司, 大楽隆男, 濱幸雄: エコセメントを用いたコンクリートの初期凍害抵抗性と低温強度増進, 日本建築学会学術講演梗概集 A, pp. 1113 ~ 1114, 2007. 8

[2008 年 2 月 19 日原稿受理 2008 年 11 月 7 日採用決定]