

第2章 実際に製造されている生コンクリートの耐凍害性

2.1 緒言

本研究遂行の契機となったのは、岩手県および北海道を対象地域としたコンクリート構造物の凍害調査および実際に製造されている生コンクリートを対象とした凍結融解試験である。前者では、凍害の発生が依然として今日的な問題であることを痛感し、後者では、実際に供給されているコンクリートの耐凍害性が必ずしも万全ではないことを認識した。

生コンクリートを対象とした凍結融解試験の結果には、本研究の主題であるコンクリートの耐凍害性への骨材の関りについて、いくつかの示唆に富んだ内容が含まれている。そこで、この試験の概要を述べ、次章以降の実験を実施するに至った動機を明確にしておくこととする。

筆者は、生コンクリート製造業の立場にある。コンクリートの凍害を防止するには、設計や施工の段階で凍害に対する十分な配慮を必要とするだけでなく、コンクリートそのものが、優れた耐凍害性を有していなければならない。コンクリート製造業者としても、十分に耐凍害性を有したコンクリートを供給する責務がある。そのためには、まず実際に製造されているコンクリートの耐凍害性を知らねばならない。このような認識のもとに、この試験が企画され、実施された。具体的には、岩手県内で実際に製造、出荷されている 59 工場の生コンクリートを対象として、硬化コンクリートの凍結融解試験を行い、耐凍害性の実態を把握するとともに、耐凍害性に影響を及ぼす要因を検討した¹⁾。試験を実施したのは、筆者の属する岩手県生コンクリート工業組合の共同試験場である。

2.2 試験の概要

2.2.1 供試体

表 2-1 に各生コンクリート工場で用いている細骨材および粗骨材の絶乾密度、吸水率および硫酸ナトリウムによる安定性損失質量を示す。骨材の品質特性として、吸水率はコンクリートの凍結融解抵抗性を表す指標としてよく用いられているが、安定性損失質量については、両者の相関が比較的高いとする例と、逆に全く相関がないとする例とがあって、はっきりしない²⁾。吸水率に着目すれば、工場によって、比較的大きな違いがみられる。

これらの試験値は、各生コン工場が測定したものではなく、厳密を期すため、共同試験場に骨材を搬入して測定したものであり、得られたデータの中には、JIS A 5308 附属書 1「レディーミクストコンクリート用骨材」あるいは JIS A 5005「コンクリート用碎石及び砕砂」の規格値を満足しない値も含まれている。

表 2-1 細骨材および粗骨材の物理的品質

No.	細骨材			粗骨材		
	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性損失 質量 (%)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性損失 質量 (%)
1	2.51	2.49	3.1	2.58	2.08	6.9
2	2.54	2.29	0.5	2.55	2.39	17.0
3	2.50	2.59	5.5	2.58	2.31	7.1
4	2.52	2.62	3.7	2.60	2.28	6.4
5	2.50	3.08	9.0	2.56	2.66	5.5
6	2.42	3.92	6.5	2.46	3.44	3.4
7	2.47	2.78	8.7	2.51	2.78	3.3
8	2.44	3.58	8.2	2.46	3.52	11.9
9	2.61	1.80	5.2	2.63	1.44	9.3
10	2.49	2.66	5.0	2.44	3.72	10.8
11	2.52	2.73	4.7	2.58	2.53	7.6
12	2.53	2.48	6.5	2.50	3.48	7.8
13	2.60	1.85	3.2	2.66	1.50	11.3
14	2.46	3.33	6.0	2.53	2.74	5.6
15	2.50	3.16	4.4	2.67	1.39	9.4
16	2.61	1.15	2.2	2.67	0.39	0.4
17	2.59	2.10	2.7	2.62	2.10	8.3
18	2.50	2.96	3.1	2.56	2.50	8.6
19	2.51	2.85	3.8	2.54	2.62	10.5
20	2.49	2.66	3.1	2.93	0.61	6.4
21	2.46	3.39	3.1	2.48	3.74	10.3
22	2.49	2.86	4.2	2.81	0.36	2.4
23	2.59	2.68	3.7	2.92	0.65	0.3
24	2.48	3.22	2.0	2.46	3.09	1.7
25	2.44	3.46	4.5	2.61	1.89	8.4
26	2.47	3.39	2.3	2.72	0.54	0.5
27	2.54	1.92	1.7	2.73	0.51	0.5
28	2.53	2.45	2.8	2.71	0.49	1.5
29	2.53	2.63	0.6	2.72	0.51	1.5
30	2.52	2.63	3.2	2.73	0.50	0.3
31	2.54	2.20	1.8	2.71	0.79	0.0
32	2.55	2.14	1.1	2.70	0.53	0.5
33	2.42	3.82	7.6	2.54	3.02	7.4
34	2.40	4.11	7.6	2.50	3.21	7.4
35	2.76	1.74	3.1	2.66	1.18	4.1
36	2.79	1.77	2.7	2.62	1.51	3.5
37	2.57	2.10	2.9	2.68	1.25	3.4
38	2.61	1.49	1.7	2.63	1.73	3.1
39	2.55	2.28	4.1	2.62	1.52	5.0
40	2.56	1.96	3.5	2.63	1.20	5.8
41	2.59	1.60	1.3	2.66	1.04	3.0
42	2.60	1.47	1.8	2.66	1.13	3.6
43	2.55	2.00	1.8	2.65	1.08	5.9
44	2.62	0.90	3.6	2.64	0.52	2.2
45	2.62	0.79	1.5	2.66	0.39	2.2
46	2.59	1.51	4.6	2.65	1.01	4.7
47	2.55	2.01	2.8	2.64	1.12	1.8
48	2.66	1.01	1.8	2.70	0.39	1.0
49	2.66	0.97	2.0	2.69	0.57	1.7
50	2.59	2.01	1.6	2.68	1.08	1.7
51	2.60	1.66	3.2	2.69	0.55	1.2
52	2.56	1.52	4.4	2.72	0.74	5.7
53	2.63	0.99	1.4	2.63	0.49	2.7
54	2.57	1.11	3.6	2.66	0.46	2.2
55	2.57	2.14	4.3	2.69	0.33	0.5
56	2.59	1.94	3.1	2.59	0.91	9.3
57	2.56	2.58	3.3	2.90	0.57	2.3
58	2.54	2.83	4.1	2.64	1.52	4.5
59	2.55	1.97	1.8	2.68	1.23	0.1
平均値	2.55	2.31	3.6	2.64	1.52	4.8
最大値	2.79	4.11	9.0	2.93	3.74	17.0
最小値	2.40	0.79	0.5	2.44	0.33	0.0
標準偏差	0.34	0.80	1.97	0.10	1.04	3.74

凍結融解試験用の供試体は、岩手県生コンクリート工業組合内にある 59 の各工場で、実際に製造されている生コンクリートについて品質試験（スランプ、空気量、単位容積質量等）を行ったうえで作製した。コンクリートの配合およびそれらの試験結果を、表 2-2 に示す。

表 2-2 コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの試験結果

No.	配合	W/C (%)	フレッシュコンクリートの試験結果		
			スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)
1	21-18-25 N	54.5	19.0	5.6	2285
2	18-18-25 N	59.1	19.5	4.2	2227
3	24-15-25 N	50.8	20.0	4.9	2276
4	24-15-25 N	51.9	14.0	5.2	2176
5	21-12-25 N	58.0	11.5	4.7	2256
6	24-18-25 N	50.1	17.5	4.0	2213
7	21-18-25 N	53.8	18.0	5.0	2270
8	18-12-25 N	58.0	11.0	5.5	2243
9	21-8-25 N	53.5	7.5	4.5	2345
10	21-18-25 N	53.5	17.0	5.2	2237
11	18-18-25 N	57.3	18.5	5.0	2257
12	16-8-25 N	61.5	9.0	4.9	2264
13	18-8-25 N	57.0	7.0	4.0	2296
14	21-18-25 N	54.2	17.5	4.8	2241
15	21-18-25 N	52.2	17.0	5.2	2309
16	19.5-12-40 N	59.5	11.5	4.9	2295
17	21-8-25 N	54.1	7.0	4.7	2333
18	21-15-25 N	53.0	15.0	5.8	2245
19	24-12-25 N	47.9	13.0	5.1	2279
20	21-12-25 N	57.2	11.5	5.2	2414
21	21-15-25 N	53.0	17.0	4.3	2240
22	18-15-20 N	62.3	13.0	4.9	2289
23	21-8-25 N	57.3	9.5	3.9	2419
24	21-15-25 N	51.2	16.0	5.0	2254
25	21-18-25 N	52.2	19.0	4.7	2250
26	18-15-25 N	62.5	15.5	4.9	2285
27	16-8-25 N	64.5	10.5	5.5	2310
28	21-18-25 N	57.0	19.5	5.1	2283
29	21-8-25 N	58.0	9.0	5.3	2300
30	24-18-25 N	53.0	19.5	4.9	2264
31	18-8-25 N	63.5	10.5	5.4	2250
32	21-8-25 N	59.0	7.5	4.0	2336
33	21-8-25 N	50.0	7.5	5.0	2285
34	16-8-25 N	57.0	9.0	5.1	2254
35	24-8-25 N	49.5	9.0	4.9	2341
36	24-8-25 N	49.5	10.0	4.8	2338
37	21-8-25 N	54.5	8.0	4.4	2337
38	21-8-25 N	61.5	8.0	4.5	2311
39	24-8-25 N	47.0	7.0	4.1	2347
40	21-8-25 N	53.0	8.5	5.6	2292
41	18-8-40 N	60.0	9.0	4.8	2346
42	21-18-25 N	57.0	19.5	5.6	2276
43	24-18-25 N	51.0	19.5	5.0	2272
44	16-8-25 N	70.2	9.5	4.0	2299
45	24-8-25 N	54.0	9.5	4.0	2284
46	21-8-25 N	56.0	8.0	4.1	2277
47	19.5-8-25 N	59.5	8.0	4.4	2290
48	21-18-25 N	59.5	19.0	4.5	2327
49	21-8-40 N	59.5	8.5	5.4	2360
50	21-8-25 N	58.5	9.0	4.6	2346
51	21-12-25 N	59.0	12.0	4.2	2324
52	22.5-8-40 N	60.0	9.0	5.6	2320
53	18-8-40 N	65.0	8.0	4.4	2338
54	21-8-25 N	59.0	9.0	4.5	2300
55	18-15-25 N	64.0	14.5	4.9	2284
56	21-15-25 N	60.6	14.5	4.3	2268
57	18-12-25 N	64.9	13.0	4.9	2352
58	21-8-25 N	57.0	9.0	5.4	2263
59	21-12-25 N	57.0	14.5	4.0	2315
平均値	—	56.7	12.5	4.8	2293
最大値	—	70.2	20.0	5.8	2419
最小値	—	47.0	7.0	3.9	2176
標準偏差	—	4.79	4.36	0.51	45.26

打設後2日間は、型枠に入れたまま乾燥させない状態で放置し、その後、同じく乾燥させない状態で供試体を共同試験場に搬入して脱型を行い、材齢14日まで、標準水中養生した。試料の採取は、当工業組合の品質管理監査と時を同じくして行っており、具体的には10月である。

供試体作製時には、監査員立会のもとに、練混ぜ直後のスランプや空気量等を測定したが、耐凍害性にとって重要な要因になると思われる空気量³⁾⁴⁾については、各工場が所有するエアメーターを用いて、日常的に行っているJIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法」で測定しており、各工場とも、骨材修正係数は考慮していない。

使用骨材は、工場によって異なる。当初は、この違いに着目し、骨材の品質とコンクリートの耐凍害性との関連をとらえることを主眼としてこの試験を企画した。そのため、各工場で骨材の品質以外の条件がなるべく均一となるよう、コンクリートの種類を、呼び強度の強度値21N/mm²、スランプ8～15cm、粗骨材の最大寸法25mmに統一しようとしたが、供試体作製当日の出荷の都合で、意図した種類と異なるコンクリートで供試体を作製する例が少なくなかった。したがって、試験によって得られた結果には、骨材の違いのほかに、配合条件等の相違という要因も含まれている。凍結融解試験用コンクリート供試体は、10×10×40cmの角柱であり、各3本作製した。

2.2.2 試験方法

凍結融解試験は、ASTM C-666 に準拠し、材齢14日の標準養生を行った後に、気中凍結・水中融解試験方法で行った。温度範囲は+5～-18℃であり、300サイクルまで凍結融解を繰り返した。測定項目は、相対動弾性係数および質量減少率であり、30サイクル毎に測定した。また、供試体に劣化が認められたものについては、その状況を記録した。

相対動弾性係数は、(2-1)式によって計算した。

$$Pn = \left(\frac{f_n^2}{f_0^2} \right) \times 100 \quad (2-1)$$

ここに、Pn：凍結融解nサイクル後の相対動弾性係数（％）

f_n ：凍結融解nサイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数（Hz）

f_0 ：凍結融解0サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数（Hz）

質量減少率は、(2-2)式によって計算し、JIS Z 8401（数値の丸め方）により小数点以下1桁に丸めた。

$$Wn = \frac{w_0 - w_n}{w_0} \times 100 \quad (2-2)$$

ここに、 Wn ：凍結融解 n サイクル後の質量減少率（％）

w_n ：凍結融解 n サイクル後の供試体の質量（g）

w_0 ：凍結融解 0 サイクルにおける供試体の質量（g）

コンクリートの耐凍害性は、一般に耐久性指数によって判定されることから、本研究においても（2-3）式によってこれを求めた。

$$DF = \frac{P \times N}{M} \quad (2-3)$$

ここに、 DF ：耐久性指数

P ： N サイクルのときの相対動弾性係数（％）

N ：相対動弾性係数が 60％になるときのサイクル数、または 300 サイクルのいずれか小さいもの

M ：300 サイクル

2.2.3 硬化コンクリートの空気量、気泡間隔係数および圧縮強度

写真 2-1 は、120 倍の顕微鏡を有する硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数の測定装置である。硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数は、100×100mm の供試体を用い、ASTM C 457 に示されるリニアトラバース法により求めた。測定に当たり、コンクリート供試体を切断して、その断面を十分に研磨した。実際の測定では、90mm のトラバース線上にある空気泡総量や空気泡弦長の総和などを顕微鏡観察によって測定し、1 本 1 本の硬化コンクリートの空気量や気泡間隔係数を求めた。さらに、31 本のトラバースラインについて、同様の作業を行い、これらの平均値を実際の値として採用した。この際、弦長が 1mm 以上の気泡については、エントラップトエアの恐れが強いため、測定の対象外とした。

コンクリートの耐久性には、圧縮強度も関連する可能性がある。そこで、コンクリートの圧縮強度を、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づき求めた。

2.3 試験結果および考察

2.3.1 凍結融解抵抗性

表 2-3 は、凍結融解抵抗性として質量減少率、相対動弾性係数、耐久性指数および圧縮強度の試験結果を示したものである。

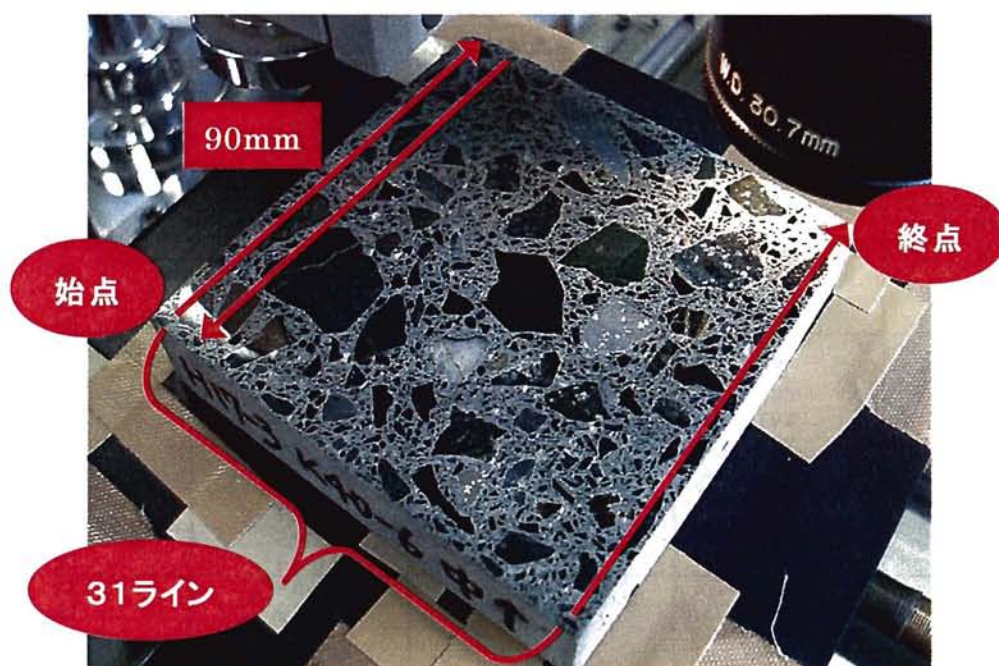


写真 2-1 気泡間隔係数の測定装置

図 2-1 は、耐久性指数の頻度図である。一般に耐凍害性を有しているとされる耐久性指数 60 以上の工場が全体の 7 割程度を占め、全工場平均の耐久性指数は 76%であり、耐久性指数 90 以上の工場も多いことから、岩手県内の生コン工場から出荷されるコンクリートは、総体的には良好な耐凍害性を示していると言える。しかし、耐久性指数 60 未満の工場が全体の 3 割程度を占めている点は看過できない。中には、最初の 30 サイクルで、相対動弾性係数が測定不能となる例もみられた。

凍結融解試験は過酷な条件のもとで行われており、得られた結果から、実際のコンクリート構造物の耐凍害性を判定しうるか否かについては、常に議論のあるところである。本実験で、小さな耐久性指数を示した工場の生コンクリートについても、実際の構造物に使用された場合に、凍害が必ず発生するとは断定できない。筆者らの調査でも、同一工場で、同一配合で製造された生コンクリートを用いたにもかかわらず、主要国道に隣接し、連続してしばしば水で飽和されるコンクリート構造物では凍害が生じ、国道に隣接せず、普通の露出状態にある別の構造物では凍害が生じていないケースのあることが明らかとなっている⁵⁾。これは、コンクリートの品質が同一であっても、気象条件が異なれば、その凍害の程度も異なることを明らかにする好例である。

凍害と気象条件との関連については、凍結融解日数に湿潤の程度を表す係数を乗じた凍害サイクルの指標が、被害の程度と優れた相関関係にあることを見出し

表 2-3 コンクリートの凍結融解抵抗性および圧縮強度

No.	質量減少率 (%)	相対動弾性係数 (%)	耐久性指数	圧縮強度 (N/mm ²)
1	+0.5	99	99	33.1
2	+1.2	87	87	21.9
3	+0.7	99	99	29.0
4	+0.3	100	100	32.0
5	+0.8	92	92	34.6
6	-0.1	52	5	28.2
7	+1.3	98	98	26.7
8	+0.9	94	94	26.6
9	+0.6	102	102	34.6
10	±0.0	54	46	27.7
11	+0.2	46	26	21.9
12	-0.2	60	30	25.6
13	+0.7	105	105	30.4
14	+0.5	102	102	26.5
15	+0.7	102	102	25.3
16	+0.3	105	105	30.8
17	+1.1	78	54	31.0
18	+0.5	58	23	22.4
19	+0.2	37	4	28.0
20	+0.6	103	103	33.6
21	+0.8	38	20	24.0
22	+1.3	101	101	22.1
23	+1.0	100	100	23.3
24	+0.6	74	74	31.9
25	+1.1	99	99	26.5
26	+1.4	89	89	20.2
27	+0.1	105	105	18.1
28	+0.8	98	98	25.7
29	+0.8	101	101	27.7
30	+0.5	101	101	28.6
31	+0.6	99	99	23.9
32	+0.6	100	100	33.4
33	-0.2	32	4	27.8
34	-0.3	56	5	25.9
35	+0.3	98	98	32.4
36	+0.3	98	98	30.6
37	-0.3	52	48	31.3
38	±0.0	0	3	29.9
39	-0.4	75	45	26.7
40	+0.3	99	99	28.6
41	+0.4	102	102	26.6
42	+0.4	100	100	27.5
43	+0.1	101	101	30.7
44	+0.7	99	99	20.7
45	+0.1	100	100	36.7
46	+0.3	93	93	25.0
47	+1.8	103	103	18.8
48	+1.7	65	57	29.3
49	-0.3	45	15	30.9
50	-0.1	41	8	32.1
51	-0.1	56	10	34.4
52	+0.3	103	103	30.4
53	+0.2	98	98	29.5
54	+0.1	96	96	36.7
55	+0.1	99	99	27.1
56	-0.1	58	45	30.5
57	+0.3	102	102	23.0
58	+0.5	107	107	29.6
59	+0.9	104	104	33.1
平均値	+0.5	84	76	28.3
最大値	+1.8	107	107	36.7
最小値	-0.4	0	3	18.1
標準偏差	0.50	25.01	36.29	5.64

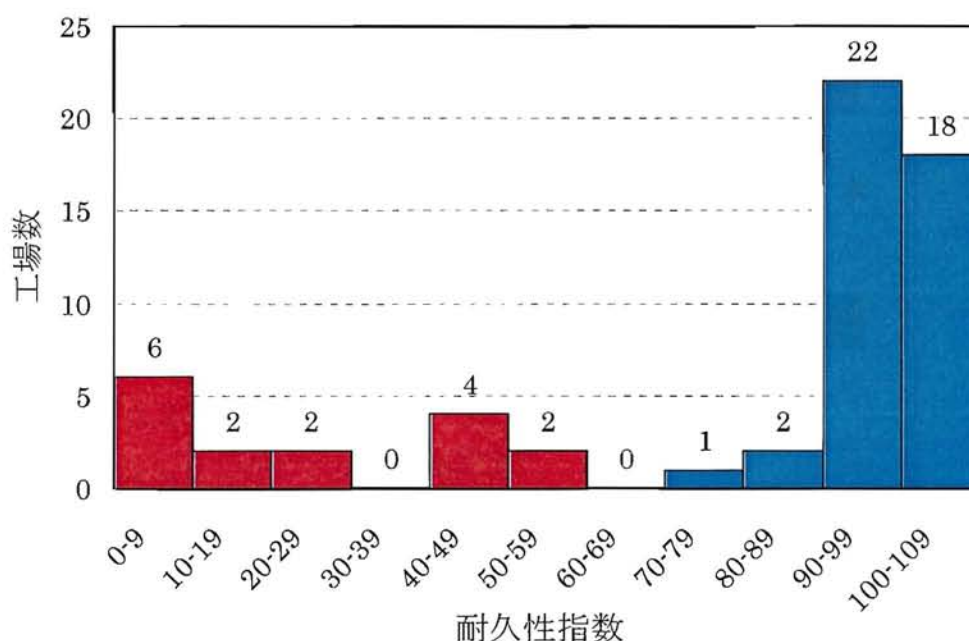


図 2-1 耐久性指数の頻度図

た藤原の研究⁶⁾や、全天日射量を考慮した凍結融解サイクル数は凍害の発生割合と相関関係が高いことを明らかにした筆者らの研究⁷⁾などがある。ただし、凍結融解試験結果に基づく耐久性指数 60 以上が耐凍害性を有することになる根拠と実際の気象条件との関係は、必ずしも明確になっているわけではない。実際との相関が不明であっても、他に有効な判定基準がない以上、一般に耐凍害性を有すると考えられている耐久性指数 60 以上のコンクリートを製造するよう努めるのが、生コン工場に課せられた責務であると思われる。そのためにも、現状を正しく認識した上で、耐久性指数に影響を及ぼす要因を解析し、耐凍害性の向上に寄与する方策を見出す必要がある。

2.3.2 骨材の吸水率の影響

本試験に用いられたコンクリートの骨材は多種にわたっている。粗骨材では、川砂利・陸砂利（以下、砂利とする）、碎石および砂利と碎石の混合、細骨材では、川砂・陸砂（以下、砂）、砕砂およびそれらの混合である。多様な骨材の品質とコンクリートの耐久性指数との関連を明らかにするため、ここでは、骨材の品質を比較的良く表すとされる吸水率に着目し、検討を行う。

図 2-2 は、細骨材および粗骨材の吸水率と耐久性指数の関係を表しており、品質との関連を捉えやすくするため、吸水率 3% を境に 4 つの領域に区分してある。耐久性指数は、60 を境に 2 つに分類した。

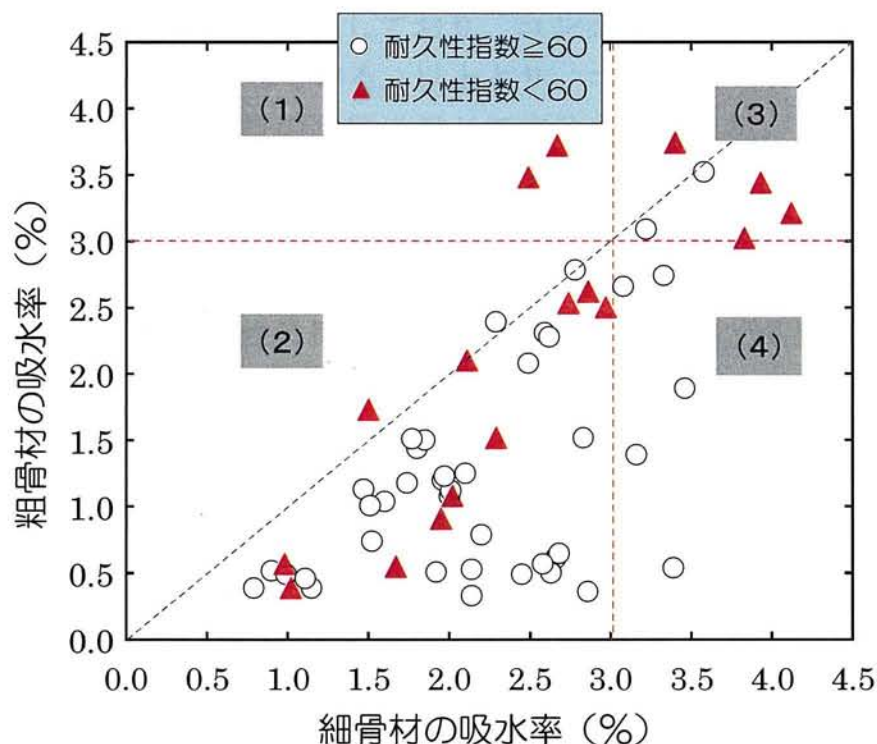


図 2-2 細骨材および粗骨材の吸水率と耐久性指数の関係

全体的に細骨材の吸水率が、粗骨材のそれを上回っていることが認められる。このことから、相対的に品質の劣る細骨材に注目して耐久性指数との関連を考察すべきであると考えられる。しかしながら、図の領域(3)、(4)に注目すれば、細骨材の吸水率3%以上の領域で耐久性指数60未満の工場は11工場中、4工場に過ぎない。しかも、細骨材の吸水率が3%以上であっても、粗骨材の吸水率が3%以下の領域(4)では、5工場全てが耐久性指数60以上を示している。これに対して、粗骨材の吸水率3%以上の領域(1)および(3)では、8工場中、6工場が耐久性指数60未満となっている。これらのことから、コンクリートの耐久性指数に対しては、細骨材の品質より粗骨材の品質の及ぼす影響が大きいことがわかる。

細骨材より粗骨材の品質が、コンクリートの耐凍害性に大きく影響を及ぼすことは、これまでも多く指摘されており²⁾、本研究もそれを裏付ける結果となった。領域(2)は、細骨材および粗骨材ともに良質と評価できる領域であるが、耐久性指数60未満が少なからず存在しており、コンクリートの耐凍害性を骨材の吸水率のみで解釈できない。

図 2-3 は、粗骨材の吸水率とコンクリートの耐久性指数との関係を示しており、粗骨材の種類も判別できるようにしてある。ここでも、粗骨材が良質で耐久性指数が60以上の領域(1)と、粗骨材が低品質で耐久性指数が60未満の領域(4)

に全工場の8割近い45工場が属しており、コンクリートの耐久性に粗骨材の品質が大きく関わることを示している。以上より、コンクリートの耐凍害性を高めるためには、使用する粗骨材の品質に対して十分な配慮を払い、物理的性質に優れたものを使用することが極めて重要であると指摘できる。

ただし、粗骨材の吸水率が小さくてもコンクリートの耐凍害性が劣る領域(2)、逆に粗骨材の吸水率が大きくても耐凍害性に優れる領域(3)にも、少なからぬ例が存在しており、耐凍害性に関し、粗骨材の吸水率のみで品質を断定できない面がある。

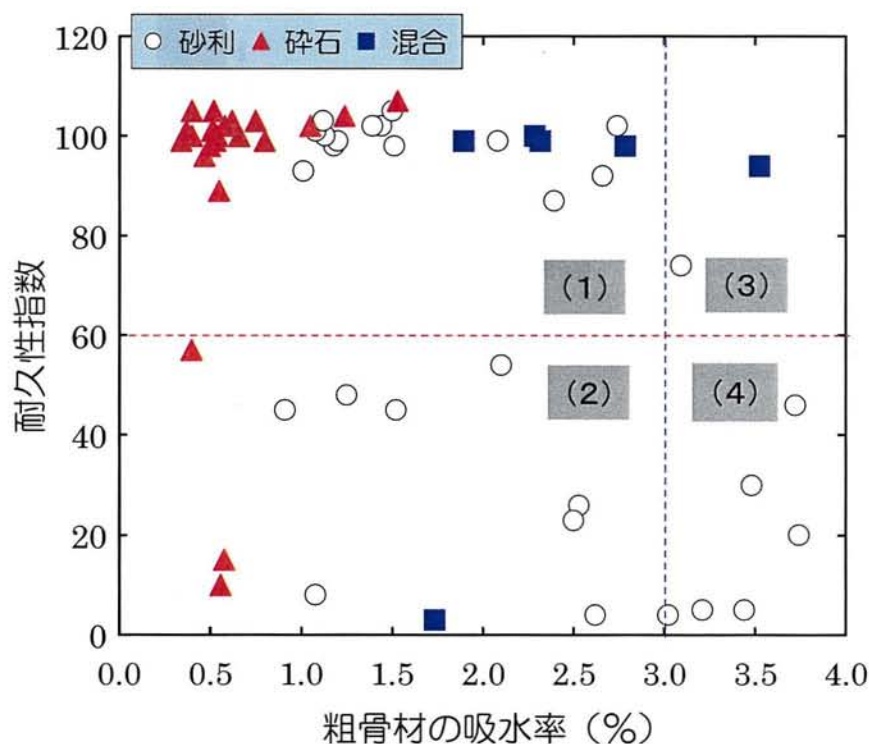


図 2-3 粗骨材の吸水率と耐久性指数の関係

2.3.3 ポップアウト等の影響

凍結融解試験を終えた供試体については、その外観を観察した。認められた劣化は、ポップアウト、スケーリングおよびひび割れであった。この中で、粗骨材の品質との関連が大きいと考えられるポップアウトおよびモルタルの劣化に起因するスケーリングに注目してみる。ポップアウトとは、コンクリートの表面部分が飛び出すように剥がれてくる現象をいう。凍害で飛び出すのは、主に粗骨材である。また、スケーリングとは、コンクリート表面がフレーク状に剥がれ落ちる現象をいう。

図 2-4 は、粗骨材種類別のポップアウトの発生状況である。ポップアウトの個

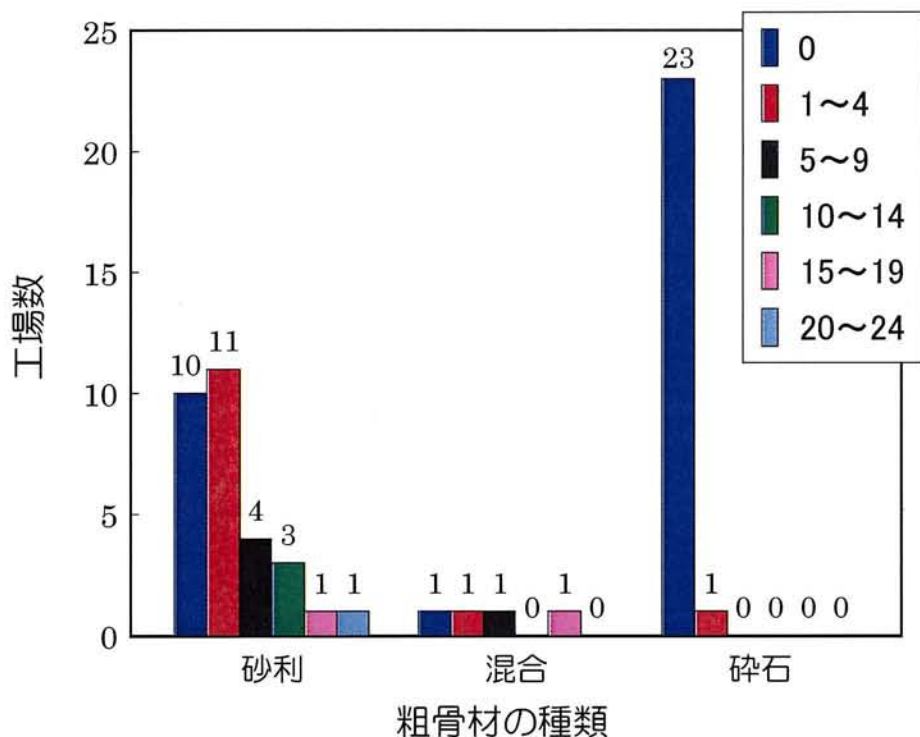


図 2-4 ポップアウトの頻度図

数は、3本の供試体に発生した総数を示す。

砂利のみおよび砂利と碎石の混合使用の場合に、ポップアウトが高い割合で発生していることがわかる。この中には、粗骨材の吸水率が、1.0%以下にも関わらずポップアウトが発生しているものもあった。その反面、碎石のみ使用の場合には、24工場中、1工場しかポップアウトが発生していない。

砂利は多様な石質の集合体であり、全体の平均的品質が良くても、その中に物理的性質に劣る粒子が含まれれば、ポップアウトの発生を招く恐れがあり、極端な場合には、コンクリートの耐久性指数を低下させることも考えられる。図 2-3 の領域(2)は、粗骨材の品質が優れているにも関わらず、コンクリートの耐久性指数が 60 未満の領域であり、骨材の品質では説明がつかない領域である。この中で、砂利および混合使用の 9 工場のうち、5 工場でポップアウトが発生しており、供試体に発生したポップアウトの個数も 1 工場を除いて 6 個以上と比較的多いことから、物理的性質に劣る粒子のポップアウトが、耐久性指数を低下させた原因ではないかと考えられる。

図 2-5 は、細骨材種類別のスケーリング発生状況を示している。スケーリングの程度は 4 段階に分類した²⁾。砂のみの場合、スケーリング発生割合はそれほど大きくない。これに対し、砕砂使用の 6 工場中、半分の 3 工場でスケーリングが発生しており、この点が注目される。しかも、この 3 工場は、良質の碎石を使

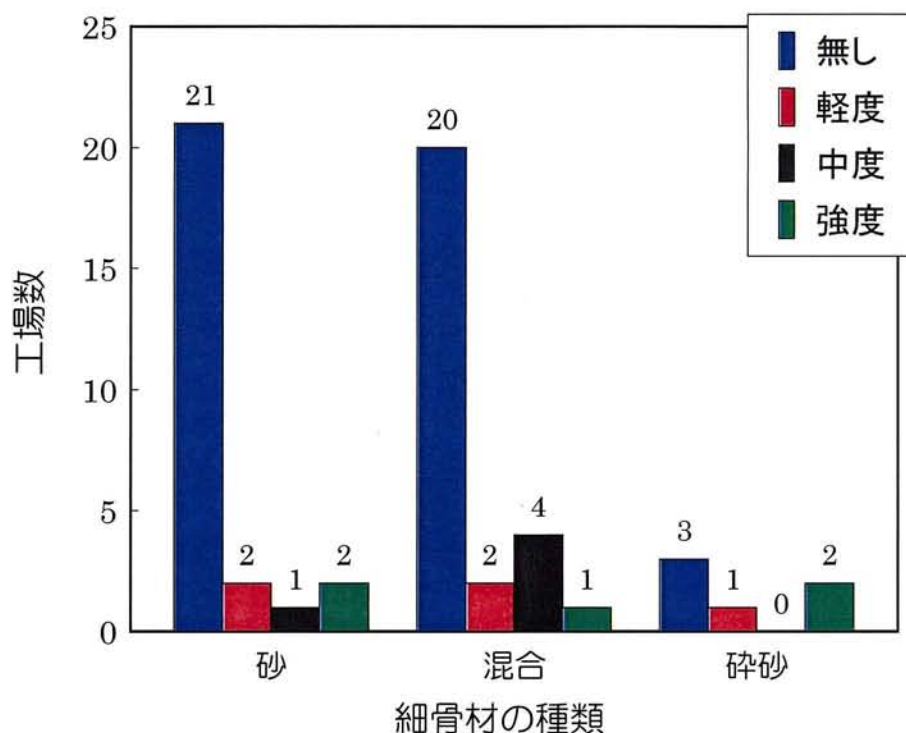


図 2-5 スケーリングの頻度図

用しているにも関わらず、耐久性指数が全て 60 未満を示している。図 2-3 の領域（2）にある砕石使用の 3 工場がこれに該当しており、粗骨材の品質ではコンクリートの耐凍害性が劣った原因を説明できない例である。この 3 工場の場合、スケージングの発生が耐久性指数の低下を招いたことは確実であり、これに何らかの形で砕砂が関連した可能性がある。この点については、別途検討が必要である。

2.3.4 空気量の影響

コンクリート中の空気量、およびその分布形態が、耐凍害性に大きく影響することは、これまでに多くの研究で明らかにされている²⁾。次にこの点について検討してみる。

図 2-6 は、フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの空気量と耐久性指数との関係を示している。まず、フレッシュコンクリートの空気量に注目すると、空気量 4～6% の範囲の中に、耐久性指数 60 未満を示す点が、ランダムに分布しており、空気量の多いほど、耐凍害性に優れているという明瞭な傾向は見い出せない。これに対して、硬化コンクリートの空気量と耐久性指数との関係では、図の下方、すなわち硬化後の空気量が小さい方に耐久性指数 60 未満の点が集中する傾向にあり、空気量 3% 以下の領域には、耐久性指数 60 未満を示した 15 工

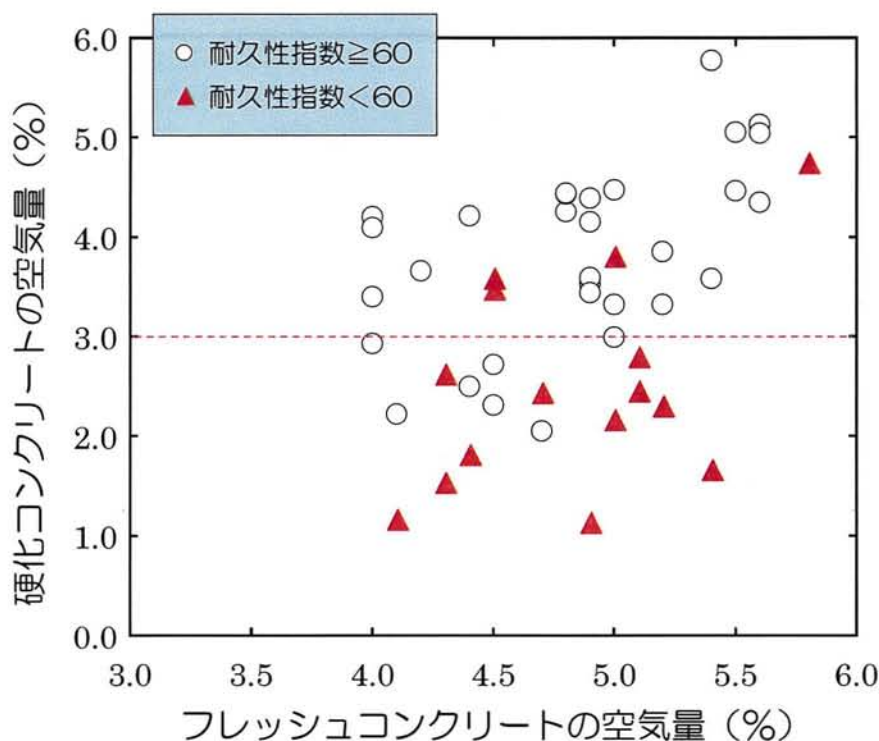


図 2-6 フレッシュコンクリートの空気量および硬化コンクリートの空気量と耐久性指数との関係

場のうち、11 工場が分布する。このことから、コンクリートの耐凍害性に対して、硬化コンクリートの空気量が大きな影響を及ぼしていることがわかる。

さらに、図 2-3 の領域 (3) に属している 2 工場のいずれもが、硬化コンクリートの空気量が 4.5% 以上であったことから、骨材の品質が劣る場合でも、所定の空気量を確保することによって、コンクリートに十分な耐凍害性を与え得る可能性があることを示唆している。

ただし、この場合注意を要するのは、あくまで硬化した段階での空気量が重要であるということである。本試験結果では、フレッシュコンクリートの空気量が 4.1% であったものが、硬化後 1.2% まで低下する例がみられ、全体の平均でも 1.4% の低下が見られた。このように、打込み以前のコンクリートの空気量が規定の範囲にあっても、硬化後、適切な空気量を確保できるとは限らない。耐凍害性が特に要求される場合には、硬化後の空気量を想定し、フレッシュコンクリートの目標空気量を高く設定することが有効な対策になると考えられる。

図 2-7 に、硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係を示す。一般に、コンクリートの耐凍害性にとって、硬化後の空気量以上に、気泡間隔係数が大きく影響すると言われている²⁾。ここで、気泡間隔係数 $300\mu\text{m}$ 以下に着目すれば、ここに含まれる 10 工場のうち、耐久性指数 60 未満を示すのは、1 工場のみであ

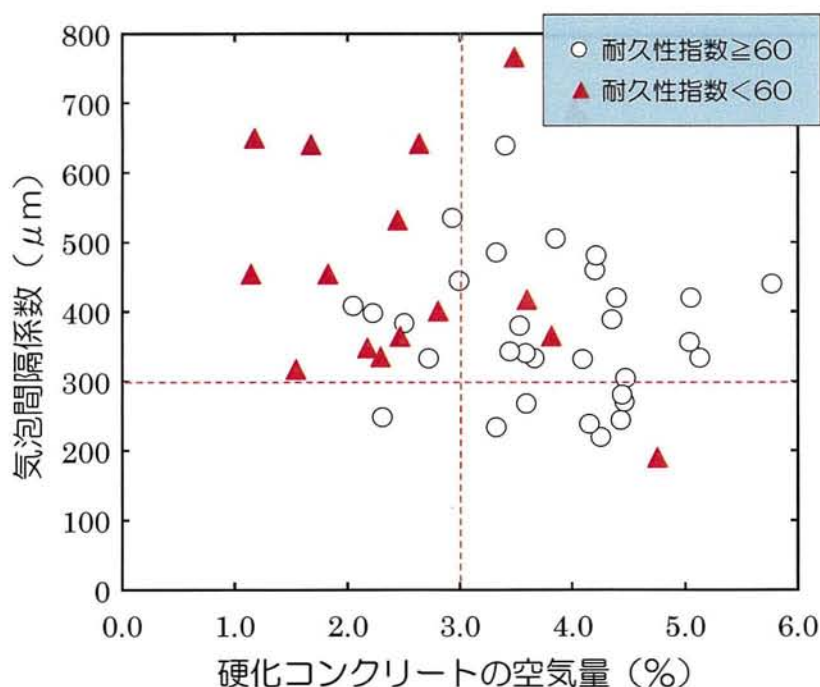


図 2-7 硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係

る。この工場にはポップアウトが発生しており、これが耐久性指数の低下を招いた原因と考えられることから、気泡間隔係数が適切であっても耐凍害性に劣る可能性のある例であり、これ以外の 9 工場は全て耐久性指数 60 以上を示している。このように、耐久性指数と気泡間隔係数とは密接な関係があることは明らかであり、コンクリートの耐凍害性を高めるためには、気泡間隔係数を小さくすることが極めて重要であると言える。

図の結果によれば、気泡間隔係数 $300\ \mu\text{m}$ 以下、硬化コンクリートの空気量で 3% 以上が、コンクリートの耐凍害性を確保する目安であるように思われる。

2.3.5 水セメント比の影響

図 2-8 に、水セメント比と相対動弾性係数の関係を示す。土木学会コンクリート標準示方書⁸⁾では、コンクリート構造物の凍結融解作用に関する照査として相対動弾性係数を取り入れており、コンクリート材料にはその相対動弾性係数を満足するために、最大水セメント比を規定している。凍結融解試験方法としては、水中凍結・水中融解試験方法が採用されているので、本試験方法とは異なる。気中凍結・水中融解試験方法 (B 法) と水中凍結・水中融解試験方法 (A 法) を比較した文献によると、耐久性指数は A 法の方が小さくなることが明らかにされている⁹⁾が、参考までに、水セメント比と相対動弾性係数の関係を調べてみることにした。コンクリート標準示方書によると、連続して水で飽和され、凍結融解

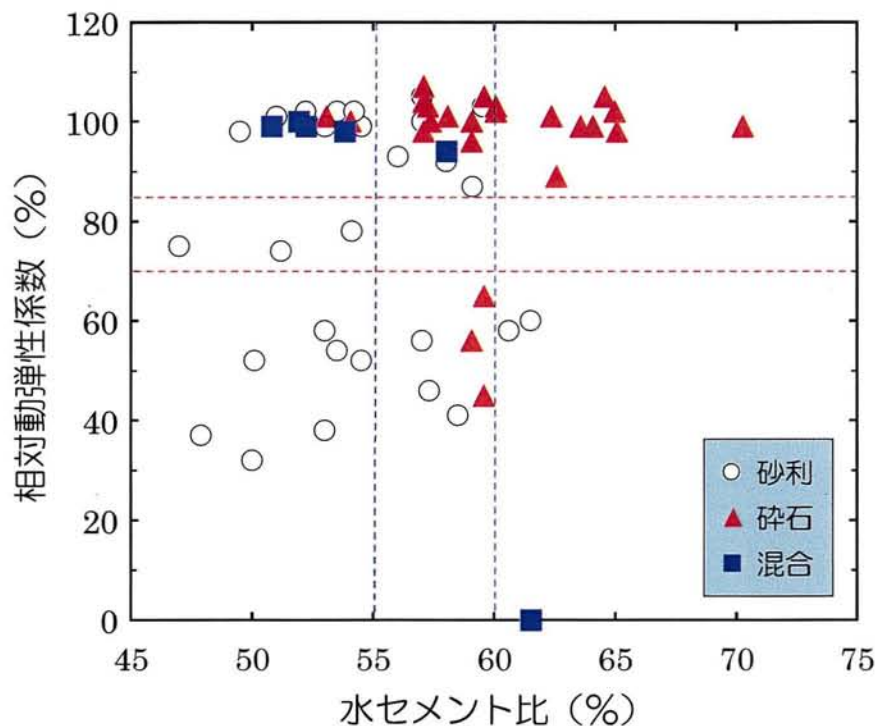


図 2-8 水セメント比と相対動弾性係数の関係

がしばしば繰り返される環境条件の場合、構造物の断面の厚さが 20cm 程度以下の薄い構造物では、水セメント比の最大値を 55%以下とするように規定している。この場合、コンクリートに設定される所要の相対動弾性係数は、85%以上である。図において、水セメント比 55%以下の領域にある工場は 24 工場で、10 工場はその許容値を満足できていない。その 10 工場は、いずれも砂利を用いており、粗骨材として砂利を用いた場合、水セメント比が 55%以下であっても、これに対応する相対動弾性係数の指標を満足できない恐れがあるので、注意を要する。

構造物が普通の露出状態にあり、連続して水で飽和されない環境条件の場合には、最大水セメント比は 60%に緩和されている。この場合に要求される相対動弾性係数は 70%以上であり、相対動弾性係数 85%以上の場合には使用できないコンクリートが 3 例含まれているので、条件が緩和された効果は出てはいる。しかしながら、先の解析で問題になった砕石使用の 3 例を含め、砂利を用いた 10 工場はこの条件を満足できておらず、コンクリートの耐凍害性の有無を確認するには、水セメント比の照査だけではなく、実際の試験による相対動弾性係数の照査も必要であることを示唆している。ただし、吸水率の小さい砕石を用いた場合、水セメント比が 60%以上であっても、相対動弾性係数が 85%以上を満足している工場もあることから、水セメント比が大きくても、砕石を使用した場合には耐凍害性を確保できる可能性があることを示唆しているとも言える。

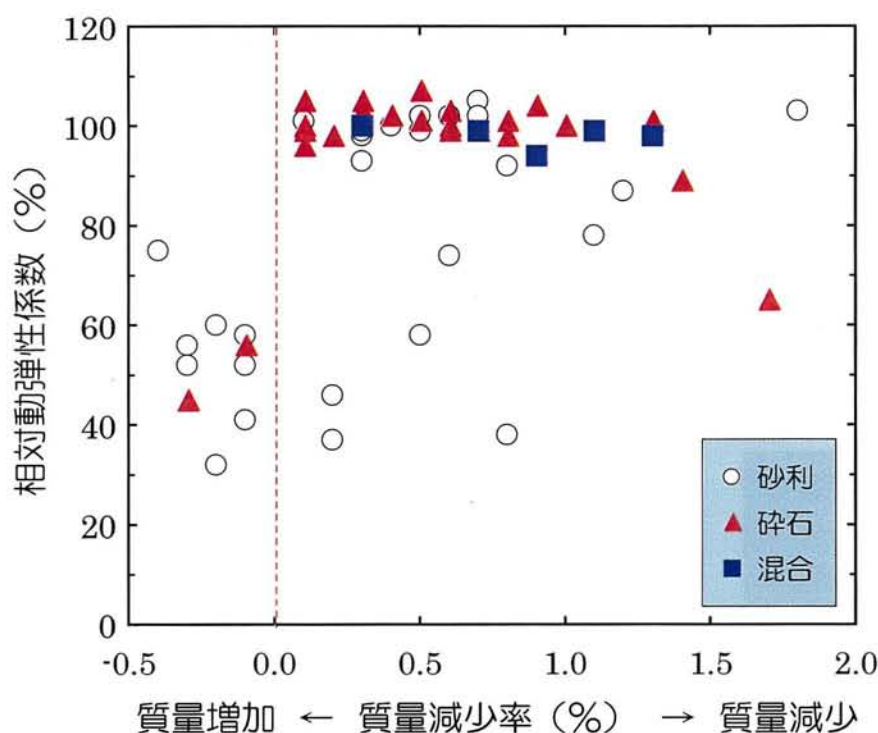


図 2-9 質量減少率と相対動弾性係数の関係

図 2-9 は、質量減少率と相対動弾性係数の関係を示したものである。コンクリート標準示方書によると、凍結融解作用に関する構造物の性能照査には、相対動弾性係数とともに、質量減少率をその指標として用いてもよいとしている。図での質量減少率は、測定が可能となった最後のサイクルでの値を採用しているが、両者には、一見して相関関係はみられない。質量減少率は、通常、試験開始時の質量と各サイクルの質量の差を試験開始時の質量で除した（2-2）式で求められるが、質量減少率は相対動弾性係数のようにサイクル数を考慮していない点で、そのままの値を採用するには問題がある。質量減少率を指標として用いるには、耐久性指数が動弾性係数を相対的に処理し、その相対動弾性係数が 60% になるサイクルと 300 サイクルの相対動弾性係数の関係から求められるように、サイクルによる変動がない指数として処理する必要があると考えられる。

2.3.6 圧縮強度の影響

凍結工程でコンクリート中の水が凍結し、未凍結水の移動の際に生じる膨張圧を緩和する役割を果たすのが空気泡である。この空気泡の役割が充分でないと、コンクリート強度が抵抗性能として関わることを考えられることから、凍結融解抵抗性に及ぼす圧縮強度の影響を検討することにした。図 2-10 に、圧縮強度と耐久性指数の関係を示す。圧縮強度が小さくなるにつれて、耐久性指数が小さく

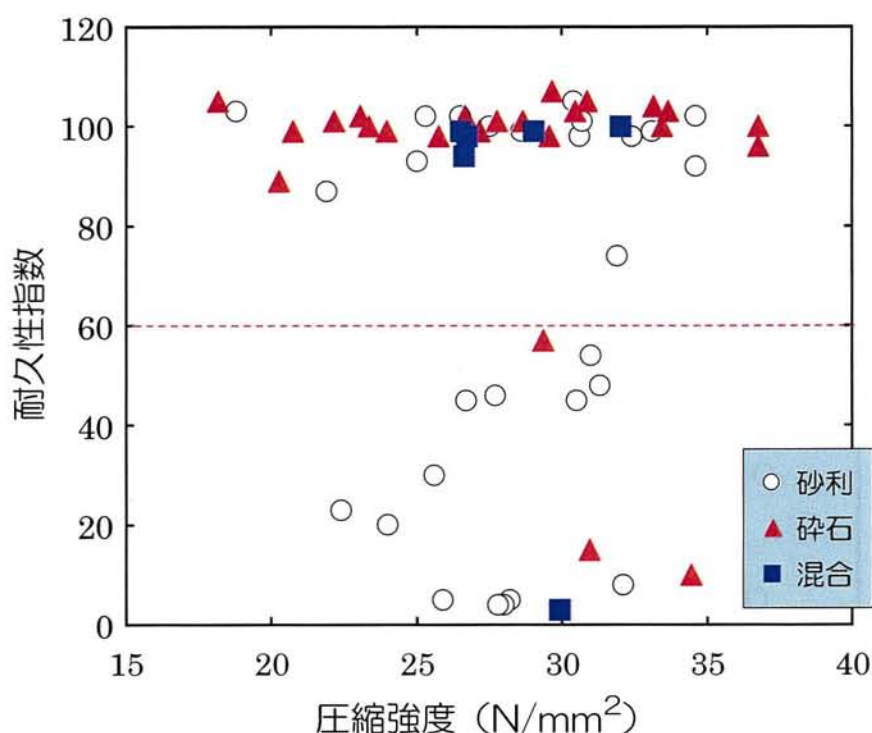


図 2-10 圧縮強度と耐久性指数の関係

なる関係は見られず、総体的には両者には相関関係はないと言える。

ただし、圧縮強度の効果は空気量や気泡間隔係数に比べて現れにくいとも考えられるので、サンプル数を絞って再検討することにした。具体的には、前述の粗骨材の吸水率と耐久性指数の関係を表した図 2-3 を用い、一定の吸水率の範囲にあるものの、耐凍害性に違いがみられるサンプルを抽出し、圧縮強度とともに空気量や気泡間隔係数など一連の結果を調べることにした。図 2-11 に、吸水率 2.5～3.0% の範囲で選定した 6 例（グループⅠ：A～C，グループⅡ：D～F）を示す。グループⅠの 3 例は凍結融解抵抗性が優れているのに対して、グループⅡの 3 例は耐凍害性に劣っているのが示されている。

表 2-4 は、6 例の圧縮強度のほかに、吸水率や空気量など、一連の試験結果を示したものである。グループⅠとⅡで、フレッシュコンクリートや硬化コンクリートの空気量に大きな違いは見られず、気泡間隔係数にも大きな差はみられない。グループⅡの E は、気泡間隔係数がむしろ小さい値を示しており、耐凍害性低下の要因とはなり得ないことを示唆している。これらの要因に比べて、圧縮強度は F が大きい傾向を示しているものの、明らかにグループⅡの方が小さい。

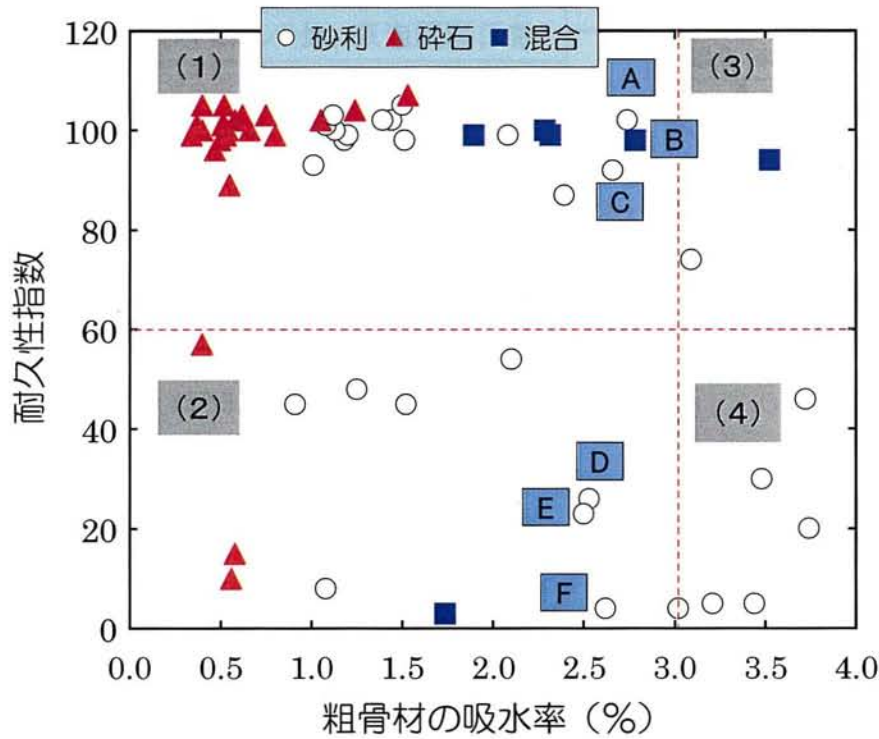


図 2-11 粗骨材の吸水率と耐久性指数の関係

表 2-4 6 例の一連の試験結果

グループ	No.	W/C (%)	粗骨材の吸水率 (%)	空気量 (%)		気泡間隔係数 (μm)	圧縮強度 (N/mm ²)	耐久性指数
				練混ぜ後	硬化後			
I	A	54.2	2.74	4.8	4.3	220	26.5	102
	B	53.8	2.78	5.0	3.3	485	26.7	98
	C	58.0	2.66	4.7	3.1	408	34.6	92
II	D	57.3	2.53	5.0	3.8	365	21.9	26
	E	53.0	2.50	5.8	4.7	190	22.4	23
	F	47.9	2.62	5.1	2.8	401	28.0	4

6 例の圧縮強度と耐久性指数の関係を示したのが、図 2-12 である。図では、参考までに、水セメント比と気泡間隔係数も示している。グループ II において、D および E の耐久性指数が小さくなったのは、圧縮強度が比較的小さく、凍結時の膨張圧を抑制できなかったことが原因として考えられる。ただし、グループ II の F は、圧縮強度が比較的大きく、圧縮強度では耐凍害性低下の原因を説明することができない。注目すべきは、その水セメント比である。既存の文献によると、同程度の空気量の場合、水セメント比が小さくなると気泡間隔係数が小さくなることが指摘されている²⁾。しかしながら、F の水セメント比は比較的小さいにも関わらず、気泡間隔係数は大きい値を示している。その気泡間隔係数は B のそれと同程度であるが、B は耐凍害性に優れる結果を示していることから、F が耐凍害性に劣ったのは気泡構造や圧縮強度以外の何らかの原因が影響したものと考

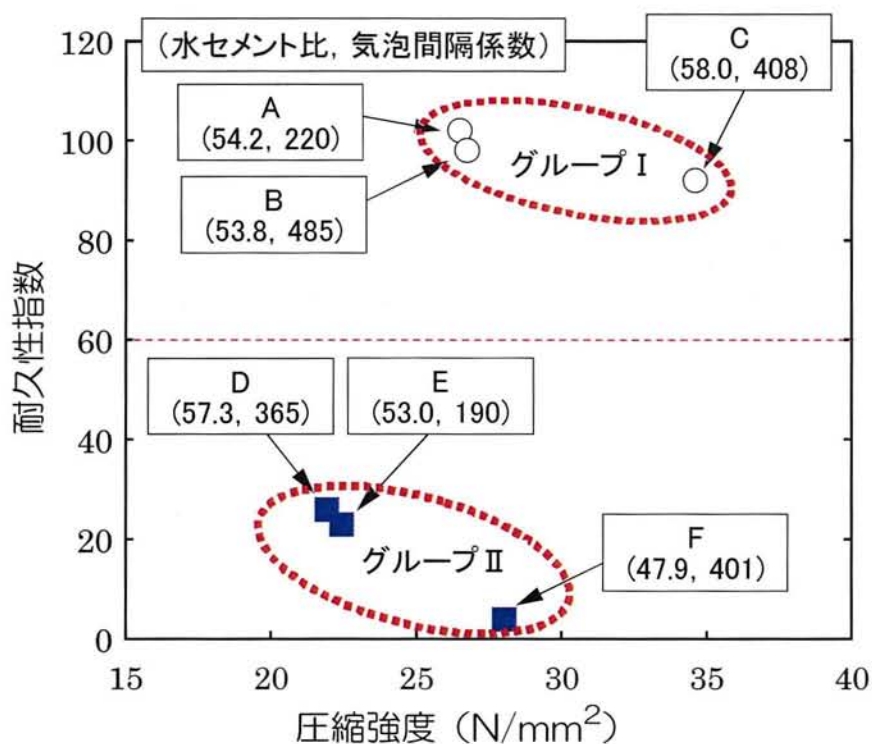


図 2-12 圧縮強度と耐久性指数の関係

えられる。

一連の検討により、総体的には耐凍害性に及ぼす圧縮強度の影響は明確にはみられなかったが、粗骨材の吸水率の範囲を限定し、より詳細に検討すると、圧縮強度の低下が耐凍害性の低下を引き起こしている例も見られた。

2.3.7 重回帰分析

本実験の場合、生コン工場で実際に製造されているコンクリートを対象としており、材料、配合、製造方法等の条件がそれぞれ異なるため、一連の検討でも見られたように、得られた結果を単一の要因のみで解釈するには無理がある。そこで耐久性指数を被説明変数（従属変数）、材料の物性や配合要因等を説明変数（独立変数）として、全工場を対象とした重回帰分析を試みたところ、(2-4)の回帰式が得られた。

$$DF = -37.983Ds + 19.320Dg - 0.311Ws - 17.121Wg - 0.421Wc + 8.945Va - 0.180Fc + 134.904 \quad (2-4)$$

ここに、DF：耐久性指数

Ds：細骨材の絶乾密度 (g/cm³)

Dg：粗骨材の絶乾密度 (g/cm³)

Ws：細骨材の吸水率 (%)

Wg：粗骨材の吸水率 (%)

Wc：水セメント比 (%)

Va：空気量 (%)

Fc：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

表 2-5 は、重回帰分析の結果である。回帰式の重相関係数は 0.48 と高くはなく、しかも細骨材の絶乾密度と圧縮強度の係数が常識と反する符号を示すなど、決して満足できる結果ではない。しかも、回帰式の説明変数は、それぞれ単位が異なるので、偏回帰係数では被説明変数に対する影響力を比較しづらい面がある¹⁰⁾。そこで、単位の影響を取り除くため、説明変数と被説明変数の標準偏差を用い、偏回帰係数を標準偏回帰係数に変換することにした。表 2-5 では、標準偏回帰係数もあわせて示している。

表 2-5 重回帰分析の結果

回帰統計						
重相関 R	0.481034					
重決定 R ²	0.231394					
補正 R ²	0.125899					
標準誤差	33.92911					
観測数	59					

被説明変数 または 説明変数	係数	標準誤差	標準偏差	標準 偏回帰係数	t	P-値
耐久性指数	134.9037	392.1264	36.29038	—	0.344031305	0.732237
細骨材の絶乾密度	-37.9833	115.3257	0.073563	-0.07699	-0.023413263	0.981412
粗骨材の絶乾密度	19.32016	90.06732	0.103153	0.054916	-1.555053603	0.126118
細骨材の吸水率	-0.31098	13.28233	0.799732	-0.00685	-0.329356271	0.743235
粗骨材の吸水率	-17.1213	11.01011	1.038189	-0.4898	0.214507946	0.831006
水セメント比	-0.42082	1.263448	4.785904	-0.0555	-0.333070145	0.740447
練混ぜ後の空気量	8.944538	9.104216	0.505655	0.124629	0.982461031	0.330511
圧縮強度	-0.17958	1.225651	4.354756	-0.02155	-0.146514911	0.884093

標準偏回帰係数を用いた回帰式を、(2-5)に示す。

$$\begin{aligned} DF = & -0.077D_s + 0.055D_g - 0.007W_s - 0.494W_g \\ & - 0.056W_c + 0.125V_a - 0.022F_c \end{aligned} \quad (2-5)$$

式(2-5)によると、式(2-4)と同様に、細骨材の絶乾密度と圧縮強度の係数が常識と反する符号を示しているものの、それぞれの説明変数の大きさの比較が可能になり、粗骨材の吸水率や空気量の影響力が比較的強く、細骨材の吸水率や圧縮強度の影響力は低いことが明らかとなった。これは、粗骨材の物性がコンクリートの耐凍害性に大きくかかわるとの上述の結果を裏付けていると言える。

ここで示した分析は、あくまで一例に過ぎないが、より綿密な実験および分析を行えば、実用に耐えうる回帰式が得られるものと期待される。

2.4 結言

岩手県のような寒冷地においては、生コンクリート自体の耐凍害性の確保が重要な課題であると考え、実際に製造されている生コンクリートを対象に凍結融解試験を行った。予定していた試料の採取ができなかったことなどもあり、明快な成果が得られたとはいいがたい。しかし、本研究の成果は、実際に製造・出荷されている生コンクリートを対象として、耐凍害性を調査した点に最大の特色があり、これに類似の研究は極めて少ないように思われる。これは、本研究のように、対象とする工場の数を多くした体系的な調査が実施されていないか、あるいは実施されていても、公表されていないためであると考えられる。

本試験結果で、耐久性指数 60 未満を示したコンクリートが実際に構造物に打込まれた場合、凍結融解試験の環境条件と実際の気象条件が異なるため、耐凍害性に劣るとは必ずしも言えない。しかしながら、耐凍害性に懸念があるコンクリートが少なからず存在することも本研究で判明した事実であり、耐凍害性に優れたコンクリートを供給するためにも、この種の研究の重要性を痛感させられた。

得られた結論を要約すれば、以下のようなものである。

- (1) コンクリートの耐凍害性は、使用する骨材に大きく影響され、特に粗骨材の品質によるところが大きい。
- (2) 粗骨材に砂利を使用する場合、ポップアウトが発生しやすいので十分な配慮を要する。
- (3) コンクリートの耐凍害性を高めるためには、硬化後の空気量を所定量確保することが重要であり、硬化後の空気量は3%以上が望ましい。

- (4) 気泡間隔係数が小さければ更に耐凍害性は高まり、気泡間隔係数 $300\mu\text{m}$ 以下を目標とすれば、優れた耐凍害性を期待できる。
- (5) 土木学会標準示方書で規定する水セメント比を満足しても、これに対応する相対動弾性係数の指標を満足できない恐れがあるので、凍結融解試験を実際に行って確認するのが望ましい。
- (6) 質量減少率を耐凍害性の評価指標とする場合には、耐久性指数のようにサイクル数に影響されない指標にしてから用いるべきである。
- (7) 圧縮強度が耐凍害性に及ぼす影響については、総体的には確認されなかったが、粗骨材の吸水率をより詳細に限定した範囲で検討すると、圧縮強度も耐凍害性に影響を及ぼしている。
- (8) 重回帰分析を行った結果によると、粗骨材の吸水率や空気量が耐久性指数に及ぼす影響が強く、一連の解析を裏付ける結果が得られた。

コンクリートの耐凍害性に及ぼす骨材の影響を明らかにしようとする本研究の主題に関連して、生コンクリートを対象とした凍結融解試験の結果から検討すべき課題を抽出すれば、以下のようになる。

- (1) 骨材の物理的性質が良質であっても、コンクリートの耐凍害性に劣る例がある。とくに、碎石と砕砂の組合せで、スケーリングが発生し、小さな耐久性指数を示した例については、その原因がまったく不明であり、原因の解明と対策の確立がきわめて重要である。
- (2) いわゆる低品質骨材を使用すれば、コンクリートの耐凍害性が劣る可能性は高い。この原因を解明するには、骨材自体の耐凍害性を把握し、さらに複合材料としての力学的挙動を明らかにする必要がある。低品質骨材を用いても、耐凍害性を確保できるような方策の確立も重要な課題となる。

本研究では、これら2つの課題について、実験的な検討を行うこととした。

参考文献

- 1) 藤原忠司ほか：実際に製造されている生コンクリートの耐凍害性，セメント・コンクリート論文集，No.49，pp.668－673（1995）
- 2) 長谷川寿夫・藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ・凍害，技報堂出版（1988）
- 3) 小林正几：コンクリートの凍結融解作用による劣化に関する 2，3 の考察，コンクリート・ジャーナル，Vol.7，No.9，pp.13－20（1969）
- 4) 長谷川寿夫ほか：骨材の種類・粒度およびコンシステンシーによる混入空気量と耐凍害性の関係，セメント技術年報，XXXI，pp.339－342（1977）
- 5) 藤原裕介ほか：コンクリート構造物に発生した凍害の現状とその原因について，第12回生コン技術大会研究発表論文集，pp.177－182（2003）
- 6) 藤原忠司：コンクリートの凍害に関する劣化外力の評価方法，土木学会論文集，No.435，pp.111－120（1991）
- 7) 袴田豊ほか：岩手県および北海道南部におけるコンクリート構造物の凍害の現状とその原因，セメント・コンクリート論文集，No.53，pp.409－416（1999）
- 8) コンクリート標準示方書・施工編：社団法人土木学会（2002）
- 9) 鎌田英治：凍結融解抵抗性（耐凍害性），コンクリート工学，Vol.22，No.3，pp.38－46（1984）
- 10) Excel で学ぶ回帰分析：ナツメ社（2004）

第3章 コンクリートの耐凍害性に及ぼす砕砂中のカーボンの影響

3.1 緒言

前章では、実際に製造されている生コンクリートを対象として、硬化コンクリートの耐凍害性を調べた試験の結果を述べた。その結果のうち、粗骨材の吸水率とコンクリートの耐久性指数の関係を図 3-1 に再掲する。

図の領域(2)に位置するのは、粗骨材の吸水率が規格を満たしているにも関わらず、コンクリートの耐凍害性を確保できなかった例である。これらの例の中でも、とくに注目すべきは、粗骨材として碎石を用いた3例であり、それらの吸水率は極めて小さく、しかもフレッシュコンクリートの空気量も適切であったにも関わらず、コンクリートの耐凍害性は劣っていた。他の碎石を使用したコンクリートの耐凍害性はおしなべて優れており、なおさら、これら3例だけが際立っている。これらの生コンクリートは、実際に出荷されており、原因を解明し、改善策を打ち立てる必要に迫られた。なお、これら3工場は、いずれも同じ碎石プラントで製造された碎石および砕砂を使用している。

原因を模索する中で、注目したのは骨材である。該当する工場で使用していた骨材は、石灰岩質の碎石および砕砂であり、石質そのものに問題があって、コンクリートの耐凍害性が損なわれた可能性があるかと推察された。また、砕砂の洗い

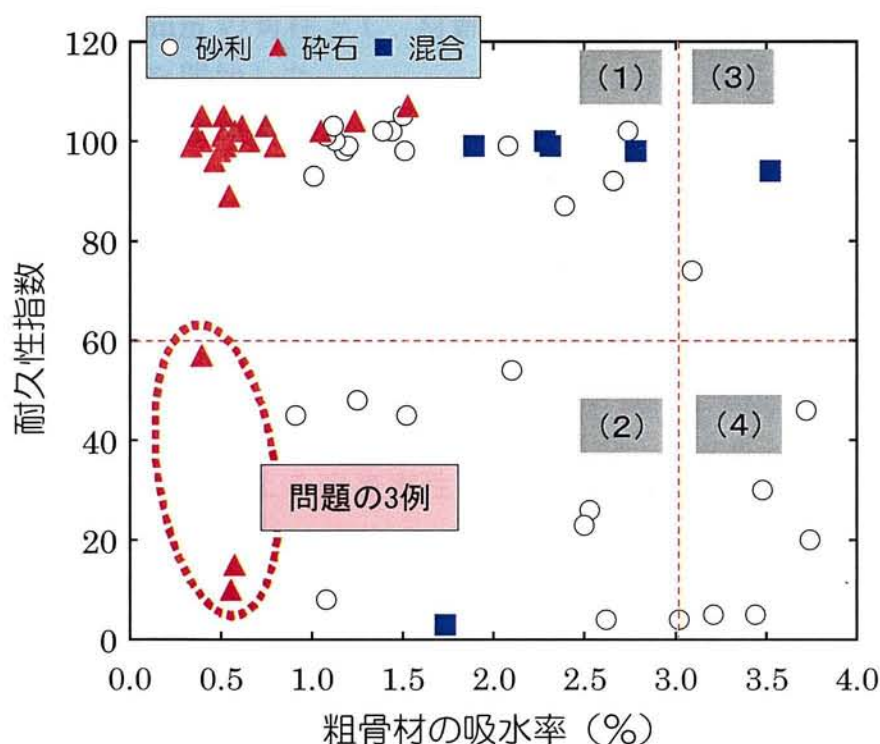


図 3-1 粗骨材の吸水率と耐久性指数の関係

試験で失われる量，すなわち微粒分量の多いことも特徴であり，これが耐凍害性に関連している可能性も考えられた。

耐凍害性に重要な連行空気をもたらす AE 剤や AE 減水剤については，JIS A 6204「コンクリート用化学混和剤」に従い，コンクリートの凍結融解試験を行って，その性能を確認するように規定されており，市販されている AE 剤や AE 減水剤のすべてが，コンクリートの耐凍害性に寄与するのは疑いない。しかし，この確認において，使用する細骨材に対しては，洗い損失量が 2% 以下であることと規定されており，微粉末が多量に含まれる場合を想定していないため，微粉末と空気量，さらには耐凍害性との因果関係が，未知のままに残されていると思われる。

ここでの目的は，これらの推察をもとに，一見して特異な現象の真の原因を実験的に追究することにある。

3.2 実験概要

実験は，考えられる原因の真偽を確かめながら，いくつかの段階で行われており，それぞれの実験内容は，該当する箇所で述べる。

各段階に共通しているコンクリートの凍結融解試験は，寒冷地のコンクリート構造物のほとんどが気中で凍結するため，JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠し，気中凍結・水中融解試験方法（B 法）で行った。供試体は，寸法 100×100×400mm の角柱とし，材齢 14 日まで 20℃の標準水中養生を行った後，凍結融解試験を開始した。

硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数は，ASTM C-457 に示されるリニアトラバース法により，気泡間隔係数測定用供試体（100×100mm）の断面を十分に研磨した後，90mm のトラバース線上の空気泡総量や空気泡弦長の総和などを顕微鏡観察によって測定した。

3.3 骨材の石質の影響

3.3.1 実験概要

はじめに，骨材の石質による耐凍害性への影響を調べる実験を行った。表 3-1 に，用いた骨材の品質を示す。

該当する工場で使用している骨材を産出する砕石場から，目視により，性質が異なると思われる 2 種類の砕石および砕砂を採取しており，それらは表中の a および b であり，石質はいずれも石灰岩である。b の砕砂には，JIS A 1103「骨材の微粒分量試験方法」で求めた規準の 7% を超える微粒分が含まれており，対象とした石灰岩の砕砂は微粒分を含みやすいものであることが，この測定値からも

表 3-1 使用骨材の品質

骨材の種類		粗粒率 FM	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粒分量 (%)
a	砕砂 (石灰岩)	2.65	2.65	1.32	4.9
	砕石 (石灰岩)	6.30	2.70	0.41	1.6
b	砕砂 (石灰岩)	2.67	2.63	1.65	8.6
	砕石 (石灰岩)	6.50	2.70	0.42	1.2
c	砕砂 (石灰岩)	3.29	2.66	0.99	2.8
	砕石 (石灰岩)	6.54	2.70	0.36	1.6
d	砕砂 (斑れい岩)	2.58	2.81	1.70	4.2
	砕石 (斑れい岩)	6.54	2.92	0.87	0.4

※ 網掛け：JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」の規格外

伺える。比較のために用いた c は、産地の異なる石灰岩質であり、d は斑れい岩質である。

セメントには普通ポルトランドセメント、混和剤には A 社の AE 減水剤標準型 I 種および AE 剤を用いた。表 3-2 に、コンクリートの配合を示す。水セメント比は 58.5% とし、スランプを 8.0 ± 2.5 cm および空気量は 4.5 ± 1.0 % を目標にして配合を設定した。

表 3-2 コンクリートの配合

種類	W/C (%)	s/a (%)	目標 空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
a	58.5	48.0	4.5 ± 1.0	158	270	907	999
b				158	270	899	999
c				168	285	914	1087
d				148	254	931	1018

3.3.2 実験結果および考察

コンクリートの相対動弾性係数の推移を、図 3-2 に示す。いずれの骨材を用いたコンクリートとも、300 サイクルを通じて 90% 以上の相対動弾性係数を示し、優れた凍結融解抵抗性を示している。

コンクリートの質量減少率の推移を、図 3-3 に示す。コンクリート a および b いずれもサイクルの経過に伴い、質量の減少、すなわち質量減少率は増加してお

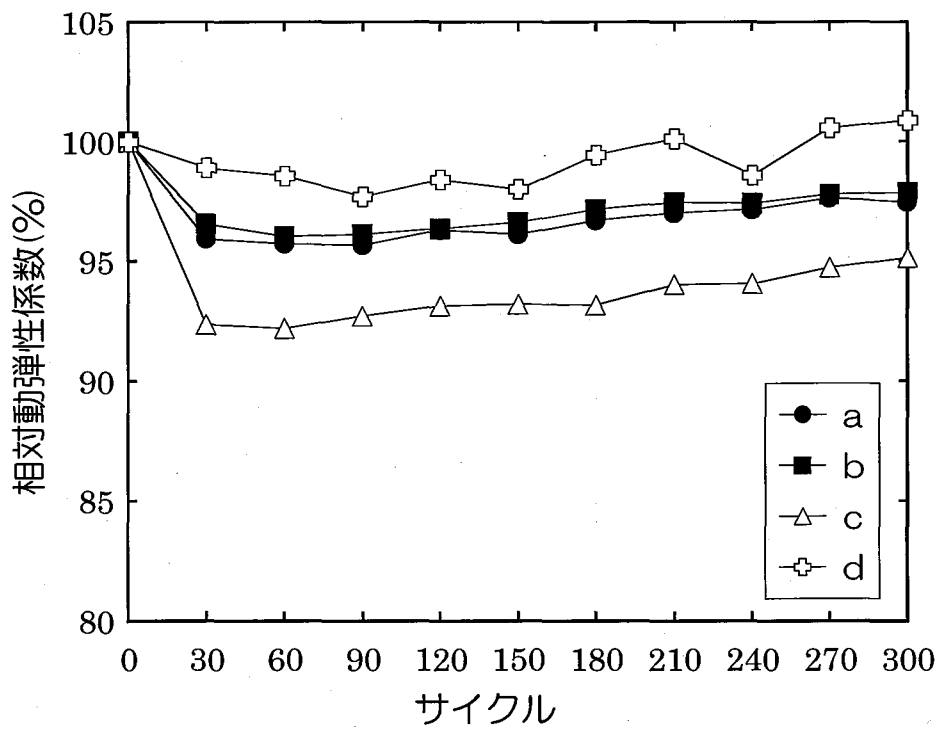


図 3-2 コンクリートの相対動弾性係数の推移

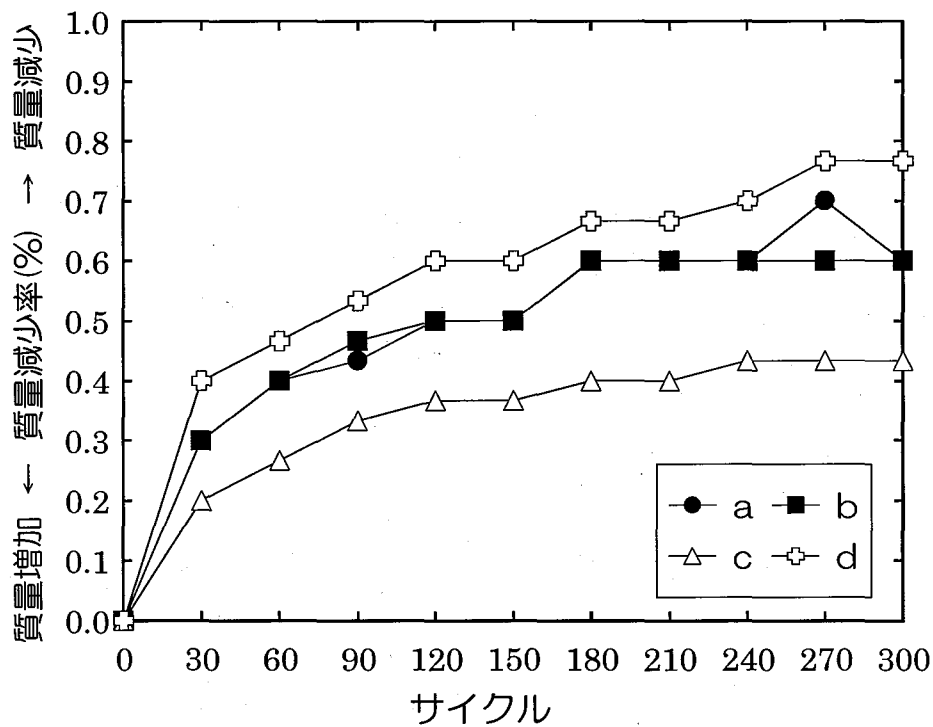


図 3-3 コンクリートの質量減少率の推移

り、300 サイクル終了時の質量減少率は、いずれも 0.6% である。試験開始時の質量の 99.4% はその原形を保っていたことになり、質量減少率の面から見ても、優れた耐凍害性を示した。

コンクリートの耐久性指数が、図 3-4 に示されている。いずれの骨材を用いたコンクリートとも、95 以上の耐久性指数を示し、試験終了後の供試体に、劣化の兆候は観察されていない。一般に、耐久性指数は 60 以上あれば、耐凍害性を有していると判断されており、この結果からすれば、骨材が石灰岩質であっても、耐凍害性に問題はないことになる。文献調査を行っても、石灰岩を用いた場合耐凍害性が低下するという報告はある¹⁾が、これは石灰岩の線膨脹係数が小さいことに起因するためであるとしており、これ以外にことさら耐凍害性が劣るとする例は見当たらない。ここでは、骨材の石質が、該当する工場のコンクリートの耐凍害性を低めた原因ではないと考えることにした。

生コンクリートを対象とした凍結融解試験では、該当工場のコンクリートが著しく耐凍害性に劣る結果を示した。これに対し、ここでの実験では、耐凍害性を確保しており、実験は先の試験結果を再現できなかったことになる。実験での使用材料や配合は、該当工場と同じようにしており、唯一異なるのは、混和剤である。ここでの実験では、A 社の混和剤を用いたが、当該工場では、B 社の混和剤を用いている。

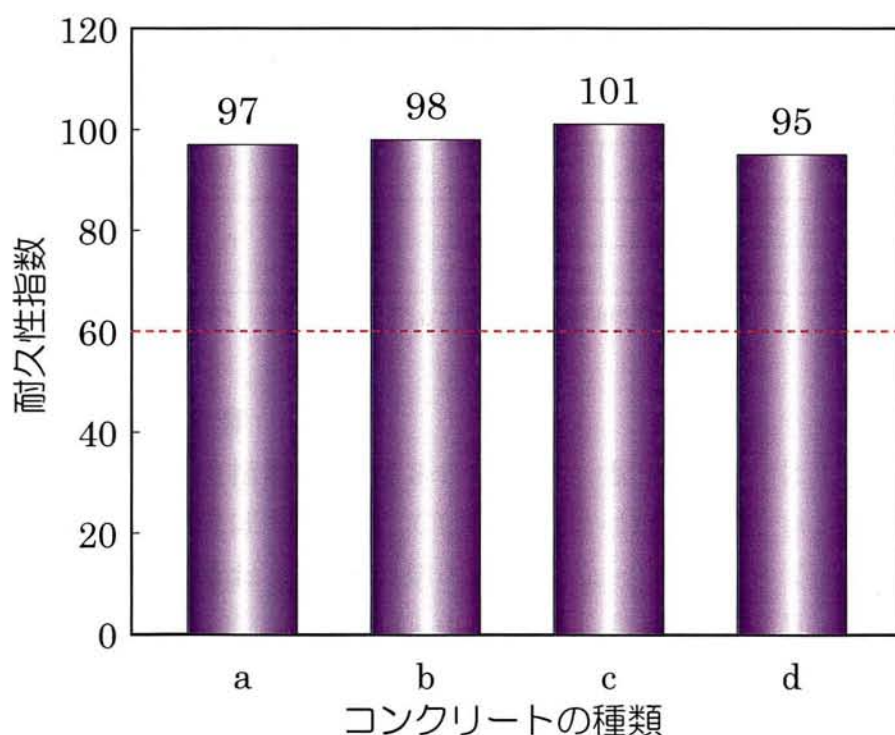


図 3-4 コンクリートの耐久性指数

表 3-1 から明らかなように、当該工場が用いている骨材には、微粒分量が多い。この微粒分量と混和剤の組合せにより、コンクリートの気泡分布や気泡間隔係数が影響を受け、耐凍害性が劣った可能性もあり、次の段階では、この点に着目することにした。

3.4 骨材の微粒分の影響

3.4.1 実験概要

再び上記の砕石プラントから骨材を採取したところ、砕砂に含まれる微粒分量は 9.5% であった。この砕砂については、コンクリートの耐凍害性に対する微粒分量の影響を把握するため、水洗いによって、微粒分量をできるだけ取り除いた砕砂も準備した。この砕砂の微粒分量は、0.9% となっている。

表 3-3 に、微粒分量に着目したコンクリートの配合を示す。基本的に、前段階の実験と変わらないが、混和剤としては、前段階の A 社のほかに、該当工場で使用している B 社、さらに C～F 社の 4 種類を加え、合計 6 種類とした。いずれも、AE 減水剤標準型 I 種および AE 剤であり、AE 剤に関しては B および F が非イオン系で、これ以外はいずれも陰イオン系である。

これら混和剤の種類による影響を厳密に検討するためには、ほぼ同一の空気量で比較する必要がある。そこで、フレッシュコンクリートの目標空気量は 4.5% とし、許容差を $\pm 0.3\%$ と通常より厳しく設定して、比較を厳密にした。

表 3-3 コンクリートの配合

微粒分量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	目標 空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
9.5	58.5	48.0	4.5	184	315	866	939
0.9				170	291	896	968

※ 混和剤は、A, B, C, D, E, F の 6 種類を使用

3.4.2 実験結果および考察

コンクリートの耐久性指数を、図 3-5 に示す。配合を同一にし、フレッシュコンクリートの空気量をほぼ一定にしているにもかかわらず、コンクリートの耐凍害性は、砕砂の微粒分量および混和剤の種類によって、大きく異なっている。

砕砂の微粒分量が 9.5% で、混和剤 B を使用した場合に着目すると、耐久性指数は 50 で、耐凍害性に劣っている。実際に製造されている生コンクリートを対象とした凍結融解試験の際、該当工場の微粒分量は 9.5% に近く、混和剤は B 社であった。したがって、この実験では、先の凍結融解試験の結果を再現できたこ

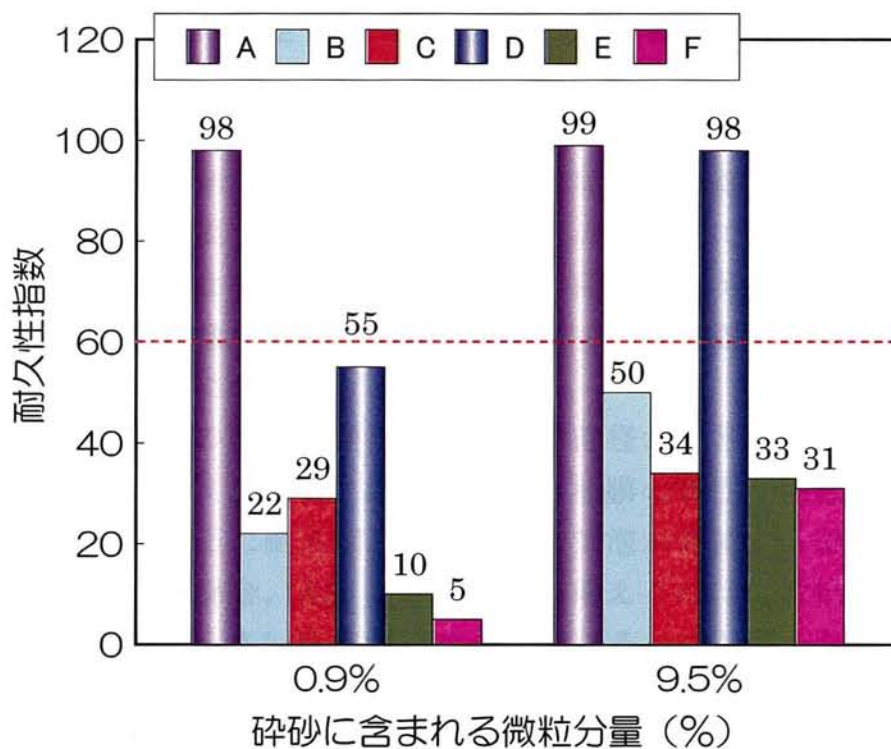


図 3-5 コンクリートの耐久性指数

となる。

砕砂の微粒分量が 9.5% の場合、混和剤 A と D では、耐久性指数が 100 に近く、優れた耐凍害性を示している。両者の AE 剤は、陰イオン系であるが、同じ陰イオン系であっても、混和剤 C と E は、小さな耐久性指数を示しており、AE 剤のタイプで、耐凍害性を論じるには無理がある。換言すれば、混和剤 B を用いたコンクリートの耐凍害性が劣る理由を、AE 剤が非イオン系であることに求めるわけにはいかない。

砕砂を水洗いして、微粒分量を 0.9% にした場合、混和剤 A を除き、いずれの混和剤を用いても、コンクリートの耐凍害性は、微粒分量 9.5% に比べ、劣る結果となっている。これを単純に受け止めれば、微粒分の多さが、コンクリートの耐凍害性を低下させる主因ではない、ということになる。既存の文献でも、空気量および耐久性指数に及ぼす石灰岩の石粉の影響を検討しており、練混ぜ後に比べて硬化後の空気量が減少する傾向があること、石粉の種類によらず、石粉を置換すると耐久性指数は増加する傾向にあることを報告しており、微粒分が耐凍害性を損ねる原因とはなり得ず、むしろ凍結融解抵抗性を高めることを明らかにしている¹⁾。

本実験では、フレッシュコンクリートの空気量を所定の値 ($4.5 \pm 0.3\%$) とするため、いずれの混和剤の場合でも、AE 減水剤の使用量を各メーカーの推奨値

としたうえで、空気量の不足分を AE 剤で補った。図 3-6 は、AE 剤の原液使用量を示している。

混和剤の性能がそれぞれ異なるため、混和剤の種類による原液使用量の違いを比較するのは無意味であるが、注目すべきは、同じ混和剤でも、砕砂の微粒分量によって原液使用量が異なる点であり、いずれの混和剤でも、微粒分量の多い場合に、AE 剤の使用量は多くなる。すなわち、微粒分量が多いほど、所定の空気量を確保するために多量の AE 剤を要し、換言すれば、微粒分の存在が空気泡の連行を妨げていることになる。

気泡の内圧は、気泡の直径に逆比例し、その直径が小さいほど、発生する内圧は大きくなるといわれており²⁾、混和剤のもつ液膜の弾性や粘度が小さく、安定性に劣る場合はこの内圧に耐え切れず、小さな気泡が消滅する恐れが強くなることになる。微粒分量が多い場合、AE 剤の使用量が増えるのは、微粒分の存在によって分散効果が高まり、小さい気泡ができやすくなるためと考えられるが、小さい気泡は内圧が大きくなるので、消失しやすくなる。所要の空気量を確保するには、液膜の弾性や粘度を高くする必要があるので、AE 剤の使用量が増えるのではないかと推察される。

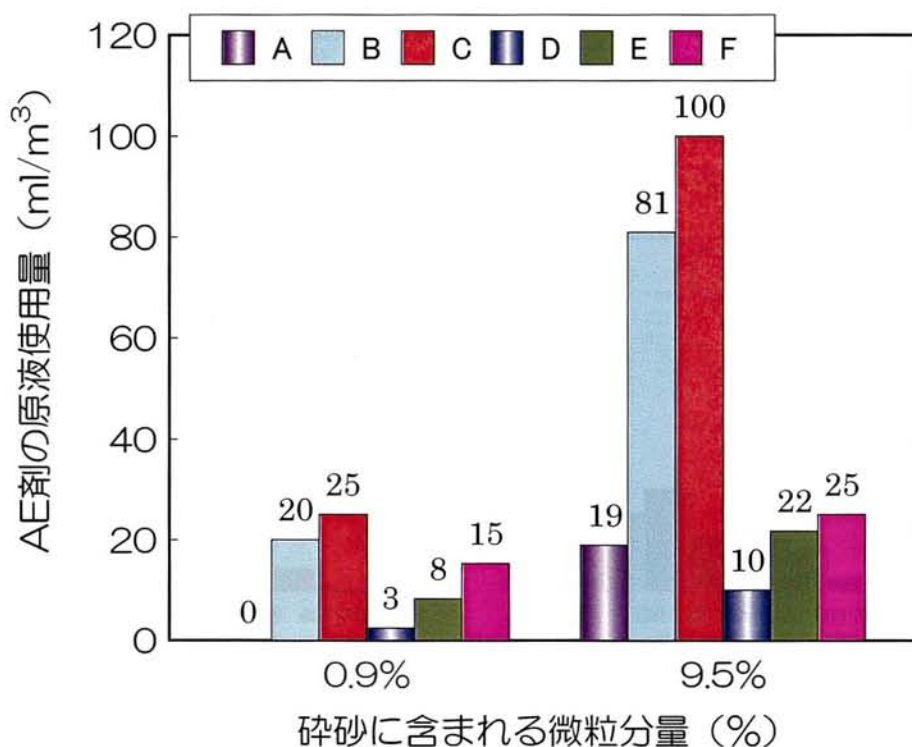


図 3-6 AE 剤の原液使用量

図 3-7～図 3-12 は、硬化コンクリート内の気泡弦長の分布を、混和剤と微粒分との組合せで示している。本来、気泡分布を示すに当たっては、気泡の直径を対象とすべきであるが、気泡の直径と弦長との個数分布はほぼ相似していると考え、気泡間隔係数の測定で求めた気泡の弦長を対象とした。個数は、気泡間隔係数測定用供試体（100×100mm）内でカウントされた気泡の数である。

いずれの混和剤も微粉末が多くなるほど気泡の総数は多く、しかも耐凍害性の確保に効果があるといわれている 200 μm 以下の気泡の数も多い。微粒分が多ければ、所定の空気量を確保するために、AE 剤の量を多くする必要があるが、AE 剤によって連行される空気泡は、AE 減水剤でもたらされる気泡に比べ、安定性がよく、硬化後のコンクリートにより多く残留していることになる。

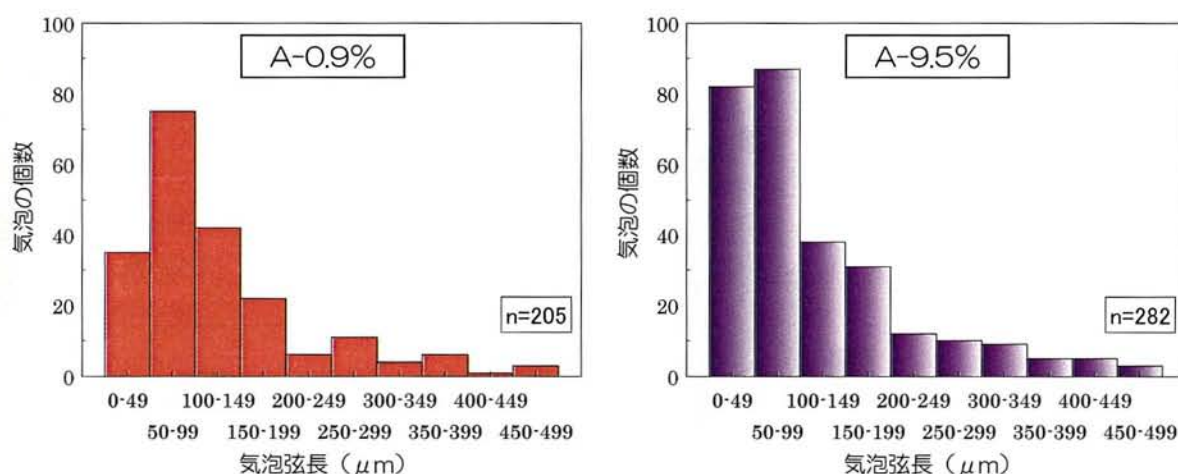


図 3-7 硬化コンクリート内の気泡弦長の分布 (A-0.9%, A-9.5%)

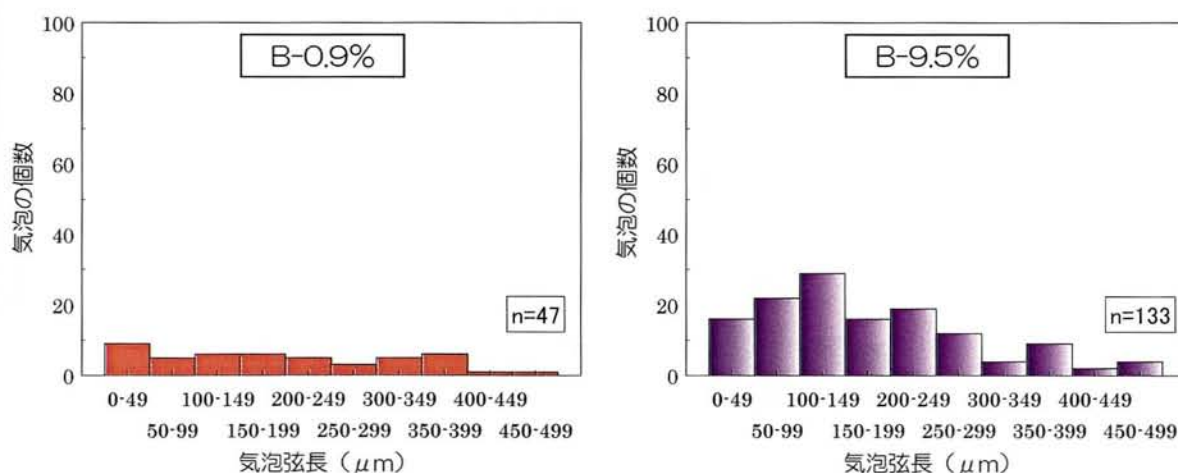


図 3-8 硬化コンクリート内の気泡弦長の分布 (B-0.9%, B-9.5%)

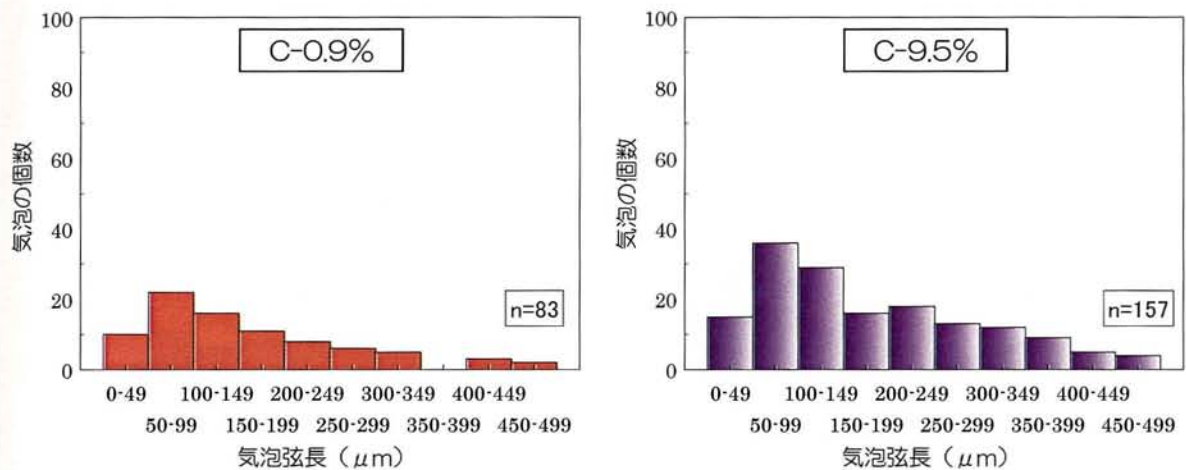


図 3-9 硬化コンクリート内の気泡弦長の分布 (C-0.9%, C-9.5%)

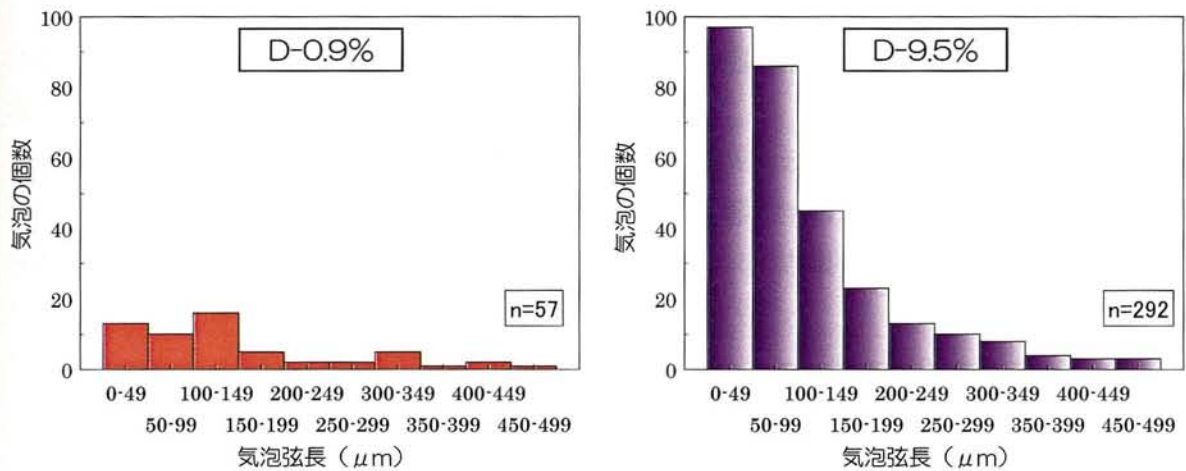


図 3-10 硬化コンクリート内の気泡弦長の分布 (D-0.9%, D-9.5%)

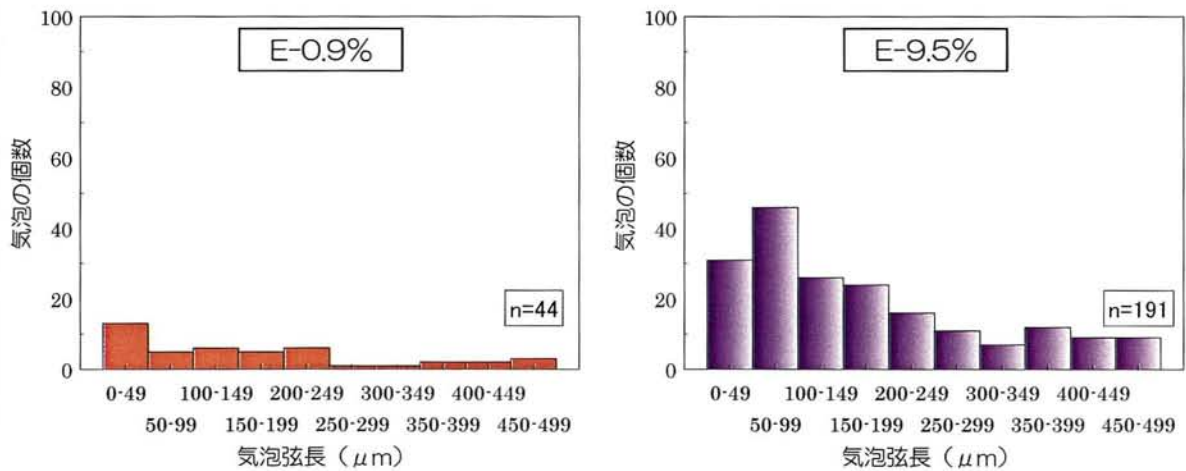


図 3-11 硬化コンクリート内の気泡弦長の分布 (E-0.9%, E-9.5%)

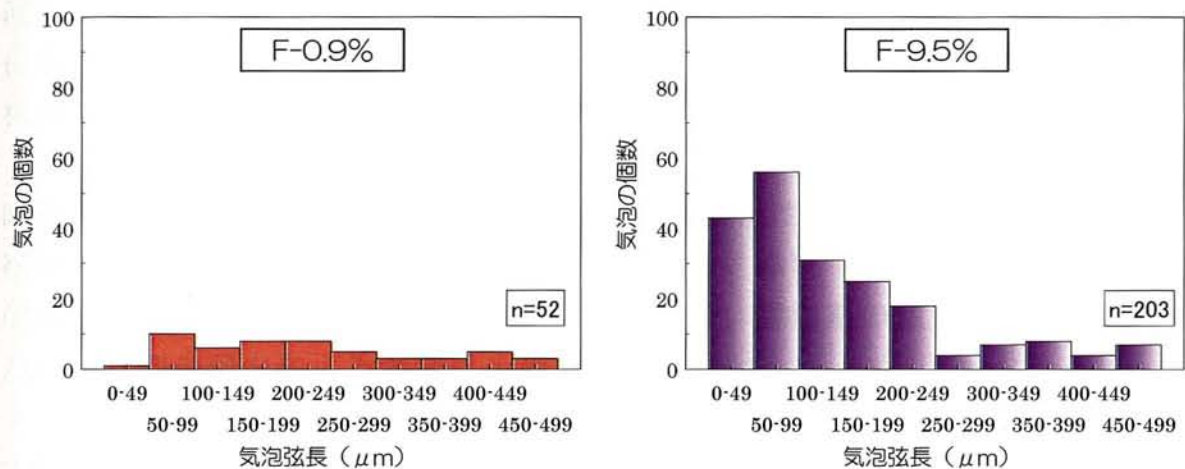


図 3-12 硬化コンクリート内の気泡弦長の分布 (F-0.9%, F-9.5%)

図 3-13 は、硬化コンクリートの気泡間隔係数と耐久性指数との関係を示している。両者には、一定の関係が見受けられ、気泡間隔係数が小さいほど耐久性指数が高い。

砕砂の微粒分量で比較すれば、微粒分量の多いほど、気泡間隔係数が小さく、耐久性指数が大きくなる傾向にある。微粒分が多ければ、所定の空気量を確保するために、AE 剤の量を多くする必要がある。この結果によれば、AE 剤によって

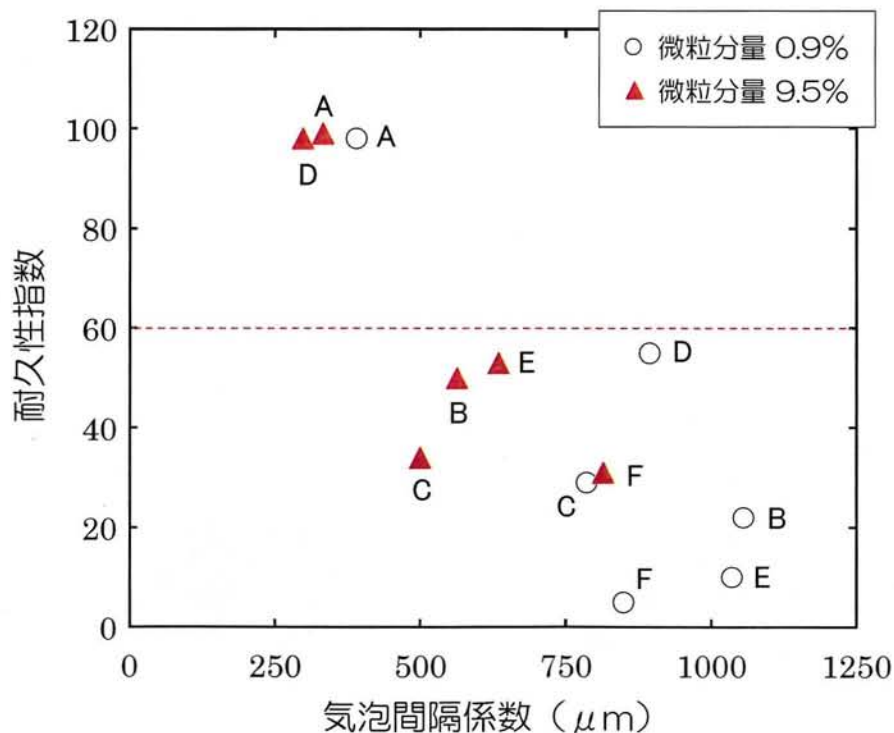


図 3-13 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

連行される空気泡は、AE 減水剤でもたらされる気泡に比べ、安定性がよく、硬化後のコンクリートにより多く残留して、気泡間隔係数を小さくし、耐凍害性を相対的に向上させると推察される。

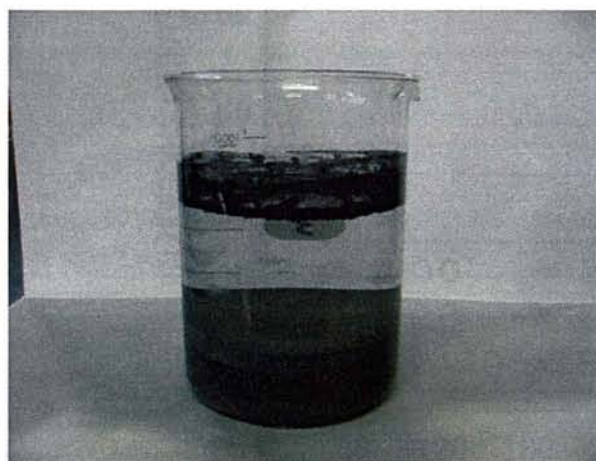
ここで着目すべきは、同じ微粒分量であっても、混和剤の種類により、気泡間隔係数に大きな違いが見られ、結果的に、耐凍害性も著しく異なる点であろう。微粒分が AE 剤の使用量を増大させるとしても、微粒であることそのものが直接的に硬化後の気泡形成に影響するとは考え難く、混和剤の種類による耐凍害性の違いは、別の理由によると受け止めざるを得ない。

3.5 骨材に含まれる異物の影響

3.5.1 実験概要

写真 3-1 は、ビーカー内で砕砂を水洗いし、静置しておいた様子である。通常の砕砂では、水が澄んでいるのに対し、ここで対象としている砕砂の場合は、水面近くに黒色の異物が浮遊している。この現象は、砕石プラントでも生じており、洗浄水槽には、多くの黒色物が浮遊していた。この物質が、耐凍害性に影響を及ぼしている可能性があると考え、プラントから黒色物を採取し、検討することとした。

表 3-4 は、黒色物と耐凍害性との因果関係を明らかにするための実験で設定したコンクリートの配合である。砕砂をあらかじめ洗浄し、それに黒色物を加えた。無添加と併せ、黒色物の添加割合は、3 水準となる。混和剤には、A と B を用いた。この実験でも、フレッシュコンクリートの空気量は、 $4.5 \pm 0.3\%$ に設定している。



対象としている砕砂



通常の砕砂

写真 3-1 砕砂に浮遊する黒色物

表 3-4 黒色物に着目したコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	※1 黒色物 (%)	※1 炭素量 (ppm)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	黒色物	粗骨材
58.5	48.0	4.5	0.000	0.0	170	291	807	0.000	1054
			0.020	9.8				0.161	
			0.500	245.0				4.035	

※1 黒色物および炭素量は、砕砂に対する割合

※2 混和剤は、A および B の 2 種類を使用

3.5.2 実験結果および考察

図 3-14 は、凍結融解に伴う相対動弾性係数の変化を示している。凍結融解 300 サイクルでそれほどの差が認められなかったため、540 サイクルまで試験を延長した。混和剤 A の場合、黒色物を添加しても、相対動弾性係数の低下は見られない。これに対し、混和剤 B では、黒色物の添加により、耐凍害性は明らかに低下する。

硬化後の空気残存率と 540 サイクル時の相対動弾性係数との関係を図 3-15 に示す。ここでの空気残存率とは、フレッシュコンクリートの空気量に対する硬化後の空気量の百分率割合である。混和剤 A および B ともに、黒色物を添加するほど空気残存率は小さくなり、混和剤 B で、その傾向が著しい。

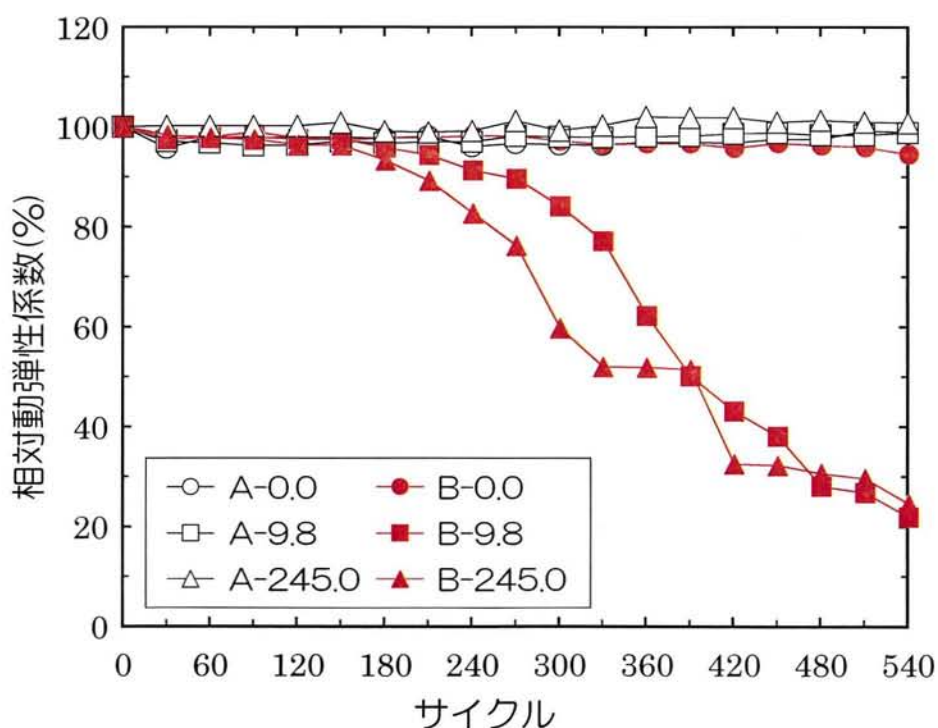


図 3-14 相対動弾性係数の変化

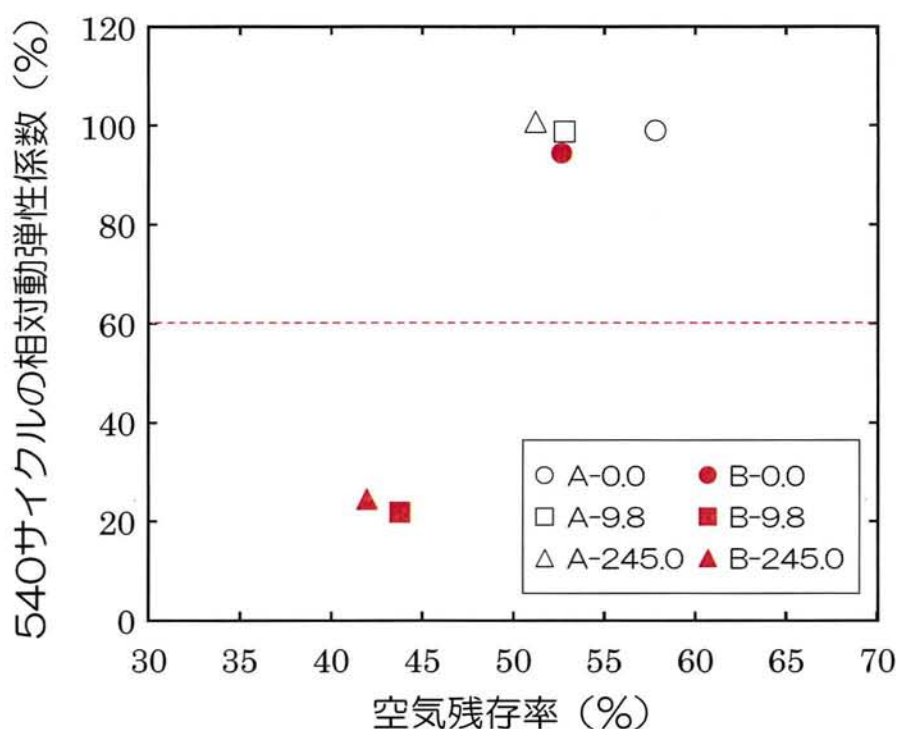


図 3-15 空気残存率と 540 サイクルの相対動弾性係数の関係

図 3-16 は、気泡間隔係数測定用供試体（100×100mm）内で観察された気泡弦長 50 μm 毎の気泡の累積個数を示している。混和剤 A に比べて、混和剤 B を用いたコンクリートは、耐凍害性の確保に有効な 100 μm 程度以下の微細な気泡が少ない。この傾向は、黒色物の含有量が多くなるほど顕著である。したがって、混和剤 B の場合、黒色物の存在によって、硬化コンクリートに残存する空気泡が少なくなり、しかも、微細な気泡が少なくて、耐凍害性が低下することになる。

気泡の内圧は、気泡の直径に逆比例し、気泡が小さいほど、発生する内圧が大きいとされている²⁾。換言すれば、混和剤のもつ液膜の弾性や粘度が小さく、安定性に劣る場合は、この内圧に耐え切れず、黒色物の存在により、小さな気泡が消滅する恐れが強くなることになる。

黒色物の正体を突き止めるべく、JIS G 1211 附属書 3「高周波誘導加熱炉燃焼－赤外線吸収法」に準じて、分析を行ってみた。その結果、黒色物には 4.9% の炭素（カーボン）が含まれていることが判明した。この骨材は、古生代石炭紀の石灰岩と粘板岩により、ほぼ 7:3 の割合で構成されている。粘板岩は、泥岩が強い圧密を受けてできたもので、年代が比較的新しい場合、あるいは圧密の程度が小さい場合、カーボンが含まれることがあると言われている。

たとえば、未燃カーボンを多く含むフライアッシュを混和材として用いた場合、混和剤の種類によっては、コンクリートの耐凍害性が損なわれる恐れのあること

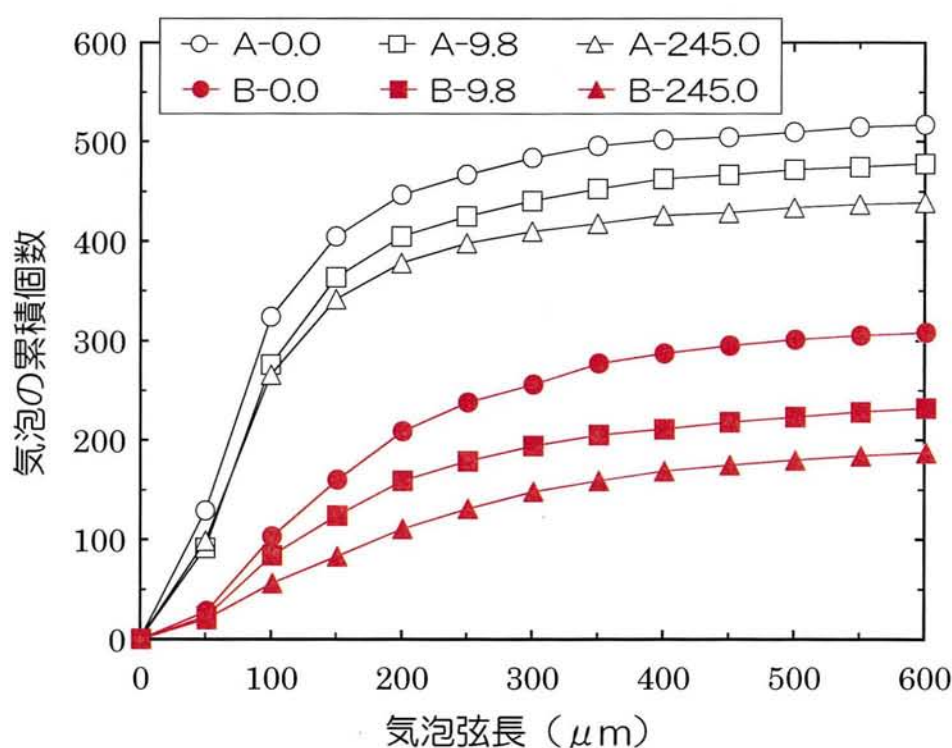


図 3-16 気泡の累積個数

は、よく知られている³⁾。ここでの場合も、これと同じ理由で、黒色物に含まれるカーボンと、混和剤 B との組合せが、コンクリートの耐凍害性を低下させた可能性が強いと考えられる。

耐凍害性を確保する上で重要な働きをするのが、混和剤によって生成される気泡である。気泡の泡立ちやすさは、混和剤の表面張力と関連があるといわれている⁴⁾⁵⁾。そこで、AE 減水剤 A と B を希釈した水溶液およびこれに黒色物を加えた水溶液の表面張力の時間的な変化を測定してみた。測定には、動的接触角測定装置を用いた。図 3-17 は、その結果である。

AE 剤を溶かした水溶液の表面張力は、純水に比べ大幅に低下し、時間が経過しても低下したままの値を維持する。低下の程度は、A と B とで大差ない。これに黒色物を添加すると、ただちに、すなわち図では経過時間 0 分に示してあるように、表面張力が増加する。この実験では、比較のため、 $1000\text{m}^2/\text{g}$ 程度のきわめて大きな比表面積を有する活性炭を混入した場合も検討しているが、黒色物混入による表面張力の増加は、活性炭の場合に匹敵する。

この現象は、コンクリートの練混ぜ時に発生すると考えられ、AE 剤の働きが損なわれる分は、AE 剤の量を増やすことで対応し、フレッシュコンクリートの空気量を確保する。問題は、その後の経過であり、図によれば、AE 剤 A の場合、活性炭によって、表面張力は増大するが、黒色物によっては、その後の表面張力

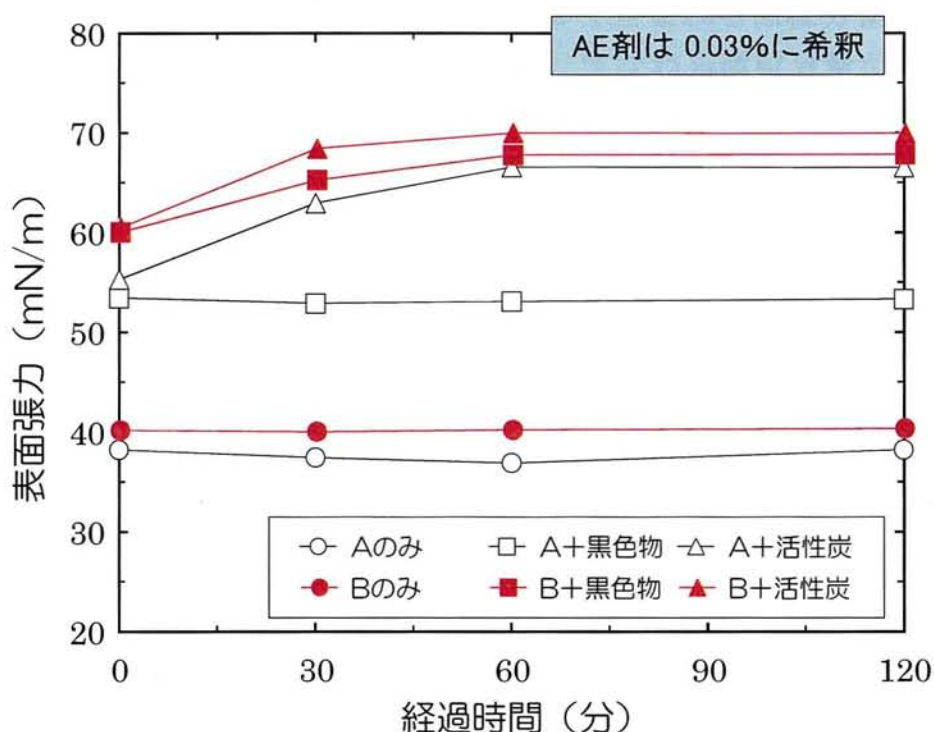


図 3-17 表面張力の時間的な変化

に変化が見られない。これに対し、AE 剤 B の場合には、黒色物の混入によって、活性炭と同じ程度に表面張力が増大している。この現象は、コンクリートの凝結過程で発生すると考えられ、AE 剤 B の場合には、この過程で黒色物の影響を受け、一端生成した気泡の皮膜の表面張力が徐々に大きくなる。表面張力が大きくなる気泡は、気泡としての安定感に欠け、生成した気泡のいくつかが凝結過程で消失して硬化後の空気残存率が小さくなり、結果的に耐凍害性が損なわれると推察される。

3.6 結言

実際に製造されている生コンクリートを対象とした凍結融解試験において、骨材の物理的性質が良好で、フレッシュコンクリートの空気量も適切であったにも関わらず、耐凍害性に劣った例について、原因解明のための実験を行った。得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 骨材の石質による耐凍害性への影響を調べる実験を行った。石質は、石灰岩質であり、これを用いたコンクリートの凍結融解試験を行ったところ、いずれも耐久性指数は 60 を大きく上回る 90 以上を示し、優れた耐凍害性を示したことから、骨材の石質が、該当する工場のコンクリートの耐凍害性を低めた原因ではないと考えることにした。

- (2) 次に注目したのは、石灰岩質の砕砂に多く含まれる微粒分量である。この砕砂には、砕砂の洗い試験で失われる量、すなわち微粒分量が規準の7%を超えて含まれていることも特徴であり、これが耐凍害性に関連している可能性も考えられた。そこで、微粒分量9.5%と0.9%の砕砂、および該当する工場で用いられている混和剤を含む複数の混和剤を用いて凍結融解試験を行ったところ、耐凍害性に違いは見られたものの、いずれの混和剤も微粒分量の多いほど、気泡間隔係数が小さく、耐久性指数が大きくなる傾向が見られたことから、微粒分の存在が耐凍害性を低くした原因ではないと判断した。
- (3) 用いた砕砂には、カーボンが含まれており、これが耐凍害性低下の原因と考えられたことから、この点に着目した実験を行ったところ、該当する混和剤を用いたコンクリートは、カーボンを多く含むほど耐凍害性の低下が見られた。このコンクリートは、気泡の個数も少なく、混和剤の表面張力も大きくなる傾向が見られた。
- (4) 一連の検討の結果、吸水率がきわめて小さいコンクリートの耐凍害性が低下したのは、骨材にカーボンが含まれており、使用した混和剤が、このカーボンの影響を受けて、コンクリート硬化後の空気量が不十分となり、そのために耐凍害性が損なわれたと判断した。

本研究の結果を受けて、該当する砕石プラントでは、洗浄を徹底してカーボンの除去に努めており、その骨材を使用している生コン工場でも、混和剤を変更した。これにより、現在では、耐凍害性を確保できる生コンクリートが供給されている。

カーボンに関しては、フライアッシュ等で問題視される場合が多いが、骨材でも、カーボンが含まれる可能性のあることを、本研究で明らかにした。そのような骨材の場合、耐凍害性に注意を要すると指摘できる。

参考文献

- 1) 千歩修ほか：コンクリートの耐凍害性に及ぼす粗骨材の線膨脹係数と石粉の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.787－792（2000）
- 2) 社団法人セメント協会編：コンクリート技術者のためのセメント化学雑論，社団法人セメント協会，pp.75－81（1985）
- 3) 長瀧重義ほか：フライアッシュコンクリートの空気連行性と耐凍害性，コンクリート工学年次論文集，Vol.9-1，pp.199－204（1987）
- 4) 笠井芳夫・小林正几編：セメント・コンクリート用混和材料，技術書院，pp.410－411（1986）
- 5) シーエムシー編集部編：コンクリート混和剤の開発技術，シーエムシー，p.16（2000）