

コンクリートの耐凍害性評価方法に関する研究

大和, 竹史

<https://doi.org/10.11501/3090248>

出版情報 : 九州大学, 1992, 博士 (工学), 論文博士
バージョン :
権利関係 :

3.3 苫小牧における各種コンクリートの戸外暴露実験

3.3.1 使用材料およびコンクリートの種類

表-3.6に使用したセメント、骨材、混和剤等の種類とその性質を示す。

表-3.6 使用材料

材 料 名	種 類	比重	吸水率(%)	粗粒率(%)	備 考
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16	—	—	シリーズ I ~ IV
細 骨 材	海砂(福岡)	2.59	1.50	2.65	シリーズ I ~ IV
粗 骨 材	角閃岩碎石(福岡県久山)	2.89	1.10	6.93	シリーズ I, II, IV
	造粒型人工軽量骨材(宇部)	1.61	—	—	シリーズ I ~ IV
混 和 剤	マイテイ150	—	—	—	シリーズ I ~ IV
	NL 4000	—	—	—	シリーズ I
	ヴィンソル	—	—	—	シリーズ I ~ IV

コンクリートの種類はシリーズ I ~ IV よりなり、その総数は42である。

シリーズ I は高性能減水剤を用いた水セメント比30, 35, 40, 50%のNON-AEおよびAEコンクリートからなる。以下、シリーズ II はNON-AEコンクリートおよび空気量8%までのAEコンクリート、シリーズ III は乾燥軽量骨材および表乾軽量骨材の2種類を用いたコンクリート、シリーズ IV は鉄筋コンクリートおよび無筋コンクリートである。コンクリートの配合および強度をそれぞれ表-3.7、表-3.8に示す。

3.3.2 コンクリート試験体の作製および戸外暴露試験方法

コンクリート試験体の種類はシリーズ II および IV では $7.5 \times 10 \times 40$ cmの角柱を、その他のシリーズでは $\phi 15 \times 30$ cmの円柱とし、1 配合につき3個の試験体を作製した。試験体はすべて、福岡大学コンクリート実験室で1980年8月~9月に作製したものである。

材令1ヶ月間まで20°Cの水中で養生した後、苫小牧に設置する11月まで室内に保存した。暴露開始時の試験体の材令はシリーズ I ~ IV で3~4ヶ月である。

試験体の暴露場所は苫小牧市沼の端の苫小牧プレコン工場内である。円柱試験体はコンクリート製床版の上にすべて鉛直に立てシリーズ II におけるKA0, KA6, UA0, UA6の角柱は南向き、北向き(水平と45度方向)、鉛直方向および砂中水平方向の4通りの向きに設置した。試験体の設置位置を変化させた目的は位置によって試験体の温度変化がかなり相違すると予想したためである。その他の角柱試験体はコンクリート製床版上に敷いた砂中に埋め込み、上面(7.5×40 cm)のみ暴露するように設置した。試験体の暴露状況を写真-

3.10に示す。

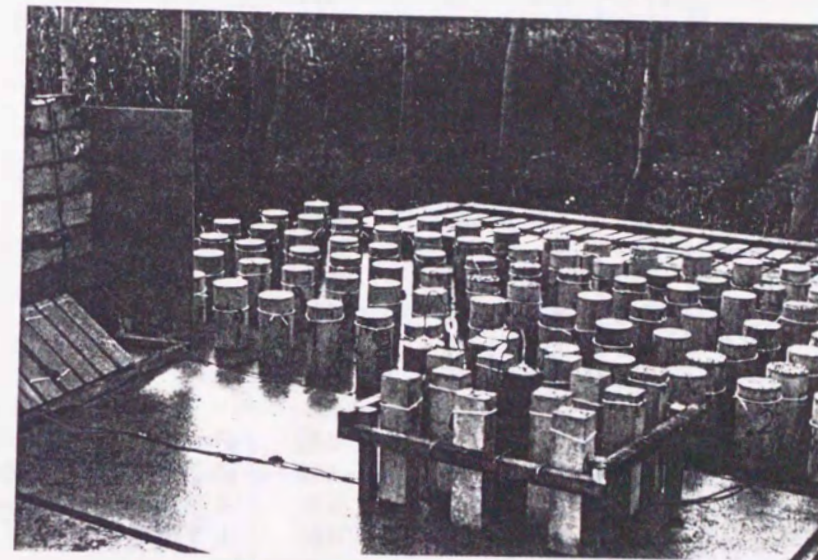


写真-3.10 試験体の暴露状況

表-3.7 コンクリートの配合

シ ー ズ	配 合 の 記 号	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スラ ンプ (cm)	空 気 量 (%)	水 セ メント 比 (%)	単 位 セ メント 量 (kg/m ³)	備 考
I	MOA	20	19.0	0.7	30	560	角閃岩碎石 マイティ150 NON-AEコンクリート
	MOB	"	13.5	1.5	35	490	
	MOC	"	15.5	1.3	40	440	
	MOD	"	9.5	1.9	50	350	
	UMOA	15	16.5	1.6	30	540	人工軽量骨材 マイティ150 NON-AEコンクリート
	UMOB	"	11.0	2.1	35	470	
	UMOC	"	11.0	2.1	40	410	
	UMOD	"	7.5	3.3	50	330	
	MAA	20	12.5	3.7	30	560	角閃岩碎石 マイティ150 AEコンクリート
	MAB	"	16.0	5.0	35	490	
	MAC	"	17.0	6.5	40	430	
	MAD	"	17.0	4.7	50	350	
	UMAA	15	18.5	3.3	30	530	人工軽量骨材 マイティ150 AEコンクリート
	UMAB	"	7.0	3.4	35	460	
	UMAC	"	17.0	5.1	40	400	
	UMAD	"	18.5	4.7	50	310	
	NOC	20	6.5	1.1	40	440	碎石NON-AEコンクリート, NL4000 碎石AEコンクリート, NL4000 人工軽骨NON-AEコンクリート, NL4000 人工軽骨AEコンクリート, NL4000
	NAC	"	19.0	8.5	40	430	
UNOC	15	10.5	1.5	40	410		
UNAC	"	18.0	3.0	40	400		
II	KAO	20	12.5	0.8	53	350	角閃岩碎石NON-AEコンクリート 目標空気量 3%のAEコンクリート " 4%のAEコンクリート " 6%のAEコンクリート " 8%のAEコンクリート
	KATH	"	13.5	4.0	53	350	
	KAFO	"	2.0	4.5	53	300	
	KASI	"	3.0	5.6	53	300	
	KAEI	"	13.0	9.0	53	300	
	UAO	15	7.5	1.8	53	350	人工軽骨NON-AEコンクリート 目標空気量 3%のAEコンクリート " 4%のAEコンクリート " 6%のAEコンクリート " 8%のAEコンクリート
	UATH	"	22.5	1.6	53	350	
	UAFO	"	4.0	3.3	53	300	
	UASI	"	11.0	6.0	53	300	
	UAEI	"	17.0	7.5	53	300	
III	UND	15	15.0	3.1	57	350	人工軽骨NON-AEコンクリート (乾燥) " (表乾)
	UNW	"	18.0	2.0	50	350	
	UAD	"	16.0	5.7	57	350	人工軽骨AEコンクリート (乾燥) " (表乾)
	UAW	"	18.0	3.0	50	350	
IV	KAP, KAR	20	3.0	5.6	53	300	碎石AEコンクリート (Rは鉄筋) 碎石NON-AEコンクリート (")
	KNP, KNR	"	5.5	1.4	53	350	
	UAP, UAR	15	11.0	6.0	53	300	人工軽骨AEコンクリート (") 人工軽骨NON-AEコンクリート (")
	UNP, UNR	"	19.5	2.0	53	350	

表-3.8 コンクリートの圧縮強度

シリーズ	配合の記号	圧縮強度 (kgf/cm ²)	
		材令7日	材令28日
I	MOA	375	434
	MOB	421	554
	MOC	278	399
	MOD	231	360
	UMOA	248	356
	UMOB	279	360
	UMOC	246	289
	UMOD	178	237
	MAA	433	568
	MAB	336	448
	MAC	292	405
	MAD	167	287
	UMAA	263	335
	UMAB	302	326
	UMAC	229	282
	UMAD	144	191
	NOC	287	443
	NAC	198	258
UNOC	198	239	
UNAC	155	195	
II	KAO	199	307
	KATH	179	318
	KAFO	211	329
	KASI	180	290
	KAEI	134	258
	UAO	176	245
	UATH	162	213
	UAFO	186	242
	UASI	132	188
	UAEI	103	160
III	UND	220	233
	UNW	184	234
	UAD	198	258
	UAW	169	216
IV	KAP, KAR	180	290
	KNP, KNR	215	333
	UAP, UAR	132	188
	UNP, UNR	158	242

暴露した試験体の中心温度が気温にどのように追随するのか自記温度記録計（抵抗式）により連続的に3ヶ年間測定した。そのなかから1981年1月30日における測定結果を図-3.15に示す。当日の最低温度は -17°C であるが、3ヶ年の温度測定により求めた1年当たりの平均凍結融解サイクル数は132回であり、試験体の凍結最低温度の平均値は -6.6°C 、融解最高温度の平均値は 7.7°C であった。したがって、試験体は9ヶ年で1200回程度の凍結融解の繰り返しを受けている。

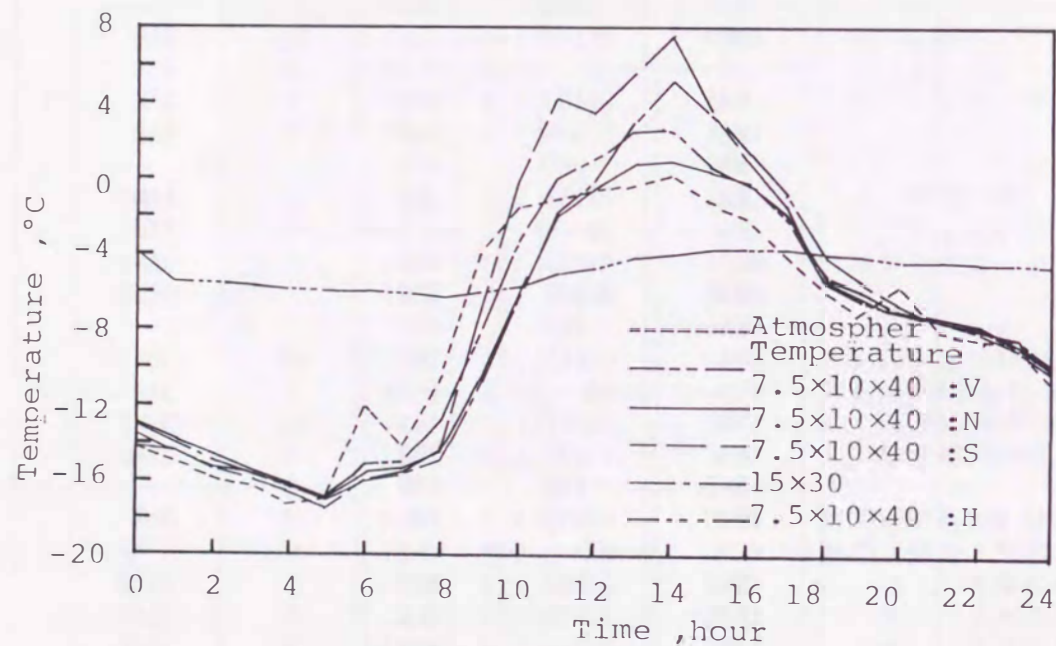


図-3.15 試験体中心温度・時間曲線(1981.1.30)

3.3.3 戸外暴露試験結果および考察

暴露開始後の動弾性係数を100として求めた相対動弾性係数の変化を表-3.10に示す。暴露開始後9ヶ年（シリーズIVでは7年）までの経年変化について検討する。

1) シリーズI

高性能減水剤を使用した水セメント比30%~50%のコンクリート試験体の動弾性係数は1例(UMOD)を除いてすべて暴露開始当時の動弾性係数より大きい結果となっている。人工軽量骨材を用いた水セメント比50%のNON-AEコンクリートでは9年後における相対動弾性係数の低下が約5%である。水セメント比40%以下の場合角閃岩砕石および人工軽量骨材を用いたコンクリート間に明確な相違は認められず、促進試験体で一般に生

じるような相違はNON-AEコンクリートとAEコンクリートとの間にも認められない。

2) シリーズII

NON-AEコンクリートおよび空気量4%のAEコンクリートで作製した角柱試験体の設置方向は前記のように南向き(S)、北向き(N)、垂直(V)および水平(H)の4通りとした。4通りの暴露位置における角柱試験体の時間・温度関係には図-3.15に示すようにかなりの相違が認められる。凍結最低温度は水平の場合を除いてほぼ同一(図-3.15の場合、 -17°C)であるが、融解温度は南向き、鉛直、北向き、水平(周囲は砂)の順に高いことが確認できる。砂中に水平に設置した試験体はその上面が大気に暴露されているにもかかわらず、温度変化がその他に比べ非常に小さいことが認められた。したがって、他の試験体が1日のサイクルで冬期に凍結融解を生じる場合でも砂中の試験体は凍結状態のままということもあり得る。

図-3.16に5年後の相対動弾性係数(KAO、KAF0、UA0、AF0)を示す。NON-AEコンクリートとAEコンクリートを比較すると、角閃岩砕石の場合(KAO、KAF0)、NON-AEの方が砂中水平設置(H)の場合を例外として相対動弾性係数がやや小さい。しかし、人工軽量骨材の場合にはNON-AEコンクリートとAEコンクリートとの相違は小さい。図-3.16より直射日光を受ける時間の長い南向きおよび鉛直設置の方が北向きよりも相対動弾性係数が小さい傾向が認められる。しかし、最低でも98.2%(KAO-S)で、試験体の品質低下はほとんど認められない。南向きに設置した試験体でもその表面は写真3.11および3.12に示すように劣化はほとんど認められなかった。また、砂中に水平に設置した試験体はその上面が直射日光を受けるが、側面と下面が砂に接しているため試験体の温度変化が比較的緩慢である。そのために品質の低下がなく、逆に相対動弾性係数が大きくなったものと考えられる。

3) シリーズIII

軽量骨材は一般的に吸水率が大きいので表乾状態でこれを使用したコンクリートの耐凍害性は普通骨材を用いたコンクリートに比べ耐凍害性が劣る場合が多い。そこで、乾燥した軽量骨材を使用した場合、果たして良好な効果があるかどうか戸外暴露試験で検討したのである。コンクリートの種類はNON-AEコンクリート(UND、UNW)およびAEコンクリート(UAD、UAW)の2種類とした。以上の試験体は脱型後、 20°C の水中で養生を行ったがUAWDは表乾骨材を使用したコンクリートで脱型後、暴露開始時まで室内に保存したものである。表-3.10に示すように、表乾骨材を用いたNON-AEコンクリートであっても9

年後の相対動弾性係数は 100% 以上であり、品質の低下は認められなかった。

4) シリーズIV

粗骨材として角閃岩砕石および人工軽量骨材を用いた AE および NON-AE コンクリートについて、内部鉄筋拘束の相異が、コンクリート品質の経年変化に及ぼす影響を検討したが、表-3.10 に示すようにいずれの試験体も 100% 以上の動弾性係数を示しておりその相違は明確に表れていない。

以上のように、暴露開始後 7~9 年の時点でコンクリート試験体に顕著な品質低下は認められないことが明らかとなった。

3.3.4 戸外暴露試験結果と凍結融解試験結果との相関性

シリーズIIの角閃岩砕石を用いた NON-AE コンクリート(KAO) および AE コンクリート(KAFO)、人工軽量骨材を用いた NON-AE コンクリート(UAO) および AE コンクリート(UAFO)については ASTM-C666 A法に従って急速水中凍結融解試験を実施した。試験に用いた供試体は 7.5×10×40cmの角柱 2個である。供試体は脱型後、材令28日まで20℃の水中で養生した後、約4年間福岡大学コンクリート実験室外に暴露し、次いで約1年間、20℃の水中に保存したものである。図-3.17 に凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の推移を示す。NON-AE コンクリート(KAOおよびUAO)と人工軽量骨材を用いた AE コンクリート(UAFO)の耐凍害性は小さく、耐久性指数はそれぞれ、1.0、1.2、1.4であった。一方、角閃岩砕石を用いた AE コンクリートの耐久性指数は一般の場合より小さい20であった。この原因は約1ヶ年の戸外暴露の影響によるものと思われる。

以上のように凍結融解試験では NON-AE と AE コンクリートおよび普通コンクリートと軽量コンクリートの耐凍害性に相違が認められた。しかしながら、同配合のコンクリートで作製し、苫小牧に暴露した試験体(KAO, KAFO, UAO, UAFO)の相対動弾性係数は表-3.10に示すように設置当初より幾分増加しているケースが多く、9ヶ年の暴露による劣化は認め難い。冬期における試験体の温度は図-3.15 に示すように早朝に -18℃程度に降下して、昼すぎには 0℃以上に上昇する日もある。しかし、試験体が受ける温度条件は ASTM-C666 A法の場合に比べ比較的緩慢であること、また凍結前の試験体は常に湿潤状態とは限らない。また凍結前に乾燥を受けた供試体は湿潤状態の場合より優れた耐凍害性を有することを2章で示した。このような原因により厳しい気象条件下にある暴露試験体にもかかわらず良好な耐凍害性を示したものと考えられる。

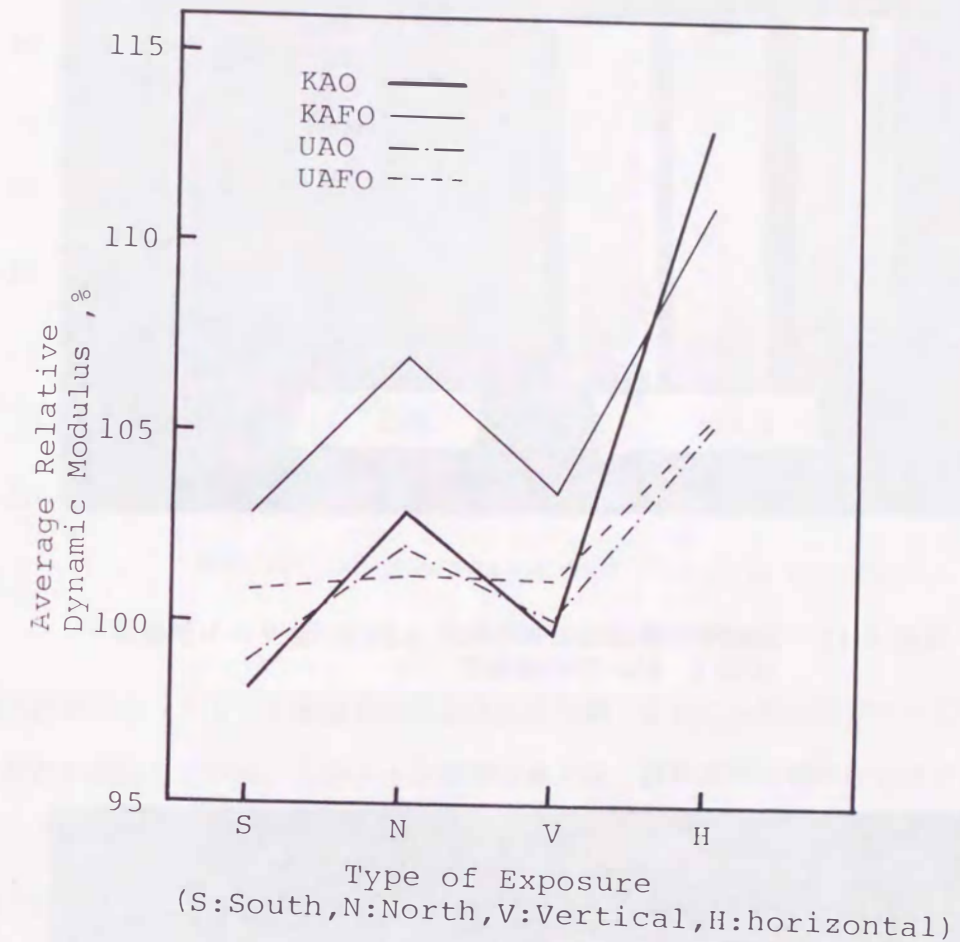


図-3.16 設置方向の異なるコンクリート試験体の5ヶ年後の相対動弾性係数

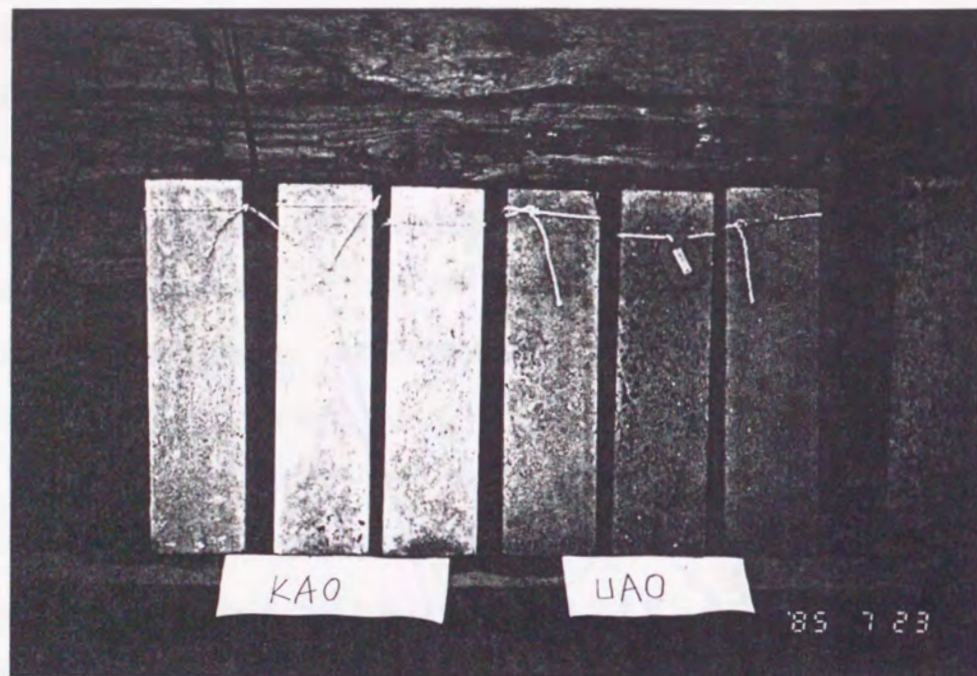


写真-3.11 南向きに設置したNON-AEコンクリート試験体 (KAO-S, UAO-S)の表面部

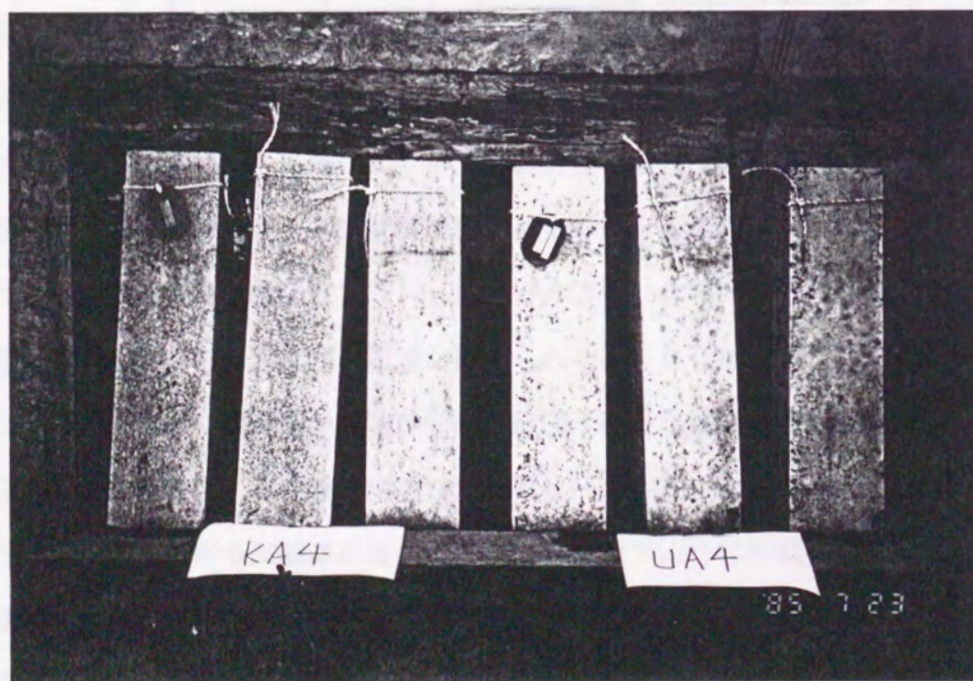


写真-3.12 南向きに設置したAEコンクリート試験体 (KAFO-S, UAFO-S)の表面部

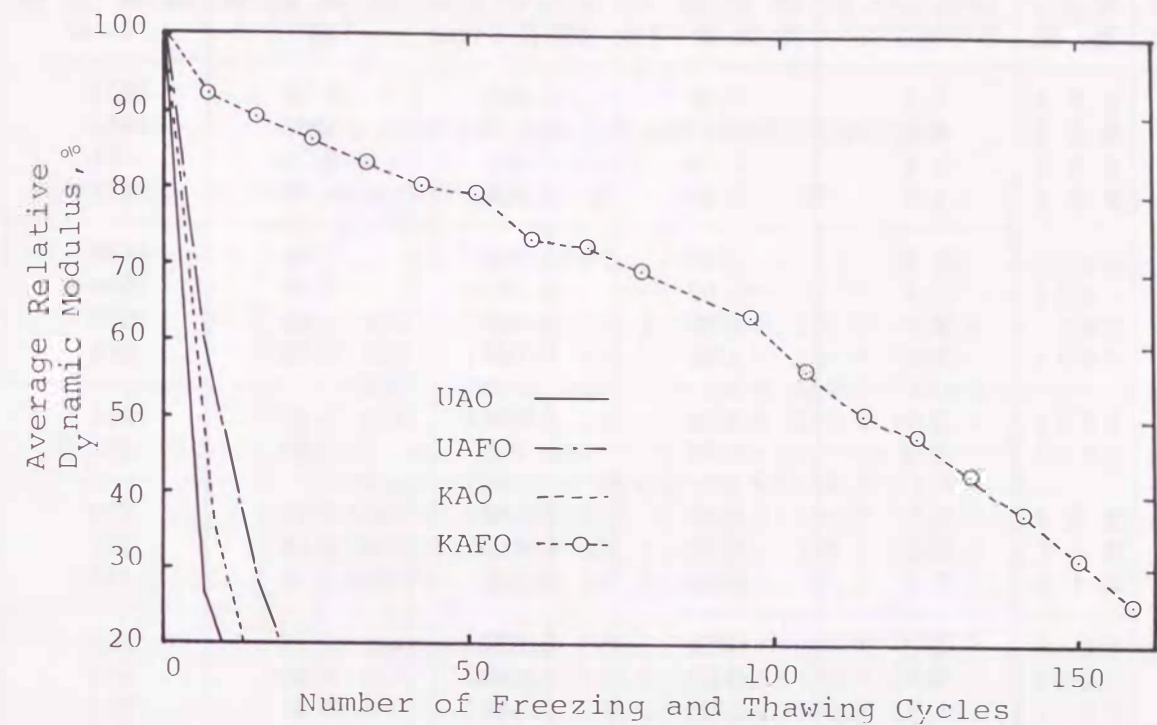


図-3.17 急速水中凍結融解試験結果

苫小牧市のコンクリート製縁石の凍害状況を写真-3.13に示す。指でつくと崩れる程度に劣化が進行していた。このような凍害は施工後、数年の内に見受けられるとのことである。このコンクリートには粗骨材として玉砂利を使用したことは分かるが、その他の材料および配合は不明である。したがって、確定的なことは言えないが、この凍害の原因は空気量や強度の不足および飽水度が高いためと思われる。このような状況下でのコンクリートの品質変化と促進試験結果との関連性については今後、研究を行いたい。

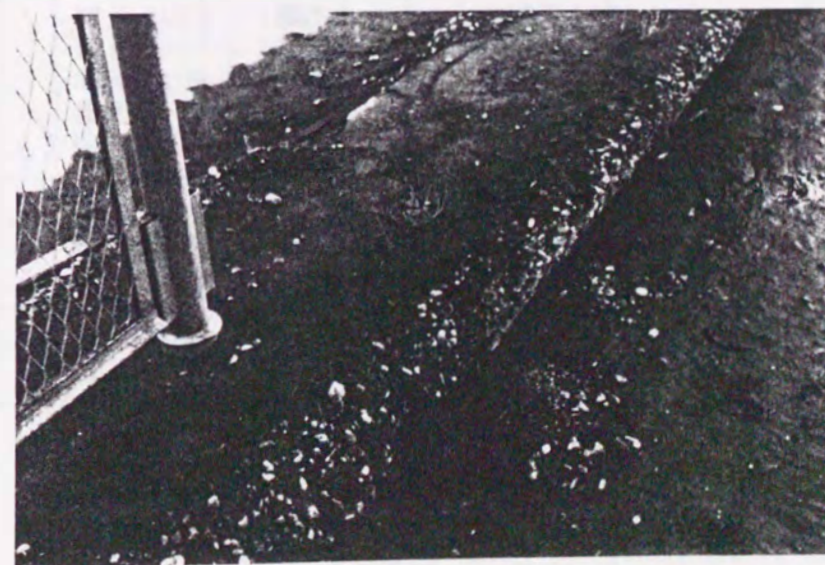


写真-3.13 コンクリート製縁石の凍害状況

表-3.9 硬化コンクリートの空気泡分布に関するパラメータ

シリーズ	配合の種類	フレッシュコンクリートの空気量(%)	硬化後の空気量(%)	気泡の平均切断長さ(mm)	比表面積(mm ⁻¹)	間隔係数(μm)
I	MOA	0.7	1.36	0.802	4.99	1904
	MOB	1.5	1.13	0.513	7.80	1286
	MOC	1.3	1.54	0.592	6.76	1284
	MOD	1.9	1.59	0.691	5.79	1417
	UMOA	1.6	1.92	0.564	7.09	1139
	UMOB	2.1	2.02	0.561	7.13	1080
	UMOC	2.1	1.65	0.501	7.98	1022
	UMOD	3.3	3.61	0.708	5.65	984
	UMOD	3.3	3.61	0.708	5.65	984
	MAB	5.0	4.15	0.519	7.71	739
	MAC	6.5	6.05	0.417	9.59	487
	MAD	4.7	3.44	0.304	13.16	444
	UMAA	3.3	3.51	0.394	10.15	605
	UMAB	3.4	3.07	0.580	6.90	918
	UMAC	5.1	3.23	0.449	8.91	674
	UMAD	4.7	2.99	0.398	10.05	586
	UMAD	4.7	2.99	0.398	10.05	586
	UMAB	3.4	3.07	0.580	6.90	918
	NOC	1.1	1.59	0.442	9.05	945
	NAC	8.5	5.45	0.491	8.15	601
UNOC	1.5	1.87	0.780	5.13	1508	
UNAC	3.0	3.81	0.604	6.62	842	
II	KAO	0.8	0.87	0.299	13.38	804
	KAF0	4.5	3.04	0.232	17.24	339
	KASI	5.6	5.45	0.345	11.59	387
	UA0	1.8	2.82	0.508	7.94	817
	UATH	1.6	1.92	0.355	11.27	682
	UAF0	3.3	2.95	0.399	10.03	591
	UASI	6.0	4.37	0.377	10.61	468
UAEI	7.5	7.50	0.507	7.90	429	
III	UNW	2.0	3.66	0.515	7.77	731
	UAD	5.7	4.72	0.508	7.87	667
	UAW	3.0	4.16	0.467	8.57	625
IV	UNP	2.0	2.99	0.352	11.36	556
	KNP	1.4	2.44	0.436	9.17	754

表-3.10(その1) 戸外暴露試験体の相対動弾性係数

シリーズ	配合の記号	経過冬数				
		1	3	5	7	9
I	MOA	103.3	103.9	106.5	107.5	108.6
	MOB	103.5	104.0	105.2	105.4	106.1
	MOC	105.8	107.4	109.3	110.3	111.3
	MOD	104.6	103.1	103.8	103.5	103.0
	UMOA	100.5	98.3	103.8	104.4	104.6
	UMOB	101.5	102.7	105.2	104.8	105.8
	UMOC	100.3	103.8	105.1	104.2	103.0
	UMOD	99.9	100.4	99.3	97.0	94.7
	MAA	103.6	104.4	106.1	106.4	106.7
	MAB	105.0	104.6	106.3	106.9	107.3
	MAC	101.5	102.0	104.6	104.9	105.2
	MAD	104.4	103.6	103.7	104.9	104.3
	UMAA	95.4	98.6	103.8	104.2	106.6
	UMAB	98.4	102.4	105.6	107.3	106.8
	UMAC	100.9	102.5	107.9	107.3	105.4
	UMAD	99.5	98.9	99.6	101.1	101.9
NOC	104.8	105.8	107.3	108.3	108.8	
NAC	105.8	106.9	109.6	111.0	111.0	
UNOC	100.8	105.8	109.2	106.7	108.0	
UNAC	100.8	101.8	104.0	107.0	106.3	
II	KAO-S	100.9	98.3	98.2	97.1	97.6
	KAO-N	103.6	102.7	102.8	103.0	103.2
	KAO-V	101.7	99.5	99.7	99.2	99.1
	KAO-II	110.6	112.1	113.0	112.4	-
	KATH	104.9	102.8	103.4	101.7	102.8
	KAF0-S	104.2	101.8	102.6	102.2	104.0
	KAF0-N	106.0	106.1	106.9	108.1	108.5
	KAF0-V	103.5	102.4	103.4	102.6	103.2
	KAF0-II	108.1	110.9	111.0	111.3	-
	KASI	106.5	107.5	108.3	108.1	107.8
KAEI	104.9	100.9	100.7	101.1	102.4	

表-3.10(その2) 戸外暴露試験体の相対動弾性係数

列 - ズ	配合の 記号	経 過 冬 数				
		1	3	5	7	9
II	UAO-S	102.0	101.3	100.8	102.1	102.8
	UAO-N	101.1	101.0	101.2	102.7	101.9
	UAO-V	101.3	101.2	101.1	102.5	102.3
	UAO-II	105.4	106.6	105.3	106.4	-
	UATH	101.0	96.9	99.0	98.2	97.6
	UAFO-S	101.6	101.0	98.9	99.7	100.0
	UAFO-N	102.2	101.2	101.8	103.4	103.5
	UAFO-V	100.6	100.0	100.1	100.7	100.1
	UAFO-II	104.9	106.4	105.1	105.5	-
	UASI	101.1	102.9	103.1	103.5	103.7
III	UAEI	103.0	110.8	100.0	103.7	104.4
	UND	99.5	102.7	104.6	105.5	105.8
	UNW	101.3	101.2	102.9	104.2	102.3
	UAD	103.6	103.4	105.3	105.6	106.6
	UAW	98.7	100.3	101.5	101.8	102.7
IV	UAWD	103.4	104.2	105.3	105.1	105.8
	KAP	118.7	122.2	105.9	122.6	-
	KNP	116.4	120.2	121.3	121.1	-
	UAP	107.4	109.5	109.0	-	-
	UNP	106.7	108.8	107.7	-	-
	KAR	120.6	123.8	121.7	123.7	-
	KNR	111.7	114.9	116.0	115.2	-
	UAR	105.6	107.3	106.9	106.4	-
	UNR	105.7	107.5	106.6	106.9	-

3.4 内的要因および外的要因を考慮した耐久性指数推定式による耐久性指数と戸外暴露試験体の相対動弾性係数の比較

3.4.1 はじめに

第2章において、コンクリートの耐凍害性に及ぼす使用材料および配合等の内的要因の影響を検討した結果、使用材料では粗骨材、配合では単位セメント量、単位水量、空気量等の要因が耐凍害性評価の上で重要であること、また、外的要因としては凍結最低温度、飽水度および塩分環境がKey Factorであることを述べた。2.9節では、普通コンクリートおよび軽量コンクリートについて多変数解析により内的要因および外的要因を考慮した耐久性指数推定式を提案した。配合設計およびコンクリート構造物の環境条件が与えられれば現場におけるコンクリートの耐久性指数をこの推定式から計算できるが、いままでこれを暴露試験体の相対動弾性係数と比較した研究例は見当たらない。ここでは、下笠ダムおよび苫小牧における外的要因を考慮して求めた耐久性指数推定式から計算した耐久性指数と戸外暴露試験体の相対動弾性係数の経年変化を比較検討する。

3.4.2 耐久性指数推定式の決定

普通コンクリートについて、改めて耐久性指数推定式を以下に記す。

$$DF = \alpha (77.8 - 0.57W + 0.1C + 21.79Air - 1.42Air^2) \quad (3.1)$$

ここに、

$$\alpha = \nu_1 \nu_2 \nu_3$$

ν_1 : 凍結最低温度別補正係数
 ν_2 : 飽水度別補正係数
 ν_3 : 塩分環境別補正係数

実際の凍結最低気温は下笠ダムで -2.5°C 、苫小牧で -6.5°C 程度である。表-2.62の普通骨材コンクリートに対する計算式より凍結最低温度別補正係数を求めると、下笠ダムで $\nu_1 = 1.72$ 、苫小牧で $\nu_1 = 1.54$ が得られる。飽水度別補正係数はしばしば乾燥するので両暴露地とも1.4とする。また、両暴露地とも塩分環境ではないので塩分環境別補正係数は1.0とする。

以上をまとめると、下笠ダムでは

$$\nu_1 = 1.72, \nu_2 = 1.4, \nu_3 = 1.0 \text{ となり } \alpha = 2.41 \text{ が得られる。}$$

苫小牧では、

$$\nu_1 = 1.54, \nu_2 = 1.4, \nu_3 = 1.0 \text{ となり } \alpha = 2.16 \text{ が得られる。}$$

3.4.3 耐久性指数推定式による耐久性指数と戸外暴露試験体の相対動弾性係数との比較

表-3.11および表-3.12に、下笠ダムおよび苫小牧に暴露した各コンクリートの耐久性指数の計算値、暴露試験体の相対動弾性係数および計算値を相対動弾性係数で除した係数を示す。耐久性指数は式(3.1)で $\alpha=1.0$ とした、すなわち内的要因のみを考慮した耐久性指数(DF_1)と下笠ダムでは $\alpha=2.41$ 、苫小牧では $\alpha=2.16$ の補正係数の積を見込み外的要因も考慮した耐久性指数(DF_2)を示している。ただし、耐久性指数 DF_2 の上限は100とした。下笠ダムに暴露した試験体の相対動弾性係数は11年経過後の値であり、受けた凍結融解の繰り返し作用は約700回である。一方、苫小牧市の暴露試験体の経過年数は9年であり、凍結融解の繰り返し作用は約1200回である。

表-3.11 耐久性指数推定式による耐久性指数と
下笠ダム暴露試験体の相対動弾性係数

シリーズ	配合記号	耐久性指数計算値		相対動弾性係数 (%) R. D	係数 $DF_2/R. D$
		DF_1	DF_2		
I	N	86.5	100.0	101.3	0.99
	S	96.2	100.0	101.3	0.99
	F	101.0	100.0	96.8	1.03
	K	73.3	100.0	110.2	0.91
II	BA	75.1	100.0	92.6	1.08
	AN	73.7	100.0	94.7	1.05
	LI	75.1	100.0	81.3	1.23
	SE	84.7	100.0	92.4	1.09
	BAN	49.9	100.0	97.0	1.03
	ANN	40.7	98.1	98.8	0.99
	LIN	46.5	100.0	86.3	1.16
	SEN	44.3	100.0	101.4	0.99
III	AO	28.3	68.2	99.7	0.68
	ATW	53.3	100.0	104.3	0.96
	ATH	79.1	100.0	103.9	0.96
	AF	86.0	100.0	98.9	1.01
	AS	91.9	100.0	105.3	0.95
	AEI	99.1	100.0	111.9	0.89
	ATEN	95.2	100.0	106.6	0.93
IV	TA	92.4	100.0	103.4	0.97
	TB	87.4	100.0	100.3	1.00
	TC	70.1	100.0	94.7	1.05
	TD	69.5	100.0	110.0	0.91

表-3.12 耐久性指数推定式による耐久性指数と
苫小牧市暴露試験体の相対動弾性係数

シリーズ	配合記号	耐久性指数		相対動弾性係数 (%) R. D	係数 $DF_2/R. D$
		DF_1	DF_2		
I	MOA	52.6	100.0	108.5	0.92
	MOB	58.3	100.0	106.1	0.94
	MOC	47.4	100.0	111.3	0.90
	MOD	49.3	100.0	103.0	0.97
	MAA	99.2	100.0	106.7	0.93
	MAB	102.2	100.0	107.3	0.93
	MAC	102.1	100.0	105.2	0.95
	MAD	84.1	100.0	104.3	0.96
	NOC	43.7	94.4	108.8	0.87
	NAC	105.4	100.0	111.0	0.90
II	KAO	23.3	50.3	99.1	0.51
	KATH	71.2	100.0	102.8	0.97
	KAF0	86.5	100.0	103.2	0.97
	KASI	94.7	100.0	107.8	0.93
	KA EI	98.3	100.0	102.4	0.98

耐久性指数の計算値を相対動弾性係数で除した係数は下笠ダム暴露の場合、0.68~1.23、苫小牧暴露の場合、0.51~0.98の範囲にある。NON-AEコンクリートである下笠ダム暴露試験シリーズIIIのAOおよび苫小牧暴露試験シリーズIIのKAOについては、係数が0.68および0.51となり両者とも最低値を示している。この原因は、外的要因を考慮する係数決定の際、空気量の範囲を2.5~4%としたため、この範囲を下回るNON-AEコンクリートでこのような結果が得られたものと思われる。

係数が逆に大きいものは下笠ダム暴露の石灰岩コンクリートLIおよびLINで、それぞれ1.23、1.16である。用いた石灰岩は破砕値が52%で、安定性試験による損失質量が93%にも達する低品質のものである。多変量解析に用いた普通コンクリートの粗骨材は角閃岩がほとんどであったため、これより低品質の石灰岩を用いたコンクリート、LIおよびLINでこのような結果が得られたものと思われる。

上記の最低値および石灰岩コンクリートの係数を除外すれば、係数の範囲は下笠ダム暴露の場合、0.89~1.09、苫小牧暴露の場合、0.87~0.98の範囲となり、第2章で、内的要因および外的要因を考慮し、実験的かつ数値解析的に導いた耐久性指数推定式は実用可能なものと思われる。

3.5 本章の要約

凍結融解作用を受けるコンクリートの品質の経年変化に関する基礎的資料を得ることを目的として九州下笠ダムおよび北海道苫小牧において戸外暴露試験を実施した。

まず、下笠ダムにおける戸外暴露試験により得られた結果を要約すると次のとおりである。

(1) スラストブロック上の空中の試験体が1冬当たり受ける凍結融解の繰り返し回数は65回(7ヶ年平均)で、その平均凍結最低温度は -2.5°C 、融解最高温度は 17.0°C であった。

また、気温が 0°C 以下に下がっても水中の試験体および上流地点における試験体には凍結融解の繰り返しが作用しないことが明らかとなった。

(2) コンクリート試験体の品質の経年変化に及ぼすセメントの種類の影響は明確には認められない。しかし、高炉セメントB種を用いたコンクリート試験体はいずれの暴露方向においても11年後の動弾性係数は暴露当初に比べ10%以上増加しているのが認められた。ダム上流地点に暴露した早強ポルトランドセメントを用いた試験体の11年経過後の動弾性係数は暴露当初に比べ減少したが、試験体表面部に異常は認められなかった。

(3) 粗骨材に安山岩、玄武岩、石灰岩および蛇紋岩を用いたNON-AEおよびAEコンクリートの試験体の品質は上流地点およびスラストブロック上の空中ではほとんど低下しており、スラストブロック上の水中では石灰岩を用いた試験体のみわずかに低下している。

他の骨材に比べて石灰岩を用いたコンクリート試験体の品質の低下が大きく、スラストブロック上の空中に暴露した場合、動弾性係数が暴露当初より約20%低下しているのが認められた。また、上流地点に設置した石灰岩を用いたコンクリート試験体の表面部は一部欠損し粗骨材が露出しているのが認められた。したがって骨材に石灰岩を使用する場合にはその耐久性に十分注意する必要がある。

(4) 上流地点におけるコンクリート試験体の品質の経年変化と空気量(1~10%)との間に明確な関係は認められない。また、上流地点におけるコンクリート試験体の動弾性係数は暴露後4年以降、減少の傾向が認められる。空気量を約10%含むコンクリート試験体(ATEN)では表面部の一部に粗骨材の露出が認められた。したがって、空気量は必要以上に多く連行しすぎないように注意しなければならない。一方、スラストブロックの空中や水中においてはコンクリートの品質の低下はほとんど認められず動弾性係数が増加している場合が多い。

(5) コンクリート試験体の品質の経年変化に及ぼす水セメント比の影響はいずれの暴露方

向の場合においても明確に認められなかった。上流地点におけるコンクリート試験体の動弾性係数は他のシリーズと同様に暴露後4年以降減少の傾向が認められる。また、上流地点では水セメント比の大きい62%および70%の試験体の表面部で劣化が進み、粗骨材の露出が認められた。したがって、水セメント比は所定のワーカビリティがえられる範囲内でできるだけ小さくする必要がある。

(6) 人工軽量骨材を用いたコンクリート試験体の経年変化には上流地点において普通骨材を用いた場合と同様に、暴露後4年以降に品質の低下が認められる。しかし、動弾性係数が暴露当初に比べて低下した試験体の表面部に異常は認められなかった。

一方、スラストブロックの空中や水中における人工軽量骨材を用いたコンクリート試験体の経年変化は普通コンクリートに比べ非常に小さく、11年後においても暴露当初に比べ多くても2%程度の増加であった。以上のように耐久性が小さいと言われる人工軽量骨材を用いたコンクリートでも本実験の範囲内でかなり良好な耐久性が認められた。

(7) コンクリート試験体は上流地点で暴露4年後以降にその動弾性係数の減少が認められ11年後においては暴露当初に比べほとんどの場合、わずかながら品質が低下している。

スラストブロック水中の試験体では11年後においても暴露当初に比べて増加している場合がほとんどである。また、スラストブロック空中におけるコンクリート試験体の品質は水中の場合よりも低下している例が多いことが認められた。この原因は空中の試験体が乾燥・湿潤作用や冬期に軽微な凍結融解作用を受けるためと考えられる。

つぎに、苫小牧における暴露試験結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 空中の試験体が1冬当たり受ける凍結融解サイクルは132回(3ヶ年平均)で、その平均凍結最低温度は -6.6°C 、平均融解最高温度は 7.7°C であった。これは下笠ダム地点に比べかなり厳しい気象条件である。また、砂中にわずか7.5cm埋められ上面を露出した試験体が1冬当たり受ける凍結融解サイクル(3ヶ年平均)は132回未満で平均最低凍結温度は -2.2°C 、平均融解温度は 3.4°C であり、かなり緩慢になることが明らかとなった。

(2) シリーズIでは粗骨材に角閃岩砕石および人工軽量骨材を使用しかつ高性能減水剤を用いた水セメント比30~50%のNON-AEおよびAEコンクリート試験体、シリーズIIでは空気量の異なる普通および軽量コンクリート試験体、シリーズIIIでは表乾および乾燥軽量骨材を使用したNON-AEおよびAEコンクリート試験体、シリーズIVでは無筋および鉄筋コンクリート試験体、さらにシリーズVでは蒸気養生および標準養生を施したNON-AEおよびAEコン

クリート試験体をそれぞれ暴露させ、現在までに動弾性係数の測定を9年間行ってきた。その結果、上記の各種コンクリート試験体の動弾性係数の低下はほとんど認められず、むしろ増加していることが明らかとなった。

(3) シリーズIIでは試験体を南向き、北向き、鉛直および砂中などと状態を変えて設置したが、南向きおよび鉛直向き設置の方が北向きおよび砂中に設置の場合より動弾性係数の増加が小さい傾向が認められた。これは南向きおよび鉛直向き設置の試験体の受ける凍結融解作用の変化の方がより厳しいためと考えられる。

第2章で求めた耐久性指数推定式による計算値と相対動弾性係数との比較検討を行った結果、計算値を相対動弾性係数で除した係数の範囲が、下笠ダム暴露の場合、0.89~1.09、苫小牧暴露の場合、0.86~0.98の範囲となり、内的要因および外的要因を考慮し、実験的かつ数値解析的に導いた耐久性指数推定式は実用可能なものと思われる。すなわち、コンクリートの内的要因（空気量、単位水量、単位セメント量）とコンクリート構造物の建造される地域およびコンクリートの部位から決まる外的要因（凍結最低温度、飽水度、塩分環境の有無）が与えられれば、提案式により耐久性指数（相対動弾性係数）を推定することが可能で、コンクリート構造物の耐久設計上、有用な資料を得るといふ本論文の目的を達成したものと思われる。

第4章 凍結融解過程におけるNON-AEおよびAEコンクリートの温度・長さ変化関係、ダイレーションおよび凍結水量の測定

4.1 はじめに

凍結融解作用によってコンクリートが劣化するのはコンクリート中に含まれる自由水の凍結によるものであり、空気泡を連行すると耐凍害性を著しく改善できることは良く知られている。また、凍結融解試験では凍結融解サイクルの進行に伴う劣化を相対動弾性係数で表すことが多い。しかしながら、コンクリートのその他の諸性質がどのように推移していくのかを知ることは劣化過程を考察する上で、また、適切な劣化指標を検討する観点から極めて重要である。

以上の観点から、本章ではまず、凍結融解サイクルに伴うコンクリートの質量、圧縮強度、引張強度、動弾性係数、透水係数ならびに長さ変化を測定し、劣化過程の考察と各測定項目の劣化指標としての適否を検討した。

上記の検討により、長さ変化は無破壊で連続的に測定が可能な点においても良好な劣化指標であることが判明したので、凍結融解サイクルに伴うコンクリート供試体の温度・長さ変化関係の測定方法が確立できれば、従来の凍結融解試験に比べ比較的短時間で耐凍害性を評価できることも考えられる。セメントペーストの凍結融解サイクルに伴う長さ変化についてはBeaudoinおよびMacLinnis¹⁰⁷⁾、Litvan⁹⁾、鎌田および洪⁶³⁾らが検討を行っている。一方、コンクリート供試体における測定はCady⁶¹⁾、Vuorinen⁶⁷⁾らが行っているが、日本における測定例は極めて少ない。また、凍害にはコンクリート内部に凍結する水（以下、凍結水量と記す）の存在が必要条件であるから、水の凍結融解挙動を把握することが重要である。Cady⁶¹⁾はコンクリートの凍害機構を研究する目的で冷間示差熱分析(CQDTA)を応用してコンクリート中の凍結水量を測定している。日本では、須藤および秋葉⁹⁹⁾がセメント硬化体の凍結融解に関するDTA方法による研究成果を得ている。また、Vuorinen⁶⁷⁾、沢田および鎌田¹⁰⁹⁾らは熱量計を用いて凍結水量を測定している。

本章の後半部では温度・長さ変化関係の測定と同時に、示差熱測定（試料と基準物質について反応熱を測定し、その差を比較する技術）を応用してコンクリート中の凍結水量を測定し、コンクリートの耐凍害性評価法としての妥当性を検討し、凍害機構の考察を行った。

4.2 凍結融解の繰り返しに伴うNON-AEおよびAEコンクリートの諸性状の推移

4.2.1 目的

凍結融解試験では供試体本数の制約上、静的試験で供試体を破壊することが出来ないの
で、質量や動弾性係数を無破壊で測定し、0サイクルでの値を100とした相対動弾性係数
で劣化程度を判断している。エントレインドエヤーが運行されていなかったり、強度不足
の場合には凍結融解の繰り返しにより、コンクリート組織の弛みが生じる。この組織の弛
みは供試体の長さ変化にも反映されるものと考え、劣化指標としての適否を検討する目
的で、凍結融解の繰り返しに伴うNON-AEおよびAEコンクリートの長さ変化を測定した。

また、併せて供試体の質量、圧縮強度、引張強度、動弾性係数および透水係数の推移につ
いてもどの様な推移をたどるのか検討を加えた。

4.2.2 実験方法

(1) 使用材料およびコンクリートの配合

セメントは普通ポルトランドセメント（比重3.16、比表面積3040cm²/g）を使用し、細骨
材として、福岡市志賀島産の海砂（十分除塩済み）を、粗骨材として造粒型人工軽量骨材
（最大寸法15mm）を使用した。表-4.1に、使用骨材の物理的性質を示す。コンクリートは
NON-AEコンクリートとAEコンクリートの2種類とした。両者で、水セメント比お
よび単位水量を一定とした。AEコンクリートの目標空気量は6±1%とした。コンクリ
ートの示方配合を表-4.2に示す。

(2) 凍結融解試験方法

コンクリート供試体としてASTM C666 で指定されている供試体は10×10×40cmの角柱
であるが、この他に10×20cmの円柱を用いて凍結融解試験用供試体として妥当か検討した。

凍結融解中のコンクリートの長さ変化を測定するためのカールソン型ゲージを供試体中
に埋設した。円柱供試体は脱型後、材令28日まで20℃の水中で養生したものと、材令7日
まで水中で養生後、21日間、約20℃の恒温室に保存したもの（空中養生と、以下記す）の
2通りとした。

表-4.1 骨材の物理的性質

種類 \ 項目	比重	吸水率 (%)	粗粒率
細骨材	2.59	1.93	2.70
粗骨材	1.47	14.41	6.25

表-4.2 コンクリートの示方配合

種類	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (Kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 114
NON-AE	7 ± 1	0.4 ± 0.1	53	40	186	350	723	621	0
AE	7 ± 1	6 ± 1	53	40	186	310	697	598	0.0083

凍結融解試験はASTM-C666 A法に準じ、1サイクルを3時間とし、凍結最低温度は-18
℃、融解最高温度は+4℃を標準にした。供試体周囲の状態は、ゴム容器の中に水を入れ
る場合（水中試験）と、ゴム容器には水を入れない場合（空中試験）の2通りとした。空
中試験の場合には水の供給を断つために供試体をポリエチレン袋に入れた。

(3) 長さ変化の測定

供試体中に埋設したゲージの動きは、ブリッジボックス、動ひずみ計を介してサーボコ
ーダあるいはXYレコーダのX軸に記録した。XYレコーダのY軸には供試体の温度変化
を記録した。

(4) 質量および動弾性係数の測定

融解終了時に、従来からの測定項目である供試体の質量と動弾性係数を少なくとも30
サイクル間隔で測定した。動弾性係数はたわみ振動法で測定することを原則としたが、角
柱供試体では縦振動法による測定も行い、両者の結果を比較した。

(5) 強度試験

8、24、104 および 300サイクル終了後には圧縮強度と引張強度を測定した。圧縮強度試験はイオウキヤッピングを施して行い、引張強度は割裂試験により求めた

(6) 透水試験

凍結融解の繰り返しによってコンクリート内部のフラック発生がどの程度、水密性の低下をもたらすのか検討するために8、24、104 および 300サイクル終了後における透水係数を測定した。所定の凍結融解サイクルを受けたφ10×20cmの供試体を、コンクリートカッターで入念に切断して、中央部よりφ10×5cmの透水試験用供試体を作製した。透水試験用供試体は予め、24時間、105℃で乾燥して含水状態による水密性の相違をできるだけなくしてから透水試験を実施した。この場合、乾燥による微細なひびわれの発生を極力さけるために、供試体の加熱は徐々に行った。用いた透水試験機はアウトプット方式で加圧力は10kgf/cm²とした。透水係数は次式により計算した。

$$K = \rho \frac{h}{P} \cdot \frac{Q}{A}$$

ここに、

K : 透水係数(cm/sec)

P : 水圧(kgf/cm²)

A : 供試体の断面積(cm²)

Q : 流出量(cm³/sec)

ρ : 水の単位質量(kg/cm³)

h : 供試体の高さ(cm)

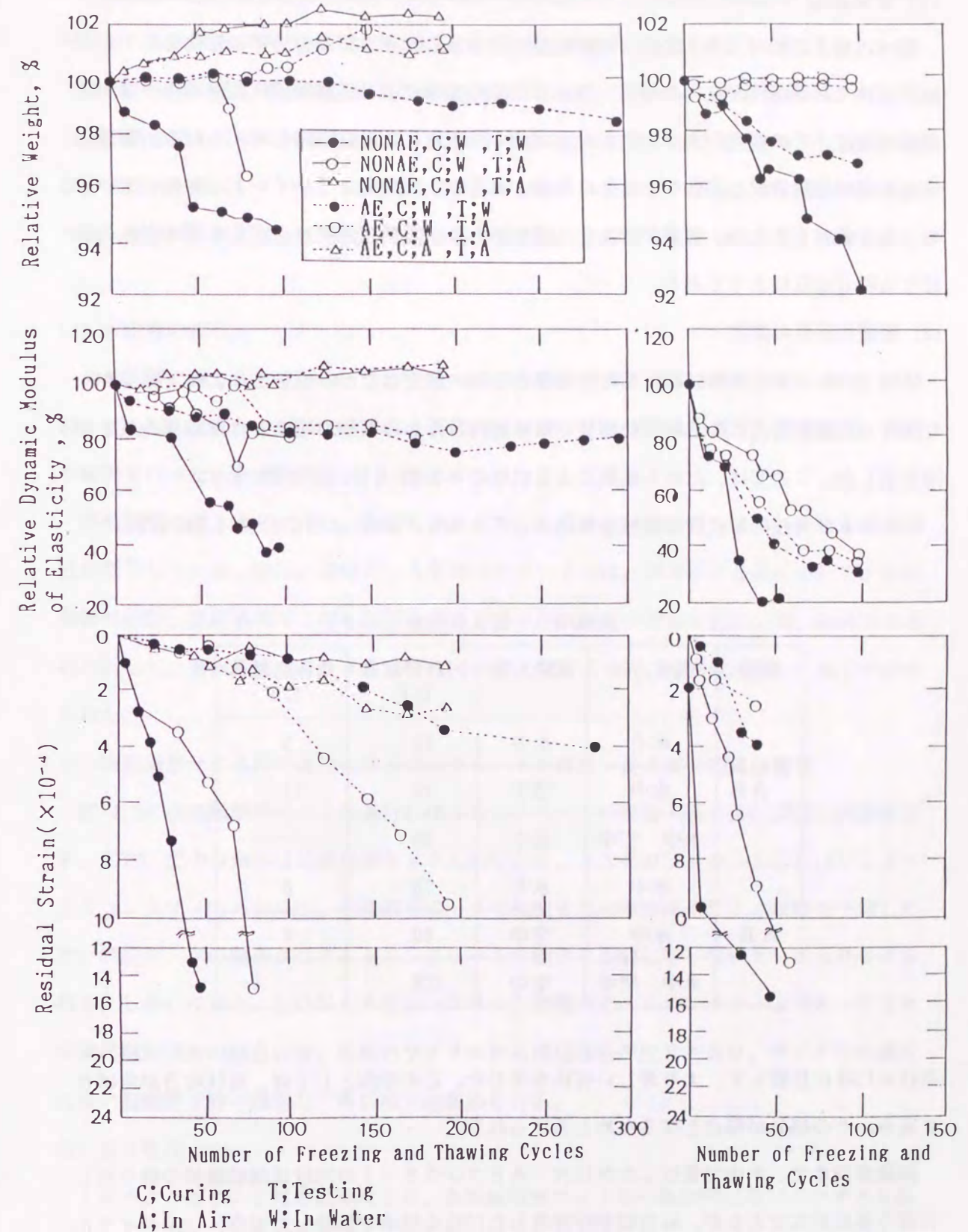


図-4.1 NON-AEコンクリート円柱
供試体の凍結融解試験結果

図-4.2 NON-AEコンクリート
角柱供試体の凍結融解
試験結果

4.2.3 実験結果および考察

(1) 質量変化

図-4.1および図-4.2の上図に、凍結融解の繰り返しに伴う質量百分率の変化を示す。円柱供試体で試験条件が空中の場合、質量は増加の傾向にあり、試験前に乾燥過程がはいる供試体ほど、その傾向が大きい。これは試験中の吸水による質量増と考えられる。質量測定は動弾性係数算出に必要であるから実施されるが、実際にコンクリートは劣化しているのに水を吸収するため、質量が増加する場合があります、質量百分率は必ずしも耐凍害性の良好な指標ではないようである。

(2) 動弾性係数の変化

ASTM C666 の凍結融解試験における動弾性係数の測定はたわみ振動法によって行うが、今回行った縦振動法による動弾性係数の推移傾向はたわみ振動の場合とほぼ同様の低下傾向を示した。ここでは、たわみ振動による結果のみを図-4.1と図-4.2に示す。

円柱および角柱の耐久性指数性を算出式 $DF = 60N / 300$ により求め表-4.3に示す。

表-4.3 耐久性指数 (DF)

種類	養生方法	試験方法	円柱供試体 DF	角柱供試体 DF
NON-AE	水中	水中	10	5
	水中	空中	19	11
	水中, 空中	空中	99	—
AE	水中	水中	78	6
	水中	空中	69	7
	水中, 空中	空中	108	—

角柱は円柱に比較して、より著しい劣化を生じた。この原因としては、角柱の方が角ばりに富み、その部分が弱点となるためと考えられる。

試験直前まで、水中で養生したNON-AEコンクリートの円柱は凍結融解の繰り返しに伴う劣化が大であるが、21日間空中保存した円柱を空中で試験した場合、200サイクル終了後においても、相対動弾性係数は横ばい状態で劣化が非常に小さい。これは乾燥による凍結水量の減少および空中試験のため水の供給がないことが原因と考えられる。

(3) 圧縮強度と引張強度の変化

凍結融解の繰り返しに伴う円柱 (水中養生、水中試験) の強度変化を表-4.4に示す。NON-AEコンクリートでは圧縮強度と引張強度の低下が著しいが、AEコンクリートでは300サイクル終了後も強度低下が小さい。鎌田、洪ら²³⁾ は人工軽量骨材コンクリート中の粗骨材とペーストの付着面に、比較的、幅の広い凍害きれつが発生し、付着面が破壊する傾向を確認している。本実験におけるNON-AEコンクリートでも凍結融解の繰り返しに伴い、供試体にこの種のひびわれが強度低下をもたらしたものと考えられる。

(4) 水密性の変化

凍結融解の繰り返しに伴い、コンクリートの水密性が低下すると考えられるので、試験前、8、24、100および300サイクル終了後にコンクリート (水中養生、水中試験) の透水試験を行った。その結果を表-4.5に示す。

凍結融解の繰り返しに伴い、NON-AEコンクリート、AEコンクリートともに水密性が低下している。特に、NON-AEコンクリートでは、24サイクル後において、相対動弾性係数、圧縮強度ならびに引張強度の百分率が試験前のそれぞれ81、79、91%であるのに対して、透水係数は0サイクル時の435倍となっており、水密性の著しい低下が認められた。

(5) 凍結融解サイクルの進行に伴うコンクリートの温度・長さ変化関係の推移

図-4.3に凍結融解サイクルの進行に伴うコンクリートの温度・長さ変化関係の推移を示す。なお、図中の数字は凍結融解サイクル数を示す。AEコンクリートおよびNON-AEコンクリートにおいて、凍結過程の-2℃程度までは温度降下による収縮を予想したが、埋設ゲージの動きが必ずしもコンクリートの動きに追随していないケースも見受けられる。しかしながら、NON-AEコンクリートの場合とAEコンクリートであっても水中凍結融解試験の場合には、初期のサイクルから凍結膨張が生じており、サイクルの進行に伴い融解終了時の残留ひずみに増大が認められる。

(6) 長さ変化

1サイクル目の+4℃を基準にとり、各凍結融解サイクルの融解時におけるひずみを長さ変化と定義し、図-4.1と図-4.2の最下図に、各種試験条件下の長さ変化を示す。図から明らかなように、凍結融解の繰り返しに伴う長さ変化は相対動弾性係数や重量百分率の変化に比較して、ばらつきが少なく、凍結融解の繰り返しによる劣化指標として適切である。

この長さ変化と相対動弾性係数の低下の関係を、図-4.3に示す。この両者の関係は、コンクリートの配合、供試体の含水状態や凍結融解作用の外的条件すなわち、水中であるか空中であるかなどにより相違している。本実験においては、耐凍害性不足のNON-AEコンクリートの水中養生・水中試験の場合、相対動弾性係数60%に対応する長さ変化は角柱で 1200×10^{-6} 、円柱で 1500×10^{-6} である。

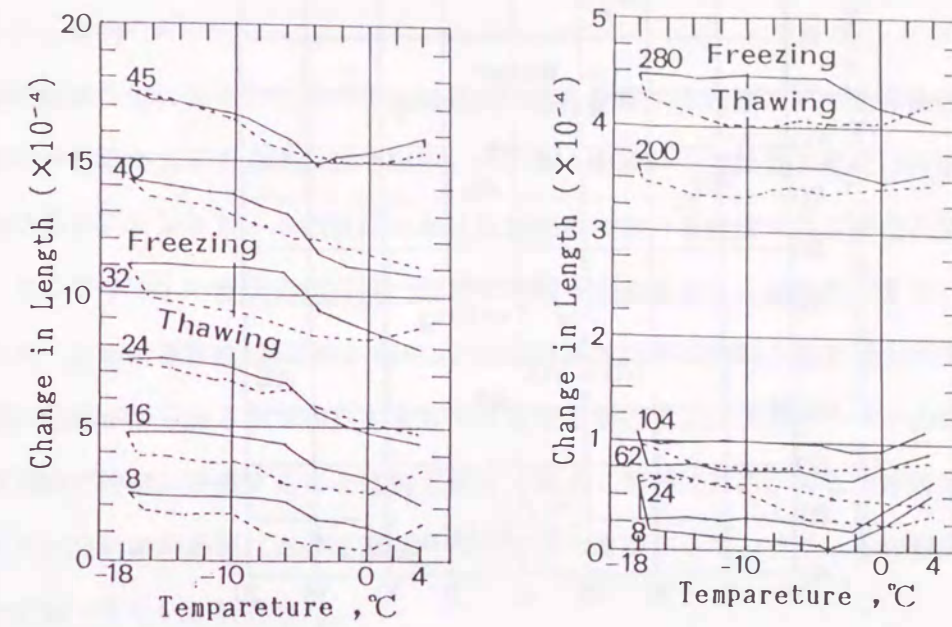
鎌田、洪⁶⁾は上記の条件によって、両者の関係が異なるとしながらも、コンクリートの破壊の目安として、 1000×10^{-6} の凍伸度(DEF、残留膨張量のこと)を示しており、この段階で、動弾性係数値は試験開始前の60%前後になるとしている。鎌田らの実験は角柱で行われたことを考慮すると、著者が求めた相対動弾性係数60%に相当する長さ変化 1000×10^{-6} は鎌田らの測定値とほぼ等しいと言える。

表-4.4 凍結融解の繰り返しに伴うコンクリート強度変化

種類	サイクル数	圧縮強度 (kgf/cm ²)	圧縮強度百分率 (%)	引張強度 (kgf/cm ²)	引張強度百分率 (%)
NON-AE	0	350	100	19.4	100
	8	270	77	18.4	95
	24	278	79	17.6	91
	93	140	40	8.9	46
AE	0	288	100	7.8	100
	8	283	98	19.3	108
	24	232	81	19.5	110
	300	209	73	16.7	94

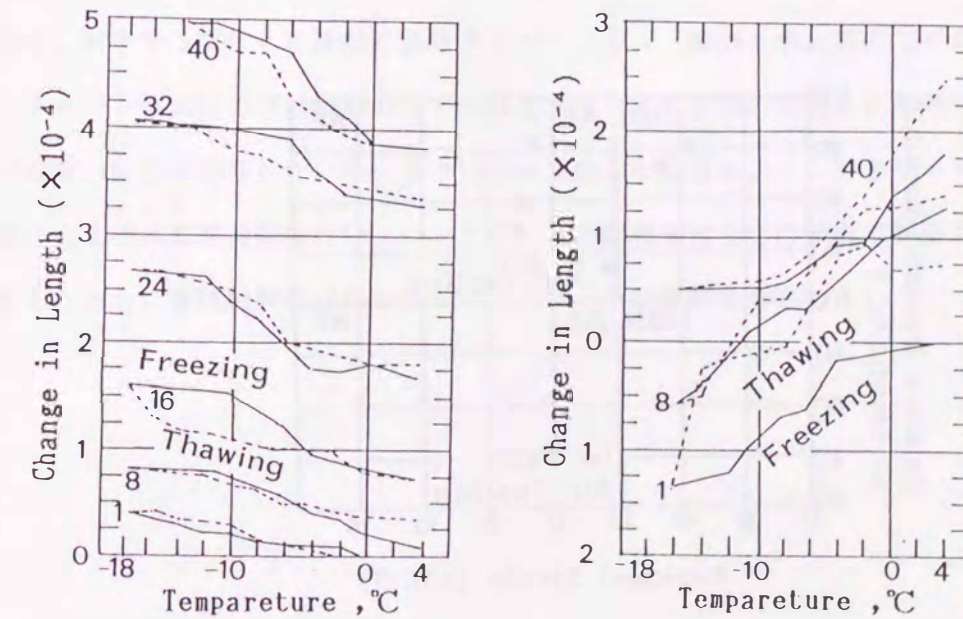
表-4.5 凍結融解の繰り返しに伴う透水係数($\times 10^{-4}$ cm/sec)の変化

種類 \ サイクル	0	8	24	100	300
NON-AE	0.001	0.106	0.435	56.10	—
AE	0.021	0.162	0.099	0.946	2.410



a)円柱(NON-AE、水中養生、水中試験)

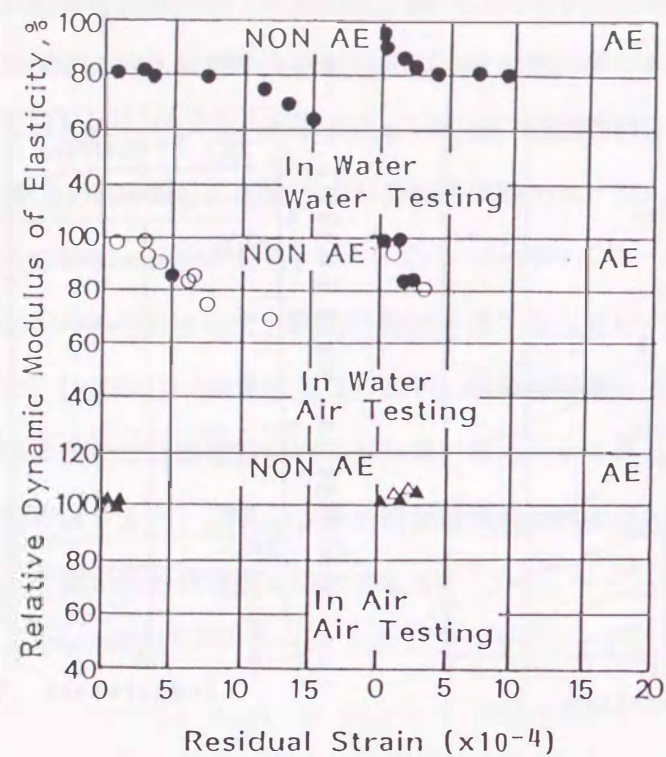
b)円柱(AE、水中養生、水中養生)



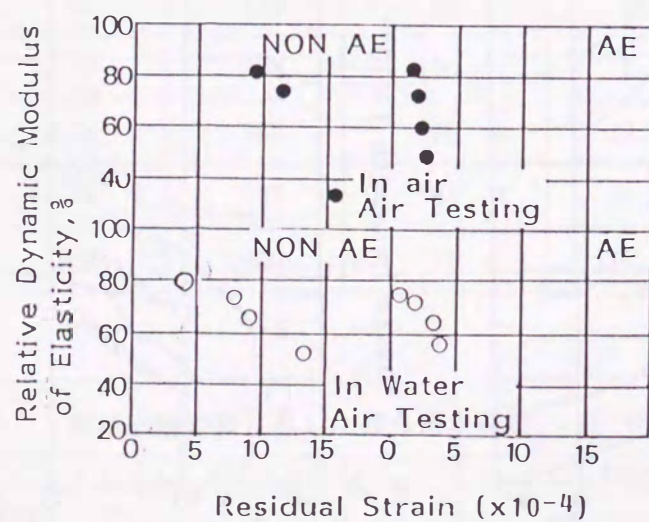
c)角柱(AE、水中養生、水中養生)

d)角柱(AE、水中養生、空中養生)

図-4.3 凍結融解サイクルの進行に伴う温度・長さ変化関係の推移



長さ変化と相対動弾性係数との関係(円柱)



長さ変化と相対動弾性係数との関係(角柱)

図-4.4 長さ変化と相対動弾性係数との関係

4.3 凍結融解過程におけるモルタルおよびコンクリートの長さ変化および示差熱分析による等価凍結水量の測定

4.3.1 目的

凍結融解作用によるコンクリートの劣化程度を把握する指標として動弾性係数の他に長さ変化が有効であることを前節で記述した。都合が良いことに長さ変化は持続的な測定が可能である。コンクリート供試体の凍結融解過程における温度・長さ変化の関係を調べれば、コンクリートの耐凍害性評価に有用な情報を得られることが期待できる。従来よりコンクリートの耐凍害性はASTM C 666による凍結融解試験で判断される場合が多いが、この試験は結果が得られるまで40日あまりの日数を必要とする。コンクリートの耐凍害性をより短期間で的確に評価することは施工管理上極めて重要である。そこで本研究では、1サイクルの凍結融解過程における温度・長さ変化の履歴からコンクリートの耐凍害性を短期間で把握できないか検討した。

コンクリートの凍害は自由水の凍結によるものであるが、その凍結はコンクリートの、特にモルタル部分の細孔径分布組織に依存し、粗大径中の水から凍結がおり微小径内の水になるほど凍結点降下が大きいことが知られている。ここでは等価凍結水量（凍結水量を間接的に測定するためこの用語を以下用いる）の測定をCady⁶¹⁾ や須藤⁹⁹⁾ らと同様に示差熱分析により行った。

まず、前半では試作した凍結によるダイレーション（膨張）測定装置でモルタルおよびコンクリート供試体の凍結融解過程での温度・長さ変化関係の測定と示差熱分析を行い、この装置の性能を確認した。次に後半では、改良した装置によりコンクリート供試体の長さ変化および示差熱分析を行い、コンクリートの耐凍害性をこの装置で評価できるのか検討するとともに凍結融解過程におけるコンクリートの挙動を考察した。

4.3.2 凍結融解過程におけるモルタルの温度・長さ関係および等価凍結水量の測定

1) 使用材料およびモルタルの配合

試験はシリーズIとシリーズIIからなり、それぞれのシリーズにおけるモルタルの配合を表-4.6 および表-4.7 に示す。シリーズIでは早強ポルトランドセメント(比重3.13)を用い、シリーズIIでは普通ポルトランドセメント(比重3.16)を用いた。細骨材には105℃で24時間乾燥した豊浦の標準砂を用いた。シリーズIのAEモルタルの作製には減水剤とAE剤を併用し、シリーズIIのダミー供試体の作製は低水セメント比であるため高性能減水剤を使用した。

表-4.6 モルタルの配合(シリーズI)

配合記号	水セメント比 (%)	セメント砂比 (質量比)	水 (g)	セメント (g)	砂 (g)	空気量* (%)
ST45-A**	45	1:2	518	1150	2300	12.2
SP50-N	50	1:2	633	1266	2532	5.4
SP50-A	50	1:2	557	1114	2228	12.0
SP65-N	65	1:2	752	1156	2312	1.8
SP65-A	65	1:2	661	1017	2034	8.2

備考: モルタル2ℓ分の配合である。空気量はST45-Aでは12回の平均値、その他は6回の平均値である。ST45-Aはダミー供試体、他はモルタル供試体である。

表-4.7 モルタルの配合(シリーズII)

配合記号	水セメント比 (%)	セメント砂比 (質量比)	水 (g)	セメント (g)	砂 (g)	空気量* (%)
ST25-A	25	1:1	445	2121	2121	4.8
NP65-N	65	1:2	753	1158	2316	2.4

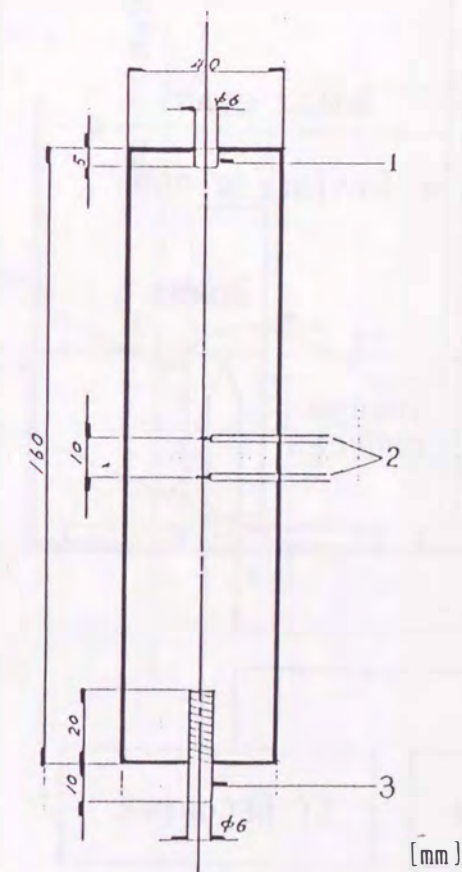
備考: モルタル2ℓ分の配合である。空気量の値はST25-A(ダミー供試体)では2回、NP65-Nでは5回の平均値である。

2) モルタル供試体の作製

図-4.5 にモルタル供試体の形状寸法等を示す。モルタル供試体は4×4×16cmの角柱を使用し、その中心部に温度と示差熱測定用にテフロン被覆CA熱電対を2組埋め込んだ。また、底面の中心には埋め込み部分20mmに1mmピッチのネジ加工を施したφ6×30mmのステンレス棒を供試体支持棒として埋め込み、上面には石英硝子棒のガイド穴としてφ6×5mmの穴を開けた。

モルタルの混練はモルタルミキサーを用いJIS R 5201に従って行った。打設後は温度20℃、湿度90%以上の恒温恒湿槽内に24時間保存した後、上面の成形および脱型を行った。脱型後も所定の材令まで温度20℃、湿度90%以上の恒温恒湿槽内において養生した。

示差熱分析に用いる標準供試体にはモルタル供試体と同形状寸法に切り出した耐火レンガを使用した。その中心部には温度と示差熱測定用にテフロン被覆CA熱電対を2組埋め込んだ。



1: Hole for guide 2: CA thermocouples 3: Stainless bar

図-4.5 モルタル供試体の形状寸法

3) 長さ変化および示差熱の測定方法

長さ変化および示差熱の測定装置を図 4.6 に示す。この装置は同時に 2 個の供試体をセットすることが出来る。供試体の凍結融解は周囲のケロシンをプログラム式制御装置で冷却加温することにより行なえる。供試体中心温度を 18.5°C から -18.5°C まで 5°C/h の速度で冷却し 1 時間 -18.5°C に保った後、5°C/h の速度で 18.5°C まで加温する 1 サイクルにおいて供試体の長さ変化および示差熱を測定した。

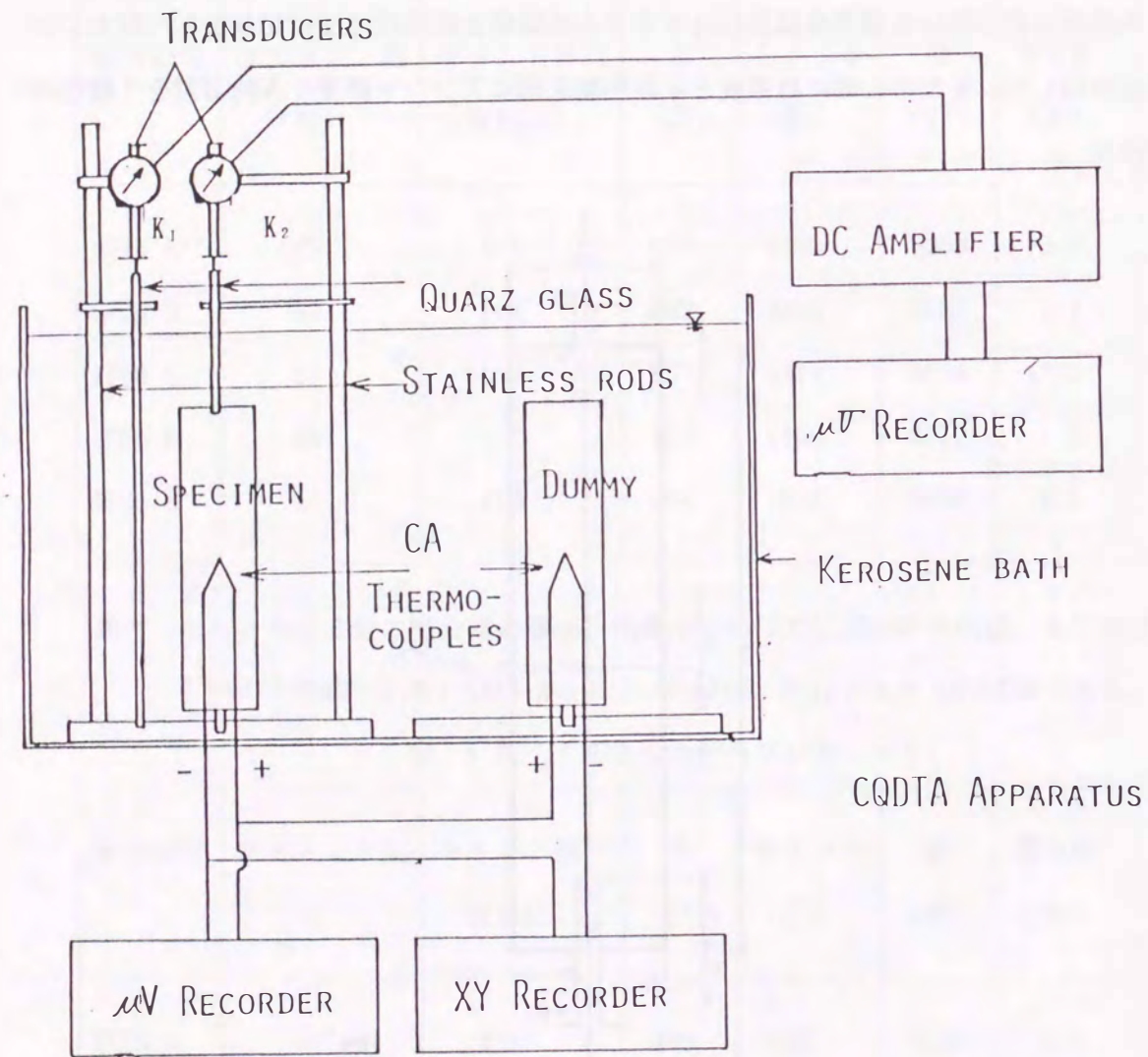
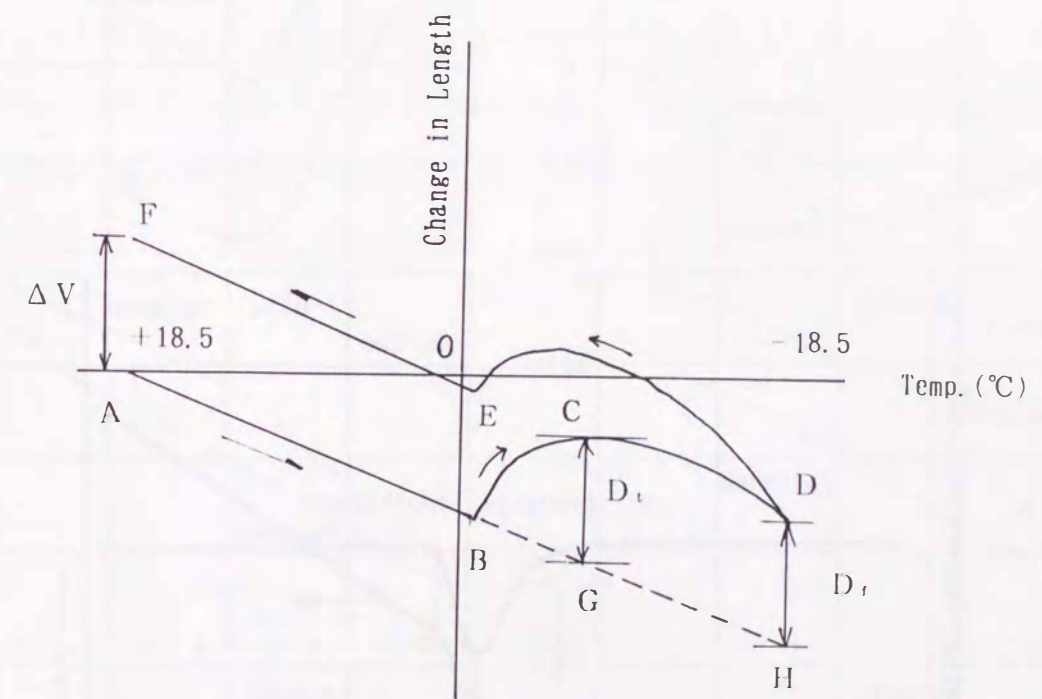


図-4.6 長さ変化および示差熱測定装置

長さ変化は変位変換器を取りつけたステンレス棒の変位を取り除くために供試体長さ（上部の石英硝子と底部のステンレス棒も含む）と等しい長さの石英硝子棒と供試体との示差変位（図中の変位変換器 K₁ と K₂ との変位差）を動ひずみ計を介して記録した。温度・長さ変化曲線の一例を図-4.7 に示す。モルタルの線膨張係数は 18.5°C から 0°C までの冷却過程で求め、凍結膨張量（ダイレーション）は一時的ダイレーション D_t と最終ダイレーションの二者の定義を以下のように定義する。

一時的ダイレーション：凍結過程の膨張最大点 C と +18.5°C から 0°C の線の延長線上の G 点（最大点 C の生じる温度に対応する）との縦距離

最終ダイレーション：凍結終了時の長さ変化 D 点と +18.5°C から 0°C の線の延長線上で -18.5°C に対応する点 H との縦距離



ΔV : Residual Strain D_t : Transient Dilation D_f : Final Dilation

図-4.7 凍結過程におけるモルタルの温度・長さ変化の一例

示差熱分析とは物質を一定の加熱速度で熱処理する際に生じた物理化学的な変化をそれに伴う熱効果として観測し、温度あるいは時間の関数として記録するものであり、試験供試体の温度とダミー供試体との温度差を時間の関数として記録するものである。モルタル供試体中の水が凍結する際に発生する潜熱により、凍結水が多いほど示差熱面積が大きくなる。

XYレコーダーのY軸に示差熱を、X軸は時間軸とし、1mm/minのチャートスピードで時間掃引した。XYレコーダーに記録された図-4.8に示すような示差熱曲線部をトレーシング紙にトレースした後、その部分をはさみで切り取りmgの単位まで質量を測定し、予め求めた係数により等価凍結水量($\mu\text{V}\cdot\text{min}$)を求めた。

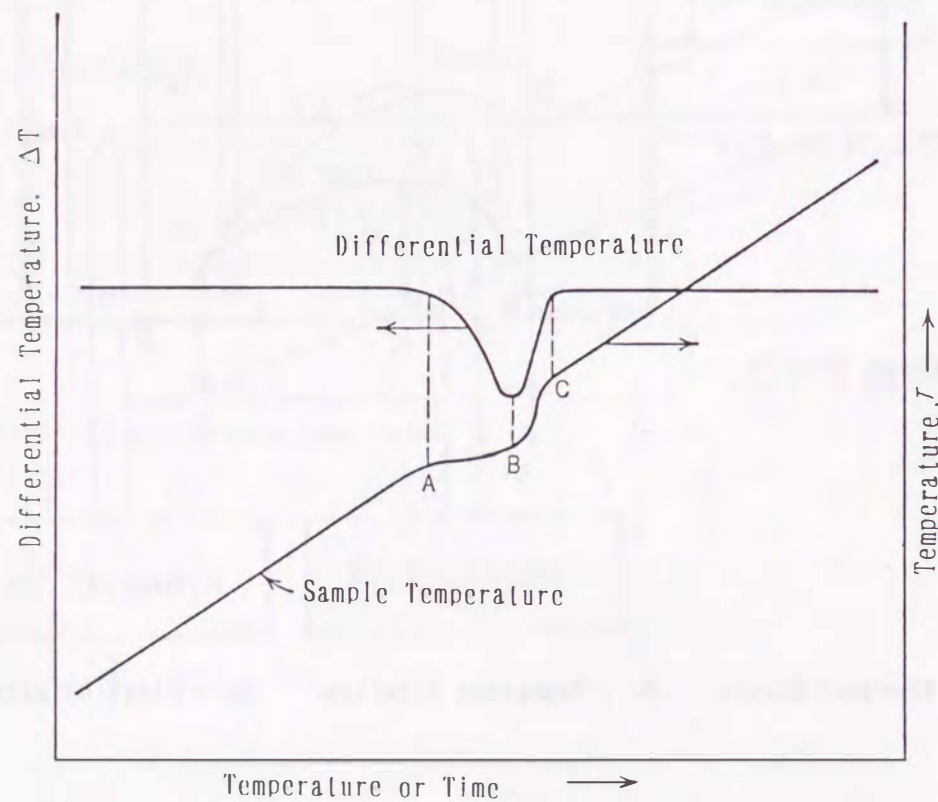


図-4.8 凍結過程におけるモルタル供試体およびダミー供試体の温度と示差熱

4) モルタル供試体のダイレージョンおよび示差熱分析による等価凍結水量

シリーズIにおけるモルタル供試体の温度・長さ変化関係を図-4.9に示す。温度・長さ変化関係より得られたダイレージョン値を表-4.8に、示差熱分析によって求めた等価凍結水量等を表-4.9に示す。

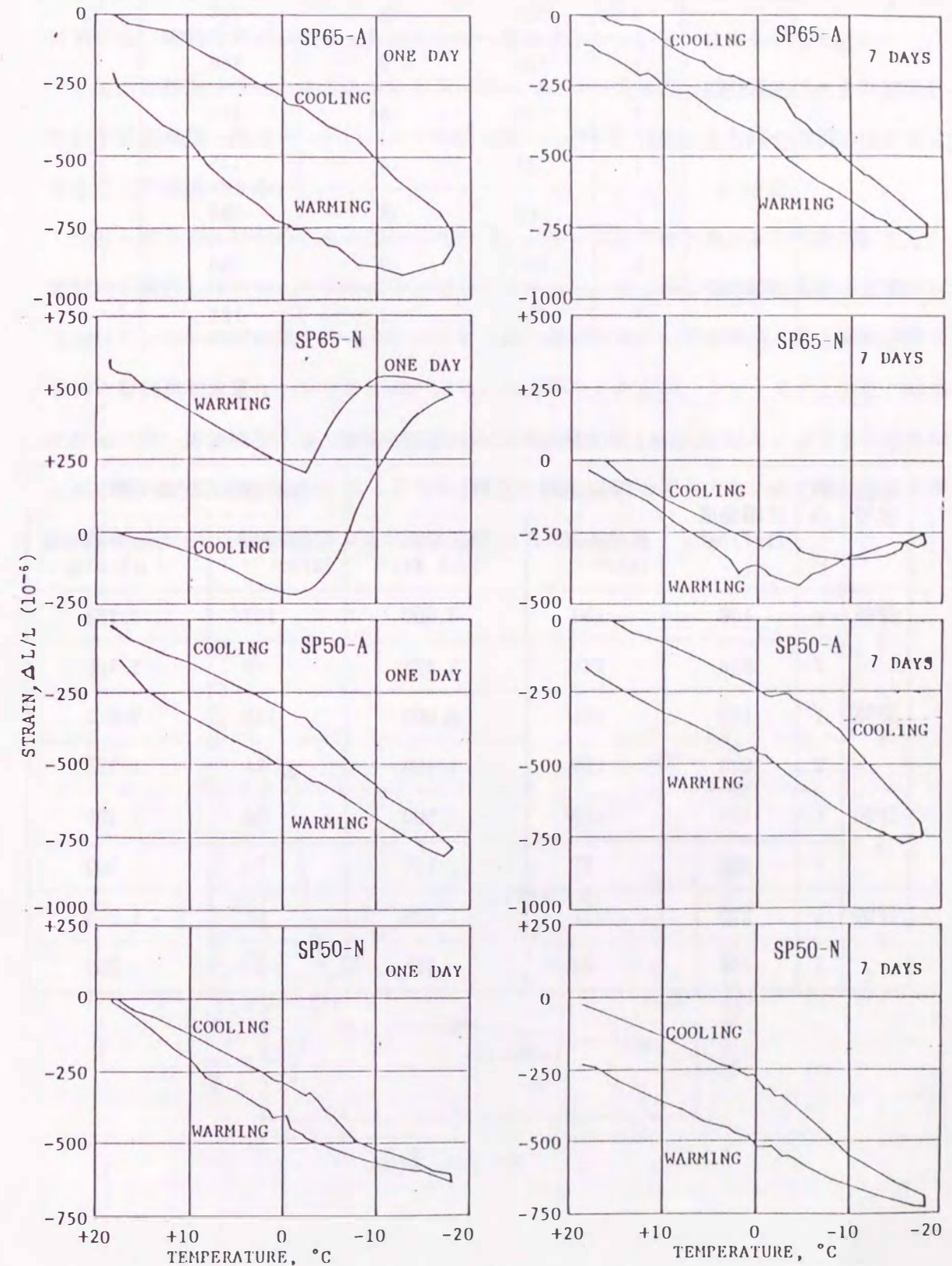


図-4.9 水セメント比、空気量の異なるモルタル供試体の温度・長さ変化関係

表-4.8 モルタル供試体の温度・長さ変化関係より求めたダイレーション

配合記号	材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	D _c (10 ⁻⁶)	D _r (10 ⁻⁶)
SP65-A	1	108	31	-169
	7	259	38	-213
SP65-N	1	162	919	888
	7	340	56	310
SP50-A	1	184	13	-175
	7	360	38	-263
SP50-N	1	235	19	-50
	7	404	13	-131

表-4.9 示差熱分析における測定結果

配合記号	材令 日	圧縮強度 (kgf/cm ²)	凍結過程示差熱分析		融解過程示差熱分析	
			継続時間 (min)	等価凍結水量 (μ V min)	継続時間 (min)	等価凍結水量 (μ V min)
SP65-A	1	108	130	3,000	147	4,188
	7	259	127	1,125	72	1,125
SP65-N	1	162	144	2,000	112	2,875
	7	340	168	1,125	64	1,375
SP50-A	1	184	119	1,500	68	1,438
	7	360	37	125	74	500
SP50-N	1	235	137	1,625	68	1,375
	7	404	22	125	31	250

シリーズIの試験結果の範囲で典型的な凍結膨張を示したのは水セメント比が大きく空気泡を連行していない材令1日のモルタル供試体SP65-Nである。その最終ダイレーションは約 900×10^{-6} である。この配合の供試体は材令7日においても約 310×10^{-6} の最終ダイレーションを示した。水セメント比65%でも空気泡を連行したモルタル供試体は材令1日における一時的なダイレーションは小さく、最終ダイレーションは負を示した。

一方、示差熱分析による等価凍結水量は表-4.9より空気泡連行の有無にはあまり関係がないが単位水量（水セメント比は大きいほど多い）が多いほど、また材令が若いほど多くなることが確認できる。

シリーズIでは材令の刻みが荒かったので、シリーズIIでは水セメント比を65%とし、空気泡を連行しないモルタル供試体の材令1日から14日までの等価凍結水量を示差熱分析で調べた。その測定結果を図-4.10に示す。凍結過程で求めた等価凍結水量と融解過程で求めた等価凍結水量にかなりの相違が認められる場合もあるが、シリーズIと同様に材令の経過に伴い等価凍結水量の減少が明瞭に認められる。若い材令ではセメントと水の水和反応の進行が遅く自由水が多量に存在すること、また間隙の径も大きいので凍結点降下が小さいことなどが等価凍結水量の大きい原因と考えられる。

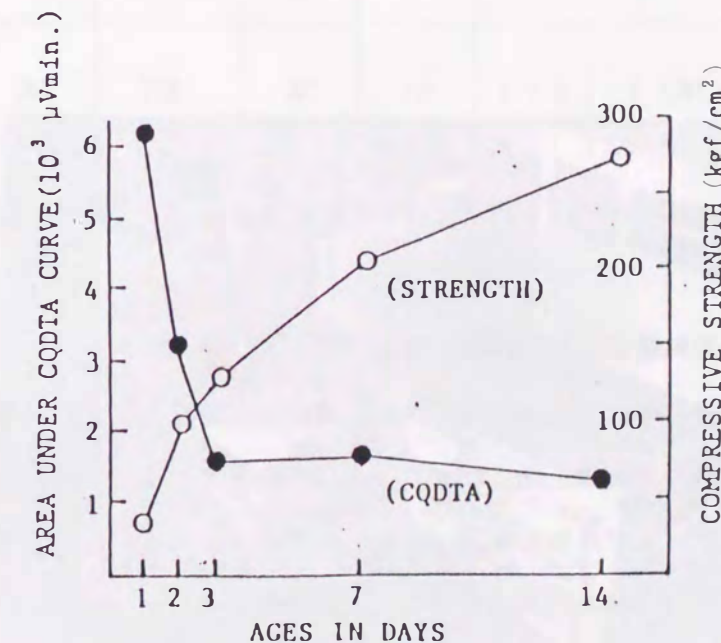


図-4.10 材令経過に伴うモルタル供試体の圧縮強度および等価凍結水量

4.3.3 凍結融解過程におけるコンクリートの温度・長さ変化関係および等価凍結水量の測定 (その1)

1) 使用材料およびコンクリートの配合

セメントには普通ポルトランドセメント(比重3.17)を使用し細骨材として川砂(比重2.53、吸水率1.70%)、粗骨材として角閃岩碎石(最大寸法15mm、比重2.97、吸水率0.67%)および人工軽量骨材(最大寸法15mm、造粒型、比重1.52、吸水率10.7%)を使用した。図-4.11に両粗骨材の細孔径分布を示す。角閃岩碎石に比べ、人工軽量骨材の総細孔容積が著しく大きく、吸水率の大きい原因であることが分る。コンクリートは普通骨材コンクリートKと人工軽量骨材コンクリートNの2種類でいずれもAEコンクリートである。表-4.10にコンクリートの示方配合を示す。なお、両コンクリートにおける単位粗骨材容積は同一である。

表-4.10 コンクリートの示方配合

配合 番号	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の 範 囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単 位 量 (Kg/m ³)		
						セメント	細骨材	粗骨材
K	15	10 ± 2	6 ± 1	55	38	327	631	1209
N	15	18 ± 2	6 ± 1	55	38	327	631	619

注：Kは普通骨材コンクリートを、Nは人工軽量骨材コンクリートを表す。

2) 長さ変化および示差熱測定用供試体の作製方法

コンクリート供試体は7.5 × 15cmの円柱である。凍結融解過程の長さ変化測定のためφ6 × 45mmのインパール棒を供試体上面に25mm、下面に35mm埋めこんだ。インパールの熱膨張係数は20℃付近で0.1 × 10⁻⁶/℃と非常に小さいのでこれを利用した。示差熱測定用の熱電対はCA(クロメルアルメル)あるいはCC(銅コンスタンタン)でこれをコンクリート供試体とダミー供試体の中心部に埋設した。なお、ダミー供試体には水セメント比0.25でセメント砂比(質量比)1.0のモルタルで作製した7.5 × 15cmの円柱(材令28日)を用いた。

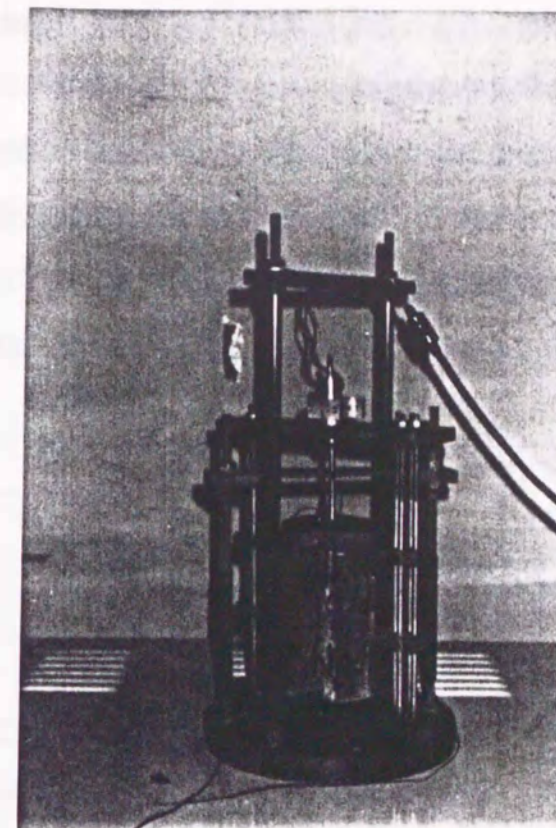


写真-4.1 長さ変化測定用フレーム

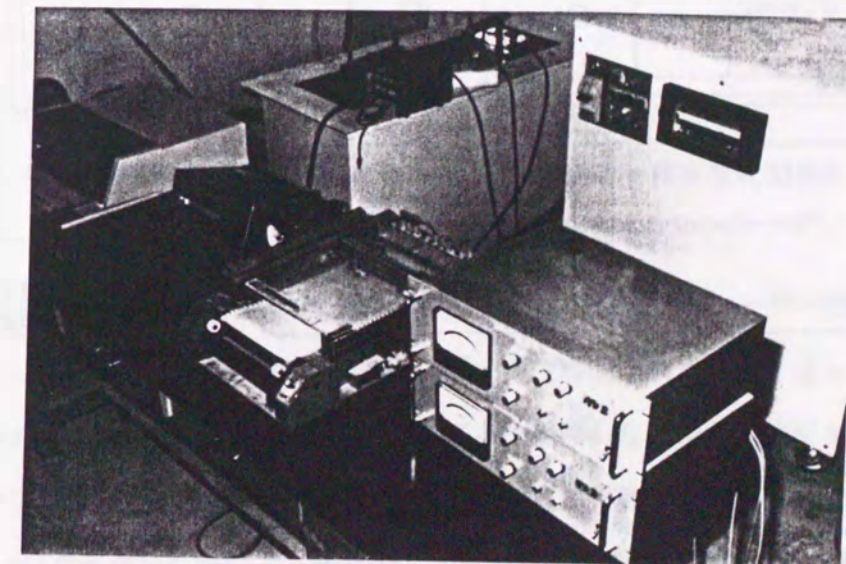


写真-4.2 測定装置の全景

3) 長さ変化および示差熱測定方法

コンクリート供試体の凍結融解過程における長さ変化および示差熱の測定を1、3、7、28日の各材令で開始した。所定の材令に達した供試体をインパール製のフレーム（写真-4.2）にセットし、プログラム式凍結融解試験槽内で供試体中心温度を +20°Cに保持し差動変位計、XYレコーダー、ペンレコーダー等の調整を行った後、-20°Cまで1時間に5°C/hの割合で凍結させ1時間 -20°Cに保った後、+20°Cまで5°C/h割合で融解させた。この凍結融解過程での温度・長さ変化関係および示差熱をそれぞれ、XYレコーダーとペンレコーダーに記録した。試験装置の接続要領を図-4.11に示す。また、試験装置の全景を写真-4.2に示す。

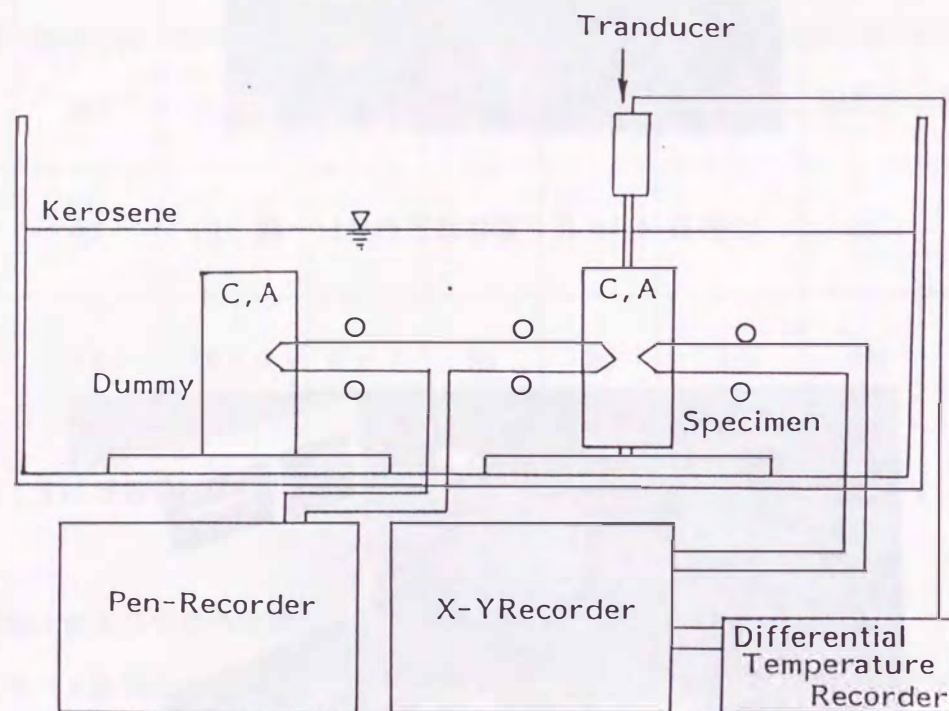


図-4.11 長さ変化および示差熱測定装置

4) ダイレーションおよび等価凍結水量の定義

凍結融解過程におけるコンクリートの温度・長さ変化関係の一例を図-4.12に示す。コンクリート供試体の長さ変化の推移はまず20°C（図のA点）から0°C付近（B）までは直線的に収縮するが、0°C以下になると図のように膨張を生じる場合がある。20°C（A）と膨張開始点（B）を結ぶ直線の延長線と-20°Cでの鉛直線との交点をGとする。-20°Cにおける供試体の実際の長さ変化とGとの差をダイレーション D_r と定義する。

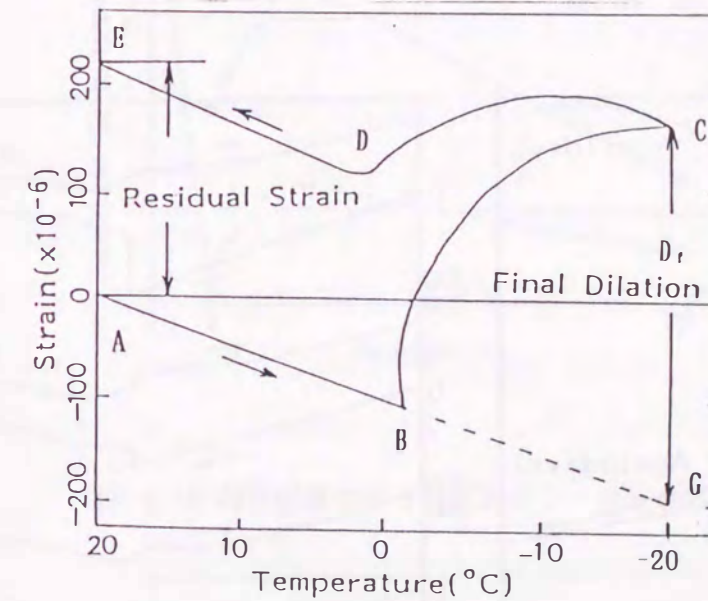
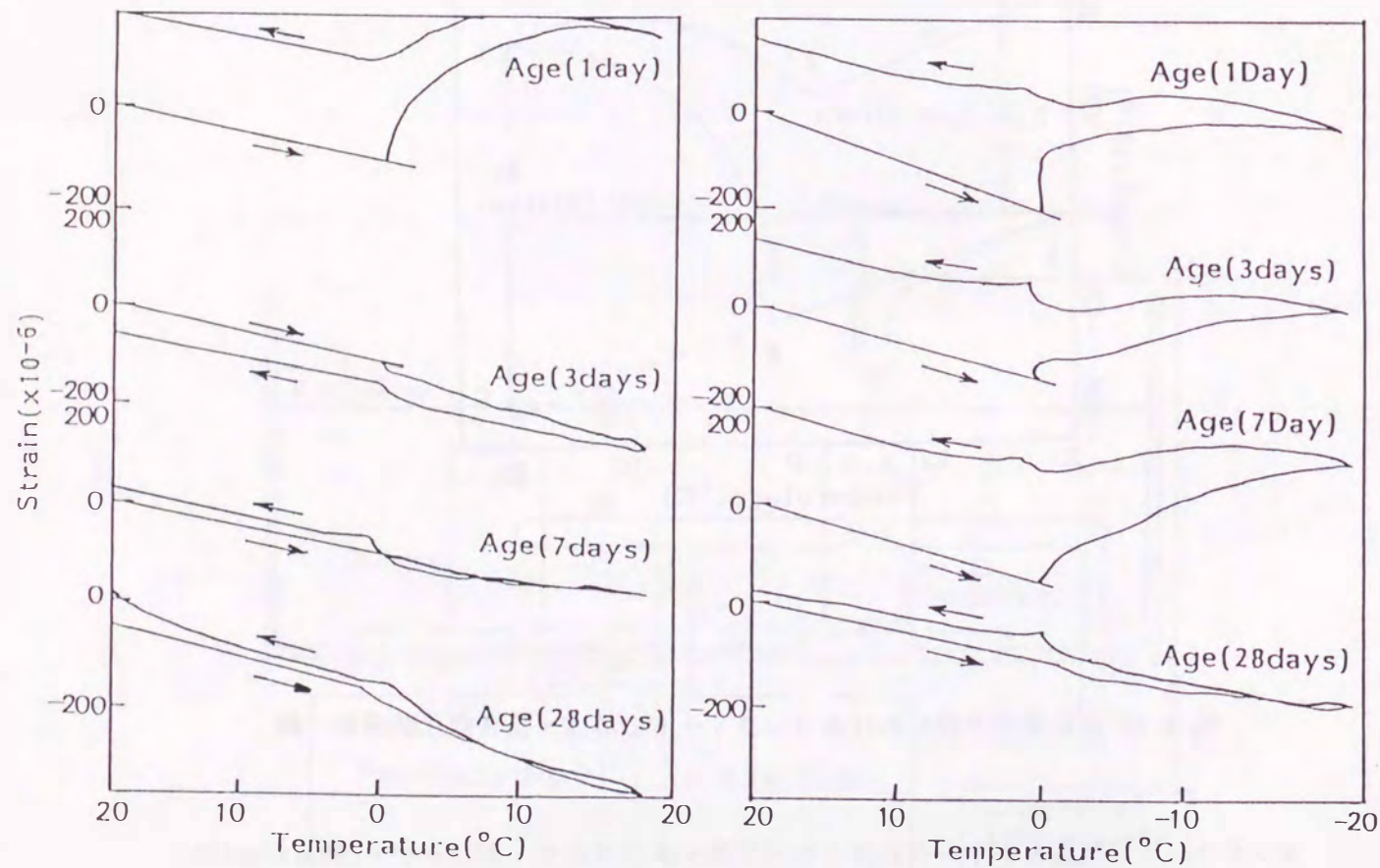


図-4.12 凍結融解過程におけるコンクリートの温度・長さ変化関係の一例

コンクリート供試体とダミー供試体との示差熱を多ペン式サーボコーダー(50 $\mu\text{V}/\text{cm}$)のY軸に記録し、X軸は1mm/min.のチャートスピードで時間掃引させた。従って、記録紙の1 cm^2 は500 $\mu\text{V} \cdot \text{min}$ に相当する。サーボコーダーに記録した示差熱曲線部をトレーシング紙にトレースした後、ハサミで切り取りその重量を自動天秤でmgの単位まで測った。トレーシング紙の1 cm^2 の重量は4.04mgであったので示差熱曲線部の面積はその切り取った重量を4.04で除して求められる。この示差熱曲線部の面積を等価凍結水量 ($\mu\text{V} \cdot \text{min}$)と定義する。

5) 実験結果および考察

凍結融解過程におけるコンクリートの温度・長さ変化関係を図-4.13 に示す。図-4.13 より材令7日の角閃岩コンクリートおよび人工軽量骨材コンクリートの線膨張係数を冷却過程で求めると、それぞれ 9.1×10^{-6} 、 9.4×10^{-6} となる。コンクリートの線膨張係数は骨材の品質、骨材量などにより異なるが、通常の温度変化の範囲において $7 \sim 13^{-6} / ^\circ\text{C}$ であることから、測定値は妥当な値と考えられる。ダイレーションが生じたのは角閃岩コンクリートの材令1日と人工軽量骨材コンクリートの材令1, 3, 7日の場合である。



(a) 角閃岩コンクリートK

(b) 人工軽量骨材コンクリートN

図-4.13 各材令におけるコンクリートの温度・長さ変化関係

材令に伴うダイレーションおよび残留ひずみをそれぞれ、図-4.14、図-4.15 に示す。

全体的に若材令ほどダイレーションと残留ひずみが大きい傾向が認められる。ダイレーションと残留ひずみの関係は図-4.16 に示すようにほぼ、比例関係にある。凍結融解の繰り返しによる劣化を表す指標として長さ変化（残留ひずみの累計）の有用性を前節4.3 で記した。1サイクルの凍結融解における供試体の長さ変化を連続的に測定した本研究結果からも融解後の長さ変化を測定する意義が認められる。

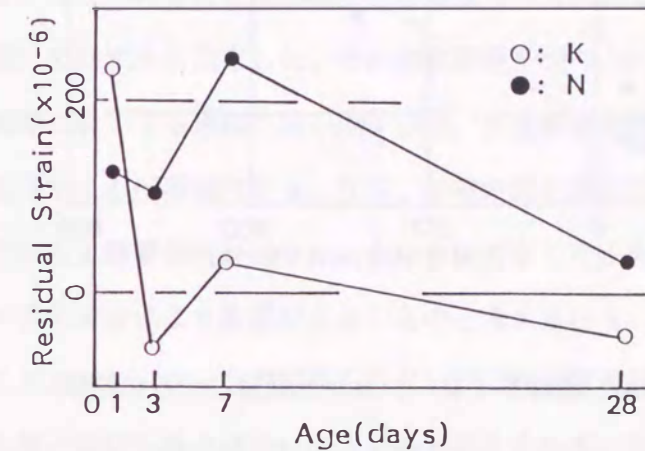


図-4.14 材令経過に伴う最終ダイレーションの推移

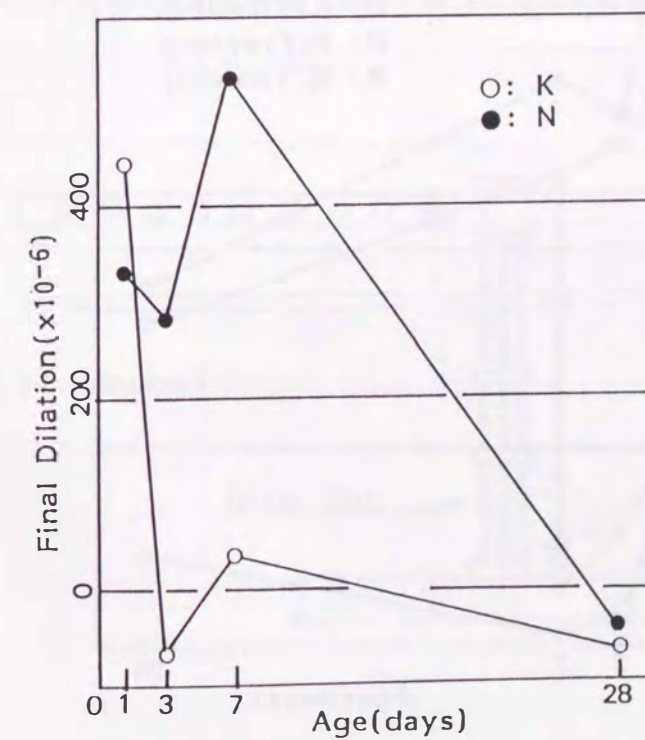


図-4.15 材令経過に伴う残留ひずみの推移

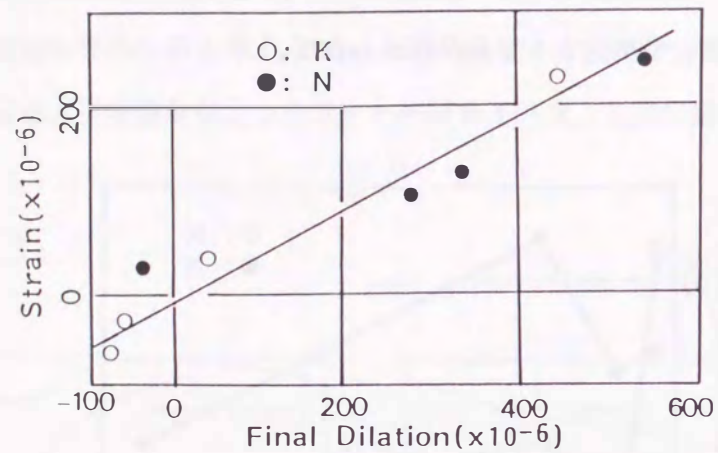


図-4.16 最終ダイレーションと残留ひずみの関係

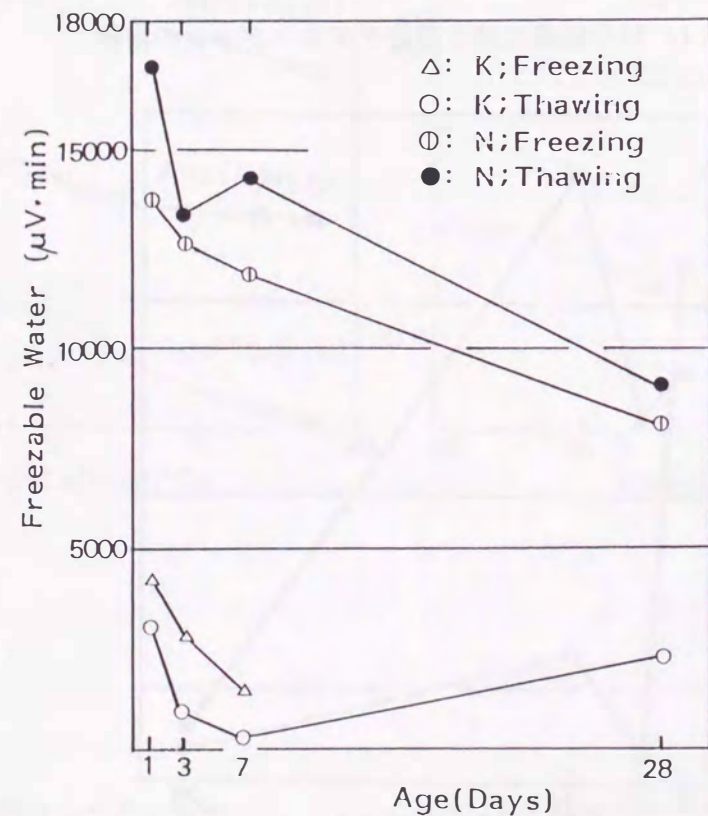


図-4.17 材令経過に伴う凍結水量の推移

図-4.17 に示差熱分析より得られた等価凍結水量 ($\mu V \cdot \text{min}$)を示す。角閃岩コンクリートおよび人工軽量骨材コンクリートにおいて、材令経過に伴う等価凍結水量の減少が認められる。これは材令経過に伴いセメントの水和反応が進行し、未水和水が減少する傾向に対応している。

一方、両コンクリートの等価凍結水量には大きな開きが認められる。この原因は両粗骨材の吸水率に大きな差があるためと考えられる。すなわち、吸水率の大きい人工軽量骨材中の水がかなり凍結するものと思われる。そこで、図-4.18 に示す骨材のひずみ測定装置を試作し、コンクリートの場合と同じ凍結融解過程での角閃岩ならびに人工軽量骨材（いずれも表乾状態）のひずみを測定した。その測定結果を図-4.19 に示す。図-4.19 において 0°C 以下の範囲においても角閃岩は収縮するが、人工軽量骨材は吸水された水の凍結により膨張挙動を示すことが確認できる。なお、骨材の細孔径分布を図-4.20 に示す。

材令7日までの人工軽量骨材コンクリートにおいて生じた正のダイレーションの大部分は軽量骨材中の水の凍結による影響が大きいものと考えられる。しかしながら、材令28日になるとほとんどダイレーションが認められない。これは材令経過に伴うモルタル部の緻密化とモルタル部の凍結水量の減少に依るものと考えられる。以上の測定結果は一般に知られている普通コンクリートと軽量コンクリートの耐凍害性の相違や初期材令での凍害の危険性を示している。今後の検討が必要であるが、従来の凍結融解試験に比べ比較的短時間で、コンクリートの耐凍害性を評価できる試験方法として有望である。

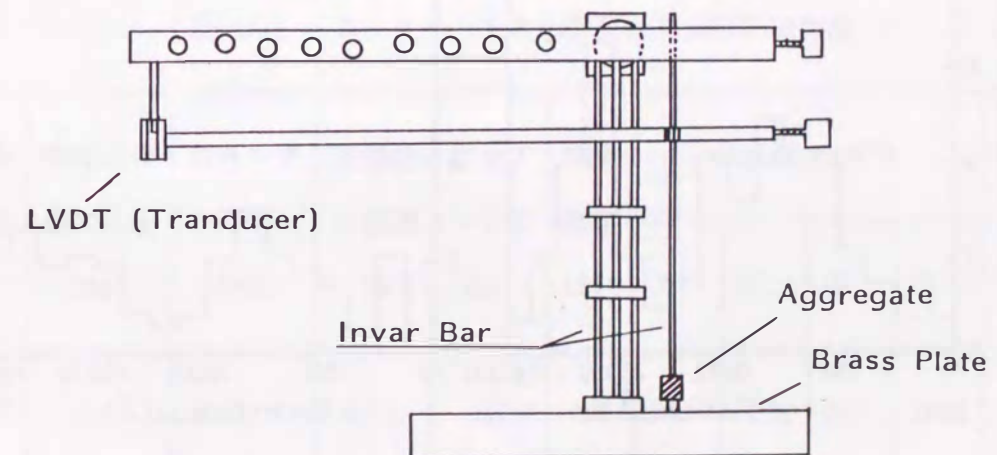


図-4.18 骨材粒のひずみ測定装置

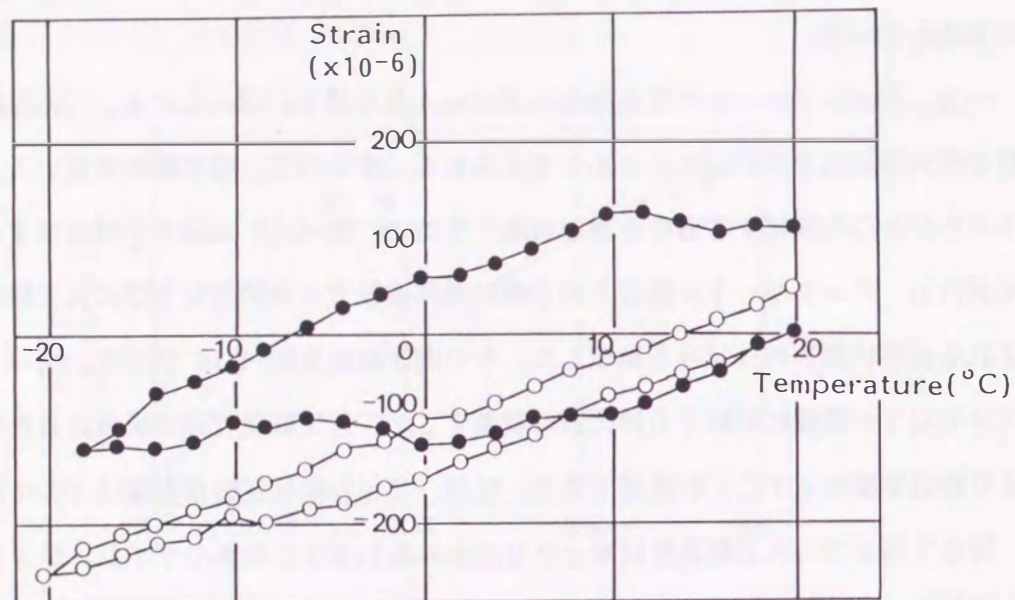


図-4.19 骨材粒の温度・ひずみ関係

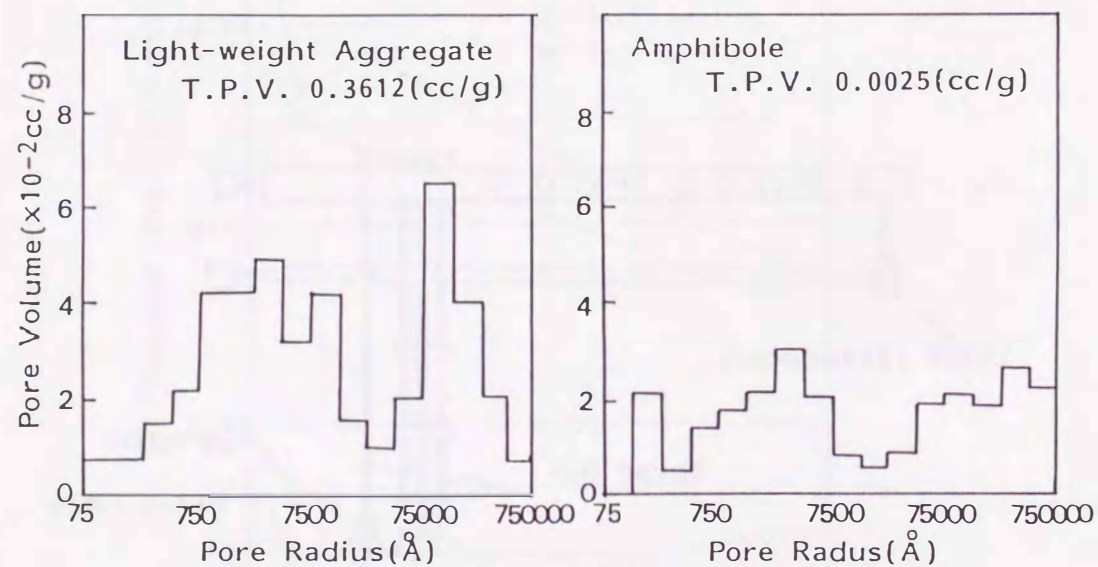


図-4.20 骨材の細孔径分布

4.3.4 凍結融解過程におけるコンクリートの温度・長さ変化関係および等価凍結水量の測定(その2)

1)目的

前節において、コンクリートの温度・長さ変化関係と並行して、示差熱分析により測定した等価凍結水量はコンクリートの凍結融解過程での挙動を考察する上で有用であるが、その単位は記録紙上の示差熱部面積($\mu\text{V} \cdot \text{min}$)である。したがって、実際にどれだけの水量が凍結しているのかは不明である。ここでは、等価凍結水量($\mu\text{V} \cdot \text{min}$)と実際の凍結水量を関連づけることを目的に強制乾燥した後、吸水させたコンクリート供試体の示差熱分析を行った。セメント硬化体のキャピラリー水もゲル水も完全に失うが、強度低下は起こらない温度として105℃を、さらに水和生成物の保有水分の大部分を失い強度低下が生じる温度として600℃を乾燥温度とした。

2)使用材料およびコンクリートの配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメント(比重3.17)である。細骨材には十分、除塩した海砂(比重2.61、吸水率1.50%)を、粗骨材には角閃岩碎石(最大寸法15mm、比重2.99)と人工軽量骨材(最大寸法15mm、比重1.48)の2種類を用いた。表-4.11にコンクリートの示方配合および材令28日における圧縮強度を示す。なお、両コンクリートにおける粗骨材容積は同一とした。

コンクリートの打ち込みは春と夏の2回行ったが、角閃岩粗骨材は1日間吸水させたものを、人工軽量骨材は7日間吸水させたものを用いた。各骨材の使用時の吸水率を表-4.12に示す。

表-4.11 コンクリートの示方配合および圧縮強度

配合 記号	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m^3)				圧縮強度 (kgf/cm^2)
						W	C	S	G	
K T	15	10 ± 2	6 ± 1	55	38	180	327	631	1209	290
N R	15	18 ± 2	6 ± 1	55	38	180	327	631	619	210

表-4.12 粗骨材の吸水率

骨材の種類	1回目	2回目
角閃岩	0.50 %	0.62 %
人工軽量骨材	25.05 %	27.51 %

3) 長さ変化および示差熱測定方法

コンクリート供試体はφ10×17.5cmの円柱である。図-4.21に示すように、長さ変化測定用にφ6×45mmのインバル棒を供試体上面に2.5cm埋め込み、下面にも3.5cm埋め込んだ。また、示差熱測定用熱電対CAを耐熱ガラス管(外径:2.4mm、内径:2.2mm)に通し、これをアルミニウム管にいれ、供試体中心部に埋め込んだ。

普通骨材コンクリートKTおよび人工軽量骨材コンクリートNRの供試体(一組3本)を材令28日まで水中で養生(20℃)した後、105℃および600℃で、それぞれ24時間および3時間乾燥した。乾燥後、3時間吸水させた2本の供試体を長さ変化および示差熱測定用とし、残り1本は吸水させずにケロシン槽に漬け、ダミー供試体とした。乾燥した供試体を吸水させると30分程度までは吸水量の増加が大きいが、その後の増加は徐々に小さくなる。本実験では3時間で吸水を打切った。

供試体をインバル製のフレーム(写真-4.2)にセットし、プログラム式凍結融解試験槽内で供試体中心温度を+20℃に保持した後、5℃/hの速度で-20℃まで冷却し1時間、-20℃に保った後、+20℃まで5℃/hの速度で融解させた。この凍結融解過程における長さ変化および示差熱を前節4.3.3と同様な方法で測定した。なお、実験は作製日が異なる供試体について2回行った。

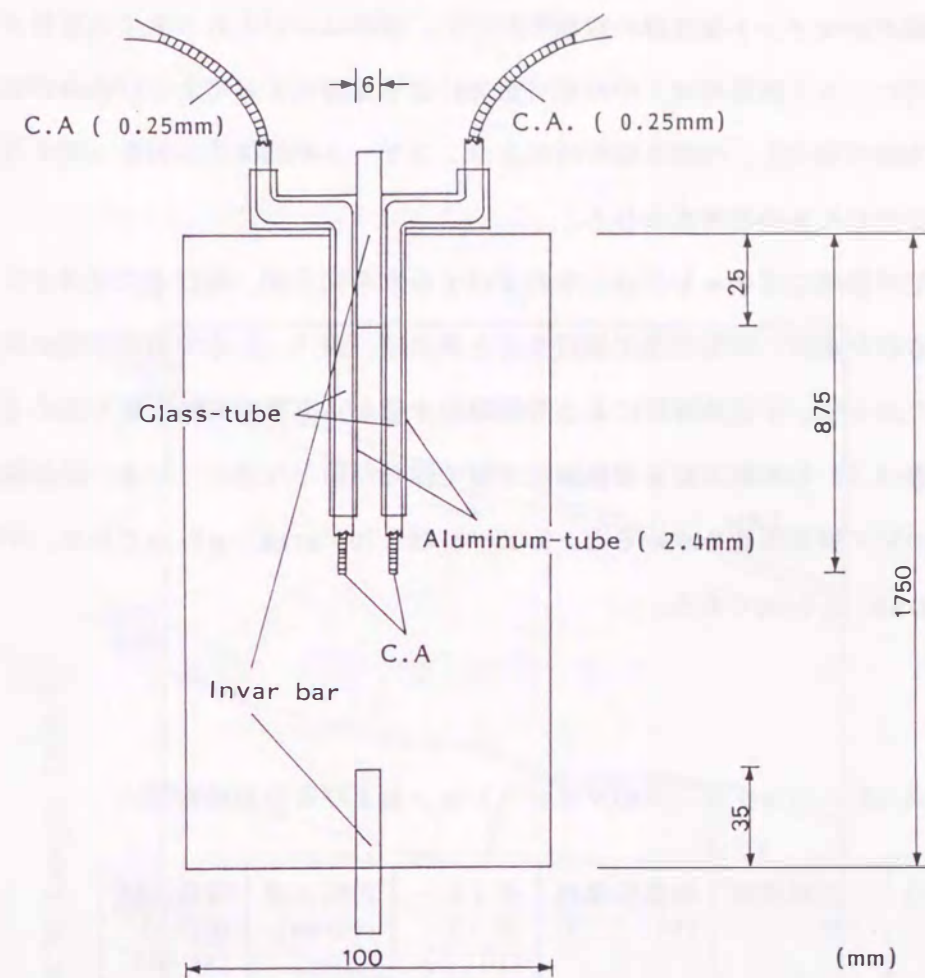


図-4.21 長さ変化および示差熱測定用供試体

4) 実験結果および考察

表-4.13に凍結過程でのコンクリート供試体の線膨張係数、ダイレーション、乾燥後の再吸水量ならびに等価凍結水量を示す。凍結融解過程における温度・長さ変化関係については1回目の試験結果(KT-1, KT-2, NR-1, NR-2, KT-3, KT-4, NR-3, NR-4)を図-4.22に示す。

105℃で乾燥後、吸水させたコンクリート供試体は負もしくは正であっても 70×10^{-6} 程度(NR-5)のダイレーションが生じたに過ぎないが、600℃乾燥後に吸水させた供試体はすべて正のダイレーションを生じた。特に、ダイレーションが大きかったのは人工軽量骨材コンクリートである。

105℃での加熱ではキャピラリー水およびゲル水を失うが、セメント硬化体の弱体化は起こらず、6%程度の空気量を連行しているため再吸水した水分が凍結しても大きな正のダイレーションは生じなかったものと考えられる。

一方、600℃での加熱では Al_2O_3 および Fe_2O_3 の化合物ならびにカルシウムシリケート水和物からの脱水がセメント硬化体の収縮を起し、微細なひびわれの発生は免れず、さらに、骨材（特に、人工軽量骨材）中の水分蒸発による爆裂によってもひびわれがはいり、再吸水する水量が増大し、凍結水量の増加とコンクリートの弱体化が相まって大きなダイレーションを生じたものと考えられる。

いま、105℃での加熱ではキャピラリー水およびゲル水を失うが、再び水に浸けることにより再吸水された水は-20℃で全て凍結するとすれば、表-6.13 中の再吸水量が凍結水量となる。したがって、示差熱解析による等価凍結水量から実際の凍結水量を求めるための換算係数は表-4.13 の再吸水量を等価凍結水量で除した値となる。いま、乾燥温度105℃の場合について換算係数を求めると、 $3.05 \sim 8.48 \times 10^{-2} \text{ gram} / \mu\text{V}\cdot\text{cm}$ であり、平均値は $4.95 \times 10^{-2} \text{ gram} / \mu\text{V}\cdot\text{cm}$ である。

表-4.13 コンクリートのダイレーションおよび等価凍結水量

記号	乾燥温度 (°C)	線膨張係数 ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	ダイレーション (10 ⁻⁶)	再吸水量 (gram)	等価凍結水量 (uV min)
KT-1	105	9.47	-80	106	3.475
KT-2	105	8.24	-73	106	3.401
NR-1	105	7.50	-33	158	3.965
NR-2	105	10.17	-40	158	4.168
KT-3	600	9.33	+33	236	7.990
KT-4	600	10.67	+33	236	7.980
NR-3	600	7.84	+267	327	15.114
NR-4	600	11.23	+253	327	15.609
KT-5	105	9.91	-133	111	2.396
KT-6	105	-	-	111	1.748
NR-5	105	9.63	+67	107	1.718
NR-6	105	6.33	-13	107	1.262
KT-7	600	-	+47	238	4.153
KT-8	600	-	+67	238	4.356
NR-7	600	11.33	+167	169	9.995
NR-8	600	9.00	+260	169	9.446

備考：-の印は妥当な結果でないものと判断したものである。

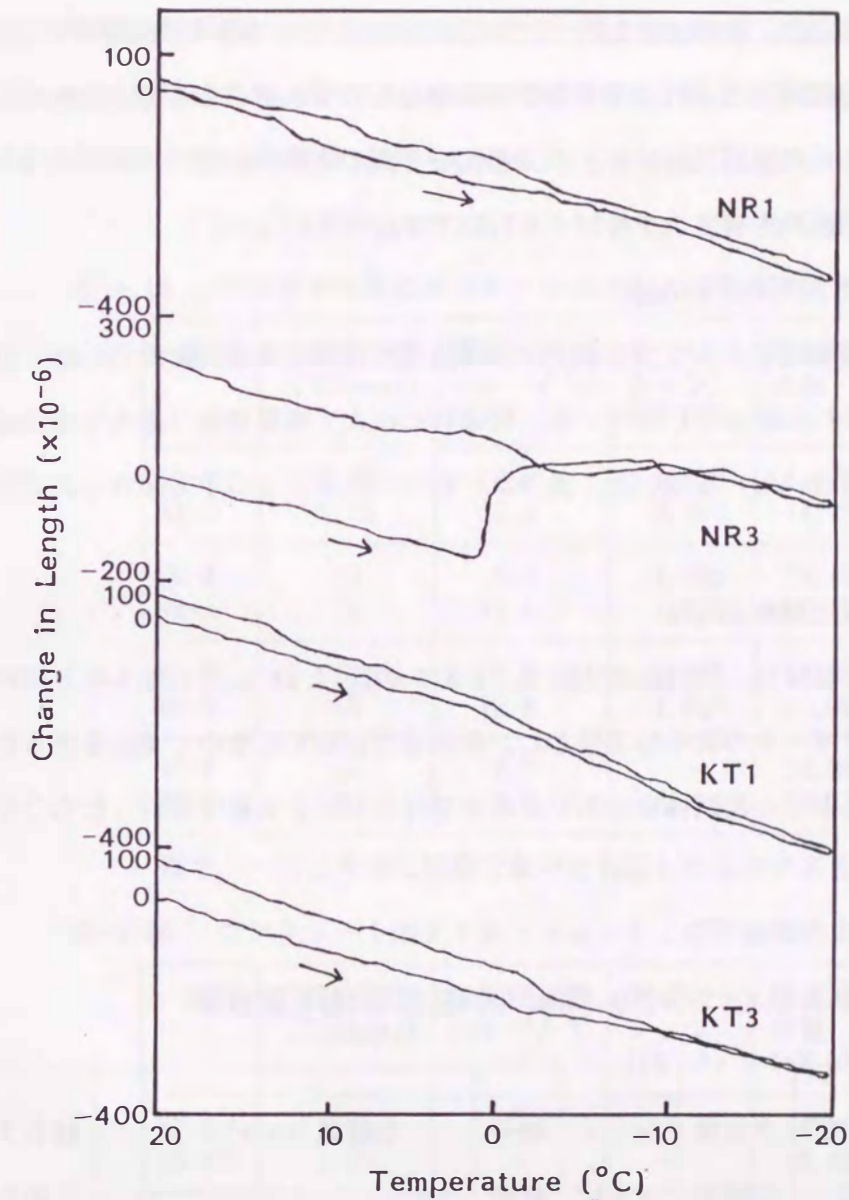


図-4.22 コンクリートの凍結融解過程における温度・長さ変化関係

4.3.5 凍結速度がコンクリートの温度・長さ変化関係および等価凍結水量に及ぼす影響

1) 試験の目的

ASTM C 666の凍結融解試験方法における正規の凍結融解サイクルは、供試体の温度を交互に4.4 °Cから-17.8 °C (40° F から 0° F) に低下させ、ついで-17.8 °Cから4.4 °C (0° F から40° F) に上昇させ、1サイクルに要する時間は2時間以上、4時間以内とする。またこの時間の25%以上を融解のために用いる。したがって、凍結のための時間は1.5~3.0 時間程度になり、凍結速度は約15.0~7.5°C/hour となる。しかしながら、自然の気象条件下での凍結速度はこれよりもかなり緩慢なものである。そこで、室内における凍結融解試験結果と戸外暴露試験結果との関連性を考慮する際に必要な、コンクリートの凍害に及ぼす凍結速度の影響度を検討する目的で本研究を行った。

2) 使用材料およびコンクリートの配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメント (比重3.17) である。細骨材には十分、除塩した海砂 (比重2.61、吸水率1.50%) を、粗骨材には人工軽量骨材 (最大寸法15mm、比重1.48、7日吸水率26.8%) を用いた。表-4.14 にコンクリートの示方配合および圧縮強度を示す。

3) 長さ変化および示差熱測定方法

コンクリート供試体はφ10×17.5cmの円柱で、4.3.4 の図-4.21 に示したものと同様である。試験時のコンクリートの材令は7日とし、それまでは20°Cの水中で養生を行った。示差熱分析用に用いるダミー供試体には20°Cの水中で材令28日まで養生を行ったものを用いた。

表-4.14 コンクリートの示方配合および圧縮強度

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単位量(kg/m ³)				材令7日 圧縮強度 (kgf/cm ²)
					W	C	S	G	
15	10 ± 2	2 ± 1	55	38	190	346	685	634	195

材令7日の供試体を水中から取り出し、表面の水を拭き取った後、インパール製のフレームにセットし、プログラム式凍結融解試験槽内で1サイクルの凍結融解過程におけるコンクリート供試体の長さ変化および示差熱の測定を行った。供試体中心温度を+20°Cに保持した後、-20°Cまで1.25、5、10、15および30°C/hour の4通りの凍結速度で凍結させ-20°Cに1時間保った後、凍結速度と同じ速度で+20°Cまで融解させた。凍結速度1.25 °C/hour は苫小牧における戸外暴露供試体中心温度記録より算出したものに相当し、ASTM C 666の凍結融解試験における凍結速度は7.5 ~15.0°C/hour の範囲である。したがって30°C/hour は極端に大きい場合である。測定は作製日が異なる供試体について2回行い、各回とも同時に2本の供試体の測定を行った。

表-4.15 コンクリートのダイレーションおよび等価凍結水量 (1回目)

記号	凍結速度 (°C/hour)	線膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)	ダイレ ーション (10 ⁻⁶)	等価凍結 水量 (uV min)
NR-1	1.25	9.3	1,733	14,223
NR-2	1.25	10.9	2,067	14,371
NR-3	5	8.4	1,825	15,495
NR-4	5	12.1	1,750	17,772
NR-5	15	8.9	1,867	12,693
NR-6	15	10.8	1,913	11,099
NR-7	30	6.7	-	20,366
NR-8	30	7.6	-	16,733

備考：-印は妥当な結果でないと判断したものである。

表-4.16 コンクリートのダイレーションおよび等価凍結水量 (2回目)

記号	凍結速度 (°C/hour)	線膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)	ダイレ ーション (10 ⁻⁶)	等価凍結 水量 (uV min)
NR-9	1.25	-	-	14,069
NR-10	1.25	-	-	13,495
NR-11	5	8.3	540	15,183
NR-12	5	11.1	833	14,812
NR-13	15	10.3	667	13,010
NR-14	15	9.7	713	11,579
NR-15	30	10.3	780	17,950
NR-16	30	9.0	853	16,465

備考：-印は妥当な結果でないと判断したものである。

4) 実験結果および考察

表-4.15 および表-4.16 にコンクリート供試体の凍結過程における線膨張係数、ダイレクションならびに等価凍結水量を示す。

凍結融解過程における温度・長さ変化関係については1回目の測定結果より、凍結速度1.25°C/hour と15°C/hour の場合 (NR-1、NR-2、NR-5、NR-6)を図-4.23 および図-4.24 に示す。凍結速度1.25°C/hour および15°C/hour のいずれの場合も、同時に測定した2本の供試体の温度・長さ変化関係は良く類似していることが認められる。

温度・長さ変化関係において、凍結膨張開始から-20°Cに対応するダイレクションに到達する履歴曲線に凍結速度の影響が認められる。すなわち、凍結速度が1.25°C/hour の場合には凍結膨張が漸増しているが、15°C/hour の場合には-0.5°C付近から-2°Cの範囲で急激に増大している。しかしながら、ダイレクションの平均値はそれぞれ、 1.900×10^{-6} および 1890×10^{-6} で、差はほとんど認められない。表-4.15 および表-4.16 に示す2回の測定結果より凍結速度がダイレクションに及ぼす影響は小さいと言える。

表-4.15 および表-4.16 に示す凍結過程における等価凍結水量の結果より、凍結速度と等価凍結水量との間にも関連性はないことが認められる。

本研究の範囲内で、飽水状態のコンクリートについては凍結速度がダイレクションおよび等価凍結水量に及ぼす影響は認められないことが明らかとなった。しかしながら、凍結速度が大きい場合には供試体内部と表面部との温度差による温度応力の発生も考えられるので、今後の検討が必要である

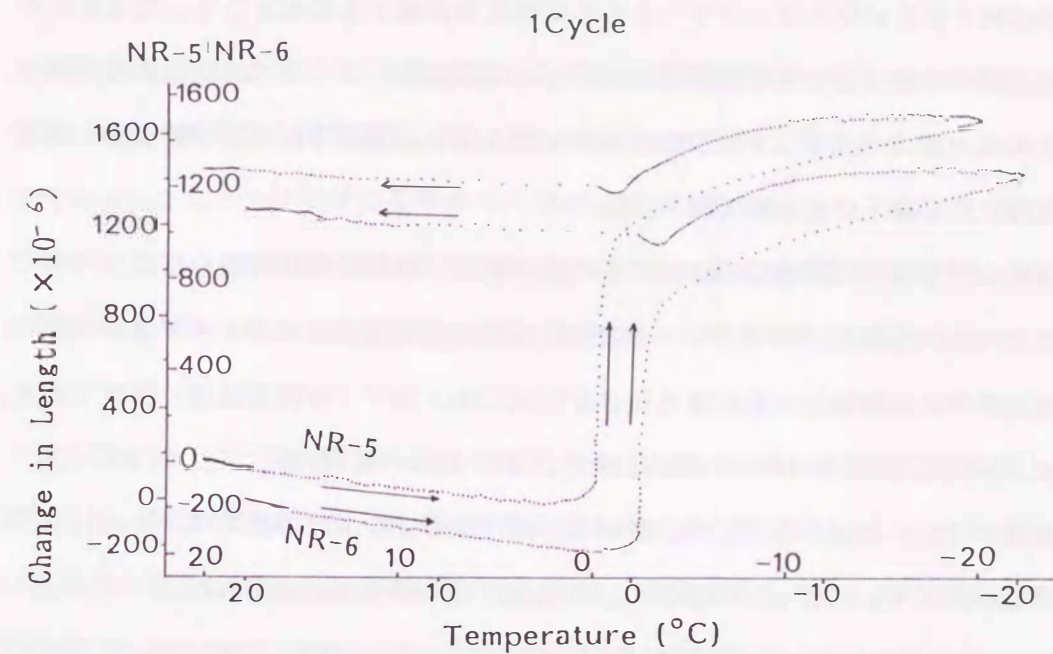


図-4.23 凍結融解過程における温度・長さ変化関係
(凍結速度: 1.25°C/hour の場合)

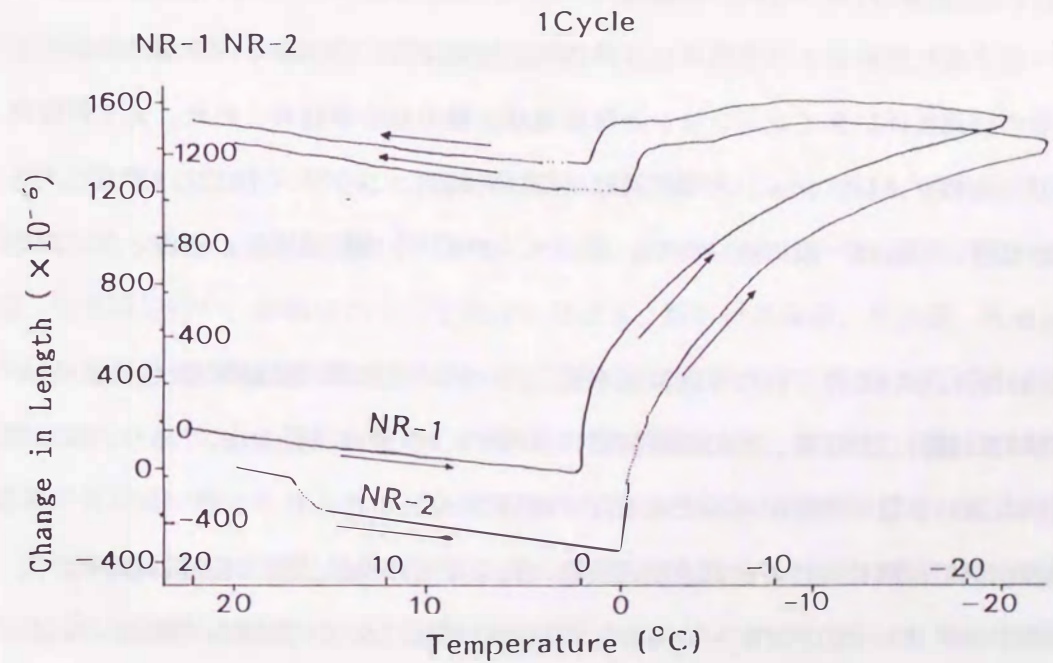


図-4.24 凍結融解過程における温度・長さ変化関係
(凍結速度: 15.0°C/hour の場合)

4.4 本節の要約

凍結融解の繰り返しに伴うコンクリートの劣化程度を評価する指標として、長さ変化が適用出来るか検討することを主な目的として行った実験結果、ならびに凍結融解過程におけるモルタルおよびコンクリートの挙動を温度・長さ関係と等価凍結水量の観点から検討して得られた知見を以下にまとめて記す。

- 1) 凍結融解の繰り返しに伴うコンクリートの長さ変化は相対動弾性係数や質量百分率に比較してばらつきが少なく、コンクリートの劣化指標として適切であることが分かった。ちなみに相対動弾性係数60%に対応する長さ変化は 1200×10^{-6} (角柱供試体) 程度である。
- 2) 水セメント比65%のNON-AEモルタルは材令1日で 900×10^{-6} 程度、7日で 300×10^{-6} 程度の大きなダイレーションを示した。しかし、同一水セメント比のAEモルタルは材令1日であってもそのダイレーションは小さく、空気泡存在の効果が認められた。
- 3) 示差熱分析によるモルタルの等価凍結水量はモルタル配合の単位水量が多い程、また初期材令ほど大きな値が得られ、凍害発生の原因である凍結水量を間接的に示すことが分かった。
- 4) 粗骨材に角閃岩碎石および人工軽量骨材を用いたAEコンクリートの凍結融解過程における温度・長さ変化関係および等価凍結水量の測定結果より、コンクリートもモルタルと同様に材令の経過に伴いダイレーションと等価凍結水量の減少が認められた。人工軽量骨材コンクリートのダイレーションと等価凍結水量は角閃岩コンクリートに比べ著しく大きい測定値となり、これは一般に知られている両コンクリートの耐凍害性の相違と良く対応している。
- 5) 示差熱分析において得られた等価凍結水量 ($\mu\text{V} \cdot \text{min}$) と実際の凍結水量 (gram) との対応を実験的に検討した結果、その換算係数は平均で4.95 gram/ $\mu\text{V} \cdot \text{min}$ であり、ある程度の定量的な凍結水量の把握が可能であることが分かった。
- 6) 急速凍結融解試験における凍結速度と実際の気象下での凍結速度の相違に着目して、凍結速度がコンクリートのダイレーションと等価凍結水量に及ぼす影響を実験的に検討した結果、その影響は小さいことが分かった。

急速凍結融解試験の結果との対応を今後、検討して行く必要があるが、1サイクルの温度・長さ変化関係および示差熱分析による等価凍結水量は凍結融解過程での挙動を極めて良好に反映しているので、コンクリートの耐凍害性を評価する試験方法として利用できるものと思われる。

第5章 総括

本研究は、コンクリートの耐凍害性に対する影響要因の中から主要なものを実験的に確定し、これらを考慮して数値解析的に新しい耐久性指数推定式を求めるとともに、その有用性をコンクリート試験体の長年月戸外暴露試験により実証した。さらに、凍結融解過程でのコンクリートの温度・長さ変化関係および凍結水量の測定方法を確立し、これらが凍害機構の研究手段および耐凍害性の早期判定法として有効であることを示した。

第1章では、本研究の背景と既往の研究および問題点を述べ、本研究の意義と目的を明確にした。既往の研究では、耐凍害性に影響を及ぼす主要な内外的および外的要因を考慮した実用的な耐久性指数の推定式がまだないこと、気象条件を考慮しかつ促進試験との関連性を調べた例が極めて少ないことを示した。また、コンクリートの凍害が長さ変化に反映され、凍害の原因である凍結水量の測定が重要であることが指摘されているが、凍結融解過程の長さ変化および凍結水量を同時に測定出来る装置を製作し、この試験を耐凍害性の早期判定に役立てようとした試みが、我が国では見受けられないことを述べた。以上に示した現状に基づき、本研究の目的を設定した。

第2章では、まずコンクリートの耐凍害性に及ぼすセメント、骨材、混和剤等の品質、養生方法、さらに、単位水量、単位セメント量、水セメント比、空気量等の配合条件を網羅した実験を行い、詳細にわたって検討した結果、粗骨材の種類、空気量、水セメント比が耐凍害性評価の際の重要な要因であることを示した。次に、耐凍害性に及ぼす外的要因の影響についても実験的に検討し、供試体の凍結最低温度、飽水度、塩分環境の有無が耐凍害性評価の際に取り入れるべき重要な外的要因であることを示した。さらに、実験データの多変量解析の結果、耐凍害性に大きい影響を及ぼす内的要因は粗骨材の品質、単位水量、単位セメント量および空気量であることを明らかにするとともに、耐久性指数の推定式を提案し、この推定式による解析結果は他の研究者の実験結果を適用して解析した場合とも良く適合することを示した。また、凍結最低温度、飽水度、塩分環境等の外的要因の影響は内的要因のみによる耐久性指数推定式に各補正係数を乗じる形で考慮できることを明らかにした。

第3章では、軽微な凍結融解作用が生じる大分県の下笠ダムおよびかなり厳しい凍結融解作用が加わる苦小牧市沼の端におけるコンクリート試験体の暴露試験結果を示し、セメント、骨材、混和剤等の品質、単位水量、単位セメント量、水セメント比、空気量等の配合条件および暴露試験条件等がコンクリート試験体の相対動弾性係数の経年変化に及ぼす影響を検討した。その結果、相対動弾性係数はほとんどのコンクリート試験体において低下しておらず、促進試験の場合のように各要因の影響が認められないことを明らかにした。また、この傾向は凍結最低温度、飽水度、塩分環境等に関する補正係数を考慮した耐久性指数推定式により説明できることを示し、推定式の有用性を述べた。

第4章では、凍結融解作用によるコンクリート供試体の劣化指標として、長さ変化が有効であることを示した。次ぎに、重要であるにもかかわらず開発されていなかった凍結融解過程におけるコンクリート供試体の温度・長さ変化関係および示差熱分析による凍結水量を同時に自動的に測定できる新たな装置を製作し、その機構および特徴について述べた。また、開発したこの装置がコンクリートの凍害機構の研究および耐凍害性の早期判定に有効であることを述べた。

第5章では、以上の結果を要約して、総括とした。

参考文献

- 1) Powers, T. C., "A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete", J. ACI, Vol. 41, No. 4, 1944. 2.
- 2) Powers, T. C., "The air requirement of frost-resistant concrete", Proc. Highway Research Board, Vol. 29, 1949.
- 3) Powers, T. C. and Helmuth, R. A., "Theory of volume changes in hardened portland-cement paste during freezing", Proc. Highway Research Board, Vol. 32, 1953.
- 4) Powers, T. C., "Void spacing as a basis for producing air-entrained concrete", J. ACI, Vol. 50, No. 5, 1954. 5.
- 5) Powers, T. C., "Basic consideration pertaining to freezing and thawing test", Proc. ASTM, Vol. 55, 1955.
- 6) Helmuth, R. A., "Dimensional changes of hardened portland cement pastes caused by temperature changes", Proc. Highway Research Board, Vol. 40, 1961.
- 7) Cordon, W. A., "Freezing and thawing of concrete-Mechanisms and control", ACI Monograph, No. 3, 1966.
- 8) Litvan, G., "Phase Transition of Adsorbates IV. Mechanism of Frost Action in Hardened Cement Paste", J. American Ceramic Society, 55(1), 1972.
- 9) Litvan, G., "The Mechanisms of Frost Action in Concrete-Theory and Practical Implications", Proc. of Workshop on Low Temperature Effects on Concrete, pp. 115 ~134, 1988.
- 10) 鎌田英治, "セメント硬化体の微細構造とコンクリートの凍害", コンクリート工学, Vol. 19, No. 11, Nov., pp. 36 ~ 42, 1981.
- 11) Verbeck, G., and Landgren, R., "Influence of physical characteristics of aggregate on the frost resistance of concrete, Proc. ASTM, Vol. 60, 1960.
- 12) MacInnis, C., and Lau, E. C., "Maximum aggregate size effect on frost resistance of concrete, J. ACI, Vol. 68, No. 2, 1971. 2.
- 13) Dunn, J. R., and Hudec, P., "Water, Clay, and Rock Soundness", The Ohio Journal of Science, 66, 1966, pp. 153 ~168
- 14) Swayze, M. A., "More Durable Concrete with Treated cement", Engineering News-Record, Vol. 126, pp. 946 ~949, 1941.

- 15) ACI, "Concrete Containing Air-Entraining Agents-A Symposium", J. ACI, Proc. Vol. 40, No. 6, pp. 509~569, 1944. 6.
- 16) ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete", J. ACI, Vol. 74, No. 12, pp. 573~609, 1977. 12.
- 17) 菅雅弘, 鮎田耕一, 桜井宏, "12種の普通セメントを用いたコンクリートの耐凍害性", 土木学会第42回年次学術講演会, pp. 460~461, 1987.
- 18) 武田昭彦ほか, "コンクリート用骨材の耐久性の調査試験", コンクリート・ジャーナル, Vol. 6, No. 2, pp. 22~30, 1968.
- 19) 三和久勝, "砕石コンクリートの耐久性について", セメントコンクリート, No. 281, 1970. 7
- 20) 前川静男, 今井益隆, "低品質の砕石がコンクリートの諸性質に与える影響" コンクリート・ジャーナル, Vol. 8, No. 12, 1970. 12.
- 21) Klieger, P., and Hanson J. A., "Freezing and thawing test of lightweight aggregate concrete, J. ACI, Vol. 57, No. 1, 1961.
- 22) 国分正胤, "軽量骨材を用いるコンクリートにおける問題点", 土木学会コンクリートライブラリー, 第10号.
- 23) 鎌田英治ほか, "人工軽量骨材コンクリートの凍害キレツの測定", セメント技術年報, 1970.
- 24) 西岡思郎, 大江長生, "人工軽量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", セメント技術年報, 1970.
- 25) 左右田孝男, "A E モルタルおよびA E コンクリートの気泡大きさ分布と耐久性", セメントコンクリート, No. 163, 1960. 9.
- 26) 小林正児, "各種A E 剤ならびに減水剤がコンクリートの諸性質におよぼす影響について", セメント技術年報, 1967.
- 27) Roberts, L. R., and Scheiner, P., "Air Void System and Frost Resistance of Concrete Containing Superplasticizer", ACI SP-68, pp. 189~213, 1981.
- 28) Okada, E. et al, "Freeze-Thaw Resistance of Superplasticized Concrete", ACI SP 68, pp. 215~231, 1981.
- 29) Kobayashi, M., et al, "Frost Resistance of Superplasticized Concrete", ACI SP-68, pp. 269~282, 1981

- 30) Malhotra, V. M., "Mechanical Properties and Durability of Superplasticized Semi-Lightweight Concrete, ACI SP-68, pp. 283~305, 1981.
- 31) 後藤幸正, 三浦尚, 鈴木達朗, "高性能減水剤を用いたコンクリートの耐久性について", セメント技術年報 34, pp. 326~328, 1980.
- 32) 服部健一ほか, "高性能減水剤を用いたコンクリートの高強度コンクリートの耐凍結融解性", セメント技術年報 34, pp. 329~332, 1980.
- 33) 関 慎吾, "A E コンクリートにおける単位セメント量, 水セメント比 (W/C), 空気量の変化が圧縮強度, 強度増進, 水密性, 耐久性等におよぼす影響の研究, 土木学会論文報告集, 第50号, 1957. 12.
- 34) 永倉 正, "コンクリートの配合諸条件が凍結抵抗性におよぼす影響に関する基礎研究, 土木学会論文報告集, 第98号, 1963. 10.
- 35) 長谷川寿夫, 洪 悦郎, "コンクリートの凍害に及ぼす凍結最低温度の影響について", セメント技術年報 26, pp. 361~364, 1972.
- 36) Malish, W. R., "The effect of air drying upon the freezing and thawing resistance of concrete", The dissertation for the PhD. in Civil Engineering in the Graduate Colledge of the University of Illinois, 1966.
- 37) 田畑雅幸ら, "C S A セメントを使用したコンクリートの乾湿繰り返し性状と耐凍害性", セメント技術年報, No. 29, pp. 262~266, 1975.
- 38) 三浦 尚ら, "極低温の温度変化を受けるコンクリートの劣化に関する研究",
- 39) Litvan, G., "Phase Transitions of Adsorbate:VI, Effect of Deicing Agents on the Freezing of Cement Paste," J. American Ceramic Society, V. 58, No. 1-2, Jan.-Feb., pp. 26~30, 1975.
- 40) Litvan, G., "Frost Action in Cement in the Presence of Deicers", Cement and Concrete Research, V. 6, No. 3, pp. 351~356, 1976. 5.
- 41) Verbeck, G., Klieger, P., "Studies of 'Salt' Scaling of Concrete", Bulletin No. 150, Highway (Transportation) Research Board, pp. 1~13, 1957.
- 42) Hudec, P., "Freezing or Osmosis as deterioration mechanism of concrete and aggregate?", 2nd Workshop on Low Temperature Effects on Concrete, Canada/Japan Intergovernmental Agreement on Cooperation in Science and Technology, 1991. 8.

- 43) Idorn, G., "A concrete jetty with frost damage", Magazine of Concrete Research, Vol. 16, No. 47, 1964. 6.
- 44) Kokubu, M et al., "Examples of deterioration from frost damage of surfaces of concrete dam, 9th Inter. Congress on Large Dams, 1967.
- 45) Gjorv, O., "Durability of reinforced concrete wharves in Norwegian harbours, RILEM Bulletin, Vol. 2, No. 12, 1969.
- 46) 国分正胤, "土木構造物におけるコンクリートの凍害について", コンクリートジャーナル, Vol. 4, No. 11, 1966. 11.
- 47) 林 正道, "土木構造物の凍害状況", コンクリートジャーナル, Vol. 4, No. 11, 1966. 11.
- 48) 服部 隆, "北海道における建築物のコンクリートについての凍害状況", コンクリートジャーナル, Vol. 4, No. 11, 1966. 11.
- 49) 平井和喜, "東北地方の凍害状況", コンクリートジャーナル, Vol. 4, No. 11, 1966. 11.
- 50) 中村恵次, "凍害をうけたコンクリートの状態-材令50年の水路橋, セメントコンクリート, No. 294, 1971. 8.
- 51) Kennedy, T., Mather, K., "Correlation between Laboratory Accelerated Freezing and Thawing and Weathering at Treat Island, Marine", J. ACI, pp. 141 ~ 172, 1953.
- 52) Jackson, F., "Long-time study of cement performance in concrete, Chapter 9 - Correlation of the results of laboratory tests with field performance under natural freezing and thawing conditions, J. ACI, Vol. 52, No. 10, 1955. 10
- 53) Jackson, F., "Long-time study of cement performance in concrete, Chapter 11 - Report on the condition of three test pavement after 15 years of service, J. ACI, Vol. 55, No. 6, 1958.
- 54) 日本大ダム会議コンクリート凍害実験研究分科会, "大型コンクリートブロックによるダムコンクリートの耐久性試験中間報告(第1報)", 大ダム, No. 45, 1968. 10
- 55) 横山昌寛, "人工軽量骨材コンクリートの品質調査-寒冷地における4年間の暴露試験結果", セメントコンクリート, No. 288, 1971.

- 56) 長谷川寿夫, 洪 悦郎, "各種コンクリートによる凍害の地域差に関する長期暴露試験, セメント技術年報 40, pp. 364~367, 1986.
- 57) RILEM Recommendation: Methods of carrying out and reporting freeze thaw tests on concrete without de-icing chemicals.
- 58) ASTM C 666: Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.
- 59) Arni, H., Blain, B., "Evaluating the freezing and thawing durability of concrete by laboratory tests in the U. S. A., Proc. RILEM Inter. Symp. on Durability of Concrete, 1961.
- 60) Wills, M. et al., "Volume changes as a measure of freezing and thawing resistance of concrete made with different aggregate, Proc. ASTM, Vol. 63, 1963.
- 61) Cady, P., "Mechanisms of Frost Destruction in Concrete", the dissertation for the Ph.D. in Civil Engineering in the Graduate School of the Pennsylvania State University, 1967.
- 62) 鎌田英治, "コンクリートの耐凍害性に関する研究-凍伸度を指標とする耐凍害性の判定について, 日本建築学会論文報告集, No. 166, 1969. 12
- 63) 鎌田英治, 洪 悦郎, "耐凍害性指標としての長さ変化の適用性, セメント技術年報 25, 1971.
- 64) Koh, Y., Kamada, E., "The behavior of concrete subjected to freezing and thawing as a reference for frost resistivity of concrete, Proc. of 5th Inter. Symp. on the Chemistry of Cement, 1968.
- 65) 小林正几, "コンクリートの凍結融解試験方法に関する2, 3の考察", セメント技術年報 23, 1969.
- 66) Kokubu, M., Kobayashi, M., "On methods of testing durability of concrete", Proc. RILEM Inter. Symp. on Durability of Concrete, 1969.
- 67) Vuorinen, J., "On the Behaviour of Hardened Concrete During Freezing", Thesis for the degree of doctor of technology accepted by the Technical University, Otaniemi, 1969.

- 68) Rigan J., "Application of One-Cycle Freeze Tests for the Evaluation of Frost Resistance of Concrete", Proc. of the first Inter. Conf. on Durability of Building Materials and Components, STP 691 of ASTM, PP. 520~535, 1978.
- 69) 洪 悦郎, 長谷川寿夫, "コンクリートの凍結融解試験方法の動向", コンクリート工学, Vol. 19, No. 9, pp. 18 ~22, 1981. 9.
- 70) 実松 誠, 杉田英明, 米村方聖, "砕砂を使用した原子力構造物コンクリートの諸特性に関する研究", 九州電力株式会社総合研究所, 研究報告書, No. 85007, March, 1986.
- 71) セメント協会, "粗骨材の品質がコンクリートの諸性質に及ぼす影響", コンクリート専門委員会報告 F-31.
- 72) セメント協会, "細骨材の品質がコンクリートの諸性質に及ぼす影響", コンクリート専門委員会報告 F-32.
- 73) 樋口 泉, "多孔体の毛管内に分散した物質の性質と毛管構造(1)", 材料, Vol. 6, No. 3, PP. 168~176, 1968.
- 74) Jones, F.E., "The Physical Structure of cement products and its effect on durability, Third ISCC Paper 12, PP. 368~435, 1958.
- 75) 山田順治・有泉 昌, "わかりやすいセメントとコンクリートの知識", 鹿島出版会, P. 168, 1977.
- 76) 山田順治・有泉 昌, "わかりやすいセメントとコンクリートの知識", 鹿島出版会, P. 167, 1977.
- 77) 後藤幸正・藤原忠司, "コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響", 土木学会論文報告集, No. 286, 1979-6.
- 78) 添田政司・大和竹史・江本幸雄, "反応性骨材を用いたコンクリートの膨張量および細孔構造", 第40回セメント技術大会講演要旨, PP. 178~179, 1986.
- 79) 榎場重正, 川村満紀, 岡田光芳, "アルカリ骨材反応に関する基礎的研究", 材料, Vol. 26, No. 290, PP. 1078~1084, 1977.
- 80) "Expansion of Concrete due to Alkali-Silica Reaction : An Explanation", Magazine of Concrete Research, Vol. 30, No. 105, PP. 215~220, 1978.
- 81) 小林正凡, "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, No. 9, Sept., 1969.

- 82) 徳光善治, 小林一輔, 渡辺 明, 近藤時夫, "高性能減水剤の活用", 土木学会誌, Annual, pp. 51, 1984.
- 83) 福留和人, 喜多達夫, 宮野一也, "特殊水中コンクリートの乾燥収縮・クリープ特性", 土木学会第42回年次学術講演会, pp. 356~357, 1987.
- 84) 大野俊夫, 田沢雄二郎, "水溶性高分子を添加したコンクリートの凍結融解抵抗性", 土木学会第44回年次学術講演会, pp. 624~625, 1989.
- 85) 岡村 甫, "ハイパフォーマンスコンクリート(コンクリート構造物の信頼性向上を目指して), 第249回コンクリート講習会テキスト(セメント協会), pp. 69 ~77, 1990.
- 86) 鎌田英治, 大内一之, 吉野利幸, "硬化セメントペーストの凍害と細孔構造の役割について", セメント技術年報, No. 30, pp. 292~296, 1976.
- 87) Malhotra, V.M., and Carette, G.G., "Silica Fume Concrete-Properties, Applications, and Limitations", Concrete International, Vol. 15, No. 5, PP. 40~46, May 1983.
- 88) Gjorv, O.E., "Durability of Concrete Containing Condensed Silica Fume, Fly Ash Silica Fume, Slag and Other Mineral By-Products in Concrete", Vol. 2, ACI Publication SP-79, PP. 695~708, 1983.
- 89) 渡辺 明, "RCおよびPC構造物における海砂使用上の問題点解明に関する総合研究", 昭和53・54・55年度文部省科学研究費・総合研究A・研究成果報告書, 1981.
- 90) 大和竹史, 真次 寛, 小深田信昭, "志賀島橋の塩害調査報告", 土木構造・材料論文集, 第1号, pp. 109~122, 1986.
- 91) Mielenz, R.C., "Use of Surface Active Agents in Concrete", Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968.
- 92) 川田尚哉, "海砂がセメント・コンクリートに及ぼす影響", コンクリートジャーナル, Vol. 12, No. 10, pp. 25~28, 1974.
- 93) Ramachandran, V.S., "Calcium Chloride in Concrete", Science and Technology, Applied Science Publishers LTD, London.
- 94) Powers, T.C., "Freezing Effects in Concrete", American Institute, SP-47-1.

- 95) Helmuth, R. A., "Capillary Sige Restrictions on Ice Formaion in Hardened Portland Cement Pastes, Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington, PP. 855~869(1960)
- 96) 樋口 泉, "多孔体の毛管内に分散した物質の性質と毛管構造(1)", 材料, Vol. 6, No. 3, PP. 168~176, 1968.
- 97) 鎌田英治, 洪 悦郎, "人工軽量骨材コンクリートの凍害機構に関する考察", セメント技術年報, No. 25, PP. 285~290, 1971.
- 98) 洪 悦郎, 鎌田英治, "コンクリートの凍害と初期凍害 — そのメカニズムについて —", コンクリート工学, Vol. 16, No. 5, PP. 1~11, 1978.
- 99) 須動儀一, 秋葉徳二, 新井和政, "セメント硬化体の凍結融解に関するDTA法による研究", セメント技術年報, No. 29, PP. 78~82, 1975.
- 100) Czernin, W. 著, 徳根吉郎訳, "建設技術者のためのセメント・コンクリート化学", 技報堂 P. 65, 1970.
- 101) コンクリート専門委員会報告F-38, "初期の乾燥がコンクリートの諸性質に及ぼす影響", セメント協会, PP. 72~77, July, 1985.
- 102) Powers, T. C., Copeland, L. E., Hayes, J. C., Mann, H. M., "Permeability of Portland Cement Paste", Proceedings, Am. Concrete Inst., Vol. 51, PP. 294~295, 1955.
- 103) 沢田英二, 鎌田英治, コンクリートの水分凍結量の測定, セメント技術年報, No. 28, PP. 298~301, 1974.
- 104) Vuorinen, j., "On the Freezable Water in Concrete, RILEM Symposium, Durability of Concrete, Final Report No. 1, B-115~B-122, 1969.
- 105) Advisoy Committee Long-Time Study, "Ten-Year Report on the Long-Time Study of Cement Performance in Concrete", ACI Journal, Mar., 1953.
- 106) 洪 悦郎ほか, "気象条件の異なる北海道内4都市における各種コンクリートの暴露試験", セメントコンクリート, No. 319, Sept., 1973.
- 107) Beaudoin, J. and Macinnis, C., "Dimensional changes of hydrated portland cement paste during slow cooling and warming", CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, Vol. 2, pp. 225-240, 1972.
- 108) Kamada, E., Koh, E. and Tabata M., "Frost Damage of Concrete from the View Point of Pore Structures of Hardened Cement Paste", Proceedings of Workshop

- on Low Temperature Effects on Concrete, Sapporo, 1988.
- 109) 洪 悦郎ほか, "プレストレスト用高強度コンクリートの耐凍害性に関する実験", セメント技術年報, No. 36, PP. 432~435, 1982.
- 110) 洪 悦郎ほか, "耐硫酸塩セメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性について", セメント技術年報, No. 32, PP. 304~307, 1978.
- 111) 長谷川寿夫ほか, "コンクリートの凍結融解方法が試験結果に及ぼす影響", セメント技術年報, No. 39, PP. 118~121, 1985.
- 112) 三浦 尚ほか, "軽量コンクリートの凍害に対する抵抗性向上に関する研究", セメント技術年報, No. 39, PP. 134~137, 1985.
- 113) 長谷川寿夫ほか, "人工軽量骨材コンクリートの乾燥と耐凍害性", セメント技術年報, No. 36, PP. 367~370, 1982.
- 114) 渡辺 明ほか, "高強度軽量コンクリートの練混ぜ方法と凍結融解抵抗性に関する研究", 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, PP. 305~308, 1986.
- 115) 岩清水隆ほか, "高強度人工軽量コンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究", 第7回コンクリート工学年次講演会論文集, PP. 69~72, 1986.
- 116) 高橋 猛ほか, "高強度人工軽量コンクリートの耐凍結融解性に関する実験的研究", 土木学会第35回年次学術講演会論集, PP. 199~200, 1980.

謝辞

本論文をまとめるにあたり、懇切丁寧な御指導と御配慮を賜りました九州大学教授阪本好史博士（主査）をはじめとし、同大学教授堤一博士（副査）、同大学教授太田俊昭博士、同大学教授落合英俊博士（副査）、同大学教授崎野健治博士（副査）に対し深甚なる感謝の意を表します。また同大学助教授牧角龍憲博士からは本論文の作成にあたり、懇切丁寧なる御指摘を賜りました。心よりお礼申し上げます。

本研究は、著者が昭和44年4月、福岡大学工学部講師として着任した当時、九州大学工学部教授徳光善治博士、九州工業大学教授渡辺明博士の御指導の下に計画した「コンクリートの急速凍結融解試験における劣化と自然の気象作用における劣化との相関性に関する基礎研究」という長期テーマに対し、昭和45年度土木学会吉田研究奨励賞を授与されて以来、行ってきた二十二年間の成果を集約したものであります。この間、常に御支援と激励を賜りました故・徳光善治博士、渡辺明博士、さらにこの研究の機会を最初に与えていただきました佐賀大学石川達夫助教授に対し深く感謝の意を表します。

本研究の継続に欠かせない施設や器具の整備に深い御理解と御配慮を賜りました元福岡大学教授・故蓮尾誌藏先生、森脩教授ならびに福岡大学土木工学科の教職員の方々に衷心より感謝申し上げます。

暴露試験の実施に当たりましては、坂梨宏福岡大学名誉教授、九州地方建設局松原・下釜ダム管理事務所、大野コンクリート㈱大野雅由社長、松井コンクリート㈱松井郁夫社長、苫小牧プレコン㈱中村正一氏に多大な御支援を頂きました。また、暴露試験は福岡大学総合研究所、都市問題専門委員会ならびにコンクリートの耐久性専門委員会の援助を受けて実施できました。厚くお礼申し上げます。

また、研究の遂行に当たりましては、九州電力総合研究所コンクリート研究室赤司六哉元室長、実松誠氏、杉田英明氏、福岡大学江本幸雄助教授、添田政司助手、元助手山下一友氏（現、荅陽工業）、元助手坂田義明氏（現、大林道路㈱）、井上憲弘技師補、森岡隆則技師補ならびにコンクリート研究室卒業生の諸兄に御協力を賜りました。また、数値解析では元九州大学助手南英明氏に、原稿の浄書には瀬戸口朋子嬢（旧姓辰本）に御協力いただきました。謹んで謝意の意を表します。

最後に、本論文をまとめるに際して、励ましのお言葉をいただいた方々に心よりお礼申し上げます。また、これを機会に今後も積極的な研究活動を進めて行く所存であります。

