

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的研究

FUNDAMENTAL STUDIES OF THE EFFECTS OF MIX CONDITIONS ON THE FROST RESISTANCE OF CONCRETE

永 倉 正*

By Tadashi Nagakura

要 旨 本文は、コンクリートの凍結抵抗性に関する基礎的な問題として、水セメント比、細骨材率、単位セメント量、空気量、などの配合諸条件が凍結抵抗性におよぼす影響について実験的に研究した結果を述べたものである。その結果から、コンクリートの凍結抵抗性はエントレインドエアーによってきわめて顕著に増大すること、空気量の変化がなければ、水セメント比が凍結抵抗性に影響をおよぼす主要な要素であることを確認し、同時に細骨材率もまたこれに影響を与える重要な一要素であり、また水セメント比、細骨材率に変化がなければ単位セメント量、単位水量の変化は一般には凍結抵抗性に大きな影響をおよぼさないことを指摘し、凍結融解作用によるコンクリートの劣化は主として外部から浸透する自由水によるものであること、などの結論を導いた。さらに、これらの結果にもとづいて、マスコンクリートに用いる配合あるいは材料が凍結抵抗性におよぼす影響を実験室試験によって評価しようとする場合の、試験に対する一方法を導いた。

の大きな原因となっていることを知ることができる。コンクリートの凍害を防止するうえにまず必要なことは凍結抵抗性にすぐれたコンクリートをつくることであって、このためにコンクリートの凍結抵抗性をあらかじめ実験によって評価し、判断する必要があるとってくる。

本研究は、その基礎的な問題としてコンクリートの配合上の諸条件が凍結抵抗性におよぼす影響を実験的に説明しようとしたものである。すなわち、コンクリートの水セメント比、細骨材率、単位セメント量、空気量、などの諸要素が凍結抵抗性におよぼす影響を明らかにするとともに、これら相互の関連性を見出すこと、これらの結果にもとづいて、マスコンクリートに用いる配合あるいは材料が凍結抵抗性におよぼす影響を評価する場合の試験方法を導くこと、さらにコンクリートの強度、透水性、凍結融解をくり返したときの膨脹性、硬化コンクリートの空気泡諸性質などの試験、測定の結果から、その劣化現象に対して検討を加えること、などを目的として行なったものである。

なお本論文は電力中央研究所技術研究所報告¹⁾の要約で詳細についてはこれを参照していただきたい。本研究の実施にあたっては北海道大学 横道英雄教授より終始ご懇篤な指導をいただき、また本論文とりまとめには東京大学 国分正胤教授のご懇切な指導を賜わった。研究の遂行にあたっては電力中央研究所 関 慎吾氏はじめ各位より終始鞭撻をいただき、岡沢・角田・服部・原口の各氏に試験を担当していただいた。ここに厚く御礼申し上げるものである。

1. 緒 言

コンクリートの凍害の問題は、これに影響をおよぼす要素が多く、しかも、これらが相互に関連しているためきわめて複雑である。これらの要素とは、コンクリートに用いる材料および配合、コンクリートの施工、構造物がうける気象条件および拘束の程度などである。すなわち大別すれば、一つはコンクリート自体の品質による内的原因であり、一つはコンクリートに作用する外的原因であって、このうち後者は構造物の種類、その地点における気象条件などから定まってしまうものである。凍害の実例を検討するとき、コンクリートの品質の良否がそ

2. コンクリートに用いた材料

試験に用いたセメントはアサノ普通ポルトランドセ

表-1 セメントの物理的性質

種 別	比 重	粉 末 度		凝 結		強 さ (kg/cm ²)						備 考	
		ブレン (cm ² /g)	88μ の残分 (%)	始 発 時一分	終 結 時一分	曲 げ			圧 縮				
						3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日		
普通ポルト ランドセメント	A	3.15	3 010	4.0	2-06	4-00	24.8	44.2	63.2	87	196	362	水セメント比シリーズ に使用 単位セメントシリーズ に使用 細骨材率および湿式ふる い分けシリーズに使用
	B	3.16	2 870	2.3	2-10	4-30	27.3	42.2	65.8	108	168	358	
	C	3.16	2 940	2.0	2-00	4-20	25.1	42.0	70.0	93	170	361	

* 正員 工博 電力中央研究所 技術研究所 第二部コンクリート研究室

表-2 骨材の物理的性質

種別	産地	比重	吸水量(%)	安定性試験における 損失重量*(%)
川砂	相模川	2.61	2.88	3.9
川砂利	多摩川	2.63	1.27	5.9

* 硫酸ナトリウム溶液を用い、操作を5回くり返した。

表-3 コンクリートに用いた骨材の粒度

細骨材		粗骨材	
ふるいの寸法 (mm)	粒径別百分率(%)	ふるいの寸法 (mm)	粒径別百分率(%)
5	0		
2.5	10		
1.2	20		
0.6	23		
0.3	25	25	0
0.15	16	15	50
Pan	6	5	50
粗粒率	2.65		

メント、細骨材は相模川産川砂、粗骨材は多摩川産川砂利、AE 剤はビンゾール レジンである。表-1, 2 には使用したセメントおよび骨材の物理的性質を、また表-3 にはコンクリートに用いた骨材の粒度を示した。なお粗骨材最大寸法は 25 mm として試験を行なった。

3. 試験の方法

(1) 凍結融解試験

試験に用いた供試体は 7.6×9×38 cm の寸法の長方体で、21°C の水中養生をしたのち材令 28 日で凍結融解試験を開始した。試験は水中における急速凍結融解法²⁾によって行なった。これは、比較的短期間に試験結果の相対的な明瞭な評価ができるように促進試験法を採用したものである。供試体はゴム製容器に収容し、供試体と容器との間げき(3~5 mm)に水をそそいだ状態での凍結融解試験を行なった。凍結融解サイクルは供試体中心で -18~+5°C の温度サイクルとし、1 サイクルあたりの時間は約 3 時間、このうち凍結側が約 100 分、融解側は約 80 分で、このサイクルを自動試験装置によって連続してくり返した。

凍結抵抗性はたわみ共振周波数から求めた動弾性係数法によって表現した。これは重量損失法、長さ変化法、強度係数法などによる表現方法を比較した試験結果から、動弾性係数法がその表現に適していると判断して用いたものである^{1), 2), 6)}。測定は凍結融解の 20~40 サイクルごとに行ない、凍結抵抗性と動弾性係数 E および相対弾性係数 P または耐久性係数 DF によって表わした。すなわち、 $E=C \cdot W \cdot f_n$ (kg/cm²)、 $P=f_n^2/f_0^2 \times 100$ (%), $DF=\frac{P \cdot N}{300}$ (%)

ここに C : 供試体から定まる係数

W : 供試体重量 (kg)

f_n : n サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数 (c/s)

f_0 : 0 サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数 (c/s)

N : 試験を終了したときのサイクル数

試験は相対弾性係数 P が 60 % 以下に低下するまで、低下しないときは 300 サイクルまで継続した。なお試験値は供試体 3 個の平均値から求めた。

また水セメント比シリーズにおいて、たわみ共振周波数の測定と同時に供試体の膨脹量の測定を行なった。これは精度 1/1 000 mm の顕微鏡式横型コンパレーターを用いて、おおむね JISA 1125 の方式に準じて行ない、供試体 3 個の平均値をその試験値とした。

(2) 浸透性試験

コンクリートの凍結抵抗性と透水性との関連性を知る目的で行なったもので、その試験方法は、供試体内へ水が浸透する程度を容易に知るために圧力容器中の供試体に水圧を加え、水が浸透した部分の面積を供試体の破断面から求めるものである。供試体は凍結融解試験に用いたと同じバッチのコンクリートから造り、21°C の水中養生を行なったのち材令 28 日で試験をした。供試体の寸法は $\phi 10 \times 20$ cm の円柱形で、10 kg/cm² の水圧を 24 時間加えてからただちに JIS A 1113 の方法によって圧裂試験を行なった。その破断面には水が浸透して飽和した部分と浸透しない部分とが識別できるが、これを撮影した写真からプランメーターを用いて全断面積および浸透部分の面積を測定した。試験の結果を浸透率として表わしたが、これは測定面積から換算した浸透容積の供試体容積に対する比率を示したもので、供試体 2 個の平均値をその試験値とした。

(3) 圧縮強度試験

コンクリートの凍結抵抗性とそのコンクリートの強度との関連性を知る目的で行なったもので、供試体は凍結融解試験を用いたと同じバッチのコンクリートから造り、21°C の水中養生を行なったのち材令 28 日で試験をした。供試体は、水セメント比および湿式ふるいわけシリーズでは $\phi 15 \times 30$ cm 円柱形、その他のシリーズでは $\phi 10 \times 20$ cm 円柱形を用い、供試体 3 個の平均値を試験値とした。

4. 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

(1) 試験の結果

a) 水セメント比の影響 試験は AE ならびにプレーンコンクリートについて実験し、そのスランプ約 7 cm とし、ウォーカーピッチをほぼ同程度とするため大きい水セメント比のものほど細骨材率をやや大きくとった。なお AE コンクリートはその空気量を約 5 % とした。

試験の結果を表-4 ならびに図-1, 2, 3 に示した。

表-4 水セメント比シリーズにおける AE ならびにプレーン コンクリートの試験結果

	水セメント比	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	細骨材率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	ブリージング (%)	圧縮強度 σ_{28} (kg/cm ²)	浸透率 (%)	凍結抵抗性				
										相対弾性係数 P (%)	試験サイクル数	耐久係数 DF (%)	膨張率 (%)	
AE コンクリート														
AC-1	a	0.40	142	355	30.5	8.0	5.5	1.99	288	—	91.7	300	91.7	—
		0.50	139	278	33.5	8.0	5.0	3.89	233	—	87.0	—	87.0	—
		0.60	137	229	36.5	7.8	5.7	4.58	193	—	84.2	—	84.2	—
		0.70	140	200	39.5	7.5	5.4	6.43	164	—	68.5	—	68.5	—
	b	0.40	142	355	30.5	7.5	5.2	—	—	—	87.7	300	87.7	—
		0.50	138	276	33.5	7.6	5.0	—	—	—	85.2	—	85.2	—
		0.60	137	229	36.5	7.3	5.2	—	—	—	80.9	—	80.9	—
		0.70	139	199	39.5	7.7	5.6	—	—	—	76.1	—	76.1	—
	c	0.40	150	375	31.0	7.3	5.0	—	—	42.4	94.1	300	94.1	0.01
		0.50	143	286	34.0	7.2	5.2	—	—	61.6	87.0	—	87.0	0.03
		0.60	143	237	37.0	8.2	5.4	—	—	81.3	78.2	—	78.2	0.05
		0.70	145	207	40.0	7.5	5.4	—	—	96.3	69.4	—	69.4	0.09
プレーン コンクリート														
PC-1	a	0.40	157	398	33.5	7.7	1.1	2.19	479	—	57.1	149	28.4	—
		0.50	154	308	36.5	7.5	1.1	4.00	370	—	55.4	78	14.4	—
		0.60	157	262	39.5	7.7	1.3	4.75	296	—	39.3	43	5.6	—
		0.70	159	227	42.5	7.5	1.2	—	225	—	41.2	43	5.9	—
	c	0.40	173	432	36.0	7.7	1.7	—	—	50.8	59.3	107	21.2	0.32
		0.50	170	340	39.0	8.0	1.8	—	—	57.8	57.7	46	8.9	0.38
		0.60	170	284	42.0	7.7	2.0	—	—	90.9	51.5	37	6.4	0.54
		0.70	174	249	45.0	7.0	2.2	—	—	100	56.7	28	5.3	—

図-1 水セメント比の影響を試験したコンクリートの相対弾性係数と凍結融解サイクルとの関係

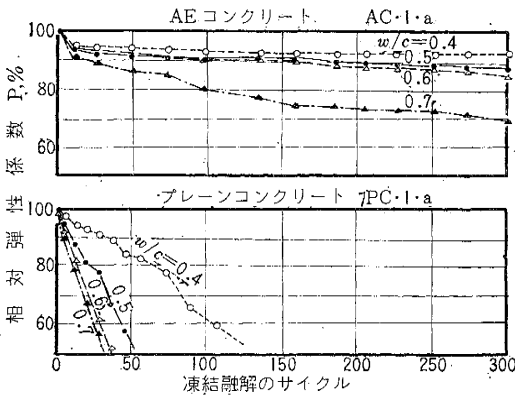
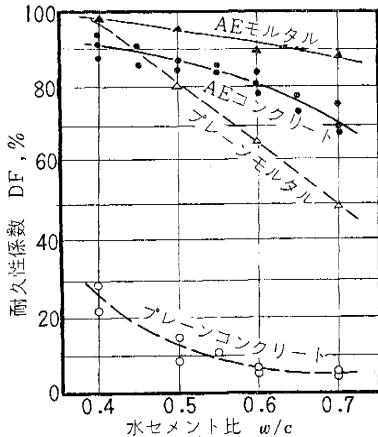
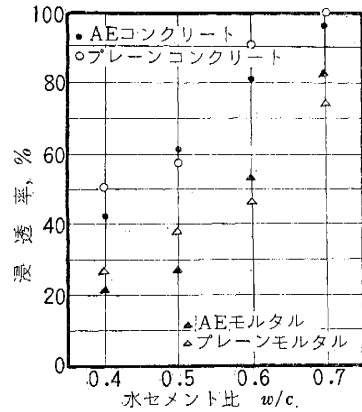


図-2 コンクリートおよびモルタルの水セメント比と凍結抵抗性との関係



試験の結果から、AE ならびにプレーン コンクリートともに凍結抵抗性は水セメント比の小さい配合ほど良好

図-3 コンクリートおよびモルタルの水セメント比と浸透率との関係



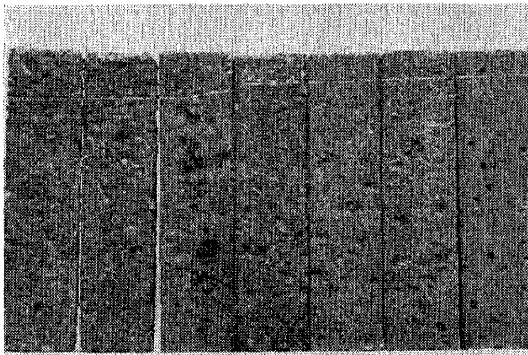
であることが明らかであった。このことはすでに多くの論文にみられて^{7)~10)} いるところであり、コンクリートの他の性質と同様に主として水セメント比によって支配されるという従来の定説を確認することができた。

図-1および2から明らかなように、プレーン コンクリートの凍結抵抗性は AE コンクリートにくらべていちじるしく低かった。AE コンクリートでは水セメント比の大きい場合でも 300 サイクルまで十分測定でき供試体もかなり堅硬であったが、プレーン コンクリートは小さい水セメント比でも約 150 サイクル以後の測定が困難となり、供試体もはなはだもろくなっていた(写真-1 参照)。この試験は促進試験であって、コンクリートが実際にさらされる凍結融解状態とは異なり、かなりきびしい条件での試験である。しかし両者の相対的な比較としては、主として米国の研究にもみられる^{7),11)~14)} ように、AE コンクリートの凍結抵抗性はプレーンコ

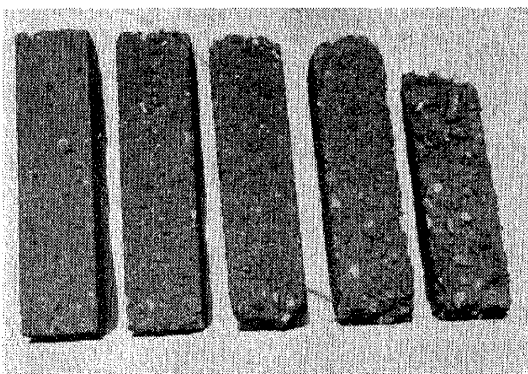
ンクリートよりも明らかにすぐれていると判断してさしつかえないと認められる。

表-4にコンクリートのブリージング、圧縮強度 σ_{28} および浸透率の値をあわせて示し、また図-3には水セメント比と浸透率との関係を示した。水セメント比の小さいコンクリートほど強度が大きく、ブリージング、浸透率は小さく、凍結抵抗性はこれらの傾向と密接に関連していると判断される。しかし AE コンクリートとプレーン コンクリートとの凍結抵抗性のい

写真-1 水セメント比の影響を試験したコンクリート供試体の状態
AE コンクリート

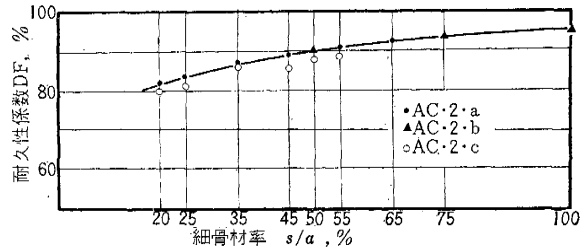


プレーン コンクリート



W/C= 0.40 0.50 0.55 0.60 0.70

図-4 AE コンクリートの細骨材率と凍結抵抗性との関係



ちじるしい相違は、透水性あるいは強度の相違がその主要な原因であるとは考えられない。これは両者の浸透率にそれほど明瞭な差が認められず、また強度では逆にプレーン コンクリートが AE コンクリートを上回っていることから判断できる。

コンクリートから粗骨材をとりのぞいた配合のモルタルについて行なった試験結果をコンクリートの結果とともに図-2および3に示した。この結果からモルタルの凍結抵抗性はコンクリートにくらべてかなり大きいことが認められた。図-3に明らかなように浸透率の値においてもモルタルはコンクリートよりも小さい。このことは、粗骨材とモルタルとの付着面がコンクリートの劣化を促進する弱点となることを示唆しており、したがってコンクリートの凍結抵抗性は細骨材率によってもまた影響されることが予測された。モルタルの凍結抵抗性がコンクリートを上回る程度はプレーンの場合に特に大きい。これは、特にプレーン コンクリートの場合に付着面が弱点となる程度が大きく、逆に AE コンクリートではエントレインド エア-の効果が付着面に大きく発揮されることを表わしていると判断できる。

b) 細骨材率の影響 水セメント比 シリーズの試験結果から、コンクリートの凍結抵抗性はそれにふくまれる粗骨材の多少によって影響されることが予想され、この観点からコンクリートの細骨材率の影響について実験を行なった。試験は、水セメント比の影響が導入されないように水セメント比0.50一定とした AE コンクリートについて行ない、表-5にその配合を示した。AC-2-a はコンクリートのスランプ約 7 cm、空気量約 5%の

表-5 細骨材率シリーズにおける AE コンクリートの試験結果

	水セメント比	細骨材率 (%)	材料の単位重量 (kg/m ³)				スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 σ_{28} (kg/cm ²)	耐久性係数 DF (%)	
			水	セメント	細骨材	粗骨材					
AC-2	a	0.50	20	135	270	361	1 582	8.0	5.3	224	81.9
			25	135	270	475	1 426	7.0	4.5	262	82.9
			35	139	278	663	1 230	7.0	4.8	314	87.0
			45	156	312	817	997	6.5	4.5	338	89.3
			55	175	350	953	780	6.5	5.5	339	91.7
			65	200	400	1 055	569	6.5	5.5	378	92.6
	b	0.50	50	184	368	828	828	17.5	6.4	281	89.5
			75	238	476	1 066	357	21.5	6.6	328	93.9
			100	275	550	1 245	-	25.0	7.3	332	95.4
	c	0.50	25			477	1 430	7.0	5.0	248	79.8
			35			663	1 230	6.0	5.3	255	81.3
			45	137	274	852	1 042	2.0	5.6	289	86.2
			55			1 042	852	0	6.8	297	85.5

条件で細骨材率を 20~65% に変化させた配合, AC・2・b は細骨材率が 50, 75, 100% (モルタル) となるまで粗骨材をとりぞいた配合とした。したがって, いずれも細骨材率の大きくなるほど単位水量および単位セメント量の多い配合となっている。これに対して AC・2・c は単位水量, 単位セメント量の変化がない場合の細骨材率の影響を知るため, これらを一定として細骨材率を変化させた配合をとった。

試験の結果を表-5 ならびに図-4 に示した。この結果から, 細骨材率の大きいすなわち粗骨材量の少ないコンクリートほど凍結抵抗性の増大する傾向が明らかに認められた。AC・2・a および b は細骨材率の増加にともなって単位セメント量の多くなっている配合であるが, 図-4 にみるように, これらの結果をプロットした点はほぼ一つの曲線上にあると認められ, 凍結抵抗性は細骨材率と比例した関係にあると判断できる。また AC・2・c の結果から, たとえセメント量の増加がなくても細骨材率のみの増加によって凍結抵抗性は増大するものであることも明らかであった。

c) 単位セメント量の影響 コンクリートの単位セメント量が凍結抵抗性におよぼす影響については, 従来単位セメント量によってある程度影響されるが, その影響は水セメント比ほど大きいものではないことがいわれている程度で^{10), 15), 16)}, あまり明らかにされていないようである。前述の水セメント比あるいは細骨材率のシリーズの配合においても, 単位セメント量の変化がその条

件の中にふくまれていた。すなわち, 水セメント比の小さい, また細骨材率の大きい配合は同時に単位セメント量の多い配合となっていたものである。しかし, この単位セメント量の変化が試験結果にどの程度の影響をおよぼしているかは明らかではなかった。

本章では, この単位セメント量の変化が凍結抵抗性におよぼす影響を知る目的から, つぎの配合を選定して試験を実施した。すなわち水セメント比を 0.50-一定とし空気量を約 5% とした AE コンクリートについて行ない, 一定の細骨材率のもとで単位セメント量を変化させた配合をとった。これは, これら諸要素の影響がふくまれない場合の実験から結果を得るためである。

試験の結果を表-6 および図-5 に示した。図-5 に明らかなように, 細骨材率が 25% (AC・3・a) および 35% (AC・3・b) の場合は単位セメント量が増加しても耐久性係数の相違はあまり認められなかったが, 細骨材率が 45% (AC・3・c) の場合は単位セメント量の増加にともなって耐久性係数も増大する傾向がみられた。この増加の傾向は, コンクリートから粗骨材をとりぞいた配合のモルタルについて同時に実施した試験結果からも明らかに認められていた。すなわち細骨材率が 35% 程度より小さい配合の場合には単位セメント量の変化によって凍結抵抗性はほとんど影響されないが, 細骨材率が大きくなるとときには単位セメント量のみの増加によって凍結抵抗性も増大する結果を示している。この試験に用いた粗骨材最大寸法 25 mm の場合の AE コン

クリートに 適当と考えられる細骨材率はおおむね 35% 程度であるので, この結果から, 一般のコンクリートの配合に用いられる細骨材率の場合は単位セメント量によって凍結抵抗性はほとんど影響されないと判断できると考える。なお, 配合が単位セメント量と同時に細骨材率も変化する場合には, この細骨材率の変化によって凍結抵抗性が影響されることはすでに細骨材率シリーズにおいて明らかにしており, また 図-5 の結果からも明らかである。

この試験は, 単位セメント量の増加にともなって単位水量も増加し, 同時にスランプも 0~20 cm の範囲に変化したコンクリートとなっている。また細骨材率シリーズにおいても細骨材率の増加とともに単位水量の増加した配合となっていた。これらから試験結果はまた水セメント比の変化がなければ, 単位水量あるいはスランプの変化によってコンクリートの凍結抵抗性はあまり影響されないことを表わしていると考えられることができる。

(2) 試験結果の考察

a) 凍結融解作用によるコンクリー

図-5 コンクリートおよびモルタルの単位セメント量と凍結抵抗性との関係

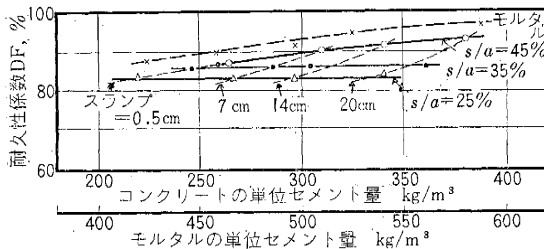


表-6 単位セメント量シリーズにおける AE コンクリートおよび AE モルタルの試験結果

	水セメント比	細骨材率 s/a(%)	単位セメント量 (kg/m³)	単位水量 (kg/m³)	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 σ_{28} (kg/cm²)	耐久性係数 DF (%)
a	0.50	25	220	110	0.5	4.7	281	83.2
			266	133	8.0	5.7	300	83.2
			296	148	13.5	5.0	291	82.9
			340	170	20.5	5.3	289	84.0
b	0.50	35	246	126	0.5	4.9	336	85.6
			260	130	2.5	4.8	311	86.9
			286	143	7.0	5.2	350	85.9
			304	152	10.5	5.0	350	86.6
360	180	20.0	4.3	347	85.5			
c	0.50	45	264	132	0.5	5.5	346	86.8
			310	155	5.0	5.3	358	89.8
			340	170	14.0	5.6	378	91.4
			380	190	20.0	6.0	366	93.0

トの劣化 凍結融解作用によるコンクリートの劣化現象については多くの研究^{(17)~(20)}で述べられているが、そのとりあげられている観点によっていろいろの結論が得られており、また十分に解明されていない点が多く、なお今後の研究にまたねばならないところであるが、本研究における各種の比較試験の結果から、その劣化はコンクリート中に浸透する自由水の凍結、これにともなう膨張によってその組織が破壊されることに主要な原因があると考えられる。コンクリートはセメントの水和作用に必要とするよりもかなり多い練りませ水を用いているために、コンクリート自体は初めから自由水を包蔵している。しかしながら、この自由水のみ凍結によつてはコンクリートの劣化はあまり進行しない。これは 図-6、7 に示した試験結果から判断できる。図-6 は供試体外部に水が存在する場合としない場合との凍結融解試験結果の比較であり、図-7 は供試体を塗料で封緘し外部からの水の浸透を遮断した場合としない場合との試験結果の比較である。コンクリートが直接水に接している場合にくらべて前者とも相対弾性係数の低下は非常に小さく、この傾向はプレーンコンクリートの場合に特に顕著である。外部からの水の浸透がない場合の劣化が小さいことは、実際の建造物の凍害例が外部に水が存在しない場合にはあまり生じていない点からも推測できるところである。図から明らかなように、水がない場合、水を遮断した場合ともに、サイクルの初期においてはコンクリート自体が保持している自由水の凍結によってある程度の組織の破壊が生じ、これが測定値のやや大きな低下として表われているが、しかし、その後の劣化はそれほど進行していない。例えば AEコンクリートでは初期に低下したのちの測定値の低下はほとんどみられず、300 サイクル終了後においても耐久係数約 95% の大きな値

図-6 水中および空中における凍結融解試験結果の比較

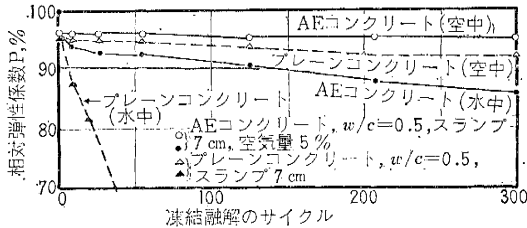
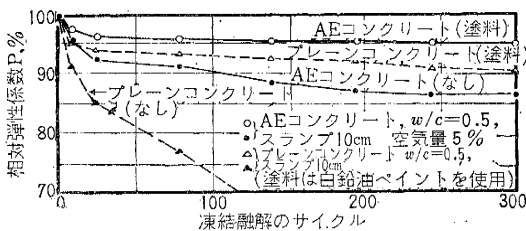


図-7 封緘したコンクリートとしないコンクリートとの凍結融解試験結果の比較

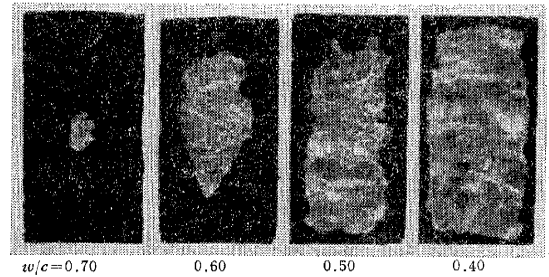


を示している。

細骨材率および単位セメント量シリーズにおいて、コンクリートの単位水質の変化によって凍結抵抗性がほとんど影響されない結果を示したことも、上記のコンクリート自体があらかじめ保持している自由水のみによって劣化はあまり促進されない結果から、これを説明できると思われる。

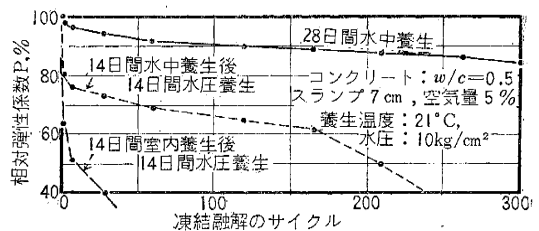
コンクリートが保持している自由水のみではコンクリートの劣化がそれほど促進されないのは内部に空げきが存在していることにあると考える。コンクリート中に存在する空げきは、一つは打込み直後の各材料粒子の沈下、ブリージングにともなう網状に形成される毛細管空げきであり、一つは連行したあるいは混入された空気泡である。したがってコンクリートは必然的に多少の透水性をもつものである。これらの空げきは、たとえば水中養生された供試体の場合でも、ある程度は毛細管作用によって吸水されるが完全に水で飽和されることはない。これは浸透試験を行なった結果において、水圧を加えた場合にはその水圧、加圧時間に応じて水が内部まで浸透しているのが認められ、単に水中養生をしたものと明瞭な相違が認められたことから明らかである (写真-2)。

写真-2 浸透性試験を行なった供試体破断面 AEコンクリート



凍結による劣化は、これらの空げきが自由水で飽和されることによって促進されると考えられる。これは 図-8 に示した試験結果から判断できる。10 kg/cm² の水圧の下で 14 日間養生したことによって、供試体はかなり内部まで自由水で飽和され、特に室内で養生したのちに水圧を加えたものは、供試体全体が飽和されていたのがその破断面から観察された。このような状態で凍結融解作用を受けたときは測定値の大きな低下を示し、特に供試

図-8 水中および水圧下で養生したコンクリートの凍結融解試験の比較



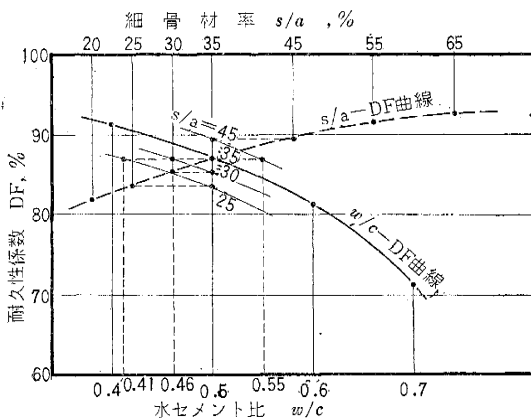
体全体が飽和されていた室内養生のち水圧で養生した場合は、初期のサイクルですでに破壊的な劣化を生じているのが認められた。空げき、空気泡が自由水で飽和されて、自由水の凍結・膨張による圧力、これにともなう水の流動を緩和する空間が存在しない場合は、コンクリートは容易に破壊することを示している。

以上の現象から、凍結融解のくり返しによってコンクリートの劣化が進行する主要な原因は、外部からの水の浸透にあると考える。表面に存在する水が凍結する際の膨張圧力によってコンクリート内部に水が浸透し、まずコンクリートの表面に近い部分の空げきが水で飽和され、その凍結によって組織の破壊が生ずる。凍結融解のくり返しによって逐次飽和度の少ない内部に水が圧入され、同時に破壊作用が進行する。すなわち、空げきを飽和している自由水の凍結時の高い膨張圧力による破壊と毛細管中を流動する水が氷に生長する際の破壊とによってコンクリートの劣化が進行すると考える。したがってコンクリートの凍結融解作用による劣化は、そのコンクリートの透水性および強度と関連性をもつものである。凍結抵抗性に劣ったコンクリートは浸透率が大きく、強度も小さい傾向を示しており、水の浸透しやすいコンクリートほど劣化も大きいと結論できると思われる。

従来コンクリートの配合が凍結融解作用による劣化におよぼす影響を論じているものは、造ったときのコンクリートの練り混ぜ水量から導かれる自由水をとりあげているものが多い。しかしながら、筆者はこの自由水が重要なのではなく、その後における、凍結融解作用をうけるときの自由水の状態、特に外部から浸透する自由水が支配的な影響を与えると考えられるものである。

b) ダム コンクリートの表面配合について 前述の試験結果からコンクリートの凍結抵抗性は細骨材率の増加に比例して増大することが明らかとなった。図-9 に AE コンクリートの凍結抵抗性におよぼす水セメント比

図-9 AE コンクリートの凍結抵抗性におよぼす水セメント比および細骨材率の影響



W/C および細骨材率 s/a の影響の相互の関係を示した。図は左・縦軸に耐久性係数 DF を、下・横軸に水セメント比 W/C を、上・横軸には細骨材率 s/a をとっている。 $W/C-DF$ 曲線、 $s/a-DF$ 曲線はいずれも試験結果から得られたものを示している。 W/C 軸と s/a 軸とは対応していないが、 $W/C=0.50$ の場合のみ対応しており、 $W/C=0.50$ のコンクリートの $s/a=35\%$ であることを示している。 $W/C-DF$ 曲線と $s/a-DF$ 曲線とは $W/C=0.50$ ($s/a=35\%$) の線上で交差し、その点の DF は約 87% の値である。いま $s/a-DF$ 曲線上の、例えば $s/a=25\%$ あるいは 30% の点を通る水平線が $W/C=0.50$ の縦軸と交差する点を通して $W/C-DF$ 曲線に平行な曲線を引くとき、この曲線は $W/C=0.50$ の、 s/a が 25% あるいは 30% に変化したときの $W/C-DF$ 曲線と考えることができる。この図から、 $s/a=35\%$ のときと同程度の耐久性係数を小さい s/a の場合に得るためには W/C を減少しなければならないことを知ることができ、 s/a を約 5% 減じた場合、同程度の耐久性係数を得るためには W/C を約 4% 程度小さくする必要のあることを示している。逆に s/a を増した場合は W/C を大きくとってよいこととなる。この試験は限られた条件のもとでの試験であり、試験条件が異なればその数値も異なってくるが、その傾向から考えて、コンクリートの凍結抵抗性は水セメント比と同時に細骨材率によってもかなり影響されることが明らかである。

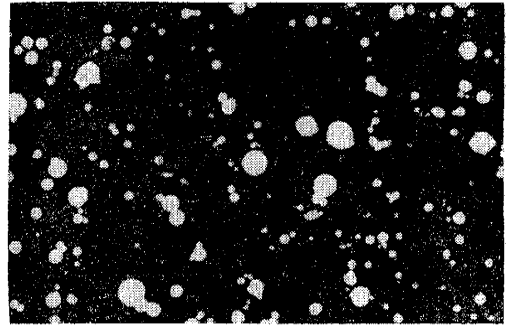
細骨材率の増加は透水性を少なくする。またコンクリートの沈下にもなうブリージングによって粗骨材下面には比較的大きな空げきが形成され、粗骨材量の多いほど、また粗骨材寸法の大きいものほどこのような弱点が形成される程度は大きい。したがって細骨材率の小さいものほど外部からの水は浸透しやすく、また粗骨材周辺の空げきが水で飽和されたときの凍結によって生ずる組織の破壊は大きいと考えられる。凍結抵抗性が重要となる構造物においては、水セメント比と同時に細骨材率の影響を考慮し、極度に細骨材率を小さく選定することはさけるのがよいと考える。特にダムにおいては骨材寸法が大きく、骨材の分離による悪影響を生じやすい。したがって、できるだけ入念な締固めをしてコンクリートの一体化をはかることが必要であることはもちろんであるが、その表面コンクリートは、大きい寸法の粗骨材をとりのぞいたコンクリート、あるいはこれを用いない配合のコンクリートによって施工することが望ましいと考える。

c) エントレインド エアーが凍結抵抗性におよぼす影響 AE コンクリートとプレーン コンクリートとの比較から、凍結抵抗性は AE コンクリートがはるかに良好である結果を示していたが、しかし、この両者の浸透率にはそれほど明瞭な相違は認められていなかった。も

ちろん、この結果は入念に締固めをした供試体についての結果であって、一般的にはウォーカービッチーの改善によって良好な施工がなされ、AE コンクリートはプレーン コンクリートよりも水密性は良好になると思われる。しかし水密性の若干の増加が凍結抵抗性を飛躍的に増大させる主要な原因とは考えられない。そのおもな原因は、T.C. Powers 氏も述べて^{17),21)}いるように空気泡の分布による凍結時の膨張圧力の緩和にあると考える。微細な数多くの気泡の存在は、自由水が毛管組織中を流動する間隔をいちじるしく短くする。この間隔が短いほど低い圧力で水は流動することが可能となり、凍結時に作用する膨張圧力は緩和される。同時にこの気泡は内部に流動する自由水を吸収する効果を与えらる。AE コンクリートの場合に、凍結によって生ずる圧力がプレーン コンクリートよりも相当に低いことは、凍結融解作用によって生ずる供試体の膨張が表-4に示したように AE コンクリートがはるかに小さかった結果からも明らかである。

コンクリート中の空気泡分布状態を把握するために、凍結融解試験に用いたと同じコンクリートで造った同じ寸法の供試体から切断した供試片を用いて、面積法^{22)~26)}(蛍光材を空気泡に填充し、それを撮影した写真から測定した(写真-3))によって空気泡の測定を行なった。空気泡分布の結果の一例を図-10に示した。AE 剤を用いることによって約 300 μ 以下の気泡が連行され、寸法の小さいものほどその個数は多く、約 100 μ 以下の

写真-3 硬化コンクリート中の空気泡分布(倍率10)
AE コンクリート
w/c=0.50, 空気量約5%



プレーン コンクリート
w/c=0.50

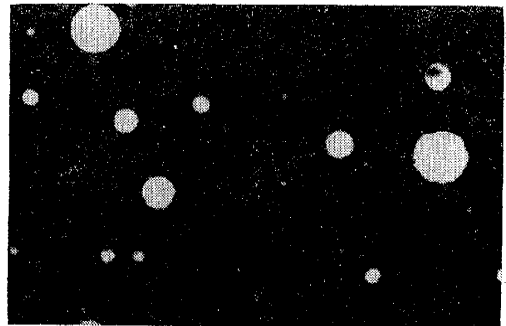
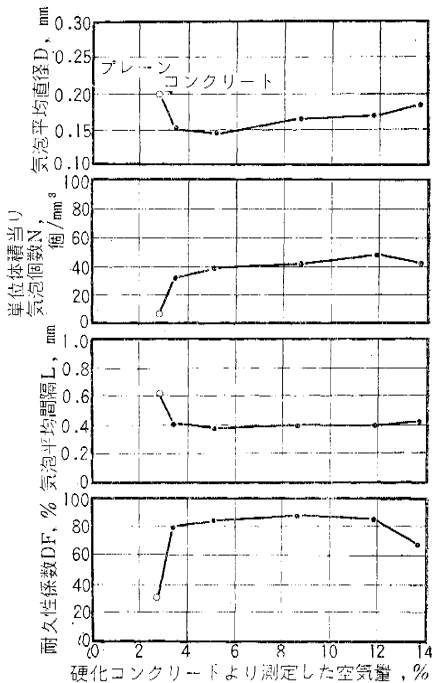


図-10 コンクリートの空気泡諸性質におよぼす空気量の影響



気泡個数は全体の約70%におよんでいることが認められた。図にみるように、わずかなエントレインドエアが連行された場合でも微細な気泡個数の増加から気泡平均間隔は急激に減少している。また一方、空気量をさらに増加していても気泡平均間隔はそれほど大きく変化していない。耐久性係数の値においてもこの気泡平均間隔と類似した傾向を示しており、凍結抵抗性のすぐれたコンクリートはおおむね気泡平均間隔も小さい結果として表われている。

以上の結果からコンクリートの凍結抵抗性を高める最も大きな要素はエントレインドエアの連行であり、凍結抵抗性を必要とする場合は必ずAEコンクリートを用いるのがよいと結論できる。またAEコンクリートの空気量の変化は、傾向としては8%程度(骨材最大寸法25mmの場合において)までは空気量の増加に比例して耐久性係数も増大するが、しかし、その増大は大きいものではなく、実用上からは所要のウォーカービッチーあるいは強度から選定される空気量でおおむね満足できる凍結抵抗性が得られるものであり、良好な施工と養生が期待できる場合には必要以上に大きい空気量をとる必要はないと思われる。

5. マス コンクリートの湿式ふるいわけが凍結抵抗性におよぼす影響

(1) 試験の結果

ダムに用いるコンクリートの粗骨材最大寸法はかなり大きく、一般には 100~150 mm、場合によってはそれ以上の寸法のものまで用いられている。このため、あらかじめダム コンクリートに用いる配合あるいは材料が凍結抵抗性におよぼす影響を評価するための試験を行なう場合、実際に用いるフルミックス コンクリートについて行なうことは、試験設備の上から、また、なるべく短期間に結果を得る上からきわめてやっかいなことである。これに対して従来は大きい粗骨材をとりのぞいたコンクリートについて、比較的小さな供試体を用いて凍結融解試験を行なう場合が多かった。しかしながら、湿式ふるいわけをすることによってコンクリートの配合は大きく変化することは明らかである。その水セメント比はもとのコンクリートとそれほど相違はないが²⁷⁾、単位水量、単位セメント量および細骨材率はそうとうに増加する。したがって湿式ふるいわけをしたコンクリートから得られる結果によって試験の目的を達し得るかはきわめて疑問である。この観点から湿式ふるいわけをしたコンクリートとしないコンクリートとの凍結抵抗性の比較を実験によって求め、さらに、その結果からダム コンクリートに用いる配合あるいは材料が凍結抵抗性におよぼす影響を試験する場合の配合を選定する一方法を導こうとしたものである。

湿式ふるいわけの影響を試験するためにつぎの2種類のコンクリートについて実験した。一つは粗骨材最大寸法がそれぞれ 150, 80, 40, 25 mm のコンクリートを 25 mm で湿式ふるいわけした実験 AC・4・a、他の一つは粗骨材最大寸法 40 mm のコンクリートをふるいの寸法それぞれ 25, 10, 5 mm で湿式ふるいわけした実験 AC・4・b である。AC・4・a シリーズの、粗骨材最大寸法 150, 80 mm のコンクリートはダムを想定した配合をとった。

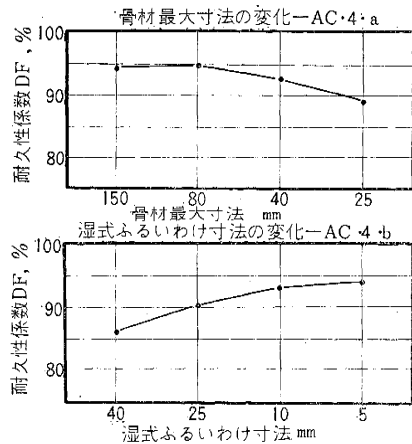
試験の結果を 表-7 および 図-11 に示した。図にみるように湿式ふるいわけしたコンクリートの凍結抵抗性はしないものにくらべて明らかに大きく、その傾向は、AC・4・a においては粗骨材最大寸法の大きいコンクリ

表-7 湿式ふるいわけシリーズにおける試験結果

AC-4	粗骨材最大寸法 (mm)	水セメント比	細骨材率 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	スランピング (cm)	空気割合 (%)	耐久性係数 DF (%)
a	150 (25)	0.43	22 (53)	220 (415)	95 (178)	3.0*	4.0* (5.2)	94.1
	80 (25)		27 (55)	251 (416)	108 (179)	3.0*	4.0* (5.1)	94.7
	40 (25)		32 (48)	286 (382)	123 (164)	3.0	4.6 (6.1)	92.3
	25		34	353	152	3.0	4.7	89.6
b	40	0.50	33	270	135	4.0	4.1	86.1
	(25)		(41)	(316)	(158)	5.0	(4.3)	90.2
	(10)		(62)	(412)	(206)	5.5	(5.3)	93.0
	(5)		(100)	(532)	(266)	7.5	(6.6)	94.0

注：40 mm ふるいで湿式ふるいわけしたコンクリートで測定

図-11 コンクリートの湿式ふるいわけが凍結抵抗性におよぼす影響



ートを湿式ふるいわけしたものほど、また AC・4・b においては湿式ふるいわけ寸法の小さいものほど大きい結果を示した。表-7 に () で示した値は、湿式ふるいわけによって粗骨材をとりのぞいたのちのコンクリート 1 m³ あたりの配合を計算によって求めたものである。

() の値から明らかなように、湿式ふるいわけによって細骨材率、単位セメント量はそうとうに大きくなっており、試験結果は、これらの大きかった配合ほど凍結抵抗性も大きい結果となっている。AC・4・a において、粗骨材最大寸法 150 mm と 80 mm との耐久性係数にほとんど相違が認められなかったが、この点も、表-7 の () にみるように、湿式ふるいわけした両者のコンクリートの間に細骨材率、単位セメント量の差がほとんど認められなかったことによってしていると判断できる。

(2) 試験結果の考察

湿式ふるいわけしたコンクリートの細骨材率、単位セメント量に相当する耐久性係数を前述の細骨材シリーズおよび単位セメント量シリーズから得られた 図-4, 5 によって推定した値と、本章の実験から得られた耐久性係数とはほぼ同じ結果を得ている。すなわち、湿式ふるいわけしたコンクリートの凍結抵抗性もそのコンクリートよりも良好な結果を与えるおもな原因は、細骨材率がいちじるしく大きくなるうえに単位セメント量もまた大きくなるためであると結論できると考える。

コンクリートの凍結抵抗性を試験する目的には、骨材の品質による影響を明らかにする場合も当然考えられる。湿式ふるいわけ法によって試験を行なうことは、きわめて多くの骨材がとりのぞかれるため骨材の品質の影響が試験結果にふくまれる程度も少なくなる。さらに、コンクリートの弾性的性質あるいは熱膨張係数、熱拡散率などの熱的性質も当然相違してくる。したがって、湿式ふるいわけをしたコンクリートについて試験をするこ

とは、まったく配合の異なったコンクリートについて試験することにはかならず、試験方法としては不相当であると判断される。

マス コンクリートに用いられる配合あるいは材料が凍結抵抗性におよぼす影響を評価するための試験方法を導くために、表-8 に示した比較試験を行なった。コンクリートに用いた粗骨材最大寸法はいずれも 25 mm とし、対象としたマス コンクリートは表-7 に示した最大寸法 150 mm のダム コンクリートである。(a) はダ

表-8 湿式ふるいわけしたコンクリートとしないコンクリートとの試験結果の比較

	粗骨材 最大寸 法 (mm)	水セメ ント比	細骨材率 (%)	単位セメ ント量 (kg/m ³)	単 位 水 量 (kg/m ³)	スラン プ (cm)	空気量 (%)	耐久性 係 数 DF (%)
	150	0.43	22	220	95			
a*	25	0.43	(53)	(415)	(178)	3.0	5.2	92.0
b	25	0.43	22	220	95	0	3.0	74.2
c	25	0.43	22	286	123	2.0	2.9	78.0

* 湿式ふるいわけしたコンクリート

ム コンクリートを 25 mm で湿式ふるいわけした配合であり、(b) はダム コンクリートと同じ配合、ただし粗骨材は 25 mm 以下に換算して用いたものである。この配合は細骨材率、単位セメント量がダム コンクリートと変化なく、骨材量も同じ量(容積)をとっている点で望ましいと考えられたが、寸法の小さい骨材の増加のために非常にあらあらしく、まったくウォーカビリティーに欠けたコンクリートとなった。このため振動締めによっても型わくの成型が容易ではなかった。また(c) はダム コンクリートと同じ水セメント比、細骨材率をとり、スランプ、空気量もほぼ同じとった。これはコンクリートが極端に硬練りとなることをさけ、なるべくものコンクリートと類似のウォーカビリティーをもつようにするためである。したがって単位水量、単位セメント量はものコンクリートよりも若干増加している。このコンクリートは、細骨材率が小さいために良好なウォーカビリティーを有しているとはいえないが、型わくの成型は振動締めをすることによって十分可能であった。

試験の結果は表-8 に示したように、湿式ふるいわけした配合(a)にくらべて、配合(b)、(c) はかなり低い耐久性係数を示している。(b) と(c) との結果には大きな相違はなかったが、(b) の場合は2個の供試体が凍結融解サイクル中に折損した。折損した供試体は粗骨材とモルタルの付着面から剥離していたことから、まったくウォーカビリティーに欠けた極端に硬いコンクリートであったためにその付着が十分でなかったことが原因となったと判断され、したがって配合(b) は試験方法としては不相当であると考えられる。

配合(c) は供試体の折損する現象は認められなかった。ただし配合の点で(b) とは多少相違しており、単

位セメント量が若干増加している。しかしながら、細骨材率はものコンクリートと同じくっており、しかもその値は小さい。細骨材率が小さい場合には単位セメント量の変化によって凍結抵抗性はほとんど影響されないことをすでに明らかにしており、したがって(b) コンクリートとの配合上の若干の相違は試験結果には大きな影響を与えていないと考えられる。

大きい骨材を用いたマス コンクリートの凍結抵抗性と小さい供試体を用いた場合のそれとの関連性についてはなお今後の研究にまたねばならない点である。しかしマス コンクリートに用いる配合あるいは材料などの相対的な評価をするための試験としてこれを小さい供試体によって行なう場合、できるだけマス コンクリートに近づけた配合をとるのが合理的であり、現在までの実験からはつぎの方法によるのが最も相当であると考えて、ここに提案する。すなわち試験をしようとするコンクリートは、供試体寸法から選定される粗骨材寸法を最大寸法とする骨材を用い、その水セメント比はマス コンクリートと同じくとり、細骨材率もなるべくこれに近づけて類似のウォーカビリティーを与え、また空気量もほぼこれと同じくする配合のコンクリートについて試験を行なう。また、コンクリートの配合、材料の点から凍結抵抗性にすぐれていることがすでに明らかであるマス コンクリートについて、同じ方法によって同時に試験を行ない、両者の相対的な比較から試験結果の評価を導くことが望ましい。

6. 結 論

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的実験を行なった結果から、実験の範囲内においてつぎの結論が導かれる。(1) コンクリートの凍結抵抗性は AE 剤による空気泡の連行によっていちじるしく増大し、また水セメント比が凍結抵抗性に影響を与える主要な要素であるとする従来の定説が確認された。AE コンクリートの空気量の変化は一般には特に大きな凍結抵抗性の相違を与えず、実用上からは所要のウォーカビリティー、あるいは強度から選定される空気量で満足できる凍結抵抗性が得られると判断できる。(2) 凍結融解作用によるコンクリート劣化の主要な原因は、外部から浸透する自由水にあるのであって、コンクリート自体が保持している自由水のみによってはその劣化はあまり影響されないと考える。(3) コンクリートの凍結抵抗性は細骨材率によっても影響され、細骨材率の減少は凍結抵抗性を相当に低下させることが明らかとなり、凍結抵抗性の点からは細骨材率もまた配合上の重要な要素として考える必要があると思われる。単位セメント量が凍結抵抗性におよぼす影響は、水セメント比、細骨材率の変化がなければ一般にはあまり認められない

が、細骨材率が実用の範囲以上に大きい場合には単位セメント量のみ増加によって凍結抵抗性は増大する。

以上の結果から、凍結抵抗性が重要である構造物においては、水セメント比の小さい AE コンクリートを用いることが当然必要であるが、同時に極度に細骨材率の減少をはかることはさける必要があり、特にダム の表面コンクリートは大きい寸法の粗骨材をのぞいたコンクリート、あるいは用いない配合のコンクリートで施工することが望ましいと考える。

マス コンクリートに用いる配合あるいは材料が凍結抵抗性におよぼす影響を明らかにする目的で試験をしようとする場合、湿式ふるいわけをしたコンクリートについて試験をすることは、細骨材率、単位セメント量のいちじるしく多い、まったくものコンクリートと異なった配合のコンクリートについて試験することにほかならず、試験方法としては不適當である。この場合の試験はつぎの方法によるのがよいと考える。試験しようとするコンクリートはできるだけマス コンクリートに近づけた配合をとるのが合理的である。したがって、そのコンクリートは、供試体寸法から選定される粗骨材寸法を最大寸法とする骨材を用い、水セメント比はマス コンクリートと同じくとり、細骨材率もなるべくこれに近づけて類似のウォーカービリチーを与え、また空気量もほぼ同じくする配合のコンクリートについて試験を行なう。

参 考 文 献

- 1) 永倉 正：コンクリートの凍結抵抗性に関する研究，電力中央研究所 技術研究所報告，土木・61012，昭和36年9月。
- 2) Tentative Method of Test for Resistance of Concrete Specimens to Rapid Freezing and Thawing in Water, ASTM Designation : C 290-57 T.
- 3) Withey, M.O. : Considerations Involved in the Making of Freezing and Thawing Tests of Concrete, Proc. ASTM, Vol. 46, p. 1198 (1946).
- 4) Allen, W. : Discussion of "Considerations Involved in the Making of Freezing and Thawing Tests of Concrete", Proc. ASTM, Vol. 46 (1946).
- 5) Price, W.H. : Discussion of "Considerations Involved in the Making of Freezing and Thawing Tests of Concrete", Proc. ASTM, Vol. 46 (1946).
- 6) Bergström, S.G. : Comparison of Non-destructive Methods of Observation Used in Freezing and Thawing Test on Concrete, 5th Congress on Large Dams, 1955, Question 19 R-70.
- 7) Blanks, R.F. & Cordon, W.A. : Practices, Experiences, and Tests with Air-entraining Agents in Making Durable Concrete, Proc. ASTM, Vol. 44 (1949).
- 8) Backstrom, J.E., Burrows, R.W., Mielenz, R.C. & Wolkodoff, V.E. : Origin, Evolution, and Effects of the Air Void System in Concrete. Part 1-4, Journal of ACI, July-Oct., 1958.

- 9) Wuerpel, C.E. : Laboratory Studies of Concrete Containing Air-entraining Admixtures, ACI Journal, Feb. 1946, Proc., Vol. 42.
- 10) Fritsch, J. : Research for Laws for the Resistance to Freezing and Thawing of Concrete Mixtures, 5th Congress on Large Dams, 1955, Question 19, R-70.
- 11) Kennedy, H.L. : Entrained Air Its Effects on the Constituents of Portland Cement Concrete, Proc. ASTM, Vol. 44 (1944).
- 12) Klieger, P. : Effect of Entrained Air on Concretes Made with So-Called "Sand-Gravel" Aggregate, ACI Journal, Oct. 1948, Proc., Vol. 45.
- 13) Hornibrook, F.B., Freiburger, H. & Litvin, A. : A Study of Durability and Void Characteristics of Concretes Containing Admixtures, Principally of the Air-entraining Type, Proc. ASTM, Vol. 46 (1946).
- 14) 国分正胤：各種 AE 剤の使用方法に関する研究，土木学会論文集 第23号，昭和30年2月。
- 15) Mary, M. & Chapelle, M. : Influence de La Nature du ciment sur La Résistance au Gel, 5th Congress on Large Dams, 1955, Question 19, R-87.
- 16) Böhmer, H. & Wogrin, A. : Concrete with Low Cement Content, 5th Congress on Large Dams, 1955, Question 19, R-50.
- 17) Powers, T.C. : A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, ACI Journal, Feb. 1945, Proc., Vol. 41.
- 18) Weiner, A. : A Study of the Influence of Thermal Properties on the Durability of Concrete, ACI Journal, May 1947, Proc., Vol. 43.
- 19) Smith, G.M. : Physical Incompatibility of Matrix and Aggregate in Concrete, Journal of ACI, March, 1956.
- 20) Berthier, R. : Bonding Between Cement and Aggregate and Their Behaviour in Frost, RILEM, Bull., No. 40, 1958.
- 21) Powers, T.C. : Void Spacing as a Basis for Producing Air-entrained Concrete, ACI Journal, May 1954, Proc., Vol. 50.
- 22) Verbeck, G.J. : The Camera Lucida Method for Measuring Air Void Hardened Concrete, ACI Journal, May 1947, Proc., Vol. 43.
- 23) Brown, L.S. & Pierson, C.U. : Linear Traverse Technique for Measurement of Air in Hardened Concrete, ACI Journal, Oct. 1950, Proc., Vol. 47.
- 24) Lord, G.W. & Willis, T.F. : Calculation of Air Bubble Size Distribution from Results of a Rosiwal Traverse of Areated Concrete, ASTM Bulletin, No. 177, 1951.
- 25) Warren, C. : Determination of the Properties of Air Voids in Concrete, Bulletin, No. 70, Highway Research Board, 1953.
- 26) 左右田・多田・前川：AE コンクリートの気泡に関する研究，セメント技術年報 XIII，昭和34年。
- 27) Bureau of Reclamation : Mass Concrete Investigation, Boulder Canyon Project Final Report, Part VII, Bull 4, 1949.