

長期現地暴露試験に基づくダムコンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究

江川顕一郎*・千代田将明**・野本高憲***
野口博章****

本研究は、20年に亘って自然環境下に暴露した1m立方のコンクリートブロックの経年測定結果を基に、ダムコンクリートの耐凍害性について論じたものである。検討の結果、AE剤を用いたものではスケーリング型の劣化形態が支配的となり、水セメント比が110%でもAE剤を用いていれば、ひびわれは無く、表面部のスケーリング劣化のみに留まること、フライアッシュの混用がダムコンクリートの耐凍害性の向上に効果があることを示し、併せて促進凍結融解試験の位置づけについて言及したものである。

Key Words : frost resistance, exposure test, dam concrete, AE agent, fly ash, crack, scaling

1. ま え が き

水殿ダム(東京電力、1969年竣工アーチ式コンクリートダム)は、長野県西部(標高855.5m、北緯36°8′)に位置し、凍結融解作用を受ける気象条件としては、比較的厳しい環境下にある¹⁾。ここでは、1969年から調整池の満水位と低水位の中間の盤に、1m立方の大型コンクリートブロックを設置し、ダムコンクリートの現位置における試験を継続実施中である。

現位置で凍結融解試験を行った例は少なく、世界でも2~3例しか報告されていない。米国のT. Kennedy他²⁾は、Treat島で種々の骨材を用いたコンクリートについて凍結融解試験を行い、各々についてその特性を述べるとともに促進試験との比較を行っている。また、米国のF. Jackson³⁾は、何種類かのセメントタイプについて現位置凍結融解試験を行っており、AE剤が非常に有効であること、及びAE剤の効果は完全に物理的現象として説明できると述べている。

日本では、日本大ダム会議コンクリート凍害実験研究分科会(委員長:國分正胤東京大学名誉教授)が、1961年から1m立方の大型ブロックを各ダムサイトに設置し、現位置で凍結融解作用によるコンクリートの劣化を調査している^{4),5)}。

水殿ダムの測定も上記研究分科会の一環として行われているものである。他のダムでは主に当該ダムと同配合のコンクリートについて測定が行われているが、水殿ダムではそれまでにない種々の配合について実験が行われている。本試験に用いた配合は、水殿ダム本体と同じ単

位結合材使用量(以下、単位セメント量と略称する)=200kg/m³を最高の富配合とし、これより貧配合のものも含めて9種選定し、最貧配合は単位セメント量=80kg/m³と、極めて結合材量の少ないものである。

試験項目は主に毎・春秋に行う動弾性係数の測定が主体であるが、暴露試験開始後18年にあたる1987年には、この大型ブロックのうち4体を切断し、圧縮強度試験やコンクリートの内部組織の測定を行った。

本論は、20年間にわたる暴露試験の結果から、貧配合を含むダムコンクリートの耐凍害性について述べるとともに、促進凍結融解試験との比較を試みたものである。

2. 試験方法

(1) 使用材料

供試体コンクリート製造に用いた各材料は、水殿ダム本体のコンクリートと同一のものである。

セメントはN社製中庸熱ポルトランドセメントを、フライアッシュは当時石炭焚きであった当社川崎火力発電所産のものを用いた。骨材は梓川産の河床砂礫を粒度調整して用い、粗骨材の最大寸法は150mm、細骨材の粗粒率は2.8程度とした。混和剤にはY社製天然樹脂酸塩AE剤を用いた。各材料の平均的な物性値は表-1の備考欄に示すとおりである。

(2) コンクリートの配合条件

暴露試験に供したコンクリートの配合は、水セメント比、単位セメント量、AE剤混入の有無、フライアッシュ混用の有無に着目して表-1に示す9配合とした。

それぞれの配合番号は、アルファベットの初めの文字がAE剤混入の有無(A:混入、N:無混入)を、次の文字がフライアッシュ混用の有無(F:混用、N:無混用)を、そして数字が水セメント比を表している。例えば、AF49配合はAE剤及びフライアッシュをともに用いた水セメント比49%の配合で、これは水殿ダム本

* 正会員 東京電力(株) 工務部 部長
(〒100 千代田区内幸町1-1-3)

** 正会員 工修 東京電力(株) 工務部工務土木課主任

*** 正会員 工修 東京電力(株) 建設部土木課主任

**** 正会員 工修 東電設計(株) 第一土木本部 水力開発部 課長代理

表-1 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの品質

項目 記号	コンクリートの配合										フレッシュコンクリート測定値				備考 (材料の主要物性値)
	Gmax (mm)	W/ (C+F) (%)	F/ (C+F) (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)						ス ラ ン プ (cm)	空 気 量 (%)	外 気 温 (°C)	コン ク リ ー ト 温 度 (°C)	
					W	C	F	S	G	AE剤					
AF 49	150	49	25	22	98	150	32.5	467	1645	54cc	3.3	3.0	28.0	23.0	
AF 71	150	71	25	24	92.5	97.5	32.5	519	1643	34	2.8	2.8	28.0	23.0	
AF 91	150	91	25	24.5	90	75	25	532	1640	23	2.9	2.6	18.5	19.0	
AF110	150	110	25	25	88	60	20	546	1636	16	2.6	3.1	19.0	14.0	
AN 71	150	71	0	24	92.5	130	0	519	1643	34	3.2	3.1	23.0	21.5	
AN 82	150	82	0	24	106	130	0	510	1614	34	14.0	3.1	22.0	18.5	
AN 91	150	91	0	24	90	100	0	532	1640	23	3.3	3.0	24.0	22.0	
NF 78	150	78	25	25	101	97.5	32.5	554	1661	0	3.1	1.1	19.0	18.5	
NN 78	150	78	0	25	101	130	0	554	1661	0	3.0	1.3	19.0	20.0	

結合材物性		C	F
比重		3.20	2.19
比表面積 (cm ² /g)		3,200	3,100
骨材物性		S	G
比重		2.62	2.66
吸水率		1.20	0.63
安定性損失量 (%)		3.1	2.1
(NaOH)			
岩質 (%)	砂岩	58.3	
	チャート	9.9	
	粘板岩	9.8	
	安山岩	8.5	
	花崗岩	7.4	
	その他	6.2	

表-2 供試体の種類および測定項目

形状	大型立方体	小型円柱	角柱
寸法	1m×1m×1m	φ15×30cm	7.5×10×40cm
測定項目	動弾性係数	動弾性係数・質量 圧縮強度	動弾性係数・質量 (促進凍結融解試験)
養生	暴露	暴露	水中/暴露
個数	2体	3体	2~3体

体と同一の配合である。

(3) 供試体の作製

作製した供試体の種類及び測定項目は表-2に示すとおりである。暴露試験用としては大型立方供試体 (1m×1m×1m) と小型円柱供試体 (φ15×30cm) を作製した。また、この他に所定の材令の強度試験用として小型円柱供試体 (標準水中養生及び暴露) を、さらに材令1年での促進凍結融解試験 (ASTM C 666) 用として角柱供試体 (7.5×10×40cm) を作製した。試験開始を材令1年としたのは、ダムコンクリートの場合供用までの期間が長く、その間一般のコンクリートに比べ十分な養生が講じられると考えたためである。

コンクリートの練りまぜは56切 (1.5 m³) の可傾式ミキサにより2.5分間行い、ダンプトラックによって運搬し、人力によって打設した。

大型ブロックの締固めはダム本体で用いたものと同じ電動式パイプレータ (直径130mm, 振動数7500rpm) を用いて行った。養生は打設直後からムシロで覆いこれに散水する方法で1週間養生した後で脱型した。

小型円柱供試体用のコンクリートは40mmで、凍結融解用の角柱供試体は25mmでそれぞれウェットスクリーニングを行い、型枠に打設した。小型円柱供試体は暴露試験用および強度試験用とも打設翌日にキャッピングし、翌々日に脱型を行い、暴露用のものは大型と同様な状態で、また強度試験用のうち水中養生のものは20°Cの水槽に入れ、所定の材令まで標準水中養生を行っ

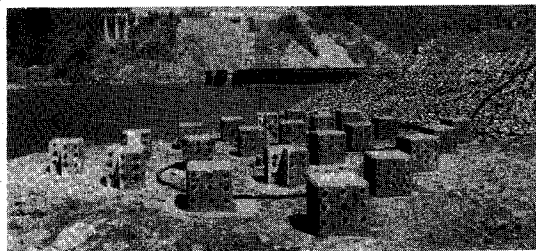


写真-1 暴露用供試体設置状況

た。また、凍結融解試験用の供試体は強度試験用の水中養生と同じ条件で養生を行った。

フレッシュコンクリートの品質管理試験結果を表-1に併せて示す。

(4) 暴露条件

a) 設置場所

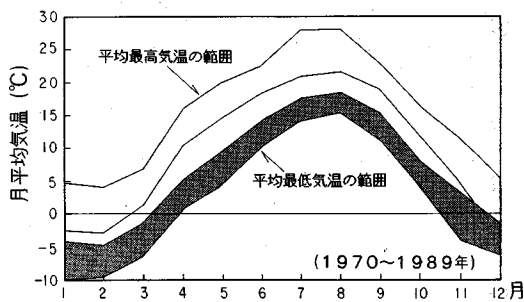
暴露用供試体は、写真-1に示すように長野県梓川の水殿ダム調整池内の右岸側 (北緯36°8', 標高850.0m) に設置されており、大型ブロックの各面はそれぞれが東西南北に面するよう配置されている。

b) 気温及び降水量

暴露後20年間における暴露地点周辺の月平均最高・最低気温の範囲を図-1に示す。これによれば、毎年12月頃から翌年3月頃まで月平均最低気温が0°C以下となるうえ、年最低気温は月平均で氷点下10°C近傍まで下がり、コンクリートに対して厳しい環境下となる。暴露後、1990年4月までに日最低気温が0°C未満になった日数は累計で2,715回であった。

また、日射計を大型ブロックの各面に設置し、12~3月間に測定した日射量は方角によってかなり異なり、コンクリート各面における1日の総日射量の比率は、南面を1とした場合、上、西、東、北面においてそれぞれ0.84, 0.58, 0.25, 0.23であった。

c) 供試体設置場所の水位変動



図一 月平均最高・最低気温の範囲

表一 供試体の経年変化測定項目

測定項目		測定方法
圧縮強度	小型供試体 (標準養生)	材令: 28日, 91日, 1年, 5年, 18年
	小型供試体 (暴露)	材令: 91日, 1年, 5年, 18年
動共振法	大型ブロック	材令: 18年 (AF49, AF110, NF78, NN78) 切出し供試体 (30cm立方)
	小型供試体 (暴露)	SONICによる一次共振振動数 ・上下間1測線 (2回/年)
超音波係数	小型供試体 (暴露)	PUNDIT*による超音波伝播速度 ・上下間1測線 (2回/年)
	大型ブロック	PUNDIT*による超音波伝播速度 ・東西南北方向側面間各9測点, 18測線 (2回/年)
質量	小型供試体 (暴露)	・2回/年

*) 機器を1977年11月より変更しているが、動弾性係数値に差はない。

表一 大型ブロックおよび小型標準水中養生供試体の気泡間隔係数

配合	気泡間隔係数 (μm)	
	大型ブロック (切出し)	小型標準水中養生供試体
AF49	153	184
AF110	124	175
AF78	295	338
NN78	367	281

供試体は、ダム調整池の運転水位 (H. W. L. 853.5 m と L. W. L. 845.5 m) の間に設置してあるため、水位の変動によって12月から3月の間に約30回水没する。

(5) 経年変化測定項目

供試体の経年変化測定項目は表一に示すとおりである。このうち、大型ブロックの圧縮強度試験のみは経年変化測定ではなく、材令18年において大型ブロックより切り出した立方供試体を用いて試験を行った。

(6) コンクリートの品質

大型ブロックおよび小型標準水中養生供試体の材令18年における気泡間隔係数測定結果を表一に示す。

また、小型供試体の材令20年までにおける圧縮強度試験結果を表一に示す。

3. 暴露試験の結果と考察

(1) 劣化の形態と測定指標について

暴露開始後20年での大型ブロックの劣化状況は次のとおりである。

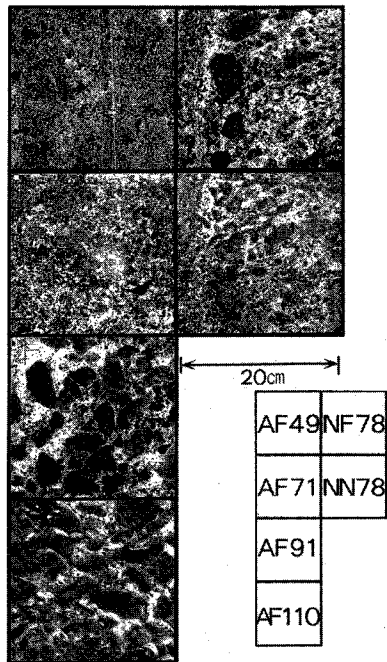
a) 大型ブロックの表面状況

材令20年目における代表的な配合の大型ブロックの

表一 小型供試体の各材令における圧縮強度 (kgf/cm²)

供試体	材令	28日	91日	1年	5年	18年	18年大型 ²⁾	20年 ³⁾
標準水中養生供試体	AF49	21.3	36.3	39.2	43.1	40.1	—	—
	AF71	15.7	22.0	28.8	31.2	—	—	41.2
	AF91	8.0	12.3	18.8	17.0	—	—	25.2
	AF110	16.6	29.4	23.3	24.2	—	—	25.8
	AF78	14.0	18.0	14.0	17.4	—	—	21.6
暴露供試体	NF78	13.9	18.9	24.3	30.4	38.1	—	—
	NN78	14.8	21.2	21.0	23.3	27.7	—	—
	AF49	—	28.4	35.0	35.7	36.9	65.3(0.88)	—
	AF71	—	22.3	28.8	28.7	—	—	—
	AF110	—	9.3	9.3	17.0	—	—	—
備考	AF78	—	9.3	2.4	2.7	9.1	20.1(0.78)	—
	AN82	—	14.8	18.2	20.0	—	—	—
	AN91	—	12.3	10.5	15.2	—	—	—
	NF78	—	16.7	18.9	24.8	24.5	39.7(0.84) ⁴⁾	—
	NN78	—	12.1	19.0	24.2	25.9	29.6(0.81) ⁴⁾	—

1), 3) 供試体2個の平均値
2) 切り出し立方供試体の強度を円柱供試体に変換 (L'Hermitteの式) () 内の数値は補正係数
4) 切り出した時にエポキシ樹脂を注入



写真一 大型ブロックの表面状況 (暴露開始後20年)

表面状態を写真一に示す。これによれば、水セメント比が大きくなるに伴い、ペースト分、続いてモルタル分が洗い出され細骨材、粗骨材が露出していく状況が認められる。この際、AE剤を用いていないNN78およびNF78配合の表面状況はこれと前後の水セメント比の配合のほぼ中間に位置し、AE剤の有無が表面状態に及ぼす影響は明瞭ではない。

b) 大型ブロックの内部状況

AE剤を用いていないNN78, NF78ならびにAE剤混入・フライアッシュ混用で水セメント比の最も小さいAF49と最も水セメント比が大きいAF110の4つの配合を対象に材令18年でブロックの南西の隅角部 (40 cm×40 cm×100 cm) を切断して、内部状況を確認した。内部のスケッチ状況は、図一に示すとおりであり、水殿ダム本体と同じ配合のAF49配合の内部には目視できるひびわれはなく、また水セメント比の最も大きい



図-2 大型ブロックの内部状況 (暴露開始後 18 年)

AF 110 配合でも同様に内部は健全な状態であった。一方、AE 剤を混入していない NN 78 および NF 78 配合では、粗骨材周辺部に多くのひびわれが認められ、両者のうちではフライアッシュを用いていない NN 78 配合により多くのひびわれが発生していること、また NF 78 では供試体上部にひびわれが集中していることが認められた。

c) 測定指標と劣化形態

超音波法によって、供試体設置後初めて迎える冬季の直前 (1969 年 12 月、供試体作製後 3~5 ヶ月経過) に計測した値を初期値とし、これに対する各測定時点での比率 (%) を求め、これを相対動弾性係数として表した。図-3 に 20 年目における相対動弾性係数を水セメント比で整理した結果を示す。測定結果は、測定方向 (東西、南北) による違いがほとんど無かったため、高さ別に 2 ブロックの平均値で示した。これによれば、AE 剤を混入していないものでは初期値を下回っているが、AE 剤を混入したものでは水セメント比に関係なく初期値以上の値を示している。また、全体的に相対動弾性係数は下段が高く上段が低く、特に上段に多くのひびわれが認められた NF 78 の上段部の相対動弾性係数も低下していることから、ひびわれの影響を表しているものと考えられる。

凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化の形態は“ひびわれ型”と“スケーリング型”に大別される⁶⁾。本試験を通じて、AE 剤を用いたものでは写真-2 から水セメント比が大きくなるにつれてスケーリングが大き

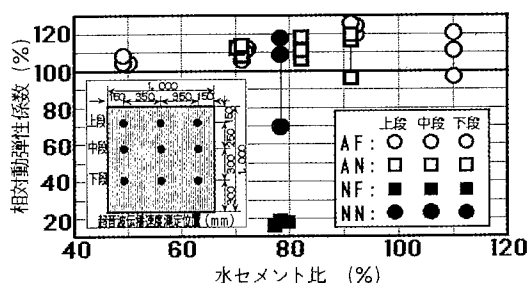


図-3 大型ブロックの相対動弾性係数 (暴露開始後 20 年)

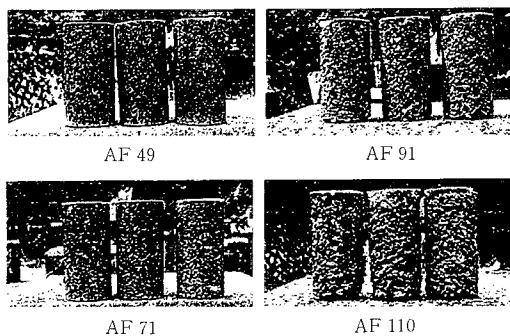


写真-3 小型供試体の表面状況 (暴露開始後 20 年)

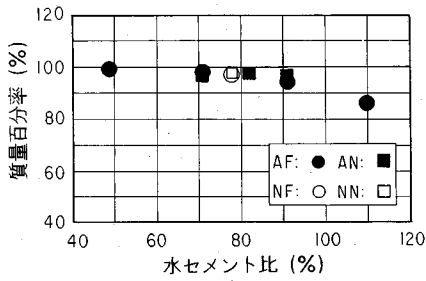
くなり、また図-2 より AE 剤を用いていない配合では、これにひびわれが加わったものと考えられる。

図-3 に示した相対動弾性係数の測定結果からは、ひびわれ型の劣化状況は表現できているが、スケーリング型の劣化を起こした AE 剤を用いた配合では水セメント比の変化に対して相対動弾性係数は変化していないことから、スケーリング型の劣化に対しては少なくとも超音波法による相対動弾性係数が劣化の指標となり得ないことがわかる。

小型暴露供試体の表面状況は、写真-3 に示すとおりであり、水セメント比の増加に伴い表面が剝離し、スケーリングが増加していくことがわかる。図-4 に小型暴露供試体の質量百分率を示す。これによれば、水セメント比の増加とともに質量百分率が小さくなり、スケーリングが大きくなっていくことが認められる。

小型暴露供試体の相対動弾性係数は、大型ブロックと同じ超音波法の他に、共振法で測定を実施している。両者の関係は図-5 に示すとおりであり、共振法ではスケーリングによる断面補正 (質量減少を断面積の減少として補正) の有無に拘らず、超音波法で求めた場合と比較して低い値を示し、水セメント比の増加とともにその差が大きくなる傾向にある。

これは、両者の測定原理ならびに測定位置の違いが影響しているものと考えられる。共振法は、供試体全体に振動を与え、1 次の固有振動数を測定して動弾性係数を求める方法である。これに対して、超音波法では供試体



図—4 小型供試体の質量百分率 (暴露開始後 20 年)

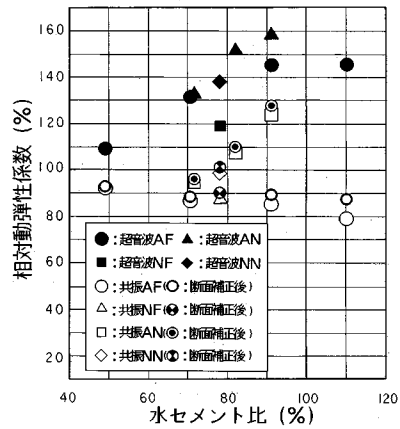
の周囲に比べ劣化の比較的小さい円柱供試体端面 (片側キャッピング) に端子を当て、供試体中央部を伝播する超音波伝播速度から動弾性係数を算出している。前者の方法によった場合、表面損傷箇所も含めた供試体全体の動弾性係数が表現できるのに対して、後者の方法によった場合では表面損傷の影響が少ないと考えられる。このため図—5 に示したように、水セメント比の増加とともに相対動弾性係数が高くなり、その傾向が超音波法で顕著に現れたものと考えられる。コンクリート強度の長期に亘っての増進割合は先に表—5 にも示したとおり水セメント比の大きなものほど大きいことから、水セメント比の大きいものほど初期値に対する強度の伸びが大きく、この強度の増加割合の程度の差が測定結果に影響し、水セメント比が大きいものほど超音波法による相対動弾性係数の値が大きくなったものと考えられる。

このように、小型暴露供試体では供試体中央部の品質に影響される超音波伝播速度が速いことおよび供試体表面に目視できるひびわれが無いことから、内部にもひびわれが生じている可能性は低いと想像され、スケーリング型が卓越しているものと考えられる。また、大型ブロックの相対動弾性係数は超音波法で測定しているが、その測定端子を当てる位置がブロック側面であるために、表面劣化部をも含んだ状態で測定されている。したがって、小型暴露供試体で認められたような水セメント比の増加とともに動弾性係数が大きくなるような傾向が現れ難かったと考えられる。

以上より、本試験でのコンクリートの劣化形態は、ひびわれ型とスケーリング型に大別され、AE 剤を用いていないものでは両者の複合劣化形態を、AE 剤を用いたものでは後者の劣化形態を示しているものと考えられる。また、小型暴露供試体では、AE 剤の使用の有無に拘らずスケーリング型劣化が支配的と考えられる。

(2) 水セメント比がスケーリング型劣化に及ぼす影響について

既に示した写真—2 からは、大型ブロックで AE 剤を用いた配合のものは、水セメント比が大きくなるほどスケーリング量が大きくなるのがわかる。また、写真—3 から小型供試体でも同様の関係があることがわかる。



図—5 小型供試体の相対動弾性係数 (暴露開始後 20 年)

このように AE 剤を用いた配合では、水セメント比がスケーリング量に及ぼす影響という点では小型暴露供試体と大型ブロックは定性的に同じであると言える。

以下に、水セメント比が大きくなると大型ブロックのスケーリング量が大きくなる原因について考察する。コンクリートの耐凍害性を決める要因は、一般に外的要因と内的要因の 2 つに分類される。外的要因は、主に温度と水分環境に関わる要因であるが、同じ環境に暴露されている大型ブロックは外的要因については同じと考えられる。

一方、内的要因としてはコンクリートが凍結融解作用を受けた場合に、内部に劣化を発生させる要因と劣化に抵抗する要因が考えられる。前者の発生側要因を表す指標としては組織の緻密さ (ここでは、特に耐凍害性において大きな役割を果たすと考えられる $10^3 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の量¹³⁾ に注目) の違いによる凍結水量の差があり、後者の抵抗側要因を表す指標としては気泡分布および強度がある。

まず、組織の緻密さの違いによる凍結水量の差は、図—6 に示した細孔径分布から知ることができる。図—6 は、暴露開始後 18 年の大型ブロックから切り出した供試体の表面部分から試料を採取し、その細孔径分布を示したものである。これによれば、スケーリング量が最大の AF 110 の方が最小の AF 49 よりも細孔径分布が粗大側にシフトしていることがわかる。このことから水セメント比が大きくなると内部の細孔組織が粗大になり、これに伴いコンクリート中の凍結水量が多くなる⁷⁾ため、発生する凍結圧が大きくなりスケーリング量も大きくなるものと考えられる。

次に、気泡組織については、表—4 の暴露開始後 18 年での切り出し供試体の気泡間隔係数は AF 49, AF 110 とともに同程度であり、水セメント比による気泡組織の差はないと判断できる。

最後に強度については、図—7 から、暴露された小型供試体の強度はセメント水比が大きくなるほどほぼ線形

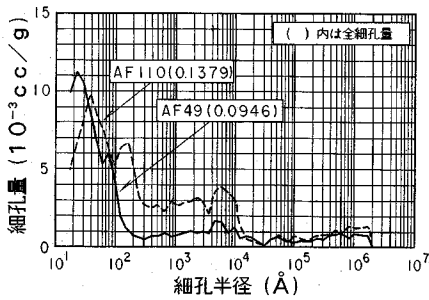


図-6 切出し供試体の細孔径分布 (暴露開始後18年, AF 49, AF 110)

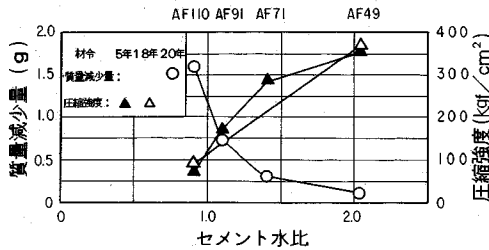


図-7 小型供試体におけるセメント水比と強度および質量減少量の関係

関係で強度が大きくなっており、また質量減少量は小さくなっていることがわかる。小型の質量減少量がコンクリート表面のスケーリングを定量的に表す指標と考えられることと、先に述べたように水セメント比がスケーリングに及ぼす点では大型ブロックと小型供試体とが定性的に一致していることから、水セメント比が大型ブロックのスケーリング量に及ぼす影響についても強度の差が一つの要因になっていると考えられる。水セメント比が大きいものはコンクリートの強度が小さいために、劣化に対する抵抗能力が小さくなりスケーリング量が大きくなるものと考えられる。

以上のことから、水セメント比が大きいものほどスケーリング量が大きくなる原因としては、組織の粗大化による凍結水量の増加と強度の低下が考えられる。

(3) AE 剤がひびわれ型劣化に及ぼす影響について

先に図-2に示したブロック内部のひびわれ状況ならびに図-3で示した20年時点での相対動弾性係数の測定結果より、AE 剤を混入することによって、ひびわれ型の劣化に対する抵抗性を向上させることが明かであり、その混入効果が認められる。また、このときのコンクリートの気泡間隔係数は、表-4に示したとおりであり、全体に小さめの値であるが、AE 剤使用の有無の差が認められ、既往の研究で示されている250 μm程度以下であれば耐久的なコンクリートとなる⁸⁾ことと一致している。

今回の暴露試験の様に試験期間が長期に亘った場合、その間に強度が増進して相対動弾性係数が増加し、これ

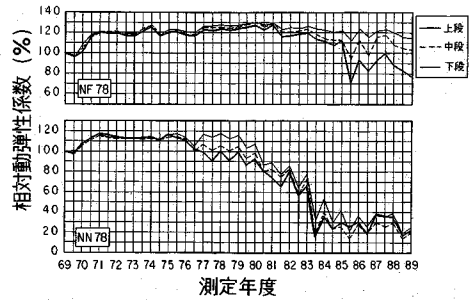


図-8 nonAE 配合 (大型ブロック) の相対動弾性係数の経年変化

によってひびわれが発生しているにも拘らず劣化が生じていないと判断する可能性が考えられる。しかし、図-2および図-3より、例えば、材令18年間で200 kgf/cm²程度の強度増加(表-5, 小型暴露供試体)があったNN 78およびNF 78でも、ひびわれの発生箇所では相対動弾性係数が大きく低下しており、超音波法による相対動弾性係数は内部劣化を捉えるに足る指標と考えられる。また、本試験では、純粹なる劣化を強度増進が補っていることも考えられるが、自然環境下における実構造物においてはその効果も含めて耐凍害性を評価すべきと考えられる。

AE 剤を混入していないNN 78およびNF 78の相対動弾性係数の経年変化を図-8に示す。これによれば、ひびわれ型劣化を起こすコンクリートの相対動弾性係数の変化は100%程度以下となった以降には急激に低下し、劣化が進行していくことが認められる。

一方、AE 剤を用いていないNN 78およびNF 78の小型暴露供試体の経年変化は図-9に示すとおりであり、AE 剤を用いていなくとも劣化の程度が極めて小さい。小型供試体の気泡間隔係数は先に表-4に示したとおりであり、直接暴露試験用の供試体を対象に測定は行っていないが、標準養生供試体による測定結果では、NN 78およびNF 78とも300 μm程度の値を示しており、劣化を起こした大型ブロックと同程度である。

このように、気泡間隔係数が同程度でも大型ブロックと小型暴露供試体でAE 剤の混入による耐凍害性向上の効果の程度が異なるのは、大型ブロックの方が劣化が進行し易い状況にあるため、大型ブロックにおいてAE 剤の効果により顕在化したものと考えられる。

大型ブロックの方が小型供試体よりも劣化が進行し易い要因としては以下の3つのものが挙げられる。

- ①供試体寸法の差による内部拘束力の違い
- ②飽水状態の違い
- ③粗骨材最大寸法の違い

このうち、図-2に示した内部ひびわれの発生状況から判る様に、粗骨材下面にひびわれが多く認められたことから、③の粗骨材の最大寸法の影響が大きいものと考え

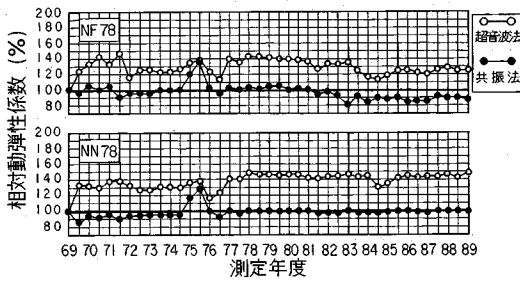


図-9 nonAE 配合(小型供試体)の相対動弾性係数の経年変化

られる。

Macinnisらは、粗骨材の最大寸法の増加により凍結融解抵抗性が低下することを報告している⁹⁾。また、小林は凍結融解作用を受けるコンクリートの骨材粒間の間隔の測定を行い、ひびわれがセメントペーストと骨材の境界周辺に集中して発生している可能性を指摘している¹⁰⁾。図-2に示した大型ブロックの切断面状況によれば、ひびわれ発生箇所の多くは粗骨材の周辺にあり、小林が指摘した可能性を裏付けているものと考えられる。これとMacinnisらの報告を併せて考えると、凍結融解作用下において粗骨材周辺は潜在的な欠陥部分となっている可能性が高いと考えられる。すなわち、粗骨材下面の組織はブリージングの影響で多孔質化しており¹¹⁾、そのためにこの箇所の凍結可能水量は一般部に比べて相対的に多くなり凍結融解による損傷が大きくなる可能性が高い。この潜在的な欠陥サイズは、粗骨材の最大寸法の増加に伴い大きくなると考えられ、大型ブロックの劣化の大きな一因と考えられる。

次に、AE 剤が粗骨材最大寸法の大きなコンクリートにおける耐凍害性の向上に及ぼす効果について考える。小林は、骨材とセメントペースト硬化体との付着性状について検討し、粗骨材下面部に集まるブリージング水が潜在的な欠陥となり、付着強度に強く影響を及ぼすことを報告している¹¹⁾。

図-2によれば、粗骨材周辺に発生しているひびわれと骨材との位置関係を見た場合、ひびわれは粗骨材の下面に多く、小林が指摘しているように粗骨材下面部に集まるブリージング水が潜在的な欠陥となっている可能性を示している。一方、これと同時期に切断したAE 剤を用いた場合のAF 49およびAF 110では、粗骨材周辺にもひびわれの発生は認められず、内部は健全な状態にあった。これは、AE 剤混入による微細な空気が骨材周辺に発生する大きな応力集中を緩和するように働いていると考えられる。AE 剤混入の効果としては、第一に微細な空気の連行による凍結時の凍結圧の緩和が挙げられる。その他、従来から知られるように材料分離の低減にも効果的であり、これを用いた場合、粗骨材下面部に集まるブリージング水が少なくなることが容易に想

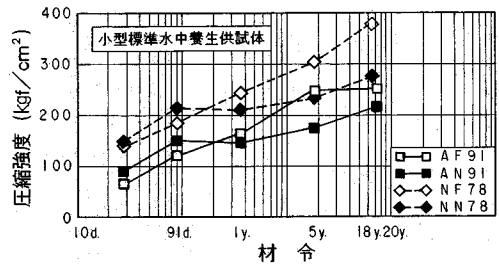


図-10 小型標準水中養生供試体の強度発現

像される。

したがって、AE 剤の混入効果としては、第一に凍結融解作用時の発生水圧の低減効果が挙げられる。この他に、40 mm でウェットスクリーニングした小型供試体においてAE 剤の混入効果が明瞭に示されなかったことを考え併せ、大きな粗骨材下面の潜在的な欠陥部の改善にも役割を果たしていることが想像される。

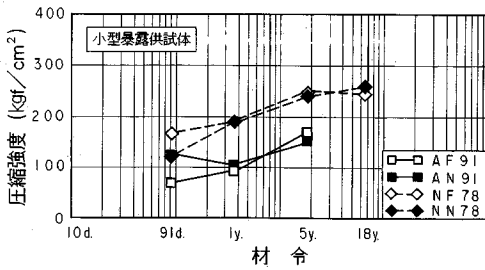
(4) フライアッシュがひびわれ型劣化に及ぼす影響について

先に示した図-3によれば、AE 剤を用いた配合の場合にはフライアッシュの混用の有無で耐凍害性に差はみられないが、AE 剤を用いない配合の場合、フライアッシュを混用した場合の方が耐凍害性に優れていることが判る。また、図-8に示した大型ブロックの測定結果からも、フライアッシュを混用した方が相対動弾性係数の低下開始時期を遅らせ、耐凍害性が向上していることがわかる。

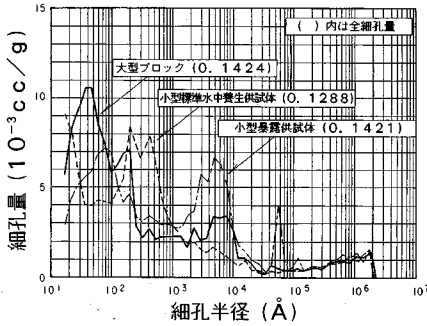
フライアッシュの混用がコンクリートの品質向上につながることは、國分によって既往研究成果がまとめられており、ポズラン反応による長期強度の増進に効果のあることが報告されている¹²⁾。

図-10, 11は、フライアッシュの混用が圧縮強度に及ぼす試験結果を示したものである。これによれば、標準水中養生の場合フライアッシュ混用の効果が明瞭に示されており、ポズラン反応が進行していることがわかる。一方、小型暴露供試体の場合は、低温・低湿度であり、ポズラン反応にとって不利な条件にあるためにフライアッシュ混用の効果はほとんど認められない。

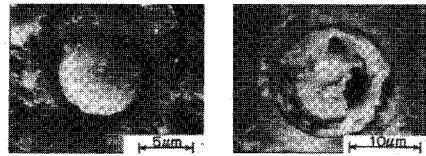
これに対し、大型ブロック内部では標準水中養生程度の養生状態にあるものと考えられる。例えば、図-12は、最も水セメント比が大きいAF 110の標準養生供試体、小型暴露供試体および大型ブロックの細孔径分布を示したものであり、大型ブロック内部の組織の緻密さ(ここでは主に細孔径分布における卓越径に着目)はAF 110のような水セメント比が極めて大きいものでも、標準供試体程度は確保されているものと判断される。さらに、写真-4は材令18年における大型ブロック内のフライアッシュの状態を示した電子顕微鏡写真であり、フライアッシュ表面が侵食されポズラン反応が進行している¹⁴⁾



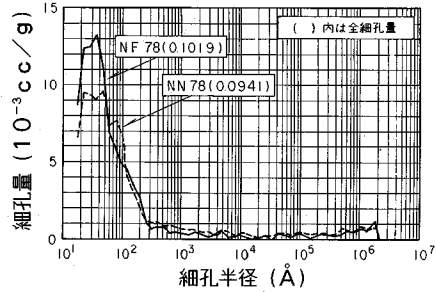
図—11 小型暴露供試体の強度発現



図—12 AF 110の細孔径分布



写真—4 大型ブロックのフライアッシュの状況 (暴露開始後18年)



図—13 切出し供試体の細孔径分布 (暴露開始後18年, NF 78, NN 78)

ことがわかる。したがって、フライアッシュを混用した場合の大型ブロックの強度は、混用しない場合に比べ高いことが十分に考えられる。

図—13はフライアッシュの混用が水和物組織の緻密化に及ぼす影響を検討するために実施した、大型ブロック内部からの採取試料による細孔径分布測定結果を示したものである。これによれば、フライアッシュを混用した方では、フライアッシュの混用により卓越する径が多少細径側へ移動しているが、両者の差は小さい。

コンクリートの耐凍害性は、細孔径分布が深く関連し、セメントペースト硬化体を用いた促進試験の結果からは $10^3 \sim 10^4 \text{ \AA}$ 程度が多いと劣化し易いとされている¹³⁾。図—13に示した細孔径分布によれば、この範囲における両者の差は極めて少ない。したがって、フライアッシュの混用効果が細孔量の減少以外に別な効果を持っているのではないと思われる。すなわち、フライアッシュを混用した場合の強度増進の理由がフライアッシュ粒子とセメント水和物とを強固に結合させる効果が大きいこと¹²⁾を考えれば、フライアッシュの混用による耐凍害性の向上は、水和物自体の強度増加によるものと考えられる。

一方、図—9に示した小型暴露供試体の相対動弾性係数の経年変化から、小型暴露供試体の相対動弾性係数は大型ブロックとは逆にフライアッシュを混用した方が小さく、劣化が大きくなっている。

小型暴露供試体の強度は、図—11に示したとおりであり、養生環境がボゾラン反応にとって不利な状態にあり、フライアッシュを用いても長期強度の増進はほとんど認められない。したがって、結合材の一部としてフライ

アッシュの効果が大型ブロックの内部と比較して十分に発揮されていない、フライアッシュ混用による強度発現の遅れ分だけ、劣化を受け易い状況にあったと考えられる。このことより、フライアッシュは用いられたコンクリートの養生状態がボゾラン反応に適した環境下であれば、耐凍害性の向上にもその混用効果があると考えられる。

4. 自然環境下におけるダムコンクリートの耐凍害性の評価について

長期間自然環境下に暴露されたコンクリートの劣化に及ぼす要因には、種々のものが考えられるが、今回の暴露試験においては、AE剤の使用の有無により劣化に大きな差が生じていることから、凍結融解作用によるものが支配的と考えられる。

ここでは、小型供試体暴露試験および室内促進試験の結果から大型ブロックの耐凍害性を評価する際の問題点を整理し、評価の可能性について述べる。室内促進試験は、図—14に示す材令1年まで水中養生したコンクリート供試体の促進凍結融解試験結果を用いる。表—6に大型ブロック、小型暴露供試体および促進試験供試体の3者の間で、相対動弾性係数と質量百分率について比較を行った結果を示す。

(1) 促進試験結果に基づく小型暴露供試体の耐凍害性評価について

表—6で促進と小型暴露の相対動弾性係数(共振法)を比較すると、総ての配合で促進の方が相対動弾性係数が小さいことがわかる。この差の原因として考えられるのは温度・湿潤条件である。例えば温度条件だけを見ても水殿ダムにおける凍結温度および融解温度を 0°C と仮定したときの凍結融解サイクル数は、20年間に1500

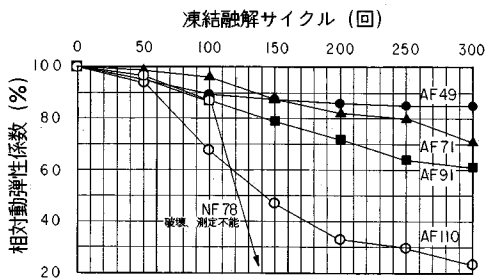


図-14 促進凍結融解試験結果

回余りとなり、促進試験の5倍程度の凍結融解の繰り返しを受けている。それにも拘らず、小型暴露供試体の方が高い相対動弾性係数を示していることは、促進試験の方が最低温度、湿潤の程度ならびに凍結速度が自然環境に比べて過酷なことを意味していると考えられる。また、促進と小型暴露の相対動弾性係数の間に特に明確な関係はなく、促進の相対動弾性係数から小型暴露の相対動弾性係数を直接推定できないことがわかる。あえて言えば、それぞれにおける配合間での相対動弾性係数の大小関係がほぼ一致していることから、配合間での優劣順位を推定することは可能と考えられる。

表-6の促進と小型暴露の質量百分率の関係をみると、相対動弾性係数と同様に、特に明確な関係は見いだせないものの、それぞれの中での配合間の質量百分率の大小関係はほぼ一致していることがわかる。つまりAE剤を用いてスケーリング型劣化が支配的になるコンクリート配合では、促進試験供試体の質量百分率から小型暴露供試体のスケーリング量を直接推定することは難しいが、配合間での優劣順位をつけて評価することは可能と考えられる。

(2) 小型供試体暴露試験結果に基づく大型ブロックの耐凍害性評価について

表-6から、小型暴露と大型ブロックの相対動弾性係数(超音波法)を比較すると、総ての配合において大型ブロックの方が小さくなっており、特にAE剤を用いない場合で両者の差が顕著になっているために、直接的な対比はできないことがわかる。この原因としては3.(3)で述べたとおりウェットスクリーニングによる粗骨材最大寸法の差の影響が大きいと考えられる。また、それぞれの中で配合間の相対動弾性係数の大小関係が一致しないことから、配合間の優劣順位をつけて評価することも困難であると考えられる。

質量百分率は大型ブロックの質量が測定できないため、直接的な比較はできないものの、小型暴露供試体の質量百分率の大小関係と写真-2に示した大型ブロックの表面状況が一致していることがわかる。

(3) 室内促進試験結果に基づく大型ブロックの耐凍害性推定について

表-6 相対動弾性係数と質量百分率の比較

試験条件	現地暴露			促進凍結融解試験		
	供試体の形状寸法	1×1×1mの大型ブロック	φ15×30cmの円柱供試体	7.5×1.0×4.0cmの角柱供試体		
測定項目	相対動弾性係数 (%)			質量 (%)	耐久性係数 (%)	質量 (%)
	配合	超音波法	超音波法 共振法			
AF 49	104	109	92	99	85	98
AF 71	109	134	86	98	71	90
AF 91	123	145	86	94	61	81
AF 110	108	147	79	86	24	75
NF 78	98	120	87	97	29	97
NN 78	18	142	99	97	-	-

ASTM C 666等に代表される室内促進凍結融解試験は、骨材、混和剤、コンクリートの耐凍害性を評価する上で一般に多用されているが、現状では自然環境下のコンクリート自体の耐凍害性を直接的に評価するまでには至っていないと思われる。

(1) および(2)から、促進の相対動弾性係数結果から大型ブロックの耐凍害性を評価することは、2つの試験法の温度条件と粗骨材最大寸法がともに異なることから非常に困難であることと、配合間での優劣順位をつけて評価することも困難であることがわかる。ただし、今回の試験結果から少なくとも次のことは言える。図-14において促進凍結融解サイクル300回以前に破壊したNF78が、自然環境下にある大型ブロックでも著しく劣化していることから、AE剤を用いない配合でひびわれ型劣化を起こすような耐凍害性に劣るコンクリートにおいては、促進300サイクル以前の供試体破壊は自然環境下のダムコンクリートの劣化を意味する目安になる。

一方、AE剤を用いてスケーリング型劣化が支配的になると考えられる配合では、促進の質量百分率から大型ブロックのスケーリング量を直接的に推定することは難しいが、配合間での優劣順位をつけて評価することは可能であると考えられる。

5. 結 論

本研究の範囲内で次のことが言えると思われる。

(1) 水殿ダムの本体部分と同じ配合(AE剤混入、フライアッシュ25%混用、水セメント比49%)の大型ブロックは、20年間の凍結融解作用を受けても表面部および内部ともに劣化は見られない。

(2) AE剤を混入した配合ではスケーリング型の劣化形態を示し、水セメント比が大きくなるほどスケーリング量が大きくなる。ただし、AE剤を混入し水セメント比が110%の大型ブロックが20年間暴露された場合でも、表面部はスケーリングが顕著に進むが、ひびわれは無く、内部は健全な状態を維持している。これに対し、

AE 剤を混入しない配合では、スケーリング型とひびわれ型の複合劣化形態を示し、このようなものでは、急激に劣化が進行する場合のあることが認められる。

また、スケーリング型の劣化に対しては少なくとも超音波法による相対動弾性係数は劣化の指標になり得ない。

(3) フライアッシュは用いられたコンクリートの養生状態がダムコンクリート内部のようなボラン反応に適した環境下であれば、耐凍害性の向上にもその混用効果があると考えられる。

(4) 大型ブロックと小型暴露供試体を比較した場合、大型ブロックに代表されるダムコンクリートは、用いる粗骨材の最大寸法が大きいことにより潜在的な欠陥サイズが大きくなるなど、耐凍害性上、通常のコンクリートに比べ劣化し易い要素を含んでいる。しかしその一方で、構造体としてのサイズが大きいためにその内部はセメント等の水和に好条件であるので、組織の緻密化が図られており、AE コンクリートとすれば十分に耐久的と言える。

(5) 室内促進凍結融解試験の試験条件は自然環境に比べかなり厳しい条件にあり、この結果から直接的にコンクリートの耐凍害性を評価することは困難である。ただし、nonAE などの劣化の著しいコンクリートでは、促進試験の 300 サイクルまでの相対動弾性係数から、劣化程度の目安を得ることができると考えられる。

また、大型ブロックのスケーリング量は促進の質量百分率から配合間での優劣順位をつけて評価することが可能と考えられる。

謝 辞

本試験の計画を立てられたのは水越達雄氏（元東京電力最高顧問）であり、氏の卓抜なる識見により本論は出来上がったといえる。深甚なる謝意を表す次第である。また、本試験に当たっては、國分正胤東京大学名誉教授、小林正几法政大学教授、長瀧重義東京工業大学教授、岡村甫東京大学教授にご指導を賜った。ここに深く謝意を表す。最後に、20年余りにわたる長期の測定及び論文の取りまとめにあたっては、当社技術研究所構造研究室を

はじめ、多くの方の労を賜った。併せて謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) 例えば、(社)セメント協会：耐久性を阻害する要因マップ (D-1~D-3) 1985年4月~1988年6月。
- 2) Thomas B. Kenedy and Katharine Mather : Correlation Between Laboratory Accelerated Freezing and Thawing and Weathering at Treat Island, Maine, J. ACI, Oct., pp.141~172, 1953.
- 3) F.H.Jackson : Long-Time Study of Cement Performance in Concrete, J. ACI, Oct., pp.159~193, 1955.
- 4) 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 (第一報), 大ダム, 第45号, pp.1~30, 1968年10月。
- 5) 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 (第二報), 大ダム, 第76号, pp.1~16, 1976年6月。
- 6) 長谷川寿夫・藤原忠司：凍害, 技報堂出版, p.29, 1988年2月。
- 7) 鎌田英治：凍害のメカニズムと耐凍害性, セメント・コンクリート, No.461, pp.34~41, 1985年7月。
- 8) 小林正几：コンクリートの耐久性に関する各種混和剤の複合効果について, 日科技連第5回複合材料シンポジウム, 1978年。
- 9) Macinnis, C. and Lau, E.C. : Maximum Aggregate Size Effect on Frost Resistance of Concrete, J. ACI, Vol.68, No.2, pp.144~149, Feb.,1971.
- 10) 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, XXIII, pp.261~264, 1969年。
- 11) 小林正几：骨材とセメントペースト硬化体との付着性状について, セメント・コンクリート, No.319, pp.22~26, 1973年9月。
- 12) 國分正胤：フライアッシュおよびフライアッシュセメント, セメント・コンクリート, No.267, pp.2~19, 1969年5月。
- 13) 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, pp.36~42, 1981年11月。
- 14) 山崎寛司・佐藤健：ボラン・フライアッシュがコンクリートに及ぼす影響, コンクリート工学, Vol.19, No.11, pp.68~74, 1981年11月。

(1992.7.31 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON THE FROST RESISTANCE OF DAM CONCRETE BASED ON LONG-TERM EXPOSURE TEST

Kenichirou EGAWA, Masaaki CHIYODA, Takanori NOMOTO and Hiroaki NOGUCHI

This paper deals with the frost resistance of dam concrete on the basis of measurement data on one-cubic-meter concrete blocks, which have been weathered for twenty years. Analysis of the data revealed that the dominant pattern of deterioration of concrete containing an AE agent is scaling, that even at a water-cement ratio of 110%, concrete containing an AE agent does not develop any cracks although shallow scaling occurs, and that use of Fly ash improves the frost resistance of dam concrete. In this paper, the significance of accelerated freezing and thawing testing is also discussed.