

# 論文 長期暴露試験に基づくダムコンクリートの耐久性評価

松浦 忠孝\*1・小林 保之\*2・石田 哲也\*3

**要旨:** 日本大ダム会議では 1961 年から寒冷地における長期暴露試験を実施している。筆者は、長野県西部の水殿ダムにおいて 50 年以上に渡り実際の気象作用を受けた大型供試体および小型供試体を用いて、水結合材比、フライアッシュ、AE 剤の使用の有無が凍害劣化に与える影響を確認した。その結果、実環境においてダム本体と同じ配合のコンクリートは十分な耐久性を有すること、フライアッシュや AE 剤の使用が耐凍害性の向上に寄与することを確認した。また、精度向上の課題はあるが、小型供試体による試験あるいは促進凍結融解試験は、実環境におけるコンクリートの耐久性の優劣を定性的に評価できることが示唆された。

**キーワード:** 長期暴露, 耐久性, 凍害, ダム, フライアッシュ, AE 剤

## 1. はじめに

寒冷地に在るダムコンクリートの気象作用に対する耐久性とコンクリート供試体による耐久性試験結果との関連性を明らかにするため、日本大ダム会議ダムコンクリート凍害実験研究分科会では 1961 年から現地暴露試験を実施している。東京電力では、当研究分科会の一環として、長野県西部の梓川水系(標高 855.5m, 北緯 36°8')に位置し、冬期には比較的厳しい気象環境となる水殿ダム(アーチ式コンクリートダム)の調整池内において、1969 年のダム竣工から 50 年以上に渡り、1 m 立法の大型供試体およびφ150×300 mm の小型供試体を写真-1 に示すように屋外暴露することによって、実際の気象作用による凍結融解試験を継続実施している。この試験は、水殿ダム本体に用いられたコンクリートと同一の配合をはじめ、水結合材比、フライアッシュの混用、AE 剤使用の有無など変化に富む 10 種類のコンクリート配合が用いられているという特徴を有する。

本稿では、このような世界的にも極めて珍しい長期暴露による凍結融解試験の結果を、既報<sup>1),2)</sup>に続き 50 年を超えるデータとして示すとともに、これまでに得られた計測結果をもとに、ダムコンクリートの耐久性について配合および試験方法等の観点から考察を述べる。

## 2. 試験方法

### 2.1 使用材料

供試体コンクリートに用いた各材料は、水殿ダム本体に使用したものと同一のものである。セメントには N 社製中庸熱ポルトランドセメントを使用し、フライアッシュ(以降、図中では FA という)には当時石炭焼きであった川崎火力発電所産のものを使用している。骨材には水殿ダムが立地する梓川産の河床砂礫を粒度調整したも

のを使用しており、粗骨材の最大寸法は 150 mm, 細骨材の粗粒率は 2.8 程度である。また、混和剤には Y 社製天然樹脂酸塩 AE 剤を用いている。各材料の平均的な物性値を表-1 に示す。

### 2.2 コンクリート配合・供試体の作製

暴露試験に供したコンクリートは、ダム本体と同じ配合 A(水結合材比 W/B=49%, フライアッシュ置換率 25%, AE 剤使用)をはじめ、W/B, フライアッシュの混用、AE 剤使用の有無を変化させた表-2 の 10 配合である。



写真-1 長期暴露試験実施状況

表-1 材料の物性値

項目	諸元	備考
セメント C	密度 3.2 g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3,200 cm <sup>2</sup> /g	
フライアッシュ F	密度 2.19 g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3,100 cm <sup>2</sup> /g	
細骨材 S	表乾密度 2.62 g/cm <sup>3</sup> 吸水率 1.20 % 安定性損失量 3.1 %	[岩質] (%) 砂岩 58.3 チャート 9.9 粘板岩 9.8
粗骨材 G	表乾密度 2.66 g/cm <sup>3</sup> 吸水率 0.63 % 安定性損失量 2.1 %	安山岩 8.5 花崗岩 7.4 その他 6.2

\*1 東京電力ホールディングス(株) 経営技術戦略研究所 技術開発部 博士(工学)(正会員)

\*2 東京電力ホールディングス(株) 経営技術戦略研究所 技術開発部 修士(工学)(正会員)

\*3 東京大学 大学院工学系研究科 教授 博士(工学)(正会員)

表-2 コンクリート配合

No.	粗骨材の最大寸法 (mm)	水結合材比 W/B (%)	フライッシュ置換率 F/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE 剤 (g/m <sup>3</sup> )	フレッシュ性状		温度 (°C)	
					水 W	結合材 B		細骨材 S	粗骨材 G		スランプ (cm)	空気量 (%)	気温	コンクリート
						セメント C	フライッシュ F							
A	150	49	25	22	98	150	50	467	1654	54	3.3	3.0	28.0	23.0
B	150	54	25	23	95	131.2	43.8	492	1649	48	3.2	3.1	26.0	23.0
C	150	71	25	24	92.5	97.5	32.5	519	1643	34	3.0	2.8	28.0	23.0
D	150	78	25	25	101	97.5	32.5	554	1661	0	3.1	1.1	19.0	18.5
E	150	71	0	24	92.5	130	0	519	1643	34	3.2	3.1	23.0	21.5
F	150	78	0	25	101	130	0	554	1661	0	3.0	1.3	19.0	20.0
G	150	82	0	24	106	130	0	510	1614	34	14.0	3.1	22.0	18.5
I	150	91	25	24.5	90	75	25	532	1640	23	2.9	2.6	18.5	19.0
J	150	91	0	24.5	90	100	0	532	1640	23	3.3	3.0	24.0	22.0
K	150	110	25	25	88	60	20	546	1636	16	2.6	3.1	19.0	14.0

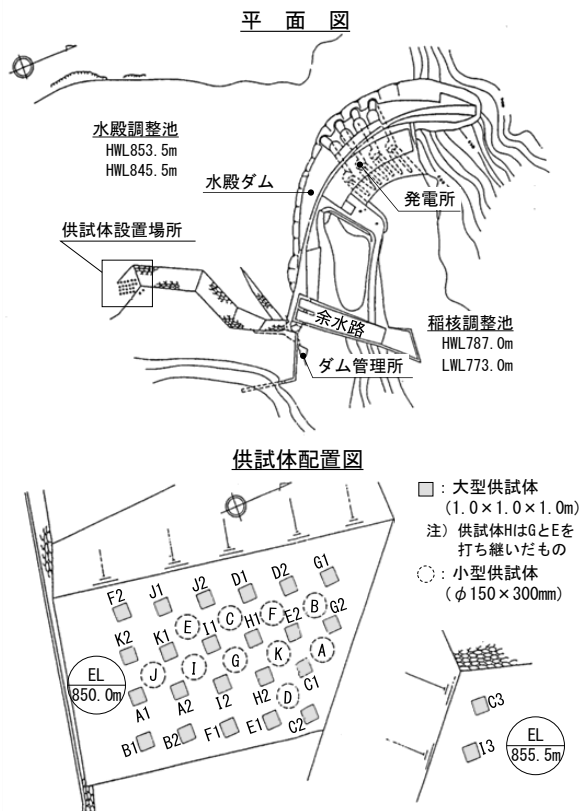


図-1 供試体設置位置図

大型供試体 (1m 立法) は、最大寸法 150 mm の粗骨材を含むフルミックスのコンクリートを用いて各配合 2 ないし 3 体作製し、小型供試体は 40 mm でウェットスクリーニングしたコンクリートを用いて各配合 3 体作製している。

### 2.3 暴露条件

#### (1) 設置場所

供試体は、図-1 に示す水殿ダム調整池の右岸側、満水位と低水位の中間標高に位置する盤に設置している。このうち大型供試体は土間コンクリート上に打設しており、四方はそれぞれ東西南北に面するように配置している。

#### (2) 気温・降水量

直近 2013~2023 年における当該地点の最高・平均・最

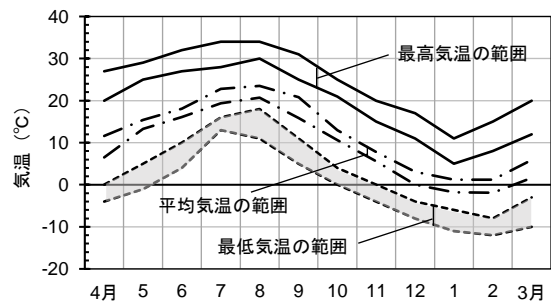


図-2 暴露試験箇所の気温 (2013~2023 年)

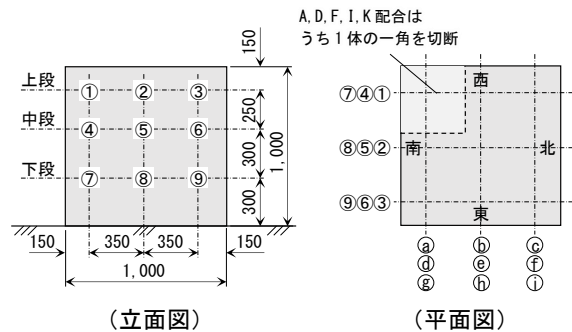


図-3 大型供試体の測点

低気温の範囲を図-2 に示す。毎年 12 月下旬から翌年 3 月上旬までは最低気温が氷点下 10 °C 近傍まで達するようなコンクリートに対して厳しい環境である。1969 年の暴露試験開始以降に作用した凍結融解サイクル数は、気象データが欠落している期間があるため正確に把握できていないが、2013~2023 年において最低気温が氷点下となった日数が年平均 87 日であったことから推定すると、その累計は少なくとも 4,000 回を超えるとみられる。

#### (3) 水位変動

供試体は、ダム調整池の運転水位内 (H.W.L. 853.5m~L.W.L. 845.5m) に設置されているため、水位変動によって水中に没することがある。その頻度は当該年の運用によって異なるが、2013~2023 年の冬期 12 月から 3 月にかけての水没回数は平均で 12 回/年程度である。なお、この調整池は冬期であっても結氷することはない。

## 2.4 試験方法

本稿では、耐凍害性の評価に資する動弾性係数の測定について主に取り上げる。大型供試体は、超音波試験機により図-3に示す1方向9測線を基本として、東-西・南-北の2方向の超音波伝播速度を測定した。なお、配合A, D, F, I, Kの供試体は、うち1体の一角を暴露開始から18年時点で内部組織観察のために切断しており、以降、当該部位は切断面を介して測定している。小型供試体は、超音波伝播速度を軸方向に1測線測定するとともに、共鳴振動法非破壊試験機により一次共鳴振動数(縦振動)を測定した。なお、超音波伝播速度、一次共鳴振動数ともに測定不能であった測線は、測定値から算定する動弾性係数をゼロとして取り扱った。

動弾性係数の算定は(式1)および(式2)による。また、相対動弾性係数は初期値に対する比(%)とした。

(超音波法)

$$E_d = \rho V_P^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{g(1-\nu)} \quad (\text{式1})$$

ここに、 $E_d$ : 動弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\rho$ : 供試体の単位容積質量 (N/m<sup>3</sup>, 配合上の理論値)、 $V_P$ : 超音波伝播速度 (km/s)、 $g$ : 重力加速度 (9.8m/s<sup>2</sup>)、 $\nu$ : ポアソン比 (0.2)

(共鳴振動法)

$$E_d = 408 \times 10^{-3} \frac{L}{A} m \cdot f^2 \quad (\text{式2})$$

ここに、 $E_d$ : 動弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)、 $L$ : 供試体長さ (mm)、 $A$ : 断面積 (mm<sup>2</sup>)、 $m$ : 質量 (kg)、 $f$ : 一次共鳴振動数 (Hz)

## 3. 試験結果と考察

### 3.1 外観

現時点(暴露開始から55年)の大型供試体および小型供試体の外観状況を写真-2および写真-3に示す。

大型供試体はいずれも原形を留めているが、一部のブロックには写真-4に示すような供試体上面に十字状のひび割れが認められた。このひび割れは1990年頃(暴露



写真-4 大型供試体上面に生じたひび割れ

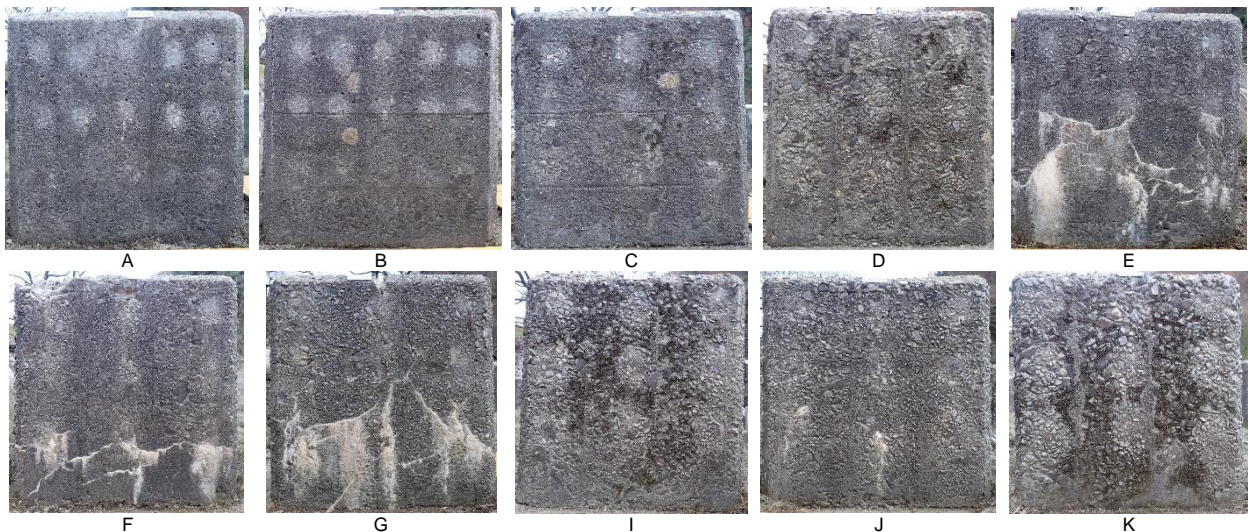


写真-2 大型供試体\*の外観状況 (暴露55年)

\*撮影方向は西面で統一。

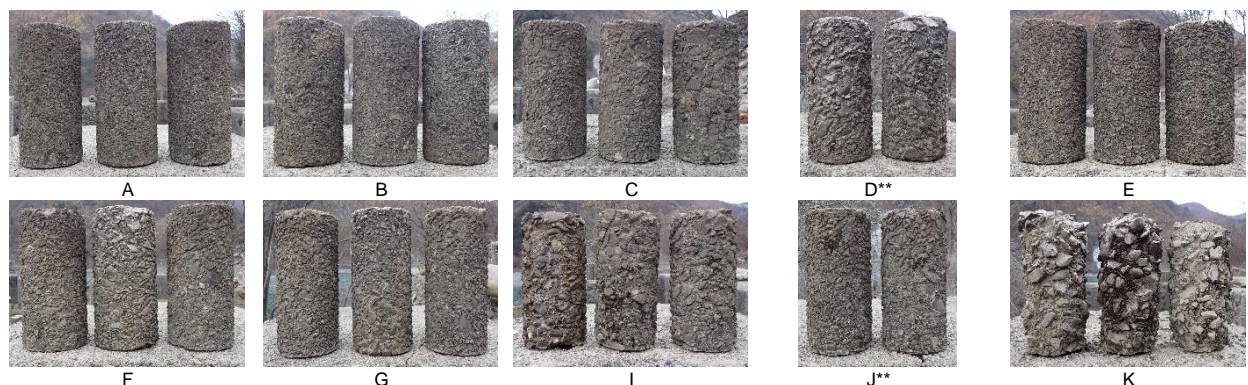


写真-3 小型供試体の外観状況 (暴露55年)

\*\*配合D, Jは暴露中に1本ずつ紛失。

開始から約 20 年)に確認されたもので、ひび割れの形態から発生要因は凍結融解作用によるものではなく、供試体上面への日射に起因する温度変化に伴う膨張・収縮の影響が蓄積したものと推察される。

この他、AE 剤を使用していない配合 D, F の供試体には写真-5 のように粗骨材の下面に沿ったひび割れが多く認められ、配合 F の角部では写真-6 のように一部剥落も認められた。また、フライアッシュを混用していない配合 E, F, G, J においては遊離石灰を伴うひび割れが認められた。これらに対し、ダム本体と同じ配合、あるいはフライアッシュと AE 剤の両方を使用した配合 A, B, C, I, K の供試体は、W/B が高いものほどスケーリングの進行が認められるものの、前述の十字状ひび割れを除いて外観上有意な劣化進行は認められない。

小型供試体は、単位セメント量が極めて少ない配合 I, K および AE 剤を使用していない配合 D, F にスケーリングによる断面減少が認められるものの、暴露開始から 50 年を超えた現在もひび割れ等によって崩壊したものはなく、円柱形状が保持されている。

### 3.2 大型供試体の相対動弾性係数の推移

#### (1) 供試体上面のひび割れの影響

供試体上面に生じた十字状のひび割れの影響もあって、供試体上段(図-3における測線 1~3, a~c)の相対動弾性係数は図-4 のように全ての配合で低下している。本稿では凍結融解作用による影響に焦点をあてるため、十字状ひび割れの影響が及んでいないと考えられる供試体下段(測線 7~9, g~i)および測線内に十字ひび割れが横断していない切断面(測線 1・4・7, a・d・g)の測定結果を用いて評価を行うこととする。なお、上中下段別の結果など測定結果の詳細は機会をあらためて報告する。



写真-5 ひび割れ状況

写真-6 剥落状況

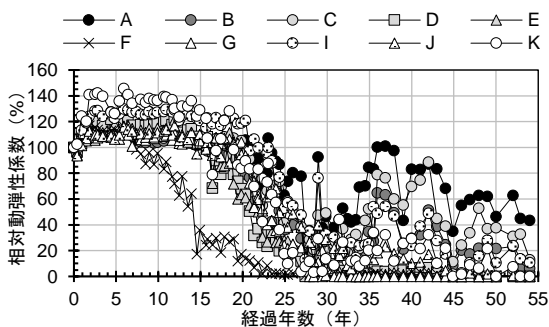


図-4 大型供試体上段の相対動弾性係数の推移

#### (2) 水結合材比による影響

図-5 にはフライアッシュおよび AE 剤を使用しつつ、W/B が異なる配合 A, B, C, I, K について、供試体下段の相対動弾性係数の推移を示す。また、図-6 には配合 A, I, K を対象とした切断面の相対動弾性係数の推移を示す。

暴露開始から約 20 年経過時点までは W/B=110% の超貧配合 K を含む全ての配合で相対動弾性係数が 100% を上回り、気象作用による顕著な劣化は認められなかった。なお、暴露 20 年間で作用したと推定される凍結融解回数(気温が 0°C を跨いだ回数)は 1,500~1,800 回程度である。その後、25~35 年にかけて計測結果が不安定な期間があるものの、W/B=110% (配合 K) 以外は 50 年を超えた現在も高い相対動弾性係数を維持している。特に、ダム本体と同じ配合 A は供試体下段、切断面ともに相対動弾性係数が 100% 相当で安定している。この結果は、ダムコンクリートが実際の気象作用に対して十分な耐凍害性を有することを示している。なお、供試体下段の測定結果において近年わずかな低下傾向が認められるが、いずれも既往履歴の範囲であることから今後の経過に注意を払いたい。

#### (3) フライアッシュによる影響

AE 剤を使用した配合のうちフライアッシュを混用した配合 C, I と混用していない配合 E, J について、相対動弾性係数の推移を図-7 に示す。

(2)の結果と同様に、暴露開始から約 20 年は全ての配合で相対動弾性係数が 100% を上回り、気象作用による顕著な劣化は認められない。しかしその後、フライアッ

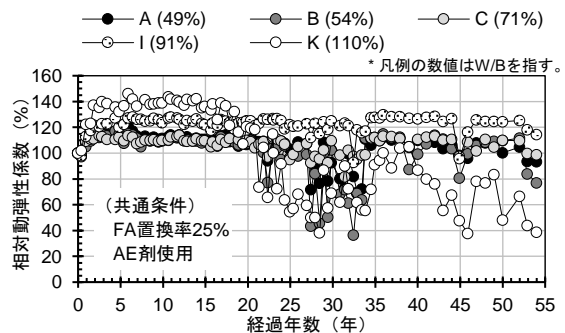


図-5 W/B 別の相対動弾性係数の推移 (下段)

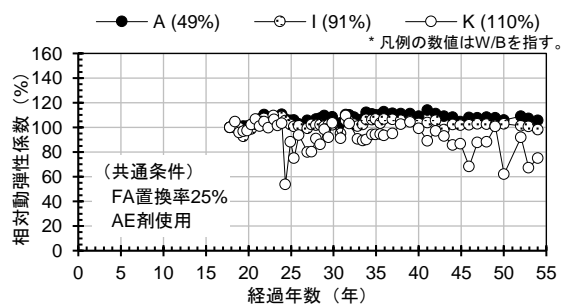


図-6 W/B 別の相対動弾性係数の推移 (切断面)

シュを混用していない配合 E, J は、20~30 年を起点に相対動弾性係数が低下し始め、直近では両者とも計測不能（相対動弾性係数ゼロ）となった。なお、フライアッシュを混用していない配合において W/B が高い方が耐久的であった原因は不明である。一方、フライアッシュを混用した配合 C, I は 50 年を超えた現在も相対動弾性係数 100% 相当が維持されている。この結果は、W/B=71~91% という貧配合の条件下においてもフライアッシュの混用が耐凍害性の向上に寄与することを示唆している。

#### (4) AE 剤による影響

AE 剤を使用した配合 C, E と、未使用の配合 D, F について、供試体下段の相対動弾性係数の推移を図-8 に示す。また、図-9 に配合 D, F を対象とした切断面の相対動弾性係数の推移を示す。

このうちフライアッシュを使用した配合 C, D は、前述と同様に暴露開始から約 20 年は気象作用による顕著な劣化は認められない。しかしその後、AE 剤を使用していない配合 D は 30 年頃から明らかに低下が進行し、45 年

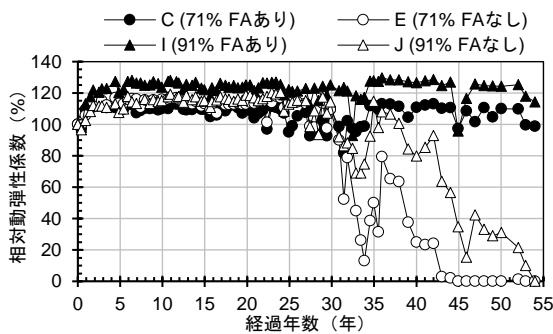


図-7 FAの有無と相対動弾性係数の推移（下段）

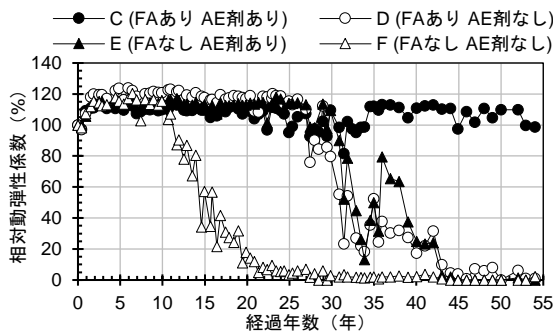


図-8 AE剤の有無と相対動弾性係数の推移（下段）

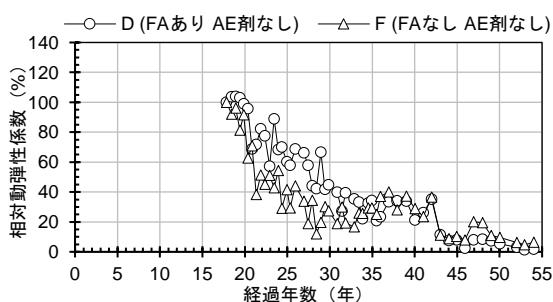


図-9 AE剤の有無と相対動弾性係数の推移（切断面）

経過時点でほぼ計測不能となった。さらにフライアッシュを混用せず、また AE 剤も使用していない配合 F は、他の配合と比べても劣化の進行が著しく早く、供試体下段の測定結果においては 10 年経過時点で相対動弾性係数が低下し始め、20 年経過時点でほぼ計測不能に至った。切断面の測定結果においても低下時期に差はあるものの、AE 剤未使用の配合は明らかに相対動弾性係数が低下しており、内部まで劣化が進行していることを示唆している。これらの結果は既往知見<sup>3)</sup>によって広く知られるように AE 剤がひび割れ型の凍害劣化に対する抵抗性向上に寄与することを示している。なお、配合 D, E の傾向が同等であることを捉えると、本試験の範囲においてフライアッシュと AE 剤は、耐凍害性の向上に対し同等の効果を与えているとみられる。

#### 3.3 小型供試体の相対動弾性係数の推移

小型供試体の超音波法および共鳴振動法による相対動弾性係数の推移を図-10 に示す。全ての配合において測定法によらず相対動弾性係数の明らかな低下は認められず、暴露開始から 50 年を超えた現在も高い相対動弾性係数を維持している。同じ気象環境に暴露され、与えられる外力は同等であるにも関わらず、大型供試体の結果とは明らかに傾向が異なる。この相違について既報では、切断面の観察結果と Macinnis ら<sup>4)</sup>および小林<sup>5)</sup>の報告をもとに、骨材寸法が大きいほどブリーディングに

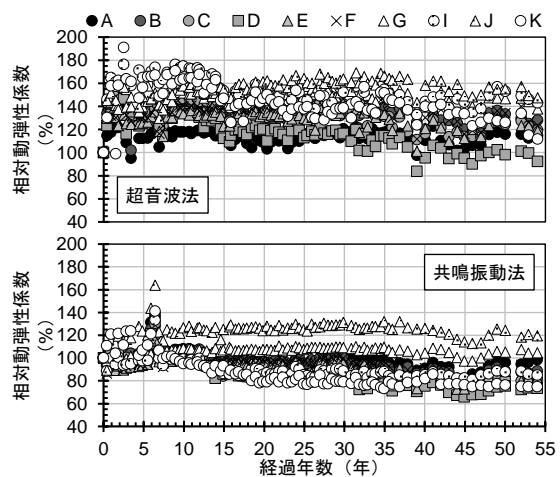


図-10 小型供試体による相対動弾性係数の推移

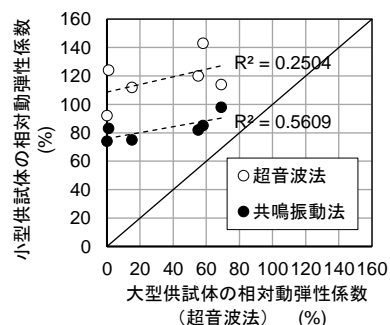


図-11 大型・小型供試体の相対動弾性係数の関係

よって形成される骨材下面の潜在的な欠陥のサイズが大きくなるのが要因と推定している。<sup>1)</sup>

次に、図-11 に大型供試体（超音波法）と小型供試体（超音波法・共鳴振動法）の相対動弾性係数の関係を示す。先のとおり両者に等価性は認められず、小型供試体の評価結果をもって直接的に実規模サイズのコンクリートの劣化進行を表現することは困難である。ただし、本試験範囲において共鳴振動法による結果は一定の相関が認められることから、これを用いて配合間の耐久性の優劣を定性的に評価することは可能と考えられる。小型供試体による評価の精度を上げるには、今回得られた結果を活用しつつ、骨材の最大寸法による影響など懸念される要因を明らかにする必要がある、今後の課題としたい。

### 3.4 促進試験の妥当性

図-12 には既報<sup>1)</sup>の促進凍結融解試験（ASTM C666, 供試体寸法 75×100×400mm, 最大骨材寸法 40mm）における凍結融解サイクル 300 回時の相対動弾性係数と長期暴露試験（凍結融解サイクル 4,000 回以上）における小型供試体の相対動弾性係数との関係を示す。

暴露試験の相対動弾性係数は、凍結融解サイクルに 10 倍以上の違いがあるにも関わらず、促進試験の結果よりいずれも高い値となっている。この結果は、促進試験の方が自然環境より最低温度、凍結速度、湿潤状態等の条件が過酷であることを意味していると考えられる。一方、本試験範囲において共鳴振動法による結果と促進試験の結果の間には高い相関が認められる。これらの結果から、促進凍結融解試験は、精度向上の課題はあるものの、実際の気象作用における配合間の耐久性の優劣を定性的に評価できるものと考えられる。

## 4. まとめ

水殿ダムにおいて実施した長期暴露試験の結果を以下に整理する。

- (1) ダム本体と同一の配合（水結合材比 49%, フライアッシュ混用, AE 剤使用）は、50 年以上が経過した現在も高い相対動弾性係数を維持しており、十分な耐久性を有することが確認された。
- (2) 水結合材比によらず、フライアッシュ混用によって相対動弾性係数の低下を抑制する傾向が確認された。なお、本試験範囲においてフライアッシュによる耐凍害性の向上への寄与度は、AE 剤と概ね同等とみられる。
- (3) AE 剤を使用しない配合では、ひび割れ型の劣化が進行し、相対動弾性係数が早期に低下することが確認された。すなわち AE 剤の使用が耐凍害性の向上に寄与することが長期暴露試験においても確認された。

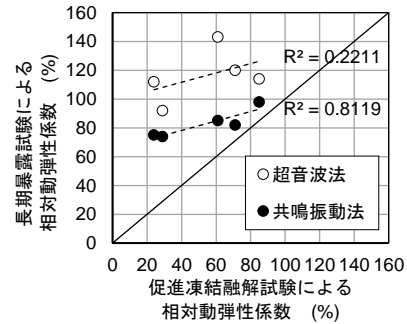


図-12 促進凍結融解試験と暴露試験結果の関係

- (4) 暴露試験において、小型供試体の相対動弾性係数は、大型供試体に対して相対的に高くなる傾向を示した。その影響要因のひとつとして最大骨材寸法の違いが考えられる。
- (5) 促進凍結融解試験は、自然環境と比べて条件が過酷であるが、その傾向は暴露試験における小型供試体（共鳴振動法）の傾向と整合的であった。この結果から、促進試験によって実際の気象作用におけるコンクリートの耐久性の優劣を定性的に評価できることが示唆された。

**謝辞** 半世紀を超える本試験の実施に当たっては、日本大ダム会議ダムコンクリート凍害実験研究分科会を通じて國分正胤先生、小林正凡先生、長瀧重義先生に数多くのご指導を賜りました。また、日本大ダム会議事務局長の野口博章氏をはじめ、江川頭一郎氏、堤知明氏など諸先輩の長きに渡るご尽力により今日の成果を得ることができました。ここに深甚なる謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 江川頭一郎, 千代田将明, 野本高憲, 野口博章: 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, 土木学会論文集, No.472, V-20, pp.39-48, 1993.8
- 2) 石井清, 江川頭一郎, 堤知明, 野口博章: 凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究, 土木学会論文集, No.564, V-35, pp.221-232, 1997.5
- 3) 岸谷孝一: AE 剤, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.3, pp.7-16, 1970.3
- 4) Macinnis. C and Lau. E. C: Maximum Aggregate Size Effect on Frost Resistance of Concrete, J. ACI, Vol.68, No.2, pp.144-149, 1971.2
- 5) 小林正凡: 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
- 6) 小林正凡: 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, 1973.9