

報告 ダムコンクリートの凍結融解抵抗性評価と表面劣化の影響

成岡 正祥^{*1}・原 孝志^{*2}・武石 昭一郎^{*3}

要旨：寒冷地に建設されたダムのコンクリートの凍結融解抵抗性を評価するため、著者らはダム本体の測定とともにダム地点にコンクリート供試体を設置し、使用材料、配合条件、環境条件を変えて、動弾性係数の経年変化を測定している。測定開始後 40 年以上経過し、測定点によっては測定値が低下する現象が見られたため、成分分析、組織観察を行なったところ、内部は健全であり、表面劣化であることがわかった。また、表面劣化部分を研磨等により除去すれば、低下していた超音波法による動弾性係数が回復することを確認した。

キーワード：表面劣化、凍結融解抵抗性、ダムコンクリート

1. はじめに

寒冷地に建設されるダムのコンクリートの凍結融解抵抗性は、気象や設置場所（陸上・水中・水位変動部）などの環境条件、使用材料、配合条件などによって複雑に影響を受ける。諸条件の相違がダムコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響を検証するため、社団法人日本大ダム会議のコンクリート凍害実験研究分科会では長期暴露試験を 1961 年から実施しており、著者らもこの試験に協力参加している。¹⁾

本報告は凍結融解を受ける自然環境下のダムコンクリートの動弾性係数を 40 年以上にわたり測定を続けた結果をまとめ、凍結融解抵抗性について検討したものである。また、長期暴露によりコンクリート表面に劣化が見られ、動弾性係数の測定が困難になることがあるため、表面劣化の影響について検討を行なった。

2. 測定概要

2.1 測定対象ダム

長期暴露試験実施中のダムを表-1 に示す。

奥只見ダムと大鳥ダムは東北地方山間部の豪雪地帯に位置し、それぞれ 1960 年、1963 年に竣工している。仙美里ダムは北海道の十勝地方に 1962 年に竣工し、国内で最も凍害危険度の高い

表-1 ダム諸元

ダム名	ダム高 (m)	堤頂長 (m)	堤体積 (10 ³ m ³)	利用水深 (m)	貯水容量 (10 ⁶ m ³)
奥只見	157.00	480	1,636	60.00	601.00
大鳥	83.00	188	160	6.00	15.80
仙美里	11.70	363	65	0.70	3.10

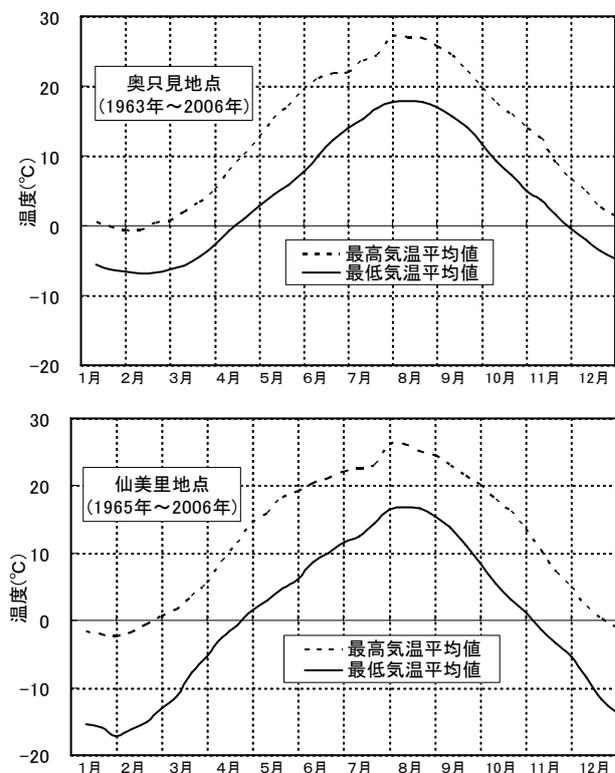


図-1 年間気温

*1 電源開発 (株) 技術開発センター茅ヶ崎研究所 工修 (正会員)

*2 (株) 開発設計コンサルタント 技術研究所 (正会員)

*3 (株) 開発設計コンサルタント 技術研究所 (非会員)

表-2 測定するダム堤体、ブロック供試体および小型供試体（奥只見・大鳥地点）

	寸法 (cm)	設置場所	数 量			暴露環境	測定項目
			配合数	配合当たり 数量	計		
ダム堤体 (箱抜き)		大鳥ダム上流 面水位変動部	1	2箇所	2箇所	乾湿繰返し	超音波伝播速度 6測線
ブロック供試体	100×100×100	奥只見ダム下 流左岸陸上	4	2個	8個	常時気中	超音波伝播速度 8測線/個
小型供試体	φ15×30		4	4本	16本		共鳴振動数

表-3 コンクリート配合（奥只見・大鳥地点）

	配合名	Gmax (mm)	単体量 (kg/m ³)		F/C+F (%)	W/C+F (%)	s/a (%)	スラン プ(cm) ²	空気量 (%) ²⁾	σ ₉₁ (kgf/cm ²)	耐久 性指 数 ³⁾	備考	
			C+F	W									
大鳥ダム 堤体	—	150	210	99	30	47	23	1.5	3	387	83	外部 コンクリート	
ブロック 供試体, 小型供試 体	A	150 ¹⁾	210±1	93	25	44	23	4.7	3.3	338	76	標準	
	B			105		50	26	7.2	~3.4	296	87	W/C増	
	C			93		0	44	23	15.0	0.5	342	4	W/C増 non-AE
	D			93		0	44	23	1.5	2.9	396	86	non-FA

注) C: 中庸熟ポルトランドセメント, F: フライアッシュ, 骨材: 碎石および砕砂

1) 小型供試体は40mmフルイでウェットスクリーニング

2) スランプおよび空気量はウェットスクリーニング後の実測値

3) 91日標準養生後 凍結融解試験 (ASTM C292-52T) 300サイクル終了時の値

地域に属するため、測定の対象に選定した。

2.2 気象条件

奥只見・大鳥地点（両ダムは近接しており、気象条件はほぼ同一と考えられる）および仙美里地点の年間平均気温変化を図-1に示す。

2.3 奥只見・大鳥地点における測定

奥只見・大鳥地点では、ダムコンクリートの配合条件が凍結融解抵抗性に及ぼす影響、および実ダム（大鳥ダム）とブロック供試体との経年変化の相違に測定の主眼を置いた。測定対象とするダム堤体や供試体の諸元およびダムコンクリートの配合を表-2、表-3にそれぞれ示す。

ブロック供試体の配合は、奥只見ダム外部配合を標準として、連行空気量、水セメント比、フライアッシュ置換率を変更した4種類である。配合毎に、ブロック供試体（1m立方）を2個、ウェットスクリーニングを施した小型供試体（φ15×30cm）を4本作製し、1963年以来気中暴露させている。また、同時に作製した小型供試体を現場暴露と並行して室内標準養生に供しており、現場と室内における養生条件の差が経



写真-1 奥只見地点ブロック供試体



写真-2 大鳥ダム上流面

年品質変化に及ぼす影響を比較評価できる。

大鳥ダム上流側の水位変動部は、乾湿繰返しを受ける厳しい環境下に晒されているが、ここに間隔1mで箱抜き2箇所を設け、1964年に

来超音波伝播速度の測定を継続している。大鳥ダムの外部配合は、ブロック供試体と同じ材料（結合材、骨材、AE剤）で、フライアッシュ置換率や単位水量には若干差があるものの、ブロック供試体配合Aと類似した配合を用いている。従って、奥只見のブロック供試体と大鳥ダム堤体との測定結果を比較することによって、気中暴露ブロックと水位変動部の実ダムとの環境影響の差を評価することができる。

奥只見地点ブロック供試体を写真-1に、大鳥ダム上流面を写真-2に、大鳥ダムの堤体箱抜き部を図-2にそれぞれ示す。

2.4 仙美里地点における測定

仙美里地点では、設置場所（陸上・水中・水位変動部）の影響を検討することに、主眼を置いた。すなわち、仙美里ダムは利用水深の小さい逆調整ダムであることを利用し、気中・水中・水位変動部（乾湿繰返し）の3つの条件下にブロック供試体を設置している。コンクリートの配合は、スランプと水セメント比を一定とし連行空気の有無を変更した2種類で、セメントには高炉セメントを使用している。

供試体の諸元および配合を表-4、5にそれぞれ

れ示す。2配合・3暴露条件で各1~2個、計7個のフルサイズのブロック供試体（1m立方）を設置し、1962年以来現地暴露している。また、ウェットスクリーニングを施した小型供試体（7.5×10×40cm）を配合毎に1~2本作製し、現地気中暴露している。

2.5 経年劣化の評価方法

現場測定は1962年~64年以来、年1~2回の頻度で実施している。

大鳥ダム堤体の測定は、ダム水位低下時に観測員がタラップで箱抜き箇所まで降りて、箱抜きの側面に設けた測点に測定端子を当て超音波伝播速度を測定する。また、仙美里地点の水中

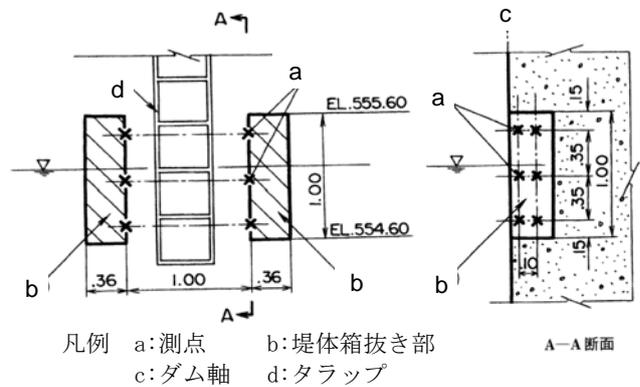


図-2 大鳥ダム測定箇所詳細

表-4 測定するブロック供試体および小型供試体（仙美里地点）

	寸法 (cm)	設置場所	数量			暴露環境	測定項目
			配合数	配合当たり 数量	計		
ブロック供試体	100×100×100	ダム上流右岸 陸上	2	1個	2個	気中	超音波伝播速度 18測線/個
		調整池低水位 以深	2	1個	2個	水中	
		調整池水位変動部	2	1~2個	3個	乾湿繰返し	
小型供試体	7.5×10×40	ダム上流右岸	2	1~2本	3本	気中	共鳴振動数

表-5 コンクリート配合（仙美里地点）

配合名	Gmax (mm)	単位量 (kg/m ³)		W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm) ²⁾	空気量 (%) ²⁾	σ ₉₁ (kgf/cm ²)	耐久性 指数 ³⁾	備考
		C	W							
A	60 ¹⁾	250	112	45	31	3.3	3.4	302	57	標準：仙美里ダムの外部配合
B		290	130		34	3.1	1.0	352	40	比較用：non-FA

注) C：高炉セメント（置換え率50%），骨材：碎石および砕砂

1) 小型供試体では25mmフルイでウェットスクリーニング

2) スランプおよび空気量はウェットスクリーニング後の実測値の平均値

3) 91日標準養生後凍結融解試験（ASTM C292-52T）300サイクル終了時の値

ブロック供試体は、測定の際にはクレーンで陸上に引き揚げ、陸上で測定する。

大鳥ダム堤体は6測線（測線長1m）、ブロック供試体では1個当たり18測線（測線長1m）の超音波伝播速度を直接法で測定し、その平均値で動弾性係数に換算する（超音波法）。小型供試体は共鳴振動数を測定して動弾性係数に換算する（共鳴振動法）。

コンクリートの打設から1年目または2年目の値を初期値として、初期値に対する測定時の動弾性係数の比率（動弾性係数百分率）を、コンクリートの健全度の指標とする。

測定期間中に装置の交換を行なったが、測定値は超音波測定装置が異なると相違したため、5年間新旧両器で測定して補正係数を算定し、新しい装置で測定およびデータ解析を継続した。

3. 動弾性係数経年変化結果

3.1 奥只見・大鳥地点におけるブロック供試体および小型供試体

気中暴露の環境下にある4配合のブロック供試体および小型供試体の動弾性係数百分率の経年変化を図-3 a,bに示す。ブロック供試体は43年を経た現在でも、動弾性係数百分率は約90%以上を保っている。配合間の差は小さい。

小型供試体の動弾性係数百分率は全体として漸減傾向であるが、約20年目～30年目に75%～85%と低下したように、変動が大きい。

また、室内促進凍結融解試験ではAE剤の影響が顕著に認められたが（表-3参照）、現地暴露したブロック供試体、小型供試体ともAE剤の有無の影響が余り認められない点、並びに現地暴露した小型供試体の動弾性係数百分率の低下度

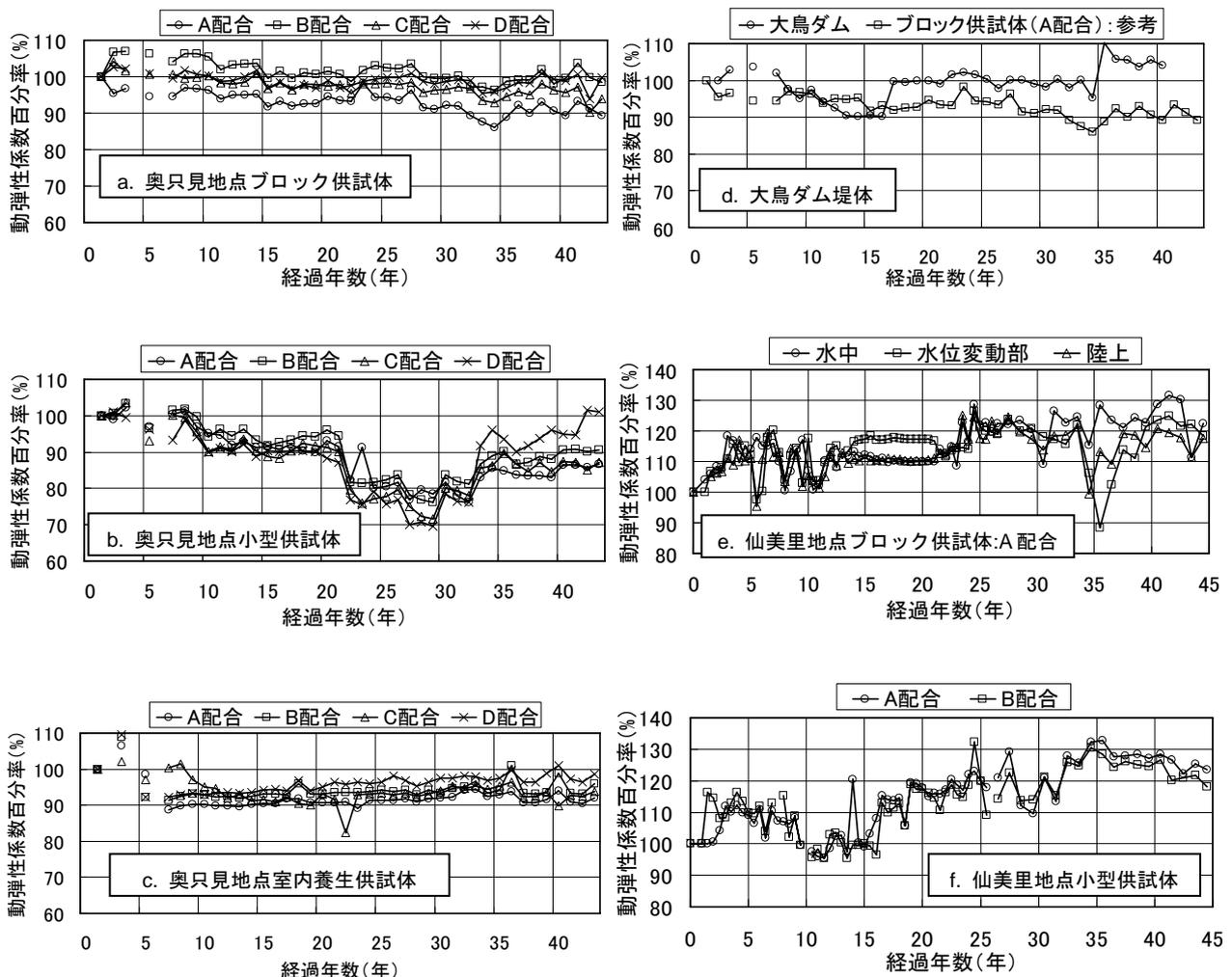


図-3 動弾性係数百分率の経年変化

が、室内促進凍結融解試験における低下度とほぼ同程度（約90%）である点が注目される。

なお、室内標準養生の小型供試体の動弾性係数百分率は、90～100%で安定しており、材料や配合には異状がないと思われる（図-3c参照）。

3.2 大鳥ダム堤体

大鳥ダム堤体の動弾性係数百分率は測定開始から40年を経て100%前後を維持しており、気中暴露している奥只見のブロック供試体の結果と比較しても同等以上である。（図-3d参照）これは水位変動部の厳しい条件下にあっても、適切な設計・施工を行えば健全性が保たれることを示している。

3.3 仙美里地点におけるブロック供試体および小型供試体

3 暴露環境下のブロック供試体および気中暴露した2配合の小型供試体の動弾性係数百分率の経年変化を図-3e,fに示す。AE剤の有無や暴露環境に関わらず、動弾性係数百分率は長期的に低下ではなく漸増傾向を示している。特に4年目までの増加は顕著である。

室内促進凍結融解試験における耐久性指数は40～57（表-5参照）であったが、現地暴露の小型供試体の動弾性係数百分率は100%を大きく上回っている。また、奥只見地点と同様に、現地暴露ではAE剤の有無の影響は小さい。

ブロック供試体測定値が近年、大きく変動しているのはブロック供試体の表面劣化により、超音波測定端子の接触が悪くなったためと考えられる。

4. 表面劣化の影響

4.1 供試体表面状況

厳しい環境に長期間暴露されていることにより、供試体の表面にモルタル欠損部やスケーリングが発生し、動弾性係数の低下や測定不能となる測定点が現れるようになった。しかし、この動弾性係数の低下や測定不能はコンクリート表面のみの劣化と考え、コンクリート内部の健全性と表面劣化の影響を確認することとした。

4.2 確認方法

表面劣化状況を詳細に確認するため、ブロック供試体上部からコアを採取し、組織観察、成分分析を行なった。対象は奥只見地点のブロック供試体全配合と仙美里地点の陸上部に暴露してあるブロック供試体とした。

また、表面劣化の影響を確認するため、段階的に表面研磨深さを変えながら測定を行い、劣化部分を除去して動弾性係数を測定した。

4.3 電子顕微鏡観察

採取したコアを割裂し、フレッシュな面で電子顕微鏡観察を行なった。

いずれの配合の試料も表面付近はC-S-H等のセメント水和物が分解・変質し、ポーラスな組織となっており、主な水和物は低CaO/SiO₂比のC-S-Hあるいはシリカゲルである（写真-3）。

骨材との界面は剥離したものが多く、剥離した面にはカルサイトが生成しているのが観察された。変質層は2～3mm程度で、それ以降の深

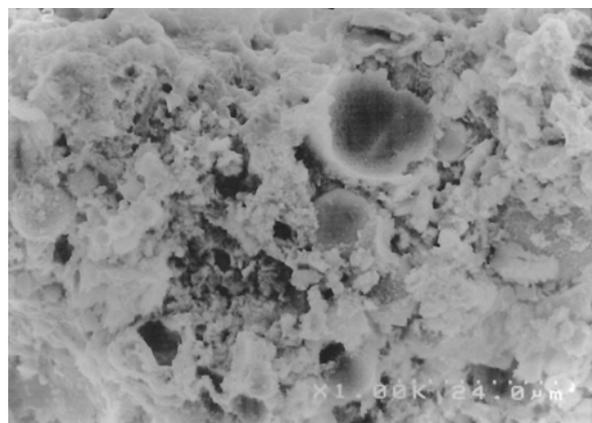


写真-3 表面劣化により多孔質化した組織

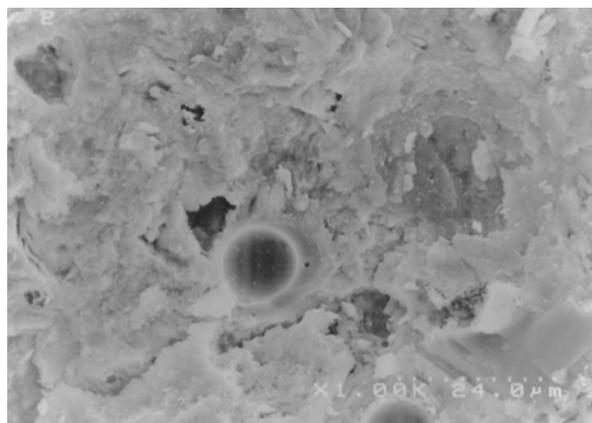


写真-4 表面より5mmの深さの組織

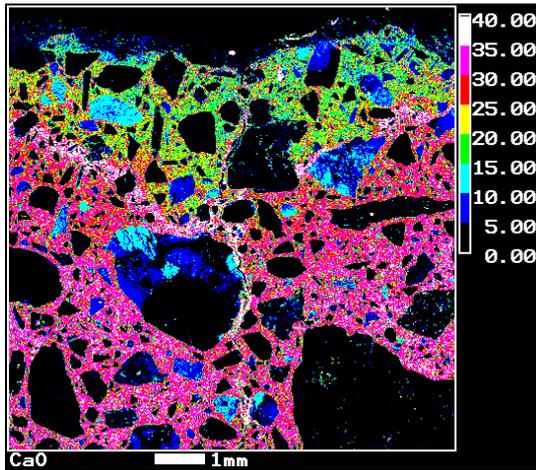


図-4 EPMA 画像 (表面から 0~1cm)

さでは緻密な組織となっている。緻密な部分のフライアッシュはポゾラン反応が進行しセメントペーストと一体化している様子が観察された(写真-4)。

4.4 EPMA による分析

表面から深さ 0~1cm 及び 10~11cm の部分を分析の対象とした。

深さ 10~11cm の部分はいずれの配合の供試体もセメントペーストの化学成分は均一な分布となっていた。また、0~1cm の部分は炭酸化や溶出により、表面側で化学成分の濃度変化が顕著に見られたが、5mm 以上の深さになると 10~11cm の濃度とほぼ同じとなった(図-4)。

4.5 表面研磨と動弾性係数との関係

表面劣化が動弾性係数(超音波法)に与える影響を確認するため、表面をサンダーで 1mm, 2~3mm, 4~5mm と段階的に研磨して測定値の変化を確認した。研磨する部分は測定値が安定している既知測定点近傍で表面が劣化している部分 4 点(A~D)を選び、既知測定値との比較を行った。

測定結果を図-5に示す。A 点は研磨深さ 1mm, 2~3mm と深くすることにより、徐々に伝播速度が増加し、それ以上削っても増加は見られなかった。その他の B~D 点は 1mm 研磨することにより伝播速度が増加し、その後、深く研磨しても伝播速度は変化しなかった。研磨により各点の測定値は既知測定点とほぼ同じとなった。

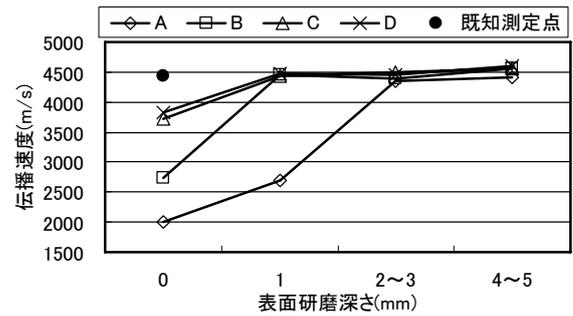


図-5 表面研磨深さと超音波伝播速度

5. まとめ

ダムコンクリートの凍結融解抵抗性を動弾性係数百分率の経年変化で評価した結果と表面劣化の影響を以下にまとめる。

- (1) 40 年以上経た段階でいずれの配合・条件での供試体も顕著な測定値の低下は見られない。
- (2) 大鳥ダムの堤体も目視確認、動弾性係数の測定結果から凍害は認められず健全である。
- (3) 暴露環境の条件(気中、水中、水位変動部)に関しては大鳥ダム堤体の水位変動部が健全性を保っていること、仙美里地点での暴露条件の差が小さいことなどから、良好に設計・施工されたダムコンクリートでは、その影響は余り大きくないと言える。
- (4) 奥只見地点・仙美里地点ともに現地暴露条件下では、AE 剤を使用していない供試体も大きな凍害を受けていない。
- (5) 近年、奥只見地点・仙美里地点とも動弾性係数測定値が測定点によっては低下する現象が見られるが、成分分析、組織観察の結果、表面付近のごく浅層の劣化によるもので、コンクリート全体は凍害を受けていない。
- (6) 表面劣化は 5mm 以下であり、表面を研磨し劣化部分を除去することにより、超音波法による測定値も回復する。

参考文献

- 1) 高山信紀, 土田 茂, 前田哲宏, 鈴木世二: 寒冷地におけるコンクリートダム堤体および供試体の長期測定結果について, 大ダム, No.175, pp.45-54, 2001.4