

論文 凍害環境に暴露した大型コンクリート供試体の物性評価

佐藤 道生^{*1}・酒井 隆行^{*2}・上山 邦彦^{*3}

要旨：凍害による構造物の健全度低下予測を精度良く行う上で必要な知見を得ることを目的に、凍結融解を受ける自然環境下に暴露された配合条件の異なる複数の大型供試体及び供用されているダム堤体から採取したコンクリートコアについて、凍害劣化深さなどの物性評価を行った。また長期暴露後のコンクリートコアについて凍結融解試験を実施した結果、建設当時と同様の凍結融解抵抗性を示しており、コンクリートの健全性を確認した。

キーワード：ダムコンクリート、凍結融解抵抗性、凍害劣化深さ、凍害

1. はじめに

凍害による劣化はコンクリート表面から内部に向けて進行し、スケーリング開始、骨材の露出・はく落、鋼材の露出・腐食という現象を伴いながら部材の性能が低下する。構造物の維持管理を行ううえで劣化の進行を時間軸で予測するためには暴露環境や暴露時間に応じた凍害劣化深さを評価する必要があるが、配合条件などの影響を比較した事例は少ない。

社団法人日本大ダム会議コンクリート凍害実験研究分科会では、気象や設置場所等の環境条件、使用材料、配合条件など諸条件の相違が凍結融解抵抗性に及ぼす影響を検証することを目的に、大型コンクリート供試体の長期暴露試験を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、凍害による構造物の健全度低下予測を精度良く行う上で必要な知見を得ることを目的に、凍害劣化深さなどの物性評価を行い、37～39年を経たコンクリートの凍結融解抵抗性を評価するものである。調査は、凍

結融解を受ける自然環境下に暴露された配合条件の異なる大型供試体6体に加え、大型供試体と実構造物の差を比較することを目的にダム堤体から採取したコンクリートコアについて実施した。

2. 大型供試体の経年変化の概要

2.1 対象供試体

供試体の諸元およびの配合を表-1に示す。

(1)奥只見ダム

奥只見ダムは東北地方山間部の豪雪地帯に位置し、1960年竣工の重力式コンクリートダムである。図-1にダム地点における年間平均気温を示す。大型供試体の配合は、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えた4種類としており、配合毎に大型供試体(1m立方)を2個作製し、1963年以来ダム近傍に気中暴露させている。

(2)仙美里ダム

仙美里ダムは北海道十勝地方に位置し、1962年に竣工

表-1 コンクリート配合

試料名	Gmax (mm)	単体量(kg/m ³)		F/C+F (%) ¹⁾	W/(C+F) (%) ¹⁾	s/a (%)	スランプ (cm) ²⁾	Air (%) ²⁾	σ 91 (kgf/cm ²)	耐久性 指数 ³⁾	備考									
		C+F ¹⁾	W																	
奥只見ダム堤体	150	210	99	30	47	23	2.5	3.5	293 ⁴⁾	83	外部コンクリート									
奥只見 大型供試体	A	150	211	25	50	26	7.2	~3.4	296	87	W/C 増									
	B											93	44	23	4.7	3.3				
	C											105	0	44	23	1.5	2.9	396	86	non-FA
	D											93	0	44	23	1.5	2.9	396	86	non-FA
仙美里 大型供試体	A	60	250	112	—	45	31	3.3	3.4	302	57	標準								
	B												290	130	—	45	34	3.1	1.0	352

- 1) C：中庸熟ポルトランドセメント[奥只見]・高炉セメント[仙美里,置換率50%], F：フライアッシュ, 骨材：砕石・砕砂
 2) スランプ及び空気量はウェットスクリーニング後の実測値
 3) 91日間標準養生後凍結融解試験 (ASTM C292-52T) 300サイクル終了時の値 4) 施工時における月平均値 (S36.5)

*1 電源開発(株) 技術開発センター 茅ヶ崎研究所 土木材料研究室 工修 (正会員)
 *2 電源開発(株) 技術開発センター 茅ヶ崎研究所 土木材料研究室 (正会員)
 *3 電源開発(株) 技術開発センター 茅ヶ崎研究所 土木材料研究室

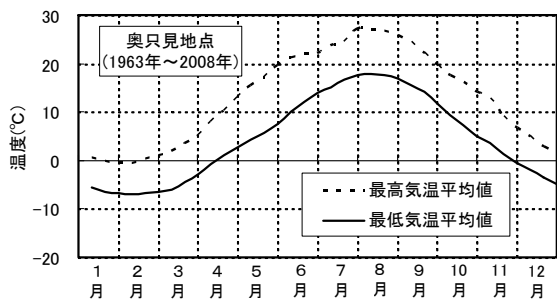


図-1 奥只見地点 年間気温

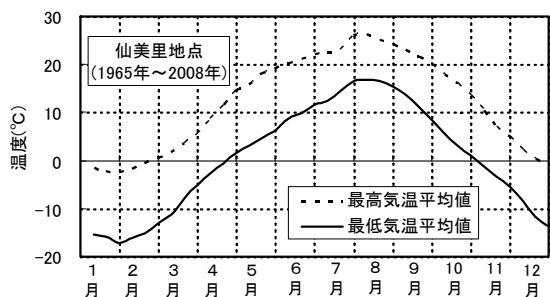


図-2 仙美里地点 年間気温

したダムである。当地点は凍害危険度が最も高い地域である。図-2にダム地点における年間気温を示す。仙美里地点では、気中・水中・水位変動部の3つの条件下に大型供試体を設置している。コンクリート配合は、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種類とし、高炉セメントを使用している。2配合・3暴露条件で各1~2個、計7個のフルサイズの大型供試体(1m立方)を設置し、1962年以来現地暴露している。

2.2 測定方法及び計測結果

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。大型供試体では相対する面ごとに9測点、合計18測線で、厚さ1mのコンクリートを伝播する超音波伝播速度を測定し、18側線の平均値から動弾性係数を換算している。コンクリートの打設から1年目又は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)を健全度の指標とする。

(1)奥只見ダム

気中暴露の環境下にある4配合の大型供試体の動弾性係数百分率の経年変化を図-3に示す。大型供試体は46年を経た現在でも、動弾性係数百分率は約90%を保っており、配合間の差は小さい。

供試体作製に先立ち実施した促進凍結融解試験(ASTM C292-52T)ではAE剤の影響が顕著に認められたが(表-1)、現地暴露した大型供試体ではAE剤の有無の影響が余り認められない。

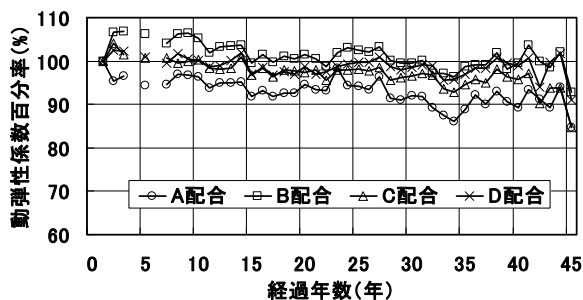


図-3 奥只見地点 動弾性係数百分率の経時変化

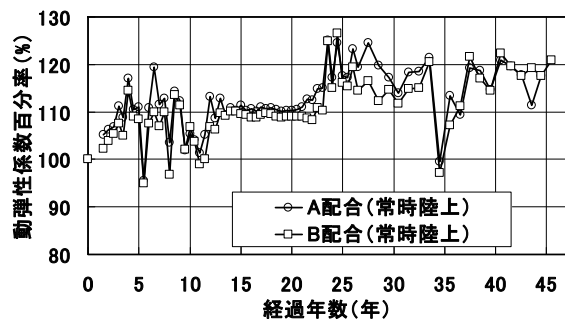


図-4 仙美里地点 動弾性係数百分率の経時変化

(2)仙美里ダム

暴露環境下の大型供試体の動弾性係数百分率の経年変化を図-4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。

供試体作製に先立ち実施した促進凍結融解試験における耐久性指数は40~57(表-1)であったが、現地暴露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。

3. コンクリートコア試料の評価

3.1 対象試料

凍結融解による劣化状況を詳細に評価するため、大型供試体上部からコンクリートコアを採取し、組織観察を行なった。

コンクリートコアの採取は、奥只見地点の大型供試体4試料と、仙美里地点の常時陸上に暴露されている大型供試体2試料とした。採取時期は平成12年10月であり、打設後37~38年経過した状態である。

また、大型供試体と実構造物の差を評価するため、奥只見ダム堤体右岸側(24BL, EL.715m付近)よりコンクリートコアの採取を行った。採取箇所を図-5に示す。奥只見ダムのコンクリート配合は表-1に示したとおりであり、外部配合に相当する。

採取時期は平成12年10月であり、打設(昭和36年5月)後39年経過した状態である。

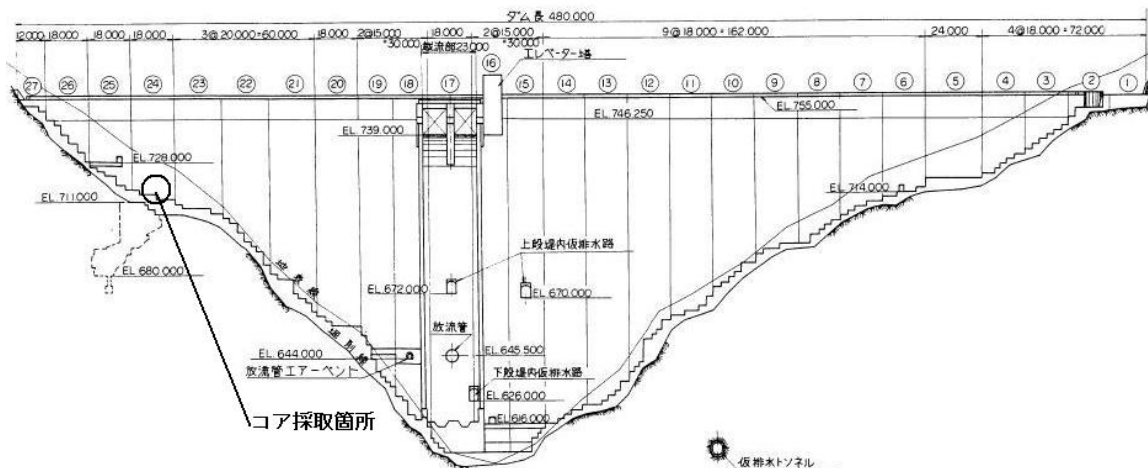


図-5 奥只見ダム堤体コア採取位置図

3.2 測定方法

採取したコアの中酸化深さ、凍害劣化深さ、凍結融解抵抗性を評価するため、下記の計測を行った。凍害劣化深さについては、EPMAによる評価を実施した他、深度方向の硬化体の物性変化をビッカース硬さ、細孔径分布により評価した。

(1)動弾性係数

超音波伝搬速度を計測し、動弾性係数をもとめた。

(2)中酸化深さ

中酸化深さは、コンクリートコアの切断面にフェノールフタレイン 1%溶液を噴霧し、変色部境界の深さを計測した。

(3)EPMA 面分析

EPMA 面分析は、最表面を含む約 40mm 角の試験片を対象に、Ca, Si, Al 及び C について面分析を実施した。供試体の整形にあたっては研磨中に脆弱部の脱落がないようにエポキシ樹脂で補強を施した。一番変化の大きい表層部（深さ 0~1cm）と内部（深さ 10~11cm）については、一辺 1cm の範囲で詳細な面分析を実施した。

(4)細孔径分布

細孔径分布計測は水銀圧入式ポロシメーターにより計測した。試料は、表層より 0~10mm, 10~20mm, 20~30mm の深さごと約 9mm 角の立方体に切断し、1 時間のアセトン浸漬及び 24 時間室内にて風乾を行なった後、凍結真空乾燥機にて 1 週間乾燥したものとした。

(5)ビッカース硬さ

ビッカース硬さとは微小な圧子のある試験荷重にてコンクリート表面に押込んだ際に残る永久くぼみの表面積から求められる硬さを示す尺度である。表層からの劣化の影響を把握するため、電動ビッカース硬度計を用いて深さ毎にビッカース硬さを計測した。

(6)凍結融解抵抗性

コア供試体の凍結融解抵抗性を評価するため、ASTM C457-71 リニアトラバース法により気泡間隔係数を計測した。また長期間の暴露による凍結融解抵抗性への影響を把握するため、JIS A1148 A 法（水中凍結水中融解法）に準じてコア試料を用いた凍結融解試験を実施した。

3.3 測定結果

(1)硬化体の評価（動弾性係数他）

大型供試体から採取したコンクリートコアと大型供試体の超音波速度百分率を比べたものを図-6に示す。年に 1 回の頻度で計測されている大型供試体の計測結果と比べて、コアの値がやや大きい値を示しているものの、現在までの計測値が妥当であることを示している。

奥只見ダム堤体より採取したコアについては圧縮強度試験を実施した。試験結果を図-7に示す。図中には 91 日までの強度と比較して大きく上回っており、健全な状態を維持していることがわかる。

(2)中酸化深さ

試料の中酸化深さを表-2に示す。供試体によって多少の変動はあるものの、中酸化は数 mm 程度に止まっている。表には中酸化深さの最大値から推定した中酸化速度係数と、コンクリート標準示方書に記載の推定式より推定した中酸化速度係数を示す。配合から推定された値と比べ実測値は小さい値であった。

(3)コンクリートコアの凍害劣化深さ評価

1 辺 4cm の範囲について行った EPMA 面分析結果のうち炭素の分析例を、図-8に示す。表層近傍では 5mm 程度の範囲で中酸化が見られており、フェノールフタレイン法による結果と合致する。なお最も表層（図中の上縁付近）は試料の固定に用いたエポキシ樹脂に含まれる炭素の影響により高濃度である。

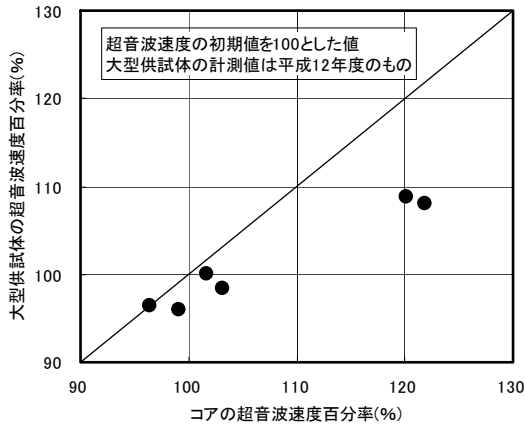


図-6 大型供試体とコアの超音波速度の比較

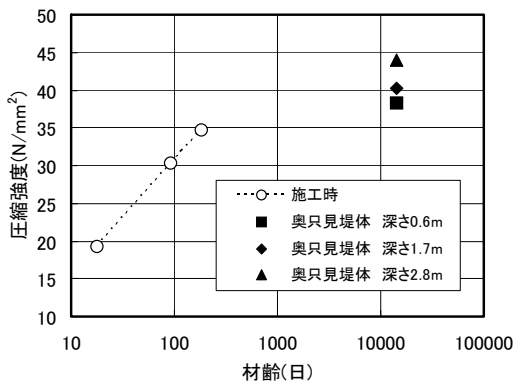


図-7 奥只見堤体コアの圧縮強度

表-2 中性化深さと中性化速度係数

試料名	中性化深さ(mm)			中性化速度係数の推定値 (mm/√年)	
	平均	最大	最小	最大値から	配合から
奥只見堤体	0.0	2.2	0.0	0.35	2.5
奥只見 A	4.1	6.4	1.2	1.1	1.7
奥只見 B	0.0	4.9	0.0	0.81	2.4
奥只見 C	1.4	3.5	0.0	0.58	2.4
奥只見 D	0.0	3.8	0.0	0.63	0.42
仙美里 A	1.4	10.9	0.0	1.8	2.2
仙美里 B	1.1	7.6	0.0	1.2	2.2

また、骨材との界面を中心に微細なクラックが発生し、その近傍が中性化している様子が観察される。

視野を 1cm とした分析結果の一例を図-9, 10 に示す。表層部分には 1mm 程度の不陸があり、凍結融解により表層部が一部消失している。試料の表面から 5mm 程度の範囲で炭酸化及び Ca 濃度の低下がみられる。

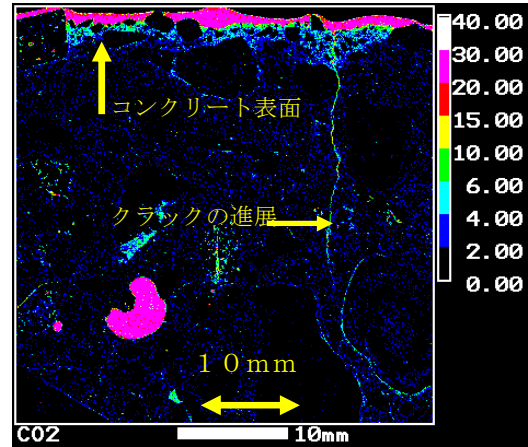


図-8 EPMA 面分析 (奥只見 C, CO₂, 視野 4cm)

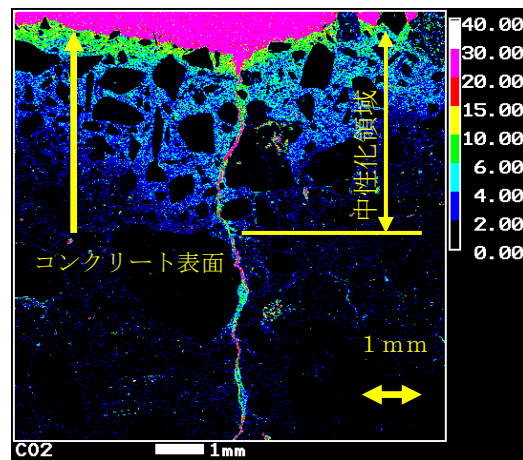


図-9 EPMA 面分析 (奥只見 C, CO₂, 視野 1cm)

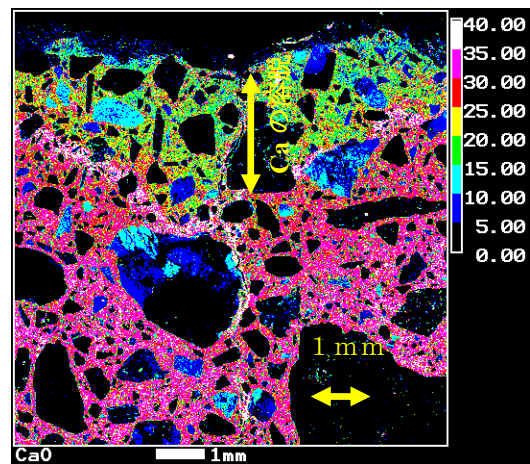


図-10 EPMA 面分析 (奥只見 C, CaO, 視野 1cm)

また、画面中央には骨材の境界面に沿ってクラックが進展しており、クラック周辺から炭酸化の進行が観察された。このようなクラックは、ほぼすべての試料で観察されており、凍害による微細なクラックが発生した後にクラックに沿って中性化が進行していることを示す。

表-3 ビッカース硬さの変化

	奥只見					仙美里	
	堤体	A	B	C	D	A	B
表面(0~5.5mm)	25.5	35.1	33.6	28.9	29.9	59.2	40.2
内部(5.5mm以深)	29.8	39.2	36.8	33.5	34.0	81.7	46.5
全平均	28.1	37.6	35.6	31.7	32.4	71.5	44.1

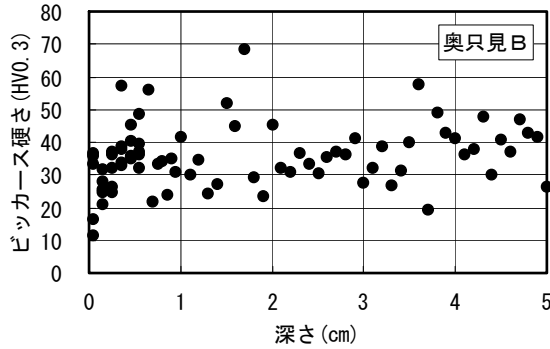


図-11 ビッカース硬さの深度ごとの変化

物理的な硬化体性状の変化を把握するため、深度ごとのビッカース硬さの変化を測定した。

計測結果の一例を図-11に、表層部と内部のビッカース硬さの差を表-3に示す。表層より5mm程度の部分で硬さの低下が見られており、凍害の影響により表層が脆弱化していることがわかる。なお、ビッカース硬さは、骨材などの影響により計測値がばらつく傾向があり、凍害劣化深さを明確に把握することは困難であった。

表層からの変化を細孔径分布の変化として確認することを目的に、表層から3cmまで、1cmごとの細孔径分布の変化を評価した。測定結果を図-12に示す。

岡本ら³⁾のモルタルによる試験結果によると、凍結融解による微視的破壊により約1.0~0.1 μ m付近の細孔が増加するとしている。仙美里地点の最低温度を勘案し、凍結温度が-20 $^{\circ}$ Cのときの影響最小径が約0.05 μ mである⁴⁾ことから、全細孔容積に加えて、細孔直径0.05~1 μ mの細孔容積の累積値を比較した。表層に近いことからコンクリート組織が粗くなる傾向が見られるが、いずれの試料でも深度が深くなるにつれて細孔直径0.05~1 μ mの細孔容積は減少する傾向にあり、内部ほど凍害の影響が少ないことを示している。特に、奥只見堤体、奥只見D、仙美里A、仙美里Bでは20~30mmの深さまで細孔径の変化が続いており、凍害による影響を受けていることを示している。

(4)大型供試体の表面劣化の計測値への影響

毎年実施している大型供試体の超音波法による動弾性係数計測では、一部の測定点で計測値の変動が大きくなる傾向が見られた。動弾性係数の変動が表面劣化によるものか躯体全体の劣化によるものかを確認するため、供試体表面をディスクサンダーで1mm、2~3mm、4~

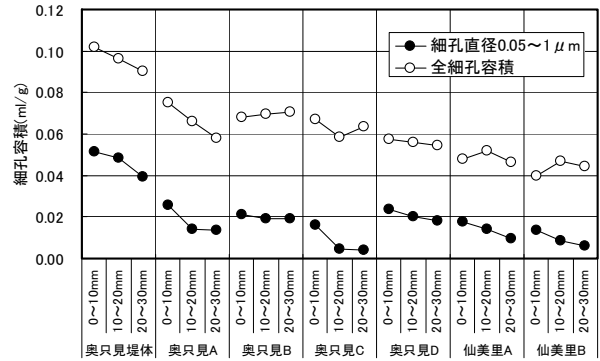


図-12 深さごとの細孔径分布

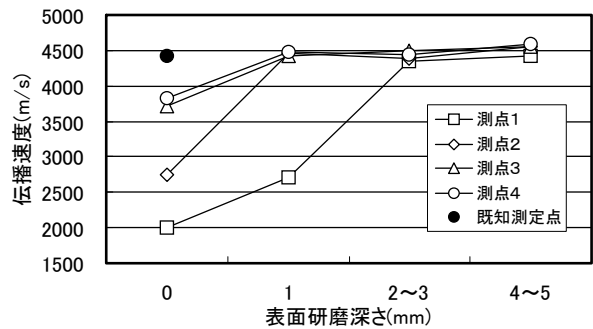


図-13 表面研磨深さと超音波伝播速度の変化

5mmと段階的に研磨して超音波伝播速度の変化を確認した。

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点を選び、既知測定値との比較を行った。測定結果を図-13に示す。

測点1では研磨深さ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。その他の測点点は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。

(5)凍害による劣化予測

以上の結果より、表層から中性化を伴いながら進行する劣化をEPMA分析及びビッカース硬さで評価した場合その範囲は5mm程度であるが、クラックの進展、骨材界面の緩みなどに着目した凍害劣化深さは3~4cm程度と考えられる。

凍害は凍結融解時の温度条件や外部からの水分の供給などが影響するため実構造物を対象に精緻な劣化予想を行うことは困難である。しかし、毎年の温度変化が大きく変わらないとした場合、年ごとの凍結融解回数にはほぼ等しいと考えられる。そこで、凍害による劣化深さは暴露経過年数に関係すると仮定したうえで、中性化に倣い式(1)によるものとして凍害劣化深さの予測を試みた。

表-4 凍害劣化深さの予測

	37年経過後の凍害劣化深さ	
	5mm	40mm
凍害速度係数	0.82	6.6
竣工後50年予測値	6mm	47mm
竣工後100年予測値	8mm	66mm

表-5 暴露前後の耐久性指数の比較

	気泡間隔 係数(μm)	耐久性指数	
		暴露前	暴露後
奥只見堤体	86	83	84
奥只見A	173	76	66
奥只見B	179	87	84
奥只見C	786	4	8
奥只見D	202	86	64
仙美里A	399	57	50
仙美里B	1512	40	8

$$y = b \times \sqrt{t} \quad \text{式(1)}$$

ここに、y：凍害劣化深さ(mm)、b：凍害速度係数、
t：経過年数

竣工後37～39年経過した時点で、凍害深さを5mm、4cmとした場合、竣工後50年、100年の凍害劣化深さは表-4のとおりとなる。

(6)配合条件の凍結融解抵抗性への影響

コンクリートコアの気泡間隔係数及び暴露前後の耐久性指数を表-5に示す。

Non-AE配合である奥只見C及び仙美里Bでは気泡間隔係数が大きく、耐久性指数と傾向が合致する。

暴露前後の耐久性指数を比較すると、概ね8割程度の減少しているものもある。この減少については凍結融解の影響のほかに、コアリングによる擾乱の影響も考えられることから留意が必要である。

フライアッシュを使用していない奥只見Dとフライアッシュを使用した奥只見Aでは、耐久性指数及び気泡間隔係数がほぼ同様の値となっており、両者の耐久性に関する差は見られない。

単位水量及び水結合材比の異なる奥只見Aと奥只見Bを比較すると、単位水量及び水結合材比の大きい奥只見Bが凍結融解抵抗性の面で優れていた。両者の気泡間隔係数はほぼ等しいことを考慮すると、スランブが大きくワーカブルな配合である奥只見Bの方が耐久的なコンクリートとなったものと思われる。なお、堤体については、奥只見Bに近い配合であるが、奥只見Bと同様、気泡間

隔係数が最も小さく、耐久性指数も84となっており、十分な耐久性を有していることを確認した。

AE剤の有無による影響を評価するため、奥只見A・奥只見C、仙美里A・仙美里Bを比較すると、AE剤混入の効果が明らかになることがわかる。

4. まとめ

約40年にわたって非破壊検査により動弾性係数の計測を行ってきた大型供試体からコンクリートコアを採取し、凍結融解による劣化深さの評価を行った。その結果は下記のとおりである。

- 1) 表層5mm程度の領域は中性化していた他、ビッカース硬さの低下などポーラスな組織となっており、大型供試体を対象にした超音波伝播速度計測にも影響を与えていた。
- 2) EPMA分析ではクラックの進展による深さ3～4cmの劣化が観察されており、細孔径分析の結果から凍害の影響が数cmに及んでいた。
- 3) 表層付近は表層を除いたコアを対象に凍結融解試験を実施した結果、暴露前の凍結融解抵抗性とほぼ同等の値となっており、凍害劣化の範囲はごく表層にとどまっていた。
- 4) 約40年にわたる動弾性係数の計測ではAE剤の添加の有無による耐久性の差異が明確になっていないが、暴露前後に実施した凍結融解試験の結果では耐久性の差異が明確であった。

大型供試体を設置している奥只見・仙美里の両地点はいったん積雪に覆われると融雪しないことから、凍結融解の履歴が少ない可能性がある。今後は、コンクリート内部における温度計測を通じて、温度履歴を加味した劣化予測評価を検討する予定である。

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
- 2) 成岡正祥、原孝志、武石昭一郎：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.29、pp.619-624、2007
- 3) 岡本修一、魚本健人：コンクリートの凍結融解性状に関する基礎的研究(2)、生産研究、Vol.48、No.12、1996.
- 4) 魚本健人：コンクリート構造物のマテリアルデザイン、pp169、2007