積雪寒冷地のダムコンクリートのスケーリング進行予測に関する検討

北海道大学大学院工学院　　学生員　○竹田京子
北海道大学大学院工学研究院　正会員　佐藤靖彦
国土交通省　北海道開発局　　長谷川武春

1. はじめに

全国的にダムの高齢化が問題となっている。適切な維持管理を実施する上で，ダムの健全度評価と将来予測が課題である。本研究では積雪寒冷地に供用されるダム堤体コンクリートに生じるスケーリングに注目し，抵抗性の評価と進行に関する検討を行い，スケーリング進行予測法を開発した。その結果をここに報告する。

2. 実験概要

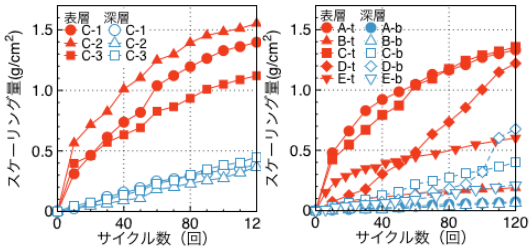
本研究では，**表-1** に示す 5 か所のコンクリートダムから採取した直径 190mm 高さ約 600mm の円柱状コアから供試体を切り出した。各コアの表面と，表面からおよそ 300mm 離れた位置からそれぞれ厚さ 75mm で切り出した円板の合計 30 体の供試体を用意した。前者を表層部，後者を深層部と呼ぶ。凍結融解試験は，けい酸塩系表面含浸工法の設計施工指針(案)[1]におけるスケーリングに対する抵抗性試験を参考に行った。試験液には，スケーリングの進行を促進する目的で濃度 3%塩化ナトリウム水溶液を用いた。温度変化は+20°C～-20°Cの範囲で，12 時間 1 サイクルとした。計 120 サイクルに至るまで 10 サイクル毎にスケーリング片絶乾質量とスケーリング深さを測定した。また各ダムの表層部供試体に対し，0 サイクル時点の初期スケーリング深さを測定した。

表-1　ダムとコアサンプリング

ダム(供用年数)	採取コア	供試体作製位置
A(44年), B(43年) C(58年), D(32年) E(47年)	各3本 (No.1～3)	表層部(-t), 深層部(-b)

3. 実験結果と考察

スケーリング片質量を単純に累加した累計スケーリング片質量と凍結融解回数の代表的な関係を**図-1 (a)**，ダム間の比較のために表層部と深層部それぞれの平均値で表した結果を**図-1 (b)** に示す。深部の供試体に比べ，表面部の供試体では多くのスケーリングが生じた。深部では概ね線形に進行している。一方，表面部では 30 サイクル程度まで大きく増加し，その後の進行が徐々に緩やかになっている。表層部では曲線的，深層部で直線的に進行しているが，その傾きはダムごとに異なった。これは**表-2** に示すような配合条件や，気象条件がダムごとに異なるためと考えられる。



(a) ダム C　　(b) ダム間比較

図-1 スケーリング片質量

表-2　ダム各条件

	A	B	C	D	E
空気量(%)	6±1	4±1	3±1	3±1	4±1
圧縮強度(MPa)	33.9	42.6	25.0	42.1	28.8
W/C	49.0	46.7	44.0	46.4	47.7
使用セメント	高炉スラグ55%	中庸熱ポルトランド	高炉スラグ50%	フライアッシュ20%	高炉スラグ55%
初期スケーリング深さ(mm)	4.99	1.77	1.71	1.04	1.22

4. スケーリング進行予測法の開発

開発においてはまず凍結融解試験におけるスケーリング進行予測を深層部，次いで表層部に対し行った。さらに凍結融解試験におけるサイクル数と実環境下における供用年数との関係を表層部の予測式へ導入することでダムのスケーリング進行予測を可能とした。

4-1 凍結融解試験におけるスケーリング進行予測式

深層部供試体のスケーリング進行予測式

$$S_{wb} = \alpha_b N = k_1 k_2 N \qquad (1)$$

S_{Wb}　:深層部供試体スケーリング量(g/cm^2)

α_b　:コンクリートの品質に関する係数で，空気量の影響を表す係数(k_1)，圧縮強度の影響を表す係数(k_2)の積により表される[2]。

N　:凍結融解試験サイクル数(回)

表-3　各係数一覧

空気量	4%以上	4%未満	-
k_1	0.05	0.17	
圧縮強度	35MPa以上	35MPa未満 30MPa以上	30MPa未満
k_2	0.2	0.3	0.5
堤体面	上流面	下流面	-
k_3	10.5	1.6	
高炉スラグセメントの使用	有り	無し	-
k_4	8.0	2.0	

キーワード　凍害，スケーリング，ダムコンクリート，予測法
連絡先　　〒060-8628　札幌市北区北 13 条西 8 丁目　北海道大学大学院工学院　ＴＥＬ011-706-6220

表層部供試体のスケーリング進行予測式

$$S_{wt} = \alpha_b \alpha_t \sqrt{N} = (k_1 k_2)(k_3 k_4 k_5)\sqrt{N} \quad (2)$$

S_{Wt} :表層部供試体スケーリング量(g/cm^2)

α_t :深層部と表層部の差異を表す係数で，水分供給の差異を表す係数(k_3)[3]，セメントの種類の影響を表す係数（k_4）[2]，凍結融解係数と最低温度の影響を考慮する係数（k_5）[4]の積により表される。

凍結最低温度による重み付けを考慮する式

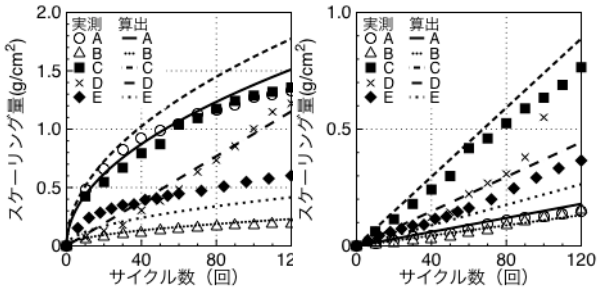
$$k_5 = \left(\frac{N_{FT}}{2000} \times T_{eq}\right)^{0.62} \quad (3)$$

N_{FT} :供用中に受けた凍結回数(回)

T_{eq} :最低気温の影響を表す係数

$$T_{eq} = \frac{\frac{14}{18}N_{14} + \frac{18}{18}N_{18} + \frac{22}{18}N_{22} + \frac{26}{18}N_{26}}{N_{14} + N_{18} + N_{22} + N_{26}} \quad (4)$$

N_{14}，N_{18}，N_{22}，N_{26} は，それぞれ最低気温が-14°Cから-18°C，-18°Cから-22°C，-22°Cから-26°C，-26°C以下の日数である。k_1 から k_4 の係数は**表-3** に示されている。



(a)深層部　(b)表層部

図-2　実験結果と予測式による算出値の比較

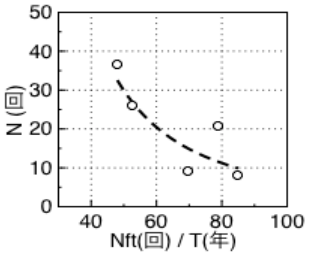


図-3　凍結融解試験サイクル数と 1 年あたりの凍結融解回数の関係

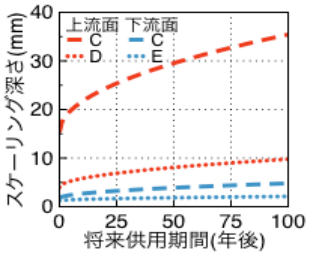


図-4　予測法による 100 年後のスケーリング

予測式による算出値と実験における実測値の比較を**図-2** に示す。概ね一致していることが明らかである。

4-2 供用年数相当サイクル数

表層部供試体のスケーリング深さ測定結果において 10 サイクルまでの傾きを延長した時に初期スケーリング深さに至るサイクル数と，一年あたり凍結融解回数に**図-3** のような相関が見られたことから，実環境でのダム供用年数と室内での凍結融解試験のサイクル数が次式により表されると考える。

$$T_{Future} = \frac{T_{in-service}}{N_{eq}} N \quad (5)$$

T_{Future} はこの先の供用年数(年)，$T_{in-service}$ は現在の供用年数(年)，N_{eq} は現在の供用年数に相当するサイクル数(回)。

$$N_{eq} = 10^5 \left(\frac{N_{FT}}{T_{in-service}}\right)^{-2.1} \quad (6)$$

4-3 予測式を用いた各ダムスケーリング進行予測

式(1)～(6)式を用いスケーリング進行予測を行った結果の一部を**図-4** に示す。100 年後のスケーリング深さは最も進行するダム C の堤体上流面の場合で 35 ミリ程度と予測できた。

5. まとめ

ダム堤体コンクリートのスケーリングの進行程度は，ダムごと大きく異なる。またダム固有の条件である空気量，圧縮強度，凍結融解回数，凍結最低気温，セメントの影響，水分供給状況の影響を考慮に入れたスケーリング進行予測法を開発した。

参考文献

[1]土木学会　コンクリート委員会　けい酸塩系表面含浸材設計施工研究小委員会：コンクリートライブラリー137 けい酸塩系含浸材工法の設計施工指針（案），2012

[2]遠藤裕丈：凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングに対する耐久性設計法に関する研究，北海道大学学位論文，2012

[3]三浦泰人，佐藤靖彦：メソスケールでの Ca 溶脱により変化するモルタルの力学的性質と物理化学的性質の関係性評価，コンクリート工学論文集，Vol.25，pp.109-118，2014

[4]桂修:過冷却現象を考慮したコンクリートの凍害機構に関する研究，北海道大学学位論文，1999