論文　凍結融解作用によるコンクリートのスケーリングと劣化度の関係

緒方英彦*1・佐藤周之*2・石井将幸*3・高田龍一*4

要旨：凍害による劣化が進行しているコンクリート構造物の補修・補強においては，劣化部の適切な除去と残存する部分の健全度の評価が不可欠である。本研究では，コンクリートの凍結融解試験を 800 サイクルまで行い，50 もしくは 100 サイクル毎にスケーリング率及びスケーリング部分を除去した残存部の相対密度，相対動弾性係数，相対超音波伝播速度，透水係数を求め，凍結融解作用によるスケーリング部分を除去した残存部の劣化度を検討した。

キーワード：補修・補強，凍結融解作用，スケーリング，劣化度

１．はじめに

劣化が進行したコンクリート構造物の補修・補強では，劣化機構を特定するとともに劣化度，つまりは現状性能を把握し，現状性能と構造物に要求される性能の差を解消するための対策を施すことが基本となる。補修・補強工法は，期待する効果（劣化因子の遮断，劣化速度の抑制，劣化因子の除去，耐荷力及び変形性能の改善）に応じて選定されるが，その内容は劣化機構により異なる [1)]。

コンクリートの劣化機構のひとつに凍害がある。凍害は，寒さの厳しい北海道や東北地方だけではなく，西日本の内陸部や山間部でも数多く見られる劣化機構である。凍害による劣化が進行しているコンクリート構造物の補修・補強では，まずブレーカやウォータージェット（超高圧水）等により劣化部を除去する作業が行われ，その後残存する部分を対象に構造物の所要の性能を確保するための対策が施される。

除去する劣化部の範囲は，一般に凍害深さを基に定められ，凍害深さはスケーリング深さや微細ひび割れ深さによる劣化深さを測定して総合的に判断すると良いとされている [2)]。凍害深さを適切に把握するためには，凍害が確認された場所からコアを採取するのが最も適当であるが，広範囲の劣化部を対象に実施することは現実的に難しい。また，非破壊試験である超音波法を利用して間接的に凍害深さを把握する方法もあるが，実構造物での実績は十分ではない [3)4)]。実際は，いくつかのコア試験や現場試験の結果を踏まえて基準となる除去範囲を把握した後に，ブレーカやウォータージェット等でスケーリングが生じている部分を除去しながら残存部の状況を随時確認して，適当な除去範囲を決めているのがほとんどである。

一方，補修・補強を実施後の構造物が所要の性能を確保するためには，劣化部を除去した残存部が所要の性能を有していなければならない。残存部の性能評価は，補修・補強後の構造物の性能を確保する上で重要な事項であるが，実際は劣化部を除去するという行為に主眼が置かれ，残存部は健全であると暗に見なされている傾向がある。特に凍害による劣化が広範囲に生じている場合には，残存部の性能評価を全体的に行うことは現実的に難しく，そのようにならざるを得ない。

以上のことを踏まえ本研究では，広範囲に凍害による劣化が生じているコンクリート構造物

*1 鳥取大学　農学部生物資源環境学科助教授　博士（農学）　(正会員)
*2 島根大学　生物資源科学地域開発科学科研究員　博士（農学）　(正会員)
*3 島根大学　生物資源科学地域開発科学科助教授　博士（農学）
*4 松江工業高等専門学校　環境・建設工学科教授　農学博士　(正会員)

表－１　コンクリートの示方配合

Gmax（mm）	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単　位　量（kg／m³）				
					W	C	S	G	AE 剤(g/m³)
20	10±2	55	6	41.3	181	329	679	1,012	99

混和剤：マイクロエア 775S

表－２　材料の物性値

材料	密度(g/cm³)	吸水率(%)	含水率(%)	有効吸水率(%)	F.M.
セメント（普通ポルトランドセメント）	3.16	－	－	－	－
細骨材（中国産）	2.51	1.73	0.248	1.482	1.85
粗骨材（鳥取県産砕石）	2.63	1.37	0.819	0.551	6.85

で，劣化部を除去した残存部の性能評価が現実的に行いにくい場合を想定して，これまで暗に健全であると見なされていた残存部が所要の性能を有しているかを検証することを目的に次の室内実験を実施した。

まず，コンクリートの凍結融解試験を 800 サイクルまで行い，50 もしくは 100 サイクル毎にスケーリング部分を除去した残存部の質量，一次共鳴振動数，超音波伝播速度，透水係数を測定した。ここで，劣化部に相当するスケーリング部分の除去は，金ブラシを用いて手動で行ったことから，本研究における劣化部は，金ブラシで除去可能な範囲と見なすことができる。次に，得られたデータを用いてスケーリング率，相対密度，相対動弾性係数，相対超音波伝播速度を求め，凍結融解作用によるスケーリング部分を除去した残存部の劣化度を検討した。通常行われる凍結融解試験では，300 サイクルまでの結果を用いて耐凍結融解特性の評価を行うが，本研究ではスケーリング部分を除去した残存部の劣化度を検討することが目的であることから 800 サイクルまで試験を実施した。

２．実験及び評価方法の概要

２.１ 実験の概要

本研究で使用するコンクリートの示方配合を**表－１**に，材料の物性値を**表－２**に示す。作製したコンクリート供試体は，凍結融解試験に使用する角柱供試体（10cm×10cm×40cm）と円柱供試体（直径 10×高さ 20cm），及びコンクリートの基本的物性を測定するための円柱供試体（直径 10×高さ 20cm）である。各供試体は打設の翌日に脱型した後，所定の材齢まで標準水中養生を行った。

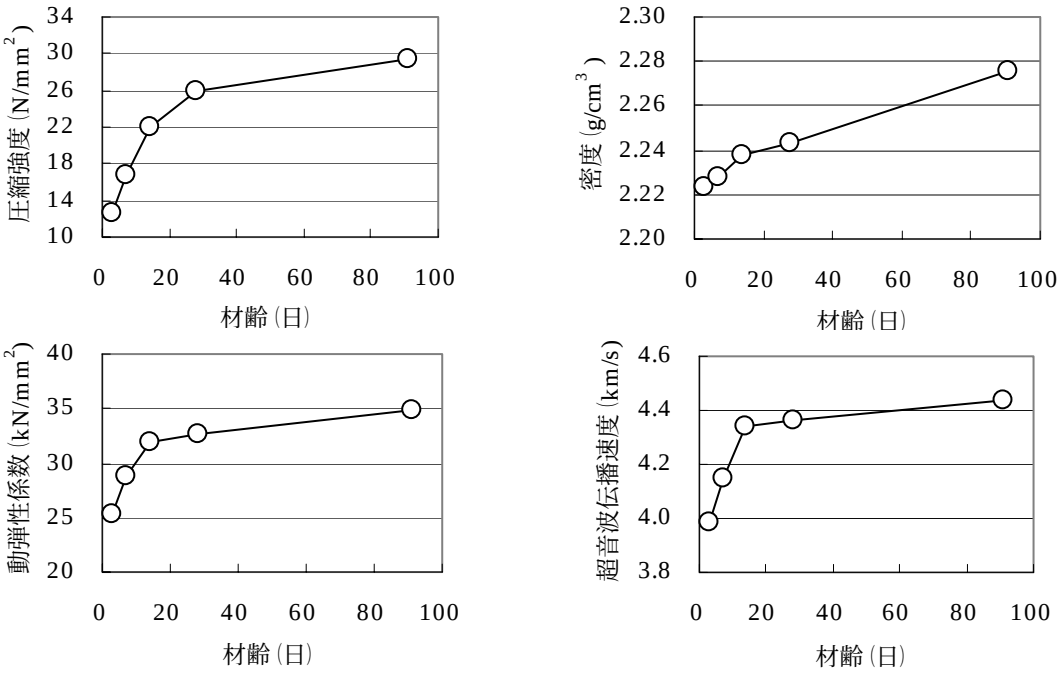
角柱供試体と円柱供試体の凍結融解試験は，両者とも JIS A 1148 に準じた A 法（水中凍結水中融解試験方法）で行った。試験開始材齢は，現在供用中の構造物の多くが JSCE G501 で試験されていることを踏まえ，標準の材齢 28 日ではなく材齢 14 日とした。角柱供試体では，50 もしくは 100 サイクル毎に金ブラシでスケーリング部分を除去した残存部の質量，一次共鳴振動数，超音波伝播速度を測定し，円柱供試体では同様に透水係数を測定した。

一次共鳴振動数は JIS A 1127 に準じて測定し，超音波伝播速度は周波数 50kHz の P 波用振動子を使用した二探触子法で測定した。超音波パルスの透過は，供試体の端面に発・受振子を設置し，供試体の長さ 40cm を伝播距離とした。

透水係数はアウトプット法による 1MPa の高圧透水試験で測定した。透水試験用の供試体は，まず円柱供試体の両端面 1cm を切り落とし，その後に高さ 4cm の 3 層（上層，中層，下層）に切断して各層の両端面を研磨したものである。各層の標準となる寸法は直径 10cm×高さ 4cm であるが，スケーリングが進行し断面が確保できなくなったものについては，シリコンコークで側面を全てコーティングして実験を行った。

２.２ 評価方法の概要

凍結融解作用によるスケーリング部分を除去した残存部の劣化度の評価は，測定する質量，一次共鳴振動数，超音波伝播速度から求められ



図－１　コンクリートの圧縮強度，密度，動弾性係数，超音波伝播速度の経時変化

るスケーリング率, 相対密度, 相対動弾性係数, 相対超音波伝播速度，及び透水試験から求められる透水係数で行う。ここで, スケーリング率, 相対密度，相対動弾性係数，相対超音波伝播速度は，次の式から求める [3)4)5)]。

$$\text{スケーリング率}(\%) = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \times 100 \qquad (1)$$

W_0：凍結融解試験前の質量(g)，W_n：凍結融解サイクル n 回における質量(g)

$$\text{相対密度}(\%) = \frac{\rho_n}{\rho_0} \times 100 \qquad (2)$$

ρ_0：凍結融解試験前の密度(g/cm³)，ρ_n：凍結融解サイクル n 回における密度(g/cm³)

$$\text{相対動弾性係数}(\%) = \frac{f_n^{\,2}}{f_0^{\,2}} \times 100 \qquad (3)$$

f_0：凍結融解試験前の一次共鳴振動数(Hz)，f_n：凍結融解サイクル n 回における一次共鳴振動数(Hz)

$$\text{相対超音波伝播速度}(\%) = \frac{VL_n^{\,2}}{VL_0^{\,2}} \times 100 \qquad (4)$$

VL_0：凍結融解試験前の超音波伝播速度(km/s)，VL_n：凍結融解サイクル n 回における超音波伝播速度(km/s)

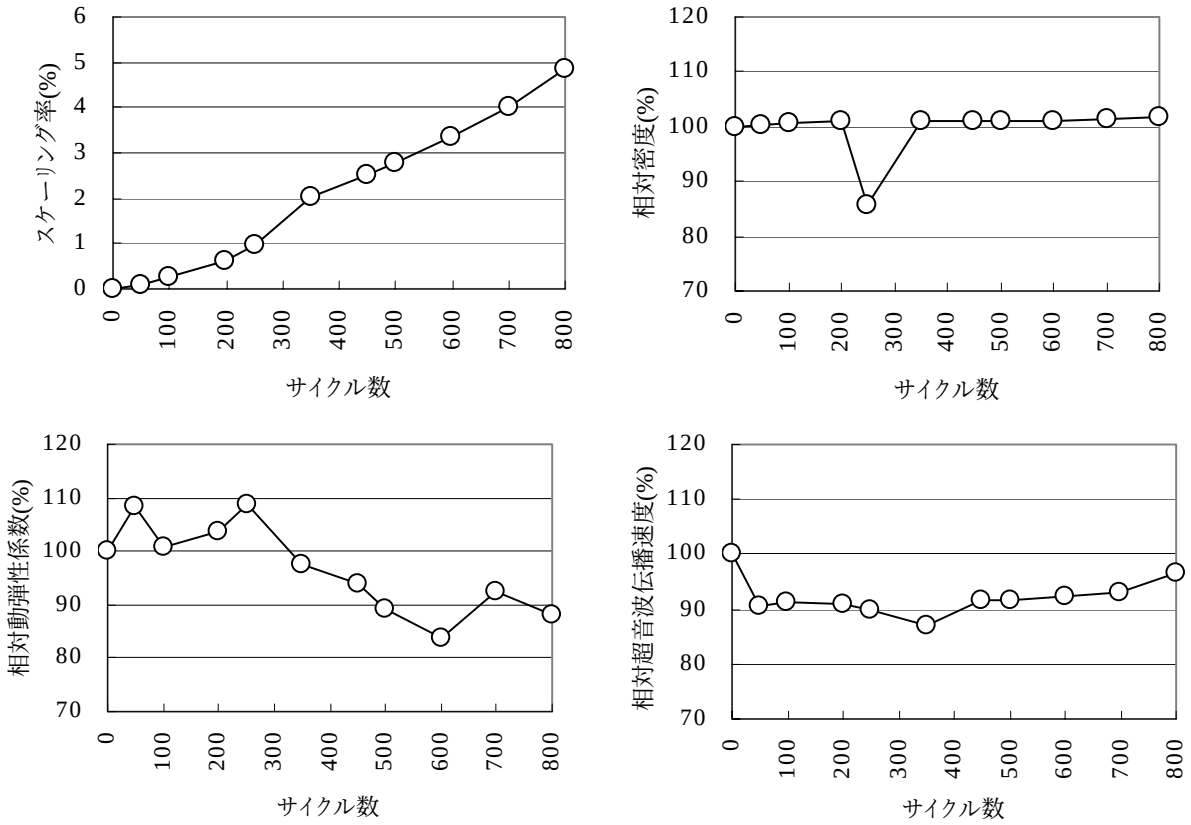
３．実験の結果と考察

３.１ コンクリートの基本的物性

本研究で作製したコンクリートの基本的物性として圧縮強度，密度，動弾性係数，超音波伝播速度を材齢 3，7，14，28，91 日に測定した。円柱供試体 3 本の測定結果の平均値を**図－１**に示す。凍結融解試験の試験開始材齢は 14 日であり, その時の各物性の値は圧縮強度 22.1N/mm²，密度 2.238g/cm³，動弾性係数 32.0kN/mm²，超音波伝播速度 4.34km/s であった。また，材齢 14 日の円柱供試体の上層，中層，下層における透水係数の平均値は 4.98×10^{-12}m/s であった。これらの結果から，今回作製したコンクリートは，普通コンクリートとして十分な品質を有した健全なコンクリートであると見なすことができる。

３.２ スケーリング部分を除去した残存部の劣化度

凍結融解試験を 800 サイクルまで繰り返し，50 もしくは 100 サイクル毎にスケーリング部分を除去した残存部の質量，一次共鳴振動数，超音波伝播速度，透水係数を測定した。得られたデータを用いて前記した方法により求めたスケ

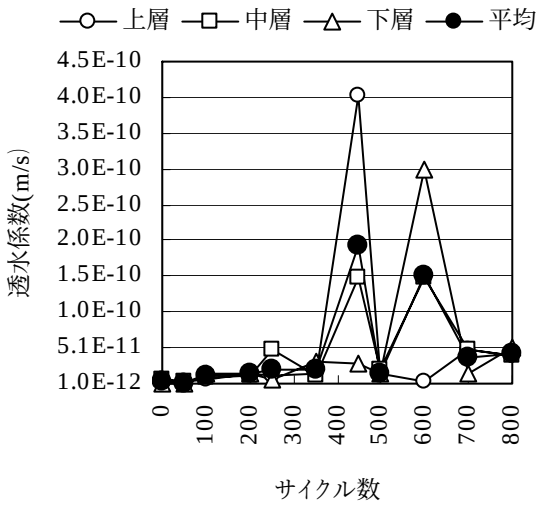


図－２　スケーリング率，相対密度，相対動弾性係数，相対超音波伝播速度の結果

ーリング率，相対密度，相対動弾性係数，相対超音波伝播速度を**図－２**に示す。また，**図－３**には，各サイクルにおける円柱供試体の上層，中層，下層及び３層の平均の透水係数を示す。

スケーリング率は，凍結融解のサイクルが進むにつれて徐々に増加しており，800 サイクルで約 5 %まで達する。凍結融解試験前の角柱供試体の質量は 8,680g であり，800 サイクルの質量は 8,258g であることから 422g もスケーリングが起こっていることになる。凍結融解のサイクルが進むにつれて進行するスケーリングの状況を**写真－１**に示す。スケーリング率は，角柱供試体の結果から求めているが，適当な写真が揃っていないことから，ここでは参考までに円柱供試体の写真を示す。写真からも凍結融解のサイクルが進むにつれてスケーリングが徐々に進行していることがわかり，スケーリング率約 5%は軽度なスケーリングではないことがわかる。

密度は，凍結融解のサイクルに関係なくほぼ一定となっており，スケーリングが進行したとしてもスケーリング部分を除去した残存部では，所要の密度を有していることがわかる。250 サイクルだけが極端に小さくなっているが，前後サイクルの結果を踏まえると人為的な測定ミスであると判断できる。



図－３　透水係数の結果

相対動弾性係数は，いったん 109%（250 サイクル）まで増加し，その後凍結融解のサイクル

50 サイクル

100 サイクル

250 サイクル

500 サイクル

600 サイクル

800 サイクル

写真－１　各凍結融解サイクルにおける円柱供試体のスケーリング状況

が進むにつれて徐々に減少する。スケーリング率との関係で見てみると，スケーリング率がさほど大きくない 250 サイクルまでは相対動弾性係数が増加しており，その後スケーリング率の増加とともに相対動弾性係数が徐々に減少していることになる。ただし，スケーリングを起こした部分を除去しながら凍結融解のサイクルを進めていることから，スケーリング率に比べて相対動弾性係数の減少は小さく，800 サイクルで 88%である。これは，健全なコンクリートの凍結融解作用による劣化はスケーリングというかたちで表面から起こり，そのために凍結融解作用による劣化はスケーリング率に直接関わるものの，相対動弾性係数は未だ凍結融解作用による劣化が進行していない残存部の測定値を用いるからである。

相対超音波伝播速度は，凍結融解のサイクルが進むにつれて若干の変化をするものの，おおよそ 90%前後の値となっている。相対超音波伝播速度と相対動弾性係数の間には高い相関があることから[3)4)]，本研究においても相対超音波伝播速度と相対動弾性係数がおおよそ同じ値を示すと思われた。しかし，両者とも耐凍結融解特性の評価基準となる 80%以上という点では同じであるものの，値は異なる。超音波の測定を角柱供試体の縦断面と横断面で行った過去の実験からは，超音波伝播速度の測定値は特に一部の劣化部に左右されることがわかっている[4)]。このことを踏まえると，超音波伝播速度では，スケーリング部分を除去した残存部の中でも特に劣化が顕著な一部の値を測定していることになり，残存部全体の共鳴振動である一次共鳴振動数とは測定対象になる部分がミクロな意味で異なるためであると考えられる。

透水係数は，スケーリング率がさほど大きくない 250 サイクルまでは供試体の上層，中層，下層による違いもあまりなく，徐々に大きくなる傾向を示す。しかし，凍結融解のサイクルが

進みスケーリング率が大きくなるに従い，供試体の上層, 中層, 下層にばらつきが見られだす。このばらつきが生じた原因は，凍結融解試験に設置する際の供試体方向や供試体上下における密度の違い等の影響も考えられるが，スケーリング部分の除去が一部不完全であり，その影響が透水係数に表れたことも一因と考えられる。

凍結融解のサイクルが進行した 700 サイクル及び 800 サイクルの透水係数は, 3.72×10^{-11}m/s 及び 4.41×10^{-11}m/s であり，凍結融解試験前の透水係数である 4.98×10^{-12}m/s よりも 1 オーダー程度大きくなっている。*W/C* からコンクリートの透水係数を予測する以下の式[6]を用いて, 今回のコンクリートの透水係数を予測すると, *W/C*は 55%であることから 7.33×10^{-11}m/s となる。

$$\log K_p = 4.3\cdot W/C - 12.5 \qquad (5)$$

K_p：コンクリートの透水係数の予測値(m/s)

このことから，スケーリング部分を除去した残存部の透水係数は，凍結融解のサイクルが進むことで 1 オーダー程度大きくなるが，その値は *W/C* から予測される透水係数よりも小さく，水密性に影響を与えるほどではないことがわかる。

4. まとめ

本研究では，コンクリートの凍結融解試験を 800 サイクルまで行い，50 もしくは 100 サイクル毎にスケーリング率及びスケーリング部分を除去した残存部の相対密度，相対動弾性係数, 相対超音波伝播速度を求め，これらの測定結果から残存部の劣化度を検討した。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) スケーリング率は, 健全なコンクリートであっても凍結融解のサイクルが進むにつれて徐々に増加し，800 サイクルで約 5%まで達する。
(2) 密度は, 凍結融解のサイクルに関係なくほぼ一定となる。
(3) 相対動弾性係数及び相対超音波伝播速度は, 800 サイクルでも 80%以上を確保している。
(4) 透水係数は, 800 サイクルで凍結融解試験前の値より 1 オーダー程度大きくなるが, 水密性に影響を与えるほどではない。

このように，凍結融解作用によるスケーリングが進行し, スケーリング率が約 5%に達したコンクリートにおいても，スケーリング部分を除去した残存部の相対密度，相対動弾性係数，相対超音波伝播速度，透水係数はさほど低下しておらず，所要の性能を有していることが明らかとなった。このことは，目視観察により著しいスケーリングが認められ，凍害が進行していると判断される構造物においても，スケーリング部分を除去した残存部は十分に健全な状態であり，残存部を対象に補修・補強を実施することが是なることを裏付ける結果であると言える。ただし，今回得られた結果は，健全なコンクリートが凍結融解作用を受けた場合であり，初期欠陥があり耐久性の劣るコンクリートの場合とは状況が異なることに留意しなければならない。

謝辞：本研究の一部は，平成16 年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(1)，課題番号16380158）により行われたことを付記する。

参考文献

1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'04，日本コンクリート工学協会，pp.234-243，2004
2) 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書［維持管理編］, 土木学会, pp.113-124, 2001
3) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中資博：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価，コンクリート工学年次論文集 Vol.24，pp.1563-1568，2002
4) 高田龍一, 郭　世文, 緒方英彦, 服部九二雄：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解性能評価に関する検討, コンクリート工学年次論文集 Vol. 26，pp.1911-1916，2004
5) 高科　豊：融雪剤が浸透したコンクリートのスケーリング劣化の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.619-624, 2001
6) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書［施工編］，土木学会，pp.84-85，2002