

論文 簡易で実用的なスケーリング進行予測式の提案

遠藤 裕丈^{*1}・田口 史雄^{*2}・林田 宏^{*3}・名和 豊春^{*4}

要旨：近年、コンクリート構造物を戦略的に維持管理し、長く使いこなす気運が社会的に高まっている。このニーズに応えるには、耐久性設計に資する実用的なコンクリートの劣化予測式の確立・普及が不可欠である。しかし、寒冷地で懸念される凍害に関しては未だ劣化予測式が確立されていない。このことに鑑み、本研究では実用的な凍害の予測式の開発を目指し、その一環としてスケーリングによる断面欠損の進行性の照査に資する簡易で実用的な予測式の提案を行った。さらに、室内実験および構造物調査により、その適用性を検証した。検証の結果、予測式は実測値と良く対応することを確認した。さらに、得られた成果をとりまとめ、予測式の導出フローを整理・提案した。

キーワード：コンクリート、凍害、スケーリング、劣化予測

1. はじめに

我が国では今日までに大量のコンクリート構造物が建設されてきた。今後は、これら膨大な数の構造物の高齢化による維持補修・更新費の増加が予想される。しかし、財政の逼迫および少子高齢化の進行など我が国を取り巻く社会情勢は非常に厳しく、従来のスクラップ・アンド・ビルトによる対応は容易ではない。このため、戦略的な維持管理・補修計画を立案し、構造物をより長く使いこなす必要性が益々高まっている。この社会ニーズに対応するには、構造物の劣化の進行を予測できる実用的な予測式の確立・普及が不可欠である。

寒冷地のコンクリート構造物が受けやすい代表的な被害の一つに凍害がある。特に、凍結防止剤の散布が行われる地区では、凍結融解に加えて塩化物の作用を複合的に受けることからコンクリートの表面がうろこ状に剥げ落ちるスケーリングの被害が多く見られる。スケーリングは構造物の美観低下やかぶりの減少に伴う鋼材の腐食速度の増加を引き起こすため、コンクリートの耐久性の早期低下が懸念される。

2007年に改訂されたコンクリート標準示方書〔維持管理編〕では、中性化、塩害、化学的侵食、疲労に関しては実用的な予測式が示されているが、その他の劣化を対象とした予測式については未だ示されていない¹⁾。凍害もその一つであり、寒冷環境下に曝されているコンクリート構造物の機能保持、長寿命化を図るため、凍害についても実用的な予測式を開発する必要がある。

凍害の形態はポップアウト、微細ひび割れ、スケーリング、崩壊などに幅広く分類される²⁾。形態は非常に複雑であるが、凍害はいくつかの劣化の進行パターンがあ

り、個々のパターンに限定すれば評価が可能な場合もあるとされ、そのパターンの一つにスケーリングによる断面欠損が挙げられている³⁾。筆者らも水セメント比と凍結融解履歴（供用年数もしくはサイクル）からスケーリングの進行性を評価することが概ね可能であることを確認している⁴⁾。

本論文では既報⁴⁾で得た知見をさらに応用し、積雪寒冷地におけるコンクリートの耐久性設計に資する実用的なスケーリングの進行予測式を提案するとともに、室内実験および構造物調査において提案した予測式の適用性を検証したので、その結果を報告する。

2. 予測式導出の考え方の整理

筆者らは既報⁴⁾において、実験・調査で取得した多くのデータを解析し、長期的なスケーリングの進行性を評価するための基本的な考え方（次式）を整理した。

$$\begin{cases} \gamma_w = \left(a \left[\frac{t}{A} \right] + b \right) \left(\frac{W/C}{B} \right) + c \left(\frac{t}{A} \right) + d \\ D_m = f e^{g \log \gamma_w} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 γ_w はスケーリングの進行性を表す指標値、 t は供用年数(年)（室内実験ではサイクルに置き換えることができる）、 W/C は水セメント比(%), D_m は剥離度(mm)（剥離深さ(mm)と評価対象面（50×50cm）の面積に占める剥離面積の割合との積⁵⁾（詳細は4.2で後述）、室内実験ではスケーリング量(g/cm²)に置き換えることができる）、 a, b, c, d, f, g, A, B はコンクリートの品質お

*1 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 研究員 博士(工学) (正会員)

*2 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 上席研究員 博士(工学) (正会員)

*3 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 主任研究員 (正会員)

*4 北海道大学大学院工学研究院 環境循環システム専攻 教授 博士(工学) (正会員)

よび環境条件によって定まる係数（うち、 A 、 B は t および W/C を無次元化させるための係数）である。

ここで γ_w は、次のように書き換えることができる。

$$\gamma_w = \left(a \left[\frac{W/C}{B} \right] + c \right) \left(\frac{t}{A} \right) + b \left(\frac{W/C}{B} \right) + d$$

コンクリート部材のスケーリングの進行予測を行うにあたり、部材の水セメント比を W/C に代入すると、 $a \left(\frac{W/C}{B} \right) + c$ および $b \left(\frac{W/C}{B} \right) + d$ はともに定数となる。それぞれの定数を m 、 n で表すと、次のように整理できる。

$$\gamma_w = m \left(\frac{t}{A} \right) + n$$

ここで、定数 m 、 n を左辺へ移し、移した後の左辺をまとめて γ_w' で表記すると次式が得られる。

$$\frac{\gamma_w - n}{m} = \gamma_w' = \frac{t}{A}$$

ここに、 γ_w' は m 、 n によって定まるスケーリングの進行性を表す指標値の修正値である。

γ_w の補正によって、式(1)に示す f 、 g も自動的に補正がなされる。ここで、 f の補正値を p 、 g の補正値を q とすると、式(1)を大きく簡素化させた形のスケーリング進行予測式が導出される。

$$D_m = p e^{q \log \frac{t}{A}} \quad (2)$$

すなわち、測定により得られた D_m と $\log(t/A)$ の関係をグラフ化し、指数近似して p 、 q を決定することで、ある年数 t までの剥離度 D_m を簡易に予測することができる。

本研究では以下、室内実験および構造物調査を行い、劣化予測への式(2)の適用性について検証する。

3. 室内実験による検証

3.1 コンクリートの配合

表-1 にコンクリートの配合を示す。水セメント比は50%、セメントは普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種の2種類とした。細骨材は除塩処理を施した苦小牧市錦岡産の海砂（密度 2.70g/cm^3 、吸水率0.89%）、粗骨材は小樽市見晴産の砕石（密度 2.68g/cm^3 、吸水率1.07%）を使用した。

表-1 コンクリートの配合

記号	セメント	単位量(kg/m^3)				A ($C \times \%$)
		W	C	S	G	
N5	普通	140	280	862	1,089	2.5
B5	高炉B	140	280	859	1,085	2.5

【備考】 Wは水、Cはセメント、Sは細骨材、Gは粗骨材、AはAE減水剤を表す。いずれの配合も、水セメント比は50%、細骨材率は44%、粗骨材最大寸法は25mm、フレッシュコンクリートの目標空気量は4.5%である。AE減水剤の成分はリグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体である。

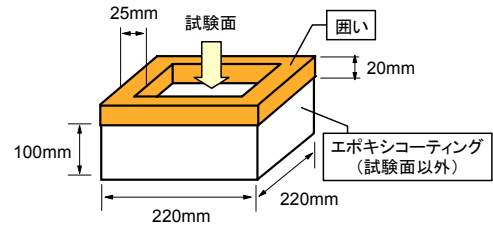


図-1 供試体

3.2 供試体・養生

図-1 に供試体を示す。供試体の寸法は $220 \times 220 \times 100\text{mm}$ とした。打設後、材齢7日まで養生マットに見立てた湿らせた麻布で供試体を覆い、その後は凍結融解試験開始材齢の91日まで恒温恒湿室（温度 20°C 、湿度60%）に静置した。途中、材齢14日に試験面以外の5面をエポキシ樹脂でコーティングし、材齢21日に試験面に試験水を張るための囲い（幅25mm、高さ20mm）を設置した。試験面は打設面とした。

3.3 凍結融解試験

凍結融解試験はASTM C 672に準じ、試験面に濃度3%の塩化ナトリウム水溶液を厚さ6mm張って、 -18°C で16時間、 23°C で8時間の1日1サイクルの凍結融解の繰り返し作用を約300サイクル与え、スケーリング量の測定を行った。測定は、5、10、15、30サイクル、30サイクル以降は15サイクルごとに行った。スケーリング量(g/cm^2)は、剥離したコンクリート片を採取し、 110°C で24時間乾燥させた後の質量(g)を試験面の面積（ $17\text{cm} \times 17\text{cm} = 289\text{cm}^2$ ）で除した値とした。なお、供試体は1配合3個とし、3個の平均を実測値とした。

3.4 予測式の導出および実測値との比較

凍結融解試験で得たスケーリング量の実測値から式(2)の p と q を求める。この3章では、4章で後述する構造物調査での測定項目の違いを明確に区分する理由から、スケーリング量に相当する D_m を SC 、サイクルに相当する t を cyc で表記することとする。 cyc を無次元化させるための係数 A は、測定サイクルの中間をとって150とした。

図-2は p と q を求めるために整理した $\log cyc/150$ と

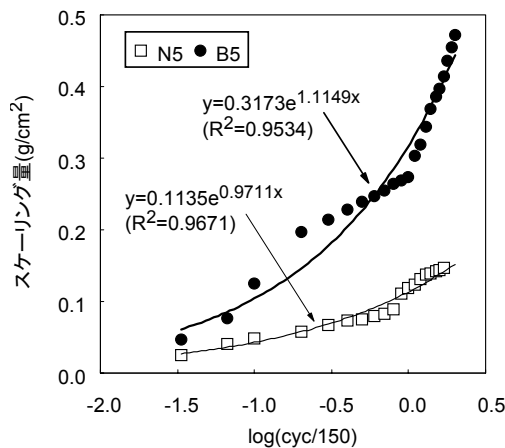


図-2 p と q の解析結果（室内実験）

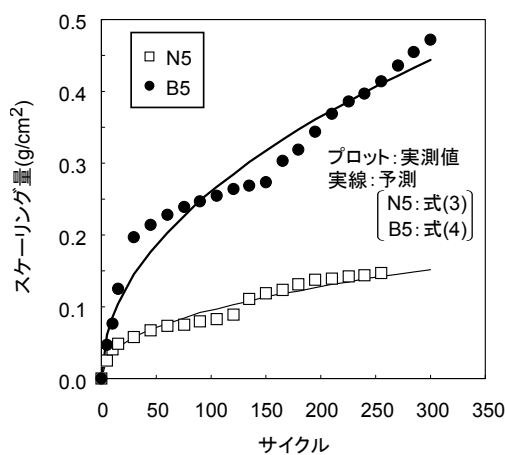


図-3 スケーリング量の推移の予測と実際の比較

スケーリング量の関係である。式(2)の形にあわせて指数近似による回帰分析を行ったところ、次式が得られた。

$$\text{N5)} \quad SC = 0.11e^{0.97 \log \frac{\text{cyc}}{150}} \quad (3)$$

$$\text{B5)} \quad SC = 0.32e^{1.11 \log \frac{\text{cyc}}{150}} \quad (4)$$

相関係数は N5, B5 とも 0.95 以上の高い値が示された。

図-3 はスケーリング量の実測値と式(3)、式(4)で示した予測式から求めた計算値を比較したものである。実測値は試験開始後、B5, N5 のいずれも約 50 サイクルにかけてスケーリングが急速に発生する挙動を示した。これはブリーディングによって脆弱化したコンクリート表面の極薄層が試験開始直後に急速にスケーリングした⁶⁾ことによると考えられる。それ以降は概ね一定の割合でスケーリング量が増加し、特に、N5 に比べて B5 の方が多くスケーリングする特徴的な傾向が示された。筆者は既往の研究で、高炉セメント B 種を使用したコンクリートの組織は、普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べて水密性が高いため、脆弱な表層に供給された塩水は

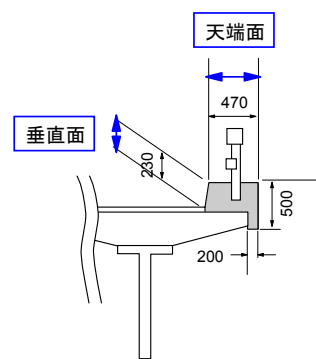


図-4 地覆コンクリートの寸法

表-2 地覆コンクリートの配合

セメント	単位量(kg/m³)					A (C×%)
	W	C	Ex	S	G	
普通	145	252	30	713	1144	0.04

【備考】 W は水、C はセメント、Ex は膨張材、S は細骨材、G は粗骨材、A は AE 剤を表す。細骨材率は 38%、粗骨材最大寸法は 40mm、フレッシュコンクリートの目標空気量は 4.5% である。AE 減水剤の成分はアニオン系界面活性剤である。

表-3 現地の冬期環境

項目	12 月	1 月	2 月	3 月
最低温度(℃)	-22.1	-25.8	-24.9	-23.7
凍結融解日数	21	10	8	24
凍結持続日数	10	20	19	5

【備考】 アメダスは 2004.12～2005.3 のデータ

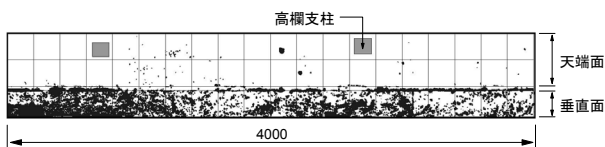
内部へ移動せず表層に留まりやすく、これによって凍結圧の負荷が表層に集積し、スケーリングが多く発生しやすいことを確認しており⁷⁾、実験結果はこの知見と良く対応している。予測式は、これら特徴的な推移を良く予測できていることが見て取れる

4. 構造物調査による検証

4.1 調査対象構造物

ここでは、塩化物系の凍結防止剤の散布が冬期間実施されている北海道道東地方に架かる道路橋の地覆コンクリートを調査の対象とした。図-4 に地覆コンクリートの寸法を示す。本橋は橋長が 73m で緩やかなカーブとなっており、カーブの外側から内側に向かって 4% の横断勾配がついている。本調査では、路面水が集まりやすいカーブ内側の地覆を調査の対象とした。表-2 にコンクリートの配合を示す。本橋は 1962 年 11 月に架設された既設橋で、地覆については 2004 年 10 月に打換えが実施され、打設から 6 年が経過している。

表-3 は本橋の立地地区における冬期の環境をアメダス⁸⁾で調べたものである。本橋は、最低気温が-20℃を下



図－５ 打設から５年経過後の地覆のスケーリング状況
の一例（黒く着色した範囲がスケーリング）



写真－１ 打設から５年後の地覆の状況（３月に撮影）

回る厳しい環境下に位置している。また、最低気温がコンクリートの凍結温度とされる -2°C ⁹⁾以下で、最高気温が -2°C より高い日を凍結融解日数、最低、最高気温がともに -2°C 以下の日を凍結持続日数とし、それぞれの日数をカウントしたところ、凍結融解日数の合計は 63 日、凍結持続日数の合計は 54 日であった。凍結融解日数は 1, 2 月が少なく、12, 3 月が多い傾向にある。これは、1, 2 月は最高気温が -2°C まで上昇する日数が少なく、日中も凍結状態が継続されているためである。

図－５は打設から５年後の橋梁中央付近の地覆コンクリート（延長 4m）におけるスケーリングの発生状況をトレースしたものである。スケーリングは道路側の垂直面に多く発生しているのに対し、天端面は被害が小さい状況にあった。写真－１は打設から５年後の３月に撮影した地覆の状況である。路肩の舗装面と天端面は土砂で覆われている状況にあることが確認された。この土砂が保護材の役割を果たしたことで、外気に露出しやすく、車両通過時の飛沫を受けやすい垂直面にスケーリングの被害が集中したものと考えられる。

4.2 スケーリングの程度の調査

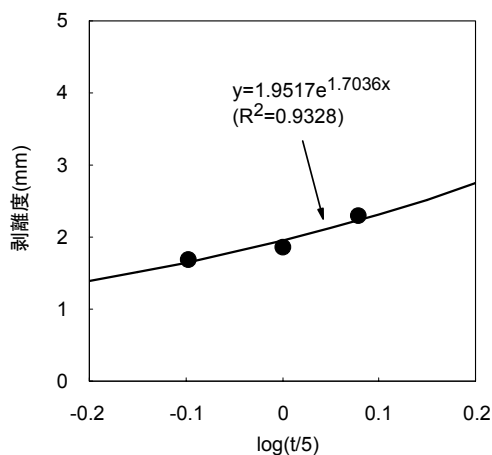
地覆コンクリートにおけるスケーリングの程度は剥離度で表現することとした。剥離度の定義は既往の報告書⁵⁾に記載されており、次式で表される。

$$D_m = D \times A_s \quad (5)$$

ここに、 D_m は剥離度(mm)、 D は剥離深さ(mm)、 A_s は剥離面積率である。

表－４ 剥離度の測定結果（垂直面）

経過年数	剥離度(mm)
t	D_m
4	1.7
5	1.8
6	2.3



図－６ p と q の解析結果（垂直面）

報告書⁵⁾では、測定対象面に $50 \times 50 \text{cm}$ の枠を置き、枠内で最も剥離が生じている範囲において剥離深さを 10 点測定し、その平均値を D 、枠内における剥離箇所の面積を枠の面積で除した値を A_s と定義している。しかし、 A_s については、部材の形状および寸法の関係で、垂直面および天端面に $50 \times 50 \text{cm}$ の枠を据え付けることが不可能であるため、ここでは図－５に示したトレース図の着色範囲の面積をパソコンで算出し、調査対象面の面積（垂直面は $400 \text{cm} \times 23 \text{cm}$ 、天端面は $400 \times 47 \text{cm}$ ）で除した値を A_s とした。

剥離深さは定義に準じて剥離の程度が大きい範囲を選定し、ノギスで 0 点測定し、その平均を D とした。

現地での調査は、地覆コンクリートの打設から 4, 5, 6 年後の 3 カ年にわたり行った。

4.3 調査結果および予測式の導出

表－４にスケーリングの被害が大きかった垂直面における剥離度の測定結果、図－６に p と q を求めるために整理した無次元化させた年数の対数値と剥離度の関係を示す。年数を無次元化させるための係数 A は、4～6 年の中間をとって 5 とした。前述の室内実験と同様に図－６のグラフを指数近似させた結果、 $p=1.95$ 、 $q=1.7$ となり、地覆コンクリートの垂直面におけるスケーリングの進行性を予測する式として、次式が得られた。

$$D_m = 1.95e^{1.7 \log \frac{t}{5}} \quad (6)$$

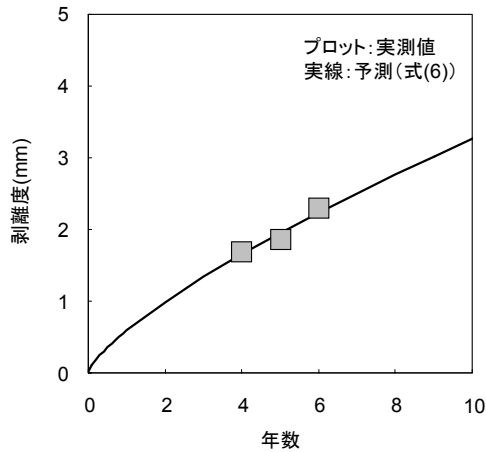


図-7 剥離度の推移の予測と実際の比較（垂直面）

表-5 剥離度の測定結果（天端面）

経過年数	剥離度(mm)
t	D_m
4	0.01
5	0.02
6	0.04

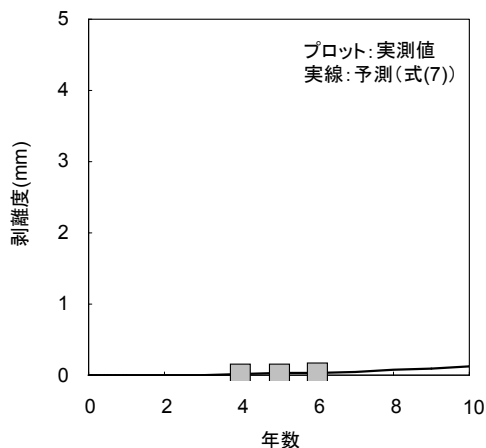


図-8 剥離度の推移の予測と実際の比較（天端面）

図-7 は地覆コンクリートの垂直面の剥離度の実測値と式(6)による予測値を比較したものである。実測値と予測値は良く対応した。本調査の範囲では、地覆の垂直面は打設から10年経過時に剥離度が3.3mm、20年経過時に剥離度が5.4mmに達し、20年経過時には平均深さ5mm程度のかぶりコンクリートが全面的に欠損する予測結果が示された。

これと同様の解析を天端面でも試みた。表-5 に剥離度の測定結果を示す。垂直面に比べると剥離度は極めて小さく、打設・供用から6年までの期間においては剥離度の変化は小さい状況にあるが、現時点までに得たデータの範囲で解析を行った結果、次式が示された。

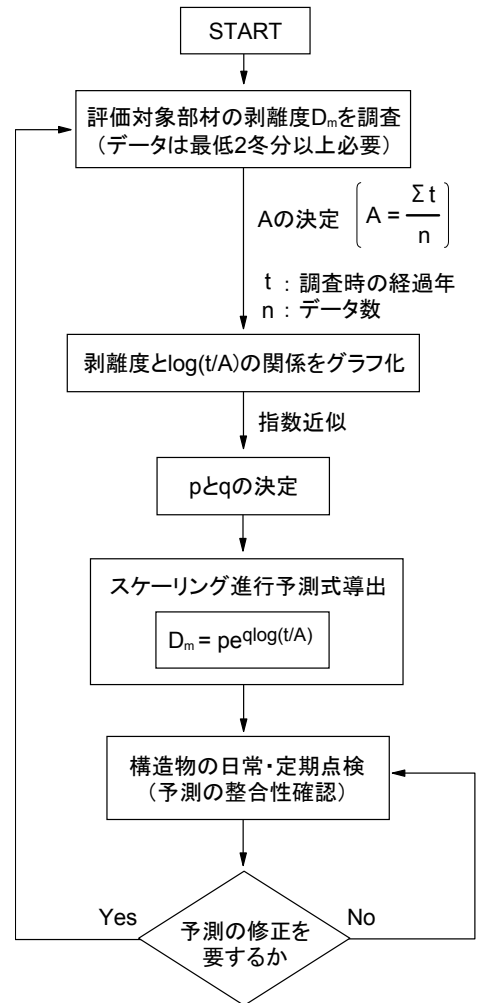


図-9 スケーリング進行予測式の導出フロー

$$D_m = 0.02e^{5.44 \log \frac{t}{5}} \quad (7)$$

図-8 は天端面の剥離度の実測値と式(7)による予測値を比較したものである。現時点までの期間においては実測値と予測値は概ね対応する結果を示したものの、この式は垂直面とは対照的に、供用から6年以内の剥離度および剥離度の変動が極めて小さい数点のデータをもとに算出した式であるため、式の精度を将来的にさらに高めるには、今後も継続的にデータを取得・蓄積し、適宜解析を行って式の修正を図っていくことが望ましい。

5. スケーリング進行予測式導出フローの提案

図-9 に本論文で得た成果の範囲でとりまとめたスケーリングの進行予測式の導出フローを示す。式(2)には係数が p, q の2種類あるため、データの数は2つ以上すなわち最低2冬分以上の調査の実施が必要となる。このため、あらかじめ日常点検において D_m をできるだけ多く取得しておくことが望ましい。次に、調査を行った時点

の経過年数 t の合計を求め、その平均 A で年数を無次元化させ、さらにその対数をとった $\log(t/A)$ と D_m の関係をグラフ化する。このグラフを指数近似させることで p 、 q が決定され、スケーリングの進行予測式を簡易的に導出することができる。

なお、導出した予測式は、それまでに行った数回の調査により取得したデータを基に導出したものである。このため、今後の点検で得られるデータを追加することにより、予測式の精度向上が期待される場合は適宜、修正を図っていく¹⁰⁾ことが望ましい。

スケーリングによるかぶりの減少は、鉄筋腐食速度に大きな影響を及ぼす。しかし、現在、Fick の拡散方程式に準じて行われている塩化物イオンの浸透性に関する照査¹¹⁾では、スケーリングによるかぶりの経時的減少の影響は考慮されていない。本研究で整理したスケーリングの進行予測式と Fick の拡散方程式を組み合わせることにより、寒冷地におけるコンクリートの耐久性照査技術の精度向上が期待される。これについては今後の課題としたい。

6. まとめ

本研究では、実用的な凍害の進行予測式の開発を目指し、その一環としてスケーリングによる断面欠損の進行性の照査に資する実用的な予測式の提案を行った。さらに室内実験および構造物調査を実施して、その適用性について検証した。得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- 1) 本研究で提案した簡易的なスケーリング進行予測式は、室内実験、構造物調査のいずれにおいても実測値と良く対応し、予測式の有効性を確認することができた。
- 2) 得られた成果をとりまとめ、耐久性設計に資するス

ケーリング進行予測式の導出フローを整理・提案した。

参考文献

- 1) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，pp.81-228，2008.6
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの診断技術'02〔基礎編〕，p.47，2002.1
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの診断技術'02〔基礎編〕，p.202，2002.1
- 4) 遠藤裕丈，田口史雄，名和豊春：スケーリング進行性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1129-1134，2009.7
- 5) 北海道開発局港湾部港湾建設課，社団法人寒地港湾技術研究センター：海洋環境下におけるコンクリートの耐久性向上技術検討業務報告書，2000.3
- 6) 権代由範，庄谷征美，月永洋一，子田康弘：塩化物環境下におけるスケーリング抵抗性の評価試験法に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，第20 巻，第1 号，pp.59-70，2009.1
- 7) 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，北海道大学博士学位論文，2011.3
- 8) 気象庁：2004.12～2005.3 アメダスデータ
- 9) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'99，p.155，1999.9
- 10) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，p.132，2008.6
- 11) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，p.112，2008.6