論文 スケーリング進行性評価に関する研究

遠藤 裕丈*1·田口 史雄*2·名和 豊春*3

要旨:海水と凍結融解の複合作用を受ける寒地の防波堤上部工天端面におけるスケーリングの進行性を簡易 的に評価する手法について検討を行った。スケーリングの進行性に及ぼす水セメント比の影響は、一次関数 で説明できることを明らかにし、さらに水セメント比と凍結融解履歴(供用年数、サイクル)のパラメータ から、スケーリングの進行性を簡易的に評価する式を提案した。

キーワード:凍結融解,スケーリング,水セメント比,予測

1. はじめに

寒地沿岸部のコンクリート構造物は,海水と凍結融解 の作用を複合的に受ける。海水に含まれる塩化物イオン は,スケーリング(コンクリートの表面がうろこ状に剥 げ落ちる形態の凍害)の進行を促進させることが知られ ている。スケーリングが生じると,構造物の美観低下や, かぶりの減少に伴う鋼材の早期腐食を引き起こすため, コンクリートの耐久性低下が懸念される。

また,社会的背景として,我が国では近年,コンクリ ート構造物の合理的な維持管理,社会資本ストックの有 効活用に対する意識が高まっている。このため,劣化予 測技術の向上を図り,性能照査型の設計体系を高度化さ せることが求められている。

このようなことから,筆者らはこれまで,海水と凍結 融解の複合作用を受ける実際のコンクリート構造物の スケーリングの進行を予測する方法を構築するため,建 設から10数年~約40年を経た北海道内の防波堤上部の 天端面を対象に調査を行い,重回帰分析の結果をもとに, 検討した各々の影響因子〔水セメント比(内部および表 層部),圧縮強度,空気量,気泡間隔係数,地域係数¹⁾, 供用年数〕に重み係数を乗じ,それらを組み合わせたス ケーリング進行性指標値 yを提案してきた²⁾。しかしな がら,パラメータが7因子と多く,各々の因子調査には 多大な労力を要するという短所があり,実用性を高める には,予測方法の簡素化を図ることが望ましいと考えた。

そこで,既報の調査・解析²において重み係数が大き いと評価された水セメント比と供用年数(サイクル)の 2つにパラメータを絞り込み,スケーリングの進行性の 予測方法の簡素化に向けた実験・解析を行った。なお, 評価対象構造物は防波堤の上部天端面とする。

2. 室内実験での基礎的検討

はじめに,スケーリングの進行に及ぼす水セメント比

表-1 コンクリートの配合

記品	W/C	単位量(kg/m ³)				А
口与	(%)	W	С	S	G	(C×%)
B35	35	143	409	753	1,072	0.6
B45	45	144	320	823	1,078	2.5
B55	55	145	264	882	1,065	2.5
B65	65	145	223	939	1,047	2.5

W/C:水セメント比,W:水,C:セメント,S:細骨材,G:粗骨材,A:混和剤 混和剤の種類は,B35はポリカルボン酸エーテル複合体,B45,B55, B65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。



および凍結融解履歴年数(サイクル)の影響をどのよう な関数式で説明できるのか基礎的な検討を行うため, ASTM C 672 に準じたスケーリング試験を行った。

2.1 コンクリートの配合

表-1 に配合を示す。セメントは北海道の防波堤で多 く用いられる高炉セメントB種を使用した。水セメント 比は 35,45,55,65%,空気量は 4.5%とした。細骨材 は苫小牧錦岡産の除塩処理済の海砂(密度 2.70g/cm³), 粗骨材は小樽見晴産の砕石(密度 2.67g/cm³,最大寸法 25mm)を用いた。

2.2 供試体

図-1に供試体を示す。寸法は220×220×100mmとし、 試験面に試験水を張るための土手(幅25mm,高さ20mm) を設置した。天端面が打ち込み面であることを考慮し、

*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 (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(工) (正会員) *3 北海道大学大学院 工学研究科環境循環システム工学専攻 教授 工博 (正会員)



凍結融解試験面はコンクリート打設面とした。試験面以 外の5面は、エポキシ樹脂でコーティングした。

2.3 養生

材齢3日まで湿気養生を行い、その後は試験開始材齢の28日まで恒温恒湿室(温度20℃,湿度60%)に静置した。土手は、材齢21日にシリコーンとエポキシ樹脂で取り付けた。

図-2に、材齢28日の供試体の物性を示す。圧縮強度 は20~55N/mm²,既報³⁾で打設面におけるスケーリング の進行性と密接な関係にあると評価された75nm以上の 細孔量(深さ0~5mm層)は0.1~0.4ml/g,打設面のプ ルオフ強度は1.0~2.5N/mm²であった。また、水セメン ト比の増加に伴い、細孔量は比例的に増加し、一方で圧 縮強度とプルオフ強度は減少する傾向が確認された。

2.4 凍結融解試験

凍結融解試験はASTMC672に準じ,試験面に市販の 人工海水を厚さ6mm張って,-18℃で16時間,23℃で8 時間の1日1サイクルの凍結融解作用を約500サイクル まで繰り返し与え,スケーリング量を測定した。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. 室内実験の結果と考察

3.1 スケーリング試験

図-3 にスケーリング試験の結果を示す。水セメント 比が大きい供試体ほどスケーリングは多く発生する結 果が示された。この傾向は、約500サイクルの長期にわ たって持続した。なお、水セメント比55%、65%は、0 サイクルから約50サイクルにかけてのスケーリングの 進行速度は早い傾向にあった。これは、ブリーディング 等の影響で打設面の薄層が極度に脆弱化し、試験開始後、 それらが短時間で一気に剥がれたものと類推される。



3.2 スケーリングの進行性に関する解析的考察

図-3の結果を整理し、水セメント比、サイクル、スケーリング量の3者の関係を調べた。ここでは、水セメント比を W/C(%)、サイクル数を cyc、スケーリング量を SC(g/cm²)で表し、各パラメータを代表値で割り、無次元 化させて分析を行った。なお、データの分布の特徴を評価する場合、中心データである平均値からの分散の程度 を把握することが一般的であることから、ここでは、実験データの平均値で除すこととした(それぞれの無次元 値は W/C/50、cyc/237、SC/0.27 である)。

図-4 に無次元化させた水セメント比(W/C/50)とス ケーリング量(SC/0.27)の関係を示す。本研究ではスケ ーリングの進行速度が極度に早かった100サイクル未満 のデータは解析の対象外とし、100~500サイクルのデー タを扱って長期的なスケーリングの進行性を評価した。 図には100、200、300、400、500サイクルのデータを示 した。いずれのサイクルも SC/0.27=a・(W/C/50)+bの一次



関数の関係が成立することが確認された。この結果は、 図-2 で示した水セメント比の増加に伴い、コンクリートの品質が低下する結果とも良く対応している。

次に、一次関数式の傾き a と切片 b の経時変化につい て調べた。図-5 に無次元化させたサイクル (100, 200, 300, 400, 500, 600 サイクルの無次元値はそれぞれ 0.42, 0.85, 1.27, 1.69, 2.11) と傾き a および切片 b の関係を 示す。a の増加量は、スケーリングの進行性に及ぼす水 セメント比の影響度の経時変化を表している. a はサイ クルの進行に伴って増加しており、水セメント比の影響 によってもたらされる各供試体のスケーリング量の差 が経時的に大きくなっていることが読み取れるが、その 変化の割合はほぼ一定であった。このことから、100~ 500 サイクルの範囲では、水セメント比はスケーリング の軽重差だけではなく、スケーリングの進行速度とも高 い相関関係にあることが明らかとなった。また、b も a の変化に連動して比例的に変化することも確認された。

以上より, SC/0.27 を ywで表すと,打設面のスケーリングの進行性に及ぼす水セメント比とサイクル (100~



500 サイクル)の影響を表す式として,式(1)が得られた。

$$\gamma_{w} = \left(1.09 \left[\frac{cyc}{237}\right] + 1.11\right) \left(\frac{W/C}{50}\right) - 0.57 \left(\frac{cyc}{237}\right) - 0.57$$

図-6は、式(1)から求めた ywの計算値とスケーリング 量の実測値との関係である。データの分布を評価する場 合、対数に変換することで分布のゆらぎが軽減され、関 係が理解しやすくなる場合が多いことから、ここでは yw の常用対数をとって結果を整理した。回帰分析を行って 近似曲線を求めたところ、式(2)が得られた。相関係数は 0.96と高く、相関性は良好であることが確認された。

$$SC = 0.26e^{2.42\log\gamma_w}$$
(2)

4. 構造物での実証的検討

次に, 既報²⁾で述べたスケーリングの被害を受けた防 波堤の上部天端面における調査データを用いて, 室内実 験で得た式の妥当性の評価を試みた。

4.1 調査箇所の概要

調査箇所は,未嵩上かつ未補修の北海道内のA,B,C, D,E,F港の防波堤の上部天端面である。図-7に位置 図を示す。2000~2004 年度のアメダス⁴⁾から求めた 12 ~3月の最低気温の極値はA~E港が-8.2~-10.4℃,F港 は-4.5℃であった。一方,最低気温がコンクリートの凍 結温度とされる-2℃⁵⁾以下で,最高温度が-2℃より高い日 を凍結融解日数としてカウントすると,12~3月のA~F 港の凍結融解日数は57~89日であった。なお,数値は5 年間の平均である。

4.2 スケーリングの評価方法

室内実験ではスケーリング量で評価したが,実際の構 造物ではスケーリング量の測定は困難である。そこで, 防波堤の上部天端面では「海洋環境下におけるコンクリ



図-8 剥離度の測定



写真-1 剥離度 31mm の天端面



図-9 コンクリートの品質調査に用いたコア部位

ートの耐久性向上技術検討委員会」が提案した式(3)に示 す「剥離度」⁶⁾でスケーリングの程度を評価した。

$$D_m = D \times A_S \tag{3}$$

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。

測定は図-8 に示すように,はじめに,測定対象面に 50×50cmの枠を置き,最も剥離が生じている箇所におい て,剥離深さをデプスゲージで10 点測定し,その平均 値 D(mm)を算出した。次に,枠内における剥離部分の面



図-10 水セメント比(配合推定値)と剥離度の関係



図ー11 水セメント比と圧縮強度の関係

積 $S(cm^2)$ を算出し,枠面積の 2500 cm^2 で除して剥離面積 率 A_s を求め,最後に,両者を乗じて剥離度 $D_m(mm)$ を算 出した。一例として,剥離度 31mmの天端面の状態を**写 真**-1 に示す。なお,スケーリングが全面的に激しく進 行しており,基準面が残っていなかった箇所においては, 最も高い位置にある骨材の頂点を基準に仮定して剥離 深さの測定を行った。

4.3 コンクリートの品質調査

現地のコンクリートについては、配合記録が残されて いないため、配合推定により水セメント比を調べた。図 -9 に示すように、天端面からコア試料を3本採取し、 深さ350~400mmから試料を切り出して分析を行った。 A、B、C、D、E港はセメント協会法のF-18、骨材に石 灰石が使用されていたF港は硬化ペーストのシリカ量か ら推定する方法⁷⁾に準じて行った。また、深さ50~350mm の部位を用いて、コンクリートの圧縮強度を測定した。

5. 構造物調査の結果と考察

5.1 コンクリートの品質とスケーリングの程度の関係

図-10に水セメント比と剥離度の関係を示す。凡例の





数字は供用年数を表している。10数年経過の B~E 港の 防波堤と,約40年経過のA港の防波堤においては,水 セメント比の増加に伴い,スケーリングの程度が大きく なる関係が得られ,室内実験と同様の傾向が示された。

しかし, F 港はデータにばらつきがみられ(例えば※ 印),明確な相関は得られなかった。

図-11 は水セメント比と圧縮強度の関係を示している。使用材料,打設および養生方法を統一化している室内実験のような高い相関係数は得られなかったが,水セメント比の増加に伴い,概ね圧縮強度が低下する形の分布が概ね示された。楕円で囲ったデータは,図-10に※印を付した箇所の調査データであるが,他のデータと比較すると,回帰直線から大きく外れていることが認められた。

図-12 は圧縮強度と剥離度の関係を示している。相関 係数は小さいが,圧縮強度が大きくなるにつれて剥離度 が小さくなる形の分布が,全ての防波堤において見受け られた。すなわち,F港は,水セメント比は適切に設計



図-14 傾き*a*, 切片*b*の経時変化(防波堤)

されたものの,施工の際にジャンカ等の不良部が形成さ れ,満足な品質・強度が確保されなかったために,スケ ーリング抵抗性が低下したものと類推される。

5.2 室内実験での解析方法に準じた評価

図-10 に示したように、コンクリートの品質がさほど 芳しくなかった F 港を除くと、水セメント比と剥離度は 良い相関にあった。そこで、品質が比較的良好であった A~E 港を対象に解析を行った。

解析は、室内実験と同じ方法で、スケーリング量を剥離度、サイクルを年数に置き換えて計算を行った。はじめに A~E 港の剥離度と年数を測定データの平均(各々7.3、59.1)で除して無次元化し、 $D_m/7.3=a \cdot (W/C/59.1)+b$ の一次関数で整理した(図-13)。次に、求めた一次関数の傾き a と切片 b の経時変化を直線回帰で求めた(図-14)。現時点ではデータ数が少なく、今後、データを蓄積して精度の向上を図っていく必要はあるが、本研究で行った検討の範囲では、式(4)が導出された($D_m/7.3$ は y_w としている)。

$$\gamma_{w} = \left(12.1 \left[\frac{t}{23.4}\right] - 4.48\right) \left(\frac{W/C}{59.1}\right) -11.3 \left(\frac{t}{23.4}\right) + 4.56$$
(4)

γw と剥離度の実測値の関係は、図-15に示すように式 (5)で表される。相関係数は 0.83 で室内実験に比べると小 さいが、曲線に概ね沿った形でデータがプロットされた。

$$D_m = 6.66e^{2.91\log\gamma_w}$$
(5)

なお,式(4)の W/Cに48~53%の値を入力すると,t=12~16年においては yw>0で log yw は算出されるが,t=40年では yw<0となり, log yw は算出されない。これは、図



-10 で示した =10 数年と =40 年の回帰直線の位置関係 は、現実的には全ての W/C の範囲において =10 数年よ りも年数が古い =40 年の方が上方に表示されないとい けないが、本研究ではデータの補正は行わず、実測値を 一律で直線回帰させた関係で、W/C=48~53%において =10 数年と =40 年の回帰直線の位置関係が逆転し、その 結果、W/C=48~53%では計算上、経年的に剥離度が減少 し、 =40 年には 0 を下回るという評価がなされたことに よる。そのため、式(4)の適用範囲は限定的(W/C=54%以 上)となるが、室内実験で検討した簡易的な評価方法は、 本研究の範囲では妥当性があると評価された。

以上より、コンクリートの品質が適切な場合、打設面 における長期的なスケーリングの進行性(室内実験では 100~500 サイクル、構造物では10数年~約40年)は、 式(6)を用いることで、水セメント比と凍結融解履歴年数 (サイクル)から簡易的に評価できることが示された。

$$\begin{cases} \gamma_{w} = \left(a\left[\frac{t}{A}\right] + b\right)\left(\frac{W/C}{B}\right) + c\left(\frac{t}{A}\right) + d\\ D_{m} = fe^{g\log\gamma_{w}} \end{cases}$$
(6)

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) (室内実験ではスケーリング量(g/cm^2)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。

さらにデータの蓄積・充実が図られれば、本成果を用 いることで、室内実験のサイクルを実環境の年数に換算 できる可能性が期待される。これについては、今後の検 討課題としたい。

6. まとめ

本研究では、防波堤の上部天端面を評価対象とし、打 設面におけるスケーリングの進行性を、水セメント比と 凍結融解履歴(供用年数やサイクル)の2つのパラメー タから簡易的に評価する方法について解析的かつ実証 的な検討を行った。得られた知見をまとめると、以下の 通りである。

- (1) 打設面のスケーリング進行性に及ぼす水セメント比の影響は、一次関数の形で説明できる。その関係は、 長期に亘って保持される。
- (2) 水セメント比が適当な値でも、施工の際にジャンカ 等の不良部が形成され、満足な品質・強度が確保さ れない場合は、所定のスケーリング抵抗性を期待す ることは困難である。
- (3) コンクリートの品質が適切な場合,打設面における 長期的なスケーリングの進行性(室内実験では 100 ~500 サイクル,構造物では 10 数年~約 40 年)は, 水セメント比と凍結融解履歴年数(サイクル)から 簡易的に評価できる。

参考文献

- 濱幸雄,松村光太郎,田畑雅幸,冨板崇,鎌田英治: 気温要因を考慮したコンクリートの凍害劣化予測, 日本建築学会構造系論文集,第 523 号, pp.9-16, 1999.9
- 遠藤裕丈,田口史雄,嶋田久俊,星俊彦,太田利隆, 佐伯昇,名和豊春:10数年および約40年経過した 北海道の港湾コンクリート構造物のスケーリング 進行性評価,土木学会論文集,Vol.64,No.3, pp.484-499,2008.9
- 遠藤裕丈,田口史雄,嶋田久俊:塩化物水溶液による長期凍結融解作用を受けたコンクリートのスケ ーリング特性,土木学会論文集,No.725,V-58, pp.227-244,2003.2
- 4) 気象庁: 2000.12~2001.3, 2001.12~2002.3, 2002.12
 ~2003.3, 2003.12~2004.3, 2004.12~2005.3 アメダ スデータ
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 吉田八郎,横田滋,高野豊:石灰石骨材を使用した 硬化コンクリート中のセメント量推定方法,コンク リート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.347-352, 1990.