# 論文 凍結融解作用によるコンクリートの質量減少率予測手法の提案

長谷川 拓哉\*1·千歩 修\*2·福山 智子\*3

要旨:本研究では、寒冷地のコンクリート構造物の耐久設計、維持管理に用いることを想定した実用的なス ケーリング進行予測式の提案を目的として、JIS A 1148 A 法のデータを収集し、質量減少率の予測手法を検 討した。A 法における質量減少率は、ゴンペルツ曲線により精度よく表現できることを示し、この曲線を用い て、W/C と環境の凍結最低温度から、塩分の影響がない場合の凍結融解による質量減少率を予測する手法を 提案した。既往の屋外暴露結果および実構造物調査結果を用いて、提案した予測手法の妥当性を検討した。 キーワード:凍結融解作用、スケーリング、質量減少率、予測手法、JIS A 1148 A 法

#### 1. はじめに

寒冷地におけるコンクリート構造物の維持管理を行う 上で, 凍害劣化の進行予測は重要である。 凍害劣化のう ち,相対動弾性係数の低下を指標とする内部膨張劣化は, その進行予測手法が提案されているが<sup>例えば 1), 2)</sup>, スケー リングについては予測手法の検討は少ない。遠藤らは, スケーリングの進行性について検討し<sup>3)</sup>, 簡易なスケー リング進行予測式を提案している4)。また、本学会「コ ンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委 員会(2006~2007)」において塩分の影響がない場合のス ケーリング進行予測手法(S-ASTM 相当サイクル数)が 提案されている 5)。しかし、前者は、予測に現場の調査 データが必要であり,設計段階での予測を行うためには 工夫が必要となる。また,後者は現場の調査データを必 要としないものの、スケーリング量の増加を直線と仮定 しており,スケーリング進行の初期段階にしか対応でき ないと考えられる。

本研究では、塩分を含まない場合の実用的なスケーリング進行予測式の提案を目的として、JISA1148(ASTMC 666)A法(以下「A法」)のデータを収集し、質量減少率の予測手法を検討した結果を報告する。

#### 2. 検討の概要

# 2.1 検討に用いたデータの概要

表-1 に収集したA法のデータの概要を,表-2 にデータ の水セメント比毎の内訳を示す。ここでは,既報<sup>の</sup>と同 様に基本となる傾向を把握するため,普通ポルトランド セメント,普通骨材を用いた普通コンクリートを対象と し,試験体形状,養生などの条件が同一のものを収集し た。試験データは,北海道大学建築材料学研究室(講座) で1978~2014年の37年間に行われた実験によるデータ とした。なお,水セメント比では0.70~0.38の範囲を対 \*1 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門 表-1 収集したデータの概要

	2	
試験機関		北海道大学 建築材料学研究室(講座)
試験時期		1978~2014年
試験法		ASTM C 666 (JIS A 1148) A法
W/C		0.70~0.38
使用材料	セメント	普通ポルトランドセメント
	粗骨材	吸水率1.61~3.13%の普通骨材
	細骨材	吸水率1.01~2.54%の普通骨材
	混和剤	AEコンクリートの場合:AE剤、AE減水剤または 高性能AE減水剤 一部にAE助剤使用
養生		2週水中養生
試験体形状		$75 \times 75 \times 400$ mm
試験条件		塩化物を使用しない

表-2 収集したデータの W/C 毎の内訳

W/C	データ数*
0.70	21(9)
$\sim 0.60$	26(15)
$\sim 0.50$	72(27)
$\sim 0.40$	22(12)
$\sim 0.38$	15(12)
計	156
*()内は各データ	数のうち最低凍
結温度-18℃以外	トのデータ数

象とした。これはA法でスケーリングが生じる水セメン ト比の限界は概ね0.35前後にあると考えられるからであ る<sup>6</sup>。また,試験方法はA法と同じであるが,凍結最低温 度が異なっているデータもあわせて収集した<sup>7),8)</sup>。

収集した全てのデータは,注意深く試験が行われ,試 験相互の比較ができると仮定した。

# 2.2 本検討における A 法データの位置づけ

既報<sup>6)</sup>でも述べた通り,A法は,スケーリングの試験 としては不適当といわれている。剥離片の管理が困難で あるとともに,A法で通常測定される質量には,スケー リングの他,試験体の含水状態など質量が変化する要因 が複合的に表れていると考えられるからである。さらに, 試験時の吸水方法について,ASTMC 672 や RILEM CIF 法などのように一面吸水が実現象に近いと考えられるが, A法では試験体全体から吸水することになり,実現象と は異なっていると考えられる。

\*1 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門 准教授 博士(工学) (正会員) \*2 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門 教授 工学博士 (正会員) \*3 北海道大学大学院工学研究院空間性能システム部門 助教 博士(工学) (正会員)

一方で、A 法と ASTM C 672 によるスケーリング抵抗 性の評価は同様の傾向となることも指摘されている<sup>9</sup>。 ここで, 著者らが行った実験<sup>10)</sup>における CIF 法と A 法の 関係を図-1に示す。なお、ここにいうA法によるスケー リング量は、質量減少量を示している。この図では、 W/C0.55 の 28 サイクルの A 法のスケーリング量を基準 とし、CIF 法の試験結果を同じスケーリング量になった サイクル(67 サイクル)が28 サイクルとなるよう調整 (サイクル×28/67) している。図より、サイクルをあわ せると両者はほぼ同等のスケーリング量となることがわ かる。限られた試験で、データ数も少ないため明確なこ とは言えないが、異なる試験条件でのスケーリング進行 が類似していることから、A法で得られた「ポテンシャ ルとしてのスケーリング抵抗性」<sup>6</sup>は、実環境を含めた 異なる凍結融解条件においても一定の指標となる可能性 があると考えられる。この点をふまえ、本検討では、A 法による「ポテンシャルとしてのスケーリング抵抗性」 として質量減少率の予測式を検討し、その予測が実環境 でのスケーリング進行を説明できると仮定し、以下の検 討を行うこととした。

#### 3. 質量減少率の予測式の検討

# 3.1 式の検討

S-ASTM 相当サイクル<sup>5)</sup>では,スケーリングによる質 量減少率の変化を直線と仮定している。しかし,早期に スケーリングが進行する場合,直線で近似ができないこ とも多い。遠藤らは,スケーリングの簡易な予測式とし て式(1)を提案している<sup>4)</sup>。

$$D_m = pe^{q\log(\frac{t}{A})}$$
ここで,  $D_m$ : 剥離度 (mm),  $t$ : 供用年数 (年),  
p,q,A: 係数

ここで,剥離度 D<sub>m</sub> は室内試験ではスケーリング量に 置き換えられるものである。本検討で対象とした質量減 少率は,理論上は無限大の時間で 100%になる。式(1)で はスケーリングは一定値に収束しないため,本検討では 適当ではない。そこで,無限大の時間で 100%に漸近に するよう,ゴンペルツ曲線(式(2))で表すこととした。

$$w_t = 100e^{\left(-a\left(\frac{1}{n}\right)^{\nu}\right)} \tag{2}$$

h

ここで, w<sub>t</sub>: 質量減少率(%), n: 凍結融解サイクル, a, b: 係数

図-2 に試験結果より最小二乗法によって係数 a,b を求めた結果の例を示す。式(2)は良好に試験結果を表しており,以下,式(2)を質量減少率の予測式として検討を行う。



#### 3.2 係数の検討

図-3 に各試験データより算出した係数 b と a の関係を 示す。両者は高い相関がみられ、これより得られた式(3) によって係数 b がわかれば係数 a が決定できるといえる。 係数 b の変化に対し、係数 a は指数的に変化している。 そこで係数 b を対象に以下の検討を行うこととした。

$$a = 6.57e^{3.43b} \tag{3}$$

耐久性指数と係数 b の関係を図-4 に示す。耐久性指数 60 未満ではばらつきが大きくなり、耐久性指数 20 以下 では著しくばらついていることがわかる。これは、耐凍 害性が低いコンクリートは早期に組織が緩み、スケーリ ングを含む欠損が多くなることが考えられる。これから、 耐凍害性が低いコンクリートの質量減少率を確定論的に 予測することは困難であると考えられる。また、耐久性 指数が低いコンクリートを内部膨張劣化が進行したコン クリートと考えると、同様にスケーリングの予測は困難 といえる。ここでは、耐久性指数が 60 未満のコンクリー トや相対動弾性係数が 60%未満におけるスケーリング進 行は、対象外とした。これらは、確率論的な取り扱いが 考えられるが、検討の必要性も含め今後の課題としたい。

#### 3.3 係数の算定手法の検討

ここで,既報<sup>の</sup>では,コンクリートの質量減少率に及 ぼす影響として,水セメント比,空気量,骨材の品質を 指摘している。また,文献<sup>5)</sup>では,A法におけるコンク リートの質量減少率に及ぼす影響要因について分散分析 を行った結果,養生の影響が有意であり,次いで凍結最 低温度の影響が大きいことを指摘している。空気量,骨 材の品質の影響は,水セメント比の影響に比べると大き くなく,実構造物ではJIS に従うため一定の品質が確保 されていると考えられることから,係数算定のパラメー タとしては考慮しないこととした。また,養生の影響は コンクリートのスケーリング進行性の大小として表れる と考えられる。ここではできるだけ予測に必要な要因を 少なくするため,水セメント比の大小でスケーリング進 行性の大小を表現することとし,係数の検討は,水セメ ント比と凍結最低温度の影響に絞って行うこととした。

図-5 に水セメント比と収集データから求めた水セメ ント比毎の係数bの平均値(図中の「〇」)の関係を示す。 両者は高い相関が確認でき,水セメント比から係数bが 求められると考えられる。ここで,係数bのばらつきに ついて,内部膨張劣化が進行していない40のデータを対 象に平均値を1とした時の度数分布を図-6に示す。正規 分布とみなせると仮定すると,その標準偏差は0.242と なった。平均値は1であるので変動係数が0.242であり, これは試験体作製や試験実施時のばらつきと考えられる。 予測にあたって,この程度のばらつきがあることを考慮 する必要があるといえる。

最低凍結温度を変えた実験結果<sup>7),8</sup>から求めた係数 b の例(W/C0.60)を図-7に示す。係数 b は概ね凍結最低 温度と直線関係にあることがわかる。他の水セメント比 も同様であり、この直線の傾きを水セメント比毎に求め た結果を図-8に示す。凍結最低温度に対する係数 b は、 水セメント比と高い相関があることがわかる。ここで、 凍結最低温度に対する係数 b に-18℃を乗じた値は図-5 と同じになるはずである。図-5中にその値(図中の「◇」) を示す。両者にはややばらつきがみられるものの、ほぼ 同程度の値を示している。ここで図-5に示したデータ全 てで直線回帰を行った。これを-18℃の比として表すと、 凍結最低温度に対する係数 b は、式(4)で表すことができ る。





低数 b の例(W/C0.60)

$$b = (x - 0.235) \frac{T}{-18}$$
(4)

ここで, x: 水セメント比, T: 凍結最低温度 (℃)

コンクリートの水セメント比と環境における凍結最低 温度を用い,式(2)~(4)によってスケーリングによる質量 減少率の予測ができると考えられる。

# 4. 質量減少率の予測式適用性の検証

#### 4.1 屋外暴露試験による検証

提案した予測式について屋外暴露試験結果との比較 により,予測結果の妥当性について検証を行うこととし た。検証に用いた気象データは、統計期間 1981~2010 年の平年値を用い、凍結最低温度に用いるコンクリート 温度は、文献<sup>11)</sup>で検討した日毎の気温からの予測から求 めた。凍結融解の条件は、凍結を日最低気温が-1.0℃以 下,融解を日最高気温が 0℃以上とし、真冬日が連続す る期間の最低温度は、その期間の最も低い日最低気温を 用いることとした。サイクルで凍結最低温度が異なる場 合の質量減少率の変化は、図-9のように、凍結最低温度 が次の条件となるまでのサイクル(ここでは凍結最低温 度-10℃の1サイクル)で生じた質量減少率について、次 サイクルの凍結最低温度(ここでは-15℃)の条件でその 質量減少率となる時のサイクル数を求め、そこから次の 1 サイクルの質量減少率が変化するものと仮定した。試











図-10 屋外暴露試験<sup>12,13</sup>による質量減少率と式(2)により予測した質量減少率の例

1.1. 6			1.1 6		_	1.1 6		_	1.1. 6		_			
地名	n	T <sub>eq</sub>	地名		Teq	地名		Teq	地名		Teq	地名		Teq
稚内	49	-3.7	苫小牧	127	-7.0	盛岡	125	-5.2	宇都宮	79	-3.0	四日市	31	-1.5
北見枝幸	59	-4.7	浦河	127	-5.6	宮古	106	-4.0	福井	15	-1.1	日光	118	-6.4
羽幌	82	-5.7	江差	99	-3.7	酒田	59	-1.9	高山	118	-5.0	豊岡	24	-1.4
雄武	79	-5.8	函館	128	-5.8	山形	101	-3.6	松本	118	-5.0	舞鶴	12	-1.1
留萌	82	-5.3	俱知安	83	-6.3	仙台	71	-2.3	諏訪	117	-5.5	津山	79	-2.3
旭川	78	-6.2	紋別	70	-5.1	石巻	88	-2.9	軽井沢	150	-7.7	福山	24	-1.4
網走	70	-5.3	広尾	103	-7.0	福島	74	-2.4	前橋	47	-1.7	姫路	22	-1.4
小樽	88	-4.7	大船渡	93	-3.1	白河	103	-3.8	熊谷	42	-1.5	奈良	27	-1.3
札幌	93	-5.4	新庄	114	-4.2	小名浜	38	-1.5	水戸	74	-2.6	山口	6	-1.1
岩見沢	75	-5.8	若松	103	-3.8	輪島	24	-1.2	飯田	97	-3.8	日田	39	-1.4
帯広	97	-8.1	深浦	92	-3.0	新潟	18	-1.2	甲府	69	-2.7	雲仙岳	45	-1.8
釧路	109	-7.3	青森	109	-4.0	伏木	27	-1.4	河口湖	122	-5.6	阿蘇山	104	-4.4
根室	80	-4.7	むつ	123	-5.1	富山	32	-1.4	秩父	99	-4.1	人吉	13	-1.3
寿都	90	-4.1	八戸	111	-4.2	長野	106	-4.2	館野	87	-3.3	n:年間凍	結融解回数	<b>太</b> (回/年)
室蘭	98	-4.0	秋田	90	-2.9	高田	54	-1.8	上野	62	-1.8	_T <sub>eq</sub> :等価	i凍結最低%	昰度 (℃)

表-3 各地域の平年値より求めた凍結融解回数と等価凍結最低温度

験体は,水平に置かれており,積雪の影響等で常に水に 接している条件と仮定した。

屋外暴露試験の結果は 10 年以上の結果が示されてい る既往の研究<sup>12),13)</sup>を用いた。予測結果を図-10,11 に示 す。それぞれの図の小さいキャラクタが実測結果,実線 が予測結果を示している。なお、文献<sup>13)</sup>では試験体寸法が 100×100×400mm であるため,収集データの試験体寸法 である 75×75×400mm との体積表面積比の比率(1.3) を乗じて補正している。実測結果は予測結果と異なって おり、対応がみられない。ここで、暴露開始後、冬季以 前に質量が減少していることから、質量減少率には乾燥 による水分逸散の影響を受けていると考えられる。そこ で、文献<sup>12)</sup>では 0.25 年の質量減少率、文献<sup>13)</sup>ではスケ ーリングがごくわずかと思われる試験体の1年目の質量 減少率(試験体寸法の補正後で0.9%)を乾燥による影響 と考え、その分を差し引いた値をスケーリングによる質 量減少率として補正した。図中の大きなキャラクタで補 正値を示している。実測値(補正値)と予測値は概ね近 い傾向がみられ、本予測式によって予測できる可能性が 示唆された。しかし、 釧路や室蘭の結果等は予測結果と 実測値(補正値)が異なる結果もみられた。これは、暴 露条件の違いや予測に用いる気象データの影響と考えら れ、今後さらに検討が必要と考えられる。

ここで、凍結融解サイクル毎に凍結最低温度を変える のは煩雑であり実用的ではない。そこで、20年間の質量 減少率から、各凍結融解サイクルが同じ凍結最低温度で あったとした場合の温度を「等価凍結最低温度」として 求めた。統計期間 1981~2010 年までの平年値を用いた年 間凍結融解回数と等価凍結最低温度を表-3 に示す。この 値を用いることにより、簡易に予測可能と考えられる。

#### 4.2 実構造物による検証

実構造物の予測を行う上で,質量減少率をスケーリン グ量等に換算する必要がある。また,部材の温度分布や含 水率分布についても検討が必要であり,試験体での予測



図-11 実構造物調査のスケーリング量<sup>14)</sup>と予測し たスケーリング量の関係

が実構造物には適用できないことが考えられる。一方で, 試験体での予測が実構造物の予測の目安となる可能性も あることから,ここでは試行として単純に今回対象とし た試験体より導かれた質量減少率の予測式が実構造物に も適用できるものと仮定し,検討を行うこととした。ス ケーリング量への換算は,コンクリートの密度を 2300kg/m<sup>3</sup>,試験体寸法を0.075×0.075×0.4m として,換 算式(5)を求めて行った。

$$S_c = F \times \left(\frac{w_t}{100}\right) \tag{5}$$

ここで, *S<sub>c</sub>*:スケーリング量(kg/m<sup>2</sup>) F:換算係数 (kg/m<sup>2</sup>,ここでは 39.4=2300 (密度, kg/m<sup>3</sup>)×0.00225 (体積,m<sup>3</sup>)÷0.13125 (表面積,m<sup>2</sup>))

旭川における塩分の影響を受けていない実構造物で 行った実測調査結果<sup>14)</sup>の水平面のスケーリング量の推 定値の平均と**表-3**の値を用いて予測した結果(実線)を 図-11 に示す。なお,建設当時の仕様書から水セメント 比を 0.6 と仮定している。水平面のため,試験体と同様 に常に水に接している条件と仮定している。ばらつきを 考慮し,不良率 4%,前述の変動係数 0.242 として求めた 予測結果(点線)も併せて示す。供用期間 50 年以上の場 合を除いて実測値は不良率 4%の上下限の中に入り,予 測値と近くなる傾向を示した。供用期間 50 年以上のもの は内部膨張劣化が進行しており,これが原因で大きく外 れたと考えられる。

実構造物への適用性の可能性を示したが、データが少 なく検討が十分とはいえない。特に今回は、水に常に接 している条件としているが、実際には乾燥を受けるため、 含水状態の考慮が必要である。さらに、部材内の温度分 布の影響等、構造物でのスケーリング進行に及ぼす影響 要因についても検討が必要である。実用化にあたっては、 実構造物のデータを蓄積して、検討が必要と考えられる。 また、混和材料が使用されている場合や、塩分の影響に ついても併せて検討が必要である。

## 5. まとめ

- (1)JIS A 1148 A 法における質量減少率は, ゴンペルツ曲 線によって精度よく表現できる。
- (2)内部膨張劣化が進行したコンクリートのスケーリン グ進行は、ばらつきが大きく予測が困難である。
- (3)コンクリートの水セメント比と環境の凍結最低温度 から、塩分の影響がない場合の凍結融解による質量減 少率を予測する手法を提案した。

## 謝辞

本研究の一部は,科研費基盤研究(C)(課題番号: 26420541)の助成を得ました。また,実験の一部は北方 建築総合研究所の谷口円氏のご協力を得ました。凍結融 解試験のデータは,本研究室を卒業・修了された諸氏の データを使わせていただきました。ここに記し,心から の謝意を表します。

# 参考文献

- 浜幸雄,松村光太郎,田畑雅幸,冨板崇,鎌田英治: 気象因子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
- 石井清,江川顕一郎,堤知明,野口博章:凍結融解 作用を受けるコンクリートの劣化予測に関する研 究,土木学会論文集, No.564/V-35, pp.221-232, 1997.5
- 遠藤裕丈,田口史雄,名和豊春:スケーリングの進行性に及ぼす凍結融解を受けるまでの期間の暴露

環境の影響, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.3, pp.348-365, 2010.9

- 4) 遠藤裕丈,田口史雄,林田宏,名和豊春:簡易で実用的なスケーリング進行予測式の提案,コンクリート工学年次論文集,Vol.33,No.1, pp.923-928,2011.7
- 5) 日本コンクリート工学協会:コンクリートの凍結融 解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書, 2008.8
- 長谷川拓哉,千歩修:凍結融解作用によるコンクリートの質量変化に関する文献的検討,コンクリート 工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.933-937, 2008.7
- 7) 漆崎要,桂修,鎌田英治:コンクリートの凍害に及 ぼす凍結最低温度の影響に関する研究,コンクリー ト工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.919-924, 1998.7
- 8) 田畑雅幸, 洪悦郎, 鎌田英治, 大上亮一, 狩野拓史: プレストレスト用高強度コンクリートの耐凍害性 に関する実験, セメント技術年報, No.36, pp.432-435, 1982
- 9) 権代由範,月永洋一,庄谷征実,阿波稔,菅原隆: 凍結融解試験法の違いによる塩化物作用下でのコ ンクリートの耐凍害性評価,日本コンクリート工学 協会,コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に 関するシンポジウム,pp.89-96,2006.12
- 10) 長谷川拓哉,谷口円,桂修,千歩修:光沢度計によるスケーリング測定手法の検討,日本建築学会北海 道支部研究報告集,NO.82, pp.1-4, 2009.7
- 11) 長谷川拓哉,千歩修,福山智子:コンクリートの凍 害劣化を対象とした劣化予測手法および気象デー タの違いによる耐用年数の比較,コンクリート工学 年次論文集, Vol.37, No.1, pp.859-864, 2015.7
- 12) 田畑雅幸,平野彰彦,濱幸雄:札幌市に長期屋外暴 露したコンクリートの耐凍害性について,日本建築 学会北海道支部研究報告集,No.79, pp.9-12, 2006.7
- 13) 日本コンクリート工学協会:自然環境とコンクリー
   ト性能評価に関するシンポジウム委員会報告書,
   2005.6
- 14) 柿原巧弥,千歩修,長谷川拓哉:凍害劣化を受けた
   R C 造構造物の目視による各種性能に関する劣化
   評価,コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.851-856, 2010.7