

凍結融解と塩化物の複合作用を受ける コンクリートの性能評価法の提案

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○遠藤 裕丈
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 島多 昭典

コンクリート構造物の維持管理を計画的に行うには、コンクリートの性能が時間軸に沿ってどのように低下するかを定量的に整理する必要がある。コンクリートが凍結融解と塩化物の複合作用を受けると凍害と同時に塩化物イオン浸透が促進され、鉄筋の早期腐食が懸念される。合理的な性能評価法の提案に向け、スケーリングと相対動弾性係数の予測から塩化物イオン拡散係数の経時変化を把握し、凍害を考慮した塩化物イオンの浸透予測を行う方法を開発した。

キーワード：コンクリート、凍結融解、塩化物イオン、予測、差分

1. はじめに

限られた財源の中でコンクリート構造物の維持管理を合理的に実践するには、コンクリートの劣化予測を行い、適切な修繕計画を立てることが大切である。特に寒冷地の道路橋は凍結融解と凍結防止剤など塩化物の複合作用による劣化を受けやすく、このような厳しい環境下でのコンクリートの性能を適性に評価する技術が必要となる。

著者らはこれまで、計画的な維持管理に資する、凍害を考慮した塩化物イオンの浸透予測方法の提案に向け、一般的なコンクリートに凍結融解と塩化物の複合作用を与えて、塩化物イオンの浸透に及ぼす凍害の影響を調べてきた^{1), 2), 3), 4)}。本研究では、取得したこれらのデータを包括的にとりまとめ、凍害を考慮した塩化物イオンの浸透予測の体系化を図った。

2. 体系化の考え方

(1) 凍害の進行予測

コンクリートが凍害を受けると、スケーリングとひび割れが複合的に発生する(写真-1)。凍害の進行を簡易に予測するモデルとして、既報は次式を示している^{5), 6)}。

$$SC = ae^{\frac{b \log \frac{cyc}{A}}{A}} \quad (1)$$

$$RE_d = 100e^{-c \cdot cyc^d} \quad (\text{欠損に至るまで}) \quad (2)$$

ここに、 SC はスケーリング量(g/cm^2)、 RE_d は相対動弾性係数(%), cyc は凍結融解サイクル、 A はサイクルを無

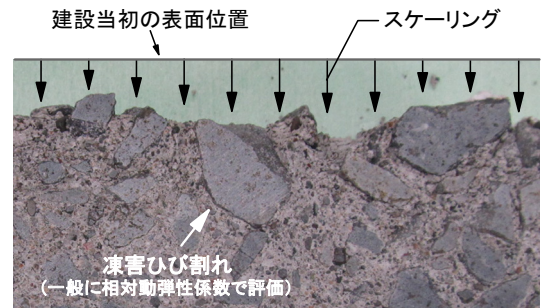


写真-1 凍害を受けたコンクリートの断面の一例

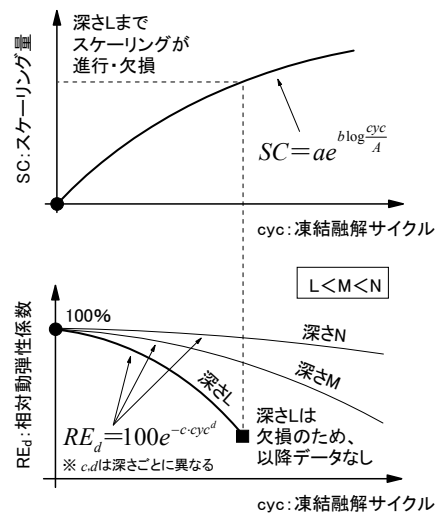


図-1 凍害の進行予測の概念

次元化させるための係数(一般に最長サイクルの1/2)、 a, b, c, d は係数である。図-1に概念を示す。

なお、凍結防止剤の散布量はスパイクタイヤの使用が規制された1991年以降、大きく増加している⁷⁾ことから、1991年以前に建設された道路橋においては、塩化物の供給環境の変遷に留意して凍害の進行予測を行う必要がある。著者らは既報の実験から、環境の変遷を考慮した凍害の進行予測の考え方として次式を示した⁴⁾。

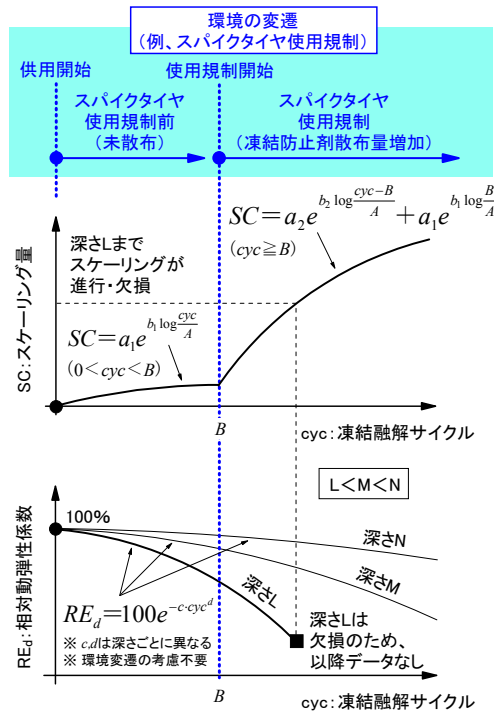


図-2 環境の変遷を考慮した凍害の進行予測の概念

$$SC = a_1 e^{b_1 \log \frac{cyc}{A}} \quad (0 < cyc < B) \quad (3)$$

$$SC = a_2 e^{b_2 \log \frac{cyc-B}{A}} + a_1 e^{b_1 \log \frac{B}{A}} \quad (cyc \geq B) \quad (4)$$

$$RE_d = 100 e^{-c \cdot cyc^d} \quad (\text{欠損に至るまで}) \quad (5)$$

ここに、 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 は係数、 B はスパイクタイヤ使用規制開始までに受けた凍結融解サイクル（試験水の種類を通常の水から、塩化物を含んでいる水へ切り替えた凍結融解サイクル数）である。図-2に概念を示す。

(2) 塩化物イオンの浸透予測

現在の設計では、コンクリート表面の塩化物イオン量と塩化物イオンの見かけの拡散係数（以下、拡散係数と記す）を常に一定として解いた Fick の拡散方程式の解である式(6)が使用されている^{8), 9)}。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (6)$$

ここに、 $C(x, t)$ は時間 t (年)における表面から深さ x (cm) の塩化物イオン量 (kg/m^3)、 C_0 はコンクリート表面の塩化物イオン量 (kg/m^3)、 erf は誤差関数、 D は拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)である。

しかし、凍害を受ける場合（写真-1）、凍害の進行に応じて拡散係数を変化させる必要がある。凍害の程度は深さごとに異なり、深さと時間を変数として拡散係数を変化させる場合、Fick の拡散方程式そのものを解く必要があり、計算が複雑となる。著者ら既報で、式(7)に示

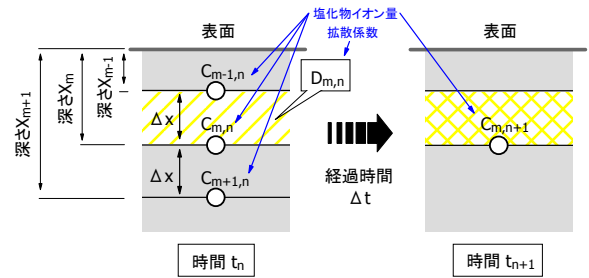


図-3 Fickの拡散方程式の差分式(式(7))に用いる変数

す Fick の拡散方程式の差分式¹⁰⁾を活用することにより、凍害の進行を考慮した塩化物イオンの浸透予測を比較的簡易に行えることを示した¹⁾。

$$\begin{cases} C_{m,n+1} = D_{m,n} r (C_{m+1,n} + C_{m-1,n}) + C_{m,n} (1 - 2D_{m,n} r) \\ r = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (\text{ただし } r \leq \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 $C_{m,n}$ は時間 t_n (年)における深さ x_m (cm) の塩化物イオン量 (kg/m^3)、 r は係数、 Δt は時間 t のきざみ幅 ($t_n = n\Delta t$)、 Δx は深さ x のきざみ幅 ($x_m = m\Delta x$)、 $D_{m,n}$ は時間 t_n における深さ $x_{m-1} \sim x_m$ 間の拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)である。図-3にこれらの変数を示す。

(3) 凍害を考慮した塩化物イオンの浸透予測の概念

図-4に概念を示す。塩化物イオンの浸透予測に先立ち、凍害の進行によって拡散係数は経時的に何倍増加するのか（以下、増加比と記す）、定量的に把握する必要がある。凍害の程度は深さごとに異なるため、深さごとに把握しなければならない。そこで、深さ5～15mm、15～25mm、25～35mm、…の各層ごとに、拡散係数の増加比の経時変化を把握する。

深さ5～15mmは、この層の相対動弾性係数（図-4には中間をとり、深さ10mmの相対動弾性係数と記載）の低下に加え、その上層で発生するスケーリングの影響を考慮する必要がある。この2種類の凍害の程度をもとに、拡散係数の増加比を決定する。

深さ15～25mmは、この層の相対動弾性係数（図-4には中間をとり、深さ20mmの相対動弾性係数と記載）の低下に加え、その上層で発生する凍害の影響を考慮する必要がある。ただし、上層の凍害の影響は、先に決定した深さ5～15mmの拡散係数の増加比で整理済みのため、これと深さ20mmの相対動弾性係数をもとに、深さ15～25mmの拡散係数の増加比を決定する。

深さ25～35mm以降の拡散係数の増加比の決定方法の考え方は、深さ15～25mmと同様である。

凍害による各層（深さ5～15mm、15～25mm、25～35mm、…）の拡散係数の増加比の経時変化が定まり、外部から表層（深さ0～10mm）へ侵入する塩化物イオン量を設定することで、凍害を考慮した塩化物イオンの浸透予測が式(7)より行える。

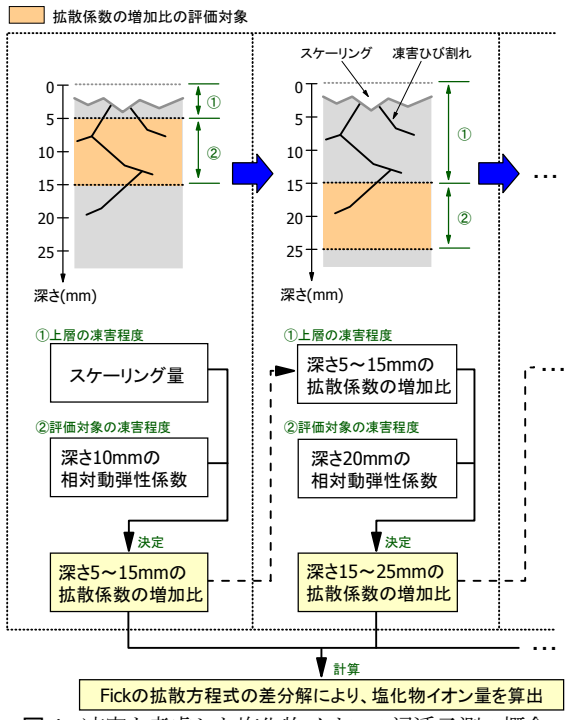


図-4 凍害を考慮した塩化物イオンの浸透予測の概念

(4) 本研究のねらい

スケージング量と各深さの相対動弾性係数の経時変化は、図-1、2で示したように定式化できる。また、著者らは既報¹⁾で、拡散係数は凍害の進行によって直線的に増加、言い換えると、拡散係数の経時変化は一次関数の式で大凡表せる実験結果を示した。

これらの式を連立させると、任意のサイクルにおけるスケージング量、相対動弾性係数、拡散係数の増加比が把握でき、3者の関係を明確にできる。本研究ではこれに即してデータを整理し、図-4の概念の具体化を図る。

3. 実験概要

(1) コンクリート配合および供試体

表-1にコンクリート配合を示す。細骨材は苫小牧錦岡産の海砂（除塩処理済）、粗骨材は小樽見晴産の碎石を使用した。表に記載している実験1～5の説明は後述する。供試体は100×100×400mmの角柱とし、材齢7日まで湿布養生を施した後、材齢28日まで恒温恒湿室に静置した。

(2) 実験方法

道路橋部材の露出状況を模擬し、供試体の一面からのみ凍結融解作用を最長600サイクルまで与え、概ね25サイクル毎にスケージング量、概ね100サイクル毎に深さ10、20、30、40、50mmの相対動弾性係数と深さ0～10、10～20、20～30、30～40、40～50mm（以降、中間をとり、5、15、25、35、45mmと記載）の塩化物イオン量を調べた。凍結融解を与える試験面は打設面とし、残りの5面

表-1 コンクリート配合

実験					配合 No.	W/C (%)	セメント	単位量(kg/m ³)			
1	2	3	4	5				W	C	S	G
○	○				1	45	普通	144	320	815	1082
○	○				2	55		146	265	871	1065
○	○				3	65		148	228	922	1041
○	○				4	45	高炉	145	322	808	1073
○	○				5	55		147	267	865	1059
○	○				6	65		149	229	917	1035
		○			7	55	普通	168	305	903	1061
		○			8		高炉	167	304	900	1057
			○		9		普通	146	265	871	1067
				○	10	高炉	147	267	865	1061	

配合No.1,2,3,4,5,6,9,10の目標空気量は4.5±1.5%、配合No.7,8,10 non-AE

【略称】 W/C：水セメント比
 セメント：使用セメント
 普通：普通ポルトランドセメント
 高炉：高炉セメントB種
 W：水
 C：セメント
 S：細骨材
 G：粗骨材（最大径25mm）

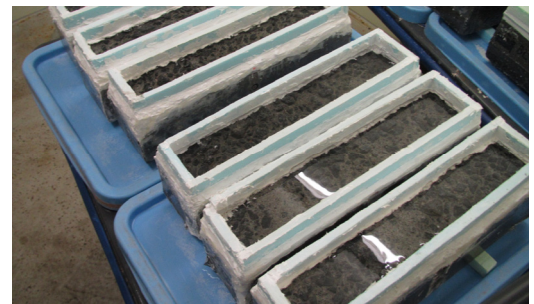


写真-2 凍結融解試験状況の一例

は劣化の発生を防ぐため、エポキシ樹脂を塗布した。

本研究で行った凍結融解試験は、下記の5種類である。

■実験1：JIS A 1148に準じた一般の急速凍結融解試験

コンクリートの表面を3mm厚の水で覆うことができるゴム製の容器に供試体を挿入し、濃度3%の塩化ナトリウム水溶液（以下、塩水と記す）を容器に注いだ後、容器を試験槽に格納し、JIS A 1148に準じて-18℃～5℃の範囲で3～4時間1サイクルの急速凍結融解作用を与えた。

■実験2：ASTM C 672に準じた凍結融解試験

実験1よりも実環境に近く、凍結融解の繰り返しが比較的緩やかなASTM C 672を準用して、試験面に塩水を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与えた（写真-2）。

■実験3：non-AEコンクリート供試体の凍結融解試験

凍害を促す理由から、エントレインドエアーを導入しないnon-AEコンクリート供試体による凍結融解試験を行った。試験方法はASTM C 672を準用し、試験水は塩水を用いた。なお、前述の実験1、2、後述する実験4、5の供試体についてはAEコンクリートである（表-1）。

■実験4：夏季に受ける乾燥を考慮した凍結融解試験

寒冷地の道路橋は、冬季は凍結融解と塩化物の複合作用を受ける一方、夏季は高温の影響により乾燥を受ける。これを実験的に再現させるねらいで、ASTM C 672を準用した塩水による凍結融解作用を49サイクル与え、その後、北海道の夏季の気温¹¹⁾を参考に40℃に設定した乾燥機に28日静置し、再び凍結融解作用を与える形で、凍結融解と乾燥を交互に繰り返した。

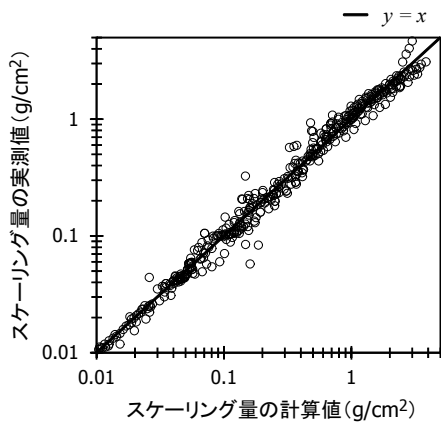


図-5 スケーリング量の計算値と実測値

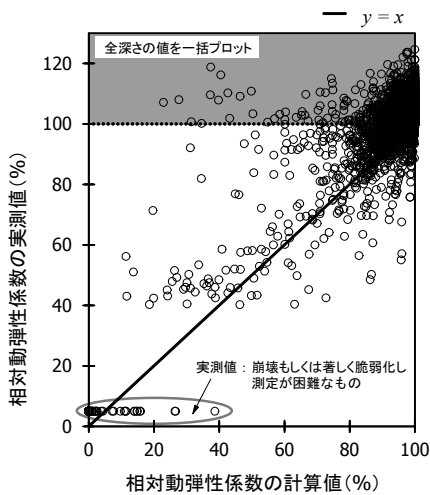


図-6 相対動弾性係数の計算値と実測値

■実験5：環境の変遷を考慮した凍結融解試験

凍結防止剤の散布量はスパイクタイヤの使用規制以降に増加している。そこで、スパイクタイヤ規制前に供用を開始した道路橋を想定し、はじめは淡水を試験水とし、途中から塩水に切り替える凍結融解試験を行った。試験方法はASTM C 672を準用した。試験水の切り替え作業は100もしくは200サイクル経過時に行い、切り替え後は塩水による凍結融解作用を300サイクル与えた。

4. 実験結果・考察

(1) 凍害の進行予測式の妥当性の確認

体系化に先立ち、式(1)～(5)の凍害の進行予測式の信頼性を確認するため、予測式による計算値と実測値を比較した。図-5にスケーリング量、図-6に相対動弾性係数を示す。図には実験1～5で取得したすべてのデータを一括プロットした(後述の図-7、8、9、10も同様)。スケーリング量は計算値と実測値がほぼ一致し、予測式の信頼性は高いことがわかる。相対動弾性係数は試験途中で100%を上回った実測値を除外すると全体的に1:1の直線近傍にプロットされており、予測式は概ね妥当と言える。

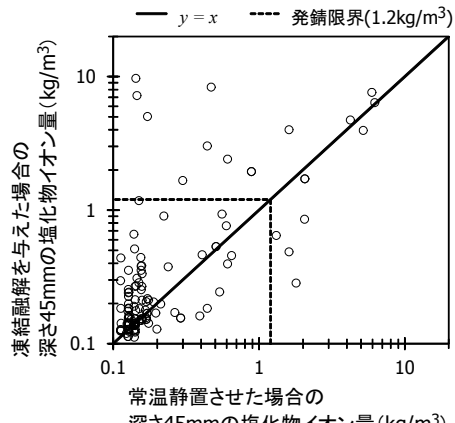


図-7 塩化物イオンの浸透に及ぼす凍害の影響(深さ45mm)

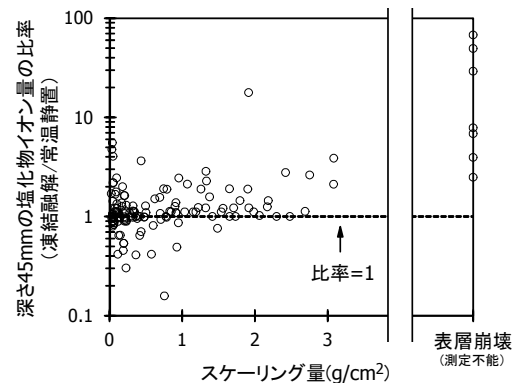


図-8 スケーリング量と深さ45mmの塩化物イオン量の比率(凍結融解/常温静置)の関係

(2) 塩化物イオンの浸透に及ぼす凍結融解の影響

実験1～5における「凍結融解」の行程を「常温静置」に置き換えた供試体を別途用意し、塩化物イオンの浸透に及ぼす凍結融解の影響を調べた。図-7に常温静置させた場合と凍結融解を与えた場合との深さ45mmの塩化物イオン量の比較を示す。1:1の直線より上の領域にプロットされたデータが多く、凍結融解の影響が認められた。図-8にスケーリング量と深さ45mmの塩化物イオン量の比率(凍結融解/常温静置)の関係を示す。比率1以上は凍結融解を与えた方が多いことを意味する。スケーリング量が多いほど比率1以上を呈しやすい傾向が示された。これはスケーリングによって供試体の厚さが減少し、塩化物イオンの移動距離が縮まったことが影響している。なお、スケーリングは小さいものの比率が1以上のデータも確認された。凍結融解によって内部に発生したひび割れにより、浸透が促進されたためと考えられる。

(3) 塩化物イオン量の予測に関する考察

拡散係数を常時一定とした式(6)による予測結果(計算値)と凍結融解を与えた場合の実測値との比較を図-9に示す。拡散係数は前述の「凍結融解」を「常温静置」に置き換えた供試体から求めた。予測が 1.2kg/m^3 未満でも実測値が 1.2kg/m^3 を大きく上回るプロットも確認され、予測は実測値を過小評価している。

次に、凍害の進行に応じて拡散係数を経時的に変化さ

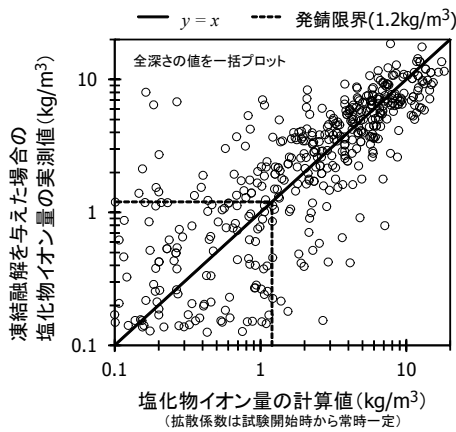


図-9 塩化物イオン量の計算値(拡散係数は常時一定)と実測値

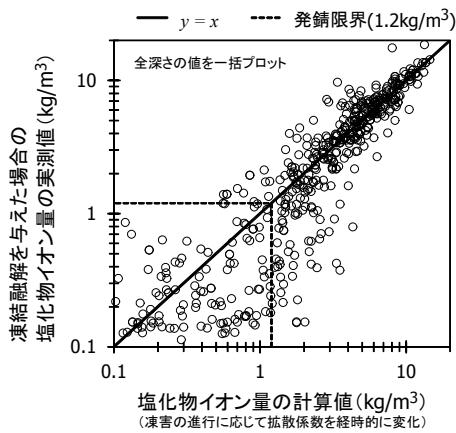


図-10 塩化物イオン量の計算値(凍害の進行に応じて拡散係数を経時的に変化)と実測値

せた際の式(7)による予測結果と凍結融解を与えた場合の実測値との比較を図-10に示す。なお、拡散係数は直線的に増加すると仮定している。図-9と比べるとばらつきは改善され、予測が 1.2kg/m^3 未満の範囲では実測値が 1.2kg/m^3 を上回るプロットも減少している。全体的に、予測は実測値を安全に評価していることがわかる。

(4) 凍害を考慮した塩化物イオンの浸透予測の体系化

図-5、6、10の考察で得た予測式をもとに、図-4の概念の具体化を図る。

はじめに、図-11に示す要領で、実験1~5で得た凍害の進行予測と深さ5~15mmの拡散係数の増加比の経時変化をもとに、深さ5~15mmの拡散係数の増加比が10倍に達するときのスケールリング量と深さ10mmの相対動弾性係数を調べた。図-12に結果を示す。なお、凍害の進行が緩慢で、拡散係数の増加が確認されなかった供試体のデータはプロットしていない。プロットがすべて収まるよう、原点通過の下限線 ($y=778x$) を引く。例えば、深さ5~15mmの拡散係数の増加比を10倍以下に抑えることが要求される場合、この下限線が維持管理限界となる。

次に、同様の方法で、深さ5~15mmの拡散係数の増加比が2、50、100、300倍に達するときの下限線をそれぞれ求め、増加比と下限線の傾きとの関係を調べた。図-13に結果を示す。図中に併記した回帰式より、拡散係

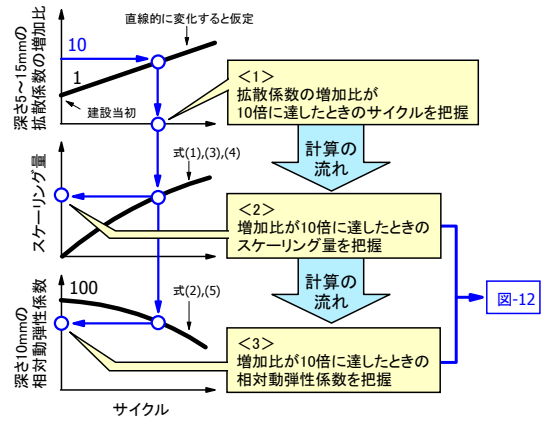


図-11 深さ5~15mmの拡散係数の増加比が10倍に達するスケールリング量と深さ10mmの相対動弾性係数の算出方法

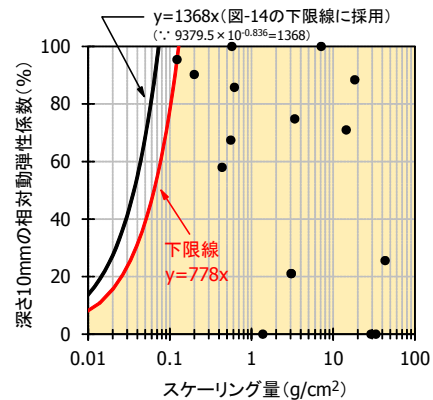


図-12 深さ5~15mmの拡散係数の増加比が10倍に達するときのスケールリング量と深さ10mmの相対動弾性係数の分布

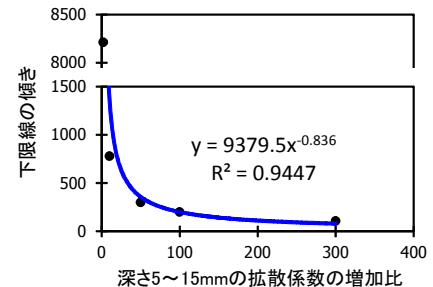


図-13 深さ5~15mmの拡散係数の増加比と下限線(図-12)の傾き

数の増加比が 10^1 、 10^2 、 10^3 、 10^4 、…倍に達するときの下限線の傾きもそれぞれ求め、整理すると図-14の上のグラフが得られる。例えば、深さ10mmの相対動弾性係数がさほど低下していなくても、平均スケールリング深さが2~3mmに達すると、深さ5~15mmの拡散係数は建設当初の値から約100倍増加する場合があると言える。

さらに整理すると、図-14の中央と下に示すように、凍害の程度から深さ15~25mm、25~35mmの拡散係数の増加比を安全側に決定するグラフも得られる。

本研究の範囲で、凍害を考慮した安全な塩化物イオンの浸透予測の体系を整理すると図-15のようになる。なお、予測に先立ち、外部から表層(深さ0~10mm)へ侵入する塩化物イオン量(図には深さ5mmの塩化物イオン量と記載)を決定する必要がある。この値は既往の調査結果に鑑み¹²⁾、現場では常時一定としてよいと思われる。

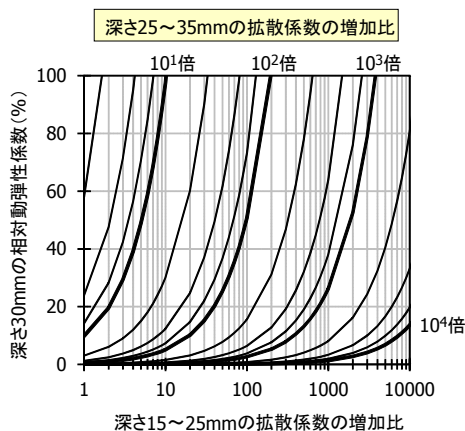
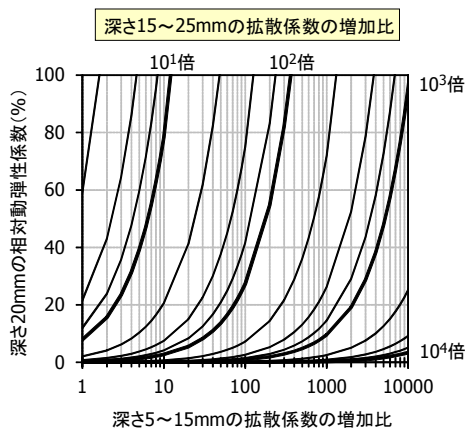
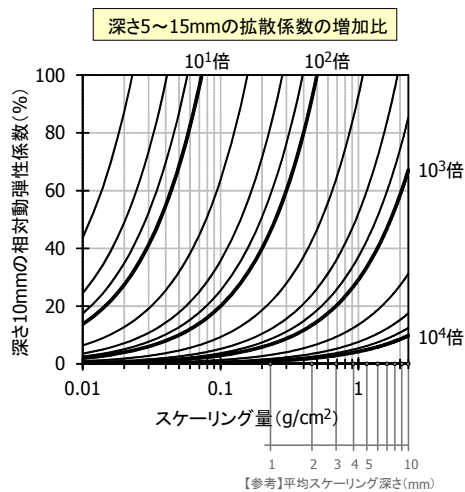


図-14 凍害の進行による深さ5～15、15～25、25～35mmの拡散係数の増加比の変化

5. まとめ

これまで行った種々の凍結融解試験で得たデータを包括的に整理し、凍害を考慮した塩化物イオンの浸透予測の体系化を図った。現在、任意の経過年に調査したデータを入力し、簡易な操作を行うだけで図-15に示した凍害の進行予測、塩化物イオンの浸透予測が自動的に行われるExcelプログラムを作成中である。今後、この成果を寒冷地における既存部材の修繕計画の立案、新設部材のLCC評価に必要な劣化曲線の策定に役立てていきたい。

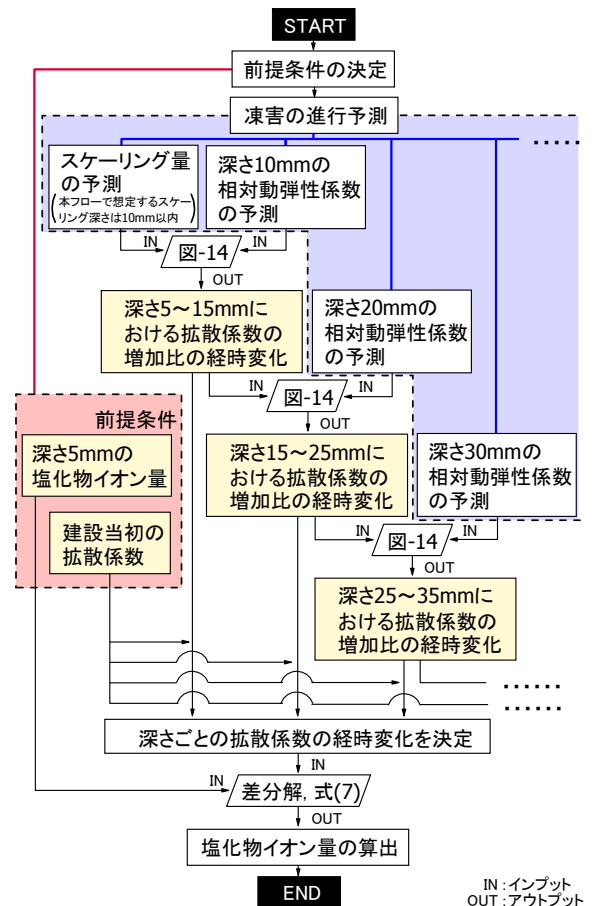


図-15 凍害を考慮した塩化物イオンの浸透予測の体系

参考文献

- 1) 遠藤裕丈, 田口史雄, 田畑浩太郎: 寒冷環境下での塩化物イオン浸透予測技術に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.913-918, 2013.7
- 2) 遠藤裕丈, 島多昭典: 凍害を考慮した塩害に対するコンクリートの耐久性設計・評価法の体系化に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.829-834, 2015.7
- 3) 遠藤裕丈, 島多昭典, 田畑浩太郎: 塩分環境下での凍害の進行に及ぼす乾燥・乾湿の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1024-1029, 2014.7
- 4) 遠藤裕丈, 島多昭典, 川村浩二: 環境条件の変遷を考慮した凍害予測に関する基礎的研究, 第14回コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, pp.141-148, 2014.10
- 5) 遠藤裕丈: 凍結融解と塩化物の複合作用によるスケール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, pp.99-101, 2011.3
- 6) 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基礎的研究, 法政大学博士学位論文, p.32, 2007.9
- 7) 社団法人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, p.21, 2008.8
- 8) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書「設計編」, p.149, 2013.3
- 9) 土木学会: 2013年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」, p.171, 2013.10
- 10) 守分敦郎, 長滝重義, 大即信明, 三浦成夫: 既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡散過程より評価される表面処理工法の適用性, 土木学会論文集, No.520, V-28, pp.111-122, 1995.8
- 11) 気象庁ホームページ
- 12) 遠藤裕丈, 島多昭典: 寒冷環境下における約10年間のシラン系表面含浸材の効果に関する追跡調査, 第58回(平成26年度)北海道開発技術研究発表会発表概要集, 2015.2