

15.6 凍害の各種劣化形態が複合したコンクリート構造物の性能評価法の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

技術開発調整監付（寒地技術推進室）

研究担当者：田口史雄、林田宏、遠藤裕丈、田畑浩太郎、
横山博之、宮本修司、中村直久、村中智幸

【要旨】

2 種類以上の凍害形態（例えば、スケーリングとひび割れ）が複合的に発生した場合のコンクリートの性能評価法の提案に向け、平成 23 年度は、(1)スケーリング・ひび割れが複合化した凍害の程度の現状の整理、(2)スケーリング・ひび割れが複合化した凍害の進行性の評価、(3)塩化物イオンの浸透性への影響の評価、の 3 つを目的に、気象条件が厳しい北海道山間部（陸別、日高）の道路橋を対象に凍害の程度の現状を把握するとともに、水セメント比を変化させた場合の凍害の進行性、および塩化物イオンの浸透性に及ぼす凍害の影響を把握するための室内実験を行った。構造物調査では凍害の形態は凍結防止剤などの環境条件によって異なることを確認した。室内実験ではスケーリングに及ぼす水セメント比の影響が大きい結果を得たが、相対動弾性係数については、今回の実験の範囲では水セメント比の影響が明確に表れなかった。また、塩化物イオンの浸透性の評価方法として差分法が有効である知見を得た。

キーワード：凍結融解、スケーリング、ひび割れ、塩化物イオン、性能評価

1. はじめに

社会資本ストックの維持管理・更新費の増加に伴い、新たな社会基盤の整備に対する投資余力は減少傾向にある¹⁾。このため、厳しい予算的制約の下でコンクリート構造物の長寿命化を効率的に図り、ライフサイクルコストの縮減に努めることが社会的に求められている。そのため、コンクリートの劣化予測技術の精度向上が不可欠である。

現在の凍害の予測は、単一の凍害形態（例えば、スケーリングのみ）の進行が前提となっている。しかし、現実的には 2 種類以上の凍害形態（例えば、スケーリングとひび割れ）が同時に起こるケースが殆どであり、コンクリートの性能評価の適正化を図るには、実態に即した 2 種類以上の凍害形態が同時に発生・進行する条件下での評価が行える方法を開発する必要がある。例えば、塩害に対する耐久性能の照査では、一般に拡散係数を一定とした Fick の拡散方程式の解によって塩化物イオンの浸透量の予測が行われる^{2), 3)}が、寒冷環境下では塩化物イオンの供給と凍結融解によるスケーリングやひび割れの発生・進行が同時に起こることから、拡散係数に及ぼす凍害の影響が適切に考慮された評価方法が求められる。

本研究では、代表的な凍害形態であるスケーリングとひび割れが複合的に発生しているコンクリートの耐久性

能を適切に評価できる方法の提案に向け、実際の寒冷環境下におけるデータを取得するための構造物調査と、性能評価の考え方やフローを整理・構築するための室内実験を行っている。平成 23 年度は気象条件が厳しい北海道山間部（陸別、日高）の道路橋を対象に凍害の程度の現状を把握するとともに、水セメント比を変化させた場合の凍害の進行性、および塩化物イオンの浸透性に及ぼす凍害の影響を把握するための室内実験を行った。

2. 構造物調査

はじめに、スケーリングとひび割れが複合化した凍害の程度の現状を把握する目的で行った構造物調査の結果について述べる。

2.1 調査概要

(1) 調査橋梁

図-1 に凍害危険度マップ⁴⁾、表-1 に凍害危険度を示す。このマップは、外気温上の最低温度や凍結融解日数などの気象データを基に凍害の発生の危険性を 1～5 の数値で表現したものである。数値が大きいほど、凍害が発生する危険性が大きいことを示している。

ここでは凍害の程度の現状の把握が目的であることに鑑み、凍害危険度が大きいエリアの中から、架設後の経過年数など劣化との関連が大きいと考えられる因子がで

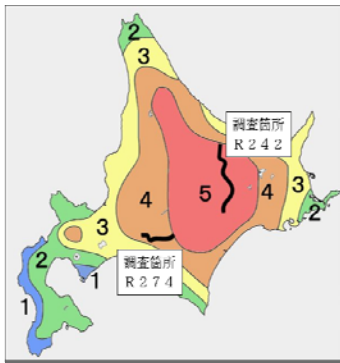


図-1 凍害危険度マップおよび調査路線・箇所

表-1 凍害危険度

凍害危険度	凍害の予想程度
1	ごく軽微
2	軽微
3	やや大きい
4	大きい
5	極めて大きい

きるだけ偏らないように調査橋梁を選定した。今回は、凍害危険度5（凍害の予想程度が極めて大きい）のエリアに位置する一般国道242号の遠軽～陸別～足寄間の34橋と、凍害危険度4（凍害の予想程度が大きい）のエリアに位置する一般国道274号の夕張～日高～日勝峠間の25橋を選定した。調査路線ならびに箇所は図-1、調査橋梁は表-2、3の通りである。橋梁は、歩道の有無や幅員構成に多少の違いはあるが、全て2車線道路である。また、冬期交通の安全確保を目的に散布される凍結防止剤の散布量を別途確認したところ、平成15年度における一般国道274号の散布量は一般国道242号のおよそ7倍であった。

(2) 調査内容

起点側および終点側の橋台前面部とウイング部を対象に、目視による表面の凍害状況の把握と、超音波測定器による内部の凍害状況の把握を行った。

表面の凍害（スケーリング）の程度は図-2に示すASTM C 672の基準⁹⁾に準じ、粗骨材の露出状態を目視で確認し、その結果をもとに0～5点の評価点を付けることで把握した。内部の凍害（ひび割れ）の程度は相対動弾性係数で評価することとし、ここでは表面走査法⁹⁾により把握することとした。

表面走査法は、コンクリートの表面近傍に存在する劣化層の厚さを超音波によって非破壊で推定する方法である。超音波は、損傷の程度が小さい緻密な組織を伝わりながら、最短時間で受振子に到達する性質がある。図-3に示すように、劣化層が表面近傍に存在する場合、表面に超音波の発振子と受振子を配置し、受振子を一定の間

表-2 調査橋梁(1) 一般国道 242 号
(凍害危険度 5、凍結防止剤：少)

No.	橋長 (m)	架設年度	所在地	No.	橋長 (m)	架設年度	所在地
1	152	1976	遠軽町	18	25	1957	置戸町
2	15	1967		19	19	1972	
3	41	1961		20	13	1973	
4	60	1959		21	35	1978	陸別町
5	60	1960		22	14	1979	
6	70	1977		23	35	1974	
7	21	1972		24	31	1973	
8	19	1972		25	42	1959	
9	20	1971		26	25	1972	
10	20	1971		27	60	1962	
11	13	1967	北見市	28	40	1962	足寄町
12	35	1967		29	14	1964	
13	51	1967		30	64	1957	
14	14	1972	置戸町	31	131	1969	
15	41	1965		32	13	1989	
16	90	1974		33	10	1999	
17	23	1956		34	206	2002	

表-3 調査橋梁(2) 一般国道 274 号
(凍害危険度 4、凍結防止剤：多)

No.	橋長 (m)	架設年度	所在地	No.	橋長 (m)	架設年度	所在地
1	155	1995	夕張市	14	135	1984	むかわ町
2	103	1958		15	160	1968	
3	48	1987		16	141	1988	
4	31	1988		17	114	1988	占冠村
5	28	1988		18	167	1990	
6	21	1988		19	40	1970	
7	59	1971		20	154	1974	
8	27	1966	むかわ町	21	84	1960	日高町
9	85	1973		22	59	1979	
10	188	1985		23	62	1973	
11	121	1985		24	64	1979	
12	130	1982		25	58	1982	
13	206	1983		—	—	—	—

隔で発振子から遠ざけていくと、発・受振子間距離がある値以上になると超音波の伝播経路は最短距離である健全層の縁端面に一本化され、発・受振子間距離に対する伝播時間の増加の割合は小さくなる。このため、発・受振子間距離と超音波伝播時間の関係は、図-3の下に示すような折れ線グラフとなる。

ここで、原点から変曲点までの距離を X_0 、劣化層と健全層縁端面における超音波伝播速度をそれぞれ V_d 、 V_s （グラフの傾きの逆数）とすると、劣化層の厚さ t は式(1)で表される⁹⁾。







点	劣化事例写真	点	劣化事例写真
0		1	
	なし		粗骨材の露出し、深さ3mm以下の剥離
2		3	
	評価1と評価3の中間程度の剥離		粗骨材がいくつか露出する程度の剥離
4		5	
	評価3と評価5の中間程度の剥離		粗骨材が全面露出する程の激しい剥離

図-2 ASTM C 672 準拠の目視評価の基準 (写真は代表例)

$$t = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}} \quad (1)$$

コンクリートが全体的に健全もしくは劣化している場合は、基本的に品質が一様に均等なため、発・受振子間距離と超音波伝播時間の関係は折れ線ではなく、直線グラフとなる。その場合の t は0か部材の全厚のいずれかとなる。

既報⁷⁾では、凍害診断への表面走査法の応用を試みた研究の結果が報告されている。図-4の上に示すように、傾き1と測定可能な最浅位置である深さ10mmの相対動弾性係数、および、傾き2と深さ t 位置の相対動弾性係数の関係を回帰分析し、以下の実験式を示している。

$$RE_d = 21.7x^{-0.81} \quad (2)$$

ここに、 RE_d は深さ10mmもしくは深さ t の相対動弾性係数(%)である。 x は表面走査法のグラフの傾きで、 RE_d の対象が深さ10mmの場合は傾き1、深さ t の場合は傾き2(図-4)の値となる。

一般に凍害による損傷は水分の影響を最も強く受けやすい表面が最も大きく、相対動弾性係数は表面から内部にかけて大きくなることから、相対動弾性係数の真値は

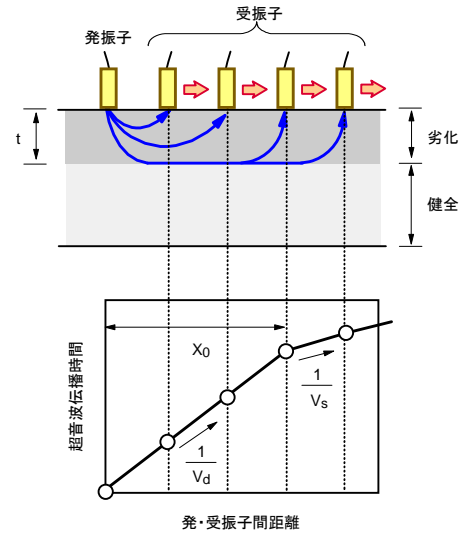
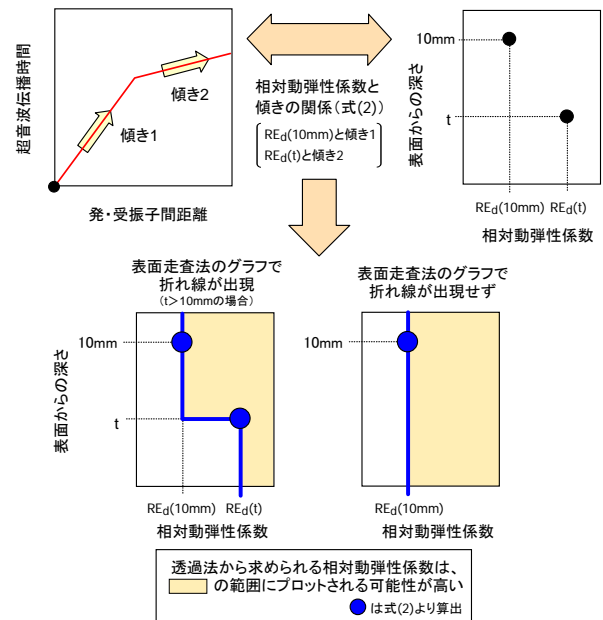

図-3 表面走査法の概念⁶⁾

図-4 表面走査法による凍害診断の考え方⁷⁾

図-4の下に示す橙色で塗りつぶした範囲にプロットされることになる。この考え方が概ね妥当であることは、凍害を受けた道路橋での調査で経験的に確認されている⁷⁾。

ここでは、この方法に基づいて予想される相対動弾性係数の下限(図-4の下に示す青線、以下、予想下限値と記す)を調べることで内部の凍害状況を把握することとした。

2.2 調査結果・考察

(1) 表面の凍害状況 (スケーリング)

目視による表面の凍害状況の調査結果を図-5に示す。凍害危険度が5で凍結防止剤の散布量が少ない一般国道242号は34橋中、評価0点の橋梁は3橋、評価1点の橋梁は18橋あり、評価0～1点は全体の約6割を占めてい

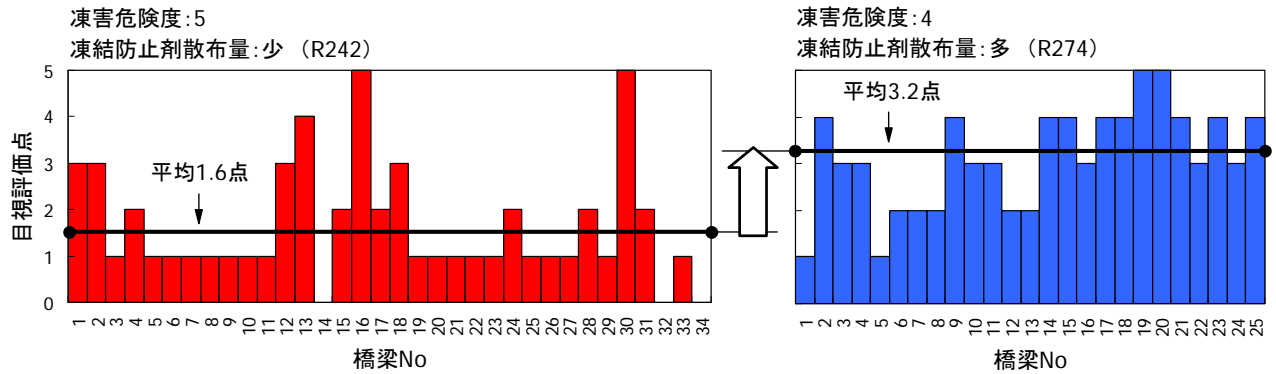


図-5 調査対象橋梁の目視評価点

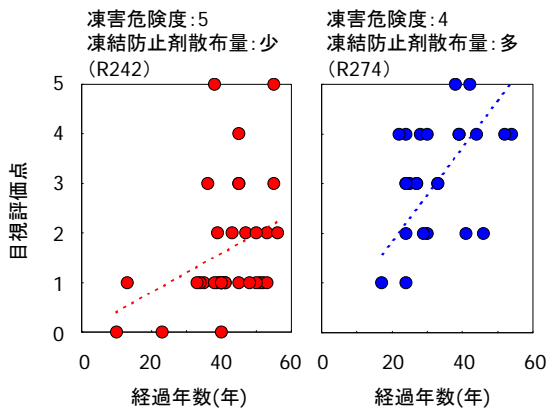


図-6 経過年数と目視評価点の関係

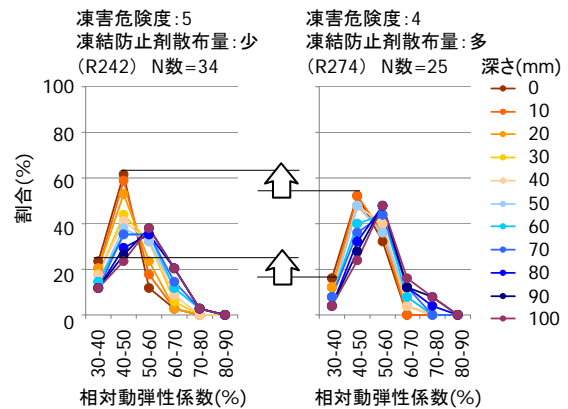


図-7 深さごとの相対動弾性係数の予測下限値のヒストグラム

た。これに対して、評価3点以上の橋梁は全体の2割程度しかなかった。全体の評価点の平均は1.6点で、この点数と図-2の基準とを照らし合わせると、調査した部材は粗骨材の露出は比較的少なく、外観上の損傷はさほど大きくないといえる。一方、凍害危険度が1ランク小さい4で凍結防止剤の散布量が多い一般国道274号は、評価0点の橋梁が1橋も無く、評価1点の橋梁も25橋中2橋と少なかった。逆に、評価3点以上の橋梁数は全体の6割を越えていることが確認された。全体の平均値は3.2点で、一般国道242号に比べると点数は倍になっている。

図-6に経過年数と評価点の関係を示す。いずれの地区でも、データは概ね右肩上がりの形で分布しており、評価点は経年的に増加する傾向を呈しているが、増加の割合は凍結防止剤の散布量が多い一般国道274号の方がやや大きいように見受けられる。

橋台前面部とウイング部を対象とした今回の調査では、スケーリングの程度は低気温や凍結融解日数よりも凍結防止剤の影響に大きく依存する傾向が示された。

(2) 内部の凍害状況（ひび割れ）

図-7に表面走査法による測定の結果をもとに作成した深さ方向における相対動弾性係数の予想下限値のヒス

トグラムを示す。ここでは傾向を深さごとに把握しやすいようにするため、折れ線グラフの形で示した。いずれの地区および深さにおいても、予測下限値の最頻値（ピーク）は、一般的な耐凍害性の下限値とされる60%を下回る40～60%の範囲に出現した。このことは、凍害は表面のみならず、深さ100mm程度の範囲まで進行している可能性があることを示唆している。また、損傷の程度が大きい部材の割合は、凍結防止剤の散布量は少ないものの凍害危険度が大きい一般国道242号の方が多く、今回の調査では、ひび割れの程度については凍害危険度の影響が大きい傾向が示された。

しかしながらデータが未だ少なく、今後も傾向の把握に向けて、さらにデータの蓄積を図る必要がある。

3. 室内実験

次に、水セメント比を変化させた場合のスケーリングとひび割れが複合化した凍害の進行性、および塩化物イオンの浸透性に及ぼす凍害の影響を把握する目的で行った室内実験の結果について述べる。

3.1 検討の方法の整理

はじめに、研究に先立ち、凍害の進行性および塩化物イオンの進行性に及ぼす凍害の影響の把握の考え方につ

いて整理する。

(1) 凍害の進行性

凍害の進行性を把握するには、時間を変数に組み込まれたモデルが必要となる。本研究では実用的な性能評価法を構築する観点から比較的簡易なモデルを適用することとし、既報で提案された式(3)⁸⁾と式(4)⁹⁾の組み合わせによって凍害の進行性の把握を試みることとする。

$$SC = a \cdot \exp \left(b \cdot \log \left(\frac{cyc}{A} \right) \right) \quad (3)$$

$$RE_d = 100 \cdot \exp \left(-c \cdot cyc^d \right) \quad (4)$$

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 はサイクルを無次元化させるための係数、 a 、 b 、 c 、 d はコンクリートの品質など実験条件によって定まる係数である。

(2) 塩化物イオンの浸透性

一般に塩害に対する耐久性の評価は、コンクリート表面の塩化物イオン量と拡散係数が常に一定で、塩化物イオンの浸透挙動がFickの拡散方程式の解（以下、Fick式と記す）に従うと仮定し、一般的には簡易な方法として式(5)により行われる。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (5)$$

ここに、 $C(x, t)$ は時間 t (年)における深さ x (cm)の塩化物イオン量(kg/m^3)、 D は塩化物イオンの拡散係数($cm^2/年$)、 C_0 はコンクリート表面の塩化物イオン量(kg/m^3)、 erf は誤差関数である。

しかし、凍害による損傷が発生・進展すると、塩化物イオンの浸透性状は変化するため、スケーリングとひび割れが複合的に発生しているコンクリートへの式(5)の適用は困難と考えられる。このため計算条件の設定が複雑になる場合はFickの拡散方程式を解いた式(6)に示す差分方程式の適用が有効とされている^{10), 11)}。

$$\begin{cases} C_{m,n+1} = Dr(C_{m+1,n} + C_{m-1,n}) + C_{m,n}(1 - 2Dr) \\ r = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad \left(\text{ただし } r \leq \frac{1}{2} \right) \end{cases} \quad (6)$$

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($t = n\Delta t$)、 Δx は深さ x のきざみ幅($x = m\Delta x$)である(図-8)。

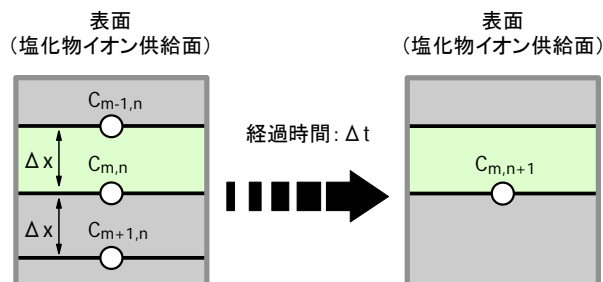


図-8 差分法による拡散係数の算出に必要な情報
(図における算出対象は薄緑色の層)

表-4 コンクリート配合

W/C (%)	単位量(kg/m^3)				目標 空気量	強度 (MPa)
	W	C	S	G		
45	145	322	808	1073	4.5%	41.1
55	147	267	865	1059		19.2
65	149	229	917	1035		16.4

強度は材齢28日の圧縮強度（実測）

差分法は、主に表面被覆材の施工や断面補修によって任意の範囲の拡散係数が変化した場合の塩化物イオンの浸透予測に適する方法である。ここでは、この理論を応用し、差分法で算出した塩化物イオン量の計算値と、スケーリングとひび割れが複合的に発生したコンクリートの塩化物イオン量の実測値の残差平方和が最小となる D を調べて、拡散係数の変化に及ぼす凍結融解の影響の把握を試みることとする。

なお、一般に細孔溶液が凍結すると、塩化物イオンの移動は制限される¹²⁾。よって、拡散係数を適切に求めるには、本来は試験期間全体を凍結期間と融解期間に分けて、双方の期間が重複しないように Δt を定めて境界条件を設定する必要がある。しかし、実際の環境下で凍結・融解期間を分けることは極めて難しい。そのため、ここでは実務への研究成果の普及を見据えて凍結・融解の期間分けは行わず、試験期間全体を通した形で Δt を設定して見かけ上の拡散係数（以下、見かけの拡散係数と記す）の変化を把握することとする。

3.2 実験概要

(1) コンクリートの配合・使用材料

表-4にコンクリートの配合を示す。セメントは高炉セメントB種を使用した。水セメント比は45、55、65%の3水準とし、目標空気量は4.5%に設定した。細骨材は苫小牧市錦岡産の海砂（表乾密度 $2.67g/cm^3$ 、絶乾密度 $2.65g/cm^3$ 、吸水率0.87%、粗粒率2.85）、粗骨材は小樽市見晴産の碎石（表乾密度 $2.67g/cm^3$ 、絶乾密度 $2.62g/cm^3$ 、吸水率1.78%、粗粒率6.74）を使用した。粗骨材の最大寸法は25mmとした。AE減水剤は、リグニンスルホン

酸化化合物およびポリオール複合体を主成分とするものを使用した。

(2) 供試体・養生

図-9に供試体を示す。寸法は100×100×400mmとした。打設後、材齢7日まで湿った麻布で供試体を覆い、その後は材齢28日まで供試体を恒温恒湿室（温度20℃、湿度60%）に静置した。ここでは構造物の状態にあわせてコンクリートの1面に対してのみ凍結融解を与えることとした。凍結融解作用面は凍害を促進させる理由から比較的脆弱な打設面（100×400mm）とし、打設面以外の5面には防水処理（シラン系表面含浸材の塗布およびスチレンボードの貼り付け）を施した。

(3) 試験・測定

材齢28日から凍結融解試験を開始した。凍結融解試験はJISA1148を準用して行った。試験水は3%濃度の塩化ナトリウム水溶液（以下、塩水と記す）とし、コンクリートの表面が3mm厚の塩水で覆われるサイズのゴム製の容器に供試体を挿入し、容器を試験槽に入れて凍結温度-18℃、融解温度5℃の範囲で1サイクル3～4時間の急速凍結融解作用を与えた。凍結融解試験は600サイクルまで行い、途中、約36サイクルに1回の割合でスケーリング量の測定、100、200、300、400、500、600サイクルに相対動弾性係数と塩化物イオン量の測定を行った。

スケーリング量は、剥離片を110℃で24時間乾燥させ、乾燥後の剥離片の質量を測定して求めた。相対動弾性係数は、超音波測定器を使用して深さ2、4、6、8cm位置の超音波伝播速度を図-9に示す要領で測定し、既報¹³⁾の実験式を参考に式(7)より動弾性係数、式(8)より各深さの相対動弾性係数を求めた。

$$E_{dn}=4.0387V_n^2 \text{ ? } 14.438V_n \text{ ? } 20.708 \quad (7)$$

$$RE_d = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \text{ ? } 100 \quad (8)$$

ここに、 E_{dn} は凍結融解作用を n サイクル与えた供試体の動弾性係数(GPa)、 V_n は n サイクルにおける超音波伝播速度(km/s)、 RE_d は n サイクルにおける相対動弾性係数(%)、 E_{d0} は凍結融解の影響を受けていない供試体の動弾性係数(GPa)である。

塩化物イオン量の測定はJIS A 1154の硝酸銀滴定法に準じて行った。コンクリートカッターを用いて深さ0～5cmの範囲を1cm間隔でスライスし、深さ0～1cm間、1～2cm間、2～3cm間、3～4cm間、4～5cm間（以下、0.5cm、1.5cm、2.5cm、3.5cm、4.5cmと記す）の全塩化物イオン

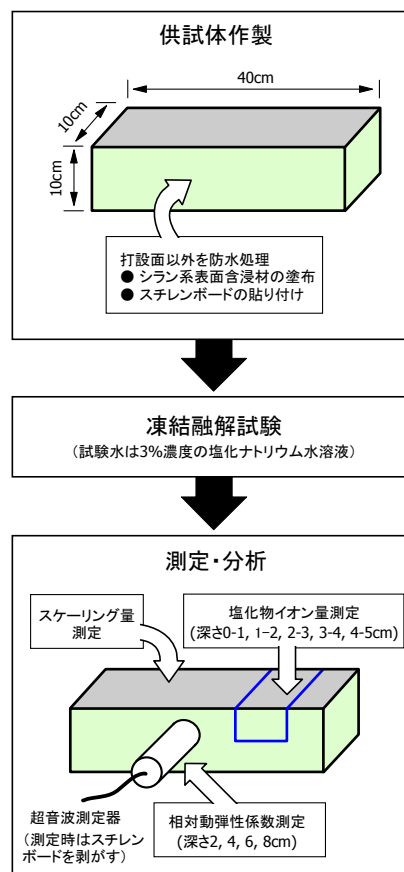


図-9 実験の流れ

量を測定した。また、比較のため、図-9の供試体を凍結融解試験と同じ期間（100サイクルは17日間、200サイクルは34日間、300サイクルは50日間、400サイクルは67日間、500サイクルは84日間、600サイクルは100日間）塩水に浸漬させた場合（以下、塩水浸漬と記す）の全塩化物イオン量もあわせて測定した。

3.3 実験結果・考察

(1) 凍害の進行性

図-10に凍結融解試験の結果を示す。スケーリング量は水セメント比が大きいほど多い結果が得られ、水セメント比と密接な関係にある傾向が示された。図-11は、式(3)から求めたスケーリング量の計算値と実測値の関係を示している。サイクルを無次元化させるための係数 A は、最長サイクルである600サイクルの中間をとって300とした。計算値と実測値は良く対応し、今回の実験の範囲では、スケーリングの進行性は式(3)を用いて把握・説明できることが確認された。

これに対して相対動弾性係数は、いずれの供試体ならびにいずれの深さにおいても全体的に概ね80%以上の高い値を示し、相対動弾性係数の顕著な低下は確認されなかった。相対動弾性係数と深さの関係についても明確に表れなかった。

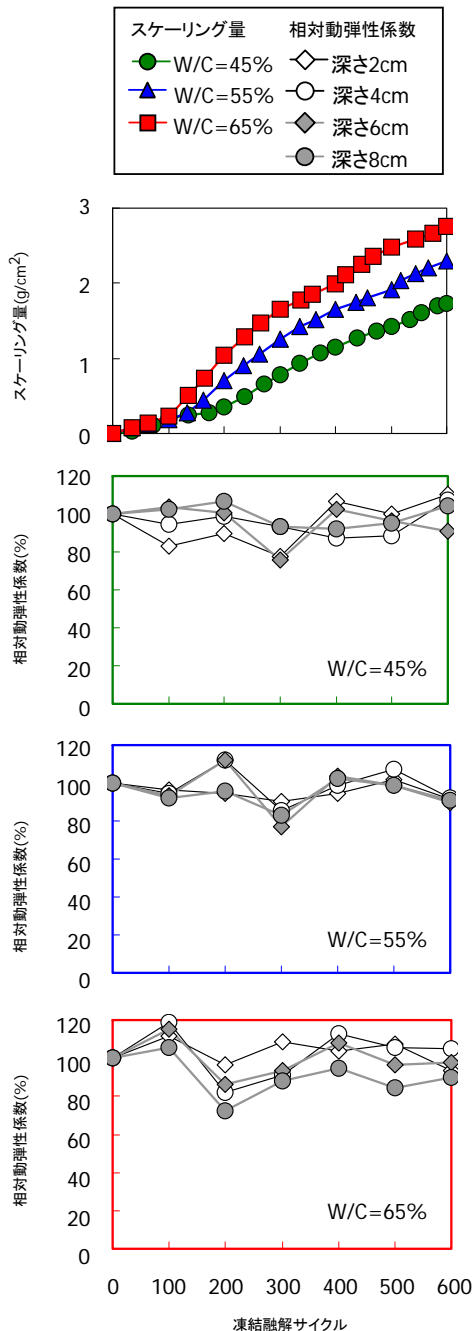


図-10 凍結融解試験の結果

今回使用した供試体は、表層ではスケーリングが経時的に進展する一方、内部では顕著な損傷が殆ど生じず、凍害による損傷は表層に集中的に発生する形態を呈した。ここでは、寒冷地における一般的なコンクリートの配合設計にあわせて AE 減水剤を使用しているが、AE 減水剤の使用によって混入されるエントレインドエアは、凍結行程で発生する未凍結水の移動による水圧を緩和させる機能を有することが知られている¹⁴⁾。今回の実験では、相対動弾性係数については水セメント比の影響よりも AE 減水剤の効果が卓越したように類推される。

一方、千歩ら¹⁵⁾は、実環境で想定される夏期の乾湿繰

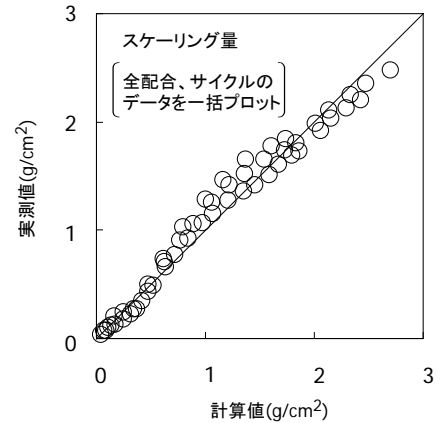


図-11 スケーリング量の計算値と実測値
(ただし、係数 A は 300)

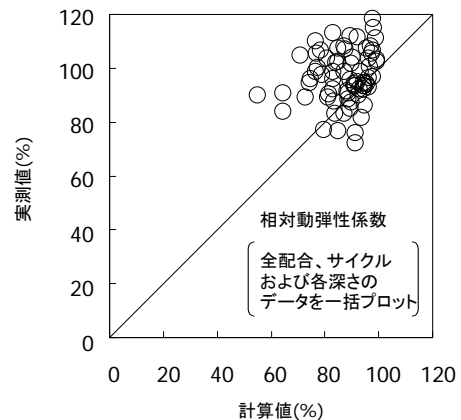


図-12 相対動弾性係数の計算値と実測値

り返しに着目した検討を行い、水中凍結融解試験の結果が良好なコンクリートであっても、凍結融解前に乾湿の繰り返しを受けた場合は相対動弾性係数の低下速度が大きくなることを報告している。今後はスケーリングとひび割れが複合化した凍害の進行性に及ぼす乾湿繰り返しなど種々の条件の影響についても詳しく調べていく必要がある。

図-12 に式(4)から求めた相対動弾性係数の計算値と実測値の関係を示す。既報⁹⁾では実験水に淡水が使用されているが、塩水を使用した本研究においても大半のデータが 45°線の近傍に重なってプロットされる結果が示された。しかしながら、ややばらつきがあることに加え、データのプロット域が限られた範囲に集中していることから、凍害が進展しやすいコンクリートを用いた実験を行うなど、今後もさらに検討を重ねていく必要がある。

なお、次年度以降は実構造物においても今回の実内実験と同様の要領で式(3)、式(4)を用いた評価を行い、実環境下での凍害の進行性について調べていく予定である。

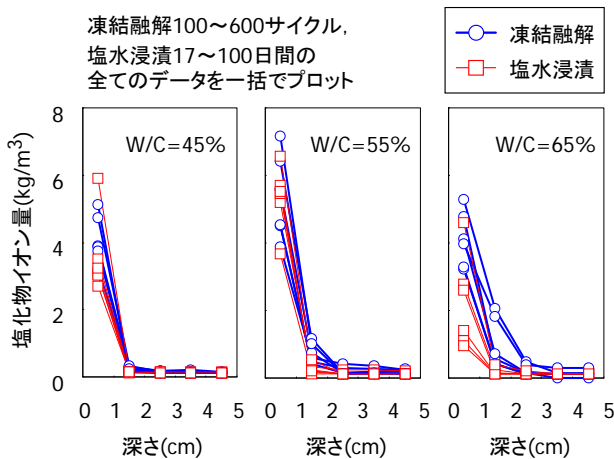


図-13 塩化物イオン量の測定結果

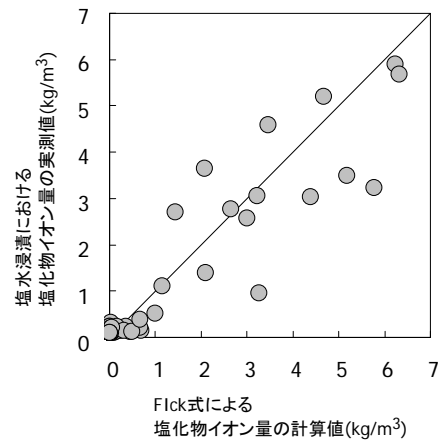


図-14 Fick 式による計算値と塩水浸漬の実測値 (全ての期間および各深さのデータを一括プロット)

(2) 塩化物イオンの浸透性

a) 塩化物イオン量

図-13 に塩化物イオン量の測定結果を示す。図には凍結融解 100～600 サイクル、塩水浸漬 17～100 日間の全データを一括してプロットしている。塩化物イオンの浸透深さは、全体的に水セメント比が大きいほど深い傾向を示した。また、特徴的な傾向として、水セメント比 55% の深さ 1.5cm、水セメント比 65% の深さ 1.5、2.5cm の塩化物イオン量は、凍結融解を与えた方が多いことが明確に読み取れる。これは凍害の発生に伴い、塩化物イオンの浸透性が大きくなったことを示している。

図-14 は式(5)で示した Fick 式から求めた塩化物イオン量の計算値と塩水浸漬における実測値との比較を示している。多少ばらついてはいるものの、データは概ね 45° 線に沿ってプロットされた。このことから、Fick 式は凍結融解が作用しない塩水浸漬環境下での塩化物イオン量の予測には適すると言える。

図-15 は Fick 式による計算値と凍結融解における実測値との比較を示している。図-14 とは対照的に凍結融解を与えたときは殆どのデータが 45° 線よりも上の範囲にプロットされ、Fick 式では危険側の評価がなされていることが確認された。

以上のことから、凍結融解環境下では現在の耐久性設計で使用されている Fick 式をそのまま適用することは厳しいことが確認された。

b) 見かけの拡散係数

次に、差分法を用いて、凍結融解の影響を受けたコンクリートの見かけの拡散係数を図-16 の手順に基づき算出した。手順の詳細を、以下①～④に述べる。

① Δx の設定

式(6)の Δx は、塩化物イオンの測定位置にあわせて

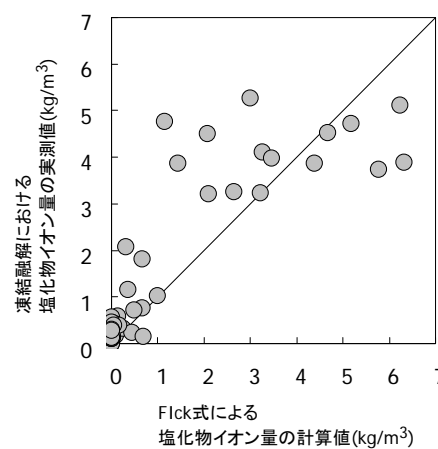


図-15 Fick 式による計算値と凍結融解の実測値 (全ての期間および各深さのデータを一括プロット)

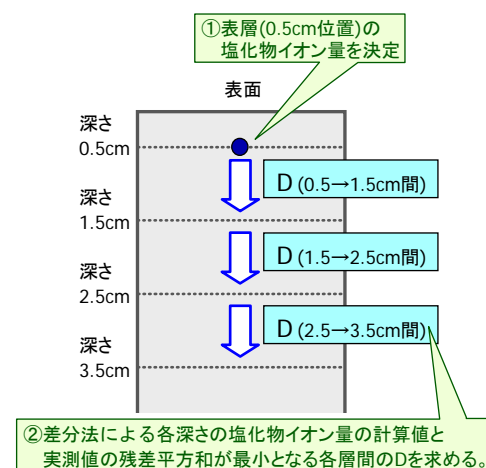


図-16 見かけの拡散係数の算出手順

0.5cm とした。

② Δt の設定

式(6)の Δt は、100 サイクルおきに塩化物イオン量を測定している関係から 0.05 年 (100 サイクル) に設定した。

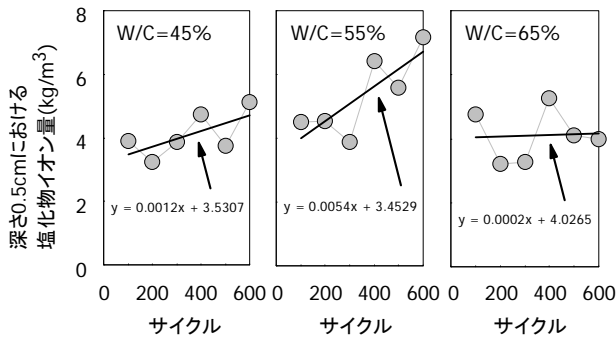


図-17 深さ 0.5cm における塩化物イオン量の経時変化

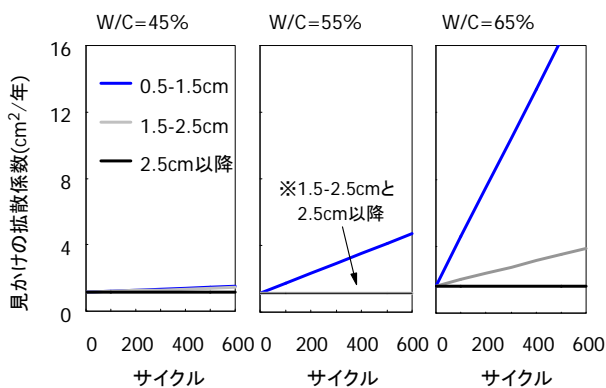


図-18 見かけの拡散係数の経時変化

③ 外部から供給される塩化物イオン量の設定

算出を行うには、Fick 式の C_0 に相当する、外部から供給される塩化物イオン量を決定する必要がある。しかしながら、凍結期間は試験水が氷に変化するため C_0 は常時一定とはならず、凍結および融解の期間で変化する。このため、計算を簡易に行うためには試験期間全体を通して C_0 を決定する必要がある。しかし、実環境では設定が非常に複雑であり、また、表層がスケリングで経時的に減少するため、 C_0 を決定することが困難である。このため、本検討では深さ 0.5cm の塩化物イオン量に着目し、深さ 0.5cm の塩化物イオン量の経時変化を回帰分析し、その回帰式から $C_{0.5n}$ を決定し、解析に利用することとした。なお、 $C_{0.5n}$ を求めた回帰式は図-17 に示す通りである。

④ 見かけの拡散係数 D の決定

式(6)において $C_{1.5n}$ 、 $C_{2.5n}$ 、 $C_{3.5n}$ 、 $C_{4.5n}$ の計算値とそれぞれの深さの実測値との残差平方和が最小となる D を 4 層（深さ 0.5～1.5cm 間、1.5～2.5cm 間、2.5～3.5cm 間、3.5～4.5cm 間）についてそれぞれ求め、その値を計算上利用する見かけの拡散係数とすることとした。なお、計算を極力簡便に行う理由から見かけの拡散係数の経時変化を一次関数の形でシンプルに表現することとした。

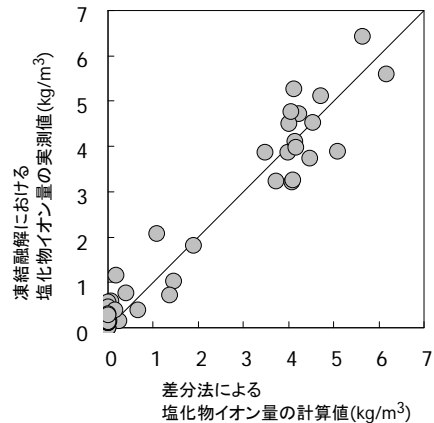


図-19 差分法による計算値と凍結融解の実測値（全ての期間および各深さのデータを一括プロット）

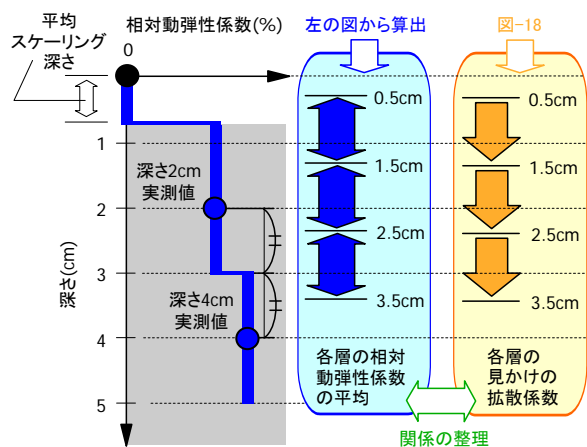


図-20 見かけの拡散係数と相対動弾性係数の関係の把握の流れ

図-18 に見かけの拡散係数の経時変化を示す。グラフの切片に相当する 0 サイクルの見かけの拡散係数は損傷を受ける前の拡散係数、すなわち塩水浸漬における拡散係数（約 $1.1 \sim 1.6 \text{ cm}^2/\text{年}$ ）である。今回の実験においては、水セメント比 55% の深さ 0.5～1.5cm 間、水セメント比 65% の 0.5～2.5cm 間において見かけの拡散係数の明確な増加が示された。深さ 0.5～1.5cm 間における 600 サイクルの見かけの拡散係数は、45% が $1.5 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、55% が $4.7 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、65% は $19.3 \text{ cm}^2/\text{年}$ で、凍結融解を受ける前に比べてそれぞれ 1.3 倍、4.1 倍、11.8 倍増加しており、スケリングとひび割れが複合化した凍害の進展に伴って見かけの拡散係数は部分的に数倍～十数倍増加することが明らかとなった。

これらの情報を式(6)の差分方程式に代入して計算した凍結融解を受けた場合の塩化物イオン量の計算値と実測値の比較を図-19 に示す。図-15 とは対照的に計算値と実測値は良く対応し、凍害による損傷を受けた場合の塩化物イオンの浸透性の評価方法として差分法が有効であ

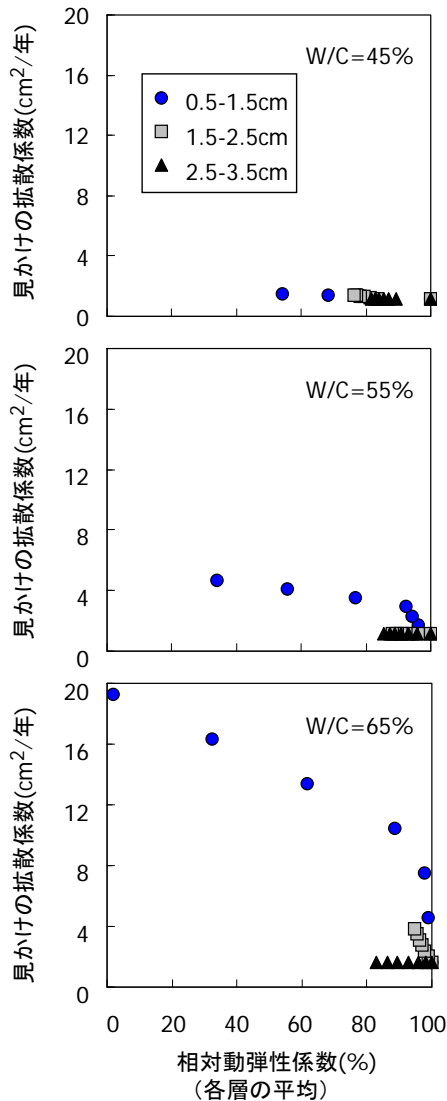


図-21 相対動弾性係数と見かけの拡散係数の関係

る知見を得た。

c) 相対動弾性係数と見かけの拡散係数の関係

次に、前節で述べた相対動弾性係数の測定結果と見かけの拡散係数の関係について、図-20 に示すようにスケーリングの影響を考慮して考察する。

なお、計算の便宜上、スケーリング発生前の表面から剥離面までの範囲（スケーリング深さ）の相対動弾性係数をゼロと仮定した。スケーリング深さは、面的均等に欠損が生じていると単純化させて考えることとし、式(9)より求めた。

$$h = \frac{SC}{\rho} \quad (9)$$

ここに、 h は平均スケーリング深さ(cm)である。SCは

スケーリング量(g/cm^2)、 ρ はコンクリートの密度(g/cm^3)で、SCは式(3)による計算値、 ρ はコンクリートの配合(表-4)から求めた。

各層の相対動弾性係数は、図-20の左に示した各層内の値(線上)の平均とした。なお、剥離面直下の相対動弾性係数は測定が極めて困難であることから、本年度の研究では剥離面に最も近い位置の実測値(図-20の場合は深さ2cm)をあてることとした。

図-21に相対動弾性係数と見かけの拡散係数の関係を示す。全体的に相対動弾性係数の減少に伴って見かけの拡散係数は増加する傾向を示した。この傾向は水セメント比が大きいほど顕著に表れており、両者の関係に及ぼす水セメント比の影響は大きいことが確認された。

なお、相対動弾性係数の平均が同じ値でも、見かけの拡散係数は表面に近い層ほど大きく、両者の関係は、同じコンクリートでも深さごとに異なる傾向が示された。これは図-13で示したように表面に近い層(0.5~1.5cm)と内部の層(1.5~2.5cm、2.5~3.5cm)では侵入している塩化物イオンの量が異なり、量が少ない内部の層では見かけ上、拡散係数の変化が明確に表れなかったことが考えられる。見かけの拡散係数の設定に際しては、コンクリートの水セメント比に加えて、表面からの深さも考慮して設定する必要があることがわかった。

今後は凍害の進行状況から見かけの拡散係数を求めて塩化物イオン量を把握できる方法の確立に向け、さらにデータの積み重ねと分析を進めていく予定である。

4. まとめ

本研究の最終目標である、代表的な凍害形態であるスケーリングとひび割れが複合的に発生しているコンクリートの耐久性能を適切に評価できる方法の確立・提案に向けて、平成23年度は、気象条件が厳しい北海道山間部(陸別、日高)の道路橋を対象に凍害の程度の現状を把握するとともに、水セメント比を変化させた場合の凍害の進行性、および塩化物イオンの浸透性に及ぼす凍害の影響を把握するための室内実験を行った。

本年度に行った調査および実験の範囲で得られた知見をまとめると、以下ようになる。

- (1) 表面の凍害(スケーリング)の程度は低気温や凍結融解日数よりも凍結防止剤の影響に大きく依存する傾向が示された。
- (2) 内部の凍害(ひび割れ)の程度については凍害危険度の影響が大きい傾向が示された。
- (3) スケーリングに及ぼす水セメント比の影響は大き

かったが、相対動弾性係数については水セメント比の影響が明確に表れなかった。

- (4) 水セメント比 55%の深さ 0.5～1.5cm 間、水セメント比 65%の 0.5～2.5cm 間では、凍害の進行による見かけの拡散係数の増加が明確に示された。
- (5) 差分法は、凍害による損傷を受けた場合の塩化物イオンの浸透性の評価方法として有効である。

5. 今後の課題

次年度は、今回の室内実験で得た知見に基づいて、今回調査した路線(図-1)の道路橋の橋台前面部およびウィング部の耐久性能の経年変化の大まかな推移について調べる予定である。

また、今回、検討条件とはしなかったセメントの種類の違いや、乾湿繰り返しなど種々の環境条件が凍害の進行性に及ぼす影響についても明らかにするとともに、凍害危険度が 1～3 で凍結防止剤の散布が多い路線など、今回の調査(図-1)で対象としなかった地区でも調査を行い、地域条件(凍害危険度、凍結防止剤など)と耐久性能の変化の推移の関係についても整理したいと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 21 年度国土交通白書，第 I 部
- 2) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，p.119-122，2008.3
- 3) 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
- 4) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案，セメント技術年報，XXIX，pp.248-253，1975.
- 5) American Society for Testing and Materials：Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals
- 6) 柏忠二，明石外世樹，小坂義夫：コンクリートの非破壊試験法—日欧米の論文・規格・文献—，p.42，1980.
- 7) 遠藤裕丈，田口史雄，林田宏：コンクリート部材の凍害診断への表面走査法の適用に関する研究，第 55 回(平成 23 年度)北海道開発技術研究発表会発表概要集，2012.2
- 8) 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，p.138，2011.3
- 9) 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
- 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) 朝倉啓仁，林田宏，田口史雄，嶋田久俊：凍結防止剤の散布期間を考慮したコンクリート部材の塩分浸透解析手法，土木学会北海道支部論文報告集第 63 号，F-3，2007.2
- 12) 大竹康広，横田弘，橋本勝文，松本直也：凍害環境下におけるコンクリートへの凍結防止剤由来塩分の浸透性状：土木学会第 66 回年次学術講演会，V-069，pp.137-138，2011.9
- 13) 緒方英彦，野中資博，藤原貴央，高田龍一，服部九二雄：超音波法によるコンクリート製水路の凍害診断，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論文集，日本コンクリート工学協会，pp.63-70，2006.12
- 14) 長谷川寿夫，藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ「凍害」，技報堂出版，1988.2
- 15) 千歩修，濱田英介，友澤史紀：乾湿繰り返しがコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.731-736，2003.

DEVELOPMENT OF A PERFORMANCE EVALUATION METHOD FOR CONCRETE STRUCTURES SUBJECTED TO A COMBINATION OF VARIOUS FORMS OF DETERIORATION CAUSED BY FROST DAMAGE

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2015

Research Team : Cold-Region Maintenance Engineering Research Group
(Materials Research Team)
Cold-Region Technology Development Coordination
(Cold-Region Technology Promotion Division)

Author : TAGUCHI Fumio, HAYASHIDA Hiroshi,
ENDOH Hirotake, TABATA Kohtaroh,
YOKOYAMA Hiroyuki, MIYAMOTO Syuji,
NAKAMURA Naohisa, MURANAKA Tomoyuki

Abstract : Toward the proposal of a performance evaluation method for concrete affected by more than one type of complex frost damage(e.g., scaling and cracking), in FY 2011, in order to (1) understand the state of frost damage with scaling and cracking, (2) evaluate the progress of frost damage with scaling and cracking, and (3) evaluate the influence chloride ion penetration, the characteristics of actual frost damage to road bridges in the severe climatic conditions of Rikubetsu and Hidaka (mountainous areas of Hokkaido) were clarified. Laboratory experiments were also conducted to grasp the progress of frost damage with different water-cement ratios and to grasp the effects of frost damage on chloride ion permeability. The structural surveys confirmed that forms of frost damage varied with environmental conditions such as deicing salt. Meanwhile, the results of the laboratory experiments suggested that the effects of the water-cement ratio on scaling were significant. On the other hand, in the range of this laboratory, the effects of the water-cement ratio on the relative dynamic modulus of elasticity were not shown definitely. It was also found that the difference method was an effective approach to evaluating chloride ion permeability.

Key words : Freeze-Thaw, Scaling, Cracking, Chloride Ion, Performance Evaluation