

論文 コンクリート構造物の温湿度変化と凍害劣化予測に関する検討

林田 宏*1・濱 幸雄*2・田口 史雄*3・遠藤 裕丈*4

要旨: コンクリート構造物の凍害劣化に影響を及ぼす部位毎の含水状態を把握するため、小型温湿度センサーを用いて、実構造物のコンクリート中の温湿度の測定を行った。また、得られた温湿度データを既存の劣化予測手法に適用し、水分の影響等に関する検討を行った。その結果、コンクリート中の温湿度は積雪等の環境条件や部位によって異なり、ASTM 相当サイクルを劣化予測手法として用いる場合、室内促進試験と構造物の水分供給条件の違いなどに起因し、凍結融解による損傷量の差や劣化速度に差がある可能性があることが分かった。

キーワード: コンクリート構造物, 温湿度センサー, 相対湿度, 劣化予測, 凍害

1. はじめに

凍害劣化にとって水分条件は温度条件と並び重要なパラメータである。また、コンクリート構造物の水分条件は部位条件や地域条件によって異なるが¹⁾、既存の凍害劣化予測手法^{例えば 2)~6)}では、パラメータとして十分考慮されていない。

本検討ではコンクリート構造物の部位毎の含水状態を把握するため、小型温湿度センサーを用いて、温湿度の測定を行った。また、得られた温湿度データを ASTM 相当サイクルを用いる劣化予測手法に適用し、コンクリート構造物の劣化予測に与える水分の影響について検討を行った。

2. コンクリート構造物の温湿度に関する調査

2.1 調査概要

(1) 対象構造物, 部位

図-1 は年最深積雪 (1971~2000 年の平年値)⁷⁾を示しており、対象構造物は積雪が比較的多い地域にある A 樋門と積雪が比較的少ない地域にある B 樋門とした。また、対象部位は写真-1 に示すように、積雪や融雪水が上面にたまりやすい水平部位として「操作台」、垂直部位として天端からの融雪水が供給されやすい「擁壁上部」と水面に近い「擁壁下部」の計 3 部位を選定した。

(2) 調査方法

温湿度センサーは、高分子湿度センサーを備えた小型温湿度センサーに透湿性防水シートで防水・透湿処理をしたものを用いた。センサーは、表面から深さ約 1cm の位置に埋設した。埋設方法は対象部位にコンクリートドリルで孔をあけ、センサーを所定の位置に据え付けた後、孔を無収縮モルタルで埋め戻し、表面は母材とモルタル

の継ぎ目から水分が進入しないようシーリング材によってシールした。測定は冬期のコンクリートの温湿度を把握するため、2008 年 11 月から 2009 年 4 月まで行った。

2.2 調査結果

深さ約 1cm のコンクリート温度と相対湿度 (以下、「湿度」という。) の測定結果をそれぞれ図-2、図-3 に示す。また、-1°C で凍結、0°C で融解する²⁾と仮定し、1 回の凍結融解時の最低温度と凍結開始時の湿度をプロットしたものを図-4 に示す。

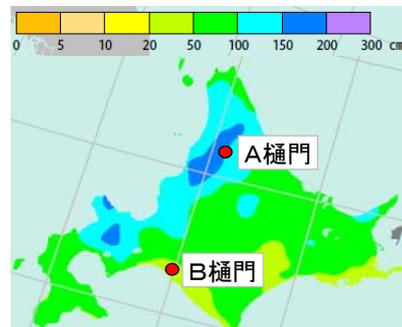


図-1 年最深積雪と調査箇所



写真-1 調査部位

*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 主任研究員 (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域 教授 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 上席研究員 工博 (正会員)

*4 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)

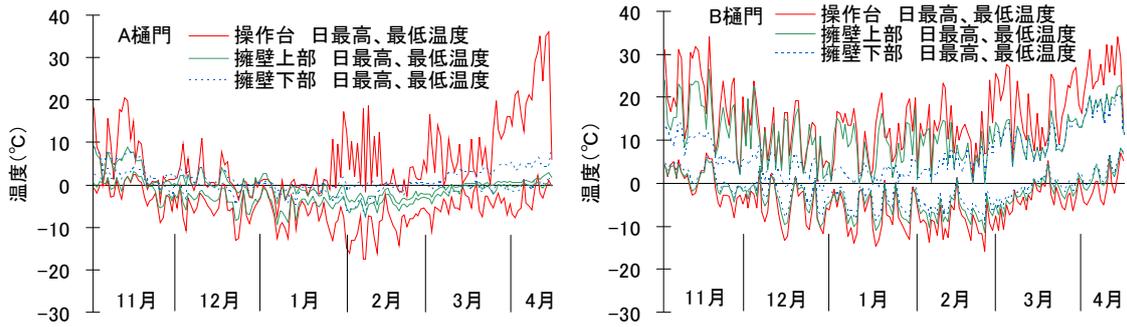


図-2 コンクリート温度

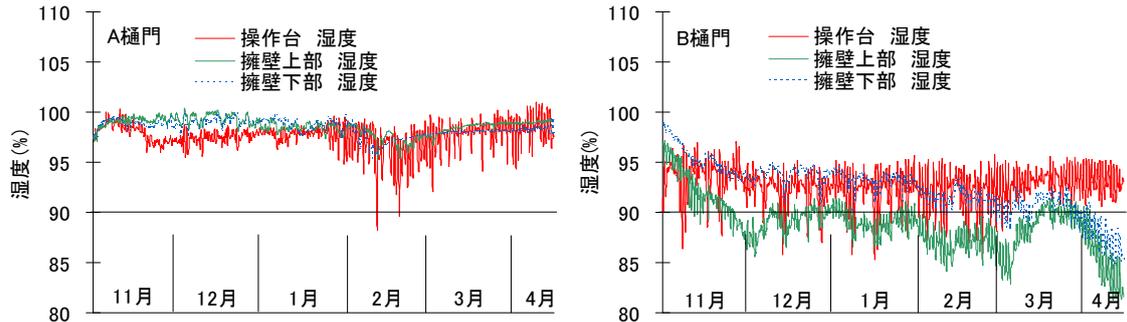


図-3 コンクリート湿度

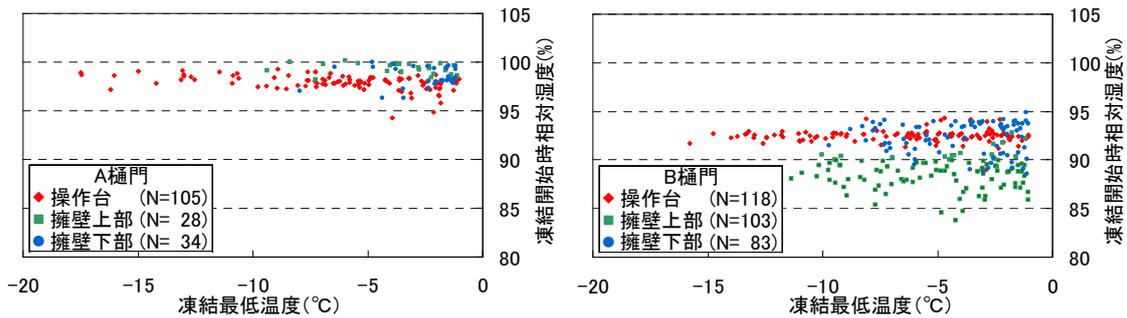


図-4 凍結融解時の最低温度と湿度

(1) コンクリート温度

まず、図-2に示すB樋門について見ると、操作台は日射の影響や部材が薄いことなどから、日最高温度と日最低温度との差（以下、「振幅」という。）が3部位中で最も大きい。その振幅は最も気温が低くなる1~2月においても最低温度が-15℃、最高温度が25℃と1日の振幅が40℃に達する時もある。また、擁壁については上部、下部の順に振幅が小さい。これは、上部は比較的日射の影響を受けやすいが、下部は受けにくいことなどが考えられる。また、図-4に示すように、凍結融解回数についても振幅と同様に操作台、上部、下部の順に少なくなる。さらに凍結最低温度が-10℃以下の凍結融解回数についても操作台、上部、下部の順に少なくなる。

次に、図-2に示すA樋門について見ると、部位毎の振幅は、B樋門と同様に、操作台が最も大きい。擁壁については、上部に比べて下部の振幅が若干大きい傾向が

あるが、振幅そのものが小さく、0℃以下で推移している部分が多い。写真-2はA樋門近傍にある、他樋門の擁壁部分の積雪状態を示したものである。擁壁の温度分布が上記のようになったのは、この写真と同様に擁壁上部に大きな雪庇が発達したため日射が遮られたり、下部付近に堆雪したことなどが考えられる。また、図-4に示すように、凍結融解回数もこのことに起因し、操作台が105回であるのに対し、擁壁上部28回、下部34回と大幅に回数が少ない。さらに、擁壁の凍結融解時の凍結最低温度を見てみると、その多くが-5℃以上の範囲に集中しており、厳寒期は凍結融解作用をほとんど受けておらず、初冬期や春先の積雪が少なく、比較的気温が高くなってきた時に凍結融解作用を受けているものと考えられる。

(2) コンクリート湿度

まず、図-3に示すA樋門について見ると、全期間に



写真-2 擁壁部分の積雪状態（2月撮影）
（左：A 樋門地域，右：B 樋門地域）

において、全ての部位の湿度が概ね 95%以上で推移している。一方、振幅については、擁壁上部、下部が比較的小さいのに対し、操作台は比較的大きく、その振幅は 10%程度となる時もある。この湿度の振幅の傾向は温度の傾向と類似しており、センサーを設置した深さ約 1cm の位置では、温度の変化に連動して、湿度がその影響を受けているものと推察される。

次に、B 樋門について見ると、部位毎に差があり、操作台と擁壁下部は概ね 90~95%、擁壁上部は概ね 90%以下で推移しており、A 樋門と比較すると、全ての部位で湿度が低くなっている。これは積雪深に起因するものと考えられる。すなわち、積雪が多い A 樋門では融雪水が比較的多く供給されるのに対し、写真-2 に示すように積雪が少ない B 樋門では融雪水の供給が少なく比較的乾燥した状態となっていることによるものと考えられる。また、振幅については全ての部位で比較的振幅が大きい。これは前述のように、温度変化に起因するものと考えられる。

3. 劣化予測に関する検討

3.1 劣化予測法の概要

劣化予測法に関しては、既に提案がなされている劣化予測手法のうち、外部環境因子をパラメータとして多く考慮している「ASTM 相当サイクル」²⁾を用いることとした。ここで「ASTM 相当サイクル」とは、ある地域の気象条件下でコンクリートが 1 年間に受ける凍結融解作用を、式(1)を用いて ASTM C-666 A 法の標準条件の凍結最低温度である -18℃を基準とした ASTM 相当サイクル数として算出し、耐用年数を推定する手法である。

$$C_{y_{ASTM-sp}} = C \times F \times R_{sp} \\ = C \times F \times s \times p \times Ra_{90} \quad (1)$$

ここに、 $C_{y_{ASTM-sp}}$ ：ASTM 相当サイクル数（回/年）、 C ：養生条件に関する係数、 F ：凍結融解条件に関する係数、 R_{sp} ： $\Sigma(-ts/18)^\beta$ 、 ts ：凍結最低温度（℃）、 β ：定数、 s ：日照条件に関する係数、 p ：劣化過程係数、 Ra_{90} ：気温による ASTM 相当サイクル数

今回、検討では Ra_{90} は温湿度センサーによる深さ約 1cm の温度データを用いて求めた。したがって、日射の

影響はセンサーのデータに含まれていることから、日照係数 s は 1.0 とした。また、養生係数 C は建設時の養生温度などを考慮し「30℃乾燥」の値である 0.14 ($Ed > 90\%$) と 0.45 ($90\% \geq Ed$) を、凍結係数 F は室内促進試験のような水中凍結を生じる状況でない判断し、「気中凍結水中融解」の値である 0.21 ($Ed > 90\%$) と 0.23 ($90\% \geq Ed$) を用いた。

3.2 実構造物の凍害劣化状況

(1) 調査方法

構造物の凍害劣化調査は、温湿度センサーを設置した箇所を対象として、外観目視調査と採取コアの超音波伝播速度測定を行った。

まず、外観目視調査における凍害に関する劣化度の評価は、目視調査による半定量的なランク付けによる外観評点を用いて実施した。その凍害に関する外観評点は、ASTM C 672 の室内試験における目視判定法に準じ、表-1 によって行った。

次に、超音波伝播速度測定については、調査箇所からコア（ $\phi=10\text{cm}$ 、 $L=10\text{cm}$ ）を採取し、直径方向の超音波伝播速度測定を行った。なお、測定深さは、温湿度センサーの設置位置が深さ約 1cm であること、また、劣化予測手法の算出結果がコンクリート表層部分を想定していること、さらに、深触子の径（ $\phi=2\text{cm}$ ）を考慮し、測定はコア表面から深さ 1.5cm のところで測定を行った（以下、この位置の超音波伝播速度を「 V_L 」という。）。また、前報⁸⁾と同様に、式(2)および式(3)⁹⁾を用いて超音波伝播速度から相対動弾性係数を求めた。なお、 E_{do} の算出では健全とみなせる箇所の超音波伝播速度として各コアの深部の最速の超音波伝播速度のデータを用いた（以下、この超音波伝播速度を「 V_0 」という。）。

$$E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \quad (2)$$

$$\text{相対動弾性係数 (\%)} = \frac{E_{dn}}{E_{do}} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 E_{dn} ：供用中のコンクリート構造物における動弾性係数（GPa）、 E_{do} ：供用開始直後のコンクリート構造物における動弾性係数、もしくは供用開始直後の測定値がない場合は供用中のコンクリート構造物において健全とみなせる箇所の動弾性係数（GPa）、 V ：超音波伝播速度（km/s）である。

表-1 凍害劣化の外観評点

評点	区分の基準
0	なし
1	粗骨材の露出なし、深さ3mm以下の剥離
2	評価1と評価3の中間程度の剥離
3	粗骨材がいくつか露出する程度の剥離
4	評価3と評価5の中間程度の剥離
5	粗骨材が全面露出する程の激しい剥離

(2) 調査結果

超音波伝播速度測定、相対動弾性係数算出および外観評価の結果を表-2に示す。

超音波伝播速度の絶対値による評価基準として健全なコンクリートの一般的な超音波伝播速度は4000m/s以上とされている¹⁰⁾。 V_L については、すべての箇所でも4000m/sを下回っており、外観評価の結果も考慮すると、ある程度の凍害劣化を受けていると考えられる。一方、 V_0 については、A、B 樋門ともに操作台、擁壁下部は4000m/s以上であり、劣化を受けていないと考えられるが、擁壁上部は4000m/sを下回っている。これは、コンクリート打設の高さがある程度高い場合、上部と下部でブリーディング等によりコンクリートに品質差が生じる場合があるとされており¹¹⁾、これらの擁壁も上下で品質差があると考えられる。また、外観評価による擁壁上部の表面の凍害劣化程度は小さく、深部は劣化を受けていないと考えられることから、相対動弾性係数の算出に当たっては、この値を V_0 として用いることとした。

次に、相対動弾性係数を見てみると、A 樋門については操作台が72%と最も低く、ついで擁壁下部が77%、擁壁上部が93%となった。また、B 樋門については操作台が79%と最も低く、ついで擁壁下部が91%、擁壁上部が94%となった。これらの結果は、概ね外観評価の結果と傾向が一致するが、B 樋門の擁壁下部は相対動弾性係数があまり低下していないにもかかわらず、外観評価は低い。これは擁壁下部の表面は流水等によるすり減りの影響を受けているためと考えられる。

3.3 実構造物と劣化予測の比較

(1) 比較方法概要

実構造物と劣化予測の比較は以下のように行った。

表-2 凍害劣化調査結果

樋門名	調査部位	供用年数	V_L (m/s)	V_0 (m/s)	Ed	外観評点
A樋門	操作台	32年	3611	4241	72%	4
	壁上部		3732	3870	93%	1
	壁下部		3790	4311	77%	4
B樋門	操作台	36年	3571	4009	79%	3
	壁上部		3485	3605	94%	1
	壁下部		3879	4065	91%	4

a. コンクリート構造物の配合等を考慮して室内促進試験を行い、ASTM相当サイクルの相対動弾性係数と時間(予測年数)の関係を求める。

b. a.で求めた関係から構造物の相対動弾性係数に達する予測年数を求める。

c. b.で求めた予測年数と構造物の供用年数を比較する。

(2) 室内促進試験

予測に当たっては、実構造物に使用されたコンクリートに関する室内促進試験データが必要である。樋門に使用されている標準的な配合は前報⁸⁾の構造物と同じ、かつ、建設された年代も同程度であることから、室内促進試験データは前報⁸⁾と同じデータを用いた。既往の結果では、相対動弾性係数が90および60%に達するのは、それぞれ3.4cycおよび13.8cycであった。

(3) ASTM相当サイクルの算出

Bargerら¹²⁾が湿度90%で平衡するよりも低い含水率である場合、凍害劣化の可能性が低下することを指摘していることに基づき、長谷川ら¹³⁾は、低い湿度で凍結融解が作用した場合、その凍結融解は凍害劣化に寄与しないとして、凍害劣化に寄与しない回数を除いた凍結融解回数(以下、「実効回数」という。)について検討しており、本検討でもこの考え方に基づき、 Ra_{90} の算出に当たっては、コンクリート温度データのみで求めた凍結融解回数

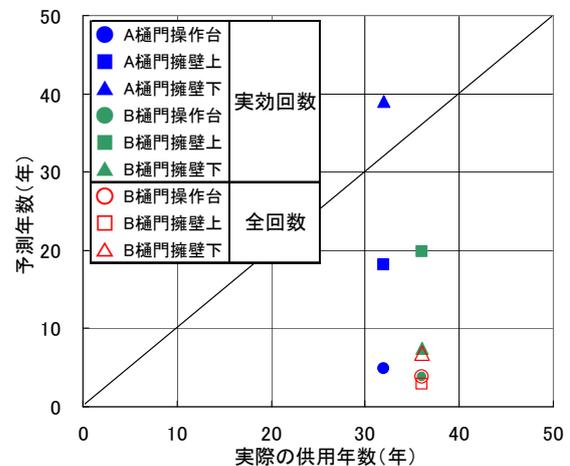


図-5 供用年数と劣化予測による算出年

表-3 ASTM相当サイクルの算出結果

樋門名	調査部位	(a) Ra_{90} (回)	(b)ASTM相当 サイクル(回/年)		(c)ASTM相当による 予測年数(年)		(d) Ed	(e)予測 年数 (年)	(f)凍結 融解回数 (回)	(g)供用 年数 (年)
			$Ed > 90\%$	$90\% \geq Ed$	$Ed = 90\%$	$Ed = 60\%$				
A樋門 (実回数)	操作台	31.7	0.93	5.38	3.6	5.5	72%	4.8	9.6	32
	壁上部	4.5	0.13	0.75	25.9	39.7	93%	18.2	2.4	
	壁下部	3.6	0.10	0.61	31.7	48.5	77%	39.0	7.9	
B樋門 (実回数)	操作台	36.3	1.06	6.16	3.1	4.8	79%	3.8	7.2	36
	壁上部	3.5	0.10	0.59	32.9	50.3	94%	19.8	2.0	
	壁下部	14.0	0.41	2.37	8.2	12.6	91%	7.4	3.1	
B樋門 (全回数)	操作台	36.5	1.07	6.18	3.1	4.8	79%	3.8	7.2	36
	壁上部	23.8	0.70	4.04	4.9	7.4	94%	2.9	2.0	
	壁下部	15.0	0.44	2.55	7.7	11.8	91%	6.9	3.1	

(以下、「全回数」という。)と凍結時の湿度が90%以下の凍結融解を除いた実効回数を用いて劣化予測の検討を行うこととした。ただし、A樋門は全ての部位において湿度90%以上であったため、全回数と実効回数は一致する。

ASTM相当サイクルの算出結果を表-3に示す。なお、各項目の算出方法等は以下のとおりである。

- (a) コンクリート温度から算出した ASTM 相当サイクル数
- (b) (a)と式(1)から算出した水分条件等を考慮した ASTM 相当サイクル数
- (c) (b)と室内試験結果から算出した相対動弾性係数が90%および60%になる予測年数
- (d) 超音波伝播速度から算出した相対動弾性係数
- (e) (c)と(d)から算出した予測年数
- (f) (b),(c), (e)から算出した凍結融解回数
- (g) 実構造物の供用年数

(4) 実構造物データと予測結果の比較と考察

(3)で求めた相対動弾性係数に達する年数と実際の供用年数の関係をグラフ化したものを図-5に示す。また、実構造物データと予測結果の比較と考察について以下に示す。

1) 全凍結融解回数と実効凍結融解回数

まず、B樋門の全回数と実効回数の結果を比較すると、表-3の Ra_{90} の差が少ない操作台と擁壁下部はほとんど変わらないが、 Ra_{90} に差がある擁壁上部は湿度を考慮した実効回数とすることで相関がよくなった。このことから、劣化予測に用いる凍結融解回数については、部位毎に湿度などの構造物の水分条件を考慮することが重要であることが分かった。

2) 室内試験と実構造物の凍結融解による損傷

次にA、B樋門の実効回数の結果に着目すると、A樋門の擁壁下部を除いた全ての部位で予測年数が供用年数を下回っている。さらに、その結果は比較的相関がよいグループとよくないグループに大別できる。相関がよいグループはA、B樋門の擁壁上部であり、表-3(f)の凍結融解回数が比較的少ないものである。一方、相関がよくないグループはA、B樋門の操作台とB樋門の擁壁下部であり、凍結融解回数が比較的多いものである。

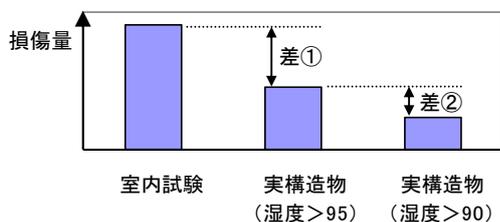


図-6 凍結融解による損傷量 (概念図)

この理由として、ASTM相当サイクルによる劣化予測手法はASTM C 666による室内促進試験結果をベースに各係数が決定されているが、この試験は、実際の気象条件と比較して、冷却速度が急速すぎるため、水圧が急激に増大することが指摘されている¹⁴⁾。したがって、室内促進試験と実構造物では、最低温度が同じ1回の凍結融解作用でも、図-6のように受ける損傷量(相対動弾性係数の低下量など)が異なる可能性がある。

また、凍害劣化は力学的疲労と同様に損傷が累積するとされており¹⁵⁾、1回の凍結融解作用で受ける損傷量が異なるとすれば、凍結融解回数が増えるほど、差も蓄積され、室内試験を基にした予測の損傷量と実構造物の損傷量とに開きが生じてくる。したがって、図-7に示すように、例えば、凍結融解回数の多いA樋門の操作台の方が凍結融解回数の少ないA樋門の擁壁上部よりも予測と実際の損傷量の差が大きくなるため、相関が悪くなったものと考えられるが、今後更なる検討が必要である。

3) 凍害劣化進行に伴う劣化速度の変化

表-3および図-5に示すとおり、相対動弾性係数が90%を下回るA、B樋門の操作台は最も相関がよくない。この理由として、以下のことが考えられる。

室内促進試験では相対動弾性係数の低下が加速する傾向がある。このことを踏まえ、ASTM相当サイクルでは、相対動弾性係数90%を境として劣化過程係数Pを変えており、相対動弾性係数90%を超えると劣化速度が速くなる。しかし、公表されている暴露供試体の相対動弾性係数の変化を見ると(例えば2)、3)、さほど加速はしていない。これは前述の2)とも関連するが、室内促進試験では供試体を水中に浸漬させるため、凍害劣化によって生じたひび割れに水が入り込み、劣化速度を加速させる¹⁶⁾。しかし、実構造物では、部位によっては室内促進試験ほどの水分の供給がないため、暴露供試体と同様に劣化速度はさほど加速せず、相対動弾性係数90%を下回ると予測と実構造物の劣化の差がより拡大すると考えられる。

4) 湿度の差による損傷量の差

図-5のA、B樋門の操作台について見ると、B樋門

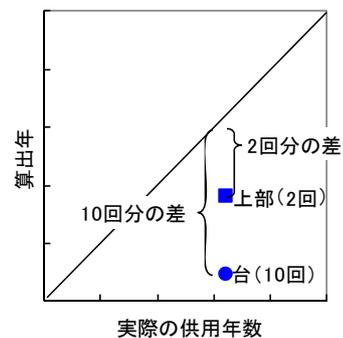


図-7 凍結融解回数の違いによる実供用年数と予測年数の相関の差 (概念図)

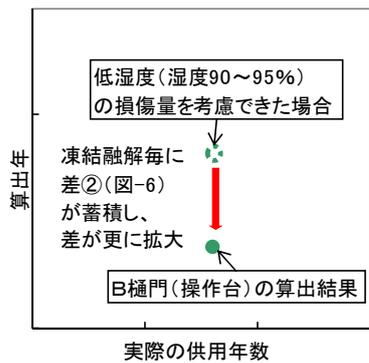


図-8 湿度の差による相関の差 (概念図)

の方がA樋門よりも相関が若干悪くなっている。これは、湿度の差に起因している可能性があると考えられる。すなわち、今回の検討では湿度90%以上を有効な凍結融解回数として、一律にカウントしたが、実際にはA樋門の湿度は95%以上、B樋門の湿度は90~95%と湿度に差がある。これは、凍結水量にも差がある可能性を示しており、最低温度が同じ1回の凍結融解作用でも、図-6のように受ける損傷量が異なる可能性があるということである。1回の凍結融解作用で受ける損傷量が異なるとすれば、凍結融解回数が増えるほど、差が蓄積され、図-8のように相関が悪くなるのは2)と同様である。

以上のようなことから、ASTM相当サイクルを実構造物の劣化予測として用いる場合、環境条件や部位条件に応じて、実環境における水分の影響等を考慮するための補正などが必要となる可能性がある。今後は、さらにコンクリート構造物の温湿度等のデータ収集を行い、水分の影響等を考慮するための補正などの方法について検討していく。

4. まとめ

- (1) 実構造物のコンクリート中の温湿度は積雪等の環境条件や部位によって異なる。
- (2) コンクリート構造物の劣化予測に用いる凍結融解回数については、コンクリート温度だけでなく、コンクリート内部の湿度などの構造物の水分条件を考慮する必要がある。
- (3) ASTM相当サイクルを実構造物の劣化予測として用いる場合、室内促進試験と実構造物の水分供給条件の違いなどに起因し、凍結融解による損傷量の差や劣化速度に差がある可能性がある。
- (4) コンクリート内部の湿度が90%以上の範囲でも、コンクリート内部の湿度の差により構造物が受ける損傷量が異なる可能性がある。

参考文献

- 1) コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する

る研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.49，2008

- 2) 浜幸雄ほか：気温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
- 3) 石井清ほか：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
- 4) 三橋博三ほか：コンクリートの凍害劣化確率モデルに関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.450，pp.1-6，1993.8
- 5) 成田健ほか：凍害劣化確率モデルの構成要素に及ぼす影響因子の考察，日本建築学会構造系論文集，No.455，pp.1-6，1994.1
- 6) 山下英俊ほか：凍結融解を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.1021-1026，1992.6
- 7) 気象庁ホームページ
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/atlas/snow/snow_13.pdf
- 8) 林田宏ほか：コンクリート構造物の凍害に関する環境要因と劣化予測の適用性に関する検討，コンクリート工学年次論文集 Vol.30，No.1，pp.909-914，2008.7
- 9) 緒方英彦ほか：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，日本コンクリート工学協会，pp.63-70，2006.12
- 10) コンクリート技術の要点'99，pp.155，日本コンクリート工学協会，1999
- 11) 施工によるコンクリートの品質のばらつき調査報告書，建設省土木研究所地質科学部コンクリート研究室，1971.1
- 12) Bager.D.H.,Sellevoid.E.J.: Ice Formation in Hardened Cement Paste, Part1-Room Temperature Cured Pastes with Variable Moisture Contents, CEMENT and CONCRETE RESERCH, Vol.16, PP.709-720, 1986
- 13) 長谷川拓哉ほか：札幌市に屋外暴露したコンクリート内部の温湿度変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.907-911，2009
- 14) 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，日本コンクリート工学協会，pp.184，2008
- 15) 山下英俊：コンクリート構造物の凍害の劣化評価と予測に関する研究，北海道大学学位論文，1999
- 16) 桂修ほか：コンクリートの凍害劣化度評価と予測法に関する研究，コンクリートの試験方法に関するシンポジウム，日本建築学会，pp.2-11-2-16，2003.11