論文 凍害劣化予測における水分条件補正に関する検討

林田 宏*1·濱 幸雄*2·遠藤 裕丈*3

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用いて、 ASTM 相当サイクルによる劣化予測を行い、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 中の温湿度は部位条件や積雪等の環境条件で異なることが分かった。また、室内促進試験と実構造物の水分 条件の違いなどのため、凍結融解による損傷量等に差があり、予測の劣化速度が実際よりも速いことが分か った。この劣化速度の差を補正するため、部位毎の水分条件補正係数を示した。 キーワード: 凍害、コンクリート構造物、相対湿度、劣化予測、水分条件

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。しかし,既存の凍害劣化予測手法^{例え} ^(1),2)では,パラメータとして十分考慮されていない。

著者らは前報³⁾で小型温湿度センサーを用いて把握し たコンクリート構造物の部位毎の温湿度データを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。その結果,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 差などがある可能性が考えられた。

本検討では追加収集した温湿度データを用いて,前報 ³⁾で立てた仮説について検証を行うとともに,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する 凍結融解に伴う損傷量の差による劣化予測のずれを補 正する方法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は凍害危険度⁴⁾と年最深積雪(1971~2000年の 平年値)⁵⁾を示しており,対象構造物は凍害危険度と年 最深積雪の大小を考慮し,道内7地域の河川樋門とした。 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」,水分 供給が雨がかりのみとなるような一般的な垂直部位と して「擁壁」を選定した。なお,擁壁は日射の影響を受 けやすい南面を選定したが,一部の地域の擁壁について は南向きでないなどの理由で調査を行っていない。

(2) 調査方法

温湿度センサーは、シートで防水・透湿処理を行い、

表面から深さ約 1cm の位置に埋設した。測定は 2009 年 11 月から 2010 年 4 月まで行った。

2.2 調査結果

-1℃で凍結,0℃で融解する¹⁾と仮定し,センサーから 得られたコンクリート温度と相対湿度(以下,「湿度」 という。)のデータを用いて,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-2,3 に示す。



図一1 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 研究員 (正会員)

(1) コンクリート温度および凍結融解回数

まず、図-2に示す操作台の最低温度について見ると、 地域によっては-25℃に達する場合があるのに対し、図-3に示す擁壁についてはほとんどの地域で最低温度は 概ね-10℃以上である。

次に、図-2、3の凡例中のNとして示している各地 域の凍結融解回数について見ると、全ての地域で擁壁の 回数が操作台の回数より少なくなっている。表-1は擁 壁と操作台の凍結融解回数の比を示したものであり、雪 庇の影響を受け、16%と値が極端に少ない「美深」を除 くと、その割合は30~70%程度である。これは擁壁の凍 結融解回数は11月頃の初冬期と3~4月頃の融雪期の比 較的温度の高くなってきた時に擁壁のコンクリート温 度は 0℃以上であることが多くなり、凍結融解回数が少 なくなるためである。

(2) コンクリート湿度

まず、図-2に示す操作台の湿度について見ると、ほ とんどの地域で概ね95%以上であり、比較的高湿度の状 態である。それに対し、図-3に示す擁壁については操 作台に比べてばらつきが大きく、湿度が95%を下回る凍 結融解が多い地域もいくつかある。冬季の湿度は積雪か らの融雪水に大きく影響を受けると考えられるため、 2009 年度の最深積雪と全ての凍結融解の凍結開始時の 湿度の平均(以下、「平均湿度」という。)との比較を行 った結果を図-4に示す。平均湿度は「標茶」が操作台、 擁壁ともに約100%で同程度となっている以外は、全て の地域で操作台の平均湿度が擁壁の平均湿度を上回っ ている。また、最深積雪との関係を見ると、「鵡川」と 「標茶」を除くと、ばらつきはあるものの、最深積雪が 大きくなるほど、平均湿度は高くなる傾向にある。

以上のように,最低温度,湿度,凍結融解回数のいず れの観点からも擁壁に比べて,操作台が凍害環境として 厳しい環境にさらされている。

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,前報³⁾と同様に「ASTM 相当 サイクル」¹⁾を用いた。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。

$Cy_{ASTM}.sp = C \times F \times Rsp$

 $= C \times F \times$

$$s \times p \times Ra_{90}$$
 (1)

ここに、*Cy_{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, $Rsp: \Sigma(-ts/18)^{\beta}$, $ts: 凍結最低温度 (℃), \beta: 定数, s: 日照条件に関する係数, p: 劣化過程係数, <math>Ra_{90}$: 気温による ASTM 相当サイクル数

今回の検討では Ra_{90} は温湿度センサーによる深さ約 lcm 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(相対動 弾性係数(以下「Ed」)>90%) と 0.45($90\% \ge Ed$)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 況でないと判断し、「気中凍結水中融解」の値である 0.21 (Ed>90%) と 0.23($90\% \ge Ed$)を用いた。





-					
鵡川	千歳	標茶	帯広	江別	美深
74%	32%	50%	53%	62%	16%



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,外観目視調査はASTM C 672 の室内試験におけ る目視判定法に準じ,**表-2**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(ϕ =10cm, L=10cm)を採取し,直径方向の超音波 伝播速度測定を行った。なお,測定深さは前報³⁾と同様 にコア表面から深さ 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, 既報⁶⁾と同様に,式(2)および式(3)⁷⁾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。)。

$$E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \tag{2}$$

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

(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-3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⁸⁾。V_Lについては、「千歳」の擁壁を除き、 すべての箇所で 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、V₀については、超音波伝播速度の精度 が±5%とされている⁹ことを考慮すると、ほとんどのデ ータが概ね 4000m/s 以上であるが、「千歳」、「標茶」、「江 別」の操作台のデータが約 3600m/s と低い値となってい る。これは、コンクリート打設の高さがある場合、上部 と下部でブリーディング等により生じる品質差¹⁰に起 因していると考えられる。また、これらの外観評点は小 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 V₀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,操作台が概ね70 ~80%程度,擁壁が80~90%程度であり,総じて凍害環 境として厳しい環境にさらされている操作台の相対動 弾性係数の方が低くなっていた。

3.3 実構造物と劣化予測の比較

(1) 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既報^のの構造物と同じ、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既報^の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 3.4 サイクルおよび 13.8 サイクルであった。

(2) ASTM 相当サイクルの算出

Barger ら¹¹⁾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¹²⁾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,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。

ASTM 相当サイクルの算出結果を表-4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

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

表-2 凍害劣化の外観評点

表-3 凍害劣化調査結果

部位	地域	供用 年数	V_L (m/s)	V₀ (m∕s)	Ed	外観 評点
	鵡川	36 年	3571	4009	79%	3
	千歳	27 年	3236	3560	81%	2
操 作 台	標茶	22 年	3226	3650	78%	2
	帯広	37 年	3663	4049	82%	2
	江別	27 年	3215	3636	78%	2
	美深	32 年	3611	4241	72%	3
	北見	21 年	3584	4027	79%	4
	鵡川	22 年	3527	3923	81%	2
	千歳	39 年	4203	4445	89%	2
擁	標茶	22 年	3712	3970	87%	2
堂	帯広	21 年	3862	4121	88%	1
	江別	22 年	3788	3929	93%	2

- (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6 0%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
- (b) (c)から算出した ASTM 相当サイクルの1年当たりの相対動弾性係数の低下量(以下「*AEd* ASTM」)
- (i) (d)と(g)から算出した実構造物の1年当たりの相
 対動弾性係数の低下量(以下「*AEd Act*」)

(3) 実構造物データと予測結果の比較と考察

(2)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) 室内試験と実環境の凍結融解による損傷量の差

全てのデータの予測年数が供用年数を下回っており, 特に,操作台のデータは予測年数が供用年数を大きく下 回っている。これは ASTM 相当サイクルを用いた予測で は劣化速度が実際の劣化速度よりも速いということを 示している。

図-6は供用期間中の ASTM 相当サイクル数(以下, 「全サイクル数」という。)と予測年数と供用年数の差 の関係を示したものである。なお,全サイクル数は気温 による1年間の ASTM 相当サイクル数である Ra₉₀に供 用年数を乗じて算出した。操作台と擁壁の回帰直線の傾 きは ASTM 相当サイクル1回当たりの予測年数と供用年 数との差,すなわち,室内試験と実環境における損傷量 の差を示している。損傷量に差が生じている理由として, 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



図-6 全サイクル数と予測と供用年数の差

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¹³⁾ことが指摘されており、このことなどに起因していると考えられる。

2) 部位毎の凍結融解による損傷量の差

また,図-6に示すように操作台と擁壁の回帰直線の 傾きが異なっている。これは,前述したように操作台と 擁壁との湿度の差に起因し,図-6の下の損傷量の概念

部	地域	(a) (b) Ra ₉₀ ASTM 相当 (回) 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	(f) 凍結 融解	(f) (g) 凍結 供用 融解 年数	(h) <i>ΔEd _{ASTM}</i> (%/年)		(i) ⊿Ed _{ACT} (%/年)	最深 積雪 (cm)	
1⊻.			Ed>90%	90%≧ <i>Ed</i>	Ed=90%	Ed=60%		(年)	回数 (回)	(年)	Ed>90%	90%≧ <i>Ed</i>		
操作台	鵡川	42.8	1.26	7.27	2.70	4.13	79%	3.2	7.2	36年	3.70	20.96	0.58	28
	千歳	42.7	1.26	7.25	2.71	4.14	81%	3.1	6.5	27 年	3.70	20.93	0.70	46
	標茶	71.9	2.11	12.20	1.61	2.46	78%	1.9	7.6	22 年	6.22	35.20	1.00	59
	帯広	58.7	1.73	9.97	1.97	3.01	82%	2.2	6.2	37年	5.08	28.75	0.49	72
	江別	42.5	1.25	7.22	2.72	4.16	78%	3.3	7.6	27 年	3.68	20.83	0.81	79
	美深	23.9	0.70	4.06	4.83	7.39	72%	6.4	9.6	32 年	2.07	11.72	0.88	141
	北見	63.7	1.87	10.82	1.81	2.78	79%	2.2	7.2	21 年	5.51	31.21	1.00	55
擁壁	鵡川	22.5	0.66	3.83	5.13	7.85	81%	5.9	6.5	22 年	1.95	11.04	0.86	28
	千歳	5.8	0.17	0.98	20.08	30.73	89%	20.4	3.7	39年	0.50	2.82	0.28	46
	標茶	16.5	0.48	2.79	7.03	10.75	87%	7.4	4.4	22 年	1.42	8.06	0.59	59
	帯広	13.4	0.39	2.27	8.65	13.23	88%	9.0	4.1	21 年	1.16	6.55	0.57	72
	江別	12.5	0.37	2.12	9.26	14.17	93%	6.5	2.4	22 年	1.08	6.11	0.32	79

表-4 ASTM 相当サイクルの算出結果

図のように室内試験とそれぞれの部位の実環境におけ る損傷量が異なるためであると考えられる。すなわち, 比較的高湿度の操作台は室内試験との損傷量の差が小 さく回帰直線の傾きが小さくなるが,比較的低湿度の擁 壁は室内試験との損傷量の差が大きく回帰直線の傾き が大きくなっているものと考えられる。

3)損傷量の差の蓄積

さらに、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¹⁴⁾,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-6に示 すように、操作台については室内試験との損傷量の差は 擁壁に比べて小さいものの、1年当たりの凍結融解回数 が多いことなどにより全サイクル数が擁壁に比べて多 いため、損傷量の差の全蓄積量である予測年数と供用年 数との差は擁壁よりも操作台の方が大きくなっている と考えられる。そのため、図-5に示すように、操作台 のデータは予測年数が供用年数を大きく下回る結果に なったものと考えられる。

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 補正などが必要と考えられる。次項では,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を行う。

3.4 水分の影響等の補正方法に関する検討

前述のように、ASTM 相当サイクルを用いた場合の劣 化予測と実構造物の劣化の差は、水分条件の違いによる 損傷量の差に起因すると考えられるため、式(4)のように 水分条件補正係数(以下、「補正係数」という。)を仮定 し、操作台と擁壁の補正係数について検討を行う。なお、 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¹⁵⁾が、暴露供試体^(例えば 1), 2)ではさほど加速 していないことを考慮し、ΔEd_{ACT} は供用期間を通じて 一定であると仮定した。

$$\Delta Ed_{ACT} = \alpha \times \Delta Ed_{ASTM} \tag{4}$$

ここに、 ΔEd_{ACT} :実構造物の1年当たりの相対動弾 性係数の低下量、 ΔEd_{ASTM} :ASTM相当サイクルで算出 された1年当たりの相対動弾性係数の低下量、 α :水分 条件補正係数

(1) 擁壁の水分条件補正係数の検討

表-4に示す ΔEd_{ACT} と ΔEd_{ASTM} のデータから回帰 分析により補正係数を求める。なお、 ΔEd_{ASTM} は相対動 弾性係数 90%を境として異なるため、それぞれについて 補正係数を求める。回帰分析の結果を図-7に示す。こ



図-9 最深積雪とΔEd_{ACT} ∕ΔEd_{ASTM}

の結果から,相対動弾性係数が 90%より大きい場合, ASTM 相当サイクルの約 43%程度(*a* = 0.425),相対動 弾性係数が 90%以下の場合,ASTM 相当サイクルの約 8%程度(*a* = 0.075)となった。

(2) 操作台の水分条件補正係数の検討

擁壁の場合と同様に表-4のデータを用いて回帰分 析を行った(図-8)。その結果、データのばらつきが 大きく、相関係数が小さい結果となった。この原因とし て、以下のようなことが考えられる。

操作台は水平部材であり、その上に堆積した雪からの 融雪に伴う水分供給の影響を大きく受けている可能性 があり、操作台の補正係数を適切に設定するためには、 水分供給を表すパラメータの導入が必要であると考え られる。水分供給を表すパラメータとしてコンクリート 中の湿度を用いることが考えられるが、凍害劣化予測の 実用性等を考慮すると、公表されている気象データなど を用いることが望ましい。一方、凍害危険度⁴⁰の算出で は積雪量が水分条件として用いられており、凍害危険度 と実構造物の劣化にはよい相関があることが、多くの論 文等^{例えば16)}で報告されている。以上のことから、今回の 検討では、前述したようにばらつきはあるもののコンク リート中の湿度とある程度の相関がある最深積雪を式 (5)のようにパラメータとして用いることとした。

$$\Delta Ed_{ACT} / \Delta Ed_{ASTM} = \alpha = f(H)$$
 (5)
ここに, H: 2009 年度の最深積雪

回帰分析の結果を図-9に示す。この結果から,操作 台の補正係数は図-9に示す回帰式のようになり,相対 動弾性係数が90%より大きい場合,ASTM相当サイクル の約16~42%程度となり,相対動弾性係数が90%以下の 場合, ASTM相当サイクルの約3~7%程度となった。

(3) 各部位の水分条件補正係数に関する考察

擁壁の補正係数が積雪深によらず一定の値となった のに対し,操作台の補正係数は積雪深に依存する形となった。これは擁壁の水分供給が基本的に雨がかりのみと なるような鉛直部材であり,積雪の影響よりも最低温度 や凍結融解回数の方が大きな影響を与えているのに対 し,操作台は水平部材であり,その上に堆積した雪から の融雪に伴う水分供給が多い部位であるため,積雪の影 響を大きく受けているためであると考えられる。

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。特に、湿度について は水平部材である操作台の方が、鉛直部材である擁 壁に比べ高湿度の状態となっていた。また、湿度は ばらつきはあるものの積雪深との相関が見られた。
- (2) 水分供給条件の違いなどに起因し、室内促進試験と 実構造物とで凍結融解による損傷量に差があり、 ASTM相当サイクルの劣化速度が実際の劣化速度よ りも速い。
- (3) 上記の劣化速度の差を補正するため部位毎の水分 条件補正係数を示した。補正係数は操作台と擁壁と でその形が異なる形となった。これは、操作台は水 平部材であるため積雪の影響を大きく受けるが、擁 壁は垂直部材であるため、積雪の影響は小さいため と考えられる。

今後の課題として、今回示した補正係数は限られた実 構造物データを基に提案したものであるため、更に実構 造物データを増やすなどして、精度向上を図る必要があ る。また、補正係数の算出に用いた温度や最深積雪はセ ンサーを設置した 2009 年度のデータであるため、平年 値などを用いて、更に検証を行う必要がある。

参考文献

1) 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

- 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
- 林田宏ほか: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,コンクリート工学年次論 文集, Vol.32, No.1, pp.845-850, 2010.7
- 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) 気象庁ホームページ http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/atlas/snow /snow_13.pdf
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- コンクリート構造物の非破壊試験法、(社)日本非 破壊検査協会編,養賢堂, p.130, 1994
- 10) 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
- Bager.D.H.,Sellevold.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
- 12) 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
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き(案),北海道土木技術会コンクリート研究委員会コンクリート維持管理小委員会, pp.2-47,平成 18年3月