

コンクリート構造物の凍害劣化予測手法に関する研究

共同研究報告書

平成23年12月

独立行政法人土木研究所寒地土木研究所
国立大学法人室蘭工業大学

Copyright © (2011) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

コンクリート構造物の凍害劣化予測手法に関する研究

共同研究報告書

独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ耐寒材料チーム

上席研究員 田口 史雄
主任研究員 林田 宏
研究員 遠藤 裕丈

国立大学法人室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域

教授 濱 幸雄

要旨

超音波伝播速度等の劣化度指標と力学特性および拡散係数などの材料物性との関係の検討を行った結果、超音波伝播速度と圧縮強度および拡散係数は高い相関関係にあり、超音波伝播速度を変数にとった式により実構造物、室内促進試験とも共通的な評価が行えることが明らかとなった。また、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。さらに、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結果、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、劣化予測、水分条件、超音波伝播速度、圧縮強度、拡散係数

目次

まえがき

1. 研究目的	1
2. 劣化度指標と材料物性との関係の検討	2
2. 1 検討方法	2
2. 1. 1 検討概要	2
2. 1. 2 室内促進試験概要	2
2. 1. 3 実構造物調査概要	3
2. 2 検討結果	4
2. 2. 1 力学特性の変化に及ぼす凍害の影響の評価	4
2. 2. 2 拡散係数の変化に及ぼす凍害の影響の評価	5
2. 2. 3 総合評価	6
3. 予測手法の検討	7
3. 1 コンクリート構造物の温湿度に関する調査	7
3. 1. 1 調査概要	7
3. 1. 2 調査結果	8
3. 2 劣化予測に関する検討	11
3. 2. 1 劣化予測法の概要	11
3. 2. 2 実構造物の凍害劣化状況	11
3. 2. 3 実構造物と劣化予測の比較	13
3. 2. 4 水分の影響等の補正方法に関する検討	17
4. まとめ	21
参考文献	22

まえがき

我が国では今日までに大量のコンクリート構造物が建設されてきた。今後は、これら膨大な数の構造物の老朽化による維持補修・更新費の増加が予想される。しかし、財政の逼迫および少子高齢化の進行など我が国を取り巻く社会情勢は非常に厳しく、従来のスクラップ・アンド・ビルドによる対応は容易ではない。このため、戦略的な維持管理・補修計画を立案し、構造物をより長く使いこなす必要性が益々高まっている。この社会ニーズに対応するには、構造物の劣化進行を予測するための実用的な予測式の確立・普及が不可欠である。

積雪寒冷地における代表的な劣化の一つに凍害があり、積雪寒冷地のコンクリート構造物は、凍害を受け耐久性に深刻な影響が及んでいる。2007年に改訂されたコンクリート標準示方書〔維持管理編〕では、中性化、塩害、化学的侵食、疲労に関しては実用的な予測式が示されているが、その他の劣化を対象とした予測式については未だ示されていない¹⁾。凍害もその一つであり、寒冷環境下に曝されているコンクリート構造物の機能保持、長寿命化を図るため、凍害についても実用的な予測式を開発する必要がある。

本研究報告書は、以上のようなことを背景として行った凍害を受けたコンクリートの劣化予測手法等について検討を行った結果をとりまとめたものである。

1. 研究目的

(1) 目的

凍害劣化予測手法については、いくつかの手法が提案されている^(例えば2)~6)。しかし、凍害劣化にとって温度条件と並び重要なパラメータである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⁷⁾、既存の凍害劣化予測手法では、パラメータとして十分考慮されていない。そこで、本研究ではコンクリート構造物の部位毎の含水状態を把握し、実環境における水分の影響を考慮した実用的な凍害劣化予測手法を開発することを目的として研究を行った。

また、凍害劣化に伴うコンクリート構造物の安全性や耐久性などの性能低下を適切に評価するためには、上記で述べたコンクリートの凍害劣化予測とともに凍害劣化程度と圧縮強度などの力学特性や拡散係数などの材料物性との関係が必要不可欠である。そこで、本研究ではコンクリート構造物の凍害劣化度指標として超音波伝播速度等に着目し、劣化度指標と材料物性との関係の検討を併せて行った。

(2) 研究の実施場所

寒地土木研究所、室蘭工業大学

(3) 研究内容

- ・劣化度指標と材料物性との関係の検討
- ・予測手法の検討

(4) 参加した研究者

機 関 名	所 属 名	氏 名	役 職 名
寒地土木研究所	寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム	田口 史雄	上席研究員
		林田 宏	主任研究員
		遠藤 裕丈	研究員
室蘭工業大学大学院	工学研究科くらし環境系領域	濱 幸雄	教授

(5) 研究の実施期間

平成 19 年 7 月 10 日～平成 22 年 3 月 31 日

2. 劣化度指標と材料物性との関係の検討

2. 1 検討方法

2. 1. 1 検討概要

まず、2 章では、凍害を受けた構造物および室内実験で取得したデータの分析を行い、材料の力学特性および拡散係数の低下に及ぼす凍害の影響について定量的な評価を行ったので、その結果を述べる。

2. 1. 2 室内促進試験概要

(1) コンクリート配合・使用材料

表-2.1.1 にコンクリート配合を示す。配合は、北海道開発局道路橋設計要領⁸⁾ の RC-1 に準じ、水セメント比 55%、単位セメント量 280kg/m³ とした。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は除塩処理を施した苫小牧樽前産の海砂（密度 2.70g/cm³、吸水率 0.89%）、粗骨材は小樽見晴産の碎石（密度 2.68g/cm³、吸水率 1.07%、最大寸法 25mm）を使用した。凍害を促進させる理由から AE 剤は使用していない。

表-2.1.1 コンクリート配合（室内促進試験）

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
55	44	154	280	840	1052

(2) 供試体

図-2.1.1 に供試体を示す。供試体の寸法は JIS A 1148 の規定にあわせて 100×100×400mm とした。材齢 28 日まで水中養生を行った後、実構造物を想定し、極力、水分の供給面を一面に限定するため、打設面以外の五面に厚さ 2mm の合板をはり付けた。

(3) 実験内容

合板はり付け後、JIS A 1148 (A 法) に準拠し、3~4 時間 1 サイクルの急速水中凍結融解試験（最低温度 -18℃、最高温度 5℃）を行った。凍結融解サイクルは 7、14、28、50、100、173、200 サイクルとした。

凍結融解試験終了後、図-2.1.2 に示すように、コンクリートカッターを用いて供試体中央部から 100×100×100mm 寸法の試料を切り出し、40℃で 7 日間の乾燥を与えた後、側面に発・受信子をあてて深さ方向の超音波伝播速度を測定した。なお、乾燥を与えたのは、微細ひび割れに多くの水分が供給・蓄積されていると、見かけの超音波伝播速度は大きく表示されることから、水分量を低減させる目的で行った。また、乾燥温度は、40℃程度であれば組織変化に対する影響が少ないとする堀ら⁹⁾の報告に基づき、40℃とした。

その後、試料を 20mm 間隔でスライスし、各スライス片を用いて ASTM C 457 を準用したひびわれ密度（測線長 1mm あたりのひびわれ本数、図-2.1.3）と JSGE-G 571 に準じた拡散係数の測定を行った。また、深さ 20mm 位置から φ30mm の小径コアを採取し、圧縮強度の測定を行った。

なお、凍結融解を与えたことで顕著に脆弱化した試料の中には、切り出し作業中に崩壊に至ったものもあった。これらの試料については、測定を行っていない。

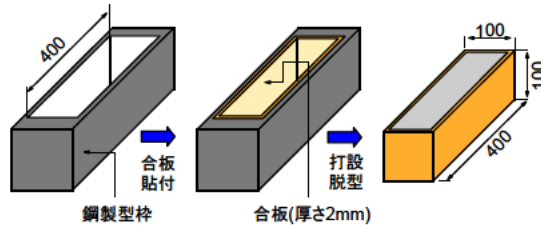


図-2.1.1 供試体

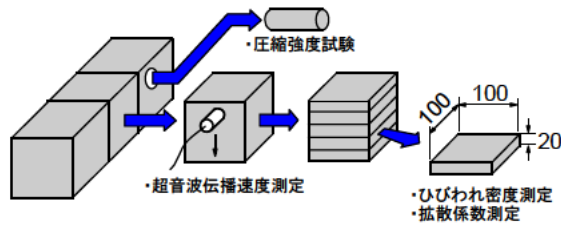


図-2.1.2 測定に用いた試料の部位

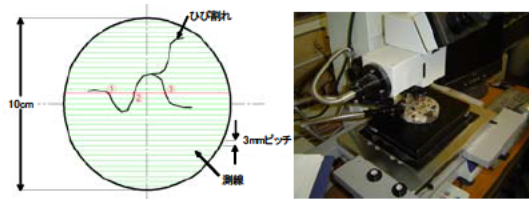


図-2.1.3 ひびわれ密度の測定状況

2. 1. 3 実構造物調査概要

(1) 調査箇所

図-2.1.4 に調査箇所を示す。本研究では、凍害による単独劣化を受けている北海道の道北地方に位置する河川樋門8箇所を調査の対象とした。長谷川らは、全国の気象データを基にコンクリートの凍害の危険性を地域ごとに0～5の6段階で表した凍害危険度マップを提案している¹⁰⁾。この指標は、数値が高いほど凍害が発生する危険性が大きいことを表している。今回選定した箇所は、凍害危険度が4～5の地域に位置している。

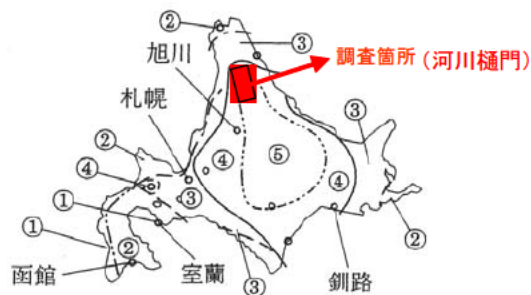


図-2.1.4 調査箇所位置図 (○の数字は凍害危険度)

(2) 調査内容

各構造物からφ100mmのコアを採取し、以下の調査を行った。なお、調査に先立ち、室内試験と同様に透過法によるコアの超音波伝播速度の測定と各スライスのひび割れ密度の測定を行った。

1) 実効拡散係数測定

コアを20mm厚にスライスし、JSGE-G 571に準じた実効拡散係数の測定を行った。

2) 圧縮強度測定

コアを30mm厚にスライスしてから、30×30×60mmの角柱を切り出し、圧縮強度の測定を行った。

2. 2 検討結果

2. 2. 1 力学特性の変化に及ぼす凍害の影響の評価

図-2.2.1に超音波伝播速度と小径コアの圧縮強度との関係を示す。室内促進試験、実構造物ともに、超音波伝播速度が3~4km/sの範囲で、速度の低下に伴って強度が低下する結果が得られた。超音波伝播速度が同じ場合、強度は室内促進試験の方が実構造物に比べて約20MPa高い傾向にあった。

図-2.2.2はひびわれ密度と小径コアの圧縮強度との関係を示している。ひびわれ密度が0~0.04本/mmの範囲においては、ひびわれ密度の増加に伴って強度が低下する関係が示された。室内促進試験と実構造物のデータを比較すると、ひびわれ密度が同じ場合は実構造物の方が強度は小さい結果が示された。これは、超音波伝播速度と同じ傾向であった。粗骨材の最大径は室内が25mmに対し、実構造物は40mmと大きく、骨材径の差異が強度に影響した¹⁾ことが理由の一つに考えられる。

また、ひびわれ密度の増加に従い、室内促進試験と実構造物の強度差が小さくなる傾向もあわせて確認された。ひびわれ密度が0.04本/mmを上回ると、コンクリートの力学特性が大きく失われ、骨材径の差異による有意差はなくなることがわかった。

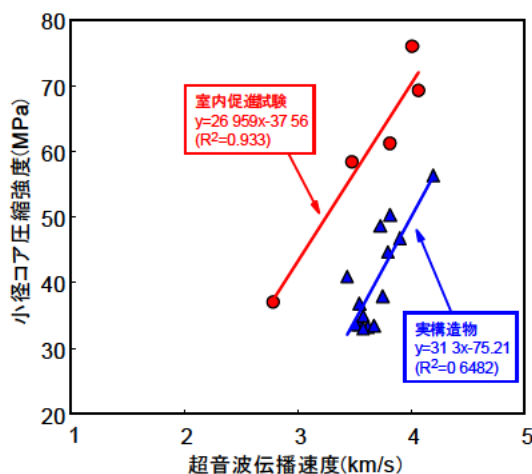


図-2.2.1 超音波伝播速度と小径コア圧縮強度

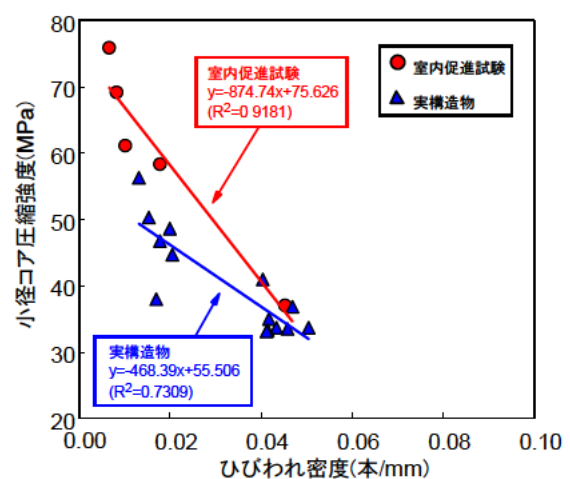


図-2.2.2 ひびわれ密度と小径コア圧縮強度の関係

2. 2. 2 拡散係数の変化に及ぼす凍害の影響の評価

図-2.2.3 に超音波伝播速度と塩化物イオン実効拡散係数との関係を示す。室内促進試験の173サイクルのデータを除くと、室内促進試験、実構造物ともに、超音波伝播速度の低下に伴い、拡散係数は大きくなる傾向が示された。100、200 サイクルの供試体は一部が崩壊する程大きく脆弱化した、その中間の173サイクルの供試体はコンクリートカッターで難なくスライスが行える程の硬質状態にあった。超音波は2km/s以下まで低下しており、組織は相応の損傷を受けていると察せられるが、試料が硬質性を保持した理由は明らかにできなかった。

ここで、図-2.2.1 と図-2.2.3 の結果を比較する。超音波伝播速度が3~4km/s の区間においては、強度は室内の方が大きかったが、拡散係数は室内の方が $5.6 \times 10^{-8} \sim 5.9 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 大きい傾向にあった。強度が高いほど組織は緻密であるため、それによって拡散係数も小さくなるように思われるが、今回の結果はこれに矛盾している。写真-2.2.1 と写真-2.2.2 は、各々の試料の断面を示している。実構造物の方が、塩化物イオンの通り道にあたる硬化セメントペーストの割合が少ないことが視覚的に把握できる。これは、実構造物は室内に比べて骨材径が大きい、骨材の表面積が相対的に小さくなり、結果的に断面全体に占める粗骨材の割合が大きくなったものと考えられる。この状態は図-2.2.3 の結果と良く一致しており、骨材径の差異が結果に影響したことが一つに考察される。

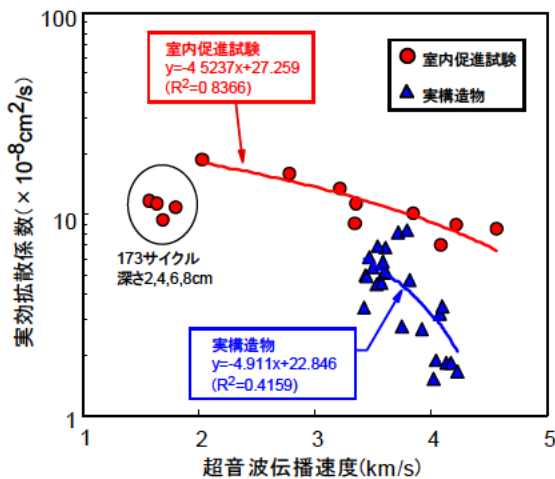


図-2.2.3 超音波伝播速度と実効拡散係数の関係

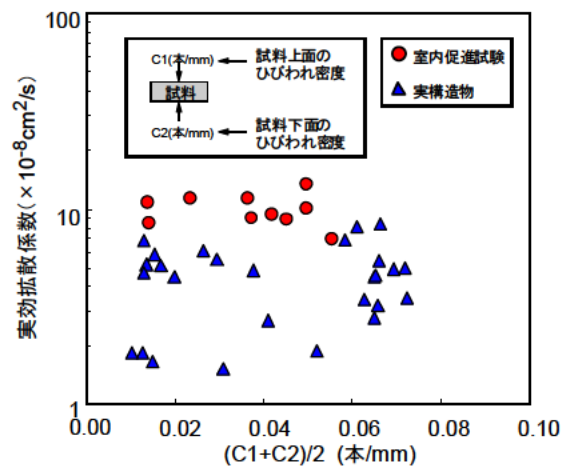


図-2.2.4 ひびわれ密度と実効拡散係数の関係

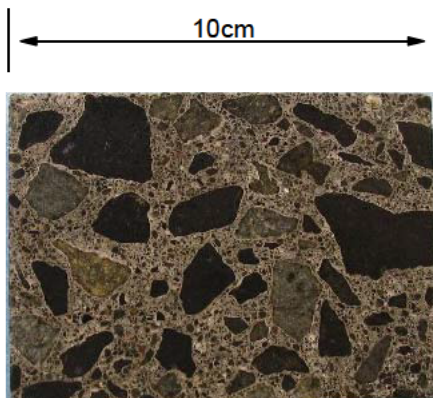


写真-2.2.1 試料断面 (室内促進試験供試体)

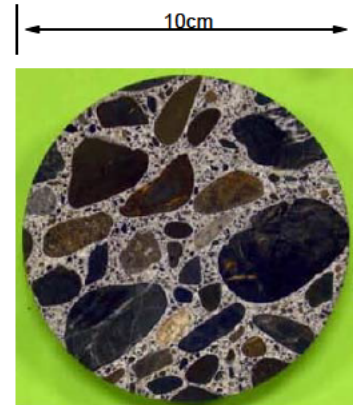


写真-2.2.2 試料断面 (実構造物採取コア)

図-2.2.4 にひびわれ密度と塩化物イオン実効拡散係数の関係を示す。ここでは、試料の上面と下面のひびわれ密度の平均を X 軸にとって結果を整理している。全体的にみると、ひびわれ密度が同一の場合は、室内促進試験の方が拡散係数は大きい関係が概ね認められるが、拡散係数に及ぼすひびわれ密度の影響については室内促進試験、実構造物ともばらつきが大きく、明確な相関は把握できなかった。

2. 2. 3 総合評価

凍害劣化度指標である超音波伝播速度と圧縮強度および拡散係数は高い相関関係にあった。ひびわれ密度は、圧縮強度と高い相関関係にあったが、拡散係数との相関関係は低かった。既往の研究でひびわれ密度と超音波伝播速度の相関は、材齢が長いコンクリートにおいてばらつきが大きい¹²⁾ことが確認されており、今後ひびわれの本数のみならず、ひびわれの形態（幅、長さ、深さ等）もあわせて評価していく必要がある。

3. 予測手法の検討

検討は以下の手順で行った。

- ①コンクリート構造物の部位別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調査を行った。併せて、超音波伝播速度を用いて凍害劣化程度（相対動弾性係数）に関する調査を行った。
- ②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）の関係を求めた。この関係を用いて①の構造物の相対動弾性係数に達する予測年数を求めた。
- ③②で求めた予測年数と構造物の供用年数を比較し、実環境における水分の影響を考慮するための水分条件補正係数の検討を行った。

3. 1 コンクリート構造物の温湿度に関する調査

3. 1. 1 調査概要

(1)対象構造物、部位

図-3.1.1 は凍害危険度¹⁰⁾と年最深積雪（1971～2000年の平年値）¹³⁾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-3.1.1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。

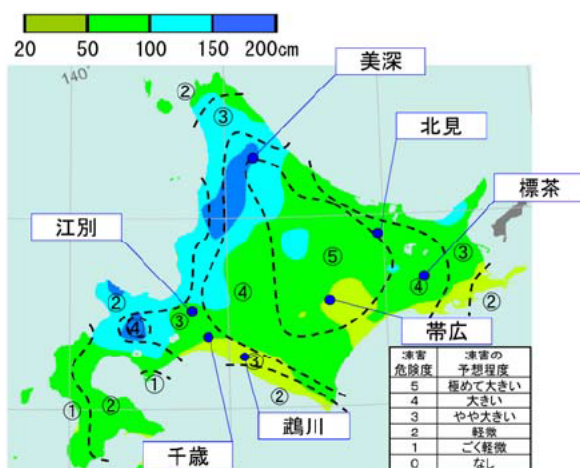


図-3.1.1 調査箇所



写真-3.1.1 調査部位

(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 1 cm 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。設置状況を写真-3.1.2 に示す。測定は冬期のコンクリートの温湿度を把握するため、2009 年 11 月から 2010 年 3 月まで行った。



写真-3.1.2 温湿度センサーの設置状況

3. 1. 2 調査結果

-1°Cで凍結、0°Cで融解する²⁾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-3.1.2、図-3.1.3 に示す

(1) コンクリート温度および凍結融解回数

まず、図-3.1.2 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°Cに達する場合があるのに対し、図-3.1.3 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°C以上である。

次に、図-3.1.2、図-3.1.3 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。図-3.1.4 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気温の高くなってきた時に擁壁のコンクリート温度は0°C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-3.1.2 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-3.1.3 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-3.1.5 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、「鶴川」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。

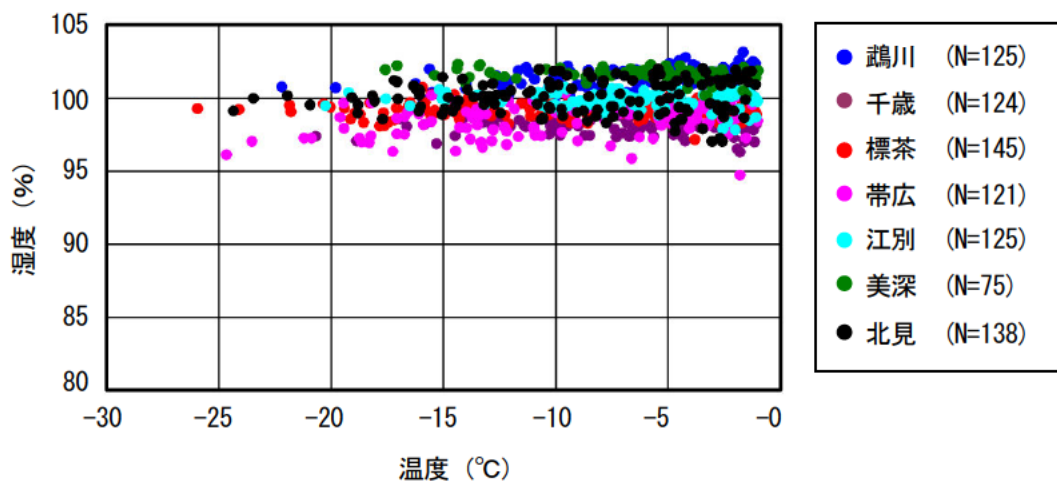


図-3.1.2 凍結融解時の最低温度と湿度（操作台）

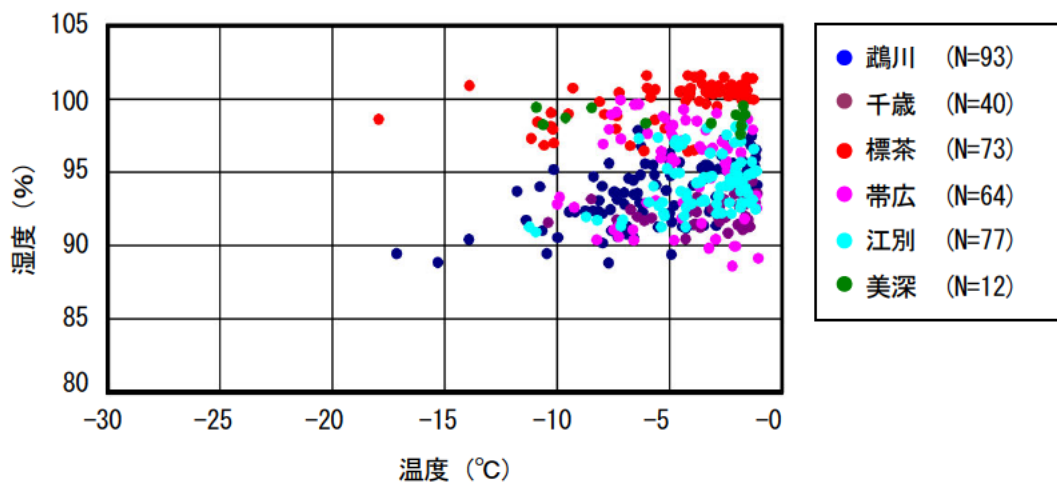


図-3.1.3 凍結融解時の最低温度と湿度（擁壁）

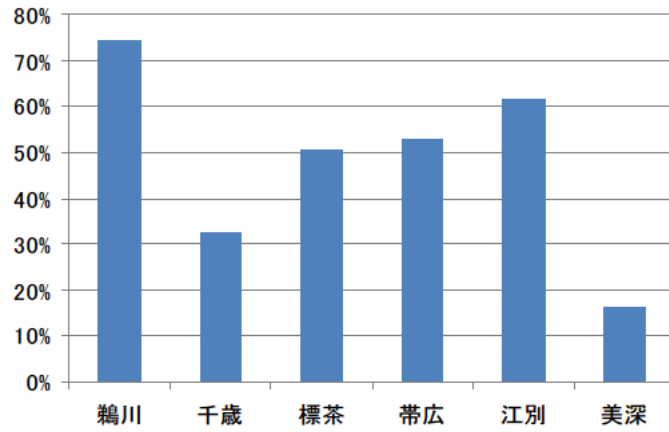


図-3.1.4 擁壁と操作台の凍結融解回数之比

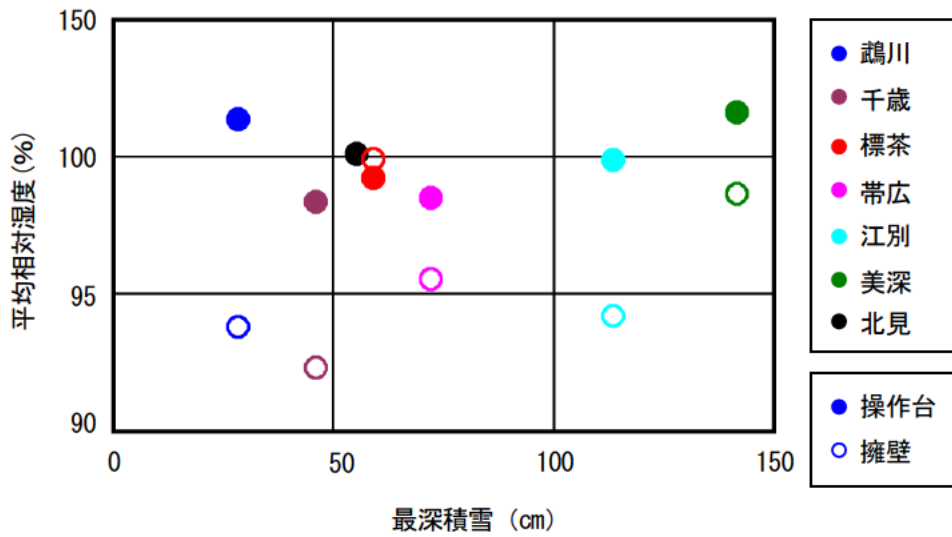


図-3.1.5 最深積雪と平均湿度

3. 2 劣化予測に関する検討

3. 2. 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。「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°C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。

$$Cy_{ASTM-SP} = C \times F \times R_{sp}$$

$$= C \times F \times s \times p \times Ra_{90} \quad \text{式(1)}$$

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、 R_{sp} : $\Sigma(-ts/18)^\beta$ 、 ts : 凍結最低温度 (°C)、 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

今回の検討では 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°C乾燥」の値である 0.14 (相対動弾性係数 (以下「 Ed 」) $>90\%$) と 0.45 ($90\% \geq Ed$) を、凍結係数 F は写真-3.1.2 に示すように操作台端部では滞水は生じず、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 ($90\% \geq Ed$) を用いた。

3. 2. 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-3.2.1 によって行った。

表-3.2.1 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

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、式(2)および式(3)¹⁴)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_{d0} 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。）。

$$E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \quad \text{式(2)}$$

$$\text{相対動弾性係数 (\%)} = \frac{E_{d0}}{E_{d0}} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

ここに、 E_{d0} ：供用中のコンクリート構造物における動弾性係数（GPa）、 E_d ：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-3.2.2に示す。

表-3.2.2 凍害劣化調査結果

部位	地域	供用年数	V_L (m/s)	V_0 (m/s)	E_d	外観 評点
操作台	鶴川	36	3571	4009	79%	3
	千歳	27	3236	3560	81%	2
	標茶	22	3226	3650	78%	2
	帯広	37	3663	4049	82%	2
	江別	27	3215	3636	78%	2
	美深	32	3611	4241	72%	3
	北見	21	3584	4027	79%	4
擁壁	鶴川	22	3527	3923	81%	2
	千歳	39	4203	4445	89%	2
	標茶	22	3712	3970	87%	2
	帯広	21	3862	4121	88%	1
	江別	22	3788	3929	93%	2

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¹⁵⁾。 V_L については、「千歳」の擁壁を除き、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、超音波伝播速度の精度が±5%とされている¹⁶⁾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¹⁷⁾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 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、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. 2. 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で室内促進試験を行った結果、図-3.2.1 に示すように相対動弾性係数が 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。

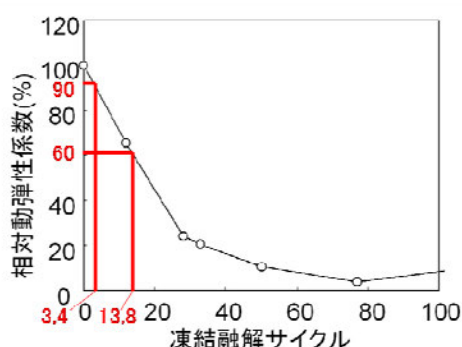


図-3.2.1 凍結融解試験結果

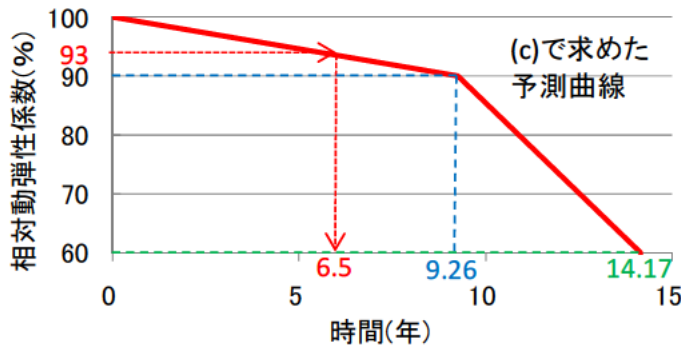
(2) ASTM 相当サイクルの算出

Barger ら¹⁸⁾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¹⁹⁾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-3.2.3 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) Ra_{90} : 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 (図-3.2.1) 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

〈算出例〉 擁壁 (江別) の場合



- (f) (b)、(e) から算出した凍結融解回数

〈算出例〉 擁壁 (江別) の場合 $0.37 \times 6.5 = 2.4$ 回

- (g) 実構造物の供用年数

- (h) (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「 ΔEd_{ASTM} 」)

〈算出例〉 擁壁 (江別) の場合 $(100-90)/9.26=1.08\%/年$ ($Ed > 90\%$)

- (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「 ΔEd_{ACT} 」)

〈算出例〉 擁壁 (江別) の場合 $(100-93)/22=0.32\%/年$

表-3.2.3 ASTM 相当サイクルの算出結果

部位	地域	(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)	(h) ΔEd_{ASTM} (%/年)		(i) ΔEd_{ACT} (%/年)	最深 積雪 (cm)
			Ed >90%	90% $\geq Ed$	Ed =90%	Ed =60%					Ed >90%	90% $\geq Ed$		
操作台	鶴川	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	鶴川	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

(2)で求めた相対動弾性係数に達する年数（表-3.2.3）と実際の供用年数の関係をグラフ化したものを図-3.2.2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。

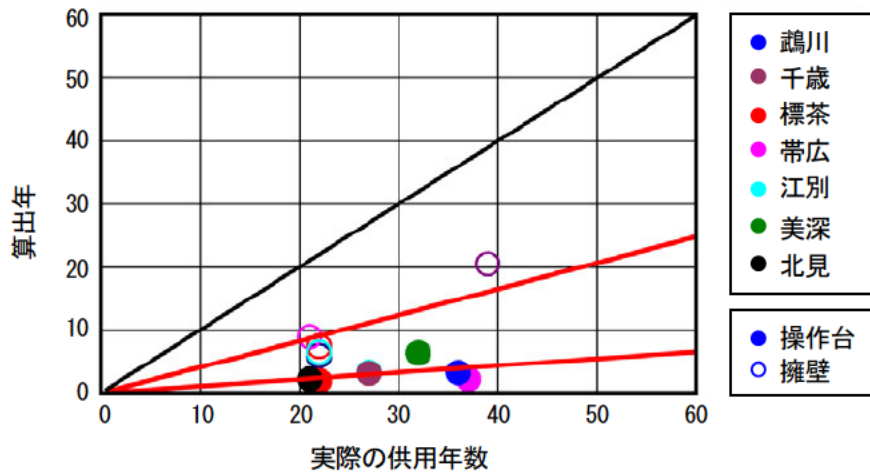


図-3.2.2 供用年数と劣化予測による算出年

図-3.2.3 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。）と供用年数と予測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 Ra_{90} 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²⁰⁾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。

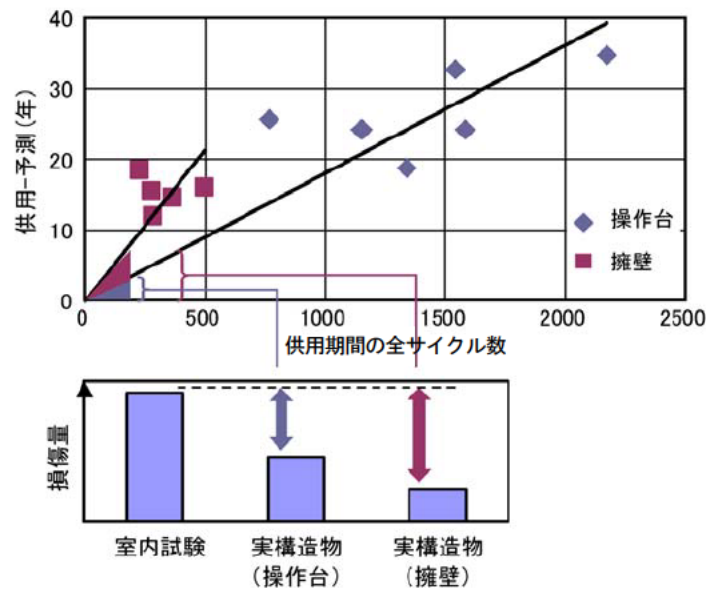


図-3.2.3 全サイクル数と供用年数と予測の差

2) 部位毎の凍結融解による損傷量の差

また、図-3.2.3 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-3.2.3 の下の損傷量の概念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²¹⁾、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-3.2.3 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-3.2.2 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. 2. 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²²⁾が、暴露供試体^{例えば2)、3)}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。

$$\Delta Ed_{ACT} = \alpha \times \Delta Ed_{ASTM} \quad \text{式(4)}$$

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-3.2.3 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-3.2.4 に示す。この結果から、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 ($\alpha = 0.4254$)、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 ($\alpha = 0.0751$) となった。

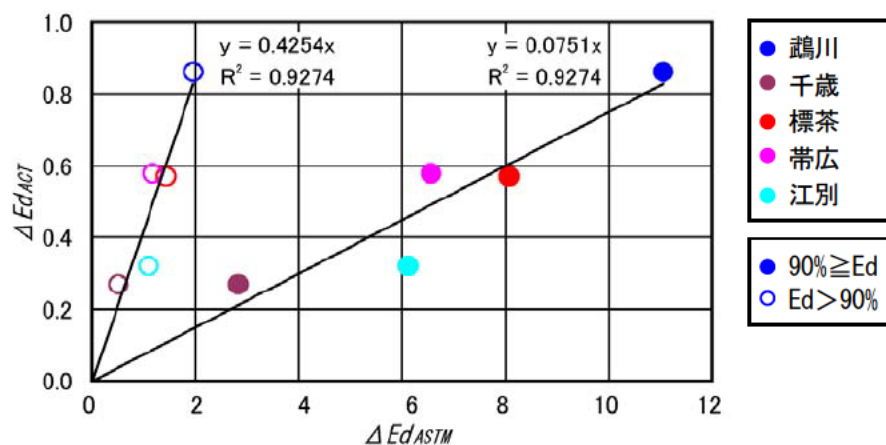


図-3.2.4 ΔEd_{ACT} と ΔEd_{ASTM} (擁壁)

(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-3.2.3 のデータを用いて回帰分析を行った (図-3.2.5)。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¹⁰⁾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²³⁾}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水分量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。

$$\Delta Ed_{ACT} / \Delta Ed_{ASTM} = \alpha = f(H) \quad \text{式(5)}$$

ここに、 H : 2009 年度の最深積雪

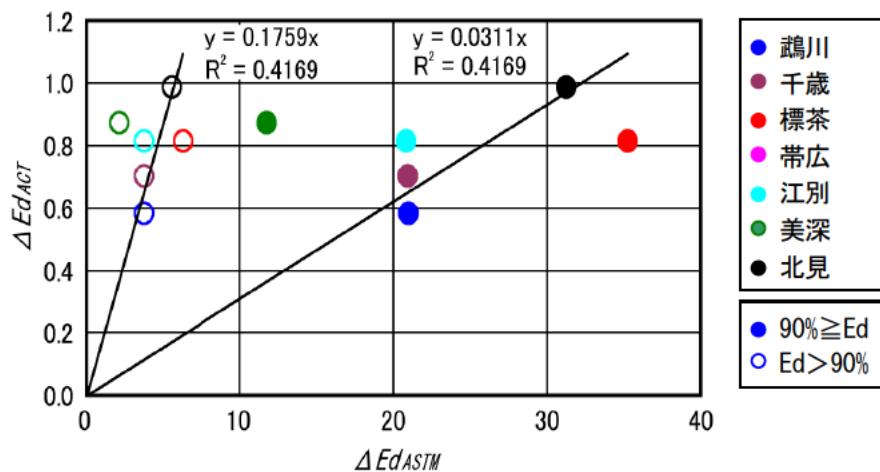


図-3.2.5 ΔEd_{ACT} と ΔEd_{ASTM} (操作台)

回帰分析の結果を図-3.2.6 に示す。この結果から、操作台の補正係数は図-3.2.6 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、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。

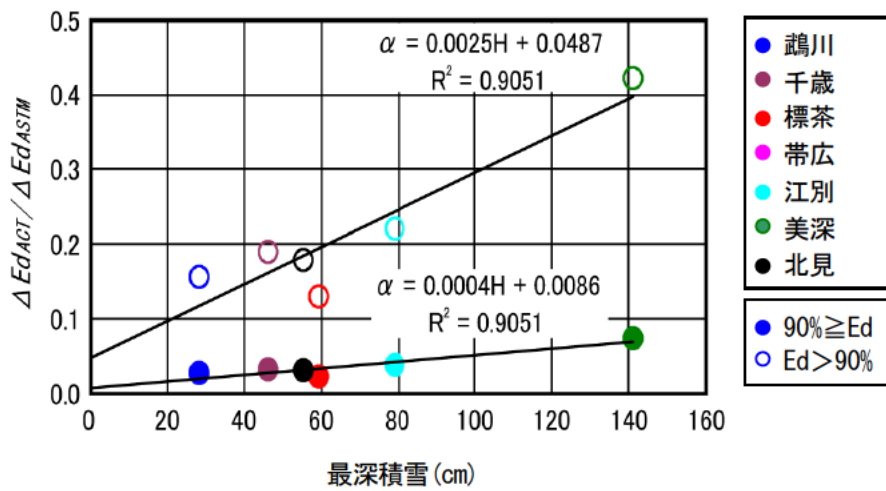


図-3.2.6 最深積雪と $\Delta Ed_{ACT} / \Delta Ed_{ASTM}$

4. まとめ

劣化度指標と材料物性との関係について検討を行った結果、超音波伝播速度と圧縮強度および拡散係数は高い相関関係にあり、超音波伝播速度を変数にとった式により実構造物、室内促進試験とも共通的な評価が行えることが明らかとなった。

次に、劣化予測手法について検討を行った結果、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。

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

(擁壁の水分条件補正係数)

$$\alpha = 0.4254 \quad (Ed > 90)$$

$$\alpha = 0.0751 \quad (Ed \leq 90)$$

(操作台の水分条件補正係数)

$$\alpha = 0.0025H + 0.0487 \quad (Ed > 90)$$

$$\alpha = 0.0004H + 0.0086 \quad (Ed \leq 90)$$

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、 H : 2009年度の最深積雪

<参考文献>

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕、pp.81-228、2008.6
- 2) 浜幸雄・松村光太郎・田畑雅幸・富板崇・鎌田英治：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・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
- 4) 三橋博三・成田健・平井和喜：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・三橋博三・平井和喜・田畑雅幸：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・村上祐治・鈴木篤・吉川弘道：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) 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.49、2008
- 8) 北海道開発局道路設計要領、第3集橋梁、第2編コンクリート、p.3-コ2-4、2006.4
- 9) 堀宗朗、多田浩治、斉藤裕、三浦尚：細孔構造の変化に着目したコンクリートの低温劣化の診断法の基礎的研究、コンクリート工学年次論文集 Vol.13、pp.723-728、1991
- 10) 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.
- 11) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'99、p.57、1999.9
- 12) 田口史雄、林田宏、遠藤裕丈、草間祥吾：凍害を受けたコンクリートの超音波伝播速度とひび割れ本数の関係の評価、土木学会第63回年次学術講演概要集、V-274、pp.547-548、2008.9
- 13) 気象庁ホームページ
http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/atlas/snow/snow_13.pdf
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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
- 17) 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. 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
- 18) 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
- 19) 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

- 20) 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
- 21) 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
- 22) 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
- 23) 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

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.426 December 2011

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所
寒地土木研究所 寒地技術推進室

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 電話 011-590-4046