## 11.2 コンクリートの凍害、塩害との複合劣化挙動及び評価に関する研究

研究予算:運営費交付金(重点) 研究期間:平18~平22 担当チーム:耐寒材料チーム 研究担当者:林田 宏、遠藤裕丈、草間祥吾

【要旨】

凍害、凍害と塩害による複合劣化は、寒冷地のコンクリート構造物が受ける代表的な被害であるが、実環境下 での合理的な耐久設計法は確立されていない。この課題の解決に向け、平成18年度は重要な外部環境因子の抽出 を行い、平成19年度は実構造物の劣化と外部環境因子との関連性、実構造物の超音波測定値と室内促進試験の相 関について評価を行った。水や凍結防止剤の流路に相当する部位、供用年数が長い部位では、劣化が大きい傾向 にあった。超音波伝播速度とひび割れ密度の相関性は、凍結融解回数および供用年数が長い場合、ばらつきが大 きく、ひびわれの発生形態や材齢の進行が超音波伝播速度に影響を及ぼしたことが一因と考察された。 キーワード:凍害、塩害、複合劣化、超音波伝播速度、ひび割れ

## 1. はじめに

寒冷地のコンクリート構造物が受ける主な被害に、 凍害による単独劣化、凍害と塩害による複合劣化(以 下、「複合劣化」という。)が挙げられ、ひび割れの進 展によるコンクリートの耐久性の低下や、水や塩化物 イオンなど劣化因子の浸透速度の増加、鋼材腐食の助 長などが懸念される。

積雪寒冷地では、耐久性設計において凍害および複 合劣化の影響を適切に評価することが求められる。し かし、凍害および複合劣化を受けた実際の構造物を対 象とした調査、研究はそれほど多くなく、実環境下に おける耐久性や凍害劣化の程度の定量的な評価手法は 確立されていないのが現状である。そのため、凍害劣 化の診断および予測手法を確立し、実環境における凍 害および複合劣化に対する合理的な耐久設計法を開発 することは重要な課題である。

本研究では、この課題の解決に向けて、平成18年度 は凍害、複合劣化の進行に及ぼす重要な外部環境因子 の絞り込みを図ることを目的に、過去20年間に発表さ れた論文の分析を行った。本年度は、これら絞り込ん だ外部環境因子と実構造物における凍害劣化との関係 を評価することを目的に、実構造物の劣化(超音波伝 播速度等)と外部環境因子との関連性整理を行った。 また、超音波伝播速度と凍害による損傷の程度との相 関の評価を目的に、実構造物の超音波測定値と室内促 進試験の相関整理を行った。以下に、それぞれの研究 の成果を報告する。

## 2. 外部環境因子と実構造物の劣化との関連性

#### 2.1 研究の概要

先に絞り込みを行った凍害、複合劣化の進行に及ぼ す重要な外部環境因子と実構造物の劣化との関連性に ついて検討を行った。平成18年度は、凍害、複合劣化 の進行に及ぼす重要な外部環境因子として、以下の7 因子を抽出した。

①水の供給
 ②凍結融解回数
 ③最低気温
 ④日射(方位)
 ⑤乾燥(乾湿)
 ⑥風
 ⑦塩分

なお、「乾燥(乾湿)」については、室内実験による 検討がほとんどであり、その手法を実構造物に適用す ることが困難であること、また、「風」については、前 述のように定性的には劣化への影響が指摘されている が、劣化予測等のパラメーターとして反映しようとす ると、定量的かつ汎用的データであるアメダスなどの データを使用することが望ましいと考えられる。しか し、アメダスなどの観測地点と実構造物の位置とでは 地形条件等により風速等がかなり異なり、実構造物の 劣化との関連性を明らかにすることが困難であること などが想定される。

このことから、今回の検討に当たっては、下記の5 因子について、検討を行った。

- 水の供給
- ② 凍結融解回数
- ③最低温度
- ④ 日射 (方位)
- ⑤ 塩分

## 2.2 調査概要

## 2.2.1 調查対象構造物

凍害劣化は劣化を促進する因子としての塩分の有無 により、その劣化形態は大きく「凍害による単独劣化」 と「複合劣化」に分類される。今回は、これらの劣化 形態を考慮し、主に「河川樋門」と「橋梁地覆」を対 象として、調査を行った。

## (1) 凍害による単独劣化を受けた構造物

凍害による単独劣化を受けた構造物として、凍結防 止剤が散布されていない区間の橋台竪壁・翼壁および 河川樋門を対象に調査を行ったが、本報告では河川樋 門について述べる。凍害に影響を与える環境因子とし ては気温や凍結融解回数等の「地域条件」と水分供給 状態や日射等の「部位条件」に大別される。凍害の単 独劣化に関する調査では「地域条件」として凍害危険 度が高く、道北地域にある約50箇所の河川樋門を対象 とした(図-1)。ここで、図に併記されている凍害危険 度とは、長谷川<sup>1)</sup>が提案した、外気温上の最低温度や 凍結融解日数等を考慮して 0~5 にグレード分けした ものであり、凍結融解作用の厳しさの目安となるもの である(表-1)。また、「部位条件」として、凍害に大 きな影響を与える水分供給状態の違いに着目し、調査 部位については写真-1に示すように「操作台」、「門柱」、 「擁壁」の3部位を選定し、「擁壁」については更に、 「上部」、「中間部」、「喫水部」に分けて調査を行った。

#### (2) 複合劣化を受けた構造物

北海道の国道では、ほぼ全ての路線で冬期路面管理 のため、主に塩化物系の凍結防止剤が散布されており、 凍結防止剤を含む融雪水等が接するコンクリート構造 物では複合劣化が生じている。今回の調査では、複合 劣化を生じている実構造物として橋梁地覆を対象に調 査を行った。なお、劣化と塩分、とくに塩分量との関 係について検討するため、対象橋梁の選定にあたって は、海からの飛来塩分の影響を受けず、塩分の供給源 としては凍結防止剤しかないと思われる路線A(山間 部)52橋、路線B(平野、山間部)92橋、路線C(平 野部、積雪少)26橋、路線D(凍結防止剤全線散布) 13橋の4路線を選定し、凍結防止剤が飛散、付着する と考えられる、図-2に示す部位を対象に行った。



#### 図-1 調査箇所(河川樋門、〇の数字は凍害危険度)

表-1 凍害危険度<sup>1)</sup>

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



写真-1 調査部位(河川樋門)



## 2.2.2 調査方法

## (1) 外観調査

外部環境因子と実構造物の劣化との関連性をマクロ 的に把握するため、外観目視調査を行った。本調査に おける凍害に関する凍害劣化度の評価は、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-2 によって行った。このとき、部材面の全体で最も外観評点が高い 評点を構造物の外観評点とした。

## (2) 超音波伝播速度測定

コンクリート標準示方書<sup>2</sup>では、凍害深さがかぶり 以上になったとき鋼材腐食が著しくなり、使用性能や 安全性能に影響を及ぼすとされており、外部環境因子 と実構造物の劣化との関連性を検討するに当たり、凍 害深さや程度との関連性を検討することが重要である。

凍害深さ等を評価する方法として、いくつかの方法 が提案されているが、今回の調査では比較的簡便で経 済的に評価を行うことが可能な超音波伝播速度測定手 法を用いて調査を行った。この手法は、凍害劣化によ って発生する微細ひび割れによる損傷が大きいほど伝 播経路が長くなり、超音波伝播速度が遅くなる原理を 利用するものである。

今回の調査では、橋台竪壁を対象として、超音波測 定手法とその評価について後述する予備検討を行った 後、河川樋門を対象としてコアを採取し、図-3に示す ように、採取したコア側面を直径方向に発振子、受振 子で挟み込み、構造物の表面側から深さ方向に超音波 伝播速度の分布を測定し、凍害深さや程度に関する評 価を行った。測定は、構造物のかぶりである深さ 10cm まで測定を行った。ここでは、凍害に大きな影響を与



図-4 部位別の外観評点(河川樋門)

える水分の供給状態の影響に着目するため、「操作台」、 「門柱」、「擁壁上部」、「擁壁中間部」、「擁壁喫水部」 の各部位から外観評点が 1~5 のものをなるべく選定 するようにした。

- 2.3 調査結果
- 2.3.1 外観調査結果
- (1) 水の供給と外観評点

#### 1) 河川樋門

図-4 に部位別の外観評点を示す。操作台については 外観評点0がなく、外観評点1~5まで幅広く分布して いる。特に他の部位と比べて外観評点3以上の割合が 大きく、凍害劣化を顕著に受けている部位であるとい える。また、擁壁(喫水部)についても、外観評点3 以上の割合が他の部位と比べ多くなっている。

一方、門柱と擁壁(上部、中間部)については外観 評点5がなく、また、外観評点3~4の占める割合も非 常に少なく、外観評点0~2がほとんどであり、外観上 は凍害劣化をさほど受けていない。

これらの調査結果から、以下のようなことが考えら れる。まず、操作台については、水平面であることか ら、冬期に雪が堆積し、日射や春先などの温度上昇に よって、水分が供給されやすく、外観評点が大きくな っていると考えられる。さらに、操作台は部材厚が比 較的薄いことから、コンクリートの温度変化が他の部 位に比べ厳しい。特に偶角部は温度変化が著しいこと から凍害劣化が著しく進行している傾向にあった。次 に、擁壁(喫水部)についても水面から水分が供給さ れるため、他の部位に比べ外観評点が大きくなってい るものと考えられる。一方、門柱については、そのほ とんどの部分が操作台の下にあり、顕著な水分の供給 を免れている。凍害劣化を受けている部分は操作台か ら経由してきていると思われる融雪水が供給されてい る部分くらいであった。また、擁壁(上部・中間部) が門柱と比べ、外観評点が若干大きくなっているのは、 擁壁上部に堆積した雪からの融雪水の供給があるため であると考えられる。擁壁上部からの融雪水は擁壁の 下の部分に行くにしたがって供給量が減少するため、 擁壁(上部)と擁壁(中間部)とで外観評点に差が生 じることが考えられたが、今回の調査結果では、両者 に顕著な外観評点の差は見られなかった。

#### 2) 橋梁地覆

図-5 に地覆における外観評点を示す。地覆車道面は、 地覆天端や地覆側面に比べ外観評点が大きい傾向を示 した。地覆車道面は、堆雪による水分の供給や路面凍 結防止剤を含んだ融雪水の流路となり、一層塩化物と 凍結融解の影響を受けるためと考えられる。

#### (2) 凍結融解回数と外観評点

凍害は、水分の供給条件等が同じであれば、基本的 に凍結融解回数が多いほど、劣化は大きくなる。すな わち、環境条件やコンクリートの配合等の条件が同一 であれば、構造物の供用年数が長いほど凍結融解回数 が多くなり、劣化は大きくなる。そこで、供用年数と 劣化の関係の検討を行った。

#### 1) 河川樋門

劣化の顕著な操作台について検討を行った結果を図 -6 に示す。まず、供用年数が10~19年のものについ ては全て外観評点1となっている。次に、供用年数が 20~29年のものについては、外観評点1~5まで分布 しており、外観評点1の割合が最も大きく、外観評点 5に向かって次第に割合は減少している。さらに、供 用年数が30~39年のものについては、外観評点1より も2の割合が大きくなり、20~29年の外観評点2の割 合と比べてもその割合も大きい。また、外観評点5に 向かって次第に割合が減少する傾向は20~29年のも のと同様である。一方、供用年数が40~49年のものに ついては、外観評点5がなく、また、外観評点1~4 の割合が同じとなった。

これらの結果から、多少ばらつきはあるが、供用年 数が長いほど、外観評点が大きくなる傾向が読み取れ る。



図-5 地覆の外観評点





#### 2) 橋梁地覆

図-7 に地覆車道面における供用年数と外観評点の 関係を示す。構造物の個々の環境条件、あるいは材料 条件が異なるためばらつきがあるものの、供用 0~40 年の範囲では供用年数が長いほど外観評点が大きい傾 向を示した。また、路線Dは他の路線に比べて供用年 数が短いものの外観評点が大きい傾向を示した。路線 Dは、路面管理の維持水準が他の路線に比べて高く、 除排雪により路面の露出状態が多い中で凍結防止剤に よる塩化物イオンが供給され、塩化物と凍結融解の影 響を受け易いことが要因と考えられる。

## (3) 凍結持続日数を考慮した最低温度と外観評点

日最低気温の年間極値と暴露供試体の劣化との関連 性について検討を行った研究<sup>3</sup>では、凍結持続日が比 較的少ない本州では、良い相関が認められたが、凍結 持続日数の長い北海道では相関が悪いとしている。同 研究では凍結持続日数の影響を考慮した地域の凍結融 解作用の厳しさを表す指標、具体的には凍結持続日数 の割合で日最低気温の年間極値の低減を行った式(1) の「地域係数」を用いることで、良い相関が得られる としている。なお、同研究では地域係数と室内凍結融 解試験回数が比例することを明らかにしている。すな わち、地域係数が大きいほど室内凍結融解試験回数が 多いということを意味しており、同一のコンクリート であれば、劣化は大きくなる。

$$T = -t_{amin} \left( 1 - \left[ \frac{D_f}{D_w} \right] \right)$$
(1)

ここに、Tは地域係数、 $t_{amin}$ は最低温度( $\mathbb{C}$ )、 $D_f$ は凍結持続日数(日)、 $D_w$ は凍結融解日数(日)である。

そこで、今回の検討に当たっても、この地域係数を 用いて、最低温度と劣化度との関連性について検討を 行った。地域係数の算出に当たっては、1976年~2006 年までのアメダスデータを用いて、11月~3月の各月 の地域係数を算出し、5ヶ月の平均値を求めた。この 算出した地域係数を北海道地図上に落とし込み、その 等価線地図を作成した(図-8)。

図-9 は作成した地域係数の等価線地図から調査を 行った地覆車道面の位置を割り出し、地域係数と外観 評点の関係を示したものである。その結果、地域係数 1~3 では外観評点2 にピークがあるのに対し、地域係 数 3~5 では外観評点4 にピークがある。すなわち、 地域係数が高くなるほど、外観評点が大きくなる傾向 が読み取れる。

#### (4) 日射(方位)と外観評点

図-10 に地覆車道面における外観評点の出現割合の 方位分布を示す。日射の影響により南面の凍結融解回 数が多くなるため、外観評点が大きくなる傾向がある と考えられたが、本調査結果では北面の外観評点も大 きく、方位による明確な傾向は現れなかった。

この原因として地覆車道面は除雪後も堆雪する橋梁 があり、冬期間の凍結融解回数にばらつきがあること が一因と考えられる。今後これらの堆雪の影響を調査





#### し、評価していく必要がある。

一方、図-11 に示す地覆側面の場合、地覆車道面に 比べ水分が少ない環境であるため、全体的に外観評点 が小さい傾向にある。また、わずかであるが西面、 北西面の外観評点が大きく、このことは冬期間の季節 風の影響により、凍結融解回数が多い<sup>4</sup>ことも一因と して考えられる。

#### (5) 塩分と外観評点

凍結防止剤散布量は、個々の橋梁に直接散布された 量を把握していないことから、路線を一定区間に区切 った散布量調査実績(以下:補正散布量と称す)を用 いて式(2)から推定した。

$$M = \sum_{K=A}^{B} \alpha \cdot \beta \tag{2}$$

ここに、MはA~B年における補正散布量(t/km)、A、 B は年度、αは各年度の管理区域毎の凍結防止剤総散 布量(t/km)、βは別調査による路線、区間毎の散布比



図-10 地覆車道面の方位別外観評点



図-11 地覆側面の方位別外観評点





率(%)である。

このとき、凍結防止剤は種類によって含有する塩化 物量が異なるが、集計に用いた各凍結防止剤中の塩化 物量は重量比で 61~74%であるため、種類による差は



写真-2 電気抵抗式含水率計

小さいと判断し補正せず、凍結防止剤の実散布量を集 計した。また、各部材において供用中に補修を行って いる場合、補修後の年数を供用年数とし、その間の凍 結防止剤の散布量を推計した。

図-12 に補正散布量と地覆車道面の外観評点の関係 を示す。本調査の範囲では、個々の橋梁に直接供給 された凍結防止剤の量を把握していないことや、凍害 に及ぼす他の要因、すなわち、前述の温度や水分等の 環境の影響を受けるため、データにばらつきがあるも のの、散布量が多いほど外観評点が大きくなる傾向を 示した。このことは、塩化物イオンと凍結融解の複合 作用により劣化が促進されたことを示している。さら に今後、構造物への塩分供給量や温度、水分の状況等 のデータの精度を高めることにより、より明瞭な関係 が導き出せるものと考えられる。

#### 2.3.2 超音波速度測定手法等の予備検討

凍害劣化を把握する方法として、超音波伝播速度、 細孔径分布や顕微鏡観察による方法などが提案されて いるが、これらの方法を用いた既存のコンクリート構 造物における凍害劣化の評価方法は、未だ十分に確立 されていない。そこで、より簡便で経済的に調査を行 うことが可能な診断手法を確立するため、その一手法 として超音波伝播速度を用いた凍害診断について検討 を行った。

#### (1) 対象構造物

検討は橋台竪壁側面の凍害劣化部(以下、「劣化部」 という。)を対象として行った。劣化部には水みちが見 られ、表面は粗骨材がいくつか露出している状態で、 表-2の外観評点では3程度であった。また、水分の供 給を受けない橋台竪壁前面の健全部(以下、「健全部」 という。)についても比較のために調査を行った。

## (2) 調査方法

#### 1) 内部水分量調査

構造物の水分量が超音波伝播速度に与える影響を把 握するため、電気抵抗式含水率計(**写真-2**)を用いた



#### 図-13 内部水分量調査



図-14 顕微鏡観察によるひび割れ密度測定

実構造物の内部水分量調査を行った。この装置は測定 対象物に低周波(120Hz)電圧を1V加え、その電流電 圧変化を測定して間接的に含水率を求めるものである。 電極はコンクリートに対して一様な接触状態を得るた めに金属ブラシを用いている。測定は、φ6mm 乾式ド リルで2つの孔を約3cm間隔であけ、計測時には接触 部が十分削孔面に接触するようにエアーで削孔内部を 清掃した後、その中にブラシ電極を差し込み、深さ2cm、 4cm、6cm、8cm、10cmの5箇所で計測を行った。なお、 水分量調査については、コアを採取後、採取位置から 5cm離れたところで調査を行った(図-13)。

#### 2) 超音波伝播速度測定

劣化部および健全部から採取したコア(φ10cm)を 湿潤のままの状態と乾燥機で乾燥させた状態の2通り について超音波伝播速度測定を行った。測定方法は、 図−3で示した通りである。

なお、乾燥に当たっては、組織変化に対する影響を 考慮し、40 $^{(5)}$ でコアの質量が一定となるまで乾燥さ せた。また、超音波伝播速度の測定に当たっては、 周 波数は28kHz とし、センサーは $\phi$ 20nm を使用した。

#### 3) 顕微鏡観察によるひび割れ密度測定

凍害によって発生する微細ひひ割れ等による組織変

### 11.2 コンクリートの凍害、塩害との複合劣化挙動 及び評価に関する研究

化を直接確認するため、超音波測定位置でコアをスラ イスし、顕微鏡を用いて測線長 1mm あたりのひび割れ 本数(以下、ひびわれ密度と記す)を算出し、超音波 伝播速度測定との関係について検討を行った。なお、 試料面積、測線長は米国材料試験協会規格 ASTM C 457 に準じ、微細ひび割れをきわだたせるための蛍光塗料 等は用いていない(図-14)。

上述の1)~3)の測定については、コンクリート標準 示方書では凍害深さがかぶり以上になったとき、鋼材 腐食が著しくなり、使用性能や安全性能に影響を及ぼ すとされている<sup>22</sup>ことから、いずれの測定も竪壁のか ぶりである深さ 10cm まで測定を行った。

#### (3) 調査結果

図-15 に超音波伝播速度測定結果を示す。劣化部(湿潤)の速度は表面に向かって低下傾向を示しているものの、全体的に速く、健全部(湿潤)との差は大きくないが、乾燥を行うことによりその差が明瞭となった。また、健全部(乾燥)の速度に着目すると、8~10cmで速度4300m/sで概ね一定となっており、この速度(図中の点線)と健全部(乾燥)の速度を比較すると、一般的に健全なコンクリートでも深部の速度は概ね一定であるが、表面に近いほど低下する<sup>60</sup>とされている傾向が確認できる。一方、劣化部(乾燥)の速度は健全部(乾燥)に比べ、凍害劣化のため、さらに低下している。

図-16 は湿潤と乾燥の速度差を示したものであるが、 健全部は4cm以深で概ね一定であるのに対し、劣化部 では表面に近いほど速度差が大きくなっている。図-17 は水分量を示したものであるが、劣化部は健全部に比 べて水分量が多く、また表面に近いほどその差も大き い。図-18 は劣化部の超音波伝播速度(乾燥) とひび 割れ密度の関係を示したものであり、凍害に特徴的に 発生する微細ひび割れの本数が多いほど、速度が低下 する傾向を示している。

以上のことをまとめると、次のようになる。

- ①劣化部は表面に近いほど凍害による微細ひび割れが 多くなっており、その中に水分が存在するため、劣 化部と健全部の水分量の差は表面に近いほど拡大す る(図-17、18)。
- ②このため、劣化部は表面に近いほど、湿潤と乾燥の 速度差が大きくなる(図-16)。すなわち、本来は劣 化に伴い速度が低下するはずが、湿潤状態では微細 ひび割れ中の水分の影響により、劣化部の速度低下 が起こりにくくなっている(図-15)。

## (4) 凍害深さの評価方法に関する考察

凍害劣化を受けたコンクリート構造物の補修設計な どを検討する際は診断結果から組織がゆるんでいる凍 害劣化範囲、すなわち、断面を除去する範囲を特定す る必要がある。そこで、以下では得られた結果を基に 凍害深さに関する考察を試みた。

いくつかの研究では凍害劣化の評価に当たって、耐 凍結融解抵抗性の評価指標としてなじみの深い相対動 弾性係数を用いて評価を行う試みがなされている。緒 方ら<sup>71</sup>は実験式である式(3)を用いて動弾性係数を求 め、式(4)から相対動弾性係数を求める方法を提案して いる。

$$E_d = 4.0387 V^2 - 14.438V + 20.708 \tag{3}$$

相対動弾性係数 (%) = 
$$\frac{E_{dn}}{E_{do}} \times 100$$
 (4)

ここに、*E*<sub>d</sub>は動弾性係数(GPa)、*E*<sub>dn</sub>は供用中のコン クリート構造物における動弾性係数(GPa)、*E*<sub>dn</sub>は供用 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*は超音波伝播速度(km/s) である。

本研究においても、この方法により相対動弾性係数 を求めて凍害深さの評価を行った。なお、相対動弾性 係数の算出に当たり  $E_{dr}$ の算出では劣化部(乾燥)の超 音波伝播速度を用い、また、 $E_{dr}$ 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深さ 10cm のものを 用いた。算出結果を図-19に示す。

相対動弾性係数を用いた凍害深さの評価については 様々な考え方が用いられているが、コンクリート標準 示方書(施工編)<sup>®</sup>では凍結融解作用に関する照査は、 構造物中のコンクリートが劣化を受けた場合に関して、 気象条件、断面、構造物の露出状態により相対動弾性 係数の最小限界値等を用いて行うこととしており、相 対動弾性係数の最小限界値は 85~60%の範囲で設定 されている。また桂ら<sup>®</sup>は、室内実験の結果から相対 動弾性係数で 85%程度を境として、凍害劣化の進行が 加速することを明らかにしている。これは、凍害劣化 による微細ひび割れ内に水が供給されることで、凍結 水量が増加し組織の劣化が加速されるためであるとし ている。これらの知見から今回の検討ではコンクリー



図-19 超音波伝播速度より求めた相対動弾性係数



ト標準示方書が定める相対動弾性係数の最小限界値の うち、もっとも安全側である85%を仮の閾値とし、こ の値を下回る部分を凍害劣化による組織のゆるみ域と して仮定すると、図-19の結果から約8cmまでが凍害 劣化範囲であると考えられる。この結果は図-18に示 すようにひひ割れ本数が約8cmの深さから表面に向け て増加していること、また、健全なコンクリートの一 般的な超音波伝播速度は4000m/s以上とされており<sup>10)</sup>、 表面から約8cmまでの部分で超音波伝播速度が 4000m/s以下となっている結果とも一致する。



図-21 外観評点と凍害深さ

#### 2.3.3 超音波速度測定結果

## (1) 水の供給と凍害深さの関係

予備検討の結果、相対動弾性係数85%を閾値とする ことで良好な評価を得ることができたことから、今回 の検討に当たっても、超音波伝播速度を相対動弾性係 数に換算し、この閾値を下回る部分を凍害深さとし、 凍害劣化による組織のゆるみ域として仮定した。調査 結果を図-20に示す。ここには、河川樋門の結果を示 している。なお、図中の凡例は外観評価による外観評 点、破線は閾値、円で囲っているプロットは閾値を下 回った位置を示している。図をみると、「操作台」、「擁 壁喫水部」は外観調査結果と同様に複数の箇所が閾値 を下回る劣化を受けていた。一方、「門柱」、「擁壁中間 部」についても外観調査結果と同様に閾値を下回るほ どの顕著な劣化はほとんど受けていなかった。「擁壁上 部」については外観調査結果以上の割合で、複数の箇 所が閾値を下回る劣化を受けていた。

#### (2) 外観調査と凍害深さの関係

閾値を下回った測定点の深さを凍害深さと仮定し、 外観評点との比較を行った。結果を図-21 に示す。こ の結果から、ばらつきはあるが、外観評点が高いほど、 凍害深さが深くなっている傾向が読み取れる。また、 ばらつきはあるものの、全体的に外観調査結果と同様 に「操作台」や「擁壁喫水部」の凍害深さが深くなっ ている。一方、「擁壁上部」や「擁壁中間部」にも凍害 深さが深くなっている。これらについては基本的に外 観評点の小さい部位であるが、擁壁上に積もった雪か らの融雪水の供給が多かったり、施工時の影響などに より外観評点が高くなった可能性があり、その場合、 凍害深さが深くなったものと考えられる。また、外観 評点が4や5のように高くても凍害深さが浅い場合も あり、これについては今後、検討していきたい。

#### 3. 実構造物の超音波測定値と室内促進試験の相関

## 3.1 研究の概要

超音波伝播速度は、凍害の程度をより簡便に診断す る手法の一つとして提案されている。しかし、劣化診 断を的確に行うには、超音波伝播速度と凍害による損 傷の度合との関係を明確にする必要がある。

そこで、室内試験ならびに凍害を受けた実構造物に おいて調査を実施し、超音波伝播速度と凍害による損 傷の度合との相関性について評価を行った。

## 3.2 試験概要

## 3.2.1 室内試験

#### (1) コンクリートの配合・使用材料

表-3にコンクリートの配合を示す。配合は、北海道の内陸部の鉄筋コンクリート構造物の標準配合<sup>111</sup>に準じ、水セメント比を55%、単位セメント量を280kg/m<sup>3</sup>とした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は除塩処理済の苫小牧市樽前産海砂(密度2.70g/cm<sup>3</sup>、吸水率0.89%)、粗骨材は小樽市見晴産砕石(密度2.68g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.07%、最大寸法25mm)を用いた。なお、凍害を促進させる観点から、AE剤は使用しない配合とした。

#### (2) 供試体

図-22 に供試体を示す。供試体の寸法は100×100×400mm とした。ここでは、実構造物を想定し、水分の供給面を一面に極力限定するため、7 日間の水中養生を終了した後、打設面以外の5 面に厚さ 2mm の合板を貼付けた。

#### (3) 凍結融解試験

凍結融解試験は材齢 28 日より行った。本研究では JISA 1148 に準じ、最低温度を-18℃、最高温度を5℃ とし、1 サイクル 3~4 時間の凍結融解作用を与えた。 ここでは、凍結融解作用を 0、7、14、28、50、100、 173、200 サイクル与えた。

#### (4) 超音波伝播速度の測定

所定のサイクルに達した後、図-23 に示すように100 ×100×100mm 寸法で試料を切り出し、側面にφ20mm の発・受信子をあてて超音波伝播速度を測定した。な お、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<sup>12</sup>こ とから、ここでは試料を乾燥させ、水分量を低減させ てから測定を行った。

乾燥は、温度が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<sup>50</sup>の報告に基づき、40℃で7 日間行った。

表-3 コンクリートの配合										
W/C	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								
$\langle 0 \rangle$	(0)()		C	G						

(%)	(%)	W	С	S	G
55	44	154	280	840	1052





図-23 超音波伝播速度・ひび割れ密度の測定

#### (5) ひび割れ密度の測定

ここでは、前述したひび割れ密度をもって、凍害劣 化の程度を評価することとした。超音波伝播速度を測 定した後、20mm間隔で試料をスライスし(図-23)、顕 微鏡を用いてひび割れ密度を求めた。測定は、表面か ら深さ20、40、60、80mmで行った。

#### 3.2.2 実構造物での調査(河川樋門)

凍害は、塩化物イオンの介在の有無によって、劣化 形態は大きく異なる。ここでは、凍害による単独劣化 を受けている河川樋門を調査の対象とした。調査箇所 は 2.2.1 の(2)に同じである。各部位から採取したφ 100mm のコアの両側面に発・受信子をあてて超音波伝 播速度を測定し、その後、コアをスライスしてひび割 れ密度を測定した。測定は深さ 15、20、40、60、80mm

位置で行った.

#### 3.3 試験結果および考察

# 3.3.1 超音波伝播速度とひびわれ密度の関係

## (1) 室内試験

図-24 は室内試験における超音波伝播速度とひび割 れ密度の関係を示している。図には、全てのデータを 一括してプロットしている。サイクルごとにみると、 28 サイクルまでは、超音波伝播速度の低下に従ってひ び割れ密度は大きくなる良好な相関(r<sup>2</sup>=0.6641)を示



し、超音波伝播速度は凍害による損傷状態を良く評価 していることが確認された。

しかし、全てのサイクルのデータを総合すると、相関係数は0.6641から0.4894に低下する結果となった。 これは、ひび割れの本数が同じでも発生形態も一様と は限らず、その形態が複雑であるほど迂回距離も長く なることから、サイクルの増加に伴うひび割れの発生 形態の違いが相関係数の低下に影響していることが 考えられる。

このことは、超音波伝播速度によって凍害による損 傷の度合を評価する場合、劣化の程度により精度が異 なる可能性があることを示している。

#### (2) 河川樋門

図-25 に河川樋門における超音波伝播速度とひび割 れ密度の関係を示す。図には、室内試験で得た回帰式 も図示した。超音波伝播速度は、殆どのデータが 3.0 ~4.0km/sec の区間に分布し、室内試験の結果に比べ



図-26 超音波伝播速度とひび割れ密度の関係 (河川樋門、部位ごとに整理)



写真-3 門柱の外観

るとプロットの範囲は限定的であったが、ひび割れ密 度の分布範囲は 0~0.20 本/mm と極めて広範で、ばら つきは非常に大きい結果となった。ここで、供用年数 ごとに着目すると、それぞれの回帰式の傾きは、年数 の経過に伴い増加している傾向が全体的に見受けら れる。なお、供用 40~49 年に関しては、相関が認め られない分布を呈していた。

図-26 は、図-25 の結果を部位ごとに整理したもの である。操作台、擁壁の中間部と喫水部では、超音波 伝播速度の減少に伴ってひび割れ密度は増加する関 係がみられるが、門柱と擁壁上部ではこのような関係 が総じて見られなかった。写真-3 は門柱の外観を示し ているが、ジャンカ等がみられる。ばらつきは狭小断 面における特定の部位で生じていることから、施工性 の影響が推察されるが、全体的には供用年数が長い構 造物で相関が小さい傾向にあることから、材齢の進行 が超音波伝播速度に影響を及ぼしたことが考えられ る。

# 3.3.2 湿潤と乾燥における超音波伝播速度差とひび われ密度の関係

図-27(室内試験)および図-28(河川樋門、年数ご と)に湿潤状態と乾燥状態における超音波伝播速度の 差とひひ割れ密度の関係を示す。速度差が大きいほど、 ひび割れに水分が多く含まれていることを意味する。 ばらつきは大きいが、速度差が大きいほどひび割れ密 度が大きい傾向が概ね見受けられる。

図-29 は部位ごとに整理した結果である。図-26 では 門柱と擁壁上部において施工性の影響を考察したが、 これらを除外すると、実構造物のデータは全体的に図 -27 で示した室内試験の結果に近い傾向が見受けられ、 実構造物の調査結果と室内促進の結果は対応している ように思われる。

#### 4. まとめ

## 4.1 外部環境因子と実構造物の劣化との関連性

実構造物の劣化(超音波伝播速度等)と平成18年度 に抽出した外部環境因子との関連性を評価した結果、 以下のことが明らかとなった。

- (1) 水分が供給される部位や、凍結防止剤の流路に相当する地覆車道面では外観評点が大きい。
- (2)供用年数が長いほど外観評点は大きい傾向にあったが、路面管理の水準が高い路線(凍結防止剤の散布量が多い路線)では、供用年数が短いにも関わらず外観評点が大きい箇所もあった。
- (3) 凍結持続日数を考慮した最低温度(地域係数)が 大きいほど外観評点は大きい傾向にあった。
- (4) 方位の影響は不明瞭であったが、これは冬期の堆 雪状況に起因し、凍結融解回数にばらつきが生じ たことが一因と考えられる。
- (5) 外観評点が高いほど凍害深さは深い傾向にあった が、外観評点が低くても内部劣化が進んでいる箇 所もみられ、凍害は見かけ以上に内部劣化が進行 している場合があることが確認された。
- 4.2 実構造物の超音波測定値と室内促進試験の相関 実構造物の超音波測定値と室内促進試験の相関を整 理した結果、以下のことが明らかとなった。
- (1) 室内試験では、28 サイクルまでは超音波伝播速度 とひび割れ密度は良好な相関を示したが、全デー タを総合すると相関係数は低下した。
- (2) 河川樋門では、供用年数が長い構造物でばらつが



図-27 湿潤と乾燥における超音波伝播速度の差と ひび割れ密度の関係(室内試験)



図-28 湿潤と乾燥における超音波伝播速度の差と ひび割れ密度の関係(河川樋門、年数別)



大きい傾向が示され、ひびわれの発生形態や材齢の進行が超音波伝播速度に影響を及ぼしたと考えられた。 (3)河川樋門におけるデータのばらつきは、門柱や擁 壁上部といった特定の部位でみられ、ジャンカ等 の欠陥の存在が、データのばらつきに影響をもた らした可能性が考えられる。

(4) 超音波伝播速度とひび割れ密度の関係は、劣化の 程度によって精度は異なる可能性がある。

#### 5. 今後の課題

平成20年度以降は診断技術の確立に向け、超音波伝 播速度とひび割れ密度の相関係数の向上に向けた検討、 ひび割れ密度と材料物性(拡散係数や力学特性など) の関係の評価を行う。さらに、凍害を受けたコンクリ ート部材の力学的性能の解明に向けた検討も進める。

#### 参考文献

- 長谷川寿夫,藤原忠司;凍害,コンクリート構造物の耐 久性シリーズ,技報堂出版,1988.2
- 2) コンクリート標準示方書 [維持管理編]、土木学会、 pp. 115、2001
- 3) 濱幸雄,松村光太郎,田畑雅幸,冨板崇,鎌田英治:気 象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
- (4) 富板崇,浜幸雄,濱崎仁;コンクリート供試体表面温度 の気象因子による推定とその応用,自然環境とコンクリ ート性能評価に関するシンポジウム,pp.203-207, 2005.6
- 5) 堀宗朗、多田浩治、斉藤裕、三浦尚堀: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

- 6) 微破壊・非破壊試験によるコンクリート構造物の強度測 定要領(案)、国土交通省、2006
- 7) 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、日本コンクリート工学協会、pp63-70、2006.12
- 8) コンクリート標準示方書 [施工編]、土木学会、pp. 29、 2002
- 9) 桂修、松村宇: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、pp2-11-2-16、2003.11
- 10) コンクリート技術の要点'99、pp.106、日本コンクリート工学協会、1999
- 11) 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
- 林田宏,田口史雄,遠藤裕丈,草間祥吾;超音波伝播速 度測定によるコンクリート構造物の凍害診断に関する 基礎的研究,寒地土木研究所月報 No656, pp. 10 -15,2008.1

# EXAMINATION AND EVALUATION OF DETERIORATION OF CONCRETE FROM COMBINED FROST AND SALT DAMAGE

**Abstract** : Frost action and combined deterioration caused by frost and salt represent typical types of damage that affect concrete structures in cold regions. Despite this, no rational durability design methods for actual environments have yet been established. To address this, evaluation was performed in 2007 on the relationship between deterioration in actual structures and external environmental factors by measuring values such as ultrasonic propagation velocity, and on the correlation between these values and the results of laboratory acceleration tests. The degree of frost deterioration tended to be higher in sections with many years of service that were exposed to water and anti-freeze agents. The correlation between ultrasonic propagation velocity and crack density varied greatly for concrete with a long freeze-thaw cycle or service life. This was thought to be partly due to the effect of the mode of crack generation and the aging of the material on the ultrasonic propagation velocity. **Key words** : frost damage, salt damage, combined deterioration, ultrasonic velocity, crack