

## 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、内藤 勲、遠藤裕丈、草間祥吾、安達 優

### 【要旨】

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。力学特性（圧縮強度）はひびわれ密度で評価が行えるが、拡散係数は更にひびわれ幅や長さを考慮する必要があり、診断を行う場合、実用性を勘案すると超音波伝播速度による簡易的な評価が望ましい。また、凍結融解作用を受けたコンクリート部材の材料劣化と力学性能の関係を明らかにすることを目的に、大型凍結融解試験装置でRCはり部材に凍結融解作用を与え、静的載荷実験を行った。その結果、凍害劣化範囲の違いにより、異なる破壊形態となった。  
 キーワード：凍害劣化、超音波伝播速度、ひびわれ密度、圧縮強度、塩化物イオン拡散係数、力学性能

### 1. はじめに

凍害等の劣化を受けたコンクリート構造物の材料劣化と構造物に要求される性能の関係は現段階では十分に明らかとなっていない。そのため、劣化を受けた構造物の補修・補強においては、材料劣化のみを補修等の判断基準としているのが現状である。しかし、より適切にコンクリート構造物の維持管理を行っていくためには、劣化に伴う材料物性の低下や劣化を受けた部材の性能低下を適切に評価することが必要である。例えば、力学性能の観点では、部材レベルでの安全性等を適切に評価することにより、合理的補修を行うことが可能となり、LCCの縮減につながるものと考えられる。そこで、本研究では、凍害劣化に伴う材料物性の低下や凍害劣化を受けたコンクリート部材の力学性能を明らかにするための検討を行った。

### 2. 実構造物の超音波測定値と室内促進試験および材料物性（力学特性、拡散係数）の相関分析

#### 2.1 研究の概要

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。

#### 2.2 室内促進試験概要

##### 2.2.1 コンクリート配合・使用材料

表-2.1 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<sup>1)</sup>のRC-1に準じ、水セメント比55%、単位セメント量280kg/m<sup>3</sup>とした。セメントは普

表-2.1 コンクリート配合（室内促進試験）

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

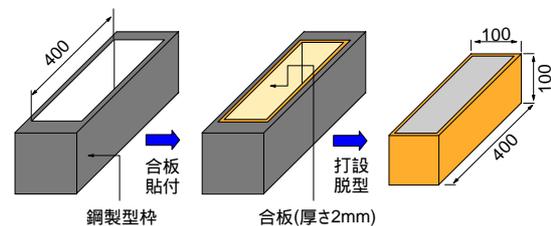


図-2.1 供試体

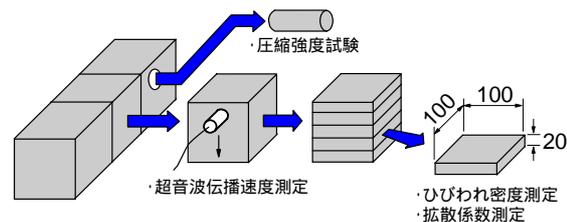


図-2.2 測定に用いた試料の部位

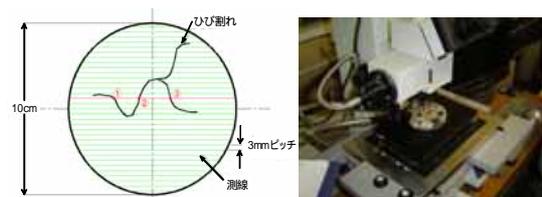


図-2.3 ひびわれ密度の測定状況

通ポルトランドセメント、細骨材は余塩処理を施した苫小牧樽前産の海砂（密度  $2.70\text{g/cm}^3$ 、吸水率  $0.89\%$ ）、粗骨材は小樽見晴産の砕石（密度  $2.68\text{g/cm}^3$ 、吸水率  $1.07\%$ 、最大寸法  $25\text{mm}$ ）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。

### 2.2.2 供試体

図-2.1 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  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  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  $2\text{mm}$  の合板をはり付けた。

### 2.2.3 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-2.2 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  $100 \times 100 \times 100\text{mm}$  寸法の試料を切り出し、 $40^\circ\text{C}$  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、 $40^\circ\text{C}$  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>2)</sup>の報告に基づき、 $40^\circ\text{C}$  とした。

その後、試料を  $20\text{mm}$  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  $1\text{mm}$  あたりのひびわれ本数、図-2.3）と JSGE-G 571 に準じた拡散係数の測定を行った。また、深さ  $20\text{mm}$  位置から  $30\text{mm}$  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。

## 2.3 実構造物調査概要

### 2.3.1 調査箇所

図-2.4 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<sup>3)</sup>。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

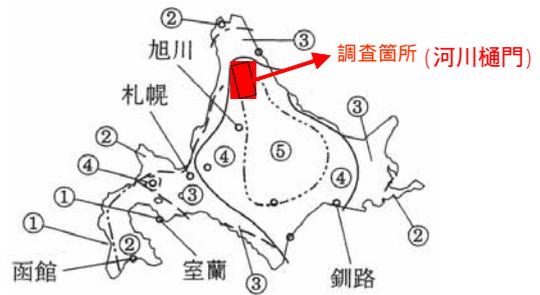


図-2.4 調査箇所位置図（の数字は凍害危険度）

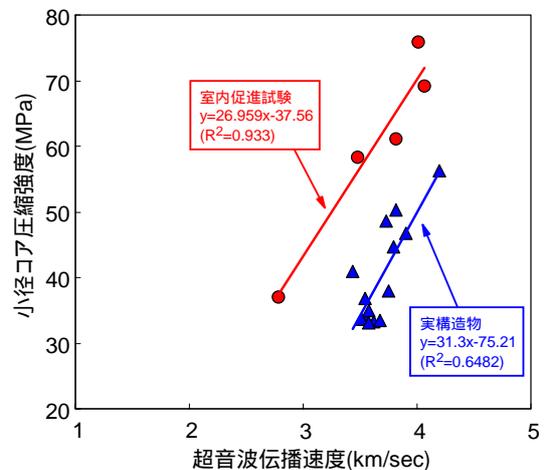


図-2.5 超音波伝播速度と小径コア圧縮強度の関係

た箇所は、凍害危険度が 4~5 の地域に位置している。

### 2.3.2 調査内容

各構造物から  $100\text{mm}$  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  $20\text{mm}$  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  $30\text{mm}$  厚にスライスしてから、 $30 \times 30 \times 60\text{mm}$  の角柱を切り出し、圧縮強度の測定を行った。

## 2.4 結果および考察

### 2.4.1 力学特性の変化に及ぼす凍害の影響の評価

図-2.5 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

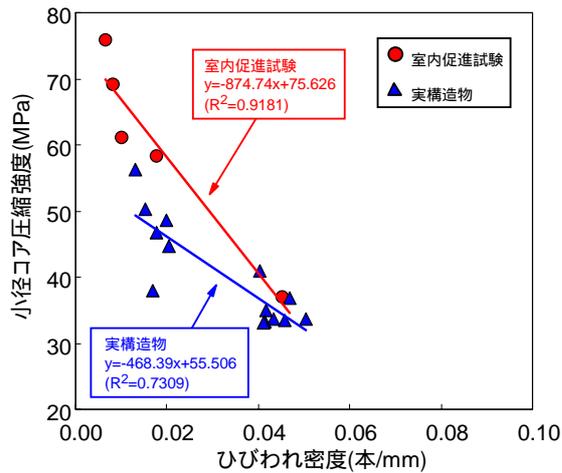


図-2.6 ひびわれ密度と小径コア圧縮強度の関係

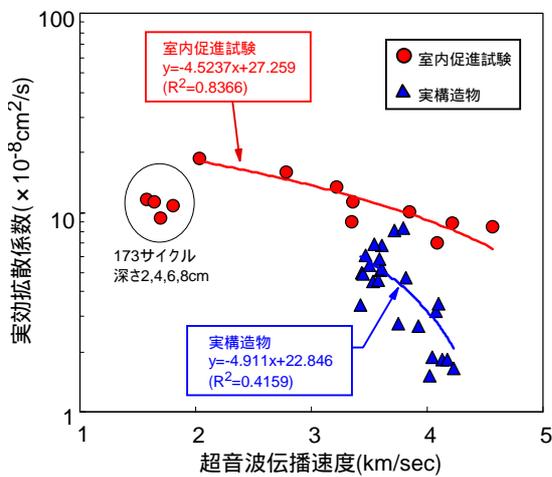


図-2.7 超音波伝播速度と実効拡散係数の関係

播速度が3~4km/sの範囲においては、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-2.6 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<sup>4)</sup>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

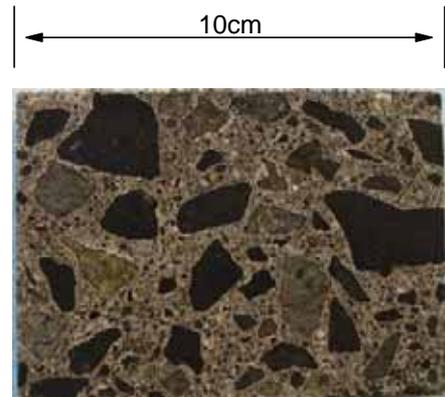


写真-2.1 試料断面（室内促進試験供試体）

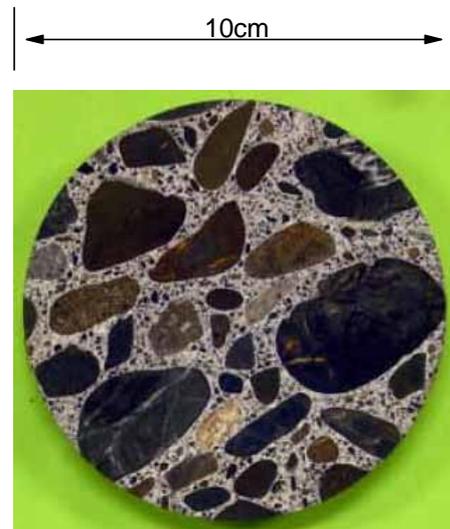


写真-2.2 試料断面（実構造物採取コア）

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。

#### 2.4.2 拡散係数の変化に及ぼす凍害の影響の評価

図-2.7 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ならなかった。

ここで、図-2.5と図-2.7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 $5.6 \times 10^{-8}$

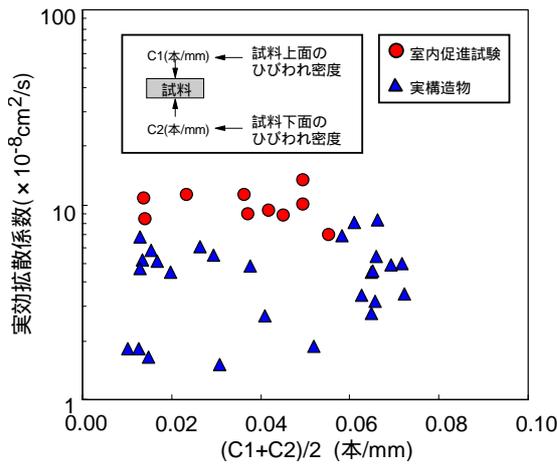


図-2.8 ひびわれ密度と実効拡散係数の関係

$\sim 5.9 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$  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、それに従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-2.1と写真-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いため、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-2.7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-2.8 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。

#### 2.4.3 総合評価

現段階での評価として、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、圧縮強度とは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<sup>5)</sup>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。

表-3.1 コンクリートの配合

単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)
194	65.0	47.2	2.0

表-3.2 使用材料

使用材料	比重	表面水率 (%)	吸水率 (%)
普通ポルトランドセメント	3.14		
細骨材(富川産)	2.67	1.11	1.5
細骨材(幌延産)	2.61	0.89	1.32
粗骨材(札幌産)	2.63	0	2.11

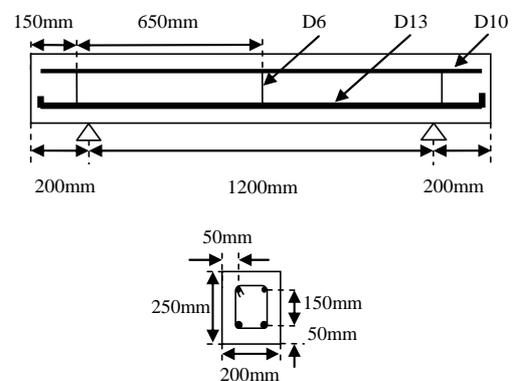


図-3.1 供試体

### 3. 凍害劣化を受けたコンクリート部材の力学的性能

#### 3.1 研究の概要

次に、3章では、凍結融解作用を受けたコンクリート部材の材料劣化と力学性能の関係を明らかにすることを目的に行った、大型凍結融解試験装置を用いて凍結融解作用を与えたRCはり部材の静的載荷実験の結果について述べる。

#### 3.2 試験概要

##### 3.2.1 コンクリートの配合・使用材料

表-3.1および表-3.2にコンクリートの配合・使用材料を示す。配合は、なるべく短期間で凍害を促進させる観点から、水セメント比を65%とし、AE剤は使用しない配合とした。

##### 3.2.2 供試体

図-3.1に供試体を示す。供試体の寸法は200×250×1600mmとした。なお、供試体の寸法等は、凍害等劣化が顕著である壁高欄を考慮し、供試体の寸法、配筋等を決定した。ただし、このように大きな供試体に凍

結融解作用を与え、静的載荷試験を行った事例は過去にほとんどない。したがって、まずは力学的な基礎性状を把握しやすくするため、引張側のみ鉄筋径、鉄筋比を壁高欄と同様とし、圧縮側については最小限の組立鉄筋としてD10を用いた。

### 3.2.3 凍結融解試験

凍結融解試験は ASTM-C-672 を参考として、水分供給条件については、図-3.2 に示すように、上面全体、上面中央部分の2種類の条件で、一面凍結融解試験を行った（以下、を「A供試体」、を「B供試体」という。また、水分供給側の面を「上面」という。）なお、上面中央部分のみの水分供給を行ったのは、過去に行った壁高欄の現地調査の結果、壁高欄下側に劣化が集中的に生じていた事例があることを考慮したためである。また、温度条件については、劣化を促進するため、最低温度を-25、最高温度を25とし、15サイクルまでは1サイクル8時間、以降は1サイクル12時間の凍結融解作用を89サイクル与えた。

### 3.2.4 静的載荷試験

供試体への載荷は中央1点載荷を採用し、変位計を支点上および中央点の3点に設置した（図-3.3）。また試験中には荷重、変位計およびひずみゲージの値を随時測定し、ある程度の荷重をかけた後に適宜ひび割れの観察も行った。

## 3.3 試験結果および考察

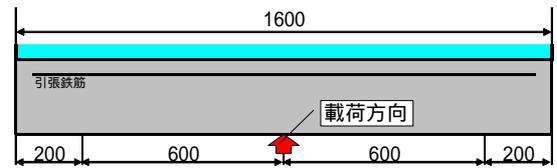
### 3.3.1 凍害劣化調査結果

凍害劣化調査は載荷試験用供試体と同時に作成した材料物性値測定用供試体を用いて調査を行った。

#### (1) 超音波伝播速度測定

凍害劣化範囲、程度を把握するため、図-3.4 に示す供試体中央位置、中央から250mmの位置、支点位置の断面で透過法により超音波伝播速度測定を25mm間隔で行った。測定結果を図-3.5 および図-3.6 に示す。その結果、A、B供試体ともに中央付近から上面に向けて速度が上昇しているのに対し、中央付近から下面に向けて速度が低下している傾向が見られた。凍結融解作用を与えている上面付近で速度が速くなっている原因の一つとして、水分の影響<sup>6)</sup>が考えられたため、図-3.4 に示す位置でコア採取（10cm×25cm）を行い、湿潤状態と乾燥状態の超音波伝播速度測定を10~20mm間隔で行った。その結果を図-3.7 および図-3.8 に示す。その結果、僅かではあるが深さ10cm程度から速度が低下している傾向が見られることから、この範囲で凍害劣化を受けていると考えられた。

A供試体：上面全体から水分供給



B供試体：上面中央部分のみ水分供給

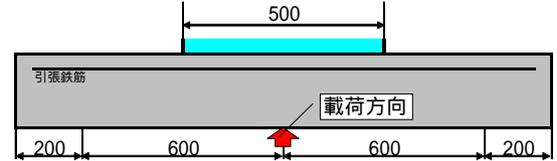


図-3.2 水分供給条件

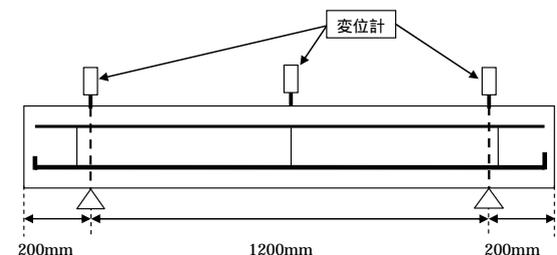


図-3.3 変位計設置箇所

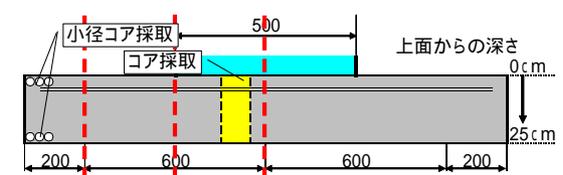


図-3.4 超音波伝播速度等測定箇所

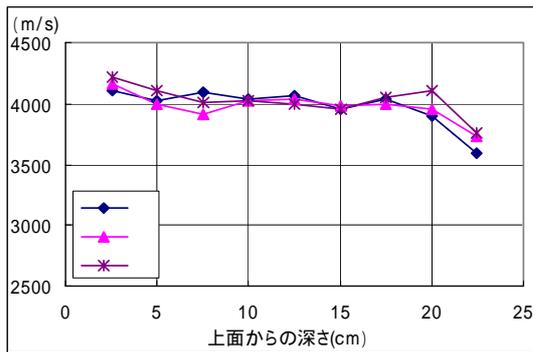


図-3.5 超音波伝播速度測定結果 (A 供試体)

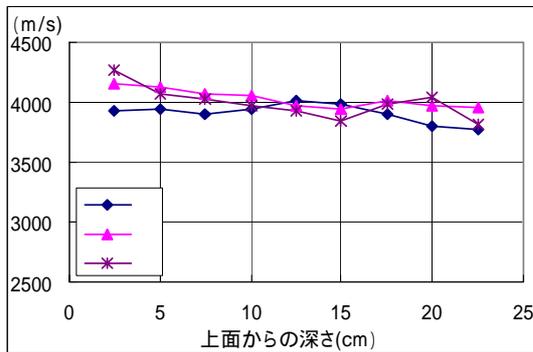


図-3.6 超音波伝播速度測定結果 (B 供試体)

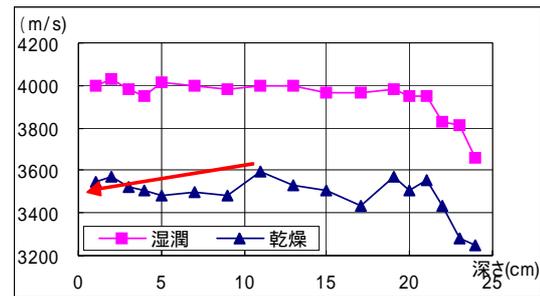


図-3.7 コア超音波伝播速度測定結果 (A 供試体)

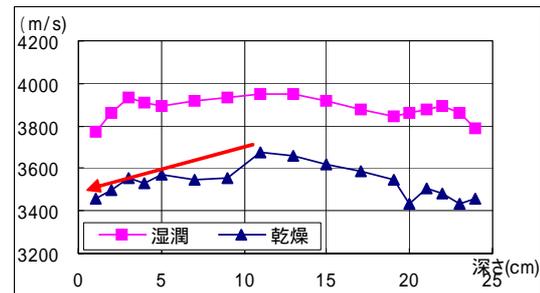


図-3.8 コア超音波伝播速度測定結果 (B 供試体)

## (2) 圧縮強度試験

また、下面に向けて速度が低下している原因の一つとして、水セメント比が65%と比較的高く、また、下面がコンクリート打設面であったため、ブリーディング等による強度低下が考えられた。そのため、図-3.4に示す位置で小径コア(25mm×50mm)の採取を行い、圧縮強度試験を行った。比較のため、凍結融解を与えていない供試体(以下、「N供試体」という。)についても圧縮強度試験を行った。なお、N供試体は小径コア採取時点で、載荷試験済みであったため、なるべく載荷試験の影響を受けていないと考えられるはり端部の位置から小径コアを採取した。

圧縮強度試験結果を図-3.9に示す。その結果、全ての供試体において、上面側と下面側の圧縮強度に顕著な強度差があった。また、下面側は各供試体で強度にあまり差がないのに対し、上面側は凍結融解作用を受けていないN供試体の強度が最も大きく、水分の供給を受け凍結融解作用を受けているA供試体の強度はN供試体に比べ10%程度低い結果となり、B供試体はその中間程度の値となっていた。

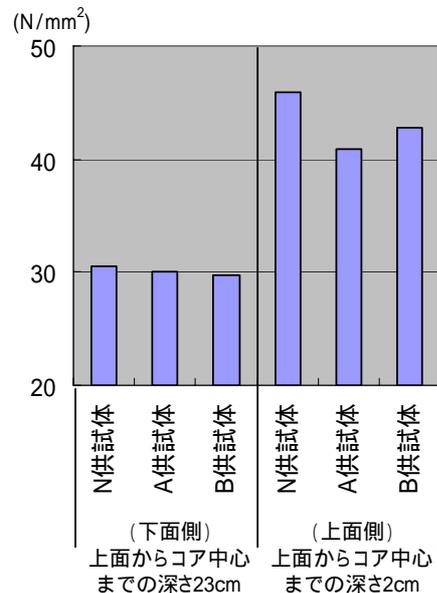


図-3.9 圧縮強度試験結果

## (3) 凍害劣化程度および範囲

以上のことを総合的に考えると、凍結融解作用を与えたA、B供試体は水分の供給を受けている部分で凍害劣化を受けているが、その程度は小さいものと考えられる。また、凍害劣化ではないが、供試体の上下でブリーディング等による強度差があると考えられる。

表-3.3 静的載荷試験結果

供試体	劣化	最大荷重 (kN)	破壊形態
N	無	70.8	曲げ圧縮破壊
A	全体的	76.4	曲げせん断破壊
B	中央部分的	72.8	曲げ圧縮破壊

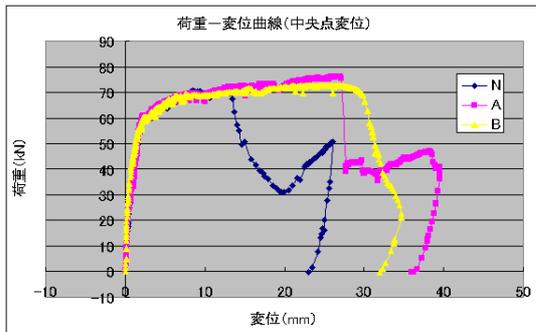


図-3.10 荷重変位曲線 (中央点変位)

### 3.3.2 静的載荷試験結果

静的載荷試験の結果を表-3.3 に示す。また、載荷時の各供試体の荷重変位曲線を図-3.10 に、破壊時の各供試体の状況を図-3.11 から図-3.13 に示す。

試験の結果、最大荷重に大きな変化は生じていないが、破壊形態が異なる結果となった。後藤ら<sup>7)</sup>は健全試験体と凍害劣化を受けた試験体のシミュレーションを行い、健全試験体は曲げ圧縮破壊、劣化試験体はせん断破壊になるなど、劣化の有無により破壊形態が異なる可能性があることを報告している。今回の結果も、N供試体は劣化部がなく、B供試体も劣化部が中央部分に限られており、荷重を負担できる部分が大きく、曲げ圧縮破壊となったのに対し、A供試体は引張縁全体に劣化が生じていたため、荷重を負担できる部分が減少し、特定の部分に応力が集中し、曲げせん断破壊になったと考えられる。しかし、最大荷重は、逆にA供試体が最も大きい結果となっているなど、上記の考えでは整合しない結果も生じており、今後、より詳細な検討を行う必要がある。

## 4. まとめ

### 4.1 実構造物の超音波測定値と室内促進試験および材料物性 (力学特性、拡散係数) の相関分析とまとめ

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結果、以下のこ



図-3.11 破壊時の状況 (N供試体)

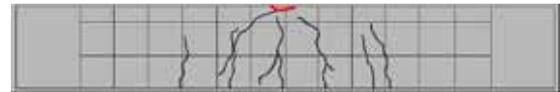


図-3.12 破壊時の状況 (A供試体)



図-3.13 破壊時の状況 (B供試体)

とが明らかとなった。

- (1) 力学特性 (圧縮強度) に及ぼす凍害の影響は、実構造物、室内促進試験とも、ひびわれ密度を変数にとった式により共通的な評価が行える。
- (2) 拡散係数に及ぼす凍害の影響をひびわれ密度のみで評価を行うことは難しく、ひびわれ幅や長さの影響を考慮する必要があるが、診断を行う場合、実用性を考慮すると超音波伝播速度による簡易的な評価が望ましい。

#### 4.2 凍害劣化を受けたコンクリート部材の力学的性能

R C はり部材に凍結融解作用を与え、静的載荷実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 凍害劣化程度が比較的小さい場合には、最大荷重に大きな変化は生じない。
- (2) 凍害劣化範囲の違いにより、異なる破壊形態となった。

#### 5. 今後の課題

コンクリート部材の凍害劣化範囲や程度をより大きくするなどして、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をさらに進める。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 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

- 3) 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.
- 4) 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
- 5) 田口史雄，林田宏，遠藤裕文，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
- 6) 林田宏，田口史雄，遠藤裕文，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
- 7) 後藤康明，北川淳：凍害による部材特性の予測解析，凍害の予測と耐久性設計の現状，日本コンクリート工学協会北海道支部，pp.31-48，2006.6

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

**Abstract** : A qualitative study was performed to determine the impact of frost damage on the mechanical characteristics of materials and the resulting decrease in their diffusion coefficients. Mechanical characteristics (compressive strength) can be evaluated based on crack density, while crack widths and crack lengths must also be considered to ascertain diffusion coefficients. If diagnosis is conducted, simplified evaluation using ultrasonic velocity is preferable in view of serviceability. To elucidate the correlation between structural performance and the deterioration of concrete subjected to the effects of freezing and thawing, static load tests involving the application of freeze-thaw action to reinforced concrete beams were conducted using large-scale freeze-thaw test equipment. The results indicated that different scopes of frost damage produced different fracture patterns.

**Key words:** Frost damage, Ultrasonic velocity, Crack density, Compressive strength, Diffusion coefficient of chloride ion, Structural performance