

寒冷地の RC 開水路側壁における
凍害劣化と診断手法に関する研究

Research on Frost Damage Deterioration and Diagnosis Method
of RC Open Channel Sidewall in Cold Region

周 藤 将 司

Masashi SUTO

2014

目次

第 1 章	序論	- 2 -
1.1	研究の背景	- 2 -
(1)	農業水利施設の現状	- 2 -
(2)	RC 開水路の供用環境の特徴	- 3 -
1.2	既往の研究	- 4 -
(1)	コンクリート構造物の凍害診断	- 4 -
(2)	薄肉構造である RC 開水路の凍害	- 7 -
1.3	本研究の目的	- 9 -
1.4	本論文の構成	- 10 -
第 2 章	RC 開水路側壁の凍害による変状と力学特性の変化	- 14 -
2.1	概要	- 14 -
2.2	表面変状	- 14 -
2.3	内部変状	- 17 -
2.4	力学特性の変化	- 22 -
(1)	検討概要	- 22 -
(2)	供試体概要	- 25 -
(3)	相対動弾性係数と各種物性値の比較	- 27 -
2.5	第 2 章の結論	- 32 -
第 3 章	RC 開水路における凍害の目視診断	- 34 -
3.1	概要	- 34 -
3.2	対象構造物の概要および表面変状の発生状況	- 34 -
3.3	採取コアによる内部変状の発生状況確認	- 36 -
3.4	目視診断による層状ひび割れの診断手法	- 38 -
3.5	第 3 章の結論	- 39 -
第 4 章	内部変状が電磁波レーダ法による鉄筋探査に及ぼす影響	- 42 -
4.1	概要	- 42 -
4.2	供試体による試験	- 44 -
(1)	試験概要	- 44 -
(2)	層状ひび割れが電磁波レーダ反射画像に及ぼす影響	- 45 -
4.3	実構造物による試験	- 46 -
(1)	試験概要	- 46 -
(2)	層状ひび割れの有無による電磁波レーダ反射画像の違い	- 47 -
4.4	複数の開水路における現地試験	- 48 -
(1)	試験概要	- 48 -

(2) 超音波伝播速度と電磁波レーダ反射画像の関係	- 50 -
4.5 第4章まとめ	- 53 -
第5章 注入工法を用いた層状ひび割れ評価手法に関する検討	- 56 -
5.1 概要	- 56 -
5.2 L型ブロックを用いた試験	- 57 -
(1) ブロック概要	- 57 -
(2) 注入試験方法	- 57 -
(3) 注入試験前後の超音波伝播速度の変化	- 59 -
(4) コア観察による充填度合いの確認	- 63 -
5.3 現場打ちフリーフォーム水路の側壁を用いた詳細試験	- 65 -
(1) 試験概要	- 65 -
(2) 注入試験方法	- 66 -
(3) 注入材の充填度合い	- 68 -
(4) 注入材充填前後の超音波伝播速度の変化	- 68 -
(5) コア供試体の超音波伝播速度	- 70 -
5.4 第5章まとめ	- 72 -
第6章 共鳴振動法による動弾性係数の現地試験	- 74 -
6.1 概要	- 74 -
6.2 小型起振機を用いた一次共鳴振動数の評価	- 75 -
(1) 小型起振機を用いた共鳴振動法の概要	- 75 -
(2) 一次共鳴振動数の評価	- 75 -
(3) 供試体における一次共鳴振動数の評価結果	- 77 -
6.3 動弾性係数評価フローの検討	- 79 -
(1) 検討フローの概要	- 79 -
(2) 大型壁体供試体を用いた検討	- 81 -
6.4 実構造物を用いた評価	- 82 -
(1) 現地試験概要	- 82 -
(2) フロー図から求まる動弾性係数とポアソン比との関係	- 83 -
6.5 第6章まとめ	- 84 -
第7章 結論	- 88 -
参考文献	- 93 -
謝辞	- 97 -
摘要	- 99 -
Abstract	- 101 -
学位論文の基礎となる公表論文	- 105 -

第 1 章

序 論

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

(1) 農業水利施設の現状

農業水利施設とは農業用水の取水・貯水・導水・送水・排水を行う施設のことであり、代表的なものとしてはダム・頭首工・用排水機場・用排水路などが挙げられる。農業水利施設全体での資産価値（農業水利ストック量）は、再建設費で約 50 兆円に上る（平成 21 年 3 月時点）。農業水利施設の中で、受益面積が 100ha 以上の施設を基幹的水利施設と言う。基幹的水利施設については、用排水路の延長が約 4 万 9 千 km であり、ストック量は全体の 4 割弱となる 18 兆円にも上る [1-1]。

これらの水利施設の多くは戦後に集中的に整備されたものであり、近年、耐用年数を超過し更新時期を迎える施設が増加している。平成 24 年度食料・農業・農村白書によれば、基幹的水利施設において標準耐用年数を超過している割合は 17% であり、今後 10 年のうちに標準耐用年数を超過する施設を加えると全体の 31% となる [1-2]。

標準耐用年数を超過し更新期を迎える農業水利施設については、全てを改築することは不可能である。現在は、既存の農業水利施設の機能を効率的に維持することを目的とした機能診断を行い、適切な予防保全対策を行うことが求められている。機能保全対策を通じて施設の有効活用や長寿命化を図り、ライフサイクルコストを低減させることを目的とした一連の取組みを総称してストックマネジメントと呼ぶ。

農林水産省では、平成 18 年からストックマネジメントに係る基本的な考え方と実施方針の枠組みを整理することを目的として「農業水利施設の機能保全の手引き」を策定している。機能保全の手引きは、水利施設ごとに整理させており、開水路編、頭首工編など、総論編を含めて計 11 編が策定されている。ストックマネジメントの考え方として、最も重要な項目は、施設の長寿命化である。施設の長寿命化を図るためには、適切に現状を評価し、適切な対策を講じることが必要となる。機能保全の手引き「総論編」によれば、ストックマネジメントに関する研究は多く行われているものの、対象となる構造物も多く、十分なデータ数の確保まで至っていない現状であると解説されている [1-3]。

農業水利施設の機能診断は、事前調査、現地踏査、現地調査という順序に沿って行うこととされている [1-4]。事前調査では、構造物の供用環境や供用条件を整理し、現地で実際の調査を行う際に必要となる基本データの収集を行う。

その後の現地踏査では、実際に現地で概査を行い、調査箇所を選定を行う。現地調査では、踏査の段階で選定した調査箇所について様々な試験方法を用いて精査を行い、詳細な診断を行う。水利施設において、特に用排水路については延長距離が長いために、現地調査を行うことができる箇所は時間面や費用面から限定される。したがって、現地調査を行う前に実施する現地踏査が非常に重要な役割を担うこととなる。現地踏査の段階で調査箇所を選定する際には、水利施設の劣化状態を適切に評価するために、その構造物における代表的な劣化の箇所を選定しなければならない。しかし現時点では、明確な選定基準が定められていないことから、農業水利施設の機能診断を確実に行うための前提として、この問題を工学的に解決する必要がある。

(2) RC 開水路の供用環境の特徴

本研究で対象とした RC 開水路は農業水利施設のひとつであり、スパンごとに区切られた構造物が連続して設置されることで長い延長距離となっている。RC 構造の開水路の構造形式には、フリューム水路、二次製品である L 型ブロックや U 型ブロックなどが挙げられる。いずれの構造形式についても RC 開水路の特徴としては、面的な広がりを持つ薄肉構造物である点が挙げられる。

また、RC 開水路は、各々が特徴的な環境条件の下で供用されている[1-5]。側壁では、夏季の灌漑期に通水を行うと水位より下部の水中に隠れる部分（以下、水中部と呼ぶ）と、水位より上部の気中に曝される部分（以下、気中部と呼ぶ）が存在する。また、冬季の非灌漑期においては、通水が無いために灌漑期に水中部だった箇所も気中に曝されることになる。背面の状態も、土中に埋もれている場合（埋設型）と大気に曝されている場合（置樋型）に大別される。更に、土中に埋もれている場合には、地下水位の高低も供用条件が異なる要因として挙げられる。例えば、斜面に水路を設置した場合では、山側の地下水位は高く、谷側の地下水位は低くなり、同一のスパン内でも左右岸で条件が異なる。左右岸で異なる条件としては、他に日射の影響も挙げられる。左右岸の側壁は平行に設置されるため、日射を受ける面はどちらか一方のみに限られる。

このように、RC 開水路の供用環境は様々であり、コンクリート構造物である RC 開水路に発生する劣化も、この環境条件に応じた特徴を有している。特に寒冷地においては、凍結融解の繰返し作用による凍害劣化が発生するが、構造物が置かれる環境条件の違いによって、凍害劣化による変状の発生状況も異なる。一例として、写真 1-1 に同スパン内の左右岸の表面状態を示す。左岸側の気中部では、表面変状として水路長手方向に延びるひび割れが確認される。一方、右岸側では、特に目立った変状は確認できない。これらの凍害劣化による変状

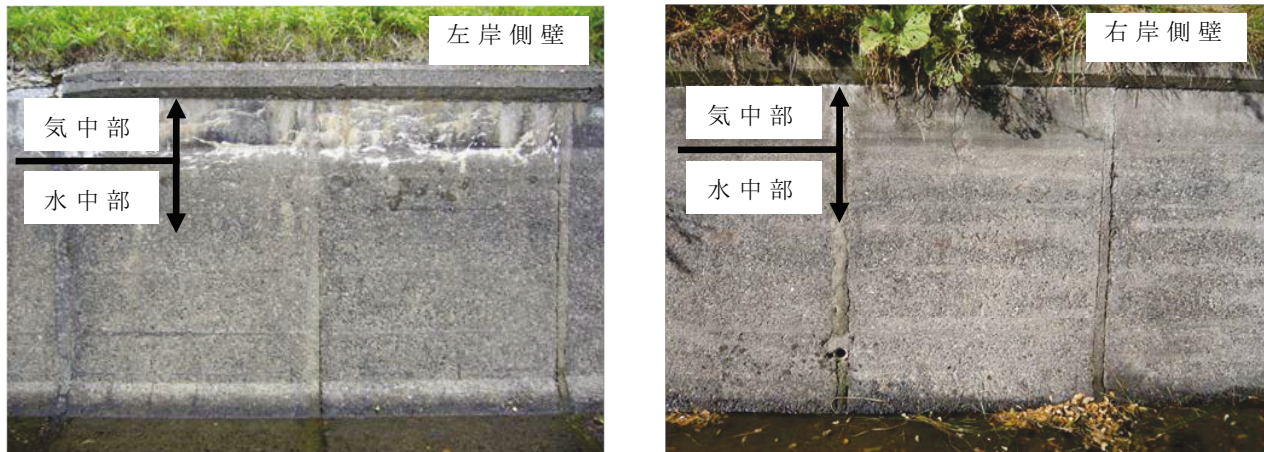


写真 1-1 RC 開水路の左右岸における変状の違い

の発生パターンについては、ひび割れやスケーリングといった形態で表面化するが、どのような環境条件の場合にどのような変状が生じるのかといった分類は行われていない。機能診断を行う上では構造物に応じた診断が求められるため、環境条件に応じた変状の発生パターンを分類し整理することが求められる。

1.2 既往の研究

(1) コンクリート構造物の凍害診断

コンクリート構造物の凍害についての研究は古くから行われているが、一般的に凍害劣化の進行は「水圧説」[1-6]によって説明される。水は、凍結して氷になる際に約 9% の体積膨張を生じる。コンクリート内部で水の凍結が生じると、氷の体積膨張によって未凍結水は移動する。水圧説は、未凍結水の移動の際に生じる移動圧によって微細ひび割れが進展し、凍害劣化が生じるというものである。移動圧を緩和し、凍結融解作用に対する抵抗性を高める方法としては、AE 剤の使用が効果的である。AE 剤を使用すると、コンクリート内に直径が 10 ～ 100 μm 程度の球形の気泡であるエントレインドエアが分散して導入される。エントレインドエアを単位体積の 3 ～ 6% 導入することで、耐凍害性を有するコンクリートとなる[1-7]。

凍害の劣化予測については、図 1-1 に示す、地域ごとに凍害劣化の危険度を示した凍害危険度マップが示されている[1-8]。また、コンクリート標準示方書では、劣化の評価を行う際の劣化過程の定義やグレードが表 1-1、1-2 のとおり示されている[1-9]。また、表 1-1、1-2 を基にした劣化度という指標を用いた評価も行われている[1-10]。劣化度と劣化状態の関係を表 1-3 に示す。

凍害劣化については、同じ変状が生じる箇所であっても、環境条件によって

1.○内の数字は凍害危険度

凍害危険度	凍害の予測程度
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

2.コンクリートの品質が良くない場合には、----内の地域でも凍害が発生する。

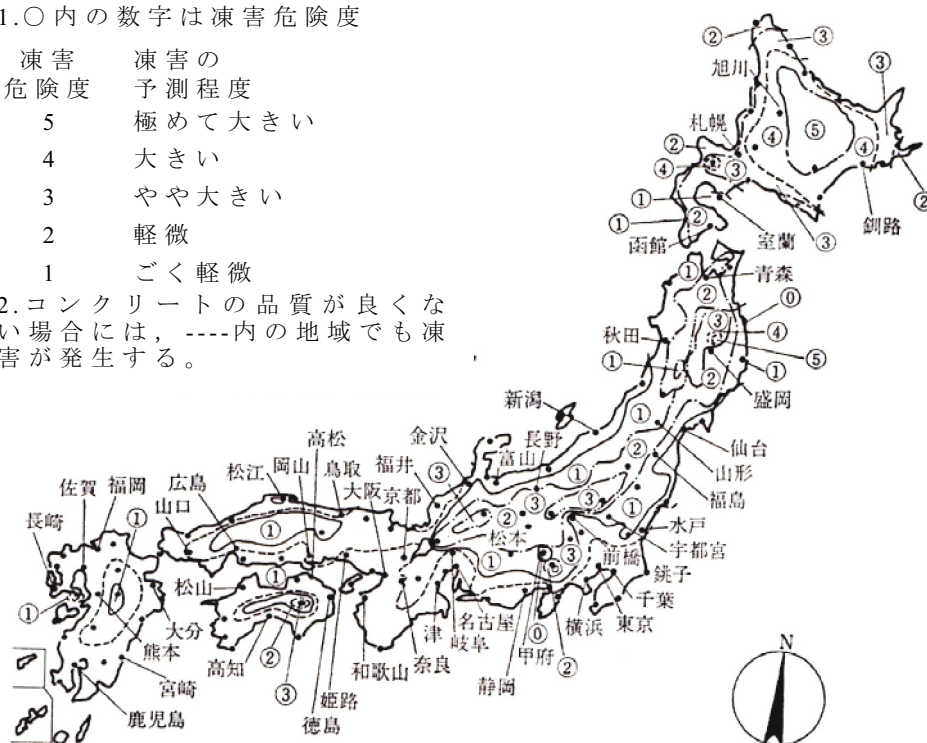


図 1-1 凍害危険度マップ [1-8]

表 1-1 各劣化過程の定義と期間を決定する要因

劣化過程	定義	期間を決定する要因
潜伏期	凍結融解作用を受けスケーリングが発生するまでの期間	凍害発生の可能性の有無，最低温度，凍結水量，凍結融解回数
進展期	コンクリート表面の劣化が進行し，骨材が露出，もしくははく離するまでの期間	最低温度，凍結水量，凍結融解回数
加速期	鋼材が露出したり，鋼材露出が開始するまでの期間	凍害深さ，鋼材の腐食速度
劣化期	鋼材の腐食が進行し，耐荷性の低下が顕著な期間	凍害深さ，鋼材の腐食速度

劣化の進行速度は大きく異なるため，劣化の予測式が作成されていない。また，凍害は，劣化機構の断定を行う場合に，凍害は中性化，塩害，アルカリシリカ反応などの化学的変化を伴う劣化機構とは異なり，水の凍結に伴う体積膨張に起因する物理的劣化であるため，劣化の原因を特定する手段が無く，変状のパターンから，状況証拠的に凍害劣化と特定する場合はほとんどであると述べてい

表 1-2 構造物の外観上のグレードと劣化状態の関係

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ（潜伏期）	凍結融解作用を受けるが，性能低下がなく初期の健全性を保持している段階
状態Ⅱ（進展期）	凍害深さが小さく剛性にほとんど変化はなく鋼材腐食もないが，美観等に影響を及ぼす段階
状態Ⅲ（加速期）	凍害深さが大きくなり，はく落等の第三者への影響が起こり鋼材腐食が発生する段階
状態Ⅳ（劣化期）	凍害深さが鋼材位置以上になり，腐食が著しくなり，使用性能や安全性能へ影響を及ぼす段階

表 1-3 劣化度と劣化状態の関係

劣化度	劣化状態
Ⅰ（潜伏期）	凍害深さ率が小さく，劣化はほとんどなし
Ⅱ-1（進展期-1）	軽度の劣化
Ⅱ-2（進展期-2）	中度の劣化
Ⅲ（加速期）	やや重度の劣化
Ⅳ（劣化期）	重度の劣化

る[1-11]。

凍害の診断手法については，超音波法を用いて劣化の評価を行う研究が多く行われている。超音波法は，端子で対象物を挟み込んで測定を行う透過法と，同一表面に端子を設置して測定を行う表面法とに大別される。超音波法で測定を行う超音波伝播速度の特徴としては，健全で密な状態のコンクリートでは伝播速度が速くなり，劣化が進行して粗な状態のコンクリートでは超音波パルスの透過が阻害されるため伝播速度が遅くなることが挙げられる。一般に，健全な状態のコンクリートの超音波伝播速度は，3000～5250m/sec であると言われている[1-12]。

透過法の測定は，破壊試験の際に用いられる場合が多い。測定方法は，採取したコア供試体に対して直径方向に発・受振子を設置して，深さ方向に端子を移動しながら超音波伝播速度を繰り返し測定する方法である[1-13]。測定値からは，深さ方向の超音波伝播速度の違いを利用して，凍害劣化深さを推定することができる。

表面法では、測定方法として表面走査法と超音波法（土研法）（以下、土研法と呼ぶ）が提案されている。表面走査法は、コンクリートの表面劣化深さを推定する手法であり、1974年制定の BS4408 Part5 に示されている手法である[1-14]。日本では、1981年に柏によって紹介された[1-15]。この手法は表面劣化深さを推定する手法であるが、遠藤らは表面から劣化が進行する凍害劣化への利用を考案し、表面走査法による凍害劣化深さの推定が可能であることを明らかにしている[1-16, 1-17]。また、下村らは、スリットの入ったコンクリート供試体を用いた検討から、表面法による評価可能な深さは 70mm 程度であることを明らかにしている[1-18]。土研法は、土木研究所によって考案された手法であり、超音波伝播速度からコンクリートの強度推定を行う手法である[1-19]。森濱は、この手法によって、±15%程度の精度で強度の推定が可能であることを示している[1-20]。

一般的にコンクリートの耐凍害性を示す指標としては、相対動弾性係数が用いられる。相対動弾性係数による評価では、JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法」において凍結融解のサイクルが 300 サイクル完了時に 60%以上の値を示していると耐凍害性を有するコンクリートであると評価される。また、桂らは、相対動弾性係数が 85%を境に凍害劣化の進行が加速することを明らかにしている[1-21]。

相対動弾性係数は、JIS A 1127:2010「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」に準じて、一次共鳴振動数を供試体の形状に応じてたわみ振動、または縦振動によって測定し、劣化前の健全な状態の値と劣化後の値の二乗比を採ることで示される。この試験は、実構造物の施工と同様の配合のコンクリート供試体を作製して行われる。また、破壊試験として実構造物から採取したコア供試体を用いて評価を行う場合もある。しかし、定型以外のコンクリートについては、本試験法を適用して一次共鳴振動数の測定を行うことができない。一次共鳴振動数を構造物に対して直接測定する他の方法は確立されておらず、試験方法の考案が求められている。

(2)薄肉構造である RC 開水路の凍害

前項で述べた試験方法はいずれもコンクリート構造物を対象とした評価手法である。本研究で対象とする RC 開水路は、1.1 節(2)項で述べたとおり薄肉構造という特徴を有している。近年の研究からは、薄肉構造のコンクリート構造物において、凍害による変状が一般の構造物とは異なる形態で発生していることが確認、報告されている。

RC 開水路の凍害劣化による表面変状で一般的に確認される変状は、写真 1-2

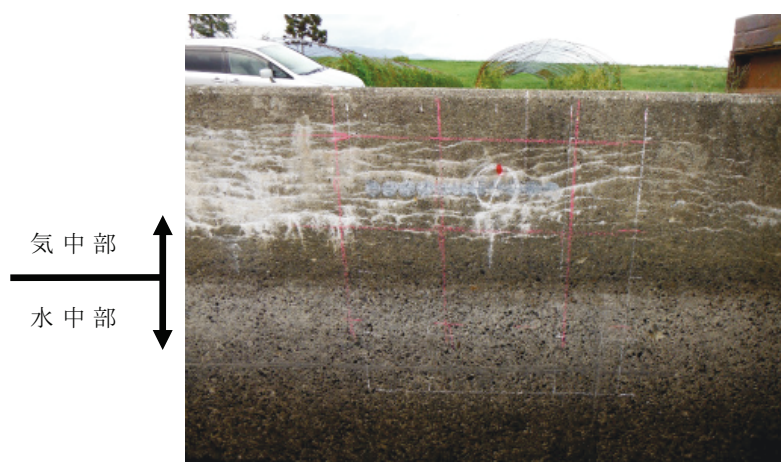


写真 1-2 RC 開水路側壁の表面のひび割れ

に示されるような水路長手方向に延びるひび割れである。ひび割れの発生場所は概ね気中部に相当する場所であり、灌漑期の水中部にあたる場所ではひび割れの発生はほとんど確認されない。緒方らは、このメカニズムとして凍結期ではなく、非凍結期の灌漑期の状態が影響を及ぼしていると考え、青野らの既往の研究から以下の考察を行っている[1-22]。

青野らは、硬化セメントペーストが乾湿繰返し作用を受ける際に C-S-H のシリケートアニオン鎖の結合が生じ、これがペースト内の細孔構造の粗大化を生じる原因となり、耐凍害性に影響を与えることを明らかにしている[1-23]。青野らの報告では、耐凍害性低下の本質的な原因はナノ構造レベルでの変化に起因する可能性が考えられるとまとめられている[1-24]。灌漑期における気中部は、降雨などの環境的要因によって乾湿繰返し作用を受ける。その際に生じるシリケートアニオン鎖の結合によって粗大化した細孔構造が、非灌漑期の凍結期に凍害劣化を促進する要因となっている。

RC 開水路の表面変状については、上述のとおり説明される。一方、内部変状については、表面変状とは異なる方向のひび割れが生じる事例が報告されている。緒方らは、凍害劣化の進行した RC 開水路から採取したコア側面から層状ひび割れを確認している。写真 1-3 に層状ひび割れの発生状況を示す。層状ひび割れの発生メカニズムについては、次のとおりとして説明している[1-25]。RC 開水路は面的な広がりを持つ薄肉構造物であり、凍結期に受ける凍結融解作用は面的に作用する。凍結融解作用の要因である温度変化が面的に作用して内部に伝達されることで、部材厚方向に温度差が生じ、水分の凍結に伴う未凍結水の移動圧も部材厚方向に生じることで層状ひび割れが発生すると推察される。

層状ひび割れに対する詳細な考察としては、層状ひび割れの確認されるコア

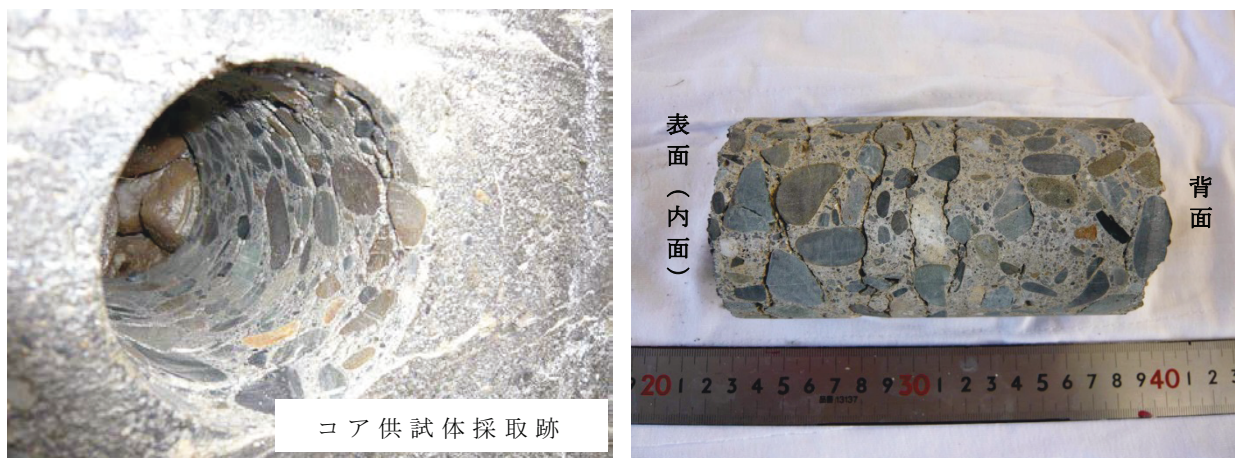


写真 1-3 RC 開水路側壁の層状ひび割れの発生状況 [1-25]

供試体に対するマイクロスコープによる画像解析から，層状ひび割れ間の距離を測定したものがあある [1-5]。ひび割れの間隔は概ね等間隔であるが，側壁表面（内面）側の方が背面側と比較してやや狭い間隔でひび割れが生じている。また，同一バレル間で採取した気中部と水中部のひび割れ距離が同様な結果となっており，内部変状の連続性が推察されている。しかし，内部変状の連続性については，これまでコア供試体による点のデータとして得られているだけであり，現状では面的な広がりについては確認されていない。

1.3 本研究の目的

日本国内における寒冷地は，北海道や東北地方だけでなく本州の山間部にも存在し，凍結融解の繰返し作用に起因する凍害による問題はそれぞれの地域で顕在化している。特に RC 開水路の凍害については，近年，表面変状と内部変状によるひび割れの発生形態が異なることが明らかになっている。RC 開水路は，日本の農業を支える基盤となる農業用水利施設であることから，その長寿命化を図るために，凍害劣化に対する適切な診断と対策を行わなければならない。

RC 開水路のストックマネジメントを行う上では，既往の研究によって明らかになっている変状の発生メカニズムやパターンについて更なる検討が必要とされる。また，変状発生時の力学特性の変化や変状，特に内部変状の診断・評価手法を明確に示すことが，今後のストックマネジメント事業の進展のためには必要不可欠であると考えられる。

本論文では，寒冷地における RC 開水路のストックマネジメント，特に機能診断に資することを目的として，次の項目の研究に取り組んだ。

- ① 凍害による劣化が進行したコンクリートの力学特性を凍害診断に即した

形で整理を行う。

- ② 現地踏査の段階で内部変状の評価を目視診断によって行う。
- ③ ②を終えた後、現地調査の段階で層状ひび割れの評価を定量的に行う。
- ④ 実務として機能診断を行うことを想定して、非破壊試験による凍害診断手法の提案を行う。

1.4 本論文の構成

本論文は、以下の 7 章から構成される。

- 第 1 章 序論
- 第 2 章 RC 開水路側壁の凍害による変状と力学特性の変化
- 第 3 章 RC 開水路における凍害の目視診断
- 第 4 章 内部変状が電磁波レーダ法による鉄筋探査に及ぼす影響
- 第 5 章 注入工法を用いた層状ひび割れ評価手法に関する検討
- 第 6 章 共鳴振動法による動弾性係数の現地試験
- 第 7 章 結論

各章の主な内容を以下に示す。

第 1 章 序論

本研究の背景について述べ、RC 開水路の凍害に関する既往の研究を整理した上で課題となる点を見出し、本研究の目的を示した。

第 2 章 RC 開水路側壁の凍害による変状と力学特性の変化

RC 開水路の凍害における表面変状と内部変状の関連性について述べた上で、それらの変状による力学特性の変化を検討した。力学特性については、相対動弾性係数との関係から整理した。

第 3 章 RC 開水路における凍害の目視診断

凍害劣化の進行した RC 開水路において表面変状の形態から、内部変状の評価を行うことを目的として検討を行った。採取したコア供試体による内部変状の発生状況から、層状ひび割れの生じ易い箇所の表面変状の特徴をまとめた。

第 4 章 内部変状が電磁波レーダ法による鉄筋探査に及ぼす影響

電磁波レーダ法による走査に層状ひび割れが及ぼす影響についての検討を行った。まず、室内試験として供試体を用いた試験と実構造物を用いた試験を行い、その後に複数の開水路における現地試験を行った。

第 5 章 注入工法を用いた層状ひび割れ評価手法に関する検討

注入工法を用いて層状ひび割れの発生範囲を定量的に評価する手法についての検討を行った。検討に際しては、層状ひび割れが発生している RC 開水路の一部を実験室に搬入し、室内試験を行った。

第 6 章 共鳴振動法による動弾性係数の現地試験

小型起振機を用いた共鳴振動法による一次共鳴振動数の測定手法についての検討を行い、その実用性を確認した。その後、現地試験を行う際の測定フローを示し、そのフロー図に則った測定を行うことでフロー図の妥当性の確認を行った。

第 7 章 結論

各章から得られたまとめを整理し、本研究の結論を示すとともに、残された今後の課題について述べた。

第 2 章

RC 開水路側壁の凍害による変状と 力学特性の変化

第 2 章 RC 開水路側壁の凍害による変状と力学特性の変化

2.1 概要

凍害による変状は，表面変状と内部変状に区別される。表面変状とは目視によって確認されるコンクリート表面に生じた変状であり，代表的な変状としては，ひび割れやスケーリング，ポップアウトが挙げられる。一方，内部変状はコンクリート内部に生じた変状であり，代表的な変状としてはひび割れや組織の緩みが挙げられる。内部変状は目視で確認することが不可能であるため，その発生状況や形態については整理が行われていないのが現状である。また，RC 開水路側壁に代表される薄肉構造物については，近年，表面変状と内部変状でひび割れの方法が異なることが報告されている。特に内部変状については，側壁表面に対して層状にひび割れが発生することが確認されている。しかし，この層状ひび割れの発生形態についてはコア供試体による確認が行われているのみであり，面的な広がりについては確認がなされていない。

そこで，寒冷地において長期間供用され，凍害劣化の進行している RC 開水路側壁を対象として，表面変状と内部変状の調査を行った。表面変状については，主にスケーリングの有無やひび割れの方法について目視調査を行い，ひび割れ深さとの関係についての考察を加えた。内部変状については，開水路側壁として供用されていた L 型ブロックを実験室に搬入し，ブロックを長手方向に切断することで層状ひび割れの分布や連続性の確認を行った。さらに，層状ひび割れの生じている箇所に蛍光塗料を含んだ注入材を充填し，その箇所からコアを採取することで側壁の鉛直方向へのひび割れの分布の確認も合わせて行った。

2.2 表面変状

第 1 章で述べたとおり，RC 開水路側壁の表面変状としては，側壁の長手方向に延びるひび割れが多く確認される。

写真 2-1 は，北海道内で供用されて 40 年程度が経過し，凍害による表面変状が生じている RC 開水路の目地近傍の状態を示したものである。水路の 1 スパンで区切って表面のひび割れの発生状況を確認すると，スパン端部の目地に近い箇所では，写真 2-1 に示すような目地から斜めに立ち上がるひび割れも確認された。このひび割れについては，目地を挟んで隣接するスパンのどちらか一方のみで発生している状況が多く，箇所で確認された。ひび割れがどちらか一方のみで発生する理由としては，水路建設時の状況が関係すると考えられる。水路の打設はスパンごとに行われるが，その際にスパンをひとつ飛ばしにして打設



写真 2-1 目地から斜めに立ち上がるひび割れ



写真 2-2 表面のひび割れの状況

が進められる。間に入るスパンは、両隣のコンクリートが硬化した後に打設されることとなる。したがって、スパンには先打ちと後打ちの区間が交互に存在する。後打ちのスパンでは、躯体の温度変化に対する体積変化が先打ちのスパンによって拘束されるために目地近傍で応力が集中し、ひび割れが生じると考察される。その際に生じたひび割れの箇所では凍結融解の繰返し作用が生じることで、目地から斜めに立ち上がるひび割れが進展すると考えられる。

写真 2-2 にスパン中央部の表面ひび割れの様子を示す。写真 2-2 は、写真 2-1 と同様の供用条件の RC 開水路側壁であるが、それぞれ別の場所に位置する開水路である。スパン中央部では、灌漑期における最多頻度水位より上部の気中部だけにひび割れの発生が顕著である。このひび割れは長手方向に延びているものの、全てが直線的に発生しているのではなく、上下に湾曲しながら分布している。全体でみると、ひび割れが上部にのみ発生している箇所と、下部まで発

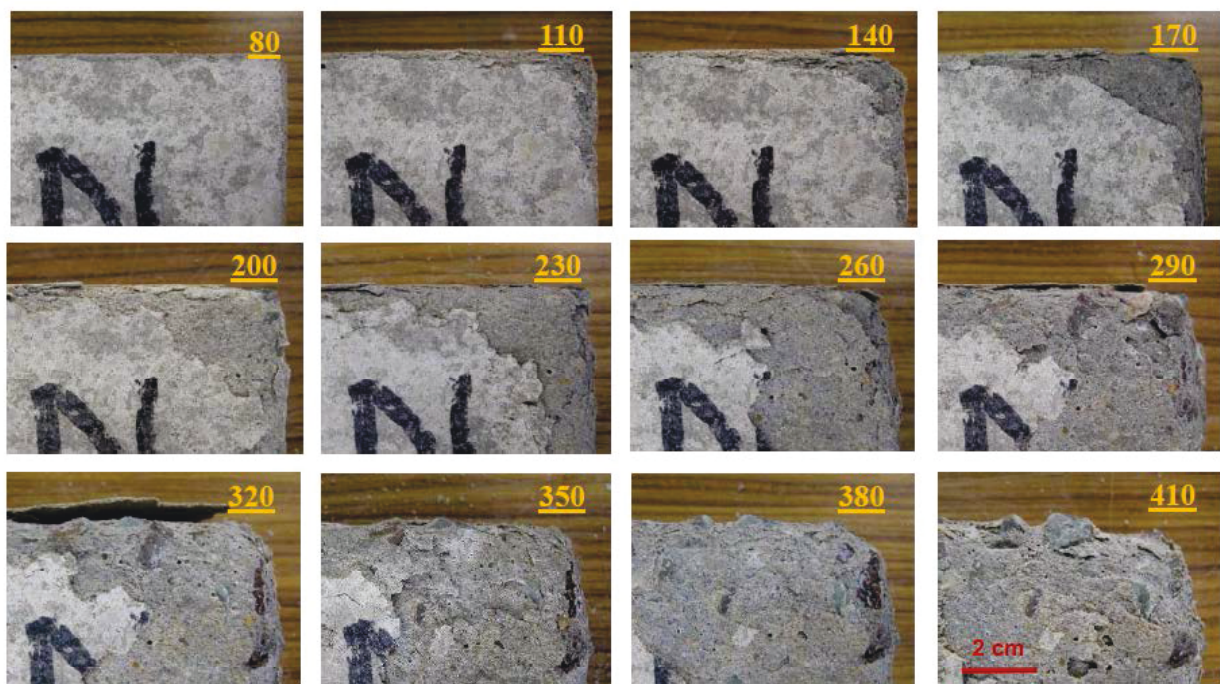


写真 2-3 凍結融解サイクルの進行に伴う供試体隅角部の劣化過程[2-2]

生している箇所に分類することができる。

ひび割れの分布については上述のとおりであるが、凍害診断を行う際には凍害劣化深さを求めることが必要である。これは、診断後に対策を行う際に劣化部を適切に除去する必要があるためである。既往の研究では、超音波伝播速度の測定によって凍害劣化深さを求める手法についての検討が行われてきた。例えば、山下らは超音波伝播速度の測定に細孔径分布の測定を組み合わせることで凍害深さを推定する方法を試みている[2-1]。その他には、第 1 章で述べた表面走査法や土研法についての研究が行われてきた。開水路側壁などの薄肉構造物におけるひび割れ深さについては、層状ひび割れの影響も考えられるため、ひび割れ進展のメカニズムについて整理する必要がある。

森田らが行った室内試験の結果からは、コンクリートが凍結融解作用を繰返し受けることで表面から劣化が進行し、まずコンクリート表層のスキン層一層のみが剥離する現象が確認されている。写真 2-3 に凍結融解サイクルの進行に伴う供試体隅角部の劣化過程を示す[2-2]。しかし、この試験は室内試験で $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ の角柱供試体を用いた場合の試験結果であり、実際に現地でも同様の現象が生じるか否かについては検討されていない。

そこで本研究では、現地調査を行うことで表層の一層のみが剥離する現象の確認を行った。調査個所は北海道内で供用されている RC 開水路であり、凍害劣



写真 2-4 表面のひび割れの状況

化が進行している箇所を選定して調査を行った。

調査箇所の表面変状の状態を写真 2-4 に示す。写真 2-4 の箇所は、供用後 45 年程度が経過した箇所である。調査箇所からは、表面変状としてスケーリングが発生し、表層の一層のみが剥離している箇所が確認された。これは、RC 開水路側壁に対して気温の変化や日射による温度変化が面的に作用した結果であると考えられる。温度変化が点ではなく面として作用することで温度勾配が部材厚方向に生じ、この温度勾配に起因した凍結融解の繰返し作用によって微細なひび割れが生じる。微細ひび割れは面全体で生じることから、それらが徐々に拡大して連続したひび割れとなることで層状ひび割れへと進展するものと考えられる。

写真 2-4 に示した水路側壁では、表層の一層のみが剥離している箇所において、表面ひび割れは第一層のみで進行しており、内部までひび割れが到達していないことが確認された。表面変状として表面から目視で確認することが可能なひび割れは、薄肉構造物においては深さ方向への進展は顕著ではなく、表層のスキン層の厚さ分のみ深さ方向に進行する。このことから、スキン層のスケーリングは、内部変状として発生する層状ひび割れの一種であると言える。本調査によって、表面変状である表面ひび割れのひび割れ深さは、内部変状の進行度合いと関連性があることが示された。

2.3 内部変状

内部変状としては、既往の研究によって層状ひび割れが発生することが確認されている[2-3]。本節では、これまで点データのみで確認されてきた層状ひび割れを面的に評価することを目的とした試験を行う。まず、L 型ブロックを長手

切断位置
(最多頻度水位)



写真 2-5 切断を行う L 型ブロックの表面状態

方向に切断することで層状ひび割れの分布を確認する。その後、別の RC 開水路側壁から複数採取したコア供試体から、鉛直方向のひび割れの分布についての考察を行う。鉛直方向のひび割れについては、単にひび割れの分布や方向の傾向を探るだけではなく、層状ひび割れの連続性を確認することも目的としている。そこで本試験では、側壁ブロックに注入孔を削孔した後に注入材（蛍光塗料を混入したエポキシ樹脂）を充填し、その充填状況を踏まえて層状ひび割れの発生形態に考察を加える。

本試験で対象とした RC 開水路は、北海道内で昭和 40 年代に築造された背面が土中に埋もれている埋設型であり、側壁と底版からなる L 型ブロックである。水路側壁の内面側の状態を写真 2-5 に示す。側壁部の寸法は、側壁上端からハンチ上端までの高さ 2070mm、幅 1200mm、側壁上端の厚さ 130mm、ハンチ上端の厚さ 160mm である。また、この L 型ブロックの内側は、南東向き面となっており凍結融解の作用を受け易い供用環境にあった。表面の目視観察からは、最多頻度水位より上部の気中部に凍害劣化による長手方向に延びるひび割れが多く存在し、ひび割れ箇所からはエフロレッセンスの発生も確認された。一方、最多頻度水位より下部の水中部では摩耗により粗骨材の露出が目立つが、凍害劣化によるものと思われる変状は確認されなかった。

気中部を切断した際の断面状況を写真 2-6 に示す。緒方らは、開水路のような薄肉構造物の凍害劣化ひび割れは表面部と内部でひび割れの進行方向が異なることを示している[2-4]。切断した L 型ブロックについても、表面部には長手方向に延びるひび割れが生じていたが、断面からは層状ひび割れが確認された。内部の層状ひび割れについては、これまで採取コアの観察しか行われておらず、部材内部における連続性については明らかにされていないが、本試験の結果により層状ひび割れは連続している長さは異なるもののいずれも連続したひび割

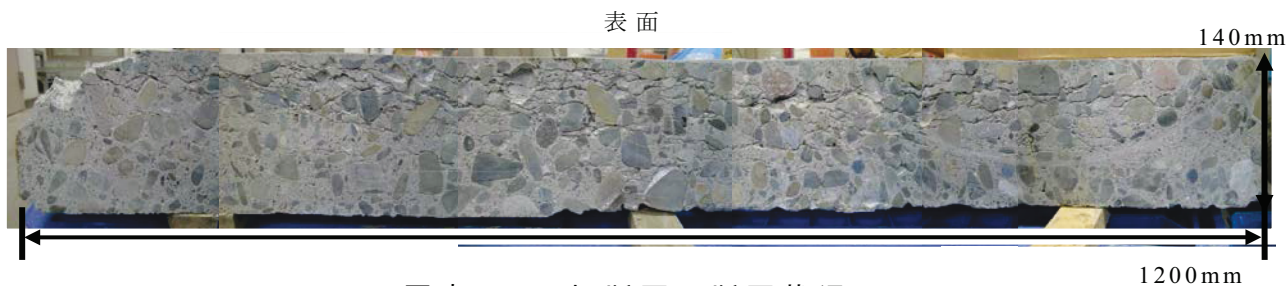


写真 2-6 切断面の断面状況



写真 2-7 垂直方向のひび割れ評価用ブロックの表面状態

れであることが確認された。また、写真 2-6 からは、層状ひび割れは表面側に集中して生じており、背面側には生じていないことがわかる。これは、表面側は日射を受け凍結融解作用が多く働くために、凍害劣化が表面側からのみ進行したためである。切断面の観察からは、層状ひび割れの連続性が明確になったため、この後に行う注入材の充填では連続している層状ひび割れが注入材により閉塞することで面的に一体性が確保されることが示唆される。

次に鉛直方向のひび割れの分布について考察するために行った試験に用いた側壁ブロックを写真 2-7 に示す。このブロックは、RC 構造の現場打ちフリーフォーム水路の側壁を採取したものである。側壁の表面は南向きに面しており、背面は土中に埋もれた状態で供用されていた。このブロックの幅は 1500mm、高さは 2400mm、側壁上端の厚さは 200mm、ハンチ上端の厚さは 300mm である。注入材の充填は、層状ひび割れの発生が顕著であると考えられるブロックの気中部を対象として行った。

写真 2-8 に気中部のコア供試体採取位置を示す。コア供試体は、各ブロックの注入孔直上と注入孔近辺で注入材の充填がなされた、あるいはなされたと思われる箇所から採取した。また、凍害による劣化が生じておらず、層状ひび割れが発生していない箇所である水中部からもコア供試体を採取した。加えて、コ



写真 2-8 コア供試体採取位置(気中部)

表 2-1 採取したコア供試体の目視情報

No.	ひび割れ	注入材の充填
1	有り	—
2	有り	有り
3	有り	有り



【No.1】



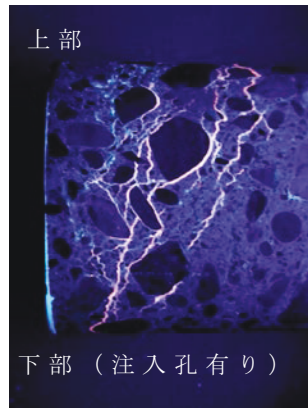
【水中部から採取したコア供試体】

写真 2-9 注入材充填前に採取したコア供試体

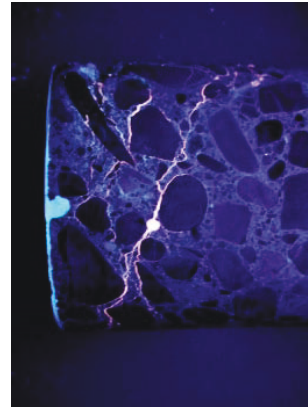
コア供試体の採取は、注入材の充填前にも行っている（コア供試体 No.1）。採取したコア供試体の目視情報を表 2-1 に示す。

写真 2-9 に注入材充填前に採取したコア供試体を示す。コア供試体 No.1 では表面側に複数の層状ひび割れが確認された。一方、水中部から採取したコア供試体からは、想定通りひび割れは確認されなかった。

写真 2-10 に注入材充填後に採取したコア供試体を示す。ブロック No.2, 3 では、注入材が供試体の斜め方向に充填されていることが確認された。なお、注入孔はコア供試体採取位置の下部に存在する。コア供試体のひび割れは、上部側において表面付近から内部まで発生していることが確認されるが、下部側では表面付近のみに発生している。このことから、水路側壁の層状ひび割れは、斜め方向に連続して発生していることが明らかになった。



【ブロック No.2】



【ブロック No.3】

写真 2-10 注入材充填後に採取したコア供試体
(ブラックライト照射による撮影)

層状ひび割れが斜め方向に生じる要因としては、次のとおり考えられる。水路側壁の凍結融解作用は、日射の影響を面的に受ける水路表面側において卓越し、凍結融解の繰返し作用を受けることで表面側から組織の緩みが生じる。一方、層状ひび割れは、天端のスケーリングによる影響から水分の通り道となる部位で発生し易いことが明らかとなっている。天端からの水分の供給は、同じ気中部においても天端に近い上部の方がより多く受けると言える。凍結融解作用によって組織の緩みの生じた部位に水分の供給が多くなることで、骨材とモルタルの界面からひび割れが進行し次第にそれらが連続していくと考えられる。初期の段階でこの影響を受ける箇所は表面側の最上部であり、その後は次第に下部、内部の双方向にひび割れが増大していくと予測される。また、下部、内部へのひび割れの増大は、既にひび割れが生じて拘束力が少なくなっている上部、表面部側に向けて内部の応力が作用した結果であるとも考えられる。したがって層状ひび割れは、図 2-1 に示すように表面に対して角度を持った状態で進展すると考えられる。

このひび割れの発生過程は、室内試験においてコンクリート供試体に凍結融解作用を施して実構造物のひび割れの発生過程を再現した既往の研究[2-2]とも一致する。既往の研究では、劣化因子である凍結融解作用の影響を大きく受ける供試体の隅角部や縁部から層状ひび割れが進行し、次第に表層の剥離が生じることを明らかにしており、本研究において実構造物の場合でも劣化因子の影響が大きくなる箇所から層状ひび割れが進行することが確認された。

写真 2-11 にコア供試体を採取したブロックの切断面の一部を示す。層状ひび割れは、前記のブロックと同様に切断面全域に渡ってブロック表面側に多く確認された。ひび割れの発生程度については、目視上ではブロックの目地に近い

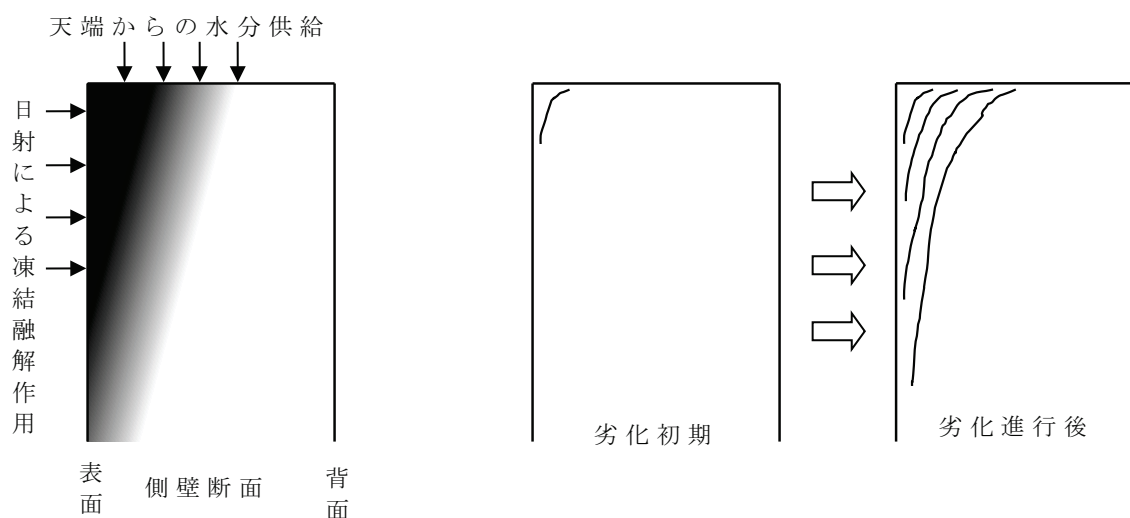


図 2-1 層状ひび割れの発生過程イメージ図

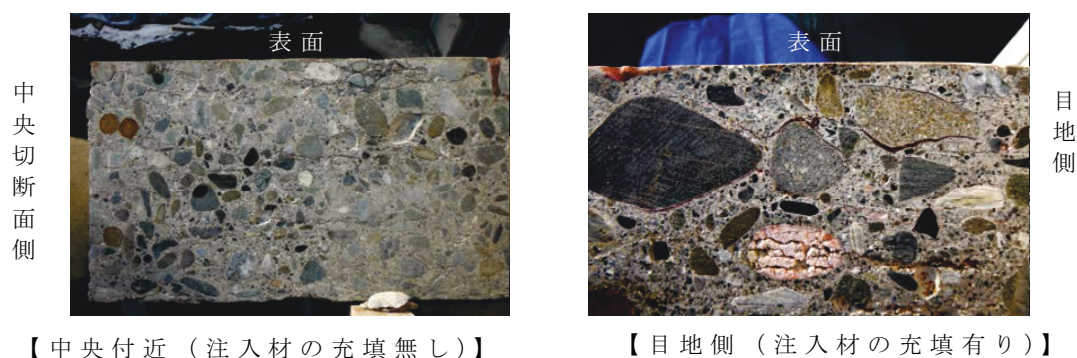


写真 2-11 ブロック切断面

部分（以下，目地側と呼ぶ）と中央に近い部分（以下，中央側と呼ぶ）において同等に確認された。しかし，コア供試体の目視観察からは，注入材の充填跡は目地側でのみ確認されており，ひび割れの連続性については目地側と中央側において異なっていた。注入材充填時には目地側側面から注入材の漏出を確認していることから，特に目地側では多くの連続した層状ひび割れが存在していたと考えられる。これは，2.2 節で述べた目地付近特有のひび割れの発生形態が影響していると考えられる。

2.4 力学特性の変化

(1) 検討概要

凍害により変状が生じた構造物については，劣化程度を把握するための診断を行う必要がある。一般的にコンクリート構造物の凍害劣化診断の指標には，相対動弾性係数が用いられる。相対動弾性係数は，式 2-1 によって表される。

$$DM = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100$$

式 2-1

DM : 相対動弾性係数(%), f_n :凍結融解 n サイクル時の一次共鳴振動数(Hz),
 f_0 :凍結融解 0 サイクル時の一次共鳴振動数(Hz)

一次共鳴振動数は、JIS A 1127:2010「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」に準じて、対象とする供試体の形状に応じてたわみ振動、または縦振動によって測定される。相対動弾性係数は、前述のとおり JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法」において凍結融解のサイクルが 300 サイクル完了時に 60%以上の値を示していると、試験を行ったコンクリートが耐凍害性を有するものであると評価される。また、桂らは、相対動弾性係数が 85%を境に凍害劣化の進行が加速することを明らかにしており[2-5]、相対動弾性係数の閾値は 85%と考えることもできる。

相対動弾性係数は凍害劣化の程度を示す指標として広く用いられているにも関わらず、コンクリートの力学特性との関係性について検討された事例は少ない。構造物の耐力についての検討は、超音波法や共鳴振動法といった非破壊試験の結果ではなく、圧縮強度などの破壊試験の結果から得られる力学特性を示す値を基に行われる。したがって、相対動弾性係数が低下すると力学特性にどのような変化が生じるのかを明らかにすることは、構造物のストックマネジメントの観点からも重要な課題であると言える。既往の研究としては、松村ら[2-6]や、高柴ら[2-7]の行った研究が挙げられる。これらの研究では、横軸に相対動弾性係数を、縦軸に圧縮強度比や静弾性係数比を示した関係式が示されている。また、佐藤らは、横軸に凍結融解サイクルを、縦軸に圧縮強度、中性化深さを示したグラフを作成している[2-8]。この研究では、相対動弾性係数も合わせて測定されているため、相対動弾性係数と圧縮強度の関係を示すことも可能である。しかしこれらの研究は、データ数が少なく、汎用性についての検討も行われていない。

そこで、本節では、複数の種類のセメントを使用し、JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法」に示されている B 法（気中凍結水中融解試験）により劣化させたコンクリート供試体と、寒冷地である北海道内で供用されている RC 開水路から採取したコア供試体を用いて、相対動弾性係数と圧縮強度比、静弾性係数比、引張強度比および曲げ強度比の関係について検討を行った。

また、力学特性を示す指標としては、弾性係数が挙げられる。弾性係数は、静弾性係数と動弾性係数に分類される。静弾性係数は、破壊試験を行う際の応

力－ひずみ曲線から，最大応力の 3 分の 1 の応力点とひずみが 50×10^{-6} の点を結んだ直線の傾きから求める割線弾性係数の値を用いる。一方，動弾性係数は，前記の JIS A 1127:2010 によって **式 2-2** から求められる。

$$E_D = 4 \times 10^{-3} \frac{L}{A} m f_2^2 \quad \text{式 2-2}$$

E_D : 動弾性係数 (N/mm²)， L : 供試体の長さ (mm)， A : 供試体の断面積 (mm²)， m : 供試体の質量 (kg)， f_2 : 縦振動の一次共鳴振動数 (Hz)

式 2-2 は，ポアソン比を考慮していない形の理論式である。ポアソン比を考慮した動弾性係数の理論式は **式 2-3** である。

$$E_D = \rho V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad \text{式 2-3}$$

ρ : 密度 (kg/m³) V : 弾性波速度 (音速) (m/sec)， ν : ポアソン比

評価を行うコンクリートは三次元体である。したがって，実構造物において弾性波を利用して動弾性係数を評価する場合には，構造物の拘束条件からポアソン比を考慮した **式 2-3** を用いることが望ましいと言える。凍害による劣化過程において **式 2-3** によって動弾性係数の評価を行う際には，劣化段階におけるコンクリートの密度，超音波伝播速度およびポアソン比の 3 つの指標を明らかにする必要がある。密度と超音波伝播速度については，コア供試体を用いた試験によって求めることが可能であり劣化段階に応じてその都度測定を行うことができる。ポアソン比については，弾性範囲内では一定の値 (0.2) として計算を行う場合が一般的である [2-9]。池田らは，ポアソン比を考慮せずに求める動弾性係数は静弾性係数と比較して 5 割程度大きくなることを明らかにしており，動弾性係数の評価を行う際のポアソン比考慮の重要性を示している [2-10]。ただし，池田らの研究では，ポアソン比を各劣化段階で一定値 (0.2) としており，この仮定条件が及ぼす影響については言及していない。

そこで本節では，凍害劣化が進行して相対動弾性係数が低下したコンクリート供試体について動ポアソン比とポアソン比の測定を行い，劣化過程における両者の変化についての検討も合わせて行った。

動ポアソン比については，前記の JIS A 1127:2010 に準拠して試験を行った。まず，ねじり振動による一次共鳴振動数の測定を行い，**式 2-4** によって動せん断弾性係数を求めた。

$$G_D = 4 \times 10^{-3} \frac{LR}{A} m f_3^2 \quad \text{式 2-4}$$

G_d ：動せん断弾性係数（N/mm²）， L ：供試体の長さ（mm）， R ：形状係数， A ：供試体の断面積（mm²）， m ：供試体の質量（kg）， f_3 ：ねじり振動の一次共鳴振動数（Hz）

その後，式 2-4 から求めた動せん断弾性係数と，式 2-2 から求めた動弾性係数を利用した式 2-5 によって動ポアソン比を求めた。

$$\nu_D = \frac{E_D}{2G_D} - 1 \quad \text{式 2-5}$$

ν_D ：動ポアソン比

ポアソン比については，載荷試験によって求まる応力－ひずみ曲線から，動弾性係数を求める場合に使用する最大応力の 3 分の 1 の応力点とひずみが 50×10^{-6} の点の間のデータの縦ひずみと横ひずみから式 2-6 によって求めた。

$$\nu = \frac{\text{横ひずみ}}{\text{縦ひずみ}} \quad \text{式 2-6}$$

ν ：ポアソン比

応力－ひずみ曲線上にはデータ数が複数存在するため，求められるポアソン比もデータの数だけ存在する。ここでは，それらのポアソン比の平均値をとって供試体から求まる最終的なポアソン比とした。

(2) 供試体概要

本検討においては，実験室で作製したコンクリート供試体と現場から採取したコア供試体を使用した。

コンクリート供試体は，標準円柱供試体（ $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ ）と標準角柱供試体（ $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ ）である。配合については，劣化程度を調整して相対動弾性係数を幅広くばらつかせて測定を行うことを目的として，AE コンクリートと non-AE コンクリートの双方を作製した。

使用したセメントは普通ポルトランドセメント（密度： 3.15g/cm^3 ），フライアッシュセメント（密度： 2.93g/cm^3 ）および高炉セメント（密度： 3.03g/cm^3 ）で

表 2-2 コンクリートの示方配合（普通ポルトランドセメント使用時）

（上：AE コンクリート， 下：non-AE コンクリート）

Gmax (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE 剤 (g/m ³)
					W	C	S	G	
20	8±1.5	55	6±0.5	39.6	170	283	702	1056	2830.0

Gmax (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE 剤 (g/m ³)
					W	C	S	G	
20	8±1.5	55	6±0.5	39.6	170	283	702	1056	0

ある。細骨材（密度：2.59g/cm³，吸水率：1.59%，F.M.：1.83）と粗骨材（密度：2.59g/cm³，吸水率：1.62%，F.M.：6.68）は共に鳥取県産のものを使用し，AE材は高性能 AE 減水材（レオビルド SP8N）を使用した。普通ポルトランドセメントを用いた際の AE コンクリート，non-AE コンクリートの示方配合は表 2-2 に示すとおりである。脱型後は水温 20℃の標準水中養生を行った。試験開始材齢は，相対動弾性係数をばらつかせることを目的として 7 日から 28 日までの範囲でばらつきを持たせた。所定の材齢が経過した供試体については，初期値の測定を行った後に凍結融解試験に供した。試験開始後は，相対動弾性係数が概ね所定の値まで低下した時点で試験を行った。

コア供試体は，寒冷地である北海道内で供用されている複数の RC 開水路側壁から採取したものをを用いた。水路の供用年数は，概ね 30 年から 40 年程度である。コア供試体の採取は JIS A 1107:2012 に準拠して行い，コア径は 100mm として採取した。コアにおける相対動弾性係数の評価は，次のとおりに行った。まず，コア供試体側面に対して表面側から深さ方向に 10mm 刻みで超音波法の透過法による測定を行い，最も超音波伝播速度の速い箇所を健全部と評価して，超音波伝播速度から緒方らによって提案された実験式（式 2-7）を用いて動弾性係数を求めた[2-8]。

$$E_D = 4.0837V^2 - 14.438V + 20.708$$

式 2-7

E_D ：動弾性係数（N/mm²）， V ：超音波伝播速度（km/sec）

次に，コア供試体の軸方向を透過経路として透過法による測定を行い，同様に式 2-7 によって動弾性係数を求めた。相対動弾性係数は，軸方向の超音波伝播速度から求めた動弾性係数を健全部から求めた動弾性係数で除すことで求めた。

■コンクリート供試体 ◆コア供試体 ●既往研究

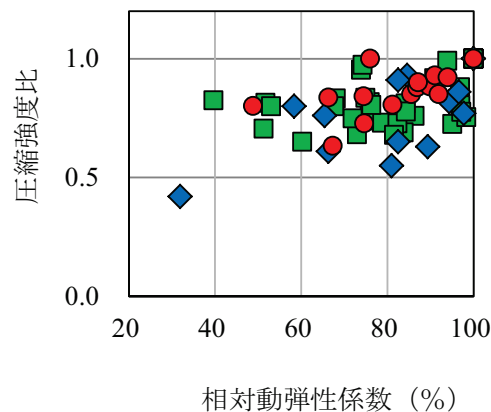


図 2-2 相対動弾性係数と圧縮強度比の関係

コンクリート供試体，コア供試体共に測定項目は，非破壊試験については，縦振動・たわみ振動・ねじり振動による一次共鳴振動数（JIS A 1127:2010 に準拠），超音波伝播速度である。破壊試験については，圧縮強度（JIS A 1108:2006 に準拠），静弾性係数（JIS A 1149:2010 に準拠），引張強度（JIS A 1113:2006 に準拠），曲げ強度（JIS A 1106:2006 に準拠）である。

(3) 相対動弾性係数と各種物性値の比較

図 2-2 に相対動弾性係数と圧縮強度比の関係を示す。既往研究[2-6, 2-7]から求まる近似式と，本研究で行ったコンクリート供試体とコア供試体の測定値から求まる近似式はそれぞれ次のように示される。また，以降の各近似式には，決定係数 R^2 とデータ数 n を合わせて示す。

$$\text{既往研究} \quad R_{cs}=0.0071 (DM-100) + 1 \quad (R^2=0.333, n=15) \quad \text{式 2-8}$$

$$\text{本研究} \quad R_{cs}=0.0074 (DM-100) + 1 \quad (R^2=0.319, n=52) \quad \text{式 2-9}$$

R_{cs} : 圧縮強度比， DM : 相対動弾性係数 (%)

既往研究では相対動弾性係数が 10%低下するときに圧縮強度は 7.1%低下する。それに対して本研究でもほぼ同等の値である 7.4%が得られている。決定係数については，既往研究の 0.333 に対して本研究では 0.319 であり，既往研究と一致する傾向のデータが得られたと言える。

図 2-3 に相対動弾性係数と静弾性係数比の関係を示す。既往研究[2-6, 2-7]から求まる近似式と，本研究で行ったコンクリート供試体とコア供試体の測定値から求まる近似式はそれぞれ次のように示される。

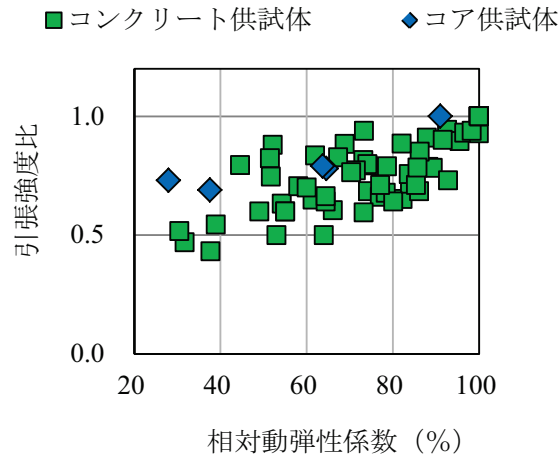


図 2-4 相対動弾性係数と引張強度比の関係

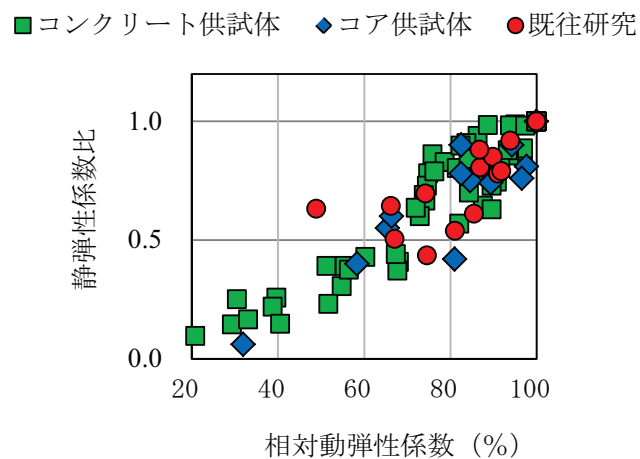


図 2-3 相対動弾性係数と静弾性係数比の関係

$$\text{既往研究} \quad \text{Rem} = 0.015 (\text{DM} - 100) + 1 \quad (R^2 = 0.524, n = 15) \quad \text{式 2-10}$$

$$\text{本研究} \quad \text{Rem} = 0.012 (\text{DM} - 100) + 1 \quad (R^2 = 0.868, n = 69) \quad \text{式 2-11}$$

Rem : 静弾性係数比, **DM** : 相対動弾性係数 (%)

既往の研究では、相対動弾性係数が 10%低下するときに静弾性係数は 15%低下するが、本研究でも概ね近い値の 12%が得られている。決定係数については、既往研究の 0.524 に対して本研究では 0.868 である。相対動弾性係数と静弾性係数比は、線形関係にあることが確認された上で、本研究によって更に良好な線形関係が得られることが確認された。

図 2-4 に相対動弾性係数と引張強度比の関係を示す。引張強度比については既往の研究において検討されていないため、ここでは本研究で行ったコンクリート供試体とコア供試体の測定値から求めた近似式を次式に示す。

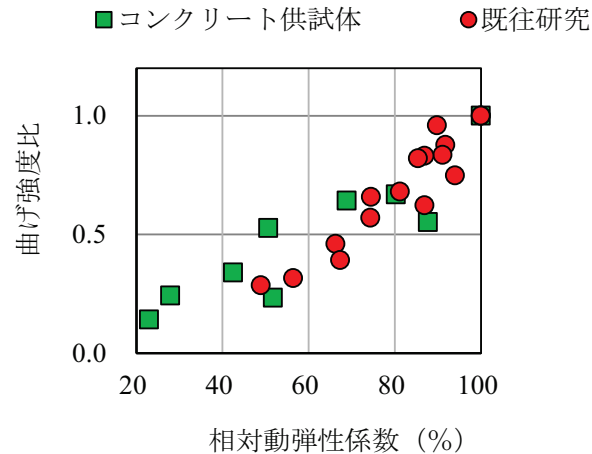


図 2-5 相対動弾性係数と曲げ強度比の関係

$$\text{本研究} \quad R_{ts}=0.0074 (DM-100) + 1 \quad (R^2=0.570, n=70) \quad \text{式 2-12}$$

R_{ts} : 引張強度比, DM : 相対動弾性係数 (%)

本研究からは, 相対動弾性係数が 10%低下するときに引張強度比が 7.4%低下することが確認された。また, 決定係数は 0.570 であった。

図 2-5 に相対動弾性係数と曲げ強度比の関係を示す。既往研究[2-6, 2-7]から求まる近似式と, 本研究で行ったコンクリート供試体とコア供試体の測定値から求まる近似式はそれぞれ次のように示される。

$$\text{既往研究} \quad R_{fs}=0.013 (DM-100) + 1 \quad (R^2=0.891, n=16) \quad \text{式 2-13}$$

$$\text{本研究} \quad R_{fs}=0.012 (DM-100) + 1 \quad (R^2=0.810, n=9) \quad \text{式 2-14}$$

R_{fs} : 曲げ強度比, DM : 相対動弾性係数 (%)

既往の研究では, 相対動弾性係数が 10%低下するときに静弾性係数は 13%低下するが, 本研究でも概ね近い値の 12%が得られている。決定係数については, 既往研究の 0.891 に対して本研究では 0.810 である。相対動弾性係数と曲げ強度比は, 既往の研究のとおり線形関係で表されることが確認された。

ここで, 各近似式から得られた決定係数をまとめると表 2-3 のとおりである。各決定係数を比較すると, 圧縮強度比のみ低い値を示している。本研究では圧縮強度と静弾性係数は載荷試験時に同時に測定を行っていることから, 本来であれば両者ともに同等の決定係数が得られると考えられる。しかし, 両者の決定係数には開きが見られた。これは, 同一の載荷試験でありながらも両者の算定に使用するデータが異なることが影響していると考えられる。

表 2-3 各近似式から得られた相関係数

評価対象	既往研究	本研究
圧縮強度比	0.333	0.319
静弾性係数比	0.524	0.868
引張強度比	—	0.570
曲げ強度比	0.891	0.810

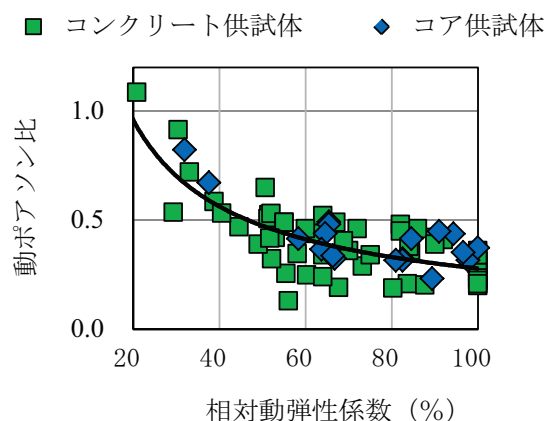


図 2-6 相対動弾性係数と動ポアソン比の関係

静弾性係数の算定には、応力－ひずみ曲線において 50×10^{-6} のひずみ点から最大応力の 3 分の 1 の点までのデータが用いられる。したがって、静弾性係数は弾性領域における連続した複数点のデータから得られる評価値であるため、ばらつきが少なくなり、決定係数も比較的大きくなったと考えられる。

一方、圧縮強度の算定には、応力－ひずみ曲線において降伏点の 1 点のデータが用いられるため、試験体の個体差の影響を極めて受け易い。そのため、算定される値のばらつきが大きくなり、圧縮強度比の近似直線から離れて残差が大きくなるデータが増えたことで決定係数も小さくなったものと考えられる。

図 2-6 に相対動弾性係数と動ポアソン比の関係を示す。コンクリート供試体とコア供試体の結果から求めた近似式を次式に示す。

$$\nu_D = 9.6147DM^{-0.77} \quad (R^2=0.499, \ n=82) \quad \text{式 2-15}$$

ν_D ：動ポアソン比，DM：相対動弾性係数（％）

動ポアソン比は、相対動弾性係数 60％程度まで緩やかに増加するが、それ以下になると大幅に増加する。コンクリートの凍結融解抵抗性は、相対動弾性係数 60％を閾値として評価される。この閾値と本研究の動ポアソン比の変化点は

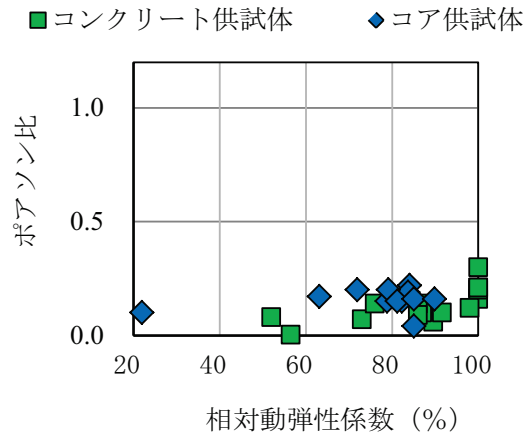


図 2-7 相対動弾性係数とポアソン比の関係

概ね一致する結果となった。

ここで、弾性体におけるポアソン比の最大値は 0.5 である。また、式 2-3 において動ポアソン比が 0.5 以上になると、動弾性係数は負の値で算出されることになる。図 2-6 においては、相対動弾性係数 60% を閾値として動ポアソン比が 0.5 以上の値を取るケースが生じている。したがって、動ポアソン比は、相対動弾性係数 60% 以上において一定としてもよいが、60% 以下においては動ポアソン比を考慮した評価を行うことが不可能である。ポアソン比を考慮しない別の式から動弾性係数の評価を行うことも考えられるが、60% 以下の場合には、動弾性係数の評価を行うことができない程劣化が進行していると考えられるべきであると言える。

図 2-7 に相対動弾性係数とポアソン比の関係を示す。コンクリート供試体とコア供試体の結果から求めた近似式を次式に示す。

$$\nu = 0.0016DM + 0.0134 \quad (R^2=0.203, \ n=30) \quad \text{式 2-16}$$

ν : ポアソン比, DM : 相対動弾性係数 (%)

載荷試験によって求まるポアソン比は、相対動弾性係数の低下に伴う値の変化がほとんど見られないことが確認された。本試験結果からは凍結融解作用によって縦と横のひずみの関係に変化が見られない。しかし、凍害の生じた構造物からコア供試体を採取して試験を行う際に、層状ひび割れを伴うような供試体を用いる場合には、横ひずみに対して縦ひずみが卓越することが予想される。したがって、図 2-7 から得られた近似曲線で全ての範囲で相対動弾性係数に対するポアソン比の評価が可能であるとは必ずしも言えないという点に留意する必要がある。

2.5 第 2 章の結論

第 2 章においては、RC 開水路側壁の表面変状と内部変状についてそれぞれ調査を行い、両者の関係性について考察した。また、凍害診断の際に用いられる相対動弾性係数とコンクリートの各種物性値の関係について、得られたデータから近似式を求めることで明らかにした。以下に本章から得られた結論を示す。

- (1) 表面変状として生じるひび割れは、表層のスキン層の厚さ分のみ深さ方向に進行する。
- (2) 上記(1)より、スキン層のスケーリングは内部変状として発生する層状ひび割れの一種であると言え、表面変状である表面ひび割れのひび割れ深さは内部変状の進行度合いと関連性がある。
- (3) 内部変状として生じる層状ひび割れは、表面側に集中して生じており、連続したひび割れである。
- (4) 層状ひび割れは、水路側壁表面に対して角度を持った状態で進展し、側壁の表面側の上部において特に顕著に進展する。
- (5) 相対動弾性係数と圧縮強度比、静弾性係数比、引張強度比、曲げ強度比は、近似式によって線形関係で示すことが可能である。
- (6) 相対動弾性係数と圧縮強度比の関係については、相対動弾性係数と静弾性係数比の関係と比較して決定係数が低くなることが確認された。要因としては、圧縮強度を求める際に使用する応力の降伏点の値にばらつきが生じることが挙げられる。
- (7) 動ポアソン比は、相対動弾性係数 60% 以上では一定値を用いても構わない。
- (8) 動ポアソン比は、相対動弾性係数 60% 以下の場合に 0.5 を上回るケースが生じ、弾性体として動弾性係数の評価を行えない場合がある。

第 3 章

RC 開水路における凍害の目視診断

第 3 章 RC 開水路における凍害の目視診断

3.1 概要

第 2 章においては，表面変状と内部変状の特徴および劣化に伴う力学特性の変化について示した。RC 開水路において長寿命化を図るための対策を的確に策定するためには，これらの変状を正確に診断しなければならない。

農業水利施設の現状を評価することが目的となる機能診断では，事前調査，現地踏査（概査），現地調査（精査）が一連の調査として取り組まれる[3-1]。この機能診断において対象施設の現状を的確に調査するためには，現地踏査の段階で表面・内部変状の発生個所を的確に見出すことが重要である。表面変状である表面ひび割れは目視調査でその劣化程度を容易に診断することができるものの，内部変状である層状ひび割れは目視による直接的な診断は不可能であり，その他の調査手法も未確立である。

表面変状と内部変状は，ひび割れの発生方向が異なることから，それぞれのひび割れの発生原因となる応力の作用方向が異なることがわかる。両者は異なる発生形態であるものの同じ部材の側壁に発生しており，両者は全く無関係ではなく，表面変状の発生状況の特徴から内部変状の診断に繋がる情報が得られるのではないかと考えられる。2.2 節においても，表面変状と内部変状の関連性について述べている。

そこで第 3 章では，RC 開水路に特徴的な表面変状を有する側壁を対象として，表面変状の特徴を分析した上で，採取したコアから内部変状の発生状況を確認し，その上で表面変状から内部変状の発生箇所を目視調査により定性的に診断するための手法を明らかにする。

3.2 対象構造物の概要および表面変状の発生状況

本章で対象にした凍害が発生している開水路は，北海道にある 1974(昭和 49)年頃に築造された埋設型の現場打ちコンクリート開水路である。側壁（高さ 2000mm，幅約 8000mm，部材厚さ 200mm）の全景を写真 3-1 に示す。この側壁には，開水路に特徴的な表面変状が発生している。まず，最多頻度水位の上部である気中部だけに表面ひび割れが発生し，下部である水中部には表面ひび割れが見られない。次に，目地付近の気中部には，凍結期の凍結融解作用だけでなく，非凍結期における気温の変化に応じた側壁の体積変化が隣接するスパンによって拘束されることで発生する応力によるひび割れが斜めに立ち上がる形で発生している。

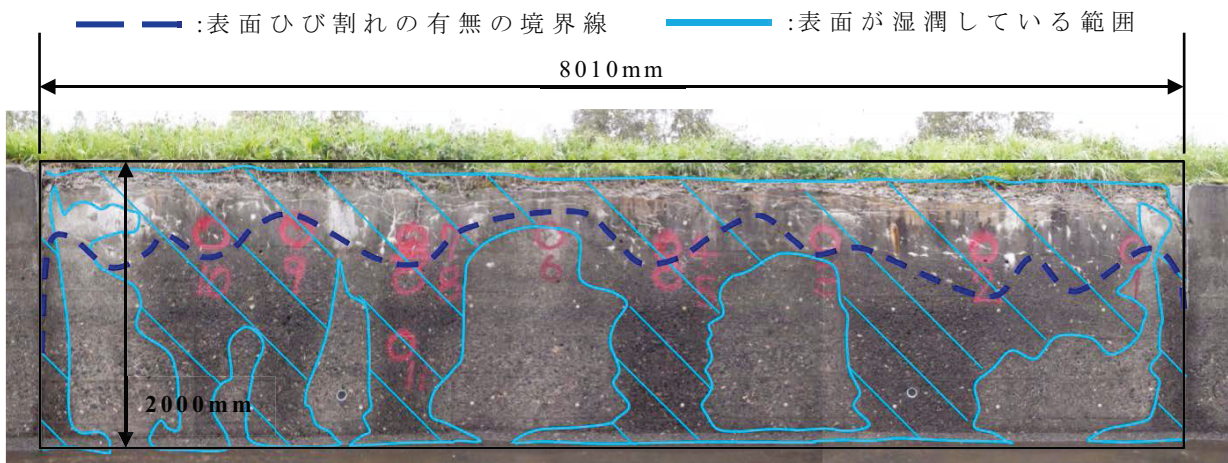


写真 3-1 調査対象側壁の全景と調査箇所概要

側壁の気中部に見られる表面ひび割れは数多くあり，その発生方向は規則性がなく，ひび割れ長さもばらばらである。表面ひび割れの有無の境界は，写真中に示すように，最多頻度水位の位置に沿うように高さ方向に平行ではなく，上下に湾曲して発生している。表面ひび割れが側壁の高さの低いところまで存在する箇所（以下，下に凸の箇所と呼ぶ）の天端は，特にスケーリングが著しいため，降雨や融雪水が他よりも多く流れ込む箇所であることが示唆される。また，表面ひび割れには，エフロレッセンスが発生しており，側壁内部から表

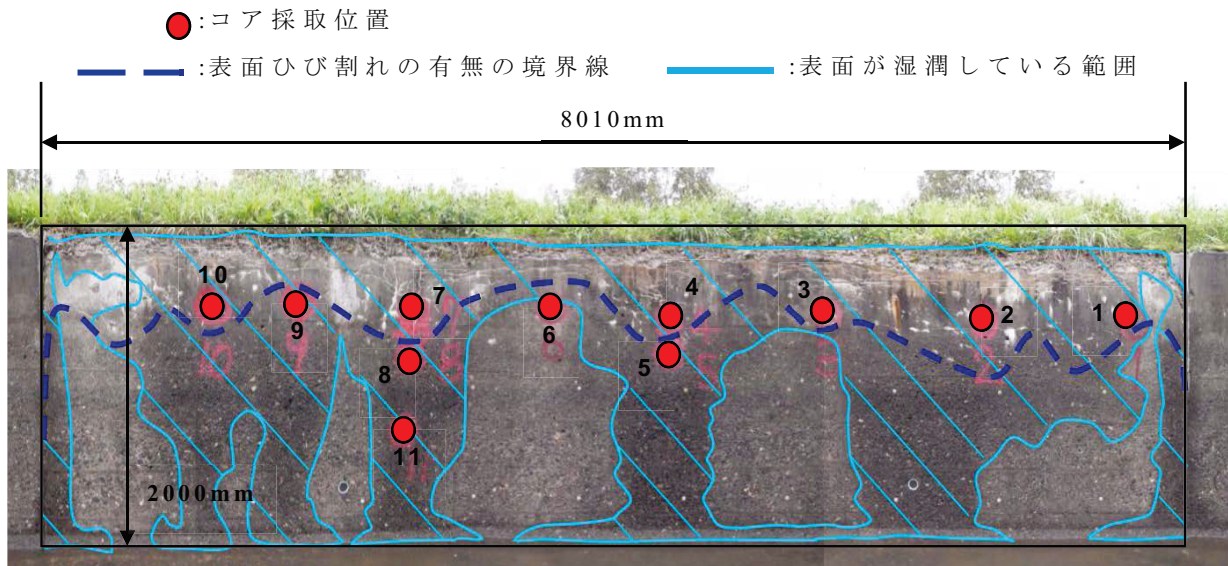


写真 3-2 コア採取位置

面に向けて水の移動があることがわかる。

一方、現地調査の日によっては、側壁表面の状況(写真 3-1 の上段および中段)に違いが見られ、降雨の数日後には、上段に示すように全面ではなく部分的に湿潤している箇所が見られる。この側壁表面における湿潤箇所については、後に考察する。

3.3 採取コアによる内部変状の発生状況確認

対象とした側壁からは、JIS A 1107:2012 に準拠して計 11 本のコア供試体を採取した。コアビットの径は 75mm であり、採取したコア供試体の直径は 69mm、長さは部材厚さと同じ 200mm である。コア供試体を採取する目的が表面変状の特徴から内部変状を診断するための目視調査の手法を検討することであることから、採取位置は、上下の湾曲を有する表面ひび割れの形態を考慮に入れて決定した(表 3-1 を参照)。写真 3-2 にコア供試体の採取位置を示す。採取したコア供試体の状況を写真 3-3 に示し、表 3-1 に結果を整理して示す。

コア 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10 は、ほぼ同じ高さの気中部の位置から採取したものであるが、表面ひび割れの形態としては、コア 2, 3, 4, 7, 10 が下に凸の箇所、コア 6, 9 がひび割れが側壁の高さの高いところのみに存在する箇所(以下、上に凸の箇所と呼ぶ)と異なる。コアの状況からは、下に凸の箇所で確実に複数の層状ひび割れが発生してことがわかる。一方、上に凸の箇所ではコア 6 に層状ひび割れの発生が確認できるもののコアの一体性は確保されており、下に凸の箇所よりも軽度の内部変状であると見なされる。また、コア 9 では層状ひ

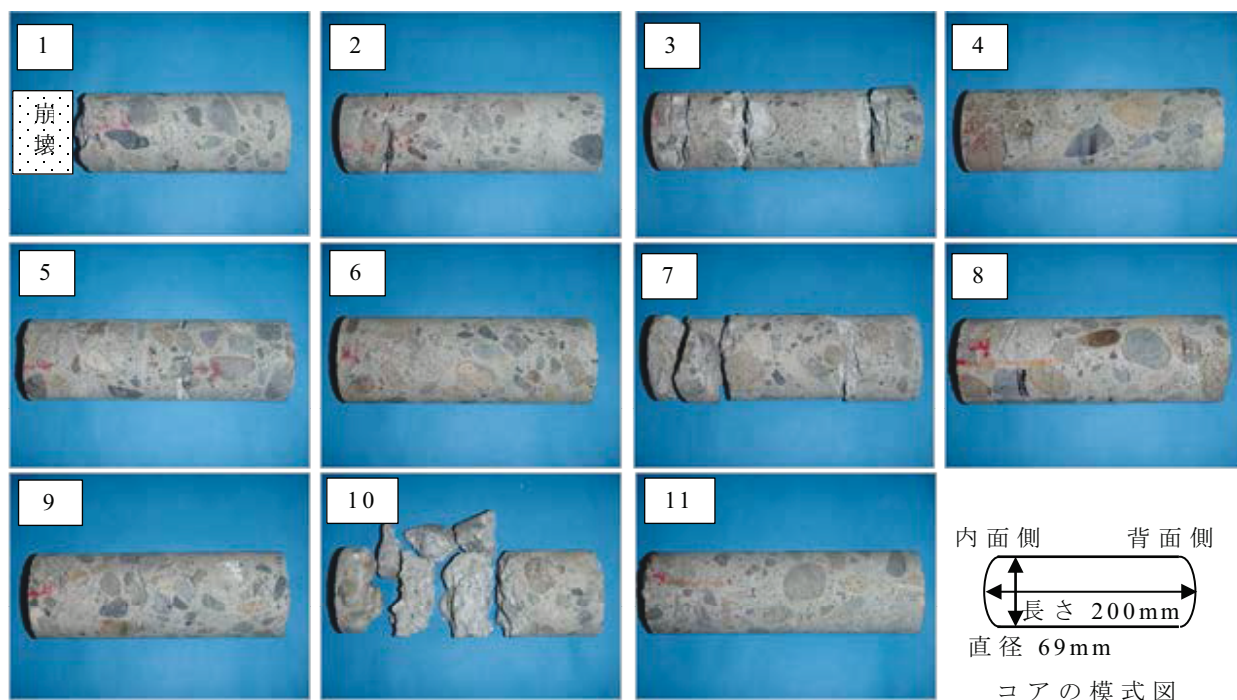


写真 3-3 コアの状況

び割れが発生していない。これらのことから、内部変状である層状ひび割れが発生している可能性は、表面ひび割れが上に凸の箇所では低く、下に凸の箇所では高くなると考えられる。

目地付近から採取したコア 1 は、内面側から 30mm まで崩壊している。これまでに述べたように目地付近では、隣接する先打ちのスペンが拘束体となることで、側壁の体積変化による応力が繰返し作用することから、コンクリート組織の緩みが著しかったことがわかる。

コア 5 , 8 は、表面ひび割れの形態が下に凸になる箇所の直下の水中部から採取したものである。コア 5 を採取した位置の表面にはひび割れが発生していないものの、内部には複数の層状ひび割れの存在が確認され、層状ひび割れの発生位置が内面側から 50mm と同じであることから、コア 4 とコア 5 の層状ひび割れは連続している可能性が示唆される。また、コア 7 の直下にあるコア 8 は、全体的に骨材およびその周囲に微細ひび割れが発生しているものの、層状ひび割れは発生していないことから、コア 7 の層状ひび割れはコア 8 まで伸びておらず、その途中で止まっていることが示唆される。コア 11 には、目視できる限りのひび割れを確認することができない。コア 11 は、コア 7 , 8 の直下であり、両者のコアの状況からも、側壁の上部である気中部に発生している内部変状の層状ひび割れは、下部の水中部に向かうに従い徐々に軽度になることがわかる。

表 3-1 コアの採取位置および状況

位置	コア採取位置における表面ひび割れの状況	コアの一体性	コアの状況
1	目地付近の斜めひび割れ	×	内面側から 30mm までは崩壊，他は所々に微細ひび割れ有り
2	下に凸 (表面ひび割れ少)	×	内面側から 20～30mm に層状ひび割れ，他は所々に微細ひび割れ有り
3	下に凸	×	内面側から 15mm, 30mm, 70mm, 170mm に層状ひび割れ有り
4	下に凸 (表面ひび割れ少)	○	内面側から 50mm に層状ひび割れ有り，他は骨材に微細ひび割れ有り
5	下に凸 (4 の 300mm 下部)	×	内面側から 50～70mm, 130mm, 190mm に層状ひび割れ有り
6	上に凸	○	内面側から 50mm に層状ひび割れ有り，他はひび割れ無し
7	下に凸	×	内面側から 20mm, 50mm, 150mm に層状ひび割れ有り，150mm の位置で一部崩壊
8	下に凸 (7 の 300mm 下部)	○	全体的に骨材およびその周囲に微細ひび割れ有り
9	上に凸	○	微細な層状ひび割れ有り，全体的に微細ひび割れ有り
10	下に凸 (表面ひび割れ少)	×	内面側から 20mm までと背面側から 70mm まで以外は崩壊（3 つの層状ひび割れの発生可能性有り）
11	ひび割れ無し (7 の 750mm 下部)	○	ひび割れ無し

3.4 目視診断による層状ひび割れの診断手法

今回対象にした開水路側壁の表面ひび割れは，水平ではなく上下に湾曲して発生している。また，表面ひび割れの形態が下に凸の箇所为天端はスケーリングが著しく，さらに，降雨の数日後には下に凸の箇所から下部が特に湿潤している。目視調査により確認できるこれらの事項と採取コアにおける層状ひび割れの発生状況を関係付けて考察すると，スケーリングの発生状況から融雪水などが地形的に流れ込み易いと判断できる箇所では，コンクリート内部の飽水度が高くなり，側壁内部の温度変化が面的に起こっているとしても，その箇所で凍結時に体積膨張が生じることで凍害が他の箇所に比べて進行していることが考察できる。そして，これらを原因として凍害が進行している箇所では，コンクリート組織の緩みや微細ひび割れが生じているために，更に水が供給されやすく凍結時の膨張圧力に追従してひび割れが拡大しやすくなるために，凹凸の形態をもって表面ひび割れが発生すると考えられる。特に凍害によりコンクリ

ート内部にひび割れや空隙が生じている場合は、透水性が大きくなり側壁内部の水は重力にしたがって下に移動することから、表面ひび割れの形態が下に凸のところ、層状ひび割れが発生している可能性が高くなり、その箇所は部分的な湿潤状態として表れると考察できる。以上のことを整理すると、開水路側壁の内部変状である層状ひび割れは、次の条件が複数揃う箇所に発生している可能性が高い。

- 側壁の天端に他よりも著しいスケーリングが発生している箇所
- 表面ひび割れの形態が下に凸の箇所
- 降雨の数日後に表面が湿潤している箇所

目視調査による層状ひび割れの発生箇所の定性的診断は、これらの条件が複数揃う箇所を踏査により見つけることで行うことができると考えられる。一方、表面ひび割れは、内部の凍結時の膨張圧力に追随して拡大するものと考えられる[3-2]。これより、表面ひび割れが他よりも多く発生している箇所では、凍結時の膨張圧力が内部の層状ひび割れの発生や拡大に使われず、表面ひび割れの拡大に使われるため、層状ひび割れが発生あるいは他の箇所よりも拡大している可能性は低い。

今回の採取コアの結果だけで断言できるものではないが、層状ひび割れが発生している可能性が高い箇所は、上記の条件に「表面のひび割れ密度が他よりも小さい箇所」も加えることができると考えられる。

3.5 第3章の結論

第3章においては、凍害劣化の進行したRC開水路において表面変状の形態から、内部変状の評価を行うことを目的として検討を行った。採取したコア供試体による内部変状の発生状況から、層状ひび割れの生じやすい箇所の表面変状の特徴をまとめた。以下に本章から得られた結論を示す。

- (1) 表面ひび割れが上下に湾曲して発生している開水路側壁では、水路側壁の低いところまで表面ひび割れが生じている箇所で内部変状である層状ひび割れが発生している可能性が高い。
- (2) 目視調査による層状ひび割れの発生箇所の定性的診断は、側壁の天端に他よりも著しいスケーリングが発生している、表面ひび割れが水路側壁の低いところまで生じている、降雨の数日後に表面が湿潤している、といった条件が複数揃う箇所を踏査により見つけることで行うことができる。

第 4 章

内部変状が

電磁波レーダ法による鉄筋探査に及ぼす影響

第 4 章 内部変状が電磁波レーダ法による鉄筋探査に及ぼす影響

4.1 概要

第 3 章においては、現地踏査の段階で内部変状の評価を行うことを目的とした検討を行った。現地踏査による評価を終えた RC 開水路側壁については、調査箇所を選定した後に現地調査を行うこととなる。現地調査では非破壊試験、破壊試験による精査を行うが、その際には事前に構造物の配筋状態を確認しておく必要がある。

既往の研究において、非破壊試験である超音波法の表面走査法による検討を行う場合には、鉄筋が超音波パルスの伝播に影響を及ぼす可能性が示されており、鉄筋位置を考慮して超音波端子を設置することが望ましいとされている。例えば石神らは、あらかじめ鉄筋探査を行った上で、発振子を鉄筋の直上から 100mm ずらして設置している[4-1]。また、微破壊試験に分類されるコア供試体の採取により各種試験を行う場合には、構造上の安全性を保つために鉄筋を避けてコア供試体を採取する必要がある。

配筋状態を確認する方法としては、電磁誘導法や電磁波レーダ法などが挙げられる。この中で電磁波レーダ法は、広範囲を迅速に測定することができる測定方法であり、鉄筋とコンクリートの誘電率が異なることを利用して電磁波の反射画像から鉄筋の位置やかぶり厚さを求める方法である[4-2]。RC 開水路に代表される薄肉構造物では、前述のとおり凍害劣化に伴う内部変状として層状ひび割れが発生している場合がある。層状ひび割れは、第 2 章で述べたとおり表面側から生じるため、鉄筋のかぶりの位置に多く発生する。

層状ひび割れが発生している RC 開水路は内部に空隙層を有していることとなり、鉄筋、コンクリート、空隙と誘電率の異なる 3 種類の媒質が存在する。電磁波の反射は誘電率の異なる媒質に接したときに生じる。したがって、電磁波レーダの反射画像は、内部で層状ひび割れが生じている状態と、健全な状態で空隙を含まない状態とでは異なることとなる。電磁波往復伝播時間を求める式[4-3]と、その式を変形してかぶり厚さに関する式に変形したものを式 4-1、4-2 に示す。また、電磁波往復伝播時間を求める際のイメージ図を図 4-1 に示す。

$$T_1 = \frac{2(\sqrt{x^2 + d^2} - a)}{c/\sqrt{\epsilon}} \quad \text{式 4-1}$$

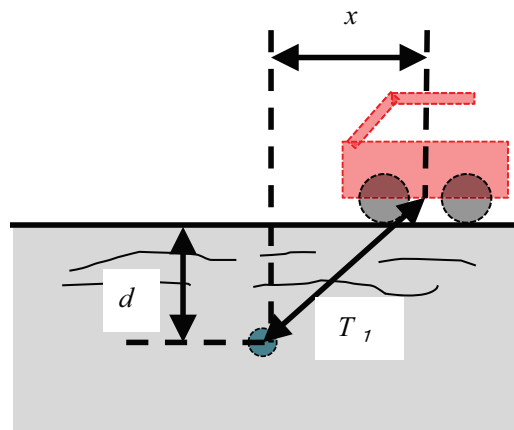


図 4-1 電磁波往復伝播時間算出のイメージ図

$$d = \sqrt{\left\{ \frac{T_1 c}{2 \sqrt{\epsilon}} + a \right\}^2 - x^2} \quad \text{式 4-2}$$

T_1 ：電磁波往復伝播時間， x ：電磁波レーダから鉄筋までの水平距離， d ：鉄筋の深さ， a ：鉄筋の半径， c ：光速（ $30 \times 10^4 \text{ km/sec}$ ）， ϵ ：比誘電率

コンクリートの比誘電率は含水状態によって変化するが概ね 6～9 程度であり，鉄筋の比誘電率は無限大（ ∞ ）とされている。電磁波は，コンクリートよりも比誘電率の大きい鉄筋に到達する前に，コンクリートよりも比誘電率の小さい空隙（比誘電率：1）においても反射をすることになる。その際には式 4-2 における ϵ が小さい値を取るためにかぶり厚さは大きく評価されることになると考えられる。

そこで本章では，まず，電磁波レーダによって鉄筋探査を行う場合に，内部変状である層状ひび割れの有無によって反射画像にどのような差異が生じるのかを室内試験によって実験的に検討した。まず，供試体による試験として，健全な供試体と凍害劣化による層状ひび割れを模擬したひび割れを導入した供試体，およびひび割れを注入工法によって充填し一体化を図った供試体での反射画像の違いについて述べる。次に実構造物による試験として，実験室に搬入した RC 開水路側壁の一部を用いて層状ひび割れが生じている箇所と層状ひび割れの生じていない箇所との反射画像の違いについて述べる。

その後，凍害劣化の生じた複数の RC 開水路側壁を対象として，電磁波レーダの走査を行う現地試験を行った。電磁波レーダ走査の際には，表面走査法による層状ひび割れの程度の推察を同時に行い，得られた反射画像からは，かぶり厚さの変化について考察した。最後に，層状ひび割れの発生程度とかぶり厚さ

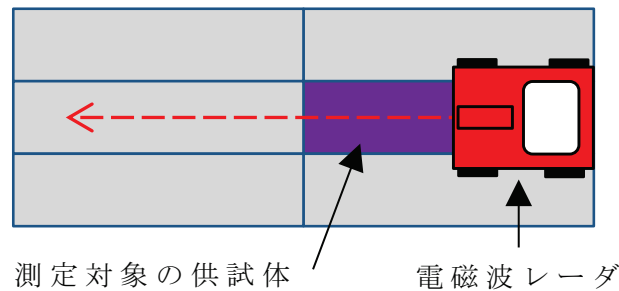


図 4-2 電磁波レーダ測定方法

の関係性についての考察を加えた。

4.2 供試体による試験

(1) 試験概要

測定に用いた機器は、GSSI 社製ストラクチャスキャン SIR-EZ HR である。周波数は 1600MHz であり、水平分解能は深度：水平＝1：0.3 である。本章の以降の試験においては、全て本機器を使用した。

供試体による試験は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の無筋コンクリートの角柱供試体を用いて行った。電磁波レーダの走査に際しては、供試体接地面以深の影響を無くすために、あらかじめ接地面で一定の反射画像が得られることを確認している。電磁波レーダの走査面は、図 4-2 に示すように測定対象となる供試体の他に 5 本の健全な供試体を使用し、計 6 本の供試体によって用意した。測定は、3 ケースの測定条件で行った。

Case1 は、図中の測定対象の供試体を健全な供試体とした場合である。

Case2 は、層状ひび割れを模擬したひび割れを導入した供試体（以下、ひび割れ供試体と呼ぶ）を対象に測定した場合である。この供試体は、以下の手順で作製した。まず、後に注入工法によってひび割れを充填するために深さ 60mm 程度の注入孔を 2 カ所に設けた。次に、注入孔を設けた面を側面として耐圧試験機によって繰返し载荷を行った。繰返し载荷では、供試体に直線的なひび割れを導入するために、载荷面の供試体軸方向の中心に鉄製の棒材（ $\phi 16\text{mm}$ ）を設置して载荷した。この方法を両側面で行うことで供試体にひび割れを導入した。その後、ひび割れを導入した供試体に対して注入材の充填を行った。

Case3 は、注入材の充填を行った供試体（以下、充填後供試体と呼ぶ）を対象に測定した場合である。注入材にはセメント系材料を用いて、充填は 2 カ所設けた注入孔のうちの一方から低圧注入器具を用いて行った。注入材にセメント系材料を用いた理由は、母材である供試体と注入材の誘電率を同等なものとし、

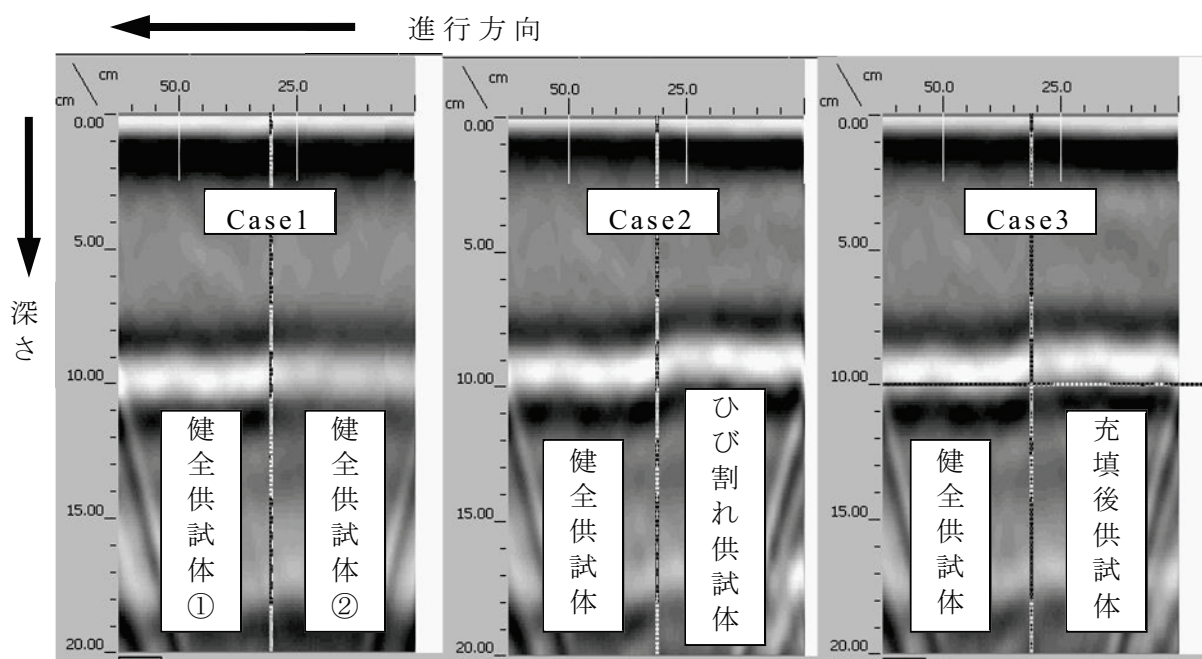


図 4-3 各ケースにおける電磁波レーダ反射画像

表 4-1 電磁波レーダ画像による状態の異なる供試体の厚さと
健全部に対する比

	Case1 健全供試体		Case2 ひび割れ供試体		Case3 充填後供試体	
	健全①	健全②	健全	ひび割れ	健全	充填後
厚さ (mm)	89.5	88.0	85.7	80.6	86.4	84.2
健全部に対する比	1.00	0.983	1.00	0.940	1.00	0.975

電磁波レーダの反射画像で一体化したことをより明瞭に確認するためである。
注入材充填後は，注入材の硬化を待った後に電磁波レーダによる測定を行った。

(2) 層状ひび割れが電磁波レーダ反射画像に及ぼす影響

図 4-3 に各々の供試体で電磁波レーダを走査した画像を示す。図に示す画像では縦軸が深さ方向を示し，横軸は右から左へと進む電磁波レーダの進行方向を示す。図中の深さ 10cm 付近に見られる白色のラインは供試体の下に敷設した木材を示しており，この白色域の上端までが電磁波レーダによって評価された供試体の厚さとなる。

表 4-1 に電磁波レーダの画像から求められた供試体の厚さとそれぞれのケースの健全部に対する比を示す。なお，本試験では測定機器の比誘電率を 12 と設定している。これは，比誘電率が高いほど反射画像の濃淡が明瞭に示されるこ

とを予備試験において確認しているためである。供試体の厚さは、それぞれ 5 点で測定した結果を平均したものである。Case1 では測定対象の供試体（健全供試体②）と比較用の供試体（健全供試体①）が共に健全な供試体であり、両者の差は僅か 1.5mm であった。Case2 ではひび割れ供試体の厚さが薄く評価される傾向を示し、健全供試体との差は 5.1mm であった。これは、入力された電磁波が供試体の底面ではなく、ひび割れの箇所では反射して出力されたことが影響していると考えられる。これより、電磁波レーダの反射画像を確認することによって層状ひび割れの発生の有無を確認することが可能であることが確認された。ここで、全ての測定終了後に供試体を切断してひび割れ供試体のひび割れの位置を確認したところ、ひび割れの発生深さは平均 49mm であった。したがって、求められた厚さは、比誘電率を高く設定したことを考慮しても、供試体に導入したひび割れの位置を正確に捉えたものではないことがわかる。

本試験結果の範疇からは、電磁波レーダ法では層状ひび割れの発生している深さを正確に捉えることは難しいものの、層状ひび割れの発生している範囲を定性的にはあるが明確にすることができると示唆された。Case3 では劣化部と健全部の差が 2.2mm となり、Case2 と比較して差が小さくなった。ここで、Case1 健全供試体②と Case3 充填後供試体の比について危険率 5% で有意差検定を行ったところ、両者には有意差がないことが確認された。

これより、ひび割れ箇所に注入材が充填されて再び一体化した場合には健全な状態と同等な反射画像が得られ、また、注入工法による注入材の充填度合いは電磁波レーダ法によって評価できる可能性があることが明らかとなった。さらに、層状ひび割れは電磁波レーダの走査結果に影響を及ぼすことから、凍害の生じた RC 開水路で鉄筋探査を行う際には、電磁波レーダの走査結果に影響を及ぼす可能性があることが示唆される結果が得られた。

4.3 実構造物による試験

(1) 試験概要

実構造物による試験は、内部状態の差異による電磁波レーダ画像の違いを確認することを目的として層状ひび割れの発生している劣化部と層状ひび割れの発生していない健全部において行った。

劣化部の測定としては、北海道内の RC 開水路から採取した L 型ブロックの側壁気中部を用いた。この L 型ブロック側壁部の寸法は、側壁上端からハンチ上端までの高さ 2070mm、幅 1200mm、側壁上端の厚さ 130mm、ハンチ上端の厚さ 160mm である。また、L 型ブロックの内側は南東向き面で凍結融解作用を受け易い供用環境にあり、表面の目視観察からは最多頻度水位より上部の気中部に

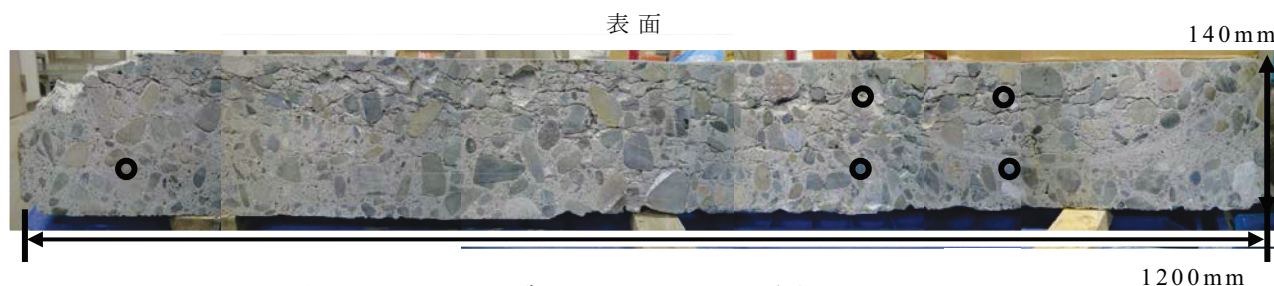


写真 4-1 L 型ブロック層状ひび割れ発生状況

凍害劣化による長手方向に延びるひび割れが多く確認された。長手方向に延びるひび割れが確認される気中部の最下端で切断した際の断面状況を写真 4-1 に示す。なお、写真中の丸印は鉄筋の位置を示している。鉄筋は直径 9mm の異形鉄筋であり、壁厚は 140mm、表側の鉄筋のかぶりは 40mm、裏側の鉄筋の表面からの深さは 100mm である。電磁波レーダによる走査は、写真 4-1 の L 型ブロック表面において右側から行い、鉄筋がダブル配筋されている 2 カ所を通過させて概ね 800mm の距離で行った。

健全部の走査については、劣化部の測定に用いたブロックとは異なる L 型ブロックを用いた。表面の骨材露出は確認されるものの凍害劣化は進行しておらず層状ひび割れの発生していない水中部において同様の方法で行った。なお、このブロックの配筋状態は、千鳥配筋であった。

(2)層状ひび割れの有無による電磁波レーダ反射画像の違い

図 4-4 に劣化部と健全部それぞれの電磁波レーダ反射画像を示す。なお、この反射画像は、走査した際に得られた画像をそれぞれ自動ゲイン（最適化）したものである。その際は誘電率の調整も行われており、劣化部の比誘電率は 6.0、健全部の比誘電率は 10.0 となっている。また、画像中の黄色丸印で示した箇所は、測定機器の鉄筋自動認識機能によって検出された鉄筋の位置を示している。両者の比誘電率が異なることから、反射画像から得られる鉄筋のかぶり厚さについては比較を行うことができないが、両画像を見比べると反射画像の表れ方に違いがあることがわかる。

本試験で劣化部の測定として用いた L 型ブロックは写真 4-1 より表面付近において層状ひび割れが多数発生していることが確認され、図 4-4 において鉄筋の位置を示す山形の波形は健全部の反射画像と比較すると明瞭さに差があることがわかる。図からは、健全部のように層状ひび割れの生じていない場合には鉄筋位置を明瞭に確認することができるが、劣化部のように層状ひび割れの生じている場合には明瞭な反射画像が得られず鉄筋位置を容易に判断することは難しい。一般的に鉄筋がダブル配筋されている場合には、表側の鉄筋で電磁波が

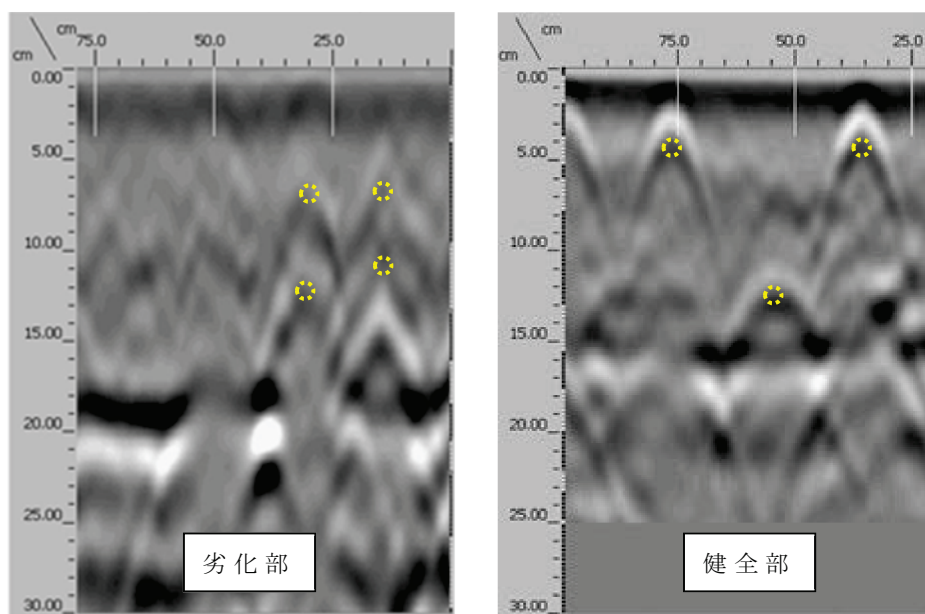


図 4-4 劣化部と健全部の電磁波レーダ反射画像の違い
(破線黄丸は画像から確認される鉄筋位置)

反射して画像上に現れ、裏側に存在する鉄筋には直上からの電磁波が到達しないために反射画像に現れ難い。

しかし、本試験結果においては、表側の鉄筋と裏側の鉄筋が同等に表示されることが確認された。この要因としては、以下のとおりに考えられる。本試験において層状ひび割れの生じている L 型ブロックでは、表側の鉄筋は層状ひび割れの発生している範囲に存在し、裏側の鉄筋は層状ひび割れの発生していない範囲に存在する。入力された電磁波は層状ひび割れのように一体化の図られていない箇所で乱れて反射し、その結果として反射画像は明瞭なものではなくなったと思われる。これにより表側の鉄筋の反射画像は、不明瞭な反射画像中に埋もれる形で確認し難いものになったと考えられる。裏側に存在する鉄筋については、鉄筋の周囲に層状ひび割れが発生していなかったために鉄筋の反射画像を比較的良好に得られたと考えられる。

これらの要因から、結果として本試験の場合には、確認し難い表側の鉄筋と現れ難い裏側の鉄筋の反射画像が同等な明瞭さとなって現れたと考えられる。これより、層状ひび割れは、電磁波レーダの走査の際に得られる反射波画像に影響を及ぼしていることが考えられる。

4.4 複数の開水路における現地試験

(1) 試験概要

試験は、寒冷地である北海道内の凍害が生じている RC 開水路側壁 8 地点で行

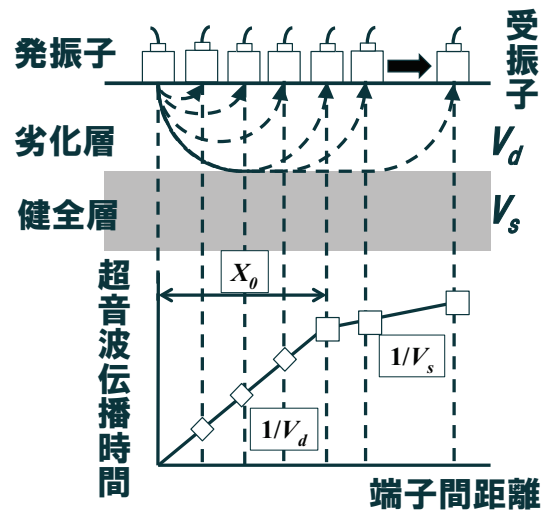


図 4-5 表面走査法の測定イメージ図

った。試験を行った RC 開水路は供用後 40～50 年程度が経過したものであり、凍害劣化の確認は表面変状から目視によって判断した。本試験で対象とした水路では、いずれも気中部において長手方向に延びるひび割れが確認された。

測定項目は、電磁波レーダによる走査と表面走査法による超音波伝播時間である。電磁波レーダによる走査は、水路の鉛直方向に対して行った。測線は 200mm 間隔で 5 測線設けた。測定は上端から 900mm の地点を始点として電磁波レーダの走査を開始し、上端から 100mm の地点を終点として下方から上方へ向けて概ね 800mm の距離で行った。電磁波レーダの比誘電率の設定は、鉄筋からの反射波が鮮明に得られることを条件として 9 と設定した。

表面走査法による超音波伝播時間の測定は、層状ひび割れの程度を推察することを目的として行った。測定は気中部で行い、測線は鉄筋の影響を受けない箇所を選択して決定した。超音波法の測定には、振動子周波数 54kHz、発・受振子の直径 50mm の超音波測定器を用いた。表面走査法の測定では、まず発振子を起点に設置し、受振子を起点から長手方向に 50～500mm まで 50mm ずつ移動させて設置し、計 10 点で超音波伝播速度の測定を行った。なお、測定時の端子間距離については、既往の研究[4-4]を参考として決定した。表面走査法の測定イメージ図は図 4-5 に示すとおりである。

表面走査法の結果からは、式 4-3 を用いて凍害劣化深さの推定を試みた。

$$t = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}} \quad \text{式 4-3}$$

t : 劣化部の厚さ (mm), V_d : 劣化部の超音波伝播速度 (km/sec), V_s : 健全部

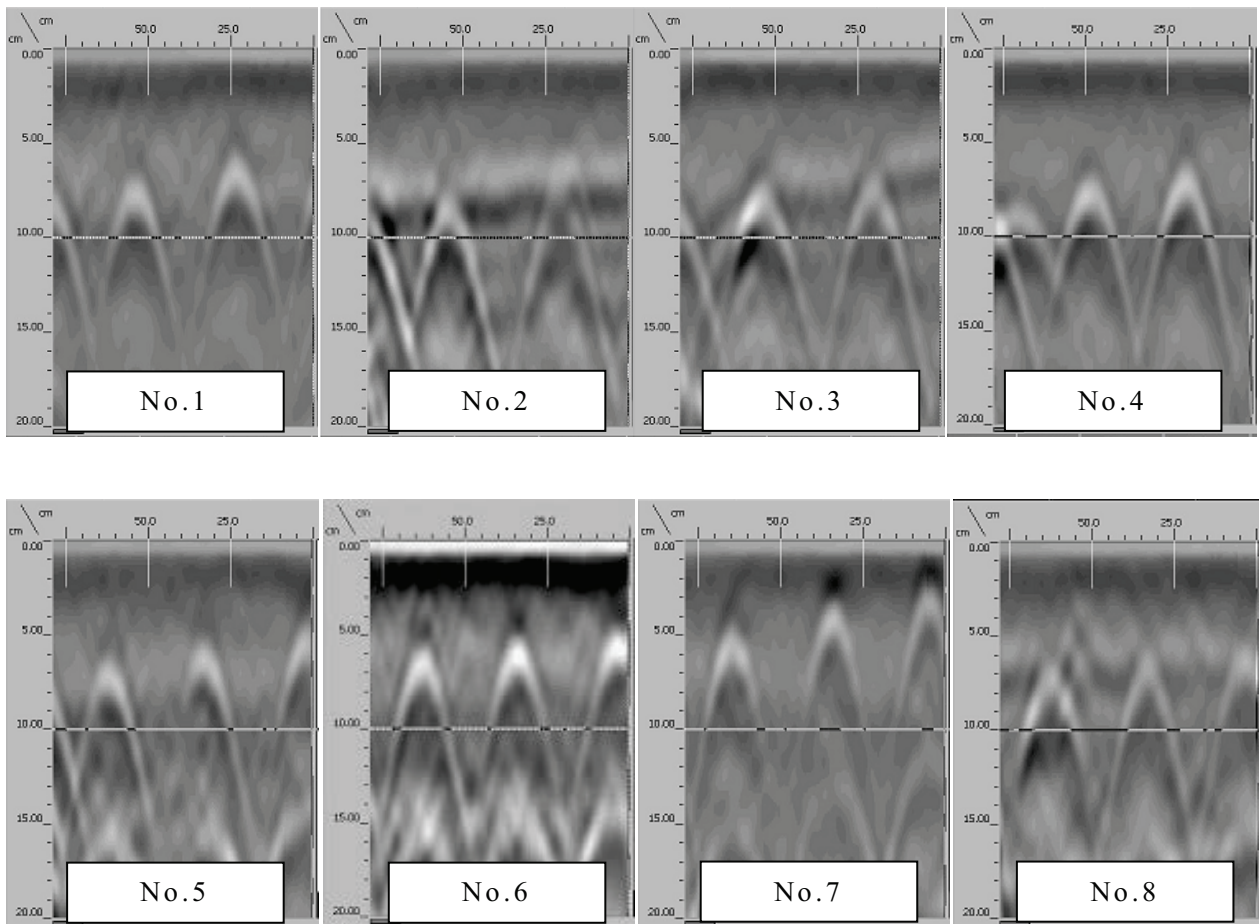


図 4-6 各測点における反射画像

の超音波伝播速度 (km/sec), X_0 : 直線の傾きが変わる位置 (mm)

遠藤らは、コンクリートの表層に劣化部が存在し、内部に健全部が存在する場合に表面走査法の試験結果から式 4-3 を用いて凍害劣化深さを一定の精度で推定することが可能であることを示している[4-4, 4-5]。本来であれば式 4-3 は、表層に劣化部が存在し、内部に健全層が存在する場合に劣化部の厚さ（深さ）を求めることを目的とした式であり、 t を求める際は、 $V_d < V_s$ となることが条件に挙げられる。凍害劣化は一般的に表層から劣化が進行するために、凍害劣化深さの推定においても式 4-3 が有効である。しかし、本試験で対象とした L 型ブロック側壁においては、表面変状の形態から表層よりも内部に劣化部の存在が予測されている。本試験においては、試験対象の構造物が内部変状として層状ひび割れを有している場合に表面走査法の結果がどのような傾向を示すのかを合わせて確認し、電磁波レーダ反射画像との関係性を確認した。

(2) 超音波伝播速度と電磁波レーダ反射画像の関係

図 4-6 に 8 カ所の測点における電磁波レーダの反射画像を示す。画像は 5 測線

表 4-2 電磁波レーダの画像から求められた鉄筋の深さと
下側の鉄筋深さに対する上側の鉄筋深さの比

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
(a) 上部の鉄筋のかぶり厚さ (mm)	62.6	71.0	64.2	67.1	63.1	55.2	48.3	62.9
(b) 下部の鉄筋のかぶり厚さ (mm)	50.9	65.7	63.1	59.2	55.5	48.5	32.1	57.0
かぶり厚さの比 (a) / (b)	1.23	1.08	1.02	1.13	1.14	1.14	1.50	1.10
V_d (km/sec)	2.67	2.37	3.23	4.19	2.24	2.41	2.34	2.40
V_s (km/sec)	1.51	1.41			1.61		29.4	0.77
V_s / V_d	0.57	0.59	1.00	1.00	0.72	1.00	12.5	0.32

の反射画像の内，その地点の傾向を最も表しているものを掲載している。反射画像の横軸は電磁波レーダの進行方向を示している。進行方向は，画像の左側から右側の方向であり，左側の山形波形が上部側の鉄筋を示している。

画像からは，下部の鉄筋に対して上部の鉄筋のかぶり厚さが厚く評価される傾向があることが確認された。表 4-2 に電磁波レーダの画像から求められた鉄筋のかぶり厚さと，下部のかぶり厚さに対する上部のかぶり厚さの比を示す。また，表 4-2 には表面走査法の結果から求めた V_d と V_s を合わせて示す。

V_d と V_s の大小関係は， $V_d > V_s$ となるケースが 4 ケース， $V_d = V_s$ となるケースが 3 ケース， $V_d < V_s$ となる傾向を示したケースが 1 ケースであった。しかし， $V_d < V_s$ となる No.7 については， V_s の値が極めて大きく一般的なコンクリートの超音波伝播速度とは大きく異なるために異常値と捉えることができる。 V_s の値が異常値となった要因としては，内部変状として層状ひび割れが生じていた可能性が示唆される。したがって，測定した 8 カ所については，式 4-3 による劣化深さの推定はいずれの箇所でも行うことができなかった。これらの結果より，測定した 8 カ所のうち特に No.3，4，6 を除く 5 カ所については，内部の劣化が進行し，層状ひび割れを有している可能性が高いと判断することができる。既往の研究において層状ひび割れは，開水路側壁の上端から発生し，上端に近い箇所ほど多く発生することが明らかになっている。したがって，電磁波レーダの反射画像は，層状ひび割れが多く発生している箇所において鉄筋のかぶり厚さを厚く評価する傾向にあることが明らかとなった。これより，層状ひび割れの生じている箇所で電磁波レーダによる鉄筋探査を行う場合には，反射画像に

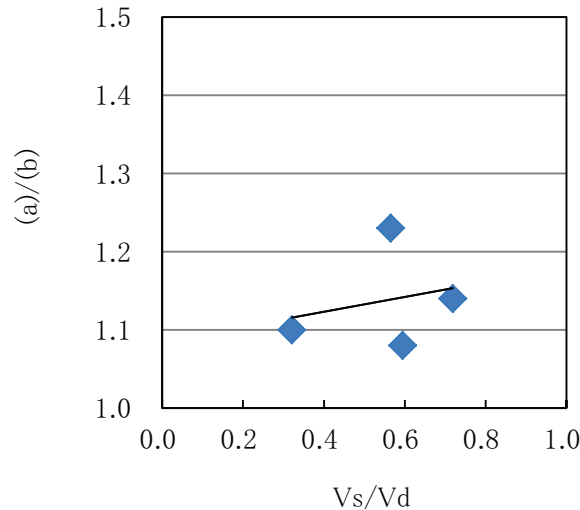


図 4-7 V_d / V_s 比とかぶり厚さの比の関係

示されるかぶり厚さが本来のかぶり厚さとは異なる可能性がある点に留意する必要があることがわかる。

ここで、供試体を用いた試験では、ひび割れの生じた供試体はひび割れの生じていない健全供試体と比較して供試体厚さが薄く評価される傾向を示している。供試体を用いた試験では供試体の厚さを評価対象としているために、かぶり厚さを評価した本試験とは異なる点もあるが、結果としては逆の傾向を示していると言える。この理由は以下のとおり考えられる。供試体を用いた試験では、供試体内部におけるひび割れは 1 本のみであり、それが直線的に連続している。したがって得られる反射波に乱れが生じる現象は、生じ難いと言える。一方、本試験では、実構造物を対象としている。水路側壁内部におけるひび割れは複数生じていると予測され、連続・不連続のもの、ひび割れ幅の異なるものが混在していると考えられる。そのため、得られる反射波には乱れが生じ、均一なものを得ることはできない。また、鉄筋からの反射波は、多くのひび割れによって減衰した電磁波の透過によって表示されることとなる。これらの得られる反射波の違いによって、供試体を用いた試験と異なる傾向が得られたと考えられる。

表 4-2 の最下段には、 V_d に対する V_s の比 V_s / V_d を示している。ここでは、 V_s / V_d を層状ひび割れの発生程度を示す指標として用いる。 $V_d / V_s > 1$ となる 4 データについてかぶり厚さの比との関係を図 4-7 に示す。両者の相関係数は 0.056 であり、本試験で得られたデータからは両者の相関性を確認することができなかった。

本試験の結果は、8 カ所の電磁波レーダの走査から得られたものである。今後は、データを蓄積することによって、層状ひび割れと評価されるかぶり厚さの

詳細な関係性について明らかにされると考えられる。本試験結果の範疇からは、層状ひび割れを有する RC 開水路側壁においてかぶり厚さを厚く評価する傾向が確認されたことから、実構造物においてかぶり厚さの評価を行う場合には、この点に留意する必要があると言える。

4.5 第 4 章まとめ

第 4 章においては、RC 開水路の精査に関する項目として電磁波レーダ法による走査に層状ひび割れが及ぼす影響についての検討を行った。まず、室内試験として供試体を用いた試験と実構造物を用いた試験を行い、その後に複数の開水路における現地試験を行った。以下に本章から得られた結論を示す。

- (1) 電磁波レーダによる走査では、コンクリート内部の層状ひび割れの発生を定性的に確認することができる。
- (2) 層状ひび割れに対して注入工法を適用した場合には、注入前後の反射画像を確認することで注入材充填の有無を確認することができる。
- (3) 実構造物において層状ひび割れが生じている場合には、生じているひび割れの程度にもよるが電磁波レーダ法によって鉄筋探査を行うことは困難である。
- (4) 構造物の鉄筋がダブル配筋で表側の鉄筋が層状ひび割れ中に埋もれる形になっている場合には、表側と裏側の鉄筋が同等な明瞭さの反射画像として現れる。
- (5) 本試験結果の範疇からは、層状ひび割れの発生程度とかぶり厚さの評価値との間に相関性は確認されない。
- (6) 電磁波レーダの反射画像は層状ひび割れの生じている箇所においてかぶり厚さを厚く示す傾向があり、実際の診断の際にはこの点に留意する必要がある。

第 5 章

注入工法を用いた

層状ひび割れ評価手法に関する検討

第 5 章 注入工法を用いた層状ひび割れ評価手法に関する検討

5.1 概要

第 4 章では、現地調査（精査）を行う際の留意点についての検討を行った。構造診断を行う際には、電磁波レーダの反射画像に層状ひび割れが及ぼす影響を考慮した上で鉄筋探査を行った後に、内部変状の発生の程度や範囲を明らかにすることを目的とした調査が必要となる。

内部変状である層状ひび割れについては、第 3 章でも述べたとおり、定性的、定量的評価手法として明確なものは存在しない。第 3 章では定性的評価につながる目視診断についての検討を行い、表面変状の形態から内部変状を予測する方法を提案した。本章では、より定量的な評価を行うことを目的として、注入工法を用いた評価手法について検討を行った。

注入工法は、コンクリートのひび割れ補修工法のひとつであり、防水性・耐久性の向上の他、躯体の一体化を図ることを目的として広く用いられている工法である[5-1]。注入工法を表面のひび割れに対して施工する場合には、ひび割れが目視によって確認可能であるため比較的確実に注入材の充填を行うことができる。一方、内部のひび割れや空隙に対して施工する場合には、ひび割れや空隙の箇所、範囲が不明確であるために、注入材の充填が十分になされているか否かの判断を定量的に行うことは難しい。充填範囲については、定性的な評価として他の注入孔からの注入材の漏出によって確認されるが、定量的な評価方法は確立されておらず、この点が課題として挙げられる。

そこで本研究では、凍害の生じた RC 開水路側壁を対象に注入工法を実施し、層状ひび割れへの注入材充填前後の超音波伝播速度の変化から層状ひび割れの範囲の定量的評価方法について検討した。検討に際しては、供用中の水路側壁から 3 枚のブロックを採取し、それぞれ異なる条件で注入試験を実施し、層状ひび割れへの注入材充填前後の超音波伝播速度の変化から層状ひび割れの範囲の定量的評価方法について検討した。

まず L 型ブロックから採取した 1 枚目のブロックでは、注入材充填による超音波伝播速度の変化をブロック表面の広範囲で確認した。その後に現場打ちフリーム水路の側壁から隣接した 2 枚のブロックを採取し、それぞれ異なる注入材を用いて注入工法を実施した上で、詳細な検討を行った。



写真 5-1 L 型ブロックの表面状況

5.2 L 型ブロックを用いた試験

(1) ブロック概要

本試験では，昭和 40 年代に築造され北海道内で供用されている埋設型の側壁と底版からなる L 型ブロックを用いた。水路側壁の内面側の状態を写真 5-1 に示す。側壁部の寸法は，側壁上端からハンチ上端までの高さ 2070mm，幅 1200mm，側壁上端の厚さ 130mm，ハンチ上端の厚さ 160mm である。また，この L 型ブロックの内側は，南東向き面となっており凍結融解の作用を受け易い供用環境にあった。表面の目視観察からは，最多頻度水位より上部の気中部に凍害劣化による長手方向に延びるひび割れが多く存在し，ひび割れ箇所からはエフロレッセンスの発生も確認された。一方，最多頻度水位より下部の水中部では摩耗により粗骨材の露出が目立つが，凍害劣化によるものと思われる変状は確認されなかった。

(2) 注入試験方法

注入試験は，次の手順で行った。まず，注入材による充填を広範囲に確実にを行うために L 型ブロックの底版部を切断し，側壁部を横に倒した状態にした。その際には，同じく充填を広範囲に確実にを行うことを優先するために注入材の漏出防止を目的としてあらかじめ背面にエポキシ樹脂系のパテ材によるシール材の塗布を施した。次に，L 型ブロックの上端から縦 100mm ごと，横 150mm ごとに計 63 カ所に径 6mm の注入孔を削孔した。注入孔は表層から深い位置に存在する層状ひび割れに対しても注入材を充填させるために部材を 5mm 程度残す深さまで削孔し，深さは概ね 125～135mm であった。注入孔削孔位置を写真 5-2 に示す。その後，注入材の漏出を防ぐためにシール材を表面と側面に塗布し，あわせて注入台座の取付けも行った。

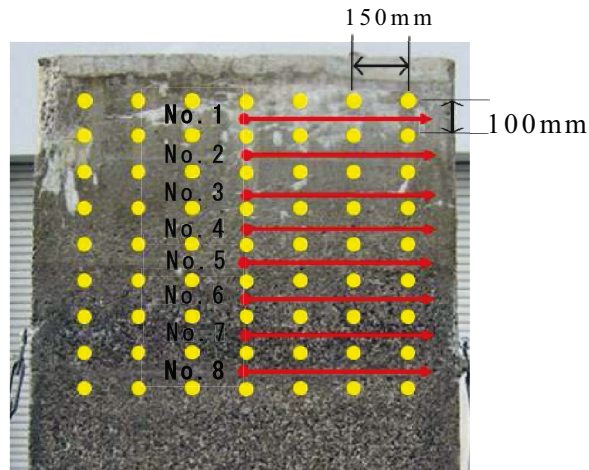


写真 5-2 Case 1 の注入孔の位置
（直線は超音波伝播速度の測線）

シール材の塗布後，高さの異なる計 8 カ所で超音波法の表面走査法による超音波伝播速度の測定を行った。表面走査法の測定位置を写真 5-2 に合わせて示す。測定位置の番号は上部が No.1, 最下部が No.8 である。超音波伝播速度の測定は，振動子周波数 54kHz，発・受振子の直径 50mm の超音波測定器を用いて行った。表面走査法による超音波伝播速度の測定は，まず基点となる点に発振子を設置し，次に受振子を基点から長手方向に 50～500mm まで 50mm 間隔で移動させて計 10 点で行った。なお，測定時の端子間距離については，既往の研究[5-2]を参考として決定した。本章のこれ以降の試験では，表面走査法の測定方法・機器は全て同様である。

表面走査法の結果からは，第 4 章でも使用した以下の式を用いて凍害劣化深さの推定を行った。

$$t = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}} \quad \text{式 4-3}$$

第 4 章で行った表面走査法による超音波伝播速度の測定では，層状ひび割れの発生している箇所では，表面よりも内部の速度が遅くなる現象が複数確認された。その場合には，式 4-3 のルート内が負の値を示し，劣化深さの推定を行うことができない。そこで，本章では，この現象を利用して層状ひび割れの発生域と注入材の充填域の評価を試みた。

注入材の充填は，超音波伝播速度の測定の後に行った。本試験で用いた注入材は，JIS A 6024:2008「建築補修用注入エポキシ樹脂」硬質形（Ⅰ）低粘度形，および国土交通省土木補修用エポキシ樹脂注入材 1 種適合品の低粘度形エポキ

シ樹脂である。注入の際に一部の注入孔では、採取後のコアを用いて充填範囲を直接確認するために、蛍光塗料をエポキシ樹脂の重量比 0.3% 混入した注入材で充填を行った。本試験では、注入器具に土質試験で用いるモールドを使用し、エアコンプレッサーによって圧力を加えることで注入材の充填を行った。注入材の充填は下部（水中部側）の注入孔から開始し、順次上部（気中部側）へ注入器具の設置位置を変更しながら行った。注入器具の設置位置の変更は、注入材の充填がなされない場合、または、隣接する注入孔から注入材の漏出が確認された段階で行った。

エポキシ樹脂充填後の試験は、樹脂の硬化を確認し、注入工法実施 2 日経過後に行った。2 日経過後には、注入材充填前と同じ箇所超音波伝播速度の測定を行い、その後コア供試体の削孔を行った。コア供試体の削孔は JIS A 1107:2012 に準拠して行い、コア径は 75mm とした。採取したコア供試体に対しては、側面から注入材充填状況の確認を行った。また、一部のコア供試体については、コアを切断してデジタルマイクロスコープを用いて層状ひび割れ幅と注入材充填域の幅の測定を行った。

(3) 注入試験前後の超音波伝播速度の変化

注入試験前の表面走査法の測定結果を図 5-1 に、凍害劣化深さの推定結果を表 5-1 にそれぞれ示す。図中の 2 直線の回帰式は既往のプログラム[5-3]によって決定した。2 直線の決定では、まず全測定値を用いて 2 直線に分類した後、直線の値と 10%以上の差異が生じた値を除外値として棄却し改めて回帰式を求めた。図中に示す回帰式は式 4-3 において V_d , V_s を求めるためのものであり、 V_d , V_s は回帰式の傾きの逆数によって求められる。なお、No.2 の端子間距離 350, 450, 500mm では、測定箇所の凍害劣化が顕著であり、超音波パルスの透過が阻害されたために測定が不可能であった。

結果として式 4-3 によって凍害劣化深さの推定が可能であったのは、水中部に近い下部の No.5 および No.7 のみであった。No.6 については劣化深さの推定値が負の値となったが、これは 2 直線の変曲点である X_0 の値が負の値になったためである。凍害劣化深さの推定値が僅かな測点でしか得られないという結果は、図中の 2 本の回帰直線から求められる V_s と V_d の関係に起因したものである。式 4-3 は、 $V_s > V_d$ という条件の下で成立する。これは、表層に劣化部がある場合の超音波パルスは端子間距離を延ばすとやがて劣化部と健全部の縁端を伝播経路とするため、それ以降の端子間距離では伝播経路が同一になり、速度の変化が小さくなるためである[5-2]。一方で、本試験では多くの測定箇所測定結果が

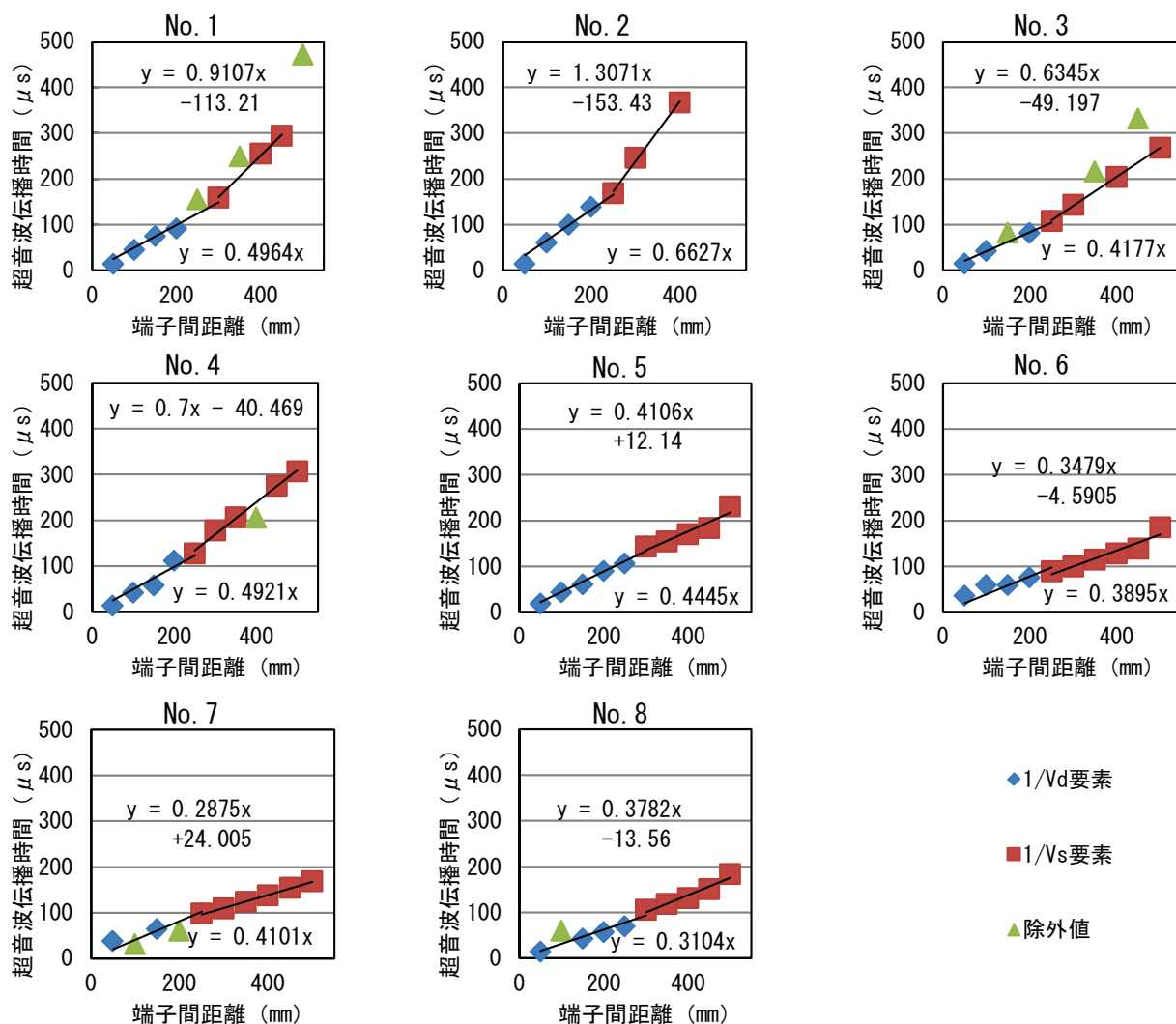


図 5-1 注入材充填前の超音波伝播時間

表 5-1 凍害劣化深さの推定結果

No.	V_d (km/sec)	V_s (km/sec)	凍害劣化深さ (mm)
No.1	2.01	1.10	—
No.2	1.51	0.77	—
No.3	2.39	1.58	—
No.4	2.03	1.43	—
No.5	2.25	2.44	35.65
No.6	2.57	2.87	-13.10
No.7	2.44	3.48	41.04
No.8	3.22	2.64	—

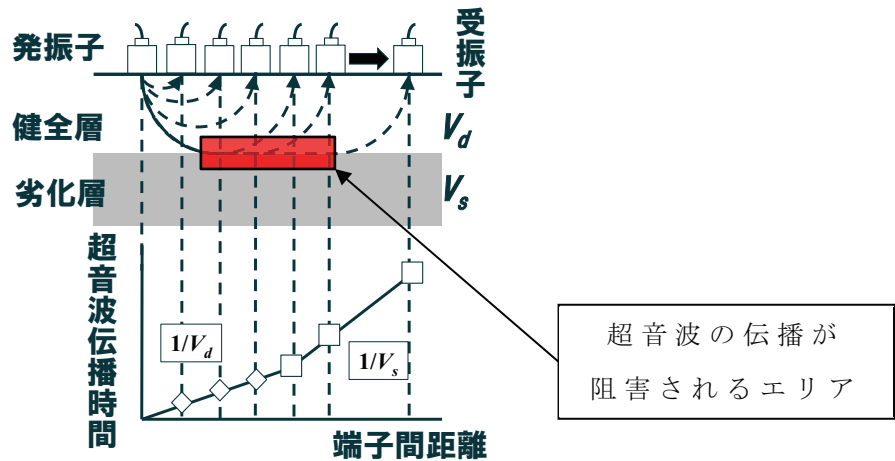


図 5-2 表面走査法の測定イメージ図

$V_s < V_d$ となり，逆勾配のグラフを示した。逆勾配となる要因としては，内部に層状ひび割れが生じている場合には内部の劣化部が超音波パルスの透過を阻害するために，端子間距離が長大すると（端子間距離＜伝播距離）となるためであると考えられる。超音波パルスの透過と V_s ， V_d の示す傾向について図 5-2 に示す。本試験においても L 型ブロックは，凍害劣化によって内部に層状ひび割れが生じていたために $V_s < V_d$ となったと考えられる。したがって，表面走査法を用いて凍害劣化診断を行った際に $V_s < V_d$ となる結果を得る場合には，内部劣化として層状ひび割れを生じている可能性が高いという評価を定性的に下すことができると言える。

注入試験後の表面走査法の測定結果を図 5-3 に，凍害劣化深さの推定結果を表 5-2 にそれぞれ示す。

No.1 および No.2 については，測線が層状ひび割れに注入材が充填された範囲（写真 5-3 上部の赤枠の範囲）を横断しており注入試験前の超音波伝播速度と比較して，値が大きくなることが確認された。また，図 5-3 では図 5-1 と比較して，端子間距離と超音波伝播時間の関係が直線から外れるデータ数が少なくなる傾向を示した。これは，層状ひび割れとなって不連続になっていた部分に注入材が充填され，それまで超音波パルスの透過が阻害されていた箇所をより直線的に透過することが可能となったためであると考えられる。図 5-2 内の赤枠で示している「超音波の伝播が阻害されるエリア」の領域を滑らかに透過することが可能となり，2 直線の傾きの差は大幅に低下した。しかし，依然として $V_s < V_d$ の関係は保持されており，式 4-3 による劣化深さの推定を行うことは不可能であった。No.3 から No.8 についても同様に超音波伝播速度の値が大きくなることが確認された。この結果については，注入孔付近における僅かな範囲のひび割れが注入材によって閉塞し，超音波パルスが透過し易い経路が確保された

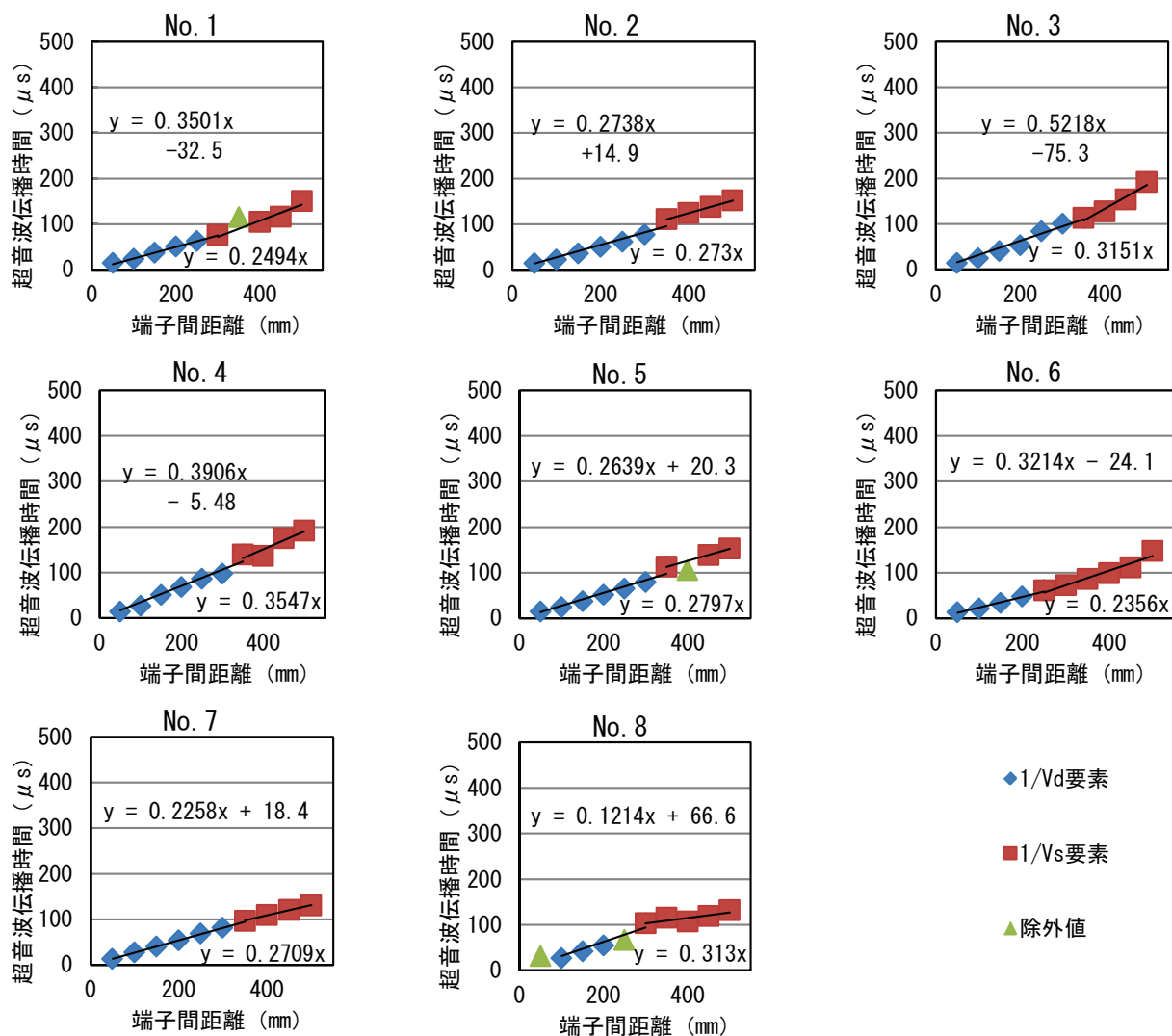


図 5-3 注入材充填後の超音波伝播時間

表 5-2 凍害劣化深さの推定結果

No.	V_d (km/sec)	V_s (km/sec)	凍害劣化深さ (mm)
No.1	4.01	2.86	—
No.2	3.66	3.65	—
No.3	3.17	1.92	—
No.4	2.82	2.56	—
No.5	3.58	3.79	109.68
No.6	4.24	3.11	—
No.7	3.69	4.43	60.60
No.8	3.19	8.24	115.46

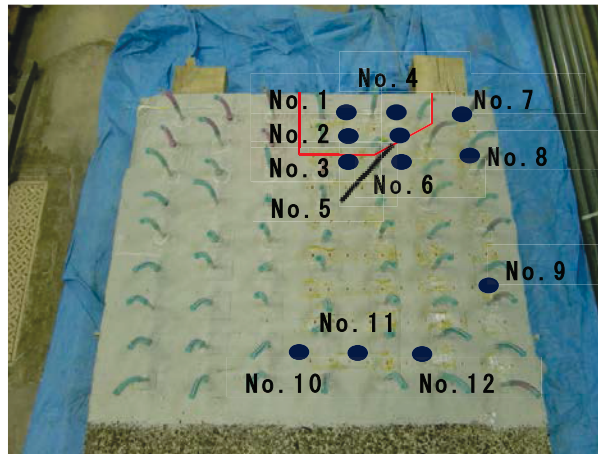


写真 5-3 コア採取位置

ためであると考える。

図 5-1, 5-3 から、超音波伝播時間は水中部に近い測定箇所ほど小さくなっており、また、注入試験前後の値の差も小さくなっていることがわかる。緒方らの既往の研究において、層状ひび割れは気中部に多く存在し、水中部においては多くは発生していないことが確認されている[5-4]。本試験においては、超音波伝播時間の変化から水中部に近づくほど内部ひび割れが少なくなっていることが示唆される結果となった。また、全体を通して超音波伝播速度の値は、一般的なコンクリートの値としては低い値を示した。これは、層状ひび割れを生じていない箇所であっても凍害による劣化が進行していることを示している。

(4) コア観察による充填度合いの確認

写真 5-3 にコアの採取位置を示す。コアは 12 ヶ所から採取した。No.1 から No.6 については連続した層状ひび割れが存在し注入材による充填がなされた箇所の付近より、No.7 から No.9 については蛍光塗料を混入した注入材を充填した箇所で注入孔上より、No.10 から No.12 は水中部に近く内部の状態は健全と思われる箇所よりそれぞれ採取を行った。コア側面の観察から、No. 1, 2, 4, 5 のコア供試体については、層状ひび割れの箇所に注入材が充填されたことで一体化が図られていることが確認された。

コア供試体 No.1 の状態を写真 5-4 に、コンクリートカッターにより切断して断面にブラックライトを照射して撮影した画像を写真 5-5 にそれぞれ示す。写真 5-4 は、表面側に存在する層状ひび割れの箇所に注入材が充填されている状態を確認することができる。また、写真 5-5 においては、目視だけでは確認を行い難い微細なひび割れ箇所まで注入材が充填されていることが明らかになった。

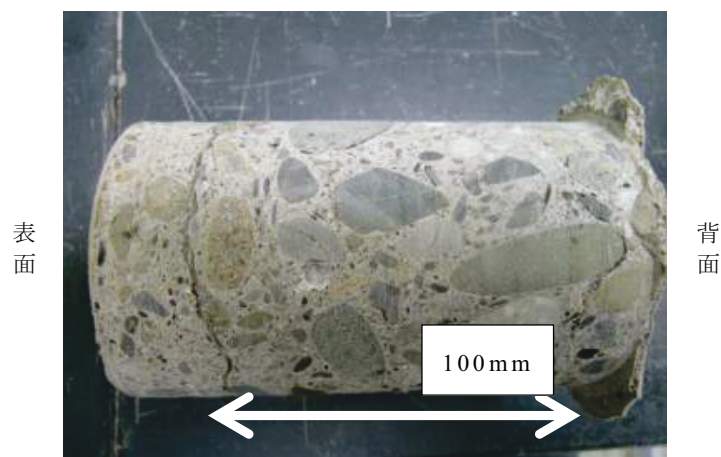


写真 5-4 コア供試体 No.1 の側面

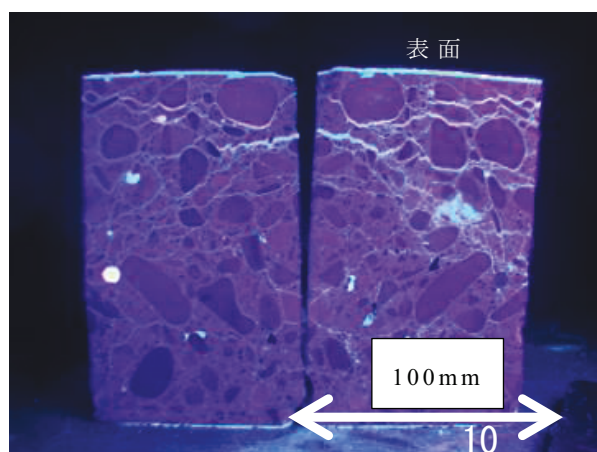


写真 5-5 コア供試体 No.1 の側面
(ブラックライト照射)

デジタルマイクロスコープによる観察では、最大のひび割れ幅が 1.35mm であり、最小では $14\mu\text{m}$ のひび割れ幅まで充填されていることが確認された。

写真 5-6 は、コア供試体 No.7 の断面画像である。No.7 の断面観察からは、注入孔の周りに層状ひび割れの発生が確認されず、注入孔のみに充填されているように見える。しかし、写真 5-7 に示すデジタルマイクロスコープによる観察では、コア供試体 No.7 の注入孔とつながっている微細ひび割れに充填がなされていることが確認された。なお、この微細ひび割れの幅は、 $36\mu\text{m}$ と $250\mu\text{m}$ であった。このような微細ひび割れに対しての注入材の僅かな充填は、多くの注入孔内で行われているものと考えられる。その結果として、注入材充填後に超音波伝播速度の値が大きくなったものと考えられる。

本試験の結果からは、注入材充填前後に表面走査法の測定を行って値を比較することで、内部ひび割れに対する充填範囲を評価できることの可能性が示唆

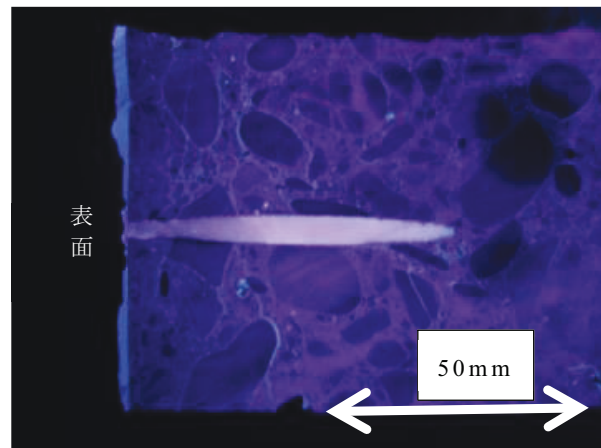


写真 5-6 コア供試体 No.7 の断面

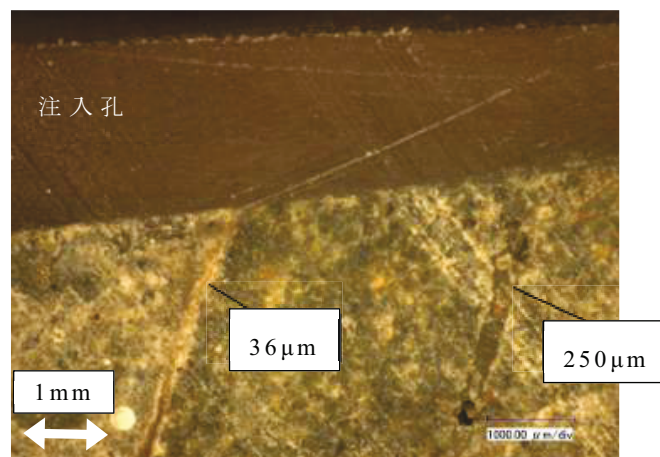


写真 5-7 コア供試体 No.7 のデジタルマイクロスコープによる観察

された。充填前後の値に大きな差がある場合には充填がなされたと判断し、充填前後の値に大きな差がない場合には注入材が充填されなかった、または、元来ひび割れを有していない箇所であると判断することができる。本試験の場合には注入孔を短い間隔で設置したため、表面走査法の測定結果に対しては注入孔自体の影響も考えられる。しかし、表面走査法の測線は注入孔を跨いではおらず、超音波パルスの伝播経路においても注入孔は透過していないものと考えられる。したがって、注入孔から離れた箇所で表面走査法の測定を行う場合にも、内部が充填されている状態であれば、本試験の結果と同様に値の変化を確認することが可能であると言える。

5.3 現場打ちフリーフォーム水路の側壁を用いた詳細試験

(1) 試験概要

本試験で使用するブロック 2 枚は、RC 構造の現場打ちフリーフォーム水路の同一

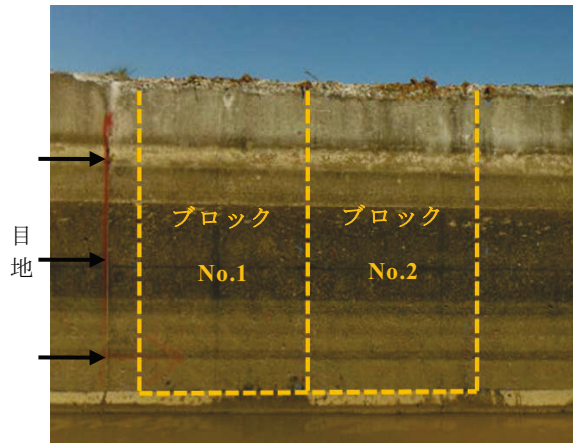


写真 5-8 水路側壁の状況および切り出し位置

スパンの側壁からブロック同士が隣接する形で採取した。ブロックを採取したスパンは埋設型の形式であり，北海道内で供用後 50 年程度が経過していた。この水路の 1 スパンの幅は約 8000mm，高さは 2400mm，側壁上端の厚さは 200mm，ハンチ上端の厚さは 300mm である。ブロックの切出しについては，目地部に存在する止水板を考慮して，バレルの下流側目地から 200mm 離れた箇所を基線として上流側に向かって 1500mm 間隔で切断作業を行った。本試験では，目地側のブロックをブロック No.1，中央側のブロックをブロック No.2 とする。写真 5-8 に側壁の表面状況と切り出し位置を示す。

ブロックの表面変状としては，気中部において凍害劣化による長手方向に延びるひび割れが確認された。また，目地に近い箇所では，目地から斜めに立ち上がるひび割れも確認された。このひび割れは前述のとおり凍害の影響のみではなく，躯体の温度変化に対する体積変化が，隣接する先打ちのスパンによって拘束されるために生じた応力に起因したひび割れであると考えられる。水中部では，流水による摩耗の影響で骨材露出が目立つがひび割れの発生は確認されなかった。ブロックの天端ではスケーリングによる骨材の剥離が進行しており，一部では配筋筋が露出している箇所も確認された。

(2) 注入試験方法

注入試験は，次の手順で行った。まず，ブロックの下地処理としてグラインダーによる表面の研磨を行った。次に，2 枚のブロックの気中部に縦，横それぞれ 200mm ごとに 2 行 7 列，計 14 カ所に注入孔を削孔し，注入台座を取り付けた。1 行目が上段，2 行目が下段である。また，注入台座取り付け用孔とは別に空気抜き用孔を注入孔の長手方向中間点に計 12 カ所削孔した。いずれの孔も径は 10mm，深さは約 100mm である。写真 5-9 に削孔位置を示す。注入台座取り付け

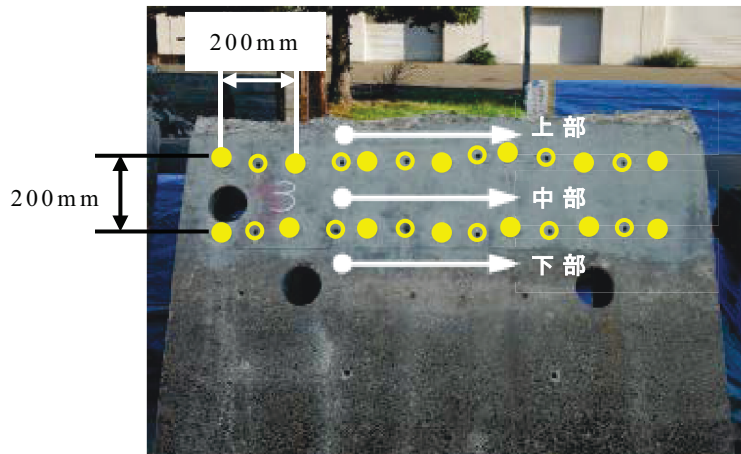


写真 5-9 注入孔削孔位置

(白抜きは空気抜き用孔，また白線は表面走査法の測線を示す)

の際には，注入材を確実に層状ひび割れに充填し，表面ひび割れからの注入材の漏出を防ぐためにエポキシ樹脂系のパテ材によって表面ひび割れの箇所をシールした。その後，注入孔の上段の上部（以下，上部と呼ぶ），上下段の中央部（以下，中部と呼ぶ）および下段の下部（以下，下部と呼ぶ）の計 3 カ所で超音波法の表面走査法による超音波伝播速度の測定を行った。表面走査法の測線を写真 5-9 に合わせて示す。表面走査法の結果からは，式 4-3 を用いて凍害劣化深さの推定を試みた。

超音波伝播速度の測定後は，注入材充填前の状態を確認するために両ブロックの気中部からコア供試体を採取した。コア採取は JIS A 1107:2012 に準拠して行い，コア径は 100mm とした。注入材の充填は，コア供試体の採取後に行った。本試験では注入材として，ブロック No.1 に対して有機系材料を，ブロック No.2 に対して無機系材料をそれぞれ用いた。試験で用いた有機系材料は JIS A 6024 「建築補修用注入エポキシ樹脂」硬質形（I）低粘度形，および国土交通省土木補修用エポキシ樹脂注入材 1 種適合品の低粘度形エポキシ樹脂であり，無機系材料は超微粒子セメントを主成分とするプレミックスセメントである。注入の際に有機系材料には，採取後のコア側面から充填範囲を目視観察するために，蛍光塗料をエポキシ樹脂の重量比 0.3% 混入した。注入器具には，容量 100ml の低圧注入器具を用いた。

注入材の充填後の試験は，充填から 1 日経過後に注入材が硬化したことを確認して行った。注入材の硬化は，注入器具に残存した注入材の状態から判断した。注入材充填後は，注入材充填前と同じ 3 カ所で超音波伝播速度の測定を行い，その後コア供試体の採取を行った。コア供試体の採取方法・条件は注入材充填前と同様である。採取したコア供試体については，側面から内部変状と注



【ブロック No.1 側面】

【ブロック No.2 コア孔】

写真 5-10 注入材漏出状況

入材充填状況を目視で確認し，透過法による深さ方向の超音波伝播速度の測定を行った。

(3) 注入材の充填度合い

注入材の充填は，ブロック No.1 において比較的多量になされた。ブロック No.1 については，上段 7 カ所の注入孔の内 3 カ所については充填の過程で注入器具に注入材を一度注ぎ足しており，空気抜き用孔や目地側側面の層状ひび割れが確認される箇所から注入材の漏出が確認された（写真 5-10 左）。ブロック No.2 については，空気抜き用孔からの漏出は確認されなかったが，コア採取跡からひび割れに沿って水分の漏出が確認された（写真 5-10 右）ことから，注入材の充填が示唆された。注入材の充填状況からは層状ひび割れは目地に近い箇所が多く発生しており，その要因としては目地から立ち上がるひび割れが凍結融解作用を受けることで拡大し，連続したひび割れとなったことが考えられる。

(4) 注入材充填前後の超音波伝播速度の変化

注入材充填前の表面走査法の測定結果を図 5-4 に，注入材充填後の表面走査法の測定結果を図 5-5 にそれぞれ示す。図中の 2 直線の回帰式は既往のプログラム [5-3] によって決定した。2 直線の決定では，まず全測定値を用いて 2 直線に分類した後，直線の値と 10%以上の差異が生じた値を除外値として棄却し改めて回帰式を求めた。 V_d ， V_s は回帰式の傾きの逆数によって求められる。表面走査法の測定結果から求めた超音波伝播速度 V_d ， V_s を表 5-3 に示す。図 5-5 において No.1 の上部と中部は，2 直線による回帰を行った際に傾きの差が 0.1 以下の僅かなものであったため 1 本の直線と見なした。

本試験では全ての測線で $V_d > V_s$ の関係となり，式 4-3 によって凍害劣化深さ

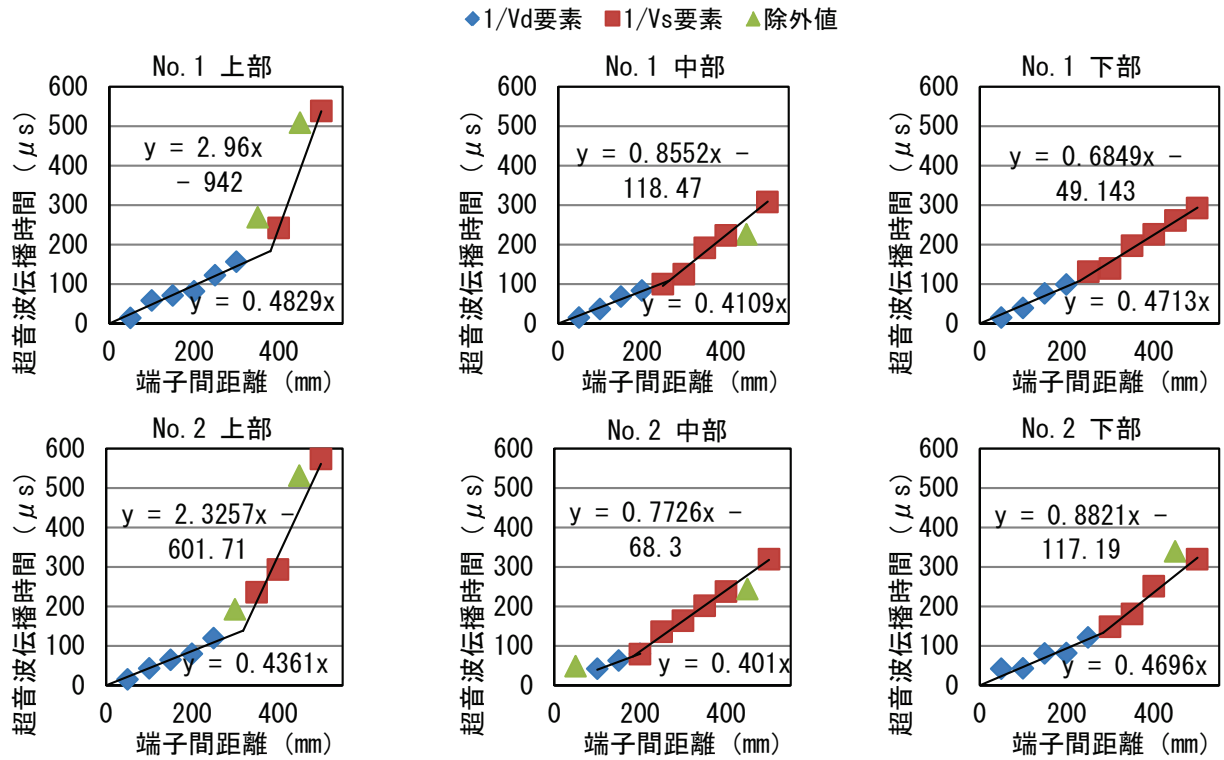


図 5-4 注入材充填前の超音波伝播時間

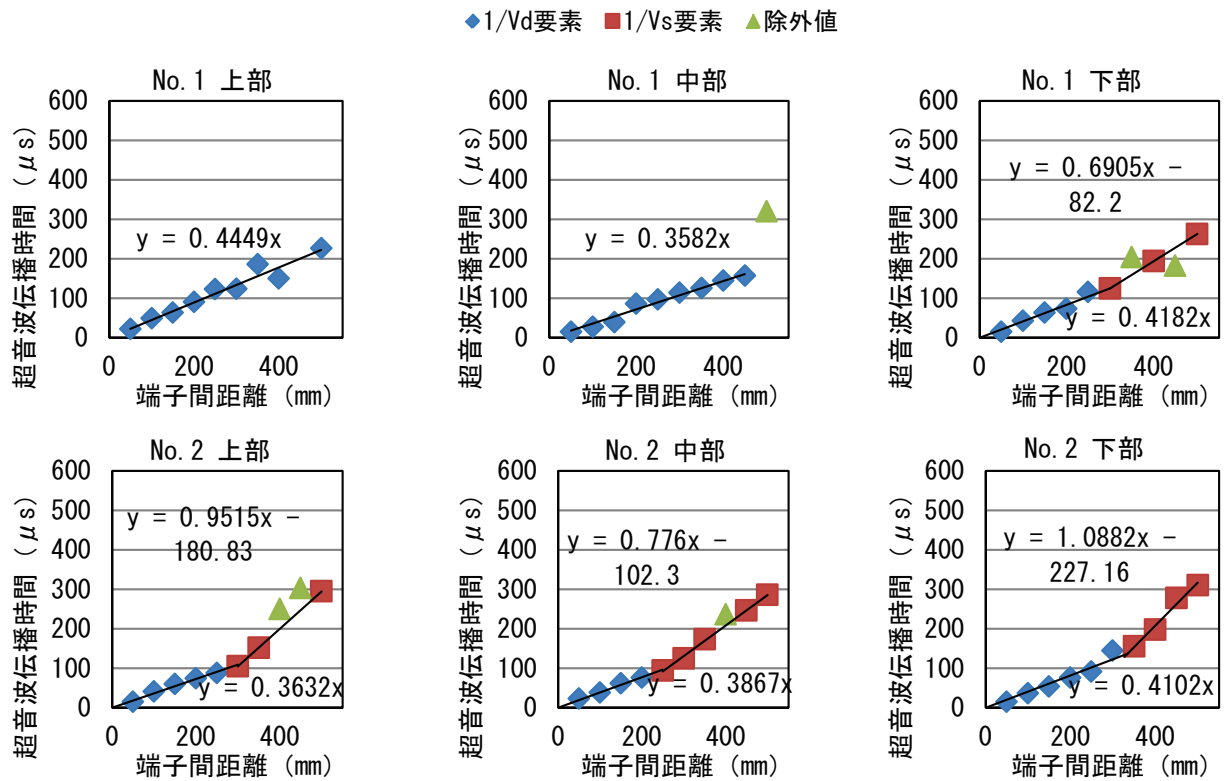


図 5-5 注入材充填後の超音波伝播時間

表 5-3 表面走査法から求めた超音波伝播速度 (m/sec)

測 点	充 填 前		充 填 後	
	V_d	V_s	V_d	V_s
No.1 上部	2070	340	2250	
No.1 中部	2430	1170	2790	
No.1 下部	2120	1460	2390	1450
No.2 上部	2290	430	2750	1050
No.2 中部	2490	1290	2590	1290
No.2 下部	2130	1130	2440	920

の推定を行う条件である $V_d < V_s$ の関係となる箇所は確認されなかった。この結果は前章までの結果と同様の傾向であり，内部に層状ひび割れが存在することが示唆される結果となった。図 5-4 においては，2 直線の傾きの差は上部が最も大きく，下部の方が小さくなる傾向を示した。 V_d ， V_s の差は層状ひび割れの発生程度によって生じたものであると考えられ，層状ひび割れは伝播速度が遅くなる上部により多く生じていると考えられる。

図 5-5 においては，上部と中部で図 5-4 と比較して緩勾配になり伝播速度が速くなる傾向を示した。これは，超音波パルスの透過が阻害されていたひび割れの箇所が注入材によって充填されたことで，超音波パルスの直線的な透過経路が確保されたためであると考えられる。また，下部では，上述の傾向は確認されなかったことから注入材が充填されなかった箇所であると考えられる。No.1 の上部と中部では，表面部と内部において速度の差が無くなり，直線のグラフとなった。この 2 測点は注入材の充填が多くなされた箇所と一致するため，注入材による充填が十分になされれば層状ひび割れが生じていた側壁内部であっても表面部と同等な伝播速度を得られる可能性が示唆される結果となった。また，この傾向を利用することで，内部の層状ひび割れへの注入材の充填範囲および層状ひび割れの範囲を推定することが可能であると言える。

(5) コア供試体の超音波伝播速度

コア供試体の採取位置を写真 5-11 に示す。コア供試体の採取はブロック No.1 において行い，コア供試体 a は注入材充填前に採取を行っている。コア供試体 b，c は注入材充填後に採取したものであるが，コア供試体 c については注入材の充填がなされた形跡は確認されていない。また，これらとは別に水中部からもコア供試体を 1 本採取した。



写真 5-11 コア供試体採取位置

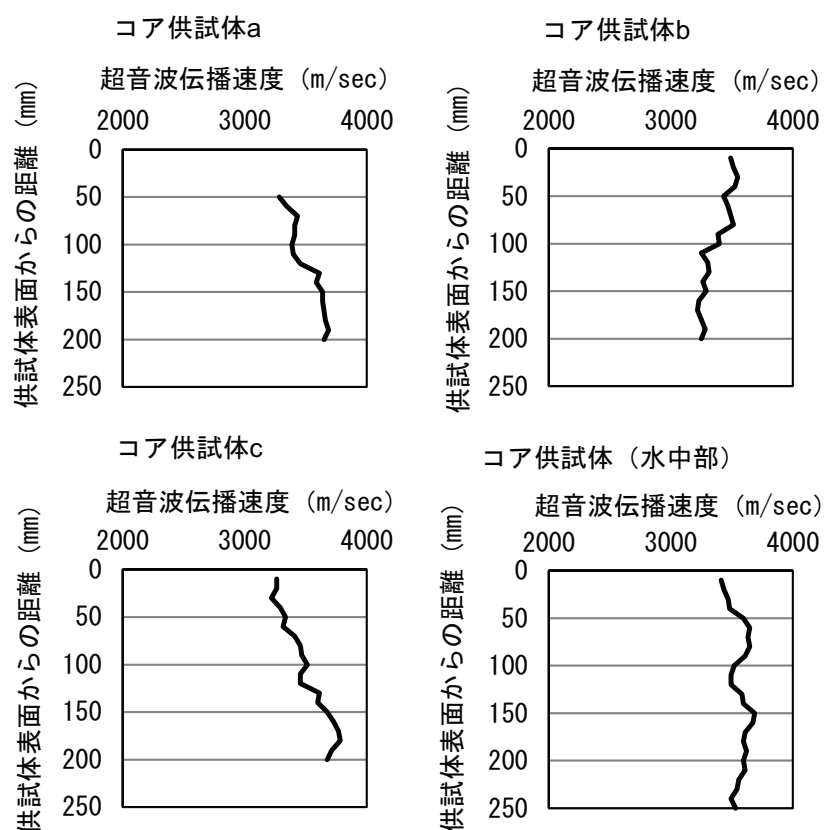


図 5-6 コア供試体の深さごとの超音波伝播速度

図 5-6 にコア供試体の透過法による深さ方向の超音波伝播速度の測定結果を示す。深さ方向の測定は超音波端子を 10mm ずつ移動させて行った。コア供試体 a については、表面から 40mm の深さまではひび割れの発生が顕著であったために測定不可であった。

ひび割れの生じていない水中部においては、深度に関係なく概ね 3500m/sec 付近で安定した値が得られた。注入材の充填の影響の無いコア供試体 a, c については、深度が進むにしたがって超音波伝播速度が速くなる傾向を示した。これは、表面側から凍害劣化が進行していたためであると考えられる。コア供試

体 b については、表面側で超音波伝播速度が速くなることが確認された。超音波伝播速度の値は深さ 100mm を境界として変化しており、100mm までの深さではひび割れの生じていない水中部と同等な値を示した。また、伝播速度の境界となる 100mm は、本試験で設けた注入孔の深さと一致している。したがって、深さ 100mm までの測点では、ひび割れ部に注入材が充填されたことによって超音波パルスの透過経路が確保され、100mm 以深の伝播速度と比較して大きな値を示したと考えられる。

透過法の測定結果からは、層状ひび割れに対する注入材充填によって超音波伝播速度が速くなる傾向が確認された。この傾向は表面走査法による結果と一致したものであり、超音波法によって層状ひび割れの評価が可能であることをより確実に示す結果となった。

5.4 第 5 章まとめ

第 5 章においては、注入工法を用いて層状ひび割れの範囲を定量的に評価する手法についての検討を行った。以下に本章から得られた結論を示す。

- (1) 側壁内部の層状ひび割れに対するエポキシ樹脂の充填は、層状ひび割れが連続しているために可能である。充填可能な最小のひび割れ幅は、本研究において $14\mu\text{m}$ である。
- (2) 注入材の充填によって内部のひび割れが閉塞した場合、超音波伝播速度の値は注入材充填前と比較して大きくなる傾向を示す。また、超音波伝播速度の変化に着目することで、注入材充填によってひび割れの閉塞が行われているか否かを評価することが可能である。
- (3) 表面走査法による超音波伝播速度の測定では、注入材の充填によって表面部と内部で伝播速度の差が無くなり、超音波伝播速度がほぼ一定の値を示す。
- (4) 透過法による超音波伝播速度の測定では、伝播速度は注入材の充填によって速くなり、ひび割れの生じていない状態のコンクリートと同等な値を示す。
- (5) 注入材によるひび割れの充填によって超音波伝播速度が速くなる傾向は、表面走査法と透過法の双方の測定方法によって確認された。
- (6) 注入材の充填範囲は上記 (3) の傾向の把握によって推定することが可能であり、同時に層状ひび割れの範囲も推定することが可能である。

第 6 章

共鳴振動法による動弾性係数の現地試験

第 6 章 共鳴振動法による動弾性係数の現地試験

6.1 概要

JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験」で定義されている相対動弾性係数は、使用材料や配合の異なるコンクリートの凍結融解抵抗性を評価するための指標であり、コンクリート構造物の耐凍害性を直接的に評価するものではないとされている。しかし、データの蓄積量が多く認知度も高いことから、供用中の構造物における凍害診断指標として広く一般に用いられている。

相対動弾性係数は、JIS A 1127:2010「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」で測定される一次共鳴振動数を用いて求められるが、本試験方法では、寸法・形状が定められた円柱・角柱供試体あるいは構造物から採取した円柱形のコアを対象にしているため、非破壊試験として構造物に直接適用することができない。そこで、一般には、一次共鳴振動数から算定される動弾性係数との関係が理論的にも明確にされている超音波法による超音波伝播速度の測定値を用いて構造物の相対動弾性係数の評価が行われている[例えば 6-1, 6-2]。しかし、超音波伝播速度と動弾性係数の関係式では、式 2-3 に示すとおり、対象とするコンクリートの密度やポアソン比を考慮する必要がある。また、凍害劣化として発生しているひび割れの量や位置によっては、超音波伝播速度と動弾性係数の間に傾向が見られない場合があるため、超音波伝播速度による相対動弾性係数の評価は一つの手法として利用性は認められるものの、あくまでも本来の一次共鳴振動数による相対動弾性係数の評価の代わりでしかない。

市販の共鳴振動による動弾性係数測定器は、JIS A 1127:2010 に準拠した仕様となっており、発振器の駆動端子とピックアップは固定されているため現地試験に供することは難しい。一方、小型起振機を用いて対象構造部材に振動を入力し、振動波形から共鳴振動数を求めることでコンクリート内部の損傷評価を行う手法が齊木ら[6-3]、大竹ら[6-4]により検討されており、この手法を応用することで、実際の構造物を対象に現地非破壊試験で一次共鳴振動数、引いては弾性係数、相対動弾性係数の評価が行えると考えられる。

そこで本章では、コア供試体を必要とせず、現地非破壊試験から必要となる評価値を得ることを目的として試験を行った。まず現地非破壊試験としての共鳴振動法による一次共鳴振動数の測定に関する研究の基礎として、発振器に小型起振機を用いた手法を円柱・角柱供試体に適用し、市販の共鳴振動による動弾性係数測定器による測定値と比較考察することで、その妥当性を評価した結

果について示す。

また、上述の検討により、現地試験での一次共鳴振動数の測定が可能になれば、コア供試体を必要としない非破壊試験によって動弾性係数を求めることが可能となる。動弾性係数の推定式は、理論式を組み合わせることで式を様々に変形させることができる。また、緒方らによって実験式も提案されている[6-5]。したがって、既知のデータや測定から得られたデータを利用して動弾性係数を評価する場合には、利用するデータや推定式を適切に選択する必要がある。

そこで本章では、現地非破壊試験による動弾性係数の推定のためのフロー図を作成し、推定方法について整理を行った結果について示す。さらに、薄肉構造の大型壁体供試体を用いてフロー図に則った動弾性係数の評価を行い、検討フローに対する考察を行った結果についても示す。

6.2 小型起振機を用いた一次共鳴振動数の評価

(1) 小型起振機を用いた共鳴振動法の概要

市販の共鳴振動による動弾性係数測定器としては、例えば本研究で用いた PC オートスキャン型動ヤング率測定器 (MIN-011-0-8, マルイ) がある。この試験機では、振動数が可変の発振器、増幅器および駆動端子で構成される駆動回路で試験体に振動を入力し、ピックアップで振動の加速度に比例した電圧を測定することで一次共鳴振動数を求める。この測定器における圧力型加速度ピックアップの測定加速度は、 $0.01 \sim 1G$ ($1G = 9.80665 \text{ m/sec}^2$) である。

本研究で検討する発振器に小型起振機を用いた手法は、基本的なシステム構成は市販のものと同じであるが、駆動回路とピックアップを対象とする構造部材の任意の位置に設置できるように完全に分離できる特徴を有し、振動の入力は小型起振機、振動波形の測定は圧電式加速度ピックアップで行うものである。本手法における駆動回路は、振動発生機部となる小型起振機 (WaveMaker Mobile, 旭製作所) と振動コンソール部 (WAVE MAKER: APD-050FCA, 旭製作所) で構成される振動発生装置に、掃引試験コントロール機器 (WAVE FACTORY: WF1973, 旭製作所) を加えたものである。表 6-1 に駆動回路の機器の仕様を示す。また、振動波形のデータ収集には、振動分析計 (PV-57I, リオン, 測定加速度: $0.02 \sim 200 \text{ m/sec}^2$) を用いる。写真 6-1 に本研究で用いた機器を示す。

(2) 一次共鳴振動数の評価

本研究に用いた供試体は、表 6-2 に示す示方配合で作製した円柱供試体 ($\phi 100 \times 200 \text{ mm}$) および角柱供試体 ($100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$) である。凍結融解試験による劣化の進行を早めるために、non-AE コンクリートとしている。セメントは普

表 6-1 駆動回路の機器の仕様

振動 発生機部	加振力 (N)	9.8
	周波数範囲 (Hz)	DC～10,000
	最大加速度 (m/sec^2)	326
	最大振幅 (mmp-p)	5
	バネ常数 (kg/cm)	2
	可動部重量 (g)	30
	最大積載重量 (g)	50
	加振機重量 (kg)	0.4
	大きさ ($\phi \times H$) (mm)	41×56
振動 コンソール部	定格出力 (VA)	50
	最大電流 (Arms)	3.3
	最大電圧 (Vrms)	15
	消費電力 (VA)	125
	本体重量 (kg)	3.2
	大きさ ($W \times D \times H$) (mm)	210×280×92
	電源	単相 110V15A



写真 6-1 本研究で用いた機器

表 6-2 コンクリートの示方配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 剤 (g/m ³)
					W	C	S	G	
20	8±1.5	55	6±0.5	39.6	170	283	702	1056	0.0

通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³), 細骨材(密度 2.59g/cm³, 吸水率 1.59%, F.M.1.83) ならびに粗骨材(密度 2.59g/cm³, 吸水率 1.62%, F.M.6.68) は鳥取県産である。

供試体は, 材齢 7 日まで水温 20℃の標準水中養生を行い, その後 JIS A 1148:2010 に準拠した気中凍結水中融解試験(B 法)に供した。作製した供試体の数は, 標準円柱供試体が 24 本, 標準角柱供試体が 12 本である。

一次共鳴振動数の測定は, 凍結融解試験に供する前および凍結融解試験の途中に実施することとし, 各測定時の凍結融解サイクル数は, 幅広い劣化過程における一次共鳴振動数の傾向を把握することを考慮して調整した。

一次共鳴振動数の測定は, 次の Case 1～Case 3 の 3 パターンで実施した。

Case 1 は JIS A 1127:2010 に基づく市販の動弾性係数測定器で測定したケースである。

Case 2 は駆動回路に市販の動弾性係数測定器を用い, 波形収録には振動分析計を用いたケースである。

Case 3 は発振器に小型加振機を用いた駆動回路を用い, 波形収録には振動分析計を用いたケースである。

このように, Case 3 が駆動回路とピックアップを完全に分離した本研究で検討する手法となる。ここで, Case 2, 3 における一次共鳴振動数の評価は, 振動分析計のピックアップで測定された時間信号 $x(t)$ のパワーを FFT 解析することで横軸を周波数としたパワースペクトルを求め, ピーク周波数をもって一次共鳴振動数とした。

(3) 供試体における一次共鳴振動数の評価結果

供試体の長さ方向の縦振動(供試体の端面から小型起振機で振動を入力し, 反対面でピックアップによる振動波形の測定)により一次共鳴振動数を評価した結果を図 6-4 に示す。図は, Case 1 と Case 2 の関係, Case 1 と Case 3 の関係を考察するために 2 軸としている。

円柱供試体における決定係数は, Case 1－Case 2 が 0.990, Case 1－Case 3 が 0.990 であり, 両者とも高い値を示したことから, Case 3 の小型加振機を用いた縦振動による共鳴振動法は, JIS A 1127:2010 に基づく市販の動弾性係数測定器

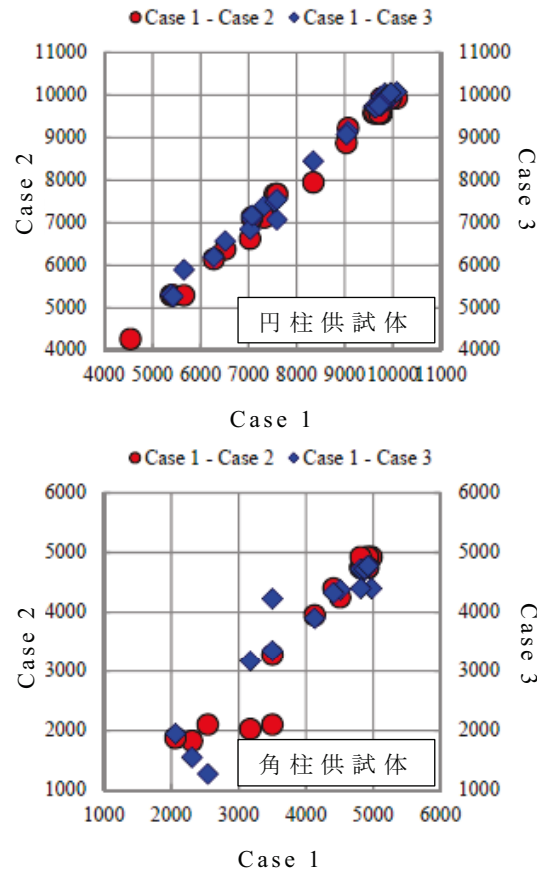


図 6-4 Case1～Case3 の一次共鳴振動数の関係

と同等に一次共鳴振動数が評価できる手法であると認めることができる。

角柱供試体では，凍結融解サイクルが進み劣化が進行して共鳴振動数が低くなるところで若干の差が見られる。これは，長さ方向の縦振動において，その対象となる長さが円柱供試体 200mm であるのに対して角柱供試体 400mm と異なり，角柱供試体では振動の減衰が円柱供試体より大きく，ピックアップの性能の違いが現れた結果であると考えられる。このように劣化が進行している段階ではピックアップによる影響が見られるものの，決定係数は Case 1－Case 2 が 0.933，Case 1－Case 3 が 0.902 と非常に高い値であり，円柱供試体と同様に角柱供試体においても Case 3 の小型加振機を用いた縦振動による共鳴振動法の妥当性を確認することができる。

一方，写真 6-2 に示すように，角柱供試体において，横断方向の縦振動で測定した場合（Position A），発振器である小型加振機と波形収録のピックアップを同一表面に設置した場合（Position B）で測定した結果を図 6-5 に示す。Position B の測定は，例えば壁面などのように発振器とピックアップを対面で設置できない部材において想定されるケースである。図 6-5 のデータからは値のばらつきが確認されるが，このばらつきは Position B ではレーリー波の影響が考えられるた

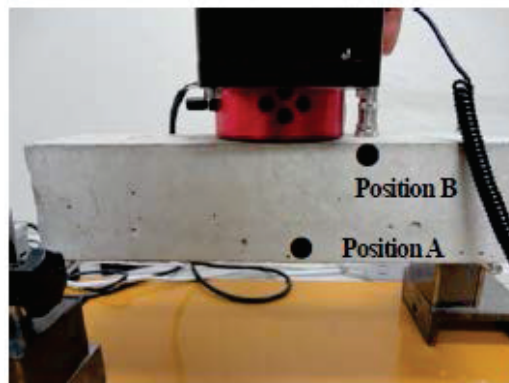


写真 6-2 角柱供試体の横断方向における一次共鳴振動数の測定

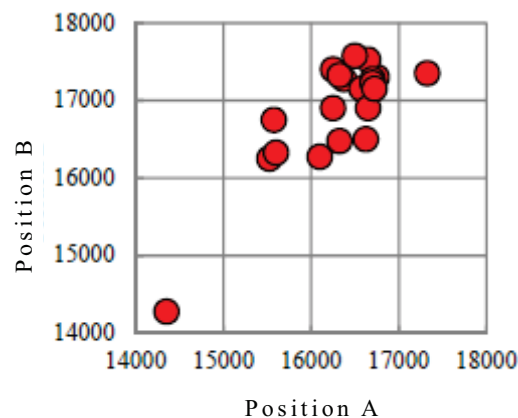


図 6-5 角柱供試体の横断方向における一次共鳴振動数の測定

めに生じたものであると考えられる。

6.3 動弾性係数評価フローの検討

(1) 検討フローの概要

図 6-6 に現地非破壊試験による動弾性係数の推定のためのフロー図を示す。本フロー図は、現地においてコア供試体を採取することなく動弾性係数の推定を行うフローとなっている。また、本フロー図では、初めに超音波伝播速度の測定を行うことを前提としており、その他に共鳴振動法と電磁波レーダ法による測定を組み合わせることで動弾性係数の評価を行う。

式①は、前述の緒方らによって提案された実験式であり、超音波伝播速度の値のみから動弾性係数を推定することができる式である[6-5]。

式②、③は、ポアソン比を考慮した場合の動弾性係数の理論式である。ポアソン比については、2.4 節の相対動弾性係数と動ポアソン比の関係から、相対動弾性係数が 60% までは一定値を用いて良いが、60%を下回る場合には動弾性係

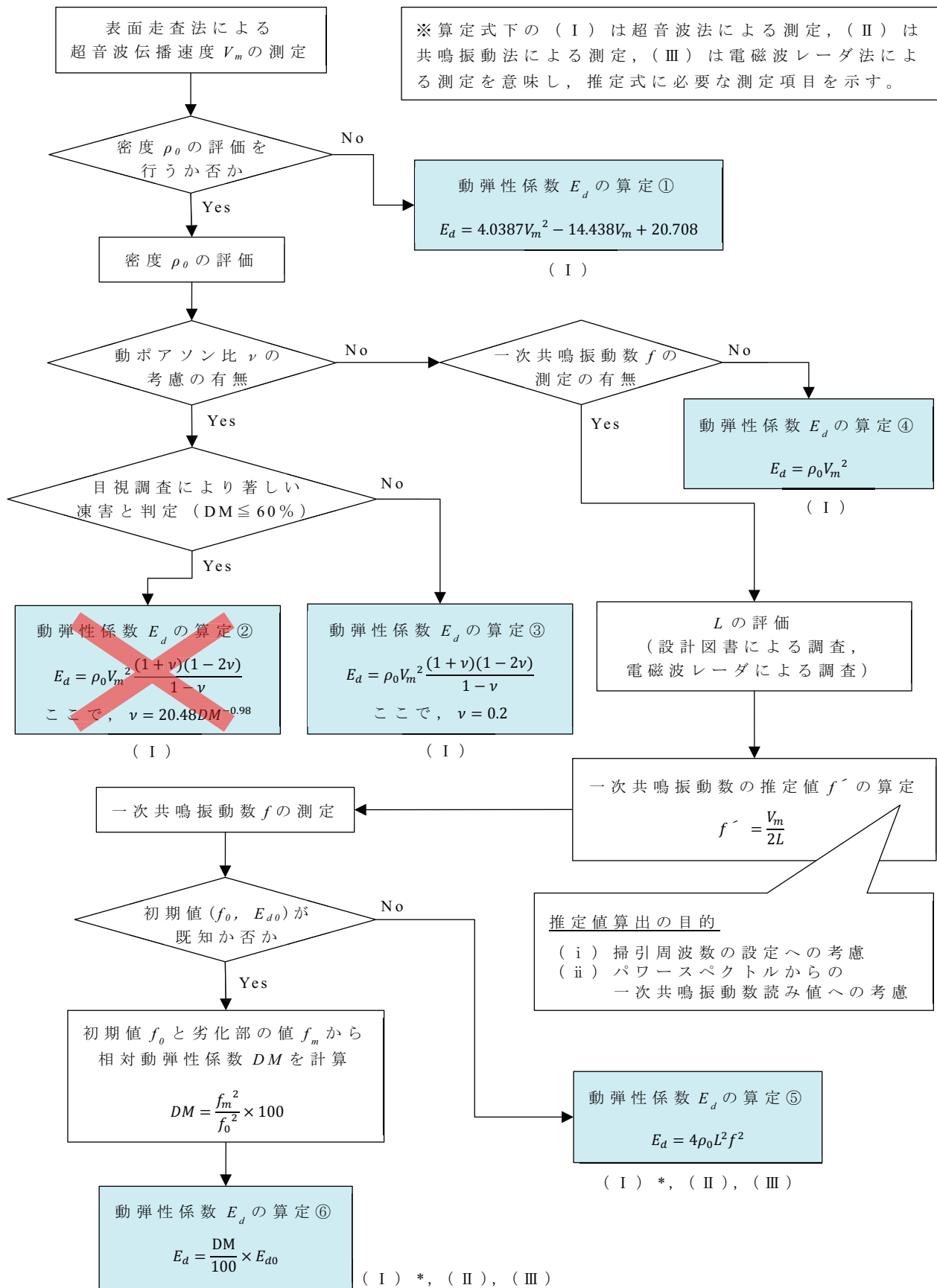


図 6-6 現地非破壊試験による動弾性係数の推定のためのフロー図

数の評価を行うことができない程劣化が進行していると考えべきとの結論が得られたため、ここでは式③による推定のみを行うこととする。なお、ここではポアソン比を 0.2 として推定を行った。

式④は、ポアソン比を無視した場合の動弾性係数の理論式である。

式⑤は、式④の理論式を変形し、超音波伝播速度ではなく、一次共鳴振動数の値から動弾性係数を推定する式である。

式⑥は、一次共鳴振動数および動弾性係数の初期値が既知の場合において適用することができる式であり、相対動弾性係数の推定値を利用して動弾性係数を推定する式である。

また、それぞれの式の下部に記されているローマ数字は、各式で動弾性係数を求める際に必要となる測定項目を示している。式⑤、⑥では、計算中に超音波伝播速度の値を用いることは無いが、計算に至るまでの過程で超音波伝播速度の値を必要とするために星印を付記している。

以上のとおり、動弾性係数の推定に至る過程として、6 種類の推定方法によるフローが提案される。

(2) 大型壁体供試体を用いた検討

前記のフロー図について、その推定方法の妥当性および薄肉構造体の動弾性係数の推定に相応しい推定フローを検証することを目的として、大型壁体試験体を用いた検討を行った。

大型壁体試験体は、無筋のコンクリート壁（高さ 700mm，壁厚 200mm，長さ 2300mm）であり，鳥取大学学内で打設した後，屋外の曝露環境下で 1 年 8 カ月が経過したものである。供試体の使用材料と配合は，6.2 節の供試体の配合と同様である。

本検討においては壁厚が既知であるため，電磁波レーダによる壁厚の評価は行っていない。その他の測定は，フロー図に則って行った。全測定終了後には，一次共鳴振動数の測定位置からコア供試体を採取し，JIS A 1127:2010 に定める式（以下，JIS 式と呼ぶ）から動弾性係数を，載荷試験時の縦ひずみと横ひずみから式 2-6 によってポアソン比を，それぞれ求めた。測定は同一表面の 3 カ所で行い，採取したコア供試体本数も 3 本である。

表 6-3 に検討結果の一覧を示す。本検討においては，試験体が未劣化であるため式⑥での動弾性係数の推定は行っていない。コア供試体の測定から求めたポアソン比は概ね 0.2 前後の値であり，式③でポアソン比 0.2 を使用することに対する妥当性が確認された。

ここで，式③，④については，表面走査法によって測定された超音波伝播速

表 6-3 動弾性係数の推定結果とポアソン比

測点 (供試体) No.	動弾性係数 (kN/mm ²)						コア供試体測定値	
	式①	式②	式③	式④	式⑤	式⑥	JIS 式による 動弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン 比
1	32.9	—	37.9	42.1	43.0	—	39.6	0.18
2	32.3	—	37.2	41.4	42.8	—	38.3	0.23
3	30.7	—	35.8	39.8	40.8	—	38.2	0.20

度を利用している。表面走査法の測定には、超音波パルスの透過について縦弾性波以外に測定表面を伝わるレーリー波も影響することが考えられるため、弾性波の伝播する方向と弾性波の伝播する方向に対して直角の方向の二次元の拘束を受けることとなり、ポアソン比を考慮する必要があると考えられる。したがってここでは、式③の値を採用するべきであると言える。式⑤については、一次共鳴振動数の測定の際に小型起振機とピックアップを同一表面に設置して一次元の領域で縦振動を測定しているため、拘束条件は弾性波の伝播する方向に対して直角の方向の一次元のみとなり、ポアソン比を考慮する必要はなくなる。

式③、⑤は、異なる測定方法から得られた値であるが、式③は超音波伝播速度を、式⑤は一次共鳴振動数をそれぞれ利用したものであり両者ともに弾性波を利用して動弾性係数の評価値を求めている。ここで例えば、式③、⑤の平均値を求めると、測点 No.1 から順に 40.5, 40.0, 38.3kN/mm² となり、JIS 式から求まる動弾性係数とほぼ同程度の値となることが確認された。これより、本試験結果の範疇からは、いずれか一つの式から求めた推定値を利用するのではなく、同じ弾性波法である超音波伝播速度を用いる式③と一次共鳴振動数を用いる式⑤から求めた推定値を複合することで、より精度の高い動弾性係数の評価を行える可能性が示唆された。

6.4 実構造物を用いた評価

(1) 現地試験概要

実構造物を用いた試験は、青森県内で供用されている RC 開水路側壁を対象として行った。試験を行った区間は、凍害による劣化が著しく進行しており天端からのスケーリングや長手方向に延びるひび割れおよびひび割れ部のエフロレンスが多数確認された。試験を行った区間の一部の表面状態を写真 6-3 に示



写真 6-3 現地試験の試験区間の状況

表 6-4 動弾性係数の推定結果とポアソン比

測点 (供試体) No.	動弾性係数 (kN/mm ²)						コア供試体測定値	
	式①	式②	式③	式④	式⑤	式⑥	JIS 式による 動弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン 比
1	13.4	—	18.8	20.9	23.5	—	23.7	0.03
2	15.8	—	21.7	24.1	19.1	—	33.2	0.17
3	8.4	—	9.8	10.9	17.4	—	30.8	0.01

す。

現地試験では、前節で述べたフロー図に則った測定を行い、動弾性係数の評価を行った。なお、対象とした開水路は、背面の一部が露出する形で供用されていたため、壁厚の評価を目的とする電磁波レーダによる測定は行っていない。現地における非破壊試験終了後には、前節と同様にコア供試体を採取して室内試験を行った。本試験では、目視によって凍害劣化程度の違いを評価し、劣化程度の異なる 3 点で評価を行った。

(2) フロー図から求まる動弾性係数とポアソン比との関係

フロー図に則って評価した動弾性係数とポアソン比の結果一覧を表 6-4 に示す。動弾性係数の評価値は、全体的に JIS 式と比較して小さい値を示している。ポアソン比に着目すると、No.1, 3 については極めて小さい値となり、適切にポアソン比の評価が行えていないことがわかる。ここで、コア供試体 No.3 の側面



写真 6-4 コア供試体 No.3 の側面の状態

の状態を写真 6-4 に示す。写真からは、層状ひび割れが表面から背面まで多数確認される。この状態のコア供試体で載荷試験を行うと、層状ひび割れとして空隙になっている箇所が圧縮されることで縦ひずみが大きくなる。ポアソン比の算定式では分母に縦ひずみが入ることから、分母が大きくなることでポアソン比が小さく評価されたと言える。この結果は、2.4 節で述べた考察と一致するものである。

したがって、凍害劣化の進行により層状ひび割れが発生した劣化の劣化期・加速期にあるような状態では、本フローを用いた動弾性係数の適切な評価は困難であると言える。本フローを用いる場合は、層状ひび割れの発生していない段階である、劣化の潜伏期・進展期にあたる状態の構造物を対象とすべきである。

これらの事象から図 6-6 のフロー図を整理すると図 6-7 に示すとおりとなる。ここでは、評価対象の構造物を劣化の潜伏期・進展期にあたる状態にあるものに限定することで、相対動弾性係数が 60% 以上か否かの評価は行わないものとする。式①については、簡易的に評価を行う際に必要となる項目であるため、引き続き掲載している。算定式は③と⑤のみに限定することでフロー図自体の簡素化が図られた。

6.5 第 6 章まとめ

第 6 章においては、小型起振機を用いた共鳴振動法による一次共鳴振動数の測定手法についての検討を行い、その実用性を確認した。また、現地非破壊試験による動弾性係数の推定のためのフロー図を作成し、そのフロー図に則った測定を行うことでフロー図の妥当性の確認を行った。以下に本章から得られた結論を示す。

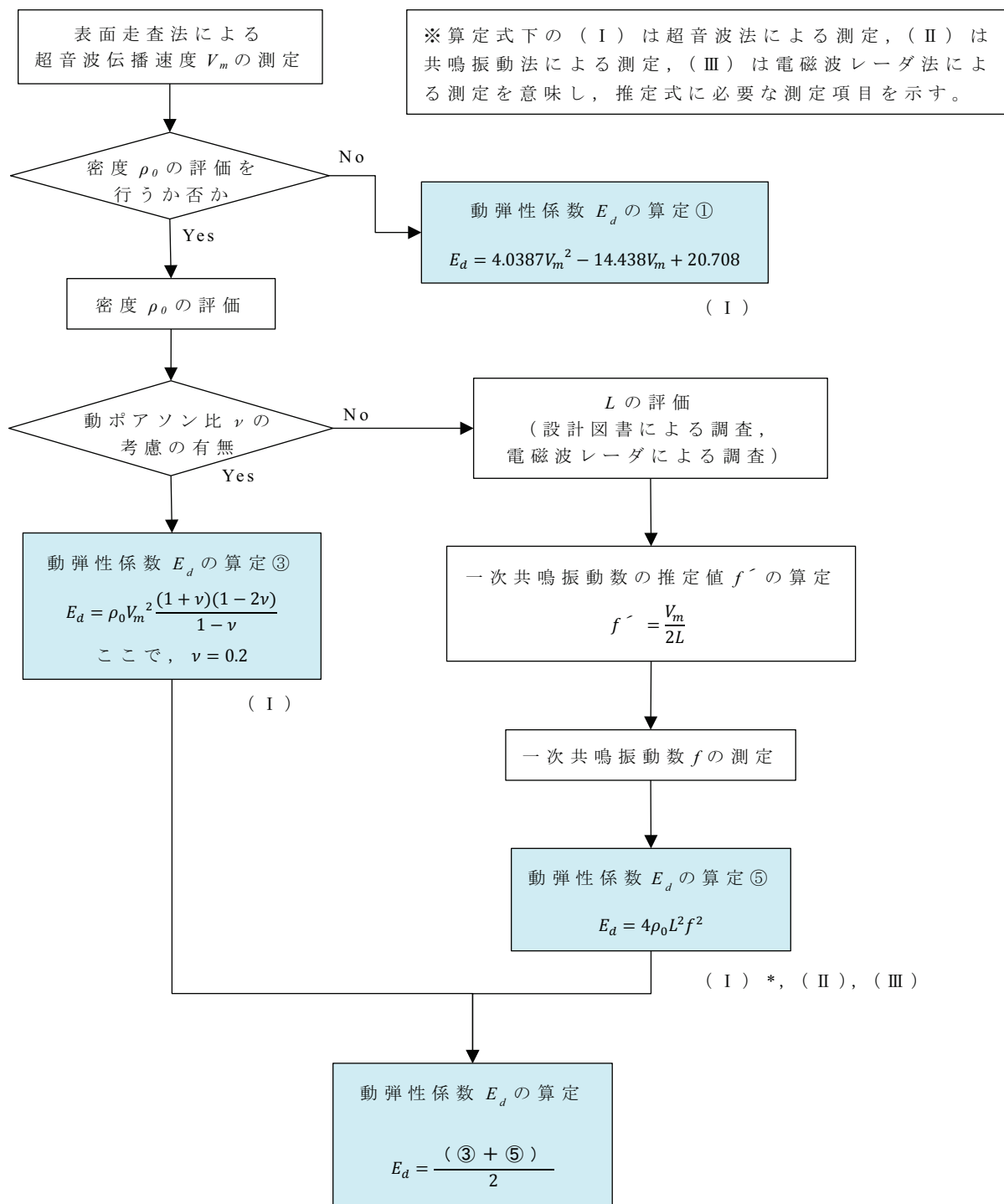


図 6-7 現地非破壊試験による動弾性係数の推定のためのフロー図 (改)

- (1) 小型起振機を用いた室内試験の結果からは, JIS 規格に準じた試験機と同等の一次共鳴振動数の測定が可能であると考えられる。
- (2) 上記(1)の結果を受け, フロー図に則った試験を行ったところ, 未劣化の試験体については, 動弾性係数の評価を一定の精度で行うことが可能である。
- (3) 同じ弾性波法である超音波伝播速度を用いた推定値と一次共鳴振動数を

用いた推定値を複合することで、さらに精度よく動弾性係数を推定できる可能性があることが示唆される。

- (4) 劣化の著しい試験体での評価からは精度のよい動弾性係数の推定は行えず、本フローによる検討は凍害劣化の潜伏期・進展期に相当する状態のコンクリートまでが適用範囲であると考えられる。

第 7 章

結 論

第 7 章 結論

以下に本論文の各章で得られた結論を示すとともに、今後の課題と期待を述べて本論文の結論とする。

第 2 章においては、RC 開水路側壁の表面変状と内部変状についてそれぞれ調査を行い、両者の関係性について考察した。また、凍害診断の際に用いられる相対動弾性係数とコンクリートの各種物性値の関係について、得られたデータから近似式を求めることで明らかにした。以下に第 2 章から得られた結論を示す。

- (1) 表面変状として生じるひび割れは、表層のスキン層の厚さ分のみ深さ方向に進行する。
- (2) 上記(1)より、スキン層のスケーリングは内部変状として発生する層状ひび割れの一種であると言え、表面変状である表面ひび割れのひび割れ深さは内部変状の進行度合いと関連性がある。
- (3) 内部変状として生じる層状ひび割れは、表面側に集中して生じており、連続したひび割れである。
- (4) 層状ひび割れは、水路側壁表面に対して角度を持った状態で進展し、側壁の表面側の上部において特に顕著に進展する。
- (5) 相対動弾性係数と圧縮強度比、静弾性係数比、引張強度比、曲げ強度比は、近似式によって線形関係で示すことが可能である。
- (6) 相対動弾性係数と圧縮強度比の関係については、相対動弾性係数と静弾性係数比の関係と比較して決定係数が低くなることが確認された。要因としては、圧縮強度を求める際に使用する応力の降伏点の値にばらつきが生じることが挙げられる。
- (7) 動ポアソン比は、相対動弾性係数 60% 以上では一定値を用いても構わない。
- (8) 動ポアソン比は、相対動弾性係数 60% 以下の場合に 0.5 を上回るケースが生じ、弾性体として動弾性係数の評価を行えない場合がある。

第 3 章においては、凍害劣化の進行した RC 開水路において表面変状の形態から、内部変状の評価を行うことを目的として検討を行った。採取したコア供試体による内部変状の発生状況から、層状ひび割れの生じ易い箇所の表面変状の特徴をまとめた。以下に第 3 章から得られた結論を示す。

- (1) 表面ひび割れが上下に湾曲して発生している開水路側壁では、水路側壁の低

いところまで表面ひび割れが生じている箇所では内部変状である層状ひび割れが発生している可能性が高い。

- (2) 目視調査による層状ひび割れの発生箇所の定性的診断は、側壁の天端に他よりも著しいスケーリングが発生している、表面ひび割れが水路側壁の低いところまで生じている、降雨の数日後に表面が湿潤している、といった条件が複数揃う箇所を踏査により見つけることで行うことができる。

第4章においては、RC開水路の精査に関する項目として電磁波レーダ法による走査に層状ひび割れが及ぼす影響についての検討を行った。まず、室内試験として供試体を用いた試験と実構造物を用いた試験を行い、その後に複数の開水路における現地試験を行った。以下に第4章から得られた結論を示す。

- (1) 電磁波レーダによる走査では、コンクリート内部の層状ひび割れの発生を定性的に確認することができる。
- (2) 層状ひび割れに対して注入工法を適用した場合には、注入前後の反射画像を確認することで充填の有無を確認することができる。
- (3) 実構造物において層状ひび割れが生じている場合には、生じているひび割れの程度にもよるが電磁波レーダ法によって鉄筋探査を行うことは困難である。
- (4) 構造物の鉄筋がダブル配筋で表側の鉄筋が層状ひび割れ中に埋もれる形になっている場合には、表側と裏側の鉄筋が同等な明瞭さの反射画像として現れる。
- (5) 本試験結果の範疇からは、層状ひび割れの発生程度とかぶり厚さの比との間に相関性は確認されない。
- (6) 電磁波レーダの反射画像は層状ひび割れの生じている箇所においてかぶり厚さを厚く示す傾向があり、実際の診断の際にはこの点に留意する必要がある。

第5章においては、注入工法を用いて層状ひび割れの範囲を定量的に評価する手法についての検討を行った。以下に第5章から得られた結論を示す。

- (1) 側壁内部の層状ひび割れに対するエポキシ樹脂の充填は、層状ひび割れが連続しているために可能である。充填可能な最小のひび割れ幅は、本研究において $14\mu\text{m}$ である。
- (2) 注入材の充填によって内部のひび割れが閉塞した場合、超音波伝播速度の値は注入材充填前と比較して大きくなる傾向を示す。また、超音波伝播速度の変化に着目することで、注入材充填によってひび割れの閉塞が行われているか否かを評価することが可能である。
- (3) 表面走査法による超音波伝播速度の測定では、注入材の充填によって表面部

と内部で伝播速度の差が無くなり，超音波伝播速度がほぼ一定の値を示す。

- (4) 透過法による超音波伝播速度の測定では，伝播速度は注入材の充填によって速くなり，ひび割れの生じていない状態のコンクリートと同等な値を示す。
- (5) 注入材によるひび割れの充填によって超音波伝播速度が速くなる傾向は，表面走査法と透過法の双方の測定方法によって確認された。
- (6) 注入材の充填範囲は上記（3）の傾向の把握によって推定することが可能であり，同時に層状ひび割れの範囲も推定することが可能である。

第 6 章においては，小型起振機を用いた共鳴振動法による一次共鳴振動数の測定手法についての検討を行い，その実用性を確認した。また，現地非破壊試験による動弾性係数の推定のためのフロー図を作成し，そのフロー図に則った測定を行うことでフロー図の妥当性の確認を行った。以下に第 6 章から得られた結論を示す。

- (1) 小型起振機を用いた室内試験の結果からは，JIS 規格に準じた試験機と同等の一次共鳴振動数の測定が可能であることが確認された。
- (2) 上記(1)の結果を受け，フロー図に則った試験を行ったところ，未劣化の試験体については，動弾性係数の評価を一定の精度で行うことが可能である。
- (3) 同じ弾性波法である超音波伝播速度を用いた推定値と一次共鳴振動数を用いた推定値を複合することで，さらに精度よく動弾性係数を推定できる可能性があることが示唆された。
- (4) 劣化の著しい試験体での評価からは精度のよい動弾性係数の評価は行えておらず，本フローによる検討は凍害劣化の潜伏期・進展期に相当する状態のコンクリートまでが適用範囲であると考えられる。

以上の各章の結論を取りまとめて、本研究の目的と照らし合わせると以下のように再整理される。

- ① 凍害による劣化が進行したコンクリートの力学特性を凍害診断に即した形で整理を行う。

本論文では、凍害劣化の指標として一般的に用いられる相対動弾性係数と各種力学性能の関係式を示した。変状の状況から、状況証拠的に凍害劣化であると認められる場合には、第 2 章で示した関係式を利用することで、構造物の相対動弾性係数の推定が可能となった。

- ② 現地踏査の段階で内部変状の評価を目視診断によって行う。

本論文では、表面変状のひび割れの形態や、RC 開水路の供用されている環境条件から、内部変状の層状ひび割れの発生している位置を定性的に評価することが可能な目視診断の項目が整理された。これより、現地踏査の段階において非破壊で層状ひび割れの発生位置の目途を立てることが可能となった。

- ③ 目的②の後、現地調査の段階で層状ひび割れの評価を定量的に行う。

本論文では、層状ひび割れに対する注入工法を実施し、超音波法の表面走査法の測定を行うことで、層状ひび割れの発生範囲を推定することが可能であることを明らかにした。また、表面走査法の測定結果から得られるグラフの 2 直線の傾きを比較することで、層状ひび割れの発生の有無を評価することが可能となった。

- ④ 実務として機能診断を行うことを想定して、非破壊試験による凍害診断手法の提案を行う。

本論文では、小型起振機を用いることで非破壊による動弾性係数の評価方法を確立した。また、フロー図を作成することで現場での測定方法と検討手順を示し、劣化が比較的進行していない段階においては動弾性係数の評価、さらに動弾性係数を用いた凍害診断が行える可能性を示した。

本研究では、農業用水利施設の中でも RC 開水路に的を絞って研究を行った。さらに、劣化機構も凍害に限定し、寒冷地における機能診断に資することに特化した研究でもある。凍害劣化による変状は、北海道や東北地方に限らず、関東地方から中国地方にかけて広い範囲で発生している。今回得られた成果が広く認知され、今後、機能診断を行う際の参考となれば幸いである。

RC 開水路の凍害による内部変状は、近年になって明らかにされた事象であり、研究を行う余地は未だ多く残されていると考えられる。

電磁波レーダによる検討からは、電磁波レーダによる走査のみで層状ひび割れを評価できる可能性が示唆された。今後、研究を進めることで、簡易的に層状ひび割れの定量的な診断が行えると考えられる。

実務として診断を行う際には、第 6 章で作成したフロー図が参考になると考えられる。本研究で試験を行った箇所は未劣化のものも含めて数ヶ所であり、フロー図を含めた評価方法については今後さらにデータ数を蓄積して精査を行うことが求められる。フロー図の形も現時点での形であり、これが必ずしも最適であるとは言い切れない。今後の検討によって、形が変わることも十分に考えられる。

RC 開水路の凍害劣化について、今後は、診断後の対策の方法についての研究が必要となる。現在、各所で盛んに対策工法に関する研究が行われている。層状ひび割れという、特徴的な内部変状を有する RC 開水路に対して、どのような対策が適しているのかを探っていく必要があると考える。

参考文献

- [1-1] 農林水産省 HP：農業水利施設のストックマネジメントについて，
http://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/pdf/stock_management.pdf
- [1-2] 農林水産省：平成 24 年度 食料・農業・農村白書，pp.175-176
- [1-3] 農業土木事業協会：農業水利施設の機能保全の手引き，pp.3，2007
- [1-4] 同上，pp.21-22，2007
- [1-5] 緒方英彦，鈴木哲也，山崎大輔，濱 幸雄：壁状構造物であるコンクリート製開水路の側壁内部の凍害劣化，コンクリート工学年次論文集 Vol. 32，pp.833-838，2010
- [1-6] T.C.Powers：A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete，Journal of American Concrete Institute，Vol.16，No.4，pp.245-272，1945
- [1-7] 小林一輔編：最新コンクリート工学 第 5 版，森北出版，pp.26-27，2002
- [1-8] 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 Vol.29，pp.248-253，1975
- [1-9] 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 維持管理編，2007
- [1-10] 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'12 基礎編，pp.204-206
- [1-11] 濱 幸雄：凍害の診断方法の現状と課題，コンクリート工学，Vol.48，No.5，pp.66-69
- [1-12] 日本非破壊検査協会編：新コンクリートの非破壊試験，技報堂出版，pp.63-64，2010
- [1-13] 同[1-9]
- [1-14] BS4408：Recommendations for Non-Destructive Methods of Test for Concrete，Part 5 Measurement of the Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete，E3 Estimating the thickness of a layer of inferior quality concrete，British Standards Institution，1974
- [1-15] 柏忠二編：コンクリートの非破壊試験法，技報堂，pp.41-42，1981
- [1-16] 遠藤裕丈，田口史雄，林田宏，草間祥吾：非破壊による凍害深さの評価，コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する委員会報告書・論文集，日本コンクリート工学協会，pp.293-298，2008
- [1-17] 遠藤裕丈，田口史雄，林田宏：コンクリートの凍害劣化の簡易診断技術に関する基礎的研究，寒地土木研究所月報，Vol.690，pp.15-22，2010
- [1-18] 下村雄介，鎌田敏郎，内田慎哉，六郷恵哲：超音波に基づく表面から深

- さ方向へのコンクリートの品質評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, pp.1907-1912, 2006
- [1-19] 土木研究所：超音波試験（土研法）による新設の構造体コンクリート強度測定要領（案），2006
- [1-20] 森濱和正：超音波法(土研法)による構造体コンクリート強度の推定精度，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，pp.727-732，2006
- [1-21] 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
- [1-22] 緒方英彦，高田龍一，野中資博，服部九二雄：RC開水路の凍害，農業農村工学会誌，Vol.76，No.9，pp.31-34，2008
- [1-23] 青野義道，松下文明，柴田純夫，濱 幸雄：乾湿繰返しによるセメントペーストの細孔構造変化，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，pp.731-736，2006
- [1-24] 青野義道，松下文明，柴田純夫，濱 幸雄：乾燥および乾湿繰返しによる硬化セメントペーストの微細構造変化と耐凍害性への影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，pp.921-926，2008
- [1-25] 緒方英彦，高田龍一，鈴木哲也，山崎大輔，佐藤周之：RC開水路の側壁内部における凍害ひび割れの発生形態，農業農村工学会誌，Vol.78，No.5，pp.29-33，2010
- [2-1] 山下英俊，堺孝司，佐伯昇：超音波伝播速度を用いた凍害深さの推定，コンクリート工学論文集，Vol.7，No.2，179-186，1996
- [2-2] 森田匡隆，周藤将司，緒方英彦，高田龍一：凍結融解作用によるコンクリート開水路の表面変状の発生形態，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，pp.911-916，2011
- [2-3] 同[1-5]
- [2-4] 同[1-25]
- [2-5] 同[1-21]
- [2-6] 松村宇，桂修，吉野利幸：凍害を受けたコンクリートの性状と劣化度評価法に関する研究，日本建築学構造系論文集，Vol.563，pp.9-13，2003
- [2-7] 高柴保明，堺孝司，熊谷守晃：凍害およびアルカリ骨材反応を受けたコンクリートの力学特性，コンクリート工学次論文報告集，Vol.20，pp.221-226，1998
- [2-8] 佐藤一郎，小野博宣，渡辺健治：凍結融解作用によって劣化したコンク

- リートの基礎的物性, 学術講演梗概集 A-1, 材料施工 2002, pp.791-792, 2002
- [2-9] 全国高専土木学会編: 新版 鉄筋コンクリート工学, コロナ社, pp.12-13, 2001
- [2-10] 池田幸史, 鈴木哲也, 大津政康: 共鳴法における劣化コンクリートの動的弾性係数に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, pp.423-428, 2004
- [2-11] 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中資博: 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, pp.1563-1568, 2002
- [3-1] 同[1-3]
- [3-2] 同[1-16]
- [4-1] 石神暁郎, 金田敏和, 佐藤智, 周藤将司, 緒方英彦: 超音波を用いたコンクリート開水路の凍害劣化深さの推定, 農業農村工学会論文集, Vol.81, No.1, pp.87-98, 2013
- [4-2] 同[1-12], pp.55-57
- [4-3] 須賀大輔, 田中正吾: 信号伝播モデルを用いた電磁波レーダによる鉄筋コンクリート構造物の非破壊検査, 計測自動制御学会論文集, Vol.41, No.2, pp.95-101, 2005
- [4-4] 同[1-16]
- [4-5] 同[1-17]
- [5-1] 同[1-10], pp.248-249
- [5-2] 同[1-17]
- [5-3] 群馬大学 HP: 二本の直線による折れ線回帰, <http://aoki2.si.gunma-u.ac.jp/lecture/stats-by-excel/vba/html/oresen-kaiki.html>
- [5-4] 同[1-5]
- [6-1] 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論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.63-70, 2006
- [6-2] 同[2-8]

- [6-3] 齊木佑介，内藤英樹，平岡拓朗，鈴木基行：共鳴振動法によるコンクリート内部の損傷評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，pp.1715-1720，2010
- [6-4] 大竹雄介，内藤英樹，中野 聡，鈴木基行：小型起振機を用いたコンクリート橋の強制振動試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，pp.1459-1464，2010
- [6-5] 同[2-11]

謝 辞

本論文の作成に際しては、多くの方からのご指導とご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を示します。

主指導教員である鳥取大学農学部准教授の緒方英彦先生には、研究の計画から実施、取りまとめに至るまで、終始懇切丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました。修士課程から基盤造構学研究室に所属して以来 5 年間、研究は基より普段の研究室内生活においても多くのご助言をいただきました。また、現在だけでなく将来のことも考慮し、学外の研究機関の方々と接する機会も数多く設けていただきました。ありがとうございました。心より感謝申し上げます。緒方先生の指導の下で学位を取得できたことは私の誇りです。

島根大学生物資源科学部教授（副指導教員）の長束勇先生、同准教授の石井将幸先生、鳥取大学農学部教授（副指導教員）の北村義信先生、同教授の猪迫耕二先生には、学位論文審査の審査員を引き受けていただき、研究に対して貴重なご意見をいただきました。心より感謝申し上げます。特に長束先生からは、ご指導いただく度にきめ細かなご助言をいただきました。誠にありがとうございました。

補助教員である鳥取大学農学部助教の兵頭正浩先生には、研究に関する多くのご助言をいただいた他、普段から研究室内外の様々な場面で気にかけていただき、精神的にも支えていただきました。ありがとうございました。心より感謝申し上げます。

鳥取大学名誉教授の服部九二雄先生には、博士課程進学へのきっかけを与えていただき、進学について相談した際には温かい励ましの言葉をいただきました。ありがとうございました。心より感謝申し上げます。

本研究の一部は、独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所寒地農業基盤研究グループ水利基盤チームとの共同研究の成果であります。共同研究の一環として、延べ 5 カ月弱の期間に渡って、招へい研究員として同チームに滞在して研究させていただきました。寒地農業基盤研究グループ長（当時）の鎌田貢次様、水利基盤チーム上席研究員の中村正和様には、招へい研究員の制度にご理解をいただき快く受け入れていただきました。また、同チーム主任研究員の佐藤智様、研究員の石神暁郎様、同じく研究員（当時）の金田敏和様には、招へい期間中の研究遂行に際して多くのご指導、ご協力をいただきました。寒地土木研究所の関係者の皆様に心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

鳥取大学農学部基盤造構学研究室の専攻生の皆様には、学内外で行う試験や

調査の度にご協力をいただきました。特に川端唯斗君，今井敏光君，浅田勇輝君は，コンクリートの凍害に関する卒業論文テーマだったこともあり，大変お世話になりました。誠にありがとうございました。

小生は博士課程 3 年時の 2013 年 10 月より，松江工業高等専門学校の環境・建設工学科助教として採用され，社会人学生へ移行しております。校長の井上明先生，同学科教授（学科長）の荒尾慎司先生，同教授の高田龍一先生を始め多くの皆様のご理解を得て学位論文の執筆を行うことができました。心より感謝申し上げます。特に高田先生には，松江高専専攻科在籍時に鳥取大学大学院への進学のかっかけを与えていただき，進学後も常に気にかけていただきました。誠にありがとうございました。今後は，松江高専の発展のために尽力する所存です。

また，本論文の作成に際しては，ここにお名前を記すことのできなかった実に多くの方々のご支援，ご協力をいただきました。関係する皆様に心より感謝申し上げます。

なお，小生は博士課程進学時に日本学術振興会特別研究員（DC1）として採用されております（松江工業高等専門学校での採用に伴い中途辞退）。本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費（23・4565）の助成を受けたものです。ここに記して感謝いたします。

最後に，大学院博士課程まで進学することに理解を示し，いつも温かく見守り応援してくれた両親に対して深く感謝の意を示します。

摘要

現在供用されている構造物には、標準耐用年数を超過して供用されているものが多数存在している。農業水利施設についても同様であり、特に研究対象とした用排水路については、全国で約 4 万 9 千 km に及ぶ総延長のうち 17% が既に標準耐用年数を超過しており、今後超過する水利施設の割合はさらに増加する。現在は、既存の農業水利ストックの機能を効率的に維持することを目的とした機能診断を行い、適切な予防保全対策を行うことが求められている。

本研究で対象とする寒冷地の RC 開水路においては、近年、特徴的な凍害による変状が明らかになっている。具体的には、表面変状としてのひび割れと内部変状としてのひび割れの方法が異なるという点である。しかし、現時点では、それらの変状については未解明な点が多く、既往の研究によって明らかになっている変状の発生メカニズムやパターンについて更なる検討が必要とされる。また、変状発生時の力学特性の変化や変状、特に内部変状の診断・評価手法を明確に示すことが、今後のストックマネジメントの進展のためには必要不可欠であると考えられる。

そこで本論文では、寒冷地における RC 開水路のストックマネジメント、特に機能診断に資することを目的として次の研究を行った。まず、RC 開水路側壁の表面変状と内部変状についてそれぞれ調査を行い、両者の関係性について考察した。また、凍害診断の際に用いられる相対動弾性係数とコンクリートの各種力学特性の関係について明らかにした。

次に、内部変状の診断方法として、現地踏査（概査）と現地調査（精査）のそれぞれの段階における調査手法の検討を行った。概査の段階では、目視診断によって表面変状の特徴から内部変状の発生箇所を定性的に明らかにするために着目すべき診断ポイントを明らかにした。また、精査の段階では、注入工法と超音波法を用いて内部変状の発生箇所をより定量的に評価する手法について検討を行い、層状ひび割れの発生範囲の推定が可能であることを明らかにした。

さらに、現地非破壊試験としての共鳴振動法による一次共鳴振動数の測定を小型起振機を用いて行う手法についての検討を行い、その実用性を確認した。その後、現地非破壊試験による動弾性係数の推定のためのフロー図を作成し、そのフロー図に則った測定を行うことでフロー図の妥当性を確認した。

本研究によって得られた知見を以下に概括する。

(1) 凍害劣化が進行したコンクリートの力学特性と相対動弾性係数について

① 相対動弾性係数と圧縮強度比、静弾性係数比、引張強度比、曲げ強度比は、

近似式によって線形関係で示すことが可能である。

- ② 相対動弾性係数と圧縮強度比の関係については、相対動弾性係数と静弾性係数比の関係と比較して決定係数が低くなることが確認された。要因としては、圧縮強度を求める際に使用する応力の降伏点の値にばらつきが生じることが挙げられる。
- (2) 現地踏査における目視診断による内部変状の評価について
 - ① 表面ひび割れが上下に湾曲して発生している開水路側壁では、水路側壁の低いところまで表面ひび割れが生じている箇所では内部変状である層状ひび割れが発生している可能性が高い。
 - ② 目視調査による層状ひび割れの発生箇所の定性的診断は、側壁の天端に他よりも著しいスケーリングが発生している、表面ひび割れが水路側壁の低いところまで生じている、降雨の数日後に表面が湿潤している、といった条件が複数揃う箇所を踏査により見つけることで行うことができる。
- (3) 現地調査における層状ひび割れの定量的評価について
 - ① 注入材の充填によって内部のひび割れが閉塞した場合、超音波伝播速度の値は注入材充填前と比較して大きくなる傾向を示す。また、超音波伝播速度の変化に着目することで、注入材充填によってひび割れの閉塞が行われているか否かを評価することが可能である。
 - ② 表面走査法による超音波伝播速度の測定では、注入材の充填によって表面部と内部で伝播速度の差が無くなり、超音波伝播速度がほぼ一定の値を示す。
 - ③ 注入材の充填範囲は上述の傾向の把握によって推定することが可能であり、同時に層状ひび割れの範囲も推定することが可能である。
- (4) 実務として機能診断を行う際の非破壊試験による凍害診断手法について
 - ① 小型起振機を用いた室内試験の結果からは、JIS規格に準じた試験機と同等の一次共鳴振動数の測定が可能である。
 - ② 上記①の結果を受け、作成した動弾性評価フローに則った試験を行ったところ、未劣化の試験体については、動弾性係数の評価を一定の精度で行うことが可能である。
 - ③ 同じ弾性波法である超音波伝播速度を用いた推定値と一次共鳴振動数を用いた推定値を複合することで、さらに精度よく動弾性係数を推定できる可能性があることが示唆される。
 - ④ 劣化の著しい試験体での評価からは精度のよい動弾性係数の推定は行えず、本フローによる検討は凍害劣化の潜伏期・進展期に相当する状態のコンクリートまでが適用範囲であると考えられる。

Abstract

Among infrastructures in Japan, there are many structures that exceeded the standard serviceable life. Similar problems have occurred in irrigation and drainage facilities. Especially in irrigation and drainage canal, 17% of the total length (approximately 49,000km) have exceeds their standard serviceable life. Implementation of appropriate preventive maintenance measures is required, as well as function diagnosis for maintaining a function of the existing irrigation and drainage facilities effectively. Concept of this series is referred to as the stock management.

RC open channels in cold region show deformation due to frost damage, however its mechanism is not completely clarified. Recently, it is discovered that the direction of surface and internal cracks is different. It is necessary to examine the pattern and the mechanism of deformation, and to develop diagnosis and evaluation methods for internal deformation.

In this thesis, the following studies were carried out with the aim to contribute to the stock management (functional diagnosis in particular) of RC open channel in cold region. First, the survey was carried out for internal deformation and surface deformation in RC open channel sidewalls, and it was clarified the relationship between these deformation. In addition, the relationship between various dynamic properties of concrete and the relative dynamic modulus of elasticity was examined. Then, as a diagnostic method for internal deformation, survey methods in the field survey and minute investigation were investigated.

In the field survey, it clarified diagnosis methods in order to evaluate qualitatively the occurrence of internal deformation from the characteristics of surface deformation through visual diagnosis. In minute investigation, it is revealed that it is possible to estimate more quantitatively the extent of internal deformation (layered cracks) by investigating using the ultrasonic method and the grouting method.

In addition, a technique to measure the first resonance frequency in on-site nondestructive tests using small- sized vibrator was examined, and its utility was confirmed. A flow chart to estimate dynamic modulus of elasticity from on-site nondestructive test was drawn up, and its validity was confirmed by carrying out a measurement in accordance to it.

The results acquired in this research can be integrated as follows:

- (1) Relative dynamic modulus of elasticity and mechanical properties of deteriorated concrete due to frost damage
 - 1) Relationship of relative compressive strength, relative modulus of static elasticity, relative tensile strength and relative flexural strength against the relative dynamic modulus of elasticity shows linear relations.
 - 2) Relationship between relative compressive strength and relative dynamic modulus of elasticity shows lower coefficient of determination than relationship between relative modulus of static elasticity and relative dynamic modulus of elasticity.
- (2) Evaluation of internal deformation by visual diagnosis in field survey
 - 1) In open channel sidewalls with surface cracks by frost damage, possibility of occurring of layered cracks is high where surface cracks exist in the lower portion of the sidewall.
 - 2) In qualitative diagnosis for layered cracks through visual diagnosis, it can be diagnosed by finding the point where these 3 phenomena are aligned together; a significant scaling heavier than other places in levee crown of the sidewall, surface cracks in the lower portion of the sidewall and wetness in the surface of the sidewall after a few days of rain.
- (3) Quantitative evaluation of the layered cracks in minute investigation
 - 1) In case of the layered cracks is filled by filling material, the ultrasonic propagation velocity showed a tendency to be bigger than before filling. By focusing on the change in ultrasonic propagation velocity, it is possible to evaluate whether cracks are filled efficiently.
 - 2) In the measurement of ultrasonic propagation velocity using the surface scanning method, the difference in propagation velocity between the surface and internal parts can be eliminated by grouting method. Then, the ultrasonic propagation velocity shows nearly identical values.
 - 3) Range of filled cracks can be estimated by following above. It is also possible to estimate the range of layered cracks.
- (4) A frost damage diagnosis technique using nondestructive tests for the function diagnosis
 - 1) From the results of laboratory tests using small-sized vibrator, it is confirmed that small-sized vibrator is possible to measure the first resonance frequency similarly to the tester which complies with JIS standard.
 - 2) Following the above results, evaluations in accordance with the proposed

flow chart were carried out. For non-deteriorated specimens, the dynamic modulus of elasticity is obtained with acceptable precision.

- 3) It is supposed that the accuracy of the estimation of dynamic modulus of elasticity can be improved by combined estimation with the first resonance frequency and the ultrasonic propagation velocity.
- 4) It is not possible to estimate the dynamic modulus of elasticity accurately for cases that significantly deteriorated due to frost damage. It is thought that the proposed method is applicable to concrete in the incubation period and advanced period of frost damage deterioration.

学位論文の基礎となる公表論文

— 学術論文 —

- 1) 周藤将司，緒方英彦，石神暁郎，金田敏和：凍害劣化の生じた RC 開水路側壁のひび割れに対する注入工法の適用性と超音波法による充填部の評価，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.295-302，2013【本論文；第 2 章，第 5 章】
- 2) 周藤将司，緒方英彦，石神暁郎，佐藤智：凍害劣化した RC 開水路におけるひび割れ注入工法による内部変状の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35，No.1，pp. 919-924，2013【本論文；第 2 章，第 5 章】

学位論文の基礎となる公表論文

—参考論文—

- 1) 森田匡隆，周藤将司，緒方英彦，高田龍一：凍結融解作用によるコンクリート開水路の表面変状の発生形態，コンクリート工学年次論文集 Vol. 33, No.1, pp. 911-916, 2011【本論文；第2章】
- 2) 周藤将司，森田匡隆，緒方英彦，山崎大輔：コンクリート表面の炭酸化が非破壊試験結果に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集 Vol. 33, No.1, pp. 1679-1684, 2011【本論文；第3章】
- 3) 緒方英彦，金田敏和，石神暁郎，周藤将司：凍結融解作用による開水路側壁の内部変状に対する目視調査および超音波試験の考察，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34, No.1, pp. 892-897, 2012【本論文；第3章】