

## 論文 Sonic-IR 法の適用によるコンクリートの凍害劣化評価

熊谷 駿佑\*1・橋本 勝文\*2・杉山 隆文\*3・高橋 尚\*4

**要旨:** インフラ構造物の老朽化や建設業での人材不足が問題となっている昨今の社会において、効率性と精度を兼ね備えたコンクリートの非破壊検査手法が求められている。Sonic-IR 法は、超音波加振時の発熱挙動から金属材料等のき裂や欠陥を検出する手法の一つである。本研究では、寒冷地における凍結融解作用の繰返しによるコンクリートの凍害劣化を評価するために Sonic-IR 法を適用した。その結果、凍結融解繰返しによる凍害劣化の進行に伴う超音波パルス伝搬速度および質量減少率の変化と超音波加振時の発熱挙動の関係から、Sonic-IR 法のコンクリートの凍害劣化評価手法としての適用可能性を示すことができた。

**キーワード:** 非破壊検査, 凍結融解, Sonic-IR 法, サーモグラフィ, 超音波

## 1. はじめに

近年、日本では高度経済成長期に建設されたインフラ構造物の老朽化が進行している。建設後 50 年以上が経過する施設の割合は 2029 年度には 50%に達するなど、今後も加速度的に増加する見込みである。それに伴って構造物の維持管理に必要な点検、診断および対策工は増加していくと考えられる。さらに、建設業に従事する人口は減少しており、2024 年度からは時間外労働の上限規制が適用されるなど長時間労働を是正する動きも強まっている。以上の背景より、建設業では人材不足の問題が深刻化している。インフラの維持管理についても人材の確保が困難になっており、すでに各地の構造物において対策工に遅れが生じているのが現状である<sup>1)</sup>。修繕や補修が遅れる要因の一つに対策を必要とする箇所と損傷の程度の特定が困難であるという原因が考えられる。一般には、構造物表面の浮きやはく離などの欠陥を発見する簡易的な検査手法として打音検査が広く用いられている。打音検査は使用機材が小型軽量であり所要時間が短いために簡便な検査として汎用的に実施されている。しかしながら、損傷の診断は検査者の経験や感覚に依存する場合がある。そのため、社会基盤インフラを主として構成するコンクリート構造物に対する効率的かつ正確性の高い非破壊検査手法が求められており、赤外線サーモグラフィや超音波を用いる非破壊検査手法が盛んに研究開発され、実構造物の点検および調査に適用されている。

熱伝導性の高い金属などの材料に対する簡便かつ正確な非破壊検査手法として超音波励起サーモグラフィ法（以下、Sonic-IR 法とする。）が存在する。き裂（コンクリート分野におけるひび割れとほぼ同義である。以下、ひび割れとする。）を含む金属材料を超音波によって連続的に加振した際、ひび割れ界面では摩擦に起因する局

所的な温度上昇が生じる。この発熱を赤外線サーモグラフィカメラで撮影し、き裂を検知する検査手法が Sonic-IR 法である。摩擦による発熱を利用する特性から、幅の狭い閉じたひび割れの検出に適するとされており、既往の研究においては製鉄所の搬送設備の疲労き裂検出などに適用例がある<sup>2)</sup>。本手法をコンクリート構造物に適用できれば、極短時間の超音波加振により得られる発熱挙動から構造物内部の損傷度の簡易的な推定やひび割れの定量評価が可能になることが期待できる。一方で、コンクリート等のセメント系材料は熱伝導性が低く、配合や構造物の暴露環境に応じて内部構造や水分状態が異なると考えられる。セメント系材料への本手法の適用を試みた先行研究は少ないが、既往の研究では特定の条件でモルタル内部のひび割れ界面における発熱を熱画像から同定できることや<sup>3)</sup>、モルタル供試体の損傷度が発熱に対して影響を及ぼすことが示されている<sup>4)</sup>。しかしながら、上述の研究はいずれもモルタル供試体を対象として得られた結果を示すものであり、粗骨材を含み、モルタル以上に内部の不均一性の高いコンクリートに対して Sonic-IR 法を適用した場合の発熱の特性は明らかになっていない。また、先行研究においては、力学的な载荷により導入したひび割れあるいは模擬ひび割れを Sonic-IR 法による検出対象としており、環境中での実際の劣化進行により生じたひび割れ等の損傷に対する Sonic-IR 法の適用例は存在しない。凍結融解に伴う凍害をはじめとしたコンクリートの劣化現象は寒冷地におけるインフラ構造物の損傷の主要な原因である。そのため、劣化によって損傷したコンクリートに対して Sonic-IR 法を適用することで、非破壊検査手法としての本手法の有用性を検討することは大変有意義であると考えられる。

本研究ではコンクリート供試体を用いて凍結融解試

\*1 北海道大学大学院 工学院環境フィールド工学専攻 (学生会員)

\*2 北海道大学大学院 工学研究院土木工学部門 准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 北海道大学大学院 工学研究院土木工学部門 教授 Ph.D. (正会員)

\*4 北海道大学大学院 工学院環境フィールド工学専攻 (学生会員)

表-1 供試体の配合

W/C	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	水	セメント	細骨材 (川砂)	粗骨材 (碎石)
0.45	201	448	810	911
0.50	201	403	846	914
0.55	201	366	878	912
0.60	201	336	909	907

材料	種類または産地	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	粗粒率
セメント	普通ポルトランドセメント	3.14	-
粗骨材 (碎石)	新ひだか産	2.74	6.70
細骨材 (川砂)	新ひだか産	2.67	2.94

験を実施し、サイクルの進行とともに Sonic-IR 法を適用した。凍結融解サイクルの増加に伴う発熱挙動の変化と凍害劣化の進行に関する評価結果を比較することで、コンクリートの凍結融解による劣化に対する Sonic-IR 法の適用の可能性について考察した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体の作製

凍害の進行と発熱の関係の評価を行うため、凍害耐性の異なる水セメント比 (W/C) 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 の4水準の円柱供試体 (直径 50mm, 高さ 100mm) を各2体 (供試体 A および B) 作製した。配合を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。AE 剤は使用していない。粗骨材は 5 号と 6 号の碎石を同重量混合して使用した。最大寸法は 20mm である。打設の 24 時間後に脱型し、28 日間封緘養生を行った。

### 2.2 凍結融解試験

#### (1) 凍結融解試験の概要

図-1 に示すように一辺 11.5cm, 高さ 50.5cm の直方体のゴム製容器に 4 個の供試体を入れた状態で水中凍結融解試験を実施した。ゴム製容器内部の空間を調整するために、コンクリート製の円柱を容器内に格納した。凍結融解のサイクルは JIS A 1148 A 法に示されたサイクルと同様とした。10 サイクルごとに供試体を取り出し、湿潤状態で超音波パルス伝搬速度を測定した。その後、供試体を乾燥させ、乾燥重量の計測と超音波加振による発熱の測定を行った。測定終了後は供試体を水中で 7 日間浸漬させて湿潤状態とした後、再び凍結融解試験を 10 サイクル実施した。これをサイクル数が 30 サイクルに達するまで繰り返した。

#### (2) 超音波パルス伝搬速度の測定方法

供試体上面 (型枠面) から超音波パルスを入力して下面 (打設面) で受信し、超音波パルスの伝搬時間を測定した。超音波パルスの入力周波数は 54kHz, 繰り返し周波数は 100Hz, 発信励起電圧は 250V とした。機器の測定分解能は 0.1μs であった。センサと供試体の間にグリスを塗布し、供試体を寝かせた状態で測定を行った。測

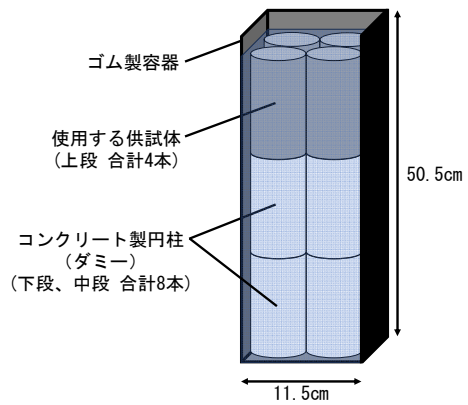


図-1 供試体の格納方法

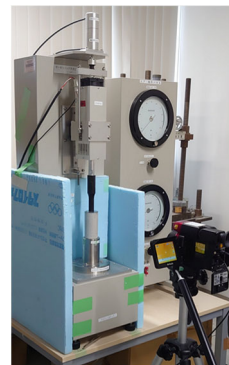


図-2 実験の様子



図-3 加振ホーン先端と供試体

定は各供試体に対して 3 回実施し、平均値を伝搬時間とした。伝搬距離を供試体の高さである 100mm として測定した所要時間から超音波パルス伝搬速度を求めた。

#### (3) 乾燥重量の測定方法

乾燥重量は供試体を水中から取り出して表面の水をふき取り、40℃の定温乾燥器内に 3 日間静置した後に測定した。なお、累計 10 サイクル経過時の測定のみ 20℃の恒温槽内に 1 日静置した状態で重量の測定を行った。測定は各供試体に対して 1 回実施し、測定した乾燥重量から供試体の質量減少率を算出した。

### 2.3 Sonic-IR 法による発熱の測定

#### (1) 超音波加振の概要

各供試体に対して加振ホーンによる超音波加振を行い、供試体表面の発熱を赤外線サーモグラフィカメラで撮影した。図-2 に撮影の様子を示す。図-3 に加振ホーン先端部と供試体の様子を示す。ホーン先端での応力集中による供試体の損傷を避けるため、加振ホーンの先端に直径 50mm, 厚さ 1mm の金属板を取り付け、供試体上面に均等に加振力が加わるようにした。超音波の周波数は 20.2kHz (振幅 20μm), 28.8kHz (振幅 13μm), 39.6kHz (振幅 8μm) の 3 水準, 加振ホーンによる拘束力は 19.8N とし、3 秒間加振を行った。簡単のため、以降は各実験ケースの周波数を 20kHz, 30kHz, 40kHz と表記する。

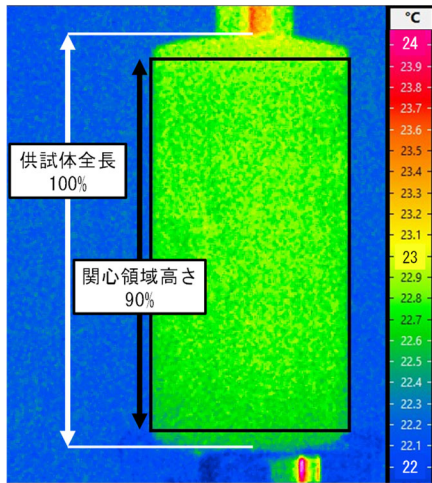


図-4 関心領域の選定方法

## (2) 実験環境

実験時の室温は空調設定で 20°C とし、供試体の周囲をスチレンボードで囲い、周囲からの断熱を行った。供試体は先述した手順で乾燥させた後に室温 20°C、湿度 40% に設定した恒温恒湿槽に 24 時間以上保管し、室温と同程度の温度かつ気乾状態として実験を行った。

## (3) 撮影条件

供試体とカメラレンズの距離は 40cm とし、供試体を画面の中心に水平方向から捉えるようにカメラの位置を調整した。フレームレートは 10Hz とし、超音波加振を行う 3 秒間を含む 10 秒間の動画を撮影した。また、1つの供試体に対して前面と背面の 2 方向から 2 回ずつ撮影を行った。加振による温度上昇の影響を排除するため、同一の供試体に対する加振は 5 分以上の時間を空けた。

## (4) 熱画像の関心領域

加振中は加振ホーンと供試体の間でも発熱が生じ、供試体の上端部はその影響を受ける。また、加振装置と接触する下端部も同様に温度の影響を受ける。供試体の劣化損傷による発熱のみを抽出するために、図-4 のように供試体撮影領域の上下端部分を 5% ずつトリミングすることで関心領域とした。超音波加振開始時の温度を基準とした温度差分データを取得し、加振開始から 3 秒後までの温度上昇量を用いて実験結果の分析を行った。

## 3. 実験結果

W/C と各供試体 A および B を合わせて呼称する。例えば、W/C が 0.45 の供試体は、0.45A および 0.45B である。10 サイクル経過時点で 0.60A 及び 0.60B にスケーリングが生じた。サイクルの増加に伴い、他の供試体でもスケーリングが増加し、30 サイクル経過後には一部の供試体で骨材の表面への露出も見られた。

### 3.1 凍結融解の進行に伴う超音波パルス伝搬速度の変化

図-5 に供試体の超音波パルス伝搬速度の推移を示す。

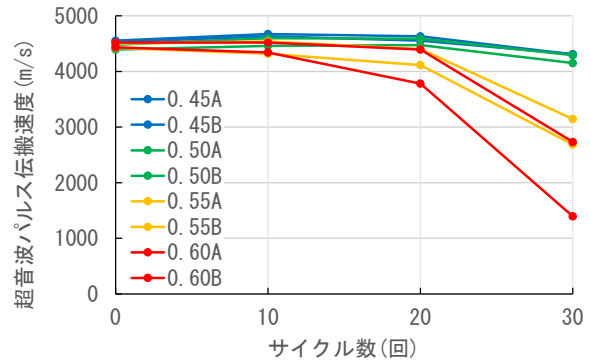


図-5 超音波パルス伝搬速度の推移

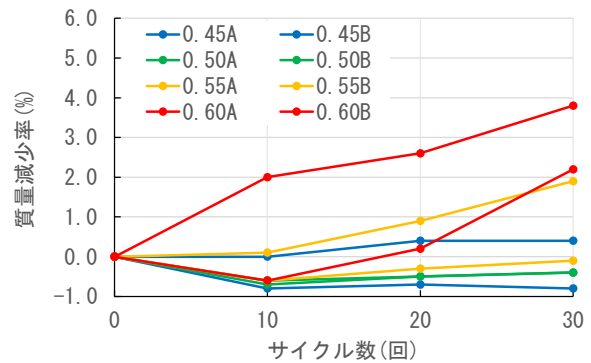


図-6 質量減少率の推移

超音波パルス伝搬速度は凍結融解サイクルの増加に伴い低下している。W/C の高い供試体では低下がより顕著である。伝搬速度の低下は供試体の凍害が表面から目視できない深さまで進行し、供試体内部において骨材とモルタルの剥離などが発生したことを示すと考えられ、この結果から供試体の凍害が進行していることがわかる。

### 3.2 凍結融解の進行に伴う質量減少率の変化

図-6 に凍結融解の進行に伴う供試体の質量減少率の推移を示す。同一の W/C の供試体でも質量減少率に差が生じたが、これは使用した骨材が供試体に対して非常に大きく、骨材配置のスケーリング量への影響が顕著であったことが要因とみられる。一部の結果で 0 から 10 サイクルにかけて質量減少率が低下している。これは先述した乾燥方法の違いにより、供試体内に水分が多く残存したことが原因と考えられる。その後、質量減少率はほぼ一定、または増加傾向となる。特に、W/C の高い供試体で質量減少率の増加が顕著であり、凍結融解作用によるスケーリングの増加が読み取れる。

### 3.3 Sonic-IR 法の適用による供試体の温度上昇

#### (1) 加振周波数と供試体形状の発熱への影響

取得した熱画像の一例を図-7 に示す。コンクリートの供試体表面において発熱を確認できているが、超音波加振による発熱は供試体全体で生じるのではなく、ひび割れや損傷を生じた箇所と推定される特定の箇所に偏在していることがわかる。このため、関心領域全体の温度

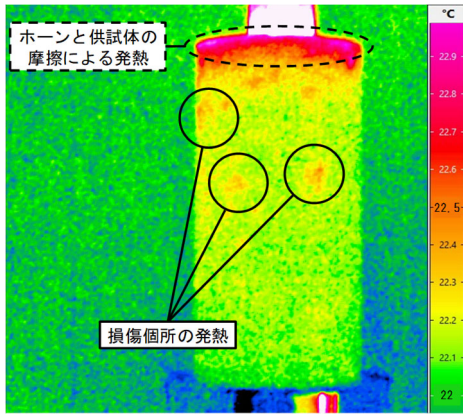


図-7 超音波加振による供試体の発熱

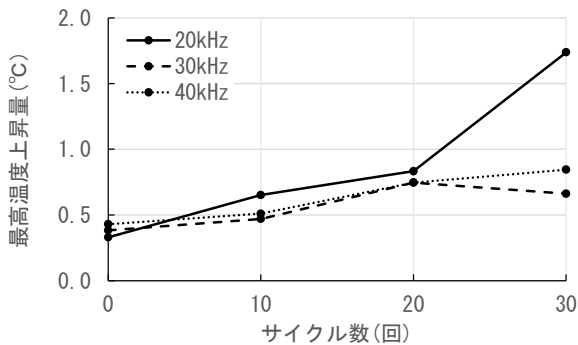


図-8 各周波数の超音波に対する最高温度上昇量

上昇ではなく、領域内で検出された温度上昇量の最高値に注目することで熱画像から得られたデータを整理した。図-8に各周波数での超音波加振開始から3秒経過時点での関心領域内における温度上昇量の最高値（以下、最高温度上昇量とする。）を示す。この図で示す最高温度上昇量は、8個の供試体に対する超音波加振の結果を平均した値である。30kHz および 40kHz と比較して、20kHz の超音波による供試体の最高温度上昇量が大いことがわかる。この傾向は 30 サイクル経過後に非常に顕著に表れている。ここで、図-5 からわかるように各供試体の超音波パルス伝搬速度はサイクルが進むごとに加速度的に低下しており、供試体の弾性係数も加速度的に低下していることが推測できる。そのため、20kHz の超音波に対する発熱が大きくなった要因として、供試体の弾性係数の低下に伴い、低い周波数の超音波で振動が励起されやすくなった可能性が挙げられる。しかしながら、ホーンの振幅や周波数の違いにより各実験ケースで供試体に加えられる振動のエネルギーが異なることから、単純に弾性係数の低下のみがこの現象の要因であると特定することはできない。この点については今後の検討課題である。以下の分析では発熱が大きく、分析に適する20kHzの超音波に対しての発熱を対象とする。

## (2) 凍結融解の進行と発熱の関係

図-9に各供試体の20kHzの超音波に対する最高温度

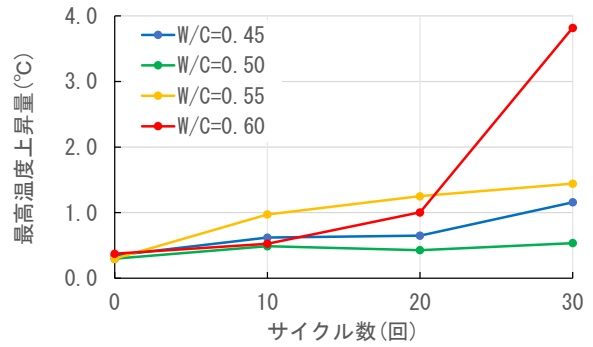


図-9 20kHzの超音波に対する最高温度上昇量

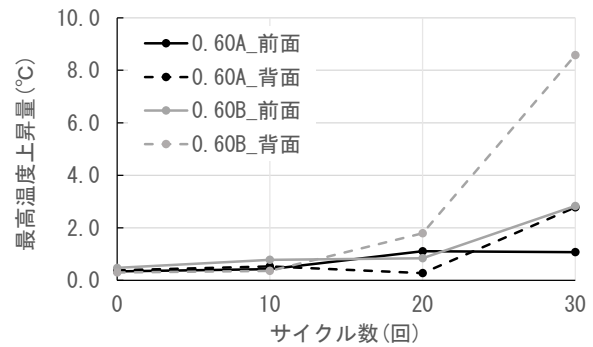


図-10 水セメント比0.6の供試体の最高温度上昇量

上昇量を示す。図に示す各水準の値はW/Cの等しい2体の供試体に対する合計8回の試験結果の平均である。最高温度上昇量は凍結融解サイクル数の増加に応じて増大している。また、W/Cの高い供試体では最高温度の上昇がより顕著に確認できる。これより、凍害劣化の進展に応じ、超音波加振に対する供試体の発熱が増大することがわかる。

## (3) 最高温度上昇量のばらつき

上述の結果から最高温度上昇量の増大が顕著となるW/Cが0.6の供試体に対して加振を行った際の各供試体の測定面ごとの最高温度上昇量を図-10に示す。供試体の撮影面により検出される最高温度上昇量の検出範囲に大きく差が出ている。これは、ひび割れ箇所のような特異的に発熱が大きくなる点が存在するためである。先行研究<sup>9)</sup>で示された実験結果からも、ひび割れや表面の欠陥箇所では温度上昇が極端に大きくなる点を確認できることから、この特異的な発熱現象はSonic-IR法によるセメント系材料の発熱が持つ特性であると考えられる。最高温度上昇量の不均一性は凍結融解サイクルが進むほど顕著になっていることもひび割れの局所的な発生を示唆していると言える。また、最高温度上昇量のばらつきは同一の撮影面に同条件で加振を行う際にも発生する場合がある。図-11に30サイクル経過後の加振試験から得た供試体の最高温度上昇量のばらつきを示す。横軸および縦軸はそれぞれ1回目と2回目の加振で得られた最高温度上昇量を示している。補

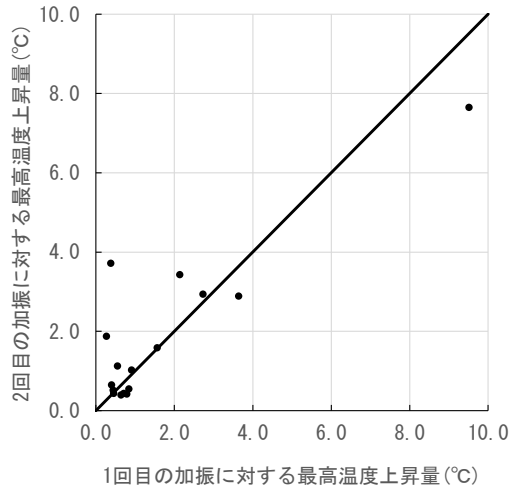


図-11 同一の加振に対する最高温度上昇量のばらつき

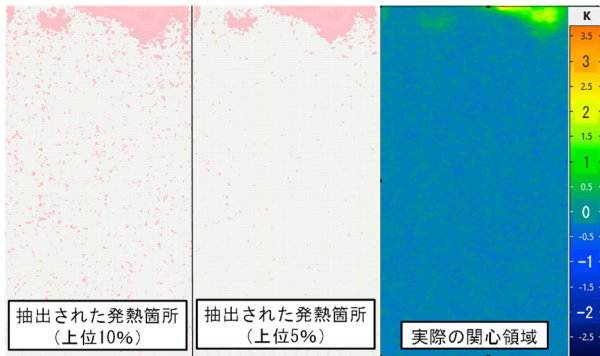


図-12 閾値の設定により抽出される発熱箇所

助線である  $y=x$  の直線上から大きく乖離するプロットが散見され、最高温度上昇量にばらつきが生じていることがわかる。Sonic-IR 法により得られる結果の分析に最高温度上昇量を使用する場合、上記のばらつきの影響を受けている可能性が高く、注意する必要がある。

#### (4) 発熱箇所の抽出

最高温度上昇量のばらつきと発熱箇所の分布の偏りを踏まえ、熱画像の関心領域内に含まれる画素のうち、温度上昇量が相対的に大きい画素を発熱箇所として抽出し、この発熱箇所の温度上昇量の平均値に注目することで、上記のばらつきの影響を抑えた発熱の傾向を分析できると考えた。上位 10%および 5%を閾値とすると、発熱箇所は図-12 に示すような分布で抽出されることになる。10%を閾値とした場合、関心領域上部に見られる主要な発熱以外に、供試体全体に点在した画素が抽出される。これらの画素は赤外線検知のノイズ成分を含む温度検出結果である可能性が高い。一方で、閾値を上位 5%とした場合、上部の加振ホーンからの超音波加振による発熱のみが抽出されており、ノイズ成分を含む温度検出が少ないと考えられる。以上の結果から、本研究での分析に使用する発熱箇所は上位 5%とした。以降は抽出した発

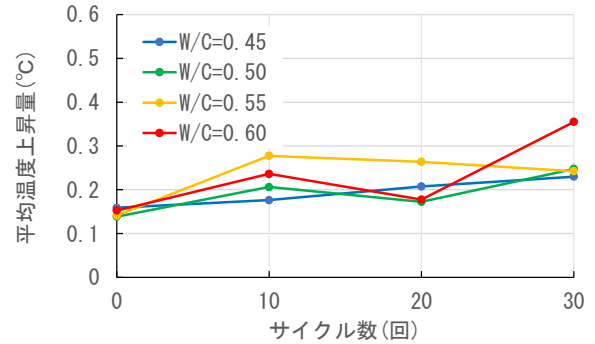


図-13 発熱箇所の平均温度上昇量

熱箇所を示す画素について、温度上昇量の平均値を平均温度上昇量と呼称する。図-13 に平均温度上昇量の推移を示す。平均温度上昇量はサイクル数の増加に伴い、増大する傾向にある。また、水セメント比の高い供試体は平均温度上昇量が大きくなる傾向にある。この傾向は最高温度上昇量の変化と共通しており、閾値を設けた発熱箇所のデータ分析についても温度上昇の特徴を捉えていると判断できる。図-13 において、10 サイクル経過時から 20 サイクル経過時にかけては平均温度上昇量が低下する。コンクリートの縦波共振周波数はコンクリートの含水比の影響を受けるため<sup>9)</sup>、この温度低下は先述した乾燥方法の違いによって 10 サイクル経過後の測定時に供試体が十分に乾燥しておらず、振動特性が変化したことが原因である可能性が高い。このことから、コンクリート中の水分量は Sonic-IR 法による発熱に対しても影響を及ぼすと考えられる。また、10 サイクル経過時から 20 サイクル経過時にかけての平均温度上昇量の低下は W/C が 0.6 の供試体で最も大きく、W/C が 0.45 の供試体では低下は見られない。すなわち、W/C が高いほど水分量の影響が大きくなる傾向にあると考えられる。

### 3.4 Sonic-IR 法による凍害劣化進行の評価

#### (1) 発熱と質量減少率の関係

図-14 に平均温度上昇量と供試体の質量減少率の関係を示す。質量減少率 0%未満の領域では質量減少率と平均温度上昇量の間には正の相関が見られる。しかしながら、質量減少率が 0%以上の領域に注目した場合には両者の間の相関関係は緩やかになる。これは供試体の劣化が一定以上進行した場合、スケーリングやひび割れ幅の増加によって、摩擦が生じやすいとされる幅の狭いひび割れの増加が止まるためであると考えられる。以上より、本研究の範囲内で得られた質量減少率と平均温度上昇量の間には正の相関が見られ、Sonic-IR 法による凍結融解の評価が可能である可能性がある。

#### (2) 発熱と超音波パルス伝搬速度の関係

図-15 に平均温度上昇量と超音波パルス伝搬速度の関係を示す。超音波パルス伝搬速度と供試体の平均温度

上昇量の間には負の相関が確認できる。ただし、超音波パルス伝搬速度が4000m/s以下の領域では、超音波パルス伝搬速度の減少に伴う平均温度上昇量の増加が緩やかになっている。この結果も、供試体の損傷が一定以上進行したことで、発熱が生じやすい微細なひび割れの増加が止まったためであると考えられる。しかしながら、この区間の発熱についてはサンプル数が少なく、詳細な評価を行うことはできない。図-16に示すように、超音波パルス伝搬速度が4000m/s以上の領域に注目すると、超音波パルス伝搬速度と平均温度上昇量の間には先ほどと同様の傾向の相関が見られる。一般的には、健全なコンクリートの超音波パルス伝搬速度は4000m/s以上とされていることから、この区間に存在する供試体の凍結融解による損傷はスケーリングなど供試体表面の損傷を除き、軽微であると考えられる。しかしながら、この区間において平均温度上昇量と超音波パルス伝搬速度の相関が見られることから、Sonic-IR法によって凍結融解による劣化の初期段階を捉えることができる可能性がある。

#### 4. まとめ

本論文では、Sonic-IR法の凍害劣化の評価への適用の可能性を明らかにすることを目的とした。そして、凍結融解試験を実施したコンクリート供試体にSonic-IR法を適用し、得られた発熱データと超音波パルス伝搬速度および質量減少率との関連性を評価した。その結果、以下に示す知見が得られた。

- (1) 凍害による弾性係数の低下が超音波の周波数に対する供試体の発熱特性に影響する可能性がある。
- (2) 供試体内の水分量が発熱に影響を及ぼす。
- (3) 供試体の平均温度上昇量と質量減少率、超音波パルス伝搬速度には相関がある。
- (4) Sonic-IR法を用いることで凍害劣化の評価が可能である。特に、凍結融解の発生初期の劣化を評価できる可能性がある。

今後さらなる検討を進めるためには、先述した局所的な温度上昇や温度上昇範囲の抽出手法などデータの扱い方に関しての精査が必要である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，2022.8
- 2) 西名慶晃，今西大輔：超音波励起サーモグラフィ法によるき裂検知技術の基礎検討，日本機械学会論文集，Vol.83，No.846，p.16-00251，2017.2
- 3) Hashimoto, K. and Shiotani, T.: Sonic-IR imaging technique for detection of crack interfaces in cementitious materials, Construction and Building Materials, Vol.386, 131549, July.2023

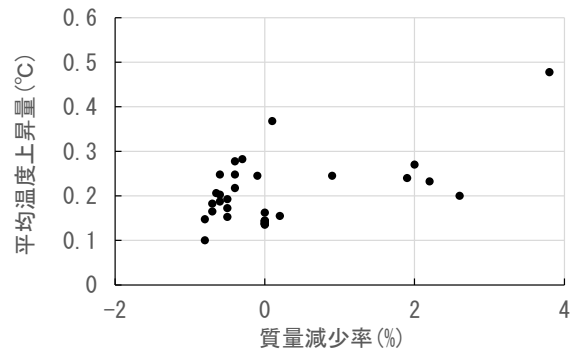


図-14 平均温度上昇量と質量減少率の相関

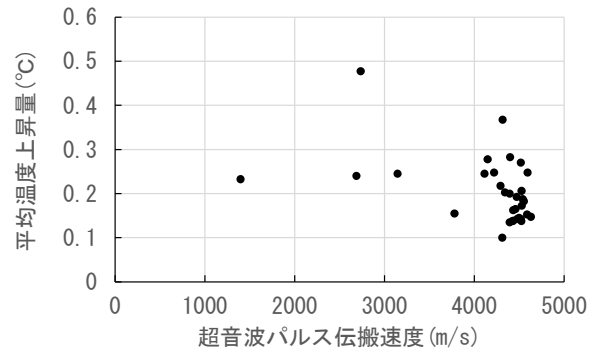


図-15 平均温度上昇量と超音波パルス伝搬速度の関係 (0~5000m/s)

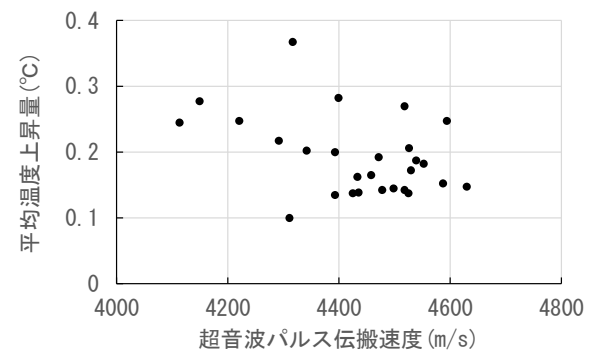


図-16 平均温度上昇量と超音波パルス伝搬速度の関係 (4000~4800m/s)

- 4) 高橋尚，橋本勝文，杉山隆文，熊谷駿佑：サーモニック法によるモルタル内部の損傷度と発熱挙動，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.23，pp.44-49，2023.10
- 5) 熊谷駿佑，橋本勝文，高橋尚，杉山隆文：サーモニック法による超音波加振条件とひび割れを有するモルタルの発熱挙動，土木学会北海道支部論文報告集，Vol.79，E-16，2023
- 6) 小林晃，豊田靖浩，山本清仁，青山威康：弾性波の共振周波数に及ぼすコンクリート中の水分の影響，農業農村工学会論文集，Vol.75，No.6，pp.71-78，2007.12
- 7) コンクリートの診断技術'02，基礎編，p.106，日本コンクリート工学協会，2002