

# 積雪寒冷地におけるコンクリート劣化の評価技術の開発

板橋 孝至, 田中 大之, 高橋 英徳, 谷口 円\*

## Development of Deterioration Evaluation Method for Damaged Concrete in Cold Region

Koji ITABASHI, Hiroyuki TANAKA, Hidenori TAKAHASHI, Madoka TANIGUCHI\*

### 抄 録

積雪寒冷地のコンクリート構造物の凍害及び塩害による劣化の分析評価技術への要望が増えていることから、X線CTを用いた劣化コンクリートの定量的かつ立体的なひび割れ評価技術、及びEPMAを用いたコンクリートに浸入した低濃度塩素の定量分析技術の開発を行った。ひび割れ評価技術については、コンクリート試験体のX線CT撮影条件、撮影画像からのひび割れ抽出方法、及び抽出したひび割れの定量性の検討によって適切な条件を選定した結果、直径100mmの円柱試験体について0.200mm以上のひび割れを非破壊で定量的かつ立体的に評価する技術を確立した。この技術を用いて、一面からの繰り返し凍結融解によるひび割れの深さ方向に浸入した様子を把握できた。塩素分析技術については、低濃度域に対応した検量線を作成することによりEPMAを用いたコンクリート中の塩素の定量的面分析技術を確立した。

**キーワード**：コンクリート劣化, 積雪寒冷地, X線CT

### Abstract

The two methods were developed that a quantitative and three-dimensional crack evaluation method using X-ray CT system and a quantitative analysis method of trace Chlorine infiltrated into concrete using EPMA. There is an increasing demand for evaluation method of deterioration due to frost damage and salt damage of concrete structures in cold region. We established the method to evaluate crack of concrete structures nondestructively and three-dimensionally. This method is able to evaluate the cracks of 0.200mm or more in concrete structures for a cylindrical specimen of 100mm in diameter, with appropriate conditions such as taking the photographing conditions, crack extraction method from the X-ray CT image and examining the quantitiveness of the extracted cracks. Using this method, it was possible to grasp how the crack penetrated into the concrete specimen in the depth direction by repeated freeze-thaw from one side. With regards to the Chlorine analysis method, we established a quantitative analysis mapping method for chlorine in concrete using EPMA by making calibration curve Corresponding to the low concentration range.

**KEY-WORDS** : Damaged-concrete, Cold-region, X-ray CT system

### 1. はじめに

社会インフラの維持管理において、構造物の劣化診断技術の確立は喫緊の課題である。国土強靱化基本法（平成25年12月）では、科学的知見に基づく研究開発の推進及びその成果の普及を図りながら、地域の特性に応じて施設又は設備の効率的かつ効果的な維持管理に資することを定めており、北海

道においても平成27年3月に地域計画である「北海道強靱化計画」を策定したところである。一連の施策動向を踏まえて、道内の非破壊検査企業から、橋梁や建築物の鉄骨系検査に加えて社会インフラも含めたコンクリート構造物検査への参入に対する技術支援が強く要望されている。

コンクリート構造物の凍害による損傷の進行を予測するためには、現状を詳細に把握することが重要である。特に、供

\* 北方建築総合研究所 Northern Regional Building Research Institute

事業名：重点研究

課題名：積雪寒冷地におけるコンクリート劣化の分析評価技術の開発（平成27～29年度）

用中のコンクリートに発生したひび割れの大きさや分布等を詳細に評価することでより精度の高い寿命予測法の確立に必要な基礎データを得ることができる。松村ら<sup>1)</sup>は、凍害の際に発生する微細ひび割れに着目し数mmごとに切断したコンクリート断面の顕微鏡観察から得られる微細ひび割れ密度より力学特性値を推測する手法を提案した。一方、近年、産業用マイクロフォーカスX線CT装置（以下X線CT）を用いてコンクリートの空隙（気泡+ひび割れ）構造や骨材分布を立体的に観察した報告が増えてきている。杉山ら<sup>2)</sup>はAEモルタル中の空隙構造を定量的に評価した。また、吉川ら<sup>3)</sup>はモルタル中に導入した曲げひび割れの3次元可視化を行った。しかし、これらの空隙評価はコンクリート中の巻き込み空気及び連行空気由来する気泡も含んでおり、ひび割れのみを抽出し、その定量性を評価した事例は、ほとんど報告されていない。

塩害については、道総研の分野横断型研究会活動である「塩害等による構造物・環境影響に関する研究会」においても融雪剤等による鉄筋コンクリート建築物への影響が指摘されている。分析手法としては、コンクリート構造物からのコア抜き試料あるいは削孔粉末に対し、JIS A 1154に規定されている湿式法により分析するのが一般的であるが、cm単位の一定体積の平均値しか得られないため詳細な進行予測には適さないという課題があった。この課題を解決するために、近年、土木学会において、固体表面における微小領域の元素の定量分析及び面分布に関する測定が可能なEPMAを用いた元素分析方法を規定した「EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法(案)」(2006)<sup>4)</sup>が制定されている。

このような背景を受けて、(一社)日本非破壊検査協会や(公社)日本コンクリート工学会等の関連学協会においても検査技術に関する特別シンポジウムや劣化診断に関する委員会などを設けて、新たな非破壊検査技術の開発や劣化診断のための指針作りを進めている。しかし、北海道を含む積雪寒冷地におけるコンクリート構造物は凍害などの厳しい環境作用を受けているにもかかわらず、コンクリート劣化の非破壊・分析評価技術が十分に開発されていない。

本研究では、積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の凍害・塩害による劣化を定量的に評価し、道内の非破壊検査業界のコンクリート構造物検査分野への参入に向けた技術支援を行うために、新たな非破壊検査技術と分析技術の開発を行うこととした。

## 2. 実験方法

### 2.1 X線CTによるひび割れ等の評価技術の開発

図1に、コンクリートのひび割れ量を計測する手法の一つであるASTM C 457に準拠したリニアトラバース法の模式図を示す。コンクリート試験体の任意の断面を顕微鏡観察に

より2000mm以上走査し、ひび割れ密度を算出する方法である。

ひび割れ密度は、式(1)により算出される。

$$\begin{aligned} \text{ひび割れ密度 (本/mm)} \\ = \text{ひび割れ交差本数} / \text{顕微鏡走査長さ} \quad \dots(1) \end{aligned}$$

断面の顕微鏡観察によるひび割れ本数の計測は、非常に微細なひび割れまで検出可能だが、試験体の任意の断面しか測定できない。また、ひび割れの3次元的な分布の定量的評価や、ひび割れの伝播経路推定をする点に課題がある。そこで、物質の密度にほぼ比例するX線吸収係数を立体的に計測し輝度値の違いとして表示できるX線CTを用いて、コンクリートの内部に存在するひび割れを輝度値により分離し、立体的かつ定量的に計測する技術を検討した。

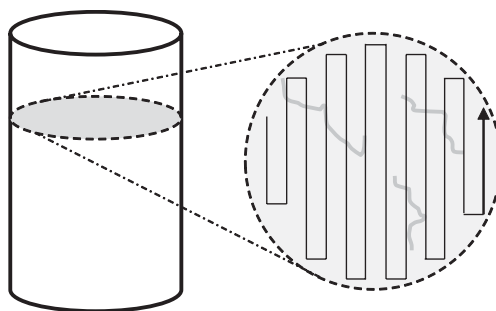


図1 リニアトラバース法模式図  
(黒折れ線が走査線、灰曲線がひび割れ)

#### 2.1.1 試験体

試験に用いたコンクリート試験体の形状は、円柱試験体及び梁型試験体とした<sup>5)</sup>。円柱試験体の寸法は直径100×高さ200mmであり、ひび割れ抽出方法の検討では、一軸圧縮応力を载荷しひび割れを導入して試験体として用いた。また、実構造物の塩化物量の測定にも利用した。梁型試験体は、寸法が100×100×400mmの断面が正方形の角柱状で、凍結解凍繰り返し試験体を作製した。

#### 2.1.2 X線CTによる撮影条件の検討

コンクリート内部のひび割れ検出に用いたX線CT装置は、当場所有の(株)島津製作所製inspeXio SMX-225CTおよび苫小牧市テクノセンター所有の(株)ニコンインステック製XT\_H 225\_STである。いずれもX線発生管の最大管電圧は225kV、X線検出器としてフラットパネル型検出器(FPD)を搭載している。これらを用いて、画像解析において優先される画像のコントラスト、鮮明さを評価の視点とし、X線発生管電圧を155~205kV、X線発生管電流を300~900μA、ビュー数1000~3000枚、1ビューあたりの撮影時間を256~2000msec、と変化させ、適切な撮影条件を検討した。また、本研究で取り扱うような大型でX線吸収係数が比較的高いサンプルを撮影する場合には、X線の線質が変化することに起因してサンプ

ル中央と外周部において画像の平均輝度値が変化するカップリングアーチファクトが生ずることが知られている<sup>6)</sup>。これは厚さ0～2mm金属フィルターを装着して低減<sup>7)</sup>した。

図2に、予備実験として100×100×400mmの梁型試験体全体を撮影したX線CT撮影試験体配置図を、図3に撮影した断層画像例を示す。様々な条件を検討したが、いずれのX線CT装置を用いても平均輝度値の変動が複雑かつ大きく、非破壊で全体を撮影・評価することは困難であった。そこで梁型試験体については、試験体を分割して評価することとし、長軸と垂直な方向にスライスして検討した。スライス幅は、100×100×10～30mm厚さと変化させた。また、スライス試験体設置角度を垂直～30°の範囲で変化させた場合の影響について検討した。

図4に、スライスした梁型試験体のX線CT撮影試験体設置及び撮影したスライス全体撮影断層画像の例を示す。スライスして100×100×30mm厚さのサイズとするとアーチファクトの少ない画像が得られた。

図5に、100×100×30mm試験体の撮影範囲を示す。凍結融解試験体においては、開口幅が小さいひび割れを抽出する必要があったため、凍結融解試験後スライスした試験体を凍結融解面から反対面までを含む中央部の直径35mmの範囲を拡大撮影した。これらを踏まえてSMX-225CTを用いた最適撮影条件を検討した結果、X線発生管電圧199kV、X線発生管電流200μA、SDD（X線焦点からX線検出器までの距離）1000mm、SRD（X線焦点から試験体中心までの距離）97mm、サンプル1回転あたりのビュー数3600枚、ボクセル（2次元画像データのピクセルに相当）サイズ0.034mm、サンプルサイズ100×100×20mm、サンプル設置角度は垂直であった。試験体をスライスし垂直に立てることによりサン

ルを透過するX線量が増加し、平均輝度値の変動の低減に寄与したと考えられる。

円柱試験体については、平均輝度値の変動は認められたが、分布は単純形状であったため、試験体ではなく撮影した画像を中央部と周辺部に2分割することでひび割れ抽出が可能であった。

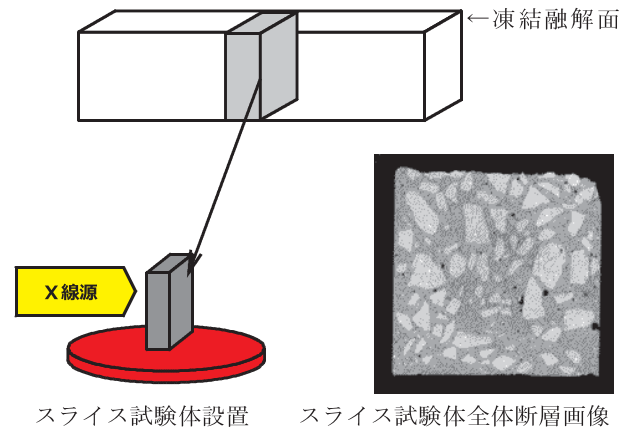


図4 梁型試験体スライス試験体撮影配置とX線CT画像

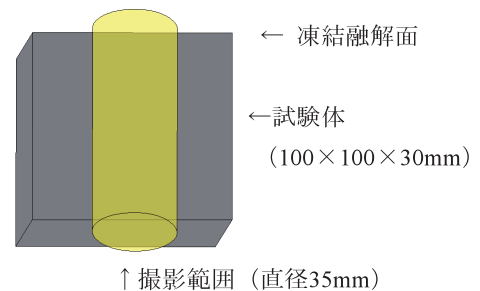


図5 凍結融解試験体の拡大撮影範囲模式図

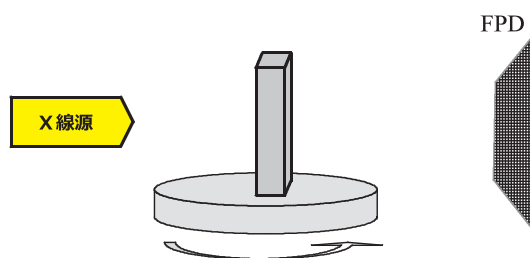


図2 コンクリート梁型試験体の全体撮影配置図

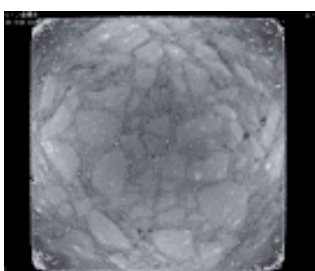


図3 コンクリート梁型試験体全体撮影の断層画像例

### 2.1.3 撮影画像からのひび割れ抽出方法

図6に、解析手順のフローチャートを示す。画像解析には、ラトックシステムエンジニアリング㈱のTRI/3D-BON-FCS64（以下、画像解析ソフト）を用いた。円柱試験体のX線CT撮影画像解析に当たって、バックグラウンドの除去後、画像の白黒反転を施し関心領域（周辺空気を含まないコンクリート）を指定した。関心領域は外側が白く、その内側が徐々に黒く表示されるカップリングアーチファクトを生じているため、全体を単一の閾値で二値化処理すると、中央部は過剰に周辺部は過小に空隙を抽出することになる。そこで、対象画像の関心領域を中央部と円環状の周辺部に分割し、それぞれの領域において最適な輝度値を閾値として設定し空隙を検出した。

図7に、円柱試験体全体撮影時の断層画像例を、図8に、図7の中央を通る線分における輝度値のラインプロファイル例を示す。コントラストと鮮明さのバランスのとれた画像が得られているが、わずかにカップリングアーチファクトが生じ、試験体中央部と外周部において画像の平均輝度値が1000/

65535ほど変化することが明らかとなった。この平均輝度値の差によるひび割れ抽出の誤差を解消するため、関心領域を中央部と周辺部に分割して再合成することとした。図7と図8に点線でその境界を示した。中央部とする範囲は、図8のラインプロファイルから直径60mmとし、それぞれの領域において最適な輝度値の閾値を設定して空隙を抽出し、後に2つの関心領域の空隙を合成した。

図9に、撮影空間全体の輝度値ヒストグラムの一例を示す。2つのピークは、左がサンプル周辺の空気に、右がコンクリートに帰属しており、空隙に帰属する輝度値はコンクリートのピークにも含まれていることがわかった。

空隙のみを選択できるように輝度値の閾値を設定し、二値化処理を行い空隙を検出した。図10にコンクリートを関心領域に指定した輝度値ヒストグラム（灰色）と、コンクリートにおける関心領域を中央部（細点線）と周辺部（1点鎖線）に分割することにより得られるヒストグラムを示す。垂線は、関心領域を分割して得られたそれぞれの閾値である。関心領域をコンクリートに限定した場合の最低輝度値は、図9における左ピークと右ピーク間の最も頻度が小さい輝度値とほぼ同一で、約16300であった。最適な閾値は、コンクリートの最低輝度値と最頻度輝度値を二等分する値となり、中央部は約21000、周辺部は約22000であった。この値は、測定環境及び試験体状態により変動があるため、ひび割れの抽出漏れがないように微調整を行った。

検出した空隙は、輝度値ではひび割れと気泡に分別できないため、空隙の形状を回転楕円体で近似し、長軸と短軸の比が2より小さいすなわち球形に近い空隙を気泡と見なして分離することにより、ひび割れのみを抽出した。このようにひび割れを抽出したそれぞれの関心領域の3次元データを合成し全体のひび割れを抽出した。

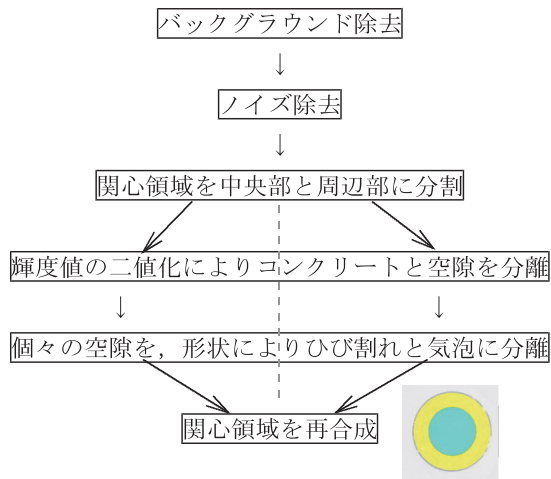


図6 解析手順のフローチャート

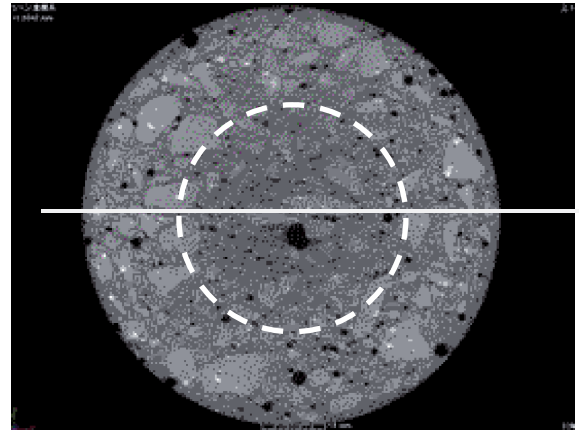


図7 円柱試験体のCT断層画像例  
(カッピングによりわずかに中央が暗い)

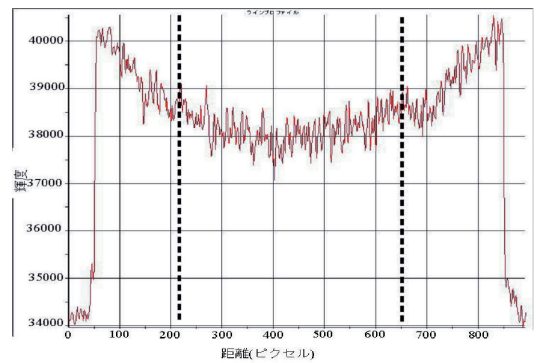


図8 図6の中央線分における輝度ラインプロファイル  
および領域分割位置

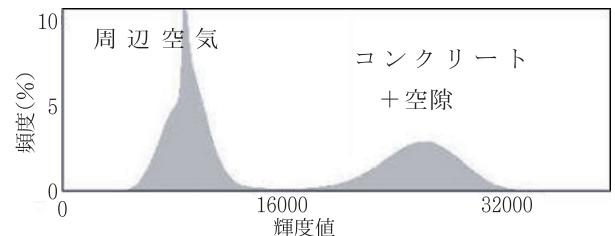


図9 撮影空間全体の輝度値ヒストグラム例

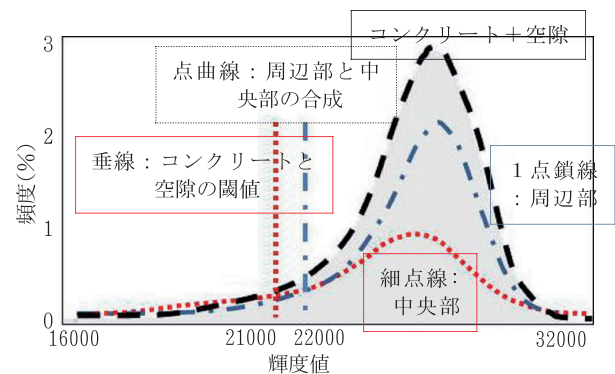


図10 関心領域の輝度値ヒストグラムと  
分割による空隙分離輝度値

### 2.1.4 抽出したひび割れの定量性の検証

コンクリートのX線CT画像から抽出したひび割れについては開口幅や体積率等のデータが得られるが、それらの定量性の検証が必要である。そこで、

- a) 検出可能なひび割れの最小開口幅の検証
  - b) 超音波伝播速度比とX線CTによるひび割れ体積率との比較
  - c) 室内凍結融解試験体を用いたひび割れの抽出を検討した。
- a) 最小開口幅

X線CTは解像度の限界があるため、抽出可能なひび割れの最小開口幅の検証が必要である。そこで、X線吸収係数がコンクリートより小さく、一定の厚みを持ち入手が容易なプラスチックフィルムを擬似ひび割れとして用いた。円柱試験体打設の際に中央付近に直径50mm、厚さ0.080, 0.100, 0.150, 0.200mmのフィルムをあらかじめ埋入した試験体を作製し、X線CTで抽出可能なひび割れの最小開口幅を検証した。

図11に、擬似ひび割れの配置模式図を示す。撮影条件は、金属フィルターとして1.5mmの銅板を設置し、X線管電圧199kV、管電流値400 $\mu$ A、SDD800mm、SRD420mm、ビュー数3600枚、1枚あたりの露光時間は250msec、ボックスサイズは0.100mmである。

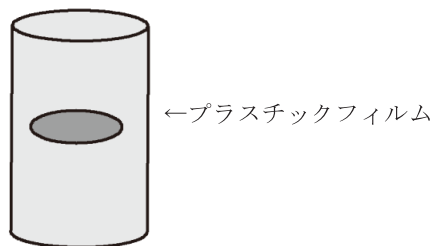


図 11 擬似ひび割れ配置模式図

#### b) 超音波伝播速度と試料中のひび割れ体積率

X線CTで抽出したひび割れ体積率が全体のひび割れ量を反映しているかを検証するために、圧縮荷前後の超音波伝播速度比とX線CTで抽出したひび割れ体積率との相関関係を調べた。超音波伝播速度比のデータは、中村ら<sup>8)</sup>によって、荷重直角方向に試験体上端より20mm間隔で9測線の透過法による超音波伝播速度の測定（振動数54kHz、センサー径25mm）から得られた。

図12に、超音波伝播速度の測定概略図を示す。あらかじめ超音波伝播速度を測定した円柱試験体に一軸圧縮最大応力(32.6N/mm<sup>2</sup>)を1回荷重しひび割れを導入した。荷重後の超音波伝播速度を測定し、荷重垂直方向に約20mm間隔で切断した試験体をX線CT撮影した。X線CTによるひび割れ体積率は、式(2)によって算出した。

$$R_v = V_c / V_s \times 100 \quad \dots(2)$$

$R_v$ : ひび割れ体積率(vol%)

$V_c$ : X線CT画像から抽出した全ひび割れ体積(mm<sup>3</sup>)

$V_s$ : X線CTが算出した試験体の体積(mm<sup>3</sup>)

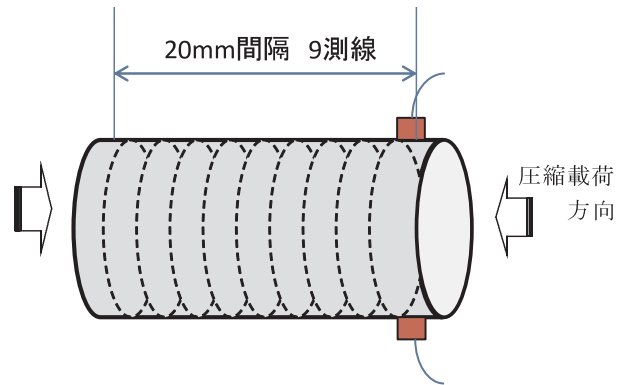


図 12 超音波測定位置

#### c) 室内凍結融解試験体のひび割れの抽出

実環境を模した一面吸水凍結融解室内促進試験法(CIF試験法)により、繰り返し凍結融解で劣化させた梁型試験体を用いて、表層からのひび割れ浸入の検出を調査した。

図13に、CIF試験法の模式図を示す。図のような下面吸水状態で最高温度+20℃を1時間保持、最低温度-20℃を3時間保持、温度勾配±10K/hrで1日2サイクルの一面凍結融解試験を1100サイクル繰り返した。

X線CT撮影画像から抽出したひび割れの評価は、凍結融解面から所定の距離における断面のひび割れ面積率を、式(3)によって算出した。

$$R_a = A_c / A_s \quad \dots(3)$$

$R_a$ : 断面のひび割れ面積率(%)

$A_c$ : X線CT画像から抽出したひび割れ面積(mm<sup>2</sup>)

$A_s$ : X線CTが算出した試験体の断面積(mm<sup>2</sup>)

断面の顕微鏡観察によるひび割れ密度と比較しひび割れ面積率の妥当性を検証した。

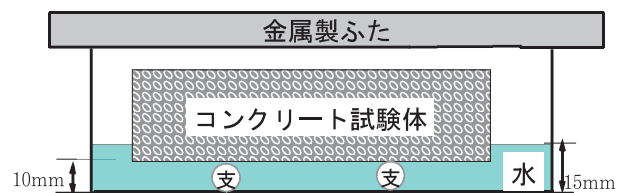


図 13 凍結融解試験模式図

## 2.2 EPMAによる低濃度塩素分析評価技術の開発

### 2.2.1 低濃度塩素の検量線作成用標準試料

一般に、低濃度域を精度良く面分析するためには、実試験体に即した成分濃度の標準試料を用いた検量線が必要である。塩素濃度の異なる4水準の塩素濃度で標準試料を作製した。図14に、作製した標準試料の外観を示す。認証標準物質の普通ポルトランドセメントに対し、配合後の塩素濃度が0.02,

0.1, 0.5, 1.0mass%となるように塩化ナトリウム水溶液及び蒸留水を添加・混練後、内径15mmの塩化ビニルパイプに充填硬化させてセメントペースト硬化体を作製した。続いて、内径43mmの型枠に設置後、塩素を含まないエポキシ樹脂で充填し、樹脂硬化後、高さ約10mmに切断して端面を研磨することにより標準試料を作製した。試料研磨は、土木学会規準<sup>4)</sup>を基に、SiC研磨紙を用いて無水研磨した。研磨の順序は、#240, #400, #800, #1200, #2000である。標準試料への導電性付与は、日本電子JEE-4Xを用いてカーボン蒸着により行った。本装置の到達圧力は $2.67 \times 10^{-4}$ Pa、カーボンロッド電圧は25Vで一定である。

検量線作成におけるEPMA分析条件は、土木学会規準<sup>4)</sup>に準拠し、加速電圧：15kV、照射電流： $1 \times 10^{-7}$ A、プローブ径：50 $\mu$ m、測定時間：40ms、分光結晶：PETH 151.18mm、ピクセルサイズ：0.100 $\times$ 0.100mmの条件で、標準試料中央の10 $\times$ 10mmの領域を測定した。

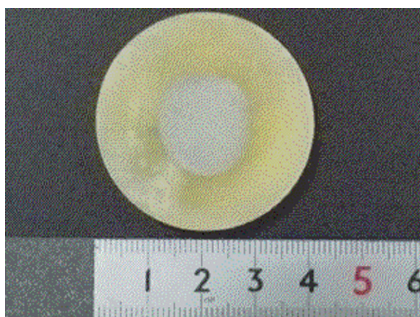


図14 NaClを添加したセメントペースト標準試料の外観

### 2.2.2 実構造物試験体による低濃度塩素の定量的評価

図15に、実環境において長年海水浸漬を受けた約50 $\times$ 50mmのコンクリート試験体の写真を示す。測定条件は検量線作成条件に揃え、ピクセルサイズ0.100 $\times$ 0.100mmの条件で、海水接触面を含む45 $\times$ 45mmを測定した。

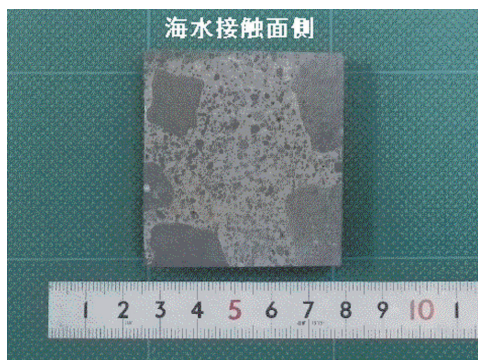


図15 海水浸漬を受けたコンクリートサンプル

## 3. 結果と考察

### 3.1 X線CTによるひび割れ等の評価技術の開発

#### 3.1.1 X線CTによる撮影条件の検討

X線CT撮影では、X線発生管電圧、X線発生管電流、試験体1回転あたりの撮影枚数（ビュー数）、撮影1枚あたりの露光時間の変化が、それぞれX線の透過力、画像のコントラスト、画像の鮮明さに影響を与える。

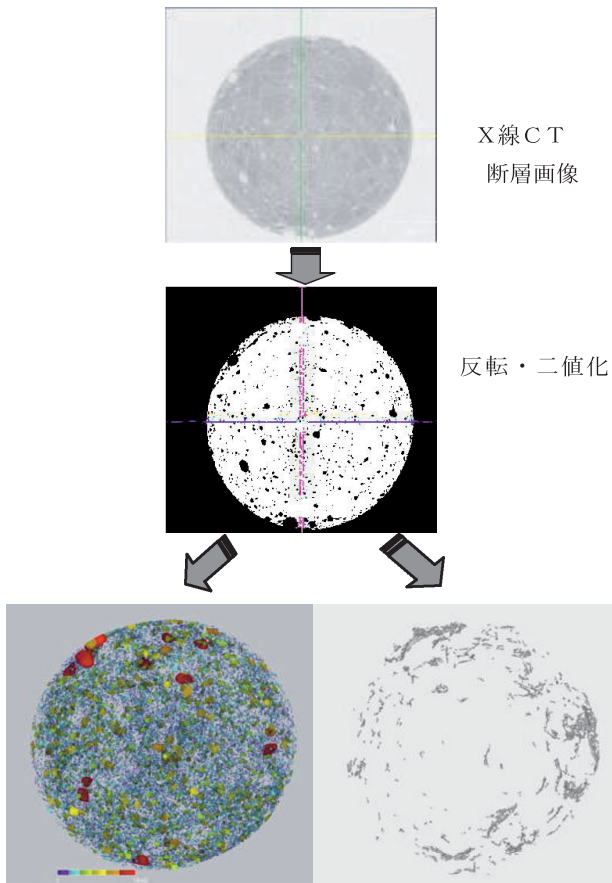
一般に、X線発生管電圧を高くすると、透過力の高いX線が発生するため、金属フィルターを装着してカップリングアーチファクトを低減することにより一定のコントラストの画像が得られる。一方、X線発生源のスポット径が大きくなるため、画像の鮮明さが低下する。これらを踏まえて様々な条件で円柱試験体撮影した結果、XT\_H225\_STにおいては金属フィルターとして2.0mmの銅板を設置し、X線管電圧200kV、管電流値580 $\mu$ A、SDD1000mm、SRD710mm、ビュー数を3000枚、1枚あたりの露光時間を500msec、ボクセルサイズは0.100mmに設定することで画像のコントラストと鮮明さのバランスがとれた撮影条件となることが確認された。同様にSMX-225CTにおける最適な撮影条件は、金属フィルターとして2.0mmの銅板を設置し、X線管電圧199kV、管電流値250 $\mu$ A、SDD600mm、SRD220mm、ビュー数3600枚、1枚あたりの露光時間は250msec、ボクセルサイズは0.100mmであった。

梁型試験体の撮影条件検討結果については、3.1.3項c)で述べる。

#### 3.1.2 撮影画像からのひび割れ抽出方法

図16に、一軸圧縮応力を载荷しひび割れを導入した円柱試験体のX線CT断層画像及び分離したひび割れと気泡の3次元透過画像の一例を示す。検出した空隙は、2.1.3項で述べた方法により気泡とひび割れに分離した。

気泡の3次元透過画像においては、連行気泡が試験体全体に均一に検出できていることから、気泡を含めた空隙は両方の領域において同等に検出できており、領域分割による空隙検出は円柱試験体のような単純形状試験体におけるカップリングの影響を除去するために有効な手段であると確認された。また、ひび割れの3次元透過画像において、試験体外周部は中央部と比較してひび割れが多いことが明らかとなった。一般的に、一軸圧縮したコンクリート試験体の場合、ひび割れは外周部から発生することから、その現象を捉えることができた。



分離した気泡と抽出したひび割れ（ともに立体透過画像）

図16 X線CT画像からのひび割れと気泡の分離例

### 3.1.3 抽出したひび割れの定量性評価

#### a) 最小開口幅

図17に、厚さ0.080, 0.100, 0.150, 0.200mmのプラスチックフィルムを埋入した円柱試験体の撮影画像から抽出した擬似ひび割れ形状を示す。プラスチックはコンクリートの半分以下の密度であるため、一定以上の厚みがあるフィルムについてはX線CTによる検出が可能であると予想された。厚さ0.080および0.100mmの擬似ひび割れの場合、画像上で目視による識別はできたが、画像解析ソフトによる気泡との分離が全く行えず擬似ひび割れ形状の抽出は困難であった。厚さ0.150mmの擬似ひび割れの場合、気泡との分離は不十分であるが形状を抽出することができた。厚さ0.200mmの擬似ひび割れの場合、気泡との分離は可能となり形状を抽出することができた。一般に、X線CTの検出限界は、装置や撮影条件による因子、対象物による因子、ソフトウェア技術による因子が考えられ、輪郭形状の高精度化が検討されている<sup>9)</sup>。特に、ソフトウェア技術における画像処理において、対象物とそれ以外を識別するための等値面を設定するために、少なくとも $2 \times 2 \times 2$ すなわち8ボクセル以上の分解能が必要となる。実際の評価では最小ボクセルサイズが0.100mmであることから上記の結果は妥当であると考えられる。

以上のことから、抽出可能なひび割れの最小開口幅は、ボクセルサイズの2倍であり、直径100mm円柱試験体の全体撮影においては、0.200mm以上のひび割れを定量的に抽出可能であることがわかった。

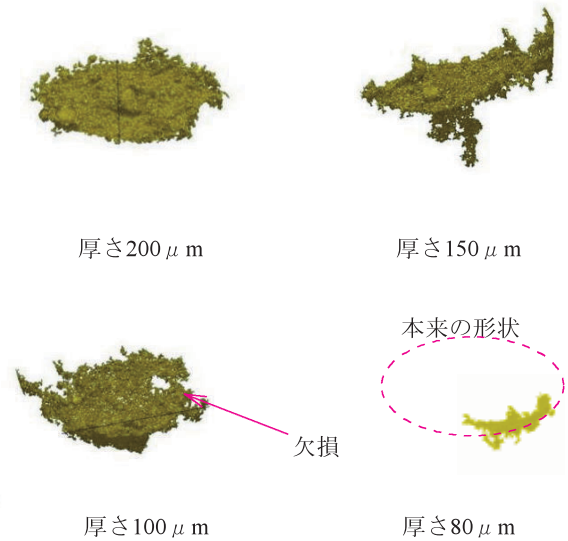


図17 ひび割れの検出下限開口幅の評価例

#### b) 超音波伝播速度と試料中のひび割れ率

図18に、切断した各スライスの超音波伝播速度比(細棒)とひび割れ体積率(太棒)を示す。

ひび割れ体積率は、約40mmの測定位置で最大値を示し、離れるにしたがって減少する傾向を示した。一方中村ら<sup>9)</sup>は、超音波伝播速度比が、同じく約40mmの測定位置で最小値を示し、表面におけるひび割れ発生位置と概ね一致していること及び離れるにしたがって増加する傾向を報告しており、同様の結果となった。

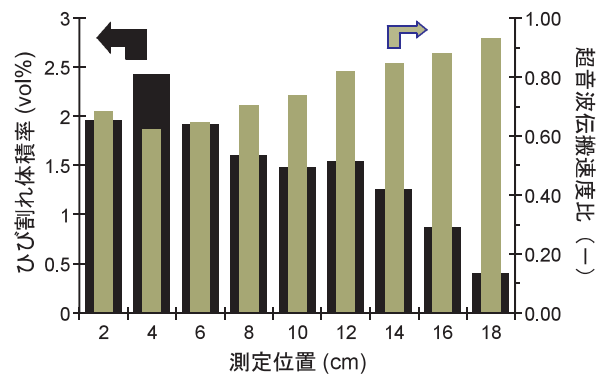


図18 サンプルの測定位置ごとにおけるひび割れ体積率及び超音波伝播速度比

図19に、X線CTによるひび割れ体積率と超音波伝播速度比の関係を示す。超音波伝播速度比とX線CTで抽出したひび割れ体積率に負の相関があり、 $R^2=0.88$ であった。

中村ら<sup>9)</sup>は、コンクリートの損傷度を直接的に評価する顕

微鏡を用いたひび割れ密度と載荷前後における超音波伝播速度の比（超音波伝播速度比）に負の相関があることを報告している。このことから、超音波法と同様にX線CTを用いてひび割れ体積率を評価することで、非破壊でコンクリートの内部損傷を評価できた。

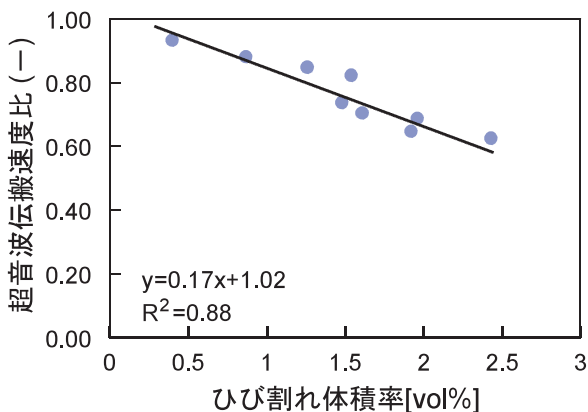


図 19 ひび割れ体積率の変化による超音波伝播速度比の影響

c) 凍結融解試験体におけるひび割れ抽出

図20に、凍結融解面からの距離とその距離における断面のひび割れ面積率の変化を、図21に、凍結融解面からの距離とその距離における断面の顕微鏡観察によるひび割れ密度の変化を示す。

凍結融解面から5mmの範囲におけるX線CTによるひび割れ面積率を詳細に検討すると、それより深い範囲のひび割れ面積率より小さい。一方、顕微鏡観察においては、凍結融解面から5mmの範囲におけるひび割れを検出できている。X線CTによる表面付近の測定では、画像を二値化して空隙を検出する段階においてコンクリートに囲まれた独立空隙を検出しているため、外表面に開口しているひび割れが検出不可能であることによると考えられる。一方、顕微鏡観察においては、そのような検出漏れがない。このことから、X線CTを用いて表面付近のひび割れを検出するためには、試験体あるいは画像解析過程のいずれかにおいて、ひび割れの開口部を閉塞させる処理が必要であることがわかった。

凍結融解面から5mmより深い領域については、X線CTのひび割れ面積率と顕微鏡によるひび割れ密度は、凍結融解面から離れるに従って漸減していた。一方向からの凍結融解繰り返し試験による凍結面から深さ方向にひび割れが減少する傾向を、X線CTを用いることにより捉えることが可能であることが確認された。

顕微鏡観察における90mmの位置でのひび割れ密度上昇については、谷口らは、1000サイクル（500日以上）の長期にわたるCIF試験であったため、上面に落下した結露水による影響が表れたと考察している<sup>10)</sup>。

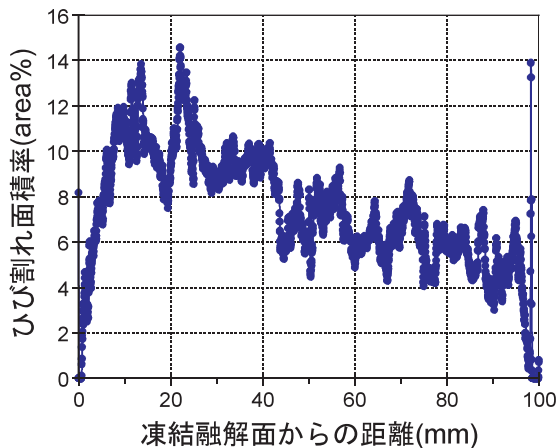


図 20 CIF 試験体におけるひび割れ面積率の変化

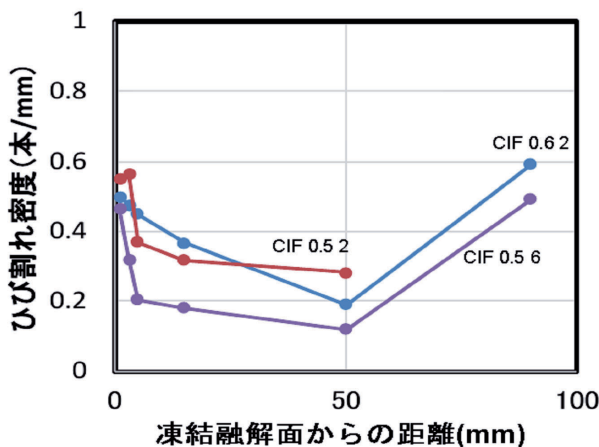


図 21 CIF 試験体におけるひび割れ密度の変化<sup>10)</sup>

3.2 EPMAによる低濃度塩素分析評価技術の開発

3.2.1 低濃度塩素検量線作成用標準試料

表1に作成した標準試料の一覧を示す。硬化、乾燥により塩素濃度が変動するため、同じ試料を JIS A 1154 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオン濃度の試験方法である電位差滴定法で湿式分析し、その結果を実濃度とした。湿式分析により確定した標準試料の塩化物イオン濃度は、0.022、0.143、0.636及び1.225mass%であった。

表 1 作成した標準試料 (mass%)

試料番号	配合塩素濃度	実濃度
1	0.02 (NaCl無添加)	0.022
2	0.1	0.143
3	0.5	0.636
4	1.0	1.225

3.2.2 分析試料の前処理方法（加工、導電処理等）の検討

図22に、カーボン蒸着試験用の試料を示す。図の左の試料は、薬包紙で4分の1ずつマスキングしながら、蒸着時間を7秒に固定し、右上から時計回りに、カーボンロッド電流



35A, 25A, 25A, 30Aの条件におけるカーボン蒸着を比較したものであり、右の試料は、同様なマスキングにより、右上から時計回りに、35A×10s, 30A×10s, 30A×5s, 35A×5sの条件におけるカーボン蒸着を比較したものである。

種々の条件を検討した結果、カーボン薄膜の厚さが10nm以下の場合、均一な膜厚にならず測定値がばらつき、30nm以上の場合、検出されるX線の強度が低下することが明らかとなった。

1.33×10<sup>-3</sup>Pa, カーボンロッド電圧25V, 電流35Aで10sの蒸着を行うことにより、安定的に約20nmのカーボン薄膜を蒸着することが可能となった。

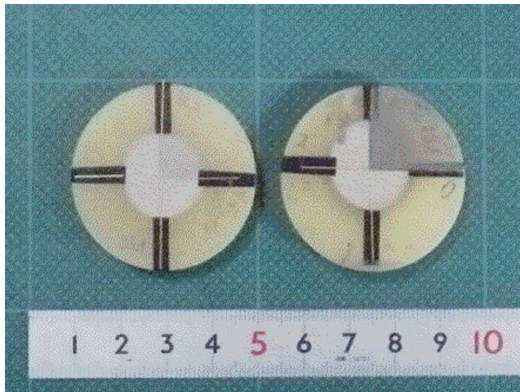


図22 カーボン蒸着条件を検討中の試料外観

### 3.2.3 標準試料による低濃度塩素用検量線の作成

図23に作成した検量線を示す。横軸が湿式分析により測定した標準試料の塩化物イオン濃度(mass%), 縦軸がEPMAによる標準サンプルの塩素に帰属するX線の強度平均値(count/msec/μA)である。得られた検量線は、R<sup>2</sup>=0.994と高い直線性を有しており、塩素濃度0.022~1.225mass%の範囲において適切にコンクリート中の塩素濃度分布を分析することが可能となった。

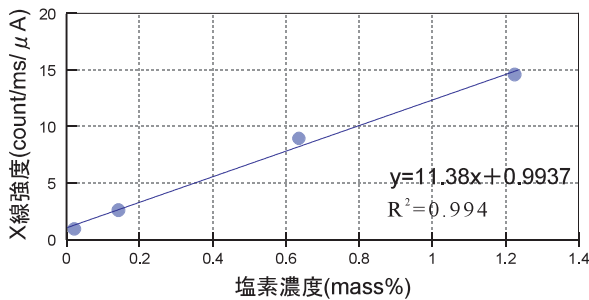


図23 作成した低濃度塩素の検量線

### 3.2.4 実構造物サンプルによる低濃度塩素の定量的評価

図24に、実環境において長年海水浸漬を受けた試験体を、装置内蔵の汎用検量線で計算した塩素分布の面分析結果を示す。測定条件は検量線作成条件に揃え、ピクセルサイズ: 0.100×0.100mmの条件で、海水接触面を含む45×45mmを

測定した。図の左側の分布図が塩素濃度を色分けで表示しており、色分けは、図の右側のカラーバーに示すとおり、黒→灰色→白の順に塩素濃度が高いことを示している。海水接触面は、分布図の上面であり、その直下から図の下方、すなわち内部に向かって徐々に塩素濃度が低下する傾向がうかがえる。図中の黒い領域は、骨材に対応しており塩素が検出されなかった上に、塩素濃度がマイナスにカウントされていた。一方、セメントマトリックスを示す着色部を詳細に検討したところ、濃く表示された範囲の塩素濃度はマイナスとなっており、汎用検量線は低濃度塩素の定量に適さないことが確認された。また、分布図全体の塩素濃度の平均値が-0.030mass%になった。

図25に、同じ測定データに対して、作成した低濃度塩素検量線で計算した面分析結果を示す。骨材以外のセメントマトリックスを示す着色部の塩素濃度はすべてプラスに補正され、分布図全体の塩素濃度の平均値が0.556mass%とプラスに転じていた。塩素濃度分布図中において、1.225mass%以上の範囲については検量線の範囲外であるため外挿の値となるが、作成した低濃度塩素検量線はおおむね適正な分析値を与える

海水接触面側

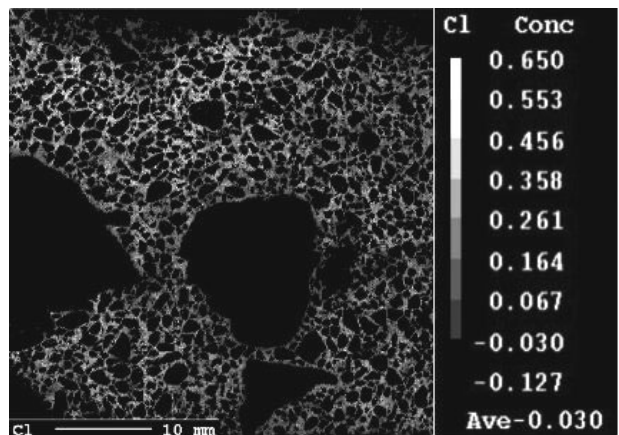


図24 汎用検量線による低濃度塩素の面分析結果

海水接触面側

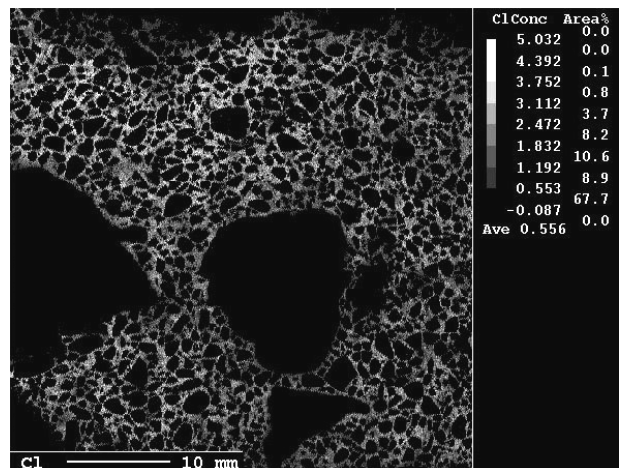


図25 低濃度塩素用検量線による面分析結果

ことができたと考えられる。なお、分布図中の骨材の塩素濃度がマイナスとなるのは、主な組成が標準試料と異なり検量線適用範囲外であるためと考えられる。

#### 4. まとめ

北海道を含む積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の凍害・塩害による劣化を定量的に評価するために、X線CTを用いた新たな非破壊検査技術とEPMAを用いた低濃度塩素の分析技術の開発を行い、次の結論が得られた。

- 1) 2種のX線CT装置で、円柱試験体の撮影条件を検討した結果、XH\_H225\_STを用いた最適撮影条件は、金属フィルターとして2.0mmの銅板を設置し、X線管電圧195kV、管電流値580 $\mu$ A、ビュー数を3000枚、1枚あたりの露光時間500msecであった。同様にSMX-225CTにおける最適撮影条件は、金属フィルターとして2.0mmの銅板を設置し、X線管電圧199kV、管電流値250 $\mu$ A、ビュー数3600枚、1枚あたりの露光時間250msecであった。試験体全体撮影時のボクセルサイズはともに0.100mmであった。
- 2) 撮影画像からのひび割れ抽出方法を検討した結果、対象画像の関心領域を中央と周辺部に分割することにより、カップリングアーチファクトの影響を除去できた。さらに、それぞれの領域において平均化処理によるノイズ除去を実施してから、輝度値の二値化によりコンクリートと空隙を分離し、個々の空隙を形状分離することにより、ひび割れのみを抽出可能となった。
- 3) 抽出可能なひび割れの最小開口幅を検討した結果、円柱試験体全体撮影においては、ボクセルサイズの2倍である0.200mm以上のひび割れを定量的に抽出可能であることがわかった。
- 4) X線CTで抽出したひび割れ体積率が全体のひび割れ量を反映しているかを検証するため、超音波伝播速度比を用いて検証した結果、ひび割れ体積率が大きくなるほど超音波伝播速度比は直線的に低下する傾向が認められた。
- 5) CIF試験法により、1方向からの凍結融解に伴うひび割れの侵入状況をX線CTである程度把握することができたが、凍結融解面に開口したひび割れを検出するためには、コンクリート表面付近の開口部についての処理が必要である。
- 6) 低濃度域塩素(0.022~1.22mass%)に対応した検量線を作成し、コンクリート内の塩素量を定量的かつ0.100mm単位で面分析することが可能となった。

#### 参考文献

- 1) 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, 日本建築学会構造系論文集, 第563号, pp.9-13, 2003.1
- 2) 杉山隆文, 志村和紀, 畠田大規: 高解像度型X線CTによるAEモルタル中の空隙構造の透視, 土木学会論文集E2, Vol.67, No.3, pp.351-360, 2011
- 3) 吉川昂純, 杉山隆文, Ivan sandi darma, 他: X線CTによる曲げひび割れ及び炭酸セシウム水溶液の移動の可視化, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, 2012
- 4) 土木学会: 土木学会規準「EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法(案)(JSCE-G 574-2005)」の制定, 土木学会論文集E, vol.62, No.1, pp.246-259, 2006.2
- 5) (一財)日本規格協会: JISハンドブック 10 生コンクリート, 2008
- 6) JIS B 7442産業用X線CT装置-用語, 2013
- 7) 紋川 亮, 中川朋恵, 金城康人, 他: X線CT画像計測技術による上流技術支援システムの構築, 東京都立産業技術研究センター研究報告, 第7号, pp.26-29, 2012
- 8) 中村拓郎, 谷口 円: 繰り返し載荷履歴を受けたコンクリートの微細ひび割れと力学特性, コンクリート工学年次論文集, vol.38, No.1, pp.435-440, 2016
- 9) 金子 奨, 青木義満, 滝 克彦: 産業用X線CT画像の形状精度追求に関する考察(メディア工学), 映像情報メディア学会技術報告 31(14).2 p.17-20, 2007
- 10) 谷口円, 板橋孝至, 田中大之, 中村拓郎: 凍結融解作用による内部損傷の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No. 1, pp.863-868, 2019