

報告 凍結融解作用による内部損傷の評価

谷口 円^{*1}・板橋 孝至^{*2}・田中 大之^{*3}・中村 拓郎^{*4}

要旨: 本研究では、コンクリートの凍結融解作用による内部損傷の分布を微細ひび割れの観察により評価するとともに産業用 X 線 CT による評価の可能性を検討した。水分の供給条件の異なる凍結融解作用を受けた試験体内部のひび割れ分布を断面の顕微鏡観察により評価し、表層近傍でひび割れが多いことを明らかにした。力学的手法により損傷を受けたコンクリートの X 線 CT 画像と市販ソフトによるひび割れ評価手法を検討し、100φ円柱試験体の圧縮载荷による損傷を認識可能な CT の撮影条件を明らかにした。その手法を適用し、促進凍結融解による損傷を受けたコンクリート試験体の内部のひび割れ分布評価を行った。

キーワード: 凍害, 内部損傷, 微細ひび割れ, 顕微鏡, X 線 CT, 深さ方向

1. はじめに

コンクリートは多孔体であり、寒冷地においては吸水と同時に凍結融解作用を受けることによる組織破壊が生じる。この凍害現象のメカニズムが完全に解明されたとはいえず、合理的なメンテナンスサイクルを構築するための劣化進行予測が十分に行えていない。実構造物では水分供給の多い表層から内部方向へと凍害劣化が進行し、表層からの距離でコンクリートの損傷程度が異なると推測される。しかしながら、任意断面での損傷程度の評価方法が十分に確立されていない。

これまでに筆者らは、凍害により発生する微細なひび割れを断面の顕微鏡観察で評価し、促進試験方法の相違によるコンクリート内部の微細ひび割れの分布に相違があることを明らかにした¹⁾。しかしながら、顕微鏡観察による手法は切断、研磨の前処理の影響、観察手間の膨大さ、個人差等の課題がある。一方、近年、産業用 X 線 CT²⁾によりコンクリート内部の空隙構造評価³⁾や損傷評価⁴⁾が行われている。サンプルの大きさ等の制約はあるが、前処理が不要であり、非破壊内部検査手法として期待される。

本研究では、凍結融解作用による内部損傷の分布を既往の微細ひび割れの観察により評価するとともに、産業用 X 線 CT による評価の可能性を検討した。はじめに力学的手法により損傷を受けたコンクリートについて、X 線 CT 画像と市販ソフトによるひび割れ評価手法を検討した。次にその手法により、促進凍結融解による損傷を受けたコンクリート試験体のひび割れ分布評価の可能性を検討した。

2. 産業用 X 線 CT によるひび割れ定量手法の検討

2.1 試験体撮影条件の検討

(1) 実験概要

X 線 CT 撮影では、X 線発生管電圧、電流、撮影枚数(ビュー数)、撮影 1 枚あたりの露光時間等を適切に設定することが必須である。そのため、コンクリート試験体のような大型で X 線吸収係数が比較的高いサンプルを撮影するための撮影条件について検討を行った。

使用したコンクリートは、旭川市内の JIS 認可工場で製造された呼び強度 24、スランプ 18cm、空気量 4.5% のレディミクストコンクリートとした。骨材の最大寸法は 25mm、W/C=59.8%であった。

作製したサンプルは、円柱試験体(100φ×200mm)、角柱試験体(100×100×400mm)とした。いずれも全体像の撮影可能性について検討し、角柱については、10、20、50、100mm でスライスしたものも検討した。

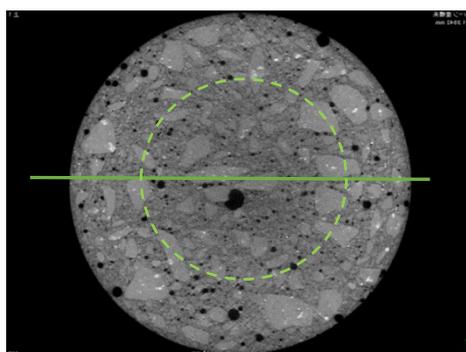
画像解析において優先される画像のコントラスト、鮮明さを評価の視点とし、X 線発生管電圧を 155~205kV、X 線発生管電流を 300~900μA、ビュー数 1000~3000 枚、1 ビューあたりの撮影時間を 256~2000msec、金属フィルターを 0~2mm 厚さと変化させ、適切な撮影条件を検討した。なお、X 線 CT 装置は、北海道内で利用可能な(株)島津製作所製 inspeXio SMX-225CT および(株)ニコンインステック製 XT_H225_ST を使用した。いずれも X 線発生管の最大管電圧は 225kV、X 線検出器としてフラットパネル型検出器(FPD)を搭載している。SMX-225CT に搭載されている FPD は一辺が 1024pixel/8 インチ(約 20cm)であるため、長尺試料は撮影範囲を分割して撮影した後で各画像を結合する必要がある。一方、XH_H225_ST に搭載されている FPD は一辺が 2048pixel/16 インチ(約 40cm)であるため、一括撮影が可能である。そのため、試験体の全体撮影は XT_H225_ST、

*1 地独) 北海道立総合研究機構 北方建築総合研究所 研究主幹 博士(工学) (正会員)

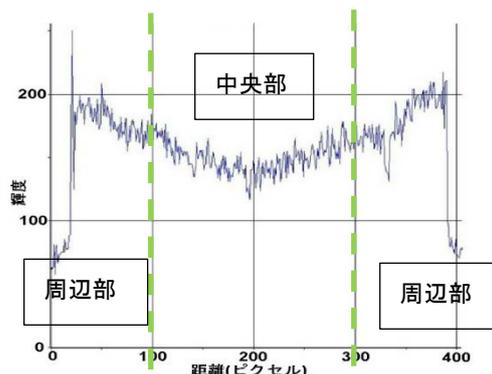
*2 地独) 北海道立総合研究機構 工業試験場 研究主査

*3 地独) 北海道立総合研究機構 工業試験場 製品技術部長

*4 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 研究員 博士(工学) (正会員)



断層画像



直径方向の輝度ラインプロファイル及び領域分割位置

図-1 円柱試験体全体撮影時のカップリングアーチファクト

拡大撮影は inspeXio SMX-225CT で行うこととした。

(2)円柱試験体の撮影条件の決定

金属板フィルターとして 2.0mm の銅板を設置し、X 線管電圧 200kV、管電流値 580 μ A、SDD(X 線焦点から X 線検出器までの距離)1000mm、SRD(X 線焦点からワークまでの距離)710mm、ビュー数を 3000 枚、1 枚あたりの露光時間を 500msec 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のとれた撮影条件となることが確認された。本条件における画素サイズは 100 μ m であった。

同様の検討を行い、SMX-225CT における撮影条件は、FPD 前に 2.0mm の銅板を設置し、X 線管電圧 199kV、管電流値 250 μ A、SDD600mm、SRD220mm、ビュー数 3600 枚、1 枚あたりの露光時間は 250msec であった。本条件における画素サイズは、100 μ m であった

図-1 に円柱試験体全体撮影時の断層画像例と輝度値のラインプロファイルを示す。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、サンプル中央と外周部で画像の平均輝度値が 1000/65535 程度変化していた。

(3)角柱試験体の撮影条件の決定

図-2 に角柱試験体全体撮影時のサンプル配置および断層画像例を示す。試験体全体撮影では、いずれの X 線 CT 装置でも鮮明かつ輝度値変動が小さい画像が得られなかった。そのため、試験体中央部をスライスしたサンプルで撮影し、適切な厚さについて検討した。

図-3 に角柱試験体スライスの X 線 CT 撮影配置および SMX-225CT を用いて上述条件で撮影した断層画像例を示す。スライス厚さを 20mm 程度とすることでアーチファクトの少ない画像が得られた。ところが、促進凍結融解試験体のひび割れは、画素サイズ 100 μ m の解像度では検出されなかった。凍結融解によるひび割れ幅が微細であるためと考えられる。そのため、骨材とペーストの両方含むことが可能な最小径 ϕ 35mm の範囲で拡大撮影を行うことで、ひび割れを検出した。撮影には SMX-225CT を用いて、撮影条件は、FPD 前に 1mm の銅版を

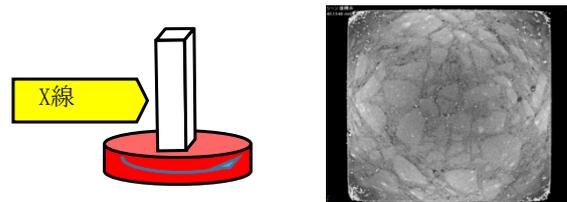


図-2 角柱試験体の全体撮影

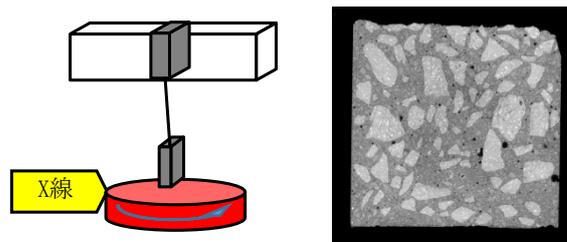


図-3 角柱試験体スライスサンプルの撮影

設置し、X 線発生管電圧 199kV、管電流値 200 μ A、SDD800mm、SRD97.5mm、ビュー数 3600 枚 1 枚あたりの露光時間 250msec とした。本条件における画素サイズは 35 μ m であった。

2.2 ひび割れの認識、定量手法の検討

(1)実験概要

既往の研究⁵⁾では、圧縮荷重によりひび割れを導入し、数 μ m 以上のひび割れの観察結果と超音波伝搬速度の関係を検討している。ここでは、既往の研究⁵⁾と同じ試験体で得られた結果と対比し、X 線 CT によるひび割れの認識、定量手法について検討を行った。使用したコンクリート、実験手法等の詳細は文献⁵⁾を参照されたい。

最大荷重まで荷重した試験体について、荷重の前後で試験体短軸方向に試験体上端より 2cm 間隔で 9 側線の透過法による超音波伝搬速度の測定(振動数 54kHz、センサー径 25mm)を行った。また、松村らの手法⁶⁾に準じてひび割れ観察を行った。計測後の試験体を 2cm きざみで切断、4、8、12、16cm の面を研磨、蛍光塗料を含浸し、観察面とした。ひび割れ密度は以下の式で算定した。

$$C_n = N/L \quad (1)$$

ここに、 C_n : ひび割れ密度(本/mm)、 N : 測線を横切る

ひび割れの総本数(本), L : 総測線長(mm)

なお、総測線長については、ASTM C457 リニアトラバース法⁷⁾における骨材最大寸法による側線長と測定面積の関係を準用し、2413 mm以上とした。

CT 画像の撮影は、顕微鏡観察を行った 100φ×20mm に切断した試験体を用いて、切断面が X 線照射方向に水平になるよう設置し、撮影を行った。CT 画像からのひび割れの解析には、ラトックシステムエンジニアリング(株)の TRI/3D-BON-FCS64 を用いた。

図-4 に X 線 CT 画像から抽出したひび割れの画像を示す。ひび割れの抽出は、バックグラウンド除去後、画像の白黒反転を施し、中心部(中心から半径 60mm の範囲)と周辺部に分割して行った。これは撮影画像にカップリングアーチファクトが認められたためである。空隙(気泡およびひび割れ)を抽出するための輝度値の閾値は、乾燥度合いや環境条件により撮影結果が変動するため、目視により判断した。得られた閾値は、中央部で平均 21000 程度、周辺部で平均 22000 程度とサンプルによる差は小さかった。空隙抽出後、2 つの領域を合成し、抽出した空隙からひび割れを抽出した。空隙の形状を回転楕円体で近似し、長軸と短軸の比が 2 より小さいものを気泡として除去した。

ひび割れ体積率は、次の式によって算出した。

$$V_V = V_C / V_S \quad (2)$$

ここに、 V_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(mm³), V_S : X 線 CT で算出した試験体の体積(mm³)

(2)実験結果

図-5 に測定位置と X 線 CT によるひび割れ体積率、顕微鏡観察によるひび割れ密度の関係を示す。測定位置とひび割れ体積率、ひび割れ密度はばらつきがあるものの、いずれも 4 cm を頂点に測定位置が上面より離れるにつれ小さくなる傾向が認められた。

図-6 に超音波伝搬速度比とひび割れ体積率の関係を示す。超音波伝搬速度比は、同位置で圧縮荷前計測した超音波伝搬速度に対する圧縮荷後に得られた値の比で表した。ひび割れ体積率が大きくなるほど超音波伝搬速度比は直線的に低下する傾向が認められた。

以上から、X 線 CT 手法にてコンクリート内部の損傷を定量的に評価できると考えた。

3. 促進凍結融解試験によるコンクリート内部の微細ひび割れ

3.1 実験概要

(1)使用材料と調合

表-1 にコンクリートの調合とフレッシュコンクリートの試験結果を合わせて示す。使用セメントは普通ポル

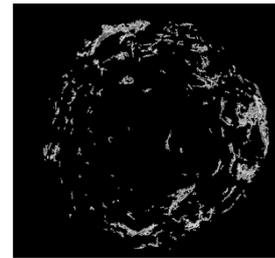


図-4 X 線 CT 断層画像から抽出したひび割れ画像の例

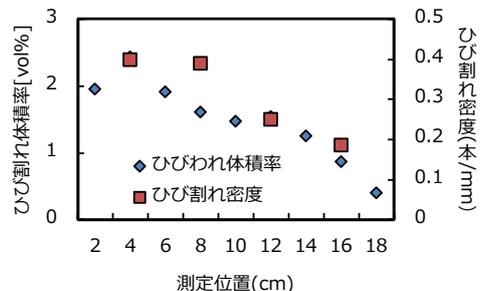


図-5 ひび割れ体積率、ひび割れ密度

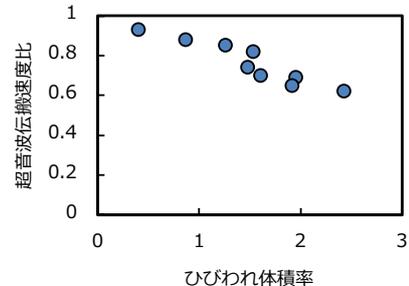


図-6 超音波伝搬速度比とひび割れ体積率

トランドセメント, AE 減水剤は標準形 I 種を使用した。細骨材は比布産陸砂, 粗骨材は当麻産碎石とした。

(2)実験方法

作製したコンクリートは、水セメント比 0.4, 0.5, 0.6, 目標空気量 2.0% とした 3 種類と水セメント比 0.5 で目標空気量 3.5%, 6.0% の 2 種類を加えた計 5 種類とした。コンクリートは打設後すぐに 20°C の恒温室で養生し、材齢 1 日で脱型した。脱型した試験体は、20°C 水槽にて水中養生を行った。作製した試験体は凍結融解試験用に 100×100×400mm の角柱試験体、圧縮強度試験用に φ 100×200mm の円柱試験体とした。

試験項目は、促進凍結融解試験と圧縮強度試験を実施した。促進凍結融解試験条件は 2 種類とし、JISA1148A 法に準じた条件の凍結融解試験(以下、ASIM 法とする)、CIF 試験として RILEM TC 176-IDC: Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test - Reference method and alternative methods A and B に準じた条件(以下、CIF 法とする)とした。これらの 2 種類の試験を、同一形状の試験体(100 角角柱)それぞれ 2 本ずつで行った。なお、試験開始までの養生は、水中養生終了の材齢を 28 日とし、ASTM 法は養生終了直後から試験を開始、CIF 法は

表-1 コンクリートの調合とフレッシュ性状

水セメント比	目標空気量	かさ容積 (m/m ³)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				AE減水剤 (C×%)	消泡剤 (混和剤×%)	AE剤 (C×%)	空気量 (%)	スラブ cm	練上がり温度 °C
				W	C	S	G						
0.5	2.0	0.60	47.8	185	370	835	1020	1.5	0.05	-	1.5	16.5	25.0
0.5	6.0	0.60	45.2	180	360	753	1020	1.5	0.05	0.008	4.9	19.6	25.0
0.5	3.5	0.60	46.8	183	366	805	1020	1.5	0.05	0.002	3.2	17.2	25.5
0.6	2.0	0.60	49.2	185	308	886	1020	1.5	0.05	-	2.5	16.0	26.0
0.4	2.0	0.60	45.4	185	463	760	1020	1.0	-	-	2.5	18.1	26.0

4週間20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室にて乾燥させたのち、試験に供した。CIF法の試験面は、打設時の底面とした。試験の終了はサイクル数で決定せず、相対動弾性係数が60、30%になるまでとした。

測定項目は、たわみ振動による一次共鳴周波数、底面を0とした深さ方向(12.5, 30, 50, 70, 87.5mm)の超音波伝搬速度、試験体の質量、CIF法ではスケール量の測定も行った。たわみ振動の一次共鳴周波数からは、JISA1148に基づき、相対動弾性係数を算定した。なお、CIF試験の試験体では、側面をプチルテープ等で防水する。そのため、予備実験および試験前後にテープの有無がたわみ振動の一時共鳴周波数に与える影響を検討し、値に相違ないことを確認した。

促進試験終了後の劣化試験体について、顕微鏡観察による微細ひび割れ計測、X線CTによるひび割れ評価を行った。試験終了後のサンプルから、顕微鏡観察用(100×100×100mmサンプル)とX線CT撮影用(100×100×20mmサンプル)を切り出した。図-7にサンプルの切断位置を示す。X線CT画像によるひび割れの評価はCIF法による劣化サンプルについてのみ実施した。

顕微鏡観察用のサンプルは、切り出した後、観察面に蛍光塗料を混合したエポキシ樹脂を真空含浸し、硬化させた。硬化後、表層からおおよそ1, 3, 5, 15, 50, 90mmの位置で切断または研磨により断面を露出した。試験面は、試験片を#80, #350, #800の研磨版および9μmのダイヤモンドスプレーを用いて研磨した。研磨後、超

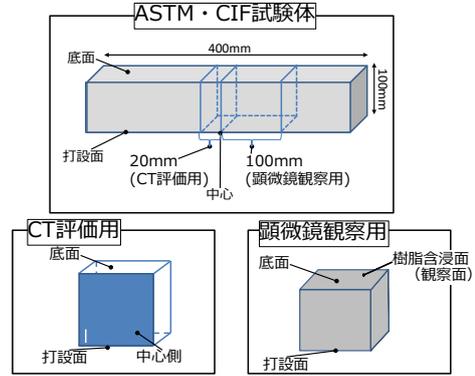


図-7 サンプルの切断位置

音波洗浄、乾燥させた後、水性蛍光塗料を塗布、乾燥させ、ひび割れに浸透した以外の塗料を研磨剤で除去した。その後、2.2と同様の手法でひび割れ密度(本/mm)を算出した。

X線CTによる撮影は、試験体を切断し形状を整えた後、常温で乾燥させを行った。スライスしたサンプルの凍結融解面から反対面までを含む中央部の35mmの範囲について拡大撮影し、ひび割れ量の評価を深さ方向に面積率で行った。ひび割れ面積率の算定式を以下に示す。

$$A_a = A_c / A_{st} \quad (3)$$

ここに、 A_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(mm²), A_{st} :X線CTが算出した深さ t での試験体の断面積(mm²)

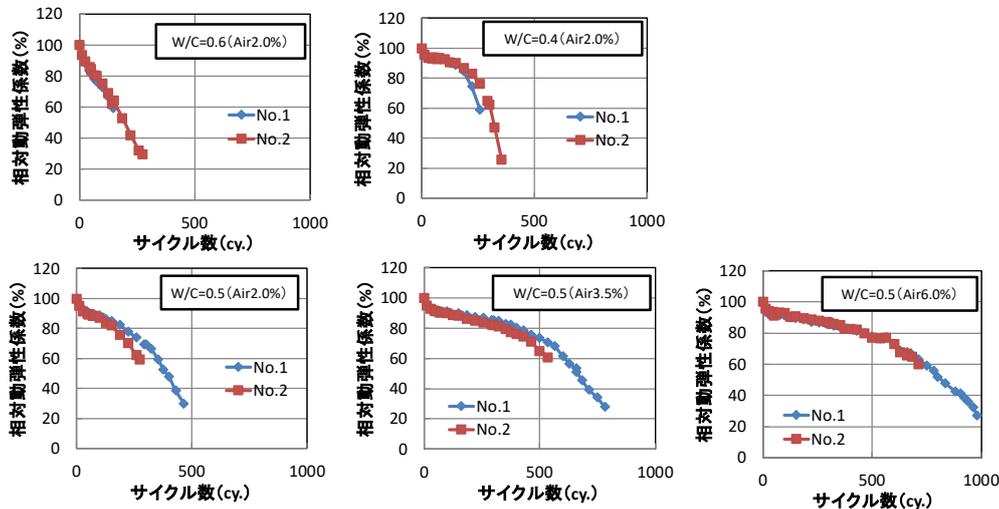


図-8 ASTM法による相対動弾性係数の変化

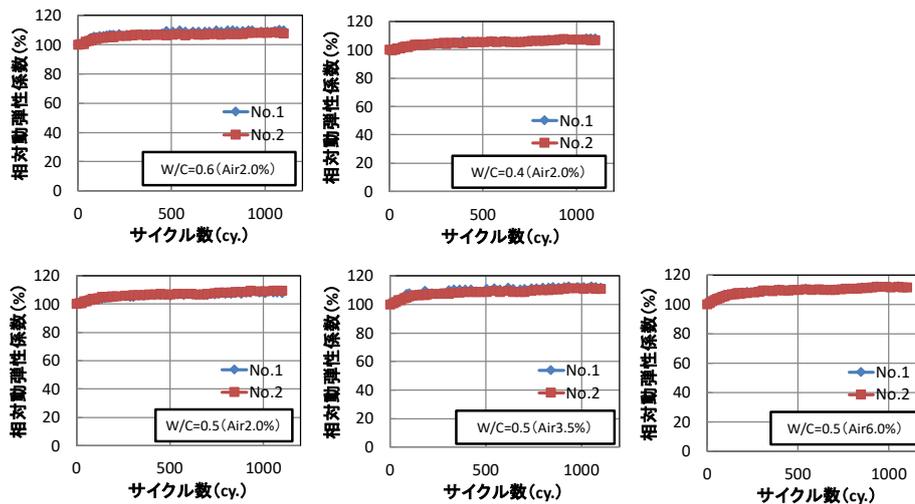


図-9 CIF法による相対動弾性係数の変化

3.2 実験結果

(1) 促進試験

図-8にASTM法による相対動弾性係数の変化を示す。凍結融解試験の総試験サイクル数は、X線CT、微細ひび割れ観察による損傷評価のため、相対動弾性係数で60、30%になるまでとした。そのため、最も長いもので981サイクルまでの計測を行った。

ASTM法による試験では、水セメント比の高いもので相対動弾性係数の低下が早かった。水セメント比の最も低いものでは、あるところから顕著に低下した。空気量を増加させるにつれ、相対動弾性係数の低下が遅くなった。これらの結果は既往の結果と相違ないものであった。

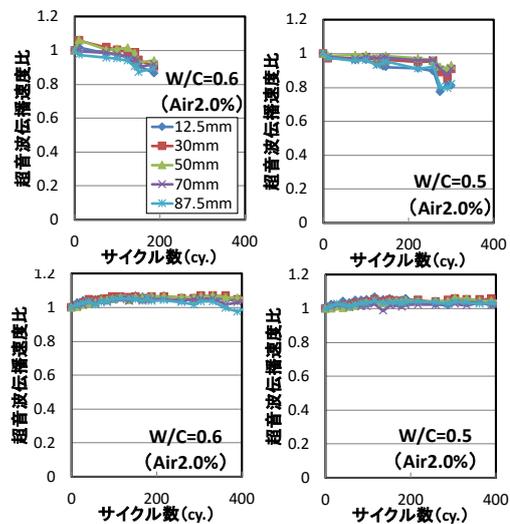
図-9にCIF法による相対動弾性係数の変化を示す。CIF法による試験では、水セメント比、空気量にかかわらず、すべての試験体で相対動弾性係数の低下が認められなかった。そのため、想定した劣化状況とはならなかったが、1100サイクル(550日)で試験を打ち切った。

図-10に2種の凍結融解試験での超音波伝搬速度比の変化を水セメント比0.5、0.6の空気量2%のもの(ASTMは相対動弾性60%まで低下させたもの)について示す。速度比は試験開始時に対する各サイクル時の値の比で表した。ASTM法では、いずれも速度比はサイクルが進むとある時期を境にと急激に低下しており、相対動弾性係数の低下傾向とは少し異なる結果となった。また、測定位置による速度比の違いは認められなかった。CIF法では、いずれも速度比は低下しなかった。

(2) 内部損傷の評価

図-11に底面から内部への深さとひび割れ密度の関係の一例を示す。凡例のうち、ASTM、CIFとあるのは試験法、0.5、0.6とあるのは水セメント比、2は空気量、最後の数字は相対動弾性係数を示す。

相対動弾性係数の目標を30、60%としたことは、事前検討の結果をふまえたもので、CTによる微細ひび割れの認識が相対動弾性係数の高い範囲80%以上では難しいと



上段：ASTM法、下段CIF法

図-10 超音波伝搬速度比の変化

考えられたことによる。一方で、ひび割れ観察結果では、高いひび割れ密度となることが予想された。

ASTM法では、表層部で0.6~0.8程度とひび割れ密度が高く、内部で減少した。水セメント比0.6の2%、相対動弾性係数58.1%では深さ90mmを計測しており、90mmでひび割れ密度は再度0.8程度の高い値を示した。また、内部のひび割れ密度をみると、相対動弾性60%のものでは、0.4~0.6となる一方、より損傷しているはずの相対動弾性係数30%で0.3~0.4となった。これは、ひび割れの本数のみを評価対象としているためと考えられる。

CIF法では、表層部5mm程度までで0.4~0.6とひび割れ密度が高く、10mmから内部についてはひび割れ密度が大きく変わらず、0.2~0.3となっていた。損傷を受けていないと考えられる中心部でも、前処理等によるひび割れが観察されると考えられる。また、90mmの位置では、ひび割れ密度が上昇していた。このことは、CIF法では、底面から水分が移動してくるが、上面には結露水が落下することが避けられない。特に本研究では試験期間が1000サイクル(500日以上)の長期間にわたるため、

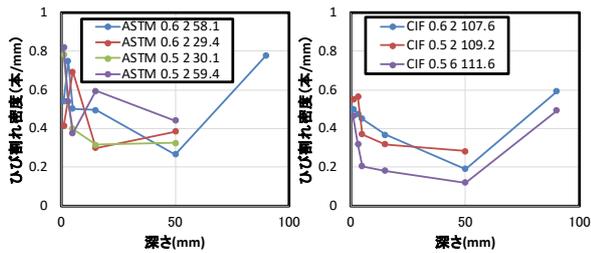


図-11 深さ方向とひび割れ密度 (顕微鏡)

これらの影響が表れたと考える。

ASTM 法と CIF 法によるひび割れ密度を比較すると、水分に接する表層付近 5mm 程度までは大差ない。10~50mm では、ASTM 法では 0.3~0.5 程度に対し、CIF 法はひび割れ密度が 0.2~0.3 程度となった。90mm ではサンプル数が少ないものの、ASTM 法では 0.8 本程度、CIF 法では 0.6 本程度となった。

顕微鏡観察による損傷度評価では、ASTM 法、CIF 法試験後の相対動弾性係数の値が大きく異なるサンプルで深さ方向とひび割れ密度の関係に顕著な差が認められなかった。また、CIF 法ではたわみ振動の一次共鳴周波数が変化していないが、ひび割れ密度は増加する傾向が認められた。理由については、今後の検討を要する。

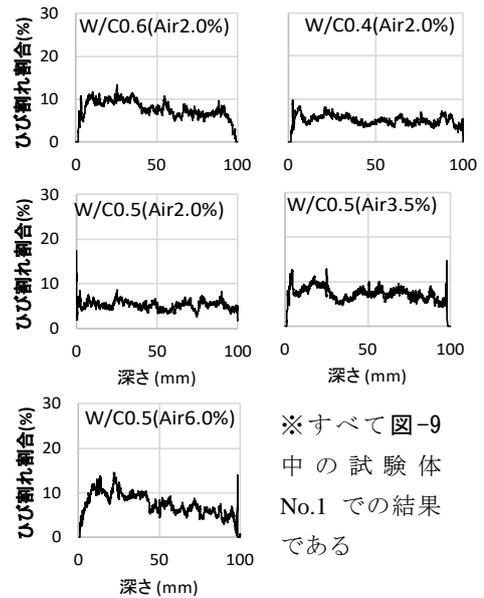
図-12 に CIF 法試験後の試験体での底面から内部への深さと X 線 CT による撮影画像から求めたひび割れ面積率の関係を示す。X 線 CT 画像から求めたひび割れ面積率は、5~10%程度の範囲であった。水セメント比 0.6 のもの、水セメント比 0.5 で空気量 3.5, 6.0%のもので、10%程度の割合であった。それ以外の 2 種類については、5%程度であった。10%程度のものでは、表層部から深さ 50mm までの範囲で幾分ひび割れ割合が高い傾向が認められた。5%程度のものでは、表層付近でひび割れ割合が高いものがあった。いずれにおいても、ひび割れ割合の分布に表層~内部において、顕著な変化があるとはいえない。この傾向は、顕微鏡観察による結果と異なる傾向であった。この違いは、X 線 CT によるひび割れ検出が画素サイズのおよそ 2 倍以上の開口幅を持つひび割れに限定されていることに起因すると考えられる。

以上から、今回の X 線 CT による計測結果は相対動弾性係数を変化させたサンプル等での比較を行っていないが、顕微鏡観察の結果と X 線 CT による結果は一致しなかった。引き続き検討を行う予定である。

4. まとめ

本研究の範囲で得られた結果を以下にまとめる。

- ・ 円柱試験体の圧縮荷重による損傷を認識可能な X 線 CT の撮影条件を明らかにした。
- ・ 水分の供給条件の異なる凍結融解作用を受けた試



※すべて図-9
中の試験体
No.1 の結果
である

図-12 深さ方向とひび割れ面積率 (X 線 CT)

験体内部のひび割れ分布を断面の顕微鏡観察により評価し、表層近傍でひび割れが多いことを明らかにした。

- ・ 顕微鏡観察の結果と X 線 CT による結果は一致しなかった。

参考文献

- 1) 谷口円, 伊庭千恵美, 桂修: 促進凍結融解によるコンクリート内部の微細ひび割れ分布, 日本建築学会学術講演梗概集 A-1, 2011
- 2) 松浦滋男, 藤井正司: 産業用 X 線 CT スキャナ, 日本複合材料学会誌, pp.2-7, 12, 1, 1986
- 3) 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 (材料・コンクリート構造), 2011, 67 巻, 3 号, p. 351-360
- 4) たとえば, Yuzo Obara, Izumi Tanikura, Jahe Jung, Ren Shintani, Shinya Watanabe: Evaluation of Micro-damage of Concrete Specimens under Cyclic Uniaxial Loading by X-ray CT Method, Journal of Advanced Concrete Technology, 2016, Volume 14, Issue 8, Pages 433-443
- 5) 中村拓郎, 谷口円: 繰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, 38 巻, 1 号, p. 435-440, 2016
- 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, 日本建築学会構造系論文集, 2003, 68 巻, 563 号, p. 9-13
- 7) ASTM C457/C457M-10a: Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete