

論文 X線CT画像を用いた内部変形計測による供試体端面からの凍害劣化進行評価の検討

麓 隆行¹・仲松 弥隼²・高田 良章³・村田 隆男⁴

要旨: 実際の構造物で凍結融解により生じる劣化の深さ方向への進行速度を計測するため、端面から冷却し、温度勾配をつけた凍結融解を繰り返したモルタルおよびコンクリート供試体内部の凍結時の内部膨張範囲を3次元画像相関法により推定することを試みた。その結果、室内実験で端面から冷却されたモルタル供試体内部での体積膨張範囲や劣化進行を可視化でき、劣化進行速度も推定できた。また、砕石が含まれると、粗骨材表面や粗骨材と粗骨材の間でも体積膨張ひずみが大きくなることが示された。

キーワード: 凍結融解, X線CT, 画像相関法, 体積ひずみ, 劣化進行速度

1. はじめに

凍害では、氷点下のコンクリート内部で生じる自由水の凍結膨張に起因した微細なひび割れが、凍結と融解の繰り返しにより増大して内部組織が緩み、強度や物質透過抵抗性が低下する。実構造物では表面から冷却されて内部へと温度勾配が生じる。コンクリート内部の自由水の凍結温度はイオン濃度や細孔径により変わるため、同じ箇所でも温度が低いほど凍結水量が増えると考えられる。その結果、表面ほど凍結量が多くなり、それによる膨張圧の一部は未凍結水を通じて内部へと伝播し、凍結融解の繰り返して劣化が内部へと進行すると考えられる。

実構造物の凍結融解による劣化進行に対する耐用年数の検討には、室内実験による基礎的な知見と実構造物での情報収集が重要となる。実構造物では、超音波伝播速度や蛍光樹脂による表面ひび割れの可視化などのコア調査手法が活用されている¹⁾が、多様な条件下で得られた情報の整理には時間がかかるなど課題もある。

室内実験では、JIS A 1148²⁾を用いた研究が多いが、実構造物よりも劣化条件が厳しく、供試体全体の劣化程度を判断するため、凍害による供試体内部の劣化分布の推定は難しい。超音波伝播速度¹⁾等の活用も考えられるが、局所的に脆弱な箇所の評価や詳細な劣化深さの把握は難しいと考えられる。そのため、表面からの内部へと凍結融解劣化が進む状況の再現や、供試体内部で局所的に劣化が生じる状況の評価する手法が必要だと考えられる。

著者らは、既往の研究で凍結による内部膨張範囲を、X線CT画像を用いた画像計測により約1mm単位で計測した³⁾。この手法を用いて端面から冷却された供試体内部の凍結膨張範囲を計測すれば、構造物表面からの劣化を模擬した劣化進行過程を推定できる可能性があると考え

えた。

そこで、本研究では、室内実験で端面から冷却された供試体内部への凍結膨張範囲の進行過程を、X線CT画像を用いた内部変形計測により計測できるか検討した。

本研究の目的を確認する対象として、モルタルとそれに砕石を混合したコンクリートに加え、再生粗骨材コンクリートも対象とした。これは、既往の研究で粗骨材表面の影響によりモルタルに比べてコンクリートの凍結融解抵抗性が低い⁴⁾こと、また吸水率が高い(旧モルタルの付着量が多い)再生粗骨材を用いたコンクリートほど、普通コンクリートより凍結融解抵抗性が低い⁵⁾ことが指摘されており、その基礎的検証も行うためである。

2. 実験概要

2.1 再生粗骨材

実験室で原コンクリートおよび原モルタルを製造、破碎して、再生粗骨材を模擬した粒子を製造した。

使用材料は、水道水、普通ポルトランドセメントC(密度3.16g/cm³)、高槻産硬質砂岩砕砂S1(表乾密度2.64g/cm³, 吸水率1.86%)、大分産石灰石砕砂S2(表乾密度2.69g/cm³, 吸水率0.59%)、高槻産硬質砂岩砕砂G1(表乾密度2.69g/cm³, 吸水率0.59%)および大分産石灰石砕砂G2(表乾密度2.70g/cm³, 吸水率0.33%)である。また、X線CT装置による撮影後の画像計測の精度改善のために細骨材体積の3割を銅スラグ細骨材(Cu)(密度3.47g/cm³, 吸水率0.84%)で置換した。表-1に配合、フレッシュ性状および破碎時の圧縮強度の結果を示す。混和剤には高機能タイプのAE減水剤(AE1)を添加した。強制2軸練りミキサで練り混ぜ、各々直径100mm×高さ200mmの供試体を40本作製した。翌日脱型後、48

*1 近畿大学 理工学部社会科環境工学科教授 博(工) (正会員)

*2 日本振興(株)

*3 (株)フローリック 技術本部コンクリート研究所 博(工) (正会員)

*4 大阪兵庫生コンクリート工業組合 (正会員)

表-1 原コンクリートおよび原モルタルの配合, フレッシュ性状および圧縮強度

種類	粗骨材 最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)								スランプ (cm)	空気量 (%)	破碎時の 圧縮強度 (N/mm ²)
				W	C	S1	S2	Cu	G1	G2	AE1			
原コンクリート	20	57	45.0	175	304	340	229	321	501	503	3.04	12.3	4.7	47.8
原モルタル	—	57	—	287	501	560	376	529	—	—	5.01	—	4.3	51.9

表-2 再生粗骨材の品質

原料	記号	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粒径判定 実積率(%)
原コンクリート	RCG	2.46	8.84	53.0
原モルタル	RMG	2.32	9.90	47.5

日間水中養生した。養生後に、それぞれを小型ジョークラッシュにより粒径約 20mm 以下に破碎し、4.75~16mm を木枠ふるいでふるい分け、原コンクリートから作製した再生粗骨材を RCG、原モルタルから作製した再生粗骨材を RMG とした。破碎時の原コンクリートの圧縮強度は 47.8 N/mm²、原モルタルの圧縮強度は 51.9 N/mm² だった。表-2 に製造した再生粗骨材の品質を示す。

2.2 供試体概要

コンクリートと、その配合から粗骨材を取り除いたモルタルの供試体を作製した。モルタルおよびコンクリートを作製する材料として、原コンクリートと同じ材料を用いた。AE 減水剤 (AE2) には先とは別の高機能タイプの AE 減水剤、消泡剤 (DF) にポリエーテル系の界面活性剤を使用した。また、2.1 節と同様の理由で、細骨材体積の 3 割を銅スラグ細骨材 (Cu) に置換した。

表-3 に使用した配合を示す。コンクリートの場合、コンクリート中の粗骨材容積を 397 L/m³ で一定とし、AE 減水剤は原液を C×0.5%、消泡剤は C×0.004% とした。

練混ぜは、10L のオムニミキサを用いて行った。モルタルの場合、練混ぜ直後に JIS R 5201 に準じて 15 回落下後のモルタルフローと JIS A 1116 を参考に直径 100mm、高さ 200mm のプラスチックモールドを用いて質量法により空気量を計測した。一方、コンクリートの場合、練混ぜ直後に JIS A 1101 に従ってスランプを計測し、空気量をモルタルと同様の方法で計測した。表-3 にフレッシュ性状の試験結果を示す。空気量は質量法で 0.1~0.6% とほぼ 0% になった。そのため、単位水量 185kg/m³ にもかかわらず、スランプは 2~5cm となった。

練り混ぜ後、直径 75mm、高さ 150mm の型枠 3 本に打

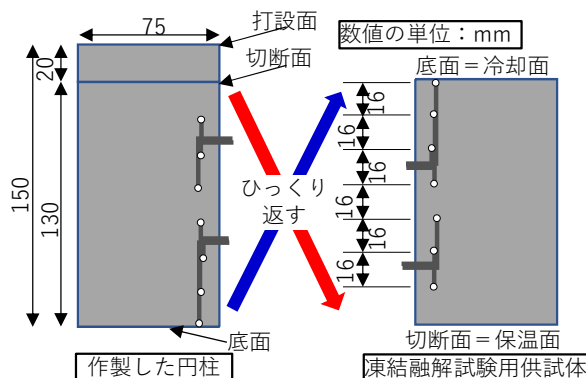


図-1 作製した円柱から作製した供試体の概要

ち込んだ。図-1 に作製した円柱とそれから加工された凍結融解供試体の概要を示す。あらかじめ、型枠の側面から熱電対を設置し、打設後にコンクリート内部の側面から約 10mm の位置で所定の高さに熱電対を埋め込んだ。熱電対を埋め込んだ高さは、型枠底面から約 0, 16, 32, 48, 82, 98, および 114mm とした。モルタルやコンクリートは翌日脱型し、20℃の水中で 4~6 週間養生した。そして冷却装置に入る高さとするため、実験する 3 日前に打設面から高さ 20mm を切断した。凍結融解中の乾燥を防ぐため、側面にシリコン樹脂を塗って、一面からの凍結融解試験用供試体とし、再び水中で試験日まで養生した。なお、供試体は円柱の上下を入れ替えたため、以降、切断面を供試体下端、打設時の底面を供試体上端と呼ぶ。

2.3 凍結融解方法と X 線 CT 撮影の概要

図-2 に一方向からの冷却する実験装置の概要を示す。冷却は -25℃ まで調整可能な恒温槽内で行った。まず、恒温槽内に厚さ 20mm の断熱材で覆った水槽を用意した。水中から取り出した供試体の側面を、濡れた布で覆った上からストレッチフィルムを巻いて保水した後、厚さ 80mm の発泡スチロールで覆った。供試体下端に熱伝導グリスを塗って脚のついたアルミ板を取り付け、このアルミ板の脚を先の水槽内の水に浸けた。水槽には、恒温槽の外に置いた恒温水循環装置からホースを繋げて 6℃

表-3 実験で使用したコンクリートおよびモルタルの配合, フレッシュ性状

配合 記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)											モルタル フロー (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)		
			W	C	S1	S2	Cu	G1	G2	RCG	RMG	AE2	DF					
NM	68	—	301	442	624	419	582	—	—	—	—	—	—	2.21	0.017	210	—	0.1
NC	68	46.0	182	267	376	253	351	533	535	—	—	—	1.33	0.011	—	5.5	0.4	
RC	68	46.0	182	267	376	253	351	—	—	976	—	—	1.33	0.011	—	2.0	0.3	
RM	68	46.0	182	267	376	253	351	—	—	—	920	—	1.33	0.011	—	2.3	0.6	

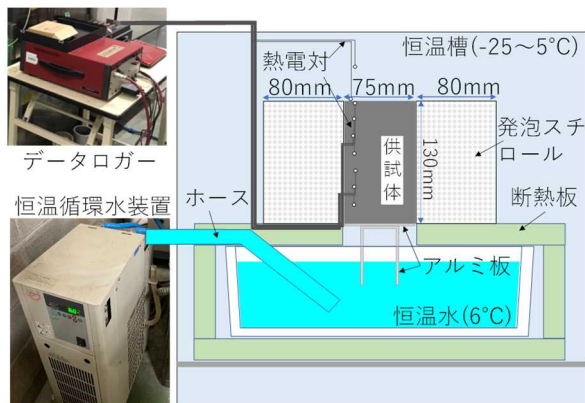


図-2 一方向からの冷却する実験装置の概要

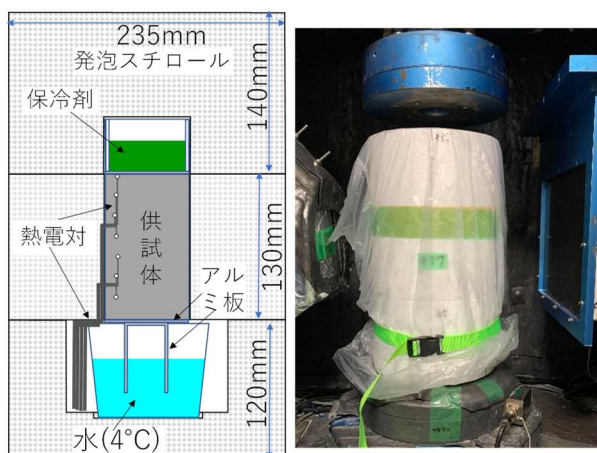


図-3 X線CT撮影時の保温方法の概要

の水を循環させた。これにより、供試体下端から約 6°C で加温する環境とした。一方、恒温槽内に面した供試体上端から、恒温槽の温度制御により冷却と加温を繰り返すことができる。実験では、恒温槽内温度を 60 分で -25°C まで冷却した後、340 分間の温度保持を行う冷却過程と、60 分で 5°C まで昇温後、150 分間の温度保持を行う加温過程を 10 回繰り返した。

X線CT装置による撮影は、試験開始前と 1, 5 および 10 サイクル目の -25°C を保持した 340 分間のうち、250~340 分の間で実施した。また、モルタル供試体のみ、10 サイクル目の融解時にも撮影を実施した。図-3 に撮影時の供試体の保温方法を示す。直後 250 分経過時に恒温槽の扉を開け、発泡スチロールごと水槽から取り出した供試体下端のアルミ板の脚を、別途用意した発泡スチロール内のカップに入れた約 4°C の水に浸けた。さらに供試体上端には保冷剤を入れたカップを乗せたアルミ板を設置し、その上から発泡スチロールで覆った。なお、保冷剤は、恒温槽内で供試体上端と同じく -25°C で十分に冷却している。発泡スチロールはほぼ隙間なく連結したうえ、養生テープを貼り付けて固定した。これにより、撮影等の恒温槽外での作業中も温度分布の維持を試みた。

画像取得条件は、管電圧 200kV、管電流 100 μ A、積算レート 2frames/s プロジェクション数 2000 とし、X線管

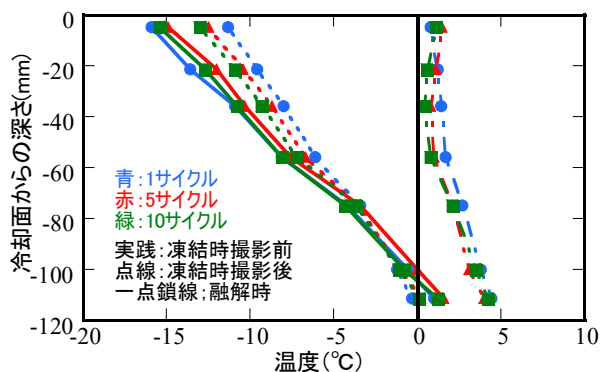


図-4 NM 内部の各サイクル時の温度分布

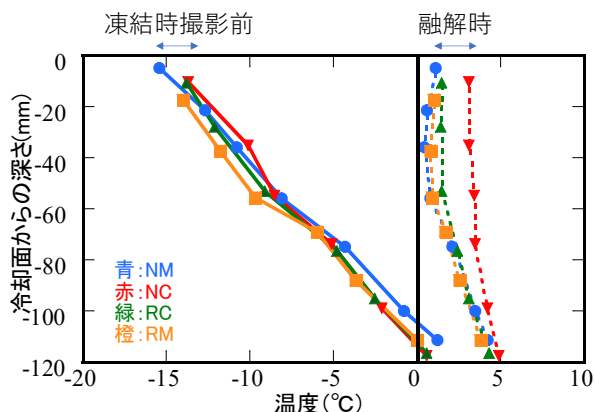


図-5 各配合の供試体内部の 10 サイクル目の温度分布

に金属フィルタとして 2mm の銅板を取り付けた。撮影時間は約 20 分であり、供試体冷却面から約 70mm の範囲の 3 次元画像 (解像度 0.0615 mm) を取得した。

図-4 にモルタル内部の各サイクル時の温度分布を示す。モルタル内部の温度は、X線CTでの撮影直前に冷却面で -16°C 程度で、深さ約 100mm で 0°C となり、それ以降は 0°C 以上となった。その後、撮影作業後に恒温槽に戻した際の温度は、冷却面で約 -11°C と最大で約 5°C の上昇が見られた。撮影中の温度は、撮影前後の平均値程度であったと考えられる。一方、昇温過程終了時には、すべての深さで 0.5~4.5°C であった。以上の傾向は、サイクル数に拘わらず、ほぼ同じ傾向だった。

図-5 に各配合での供試体内部の 10 サイクル目の温度分布を示す。モルタルや粗骨材の種類に拘わらず、融解時に少し差があるが、概ね同程度であると考えられた。

2.4 画像処理と画像計測の概要

得た画像を用いて、3次元画像相関法 (Digital Volume Collation, 以下 DVC) による内部変形計測を行った。計測には、Tudisco ら⁹⁾が作成した TomoWarp2 を用いた。本研究では、凍結融解試験開始前の室温 (約 20°C) での画像と、各サイクルでの凍結時の撮影画像とを用いて計測した。この時、Correlation window の一辺を 32voxels (1.97mm) とし、その重心点の間隔を 16voxels (0.98mm) とした。隣り合う Correlation window の重心点での各軸方向の計測変位の差から各軸方向ひずみを算出し、その

総量を体積ひずみとして算出した。

体積ひずみの3次元分布は解像度0.98mmの3次元画像として出力され、フリーソフトのImageJ⁷⁾を用いて3Dメディアンフィルタ(半径2.0)でノイズを除去した後、考察に使用した。冷却面からの深さ方向の体積ひずみ分布を算出する際には、深さ方向に一枚(0.98mm)ごとの断面範囲内の体積ひずみの算術平均を算出した。ただし、体積ひずみ画像では粗骨材表面や供試体側面でX線CT画像の鮮明さやフィルタ処理の影響で局所的に大きなひずみ値が算出される傾向がみられた。そこで、本研究ではImageJを用いてerode処理を2回行い、その影響を取り除いたモルタル部分の体積ひずみを算出した。

3. 実験結果と考察

3.1 モルタル(NM)に関する検討

図-6に、モルタルでの供試体中央縦断面の体積ひずみ画像を示す。赤色が濃いほど膨張ひずみが大きいこと、青色が濃いほど収縮ひずみが大きいことを示している。1および5サイクル目では、深さ10mmまでに比較的大きな体積膨張を示す範囲(○の範囲)がみられるが、それより深くなると膨張を示す箇所はまばらになった。深さ10~70mmでは、図-5より-6℃以下の低温で、まばらな膨張箇所は細骨材周囲の遷移帯など比較的大きな細孔径内の自由水の凍結だと考えられる。また、深さ0~10mmでは-14℃以下となり、比較的大きな細孔径内の自由水の凍結に加え、より小さな細孔での自由水の凍結が増加したことを示すと考えられる。10サイクル目には左側で膨張範囲(○の範囲)が広がったようにも見える。10サイクル目の凍結時と融解時に明確な差はなかった。なお、供試体側面の大きなひずみ値は、X線CT画像での供試体側面の鮮明さやフィルタ処理の影響だと考えられる。

図-7に、モルタル供試体の冷却面からの深さと体積ひずみとの関係を示す。なお、図-6の結果から、表面の2mm以降での計測深さにおいて、2.3節の方法で各断面での平均体積ひずみを算出している。常温でのX線CT画像を基準としたため、図示した範囲は約-16~-6℃に冷却されており、モルタルの線膨張係数を10~15μ/℃と仮定する⁸⁾と供試体内部で200~700μ程度の体積収縮が生じると考えられる。細骨材の配置による影響で体積ひずみ値の変動は大きいですが、凍結時の50mmより深い箇所の温度は-10~-6℃で、-680~-180μの範囲を示し、線膨張係数から予想したひずみ値の範囲に近い。一方で、冷却面から深さ50mmの間でいずれのサイクルでも、体積膨張が生じた範囲があった。その深さは、1サイクル目の凍結時には7.9mmだった。凍結融解を繰り返すと体積膨張を示す深さは、5サイクル目の凍結時には18.7mm、10サイクル目の凍結時には37.4mmまで膨張範囲が広がっ

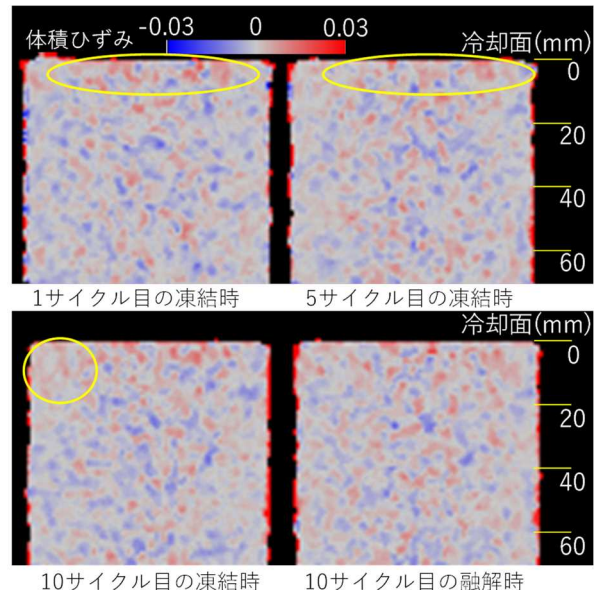


図-6 モルタル供試体の中央縦断面の体積ひずみ分布

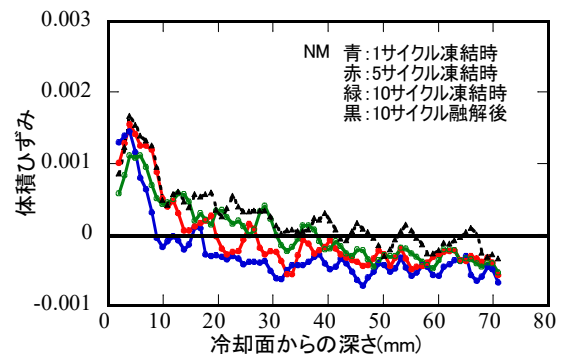


図-7 NMの冷却面からの深さと体積ひずみとの関係

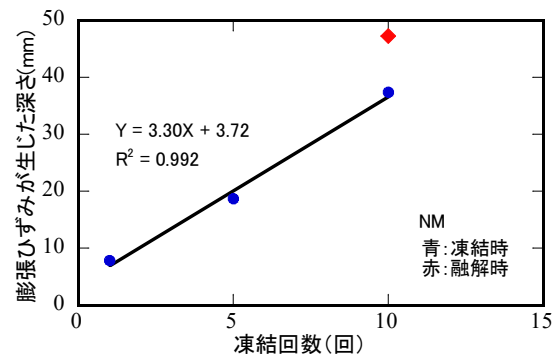


図-8 NMの凍結回数と膨張ひずみが生じた深さとの関係

た。モルタル供試体では10サイクル目の融解時にもX線CT撮影を行っており、融解時に体積膨張が生じた範囲は深さ47.2mmまでとなり、凍結時よりも1.3倍程度広がった。この範囲は、10サイクル目の凍結時に200~400μ、すなわち温度による体積収縮ひずみよりも大きな体積ひずみ値を示した範囲と関係していると考えられる。

図-8に、凍結回数と膨張ひずみが生じた深さとの関係を示す。凍結時の結果を最小二乗法で近似した結果も示した。凍結回数の増加に比例して凍結時の膨張深さが大きくなり、その寄与率は $R^2=0.992$ であった。この時の

傾きは膨張範囲の内部へと進行速度を表しており、本実験の結果では、3.30mm/凍結回数だと考えられる。

以上の結果から次のように考えた。1章で述べたように、自由水の凍結温度はイオン濃度や存在する細孔径により変化するため、本研究では、同じ水平断面内の体積膨張ひずみ値の平均値は、温度が低いほど大きくなると考えられる。凍結により生じた膨張圧の一部は未凍結部を伝播するが、骨材や先に凍結した箇所がある場合には伝播できずその場で体積膨張を生じると考えられる。このため低温の断面ほどひずみ値は大きく、断面内の体積膨張を示す面積も広がった。少なくとも、凍結時に体積膨張ひずみを示した範囲は微細ひび割れが発生していると考えられ、その体積膨張範囲の拡大は深さ方向への劣化進行を示すと推察される。本研究で、モルタル供試体ではその進行速度を評価できることがわかった。

一方、10サイクル目の凍結時と融解時の関係から、付与された温度でのモルタルの体積収縮ひずみよりも大きくなった断面内では微細ひび割れが生じ、融解時にはひび割れが開くことで体積膨張が生じた可能性があり、今後確認が必要だと考えられる。

3.2 再生粗骨材コンクリート (RM, RC) および碎石コンクリート (NC) に関する検討

図-9に、碎石の混入率の低い順に、RM, RC および NC での1サイクル目と10サイクル目の体積ひずみ算出結果を示す。供試体内の黒い箇所は粗骨材または原粗骨材 (以下、(原)粗骨材) の箇所とほぼ一致した。(原)粗骨材内部の輝度変化は小さく、DVCで十分な画像相関が得られなかったと考えられる。一方、再生粗骨材の付着モルタル部ではDVCで十分な画像相関を得た。その結果、NCとRCの配合上の粗骨材容積は同じでも、RCのほうが実質的な(原)粗骨材と(原)粗骨材の間が広がった。

RMでは、NMと同様に体積膨張が点在したが、膨張範囲の明確な深さ方向への進行は見られない。

RCでは、原粗骨材表面で大きな膨張ひずみを示した。実質的な原粗骨材と原粗骨材の間の体積膨張ひずみは、1サイクル目ではNM同様に点在したのみだが、10サイクル目には深さ約40mmまでの範囲(例えば矢印位置)で明確な体積膨張ひずみの増加と範囲拡大がみられた。

NCでは、RCと同様に粗骨材表面に大きな膨張を示した。粗骨材と粗骨材の間での体積膨張(例えば矢印位置)も1サイクル目から広範囲で生じていた。その後、範囲が拡大している箇所もみられた。なお、側面付近に収縮を示す箇所があり、粗骨材の存在の影響も考えられたが、本研究では原因を明確にできなかった。

既往の研究では、モルタルに比べてコンクリートの凍結融解抵抗性は低下すること⁹⁾、また粒径の大きな粗骨材と粗骨材の間では膨張ひずみ値が大きくなる可能性が

指摘されている⁹⁾。同様な傾向がRCやNCで生じていた。ただし、RCよりもNCのほうが(原)粗骨材と(原)粗骨材の間で体積膨張ひずみが大きく、範囲が広い。粗骨材間の距離が短くなり、凍結による膨張圧がより伝播できなかったことを示していると考えられる。

図-10~12に、RM, RC および NC の冷却面からの深さと体積ひずみとの関係を示す。なお、図-9の結果から、表面の2mm以降での計測深さにおいて、2.3節の方法で各断面での平均体積ひずみを算出している。

RMでは、1サイクル目と5サイクル目ではほとんどの範囲で0~-730 μ の体積収縮を示した。NMに比べて体積膨張がみられない原因として、原モルタルのW/Cが

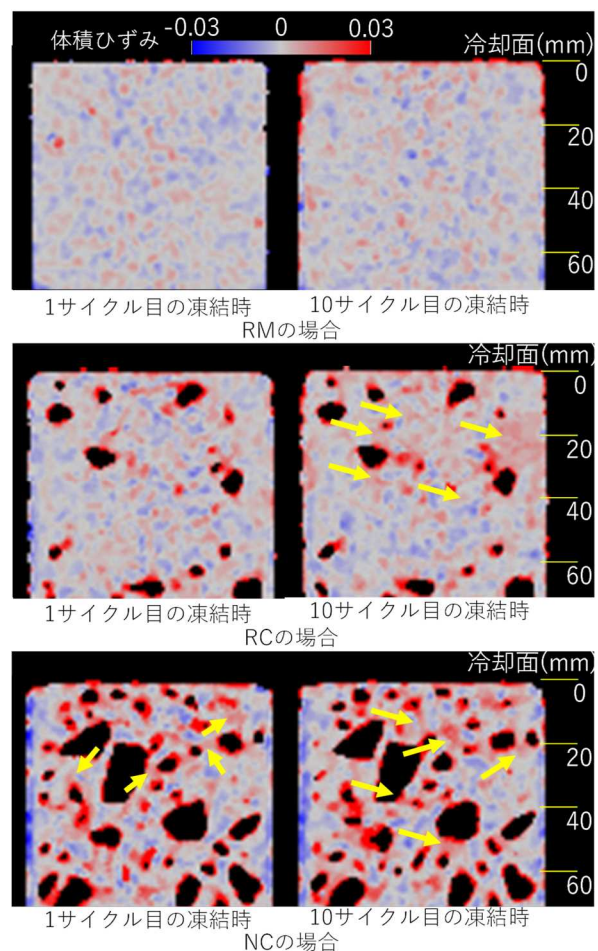


図-9 各供試体の中央縦断面の体積ひずみ分布

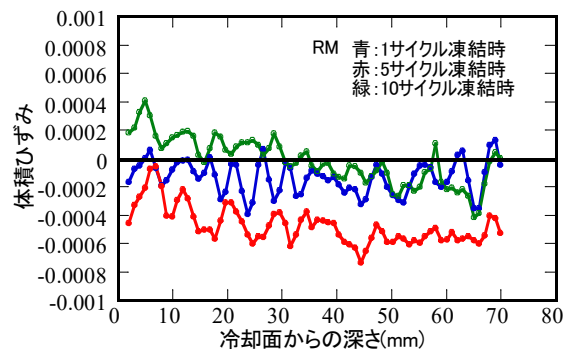


図-10 RMの冷却面からの深さと体積ひずみとの関係

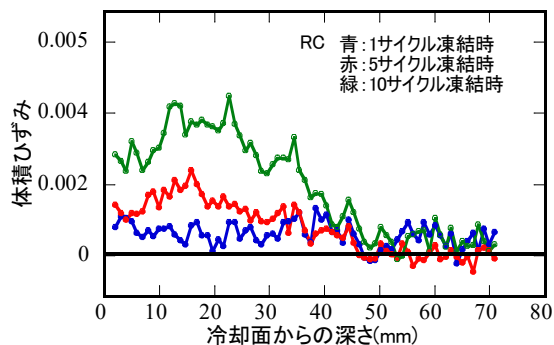


図-11 RCの冷却面からの深さと体積ひずみとの関係

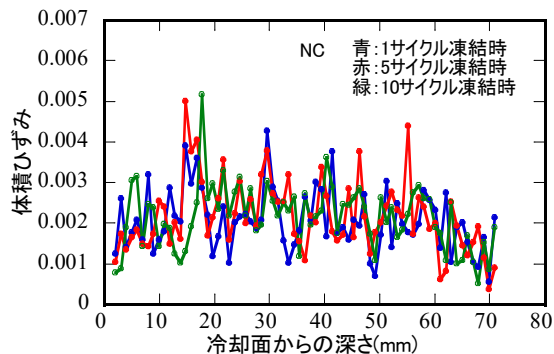


図-12 NCの冷却面からの深さと体積ひずみとの関係

RMのW/Cよりも小さく、4.3%の空気量を含むため、RMGの凍結融解抵抗性が高いことが考えられる。ただし、10サイクル目には、NMと同程度の深さ34.4mmまで体積膨張を示した。平均値では読み取れない劣化が進んだ可能性があるが、本研究では明確にできなかった。

RCでは、RCGの付着モルタルのW/Cが小さく、4.7%の空気量を含むものの、冷却面から深さ48.2mmの範囲で高い体積膨張が生じ、それ以降で $-400\sim 930\mu$ の範囲のひずみ値となった。原粗骨材が存在することで自由水の凍結による膨張圧の伝搬が阻害されたためだと考えられる。その膨張範囲変化は明確ではないが、1サイクル目との比較から、5サイクル目では深さ31.5mm程度、10サイクル目では深さ41.3mm程度と推察され、NMよりも少し大きい可能性がある。

NCでは $380\sim 5170\mu$ の膨張ひずみを示し、サイクル数による変化は小さい。粗骨材表面などのノイズの影響を十分に除外できなかったためだと考えられる。また細粗骨材の影響で断面間の変動も大きい。本節冒頭に述べたように実質的な粗骨材と粗骨材の間の距離が小さく、その間のモルタル中の空気量も少ないためだと考えられる。

以上から、本研究の手法で、粗骨材表面での体積膨張だけでなく、実質的な(原)粗骨材と(原)粗骨材の間が狭いほどモルタル部分で体積膨張が生じる可能性が示された。ただし、粗骨材表面などの影響を十分に除外できなかったため、膨張範囲の進行への影響は明確にできなかったと考えている。今後、粗骨材が混入した際の劣化範囲の

算出方法を検討する必要がある。

4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 室内実験で端面から冷却されたモルタル供試体内部への体積膨張範囲の進行過程を、X線CT画像を用いた内部変形計測により可視化できた。
- (2) W/C=68%で空気量0%のモルタルで実施した場合、本実験条件の1サイクルあたり凍結時の膨張範囲は3.30mmずつ進行した。また凍結時の膨張範囲は、融解時には1.3倍程度に広がった。
- (3) 本研究の手法で、粗骨材表面での体積膨張だけでなく、粗骨材と粗骨材の間隔が狭いほどモルタル部分で体積膨張が生じる可能性が示された。粗骨材が存在することで自由水の凍結による膨張圧の伝搬が阻害されたためと考えられる。

今後、凍結膨張範囲と融解後の膨張範囲との関係、粗骨材が混入した際の劣化範囲の算出方法や劣化程度との関係などの検討が必要だと考えられる。

参考文献

- 1) コンクリート構造物の耐凍害性確保に関する調査研究委員会：コンクリート構造物の耐凍害性確保に関する調査研究委員会報告書，土木学会，2021.10
- 2) JISA 1148-2010「コンクリートの凍結融解試験方法」
- 3) 麓隆行，山本大悟，村田隆男，高田良章：X線CT法を用いた氷点下での空気無混入モルタル内部の体積変化，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. 21，pp. 149-154，2021.10
- 4) 永倉正：コンクリートの配合諸条件が凍結融解抵抗性におよぼす影響に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 98，pp. 15-25，1963.10
- 5) 後藤彰，堺孝司：再生骨材を用いたコンクリートの耐凍害性と乾燥収縮，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19，No. 1，pp. 1105-1110，1997.7
- 6) Tudisco, E. 他：TomoWarp2: A local digital volume correlation code, SoftwareX, Vol.6, pp. 267-270, 2017.
- 7) ImageJ 参照：<https://imagej.nih.gov/ij/index.html> (閲覧日：2022年12月9日)
- 8) 石田征男，佐藤嘉昭，清原千鶴，永松静也：モルタルおよびセメントペーストの試験体の線膨張係数に関する研究，日本建築学会九州支部研究報告，第36号，材料施工，pp. 81-84，1997.3
- 9) 鮎田耕一：凍結作用を受けるコンクリートの粗骨材の間隔の変化について，土木学会年次学術講演会講演概要集第5部，Vol. 30，pp. 141-142，1975.