

論文 X線CT法を用いた端面から冷却した試験体内部の膨張の方向性に関する考察

麓 隆行*1・西川 拓輝*2・三島 剛*3・村田 隆男*4

要旨: 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。そのため、構造体内部ほど未凍結の自由水があり、冷却面で生じた膨張圧により押し出されることで圧力が緩和され、試験体全体を凍結する場合は現象が異なる可能性がある。本研究では、その解明を目的に、著者らが提案した端面から試験体を冷却する方法を用い、X線CT法による試験体内部の膨張ひずみ分布の方向性を検討した。3時間で上端からの凍結融解を試験体に与えた結果、深さ方向の膨張ひずみは水平方向のそれとは特徴が異なること、冷却速度が速いほど膨張ひずみはより大きくなることを明らかにした。

キーワード: 凍結融解, X線CT, 画像相関法, 膨張ひずみ, 方向性, 冷却速度

1. はじめに

凍害では、氷点下のコンクリート内部で、自由水の凍結膨張に起因した圧力により微小な損傷が生じることで強度や物質透過抵抗性が低下すると考えられる。既往の研究で、損傷程度を推定するために凍結融解で生じるひずみ変化も検討されている¹⁾。ただし、全体を冷却した試験体の平均ひずみを検討した研究がほとんどである。

一方、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化する。そのため、構造体内部ほど未凍結の自由水が多いと考えられ、それらが冷却面で生じた膨張圧を緩和する可能性がある。その程度は、細孔構造や冷却速度の影響を受けると考えられる。したがって、実構造物での凍結融解による劣化を、全体を冷却した試験体で評価することは難しい可能性があり、端面から冷却した試験体で、その深さ方向の膨張量の推移を計測することが望ましいと考えられる。

著者らは、既往の研究で試験体を端面から冷却し、試験体内部に温度変化を生じさせる実験手法を提案した²⁾。そして、その凍結による内部膨張範囲や膨張量を、X線CT画像を用いた画像計測により約1mm単位で計測できることを示した。この手法により、試験体や冷却条件を変えれば、先に示した仮定を推定する一助になると考えた。しかし、既報の研究²⁾では、恒温槽の冷却能力が十分とはいえず、冷却速度が遅く、限られた時間では凍結融解サイクル数も少なかった。

そこで本研究では、提案した手法を、-40℃まで冷却できる恒温槽を使用することで凍結速度を早くし、凍結回数を増やすことを試みた。そして、その結果と、既報²⁾

の結果を比較しながら、内部膨張の方向性や凍結速度の影響を明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

本研究では、内部の変形計測が容易なモルタル試験体を用い、消泡剤を使用して空気量の影響をできるだけ取り除いた。なお、凍結速度の影響は、著者らの2022年の研究成果との比較から検討した。

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%)および大分産石灰石砕砂 S2(表乾密度 2.69g/cm³, 吸水率 0.59%)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割に銅スラグ細骨材(Cu)(密度 3.47g/cm³, 吸水率 0.84%)を使用した³⁾。空気量は、高機能タイプのAE減水剤(AD)、AE剤(AE)およびポリエーテル系消泡剤(DF)を使用した。2022年も同じ材料を使用した。

表-1に使用した配合とフレッシュ性状を示す。2024年の配合では、2022年と異なり、AE剤を使用したため、AE減水剤の使用量が異なるものの、消泡剤の添加量はC×0.004%で一定した。

練混ぜには10Lのオムニミキサを用いた。C、S1、S2およびCuを投入し、空練りを低速で15秒行った。その後、各種化学混和剤を混ぜた練混ぜ水を投入して低速で30秒、さらに高速で90秒練り混ぜてから排出した。練混ぜ直後にJIS R 5201に準じたモルタルフローと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た質量法による空気量を計測した。表-

*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 ライト工業 (株)

*3 (株) フローリック 関西支店 博(工) (正会員)

*4 元大阪兵庫生コンクリート工業組合 (正会員)

表-1 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

実施年	W/C (%)	単位量(kg/m ³)								モルタルフロー(mm)		空気量 (%)
		W	C	S1	S2	Cu	AD	AE	DF	0打	15打	
2024	68	297	437	621	431	588	0.44	0.004	0.017	113×114	218×213	0.69
2022	68	301	442	624	419	582	2.21	—	0.017	118×118	213×208	0.14

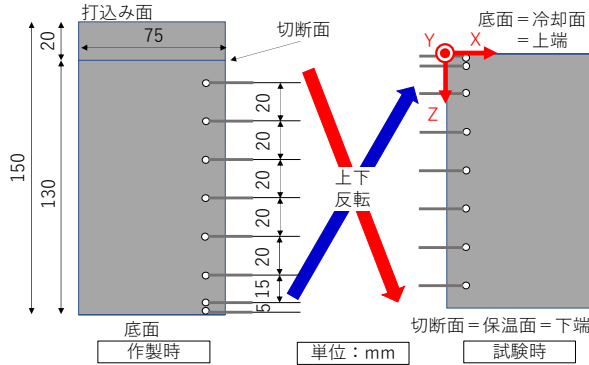


図-1 試験体の概要

1にフレッシュ性状の試験結果を示す。

試験体の形状は直径75mm、高さ150mmとした。型枠は6体用意し、そのうち2体は、熱電対を埋め込むために底面から0(ほぼ表面)、5、20、40、60、80、100、120mmの高さに3×4mmの開口を設けた特注の型枠である。その開口に、試験体側面から約10mm内部に配置されるように、あらかじめ熱電対を設置した。モルタルは、練混ぜ直後に打ち込み、翌日に脱型した。材齢86日まで20℃の水中で養生した後、1体の試験体を用いて凍結融解試験を実施した。また凍結融解試験の開始直後に、圧縮強度試験および割裂引張試験を実施した。圧縮強度試験では打込み面を研磨後、JIS A 1108に準じて3体の試験体で実施した。また、割裂引張試験では円柱を高さ中央で切断した後、2体の試験体でJIS A 1113に準じて実施した。なお、圧縮強度の平均値は45.2N/mm²、割裂引張強度の平均値は3.10N/mm²であった。

図-1に凍結融解に用いた試験体の概要を示す。養生後に、装置内に収まるように試験体の打込み面から高さ20mmの位置で切断し、凍結融解中の乾燥を防ぐために側面にシリコン樹脂を塗った。翌日まで20℃の室内で保存後、再び水中に浸漬して試験体内部を湿潤状態とした。端面から凍結融解を行う際には試験体の上下を入れ替えて実施した。以降、切断面を試験体下端、打込み時の底面を試験体上端と呼ぶ。

2.2 凍結融解方法の概要

図-2に試験体上端からの冷却する実験装置の概要を示す。実験は-40℃まで冷却可能な恒温槽内で行った。恒温槽内に厚さ22.5mmの発泡スチロールで作った水槽を用意し、槽外に置いた恒温水循環装置からホースを繋げて10℃の水を循環させた。そして、試験体下端を差し込

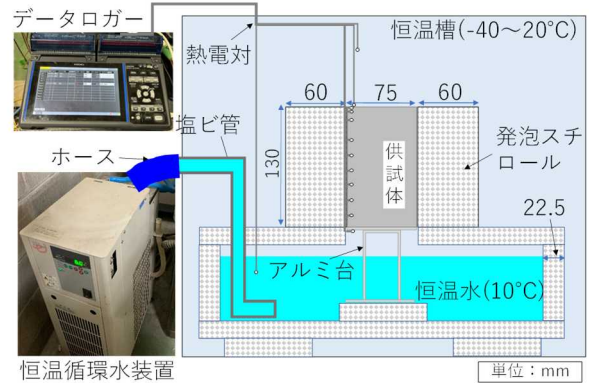


図-2 試験体上端からの冷却する実験装置の概要

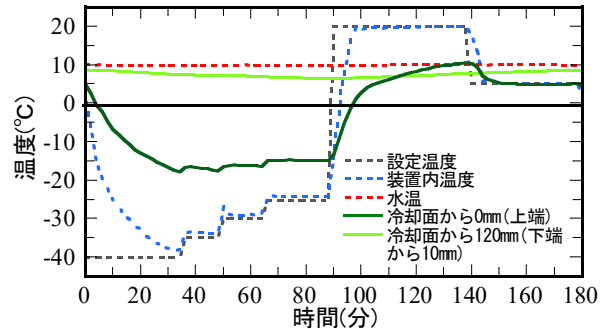


図-3 1サイクルの設定温度と各計測温度推移例

む直径75mmの開口部を開けた厚さ20mmの発泡スチロール製蓋を取り付けた。次に、水中から取り出した試験体の側面を濡れた布で覆い、その上からストレッチフィルムを巻いた。その試験体を厚さ約60mmの発泡スチロールで覆った後、試験体下端に熱伝導グリスを塗ったアルミ台(直径75mm、高さ84mm)を取り付け、このアルミ台を水槽蓋の開口部を通して水槽内の水に浸けた。

図-3に1サイクルでの温度制御中の熱電対での計測例を示す。点線は制御側の温度で、実線は試験体内部の上下端近くの温度である。水温は10℃と一定である。恒温槽の設定は35分間-40℃で保持後、15分ごとに保持温度を-35、-30、そして-25℃と段階的に引き上げた。その後、一気に20℃に引き上げて50分間保持後、40分間5℃に設定した。1サイクルは180分(3時間)となる。

この設定により、冷却面から0mm(上端)は、開始35分で約-17℃に達した後、恒温槽内の段階的な温度上昇でゆっくりと約-15℃まで温度が上昇した。その後、設定温度を20℃とすると開始130分後に約10℃となり、設定温度を5℃とすると開始156分後に試験体上端5℃となった。冷却面から120mm(下端から10mm)の位置では6~9℃の範囲で推移した。2024年の実験では、これを90サ

イクルまで繰り返した。

2022 年の実験²⁾では、-25℃まで冷却できる恒温槽を用いて槽内温度を 60 分で-25℃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℃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。また、下端の循環水の温度は 6℃とした。このとき、試験体の冷却面から深さ 5mm では開始 400 分後に約-16℃となった。

2.3 X線 CT 撮影と画像計測の概要

X線 CT 装置による撮影は、試験開始前の室温(約 25℃)と 10, 30, 60 および 90 サイクル目の設定温度-25℃での保持時間を延長し、開始 80 分以降に冷却状態を保持して実施した。

図-4 に X線 CT 撮影時の保温方法の概要を示す。アルミ台を取り付けたまま、発泡スチロールごと試験体を恒温槽から取り出し、試験体下端のアルミ台を別途用意した発泡スチロール内に入れた約 4℃の水に浸けた。さらに試験体上端には保冷剤を入れたアルミカップを設置し、その上から発泡スチロールで覆った。保冷剤は恒温槽内で十分に冷却している。なお、既往の研究²⁾で、冷却面が最大 5℃ほど上昇する範囲で温度保持が可能なことを確認している。

画像取得条件は、管電圧 200kV、管電流 100μA、積算レート 2frames/s プロジェクション数 2000 とし、X線管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、1 度に試験体冷却面から約 70mm の範囲の 3 次元画像(解像度 0.0615 mm)を取得した。そのため、試験体は上下 2 回に分けて撮影した。

取得した画像を用いて、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 社⁴⁾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 25℃)での撮影画像と、所定の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

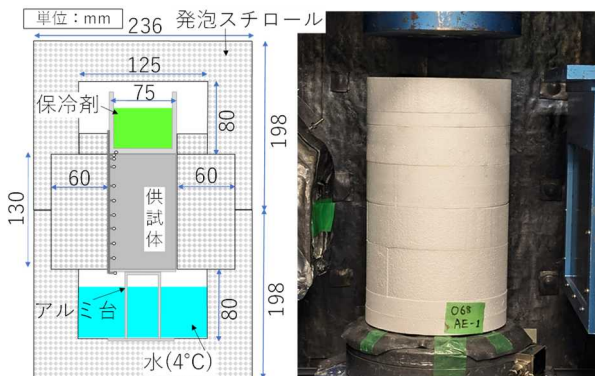


図-4 X線 CT 撮影時の保温方法の概要

(0.98mm)とした。隣り合う Correlation window の重心点で図-1 に示す各軸方向の計測変位の差から各軸方向のひずみを算出した。そして、以下の式から体積ひずみや水平面の面積ひずみとして算出した。

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (1)$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_x + \varepsilon_y \quad (2)$$

ここで、 ε_v : 体積ひずみ, ε_a : 水平面の面積ひずみ, ε_x : 図-1 の X 方向のひずみ, ε_y : 図-1 の Y 方向のひずみ, および ε_z : 図-1 の Z 方向のひずみ(深さ方向のひずみ)である。

体積ひずみ(ε_v), 面積ひずみ(ε_a)および深さ方向ひずみ(ε_z)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 ImageJ⁵⁾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。各ひずみの冷却面から深さ方向の推移を算出する際には、深さ方向一枚(0.98mm)ごとの断面内の各ひずみの算術平均を算出した。

2.4 超音波伝播速度の計測概要

X線 CT 画像からの計測結果の妥当性を確認するため、超音波伝播速度を凍結融解試験前と 90 サイクル終了後に計測し、深さ方向におけるその減少率の変化を検討した。計測箇所は、シリコン樹脂を塗布前、あるいは剥がした直後の試験体側面に対し、冷却面から深さ方向に 15mm ごとの位置とした。54kHz の端子で 250V, Gain 2 倍とした場合と、250kHz の端子で 125V, Gain 5 倍とした場合の 2 種類の条件で計測した。計測された超音波伝播時間で直径 75mm を除して超音波伝播速度を算出した。

3. 実験結果と考察

3.1 最高・最低温度分布

図-5 に、モルタル試験体の中央縦断面における深さ方向と最高・最低温度を示す。2024 年の結果に加えて、比較する 2022 年の結果を示す。

2024 年の最低温度は、冷却面である上端付近で-19℃

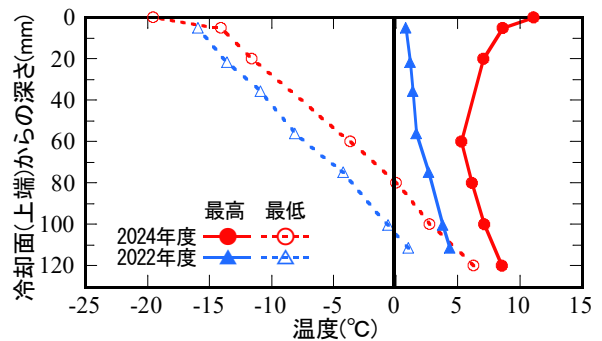


図-5 冷却面(上端)からの深さと最高・最低温度

となったが、深さ 5mm では-14℃程度となり、深くなるほど直線的に温度が上昇した。深さ 80mm で 0℃となり、下端から 10mm の位置(深さ 120mm)で 7℃程度となった。上端の最低温度が大きく低下したのは、短時間で設定温度を変化させたため、熱の伝わる時間が短く、その温度変化が表面のみに影響したためだと考えられる。なお、最高温度は上下端で約 10℃となり、中央付近で 6℃程度となった。

冷却速度が異なる 2022 年では、同じ深さでも 2024 年よりも 2~5℃ほど低かった。これは、2024 年の冷却時間 90 分よりも 2022 年の冷却時間は 400 分と 4.4 倍長いいため、内部まで冷却が進んだことが原因と考えられる。

3.2 超音波伝播速度の結果

図-6 に超音波伝播速度の減少率の深さ方向の推移を示す。いずれの条件でも、深さ 45mm より深くなると減少率は 0%だったが、それより浅くなると、冷却面に近いほど超音波伝播速度の減少率が大きくなった。本実験の条件では、深さ 30~45mm の間まで凍結融解による劣化が進んだ可能性がある。また、計測条件では 250kHz のほうが、54kHz よりも減少率が大きかった。損傷が微細であるため、伝播する波長が短い方が損傷に敏感だった可能性が考えられる。

3.3 縦断面内の体積ひずみ

図-7 に、深さ方向(XZ)断面の体積ひずみ画像を計測サイクルごとに示す。収縮を負の値として青色で示し、膨張を正の値として赤色で示した。なお、図の高さは、

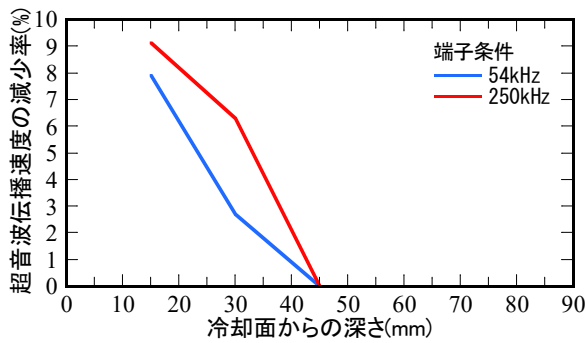


図-6 超音波伝播速度の減少率の深さ方向の推移

冷却面から深さ 66mm までの範囲を示し、その温度範囲は、図-5 より-19~-4℃の範囲であった。

いずれの断面でも、赤色の箇所が散在している。冷却による体積膨張はモルタル内の細孔構造内で局所的に生じるためだと考えられる。一方、局所的な体積膨張に挟まれた箇所では体積収縮が生じる可能性が考えられる。サイクル数が増えても深さ方向への変化は必ずしも明確ではない。これは、局所的に劣化が進行しているため、一つの XZ 断面に連続的に劣化箇所が現れないことが原因と考えられる。そこで、同じ温度の各水平断面でのひずみ分布で劣化により生じるひずみ値を検討した。

3.4 深さ方向の体積ひずみ分布

図-8 に深さごとの断面内の体積ひずみ分布を示す。ここでは冷却面からの深さ 10mm ごとに、体積ひずみが正值(膨張)の範囲の断面に占める割合分布を示している。深さ 30~50mm では体積ひずみ分布に大きな差は見られない。これに比べて、深さ 10~20mm では体積ひずみ 0.002 以上の範囲で断面に占める割合が大きくなった。冷却面付近では、体積ひずみ 0.001 以上で、さらに断面に占める割合が増加した。以上から、深さ 30mm までは温度低下による体積ひずみの増加が見られるが、明確な閾値は見られなかった。そこで、約 1mm ごとにひずみ値の断面平均を算出し、その深さ方向の連続的な推移を算出した。

図-9 に、体積ひずみの断面平均の深さ方向の推移を示す。ここでは試験体の全体の画像計測結果を示す。冷

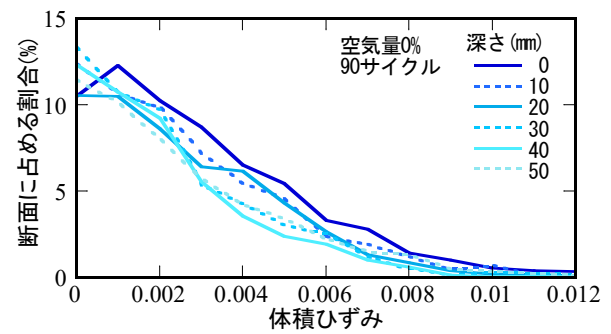


図-8 深さごとの断面内の体積ひずみ分布

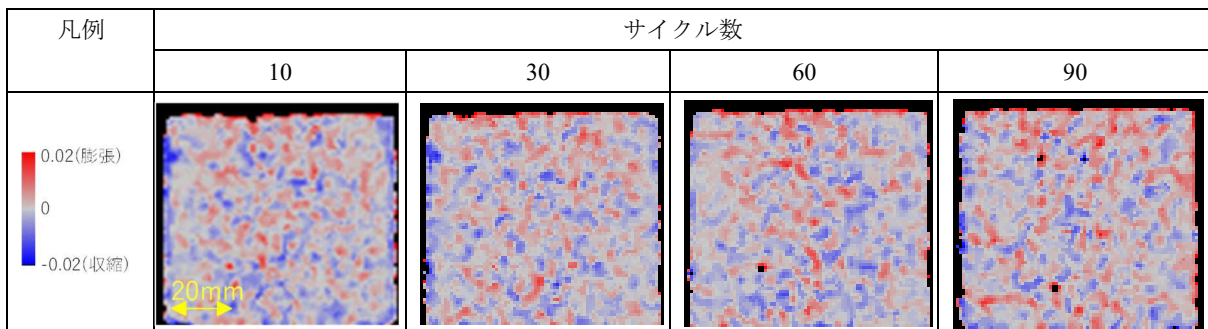


図-7 深さ方向(XZ)断面の体積ひずみ画像

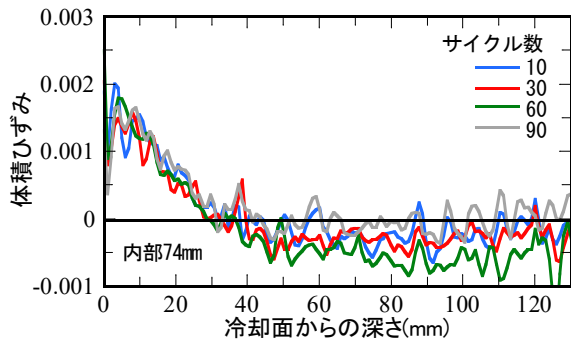


図-9 体積ひずみの断面平均の深さ方向の推移

却面では最大で 0.002 の膨張ひずみがあり、そこから深さ 46mm までは直線的にひずみ値が低下した。この範囲の内部温度は $-19\sim-7^{\circ}\text{C}$ であった。それより深い位置ではばらつくが、およそ $0\sim-0.001$ の収縮ひずみを示した。深さ 46mm より深い位置は約 $-5\sim-7^{\circ}\text{C}$ に冷却されている。既往の研究²⁾でも示したように、モルタルの線膨張係数を $10\sim 15\mu\text{/}^{\circ}\text{C}$ と仮定する⁶⁾と、常温(約 25°C)での X 線 CT 画像を基準として計測したことから試験体内部で $-0.00054\sim-0.00135$ 程度の体積収縮ひずみが生じると推定される。よって、深さ 46mm より深い範囲では、そのひずみ値に近い範囲にあり、温度低下による収縮だと考えた。したがって、それよりも浅い範囲では体積膨張が明確に生じたと考えられる。ただし、本実験でのサイクル数の増加による変化はほとんどなかった。なお、この体積膨張を示した範囲は、超音波伝播速度の減少量を示した範囲とほぼ同じだと考えられる。

3.5 膨張ひずみの方向性

次に膨張の方向性について検討した。

図-10 と図-11 に面積ひずみと深さ方向ひずみの断面平均の深さ方向の推移を示す。ここでは、体積ひずみで変化が見られた深さ 66mm までの結果を示す。面積ひずみで膨張を生じる範囲は 45mm 程度で、体積ひずみでの範囲と同程度であった。ただし、冷却面から深さ 20mm まで約 0.0006 の膨張ひずみで変化は小さい。深さ 20mm より深くなると急激にひずみ値が小さくなり、深さ 45mm で $0\sim 0.0003$ 程度の収縮ひずみとなった。一方、深さ方向のひずみでは、冷却面で約 $0.001\sim 0.0013$ の膨張ひずみがあり、深くなるほどひずみ値が小さくなった。そして深さ 30mm でひずみ値が 0 付近となり、深さ 46mm より深くなると収縮ひずみに転じた。

面積ひずみは X 方向と Y 方向のひずみを加算した値であり、等方に膨張していれば、深さ方向ひずみ(Z 方向)の 2 倍程度となると考えられる。しかし、深さ約 $0\sim 15\text{mm}$ では、深さ方向ひずみの値は、面積ひずみより大きい。これは、拘束のない冷却面方向へと膨張が生じたことを示すと考えられ、スケーリング等の剥離に繋がる現象で

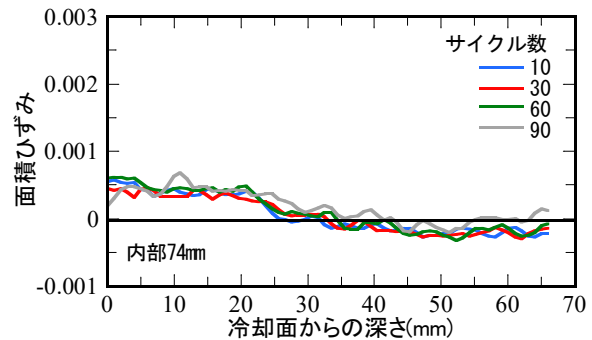


図-10 面積ひずみの断面平均の深さ方向の推移

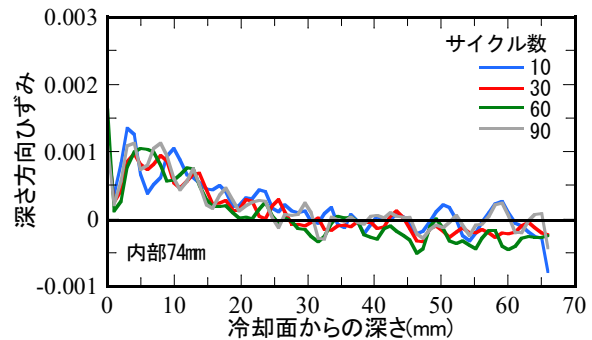


図-11 深さ方向ひずみの断面平均の深さ方向の推移

はないかと推察される。一方、15mm より深い範囲では、面積ひずみは深さ方向ひずみの 2 倍程度であり、方向性は見られなくなった。

3.6 冷却速度の影響

ここまで考察してきた 2024 年の結果と 2022 年の結果を比較し、冷却速度の影響を検討する。

図-12~14 に体積ひずみ、面積ひずみおよび深さ方向のひずみの断面平均の推移を比較した結果を示す。ここでは深さ 66mm までの結果を示している。2024 年に比べて、冷却時間が 4.4 倍長いと冷却面付近での体積ひずみはほぼ同じだが、深さ 8mm より深くなると冷却速度が遅いほうが急激に小さくなった。そのため、凍結速度が早くなると体積膨張がより深くまで生じた。

面積ひずみでは、2024 年に比べて、2022 年のほうがひずみ値は半分程度であったが、膨張を示す範囲に差は見られない。一方、深さ方向のひずみでは、2024 年に深さ 35mm まで膨張を示したが、2022 年には深さ 8mm 程度の範囲でしか膨張が見られなかった。

以上から、凍結速度が速くなると、自由水の凍結やそれに起因する未凍結水への圧力伝播の速度が速くなり、未凍結水が移動できずに膨張量が大きくなることが考えられる。本実験の結果では、水平方向では、凍結速度が約 4.4 倍で、水平方向の膨張量の増加程度は約 2 倍であった。深さ方向に関しては、自由端である凍結面付近では、凍結速度にかかわらず 3.4 節に示したようにスケーリングに影響する膨張が生じると考えられる。一方、冷

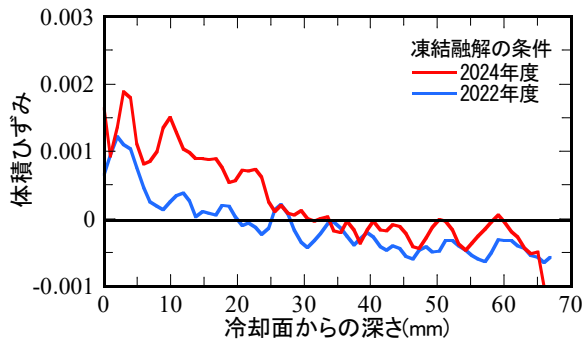


図-12 異なる凍結速度での体積ひずみの比較

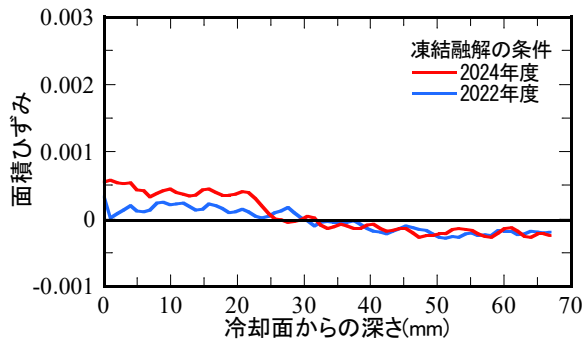


図-13 異なる凍結速度での面積ひずみの比較

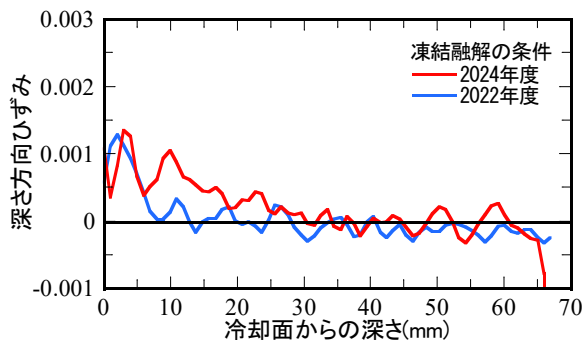


図-14 異なる凍結速度での深さ方向ひずみの比較

却面から深くなると、水平方向に比べて冷却速度の増加による膨張ひずみの発生範囲の増加が顕著となった。本実験では、冷却速度が4.4倍となると、膨張深さが8mmから35mmへと3.5倍程度となった。このことは、深さ方向には温度差があるため、より内部へと未凍結の自由水が容易に移動できることを示していると考えられる。

4. まとめ

本研究では、W/C=68%のモルタル試験体を用いた上端からの凍結融解を与えた際の内部膨張について、X線CT法を活用して検討した。得られた結果を以下に示す。

(1) 本研究の実験装置と-40℃の恒温槽を用いることで、

3時間で上端からの凍結融解を試験体に与えることができた。

- (2) 上端からの凍結融解を与えた試験体内部に生じる体積膨張を計測できる範囲は、超音波伝播速度の減少率が生じる範囲とほぼ同じだった。
- (3) 上端からの凍結融解を与えた試験体内部に生じる膨張ひずみは、水平方向と深さ方向で異なる。これは、深さ方向に温度分布があることが原因だと考えられる。
- (4) 上端からの凍結融解を与えた試験体内部に生じる膨張ひずみは冷却速度が速いほどより大きくなり、その範囲はより深くなる。

以上から、1.で示した仮定の可能性が示されたが、その条件は限定的であるため、今後も検討を続ける予定である。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP24K00963 および高橋産業経済研究財団の助成を受けた研究の一部です。

参考文献

- 1) 例えば、菅原奈美, 鈴木邦康, 濱幸雄, 原田彩加: 凍結融解作用によるコンクリートひずみ挙動と凍害劣化に及ぼす鉄筋拘束の影響, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 80, pp. 5-6, 2007.
- 2) 麓 隆行, 仲松 弥隼, 高田 良章, 村田 隆男: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 562-567, 2023.
- 3) 麓隆行: 圧縮応力下のコンクリート試験体のX線CT画像への各種3次元画像計測法の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 1, pp. 53-58, 2019.
- 4) Tudisco, E., Ando, E., Cailetud, R. and Hall, A. S.: TomoWarp2: A local digital volume correlation code, Software X, Vol.6, pp. 267-270, 2017.
- 5) Rasband, W.S.: ImageJ, U.S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <https://imagej.net/ij/>, 1997-2018. (2024/5/7 Accessed)
- 6) 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.