

ASR模擬供試体内部での膨張進展過程の計測に対する X線CT画像と画像相関法の適用性

APPLICABILITY OF X-RAY CT IMAGE AND IMAGE CORRELATION METHOD
TO MEASUREMENT OF EXPANSION PROCESS INSIDE ASR SIMULATED SPECIMEN

麓隆行*、山本康輔**、岩月栄治***、中井 慶成**

by Takayuki FUMOTO, Kosuke YAMAMOTO, Eiji IWATSUKI, Keisei NAKAI

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (ASR) とは、骨材中の一部の反応性珪物とコンクリート内部のアルカリ成分との反応により、膨張性を有する反応物を生じる現象である。この反応物が水分を吸収して膨張することで、コンクリート内部において局所的な引張応力が生じ、骨材やモルタル内部にひび割れが生じると考えられている¹⁾。この現象は、コンクリートを内部から破壊するとともに、骨材自体の破壊や鉄筋の破断といった様々な状態を引き起こす。しかし、コンクリート内部でのひび割れの発生、成長、そして骨材の破断過程は明確になっていない。その過程が明確になれば、その後のコンクリートの力学的特性や維持管理に有益な知見となると考えられる。

膨張過程の計測法として、著者らはX線Computed Tomography (CT) 画像を用いた画像計測に着目した。X線CT法では、供試体内部の相対的なX線吸収量の分布を3次元濃淡画像として出力できる²⁾。X線吸収量は物質の密度や成分により影響されることから、密度の異なる骨材やペースト、そしてひび割れを視認することが可能である。さらに、圧縮荷重や乾燥などの環境変化が生じる前後の供試体の3次元画像を比較することで、環境変化により供試体内部で生じた変化を推定できる²⁾。比較方法は、輝度や形状等の変化だけでなく、粒子追跡法や画像相関法による変形やひずみなどを推定することも可能である^{2)~4)}。

麓は、これまで近畿大学所有のX線CT装置を用いて、荷重前後の供試体内部の3次元画像を得て、画像相関法により、内部の変形や体積ひずみの3次元分布を計測してきた⁴⁾。これまでの手法を活用して、ASRの膨張過程を計測することができれば、供試体内部での膨張発生箇所の特徴やその後の成長による破壊進行過程などを明らかにできると考えられる。

そこで、本研究では、そのASRによる膨張過程の計測へのX線CT法の適用性を確認するため、ASRの模擬反応生成物を混入した供試体から得たX線CT画像を用いたひび割れ観察や画像計測を行った。

2. 実験概要

2. 1 供試体の概要

本研究では、ASRによる膨張過程の計測へのX線CT法の適用性を確認することを目的とするため、短期間で膨張する供試体で計測を行うこととした。そのため、反応性珪物を含まない石灰石砕砂を使用した基準モルタルと、基準モルタルの一部を模擬反応生成物に置換したASR模擬モルタルの膨張劣化過程を比較することで実施した。なお、模擬反応生成物には、岩月らが過去に使用した水ガラスカレットを使用した⁵⁾。

基準モルタルには、水道水、研究用普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm^3 、 Na_2O 等価量 0.55%)、石灰石砕砂 (表乾密度 2.69 g/cm^3) を用いた。水、セメントおよび砂を質量比 $1 : 2 : 4.5$ で混合した。

ASR模擬モルタルには、上記の材料に加えて、短期での膨張が見込まれる反応生成物を模擬した水ガラスカレット (以下、カレット) を混入した。カレットは、既往論文⁵⁾を参考に $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O} = 3.6$ 、粒径 $0.5 \sim 4 \text{ mm}$ の粒子とし、細骨材の代替としてセメント質量の 5% でモルタルに混入した。

いずれのモルタルにも、既往の研究⁴⁾を参考に、画像計測の精度向上のために 0.3 mm のジルコニア球をモルタル全体積の 0.5% 混入した。

練混ぜはいずれも 10L の縦型ミキサーを用いて実施した。製造した各モルタルを直径 75mm 、高さ 150mm の型枠に打設した。基準モルタルおよびASR模擬モルタル供試体を各3体、合計6体作製した。型枠の上下面には、あらかじめASTM C227⁶⁾に準じた長さ変化率測定の際の計測端子となる直径 6mm 、長さ 35mm のボルトを取り付けた厚さ 2mm のステンレス板を設置した。翌日脱型し、画像計測時の機械的誤差を減らすためのセラミック球を有するプラスチック円

* 近畿大学准教授 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)、** 近畿大学 理工学部社会環境工学科、*** 愛知工業大学工学部土木工学科

筒を取り付けた³⁾。最終的に、図1のように円筒を取り付けた供試体上下面からボルトの先端が2mm突出した形状となる。

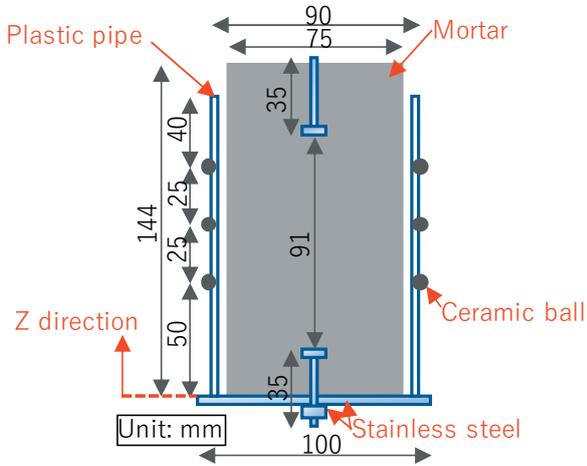


図1 固定点を取り付けた供試体

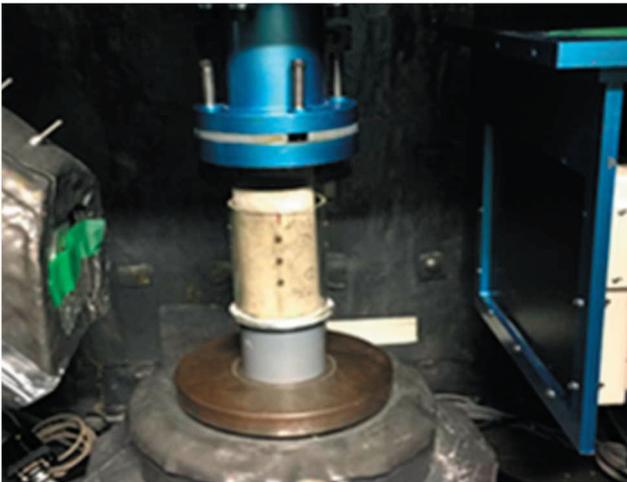


図2 X線CT撮影時の様子

表1 X線CT撮影の条件

Condition	Value
Voltage of X ray tube (kV)	170
Current of X ray tube (μA)	100
Frame rate (frame/sec)	4
Projection number	2000
Pixel number (pixel)	896×704
One side size of voxel (mm)	0.123
Scanning time (sec)	500
Copper thickness (mm)	3

脱型直後に、初期状態の計測を実施した。詳細な計測内容は次節で説明する。初期状態の計測直後に、供試体を密閉できるアルミ箱に入れ、箱ごと40℃の恒温槽に保管した。アルミ箱内が相対湿度95%以上となるように、箱内に高さ約10 mmの水を張った。なお、箱底に下地を設置し、供試体が水に触れないように工夫した。

2. 2 計測方法の概要

まず、長さ変化計測を40℃での養生を開始してから、2週間ごとに行った。長さ変化率は、ASTM C227に準じてダイヤルゲージを用いて供試体長さを計測した。そして40℃で養生開始時の供試体長さを基準として、式(1)にて長さ変化率を計測した。

$$\varepsilon_l = \frac{(X_{01} - X_{02}) - (X_{i1} - X_{i2})}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 ε_l は長さ変化率(%)、 L_0 は基長、 X_{01} と X_{02} はそれぞれ基準とした時点における標準尺および供試体の測定値、そして X_{i1} と X_{i2} はそれぞれ時点*i*における標準尺および供試体の測定値である。

次に、40℃での養生を開始してから1、28、86、138、201および241日目にX線CT画像からの計測を行った。X線CT画像の取得には、図2のように近畿大学所有のX線CT装置⁷⁾を用いて、直径約110mm、供試体高さ中央から高さ約±43mmの領域を撮影した。撮影条件は、管電圧170 kV、管電流100 μA、積算時間0.25秒、撮影数2000枚とし、ビームハードニング低減を目的に銅板3 mmを使用した。解像度は一辺0.123 mmの立方体とした。

X線CT画像を用いた変形計測では、Tudiscoら⁸⁾の作成した3次元画像相関法プログラムTomowarp2を用いた。3次元画像相関法(Digital Volume Correlation、以下DVC)は、指定した領域(サブセット)内部の濃淡と一致する箇所を、相互相関関数を利用して推定する手法である。本研究では、脱型直後の撮影画像と、所定の材齢時の撮影画像の比較から所定の材齢時の撮影画像を用いて算出した。本研究では、サブセットを一辺約2 mm(16 pixels)の立方体とし、その重心間隔を約1 mm(8 pixels)とした。

画像計測後、供試体底面から高さ約25mmと約87mmの断面の高さ方向の平均変位の差を高さの差約62mmで除して、供試体の長さ変化率を算出した。さらに隣接するサブセットの変位差からX、Y、およびZ方向の軸方向ひずみを算出し、式(2)から体積ひずみを算出した。

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (2)$$

ここで、 ϵ_{vol} は体積ひずみ、 ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z は X、Y、Z 方向の軸方向ひずみである。

3. 実験結果と考察

3. 1 長さ変化試験の結果

図3にASTM C227に準じて計測した長さ変化率と画像計測から得られた高さ方向の長さ変化率を示す。温度40℃、相対湿度95%以上で保存した場合、基準モルタルでは、膨張も収縮も見られない。一方、カレットを有する供試体の長さ変化率は、材齢28日以

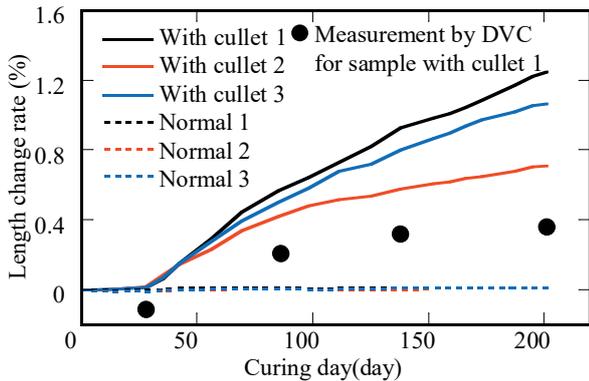


図3 長さ変化率の計測結果と画像計測から得られた高さ方向の長さ変化率との比較

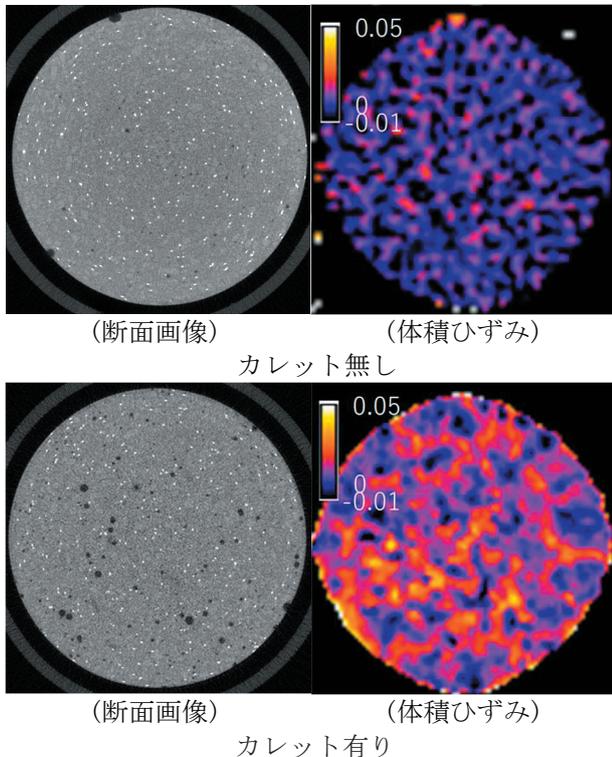


図4 材齢86日でのカレットの有無による断面画像とその断面での体積ひずみ算出結果(アルカリ量0.53%の供試体で高さ中央断面)

降で増加し始め、材齢86日で0.42～0.57%、材齢138日で0.58～0.93%となり、養生材齢200日では0.71～1.24%の膨張率となった。同配合の供試体で膨張率が異なるのは、カレットの混入量や位置による影響だと考えられる。以上から、石灰石砕砂では膨張が見られず、カレットの混入により膨張が生じているといえる。

一方、最も膨張したカレットを有する供試体1についてDVCの結果から求めた変位から算出したZ方向のひずみを●でプロットした。Z方向ひずみは、いずれの養生材齢でもASTMに準じて計測した長さ変化率とは大きく異なった。この理由は明確でないが、供試体内部に膨張ひずみや収縮ひずみが複雑に存在するため、断面内を平均して求めた長さ変化率では実際の計測結果とは異なると考えられる。

3. 2 ASRで生じた鉱物の膨張計測への適用性

図4に、アルカリ量0.53%の場合の材齢86日でのカレットの有無による断面画像とその断面での体積ひず

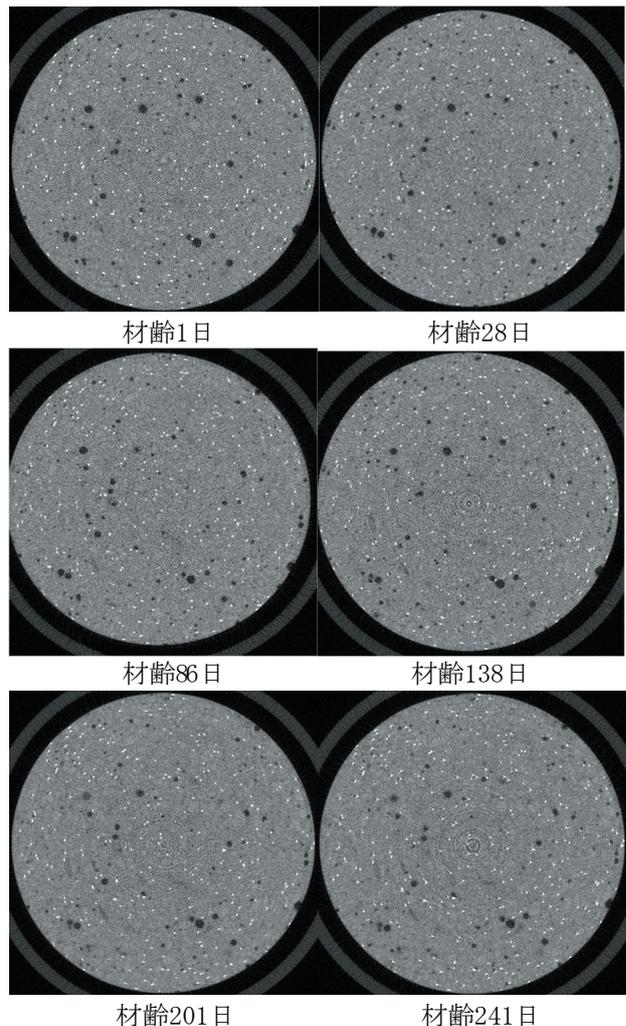


図5 カレット有り供試体における断面画像の変化(アルカリ量0.53%の供試体で高さ中央断面)

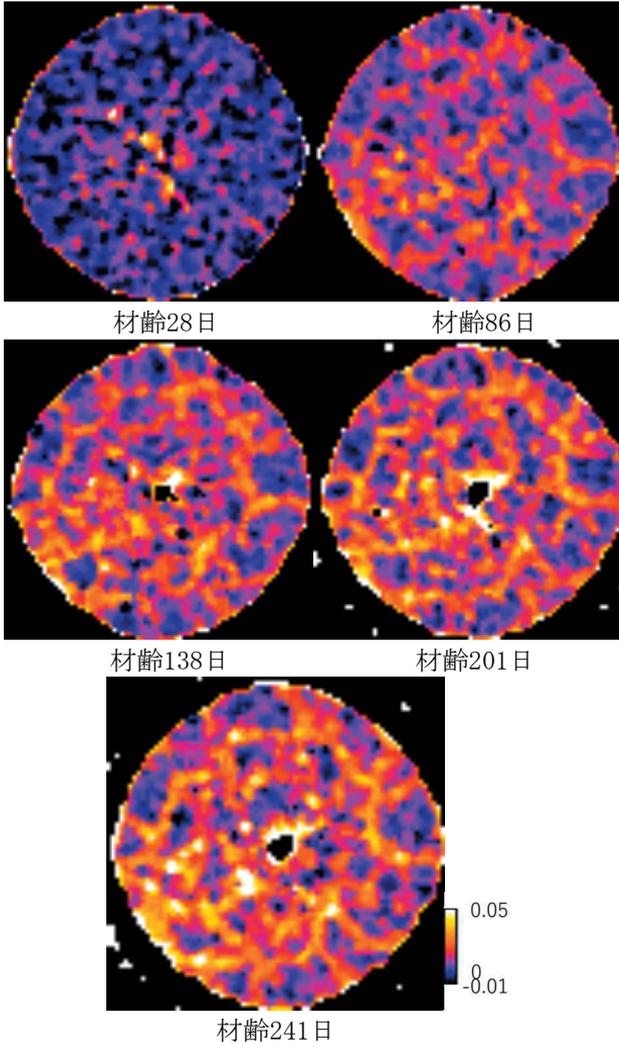
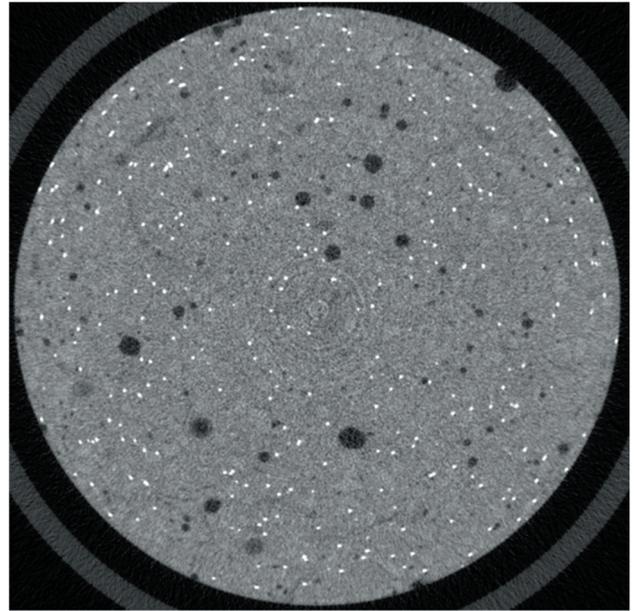


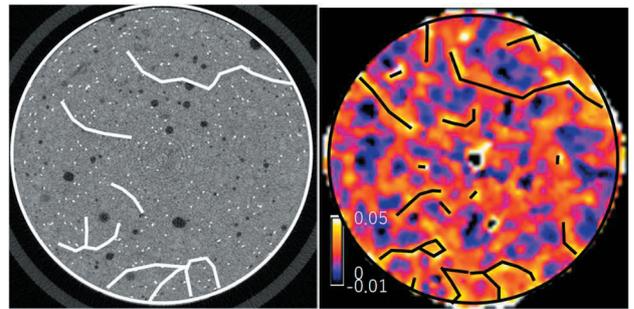
図6 カレット有り供試体における図5の断面画像での体積ひずみの変化(アルカリ量0.53%の供試体で高さ中央断面)

み算出結果を示す。なお、供試体はそれぞれ図3のカレット無しの供試体1、カレット有りの供試体1の結果である。また、体積ひずみの画像は元画像とは解像度が異なるが、一辺が同じとなるように表示して示した。明るいほど膨張ひずみ(正の値)が大きいことを示し、負の値は収縮ひずみを示している。カレットが無い場合、体積ひずみにほとんど変化はなく、膨張傾向は見られない。なお、わずかに収縮した箇所は、自己収縮の影響の可能性もある。この結果は、図3の結果の裏付けとなると考えられる。

一方、カレットが有る場合、一部分で大きな膨張が見られた。カレットの周囲での反応生成物の膨張の可能性もある。また、以上の結果は、カレットを混入することで、膨張の傾向が見られること、それをDVCによる画像計測から算出した体積ひずみで表現できる可能性を示している。



(a) 高さ中央から12mm程度下の断面画像



(b) 断面画像のトレース (c) 体積ひずみのトレース



(d) トレース結果の重ね合わせ
(灰：断面画像、黒：体積ひずみ)

図7 ひび割れ箇所と体積膨張箇所の比較

3.3 ASRで生じた鉱物の膨張過程計測への適用性

図5に供試体の高さ中央の断面画像例を示す。これらの画像は、なお、これは最も膨張したカレット有りの供試体1の結果である。ノイズ除去を目的として、 3×3 でメディアンフィルタ処理した画像である。また、体積ひずみの画像は元画像とは解像度が異なるが、一辺が同じとなるように表示して示した。また、ピクセルサイズは一辺0.123mmであるため、0.1mm程度のひび割れが見分けられると考えられる。40°Cでの養生を開始した直後は、特に目立った特徴はない。材齢28~86日では、一部の空隙が灰色に変化している。一方、材齢138~241日では、少し不明確なところもあるが、0.1mm程度の蛇行線が数カ所見られた。材齢86日までは、空隙への水の浸入等が生じているのみで、ひび割れは観察できないが、材齢201日までに、生じた細いひび割れを観察できた。

図6に、図5の断面位置で生じた体積ひずみ分布を示す。凡例のように明色ほど膨張ひずみ（正の値）が大きく、負の値は圧縮ひずみを示している。なお、これは最も膨張したカレット有りの供試体1の結果である。また、体積ひずみの画像は元画像とは解像度が異なるが、一辺が同じとなるように表示して示した。養生材齢28日では、ほとんど体積変化は生じていないと考えられる。養生材齢86日では、一部で明確な明色の膨張が見られ、線上に連続していた。養生材齢138~241日となると、養生材齢86日に見られた膨張箇所が徐々に明確な幅を持つようになり、さらに連結して網目状を有するようになった。なお、画像中央の大きな膨張ひずみは、リングアーチファクト等による誤差と考えられる。

以上から、ASRによる膨張と見られる箇所での膨張ひずみの増加や連結過程を、定期的に得られたX線CT画像から推定できることがわかる。

3.4 膨張ひずみ値とひび割れとの関係

膨張箇所がひび割れ箇所と一致するかを確認するため、断面画像のひび割れと体積ひずみ画像の明色の箇所を目視でトレースし、それらを重ね合わせて比較することとした。

図8に断面画像のひび割れ発生箇所とDVCの結果で計測された膨張ひずみの箇所をトレースした結果を示す。なお、これは最も膨張したカレット有りの供試体1の結果である。(a)は、供試体高さ中央から12mm下がった位置の断面画像を示す。ひび割れ幅が0.1mm程度であるため、箇所が明確な断面を選定した。(b)は(a)の断面画像のトレース結果である。前後の画像から、ひび割れと判断した箇所を白線として示している。(c)は、同じ断面に関する体積ひずみの計測結果について、体積ひずみ0.02以上の膨張箇所を黒線

として示している。(d)は、(b)と(c)の結果を重ね合わせた図である。(b)の結果を灰線で、(c)の結果を黒線で示した。

完全な一致ではないが、ひずみが0.02以上に膨張している箇所では、目視でひび割れが確認できたか所とおおむね一致していると考えられる。完全でない理由は、断面画像とDVC計測結果の解像度が異なることが原因だと考えられる。一方で、ひずみが0.02以下であっても、膨張が確認された箇所ではひび割れは視認できないものの、微細ひび割れ、あるいはひび割れ直前の膨張が生じていると考えられる。今後ひび割れ進展を計測し、そのことを確認していきたい。

4. まとめ

X線CT画像への画像相関法の適用により、ASR模擬反応生成物の膨張とその増加や連結過程を計測できた。これらの膨張ひずみとひび割れの発生箇所との関係を比較し、体積ひずみ0.02程度以上の大きな膨張箇所ではひび割れ箇所と概ね一致していることが確認できた。今後、追跡調査で、体積ひずみ0.02以下の膨張箇所にひび割れが進展するのか確認していきたい。

ただし、画像計測から得られた高さ方向の長さ変化率は、ASTM C227に準じて計測した長さ変化率より小さかった。この原因は今後の計測の中で検討したい。

謝辞

本研究は科学研究費補助金（基盤研究C、課題番号17K06522）によった。

参考文献

- 1) 例えば、アルカリ骨材反応対策小委員会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書—鉄筋破断と新たな対応—、土木学会、コンクリートライブラリー124（2005）
- 2) 高野大樹、大谷順：X線CTによる地盤材料の構造の可視化 1. X線CTの総論と画像解析手法、材料、Vol. 62, No. 10, pp. 654-659（2013）
- 3) 裏泰樹、麓隆行、竹原幸生：開発したX線CT装置を用いたコンクリートの内部変位計測精度に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 38, No. 1, pp. 429-434（2016）
- 4) 麓隆行：圧縮応力下のコンクリート供試体のX線CT画像への各種3次元画像計測法の適用性、コンクリート工学年次論文集、Vol. 41, No. 1, pp. 53-58（2019）
- 5) 岩月栄治、森野 奎二：水ガラスカレットを用い

- た ASR のメカニズムに関する検討, 土木学会第
6) 64 回年次学術講演会, pp. 199-200 (2009)
- 7) ASTM C227-10 Standard Test Method for
Potential Alkali Reactivity of Cement-
Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)
- 8) 麓隆行: 新しい機構の X 線 CT の開発とポリマー
コンクリートの圧縮試験への適用, 土木学会論
文集 E2, Vol. 69, No. 2, pp. 182-191 (2013)
- 9) Tudisco, E. et al.: TomoWarp2: A local
digital volume correlation code, SoftwareX,
Vol. 6, pp. 267-270 (2017)
- (2019 年 11 月 7 日受付 2020 年 1 月 25 日受理)