

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06522

研究課題名(和文) コンクリート内部の局所変形計測のためのX線CT画像計測法の開発

研究課題名(英文) Development of X-ray CT image measurement method for local deformation in concrete

研究代表者

麓 隆行 (Takayuki, Fumoto)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：30315981

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：圧縮載荷のような短期的に供試体内部の変形計測のために、撮影時の機械的誤差を減らすための載荷板に取り付ける固定点を有する治具を開発した。また、乾燥収縮やASRのような長期的な供試体内部の変形計測のために、供試体に取り付ける治具も開発した。一方、拘束されたASR供試体や凍結融解を受けた供試体について、3次元画像相関法(DVC)を利用して算出した隣り合う計測位置の変位差から内部の体積ひずみを求める場合、治具を用いなくても、十分な精度で計測できることを示した。以上から、コンクリート供試体内部の局所的な収縮・膨張変形を短期・長期的に計測できるX線CT画像計測法を確立できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果としてX線CT装置で活用できる供試体内部の変形手法を開発した。例えば近畿大学のX線CT装置は、使用材料の粒子が大きいコンクリート試験体内部での挙動を計測するために、解像度0.062mm程度で、直径100mmの3次元画像を得られる。これにより、コンクリート分野で一般的に使用される直径100mmの供試体を用いて、応力変形、乾燥収縮、ASR膨張、凍結融解等の状況下で生じる供試体内部で体積変化を可視化することができ、表面から劣化が生じる現象のより深い理解に繋がる。そして、その結果は、FEM等による解析での現象の再現やより適切な構造設計や維持管理にも応用できると期待される。

研究成果の概要(英文)：For short-period deformation measurement inside the specimen such as compression loading, we have developed a jig with fixed balls to attach on the loading plate due to reduce mechanical errors during scanning. We also developed a jig to be attached directly on the specimen for long-period measurement of internal deformation such as drying shrinkage and ASR. On the other hand, the internal volumetric strain is calculated from the displacement difference between the adjacent measurement positions calculated by the digital volume correlation. That volumetric strain had sufficient accuracy without the jig because the difference reduces the error. As the results, an X-ray CT image measurement method for measuring local shrinkage and expansion deformation inside the concrete specimen in the short-term and long-term was established.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート X線CT 画像相関法 体積ひずみ 圧縮応力 乾燥収縮 アルカリ骨材反応 凍結融解

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の管理において、外的要因による劣化の状況を適切に評価するため、劣化深さや進行予測を適切に行うための基礎知見が重要となる。特に、様々な環境下での供試体内部の膨張や収縮を伴う変形を計測し、深さ方向への劣化の進行速度や劣化程度の分布に関する知見を得ることが使用材料の役割や劣化の進行を知るうえで有効だと考えられる。しかし、劣化による内部の変形挙動の解明には理論モデルや 2 次元計測等、間接的な検討が多く、より直接的な 3 次元での内部の可視化やその計測はまだない。

材料内部の 3 次元可視化手法の一つに X 線 CT 法があり、地盤工学や建設材料学等でも使用されている。変形前後の X 線 CT 画像のから内部変形計測も行われている。研究代表者は、これまで粒子追跡法 (PTV) 計測の手法を検討してきた。しかし、トレーサーへの粒子追跡法 (PTV) 計測では、粒子配置が離散的で、小粒径だと重心位置の計測精度も限界がある。一方、局所的な変形の 3 次元分布の計測には、3 次元画像相関法 (DVC) が適すると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究では、コンクリート内部の局所的な収縮・膨張変形の 3 次元分布計測のための X 線 CT 画像計測法の開発を目的とした。具体的には、DVC による計測手法の開発と計測精度の検討を行い、短期的な計測例としてコンクリートの圧縮荷重試験での内部収縮計測を実施した。また、膨張変形および数ヶ月以上の長期計測の事例として、アルカリ骨材反応 (ASR) による内部膨張計測の検討により、妥当性の検討を行った。また、追加事例として、乾燥や凍結融解による内部変形計測についても適用性を調べ、多様な環境下の供試体の変形計測に適用できることを確認した。

### 3. 研究の方法

まず、供試体に既知の移動量を与えた際の各画像計測法での計測精度を確認した。このとき、既往の研究結果に基づき、撮影時の機械的誤差を減らすために今回開発した固定された基準点となるセラミック粒子を取り付けたプラスチック円筒を上部載荷板に取り付けた。これらの移動ベクトルから、3 次元計測結果の誤差をアフィン変換にて減らした。3 次元画像の画素は一辺 0.123mm の立方体である。ここでは 2 種類の画像計測手法で 3 次元変形計測を行った。

次に精度を確認した手法を用いて、短期計測例として、圧縮応力下の変形を計測した。ペーストの水セメント比 0.6 のペーストを用いて、実験を行った。ペーストのみの供試体と、中央に 1 粒の碎石を設置したペースト供試体の 2 種類を用意した。側面のひずみゲージで所定の圧縮ひずみを与えた状態で得られた X 線 CT 画像を用いて DVC で計測を行い、計測結果から、供試体中央部から高さ方向に  $\pm 27$  mm 離れた供試体内部の 2 つの水平面の垂直変位の平均値を求め、その差を用いて 2 平面間の垂直ひずみを算出した。また、隣り合う計測結果から各着目点での各軸方向のひずみを算出し、それらの合計を体積ひずみとして算出した。

また、ASR による内部膨張計測を、長期計測例として実施した。基準モルタルは、水道水、研究用普通セメント ( $\text{Na}_2\text{O}$  等価量 0.55%)、石灰石砕砂を質量比 1 : 2 : 4.5 で混合し、作製した。ASR 模擬供試体には、早期の膨張により適用性を確認するため、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。供試体には、図-1 のように画像計測時の機械的誤差を減らすための位置補正の基準となるセラミック球を有するプラスチック円筒を取り付けた。そして、温度 40°C、相対湿度 90% 以上の箱内で、供試体を養生した。所定の材齢で、近畿大学所有の X 線 CT 装置にて供試体高さ中央部を撮影した。得られた X 線 CT 画像を用いて、DVC により内部変形を計測した。その結果を用いて、隣接するサブセットの変位差から各軸方向のひずみを算出し、体積ひずみを算出した。

その後、乾燥収縮時の内部収縮および凍結融解時の内部膨張への適用性の確認も試みた。

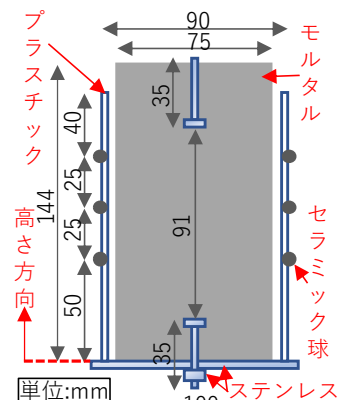


図-1 供試体の概要図

### 4. 研究成果

#### (1) 主な実験結果

図-2 に、ジルコニア球の粒径ごとに供試体の移動距離と画像計測結果の標準偏差の関係を示す。図中には、PTV で計測した結果と DVC で計測した結果を示している。この結果から、PTV の場合、粒径 1.0mm 以上の粒子を用いると、また DVC の場合、粒径 0.3mm 以下の粒子を用いると、0.01mm 程度の誤差で移動距離を計測できた。DVC の場合、0.3mm 以下の粒子を用いれば、小さな範囲を対象としても画像相関の十分な精度となった。

次に、圧縮応力下での内部変形計測を試みた結果を示す。X 線 CT 法で撮影された破壊後の供試体縦断面画像を示す。いずれもせん断ひび割れを生じて破壊していた。特に碎石を入れた場合、碎石の形状や配置の影響もあり、粒子上面がすべり面となり、破壊に至っていた。破壊過程を推定するため、それぞれの供試体側面に貼り付けたひずみゲージの平均値が 1000 $\mu$  と 3000 $\mu$  付近での X 線 CT 画像から算出された供試体中央縦断面の体積ひずみ分布を比較した。その結果を

図-3 に示す. 圧縮応力の増加による供試体内の圧縮ひずみ領域の増加は, 碎石の有無により差は見られない. しかし, 碎石が存在すると周囲にせん断変形とみられる膨張ひずみが多くなり, ひずみの増加とともに, 骨材面の延長上にせん断ひずみが延長されていき, やがてせん断破壊に至る経過が確認された.

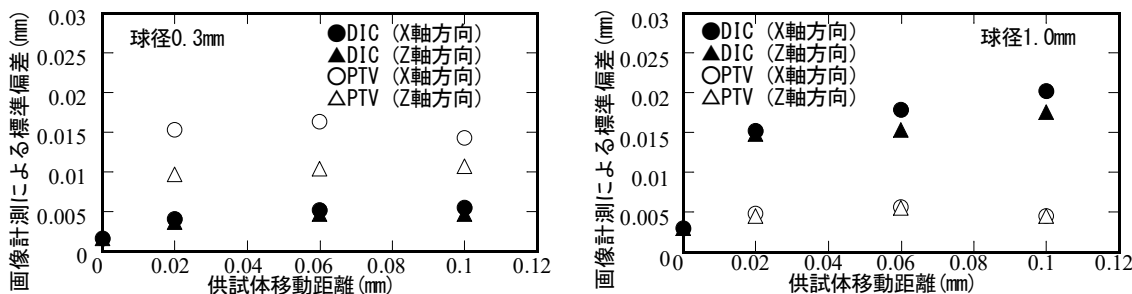


図-2 粒径 0.3mm および 1.0mm の粒子を混入した供試体移動距離と画像計測結果の標準偏差との関係

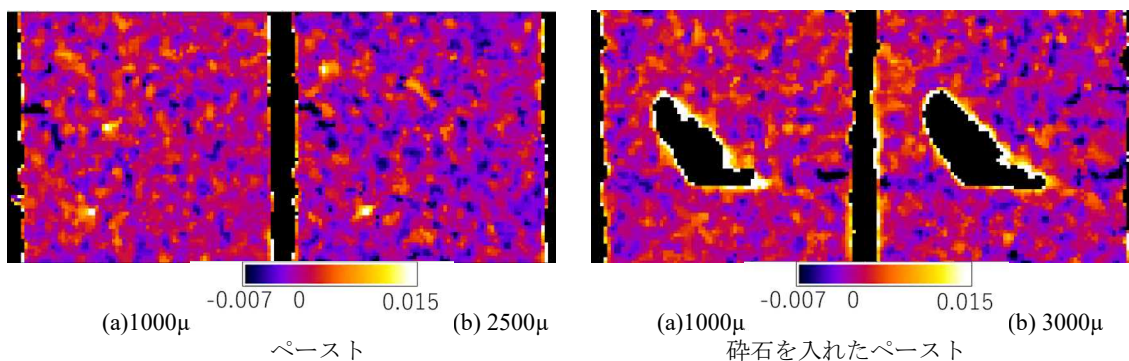


図-3 ゲージ値 1000 or 3000μ の際の供試体中央縦断面での体積ひずみ分布

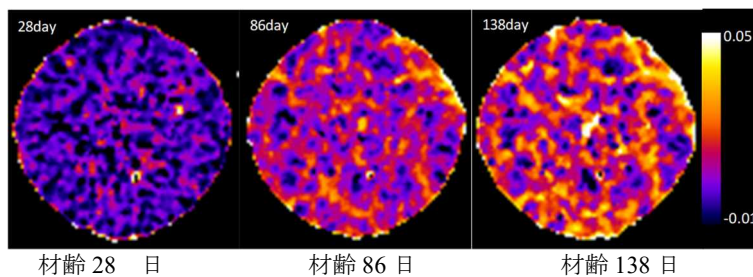


図-4 供試体高さ中央の水平断面で生じた体積ひずみ

図-4 に ASR 模擬骨材を混入した供試体の画像計測結果をから供試体高さ中央の水平断面での体積ひずみ分布を示す. 材齢 28 日では全面に圧縮ひずみが散見された. 材齢 86 日では長さ変化率の増加に伴い, 供試体内部にも膨張ひずみが網目状に生じていた. それらを中心に材齢 138 日には局所的に膨張, 連続し, 長さ変化の増加につながったと考えられた. すなわち, アルカリ骨材反応による粒子周囲の膨張変形を計測できる可能性が示された. この傾向は, 基準モルタルでは, 確認されなかった.

このほか, 乾燥収縮によるコンクリート供試体内部の収縮変形や凍結融解による凍結融解による内部の膨張変形に関する計測にも適用を試み, 従来の見かけの変形計測と同程度の精度で, 内部ひずみ分布を 1~2mm 単位で計測でき, 配合条件の違いを明らかにできる可能性を示した.

### (2) 得られた成果の特徴と位置づけ

以上から, 本研究では, 圧縮荷重のような短期的な供試体内部の変形計測のために取り付ける固定点を有する治具とともに, 乾燥収縮や ASR のような長期的な供試体内部の変形計測のために, 供試体に取り付ける治具を開発した. 一方, 拘束された ASR 供試体や凍結融解を受けた供試体について, DVC を利用して内部の体積ひずみを求める場合, 治具を用いなくても, 十分な精度で計測できることを示した. そして, これらの手法を用いて, 圧縮応力, アルカリ骨材反応, 乾燥, および凍結融解にさらされた供試体の内部変形計を試み, 有益な情報を得られる精度があることを確認した. したがって, コンクリート供試体内部の局所的な収縮・膨張変形を短期・長期的に計測できる X 線 CT 画像計測法を確立できた.

### (3) 今後の展望

本成果により, コンクリート分野で一般的に使用される直径 100mm の供試体を用いて, 応力変形, 乾燥収縮, ASR 膨張, 凍結融解等の状況下で生じる供試体内部で体積変化を可視化することができ, 現象のより深い理解に繋がる. そして, その結果は, FEM 等による解析での現象の再現やより適切な構造設計や維持管理にも応用できると期待される.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 麓隆行	4. 巻 41
2. 論文標題 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	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 53-58
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 麓隆行	4. 巻 19
2. 論文標題 X線CT法によるペースト供試体内部の水分逸散による体積変化分布に関する基礎研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 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	6. 最初と最後の頁 407-412
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 瀬古繁喜, 麓隆行, 裏泰樹, 山田和夫	4. 巻 40
2. 論文標題 圧縮強度の水準が30N/mm <sup>2</sup> と100N/mm <sup>2</sup> で高さ直径比が異なるモルタル供試体の圧縮載荷時における破壊挙動に関する研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 pp.417-422
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 的場良太, 裏泰樹, 三方康弘, 麓隆行	4. 巻 39
2. 論文標題 ASR と鋼材腐食による複合劣化が生じた RC はり部材の耐荷特性やひび割れ特性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 925-930
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 瀬古繁喜, 麓隆行, 裏泰樹, 山田和夫	4. 巻 39
2. 論文標題 直径と高さ直径比が異なるモルタル供試体の圧縮強度試験における破壊進展状況に関する研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 313-318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 迫井裕樹, 麓隆行, 阿波稔, 月永洋一	4. 巻 39
2. 論文標題 凍結融解環境における塩化物イオン浸透性	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 751-756
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 麓隆行, 若月栄治, 中井慶成
2. 発表標題 ASR模擬供試体内部の膨張計測へのX線CT画像を用いた画像相関法の適用性
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 麓隆行, 高木雅斗, 藤田昇悟
2. 発表標題 X線CT法によるペースト供試体内部の水分逸散と体積変化分布に関する基礎検討
3. 学会等名 資源・素材2019 (秋季大会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 麓隆行, 山本康輔, 岩月栄治, 中井慶成
2. 発表標題 X線CT画像と画像相関法を用いたASR模擬供試体内部の膨張計測に関する検討
3. 学会等名 資源・素材2019 (秋季大会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Fumoto and Stephen Hall
2. 発表標題 Fundamental study on deformation of paste around one aggregate in specimen under compressive stress by x ray CT and DVC
3. 学会等名 the 6th International Conference on Material Modelling (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Fumoto and Stephen Hall
2. 発表標題 DEFORMATION OF MORTAR AROUND AN AGGREGATE IN A TRIAL SPECIMEN UNDER COMPRESSIVE STRESS USING X RAY CT AND DVC
3. 学会等名 International Conference on Tomography of Materials & Structures (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大林俊介, 波多野雄士, 三方康弘, 井上晋
2. 発表標題 ASRを生じたコンクリート供試体の経過観察
3. 学会等名 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 田中宏幸, 三方康弘, 井上晋
2. 発表標題 ASR劣化によるPRC部材の経時挙動に関する研究
3. 学会等名 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大林俊介, 波多野雄士, 三方康弘, 井上晋
2. 発表標題 ASRを生じたコンクリート供試体の超音波トモグラフィー計測
3. 学会等名 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中宏幸, 三方康弘, 井上晋
2. 発表標題 ASR劣化によるPRC部材の経過観察に関する研究
3. 学会等名 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本康輔, 高木雅斗, 麓隆行
2. 発表標題 モルタル供試体内部の乾燥率と体積変化の計測へのX線CT画像の適用性
3. 学会等名 2020年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 麓隆行, 川本幸宏, 村田隆男, 高田良章
2. 発表標題 凍結融解を繰り返した供試体内部の体積変化計測へのX線CT法の適用
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本康輔, 麓隆行, 三方康弘, 大林俊介
2. 発表標題 X線CT法を用いた拘束下のASR反応性骨材を用いた供試体内部の基礎検討
3. 学会等名 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大林俊介, 山本康輔, 波多野雄士, 三方康弘, 麓隆行
2. 発表標題 超音波トモグラフィ計測とX線CT撮影によるASRを生じたコンクリートの健全度評価
3. 学会等名 2020年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中宏幸, 三方康弘, 井上晋
2. 発表標題 ASR劣化が生じたPRCはり部材のせん断耐荷特性
3. 学会等名 2020年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 K. Takehara, T. Fumoto
2. 発表標題 Measurement of three-dimensional deformation inside construction material using X-ray CT and particle tracking velocimetry
3. 学会等名 3rd International Conference on Tomography of Materials and Structures (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Ura, T. Fumoto, K. Takehara
2. 発表標題 Fundamental Study on Error of Moving Displacement Measured Using New X-Ray CT Apparatus
3. 学会等名 3rd International Conference on Tomography of Materials and Structures (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	岩月 栄治  (Iwatsuki Eiji)  (10278228)	愛知工業大学・工学部・教授    (33903)	
研究分担者	三方 康弘  (Mikata Yasuhiro)  (60434784)	大阪工業大学・工学部・教授    (34406)	