

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：34419

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630207

研究課題名（和文）X線CTとPTVを用いたコンクリート内部の変形計測手法の開発

研究課題名（英文）Development of Measurement Method for Internal Displacement in Concrete with X Ray Computed Tomography and Particle Tracking Velocimetry

研究代表者

麓 隆行（FUMOTO, Takayuki）

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） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：既往の研究では、載荷や劣化によるコンクリート内部の膨張、収縮挙動について、理論モデルや画像相関法などを用いた推定にとどまっている。より実際の内部変形挙動を計測するため、研究代表者は、新たなX線CT装置を開発し、X線CTやPTVを用いた3次元での内部変形計測法を提案した。本研究では、提案した計測手法の開発を目的とし、指標の選定、基礎計測技術の確立、そして適用性確認を行った。その結果、ジルコニア球を指標とし、基準点を用いた座標変換により、圧縮試験時のコンクリート内部の変形を270 μ 程度の誤差までで計測できる手法を確立できた。

研究成果の概要（英文）：In previous studies, the expand or shrinkage displacement in the concrete specimen was estimated with the theoretical models or 2-dimensional image correlation methods. To understand the practical internal displacement in concrete, we have developed the new X ray computed tomography apparatus and propose the measurement methods with the 3-dimensional image and the particle tracking velocimetry method. In this study, for the development of the proposal measurement methods, the tracer for the displacements is selected, fundamental measurement techniques are developed and the developed measurement method is applied for the internal displacements of concrete specimens. As the results, it is clarified that the best marker was the zirconia ball and the coordinate transformation decreased the mechanical errors of 3-dimensional images. We can to measure the internal displacements of the concrete specimen with the error of approximately 270 μ with the method proposed in this study.

研究分野：建設材料学

キーワード：コンクリート X線CT PTV 3次元画像 画像計測 内部変形

1. 研究開始当初の背景

老朽化したコンクリート構造物への適切な対策を講じるためには、荷重や劣化によるコンクリートの性能低下度合いの評価が重要である。既往の研究では、外的要因によるコンクリート内部のペーストの膨張、収縮挙動を理論モデルや断面の画像相関法などで推定するにとどまっている。そのため、3次元で詳細な内部の変形計測を試みた結果はほとんどなく、未解明な点も多い。

材料内部の観察手法の一つに X 線 CT 画像の画像計測がある。地盤工学分野での利用は多いが、建設材料分野での利用は少ない。その理由の一つが、コンクリート供試体を対象とすると、形状が大きく、高荷重での荷重状態の再現が難しいことである。そのような現状に対して、研究代表者は、図 1 に示す 300kN まで荷重しながら撮影できる X 線 CT を開発した。この装置を用いた計測手法を開発すれば、前述の解明に寄与できると考えられる。

X 線 CT 画像は、対象物内部の X 線の減衰度合いの 3 次元分布である。X 線の減衰度合いは、照射した X 線の強さ、物質の密度や材質等の影響を受ける。コンクリート内部の X 線 CT 画像では、ペースト、細骨材および粗骨材の密度が近いと、大型試験体での画像解析で認識することは難しい。そこで、コンクリートにトレーサーを混合し、これまでに無い、X 線 CT や PTV を併用した 3 次元でのペーストの詳細な変形挙動計測を考えた。

本研究の手法が確立されれば、Hashin²⁾の提案する複合則理論モデルの検証、アルカリ骨材反応における骨材周囲での膨張挙動とひび割れ発生機構の解明、凍結融解試験でのコンクリート内部の膨張、収縮範囲の同定など、コンクリートの現象解明が期待できる。

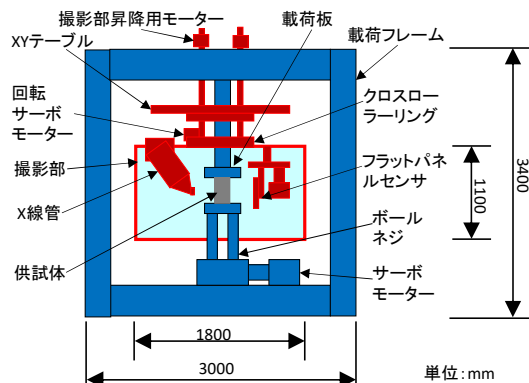


図 1 開発した X 線 CT 装置¹⁾

2. 研究の目的

本研究では、X 線 CT と 3 次元 PTV により、コンクリートに混合したトレーサーの移動計測を行い、内部変形の計測手法を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究で明らかにする課題をまとめると以下ようになる。

(A) トレーサーの選定

(B) X 線 CT と 3 次元 PTV による基礎計測技術の確立

(C) コンクリート試験体の荷重への適用性

4. 研究成果

4.1 トレーサーの選定

(1) 画像の比較による選定

本研究では、密度 3.98g/cm^3 のアルミナ粒子、密度 4.90g/cm^3 の酸化鉄粒子、および密度 6.06g/cm^3 のジルコニア球について、各 2 種類の粒子径を候補とした。早強セメントを用いた $W/C=65\%$ のモルタル全体積の 0.5% を細骨材の一部として指標を混入した。φ75mm×150mm の供試体を作製し、材齢 7 日に X 線 CT 装置にてスキャンした。

図 2 に各種の指標を混入したモルタルの断面画像を示す。アルミナ粒子を混入した場合、粒子はほとんど確認できない。酸化鉄を混入した場合、粒径 0.6mm では粒子が視認できる。そして、ジルコニア球を用いた場合、粒径に関わらず粒子が視認できる。すなわち、セメントペーストや骨材に対して密度差が 4g/cm^3 以上だと、指標位置を分別できる可能性がある。また、粒径が小さいと、同じ体積を混合した場合に、より情報を得られる可能性がある。そこで、本研究では、 0.3mm のジルコニア球を指標として選定した。

(2) 選定粒子の内部変形計測への適用性確認

次に、選定した指標を混合したモルタル供試体 6 体を作製し、3 体にひずみゲージを添付し、JIS A 1108 に準じて圧縮強度試験を行った。その後、残りの 3 体を用いて、任意の圧縮荷重を負荷した状態での X 線 CT 撮影から得た 3 次元画像から、求めたい 2 つの荷重の断面画像を選定し、PIV (Particle Image Velocimetry; 粒子画像流速測定法) を用いて粒子の移動量を計測した。PIV には、イリノイ大学で開発されたフリーソフトウェア²⁾を使用した。X 線の照射条件を電圧 210kV、電流 $100\mu\text{A}$ 、解像度 0.123mm とし、試験体高さ中央から上下 30mm の範囲を計測対象とした。

図 3 に、JIS に準拠した圧縮試験(以下、JIS 法)による応力-ひずみ関係と、X 線 CT 装置で

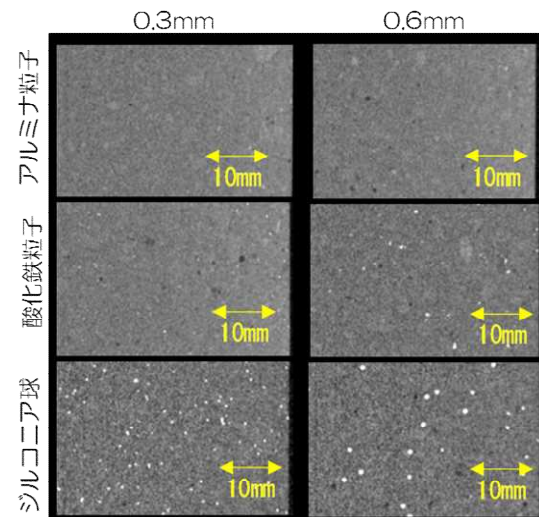


図 2 供試体の断面画像例

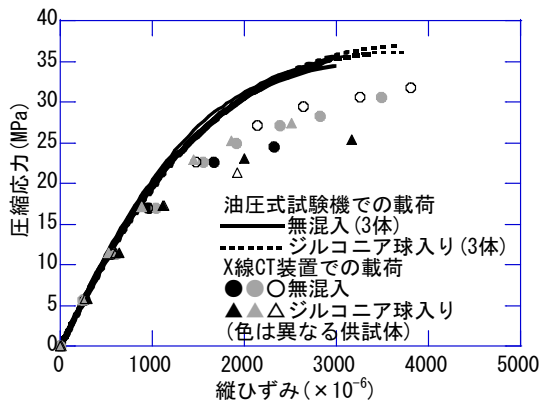


図3 応力-ひずみ関係

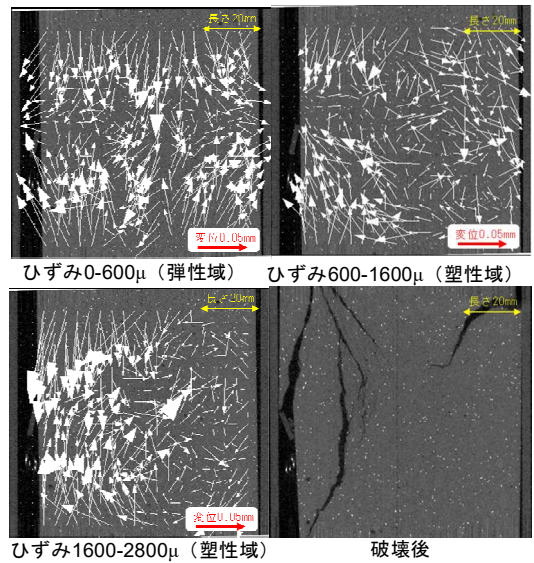


図4 供試体断面画像

荷重を実施した際の応力-ひずみ関係を重ねて示す。JIS法では、指標の有無による応力-ひずみ関係に差はみられない。X線CT装置での荷重では、15MPa程度まではほぼ同じ傾向だが、それ以降はJIS法に比べて同じ圧縮応力下でのひずみが大きくなった。最終的に圧縮強度も14~25%ほど低下した。これは、X線CT撮影で150秒間、一定の圧縮応力で保持するため、高荷重域ではクリープ破壊が進行したことが原因だと考えられる。しかし、破壊時のひずみ値に大きな差はなく、本装置は変形傾向の考察に有効だと考えられる。

図4に、ひずみ0, 600, 1600および2800μの各間のX線CTによる断面画像を用いたPIV計測結果と破壊後の断面画像を示す。ひずみ0-600μでの領域では、供試体の高さ方向の中央に向かって上下から軸方向の圧縮変位が生じ、軸直角方向の膨張変位が生じている状況が計測できた。その傾向は供試体外周ほど大きい。

ひずみ600-1600μでの領域では、断面画像の右上および左下に大きな斜めの変位が生じ、断面中央に斜めに生じたせん断面が見られた。その後、ひずみ1600-2800μの領域では、左中央部に縦方向の変位が集中している様子が見られる。その変位の集中する箇所は、破壊後に示された断面画像の左側での破壊位

置と一致していた。
 以上から、粒径0.3mmのジルコニア球を混入したモルタルで、圧縮応力下の供試体の内部をPIVにより計測したところ、供試体の内部変形状況を計測でき、最終的な破壊に至る過程を推定できた。

4.2 X線CTと3次元PTVによる基礎計測技術の確立

(1) アフィン変換の適用性の確認

コンクリートの圧縮試験において、破壊時の縦ひずみは3000~4000μになると考えられる。その際、X線CT装置で一度に計測できる高さ60mm程度の範囲では、0.18~0.24mm程度の変形が生じる。その変形を計測するために、X線CT画像を用いたPTV計測では約0.01mmの精度が必要だと考えた。そこで、現状の手法での計測精度の確認と、座標変換による精度改善を試みた。

40個の直径14.288mmのセラミック球をランダムに内径60mmのポリスチレン容器に詰めた。このポリスチレン容器を載せたXYZフラットステージをX線CT内のステージに設置した。セラミック球は相互差0.04μm、真球度0.081μmのベアリング用真球である。そこに図5に示す12個の直径2.381mmの基準点を有する治具を、ステージの動きに影響されない上部載荷板に取り付けた。

ステージを稼働させず、ポリスチレン容器の高さ中央位置を中心に、X線CT装置で12回連続して撮影した。撮影条件を電圧175kV、電流50μA、分解能0.123mmとした。

X線CT画像をPタイル法にてセラミック球を2値化した後、市販の画像解析ソフトを用いて個々のセラミック球と基準点の同定と重心位置や球相当直径の算出を行った。

本研究では、1回目の重心位置を真の座標、2回目以降の重心位置を計測座標とした。真の座標と計測座標との差から求めた誤差ベクトルのスカラー量が、図6のようにガウス分布に従うと仮定し、真の座標からの偏りを評価するために平均値を系統誤差とし、そして計測値のばらつきを評価するために標準偏差を計測誤差として算出した。

精度改善方法として、撮影上の機構の誤差を減らすため、式(1)によりアフィン変換(座標変換)³⁾を行った。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & b_x \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & b_y \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & b_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、a11~a33およびbx~bzは定数である。基準点を用いて最小二乗法により逆算した変換行列を用いて、2回目以降のセラミック球の重心位置の幾何変換を行い、1回目の重心位置との関係から、誤差、系統誤差および計測誤差を算出した。

図7に、各撮影回数でのアフィン変換前後の40個のセラミック球の系統誤差を示す。アフィン変換前の系統誤差は、約0.005~

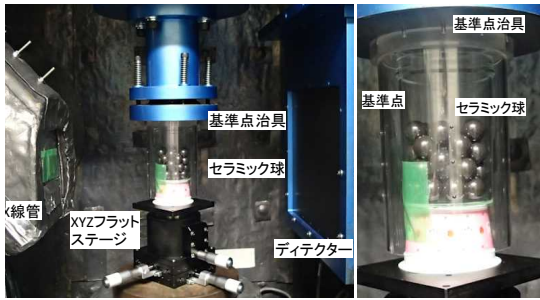


図5 X線CT装置での撮影図

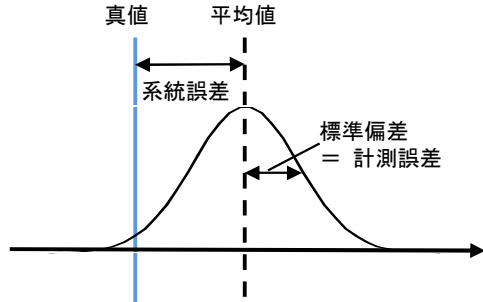


図6 本研究での系統誤差と計測誤差の関係

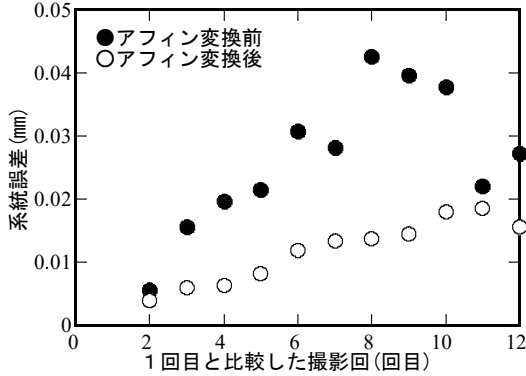


図7 アフィン変換前後の系統誤差

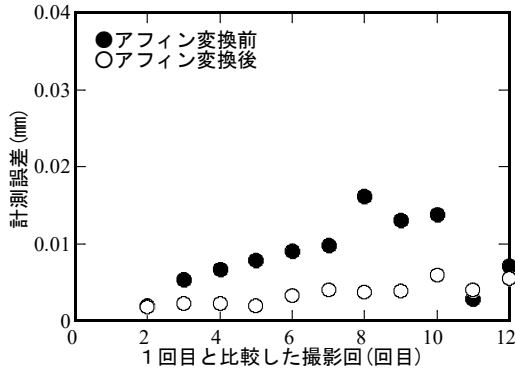


図8 アフィン変換前後の計測誤差

0.043mmの範囲であった。アフィン変換を行った場合、回数を重ねるごとに増加するものの、6回目までで0.012mm以下の系統誤差であった。また、9回目までで0.015mmとなり、10~12回目で最大約0.019mmに留まった。

図8に、アフィン変換前後の40個のセラミック球の計測誤差を示す。系統誤差と同様の傾向となった。

以上から、連続して12回撮影したX線CT画像から、画像計測によりセラミック球の重心位置を算定した結果、6回程度であれば、系統誤差0.012mm、計測誤差0.006mm以内の

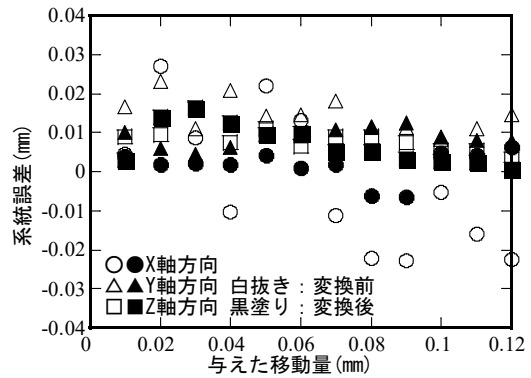


図9 与えた移動量と系統誤差との関係

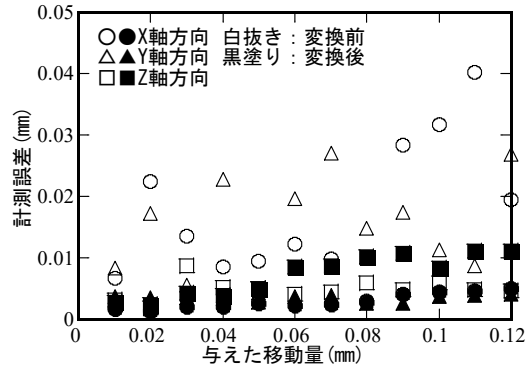


図10 与えた移動量と計測誤差との関係

誤差で計測可能であり、目標とした0.01mm程度の計測精度が得られることがわかる。

(2) セラミック球の移動量の計測精度に関する検討

4.2(1)節と同様の計測を、XYZフラットステージを各軸方向に0.01mmずつ0.12mmまで移動させて実施した。そして、前節と同様に、得られた3次元画像からセラミック球を同定し、重心位置を算定した。そして、アフィン変換の有無の効果について検討した。

図9に移動を計測した場合の系統誤差を示す。アフィン変換前では、X軸方向に-0.022~0.027mmの差が、Y軸方向に0.008~0.023mmの差が、そしてZ軸方向に0.003~0.016mmの差が見られた。この差は、アフィン変換によりX軸方向-0.006~0.006mmに、Y軸方向0.004~0.013mm、Z軸方向0.001~0.016mmとなった。

図10に移動を計測した場合の計測誤差を示す。X軸方向に0.003~0.040mm、Y軸方向に0.004~0.027mm、そしてZ軸方向に0.002~0.009mmとなった。この計測誤差は、アフィン変換により、X軸方向に0.001~0.005mmへと、Y軸方向に0.003~0.004mmおよびZ軸方向に0.002~0.011mmとなった。

以上より、アフィン変換による精度改善は有効であり、開発した装置で連続的に増加する変位を計測した場合、系統誤差は-0.006~0.016mm、その計測誤差0.011mm以内の計測可能であることがわかった。すなわち、0.01~0.02mmの精度で計測できると考えられる。

4.3 コンクリート試験体の載荷への適用性

直径0.34mmのジルコニア球を指標とし、W/C=50%のモルタル供試体(直径75mm×高

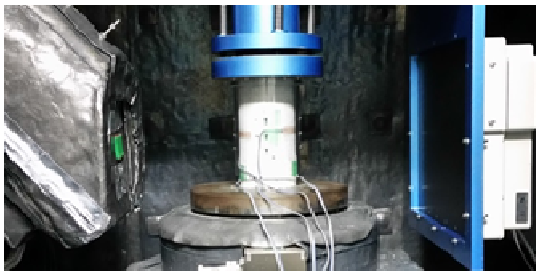


図 11 CT 法試験風景

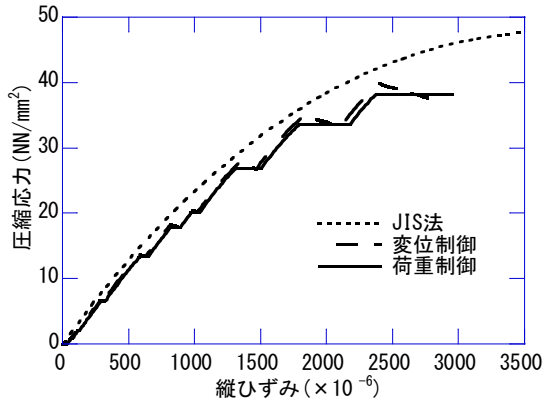


図 12 圧縮強度試験の応力-ひずみ曲線

さ 150mm) を作製した。材齢 83 日に水中から供試体を引き上げ、左右側面にひずみゲージを貼り付けた。JIS A 1108 に準じて圧縮強度試験を行った (以下、JIS 法) 後、図 11 のように開発した X 線 CT 装置で、圧縮応力下でモルタルの撮影を行った。JIS 法の結果により定めた 10 段階の目標荷重に達した際に、X 線 CT 撮影を開始した。撮影中の制御法として、荷重計の支持値を一定とする方法と、変位系の支持値を一定とする方法の 2 種類を試みた。撮影条件は管電圧 190kV、管電流 100 μ A、分解能 0.123mm、撮影時間 400s で行い、撮影範囲は試験体中央から \pm 3cm とした。以降、この方法を CT 法と記す。

市販の画像ソフトを用いて、ジルコニア球と基準点を同定後、球相等直径や重心位置を計測した。そして、異なる荷重下の 3 次元画像を用いて、同じ指標の重心位置の移動を PTV により推定した。その際、機械的誤差を小さくするため、基準点を用いたアフィン変換を行った。

本研究で適用した内部変形計測法の精度の確認を行った。供試体左右側面に貼り付けたひずみゲージの上に、直径 0.34mm のジルコニア球をひずみゲージの中心、中心 \pm 25mm の 3 点、左右で計 6 点貼り付けた。この 6 点に対して求めた変位から各ジルコニア球間のひずみを算出し、ひずみゲージの計測値と比較した。

JIS 法、CT 法での応力-ひずみ曲線を図 12 に示す。また、撮影中の荷重を一定とした場合と、変位を一定とした場合も比較した。13N/mm² までの弾性域付近では全供試体ともほぼ同一直線状にあった。しかし、それ以上載荷すると CT 法でのひずみが JIS 法に比べて大きくなった。CT 法では、供試体が撮影

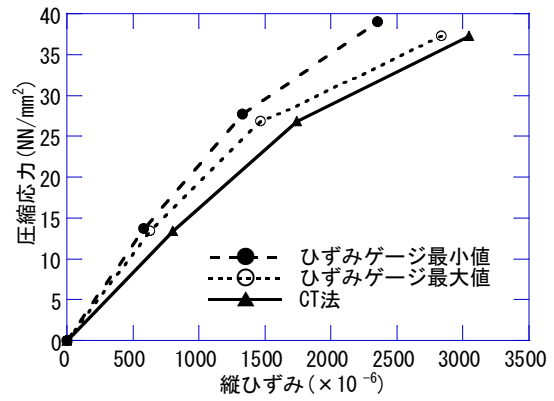


図 13 精度確認結果

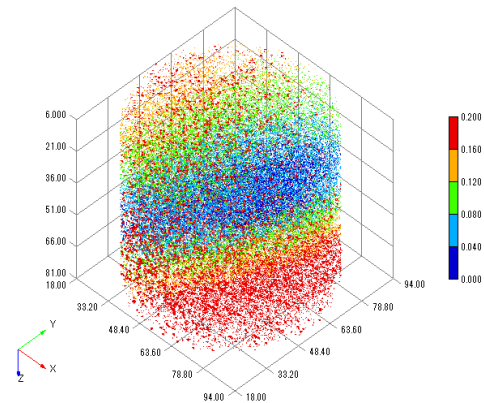


図 14 PTV 結果 1kN~170kN

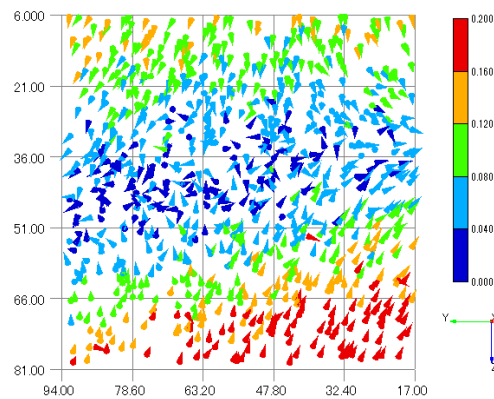


図 15 PTV 結果 (YZ 断面) 1kN~170kN

時に 400 秒間一定の圧縮応力を受けるため、塑性域ではクリープ破壊が進行したと考えられる。また、クリープ破壊に関して、荷重を一定として撮影した場合に比べて、変位を一定として撮影した場合のほうが、荷重が大きくなり、破壊に近くなると応力緩和によるひずみの変化はあるものの、その大きさが小さくなった。すなわち、計測による変形量の誤差が小さくなると考えられる。以上から、以降の結果では、X 線 CT 撮影時に変位を一定として載荷板を制御した結果を示す。

内部変形計測で求めたひずみ値と、ひずみゲージでの計測値との比較を図 13 に示す。CT 撮影中にクリープ破壊が発生することを考慮し、撮影開始時、撮影終了後の最小、最大のひずみと 3 次元画像による内部変形計測で求めたひずみを比較した。内部変形計測で

の値とひずみゲージ値との差は、載荷荷重によりばらつきはあるものの $178\sim 274\times 10^{-6}$ となった。この値は、長さ 50mm を基長とすると $0.010\sim 0.016\text{mm}$ の変形量となった。この変形量の誤差は、既往の研究 4.2(2)節の結果で示された、X線 CT 装置による機械的な誤差 ($-0.006\sim 0.016\text{mm}$) と同程度であった。以上の計測精度で得られた 3次元変形分布を図 14 に、YZ 断面の結果を図 15 に示す。

4.4 まとめ

以上の研究から得られた提案手法による計測条件や精度と今後の課題をまとめる。

- 1) セメントペーストや骨材に対して密度差 $4\text{g}/\text{cm}^3$ 以上で、指標位置を識別できる
- 2) 基準点を設けてアフィン変換を行うことが精度向上に効果的である。
- 3) XYZ 軸方向への移動に対する系統誤差は $-0.006\sim 0.016\text{ mm}$ 、その計測誤差 0.011mm 以内であった。
- 4) X線 CT 撮影時の載荷方法は、荷重を一定とする制御よりも変位を一定とする制御の方が、破壊荷重に近い場合にクリープ破壊の進行を抑制できる。
- 5) 以上を考慮して計測した結果、CT 法での計測結果は、ひずみゲージを用いた計測結果に比べて $178\sim 274\times 10^{-6}$ ほど大きくなった。この値は、長さ 50mm を基長とすると $0.010\sim 0.016\text{mm}$ の変形量となり、まとめの 3) と同程度であった。

以上から、機械的な誤差による影響はあるものの、 270×10^{-6} 程度の誤差までで変形を計測できた。今後は、X線 CT 装置での機械的な誤差を減らすために、指標の大きさの選定や基準点の計測精度等を工夫することで、精度の良い計測を検討したい。

参考文献

- 1) 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.
- 2) K.T. Christensen, S.M. Soloff, R.J. Adrian: PIV Sleuth, Technical Report 943, Department of Theoretical and Applied Mechanics, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2000.
- 3) 江見圭司, 江見善一: 線形代数と幾何 - 多次元の図形的解釈 -, 共立出版, pp. 120-123, 2004.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 麓隆行, 裏泰樹, 竹原幸生, X線 CT を用いた圧縮応力によるコンクリート内部の変形計測に用いる指標に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 38, No. 1, pp. 423-428(2016)
- ② 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, 査読有, Vol. 38, No. 1, pp. 429-434(2016)

[学会発表] (計 8 件)

- ① Taiju URA, Takayuki FUMOTO, Kohsei TAKEHARA: Fundamental study on error of moving displacement measured using new X-ray CT apparatus, 3rd International Conference on Tomography of Materials and Structures, Poster, Sweden Lund(2017)
 - ② Kohsei TAKEHARA, Takayuki FUMOTO, Taiju URA: Measurement of Deformation inside concrete under Large compression stress by X ray CT and PTV, 3rd International Conference on Tomography of Materials and Structures, Poster, Sweden Lund(2017)
 - ③ 裏泰樹, 麓隆行, 竹原幸生, X線 CT と 3次元画像計測による圧縮試験時のコンクリート内部の変形計測に関する基礎検討, 資源・素材講演集, pp. CD-ROM-(2016)
 - ④ 裏泰樹, 麓隆行, 竹原幸生, X線 CT と PTV を用いた載荷によるコンクリート内部変形計測法の開発, 土木学会第 71 回年次学術講演会, (2016)
 - ⑤ 裏泰樹, 麓隆行, X線 CT を用いた圧縮応力によるコンクリート内部の変形計測に関する基礎, 日本実験力学学会, (2016)
 - ⑥ Takayuki FUMOTO and Kousei TAKEHARA: Measurement of three-deformation inside construction material using X ray CT and particle tracking velocimetry, 2nd International Conference on Tomography of Materials and Structures, Poster, Quebec Canada (2015)
 - ⑦ Takayuki FUMOTO: Development of X-ray computed tomography system with scanning device rotating around sample and its application for construction material, X-ray CT visualization for socio-cultural engineering & Environmental materials, X-Earth 2014, Kumamoto Japan(2014)
 - ⑧ 麓隆行, 竹原幸生, X線 CT による圧縮応力下のモルタル内部の変位分布計測手法の検討, 土木学会応用力学委員会, 土木学会応用力学委員会, (2014)
- [図書] (計 0 件)
[産業財産権] 出願 0 件, 取得 0 件
[その他] ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

麓 隆行 (FUMOTO, Takayuki)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号: 30315981

(2) 研究分担者

竹原 幸生 (TAKEHARA, Kosei)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号: 50216933