

論文 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

裏 泰樹*1・麓 隆行*2・竹原 幸生*3

要旨：圧縮応力下でのコンクリート内部のペーストや骨材の挙動を解明するため、載荷状態の対象物を撮影可能な X 線 CT 装置を開発した。本研究では、開発した装置での変位計測精度を明らかにするため、静止状態や所定の移動を付与した 40 個のセラミック球の重心位置を計測し、その系統誤差や計測誤差を検討した。その結果、初期基準点を設けて移動前後の重心位置に幾何変換を実施すれば、系統誤差や計測誤差を小さくできることがわかった。幾何変換を実施した場合、静止状態での系統誤差は 0.012mm、その計測誤差は 0.006mm であった。また、所定の移動に関しても、同程度の精度で計測できることがわかった。

キーワード：X 線 CT, 画像計測, 誤差, 平均値, 標準偏差

1. はじめに

複合材料が外力を受けた際の内部変位挙動を解明することは、混合された材料の役割を理解し、適切な材料選定を行ううえで重要である。

非破壊で材料内部を可視化する手法の一つである X 線 CT 法は、コンクリート工学、地盤工学および舗装工学などの多様な分野で使用されている^{1)~4)}。その手法は、2 種類の荷重を負荷した供試体内部の 3 次元画像を比較した画像相関法による移動量計測が多い。

一般的な X 線 CT 装置の撮影機構では、供試体を載せた試料台が自転するため、小型載荷装置を試料台に設置することとなる¹⁾。しかし、この機構では、高い荷重での載荷を再現することは難しい。そこで、麓は、圧縮試験機の内側に X 線 CT 法の撮影機構を有し、それが載荷状態の供試体の周囲を回転する装置を開発した⁵⁾。本装置により載荷中のポリマーコンクリート供試体内部を撮影できることや PIV での内部変形計測が可能であることを示した。より局所的な内部変形量を計測するために、骨材や指標を用いた粒子追跡法(PTV)を利用することを考えた。しかし、コンクリートの変形量が小さいため、その計測精度が課題となる。

コンクリートの圧縮試験において、破壊時の縦ひずみは 3000~4000 μ 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。

本研究では、開発した X 線 CT 装置での変位計測精度の確認および約 0.01mm の精度への改善を目的とする。

そのため、静止あるいは既知の移動量だけ動いたセラミック球の移動量を、開発した装置から得られた X 線 CT 画像を用いた計測により推定し、その計測誤差や系統誤差を検討した。

2. 開発した X 線 CT 装置の概要⁵⁾

図-1 に開発した X 線 CT 装置を示す。装置の外側(青色)に圧縮試験機を据え、載荷箇所を取り囲むように X 線 CT 撮影装置(赤色)を設置している。X 線 CT 撮影装置は、圧縮試験機上部からつり下げられ、クロスローラーリングで回転する。載荷機構とは切り離されていることから、圧縮応力下の供試体をそのまま撮影できる。一度に直径約 100mm、高さ約 60mm の範囲を、最小分解能 0.062mm で撮影できる。本研究では、撮影時間や撮影後の画像処理の効率を考え、分解能 0.123mm として撮影した。撮影された透過情報から再構成により対象内の X 線吸収係数

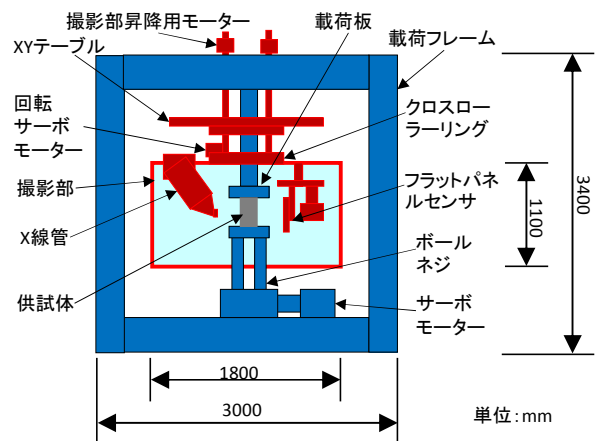


図-1 開発した X 線 CT 装置の概要図⁵⁾

*1 近畿大学大学院 総合理工学研究科環境系工学専攻 (学生会員)

*2 近畿大学 理工学部社会環境工学科准教授 博(工) (正会員)

*3 近畿大学 理工学部社会環境工学科教授 博(工)

の3次元分布を算出した。

3. 静止したセラミック球の計測

3.1 実験概要

図-2のように、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図-1に示す供試体の位置に設置した。セラミック球は相互差 $0.04\mu\text{m}$ 、真球度 $0.081\mu\text{m}$ のベアリング用真球であり、撮影で使用する主な範囲内を適度な個数で計測できること、X線CT装置で撮影可能でその粒子形状の計測精度が既知であること⁹⁾を考慮して使用した。

ステージは稼働させず、ポリスチレン容器の高さ中央位置を中心に、開発した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 $50\mu\text{A}$ 、分解能 0.123mm とした。

X線CTで得た3次元画像を用いて、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



図-2 実験に使用した14.288mmのセラミック球

表-1 セラミック球の粒子に関する画像計測条件

対象		粒子
エロージョン	回数	無
近傍	削除(直径x)	1.5
	同一視(直径x)	1.0
ダイレーション	回数	無
微小粒子統合直径(mm)		1.0

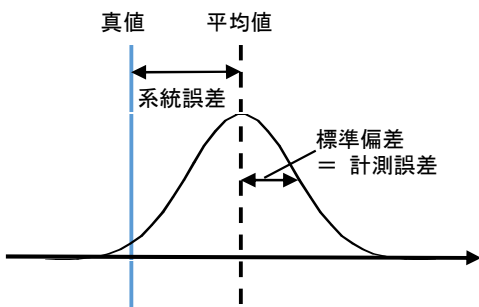


図-3 本研究での系統誤差と計測誤差の関係

用いて個々のセラミック球を同定した。同定に用いた条件を表-1に示す。なお、各条件の詳細は、参考文献7)を参照頂きたい。そして、同定された個々のセラミック球の重心位置や球相当直径などを算出した。

本研究の計測精度の評価では、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誤差ベクトルを求め、そのスカラー量を算出した。図-3のようにそのスカラー量がガウス分布に従うと仮定し、求めた個々のスカラー量を重心位置の誤差とし、真の座標からの偏りを評価するために40個のスカラー量の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40個のスカラー量の標準偏差を計測誤差として算出した。

3.2 実験結果

図-4に球相当直径の計測結果を示す。40個のセラミック球に関する最大値、平均値および最小値を示している。真値である14.288mmに対し、計測された球相当直径の平均値は14.302mmと 0.014mm の差が見られた。一方、最大値は $14.328\sim 14.340\text{mm}$ 、最小値は $14.245\sim 14.251\text{mm}$ と、真値に対して誤差は $-0.037\sim 0.052\text{mm}$ の範囲であった。これは、ビームハードニング⁷⁾などによる

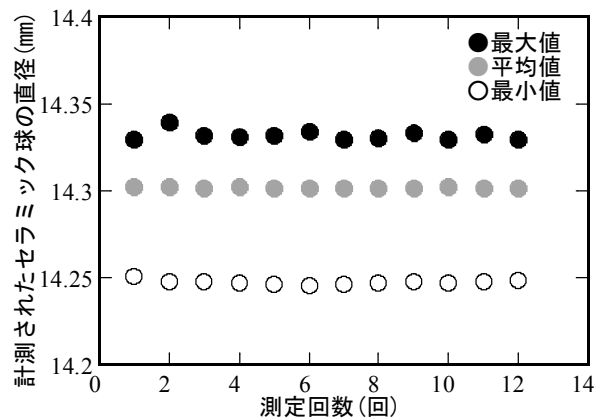


図-4 14.288mmのセラミック球の直径の計測結果

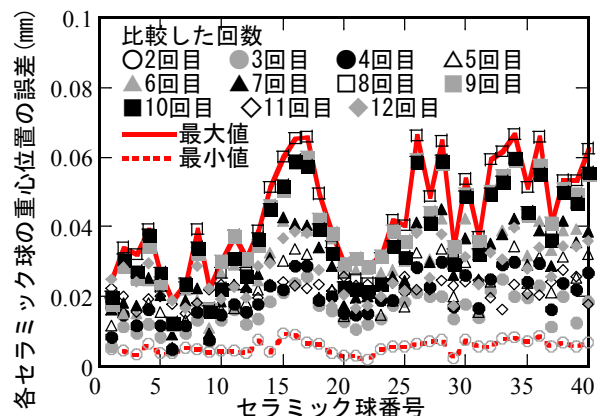


図-5 個々のセラミック球の重心位置の移動量

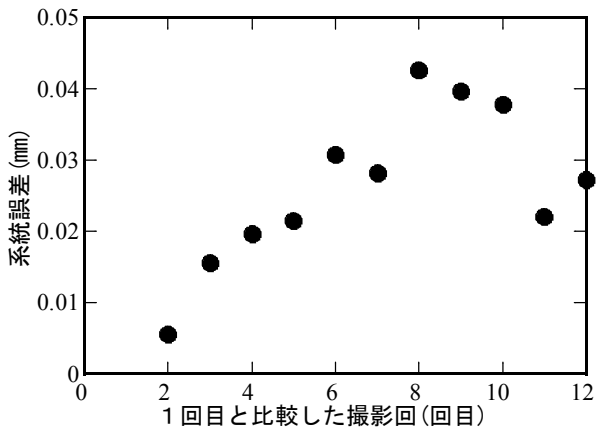


図-6 セラミック球の重心位置に関する系統誤差

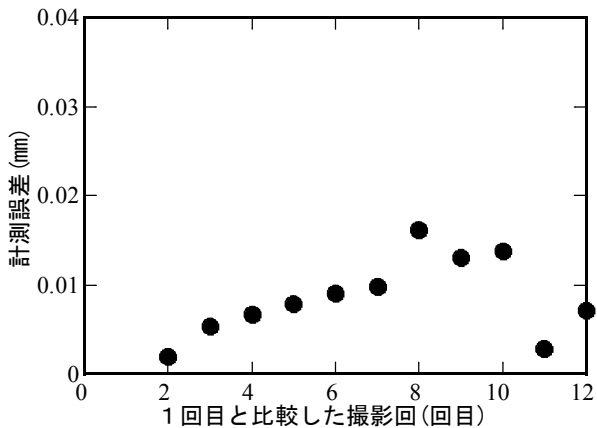


図-7 セラミック球の重心位置の計測誤差

3次元画像や2値化の閾値選定での誤差が影響したと考えられ、今後、改善が必要だと考えられる。ただし、計測回数間での変動は0.006~0.012mmと小さく、対象となる粒子を一定の誤差で計測できていることから、その重心位置の推定への影響は小さいと考えた。

図-5に40個のセラミック球の重心位置の誤差を示す。計測された誤差は0~0.07mmの範囲に収まった。

図-6に各回のセラミック球の重心位置の系統誤差を示す。系統誤差は、5回目以上となると0.03mm以上となり、最大で約0.045mmとなった。特に8~10回目に系統誤差が大きくなった。

図-7に各回のセラミック球の重心位置の計測誤差を示す。計測誤差も同様に、7回目以上となると0.01mm以上となり、最大で約0.016mmとなった。同様に8~10回目に計測誤差が大きくなった。すなわち、系統誤差の増加とともに、計測誤差も大きくなることがわかる。

以上の結果の要因には、撮影上の機構とX線管やディテクター等の装置固有の誤差が考えられる。撮影上の機構では本装置特有の回転開始位置の変動や回転中の上下動等が考えられる。一方、装置固有の要因では、X線管内の温度上昇などによる真空度低下等によるX線エネルギーのばらつきが考えられる。

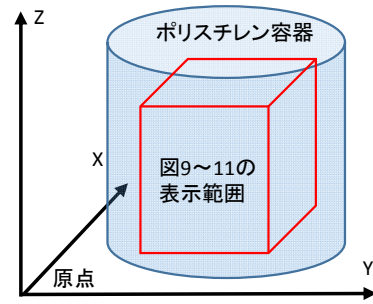


図-8 撮影時の軸方向と図-9~11の表示範囲

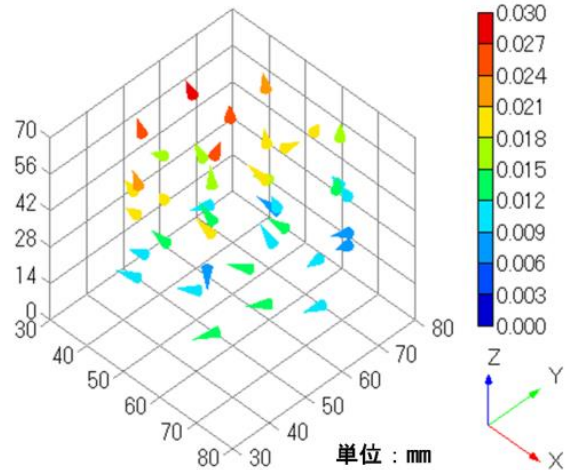


図-9 1回目から10回目への誤差ベクトル(鳥瞰図)

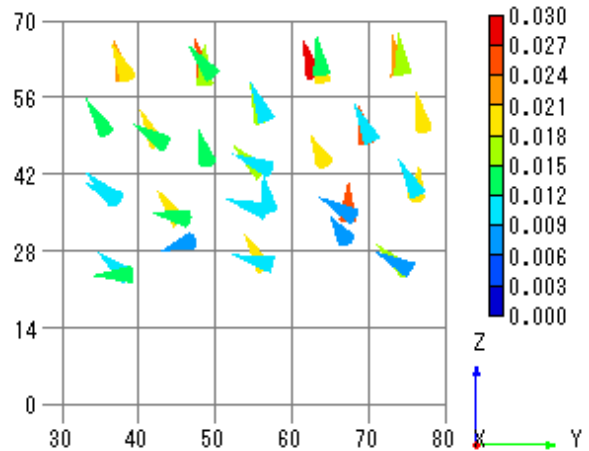


図-10 1回目から10回目への誤差ベクトル(ZY図)

そこで、図-8に設定した軸に従い、赤色で示す範囲について、1回目と10回目を比較した際の誤差ベクトルを図-9~11に3次元で図示した。鳥瞰図(図-9)では、誤差ベクトルの方向も多様で、一貫性がないように見える。しかし、ZY面(図-10)から見ると、全体的に上方に大きく向いた誤差ベクトルが見られた。また、下部に移動するにつれて、Y軸方向への移動が含まれるようになった。そこで、XY面(図-11)を確認すると、X座標で45~80mm、Y座標で30~70mmの範囲でY軸方向に向いた誤差ベクトルが見られた。なお、1回目と2~11回目までを比較した場合も、それぞれの方向や量は異なる

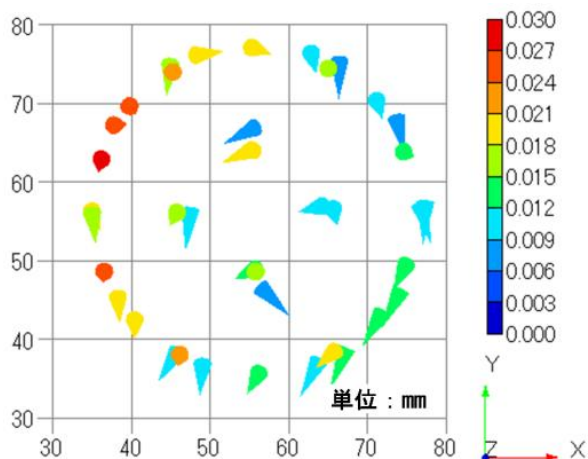


図-11 1回目から10回目への誤差ベクトル(XY図)

るが、規則性を有していた。

以上から、誤差ベクトルの大きさや方向に規則性があり、その要因として撮影上の機構の影響が強いと考えられた。そこで、固定した基準点を設けて、幾何変換を用いることで撮影機構上の誤差を減らすことを考えた。

4. 静止したセラミック球へのアフィン変換の適用

4.1 実験概要

40個の直径14.288mmのセラミック球をランダムにポリスチレン容器に詰めて、X線CT装置にて撮影した。図-12に示す基準点を有する治具を、XYZフラットステージの動きに影響されない上部に取り付けた。取り付けた様子を図-13に示す。直径2.381mmのセラミック球を内径80mm、厚さ3mmの亚克力円筒に高さ20mmごとに4個、計12個を埋め込み、基準点とした。2つの画像を比較する際には、この12個の基準点の重心位置が固定されるように、式(1)のアフィン変換 \mathcal{T} を実施した。式(1)は、定数 $a_{11} \sim a_{33}$ および $b_x \sim b_z$ により示された変換行列にて、座標 (x, y, z) を座標 (x', y', z') へと変換できる関係式である。

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

市販の画像解析ソフトにて各測定回の直径14.288mmのセラミック球と基準点を同定した後、個々の重心位置を算出した。そして、2回目以降の基準点が1回目の基準点へと移動するように式(1)の変換行列を最小二乗法にて算出した。求め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、3章と同様に、誤差、系統誤差および計測誤差を算出した。

4.2 実験結果

図-14に、アフィン変換によって求められた40個の



図-12 基準点のための治具と設置した様子

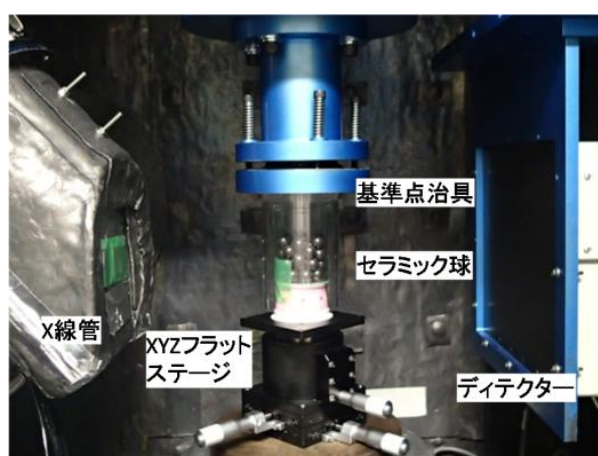


図-13 X線CT装置での撮影図

重心座標の誤差を示す。その誤差は、0.035mm以下となった。図-5と比較して約半分の移動量へと減少した。

図-15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0.005~0.043mm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-16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。系統誤差と同様に、回数が増加すると、計測誤差は大きくなった。アフィン変換前では、7回目に約0.01mm程度となり、最大で0.016mmとなった。一方でアフィン変換により計測誤差は小さくなり、7~9回目で0.004mm程度、それ以降でも最大0.006mmまでとなった。すなわち、12回程度の連続撮影では、1voxelの5%以下であることがわかる。

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

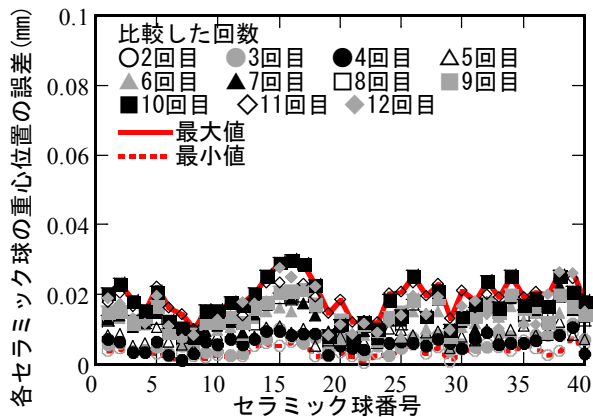


図-14 個々のセラミック球の重心位置の変化(変換後)

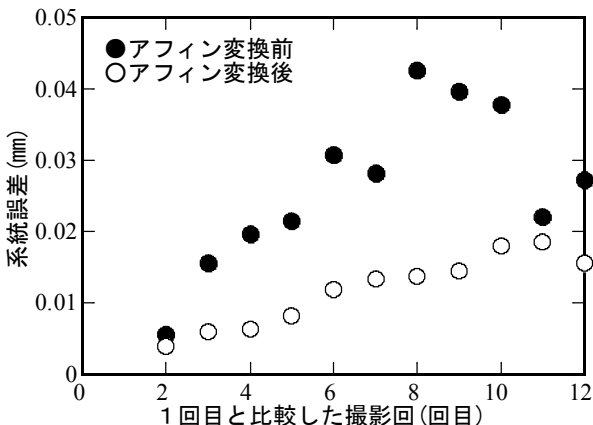


図-15 アフィン変換前後の系統誤差

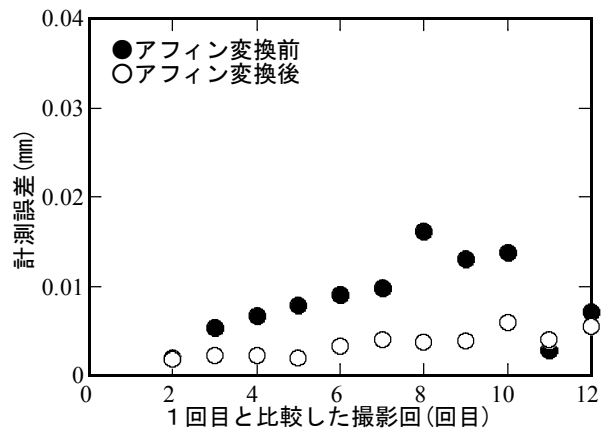


図-16 アフィン変換前後の計測誤差

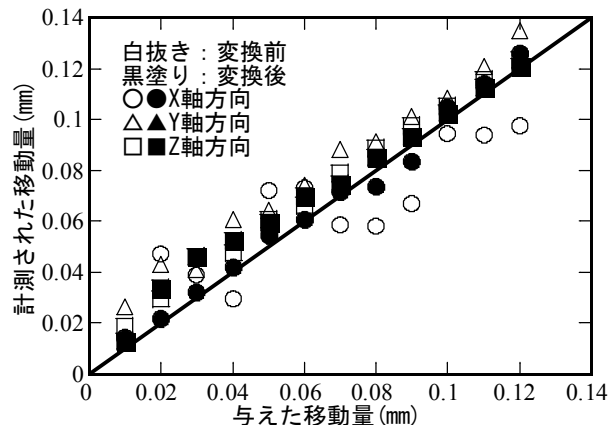


図-17 与えた移動量と計測された移動量の比較

以内の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。また、12 回程度撮影を連続した場合、系統誤差 0.019mm となった。連続回数が増えると誤差が増加している要因として、まだ残る機械的誤差や X 線管の温度上昇等による真空度低下に起因する X 線強度のばらつきなどが考えられる。

5. セラミック球の移動量の計測精度に関する検討

5.1 実験概要

40 個のセラミック球をランダムにポリスチレン容器に詰めて、XYZ フラットステージに載せ、図-1 の供試体位置に設置した。載荷部の上側載荷板に基準点を有する治具を取り付けて X 線 CT 撮影を行った。XYZ フラットステージは各方向に 0.01mm の目盛りが記されたつまみにより、精密な移動が可能である。そこで、1 回撮影する毎に、X 軸方向に 0.01mm ずつ 0.12mm まで移動させて、移動ごとに X 線 CT での撮影を実施した。同様に Y 軸方向および Z 軸方向でも実施した。その後、これまで同様に、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。

まず、アフィン変換を行わずに、所定の移動を付与した直径 14.288mm のセラミック球の重心位置と各軸方向で最初に計測されたセラミック球の重心位置との差から

アフィン変換前の移動ベクトルを算出した。次に、所定の移動を付与したセラミック球の座標位置に、基準点の誤差ベクトルから求めた変換行列を用いてアフィン変換を行った。アフィン変換後の重心位置と各軸方向で最初に計測された重心位置との差からアフィン変換後の移動ベクトルを算出した。3 次元移動ベクトルのスカラー量を移動量として算出した。そして、計測された各軸方向への移動量の 40 個の平均値と与えた移動量の差から系統誤差を、その差の標準偏差を計測誤差として求めた。

5.2 実験結果

図-17 に与えた移動量と計測された系統誤差との関係を示す。45 度の実線は与えた移動量と計測された移動量が等しくなる場合を示している。アフィン変換前（白抜き）に比べて、アフィン変換後（黒塗り）の場合に与えた移動量と計測された移動量の差が小さくなっていることがわかる。

そこで、図-18 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-19 に移動量の計測誤差を示した。アフィン変換前

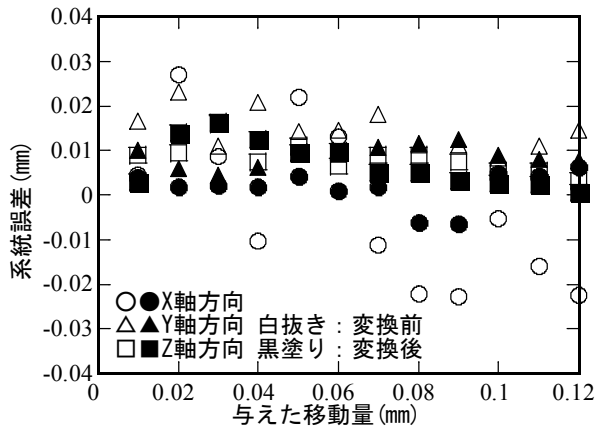


図-18 与えた移動量と系統誤差との関係

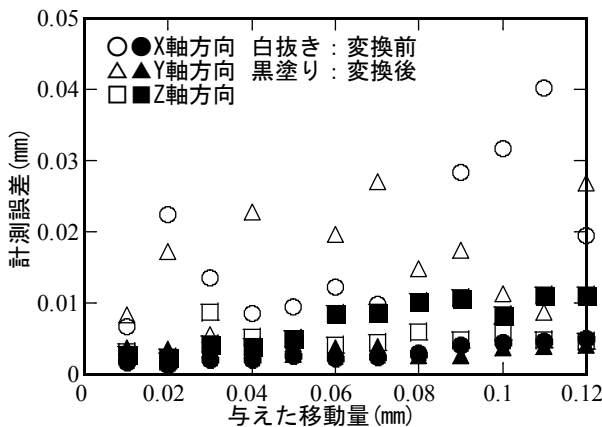


図-19 与えた移動量と計測誤差との関係

では、計測誤差は、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、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。なお、これらの誤差の要因には、機械的誤差、画像計測での誤差や X 線管の温度上昇等による真空度低下に起因する X 線エネルギーのばらつきなどが挙げられる。その場合、例えば、より明暗のはっきりした X 線 CT 画像の取得や基準点の粒径を大きくした計測精度向上等、連続撮影回数調整などの実施により、誤差低減をはかれると考えられる。比較的弾性率の高いコンクリートの場合、計測範囲内の移動量がさらに小さくなると考えられるため、今後も誤差低減に取り組む予定である。

6. 結論

開発した X 線 CT 装置による圧縮応力下の材料内部の

変位計測精度を調べるため、所定の移動量を付与した 40 個のセラミック球の重心位置を計測して、基本的な統計量を考察した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 開発した装置での変位計測では、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がある。
- 2) 静止した粒子の重心位置の計測では、6 回程度であれば系統誤差 0.012mm, 計測誤差 0.006mm 以下であった。それ以上でも最大誤差 0.019mm であった。
- 3) XYZ 軸方向への移動に対する系統誤差は-0.006~0.016 mm, その計測誤差 0.011mm 以内であった。

以上から、開発した本装置において、コンクリート供試体に載荷した際に、0.01~0.02mm の精度で内部変形計測が実施できることがわかった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 26630207 の助成を受けたものです。また、本実験を実施するにあたり、市来凱斗君にもご尽力頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 人見尚: 高分解能 X 線 CT を用いたコンクリートの微細構造観察に関する研究, コンクリート工学, Vol. 47, No. 4, pp. 42-47, 2009.
- 3) 杉山隆文, 志村和紀, 島田大規: 高解像度型 X 線 CT による AE モルタル中の空隙構造の透視, 土木学会論文集 E2, Vol. 67, No. 3, pp. 351-360, 2011.
- 4) 谷口聡, 大谷順, 佐藤宇紘, 熊谷政行, 姫野賢治: X 線 CT 及びデジタル画像相関法を用いたアスファルト混合物内部の変形特性の把握, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 69, No. 3, pp. I_49-I_57, 2013.
- 5) 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.
- 6) 麓隆行: X 線 CT を用いた 3 次元画像計測のポーラスコンクリート内部の物性評価への適用性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1672-1677, 2014.
- 7) 麓隆行, 平井慎一, 溝口達也, 松本嶺: X 線 CT 画像の 3 次元粒子計測による砕石の粒子形状の分析, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.70-75, 2012.
- 8) 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.