論文 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

麓 隆行*1

要旨:X線CT画像を利用した画像解析法によりコンクリート供試体内部の変形を計測することは、各種材料の役割を知る上で重要な手法だと考えられる。本研究では、圧縮応力下のコンクリート供試体内部の変形計測への粒子追跡法(PTV)または3次元画像相関法(DVC)の適用性について検討した。その結果、計測手法の特性により、PTVの場合、粒径1.0mm以上のトレーサーを、またDVCの場合、粒径0.3mm以下のトレーサーを混合すると、0.01mm程度の誤差で変位を計測できた。また、DVCを用いると荷重の増加による体積ひずみやせん断ひずみの増加箇所を推定できることが示された。

キーワード:コンクリート,圧縮応力,内部変形,X線CT,画像計測,粒子追跡法,画像相関法

1. はじめに

コンクリート材料には、高性能化や資源の枯渇から、 多様な材料の使用が望まれる。それらの普及には、使用 した材料がコンクリートに及ぼす影響を明確にすること が重要である。その際、各種強度や体積変化などの各種 試験値を計測し、普通コンクリートとの比較から使用材 料の物性の影響を推定することが多い。また、Hashin-Hansen 式などの理論的な内部変形の推定¹¹や骨材にひず みゲージを添付するなどの直接的な計測²¹も行われてい る。しかし、骨材の粒度や形状等の影響、および計測が 煩雑となり、3 次元的な挙動の解明は難しい。

3 次元的な内部挙動を計測する方法の一つに X 線 CT 法と画像計測を用いた内部計測がある。著者は供試体の 変形前後の X 線 CT 画像から,事前に混入した 0.3 mmの トレーサー粒子の重心位置の移動ベクトルを計測する粒 子追跡法(Particle Tracking Velocimetry:以下 PTV)を検 討してきた³⁾。しかし,現状ではトレーサー粒子の配置 が不規則となり,局所的な移動計測が難しい。一方,変 形前後の供試体内のランダムドットパターン画像を比較 し、任意の3次元領域の移動ベクトルを計測する3次元 画像相関法 (Degital Volume Correlation:以下 DVC) があ る。この手法では、3 次元マス目位置で変形計測が可能 で,隣接領域の移動量から各種ひずみ分布を算出できる。 載荷状態のX線CT画像に適用すると、その変形やひび 割れを精度よく計測できると考えられる。その際、密度 差が小さいコンクリート内部を計測するためには、トレ ーサー粒子の混入が、より明確なランダムパターンの形 成に有効だと考えられる。

そこで本研究では、載荷状態にあるコンクリート供試 体内部の3次元変形計測へのPTVとDVCの適用性を検 討することを目的とした。まず異なる直径のレーサー粒 子を含むモルタル供試体に既知の移動量を与え,各画像 計測法の計測精度を確認した。その結果得られたトレー サー粒子を混入したコンクリート供試体内部の圧縮応力 下での変形を計測して,各画像計測法の適用性を検討し た。

2. 計測精度に関する実験

2.1 実験概要

本章では、トレーサー粒子混入によるモルタルの応力 -ひずみ関係や画像計測精度への影響を確認した。モルタ ルには、水道水(W)、早強ポルトランドセメント(C)、標 準砂(S)、2 液性増粘剤(Ta, Tb)を使用した。トレーサーに 粒径 0.3mm、0.65mm および 1.0mm のジルコニア球(Zr) を用いた。Zr はいずれもモルタル全体積の約 0.5%混入 した。表-1にモルタルの配合を示す。

モルタルの練混ぜは、モルタルミキサに Ta を含む水 とセメントを投入し、低速で 30 秒練り混ぜた後に細骨 材を投入し、低速で 30 秒練り混ぜ後に高速で 30 秒練り 混ぜた。90 秒間休ませた後、高速で 30 秒練り混ぜ、Tb と Zr を加えて高速で 30 秒練り混ぜた。

練混ぜ後, 直径 75mm×高さ 150mm の円柱型枠にモル タルを各4本打設した。翌日脱型し, 20℃で水中養生し た。材齢7日で水中から供試体を引き上げ,実験に使用 した。まず応力-ひずみ関係への影響を確認するため,3 本の圧縮試験をJISA 1108 に準じて行い,ひずみゲージ を用いて応力-ひずみ関係を調べた。

次に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。1 体の供試体を用い, XYZ 軸フラットスチールステージ上に供試体を乗せ, 図-1 に示す X 軸方向に 0.02mm ずつ 0.1mm まで, Z 軸方向に 0.02mm ずつ 0.1mm まで移動させた後, 近畿大学所有の

*1 近畿大学 理工学部社会環境工学科准教授 博(工) (正会員)

X線CT装置⁴⁾で撮影を行った。撮影条件は管電圧210kV, 管電流 100µA,積算時間 0.2s,投影数 2000,銅板 3mm と した。このとき,既往の研究結果 ³に基づき,撮影時の 機械的誤差を減らすため,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.撮影の様子を図-1 に,圧縮試験の様子 を図-2 に,そして撮影された断面画像を図-3 に示す。

撮影された3次元画像から2種類の画像計測手法を用 いて供試体内部の3次元変形計測を行った。3次元画像 の画素は一辺0.123mmの立方体である。まず,著者らの 既往の研究手法³に基づき,ジルコニア粒子に対する PTV⁵により計測した。市販のソフトを用い,図-3のよ うに輝度値の異なるジルコニア球を目視で二値化後,粒 子分離して形状計測を行い,球相当径や重心位置を算出 した。得たデータを用い,任意の荷重間のジルコニア球



粒径 1.0mm の場合 図-3 異なる径のジルコニア粒子を混入した断面画像

の移動ベクトルを竹原らの開発したプログラム ⁵により 計測した。PTV の追跡誤差を減らすため,自前に一部の 断面画像を用いた粒子画像流速測定法(PIV)計測の結果 を考慮した。次ぎに3次元画像相関法(以下,DVC)に より計測した。計測では,Hall⁶らが作成した DVC プロ グラム,TomoWarp2を用いた。その際,相関を算出する ために分割した対象領域(以下,サブセット)を約1.23 mm の立方体とし,その半分を隣り合うサブセットの図 心位置間隔として計測した。そして,いずれの方法でも 得られた変位後の指標の重心位置に対しても,供試体の 周囲に12 個の固定した基準点を用いてアフィン変換²) により機械的誤差を補正した。

2.2 実験結果

図-4 に市販のソフトで計測したトレーサーの粒径分 布とジルコニア球購入時の検査表による直径分布との比 較を示す。計測された平均直径は検査表の平均直径とほ ぼ同じであった。しかし,直径範囲は検査表に比べて計 測結果の方が大きくなった。特に粒径 0.3mm では範囲が 広くなった。

圧縮試験で得られた応力-ひずみ関係を図-5 に示す。 粒径にかかわらずジルコニア球の混入が圧縮強度に及ぼ す影響は少ないと考えられる。

図-6~11 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平均値との関係、そしてその 画像計測結果の標準偏差を示す。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。

供試体の移動距離と画像計測結果との関係では,PTV の場合,ジルコニア球の粒径が大きいほど差が小さくな



表-1 配合表



り, 粒径 1.0mm では 0.003mm の差であった。一方, DVC の場合, ジルコニア球の粒径が小さいほど差が小さくな り, 粒径 0.3mm では 0.003mm の差であった。

この傾向は,標準偏差で明確になった。すなわち,PTV の場合,ジルコニア球の粒径が大きいほど標準偏差が小 さくなり,粒径 1.0mm では 0.006mm であった。一方, DVC の場合,ジルコニア球の粒径が小さいほど標準偏差 が小さくなり,粒径 0.3mm では 0.005mm であった。

以上から, 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 程度の誤差で計測できると考えられる。こ れは, 粒子径の計測結果でも示されたように, PTV で重 要となる粒子のジルコニア球の重心位置を推定するにあ たり, 一定以上の粒子径が必要となることがわかる。一 方, DVC の場合,本実験のように同じ体積率で混合した 場合,粒子径が小さいほど粒子数が多くなり,粒径 0.3mm



以下とすると、小さな範囲を対象としても画像相関の十 分な精度となると考えられる。

3. 圧縮応力下のコンクリート供試体への適用性

3.1 実験概要

本章では, PTV および DVC のコンクリートの内部変 形計測への適用を行った。使用材料として,水(W),早強 ポルトランドセメント(C:密度 3.13g/cm³),山砂(S:表乾 密度 2.59g/cm³,吸水率 2.13%),6 号砕石(G:表乾密度 2.61g/cm³,吸水率 1.15%),高性能 AE 減水剤(SP),を用 意した。またトレーサーとしてジルコニア球(Zr)を混合 し,その粒径を PTV 用コンクリートでは 1.0 mm, DVC 用コンクリートでは 0.3 mm とした。配合表を表-3 に示 す。

コンクリートは、モルタルをミキサで練り混ぜた後、 手練りで粗骨材を混合した。プラネタリー式ミキサにセ

W/C	s/a	単位量(kg/m³)				
(%)	(%)	W	С	S1	G	Zr
50	46.2	180	360	808	948	61
SP:1.8kg/m ³ , 消泡剤:0.14 kg/m ³ , 増粘剤:5.41 kg/m ³						

表-3 コンクリート配合表

メント,細骨材を入れて低速で 30 秒練り混ぜた後,水と 高性能 AE 減水剤を加えて低速で 30 秒,高速で 60 秒練 り混ぜた。最後に、ジルコニア球を加えて低速 30 秒練り 混ぜてモルタルを作製した。そのモルタルをミキサから 排出し、ねり舟内で粗骨材を手動で練り混ぜて作製した コンクリートを直径 75mm×高さ 150mm の円柱型枠に 各5本打設した。翌日脱型後,供試体を材齢7日まで 20℃ の水中で養生した。

養生後,載荷状態の X線 CT 画像の取得を行った。使 用したのは,近畿大学所有の載荷装置内部に X線撮影装 置を有する X線 CT 装置⁴⁾である。載荷状態の撮影前に, 供試体の応力-ひずみ特性を知るため,JIS A 1108 に準じ て,ひずみゲージを貼り付けた供試体各 3本に対して万 能試験機にて載荷試験を行った。得られた応力-ひずみ関 係をもとに,X線 CT 装置での目標載荷荷重を設定した。

次に、X線CT装置内部に左右側面にひずみゲージを 貼り付けた供試体をセットし、載荷状態のX線CT撮影 を行った。撮影条件や画素サイズは2章と同じとした。 まず1kN載荷した状態で1回目の撮影を行った後、目 標荷重まで載荷、停止して、再びX線CT撮影を行った。 目標荷重は60,120および160kNとした。また、PTV用 供試体には、画像計測結果とひずみゲージの値を比較す るため、左右のひずみゲージの端部および中央部に各1 個、計6個の直径1mmのジルコニア球を貼り付けた。

そして PTV と DVC, それぞれの手法で画像計測を行った。PTV での計測手順は,前章と同じとした。ひずみ ゲージ上に添付したジルコニア球を用いて算出した粒子 間距離の変化から各荷重時のひずみ値を算出した。また, 計測結果から供試体中央付近の変位計測結果を抽出した。 DVC での計測では,前章と同様に TomoWarp2 を用い, サブセットを 1.23 mm,または 2.46 mm の立方体とし, その半分をサブセットの図心位置間隔として計測した。 計測結果から,供試体中央部から高さ方向に±25 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,隣り合うサブセット間の変位差から求めたひずみ から式(1),式(2)より体積ひずみε_{vol}分布およびせん断ひ ずみε_s分布を算出した。

 $\varepsilon_{vol} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$

(1)

$$\epsilon_s{=}\frac{1}{3}\sqrt{A{+}3\epsilon_{yx}{}^2{+}3\epsilon_{zx}{}^2{+}3\epsilon_{zy}{}^2}$$

 \sub
 \sub
 ,

 $A=2(\varepsilon_{xx}-\varepsilon_{yy})^{2}+2(\varepsilon_{xx}-\varepsilon_{zz})^{2}+2(\varepsilon_{yy}-\varepsilon_{zz})^{2}$

3.2 実験結果

(1) 供試体側面のひずみ値に関する検討

図-12 にひずみゲージ値と PTV により算出した縦ひ ずみ値との比較を示す。なお、用いたコンクリートの最 大荷重は 167.9kN, 圧縮強度 38.0N/mm²であった。また、 塑性域では X線 CT 撮影開始時と終了時のひずみ値に差 が生じるため、本図には撮影開始時と撮影終了時のひず みを示している。応力約 13.6 N/mm²では撮影前後のひず みと、画像計測によるひずみはほぼ同じであった。一方、 応力 27.2 N/mm²は、画像計測によるひずみは、撮影開始 時のひずみと同程度であり、撮影終了時のひずみとは 114×10⁻⁶の差があった。応力 36.2 N/mm²は、撮影終了時 ひずみとほぼ同じ値であり、撮影開始時に比べ 459×10⁻⁶大きかった。

図-13 に DVC により算出した縦ひずみ値との比較を 示す。応力 13.6 N/mm²ではひずみゲージの値と比べ,サ ブセットを 1.23 mm とした場合は 100×10⁻⁶ ほど大きく なったが,サブセットを2.46 mm とすると同程度となっ た。応力 27.2 N/mm²では,サブセットを 1.23 mm とした ひずみとほぼ同じだが,撮影終了時のひずみと比べ 58× 10⁻⁶ 小さかった。一方,サブセットを 2.46 mm とした場 合,撮影開始時の場合は撮影終了時のひずみよりも 55×







(2)



図-14 供試体断面画像(軸単位:mm)



図-15 PTV による供試体内部の変形計測結果(軸単位:mm)



供試体断面画像例(赤:骨材位置) 左断面の垂直方向変位分布 左断面での体積ひずみ分布 図-16 DVCによる垂直方向変位の計測結果と体積ひずみの算出結果(軸単位:mm)

10⁻⁶大きかった。応力 36.2 N/mm²では,サブセットの大 きさに関わらず,撮影開始時と撮影終了時のひずみの間 に収まった。

以上から,弾性域では撮影中の変形がほとんどないた め,画像計測でほぼ計測できる。しかし,塑性域では, 荷重が大きいほど撮影中の塑性変形が初期に生じるため, 画像計測値は撮影終了時のひずみ値に近くなる。また, DVCでは,サブセットが小さいと,画像のノイズに起因 して計測誤差が大きくなると考えられる。

(2)PTV による内部変形計測結果

図-14 に供試体中心を通る断面画像と、図-15 にその断面前後の厚さ 0.5mm の PTV による 160kN 載荷時の変位計測結果を示す。画像計測によるトレーサーの最大変位量は上下端部で計測され約 0.13mm であった。上下端部では垂直方向に大きく変形したが、断面中心部分でトレーサーの変位量は約 0~0.04mm と小さい。局所的に体積が収縮している様子が伺える。また、図-15 の赤枠部分において、粗骨材の周りのトレーサーの変位量は0.08~0.1mm の範囲にあり、ほぼ同じ変位量、変位方向

であった。砕石が大きな変形を生じたとは考えにくいた め、ペーストの変形に伴って砕石も移動し、コンクリー トが見かけ上変形していると考えられる。すなわち、PTV によりコンクリート全体の変形計測や砕石周囲の変形の 推定が可能だと考えられる。なお、粒子重心位置の計測 精度の向上により、より小さい粒子を多く混入して計測 できると考えられる。

(3)DVCによる内部変形計測結果

図-16 に載荷前の供試体中心付近の XZ 断面, DVC を 用いた 160kN 載荷による同断面の垂直方向変位分布, お よび体積ひずみ分布を示す。骨材位置を赤線や黄線で示 している。供試体下方から変位を与えているため,供試 体下部になるほど色が暗く,変形量が大きいことがわか る。なお、粒径の大きな骨材内部の変形は小さいため算 出できていない。体積ひずみ分布では,正値は膨張ひず み,負値は収縮ひずみを示す。骨材間隙内で収縮ひずみ が生じているが,しばしば骨材端部にから膨張ひずみが 生じており,徐々に連続しているように見える。

図-17 に、図-16 と同断面の 60kN 載荷時のせん断ひ



 60kN 載荷時のせん断ひずみ分布
 160kN 載荷時のせん断ひずみ分布

 図-17 DVC によるせん断ひずみ算出結果(軸単位:mm)

ずみ分布および160kN載荷時のせん断ひずみ分布を示す。 黄線で囲む箇所など,骨材間隙でせん断ひずみの増加が 見られるとともに,それらが連続し始めていることが示 唆される。これらが将来的に破壊の一因となると考えら れる。この箇所は,図-16 でおよそ膨張ひずみが大きく なっている箇所と関係している。すなわち,圧縮変形が 限界となり,せん断や引張変形に移行し,体積膨張を起 こしている箇所だと推測される。なお,本実験では小径 の粗骨材を用いたため,粒子数が多く煩雑となった。今 後は,粗骨材径を大きくし,骨材種を変えて計測を行う ことも有効だと考えられる。

4. まとめ

本研究では、コンクリート供試体内部の3次元変形計 測へのPTVとDVCの適用性を検討することを目的とし、 混入するジルコニア球の選定とそれを混入した普通コン クリート供試体内部の圧縮応力下での変位分布やひずみ 分布を計測した。その結果、以下の結論が得られた。

- PTV の場合, 粒径 1.0mm 以上のトレーサーを, また DVC の場合, 粒径 0.3mm 以下のトレーサーを混合 すると, 変位を 0.01mm 程度の誤差で計測できる。
- (2) PTV によりコンクリート全体の変形計測や砕石周 囲の巨視的な変形の推定が可能だと考えられる。
- (3) DVC によりコンクリート内部の変形だけでなく,体 積ひずみやせん断ひずみが算出され,荷重増加によ り内部ひずみが増加する箇所が推定され,破壊の起 点となる箇所を推定できる可能性がある。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17K06522 の助成を受けたものです。また、本研究の遂行にあたり、近畿大学理工学

部 竹原幸生教授, Lund University Associate Professor Stephen A. Hall, 近畿大学大学院総合理工学研究科 裏 泰樹君に多大なご支援を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 川上英男: コンクリートの弾性係数と粗骨材の見か けの弾性係数, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 493-498, 2009
- 熊野知司,檜田篤志,葉山和則:コンクリート中に おける粗骨材のひずみ挙動に関する一検討,コンク リート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.57-62, 2016
- 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
- 益隆行: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
- Takehara, K., Adrian, R. J., Etoh, G. T., Christensen, K. T.: A Kalman tracker for super-resolution PIV, Experiments in Fluids [Suppl.], pp. s34-s41, 2000
- Tudisco, E., Andòb, E., Cailletaudb, R. and Hall, S. A.: TomoWarp2: A local digital volume correlation code, SoftwareX, Vol.6, pp. 267-270, 2017