

論文 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

麓 隆行*1・裏 泰樹*2・竹原幸生*3

要旨: これまで、高荷重下の供試体内部を可視化できる装置がなかったため、圧縮応力下の供試体内部のペーストや骨材の挙動解明はできなかった。麓は300kNまでの荷重下で撮影可能なX線CT装置を開発した。本装置で得た異なる荷重下での3次元画像に画像相関法等を実施すれば、供試体内部の変形を計測できる可能性がある。本研究では、画像相関法の精度向上のために、コンクリートに混入する目印となる指標を選定した。その結果、粒径0.3mmのジルコニア球を混入したモルタルを用いて、PIVにより弾性域や塑性域での圧縮応力による断面内の内部変形を計測できることがわかった。

キーワード: コンクリート, モルタル, X線CT, 指標, PIV, 圧縮強度, 応力-ひずみ関係

1. はじめに

コンクリートは、骨材とペーストとの複合材料である。したがって、コンクリート性状の理解を深めるためには、ペーストと骨材の挙動を理解することが重要である。

例えば、圧縮応力によるコンクリートの体積変化における骨材の役割について多くの研究がある¹⁾²⁾。その手法として、応力-ひずみ関係の詳細な分析や Hashin-Hansen モデル³⁾などの理論式などが用いられる。このような間接的な推定手法を用いるのは、内部挙動を非破壊試験で計測する手法が十分でなかったためだと考えられる。

材料の内部観察が非破壊で可能な技術として MRI, X線CT, 弾性波などがあり⁴⁾⁶⁾、近年では高解像度での観察も可能となっている。これらの手法では、それぞれ磁気, X線, 弾性波などの減衰量分布を、多方向からの照射結果から逆解析により推定する。よって、異なる荷重下でのコンクリート内部の減衰量分布を比較し、それらの移動量を算定できれば、コンクリート内部の変形を計測できると考えられる。

コンクリートの挙動の解明には数百 kN 程度の荷重を再現しながら非破壊手法を適用する必要がある。しかし、そのような装置は世界的に見ても少ない。そこで、著者らは300kNの圧縮試験機の載荷部にX線CTを設置した装置を開発した⁷⁾。この装置では、300kNまでの任意の荷重をかけた状態でX線CT撮影が可能となる。また、2種類の荷重下でのX線CT画像を比較することで、内部変形を計測できる。

変形計測手法には、特徴的なパターン画像の移動方向や移動量を計測する画像相関法 (Digital Image Correlation: DIC) や粒子の移動を追跡する粒子追跡法

(Particle Tracking Velocimetry: PTV) などがある⁸⁾。これらを精度良く実施するためには、明確な濃淡を有することが重要となる。

X線CT法は、X線を照射された対象物内部のX線吸収係数の空間分布を推定する手法である。X線吸収係数は、照射されたX線特性、物質の種類、密度により異なる。すなわち、明確な濃淡を有する3次元画像を得るためには、明確に異なる密度や素材の材料が分散していることが必要となる。コンクリートの構成材料は主にセメントペーストと骨材であり、その密度差は小さい。そこで、それらとの密度差が大きい粒子を指標として混合し、精度の良い画像計測を行うことを考えた。

本研究では、開発したX線CT装置で載荷応力下の供試体内部の変形計測を行うための指標を選定することを目的とした。そのため、まず指標を混入したモルタル供試体のX線CT画像で明確な濃淡や適度な分散の状態を確認して指標選定を行った。そして、選定された指標を用いて、載荷状態のモルタル供試体内部の変形計測を画像相関法にて実施した。

2. 実験概要

2.1 X線CT法の概要と候補とした指標

X線CT法でコンクリート内部の変形計測を実施するためには、変形前後のX線CT画像が必要になる。それらの画像の濃淡模様や粒子追跡により内部変形挙動を計測することが可能となると考えている。

X線CT法により得られる3次元画像は、照射されたX線が対象物内部を透過する際の減衰度合いの分布を3次元画像化している。3次元画像は白黒画像であり、減衰度合いが大きいほど白色に、減衰度合いが小さいほど

*1 近畿大学 理工学部社会環境工学科准教授 博(工) (正会員)

*2 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)

*3 近畿大学 理工学部社会環境工学科教授 博(工)

黒色に表現される。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。すなわち、密度差のある素材があれば、濃淡模様においても粒子同定においても精度の良い計測が可能となると考えられる。

図-1に、一般的な材料を使用したコンクリート内部を可視化した例を示す。ペースト、細骨材および粗骨材の密度が近いため、目視では認識できても、画像解析で認識するのは難しい。すなわち、現在使用している材料以外に、密度の高いあるいは低い指標を混合する必要がある。ただし、低い密度であれば気泡等との見分けがつかないと考えられる。

以上から、コンクリートに使用する材料よりも密度の高い素材を混入することにより、内部変形を計測できる3次元画像を構築できると考えられた。そこで、指標として次の材料を候補とし、以降の実験で最適な指標を選定することとした。本研究では、図-2に示す密度3.98g/cm³のアルミナ粒子、密度4.90g/cm³の酸化鉄粒子、および密度6.06g/cm³のジルコニア球を候補とした。アルミナ粒子やジルコニア球は、ベアリングや研磨材として使用されており、粒子径を0.3mm、および0.6mmの粒子を用意した。また、酸化鉄粒子は、重量コンクリートなどに使用される酸化鉄粉を0.3mmおよび0.6mmのふるいに留まる粒子のみを用いた。

2.2 モルタル供試体の概要

研究対象はコンクリートであるが、本研究では基礎研究であることから、モルタルを用いて実験を行った。セメントには早強ポルトランドセメント（密度3.13g/cm³）を用いた。細骨材には、川砂（表乾密度2.62g/cm³、吸水

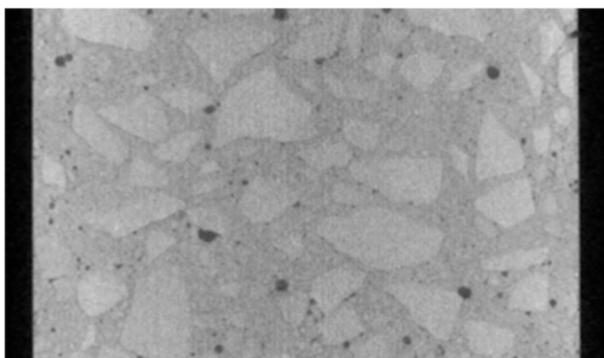


図-1 X線CT法で得られるコンクリート断面画像例

率1.78%、粗粒率2.82)、山砂（表乾密度2.60g/cm³、吸水率2.03%、粗粒率2.11)および砕砂（表乾密度2.56g/cm³、吸水率2.04%、粗粒率1.64)を混合して用いた。

配合は、表-1に示すW/C=65%を基準とした配合を用いた。各指標を混入する際には、モルタル全体積の0.5%を細骨材の一部と置換して使用した。プラネタリー式縦型ミキサを用いて、9L練り混ぜた。まず、セメントおよび細骨材を低速30秒で空練り後、水と混和剤を投入して低速60秒練り混ぜた。かき落とし後、高速で60秒練り混ぜた後、指標を投入し、高速で30秒練り混ぜた。

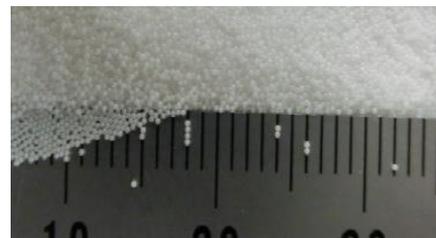
練混ぜ後、φ75mm×150mm型枠に、指標を無混入のモルタル、および各指標を混入したモルタルを打設した。まず指標の選定のために表-1に示す配合2~4で各5体作製した。その後、選定した指標を混入した配合4と無混入の配合1で各6体作製した。3層各10回突き棒で突き、木槌で叩き、振動数200Hzの振動機を5秒押し当て



アルミナ粒子



酸化鉄粒子



ジルコニア球

図-2 候補とした指標(いずれも粒径0.3mm)

表-1 モルタルの配合

配合番号	指標	W/C (%)	S/C	単位量(kg/m ³)						混和剤(C×%)	
				水	セメント	砕砂	山砂	川砂	指標	高性能 AE 減水剤	消泡剤
1	なし	65	3.6	306	470	284	495	627	0	0.5	1
2	アルミナ粒子	65	3.6	306	470	282	490	621	20	0.5	1
3	酸化鉄	65	3.6	306	470	282	490	621	25	0.5	1
4	ジルコニア球	65	3.6	306	470	282	490	621	30	0.5	1

注) 各指標を混入する際には、モルタル全体積の0.5%を細骨材の一部と置換して使用した。



図-3 開発した X 線 CT 装置の外観

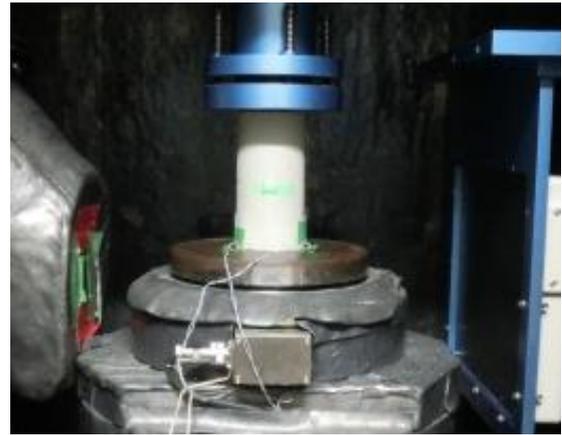


図-4 開発した X 線 CT 装置の内部(撮影位置未調整)

た。その後、もう一度木槌で叩き、余剰空隙を追い出した。側面の気泡を取り除くために型枠の内周にコンクリートナイフを沿わせるように入れた。その後、ラップをして、湿布を被せ室温 20℃、湿度 60%の恒温室にて静置し、翌日に脱型した。その後、標準養生を 7 日間行った。

2.3 モルタルを用いた実験の概要

フレッシュ性状については、モルタルフロー試験を行った。硬化後の試験として、材齢 7 日に各指標を混入した配合 2~4 の各供試体 5 体のうち 1 体を X 線 CT 装置にてスキャンし、再構成された断面画像を比較した。その後、残りの供試体のうち 3 体を、2000kN の油圧式圧縮試験機にて JIS A 1108 に準じて圧縮強度試験を行った。フロー値および圧縮強度の結果に基づき、より適切と考えられる指標を選定した。

指標選定後、再度作製した配合 1 および 4 の供試体 6 体のうち 3 体を用いて、ひずみゲージを軸方向に取り付け、2000kN の油圧式圧縮試験機にて JIS A 1108 に準じて圧縮強度試験を行った。その後、残りの供試体 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 法による撮影を試みた。目標とした載荷荷重は 0, 25, 50, 75, 100, 110, 120, 135, 140kN とした。載荷速度は約 4kN/s とし、目標荷重に達したら、サーボモーターにてその目標荷重を維持するように調整し、X 線 CT 撮影を実施した。撮影時間は約 150 秒であった。撮影を終えると次に高い目標荷重へと荷重を増やし、破壊するまで同様の作業を繰り返した。撮影結果から再構成された 3 次元画像から、変形を求めたい 2 つの荷重の同位置と考えられる断面画像を選定し、供試体内部を画像相関法の一つである PIV(Particle Image Velocimetry; 粒子画像流速測定法)計測を用いて計測した。本研究では、イリノイ大学で開発されたフリーのソフトウェア⁹⁾を使用した。

なお、図-3 および図-4 に示す本研究で使用した近畿大学所有の X 線 CT⁷⁾の撮影部は、X 線管(最大電圧 230kV、最大電流 1000 μ A)と受感パネル(Active pixels

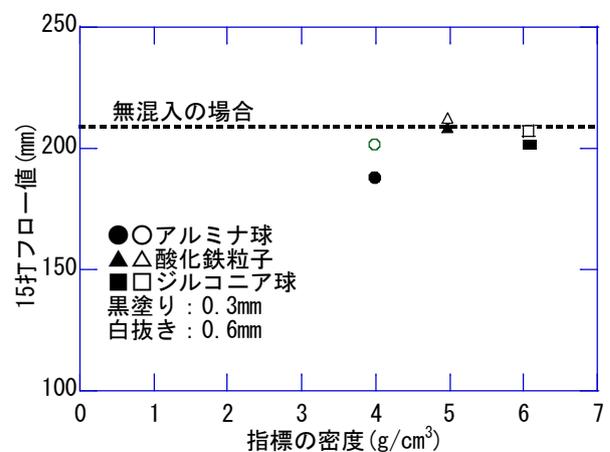


図-5 15 打のフロー値と密度関係

1408×1888pixel)を有している。撮影部が、300kN の載荷試験機の内側に設置されており、載荷状態での撮影が可能である。本研究では、載荷試験機にて供試体の圧縮試験を実施し、適宜応力状態を保持した状態で、X 線の照射条件を電圧 210kV、電流 100 μ A、解像度 0.123mm とし、試験体高さ中央から上下 30mm の範囲を撮影した。撮影された情報から再構成により、各応力下での 3 次元画像を取得した。

3. 実験結果

3.1 指標の選定に関する検討結果

図-5 に各粒子の混入によるフロー値を示す。無混入の場合、15 打フロー値は 209mm であった。粒径 0.6mm の各種指標を 0.5%混入した場合、そのフロー値は 202~213mm と、アルミナ粒子で少し低下が見られたが、無混入の場合とほとんど差が見られなかった。一方、粒径 0.3mm の酸化鉄粒子やジルコニア球を用いた場合のフロー値は、202~209mm と無混入の場合とほぼ同じであった。しかし、アルミナ粒子を用いた場合には無混入の場合に比べて 21mm 低下した。このフロー値の低下には、

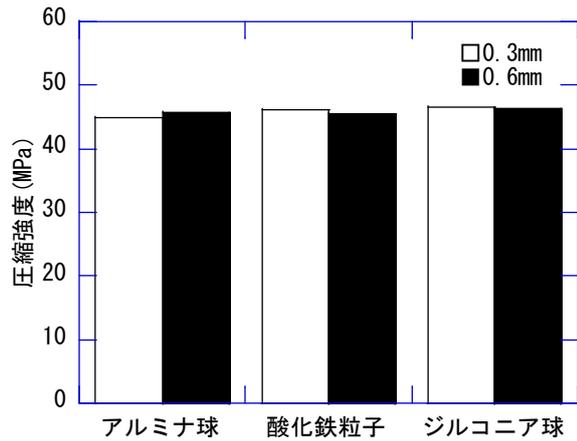


図-6 指標を入れたモルタルの圧縮強度

アルミナ粒子の形状や混和剤の吸着の影響が考えられる。

図-6 に指標を混入した場合の圧縮強度試験結果を示す。圧縮強度は 45~46MPa に収まっている。モルタル全体の 0.5%混入した場合、球の種類と大きさによる差は見られない。ここでは、無混入の場合について検討していない。混入の有無による差は後述の図-8 で述べる。

図-7 に各種の指標を混入したモルタルに対して X 線 CT 法により得られた断面画像を示す。アルミナ粒子を混入した場合、粒径が 0.3mm においても、粒径 0.6mm においても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 0.3mm ではわずかに粒子が認められる。一方、粒径 0.6mm では粒子がはっきりと認識できる。そして、ジルコニア球を用いた場合、粒径 0.3mm でも、粒径

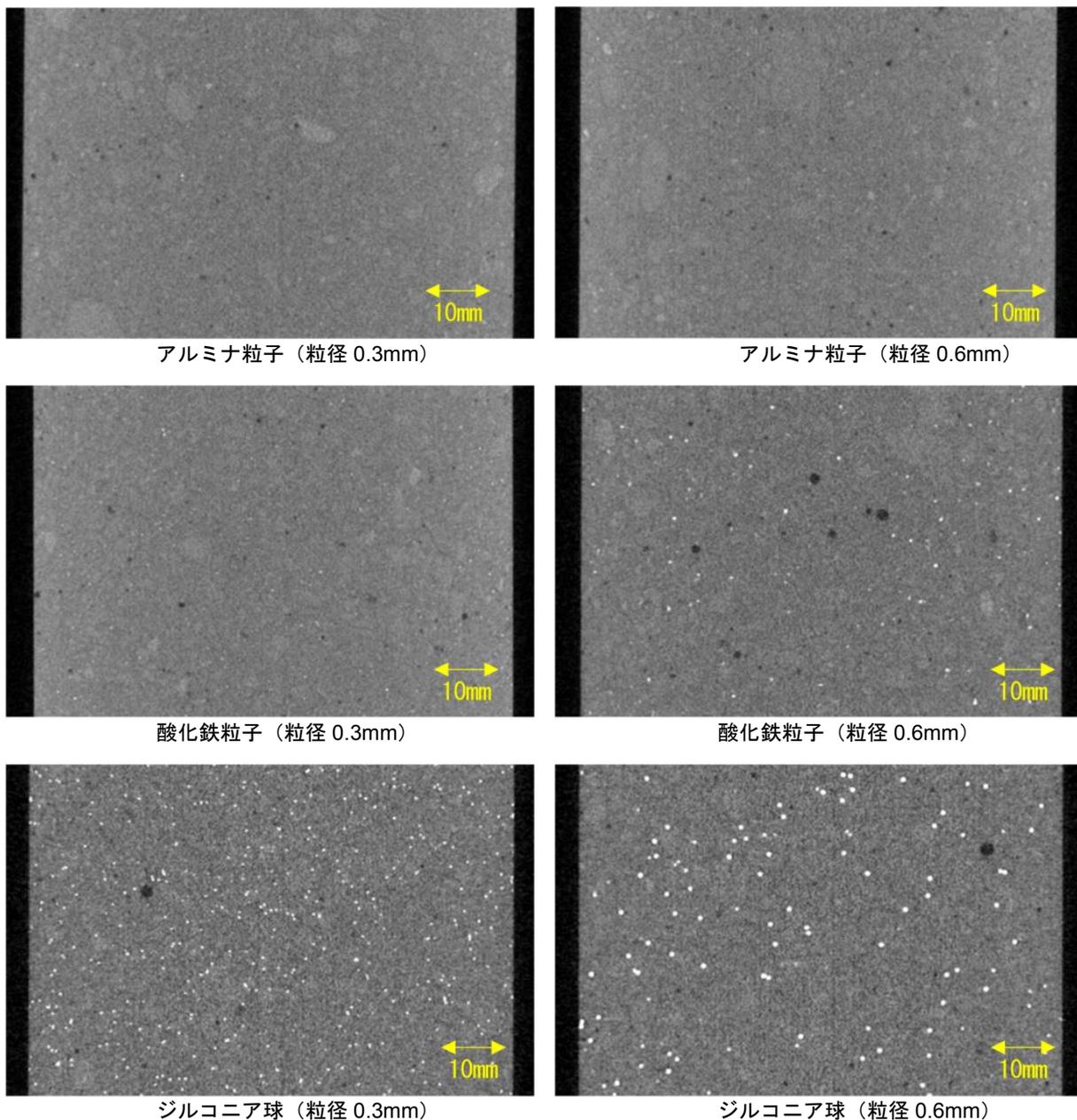


図-7 供試体の断面画像例

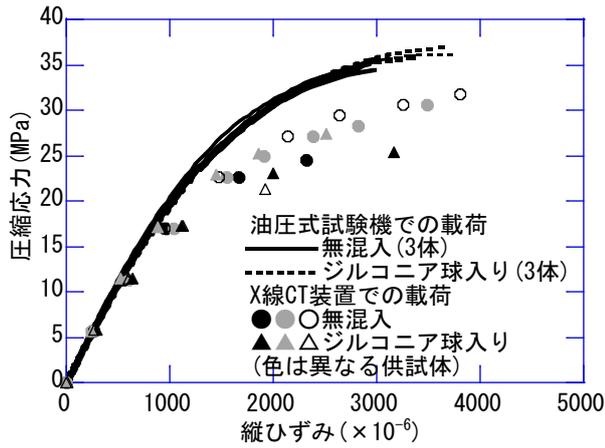
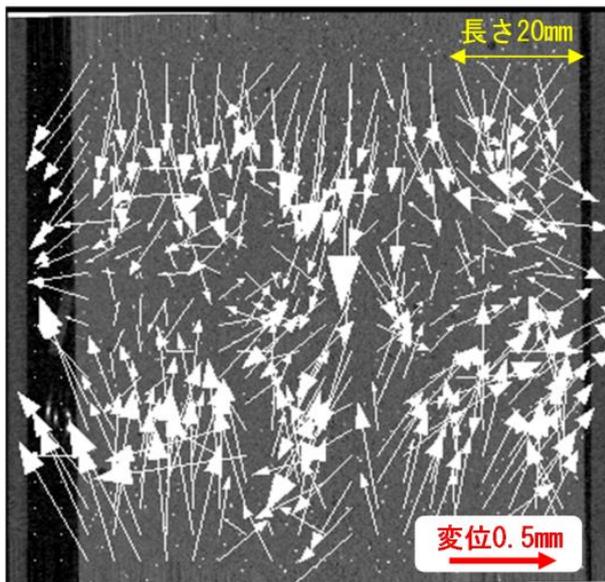


図-8 応力-ひずみ関係

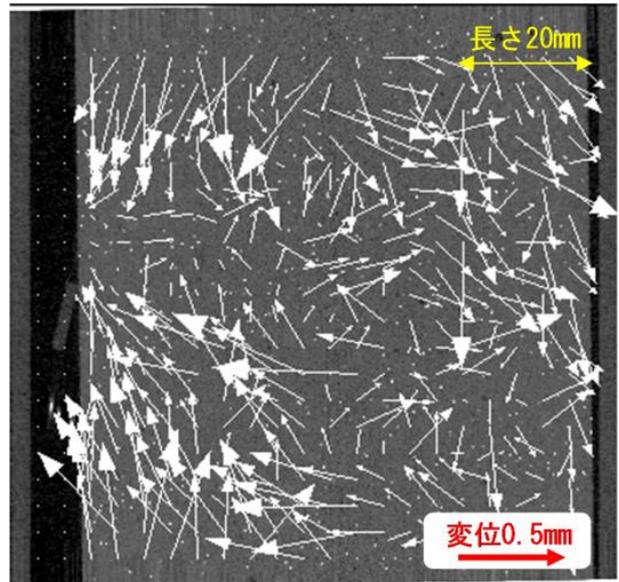
0.6mmでもはっきりと粒子が認識できる。すなわち、セメントペーストや骨材に対して密度差が 4g/cm^3 ほどだと、指標位置を分別できる可能性があることがわかった。また、粒径0.6mmに比べ、粒径0.3mmの場合、同じ体積を混合しても粒子数が多く、より情報を得られる可能性がある。そこで、本研究では、0.3mmのジルコニア球を指標として選定した。

3.2 選定された指標を用いたモルタルの検討

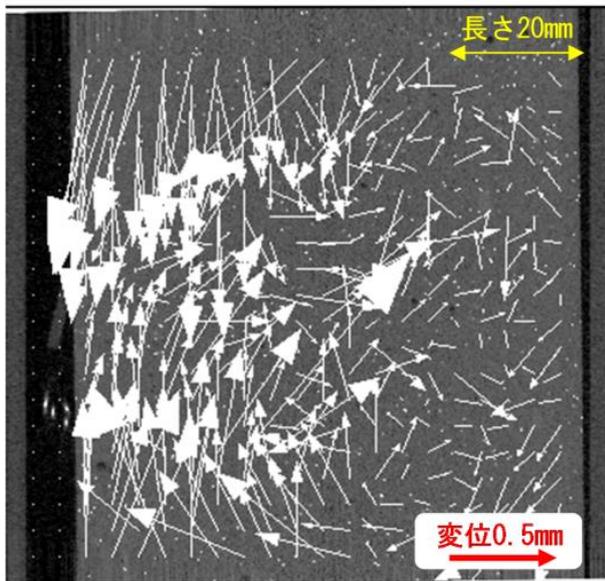
図-8に、JISに準拠した圧縮試験(以下、JIS法)による応力-ひずみ関係と、X線CT装置で载荷を実施した際の応力-ひずみ関係を重ねて示す。JIS法では、指標を混合していないモルタルの圧縮強度は35.2MPaであり、静弾性係数は21.8GPaであった。一方、ジルコニアを混合し



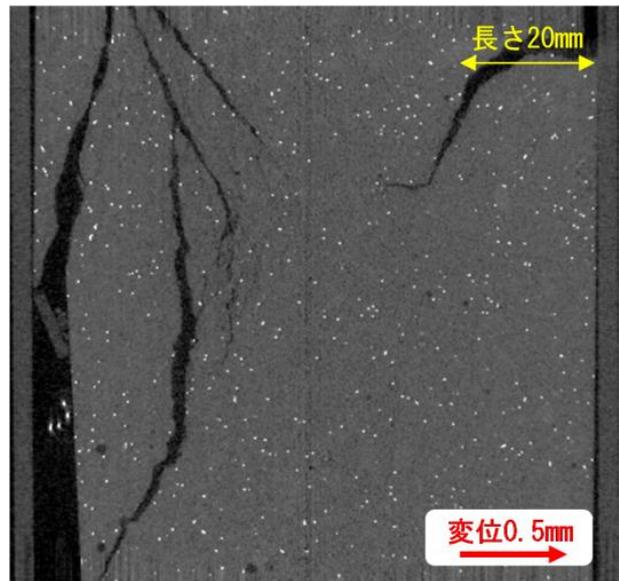
ひずみ 0-600 μ 間 (弾性域) の変位



ひずみ 600-1600 μ 間 (塑性域) の変位



ひずみ 1600-2800 μ 間 (塑性域) の変位



破壊後の X 線 CT 画像

図-9 供試体断面画像

た場合の圧縮強度は 36.3MPa、静弾性係数は 21.4GPa であり、応力-ひずみ関係にもほとんど差はみられない。

X 線 CT 装置での載荷では、15MPa 程度まではほぼ同じ関係であるが、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。そして、最終的に圧縮強度が 14~25%ほど低下した。すなわち、X 線 CT 装置での撮影しながらの載荷では、JIS 法と比べて弾性域に近い低荷重域での応力-ひずみは同程度となるが、塑性域に近い高荷重域では同荷重でもひずみが大きくなり、結果として圧縮強度が低下することがわかった。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ブ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、本装置で破壊状態を観察することは有効であると考えられる。

図-8 において、油圧式試験機で載荷した場合の圧縮強度 35.2MPa であったことから、少なくとも圧縮応力 11.7 MPa までは弾性域と考えられる。そのひずみは約 600 μ であった。また、X 線 CT 装置での載荷による応力-ひずみ関係における変曲点は約 1600 μ であり、すべての供試体での最小破壊ひずみは約 2800 μ であった。

そこで、図-9 に、ひずみ 0, 600, 1600 および 2800 μ 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 0-600 μ 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る。その傾向は供試体外周ほど大きい。

ひずみ 600-1600 μ 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 1600-2800 μ 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わかる。その変位の集中する箇所は、破壊後の断面画像の左側での破壊位置と一致していた。

以上から、ジルコニアを用いて、X 線 CT によるモルタルの内部変形計測が可能であることがわかった。今後、種々の画像計測手法を適用し、詳細な内部変形観察を実施したいと考えている。

4. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) モルタルの指標として粒径 0.3mm のジルコニアが適している。

- (2) 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。

今後、さらなる検討を行い、精度のよい 3 次元計測へと発展させていきたい。

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、尾濱太一君にもご尽力頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 493-498, 2008.
- 2) 麓隆行, 柏木洗一: 副産物粗骨材の弾性係数がコンクリートの圧縮破壊挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 145-150, 2009.
- 3) Z.Hashin,: The Elastic Modulus of Hetero-homogeneous Materials, J.of App.Mech, Vol. 29, No.1, pp.143-150, 1962.3.
- 4) 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.
- 5) 大津政康: コンクリート非破壊評価のための弾性波法の理論と適用, コンクリート工学, Vol. 46, No. 2, pp. 5-11, 2008.
- 6) 杉山隆文, 志村和紀, 畠田大規: 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.