

論文 モデルコンクリートを用いた粗骨材周りの圧縮破壊挙動の計測

相馬 悠人*1・石井 颯季*2・豊増 汰一*3・車谷 麻緒*4

要旨：本研究では、コンクリートの微視的な破壊挙動に関する数値シミュレーションの妥当性を確認するために有用な実験データを取得することを目的とし、円柱骨材を用いて単純化したモデルコンクリートを製作して一軸圧縮試験を実施した。また、モデルコンクリートに使用したモルタルおよび円柱骨材単体の一軸圧縮試験も併せて行った。結果として、モルタルと円柱骨材の圧縮強度および静弾性係数を取得し、さらに、モデルコンクリート供試体の力学挙動や円柱骨材周りに生じるひび割れの進展パターンに関する実験データを取得することができた。

キーワード：モデルコンクリート, 円柱骨材, 一軸圧縮試験, 圧縮強度, 静弾性係数

1. はじめに

コンクリートは優れた圧縮強度を有することから、圧縮に抵抗する材料として、多様な構造物に広く利用されている。コンクリートの圧縮挙動を精度よく予測することは、構造物の安全性や耐久性を向上させる上で重要な課題である。コンクリートはモルタルと粗骨材から成る非均質材料であり、その非均質性に起因して複雑な破壊挙動を示す。圧縮荷重を受けるコンクリートでは、初期段階においてモルタルと粗骨材の界面で微視的な破壊面が形成される。そして、圧縮荷重の増加に伴い、材料界面で生じた破壊面がモルタルへと進展し、最終的には複数の破壊面が進展・連結することにより、巨視的なひび割れを形成し、終局に至ると考えられている。

このような複雑なコンクリートの圧縮挙動を精度よく予測するため、近年、コンクリートをモルタルと粗骨材から成る非均質材料として扱う数値シミュレーションが増えている¹⁾²⁾。このような手法は、コンクリートの微視的な破壊挙動から全体的な力学挙動までを詳細に再現できる方法であり、コンクリートの破壊メカニズムを評価する上で有効である。一方で、数値シミュレーションでは、解析結果の妥当性を示すことが重要であり、実験結果との比較が不可欠である。しかしながら、コンクリートの圧縮破壊はばらつきが大きいことや、微視的な破壊挙動に焦点を当てた実験データがほとんどないことから、実験結果と解析結果を定量的に比較することは容易ではないのが現状である。

コンクリートの圧縮破壊のメカニズムを明らかにすることを目的とした実験的研究として、円柱骨材とモルタルを使用してコンクリートを単純化したモデルコンクリートを用いた実験が行われている³⁾⁷⁾。コンクリート

を単純化した供試体を用いることで、粗骨材周りに生じる微視的な破壊挙動を詳細に評価できる実験方法である。しかしながら、既往の研究では、粗骨材周りの微視的な破壊までを対象としていないものや、粗骨材の材料である岩石ではなく、モルタルを疑似的に円柱骨材として使用する例がほとんどである。この場合、円柱骨材とモルタル間の材料界面の状態が実際とは異なる可能性があり、コンクリートにおける粗骨材周りに生じる微視的な破壊挙動とは異なることが考えられる。

そこで本研究では、コンクリートにおける微視的な破壊挙動に関する数値シミュレーションの妥当性を確認するため、信頼性の高い実験データを取得することを目的とする。具体的には、粗骨材の材料である硬質砂岩からコア抜きした円柱骨材を用いてモデルコンクリート供試体を作製し、一軸圧縮試験を実施することで、定量的な実験データを取得する。本研究で対象とするモデルコンクリートを模擬した数値シミュレーションを実施し、実験結果と解析結果における力学挙動やひび割れ進展挙動を定量的に比較することで、数値シミュレーションの妥当性を確認することが可能となる。

2. 実験概要

2.1 モデルコンクリート供試体の概要

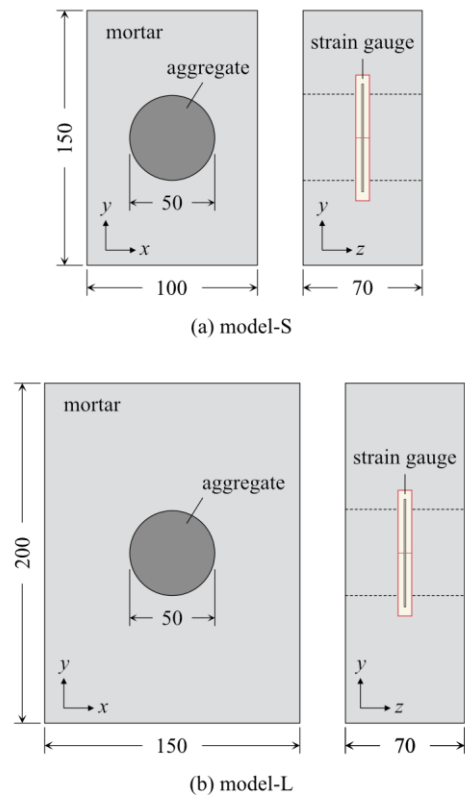
粗骨材周りに生じる微視的な圧縮破壊挙動を測定するため、円柱骨材を用いて単純化したモデルコンクリートを作製した。図-1に円柱骨材を用いたモデルコンクリート供試体の概要を示す。円柱骨材とモルタルとの体積比によって、円柱骨材周りに生じる破壊挙動が異なることが考えられる。モルタルの領域が小さい場合、円柱骨材周りのかぶりが薄くなるため、一軸圧縮試験時に載荷

*1 福島工業高等専門学校 都市システム工学科助教 工博 (正会員)

*2 福島工業高等専門学校 都市システム工学科

*3 福島工業高等専門学校 都市システム工学科 (現 長岡技術科学大学 環境社会基盤工学課程)

*4 茨城大学大学院 理工学研究科都市システム工学領域准教授 工博 (正会員)



図ー１ モデルコンクリート供試体の概要

表ー１ モルタルの配合

セメントの種類	普通ポルトランドセメント
水セメント比	55%
単位水量	265 kg/m ³
単位セメント量	490 kg/m ³
単位細骨材量	1471 kg/m ³
単位混和剤量	4.9 kg/m ³

板に接する端部の拘束の影響を受け、骨材周りのひび割れが進展しにくくなる可能性が考えられる。一方で、モルタルの領域が大きい場合、円柱骨材周りで発生した破壊がモルタルへと進展しやすくなることが考えられるが、モルタルの領域が大きい分、円柱骨材周りで生じる破壊よりもモルタルに生じる破壊が支配的になる可能性が考えられる。そこで本研究では、外形寸法の異なる model-S と model-L の 2 種類の供試体を作製した。各ケースともに 3 体ずつ供試体を作製した。なお、供試体の打設時期は各ケースで異なる。

表ー１にモルタルの配合を示す。普通ポルトランドセメントを使用し、標準的なモルタルとなるように配合設計を行った。混和剤として AE 減水剤ポゾリス No.70 の 4 倍希釈液を使用し、モルタルの流動性を確保した。モルタルの練り混ぜには、マゼラー製のモルタルミキサー PM-15N を使用した。円柱骨材の製作には、一般的な粗



写真ー１ 硬質砂岩ブロックおよび円柱骨材



写真ー２ モデルコンクリート(model-S)の打設時の様子

骨材の材料である硬質砂岩のブロックを使用した。本研究で使用した硬質砂岩は、茨城県桜川市で採取されたものであり、絶乾密度は 2.63 g/cm³、吸水率は 0.62% である。ブロック状の硬質砂岩に対してコア抜きを実施した後、表面を研磨して直径 50 mm、高さ 70 mm の円柱状の骨材に加工した。写真ー１に硬質砂岩ブロックおよび製作した円柱骨材を示す。モデルコンクリート供試体の製作には、写真ー２に示す型枠を使用した。鋼製型枠の内部に木板で仕切りを設け、所定の供試体寸法を確保できるよ

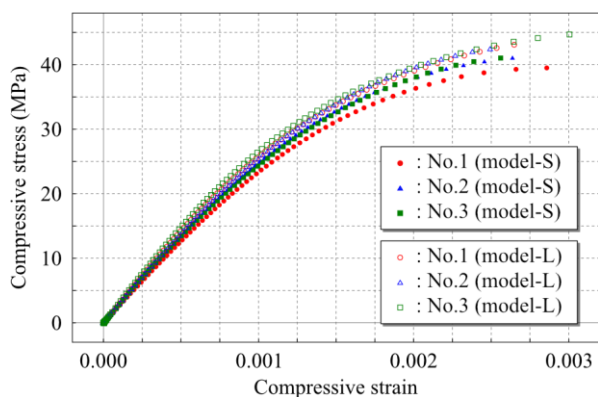


図-2 モルタル円柱供試体の応力-ひずみ関係

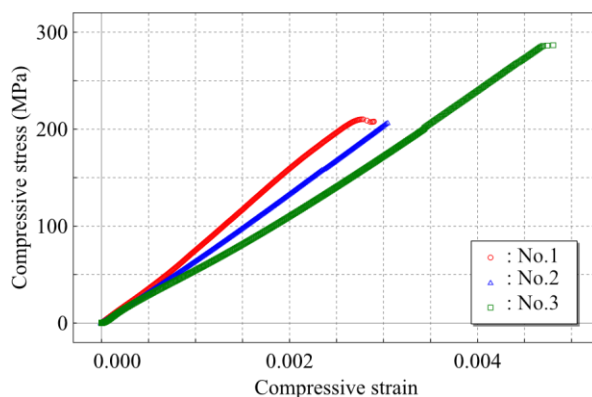


図-3 円柱骨材の応力-ひずみ関係

表-2 モルタル円柱供試体の圧縮強度と静弾性係数

(a) Mortar in model-S

	Compressive strength	Static modulus of elasticity
No.1	39.5 MPa	25.2 GPa
No.2	41.0 MPa	27.2 GPa
No.3	41.0 MPa	26.7 GPa
Ave.	40.5 MPa	26.4 GPa

(b) Mortar in model-L

	Compressive strength	Static modulus of elasticity
No.1	43.1 MPa	28.4 GPa
No.2	42.4 MPa	27.2 GPa
No.3	44.9 MPa	29.6 GPa
Ave.	43.5 MPa	28.4 GPa

表-3 円柱骨材の圧縮強度と静弾性係数

	Compressive strength	Static modulus of elasticity
No.1	210.2 MPa	74.5 GPa
No.2	206.2 MPa	64.0 GPa
No.3	286.6 MPa	55.2 GPa
Ave.	234.3 MPa	64.6 GPa

うに調整した。円柱骨材を供試体の中央に正確に固定するため、突っ張り棒を使用して位置がずれないように留意した。モルタルの打設方向は、図-1 に示す z 軸方向である。モルタルの打設後は湿潤養生を行い、打設から 24 時間後に脱型し、その後は水中養生を行った。また、モルタルの圧縮強度および静弾性係数を測定するため、model-S と model-L の各ケースにおいて直径 50 mm、高さ 100 mm のモルタル円柱供試体を 3 体ずつ作製した。

2.2 モルタル円柱供試体と円柱骨材の一軸圧縮試験

本研究で使用するモルタルと粗骨材の圧縮強度および静弾性係数を計測するため、モルタル円柱供試体と円柱骨材を対象に一軸圧縮試験を実施した。モルタル円柱供試体の圧縮試験に関しては、打設後 28 日目に実施した。試験装置には、島津製作所製の CCH-2000kNX を使用した。試験装置の上部の圧盤には、球座構造が備え付けられている。試験装置と供試体端面との間に摩擦が生じることで、圧縮破壊の力学挙動に影響を及ぼす可能性があるが、本研究では摩擦を低減するための特別な処理は行っていない。供試体端面を研磨し、試験装置から力が均

一に加わるよう留意した。一軸圧縮試験は JIS A 1108 に準拠して実施した。載荷速度は 0.6 MPa/sec である。モルタル円柱供試体と円柱骨材の圧縮ひずみを測定するため、各供試体の側面の 2 箇所にゲージ長 30 mm のひずみゲージを貼付した。データ記録装置には、東京測器研究所製の TDS-540 を使用し、試験装置の圧縮荷重と供試体の圧縮ひずみ(2 箇所)を 1 秒毎に記録した。また、モルタル円柱供試体と円柱骨材の静弾性係数は、JIS A 1149 の規定に従い、最大荷重の 1/3 に相当する圧縮応力と、供試体の圧縮ひずみ 50×10^{-6} のときの圧縮応力を結ぶ線分の勾配とした。

2.3 モデルコンクリート供試体の一軸圧縮試験

図-1 に示すモデルコンクリート供試体に対して、 y 軸方向に圧縮荷重を加える一軸圧縮試験を実施した。model-S および model-L ともに打設後 28 日目に試験を実施した。試験装置および記録装置は、2.2 節に記載したものと同様である。試験前に供試体の端面を荷重軸に対して直角になるよう研磨し、偏心荷重が生じないように留意した。円柱骨材周りの圧縮ひずみを精度よく測定するため、供試体の両側面にゲージ長 60 mm のひずみゲージを貼付し、試験装置の圧縮荷重と供試体の圧縮ひずみ(2 箇所)を 1 秒毎に記録した。さらに、円柱骨材周りに生じるひび割れを記録するため、デジタル一眼レフカメラを用いて供試体表面を 1 秒毎に撮影した。model-S の載荷速度は 0.2 kN/sec、model-L の載荷速度は 2 kN/sec とした。両ケースでは載荷速度が異なるものの、いずれも静的載荷となるように載荷速度を設定した。

3. 実験結果

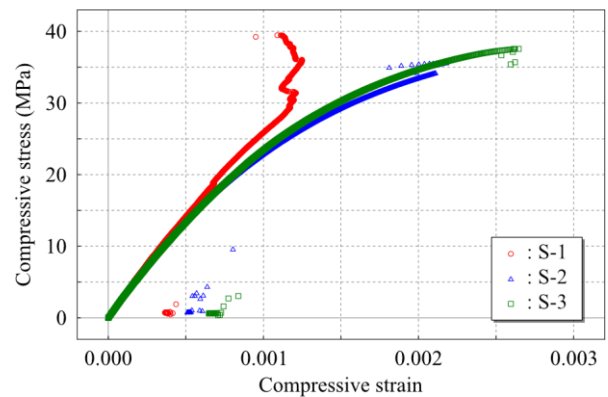
3.1 モルタル円柱供試体と円柱骨材の圧縮強度および静弾性係数

図-2 にモルタル円柱供試体の圧縮応力-圧縮ひずみ関係を示す。グラフの縦軸に示した圧縮応力は、試験装置の荷重を供試体の断面積で除した値である。横軸に示した圧縮ひずみは、円柱供試体の側面の2箇所に貼付したひずみゲージで測定したひずみ値の平均値である。以降に示すグラフの圧縮応力と圧縮ひずみも同様の方法で算出した値を示している。また、表-2 にモルタル円柱供試体の圧縮強度および静弾性係数を示す。model-S と model-L に使用したモルタルは打設時期が異なるため、各ケースのモルタルの圧縮強度および静弾性係数に多少の差が見られるものの、これらの値は標準的なモルタルが取り得る値の範囲内に収まっている。

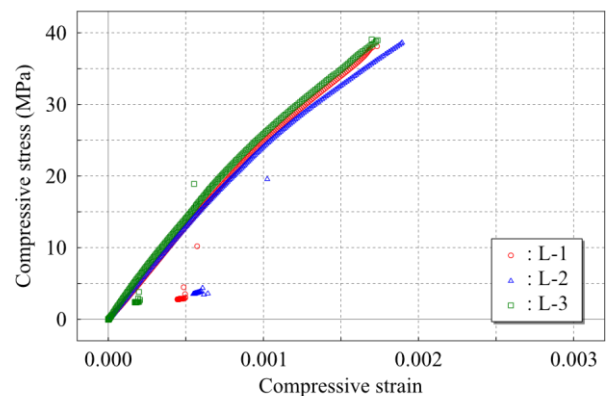
図-3 に円柱骨材の圧縮応力-圧縮ひずみ関係を示す。また、表-3 に円柱骨材の圧縮強度および静弾性係数を示す。結果を見ると、圧縮強度および静弾性係数ともにモルタルの値を大きく上回っていることがわかる。圧縮強度および静弾性係数にばらつきが見られるが、これは硬質砂岩ブロックから供試体をコア抜きする際や供試体を研磨する際に、供試体内部に微視的な破壊面が形成された可能性が考えられる。しかしながら、このばらつきに関しては、既往研究^{8),9)}においても確認されており、本研究で得られた圧縮強度および静弾性係数の値は既往研究で報告されている硬質砂岩の特性値の範囲内である。したがって、本研究で得られた値は妥当であると判断できる。また、モデルコンクリートを模擬した数値シミュレーションにおいて材料特性の設定する際、本研究で得られた実験データを参考とすることで、実験結果と解析結果の比較精度を向上させることが可能となる。

3.2 モデルコンクリート供試体の圧縮破壊挙動

図-4 にモデルコンクリート供試体の圧縮応力-圧縮ひずみ関係を示す。また、表-4 にモデルコンクリート供試体の圧縮強度および静弾性係数を示す。model-S の圧縮応力-圧縮ひずみ関係では、S-1 供試体の力学挙動が他の供試体と異なる傾向を示している。この原因としては、ひずみゲージの貼付箇所にひび割れが生じたため、ひずみが開放され、正確な測定ができなかった可能性が考えられる。それ以外の供試体では、概ね同様の力学挙動を示していることが確認された。一方、model-L の圧縮応力-圧縮ひずみ関係では、3つの供試体全てでほとんど同様の力学挙動が確認され、ばらつきは小さいといえる。また、表-2 に示したモルタルの圧縮強度および静弾性係数と比較すると、モデルコンクリート供試体の静弾性係数はモルタルの値とほとんど同様の値が得られている。しかし、圧縮強度に関しては、円柱骨材の導入



(a) model-S



(b) model-L

図-4 モデルコンクリートの応力-ひずみ関係

表-4 モデルコンクリートの圧縮強度と静弾性係数
(a) model-S

	Compressive strength	Static modulus of elasticity
S-1	39.5 MPa	28.1 GPa
S-2	35.6 MPa	26.9 GPa
S-3	37.6 MPa	26.4 GPa
Ave.	37.5 MPa	27.1 GPa

(b) model-L

	Compressive strength	Static modulus of elasticity
L-1	38.1 MPa	26.3 GPa
L-2	38.6 MPa	26.1 GPa
L-3	39.1 MPa	28.2 GPa
Ave.	38.6 MPa	26.8 GPa

によってモルタルと円柱骨材の界面において力学的な弱部が形成されるため、モルタル単体の圧縮強度よりもモデルコンクリートの圧縮強度のほうが小さい値を示していることが確認された。

写真-3 に最大圧縮応力時における円柱骨材周りのひび割れの様子を示す。model-S のケースでは、最大圧縮応

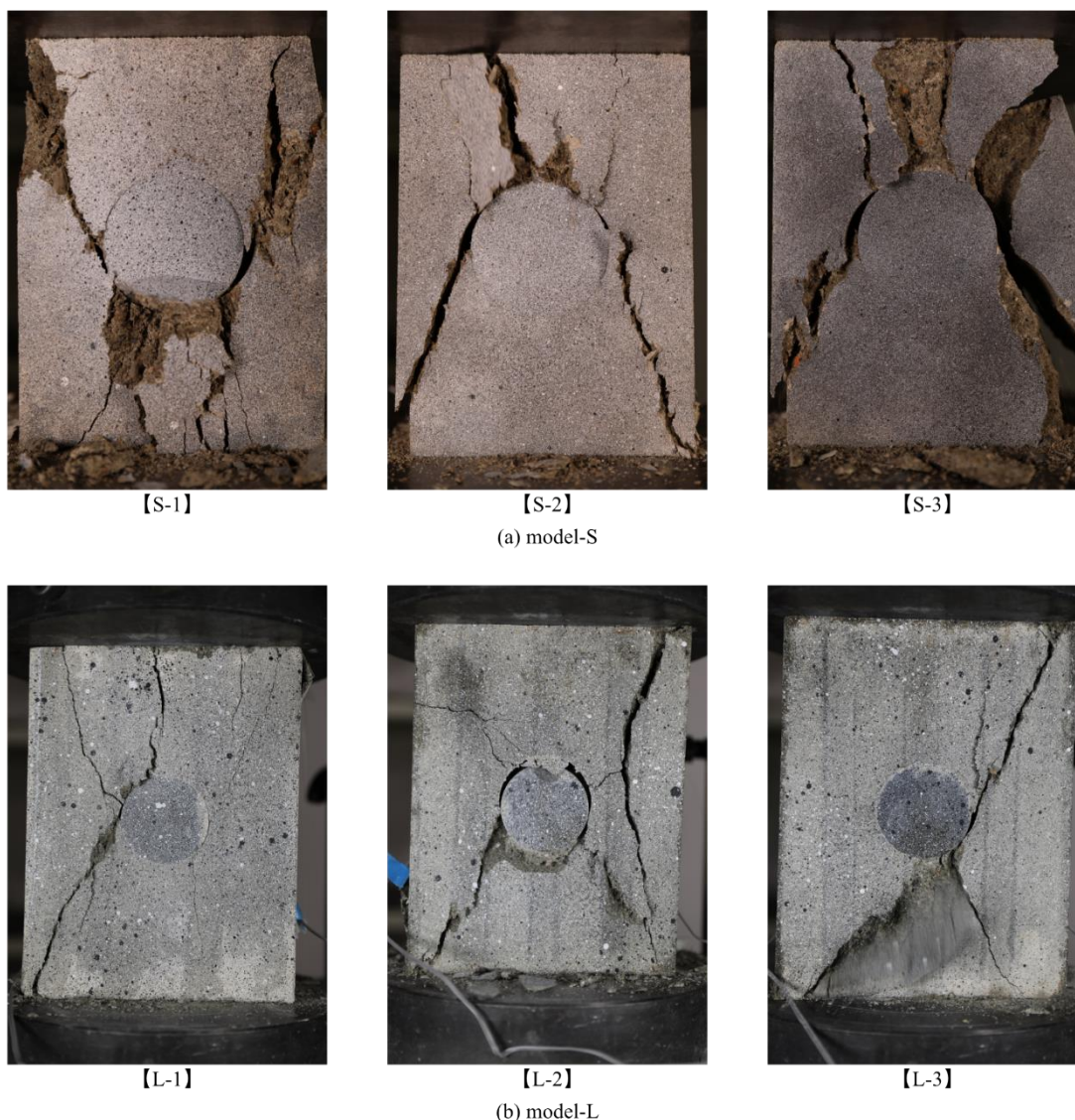


写真-3 最大圧縮応力時における円柱骨材周りのひび割れの様子

力に達する直前において、円柱骨材とモルタルの境界面からせん断で生じたと思われるハの字形のひび割れが進展し、続いて、円柱骨材の直上または直下において荷重軸方向に沿ったひび割れが進展する傾向が見られた。一方で、model-L のケースでは、モルタルの体積率が円柱骨材に比べて大きいため、モルタルの破壊が支配的となり、ひび割れの発生位置や進展パターンにばらつきが生じることが確認された。

数値シミュレーションにおいて、コンクリートの微視的な破壊挙動の妥当性を確認する際、本研究で対象としたモデルコンクリートを模擬した数値シミュレーションを実施し、実験結果と解析結果を比較することで、妥当性を確認することができる。特に、本研究で得られた圧縮応力-圧縮ひずみ関係や、円柱骨材周りに生じるひび割れ進展の傾向を再現することができれば、数値シミュレーションの再現精度を定量的に示すことができる。ただし、実験においては供試体端面に生じる摩擦が破壊挙

動に影響を及ぼしている可能性が考えられる。そのため、より精度よく実験結果と解析結果を比較するためには、数値シミュレーションにおいても供試体端面の摩擦を適切に考慮する必要がある。

4. おわりに

本研究では、コンクリートの数値シミュレーションにおける妥当性を確認するための定量的な実験データを取得することを目的とし、円柱骨材を用いて単純化したモデルコンクリート供試体の一軸圧縮試験を実施した。加えて、モデルコンクリートの材料であるモルタルと円柱骨材の材料特性を取得するため、各材料の一軸圧縮試験も実施した。既往研究では、モルタルを用いて円柱骨材を疑似的に作製している例がほとんどであるが、本研究では、粗骨材の原石を加工して円柱骨材を作製しており、粗骨材とモルタルの界面の状態や剛性の違いなどを、実際のコンクリートに近い状態で再現できたと考えられる。

実験の結果、モルタルと円柱骨材の圧縮強度および静弾性係数を取得し、さらに、モデルコンクリート供試体の力学挙動および材料特性、ひび割れの傾向を得ることができた。これらの実験データに基づき、数値シミュレーションの解析結果と実験結果を比較することで、骨材周りに生じる微視的な破壊挙動の妥当性の確認や、骨材周りに形成される弱部のパラメータ評価などに活用できると考えられる。

今後は、モデルコンクリート供試体の一軸圧縮試験時に撮影した供試体表面の画像データを活用し、供試体表面に生じたひずみ分布を解析する予定であり、円柱骨材周りに生じる破壊挙動を比較するために有用となる定量的なデータを示すことを考えている。

謝辞

本研究を実施するにあたり、円柱骨材の製作を NC セグメント株式会社の山下悠貴様にご助力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Kohei Nagai, Yasuhiko Sato and Tamon Ueda: Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by 3D RBSM, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.3, No.3, pp.385-402, 2005
- 2) 車谷麻緒, 加藤匠, 松村眞由: フェーズフィールド法によるコンクリートのメゾスケールモデルの作

成とその数値実験への適用, 日本計算工学会論文集, Vol.2020, pp.20200008, 2020

- 3) 小阪義夫, 谷川恭雄, 太田福男: コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響, 日本建築学会論文報告集, Vol.20, No.208, pp.41-46, 1971
- 4) 和泉正哲, 三橋博三, 佐々木達夫: コンクリートの圧縮破壊発生機構に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, Vol.289, pp.11-25, 1980
- 5) 梅原秀哲, 張剣, 上田稔, 吉田弥智: ダムコンクリートの圧縮強度に及ぼす粗骨材の影響, 土木学会論文集, Vol.1992, No.451, pp.235-244, 1992
- 6) 平岩陸: 載荷方向の違いがコンクリート内部のひずみ・変形挙動に及ぼす影響に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.215-220, 2020
- 7) 梶川康男, 橘吉宏, 吉田博: 骨材-モルタル平面モデルを用いたコンクリートの変形挙動, 土木学会論文集 Vol.1985, No.356, pp.369-377, 1985
- 8) 立松和彦, 荒井正直, 岩清水隆, 木村芳幹, 浦野英男, 今本啓一, 元木亮: 関西地域における骨材原石の乾燥収縮および細孔径分布に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.66, No.549, pp.1-6, 2001
- 9) 中根政範, 黒井登起雄, 松村仁夫: コンクリートの乾燥収縮に及ぼす栃木県産岩石の特性とその関連性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.511-516, 2013