

損傷度の異なるコンクリートコアの有限要素シミュレーションによる圧縮破壊挙動の推定

新潟大学大学院自然科学研究科 学生会員 ○田中 熙 柴野 一真
新潟大学大学院総合学術研究科 学生会員 池田 弘毅
新潟大学自然科学系（農学部） 正会員 鈴木 哲也

1. はじめに

コンクリートは構造物の建設材料として主要な位置を占めている。その非線形な力学挙動が、内部損傷の進展過程の推定を困難にしている。この推定に対し、有限要素法に基づくシミュレーション解析手法が検討されている¹⁾。

このシミュレーションにおいては、モデルの材料分布や材料特性が、解析精度に影響を与える²⁾。既往のメソスケール解析では、骨材の形状と分布をアルゴリズムにより生成する手法が用いられてきた³⁾。生成された骨材配置は、実構造物から採取したコアの内部構造とは一致しない。実コアの破壊挙動を推定するには、実際の材料分布をモデルに取り込む必要がある。X線CTデータにより内部の材料分布を再現する手法が検討されている。

供用中の構造物では、部位によって損傷の程度が異なる。損傷の程度が破壊挙動に及ぼす影響を解析により評価できれば、部位ごとの健全度診断に利用できる。損傷の程度が異なるコアを同一の手順でモデル化し、解析結果を比較した例は少ない。

そこで本研究では、損傷度の異なる3部位から採取したコンクリートコアを、X線CTデータに基づいてモデル化した。圧縮破壊シミュレーションを実施し、損傷度の違いが破壊挙動の解析結果に表れるかを検証した。

2. 解析方法

調査対象構造物は、供用中の矢代川頭首工である。底部、左岸側堰柱、右岸側堰柱の3部位からコンクリート円柱コアを採取した。採取本数は、底部で3本、左岸側堰柱で10本、右岸側堰柱で8本である。頭首工の各部位は損傷の程度が異なっており、採取したコアにおいてもその傾向が確認された。コアの直径は約100 mmであり、高さは各コアによって異なる。

各コアに対し、ボクセルサイズ $0.351 \times 0.351 \times 0.5$ mmでX線CTスキャンを行った。得られた画像の

各領域を、背景、ひび割れ、空隙、骨材、モルタルの5つのラベルに分類した。背景を除く4つの材料をメッシュ生成の対象とした。骨材とモルタルの界面は、界面遷移帯（ITZ：Interfacial Transition Zone）として別に定義した。

X線CT画像の境界は微細な凹凸を含み、そのままでは要素数が過大になる。そこでスムージング、モルフォロジカルフィルタ、ブーリアン演算、孤立領域の除去をすることにより、各材料相の境界を調節した。要素数を抑えるため、画像を6倍にリサンプリングした。メッシュはメッシュ生成ソフトウェアである Simpleware により生成した（図-1）。ボクセルを直接変換する FE Grid ではなく、領域ごとに要素寸法を制御できる FE Free を用いた。要素には2次四面体要素を用いた。空隙は非メッシュ化とし、自由表面として扱った。

圧縮破壊試験のシミュレーションには、CAE 解

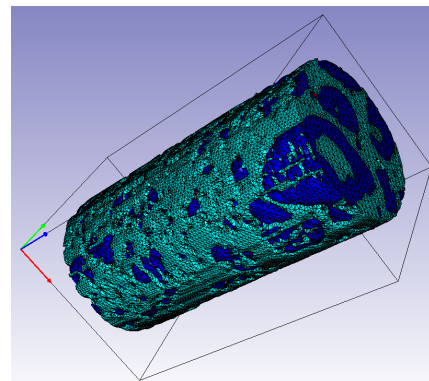


図-1 コンクリートコアのメッシュ生成結果

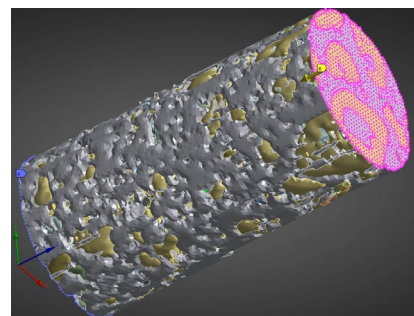


図-2 Ansys 上におけるコンクリートコアモデル

析ソフトウェアである Ansys を用いた。モデルの下端面を固定面とし、上端面に変位制御により強制変位を与えた（図-2）。骨材は線形弾性モデルとし、内部で損傷を生じないものとした。モルタルには Menetrey-Willam モデルを用い、塑性および軟化を表現した。ITZ およびひび割れには凝集力モデル（CZM）を適用し、それぞれ界面剥離と既存ひび割れ面の接触・分離を表現した。本報で解析したモデルの高さは 228.0 mm、要素数は 353,685 であり、骨材が 104,871、モルタルが 248,814 である。解析結果は、対応するコアの一軸圧縮試験の結果と比較した。

3. 結果および考察

部位別の材料体積率を表-1 に示す。ひび割れの割合は、左岸側堰柱で 1.55 %と最も大きい。空隙の割合は、底部で 4.79 %と最も大きく、右岸側堰柱で 1.29 %と最も小さい。ひび割れと空隙を合わせた欠陥の割合は、底部、左岸側堰柱、右岸側堰柱の順に小さくなる。一軸圧縮試験による強度の平均は、右岸側堰柱で 21.4 MPa、左岸側堰柱で 13.9 MPa、底部で 13.8 MPa であった。欠陥の割合が最も小さい右岸側堰柱で強度が最も大きく、欠陥体積率を損傷度の指標として扱える可能性がある。X 線 CT データを活用したメッシュ生成により、部位ごとの損傷度の差をモデルに反映できる可能性が示唆された。メッシュ生成後の骨材体積率は CT 実測値の 0.98 倍であり、モルタルは連続相として再現された。

右岸側堰柱から採取したコアの応力-ひずみ関係を図-3 に示す。解析の初期接線弾性係数は 26.7 GPa であり、実験値 21.9 GPa の 1.22 倍であった。実験の最大応力 24.4 MPa に達するひずみは、実験値の 88 %であった。X 線 CT データに基づくモデル化により、実コアの初期剛性を同程度の水準で再現できるものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、損傷度の異なる 3 部位から採取したコンクリートコアを、X 線 CT データに基づいてモデル化した。部位別の欠陥体積率は、底部、左岸側堰柱、右岸側堰柱の順に小さくなり、欠陥が最も少ない右岸側堰柱で圧縮強度が最も大きかった右岸側堰柱のコアでは、初期接線弾性係数が実験値の 1.22 倍となった。X 線 CT データに基づくモデル化により、部位ごとの損傷度の差を材料分布として再現できると考えられる。

参考文献

- 1) Cervera, M., Barbat, G. B., Chiumenti, M. and Wu, J.-Y. (2022): A Comparative Review of XFEM, Mixed FEM and Phase-Field Models for Quasi-brittle Cracking, Archives of Computational Methods in Engineering, 29(2), 1009-1083.
- 2) Huang, Y.-J., Zhang, H., Li, B.-B., Yang, Z.-J., Wu, J.-Y. and Withers, P. J. (2021): Generation of high-fidelity random fields from micro CT images and phase field-based mesoscale fracture modelling of concrete, Engineering Fracture Mechanics, 249, 107762.
- 3) Thilakarathna, P. S. M., Kristombu Baduge, K. S., Mendis, P., Vimonsatit, V. and Lee, H. (2020): Mesoscale modelling of concrete - A review of geometry generation, placing algorithms, constitutive relations and applications, Engineering Fracture Mechanics, 231, 106974.

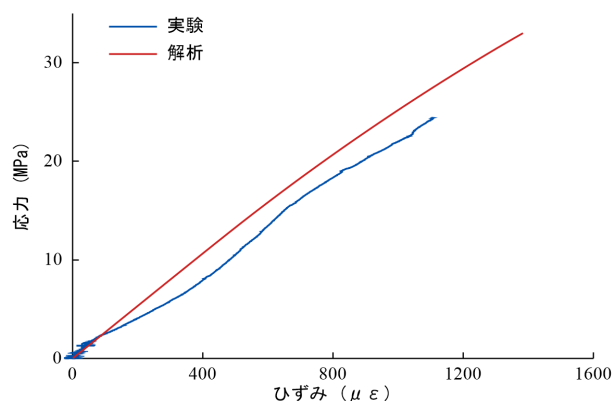


図-3 応力-ひずみ関係（実験との対比）

表-1 部位別の材料体積率

採取位置	ひび割れ	空隙	骨材	モルタル
底部	0.33%	4.79%	37.08%	57.80%
左岸側堰柱	1.55%	2.15%	31.52%	64.78%
右岸側堰柱	0.46%	1.29%	36.26%	61.99%
全体	0.86%	2.14%	34.56%	62.44%