

拡張ボクセル有限要素法を用いたコンクリートの微細構造解析に関する研究

茨城大学 学生会員 ○川瀬 晴香

茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

コンクリートは粗骨材・細骨材・セメントなどからなる複合材料であり、粗骨材周辺において複雑な力学挙動を示す。コンクリート内部の力学挙動を解明するために、粗骨材-モルタル 2 相材料モデルとして数値解析を行う場合、界面形状に適したメッシュが必要となるが、3次元解析モデルの作成は非常に困難である。

そこで本研究では、画像データなどから一律にメッシュ生成が行えるボクセル要素に、メッシュフリー法の 1 つである拡張有限要素法 X-FEM(eXtended Finite Element Method)^{1), 2)}を適用した拡張ボクセル有限要素法を用いる。X-FEM を用いることで、ボクセル要素における界面が階段状に近似されるという問題点を解消した解析手法となっている。本研究ではコンクリートの 3 次元粗骨材-モルタル数値解析モデルの作成手法並びに、これに対する拡張ボクセル有限要素法の適用性および有効性を示すことを目的とする。

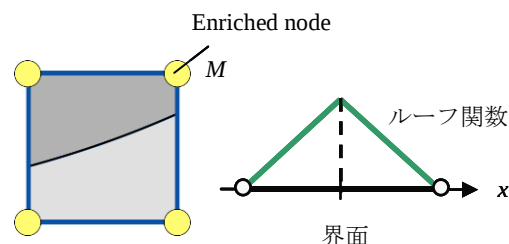


図-1 エンリッチ要素とループ関数

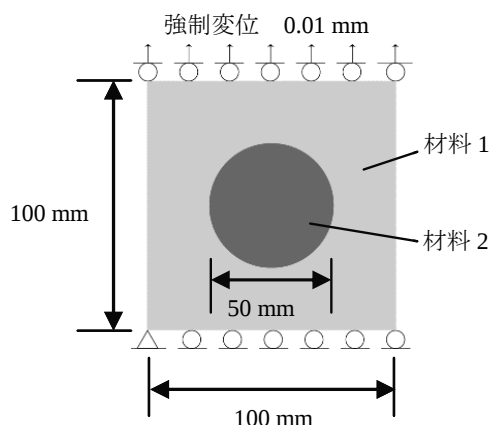


図-2 2次元引張問題

2. 解析手法

2.1 X-FEM の概説

X-FEM は、エンリッチメントと呼ばれる近似の高度化により、材料界面におけるひずみの不連続性を導入することができ、要素内に材料界面が含まれる場合の解析を可能にしている。

図-1 に示すような材料界面を含む要素に対し、X-FEM の変位の近似は次式で表される。

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \sum_{I \in N_E} N_I(\mathbf{x}) \mathbf{d}_I + \sum_{I \in M} N_I(\mathbf{x}) F(\mathbf{x}) \mathbf{b}_I \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ は変位ベクトル、 $N_I(\mathbf{x})$ は通常の FEM における節点 I の形状関数、 N_E は要素を構成する節点数、 $\mathbf{d}_I$ は節点 I の自由度ベクトル、 $\mathbf{b}_I$ は節点 I の付加自由度ベクトル、 M はエンリッチされる節点集合、 $F(\mathbf{x})$ はエンリッチ関数である。通常の FEM における変位の近似の式に、材料界面におけるひずみの不連続性を近似するためにエンリッチ関数を付加する形となっている。具体的には図-1 に示すようなループ型の関数であり、変

位が連続でありながらその微分値であるひずみは不連続となっている。ループ関数は次式で与えられる。

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{I=1}^{N_E} |f_I| N_I(\mathbf{x}) - \left| \sum_{I=1}^{N_E} f_I N_I(\mathbf{x}) \right| \quad (2)$$

ここで f_I はレベルセット関数であり、要素内における界面の位置を表す関数となっている。

2.2 解析精度

X-FEM の解析精度について検証する。解析対象は図-2 に示すような、材料 1(ヤング率：20 GPa, ポアソン比：0.2), 材料 2(ヤング率：50 GPa, ポアソン比：0.2) からなる 2 相材料モデルとする。X-FEM の解析精度を示すため、通常の FEM とボクセル FEM による解析結果と比較する。

各解析結果として、von-Mises 応力分布を図-3 に示す。ボクセル FEM は材料界面を階段状にモデル化しているため、FEM の結果と比較して不自然な応力分布となっている。

キーワード 拡張ボクセル有限要素法, コンクリート微細構造, X-FEM, エンリッチメント, ボクセル FEM

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学工学部 TEL. 0294-38-5004 FAX. 0294-38-5268

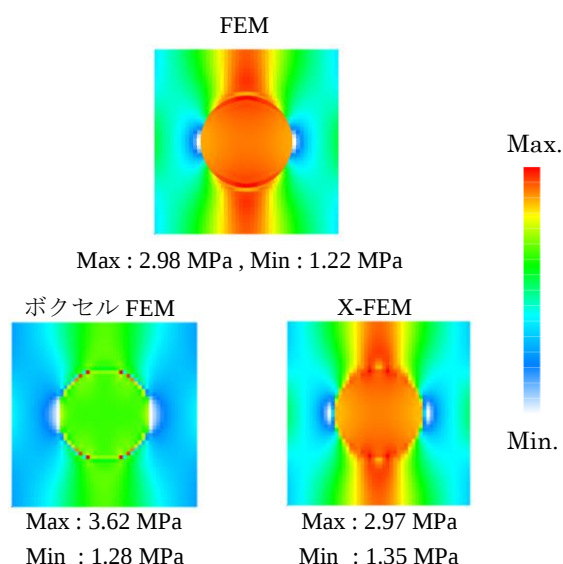


図-3 von-Mises 応力分布の比較

一方、X-FEM では同じようなボクセルメッシュを用いているが、エンリッチ近似により要素内にひずみの不連続性を導入しているため、FEM の結果と比較して、ほぼ同様の結果が得られている。

2.3 複数界面への対応

コンクリートには多くの粗骨材が含まれており、モデル化する際、要素内に複数の界面が形成されることがある。そこで、本研究ではレベルセット関数を工夫することにより、要素内に含まれる複数界面に対応していく。図-4 に示すような要素内に界面が 2 つ存在する場合には、レベルセット関数を 2 つ設定し、それぞれの界面までの距離を定義することで、解析を可能としている。

図-4 下段に示すような界面を含む要素同士が隣り合う場合についての適用を示す。この場合は、レベルセット関数を 2 つ設定し、それぞれの界面を定義することで解析を可能としている。

3. 3次元粗骨材-モルタルモデルへの適用

3.1 3次元粗骨材-モルタルモデルの作成

解析対象は図-5 に示すような立方体(200×200×200 mm³)の中に骨材を想定した球がランダムに配置された 3次元粗骨材-モルタルモデルとする。ボクセル分割されたこのモデルに、引張の強制変位(0.02 mm)を与え、拡張ボクセル有限要素法を用いて解析を行う。

3.2 応力解析結果

解析結果として、von-Mises 応力分布を図-5 に示す。下段右図はモデル内部における応力分布を示しており、

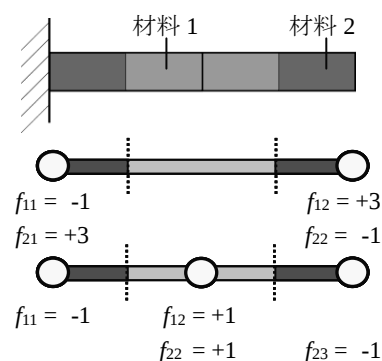


図-4 複数界面

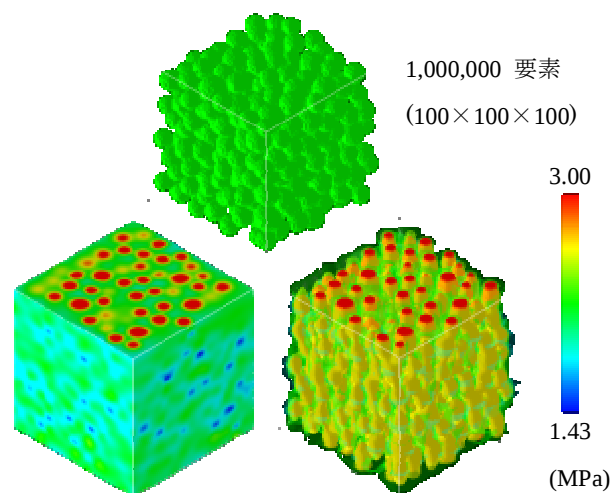


図-5 3次元解析モデルと von-Mises 応力分布

粗骨材周辺における応力集中の様子が表されている。この解析結果から、3次元粗骨材-モルタルモデルへの拡張ボクセル有限要素法の適用は十分有効であることが示せた。

4. おわりに

本研究では、材料界面におけるひずみの不連続性を導入した X-FEM を、ボクセル要素に適用した拡張ボクセル有限要素法を用い、3次元粗骨材-モルタルモデルの応力解析を行うことにより、その適用性および有効性を示した。より実際のコンクリートに近いモデルを作成し、解析を行うことが今後の課題である。

参考文献

- 1) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 京谷孝史: X-FEM による非均質材料の波動伝播解析に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.67, NO.1, 69-81, 2011.
- 2) 鈴木克幸, 長嶋利夫, 萩原世也: メッシュフリー解析法, 丸善株式会社, pp71-95, 2006.