

FEM-DEM 連携解析によるコンクリート構造物のひび割れ進展評価技術の開発

鹿島建設(株) 正会員 ○清水浩之 大家史 大野進太郎 大谷芳輝
(株)地層科学研究所 関野真登

1. はじめに

コンクリート構造物は供用期間が長くなるとともにひび割れやたわみを生じるため、維持管理計画を作成する際にはこれらについて定量的に評価する技術が必要となる。粒状体個別要素法（DEM: Distinct Element Method）¹⁾は、不連続体を対象として開発された解析手法であり、解析対象をばねによって結合された粒子の集合体としてモデル化する。このとき、モデルの変形等により粒子間に作用する力に応じて、粒子間を結合するばねを破断させることでひび割れの発生や進展を比較的容易に、かつ適切に表現できる特徴がある。しかし、DEM は膨大な計算量を必要とする手法であるため、詳細なひび割れ形状を表現できる精度を確保したままコンクリート構造物全域に対する解析を実行するのは困難であるといった問題点がある。

このような背景のもと、従来用いられてきた有限要素法 (FEM: Finite Element Method) のような連続体解析手法と DEM を連携させることで詳細なひび割れ進展の評価を現実的な解析時間で行う手法 ²⁾ (以下、FEM-DEM 連携解析手法とする) を開発した。本論文では FEM-DEM 連携解析によるコンクリート構造物のひび割れ解析事例を通して、本手法の利点やさらなる評価技術の高度化を目指すための課題について報告する。

2. FEM-DEM 連携解析手法の概要

FEM-DEM 連携解析では、FEM による広範囲の力学解析結果を利用し、対象の一部領域のみに DEM を適用する。具体的な連携解析の流れを以下に示す。

- 1) 図-1 に示すように、構造物全域を対象とした FEM 解析を実行し、その結果から特にひび割れが重要な影響を及ぼす範囲を選択してその部分のメッシュ形状を抽出する。
- 2) 抽出したメッシュ形状に重なるように DEM 粒子を配置する。
- 3) FEM により計算された節点変位をモデル外周付近の DEM 粒子に強制変位として割り当てることによってひび割れの発生と進展を解析する。

3. FEM-DEM 連携解析によるひび割れ進展評価

施工後 10 年を経過したボックスカルバートを対象とした，既存の三次元構造-材料応答連成解析システム³⁾（以下，DuCOM-COM3 とする）による FEM 解析結果を DEM 連携の対象とした．対象ボックスカルバートは高さ 22m，幅 15m の鉄筋コンクリート造であり，自重，側圧，土被り圧を載荷する．さらに，10 年間の外気暴露による温度変化や湿潤状態の変化，クリープ変形等を考慮している．

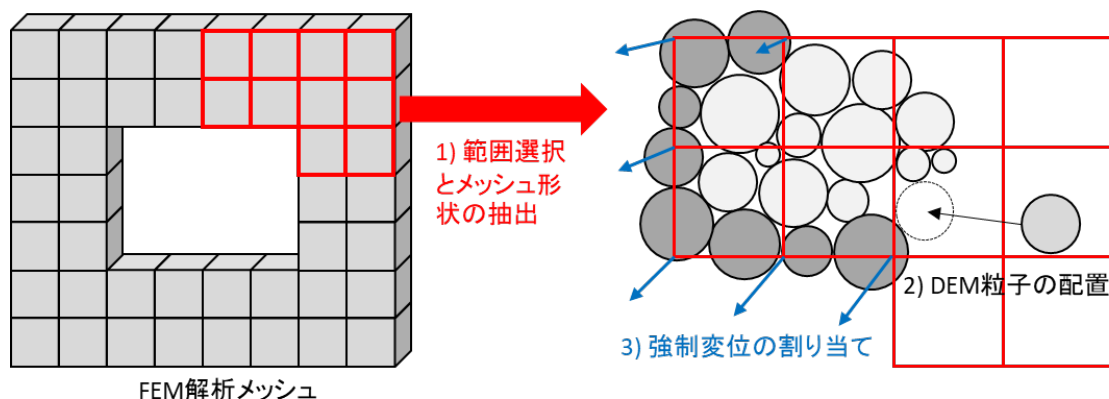


図-1 FEM-DEM 連携解析の流れ

キーワード 個別要素法 (DEM), 有限要素法 (FEM), ひび割れ進展, コンクリート
連絡先 〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設株式会社 土木設計本部 解析技術部 TEL 03-6229-6318

図-2(右上)は DuCOM-COM3 による対象カルバートの解析結果の二次元断面から頂版と側壁を含む一部分を切り出し、最大主ひずみコンターを描いたものである(引張が正)。同図に示す通り、頂版内側と側壁外側にひび割れの開口を示す大きなひずみが集中しており、これは現実の構造物で観察されたひび割れの発生状況と整合する結果であった。しかし、コンクリート表面付近ではひずみが平均化されてしまい、要素サイズよりも小さな個別のひび割れの詳細形状を判別することができないことがわかる。

そこで、この二次元断面について二次元 DEM による連携解析を行い、ひび割れ詳細情報の補完を行った。DEM 連携解析により得られたひび割れの開口幅分布を図-2(左下)に示す。発生したひび割れの位置と方向を線分で表示し、それぞれの線分の色は開口幅の大きさを示している。また、拡大図に示す濃灰色の粒子は FEM 連携により強制変位を与えられた粒子を表している。同図に示すように、DEM 連携により得られたひび割れの分布状況は DuCOM-COM3 により計算されたひずみの集中領域と一致しており、さらにコンクリート表面の微小なひび割れや個別のひび割れの連結・分岐状況、それぞれの詳細な開口幅分布も得ることができた。

今回の FEM-DEM 連携解析では DuCOM-COM3 により算出したモデル外周の変位情報のみを用いたが、より定量的に精度の高い解析を行うためには対象構造物内部に存在する鉄筋の配置やコンクリート表面での材料の劣化等の効果を DEM においても明示的に考慮する必要がある。

4. おわりに

本論文で報告した FEM-DEM 連携解析手法は、連続体解析における節点変位情報があれば実行可能であり、既存の多くの連続体解析との連携が可能である。その際、DEM は既存の結果を補足する補助的な解析となるため、従来の土木設計における解析評価の流れを大きく変える必要がなく、比較的容易に詳細なひび割れ情報が得られる利点がある。また連携解析の適用範囲を、より小さい範囲とすることで大幅に計算量を削減することができ、このことは膨大な計算時間のため実務での利用が困難とされている三次元 DEM を現実的な計算時間で完了できる可能性を示していると考えられる。

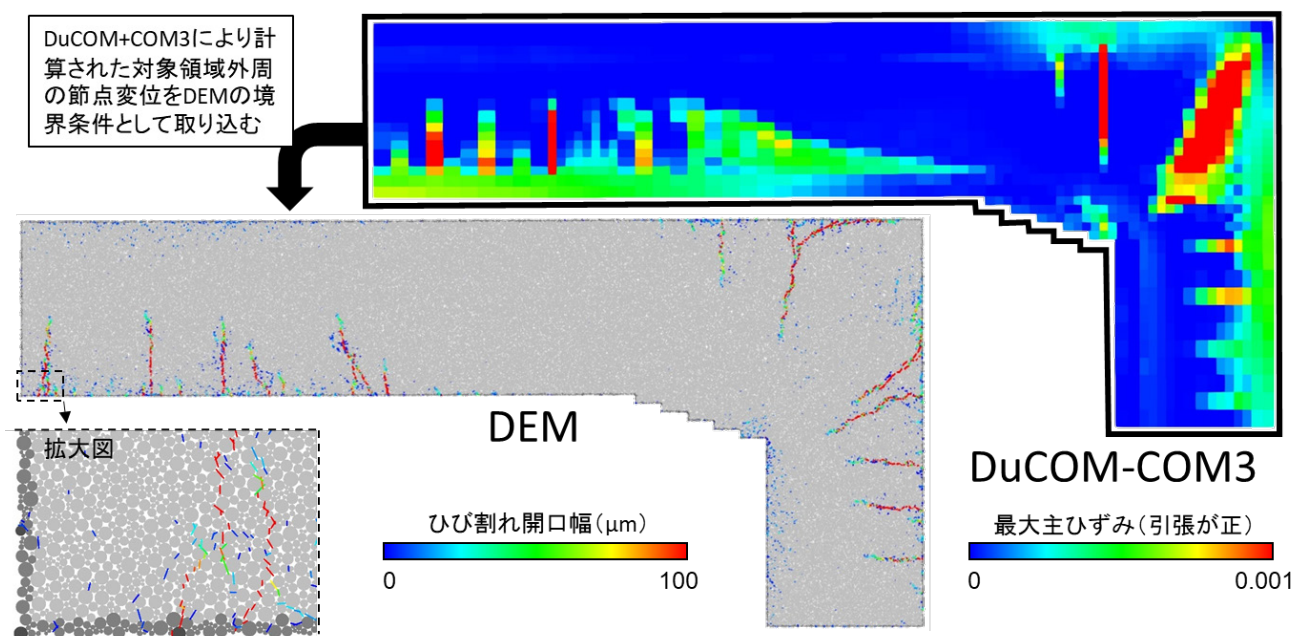


図-2 FEM-DEM 連携解析結果 (右上 : DuCOM-COM3 左下 : DEM)

参考文献

- 1) Potyondy, D. O. and Cundall, P. A.: A bonded-particle model for rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41, pp.1329-1364, 2004.
- 2) 日本原子力研究開発機構: 平成 26 年度地層処分技術調査等事業セメント材料影響評価技術高度化開発報告書, 2015.
- 3) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor and Francis, 2008.