

## セメント材料の圧縮破壊挙動に対する損傷モデルと修正 von-Mises 基準の適用性

茨城大学 学生会員 ○升井 尋斗  
茨城大学 正会員 車谷 麻緒

## 1. はじめに

コンクリートを主とするセメント系材料は一般的に圧縮力に抵抗する材料として使用されている。圧縮破壊が生じると部材が終局状態に至ることから、圧縮破壊における挙動を定量的に評価することは重要である。セメント系材料の破壊挙動について様々な数値解析手法が提案されており、剛体ばねモデルなど要素間の不連続な変位によって破壊を表現する不連続体モデルと、有限要素法をベースとし、剛性低下によって破壊を表現する連続体モデルの2つに大別することができる。不連続体モデルでは、破壊を表現するために近似や仮定を導入していることが多く、圧縮破壊挙動を適切に評価するためには、連続体モデルでの圧縮破壊の再現が求められている。連続体モデルの一つである損傷モデルは剛性低下によって間接的にひび割れ破壊を再現する方法であり、その剛性低下の判定方法として、セメント系材料の圧縮力に強く引張力に弱い特徴を考慮した修正 von-Mises 基準が提案されている<sup>1)</sup>。これまでに、引張破壊や曲げ破壊に対して修正 von-Mises 基準を導入した損傷モデルの妥当性が示されているものの、圧縮破壊挙動に対する適用性を検討した例は見当たらない。

そこで本研究では、セメント系材料を用いた供試体の圧縮破壊試験を対象に、損傷モデルおよび修正 von-Mises 基準を用いた数値解析によって実験結果を再現することで、圧縮破壊挙動における損傷モデルと修正 von-Mises 基準の適用性を検討する。

## 2. 数値解析手法

車谷らが提案した等方性損傷モデル<sup>2)</sup>を用いる。損傷モデルの構成則は次式で表される。

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D)\boldsymbol{c} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}$  は応力、ひずみテンソル、 $\boldsymbol{c}$  は弾性係数テンソル、 $D$  は損傷変数であり、0~1 の値をとるスカ

ラー値関数である。損傷変数は次式で示される。

$$D(\varepsilon) = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \exp\left(-\frac{E\varepsilon_0 h_c}{G_f}(\varepsilon - \varepsilon_0)\right) \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon$  は変形履歴における最大等価ひずみ、 $\varepsilon_0$  は破壊発生ひずみ、 $E$  はヤング率、 $G_f$  は破壊エネルギー、 $h_c$  は要素長さである。等価ひずみに、次式で与えられる修正 von-Mises 基準に基づく等価ひずみ $\varepsilon_{eq}$ を用いる。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2} \quad (3)$$

ここで、 $\nu$  はポアソン比、 $k$  は圧縮引張強度比、 $I_1$  はひずみテンソルの第1不変量、 $J_2$  は偏差ひずみテンソルの第2不変量である。圧縮引張強度比 $k$ によって、圧縮力に強く引張力に弱いセメント系材料の特徴を表現できる。修正 von-Mises 基準は、この等価ひずみ $\varepsilon_{eq}$ が破壊発生ひずみ $\varepsilon_0$ を超えるとその領域で破壊したと判定する方法である。

## 3. 検証例題

検証例題として円孔を有するモルタル平板の圧縮破壊について、実験と同様のひび割れ経路と応答結果を再現可能であるか比較検討を行う。具体的には、和泉らの実験<sup>3)</sup>と、それを参考として著者らが行った実験の2例の結果で再現性を検証する。

## 3.1 和泉らの円孔付きモルタル圧縮破壊実験

和泉らは中央に円孔を有するモルタル平板供試体を作成し、破断にいたるまで一軸の圧縮力を載荷した。平板の寸法は、120×120 mm、厚さ 20 mm、円孔の直径は 10 mm である。供試体表面に被膜を塗布することでひび割れ形状を可視化した。

解析モデルは、四面体1次要素を用いて要素数 1350722、節点数に要素分割した3次元モデルとした。一軸圧縮状態となるよう、下面を固定して上面

キーワード 有限要素法、損傷モデル、修正 von-Mises 基準、モルタル、圧縮破壊、

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢 4-12-1 茨城大学工学部 TEL：0294-38-5162 FAX：0294-38-5268

に強制変位 0.3 mm を与えた。解析における材料パラメータは、ヤング率  $E$  を 20 GPa, ポアソン比  $\nu$  を 0.2, 圧縮引張強度比  $k$  を 15, 破壊エネルギーを 0.05 N/mm, 破壊発生ひずみ  $\varepsilon_0$  を  $1.5 \times 10^{-4}$  とした。

実験によって得られた最大荷重付近の供試体表面のひび割れを図-1 (a) に示す。また、解析で得られた等価ひずみ分布を図-1 (b) に示す。用いた解析手法では、等価ひずみの局所化をひび割れとみなすことができる。図-1 では円孔から斜め方向に発生したひび割れが上下方向に進展する挙動が一致しており、実験と同様の結果を得られていることがわかる。最大荷重についても、実験は 104.1 kN, 解析は 93.2 kN とほぼ一致した。

### 3.2 本研究における圧縮破壊実験

中央に円孔を有するモルタル平板供試体を作成し、破断にいたるまで一軸の圧縮力を载荷した。平板の寸法は、100×100 mm, 厚さ 32 mm, 円孔の直径は 13 mm である。デジタル画像相関法 (DIC) を用いて供試体表面のひび割れ進展を計測した。

解析モデルは、四面体 1 次要素を用いて要素数 1285356, 節点数 215106 に要素分割した 3 次元モデルとした。一軸圧縮状態となるよう、下面を固定して上面に強制変位 0.35 mm を与えた。解析における材料パラメータは、ヤング率  $E$  を 10 GPa, ポアソン比  $\nu$  を 0.2, 圧縮破壊強度比  $k$  を 15, 破壊エネルギーを 0.05 N/mm, 破壊発生ひずみ  $\varepsilon_0$  を  $2.0 \times 10^{-4}$  とした。

実験の DIC 計測から得られた最大主ひずみ分布を図-2 (a), 図-3 (a) に示す。また、解析で得られた等価ひずみの分布を図-2 (b), 図-3 (b) に示す。ひび割れ発生初期の図-2 において、円孔上下部から短く発生するひび割れについて、解析結果は実験結果を再現できている。さらに最大荷重付近の図-3 では、図-2 で計測した円孔上下部のひび割れが進展せず、円孔から斜め方向に新たに発生したひび割れが進展していく複雑なひび割れ挙動を的確に再現している。最大荷重についても、実験は 82.7 kN, 解析は 82.0 kN とほぼ一致した。

### 4. おわりに

本研究では、修正 von-Mises 基準を導入した損傷モデルを圧縮破壊に適用し、2 例の実験結果と比較検討を行うことでその妥当性を示した。

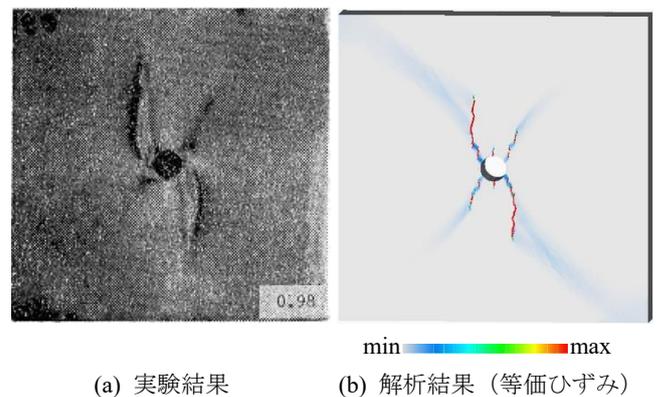


図-1 和泉らの実験における最大荷重付近のひび割れの比較

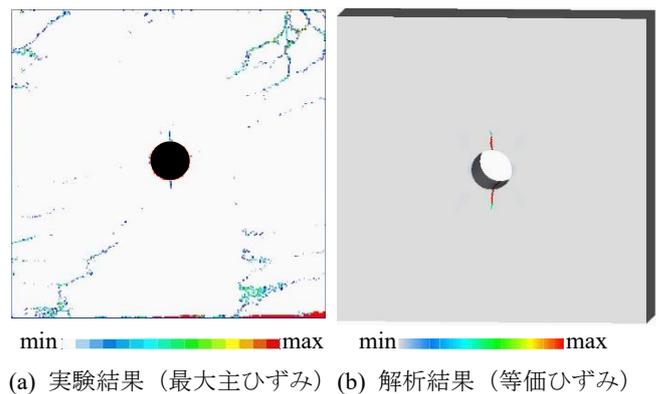


図-2 ひび割れ発生初期のひび割れの比較

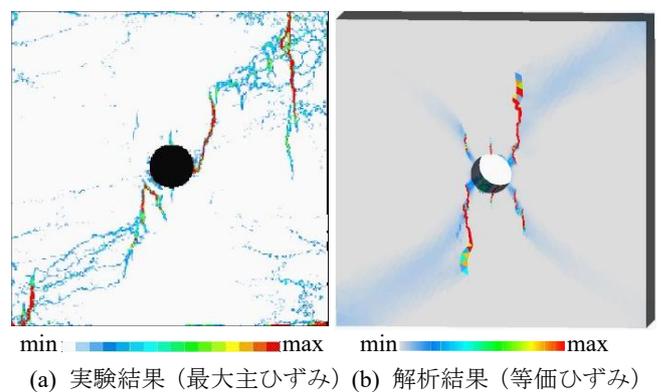


図-3 最大荷重付近のひび割れの比較

### 参考文献

- 1) J.H.P de Vree, W.A.M Brekelmans and M.A.J van Gils: Comparison of nonlocal approaches in continuum damage mechanics, *Comput. Struct.*, 55, pp.581-588, 1995.
- 2) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 檜山和男: コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vol.2013, pp.20130015, 2013
- 3) 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, 第 289 号, 1980