

## 摩擦接触を考慮した損傷モデルによる準脆性材料のひび割れ進展解析

茨城大学大学院 学生会員 ○相馬 悠人  
茨城大学大学院 正会員 車谷 麻緒

### 1. はじめに

コンクリートのような準脆性材料では、引張と圧縮の荷重に対して破壊挙動が異なる。特に、圧縮荷重下では、ひび割れの開口挙動に加えて、一度開口したひび割れ面において摩擦接触が生じる。そのようなひび割れの開閉挙動が繰り返されるため、破壊挙動は複雑になり、予測することが困難になる。そこで、より精度よく破壊挙動を予測するため、ひび割れの開口挙動だけでなく摩擦接触を考慮した数値解析手法が必要となる。

数値解析によりひび割れを表現する方法としては、要素間の分離や、要素の剛性低下によるものがあるが、その多くは要素サイズに依存することや、破壊を巨視的に評価するなどの問題がある。対して、車谷らが開発した等方性損傷モデル<sup>1)</sup>では、要素サイズに依存せずに、詳細にひび割れ進展挙動を再現できることが示されている。しかしながら、この手法では、ひび割れ面の摩擦接触を考慮していない問題がある。

そこで本研究では、従来の等方性損傷モデルを拡張し、ひび割れの開口挙動だけでなく摩擦接触まで考慮した損傷モデルを提案する。そして、既往の一面せん断試験と比較し、提案モデルの妥当性を検証する。

### 2. 解析手法

#### 2.1 ひび割れの開口挙動

等方性損傷モデルの定式化を用い、ひび割れの開口挙動を表現する。構成則は次式で表される。

$$\sigma = (1 - D)C\varepsilon \quad (1)$$

ここで、 $\sigma, \varepsilon$  は応力とひずみベクトル、 $C$  は弾性係数マトリックスである。 $D$  は0~1の値を取る損傷変数である。

#### 2.2 ひび割れ面の摩擦接触

ひび割れ面に対して垂直、水平方向に座標軸を取る局所座標系の応力とひずみに着目し、摩擦接触を定式化する。局所座標系の応力とひずみは次式で表される。

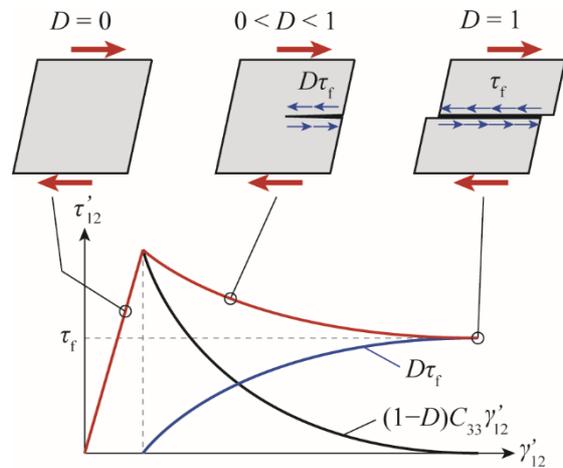


図-1 損傷と摩擦力を考慮したせん断応力

$$\sigma' = R\sigma \quad (2)$$

$$\varepsilon' = R\varepsilon \quad (3)$$

ここで、 $\sigma', \varepsilon'$  は局所座標系の応力とひずみベクトルである。 $R\sigma, R\varepsilon$  は、応力とひずみベクトルの座標変換行列である。本研究では、局所座標系の座標軸を予め設定し、座標変換行列を算出する。

接触方向のひずみを用いて接触を判定する。接触していると判定された場合、接触方向の剛性を保持させることで接触挙動を表現する。接触方向の応力は次式で表される。

$$\varepsilon'_{11} > 0 \quad \sigma'_{11} = (1 - D)C_{11}\varepsilon'_{11} + (1 - D)C_{12}\varepsilon'_{22} \quad (4)$$

$$\varepsilon'_{11} \leq 0 \quad \sigma'_{11} = C_{11}\varepsilon'_{11} + (1 - D)C_{12}\varepsilon'_{22} \quad (5)$$

接触していると判定された要素では、次に摩擦力を評価する。接触方向の応力を垂直抗力とすることで、摩擦力は次式で表される。

$$\tau_f = \mu|\sigma'_{11}| \quad (6)$$

ここで、 $\tau_f$  はクーロンの摩擦力、 $\mu$  は摩擦係数である。

クーロンの摩擦力と局所座標系のせん断応力を比較し、摩擦すべりを判定する。摩擦力が大きい場合、ひび割れ面が固着した状態とし、弾性応力になると仮定する。局所座標系のせん断応力が大きい場合、ひび割れ面

キーワード 準脆性材料, ひび割れ, 有限要素法, 損傷モデル, 摩擦接触

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 : 0294-38-5151 FAX : 0294-38-5268

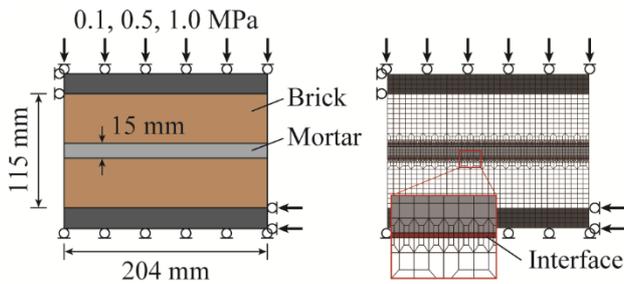


図-2 実験概要と解析モデル

がすべっている状態とし、損傷による剛性低下と摩擦力を組み合わせたせん断応力とする。図-1 にせん断応力の概要を示す。局所座標系のせん断応力は次式で表される。

$$\tau_f \geq |\tau'_{12}| \quad \tau'_{12} = C_{33}\gamma'_{12} \quad (7)$$

$$\tau_f < |\tau'_{12}| \quad \tau'_{12} = (1 - D)C_{33}\gamma'_{12} + \text{sgn}(\gamma'_{12})D\tau_f \quad (8)$$

最後に、算出した局所座標系の応力を全体計に変換し、解析領域の応力状態を評価する。

### 3. 妥当性の検証

#### 3.1 実験概要と解析モデル

提案モデルの妥当性を検証するため、既往の一面せん断試験<sup>2)</sup>と解析結果を比較した。また、従来の等方性損傷モデルとも比較した。図-2 に実験概要と解析モデルを示す。実験では、レンガとモルタルの界面が片側だけ剥離したため、解析モデルでは、界面までモデル化し、片側だけ破壊する条件を与えた。解析モデルの節点数は2790、要素数は2270である。レンガは、ヤング率17 GPa、ポアソン比0.15、モルタルは、ヤング率5 GPa、ポアソン比0.2、界面は、ヤング率1 GPa、ポアソン比0.2、圧縮引張強度比10、破壊エネルギー0.01 N/mm、破壊発生ひずみ0.0006、摩擦係数0.8を与えた。垂直方向に0.1, 0.5, 1.0 MPaの荷重を一定に与え、水平方向に強制変位0.8 mmを400 stepで与えた。

#### 3.2 実験結果と解析結果の比較

図-3 にせん断応力-せん断変位関係を示す。等方性損傷モデルでは、破壊が生じると、全方向の剛性が低下するため、応力が低下し続けている。対して、提案モデルでは、実験結果を精度よく再現できている。

図-4 に変形図と損傷変数分布を示す。変形に着目すると、等方性損傷モデルでは、要素が潰れるように変形しているのに対し、提案モデルは、ひび割れ面に対して、

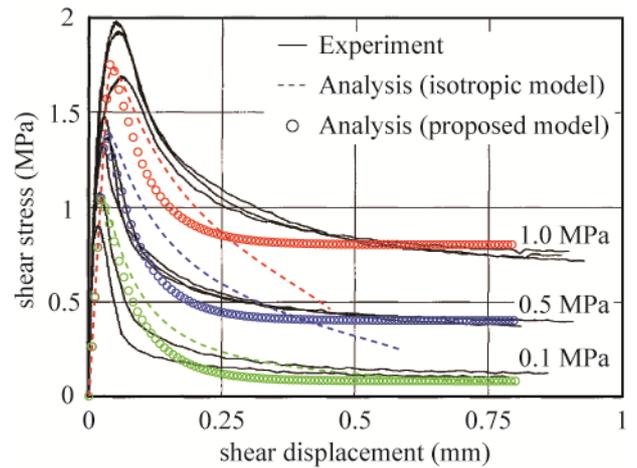


図-3 せん断応力-せん断変位関係

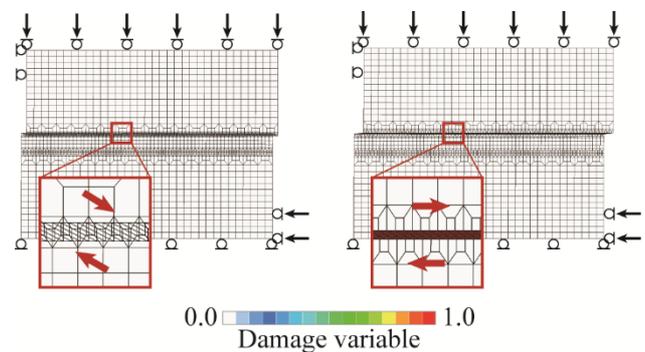


図-4 変形図と損傷変数分布

すべるように変形している。以上より、提案モデルが摩擦接触を精度よく再現できていることがわかる。

### 4. おわりに

本研究では、ひび割れ面の摩擦接触を考慮した損傷モデルを提案し、既往の一面せん断試験と比較することで提案モデルの妥当性を検証した。結果として、各垂直荷重での実験結果を精度よく再現することができた。今後は、提案モデルを接触方向が未知の問題に適用できる方法へと拡張する予定である。

### 参考文献

- 1) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 櫻山和男: 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, No.2013, pp.20130015, 2013.
- 2) R. V. D. Pluijm: Shear behavior of bed joints, In: Proceedings of the Sixth North American Masonry Conference, pp.125-136, 1993.