

ひび割れ面の接触や摩擦すべりを考慮した損傷モデルによる破壊シミュレーション

茨城大学大学院 学生会員 ○相馬 悠人
茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

地震が頻発する我が国において、鉄筋コンクリート構造物の耐震性能を評価することは重要である。地震のような繰り返し荷重が作用する場合、コンクリートのひび割れ面や異種材料間の境界面において、接触や摩擦すべり挙動が生じるため、鉄筋コンクリート構造物は複雑な破壊挙動を示す。そこで、ひび割れの開口挙動に加えて、接触や摩擦すべり挙動を考慮した数値解析手法が要求されている。

これまで、破壊挙動を予測するため、様々な数値解析手法が提案されているが、接触や摩擦すべり挙動まで考慮してひび割れ進展挙動を再現した例はほとんどない。その理由としては、コンクリートのひび割れの開口挙動を再現するだけでも容易ではないためである。

ひび割れ進展挙動のモデル化には、要素の分離や、要素の剛性低下により表現する方法があるが、いずれもメッシュに依存することや、破壊を巨視的に評価するなどの問題がある。これらの方法に対して、車谷らは破壊力学に基づき損傷モデルを定式化することにより、メッシュに依存せずに詳細にひび割れ進展挙動を再現した¹⁾。しかし、この方法に関しても、接触や摩擦すべり挙動までは考慮されていない。

そこで本研究では、ひび割れの開口から接触、摩擦すべりまで考慮した損傷モデルを開発し、実験結果と比較することで、その再現性を検証する。

2. 数値解析手法

2.1 ひび割れの開口挙動

ひび割れの開口挙動は、車谷らの等方性損傷モデルにより表現する¹⁾。構成則は次式で表される。

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

ここで、 σ 、 ε は応力、ひずみベクトル、 C は弾性係数マトリックス、 D は0~1の値を取る損傷変数である。

2.2 ひび割れ面の接触、摩擦すべり挙動

接触方向と第1軸方向が一致する局所座標系にお

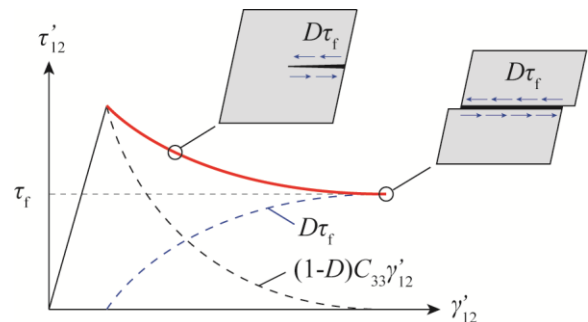


図-1 摩擦力を考慮したせん断力

る応力とひずみを用いて、接触やすべりを判定する。局所座標系の応力とひずみは次式で表される。

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

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

ここで、 σ' 、 ε' は局所座標系の応力、ひずみベクトル、 R_σ 、 R_ε は応力、ひずみベクトルの座標変換行列である。接触方向と局所座標系における第1軸方向が一致するように角度を設定し、座標変換行列の値を求める。

接触判定は局所座標系における第1軸方向のひずみにより行う。第1軸方向の剛性が保持されるように構成則を定式化することで接触挙動を表現する。局所座標系における第1軸方向の応力は次式で表される。

$$\varepsilon'_1 > 0 \quad \sigma'_1 = (1-D)C_{11}\varepsilon'_1 + (1-D)C_{12}\varepsilon'_2 \quad (4)$$

$$\varepsilon'_1 \leq 0 \quad \sigma'_1 = C_{11}\varepsilon'_1 + (1-D)C_{12}\varepsilon'_2 \quad (5)$$

接触と判定された要素に対して、すべりの判定を行う。すべりの判定には、クーロンの摩擦力を用いる。局所座標系における第1軸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。

$$\tau_f = \mu\sigma_n = \mu|\sigma'_1| \quad (6)$$

ここで、 τ_f は摩擦力、 σ_n は垂直抗力、 μ 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力を比較し、すべりを判定する。すべらない際は、固着した状態とする。また、摩擦すべりを表現するため、損傷と摩擦

キーワード 損傷モデル、接触、摩擦すべり、二面せん断試験

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

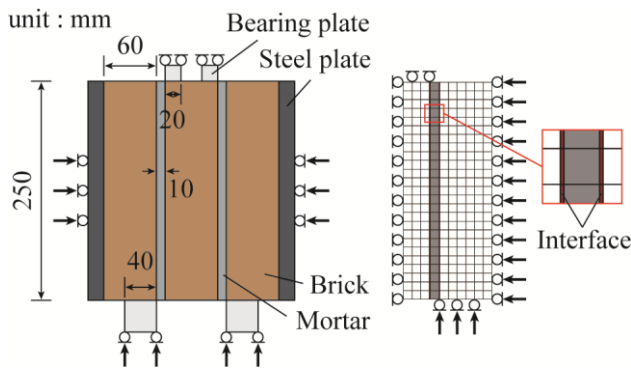


図-2 二面せん断試験の概要および数値解析モデル

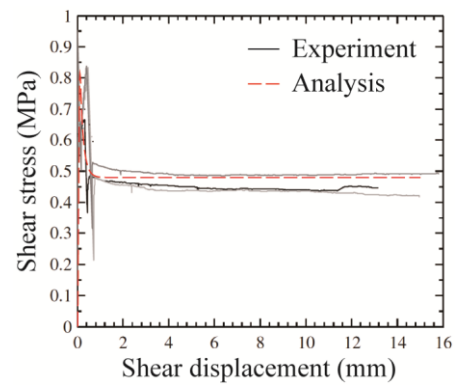


図-3 せん断応力-せん断変位関係

すべりを考慮したせん断力を定式化する．図-1 に摩擦力を考慮したせん断力の力学挙動を示す．摩擦力は破壊面で生じることから，損傷の割合を示す損傷変数と関連すると考えられる．そこで，要素の剛性低下に伴い，摩擦力が増加するように定式化した．局所座標系のせん断力は次式で表される．

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

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

ここで，すべり判定に使用する τ'_{12} は，固着状態を仮定しているため，式(7)の値を使用する．最後に，得られた局所座標系の応力を式(2)により全体座標系の応力へと変換する．

3 接触，摩擦すべりの再現性

3.1 実験概要と解析条件

接触，摩擦すべり挙動の再現性を検証するため，Beyer *et al.*の二面せん断試験²⁾を比較対象にした．図-2 に実験概要と数値解析モデルを示す．実験ではレンガとモルタルの境界面が剥離して破壊に至ったことから，数値解析モデルでは境界面をモデル化し，境界面のみ破壊するものとした．試験体の対称性を考慮し，解析範囲は 1/2 とした．材料パラメータは，レンガは，ヤング率 11 GPa，ポアソン比 0.15，モルタルは，ヤング率 10 GPa，ポアソン比 0.2，境界面は，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 0.05 N/mm，破壊発生ひずみ 0.0003，摩擦係数 0.8 とした．水平方向には 0.6 MPa の荷重を一定に与え，垂直方向には強制変位 15 mm を 750 step で与えた．

3.2 実験結果と解析結果の比較・考察

図-3 に実験と解析のせん断応力-せん断変位関係を示す．提案モデルは実験結果の力学挙動を精度よく再現できている．

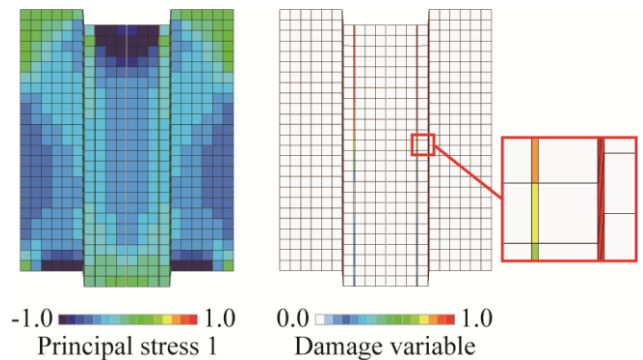


図-4 最大主応力および損傷分布

図-4 に解析結果の最大主応力分布および損傷分布を示す．結果を見ると，境界面を介して応力が伝達されている．さらに，境界面の拡大図を見ると，要素が潰れずに接触し，すべる様子を表現できている．

4. おわりに

本研究では，ひび割れ面の接触や摩擦すべりを考慮した損傷モデルを提案し，実験結果の比較することで，その再現性を示した．今後は，ひび割れの進展方向が事前に予測できない問題への適用について検討する予定である．

参考文献

- 1) 車谷麻緒，寺田賢二郎，加藤準治，京谷孝史，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，No.2013，pp.20130015，2013.
- 2) K. Beyer, A. Abo-El-Ezz, A. Dazio: Quasi-static cyclic tests on different types of masonry spandrels, Report No 327, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 2010.