

鉄筋コンクリートはりのせん断破壊における挙動のばらつき要因の分析

茨城大学 学生会員 ○河地 陽太 茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 部材の破壊形態には曲げ破壊とせん断破壊がある。車谷ら¹⁾は、せん断破壊を対象に同条件で作製した 15 体の RC 試験体の実験を一斉に実施した。結果として、せん断破壊型 RC はりは破壊までの挙動が安定せず、ばらつきが大きいことを示した。しかし、文献²⁾では、せん断挙動におけるばらつきの十分な検討は行われていない。実験では、試験体の材料特性を正確に把握することができないため、ばらつきの要因を検討することは困難である。

一方、近年では数値解析を用いて RC はりの破壊力学挙動を再現することが盛んに行われている²⁾³⁾。数値解析を用いることで、実験では困難であったばらつきの要因を検討することが可能であると考えられる。

以上の背景から本研究では、せん断破壊型 RC はりを対象に非線形有限要素解析を行い、分散分析を実施することで、ばらつきの要因を定量的に分析することを目的とする。

2. コンクリートと鉄筋の材料モデル

鉄筋コンクリートの破壊力学挙動を 3 次元で詳細に再現するには、コンクリートと鉄筋それぞれに合った材料モデルを与える必要がある。

コンクリートの材料モデルの構成則はフックの法則にスカラー変数 D を用いた次式で表される。

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

ここで、 σ はコーシーの応力テンソル、 $\mathbf{c}$ は弾性係数テンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみテンソル、 D は損傷変数である。

損傷モデルでは、ひずみテンソルをスカラー値に変換した等価ひずみを用いる。本研究では、修正 von-Mises モデルによる等価ひずみ ε_e を用いる。

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

ここで、 ν はポアソン比、 k は圧縮引張強度比、 I_1 はひ

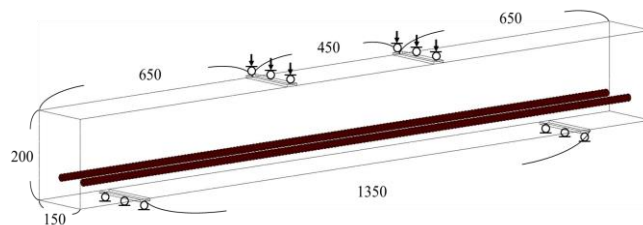


図-1 せん断破壊型 RC はりの形状と荷重・境界条件

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。等価ひずみ ε_e が破壊発生ひずみ ε_0 以上のとき、損傷変数 D は次式で表される。

$$D = 1 - \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_0} \exp \left\{ -\frac{E \varepsilon_0}{G_f} (\varepsilon_e - \varepsilon_0) h_c \right\} \quad (3)$$

ここで、 h_c は要素長さ、 E はヤング率、 G_f は破壊エネルギーである。

鉄筋の構成モデルには、非線形等方硬化則に基づく von-Mises 塑性モデルを適用する。

3. ばらつきの要因分析

本研究では、分散分析を用いてせん断破壊におけるばらつきの要因を検討する。分散分析は、選出したパラメータ (因子) を変動させた複数回の解析 (実験) を行うことで、各因子の影響を把握する手法である。文献¹⁾の実験結果から、せん断破壊型 RC はりには、最大荷重のばらつきに加えて、脆性的な破壊と延性的な破壊という挙動のばらつきの 2 つが確認できる。本研究では、これら 2 つのばらつきに対し、分散分析を用いることで各因子の影響度を確認する。実験結果における最大荷重のばらつきに対しては解析結果の最大荷重を、挙動のばらつきに対しては解析で得られる荷重-変位曲線下の面積を用いて分析する。

要因計画にしたがった 16 ケースの解析を行うことで、分散分析に用いるデータを収集する。解析対象とする有限要素モデルを図-1 に示す。ここでは、ヤング率、圧

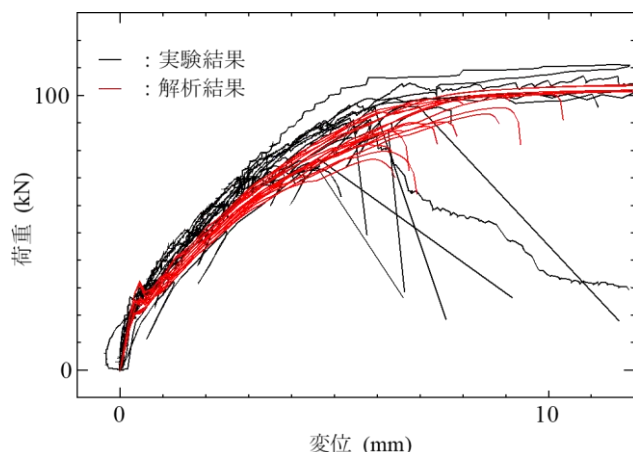


図-2 荷重－変位曲線 1)に加筆



(a) 延性破壊を示したケース



(b) 脆性破壊を示したケース

図-3 ひび割れ分布図

縮引張強度比、破壊発生ひずみ、破壊エネルギーの4つを因子とした。ヤング率は材料の剛性、圧縮引張強度比と破壊発生ひずみは材料の強度、破壊エネルギーは材料の靱性に関係する因子である。因子の変動幅は、文献¹⁾の材料試験結果を参考に設定した。

解析結果として荷重－変位関係を図-2に示す。図-2より、最大荷重のばらつきおよび、脆性的な挙動、延性的な挙動のばらつきが再現できていることが確認できる。RCはりのひび割れ分布図を図-3に示す。これを見ると、延性破壊を示したケースと、脆性破壊を示したケースでひび割れ分布に差がないことが確認できる。このことから、ばらつきの要因はひび割れ分布ではなく、変動させた4つの因子に関係していると考えられる。

そこで、分散分析を用いて各因子の影響度を定量化する。最大荷重および荷重－変位曲線下の面積に対する各因子の影響度を表-1に示す。影響度は最大値で除して正規化している。これを見ると、最大荷重に対して影響度が高い因子は、圧縮引張強度比と破壊発生ひずみであることがわかる。荷重－変位曲線下の面積に対しても最大荷重のときと同様に、圧縮引張強度比と破壊発生ひずみの影響度が高いことがわかる。

表-1 分散分析による各因子の影響度

因子	最大荷重	曲線下の面積
E	0.248	0.074
K	1.000	1.000
G_f	0.028	0.064
ε	0.509	0.423

以上より、材料の強度がせん断挙動のばらつきに対して大きな影響を与えられられる。また、実験において高い最大荷重を示したケースと延性破壊を示したケースは、材料の強度が相対的に高いケースであると考えられる。

4. おわりに

本研究では、せん断破壊挙動におけるばらつきの要因を検討した。せん断破壊型RCはりを対象に複数回の解析を行った結果から、実験結果と同じようなせん断挙動のばらつきを再現することができたことがわかる。また、分散分析の結果から、せん断挙動におけるばらつきの要因はひび割れ形状ではなく、材料強度の差である可能性を示した。

今回は、コンクリートを均一な材料として解析を行ったが、実際のコンクリートは供試体の内部で材料特性の分布が異なる。供試体内部の材料特性の不均一さを考慮したうえで、せん断破壊挙動のばらつきを検討することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 車谷麻緒, 岡崎慎一郎, 山本佳士, 上田尚史, 小倉大季: 不確かさの定量化に向けたRCはりの一斉載荷実験, 土木学会論文集 A2, Vol.75, No.2, I_411-I_420, 2019.
- 2) 山谷敦, 中村光, 檜貝勇: 回転ひび割れモデルによるRC梁のせん断挙動解析, 土木学会論文集, No.620, V-43, 187-199, 1999.
- 3) 車谷麻緒, 阿部俊逸, 相馬悠人, 寺田賢二郎: コンクリートの破壊力学と修正 von-Mises 基準に基づく等方性の有限ひずみ損傷モデル, 土木学会論文集 A2, Vol.73, No.1, 11-21, 2017.