

コンクリートの損傷と鉄筋の塑性を考慮した RC はりの破壊シミュレーション

茨城大学 学生会員 ○相馬 悠人 学生会員 根本 優輝
茨城大学 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

コンクリートに生じるひび割れは、水や有害物質の進入経路となり、構造物の耐久性に大きな影響を及ぼす。そのため、構造物の設計や維持管理において、3次元で鉄筋コンクリートを再現し、破壊進展過程を予測することが重要となる。

そこで本研究では、3次元の FEM を用いて、鉄筋の節まで再現し、塑性を考慮した数値解析を行うことで、解析結果と実験結果との整合性を評価する。また、主筋に丸鋼と異形鉄筋を使用したモデルを使用することで、鉄筋の表面形状が破壊進展挙動に及ぼす影響を比較・考察することを目的とする。

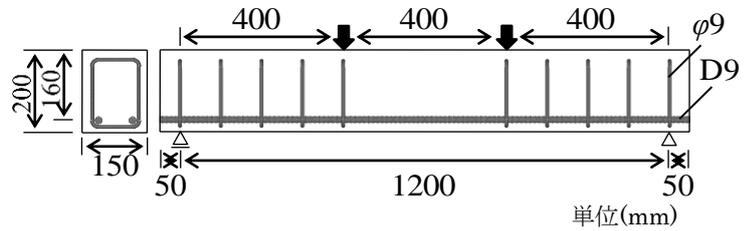


図-1 供試体概要

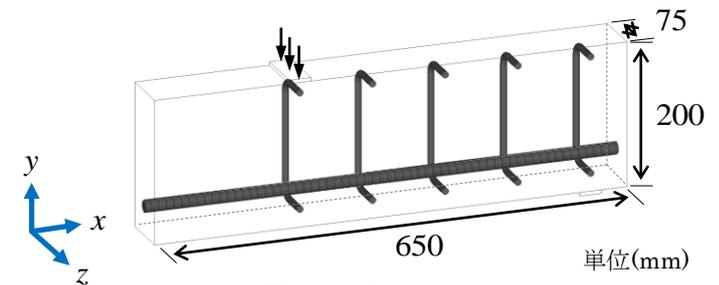


図-2 解析モデル

2. コンクリートの数値解析手法

2.1 等方性損傷モデル¹⁾

引張破壊によるひび割れ部の結合力を各要素での応力で表現し、次式で表される。

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

ここで σ はコーシー応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε はひずみテンソルである。 D は損傷の度合いを $0 \leq D \leq 1$ で表す損傷変数であり、損傷がなければ 0、完全に破壊すれば 1 となる。

2.2 等価ひずみ

多次元問題では、スカラー値である等価ひずみを用いて損傷の進展を表現する。また、準脆性材料の破壊に適した等価ひずみを次式で使用する。

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

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。

2.3 損傷変数

変形履歴における等価ひずみの最大値を $\kappa \geq 0$ で表すことにより、損傷変数 $D(\kappa)$ は次式で表される。

表-1 材料パラメータ

コンクリート		鉄筋	
ヤング率 E	20 GPa	ヤング率 E	210 GPa
ポアソン比 ν	0.2	ポアソン比 ν	0.3
強度比 k	25	降伏応力 σ_{y0}	400 MPa
破壊エネルギー G_f	0.1 N/mm	材料定数 Q	180 MPa
破壊発生ひずみ κ_0	1.0×10^{-4}	材料定数 b	15

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \exp\left[-\frac{E\kappa_0 h_e}{G_f} (\kappa - \kappa_0)\right] \quad (3)$$

ここで、 κ_0 は破壊発生ひずみ、 h_e は要素長さ、 G_f は破壊エネルギーである。

3. 鉄筋の数値解析手法

鉄筋の材料モデルには、非線形等方硬化則に基づく von-Mises の弾塑性モデルを適用する。用いた降伏関数 f は次式で表される。

$$f = \sigma_e - \sigma_{y0} - Q(1 - e^{-bp}) \quad (4)$$

ここで、 σ_e は von-Mises 応力、 σ_{y0} は初期降伏応力、 p は相当塑性ひずみ、 Q と b は非線形硬化の材料定数である。

キーワード 鉄筋コンクリート、破壊シミュレーション、損傷モデル、von-Mises 弾塑性モデル

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. 0294-38-5004 FAX. 0294-38-5268

4. 実験結果と解析結果の比較・考察

4.1 実験概要

供試体概要を図-1に示す。図-1に示したRCはりを用いて4点曲げ試験を行い、破壊に至るまで、荷重を与えた。その際のひび割れ進展状況、力学的挙動について観察した。

4.2 解析条件

本研究で対象とする3次元RCはりモデルを図-2に、材料パラメータを表-1にそれぞれ示す。コンクリートと鉄筋のパラメータは実験を基に値を選定した。解析モデルの主筋を表面形状の違う丸鋼と異形鉄筋を用いた2パターンで解析し、破壊進展に及ぼす影響を評価した。解析条件は図-2の矢印方向に12mmの強制変位を400stepで与えた。また、本研究で作成したRCはりモデルは、 x 、 z 軸方向に対称であることから1/4モデルで解析を行った。

4.3 解析結果

図-3に実験結果のひび割れ、図-4に丸鋼モデルと異形鉄筋モデルの内部ひび割れの比較、図-5に実験結果と解析結果の荷重-変位曲線及び塑性した要素数の増加量を示す。図-3より、解析結果は x 、 z 軸方向に対称であり均一なモデルのため、ひび割れ本数が多いものの、実験のひび割れ進展、ひび割れの間隔・角度を概ね再現できている。また、図-4、図-5より、丸鋼の場合は節による抵抗がないため、あまり塑性せずに破壊に至っており、鉄筋周りの損傷が端部まで速く進展していることが確認できた。3次元で鉄筋の節を再現し、塑性を考慮することで、実験と解析結果の剛性、剛性低下後の勾配を精度良く再現できた。

5. おわりに

本研究では、3次元で鉄筋の節を再現し、塑性を考慮した損傷解析を行うことで、RCはりの複雑な非線形挙動や破壊進展過程を概ね再現することができた。また、主筋に丸鋼を使用したモデルと異形鉄筋を使用したモデルを比較することで、鉄筋の表面形状の違いが破壊進展過程に及ぼす影響を確認することができた。しかし、実験結果と解析結果の荷重-変位曲線のピーク応力が一致しておらず、実験を基に選定した鉄筋のパラメータを再検討する必要がある。



実験結果 (120 kN)

図-3 実験結果のひび割れ



丸鋼 (130/400 step)



異形鉄筋 (130/400 step)



損傷変数

図-4 内部ひび割れの比較

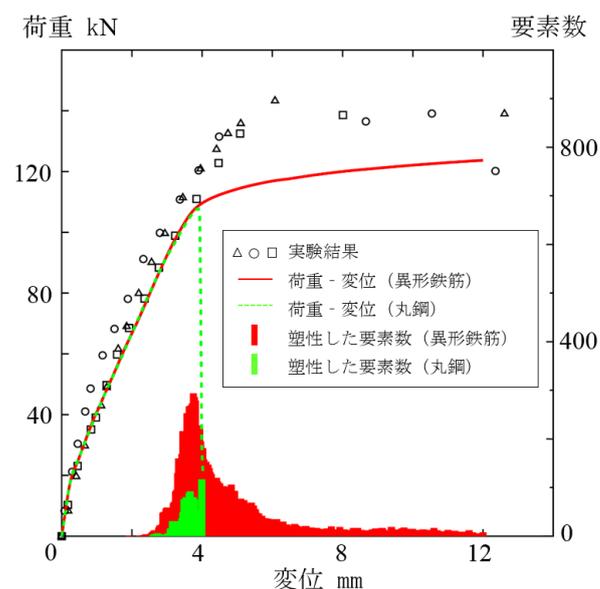


図-5 荷重-変位曲線及び塑性した要素数の増加量

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, JSCES, No.20130015, 2013.
- 2) 水野高明, 渡辺明: 丸鋼, 異形丸鋼および異形ねじり鉄筋の付着に関する研究, 土木学会論文集, 第93号, pp. 23-30, 1963.