

破壊シミュレーションに基づく鉄筋コンクリートのひび割れの3次元造形化

茨城大学大学院 学生会員 ○佐々木 浩武 茨城大学大学院 学生会員 邊見 哲一
 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

鉄筋コンクリート (RC) は、荷重の作用や使用環境の厳しさから、ひび割れの発生は避けられない。ひび割れは部材の力学性能に影響を及ぼすだけでなく、劣化の原因にもなり耐久性を低下させるため、部材における損傷や劣化の度合いの限られた判断材料となる。ひび割れの RC 部材への影響は、一般的に目視できる部材表面のひび割れ幅等により、ひび割れの奥行き方向の進展を予測し検討されるが、奥行き方向の進展はあくまで予測に留まっている。さらに、部材内部の鉄筋近傍で発生し、目視できないひび割れの存在も後藤ら¹⁾の実験により示されている。このように現在、一般的には限られたひび割れの情報しか得ることができず、ひび割れの部材への影響を理解するためには、ひび割れが部材全体に3次元でどのように存在しているかを捉えることが求められる。

近年、RC 部材のひび割れ進展挙動を3次元で詳細に再現できる破壊シミュレーション²⁾が開発、研究されている。これはひび割れを精度よく再現し、コンピュータ上で3次元的にひび割れを可視化することもできる。そのため、実験では把握しきれない部分を補い、発生するひび割れの幾何形状を3次元的に捉える上で非常に有効である。一方、3D プリント技術も発展、普及を見せている。3D プリンタによる造形化は、複雑な形状のモデルも簡単に造形でき、着色もできるため、造形物のデザインの自由度が高い。そのため、立体構造のより深い理解が期待できる。

そこで本研究では、RC 部材全体にひび割れがどのように存在しているのかを3次元で捉えることを目的とし、破壊シミュレーションに基づくひび割れの可視化、出力手法として3D プリンタによる造形化を提案する。

2. 数値解析手法

2.1 コンクリートの材料モデル

コンクリートには、等方性損傷モデルを適用する。フックの法則にスカラー変数 D を用いて次式で表す。

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

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、 ε はひずみテンソルである。 D は損傷度合いを表す損傷変数であり、0 から 1 の値をとる。

キーワード ひび割れ, 3D プリンタ, 造形化, 鉄筋コンクリート, 破壊シミュレーション

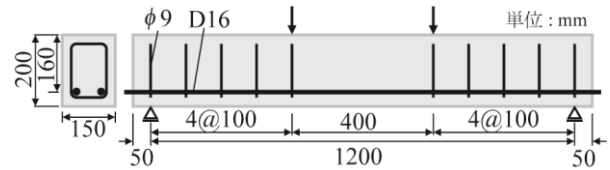


図-1 試験体概要

コンクリートの損傷評価には、修正 von-Mises モデルによる等価ひずみ ε_{eq} を用いて、次式で表す。

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

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。

変形履歴の最大等価ひずみ κ の値が破壊発生ひずみ κ_0 の値以上のとき、損傷変数 $D(\kappa)$ は次式で表す。

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

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

2.2 鉄筋の材料モデル

鉄筋には非線形等方硬化則に基づく von-Mises 弾塑性モデルを適用する。降伏関数 f を次式で表す。

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

ここで、 σ_v は von-Mises 相当応力、 σ_{y0} は初期降伏応力、 p は相当塑性ひずみ、 Q および b は鉄筋の非線形硬化パラメータである。

3. 解析手法の妥当性の検証

3.1 実験概要および数値解析条件

本解析手法の妥当性を検証するため、実験と数値解析を比較する。実験は図-1 に示す試験体を用いて荷重制御による4点曲げ試験を行い、数値解析は実験の試験体を忠実にモデル化して行った。節点数と要素数は、約37万、約200万とし、鉄筋の幾何形状まで再現した。また、強制変位を12mm、500stepで作用させた。表-1 に材料パラメータを示す。

3.2 解析手法の妥当性の検証

図-2、図-3 に実験結果と解析結果の荷重-変位関係、部材表面のひび割れを示す。解析結果のひび割れは等

表-1 材料パラメータ

コンクリート				
E	ν	κ_0	G_f	k
29 GPa	0.2	0.0001	0.1 N/mm	20
鉄筋				
E	ν	σ_{y0}	Q	b
210 GPa	0.3	400 MPa	180 MPa	15

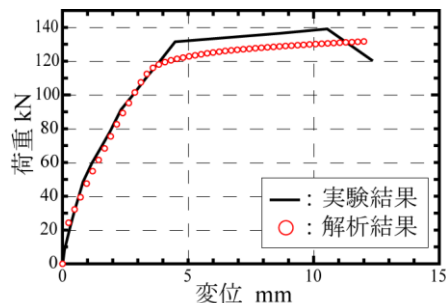


図-2 実験結果と解析結果の荷重－変位関係

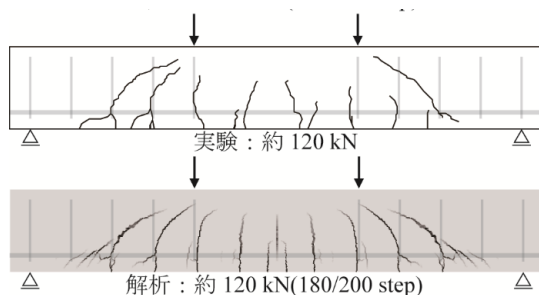


図-3 実験結果と解析結果の部材表面のひび割れ

価ひずみをひび割れとみなし可視化した。これより RC はりの破壊挙動、ひび割れ形状を概ね再現できており、部材内部のひび割れも概ね再現できていると判断できる。よって、本解析手法が妥当であると判断する。

4. 3D プリンタによる造形化と考察

4.1 造形化方法

解析結果から得られた等価ひずみをひび割れとみなし、3D プリントデータを作製した。3D プリントデータには PLY 形式を使用し、ひび割れは一目で理解できるよう明るい色に設定した。また、ひび割れの細さや大きさなどは 3D プリンタによる造形化の規格、造形物の肉厚の限界や解析結果の要素の大きさにより、現状最良のひび割れ形状に設定した。

4.2 造形結果

図-4 に造形モデルと造形結果を示す。コンピュータ上で 3 次元的に表現されたものを現実世界において 3 次元で具現化できている。具現化することにより、ひび割れの発生位置、位置関係、鉄筋近傍から発生する部材内部のひび割れの様子などのひび割れの全体像を直感的に理解できる。また、図-5 に示すように、今まで表

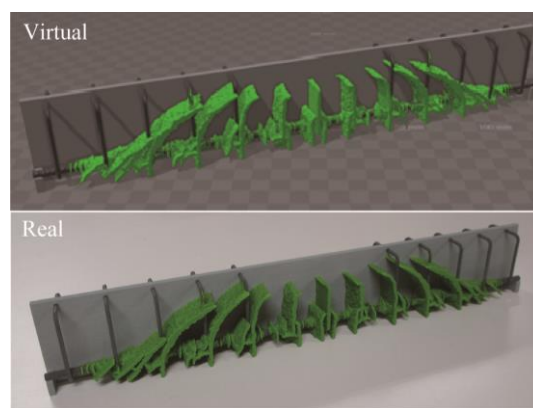


図-4 造形モデルと造形結果

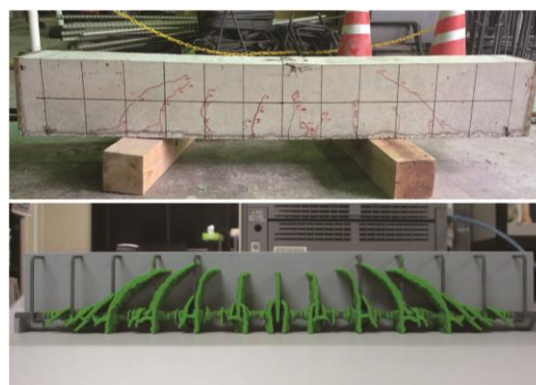


図-5 実験と造形結果の比較

面のひび割れの幅や長さから予測することしかできなかった奥行き方向のひび割れの形状を認識でき、RC 部材全体にひび割れがどのように存在しているのかを理解しやすい。以上のことから、3D プリンタによる造形化することで、RC 部材全体に発生するひび割れの形状を 3 次元で捉えることができる。また、どんな人にも理解しやすい可視化方法であるため、研究成果やひび割れの解説に応用でき、教育の現場でも使用できる。

5. おわりに

本研究ではひび割れの 3D プリンタによる造形化を提案した。ひび割れを造形化することにより、RC 部材全体において 3 次元でひび割れがどのように存在しているのかを理解することが容易になった。今後はひび割れをより詳細に造形化するため、ひび割れ幅の情報の付与やひび割れの細線化をしていく。

参考文献

- 1) 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生する実験的研究, 土木学会論文報告集, Vol.294, 1980.
- 2) 車谷麻緒, 根本優輝, 相馬悠人, 寺田賢二郎: コンクリートの破壊力学を考慮した鉄筋コンクリートの 3 次元破壊シミュレーションとその性能評価, 計算工学会論文集, vol.2016, p.20160004, 2016.