

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 学生会員 ○佐々木 浩武 茨城大学 学生会員 邊見 哲一
 茨城大学 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。発生したひび割れは部材の力学性能に影響を及ぼすとともに、劣化の原因にもなり耐久性を低下させる。ひび割れによる RC 部材への影響は、部材表面のひび割れにより検討されるが、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が後藤ら¹⁾により示されており、ひび割れの部材への影響を表面のひび割れ以外も含めて検討する必要がある。内部に発生するひび割れを実験により観察するには、RC 部材を切断しなければならず、また、その際、切断面を観察するため、ひび割れを2次元的にしか把握できない。ひび割れは部材表面だけでなく部材内部にわたり3次元的に発生するため、RC 部材への影響を検討する上で、既存の切断による部材内部のひび割れの観察では不十分であり、ひび割れの広がりを3次元的に把握す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。これは様々な条件の RC 部材を解析でき、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、発生するひび割れを3次元的に把握するうえで非常に有効である。一方、3D プリント技術³⁾がめざましい発展、普及を見せており、地質学分野では研究に用いる化石などの標本に3D プリンタ⁴⁾が使用されている。3D プリンタによる造形化は、着色ができ、造形物のデザインの自由度が高い。そのため、受け手が理解しやすいように造形できることから、立体構造のより詳細な理解が期待できる。

そこで本研究では、RC 部材に発生するひび割れの広がりを3次元的に把握することを目的とし、破壊シミュレーションに基づくひび割れの新規的な可視化、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。

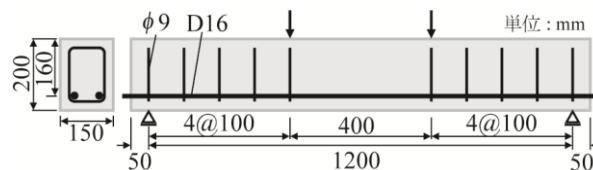


図-1 試験体概要

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

ここで、 σ はコーシーの応力テンソル、 c は弾性係数テンソル、 ε はひずみテンソルである。 D は損傷度合いを表す損傷変数であり、0 から 1 の値をとる。

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

使用した解析手法の妥当性を検証するために比較する実験概要と数値解析条件を示す。実験は図-1 に示す試験体を用いて荷重制御による 4 点曲げ試験を行った。数値解析は、図-1 に示す試験体を忠実にモデル化した。対称性を考慮し、解析領域を 1/4 とした。節点数と要素数は、約 37 万、約 200 万とし、強制変位を 12 mm、500

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

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

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	410 MPa	180 MPa	15

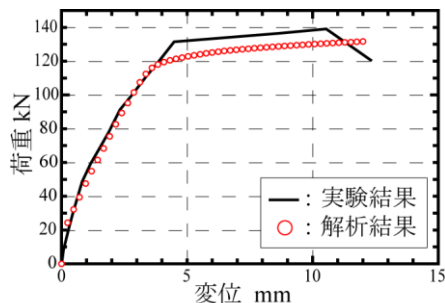


図-2 実験結果と解析結果の荷重－変位関係

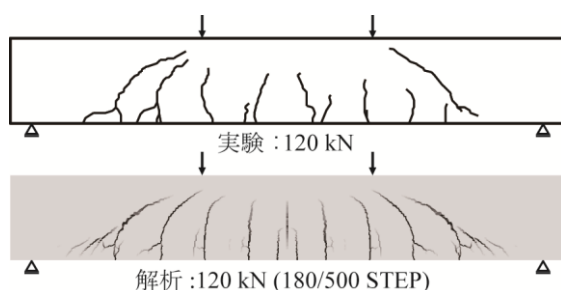


図-3 実験結果と解析結果の部材表面のひび割れ

step で作用させた。また、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 に実験結果と解析結果の荷重－変位関係、図-3 に実験結果と解析結果の部材表面のひび割れを示す。解析結果のひび割れは等価ひずみをひび割れとみなし可視化した。図-2、図-3 より RC はりの破壊挙動、ひび割れ形状を概ね再現できていることが分かる。したがって、本解析手法は RC はりのひび割れ進展挙動を再現するのに妥当である。

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成した。図-4 に造形モデルを示す。対称性を考慮し、結果の 1/2 の領域を表面(120 kN 時)と裏面(50 kN 時)に出力した。

4.2 造形結果と考察

図-5 に造形結果を示す。結果を見るとひび割れの 3 次元的な奥行きや鉄筋近傍でのひび割れの発生の様子が直感的に実感しやすい。また、現実世界で手に持って観察できることから、様々な角度から RC 部材に発生するひび割れの形状を考察することができる。さらに、強調

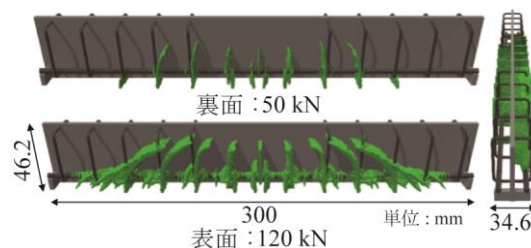


図-4 造形モデル

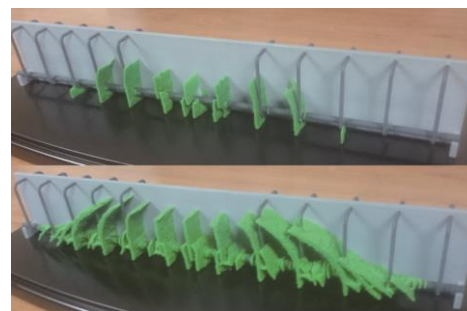


図-5 造形結果 (上:50 kN, 下:120 kN)

したい部分や説明したい部分をデータや色の選択から見やすく造形化でき、専門知識がない人でも理解しやすい立体可視化方法と言える。

以上のことから、3D プリンタによる造形化は、RC 部材に発生するひび割れの形状を 3 次元的に把握でき、構造物への影響を検討しやすくする。また、研究成果やひび割れの解説に応用でき、RC 部材のひび割れの機構についての教育やその知識の普及に使用できる。

5. おわりに

本研究では 3 次元破壊シミュレーションに基づくひび割れの新規的な可視化、出力手法として 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、鉄筋コンクリートのひび割れの広がりや 3 次元的に把握することが容易になった。

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.
- 3) 一般社団法人—コンピュータ教育振興協会: 3D プリンター活用技術検定公式ガイドブック, 日経 BP 社, p22-27, 2016.
- 4) 兼子尚知, 鶴野光, 岩下智洋: 3D プリンタによる地質標本の模型製作, 地質調査研究報告, Vol.67, No.5, p.133-135, 2016.