

RCはりの重錘落下試験のFE解析とその精度評価

九州大学 学生会員 ○片山 純一

九州大学 正会員 浅井 光輝

1. 目的

コンクリート構造物の耐衝撃性を検討する際には、現象解明および損傷分布把握のために数値解析が行われている。しかしながら、衝撃破壊現象の複雑さのため、実験と数値解析結果の詳細な精度評価を行った事例はあまり見られない。そこで本研究では、非線形有限要素解析の結果からひび割れ角度分布と検証領域内の換算ひび割れ密度を評価する単純な指標を提案し、画像処理結果との比較検証より現状における数値解析手法の精度の把握を行った。

2. 内容

本研究では、室蘭工業大学で行われた重錘落下による矩形 RC はりの衝撃実験を対象とし、実験を模擬した衝撃解析から得られる最大主ひずみ分布と、破壊状況写真から画像処理により算出したひび割れ角度、ひび割れ密度を用い、両者の比較から衝撃解析の精度評価を行う。

2.1 重錘落下試験

衝突速度 $V=7\text{m/s}$ に相当する高さ 2.5m から鋼製の重錘（質量 400kg ）を自由落下させた。また、実験に使用した矩形 RC はりは断面 $200\times 300\text{mm}$ 、純スパン長 3000mm 、全長 3400mm であり、主鉄筋比 1.1% の複鉄筋 RC はりである。形状寸法、配筋状況を図-1 に示す。

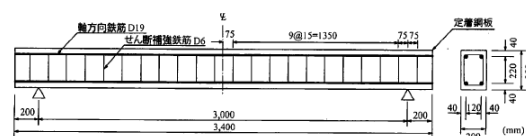


図-1 試験体の形状寸法および配筋図

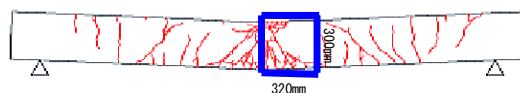


図-2 実験終了後のひび割れ分布

図-2 に実験終了後のひび割れ分布を示している。図-2 より、はり全体で下縁から上縁に進展する曲げひび割れおよび、支点から $1/4$ スパン近傍部のはり上縁から下縁に進展する曲げひび割れが発生している。また、載荷点部からはり下縁に 45° 程度の斜めひび割れも発生している。全般的には、はり中央部で角折れが生じており、曲げ破壊型の破壊形状を示している。

2.2 本研究における検査領域

本研究では、最も損傷の激しい図-2 の青色で囲まれた中央部から横 $320\times$ 縦 300mm の領域を検査領域とする。検査領域の破壊状況写真を図-3 に示す。写真は、 256×240 画素からなり解像度は 1.2mm である。

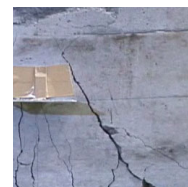
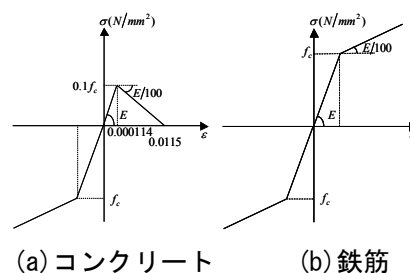


図-3 検査領域

2.3 衝撃応答解析

2.3.1 解析モデルおよび解析条件

上記の重錘落下試験の有限要素解析を以下の要領で実施した。まず、対称性を考慮した $1/4$ モデルを採用し、コンクリート要素は8節点ソリッド要素、鉄筋要素については2節点トラス要素でモデル化を行った。定形の直方体要素を用いて空間を離散化し、総節点数および総要素数は $7239, 9042$ である。なお、前述した検査領域は 16×15 要素に対応する。材料構成則を図-4 に示す。鉄筋の構成則はバイリニア型の弾塑性モデルとし、コンクリートの構成則は圧縮側にはバイリニア型の弾塑性モデル、引張側はひずみ軟化を考慮したモデルを用いた。また、本解析に用いた材料定数を表-1 に示す。



(a) コンクリート (b) 鉄筋

図-3 材料構成則

表-1 材料定数

	鉄筋(D19)	鉄筋(D6)	コンクリート
弾性係数E (N/mm ²)	2.06×10^5	2.06×10^5	2.83×10^4
ポアソン比	0.3	0.3	0.14
圧縮強度(N/mm ²)	379	373	32.3
引張強度(N/mm ²)	379	373	3.23

キーワード 衝撃解析, 有限要素解析, 精度評価, ひび割れ, 画像処理

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地 九州大学 TEL 092-802-3370

2.3.2 解析結果および考察

図-5に荷重点の変位波形を示す。この結果から、解析値と実験値を比較すると最大変位に多少の差が生じているが、変位波形が類似していることから解析によって実験を良好に再現できている。また、図-6に検査領域の最大変位時での最大主ひずみ分布を示す。

2.4 評価の概要

構造解析により得られた要素ごとの最大主ひずみの値から、換算ひび割れ密度やひび割れ方向を算出する。そして、画像処理によって抽出したひび割れ画像から得られる、ひび割れ密度やひび割れ方向とのマッチングを行い、精度評価を行う。本研究では、各要素中のコンクリート表面に近い4つの積分点での最大主ひずみの平均を各要素の最大主ひずみとする。

2.4.1 構造解析におけるひび割れの定義

本研究で用いたコンクリート構成則は、図-4に示すようにひび割れ発生ひずみからひずみ軟化が生じ、ひずみが ϵ_{co} に到達したときに最大主応力がゼロとなる多直線モデルである。本研究では、最大主応力が“0”となったときに完全な開口ひび割れが発生したものと仮定し、以下に示す手順にてひび割れ角度、ひび割れ密度を概算した。

2.4.2 ひび割れ方向およびひび割れ密度の算出

コンクリート表面の2次元的なひび割れ分布と3次元数値解析結果を比較するため、最大主ひずみベクトル(3次元)を2次元部材側面に射影したときの2次元ベクトルを求め、その直交ベクトルがx軸正方向となす角度をひび割れ方向とした。ひび割れ角度は、図-6に示すように4段階($0 \leq \theta < 30, 150 \leq \theta < 180$ のとき1、 $30 < \theta < 60$ のとき2、 $60 \leq \theta < 120$ のとき3、 $120 < \theta < 150$ のとき4)に分類した。

コンクリートの構成モデルの特徴より、各要素の換算ひび割れ密度は、図-7に示すように、ひび割れ発生時 ϵ_{ci} のひび割れ密度“0”から開口ひび割れ時のひび割れ密度 p_{max} までは直線的に増加するものと判断できる。ここで、 p_{max} は各要素のひび割れ方向に依存するため、図-6で分類したひび割れ角度4パターンに大別することで簡易的に評価している。最終的に、検査領域全体の換算ひび割れ密度は、各要素の換算ひび割れ密度の和を要素数で除すことで評価した。

2.5 画像処理とのマッチングによる数値解析の精度評価

次に比較対照とする写真の利用方法について概説する。図-3の検査領域画像に画像処理を施し、ひび割れ箇所の自動検出を行った。その後、図-8に示すようにひび割れごとに角度を評価し、これも図-6に示す4パターンに分類した。両者の比較を図-9に示すが、図-8中の番号⑤以外のひび割れ角度は概ね一致した。ひび割れ⑤は、鉄筋の付着により生じたひび割れであり、数値解析モデルの限界を示す結果である。次に、換算ひび割れ密度の比較を表-2に示すが、妥当な結果が得られている。

3. 結論

数値解析の精度は、ひび割れ角度、換算ひび割れ密度とも、比較的良好な精度の表現可能であることを確認した。ただし、連続体力学を基礎とする離散的ひび割れモデルによる限界も明らかになり、さらなる詳細な解析が必要であれば、粒子法などの最新の数値解析技術が必要不可欠であると思われる。

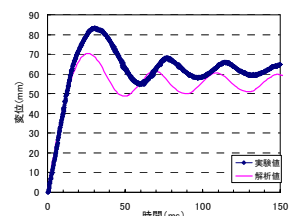


図-4 荷重点の変位波形

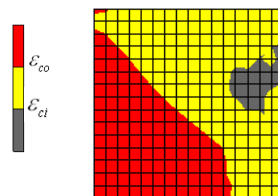


図-5 最大主ひずみ分布

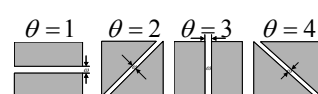


図-6 角度の分類

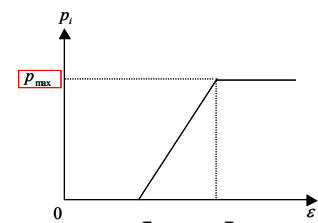


図-7 最大主ひずみと
換算ひび割れ密度の関係

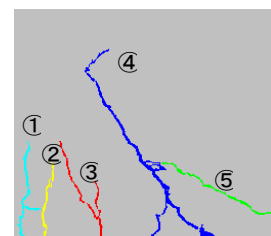


図-8 ひび割れ番号

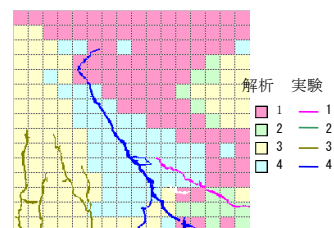


図-9 ひび割れ方向

表-2 ひび割れ密度

解析	0.037
画像処理	0.03