

損傷力学を用いた RC はりの弾塑性衝撃解析に関する研究

九州大学 学生会員 星野 展洋 九州大学 正会員 園田 佳巨
九州大学 フェロー会員 彦坂 熙

1. 緒言

近年、公共構造物の設計法が性能照査型へと移行する中で、落石防護工等の衝撃的な荷重が作用する構造物の耐衝撃性能を正確に評価するには、構造物部材の衝撃挙動を精度良く再現できる数値解析手法の確立が必要である。本研究では、材料内部の損傷の発生・進展を評価する損傷力学を弾塑性衝撃解析に適用し、最も基本的な部材である RC 単純ばりに重錘が落下したときの衝撃挙動のシミュレーションを行い、損傷力学の衝撃問題への適用に関する考察を試みた。

2. 解析手法の概要

2.1 損傷力学の導入

損傷力学は、材料の強度・剛性の低下をもたらす損傷を微視レベルにおける空隙の生成・成長によるものと考え、それらの影響を力学的に等価な巨視レベルの応力場で評価する手法である。本研究では、構造材料の損傷の評価を考えるために、部材内部の相当歪みを、材料の圧縮強度と引張強度の相違を考慮した式(1)により評価し、式(2)で示されるように、相当ひずみが損傷に関する閾値に達するときに部材内部に損傷が発生もしくは進展するものと仮定した。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{6k}{(1+\nu)^2} 2J_2} \quad (1) \quad f(\varepsilon_{eq}, \kappa) = \varepsilon_{eq} - \kappa = 0 \quad (2)$$

ここに、 I_1 : ひずみの 1 次不変量, J_2 : 偏差ひずみの 2 次不変量, k : 圧縮強度と引張強度の比, κ : 損傷進展条件パラメータ

式(1)の第 1 項と第 2 項は、それぞれ静水圧応力と偏差応力の影響を評価したもので、 $k=1$ とおけば式(1)と(2)の組み合わせによりミーゼスの降伏条件に帰着することより、鉄筋要素についても同様の式を用いた。また、材料内部の損傷度を表す損傷変数 D の評価には式(3)に示す相当歪みの指数関数式を適用した。

$$D = \left(\varepsilon_{eq} / \kappa_y\right)^2 \left(e^{\alpha(\varepsilon_{eq} - \kappa_0)} - 1\right) \quad (3)$$

ここに、 κ_0 : 損傷発生時の相当歪み, κ_y : 降伏時の相当歪み, $\alpha = \ln 2 / (\kappa_y - \kappa_0)$: 材料定数

式(3)から得られた損傷変数を、式(4)の構成式に適用することで損傷にともなう剛性の低下を除荷時・負荷時で以下のように評価した。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= E_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (f(\varepsilon_q, \kappa) < 0: \text{除荷}) \\ &= (1-D) E_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (f(\varepsilon_q, \kappa) = 0: \text{負荷}) \end{aligned} \quad (4)$$

σ_{ij} : 応力テンソル, ε_{kl} : ひずみテンソル, E_{ijkl} : ヤング係数

2.2 RC はりの衝撃応答解析

本研究では、RC はりを 3 次元有限要素モデルに離散化し、式(5)に示す運動方程式(減衰無視)を、陰解法による直接時間積分により解いた。

$$M \ddot{u}(t) + Ku(t) = P(t) \quad (5)$$

ここに、 M : 集中質量マトリックス, K : 剛性マトリックス, $P(t)$: 荷重ベクトル, $\ddot{u}(t) \cdot u(t)$: 加速度・変位ベクトル

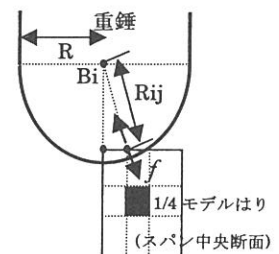


図-1 重錘衝突モデル

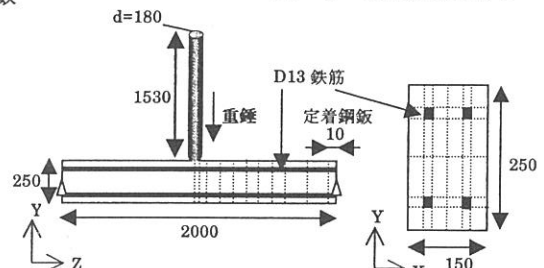


図-2 解析モデル(RC 単純梁)(単位 mm)

また、重錘衝突による衝撃力の計算は、図-1のように重錘先端の半球部分の中心点 Bi について独立した座標をとり、スパン中央部付近の接触判定点と Bi の距離 R_{ij} が式(6)を満足するときに接触状態にあると判断し、式(7)を用いて節点に作用する衝撃力 f を評価した。

$$R_{ij} < R \quad (6)$$

$$f = \frac{E_b A}{R} (R - R_{ij}) \quad (7)$$

ここに、 R : 重錘先端の半球部の半径 A : 重錘とはりの接触面積 E_b : はりの弾性係数(コンクリート)

また、重錘側の挙動については、式(8)で加速度を算定した後 RC はりと同様に、時刻歴に速度および変位の更新を行った。

$$a = g - \frac{f}{m_b} \quad (8)$$

a : 点 Bi の加速度、 g : 重力加速度、 m_b : 重錘質量

2.3 解析モデル

解析対象は、図-2に示すはり高中央部両端を固定した RC 単純はり(静的曲げ耐力 38.4kN)とし、はり軸方向と断面方向の対称性を考慮した 1/4 モデルで解析を行った。解析に用いたコンクリートと鉄筋の材料定数を表-1に示す。重錘については、長さ 1440mm の円柱体の先端に半径 90mm の半球部を有する鋼製重錘(質量 300kg)を想定し、衝突速度を $V=5\text{m/sec}$ とした。

3. 数値計算結果および考察

図-3は、重錘が $V=5\text{m/sec}$ で衝突した場合のスパン中央部の変位応答を示したものである。重錘衝突により初期の段階から RC はり内部で損傷が発生・進展し、変位応答は図-3に見られるように弾塑性挙動を示した。図-4は、重錘衝突後のはり内部の損傷の進展状況を示したものである。この図より、重錘衝突後 1.2ms ではり中央下部に引張破壊が生じ、1.7ms 経過時には引張破壊領域の広がりが見られ、衝突部近傍にも損傷が生じていることが認められる。その後、2.5ms 経過時にはり上面にも損傷領域が見られるが、これは重錘の衝突速度が速いために、はりの変位が 3 次モードに近づいているためであると推察される。

4. 結論

本研究では、簡易なスカラー変数で損傷変数を定義した場合の損傷力学の衝撃応答解析への適用性について検討した。本研究で用いた手法は、任意の応力-歪み関係から材料の損傷進展式を得ることができるため、構造部材の弾塑性衝撃挙動を簡易に求めることが可能であるが、コンクリート部材の衝撃挙動の適切なモデル化を行うには、ひび割れを生じたコンクリートの構成モデルおよび計算アルゴリズムの改良を検討する必要がある。

表-1 解析に用いた材料定数

材料定数	コンクリート	鉄筋
ヤング率 E (GPa)	20.6	206
ポアソン比 ν	0.167	0.3
密度 ρ (g/cm ³)	2.4	7.85
損傷進展係数 α	8154	770
損傷発生歪み κ_0	1.15×10^{-4}	1.1×10^{-3}
圧縮強度 f_c (MPa)	29.4	343
引張強度 f_t (MPa)	$2.94 (= f_c / 10)$	(圧縮強度)

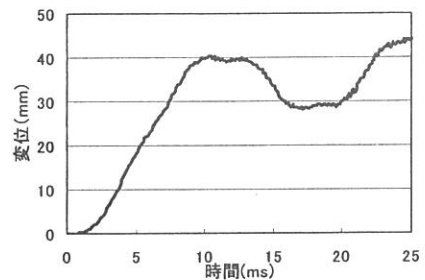


図-3 変位応答

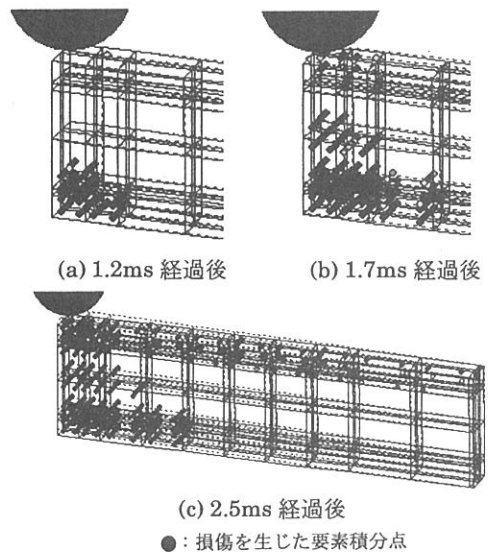


図-4 RC はりの損傷状況