

重錘落下衝突を受ける RC はりの衝撃応答解析

九州大学大学院 学生 ○玉井宏樹
九州大学大学院 正 園田佳巨

1. 緒言

耐衝撃性能を有すべき構造物の設計法が性能照査型へと移行しつつあり、その性能を明確にし、保証することがより重要になってきている。それに伴い、防護構造物に用いられる RC 部材の衝撃挙動を簡易に、かつ精度良く再現することができる数値解析手法の確立が求められている。そのような背景の下、著者らは、損傷力学を用いた衝撃応答解析手法の開発を行ってきており、現在までに、その手法を用いることにより鋼製部材の衝撃挙動を正確に評価できることを確認してきた。そこで、本研究では、RC 部材の衝撃挙動を正確に評価できる衝撃応答解析手法を作成し、RC 単純はりの重錘落下衝突実験をシミュレートした。

2. 解析手法の概要

2.1 材料の損傷度評価

コンクリート部材内部の相当歪み ε_{eq} を以下の式(1)により評価し、コンクリートの基本的性質である圧縮強度と引張強度の相違を考慮しながら、式(2)で示される負荷関数を満足するときにコンクリート内部に損傷が発生あるいは進展するものと仮定した。式(1) と(2)の組み合わせにより引張域と圧縮域で大きさの異なる降伏曲面が定義され、進展式は、損傷が歪みの増加とともに単調に増加する特性を表現するために、式(3)、図-1 に示す指数関数式を適用した。

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

$$f(\varepsilon_{eq}, \kappa) = \varepsilon_{eq} - \kappa = 0 \quad (2)$$

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

ここに、 I_1 は歪みの1次不変量、 J_2 は偏差歪みの2次不変量、 k は圧縮強度と引張強度の比、 ν はポアソン比、 κ は損傷条件パラメータである。

また、本研究では、von Mises の降伏条件を仮定して得られる以下の式(4)の弾塑性構成式中の硬化係数 H' を損傷変数 D を用いて式(5)とおくことにより、損傷による要素内部の剛性低下を考慮した。

$$d\sigma_{ij} = \left(E_{ijkl} - \frac{9G^2 \sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{\bar{\sigma}^2 (H' + 3G)} \right) d\varepsilon_{kl} \quad (4)$$

$$H' = (1-D)E^e \quad (5)$$

ここに、 $d\sigma_{ij}$ は増分応力テンソル、 $d\varepsilon_{kl}$ は増分歪みテンソル、 G はせん断弾性係数、 σ'_{ij} は偏差応力テンソルである。

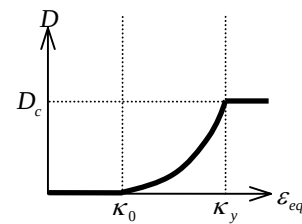


図-1 本解析に用いた損傷進展式

2.2 動的接触モデル

式(6)の条件を満たすときに接触状態にあると判断し、式(7)により節点に作用する衝撃力を算定するという簡易な手法を用いた。

$$R_{ij} = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} < R \quad (6)$$

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

ここに、 A は重錘とはりの接触面積で各時刻で重錘先端部のはり部材への貫入量から計算した。また、 E_b は接触部のはりの弾性係数であるが、本解析では RC はりを対象とした解析を行うことからコンクリートの材料特性を与えた。

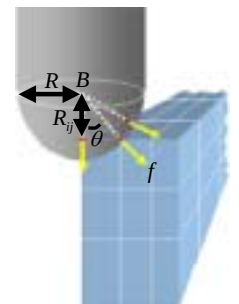


図-2 衝突のモデル化

3. RC はりの重錘落下衝突解析

3.1 解析条件及び解析モデル

本手法を用いて、矩形 RC はりの重錘落下衝撃実験を対象とした衝撃解析を行った。解析対象は、200mm×300mm の矩形断面を有する全長 3400mm、純スパン長 3000mm の複鉄筋 RC 梁である。衝突条件は、質量 400kg の鋼製重錘を衝突速度 7m/s で RC 梁に衝突させるものである。解析モデルを図-3 に示す。本解析では、計算時間短縮のため、対称性を考慮した 1/4 部をモデル化した。また、使用した要素

は全て 8 積分点を有するソリッド要素であり、時間積分手法は中央差分法である。



図-3 解析モデル (1575 節点, 1088 要素)

3.2 材料モデル

鉄筋要素の応力 - 歪み特性を表すと図-4 のようになる。降伏後の挙動に関しては、損傷変数 D の上限を 0.99 とおくことにより、材料の硬化係数を初期弾性係数の 1/100 に仮定し、除荷時の剛性として初期剛性を与えた。

また、コンクリート要素の応力 - 歪み特性を表すと図-5 のようになる。本解析では、引張軟化が衝撃応答に及ぼす影響について考察するために、コンクリートの材料モデルを 2 ケース想定して解析を行った。ケース 1 は、引張軟化を考慮していないモデルで、ケース 2 は、引張軟化を考慮しているモデルである。

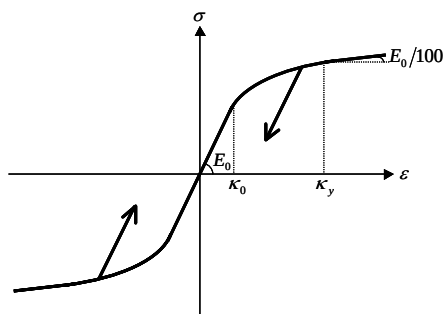


図-4 鉄筋の構成則モデル

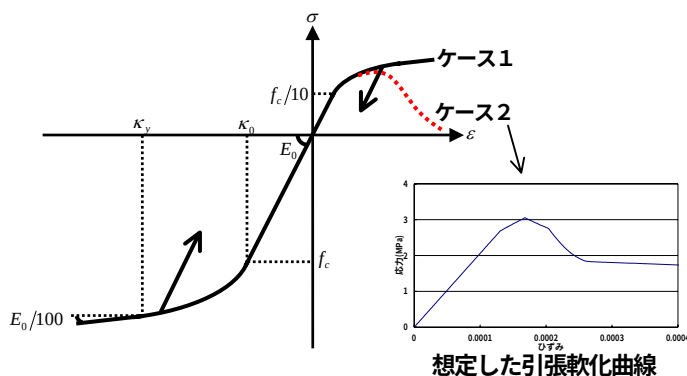


図-5 コンクリートの構成則モデル

3.3 解析結果及び考察

3.3.1 重錘衝撃力波形

図-6 に重錘衝撃力波形の比較図を示す。実験結果では、重錘衝撃力波形は衝撃初期に急激に立ち上がり、最大値約 1550kN に達した後、1msec 程度で零レベルまで急激に減少しているのに対して、本解析結果では、衝撃初期の立ち上

がりは急激ではあるが、その最大値は約 1350kN にとどまり、その後も 3msec 程度で零レベルになるようにゆっくりと減少しているが、概ね本解析結果は実験結果と比較して同様な波形を示しており、簡易な接触モデル化を用いた本手法で十分衝撃力を評価できることがわかった。

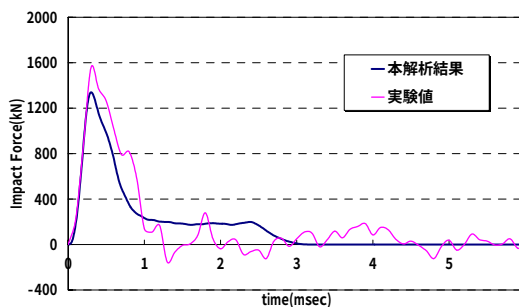


図-6 重錘衝撃力波形の比較

3.3.2 鉛直方向変位の応答

図-7 に载荷点鉛直変位応答波形を示す。引張軟化を考慮したケース 2 の解析結果はケース 1 と比較して、最大変位が大きくなり、振動周期が長くなる傾向にあると言え、実験値に近い値を示している。実験を正確にシミュレートすることは出来ていないが、引張破壊後の取り扱いが衝撃応答に及ぼす影響は無視できないものであることが確認でき、また、引張軟化モデルを導入することによって、より精度良く RC 梁の衝撃応答解析を行えることが確認できた。

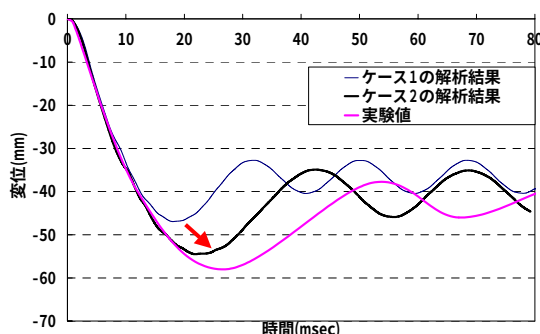


図-7 鉛直方向変位応答の比較

4. 結論

本研究により得られた結論を以下に示す。

- 1) 本手法により、RC はりの衝撃応答解析を行い、RC 梁の弾塑性衝撃応答を概ね評価できることが確認できた。
- 2) 簡易な動的接触モデルを用いた本手法により、重錘衝撃力を正確に評価できることが確認できた。
- 3) コンクリート材料の構成則に引張軟化モデルを導入することによって、実験値に近い性状を示すことがわかった。また、引張破壊後の取り扱いが衝撃応答に及ぼす影響は無視できないものであることが確認できた。
- 4) 今後、引張軟化勾配が各種衝撃応答に及ぼす影響について熟考し、適切な軟化モデルを構築する必要がある。