

重錘衝突を受ける RC はりの衝撃応答解析に関する研究

九州大学大学院 学生 ○玉井宏樹
九州大学大学院 フェロー 彦坂熙

九州大学大学院 正 園田佳巨
九州大学大学院 正 森谷晋

1. 緒言

公共構造物の設計法が性能照査型へと移行する中で、耐衝撃性能を有すべき構造物についても、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おり、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。そこで、本研究では、材料損傷の発生・進展を簡易に評価できる損傷力学を用いた衝撃応答解析プログラムを 3 次元有限要素法により作成し、衝撃力が作用する鋼製単純ばりの弾塑性衝撃応答解析により損傷力学の衝撃問題への適用に関する考察を行い、RC 単純ばりの重錘衝突実験をシミュレートした。

2. 解析手法の概要

2.1 損傷力学による定式化

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。損傷力学を連続体力学の枠内で展開するための項目として、次の 3 つが挙げられる。1) 微視的空隙の力学的効果を適当な損傷変数 D で定義する、2) 損傷変数 D の発展を支配する損傷進展式の定式化を行う、3) 損傷進展式を考慮した弾塑性構成式の定式化を行う。項目 1) に関して、本研究では、材料の損傷を部材の有効断面積の減少と解釈し¹⁾、図-1 に示すようなイメージの下に評価された損傷変数 D を用いて部材剛性の低下を評価した。また、本研究では損傷変数をスカラー変数として定義した。項目 2)、3) に関しては 2.2 で述べる。

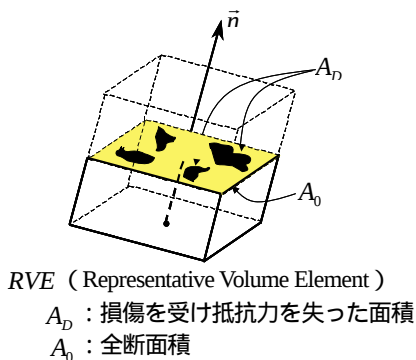


図-1 損傷力学の概念

2.2 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、項目 2) に関して、本研究では、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-2 に示す指数関数式を適用した。

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

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

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

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。

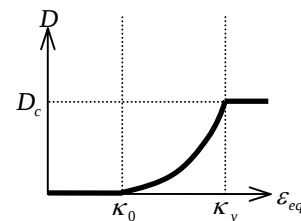


図-2 本解析に用いた損傷進展式

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。

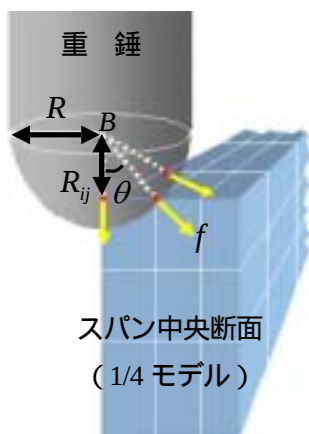


図-5 重錘衝突のモデル化

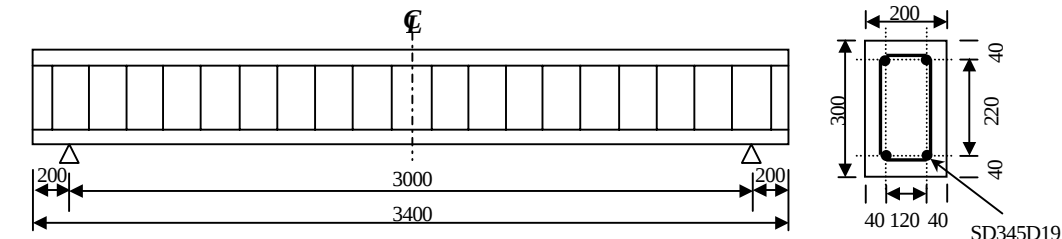


図-3 解析対象及び断面略図

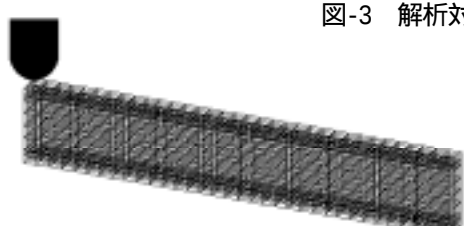


図-4 1/4 モデル図

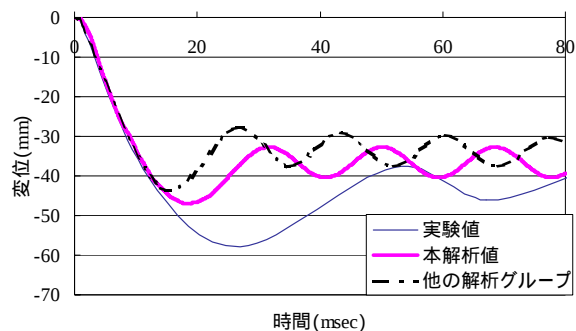


図-6 鉛直変位応答の比較

3. 数値解析結果及び考察

3.1 解析モデル

本手法を用いて、土木学会の研究委員会活動で行われた矩形 RC はりに関するラウンドロビンアナリシスのための重錘落下衝撃実験^{2),3)}を対象とした衝突解析を行った。図-3 に示す解析対象を図-4 で示すはり軸方向と断面方向の対称性を考慮した節点数 1575、要素数 1088 の 1/4 モデルでモデル化した。解析条件として、弾性係数 206GPa、ポアソン比 0.3 の材質を有する質量 400kg の重錘を衝突速度 7m/s で矩形断面 RC 単純ばりのスパン中央点に衝突させた。衝突物である重錘に関しては図-5 で示すような簡易なモデルを採用した。本解析では、鉄筋とコンクリートのどちらに対しても von Mises の降伏条件式を仮定した弾塑性構成式を用いた。鉄筋要素に関しては、損傷変数の上限を 0.99 とおくことにより塑性硬化係数を 1/100 とするバイリニア型の等方硬化則を適用した。コンクリート要素に関しては、圧縮側に対しては圧縮強度まで線形弾性のラインを描き、圧縮強度に達したら鉄筋要素と同様に損傷変数の上限を 0.99 とおき、塑性硬化係数 1/100 で硬化を示す構成則を仮定し、引張側においては引張強度が圧縮強度の 1/10 である以外は圧縮側と同様の挙動を示す。鉄筋、コンクリートどちらの場合に関しても、除荷時の剛性として初期剛性を与えた。

3.2 解析結果

図-6 に荷重点鉛直変位応答波形を示す。実験値と比較して本解析結果は、最大変位発生時間が早く、最大応答変位に関しても実験値の約 60%の値にしか到達していないが、最大変位以降の振動特性を見ると、塑性化が進むに伴い残留変位が生じ、変位応答の振幅中心にずれが生じていることが確認できた。また、同実験を対象とした市販の汎用コード LS-DYNA を利用した他の解析グループの結果と比較すると、本解析手法は同様の傾向を示し、RC はりに対して

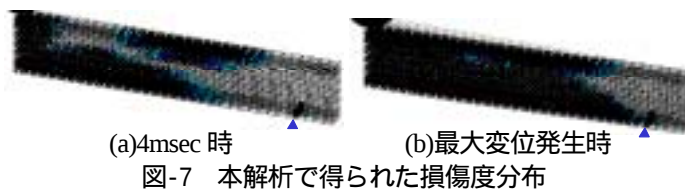


図-7 本解析で得られた損傷度分布

も本解析手法で弾塑性挙動を概ね再現できていることが確認できた。また、図-7 に本解析で得られた損傷度分布を示すが、衝突直後に衝突位置近傍及び支点近傍での損傷の発生が確認できた。つまり、衝突部の局所的な圧縮破壊の影響を考慮する必要があり、衝突物の動的接触モデルや支点部の忠実なモデル化を行わないと、はり全体としての破壊モードを再現できないと考えられる。

4. 結論

RC 単純ばりを対象とした重錘衝突解析結果から、本手法により概ね弾塑性挙動を把握できることが確認できた。また、本解析では最大応答変位等の実験値とのずれが生じたが、これは、支点治具の忠実なモデル化や衝突物の接触モデル等の改良により解消できると考えられる。本解析により得られた損傷度分布から、典型的な曲げ破壊によるはり下面の損傷の前に、衝突部近傍の局部圧縮破壊によるはり上面への損傷が顕著にみられることが確認できた。

参考文献

- 1) Lemaitre, J. : A Course On Damage Mechanics, Springer Verlag, 1996.
- 2) 土木学会：第 編委員会報告，第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.82-98, 2000.
- 3) 土木学会：衝撃実験・解析の基礎と応用，2004.