

衝撃応答解析への損傷力学の適用に関する研究

AN APPLICATION OF CONTINUUM DAMAGE MECHANICS TO IMPACT RESPONSE ANALYSIS

玉井宏樹*, 園田佳巨**

Hiroki TAMAI*, Yoshimi SONODA**

*九州大学大学院修士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

**工博九州大学大学院助教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎6-10-1)

キーワード: 損傷力学, 衝撃応答解析
(damage mechanics, impact response analysis)

1. 緒言

落石防護工等の耐衝撃性能を有すべき構造物について, その耐衝撃性能を正確に評価することがより重要になってきている. そのためには, まず部材レベルでの衝撃挙動を精度良く再現できる数値解析手法を確立する必要がある. RCはりを対象に, これまでにも数多くの解析的研究が行われてきた¹⁾²⁾が, 衝撃外乱がRCはりに作用した時の弾塑性衝撃挙動は, 曲げ破壊を対象にした計算に限定しても, 用いる解析ツール等の相違により, 同一の解析結果を得ることは困難とされている. その理由として, 解析結果が解析者の個人的な見解レベルで整理されている現状がある. そこで, 防護構造物等に用いられる梁・柱・版等のRCはり部材の衝撃挙動を精度良く再現する数値解析手法の確立が求められ, 土木学会においても衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会において, RCはりの衝撃挙動を対象に検討が進められてきた³⁾⁴⁾.

本研究では, 材料内部の損傷の発生・進展を簡易に評価する損傷力学を用いた3次元衝撃応答解析プログラムを作成し, 衝撃力が作用する単純ばり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 損傷力学の概念

損傷力学は, 外的要因による構造部材の破壊を「材料中の微視的空隙の発生と, その成長・合体による巨

視的亀裂の発達によってもたらされる⁵⁾と定義される. つまり, 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, 材料の劣化・損傷を断面レベルにおける部材の有効断面積の減少と解釈し⁶⁾, 式(1)および図-1に示すようなイメージのもとに評価された損傷変数 D を用いて部材剛性の低下を表現する.

$$D = \frac{A_D}{A_0} \quad (1)$$

ここに, A_0 は全断面積, A_D は欠陥等により抵抗力を失った断面積を表す.

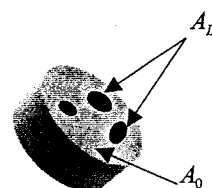


図-1 損傷の概念(有効断面の減少)

2.2 本解析に用いた損傷進展式

本研究では, 損傷は等方性であると仮定し, また, 構成方程式の定式化はひずみ等価仮説に従うものとした. つまり, 通常の応力を有効応力に置き換える以外は, 損傷を受けていない材料の構成方程式を導く過程と同様である. また, Peerlingsらは, 主歪み空間において降伏曲面を定義し, 相当歪みによりスカラー量と

して損傷度を評価する手法を提案した⁷⁾。この手法は、損傷変数の取り扱いが簡易でありうるという利点から衝撃解析への適用も容易であると判断し、本研究では同手法を引用することにした。本解析の流れを図-2のフロー図に示し、以下に簡単な説明を述べる。

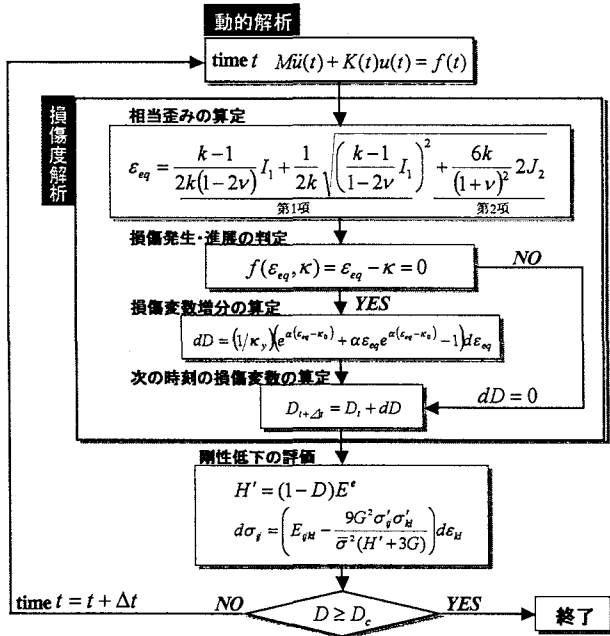


図-2 本解析のフロー図

まず、運動方程式(本解析では減衰を考慮していない)を解き、積分点での歪みを求め、その歪みを用い、コンクリート部材内部の相当歪み ϵ_{eq} を以下の式(2)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(3)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。

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

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 はポアソン比を表す。

$$f(\epsilon_{eq}, \kappa) = \epsilon_{eq} - \kappa = 0 \quad (3)$$

ここに、 κ は損傷条件パラメータを表す。

式(2)および式(3)の組み合わせにより、引張域と圧縮域で大きさが異なる降伏曲面が定義される。式(2)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、 $k=1$ とおけばミーゼスの降伏条件に一致することにより、鉄筋に関しても同様の

評価を行った。Peerlingsらは、静的なコンクリートの挙動を正確に追跡するために、コンクリートの引張軟化曲線を全応力-全歪み関係で表現した損傷進展式を提案している。しかし、この式を直接動的解析に導入することは困難であると考えられる。そこで、本研究では以下の手順により新たに増分型の応力-歪み関係式に適合した損傷進展式を誘導した。まず、損傷変数を考慮した応力増分と歪み増分の関係を次式のように単軸構成式で表す。

$$d\sigma = E(1-D)d\epsilon \quad (4)$$

式(4)を変形すると式(5)のようになる。

$$D = 1 - \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (5)$$

式(5)を見ればわかるように、適切な応力-歪み関係式を想定すれば、損傷変数を歪みの関数式で表せる。次に、材料の応力-歪み関係を非線形材料としてモデル化し、損傷発生時の歪み ϵ_0 (初期剛性が低下し始める時点の歪み) と降伏歪み ϵ_y を基準に、式(2)で表される各要素の相当歪み ϵ_{eq} が κ_0 (ϵ_0 に対応する相当歪み量) になった時点で $D=0$ から漸増し、 κ_y (ϵ_y に対応する相当歪み) に達した時に $D=D_c$ (最大損傷度) となるような式(6)に示す相当歪み ϵ_{eq} の指数関数式を損傷進展式に適用した。その結果、図-3に示すような損傷変数-相当歪み関係が求められる。

$$D = \left(\frac{\epsilon_{eq}}{\kappa_y}\right) \left(e^{\alpha(\epsilon_{eq}-\kappa_0)} - 1\right) \quad (6)$$

ここに、

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\kappa_y - \kappa_0} \quad (7)$$

で表される材料定数である。

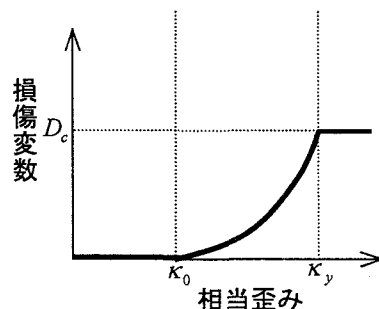


図-3 損傷進展式

本研究では、式(6)で定義した損傷変数 D を弾塑性構成式へ導入することにより、損傷発生後の材料の剛

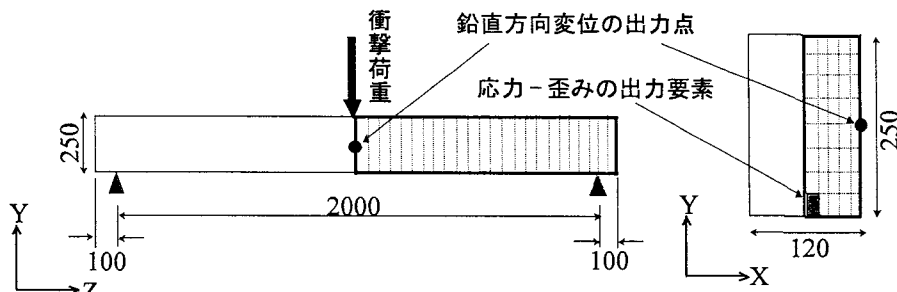


図-4 鋼製単純ばりモデル(単位: mm)

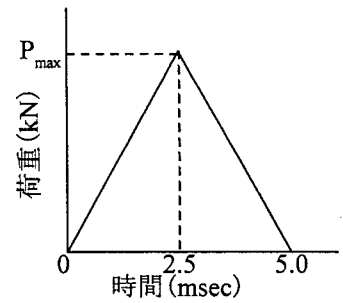


図-6 入力荷重波形

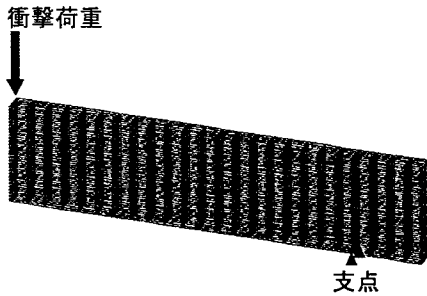


図-5 1/4 解析モデル

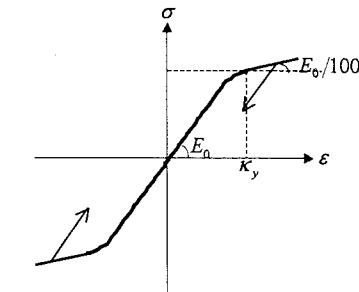


図-7 鋼材の応力-歪み特性

表-1 材料特性値

弾性係数(GPa)	206
ポアソン比	0.30
密度(g/cm ³)	8.00
降伏強度(MPa)	343
損傷発生相当歪み κ_0	1.30×10^{-3}
降伏相当歪み κ_y	2.00×10^{-3}

性低下に偏差応力の影響を考慮した。

$$d\sigma_{ij} = \left(E_{ijkl}^e - \frac{9G^2 \sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{\bar{\sigma}^2 (H' + 3G)} \right) d\epsilon_{kl} \quad (8)$$

ここに、 $d\sigma_{ij}$ は増分応力テンソル、 $d\epsilon_{kl}$ は増分歪みテンソル、 σ'_{ij} は偏差応力テンソル、 $\bar{\sigma}$ はミーゼスの降伏条件に基づく相当応力、 E_{ijkl}^e は弾性剛性テンソル、 G はせん断弾性係数を表す。また、図-2によって表すことができる損傷面をひずみ硬化によって拡大する降伏曲面と等しく扱えるものと考え、ひずみ硬化係数に相当する H' を以下の式によって定義した。

$$H' = (1 - D)E^e \quad (9)$$

以上のことを整理すると、各要素積分点において、式(2)で求めた相当歪みが式(3)を満たす場合には、式(6)により損傷度を求め、式(8)および式(9)に適用することで損傷に伴う剛性の低下を評価した。

3. 数値計算例

3.1 均質材料における損傷度解析

(1) 解析対象

図-4に示す解析対象を用いて、鋼製単純ばりの損傷度解析を行った。解析モデルの要素分割に関しては、図-5に示す1350節点、960要素の1/4モデルを用いた。表-1に鋼材の材料特性値を示す。材料損傷に関する材料特性値として、損傷変数 D の評価式(2)に用

いる材料定数 κ_0 、 κ_y は、鉄筋の単軸引張試験をモデル化した静的解析を行い、単軸応力-歪み曲線を描くように逆解析的に決定した。解析方法は、衝撃荷重をスパン中央の節点に直接荷重ベクトルとして与える荷重入力による解析とし、損傷発生の起こりうる荷重として、図-6の波形の $P_{max} = 4000\text{kN}$ を仮定した。応答値は、図-4に示すはり側面のより高中心位置における鉛直変位とスパン中央の下端要素の相当応力と相当歪みおよび片側支点反力を出力した。支点反力に関しては、支点部要素の内部応力を節点荷重に換算し、Y方向成分を支点反力として算定した。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。降伏後の挙動を含む鋼要素の応力-歪み特性を表すと図-7のようになる。本解析でもANSYS解析結果と比較するが、ANSYS解析の降伏判定は、von Misesの降伏条件によって行い、降伏後の硬化係数を初期弾性係数の1/100とするバイリニア型の等方弾塑性体としてモデル化した。

(2) 解析結果

図-8と図-9には、鉛直変位応答および片側支点反力応答のANSYS解析結果と比較したものを示す。図-8より、最大応答変位の大きさに約1割の相違が見られるが、最大変位以降の振動特性と残留変位の生じる弾塑性挙動は、同様の傾向を示すことがわかる。また、図-9の支点反力応答の比較も、変位応答と同様に両

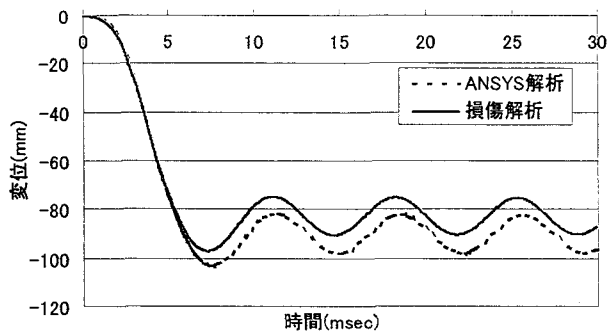


図-8 鉛直変位応答の比較

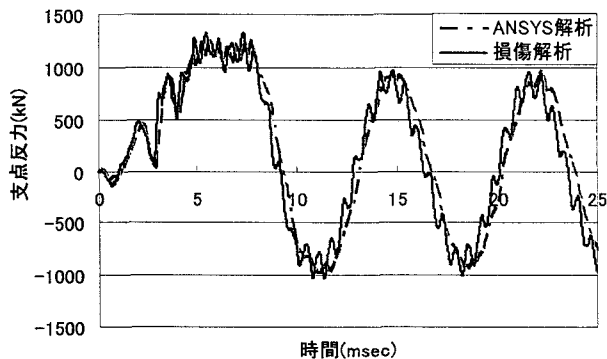


図-9 支点反力応答の比較

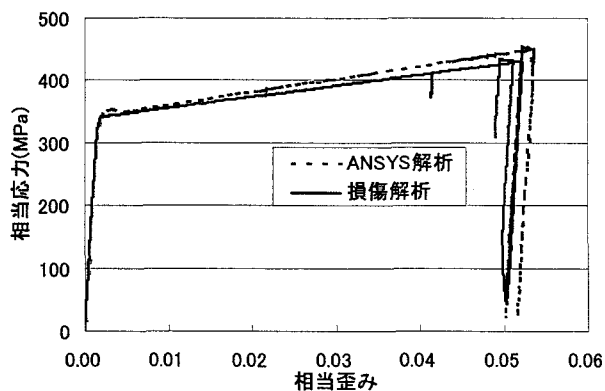


図-10 相当応力-相当歪み関係の比較

解析結果で類似した応答を示すことがわかる。すなわち、応答初期に衝撃荷重载荷の反動による負の支点反力が生じ、最大応答値付近で支点反力が一定の振幅で持続した後に自由振動となる。図-10は、スパン中央の下端要素(最大変位発生時に軸方向の引張力が卓越する要素)における相当応力-相当歪み関係をANSYS解析結果と比較したものである。この図より、損傷による要素内の剛性低下と降伏後に描く履歴曲線の分布が応力レベルで類似していることがわかる。

また、このときの鋼製はり内部の損傷分布状況を図-11に示す。損傷状況を見るための要素積分点の色は、損傷変数の値により色分けしている。損傷変数 $D > 0.90$ の積分点は黒色、 $D = 0.70 \sim 0.90$ の場合は赤色、 $D = 0.50 \sim 0.70$ の場合は青色、 $D = 0.10 \sim 0.50$ の場合

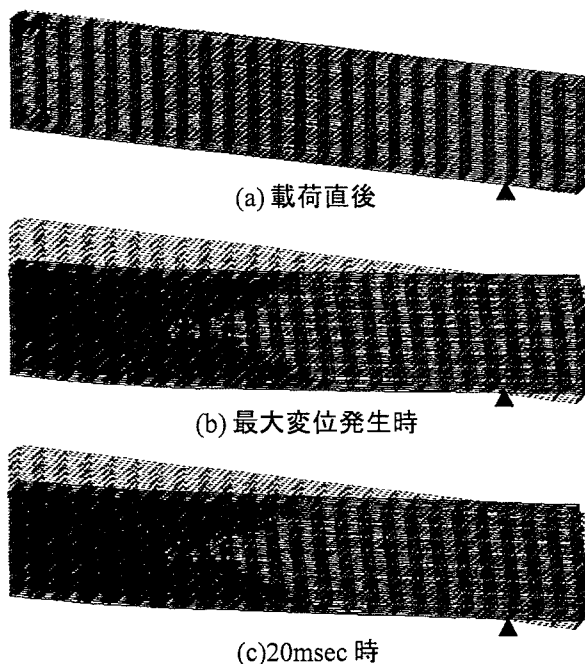


図-11 鋼製はりの損傷度分布

は水色で表現している。载荷直後(図-11(a))では、下端部よりも衝撃荷重が作用する上端部の方が損傷の進展がやや先行していることが確認できる。最大変位発生時(図-11(b))においては、その分布形状から、典型的な曲げ破壊による上・下端部への損傷領域の拡大が急速に進んでおり、最大変位以降の損傷の進展がほとんどないことを時刻20msec(図-11(c))の損傷状況から確認できた。

以上の比較結果から、陽解法を用いた本解析手法により、時間刻みごとの応力-歪み増分の収束計算を行わずに材料の剛性低下を適切に評価でき、鋼製単純ばりの弾塑性挙動を十分な精度で再現できることが確認された。

3.2 RC単純ばりの重錘衝突解析

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を対象とした衝突解析を行った。

(1) 重錘衝突のモデル化

本解析は、本手法により被衝突物であるRCはりの衝撃応答性状を表現できるかどうかを確認するためのものであり、衝突物である重錘に関しては図-12で示すような簡易なモデルを採用した。図-12のように、重錘先端の半球部の中心点 B について独立した座標をとり、接触判定点と点 B の距離 R_y が $R_y < R$ の条件式を

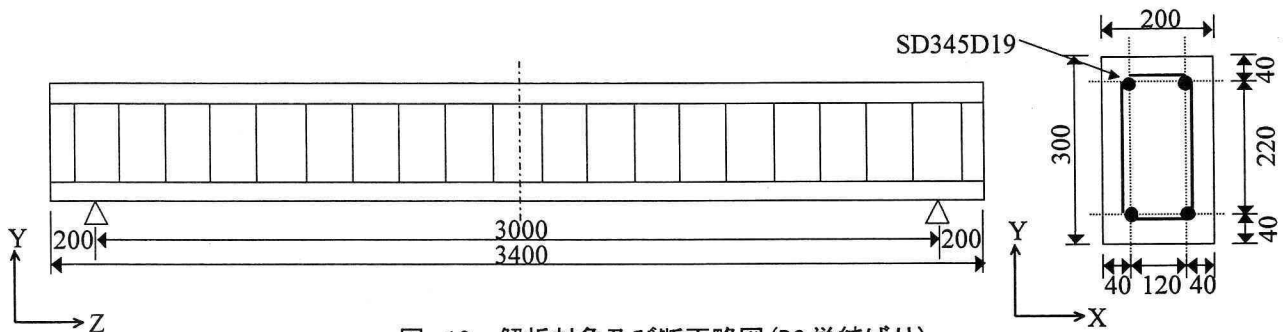


図-13 解析対象及び断面略図(RC単純ばり)

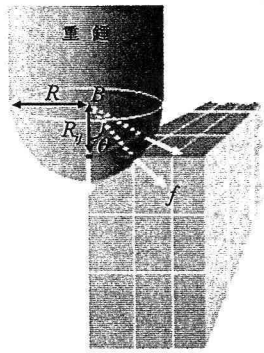


図-12 重錘衝突のモデル化

満たすときに接触状態にあると判断し、式(11)により接触点に作用する衝撃力を算定した。

$$f = \frac{E_b A}{R} (R - R_y) \quad (11)$$

ここに、 A は重錘とはりの接触面積、 E_b は接触部のはりの弾性係数を表す。ただし、本解析では接触域の動的な摩擦等の影響は考慮していない。

(2) 解析対象

図-13に示す解析対象を図-14で示すはり軸方向と断面方向の対称性を考慮した1575節点、1088要素の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。コンクリートの材料物性値は、圧縮強度32.3MPa、弾性係数28.3GPa、ポアソン比0.19を用い、引張強度には、圧縮強度の1/10を仮定した。また、D19鉄筋の材料物性値は、降伏強度379MPa、弾性係数206GPa、ポアソン比0.3を用いた。本解析では、鋼材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とおくことにより図-7に示すような塑性硬化係数を1/10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、図-15に示すように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、

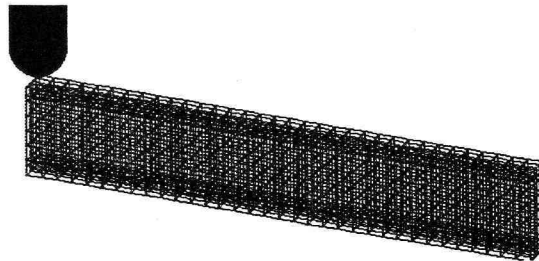


図-14 1/4解析モデル

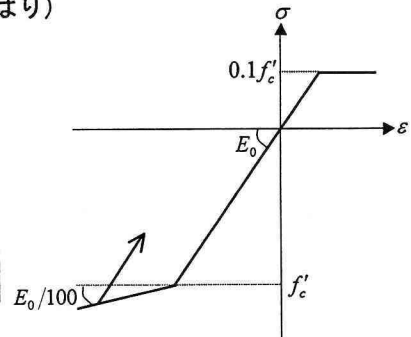


図-15 コンクリートの構成則モデル

塑性硬化係数1/10で硬化を示す構成則を仮定し、引張側も圧縮側と同様なものとしており、引張強度は圧縮強度の1/10としている。鉄筋、コンクリートどちらの場合に関しても、除荷時の剛性は初期剛性とした。また、本解析では静水圧応力の正負により圧縮域と引張域の判別を行うという簡易な判定法を用いた。

(3) 解析結果

図-16に載荷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、塑性化が進むにともない残留変位が生じ、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-17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。その後、最大変位発生時まで典型的な曲げ破壊によるはり下端への損傷領域が確認でき、それ以降の損傷領域の広がりあまり見受けられなかった。

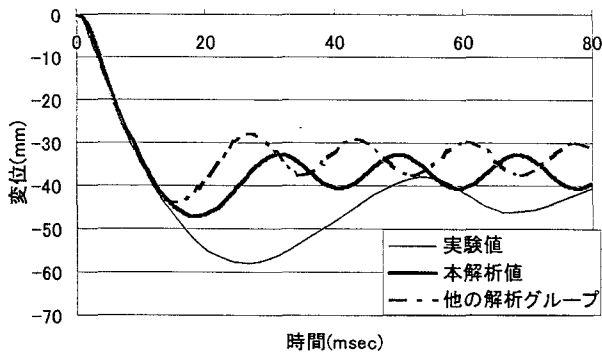


図-16 スパン中央鉛直変位応答の比較

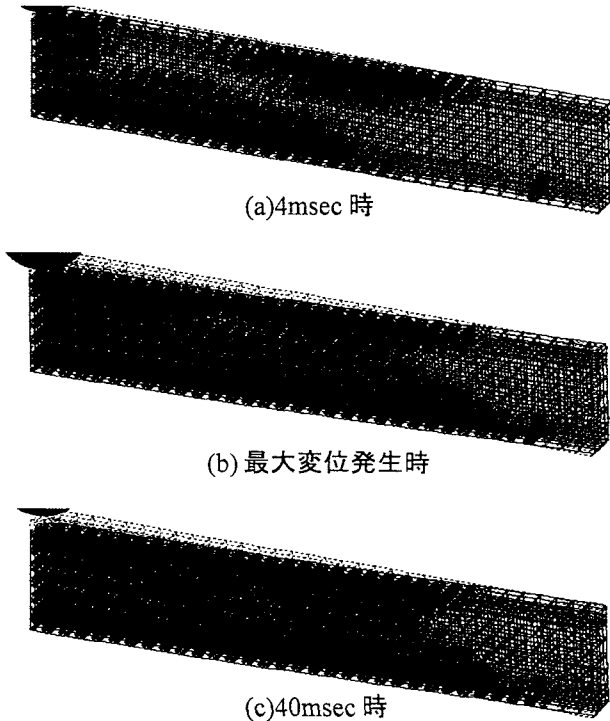


図-17 RCはりの損傷度分布

4. 結論

本研究では、損傷力学を用いた3次元衝撃応答解析プログラムを作成し、本手法の衝撃問題への適用性について検討を試みた。本研究で得られた成果を整理し、以下に示す。

(1) 弾塑性衝撃挙動を示す鋼製単純ばりの場合、陽解法を用いた本手法により、塑性化に伴う要素内の剛性低下と降伏後の履歴曲線を適切に評価でき、自作の本解析プログラムの有用性が確認できた。

(2) RC単純ばりを対象とした重錘衝突解析結果から、RCはりの損傷は、典型的な曲げ破壊によるはり下面

の損傷だけではなく、まず衝突部近傍の局部圧縮破壊によるはり上面への損傷領域の著しい拡大が確認できた。また、本解析では最大応答変位等に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、衝突物の接触モデル等の改良により軽減できると考えられる。

(3) 任意の応力-歪み関係から損傷進展式を得ることができる本手法では、弾塑性衝撃挙動を簡易に求める場合に適していると考えられる。また、本解析では、損傷変数を von Mises の降伏判定式に基づく弾塑性構成式に導入した結果、弾塑性衝撃応答を精度良く評価できることが確認された。

参考文献

- 1) 岸徳光, 安藤智啓, 井元勝慶, 河西良幸, 香月智, 上林厚志, 榎谷浩: 矩形RC梁の重錘落下衝撃挙動に関するラウンドロビンアナリシス, 構造工学論文集 Vol.49A, pp.1299-1310, 2003.
- 2) 井元勝慶, 大野友則, 佐々木晃, 小暮幹太: 重錘落下衝突を受けるRCはり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形特性, 構造工学論文集 Vol.41A, pp.1201-1212, 1995.
- 3) 土木学会: 第II編委員会経過報告, 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.
- 4) 土木学会: 衝撃実験・解析の基礎と応用
- 5) 村上澄男: 損傷力学, 「材料」第31巻, 第340号, pp.1-13, 1982.
- 6) Lemaitre, J.: A Course On Damage Mechanics, Springer Verlag, 1996.
- 7) M.G.D.Geers, R.de Borst, R.H.J.Peerlings: Damage and crack modeling in Single-edge and double-edge notched concrete beams Engineering Fracture Mechanics.65, 2000.
- 8) 園田佳巨, 星野展洋, 彦坂熙: RCはりの弾塑性衝撃応答解析への損傷力学の適用に関する研究, 構造工学論文集 Vol.49A, pp.1245-1251, 2003.