

損傷力学の概念を適用した衝撃応答解析に関する基礎的研究

Basic study on the impact response analysis by damage mechanics

園田佳巨*, 玉井宏樹**

Yoshimi SONODA*, Hiroki TAMAI**

*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)

**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)

In this paper, to establish a simple and effective numerical method for the impact behavior of structures, an applicability of the Continuum Damage Mechanics to the impact problem is analytically discussed. In this study, 3-Dimensional impact damage Finite Element Program is developed to simulate the impact behavior of simply supported reinforced concrete (RC) beams and Steel beams. As a result, it is confirmed that the proposed impact damage analysis could be applied to the evaluation on the elasto-plastic impact behaviors and the damage distribution of RC beam and Steel beam subjected to various impact load levels.

Key Words: Damage Mechanics, Reinforced concrete, Impact behavior

1. はじめに

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いる。しかし、RC はりの衝撃挙動については、これまでも数多くの解析的研究¹⁾²⁾が行われ、各研究機関で独自の解析手法が提案されてきたが、重錘等の衝突物が 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、用いる解析ツールにより材料非線形モデル等の設定等に相違があるため、同一の解析結果を得ることは困難であると言われている。この原因として、対象構造物を忠実にモデル化した3次元モデルによる衝撃応答解析には、時間積分に膨大な計算量を要するため、静的解析で用いられるような緻密な弾塑性構成式による収束計算を省くことが多く、その際の計算処理に個々のノウハウが含まれていることが考えられる。そこで、防護構造物等に用いられる梁・柱・版等の鉄筋コンクリート（以降、RC と称する）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、最も基本的な構造部材の一つである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、コンクリート構造物に特徴的なひび割れなどの材料損傷の発生・進展を簡易に評価でき、今後、既設構造物を解く上で有用になり得る手法であると考えられ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。その結果、本手法により簡易に、かつ精度良く鋼製単純ばりの弾塑性挙動を示すことが可能であることが確認でき、本手法の有用性が認められた。また、RC 単純ばりを対象とした重錘衝突解析結果から支点治具や接触部の忠実なモデル等に改良の余地があるが、実験値と同様な弾塑性挙動を概ねシミュレートできた。

2. 解析手法の概要

2.1 損傷力学の概念

一般に材料の損傷と破壊は、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⁷⁾。材料中に分布する多数の微視的空隙は、巨視的亀裂の発生と最終的な破断を引き起こすだけでなく、強度、剛性、靱性の低下、あるいは材料の残存寿命の減少といった材料の劣化、すなわち材料損傷の原因となる。このような多数の微視的空隙の力学的効果を連続的な変数場（損傷場）として把握することにより、材料中の微視的空隙の発達と微視的空隙を含む材料の挙動を追いかける学問分野を損傷力学（damage mechanics）と呼び、損傷力学は、多数の微視的空隙を含む材料、すなわち損傷材料の挙動を記述するだけでなく、巨視的亀裂の発生にいたるまでの段階、あるいは亀裂の先端進展過程をも対象としている。

つまり、損傷力学は、材料の強度・剛性の低下をもたらし損傷を、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⁸⁾、式(1)および図-1

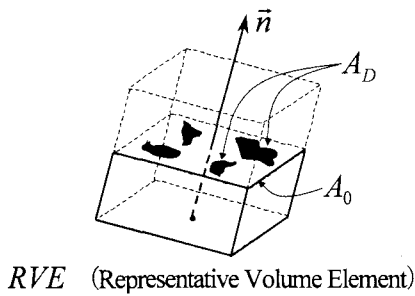


図-1 損傷力学の概念⁸⁾

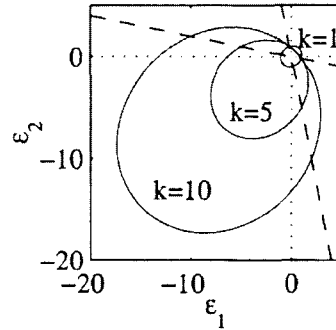


図-2 主歪み空間における降伏面（損傷面）の定義

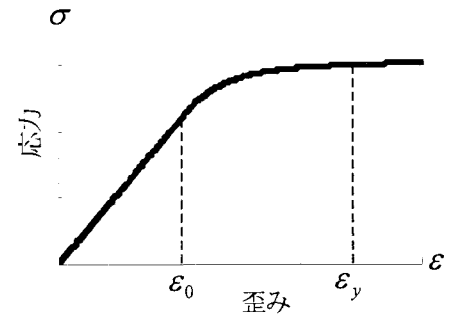


図-3 材料の応力 - 歪み関係

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。

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

なお、式(1)は力学的に均質な場とみなせるだけの十分な広がりを持つ領域で適用しなければならず、この領域のことを図-1に示してある RVE という。また、具体的な損傷変数の定義に関しては、高階のテンソル量として取り扱う方法^{9,10)}も提案されているが、本研究では、損傷変数を簡易なスカラー量として定義した。

2.2 材料の損傷度評価

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¹¹⁾を提案した。この手法は、損傷変数の取り扱いが簡易であり、時間積分に膨大な計算量を必要とする衝撃解析に適した手法であると判断し、本研究では同手法を引用することにした。

すなわち、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。

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

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。

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

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、図-2に示すような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 von Mises 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。

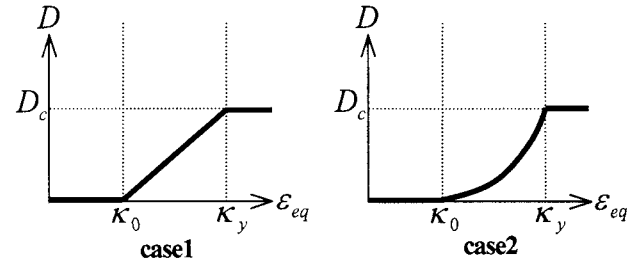


図-4 本解析に用いた損傷進展式

しかし、本研究が対象とする衝撃解析では、時刻歴な計算に用いる剛性を増分型で記述しておく必要がある。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。

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

式(4)を変形すると式(5)のようになる。

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

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 - 歪み関係を図-3に示すような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) = 1.0 となるように損傷進展式を仮定した。

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(6)に示す相当歪み ε_{eq} の線形関数式 (case 1)、および式(7)に示す相当歪み ε_{eq} の指数関数式 (case 2) を適用した。その結果、図-4に示すような損傷変数 - 相当歪み関係が求められる。

$$\text{case 1} \quad D = \left(\frac{\varepsilon_{eq} - \kappa_0}{\kappa_y - \kappa_0} \right) \quad (6)$$

$$\text{case 2} \quad D = \left(\frac{\varepsilon_{eq}}{\kappa_y} \right) \left(e^{\frac{\ln 2}{\kappa_y - \kappa_0} (\varepsilon_{eq} - \kappa_0)} - 1 \right) \quad (7)$$

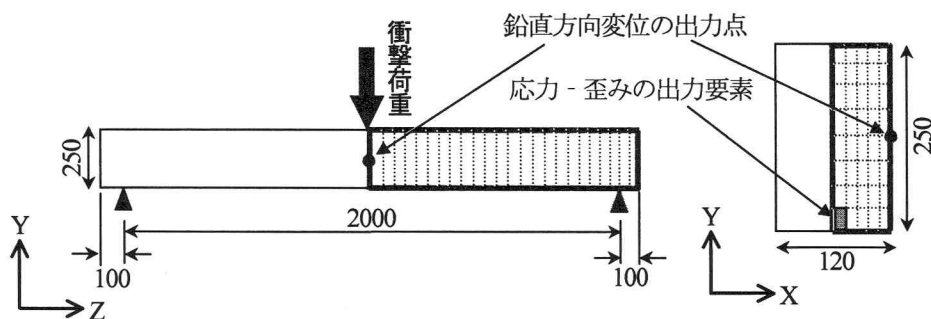


図-5 鋼製単純ばりモデル (単位: mm)

表-1 材料特性値	
降伏強度(Mpa)	343
弾性係数(Gpa)	206
ポアソン比	0.30
密度(g/cm ³)	8.00

ただし、この式(6), (7)は $\kappa_0 < \varepsilon_{eq} < \kappa_y$ の時に成り立つものである。

後述の図-23に示すように case 1, case 2 それぞれを用いて衝撃応答解析を行ったところ、損傷進展式が変位応答に及ぼす影響は非常に小さなものであったため、鋼製単純ばりに対する荷重ベクトル入力解析、およびRC単純ばりに対する重錘衝突解析には case 2 の損傷進展式を用いて解析を行い、その結果を比較・検討した。

2.3 弾塑性構成式への損傷変数の導入

衝撃荷重を受けた部材に発生する損傷の影響を、有効応力の等方的な低減と仮定した場合、通常の弾性構成式において以下のように評価することができる。

$$\sigma_{ij} = (1 - D)E_{ijkl}^e \varepsilon_{kl} \quad (8)$$

ここに、 σ_{ij} は応力テンソル、 ε_{kl} は歪みテンソル、 E_{ijkl}^e は4階の弾性係数テンソルを表す。

式(8)は、Hookeの法則によって表せる弾性体の応力 - 歪み関係式に $(1-D)$ を乗じたもので、ポアソン効果を維持したまま全ての方向の剛性を同じ割合で低減することになる。これは、材料内部の損傷の進展に等方性を仮定した簡易な評価方法であり、著者らは過去に式(8)の構成式を用いた弾塑性解析を行った¹²⁾。しかし、材料の弾塑性挙動を適切に再現するためには、損傷の進展方向が材料内部の応力状態に依存するモデルを考慮する必要があると考えられる。

そこで、本研究では、式(6), (7)で定義した損傷変数 D を弾塑性体の応力 - 歪み関係を規定する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。

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

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、 σ'_{ij} は偏差応力テンソル、 $\bar{\sigma}$ はvon Misesの降伏条件に基づく相当応力、 E_{ijkl}^e は弾性係数テンソル、 G はせん断弾性係数を表す。本研究では、式(9)を鉄筋およびコンクリートにも使用している。これは、本研究で対象とするような低速度の衝突現象におけるコンクリートの弾塑性挙動には静水圧の影響が顕著に生じないことを仮定したことになるが、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

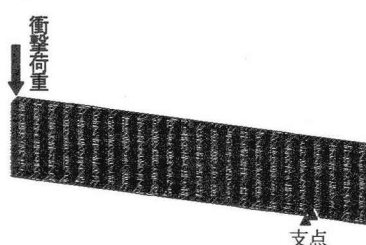


図-6 1/4 解析モデル

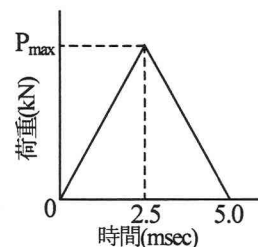


図-7 入力荷重波形

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。

$$H' = (1 - D)E \quad (10)$$

ここで、 $D=1$ の場合、 $H'=0$ となるため、本研究では D が1に近づいた際には $D=0.99$ というような損傷変数の上限値を設定し解析を行った。

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), (7)により損傷度を求め、式(9)および式(10)に適用することで損傷に伴う剛性の低下を評価した。

2.4 衝撃応答解析

(1) 時間積分

本研究では、対象とするはり部材を3次元有限要素モデルに離散化し、式(11)に示す運動方程式（減衰は考慮しない）を、中央差分法による陽解法を用いた直接時間積分によって解いた。

$$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = P(t) \quad (11)$$

ここに、 M は集中質量マトリクス、 K は剛性マトリクス、 $P(t)$ は荷重ベクトル、 $\ddot{u}(t) \cdot u(t)$ はそれぞれ加速度および変位ベクトルを表す。

陰解法は無条件安定であるのに対し、陽解法は時間刻みに制約を有することから、本解析では、その制約条件として式(12)に示すCourant条件を用いた。

$$\Delta t \leq \Delta T_{\min} = \frac{\Delta l_{\min}}{c} \quad (12)$$

ここに、 $\Delta l_{\min}$ は解析モデルの最小要素長さ、 c は式(13)で表される弾性係数 E 、密度 ρ の棒中を伝播する応力波の速度である。

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (13)$$

陽解法による本解析プログラムの解の精度を確かめる

目的で、衝撃荷重が作用する単純ばりの弾性応答の検証を行った。また、比較対象コードとしては時間積分が陰解法により定式化されている構造解析汎用コードANSYSを用いた。解析対象は図-5に示すようなはり下端を拘束した張出部を有する鋼製単純ばりとし、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。1/4モデルは、全て3次元ソリッド要素でモデル化し、要素分割は図-6に示す通りで、X方向に5、Y方向に8、Z方向に24分割の1350節点960要素とした。ANSYS解析も同様のモデル化を行った。表-1には、鋼材の材料特性値を示す。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、図-7に示す三角形の衝撃荷重波形（2.5msec時に $P_{max}=400kN$ ）を設定した。応答値として、図-5に示すはり側面のはり高中心位置における鉛直変位（Y方向）を出力した。本手法における時間刻みは式(12)から算定された ΔT_{min} よりも小さな $2.0\mu sec$ を用いた。

図-8は陽解法による本解析プログラムによる解析結果と陰解法によるANSYS解析結果とを比較したものである。時刻約4msecで変位が最大となった後、最大変位と同程度の振幅で自由振動を繰り返すという応答は、両解析結果とも一致している。表-2には、はりの1次固有振動周期をはり理論から求めた値と比較したものを示す。本解析およびANSYS解析の1次固有振動周期は、図-8から得られる定常状態（時刻5msec以降）の振動周期から算定した。両解析値とも理論値との誤差が5%以下という結果から、はりの振動を良好に表現していることが確認できた。

以上の結果から、陽解法を用いた本解析プログラムで、陰解法による汎用コードと同程度の精度で弾性応答を再現できることが認められた。

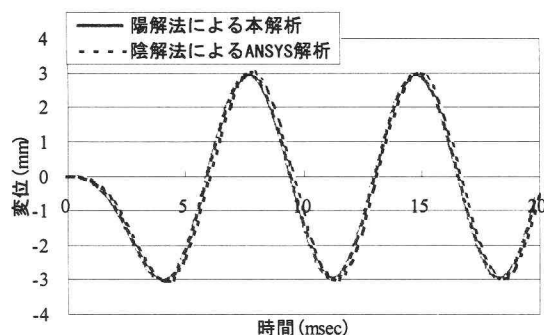


図-8 弾性解析の変位応答比較

表-2 1次固有振動周期の比較

	1次固有周期	はり理論との相違(%)
本解析	7.10	3.8
ANSYS解析	7.15	4.5
はり理論値	6.84	—

$$* \text{はり理論との相違} = \frac{\text{解析値} - \text{はり理論値}}{\text{はり理論値}} \times 100$$

(2) 動的接触モデル

衝撃解析における衝撃荷重の設定は、節点に直接的に衝

撃荷重ベクトルを与える方法（衝撃荷重入力解析）と衝突物の挙動を同時に計算しながら動的接触問題として解く方法（衝突解析）の2通りがある。本研究では、まず、衝撃解析への損傷力学の適用性を確認するために衝撃荷重入力解析を行い、その後にRC単純ばりを対象に重錘衝突解析を行った。衝突解析においては図-9のように接触部のモデル化を行い、重錘先端半球中心点 (x_0, y_0, z_0) と接触判定点 (x_b, y_b, z_b) との距離 R_y が重錘先端半球半径 R よりも小さな場合、つまり、式(14)の条件を満たすときに接触状態にあると判断し、式(15)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。

$$R_y = \sqrt{(x_0 - x_b)^2 + (y_0 - y_b)^2 + (z_0 - z_b)^2} < R \quad (14)$$

$$f = \frac{E_b A}{R} (R - R_y) \quad (15)$$

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。ただし、本解析では接触部の動的摩擦等の影響は考慮せず、衝撃荷重 f の鉛直成分のみを式(11)の荷重ベクトルとしてRCはりの節点に与えた。また、重錘側の挙動に関しては、式(16)により加速度を求めた後に、RCはりと同様に速度、変位の更新を行った。

$$a = g - \frac{f \cos \theta}{m_b} \quad (16)$$

ここに、 a は衝突物加速度（鉛直下向きを正）、 g は重力加速度、 m_b は重錘質量、 θ は鉛直軸と荷重ベクトル f がなす角度を表す。

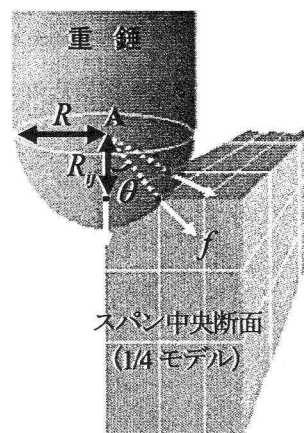


図-9 重錘衝突のモデル化

3. 数値計算結果および考察

3.1 均質材料における損傷度解析

図-5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、弾性挙動とはいえ、精度良くはりの動的挙動を把握できることが確認されたことから、計算量の増加を避けるために2.4(1)と同様に図-6に示す1/4モデルを用いた。表-1に鋼材の

表-3 損傷進展式に用いる材料定数

損傷発生相当歪み κ_0	降伏相当歪み κ_y
1.30×10^{-3}	2.00×10^{-3}

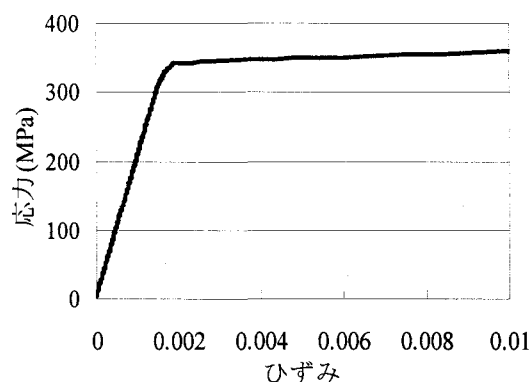


図-10 鋼材の単軸応力-歪み関係

材料特性値を示す。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-7 の波形の $P_{max}=4000\text{kN}$ を仮定した。応答値は、図-5 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。また、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 の値を表-3 に示す。これらの材料定数は、鉄筋の単軸引張試験をモデル化した静的解析を行い、図-10 に示すような単軸応力-歪み曲線を描くように逆解析的に決定した。単軸試験のシミュレーション解析については、3.2 で用いるコンクリート要素についても、単軸圧縮試験をモデル化し、同様の方法を行った。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-11 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。

図-12 は、スパン中央の変位応答を、同じ衝撃荷重を与えたときの弾性解析結果とともに示したものである。この図より、損傷を考慮した解析の最大応答変位が、弾性解析結果の 3 倍近くに達し、最大変位に達するまでの時間が 1.5 倍ほど遅れていることがわかる。また、最大変位に達した 7.0msec 以降の変位応答は、水平面まで変位が回復せず、約 80mm の残留変位が生じていることが確認できた。

図-13 と図-14 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-13 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-14 の支点

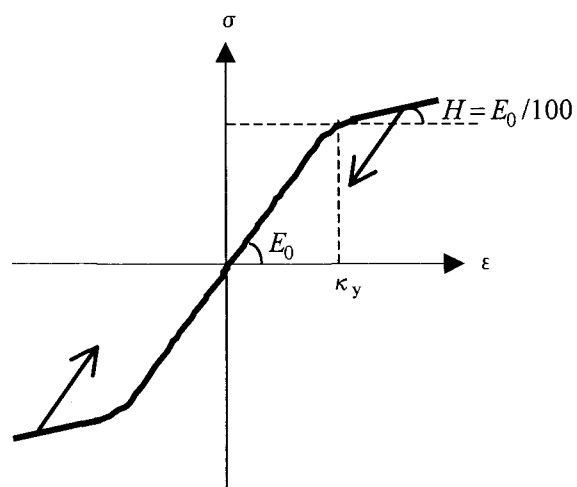


図-11 鋼材の応力-歪み特性

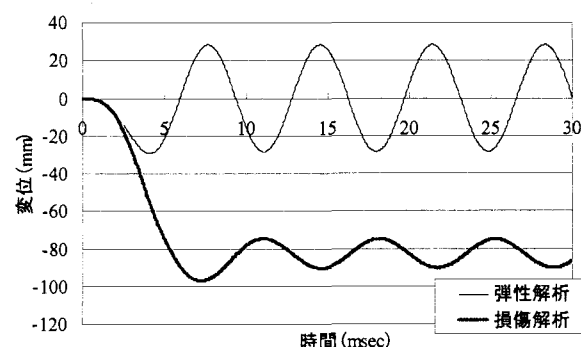


図-12 鋼製単純ばりの変位応答

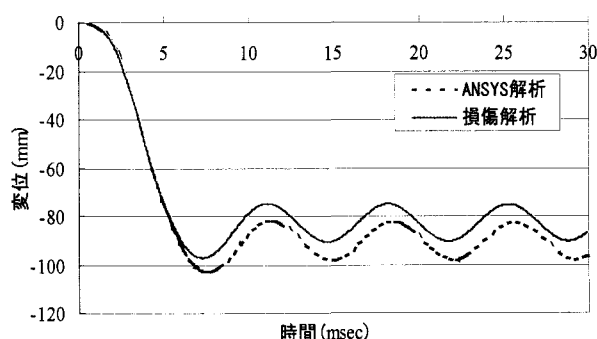


図-13 鉛直変位応答比較

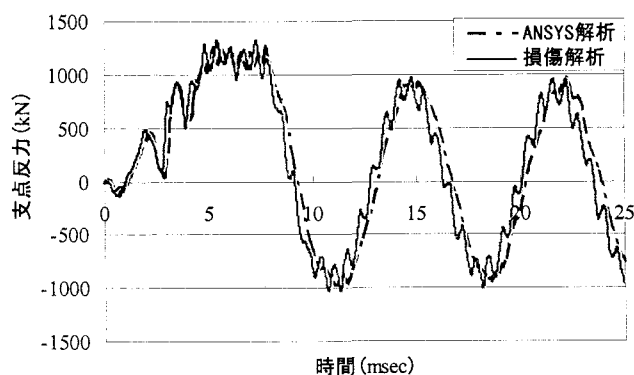


図-14 支点反力応答比較

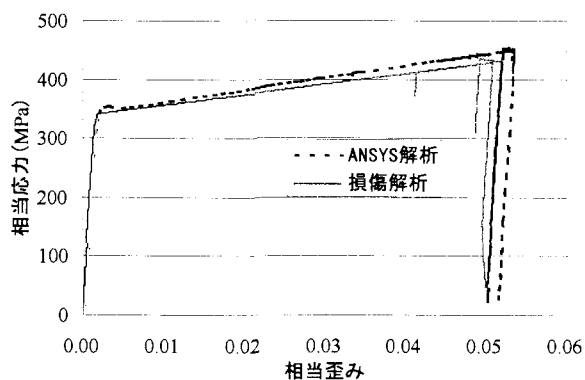
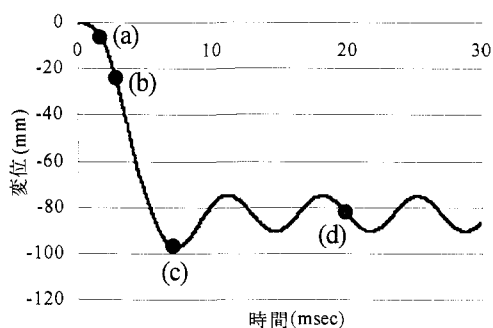


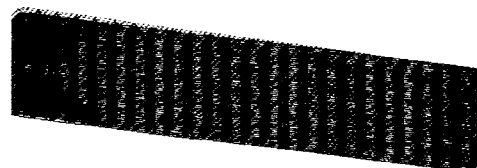
図-15 相当応力 - 相当歪み関係比較



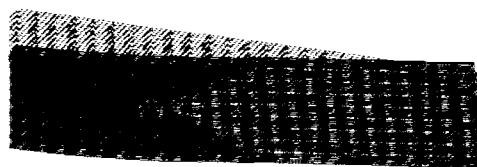
衝撃荷重



(a) 時刻 1.6msec



(b) 時刻 2.5msec



(c) 時刻 7.0msec



(d) 時刻 20.0msec

- : $D=0.90$ 以上 ● : $D=0.70 \sim 0.90$
- : $D=0.50 \sim 0.70$ ● : $D=0.10 \sim 0.50$

図-16 鋼製はりの損傷度分布

反力応答の比較も、変位応答と同様に両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-15 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-16 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、 $D = 0.10 \sim 0.50$ の場合は水色で表現している。損傷が発生し始めた時刻 1.6msec (図-16(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。時刻 2.5msec (図-16(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いることがわかる。その後、最大変位の発生する時刻 7.0msec (図-16(c)) においても、損傷分布の形を変えることなく、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-16(d)) 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。図-17 に示す解析対象を図-18 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。なお、使用した要素は鉄筋、コンクリートともに 8 節ソリッド要素である。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、引張強度 581MPa、弾性係数 206GPa、ポアソン比 0.3 を用いた。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-9 で示すような簡易なモデルを採用し、また、2.4 で述べた手法で接触部を取り扱った。本解析では、鋼材とコンクリートどちらに対しても von Mises の降伏条件式により定式化された式(9)の弾塑性構成式を用いた。ただし、コンクリートに対しては式(2)で $k=10$ とおくことによって、圧縮域と引張域の区別を考慮して得られた損傷変数 D の値を硬化係数 H' に用いている。鉄筋

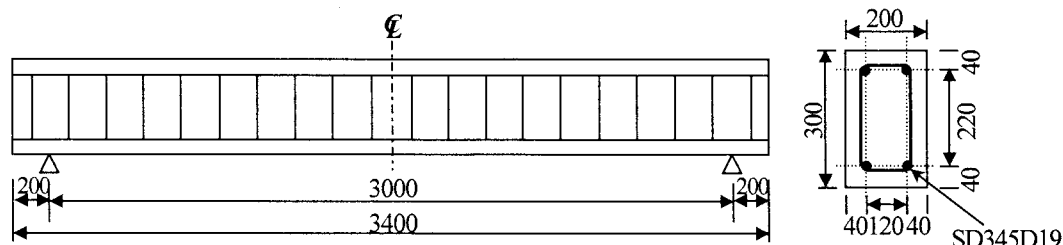


図-17 解析対象 (RC 単純はり)

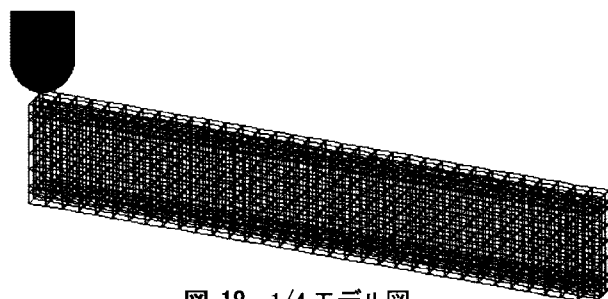


図-18 1/4 モデル図

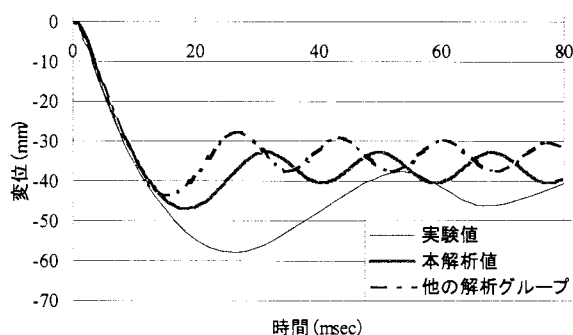


図-20 鉛直変位応答の比較

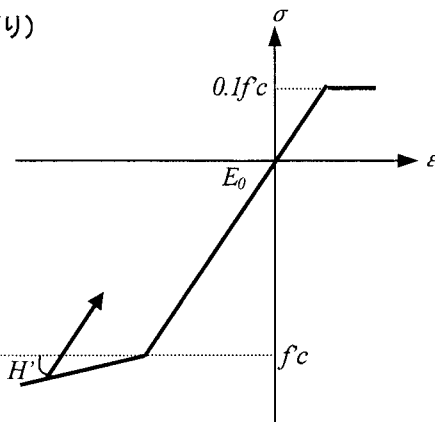


図-19 コンクリートの構成則モデル

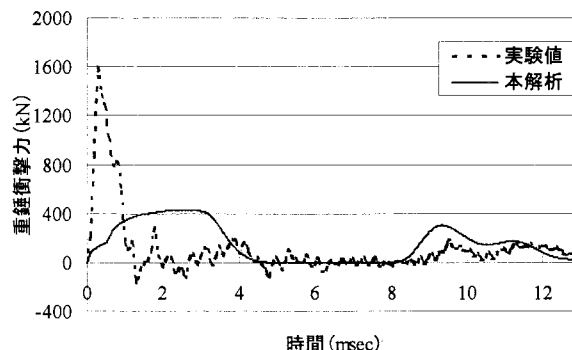
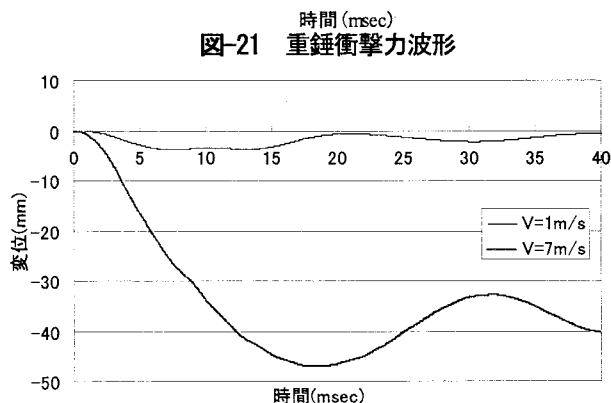
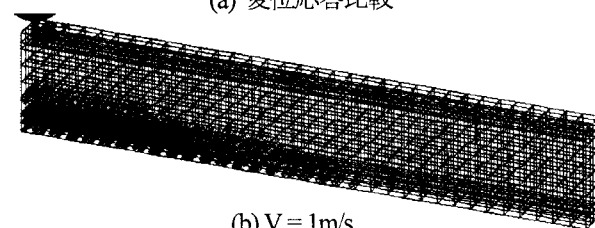


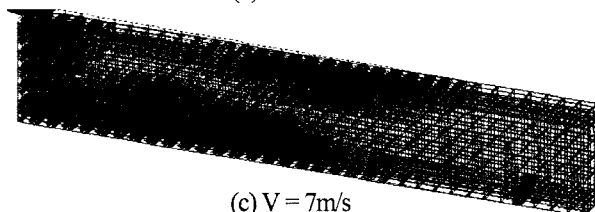
図-21 重錘衝撃力波形



(a) 変位応答比較



(b) $V = 1\text{m/s}$



(c) $V = 7\text{m/s}$

図-22 衝突速度の違いによる損傷度分布

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-11 に示すようなひずみ硬化係数を 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、図-19 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、ひずみ硬化係数 1/100 で硬化を示す構成則を仮定し、引張側においても圧縮側と同様な挙動を示すことを仮定している。また、コンクリートを適切にモデル化するためには、引張・圧縮域で降伏曲面が異なるという性質を考慮するために、損傷発生後のコンクリートに関して、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、それぞれに異なる降伏面を考え、コンクリートの応力履歴における負荷・除荷の判定を行った。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。

解析結果として、図-20 に載荷点鉛直変位応答波形を示す。本解析結果は、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、最大変位以降の振動特性において塑性化が進むこ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るといった同様の弾塑性挙動を示したが、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こと

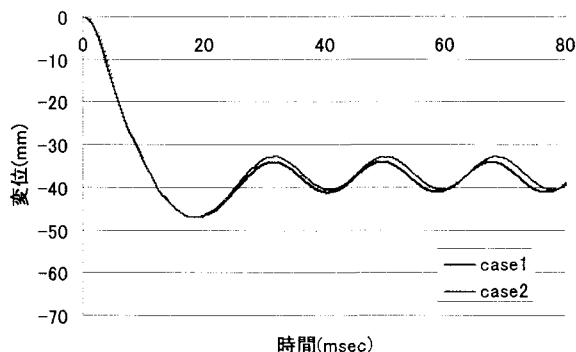


図-23 損傷進展式が弾塑性応答に及ぼす影響

が確認できた。次に、図-21には重錘衝撃力波形応答の13msecまでの比較を示す。実験で用いられた重錘の先端形状はほぼ扁平であるのに対し、本解析では曲率半径9cmで重錘先端をモデル化したために、重錘とRCはりとの接触・分離現象を忠実に表現しておらず、実験値における衝撃初期の急激な立ち上がりを確認できなかった。また、重錘衝突速度を $V = 1\text{m/s}$ と $V = 7\text{m/s}$ の2パターンで解析を行い、その変位応答比較を図-22(a)に示し、4msec時の損傷分布状況をそれぞれ図-22(b), (c)に示す。ここで、3.1と同様に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。図-22(b), (c)を比較・検討すると、衝突速度 $V = 1\text{m/s}$ の場合、スパン中央のはり下面から損傷領域が拡大していくといった典型的な曲げ破壊による分布状況を確認できた。 $V = 7\text{m/s}$ の場合もスパン中央のはり下面から損傷領域が拡大していく曲げ破壊による分布状況を確認できたが、それに加え、衝突部近傍の局所的な圧縮破壊と、支点部近傍の損傷が確認できた。なお、損傷度に加え、応力の各不変量を用いれば、より詳細な破壊パターンの識別が可能であると考えられる。

また、図-23には2.2で述べたように損傷進展式をcase 1とcase 2の二通りを用いて解析を行った際の弾塑性変位応答に対する損傷進展式の影響を比較した図を示すが、二通りの解析結果はほぼ等しい応答を示した。このことから、損傷進展式が損傷度解析における弾塑性変位応答に及ぼす影響はかなり小さいことが確認できた。

4. 結論

本研究では、損傷力学の概念を用いた3次元衝撃応答解析プログラムを作成し、衝突問題への適用を試みた。本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

- 1) 本手法により均質材料に対して衝撃荷重が作用した場合の弾塑性挙動を良好に再現できたことから、衝撃解析への損傷力学の適用性と自作の本解析プログラムの有用性が確認できた。
- 2) 鋼製単純ばりの弾塑性衝撃解析結果より、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ることを確認した。
- 3) RC単純ばりを対象とした重錘衝突解析結果から、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、支点治具を忠実にモデル化していないことや、コンクリートの引張破壊後に応力を解放せず負担させていることに起因する^{5),13)}と考えられる。

- 4) 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、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。しかし、引張・圧縮で降伏曲面が異なる材料に関しては、静水圧応力の正負により引張域と圧縮域を判別する手法では損傷発生後の材料の応力履歴を適切に評価できない可能性があり、除荷・再負荷の判定法などに改良を検討する必要があると考えられる。

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) 岸徳光, 三上浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越するRC梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集 No.619/I-47, pp.215-233, 1999.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 土木学会: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 構造工学シリーズ 15
- 6) 土木学会: 土木工学分野における衝撃実験・解析法の標準化に向けての一つの試み, 第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.275-283, 2002.
- 7) 村上澄男: 損傷力学, 「材料」第31巻, 第340号, pp.1-13, 1982.
- 8) Lemaitre, J.: A Course On Damage Mechanics, Springer Verlag, 1996.
- 9) Voyiadjis, G.Z., Park, T.: Anisotropic damage-effect tensors for the symmetrization of the effective stress tensor, Journal of Applied Mechanics.64, pp.106-110, 1997.
- 10) Ignacio Carol, Egidio Rizzi, Kasper William: On the formulation of anisotropic elastic degradation, International Journal of Solids and Structure 38, pp.491-518, 2001.
- 11) 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, pp.247-261, 2000.
- 12) 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.
- 13) 福田隆介, 石田雅利, 森川博司: 個別要素法によるRC梁の重錘落下衝撃解析, 第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.231-234, 2002.

(2004年9月17日受付)