

## (5) 損傷モデルを用いたRCはりの衝撃応答解析に関する研究

## A STUDY ON IMPACT RESPONSE ANALYSIS OF RC BEAM USING DAMAGE MODEL

玉井宏樹\*, 園田佳巨\*\*  
Hiroki Tamai, Yoshimi Sonoda

\*修士 (工学), 九州大学大学院 博士課程, 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 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: 損傷モデル, RC はり, 衝撃応答解析  
(damage model, RC beam, impact response analysis)

## 1. 緒言

近年, 土木分野の構造設計法は性能照査型に移行しつつあり, 落石防護工等の衝撃的な荷重の作用が想定される構造物についても, 性能を明確にし, 保証することが重要になってきている. そのため, 衝撃的な荷重が作用する構造物の挙動を, できるだけ簡易かつ正確に評価できる解析手法の確立を目的として, 基本的な構造部材である RC はりを対象とした解析手法の標準化に向けた検討がなされてきた<sup>1),2),3)</sup>. しかし, 構造物の弾塑性衝撃応答を正確に予測することは, 現時点においても容易ではなく, 要求性能に対する照査に適用しうる高精度な衝撃応答解析手法について模索している段階にあると言える.

一方, 経年劣化した既設 RC 構造物の数が急激に増加している我が国の現状を考えると, 新設構造物の耐衝撃性能を定量的に評価するだけでなく, 様々な要因を受けて劣化した構造物の状態を適切に再現し, その耐衝撃性能を定量的に評価することも必要であると考えられる. しかし, 力学的要因や環境的要因などによる損傷を統一的に評価することは困難であり, 力学的要因のみに着目しても繰り返し衝突などの塑性変形履歴を含めた構造材料の損傷度を定量的に評価することは容易でない.

そこで著者らは, 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, 劣化・損傷した構造物の応答を解く上で有用と考えられる連続体損傷力学を用いた3次元衝撃応答解析プログラムを作成し, RC はりの衝撃応答解析を行い, 損傷力学の適用性に関する考察を行ってきた. その結果, これまでに用いた方法<sup>4)</sup>では RC はりを対象とした衝撃応答解析に関して, 必ずしも精度良い解を得ることができず, いくつかの課題を残していた.

本研究では, これらの課題を克服し, 簡易で精度が高い汎用的な衝撃解析手法を確立するために, 汎用有限要素

素解析ソフト MARC に著者らが提案した損傷力学モデルをユーザーサブルーチンとして導入し, その有用性を検証した.

その後, 引張破壊による要素の無効化機能によりコンクリート材料の引張破壊にともなう応力解放を表現することで, RC はりを対象とした衝撃応答解析の精度を向上させ, 既報告で残っていた課題を解消できることを確認した. これらの改良により, RC 構造物の耐衝撃挙動を簡易かつ精度良く評価できる解析の基礎を確立したと考えられる.

## 2. 解析手法の概要

## 2.1 損傷モデルを用いた弾塑性衝撃応答解析手法

## (1) 損傷力学の概要および損傷進展式の定式化

連続体損傷力学は, 材料の強度や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するものである. 損傷度を表す物理量として図-1および式(1)に示すような部材断面内の抵抗力を失った断面の割合を表す損傷変数  $D$  を用いる.

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

ここに,  $A_D$  は微視空隙・欠陥等により抵抗力を失った断面積であり,  $A_0$  は全断面積を表す.

なお, 式(1)は力学的に均質な場とみなせるだけの十分な拮がりを持つ領域 (RVE) で適用しなければならない. 損傷変数の定義には, 高階のテンソル量として取り扱う方法<sup>5),7)</sup>も提案されているが, 本研究では簡易なスカラー量として定義した.

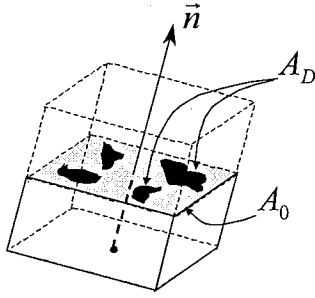


図-1 損傷力学の概念 (有効断面の減少)<sup>9)</sup>

既往の損傷力学理論では、応力、ひずみもしくはひずみエネルギーのいずれかを無損傷な状態と等価とみなして定式化が行われるが、本研究では式(2)の形式で表される有効応力を適用し、損傷を受けた材料のひずみが無損傷時の状態と等価であると仮定したひずみ等価の仮定を用いることにした。

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D} \quad (2)$$

ここに、 $\sigma$ は公称応力で、 $\tilde{\sigma}$ は損傷を考慮した有効応力を表す。

外的要因による構造部材の損傷や破壊を定量的に評価するには、実現象に適した損傷の進展式を定義する必要がある。損傷進展式には、個々の力学現象に応じた様々なものが提案されているが、塑性変形時の損傷度評価には、応力の増加と共に部材内に蓄積される塑性ひずみ増分を積分して求めた累積塑性ひずみの関数式で損傷進展を表す方法が一般的である。

損傷力学を用いた弾塑性解析も数多く行われており、鋼部材に関する代表的な例としてLemaitreらが提案したミーゼスの降伏条件に基づく損傷と塑性の連成を考慮した方法<sup>9)</sup>が最も良く知られている。一方、コンクリート部材に関しては、Peerlingsらの主ひずみ空間において降伏曲面を定義し、相当ひずみによりスカラー量として損傷度を評価する手法<sup>9)</sup>が見られる。本手法は、損傷変数の取り扱いが容易であることから、時間積分に膨大な計算量を必要とする衝撃応答解析に適した手法であると判断し、本研究ではこの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 $\bar{\varepsilon}$ を以下の式(3)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(4)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。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1\right)^2 + \frac{6k}{(1+\nu)^2} 2J_2} \quad (3)$$

ここに、 $I_1$ はひずみの1次不変量、 $J_2$ は偏差ひずみの2次不変量、 $k$ は圧縮強度と引張強度の比、 $\nu$ はポアソン比を表す。

$$f(\bar{\varepsilon}, \kappa) = \bar{\varepsilon} - \kappa = 0 \quad (4)$$

ここに、 $\kappa$ は損傷条件パラメータを表す。

式(3)および式(4)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 (損傷面) が定義される。式(3)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、鋼材に

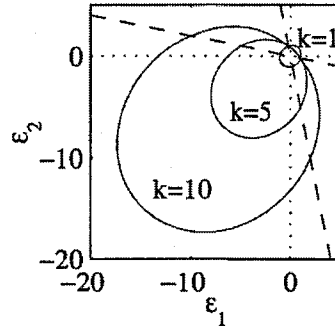


図-2 主ひずみ空間における損傷面

関しても同様の評価を行うことが可能である。

Peerlingsらの研究では、静荷重に対する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、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する必要がある。そこで、本研究では以下の手順で新たに増分型の応力 - 歪み関係に適合した損傷進展式を誘導した。まず、塑性変形時の損傷変数 $D_p$ 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換算の構成式で表す。

$$d\sigma = E(1-D_p)d\varepsilon \quad (5)$$

式(5)を変形すると式(6)のようになる。

$$D_p = 1 - \frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (6)$$

式(6)を見ればわかるように、適切な応力 - ひずみ関係式を想定すれば、損傷変数 $D_p$ をひずみの関数式で表せる。一般に、鋼材およびコンクリートは非線形材料であることから、応力 - ひずみ関係が非線形曲線で表されるモデル化を行った。損傷発生時のひずみ $\kappa_0$  (初期剛性が低下し始める時点のひずみ) と降伏相当ひずみ $\kappa_y$ を基準に、式(3)で表される各要素の相当ひずみ $\bar{\varepsilon}$ が $\kappa_0$ になった時点で $D_p = 0$ から漸増し、 $\kappa_y$ に達した時に $D_p = D_c$  (最大損傷度) 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(7)に示す相当歪み $\bar{\varepsilon}$ の指数関数式を適用した。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。

$\bar{\varepsilon} < \kappa_0$  のとき、

$$D_p = 0 \quad (7a)$$

$\kappa_0 \leq \bar{\varepsilon} < \kappa_y$  のとき、

$$D_p = \left( \frac{\bar{\varepsilon}}{\kappa_y} \right) \left( e^{\frac{\ln 2 (\bar{\varepsilon} - \kappa_0)}{\kappa_y - \kappa_0}} - 1 \right) \quad (7b)$$

$\bar{\varepsilon} \geq \kappa_y$  のとき、

$$D_p = D_c \quad (7c)$$

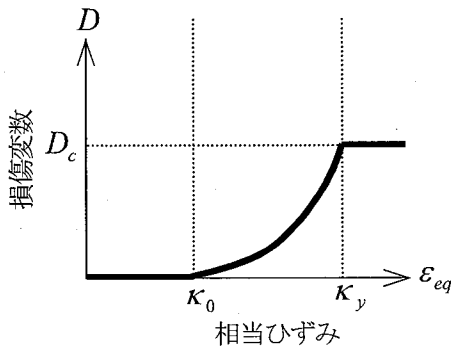


図-3 損傷進展の条件

本解析で提案した損傷進展式には、損傷パラメータと呼ばれる材料定数として $\kappa_0, \kappa_y, D_c$ の3種類が存在し、解析を行う際には適切に設定する必要がある。これら損傷パラメータの理論的な決定法は、解析精度を向上させるための今後の研究課題の一つと考えられるが、本研究では以下のような手順で損傷パラメータを決定した。

まず、 $\kappa_0, \kappa_y$ に関しては、鉄筋の単軸引張試験やコンクリートの1軸圧縮試験をモデル化した静的解析を行い、実験で得られた応力-ひずみ曲線を再現できるようにカーブフィッティングを行うことで決定した。次に、 $D_c (\leq 1.0)$ に関しては、塑性進展時の剛性(ひずみ硬化係数)と損傷変数の関係を考慮し、初期剛性の1/100まで剛性が低下することを想定した $D_c = 0.99$ という上限値を設定した。

## (2) 塑性変形進展時の構成方程式

衝撃荷重を受けた部材に発生する損傷の影響を、式(2)で定義できる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。

$$\sigma = (1 - D_p) E \varepsilon \quad (8)$$

式(8)は、Hookeの法則で表せる弾性体の応力-歪み関係式に $1 - D_p$ を乗じたもので、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はあるが、材料の弾塑性挙動を適切にモデル化するためには、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える必要がある。

そこで、本研究では、式(6), (7)で定義した損傷変数 $D_p$ を式(9)で表される弾塑性体の応力-ひずみ関係を規定する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、 $d\sigma_{ij}$ は応力増分テンソル、 $d\varepsilon_{kl}$ は歪み増分テンソル、 $\sigma'_{ij}$ は偏差応力テンソル、 $\bar{\sigma}$ は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。

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

以上のことを整理すると、各要素積分点において、式(3)で求めた相当歪みが式(4)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)に適用することで塑性変形時の剛性の低下を評価した。

## 2.2 引張破壊後のコンクリート要素の無効化

衝撃荷重を受けるRCはり全体の応答は、コンクリート材料が最大応力に達した以後に示す挙動の取り扱いに非常に影響を受けると考えられる。そこで、本研究では抵抗力を失った要素に無効化機能を用いることにより、コンクリート要素の引張破壊をモデル化した。無効化機能とは、ある条件に達した要素の機能を停止させるもので、具体的には剛性マトリックスを作成する段階で、該当要素が除外されるように設定され、同時に要素内に蓄積されたひずみエネルギーも逸散させるもので、MARCユーザーサブルーチンの一つである。本研究では、式(11)に示すように、8積分点の損傷変数の平均値 $D_{ave}$ がある閾値(ここでは、0.99と設定した)以上で、かつ、最大主応力の平均値 $\sigma_{ave}$ が3.0MPaを超える要素を無効化するように設定した。

$$D_{ave} \geq 0.99 \quad \wedge \quad \sigma_{ave} \geq 3.0(MPa) \quad (11)$$

ここに、 $\wedge$ は論理積を表す数学記号である。

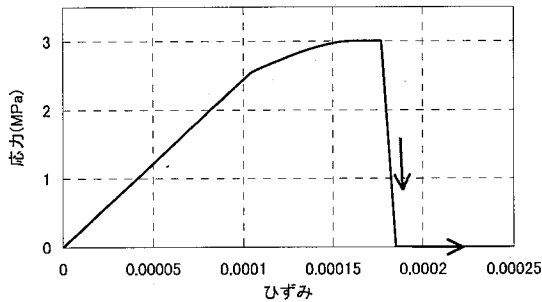


図-4 コンクリート要素の引張域のモデル化

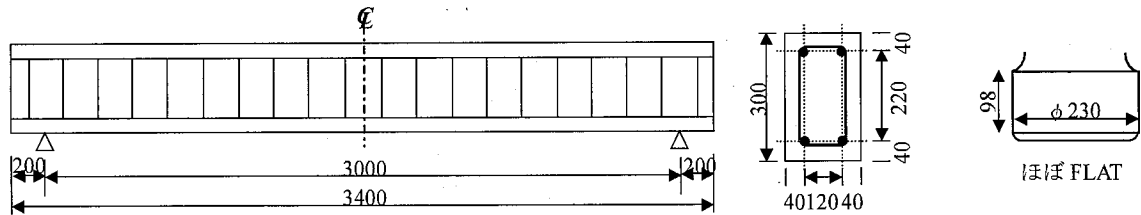


図-5 解析対象および重錘先端形状

この機能を単純に用いると、引張破壊を生じたコンクリート要素の応力解放とともに、ひずみ値もゼロに設定されて過度に脆弱化させる恐れがある。そこで、本研究では、図-4に示すように、引張破壊時に応力のみが解放されるように修正して適用し、コンクリート要素の引張破壊のモデル化を行うことにした。

### 3. 重錘落下衝突を受けるRCはりの衝撃応答解析

2章で述べた手法を用いて、鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動に関するラウンドロビンアナリシス<sup>10)</sup>のための重錘落下衝撃実験のシミュレーションを行った。

#### 3.1 解析対象および解析モデル

解析対象は図-5に示すような張出し部を有する複鉄筋矩形RC単純ばりであり、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部に衝突させた。解析モデルを図-6に示すが、計算時間短縮のため、はり軸方向と断面方向の対称性を考慮した節点数9240、要素数7290の1/4モデルで解析を行った。なお、使用した有限要素は主鉄筋およびせん断補強筋に関しては1積分点を有するトラス要素、コンクリートに関しては8積分点を有するアイソパラメトリックソリッド要素である。鉄筋およびコンクリートの材料定数を表-1に示す。また、鉄筋要素には損傷モデルを導入せず、ミーゼスの降伏条件を仮定したバイリニア型の等方硬化則を適用した弾塑性材料としてモデル化した。その際の硬化係数は1/100、除荷時の剛性は初期剛性で弾性復帰するものとした。また、コンクリート要素の材料モデルには、提案した本手法を導入した。引張強度を圧縮強度の1/10で仮定しているため、式(3)においては $k=10$ を用いて相当ひずみの算定を行った。なお、引張破壊後の取り扱い

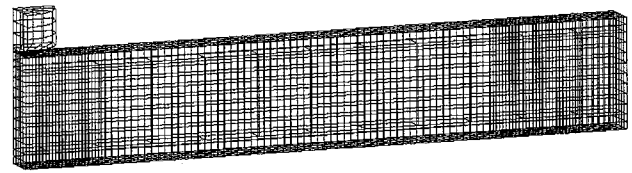


図-6 解析モデル (解析対象の1/4をモデル化)

表-1 鉄筋およびコンクリートの材料定数

	鉄筋	コンクリート	
弾性係数 (GPa)	206	20.6	
ポアソン比	0.30	0.17	
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	8.00	2.45	
降伏強度 (MPa)	343	-	
損傷パラメータ	$K_0$	-	0.00010
	$K_y$	-	0.00016
	$D_c$	-	0.99

は2.2で提案したような応力解放を考慮したモデルを設定した。また、主鉄筋と補強筋、主鉄筋および補強筋とコンクリートの界面における付着特性には完全付着を仮定した。

#### 3.2 解析結果および考察

##### (1) 鉛直方向の変位応答

ここでは、本解析により得られたスパン中央部はり下端の鉛直方向変位応答を実験値<sup>10)</sup>と比較して示す。なお、コンクリート要素のモデル化として、引張破壊後の応力解放を導入していないモデルによる結果<sup>4)</sup>も併記した。図-7より、引張破壊後の応力解放を考慮しないモデルによる変位応答は、実験値と比較すると、最大変位が約1/2と小さく、その発生時間も約10msec小さな値であることがわかる。また、残留変位も約1/2と小さく、最大変位発生時以降の自由振動周期についても実験を良好にシミュレートできているとは言い難いことが認められる。

一方、2.2で述べた引張破壊後の応力解放を導入したモデルによる変位応答は、最大変位が約74mm、その発生時間が約29msec、残留変位が約58mmであった。最大変位が約83mm、その発生時間が約31msec、残留変位が約62mmである実験値と比較すると、その差異は約1割程度と小さく、本解析手法により実験値を良好にシミュレートできていることが確認できる。この結果から、引張破壊後の応力解放を導入することで変位応答の精度が大幅に向上したことは明白で、RC部材の衝撃問題を数値計算で解く際には、コンクリートの引張破壊による応力解放を考慮したモデルを用いるべきであると考えられる。本研究では、引張破壊後のコンクリート要素の応力を直ちにゼロにするようなモデルを採用したが、適切な動的軟化勾配を考慮すれば、より解析精度の向上が期待できるものと考えられる。

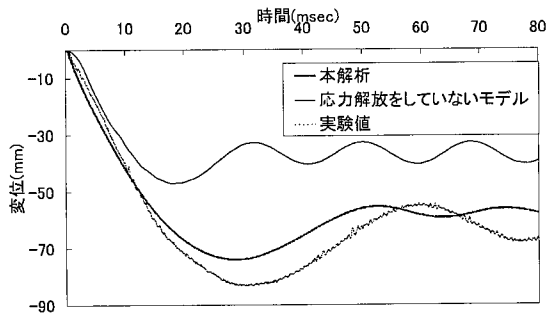


図-7 鉛直方向変位応答の比較図

(2) 片側支点反力応答および重錘衝撃力応答

図-8に片側支点反力応答の比較図を示す。本解析結果は衝突直後4.8msec後に最大支点反力約301kNを示し、衝突直後5.1msec後に最大支点反力約363kNを示した実験値をほぼシミュレートできている。また、波形全体を比較しても同様の形状で、振動周期に関してほぼ一致していることが確認できた。

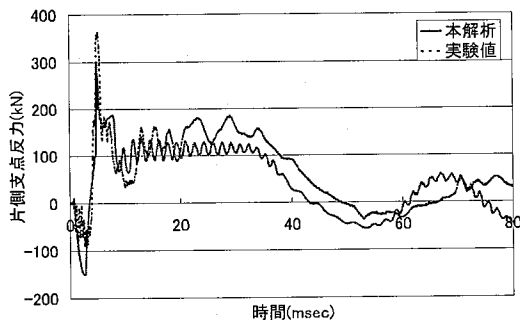


図-8 片側支点反力応答の比較図

次に、図-9に重錘衝撃力波形の比較図を示す。最大重錘衝撃力は、本解析結果が衝突直後0.2msec時に約1659kNを示し、実験値は衝突直後0.3msec時に約1557kNを示したことから、本解析手法により十分に最大衝撃力を評価できることが確認できた。また、衝突初期に急激に立ち上がり、最大値に達した後、零レベルまで急激に減少し、その後継続時間の長い波形へと推移しているといった傾向を、本解析で十分に再現できることが確認できた。

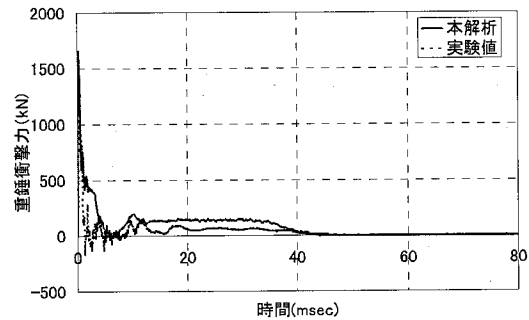


図-9 重錘衝撃力応答の比較図

(3) 損傷度分布

図-10に本解析により得られた最大変位発生時のコンクリート要素の損傷度分布状況を示す。この損傷分布は、塑性変形時の損傷変数の値によって色分けをしており、 $D_p \geq 0.90$ の領域を黒色で表現している。衝突直後に、衝突部であるはり上端より損傷の進展が始まり、その後、引張域であるはり下端への損傷が拡がり、最大変位時には図に示すように、張り出し部を除くほぼ全領域で  $D_p \geq 0.90$ の損傷度を示した。つまり、最大変位発生時までにコンクリート要素のほぼ全領域で塑性化が起こったということである。最大変位発生時以降は、はり残留変位を中心とする自由振動をすることから、損傷分布の拡がりもほとんど見られなかった。



図-10 最大変位発生時の損傷分布

#### 4. 結論

本研究は、簡易で精度の良い汎用的な衝撃応答解析手法を確立するために、損傷力学理論を衝撃問題へ適用したもので、得られた成果を要約すると以下の通りである。

- (1) 塑性化に伴う損傷変数を定義した本手法により、鋼製はり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。このことから、衝撃解析への損傷力学の適用性と本手法の有用性が確認できた。
- (2) RCはりの重錘落下衝突のシミュレーションを行い、要素の無効化によるコンクリートの引張破壊後の応力解放モデルを導入することで、精度の良い結果を得ることが可能となった。引張破壊後の応力解放を導入することによって、変位応答の精度が飛躍的に向上したことは明白であり、RC部材の衝撃問題を数値計算で解く際には、コンクリートの引張破壊による応力解放を考慮したモデルを用いるべきであることが認められた。

#### 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) 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) 園田佳巨, 玉井宏樹: 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, 構造工学論文集 Vol.51A, pp.1299-1310, 2005.
- 5) Lemaitre, J.: A Course On Damage Mechanics, Springer Verlag, 1996.
- 6) 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.
- 7) Ignacio Carol, Egidio Rizzi, Kasper William: On the formulation of anisotropic elastic degradation, International Journal of Solids and Structure 38, pp.491-518, 2001.
- 8) Lemaitre, J.: A continuum damage mechanics model for ductile fracture, Journal of Engineering Materials and Technology. 107, pp.83-89, 1985.
- 9) 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.
- 10) 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