

損傷力学を用いた RC はりの 3 次元弾塑性衝撃応答解析

3-DIMENSIONAL ELASTO-PLASTIC IMPACT RESPONSE ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS BASED ON THE DAMAGE MECHANICS

星野展洋, 園田佳巨, 彦坂熙

Nobuhiro HOSHINO*, Yoshimi SONODA**, Hiroshi HIKOSAKA***

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

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

*** 工博 九州大学教授 工学研究院建設デザイン部門(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

キーワード: 損傷力学, RC はり, 衝撃応答解析

(Damage Mechanics, Reinforced Concrete Beam, Impact Response Analysis)

1. はじめに

落石・土石流などの自然災害や車両の衝突などの人為災害等に起因する衝撃的な外力は、生起確率は小さいが、一度構造物に作用すると甚大な被害を及ぼすことが多く、被害を受けた構造物を供用し続けるためには、衝撃荷重により生じた損傷度や構造物の残存耐力の適切な評価を行うことが不可欠である。

本研究では、材料内部の損傷の発生・進展を評価する一手法である損傷力学を用いた 3 次元弾塑性衝撃応答解析プログラムを作成し、衝撃荷重としてスパン中央に重錘が落下したときの RC はりの弾塑性衝撃挙動のシミュレーションを行い、損傷力学理論の衝撃問題への適用に関する問題点について考察を試みた。

2. 解析手法の概要

2.1 損傷力学の導入

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・成長によるものと考え、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¹⁾。材料の損傷状態は、巨視レベルで定義された損傷変数 D を式(1)を用いて評価される。損傷変数の定義については、数多くのモデルが提案されているが、本研究では最

も簡易な手法として、損傷による影響を考慮した有効応力を式(2)で定義し、通常の弾性構成方程式にこれを用いることで損傷による剛性低下を評価した。

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

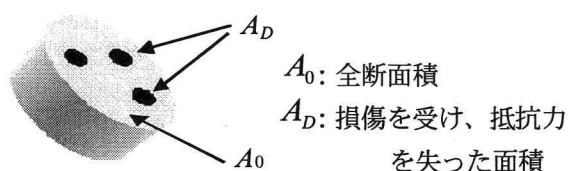


図-1 損傷変数の定義

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

ここに、 σ : 公称応力, $\tilde{\sigma}$: 有効応力

なお、コンクリートの損傷の評価を考えるために、コンクリート部材内部の相当ひずみを、圧縮強度と引張強度の相違を考慮した式(3)により評価し、式(4)で示されるように、相当ひずみが損傷に関する閾値に達するときにコンクリート内部に損傷が発生もしくは進展するものと仮定した。

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

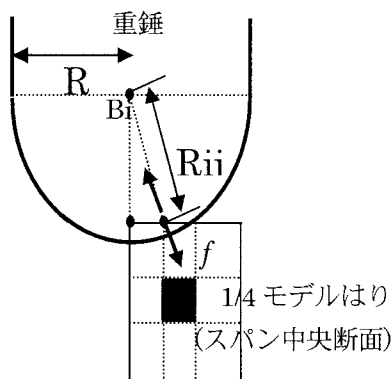


図-2 重錘衝突モデル

$$f(\varepsilon_{eq}, \kappa) = \varepsilon_{eq} - \kappa = 0 \quad (4)$$

ここに、 I_1 ：ひずみの1次不変量、 J_2 ：偏差ひずみの2次不変量、 k ：圧縮強度と引張強度の比、 κ ：損傷発生・進展条件パラメータ（無損傷時：損傷を発生させる相当ひずみ、損傷進展時：過去に生じた最大相当ひずみ）

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、 $k=1$ とおけば式(3)と(4)の組み合わせによりミーゼスの降伏条件に帰着することより、鉄筋要素についても同様の評価を行うことにした。なお、本研究で用いた損傷変数モデル²⁾は、以下の式(5)を用いて求められるスカラー量として定義するものである。

$$D = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa} \left[(1 - \alpha) + \alpha e^{-\beta(\kappa - \kappa_0)} \right] \quad (5)$$

ここに、 α 、 β ：材料定数、 κ_0 ：損傷発生時の相当ひずみ

式(5)で求めた損傷変数を用い、損傷の進展にともなう剛性低下を、以下の構成式(6)により評価した。

$$\sigma_{ij} = (1 - D) E_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (6)$$

σ_{ij} ：応力テンソル、 ε_{kl} ：ひずみテンソル、

E_{ijkl} ：ヤング係数、 D ：損傷変数

2.2 RCはりの動的応答解析

本研究では、複鉄筋RCはりを三次元有限要素モデルに離散化し、式(7)で表される運動方程式(減衰を考慮しない)を、陰解法による直接時間積分で解いた。

$$M \ddot{u}(t) + K u(t) = P(t) \quad (7)$$

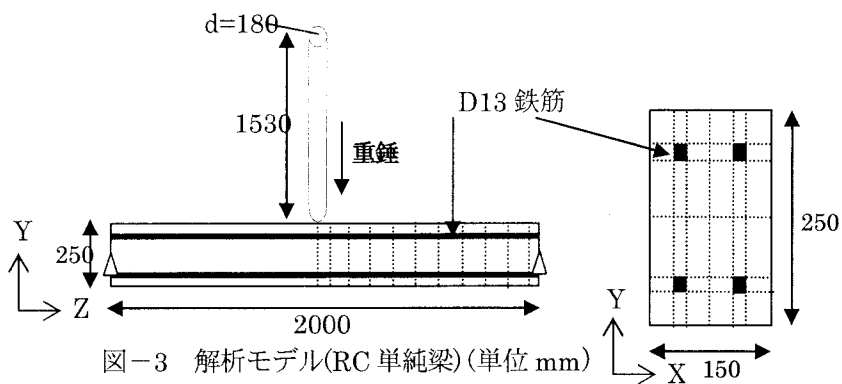


図-3 解析モデル(RC単純梁)(単位 mm)

ここに、 M ：集中質量マトリックス、 K ：剛性マトリックス、 $P(t)$ ：荷重ベクトル、 $\ddot{u}(t) \cdot u(t)$ ：それぞれ、加速度・変位ベクトル

各時間ステップで、積分点毎に得られる相当ひずみを用いて損傷度の評価を式(5)により行い、得られた損傷変数を次の時刻の構成式(6)に用いることで、損傷の進展を考慮した応答解析を行った。

2.3 重錘の衝突現象のモデル化

重錘がRCはり中央部に衝突することで生じる衝撃力の計算は、図-2のように重錘先端の半球部分(半径 R)の中心点 Bi に対して独立した座標をとり、スパン中央部上部の数個の接触判定点(RCはり側の任意の節点)と Bi の距離 R_{ij} が以下の式(8)の条件

$$R_{ij} < R \quad (8)$$

を満たすときに接触状態にあると判断し、式(9)を用いて接触状態にある節点に作用する衝撃力 f を評価した。

$$f = \frac{E_b A}{R} (R - R_{ij}) \quad (9)$$

ここに、 A ：重錘とはりの接触面積、 E_b ：RCはりの弾性係数、

ただし、本解析では動的な摩擦力等の影響は考えず、衝撃荷重 f の鉛直成分のみを式(7)の荷重ベクトルとしてRCはりに与えた。また、重錘側の挙動は、式(10)で加速度を算定した後に、RCはりと同様に、時刻歴に速度・変位の更新を行った。

$$a = g - \frac{f}{m_b} \quad (10)$$

a ：点 Bi の加速度、 g ：重力加速度、 m_b ：重錘質量

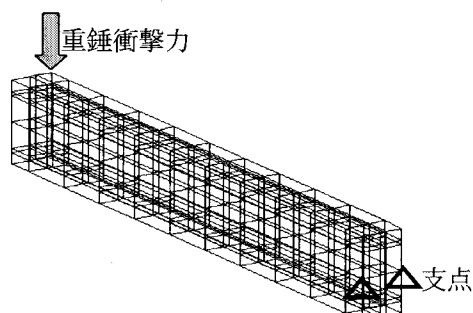


図-4 1/4 解析モデル

表-1 解析に用いた材料定数

	コンクリート	鉄筋
E (kgf/cm ²)	2.1×10^5	2.1×10^6
ν : ポアソン比	0.167	0.3
ρ : 密度 (kg/cm ³)	2.4×10^{-3}	7.85×10^{-3}
α	0.96	0.96
β	30000	3000
κ_0	1.9×10^{-4}	1.1×10^{-3}
f_{cc} : 圧縮強度 (kgf/cm ²)	450	3500
f_{ct} : 引張強度 (kgf/cm ²)	$f_{cc}/10$	(圧縮強度)

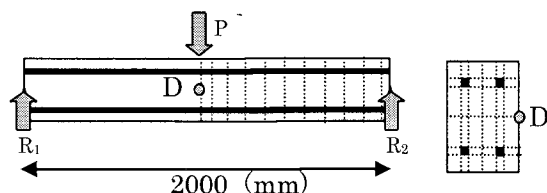


図-6 応答値の出力点

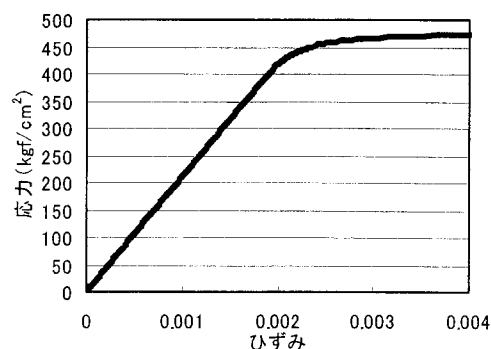
2.4 解析モデル

解析対象は、図-3に示すようなはり高中央部の両端を固定した RC はりを、軸方向と断面方向の対称性を考慮し、図-4に示す 1/4 モデル（要素分割数：X 方向 3、Y 方向 6、Z 方向 11 の 336 節点 198 要素）とした。式(5)に用いるコンクリート、鉄筋それぞれの材料定数は、図-5に示すような応力-ひずみ曲線を仮定（いずれも塑性後の硬化係数を弾性係数の 1/100 とした）し、単軸圧縮・引張試験のテストピースモデルによる同定解析により決定した。解析に用いた材料定数を表-1に示す。重錘は、先端が半径 90mm の半球状の長さ 1440mm の円柱鋼製重錘（質量 300kg）とした。重錘の衝突速度は、 $V = 1$ m/sec、 5 m/sec の 2 種類を想定し、図-6に示すスパン中央部の鉛直方向変位(D)、合支点反力($R_1 + R_2$)および重錘衝撃力(P)について考察を行った。

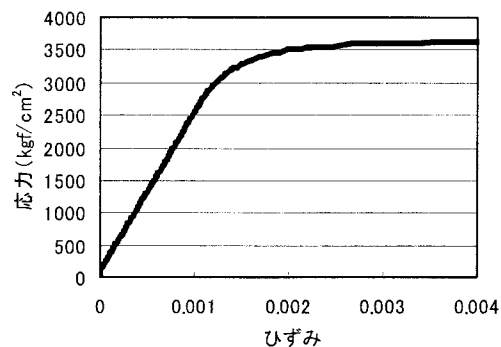
3. 数値計算結果および考察

3.1 弾性衝撃応答解析

図-7は、重錘衝突速度 $V = 1$ m/sec、 5 m/sec で弾



(a) コンクリート



(b) 鉄筋

図-5 応力-ひずみ曲線

性衝撃解析により得られたはりスパン中央部の応答変位について比較したものである。この図より、2 ケースともに時刻 5 ms あたりで最大変位を示し、時刻約 10ms から自由振動に近い挙動を示すことがわかる。また衝突速度が 5 倍になると最大応答変位もほぼ 5 倍になり、最大変位発生時刻や振動の周期についてはほぼ等しい結果が得られている。図-8は、2 ケースの両端支点における反力の時間的変化を示したもので、衝突直後の時刻約 1 ~ 3 ms で負の支点反力が発生し、時刻 5 ms あたりで最大値を示した後、時刻 10ms 前後から自由振動的な挙動を示すことが認められる。図-9は、重錘衝突位置で発生する衝撃力の時間的変化を示したものである。この図より、衝突速度が速くなるにつれて衝撃力の最大値を示す時間も早くなる傾向にあることが分かる。また本計算例では、RC はりの振動によって再び重錘とはりが衝突する二回目の衝撃力の方が最初の衝突による衝撃力を上回る結果が得られているが、この点については衝突のモデル化が簡易なために実現象を正確に表現できていないことによるものと考えられる。

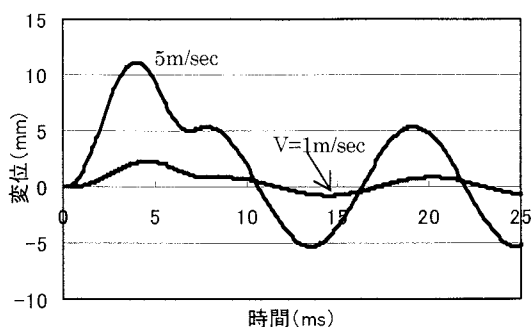


図-7 変位応答の比較

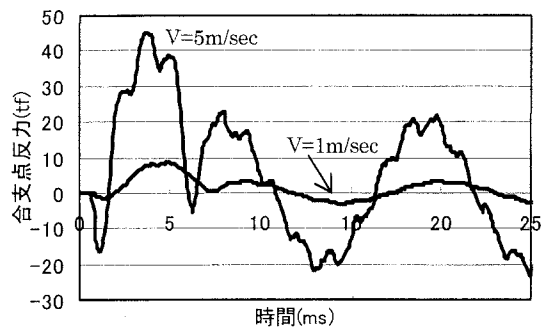


図-8 合支点反力応答の比

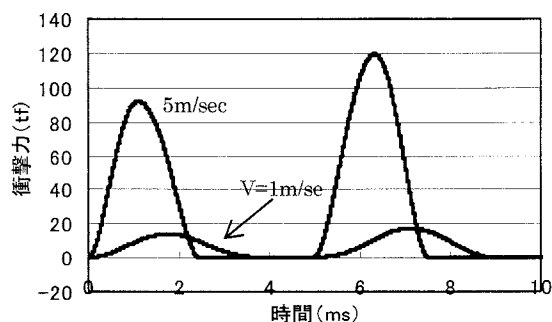


図-9 衝撃力応答の比較

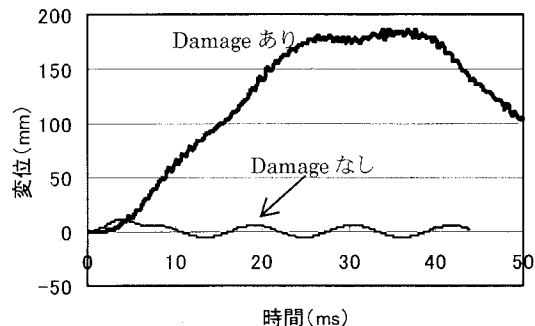


図-10 変位の弾性応答と弾塑性応答の比較
($V=5\text{m/sec}$)

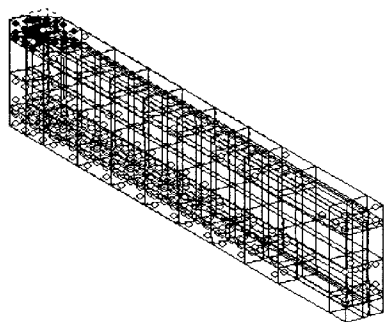


図-11 時刻 3ms の損傷分布($V=5\text{m/sec}$)

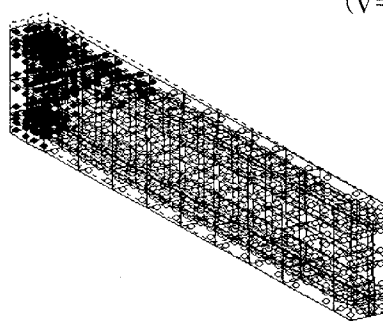


図-12 時刻 5ms の損傷分布($V=5\text{m/sec}$)

3.2 損傷の影響を考慮した衝撃応答解析

図-10は、重錘の衝突速度を $V=5\text{m/sec}$ とした場合の損傷度の影響を考慮した弾塑性解析と弾性解析の応答変位について比較したものである。この図より、重錘衝突により応答初期の段階からRCはり内部で損傷が発生・進展し、弾性応答と比較すると、最大応答変位に大きな相違が生じている。図-11、図-12は、損傷の影響を考慮した解析における時刻3msおよび5msのRCはり内部の損傷進展状況を示したもので、要素内積分点の損傷変数 D が0.99(弾性時の剛性が99%低下)に達した点を黒丸で表示している。この図より、はりの変位応答の増加とともにはり中央部に損傷が進展する状況が明瞭に表われていることがわかる。本研究では、簡易なスカラー変数で損傷度を評価したため、RCはり内部のひび割れの進展・分布については実現象を正確に評価で

きるレベルに達していない。また、衝突位置におけるモデル化に関しても、式(8)と式(9)による簡易な評価を行っているため、はり上端に過度な変形量をとまなう振動が発生するなどの問題を有している。したがって、現時点のモデルで衝撃荷重によるはり全体の損傷の程度を推定することは可能であるが、各種応答量の定量的な信頼性を向上させるために、損傷変数と衝突現象のモデル化については改善を図る必要があることが確認された。

参考文献

- 1) Lemaitre, J.: A Course On Damage Mechanics, Springer Verlag, 1996.
- 2) M.G.D.Geers, R.deBorst, R.H.J.Peerlings : Damage and crack modeling in Single-edge and double-edge notched concrete beams Engineering Fracture Mechanics 65(2000)