

損傷力学を用いた 3 次元衝撃応答解析手法に関する研究

九州大学 学生会員 ○玉井 宏樹 九州大学 正会員 園田 佳巨
九州大学 フェロー会員 彦坂 熙 (株)富士ピー・エス 正会員 星野 展洋

1. 目的

近年、公共構造物の設計法が性能照査型へと移行する中で、衝撃荷重が作用する構造物についても、その耐衝撃性能を正確に評価することが重要になっており、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、また精度良く再現す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、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、単純ば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考察を試みた。

2. 内容

2.1 解析手法の概要

2.1.1 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。また、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、**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評価する。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等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。

2.1.2 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。

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

$$f(\varepsilon_{eq}, \kappa) = \varepsilon_{eq} - \kappa = 0 \quad (2) \quad D = (\varepsilon_{eq} / \kappa_y) \left(e^{\alpha(\varepsilon_{eq} - \kappa_0)} - 1 \right) \quad (3)$$

ここに、 I_1 ：歪みの 1 次不変量、 J_2 ：偏差歪みの 2 次不変量、 k ：圧縮強度と引張強度の比、 ν ：ポアソン比、 κ ：損傷条件パラメータ、 α ：材料定数で $\alpha = \ln 2 / (\kappa_y - \kappa_0)$

式(1)、(2)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。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)に示す指数関数式を適用した。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。

2.1.3 弾塑性構成式への損傷変数の導入

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。本研究では、ミーゼスの降伏条件を仮定して得られる以下の弾塑性構成式中の硬化係数を損傷変数 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。

$$d\sigma_{ij} = \left(E_{ijkl} - \frac{9G^2 \sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{\bar{\sigma}^2 (H' + 3G)} \right) d\varepsilon_{kl} \quad (4) \quad H' = (1-D)E^e \quad (5)$$

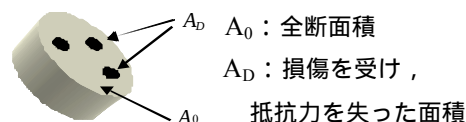


図-1 損傷変数の定義

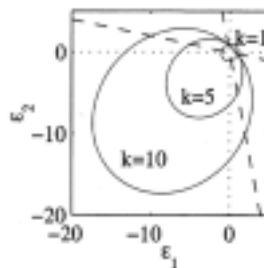


図-2 主歪み空間における降伏面

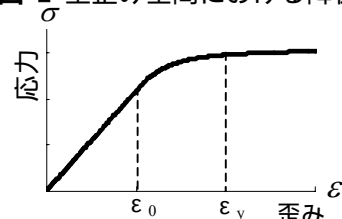


図-3 材料の応力 - 歪み関係

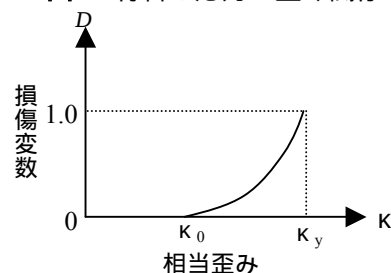


図-4 相当歪みによる損傷の進展則

キーワード：損傷力学，衝撃応答解析，RCはり

連絡先：〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1 九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 tel 092-642-3262

2.2 数値解析結果及び考察

2.2.1 解析モデル

解析対象は、図-5 に示すはり中央部の両端を固定した RC 単純ばり（静的曲げ耐力 38.4kN）とそれと全く同じ形状の鋼製単純ばりとし、はり軸方向と断面方向の対称性を考慮した 1/4 モデル(図-6)で解析を行った。衝撃荷重は、図-7 に示すような三角形状の衝撃荷重波形を仮定し、鋼製単純ばり解析の場合は、2.5msec 時に最大荷重 4500kN、RC 単純ばり解析の場合は、最大荷重 100kN、300kN、500kN の 3 種類とした。コンクリート・鉄筋（鋼材）それぞれの材料定数は、図-8 に示すような単軸応力 - 歪み曲線を仮定（いずれも降伏後の硬化係数に初期弾性係数の 1/100 を仮定し、除荷後は初期剛性を与えた）し、引張・圧縮強度試験シミュレーションにより逆解析的に定めた。解析に用いた材料定数を表-1 に示す。

2.2.2 鋼製単純ばりの衝撃応答解析

本研究では、陰解法による構造解析汎用コード ANSYS を用いた解析結果（以下 ANSYS 解析と記す）と本解析結果との比較を行った。

図-9, 10 にはそれぞれの応答値を比較したものを示す。図-9 より、最大応答変位の大きさに若干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分かる。図-10 の支点反力応答の比較も、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分かる。すなわち、応答初期に衝撃荷重載荷の反動により負の支点反力が生じ、最大値付近で支点反力が一定の振幅で持続した後、自由振動挙動となる。以上の結果から、鋼製単純ばりの弾塑性衝撃応答を十分な精度で再現できることが確認された。

2.2.3 RC 単純ばりの衝撃応答解析

図-11, 12 は最大衝撃荷重を 100kN、300kN、500kN の 3 通りで解析した場合のスパン中央の鉛直変位応答および支点反力応答を示したものである。図-11 より、最大荷重 100kN の場合、弾性挙動に近い応答を示すが、荷重レベルの高い場合は、弾塑性挙動を示し、最終的に大きな残留変位を生じることが確認できる。図-12 より、荷重レベルが高くなるにつれて、最大応答値の持続時間が長くなることが確認できる。しかし、最大支点反力の荷重レベルによる差は、最大変位の場合に比べて小さいことが分かる。これは、はり内部の損傷の進展による塑性化が進行するためであると推察される。

3. 結論

本手法により、単純ばりに衝撃荷重を与えたときの弾塑性衝撃応答特性を概ね把握することができた。したがって、本手法がミーゼスの降伏判定式に基く構造部材の弾塑性衝撃挙動を簡易に求める場合に適した手法であることが確認できた。

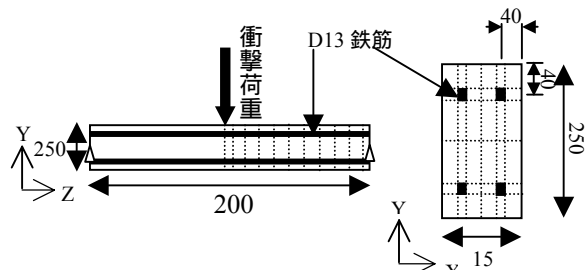


図-5 解析モデル（RC 単純ばり：mm）

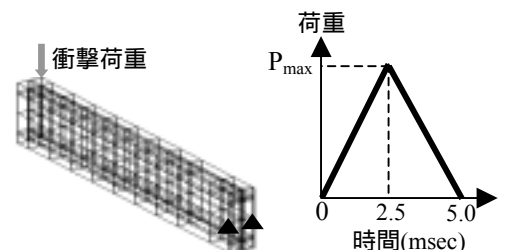
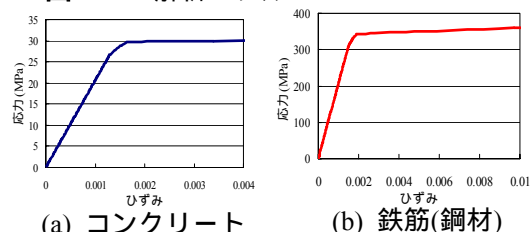


図-6 1/4 解析モデル 図-7 衝撃荷重波形



(a) コンクリート (b) 鉄筋(鋼材)

図-8 本解析で仮定した応力 - 歪み関係
表-1 解析に用いた材料定数

	コンクリート	鉄筋(鋼材)
ヤング率(GPa)	20.6	206
ポアソン比	0.167	0.3
密度(g/cm ³)	2.4	7.85
損傷発生歪み κ_0	1.30×10^{-4}	1.40×10^{-3}
降伏歪み κ_y	2.00×10^{-4}	2.00×10^{-3}
圧縮強度(MPa)	29.4	343
引張強度(MPa)	2.94	

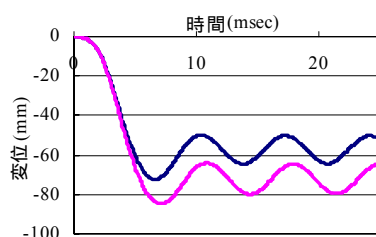


図-9 変位応答比較

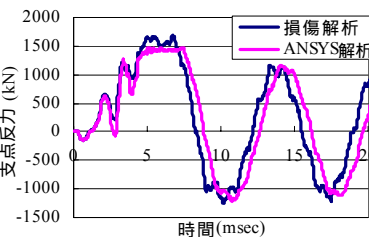


図-10 支点反力応答比較

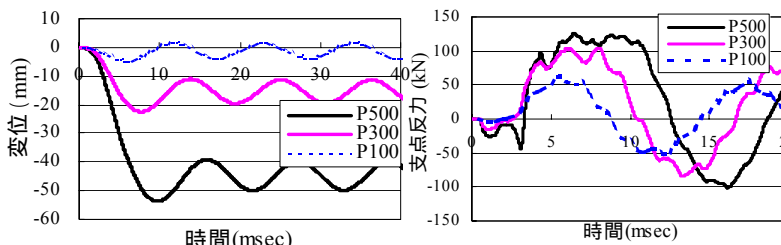


図-11 RC はり解析の変位応答

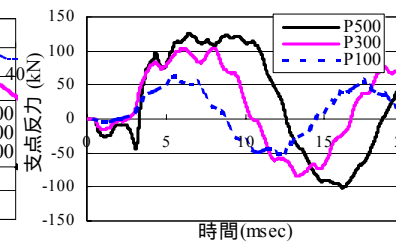


図-12 RC はり解析の支点反力応答