

粒子法を用いた鉄筋コンクリートはりの衝撃応答解析

BASIC STUDY ON THE IMPACT RESPONSE ANALYSIS OF RC BEAMS BY USING PARTICLE METHOD

中村博史*, 玉井宏樹*, 園田佳巨**, 別府万寿博***

Hiroshi NAKAMURA, Hiroki TAMAI, Yoshimi SONODA, Masuhiro BEPPU

*九州大学大学院修士課程 工学府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)

***博 (工) 防衛大学校助手 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

キーワード：粒子法、メッシュフリー法、衝撃応答解析
(particle method, MFM, impact response analysis)

1. 緒言

現在、構造物の耐衝撃設計は、基本的に最大衝撃荷重を静的荷重に置き換えた許容応力度法に基づいて行われている。しかし、構造物によって設計荷重および構造物に期待する機能や目的が異なるため、耐衝撃設計法を合理的なものとするためには構造物別に確立する方が望ましいと考えられる。また、衝撃荷重を受ける構造物の設計を性能照査型にするためには、安全性を保证するための解析手法の整備が必要である。

一般に、耐衝撃設計において破壊に対する安全性を検討するには、大変形やき裂進展などの現象を扱うことが不可避であり、特に鉄筋コンクリート構造物の場合には、衝突体の貫通・貫入やコンクリートの裏面剥離などの複雑な現象を伴うために、容易でないとされている¹⁾。しかし、数値解析に幅広く用いられている有限要素法は、連続体力学に基づいた定式化がなされているために、貫通などの不連続部を生じる問題に対してはジョイント要素などの特別な手法を導入する必要がある、必ずしも適した解析法であるとは考えられない。その様な状況の中で、1994年に Belytschko らによって提案されたエレメントフリー Galerkin 法^{2), 3)} (EFGM) の概念は、メッシュフリー法 (MFM) として種々の問題に適用されてきたが、衝撃破壊などの現象に対しても非常に有効なアイデアであると考えられる。

本研究では、鉄筋コンクリートはりに物体が高速で衝突した場合の衝撃破壊性状を把握する手法を確立するために、メッシュフリー法として分類される粒子法を用いた衝撃解析プログラムを作成し、その解析精度の検証など基礎的検討を行うものである。

2. 解析手法

2.1 粒子法の概要

粒子法は、連続体を有限個の粒子の運動として離散化する数値解析手法である。すなわち、物体を多数の粒子の集まりとして表現し、物体の変形を各粒子の移動量によって直接的に行う方法で、粒子間の結合・分離をひずみ等を基準に変化させることで、衝撃破壊などの非線形挙動を示す物体の挙動も容易に表現できるものと期待される。

粒子法では、一般に個々の粒子に対して適切な影響領域を設定し、粒子の変位などの物理量を影響範囲内の他の粒子との相互作用を考慮して求めることになる。すなわち、図-1の場合には、粒子 i は影響半径内にある粒子 j の影響は受けるが、影響半径外に存在する粒子との相互作用は考慮しない。また、粒子間の相互作用は、粒子間距離 r を変数とする重み関数 $W(r)$ を用いた重み付き平均により求めることが多い⁴⁾。

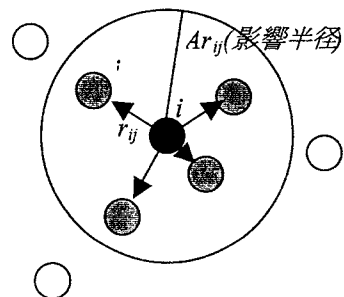


図-1 粒子間相互作用

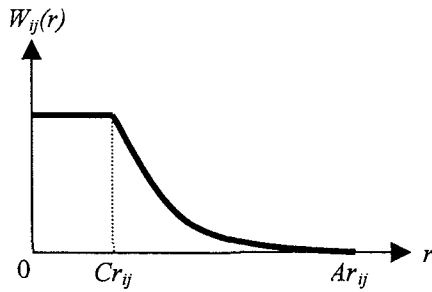


図-2 重み関数

本解析では、粒子間距離が大きくなるにつれて単調に減少する図-2 に示すような重み関数を適用することにした。この関数を式で表わすと、粒子間距離によって以下のような3区分で定義される。

① $0 < r \leq Cr_{ij}$ のとき

$$w_{ij}(r) = 1.0 \quad (1)$$

② $Cr_{ij} < r \leq Ar_{ij}$ のとき

$$w_{ij}(r) = \frac{1}{\{Cr_{ij}(1-\sqrt{\beta})\}^2} (r - Ar_{ij})^2 \quad (2)$$

③ $Ar_{ij} \leq r$ のとき

$$w_{ij}(r) = 0 \quad (3)$$

ここに、 $W_{ij}(r)$: 2 粒子 i, j 間の重み関数、 r : 粒子間距離、 Cr_{ij} : 2 粒子の半径の和、 $Ar_{ij} (= \sqrt{\beta} \times Cr_{ij})$: 解析で設定する影響半径

2. 2 鉄筋コンクリートのモデル化

本研究では、固体の変形挙動解析に粒子法概念を適用するために、2つの粒子重心を結ぶ線分に直交する境界面を粒子間中心に想定し、その面に対して法線方向および接線方向の2方向の応力ベクトルを用いた。その際、解析対象が均質材料であれば2つの粒子に同一の剛性（弾性係数）を用いて伝達応力の評価が可能である。しかし、鉄筋コンクリートのように異種材料が混在する場合には、相互に力をやり取りする2粒子 i, j に異なる材料特性を与える必要がある。そこで、本研究では異種材料粒子間の相互作用を評価する場合には、式(4)に示すようなそれぞれの粒子半径を重みとした換算剛性を用いることにした。

$$\hat{E} = \frac{E_i r_i + E_j r_j}{r_i + r_j} \quad (4)$$

ここに、 E_i : 粒子 i の弾性係数、 r_i : 粒子 i の半径

さらに、RC はりなどを二次元モデルで表現するには、同一平面内で奥行き方向に鉄筋とコンクリートが混在する領域が存在するため、奥行き方向に異種材料が混在する層については、式(5)に示すような各々の材料の総断面積比を用いて剛性を換算した。

$$\tilde{E} = \frac{E_s A_s + E_c A_c}{A_s + A_c} \quad (5)$$

ここに、 E_s : 鉄筋の弾性係数、 E_c : コンクリートの弾性係数、 A_s : 鉄筋の断面積、 A_c : コンクリートの断面積

2. 3 構成則モデル

鉄筋の応力-ひずみ関係には、図-3 に示すようなバイリニア弾塑性型を仮定し、降伏後の剛性は初期剛性の $1/100$ とした。降伏判定には *von Mises* の降伏条件を適用し、除荷が発生した場合には初期剛性を用いることにしている。

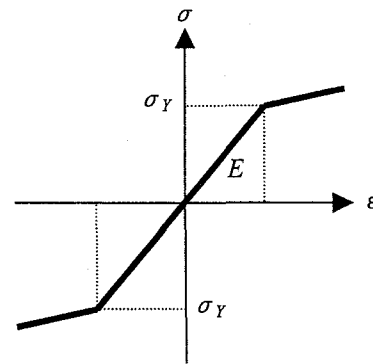


図-3 鉄筋の応力-ひずみ関係

コンクリートの構成則には、図-4 および図-5 に示すような応力-ひずみ関係と降伏曲面を仮定した。すなわち図-4 に示すように、圧縮側領域については一次降伏応力と圧縮強度を設けた2直線近似モデルで表現し、一次降伏後の剛性は初期剛性の $1/2$ とした。また、圧縮破壊後の応力解放は行っていない。引張側領域については、引張強度まで初期剛性を与え、引張破壊後は応力解放を行うことにした。

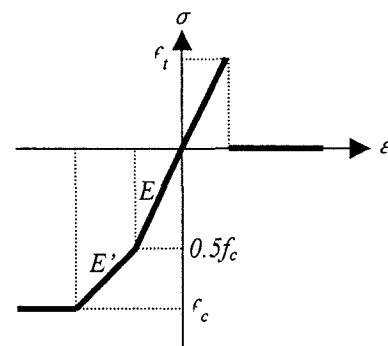


図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

なお、引張強度には一般的に良く用いられる圧縮強度の1/10の値を仮定した。また、鉄筋同様に塑性時に除荷が発生した場合は、初期剛性を用いることにした。

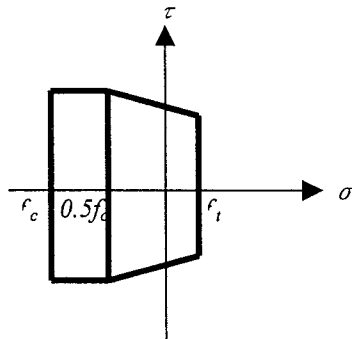


図-5 コンクリートの降伏曲面

3. 数値解析例

3.1 数値解析の流れ

本研究では、RC はりを二次元でモデル化し、式(6)に示す運動方程式を陽解法による直接時間積分により解いた。

$$M\ddot{u}(t) + Ku(t) = P(t) \quad (6)$$

各時間ステップにおいて運動方程式から算出された変位を用いて求めたひずみから影響範囲内の全粒子との間の作用応力を求め、式(7)に示すように重み関数を掛けて足し合わせることで個々の粒子に作用する応力を評価した。

$$F_i = \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} A w_{ij}(r) / \sum_{j=1}^N w_{ij}(r) \quad (7)$$

ここに、 $w_{ij}(r)$: 粒子 i, j 間の重み σ_{ij} : 粒子 i, j 間に作用する応力、 A : 粒子 i, j 間の断面積、 N : 影響半径内の粒子数

3.2 解析精度の検証

解析精度を考察するために、最初に衝撃荷重が作用したときの鋼製単純ばりモデルの弾性衝撃応答解

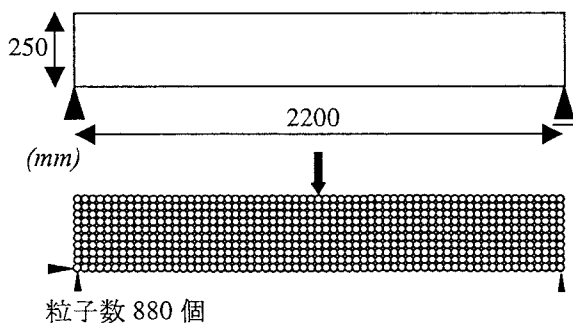


図-6 解析モデル

析を2次元粒子法と3次元 ANSYS/LS-DYNA (ソリッド要素) 解析で行った。2次元衝撃応答解析に用いた解析モデル (奥行き 15cm) の部材寸法とコンクリートおよび鉄筋の材料特性を図-6、表-1に示す。

表-1 材料定数

	コンクリート	鉄筋
ヤング率(GPa)	20.6	206
ポアソン比	0.167	0.300
密度(g/cm ³)	2.40	7.85
圧縮強度(Mpa)	29.4	343
引張強度(Mpa)	2.94	(降伏強度)

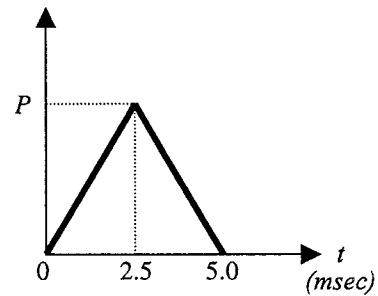


図-7 入力荷重波形

入力荷重には、図-7に示すような三角形の荷重-時間曲線 (継続時間 $T=5.0\text{msec}$ 、最大荷重 $P=9806.65\text{N}$) に従う値をスパン中央上部に鉛直下向きに与えた。

図-8は、2次元粒子法と3次元 ANSYS/LS-DYNA による鋼製単純ばりモデルのスパン中央下部の鉛直変位を比較したものである。この図より、2次元粒子法による結果は、3次元 ANSYS/LS-DYNA による解析結果と最大応答変位および応答周期にわずかな相違が見られるが、ほぼ同じ挙動を示すことがわかる。このことから、本解析手法により衝撃弾性応答を概ね評価できることが確認された。

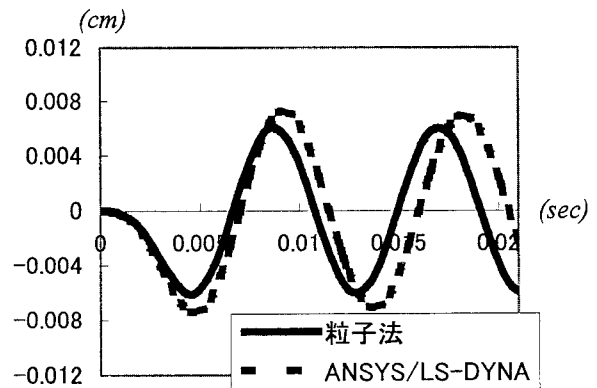
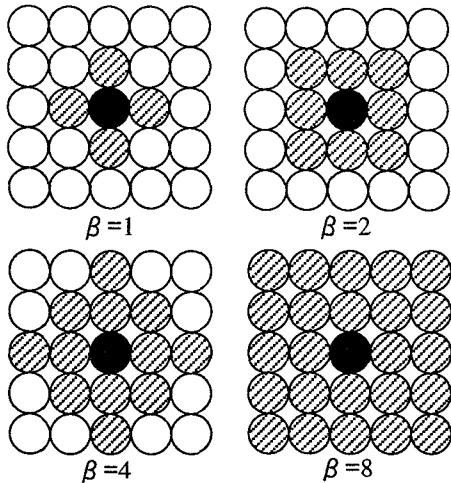


図-8 弾性応答の比較



⊗: 影響範囲内の粒子 ○: 影響範囲外の粒子

図-9 β を変えた場合の影響範囲

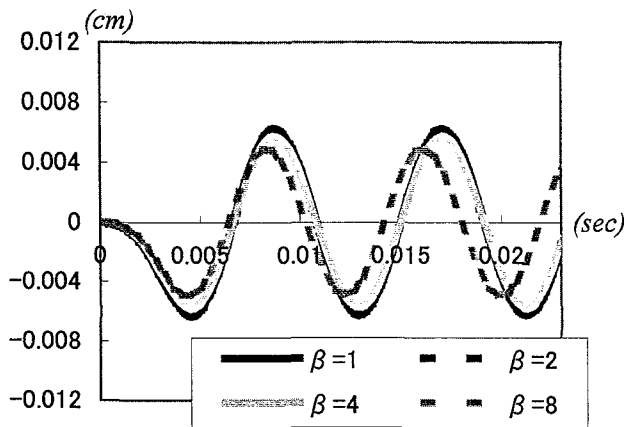


図-10 影響範囲の違いによる弾性応答比較

図-9は、粒子間の相互作用を考慮する影響範囲パラメータ β を変えた場合の具体的な影響要素数の変化を表したもので、図-10は β の値を変化させたことによるスパン中央変位の推移を調べたものである。この図より、 $\beta=1\sim 4$ の範囲では変位応答に殆ど差は見られないが、 $\beta=8$ になると明確に変位が小さくなるのがわかる。本手法では、応力を影響範囲における重み付き平均で評価するために、図-10に見られるように影響範囲を大きく設定するほど、応力が広い領域の平均値となるため、現実の応力分布と異なる応答になる傾向にあることが推察される。したがって、個々の要素の粒径を踏まえて適切な影響範囲パラメータ β を設定する必要があるものと考えられる。

3.3 弾塑性応答解析への適用

次に、RC単純ばりの弾塑性衝撃応答への適用を荷重入力により行った。

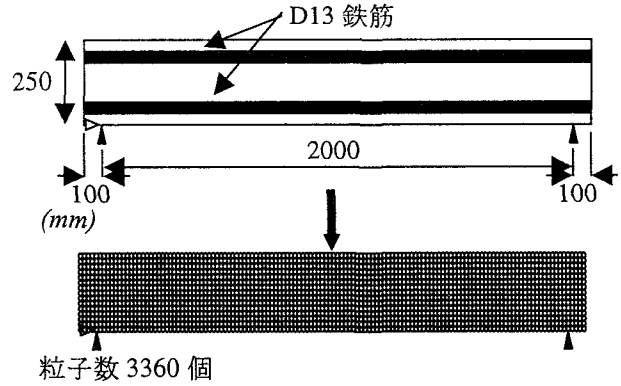


図-11 解析モデル

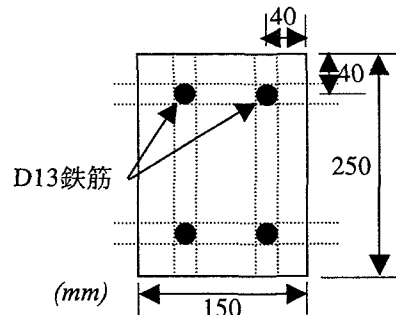


図-12 RC単純ばりの断面

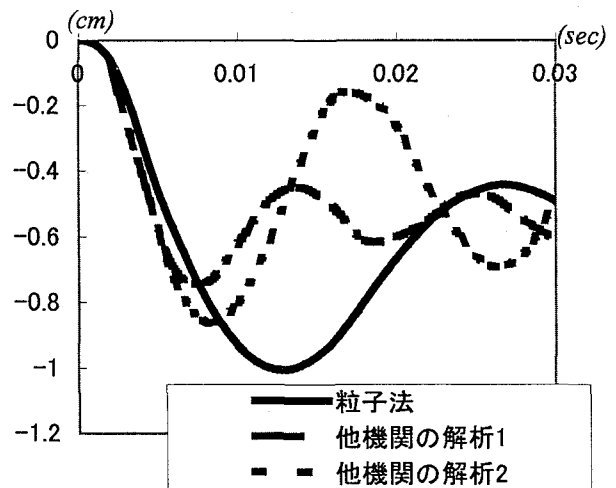


図-13 粒子法と他機関の解析手法による弾塑性応答比較

なお、ここでは2次元粒子法による弾塑性解析結果を、他機関が本手法とは異なる手法を用いて2次元モデルで過去に行った結果との比較を行った。

解析対象としたRC単純ばりの寸法および断面諸元を図-11と図-12に示す。なお、コンクリートと鉄筋の材料定数は、表-1に示す値を用いた。衝撃荷重には、図-7に示すような三角形の衝撃荷重波形（継続時間 $T=5.0\text{msec}$ 、最大荷重 $P=112.5\text{kN}$ ）を仮定した。なお、図-12に示すようなRC断面を2次元で表現するために、鉄筋とコンクリートが混

在する層には先に述べた換算剛性を用いている。

図-13は、同一条件で2次元粒子法による結果と他機関の弾塑性解析結果（解析1：2次元FEMニューマークβ法，解析2：2次元DEM）を、スパン中央下部の鉛直変位応答で比較したものである。いずれの解析結果も、塑性変形による明確な残留変位が残る振動を示しており、RC単純ばりが弾塑性挙動を示していることが分かるが、振動周期については各手法でばらつきが生じていることが認められる。粒子法による最大応答変位発生時刻は約13msecで、解析1（7.6msec）および解析2（8.7msec）より大きく、それともない最大応答変位も10mmと他機関の結果（解析1：7.6mm，解析2：8.7mm）より大きな結果が得られている。このことは、本手法で用いた降伏条件と粒子間相互作用モデル（影響範囲の大きさと重み関数の設定）に検討の余地があることを示していると考えられる。

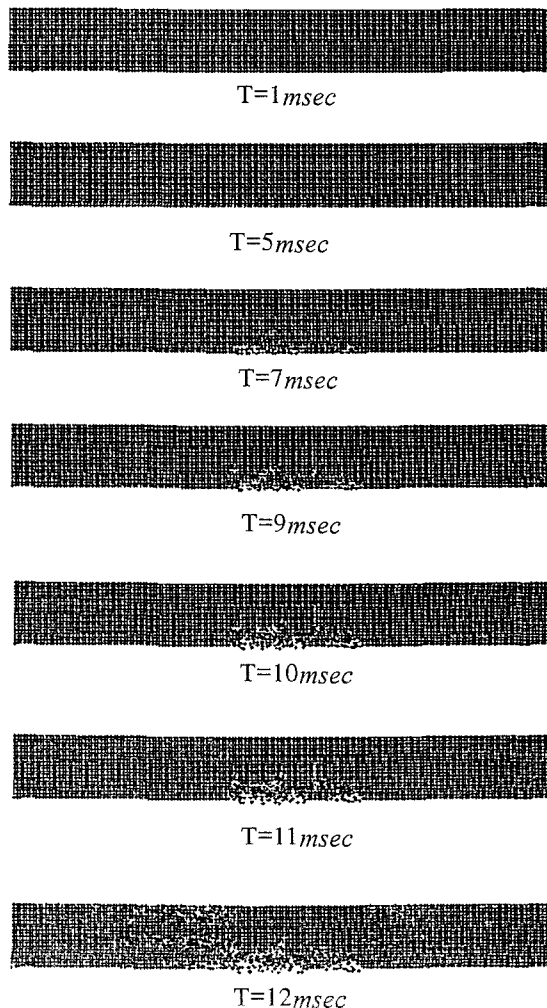


図-14 102.97kN 載荷時の変形図

図-14は、弾性限界を上回る衝撃荷重が作用したことにより弾塑性破壊を起こしたRC単純ばりの全体挙動を時刻歴に示したものである。解析対象および材料定数は、先に行った解析同様に図-11および表-1に示す値を用いた。衝撃荷重には、図-7に示す三角形の衝撃荷重波形（継続時間 $T=5.0\text{msec}$ 、最大荷重 $P=102.97\text{kN}$ ）を仮定した。この図より、本手法を用いれば、容易に裏面剥離現象を再現できることがわかる。

以上の結果より、2次元粒子法はRC構造物の衝撃破壊にともなう裏面剥離などの不連続現象の発生の可能性を検討するには適した手法であることが認められた。なお、弾塑性応答の定量的な精度を向上させるには、材料の降伏条件と粒子間相互作用モデルをより詳細に検討する必要があると考えられる。

4. 結論

本研究では、2次元粒子法の衝撃解析への適用に関する基礎的な考察を行った。本研究で得られた成果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 鋼製はりを対象とした弾性応答を3次元FEMによる解析と比較した結果、定量的に十分な精度を有することが確認された。
- 2) RCはりを対象とした弾塑性応答について、他の解析法と比較した結果、最大応答変位に有意な差が認められた。この理由については、粒子間相互作用モデルを検討する必要があると考えられる。
- 3) 粒子法を用いれば裏面剥離などの破壊現象を容易に再現できることが認められた。
- 4) 粒子法では、各粒子に作用する応力を影響範囲内の重み付き平均として評価するため、従来のDEMのような要素間バネ係数の決定に関する問題は解消されるが、適切な影響範囲を設定することが精度良い解を得るためには欠かせないことが確認された。

参考文献

- 1) 土木学会：衝突実験・解析の基礎と応用，構造工学シリーズ15，平成16年
- 2) T.Belytschko, Y.Y.Lu, L.Gu, 'Element free Galerkin methods', International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.37, 229-256(1994)
- 3) T. Belytschko, Shaoping Xiao, 'Stability Analysis of Particle Methods with Corrected Derivatives', An International Journal Computers and Mathematics with Applications 43,329-350(2002)
- 4) 越塚誠一：数値流体力学，培風館，1997年
- 5) 井浦雅司・庭山孝史：Element Free Galerkin Methodにおける基本境界条件の処理，構造工学論文集，Vol.43A, 355-364(1997.3)

- 6) Frederic A.Rasio, James C.Lombardi Jr, 'Smoothed particle hydrodynamics calculations of stellar interactions', Journal of Computational and Applied Mathematics 109,213-230(1999)