

粒子法を用いたRCはりの衝撃応答解析手法に関する基礎的研究

九州大学 学生会員 玉井宏樹 九州大学 正会員 園田佳臣
防衛大学校 正会員 別府万寿博 九州大学 フェロー会員 彦坂熙

1. 目的

原子力発電所をはじめとする重要構造物は、飛行機の落下事故のような生起確率が非常に小さな偶発的な事故に対する安全性についても検討する必要がある。構造物に物体が高速度で衝突する場合、衝突物の質量が小さくても、構造物の変形及び損傷は局部的には非常に大きくかつ甚大なものになる可能性がある。しかし、現在の連続体理論をベースとした FEM 等の解析手法では、貫通や裏面剥離等の予測は非常に困難であるとされている。そこで本研究では、大変形の取り扱いが容易な粒子法を用い、鉄筋コンクリートに高速度で物体が衝突した場合の衝撃応答性状を把握する手法を確立するための基礎的考察を試みた。

2. 内容

本研究では、粒子法を用いて鉄筋コンクリートはりの衝撃応答解析プログラムを作成し、解析精度等の基礎的検討を行った。

2.1 粒子法 (Particle Method) の導入

粒子法は、物体を微小な粒子の集まりとして表現し、各粒子の移動量によって物体の変形を直接的に表す手法である。粒子間の結合・分離をひずみ等の物理量を基準として容易に変化させることが可能であることから、局所的な変形が卓越するケースにおいて破壊など非線形挙動を示す領域内の物体の挙動追跡に適した手法であると考えられる。粒子法は、重み関数を導入した粒子間相互作用モデルを用いて連続体の離散的な計算を行うもので、変位・応力等の物理量は粒子間で相互に力を伝達し合う影響領域における重み付き平均で評価される。式(1)は、本解析プログラムに用いた重み関数であり、粒子間合力については、式(2)に示す重み付き平均で求めた。

$$w(r) = \left. \begin{aligned} &\frac{1}{\{(1-\beta) \cdot Cr_{ij}\}^2} \cdot (r - Ar_{ij}) && (Cr_{ij} \leq r \leq Ar_{ij}) \\ &1.0 && (0 \leq r \leq Cr_{ij}) \\ &0 && (Ar_{ij} \leq r) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} A \cdot w_{ij}(r) / \sum_{j=1}^N w_{ij}(r) \quad (2)$$

ここに、 $w(r)$ は重み関数、 r は2粒子間距離、 Cr_{ij} は2粒子の半径の和、 Ar_{ij} は Cr_{ij} の定数 β 倍で定義される。つまり、定数 β により影響領域が決められる。また $w_{ij}(r)$ 、 σ_{ij} 、 A はそれぞれ粒子 i, j 間の重み、応力、応力の作用面積であり、 $w_{ij}(r) / \sum_{j=1}^N w_{ij}(r)$ は重み付き平均を表す。

キーワード：粒子法、RC はり、衝撃応答解析

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

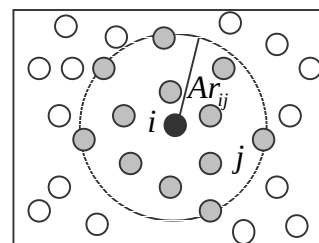


図-1 粒子間相互作用

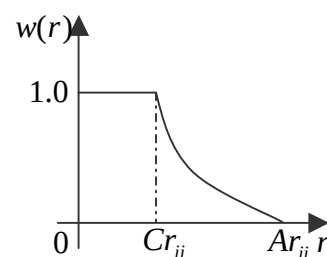


図-2 重み関数

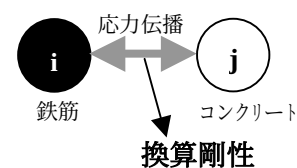


図-3 異種材料粒子間の剛性

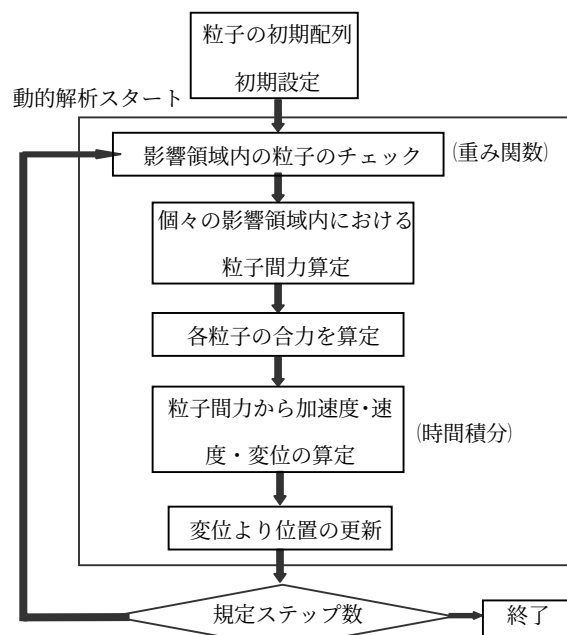


図-4 解析手順

2.2 鉄筋コンクリートのモデル化

粒子法で鉄筋コンクリートをモデル化するには、図-3に示すような異種材料粒子間の伝達応力の評価に換算剛性を用いる必要がある。そこで、本解析では粒子*i*と*j*が異種材料の場合、粒子*i*と*j*の剛性にそれぞれの粒径を重みとした式(3)を用いて換算し、応力の評価を行った。

$$\hat{E} = \frac{E_i r_i + E_j r_j}{r_i + r_j}$$

(3)

ここで、*r_i*、*r_j*はそれぞれ粒子*i*、*j*の半径を表す。

また、2次元解析を行うために、要素奥行き内で鉄筋とコンクリートが混在する層については、式(4)を用いて鉄筋とコンクリートの断面積比を用いて剛性を評価した。

$$\tilde{E} = \frac{E_s A_s + E_c A_c}{A_s + A_c}$$

(4)

ここで、*A_s*、*A_c*、*E_s*、*E_c*はそれぞれ鉄筋とコンクリートの断面積とヤング率を表す。

2.3 粒子法を用いた衝撃応答解析

2.3.1 解析手順

各粒子で求めた粒子間合力の重み付き平均値をもとに、加速度・速度・変位をそれぞれ陽解法による時間積分により、図-4の解析手順に示すように計算を行った。この際、解析上の数値安定条件として Courant 則を満足するような時間刻みとした。

2.3.2 弾性応答の検証

衝撃荷重が作用したときのコンクリートと同等の弾性剛性を有する片持ちばりモデルと RC 片持ちばりモデルの応答解析を行い、それぞれ2次元粒子法による結果と3次元 FEM 解析結果(ソリッド要素)との比較を行った。解析モデル及び鉄筋、コンクリートの材料特性は図-5、表-1、2にそれぞれ示す。また、RC 片持ちばりモデルには図-6の断面を有し、鉄筋とコンクリートが混在する層があるため先に述べた換算剛性を用いている。荷重条件は、図-7に示す三角形状の荷重-時間曲線(継続時間 *T*=5.0ms，最大荷重 *P* =5000kgf)を満たす荷重を自由端に鉛直下向きに与え、自由端近傍の変位応答を出力した。図-8は片持ちばりモデルにおける2次元粒子法と3次元 FEM 解析との弾性応答を比較したもので、また図-9はRC 片持ちばりモデルにおける2次元粒子法と3次元 FEM 解析との弾性応答を比較したものである。本解析と3次元 FEM 解析とを比較したところ、どちらのモデルでも波形・最大変位・周期ともにほぼ等しい値を示した。これらの解析結果より、粒子法が衝撃弾性応答に対して十分な精度を有することが認められた。

3. 結論

粒子法を用いて鉄筋コンクリート構造物の衝撃応答を解析するプログラムを作成し、RC 片持ちばりモデルの弾性応答解析を行った。その結果、精度良い応答を得ることができ、本解析手法が衝撃弾性応答に対して十分な精度を有することが認められた。今後、RC はりの弾塑性応答解析を行い、物体が高速度で衝突した場合に鉄筋コンクリート部材に発生する裏面剥離や貫通等の現象を追跡可能な手法を開発する予定である。

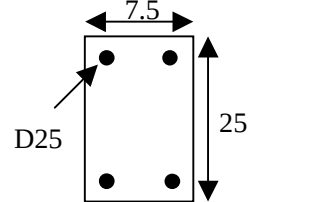
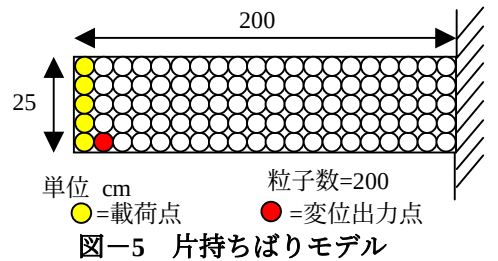


図-6 断面図

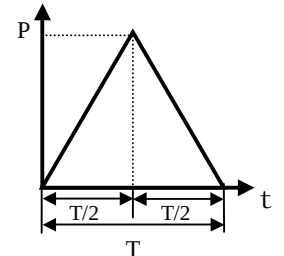


図-7 入力荷重波形

表-1 コンクリートの材料特性

ヤング率 (kgf/cm ²)	2.1×10 ⁵
ポアソン比	0.20
単位体積重量 (kgf/cm ³)	0.0030
圧縮強度 (kgf/cm ²)	300

表-2 鉄筋の材料特性

ヤング率 (kgf/cm ²)	2.1×10 ⁶
ポアソン比	0.29
単位体積重量 (kgf/cm ³)	0.0078

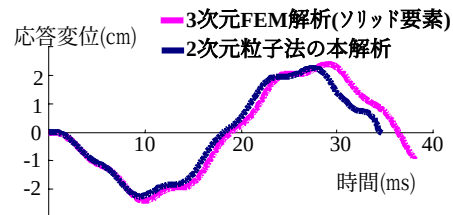


図-8 片持ちばりモデルの解析結果

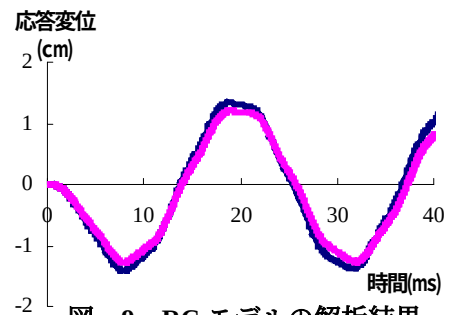


図-9 RC モデルの解析結果