

粒子法を用いた RC はりの弾塑性衝撃応答解析に関する基礎的研究

九州大学大学院 学生会員 ○玉井宏樹 九州大学大学院 正会員 園田佳巨
九州大学大学院 フェロー会員 彦坂 熙

1. はじめに

原子力発電施設をはじめとする重要構造物においては、生起確率は小さくとも構造物に甚大な被害をもたらす可能性が高い偶発的な事故に対する安全性の検討も重要である。その中の一つとして、衝撃荷重を受けた場合の RC 構造物の衝撃応答や破壊性状に関する研究が、各研究機関で行われてきた。衝撃を受ける RC 構造物の破壊性状は、衝突体の貫通・貫入、コンクリートの裏面剥離などをともなうことも多く、連続体力学に基づく FEM 等の解析手法では非常に困難となる場合もある。そこで、本研究では RC はりに物体が高速で衝突した場合の RC 構造物の衝撃応答性状を把握する解析手法を確立するために、大変形の取り扱いが容易な粒子法を用いた RC 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. 解析手法の概要

2.1 粒子法の概要

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した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。また、計算アルゴリズムは DEM とほぼ同じだが、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。つまり、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。本解析に用いた重み関数を式(1)に示す。ここに、 $w(r)$ は重み関数、 r は2粒子間距離、 C_{ij} は2粒子の半径の和、 A_{ij} は C_{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。

$$w(r) = \frac{1}{\{(1-\beta) \cdot C_{ij}\}^2} \cdot (r - A_{ij}) \quad (C_{ij} \leq r \leq A_{ij})$$

$$w(r) = 1.0 \quad (0 \leq r \leq C_{ij}) \quad (1)$$

$$w(r) = 0 \quad (A_{ij} \leq r)$$

2.2 RC のモデル化

粒子法で RC をモデル化するには、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 の剛性に各々の粒径を重みとした式(2)を用いて換算し、応力の評価を行った。また、二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(3)を用い、断面積比による換算を行った。

$$\tilde{E} = \frac{E_i r_i + E_j r_j}{r_i + r_j} \quad (2) \quad \tilde{E} = \frac{E_s A_s + E_c A_c}{A_s + A_c} \quad (3)$$

2.3 コンクリートの構成モデル

本解析手法では、粒子間の応力伝達を図3に示すように法線方向と接線方向の2方向で表されるので、弾塑性解析の際に用いたコンクリートの構成モデルを図4に示すような σ - τ 平面で表現した。せん断すべりに関しては、修正 Mohr-Coulomb の条件を用いた。また、応力-ひずみ関係より、圧縮側は降伏応力と圧縮変位を2直線で近似し、引張側はピークまで線形上昇させた。ここで、引張強度は圧縮強度の1/10とした。また、圧縮・引張ともにピーク後の軟化は考慮していない。

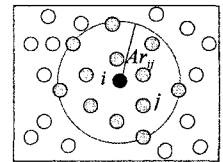


図-1 粒子間相互作用

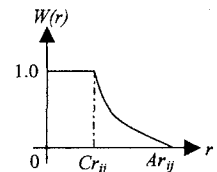


図-2 重み関数

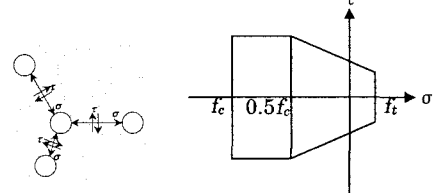


図-3 応力のやり取り 図-4 降伏曲面

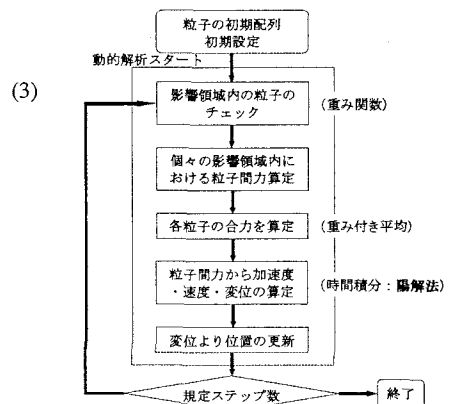


図-5 計算フロー

3. 解析内容と結果

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5に示すような手順で計算を行った。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。

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はりモデルと RC 片持ちはりモデルの応答解析を行い、各々、二次元粒子法による本解析結果と三次元 FEM 解析結果との比較を行った。解析モデルは図6に示す。鉄筋はヤング率 206 (GPa)、ポアソン比 0.29、密度 $7.8(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、コンクリートはヤング率 20.6 (GPa)、ポアソン比 0.20、密度 $3.0(\text{g}/\text{cm}^3)$ の材料特性を有するものとする。また、RC 片持ちはりモデルには図7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8に示す三角形の荷重-時間曲線継続時間 $T=5.0\text{ms}$ 、最大荷重 $P=10(\text{kN})$ を満たす荷重を自由端粒子5個に鉛直下向きに与え、自由端近傍の変位応答を出力した。それぞれ図9、10に結果を示した。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。

3.3 RC はりの弾塑性応答解析

衝撃荷重が作用したときの RC はりの弾塑性応答解析を行った。解析モデル、断面略図及び鉄筋、コンクリートの材料特性は図11、表1に示す。荷重条件は図8 ($T=5.0\text{ms}$, $P=112.5\text{kN}$) を満たす荷重をスパン中央粒子2個に鉛直下向きに与えた。また、塑性判定として鉄筋は Mises の降伏条件を、コンクリートには 23 で述べた降伏条件を与えた。図12は同じ荷重レベルで弾性解析と弾塑性解析を行い、その応答を比較したものである。弾塑性応答は弾性応答と比較して、周期が長れ、振幅中心線のずれが確認できるため、妥当な応答を示していると言える。

4. 結論

- 1) 均質材料における弾性解析により、二次元粒子法を用いた本解析結果が三次元 FEM 解析結果とほぼ等しい応答を示すことが認められた。また、簡易なモデル化による RC はりの応答解析結果も良好だったことから、RC 構造物の衝撃応答解析に二次元粒子法の適用が容易に行えることが確認できた。
- 2) RC 単純はりモデルを対象とした弾塑性解析プログラムを作成し、衝撃応答解析を行った。その結果、二次元粒子法を用いて RC はりの弾塑性変位応答を概ね把握できることが確認された。

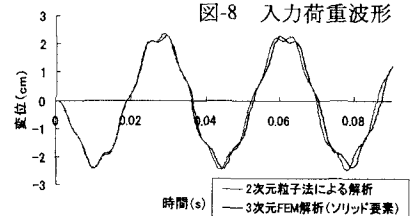
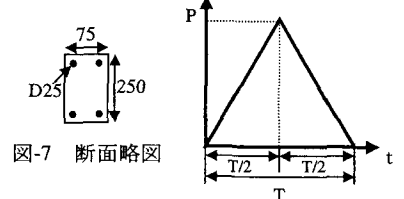
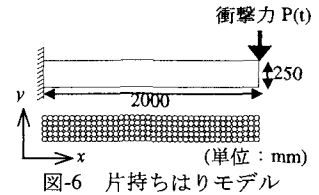


図-9 片持ちはりモデルの結果

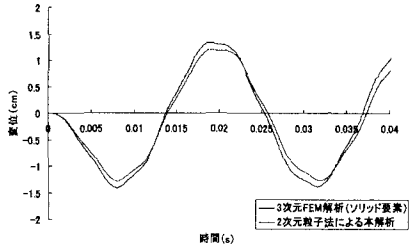


図-10 RC はりモデルの解析結果

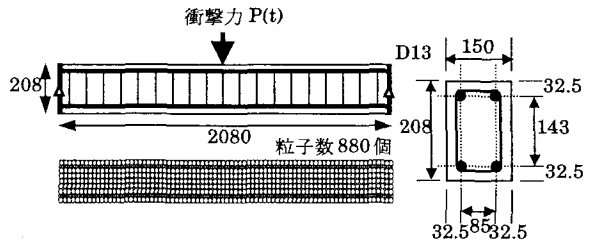


図-11 解析モデル及び断面略図

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)	3.0	7.85
圧縮強度(MPa)	29.4	343
引張強度(MPa)	$f_c/10$	

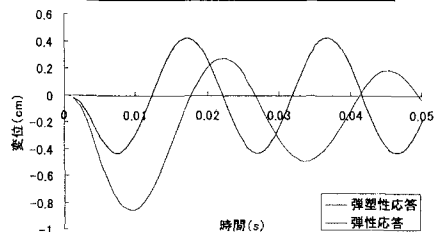


図-12 弾性応答と弾塑性応答の比較