

SPH 法を用いた RC はりの弾性衝撃応答解析に関する基礎的考察

九州大学 学生会員 ○徳丸 祥一郎
九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

1. 緒言

SPH 法は連続体を粒子の集合体として離散化し、各粒子の挙動はある一定範囲内に存在する他の粒子の物理量を kernel 関数により重み付き平均を行い、近似することで解析を行う手法である。したがって、通常の有限要素法とは異なり、粒子同士に結合・連続性の条件が課されていないため、有限要素法では取り扱いが困難であったひび割れや破壊といった現象が容易に再現できると考えられる。これまでに SPH 法を固体材料の応力解析に用いた事例も数多く見られるが、鉄筋コンクリート構造物のような異なる力学特性の材料が混在した複合材料の定量的な衝撃応答解析に適用した事例は殆ど見られない。そこで、本研究では SPH 法を用いた複合材料の衝撃応答解析を行うために、RC はりを対象とした弾性衝撃応答解析を行い、その適用可能性について基礎的な考察を試みた。

2. SPH 法を用いた RC はり解析

2.1 SPH 法の特徴

SPH 法は、各粒子の物理量を、図-1 のような影響半径内に存在する他の粒子の物理量を用いて、式(1)による kernel 関数を用いた重み付き平均を行うことによって求めていく手法である。

$$f(x) \approx \int f(x') W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

ここで $f(x)$: 物理量, h : 影響半径, W : kernel 関数である。

今回の解析では、kernel 関数として式(2)で表される 3 次 spline 関数を使用することにした。ここで

r : 粒子間距離 ($r = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2}$) である。

$$W = \frac{3}{2\pi h^3} \times \begin{cases} \frac{2}{3} - \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{r}{h}\right)^3 & 0 \leq \frac{r}{h} \leq 1 \\ \frac{1}{6} \left(2 - \frac{r}{h}\right)^3 & 1 < \frac{r}{h} \leq 2 \\ 0 & 2 < \frac{r}{h} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 RC はりの弾性解析

RC はりの応力解析を行う際には、対象モデル中にヤング率で約 10 倍の差がある鋼材とコンクリートの粒子が混在しているため、SPH 本来の重み付き平均を両者が混在した場で行うには一定の配慮が必要である。具体的には、鋼材粒子とコンクリート粒子の両者の境界上で不連続な値を有する物理量に kernel 関数を用いた重み付き平均の計算を行うと極端な精度の低下を招くことになる。今回適用した SPH 法は、ひずみと加速度の計算に kernel 関数の一次導関数を用いた近似を行うが、両者で変位の連続性が保証される状態（弾性かつ完全付着）においては、ひずみ応答の計算にも問題は生じないと考えられる。そこで、kernel 関数を用いて各粒子のひずみ速度を重み付き平均で計算し、それを時間積分することでひずみ、変位、速度および加速度を更新する手順を繰り返す方法を適用した。

また、通常の SPH の計算手順では、各粒子の加速度を求める際に式(3)のように隣接する他の粒子の質量 m_j を用いた計算を行うが、粒子密度が異なる材料が混在した場においては適切な方法とは考えられない。そこで、加速度を計算する際には、以下のように異なる材料種類の粒子間では質量の重み付き平均を用いるように改良した式(4)を使用することにした。

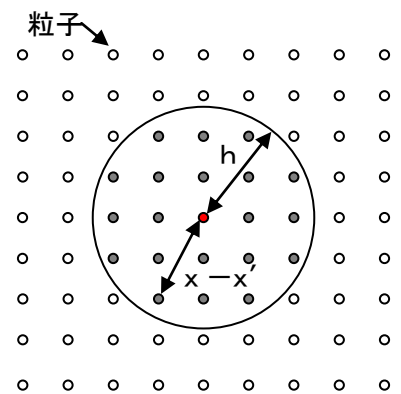


図-1 影響半径

$$a_i = \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\sigma_j}{\rho_j^2} + \frac{\sigma_i}{\rho_i^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} \quad (3) \quad \rightarrow \quad a_i = \sum_{j=1}^N \frac{1}{2} (m_j + m_i) \left(\frac{\sigma_j}{\rho_j^2} + \frac{\sigma_i}{\rho_i^2} \right) \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} \quad (4)$$

ここで、 a : 加速度, m : 質量, σ : 応力, ρ : 密度, N : 粒子 i に影響を及ぼす粒子 j の総数である.

3. RC はりの弾性衝撃応答解析

3.1 解析モデル

今回は、図-2 に示すような 3 次元 RC 複鉄筋片持ちはりモデルを作成し、自由端の中立軸位置高さの粒子に鉛直下向きに衝撃荷重を载荷し、弾性衝撃応答解析を行った. 応答変位は、自由端中立軸高さのはり幅方向中心点における鉛直変位を求めている. 解析で用いた衝撃荷重-時間波形は、図-3 に示すとおりである.

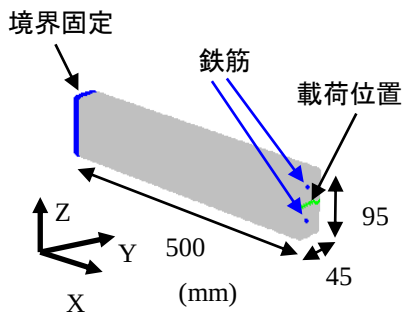


図-2 解析モデル

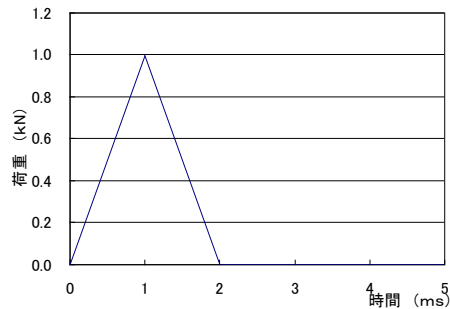


図-3 衝撃荷重波形

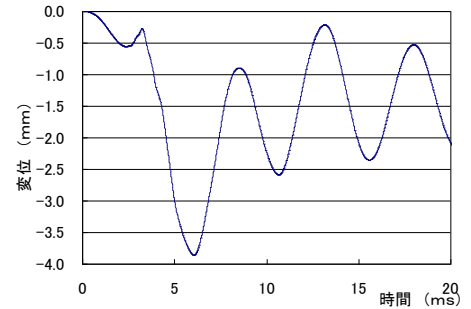


図-4 (3)式での変位-時間関係

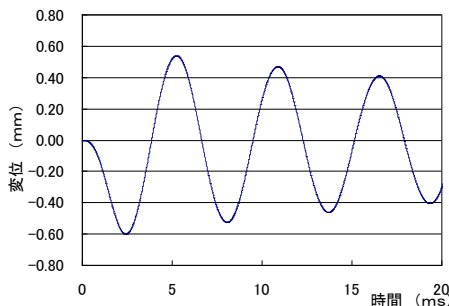


図-5 (4)式での変位-時間関係

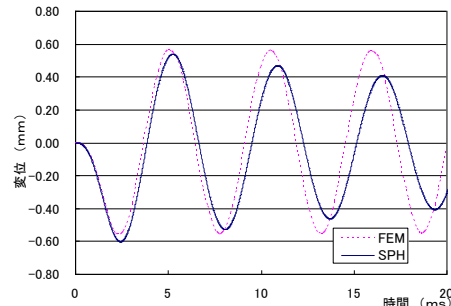


図-6 FEM と SPH の比較

3.2 解析結果

通常の SPH の加速度の計算で用いられる式(3)を適用した場合の変位-時間関係を図-4に、今回提案した式(4)を適用した場合の変位-時間関係を図-5 に示す. これらの図を見てわかるように、粒子加速度の計算に式(3)を適用すると変位応答が不安定な値を示し、最終的には破綻することが認められる. 一方、式(4)を用いた計算では、はり変位は安定した振動状態を示しながら減衰していくことが確認でき、複合材料の応答解析における式(4)の有用性が認められた. 次に、SPH 法の解析精度を確かめるため、有限要素モデルによる解析の結果と比較を行った結果を図-6 に示す. この図から、有限要素解析と SPH 法でモデルの離散化に起因する誤差や SPH 特有の人工粘性による変位の減衰状況などに相違が見られるが、SPH 法を用いても定量的に精度が高い複合材料の解析が可能であることが認められた.

4. 結論

今回の考察によって、RC はりの弾性衝撃応答は SPH 法を用いて精度良く解析できることがわかった. 今後、鋼材とコンクリートで変位の連続性が失われる塑性および破壊現象に対して、SPH 法を用いた解析で定量的な精度を損なわないための手法を検討していく予定である.