

SPH 法を用いたコンクリートの引張軟化特性に関する基礎的考察

九州大学大学院 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 関数と呼ばれる重み関数を用いて距離に応じた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ている。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に関して、そ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 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塑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。本考察は中でもコンクリートの引張軟化特性について焦点を当て、解析を行うものである。

2. 解析理論

2.1 RC はり解析

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。

2.2 コンクリートにおける軟化の再現

本研究では von Mises の降伏条件を仮定した相当応力により図-1 に示す単軸換算した応力-ひずみ関係を用いている。ここで E_c : コンクリートのヤング率、 f_c : 圧縮強度、 f_t : 引張強度であり、圧縮側は塑性後に 1/100 硬化、引張側は弾完全塑性モデルとしている。一般的にコンクリートの引張強度以降の変形特性は軟化モデルで表すことが多いが、SPH 法では直接的に応力-ひずみ関係に負の勾配を与えることができないため、引張変形時の軟化の再現には工夫が必要である。そこで本考察では軟化の表現方法として、相当応力 σ_{eq} と相当塑性ひずみ ε_{eq} を用いて軟化率という概念を取り入れることとした。その計算手順は、図-2 に示すように、まず任意の軟化勾配 α を設定し、弾完全塑性モデルにおいて構成則により得られた $\Delta\varepsilon$ から $\Delta\sigma$ を求める。次に式(1)に示すように $\Delta\sigma$ を相当応力 σ^t で除し、1 から引くことで弾完全塑性モデルを用いた場合からの引張応力の減少率を軟化率として求めた。このような手順で求めた軟化率を、1) kernel 関数及び kernel 関数の

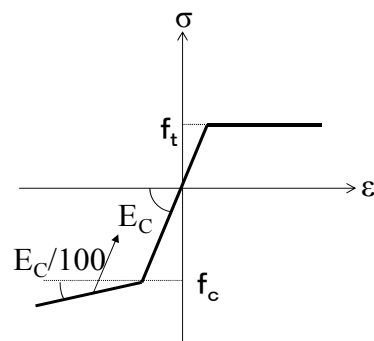
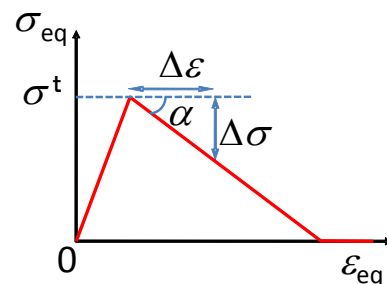
図-1 コンクリートの
応力-ひずみ関係

図-2 軟化率の計算手順

$$\text{soft(軟化率)} = 1.0 - \frac{\Delta\sigma}{\sigma^t} \quad (1)$$

キーワード：SPH 法 RC はり 弾塑性衝撃応答解析 引張軟化

連絡先：〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 TEL/FAX 092-802-3370

一次導関数に乗じることで軟化とともに SPH 法で用いる粒子の影響領域を小さくする 2)塑性判定に用いる引張強度閾値に軟化率を乗じ軟化が進むほど引張強度閾値を小さくする 2 点の修正を通常の SPH 法による計算に施し、軟化という現象を再現することとした。

3. RC はりの弾塑性衝撃応答解析

3.1 解析方法

解析モデルは両端のはり高中心がピン支持された 3 次元複鉄筋 RC はりにおいて、図-3 のように x 軸、y 軸方向に対称性を考慮した 1/4 モデルとし、スパン中央部に鉛直下向きに図-4 に示す二等辺三角形分布の衝撃荷重が作用している。また、スパン中央部におけるはり高さ中心位置において鉛直方向変位を出力した。また、材料特性値は表-1 に示すとおりである。本考察では弾完全塑性モデル、軟化勾配 α についてヤング率の 1/10 にした場合、引張強度以降に応力を 0 とするカットオフモデルの 3 通りの解析を行った。

3.2 解析結果

弾完全塑性モデル、軟化勾配をヤング率の 1/10 にした場合、カットオフモデルでの解析を行った結果が図-5 である。図-5 より、弾完全塑性モデル、軟化勾配をヤング率の 1/10 として解析を行った場合、カットオフモデルの順で最大変位が大きくなっており、本考察で用いた方法により軟化を表現できることが確認された。しかしカットオフモデルに関しては解析中に粒子の飛散が見られたことから、SPH 特有の引張不安定性等の精度低下により図のように他とは大きくかけ離れた挙動を示したと考えられる。次に本考察の解析精度を確かめるため、カットオフモデル以外の 2 条件について有限要素法を用いて同等の解析を行ったものと比較をした結果を図-6 に示す。この図より、有限要素解析を用いた場合でも、弾完全塑性モデルの場合よりも軟化勾配をヤング率の 1/10 とした方が変位、周期ともに大きくなっていることから、本考察における方法により SPH 法でも軟化勾配を考慮した際の傾向としては正しく再現できていることがわかる。しかし、SPH 法を用いた解析は有限要素解析と比べて最大変位や残留変位が大きく、また軟化勾配を考慮したことによる変位の変化も小さくなっている。これらのことから、本考察で得られた結果は定量的に精度が良いとは言い難く、さらなる検討が必要であると考えられる。

4. 結論

本考察により、軟化率という係数を導入し、kernel 関数及び引張強度しきい値を変化させることで、SPH 法を用いてもコンクリートにおける塑性変形時の軟化の傾向を再現することが可能であることが確認された。今回は軟化率を kernel 関数の一次導関数にかける際に x, y, z 軸全方向に一様に反映し、等方的に kernel 関数を小さくしているため、今後は主ひずみ方向を計算することで異方性を考慮した軟化を再現する手法や、より定量的な精度を損なわない手法を検討していく予定である。

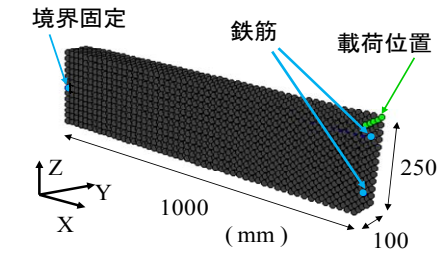


図-3 解析モデル

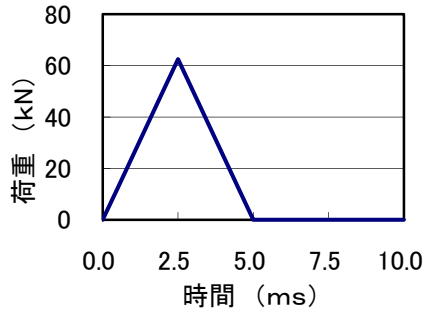


図-4 衝撃荷重波形

表-1 材料特性値

	ヤング率 (kN/mm ²)	強度 (N/mm ²)	
		圧縮	引張
鉄筋	210	300	300
コンクリート	21	30	3

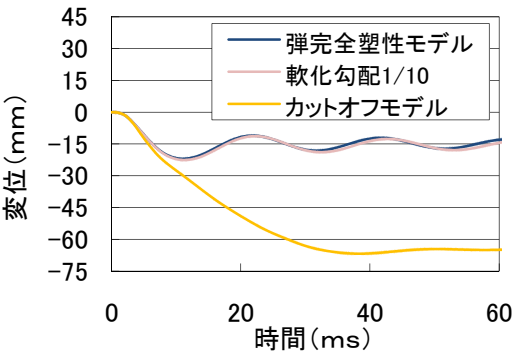


図-5 解析結果

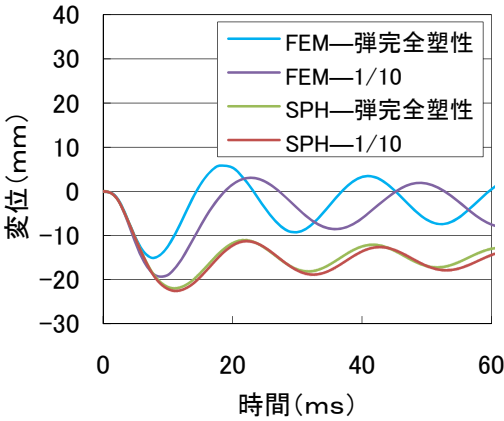


図-6 解析結果の比較