

SPH 粒子法の離散化程度および引張破壊挙動への適用に関する基礎的研究

九州大学大学院 学生会員 ○深澤仁 正会員 園田佳巨

1. 緒言

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) は連続体を粒子の集合体として離散化した粒子モデルを用いた代表的な手法で、粒子個々の挙動を近傍 (影響半径内) に存在する他の粒子との距離に応じた重みによって求めた相互作用力を作用させながら運動方程式を解くことから、個々の粒子が初期配置から大きく移動しても解析を継続することが可能である。従って、従来の有限要素法などで取り扱いが困難な大変形 (ひび割れ・貫通・破壊・飛散など) をともなう破壊現象に適用し易いと考えられる。しかし、SPH 法を用いた固体材料の解析に関する定量的な精度については、必ずしも十分に検討されているとは言い難く、特に構造部材における塑性初期の値が小さなひずみ場も高精度で計算するための離散化に関する条件は明確に示されていない。本研究では、SPH 法で固体材料の高精度な衝撃応答を得るためのモデル化に関する条件をより詳細に把握するため、はり部材を対象に、その挙動を精度良く再現するために必要な離散化レベル (はり高さ方向の必要粒子数など) について、有限要素解析モデルと比較・検討を試みた。また、最終的に破壊挙動に適用することを考慮して、引張破壊挙動の再現について基礎的な考察を実施した。

2. 離散化の程度に関する検討

図-1 に FEM 解析 (MSC.Marc ソフトウェアを使用) と SPH 解析の片持ちばり弾性解析モデルを示す。また、表-1 にそれぞれの解析における解析ケースを示す。離散化レベルと解析精度を把握するために支間 1000mm、はり高さ 100mm の片持ちばりを対象とした検討を行い、メッシュ分割数をパラメータとした。材料定数には、ヤング率 $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 0.3 と鋼材の値を仮定した。図-2 に解析ケース F1~F5 の固定端部に位置する節点の応力分布を示す。式(1)により計算した最上下縁応力の理論値は、 $\pm 150 \text{ N/mm}^2$ である。図より、ケース F1 以外はほぼ理論値と等しい値を示しており、FEM 解析の場合、はり高さ方向の要素分割を 4~5 程度で線形の応力分布を精度良く表現できることが確認できた。

$$\sigma = \pm \frac{M}{I} y \quad (1)$$

SPH 法における離散化レベルと解析精度の関係を把握するために、FEM による検討の場合と同一条件 (支間 1000mm、



図-1 片持ちばり弾性解析モデル

表-1 解析ケース

解析ケース	分割数		要素サイズ
	高さ方向	長さ方向	
F1	2	20	50 × 50 mm
F2	4	40	25 × 25 mm
F3	5	50	20 × 20 mm
F4	10	100	10 × 10 mm
F5	20	200	5 × 5 mm

解析ケース	分割数		粒子サイズ
	高さ方向	長さ方向	
S1	6	51	20 × 20 mm
S2	11	101	10 × 10 mm
S3	21	201	5 × 5 mm
S4	41	401	2.5 × 2.5 mm

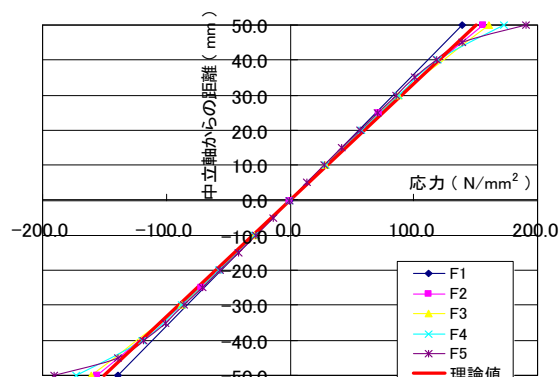


図-2 固定端部の応力分布 (FEM 解析)

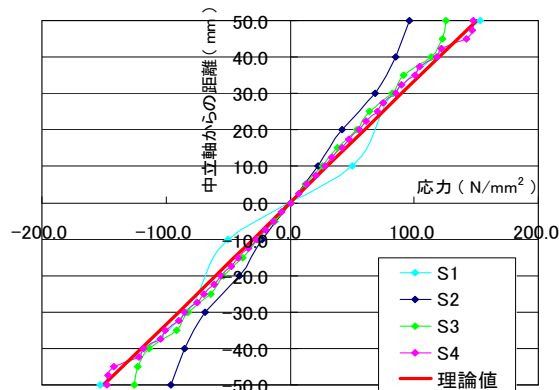


図-3 固定端部の応力分布 (SPH 解析)

はり高さ 100mm の片持ちばり，ヤング率 2.1×10^5 N/mm²，ポアソン比 0.3 の鋼材を仮定) による計算を行った．ここでは，自由表面に特別な補正を加えることなく，離散化レベル（粒子径）を変化させて解析精度を検証するために，はり高さ方向に 5～40 個の粒子を配置した 4 種類のモデル（粒子径 20mm～2.5mm）による比較検討を行った．図-3 に固定端近傍のはり断面内の応力分布を示す．図より，粒子径が小さくなり離散化レベルが細密になるほど解析値が理論値に近くなるが，同一寸法の要素を用いた FEM に比べて解析精度が低いことが認められる．この結果を，前述の FEM による考察と比較（SPH 粒子と同様に縦・横で同じ寸法の要素による結果）すると，25.0×25.0mm の正方形要素を用いた FEM 解析と直径 2.5mm の粒子を用いた SPH 解析がほぼ同程度の解析精度を有することがわかる．すなわち，片持ちばり解析において，FEM の場合，少なくともはり高さ方向の要素分割は 4～5 程度確保すれば，精度良い結果が得られるが，SPH 解析において同程度の精度を追求する場合，はり高さ方向に 40 個程度の粒子配置が必要であると考えられる．このことから，

SPH を用いて構造解析を行う場合，FEM 解析の 10 倍程度の細密な離散化が必要であることが認められる．

3. 引張破壊挙動への適用に関する検討

SPH 法を用いる利点は，従来の有限要素法などで取り扱いが困難な大変形（ひび割れ・貫通・破壊・飛散など）をとともなう破壊現象に適用し易いことであると考えられる．そこで，土木学会発行の土木材料実験指導書に記載されているコンクリート材料の割裂引張強度試験を参考に，コンクリートの引張破壊挙動の再現を試みた．

図-4 に解析モデルを示す．SPH モデルは，直径 2.0mm の粒子を用いて，直径 100mm×奥行き 20mm の円柱供試体をモデル化した．総粒子数は約 24000 粒子である．コンクリートの材料特性は，圧縮強度を 30N/mm²，引張強度を 3N/mm² とし，それ以降は初期剛性の 1/100 の剛性でひずみ硬化する特性を与え，引張破壊条件に寄与するような特別な処置は施していない．一方，FEM モデルの引張域の材料特性は，引張強度を 3N/mm² としたカットオフモデルを仮定した．

図-5 に X 軸方向の応力分布を示す．0.16ms（荷重 8kN）時には，SPH および FEM とともに，周囲に比べて中央部分の X 方向引張応力が大きな値となっており，概ね同様の分布であることが分かる．しかし，1.2ms（荷重 60kN）時の SPH 解析では，供試体中央部に引張破壊が確認できるのに対して，FEM 解析では荷重入力部位や固定端近傍で要素が大きく変形しており，精度よく解析できているとはいえない．このことから，SPH は FEM に比べて特別な処置を施さなくても，本解析における引張破壊のように，粒子が初期配置から大きく移動するような破壊挙動に対して適用できる可能性があるといえる．

4. まとめ

本研究により，SPH を用いて構造解析を行う場合，FEM 解析の 10 倍程度の細密な離散化が必要であることが認められた．また，SPH の引張破壊への適用性が確認できた．今後，SPH 解析にもカットオフモデルを適用することや，圧縮やせん断破壊を表現することを検討していく予定である．

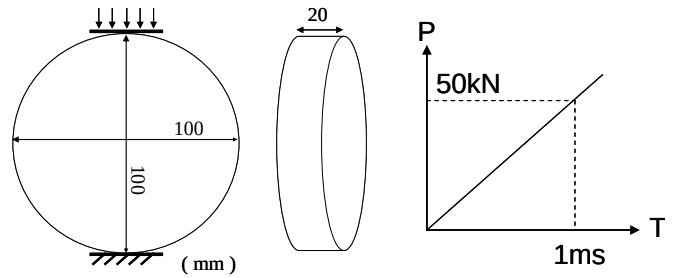


図-4 割裂引張解析モデルおよび荷重条件

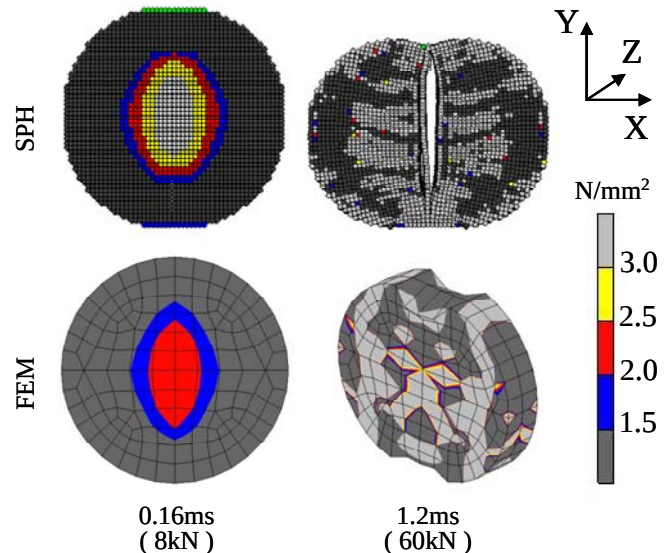


図-5 X 軸方向の応力分布