

飛翔体の高速衝突によるコンクリート版の衝撃貫通現象に関する解析的検討

九州大学大学院
九州大学大学院

学生会員 ○中村 裕希
正会員 園田 佳巨

1. 目的

コンクリート構造物に衝撃的な荷重が作用した場合、衝突条件によって構造全体に変形が生じる全体破壊と局所的な変形が卓越する局部破壊の2通りの破壊形態が生じる可能性がある。特に、高速度で飛来物がコンクリート部材に衝突するような場合には、衝突箇所近傍に生じるひび割れの進展により、貫入・貫通やコンクリート部材裏側に生じる裏面剝離など衝撃現象特有の破壊形態を示すことが知られている。しかし、これらの衝撃破壊に対する定量的な予測は困難であり、既往の研究でも実験的な評価が殆どである。そのため、衝撃荷重による局部破壊を解析的に行う場合、一般に被衝突物側の材料の圧壊を表現するエロージョンなどの特殊な解析上の処理が用いられる。

本研究は、メッシュフリー法の一つで固体材料の破壊を表現するのに適していると思われる SPH 法を用いて、圧縮破壊した粒子を縮退させる力学モデルを用いた衝撃貫通解析を試みるものである。

2. 内容

2-1. SPH 法の概要

SPH 法は、連続体を粒子の集合体として離散化し、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)に示す kernel 関数を用いた重み付き平均により近似的に求める手法である。

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

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

SPH 法を用いた固体の変形解析では、ひずみ速度の時間積分で得られるひずみを弾塑性構成式に適用することで応力を計算し、得られた応力を式(2)に代入して求めた加速度を時間積分することで変位を計算する。

$$\frac{Dv^\alpha}{Dt} = \frac{1}{\|x-x'\|} \sum_j \left(\frac{\sigma_i^{\alpha\beta}}{\rho_i} + \frac{\sigma_j^{\alpha\beta}}{\rho_j} + \Pi^{\alpha\beta} \right) \cdot 2 / ((\rho_i + \rho_j) \rho_i \rho_j) \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha} \quad (2)$$

ここで、 v^α :粒子の α 方向速度、 $\Pi^{\alpha\beta}$:人工粘性、 $\sigma_i^{\alpha\beta}$:粒子 i の応力、 ρ_i :粒子 i の密度である。

なお、kernel 関数には3次 Spline 関数を採用し、影響半径には粒子半径のみに依存する固定カーネル半径を用いて計算を行った。本研究では SPH 法を基本として解析を行ったが、高速衝突物によるコンクリート構造物の破壊を表現するために、以下に示すような特別な処理を施した。

1) 衝突荷重の評価法

異なる物体の粒子間に発生する衝突荷重の評価には、相互の重複領域から体積ひずみを求めた上で、式(3)に示すような荷重 f_{ij} が両方の粒子にかかるものと仮定した。

$$f_{ij}^\alpha = \frac{E_{ij}}{3(1-2\nu)} \cdot \frac{\Delta V_{OL}}{V} \cdot (n^\alpha + \mu t^\alpha) \quad (3)$$

ここに、 E_{ij} :粒子 ij の平均弾性、 ν :ポアソン比、 V :粒子 ij の合計体積、

ΔV_{OL} :粒子間重複部分の体積、 n^α, t^α :各法線・相対速度接線ベクトルの α 軸方向成分である。

2) コンクリートの引張軟化挙動

ひび割れ進展の影響を考慮するために引張応力の解放と kernel 関数の低減を行い、伝達応力の低下を表現した。引張軟化は、粒子の各主軸方向別に kernel 関数を定義することができる ASPH 法を使用し、主軸方向毎に引張ひずみをもとに kernel 関数の値を低減させることにした。ASPH 法に用いる kernel 関数の一次導関数は、式(4)のように表わされる。

$$\nabla W = \left(\frac{\partial W_x}{\partial x} W_y W_z, \frac{\partial W_y}{\partial y} W_z W_x, \frac{\partial W_z}{\partial z} W_x W_y \right) \quad (4)$$

ここで、 W_x : x 軸方向に定義される1次元 kernel 関数である。

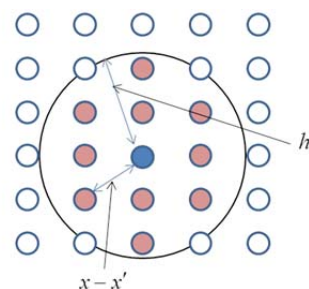


図-1 粒子の影響半径

キーワード SPH 法、貫通解析、エロージョン、局部破壊

連絡先 〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地 九州大学大学院工学府 TEL:092-802-3370

3) 圧縮破壊した粒子の取り扱い

本研究では、破壊した粒子を取り除く通常のエロージョンの代替処理として、体積ひずみが一定値 ε_{th} を超えた粒子に対して以下の処理を行った。衝突する粒子間で領域が重複する重複幅を検索し、重複幅の最大値の 1/2 を粒子半径の縮退量とみなし、縮退した粒子が縮退前と同じ内力と質量を有することを前提に応力と密度の補正を行うことにした。具体的には、縮退後の粒子半径と縮退前の粒子半径の比を dr とし、応力と密度に対して、式(5)の補正を行った。

$$\sigma'_i = dr^2 \sigma_i \quad \rho'_i = dr^3 \rho_i \quad (5)$$

ここで、 σ' :補正された σ の値である。

ここで、粒子半径の縮退が連続的に生じて過度に小さくなる粒子が現れることを防ぐために、粒子半径に下限値を設け、対象粒子が粒子半径の下限を下回った段階で応力解放を行うとともに、粉碎された粒子と見なして次の時刻から計算対象から外すことにした。

2-2. 解析概要

本研究で対象とした実験は、防衛大学校で実施された高速飛翔体による RC 版の貫通実験である。寸法 $500 \times 500 \times 80 \text{ mm}$ 、圧縮強度 25.8 MPa 、上下二辺支持を支持条件とするコンクリート版に対し、図-2 に示すような重量 50 g 、直径 25 mm の鋼製飛翔体を 415 m/s で衝突させた。実験の結果コンクリート裏面は写真-1 のようになり、飛翔体はコンクリート版を貫通し、裏面剥離が発生し局部破壊特有の破壊現象を観察することができた。

本研究で用いた解析モデルを図-3 に示す。解析モデルは、対称性を考慮した 1/2 モデルとし、上下二面の完全固定を拘束条件とした。コンクリートは粒子径 8 mm 、飛翔体は 25 mm として離散化し、粒子の影響半径は粒子径の 2.5 倍とした。材料特性として、コンクリートに圧縮限界を考慮した平面キャップ付き Drucker-Prager の降伏条件を適用し、鋼材は von Mises の降伏条件を適用し、降伏後の塑性硬化係数は初期弾性係数の 1/100 を仮定した。各種材料定数を表-1 に示す。また、粒子の縮退処理の閾値である ε_{th} については $\varepsilon_{th} = 70000\mu$ として解析を行った。

2-3. 解析結果

コンクリート版に衝突速度 800.0 m/s で飛翔体を衝突させた場合の解析を行った。応力分布の結果を図-4 に示す。図に、圧縮側の塑性領域を赤い粒子、引張側の破壊領域を橙の粒子で表示した。この図より飛翔体の衝突部付近に圧縮応力が作用し、コンクリート裏面に引張破壊によるひび割れと裏面剥離が認められ、写真-1 と似た破壊性状を示していることから、本手法で貫通破壊を再現できることがわかった。

次に、閾値を超えた粒子を次の時刻で消滅させるエロージョン処理と粒子径の縮退を用いた 2 通りの解析で、飛翔体の速度変化の比較を行った。その結果を図-5 に示す。縮退を用いた場合、エロージョンを用いた場合と比較し、貫通する過程での速度減少量が小さく、縮退モデルでは圧壊時のコンクリートの応力伝達についても考慮できていることが確認できる。

3. 結論

本研究では粒子の圧縮破壊を表現した縮退モデルを導入することでコンクリート材料の圧壊を表現し、この方法を用いてコンクリートの代表的な衝撃破壊形態である貫通現象をシミュレート可能であることがわかった。また、本研究で用いた縮退モデルでは、エロージョン処理と比較して圧壊した粒子の応力伝達を考慮でき、安全側の解析結果を得られることがわかった。本研究ではコンクリートの衝撃貫通挙動を定性的に得ることができたので、今後は定量的な挙動解析結果の一致を図ることが課題である。また、本研究で利用した圧壊の閾値は定性的にコンクリートの貫通を再現できる値を恣意的に定めているため、今後は、閾値に関する基準を改良し粒子の挙動の精度を高める必要である。

参考文献

1) 別府万寿博, 三輪幸治, 大野友則, 塩見昌紀: 鋼製剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol. 63 No. 1, pp. 178~191, 2007

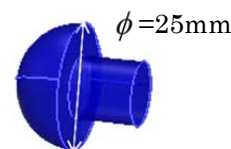


図-2 飛翔体



写真-1 貫通実験の実験結果¹⁾

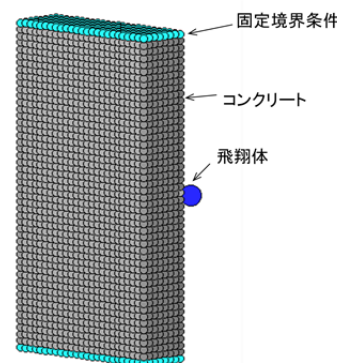


図-3 解析モデル

表-1 材料特性

	弾性係数 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	ポアソン比
飛翔体	2.01×10^5	-	345.0	0.3
コンクリート	2.51×10^4	25.8	-	0.23

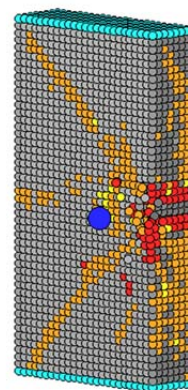


図-4 高速衝突解析の応力分布

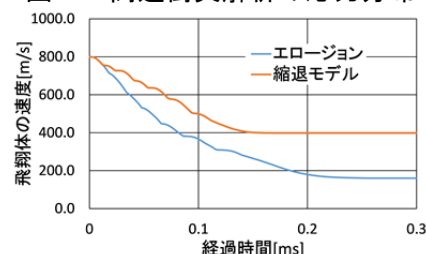


図-5 貫通時の飛翔体の速度変化