

## 1. はじめに

コンクリート構造物に高速度で飛来物が衝突するような場合には、衝突箇所の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の裏側に生じる裏面剥離などの衝撃現象特有の破壊形態を示すことが知られている。これらの衝撃荷重による局部破壊を解析的に再現するためには、コンクリート材料の圧壊を表現するエロージョンなどの特殊な解析手法が必要となるが、その適用方法については必ずしも明確に定義されていない。そこで、本研究では SPH 法を用いたコンクリート版の衝撃破壊解析を行い、局部破壊を適切に再現するために必要となる解析手法に関して検討を試みた。

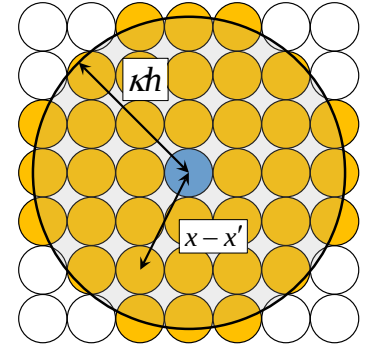


図-1 計算粒子の影響半径

## 2. 研究内容

### (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する粒子法の一つであり、評価粒子の物理量を近傍粒子の重み付きの平均および空間勾配を用いて評価を行う。粒子法は、計算格子の生成が不要であるため、格子の移動などによって発生する計算格子のゆがみによる計算の不安定が発生しないため、ラグランジュ的に大変形を伴う解析に適するという特徴を持つ。SPH 法における物理量は図-1 のように、格子幅に相当する平滑長(Smoothing length)  $h$  と、平均値の加算範囲を決定する係数  $\kappa$  によって定められる影響半径  $\kappa h$  内に存在する粒子の物理量を式 (1) のような離散化を行う。

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

ここで、 $f(x)$ :物理量、 $h$ :平滑長、 $W$ :kernel 関数である。

SPH 法を用いた固体の変形解析では、速度の空間微分によって求めたひずみ速度の時間積分を行い、得られたひずみを弾塑性構成式に適用することで応力を計算し、更新された応力を加速度式に適用することで加速度、速度、変位を得る。本研究では、kernel 関数として SPH 解析で広く用いられている 3 次 Spline 関数を採用した。

### (2) コンクリート部材の破壊の評価

SPH 法は、各粒子の物理量を影響半径  $\kappa h$  内の粒子の物理量の重み付き平均で求めるが、破壊・飛散が生じる問題を取り扱う場合には飛散した粒子が他の粒子の影響半径内に侵入し、不適切な近似を行う恐れがある。そこで、本研究では飛散した粒子の影響半径  $\kappa h$  に破壊・損傷の影響を考慮する方法を検討した。具体的には、式 (2) で得られる有効ひずみ  $\epsilon_{eff}$  を使い、図-2 に従い粒子の影響半径に損傷による不可逆的な低減を導入した。ここで、粒子の空間的な重複を防ぐため、影響半径には閾値  $\epsilon_{lim}$  で下限値  $\kappa'$  をとることを仮定した。

$$\epsilon_{eff} = \frac{2}{3} \sqrt{(\epsilon_{11}^2 + \epsilon_{22}^2 + \epsilon_{33}^2) + 5(\epsilon_{12}\epsilon_{23} + \epsilon_{23}\epsilon_{31} + \epsilon_{31}\epsilon_{12}) - 3(\epsilon_{12}^2 + \epsilon_{23}^2 + \epsilon_{31}^2)} \quad (2)$$

なお、影響半径が異なる粒子間においては、相互作用の対称性を保持させるため、両者の物理量の推定には、損傷度が小さい方を用いることとした。

### (3) 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<sup>2)</sup>である。寸法  $500 \times 500 \times 80 \text{ mm}$ 、圧縮強度  $25.8 \text{ MPa}$ 、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-3 に示す

ような重量 50g, 直径 25mm の鋼製飛翔体を 415m/s で衝突させた場合の結果を用いた。実験では、飛翔体はコンクリート版を貫通し、裏面剥離および表面剥離の発生が確認されている。

本研究で用いた解析モデルを図-4 に示す。解析モデルは、上に示した実験をモデルとし、対称性を考慮したコンクリート版寸法 250×250×80mm の 1/4 モデルを作成した。境界条件はコンクリート版上面に完全固定、各対称面上の粒子に対称面に対して垂直な方向に固定となる境界条件を与えた。図-4 のコンクリート版のモデルにおいて、青色の粒子は固定境界条件を与えた粒子であり、灰色の粒子は境界条件のない粒子である。コンクリートのコンクリート版は粒子径 5.0mm, 飛翔体は 2.5mm で離散化し、初期の平滑長  $h$  は飛翔体、コンクリートともに粒子径を用いた。また、 $\kappa$  は 2.5 とした。材料特性として、コンクリートには圧縮・引張限界面を有する Drucker-Prager の降伏条件を仮定し、引張側にはひずみ軟化を考慮した。鋼材には、von Mises の降伏条件を適用し、降伏後の塑性硬化係数を初期弾性係数の 1/100 と仮定した。各種材料定数を表-1 に示す。

また、影響半径が下限をとる  $\varepsilon_{\text{lim}}$  は 2.0 とした。

表-1 材料物性値

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

#### (4) 解析結果

解析の結果を図-5 および図-6 に示す。図-5 は損傷度を適用しない場合における解析結果である。図において青色粒子は固定境界条件を持つ粒子を、赤色および黄色の粒子はそれぞれ圧縮・引張破壊した粒子を示し、灰色の粒子はいずれにも該当しない領域を示している。図-5 から、コンクリートの表面から裏面に達する破壊が認められ、貫通破壊が表現可能であることがわかった。また、損傷度を考慮した図-6 と考慮しない図-5 の衝突部周辺の破壊性状を比較すると、どちらの場合においても高速度で衝突する飛翔体の貫通を再現可能であるが、損傷度の影響を考慮して粒子の影響範囲を低減させた場合の方が、破壊領域が狭く局所破壊の再現に適していることが推察された。また初速 415[m/s]の飛翔体の衝突後における残存速度は、損傷度を考慮した場合は 154.8[m/s]であり、考慮しない場合は 88.6[m/s]となり、両者で貫通限界速度の判定に大きな相違が生じる可能性が認められた。図-7 は飛翔体が受ける衝撃反力の時刻歴波形で、飛翔体に作用する衝撃反力は、損傷度を考慮した場合の方が作用時間は長くなるが、最大値は小さく、力積で評価すると損傷度を考慮しない場合と比較して 30%程度小さく、コンクリート版の貫通破壊に対する耐荷性能を安全側に評価するためには損傷度の影響を考慮する必要があることが認められた。

#### 参考文献

- 1)Bibiana M. Luccioni, Gabriel F. Aráoz, Nicolás A. Labanda : Defining Erosion Limit for Concrete, International Journal of Protective Structures, Vol.4 No.3, 2013
- 2)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版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

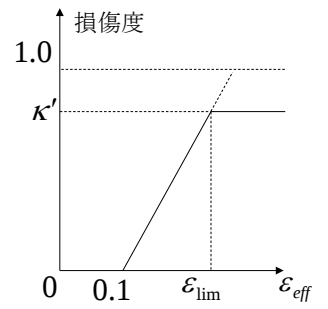


図-2 影響半径の損傷

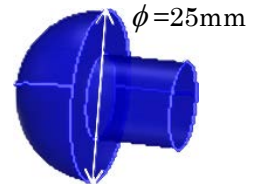


図-3 飛翔体

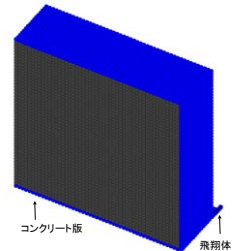


図-4 解析モデル

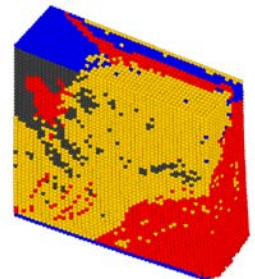


図-5 解析結果 1

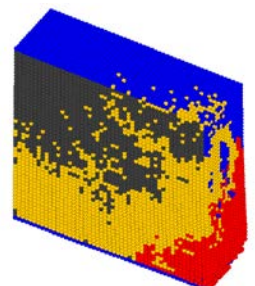


図-6 解析結果 2

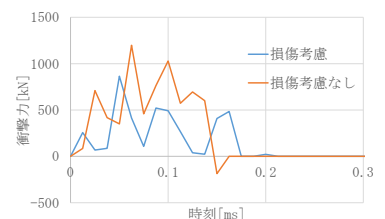


図-7 飛翔体の受ける衝撃力