

論文 高速衝突を受けるコンクリート板の局部損傷解析に対する粒子法の適用性に関する基礎的研究

別府 万寿博^{*1}・園田 佳巨^{*2}

要旨：本研究は、剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部損傷解析に対する粒子法の適用性について検討を行ったものである。まず、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の特徴について説明した。次に、粒子法による数値解析の概要について説明するとともに、重み付き平均の影響範囲やひずみ速度効果をパラメータとして、高速衝突を受けるコンクリート板の局部損傷解析を行った。検討の結果、適切な影響範囲とひずみ速度効果を考慮することにより、実験結果を比較的良好に再現できた。

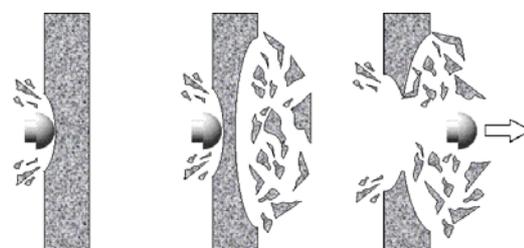
キーワード：粒子法、影響範囲、剛飛翔体、高速衝突、コンクリート板、局部破壊

1. はじめに

剛飛翔体が高速度でコンクリート板に衝突すると、図-1 に示すような表面破壊、裏面剥離、貫通など局部的な破壊（以後、局部破壊という）が生じる。コンクリート板に局部破壊が生じると、コンクリートの破壊片が周囲に飛散する。したがって、これらの飛散片による人命や構造物の二次的被害を防ぐためには、飛散物の質量や速度の分布を精度良く評価できる手法の確立が必要である¹⁾。著者らの一人は、剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の破壊に関して実験的な検討を行うとともに、有限差分法の衝撃解析コードを用いてコンクリート板の局部破壊について検討している²⁾。しかし、飛散物の評価にあたっては、連続体を仮定した解析手法よりも個別要素法や剛体バネモデルに代表される離散モデルの方が適していると考えられる。

著者らは、メッシュレス法的一种である粒子法に着目して、弾性および弾塑性解析への適用性について検討を行ってきた^{3), 4)}。この粒子法は、流体の解析を目的として開発された MPS 法⁵⁾を基本にしているため、飛散現象へも比較的容易に拡張できると考えられる。

本研究は、粒子法を飛散予測手法へ拡張する



(a) 表面破壊 (b) 裏面剥離 (c) 貫通

図-1 局部破壊の種類

前の基礎的段階として、コンクリート板の局部損傷評価に対する粒子法の適用性について検討したものである。まず、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の特徴について説明する。次に、粒子法を用いて、コンクリート板の局部破壊シミュレーションを行う。ここで、重み付き平均化の影響範囲とひずみ速度効果による強度の増加をパラメータとして検討を行った。解析結果に基づいて、コンクリート板の局部損傷の進展過程を説明した。

2. 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の特徴

2.1 実験の概要

鋼製飛翔体を写真-1 に示す。飛翔体はナイロ

*1 防衛大学校 システム工学群建設環境工学科講師 博（工）（正会員）

*2 九州大学 工学研究院建設デザイン部門教授 工博（正会員）

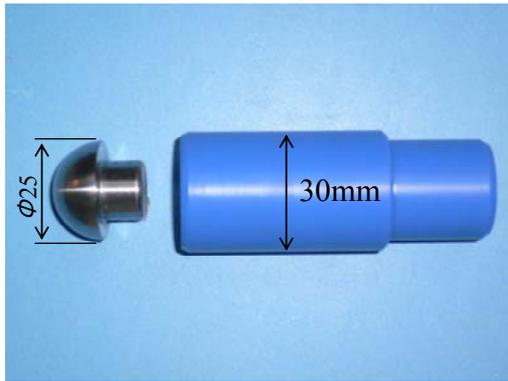


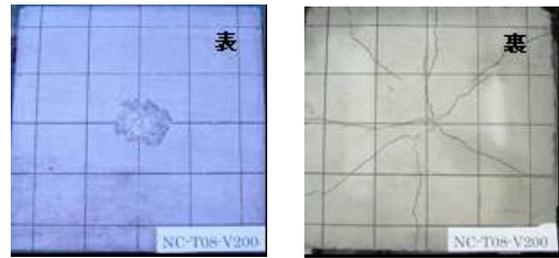
写真-1 飛翔体および固定具

ン製の固定具に組み込まれてエアチャンバーに挿入され、その後、固定具とともに発射される。飛翔体は鋼製 (SS400) であり、先端形状は半球型、直径 25mm、質量 50g である。供試体は、圧縮強度 25N/mm^2 の普通強度コンクリートを用いて無筋コンクリート板供試体を作製した。コンクリート板の寸法は、縦 50cm×横 50cm とし、数種類の板厚の供試体を作製した。

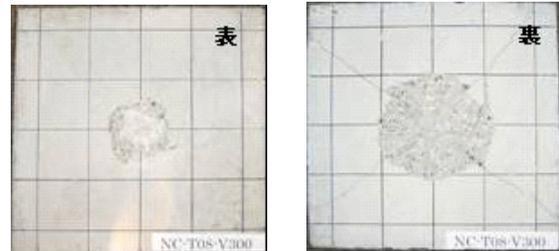
2.2 局部破壊の特徴

写真-2 に、剛飛翔体を板厚 8cm のコンクリート板に衝突させたときに生じた表面破壊、裏面剥離、貫通の状況を示す。衝突速度 210m/s では、表面に直径 10cm 程度の表面破壊が生じ、裏面には放射状のひび割れが発生した。衝突速度 310m/s になると、表面破壊とともに裏面剥離が生じていることがわかる。衝突速度 415m/s になると速度 310m/s より大きな離面剥離が生じるとともに貫通した。

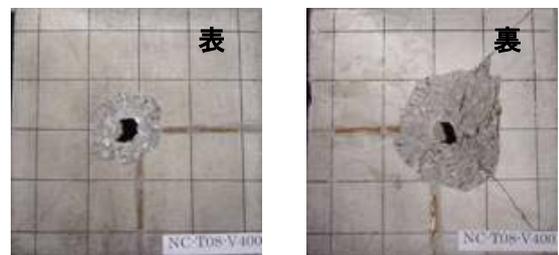
写真-3 は、表面破壊の破壊状況 (衝突速度 310m/s、板厚 10cm) を高速ビデオカメラで撮影 (12500 コマ/秒) した映像である。これより、衝突後 0.64ms においてコンクリートは粉末状に飛散していることがわかる。写真-4 は、裏面剥離したコンクリート板 (衝突速度 310m/s、板厚 8cm) の切断面を示している。これより、裏面には表面よりも大きな破壊領域が形成されるとともに、表面破壊のくぼみの下から発達した斜めのひび割れが確認できる。



(a) 表面破壊 (板厚 8cm, 速度 210m/s)



(b) 裏面剥離 (板厚 8cm, 速度 310m/s)



(c) 貫通 (板厚 8cm, 速度 415m/s)

写真-2 局部破壊の様子

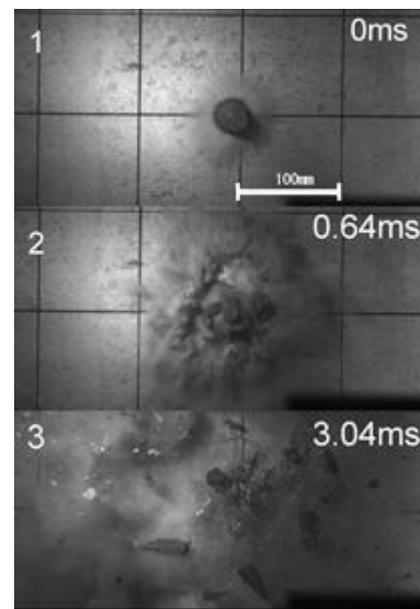


写真-3 表面破壊の映像

3. 粒子法による解析の概要^{3), 4)}

3.1 粒子法の概要

粒子法では、連続体を図-2に示すように有限個の粒子によって表し、連続体の挙動を粒子の運動によって計算する。図-3に示すように、粒

衝突側



写真-4 断面の破壊状況(裏面剥離)

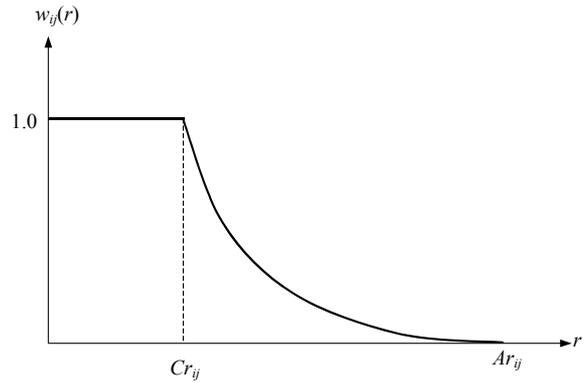


図-4 本研究で用いた重み関数

えられる。

$$m\ddot{u} = F_x \quad m\ddot{v} = F_y \quad I\ddot{\theta} = M \quad (1)$$

ここに、 m は粒子 i の質量、 I は慣性モーメント、 F_x 、 F_y 、 M はそれぞれ相互作用によって粒子 i に生じる x 、 y 、 θ 方向の力とモーメントを示す。

なお、式(1)の積分は、中央差分法により演算を行った。式(1)における x 、 y 、 θ 方向の力とモーメント F_x 、 F_y 、 M は、粒子 i 、 j 間の法線方向および接線方向のひずみに剛性を乗じて座標変換した力を重み付き平均して求められる³⁾。

3.2 解析モデルおよび構成モデル

(1) 飛翔体とコンクリート板のモデル化

本研究では、板厚 8cm のコンクリート板に飛翔体が速度 300m/s で衝突する場合を対象として、2次元軸対称系でモデル化を行った。粒子法における2次元軸対称系の概念と解析モデルを図-5に示す。飛翔体とコンクリート板の中心を対称軸として断面を離散化した。ただし、軸対称問題では、中心からの距離が離れるにしたがって質量、剛性および抵抗力がその位置の周長に比例して大きくなる。そこで、本解析では、中心から R だけ離れた位置の質量、剛性および強度として、単位厚さあたりの質量、剛性および強度にその位置の周長 $2\pi R$ を乗じた値を用いている。なお、粒子は格子状に配列し、その直径は0.5cmである。実験結果より、飛翔体には大きな変形は確認できなかったため、鋼製飛翔体は弾性体としてモデル化した。初期条件として、飛翔体の粒子に初速度 300m/s を与え、境界条件としてコンクリート板の支持部を固定した。

Continuum body

A party of particles

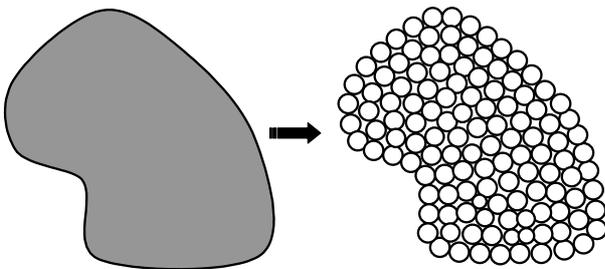


図-2 粒子法概念図

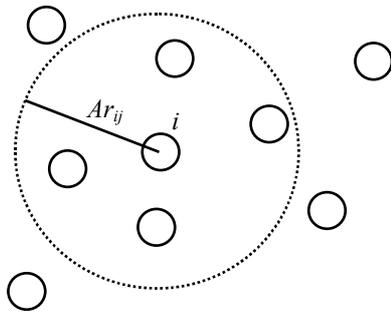


図-3 影響範囲

子 i と半径 Ar_{ij} に囲まれた円(影響範囲と呼ぶ)内に存在する粒子を考える。本研究では、粒子 i に作用する力とモーメントを、粒子間のバネ力を重み付き平均することで求めている。重み関数には様々な形が考えられるが、図-4に示す重み関数を用いている。図中の Cr_{ij} は、粒子 i 、 j の半径の和を示している。

さて、粒子 i の水平変位 u 、鉛直変位 v および回転変位 θ に関する運動方程式は、次のように与

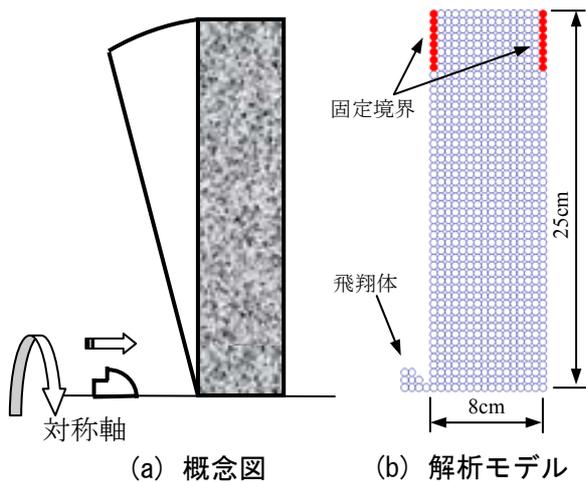


図-5 2次元軸対称モデル

飛翔体とコンクリート板との接触部については、重み付き平均化は行わず、飛翔体とコンクリート板は別個の集合体として取り扱っている。両者が接触した場合には、接触粒子間に飛翔体とコンクリートの剛性を平均した接触バネを挿入して衝突力を評価した。

(2) コンクリートの垂直および接線方向バネ

粒子法では、粒子間の垂直および接線方向バネによりコンクリートの材料特性を記述する⁴⁾。コンクリートの法線方向のバネは、圧縮側はバイリニア型の硬化塑性モデルとし、引張側は引張強度後に線形軟化するモデルとした。接線方向については、バイリニアのMohr-Coulomb型の降伏基準を用いた。コンクリートのヤング係数とポアソン比は、材料試験結果を参考にして20kN/mm²および0.15に、圧縮および引張強度はそれぞれ25.0、2.5 N/mm²とした。圧縮側の2次勾配および引張側の軟化勾配は、それぞれ初期勾配の0.1倍および100N/mm²と仮定した。

3.3 解析パラメータ

これまでに、格子状の配列を用いて重み付き平均の影響範囲について検討を行っている^{3), 4)}。一例として、図-6に粒子法によるコンクリート板の一軸圧縮解析の結果⁴⁾を示す。ここで、影響範囲の指標 β は、重み付き平均化の領域の範囲を示している。 $\beta=1.0$ の場合には、個別要素法と同じで、上下左右の4個の粒子と力の相互作用

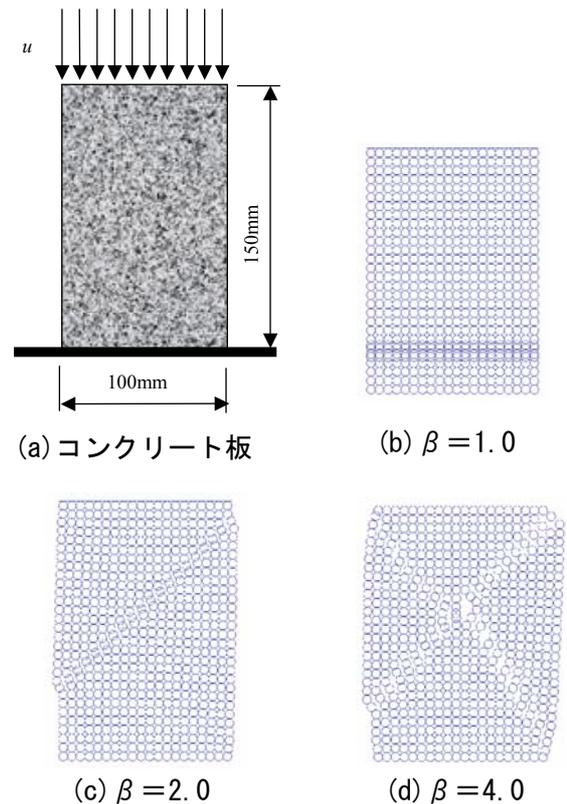


図-6 一軸圧縮を受けるコンクリート板の解析結果⁴⁾

用を行う。 $\beta=2.0$ および $\beta=4.0$ の場合には、それぞれ周囲の8個および12個の粒子と相互作用を行う。図より、 $\beta=1.0$ の場合には板下部の1層のみに局所化するが、 β を大きくして相互作用する範囲を広げることで、連続体の挙動に近づき斜めのすべり破壊も表現できることがわかる。そこで、本解析でも β を1.0~4.0に変化させてその影響を考察した。

また、これまでに行ったコンクリート板の局部破壊に関する検討²⁾より、コンクリートのひずみ速度効果が解析結果に与える影響が大きいことがわかっている。そこで、圧縮および引張強度の増加率をパラメータとした。ここで、既往の研究⁶⁾によると、ひずみ速度 10^0 (1/s)以上を与えたとき、引張強度の増加率は圧縮強度に比べて2倍程度高いため、引張強度と圧縮強度の増加率の比は2と仮定している。なお、以降の考察における強度増加の値は、圧縮強度に対して示している。

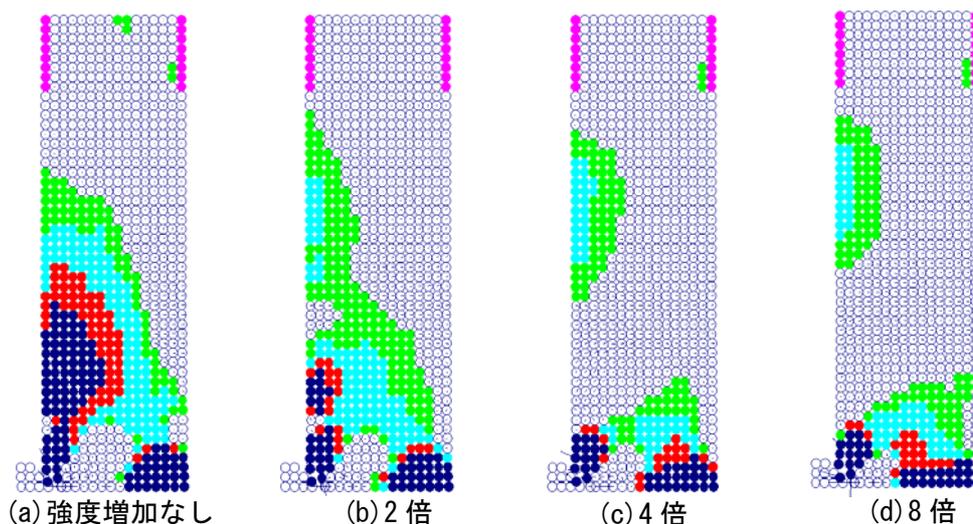


図-7 ひずみ速度効果による強度増加の影響 ($\beta=4.0$)

4. 解析結果および考察

4.1 ひずみ速度効果および影響範囲の影響

影響範囲が解析結果に与える影響は後述することとし、図-7に、影響範囲 $\beta=4.0$ を用いた場合に、ひずみ速度効果による強度増加が解析結果に与える影響を示す。図は、衝突後 $t=0.14\text{ms}$ 時の引張ひずみの分布を示しており、引張ひずみが 1000μ 以下は黄緑、 $1000\sim 5000\mu$ は水色、 $5000\sim 10000\mu$ は赤色、 10000μ 以上は紺色で示している。図-7より、ひずみ速度効果による強度の増加を考慮しない場合は、裏面よりも表面側の広い範囲においてひび割れが発生している。これは、衝突によりコンクリート板が局部的に大きく変形するため、広い範囲で損傷したものと考えられる。この表面側のひび割れ領域は、ひずみ速度効果を考慮すると急激に小さくなった。なお、この位置におけるひび割れは実験では確認できなかった。

強度を2倍に増加させると、表面側のひび割れの大きさは低減するが、領域はさほど変わらない。しかし、強度の増加を4倍～8倍に大きくすると、衝突部での塑性に使われる仕事が増え、引張強度も増加するため、表面のひび割れは飛翔体が衝突した部位近傍に集中している。また、裏面のひび割れ領域も写真-4に示したように衝突位置から斜め方向に発達し、表面および裏面損傷の直径やその大小関係も実験にほぼ一致

している。ここで、斜め方向のひび割れ領域の方向が異なるのは、解析モデルの離散化が粗いため飛翔体の先端形状を正確に模擬していないことに起因していると考えている。ちなみに、これらの値から既往の強度増加率評価式⁶⁾を用いてひずみ速度を推定すると $10^1\sim 10^3$ (1/s)であった。

図-8に、強度増加が8倍の場合に、影響範囲の大きさが解析結果に与える影響を示す。図は、衝突後 $t=0.14\text{ms}$ 時の引張ひずみの分布を示している。これより、格子状配列の場合、 $\beta=1.0$ では衝突部真裏にひび割れは発生するが、衝突部からの斜め方向ひび割れは生じなかった。一方、重み付き平均化を行うことで、斜め方向のひび割れ領域が発達しており、実験結果と整合することがわかる。

4.2 破壊の進展メカニズム

図-9に、影響範囲は $\beta=4.0$ 、強度の増加が8倍のときの損傷の進展過程を示す。これより、飛翔体が衝突すると、衝突部位の表面近傍にひび割れが発生していることがわかる。次に、時刻 $t=0.03\text{ms}$ において、コンクリート板裏面にひび割れが発生している。応力波の波動伝播理論によると、波動伝播速度 c は、ヤング係数を E 、密度を ρ とすると $c=\sqrt{E/\rho}$ で与えられ、コンクリートの場合は約 3000m/s となる。したがって、コンクリート板厚が 8cm の場合、応力波が裏面に到達するのは約 0.027ms となり、本解析結果

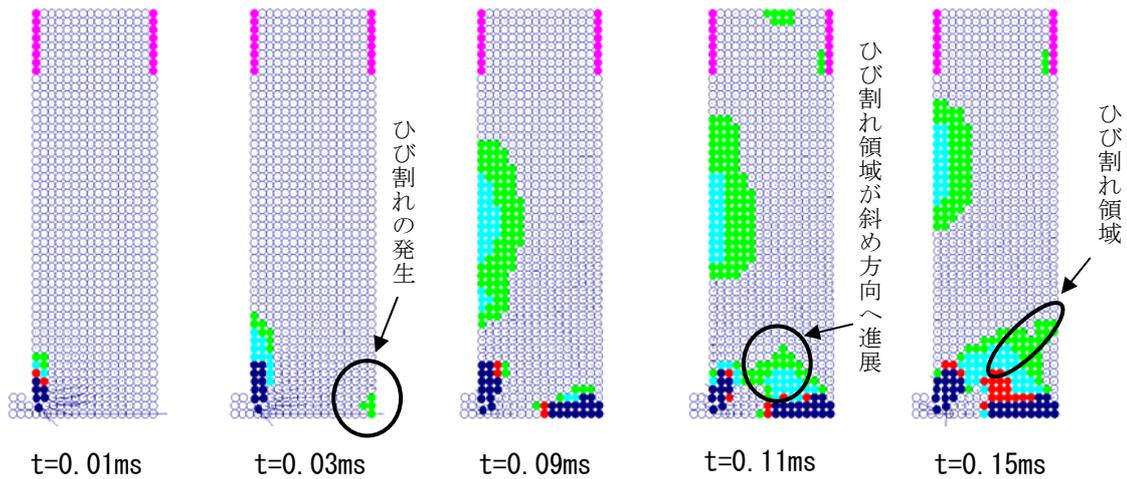


図-9 損傷進展過程 ($\beta=4.0$ ・強度増加8倍)

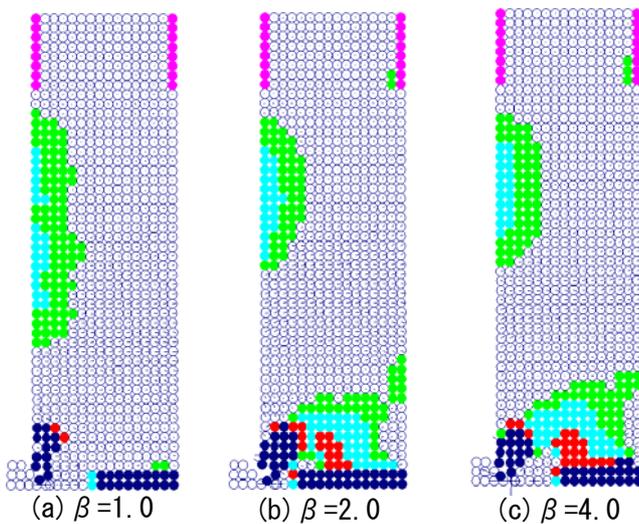


図-8 影響範囲の影響 (強度増加8倍)

と一致する。すなわち、この裏面のひび割れは、飛翔体の衝突によって生じた圧縮応力波が裏面に到達し、自由端反射して生じたものと考えられる。その後は、 $t=0.09\text{ms}$ まで衝突部真裏のひび割れは垂直に進展し、表面側ではひび割れ領域が広がっている。最終的に、板の局所的な変形によって衝突部から斜め方向のひび割れ領域が発達して、最終的な斜めひび割れを形成している。

5. 結言

本研究は、剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリートの局部損傷解析に対する粒子法の適用性を検討したものである。重み付き平均化の影響範囲およびひずみ速度効果による強度の増加を適切に考慮することで、粒子法によりコンク

リート板の局部損傷を比較的良く再現することができた。ただし、材料モデルおよび影響範囲の設定については、今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 原木大輔, 香月智, 藤掛一典: 個別要素法のコンクリート破片飛散シミュレーションへの応用, 応用力学論文集, Vol.9, pp.667-678, 2006.8
- 2) 三輪幸治, 別府万寿博, 大野友則, 片山雅英: 剛飛翔体の高速衝突を受けて生じるコンクリート板の局部破壊に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.2140, 2006.7
- 3) 別府万寿博, 園田佳巨, 玉井宏樹: 粒子法による鋼およびRCはりの弾塑性衝撃応答解析に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1179-1188, 2006.3
- 4) 別府万寿博, 園田佳巨, 玉井宏樹: 粒子法によるコンクリートおよびRCはりの非線形解析に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.2010, 2006.7
- 5) 越塚誠一: 粒子法, 丸善, 2005.2
- 6) 藤掛一典, 山根茂樹, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸引張試験においてコンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが引張特性に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.592/V-39, pp.83-95, 1998.5