

## 飛来物衝突を受ける RC 版の破壊メカニズムに関する数値解析的考察

防衛大学校 学生会員 ○片岡 新之介 正会員 別府 万寿博 市野 宏嘉

## 1. 緒言

RC 版が十数 m/s 以上の高速度の衝突を受けると、曲げやせん断破壊のような全体破壊とは異なり、表面破壊・貫入、裏面剥離および貫通の局部破壊が生じることが知られている<sup>1)</sup>。しかし、これらの局部破壊が生じるメカニズムについては未解明の点が多く、衝突速度が破壊メカニズムに与える影響について詳細な検討を行った例は少ない。本研究は、飛来物の衝突を受ける RC 版の破壊メカニズムを解明するため、数値解析的な考察を行ったものである。

## 2. 衝突を受ける RC 版の数値シミュレーション

衝突を受ける RC 版の破壊メカニズムを調べるため、既往の研究<sup>2)</sup>を参考に、RC 版に剛飛翔体を衝突させる数値シミュレーションを行った。解析には、衝撃解析コード AUTODYN (Ver.16) を使用し、対称性を考慮して図-1 に示す 1/4 モデルを作成した。コンクリートは六面体要素でモデル化し、鉄筋および裏面支持具はそれぞれはりおよびシェル要素でモデル化した。境界条件については、裏面支持具の四隅の節点の  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸方向の変位を固定した。コンクリートの材料モデルは、図-2 に示す非線形 Drucker-Prager 型の降伏関数を用いて弾塑性の挙動を再現し、破壊の判定は負圧の基準を用いて行った。コンクリートの動的圧縮および引張強度は、藤掛らの式<sup>3)</sup>および Ross らの式<sup>3)</sup>を用いてひずみ速度  $10^1 \text{ s}^{-1}$  における強度倍率を算定し、静的強度に乗じて求めた。表-1 に、コンクリートの解析定数を示す。

## 3. RC 版の動的な力の釣合いと断面力

数値解析の結果に基づいて、RC 版の自由物体における断面力の特性から、RC 版に生じる破壊の進展を考察する。RC 版の断面 ( $zx$  平面) に生じる断面力の分布を調べるため、図-3 に示すように、 $x$  軸の正方向 400mm の範囲に 100mm 間隔の断面を選択し、この断面内の  $z$  軸方向 (高さ方向) における 5mm 間隔 (25 点) のせん断応力および加速度を出力した。このせん断応力を、 $zx$  面内で積分してせん断力を算出した。また、図-4 に示すように RC 版を 100mm 間隔で円盤状に分割して質量を求め、加速度を乗じて慣性力を算出した。なお、飛翔体の衝突速度が RC 版の破壊メカニズムに与える影響を考察する

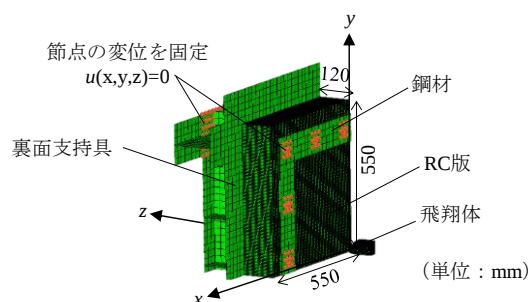
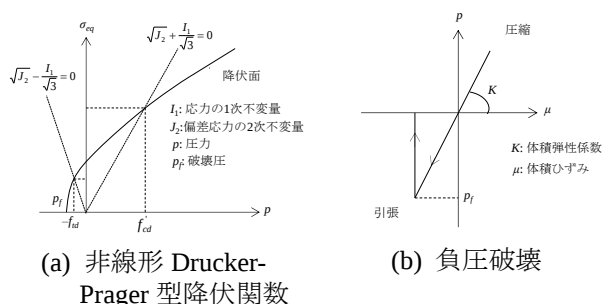


図-1 飛翔体および RC 版試験体の解析モデル



(a) 非線形 Drucker-Prager 型降伏関数

(b) 負圧破壊

図-2 降伏関数および破壊則

表-1 コンクリートの解析定数

| 解析定数         | 記号                  | 数値        | 単位               |
|--------------|---------------------|-----------|------------------|
| ヤング係数        | $E$                 | 25        | $\text{kN/mm}^2$ |
| ポアソン比        | $\nu$               | 0.2       | -                |
| 静的 (動的) 圧縮強度 | $f'_{cs} (f'_{cd})$ | 30 (50.9) | $\text{N/mm}^2$  |
| 静的 (動的) 引張強度 | $f_s (f_d)$         | 2.2 (9.0) | $\text{N/mm}^2$  |
| 破壊圧          | $p_f$               | -6.0      | $\text{N/mm}^2$  |

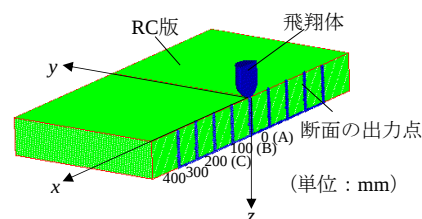


図-3 断面の出力点位置

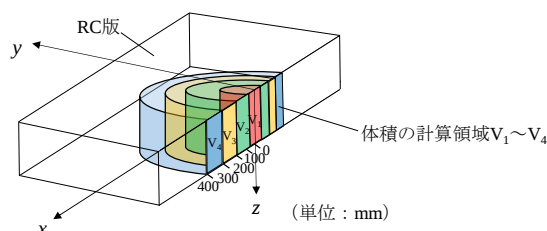


図-4 慣性力算出時の RC 版の体積

キーワード 飛来物, 衝突実験, 数値解析, 鉄筋コンクリート版, 破壊メカニズム

連絡先 〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校 建設環境工学科 TEL 046-841-3810

ため、運動エネルギーを衝突速度 54m/s のケースと同一 (6800J) とした上で、飛翔体の密度を変化させ、質量を 128kg、衝突速度を 10m/s に設定したケースについても検討を行った。

図-5 に、RC 版断面のひび割れ進展性状を示す。衝突速度 10m/s では、時刻 0.45ms に斜めひび割れが生じている。その後は、いくつかの斜めひび割れが進展し、時刻 8.0ms において最終的な破壊性状を形成した。衝突速度 54m/s においては、衝突によって生じる応力波の伝播速度を波動伝播理論から算出すると 3475m/s となり、時刻 0.03ms で裏面に到達する。しかし、時刻 0.05ms においても RC 版の断面にひび割れが生じることはなく、時刻 0.2ms において RC 版断面に斜めひび割れが発生し、時刻 0.8ms で最終的な破壊を形成した。

図-6 に、RC 版に作用する衝撃荷重、慣性力および支点反力～時間関係を示す。衝突速度 10m/s では、時刻約 1.5ms で衝撃荷重および慣性力は最大値約 200kN を示し、時刻 2ms で急激に減少した。また、その直後に支点反力が生じて増大している。一方で、衝突速度 54m/s では衝突直後から時刻 0.5ms の間に衝撃荷重および慣性力が増大し、それぞれ約 400kN～500kN 程度の最大値を示した。この間に支点反力が生じることはなく、衝撃荷重は慣性力と釣合っている。図-7 に、衝撃荷重および RC 版の zx 断面の 0mm～400mm (断面片側) に生じるせん断力～時間関係を示す。衝突速度 10m/s では、衝撃荷重が最大値を示した時刻約 1ms で、せん断力は最大値約 150kN を示し、時刻 2ms で急激に低下した後時刻 15ms まで緩やかに低下している。図-5 に示したひび割れの進展状況と比較すると、時刻約 1ms 以降において RC 版に斜めひび割れが進展する時刻は、せん断力が緩やかに減少する時刻と対応している。衝突速度 54m/s においては、衝撃荷重が最大値を示した時刻 0.3ms でせん断力は最大値約 180kN となるが、時刻 1ms 以降はほぼゼロを示している。以上から、衝突速度 10m/s では、衝突直後は衝撃荷重と慣性力が釣合うとともに、衝撃荷重が急激に低下した後に緩やかに減少して支点反力が生じる。この間に生じるせん断力に対応して、RC 版は全体的な破壊を示した。一方で、衝突速度 54m/s においては、衝突直後に衝撃荷重が慣性力と釣合う間において、せん断力が急激に増加して、RC 版は局部的な破壊を示すものと考えられる。

#### 4. 結言

本研究は、剛飛翔体の衝突を受ける RC 版の破壊メカニズムについて数値解析的な考察を行ったものである。その結果、衝突速度 10m/s では、衝突直後は衝撃荷重と慣性力が釣合い、その後に継続的に生じるせん断力に対応して RC 版には全体的な破壊が形成された。衝突速度 54m/s においては、衝突直後に RC 版の断面に生じるせん断力が急激に増加することで、局部的な破壊が生じることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 防衛施設学会：衝突作用を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン—評価手法と対策技術—，2018。
- 2) 片岡新之介，別府万寿博，市野宏嘉：剛飛翔体の中速度衝突を受ける鉄筋コンクリート版の破壊メカニズムに関する研究，土木学会関東支部，第 44 回技術研究発表会，2016。
- 3) K. Fujikake, K. Mori, K. Uebayashi, T. Ohno and J. Mizuno: Dynamic properties of concrete materials with high rates of tri-axial compressive loads, Structures under Shock & Impact VI, pp.511-522, 2000。

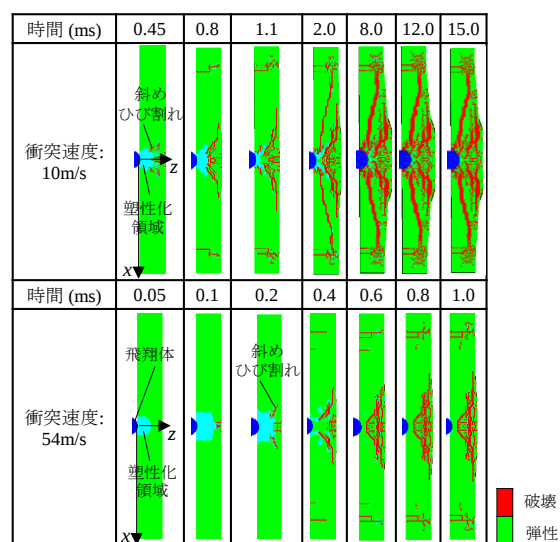
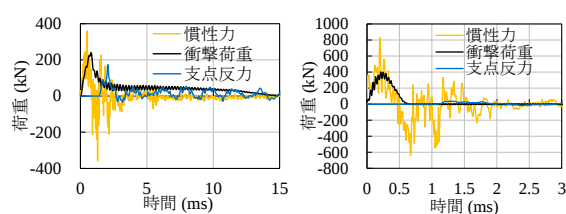
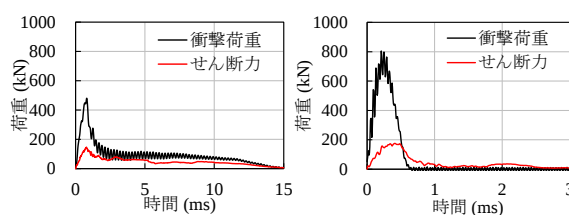


図-5 RC 版断面におけるひび割れの進展状況



(a) 衝突速度: 10m/s (b) 衝突速度: 54m/s

図-6 衝撃荷重，支点反力および慣性力～時間関係



(a) 衝突速度: 10m/s (b) 衝突速度: 54m/s

図-7 衝撃荷重およびせん断力～時間関係