

剛飛翔体の衝突を受ける RC 版の局部破壊メカニズムに関する考察

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¹⁾。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²⁾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³⁾および Ross らの式⁴⁾を用いてひずみ速度 10^1 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。解析ケースは 衝突速度 54m/s のケースについて解析を行った。

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 550mm の範囲に 5mm 間隔 (110 点)、 z 軸方向 (高さ方向) に 5mm 間隔 (25 点) の節点におけるせん断応力および加速度を出力した。このせん断応力を高さ方向に積分して単位長さあたりのせん断力を算出し、図-4 に示すように RC 版を 5mm 間隔で円筒状に分割した周長を乗じることで RC 版内のせん断力分布を求めた。また、加速度については高さ方向の平均値 (x 方向に 5mm 間隔) を算出し、

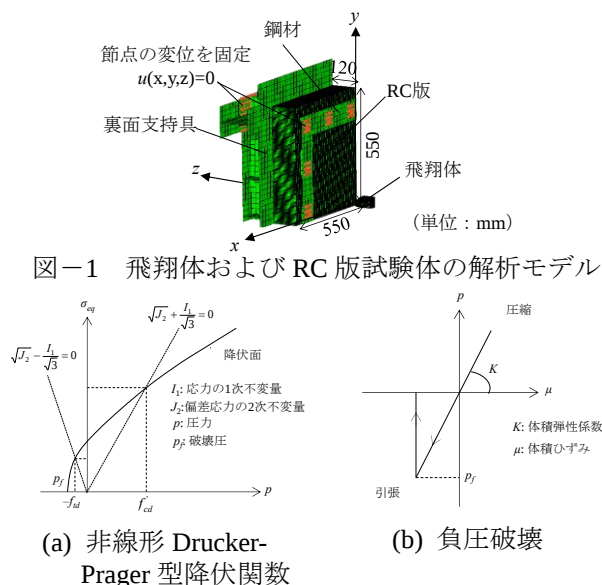


図-1 飛翔体および RC 版試験体の解析モデル

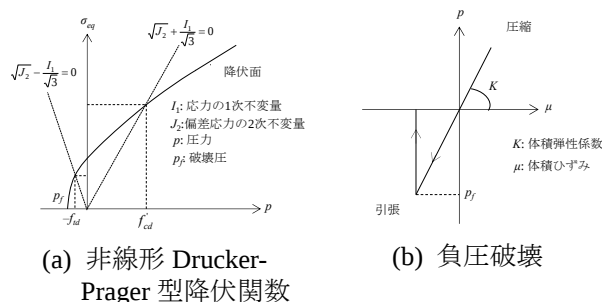
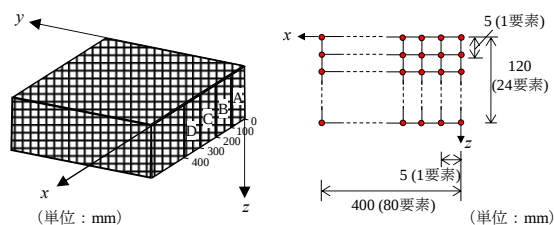


図-2 降伏関数および破壊則

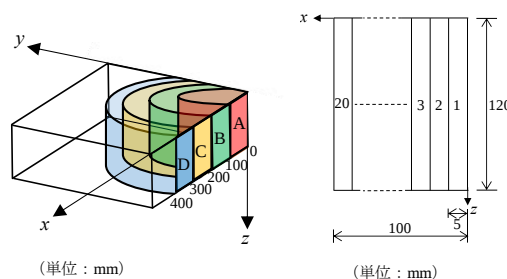
表-1 コンクリートの解析定数

解析定数	記号	数値	単位
ヤング係数	E	25	kN/mm^2
ポアソン比	ν	0.2	-
静的 (動的) 圧縮強度	$f_{cs} (f_{cd})$	30 (50.9)	N/mm^2
静的 (動的) 引張強度	$f_{ts} (f_{td})$	2.2 (9.0)	N/mm^2
破壊圧	p_f	-6.0	N/mm^2



(a) 出力範囲 (模式図) (b) A~D 面の出力位置

図-3 RC 版の加速度および応力の出力点



(a) 質量の計算 (模式図) (b) A 面の算定寸法

図-4 RC 版の質量の計算領域

キーワード 剛飛翔体, RC 版, 慣性力, せん断力, 局部破壊メカニズム

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 E-mail: ed17003@nda.ac.jp

図-4に示す円筒形の体積から算出したRC版の質量を平均した加速度に乗じることで慣性力を算出した。

図-5に、RC版断面のひび割れ進展性状を示す。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、衝撃荷重、慣性力および支点反力～時間関係を示す。衝撃荷重は、飛翔体の加速度に質量を乗じて算出した。衝突直後から時刻0.5msの間において衝撃荷重および慣性力が増大し、それぞれ時刻約0.3msにおいて約400kN～500kN程度の最大値を示しており、両者はほぼ同様の波形を示している。また、支点反力については時刻約1ms以降において生じており、衝撃荷重と慣性力が生じる間においては、支点反力が生じることはなく、衝撃荷重はRC版に生じる慣性力と釣合うと考えられる。

図-7に、RC版のzx断面(0mm～400mm)に生じるせん断力～時間関係を示す。時刻0.05msにおいては、RC版の中心から100mmの範囲においてせん断力が増大し、約200kNを示している。その後、せん断力が増大し、衝撃荷重が最大値を示す前後の時刻0.2msおよび0.4msにおいてせん断力は約600kNおよび700kNを示した。図-5に示したRC版断面のひび割れの進展性状から、斜めひび割れが進展する時刻は約0.2ms～0.4msであり、せん断力が増大する時刻に対応している。時刻0.6ms以降では、中心部付近のせん断力は減少し、中心から100mmよりも支点側のせん断力が増大した後に減少する傾向を示した。以上から、RC版断面における斜めひび割れは衝撃荷重が慣性力と釣合う間に増大するせん断力によって斜めひび割れが進展し、RC版に局部破壊が生じるものと考えられる。

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考察を行ったものである。その結果、衝突によって衝撃荷重と慣性力が釣合う間にRC版の中心付近にせん断力が増大し、RC断面に斜めひび割れが進展することで局部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。
- 4) Ross, C.A., Thompson, P.Y. and Tedesco, J.W. : Split-hopkinson pressure-bar tests on concrete and mortar in tension and compression, ACI Material Journal, Vol.86, pp.475-481, 1989。

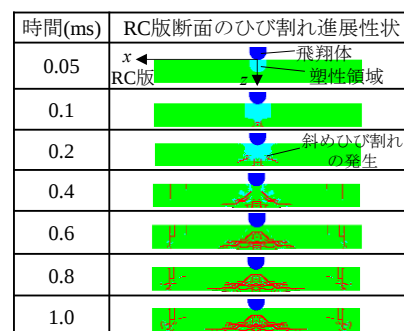


図-5 RC版断面のひび割れ進展性状

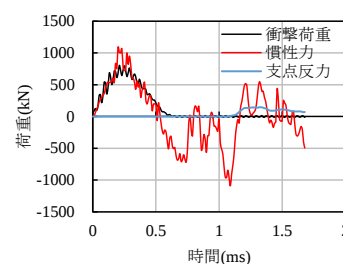


図-6 衝撃荷重、慣性力および
支点反力～時間関係

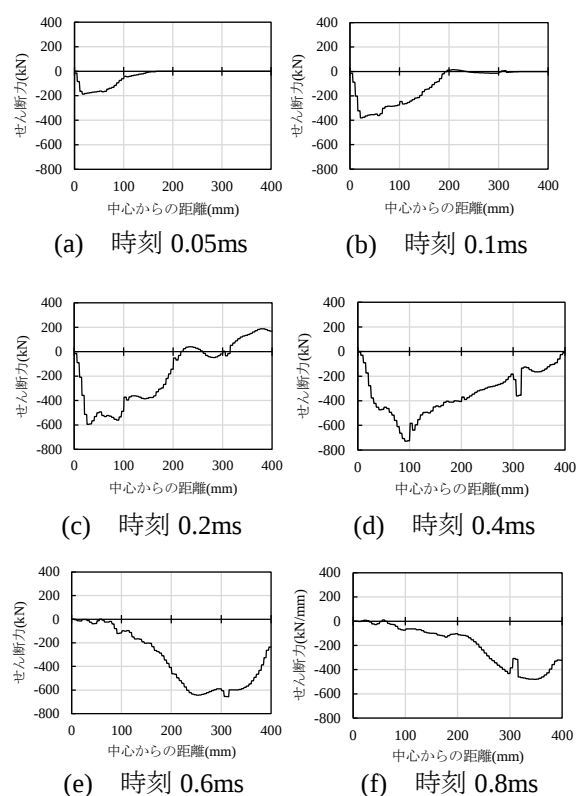


図-7 RC版のせん断力分布