

剛飛翔体の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版が数十 m/s 以上の速度を有する飛来物の衝突を受けると、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おり、多くの局部破壊評価式が提案されている¹⁾。しかし、これらの式による評価結果には比較的大きな差異が生じることが指摘されており¹⁾、衝突条件が実験結果に与える影響やRC版の破壊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明らかにするため、数値解析的な考察を行ったものである。

2. 衝突実験の再現解析

剛飛翔体の衝突を受けるRC版の衝撃応答を調べるため、著者らが行った剛飛翔体の衝突実験²⁾の再現解析を行った。解析は、汎用の衝撃解析コードであるAUTODYN Ver.16を用いて行った。解析モデルは図-1に示すような1/4モデルを作成し、コンクリートは要素寸法5mm×5mm×5mmの六面体で要素分割した。鉄筋は要素寸法5mmのはり要素でモデル化し、コンクリート要素との節点を完全結合した。コンクリートの構成則については、図-2に示すような非線形Drucker-Prager型の降伏関数を適用し、破壊の判定については負圧による破壊判定を行った。表に、コンクリートの解析定数を示す。コンクリートの動的圧縮および引張強度については、それぞれ藤掛らの式³⁾およびRossらの式³⁾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。コンクリートのモデルでは、要素の大変形による計算の中断を回避するため、相当ひずみの限界値による要素削除を行った。

図-3に、速度54m/sで衝突させた版厚12cmのRC版の断面における破壊性状および速度分布を示す。解析結果では、斜めひび割れの内側の要素の大部分が破壊と判定され、裏面側の要素は衝突方向に10m/s以上の速度を示している。以上から、実験において生じた裏面剥離を解析により再現したと考えられる。図-4に、飛翔体の変位、速度、衝撃荷重およびRC版の支点反力を示す。飛翔体の変位、速度および衝撃荷重の波形については、実験結果とほぼ一致した。RC版の支点反力が増大する時刻は、実験結果は1.8msであるのに対し、解析結果は1msとなったが、衝撃荷重が除荷された後に支点反力が生じる傾向は同様である。

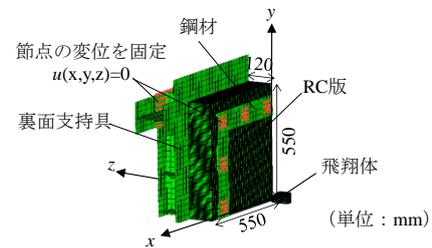
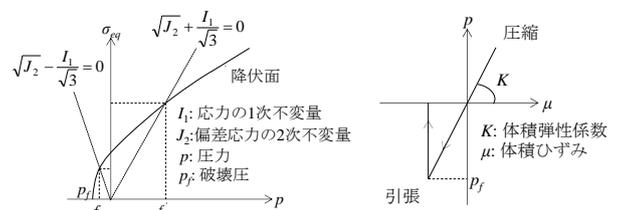


図-1 飛翔体およびRC版試験体の解析モデル

表 コンクリートの解析定数

解析定数	記号	数値	単位	解析定数	記号	数値	単位
ヤング係数	E	25	kN/mm ²	静的引張強度	f_{ts}	2.2	N/mm ²
ポアソン比	ν	0.2	-	動的引張強度	f_{td}	9.0	N/mm ²
静的圧縮強度	f_{cs}	30	N/mm ²	破壊圧	p_f	-6.0	N/mm ²
動的圧縮強度	f_{cd}	50.9	N/mm ²	相当ひずみの限界値	ϵ_{eff}	250	%



(a) 非線形 Drucker-Prager 型降伏関数 (b) 負圧破壊基準型降伏関数

図-2 構成モデル

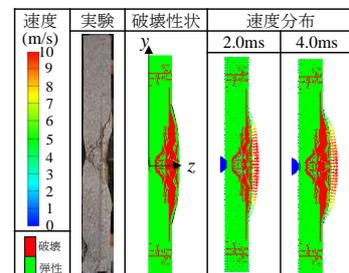


図-3 破壊性状および速度分布

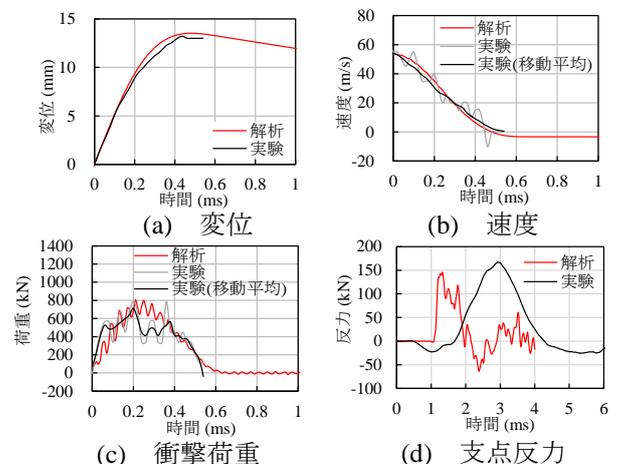


図-4 飛翔体の変位、速度、衝撃荷重およびRC版の支点反力～時間関係

キーワード 飛来物衝突, 鉄筋コンクリート版, 局部破壊, 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

3. RC版の局部破壊メカニズム

数値解析の結果に基づいて、図-5に示すようなRC版の自由物体における衝撃荷重、慣性力およびせん断力による動的力の釣合いを考察する。図-6に示すように、RC版の断面に生じる断面力の分布を得るため、 x 軸方向に $\pm 400\text{mm}$ の範囲(図中の斜線部)における 5mm 間隔の断面を選択し、この断面内の z 軸方向における 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 z 軸および x 軸方向に積分することでせん断力を算出し、図-7に示すようにRC版を 5mm 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。

図-8に、RC版断面のひび割れ進展性状を示す。時刻 0.2ms において、RC版断面に斜めひび割れが生じて進展し、時刻 1.0ms において裏面剥離が形成された。図-9に、RC版に作用する衝撃荷重、慣性力および切断面のせん断力～時間関係を示す。衝突直後から時刻 0.5ms の間にせん断力および慣性力が増大し、それぞれ約 250kN および 400kN の最大値を示した。図-8から、RC版断面の斜めひび割れは時刻 0.2ms から生じており、せん断力の増大に対応している。図-10に、衝撃荷重、慣性力および支点反力～時間関係を示す。図から、衝撃荷重の最大値が約 400kN であり、慣性力の最大値とほぼ同様の値を示している。また、波形の山なりの継続時間はいずれも約 0.6ms であり、同様の応答を示した。支点反力については、衝撃荷重および慣性力が初期に応答する間においては、ほぼゼロを示している。

以上から、本衝突条件においては、衝撃荷重は慣性力と釣合い、断面に生じるせん断力に対応して損傷が進展すると考えられる。

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、衝撃荷重が作用する間においては、衝撃荷重は慣性力と釣合うことがわかった。また、RC版の断面に生じたせん断力に対応し、斜めひび割れが進展して損傷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回関東支部技術研究発表会，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.

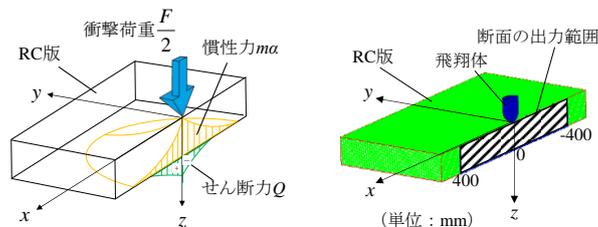


図-5 動的力の釣合い図 図-6 出力点位置

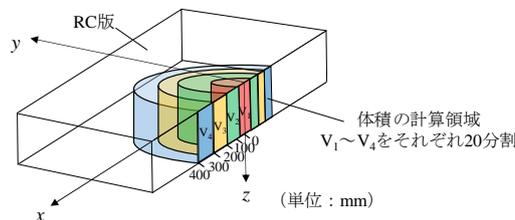


図-7 慣性力算出時の体積(5mm間隔)

時間(ms)	RC版断面のひび割れ進展性状
0.05	飛翔体 RC版 塑性領域
0.1	
0.2	斜めひび割れの発生
0.4	
0.6	
0.8	
1.0	

図-8 RC版断面のひび割れ進展性状

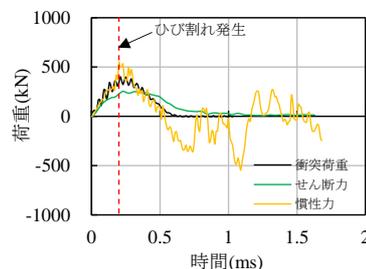


図-9 衝撃荷重、せん断力および慣性力～時間関係

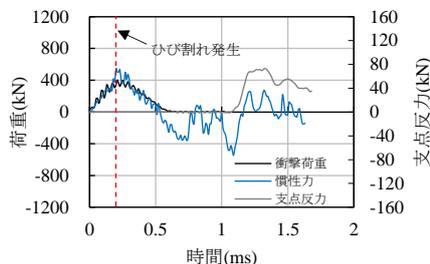


図-10 衝撃荷重、慣性力および支点反力～時間関係