

柔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検討

防衛大学校 学生会員 ○片岡 新之介
防衛大学校 正会員 別府 万寿博

1. 緒言

近年、竜巻に伴う飛来物や火山噴石の衝突を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃設計法の確立が急務となっている。これらの飛来物が衝突する場合、飛来物に変形が生じる（柔飛翔体）ことが考えられる。鉄筋コンクリート（以下 RC と呼ぶ）部材への衝突については、主として飛来物に変形しない剛飛翔体を対象とする場合が多く、柔飛翔体の衝突を受ける RC 版の破壊メカニズムを検討した例は少ない。本研究では、柔飛翔体の衝突を受ける RC 版の破壊メカニズムについて検討を行った。

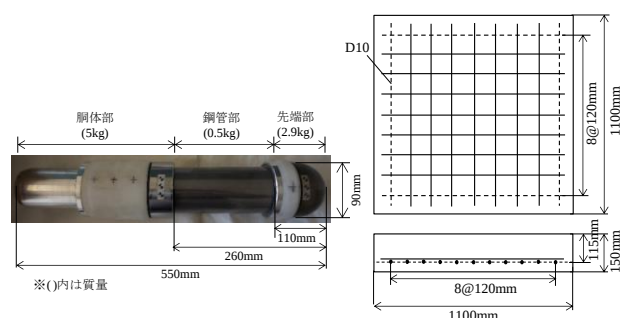
2. 柔飛翔体の衝突実験

柔飛翔体の衝突を受ける RC 版の破壊性状や飛翔体の変形を調べるために衝突実験を行った。実験には、図-1(a)に示す半球形の先端部と胴体部および鋼管部（JIS STKM11A）を有する質量 8.4kg の飛翔体を用いて、図-1(b)に示す厚さ 15cm の RC 版に衝突させた。なお、図-2に示すように RC 版は裏面支持具にボルトで固定し、四辺支持とした。実験では、衝突時の飛翔体の運動を撮影速度 50000frame/s の高速カメラで側面から撮影し、飛翔体の変位時刻歴から速度および加速度を算定した。

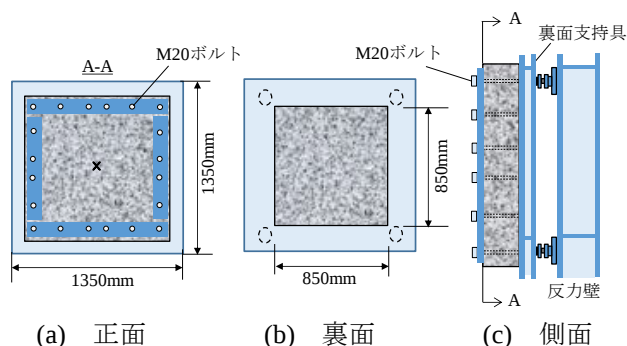
表-1に、実験ケースと実験結果を示す。衝突速度は 52m/s～66m/s に設定し、破壊モードは既往の研究を参考に局部破壊のモードとして整理した¹⁾。図-3に、RC 版の破壊性状を示す。RC 版の断面には、衝突部から斜めひび割れが進展している。また、鋼管部には座屈変形が生じ、ケース 1 およびケース 2 の変形量はそれぞれ 37.9mm および 47.9mm であった。剛飛翔体の局部破壊評価式である電中研式²⁾を用いて、RC 版の裏面剥離が発生する衝突速度を算定すると 40m/s 以上である。一方、実験ではケース 1 の衝突速度 52m/s においても表面破壊であることから、鋼管部の変形によって RC 版の損傷が低減されたと考えられる。

3. 衝突実験の数値シミュレーション

RC 版に生じた損傷の進展状況を詳細に調べるため、図-4に示すように AUTODYN Ver.15 を用いて 1/4 対称モデルを作成し、数値シミュレーションを行った。飛翔体は先端部と胴体部を固体要素、鋼管部はシェル要素（2mm×2mm）でモデル化した。RC 版については固体要素（5mm×5mm×5mm）でモデル化し、ボルトで固定した位置の節点については x および y 軸方向の自由度を固定した。また、鉄筋については梁要素（5mm）でモデル化し、コンクリートの節点と結合した。コンクリートの構成則には Drucker-



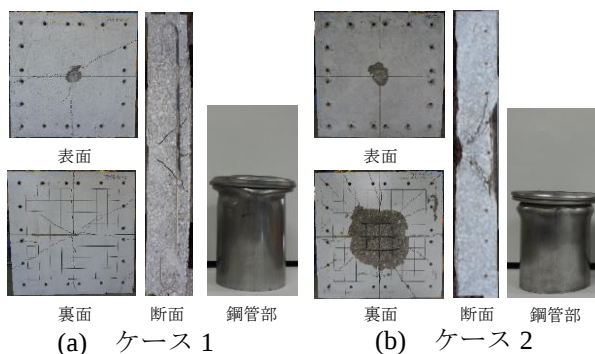
(a) 鋼製飛翔体 (b) RC 版試験体
図-1 鋼製飛翔体と RC 版試験



(a) 正面 (b) 裏面 (c) 側面
図-2 RC 版試験体の設置要領

表-1 実験結果

ケース	衝突速度 (m/s)	破壊モード	鋼管変形量 (mm)	貫入深さ (mm)
1	52	表面破壊	37.9	12.7
2	60	裏面剥離	47.9	21.0
3	66	裏面剥離	63.7	36.4



(a) ケース 1 (b) ケース 2
図-3 RC 版の破壊性状および鋼管部の変形状況

キーワード 竜巻飛来物、柔飛翔体、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 E-mail:ed17003@nda.ac.jp

Prager モデルを、破壊則には負圧破壊規準を用いた。鋼管部および鉄筋の構成則には、Johnson-Cook モデルを用いて降伏後のひずみ硬化を考慮した。表-2 に、解析定数を示す。解析ケースについては、表面破壊が生じたケース 1 に加え、飛翔体の先端部に相当する質量 2.9kg の剛飛翔体および質量 8.4kg の剛飛翔体が速度 52m/s で衝突するケースについても解析を行った。

図-5 に、飛翔体の変位、速度および加速度に質量を乗じて求めた荷重時刻歴を示す。図-5(a)および(b)にそれぞれ示す変位および速度の時刻歴をみると、解析結果と実験値はほぼ一致している。また、先端部と胴体部の最大変位の差は 39.4mm であり、実験後に計測した鋼管の変形量 37.9mm とほぼ一致する。図-5(c)の荷重時刻歴をみると、RC 版に作用する先端部の荷重は最大 700kN を示した後に減少し、その後は正負に振動している。一方で、胴体部の荷重は最大 300kN を示した後に減少して振動している。ここで、図-5(d)に示す質量 2.9kg の剛飛翔体の荷重時刻歴をみると、最大荷重は柔飛翔体の先端部と胴体部の荷重の合計と一致することがわかる。この理由は、飛翔体先端部が鋼管部の座屈によって受ける荷重は、図-6 に示すように RC 版への貫入による荷重と反対の方向に作用するためと考えられる。

図-7 に、時刻 3.0ms における RC 版断面の速度分布と損傷状況を示す。なお、RC 版の断面については z 軸について対称表示している。それぞれの速度分布をみると、柔飛翔体では RC 版の全体に渡って速度がゼロ以下となったが、質量 8.4kg の剛飛翔体では裏面の斜めひび割れの内側に 10m/s 以上の速度が生じている。すなわち、柔飛翔体では破壊が表面破壊に留まり、剛飛翔体では裏面剥離が生じたと考えられ、実験結果および局部破壊評価式の結果と整合している。また、RC 版の損傷状況をみると、柔飛翔体と質量 2.9kg の剛飛翔体のケースは、中心付近の斜めひび割れはいずれも同様に発生していることがわかる。これは、RC 版の損傷は主として先端部の衝突により生じ、胴体部が損傷に与える影響は小さいためと考えられる。

4. 結言

本研究は、柔飛翔体の衝突を受ける RC 版について考察を行ったものである。その結果、RC 版の損傷は主に先端部の荷重により生じ、胴体部の荷重は鋼管部の座屈変形により、先端部の反力と逆の方向に作用するため RC 版の損傷に与える影響は小さく、RC 版の損傷が大きく低減されることがわかった。

参考文献

- 1) 伊藤千浩, 大沼博志, 白井孝治: 飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計法, 電力中央研究所, 総合報告 U24, 1991.

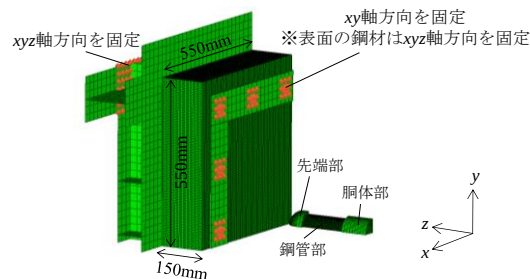


図-4 解析モデル

表-2 解析定数

材料	項目	種類	解析定数	単位	入力値
コンクリート	状態方程式	線形型	ヤング係数	kN/mm ²	25
			ポアソン比	-	0.2
	構成則	Drucker-Prager	静的圧縮強度	N/mm ²	30
			動的圧縮強度	N/mm ²	50.9
			静的引張強度	N/mm ²	2.2
			動的引張強度	N/mm ²	9.0
鉄筋(鋼管部)	破壊則	負圧破壊基準	破壊圧	N/mm ²	-6.0
	状態方程式	線形型	ヤング係数	kN/mm ²	216
			ポアソン比	-	0.3
	構成則	Johnson-Cook	降伏応力	N/mm ²	409 (380)
			最大強度	N/mm ²	592 (510)

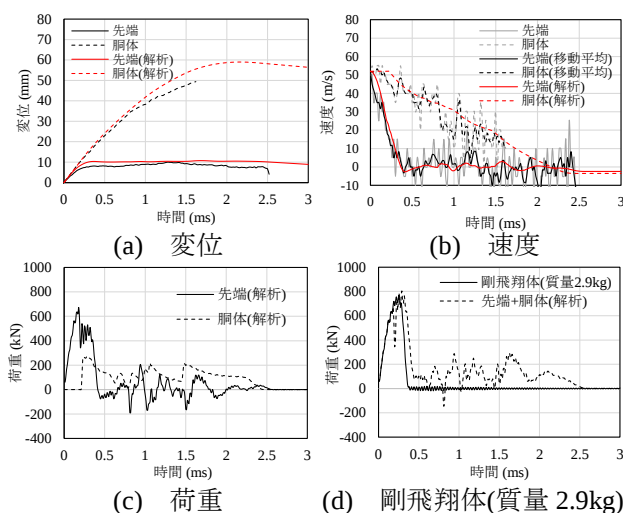
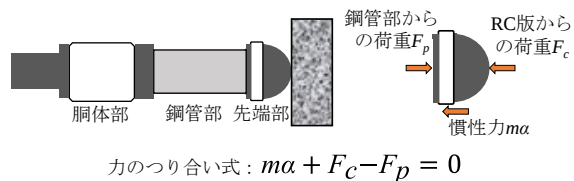


図-5 飛翔体の運動時刻歴



$$ma + F_c - F_p = 0$$

図-6 先端部に働く力のつり合い

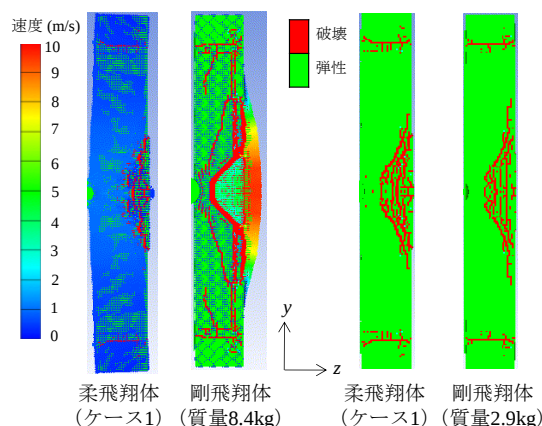


図-7 断面の損傷状況と速度分布 (t=3ms)