

飛翔体衝突を受ける RC 版の局部破壊領域に関する基礎的考察

防衛大学校 学生会員 ○森 広毅 正会員 別府 万寿博 市野 宏嘉

1. 緒言

飛翔体等が比較的大きな速度で RC 版に衝突すると局部的な破壊が生じる。これまでに、実験や数値解析によって RC 版の局部破壊に関する研究が行われている。既往の研究によると、RC 版の局部破壊は応力波の伝播や局所的変形によって発生すると説明されている。RC 版の局所的変形によるせん断破壊の発生に対して評価を行う場合には、RC 版の局部的な応答領域を算定する方法を確立する必要がある。そこで本研究では、RC 版の局部的な応答領域について実験的な検討を行った。RC 版に対する衝突実験を実施し、RC 版裏面の速度および局部応答領域の推定法を検討した。

2. RC 版の局部応答モデル

衝突を受ける RC 版の局部応答モデルを図-1 に示す。図-1 に示すように、質量 M の飛翔体が衝突速度 V_0 で RC 版に衝突し、静止線内の応答領域と完全塑性衝突するものと仮定する。なお、静止線とは RC 版の局部的な応答領域の境界を示す。このとき、最大荷重時において飛翔体が有する速度を v_m とし、静止線内の速度分布を次式に示す円錐形と仮定する。

$$v_{(x)} = \left(1 - \frac{x}{x_0}\right) v_m \quad (1)$$

ここに、 x_0 は衝突部から静止線までの距離である。衝突点における RC 版が飛翔体と同一の速度 v_m で運動すると仮定すると、衝突体と RC 版の運動量が保存されることから以下の式が成立する。

$$M(V_0 - v_m) = \frac{\pi}{3} m x_0^2 v_m \quad (2)$$

ここに、 m は RC 版の単位面積質量である。

衝突前の飛翔体の運動エネルギーと最大荷重時の運動エネルギーの差 ΔE の一部 $\alpha \Delta E$ が RC 版の運動エネルギー E_k に変換されると仮定すると、以下の式が成り立つ。

$$E_k = \alpha \Delta E \quad \Delta E = \frac{1}{2} M V_0^2 - \frac{1}{2} M v_m^2 \quad (3)$$

式(1)~(3)から、 x_0 および v_m は以下のように求められる。

$$x_0 = \sqrt{\frac{3M}{2\pi m} \left(\frac{1}{\alpha} - 4\right)} \quad v_m = \frac{2\alpha}{1-2\alpha} V_0 \quad (4)$$

このように、衝突を受ける RC 版の局部応答モデルを検討することによって、RC 版の応答領域および応答領域に生じる速度を評価することができる。ただし、エネルギー伝達率 α については実験に基づいて決定する必要がある。

3. 実験の概要および結果

質量 8.3kg、先端部の直径 90mm の鋼製飛翔体を RC 版 (1200×1200×180mm) に速度 27.4~49.4m/s で衝突させる実験を行った。図-2 に、RC 版の設置要領を示す。図-3 に、飛翔体の外観および寸法を示す。表-1 に、

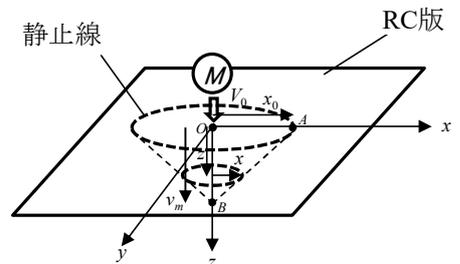


図-1 RC 版の局部応答モデル

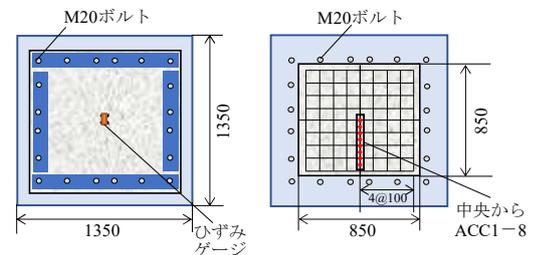


図-2 RC 版の設置要領

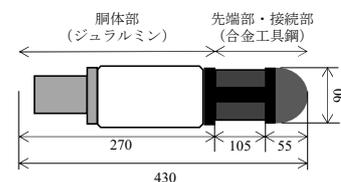


図-3 飛翔体の寸法

表-1 実験ケース

実験ケース	衝突速度 (m/s)	破壊モード	衝突回数	裏面剥離半径 (cm)
1	27.7	表面破壊	4	24.0
2	38.8	表面破壊	3	30.5
3	49.4	表面破壊	2	24.6

キーワード 飛翔体衝突, 局部応答, 局部破壊, 表面破壊, 裏面剥離

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 : em60034@nda.ac.jp

実験ケースおよび結果を示す。いずれのケースも破壊モードは表面破壊である。また、裏面剥離が発生するまで繰り返し衝突させたところ、裏面剥離の半径は平均で 26.4cm となった。RC 版に裏面中央から 5cm 間隔で加速度計を合計 8 個設置し、裏面に発生する加速度を計測した。図-4 に、加速度および速度-時間関係の一例を示す。飛翔体の衝突後、裏面が振動し、徐々に減衰することがわかる。また、いずれのケースも飛翔体が RC 版に衝突してから約 0.2ms 付近で裏面中央の加速度が最大となった。裏面の速度については、加速度-時間関係を積分することで算出した。いずれのケースも飛翔体が RC 版に衝突して約 0.3~0.5ms 後に裏面中央の速度が最大となった。図-5 に、1 回目の衝突における各時刻の速度分布を示す。時刻の経過とともに、裏面中央付近の速度が増加する傾向にあることがわかる。ただし、ケース 2 のみ 0.3~0.4ms において裏面中央の速度が減少したが、これは裏面中央の速度が約 0.32ms で最大値を示し、その後速度が低下したためと考えられる。図-6 に、実験結果および裏面の速度分布式(式(1))による速度分布を示す。なお、図は裏面中央の速度が最大値をとる時刻(約 0.3ms)の速度分布である。エネルギー伝達率を

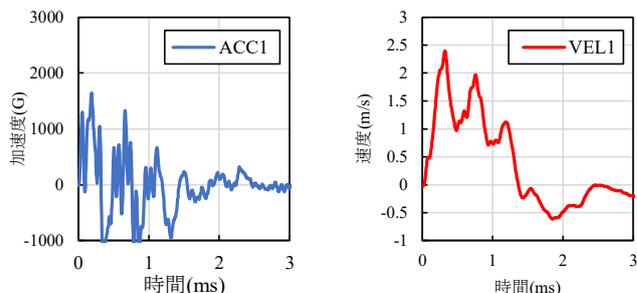
$\alpha=0.026$ とすることでケース 2 の裏面中央の速度と概ね整合した。一方、ケース 1 およびケース 3 の裏面中央の速度は速度分布式と比較するとそれぞれ約 50 および 30% の誤差が生じた。また、エネルギー伝達率を $\alpha=0.09$ とすることで x_0 と裏面剥離の半径を概ね整合することができたが、裏面中央の速度は約 300~400% の誤差となった。すなわち、理論モデルによると、飛翔体の損失エネルギーの約 2.6~9.0% が RC 版に伝達するものと考えられる。Pham ら²⁾は重錘落下衝突を受ける RC 梁においてエネルギー伝達率 α が 0.21 となったことを報告している。これは RC 梁の破壊が曲げ破壊であるのに対して RC 版の破壊がせん断破壊であること、また飛翔体の質量および速度が異なることが原因と考えられる。

4. 結言

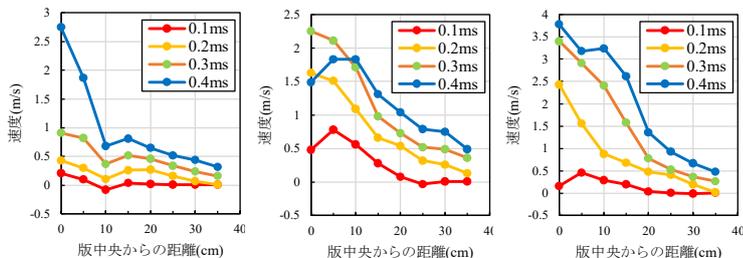
本研究は、RC 版に対する衝突実験を実施し、RC 版裏面の速度応答および局部応答領域の推定法について検討したものである。検討の結果、局部応答モデルを適用した場合、飛翔体の損失エネルギーの約 2.6~9.0% が RC 版に伝達することがわかった。エネルギー伝達率 α を裏面中央の速度に適合させた場合では、実験値と推定値には約 30~50% の誤差が生じた。また、エネルギー伝達率 α を裏面剥離の半径に適合させた場合には、裏面中央の速度は実験値と推定値で約 300~400% の誤差が生じた。

参考文献

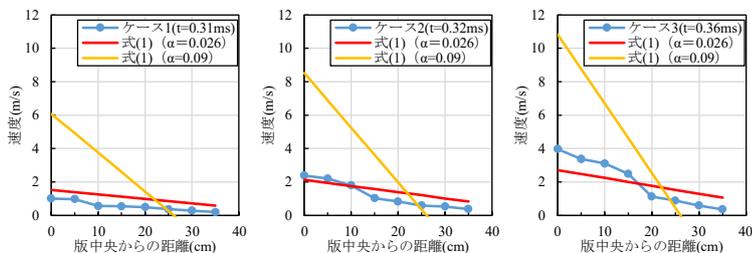
- 1) 片岡新之介, 別府万寿博, 市野宏嘉: 飛来物衝突を受ける RC 版の局部破壊メカニズムに関する基礎的考察, 応用力学論文集, Vol.22, pp.421-432, 2019
- 2) Pham, T.M, Hao, H: Plastic hinges and inertia forces in RC beams under impact loads, International Journal of Impact Engineering, Vol.103, pp.1-11, 2017



(a) 加速度-時間関係 (b) 速度-時間関係
図-4 実験結果の一例(ケース 2)



(a) ケース 1 (b) ケース 2 (c) ケース 3
図-5 各時刻の速度分布(1 回目の衝突)



(a) ケース 1 (b) ケース 2 (c) ケース 3
図-6 速度分布