

飛翔体衝突を受ける RC 版の裏面剥離評価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

飛来物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おり、RC 版の裏面剥離は応力波の伝播や局部的変形によって発生すると説明されている。RC 版の局部的せん断破壊による裏面剥離の発生を評価する場合には、RC 版の局部的な応答領域およびせん断力を算定する必要がある。そこで本研究では、RC 版に対する衝突実験を実施し、RC 版裏面の局部応答領域およびせん断力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。

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

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 版の単位面積あたりの質量である。

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 は以下のように求められる。

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

局部応答領域に最大衝撃荷重 F が作用する際の力のつり合いを考える。このとき、局部応答領域に作用する慣性力が、局部応答領域中心から x_0 にかけて線形に減衰すると仮定すると、単位面積あたりの慣性力 i は次式となる。

$$i = \frac{3F}{\pi x_0^2} \left(1 - \frac{x}{x_0}\right) \quad (5)$$

図-2 に、RC 版中心から x 離れた位置で切断した自由物体を示す。せん断力を Q とすると力のつり合いおよびせん断力は次式で表される。

$$F - Q - \int_0^x 2\pi x i dx = 0 \quad (6)$$

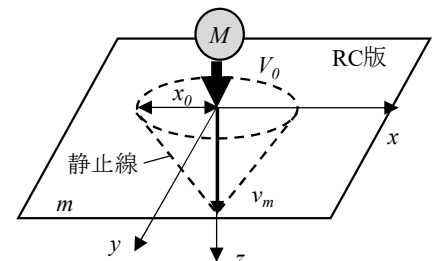


図-1 RC 版の局部応答モデル

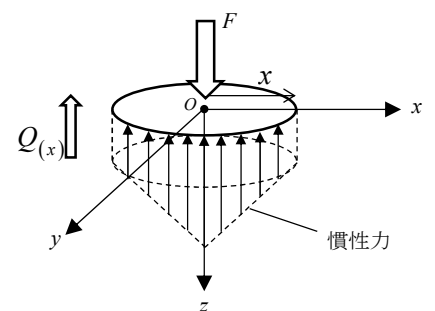


図-2 RC 版の自由物体図

キーワード 飛翔体衝突, 局部破壊, 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

$$Q = -F \left[1 + \frac{x^2}{x_0^2} \left(\frac{2x}{x_0} - 3 \right) \right] \quad (7)$$

以上のように、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 版の応答領域の半径およびせん断力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. 実験の概要および考察

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 27.7~49.4m/s で衝突させる実験を行った。図-3 に、RC 版の設置要領を示す。表-1 に、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った。図-4 に、画像解析により算出した速度および衝撃荷重-時間関係の一例を示す。ケース 1, 2 および 3 における最大衝撃荷重はそれぞれ 1253, 1538 および 1477kN であった。

本実験で用いた RC 版の押し抜きせん断耐力をコンクリート標準示方書²⁾に基づいて算定すると 267kN であった。なお、押し抜きせん断耐力の算定において、圧縮強度に藤掛らの式³⁾により算出した動的圧縮強度を用いた。載荷面の直径として飛翔体の直径を使用した。実際の載荷領域と異なるため今後検討する必要がある。また、電力中央研究所³⁾が提案した式を用いると、版厚 18cm の RC 版の裏面剥離限界は約 65m/s である。片岡らの研究⁵⁾によると、衝突速度 65m/s の最大衝撃荷重は約 1650kN である。そこで、押し抜きせん断耐力と本研究で算定したせん断力 (7式) を比較した。図-5 に、せん断力 ((7式) と押し抜きせん断耐力の比と衝突速度の関係を示す。せん断力が押し抜きせん断耐力より大きくなると、裏面剥離が発生すると仮定した。エネルギー伝達率 α を調整した結果、 $\alpha=0.155$ のときに破壊モードと評価結果が一致した。ただし、RC 版の押し抜きせん断破壊と局部破壊の破壊特性は異なる点もあるため、今後、詳細について検討する必要がある。

4. 結言

本研究は、RC 版の局部的な応答領域およびせん断力について実験的な検討を行ったものである。検討の結果、エネルギー伝達率 α を導入することで飛翔体衝突を受ける RC 版の局部応答領域およびせん断力を評価する方法を提案した。局部応答モデルを実験結果に適用した場合、 $\alpha=0.155$ のときに破壊モードと評価結果が一致した。ただし、RC 版の押し抜きせん断破壊と局部破壊の破壊特性は異なる点もあるため、今後詳細に検討する必要がある。

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) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編), 2012.
- 3) 電力中央研究所: 飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の耐衝撃設計法, 電力中央研究所報告, 総合報告 U24, 1991.
- 4) 藤掛一典, 上林勝敏, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: ひずみ速度を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.109-123, 2001.
- 5) 片岡新之介, 上野裕稔, 別府万寿博, 市野宏嘉: 剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の衝撃応答に関する基礎的検討, 構造工学論文集, Vol.62A, pp.1084-1096, 2016.

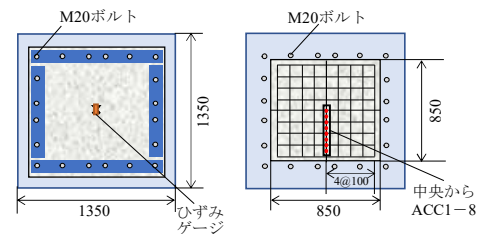
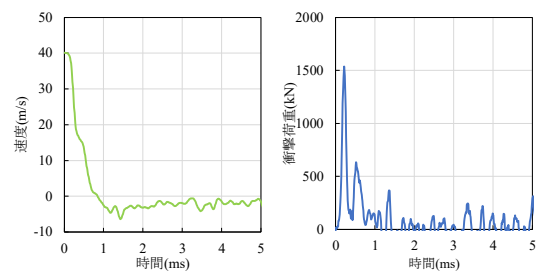


図-3 RC 版の計測要領

表-1 実験ケース

ケース	衝突速度(m/s)	破壊モード
1	27.7	表面破壊
2	38.8	表面破壊
3	49.4	表面破壊



(a) 速度-時間関係 (b) 衝撃荷重-時間関係

図-4 実験結果の一例 (ケース 2)

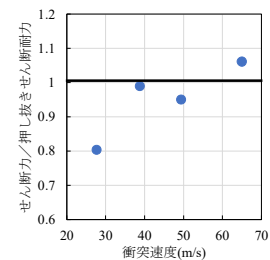


図-5 裏面剥離の評価結果