# 柔飛翔体の鉄筋コンクリート板への衝突実験における柔性係数に関する一考察

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ 正会員 〇太田 良巳・鈴木 哲夫 パシフィックコンサルタンツ(株)正会員 高橋 千明 群馬大学 正会員 蔡 飛

#### 1. はじめに

原子力分野においては、古くからタービンミサイル や航空機衝突など多くの衝突問題が議論されてきた. 近年では、原子力規制委員会が平成25年6月に制定し た「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」などにおいて、 飛翔体衝突による原子力施設への影響評価の考え方が 示されている.また、平成27年12月に内閣府(防災担 当)から「活火山における待避壕等の充実に向けた手引 き」が公開されるなど、衝突問題の重要性が高まってい る.衝突による構造物の局部損傷評価については、その 破壊様式(貫入量,裏面剥離,貫通)に応じて数多くの 評価式が提案されている<sup>1)</sup>.既往の評価式は、一般的に 剛飛翔体が構造物に垂直に衝突する事を前提としてい る.一方、衝突により飛翔体自体が変形する柔飛翔体の 衝突による損傷評価では、既往の評価式に柔性係数を 乗じて評価<sup>2)</sup>することがある.

本研究では,鉄筋コンクリート板(以下,RC板)に, 剛及び柔飛翔体を衝突させる実験を実施し,飛翔体の 変形に伴う RC板の損傷低減について検討した.

#### 2. 実験概要

図-1 に RC 板の概要及び図-2 に飛翔体の概要をそれ ぞれ示す.実験に用いた RC 板の寸法は縦 550mm×横 550mm とし,板厚を 60・80・100mm とした.鉄筋は D6mm の異形鉄筋を 60mm 間隔で表裏 2 層の配置とし た.飛翔体は鋼製で剛・柔の 2 種類とし、剛・柔ともに 直径 30mm、質量 330g で統一した.柔飛翔体について は,先頭 10mm から 60mm に空洞部を設けており,空 洞部が衝突によりアコーディオン状に座屈する構造で ある.空洞部の肉厚は 1mm である.衝突速度は,剛飛 翔体において 43~181m/s の範囲で 9 ケース,柔飛翔体 において 86~198m/s の範囲で 9 ケースである.

計測項目は RC 板において 4 隅の反力, 裏面加速度 3 カ所, 裏面鉄筋ひずみ 12 カ所及び高速度カメラによる 衝突面・裏面の撮影である.



図-2 飛翔体の概要

# 実験結果及び考察

## 3.1 RC 板の損傷状況

図-3 に RC 板の損傷状況の一例として裏面剥離の様子を示す.裏面剥離が生じたケースでは,衝突面の損傷は軽微であるが,裏面側に大きな剥離が生じる. RC 板の損傷状況は,衝突速度及び RC 板の板厚に応じて,衝突面の損傷,貫入,裏面剥離,貫通と進展する.



キーワード 衝突実験,局部損傷,剛飛翔体,柔飛翔体,柔性係数,座屈吸収エネルギー 連絡先 〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9 原子力規制庁長官官房技術基盤グループ TEL:03-5114-2226

## 3.2 Chang 式による評価との比較

飛翔体が衝突する際の構造物の損傷状況の予測式は 数多く提案されている.本節では、構造物の損傷評価に 広く使われる評価式の一つである Chang 式 <sup>1)</sup>を用いた 評価を実施する. Chang 式は次式の通りである.

貫通限界板厚; e(m)

$$\frac{e}{d} = \left(\frac{u}{V_0}\right)^{0.25} \left(\frac{M{V_0}^2}{d^3 f_c'}\right)^{0.5} \qquad \cdot \cdot \cdot (1a)$$

裏面剥離限界板厚;h。(m)

$$\frac{h_s}{d} = 1.84 \left(\frac{u}{V_0}\right)^{0.13} \frac{\left(M{V_0}^2\right)^{0.4}}{d^{1.2}(f_c')^{0.4}} \qquad \cdot \cdot \cdot (1b)$$

ここで, d: 飛翔体直径(m), V<sub>0</sub>: 飛翔体の衝突速度(m/s),  $M:飛翔体質量(kg), f_c': コンクリート圧縮強度$ (N/mm<sup>2</sup>), u:基準速度(m/s)である.

図-4 に剛飛翔体の衝突に対する実験結果と Chang 式 を用いた評価結果の比較を示す.本実験に対して, Chang 式は安全側の評価となっていることが分かる.

次に、柔飛翔体の衝突による RC 板の損傷評価を実施 するため, 衝突エネルギーと柔飛翔体の変形に伴う座 屈吸収エネルギーの関係から柔性係数を算出する.円 筒がアコーディオン状に座屈する場合、Jones and Abramowicz<sup>3)</sup>より、平均座屈力P<sub>m</sub>(kN)は次式になる.

$$P_m = \sigma_0 t \frac{6\sqrt{Dt} + 3.44t}{0.86 - 0.57\sqrt{t/D}}$$
 (2)

ここで, t: 円筒の肉厚(m), D: 円筒の平均直径(m),  $\sigma_0$ :流動応力350MPaである.

平均座屈力を用いて座屈吸収エネルギーE<sub>B</sub>(J)を算出 する. 座屈吸収エネルギーは Rier 式<sup>4)</sup>より求められる.  $DIF \cdot P_m \Delta l + E_l$  $\Delta l \leq n \delta_{\rho}$  $E_B = \begin{cases} E_B = \begin{cases} DIF \cdot P_m n\delta_e + 1.2DIF \cdot P_{max}(\Delta l - n\delta_e) + E_I & \Delta l > n\delta_e \end{cases}$  $E_I = \mu V_0^2 \Delta l/2$ ...(3)

ここで, Δl:座屈長さ(m), nδ<sub>e</sub>:全有効座屈長(m), DIF: ひずみ速度効果, μ: 単位長さ質量(kg/m), P<sub>max</sub>: 最大 座屈力(kN)である.

図-5 に衝突エネルギーと座屈吸収エネルギーの関係 を示す.本実験においては,飛翔体の座屈によって衝突 エネルギーのうち保守的に約4割のエネルギーが損失 していることがわかる. 残り6割のエネルギーが RC 板 に影響すると仮定し、柔性係数を 0.6 とした.

図-6 に柔性係数 0.6 を適用した Chang 式による評価 結果と柔飛翔体衝突の実験の関係を示す.柔性係数 0.6 を適用した評価結果は、柔飛翔体衝突による RC 板の損 傷状況とよい対応がみられた.

#### 4. 今後の展開

実験結果に適した座屈力吸収エネルギーで補正した 柔性係数について検討していくとともに、スケールの 異なる実験に対してもその適用性を確認する.





図-6 Chang 式による評価と柔飛翔体衝突実験結果の比較

#### 参考文献

- 1) Q.M.Li et al.:Local impact effects of hard missile on concrete targets, International Journal of Impact Engineering, 32, pp.224-284, 2005.
- 2) T.Sugano et al.:Local Damage to Reinforced Concrete Structures Caused by Impact of Aircraft Engine Missiles Part 2. Evaluation of Test Results, Nuclear Engineering and Design 140, pp.407-423, 1993.
- Jones N. and Abramowicz W.:Static and dynamic axial 3) crushing of circular and square tubes. IN: Reid SR, editor. Metal forming and impact mechanics. New York: Pergamon Press, 1985.
- 4) Wolf J.P. et al.: Response of equipment to aircraft impact, Nuclear Engineering and Design, 47, pp.169-193, 1978.