

(1) 柔飛来物の衝突による RC 版の局部損傷評価法

EVALUATION METHOD OF LOCAL DAMAGE OF REINFORCED CONCRETE PANEL TO
DEFORMABLE MISSILE IMPACT

小鹿紀英*、坪田張二**、河西良幸**

Norihide KOSHIKA, Haruji TSUBOTA and Yoshiyuki KASAI

*工博 鹿島 小堀研究室 (〒107 東京都港区赤坂 6-5-30)

**工博 鹿島 技術研究所 (〒182 東京都調布市飛田給 2-19-1)

キーワード: 衝突、局部破壊、柔飛来物、RC 版、貫通限界版厚、裏面剥離限界版厚
(impact, local damage, deformable missile, reinforced concrete panel, perforation thickness, scabbing thickness)

1. はじめに

飛来物が鉄筋コンクリート(RC)版に衝突する時に生じる貫通、裏面剥離等の局部破壊について、まず衝突時に変形しない剛飛来物に関しては、従来から多くの研究者によって衝撃実験に基づいた各種の防護のための限界版厚評価式が提案されてきた。しかし、一般的に飛来物は衝突時に自らも変形する柔飛来物であるために、飛来物の変形でエネルギーが消費され、同じ重量、直径を持つ剛飛来物に比べて RC 版の局部損傷度が低減されることになるが、これまで飛来物の柔性を考慮して防護版厚を定量的に精度よくかつ簡易に評価できる手法がなかったため、設計的な観点からその手法の確立が急務であった。ここでは、そうした防護設計用簡易評価手法の確立をめざして、剛飛来物から各種タイプの柔飛来物による局部損傷を統一的に取り扱うことができ、RC 版の裏面剥離限界厚さ、貫通限界厚さを評価できる手法を提案する。

2. 柔飛来物の貫入量簡易評価法と防護版厚評価式

剛飛来物の衝突に対する RC 版の局部損傷評価式の代表的なものとして NDRC 式があるが、これはマッシブなコンクリートへの貫入(マッシブ貫入)量を貫入理論に基づいて評価し、貫通、裏面剥離等の現象はマッシブ貫入量の関数として評価する式である。ここでは、NDRC 式の基本になっている剛飛来物に対するマッシブ貫入の評価法^{1),2)}を柔飛来物まで拡張して、柔飛来物から剛飛来物まで統一的に評価できる簡易評価法を提案する。ついで、貫通限界厚さ、裏面剥離限界厚さはマッシブ貫入量の関数として、NDRC 式の係数を若干変更したものを提案する。

まず、図 1 には変形性を持つ柔飛来物がマッシブコンクリートに貫入する様子を模式的に示している。ここで、衝突時の柔飛来物の挙動に関して次に示すような基本的な仮定を設けることにする。

- ① 飛来物がマッシブコンクリートに衝突する時、接触している部分のみがクラッシュする。
- ② このクラッシュする部分の軸方向強度が、飛来物の残りの健全な部分を減速させる。

図と上記の仮定をもとに、運動量保存の法則と、衝撃力は運動量の時間変化率であることを用いて、衝撃力 F は次式で与えられる。

$$F = M_m a_m + \mu(x_m)(V_m - V_f)^2 \quad (1)$$

ここで M_m 、 a_m は、それぞれ飛来物健全部分の質量および加速度、 μ は飛来物の単位長さ当たりの質量、 V_m は飛来

物速度、 V_t はマッシュコンクリートへの貫入速度である。仮定①、②から軸方向強度 $P = M_m a_m$ を(1)式に代入して

$$F = P(x_m) + \mu(x_m)(V_m - V_t)^2 \quad (2)$$

剛飛来物の場合には飛来物自身はクラッシュしないため衝撃荷重は(1)式の第1項のみで評価される。

一方、版の受ける抵抗力 R は、貫入抵抗力に影響する因子を物理的な意味合いを考慮しつつ剛飛来物の数多くの実験により検証を加えたNDRC式^{1),2)}の貫入理論により以下の式で表現される。単位はlbf、in系である。

$$R = \frac{263820}{N} \frac{\sqrt{f_c}}{180} \left[\frac{V_t}{12000d} \right]^{0.2} \cdot A \cdot g(z) \quad (3)$$

ここで、 N は飛来物の先端形状による係数で平坦の時0.72、 f_c はコンクリートの圧縮強度、 V_t はRC版への貫入速度、 d は飛来物の直径である。また、 A は飛来物の断面積、 $g(z)$ は以下の式で表される。

$$g(z) = \begin{cases} x_t / 2d & x_t / d \leq 2.0 \\ 1.0 & x_t / d > 2.0 \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $z = x_t / d$ 、 x_t はマッシュコンクリートへの貫入量である。この $g(z)$ は、飛来物先端が版に貫入していく際の表面クレータの形成において、コンクリートが押し分けられる効果を考慮したものである。

図1において衝撃力 F とRC版の抵抗力 R が接触面において釣り合っていることから、(1)式と(2)式を等置し、飛来物の単位長さあたり質量分布 $\mu(x_m)$ 、軸方向強度 $P(x_m)$ 、飛来物の衝突速度 V_{m0} 、飛来物の直径 d 、RC版のコンクリート強度 f_c を与えて、時々刻々この式を解けば、比較的簡易に柔飛来物による衝撃荷重、飛来物速度、飛来物破壊長さの各時刻歴ならびに最終貫入深さを求めることができる。これをここでは柔飛来物の簡易評価法と呼ぶ。

また、貫通限界厚さ e （貫通を防護できる最低の版厚）、裏面剥離限界厚さ s （裏面剥離を防護できる最低の版厚）は、既往のNDRC式およびDegen式を参考にしながら若干の修正を加え、以下の式で評価することにする。まず、貫通限界厚さ e に関しては、

$$e/d = \begin{cases} 2.7(x/d) - 0.7(x/d)^2 & x/d < 1.0 \\ 1.3(x/d) + 0.7 & x/d \geq 1.0 \end{cases} \quad (5)$$

一方、裏面剥離限界厚さ s に関しては、

$$s/d = \begin{cases} 7.5(x/d) - 8.0(x/d)^2 & x/d < 0.4 \\ 2.5(x/d) + 0.72 & x/d \geq 0.4 \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 x は簡易評価法で評価された貫入深さ x_t の最終値（ V_t が0になったときの貫入量）である。

3. 衝撃実験への適用

3.1 解析条件

本簡易評価法の適用性を検討するために、既往の衝撃実験^{3),4)}を対象に剛な飛来物と柔な飛来物に対して、この手法を適用し評価したマッシュコンクリートへの貫入深さをもとに、RC版の貫通限界厚さと裏面剥離限界厚さを求めた実験結果と比較する。

対象とする柔飛来物は図2に示すとおり、重量3.6kg、直径10.1cmの鋼製(S45C)円筒管で、先端、後端は円版で蓋をし、中央部には仕切り板がある。解析に必要なこの柔飛来物の重量分布と軸方向強度分布を表1に示すが、同時にこれと重量、直径が等しい円版状の剛飛来物も比較の相手として取り上げる。いずれも、衝突速度は100、215m/sの2種類、RC版のコンクリートの圧縮強度は260kgf/cm²である。

3.2 各種限界厚さの評価

衝突速度100m/sと215m/sについて本評価手法を用いて求めた剛飛来物、柔飛来物のマッシュコンクリートへの貫

入深さを表2に示す。この貫入深さと(4)、(5)式により評価した貫通限界厚さと裏面剥離限界厚さを、文献4)に記載されている実験結果と比較して図3、4に示す。これらを見ると実際の局部破壊現象がきわめて複雑な現象であるにもかかわらず、実験値と簡易評価法によるそれぞれの限界版厚は良い対応を示しており、この実験の範囲内において実用上適用性の高い式であると判断される。

また、本評価法で評価された衝突速度 215m/s 時の剛飛来物と柔飛来物の衝撃荷重の時刻歴、ならびに飛来物の減速曲線の時刻歴を図5、6に示す。剛飛来物と柔飛来物の時刻歴の傾向について述べると、衝撃荷重についてはピーク荷重が剛飛来物時には160tf弱であるのに対し、柔飛来物では約60tfと約1/3になり継続時間は0.7msecから1.7msecへ約2.5倍になっている。また、減速曲線では剛飛来物が0.1msec以降急激に直線的に減速するのに対し、柔飛来物では前半円筒部の座屈に対応する1msecまでは緩やかに減速し、その後、後半円筒部の座屈に伴い急速に減速して衝撃現象を終える。衝撃実験ではこれらのデータが得られていないが、別途実施したDEM(個別要素法)によるシミュレーション解析により評価された衝撃荷重、減速曲線⁵⁾とはよく対応しており、このことより時刻歴の諸量も適切に表現できる手法であると考えられる。

4. まとめ

これまで、柔飛来物による貫通限界厚さ、裏面剥離限界厚さを評価するためにはその都度衝撃実験を実施する必要があったが、ここでは、防護設計への適用を念頭に置いて柔飛来物のマッシュ貫入の簡易評価法ならびに貫入、裏面剥離各防護厚さの評価式を提案した。これにより、飛来物の諸元とコンクリート強度が与えられれば剛飛来物から柔飛来物まで統一的にマッシュ貫入を取り扱うことができ、それをもとに貫通限界厚さや裏面剥離限界厚さの評価が可能なることを示し、その評価結果と実験との比較によりその有効性を示した。また、局部損傷時の衝撃荷重、飛来物の時刻歴を示し、飛来物の剛性による傾向の差を評価できることを示した。

参考文献

- 1) Beth, R.A. : Penetration Theory, Separable Force Laws and the Time of Penetration, NDRC Report A-333 (OSRD-5258), June 1945.
- 2) Beth, R.A. : Final Report on Concrete Penetration, Division 2, NDRC Report A-388 (OSRD-6459), January 1946.
- 3) Sugano, T., Tsubota, H., et al : Local Damage to Reinforced Concrete Structures Caused by Impact of Aircraft Engine Missiles Part 1 Test Program, Method and Results, Nuclear Engineering and Design 140, pp. 387-405, 1993.
- 4) Sugano, T., Tsubota, H., 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.
- 5) Morikawa, H., Koshika, N., et al : Estimations of Impact Strength on Reinforced Concrete Structures by the Discrete Element Method, SMiRT-12 JH13/2, pp.333-338, 1993

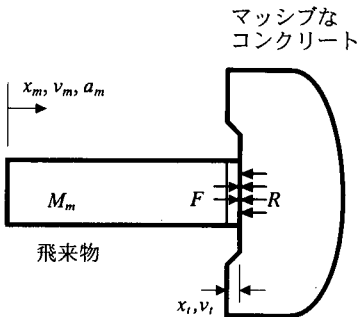


図1 柔飛来物のマッシュコンクリートへの貫入

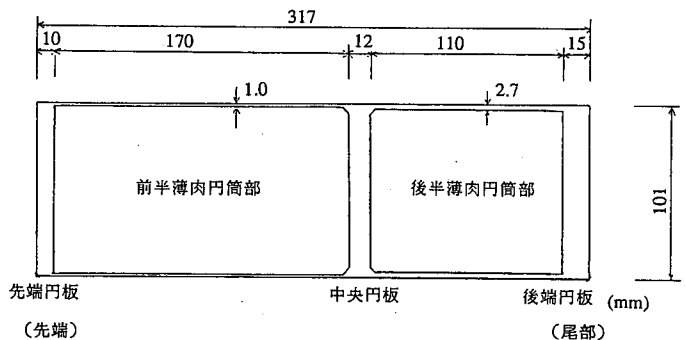


図2 対象とする柔飛来物

表1 柔飛来物の諸元

	位置 (cm)	単位長重量 (kgf/cm)	軸方向 強度(tf)
先端円版	0~1.0	0.649	剛
前半円筒部	1.0~18.0	0.026	12.1
中央円版	18.0~19.2	0.662	剛
後半円筒部	19.2~30.2	0.068	45.2
後端円版	30.2~31.7	0.649	剛

表2 マッシュコンクリートへの貫入深さ

	衝突速度 (m/s)	剛飛来物	柔飛来物
貫入深さ (cm)	100	4.4	1.6
	215	8.8	5.6

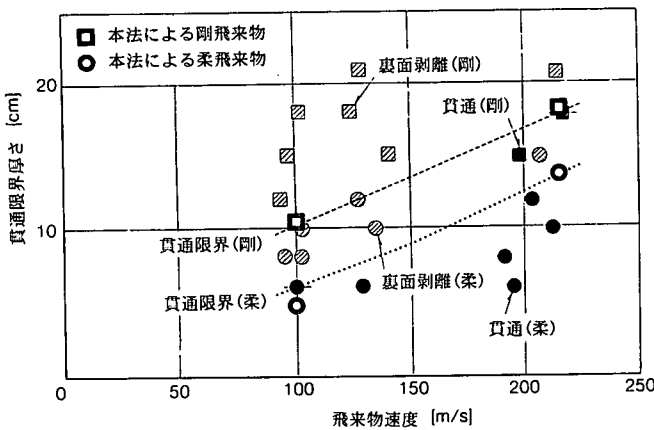


図3 貫通限界厚さの比較

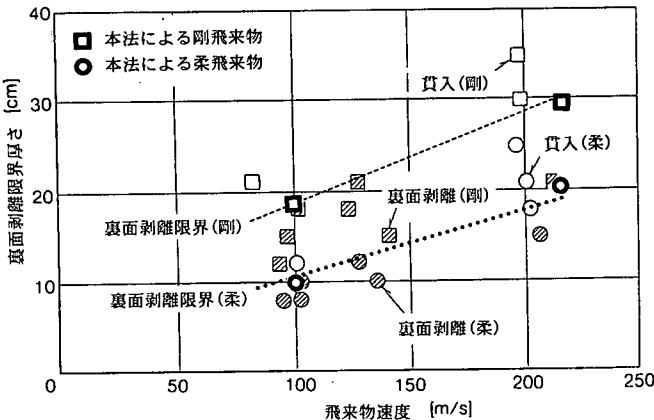
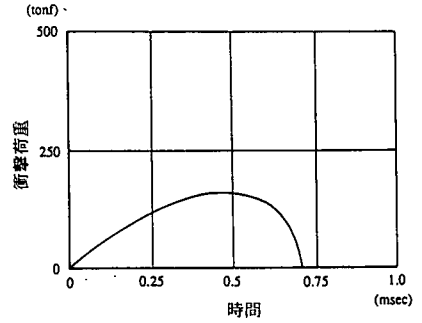
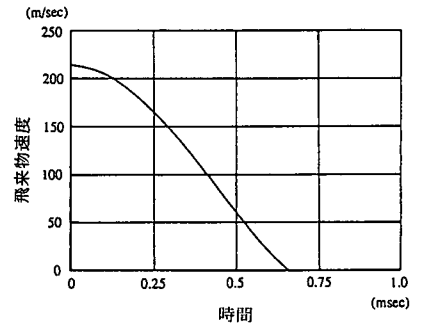


図4 裏面剥離限界厚さの比較

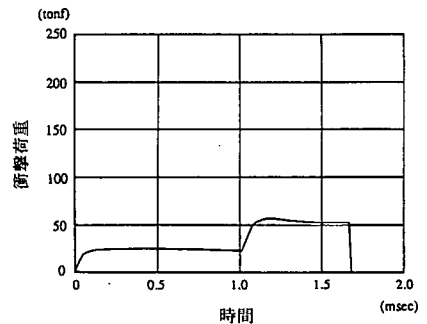


(a) 衝撃荷重曲線

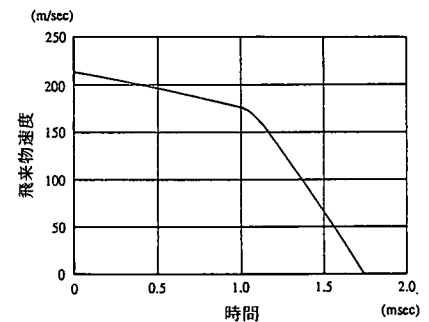


(b) 飛来物の減速曲線

図5 剛飛来物衝突時の応答 ($V_{m0} = 215\text{m/s}$)



(a) 衝撃荷重曲線



(b) 飛来物の減速曲線

図6 柔飛来物衝突時の応答 ($V_{m0} = 215\text{m/s}$)