

尖頭型飛翔体の理論的貫入評価に関する一考察

原子力規制庁地震・津波研究部門 正会員 ○太田 良巳
伊藤忠テクノソリューションズ(株) 正会員 松澤 遼

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、その損傷状況(貫入、裏面剥離、貫通)に応じて数多くの実験式が提案されている。また、計算機の処理能力の向上及びシミュレーション技術の継続的な改善により、衝撃解析ソフトを用いた大規模なシミュレーション解析による研究が数多く見られる。さらに、力学モデルに基づき、衝突過程を単純なモデルに置き換えて評価する理論的評価式も提案されている。

衝突に伴う物体の貫入量に係る既往の理論的評価式においては、衝突物の先端形状が半球型、円錐型、平坦型のケースに対して提案されている。しかし、既往の実験例の多い尖頭型(弾丸型)については提案されていない。本研究では、尖頭型の貫入事象を簡易評価する事を目的に、幾何学的形状関数を提案するとともに、既往の実験結果を用いてその適用性を確認した。

2. 衝突物貫入に係る理論的評価式

力学モデルに基づく理論的貫入評価式として、防衛施設学会より発刊されている「衝突を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン—評価手法と対策技術—」に示されている手法(以下、「防衛施設学会の手法」)¹⁾を用いる。防衛施設学会の手法は、Liら²⁾の完全塑性材料に対して貫入深さを予測するモデルを高ひずみ速度下のコンクリート材料に適用できるように改良したものである。図1に計算手順を示す。飛翔体の先端形状を形状関数 $y(x)$ と定義し、ステップiにおける速度及び貫入抵抗力を計算する。この計算を速度が0に

なるステップkまで逐次計算することにより、飛翔体の時刻歴挙動が得られる。防衛施設学会の手法の詳細については、参考文献1)を参照されたい。Liらの式及び防衛施設学会の手法では、前述の通り、衝突物の先端形状が半球型、円錐型、平坦型のケースに対して提案されている。先端形状の模式図を図2に示す。また、各先端形状の形状関数を式(1)～(3)にそれぞれ示す。

$$\text{半球型} \quad y(x) = \sqrt{-x^2 + Dx} \quad (1)$$

$$\text{円錐型} \quad y(x) = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)x \quad (2)$$

$$\text{平坦型} \quad y(x) = \frac{D}{2} \quad (3)$$

ここで、D: 衝突物半径、x: 貫入量、 θ : 先端角度である。

先端の形状として曲率半径Rを有する尖頭型について定義する。ここで、飛翔体の直径をDとしたとき、 $R = \psi D$ とする。尖頭型形状は図2d)に示すとおりである。尖頭型についても、その他の形状と同様の定式化が成り立つものとして、その先端形状を次式で表す。

$$L_1 = \sqrt{(\psi D)^2 - \left(\psi D - \frac{D}{2}\right)^2} = D \sqrt{\psi - \frac{1}{4}} \quad (4-1)$$

$$L_2 = \psi D - \frac{D}{2} = D \left(\psi - \frac{1}{2}\right) \quad (4-2)$$

$$y(x) = \sqrt{(\psi D)^2 - (L_1 - x)^2} - L_2 \quad (4-3)$$

尖頭型先端形状の形状関数は式(4-3)になる。式(4-3)をxで微分し図1の計算手順中の $(N_2)_a$ に代入して整理すると次式となる。

$$(N_2)_a = \frac{8}{(2y_a)^2} \int_0^a \frac{(\alpha - L_2)(L_1 - x_i)^3}{\alpha(\psi D)^2} dx + \frac{8\mu_m}{(2y_a)^2} \int_0^a \frac{(\alpha - L_2)(L_1 - x_i)^2}{(\psi D)^2} dx \quad (5)$$

ここで、 $\alpha = \sqrt{(\psi D)^2 - (L_1 - x_i)^2}$ である。

提案する尖頭型の形状関数を用いて、Frew, D. J.らの実験結果³⁾を評価し、その適用性について確認する。

Frew, D. J.らは、様々な直径の尖頭型鋼製飛翔体を衝突速度450～1700m/s程度で圧縮強さ56～67MPaの石灰岩に衝突させる実験を実施している³⁾。図3に実験に用いられた尖頭型衝突物及び寸法図を示す。直径25.4mm,

キーワード 衝突, 飛翔体, 尖頭型, 貫入, 理論的評価

連絡先 〒106-8450 東京都港区六本木1-9-9 原子力規制庁地震・津波研究部門 TEL: 03-5114-2226

質量 931kg, 先端部長さ 42mm 飛翔体の実験結果に対して提案する形状関数を用いた評価結果を図 4 に示す。図中の黒実線は実験における各衝突速度の最終貫入量を示す。最終貫入量に着目すると, 衝突速度 407m/s 及び 1177m/s では実験結果と理論的評価結果はほぼ一致した。また, 衝突速度 800m/s では概ね一致し安全側の評価結果となった。本研究で提案する尖頭型形状関数の適用性が確認された。

今後, 様々な寸法の尖頭型衝突実験に対しても適用性を確認していく予定である。

参考文献

- 1) 一般社団法人防衛施設学会：衝突作用を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン—評価手法と対策技術—, pp.84-95, 2018.
- 2) Li, Q. M., Weng, H. J., Chen, X. W. : A modified model for the penetration into moderately thick plates by a rigid, sharp-nosed projectile, International Journal of Impact Engineering, Vol.30, No.2, pp. 193-204, 2004.
- 3) Frew, D.J., Forrestal, M.J., Hanchak, S.J. : Penetration Experiments with Limestone Targets and Ogive-nose Steel Projectiles, SAND099-0862J, 1999.

飛翔体：直径 d , 形状関数 $y(x)$, 動摩擦係数 μ_m を下記式に入力

$$(N_1)_a = 1 + \frac{8\mu_m}{(2y_a)^2} \int_0^a y_i dx$$

$$(N_2)_a = -\frac{8}{(2y_a)^2} \int_0^a \frac{y_i y_i'^3}{1 + y_i'^2} dx + \frac{8\mu_m}{(2y_a)^2} \int_0^a \frac{y_i y_i'^2}{1 + y_i'^2} dx$$

被衝突体の圧縮強度 f_c' , 引張強度 f_t , 応力の1次不変量 I_1 を下記式に入力

$$(\sigma_{yc})_i = \sqrt{f_c' f_t - (f_c' - f_t)(I_1)_i}$$

- 無次元パラメータ N_1, N_2 を出力
- 被衝突体の降伏応力 σ_{yc} を出力

飛翔体：形状関数 $y(x)$, 質量 m
被衝突体：密度 ρ , 降伏応力 σ_{yc}
無次元パラメータ： N_1, N_2
を下記式に入力

ここで, F_i は貫入抵抗力, ΔE_i は各ステップ間の増分仕事

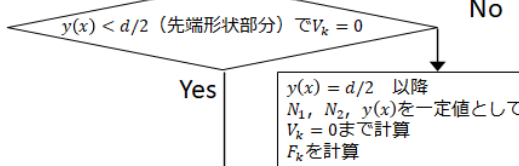
$$F_i = \pi y_i^2 \left((\sigma_{yc})_{i-1} (N_1)_i + \rho V_i^2 (N_2)_i \right)$$

$$\Delta E_i = -F_i dx = -\Delta x \left[\frac{F(x_{i-1}) + F(x_i)}{2} \right]$$

ステップ i における貫入抵抗力及び速度を出力

- 速度
$$V_i = \sqrt{\frac{m V_{i-1}^2 - \Delta x \left[\pi y_{i-1}^2 (N_1)_i (\sigma_{yc})_{i-1} + \pi y_{i-1}^2 (N_1)_{i-1} (\sigma_{yc})_{i-1} + \pi y_{i-1}^2 (N_2)_{i-1} \rho V_{i-1}^2 \right]}{\pi y_i^2 (N_2)_i \rho \Delta x + m}}$$
- 貫入抵抗力 (荷重)
$$F_i = \pi y_i^2 \left((\sigma_{yc})_{i-1} (N_1)_i + \rho V_i^2 (N_2)_i \right)$$

Δx : 貫入増分量(刻み幅)



計算終了 (全貫入深さ $x_k = k \Delta x$)

図 1 計算手順

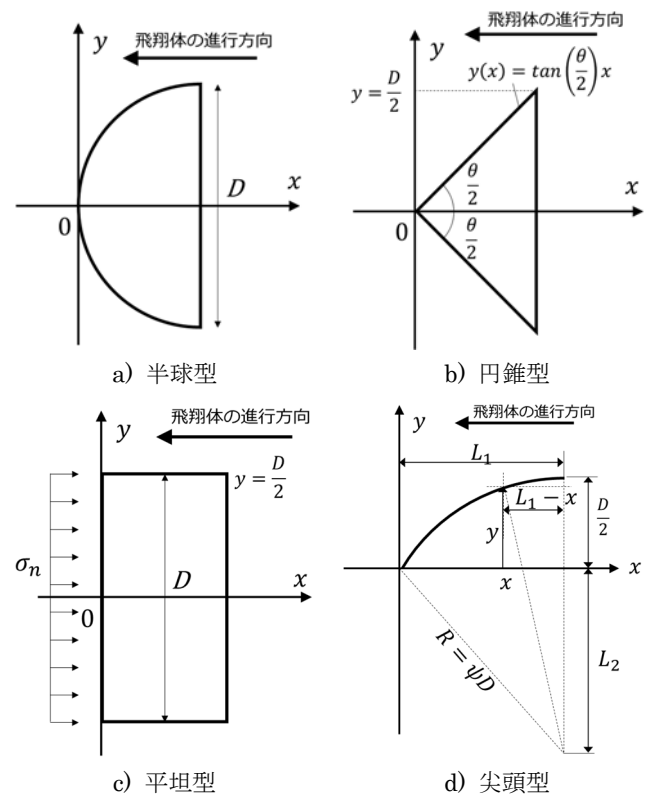


図 2 先端形状模式図

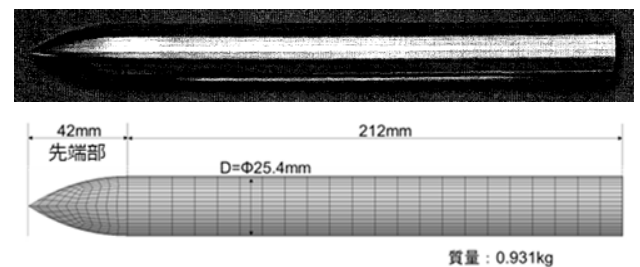


図 3 尖頭型衝突物

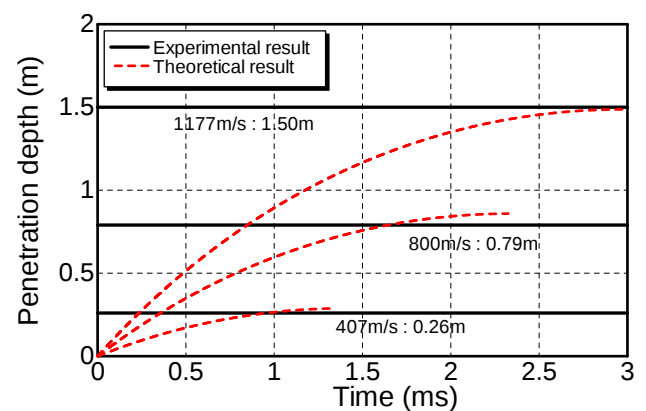


図 4 石灰岩に対する尖頭型衝突物の貫入量—時間関係