

# 剛飛翔体の高速衝突に対する岩盤貫入評価 に関する一考察

太田 良巳<sup>1\*</sup>・松澤 遼<sup>2</sup>

<sup>1</sup>原子力規制庁長官官房技術基盤グループ 地震・津波研究部門 (〒106-8450 東京都港区六本木1-9-9)

<sup>2</sup>伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 (〒105-6950 東京都港区虎ノ門4-1-1)

\*E-mail: yoshimi\_ota@nsr.go.jp

日本の原子力分野では新規規制基準で様々な衝突物に対する評価が規制要件化された。剛飛翔体の貫入評価については、コンクリートに対する多くの研究がなされている。一方、地盤や岩盤に対する既往研究が少ないのが現状である。コンクリート、地盤・岩盤への衝突に関する既往研究で提案されている貫入評価式の多くは、各々の実験結果に基づく経験式であり実験詳細が明らかにされていないものが多い。そこで、本研究では、既往の石灰岩に対する衝突実験結果を用いて、既往の貫入評価式の適用性を確認した。また、コンクリートに対して提案された半理論的解析手法や数値解析手法を用いた評価を実施し、岩盤への剛飛翔体の貫入評価について考察した。

**Key Words** : rigid projectiles, rock penetration, simulation analysis, semi-theoretical analysis, limestone

## 1. はじめに

近年、火山活動による火山噴石の衝突や竜巻に伴う飛来物の衝突などの衝突に伴う様々な被害が報告されている。平成27年12月に内閣府（防災担当）から「活火山における退避壕等の充実に向けた手引き」<sup>1)</sup>が公開されるなど、衝突に係る問題の重要性が高まっている。

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。日本では、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」<sup>2)</sup>等において、物体の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26年9月に制定した「実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド」<sup>3)</sup>では、評価対象設備が地下に設置される場合（地下埋設、地下階設置）は、地上の建屋等の損傷による波及的な物理的損傷、航空機衝突による衝撃破損について検討することが明記されている。物体衝突に対するコンクリートの構造評価については、IAEAのSafety Reports<sup>4)</sup>や米国のNEI07-13[Revision 8P]<sup>5)</sup>において既往評価式を用いた評価手法が記載されている。一方、岩盤等の土被りを有する原子力施設に対する評価手法に関する記載はない。衝突によるコンクリート構造物の局部損傷評価については、構造物の損傷状況（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。岩盤等の土被りを有する原子力施設の評価には、飛翔体の土被りへの貫入量を評価する必要がある。既往研究において、剛飛翔体の衝突に伴う岩盤への貫入量を評価する実験式がいくつか提案されている<sup>6)</sup>が、コンクリートに対する既往研究と比較すると研究例が少ないのが現状である。

本研究では、既往の石灰岩に対する剛飛翔体衝突実験結果を用いて、岩盤を対象にした既往貫入評価式の適用性を確認した。また、コンクリートに対して提案された実験式の適用性の確認及び半理論的解析手法や数値解析手法を用いた評価を実施し、岩盤に対する剛飛翔体の貫入評価について考察した。

## 2. 既往実験の概要

本研究では、Frew et al.<sup>7)</sup>及びThomas<sup>8)</sup>に示された実験結果に基づいた既往貫入評価式の適用性について検討した。Frew et al.<sup>7)</sup>は、弾丸型の鋼製飛翔体3種類（直径7.1, 12.7, 25.4mm）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種類の飛翔体のうち、直径25.4mm・質量0.931kg・先端部長さ42mm飛翔体の実験結果を用いて各種検討を実施した。図-1に実験に用いられた飛翔体及びモデル図を示す。

また、図-2に実験後の様子を示す。表-1に当該飛翔体の実験結果をそれぞれ示す。

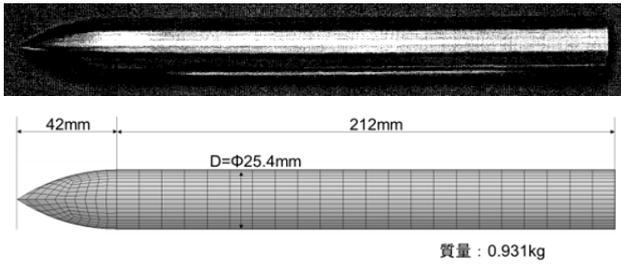


図-1 弾丸型飛翔体<sup>6)</sup>

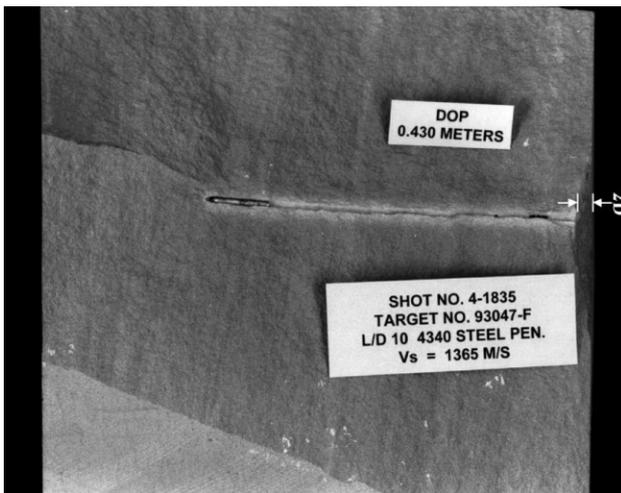


図-2 実験後の様子<sup>7)</sup>

表-1 実験結果<sup>6)</sup>

	石灰岩長さ (m)	衝突速度 (m/s)	貫入量 (m)
1	0.61	407	0.26
2	0.76	566	0.39
3	1.07	800	0.79
4	1.52	917	1.02
5	1.98	1177	1.50

### 3. 剛飛翔体の岩盤貫入に関する既往評価式及び提案式による評価

コンクリートや岩盤を対象にした剛飛翔体の貫入予測式は、各研究者の衝突実験結果を基に数多く提案されている。本章では、代表的な評価式を紹介するとともに表-1に示す実験結果と比較し、その適用性を確認する。以降に示す評価式の記号及び変数は共通である。

#### (1) コンクリート対象の評価式

コンクリートを対象にした評価式は、古くは軍事研究の一環で提案されており、1910年に提案されたPetry式は

最も古い実験式<sup>9)</sup>でそれ以降米国を中心に様々な評価式が提案されている。なお、Li et al.<sup>10)</sup>はコンクリートを対象にした評価式の概要についてとりまとめて報告している。ここに示される多くの評価式は、実験結果に基づく経験的な式である。コンクリートへの貫入評価式として、文献<sup>4)</sup>及び文献<sup>9)</sup>では、アメリカ国防研究委員会 (National Defense Research Committee: NDRC) が提案した修正NDRC式が挙げられている。修正NDRC式は次式の通りである。

$$\frac{x}{d} = \begin{cases} 2G^{0.5}, & \text{for } \frac{x}{d} \leq 2 \\ G + 1, & \text{for } \frac{x}{d} > 2 \end{cases} \quad (1)$$

$$G = 3.8 \times 10^{-5} \frac{Nm}{d\sqrt{f'_c}} \left(\frac{V}{d}\right)^{1.8} \quad (2)$$

ここで、 $x$ は貫入深さ(m)、 $d$ は飛翔体直径(m)、 $V$ は飛翔体の衝突速度(m/s)、 $m$ は飛翔体質量(kg)、 $f'_c$ はコンクリート圧縮強さ(N/mm<sup>2</sup>)である。 $N$ は、修正NDRC式の先端形状係数であり、平坦型は0.72、半球型は0.84、鈍頭(blunt)型は1.0、鋭利型は1.14である。今回の評価では、 $N=1.14$ である。

一方、近年の研究では、半理論的評価式についての報告もいくつかなされており、代表的な評価式として次式に示すWen-Xian式<sup>11)</sup>などが挙げられる。

$$\frac{x}{d} = \left(\frac{4}{\pi}\right) \frac{E_k}{\sigma d^3} \quad (3)$$

$$\sigma = \left(\alpha + \beta \sqrt{\frac{\rho_t}{Y}} V\right) Y \quad (4)$$

$$Y = \begin{cases} 1.4f'_c + 45, & f'_c \leq 75MPa \\ 150, & 75MPa < f'_c < 150MPa \\ f'_c, & f'_c \geq 150MPa \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $E_k$ は飛翔体の衝突エネルギー(N・m)、 $\alpha$ は球や円柱形空洞拡張理論より得られる係数、 $\beta$ は実験結果より得られた係数、 $\rho_t$ はコンクリートの密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $Y$ はコンクリートの圧縮強さに係る係数である。弾丸型における $\alpha$ 及び $\beta$ を表-2に示す。ここで、 $E$ は飛翔体のヤング率(N/mm<sup>2</sup>)、 $\nu$ は飛翔体のポアソン比、 $\psi$ は飛翔体の曲率半径である。

表-2 Wen-Xian式のパラメータ

	$\alpha$	$\beta$
弾丸型	$\frac{2}{3} \left\{ 1 + \ln \frac{E}{3(1-\nu)Y} \right\}$	$3/4 \psi$

#### (2) 岩盤対象の評価式

岩盤を対象にした衝突実験も古くから実施され、実験結果を用いた実験式が提案されている。なお、Gabi et al.<sup>9)</sup>は岩盤や地盤等を対象にした評価式の概要についてとりまとめて報告している。代表的な評価式としてBernard

and Creighton式及びYoung式について述べる。

岩盤を対象にしたBernard and Creighton式<sup>12)</sup>は次式に示す通りである。

$$x = \frac{mN}{A\rho_t} \left[ \frac{V}{3} \sqrt{\frac{\rho_t}{Y_r}} - \frac{4}{9} \ln \left( 1 + \frac{3}{4} V \sqrt{\frac{\rho_t}{Y_r}} \right) \right] \quad (6)$$

$$N = 0.863 \left( \frac{4\psi^2}{4\psi - 1} \right)^{1.4} \quad (7)$$

$$Y_r = \sigma_c (RQD/100)^{0.2} \quad (8)$$

ここで、 $A$ は飛翔体の断面積( $m^2$ )、 $RQD$ はRock Quality Designationの略で岩盤の割れ目の多さを表す指標である。また、式(7)は弾丸型に対する先端形状係数である。

次に岩盤を対象にしたYoung式<sup>13)</sup>を示す。

$$x = \begin{cases} 8 \times 10^{-4} KSN \left( \frac{m}{A} \right)^{0.7} \ln(1 + 2.15V^2 \times 10^{-4}) & , V < 61 \text{ m/s} \\ 1.8 \times 10^{-5} KSN \left( \frac{m}{A} \right)^{0.7} (V^2 - 30.5) & , V \geq 61 \text{ m/s} \end{cases} \quad (9)$$

$$K = 0.46m^{0.15} \quad (10)$$

$$S = 2.7(\sigma_c Q)^{-0.3} \quad (11)$$

$$N = 0.18 \left( \frac{L}{d} \right) + 0.56 \quad (12)$$

ここで、 $\sigma_c$ は岩盤の圧縮強さ( $N/mm^2$ )である。式(12)は弾丸型に対する先端形状係数、 $L$ は飛翔体先端部の長さ(m)、 $Q$ はYoung式における岩盤の状態係数であり表-3に示す通りである。

表-3 Young式のパラメータ<sup>13)</sup>

Descriptive Terms	Q
Massive	0.9
Interbedded	0.6
Joint Spacing <0.5m	0.3
Joint Spacing >0.5m	0.7
Fractured, blocky, or fissured	0.4
Highly fractured or jointed	0.2
Slightly weathered	0.7
Moderately weathered	0.4
Highly weathered	0.2
Frost shattered	0.2
Rock Quality, very good / excellent	0.9
Rock Quality, good	0.7
Rock Quality, fair	0.5
Rock Quality, poor	0.3
Rock Quality, very poor	0.1

### (3) 実験結果に適用した評価式

表-1に示す実験結果を再現する評価式を提案する。飛翔体の衝突エネルギーが岩盤への貫入のみで消費される

と仮定すると次式の関係が成り立つ。

$$\frac{1}{2} mV^2 = \sigma_c \cdot A \cdot x \quad (13)$$

式(13)を展開し表-1に示す実験結果を近似する関係式を提案する。

$$x = \frac{NE_k}{B\sigma_c(RQD/100)A} \quad (14)$$

ここで、 $N$ は先端形状係数で修正NDRC式の先端形状係数と同様とする。また、 $B$ は速度効果係数であり、次式とする。

$$B = 1.16 \times 10^{-8} V^3 - 3.28 \times 10^{-5} V^2 + 3.59 \times 10^{-2} V + 1 \quad (15)$$

式(15)は、衝突に伴い飛翔体先端に生じる最大抵抗力と岩盤の圧縮強さの比を算出し、その結果の近似曲線を表-1に示す実験結果を再現するための速度効果係数とした。最大抵抗力は、4章に示す剛飛翔体の貫入挙動評価の検討で用いた半理論的解析手法や数値シミュレーション手法から算出した。

図-3に実験結果と各評価式を用いた評価結果の比較を示す。衝突速度600m/s程度までは、どの評価式でも概ね同様の結果となった。コンクリートを対象にしたWen & Xian式のように、飛翔体の衝突エネルギーと岩盤の受ける抵抗力のつり合いから導かれる半理論的評価式は安全側の評価結果となった。

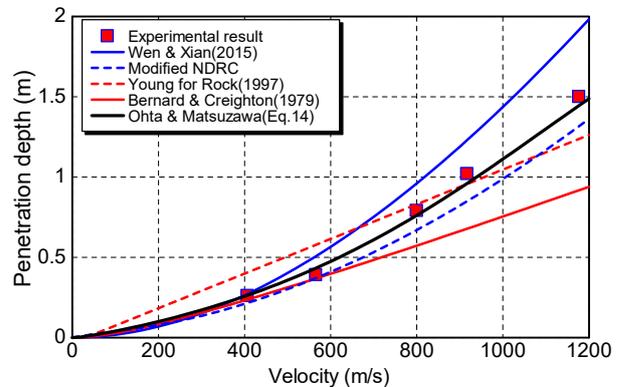


図-3 貫入量に係る実験結果と評価結果の比較

## 4. 剛飛翔体の貫入挙動評価

数値シミュレーション、既往の力学モデルに基づく理論的評価を用いた衝突時の貫入挙動の解析的評価を実施し、その適用性について確認した。

数値シミュレーションによる解析的評価として、陽解法・有限要素法による衝撃解析コードであるLS-DYNAを用いて、衝撃作用を受ける岩盤の変形・破壊解析を行った。岩盤の構成則としては、文献<sup>7)</sup>に記載された三軸圧縮試験の再現解析による検討を踏まえ、岩盤の構成則

としてRHT (Riedel-Hiermaier-Thoma) モデルを採用した。RHTモデルはRiedelら<sup>14),15),16)</sup>によるモデルであり、非線形状態方程式、圧力依存の降伏応力、およびひずみ速度に応じた動的降伏強度が考慮される。また、Lode角の効果が考慮される。降伏関数は式(16)及び(17)で表わされる。

$$F(p, \sigma_{eq}, \theta, \dot{\epsilon}_p) = \sigma_{eq} - \sigma_f(p, \theta, \dot{\epsilon}_p) \quad (16)$$

$$\sigma_f(p, \theta, \dot{\epsilon}_p) = f'_c \sigma_f^*(p^*, F_R(\dot{\epsilon}_p, p^*)) R_3(\theta, p^*) \quad (17)$$

ここで、 $F$  : 降伏関数、 $\sigma_{eq} : \sqrt{3}J_2$  ( $J_2$ は偏差応力の第2不偏量)、 $\sigma_f$  : 降伏応力、 $f'_c$  : 一軸圧縮強さ、 $p$  : 静水圧、 $F_R$  : ひずみ速度の効果を表す関数、 $R_3$  : Lode角の効果を表す関数、 $\dot{\epsilon}_p$  塑性ひずみ速度、 $\theta$  : Lode角である。図-4にRHTモデルの概要を示す。図-5に岩盤解析モデルを示す。いずれも各試験における供試体の寸法を忠実に再現した。ただし、貫入方向と直交する辺の寸法はいずれも510mmで共通である。飛翔体モデルは図-1に示す通りである。既往試験結果において飛翔体の変形はわずかであったため、解析では線形弾性体として簡略化してモデル化した。表-4から表-6に解析に用いたパラメータを示す。表-6に示した数値エロージョン則とは、数値計算上の技法のひとつであり、過度に変形して計算の進展を妨げる要素を削除するためのものである。飛翔体、岩盤ともにソリッド要素によりモデル化した。事前検討を踏まえ、岩盤の平均的な要素サイズは2.5mmとしたが、衝突位置から離れた箇所については漸次要素サイズを大きくした。また、試験体の対称性を考慮し1/4モデルとした。

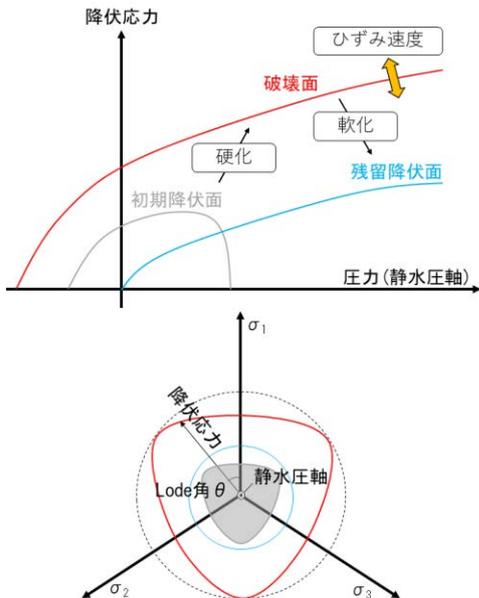


図-4 RHTモデルの概要

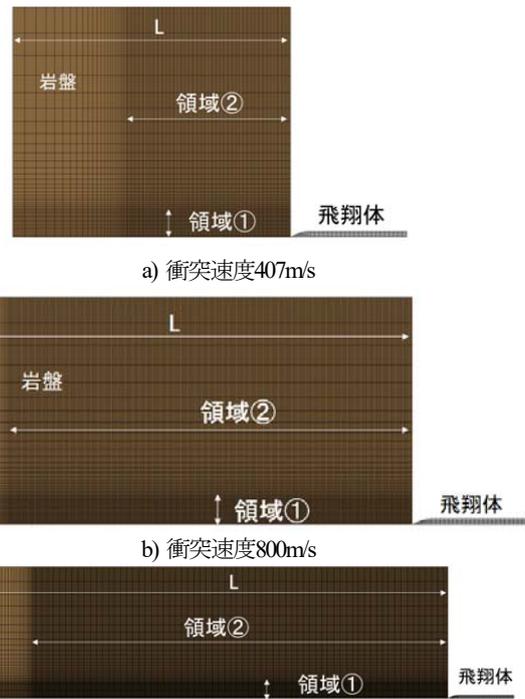


図-5 岩盤解析モデル

表-4 岩盤解析モデルの概要

衝突条件 (m/s)	長さ L(mm)	領域① (mm)	領域② (mm)	平均要素サイズ (mm)	モデル全体要素数
a)407	610	60	360	2.5	約40万
b)800	1070		900		約90万
c)1177	1980		1600		約160万

表-5 飛翔体解析モデルの材料パラメータ

項目	値
密度(kg/m <sup>3</sup> )	先端: 7850 本体: 7863
ヤング率(MPa)	200,000
ポアソン比(-)	0.3

表-6 岩盤解析モデルの材料パラメータ

項目	a)407m/s	b)800m/s	c)1177m/s
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2310		
圧縮強さ(MPa) $f'_c$	56.2	66.7	61.2
引張強さ(MPa) $f_t$	1.74	2.07	1.89
ヤング率(GPa) $E$	31.416	37.285	34.211
ポアソン比(-) $\nu$	0.29		
材料モデル	MAT RHT		
ひずみ速度効果	有		
数値エロージョン則	相当ひずみ: 200% 体積ひずみ: 25% のいずれかを満たした場合		

力学モデルに基づく既往の理論的評価手法として、防衛施設学会より発行されている「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」）<sup>17)</sup>を用いる。防衛施設学会の手法は、Li et al.<sup>18),19),20)</sup>が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-6に防衛施設学会の手法の計算手順を示す。飛翔体の先端形状を形状関数 $y(x)$ と定義し、計算時間ステップ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。当該評価式は、飛翔体と周辺材料との摩擦抵抗を無視している。防衛施設学会の手法の詳細については、参考文献<sup>17)</sup>を参考にされたい。

飛翔体の岩盤への衝突時における貫入量について、計測結果の分析、数値シミュレーションによる解析的評価及び力学モデルに基づく理論的評価を実施した結果を図-7に示す。表-1に示す実験ケースのうち、衝突速度407, 800, 1177m/sについて検討した。3ケースとも数値シミュレーション及び理論解析の結果は、図中黒線で示した表-1の各実験の最終貫入量と概ね対応する結果が得られた。

## 5. まとめ

本論文では、石灰岩への剛飛翔体の衝突実験結果を用いて、既往実験式による評価、既往理論式による評価及び数値解析の評価より検討した。本論で得られた成果は以下の通りである。

- 1) 石灰岩への貫入量について、衝突速度 600m/s 程度までは、修正 NDRC 式、Wen-Xain 式及び Bernard-Creighton 式は概ね同様の評価結果となり、実験結果と良い対応を示した。
- 2) 飛翔体の衝突エネルギーと岩盤の受ける抵抗力の関係式を用いた評価式は実験結果との相関性が良い。
- 3) 衝突に伴う飛翔体の石灰岩への貫入量について、実験結果の分析、数値シミュレーション評価及び理論解析評価から検討した。その結果、いずれの手法でも、その適用性が確認できた。

今後、岩盤への衝突実験を実施するとともに異なる条件の衝突実験に対して詳細な計測・分析、既往実験式を用いた評価、既往理論式を用いた評価及び解析評価により、その適用性を確認していくとともに評価式の高度化及び速度依存性等について検討する予定である。

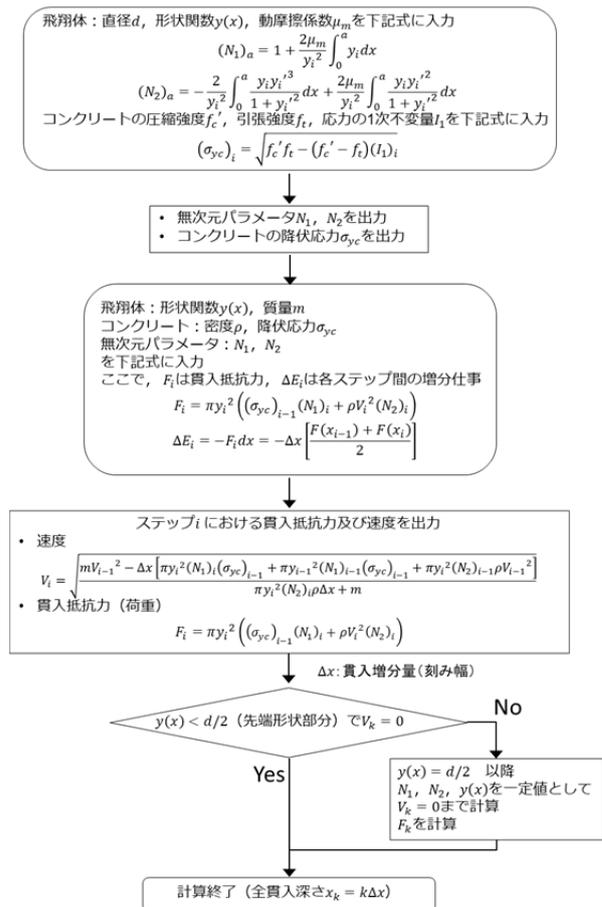


図-6 防衛施設学会の手法の計算手順<sup>17)</sup>に加筆・修正

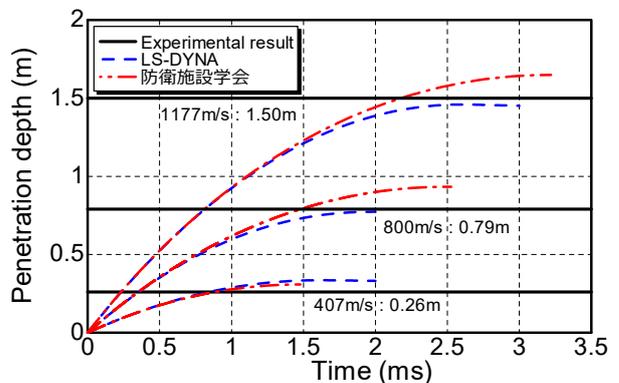


図-7 石灰岩に対する飛翔体の貫入量—時間関係

## 参考文献

- 1) 内閣府 (防災担当) : 活火山における退避壕等の充実に向けた手引き, 2015 .
- 2) 原子力規制委員会: 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド, 2013.
- 3) 原子力規制委員会: 実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド, 2014.
- 4) International Atomic Energy Agency : Safety aspects of nuclear power plants in human induced external events : Assessment of structures, SAFETY REPORTS SERIES

- No. 87, p.204, 2018.
- 5) NEI07-13[Revision 8P] : Methodology for performing aircraft impact assessments for new plant designs, ERIN Engineering & Research, Inc, April 2011.
  - 6) Gabi Ben-Dor, Anatoly Dubinsky, Tov Elperin : Engineering models of high speed penetration into geological shields, *Cent. Eur. J. Eng.* 4(1), pp.1-19, 2014.
  - 7) Frew, D.J., Forrestal, M.J., Hanchak, S.J. : Penetration Experiments with Limestone Targets and Ogive-nose Steel Projectiles, SAND099-0862J, 1999.
  - 8) Thomas L. Warren : Simulations of the penetration of limestone targets by ogive-nose 4340 steel projectiles, *International Journal of Impact Engineering* 27, pp.475-496, 2002.
  - 9) Kennedy, R.P. : A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects, *Nuclear Engineering and Design*, 37, pp.183-203, 1976.
  - 10) Li, Q. M., Reid, S. R., Wen, H. M., Telford, A. R. : Local Impact Effects of Hard Missiles on Concrete Targets, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.12, No.32, pp.224-284, 2005.
  - 11) Wen, H.M., Xian, Y.X. : A unified approach for concrete impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.77, pp.84-96, 2015.
  - 12) Bernard, R.S. and Creighton, D.C. : Projectile penetration in soil and rock: Analysis for non-normal impact, Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report SL-79-15, December 1979.
  - 13) Young, C.W. : Penetration Equations, Sandia National Laboratories, CONTRACTOR REPORT, SAND97-2426, p.24, 1997.
  - 14) LSTC: LS-DYNA Keyword user's manual, LS-DYNA R7.1, 2014.
  - 15) Riedel, W., Kawai, N., Kondo, K.: Numerical assessment for impact strength measurement in concrete materials, *International Journal of Impact Engineering*, 36, pp.283-293, 2009.
  - 16) Grunwald, C., Schaufelberger, B., Stols, A., Riedel, W., Borval, T. : A general concrete model in hydrocodes: Verification and validation of the Riedel-Hiermaier-Thoma model in LS-DYNA, *International Journal of Protective Structures*, 8(1), pp. 58-85, 2017.
  - 17) 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.
  - 18) Li, Q. M. and Chen, X. W.: Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.1, No.28, pp. 93-116, 2003.
  - 19) Li, Q. M. and Tong, D. J.: Perforation thickness and ballistic limit of concrete target subjected to rigid projectile impact, *ASCE, Journal of Engineering Mechanics*, Vol.129, No.9, pp.1082-1091, 2003.
  - 20) 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.

## A STUDY ON ROCK PENETRATION EVALUATION SUBJECTED TO HIGH SPEED IMPACT OF HARD PROJECTILES

Yoshimi OHTA, Ryo MATSUZAWA

In the field of nuclear energy in Japan, now, the new regulatory standards request evaluations of impact phenomena considering various types of impactor. For concretes subjected to rigid projectiles impact, many researchers have proposed penetration equations that evaluate penetration depth of that, however there are only a few studies on the penetration of ground and rock targets. In this study, we discuss the applicability of the existing several penetration equations for rocks by referring to the results of impact tests on limestone. Furthermore, evaluate penetration depth of the limestone tests by using another semi-theoretical analysis method proposed for concrete, and numerical simulations.