

高速飛行体の固体への衝撃貫入の解析 について

河田 幸三・塩谷 義

On An Analysis of The Penetration of Rigid-Plastic Targets by Rigid Projectiles

By

Kozo KAWATA and Tadashi SHIOYA

Abstract: The problem on the penetration of rigid-plastic targets by rigid projectiles is theoretically studied. Slip line theory is used and the analysis is based on the upper bound theorem. The process of the penetration of plate targets is classified into three stages by the depth of penetration. By the use of the proper kinematically admissible field in each stage, simple analytical formulae for the calculation of the resistance and the energy required for the penetration are obtained.

概 要

飛行体が固体に貫入する問題を剛塑性体近似に基づく上界定理を用いて解析した。飛行体が平板に貫入し、突き抜けに到る過程を3つの段階に分けて考え、それぞれについて適当な可容速度場を求めた。この手法により、飛行体の貫入抵抗、突き抜けに要するエネルギー等について簡単に扱える解析的公式を導出した。

1. はじめに

高速飛行体が固体に衝撃貫入する現象は古くから興味ある問題の一つであるが、近年になって、宇宙船と隕石の衝突の問題、原子力施設への航空機等の墜落時の安全対策など、重要な課題の一つとなってきている。従来この方面の研究としては、

- (1) 比較的低速域での現象に関する実験的に誘導した式、又はごく簡単な仮定に基づく計算式 [1~8]
- (2) 超高速域でのいわゆる hypervelocity impact での
 - a) 流体としての扱い [9]
 - b) 融解としての扱い [10]

などが見られる。これらを通観してみると、(1)は粗雑すぎる場合が多く、又、(2)はかなり精密な数値解の例もあるが、解析的公式としては与えられ難いように思われる。もちろん、この種の問題においてはあらゆる条件を満足する完全な解が求まることは期待できないが、そ

それぞれの範囲で適用性のすぐれた扱いを行なうことが望まれる。

そこで、本研究においては、速度が70 km/sにも及ぶ隕石の hypervelocity impact に比べて比較的低い速度の数100 m/s程度までの領域で十分に塑性を示す固体中に貫入して行く場合について、飛行体の質量、速度などと、貫入抵抗、貫入深さとの関係式を、もう少し精密に扱い、しかも比較的単純な形に導出することを試みる。

この種の解析には、剛塑性体近似に基づくすべり線場理論 [11] の適用が有効と考えられるが、ここでは同理論を用い、上下界法で近似する方法を用いることにする。以下、上記の手法に基づく貫入抵抗、貫入深さなどの解析での第一着手の結果について報告する。

2. 解析方法

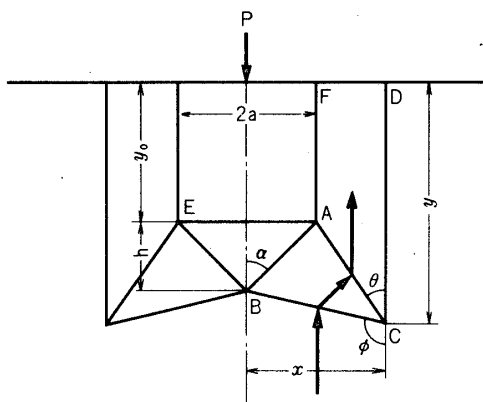
衝撃される材料の力学的性質は剛塑性体近似で表わされるものとする。本報では平面ひずみでのすべり線場理論を用い、可容速度場の仮定より得られる上界荷重から飛行体の貫入、突き抜けに要する荷重、エネルギーを求める。

衝撃される物体は、厚さ D の無限平板とし、材料のせん断降伏応力を k とする。飛行体はこれに垂直に貫入する剛体とし、その幅を $2a$ とする。

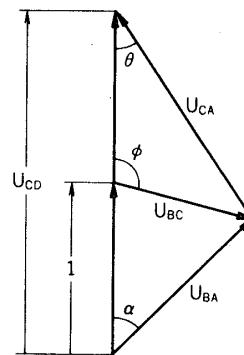
飛行体が平板を突き抜ける過程を3つの段階に分けて考え、それぞれをモデル I, II, III として扱う。モデル I は、飛行体貫入により排除される平板内の要素が、飛行体の進入してきた側の表面に押し出されるとするモデルで、飛行体が平板に接触をはじめてから、板厚に比べて比較的浅いところを進行している場合に相当する。モデル II は逆に、飛行体により排除される要素が平板の裏面に押し出されるとするモデルで、飛行体が裏面に近いところを進行している場合に相当する。モデル III は、飛行体が厚い平板中で両表面から離れた中央部を進行しているときに、排除される要素が飛行体の通過した行路に押し出されるとするモデルである。以下、それぞれについての扱いを述べる。

2.1 モデル I

すべり線場を図1のように仮定する。飛行体を静止させて考えれば、平板内の要素は図中の矢印に沿って移動する。貫入速度を単位にとると、速度場は図2のホドグラフで示される。



第 1 図



第 2 図

飛行体の側面 AF ではせん断を受けないものと仮定し, BA においては, 三角形要素 BAE がデッドメタルとして飛行体に付着しているものと考えて, BC , CD と同様に一定せん断応力 k を受けるものとする。

貫入に要する荷重の上界は次式により計算される。

$$P \cdot a \cdot 1 = k \{ BA \cdot U_{BA} + BC \cdot U_{BC} + CA \cdot U_{CA} + C_D (U_{CD} - 1) \} \dots\dots\dots(1)$$

上式における線分の長さ BA , BC , CA , CD および要素の移動速度 U_{BA} , U_{BC} , U_{CA} , U_{CD} はそれぞれ図1および図2の幾何学的関係から求められ,

$$P = (k/a) \left[\{ a Y_1^2 + h^2 x + 2 a x^2 + a Y_0^2 x / (x-a) \} / | h x + a Y_1 | + a y / (x-a) \right] \dots\dots\dots(2)$$

となる。ただし, h , x , y は図1に示す長さであり, 又, Y_0 , Y_1 は $Y_0 = y - y_0$, $Y_1 = y - y_0 - h$ である,

式(2)において変数 h , x , y に対して最小となる P を求めればよいが, ここでは簡単な解析解を求めるため, $h = a$ とし, さらに, y については i) $y = y_0 + h$ の場合と, ii) $y = y_0$ の場合の比較にとどめる。

i) $y = y_0 + h$ のとき

式(2)により

$$P = (k/a) \{ a + 2x + a^2 / (x-a) + a y / (x-a) \} \dots\dots\dots(3)$$

$\partial P / \partial x = 0$ より $x = \sqrt{(a^2 + a y) / 2}$ が得られ, これを式(3)に代入して

$$P = k (2 \sqrt{2} \sqrt{1 + y/a} + 3) = k (2 \sqrt{2} \sqrt{2 + y_0/a} + 3) \dots\dots\dots(4)$$

となる。

ii) $y = y_0$ のとき

i) と同様にして

$$P = k (2 \sqrt{2} \sqrt{4 + y_0/a} + 3) \dots\dots\dots(5)$$

が得られる。式(4)(5)を比較すれば, i) の方がよりよい上界を与えることが知られる。従って式(4)をモデルIIの解とする。

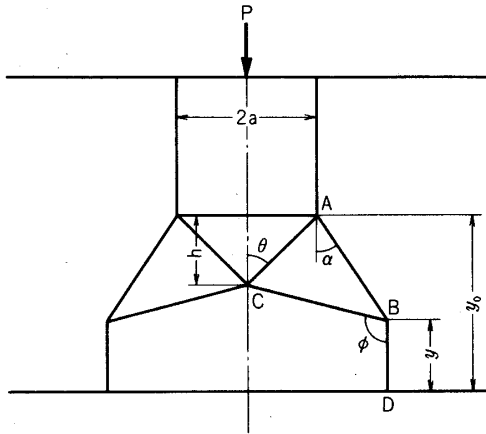
式(4)で $y_0 = 0$ とおくと, 上界荷重は, $P = 7k$ となり, 一方, 平らなポンチの押し込みの正解荷重 [11] は, $P \doteq 5.14k$ であり, この方法の近似の限度を示している。

2.2 モデル II

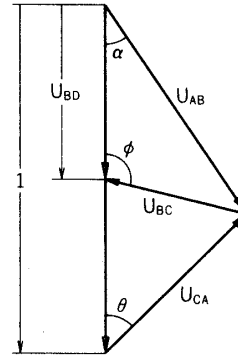
すべり線場を図3のように仮定し, 図4のホドグラフを得る。モデルIの場合と同様にして,

$$P \cdot a \cdot 1 = k \{ AB \cdot U_{AB} + CA \cdot U_{CA} + BC \cdot U_{BC} + BD \cdot U_{BD} \} \dots\dots\dots(6)$$

$h = a$, $y = y_0 - h$ において



第 3 図



第 4 図

$$P = (k/a)(2x - a + ay/x) \quad \text{ただし } x \geq a \quad \dots\dots\dots(7)$$

$\partial P / \partial x = 0$ より $x = \sqrt{ay/2}$ を式(7)に代入して

$$P = k(2\sqrt{2}\sqrt{y/a} - 1) = k(2\sqrt{2}\sqrt{y_0/a} - 1) \quad \text{ただし } y \geq 2a \quad \dots\dots\dots(8)$$

$0 \leq x \leq a$ ($0 \leq y \leq 2a$) に対しては式(6)は

$$P = k\{-3 + (4a + y)/x\}$$

となり, $x = a$ で最小である, 従って

$$P = k(1 + y/a) = ky_0/a \quad 0 \leq y \leq 2a \quad \dots\dots\dots(9)$$

式(8), (9)をモデルIIの解として用いる。

2.3 モデル III

すべり線場を図5のごとく仮定する, 計算法はモデル I の場合とほとんど同様であり, 上界荷重として

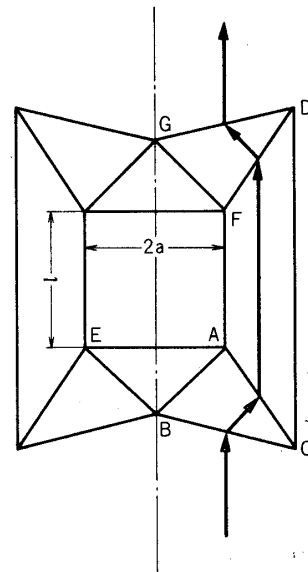
$$P = k\{4\sqrt{2}\sqrt{2 + (\ell/2a)} + 6\} \dots\dots\dots(10)$$

を得る ただし, ℓ は図中に示す長さで, 飛行体によってきまる。たとえば $\ell = 2a$ とすると, $P \doteq 15.8k$ となる。

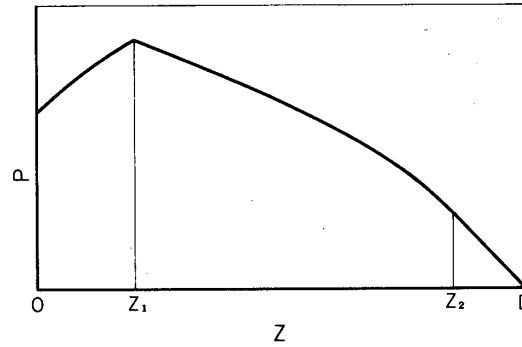
2.4 飛行体の突き抜けに要するエネルギーの計算

図6に従って式(4), (8), (9)を飛行体の貫入側からかけた深さ z の関数として改めて書き直すと,

$$P = k(2\sqrt{2}(\sqrt{z/a + 2} + 3)) \quad 0 \leq z < z_1 \quad \dots\dots\dots(11)$$



第 5 図



第 6 図

$$P = k (2 \sqrt{2} \sqrt{(D-z)/a-1} - 1) \quad z_1 \leq z < z_2 \quad (12)$$

$$P = k (D - z) / a \quad z_2 \leq z < D \quad (13)$$

ここで z_1 , z_2 は

$$z_1 / a = \begin{cases} (D/a - 3 - 2\sqrt{D/a}) / 2 & D/a \geq 9 \\ 0 & 0 \leq D/a < 9 \end{cases}$$

$$z_2 / a = \begin{cases} D/a - 1 & D/a \geq 3 \\ 0 & 0 \leq D/a < 3 \end{cases}$$

モデルⅢは $\ell = 0$ の場合でも $P = 14k$ という大きな値であり、板厚 D が $D/a \geq 42.25$ としなければ現れないので、ここではモデルⅠ、Ⅱの適用についてのみ扱う。

飛行体の平板の突き抜けに要するエネルギーは、深さ z における所要荷重 P を板厚にわたって積分することにより求められる。平板の表面は飛行体の貫入により盛り上がるため、積分域(板厚)はこの点の補正をする必要があるが、ここでは計算の簡単のためこの影響を無視する。突き抜けに要するエネルギーを U とすると、 $U = \int_0^D P \cdot 2a \cdot dz$ は式(11)(12)(13)より次のように求められる。

$$U / (2ka^2) = \frac{2}{3} (D/a + 1 - 2\sqrt{D/a})^{\frac{3}{2}} + \frac{2}{3} (D/a + 1 + 2\sqrt{D/a})^{\frac{3}{2}} + D/a - 4\sqrt{D/a} - \frac{55}{6}, \quad D/a \geq 9 \quad (14)$$

$$U / (2ka^2) = \frac{4}{3} \sqrt{2} (D/a - 1)^{\frac{3}{2}} - D/a + \frac{13}{6} \quad 3 \leq D/a < 9 \quad (15)$$

$$U / (2ka^2) = \frac{1}{2} (D/a)^2 \quad 0 \leq D/a < 3 \quad (16)$$

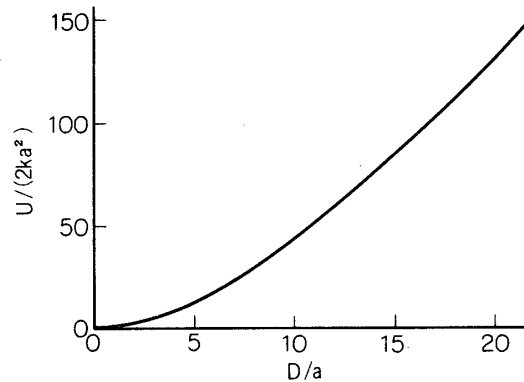
上式による板厚と突き抜けエネルギーの関係を図7に示す。この関係を用いた計算例を示す。 $k = 50 \text{ kg/mm}^2$ の材料からなる平板に、質量 100 g の飛行体が貫入する場合を考える。 $a =$

10 mm, 幅 20 mm とし, 飛行体の持つ運動エネルギーが上記の突き抜けに要するエネルギーに消費されると仮定すると, 厚さ 20 mm, 50 mm, 100 mm の平板の突き抜けに要する衝突速度は, 式(14)~(16)を用いて, それぞれ 280 m/s, 690 m/s, 1300 m/s となる。

3. 結 論

飛行体の貫入の問題に対し, 剛塑性体近似による上界法を用いて簡単に扱える計算式を導いた。本報の解析は, 衝撃による熱発生の影響, 応力波の問題等を無視しており, これらの影響の大きい高速域の現象に対しては扱えないが, 十分塑性を示す比較的低速域での飛行体の貫入の問題に対する簡単な近似として適用し得るものと考えられる。

第 7 図



1974年9月28日 材料部

参 考 文 献

- [1] Minorsky, V.U., J. Ship Research, 3-2 (1959-10), 1.
- [2] Summers, J.L. and Niehaus, W.R., NASA TND-138 (1959-12).
- [3] Giere, A.C., AIAA J., 2-8 (1964-8), 1471.
- [4] Nishiwaki, J., J. Phys. Soc. Japan, 6-5 (1951-10), 374.
- [5] Zaid, M. and Paul, B., J. Franklin Inst., 264-2 (1957-8), 117.
- [6] Paul, B. and Zaid, M., J. Franklin Inst., 265-4 (1958-4), 317.
- [7] Zaid, M. and Paul, B., J. Franklin Inst., 268-1 (1959-7), 24.
- [8] Thomson, W.T., J. Appl. Phys., 26-1 (1955-1), 80.
- [9] 例えば, Kinslow, R. (ed), High Velocity Impact Phenomena, (1970), 45, 105, 157 等, Academic Press.
- [10] Koelle, H.H. (ed) Handbook of Astronautical Engineering, (1961), 3-75. McGraw-Hill.
- [11] 例えば, Hill, R., The Mathematical Theory of Plasticity, (1950). Clarendon Press.
- [12] 河田, 塩谷, 日本航空宇宙学会第5回年会講演会講演集, (昭49-4), 53.