

衝突クレーター形成に状態方程式が及ぼす影響に関する考察（その2）

(株)大林組 正会員 ○新田祐平 高橋篤史 竹内義高 秋元理仁
JIP テクノサイエンス(株) 正会員 戸田圭彦 柳 振錫 山口清道

1. はじめに

著者らは設計技術・解析技術を宇宙空間に拡張するための基礎的検討を行っている。過年度は高速衝突における衝突クレーター形成に対して古典塑性論を適用した解釈を試み、数値解析による検証を実施したが、スケールの定量評価が依然として課題であった。

そこで本研究ではより議論を深めてクレーターサイズの定量化に関する検討を行った。前報¹⁾では、理論解析と数値解析の両面から、衝突点では圧縮過程と膨張過程における不可逆性が生じる点に着目した考察を行った。本稿では引き続き、衝突点の状態方程式の与え方がクレーター形成におよぼす影響について数値解析的な検討を行った。

2. 解析モデル

既報において参照した Suzuki ら⁴⁾の堆積岩への高速衝突実験（図-1）を対象とする。図-2 および図-3 にモデルの詳細を示す。静的解析と同様に堆積岩は Mohr-Coulomb 弾塑性体とし、非関連流動則（膨張角 0° ）とした。弾性係数を $40,000[\text{N/mm}^2]$ 、ポアソン比 0.2 とし、内部摩擦角 ϕ は解析パラメータとした。また、堆積岩の引張強度が $4.6[\text{N/mm}^2]$ となるように粘着力を換算して入力した。

3. 状態方程式が与える影響

衝突点の圧力-体積関係と、クレーターサイズに相関があるという仮説より、状態方程式の各種パラメータとクレーターサイズにも関係があると考えられる。そこで表-1 に示す前報の式(4)のパラメータの組み合わせに対するパラメトリックスタディを実施し、圧力-体積関係とクレーターサイズへの感度を調査した。ここで、パラメータ s は Hugoniot の材料パラメータで実験から求まる値（通常 1~2 程度）である。また、 γ は Mie-Grüneisen 状態方程式のパラメータで、圧力に対する温度効果の大きさを表している。

図-4 に全 5 ケースの同時刻における粒子速度分布図を示す。ただし速度が大きく既報のような塑性ひずみでの可視化では明瞭なすべり線は得られないため、便宜上、弾丸の貫入後に上向き速度を持っている領域をクレーター領域とみなした。図に示すように、 $s = 0$, $\gamma = 0$, すなわち状態方

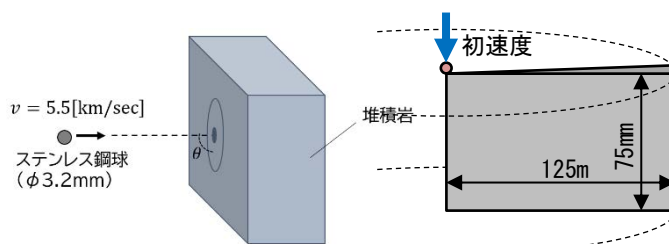


図-1 実験概要

図-2 解析モデルサイズ

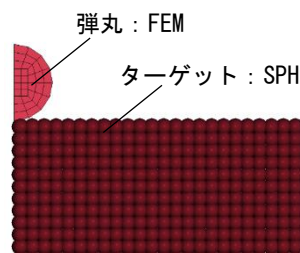


図-3 メッシュサイズ

表-1 解析ケース

No.	s	γ
1	0	0
2	0	1
3	1	0
4	1	1
5	2	1

軸対称線 ケース No. 1 のクレータ縁

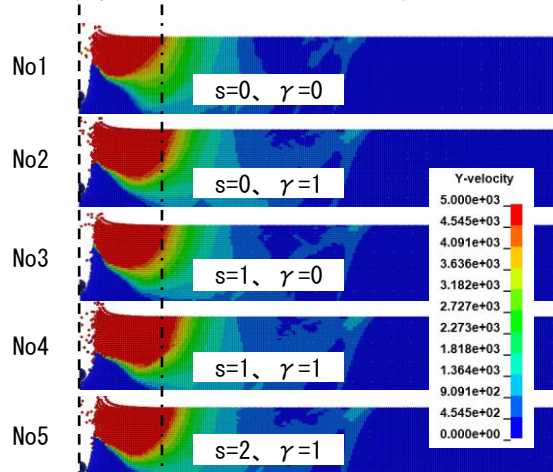


図-4 速度の分布図

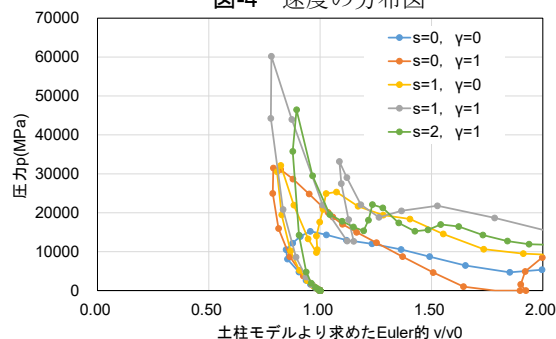


図-5 深さ 5mm 位置での圧力-体積関係

式に線形弾性関係を与えた No.1 のケースのクレーターを基準とすると、No.4, No.5 など Hugoniot と Mie-Grüneisen 状態方程式を与えたケースではより大きなクレーターが生じ

キーワード 堆積岩, 衝突解析, RHT モデル, p - α モデル, SPH 法

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 インターシティ B 棟 (株)大林組 原子力本部 FAX03-5769-1942

ていた。また図-5に全ケースの表層から5mm位置の粒子の圧力-体積関係を示す。ここでも、最も圧力が小さいケースは線形弾性体を与えたNo.1であり、状態方程式を与えたNo.4とNo.5のケースでは大きな圧力が生じた。以上の結果より衝突点で生じている圧力の大きさと、クレーターサイズには何らかの関係があることが読み取れる。

さらにNo.1およびNo.5の2ケースの膨張曲線と等エントロピー線を比較すると図-6を得る。定性的ではあるが、両者の傾向は一致していた。また図-7より膨張曲線からも圧力の定常状態が得られており、これは前報³⁾で得られた結果と同じである。

4. マッハ数と発生圧力の関係

衝突点の圧力は状態方程式のパラメータの他に粒子速度の影響を受ける。マッハ数 M と衝撃波先端の圧力 p_H の関係は次式となる。

$$M = \frac{u_s}{c_0} \quad (1)$$

$$u_p = \frac{c_0}{s} (M - 1) \quad (2)$$

$$p_H = p_0 + \frac{\rho_0 c_0^2}{s} M(M - 1) \quad (3)$$

ここに、 u_s ：衝撃波速度、 c_0 ：媒質の音速、 s ：Hugoniotパラメータ、 u_p ：粒子速度、 ρ_0 ：密度、 p_0 ：初期圧力、である。

図-8および図-9に衝突速度2750 m/sec、5500 m/sec、8250 m/secの3ケースの変形図と、表層から10mm位置での圧力-体積関係を示す。状態方程式パラメータはNo.4のものを使用した。衝突速度に応じてクレーター範囲は広がっている。また膨張曲線は理論解析より得た等エントロピー線に一致していた。

粒子速度と最大圧力の関係を図-10に示す。SPH粒子の速度と圧力の関係は式(3)から得られた p_H に一致していた。なお、衝突速度から算出した圧力も併記するが、概ね衝撃波先端でのSPH粒子速度は衝突速度の半分程度となっており、衝突点近傍では同質量同士の完全弾性衝突に近い状況であったと考えられる。

5. まとめ

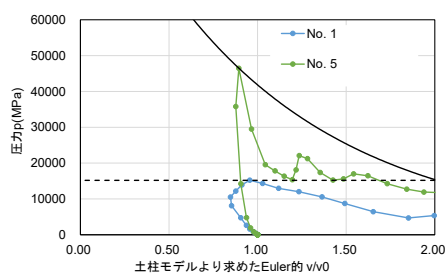


図-6 圧力-体積関係と等エントロピー線の比較 (ケース No.1, No.5)

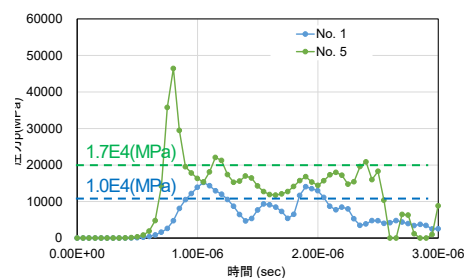


図-7 圧力の定常状態 (ケース No.1, No.5)

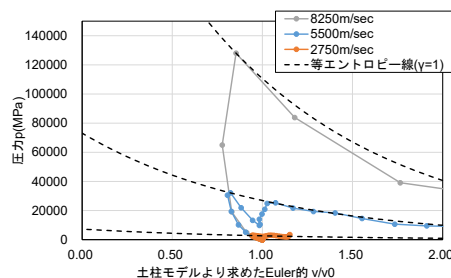


図-9 圧力-体積関係と等エントロピー線の比較 (衝突速度3 ケース)

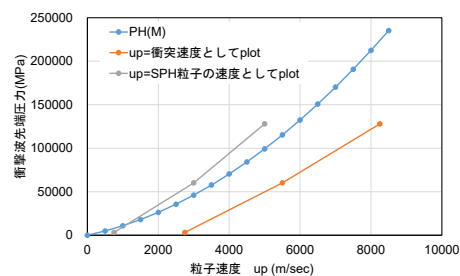


図-10 粒子速度と発生圧力の関係 (衝突速度3 ケース)

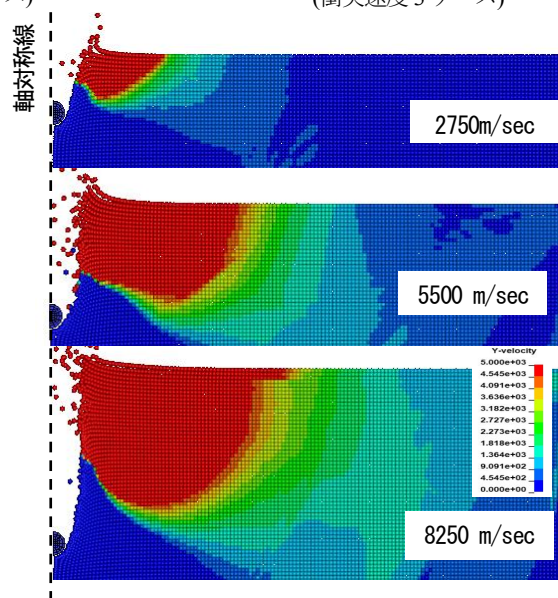


図-8 粒子速度分布

本研究では前報に引き続き衝突点近傍の圧力-体積関係に着目した数値解析を実施し、圧力とクレーターサイズとの間に関係が認められたこと、衝突点近傍の膨張曲線は Mie-Gruneisen 状態方程式から求めた等エントロピー線を辿っていること、衝撃波先端圧力の大きさとマッハ数に明瞭な関係が認められたこと、などを示した。

しかしながら発生圧力の大きさとクレーターサイズは線形関係にはない。引き続き、これらの定量評価技術の確立が課題である。

参考文献

- 1) 高橋ら：衝突クレーター形成に状態方程式が及ぼす影響に関する考察（その1），土木学会年次学術講演概要集，2023.(投稿中)
- 2) A. I. Suzuki, et. al. : Experimental study concerning the oblique impact of low- and high-density projectiles on sedimentary rocks, Planetary and Space Science, vol. 195, No. 105141, 2021.