

Prandtl-Wedgeに基づく衝突クレーター形成の解釈と数値解析的検討（その1）

(株)大林組

正会員 ○秋元 理仁 高橋 篤史

JIP テクノサイエンス(株)

正会員 戸田 圭彦 山口 清道

1. はじめに

近年、アルテミス計画をはじめとした有人宇宙飛行計画が半世紀ぶりに計画され、人間の生活域を深宇宙へ拡大することが現実味を帯びてきている。

月面有人探査やその先に想定されている火星有人探査においては人間が長期的に生活できる居住用シェルターの建設が想定されているが、宇宙空間はスペースデブリや小天体のような高速飛来物で溢れており、それらの危険から居住域を守る必要がある。したがって、構造物の設計技術・解析技術はそのような高速衝突の作用にも対応したものでなければならないが、一般的な設計技術・解析技術は航空機程度の速度（500 m/sec 以下）までを対象にしており、宇宙飛来物の速度（数 1000 m/sec 以上）は想定されていない。

そこで、本稿では建設分野における設計技術・解析技術を宇宙空間に拡張するための端緒となる基礎的検討を行った。岩石への高速衝突による衝突クレーター形成実験を対象に、古典塑性論による解釈を試み、その数値解析法について種々の検討を実施した。

2. 古典塑性論による衝突クレーター形成の解釈

Suzuki らは堆積岩を対象とした模型実験（図-1）を実施しており、その結果から図-2 に示す断面を有する衝突クレーターの形成を認めている。ここで、クレーターの大きさは衝突角度や弾丸の物性によって変化するものの、それらが同心円状に広がっている点に着目する。すなわち、斜面勾配の角度は弾丸ではなく、堆積岩に固有の物性値に支配されているように見える。

そこで本研究では岩石に形成される衝突クレーターは古典塑性論のいわゆるせん断すべり線であるの見立て、その破壊荷重や斜面角度は内部摩擦角に支配されていると考え、以下のようなクレーター形成過程の仮説を立てた。

- (1) 弾丸が衝突した瞬間、衝突点には大きな荷重が作用して衝突点付近は瞬時に塑性化する。
- (2) その後、ある時刻までにせん断すべり線が衝突点を中心に発達する。このときの衝突荷重はせん断すべり線が受け持てる最大地盤支持力と釣り合っている。

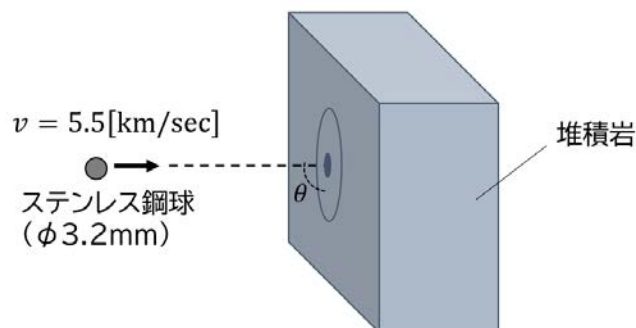


図-1 実験概要（文献1）の記述を元に作図

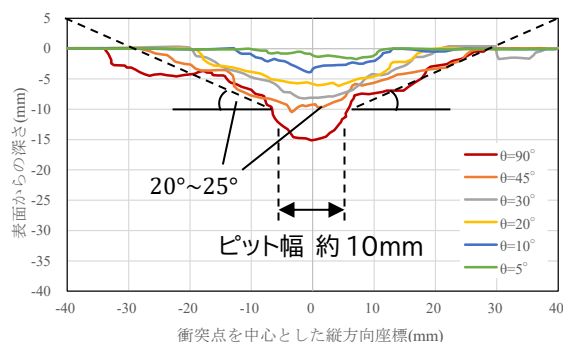
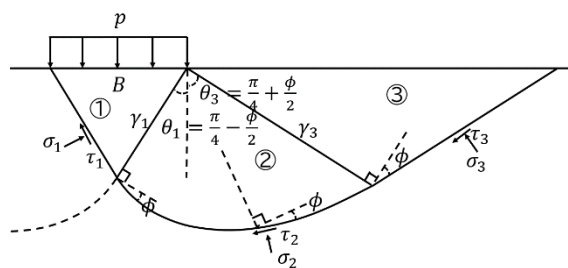


図-2 クレーター断面図(文献1)のデータをもとに作図

図-3 Prandtl-Wedge²⁾

- (3) せん断すべり線で囲まれた範囲は釣り合い不安定であるため飛散し、クレーターが形成される。

3. Prandtl-Wedgeによる荷重とクレーター形状の評価

せん断すべり線の形成が静的な釣り合いに支配されていると考えれば、その限界荷重が得られる。

Prandtl-Wedge²⁾は平面ひずみ問題においてストリップワーピングを介して地盤に荷重が作用したとき、図-3 に示すように①②③の3個の土塊に領域を分割し、それぞれの境界面での釣り合いから限界荷重を求めたモデルである。

幅Bの分布荷重pが地盤表面に作用したとき、非関連流れ

キーワード 高速衝突、堆積岩、クレーター、Prandtl-Wedge,

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

則 ($\psi = 0$) を仮定すれば限界支持力 N_c は次式の準・解析解²⁾で表される。

$$\frac{p}{c} = N_c \quad (1)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (2)$$

$$N_q = \cos^2 \phi K_p \exp(\pi \tan \phi) \quad (3)$$

$$K_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \quad (4)$$

ここに、 ϕ : 内部摩擦角, c : 粘着力, である。関連流れ則 ($\psi = \phi$) では N_q に次式を用いる。

$$N_q = K_p \exp(\pi \tan \phi) \quad (5)$$

4. 平面ひずみモデルを用いた静的解析

Prandtl-Wedge の準・解析解を数値解析的に追跡し, 形成されるクレーター形状と, その荷重値を比較した。

解析モデルは平面ひずみのハーフモデルとし, 解析領域が実験クレーターサイズに比べて十分広くなるよう幅 250 [mm], 深さ 150 [mm] とした。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 40000 [N/mm²], 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 [N/mm²] となるように粘着力を換算して入力した。

実験ではステンレス鋼球を衝突させているが, 本研究では剛なフーチングにより強制変位を载荷した。フーチングの幅は図-2 の $\theta = 90^\circ$ の衝突により形成されたクレーター形状のピット幅を参考に 5 [mm] (フルモデルでは 10 [mm]) とした。解析には衝撃解析コード LS-DYNA を使用した。

図-4 に $\phi = 30^\circ, 45^\circ$ の塑性 Mises ひずみ増分を示す。Prandtl-Wedge で仮定されたすべり面が明瞭に表れると同時に, 最大荷重に至っている。図-5 に示すように, FEM によって得られた最大荷重は概ね Prandtl-Wedge の限界支持力の準・解析解と重なった。さらにクレーターの幅は概ね直径 60 [mm] 前後, 深さは 10 [mm] 前後となり実験結果と比較的近いオーダーが得られた。しかしこれは荷重載荷幅を実験結果の観察から得たためであると考えられ, 実際には荷重載荷幅は未知量である。クレーター形状を定量的に評価するためには衝突による貫入などから直接的に等価な荷重載荷幅を得る必要がある。

5. まとめ

本研究では古典塑性論に基づく衝突クレーター形成の解析を示した。さらにその衝突による限界支持力を Prandtl-

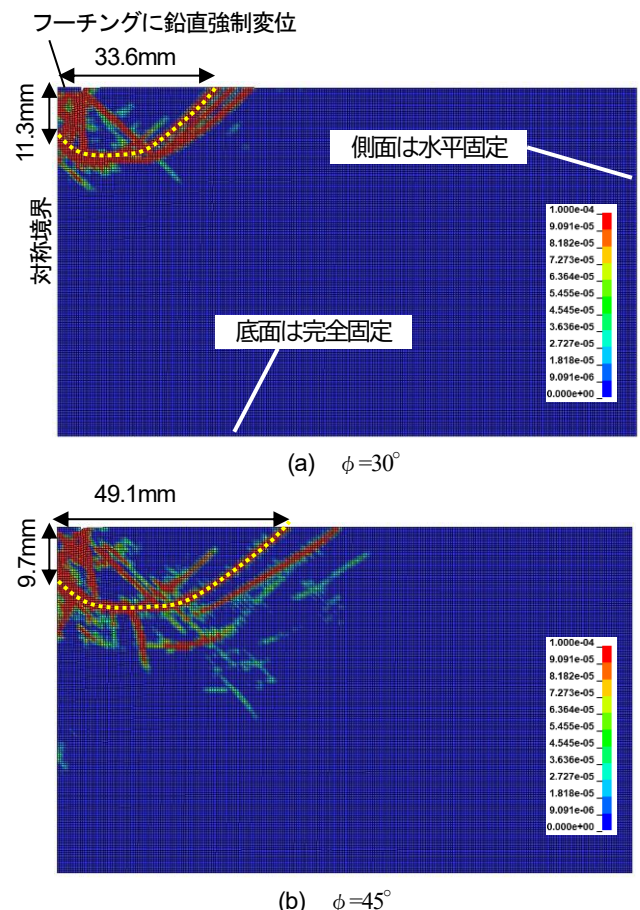


図-4 塑性 Mises ひずみ増分コンター図

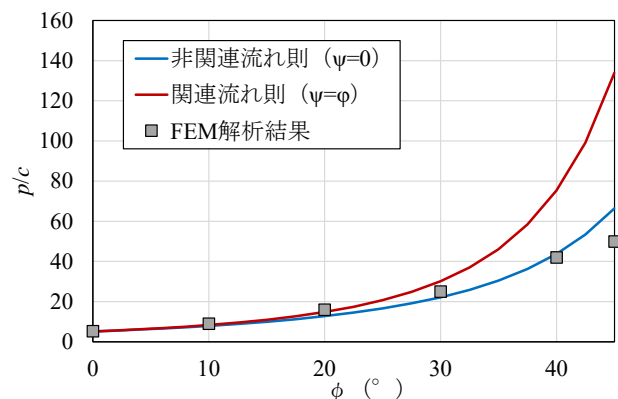


図-5 Prandtl-Wedge の限界支持力と FEM の比較

Wedge モデルの準・解析解により得た。その後, FEM による静的解析を実施し, 想定した解および破壊モードが静的な条件のもとで数値解析的に再現されることを確認した。

引き続き, 荷重を動的な衝突荷重へと変更し, クレーター形成問題の検討を実施したため, 続報にて報告する。

参考文献

- 1) 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.
- 2) S. V. Baars : 100 Year Prandtl's Wedge Intermediate report, 2016.