

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2)

(株)大林組

正会員 ○高橋 篤史 秋元 理仁

JIP テクノサイエンス(株)

正会員 戸田 圭彦 柳 振錫

1. はじめに

前報では古典塑性論に基づく衝突クレーター形成の解釈を示し、その衝突による限界支持力を Prandtl-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。

本報では、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報告する。さらに、圧縮破砕を考慮した状態方程式の導入が解析結果へ及ぼす影響および SPH 法による高速衝突解析への適用検討を試みた。

2. 平面ひずみモデルの衝突荷重への拡張

前報に引き続き Suzuki ら¹⁾の堆積岩への高速衝突実験(図-1)を対象とする。荷重を静的な強制変位から衝撃荷重に拡張するにあたり、Prandtl-Wedge の解析解との整合性が得られている平面ひずみモデルを使用する。ただし、三次元領域に作用する衝突荷重を単位厚の平面ひずみ領域に合わせて妥当な大きさへスケールリングする必要がある。そこで、図-2 に示すようにステンレス鋼球の投影面積から荷重が 45° の角度で広がると仮定し、実験でのクレーターの深さ相当である表面から 15 [mm] の位置における衝撃荷重分担面積の比率を用いて運動量をスケールリングすることにした。なお、運動量のスケールリングは速度により行い、質量は変えずに衝突速度を 210 [m/sec] として平面ひずみモデルへ弾丸と同じ幅のフォーミングを衝突させた。

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 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。

図-3 に内部摩擦角を 30° としたときの塑性 Mises ひずみ増分コンター図を示す。時刻は衝突開始から 0.02 [msec] 後である。明瞭なすべり線が認められている。この解析結果に対する荷重波形(弾丸と堆積岩の間の接触力を集計)は図-4 のように得られている。弾丸の接触初期には過大な荷重が生じているが、せん断すべり線が発生すると Prandtl-Wedge

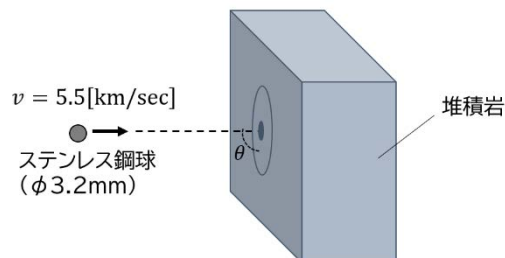


図-1 実験概要(文献1)の記述を元に作図

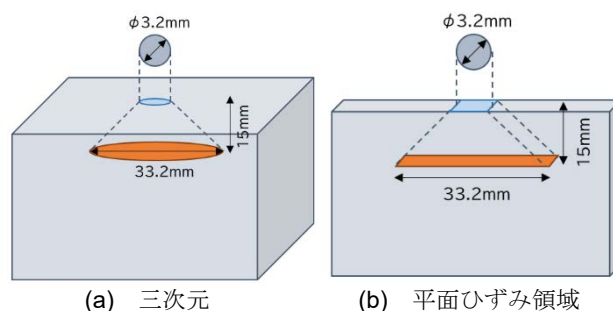
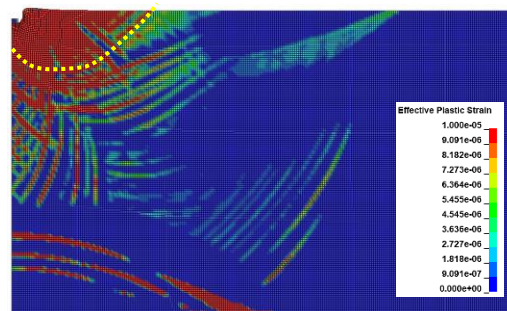
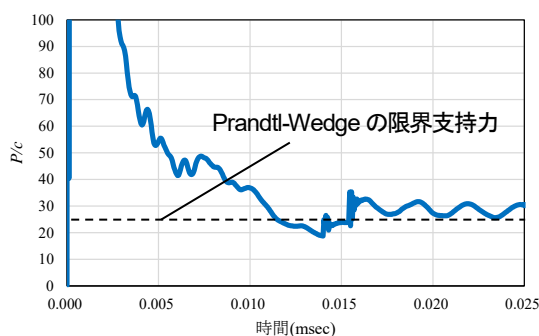


図-2 衝撃荷重分担面積の仮定

図-3 塑性 Mises ひずみ増分コンター図 ($\phi=30^\circ$, 0.02msec)図-4 荷重波形 ($\phi=30^\circ$)

の限界支持力へと収斂するような挙動になっている。本結果は、図-5 に示すように、衝撃荷重は十分にせん断すべり線が形成し得ていない状態での過渡的な領域①と、せん断すべり線形成後の疑似的に静的と見なせる領域②に分けら

キーワード 高速衝突, クレーター, RHT モデル, $p-\alpha$ 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

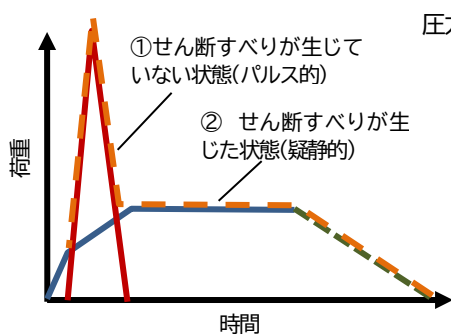


図-5 荷重波形に対する仮説

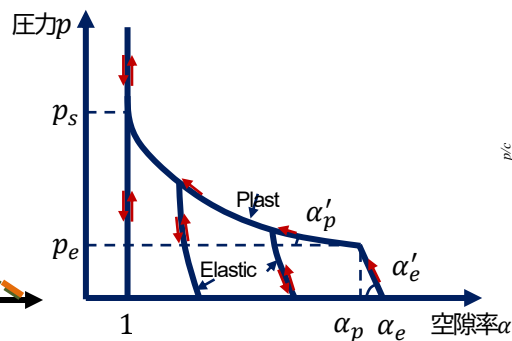
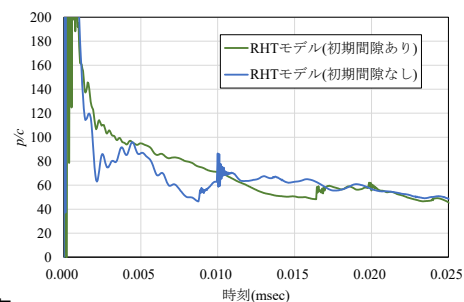
図-6 p-αモデル状態方程式³⁾

図-8 p-αモデルを導入した荷重波形

れ、領域②の荷重は Prandtl-Wedge の限界支持力により与えられるとすることで、説明できるものと考えられる。

3. 状態方程式の影響

松島ら²⁾の研究によれば高速衝突時には粒状態材料の圧力と体積変化の関係は線形関係にはなく、圧縮破砕を考慮した状態方程式の導入が必要である。そこで、圧縮破砕を考慮した p-α モデル³⁾(図-6)を導入し、その影響を検討した。なお、降伏曲面には Mohr-Coulomb モデルを拡張した RHT モデル⁴⁾を採用し、降伏曲面の圧縮側キャップが p-α モデルと連動するようにした。

解析結果を図-7 に示す。状態方程式を導入したケースもこれまでの検討と概ね同じ破壊モードに至ることを確認した。また、図-8 に示すように荷重波形は状態方程式の導入前後で同じ傾向を示し、衝撃荷重が Prandtl-Wedge の限界支持力へ収斂する様子を見せた。

4. 実スケール解析への拡張

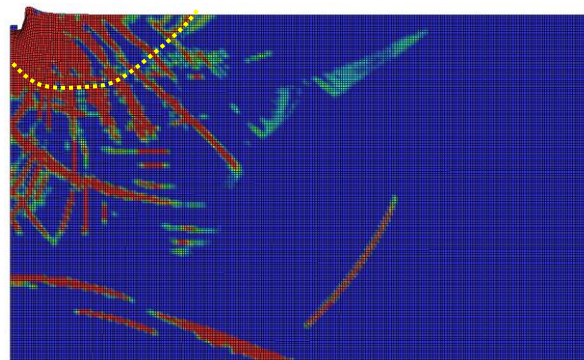
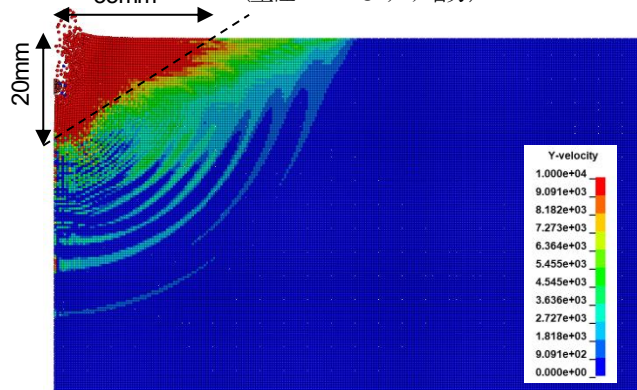
ここまで衝突実験を平面ひずみモデルに投影することで Prandtl-Wedge の解析解を動的解析へ拡張し、種々の考察を実施してきた。しかしながら、平面ひずみモデルでの評価には大胆な仮定を採用しており、定量評価へ繋げるためには三次元・実スケールへさらに拡張する必要がある。

本研究では実スケールへ拡張するにあたり、解析手法を軸対称の SPH 法へと切り替えた。FEM では、格子モデルとしての性格上、5500 [m/sec]という過大な速度による変形に数値解析が追従し得なかったためである。

図-9 に試験解析結果を示す。SPH 法ではひずみ増分は不明瞭となったため、粒子速度を用いて赤い領域の幅が実験相当となるよう可視化を試みたところ、定性的には実験と概ね近い形状のクレーターが確認された。

5. まとめ

静的に検証されたモデルに対して動的な衝撃荷重を与え、クレーター形成に関する種々の検討を行った。動的な荷重

図-7 状態方程式を導入した結果 ($\phi = 45^\circ$)
(塑性 Mises ひずみ増分)図-9 SPH法の鉛直方向速度分布 ($\phi = 45^\circ$)

に対しても、すべり線が形成された後は Prandtl-Wedge の限界支持力相当の荷重値で釣り合っていることが確認できた。引き続き、実スケールに対する定量評価およびピット形成のメカニズムの追及を行っていく予定である。

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) 松島ら : 高速圧縮破砕を受ける砂層に対するユゴニオ状態方程式の土質力学的解釈, 土木学会論文集 A2, Vol. 69, No.2, I_371-I_378, 2013.
- 3) W. Herrmann: Constitutive Equation for the Dynamic Compaction of Ductile Prous Materials, Applied Physics, 1969.
- 4) T. Borrvall, W. Riedel: The RHT concrete model in LS-DYNA, 2011.