

爆発によるクレーター形成から破壊まで：衝突との対応

○門野敏彦¹, 中村昭子², 末次竜¹, 白水誠弥¹, 高津一誠¹, 張大暁¹,
小川晃輝², 長足友哉², 野村啓太², 塩本純平², 川合伸明³, 田中茂³

1 産業医科大学・医, 2 神戸大・理, 3 熊本大・パルス研

1. はじめに

小惑星での衝突現象を理解するために曲率を持つ標的(1-3)や弾丸/標的の比が大きい場合の衝突(4)が調べられている。クレーター形成からカタストロフィック破壊に至る中間的な段階では標的側面のスポレーションが重要な役割を果たし、特に衝突破壊の程度を表す指標としてしばしば使われる最大破片の大きさは側面のスポレーションの大きさに直接左右されることがわかってきた(4)。他方、岩石の衝突破壊における最大破片の大きさについては、標的サイズに対する依存性が示唆されている(5)。つまり、側面スポレーションについての標的サイズ依存性を調べるのが小惑星での衝突過程をより理解することにつながるということである。これは小惑星の衝突の歴史を解明するだけでなく、地球に落下するおそれのある小惑星の軌道を衝突によって変える計画(6)における効率的な衝突条件を考える上でも有効であろう。

しかしながら室内衝突実験は加速装置の制約などから標的サイズが制限されている。これに対して爆薬を使えば大規模なクレーター形成/破壊実験を行うことができるが、衝突との対応が問題になる。そこでまず、標的側面のスポレーションが起こるような条件で爆発実験を行い、衝突実験の結果を基にしたモデルを使って爆発と衝突の対応を考察する。対応ができれば将来的により大規模な爆発実験を行うことによって衝突実験が難しいサイズでのクレーター形成/破壊現象を室内で再現できるだろう。

2. 実験

実験は熊本大・パルスパワー科学研究所で行われた。今回は空隙率の大きい小惑星を模擬するために標的として円柱形の石膏(密度 1.09 g/cm³, 空隙率 53±2%, 引張強度 2-3 MPa)を用いた。標的上面(平面の部分)に直径 2 cm 弱の円筒形の孔を穿ち、円柱形に成型した SEP 爆薬(エネルギー密度 4158 J/g) 1 または 3 g を孔に埋め込み爆破した。爆薬の直径は 1.6 cm, 長さは爆薬量によって異なる。

爆薬を埋め込む孔を標的の中心からずらして設定することにより、爆発点から側面までの距離が方位によって異なり同一の爆破条件で様々な標的サイズに対するデータを取ることが出来る。

3. 結果と議論

3-1 実験結果

実験後、標的および破片を回収し、標的に形成されたクレーターを調べた。爆発点におけるクレーターの深さを求め(ピット深さ)、爆発点を中心として方位角 22.5° 毎(16 方向)に、ピット半径、標的表面のクレーター半径(上面スポール半径 R_t)、爆発点から側面までの距離 L 、側面まで破壊されている場合は上面から破壊されている部分の高さ H 、を測定する。測定結果を基に、

側面スポール半径に対する角度 ϕ_s [rad] を $\tan^{-1}(L/(L-H))$ ($H < L$) または $\tan^{-1}(L/(L-H)) + \pi$ ($H > L$) で定義する。

3-2 衝突との対応

一般に衝突により標的表面近くにはほぼ弾丸サイズに等しい等圧コアが生じる。等圧コアの中心を EC と呼ぼう。衝突では EC から応力波が等方的に伝播すると見なせる。EC の深さは r_p とする。爆発では長さ δ の円筒状の爆薬を表面から深さ d 埋め込むため、爆薬の中心は表面から $d-\delta/2$ である。爆薬の中心が EC に対応すると考え爆発の場合の弾丸半径 r_p を $d-\delta/2$ と定義し、これを使ってさらに $\chi = r_p/L$ と定義する。

EC からの応力波は $P_0(r/r_p)^b$ で減衰すると仮定する。 P_0 は衝突によって発生する等圧コアの圧力または爆発による初期圧力、 r は EC からの距離、 b は減衰率である(石膏については $b=1.5$ がよく合っており(3,4)、ここでもこの値を採用する)。標的表面での応力波の垂直成分がある値をこえた部分でスポレーションが起こるというモデルで衝突実験の結果がうまく説明されている(3,4)。爆破実験においてもこのモデルを適用する。平面に対する衝突実験の結果(3)を基にして、衝突面でスポレーションを起こす垂直応力を P_s とするとき、標的側面でのスポレーションも同じ垂直応力 P_s で起こるとすると、側面スポール角度 ϕ_s は Ref. (4)の式(3)と同様に

$$P_s = P_0 \chi^b \{1 + (\chi - 1 + 1/\tan\phi_s)^2\}^{-(b+1)/2}$$

となり P_0 と χ の関数として求めることが出来る。

石膏の Hugoniot 方程式を $U_s = 1.8 + 1.8 u_p$ (U_s と u_p は衝撃波速度と粒子速度)と仮定する(7,8)と、衝突速度 v のとき $P_0 = \rho(1.8 + 0.9v)v/2$ であり(ρ は石膏の密度)、これを用いれば ϕ_s は v と χ の関数となる。

ϕ_s について、実験結果に上記のモデル曲線をフィットして対応衝突速度 v を求めた。推定した対応する衝突条件(弾丸半径 r_p および衝突速度 v)を基にして仮想弾丸運動エネルギー密度 $\rho v^2/2$ (ρ は石膏の密度)と爆発エネルギー密度 $m\epsilon/r_p^3$ (m は爆薬量、 ϵ は今回使用した SEP 爆薬のエネルギー密度: 4158 J/g)を比較した。その結果、爆発エネルギー密度と、推定した衝突速度から求めた運動エネルギー密度はほぼ同じ値であり、データの傾きは ~ 1 (比例関係)を示していた。爆発エネルギー密度は爆発実験の条件から算出される量であるので、この関係を使えば、爆発条件から衝突速度を推定することができる。

4. 数値計算

3-2 で求めた各ショットでの弾丸半径 r_p および衝突速度 v に対して数値計算を行い標的内の最大圧力分布を求め、ピット半径および深さとの比較を行った。どの衝突条件でもピット半径と深さは最大圧力 $\sim 30-100$ MPa の

範囲と一致しており、この領域が破壊されることによってピットが生じるということがわかった。これによって側面のスポレーションによって決定した爆発と衝突の対応条件は、ピットでも矛盾無く対応していることが示された。

5. まとめ

石膏標的に対して爆発実験を行い、スポレーションの大きさをモデルと比較して対応する衝突条件を求めた。また、求めた対応条件で衝突の数値計算を行い、クレーターの大きさが対応していることを確認した。

将来的には室内衝突実験では実現が難しいような標的サイズの衝突現象に対して大規模な爆発実験を行い、仮想運動エネルギー密度と爆発エネルギー密度の関係が今回と異なる結果になれば、それは衝突現象における標的サイズの効果を示していることになり、これを詳細に調べることで衝突破壊の標的サイズ依存性についての理解が深まるだろう。

参考文献

- (1) A. Fujiwara, T. Kadono, A. M. Nakamura, 1993. Cratering Experiments into Curved Surfaces and Their Implication for Craters on Small Satellites. *Icarus* 105, 345–350.
- (2) A. Fujiwara, N. Onose, M. Setoh, A. M. Nakamura, K. Hiraoka, S. Hasegawa, K. Okudaira, 2014. Experimental study of impact-cratering damage on brittle cylindrical column model as a fundamental component of space architecture. *Adv. Space Res.* 54, 1479–1486.
- (3) A. I. Suzuki, C. Okamoto, K. Kurosawa, T. Kadono, T. Hirai, S. Hasegawa, 2018. Increase in cratering efficiency with target curvature in strength-controlled craters. *Icarus* 301, 1–8.
- (4) T. Kadono, A. I. Suzuki, S. Araki, T. Asada, R. Suetsugu, S. Hasegawa, 2018. Investigation of impact craters on flat surface of cylindrical targets based on experiments and numerical simulations. *Planet. and Space Sci.* 163, 77–82.
- (5) K. R. Housen, K. A. Holsapple, 1999. Scale effects in strength-dominated collisions of rocky asteroids, *Icarus* 142, 21–33.
- (6) e.g., DART: <https://www.nasa.gov/planetarydefense/dart>
- (7) G. V. Simakov, M. N. Pavlovskiy, N. G. Kalashnikov, R. F. Trunin, 1974. Shock compressibility of twelve minerals, *Izv. Phys. Solid Earth* 8, 488–492.
- (8) M. Yasui, M. Arakawa, 2011. Impact experiments of porous gypsum-glass bead mixtures simulating parent bodies of ordinary chondrites: Implications for re-accumulation processes related to rubble-pile formation, *Icarus* 214, 754–765.