

脆性モルタル球の衝突破壊に関する実験的研究

道上達広（近畿大学工学部）

背景と目的

近年、探査機の直接観測によって、小惑星についての知識が飛躍的に増大している。探査機によって得られた重要な知見として、観測された多くの小惑星が空隙率の高い天体（多孔質天体）であることが分かった。例えば、小惑星イトカワの空隙率は40%にも及ぶ。地球の一般の岩石の空隙率が数%であると考えるといかに高い値か分かる。このように多孔質小惑星を模擬した室内衝突実験は、小惑星の衝突現象の解明のために重要である。

過去の小惑星を模擬した室内衝突破壊実験では、標的として non-porous な、つまり空隙率の小さな標的、玄武岩などに対する実験が主であった(Fujiwara et al.,1977)。これは、「小惑星の強度」＝「地上に落ちてくる隕石の強度（玄武岩程度の強度）」と考えられてきたからである。ところが、探査機の直接観測によって、小惑星は空隙率が高く強度も想定していたものよりも弱いことが分かってきた（地球上に落ちてくる隕石は、地球大気を通過できる比較的強度の強いものである）。

10数年前から空隙率の高い、つまり多孔質物質に対する実験がよく行われるようになった。多孔質物質としては、石膏やガラスビーズ焼結体、石膏ガラスビーズ混合

物や空隙率の大きな氷などがある。これらの実験結果から、同じ多孔質物質でも物質の特性によって破壊様式、つまり標的の壊れ方や破片速度が異なることが分かっている。

本研究では、多孔質物質として上記の物質以外に新たにモルタルを用いた室内衝突実験を行った。本研究の目的は、多孔質物質としてモルタルを用いた衝突破壊実験を行い、石膏などの他の多孔質物質の実験と比較検討を行うことである。

実験方法

小惑星模擬物質として平均粒径0.2mmの豊浦標準砂をセメントと水で固めたものを使用した。かさ密度 1550kg/m^3 、空隙率40%、圧縮強度 $3.2\pm 0.9\text{MPa}$ 、引張強度 0.8MPa 、音速 $2280\pm 60\text{m/s}$ である。

衝突実験は JAXA 宇宙科学研究所の2段階式軽ガス銃を用い、衝突速度 $2.5\text{-}6.8\text{km/s}$ でモルタル球（直径5.5, 7.5, 9.0cmの3種類）を完全破壊させた。弾丸には物性の良く分かっている直径7mmのナイロン球（質量0.213g）を用い、衝突角度は標的面に対して垂直である。衝突の際の真空度は 0.40Torr 以下で、2台の高速度カメラ（共に2000コマ/秒以上）を互いに垂直な方向から撮影することによって、衝突破片速度を測定することが可能である。成功ショット数は直径5.5cmの球で4ショット、直径7.5cmの球で4ショット、直径9.0cmの球で8ショットの合計16ショットである。

実験結果

本実験において、過去の衝突実験の結果

と比較するために、今回は（１）動的破壊強度（２）衝突反対点での破片速度（３）衝撃波減衰率の３つについて調べた。今回多孔質物質として比較したのは、空隙率 50%の氷、空隙率 50%の石膏である。なお、多孔質物質ではないが参考のために実験がよく行われていた玄武岩に対しても比較検討を行った。

（１）動的破壊強度

動的破壊強度は標的が破壊されときに、最大破片が 2 分の 1 になる単位質量当たりのエネルギー密度 Q^* で表される。今回のモルタルでは約 450J/kg であった。過去の実験では、動的破壊強度が強いものから順に、空隙率 50%の石膏が約 2000J/kg、玄武岩が約 700J/kg、空隙率 50%の氷が約 50J/kg である。今回のモルタルは玄武岩に近い値をとった。

（２）衝突反対点での破片速度

過去の実験では同じ物質のとき、反対点破片速度はエネルギー密度の 0.7 乗から 0.8 乗に比例することが知られている。今回のモルタルも同じ傾きになった。また、今回のモルタルは反対点破片速度が石膏のデータと近い値をとることが分かった。

物質の違いによって、反対点破片速度はどのように変わるのであろうか。同じエネルギー密度 1000kg/J で比較すると、破片速度の大きな順に、空隙率 50%の氷が約 15m/s、玄武岩が約 6.0m/s、今回のモルタルが約 1.9m/s、空隙率 50%の石膏が約 1.5m/s であった。

（３）衝撃波減衰率

上記の反対点破片速度は、反対点に到達

する衝撃波圧力によって決まることが知られている。衝撃波圧力は、衝突点の距離と共に減衰する。その減衰率は、過去の実験から物質によって大きく異なり、氷が距離の -1.0 乗(Arakawa et al., 1995)、玄武岩が距離の -1.8 乗(Nakazawa et al., 2002)、50%の石膏が距離の -4.0 乗(Okamoto and Arakawa 2009)で減衰することが分かっている。つまり、衝撃波減衰率が大きいほど、反対点破片速度は遅くなる。

今回用いたモルタルの衝撃波減衰率を見積もるために、同じ材料を用いて、1cm から 6cm の厚みの異なる平板を作成し、衝突条件が同じで厚みだけ変えて反対点破片速度を測定した。その結果、反対点破片速度は平板の厚みの -3.0 乗に比例して遅くなっていることが分かり、この標的における衝撃波の減衰率は -3.0 乗であることがわかった。以上より、物質の違いによる反対点破片速度の違いは、衝撃波減衰率、つまり減衰率が大きいほど破片速度が遅くなるのが、今回の実験でも確認された。

まとめ

本研究では、多孔質物質であっても、物質の違いによって破壊様式が異なることが予想されるため、多孔質物質のモルタル球（空隙率 40%、圧縮強度 3.2 ± 0.9 MPa、引張強度 0.8MPa）に対して、衝突破壊実験を行った。その結果、動的破壊強度 Q^* は石膏よりも小さく、玄武岩に近い値をとった。衝突反対点における破片速度は、玄武岩よりも遅く、石膏よりもわずかに速い。これは衝撃波圧力の減衰率で説明することができる。