

月・惑星探査における着陸機フットパッドの沈下量予測に関する実験的研究

立命館大学大学院 学生会員 ○中瀬翔吾 田中宏輝 非会員 山田晃愛
立命館大学 正会員 小林泰三

1. はじめに

近年，世界各国で月面での活動を目指す機運が高まってきている．月面活動には着陸機が不可欠になるが，月面は「レゴリス」と呼ばれる細粒土が厚く堆積しており，レゴリスと着陸機フットパッドの相互作用ダイナミクスを考慮した設計・運用が必要となる．著者らは，月面活動における地質・地盤リスクマネジメントの実現に向けて，月面の地形や地質・地盤特性を調査するための無人地盤調査システム^{1),2)}を開発している．本報では，開発中の地盤調査ツールで取得したデータから，着陸時のフットパッドの沈下量を予測する方法を提案する．

2. 着陸機フットパッドモデルの落下試験

本研究では，着陸機フットパッドの落下条件と沈下量の関係を明らかにするために，図1に示す装置を用いてモデル地盤へのフットパッド衝突実験を行った．フットパッドモデルは直径150mmのステンレス製剛性円盤とし，所定の高さから自由落下させる．パッド上面に設置した加速度計によって衝突時の加速度を計測するとともに，装置架台に設置したレーザ変位計によってパッドの変位（沈下量）を計測する．ここでは，質量の異なる5種類のパッドを準備し，表1に示すように，(a)落下高さを固定して質量を変化させる実験，(b)質量を固定して落下高さを変化させる実験，(c)落下エネルギーを固定して質量と落下高さを変化させる実験を行った．

本実験では，地盤材料として京都府産のまさ土（土粒子密度：2.718g/cm³，平均粒径：0.32mm，均等係数：3.76，曲率係数：1.11，最適含水比：9.6%，最大乾燥密度：1.99 g/cm³）を用いた．土槽のサイズは幅50cm×長さ105cm×高さ30cmであり，すべての実験ケースにおいて締固め度が60%（平均含水比9.5%）になるようにモデル地盤を作製した．

実験結果の一例として，時々刻々と変化する沈下量と衝撃加速度の関係を図2に示す（紙面の都合上，(a)落下高さを固定して質量を変化させる実験の結果のみを抜粋して示す）．地面への衝突時の加速度ピーク値はパッド質量が軽いほど大きな値を示し，最終沈下量はパッド質量が重いほど（落下エネルギーが大きいほど）大きくなることから分かる．

3. 载荷試験ツールを用いたフットパッド沈下量の予測

著者らは，原位置でレゴリス表層の硬さと強さに関する土質パラメータを求めることのできるローバ搭載型小型载荷・せん

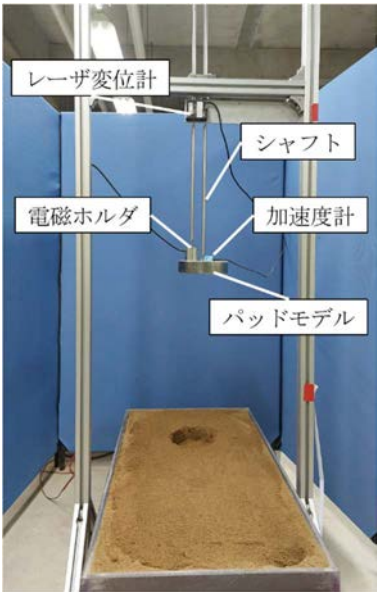


図1 落下試験機

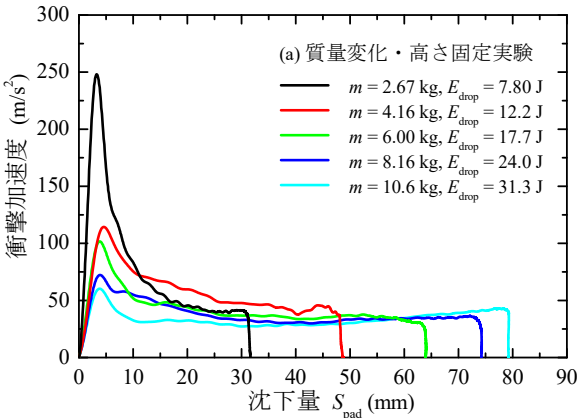


図2 落下実験の一例（加速度－沈下量関係）

表1 フットパッドモデルの落下条件

実験	(a) 質量変化・高さ固定					(b) 質量固定・高さ変化					(c) 落下エネルギー固定				
質量 m (g)	2.66	4.16	6.00	8.16	10.7	6.00					2.66	4.16	6.00	8.16	10.7
落下高さ h (cm)	30.0					20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	80.0	51.2	35.5	26.1	20.0
落下エネルギー E_{drop} (J)	7.80	12.2	17.7	24.0	31.3	11.8	17.6	23.5	29.4	35.3	20.8				

キーワード 月面探査，着陸機，沈下量，衝撃荷重，载荷試験
連絡先 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1 立命館大学地盤システム工学研究室 TEL：077-599-4183

断試験装置を開発している（図3）。直径50mmの円形平板（載荷・せん断板）を接地し、地表面に対して所定の速度で貫入あるいは回転させたときの荷重や回転トルクなどを計測するものである。平板に鉛直力のみを作用させて沈下量を計測する「載荷試験」と、所定の載荷圧を与えた状態でグローサ（突起）付き平板を回転させてトルクを計測する「回転せん断試験」の2種類の試験を同一の試験機で行えることを特徴とする。本報では、載荷試験の結果に基づいてフットパッドの沈下量を推定する方法を提案する。

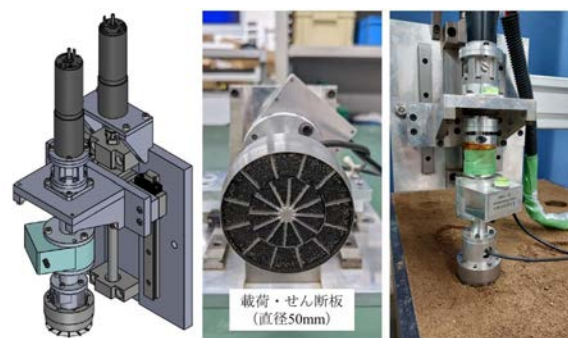


図3 載荷・せん断試験ツール

図4は、落下実験を行ったモデル地盤に対して実施した本試験装置による載荷試験の結果（荷重 P_{tool} —沈下関係 S_{tool} ）である。例えば、40mmまで貫入させるのに要した仕事（以降、静的貫入エネルギー E_{tool} という）は、沈下量40mmまでの $P_{\text{tool}}-S_{\text{tool}}$ 曲線と横軸で囲まれる面積（図4の着色部： $E_{\text{tool}, 40\text{mm}} = 8.10 \text{ J}$ ）で与えられる。載荷試験で得られた $P_{\text{tool}}-S_{\text{tool}}$ 曲線に対して沈下量毎に静的貫入エネルギーを計算すると、図5に示す静的貫入エネルギー E_{tool} —沈下量 S_{tool} 関係を得ることができ、次式で近似できる。

$$S_{\text{tool}} = 13.12 E_{\text{tool}}^{0.533} \quad (1)$$

なお、図5および式(1)は、パッド（直径150mm）と載荷・せん断板（直径50mm）の接地面積の違いによるエネルギーの正規化を行うために、載荷試験の載荷力をパッド底面面積に相当する力（載荷圧力にパッド底面面積を乗じた値）に換算した上で得られた $E_{\text{tool}}-S_{\text{tool}}$ 関係式である。

図5には、パッドの落下エネルギー E_{drop} と沈下量 S_{pad} の関係（落下実験の結果）をプロットしている。この図から、若干外れるプロットもあるが、載荷試験で得られた式(1)と落下実験の結果が一致していることが分かる。このことは、衝突による動的な土中エネルギー消散と載荷試験の貫入による静的なエネルギー消散に本質的な違いがないことを示唆しており、着陸機フットパッドの衝撃エネルギー E_{drop} を所与とすると、載荷試験で得られる $E_{\text{tool}}-S_{\text{tool}}$ 関係式に基づいてフットパッドの沈下量 S_{pad} を予測できる可能性があることを示している。

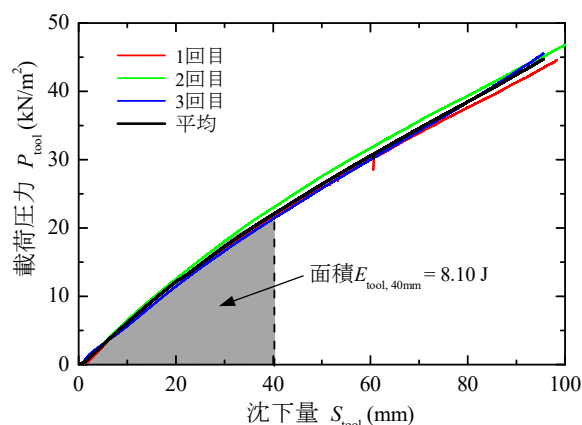


図4 載荷試験で得られた荷重—沈下関係

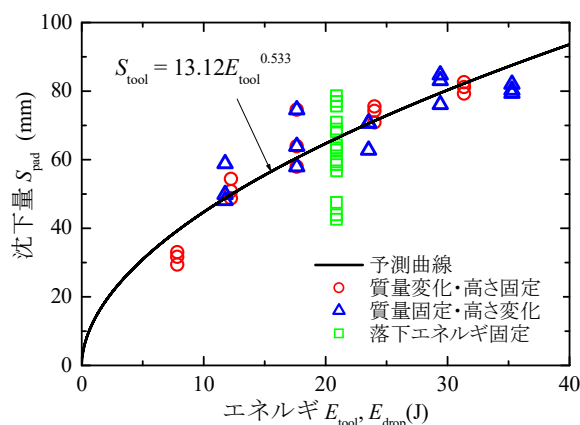


図5 落下エネルギーからの沈下量予測

4. おわりに

本研究では、限られた土質条件下ではあったものの、着陸機フットパッドの落下モデル実験を行い、別途開発中の地盤調査ツールで取得したデータからフットパッドの着陸時沈下量を推定できる可能性を示すことができた。今後は対象とする土質や地盤の条件をさらに広げるとともに、鉛直方向だけでなく水平方向の速度を持つ場合など、多様な条件における挙動予測モデルの検討を行っていきたい。

謝辞：本研究は、国土交通省・文部科学省令和4年度「月面等での建設活動に資する無人建設革新技術開発推進プロジェクト」の委託を受けて行ったものである。

参考文献：1) 小林泰三，深川良一：宇宙探査と地盤工学 第6章 宇宙探査と地盤工学，地盤工学会誌，Vol. 69, No. 7, pp.89-97, 2021, 2) 小林泰三，他：月面における測量・地盤調査システムの開発に向けた地上モデル実験，第66回宇宙科学技術連合講演会，2022。