

京都大学・工学部 学生員○秦 健太郎
 京都大学・工学研究科 正会員 建山 和由
 京都大学・大学院 学生員 土師 康一

1. はじめに

我が国は近年培った月面探査を基に、初の大型月面探査として SELENE 計画を予定している。この計画では移動探査用小型ローバの搭載が予定されており、地盤工学の分野には、特にローバの走行性の検討が求められている。月面上では地球上と異なる条件が多く存在し、特に低重力(表面重力加速度: 1.62m/s^2 , 地球上の $1/6$)や月表面がレゴリスと呼ばれる特殊土壌で覆われていることが走行性の問題に大きな影響を与えるものと予想される。そこで、本研究では低重力下におけるレゴリスの力学挙動の把握と、それに基づく走行性の検討に関して考察を行った。

2. 車両の走行性

図1に車両が不整地地盤上を走行する際に車輪に作用する力を示す。ここで θ_1 (正), θ_2 (負), z , r はそれぞれ進入角, 脱出角, 沈下量, 車輪半径を表し, 座標軸は車輪の回転角度として車軸直下を原点にし, 反時計回りを正とする。牽引力は次式で定義されており, 牽引力が正のとき車両は走行できることになる。

$$\text{牽引力} = \text{推進力} - \text{走行抵抗} \quad (1)$$

推進力と走行抵抗は主に車輪の沈下量, 車輪と地盤の間との滑りとせん断応力に左右される。車輪が土に対し制動力, 駆動力を発揮しているとき, 車輪と土の間には滑りが生じている。このとき滑り率 i は(2)式のように車輪の周速度 $r\omega$ (r : 車輪半径, ω : 車輪の回転角速度)と車両の走行速度 V_f の差と, 走行速度 V_f (制動時)または周速度 $r\omega$ (駆動時)との比で表され, 制動時には負に, 駆動時には正になる。本研究では駆動時の車輪の挙動を議論するため, 滑り率は正とする。推進力 H , 走行抵抗 R はそれぞれ進行方向を正として以下のように求めることができる。

$$i = (r\omega - V_f) / r\omega \quad \{\text{駆動時}\} \\ = (r\omega - V_f) / V_f \quad \{\text{制動時}\} \quad (2)$$

$$H = rb \left\{ \int_{\theta_2}^{\theta_1} \tau(\theta) \cos \theta d\theta - \int_{\theta_2}^0 \sigma(\theta) \sin \theta d\theta \right\} \quad (3)$$

$$R = -rb \int_0^{\theta_1} \sigma(\theta) \sin \theta d\theta \quad (<0) \quad (4)$$

ただしここで, b : 車輪幅とする。また, 法線応力分布 $\sigma(\theta)$ と接線応力分布 $\tau(\theta)$ の関係は(5)式により与えられる¹⁾。

$$\tau(\theta) = \{c + \sigma(\theta) \tan \phi\} (1 - e^{f(\theta)}) \quad (5)$$

これらの式により牽引力を算出することができる。ここで, 式(4)で用いた Coulomb の線形強度式 $\tau_{\max} = c + \sigma \tan \phi$ が低重力下のレゴリスに関しても成立するかは不明確であるため, 本研究では低重力下における一面せん断試験を行った。

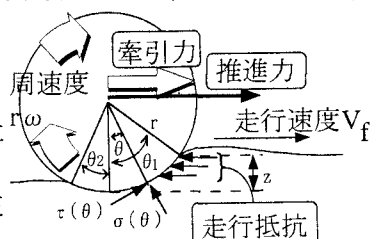


図1 車輪に作用する応力

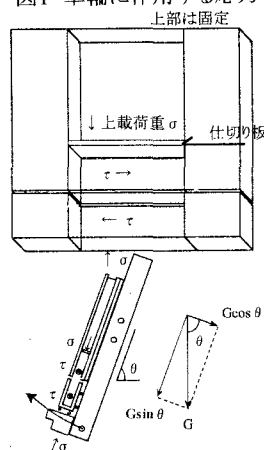


図2 実験装置と重力の斜面方向成分

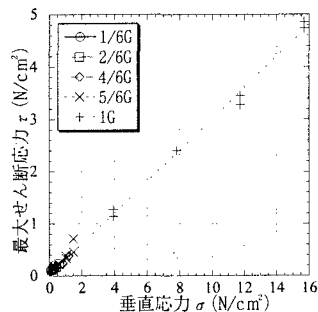


図3 1/6～1G破壊線

3. 実験装置と設定条件

図2に示す実験装置は、せん断箱を傾けることによって低重力場を想定し、せん断試験を行うものである。具体的には、せん断面に垂直な方向に働く重力の斜面方向成分 $G \sin \theta$ が 1/6G、2/6G、4/6G、5/6G となるように設定し、さらに上載荷重を与えるおもりの質量(kg)を 8.71, 14.41, 25.47, 36.68 の4パターン変化させて実験を行った。試料はレゴリスの模擬試料($D_{50}=0.0944\text{mm}$, $U_c=3.27$, $\rho_s=2.827\text{g/cm}^3$)であるシミュラントを使用した。また実験の妥当性を検証するため、1G 下における通常の一面せん断試験機を用いた実験をも併せて行った。

4. 実験結果と考察

1/6~1G の破壊線をまとめて図3に示す。また、1/6G 下について図4に破壊線を、図5にせん断直前に鉛直荷重を載荷した際に得られた法線応力-沈下量の関係を、また図6せん断力-変位の関係をに示す。まず、 τ - σ 関係については図3より、通常の1G 下で得られたプロット点を近似すると τ - σ 図上に現れる見かけの粘着力 c の値は0と見なせるが、図4に示すように1/6G の低応力に注目すると、粘着力成分がわずかながら存在していることが分かる。すなわち、牽引力の増加に繋がる粘着力成分がある程度期待できると考えられる。また、せん断力-変位の関係については、図6に示すように変位に伴い次第にせん断力が増加する傾向が見られた。

5. 走行性の検討

ここでは実際に SELENE 計画に用いるローバの諸元を表1のように設定し、以上の結果を用いて車両の発揮しうる牽引力を推定した。仮定として車輪は全て剛体車輪の駆動輪とし、その形状は円筒形とした。

図4より粘着力成分 c 、内部摩擦角 ϕ を求め、ローバの接地圧と図5より沈下量を 1.5~1.8cm に設定した。また、図6より(5)式の $(1-e^{-R_0/\theta})$ の部分を設定した。また、滑り率は車輪の空回りの多い場合を想定した 75%、空回りが少ない場合を想定した 25%とその間の 50%を設定した。以上の結果と式(3)より推進力、式(4)より走行抵抗を求め牽引力を算出し図7に示した。この図より明らかなように計算結果では牽引力は全ての条件において正になった。このことより仮定した条件内ではローバは走行可能で、沈下量が小さく、滑り率が大いほど牽引力が大となること分かった。

6. まとめ

低重力下におけるレゴリスのせん断特性を調べ、これを基に牽引力を推定すると、仮定した条件内であればローバは走行可能であることが分かった。今後数値解析や模型実験によりさらに詳細にローバの走行性能について検討する必要がある。

<参考文献>

- 1)Z.Janosi and B.Hanamoto: The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils, Proc. Of 1st Int Conf. Of ISTVS, Turin, 1961

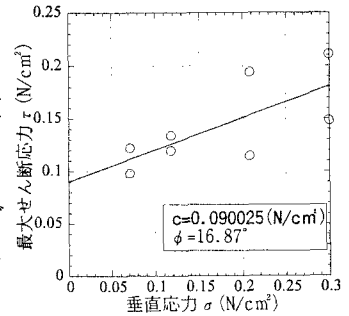


図4 1/6G破壊線

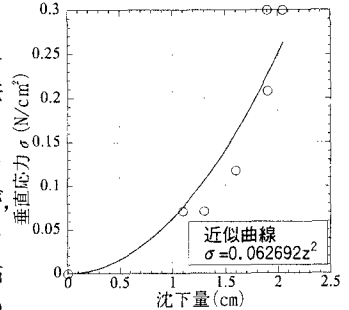


図5 1/6G法線応力-沈下量関係

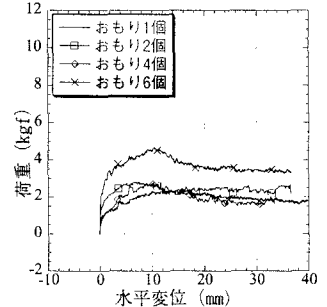


図6 1/6Gせん断力-変位関係
表1 ローバの基本設定条件

ローバの質量 $M(\text{kg})$	30
ローバの車輪数 n	4
車輪直径 $2r(\text{cm})$	15
車輪幅 $b(\text{cm})$	10
重力加速度 $g(\text{m/s}^2)$	1.62

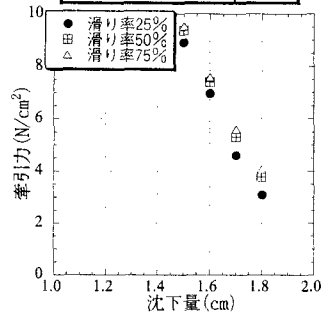


図7 1/6G牽引力-沈下量関係