

砂質地盤の定常掘削機構のモデル化に関する基礎的研究

立命館大学理工学部 正員 深川 良一 関西国際空港(株) 片木 聖樹
立命館大学大学院 学生員 ○小林 泰三 宇宙開発事業団 金森 洋史
宇宙開発事業団 佐々木 健

1. はじめに

現在, 日本宇宙開発事業団等を中心に月面の探査計画が推進されている。月の表面は, 隕石の衝突や昼夜の温度差で粉砕されたレゴリスという極めて細かい(直径 10~1000 ミクロン)粒子や岩の破片に覆われている。また, 高真空, 1/6G などといった点で地上とは異なる特徴を多く有している。月へのミッションのコストを考えると, このような条件下で想定される掘削作業を円滑に実施するためには, 出来るだけ軽い機械によって最大の効果が期待できるような掘削方法を事前に提案することが重要となる。本報告ではこうした研究の一助として, 砂質地盤の定常掘削機構をシンプルな形でモデル化し, 所要掘削力算定式の構築を試みた。

2. 平刃による水平掘削力の算定

平刃の定常掘削において, Mckyes と Ali¹⁾ は, 掘削刃の先端から土の表面にいたる破壊面は平面で構成されると仮定し, さらに掘削刃の側方の破壊も考慮して 3 次元の掘削モデルを構築した。また深川ら²⁾ は軟岩の掘削に関して Mckyes らのモデルをもとに, 掘削刃が前面刃物角, 底面刃物角を有する場合の掘削モデル (Rits モデル) に拡張した。しかしながら, これらのモデルは砂質地盤の掘削に対して, 掘削力を過小に評価する結果となることが判明している。そこで本研究では砂質地盤を掘削する場合, 掘削刃前面に堆積する砂の影響を考慮することが重要であると考え, Rits モデルをさらに発展させて, 堆積砂を考慮した基礎的な水平掘削力算定式の構築を試みた。

(1) 掘削による破壊領域のモデル化

堆積砂の形状を 3 次元的に考慮したものをモデルに組み込む方法として, 図-1 に示すように掘削刃前方および側方の破壊領域のそれぞれに対して, 堆積砂による上乗荷重 W_1 , W_2 が破壊領域の上面に作用すると考えた。

掘削刃前方および側方の破壊領域のそれぞれについて, 土塊に作用する力の釣り合いから水平掘削力 P_h を求めると次式ようになる。ここで, 地盤は内部摩擦角と見かけの粘着力を有する (c_d, ϕ_d) 材料としたが, 掘削刃と砂の境界面には付着力は働かないものとした。

$$P_h = \frac{c_d (2bd + r^2 \sin \eta' \tan \eta) \left[\sin(\phi_d + \eta) + \frac{\cos(\phi_d + \eta)}{\tan \eta} \right] + \sin(\phi_d + \eta) \left[\gamma dr \left(b + \frac{r \sin \eta'}{3} \right) + W_1 + 2W_2 \sin \eta' \right]}{\cos(\phi_d + \eta) + \tan(\omega - \delta) \sin(\phi_d + \eta)} \quad (1)$$

ただし, $r = d(\tan \omega + \cot \eta)$ である。

ここに, P_h : 水平掘削力(kN), $2b$: 掘削刃幅(m), d : 掘削深さ(m), γ : 砂の単位体積重量(kN/m^3), c_d : 粘着力(kN/m^2), η : 破壊面が地表面と成す角(deg), δ ($= 0.55\phi$)³⁾: 砂と掘削刃との摩擦角(deg), ϕ_d : 砂の内部摩擦角(deg), r : 側方掘削領域の半径(m), ω : すくい角(deg), η' ($= 90 - \eta$): 掘削方向と側方すべり面の成す角(deg), W_1 : 掘削刃前方の堆積砂の重量(kN), W_2 : 掘削刃側方の堆積砂の重量(kN)である。

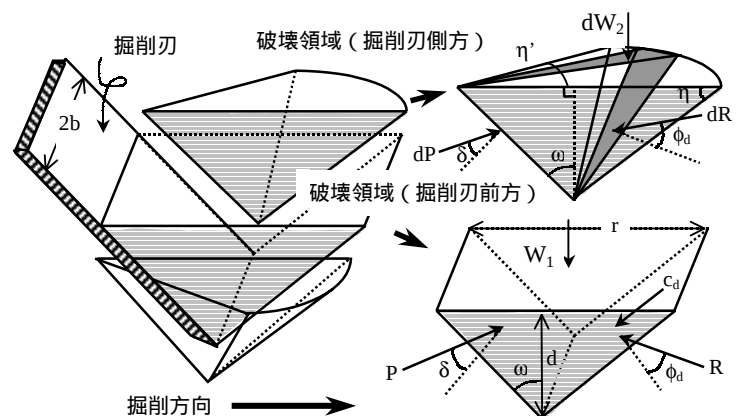


図-1 掘削による破壊領域のモデル化

キーワード: 乾燥砂, 定常掘削, モデル化

連絡先: 滋賀県草津市野路東 1-1-1 Tel: 077-566-2875 Fax: 077-566-2667

また η の値は、その値を種々に変化させた試行計算の結果より、最小の P_h を与えるものとして決定した。

(2) 掘削による堆積砂のモデル化

掘削深さと掘削刃幅の比 $d/2b$ が比較的大きくなるような掘削においては、掘削距離がある程度大きくなると、掘削刃の前方に堆積していく砂と、側方へ流れ落ちる砂の量とがバランスし、結果的に堆積砂量はある一定の定常状態に達することが予想される。このとき堆積砂の表面は自由表面となるため、堆積砂の傾斜角は安息角として地盤の内部摩擦角に一致すると仮定し、掘削刃の前方には三角柱状、側方には円錐の一部となるような堆積砂モデルを想定した（図-2 参照）。このとき、式(1)の上載荷重 W_1 、 W_2 を次のように表すことができる。

$$\left. \begin{aligned} W_1 &= dr^2 \tan \phi_d \cdot \gamma \\ W_2 &= \frac{\eta' r^3 \tan \phi_d}{6} \cdot \gamma \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3. 理論値と実験値の比較

図-3 に式(1)で計算される理論値と実験値の比較図を示した。実験は 10 cm の刃幅を有する平刃（ただし、すくい角 $\omega = 0$ (deg) とした）を用いて行った。モデル地盤として、表-1 に示すように、豊浦砂と月面の模擬土であり見かけの粘着力を有するとされるレゴリスシュミラントを用いた。

豊浦砂（図-3(a)）については、抵抗力の比較的小さい掘削の場合、堆積砂を考慮することで実測値とよい一致が見られた。抵抗力の大きい場合に差異が生じるのは、内部摩擦角の影響によってモデル化した堆積砂の重量が実際の重量を大幅に上回ることが原因として考えられる。レゴリスシュミラント（図-3(b)）については理論値が極めて大きい値を示し、理論値と実験値の一致は見られなかった。そこで $c_d \rightarrow 0$ （他の条件は同一）として計算した結果（同図中のグラフ）から、本モデル式が粘着力に極めて大きく依存していることが明らかとなった。今後、 c_d の評価について検討する必要がある。

4. おわりに

砂質地盤を対象とした定常掘削力のモデル化においては堆積砂を考慮することが重要であることがわかった。また、破壊領域および堆積砂の形状をシンプルな3次元モデルとして想定し、導かれた掘削力算定式(1)は、 c_d のない地盤に対して適用可能である結果を得た。

【参考文献】1) Makyes and Ali : The cutting of soil by narrow blades, J. of Teramech., Vol. 14, pp.43-58, 1977. 2) Fukagawa, R. et. Al. : The mechanical model of a cutting bit for excavating soft rock mass, Proc. of 13th Int. Conf. Of ISTVS, pp.258-264, 1999. 3) Potyondy, J. G. : Skin friction between various soils and construction materials, Geotechnique, Vol. 12, pp.339-353, 1961

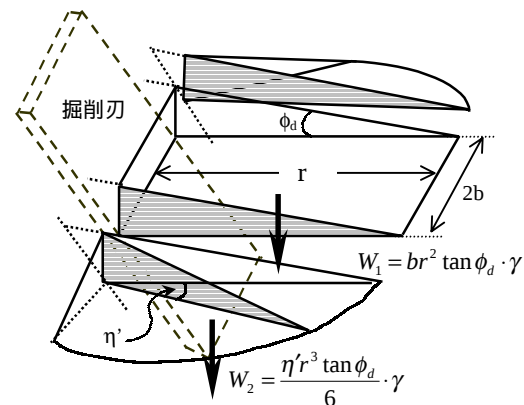


図-2 掘削による堆積砂のモデル

表-1 砂試料の物理的特性

	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	Dr (%)	ϕ_d (deg)	c_d (kN/m ²)
豊浦砂	2.61	0.95	0.58	3	31.9	0
				51	35.7	
				74	37.0	
レゴリスシュミラント	2.90	1.09	0.47	15	34.4	4.12
				51	37.7	7.64
				74	46.2	9.90

表中の強度定数は一面せん断試験で得られた値である。

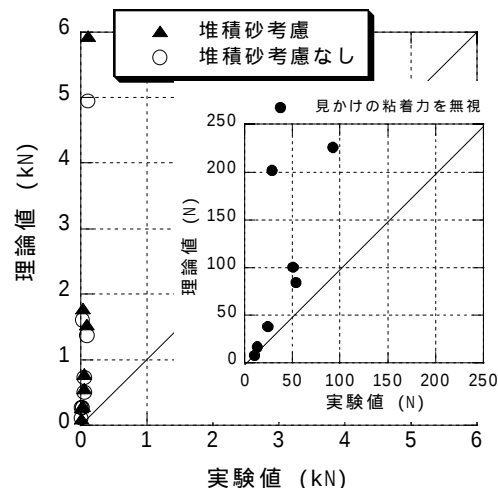
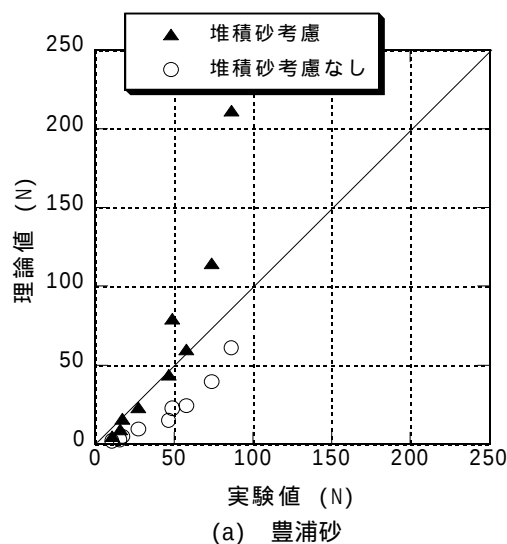


図-3 理論値と実験値の比較