第Ⅲ部門　　回転掘削のモデル化およびそれに基づく地盤強度定数の逆推定に関する研究

立命館大学理工学部　学生会員　○牧本　祐樹　立命館大学理工学部　フェロー　深川　良一
立命館大学大学院　学生会員　黒岩　晃平

1. はじめに

これまで人類は宇宙への探査を推し進めてきており，長年に渡って探査対象となってきたのが月である．世界では月面探査が再び注目されるようになり，日本においても次なる探査計画が現実味を帯びてきている．探査目的の一つとして月面表層地盤特性の把握があり，原位置試験などによる直接観測が有力とされている．我々の研究チームは，アースオーガによる月面表層掘削に着目し，掘削時の抵抗などから地盤特性を推定することを目指している．本研究では，その第１段階として掘進を伴わない回転掘削モデルを対象とし，掘削時に測定される抵抗値を用いて地盤強度定数の逆推定を試みた．

2. 回転掘削モデル [1)]

ここで回転掘削と呼ぶのは，**図-1** に示すようなもので，掘進を伴わず中心軸回りに回転させたものである．掘削時には掘削刃前方に**図-1** に示すような破壊領域が形成され，この破壊領域における力のつり合いから求めた掘削力の値を掘削時における抵抗値と呼ぶ．破壊領域および掘削力は Mackeys と Ali の平刃掘削モデル（**図-2** 参照）を参考に構築した [2)]．平刃掘削モデルにおける破壊領域は，掘削時に掘削刃の前方に形成される破壊領域と，その前方破壊領域の両側に形成される側方の破壊領域で構成される．掘削の対象となる地盤は粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を有すると仮定する．回転掘削モデルにおける掘削抵抗は，平刃掘削モデルから得た回転掘削抵抗モーメントとして表現し，この値を回転掘削モデルにおける理論値とする．以下に導かれた回転掘削モデルの掘削トルク M (Nm) を式(1)に示す．

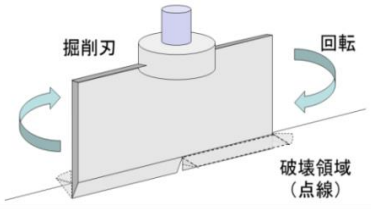

図-1. 回転掘削装置

$$M = \frac{\frac{\gamma d^2 r b^2}{4d} + \frac{cdb^2}{2}\left(1+cot\beta cot(\beta+\phi)\right) + \frac{qrb^2}{2}}{cot(\alpha+\delta)+cot(\beta+\phi)} + \frac{\left(\frac{1}{6}\gamma dr^2 + \frac{1}{2}cdr\left(1+cot\beta cot(\beta+\phi)\right) + \frac{qr^2}{2}\right)bsin\rho'}{cot(\alpha+\delta)+cot(\beta+\phi)} \quad (1)$$

ここにγ：単位体積重量(g/cm^3)，b：掘削刃幅(cm)，d：初期貫入深さ(cm)，r：前方破壊面における地表面の破壊距離(cm)，c：粘着力(kN/m^2)，α：掘削刃と地表面のなす角 (deg)，β：破壊面が地表面となす角(deg)，δ：地盤と刃との摩擦角(deg)，ϕ：砂の内部摩擦角(deg)，q：上載荷重(kN/m^2)，ρ’：掘削刃垂線に対する側方破壊面のなす角度(deg)である．

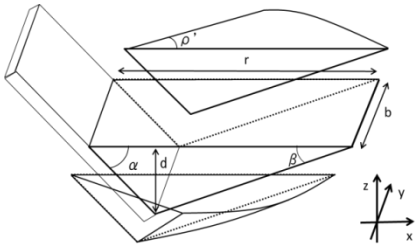

図-2. 平刃掘削モデル

3. 回転掘削試験

実際に掘削した際に得られる回転掘削抵抗モーメントを利用して地盤強度定数の逆推定を試みた．理論値は回転掘削モデルから導き，実験値としては，回転掘削試験装置（**図-2**）によってモデル地盤を掘削し，掘削機に取り付けられたトルク変換機によって抵抗モーメントを算出する．モデル地盤に所定の初期貫入深さまで掘削刃を挿入し，12 deg/sec の速さで掘削を行う．

表-1. 試験条件

刃幅 b (cm)	5, 7.5, 10
初期貫入深さ d (cm)	3, 4, 5
相対密度 Dr (%)	40, 60, 80

Hiroki MAKIMOTO, Kohei KUROIWA, Ryoichi FUKAGAWA
rd0017vi@ed.ritsumei.ac.jp

18 deg/sec においても同様の試験を行ったが最大掘削トルクはほぼ同じ値を示したため，今回は 12 deg/sec の結果のみ用いる．試験条件は，掘削試験装置における掘削刃の刃幅を 5, 7.5, 10 cm，初期貫入掘削深さを 3, 4, 5 cm と変化させる．またモデル地盤は豊浦砂および月面表層土を模擬したレゴリスシミュラント(FJS-1) を用いて，相対密度を 40, 60, 80 %となるように作製する（**表-1** 参照）．

4. 回転掘削における理論値と実測値の比較

回転掘削における掘削力の理論値および実験値を比較し，その整合性を検証する．粘着力 c および内部摩擦角 ϕ は一面せん断試験で得られた値を用いる．理論値は実験値と同様に掘削刃幅 b，初期貫入深さ d，相対密度 Dr を変化させる．豊浦砂でモデル地盤を作製した場合，理論値と実験値はいくつかの条件下で概ね良い整合性を示した．しかし，レゴリスシュミラントでモデル地盤を作製した場合，理論値が非常に大きな値を示した．これはレゴリスシュミラントの粘着力 c の評価に問題がありそうである．c を決定するために，通常の応力レベル（上載圧力＝30, 60, 90 kN/m^2）の元で一面せん断試験を実施し，相対密度 40, 60, 80 % に対して 2.8, 7.3, 8.3 (kN/m^2) の c が得られたが，これらが過大な理論値を与える原因となった．試みに粘着力を c=0 (kN/m^2) としたところ，理論値と実測値が比較的良い整合性を示していることがわかった（**図-3, 4** 参照）．今後はモデル地盤での応力レベルに対応した低応力条件下での一面せん断試験を実施し，粘着力 c を評価する必要があると考える．

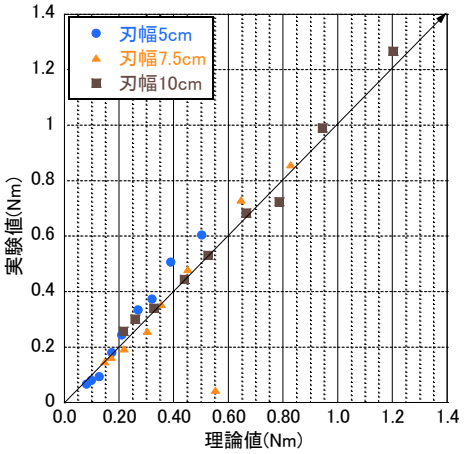

図-3. 理論値と実測値の比較（豊浦砂）

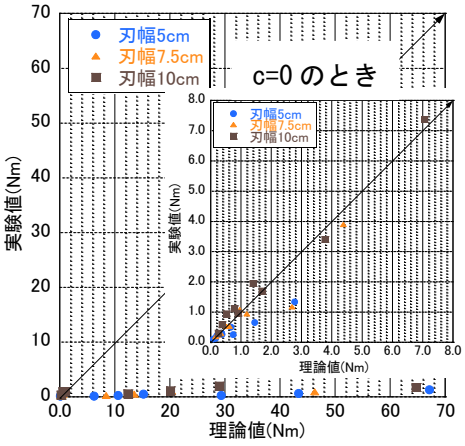

図-4. 理論値と実測値の比較
（レゴリスシミュラント）

5. 逆推定

前節において理論値と実験値が良い整合性を示した豊浦砂について地盤強度定数の逆推定を行った．一面せん断試験において豊浦砂の粘着力が 0 (kN/m^2) であったため，c=0 として内部摩擦角 ϕ のみを推定することとした．式(1)の各変数に，与えられた条件に対応する数値を代入し，内部摩擦角 ϕ のみを変数とする関数式に変換した．最終的に，地盤の相対密度に対応する内部摩擦角 ϕ を導いた．**図-5** に理論推定値と一面せん断試験から得た実験値を比較した結果を示している．結果的に各深さの掘削過程より推定された ϕ ～Dr 関係は定性的には実験値の傾向とほぼ類似した傾向を示し，特に掘削深さが深くなるほど良好な整合性を示すことがわかった．

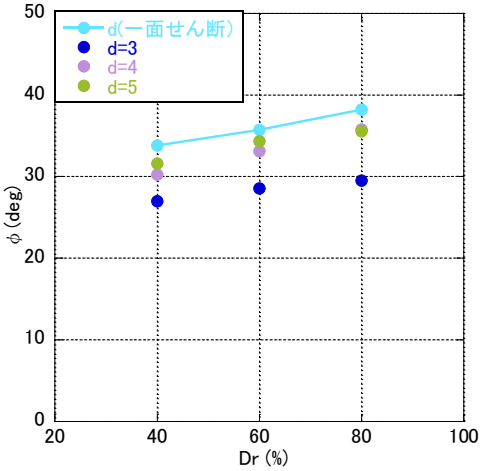

図-5. 内部摩擦角 ϕ の推定（豊浦砂）

6. おわりに

回転掘削モデルを用いて地盤強度定数の逆推定を行った．掘削時に発生する抵抗値を定量的に再現できている豊浦砂の場合，推定値は実測値と近い値を示した．今後は，レゴリスシミュラントのような粘着力 c を有する材料において c, ϕ を同時に推定する手法を提案し，その妥当性を検証する予定である．

[参考文献]

1) 八田篤諮：乾燥砂地盤における回転掘削のモデル化に関する研究，立命館大学修士論文，2000.

2) McKyes, E. and Ali, O. S.：The cutting of soil by narrow blade, *Jour. Terramechanics*, Vol.14, No.2, pp.43-58, 1977.