

立命館大学 大学院理工学研究科

学生員 ○小林 泰三

同上

学生員 吉川 邦彦

同上

学生員 渡邊 一慶

立命館大学 理工学部

正会員 深川 良一

京都大学 大学院理工学研究科

正会員 小林 俊一

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。将来の月面探査において、掘削作業は月の科学（鉱物・資源）探査に不可欠なことに加え、様々な観測機器の据付、構造物の建設、さらには資源利用のための原料採取などにおいて重要となる。月の表面は、隕石の衝突や昼夜の温度差で粉碎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おり、月地盤の掘削機構に関する特性を正確に把握するには留意すべき問題点が多い。本研究はその基礎的研究として、月土壌の模擬材料と標準的な砂を対象に平刃による掘削模型実験を行い、X 線 TV 装置を用いて地盤内部における変形の動態の可視化を試みた。

2. X 線 TV による可視化

X 線が供試体を透過する際、物質の密度と透過厚さによってその強度が変化する。この性質を利用して、透過した X 強度に応じて映し出される蛍光像を CCD カメラによって撮影することによって供試体の密度の差異（変化）を評価することができる。利用した X 線透視装置システム^{1), 2)}（図-1 参照）では動画として X 線撮影することが可能であり、ダイナミックな変形挙動を観測できる特徴を有している。本実験では掘削時の地盤のせん断変形に伴うダイレイタンス挙動（密度変化）を利用してせん断帯などの可視化を試みた。

3. 平刃による掘削の模型実験概要

実験に用いた掘削装置の概略を図-2 に示した。架台フレームに固定されたりニアドモータのラック部にステンレス製の掘削刃を取り付け、水平方向の直線運動による掘削を可能にした。掘削には刃幅 40 mm、刃の厚さ 12 mm、逃げ角 40° の平刃を用い、常に掘削深さが 40 mm を保ちながら、すくい角 α を 0°、30° とする 2 ケースの掘削実験を行った。ここに、すくい角は鉛直方向と掘削刃のなす角である。また、掘削速度は 3.2 mm/s の一定速度である。

地盤材料として月土壌の模擬試料であるレゴリスシュミラント³⁾と豊浦砂の二種類を用いた。なお、いずれの試料も気乾状態のものを用い、レゴリスシュミラントの場合は 2 層に分けた突固め、豊浦砂の場合は多重ふるいを用いた空中落下法によって地盤を作成した。相対密度は $Dr = 91.8 \sim 96.2\%$ （レゴリスシュミラント）、 $91.2 \sim 94.0\%$ （豊浦砂）であった。

4. 実験結果および考察

図-3、4 はレゴリスシュミラントにおいて、掘削状況の進展を捉えた静止画像である。ただし、掘削方向に直交する方向からの X 線照射によるものである。図中に現れる濃淡に関して、濃い部分は高密度、薄い部分は低密度を示している。上図から

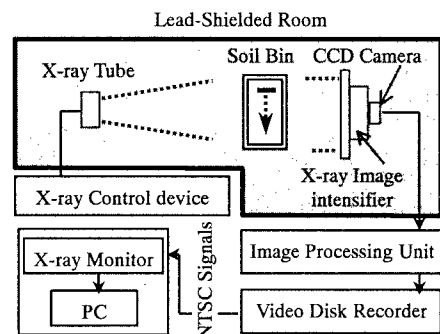


図-1 X 線 TV 透視システムの概略図

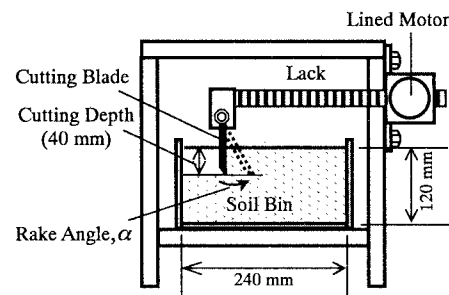


図-2 掘削装置の概略図

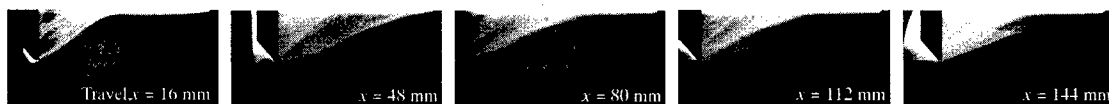


図-3 すくい角をもたない平刃による掘削状況の進展（レゴリスシュミラント， $Dr = 94.7\%$ ）



図-4 30° のすくい角を有する平刃による掘削状況の進展（レゴリスシュミラント， $Dr = 96.2\%$ ）

平刃の前進によるダイレイタンスの発生過程が明確に観察できる。得られた動画の観察から掘削刃の前進に伴う掘削機構には、図-5 に示すような掘削機構の発達パターンがあることが判明した。刃先からせん断帯が発生し（これを Step 0 とする）、直後に進行的な破壊を伴いながら地表面に到達する（Step I）。掘削刃の進行がしばらく続く間、せん断帯と地表面とが交わる点は不動のまま、破壊領域（受働領域）を小さくするような過程が存在する（Step II）。この間には圧縮による密度増加がみられないため、破壊領域の縮小分に相当する土が地表に押し上げられていると考えられる。その後、破壊領域が任意の形状にまで縮小されると（Step III）、再び刃先からせん断帯が発生しはじめる（Step 0'）。同様の動態モデルは豊浦砂の場合にも観察された。図-6 は Step I で発達するせん断帯をすくい角、砂質ごとに示した X 線画像である。両者の地盤ともに $\alpha = 30^\circ$ の場合、発達するせん断は、 $\alpha = 0^\circ$ の場合に比べて直線的に発達するようである。このような傾向は、著者の一人が行った剛塑性解析⁴⁾による計算結果によく近似するものである。土質の相違によるせん断帯あるいは受働領域への影響に関して、豊浦砂に比べてレゴリスシュミラントの場合では無数のより細かいせん断帯が観察されたが、破壊形状の形成にはあまり大きく依存していないようである。

5. まとめ

X 線透視装置を用いて地盤内部における変形の動態の可視化を試みた結果、次のようなことが明らかとなった。1) 地盤内に卓越するせん断帯は進行性を伴って間欠的に発生する。2) 次のせん断帯が発生するまでの間は、破壊領域が拡大・進展することではなく、掘削刃の前進分に相当する土が地表に押し上げられる。3) 上述のような破壊の動態パターンを繰り返しながら掘削が進行する。4) 卓越するせん断帯の形状は特にすくい角の影響を受ける。

謝辞 本実験は京都大学所有の X 透視 TV 装置を用いて行ったことを付記するとともに、実験にご協力いただいた京都大学 檜垣義雄氏ならびに同大学 建山和由 助教授に謝意を表する。

参考文献 1) 関口秀雄（研究代表者）（1999）：X 線 TV による動的荷重下の粒状体地盤 - 流体系の内部変形機構可視化に関する研究。（基礎研究 C（2））研究成果報告書，京都大学土木工学科。2) 小林俊一，高橋源太郎，関口秀雄（2000）：X 線 TV 透視装置による粒状体地盤 - 流体系の動的相互作用の可視化実験法について，応用力学論文集，Vol. 3，pp. 521-534。3) 宇宙開発事業団（2001）：月面ローバの研究，テラメカニクス研究分科会報告書，宇宙開発事業団。4) 小林泰三（2001）：すべり線解析の数値計算とその応用，第 1 回オーガナイズド・テラメカニクス・ワークショップ講演論文集，pp. 40-49。

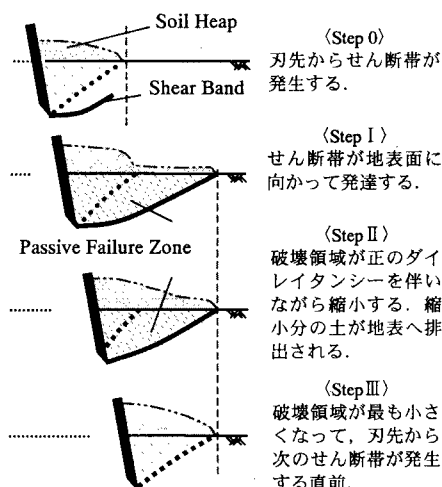


図-5 掘削機構の動態モデル

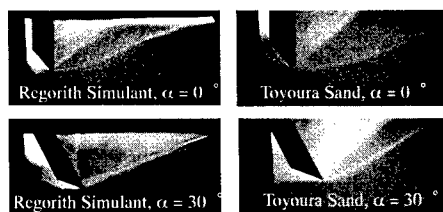


図-6 発達したせん断帯