

NKK 正会員 佐藤 豪

東京大学生産技術研究所 正会員 小長井 一男

1. はじめに

ロックフィルダムなどのような粗粒を積んだ構造の動的破壊では、粒子の形や大きさ、加振周波数とその挙動に影響を与え、粒径が大きいほど、また加振周波数が高いほど破壊しにくいことを示す研究例がある^{[1][2]}。この現象はCoulomb摩擦を想定した従来の理論の枠内だけで説明することは困難で、実際の構造物の動的安定性を議論する上で重要な検討事項である。

本研究では、粗粒からなる堤体斜面の動的破壊の特徴を考慮した概念モデルを提示し、その物理的意味を検討する。

2. 粗粒からなる構造物の動的破壊の特徴と概念モデル

小長井ら^[2]はLaser Aided Tomography(以下LAT)という新しい手法を開発した。これはガラス粒子からなる模型をガラスと同じ屈折率の液体に浸し、透明にした上で、レーザー光をシート状にして通し、堤体の任意断面内部の様子を観察する手法である(図1)。

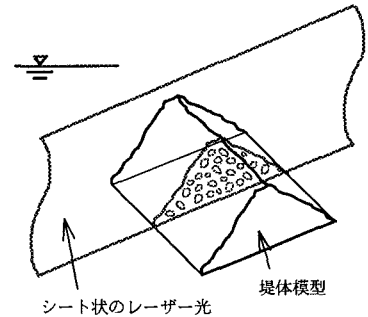


図1 Laser Aided Tomography

この手法を用いて、勾配が1:2の堤体模型を堤軸直角方向に振幅の徐々に増加する正弦波で加振した結果、ガラス粒子の積み上げ方によって斜面が体積膨張を伴いながら厚みをもって急速に滑る場合(実験結果1)と、全体にじわじわと進行性の破壊が生じる場合(実験結果2)があることが分かった。また図2で示したように、前者の場合では堤体の破壊加速度が加振周波数に依存して変化する一方で、後者の場合ではその様な傾向が現れなかった。

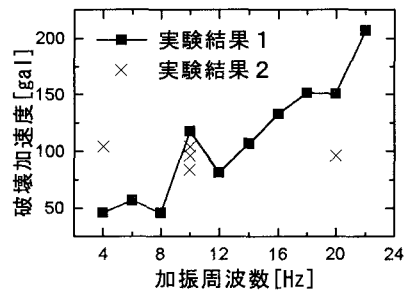


図2 破壊加速度と加振周波数

このように破壊現象を考察する上で体積変化が重要との知見を得て、図3のような破壊の概念モデルを提示する。このモデルでは、代表的な寸法、形状を有する粒子が質量 M の粒子塊の下にあり、この粒子が摩擦を伴いながら回転し、上にのった粒子塊のポテンシャルエネルギーを増すことが斜面全体の滑動のきっかけとなる。ここで θ は斜面勾配、 ϕ は粒子の回転角、 $K_F Mg\mu$ は回転する粒子の受ける摩擦力、 $\ddot{u}$ は基盤加速度、 F_x 、 F_z は粒子間の接触力、 α は上にのった粒子塊の持ち上げられる角度の初期値である。ここで L は上にのった粒子塊が持ち上がる時の回転半径であるが、 L や α は実際には粒径や粒子の噛み合わせ具合と相関の高い統計量と考えられる。以上の記号を使用して適宜簡略化を進めていくと、回転角 ϕ に関する以下の微分方程式を得る。

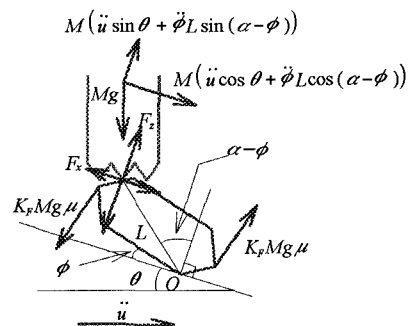


図3 概念モデル

$$\ddot{\phi} - \frac{g}{L} = \frac{g}{L} \left(\theta - \alpha - K_F \mu - \frac{\ddot{u}}{g} \right)$$

図4は上式の $\ddot{u}$ に振幅の徐々に増加する正弦波を入力して時間積分を行った際の粒子の回転角 ϕ の時刻暦である。ここで α は上にのった粒子塊の持ち上げられる角度の初期値であるが、物理的には粒子の噛み合いの深さを表している。図4から α が小さく噛み合いが浅いときは粒子はstick-slipをくり返し、逆に α が大きく噛み合いが深いときは粒子はロックングするといった全く異なる挙動を示すことが分かる。図5は α を変化させたときの加振周波数と破壊加速度の関係である。 α が斜面勾配 θ より小さく噛み合いが浅いときは、破壊加速度に周波数依存性が見られないのに対し、 α が θ より大きく噛み合いが深いときは、 α が大きくなるほど周波数依存性も高くなっている。これは、 α が小さいときは摩擦の寄与が大きく、破壊加速度は加振周波数に依存しなくなる一方、 α が大きいたきはポテンシャルの変化が支配的となるため、破壊加速度が加振周波数に強く依存するためと考えられる。

実験で観測された違いは、模型の締め固め方の違いにより α に相当するパラメータが違っていたものと解釈できる。

3. 結論

粗粒からなる堤体斜面の破壊を体積変化を考慮した簡単な概念モデルをもとに検討した。その結果、粒子の噛み合いが浅い場合、破壊現象を支配する要因は摩擦であり斜面の破壊加速度は加振周波数によらないが、粒子の噛み合いが深い場合は、ポテンシャルの変化（ダイレーション）が支配的な現象となるため破壊加速度は加振周波数に強く依存することが示された。

[参考文献]

- [1]田村重四郎,岡本舜三,加藤勝行:ロックフィルダム模型の振動破壊実験—貯水のない場合—,土質工学会誌,Vol.20,No.7,1972.
- [2]Konagai, K., C. Tamura, P. Rangelow and T. Matsushima: Laser-Aided Tomography: A Tool for Visualization of Changes in the Fabric of Granular Assemblage, Structural Eng. / Earthquake Eng., Vol.9, No.3(Proc. of JSCE No.455/I-21), pp. 193-201, 1992.

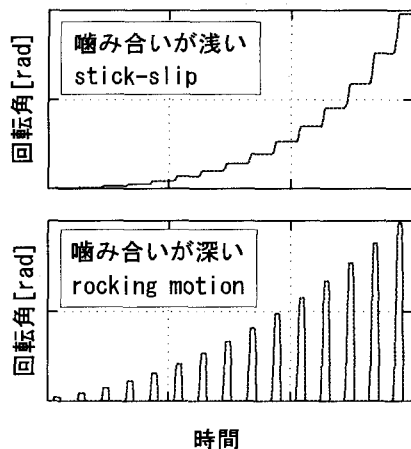


図4 粒子の回転

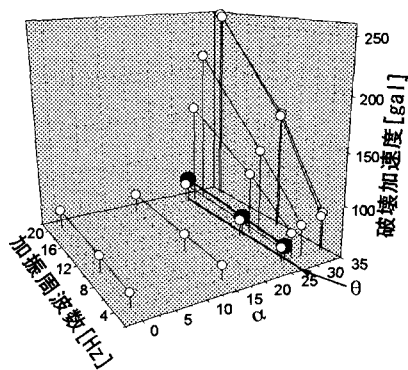


図5 α を変えた時の破壊加速度と加振周波数