

I-B 86

間隙水圧の影響を受ける粒状体斜面の動的破壊過程

鹿島建設株式会社 正会員 伊達 健介
 東京大学生産技術研究所 正会員 小長井一男
 東京大学生産技術研究所 技官 片桐 俊彦

1. はじめに

ロックフィルダムのような粗粒を積んだ構造の動的破壊について、斜面滑動の程度、あるいは滑りの速度の評価は非常に重要な問題である。本研究では、粒状体が大きく塑性変形する過程に注目し、パラメータとして、せん断破壊発生時のダイレタンシー特性を用い、新たな概念モデルを提示した。

また、粒状体斜面が水に浸されていた場合、破壊（変形）は浮力の影響分だけ、より小さな加速度で起こるはずである。しかし、その際に体積膨張によって水が斜面内部に入り込み、それにより生じる負の間隙水圧によって、破壊が抑えられる方向に力が働くと考えられる。概念モデルにはこの影響も併せて考慮した。

更にその概念モデルの妥当性を検証する為に実験を行い、結果の比較を行った。

2. 間隙水圧の影響を受ける斜面滑動モデルの提示

図1に示すように水（液体）に浸された粒状体斜面の一部から柱を取り出し、この柱の一部の微小要素 dz が塑性状態にあるとして、力の釣り合いを考え、(1)、(2)に記す(Δp : 水(液体)の水圧の動的変化分)。また、塑性状態で F_x と F_z の間の関係式を併せて(3)に記す。

$$\rho \cdot dz \cdot (\ddot{u} \cos \nu + \ddot{u}_{bottom} \cos \theta) = \rho' \cdot dz \cdot g \sin \theta - \frac{\partial F_x}{\partial z} dz \quad (1)$$

$$\rho \cdot dz \cdot (\ddot{u} \sin \nu + \ddot{u}_{bottom} \sin \theta) = \rho' \cdot dz \cdot g \cos \theta - \frac{\partial F_z}{\partial z} dz - \frac{\partial \Delta p}{\partial z} dz \quad (2)$$

$$\frac{F_x}{F_z} = -\tan \phi_{mob} \quad (3)$$

これらに対して適宜簡略化を進め、内部摩擦角 ϕ_{mob} については $\phi_{mob} = \mu + \nu$ を代入、ダイレタンシー角 ν については、せん断ひずみ γ との関係（構成則） $\nu = \nu_0 - \gamma$ (ν_0 : 最大ダイレタンシー角) という1次式で近似する。そして、(4)が得られる。

$$\rho \ddot{u} = \rho' g \theta - \phi_{mob} \left(\rho' g + \frac{\partial \Delta p}{\partial z} \right) + \frac{\partial \phi_{mob}}{\partial z} (M' g - \Delta p) - \rho \ddot{u}_{bottom} \quad (4)$$

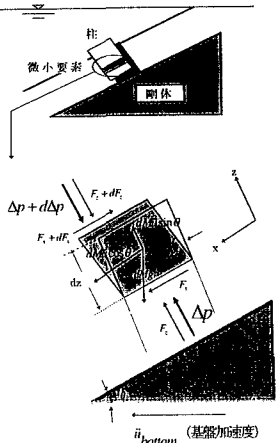


図1 微小要素(柱内部)の力の釣り合い

解析に関しては、微小要素を斜面上に積み重ねたモデルを考える。要素がせん断変形を起こしている場合 (slipping state) は上式及びダルシー則によって導かれた式を用いる。一方、せん断変形が止まっている場合 (sticking state) はひずみの時間的変化がゼロであるという変形の拘束条件式を用いる。入力加速度については、繰り返しのせん断変形に関する信頼できる構成則がないので、正弦半波を採用する。解析は差分法によって行う。

変位に関しては、図2においては一定値で留まっていたのが、同じ入力波であっても図3のように透水係数が上昇することにより、残留強度に達し変位が留まらず物理的には斜面滑動が起こってしまうと考えられる。また、滑りは最底部の要素上面で起こり、その上のマスは一体となって動いていることが示されている。

間隙水圧は図4、図5から、比較的透水係数の高い場合でも発生し、変位が急激に変化する際に瞬間的に

生じていると判断できる。更に間隙水圧は斜面滑動が起こる時はそうでない時より遥かに大きなマイナス値を示す。

変位が一定値に留まるか否かで破壊加速度を判断すると、図6のように透水係数が非常に大きい場合（間隙水圧が殆ど生じない場

half sine pulse input: $a=200$ (cm/s²)
 duration time=0.5(s)
 Number of elements =5, $\theta=0.5$
 $\nu_0=0.4$, $\mu=0.32$

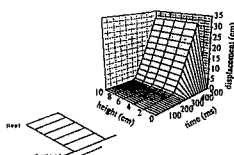


図2 正弦半波を加えた時の変位 ($k=0.001$ (m/s))

half sine pulse input: $a=200$ (cm/s²)
 duration time=0.5(s)
 Number of elements =5, $\theta=0.5$
 $\nu_0=0.4$, $\mu=0.32$

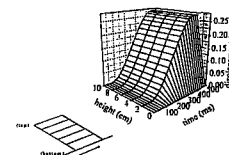


図3 正弦半波を加えた時の変位 ($k=0.01$ (m/s))

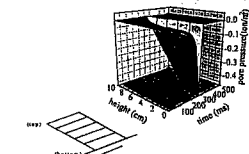


図4 正弦半波を加えた時の間隙水圧 ($k=0.001$ (m/s))

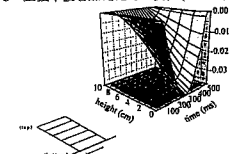


図5 正弦半波を加えた時の間隙水圧 ($k=0.01$ (m/s))

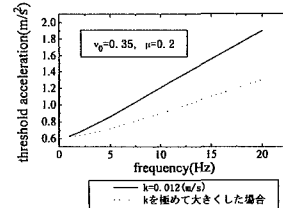


図6 間隙水圧による破壊加速度への影響

合)に比較して、実験値付近の透水係数では、少なからず間隙水圧の影響が存在することが表せる。

3. 振動実験及び解析結果との比較

図7に示すように振動台の上に固定された鉄のフレームからかごを吊るし、その中に作られた発泡アルミ板(勾配可変)上にガラス粒子の斜面を均等な厚さに積み上げる。そして、ガラスを積み上げたかごをガラス粒子の屈折率と同じ値に調節したテトラリンとテレピン油の混合液中に浸す。この斜面にシート状にしたレーザー光をあてて、任意断面形状を観察し、目視で破壊加速度を判断する(ビデオで確認)。またカメラを設置し、滑動前後を撮影する。

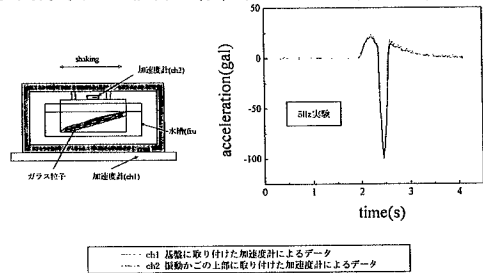


図7 実験装置と入力加速度

入力波形には解析時と同様、正弦半波加速度を採用する。入力波形が理想的な正弦半波になっていないのは、有限な振動台のストロークの幅では限界がある為、斜面に影響の無い範囲で逆の加速度をかけて工夫した結果である。

図8、図9は斜面深さ方向に関する滑り(変形量)と持ち上がり角の分布である。これは写真から破壊前後の2点を確認し、そのデータからプロットさせている。前者の実験結果はある深さで一気に滑るという解析結果を説明し得るものである。また、後者からは、体積膨張が起きていることが確認でき、またそれにより透水係数が上昇していると推測される。

破壊加速度については、図10から周波数依存性が確認できる。また、その依存傾向も実験の物性値を代入させた解析結果と少々のはらつきは認められたものの、相似性が確認できた。

間隙水圧に関しては、片方の測定位置を底面としたことから、滑り深さが最も深い20Hzの実験データを採用した。その結果、図11より瞬間的に発生していることが再現性も含めて確認された。ピーク値が計算値0.016(ton/m²)、実験値0.0035(ton/m²)と差が生じたのは先にも少しふれたが、破壊時の体積膨張により、透水係数が上昇したからだと考えられる。他のパラメータを実験によって得られた値に設定し、透水係数と破壊時の間隙水圧のピーク値の関係を示した図が図12である。これより実験で測定した透水係数 $k=0.012(m/s)$ 前後では急激にピーク値が変動しているのが判る。

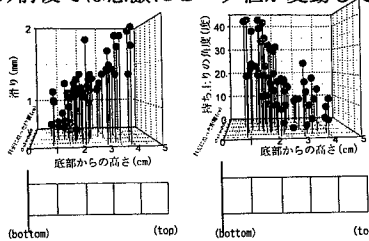


図8 滑りの深さ方向の分布(変形モード) 図9 持ち上がり角の深さ方向の分布

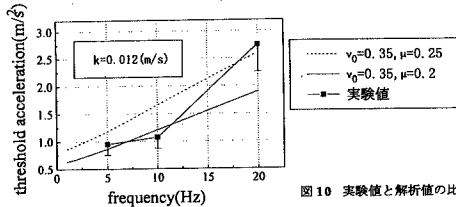


図10 実験値と解析値の比較(破壊加速度)

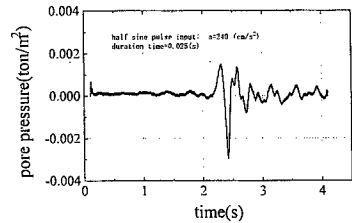


図11 間隙水圧(実験値:20Hz)

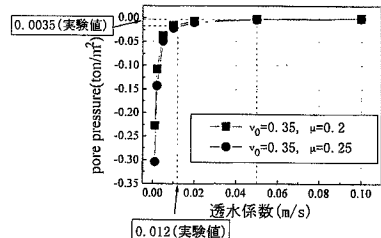


図12 透水係数と間隙水圧の関係

4. 結論

解析により、滑りは最底部の要素上面で起こり、その上のマスは一体となって動いていると示された。間隙水圧は変位が急激に変化する際に、瞬間的に発生し、また比較的透水係数の高い場合でも発生し、更に破壊を妨げる方向に影響する、ということが示された。

実験により、まず、解析と酷似した変形モードが確認された。また、解析から導かれた破壊加速度の周波数依存性について、同様の傾向が確認され、更に、間隙水圧についても瞬間的に発生することが確認された。間隙水圧のピーク値に差が生じたのは、破壊時に体積膨張が起こり、透水係数が上昇した為だと考察した。よって今後、各層における透水係数が時間変化と共に変化する、という計算方法の構築が望まれる。

参考文献 (1)Konagai, K Tamura, C Rangelow, P Matsushima, T : 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 (2)Konagai, K : Conceptual Model of Dilative Granular Surface Slide, Report of dept. Geotechnical Engineering, Norwegian Institute of Technology (NTH), pp. 1-28, 1995