

鳥取大学大学院 学 ○上田 洋, 平松 大周, 栢野 伸也
鳥取大学大学院 正 西村 強, 中村 公一

1. はじめに

トップリング崩壊には、代表的なものとしてブロックトップリング崩壊とたわみ性トップリング崩壊があり、そのうち、たわみ性トップリング崩壊は、図-1に示すような受け盤の斜面で発生しやすいとされる。このような斜面を構成している柱状要素への作用する荷重を、図-2に示すように仮定するとき、柱状要素に生ずる引張応力と岩石の強度が、その発生に関係していると考えられる。このようなことに対して、Aydan¹⁾らは岩石の引張強度を考慮した定式化を実施している。平松²⁾らは、要素内に微細な亀裂が存在する場合の亀裂先端における応力集中による影響を考慮した式を誘導している。さて、この崩壊モードに対する模型を用いた実験を行う場合、遠心模型実験が有力な手法となるが、装置全体を考えると大規模なものにならざるを得ない。そこで、本研究では、極めて短時間の片方向载荷が可能な振動台を利用して、斜面模型に水平荷重を与える実験方法を採用した。本文では、実験概要および理論式による結果の評価について述べる。

2. トップリング崩壊に対する極限平衡解析

図-1に示す斜面モデルにおいて、陰影部の柱状要素に関する力のつり合いより、 P_{i-1} は次のように求めることができる。式(1)は Aydan¹⁾ら、式(2)は亀裂の存在による断面積減少を考慮して、式(3)は亀裂先端での応力集中を考慮して平松²⁾が誘導した式である。

$$P_{i-1} = \frac{P_{i+1} \left(\eta h_i - \mu \frac{t_i}{2} \right) + S_i \frac{\bar{h}_i}{2} + S_e \frac{\bar{h}_i}{2} - \frac{2l_i \left\{ \frac{\sigma_t}{FS} + \frac{N_i - N_e}{t_i} \right\}}{\eta h_{i-1} + \mu \frac{t_i}{2}} \quad (1)$$

$$P_{i-1} = \frac{P_{i+1} \left\{ \eta h_i + \mu \left(\frac{t_i^*}{2} - t_i \right) \right\} + (S_i + S_e) \frac{\bar{h}_i}{2} + (N_e - N_i) \left(\frac{t_i}{2} - \frac{t_i^*}{2} \right) - \frac{2l_i \left\{ \sigma_t + \frac{N_i - N_e}{t_i^*} \right\}}{\eta h_{i-1} + \mu \frac{t_i^*}{2}} \quad (2)$$

$$P_{i-1} = \frac{P_{i+1} \left(\eta h_i - \mu \frac{t_i}{2} \right) + S_i \frac{\bar{h}_i}{2} + S_e \frac{\bar{h}_i}{2} - \frac{2l_i \left\{ \frac{\sigma_t}{FS'} + \frac{N_i - N_e}{t_i} \right\}}{\eta h_{i-1} + \mu \frac{t_i}{2}} \quad (3)$$

$$FS' = \frac{\sqrt{\pi a} F(\xi)}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\rho}{2r} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{\sqrt{\pi a} F(\xi)}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

σ_t : 引張強度, FS : 破壊接近度, F_e, N_e : F_e の傾斜面垂直成分, S_e : F_e の傾斜面平行成分

斜面の安定性の判断は、1 番目ブロックに斜面表面側から作用する力 P_0 で判断できる。 P_0 は、 n 番目のブロックから漸次的に P_{i-1} を求めることで、1 番目ブロックに作用する P_0 が得られる。この P_0 に注目して、斜面全体の安定性は、次のように評価する。

$P_0 < 0$ 安定, $P_0 = 0$ 限界状態, $P_0 > 0$ 不安定

振動台を用いた模型実験においては、 F_e を与えて斜面を崩壊に至らせる。

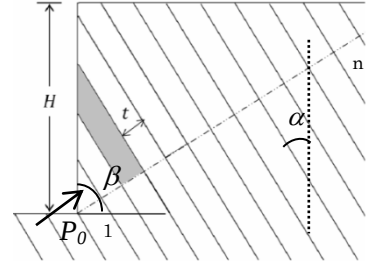


図-1：斜面モデル

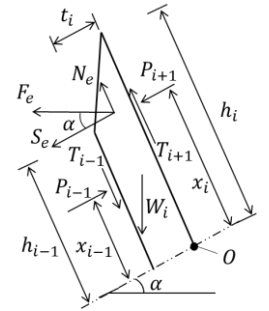


図-2：陰影部に作用する力

3. 模型実験

図-3 に模型実験装置を示す．斜面モデルには水と石膏を用いた柱状供試体を使用し，柱状供試体は，水 1:石膏 1.75 の質量比で作製した．また，斜面モデルに使用した柱状供試体の引張強度と亀裂が存在する柱状供試体の見かけの引張強度は図-4 に示した 4 点曲げ試験で求めた．その結果を図-5 に結果を示す．

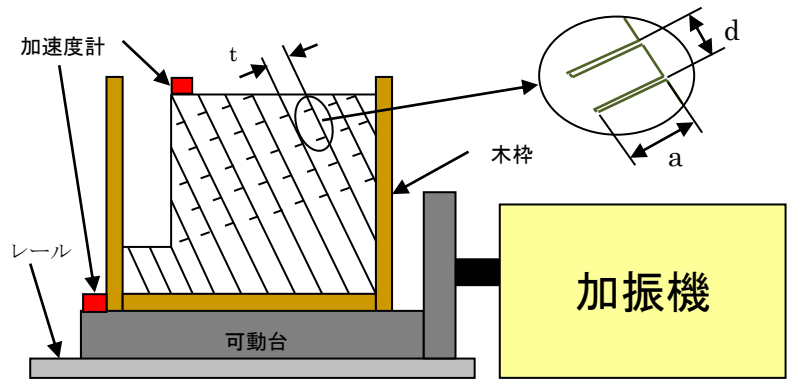


図-3：模型実験装置

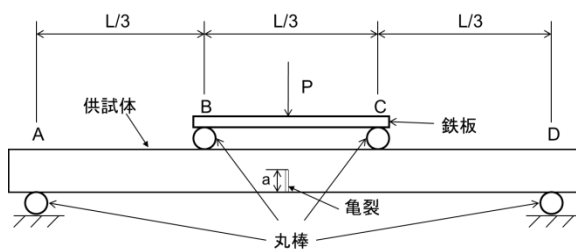


図-4：4点曲げ試験

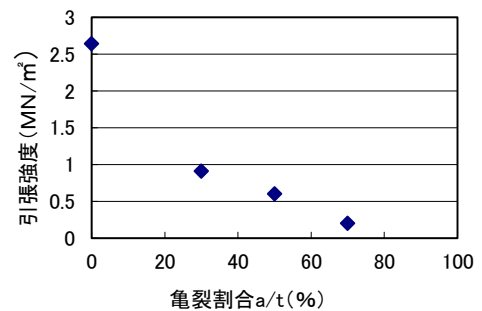


図-5：4点曲げ試験結果

振動台に短時間 Δt の片方向変位を入力して，生じる慣性力をもって斜面モデルへの F_e の载荷とした．上記の供試験体の強度や寸法に関する条件を 2. の式に入力して，斜面を崩壊に至らせる F_e の最小値を求めて，振動台への入力値（変位振幅）を決定した．図-6 の崩壊過程に示すように，斜面が崩壊するまで数度の载荷を実施した．

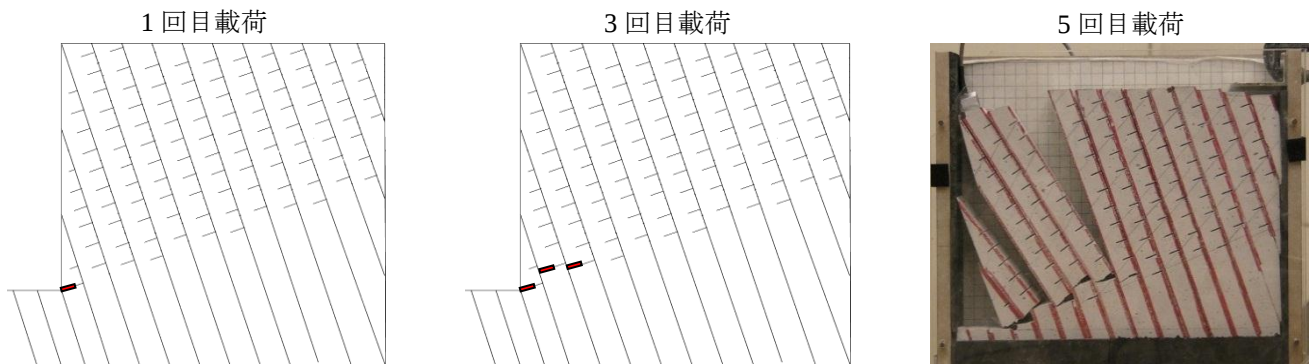


図-6：崩壊過程

実験では，図-3 の位置に加速度計を設置して，応答水平加速度を測定して，その計測値を積分することで斜面法肩の変位も求めている．なお， α ， a/t ， d については， α を 10° ， 20° ， 25° ， a/t を 30%，50%，60%， d を 10mm，15mm，30mm としてこれらを組み合わせて，全部で 7 例の実験を行っている．

4. 結果と考察

図-7 には，図-3 の d が 10mm と 15mm としたときの法肩変位を示す．この図の $d=10\text{mm}$ は，図-6 の結果を示すものであるが，法先より柱状供試験体の破壊が始まり，内部へ進行してする様子が示されていると言える．図-8，図-9 に 2. に示した式と実験結果の比較を示す．図-8 では，計測した水平加速度 a_h を対して， $k=a_h/g$ （ここに， g は重力加速度）とした量を縦軸に，図-2 の α を横軸にしている．可動台で計測した加速度と最もよく一致するの

は、式(3)であり、法肩では、これより大きな加速度が計測されていることがわかる。

図-9 は、亀裂割合 a/t と k の関係を示している。図-5 に示したように a/t が大きくなることによって、柱状供試体の見かけの引張強度が減少している。この強度の低下が、斜面の安定性に与える影響、さらに、その影響の程度を式(3)が表現していることがわかる。

5.まとめ

簡易な模型実験によりたわみ性トップリングの再現した。また、その結果を亀裂先端における応力集中を考慮した式により評価した。実斜面で、 α , t , d などの量を求めることは難しいが、式(3)によりある程度の定量的評価ができるのではないかと考えている。なお、本研究の一部は、中国電力技術研究財団による平成 23 年度試験研究助成を得て実施している。関係各位に謝意を表する。

〈参考文献〉

- 1)O.,Aydan&T.,Tawamoto : The Stability of Slopes and Underground Openings Against Flexural Toppling and Their Stilisation. Rock Mech.Rock Engng,Vol25,No3,pp143-165,1992.
- 2)平松 大周他：トップリング崩壊に対する斜面の安定性に関する研究，平成 24 年度土木学会中国支部研究発表会投稿中。

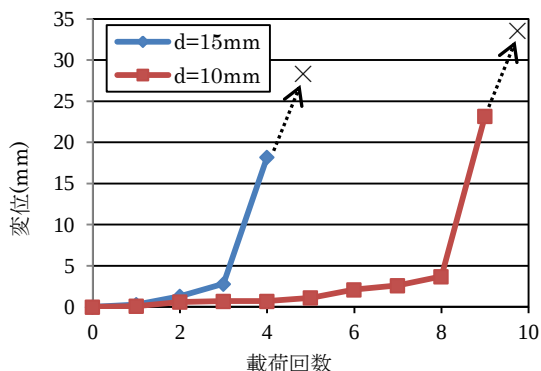


図-7：法肩変位(×は斜面の崩壊を表す)

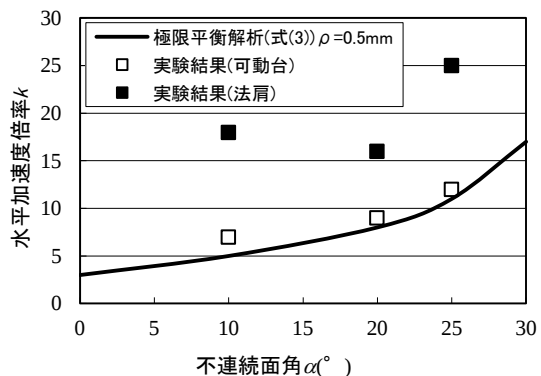


図-8：不連続面角度と水平加速度の関係

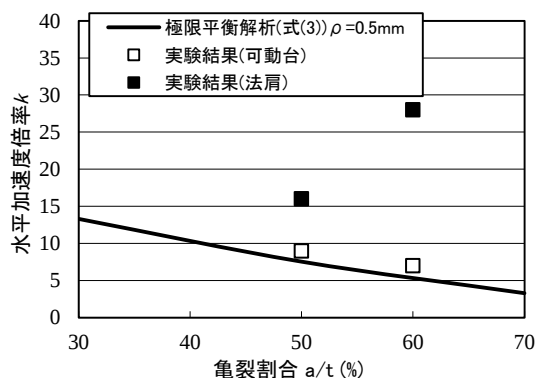


図-9：亀裂割合と水平加速度の関係