

トッピング崩壊に対する斜面の安定計算法に関する基礎的研究

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

1. はじめに

トッピング崩壊は垂直に近い節理の卓越した斜面で発生しやすいとされ, 大きな運動エネルギーを伴って斜面付近の構造物等に多大な影響を及ぼす. トッピング崩壊は, たわみ性トッピングとブロックトッピングに大別される. 本研究では, たわみ性トッピングに対する斜面の安定計算式の導出を岩石材料の引張強度に注目して検討する. このような安定計算式には, いくつかの提案式があるが, 本研究では, 既存き裂の先端における応力集中を考慮した式を示して, 模型実験結果への適用を試みる.

2. トッピング崩壊に対する安定計算式の導出

たわみ性トッピングは, 図-1 に示すブロックが層状に積み重なった斜面モデルで発生するとされている. 図-1 に受け盤斜面モデルの模式図と水平方向加速度作用時の i 番目ブロックに作用する力を示す. 剛体に作用する力のつり合いを考えると, i 番目のブロック縁端 (図中 O 点) に生じる応力から Aydan らは, 以下の式を誘導している.

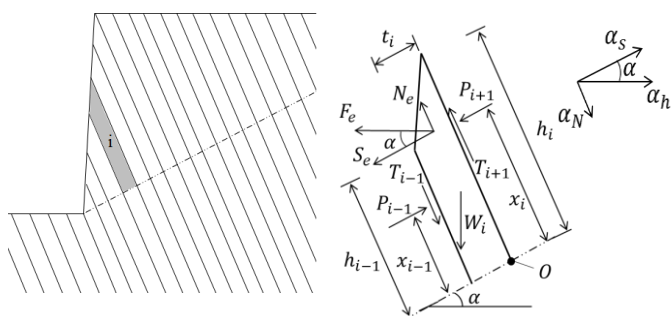


図-1 斜面モデル内の i 番目のブロックに作用する力

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

法先にあるブロックを 1 番目とし, 上部地表面に向かって n まで番号を付ける. n 番目のブロックには自重のみが作用する ($P_{n+1} = 0$) と仮定することより, P_{n-1} が得られる. つまり, 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. P_0 は 1 番目ブロックに斜面表面側から作用する力であり, P_0 の正負によって安定状態であるかが次のように判定できる¹⁾. [$P_0 < 0$ 安定, $P_0 = 0$ 限界状態, $P_0 > 0$ 不安定]

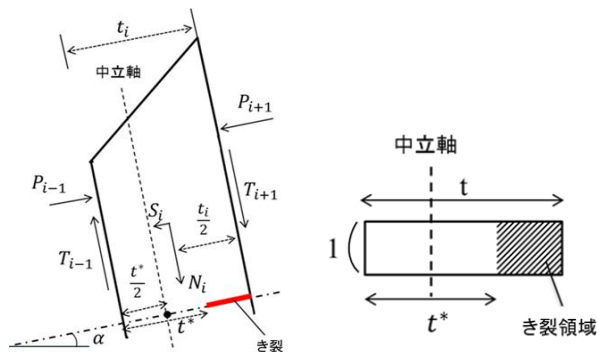
2.1 既存き裂を有するモデルへの適用

図-2 に示すように, き裂が生じている場合を考える. この場合, き裂先端における応力集中に伴い, き裂がない場合に比べ, 岩石柱の耐荷重は小さくなり, 見かけ上, 強度低下が発生したようになる. き裂の影響は(1)式を用いる場合, 見かけの引張強度を使用し, FS で調整することも考えられるが, その場合, 見かけの引張強度をどのように知ることが重要となる. そこで, き裂の影響を, (a) 断面減少, (b) モード I き裂の応力集中により考慮した 2 つの式を導出した.

(a) 断面減少による修正

断面減少によりブロック幅が t^* となり, N_i, T_{i+1}, T_{i-1} によるモーメントは, 回転軸が変化することから以下となる.

$$-N_i \left(\frac{t}{2} - \frac{t^*}{2} \right), \quad -T_{i+1} \left(t_i - \frac{t^*}{2} \right), \quad -T_{i-1} \cdot \frac{t^*}{2} \quad (2)$$



(a) 既存き裂を含むブロック (b) ブロックの断面図

図-2 き裂を含むブロック

以上の変化を考慮して式(1)を書き換えると次式が導出される。

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

(b) モード I 破壊による応力集中の考慮

線形破壊力学におけるモード I き裂の応力集中を考慮する式を導出した。モード I (開口型) き裂は、き裂面に対して引き剥がすような力が働く変形様式である。図-3 に示すようにき裂が存在するブロックに曲げモーメントが作用する場合のき裂先端部の応力集中を考える。き裂の先端が直径 2ρ の円が接するように近似されるとき、x 軸から θ 傾いた方向で焦点 F から r の距離における応力は、応力拡大係数 K_I を用いて式(4)で表される。

$$\sigma'_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\rho}{2r} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4)$$

$$K_I = \sigma_x \cdot \sqrt{\pi a} \cdot F(\xi) \quad (5)$$

$$F(\xi) \cong \sqrt{\frac{2}{\pi \xi} \tan \frac{\pi \xi}{2}} \frac{0.923 + 0.199 \left\{ 1 - \sin \left(\frac{\pi \xi}{2} \right) \right\}^4}{\cos \left(\frac{\pi \xi}{2} \right)}, \quad (\xi = \frac{a}{t}) \quad (6)$$

破壊接近度 FS を $FS = \sigma_t / \sigma'_x$ と定義すると

$$FS \left\{ \frac{\sqrt{\pi a} F(\xi)}{\sqrt{2\pi r}} \frac{\rho}{2r} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{\sqrt{\pi a} F(\xi)}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right\} = \frac{\sigma_t}{\sigma'_x} \quad (7)$$

ここで左辺 = FS' とおき、式(1)のように整理すると

$$P_{i-1} = \frac{P_{i+1} \left(\eta h_i - \mu \frac{t_i}{2} \right) + S_i \frac{\bar{h}_i}{2} + S_e \frac{\bar{h}_i}{2} - \frac{2I_i}{t_i} \left\{ \frac{\sigma_t}{FS'} + \frac{N_i - N_e}{t_i} \right\}}{\eta h_{i-1} + \mu \frac{t_i}{2}} \quad (8)$$

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

3. 導出した安定計算式の実験結果への適用

筆者らは、水と石膏で作製した亀裂を有する柱状供試体を用いてたわみ性トッピングの模型実験を実施している。実験の詳細は、別報²⁾に譲るが、模型斜面を振動台に設置して、 F_e を極めて短時間に作用させ、そして、それを繰り返して斜面を崩壊に至らせるものである。与えた実験条件 a/t , α に対して、斜面が崩壊に至ったとき、模型に設置した加速度計が示した応答水平加速度倍率 $k = ah/g$ をまとめたものを図-4, 5 に示す。式(8)が、特に、斜面下部(可動台と表記)における計測値とよく一致していることがわかる。

《参考文献》1) O. Aydan & T. Kawamoto : The Stability of Slopes and Underground Openings Against Flexural Toppling and Their Stabilisation : Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.25, No.3, pp.143-165, 1992.

2) 上田 洋他 : トッピング崩壊に関する模型衝撃実験, 平成 24 年度土木学会年次学術講演会。

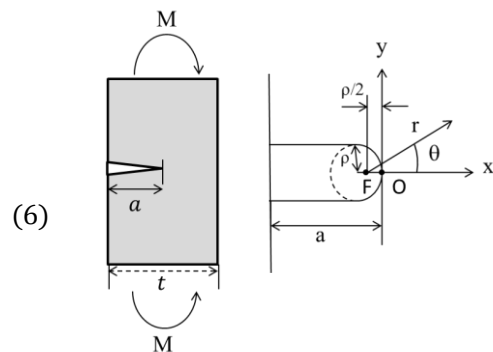


図-3 モード I き裂

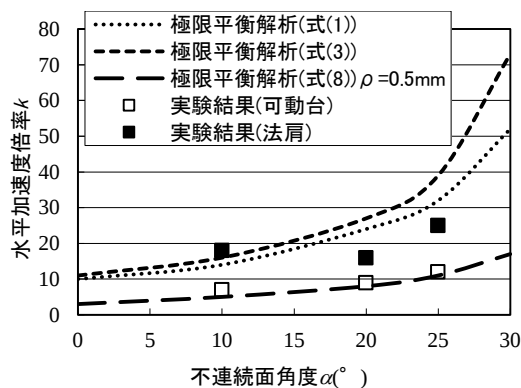


図-4: 不連続面角度と水平加速度の関係

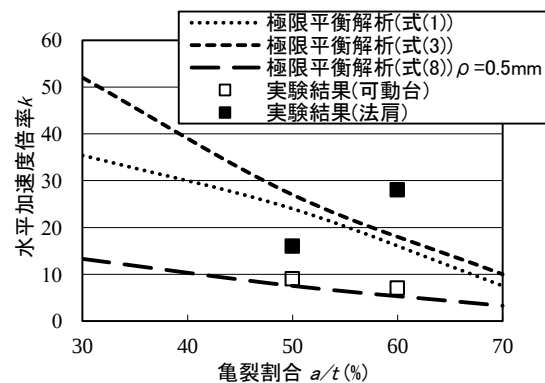


図-5: 亀裂割合 a/t と水平加速度の関係