

III-594

受け盤堆積層のトップリング解析の試み

㈱銭高組 名古屋支店 土木部 篠田勝巳
同 技術本部技術研究所 島海寿美男

1. はじめに

受け盤堆積層の崩壊、すなわちトップリング(転倒崩壊)の解析法として、現在、1)単一柱状ブロックの幅と高さの比 b/h と地層傾斜角 ϕ との関係からトップリングの有無を判定する方法¹⁾、2)地層間にジョイント要素を配置したFEMによる変形解析からトップリングを再現する方法²⁾、の二手法がある。1)は、単一個体を仮定していることから、連続する複数の地層ブロックとその層理間に働く摩擦を加味することができない。2)は、層理間の摩擦をズレ(接触、分離、せん断)で表現する解析モデルのため、ジョイント要素に不明確な鉛直・せん断方向バネ常数を入力する必要がある。そして、解析モデルの作成と計算に多大な時間を必要とすることから一般的でない。ここで、トップリングが岩盤崩壊の範疇に含まれるならば、トップリング解析も地すべり解析と同様に安定計算法によることの方が賢明であるように思える。本文は、1983年に、Zanbak³⁾が提唱したトップリング解析理論を現場に適用したところ、その崩壊形態が解析と一致した事例について述べたものである。

2. 解析理論

受け盤の崩壊力として、転倒力と滑動力が挙げられる。個々の力は

転倒力(トップリング): $P_t(i)$

$$P_{t1} = P(i+1) \cdot (M(i) - T \cdot \tan \phi_{cc})$$

$$P_{t2} = W(i)/2 \cdot (H(i) \cdot \sin \phi - T \cdot \cos \phi)$$

$$P_t(i) = (P_{t1} + P_{t2}) / L(i)$$

滑動力(すべり): $P_s(i)$

$$P_{s1} = W(i) \cdot (\cos \phi \cdot \tan \phi_{cb} - \sin \phi)$$

$$P_{s2} = 1.0 - (\tan \phi_{cc} \cdot \tan \phi_{cb})$$

$$P_s(i) = P(i+1) - (P_{s1} / P_{s2})$$

ここに、 $P(i+1)$: 転倒力

$P(i)$: 抵抗力

$M(i)$: 転倒モーメント作用長さ

$L(i)$: 抵抗モーメント作用長さ

T : 柱状岩塊の層厚

$H(i)$: 柱状岩塊の高さ

$W(i)$: 柱状岩塊の重量

ϕ_{cb} : 柱状岩塊底面と基盤面との間に働く摩擦角

ϕ_{cc} : 層理間に働く摩擦角

ϕ : 地層の傾斜角

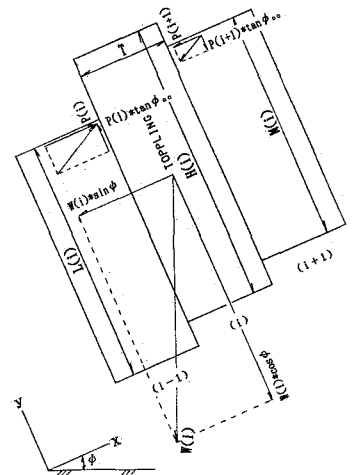


図-1 iブロックに作用する力の釣合

で表される(図-1参照)。トップリングの崩壊形態として、下流側末端ブロックがキーブロック(要石)となる。先ず末端ブロックの安定性を計算し、“安定(不動)ブロック”か、“不安定(滑動または転倒)ブロック”かを計算する。この計算では、柱状ブロック底面と基盤面との間に働く摩擦力のみ考慮する。次に、第一ブロックの計算と同様に、第二ブロックの安定性を計算する。この計算では、第一ブロックと第二ブロックの間に働く摩擦力を考慮して、“安定ブロック”か、“不安定ブロック”かを計算する。以後、この繰り返し計算を順次、行う。第一ブロックからn次ブロックにわたる判定式と内力の関係を以下に示す(図-2参照)。

判定式:

$$P_t(i) \geq P_s(i) \quad \dots\dots \text{“転倒”} : P(i) = P_t(i)$$

$$P_t(i) < P_s(i) \quad \dots\dots \text{“滑動”} : P(i) = P_s(i)$$

$$P_t(i), P_s(i) \leq 0.0 \quad \dots\dots \text{“安定”} : P(i) = 0.0$$

内力:

$$P_{x1}(i) = P(i) - P(i+1)$$

$$P_{y1}(i) = P_{x1}(i) \cdot \tan \phi_{cc}$$

$$P_{x2}(i) = W(i) \cdot \sin \phi$$

$$P_{y2}(i) = W(i) \cdot \cos \phi$$

$$P_x(i) = P_{x2}(i) - P_{x1}(i)$$

$$P_y(i) = P_{y2}(i) - P_{y1}(i)$$

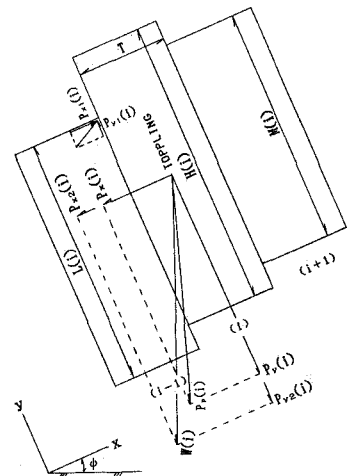


図-2 iブロックの“転倒”、“滑動”、“安定”を支配する内力

3. 解析事例

図-3は、上述の解析理論を現場(長野自動車道)で適用した事例である。岩質は第三紀黒色泥岩で、吹き付けのり枠工を施しながら9段の切り下げ施工を行う予定であった。変状は、第2のり面(下流側から数えて)の切り

下げが完了し、数日を経て発生した。変状箇所は隅角部で、将棋倒しのな倒壊であった。堆積構造は受け盤で、層理から多量の地下水湧出があった。この点から、キープブロックとなっていた下部位の柱状泥岩ブロックが地下水によって溶出し、欠落したことによってトップリングが発生したと考えられた。解析に必要な常数は、地層傾斜角 $\phi=33(\text{deg})$ 、層厚 $t=3\text{m}$ 、岩盤の単位重量 $\gamma_s=2.5\text{t/m}^3$ 、層理間摩擦角 $\phi_{oe}=35(\text{deg})$ 、岩盤底面と基盤面間摩擦角 $=35(\text{deg})$ 、のり面長さ $=32\text{ブロック}\times t=96\text{m}$ 、である。図-3に示した結果を参照すると、キープブロックの第一、第二柱状ブロックが“SLIDING(滑動)”を起こし、第三柱状ブロックから“TOPPLING(転倒)”を起こしている。この傾向は、上方ののり面全体がモルタルで覆われているため、内部の詳細については不明であるが、モルタル表面に発生した亀裂の状況と頂部の地山に発生した環状亀裂を論拠とするなら、当解析結果はのり面の変状動向を十分に再現していると考えられる。また、第一柱状ブロックに発生したすべり力は、 48t/m であることが解析によって推定された。

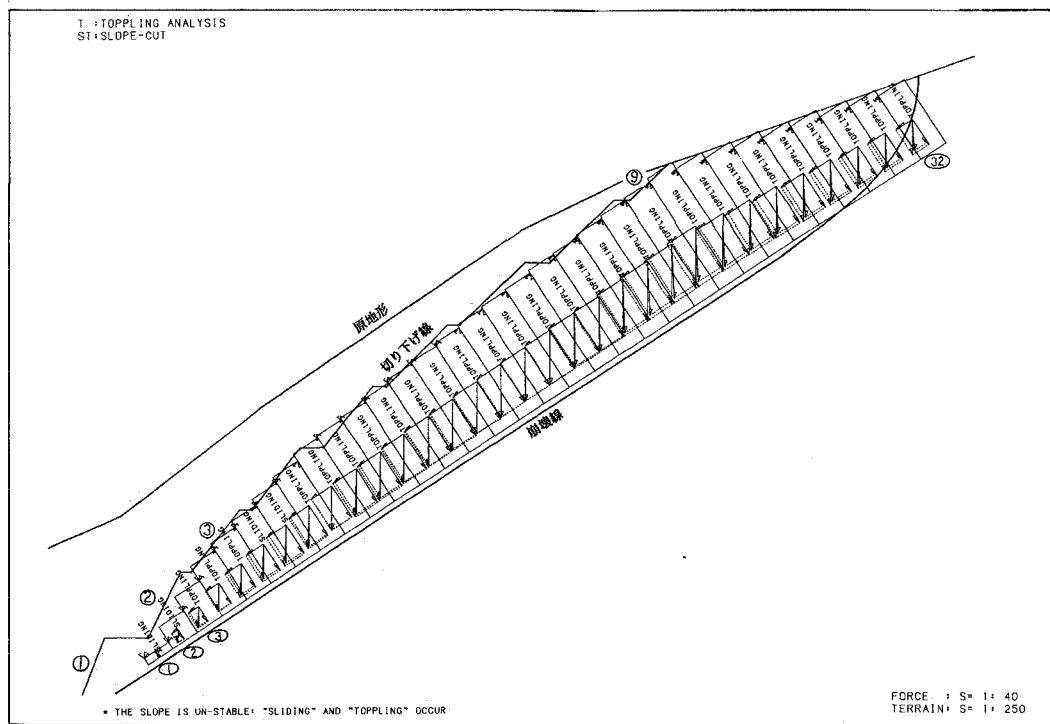


図-3 トップリング解析図

4. まとめ

受け盤堆積層のトップリング解析は、従来、単一柱状ブロックに仮定した安定解析法とジョイント要素を配置したFEMによる変形解析法の二手法によって検討が行われてきたが、当解析を通じて得た知見として、

- 1) 第三紀の岩盤は、堆積によって形成されており、単一な岩塊の安定度でトップリングの有無を評価することに無理がある
- 2) 地山全体の変形挙動を把握する手法として、FEM解析は有効な手段と言えるが、ジョイント要素に入力する鉛直・せん断バネ常数の見積もりと評価の問題、そしてモデル化と計算に多大な時間を必要とすることから一般的な解析法でない
- 3) 岩盤崩壊の範疇にトップリングが含まれるなら、地すべりまた岩盤すべり解析と類似する扱い、すなわち斜面安定問題として考えた方が明解である
- 4) Zambakは、トップリングを安定問題としてとらえ、連続する柱状ブロックを“安定(Stable)”、“滑動(Sliding)”、“転倒(Toppling)”で解を示し、“滑動(Sliding)”もしくは“転倒(Toppling)”時には個々のブロックに発生する力を与えている
- 5) Zambak法を現場で発生したトップリングに適用したところ、変状動向を十分に再現していることが分かった。

＜参考文献＞

- 1) Hoek, E., and Bray, J.W.: Rock Slope Engineering, 3rd ed., Institution of Mining and Metallurgy, London, England, 1981
- 2) 後藤英一、武田勇光: FEMによるトップリング解析の有効性について、第31回業務研究発表会論文集(その1)、平成元年6月、日本道路公団
- 3) Zambak, C.: Design Charts for Rock Slopes Susceptible to Toppling, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.109, No.8, Aug., 1983, ASCE