

Ⅲ－31 岩盤斜面の安定性と支保工についての各種評価手法の比較・検討

東北大学工学部 学生員 ○谷 宗行
東北大学工学部 正会員 岸野 佑次
東北大学工学部 正会員 京谷 孝史

1. はじめに

ロックボルトは様々な岩盤構造物に対して有効な補強手段であることは多くの建設実績から分かっているが、その定量的な評価については必ずしも明確にされていない。本研究ではある実岩盤斜面にロックボルト工を施した時と施さない時それぞれについて均質化法に基づく安定解析を行い、その岩盤斜面が自重の何倍で破壊にいたるかを算定し、比較・検討することにより支保効果の定量的な評価をしようとするものである。

ロックボルト工の設計法に関しては現在まだ明確に標準化されていないが、岩盤斜面に対して現場で行われているのは、すべり落ちようとする岩塊に対して、安全率が現状の1.2倍になるように、ロックボルトを入れることによってすべり面のせん断抵抗力を増やそうとするものである。そのため、設計に際してまず崩壊すると考えられるすべり面を決定しなければならないなどの問題がある。

2. 主なせん断強度式

実岩盤斜面を図-1のように近似したメッシュ断面に対し、安全率を求める。ここでいう安全率は、すべりを起こそうとする合力に対する、すべりに抵抗しようとする合力の比で定義している。岩盤斜面の破壊形態には様々なものがあるが、ここでは平面破壊のみを仮定する。安全率の計算は、その破壊面のせん断強さが分かることを前提とする。以下に"岩盤"のせん断強度式と"不連続面"のせん断強度式でよく知られたものを挙げる¹⁾。

岩盤のせん断強度式

a) Hoek-Brownの式：HoekとBrownは岩盤の破壊に対する主応力とモールの包絡線の間の概略の関係を与える一連の方程式を示している。

$$\sigma_{1n} = \sigma_{3n} + \sqrt{m\sigma_{3n} + s} \quad (1)$$

ここに、 m と s は材料定数であり、 σ_{1n} と σ_{3n} は無次元化した主応力 $\frac{\sigma_1}{\sigma_c}$ と $\frac{\sigma_3}{\sigma_c}$ である。 σ_c は、この岩盤のインタクト・ロック片の一軸圧縮強さである。この関係を使って岩盤の質について6分類、岩石材料について5分類、計30種類の岩盤に対し、それぞれ主応力関係とモールの包絡線の概略式を与えている。

不連続面に対するせん断強度式

b) Pattonの式：規則的な歯形形状のモデルの試験結果から次の様な破壊基準を提案している。

$$\sigma < \sigma_a \cdots \tau = \sigma \tan(\phi_b + i) \quad (2)$$

$\sigma > \sigma_a \cdots \tau = c + \sigma \tan \phi_r$
垂直応力が小さい場合は、歯形は破壊されずに乗り越えられるので、せん断強度は歯形の傾斜角度 i と基本摩擦角 ϕ_b の和で表される。垂直応力がある応力レベル σ_a より大きくなると、歯形のせん断破壊が生じ、粘着力 c と残留摩擦角 ϕ_r の和でせん断強度は表される。

c) Ladanyi-Archambaultの式：不連続面の滑りとダイレイタンシーによる抵抗、および表面凹凸のせん断破壊による抵抗を考慮した式の基準を提案している。

$$\tau = \frac{\sigma(1 - a_s)(\nu + \tan \phi_b) + a_s \tau_0}{1 - (1 - a_s)\nu \tan \phi_b} \quad (3)$$

ここで、 a_s は表面の凹凸がせん断破壊される割合、 ν はダイレイタンシー率($\nu = \tan i$)、 τ_0 は岩石のせん断強度である。

d) Bartonの式：数多くの不連続面レプリカのせん断試験から次式を提案している。

$$\tau = \sigma \tan \left\{ JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma} \right) + \phi_b \right\} \quad (4)$$

ここで、JRCは不連続面の粗さ係数(0～20)、JCSは不連続面の壁面の一軸圧縮強度である。

3. 平面すべり破壊に対するせん断強度式の適用

まず、図-1の岩盤斜面の一番右下の点を通るすべり面を仮定し、その角度を変えた時の安全率の変化をみた。岩盤斜面は安山岩から成るとしている。物性値は表-1の通りである。なお、水圧は考慮に入れてない。

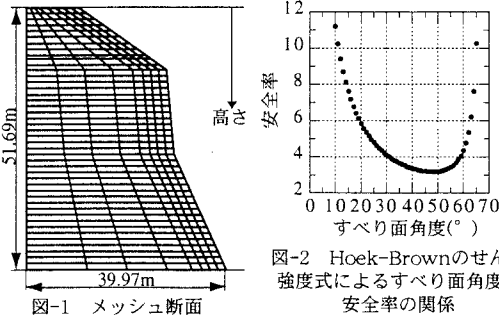
表-1 安山岩の物性値

ヤング率(MPa)	一軸圧縮強度(MPa)
3.893×10^4	232.5
粘着力c(MPa)	密度(N/m ³)
60.52	2.681×10^4
ポアソン比	内部摩擦角 ϕ
0.2	35°

a)のHoek-Brownが提案している30種類のせん断強度式から、質が"普通"、岩石材料が"安山岩"とし、

$$\tau_n = 0.295(\sigma_n + 0.0003)^{0.691} \quad (5)$$

をせん断強度式として使った。 τ_n と σ_n は無次元化したせん断応力と垂直応力、すなわち $\frac{\tau}{\sigma_c}$ と $\frac{\sigma}{\sigma_c}$ である。この時、すべり面角度と安全率の関係は図-2 のようになった。これより、すべり面の角度が 48° の時、極小安全率3.17をとることがわかる。



b) の式を用いた場合、図-3 の黒のプロットのようにすべり面角度が増すにつれて安全率は単調減少を呈した。これはもとの式が「不連続面」に対するせん断強度を表しているためで、実際の岩盤斜面が上から下まで完全に切れた状態にあるとは考えがたい。ゆえに粘着項を加えて岩盤のせん断強度式として使うことを考える。粘着項としては、「岩盤」のせん断強度式として上で使った(5)式において $\sigma=0$ のときの切片 (0.252MPa) を使うことにした。この項を加えたせん断強度式を用いた場合のすべり面角度と安全率の関係が図-3 の白プロットである。粘着項を入れたことによって安全率が極小値をとっていることが分かる。c)、d) においても b) と同様の振る舞いが見られたが、ここでは省略する。

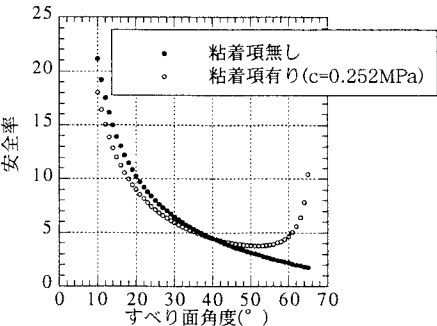


図-3 Pattonのせん断強度式に粘着項を加えた時と加えない時のすべり面角度と安全率の関係

こうして断面一番右下を通るすべり面を仮定した時の、せん断強度式ごとの極小安全率をまとめた。(表-2)なお、Bartonの結果はJRC=10としたものである。

表-2 各せん断強度式ごとの極小安全率

Patton	Ladanyi-Archambault
3.78	5.11
Barton	Hoek-Brown
3.43	3.17

4. 最小安全率の算定

岩盤のせん断強度式として知られるHoek-Brownの式を正解として平面すべりを想定し、斜面上のすべての節点を通る、様々な角度のすべり面に対して安全率を求めた。(図-4)この計算により、高さが28.82m～51.69mにあたる斜面上ではどこでもほぼ同じような安全率(3.17～3.98)をもち、中でも斜面の一番下の点を通る、すべり面の角度が 48° の平面で最もすべりが起こりやすいことがわかった。

もっとも低い安全率でも3を越えているので、本来ならば支保工が必要なしと判断されかねないところだが、今回はロックボルト工を施した時と施さない時の均質化法による安全率を比較・検討するためにあえて現状の安全率の1.2倍以上になるよう、ロックボルトを高さ28.82m～51.69mの範囲に、斜面に対して垂直に入れることにした。ロックボルト工に対する支保効果の比較・検討は講演当日行います。

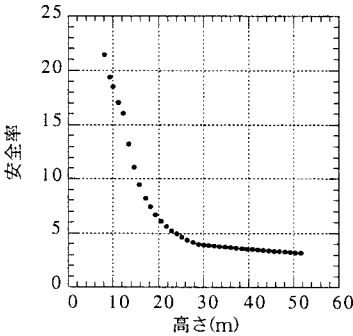


図-4 仮定するすべり面下端から岩盤斜面の上端までの高さの極小安全率の関係

5. 考察

図-1のメッシュ断面に対し、均質化法に基づく安定解析を実施した結果、荷重係数が3.14と求まった。これは表-2を見て分かるように岩盤のせん断強度を表すHoek-Brownの式によるものと非常に近い値となり、この安定解析システムの有用性がうかがえる。

参考文献

1) Evert Hoek・John Bray : Rock Slope Engineering, The Institution of Mining and Metallurgy, London 小野寺透, 吉中龍之進 訳