

Rock instability and risk analyses in open stope mine design  
 オープンストープ採鉱法における岩盤の不安定性とリスク分析

評価の段階: リスク分析、リスクアセスメント、リスクマネジメント

キーワード: Risk, Mining, Stability, Design, Empirical

概要

本論文では, Figure 1 に示すような採掘切羽の幾何学及び岩盤特性, さらには RQD, ジョイント特性などに基づく, Figure 2 に示すようなオープンストープ採掘切羽の安定性の評価方法を紹介した上で, 切羽の大きさや切羽が不安定になることによる様々な経済的効果を考慮したリスク分析を行い, 期待利益が最大化される切羽設計をするための指針を示している.

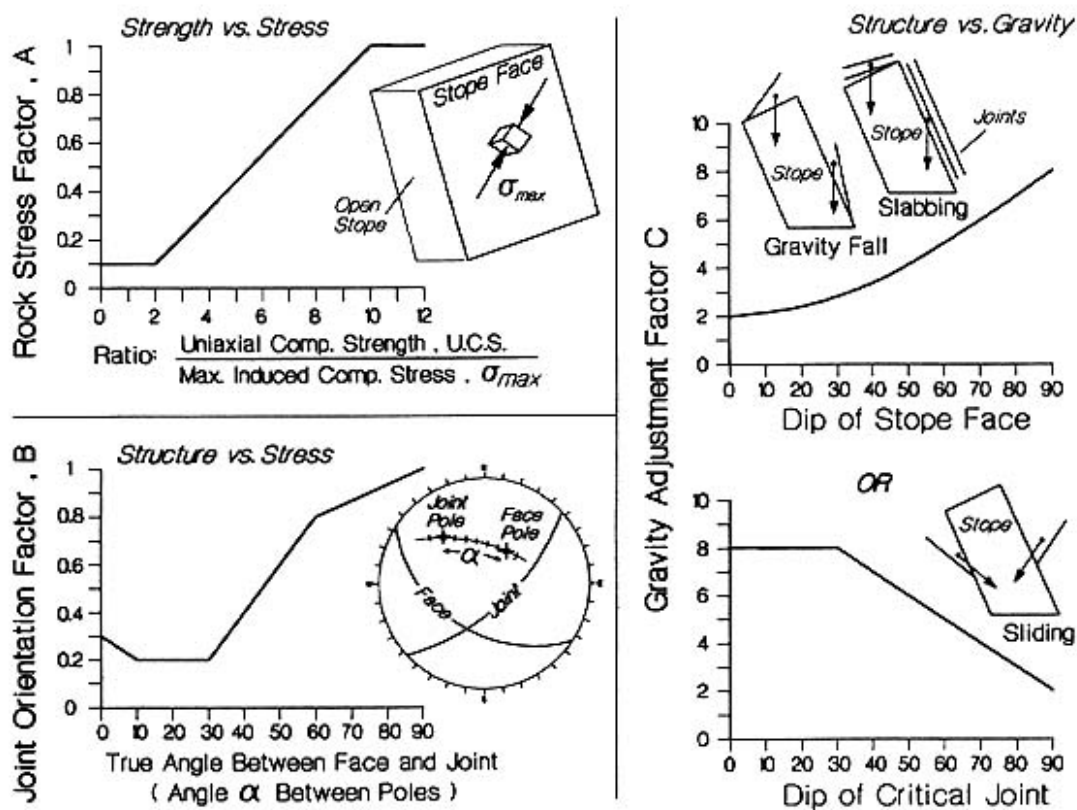
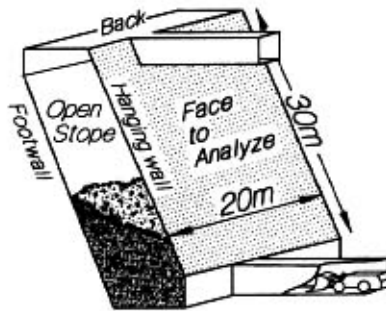


Figure 1 Input parameters for the modified stability graph method.

オープンストープ切羽の安定性評価には, Mathews ら(1981)により開発され, Potvin(1988)により硬岩の採掘現場に適合するよう改良された Stability graph method を用いている.

Example  
Input Data

RQD	80
$J_n$	9
$J_r$	1
$J_a$	1
A	0.5
B	0.5
C	5



$$N' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times A \times B \times C$$

Example :  
 $N' = 11$

$$HR = \frac{\text{Area}}{\text{Perimeter}} = \frac{20 \times 30}{40 + 60} = 6 \text{ m}$$

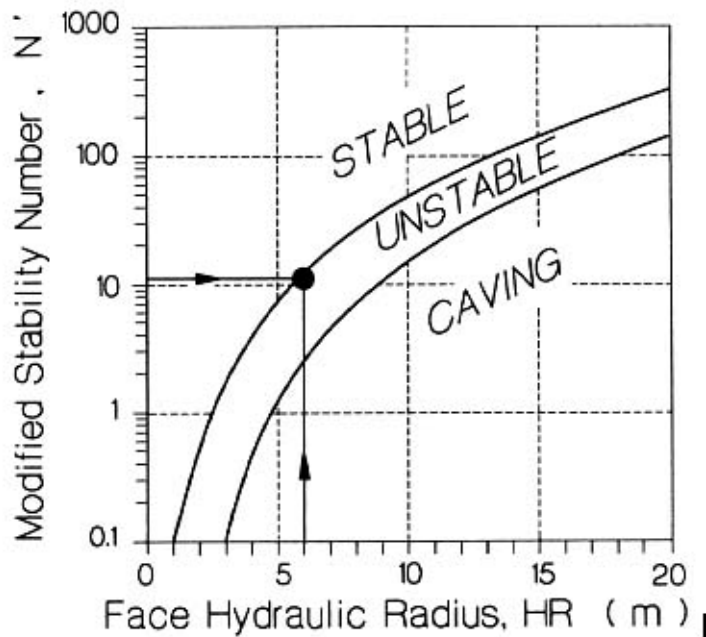


Figure 2 Example of stability assessment using the modified stability graph.

これは、

$$N' = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot A \cdot B \cdot C \quad (1)$$

RQD : rock quality designation (Deere et al. 1967)

$J_n$  : Barton の rock tunneling quality index  $Q$  におけるジョイントセット数

$J_r$  : joint roughness number

$J_a$  : 動力学的にすべる可能性のあるジョイントセットのジョイント風化指数

$A, B, C$  : Figure 1 により評価される係数

により、修正安定指数(modified stability number)  $N'$  を求め、Figure 2 により、それぞれの切羽の「切羽面積 / 切羽周長」で定義される水力半径(hydraulic radius)に応じた安定性の評価をするものである。

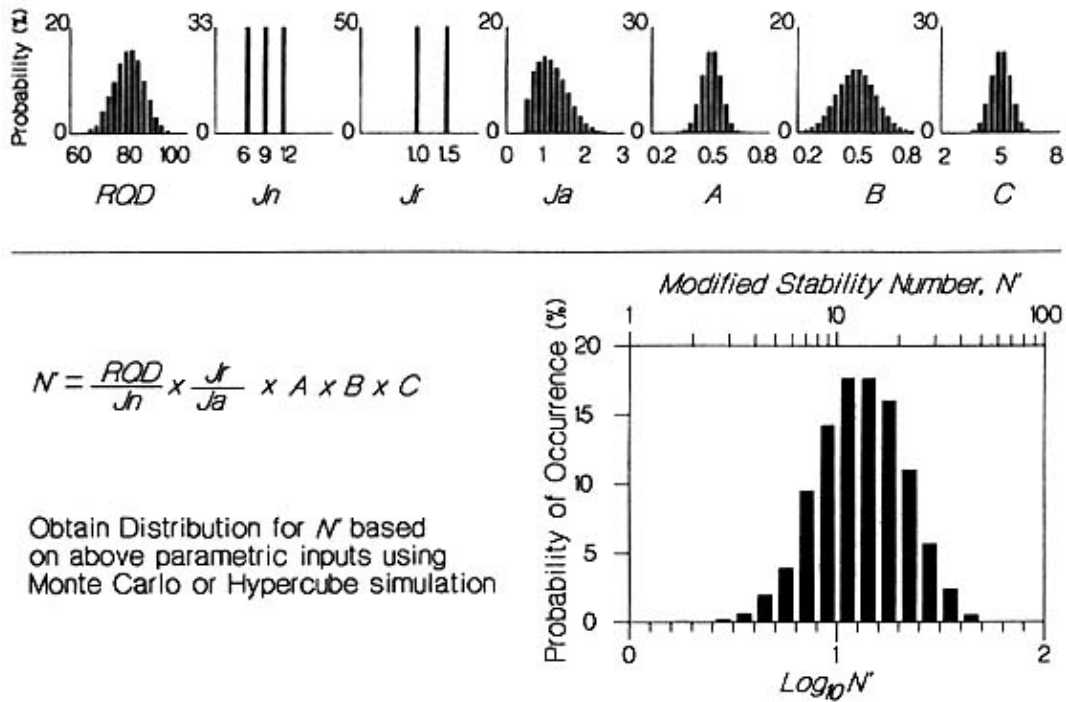


Figure 3 Example of probabilistic simulation for  $N'$  incorporating input variabilities.

Input Parameter Distributions (Example)

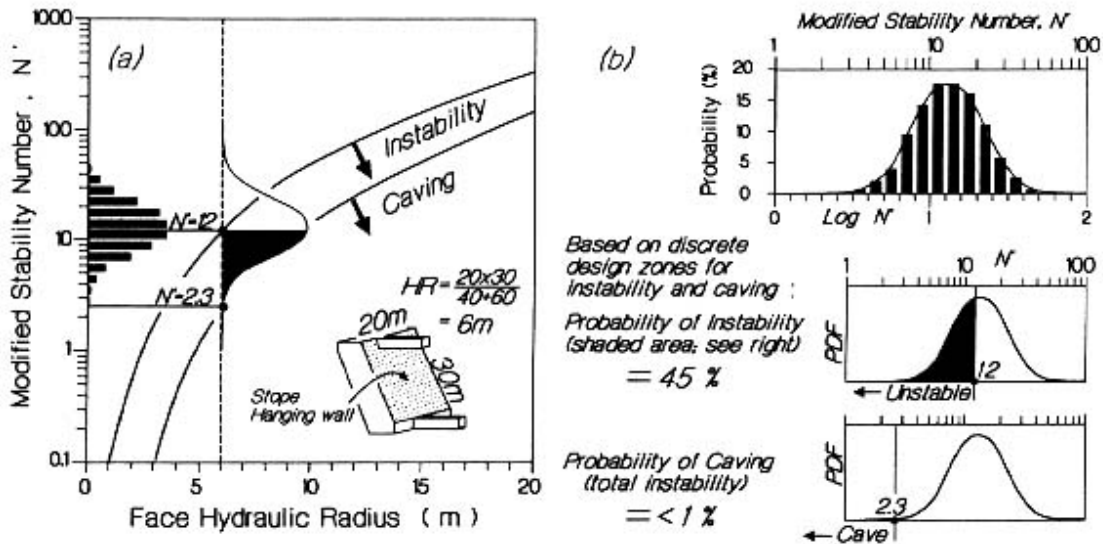


Figure 4 Estimation of instability and caving probabilities based on discrete design zones.

また、Figure 3 に示すような個々の入力データの確率分布を定義し、Latin hyper cube 法（入力変数をランダムに選ぶモンテカルロ法より効率がいい）を用いて、入力データのばらつきに対する修正安定指数の感度を評価することを提案している。これによって得られた修正安定指数の確率分布を、Figure 4 に

示すように改良安定性グラフに当てはめ、盤返りなどを伴う不安定性(instability)や採掘空洞の崩壊(caving)の確率を推定する。

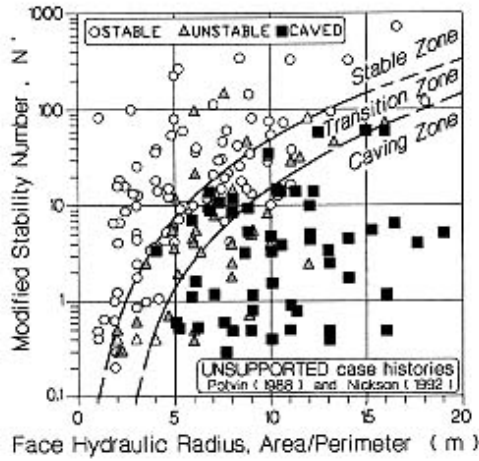


Figure 5 Calibration data base (data from Potvin 1988 Nickson 1992).

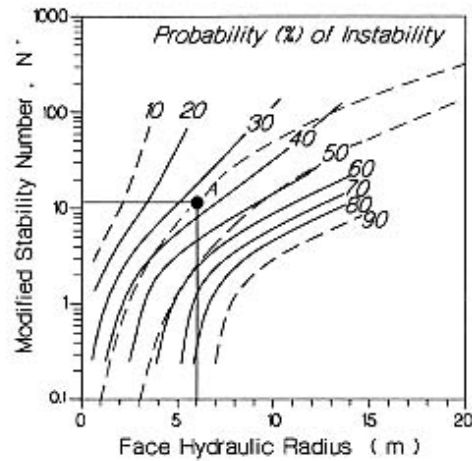


Figure 7 Isoprobability contours for all forms of instability.

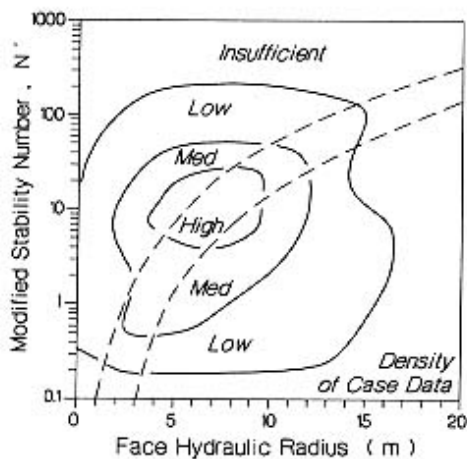


Figure 6 Relative local density of calibration data point with respect to ( $N'$ ,  $HR$ ).

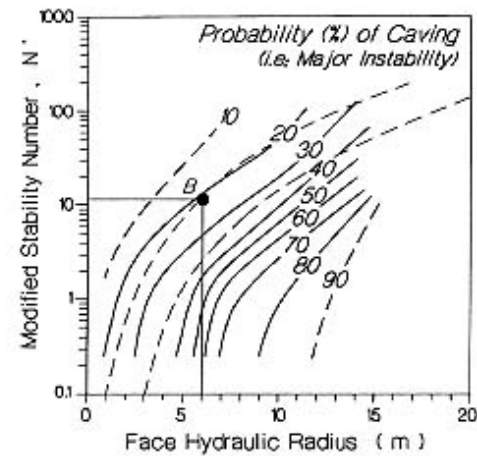


Figure 8 Isoprobability contours for major instability or caving.

さらに、Figure 5 に示す、Potvin (1988)及び Nickson(1992)の調査した 189 個の事例から、Figure 7 及び Figure 8 に示すように、改良安定性グラフ中のそれぞれの領域における不安定性及び崩壊の確率及び、Figure 6 に示すように、そのデータ数に基づく信頼性を求め、Figure 9 に示すように、それぞれの水力半径における個々の事象の確率を求める。水力半径が大きくなるに伴い Figure 10 に示すように、それぞれの事象が起きる確率も増大する。

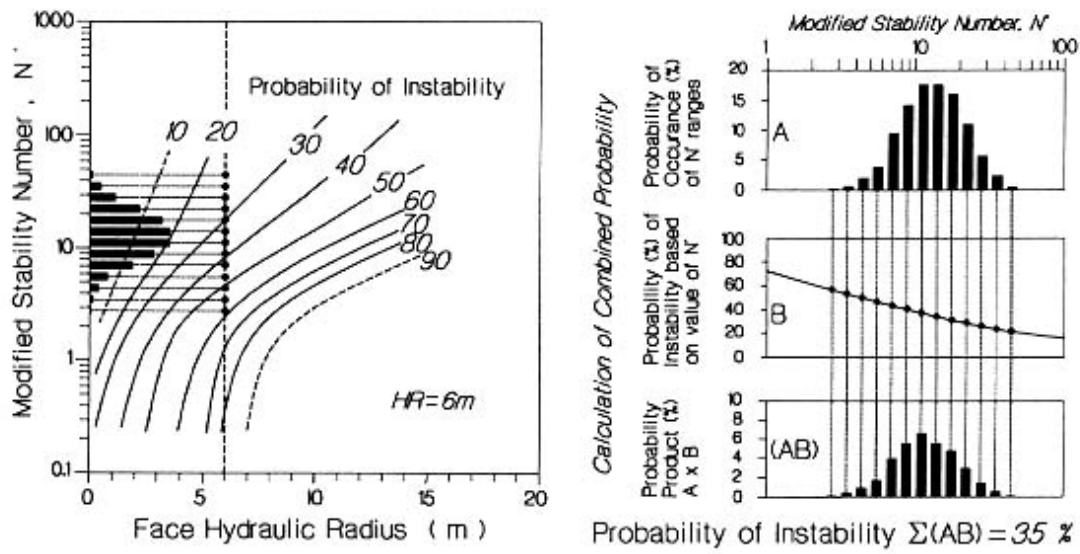


Figure 9 Combined analysis of input variability and empirical calibration uncertainty.

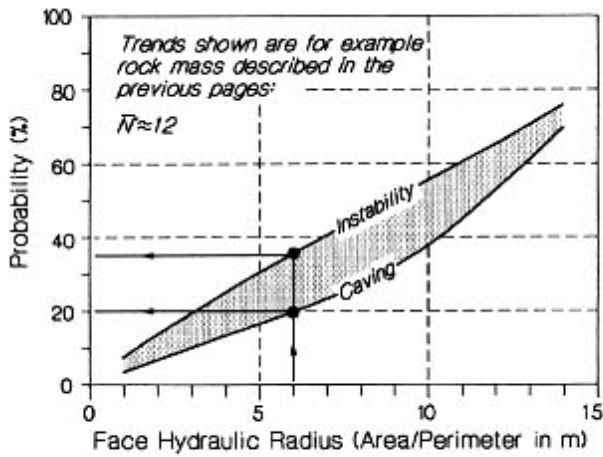


Figure 10 Increasing risk with increasing stope dimensions.

盤返りや採掘空洞の崩壊が起きる確率とそれらに伴うコストから、それぞれの水力半径における期待損失を求め、これを、それぞれの水力半径における期待利益から差し引くことにより、Figure 11 に示すように、それぞれの水力半径における正味期待利益(net gain)を求め、それが最大値をとる水力半径を、当該切羽における最適な水力半径と考えることができる。

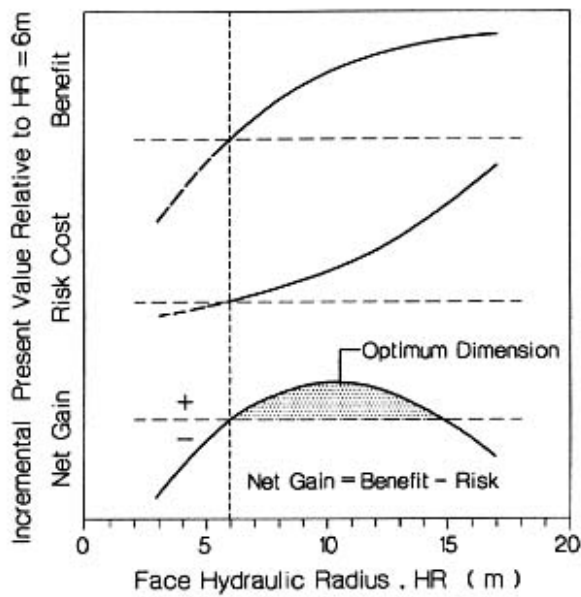


Figure 11 Schematic principle of risk cost-benefit analysis.

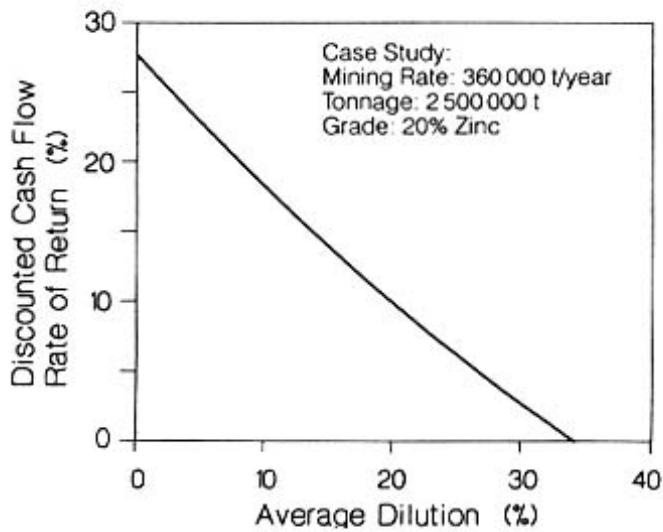


Figure 12 Typical economic consequence of dilution (based on Bawden et al. 1989).

ズリ混入がもたらすコストの一例として，Figure 12 に Bawden ら(1989)が計算した例を示している．このケースでは，ズリ混入率が 35%に達するとプロジェクトの価値が無くなることを示している．改良安定性グラフにおいて，不安定性(instability)とは 2～5%の追加的ズリ混入率を意味し，崩壊(caving)とは 15～25%以上の追加的なズリ混入率を意味する．

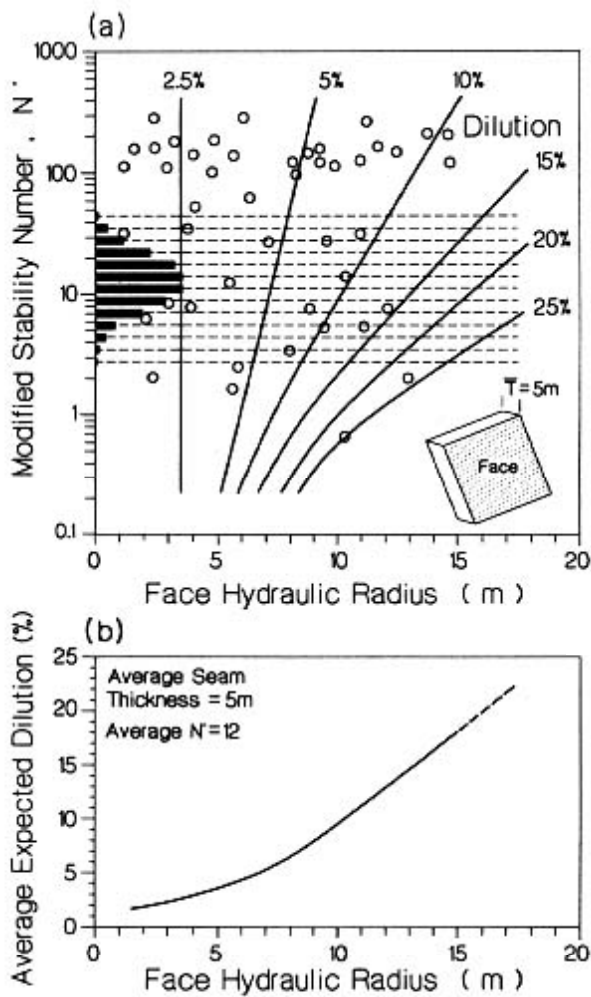


Figure 13 (a) Average dilution for a Canadian mine (based on Pakalnis et al. 1995). (b) Estimated dilution risk.

Figure 13(a)は、Pakalnisら(1995)が、実際のズリ混入率のデータを改良安定性グラフ上にプロットしたものである。これと、修正安定指数の確率分布とから、Figure 13(b)に示すように、それぞれの水力半径における期待ズリ混入率が求められる。

ズリ混入率を減少させる手段として、切羽の水力半径の低減以外に Figure 14 に示すように、ケーブルボルトにより支保をすることが考えられる。この場合、単位出鉱量あたりの支保コストと、ズリ混入の減少に伴う単位出鉱量あたりの追加的な利益の大小関係により、支保の有効性を評価することになる。

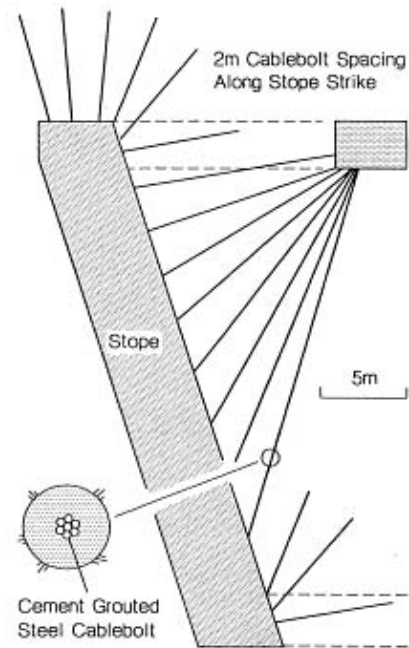


Figure 14 Typical cablebolt support system for an open stope mine.