

鉱山における斜面の安定問題

—石灰石露天掘斜面を中心に—

京都大学工学部 斎藤 敏 明

1. はじめに

一般に大規模な露天掘鉱山においては、採掘斜面の傾斜角によって可採鉱量や土量などが大きな影響を受けるため、斜面の安定性を確保できる限界の斜面角度を常に追求する必要がある。わが国の露天掘鉱山で大規模に行われ、長大な岩盤斜面を有しているのは石灰石鉱山が主であるので、ここでは石灰石露天掘斜面の安定問題を中心に述べる。わが国における石灰石の露天掘は山岳斜面で行われている場合が多く、その上部より下部へ採掘が進展するに伴い斜面高さが増大していく傾向にあり、鉱量を確保しつつ、この斜面を長期にわたって安定に保つための斜面設計が重要な課題となっている。

石灰石の採掘はベンチカットによって行われているが、斜面の安定性が最も問題となるのは最終的に残される斜面である。図-1は石灰石露天掘の一般的な模式図であるが最終斜面は図に示すように、輝緑凝灰岩や頁岩などの下盤のうえに石灰石を一部残した石灰石残壁とするのが普通である。これは、下盤の強度が一般的に小さいため、強度が比較的大きい石灰石によって斜面の安定性を確保することや、風化によって強度が低下しやすい下盤を保護することなどを目的としている。したがって、石灰石露天掘斜面の設計はこの石灰石残壁の厚さや斜面傾斜をどのように設計するかということになる。

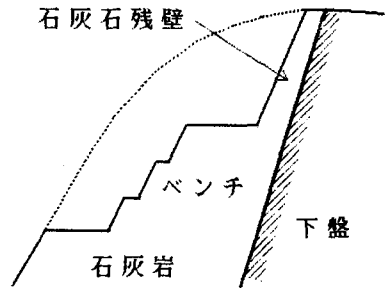


図-1 石灰石露天掘斜面

2. 石灰石露天掘斜面の安定性評価

岩盤斜面の崩壊形式は一般に、円弧すべり、平面崩壊、くさび崩壊およびトッピングの4つに大別され、その安定性は限界平衡解析による安全率によって評価されている。したがって、岩盤斜面の安定性を評価する場合これらの崩壊形式すべてについて検討を行う必要があるが、岩盤中の弱面の諸条件によって起こり得る崩壊形式は限定されることになる。石灰石の場合、一般に岩盤中に含まれる弱面を大きく小規模弱面群と大規模弱面群と仮に呼ぶ2つのグループに分けて考えることができると思われる。小規模弱面群と称するものは、一つの弱面の連続性はあまりないが、多くの弱面が岩盤全体にほぼ一様に分布し、充填物などを含まないような弱面群を指し、石灰石には普通に見られる。大規模弱面は断層などのようにかなりの連続性があり、一般に充填物を含むような弱面を言い、そのせん断強度は小規模弱面より小さいものと考えられる。

さて、小規模弱面群によって崩壊が発生する場合を考えると、多くの小弱面が連なるかたちで滑り面が形成されるものと考えられる。このとき、非常に細かな、方向性のない弱面群であれば円弧滑りの形式が最も発生しやすいものとなるが、小規模ながらある程度の連続性や方向性を有する弱面群の場合は平面崩壊に近い形式となるものと考えられる。石灰石の場合、この弱面群に対しては平面崩壊について検討するのが妥当であると思われる。一方、大規模弱面はその位置や方向を斜面上で測定することができるので、弱面の走向、傾斜を確定した解析が可能となり、この場合の崩壊形式はくさび崩壊が一般的となる。以上より、石灰石露天掘斜面の安定性は、小規模弱面群による平面崩壊と大規模弱面群によるくさび崩壊の検

討が中心となるが、2種の弱面群によって形成される滑り面の可能性などについても検討する必要がある。

3. 小規模弱面群による平面崩壊

この弱面群のせん断強度は、表面の風化はあまりないと考えられるので、その岩質のせん断試験や3軸圧縮試験の残留強度から求められる c 、 ϕ を用いることができよう。平面崩壊は、石灰岩と下盤の弱面のせん断強度の違いなどによって、さらに次のような3つの形式に分けられる。

(a) 石灰岩と下盤の強度が同程度の場合

この場合には、単一の岩盤からなる斜面として平面崩壊に対する限界平衡解析が適用できる。

(b) 下盤強度が小さい場合

下盤の強度が石灰岩に比べかなり小さい場合には、強度の違いを考慮できるJanbuの非円形滑り面法のような手法が有効となる。また、この種の崩壊例の観察から、下盤の滑りの開始によりその不釣り合い力が石灰石残壁に作用し、この残壁を变形させ、ついでこの残壁が崩壊するという崩壊過程も予想される。

(c) 石灰岩と下盤の境界が滑り面となる場合

下盤のせん断強度がある程度大きい場合、(a)で述べた平面崩壊の安全率より、石灰石と下盤の境界と石灰岩の小規模弱面で形成される滑り面による平面崩壊の安全率のほうが低くなる場合がある。境界面は大規模弱面の一種であるので、この形式は2種の弱面群によって形成される滑り面とも言える。また、斜面と走向がほぼ同じ、別の大規模弱面がある場合、これと境界面とで複合的な平面崩壊を起す可能性も報告されている。

4. 大規模弱面群によるくさび崩壊

大規模弱面のせん断強度は、小規模弱面の10~100分の1程度と見積られる。しかし、これを直接求めることはきわめて難しく、崩壊例調査データの逆解析による推定が最も有効となる。また、大規模弱面は普通、石灰岩と下盤をともに貫くように存在し、その強度も充填物などに大きく依存するため石灰岩部と下盤部で大きく異なることはない。したがって、大規模弱面群によるくさび崩壊の検討では下盤部と石灰岩部を区別する必要はないと考えられる。強度が同じであれば平面崩壊よりくさび崩壊の方が安全率は普通高くなるが、大規模弱面のせん断強度が小さいため、これらの弱面によるくさび崩壊が最も安全率が低くなる場合がある。くさび崩壊の限界平衡解析は、測定された多くの弱面のデータから、形成されるくさびが移動可能となるような2面を選び、くさび状岩塊について安全率を計算する。くさび崩壊としての安全率は、あらゆる面の組合せを検討し、その中で最低の安全率をとることになる。

5. 安定性評価

露天掘斜面としての安定性は、各々の崩壊形式について最低の安全率を算出し、さらにこれらの中での最低の安全率をもって評価しなければならない。また、その安全率を示す崩壊形式が最も発生する危険のある崩壊形式となる。斜面の安定性を確保するためには、この求められた斜面の安全率が1.2~1.3以上は必要であるとされている。石灰石残壁の設計にあたっては、この安全率が確保できるようなものにしなければならない。なお、安全率に影響を及ぼす因子のなかで特に留意すべきなのは間隙水圧の影響である。斜面の崩壊が発生するのは集中豪雨の後など間隙水圧が高くなった場合が多いことから考えても、考えられる最高の間隙水圧を設定して安全率を求めるべきである。一般に石灰石の斜面では透水性がかなり良好であるため間隙水圧はそれほど高くないと言われているが、斜面での湧水地点や流量などのデータに基づいた浸透流解析によって確かめるべきであろう。