

## Lecture

## 「安全率を考える」第7回

## Returning to the fundamentals of safety factor No.7

## 7. 道路のり面と安全率

## Road slope and its safety factor

キーワード：安全率，道路のり面，限界状態，性能指標，時間

Key words : Safety factor, Road slope, Limit states, Performance index, Time

沖村 孝 Takasi OKIMURA / 神戸大学 Kobe University

吉田信之 Nobuyuki YOSHIDA / 神戸大学 Kobe University

## 7.1 はじめに

道路を車で走行していると少なからず人工的に構築された斜面（のり面）を通る。高さ数メートルのものもあれば数十メートルの壮大なりの面もある。郊外を通る自動車専用道路ではあたかも道路線形が自然環境と融和した美しい風景に、また十数メートル高の盛土区間を運転しながら眼下の美しい景色に見とれることも少なくない。

さて、唐突ではあるが、今皆さんはドライブ中でちょうどりの面にさしかかったとしよう。皆さんは、そのときのりの面が崩れて災害に出会すのではないかとビクビクしながら運転しているだろうか。あるいは、盛土区間を走行中なら、のり面が崩れて車もろとも崩落するのではないかと心配しているだろうか。多分答えは否である。のり面が崩れてくるだろうといった心配など利用者の心に微塵もない。

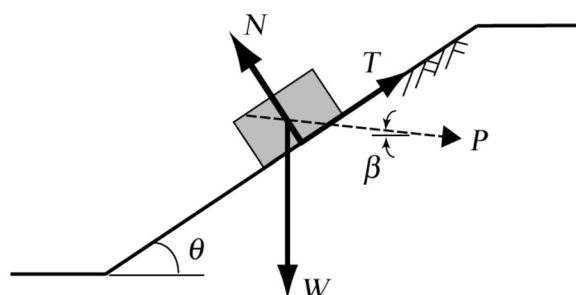
道路に課せられた機能の一つは、安全にかつ安心して通行できることである。したがって、道路空間を構成するのり面にとっては安定で崩れないことが絶対条件であり、これはのり面に対して最優先に要求されるべき性能である。

のり面（広義に斜面）で“安全”“安定”といえば、直ぐに頭に浮かぶのは安定解析と安全率である。高専や大学の講義では比較的簡単なものから複雑なものまで様々な斜面の安定解析法を勉強する。しかし、実際の斜面や対策工の設計との関連については、うん？と首をかしげた学生も少なくないのではないだろうか。社会基盤のライフサイクルコストやアセットマネジメントの重要性が叫ばれる昨今、使い慣れた安全率に見切りをつけず新たな利用法を模索することも必要である。

## 7.2 道路のり面の安全率

斜面における安全率 $F_s$ の定義は、抵抗モーメントと滑動モーメントの比あるいは抵抗力と滑動力の比で表す場合が多い。後者は、せん断抵抗力とせん断滑動力の比でもある。

さて、斜面の安定解析は、既設斜面が崩壊した場合の



図－1 斜面の安定解析（極限平衡法の考え方）

原因究明，対策工の設計や新設の土工斜面の設計を行なう場合に行われる。通常，極限平衡法を用いるのが一般的である。原理は単純明快である。ここで，図－1のような斜度 $\theta$ の斜面上に自重 $W$ の剛体ブロックが静止している状況を考えよう。現実問題に照らし合わせると，剛体ブロックはのり面を含む地山であり剛体ブロックと斜面との境界線は潜在すべり面ということになる。さて，この斜度 $\theta$ を少しずつ大きくするか，剛体ブロックを上方から下方向へ少しずつ押ししていくと，あるとき突然剛体ブロックが動き始めることになる。これを防ぐために対策法として，例えばグラウンドアンカー工（水平面から角度 $\beta$ で施工）を検討した場合，図中の力 $P$ が導入されることになる。この場合，安全率 $F_s$ を表す式は次のように誘導できる。剛体ブロックに作用する力のつり合いから，

$$N - W \cos \theta - P \sin(\theta + \beta) = 0 \quad \cdots \cdots (1)$$

$$T - W \sin \theta + P \cos(\theta + \beta) = 0 \quad \cdots \cdots (2)$$

である。剛体ブロックと斜面の接触面の長さを $L$ とし，接触面でクーロン則（粘着力 $c$ ，内部摩擦角 $\phi$ ）を適用すると，せん断抵抗力 $S$ は次式となる。

$$S = cL + N \tan \phi \quad \cdots \cdots (3)$$

したがって，安全率 $F_s$ が次のように求まる。

$$F_s = \frac{S}{T} = \frac{cL + \{W \cos \theta + P \sin(\theta + \beta)\} \tan \phi}{W \sin \theta - P \cos(\theta + \beta)} \dots\dots(4)$$

安全率 $F_s$ が1.0ということは、剛体ブロックに作用している外力が釣り合っており、剛体ブロックがまさに滑り出そうとする極限状態にあるということである。言い換えれば、これより小さくなると剛体ブロックがすべり始めるという限界状態でもある。

ところで、我が国の実践では、式(4)中の分子第二項の $P \sin(\theta + \beta) \tan \phi$ を剛体ブロックを斜面に向かって押さえつける効果（締め付け効果）として見なし、また分母第二項の $P \cos(\theta + \beta)$ をブロックを斜面上方に押し上げる効果（引き止め効果）と見なす場合が多い。地すべり関連事業における対策工法の設計を行う場合は式(4)と同じであるが、砂防事業や道路事業では補強材の抑止効果（引き止め効果）を抵抗力に加えた次式を用いることが多い。

$$F_s = \frac{S}{T} = \frac{cL + \{W \cos \theta + P \sin(\theta + \beta)\} \tan \phi}{W \sin \theta + P \cos(\theta + \beta)} \dots\dots(5)$$

また、鉄筋挿入工の場合は、積極的な引張り荷重を与えないが、すべり面に変形が生じることによって、補強材に引張り力が作用するとしてアンカー工と同様な抑止効果が検討される<sup>1)</sup>。

さて、話を安全率に戻そう。式(4)をじっくり見ると安全率に影響を及ぼす主な因子は、剛体ブロック（地山）の単位体積重量 $\gamma$ 、のり面の傾斜角 $\theta$ 、地山のせん断強度定数 $c$ 、 $\phi$ およびグラウンドアンカー工による導入力 $P$ である。せん断強度定数の減少、導入力の減少、傾斜角の増加によって安全率も小さくなるということである。安全率の値については、道路土工ののり面工・斜面安定工指針<sup>2)</sup>では、せん断強度定数を逆計算するとき用いる安全率（現況安全率）として地すべり活動中の斜面については0.95～1.0を、不滑動の場合は1.05～1.15を明示しており、また対策工を施す場合の目安になる計画安全率として1.05～1.2を示している。また、NEXCO（旧：日本道路公団）でも現況安全率を活動中の場合に0.95～1.0、不滑動中では1.00～1.05を、また計画安全率として道路土工と同じ値を明示している。急傾斜地については計画安全率を1.20以上とする基準もある。いずれにしても、安全率の値については各関係機関が斜面の重要度などを加味して設定しているようである<sup>3)</sup>。

安全率は、斜面の安定を考える上で私たちにとって最も身近な指標であることに疑いの余地は無いであろう。それでは、課題は？

### 7.3 安全率の限界と期待

道路空間を形成するのり面に対して最優先で要求される性能は、7.1でも触れたようにのり面が安定していて

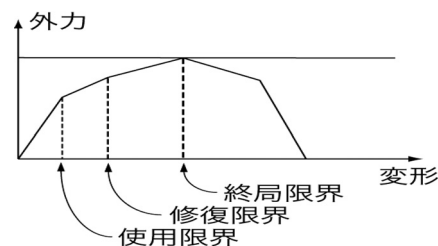


図-2 3つの限界状態

崩れないことであり、安全率はその性能指標である。

安全率は、7.2のはじめのところでも述べたが、抵抗項と滑動項の比として計算されるが、両項に潜在する様々な不確定要素に対してえいやと一つの値で表した余裕である。したがって、必ずしも合理的な安定性評価指標になっているとは言えない。各項に含まれる不確定要因の同定とそれらの重み付け（寄与率の決定）が出来てはじめて合理的な評価へとつながる。限界状態設計法はまさしくこの方向を目指している（例えば、4) 5) 6)）。

さて、地盤調査により地山条件が把握できる場合、前節で述べたように特定ののり面に対して安全率を算出することは可能である。また、崩れて初めて安全率は1.0以下になったと確認される。崩壊後の対策工の設計では、現況安全率から計画安全率まで上げるように工法を取捨選択する。

一方、維持管理の現場では、日常や定期的になされる点検で変状の有無、その許容の可否にもとづいて対策工が施されている。ここには安全率が介在することは全くない。極限平衡法で安定解析を行い安全率云々だけでは、すなわち図-1の剛体ブロックの移動量（変形量）が分からなければ維持管理に対して無力である。変形（変位）に関する何らかの指標が必要ということである。言い換えれば、のり面の設計から維持管理までを見据えて斜面の安全性を評価するためには、安全率という強度に関する性能指標と変形（変位）に関する性能指標（例えば、のり肩、のり尻における変位量やはらみだし量、あるいは対策工のクラック開口幅、等々）の両方が必要ということである。

ところで、限界状態設計法では、いくつかの限界状態が定義されている。ISO2394<sup>7)</sup>やEurocode 7<sup>5)</sup>では終局限界と使用限界の2つの状態を、また日本<sup>8)</sup>では図-2に示すような終局限界、修復限界、使用限界という3つの限界状態を定義している。のり面あるいは対策工の変形について言えば、現在、各限界状態に対応する具体的な値が基準として設定されているわけではない。将来的には現地調査、変形解析によるパラメトリックスタディとケーススタディを繰り返して何らかの典型的な値が典型的な地山条件、のり面構造、対策工毎に設定される可能性はあろう。ちなみに、宅地ではあるが擁壁の老朽化判定マニュアル案<sup>9)</sup>では、変状の程度によって小さい方から使用限界、損傷限界、終局限界状態に分類している。

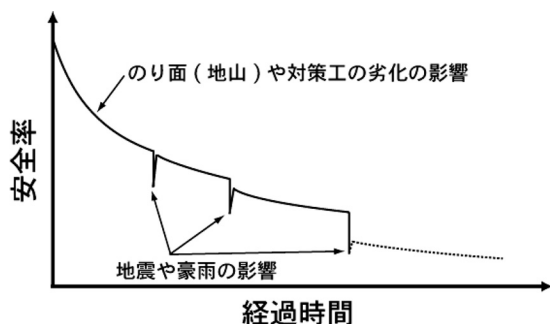
目安値として、例えば鉄筋コンクリート擁壁のコーナ部の目地の開きについては、5mm未満の小さな開きの場合を使用限界、5mm～20mm未満の開きが拡大している場合を損傷限界、20mm以上の開きがさらに拡大し擁壁にずれが生じている場合を終局限界としている。とにもかくにも、変形量と限界状態との関係が明らかになれば、のり面を合理的に維持管理することができるであろう。

しかしながら、現在の実務では、のり面が大規模あるいは崩壊時の影響が社会的経済的に甚大である等の場合を除いて、のり面の変形解析を実施することはほとんどない。のり面の大小に関わらず常に行うのは、極限平衡法による安定解析である。したがって、初期安全率や終局限界状態安全率は設定可能であることを考えると、使用限界および修復限界状態に対応するような安全率が何らかの形で設定できれば、安全率の利用に新たな展開が期待できるのではないだろうか。

#### 7.4 安全率と時間

新設であろうと既設であろうとのり面を合理的に維持管理していくためには、のり面を放置して手遅れにならないよう適切な時期に適切な箇所に適切な補修や補強を施していくことが大事である。ライフサイクルコストやアセットマネジメントの基本である。

ところで、万物は劣化していく。ここで劣化を原因に係わらず強度や剛性の低下と漠然と定義しておく。道路空間を構築するのり面も然りである。のり面の主役である地山は風化によって徐々に劣化し、切土や盛土といった応力変化や地震等のイベントによって劣化が促進されるであろう。わき役の対策工は、吹付工のようなコンクリート製では中性化や塩害、アルカリ骨材反応などにより劣化するであろうし、主な構造部材が鋼材であるロックボルト工では補強材の腐食による劣化が起こるであろう<sup>1)</sup>。なお、のり面の主役にしてもわき役にしても対象毎に劣化の速度や程度は千差万別である。いずれにしても、これら劣化は地山のせん断強度定数や対策工による導入力の減少につながり、したがって7.2で言及したように安全率の低下となる。また、地震や豪雨のような突発的なイベントによっても安全率の低下が大なり小なり生ずると考えられる。ここで新たに登場する変数は「時間」である。前出の宅地擁壁老朽化判定マニュアル(案)でも明示はないが、擁壁の変状の程度の小から大への移



図－3 安全率の経時変化(模式図)

表－1 安定解析の初期条件

| W<br>(kN) | L<br>(m) | θ<br>(deg.) | c<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | φ<br>(deg.) |
|-----------|----------|-------------|---------------------------|-------------|
| 20        | 1        | 60          | 100                       | 40          |

行には時間の重要性が暗示されている。

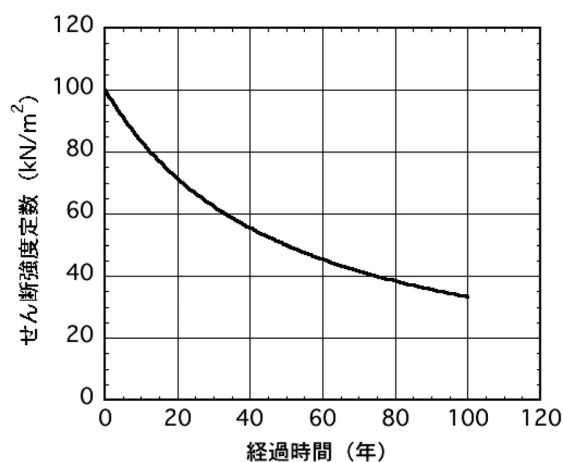
以上のこと踏まえてのり面の安全率の経時変化を模式的に表すと図－3のようになる<sup>1)</sup>。

そこで、のり面の安全性の性能指標として安全率を縦軸に取り、時間を横軸にして、それらの関係を具体的に図－1を例に考えてみよう。剛体ブロックの自重W、剛体ブロック長L、のり面勾配θ、地山のせん断強度定数c、φは、それぞれ表－1に示す通りと仮定する。また、万が一の場合は対策工として水平面から下方へ角度βでグラウンドアンカー工(導入力P(kN))を施工するものとする。さて、この場合の安全率を式(4)を用いて計算すると1.64となり、のり面は安定な状態にあると言える。

今、地山が風化によって劣化し、例えばせん断強度定数cのみが次式のような逆双曲線に従って減少すると仮定してみよう。

$$c_t = c_0 \left( 1 - \frac{t}{a + bt} \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $c_t$ は経過時間tにおけるせん断強度定数c、 $c_0$ は初期値である。また、a、bは劣化パラメータで、aは初期の劣化速度に、bは劣化の程度に強く影響する。 $c_0$ を表－1に示す100kN/m<sup>2</sup>とし、aとbを共に1とすると、図－4のようなせん断強度定数と時間の関係が得られる。これらを式(4)に代入して安全率を計算すると、図－5の実線が得られる。安全率は時間とともに低下し、約60年で限界状態(1.0)に至ることがわかる。そこで、安全率が1.05になるとき(50年経過時)にグラウンドアンカー工を計画安全率1.2になるように導入することにする。このとき必要な導入力は約12kNである。アンカー施工後も施工前と同じように地山劣化が進行していくと図－



図－4 せん断強度定数cと時間の関係

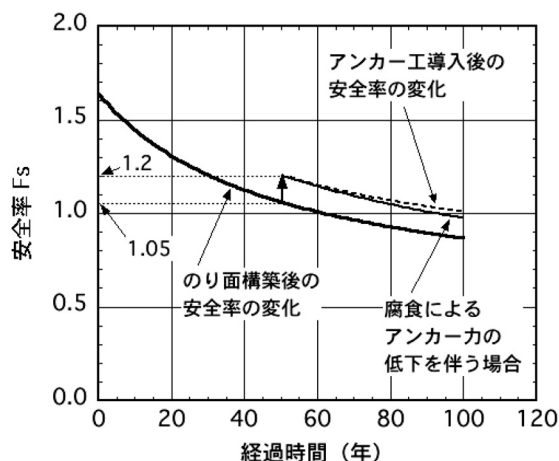


図-5 安全率と時間の関係

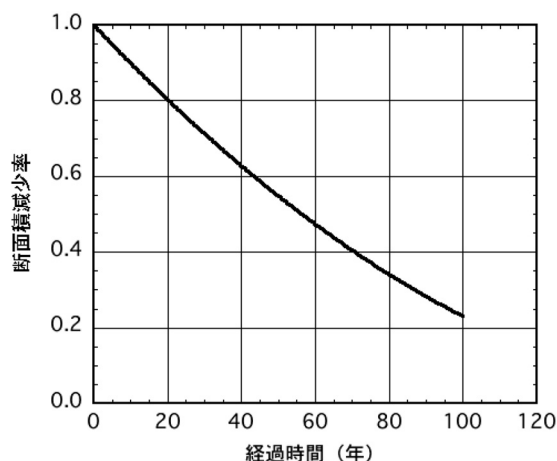


図-6 アンカー線断面積減少率の経時変化

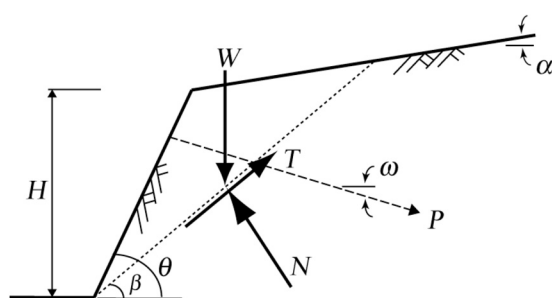


図-7 より現実的な安定解析の例

5中の破線が得られる。図から、この対策工を施すことによって、無対策の場合には60年程度でのり面崩壊が生ずるのを約100年まで延命できることがわかる。

ところで、導入したアンカー力が地山の風化や防食不十分によって緩和するとどうなるであろう。すなわち、対策工も劣化した場合である。ここでは、図-6に示すようにアンカー腐食が速度0.02mm/年で進行する場合のアンカーの断面積減少率に比例してアンカー力が低下していくと仮定して計算してみる<sup>1)</sup>。得られた安全率の経時変化を図-5中に実線で示している。腐食しない場合と比べて安全率の減少がわずかなではあるが速くなっており、のり面の寿命が約10年短くなることがわかる。この場合、先と同様に、安全率が1.05になるときにアンカーを再緊張するか増し打ちして計画安全率1.2まで上げることができれば、再び延命することができると推測できる。ここでは示さなかったが、図-7に示すようなもう少し現実的な場合でも全く同じように検討でき、さらにフック・ブラウン式のような非線形型破壊基準を用いても計算できる<sup>1)</sup>。

以上、ここでは非常に簡単な例ではあったが、安全率を性能指標として捉え、その時間変化を何がしかの方法で予測できれば安全率の新たな展開が期待できるのでは

ないだろうか。

### 7.5 おわりに

本章では、安全率の限界と新たな展開について、道路のり面を例にその復習も兼ねて検討してみた。紙数の制約上詳述できなかったが安全率に新たな展開を期待するためには、解明すべき難問が少なからず残されている。まず、設定主体は別として、各限界状態を規定する性能指標の明確化と定量化である。次に、解析に必要なパラメタ値の誘導である。現状ではのり面（地山）や対策工に関するデータが不足しており、大胆な仮定を設けざるをえない。今後機会があるごとに長期にわたる地道な地質調査や地盤調査が必要であることは言うまでもない。いかに省エネ（労力、費用）で必要な情報を得るか、現状を見据えながら一考しておく必要がある。

### 参考文献

- 1) 斜面防災研究委員会：第2編時間項を評価した新たな解析手法の提案，斜面防災研究委員会報告書，建設コンサルタンツ協会近畿支部，pp.47-95，2006.
- 2) 日本道路協会：道路土工-のり面工・斜面安定工指針，日本道路協会，pp.348-353，1999.
- 3) 澤孝平，渡辺康二，沖村孝，青木一男，佐野博昭：地盤工学，森北出版，pp.217-218，1999.
- 4) Canadian Geotechnical Society：Canadian Foundation Engineering Manual，pp.132-142，2006.
- 5) Orr, T. L. L. and Farrel, E. R.: Geotechnical Design to Eurocode 7, Springer-Verlag, 1999.
- 6) 神田 順：限界状態設計法のすすめ，建築技術，1993.
- 7) ISO: General Principles on Reliability for Structures, ISO 2394:1998, 1998.
- 8) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本，pp.3-9，2002.
- 9) 国土交通省：宅地擁壁老朽化判定マニュアル(案)，[http://www.mlit.go.jp/crd/city/plan/kaihatu\\_kyoka/takuchi\\_gaiyo/index.htm#01\\_5](http://www.mlit.go.jp/crd/city/plan/kaihatu_kyoka/takuchi_gaiyo/index.htm#01_5) (2008.04現在).

(原稿受付2008年4月30日，原稿受理2008年6月12日)