

Lecture

「安全率を考える」第10回

Returning to the fundamentals of safety factor No. 10

10. 地すべり分野における安全率に関する座談会

Round talk discussion on safety factor in the landslide

安全率に関する講座委員会* The members of lecture committee in safety factor

出席者（敬称略・50音順）

鵜飼 恵三（群馬大学 大学院工学研究科 教授）

奥園 誠之（高速道路技術センター）

釜井 俊孝（京都大学 防災研究所 教授）

土屋 智（静岡大学 農学部 教授）

司会：若井明彦（群馬大学 大学院工学研究科 准教授）

10.1 はじめに

このたび、安全率講座の一企画として「地すべり分野における安全率」と題して座談会を開催した。地すべり学会誌第1回から第8回までの周辺分野における安全率を参考にして、第9回に掲げたテーマに沿って、今日の社会環境の変化に伴い地すべりにおける安全率をどのように捉えていったらよいかを、地すべり分野に携わってきた経験豊富な学識経験者に、思うところを自由に発言していただいた。読者の皆さんに地すべり技術における安全率をどのように位置づけたらよいか、その方向性が少しでもみえれば幸いである。

若井：それでは始めさせていただきます。忌憚のないご意見を頂戴したいと思います。お集りの先生方はいずれもこの話題にご造詣の深い方ばかりですが、本日は「地すべりの安全率」を中心にした議論をさせて頂きたいと思えます。

10.2 安全率とは何か

若井：まず「安全率」とは何だろうというところから始めましょう。通常、地すべり斜面の安全率は極限平衡法で計算するということが多いわけですが、これまでの講座においても、例えば、神戸大学の沖村孝名誉教授は、“現実には、斜面が変形してもそれが即座に崩壊に至るわけではなく、安全率1.0というのはどんな意味があるのだろうか。”と指摘しておられます。また、他の著者の方も限界状態設計法、信頼性設計法など、ある程度「変形を許容する設計法」についても言及しておられるようです。鵜飼先生あたりから話題の口火を切って頂ければと思いますが、地すべり斜面の安全率というのはどんなふうに定義されるのが一般的なのでしょう。

鵜飼：私は大学で教えているので、教科書に書いてあることが安全率の出発点になってしまいます。安全率は、いわゆる理論的なもしくは教科書的な安全率と、現場の実際的な安全率とに分けて考える必要があると思っています。教科書的な安全率というと、極限平衡法において破壊するときは安全率1.0という強度安全率が基本になると思います。それから現実問題となってくると、地すべりと崖崩れではそれぞれ意味合いが違ってきます。理論的な面でも、ピーク強度とか、残留強度とかいう問題も入る。そうすると、また難しくなる。いずれにせよ一番の基本は、安全率というのは教科書的なものが基本であり、破壊時の c 、 ϕ 、 γ 、 u により強度安全率を定義することであると考えます。

若井：そうしますと、1.0というのはまさにその崩壊しようとする土塊と受け止めている抵抗力とがつりあった、力学的な平衡状態ということですね。

10.3 すべり面と安全率

釜井：大事なのは、すべり面の存在だと思います。安全率を定義する場合、すべり面上の強度を考えて、それを基にせん断抵抗力とせん断力を計算するわけです。したがって、安定計算はすべり面の概念とはほぼセットで発展して来た話であって、安全率の議論はどうしてもすべり面の存在と、なかなか切り離していくことはできないと思います。

若井：そうですね。釜井先生が「すべり面」というキーワードをおっしゃいましたが、斜面にはすべり面を想定

※) 「安全率に関する講座委員会」のメンバーは下記の方々です。
阿部真郎, 新井場公徳, 梅村順, 沖村孝, 新屋浩明,
綱木亮介, 山田正雄, 吉田信之, 吉松弘行

できるものと、できないものがあるように思います。すべり面が想定できる場合には、すべり面で発揮される抵抗力と土塊のバランスを考えることになると思いますが、地すべりの場合は再滑動のものが多く、既存のすべり面上の安定性を議論することでよいのかもしれませんが。奥園先生、そのあたりについて、実務的にはどんな考え方があるのでしょうか。

奥園：今、お話がありましたように、すべり面があるかないかはよくわからない場合もあるでしょうけれども、すべり面というものをモデル化して作らないと解析に持っていけない、ということがまず一つあります。それからそれで動いているすべりだったら、すべり面は意外にわかりやすいのですが、動いていない地すべりらしいところのすべり面をどうやって見つけ出すか、これが一番難しいんです。これによって深さが変わってきます。深さが変わってくると、だいたい土圧は二乗で効いてきますからね。ですから、深さを決める、つまりすべり面を設定するというのは非常に大事なことだと思っています。それから、広さですね、たとえば道路を作るときに、山の上まで面倒見るかという話ですね、たくさん地すべりの小ブロックが続いているときに、どこまでを対象にするかという広さ。これで設計は決まってきます。それからスタート時点の、原地形の安全率をどうするかということも重要です。さきほどの定義で行くと、滑ろうとする力と抵抗する力とのバランスで安全率が決まる。そうすると、その滑ろうとする力がわかっても、それに対する抵抗力は、これはせん断強さから求めずに地すべり独特のやり方がございまして、逆算から持ってくるというやり方でやるものですから、この現状の安全率がわからなければ、その滑ろうとする力がわかっても抵抗する力がどこまであるかということの判定するのが非常に難しい。動いているとすれば1.0を切って0.95であるのか、止まっていれば1.05なのか。これを決めないと、目標安全率が決まっている場合にそこまで上げるときの必要な抑止力が全く変わってくるんですね。1.0から1.2に上げるのと、0.95から1.2に上げるのとでは、必要抑止力が25%も違います。つまりスタート時点での判断が非常に大事だということだと思っています。

若井：奥園先生にいくつかの問題点を指摘して頂いたと思いますが、一つには、地すべりの斜面安定計算を行う場合、強度定数を決めるのに「逆算法」が使われているということですね。設計あるいは運用上の問題になりますが、先生のご指摘では、安全率の許容値を具体的にいくつに設定すべきか、またその基本となる現状の安全率がいくつであると見なすべきか、ということが重要であるということですね。安全率の実態が逆算法であるということになりますと、安全率そのものの物理的意味を議論するのがやや難しくなる感じもいたします。土屋先生、このあたりについて、実際の斜面の破壊メカニズムと関連してどんなことがいえるのでしょうか。

土屋：すべり面があらかじめ決まっているような場合と、そうでない場合があるので、両者分けておかないといけないと思います。すべり面がよくわからない状態を想定すると、抵抗する力も求まらないことになってしまいます。亀裂はあるけどすべり末端はわからない場合も多々あるので、その状態を考えるとすべり面らしきものはあるが実際には末端部が特定できないような場合です。この場合、あらかじめすべり面を決めることはできなく、むしろその時々で決まることがあるのではないかと考えられます。鶴飼先生が指摘されたように、せん断強度低減法といった概念を使わないと、このような場合では将来予測は難しいことを感じています。つまり、上から下ですべり面を特定できる場合と、何回もすべりを繰り返してその状態での強度発現にある場合とを分けておくが必要だと思います。その上で、安全率が「滑らそうとする力」に対して「抵抗する力」の比により決まるということになると思います。

釜井：重要なご指摘だと思いますが、一つ感じたのは、その全層にわたってすべり面ができていて最初から思っていない場合は、従来型の地盤工学のマジョリティからすると特殊というか異端ということになってしまうと思います。つまり、地盤の破壊問題をモデル化する際に、最初にすべり面があるということを前提にしているわけです。しかし、地すべりという現実には直面しているわれわれにとっては、結局破壊というものが局所的に発生してそれが全体に及ぶという現象こそがデフォルトであって、そういうことを日々経験しているものだから、思わず前提としてそういうことを考えていくということが感じられて非常に面白いと思いますね。

若井：釜井先生と土屋先生がおっしゃった点ですが、すべり面が既にあるのか、これから形成されるのかという視点、それからすべり面を特定できるのか、できないのかと言う視点、これらは互いに密接に関連する問題だと思います。すべり面というのは一種のひずみ軟化してしまった、あるいは破壊してしまった土の領域の連なりです。釜井先生が指摘しておられましたが、すべり面のせん断強度を軟化した後の強度としてとらえるのか、ピーク強度としてとらえるのかは、進行性破壊の話題とともに、安全率を考える上で重要な意味を持ちますね。

10.4 実務における安全率

鶴飼：安全率というのは非常に現実的な用語だと思います。実際に破壊が起こったもしくは危ないというときに、すべり面を現実的な範囲で仮定し、逆算法で決めてしまうのが一般的ではないでしょうか。斜面の設計段階で使う例は限られます。長大法面なんかの場合にはある程度やられるんですか。

奥園：やってもわからないことが多いですね。地山を代表するせん断強さがわからないんですね。

釜井：でもその対策工事の規模を決めるには計算する

のが一般的では。

奥園：そういうやり方もあります。そうではなくて標準設計がありましてですね、それでとりあえずスタートし、計測段階に入って、計測等による情報化施工ですね。何かあったら設計を軌道修正していこうという、そういうやり方と、両方ありますよね。

釜井：出発点として何かがないと一歩前に進めないケースもあると思いますが、そうした場合はどうされていますか。

奥園：これはですね、自然地山のたとえば切り取り法面は、ほとんど臨界円弧ではやりませんですね。やはり何か不連続面があったら、それをすべり面にして、一応安定計算をやることがあります。

釜井：そのとりあえずやって見て間違っていたらちょっと修正しようとかそういう場合ですが、例えば今まで経験上、スタート時点の標準設計で間違っていたことって何割くらいありますか。

奥園：かなり間違っていると思いますよねえ。だいたい安全側に間違っていますよ。

土屋：ただ現場からは基本的に「弱面を探せ」ということからスタートすることが多い。弱面があればそれを連続してすべり面とする。その結果、安全率が求められ対策に進む運びになってしまう。その過程では強度云々はさほど考慮していないかもしれない。したがって特定の弱面が存在しないような一般自然斜面ではすべり面の位置を特定することは難しい。しかし現状では、想定される弱面を探索しそこで滑動することを念頭に経験で進めてきているので、否定することも出来ません。

若井：少し整理しておきたいのは、最初にも触れましたが、安全率に力学的解釈を試みたりすることがある反面、実は運用上そうせざるを得ないからそれを使っているという、かなり実務的な色彩が濃いという点ですね。安全率は本当に運用のための便法なのか、ある程度の物理的意味を持ったものなのか、このあたりの視点が次の話題—すなわち「性能設計」ということに関連しそうですね。安全率というのは性能設計の指標となり得るのかどうか、あるいはそれ以外に適切な指標はあるのだろうか、といった議論になるかと思えます。最初、鶴飼先生が指摘されたように、“安全率1.0のとき崩壊する”という力学的な前提に戻るべきでしょうか。

鶴飼：“安全率1.0のとき崩壊する”というのは現実ではないでしょうか。

若井：そうしますと、安全率の大きさと実際の斜面の状態との関係について、何か具体的なイメージを私たちは持っているのでしょうか。安全率1.2というのは、実はこのくらいの安全性を持っている、という意識の問題なのですが・・・そういうことが先ほど議論のありました許容値の問題と関係するのではないかと思います。

奥園：東北道のある現場で地すべりを起こしたんですね。低速で少しずつ動いているような現場ですね。そこ



奥園 誠之氏

の現場はすべり面がだいたいわかっているし、滑動力もわかるわけですね。滑り始めた段階での安全率を0.95と仮定します。そして頭をはねていくと、滑動力が減っていきますね。そうすると、その安全率が上がって行くわけです。これは計算できます。このとき1.0を超えると、だいたい沈静化してくるんですね。それから1.05を超えると、だいたい止まるんですよ。だから10%かさ上げすると、だいたい止まるんですね。そうでないところももちろんございまして。それから、過去に起こった地すべりをいっぱい引っ張り出してきて、自分なりに同じ手法で安定解析やり直しまして、それで復旧してしまっている地すべりの安全率が今本当はいくらあるのかを全部計算したんです。そして、同時にその現場で、その後の変形を追跡調査したんですね。そうすると、だいたい1.0スタートで、1.1前後で実際は復旧しているものが結構多く、その中で1.1以下のものは、その後亀裂が入ったりなんかしているんですね。道路に直接の被害を及ぼしていなくても。それから1.2を超えたものは、さすがにしっかりしているんですね。だから、誰が決めたか知らないけども、道路土工指針が1.2というのは、まあいい線かなあとと思っているんですよ。やっぱり1.1を下回ってちょっと厳しい設計で終わったものは、何らかの変状がある、感覚としてはそんな感じがいたします。

10.5 安全率における不確実性

若井：過去の経験が安全率の値の妥当性をフォローしているというのは興味深いことですね。その“1.2あたりを目安にするとうまく行く”ということをもう少し掘り下げますと、斜面の中の不確定要因を反映して、1.2程度の余裕度を見ているというふうにも考えられますね。一方で、斜面自体の条件以外にも、例えば将来の作用外力についての不確定要因も大きいですよ。豪雨や地震といった将来の様々な不確実な外力に対して、どの程度の安全性を担保しておけばよいのかということも含めてご意見を頂けないでしょうか。

奥園：それは相手次第なんですよ。ですから、道路ではそのくらいで通りますが、大規模な地すべり地帯の地すべりってというのは1.2なんてとても確保できないでしょ。だから、現実的なところでやっているんですよ。それから価値の高い住宅密集地とか、それから原子力発



釜井 俊孝 氏

電所、保全対象によって随分違って来るような気がいたしますねえ。

若井：保全対象の重要度というのがありますし、より広い言い方をすれば「社会の要請」という暗黙の要求性能が時代を反映して設計に影響を与えているのでしょうか。

釜井：もう一つ先ほど奥園先生が言われたことで非常に面白いと思ったのは、安全率が10%上がるとほぼ止まったという点だと思います。これが、工学的な意味での安全率の本質ではないかと思えます。

奥園：これは結構多いですね。

若井：おもしろいですね。10%と定量的におっしゃられるのでとても説得力があるのですが、例えば、逆にこのようにも考えられるのでしょうか。その10%くらいの不確実性を残すことを許しさえすれば、斜面の安全性を論ずること、そのくらいの誤差の範囲内での斜面の安全度予測はできていると理解することもできるわけですね。

土屋：その臨界状態が正しければ、おそらく10%、20%とすれば大丈夫でしょう。臨界状態ではないとすると成り立ちません。

奥園：あの一、適切な例えではないかもしれませんが、エレベーターに乗っていて、最後の一人が乗ったらブザーが鳴って一人降りた。しかしブザーが止まらない、というのがないですか。それで二人降りたらやっと止まったとかですね。そんな感覚ですね。その最後に悪いことしたら、地すべりを起こしたら、その悪いことした分を除去しただけでは足りなくて。もうちょっと、もうちょっと（笑）。

土屋：過去の研究成果を示す文献等によれば、一般の円弧すべり式に最高水位の値を入れると、ほぼ1.0に近い値を示している。せん断試験結果も誤差を有する値と思えますが、得られた定数を入れてやると1.0近くを示している。崩壊実験結果によれば、ほぼ臨界状態に近いところが発現されるので「滑らそうとする力」に対して「すべり抵抗力」で安全率を定義すると明快ですね。臨界状態を捉えることが出来れば、10%の増分は想定的で、20%では余裕が大きいことになりませんが、その意味では1.2というのは経験的にリーズナブルと思えます。

若井：どのくらいの強度が発揮できるかという点について多少の不確実性はあったとしても、すべる場所を想定できており、すべった時の外力の条件を知っていれば、

すべり面上の強度は大まかには推定できるということですね。であるとすると、すべり面が想定できない、あるいは将来すべり面ができる斜面の場合には、それがやや難しくなってくる、ということですね。

鶴飼：安全率は、対策工の規模を定量化するのにすごく便利な指標だということですね。

10.6 対策工における要求性能

若井：そうですね。対策工の量を決めるのに、安全率を介すると議論しやすいという現実があり、設計で使われているということですね。もう少し議論を進めていきたいのは、安全率を介した対策工の設計が、私たちが目指している斜面の要求性能をちゃんと押えたものになっているか、という点です。運用上とられている手法の絶対的評価ということになるかと思いますが、安全率を介した対策工の効果の定量的評価についてご意見はありますでしょうか。

釜井：さきほど土屋先生おっしゃった通り、安定計算が臨界状態を捕まえさえすれば、定量的評価は可能だと思います。

若井：対策工というのはあくまでも何か避けたい事象を未然に防ぐために必要かつ十分な量を対策するというものだと思うので、もしかすると奥園先生が先ほど仰せのように、安全率を介してやってきた対策工の設計が、うまくその辺を間接的に反映していたことになるのかもしれない。このあたりはいかがでしょうか。斜面の安全性に関する要求性能について、対策工との関係から何かご意見はないでしょうか。

釜井：そもそも要求性能が入ってきたのが最近のことなので、将来は厳密な話になるにしても、現在やっている1.0に対して10%から20%上げるということも、結果的には広い意味で対策の性能を考えていると思えます。

若井：これまでの講座においても、例えば、神戸大学の吉田信之准教授は、「性能設計に関する国際的な動向をふまえ、地すべり斜面の限界状態を定義しながら不確実性を考慮した予測を丁寧にあげれば、安全率を介した設計にまつわる曖昧さをより分かりやすくできるのではないかと指摘していますが、私がここで申し上げたい要求性能というのはそこまで厳密なものではなく、もっと感覚的なものです。社会の要請として“この地すべりを止めてほしい、なんとか村で安全に暮らせるようにしてほしい”といったシンプルなもの。恐らく従来からそのような暗黙の要求性能を意識して対策工の設計をしているのではないかと思います。ただ、それが例えば“周辺道路の機能を維持できる変形量に抑えられるかどうか”といった具体量を意識したものになるのであれば、釜井先生がご指摘のように、今後の議論が必要なのではないでしょうか。従来暗黙のうちに意識してきたと思われる要求性能の話に戻しますが、“安全率1.2にしておく、地すべりの動きが完全に止まるのだ”というようなこと

を目安に対策をやってきたという認識でよろしいですかね。それとも、豪雨の時には少しなら動いてもいいというような認識は含まれていたのでしょうか。

土屋：おそらくそれはないと思う。動きがないように全部止める概念で進めてきていると思います。しかし現実には被害が出なければ少々動いても問題にはならず、許容される部分があっても良いかも知れません。対策工が実施されると、その状態がわからなくなることがあると思います。かといって、地すべりを放置したら流動化して保全対象域まで到達するのかの判断も極めて困難です。

若井：“予測ができないだろう”というご指摘ですね。要するに、何かが起こり始めることはわかったとしても、その程度が予測しづらいということでしょうか。

土屋：例えば、数m移動して停止するのか、あるいは数cmかの判断は極めて難しいのが現状です。これが定量化されれば、性能設計を取り入れることはできますが、予測はすごく難しいですね。

若井：そういうことですね。

奥園：実際設計するときにはですね、たとえば地下水位を下げる工法で安全率がなにかしかに上がるということが考えられますね。じゃあ何m下げるから安全率がなんぼ上がりますよって、それで1.2で設計したとしますね。それが、豪雨だとか雪融け、そのとき水位が上がってきますよね。いくら水抜対策をやっても、そのときは1.2無いんですよ。それでよしとするのかどうかっていうことなんです。まあ1.0を切ると動き出しますから、それはもちろんだめですけども。たとえば、だから常時は1.2ありますよと。しかし豪雨時は、非常時なので、1.2確保する必要がないんじゃないかと。1.0は確実に上がっていないといけなから、たとえば1.05ぐらいは、確保するべきでしょう。われわれが現場に呼ばれて行くとそう言っているんですよ。

10.7 不確実性と性能設計

若井：この座談会の後半の趣旨が性能設計あるいは性能指標ということですので、もう少しこの話を続けていきたいと思えます。地すべり対策の技術者としては“この程度でまあいいだろう”と、どこかで必要最低量を考えて対策工を設計していることになるのだと思いますが、今のお話ですと、社会が暗黙のうちに要請しているレベルの豪雨に対して安全率1.2ぐらいを確保する対策をやっておけば、動き出すことは今まであまり無かった、という意味に理解してよろしいのでしょうか。

奥園：そうですねえ。そのときは1.2無くても、常時1.2も確保していれば、非常時でもなんとか持ちこたえるんじゃないかと。それが20%の保険なんじゃないのでしょうか。20%っていうのはまさに、材料、強度の不確実性も含んでいるし、将来の災害リスクも含んで、諸々うまい具合に1.2ということに。



鵜飼 恵三氏

土屋：そのことは少々厳しいかなと思います。たとえば設計の時点で50年先の降雨に対してOKといった規模の設計をしています。本当に50年の設計規模の降雨に対しても大丈夫か？と真剣に考えるとやや不安があります。100年の降雨で設計しても同じことが言えます。これは、設計には反映されない別の要因があって、地下水経路が変化する、あるいは風化が進み強度低下があるといったことは考慮していない。現実には、時間経過にともなう要因の変化を考えると、100年であっても個人的には20～30年程度かも知れないと考えています。つまり100年規模の降雨に対応しているから100年間大丈夫だよというのはイコールではない。

奥園：100年確率の降雨量が明日降るかもしれないしね。

土屋：しかし安全を享受する側は、一般に100年間大丈夫と捉えているかも知れません。

若井：しかし、これはやはり確率的にしか議論のしようがないことですよ。そう考えてきますと、どんな程度の外力を想定して設計しているかを、従来の設計で“敢えて説明しないようにしてきた”というより、“説明できなかった”というべきなのかも知れません。降雨の場合はある程度確率的な考えができますが、地震の方がさらに厄介だと思います。地震で確率年というのは技術的に困難です。しかし、これからますます地すべり防災に対する社会の要請が高まってきた時、“この斜面はどのくらいの地震まで大丈夫なのでしょう”と住民に聞かれたりすることがあったなら、やはり何らかの答えを用意する必要はあるのだと思います。つまり、ある程度は定量的に安全度の説明をする方法を考えておくべきなのではないのでしょうか。

鵜飼：大地震が本当に来たら、多くの斜面は崩壊してしまうのではないのでしょうか。しかし、地震というのはそんなにしょっちゅう来るわけじゃない。内陸部では1000年に1回とか2000年に1回とかでしょう。それだってよくわかっていない。でも一度起こるともう大変なことです。山古志の例をみればわかるように。

若井：そのような説明で済むのかどうかという問題なのです。では何もしなくていいのか、という声も出てくるように思いますが。

土屋：いや何か対策があれば崩れない箇所も多い。例



土屋 智氏

えば、アンカー工が施工された斜面は崩壊を免れたケースも少なくない。このように対策工は効果的なのですが、定量的な評価が難しい。つまり、大地震のときには多くの斜面で崩れるが、20～30%は減少できる、あるいは半分に減少したという予測が難しい。

釜井：われわれは、どうしてもすべったかを問題にして、すべったところは割と詳しく調査しますが、実際にはすべっていない斜面も中にはあるわけで、その情報がまだちょっと欠けていると思います。だから定量的な評価がむずかしくなっている側面が大きいと思います。

若井：地震などの規模が不確実なだけではなく、私たちが見かけ上だいたい均質だと思っている地層がかなり不均質で、一見同じような斜面に見えても同じ力をかけても壊れるものと壊れないものがある、非常に不確実な対象であるということですね。

釜井：結局、すべっていないところについて、すべっているところと同じくらいの精度で調査が進めば、何か将来、定量的にものを言える可能性があると思います。

若井：これは将来的には重要な視点かもしれませんが、ところで、先ほど土屋先生もご指摘されていましたが、既存の対策工が地震時にもある程度は効くはずであるという視点が大切だと思います。では、どのくらい効くのかという議論をするためにお聞きしたいと思います。例えば雨の場合に先ほど“50年あるいは30年だろう”などと具体的な数字が出ていましたが、例えば“このくらいのレベルの豪雨に耐えうる対策工が、どのくらいの地震レベルにまで同様にカバーできる”とか、そういった視点での議論は目標としてありうるのではないかと思います。それは行きすぎでしょうかね。

土屋：おそらくその外力評価が難しいことに起因しているのではないかと思います。

若井：雨と地震では、力の作用の仕方がかなり違うということもありますね。

土屋：地下水の変動は観測値があるので、“降雨時にこの程度上昇します”ということがあって、“それに対応した対策をします”となりますが、地震時にはどうするのでしょうか。

若井：例えば、“震度いくつまでは耐えられるようにする”とか、そういう方向性はあり得ないのでしょうか。

釜井：方向性としてはあり得ると思います。しかした

だ問題は、じゃあ地震のときに、その斜面の上が一体どのくらい揺れるかということすら、分かっていない。何となく大きな地震がきて大きな被害が出ているのですが、知らないことが多すぎて、定量的な評価ができません。少なくとも、斜面の上の振動をちゃんと測るということが必要だと思います。

土屋：現実斜面を対象に10km×10km範囲のところで、想定地震動を入れて、“完全に近いシミュレーションは可能か？”と質問されると、“今のところ難しいのでは”といった答えになるのではありませんか。その辺から攻めないと難しいと考えています。

釜井：結局、初生的な地すべりの上と、再活動型で活発に動いていたすべり面の上とでは、同じ地震でも揺れ方が全然違うという観測結果もあります。そういうことからちゃんと出発しないとイケない。

若井：現状でいろいろな課題はあるにせよ、問題意識としては、もしそういうことをやりたいというふうな社会が要請した場合、豪雨と同じように、地震に対しても適切な目標を意識して、定量的に安全度を確認するという方向性は考えていくべきなのかもしれませんね。

一同：そうですね。

10.8 対策工の定量的評価は可能か

若井：これまでの議論をさらに進めたいと思います。対策工を行うための設計手法として安全率を用いているわけですが、将来もし豪雨や地震に対してさらに具体的な要求があり、住民に対して自分たちがこのレベルまでは安全保障をしているのだということを言わなくてはいけない時代が来た場合に、安全率というものが持っている物理的意味かあるいは安全率の数値と斜面の状態を連動させて議論させる視点がやはり必要になるのではないかと思います。そういうことを想定した時、今議論している安全率の意味を再確認する必要が出てまいります。そのあたりの今後の展望についてご意見はありませんでしょうか。

土屋：地すべり対策工の設計に必要な安全率について、今後その精度を向上させる必要はありますが、現状の1.2を1.15でOKということにはならないでしょう。安全率の精度の向上だけに頼ることも無理で、まして時間経過にともなう要因の変化などを考えると難しいでしょう。調査技術は進歩してきているが、1.2が1.15でいいとかいう話にはなかなか結びつかない。

鵜飼：今までの議論の中で、安全率という値が、安定性指標として、連続的にこれくらいだったら少し不安があるとか、これだったらもう逃げようとか、そういった指標にはどうもなかなかにくい。さきほど奥園先生が言われたように、10%だったらまだ大丈夫かっていう、ある意味ではそれくらい。そうすると、その間を埋めるような概念というのがどうも出てこない感じがします。

奥園：ただ少し乱暴な考えですが、極端に言えば安全

率で勝負しなくても、滑動力さえわかればそれに何%上乘せするかということですよ。滑動力が何kNだったら、それに0.1掛けするか0.2掛けするかで必要抑止力が決まってくるんですよ。つまり、安全率で評価しなくても今の現状に何%上乘せするだけでも設計できないこともないのです。

若井：つまり問題は、設計で何を説明するのかということですね。地すべり対策と状況は異なりますが、一部の構造物や盛土などでは「変形」を入れた性能設計への取り組みが始まっています。この背景には二つくらいポイントがあって、一つは社会の要請として“許容できる被害レベルを規定すべき”という声もありますが、もう一つは“ある程度の変位を許してあげない限り、想定の外力に耐えうる設計をすることが、コストの面から見てかなり困難になってきている”という現状があるのだと思います。限られた予算で地すべり対策を遂行するためには、この二つ目の視点が重要なのではないかと思います。安全率とは別に、変位あるいは他の物理量を指標として斜面の実際の現象に目を向けながら、“ここまでの変状は許していい、ここからは許せない”というような議論が、地すべり対策のための設計として今後あり得るのかどうか、ということに強く関心があります。大地震の際に、一気に斜面全体が崩壊して河道を閉塞するようなことがなければ、多少の亀裂や段差が出るくらいはいい、という意識は皆さんがお持ちと思いますが、そういった動機が変形の概念を取り入れた設計の必要性をもたらすのかも知れませんね。あるいは、地下水排除工を施した場合、完全に地すべり運動が停止しなくても、年間このくらいの移動量に留まっていれば、後は維持管理、警戒避難システム等のソフト対応でやっていく、という方向性があるとしたら、それも変形に着目した性能設計の一つなのではないかと思います。そのあたり何かご意見はございませんでしょうか。

土屋：たとえば集水井を施工したときに、上下でスライドしても破壊しないような構造にできるかということを見ると、多少動いてもスライドして追従するようなパーツで構成するとする。この構造は、少々動いても機能を失わない状態にしておけば集水され排水される。ただそういう概念は今までありませんから。

奥園：低位ひずみっていうか、同じ状態で二次クリープですかねえ。その直線状にゆっくりすべっている状態の場合で、それでも道路が開通している、結果的に許容している例はいくらでもありますね。氷河の上に道路を作っているようなものですね、ですから、上流側に余裕幅を持たせておいて、例えば1年に10cm移動する場合、10年で1m道路を上流側に移設すればいいじゃないかっていう、そういう考えはあるんですが、それでO.K.かと言われると、よくわかりませんね。ただ、現場ではそうせざるを得ないから運用でやっている。

土屋：橋梁では下盤と上盤のずれを想定し、下盤支え



若井 明彦 氏

る面積を大きくし、最大許され許容変位は何cmといった議論しているわけですからね。

若井：維持管理の段階に入った後、現実として動いてしまうようなケースが出てきた場合、それでお手上げということではなく、許容できる程度を見ながら対応を練るといことですね。地すべり対策についても、これまでは変形の予測などできなかった、では仮に予測できるようになれば、設計段階でそういうことを積極的に取り入れていくという可能性はあるのでしょうか。従来は安全率でしか議論してこなかったわけですが、例えば対策工にしても、ある一定の変位まで許すことを前提に設計するということはあり得るのでしょうか。

釜井：予測法だけじゃなくて、やっぱり維持管理が重要だと思います。高速道路とかで許容変位を議論するのは、道路を常に点検改修するからできるのだと思います。ところが実際の山の斜面でそれができるかはちょっとわからない。

土屋：それと保全対象の重要性に関わると思います。保全対象の重要性が低ければ、1mの移動でも許容される範囲かもしれません。しかし現状は同じく一律で、この許容範囲を示す指標がないので、今後は合理的に目安を作る必要があると思います。

奥園：一般には土構造は、橋梁とか構造物と違って、そういう許容範囲が広いですよ。

10.9 設計法としての性能設計

若井：仮に、変位をある程度許容する設計をするという場合、方法論としては、いわゆる高度な予測手法を介した設計、例えば、高度な土質試験技術によって得た情報をもとに、有限要素法などにより数値解析で現象予測していく、といったことが考えられます。予測できないからやらないという立場ではなく、変形の予測精度をさらに高めていくには、今後やはり実際の設計などで何度も変形予測を試みていくことが必要でしょう。ただ、このこととは別の観点から、今まで安全率を介した設計を運用してきていることを踏まえて、現実的に対応の容易な、しかし合理性の高い、第三の方法のような可能性はないのでしょうか。

鶴飼：変形を予測するとなると、構成式の問題になるので、話が難しくなりますね。ただ地すべりの浸透流解

析で有限要素法を使用した例があります。たとえば、群馬県の生須地すべり地で浸透流解析やりましたが、50年確率だったかな、三次元安全率を考えて、危険性を評価しながら観測を進めています。雨が降り水位が上がって、安全率が下がり、たとえば1.02ぐらいになったら警報を出そうとかそういうものも考えられる。だから、そういうテストケースする場所を作っていけば、だんだん安全率と変位量の関係がわかってきます。

土屋：そのためにデータの蓄積が必要でしょう。

奥園：水の話になりましたけれども、地すべりの設計での水平ボーリング打つだけの場合、それから井戸を掘る場合、それからトンネル掘る場合、良く分からんけれども、ボーリングだったら2mくらい下がるだろうとか、井戸だったら3m~5m下がるだろうとか、トンネルだったら5m~8mとか下がるだろうと。そういうことで機械的に設計しているんですよね。あまりにもそれがおおざっぱすぎるので、その浸透流解析であれ有限要素法できちっと解析し、推定しまして、でそれで設計して、それだけではいけないので、今度は実際に施工したらやっぱり水位を計測して、実際にその通りになっているかどうかをチェックすると。そこで、計算どおりになっていなければまた掘り増しするとか、あるいは別の工法を考えとか。

鵜飼：あとモデルを変えたりとかですね。

奥園：そうです。やっぱりそれで軌道修正していくというやり方だと思うんですね。

若井：そうですね。予測といっても最初の状態から将来を純粹に予測するというのは現状ではかなり困難を伴うだろうという指摘もありましたが、一方で変位や水位の動態観測を踏まえた地すべり全体の現象解釈の道具として、数値解析手法を生かす方向性は十分にあるということですね。感じましたが、「予測」という言葉を注意して使わなくてははいけませんね。必ずしも純粹な予測ということではなく、機構を説明するために多くの情報をつなぎ合わせて解釈する道具としてのシミュレーション、という割り切った使い方があるということですね。

鵜飼：性能設計というのは本来、支持力問題のように建物を地盤の上に建てたとき安全率や沈下量がどれくらいだったらいいかというような概念から出発しているように思います。それを無理矢理、自然斜面とかそういうものに当てはめようとしているっていう感じがしています。そういう風に一般論から入っていくんじゃなくて、斜面というものの実態からあげていって、それから性能設計とつじつまを合わせるっていう発想を持たないといけないような気がします。

若井：そうですね。ただ、私達が従来やってきたことが「性能を考えない設計」だったということは、決してないと思います。変位などを介さず、間接的に暗黙の性能を意識した設計をやっているのですね。だから、それを急に変位や水位といった直接的な指標を使って説

明しようとする、従来の考え方との間でいろいろな歪みが生じてくるのだと思います。今の鵜飼先生のご指摘のように、やはり地すべりというものの特徴を十分に配慮した上で、性能設計概念に向かい合う必要があると思います。性能設計が指摘している大事な点は非常にシンプルで、設計がいったい何を狙っているかを分かりやすく説明するという事です。もちろん、これを必ずしも変位で説明すべき理由はなく、安全性能を説明できる適当な参照指標を使って説明すればいいわけですね。例えば、手始めに安全率でも類似したことはできるのではないか、と思うわけです。安全率に基づく設計において、ある許容値が設定されているときに、これがどんな意味を持っており、経験上どんなことが言えるのか、が定量的に押えられていけばよいのではないかと思います。本日の話題のさらに先に「信頼性設計」といった話題もあります。現実の設計体系はすぐ変わるものではありませんが、他分野の防災対策の設計思想が徐々に性能設計、信頼性設計といった考え方へ、いずれ大きく舵を切ることになりますと、地すべり対策に対する社会の要請もそのような方向を意識したものに変わることが予想されます。私たちの持つ問題意識として、このあたりのことを今からしっかりと見据えて行かないといけないように思われます。信頼性設計もその言葉だけが一人歩きしている感がありますが、実はすでに私たちもその手法を暗黙のうちに許容しているわけです。将来起こるであろう極めて大きな豪雨に対してある一定の安全性能を有するように地すべり対策を行う、すなわち、未来長期間に渡るリスクの確実な低減を社会へ保障することこそ、まさに信頼性設計の考え方そのものであると思います。

10.10 安全率と調査の精度向上

編集部：一度、話題にもあがりましたが、安全率で2割くらいの余裕度を取れば、過去の地すべりが大体おさまるとい点については、私たちもそれを実感しているのですが、それでは、その安定計算法自体について考えるべき点はないのかどうかについてお聞きしたいと思います。強度定数 c 、 ϕ についての不確実性をなくすため、もう少し調査を増やした方がいいのではないかと、という議論は必要ないのでしょうか。

奥園：抑止工をやる場合には、必要抑止力が決まればだいたい設計できるんですよ。ところが排土工とか、水抜きをやるとかですね、いわゆる抑制工ですね、これに c と ϕ が絡んでくるんです。逆算法でスタートしても、 c の取り分と ϕ の取り分で安全率が変わってくるんですよ。これはやっぱりちょっと土質試験をやらないといけないんじゃないかと思っているんですね。

若井：土質の不確実性を絞って、 c 、 ϕ の精度を高めると、安全率を介して議論する時に、具体的にはどんなことが起こるのでしょうか。

奥園： ϕ がリッチなすべり面だったらですね、水抜き

はものすごく効くんですよ。

若井：そうですね。つまり予測精度を高めるということは、設計をしたことがより正しくなるという、そういうことですよ。先ほど話題にあがっていた“許容値をより絞り込める”という話とはまた別の話でしょうか。

土屋：間違いが少なくなり、より適切な工法を選択できる可能性があります。現在の調査方法は必ずしも完全ではないところがあるでしょう。ご指摘の通りです。

若井：先ほど、安全率の許容値を1.2としているのは、現象の不確実性が原因の一つになっているのではないかというお話がありましたが、もし精度が向上するのであれば、外力の不確実性は残るにしても、考え方としては1.2の値をさらに絞り込んでいく動機付けになり得るのでしょうか。ただ、実際の斜面の複雑さはあの通りですから、確実に安定性評価の精度が向上したと言い切れるほど斜面内部の特性を調べ上げるのは、途方もない労力が想像されます。いくらか調査数、試験数を増やしたくらいで格段に精度が向上するとは言にくい、そのような認識でよろしいでしょうか。

土屋：多分すべり面の位置に関しては、地すべり学の進歩に裏付けされて以前より精度が向上していると思います。ただ、最後に残ったのは c 、 ϕ であり、これまでも多くの土質試験を実施してきたと思いますが、現実には“どの程度反映されてきたか”ということでしょう。基本的には経験則と $1/10c$ で進めてきた経緯があります。

奥園：これはなんとかしましょうね。 $c=1/10h$ はね、これからお互いに。

土屋：それが原因で大きな失敗を生じたということも聞いてはおりません。

奥園：だから不思議ですね、先人はやっぱり偉かったのでしょうか。

釜井： $c=1/10h$ から出発しても少しずつ問題があるのを修正していつているんじゃないですか。それはやっぱり地すべりの特徴ですよ。非常に長い間観測して、それをうまく持ち帰って。

若井：前半の話に戻りますが、過去に滑ったことがある通常の地すべり斜面に対策を行うのであれば逆算もしやすいですけれども、これから滑るかもしれないものをどうやって考えるかという問題ですね。その場合、やはり純粋な予測になっていかざるを得ないのですよね。であるとすると、予測の精度が重要になるのではないかと思います。そうでないと、対策工を決めることが難しくなってしまいますね。

鵜飼：変形を予測するためにいろいろやるより、強度で安全率を確かめるために、強度の精度を上げるという方向であると思います。そのために調査の数を増やすことや試験の精度を上げることも必要になるでしょう。

若井：そうですね。鵜飼先生が“強度の議論をするのがよい”と仰っているのは、壊滅的な被害だけをまずは何とか避けよう、という要求性能が意識の中にあるから

ですね。多少の変形云々ではなく、やはり壊滅的なものを抑えるのが最優先であると。

鵜飼：安全率が高ければ変位も抑えられるから。

釜井：もう一つ。すべり面の形がやっぱり問題だと思います。地すべりの場合、どっかに力がかかっている、そこが壊れると一気に行ってしまうってよくありますよね。結局それはある種の三次元形があって、そこに特に力がかかりやすいとか、力が抜けるという事があるわけですね。したがって、我々がいかに精度を出すかっていう問題では、ある程度そういうことを調べていくことが不確実性を減らす方法かなと思います。三次元解析にもって行くには、調査にものすごくお金がかかってしまうという側面もありますが、現象の正しい理解のためには二次元で考えるよりは三次元で考えた方が簡単だということがあるわけですね。三次元解析しようと思ったら、ボーリングが増えるので、逆に不確実性が減っていくのではないかという、そういう副次的な効果もあるんですけど。本来はそういうことだろうと思います。

10.11 耐震設計と安全率

鵜飼：地震の話をしてください。ある地域を対象に液状化被害や家屋被害などの地震ハザードマップを作ることがよくあります。しかしそのハザードマップが前提としている地震は斜面にも必ず作用するはずでしょう。だけど斜面には設計はいりませんよね。それはなぜだろうかというのを考えてみる必要があります。たとえば、斜面は雨でもしよっちゅうすごい外力を受けているから、安定化していると。だから少しの地震なら安全だろうと。でも家屋は、屋根があるから雨に対して安全に設計されているけど、地震の横揺れに対しては元々何もしていないければ壊れちゃうから、それに対して耐震設計していると。そういう風に考えればいいのか。

若井：先生のおっしゃっている斜面というのは、具体的にどんな斜面のことでしょうか。

鵜飼：切土でも盛土でも自然斜面でも、いいんです。ただ残念ながら現在の方向性としてはよほど特殊な斜面でない限り耐震設計を考えるという方向ではないですよ。例えば地すべりでもそれが動くことによって道路が壊されるとか、人家に大きな被害が出るとかそういう可能性が大きいところに対しては多分考えていこうと思われま。でも、それだけでよいのかという不安が残ります。

釜井：その地域で地震係数を入れて何とかなりません。切土斜面ではどうしているのですか。

奥園：切土では、あまり入れていませんね。理科大の龍岡先生も良く言われるんですが、“構造物であれだけやっついて、土構造物で耐震設計してないのか”と。

若井：修復するときの費用対効果の問題もあると思います。道路の場合には簡単に修復できますので、崩壊してしまうという状況さえ何とか回避できればという判断

はあると思います。家屋ですと、土構造物に比べて明らかに人命に直結するので別の判断になるのでしょうか。

奥園：どういうわけか切土は地震に強いんですね。ただ切土の上の自然斜面は弱いんですね。

土屋：つまりはどこに対策を施すかが分からなかったことが大きい。一般斜面の対策といっても場所の特定ができない。砂防分野では、計画は流域で考えることになり、対象流域の出口で堰堤を設計するという概念になります。ある程度発現場所が特定されれば、土石流対策もより効果的に構ることが出来るような気がします。どこが危険となるかの判断が難しい現状では、地震対策も進まない気がします。

若井：斜面はあまりにも対象が多く、管理可能性が小さいということですね。家屋の場合は所有者、被害者が誰であるのかも明確です。ただし、家屋の近くに斜面地形があったときにはどう考えるべきでしょうか。

土屋：崩壊すると分かれば対策は出来るのですが。

若井：“総延長のどこがどのくらい崩れるのか”が予測しにくいですね。崩れない箇所が全体のほとんどであるという場合に、どういう風にお金を使って対策を考えるべきか、確かに非常に難しいですね。

鶴飼：最近では耐震の基準が厳しくなっていますから新しい家屋は大地震が起きても簡単には壊れなくなっていると思います。おそらく切土や盛土の耐震性も、家屋など他の構造物と相対的に耐震の必要性を考えなきゃいけないと思います。家屋の耐震規準は厳しいのに、切土や盛土の耐震設計はしなくても良いというわけにはいかないでしょう。

釜井：特殊な例かも知れませんが、原発の周りの斜面ではかなり厳重に耐震設計をやっています。

若井：あれはかなり要求性能を意識しているというか、被害のレベルを認識してやっていますね。他には何かご意見はございますでしょうか。

奥園：ちょっと安全率に戻りますが、安全率というのは、すべりに対する安全率であって、そこに入ってくる対策工の安全率ではないんですね。対策工の安全率はですね、アンカーなんか1.5~2.5倍の安全率が入っているんですね。それから杭だって3倍ですか、これをどう考えるべきかっていうのは良く分からないんですね。適切な例えではないかもしれませんが、車でエンジンが駄目になったのにタイヤだけが新品だったとかですね。

若井：そういうバランスは結構難しい問題ですね。先ほど話題になりました家屋の場合もそうですが、家自体はどんどん強くなっていくのですが、宅地や擁壁の耐震性などと並べて考えた場合、バランスをどう考えるべきなのだろうかと思います。いずれにせよ、各対象に対して許容すべき安全率の大きさは、それぞれ過去の経験が反映しているということなのでしょうね。

土屋：現在は、削孔能力も上がって孔壁崩壊も少なく、

また粘土の付着を許した状態でセメントミルクを流入することはないかと思います。そのことを考えると、安全率を低めに設定しても大丈夫かと思います。

奥園：ただし品質管理は大事ですね。

10.12 劣化と維持管理

若井：維持管理という観点からですが、斜面は劣化が進行するから安全率が時間的に変化するだろう、だから維持管理を考えるとときに劣化に伴って生じる変形量みたいなものを把握しておけば、破壊に至る前に対策工の検討も可能となるし、ライフサイクルコスト的な考え方が導入されるのではないかという考えもあるようです。

奥園：特に切土のり面ですね。

鶴飼：道路沿いの切土斜面の調査で規制降雨量以下で壊れている斜面や雨が降ってもいないのに壊れている斜面があるということに気づいたことがあります。それは吹付け斜面と風化した岩盤斜面に多い。そういうのはいつ壊れるか分からない。しかしおそらくちゃんと見ていれば崩壊前に小さな変形や亀裂が入ったりしているだろうと思います。理屈の上では斜面をしっかり維持管理し、観察していれば崩壊も事前に察知できるのではないかと考えています。

奥園：そうだと思いますね。徐々に老朽化していくものはですね、自覚症状がどんどんでくるんですね。集中豪雨とか地震という強烈な引き金で壊れるものとはちょっと違うんですね。ですから事前に何か症状がでくるような気がしますね。

鶴飼：維持管理を本当に徹底すれば、本来ある程度見れるものなんでしょうね。

奥園：ただ急激に落ちることがありますから、ちょっと油断するとタイミングを外してジャッジしきれないうちに落ちてくる可能性があります。

土屋：中国四川都江堰市に近代的なアースダムがあります。先の四川地震で堤体に多少の変形を生じたダムですが、主軸左岸サイドに多くのアンカーが設置されています。あの規模の地震で未崩壊ですから、アンカーの効果は多大であるとの印象を受けました。しかし、二回目に見学した時、詳細にアンカーを見たらヘッドが腐植していました。つまり、そのまま放置しても問題ないのが気になりました。このような現実を見ると中国では管理が十分にされていない可能性があります。

奥園：日本の管理技術を売り込む余地はありますね。

土屋：アンカーヘッドを鉄製カバーが腐食して中が見える状態なので、時間経過とともにアンカーそのものが効かなくなる可能性があります。

奥園：今は防食のキャップとかですね、こういうキャップとかあるんですが。昔は皆埋め殺しでしたからね、コンクリートでね。

土屋：本論から外れますが、かつての日本もそのような状態ではなかったのでしょうか。どこかで事故が起きて

徐々に管理を徹底する、あるいは十分な防錆処理をするといったことになったのではないかと考えられます。

奥園：かなり防食には気を遣うようになりましたけどね。

土屋：この意味で長年にわたって維持しようとするとは十分な管理が求められると思います。

10.13 地震後の斜面の安全性

編集部：最後になりますが、これから大きな地震がやって来ることを想定した場合、地震後の地盤のゆるみと斜面の安全性の関係について、今後どのように考えていけばよいのでしょうか。

土屋：地震の後の山の緩みを評価したことはありませんね。兵庫県南部地震後に六甲砂防事務所では六甲山の管轄域を中心に亀裂の有無と分布を調べていますが、強度としてどのくらい落ちたかという評価はしておりませんでしたね。台湾地震のその後について山地の崩壊地分布を5～6年くらい衛星で追跡すると、実は崩壊地のサイズはあまり変わらないことが示されています。何度も降雨の洗礼を受けてはいるのですが。しかし地震域の中

小河川の出口には土砂が運搬されて橋梁が流失したりする被害が生じている。それでは河川に流出する土砂の起源はどこかというところ、その河川の近傍斜面や沢に流出した土砂が流れてきている。上流側の山地帯での変化は少ない気がします。

鵜飼：その出てきた土砂も、地震のとき緩んだものが土砂として流れてきたとか。

土屋：実際には洪水時に多量に運搬され、河幅一杯に流れ、従前は河川敷内に草地が見られたのですが、これが消滅している実態があります。それは土砂が相当程度に流下していることも意味しています。しかし上流側の斜面崩壊は地震によって緩んだ地盤性状に変わっていると想定されてもそれほど拡大していない。

鵜飼：実際すごいですよね。やっぱりそんなに大した雨でなくてもね、土石流が起こったりしますからね。あれは地震の本当の影響ですよ。

若井：おおよそ話題は出つくしたと思われるので、これで本日の座談会を終了させていただきたいと思いません。長時間どうもありがとうございました。

(原稿受付2009年2月27日, 原稿受理2009年3月4日)