地すべり安定解析におけるパラダイムの転換

Paradigm revolution of slope stability analysis

林　　義隆
Yoshitaka HAYASHI

地すべり　第39巻　第4号　別刷

論説 General remarks

■地すべり安定解析におけるパラダイムの転換

Paradigm revolution of slope stability analysis

有限会社太田ジオリサーチ　林　義隆
Ohta Geo Research Co., Ltd.　Yoshitaka HAYASHI

1．はじめに

地すべりの安定解析は1958年の地すべり等防止法施行以来，行政手段の１手法として利用されてきた経緯があり，二次元極限平衡法のうち簡便法が最も多く用いられてきた。一方，近年IT技術の進歩によって複雑な計算も可能となり，簡便法以外での三次元安定解析も可能となった。このため，計算精度の向上を目的とする種々の研究成果が発表されている。

本論説では，地すべり防止対策という観点から，地すべり安定解析の意義を確認し，クーンのパラダイム説になぞらえて，地すべり安定解析における現在の問題と今後の方向性について論じることとする。

2．安定解析の歴史とその意義

地すべりの安定解析の目的は，地すべりを防止するために必要な工事規模（数量）を算出することである。具体的には，地すべり前あるいは直後の安全率を推定し，逆算法を用いることによってすべり面強度を算出，これを用いて計画安全率を達成するために必要な工事量を算出する。つまり地すべりの相対的な安定度の変化（地すべり時安全率→対策後の計画安全率）を算出して，地すべり防止対策の規模を決定する。

安定解析の精度の向上は，現場の地形形状，地下水位状態，すべり面強度等をよりよく反映できるモデルであれば，より合理的な設計に寄与することができる。この意味で，従来より，二次元極限平衡法では，簡便法よりは，Janbu法さらにMorgenstern-Price法やSpencer法などが精度のよい解析法として知られている。山上(2001)は，簡便法について次のように述べている。「簡便法に依拠した斜面対策工（抑止杭やアンカー）の設計は極めて不経済な構造物の施工に繋がる恐れが有り，早急に改められねばならない。コンピューターが十分に普及した昨今，計算量の多寡など全く問題外であり，簡便分割法は古典的な意義に止め，実務設計では捨象すべきと考える。」

しかし，現在日本では簡便法による地すべり安定解析が主流であり，Janbu法が一部の地質コンサルタントで使われている程度である。いわんやMorgenstern-Price法を用いて地すべり対策を行ったなどという事例は皆無に近い。

この理由は，地すべり対策方法の各種設計基準に簡便法が用いられていることが最も大きい。しかし，問題はそのように計算方法の精度の良し悪しに単純化されたものではない。藤田（1991）が述べているように，地すべり対策の目標となる計画安全率は，そもそも簡便法の計算をもとに設定され，長年の施工実積から割り出された多分に経験的な数値である。このため，地すべり対策では，計算方法の精度だけを向上させるだけでなく，計画安全率の検討も同時並行的に行う必要がある。

さらに，地すべりの安定解析ではすべり面の設定方法，強度の把握，地下水の評価，安定解析断面線の位置など，計算方法以外の問題でも解析結果に影響することが多い。地すべり対策が失敗する原因は，安定計算方法のみにあるのではなく，それ以前の問題，すなわち地すべり現象のモデル化に起因することがむしろ圧倒的に多い。

3．地すべり安定解析におけるパラダイムとは

前章では，地すべり安定解析方法における問題点について触れた。その論点は，極限平衡法の計算手法の精度を上げることのみでは，直接地すべり防止対策の精度の向上には結びつきにくいであろうということである。

すなわち，現行の安定解析手法を越えた地すべり対策に有効な解析を行うには，計画安全率や対策工の評価方法，地すべり土塊やすべり面強度などの物性値の適用とそのモデル化など，全面的な地すべり安定解析手法の転換が必要になってくると思われる。

この点で，都城（みやしろ）（1998）が論じているクーンのパラダイム説に関する解説が有用な示唆を与えている。都城は「一つの科学共同体のなかで，すべての人によって支持される法則，理論，用語，記号，モデル，方法，模範例，装置，価値観，自然観などのすべてを一括して，クーンは“パラダイム”(paradigm)と名づけた。」とし，「いったんパラダイムができると，その分野の科学者はみんなそれに従って考えるようになるから，もう根本問題について論争する必要はなくなる。」としている。これは，ちょうど極限平衡法に相当する。つまり，極限平衡法では，すべり力（せん断力）と抵抗力（せん断強さ）とのバランスで地すべりの安定度を評価することについての

議論をすることはない。このような状態をクーンは「通常科学」と名づけた。

「通常科学」の状態は，そのパラダイムを補強することに科学者の主眼が置かれる。このため，そのパラダイムで説明できない現象があっても，もっと工夫をすれば何とか解決できるであろうと考え，その解決の努力をすることに傾注する（そういう研究をクーンは「パズル解き」“puzzle-solving”とよんだ）。すなわち，Morgenstern-Price法などの研究である。

やがて，パラダイムで説明できない現象が多くなると，新しい理論を唱えるものが出て，「非通常科学」の時期になる。現在地すべりは移動量や変形の問題，さらに，地すべり性崩壊の到達距離の問題など，幅広い分野で，新しい解析方法が望まれている。また，地下水の取り扱い一つとっても，頭部陥没帯の水圧，すべり面に作用する水圧の評価など，多様である。これを解決する一つの方法として，有限要素法などの土塊の変形・変位を計算そのものに取り入れた手法が登場する。地すべり安定解析は現在「非通常科学」の時期に差しかかっていると考えられる。

4．地すべり三次元安定計算における研究動向

地すべり安定解析における，puzzle-solvingの一例を，三次元安定解析の計算方法について述べることとする。

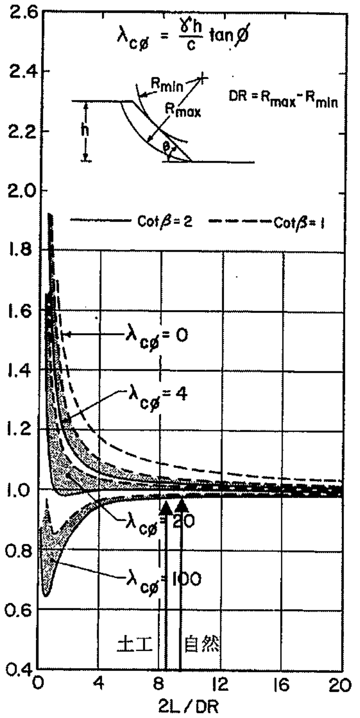
現在極限平衡法による三次元の地すべり安定解析手法は，大まかに4種類公表されている。一つは簡便法を拡張させたHovland法であり，二つ目はそれを改良した土木研究所のHovland法（以下土研式とよぶ），さらに，鵜飼（1987）によって提唱されたJanbu法による三次元安定解析，最後に，蒋ら（2002）によって試行されたスペンサー法による三次元安定解析である。

これらの解析方法は二次元断面法を三次元的に拡張した計算手法をとっており，計算精度では現在まで種々の議論を呼んできた。計算精度とは，ある斜面の三次元安定計算による最小安全率F3minとそのすべり面上の二次元安定計算による最小安全率F2minとの比：F3min/F2minについて，常にF3min/F2min≧1でなければならず，そうでない場合は，計算手法に何らかの欠陥があるというものである（この判断の仕方も研究者により多少異なる）。そもそもこの考え方自体が安定解析モデルの数学的整合性の良否を目的に論じられたものであり，実際の地すべりへの適用や計算の利便性，既存の二次元安定計算によって確立された計画安全率との関係などは考慮に入っていない。

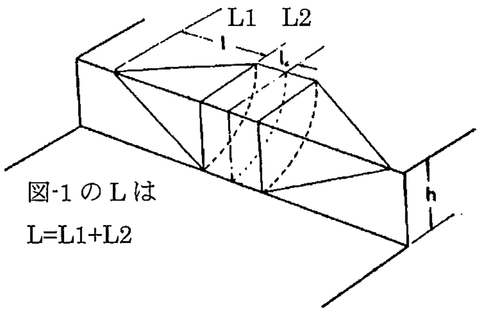
その代表的な例として，Duncan（1996）が話題にしたHovland法についての批判を取り上げよう。

4.1　Azzouzらによる批判

Hovlandは1977年に簡便法を拡張した三次元安定解析の計算方法を発表した。これに対し，Azzouzら（1978）は，計算コラム側方の力を無視していること，計算式では，すべり角度が大きくなるとϕ'の抵抗成分が過小に評価されることを理由に，Hovland法の欠陥と論文の誤りを指摘している。そのなかで，特に図－1を引用して，c≒0（図－1の$\lambda_{c\phi}$の値が大）の場合，F3/F2<1となり計算の欠陥が明らかで誤差が大きく，地すべり形状では幅／深さ比（図中の2L/DR，Lは図－2を参照）が小さくなるほどF2とF3の乖離が大きくなるので誤差が大きいということを指摘している。さらに，この幅／深さ比が無限に大きくなると，三次元安全率は0に近づくと警告した。この指摘自体は数学的には全く議論の余地はなく，Azzouzらの指摘は正しい。しかし，日本の地すべりの平均的な幅／深さ比は土工によるもので，8.32。自



図－1　幅／深さ比と安全率比の関係
c'－ϕ'がパラメータとなる。Azzouzら（1978）に加筆
高速道路調査会（1985）より，日本の地すべりの幅深さ比について，土工に起因するもの（2L/DR＝8.32）と自然発生によるもの（2L/DR＝9.45）の平均値を筆者が加筆した



図－2　図－1の三次元計算形状
Hovland（1977）による

然発生型で，9.45であり（高速道路調査会，1985），Azzouzらが問題にしている幅／深さ比（例えば4以下）とは全く異なることに注目すべきである。すなわち，一般に対策を行う地すべりの三次元安定計算を行う場合，Hovland法での計算誤差は小さく，それ以外の地形要素など，三次元安定計算本来の利点を十分反映できるということである。従ってAzzouzらは「木を見て森を見ない」，あるいは，「仏作れど魂入れず」という類の研究を行っているといわざるを得ない。これらの批判は計算力学的には正しいが，土木工学的には的を外れている“puzzle-solving”的研究と思われる。これは，都城がいうように「その理論の応用範囲を広くするために，理論の表現形式（ことに数学的表現）を変えてみる。パラダイムのなかの曖昧さを除くように，理論の修正をする。」方向に研究のベクトルが向いているのである。

4.2　Cavounidisによる検討

その後，Cavounidis（1987）は，三次元法による最小安全率F3minは断面法による安全率F2minより常に大きいかまたは同じとなるという論文を書いている。この論文では，Hovland法とChenら（1983）による方法の2つを主に批判している。本論では，Hovland法について関係した部分に注目する。

Cavounidisは，非常に単純な抽象化された論理でF3min＞F2minの証明を行っている。すなわち，

仮定1　三次元平面のF3minはS3という三次元形状のすべり面で定義される。また，S2はS3上の断面であり，その安全率F2はS3上の断面で最小を示す。なお，このときのすべり力をD0，抵抗力をR0し，

$F2 = R0/D0$ ……(1)

F2以外の断面の安全率を

$Fi = Ri/Di$ ……(2)

とする。

仮定2　二次元断面の最小安全率F2minはL2という断面で定義され，S3とは異なるすべり面上の断面である。

仮定1よりF2＝R0/D0≦Ri/Diであり，iのうちの一つ1を取り上げると

$R0/D0 \leqq R1/D1$ ……(3)

代数学の法則より

$R0/D0 \leqq (R0+R1)/(D0+D1)$ ……(4)

$R0/D0 \leqq (R0+\Sigma Ri)/(D0+\Sigma Di)$ ……(5)

また，(R0＋ΣRi)/(D0＋ΣDi) は三次元平面上のすべての断面のすべり力と抵抗力の和にさらにR0，D0を加えたものなので，(ΣRi)/(ΣDi)＝F3minとすれば

$(R0+\Sigma Ri)/(D0+\Sigma Di) \leqq F3min$ ……(6)

以上と　式(1)より

$F2 \leqq F3min$ ……(7)

一方　F2≧F2minであるので

$F2min \leqq F3min$ ……(8)

以上の数学上の論理展開より，同じ斜面であれば，二次元断面法の最小安全率は三次元のそれより常に小さいか同じということを証明している。

この証明は，個々の計算方法ではなく一般論で述べられており，三次元安定解析の安全率は，二次元断面法の積分によって求められるということが言外に含まれている。また，この仮定は複雑な地形やすべり面は想定外であり，いわゆる臨界すべり面をさしている。以上のような理想的な条件のもとで成り立つ議論であり，いわば実験的な砂山での数学的な論理展開である。このような条件でHovland法を試行した場合，そもそもHovland法による三次元安定解析の安全率は，二次元断面の推力と抵抗力の積分によって求められるという前提が成り立っていないのであるから（Hovland法の抵抗力は断面上の計算ではない），上記の論理展開上間違っていることになる。果たして，このようなことを検証し，常にF3≧F2でなければならないことが，地すべり対策にどれだけ必要であろうか疑問である。

なお，付け加えるならば，林（1998）らは，土研式では推力をベクトルで処理しているため，その数学論理上の欠点が現れないことを指摘している。

5．今後の方向

クーンは次のように新しいパラダイムの登場を説明している。

新しい理論と既存のパラダイムが比較され，それまでのパラダイムで説明されていた現象のすべてを，新しい理論で説明する努力がなされ（古いパラダイムを補強するよりも，新しい理論を打ち立てる努力をするという変化），その結果，関係ある科学者共同体の大部分が古いパラダイムを捨てて，新しい理論（パラダイム）を認めるようになると，科学革命は事実上完了する。

今後の方向として，極限平衡法を補強するか，新しい理論（パラダイム）を模索するかが，地すべり防止工学を行っている科学者に問われていると思われる。

6．結　論

地すべりの安定度を評価するための極限平衡法は，二次元であれ，三次元であれ，あくまで斜面の相対的な安定度の変化を評価する方法であると考えることが重要である。その上で，地形条件・地下水条件・残留強度などの土質定数，また，地すべりブロック相互の関係などが扱いやすい計算方法を選べば，より現実的な解析に近づくということである。地すべり安定解析は，地すべりを防止するための，現実斜面をモデル化する手段と捕らえれば，精度の問題で必要以上に悩むことは無くなると思われる。

現在の極限平衡法による地すべり安定解析の研究は，科学史的に見ると成熟期の研究であり，いわゆる“puzzle solving”に相当する。このため研究の目的は，計算

の整合性を追及することに最大の力点が置かれていると思われ，地すべり防止を行ういわゆるcivil engineeringとは無関係の「計算力学」という範疇の研究であると考えられる。

今後地すべり防止という観点から地すべり安定解析の発展を考えると，パラダイムの転換が必要である。すなわち，地すべりの変位や移動速度などの変形解析，対策工の応力解析などが一体となった解析など，新しい解析パラダイムの研究が行われることが望ましい。

引用文献

Azzouz, A. S. and Baligh, M. M. (1978)：Discussion of 'Three dimensional slope stability analysis method. ' by H. J. Hovl and, J. of Geotech.Engrg., Div.,ASCE,Vol. 104, No. 9, pp. 1206－1208.

Cavounidis, S. (1987)：On the ratio of factors of safety in slope stability analyses, Geotechnique, Vol. 37No. 2, pp. 207－210.

Chen, R. H. and Chameau, J. L. (1983)：Three-dementional limit equibrim analysys of slopes, Geotechnique, Vol. 33, No. 1, pp. 31－40.

Duncan, M. J. (1996)：State of the art：Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes, J. of Geotech. Engrg., pp. 577－596.

藤田壽夫（1991）：水没する地すべり斜面の安定解析と安定対策工に関する研究，学位論文　266P.

林　義隆，太田英将（1998）：地すべり二次元安定解析と三次元安定解析の比較，地すべり学会第37回研究発表会論文集，pp. 445－448.

Hovland, H. J. (1977)：Three dimensional slope stability analysis method. J. of Geotech. Engrg., Div., ASCE, Vol. 103, No. 9, pp. 971－986.

蒋　景彩（2002）：三次元Spencer法に基づく臨界すべり面探索について，第37回地盤工学研究会発表会講演集，pp. 2211－2212.

㈶高速道路調査会（1985）：地すべり地形の安定度評価に関する研究報告書，211p.

都城秋穂（1998）：科学革命とは何か，岩波書店，331p.

鵜飼恵三（1987）：簡易Jambu法による斜面の３次元安定解析，地すべり，Vol. 24，No. 3，pp. 8－14.

山上拓男，鵜飼恵三（2001）：斜面の安定と変形解析総説：LEMとFEMの応用　第Ⅰ編，地すべり，Vol. 38，No. 3，pp. 9－19.

（原稿受付2002年10月18日，原稿受理2002年12月17日）