

3次元地すべり安定解析における現状と課題

The present situation and problem of the three-dimensional stability analysis.



共通事業本部 地質部
安藤 勸

1. はじめに

インフラ整備の中で膨大に蓄積された社会資本は、我々の快適で文化的な生活を支える重要な「財産」であり、今後も欠くことのできないものである。これらの社会資本の多くは、従来の自然環境を我々が使い易いように改変することで整備をおこなってきた。また、これらの整備には、莫大な費用が投じられ、今後はすでにストックされた社会資本の維持と補修の時代となるといわれる。

山岳地域に道路や鉄道の敷設、または宅地造成などおこなう場合には、必ず斜面の改変が生じる。また、日本列島のように、プレートの境界部付近に位置する活動的大陸縁では、複雑な地質条件や活発な造山運動による地盤の脆弱化が顕著であり、地すべりに代表される多くの斜面変動が生じている。これらの斜面変動の的確な調査や解析は、社会資本の整備計画や、対策費用に大きな影響を与えるばかりか、重大な災害につながる可能性も含む。

本稿では、地すべりなどの安定解析で多く実施されている2次元の安定解析（以下2次元解析）の問題点と有効性を整理し、3次元安定解析（以下3次元解析）の有効性を述べる。また、3次元安定解析の問題点も併記し、今後の展望を整理する。

2. 地すべりの安定解析

従来の地すべりの安定解析では、土塊の移動方向と地すべりの形状より決定される主断面での2次元解析がおこなわれている。2次元解析には、簡便法（Fellenius法：1927年）、修正簡便法（修正Fellenius法：1975年）、Bishop法（1995年）、Janbu法（1954年）などが用いられているが、いずれも土塊の滑動力と抵抗力のバランス計算である。これらの中で一般的に用いられる計算手法は、修正簡便法が圧倒的に多い。この手法が多く用いられる理由には、簡便な計算であり、手計算でも実施できることや、多くの実績があることによる。

しかし、従来から以下の問題点が指摘されている。

- 1) すべりの層厚が最大と想定した主断面において安定解析を実施するため、一般に層厚が薄くなる地すべりの縁部に対しては、算出される抑止力が過大となり、不経済な設計となる。
- 2) 地すべりの移動方向が、計器観測などで判明している場合を除くと、設定した方向と地すべり土塊の移動方向が異なる場合がある。
- 3) 主断面測線の形状が同じであれば、地すべりの平面形状に関わらず、同じ解析結果となってしまう（図-1）

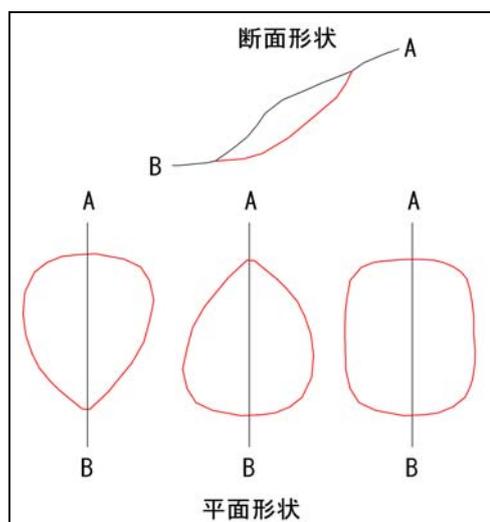


図-1 地すべりの平面形状と断面形状
断面形状が同じでも、平面形状が違う場合がある

これらの問題点は古くから議論されているが、有効な計算手法が無いことや、2次元解析の結果が、安全側の解析結果であることが多いことから、いわば「安全側だから良い」とされてきた。

しかし、昨今の公共事業縮小の中で、新たな社会資本の整備費用が削減されている状況下では、適切な対策工を提案・実施することが、インフラ整備をおこなうものの責務であると考えられる。

3. 3次元解析の普及

近年パーソナルコンピュータ（以下PC）の急速な普及と発展に伴い、大容量の計算が市販ベースのPCでおこなえるようになってきた。このことは、複雑でかつ大容量の情報処理を、個人でも実施できる環境となってきたことを示す。

また、これに伴い従来の2次元解析を主としてきた土木分野の解析においても、膨大な計算が必要な3次元解析が一般的となってきた。さらに、3次元解析に主眼を置いた研究や開発も活発におこなわれ、解析ソフト自体も廉価となりつつある。

本年、共通事業本部地質部では、3次元地すべり安定解析ソフト「Power_SSA（五大開発社製）」を導入し、その有効性の積極的な提案をおこなっているところである。

4. 3次元解析の有効性の検証

一般的に、斜面の安定解析をおこなうと、2次元解析に比べて、3次元解析の安全率の方が大きくなる。これは、3次元解析をおこなうことで、側方の拘束力の影響が表れることや、地すべりの縦断形状のみではなく、横断形状による効果も影響するためである。

以下に仮想の地すべりにおける、2次元解析結果を示すと共に、同じ断面形状となる3次元の地すべりの安定解析結果を示す。

図-2に2次元解析に用いた断面図と条件を示した。地すべりは、奥行き120m程度、幅70m程度を想定し、現況の安全率を $F_s=1.00$ 、すべり面の強度定数は、すべり土塊の平均層厚より粘着力（ c ）を推定し、逆算によりせん断抵抗角（ ϕ ）を算出した。計

算は修正簡便法により実施した。

2次元解析によれば、計画安全率（PFs）を1.20とした場合のこの仮想地すべりの必要抑止力（Pr）は2,070kN/mとなり、地すべり全体としては144,900kN（2,070kN/m×幅70m）の抑止力が必要となる。また、湛水池地すべりなどに特徴的な、水位変動の負荷が加わる場合には、さらに抑止力が大きくなると考えられ、抑止工などを実施する場合には、莫大な費用が必要となる。2次元解析では、最も抑止力が大きくなる主断面測線で解析を実施し、その結果を地すべり全体に反映させるため、地すべり全体の抑止力は大きくなってしまふことがほとんどである。

次に主断面測線の断面形状が同じ地すべりを3パターン6ケース設定し、3次元解析を実施した（表-1）。すべり面の強度定数は、すべり土塊の平均層厚より粘着力（ c ）を推定し、逆算によりせん断抵抗角（ ϕ ）を算出した。計算はHovland法（1977年）により実施した。また、2次元解析で算出した計画安全率（PFs）1.20に対する必要抑止力（Pr）を1.00として、3次元解析結果の必要抑止力の比率も合わせて示した。

3次元解析の結果、最も2次元解析の条件に近い『角型-円筒状』の地すべりにおいても、2次元解析に対して73%程度の抑止力となり、実に27%の抑止力低減となっている。いずれの解析結果も、2次元解析で算出された必要抑止力を上回るものは認められない結果となっている。また、3次元解析においても、地すべりの形状によって、強度定数や必要抑止力に差があることが読み取れる。

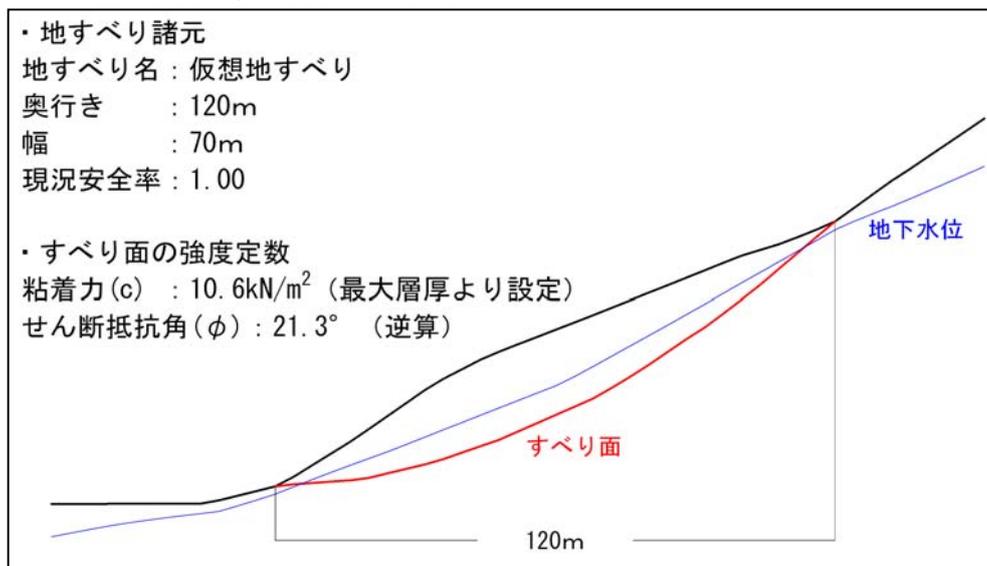
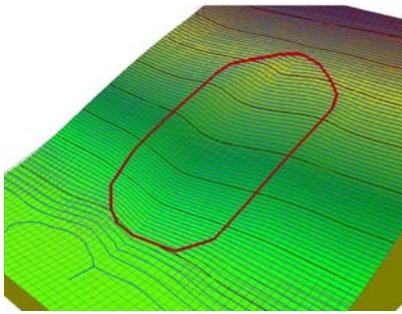
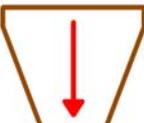
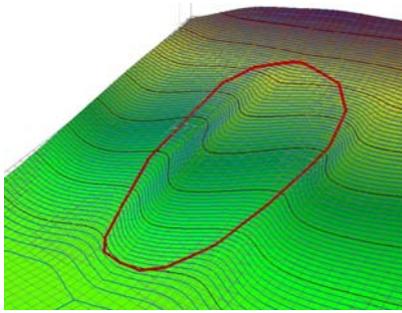
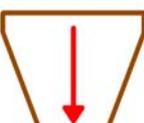
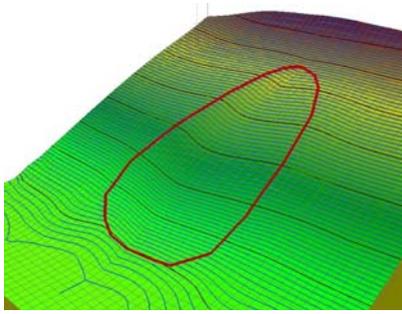
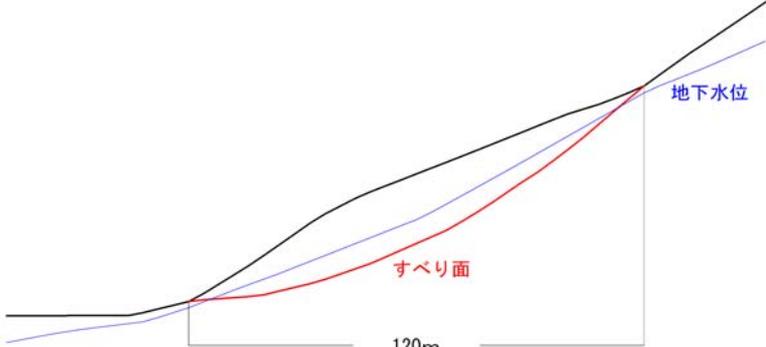


図-2 仮想地すべりの主断面測線と地すべり諸元

表-1 2次元解析-3次元解析比較表

	地すべりの形状		地すべりの3次元モデル	すべり面強度		必要抑止力	
	平面形状	断面形状		c (kN/m ²)	ϕ (°)	Pr (kN)	比率
3次元解析	角型 	円筒形状 		9.0	27.1	105,971	0.73
	角型 	スプーン形状 		7.7	26.0	91,307	0.63
	逆三角型 	円筒形状 		9.3	26.6	95,582	0.66
	逆三角型 	スプーン形状 		6.8	24.5	68,266	0.47
	三角型 	円筒形状 		9.3	26.6	95,583	0.66
	三角型 	スプーン形状 		7.9	26.4	82,139	0.57
2次元解析	比較に用いた2次元モデル			c (kN/m ²)	ϕ (°)	Pr (kN)	比率
				10.6	21.3	144,900	1.00

5 3次元解析の有効性と問題点

前項に示したとおり、3次元安定解析を実施すると、おおむね2次元解析結果よりも抑止力が小さくなることが理解できる。これは、一般に地すべりは主断面から側方方向にかけて層厚が減ることや、平面形状を考慮した安定解析となっているからである。

「コスト削減」が土木業界のみならず、社会的にも要求される中、2次元解析よりもより詳細な3次元解析をおこなうことで、対策規模やそれに伴う対策費用が大きく削減できると考えられ、非常に有効な手法であり、発注者に対するインパクトも大きい。

しかし、3次元解析を実施するにあたり、以下の問題点が挙げられる。

- 1) 地すべりの3次元形状を詳細に把握する必要がある。
- 2) 解析費用が高価である。

1) は、主断面測線のみでの調査結果で3次元解析を実施することは、解析に入力するパラメーターに「推定領域」が多くなるだけで、必ずしも精度の良い解析とはならない。そのため、地すべりの形状を3次的に把握するため、主側線の側方などにボーリング調査を実施し、3次元モデルの精度を高める必要がある。

2) は、3次元解析が普及することや、今後のPCの高度化によって、さらに簡便に解析が実施でき、廉価となることが期待される。

これらは、一連の『調査』→『設計』→『施工』の流れの中で、『調査』にかかる費用が増大することを示す。しかし、『調査』の段階で、地すべりの詳細な形状や性状の把握、それに基づく詳細な解析を実施することは、『施工』の費用を圧縮できることや最も妥当な施工が実施できることから、トータルコストの削減につながると考えられる。

また、3次元でモデル化した斜面や地すべりをビジュアル的に表現し、効果的なプレゼンテーションをおこなうこともできる(図-3～6)。今後は、公共事業に関する情報公開や、事業の継続に関する説明の必要性(アカウントビリティ)など、市民や納税者にわかり易い形で技術的な課題を表現するツールとしても3次的な解析や表現は重要性を増すと考える。

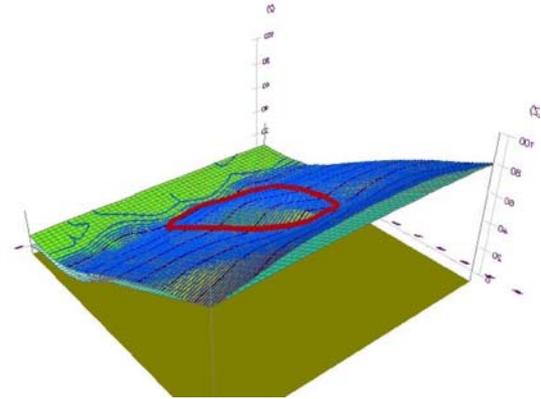


図-3 地すべり上方からの鳥瞰図

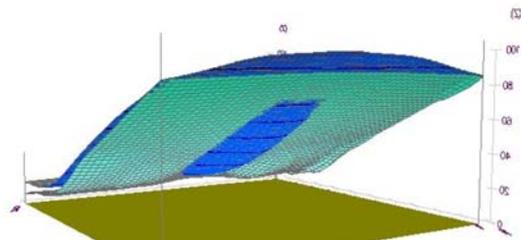


図-4 地すべりを背後から鳥瞰

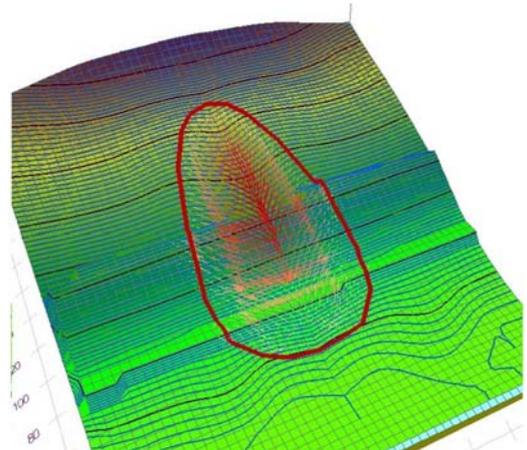


図-5 地すべりに計画路線の切土・盛土を導入し、安定解析を実施(コラムの移動方向も示す)

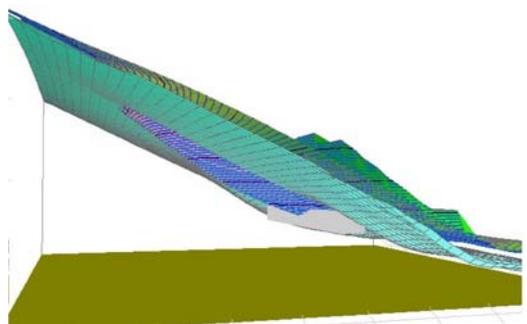


図-6 すべり面を貫くトンネルを構築(灰色部)

<以上>