

不連続性岩盤の調査・解析と評価(4)不連続性岩盤における調査・解析事例(応力変形問題)(その6)

SASAKI, Takeshi / 竹内, 則雄 / TAKEUCHI, Norio / 佐々木, 猛

(出版者 / Publisher)

社団法人地盤工学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Soil mechanics and foundation engineering / 土と基礎 : 地盤工学会誌

(巻 / Volume)

48

(号 / Number)

9

(開始ページ / Start Page)

47

(終了ページ / End Page)

53

(発行年 / Year)

2000-09-01



不連続性岩盤の調査・解析と評価

4. 不連続性岩盤における調査・解析事例 (応力変形問題) (その6)

佐々木 猛 (ささき たけし)
鹿島建設(株)情報システム部

竹内 則雄 (たけうち のりお)
法政大学工学部土木工学科

4.4 岩盤斜面

4.4.1 FEM (有限要素法) を適用した岩盤斜面の評価

—等価連続体手法 (複合降伏モデル)^{1)~3)}—

1) はじめに

岩盤斜面の主要なすべりの原因は、岩盤内に存在する既存の不連続面に起因している。これらの不連続面には確率論的に方向性が有意ではない微小クラック (以降これを無指向性と呼ぶ) と決定論的に方向性が明確な層理や節理 (以降これを指向性と呼ぶ) などの複数の不連続面群が存在する。したがって、これらの不連続面に着目した斜面の安定解析手法が安定度の評価にとって有力な手法となる。

有限要素法 (FEM) における等価連続体の複合降伏モデルは、不連続面のクラスター分析によってあらかじめ決められた特定の走向・傾斜に沿った方向の不連続面の応力状態から、あらかじめ設定した降伏条件を照らし合わせ、その安定性を簡便的に評価する方法である。この方法は、岩盤が以下の(a), (b), (c)を複合した変形特性を有するものと仮定している。

- (a) 母岩自身の弾性および弾塑性的な変形
- (b) 岩盤内の潜在的な微小クラックの開口または閉合による変形 (無指向性)
- (c) 決定論的に有意な複数の走向・傾斜を持つ、層理や節理などの不連続面群の開口・閉合およびすべりによる変形 (指向性)

岩盤の変形はこれらの総和と考え、岩盤の降伏は(a)~(c)が持つ強度にそれぞれの応力状態が最も早く達した順序で評価する。つまり、確率論的に方向が有意ではない無指向性の微小クラックを含む岩盤と決定論的に方向性が明確な指向性の不連続面それぞれに別々の強度を設定している。これを以降、複合降伏モデルと呼ぶ。ここでは、特に層理や節理などの不連続面群による指向性の岩盤の適用事例について述べる。

2) 適用事例

2-1) 石灰岩鉱床掘削斜面の例^{4),5)}

a) 概要

斜面の地質構造を図-4.4.1に示す。本斜面は古生代末期から中生代初期の海底地すべり堆積物の石灰岩、粘板岩、凝灰岩および砂岩から構成されている。石灰岩中

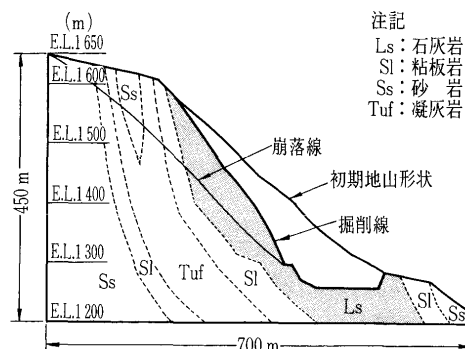


図-4.4.1 断面23の地質構造 (石灰岩鉱床)

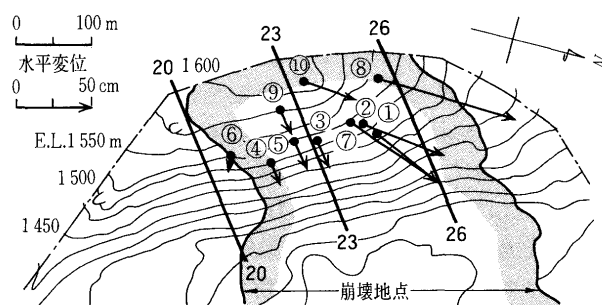


図-4.4.2 斜面の等高線と水平変位

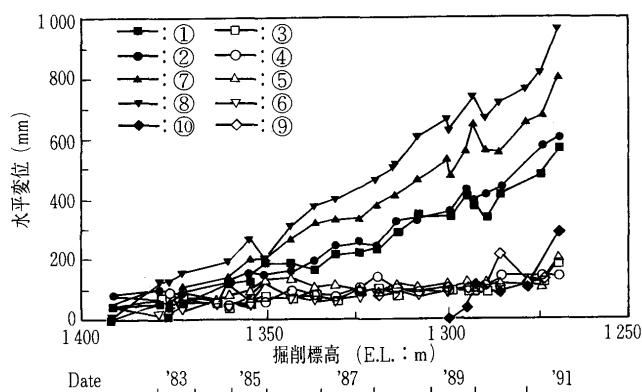


図-4.4.3 光波測量による表面変位の経時変化

の不連続面は、全体として顕著な卓越方向はみられないが、石灰岩と接する粘板岩の境界で著しい破砕がみられる。図-4.4.2に斜面の等高線と水平変位を示す。図中の丸印内の数字は表面変位の測点番号で、図-4.4.3に光波測量によるそれらの経時変化を示す。崩落状況は変位ベクトルや累積変位量から、初めに石灰岩の残壁が薄

講 座

い東北側の断面26でその上部が崩落し、続いて崩落斜面中央の断面23が崩落したものと推察される。

b) 解析

本解析の目的を崩落原因の推定におき、解析断面は崩落中心で斜面が最も長い断面23とした。本斜面は付加体（海底堆積物と陸上から供給された堆積物の混在岩）地帯に属している⁶⁾。岩盤の不連続面の走向・傾斜を調査横坑とスケッチデータからクラスター分析した結果、その方向性は特定できず、一様に分布していることが判明した。この中でも斜面の最大主応力に共役な方向（斜面に平行な方向 $\pm 45^\circ + \phi/2$ 、ここに、 ϕ は岩盤の内部摩擦角）の不連続面がすべりに対して最大せん断応力が発生する最も危険な方向であることから、不連続面の傾斜角は水平面に対して反時計回りに 30° と -30° の場合を検討した。また、岩盤と不連続面の強度・変形特性は原位置での調査結果から表4.4.1に示す物性値を設定した。

不連続面の垂直剛性 $K_n = 2.94 \times 10^5$ (MN/m³)、せん断剛性 $K_s = 11.7 \times 10^3$ (MN/m³)、不連続面の間隔を10 mとした。一般に、不連続面の剛性は不連続面を含む供試体の圧縮試験や一面せん断試験結果により求める。しかし、ここでは原位置のジャッキ試験結果や不連続面の開口幅と挟在物の種類から経験的に決定した。

石灰岩および石灰岩背面における粘板岩層の岩盤の降伏条件としては等方性のDrucker-Prager則を、石灰岩中の不連続面群の降伏条件は設定された角度に対するMohr-Coulomb則を、それぞれ別々に降伏条件を採用している。また、石灰岩以外の岩盤内には、特に不連続面は設定していない。初期応力は、解析領域内に剛性の異なる岩盤が混在するが、全領域同じ弾性係数とポアソン比 ($\nu = 0.49$) を用いた自重解析で算定した。この処置は、異なる剛性を用いて自重解析すると、物性区分の境界付近に引張り応力が発生し、初期応力として不自然な結果が得られたためである。

図4.4.4と図4.4.5は断面23の不連続面群の傾斜角が水平方向から反時計回りにそれぞれ 30° と -30° の場合の塑性領域を示す。傾斜角が -30° の場合は斜面の主応力方向に共役な角度、すなわち、最大せん断応力の発生する角度である。不連続面群の傾斜角が 30° の場合には、石灰岩の斜面の掘削表面にのみ塑性領域が現れているが、 -30° の場合には斜面中央から法尻に集中している。これらの結果から、傾斜角が 30° の不連続面群の存在により初めに斜面上部表面に変状が発生し、その後、

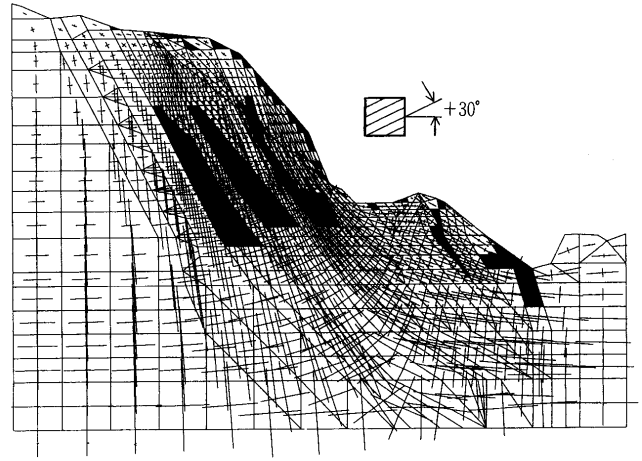


図4.4.4 主応力および塑性領域分布 (石灰岩中の不連続面の角度 30°)

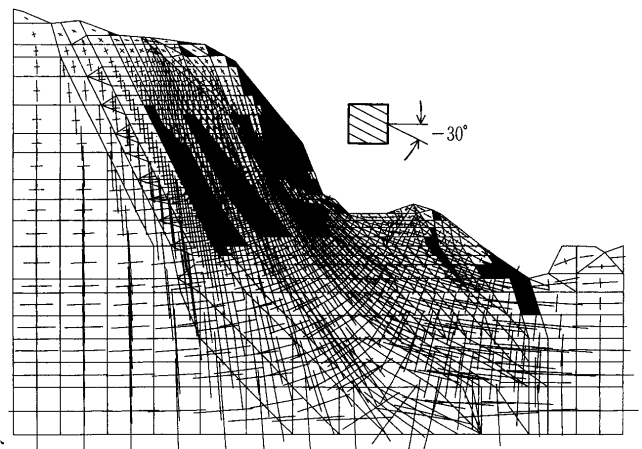


図4.4.5 主応力および塑性領域分布 (石灰岩中の不連続面の角度 -30°)

傾斜角が -30° の不連続面群の存在により法尻部に応力集中が発生し、その近くから最終的な崩落が始まったものと推定される。このように、複合降伏モデルでは掘削斜面の傾斜に対して最も危険な不連続面の傾斜角をパラメータ的にその安定性を評価できる。

2-2) ダム原石山掘削斜面の例^{7),8)}

a) 概要

口絵写真3に解析断面の地質構造を示す。本斜面は砂岩層 (S)、粘板岩層 (Sl) および粘板岩混じり砂岩層 (Als) の互層となっている。岩級区分は粘板岩層のほとんどがD級~C_L級、砂岩層は表面に近い部分でD級~C_L級、深い部分でC_M級~C_H級となっている。特に標高1160~1190 mに露出するSl-4層の一部は周辺

表4.4.1 解析用物性値 (石灰岩鉱床)

岩盤分類	岩 級	変形係数 (MPa)	ポアソン比	単位体積重量 (MN/m ³)	粘着力 (MPa)		内部摩擦角 (°)	
					母岩	不連続面	母岩	不連続面
石灰岩 (Ls)	C _H	3 920	0.25	0.0255	0.235	0.196	45	40
砂 岩 (Ss)	C _M ~D	2 940	0.25	0.0255	弾性	—	弾性	—
粘板岩 (Sl)	C _L ~D	980	0.25	0.0255	0.166	—	20	—
凝灰岩 (Tuff)	C _M ~D	2 940	0.25	0.0255	弾性	—	弾性	—

地盤よりかなり強度が小さくなっている。施工中は光波距離計による表面変位計測のほか、傾斜計や岩盤変位計による地中内変位計測などを行っており、SI-4層を掘削した時点でSI-4層より上部において最大約10数cmのトッピングモードの急激な変位が確認された。岩盤変位計の設置時に得られたボーリングコアやドレーントンネルの切羽観察によれば、不連続面の傾斜角とそれに直交する角度に卓越する不連続面が存在している。

b) 解析

弾性波速度探査結果により風化領域の存在が明らかになっており、不連続面群をこの範囲で考慮し、層理も一つの不連続面として取り扱った。また、不連続面以外の母岩部や風化領域以深の岩盤については弾性体と仮定した。解析に用いた物性値を表4.4.2に示す。これらの値は三軸圧縮試験結果および孔内載荷試験結果などから設定した。層理や節理などの不連続面の間隔および間隙幅はボーリングコア写真から推定し、それぞれの地層で間隔1m、間隙幅1mmとした。また、不連続面は、砂岩層の開口の状況は密着しており挟在物も少ないが、粘板岩層では繰り返しせん断変形の跡が認められ、開口しており粘土鉱物が挟在している。粘板岩混じり砂岩層はその中間的であった。これらの状況と、パラメーター解析から、健全時における不連続面のせん断弾性係数は母岩のせん断弾性係数の1/100、破壊時のせん断弾性係数は健全時の1/100と仮定した場合、計測と解析結果の変位のオーダーが合うことが分かり、以降この値を採用した。初期応力の算定は2-1)と同様にした。

図4.4.6(a)は不連続面を考慮しない場合、図4.4.6(b)は層理方向（不連続面の傾斜角120°）と層理にほぼ直交する方向（不連続面の傾斜角50°）の二つの不連続面を考慮した場合のSI-4層レベル掘削時（EL.1175～EL.1160m）の増分変位ベクトルを示す。不連続面を考慮しない場合は掘削面が水平方向に変位しているが、二つの不連続面を考慮した場合は変形が全体的に掘削側へ倒れ込むような下向きの変位が卓越しており、

表4.4.2 解析用物性値（ダム原石山）

岩盤分類	岩 級	変形係数 (MPa)	ポアソン比	単位体積重量 (MN/m ³)	節理の粘着力 (MPa)	節理の内部摩擦角(°)
砂 岩 (Ss)	C _H	3 000	0.25	0.0245	0.025	35
	C _M	2 000	0.25	0.0245	0.020	35
	C _L	300	0.30	0.0235	0.010	30
	D	50	0.35	0.0230	0	25
粘板岩 (Sl)	C _H	3 000	0.25	0.0260	0.025	35
	C _M	1 000	0.25	0.0245	0.010	30
	C _L	150	0.30	0.0235	0.005	20
	D	50	0.35	0.0230	0	15
粘板岩混じり砂岩 (Als)	C _H	3 000	0.25	0.0250	0.025	35
	C _M	1 000	0.25	0.0249	0.010	30
	C _L	150	0.30	0.0242	0.005	20
	D	50	0.35	0.0240	0	15
粘板岩	砂砕帯	30	0.40	0.0230	0	10

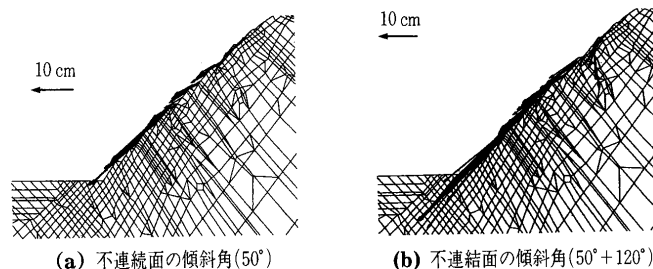


図4.4.6 SI-4層レベル掘削時（EL.1175～EL.1160m）の増分変位ベクトル

不連続面の考慮により計測で得られた結果の定性的な傾向を表現しているのが分かる。本斜面では層理方向とこれに直交する方向の傾斜角の不連続面が最も斜面の変形量に影響することが判明した。

3) 今後の課題

本手法により、岩盤内に存在する不連続面群の傾斜角と斜面の塑性領域や変形の関係をジョイント要素などを用いた解析に比較して簡便的に評価することができる。

今回は事後解析であるが、不連続面の剛性の寸法効果や応力依存性などの評価法を検討し、事前評価を定量的に行うことが重要な課題の一つである。

4.4.2 RBSM（剛体ばねモデル）を適用した岩盤斜面の評価

1) はじめに

不連続面が複雑に内在する岩盤斜面の危険度を検討するにあたり、最近では簡便法的手法に加えて数値解析的手法を用いるケースが増えている。この理由の一つとして、実現象では、ある点で発生した破壊がその応力解放によってさらに進行し、全体的な崩壊へとつながるといった進行性破壊を挙げることができる⁹⁾。

剛体ばねモデル（RBSM: Rigid Bodies-Spring Model）¹⁰⁾は内在的に不連続性の概念が取り入れられたモデルで、任意形状に分割された要素を剛体と仮定し、領域を要素に分割する。そして、各要素境界面上に体積変化とせん断変形に抵抗する2種類のばねを設け、要素内の仕事の代わりに要素境界面上に集中化された表面力の仕事を用いてエネルギーを評価する^{11),12)}。もし、不連続面の位置や物性が既知であれば、有限要素法で用いられるジョイント要素と同様の考え方に従い、直接ばねにその特性を持たせる。このような、ばね定数や不連続面の取扱い方については、本講座における文献21)に整理されている。要約すると、弾性状態のばねが破壊条件を満たした段階で、塑性流れ則に従いばねにすべりの条件を導入するか、あるいは、ばねを切って引張り破壊状態を再現する。断層などの既知の不連続面に対しても、断層の物性値をもとに破壊条件を設定し、同じ考え方を適用する。すなわち、既存の不連続面もいったん弾性と仮定し、増分解析を行うことによって、不連続面における破壊条件を満足させる。したがって、RBSMではすべての要素境界面ですべりが生じえるため、不連続面の位置を考慮して要素分割を行わなければならない。また、変位パラメーターとして、剛体内の任意点に剛体変位を

講 座

設定するため、自由度を変更せずに、要素間の切断やすべりを導入することができ、増分計算を行うことで、自動的にすべり面やクラック面を決定することができる¹³⁾。さらに、すべりとともに、引張り破壊を考慮できる非線形解析法¹⁴⁾を用いることで、進行性破壊の解析が可能になる。斜面安定の課題では、完全に崩壊が生じない場合でも、破壊の進展状況を把握することは、施工対策の上で重要であり、このようなケースにおいても、RBSMは有益な情報を提供する。

RBSMの定式化については文献12)にゆずり、ここでは、岩盤斜面の対策工に適用した事例を中心に解説する。なお、解析は自重を外力として行うが、RBSMでは要素を剛体と仮定し、要素境界辺上の表面力を取り扱うため、有限要素法のように、物性区分の境界付近で弾性係数やポアソン比の相違による不自然な引張り応力が生ずることはない。

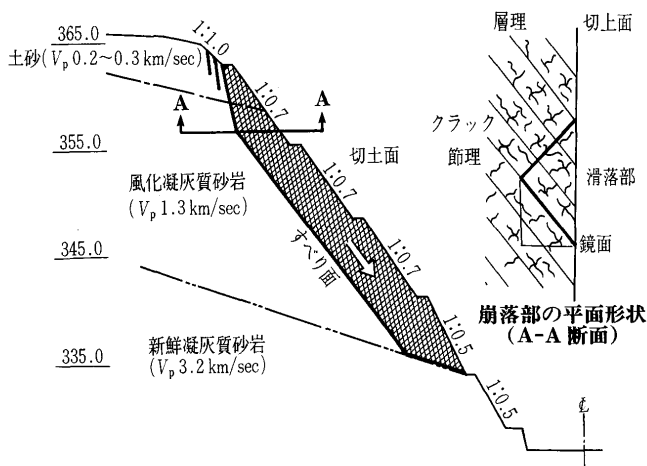
2) 適用事例

2-1) 崩壊斜面におけるロックボルト対策工の検討¹⁵⁾

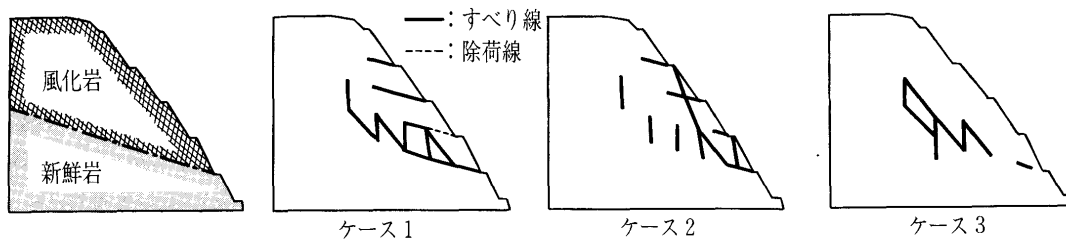
a) 概要

風化の進んだ堆積岩では、層理や節理が発達し、層理面に沿ってブロック状に割れる場合が多い。このような地盤の場合、切土に伴い法面では乾湿の繰返しで風化が進み、節理などの脆弱部におけるせん断強度が低下して滑落が生ずる場合も多々ある。また、滑落した層理面は鏡状を呈することもあり、この場合は、せん断抵抗がほとんど得られない。

このような岩盤では、不連続面を含む詳しい物性値が得られていない場合が多く、全体としての見かけの強度



図—4.4.7 斜面の地質構造と崩壊形状



図—4.4.8 崩壊斜面の解析結果

を用いて解析せざるを得ない。節理や層理を主体とした不連続性岩盤における数理的な逆解析手法が確立されていない現状では、調査データに加え、簡便法で用いられている逆算法¹⁶⁾などの結果を参考にして、試行計算を何度か行い、見かけの強度を推定する必要がある。ここでの事例は、現場付近で発生した崩壊と類似の崩壊形状を示す材料物性を試行錯誤により推定し、対策工の解析に適用した例である。

b) 解析

図—4.4.7は崩壊した岩盤斜面の断面図を示したもので、この岩盤斜面は節理が発達している。図中、左端の数字は標高 (m) を表している。図—4.4.8はそれと同じ崩壊形状を与える物性値を、簡便法の結果を基にした逆算法による値を参考にして試行錯誤により求めた例である。これによると、ケース2の物性値を用いた解析結果が実際に発生したすべり面と類似した傾向を示している。表—4.4.3は、各ケースの解析で用いた物性値を示している。

次に、実際の破壊に近いケース2の物性値を用いて、ロックボルト工により斜面を補強した場合の解析例を示す。ロックボルトをモデル化する場合、ロックボルト1本1本を梁要素で置換する方法、打設部分のせん断強度を増加させる方法¹⁷⁾、打設部分に異方性要素を用いる方法¹⁸⁾がある。ここでは、せん断強度を増加させる方法により解析を試みた。

図—4.4.9にはロックボルトの本数や長さを変えて計算した結果が示されている。上段は長めのロックボルトを少なめ（せん断強度に換算して $c=0.05$ MPa）に打設した場合で、左に打設状況、右にすべり線が示されている。この場合、法尻に法面を横切るすべりが発生しており、斜面崩壊の危険性は高い。中段は短めのロックボルトを多数（せん断強度に換算して $c=0.15$ MPa）打設した場合で、すべり面は斜面深部にのみ発生するため、崩壊の危険性を回避することができる。また、下段は位

表—4.4.3 仮定した見かけの岩盤の物性値

材 料	風 化 岩			新鮮岩
	ケース1	ケース2	ケース3	
変形係数 (GPa)	1.5	1.5	1.5	2.0
ポアソン比	0.3	0.3	0.3	0.25
単位体積重量 (kN/m ³)	20.0	20.0	20.0	20.0
せん断強さ (MPa)	0.01	0.03	0.05	0.15
内部摩擦角 (°)	25	35	35	45

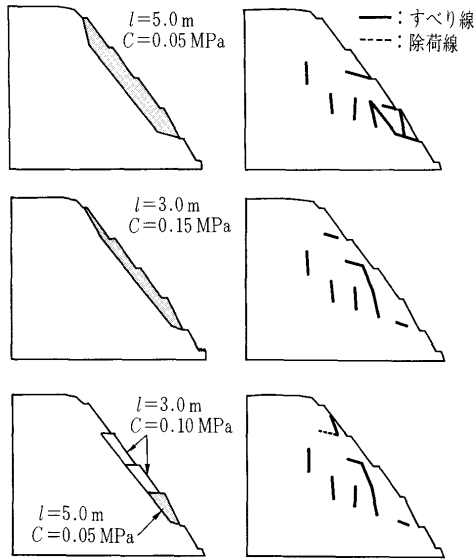


図-4.4.9 ロックボルト打設後の解析結果

置に応じて本数を変化させた結果で、経済性の高い打設方法であるといえる。

2-2) 切土斜面のロックアンカー工による対策計画

a) 概要

本事例の地質は、秩父古生層に属する堆積岩類で、砂岩および礫岩が主要構成物質をなしており、下部の露出部では新鮮硬質であるが、中～上部にかけては割れ目の多い風化岩盤となっている。また、法面に対して受け盤状の構造を呈しているが、流れ盤方向の節理が発達しており、崩壊しやすい地山状態にある。

ロックアンカーのモデル化方法には、梁要素を用いる方法とアンカー力を外力として導入する方法¹⁸⁾の2とおりの方法が考えられる。緊張力の変化に着目して解析を行う場合は前者の方法が、斜面全体の安定性を検討する場合は後者の方が取扱いが簡単である。ここでは、アンカー力を外力として与え、切土斜面全体の安定性を評価した事例を示す。

b) 解析

図-4.4.10は尾根部の中腹を1:0.3勾配で切土した岩盤斜面を示したものである。表-4.4.4は解析に用いた物性値である。これらの物性値はボーリング調査、岩盤計測 (ISRM 試験)、岩石試験などから決定した。

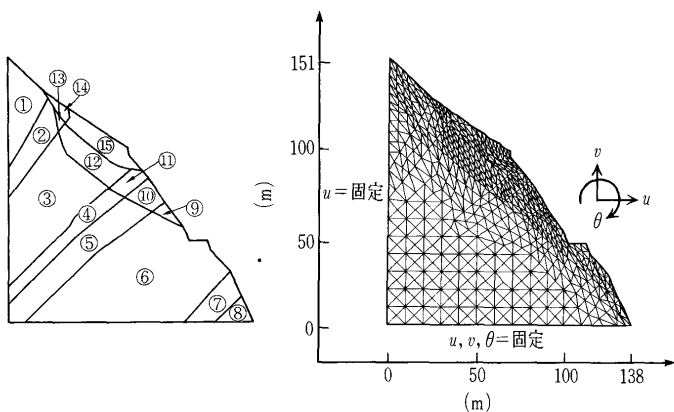


図-4.4.10 現況の地質断面と解析モデル

表-4.4.4 各地層の物性値

	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ (kN/m ³)	粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 θ (°)
①	30	0.100	25	0.3	40.0
②	44	0.120	19	0.3	40.0
③	32	0.150	24	0.3	40.0
④	44	0.120	27	0.3	40.0
⑤	33	0.170	27	0.45	35.0
⑥	44	0.120	27	0.15	43.0
⑦	33	0.170	27	0.15	43.0
⑧	44	0.120	27	0.150	43.0
⑨	44	0.120	26.5	0.031	38.4
⑩	33	0.170	26.5	0.031	38.4
⑪	44	0.120	26.5	0.031	38.4
⑫	32	0.150	26.5	0.031	38.4
⑬	44	0.120	26.5	0.031	38.4
⑭	44	0.120	18	0.013	25.5
⑮	32	0.150	18	1.013	25.5

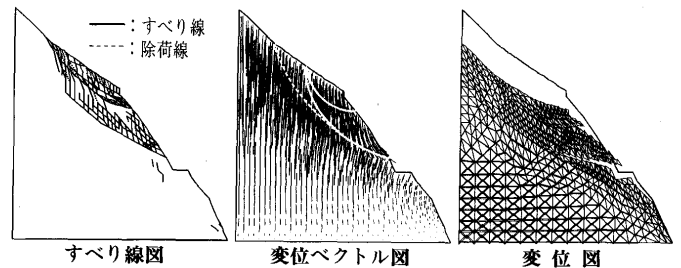


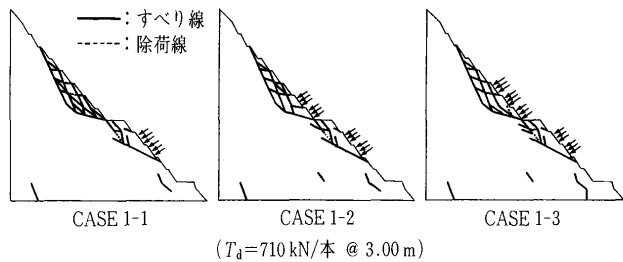
図-4.4.11 自重による現況地形の解析結果

図-4.4.11は自重を外力として現況地形の安定解析を行った結果を示したものである。すべり線図より、物性値番号⑨～⑮のすべての層において細かいすべり線が多数発生している。また、変位ベクトル図におけるベクトルの流れ状態より、白抜きで示した三つのすべりが想定できる。崩壊は、実線の二つの箇所が発生し、次いで、破線部分へ拡大するものと予測され、早急な対策が必要である。なお、本解析では斜面崩壊が発生しているため、自重が100%载荷されていない。図-4.4.11に示した変位ベクトルならびに変位モードは全体の変位挙動を調べるために、12%自重载荷時の状態を描いたもので、変位量そのものには意味がない。ここでは、この岩盤斜面に対して、切土を行い、さらにロックアンカーを打設して安定化対策を行うこととした。

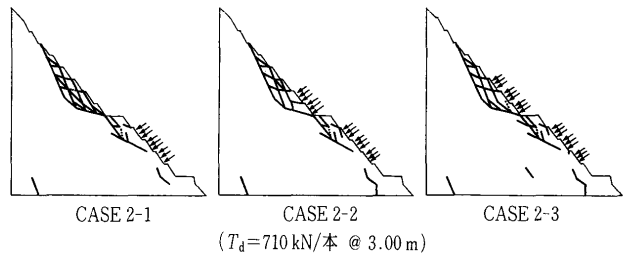
図-4.4.12は、切土後にアンカー力 (T_d) が710 kN/本のロックアンカーを3m間隔で打設した解析結果である。ケース1-1は下部の2段にロックアンカーを打設した例で、さらに上方に2段、3段と打設した例がケース1-2、1-3、下部の3段に打設した例がケース2-1で、この上方に2段、3段と打設した例がケース2-2、2-3である。

ケース1-1の解析結果より、現況解析でみられた法面下部の内部に発生していた細かいすべり線と斜面内部全体にわたる連続した長いすべり線が消えている。さらに

講座

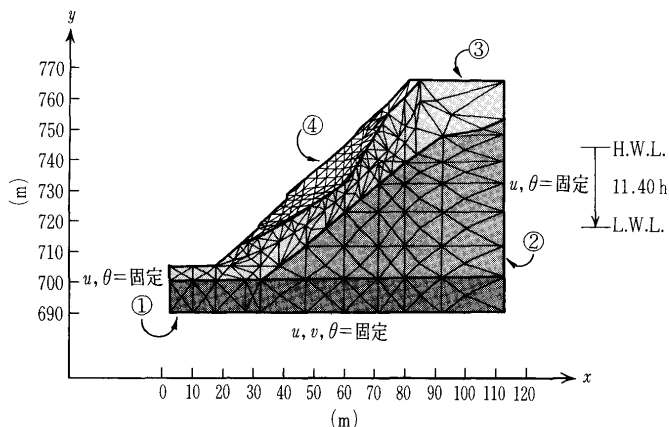


($T_d=710 \text{ kN/本} @ 3.00 \text{ m}$)



($T_d=710 \text{ kN/本} @ 3.00 \text{ m}$)

図—4.4.12 アンカー力を考慮した解析結果



図—4.4.13 水没斜面の解析モデル

表—4.4.5 解析に用いた物性値

	変形係数 E (GPa)	ポアソン比 ν	単位体積重量 γ (kN/m ³)	粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 ϕ (°)	引張り強度 σ_t (MPa)	透水係数 K (cm/s)
①	2.00	0.10	27	2.000	45.0	0.580	1.0
②	0.50	0.15	25	0.250	40.0	0.292	35.0
③	0.10	0.15	22	0.120	36.0	0.162	40.0
④	0.01	0.20	20	0.028	32.0	0.037	200.0

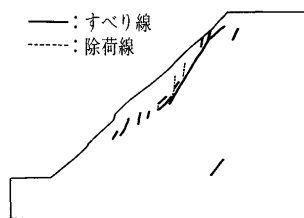
上方にアンカーを2段、3段と増やすことで斜面上部のすべりが減少しているが、あまり効果は見られない。

一方、下部を3段とした場合、斜面全体にわたって発生していた大きなすべり線が消滅し、ケース1-1~1-3でみられた下部の法面に達するすべり線が部分的に消え、すべり線は法面内部に止まっている。この例では、下部斜面に待ち受け型のアンカーを1段増やすことで安全性を高める結果となったが、全体的には、不安定な状態が続いており、さらなる対策を検討する必要がある。

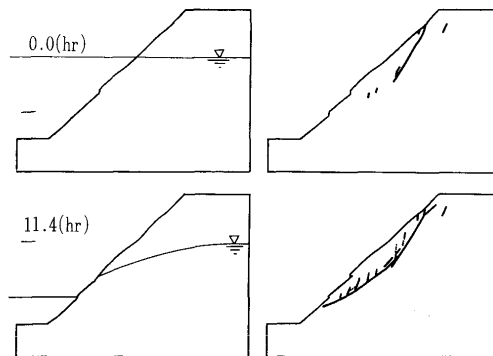
2-3) 水没斜面の安定解析事例

a) 概要

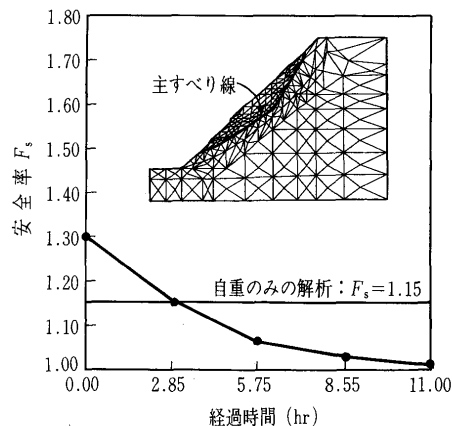
図—4.4.13は砂岩泥岩の互層からなり、表層を崩積土が覆っている岩盤斜面のモデルである。ボーリング調査を基に仮定した物性値を表—4.4.5に示す。RBSMによ



図—4.4.14 自重による初期状態の解析



図—4.4.15 高水位と低水位の解析結果



図—4.4.16 すべり面上の安全率

る離散化極限解析は、いわゆる材料非線形解析であるため、強度関係の物性値を慎重に決定する必要がある。本事例では、粘着力、内部摩擦角を三軸圧縮試験結果をもとに仮定したが、ISRM試験や、他の地盤における同様の地質に対する物性値などを参考にして総合的に判断する必要がある。また、変形にかかわる物性値は、平板載荷試験や孔内試験などの原位置試験や、三軸圧縮試験などの室内試験を参考に決定すべきであるが、本事例では同様の地質に対する物性値を参考に仮定した。著者の研究室では、岩盤物性に関するデータベースシステムを作成しており、このようなシステムを利用することで、より多くのデータを参考として物性値の仮定が行える。

b) 解析

図—4.4.14は自重を外力として解析した初期状態の結果で、細かいすべり線は見られるものの、連続したすべり線が発生しておらず、斜面の安定は保たれている。この斜面に高水位 (H.W.L.)=744 mから低水位 (L.W.L.)=718 mまで11.4時間でドローダウンが起こる場合について検討した。解析にあたり、間隙水圧は有限

要素法による浸透流解析で求めた¹⁹⁾。間隙水圧を考慮したRBSMによる解析法として有効応力法的取扱いはあるが²⁰⁾、ここでは、この間隙水圧を浮力に換算して解析した。

図—4.4.15は満水時とドローダウン終了時のすべり線を示したものである。満水時には水圧の効果によって、初期状態よりすべり線が減るが、ドローダウン終了時には大きなすべり線が発生している。この連続したすべり面上のせん断力と垂直力から求めた安全率を時刻ごとに整理した図が図—4.4.16である。満水時から時間の経過とともに安全率が低下する傾向が得られた。

3) 今後の課題

ここで紹介した、水との連成解析の手法は簡便的なものであり、今後、構成式レベルで水の影響を考慮した手法を開発する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 佐々木猛・永井文男：複合降伏モデルによる斜面の安定性に関する検討，土木学会，第48回年次学術講演会講演概要集，Vol. 3, pp. 1338~1339, 1993.
- 2) 永井文男・佐々木猛：ジョイント要素および複合降伏モデルによる岩盤斜面安定性の検討，第29回土質工学研究発表会講演論文集，pp. 1243~1244, 1994.
- 3) 佐々木猛・吉中龍之進・永井文男：有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究，土木学会論文集，No. 505/Ⅲ-29, pp. 59~68, 1994.
- 4) Yoshinaka, R., Kido, K., Sasaki, T. and Hagiwara, K.: Stability and long-term monitoring of large excavated rock slopes, ISRM Congress Paris, pp. 1443~1446, 1999. (to appear)
- 5) 吉中龍之進・佐々木猛・田部井和人・萩原捷男：長大岩盤掘削斜面の安定性検討，第34回地盤工学研究発表会，pp. 1137~1138, 1999.
- 6) 地質ニュース，地質調査所，通巻523号，3月号，1998.
- 7) 木戸研太郎・吉中龍之進・森川誠司・鹿毛量・佐々木猛：複合降伏モデルを用いた有限要素解析による節理性岩盤斜面挙動の検討，第32回地盤工学研究発表会講演論

- 文集，pp. 1287~1288, 1997.
- 8) 木戸研太郎・吉中龍之進・森川誠司・石井大介・鹿毛量・佐々木猛：等価連続体モデルを用いた節理性岩盤斜面挙動解析，日本計算工学会，Vol. 3, pp. 907~910, 1998.
- 9) 山上拓男・滝昌和・蔣景彩：極限平衡法に基づく進行性破壊を考慮した斜面安定解析，土と基礎，Vol. 47, No. 5, pp. 9~12, 1999.
- 10) Kawai, T.: New element models in discrete structural analysis, J. of the Society of Naval Architects of Japan, No. 141, pp. 187~193, 1977.
- 11) 川井忠彦：離散化極限解析法概論，培風館，1990.
- 12) 川井忠彦・竹内則雄：離散化極限解析プログラミング，培風館，1990.
- 13) 竹内則雄：地盤力学における離散化極限解析，培風館，1991.
- 14) 竹内則雄・川井忠彦：すべり・接触・引張破壊を考慮した離散化極限解析法について，日本鋼構造協会構造工学における数値解析法シンポジウム論文集，Vol. 12, pp. 311~316, 1988.
- 15) 竹内則雄：RBSMの直交異方性要素による鉄筋により補強された岩盤ジョイントのモデル化について，明星大学研究紀要—理工学部一，Vol. 29, pp. 121~134, 1992.
- 16) 奥園誠之・小川正二：設計における土のせん断強さと c 、 ϕ の考え方7，土と基礎，Vol. 32, No. 12, pp. 75~81, 1984.
- 17) 藤井齊昭・浜田英治：鉄筋による砂斜面の補強法に関する室内試験—安定解析法の検討—，中央大学理工学部紀要，Vol. 28, pp. 163~179, 1985.
- 18) 永岡雅大・竹内則雄・濱崎英作・大河原彰：ロックボルトおよびアンカーの打設角度について，土木学会第53回年次学術講演会概要集(3A)，pp. 442~443, 1998.
- 19) 大西有三・村上毅：有限要素法による地盤の応力・変形を考慮した浸透流解析，土木学会論文報告集，No. 298, pp. 87~96, 1980.
- 20) 竹内則雄・前原雅之・田中弘・高橋昌弘：間隙水圧を考慮したRBSMによる簡易斜面安定解析，土木学会第51回年次学術講演会概要集(3A)，pp. 432~433, 1996.
- 21) 亀村勝美：不連続性岩盤の調査・解析と評価，土と基礎，Vol. 48, No. 4, pp. 51~56, 2000.