

ブロック理論による岩盤斜面の解析と適用例

Application of Block Theory for Rock Slopes

三木 茂・西垣 好彦*

Shigeru Miki & Yoshihiko Nishigaki

Abstract: An outline of "Block theory" which was proposed by Goodman & Shi (1985) for rock slope analysis is described. Use of Block theory has not been common in practical works in Japan, because it was originally designed to individually analyze unstable blocks in excavation-walls. We have considered the capability of Block theory for analyses in weathered and jointed rock slopes. The "maximum key block" concept leads to success. This maximum key block region does not mean a failure region, but it is regarded as a region for support. Failure is usually initiated along pre-existing weak planes, even if the rock mass is deeply weathered. Supports of maximum key block regions in the early stages of excavation prevent failures. The three dimensional shape of the maximum key block region enables achievement of a detailed equilibrium analyses of rock slopes. The paper presents examples of the maximum key block and an application in weathered and jointed rock.

はじめに

岩盤中には小断層や節理などの多数の割れ目が含まれており、岩盤や岩石材料の強度変形特性、斜面破壊の形態などは、これらの割れ目に大きく支配されている。これらの割れ目は岩盤や岩石材料を区切り、力学特性の不連続性を示す面となることから、応用地質学や岩盤工学の分野では、層理面や片理面なども含めて不連続面とし、研究・実務の対象としている。さらに、不連続面は一種の損傷部や弱面であり滑り面としての挙動を示すため、トンネルや斜面などの掘削面においては岩塊が不連続面に沿って滑り

出す危険性がある。このため掘削面の安定性を評価する場合、不連続面の方向、分布、強度が重要となる。掘削面の安定評価においては、不連続面は岩盤を岩塊に区切る弱面であり、その方向や分布は掘削面の破壊形態や規模を規定する要因であり、強度は不連続面に沿った岩塊の滑りを規定する要因として扱われる。しかも、滑り出してくる岩塊が不連続面の組み合わせにより複雑なくさび形を示すことがあり、掘削面の安定評価に2次元断面での安定解析手法や円弧滑りに対する安定解析手法を適用することは妥当でない場合が多く、3次元での安定解析が必要となる。しかし、一般的な3次元の安定解

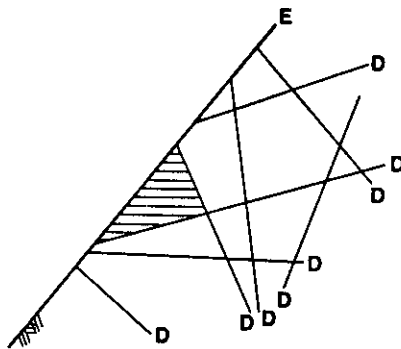
*基礎地盤コンサルタンツ(株)関西技術センター

析は数学的取扱いが複雑であるため、実務的に利用されるのは平面滑り破壊や単純なクサビ破壊などごく限られた条件の場合のみであった。しかし、近年の地下空洞や長大法面など掘削規模の大型化にともない、不連続面の分布に即した一般的な3次元の安定解析が必要となっている。ブロック理論はこのような要求に答えるものであり、これにより手軽に3次元の安定解析を行うことができる。ここでは、ブロック理論に従った不連続面の応用地質学的・岩盤工学的扱いを示すとともに、斜面についてブロック理論を応用した調査・解析手法について考察し、実斜面での調査解析例を報告する。

ブロック理論

(1) 調査・解析の流れ

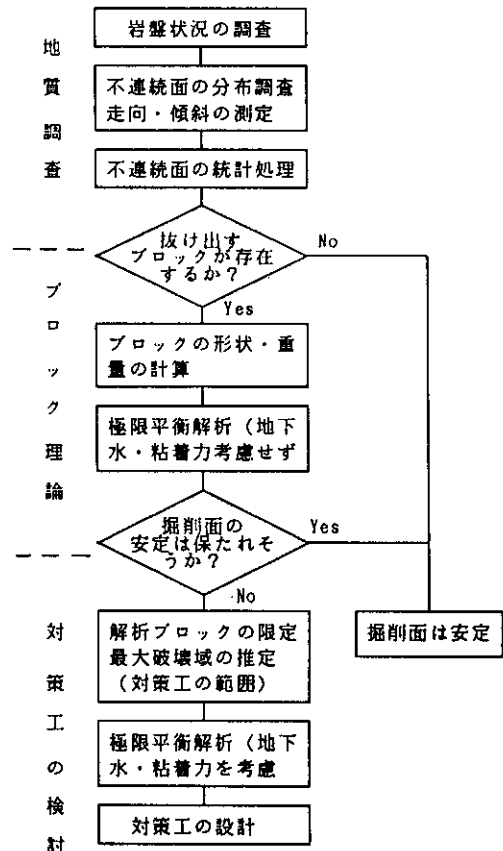
岩盤内にある節理や小断層などの不連続面と掘削面の組み合わせにより種々の形状の岩塊(ブロック)が形成されるが、掘削面から抜け出し大規模な岩盤滑りを生じる原因となる危険な岩塊を、Goodman & Shi (1982)は「キーブロック」と呼び(第1図)、キーブロックの幾何学的・運動学的性質を明らかにした。さらに、Goodman & Shi (1985)はこのような岩塊に対して安定評価を行う「ブロック理論」をまとめた。ブ



第1図 斜面上のキーブロック
E:掘削面, D:不連続面, 斜線部:キーブロック
キーブロックが動くとき斜面全体が崩壊してしまう可能性がある。

ロック理論は地質調査などから得られた岩盤中の不連続面の幾何学的情報から危険なブロックを検索し、簡単な3次元の極限平衡解析により掘削面の安定評価を行うものである。同理論の特徴は、ステレオネットを用いて図式的にキーブロックの検索・安定評価が行え、パーソナルコンピューターを利用すると迅速に解析が行えることにある。キーブロックの検索・ブロック理論による掘削面の安定評価のシステム化については、川本・藤川(1984)、大西ほか(1985)の研究があり、岩盤斜面・地下空洞への同理論の適用法が示されている。

第2図はブロック理論を用いた岩盤の安定評価の調査解析手順を示したものである。地質調査は節理などの岩盤中の不連続面の性状・方向



第2図 ブロック理論による調査・解析の手順

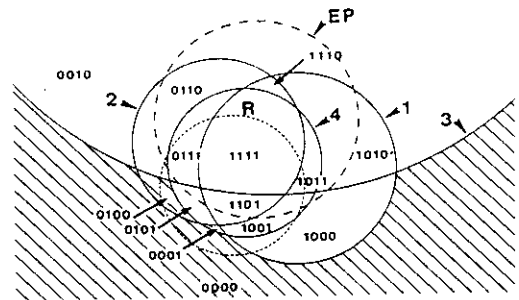
に関するものが中心となり、不連続面の発達が著しい場合は、実測された不連続面の方向性のデータをステレオ投影法等によって統計的に処理し、代表的な不連続面を選び出すことになる。この不連続面の方向性の調査は、露頭観察、掘削面観察によることが多いが、後述する適用例では現地調査で迅速に行えるボアホールテレビ観察を利用している。この調査法では、深部の不連続面の頻度・方向のほか、掘削面・地表面に現れている不連続面との関係を調べることが可能となる利点がある。ブロック理論における入力情報は、代表的な不連続面の方向・間隔・面の強度としての摩擦角、および掘削面の方向であるが、その際、大西ほか(1985)に従って以下の事項を仮定する。

- ①不連続面は完全な平面とし、面の強度は摩擦角(ϕ)で代表する。
- ②不連続面は対象岩塊に対して十分な広がりを持つ。
- ③岩塊(ブロック)は剛体とみなし、岩塊自身の変形・破壊は考えない。
- ④不連続面・掘削面は方向を示すパラメーター(走向・傾斜など)で示す。

さらに、不連続面の発達した岩盤において、実用的にブロック理論を適用するために、不連続面群の連続性・方向性・間隔などに対して確率統計処理を適用し、より現実的な岩盤モデルを作成する研究も進められている。解析は掘削面において岩盤中の不連続面で形成されるキーブロックを検索することから始め、不連続面間隔からキーブロックの3次元形状の推定を行う。なお、掘削面で観察した不連続面の位置が明らかな場合、掘削面上でのキーブロックの位置の確認を行うことができる。次に、掘削面の安定に重要な不連続面を選び出し、3次元の簡単な極限平衡解析より概略の安定評価を行う。以上がブロック理論を適用して行えることであるが、第2図では解析ブロックが限定された後、粘着力・地下水位を考慮した極限平衡解析も記してある。この具体的な方法については一般に行われているので、本文ではふれない。

(2) キーブロックの検索

第1表に示す4組の不連続面と掘削面を例にキーブロックの検索方法を示す。検索は各面をステレオネットに投影することから行い、第3図は第1表に示した面を等角投影ネットに下半球投影したものである。図中において、点線の円Rは投影ネットの外円すなわち基準円を、破線の円EPは掘削面に対する大円を、実線の円1~4は各不連続面に対する大円を表している。ブロック理論では、各面をステレオ投影するとき、計算処理が容易な等角投影法を用いるとともに、大円を基準円の外部領域にわたり描く。ここで、不連続面の大円に囲まれた領域は、不連続面の組合せで形成されるブロックを示す。図において各領域の“1”と“0”の数字は、“1”はブロックの実質部が該当する不連続



第3図 ステレオ投影法によるキーブロック検索
R:基準円(点線), EP:掘削面(破線), 1~4:不連続面(実線), 0001など:ブロックコード。投影法は等角投影法下半球投影。斜線部はキーブロックの存在領域で、JP=0000, JP=0001, JP=0100の3ブロックがキーブロックとなる。

第1表 不連続面、掘削面の方向と摩擦角

面の区分	走向	傾斜	摩擦角
1	N15W	43W	43°
2	N73E	33S	24°
3	N83W	78S	36°
4	N62W	20S	17°
掘削面	N70W	45S	

続面の下側にあることを，“0”はブロックが不連続面の上側にあることを表す。この数字の組合で不連続面から形成されるブロックのコード番号(ブロックコード:JP)を記述し、それぞれのブロックの状態を表す。ステレオネットに下半球投影した場合、大円の内側が“1”の領域、大円の外側が“0”の領域となる。例えば、ブロックコード“0100”は、ブロックが1・3・4の面に対して上側に、2の面に対して下側にあることを表す。

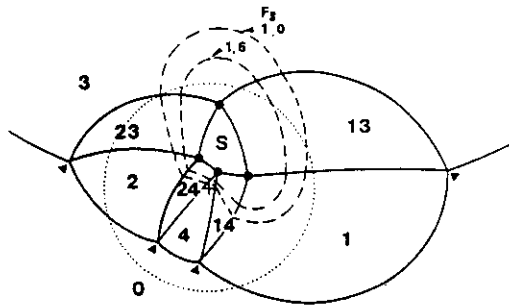
次に、これらのブロックのうち掘削面から抜け出すブロック、すなわちキーブロックの検索を行う。キーブロックは第3図におけるブロックの領域と基準円Rと掘削円EPの位置関係により検索でき、ブロックの領域が掘削円EPの外側となるとき、そのブロックは掘削面から抜け出すことが可能なブロックとみなされ、さらに、そのブロックの領域の一部あるいは全域が基準円Rに含まれる場合、掘削面から滑り落ちる可能性のあるキーブロックとみなされる。この関係を模式的に示すと第4図のようになり、最下段の関係がキーブロックとなる。第1表、第3図の例において、キーブロックになるのは図中の斜線部であり、これに含まれるブロックはJP=0001・JP=0100・JP=0000の3ブロックである。

(3)キーブロックの安定評価

上記で明らかになったキーブロックについて、それぞれ安定性の評価を行う。ここでも、解析にステレオ投影法を利用するが、これは、Londe et al. (1969)による方法を応用したものである。例として前述のJP=0000のブロックについて、ステレオネットを用いて極限平衡解析を行ったものを第5図に示す。図において、●印は各面の極を表し、各大円の交点と極を大円で結んだ曲線と大円で囲まれた領域“S”“0”“1”～“4”“13”～“24”は、ブロックの破壊モードを示す。例えば、力(重力:基準円の中心+印)が“1”の領域に作用している場合、このブロックは1の面を滑り面として破壊すると判定される。“24”の領域に力が作用してい

		斜面の状態	下半球投影
有限 ブロック	先細 ブロック		
	孤立 ブロック	安定	
		不安定 ←-ブロック	

第4図 ステレオ投影法によるキーブロックの判定
R: 基準円, EP: 掘削面.



第5図 ステレオ投影法による極限平衡解析
+ : 力の作用点, ● : 各不連続面の極, ▲ : 各大円の交点で、極から90°の距離に位置する。投影法は等角投影法下半球投影。S, 0, 1, 23などは破壊のモードを, Fs : 安全率(破線は等安全率線)。

る場合、2の面と4の面の交線にそってブロックが破壊すると判定される。さらに、“0”の領域に力が作用している場合、ブロックは抜け落ちることになる。一方、“S”の領域に力が作用している場合、そのブロックは安定であり、掘削面から抜け落ちることはないと判定される。第5図では、力が“4”の領域に働いているので、JP=0000のブロックは4の面を滑り面として破壊する。ブロックの安定性の検討は、斜面上に置かれた物体の安定を検討する方法と同じ方法で行う。安全率Fsは

$$Fs = \tan \phi_a / \tan \phi_r \quad (1)$$

で示され、 ϕ_a は滑ろうとする面の摩擦角、 ϕ_r はブロックに作用する力と滑り面の法線のなす角度となる。図において、極(●印)と力の作用している位置(+印)の距離(角度)が ϕ_r となり、上式で安全率計算することができる。この例では安全率は $F_s=0.85$ となり、 $JP=0000$ のブロックは危険なブロックである。定性的には、力の作用している位置が“S”の領域に近いほどブロックは安定性がある。なお、図中の波線はこの方法により等安全率線を描いたものである。同様の作業を全てのキーブロックについて行い、掘削面の安定評価を行う。

ブロック理論の岩盤斜面への適用性の考察

我国においては、斜面掘削の対象となる岩盤は多くの不連続面を含んだ強風化岩・軟岩である場合が多いことから、ブロック理論を適用するには以下の問題がある。

- ①不連続面が多く含まれている場合、小規模なクサビ破壊と全体的破壊の関係が明らかでなく、全体的な破壊は必ずしもキーブロックによるクサビ破壊とはなっていない。
- ②強風化岩・軟岩では、不連続面の強度とともに岩塊自体の強度が安定上問題となることが多く、ブロック理論により不連続面の強度から掘削面の安定性を評価するのは問題がある。
- ③ブロック理論における極限平衡解析では、滑り面の粘着力・地下水位が考慮できず、実用的な安定解析を行うことができない。

これらの問題点に対して、次のように考察することにより、ブロック理論の適用性は拡張される。一般に、強風化岩・軟岩斜面の破壊形態は、円弧破壊に近い形状を示していることが多いが、これらは何らかの形で、既存の節理・断層などの不連続面に破壊形態が支配されていたと考えられる形跡がしばしば観察される。また、全体破壊に先立ち、しばしば小規模な崩壊が見られるが、このような小崩壊は既存の不連続面などに規定されたクサビ破壊であることが多

い。すなわち、脆弱な岩盤斜面においても破壊の初期においては、既存の不連続面に支配されていると判断される。このことは次のことから説明される。岩石材料の強度については、「ピーク強度>残留強度」の関係があり、岩盤中の不連続面などの弱面の強度を残留強度とみなすと、強度の低い既存の弱面から崩壊は進行することになる。強風化岩石材料についても、ピーク強度と残留強度の差は小さいが、この関係は成り立っている。すなわち、切土法面の変形が微小な段階は、既存の弱面から変形・破壊が進行するとみなせる。

一方、掘削面において多数の不連続面が発達している場合、いずれの不連続面が滑り面となるか判断できず、どのような規模で崩壊が進行するかを想定するのが困難である。このようなとき、しばしば破壊域は経験的に決められ、必ずしも不連続面の調査結果が破壊域の設定に反映されていない。しかし、調査結果の統計処理で得られた代表的な不連続面に対し、ブロック理論を適用することにより、最も危険なブロックを形成する不連続面の組合せとその3次元形状から、最小単位のキーブロックが判明する。第6図は斜面における不連続面状況を模式的に示したものであるが、図中に示した最小単位のキーブロック以外に、規模の一段階大きいキーブロック、あるいはキーブロックが複合したものなどさまざまな危険な岩塊が想定される。ここで、破壊領域を想定する一つの方法として、Shi & Goodman (1987)による最大キーブロックの概念を適用する。最大キーブロックは、第6図に示したように掘削面に対して許される最大限の形状のブロックを想定したもので、最小単位のキーブロックと相似な形状を示す。なお、このブロックは必ずしも破壊時のブロックの形状を示しているのではなく、掘削面の安定のために補強すべき領域を表していると解釈される。第6図では、ブロックの形状を2次元で示したが、実際には3次元形状のブロックとなる。また、法面の延長方向に対して同様な岩盤状況である場合、このような最大キーブロックは法面のどの位置においても想定されるので、この

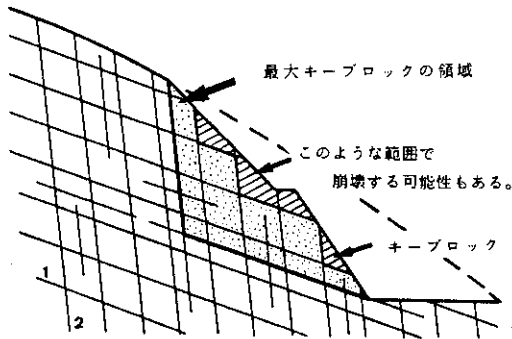
ブロックの連続的集合として、仮想的に平面破壊状のブロックを想定することができる。この関係は第7図に示すように、クサビ状の最大キープロックの稜線(滑り面の交線)の集合として仮想的な平面が形成される。しかし、このような面は、必ずしも岩盤中の弱面の構造を直接反映したものではなく、支保の範囲を示す面と解釈され、実質的に補強すべき領域を決定することができる。

以上まとめると、斜面破壊の初期段階あるいは施工前の段階においては、掘削面に対して最も危険なブロックを形成する不連続面の組合わせ、その3次元形状を解析することは、全体破壊を未然に防止すべく対策を行う上で有効であり、ブロック理論の適用性がある。このように、ブロック理論の利用により、掘削面の安定に問題となる不連続面の組合せによるブロックの限

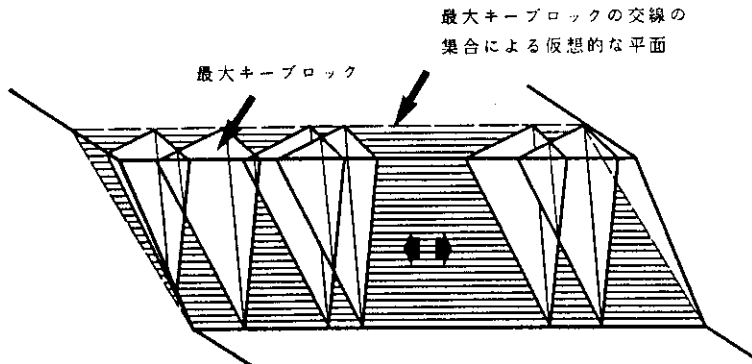
定を行い、解析モデルの単純化を図ることができ、従来、手作業で行われていた岩塊を形成する不連続面の検索、岩塊の3次元形状の複雑な計算を合理的に行える。また、ブロック理論における概略の極限平衡解析は、ブロックの3次元形状とともに最も危険なブロックを判定する根拠として利用でき、前述のように解析ブロックの形状を確定できれば、地下水位・滑り面の粘着力などを考慮した3次元の極限平衡解析により詳細な安定評価が可能となり、抑止力などが計算できる。

適用例

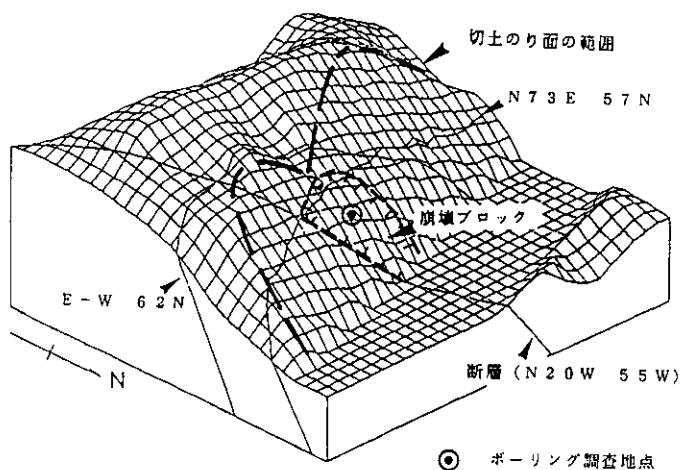
前述の考察に基づいた解析事例を次に示す。まず最初に、最大キープロックの概念の適用性を示す事例を示す。第8図は風化花崗岩での崩壊事例であり、崩壊形態は風化岩盤であるためやや不明瞭であったが、法面・ボアホールテレビによる観察結果から崩壊岩塊は断層(N20W 55W)、主滑り面(N73E 57N)および岩盤中に多数発達する片麻状構造と平行な東西性の節理で囲まれた岩塊が崩壊したと判断された。主滑り面の方向は、図中の調査ボーリング孔においてボアホールテレビ観察により確認されたものである。この崩壊岩塊の形状はクサビの先端が法尻よりわずかに深い所にくるような偏平なクサビ状岩塊であるが、図に示すように3方向の小断層と節理による最大キープロックであったと



第6図 最大キープロックの概念



第7図 三次元空間での最大キープロック

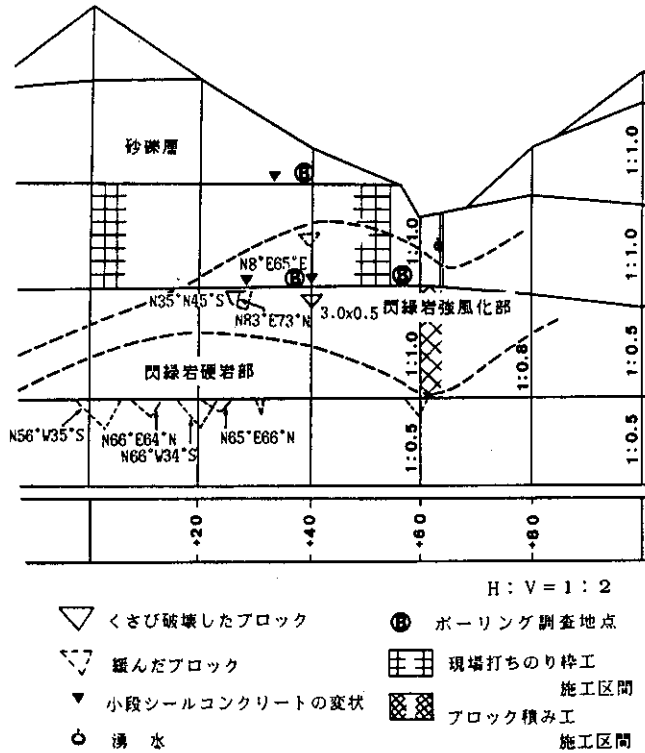


第8図 崩壊のり面の鳥瞰図(最大キープブロックによる斜面の崩壊例)

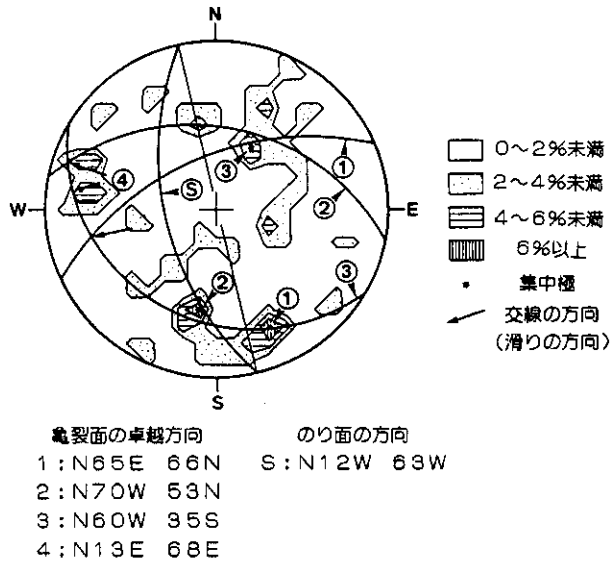
判断できる。このクサビ状岩塊の先端が法尻よりわずかに深い位置にくるように崩壊しているのは、風化のために岩塊そのものの強度が低下していたためと考えられる。この事例は風化岩盤においてもブロック理論が適用でき、最大キープブロックの考え方が有効であることを示している。

次に、崩壊の初期段階にブロック理論を適用し、これにより対策工を設計した事例を示す。第9図に小規模な崩壊が生じた法面の状況を示す。法面は花崗岩類の岩盤であり、道路建設のため最下段法面を掘削中、法面の強風化部の既存の節理に沿って小規模なクサビ破壊が生じた。このクサビ破壊は、大きな崩壊につながる危険性があったので、直ちに押え盛土が施工された。押え盛土後のボーリング調査に加え、ボアホールテレビによる節理調査を行った。ボアホールテレビで測定した岩盤中の節理面と法面で測定した節理面の方向をシュミットネットに投影し、統計処理を行うと第10図のようになり、代表的な節理として4種類あることが明らかとなった。この代表的な節理を基に、ブロック理論を用いて推定した最も危険なブロックの形状は、第10図の①と③の節理の組合せと④の引張り節理によるブロックで、第11図(a)に示した形状となり、実際に生じたクサビ破壊の形状に

類似したものであった。一方、強風化部から軟岩部にかけてのボーリング孔での節理は20～30cm 間隔で観察され、赤褐色に変色したものもあり、状況は切土面上と同じであった。しかし、滑り面と特定できるような節理は観察されなかった。岩盤状況の調査結果を、第11図(b)に断面図として示す。以上のような状況から判断し、対策工の範囲は、節理①③④で形成される最大キープブロックにより決定することにした。しかし、第9図・第11図(b)に示した調査結果から、切土法面で考えられる最大キープブロックとして、硬岩部を含む切土法面全面のブロックを想定することは、過大設計であると判断し、第11図(a)に示すように強風化部で最大となるブロックとした。その断面を第11図(b)に併せて示す。このブロックは切土法面の節理状況から、法面上でその位置を特定したのではなく、法面上のどこにおいても想定されるものである。また、一度にこのようなブロックが崩壊するのではなく、当法面の強風化部に対して安定を与えるために必要な補強すべき範囲を示したものである。極限平衡解析は上記のクサビ状のブロックについて行い、目標安全率に必要な抑止力を求め、それに対する対策工の検討を行った。

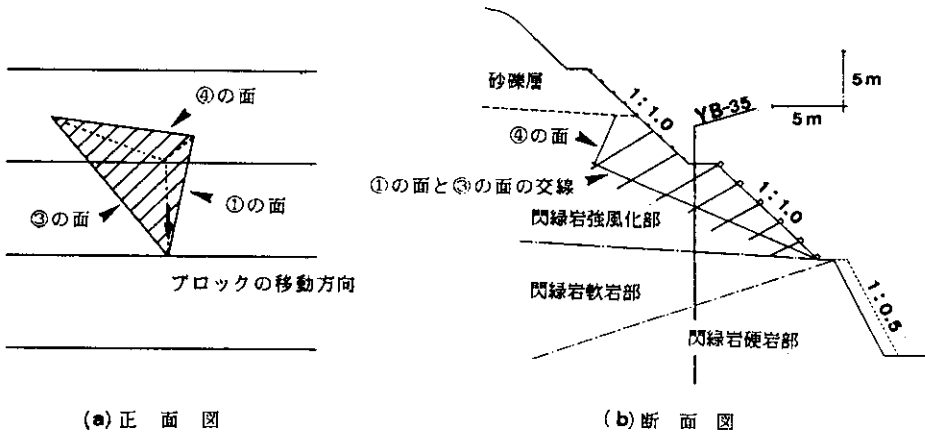


第9図 のり面の状況 西垣ほか(1989)



第10図 亀裂面の方向の密度分布 西垣ほか(1989)

S: のり面の方向, 1~4: 卓越亀裂の方向・極. 投影方法は等面積投影下半球投影.



第11図 強風化部の対策工の範囲 西垣ほか(1989)
第9図+60付近.

まとめ

応用地質学や岩盤工学においては、岩盤中の節理などの割れ目を不連続面とみなし、不連続面は岩盤中の弱面として扱う。ブロック理論は、このような不連続面を含んだ岩盤に対して安定評価を行うものであり、ここではブロック理論による不連続面の取扱いを示した。不連続面の方向や分布は崩壊形態や規模を規定する要因であり、不連続面の強度は不連続面に沿った岩塊の滑りを規定する要因となる。さらに、ブロック理論の軟岩・風化岩盤への適用性について考察し、実現場への適用例を示した。対象岩盤が軟岩・風化岩盤であっても、崩壊の端緒が既存の節理や小断層などの不連続面であることが多く、崩壊の初期段階においては、実務的にブロック理論は適用できるものと考えられる。このとき、最大キープロックの概念に基づき、3次元解析モデルの作成を行い、このモデルにより詳細な極限平衡解析が可能となる。なお、適用の妥当性については、今後、多くの事例により確認していく必要がある。

謝辞 本稿を草するにあたり、鹿児島大学理学部地学教室横田修一助教授をはじめシンポジウム世話人の方々に貴重な御意見をいただき

たことに厚く御礼を申し上げます。

文献

Goodman, R. E. and Shi, Gen-Hua, 1982: Geology and Rock Slope Stability-Application of the Key Block Concept for Rock Slope. Proc. 3rd Int. Conf. on Stability in Surface Mining, 347-373.

Goodman, R. E. and Shi, Gen-Hua, 1985: Block Theory and Its Application to Rock Engineering. Prentice-Hall, 338p.

川本眺万・藤川富夫, 1984: 岩盤掘削面におけるキープロック安定解析のシステム化について. 土木学会論文集, no. 346/III-1, 47-55.

Londe, P., Vigier, G. and Vormeringer, R., 1969: Stability of Rock Slopes, a Three-Dimensional Study. Proc. ASCE J. Soil Mech. and Found. Div. 95, SM7, Jan, 1411-1434.

西垣好彦・三木茂・小丸巖, 1989: 不連続性岩盤切土の新しい調査と解析, 第18回日本道路会議論文集, no. 205, 120-121.

大西有三・長野恵一・藤川富夫, 1985: ブロッ

ク理論による不連続性岩盤掘削時の安定性評価について. 土木学会論文集, no. 364 / III-4, 209-218.

Shi, G. E. and R. E. Goodman, 1987: Stability

Analysis of Infinte Block System using Block Theory. 第4回キープロック実用化研究会(I), 社団法人システム総合研究所, 1-72.