

ブロック理論の基礎

平成10年2月

Q Tech

〒631-0801
奈良市左京 2-3-1-5-504

TEL 0742-72-1204
FAX 0742-72-1207

阿部 求

1. まえがき

最近、大手ゼネコン、設計コンサルタントが相次いで「ブロック理論」の実用化に取り組み始めている。日本産業経済新聞紙上にも次のような記事が掲載されていた。

東急建設 岩盤のひび割れ状況 コンピューター解析

東急建設は岩盤のひび割れ状況をコンピューターで解析する新手法を開発した。トンネル工事などで岩盤を掘削していく際に、掘削面に現れるひび割れの長さや方向から、岩盤内部のひび割れ面の形状や落ちて来そうな岩塊の大きさを予測し、図面として出力する。従来、最終的には熟練者の経験とカンに頼っていたのに比べ、補強箇所と程度が正確につかめるため、大幅に省力化、低コスト化できる。

この手法は「キーブロック（岩塊）安定解析システム」。山岳トンネルを掘る際など事前にボーリング調査したり、掘削したりしながら岩盤のひび割れ状況をまず把握する。掘削面でのひびの大きさ、長さ、奥行きへの方向といった情報をコンピューターに入力する。コンピューターがその情報に沿って岩盤中のひび割れの様子を推定し、岩塊が落ちてきそうな部分を割り出す。

岩のかたまりの重さやそれを支えるために必要な長さのボルトを、現場で適当な長さのボルトを岩盤に打ち込んで補強する。

従来、岩盤を掘削する際に周辺にかかる力と状況を把握する方法にかかると状況把握する方法にFEM（有限要素法）が使われている。周辺部を細かな網目状に分け、それぞれの目はどういう力が働くかをコンピューターで計算する方法。ただFEMは岩盤が割れていない一体のものとして計算するため、実際に掘削していく際には熟練者が掘削面のひび割れを目で見ても、落ちてくる危険性を判断していた。

新システムだといちいち現場で専門家が確認しなくても、危険性を調べることができ、逆に不必要な部分まで補強しなくてすむため、労力や資材の面で大幅にむだを省ける。東急建設は現在、二カ所の工事現場でこのシステムの実証試験をしている。

ブロック理論は、カリフォルニア大学のR. E. Goodmanにより1981年に発表されたものであるが、翌1982年には応用地質株式会社の招待によりR. E. Goodman博士が来日し、「ブロック理論」についての講演が実施されている。しかしながら、その後、我国における「ブロック理論」の発展は必ずしも順調とは言えず、一部の大学、ゼネコンにおいて細々と研究されてきているのが現状である。

実際問題への適用性については未だ問題点も残されているが、切取り斜面やトンネル切羽の安定性などの分野で有効な調査、解析手法になるものと考えられる。そこで、「ブロック理論」について少しでも理解を深めるために、初級者を対象とした入門書を作成した。今後の技術的発展の一助となれば幸いである。

2. ブロック理論とは

節理の発達した不連続性岩盤の掘削面(地下空洞、斜面)においては、不連続面により形成される「くさび状岩塊」の滑落、崩壊が岩盤全体の变形、破壊を支配している。『ブロック理論』とは、このような崩壊を生じる最も危険な状態にあるくさび状岩塊(キーブロックと呼ぶ)を的確に見つけ出す方法を体系化したものである。簡単にまとめれば、いくつかの割れ目と掘削面とで構成されるブロックの3次元的な形と大きさを決定し、そのブロックが岩盤から抜け出すかどうかを判定する方法が「ブロック理論」の中身である。

簡単な例を図2-1に示す。図2-1(a)の石造りアーチにおいて、中央部にある陰影を付けたブロックがボルトで固定されている。このブロックが安定している限りアーチは機能する。この場合、このブロックがキーブロックとなる。図2-1(b)の場合、陰影を付けたブロック(1)を取り去るとブロック(2)、(3)が次々と崩落する。ブロック(1)が安定していれば空洞全体が安定する。この場合ブロック(1)がキーブロックとなる。

実際問題への適用に当たっては、3次元問題として取り扱う必要があるため、ステレオネット(ウルフネット)を使用して解析を行う。

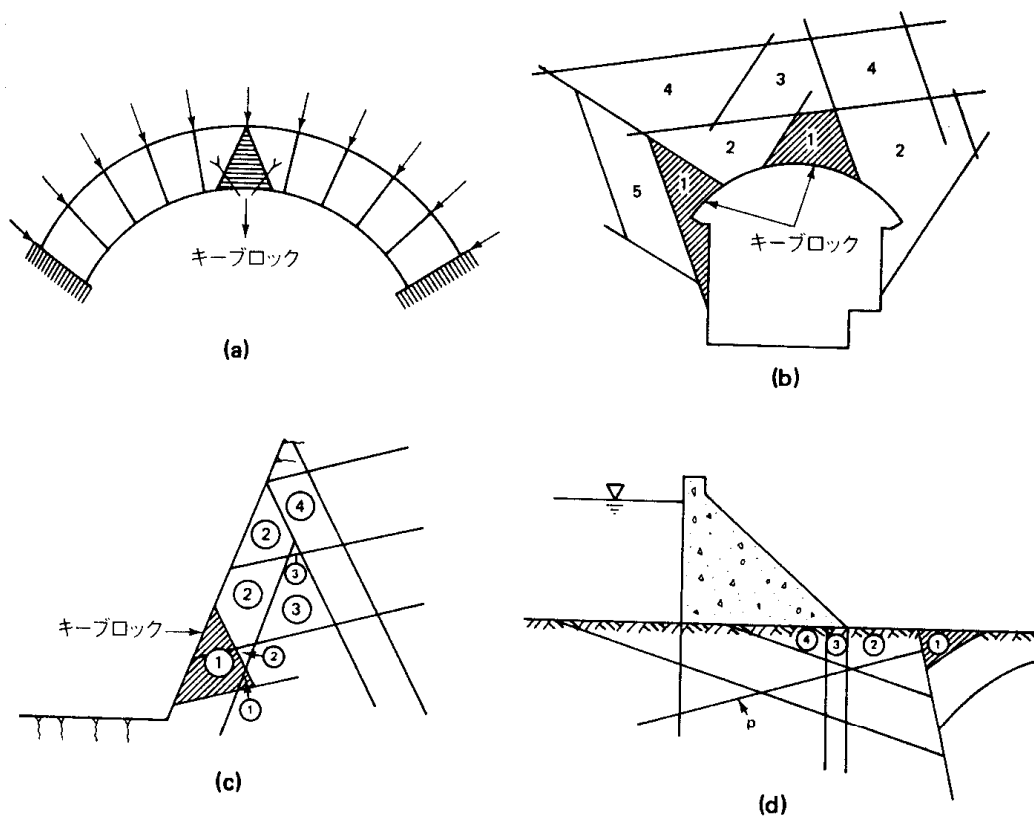


図2-1 キーブロック模式図

3. ステレオネット

キーブロック解析はステレオ投影を用いることにより図解法により簡単に解くことができる。ステレオ投影法は、地質学、結晶学等で3次元的な図解法として利用されてきているが、ここではやや異なった使い方をする。そこで、ステレオ投影の基本について簡単にまとめておく。

①. 等面積投影

等面積投影の原理を図3-1に示す。

鉛直軸と角度 α だけ傾いた直線OAを等面積投影により投影してみる。

まず、基準球最上部の点 O' の接平面上とOAの延長線との交点 A' を求める。次に、球の最下部の透視点Fと点 A' を結ぶ直線と赤道平面との交点を A_0 とする。直線OAは等面積投影により OA_0 として投影される。この時、線分 OA_0 の長さは $R\sqrt{2} \cdot \sin(\alpha/2)$ となる。

等面積投影の利点は、球面上の面積が等しく投影されることであり、基準球上のどこに位置していても等面積領域は同じ比率の面積で投影される。

一方、欠点はその投影領域が歪んでしまうことであり、また、基準球上の大円、小円が楕円曲線とはならず作図が難しいことである。

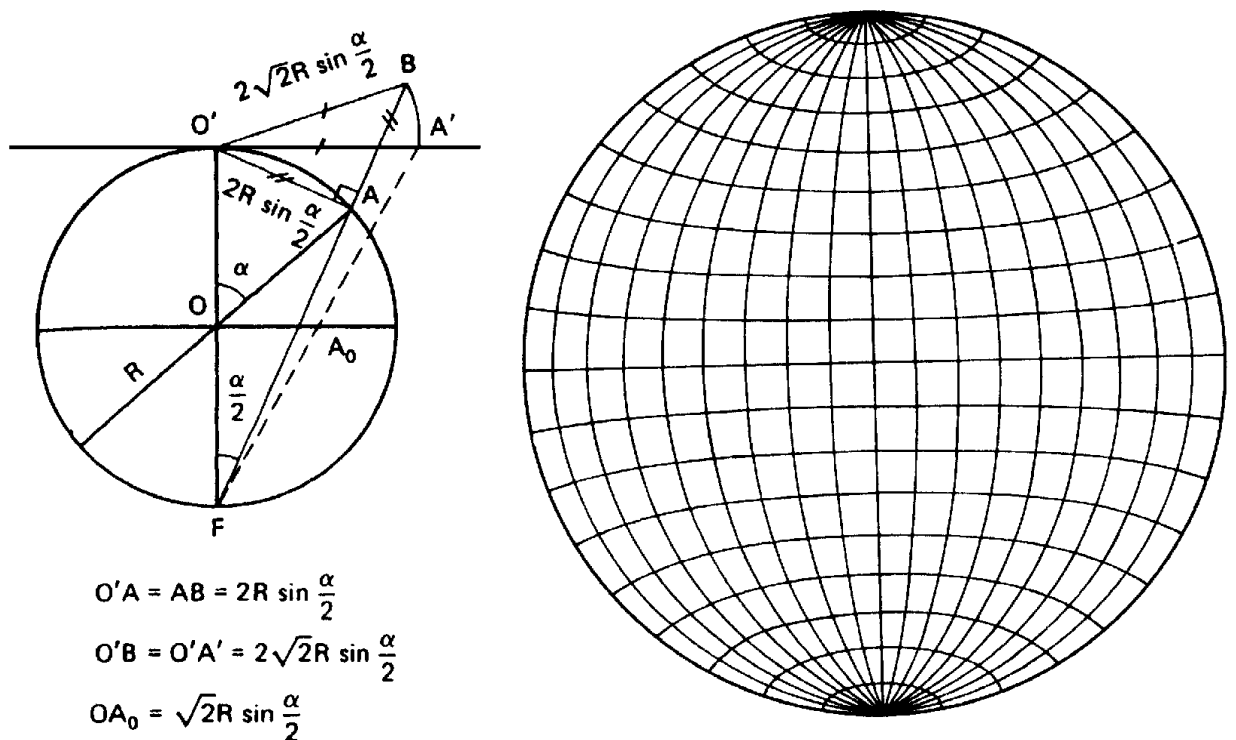


図3-1 等面積投影の原理

②. 等角投影

等角投影の原理を図3-2に示す。

鉛直軸と角度 α だけ傾いた直線OAを等角投影により投影してみる。

球の最下部の透視点Fと点Aを結ぶ直線と赤道平面との交点を A_0 とする。

直線OAは等角投影により OA_0 として投影される。

この時、線分 OA_0 の長さは $R \tan(\alpha/2)$ となる。

等角投影においては、基準球上の大円、小円が全て円弧として投影され、作図が極めて容易である。

したがって、キーブロック解析においては、作図が容易な等角投影法(ウルフネット)を使用する。

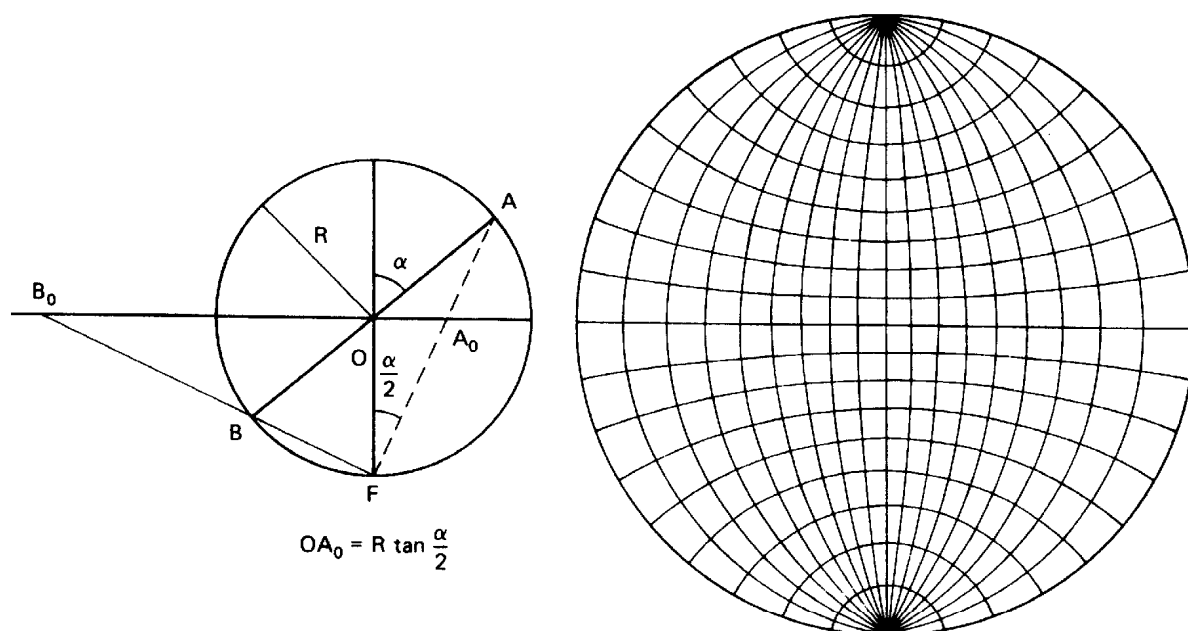


図3-2 等角投影の原理

4. キーブロックの条件

キーブロック理論においては、問題の簡略化のため次のような仮定を設けている。

- ①全ての節理面は、完全な平面とする。
- ②節理面は、領域内に完全に連続しており、ブロックの途中で消滅する節理は存在しない。
即ち、全てのブロックは既存の節理により完全に囲まれている。
- ③節理面で囲まれたブロックは剛体とする。
- ④節理面と掘削面は入力値として与えられている。

次に、キーブロックの判別方法について述べる。まず、理解を簡単にするため2次元問題で考えることとする。

2次元問題におけるブロックの移動可能性は Shi の定理により判定される。

(1). Shiの第1定理（有限ブロック、無限ブロックの判定）

2次元平面においては、図4-1に示すようにブロックは有限ブロック(a)と無限ブロック(b)とに分けられる。

各不連続面(i)の上下の空間を U_i 、 L_i で表すと図4-1の各ブロックは次のように表される。

ブロック(a) : $U_1 U_2 L_3$

ブロック(b) : $U_1 L_2 L_3$

図4-1における各不連続面を、それぞれ1点で交わるように平行移動させる。すると、図4-2に示すように、ブロック(a)では共有領域は1点となり、ブロック(b)では共有領域は面となっている。このような共有領域の違いは、ブロックの有限性に起因するものである。即ち、ブロック(a)のように共有領域が1点のみとなるブロックは有限ブロックであり、ブロック(b)のように共有領域が面となっているブロックは無窮ブロックである。

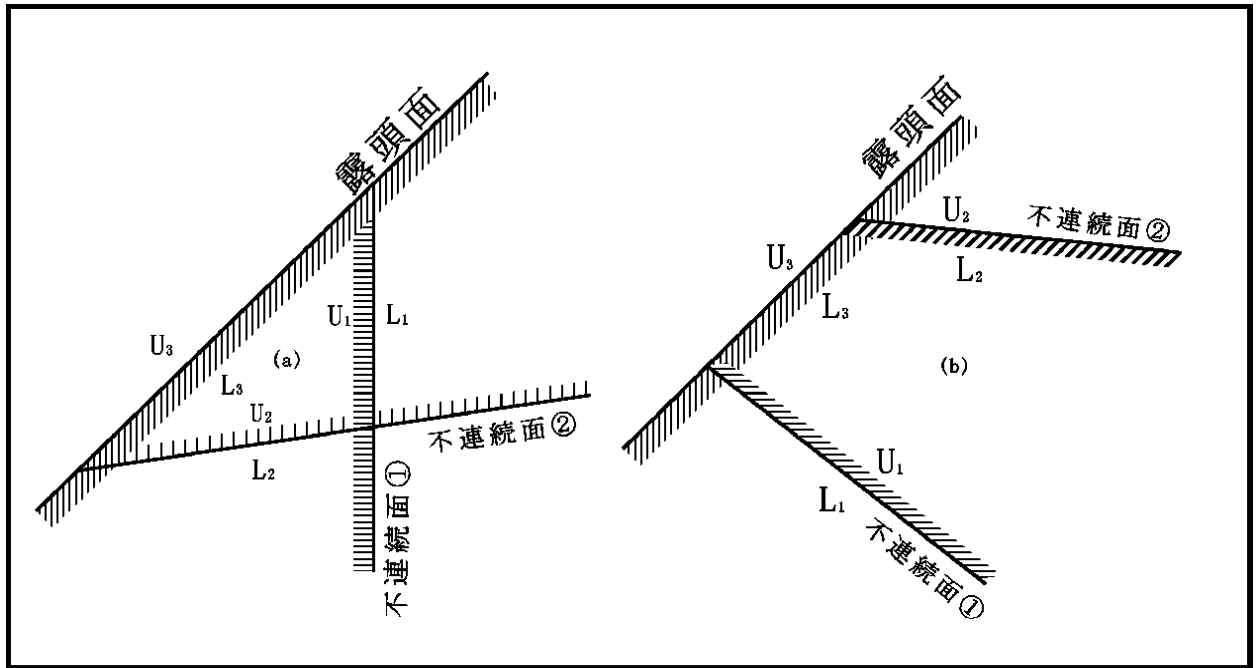


図4-1 有限ブロック (a) と無限ブロック (b) 模式図

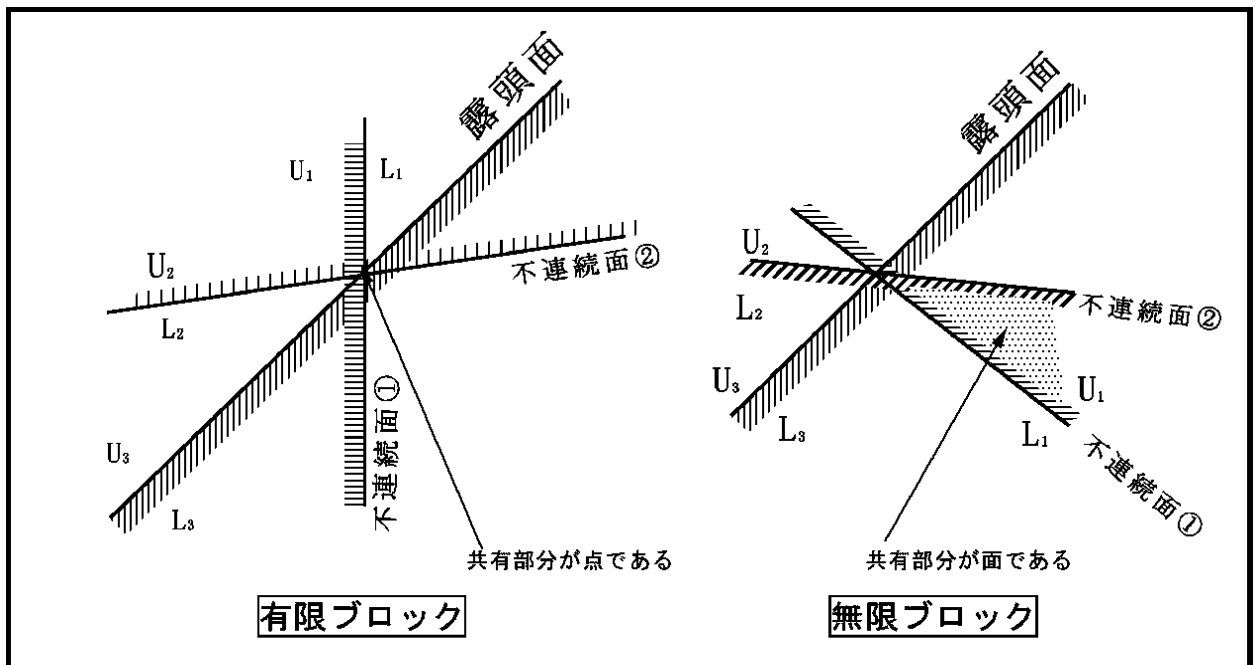


図4-2 Shiの第1定理による判定法

(2). Shiの第2定理 (ブロックの移動可能性の判定)

- ①元々、無限ブロックであるが、掘削面を付加したために有限ブロックになったブロックは移動可能である (removable block)。
- ②元々、有限ブロックであるが、掘削面を付加してもなお有限ブロックであるブロックは移動不可能である (taperd block)。

図4-3におけるブロック (A)はShiの第1定理により元々無限ブロックである。そして、掘削面を加えると有限ブロックとなる。したがって、Shiの第2定理により移動可能ブロックと判断できる。

ブロック (B)は元々有限ブロックである。そして、掘削面を加えても有限ブロックである。したがって、ブロック (b)は移動不可能なブロックである。

以上をまとめると図4-4のようになる。

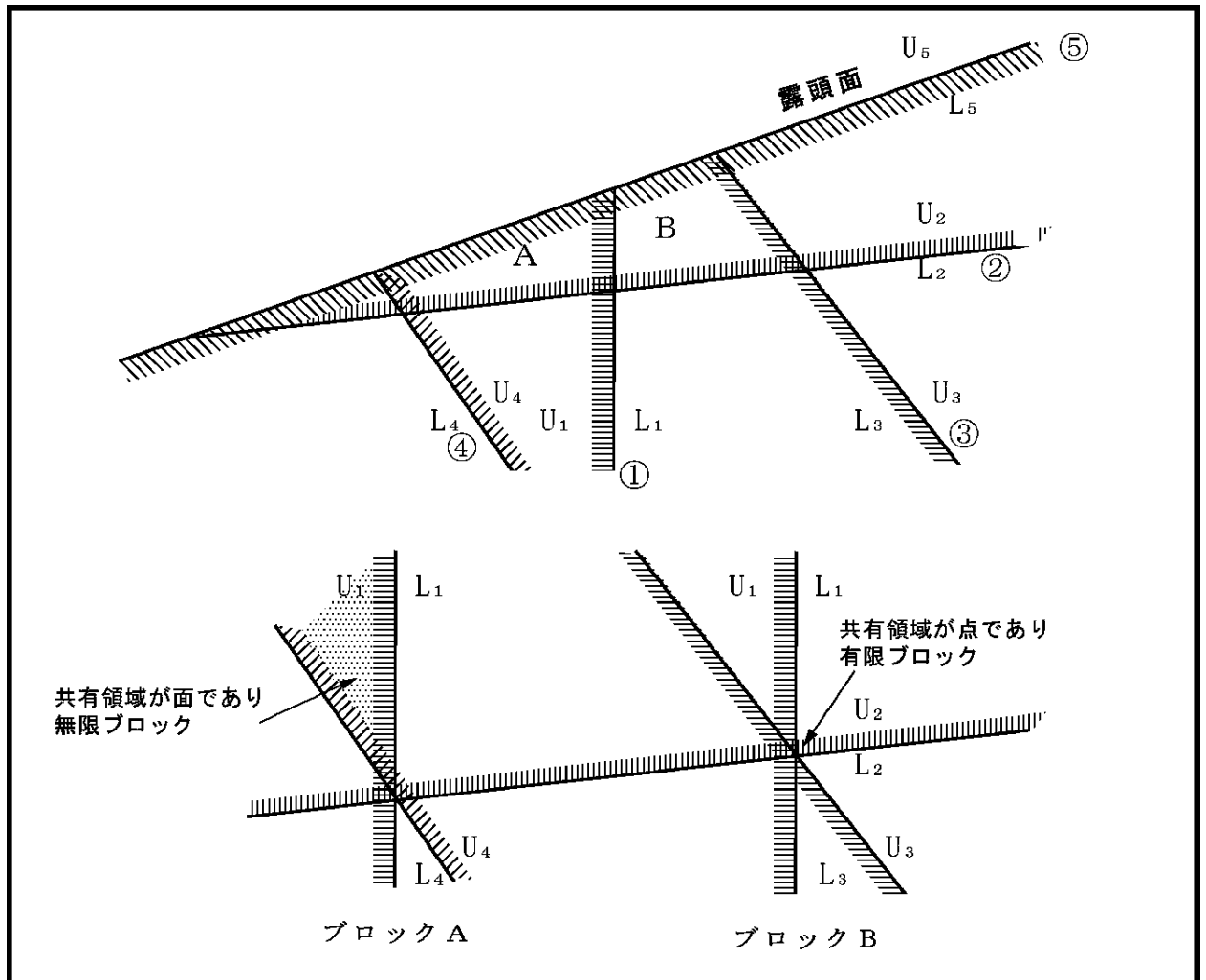


図4-3 Shiの第2定理によるブロックの移動可能性の判定法

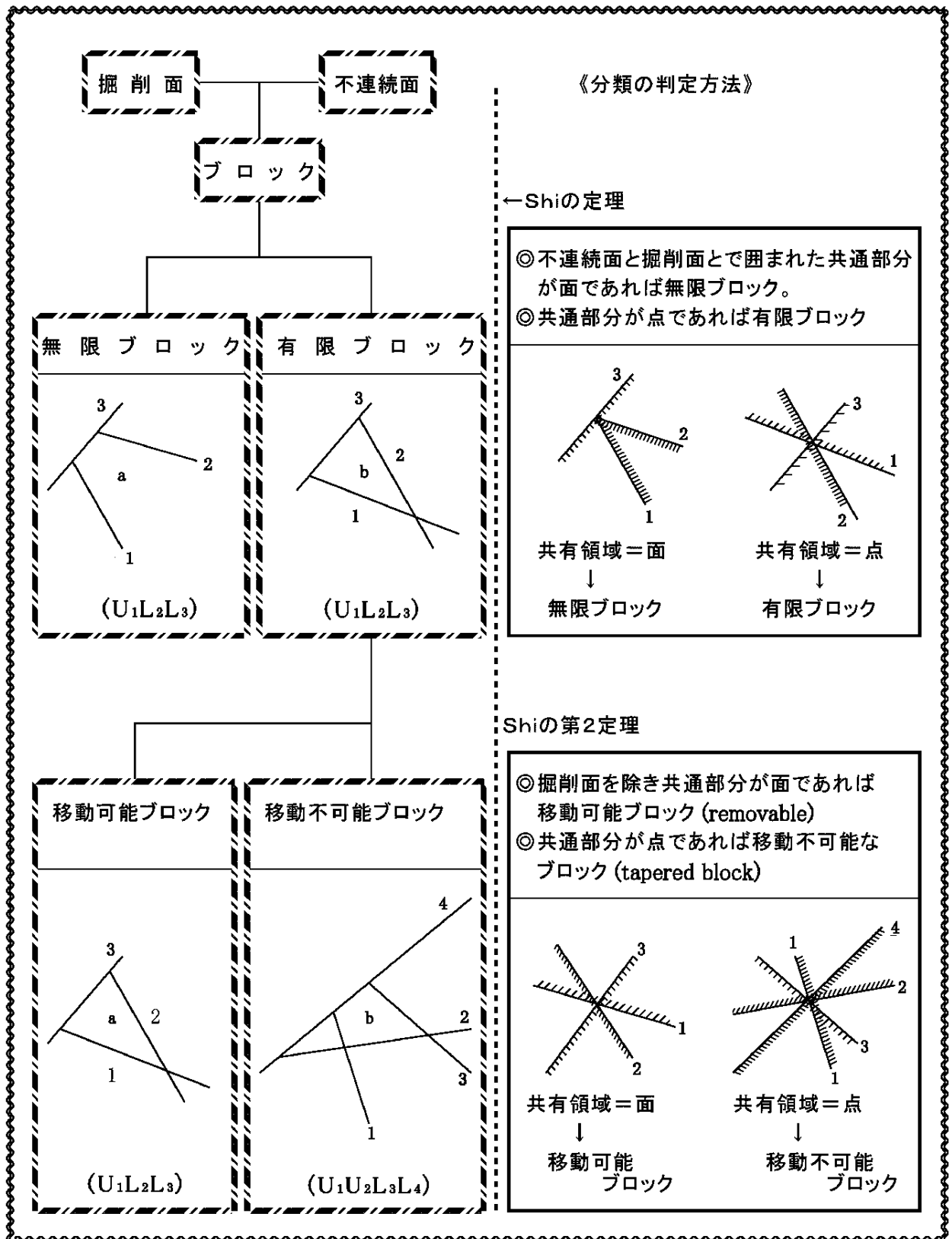


図4-4 Shiの定理総括一覧図

5. ステレオ投影によるキープロック解析

基準球の中心を通る平面は基準球と交差する大円で表され、ステレオネット上では円として投影される。

傾斜角 α の平面をステレオネットに上半球投影で表すと図5-1のようになる。ここで、 R は基準円の半径、 D は極、 C は大円の中心である。

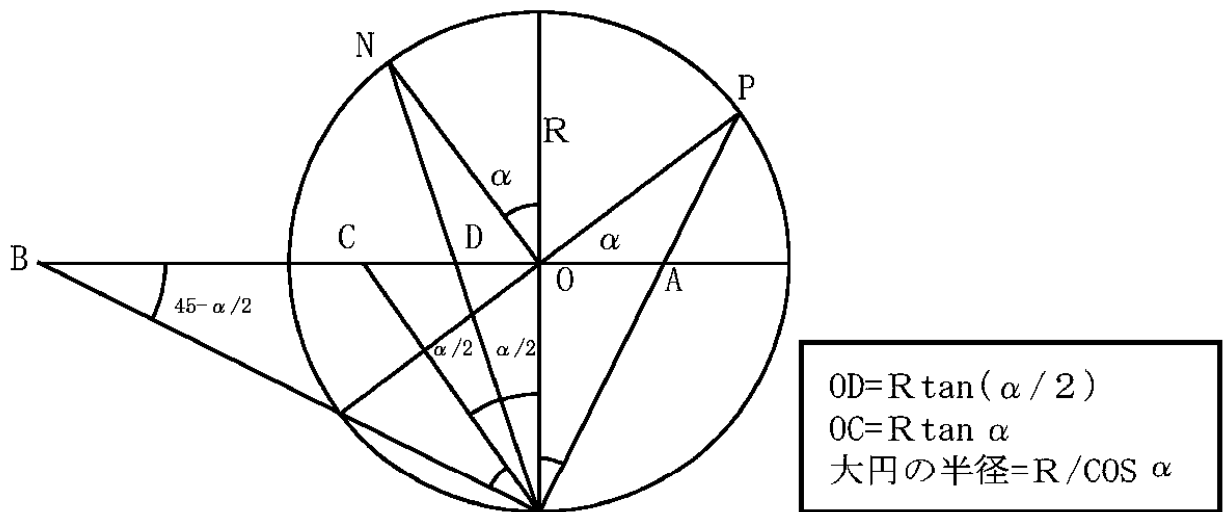


図5-1 ステレオネット上半球投影模式図

今、表5-1に示すような傾斜方位角 β (Y軸から時計回り)、水平面となす傾斜角 α の不連続面、および掘削面を考える。

表5-1 不連続面走向傾斜一覧表

不連続面No.	傾斜方位角 β	傾斜角 α
P_1	172°	71°
P_2	243°	68°
P_3	302°	38°
P_4	343°	13°
掘削面 P_5	300°	60°

これらの面をステレオネットに上半球投影すると図5-2のようになる。ここで、不連続面の大円に囲まれた領域が、不連続面の組み合わせで形成されるブロックを表している。例えば、④ブロックは、 P_1 、 P_2 大円の外側、 P_3 、 P_4 の大円の内側領域となっているが、これは④ブロックが P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 の面により区切られたブロックであり、 P_1 、 P_2 面の下側、 P_3 、 P_4 面上側にあることを意味する。面の上下をU(Upper), L(Lower)で表現すると④ブロックは $L_1L_2U_3U_4$ と表すことができる。また、不連続面上側を“0”、不連続面下側を“1”で表すことになっており、④ブロックは数値表現では(1100)と表される。

各ブロックが不連続面のどちら側に位置するかは組み合わせは、表5-2に示すように16個となる。しかし、図5-2には14個のブロックしか存在せず、⑥、⑪ブロックが見当たらない。

ステレオ投影上に表されない2個のブロックは共有領域を持たないために表現されないものであり、Shiの定理により有限ブロックであると判断できる。そして、これらはShiの第2定理により、掘削面が付加されても先細のtaperd blockになり「キーブロック」とはなり得ない。

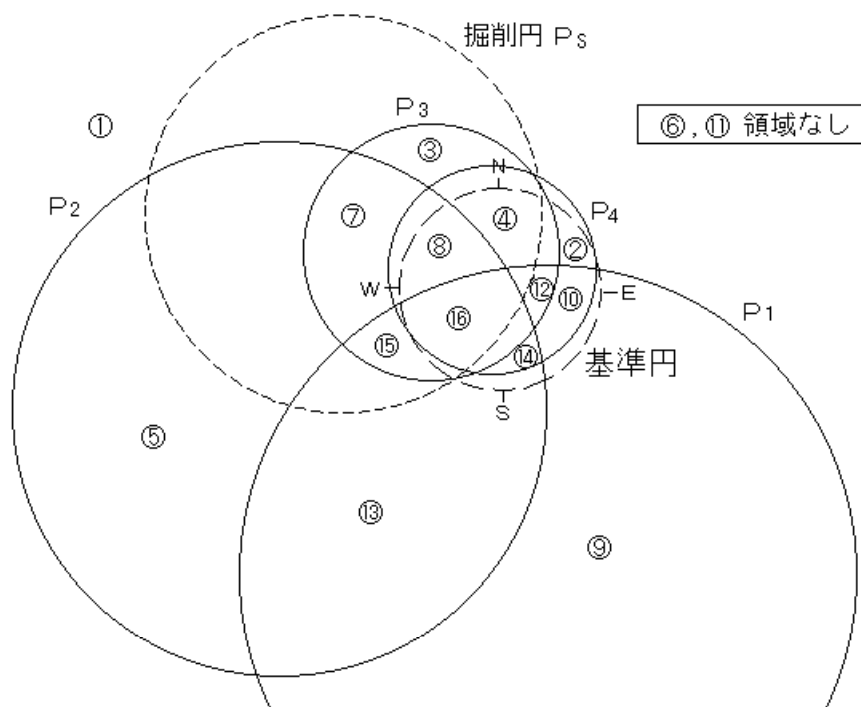


図5-2 不連続面のステレオネット投影図(上半球投影)

表5-2 ブロックと不連続面との関係一覧表

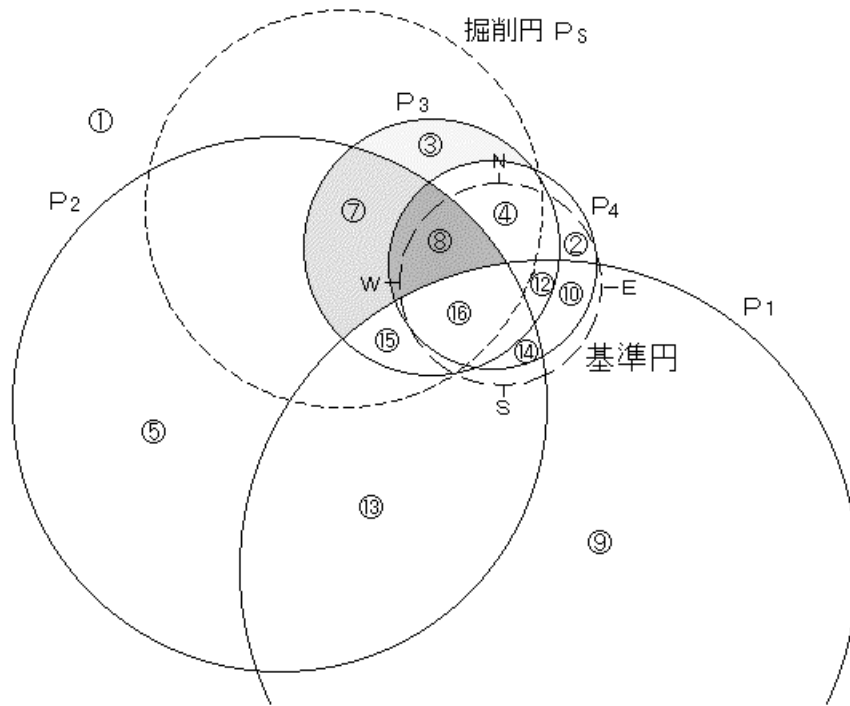
不連続面 1	L ₁								U ₁							
不連続面 2	L ₂				U ₂				L ₂				U ₂			
不連続面 3	L ₃		U ₃		L ₃		U ₃		L ₃		U ₃		L ₃		U ₃	
不連続面 4	L ₄	U ₄	L ₄	U ₄	L ₄	U ₄	L ₄	U ₄	L ₄	U ₄	L ₄	U ₄	L ₄	U ₄	L ₄	U ₄
ブロックNo.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
掘削面上			○				○	○								
掘削面下									○	○				○		
先細 ブロック						○					○					

次に、掘削面から抜け出すブロック、即ちキーブロックの検索を行う。キーブロックはブロックの領域と基準円、掘削円 P_sとの位置関係により決まる。その条件を以下に示す。また、これらの関係を図5-3、図5-4に模式的に示す。

- ◎ブロック領域が掘削大円の内側に完全に含まれる時、そのブロックは掘削面から抜け出すことが可能となる。
- ◎そのブロック領域の一部または全部が基準円の外にある時、このブロックは重力により抜け落ちる、いわゆるキーブロックになる。

図5-2においては、③、⑦、⑧ブロックが掘削大円の内側に完全に含まれるので、移動可能なブロックであり、また、一部または全部が基準円の外にあるのでキーブロックとなる。

一方、オーバーハング箇所や空洞の天端などでは、不連続面の上下関係を逆に考える必要があり、掘削大円の完全に外側領域のブロックが移動可能となる。



③⑦⑧は掘削円内に完全に含まれるため抜け出すことができる。
 そして、一部または全部が基準円の外にあるのでキーブロックとなる。

図5-3 キーブロック判定図

		露頭面での状態	上半球投影
有限 ブロック	先細		露頭大円外に出ている。
	移動 安定		露頭大円内、かつ基準円内。
	移動 可能 不安定		露頭大円内、かつ基準円外に出ている。

図5-4 キーブロック判定方法模式図

図5-4のような空洞を考えると、掘削円に完全に含まれる③、⑦、⑧が下盤の掘削面における移動可能ブロックとなり、天端の掘削面では、⑨、⑩、⑭が天端から抜け落ちる可能性のあるブロックとなる。

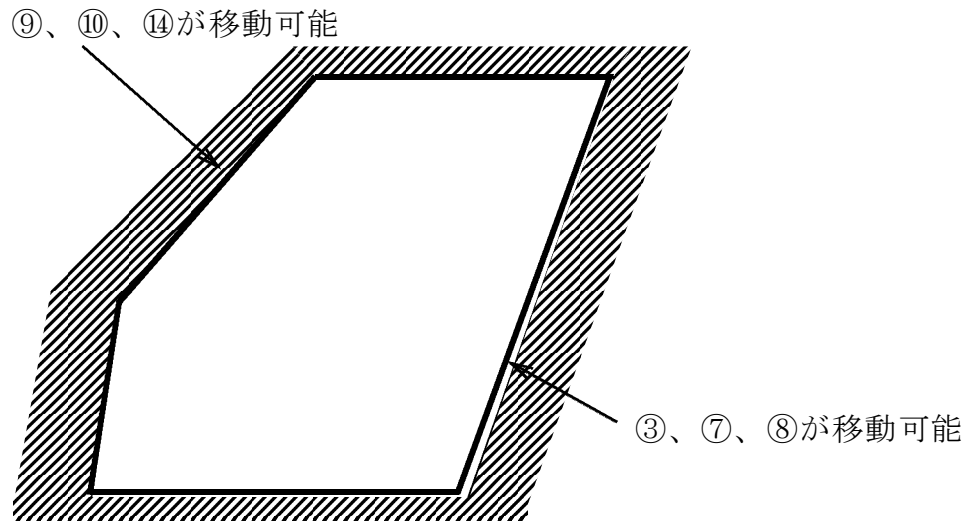


図5-4 掘削面位置とキーブロックの関係

主なブロックの形状を図5-5に示す。③、⑭ブロックは尖った頂点を持つ細長いブロックであり、実際には動き難くあまり重要ではない。このようなブロックは、ステレオ投影上では、掘削円に近く、しかも尖った頂点を持つ領域を示す。そして、このようなブロックはブロックの厚さが薄く、傾きも掘削面に平行に近くなる。

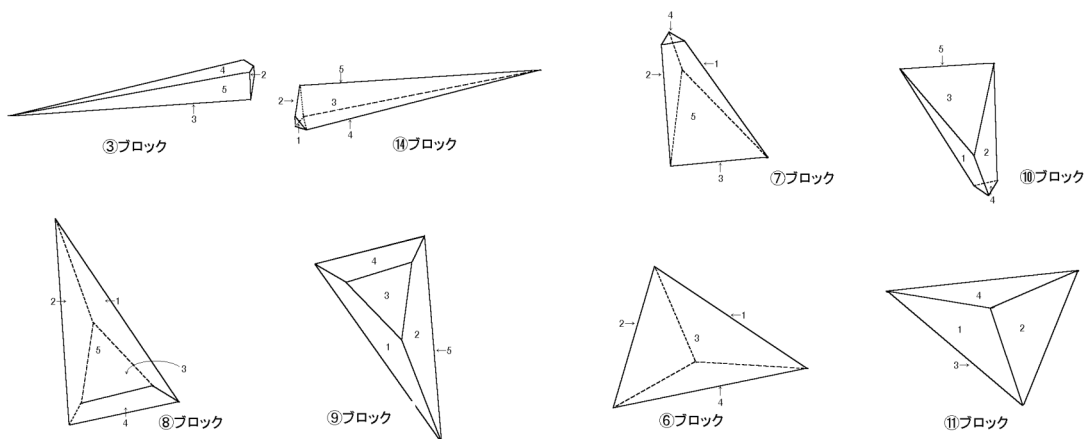


図5-5 移動可能ブロックの形状