

三、立體投影網的應用

謝敬義*

I. 前言

立體投影網原為構造地質學上將地層的層面、斷層面以及空間直線等三維之立體關係，以平面圖解法加以顯示與分析的一種工具。由於利用立體投影圖解法，可將複雜的三維立體空間加以簡化。空間不同平面之夾角，平面與直線間之交角以及空間直線間之相互關係等透過立體投影網之分析即可解決三維立體上的複雜問題。近年來，由於岩石力學的發展，對於岩體內不連續面之分析，大地工程上的應力問題，岩坡工程之穩定分析以及隧道工程中弱面岩楔之分析等均可利用此種立體投影網加以解決。由於空間平面或直線之表示方法不同，故投影分析時，常易引起困擾。本文擬將立體投影網之投影原理與種類以及目前廣被應用之分析方法加以介紹，以供大地工程師在使用立體投影網時之參考。

II. 立體投影網之投影原理及其種類

在構造地質學上，有關平面與直線的夾角關係，常可透過立體投影網加以分析與研究。由於立體投影法可將空間三維的複雜幾何關係加以簡化，以圖解法求出平面間以及平面與直線間之相互位置關係，並進行評估各類工程問題。由於立體投影網在圖面上受

到圖解法的精度限制，其所得結果不若解析幾何數理計算所得之結果精確。例如，立體幾何中，以直角座標系統計算空間兩條直線之夾角，經過冗長而繁雜的計算，可得出兩直線夾角的精確度數。若利用立體投影，則可在數十秒之內求出兩直線之夾角，但其精度誤差約在二度以內。此種誤差之容許度在大地工程的應用上，尚不致引起嚴重的差異。因此，此種立體投網除了前述構造地質學以外，在大地工程中之邊坡穩定分析、岩石力學中之應力分析，以及隧道工程之岩塊分析等亦可加以應用。欲瞭解立體投影網之投影原理以前，首先需將空間斜面與直線之表示法加以明確的定義，以便與幾何學上之直線與平面之定義加以區別。

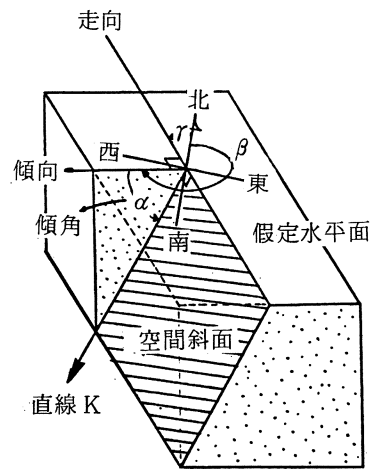
2.1 空間直線與平面的表示法

在構造地質學上，空間任一斜面的位態係以走向(sfrike)與傾斜(Dip)來加以表示。所謂走向係指空間任一斜面與假定水平面相交直線的方向(Bearing)而言。通常均以北方為準，故常以北偏東幾度或北偏西幾度加以表示；而傾斜係指垂直於走向方向，該斜面與水平面之夾角，此一傾斜角應稱之為真傾斜角(True Dip)，簡稱之為傾角。而不與走向垂直之傾角則稱之為假傾角或視傾角(Apparent Dip)。此種斜面位態資料包括走向方位與傾斜，而其中之傾斜除了應標出其

* 台灣電力公司專業地質師

傾角之外，尚須包括該斜面之傾向。例如，某一平面的位態為 $N35^{\circ}W/60^{\circ}SW$ ，其中 $N35^{\circ}W$ 表示其走向為北偏西 35 度，傾角為 60 度，傾向為西南，如圖一所示之 γ 及 α 。空間直線之位態則以傾向與傾角表示之；所謂傾向係指該直線在某一假定水平面以下之線段在水平面上之垂直投影。直線之傾向係以南北為準，如北偏東或偏西幾度以及南偏東或偏西幾度表示之；傾角則以該直線水平面以下線段與傾向之夾角表示之。例如某一直線之位態為 $S55^{\circ}W/60^{\circ}$ 即表示如圖一中之直線 K，該直線水平面以下線段在水平面上之投影直線，其方位為南偏西 55 度，如圖一中之傾向，其夾角為 60 度，相當於圖一中之 α 。前述平面與直線之表示，包括兩種不同性質的資料，一為文字資料，以東南西北表示之；另一為數字資料，以數字表示之。由於工程力學問題所涉及平面或直線資料相當繁多，如不連續面之研究等，常須作統計分析。因此，需借助電腦加以處理。一個平面位態之資料含有文字變數與數字變數，對電腦而言，其處理較為費時。因此，目前工程上對某一平面或直線之表示法可加以簡化。如空間任一斜面之位態，可利用該斜面之傾向與傾角加以表示即可。此種表示法中之傾向係自北方以順時鐘方向精確量測傾向之方位，如圖一中之 β 。因此，前述所舉平面之位態 $N35^{\circ}W/60^{\circ}SW$ ，利用此種表示法，以 $235^{\circ}/60^{\circ}$ 表示即可，其中 235 度係指其傾向如圖一中之 β ，而 60 度為傾角如圖一中之 α 。空間任一直線亦可同理推之。如前述直線為 $S55^{\circ}W/60^{\circ}$ 時，以此法表示時為 $235^{\circ}/60^{\circ}$ 。此種方法，可將平面或直線之資料，簡化為單一之數字資料。在電腦處理作業上較為便捷。一般而言，地質師對於平面與直線之測定多以前述走向傾斜法表示之。而大地工程師尤以歐洲系統之岩力專家，大多喜用後者，傾向傾角之表示法。若不瞭解

兩者之間的關係，常易引起相當之困擾。實際上，兩者之間的相互關係，主要關鍵在於走向與傾斜的定義。例如某一斜面之位態，以 $N20E/30SE$ 表示時，其走向為北偏東 20 度，因傾向為東南，且與走向垂直，因此，若以北為準，順時鐘方向計之，則該傾向為 $90^{\circ}+20^{\circ}=110^{\circ}$ ，因此以 $110/30$ 表示即可。茲再舉一例以說明兩者之間的互換關係。如某斜面的位態為 $N30^{\circ}W/60NE$ ，走向位於北偏西 30 度，而傾向東北，故以北為準，順時鐘方向之傾向為 $90^{\circ}-30^{\circ}=60^{\circ}$ ，故以 $060/60$ 加以表示。因傾向之計算以北為 0 度，順時鐘方向，正東為 90 度，正南為 180 度，正西為 270 度，再繞回正北為 360 度。因此，由 0 度至 360 度計數，故宜以三位數字表示較佳，而傾角通常均以銳角計之，由 0 度至 90 度計數，故以二位數字表示即可。



圖一 走向傾斜之定義與表示法

2.2 立體投影圖解法之原理

立體投影圖解法係利用立體投影網 (Stereonet) 將各類不同之構造面，如層面、節理面、片理面、劈理面等地質資料投繪在一張平面圖上，由此一投影圖內各構造面之分

佈以及各平面間投影後之相關位置，進行統計分析或評估計算各構造面相互間之夾角關係與交線之向量關係。由投影圖分析研究的結果，再透過立體投影網即可大致瞭解分析資料所得之結果及其在工程問題所代表的意義。

如圖二所示，若空間任一斜面通過某一球體之中心，若僅考慮南半球部份，則此一斜面與南半球之球面相交呈一弧線 $ab'cd$ (圖二a)，若圖中之 p 點代表該球體之北極極點，則由 p 點至弧線 $ab'c'd$ 任一點之連線，將與赤道面相交，若將各交點相連，則在赤道面上即呈另一弧線，如圖二a及圖二b中之 $abcd$ 。赤道面上所得之投影弧線稱之為主圓 (Great Circle)，代表空間任一斜面之投影。假定通過球心在南半球作一直線與該斜面垂直，而與南半球之球面相交於 E' ，如圖二a中之 OE' ，北極 p 與 E' 相連之直線與赤道相交於 E ，此點稱之為極 (Pole)。因此，任一斜面之極，係代表垂直於該斜面直線之投影。在投影圖上，依斜面位態之不同，其主圓與極點之位置亦因之而異。因此，各構造面之地質資料，透過立體投影網，可將繁雜的地質資料投影後以主圓或極點形式顯現。應用此一投影圖即可進行各項統計分析以及各構造面之分析研究。下節中將再作詳細討論。

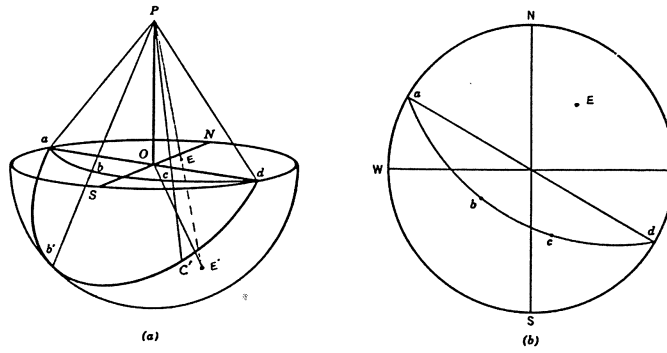
2.3 立體投影網之種類及其製作方法

一般而言，立體投影網大致可分為兩大類。一類稱之為經緯立體投影網 (Meridional Net)，另一類稱之為極座標投影網 (Polar Net)。經緯立體投影網係由兩組不同的弧線所組成，一組弧線稱之為主圓，相當於經線，另一組弧線稱之為副圓 (Small Circle)，相當於緯線。由於投影原理之不同，此類經緯立體投影網又分為等積投影網或施密特網 (Schmidt or Lambert Net)。等角投影網

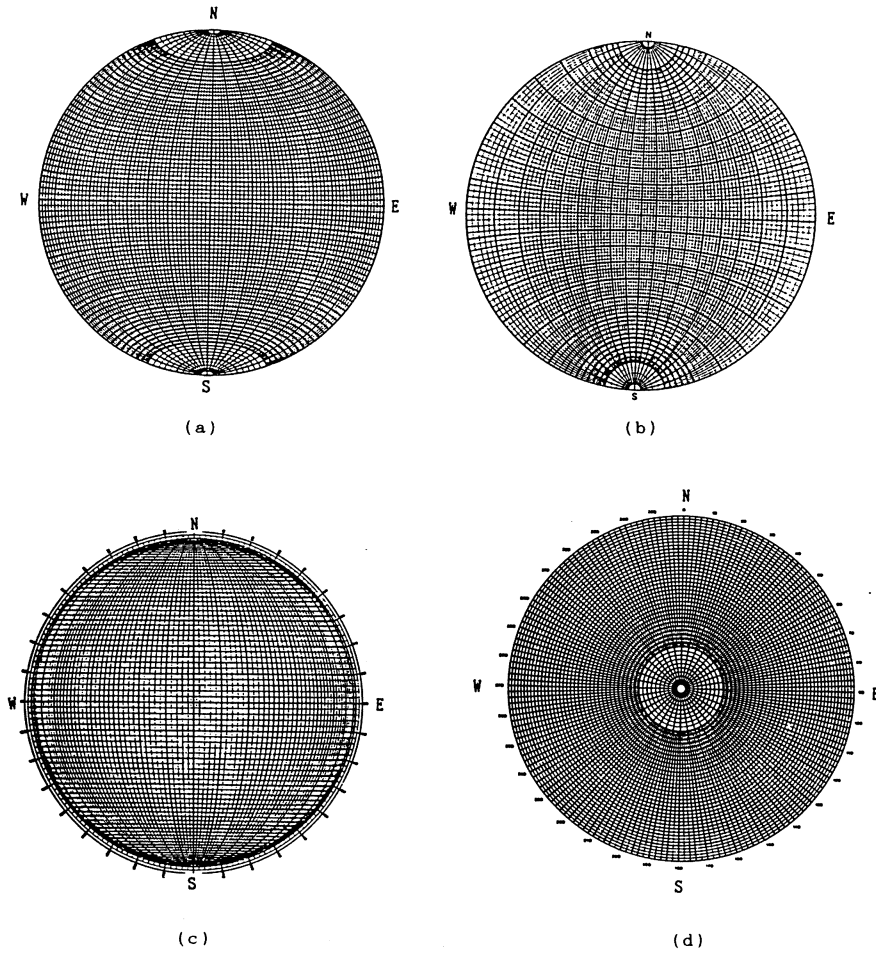
或吳爾福立體投影網 (Wulff net or Stereographic Net) 以及正交投影網 (Orthographic Net) 等三種，如圖三所示(a)(b)及(c)三者均包括主圓及副圓兩組弧線或直線，其間之差異不大。圖三(d)為極座標投影圖，由一組同心圓及放射狀直線所構成。其與經緯立體投影網之關係如圖四所示。

對於上述不同的投影網，除正交投影網大多為作製作立體剖面分解圖 (Block Diagram) 外，其餘三種均可作為各種不連續面及直線交角關係之投影分析。根據 Hoek 及 Brown (1980) 之試驗，三種立體投影網之精確度，使用之方便性以及處理之速度並無顯著之差異。惟進行構造地質資料之分析時，常涉及各構造面間之夾角問題以及直線交角等問題，施密特網及吳爾福立體投影網均可適用，但處理不連續面之統計分析，則以施密特網或極座標投影網較為適用。不論採用何種立體投影網，在資料的分析過程中，前後均應採用同一類之立體投影網，切不可將地質資料之位態以施密特網投影後，所得之投影結果再以其他如吳爾福投影網轉換回構造面之位態加以分析，採用前後不一之立體投影網將引起相當大之誤差。

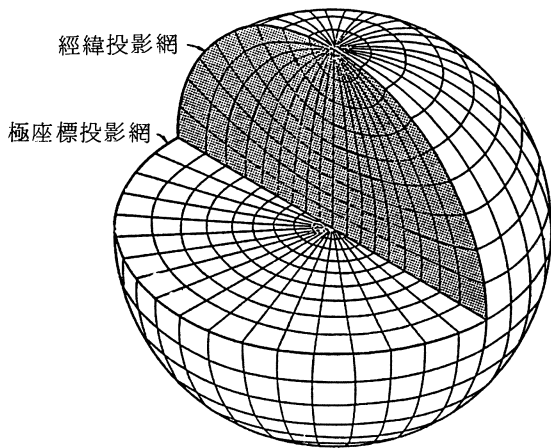
如圖五(a)所示，吳爾福立體投影網主圓之製作方法係自赤道圓上南極端點 S 與 NS 直線每隔 10° 度之夾角作一直線與 EW 直線相交，以交點為圓心，由各交點至 NS 兩端點之距離為半徑，所劃出之圓弧如圖中所示為西側之主圓群，同理可得東側之主圓群。圖五(b)所示為副圓之製作方法。在赤道圓圓周之每一象限上等分為九格，以各分劃點作切線與 NS 軸相交，以各相交點為圓心，以各交點至各象限相對應之分劃點之距離為半徑所繪出之一群副圓。圖中所示者為北側之副圓群，同理可得南側之副圓群。由此種製作過程所完成之立體投影網稱之為吳爾福立體投影網。另一種投影網係在 EW 軸上



圖二 立體投影網之投影原理



圖三 各種立體投影網(a)施密特網(b)吳爾福立體投影網
(c)正交投影網(d)極座標投影網



圖四 經緯立體投影網與極座標投影網之關係

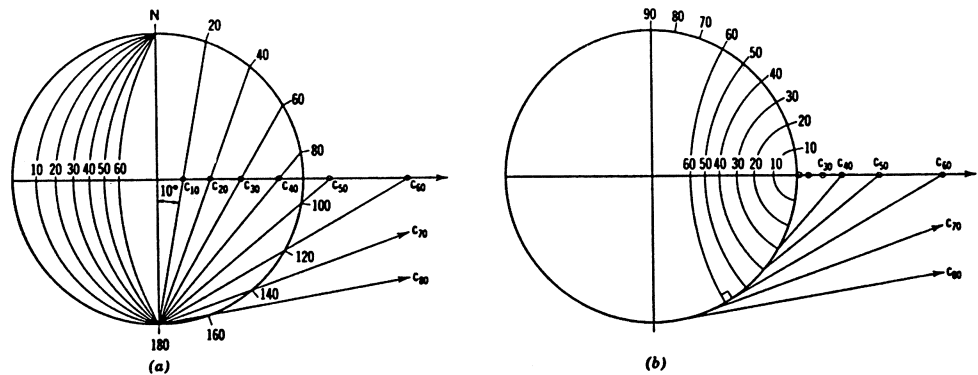
等分為18格，以通過 NS 兩端點及各交點之一所形成之圓弧為主圓，在每一主圓之圓弧上再各等分為18格，連接各主圓各對應分格點之曲線即為副圓（非圓弧），由此種製作方法所得者稱之為施密特立體投影網，由圖三(a)及三(b)所示之投影網可知，主圓之位置大致相同，但副圓則有明顯之差異。正交立體投影網係由球面之經緯線經側向正交投影而得者，而極座標立體投影網係根據經緯立體投影網經過垂直正交投影轉換而得者如圖四所示。

III. 立體投影網之應用

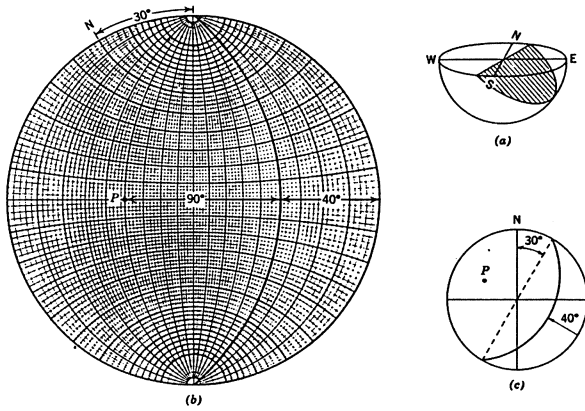
3.1 立體投影網在構造地質學上之應用

(1)空間任何斜面之投影——某一斜面之走向傾斜為 $N30^{\circ}E/40^{\circ}SE$ (或 $120/40$)。

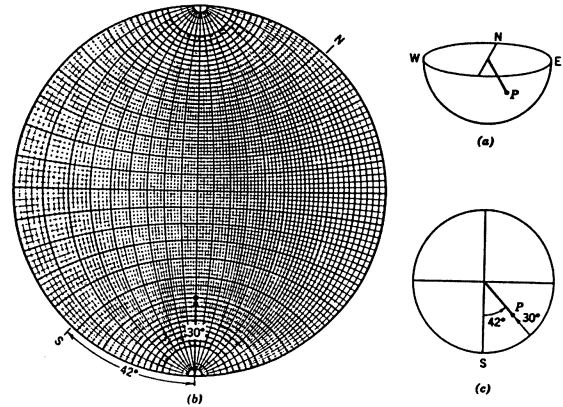
以透明紙覆於立體投影網之上，繪出投影之圓周，並標出東南西北之位置。自正北順時鐘方向量30度，並在圓周上作一記號，然後旋轉透明紙使該記號與投影網之上之N點重合，如圖六(b)，透過透明紙沿EW軸自E點向圓心量出40度，則在40度上投影網之主圓，將之描繪在透明紙上即為該斜面之主圓，順沿EW軸，自主圓再向西量90度，如圖六(b)(c)中之P點即為該斜面之極(Pole)代表垂直於該斜面直線之投影。圖六中之(a)為立體透視圖，(c)為透明紙上所顯現之投影圖。若以傾向傾角法投繪主圓與副圓時（如本例為 $120^{\circ}/40^{\circ}$ ），自N極，以順時鐘方向沿圓周標出120度之位置，並在圓周上作一記號，然後旋轉透明紙使該記號與E點重合，沿EW軸向圓心量出40度，則在40度上投影網之主圓，將之描繪在透明紙上即為該斜面之主圓，自該主圓之EW軸上向西量90度即為極。事實上，投影法稍有不同，但其結果則完全相同。



圖五 吳爾福立體投影網之製作方法



圖六 空間任一斜面之投影



圖七 空間任一直線之投影

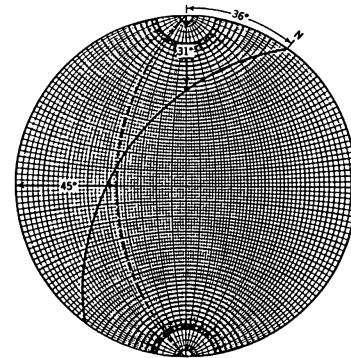
(2)空間任何直線之投影——某一直線之位態為 $S42^\circ E / 30^\circ$ (或 $138^\circ / 30^\circ$)。

以透明紙標出投影網之圓周及 NESW 位置，自 S 點向 E 向沿圓周量 42° ，或自 N 點順時鐘沿圓周量 138° ，並作一記號，旋轉透明紙，使該記號與 S 點重合，自 S 點沿 NS 軸向圓心量 30° ，並標定其位置，該點即為直線之極點位置，如圖七之 (a) (b) (c)。

(3)斜面上任一直線之投影——有一斜面，其走向傾斜為 $NS / 45^\circ W$ (或 $270^\circ / 45^\circ$)，在此斜面有一直線，其傾向傾角為 $N36^\circ W / 31^\circ$ (或 $324^\circ / 31^\circ$)。

(a)該斜面之主圓投影法與上述任何斜面之立體投影相同。因該斜面之走向為南北，故在透明紙上，自 W 點沿 EW 軸向圓心量 45° ，所得之主圓如圖八中之虛線即為該斜面之主圓。

(b)直線之投影與上述相同。在透明紙上沿圓周自北向西量 36° ，或自 N 順時鐘方向量 324° ，並作一記號，旋轉透明紙使該記號落在 N 點，自 N 點 NS 軸向圓心量 31° ，並標定其位置，該點應落在上述 (a) 步驟中斜面之主圓上經旋轉後之位置，如圖八中之實線主圓。若該點未落在主圓上，則其產生之誤差可能為投影不正確，或原來測定之數值不



圖八 斜面上任一直線之投影

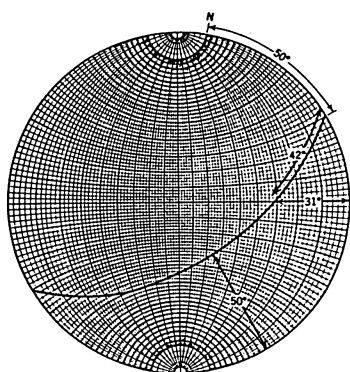
確所引起。

(4)假傾角 (或視傾角) (Apparent Dip) 之計算——有一斜面之走向傾斜為 $N50^\circ E / 50^\circ SE$ 求 $N80^\circ E$ 方向之假傾角。

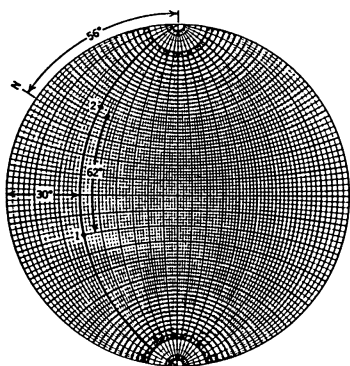
(a)先繪出該斜面之主圓，如圖九。

(b)在透明紙上標出 80° 東之位置，旋轉透明紙，使該位置與投影網之 E 點重合，沿 EW 軸，自 E 點向圓心延長而與 (a) 步驟中之主圓相交，沿 EW 軸，在 E 點與交點間之角度即為該方向之假傾斜角。

(c)旋轉透明紙回復至原來之位置，由 N 點沿主圓與上述 (b) 步驟中主圓交點間之角度 (42°) 為 $N80^\circ E$ 方向在斜面 $N50^\circ E / 50^\circ SE$ 上之直線與該斜面走向間之交角，稱之為



圖九 假傾角之計算



圖十 真傾角之計算

Pitch。

(5)真傾角之計算——某一斜面上，在 $N45^{\circ}W$ 及 $N14^{\circ}E$ 方向之假傾角各為 30° 與 22° ，求該斜面之真傾角。

(a)先將兩假傾角之極點標定出來如圖十之1, 2兩點。

(b)旋轉透明紙，使1, 2兩點同時落在立體網上之任一主圓。沿此主圓計算1, 2兩點間之交角即為該斜面之真傾角。

(c)旋轉透明紙回復至原來指北之位置，即可求出該傾斜面之走向。

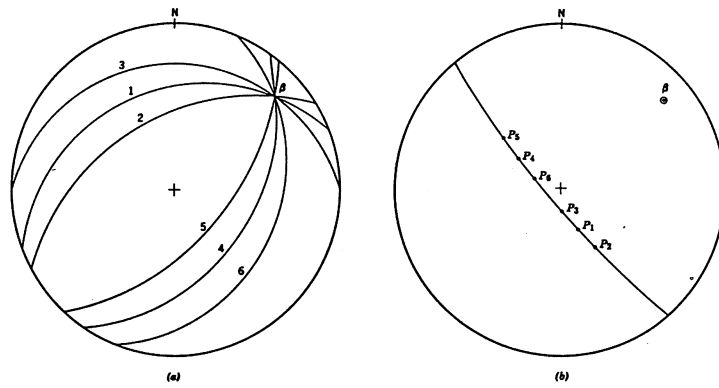
(6)Beta Diagram 及 S-pole Diagram

在構造地質學上，分析褶皺問題時，常利用所謂的 Beta Diagram 以及 S-pole

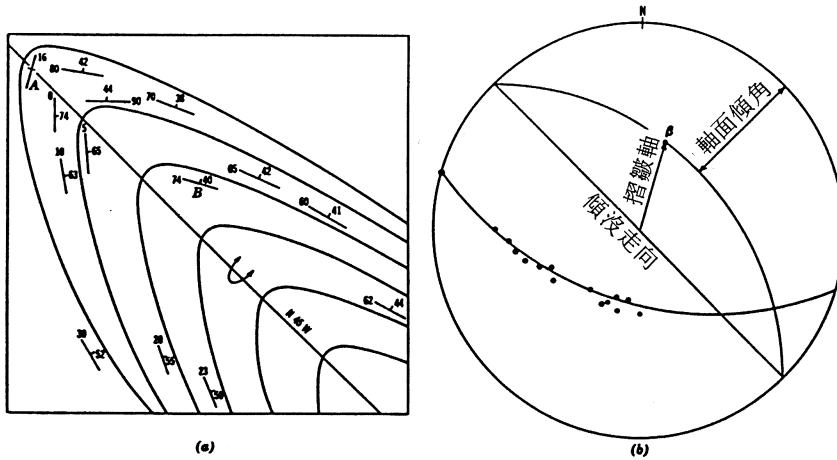
Diagram 以求出褶皺構造之軸線 (Fold Axis) 以及軸面 (Axial Plane)。所謂之 Beta Diagram 係將褶皺面上所量得之斜面，以立體投影網投繪出各斜面主圓，所有斜面主圓之共同交點稱之為 Beta Diagram，如圖十一(a)代表該褶皺構造之軸線。若以立體投影網求出各斜面之極，由所有極點求出其共同之斜面，再求出此斜面之極，稱之為 S-pole Diagram。如圖十一(b)。事實上，圖十一(a)(b)兩者殊途同歸，其結果相同。若在地質圖中，由圖上層面位態之資料及某褶皺構造之傾沒方向 (Plunge Direction) 可利用 Beta Diagram 或 S-pole Diagram 而求出該褶皺構造之軸線及軸面位態。圖十二即此類構造問題之圖解方法。

(7)構造面之統計分析

岩體之強度，主要係受岩體內之構造面或不連續面之分佈及其存在之密度所控制。根據岩體出露所量測之不連續面，由於具有不規則性以及測定時之誤差，欲瞭解其最集中之脆弱面以作為工程結構物設計之依據，須藉統計學上之概念，在投影圖上求出出現頻率或密度最大的不連續面以及其他主要之不連續面。如前所述，空間任何斜面均可利用立體投影網以極點加以表示。將投影圖上之極點分佈，利用計數網 (Counting Net)，如圖十三所示（鏤空之圓圈或正六角形，其直徑或對角線之長度為投影圖圓圈直徑之十分之一），由極點轉化為數字之分佈，如圖十四(a)所示為所有不連續面之極點經計數網統計後所得密度分佈圖。將各等密度分佈點相連後，如圖十四(b)所示之等密度區分圖。由此種等密度區分圖即可評估某一岩體內不連續面或弱面之分佈情況。此種統計分析在地下結構物之設計，如大斷面隧道開挖、地下廠房方位之配置，以及拱壩壩軸方位之選定，高坡岩石開挖時之穩定分析等均甚重要。分析此種不連續面之密度分佈統計時，

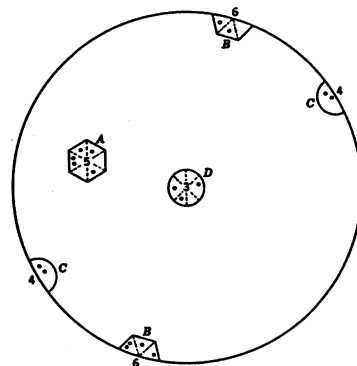


圖十一 (a)Beta diagram (b)S-pole diagram

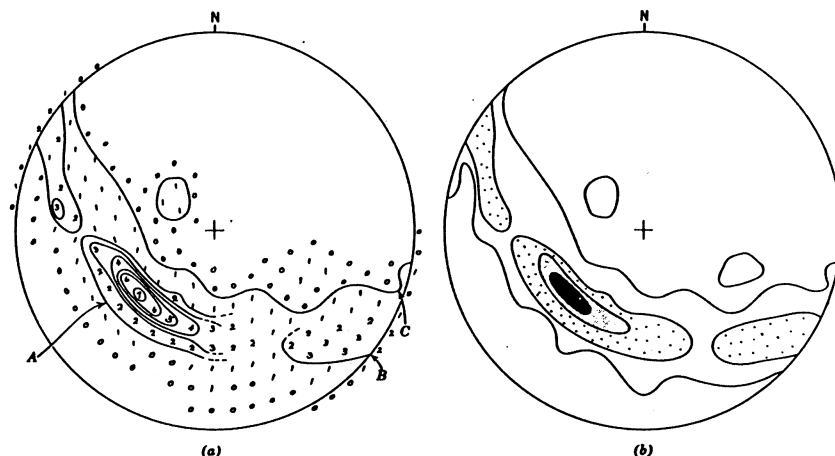


圖十二 褶皺傾沒問題

最好使用施密特網。若使用吳爾福立體投影網可能把不連續面之極點集中在靠近圖心部份，故以計數網統計時將產生較大之誤差。使用施密特網或前述之極座標立體投影網即可避免此種缺失。目前對此種不連續面之統計分析，若由上述利用立體投影網以人手計算繪製，甚為耗時費力，且易產生誤差。目前已有相當完整之電腦程式，可藉由電腦直接輸入不連續面之位態，經由程式之運算與處理，即可印出等密度之分佈資料，在岩石力學上之應用相當方便。地工技術雜誌第15期李錫堤博士曾有專文介紹。



圖十三 計數網



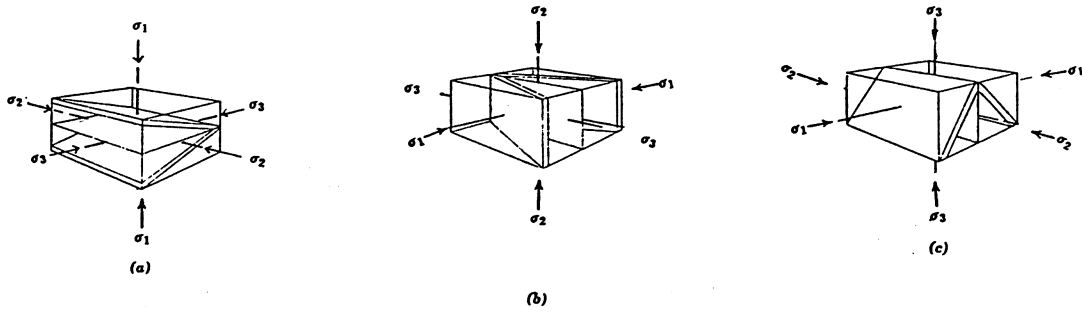
圖十四 不連續面之統計分析

3.2 立體投影網在應力分析上之應用

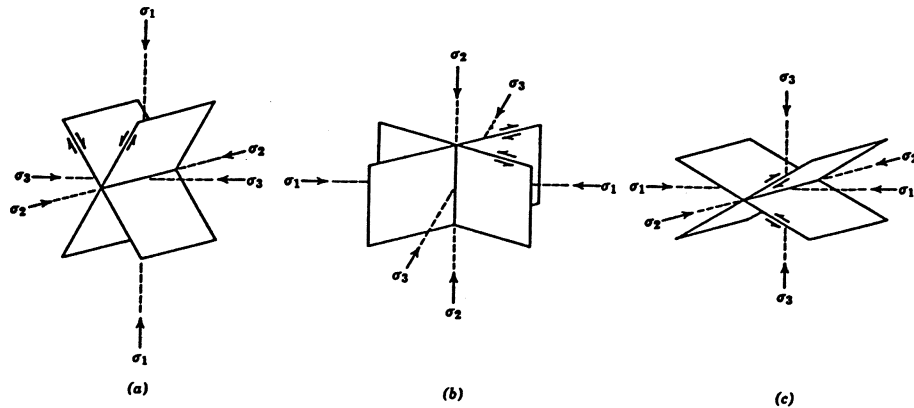
牛頓力學第二定律 $F=ma$ 定出了所謂力 (Force) 的概念，換句話說，力是使物體產生加速度的原動力。因此力是具有方向性的，是一種向量 (Vector)。根據向量法則，任何一個向量均可分解為不同方向之分向量。同理，數個不同之向量亦可找出其合向量。某一物體受數種不同方向之外力時，若該物體未產生加速後或轉動時，該物體係在平衡狀態中。在數理上，其外力對該物體所產生之總合力以及總力矩均為零。物體受此種外力之作用，其強度大小，係以應力表示之，其定義為單位面積上受力之大小。在力學分析時，某一物體所受之應力狀況，可以將各種不同方向之應力歸納為三個互相垂直之坐標系統來加以考慮。沿此坐標系之應力系統稱之為主應力軸，分別為最大主應力軸 (σ_1)、中主應力軸 (σ_2)、及最小主應力軸 (σ_3)。以此三軸所繪出之橢圓球，稱之為應力橢圓球 (Stress Ellipsoid)，此球可代表物體受應力之狀態。

在平衡狀態下，物體受力而變形，若應力達到或超過該物體內某一平面之抗剪強度

時，即沿此一剪力面發生破壞，未破壞前，物體受力即先由彈性變形而致塑性變形。岩體之褶皺及斷層即相當於塑性變形與破壞之結果。事實上，岩體受力後，所表現之力學行為，受圍壓力、溫度、以及岩石內部所含溶質等因素所影響。各類岩石在室內溫度及無圍壓力之條件下，大多呈脆性之力學行為，塑性變形並不明顯。但實際現場所觀察之地質構造形態，大規模以及劇烈之褶皺構造相當普遍。由此推論，岩體受到造山運動時，必在相當大之圍壓以及相當高溫之情況下所形成。因此岩體之褶皺與斷層之構造形態與形成該構造形態時所受之大地應力情況具有密切關係。一般而言，褶皺與斷層構造形態與大地應力之三個主應力軸之間的關係，可自圖十五及圖十六中加以表示。圖(a)為倒臥褶皺構造，最大主應力軸垂直；圖十五(b)為垂直褶皺，中主應力軸垂直；圖十五(c)為水平與對稱褶皺構造，其最小主應力軸垂直。此大地應力主應力軸相對應之斷層構造，如圖十六(a)所示為正斷層或重力斷層，最大主應力垂直，斷層面之傾角為 $45^\circ + \frac{\phi}{2}$ ， ϕ 為岩體之內摩擦角；圖十六(b)為平移斷層，中主



圖十五 主應力軸與褶皺的關係



圖十六 主應力軸與斷層的關係

應力軸垂直，斷層面垂直；圖十六(c)為逆斷層式逆衝斷層，最小主應力軸垂直。由上述各主應力軸與地質構造形態之關係中，若已知褶皺構造之軸面位態，即可大略推斷大地應力軸之方位。同理，若能找出兩個共軛斷層 (Conj-ugate Faults) 或斷層面附近之其他破裂構造面，即可推定大地應力之主應力軸方位。因此，可靠而精確之野外地質構造資料，可利用上述立體投影網之投影原理分析某一區域地質構造與大地應力分佈之情況。以下為利用褶皺與斷層構造形態，以立體投影網分析區域應力之主要例子。

(1)由區域構造地質資料求褶皺構造軸面及軸線——如圖十二(a)所示之構造地質資料，利用立體投影網可求該褶皺構造之軸面及軸線。

(a)將圖(a)上所量得各層面走向傾斜資料，以立體投影網標定其極點，如圖十二(b)。找出通過各極點之主圓，該主圓稱之為 S-pole Diagram。求出該主圓相對應之極點 β ，稱之為 β -axis。由 β -axis 至圓心之直線即為褶皺構造之軸線。

(b)由圖十二(a)中 Hinge Surface 方向 (N45°W) 與 β -axis 所形成之主圓所代表之斜面即為軸面，其傾角如圖十二(b)所示。

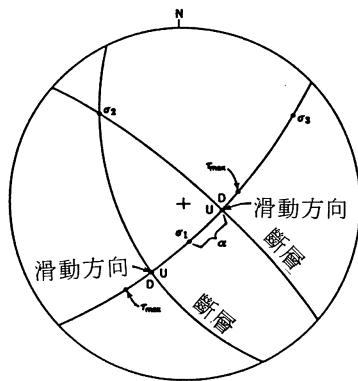
(c)由立體投影網求出軸線之方位即為中主應力軸，垂直於中主應力軸與軸面之直線為最大主應力軸，而在軸面上垂直於軸線之直線方位為最小主應力軸。

(2)由兩個共軛斷層面 (Conjugate Faults) 分析三主應力軸——一已知兩個共軛斷層，分別為 N24°W / 50°SW; N48°W / 76°NE

，分析三個主應力軸之方位、滑動方向，岩體之內摩擦角，以及斷層種類。

(a)利用立體投影網繪出兩共軛斷層面之主圓，兩主圓之交點即代表中主應力軸之方位(σ_2)，如圖十七。

(b)繪出對應於 σ_2 之主圓，此主圓所代表之平面為包括最大與最小(σ_1, σ_3)主應力軸之平面，此主圓與上述兩共軛斷層主圓之交點為代表斷層滑動之方向，如圖十七中之D點。



圖十七 共軛斷層與大地應力

(c)沿 σ_2 對應之主圓上，平分兩個D點相交之銳角即為最大主應力軸之方位，如圖中之 σ_1 ；在同一主圓上，與 σ_1 呈90度之位置即為最小主應力軸之方位，如圖中之 σ_3 ；最大剪應力 τ_{max} 之方位為沿同一主圓距 σ_1 45度之位置。

(d)在 σ_1 與滑動方向D點間之夾角為 α 。因之，岩體之內摩擦角 $\phi = 90^\circ - 2\alpha$ 。

(e)由立體投影網量得之結果， σ_1 為N57°E/68°； σ_2 為N43°W/20°； σ_3 為N53°E/13°， $\alpha = 30^\circ$ 。因 σ_1 近於垂直，故推斷為一重力斷層。

事實上，岩體受應力而達到破壞時，通常不太可能產生兩個共軛之斷層面，僅其中之一先行破壞，但主斷層附近常可發現其他明顯之構造特徵，如某一組特別發達之節理

，或張力裂隙等脆弱面之存在。下列為利用此種構造特徵分析應力情況之例子。

(3)由斷層面附近之張力裂隙分析三個主應力軸，如圖十八(a)所示，有一斷層為N10°E/25°NW，在斷層面附近有一系列之張力裂隙已為石英脈所填充，其走向傾斜為N20°W/10°NE，分析其三個主應力軸、內摩擦角、滑動方向及斷層種類。

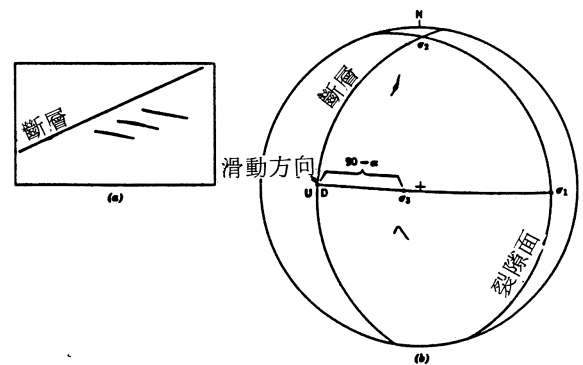
(a)由立體投影網繪出張力裂隙之主圓與斷層面之主圓，如圖十八(b)。兩主圓之交點即為中主應力軸(σ_2)之方法。

(b)以 σ_2 為極點，繪出其相對應之主圓，該主圓與斷層面主圓之交點為滑動方向之方位，而與裂隙面主圓之交點為最大主應力軸之(σ_1)方位。

(c)在 σ_2 對應主圓上，距 σ_1 90度之位置為最小主應力軸之方位。

(d)滑動方向與 σ_3 之夾角為 $90^\circ - \alpha$ ，而內摩擦角 $\phi = 90^\circ - 2\alpha$ 。

(e)由立體投影網量度之結果， σ_1 為S87°E/10°； σ_2 為N2°E/4°； σ_3 為S73°W/79°；內摩擦角 $\phi = 20^\circ$ ，因 σ_3 於垂直，故此斷層為逆衝斷層(Thrust Fault)。

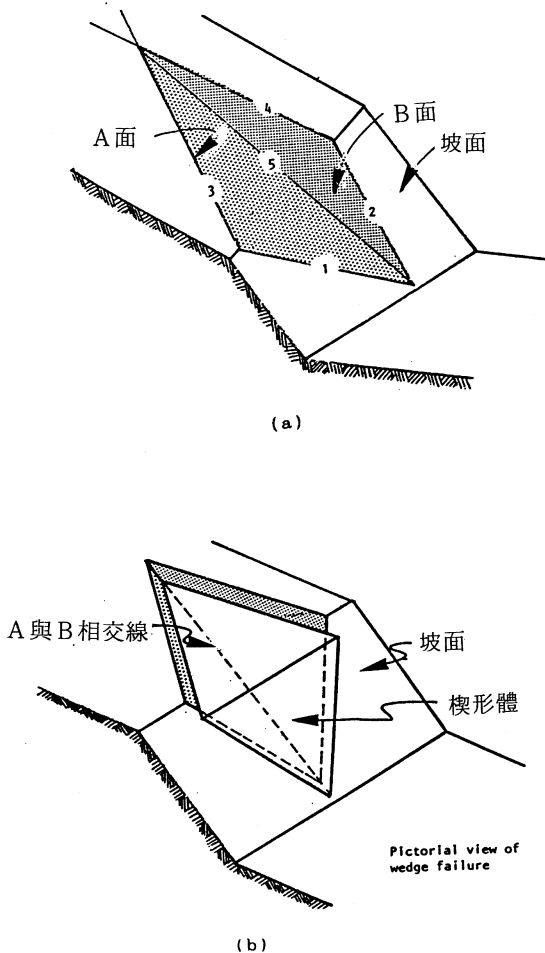


圖十八 斷層與大地應力之分析

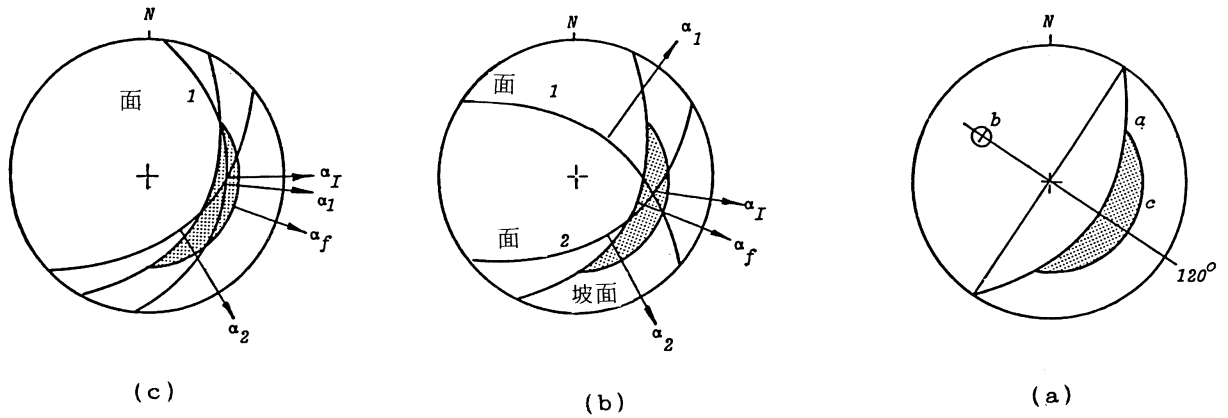
3.3 立體投影網在邊坡穩定分析之應用

岩石邊坡岩楔破壞模式（圖19）之穩定分析，通常可分為兩個步驟進行。第一個步驟需先利用立體投影網評估發生岩楔破壞之可能性。若評估結果認定岩坡可能發生岩楔破壞後，再利用岩楔破壞之分析公式計算其安全因素。在進行第一步驟評估邊坡不連續面之位態分析時必須根據現場岩坡出露之不連續面加以統計分析，求出該岩坡之弱面位態，再經與設計坡面、坡頂以及假定岩體內摩擦角的關係，在立體投影圖內評估其可能

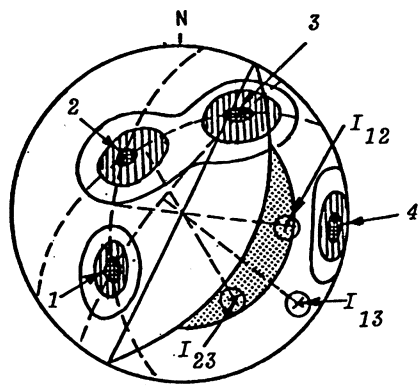
性，如圖二十(a)所示，先將設計坡面之主圓及假設岩體之內摩擦角以投影圖之中心為圓心，繪出該內摩擦角之小圓，此小圓與坡面主圓相交呈一新月形，如圖二十(a)中之陰影部份。由岩坡之地質調查中，由前述統計法評估岩坡內主要之不連續面之位態，圖二十一中之1, 2, 3, 4 分別代表由統計分析所得之不連續面之極點，由極點之位置，利用立體投影網即可反求每一不連續面之位態。由圖廿一可以看出，其中4之不連續面，其傾向與設計邊坡之傾向相反（圖中所示之範例，坡面之位態為 $120^\circ/50^\circ$ ，內摩擦角假定為 30° ），1, 3 兩不連續面主圓之相交點位於陰影區之外，故由1, 3 兩不連續面所圍成之楔形體不致產生楔形破壞問題。但1, 2及2, 3等之兩對不連續面，其主圓之交點均落在陰影區之內，故可能產生楔形破壞之滑動問題。再進一步分析各不連續面之夾角關係時，如圖二十(b)所示，1, 2 兩不連續面主圓之交點位於1, 2 兩不連續面傾向之間（圖二十(b)中之 α_1 位於 α_1 及 α_2 之間）故由此兩不連續面所圍成之楔形體將沿該兩不連續面相交直線之方向滑動。但若兩不連續面主圓之交點不在該兩不連續面傾向之間，如圖二十(c)中之 α_1 位於 α_1 及 α_2 傾向之外，但位於 α_1 之左側，則由該兩不連續面所形成之楔形體將沿2之不連續面滑落。以上之圖解分析法，可供在進行詳細計算分析前，作快速之判斷，以免在作詳細安全因數計算時，浪費不必要之時間。致於安全因素計算時，公式中所需之各不連續面之夾角關係以及直線之交角關係等，亦可自立體投影網中將不連續面、設計坡面、坡頂等各面之位態投影後，在立體投影圖上，經立體投影網求得其夾角。如圖廿二所示為某一岩坡楔形破壞模式之實例。假定兩個不連續面之位態分別為A不連續



圖十九 楔形破壞模式



圖廿 楔形破壞圖解分析

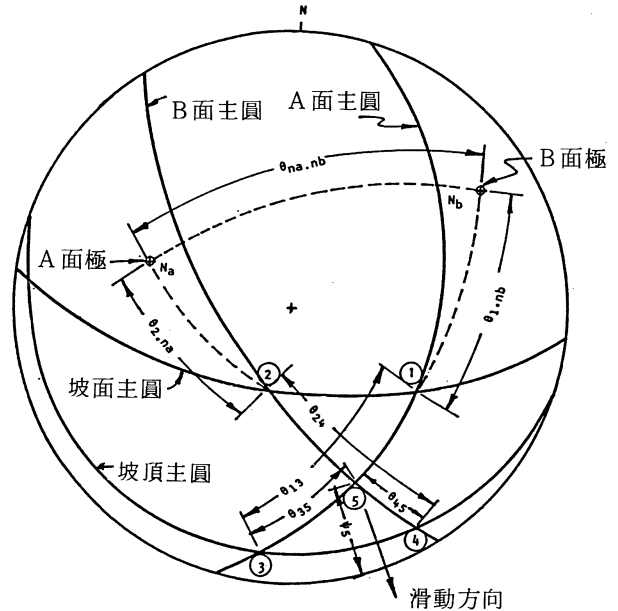


圖廿一 岩坡不連續面之分析

面 = $105^\circ/45^\circ$; B 不連續面 = $235^\circ/70^\circ$; 坡面 = $185^\circ/65^\circ$, 坡頂 = $195^\circ/12^\circ$, 經立體投影網投影後之交角關係, 如圖廿二中所示之 1, 2, 3, 4, 5 相關於圖十九(b) 中各斜面相交直線之位置。

3.4 隧道岩楔或不安定岩塊分析之應用

一般而言, 地下開挖工程所產生之破壞約可分為兩種類型。一為應力破壞 (Stress Failure), 另一為構造破壞 (Structural Failure)。前者係指地下開挖後, 開挖空間周圍之地盤, 因應力之重新調整, 而使原有應力之分佈改變其方向或集中, 因之造成開



圖廿三 楔形破壞分析所需資料之投影

挖空間周圍之地盤發生變形或破壞。後者係指地下開挖空間周圍之岩體, 因不連續面或弱面之存在, 其所圍成之岩塊, 因開挖面之掏空, 而發生掉落, 某一關鍵性岩塊之掉落致使其周圍之岩塊發生連鎖性之滑動而產生之隧道破壞。應力破壞之分析, 通常可利用彈性力學原理, 以有限元素法模擬開挖情況, 以瞭解開挖周圍地盤內部應力變化及變形

之情況，從而評估岩盤在開挖後之穩定性。而後者則可根據地下開挖後，開挖面所出露不連續面或弱面之位態，利用前述立體投影網之基本原理，分析開挖面周圍可能之不穩定岩塊及其可能之滑落方向。此種岩塊分析法係由美國加州大學 Richard Goodman 及 Gen-Hua Shi (1985) 兩位教授所發展之理論，目前似未廣泛被應用。有關岩塊之理論及其應用，中興工程顧問社，張吉佐博士曾在本雜誌第11期（民國74年7月）發表「岩塊理論及其在臺灣地下工程之應用」一文加以介紹，在此不再贅述。詳細請參看後列之參考文獻。

IV. 結 論

綜上所述，立體投影網對空間平面、直線、以及平面或直線之間的相互關係，可將三維之立體空間轉換為平面二維之分析，而得到甚為便捷而清晰之概念。利用立體投影網之圖解法，除了構造地質之外，對於工程地質及岩石力學以及岩坡穩定等大地工程問

題亦有相當大之助益。因此，立體投影網之應用不僅為工程地質師應具備之技巧亦為從事大地工程技術之設計工程師所不可或缺之知識。

IV. 參考文獻

- 謝敬義(1981)“立體投影網圖解法在工程地質及岩石力學上之應用”，台電工程月刊 第395期 第5~15頁。
- HOEK, E., BROWN, E. T. (1980) *Underground Excavations in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- HOEK, E., BRAY, J. W. (1981) *Rock Slope Engineering*, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- RAGAN, DONAL, M. (1973) *Structural Geology*, John Wiley & Sons.
- GOODMAN, RICHARD, E. (1978), *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*,
- GOODMAN, RICHARD, E. SHI, GEN-HUA, (1985) *Block Theory and its Application to Rock Engineering*, Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632