

赤平极射投影在地质灾害危险性评估中的运用

在地质灾害危险性评估中,我们经常会遇到预测边坡或危岩体失稳产生崩塌、滑坡的可能性大小问题,由于评估工作的精度所限,上述问题若要利用各类勘察设计规范提供的稳定性计算公式来解决,显然是不现实的。岩体的破坏,往往是一部分不稳定的结构体沿着某些结构面拉开,并沿着另一些结构面向着一定的临空面滑移的结果。这就揭示了岩体稳定性破坏所必需具备的边界条件(切割面、滑动面和临空面)。所以,通过对岩体结构分析,明确岩体滑移的边界条件是否具备,就可以对岩体的稳定性作出判断。赤平极射投影图法就是岩体稳定的结构分析法之一。

本讲座只对赤平极射投影图的绘制做简单的介绍,重点讲述赤平极射投影成果图在地质灾害危险性评估中的运用。在学习赤平极射投影法判断岩体稳定性时,还必须掌握与之有关的岩体结构、边坡稳定性定性评价指标等内容,这样才能有效地使赤平投影判断结果与所处地质环境条件相互结合,相互补充,相互验证,作出合理的综合评价。

一、岩体结构

存在于岩体中的各种地质界面,如岩层层面,裂隙面、断层面、不整合面等,统称为结构面。岩体受结构面切割而产生的单个块体(岩块)称为结构体。所谓岩体结构,就是指岩体中结构面和结构体两个要素的组合特征,它既表达岩体中结构面的发育程度组合,又反映了结构体的大小、几何形式及排列。

大量的工程实践表明,无论是边坡岩体的破坏,地基岩体的滑移,还是隧洞岩体的塌落等,大多是沿着岩体中软弱结构面发生的。也就是说,岩体受工程作用力的破坏过程,主要是结构体沿结构面的剪切滑移、拉开以及整体的累积变形和破裂。因此,从岩体结构的角度,利用赤平极射投影分析岩体稳定问题,首先应研究结构面和结构体的类型及其特征。

1、结构面及类型

按其成因可分为沉积结构面、火成结构面、变质结构面、构造结构面和次生结构面五类。其主要特征见表1。

表1

岩体结构面类型及其特征

成因类型	地质类型	主要特征			工程地质评价
		产状	分布	性质	
沉积结构面	1. 层层面面 2. 软弱夹层	一般与岩层产状一致，为层间结构面	一般呈层状分布，延续性较强。在海相岩层中分布不稳定，常呈交错状。易尖灭	较为平整，接触紧密 多由碎屑、泥质等松散物质构成，且不平整。易软化或泥化，强度较低	滑坡多由此类结构面所造成
	1. 不整合面、假整合面 2. 沉积间断面（古风化夹层）				
火成结构面	侵入岩体与围岩接触面 岩脉、岩墙接触面	岩脉受构造结构面控制	延伸较远、比较稳定	可具熔合及破裂两种不同的特征	一般不造成大规模的岩体破坏，但有时与构造断裂配合。也可形成岩体的滑坡
	3. 冷凝原生裂隙	受岩体接触面控制	往往短小密集	一般为张裂面，裂面较粗糙不平	
变质结构面	1. 片理	产状与岩层或构造线方向一致	短小密集	光滑平整或为波浪式，在岩体深部闭合成隐蔽结构面	常造成路堑边坡的变形，对地下洞体稳定也有影响
	2. 片岩软弱夹层		延伸较远、具固定层次	含片状矿物，呈鳞片状	
构造结构面	1. 裂隙 2. 断层	与构造线呈一定关系	张性断裂较短小，剪切断裂延伸较远。常互相交切成“X”型；压性断裂规模巨大，但有时为横断层切割成不连续状	张性断裂不平整，呈锯齿状，常具次生充填；剪切断裂较平直、光滑；压性断层具带状分布的断层泥、糜棱岩等	对岩体稳定影响很大，在许多岩体破坏过程中，大都有构造结构面的配合
	3. 层间错动面	与岩层一致	一般呈层状分布，延续性较强	物质破碎，呈鳞片状，常含泥质物	
次生结构面	1. 卸荷裂隙	一般平行于岸坡	延续性一般不强，常在地表20~40m以内发育	属张裂面，常张开，多为风化碎屑物充填	常在天然及人工边坡上造成危害。有时对桥基及浅埋隧道亦有影响，但一般易于处理
	2. 风化裂隙	无一定产状	短小密集，主要在地表风化带内发育	结构面参差不齐	
	3. 风化夹层	受原结构面控制	延续性一般不强，至岩体深部风化减弱	充填物松散、破碎、含泥质物，水稳定性很差	
	4. 泥化夹层	与岩层一致	延续性较强，但各段泥化程度不同	结构面泥化，呈塑性状态	
	5. 次生夹泥层	受原结构面控制	延续性较差，近地表及河槽两侧较发育	结构面物质细腻，强度甚低	

2、结构体及类型

不同形式的结构体的组合方式决定着岩体结构类型。常见的岩体结构类型可划分为块体结构、镶嵌结构、碎裂结构、层状结构、层状碎裂结构和等六类。其主要特征见表2。

表2 岩体结构类型及其特征

岩体结构类型	岩体地质类型	主要结构体形式	结构面发育情况	工程地质评价
块体结构	厚层沉积岩 侵入岩 火山岩 变质岩	块状 柱状	裂隙为主	岩体在整体上强度较高，变形特征接近于均质弹性各向同性体。作为地基及地下洞体具良好的工程地质条件，边坡条件虽也属良好，但要注意不利于岩体稳定的平缓裂隙。
镶嵌结构	侵入岩 非沉积变质岩	菱形 锥形	裂隙比较发育，有小断层错动带	岩体在整体上强度仍高，但不连续性较显著。局部处理后仍为良好地基，边坡过陡时以崩塌出现，不易构成巨大滑坡体，地下工程跨度不大时，崩塌事故很少。
碎裂结构	构造破碎较强烈的岩体	碎块状	裂隙、断层及断层破碎带交叉	岩体完整性破坏较大，强度受软弱结构面控制，易受地下水作用影响，岩体稳定性较差。在地基一般要求对规模较大的断层作固结灌浆处理，边坡有时出现较大变形，洞体要求衬砌。
层状结构	薄层沉积岩 沉积变质岩	板状 楔状	层理、片理、裂隙比较发育	岩体呈层状，接近于均一的各向异性介质。岩体稳定与岩层关系密切，在地基及边坡出现破坏事故较多，应结合工程的特点
层状碎裂结构	较强烈褶皱及破碎的层状岩体	碎块状 片状	层理、片理、裂隙、断层、层间错动而发育	岩体完整性破坏较大，整体强度较低，软弱结构面发育，易受地下水不良作用，稳定性很差。作为地基要求处理，边坡设计应放缓，隧道施工中常与坍塌，要求支撑紧跟加厚衬砌
散体结构	断层破碎带 风化破碎带	鳞片状 碎屑状 颗粒状	断层破碎带，分化带及次生结构面	岩体强度遇到极大破坏，接近松散介质，稳定性最差。需采取措施处理

二、边坡稳定性定性评价指标

在地质灾害危险性评估工程实践中，遇到的各种各样边坡稳定问题，归纳起来，主要就是路堑边坡、采场（取土场）边坡、隧道进出口边坡、河岸边坡、自然斜坡等稳定问题，实质上就是一个岩体的稳定问题。所谓岩体稳定，它是一个相对的概念，是指在一定的时间内、一定的自然条件和人为因素的影响下，岩体不产生破坏性的剪切滑动、塑性变形或张裂破坏。

影响边坡稳定的因素有：岩石性质、岩体结构、水的作用、风化作用、地震力、地形地貌及人为因素等。

在地质灾害危险性评估的实际工作中，编制单位为了便于划分产生崩塌、滑坡可能性大小，通常建立“边坡发生崩塌或滑坡可能性分级表”（表3）。目前评估单位一般多通过“表3”中所列的岩组类型、坡高、岩体结构面倾向、倾角与坡向、坡角、岩体结构类型等进行分析，作出定性的综合评价。

表3 边坡发生崩塌或滑坡可能性分级表

可能性分级	可能性小			可能性中等			可能性大		
岩组类型	土体	碎屑岩	碳酸盐岩	土体	碎屑岩	碳酸盐岩	土体	碎屑岩	碳酸盐岩
坡高（m）	<8	<10	<10	8~15	10~20	10~25	>15	>20	>25
岩体结构面倾向、倾角与坡向、坡角关系	结构面与坡向交角>60°且结构面倾角小于或大于坡角（斜向坡）			结构面与坡向交角30~60°且结构面倾角小于或大于坡角（斜向坡）			结构面与坡向交角<30°且结构面倾角小于坡角（顺向坡）		
岩体结构类型	整体状、块状结构			层状结构			碎裂状、散体状		

三、赤平极射投影图法

赤平极射投影，实质是利用一个球体作为投影工具，把物体置于球体中心，将物体的几何要素（点、线、面），通过极射投影于赤平面上，化立体为平面的一种投影。

1. 作图方法：

调查统计结构面时，应和工程建筑物的具体方位联系起来，按一般野外地质方法进行。对多组结构面切割的岩体，要注意分清主次和结构面相互间的组合关系，再逐一测量，这样才能较充

分的表达出结构体的特征。

以最基本的面结构面的产状为例作如下简单介绍。

如已测得两结构面产状如表4

表4 结构面产状表

结构面	走向	倾向	倾角
J1	N30° E	SE	40°
J2	N20° W	NE	60°

作此两结构面的赤平极射投影图，并求其交线的倾向和倾角。其方法大致如下：

(1) 为了简化作图手续，先准备一个等角度赤平极射投影图（吴尔福网）（如图1）。

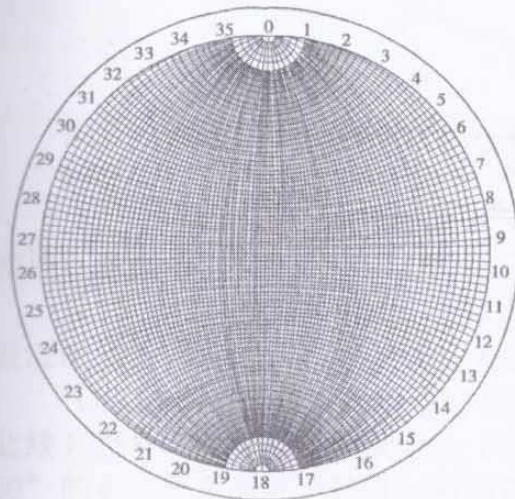


图1 吴尔福网

基圆：即赤平面与球面的交线，是网的边缘大圆。由正北顺时针为 $0^\circ - 360^\circ$ ，每小格 2° ，表示方位角，如走向、倾向、倾伏向等。

两个直径：分别为南北走向和东西走向直立平面的投影。自圆心→基圆为 $90^\circ \rightarrow 0^\circ$ ，每小格 2° ，表示倾角、倾伏角。

经线大圆：是通过球心的一系列走向南北、向东或向西倾斜的平面的投影，自南北直径向基圆代表倾角由陡到缓的倾斜平面。

纬线小圆：是一系列不通过球心的东西走向的直立平面的投影。它们将南北向直径、经线大圆和基圆等分，每小格 2° 。

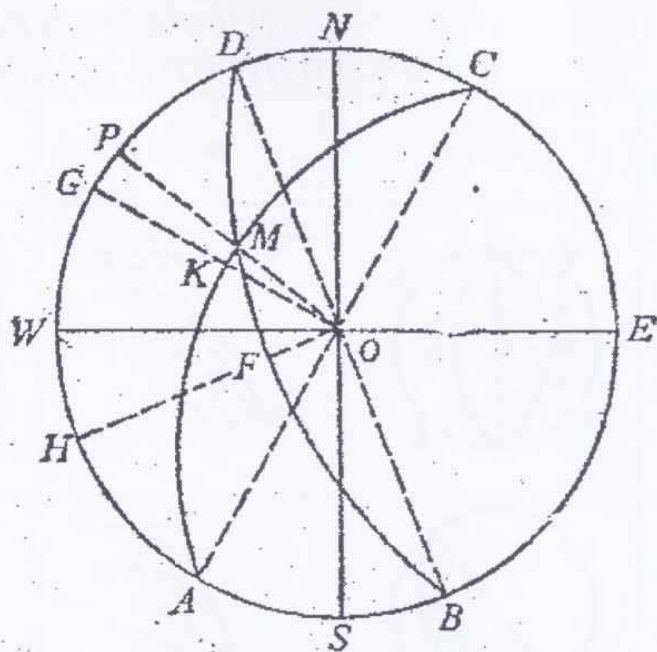


图2 两结构面的赤平极射投影图

(2) 将透明纸放在投影网上，按相同半径画一圆，并注上南北、东西方向。

(3) 利用投影网在圆角的方位度数上，经过圆心绘 $N30^{\circ}E$ 及 $N20^{\circ}W$ 的方向线，分别注为AC及BD。

(4) 转动透明纸，分别使AC、BD与投影网的上下垂之线（南北线）相合，在投影网的水平线（东西线）上找出倾角为 40° 及 60° 的点（倾向为NE、SE时在网的左边找，倾向为NW、SW时在网的右边找），分别注上K及F。通过K、F点分别描绘 40° 、 60° 的经度线，即得结构面J1、J2的赤平极射投影弧AKC和BFD。再分别延长OK、OF至圆周交于G、H点，就完成所求结构面J1、J2的投影图。图中AC、BD分别为J1、J2的走向；GK、HF表示J1、J2的倾角；KO、FO线的方向为J1、J2的倾向。

(5) 找AKC和BFD的交点，注上M，连OM并延长至圆周交于P。MO线的方向即为J1、J2交线的倾向，PM表示J1、J2交线的倾角（如图2）。

2、岩质边坡稳定性初步分析

(1)、一组结构面与坡面的边坡稳定性分析

结构面与边坡关系	平面图	剖面图	赤平投影图	边坡稳定情况
1. 内倾				稳定， 滑动可能性小
2. 外倾 结构面倾角 β 小于坡面角 α				不稳定，易 滑动
3. 外倾 $\beta > \alpha$				滑动可能性 小，但 可能沿 软弱结 构面产 生深层 滑动。
4. 斜交 夹角 $> 30^\circ$ 外倾				一般较 稳定， 坚硬岩 层滑动 可能性 小。
5. 斜交 夹角 $< 30^\circ$ 外倾				不很稳 定，可 能产生 局部滑 动。

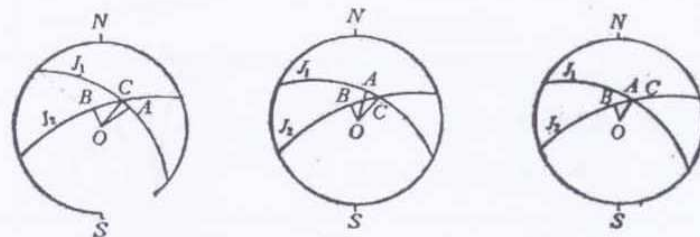
(2)、两组结构面与坡面走向基本一致稳定性分析

结构面与边坡关系	平面图	剖面图	赤平投影图	边坡稳定情况
1. 两组内倾				较稳定, 坚硬岩层滑动可能性小
2. 两组外倾 $\beta < \alpha$				不稳定, 较破碎, 易滑动
3. 两组外倾 $\beta > \alpha$				较稳定, 可产生深部滑动
4. 一组外倾 (一组内倾) $\beta < \alpha$				不稳定, 较易滑动
5. 一组外倾 (一组内倾) $\beta > \alpha$				可产生深层滑动, 内倾结构面倾角越小越易滑动

(3)、两组结构面与坡面走向斜交的稳定分析






结构面与边坡关系	平面图	立体示意图	赤平投影图	边坡稳定情况
1、结构面交线倾向与坡面相反				稳定, 滑动可能性较小
2、结构面交线倾向与坡面相同, 倾角大于坡面角				无滑动临空面, 滑动可能性较小
3、结构面交线倾向与坡面相同, 倾角小于坡面角				不稳定, 可能沿交线方向滑动

3、结构体滑移方向分析



- 1)、交线C0落于J1与J2结构面倾向线之间, 则J1与J2均为滑动面;
- 2)、交线C0落于J1与J2结构面倾向线一侧, 则靠交线的那一组结构面J1为滑动面;
- 3)、交线C0与其中一组结构面的倾向重合, 则被重合的结构面为滑动面;
(C0线为主滑动线, 其指向为滑动方向。)

四、岩质边坡破坏类型

破坏类型	示意图	特征	
平面破坏		主要结构面的走向、倾向与坡面基本一致，结构面的倾角小于坡角且大于其摩擦角，产生顺层滑坡形式的破坏，滑面是层状岩层层面或不同岩组之间的各种接触面，特别是岩层中夹有易滑的软弱层，如页岩、泥岩、泥灰岩等，而当地天然侵蚀或人工开挖基面又与软弱层分布部位邻近时，更易于产生顺层滑动	一个滑动平面和一个滑动块体
			一个滑动平面和一条张裂隙
			若干滑动平面节理
			一个主要滑动平面和主动、被动两个滑动块体
楔形破坏		两组结构面的交线倾向坡面，交线的倾角小于坡角	
曲面破坏		碎裂结构、散体结构边坡中，因岩体节理很发育、破碎而出现的滑移破坏，滑移面是圆弧面或非圆弧面的其它曲面	
倾倒破坏		岩体被陡倾结构面分割成一系列岩柱，当为软岩时，岩柱产生向坡面弯曲；当为硬岩时，岩柱可再被正交节理切割成岩块，并向坡面翻倒	

五、工程实例

选取 4 处路堑边坡和隧道进、出口边坡进行赤平投影分析。

赤平投影图仅根据边坡坡面与岩体结构面在空间的几何形态，作出边坡稳定性的初步评价，不考虑其它因素。

1、某公路工程 K10+740~K10+975 段路堑斜坡

该段属构造溶蚀低中山沟谷，山体自然坡度约 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 左右，出露基岩为不纯碳酸盐岩夹碎屑岩，碳酸盐岩呈微风化。碎屑岩呈中~强风化状。岩层产状 $38^{\circ}\angle 35^{\circ}$ ，附近无大的断层通过，发育两组节理裂隙 J1 $70^{\circ}\angle 80^{\circ}$ 、J2 $350^{\circ}\angle 55^{\circ}$ ，密度 $0.5\sim 1$ 条/m。估计切坡后边坡产状 $5^{\circ}\angle 70^{\circ}$ ，线路从斜坡中下部横切经过，路面标高为 360m。斜坡山顶标高约 400。边坡最大挖高为 37m（见图 4-1），以两组节理面及岩层面结合边坡开挖坡向作赤平投影图分析边坡稳定性。

据图 4-1 可知 J1 稳定、J2 不稳定、岩面基本稳定，切割体不稳定或基本稳定。因边坡切坡高度大，预测该边坡工程建设引发崩塌、滑坡的可能性大，威胁建设人员及施工设备安全，受威胁人数一般小于 10 人，危害程度小，危险性中等。

2、某公路工程 K49+340~K49+805 段路堑斜坡

斜坡位于构造侵蚀低山地貌，边坡岩性主要为薄层泥岩夹砂岩，时夹硅质岩。切坡处为一长舌形山脊下方，地形坡度较小，约 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。岩层产状 $250^{\circ}\angle 45^{\circ}$ ，边坡倾向 $330^{\circ}\angle 70^{\circ}$ ，岩层倾向与边坡倾向呈近垂直相交。但发育二组节理裂隙 J1 $300^{\circ}\angle 35^{\circ}$ 、J2 $130^{\circ}\angle 58^{\circ}$ ，节理裂隙发育密度 $5\sim 8$ 条/m，岩体破碎。最大切坡高度 38m，路面设计标高 352m，斜坡上部最大山顶标高 851m，山高坡长，坡面上覆第四系残坡层粘性土厚 $1\sim 3$ m，岩体风化强烈，强风化层厚 $3\sim 5$ m，切坡高度大，若放坡不当易引发崩塌、滑坡地质灾害。据图 4-2 赤平投影图分析：J1 结构面不稳定，其余结构面及切割体基本稳定或稳定，预测该边坡工程建设引发崩塌、滑坡的可能性中等。斜坡下方为本建设项目及一条二级公路，灾害一旦发生将对下方道路造成威胁，影响行车安全，受威胁人数小于 10 人。危害程度小，危险性中等。

3、某公路工程（K1+720~K3+580）隧道

地貌为构造溶蚀峰丛洼地地貌，隧道走向 75° ，地形坡度 30° ，

坡面植被中等发育，进口为 C1lz 薄厚层状泥岩、砂岩夹硅质岩、泥灰岩；出口为 D3l-w。隧道走向与山体走向呈 80° 夹角，进出口高程为 370~420m，隧道全长 1860m，最大埋深 250m，峰顶最大高程 650m，谷底标高 400m，相对高差 250m。岩层倾向 $330^\circ \angle 20^\circ \sim 30^\circ$ ，受区域地质构造影响，岩体节理裂隙发育，密度 8~10 条/m，洞口上方岩体被节理裂隙结构面切割成块状，在人为扰动、爆破震动下，可能引发危岩滚落、崩塌。出口岩体主要受岩层产状 $25^\circ \angle 23^\circ$ 、节理 J1 $350^\circ \angle 75^\circ$ 、J2 $160^\circ \angle 50^\circ$ 等三组结构面控制。进口岩体主要受岩层产状 $330^\circ \angle 30^\circ$ 、节理 J1 $0^\circ \angle 80^\circ$ 、J2 $200^\circ \angle 70^\circ$ 等三组结构面控制。作赤平投影图分析，隧洞进出口岩体各结构面及各切割体均为稳定（详见图 4-3）。预测工程建设引发危岩、崩塌、滑坡的可能性小，危害程度小，危险性小。

4、某公路工程（K74+890~K77+270）隧道

隧道全长 2380m，为全线最长隧道。最大埋深 430~495m，洞顶最大高程 800m，相对高差约 250m，隧道出口段位于谷地东侧山坡，地层岩性为 C-P 厚层状灰岩，山体基岩裸露，植被中等发育，山坡岩体浅部张开状风化裂隙发育，发育深度 3~5m，进出口地形坡度约 $60^\circ \sim 75^\circ$ 。进口岩体受岩层产状 $100^\circ \angle 15^\circ$ 、节理 J1 $60^\circ \angle 60^\circ$ 、J2 $330^\circ \angle 70^\circ$ 等三组结构面控制；出口岩体受岩层产状 $250^\circ \angle 15^\circ$ 、节理 J1 $210^\circ \angle 70^\circ$ 、J2 $130^\circ \angle 75^\circ$ 等三组结构面控制。作赤平投影图分析，进口处 J1 结构面、J1/J2 切割体、J2/岩层切割体不稳定，其余结构面及切割体稳定或基本稳定；出口处 J1 结构面、J1/J2 切割体、J2/岩层切割体不稳定，其余结构面及切割体稳定或基本稳定（见图 4-4）。工程建设引发危岩、崩塌地质灾害的可能性大，对村庄及居民造成危害，受威胁人数小于 10 人，危害程度小，危险性中等。

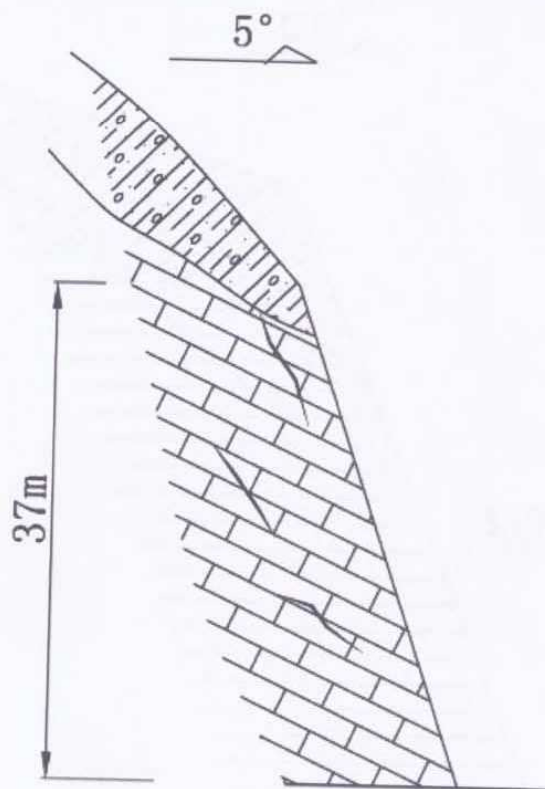
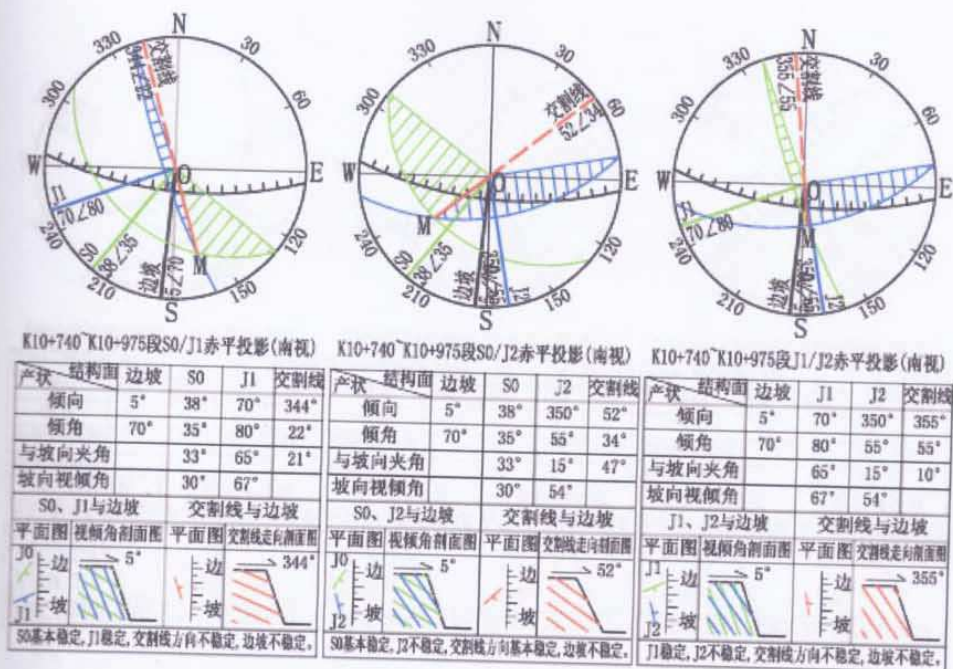
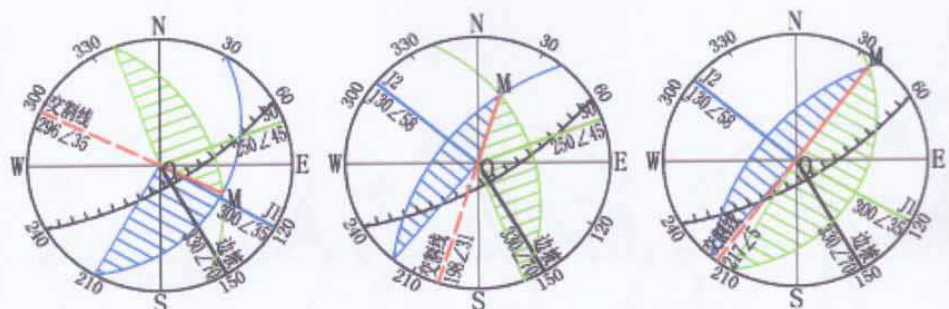


图 4-1 K10+740~K10+975 路堑边坡赤平投影及剖面图



K49+340~K49+805S0/J1赤平投影(南视)

K49+340~K49+805S0/J2赤平投影(南视)

K49+340~K49+805J1/J2赤平投影(南视)

产状	结构面	边坡	S0	J1	交割线
倾向	330°	250°	300°	296°	
倾角	70°	45°	35°	35°	
与坡向夹角		80°	30°	34°	
坡向视倾角		10°	31°		
S0、J1与边坡		交割线与边坡			
平面图	视倾角剖面图	平面图	交割线走向剖面图	平面图	视倾角剖面图
J0边	330°	J1边	296°	J0边	330°
J1坡		J1坡		J1坡	
S0稳定, J1不稳定, 交割线方向基本稳定, 边坡不稳定。					

产状	结构面	边坡	S0	J2	交割线
倾向	330°	250°	130°	198°	
倾角	70°	45°	58°	31°	
与坡向夹角		80°	160°	132°	
坡向视倾角		10°	56°		
S0、J2与边坡		交割线与边坡			
平面图	视倾角剖面图	平面图	交割线走向剖面图	平面图	视倾角剖面图
J0边	330°	J2边	18°	J0边	330°
J2坡		J2坡		J2坡	
S0稳定, J2稳定, 交割线方向稳定, 边坡稳定。					

产状	结构面	边坡	J1	J2	交割线
倾向	330°	300°	130°	217°	
倾角	70°	35°	58°	5°	
与坡向夹角		30°	160°	113°	
坡向视倾角		31°	56°		
J1、J2与边坡		交割线与边坡			
平面图	视倾角剖面图	平面图	交割线走向剖面图	平面图	视倾角剖面图
J1边	330°	J2边	37°	J1边	330°
J2坡		J2坡		J2坡	
J1不稳定, J2稳定, 交割线方向稳定, 边坡不稳定。					

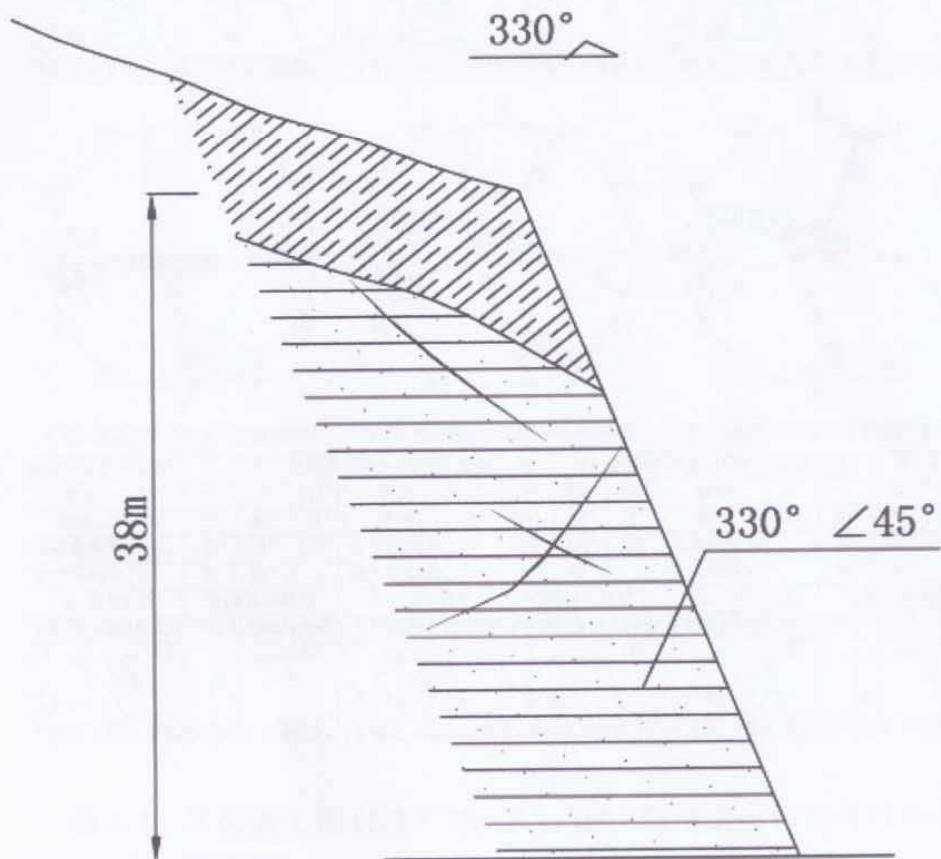


图 4-2 K49+340~K49+805 路堑边坡赤平投影及剖面图

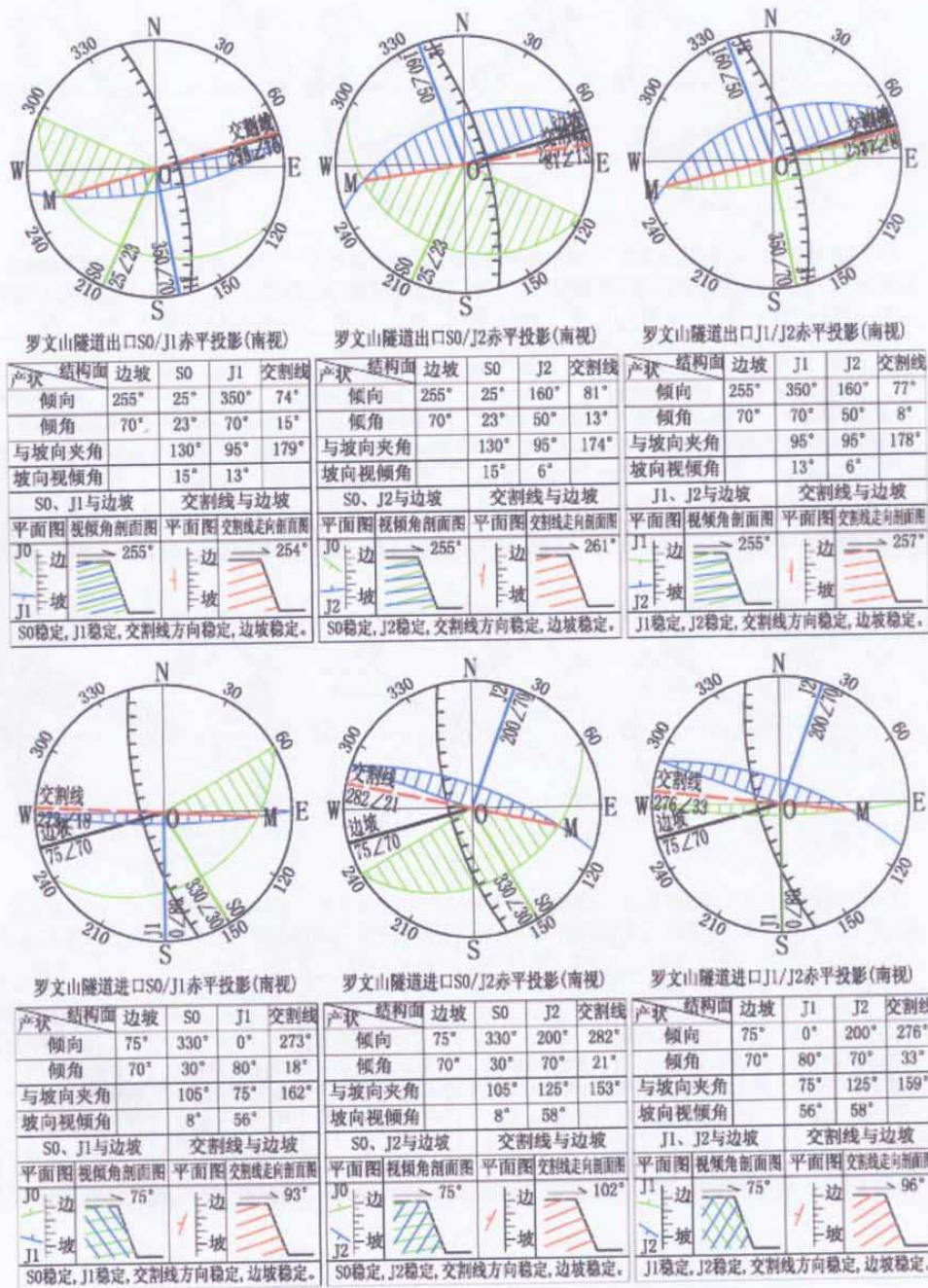


图 4-3 某公路工程(K1+720~K3+580)隧道进出口赤平投影图

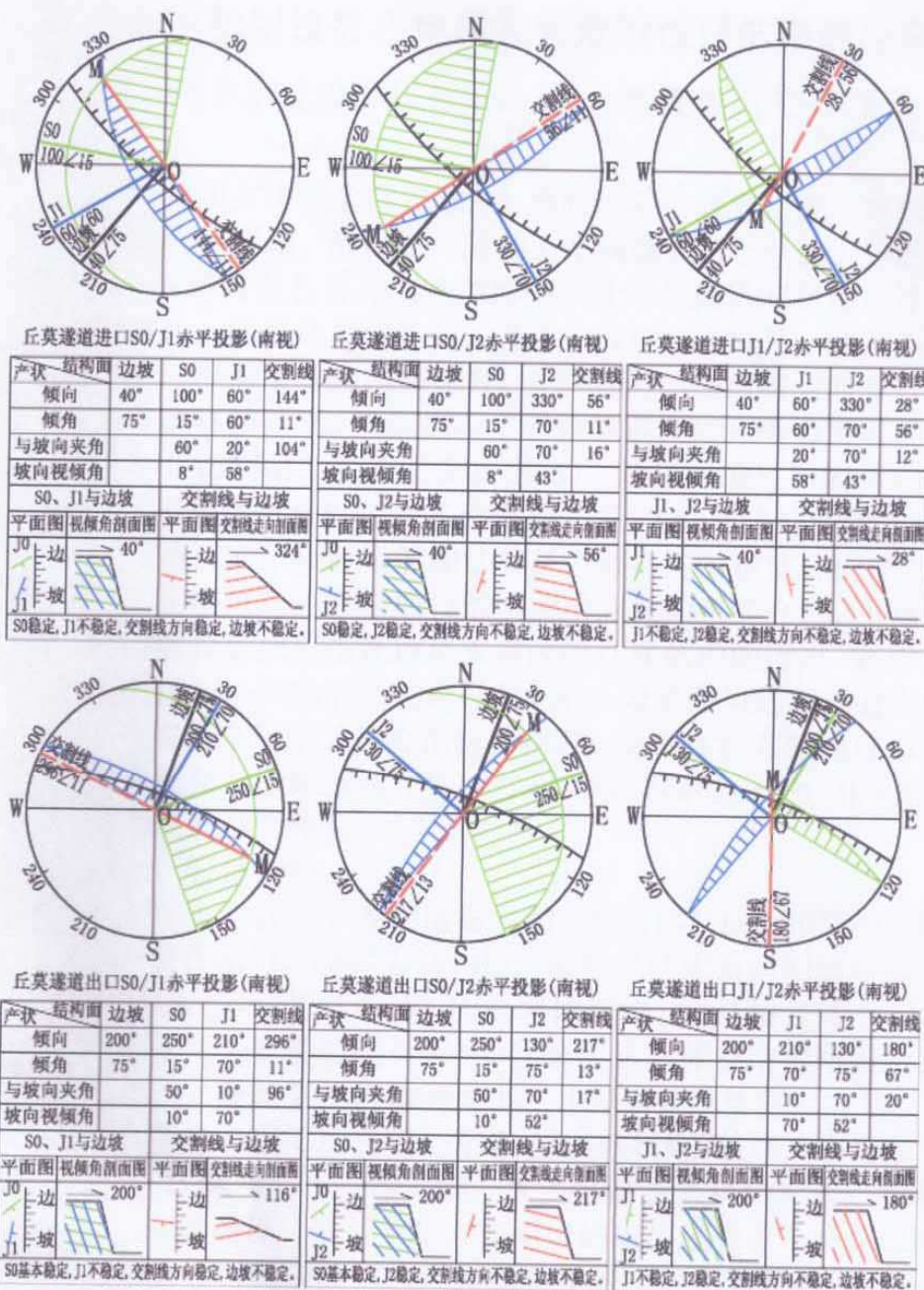


图 4-4 某公路工程 (K74+890~K77+270) 隧道进出口赤平投影图