

# 大瑞铁路澜沧江大桥工程边坡岩体结构特征研究

郑光<sup>①</sup> 杜宇本<sup>②</sup> 许强<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 成都 610059)

(<sup>②</sup>中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031)

**摘要** 岩体中结构面的展布及其组合特征决定了岩体的工程地质性质和力学性状,影响着岩体的破坏方式。大瑞铁路澜沧江大桥所处的澜沧江构造带,具有高地震烈度、活跃的新构造运动、活跃的外动力地质条件、活跃的岸坡浅表改造过程等地质特征。工程区两岸节理裂隙等弱面发育,岸坡浅表改造过程强烈,导致岩体结构复杂。通过野外现场调查,对两岸边坡岩体结构面数据进行统计分析,采用 $\chi^2$ 检验与K-S检验法对结构面进行概率密度拟合,分析岩体结构特征。结果表明:(1)右岸的优势结构面有三组;(2)左岸的优势结构面有四组;(3)各组优势结构面产出状态数据均服从正态分布。在统计分析结果的基础上,建立两岸岩体结构的统计模型,并对边坡破坏模式进行定性分析,认为:(1)右岸边坡变形破坏模式为滑移-压致拉裂;(2)左岸结构面贯通性不好,主要的破坏模式是局部块体滑移。

**关键词** 大瑞铁路 澜沧江大桥 岩石边坡 岩体结构 优势方位 变形破坏模式

中图分类号:U213.1<sup>+</sup>3 文献标识码:A

## CHARACTERISTICS OF ROCKMASS STRUCTURES AT SLOPE OF LAN-CANGJIANG BRIDGE ALONG DALI-RUILI RAILWAY

ZHENG Guang<sup>①</sup> DU Yuben<sup>②</sup> XU Qiang<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>The State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

(<sup>②</sup>China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031)

**Abstract** The complex distribution and combination characteristics of rockmass structural planes determine the engineering geology and mechanics properties and affect the failure mode of the rockmass slope. The slope at the Lancangjiang bridge along the Dali-Ruilu railway is located in the Lancangjiang tectonic belt, where seismic intensity is high, neo-tectonic movement is active, the external force and active hypabyssal and hypergene rebuilding process are also active. Therefore, the rock mass structure of the both sides of Lancang river are very complex. Based on plentiful geologic investigation data of the engineered slope at the Lancangjiang bridge, a statistical analysis are undertaken to examine the structural planes with fitting test by the way of chi-Square and Kolmogorov-Smirnov method. The results show that: (1) three preferred structure planes are in the right bank; (2) four preferred structure planes are in the left bank; (3) the occurrence of those preferred structure planes are confirming with normal distributions, respectively. Statistic models of the engineered slopes are constructed to analyze the failure modes based on the statistic results. The failure model of the right bank engineered slope is sliding and fracturing; and the failure

\* 收稿日期:2009-09-19;收到修改稿日期:2010-01-22.

基金项目:铁道部科技计划项目(编号:2008G027-B)资助.

第一作者简介:郑光,主要从事工程地质和岩土工程方面的研究工作. Email:zhengguang08@cdut.cn

model of the right bank slope is the local rock blocks losing stability.

**Key words** Dali-Ruili railway, Lancangjiang bridge, Rock slope, Rockmass structure, Superiority trend, Deformation and failure mode

# 1 引言

岩体是由岩块和分割它们的不连续面或结构面组成的地质体,结构面在空间的分布与产出状态构成了岩体的结构。岩体中结构面的展布及其组合特征决定了岩体的工程地质性质和力学性状,很大程度上影响着岩体的破坏方式,同时也构成了各类岩体工程地质问题的重要控制因素。

大瑞铁路东起大理,西至瑞丽,全长 336km,是中缅国际铁路的重要组成部分。该铁路穿行于青藏高原南东缘之横断山脉中段和南西端的滇西高原,地质复杂,地形险峻,具有高地震烈度、活跃的新构造运动、活跃的外动力地质条件、活跃的岸坡浅表改造过程等地质特征。

澜沧江大桥长 426m,桥高 238m,为单跨钢管混凝土拱桥,是大瑞铁路的重点控制性工程。据勘察,桥址区岩性为三叠系上统(T<sub>3</sub>d<sup>2</sup>)中厚层状灰岩、白云岩,岩质坚硬,桥基远高于澜沧江侵蚀基准面,岩溶不发育。由于地处澜沧江构造带,受到多期构造变动及结构面改造作用,两岸节理裂隙等弱面发育,岸坡浅表改造过程强烈,导致岩体结构复杂。工程开挖后,不同结构面相互组合,可能构成不稳定性块体的边界,并直接导致结构面切割形成的临空块体失稳破坏,对桥基的稳定和铁路线运营造成巨大危害。因此,开展以结构面优势方位统计为主要目的的岩体结构调查和研究是非常必要的。

# 2 工程区地形地貌

工程区位于大理与保山分界处澜沧江峡谷内。澜沧江在该地区基本沿构造线展布,由北西流向南东,仅雾虹桥附近呈“Z”字形拐为近东西向,河床狭窄,两岸峡谷高陡呈“V”字形(图 1)。地面高程 1170~2400m,相对高差约 1300m,自然横坡 10°~50°,左岸在 1450m 以下坡度 40°~50°,右岸坡度 50°~60°,局部为陡壁,地表横向冲沟较发育。

桥址顺构造线夹于平坡断裂(F<sub>2</sub>)与五里哨断裂(F<sub>3</sub>)之间,两岸节理裂隙等构造软弱面发育,岸坡浅表改造过程强烈。工程开挖后,各弱面极有可

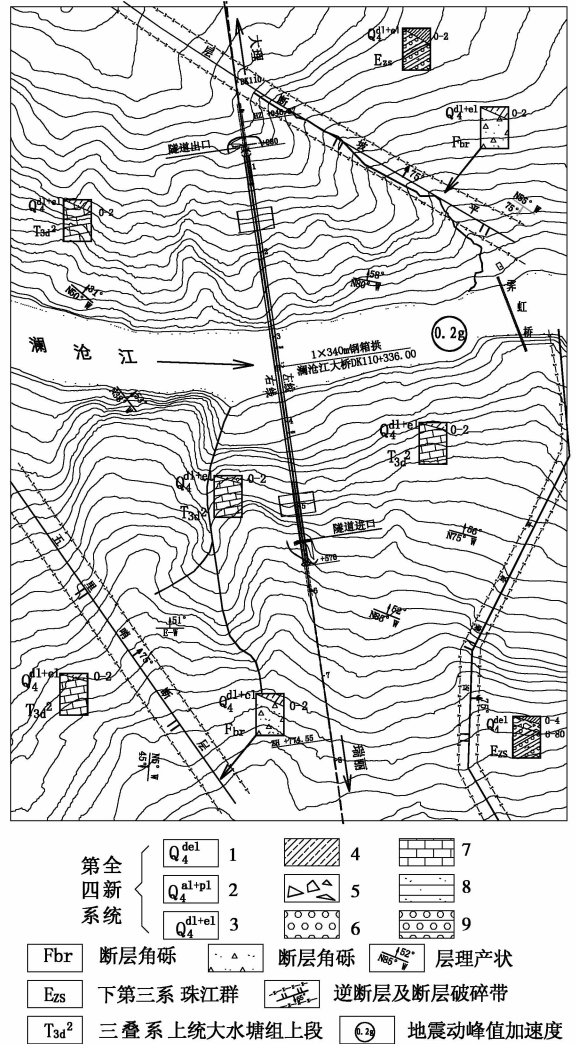


图 1 桥址区工程地质图

Fig. 1 Geological map of the Lancangjiang bridge engineering site

- 1. 滑坡堆积层; 2. 冲洪积层; 3. 坡残积层; 4. 粉质黏土;
- 5. 块石土; 6. 卵石土; 7. 灰岩; 8. 泥岩; 9. 砾岩

能组合形成不稳定块体,对桥基的稳定造成巨大隐患。

# 3 统计模型建立的理论基础和手段

由于岩体结构的各种自然特征或性质总含有一定的随机性,因而只有从大量的样本数据中求取统计规律,才能准确地获得用于岩体稳定性分析评价

的代表性特征指标,并建立岩体结构的统计模型。

以实测资料为基础,建立岩体结构的统计模型,可分为两个步骤:首先进行方位统计分析,判定岩体结构面的优势方向,划分出结构面组。然后分别对各组结构面进行统计分析,建立各组结构面的相关参数统计模型(图2)。

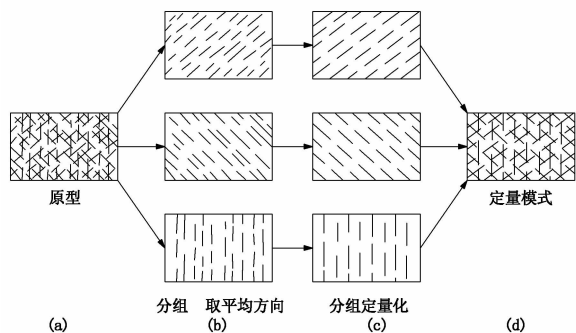


图2 岩体结构特征量化模式程序图示

Fig. 2 Schematic diagram to generalize rockmass structure

在结构面现场调查过程中,具体量测了两岸出露的几百条结构面的产出状态指标,并对迹长不足0.5m的结构面进行舍弃。在对两岸的结构面产状进行优势分析过程中,采用加拿大多伦多大学土木工程系岩石工程研究室 M. S. Diederichs 和 E. Hoek(1989)开发的“赤平投影结构数据分析软件包”(DIPS)(Windows版)完成工作。

在岩体结构统计分析中,基于对结构面的大量现场调查与测量数据,采用统计模型方法,获得表征结构面特征的指标。针对岩体结构参数主要采用不依赖关于母体分布的非参数假设检验。非参数假设检验主要有 chi-Square ( $\chi^2$ ) 拟合检验和 Kolmogorov-Smirnov 拟合检验等方法。

在结构面几何描述过程中,几何参数的概率分布形式是按结构面组来建立的,因此,在确定产状统计模型时,应按倾向(走向)、倾角进行统计,求出它们的密度函数形式及相应的均值和方差。

#### 4 右岸工程区岩体结构面特征统计

由于工程区避开了区域性断层,故研究区内无大型断裂型结构面出露,只有裂隙型结构面发育。右岸岩体结构面表面多平直粗糙,没有因相对位移而产生的擦痕,部分张开结构面间充填了乳白色钙膜,钙膜强度低,孔隙比大。

由图3 结构面极点密度等值线图可以看到,右

岸发育有三组优势结构面:第1组走向近EW,倾角中等,为顺坡向结构面;第2组走向NEE,倾角近直立;第3组为倾坡内结构面,走向NE~NEE,倾角较大。右岸各组结构面倾向统计直方图见图4所示,共统计坡面出露节理106条,右岸工程区的岩体结构面以倾向 $340^\circ \sim 20^\circ$ 和 $130^\circ \sim 160^\circ$ 两组倾向为主,与图3显示的优势走向方位角相吻合。

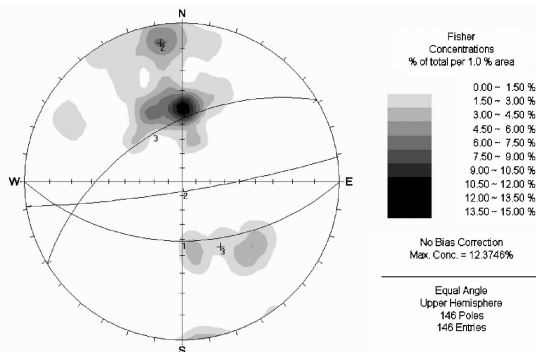


图3 右岸结构面极点密度等值线图

Fig. 3 Plot of structural features in rightbank

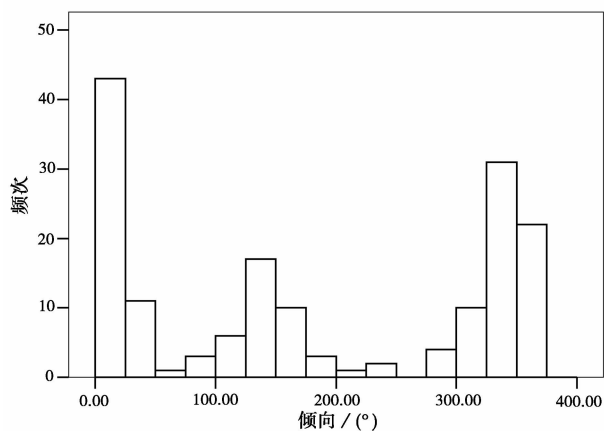


图4 右岸岩体结构面倾向统计直方图

Fig. 4 Histogram showing tendency of structural plane in rightbank

在测量区内,通过统计出的优势方位确定分组范围。对于走向,以优势方位为中心,以 $30^\circ$ 为搜索半径,得到拟合该组几何参数分布形式的数据。图5~图7分别为右岸三组优势结构面产状的分布拟合图,可以看到三组优势结构面产状数据的分布拟合程度都较好,优势方位为 $N88^\circ E/NW \angle 83^\circ$ 的结构面倾角由于接近 $90^\circ$ ,与其他结构面倾角拟合曲线不同。表1的统计计算结果表明,采用 chi-Square ( $\chi^2$ ) 拟合检验和 Kolmogorov-Smirnov 拟合检验,三组优势结构面倾向和倾角都服从正态分布。

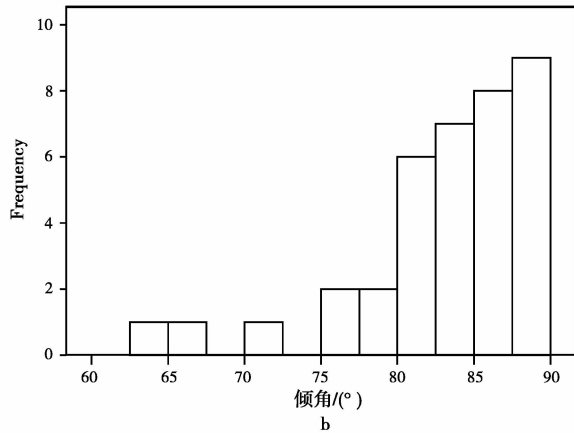
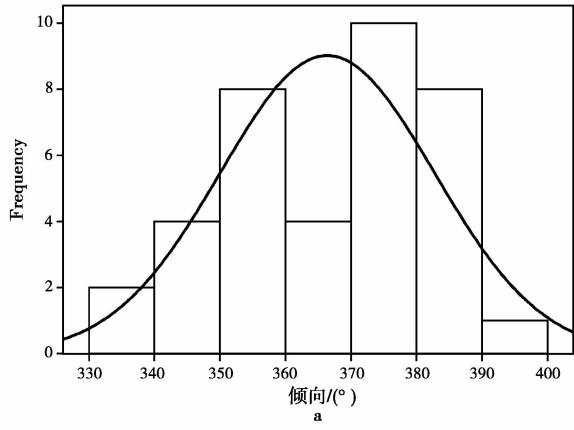


图5 右岸岩体结构面产状统计直方图  
(优势方位: N88°E/NW ∠83°)

Fig. 5 Distributions of the probability distribution functions of structural plane in rightbank  
(superiority trend: N88°E/NW ∠83°)  
a. 倾向分布拟合图; b. 倾角分布拟合图

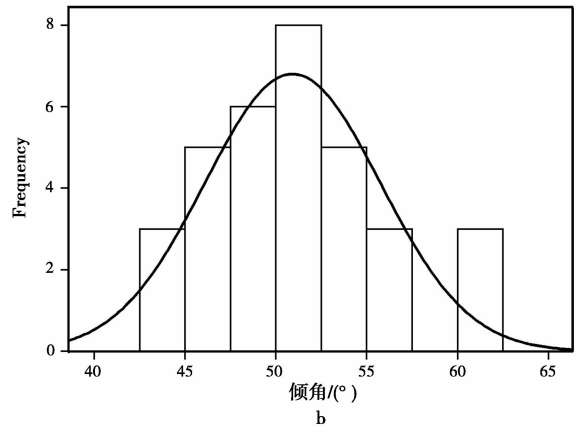
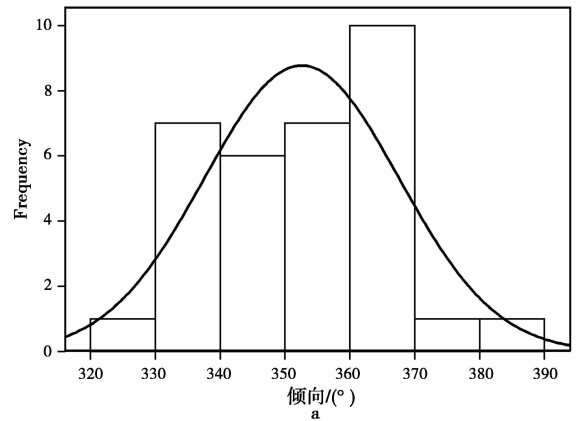


图6 右岸岩体结构面产状统计直方图  
(优势方位: N83°E/NW ∠49°)

Fig. 6 Distributions of the probability distribution functions of structural plane in rightbank  
(superiority trend: N83°E/NW ∠49°)  
a. 倾向分布拟合图; b. 倾角分布拟合图

表1 产状分布拟合结果 ( $\alpha=0.05$ )

Table 1 Distribution fitting result based on structural features ( $\alpha=0.05$ )

优势方位		产 状 要 素									
		倾 向					倾 角				
		$\chi^2$	K-S	均值	方差	分布	$\chi^2$	K-S	均值	方差	分布
右岸	N83°E/NW ∠49°	0.994	0.377	352.9	14.9	正态	0.96	0.711	49.7	6.9	正态
	N88°E/NW ∠83°	1.000	0.451	357.6	14.4	正态	0.907	0.273	82.8	5.7	
	N57°E/SE ∠54°	1.000	0.573	148.1	17.5	正态	0.98	0.554	54.8	9.7	正态
左岸	N81°E/NW ∠76°	1.000	0.593	351.6	6.01	正态	0.00	0.296	76	13.2	
	N56°E/SE ∠37°	0.366	0.775	145.57	12.6	正态	0.976	0.574	37.6	2.8	正态
	N40°W/SW ∠45°	0.978	0.485	229.5	10.1	正态	0.00	0.985	45	11.1	正态
	N13°E/SE ∠40°	0.995	0.946	103.3	2.9	正态	0.948	0.987	40.1	3.1	正态

注: 表中的  $\chi^2$  和 K-S 值均指 Asymp. Sig(渐近显著性水平)

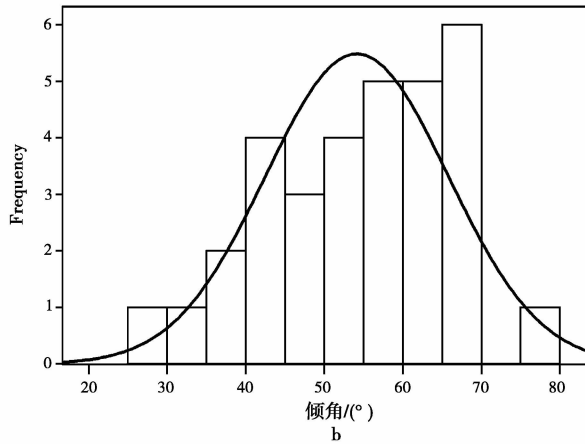
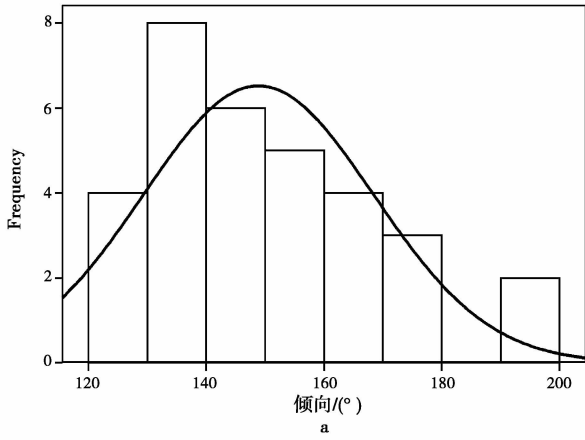


图7 右岸岩体结构面产状统计直方图  
(优势方位: N57°E/SE∠54°)

Fig. 7 Distributions of the probability distribution functions of structural plane in rightbank  
(superiority trend: N57°E/SE∠54°)  
a. 倾向分布拟合图; b. 倾角分布拟合图

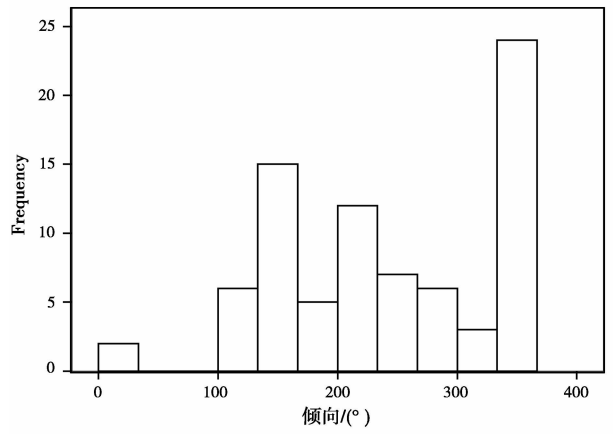


图9 左岸岩体结构面倾向统计直方图

Fig. 9 Histograms showing tendency of structural plane in leftbank

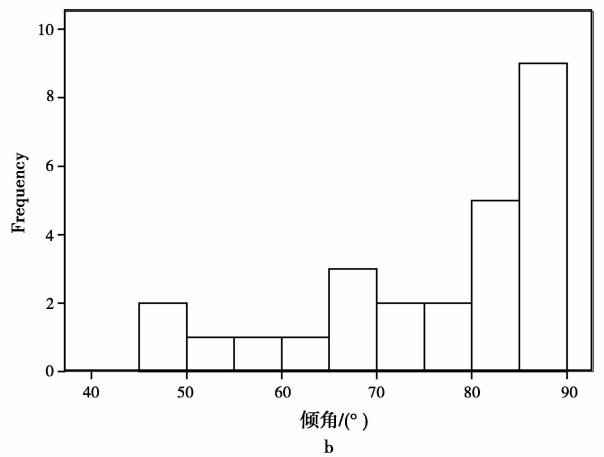
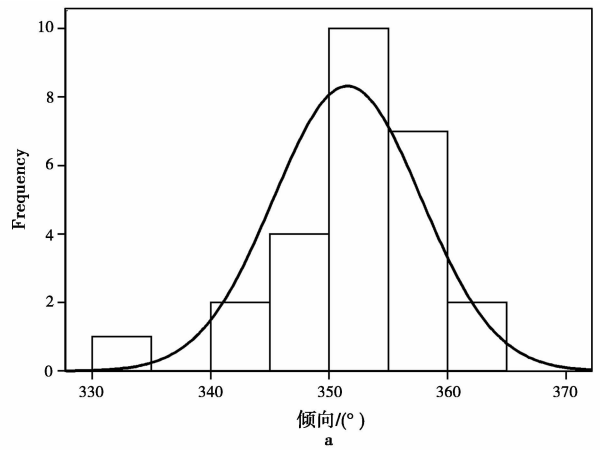


图10 左岸岩体结构面产状统计直方图  
(优势方位: N81°E/NW∠76°)

Fig. 10 Distributions of the probability distribution functions of structural plane in leftbank (superiority trend: N81°E/NW∠76°)  
a. 倾向分布拟合图; b. 倾角分布拟合图

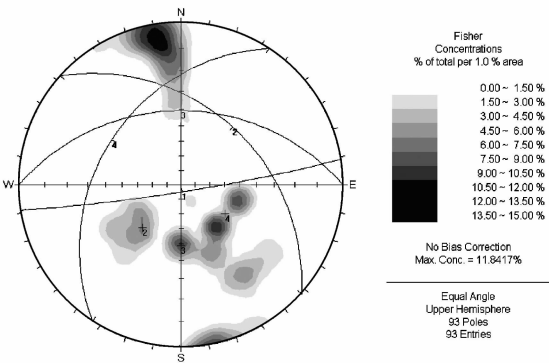


图8 左岸结构面极点密度等值线图

Fig. 8 Plot of structural features in leftbank

## 5 左岸工程区岩体结构面特征统计

左岸工程区灰岩体展现出明显的二次胶结迹象,胶结物为白色、乳白色钙质物和紫红色泥质物,被胶结角砾为灰岩和白云质灰岩。对比两岸取出的岩芯及工程开挖揭露出的新鲜岩体,左岸角砾粒径大多小于10cm,而右岸岩体被胶结角砾粒径则大于15cm~20cm,且右岸在1380m~1400m以上,岩性已是坚硬的白云质灰岩,胶结现象较少。

由于受二次胶结影响,左岸本应成组发育的结构面不是很明显,基体裂隙则较为发育。由图8可以看出,左岸工程区结构面主要发育有四组结构面:第1组走向NEE,近EW,倾向NW,近直立;第2组走向NW,倾向SW,倾向大河的上游侧;第3组走向为EW向,倾向北侧;第4组走向NE,倾向SE,倾向澜沧江下游侧。由图9倾向统计直方图可以看到,由于基体裂隙发育,以及倾向南侧的结构面较多,倾向统计直方图离散性不强,只倾向NW的一组优势结构面具有优势。

图10~图13分别为左岸发育的四组优势结构面产状分布拟合图。由于优势方位为 $N56^{\circ}E/SE \angle 37^{\circ}$ 和 $N13^{\circ}E/SW \angle 40^{\circ}$ 的两组结构面裂隙面平直、闭合,属硬性接触,且多被覆盖层掩盖,在坡体表面出露较少,统计数据较少,产状的曲线拟合度较差。对比图5和图10,两组数据显示它们应属同一组结构面。该组结构面在工程区两岸同时存在,可能构成两岸岩体发生滑移-拉裂破坏的后缘切割面。图9显示出本组结构面在左岸结构面统计数量上的优势,说明本组结构面在左岸发育较好。

通过采用 $\chi$ 和Kolmogorov-Smirnov拟合检验,左岸的四组优势结构面的倾向和倾角同样是服从正态分布的(表1)。

## 6 两岸工程区岩体结构面特征

由于岩体结构面天然露头的有限性,以及工作区特殊的地形条件,结构面间距和迹长的数据采集量不足以进行数理统计分布拟合,表2仅对各组采集数据进行平均给出。

通过现场的实际调查和量测,在室内数据统计分析的基础上,采用DIPS软件进行了结构面的优势分组,并进一步采用了 $\chi$ 检验与K-S检验法对左右两岸的结构面进行了概率密度拟合,确定左右两岸

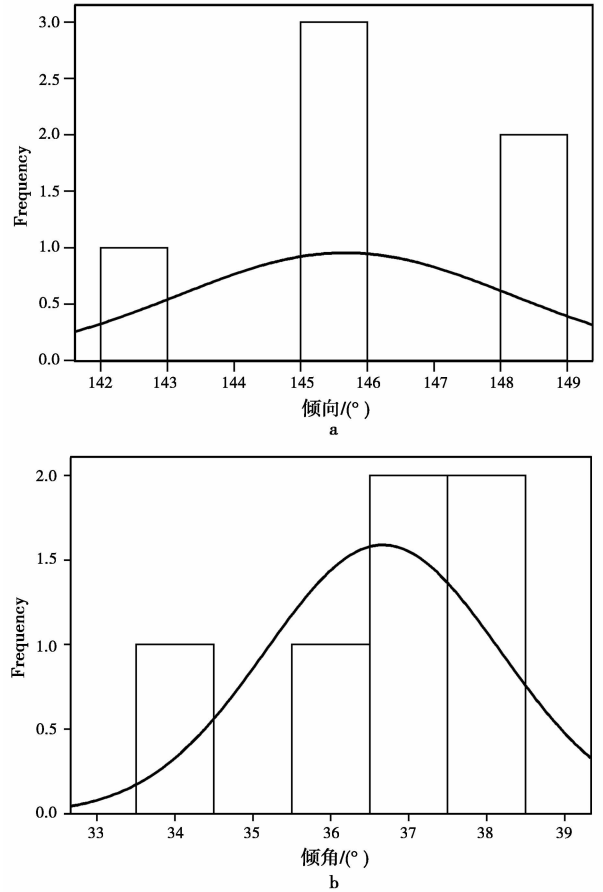


图11 左岸岩体结构面产状统计直方图  
(优势方位: $N56^{\circ}E/SE \angle 37^{\circ}$ )

Fig. 11 Distributions of the probability distribution functions of structural plane in leftbank (superiority trend:  $N56^{\circ}E/SE \angle 37^{\circ}$ )  
a. 倾向分布拟合图; b. 倾角分布拟合图

共计有7组优势结构面切割岩体,建立空间组合示意图(图14)。

对结构面特征参数的量测与统计分析可知,在右岸,大倾角结构面由于地表水易于浸入,充填程度

表2 结构面间距和迹长列表

Table 2 List of discontinuity Spacing and length

产状方位	结构面间距			结构面迹长			
	最小 /m	最大 /m	均值 /m	最小 /m	最大 /m	均值 /m	
右岸	$N83^{\circ}E/NW \angle 49^{\circ}$	0.6	1.6	1.4	5	14	13
	$N88^{\circ}E/NW \angle 83^{\circ}$	1.2	1.4	1.3	5	45	30
	$N57^{\circ}E/SE \angle 54^{\circ}$	0.2	0.7	0.5	8	10	9
左岸	$N81^{\circ}E/NW \angle 76^{\circ}$	0.6	1.2	0.8	10	10	10
	$N56^{\circ}E/SE \angle 37^{\circ}$	0.17	4	2	18	18	18
	$N40^{\circ}W/SW \angle 45^{\circ}$	1.5	1.5	1.5	4	4	4
	$N13^{\circ}E/SE \angle 40^{\circ}$	0.2	0.8	0.5	20	20	20

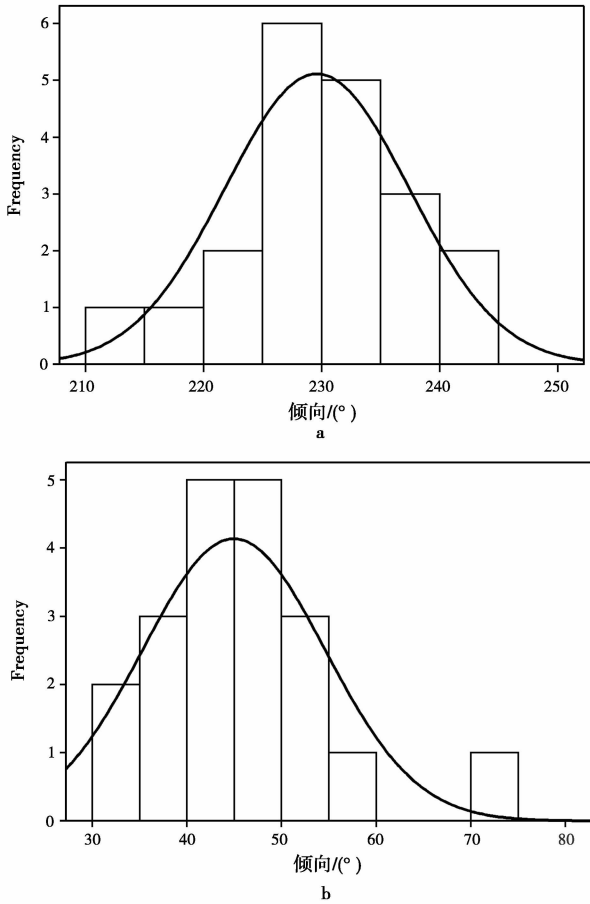


图 12 左岸岩体结构面产状统计直方图  
(优势方位:  $N40^{\circ}W/SW \angle 45^{\circ}$ )

Fig. 12 Distributions of the probability distribution functions of structural plane in leftbank (superiority trend:  $N40^{\circ}W/SW \angle 45^{\circ}$ )  
a. 倾向分布拟合图; b. 倾角分布拟合图

较差,受地表卸荷及风化影响较严重,张开度较大,迹长较大,是右岸变形破坏的主控结构面之一;中倾角外倾结构面是坡体地下水渗流的主要排泄通道,裂隙壁有溶蚀和土黄色泥质浸染现象,其充填和胶结程度均较差;上述两组结构面决定了右岸岩质边坡的破坏模式。在左岸,虽然通过结构面优势分析确定了其空间组合情况(图 14a),但是由于结构面张开度小,地表水侵入后不宜排除,在结构面较弱部位形成二次溶蚀胶结的索固段,使结构面贯通性差,空间组合不宜形成大块体。

通过建立岩体结构统计模型,在弄清结构面类型和特征的基础上,可以定性确定岩质边坡的变形破坏模式。右岸边坡变形破坏模式为滑移-压致拉裂(图 14b),主要受外倾顺坡结构面和后缘大倾角结构面组合控制。左岸由于结构面贯通性不好,主要的破坏模式是局部块体滑移,如图 14a 所示,由倾

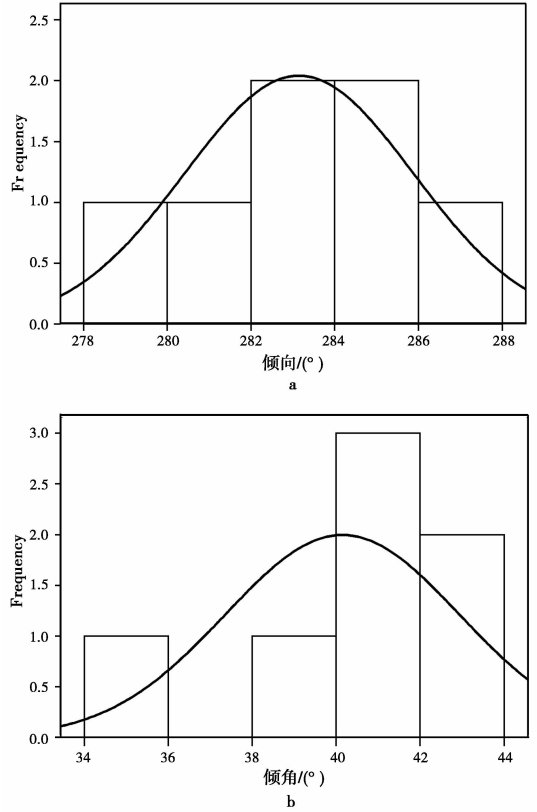


图 13 左岸岩体结构面产状统计直方图  
(优势方位:  $N13^{\circ}E/SW \angle 40^{\circ}$ )

Fig. 13 Distributions of the probability distribution functions of structural plane in leftbank (superiority trend:  $N13^{\circ}E/SW \angle 40^{\circ}$ )  
a. 倾向分布拟合图; b. 倾角分布拟合图

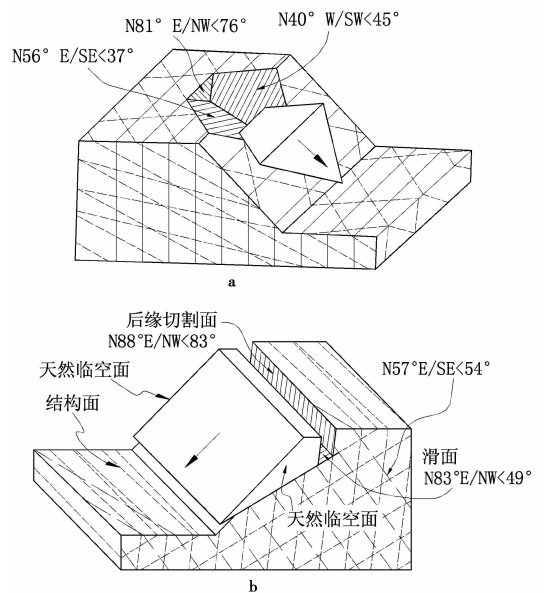


图 14 两岸工程边坡结构面空间组合示意图

Fig. 14 Spatial structure in the rockmass of engineering slope  
a. 左岸; b. 右岸

上游侧和倾下游侧的两组结构面共同组合,切割,形成楔形滑移面。

岩体结构由于其力学的控制作用,包括岩体结构控制岩体强度、控制工程岩体破坏的边界条件和控制工程岩体稳定性等,一直是岩质边坡研究工作的重点。澜沧江大桥工程边坡岩体结构统计模型的建立将为边坡稳定性研究和工程治理等工作奠定基础。

## 7 结 论

通过对澜沧江大桥工程区结构面的统计分析,可得出以下结论:

(1)两岸均发育有一组陡倾角结构面,产状一致;

(2)右岸的优势结构面有三组: $N83^{\circ}E/NW \angle 49^{\circ}$ , $N88^{\circ}E/NW \angle 83^{\circ}$ 和 $N57^{\circ}E/SE \angle 54^{\circ}$ ;

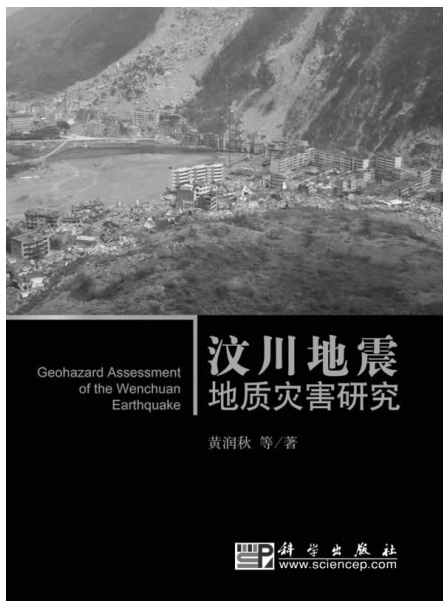
(3)左岸的优势结构面有四组: $N81^{\circ}E/NW \angle 76^{\circ}$ , $N56^{\circ}E/SE \angle 37^{\circ}$ , $N40^{\circ}W/SW \angle 45^{\circ}$ 和 $N13^{\circ}E/SE \angle 40^{\circ}$ ;

(4)右岸边坡变形破坏模式为滑移-压致拉裂破坏;左岸的破坏模式是局部楔形块体滑移。

## 参 考 文 献

- [1] 黄润秋,许模,陈剑平,等. 复杂岩体结构精细描述及其工程应用[M]. 北京:科学出版社,2004.  
Huang Runqiu, Xu Mo, Chen Jianping, et al. Fine structure description of complex rockmass and its engineering application. Beijing: Science Press, 2004.
- [2] 许强,郑光,等. 大瑞铁路澜沧江大桥隧道出口边坡稳定性及工程处理措施研究[R]. 成都:成都理工大学,2007.  
Xu Qiang, Zheng Guang, et al. Study on the slope stability and engineering treatment of Lancangjiang bridge engineering slope on Dali-Ruili Railway. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [3] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京:地质出版社,1994.  
Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Analytical principle of engineering geology. Beijing: Geological Publishing House, 1994 (in Chinese).
- [4] Goodman R E, Genhua Shi. Block theory and its application to rock engineering[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1985.
- [5] 吴义鹰,石豫川,刘宏力. 某地下厂房围岩岩体结构特征分析[J],地球与环境,2005,33(S1):189~192.  
Wu Yiyong, Shi Yuchuan, Liu Hongli. Analysing wall-rock's structure character of a underground powerhouse. Earth and Environment, 2005, 33(S1): 189~192.

## 新书介绍



## 汶川地震地质灾害研究

作者:黄润秋等,科学出版社出版,2009

本书以2008年5.12汶川大地震为研究对象,较为系统地研究和阐述了汶川大地震发生的构造背景以及触发地质灾害的发育特征、发生机理及其评价预测。重点分析了崩塌滑坡地质灾害的分布规律、斜坡强震的动力响应及破裂失稳机理、斜坡物质运动特征,震后泥石流灾害的发育特征、预测评价及危险性分析,以及崩塌滑坡堵江的形成过程、堵江特征、堰塞坝稳定性、溃坝机理及风险评估等。针对灾后恢复重建,提出了灾区地质环境应急评价的原则,并探讨了若干重点损毁城镇的重建选址问题。

全书共分三篇16章,950页,140万字,精装订,是第一本系统阐述汶川地震诱发地质灾害的专著。定价220元,邮费20元。

订购请与《工程地质学报》编辑部联系,(100029)北京北土城西路十九号,中国科学院地质与地球物理研究所,《工程地质学报》编辑部收

电话:82998121(兼传真),邮箱:gcdz@mail.igcas.ac.cn