

贵州北盘江大桥高边坡特征及其工程效应研究

赵超, 樊敬亮, 孟娟

(江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210007)

摘要:高山峡谷地区的北盘江大桥两岸高边坡, 表部风化卸荷严重。因此, 对其稳定性及危害程度进行准确评价显得尤为重要。首先, 对两岸边坡的结构类型、结构面与坡面的组合、岩体风化及物理力学性质等特征进行了研究; 然后, 对两岸边坡的岩体进行了质量分级; 在岩体质量分级的基础上, 利用 FLAC3D 数值模拟软件, 对两岸边坡在自重、大桥荷载和地震作用下引起的工程效应进行了综合评价。

关键词:北盘江大桥; 高边坡; 岩体质量; FLAC3D; 工程效应; 贵州北盘江

中图分类号: TU473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3636(2009)03-0245-06

0 引言

北盘江大桥是拟建中的上海至云南瑞丽高速公路在贵州省境内跨越北盘江峡谷的一座特大桥, 在大桥初步设计阶段, 有 465m 斜拉桥和 536m 悬索桥两种方案。由于特大桥处于高山峡谷地区, 所以峡谷两岸边坡稳定性问题是北盘江大桥工程地质方面的关键问题。因此, 通过现场工程地质条件的系统调查和室内的综合分析, 揭示两岸边坡岩体的特征及边坡稳定性, 选择合适的桥型及主墩位置, 确保大桥的安全施工和长期

运行, 具有十分重要的意义。

1 工程地质环境

1.1 地形地貌

北盘江为“V”形谷, 以 129°流向横穿桥址, 两岸地势十分陡峭。镇宁岸边坡高程从 890m 下降至 558m, 高差 332m, 纵向上地形坡度 25°~30°, 临河边坡为陡崖; 胜境关岸边坡高程从 873m 降至 558m, 高差 315m, 边坡坡度 50°。两岸卸荷裂隙十分发育, 岩体破碎(图 1)。

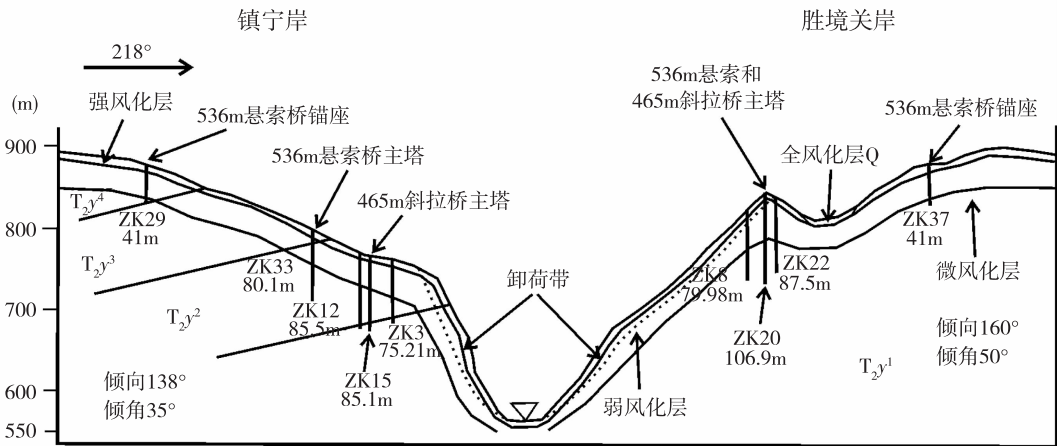


图 1 北盘江大桥中轴线地质纵剖面图

1.2 地层

桥址基岩裸露,仅在地势低凹处分布有少量第四纪残、坡积层,主要成分为灰黄色、灰褐色粘土夹少量碎石,厚度 <10m。

桥址基岩为三叠系中统杨柳井组(T_2y),主要由角砾状泥质白云岩、白云岩、白云质灰岩组成。根据岩性,将桥址地层划分为 T_2y^1 、 T_2y^2 、 T_2y^3 、 T_2y^4 4 段。

T_2y^1 :厚层、中厚层白云岩夹薄层泥质白云岩、白云质灰岩及灰质白云岩,厚度大于 100m。分布于胜境关岸及镇宁岸陡崖至河床。

T_2y^2 :薄层、极薄层角砾状泥质白云岩夹中厚层角砾状泥质白云岩及白云质灰岩,厚度 58m。

T_2y^3 :厚层、中厚层白云岩夹薄层泥质白云岩,厚度 95m。

T_2y^4 :薄层、极薄层角砾状泥质白云岩夹中厚层泥质白云岩及白云质灰岩,厚度大于 100m。

1.3 地质构造

桥址位于开阔的、倾伏向 $N40^{\circ} \sim E50^{\circ}$ 、倾伏角 35° 巴岗背斜的南东翼,背斜在大桥镇宁岸引桥及巴岗村附近发生弧形合围。两岸结构面(节理和断层)露头不好,在桥址 4 个露头处共测得 33 个结构面的要素。对这 33 个结构面要素进行了结构面极点图、结构面密度等值线图、结构面走向玫瑰图的统计分析,得到桥址优势结构面产状共 3 组:第一组产状为 $N10^{\circ}E/NW \angle 49^{\circ}$,第二组产状为 $N71^{\circ}E/NW \angle 77^{\circ}$,第三组 $N75^{\circ}W/NE \angle 65^{\circ}$ 。

1.4 水文特征

桥址枯水期未见泉水点出露,冲沟内枯水期无地表水通过。两岸钻孔均为干孔,可见桥址地下水埋深较大,地表水主要通过地表径流及沟谷排向北盘江。

在两岸进行了渗流试验,试验结果按《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50287—99)的岩土渗透性分级标准,白云岩组为中等透水岩组(表 1)。由于两岸岩体中岩溶比较发育,地下水位埋藏较深,加上渗流试验证明岩体中等透水,所以降雨一般不会对岩体中形成影响岸坡稳定性的渗透压力。

1.5 地震烈度

桥址地震影响烈度为 VI 烈度,桥址 50 年超越概率为 10% 的基岩地震水平峰值加速度为 $0.41m/s^2$ 。

表 1 桥址白云岩渗透性等级

位置		稳定渗透系数 /(cm/s)	标准渗透系数 K /(cm/s)	渗透性等级
胜境关岸	1 号坑	3.0×10^{-3}	$10^{-4} \leq K < 10^{-2}$ (中等透水)	中等透水
	2 号坑	2.2×10^{-3}		中等透水
镇宁岸	3 号坑	2.0×10^{-3}		中等透水
	4 号坑	5.0×10^{-4}		中等透水

1.6 岩溶发育情况

白云岩中普遍发育溶蚀孔、溶蚀隙。
白云岩表面风化后见刀砍状溶沟,层理成密集片状。

胜境关岸 K64 + 900 轴线右侧约 160m 处分布有 1 个大溶洞和 6 个小溶洞。其中大溶洞高约 26m,宽约 25m,洞口呈长方形,洞深约 15m;洞内崩塌物、胶结物分布较多,厚约 10m;洞口底板高程 650m 左右。

2 自然边坡稳定性评价

边坡失稳的前提是临空面与结构面构成了适合滑动的空间组合。在北盘江桥址,不同走向的裂隙由这三组优势节理发育而来。镇宁岸主要发育第一、二组优势节理,胜境关岸三组优势节理都发育。镇宁岸岩层倾向与河流流向基本一致,属横向坡(图 2),而胜境关岸为斜向坡,岩层倾向下游偏河谷(图 3)。

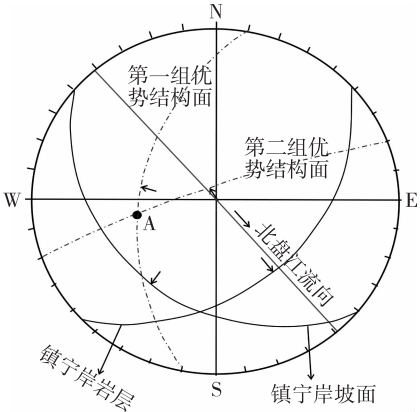


图 2 镇宁岸节理、坡面、岩层赤平投影图

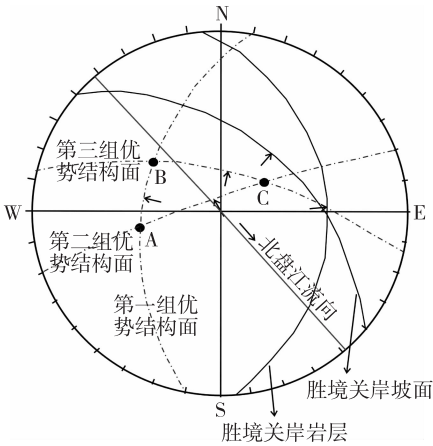


图3 胜境关岸节理、坡面、岩层赤平投影图

因为桥址镇宁岸岩层倾向与河流流向基本一致,倾角 35° 左右,属横向坡偏坡内,加上桥址岩层顺层方向连续完整,无横向临空面存在,所以边坡不具备整体滑移的失稳条件。同时,边坡表面岩体卸荷作用相对较弱,除上游侧因浅沟影响存在局部浅层顺层滑塌外,未见结构面的不利组合形成的潜在不稳定体。综上所述,镇宁岸边坡在自然状态下处于稳定状态。

推荐的465m斜拉桥方案和536m悬索桥在胜境关岸的主塔均位于一孤立的 山包上,海拔854m。山包基岩为白云岩,岩体中长、大裂隙不发育,但短、

小裂隙极为发育,溶蚀相对强烈,溶孔及蜂窝状溶蚀普遍,局部见有充泥溶洞。山包山里侧发育有一溶蚀冲沟,沟底高程790m~820m,覆盖层厚度5.2m~9.7m。山包在河下游侧(胜境关岸大桥轴线左侧)为顺向坡,地形受岩层层面控制,形成一个坡度 40° 左右的小边坡。小边坡上有一边界条件十分清楚的潜在滑动块体,但通过极限平衡计算,该块体是稳定的。山包临河侧为横向坡,坡度陡峻,局部受节理与层面组合形成的崩塌体的影响形成阶梯状凹槽。山包上游侧为反向坡,且将来的桥塔接近沟底,不存在边坡稳定性问题。综上所述,胜境关岸边坡在自然状态下处于稳定状态。

3 边坡稳定性工程效应分析

高山峡谷地区岸坡切割深、临空面大,在内外营力作用下自然边坡稳定性就比较差,当岸坡承受 $10^4\text{t}\sim 10^5\text{t}$ 竖向力、弯矩和 10^3t 向临空方向的水平力后(表2),必然会使边坡体原有的内部平衡状态发生改变,可能使桥基边坡发生变形,乃至破坏。为了评价边坡在自重、大桥荷载和地震作用下的工程效应,采用FLAC3D软件模拟三维情况下岩、土体从屈服极限到塑性流动的行为。

表2 设计主塔承台底反力

桥型	桥位	竖向力/t	水平力/t		弯矩/tm	
			横向	纵向	横向	纵向
斜拉桥	镇宁岸主塔	104 742	1 058	1 507	165 121	145 750
悬索桥		30 750	622	253	19 676	18 772
斜拉桥	胜境关主塔	84 465	976	1 012	94 078	93 375
悬索桥		27 955	565	230	17 887	17 065

3.1 软件简介

FLAC3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) 软件是由美国 Itasca 咨询公司开发的三维连续介质拉格朗日元显式有限差分计算软件。岩土力学中常用的数值分析方法有差分方法、有限无法、边界元法等几种,但这几种方法都是以连续介质为出发点,且基于小变形的假设,它们虽然也可以用来解决由几种介质所组成的非均质的问题,同时,

对于介质中的断层和软弱面,也可以用设置节理单元的办法来解决。但在解决富含节理和大变形的岩土力学问题时,所得的结果往往与实际情况相差较远。拉格朗日元显式有限差分计算是一种分析非线性大变形的数值方法,这种方法遵循连续介质的假设,利用差分格式,按时步积分求解,随着构型的变化不断更新坐标,允许介质有大的变形,能够准确地对屈服极限到塑性流动的行为进行描述。

3.2 物理模型

根据大桥中轴线工程地质纵断面图,按照桥址出露地层的岩性及其风化程度,把地质单元分为强风化泥质白云岩(三叠系中统杨柳井组第二段 T_2y^2 和第四段 T_2y^4)、弱风化泥质白云岩、微风化泥质白云岩、强风化白云岩(三叠系中统杨柳井组第一段 T_2y^1 和第三段 T_2y^3)、弱风化白云岩、微风化白云岩、卸荷强风化泥质白云岩、卸荷弱风化泥质白云岩、卸荷强风化白云岩、卸荷弱风化白云岩共 10 种不同的岩体材料(图 1)。

3.3 计算参数

为了确定桥址岩体的物理力学参数,用两种岩体质量评价方法《工程岩体质量分级标准》(GB 50218—94)和《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50287—99)对边坡岩体进行了质量分级评价,分别得到岩体基本质量指标(BQ)和总评分(T)(表 3)。表 3 显示,两种方法结果相差不大,说明评价方法的选取是合理的。然后根据《工程岩体质量分

级标准》推荐的各级岩体物理力学参数得到桥址边坡岩体的物理力学参数(表 4)。

表 3 桥址岩体质量评价

岩性	风化程度	岩体基本质量指标	岩体分级	总评分 T	类别
泥质白云岩	强风化	165.3	V	22	V
	弱风化	247.8	V ⁺		
		277.8(最低值)	IV ⁻	33	IV
	微风化	316.8(平均值)	IV		
白云岩		346.8(最高值)	IV ⁺	30.5	IV ⁻
	强风化	178.2	V		
	弱风化	250.7	IV ⁻ - V ⁺	52	III ⁻
		293.2(最低值)	IV		
	微风化	349.4(平均值)	IV ⁺		
		396.1(最高值)	III		

表 4 桥址边坡岩体物理力学参数

岩 性	风化程度	容重 / (kN/m ³)	内摩擦角/(°)	粘聚力/MPa	变形模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
泥质白云岩	强	23.0	28	0.3	2.9	0.31	0.60
	弱	23.2	29	0.5	3.6	0.30	0.70
	微	23.4	30	0.7	4.5	0.29	0.80
白云岩	强	23.6	30	0.5	5.1	0.30	0.70
	弱	23.8	31	0.7	6.4	0.29	0.80
	微	24.0	32	0.9	8.0	0.28	1.00
卸荷带 泥质白云岩	强	22.8	27	0.2	2.8	0.32	0.50
	弱	23.0	28	0.4	3.5	0.31	0.60
白云岩	强	23.4	29	0.4	5.0	0.31	0.65
	弱	23.6	30	0.5	6.3	0.30	0.75

3.4 边界条件

顺桥向取 1 300 m,横桥向取 400 m(两侧各 200 m),对边坡表面进行地形高程数据采样,采样点间距 50 m,共采集高程数据点 234 个。通过 234 个三维高程采样点坐标,建立边坡三维数值计算模型。

边界条件是:① 桥址地震基本烈度为Ⅵ度,地

震最大水平加速度取 0.41 m/s²;② 在顺桥向(x 方向)两侧面上限制顺桥向的水平位移;③ 在横桥向(y 方向)两侧面上限制横桥向的位移;④ 在模型底面上限制铅直(z 方向)位移。

3.5 主塔承台加载

把主塔承台简化为矩形截面梁,竖向力以均布正应力方式加载,(纵向和横向)弯矩以带有梯度的

(拉和压)应力方式加载,(纵向和横向)水平力以最大剪应力方式加载在承台表面上。根据表2的承台反力,计算出主塔承台表面的正应力和剪应力,见表5。

表5 主塔承台表面的应力分布

桥型	桥位	竖向力产生压应力/MPa	水平力产生剪应力/MPa		弯矩产生带梯度拉、压应力			
			横向	纵向	横向/MPa	横向梯度/(MPa·m ⁻¹)	纵向/MPa	纵向梯度/(MPa·m ⁻¹)
斜拉桥	镇宁岸	1.629	0.024 9	0.0352	-0.734	0.048 9	-0.453	0.043 2
悬索桥	主塔	1.929	0.058 5	0.023 8	-0.592	0.094 8	-0.565	0.090 4
斜拉桥	胜境关	1.314	0.022 8	0.023 6	-0.418	0.027 9	-0.436	0.041 5
悬索桥	主塔	1.753	0.053 2	0.021 6	-0.539	0.086 2	-0.514	0.082 2

3.6 数值模拟结果

数值模拟结果表明(表6):① 两岸自然边坡整体稳定;② 在边坡自重、大桥荷载和地震作用下,边坡屈服区不明显,拉应力较小,位移不大,边坡整体稳定;③ 斜拉桥和悬索桥造成岩体的应力和变形接近,无明显差别。

表6 边坡稳定性 FLAC3D 模拟结果

桥型	桥位	工况	变形	位移/cm		最大应力/MPa			边坡稳定性评价
				水平	铅直	压应力	拉应力	剪应力	
斜拉桥	镇宁岸	自重	弱风化带中泥质白云岩与白云岩交界处出现屈服区	0.37 河谷陡坡段朝河谷临空向	0.30 河床底部	4 河床	0.41 缓坡坡脚与泥质白云岩与白云岩交界处	1.4 河谷下部	稳定
	胜境关岸		不明显	0.43 小山头下较陡部位	0.30 河床底部	4 河床	0.16 小山头处	1.2 河谷下部	
	镇宁岸	自重 + 荷载 + 地震	弱风化带中泥质白云岩与白云岩交界处出现屈服区	0.23 承台开挖处岩体表部	0.84 主塔下	2 承台顶面	0.50 泥质白云岩与白云岩交界处、缓坡坡脚局部	1.4 河谷下部	稳定
	胜境关岸		不明显	0.18 承台开挖处岩体表部	0.65 主塔下	2 承台顶面	0.12 桩尖	1.2 河谷下部	
	镇宁岸		不明显	0.21 承台上方局部岩体	1.30 承台顶面	6 桩体	0.42 泥质白云岩与白云岩交界处	1.6 河谷下部	
	胜境关岸		不明显	0.20 承台开挖局部岩体	1.00 承台顶面	3 承台顶面	0.41 缓坡坡脚、泥质白云岩与白云岩交界处	1.3 河谷下部	稳定

4 结 语

① 北盘江大桥选址区自然边坡是稳定的,也不存在危及桥基安全的危岩体,桥位合适,具备建桥条件,但该处岩溶较发育,对桥基岩体强度有一定影响,应采用钻探和物探手段对深部岩溶发育情况作进一步调查。

② 用 FLAC3D 软件对边坡在荷载作用下的稳定性进行了数值模拟,结果表明:屈服区不明显,拉应力较小,位移不大,边坡整体稳定,桥位合适;斜拉桥和悬索桥造成岩体的应力和变形相接近,无明显差别。

③ FLAC3D 软件可以顺利地建立复杂地形的三维模型,从而对边坡在自重、荷载、地震等多种荷载作用下的稳定性进行计算,是一种先进的岩土计算软件。

参考文献:

[1] 国家电力公司贵阳勘测设计研究院. 镇宁至胜境关公

路北盘江特大桥两阶段(补充)初步设计工程地质勘察报告[R]. 2004.

[2] 樊敬亮. 高山峡谷地区大跨度桥梁岸坡稳定性分析、趋势预测及应用研究[D]. 北京:中国科学院地质与地球物理研究所,2005.

[3] 吕悦军. 贵州镇宁至胜境关公路重点工程场地地震安全性评价及工程场区地震动区划报告初稿[R]. 北京:中国地震局地壳应力研究所,2004.

[4] 张咸恭,王思敬,张倬元,等. 中国工程地质学[M]. 北京:科学出版社,2000.

[5] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC [M]. V. 4.0 USA:Minneapolis Minnesota, 2000.

[6] 祁生文,伍法权,兰恒星. 盘石头水库泄洪洞、导流洞进出口边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002,21(3):353-359.

[7] 刘鸿文. 材料力学:上册[M]. 北京:高等教育出版社,1995.

Studies on high slope characteristics and engineering effect of Beipanjiang Bridge in Guizhou

ZHAO Chao, FAN Jing-liang, MENG Juan

(East China Geological Exploration Bureau of Nonferrous Metals, Jiangsu Province, Nanjing 210007, China)

Abstract: The high slopes along the two banks of Beipanjiang Bridge in mountainous canyon were severely weathered, so it was rather important to evaluate the characteristics of stability and hazard degree accurately. Firstly, the authors studied the characteristics of the high slope on both banks, such as structure type, combination between structure plane and slope surface, rock mass weathering and the physical and mechanical properties. Then, the classification was given to rock mass, and based on rock mass quality classification, stability and potential engineering effect from gravity, bridge load and earthquake were synthetically evaluated by way of FLAC3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) numerical simulation software. Finally, it is concluded that the site was adapted to building bridge.

Keywords: Beipanjiang Bridge; High slope; Rock mass quality; FLAC3D; Engineering effect; Beipanjiang, Guizhou