

文章编号: 1006-6616 (2010) 01-0108-07

大瑞铁路澜沧江大桥工程边坡稳定性 三维数值模拟分析

杜宇本¹, 郑光², 蒋良文¹, 许强²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031;

2. 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, 四川 成都 610059)

摘要: 采用现场调查、工程地质分析和三维数值模拟方法, 对在建大瑞铁路工程澜沧江大桥边坡稳定性进行了综合分析研究。澜沧江大桥是在建大瑞铁路的控制性工程之一, 由于多种因素的综合作用, 桥址岸坡发育延伸较长的顺坡向节理和近垂直的陡倾节理。右岸桥位工程开挖区位于一组较大型顺坡结构面的下方, 岸坡稳定性直接关系到桥位的适宜性。综合研究表明, 工程开挖后, 右岸桥位上部岩体极易在顺坡向结构面的控制下发生滑移-拉裂式破坏, 沿外倾结构面产生较大的位移, 甚至可能失稳, 需要进行专门的工程治理。左岸边坡岩体结构相对稳定, 工程开挖后, 位移将主要集中在开挖面附近的浅表层部位, 不仅变形较小, 影响范围也相对较小。

关键词: 大瑞铁路; 澜沧江大桥; 工程边坡; 变形机制; 稳定性分析

中图分类号: P642

文献标识码: A

0 引言

大理至瑞丽铁路位于云南省西部, 是规划建设的泛亚铁路西线的重要组成部分, 是中国第一条穿越横断山脉、地形地质条件极为复杂的国家 I 级干线铁路。工程地质条件具“三高”(高地热、高地应力、高地震烈度)、“四活跃”(活跃的新构造运动、活跃的地热水环境、活跃的外动力地质条件和活跃的岸坡浅表改造过程)的特征^[1]。经多方案综合比选, 初步选定地质条件相对较好的霁虹桥桥位方案, 该方案桥长 426 m, 桥高 238 m, 为单跨钢管混凝土拱桥^[2], 是大瑞铁路的重点控制性工程。由于桥渡区位于澜沧江断裂带, 岩体破碎, 地质条件极为复杂, 工程边坡稳定性直接控制了线路方案和工程设置。本文试图通过现场调查和三维数值模拟方法, 对大桥工程边坡稳定性进行综合分析研究, 为大桥方案确定和工程设计提供依据。

收稿日期: 2009-12-19

基金项目: 铁道部科技计划项目 (编号: 2008G027-E) 资助。

作者简介: 杜宇本 (1972-), 男, 高级工程师, 主要从事铁路工程地质勘察和设计工作, E-mail: 200751947@qq.com。

1 工程地质概况

桥渡区位于大理与保山分界处澜沧江峡谷内 (见图 1、图 2)，江面宽 40 ~ 50 m，沿河两岸山势陡峻，呈典型高山峡谷地貌景观。澜沧江在该区基本沿构造线展布，由北西流向南东，仅霁虹桥附近呈“Z”字形拐为近东西向，河床狭窄，两岸峡谷高陡呈“V”字形，地面高程 1 170 ~ 2 400 m，相对高差约 1 300 m。自然横坡 10° ~ 50°，左岸在 1 450 m 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。

桥址区缓坡地段零星覆盖第四系松散土层，出露三叠系上统 (T_3d^2) 中厚层状灰岩、白云岩，岩质坚硬，岩溶弱发育。桥渡区发育澜沧江活动断裂带，断裂带大致沿澜沧江展布，由一系列近南北向的断裂组成，总体走向北北西，断面主要倾向南西，倾角 70° ~ 80°，是一条超岩石圈深断裂带。澜沧江断裂带在研究区内由东向西包括倒流河断层、平坡断层、五里哨断层和水寨断层，均为第四纪活动断层。澜沧江大桥即位于平坡断层、五里哨断层所夹持的地块上。



图 1 桥址区工程地质图
Fig. 1 A map showing the engineering geology of the bridge-site area

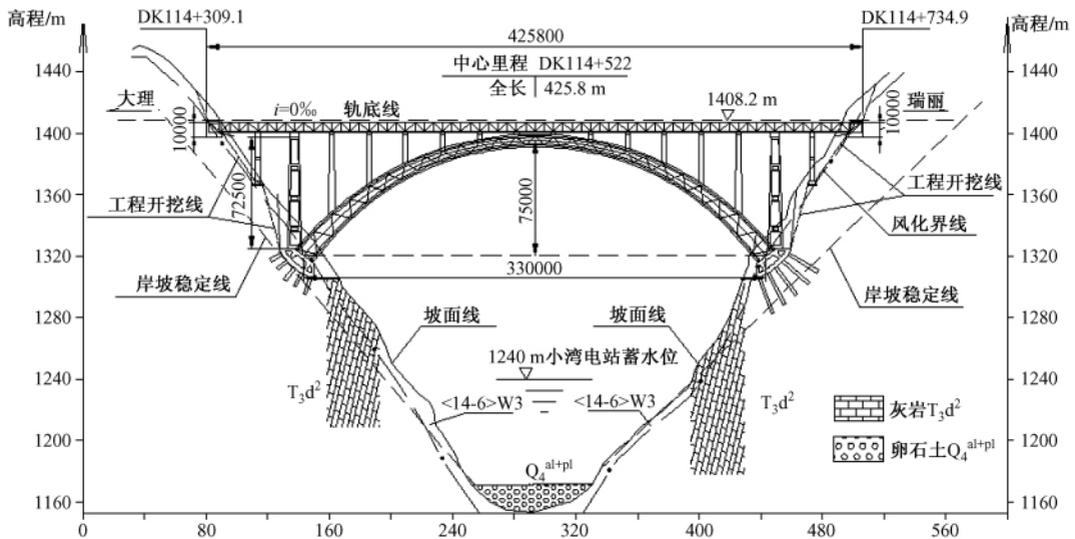


图 2 澜沧江大桥设计纵断面示意图
Fig. 2 Sketch map showing the vertical section of Lancangjiang Bridge

2 澜沧江大桥工程边坡岩体结构特征

澜沧江桥渡区特殊的地形地质条件,导致斜坡体可能的变形破坏形式比较复杂^[3]。两岸工程开挖区设计高程在 1 300 ~ 1 500 m 之间,位于两岸坡比由缓变陡的转折部。由于多种因素的综合作用,桥址岸坡发育延伸较长的顺坡向节理和近垂直的陡倾节理。顺坡向节理倾角 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$,节理间距平均 1.5 ~ 2.0 m;陡倾节理走向近东西,在两组节理的共同作用下,岩体内形成一组顺坡向的阶梯状滑面。

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^[4-6],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^[7]。由结构面极点密度图(见图 3)可以看出,右岸主要发育 3 组结构面:第 1 组走向近东西,倾角中等,为顺坡向结构面;第 2 组走向北东东,倾角近直立;第 3 组为倾坡内结构面,走向北东—北东东,倾角较大。特别是右岸桥位工程开挖区位于一组较大型顺坡结构面的下方,结构面产状 $NW 50 \sim 70^{\circ} \angle 46 \sim 54^{\circ}$,上部岩体陡直,形成陡崖(见图 4)。结构面夹层中夹有钙质胶结的角砾,其下盘面的钙质薄膜上有擦痕。在未来开挖过程中,上部岩体极易在顺坡结构面的控制下失稳发生滑移—拉裂破坏。

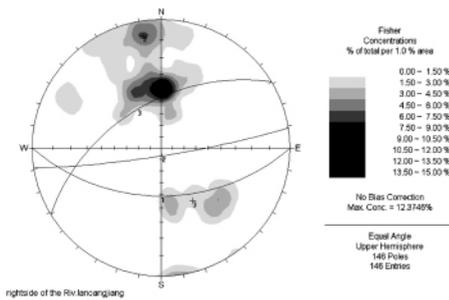


图 3 右岸结构面极点密度等值线

Fig. 3 Contours of summit density of structural plane on right bank

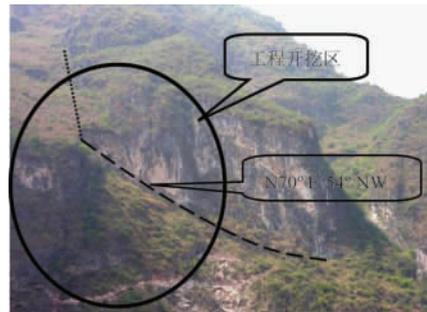


图 4 澜沧江右岸工程边坡特征

Fig. 4 Characteristics of engineering slope on the right bank of the Lancang River

左岸边坡整体性较右岸边坡好,节理面的发育程度远不及右岸,目前左岸坡体除正常卸荷变形外,无整体变形迹象。在未来开挖过程中,仅可能出现局部块体滑移脱落。

3 边坡变形失稳模式的数值模拟

3.1 计算模型

边坡稳定性数值模拟在实践中有着广泛的应用^[8-10]。考虑到计算范围的相对独立性,取模型范围为:自高程 1 070 m 以上,南北长 950 m,东西宽 650 m,覆盖整个工作区。设 X 轴沿坡面走向(东西方向), Y 轴垂直坡面走向(南北方向,取南为正方向), Z 轴垂直向上。左右两岸工程边坡建立数值计算模型,共划分了 37 450 个节点,184 361 个单元(见图 5)。

根据实际地质条件,将模型分为以下几个主要地质带:平坡断层、五里哨断层、 T_3d^2

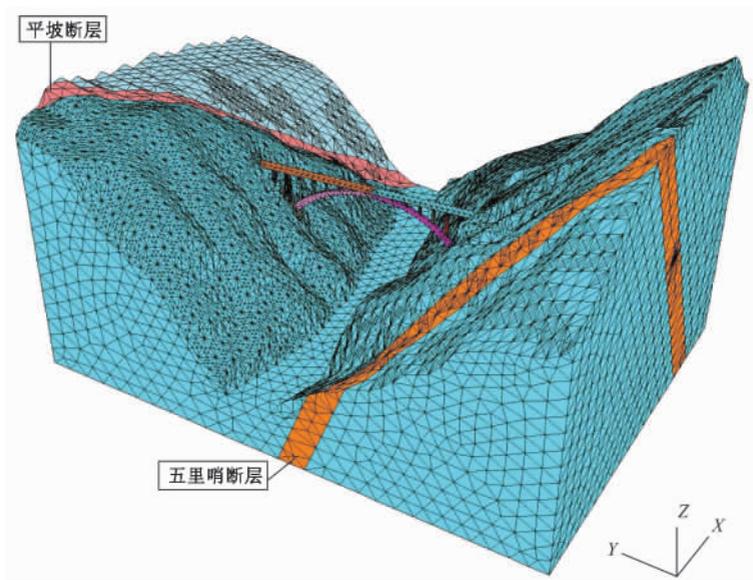


图 5 两岸工程边坡及桥体结构 FLAC3D 数值计算模型

Fig. 5 FLAC 3D digital model for engineering slopes on both banks of the Lancang River and bridge body structure

块状灰岩及位于断层外侧砂岩，并按照实际情况设置开挖体。岩体根据实际情况分为风化岩体和新鲜岩体。根据室内力学试验，并结合前期勘查资料综合确定了两岸坡体各岩性的物理力学参数（见表 1）。

表 1 工程边坡 FLAC3D 模型的计算参数

Table 1 Calculation parameters of FLAC 3D model for the engineering slopes

工程部位	岩土体名称	材料模型	弹性模量 / GPa	容重 / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	内聚力 / MPa	摩擦角 / ($^{\circ}$)
右岸	灰岩风化	弹塑性	16.2	26.81	0.40	45
	灰岩新鲜	弹塑性	17.0	28.00	1.50	55
	五里哨断层	弹塑性	15.8	26.30	0.50	37
左岸	灰岩风化	弹塑性	16.2	26.81	0.40	45
	灰岩新鲜	弹塑性	17.0	28.00	1.50	55
	深层结构面	弹塑性	16.4	26.50	0.14	34
	平坡断层	弹塑性	15.8	26.30	0.50	37
桥	桥体	弹性	30.0	20.00		

模型边界条件采用前后（ X 方向）、两侧（ Y 方向）和底面（ Z 方向）约束。采用莫尔—库仑（Mohr-Coulomb）屈服条件的弹塑性模型，分别对边坡进行天然、开挖条件下的模拟计算。

3.2 计算结果分析

开挖前的自重应力场模拟计算结果表明，该模型应力场符合一般边坡应力场的分布规律。

当开挖体位于两岸隧道进出口及其正下方时（见图 2），边坡开挖改变了岩体的原始应力状态，并产生局部应力集中。如图 6 和图 7 所示，最大主应力方向向外偏转，与开挖面近

于平行，量值为 $-3.0 \sim -3.3$ MPa，较开挖前稍有减小，在开挖边坡的表面，局部出现应力集中现象，但没有出现拉应力；最小主应力方向转为与开挖面近于垂直，量值较开挖前也有所降低，并且在开挖边坡的顶部出现拉应力集中区，拉应力值为 $0.5 \sim 2.0$ MPa，在边坡开挖面的某些部位特别是在右岸外倾结构面出露部位，应力条件发生了明显的恶化，这主要是由于开挖扰动及结构面上部岩体失去坡脚的支挡，而使稳定性降低。

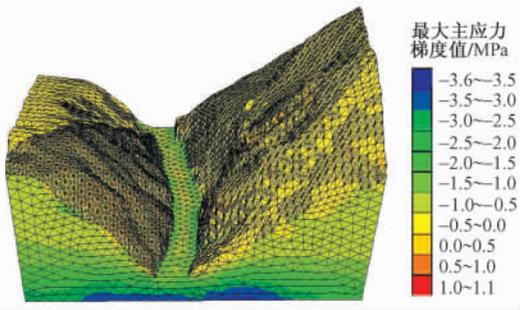


图 6 隧洞口边坡开挖最大主应力特征
Fig. 6 Characteristics of maximum excavation principal stress of side slopes in tunnel exit

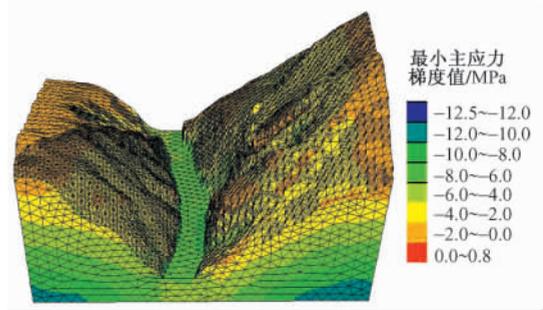


图 7 隧洞口边坡开挖最小主应力特征
Fig. 7 Characteristics of minimum excavation principal stress of side slopes in tunnel exit

图 8 和图 9 分别显示了工程开挖后两岸沿铁路线剖面的塑性区分布和位移矢量情况。边坡开挖后，右岸边坡位移量较左岸边坡大，且主要集中在桥隧衔接处的上部，这主要受顺坡向大型结构面控制。图 8 显示出右岸塑性区主要沿该组顺坡向结构面展布；左岸由于整体性较好，且没有大型结构面发育，塑性区主要集中在坡表浅层部位，且多位于河谷冲蚀处，对工程影响较小。

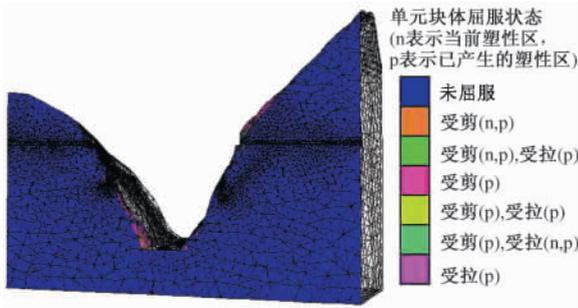


图 8 两岸工程区开挖后的塑性区分布图
Fig. 8 Distribution of ductility area after engineering excavation on both banks of the Lancang River

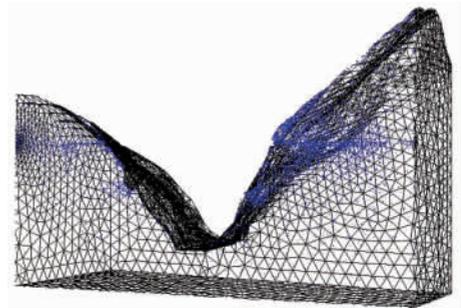


图 9 开挖边坡沿线路剖面位移矢量图
Fig. 9 Displacement vectogram along profiles on excavation slopes

右岸桥头和桥墩台处坡体对开挖的响应有所不同。由图 10 可以看出，由于应力集中主要出现在桥头隧道进口附近的陡崖，可能会使该区发生大量塑性破坏，外倾结构面上部岩体发生了较大位移，其最大位移量达到 10 mm 以上，使岩体稳定性降低；而下部桥墩台处岩体由于上部岩体应力的释放而不再承受巨大的荷载，位移量在 1 mm 以下。

工程区左岸边坡的整体性较好，斜坡坡面起伏较小、较舒缓，开挖后位移幅值较小（见图 11），仅为 1.4 mm 左右，塑性区仅存在于开挖面附近。平坡断层、五里哨断层距工程区较远，对工程影响较小。

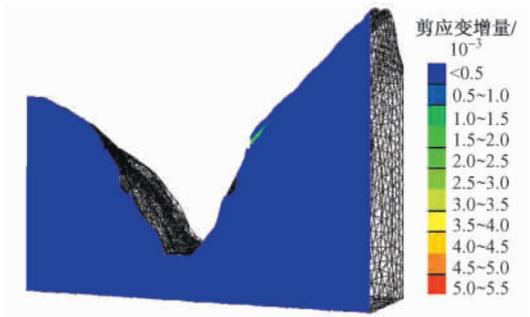


图 10 开挖边坡沿线路剖面剪应变增量

Fig. 10 Shear strain increment along excavation slopes

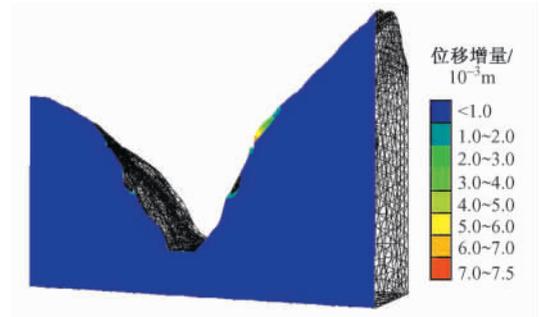


图 11 开挖边坡沿线路剖面位移幅值

Fig. 11 Displacement amplitude along excavation slopes

4 结论

(1) 工程开挖后变形主要集中在开挖体附近的浅表层部位。

(2) 右岸开挖区上部陡崖在坡脚开挖后可能沿外倾结构面产生较大的位移，甚至有整体滑移的可能。

(3) 左岸边坡岩体结构相对稳定且坡面较为舒缓，工程开挖后的位移将主要集中在开挖面附近的浅表层部位，不仅变形较小，影响范围也相对较小。

(4) 鉴于澜沧江大桥右岸边坡在未来开挖条件下可能出现显著变形破坏，建议进行专门的工程治理。

参 考 文 献

- [1] 张永双, 张加桂, 雷伟志, 等. 中国西南泛亚大通道环境工程地质问题概论 [J]. 地学前缘, 2007, 14 (6): 24 ~ 30.
ZHANG Yong-shuang, ZHANG Jia-gui, LEI Wei-zhi, et al. Discussion on the environmental geological problems in the adjacent area from southwest China to southeast Asia [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (6): 24 ~ 30.
- [2] 唐伟华, 陈明浩. 大瑞铁路澜沧江大桥桥址工程地质比选研究 [J]. 铁道工程学报, 2008, (4): 8 ~ 11.
TANG Wei-hua, CHEN Ming-hao. Comparative study on engineering geology for site selection of Lancang River Bridge on Dali-Ruili railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008, (4): 8 ~ 11.
- [3] 黄润秋. 中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化 [J]. 地球科学进展, 2005, 20 (3): 292 ~ 297.
HUANG Run-qiu. Main characteristics of high rock slopes in southwestern China and their dynamic evolution [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20 (3): 292 ~ 297.
- [4] 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 Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lan-sheng. Analytical principle of engineering geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [5] 郑光, 许强. JRC-JCS 模型在某边坡抗剪强度取值中的应用 [J]. 山西建筑, 2008, 34 (6): 15 ~ 17.
ZHENG Guang, XU Qiang. The application of JRC-JCS model in the value of one slope shearing strength [J]. Shanxi Architecture, 2008, 34 (6): 15 ~ 17.
- [6] 王来贵, 黄润秋, 张倬元, 等. 岩石力学系统运动稳定性问题及其研究现状 [J]. 地球科学进展, 1997, 12 (3): 236 ~ 241.
WANG Lai-gui, HUANG Run-qiu, ZHANG Zhuo-yuan, et al. The stability problem of rock mechanics system and its study

of present situation [J]. *Advence in Earth Sciences*, 1997, 12 (3): 236 ~ 241.

- [7] 郭长宝, 雷伟志, 张永双, 等. 滇藏铁路滇西北段主要地质灾害类型及发育规律的探讨 [J]. *地质力学学报*, 2006, 12 (2): 228 ~ 235.
GUO Chang-bao, LEI Wei-zhi, ZHANG Yong-shuang, et al. Main geohazard types and their occurrence characteristics along the YunNan-Tibet railway in NE YunNan [J]. *Journal of Geomechanics*, 2006, 12 (2): 228 ~ 235.
- [8] 张永双, 王红才. 砂黄土高边坡稳定性的数值模拟研究 [J]. *地质力学学报*, 2004, 10 (4): 357 ~ 365.
ZHANG Yong-shuang, WANG Hong-cai. Numerical simulation of the stability of high sand loess slopes [J]. *Journal of Geomechanics*, 2004, 10 (4): 357 ~ 365.
- [9] 张思峰, 周健, 宋修广, 等. 预应力锚索锚固效应的三维数值模拟及其工程应用研究 [J]. *地质力学学报*, 2006, 12 (2): 166 ~ 173.
ZHANG Si-feng, ZHOU Jian, SONG Xiu-guang, et al. 3D Numerical simulation of the anchor effect of prestressed cables and its engineering application [J]. *Journal of Geomechanics*, 2006, 12 (2): 166 ~ 173.
- [10] 卢书强. 澜沧江糯扎渡水电站开挖边坡稳定性工程地质系统研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
LU Shu-qiang. Systematical Study on Engineering Geology of the Excavation Slopes Stability of Nuozadu Hydro-power Station in Lancang River [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.

3D NUMERICAL SIMULATION OF SLOPE STABILITY OF LANCANGJIANG BRIDGE ON DALI-RUILI RAILWAY

DU Yu-ben¹, ZHENG Guang², JIANG Liang-wen¹, XU Qiang²

(1. *China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China*; 2. *State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China*)

Abstract: The Lancangjiang Bridge is one of the controlled engineerings on the under-construction Dali-Ruilu Railway. Along the bank slopes at which the bridge site is located there are greatly developed long-extending dip-slope joints and nearly vertical joints, The excavation area of the bridge site on right bank is below a group of large dip-slope structural planes, so the slope stability is directly related to the suitability of bridge site. Comprehensive studies show that excavation on right bank will be like to induce slip and tension crack failure affected by the dip-slope structural planes and to cause great displacement along extraversion structural planes, and even instability on whole slope, with which the specialized engineering management should be taken to deal. On the contrary, rock masses on left bank are of a relatively stable structure, and the displacement induced by engineering will mainly take place on shallow surface of excavation site, with slight deformation and limited influence area.

Key words: Dali-Ruilu Railway; Lancangjiang Bridge; engineering slope; deformation mechanism; stability analysis