

虎跳峡龙蟠右岸斜坡变形的地质力学机制探讨

谭儒蛟¹, 胡瑞林¹, 徐文杰¹, 曾如意², 刘衡秋¹

(1. 中国科学院 工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 国家电力公司 中南勘察设计研究院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 龙蟠为拟建虎跳峡水电站的比选坝址之一, 其右岸斜坡发育大规模的松动变形岩体。结合最新钻孔、平硐等工程地质勘察和 CSAMT 法物探资料, 在分析区域地质环境效应和剖析斜坡岩体变形特征的基础上, 否定了该斜坡为“古滑坡”的定论, 并基于其特殊的斜坡地质结构和特殊的地质孕育环境提出了斜坡岩体变形的地质力学机制: 断裂活动的构造挤压作用造成了近岸岩体的深层破碎; 区域构造应力场的转化使岩体呈先压后拉的受力效应, 地壳抬升、河流下切使深部岩体卸荷 - 拉裂和斜坡后部反倾的软硬相间地层发生了弯曲 - 蠕变和局部倾倒变形; 以坡脚深厚覆盖层压缩和塑性变形为主因, 斜坡后期主要表现为岩体的局部错滑、扩容等自适应性结构调整和追踪顺坡向结构面的累进性破坏变形, 但尚未形成贯通性剪切变形带。龙蟠斜坡的地质结构和变形模式在虎跳峡工程区具有代表性, 因此, 该结论不仅为虎跳峡电站龙蟠坝址抉择提供了理论依据, 也为分析库区斜坡成因演化和评价其稳定性奠定了基础。

关键词: 地质力学; 虎跳峡; 龙蟠斜坡; 可控源大地声频电磁法; 变形机制

中图分类号: P 64

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5674 - 06

DISCUSSION ON GEOMECHANICAL PATTERNS FOR RIGHT BANK OF LONGPAN SLOPE DEFORMATION OF TIGER LEAPING GORGE HYDROPOWER STATION

TAN Ru-jiao¹, HU Rui-lin¹, XU Wen-jie¹, ZENG Ru-yi², LIU Heng-qiu¹

(1. *Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*

2. *Central-South Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute of State Power Corporation of China, Changsha 410083, China*)

Abstract: Tiger Leaping Gorge hydropower station is a large project to be build on Jinsha River in southwest China. Longpan is one of the comparative dam addresses, but large-scale deviant rock mass was discovered on the right bank slope, where an old landslide once happened, so that Longpan dam was given up. In the latest studies, based on systematic field survey, especially through CSAMT exploration and comprehensive analyses of deformation characters of the rocks, it was proven not to be an old landslide but a deforming slope. The geologic structure of Longpan slope is very specific, and the dip direction of the stratum is opposite to slope. The sandstone stratum and slate stratum intercross alternately, and deep-seated stratum is dominated by sandstone rock which are thick and hard, with large inclination angle. But the top of the slope stratum is with thin and small inclination, and the hard and soft rock-formations intercross mutually. Lake sediments at the foot of the slope account for the particular geologic structures. The results show the geomechanical deformation patterns are as follows: (1) the activities of the fractures induce deeply fragmentized phenomenon; (2) lithosphere raising, valley cutting downwards and transforming of the regional tectonic stress-field cause unloading rebound and cracking of

收稿日期: 2005 - 06 - 28; **修回日期:** 2005 - 08 - 25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412702); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3 - SW - 134)

作者简介: 谭儒蛟(1979 -), 男, 2002 年毕业于中南大学地质工程专业, 现为硕博连读研究生, 主要从事岩质斜坡变形机理与失稳预测方面的研究工作。E-mail: tanrujiao@mail.igcas.ac.cn.

lower rock mass; and (3) the main deformation pattern of top stratum was bend-creeping. By reason of the compressibility and plastic flowing of lake sediment and superficial stratum at the foot of the slope, rock mass is adjusting to the structure by the way of stagger-sliding and lateral expanding locally, but there is no weak zone of penetrating the slope. The mode can be named Longpan-pattern, which is universal in Tiger Leaping Gorge Reach in Jinsha River, and it is significant to choose the dam address and analyze the stability of reservoir banks.

Key words: geomechanics; tiger leaping gorge hydropower station; Longpan slope; CSAMT; deformation mechanisms

1 引言

拟建的虎跳峡水电站位于金沙江干流,设计坝高超过 200 m,正常蓄水位高程为 2 010 m,总库容 $374 \times 10^8 \text{ m}^3$,装机容量 $400 \times 10^4 \text{ kW}$,是金沙江梯级水电开发的龙头水库。拟选龙蟠坝址位于云南省迪庆州中甸县与丽江市交界处,距著名的长江第一湾——石鼓的下游约 26 km 处。在龙蟠右岸发育一大规模松动变形岩体,过去学术界将其成因机制定论为“古滑坡”^[1~4](见图 1),为此导致龙蟠坝址方案搁浅。因其距离下游的上虎跳坝址也仅 18 km,无论作为坝址还是近坝库岸,龙蟠右岸斜坡的稳定性研究对于虎跳峡水利枢纽工程具有极其重要的意义。本文通过最新钻孔平硐以及 CSAMT 勘探资料,在分析区域地质环境效应和剖析斜坡岩体变形特征的基础上,否定了该斜坡为“古滑坡”的定论,并提出了斜坡变形的地质力学机制,为虎跳峡工程规划选址提供了理论依据。



图 1 龙蟠右岸斜坡变形岩体全貌
Fig.1 Picture of the Longpan slope

2 斜坡体的基本地质概况

2.1 地形地貌特征

龙蟠右岸斜坡位于虎跳峡的宽谷河段(如图 2 所示),河流在此处的流向为 $\text{NW}350^\circ$,枯水季节水位高程为 1 807 m,水面宽 164 m,水流平稳,主流

线略偏右岸,两岸均有狭长的 II 级阶地分布,阶面高程为 $1\ 830 \text{ m}^{[5]}$ 。两岸山体拔河高 600~800 m,左岸坡度 $30^\circ \sim 32^\circ$,地形整齐;右岸地形坡度 $28^\circ \sim 30^\circ$,上游有星仁冲沟深切,坡体异常向河谷临空方向宽缘突出,第四系崩坡积覆盖层较厚,地表鲜见基岩裸露。

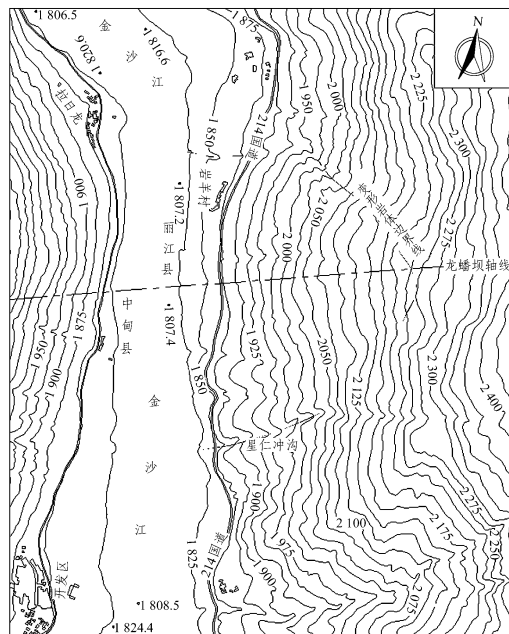
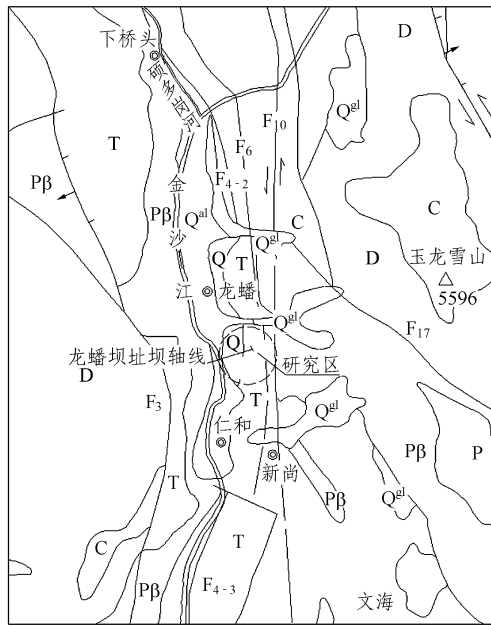


图 2 龙蟠变形岩体平面示意图(单位: m)
Fig.2 Plane map of Longpan slope(unit: m)

2.2 区域地质背景

斜坡所在的虎跳峡地区的大地构造属性是扬子地块西缘的被动大陆边缘性质,区内主要有近 SN 向、NE 向和 NW 向 3 组重要构造带,其中近 SN 向的中甸-龙蟠-乔后断裂带构成了研究区的主构造线(见图 3)。在此宽谷河段地区,WE 向发育有小羊场-五头上断裂(F_3)、冲江河断裂(F_{4-2})、白汉场断裂(F_6)和哈巴雪山-西龙断裂(F_{10})等区域性断裂。区内以断块的垂直差异升降运动为特征的新构造活动强烈,在宽谷段的形成演化过程中,本地区的构造压应力场发生了顺时针的转化^[3],由早更新世的近



F4-2—冲江河断裂；F6—白汉场断裂；F10—哈巴雪山—西龙断裂；F3—小羊场—五头上断裂

图3 区域地质构造纲要图

Fig.3 Map of geological tectonic in Tiger Leaping Gorge area

EW 向，到晚更新世以来的 NNW 向。断裂的活动性和构造应力场的转化对龙蟠变形岩体的形成有着重要影响作用。

2.3 斜坡地质构造特征

由图2区域地质构造纲要图所示，冲江河断裂止于龙蟠北，往南由于第四系深厚覆盖层未追溯到该断层的地质露头，但此断裂却关系到龙蟠坝址的取舍和右岸斜坡的形成演化以及稳定性问题。为查清斜坡的隐伏构造，本次笔者进行了可控源大地声频电磁法(CSAMT法 V6A)勘探工作，本文仅给出沿龙蟠坝轴线方向的 HN20 测线的反演断面，如图4所示，图中颜色由浅到深代表电阻率从小到大的变化。结合地质钻孔 ZK40, ZK4, ZK15 以及平硐

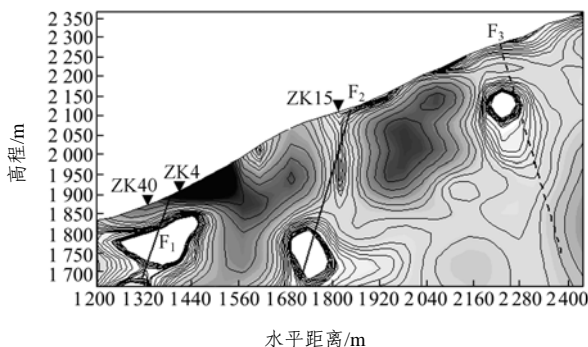


图4 HN20 测线 CSAMT 方法反演断面图

Fig.4 Interpretation profile of CSAMT about measuring line HN20

PD1, PD25 的勘探资料^[4]，确定在坡脚和高程 2 100 m 处发育有 2 条规模较大的顺坡向断层 F₁ 和 F₂，其产状分别为 NNE5°/SW∠70°和 NNW335°/SW∠76°，它们为冲江河断裂或其分支断层。在 2 300 m 位置附近没有钻孔等资料，但根据电性差异推测有较大的反倾向断层 F₃ 存在，处在斜坡变形范围以外。

2.4 地层岩性与岩体结构特征

斜坡近岸岩体主要为三叠系厚层砂岩夹砂质板岩，中上部为薄层千枚状板岩和砂岩，呈反倾叠合韵律交互层状，局部穿插灰绿色辉绿岩侵入岩脉和透镜体状结晶灰岩条带(如图5所示)。岩层走向与坡面近于一致，总体产状为 350°~15°/NE(或 SE)∠30°~75°。经节理裂隙统计分析，岩体主要发育有三组节理，其产状分别为 335°/SW∠75°~80°，350°/NE∠70°~80°和 40°/SE∠20°~25°。地表为第四系崩坡积层，成分为风化粘土夹碎石，厚度 5~40 m 不等。坡体前缘分布古湖相沉积层^[4]，主要为洪积、崩坡积以及静水环境沉积形成的混杂堆积物，厚度 170 m 左右，其上为卵砾石和中、粉细砂构成的现代河流相冲积层。

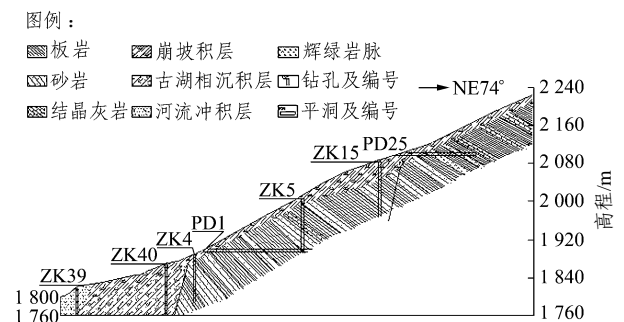


图5 龙蟠右岸斜坡工程地质剖面示意图

Fig.5 Geoengineering section for the right bank of Longpan slope

2.5 水文地质条件

地下水类型为基岩裂隙水和局部裂隙承压水。经钻孔压水试验测得岩体呈强透水性，在 1#平硐支硐入口处和支硐 110 m 位置均可见渗水现象，丰水季节支硐入口处的最大渗水量可达 5 L/s，并沿岩体裂隙流入地下。

3 斜坡岩体的变形特征

从地形上看，斜坡体向河谷方向宽缘突出，形成“鼓肚”地貌，南北两侧有冲沟切割并呈双沟同

源之势，两侧地形坡度与周围岸坡在地貌上极不协调，在高程约 2 100 m 左右的斜坡后缘出现零星台地，从而形成似“古滑坡”地貌^[6, 7]。经勘探表明，坡体近岸和中部岩体破碎松动，且范围极大，从 1[#]平硐看，水平深度约 220 m，从 4[#]、15[#]钻孔看，垂直深度近 200 m。岩体总体保持原有层序，但岩层产状变化较大，倾向为 N12°W~N73°E，倾角由坡体深部至浅部逐渐变缓，深部岩层倾角为 60°~70°，浅部倾角变缓为 10°~40°，在坡体后缘出现平卧岩层。此外，坡体内小断层、层间错动和泥化夹层等十分发育(如图 6 所示)，经 1[#]勘探平硐统计，此类软弱结构面平均间距约为 5 m/条，优势方向倾向坡内，倾角 23°~50°不等。岩体中拉张裂隙发育，图 7 为 1[#]平硐 54 m 硬质砂岩中的拉张裂缝，宽 20~40 cm，深度大于 5 m。此外，第四系崩塌积覆盖层沿着与下覆岩体的接触界面发育有顺坡向滑坡擦痕(如图 8 所示)，但滑移面延展性小，仅为崩塌积物的局部错动滑移。经平硐、钻孔、坑槽探以及 CSAMT 法 V6A 探测，坡体中未见顺坡向贯通性滑移界面或软弱带。



图 6 层间泥化夹层
Fig.6 Weak mud-stratum



图 7 1[#]平硐拉张裂缝
Fig.7 Patulous cracks for the chamber No.1



图 8 坡积层中的局部滑移面
Fig.8 A scrape of local sliding

以下，南北两侧分别以星仁沟和岩羊村北冲沟为界，南北向延伸距离近 1 km。如前文所述，岩体的变形特征在斜坡不同部位具明显分异性，近岸岩体呈 200 余米的深层破碎，以卸荷 - 拉裂变形为主，而后部岩层则表现为弯曲 - 蠕变和局部的倾倒变形。在分析区域地质环境效应和剖析岩体变形特征的基础上，笔者提出如下斜坡变形的地质力学机制(图 9, 10):

(1) 斜坡在处在 NNE 向的中甸 - 龙蟠 - 乔后断裂带，在早更新世时期断裂发生左旋走滑并伴随发生垂直升降活动，形成了龙蟠断陷盆地^[4]。这时期受断裂逆冲构造挤压作用斜坡前部岩体呈深层破碎状态，4[#]和 15[#]钻孔至 200 m 左右岩芯采取率近 10% 左右，多为岩块碎屑。同时强烈的地壳上升活动，导致了强烈侵蚀作用的发生和大量粗碎屑物的快速堆积，形成了斜坡前缘上百米的早更新世河湖相堆积。因近 EW 向压应力场的作用，斜坡岩体产生了走向为 NW 和 NE 的 2 组共轭节理，其中 NW 向节理陡倾，倾角 70°~80°不等，NE 向节理为缓倾节理，倾角 20°~25°左右。

(2) 晚更新世以来，地壳进一步抬升，并伴随着河流下切，河谷大面积卸荷，岩体卸荷回弹，结构松弛变形。晚更新世以来随着区域构造压应力主

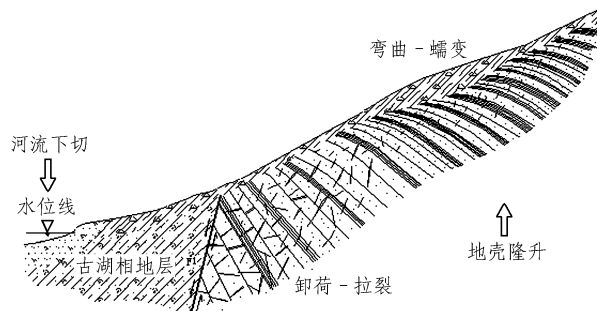


图 9 龙蟠右岸斜坡变形模式示意图
Fig.9 Schematic diagram for the deformation patterns of Longpan slope

4 斜坡变形的地质力学模式分析

龙蟠右岸斜坡变形岩体的范围为高程 2 100 m

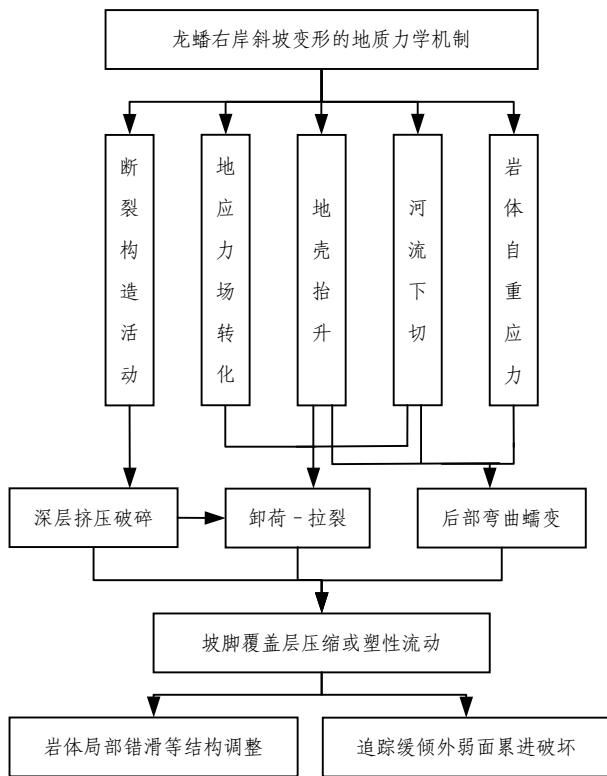


图 10 龙蟠斜坡变形的地质力学模式

Fig.10 Geomechanical patterns of slope deformation

方向转为 NNW 向，在坡体内产生与岩层走向近于垂直的拉张应力，使斜坡前部经构造挤压破碎的岩体进一步松动解体，硬质砂岩中形成了系列陡倾的拉张裂缝。斜坡后部(中上部)互韵律层状反倾地层，岩层走向与斜坡大致平行，岩层倾角 70°左右，层间泥化夹层等软弱结构面十分发育，构成了岩层弯曲变形的岩体结构条件^[8~11]。地壳抬升和金沙江下切的共同作用不仅导致了岩体的应力松弛和张应力的产生，使岩层节理显化，而且为后部岩层的弯曲蠕变提供了变形空间。在重力等荷载作用下，泥化夹层和千枚岩等软弱层受压缩，导致辞层间蠕变错动，进而岩层产生向坡外的弯曲变形，局部浅层硬质砂岩层沿倾向 SW 的节理面折断而倾倒。弯曲-蠕变的表征为斜坡向河谷方向宽缘突出，造成与周边地形不协调的“鼓肚”地貌，坡体内由深部往外，岩层倾角逐渐变缓、裂隙张开和浅部出现平卧岩层。

(3) 斜坡岩体的后期变形主要受坡脚深厚覆盖层以及顺坡向断层 F₁ 的控制。坡脚处由古湖相堆积层和现代金沙江的冲积物组成的深厚覆盖层构成了斜坡天然的柔性挡墙结构，由于斜坡应力场的重分布，使坡脚应力集中程度较高，而深厚覆盖层强度低，易发生压缩和塑性变形，致使坡内岩体发生局

部的错滑、扩容及蠕变变形，从而斜坡在顺坡向断层的控制下，表现为以岩体的自适应性结构调整和追踪顺坡向缓倾弱面结构的累进性破坏，但尚未形成连续贯通性的剪切带，斜坡后缘地表未见拉裂变形迹象。

5 结论与探讨

(1) 斜坡体未发育顺坡向贯通性的软弱结构面或剪切变形带，地表未见拉裂等明显变形迹象，F₂ 断层造成了高程为 2 100 m 零星台地，坡体中上部地层的弯曲变形和局部倾倒使得坡体向临空方向突出而呈现“鼓肚”地貌，第四系崩坡积层沿其与下伏岩体接触面有局部的错滑擦痕。因此，该斜坡并非“古滑坡”，而为“卸荷拉裂+弯曲蠕变+局部错滑”多成因变形体。

(2) 龙蟠右岸斜坡的地质结构条件为近岸岩体为厚层砂岩夹板岩，中后部为薄层千枚状板岩和砂岩构成的软硬相间的地层，岩层为反陡倾，坡角深厚的湖相沉积层与斜坡呈断层接触，构成斜坡的柔性支挡结构。在此独特地质结构基础上，受区域地质环境效应和内外地质营力的作用形成了非单一成因的地质力学变形机制：断裂活动的构造挤压作用造成了岩体的深层破碎；区域地应力场的转化使岩体呈先压后拉的受力效应，地壳抬升、河流下切导致深部岩体的卸荷松动和拉裂变形，同时使岩层节理显化，并提供了临空条件使斜坡后部陡倾的软硬相间的地层发生弯曲-蠕变和局部倾倒变形；后期岩体变形主要表现为受控于坡脚深厚覆盖层和顺坡向断层的局部错滑和扩容等岩体结构的自适应性调整过程和追踪顺坡向缓倾弱面结构的累进性破坏。龙蟠右岸斜坡的地质结构和变形机制在虎跳峡工程区具有代表性，因此本文结论不仅为坝址抉择提供了理论依据，也为分析库区斜坡成因演化和评价其稳定性奠定了基础。

(3) 基于斜坡对坝址抉择或近坝库岸安全的重要性，有必要对其稳定性做全面的分析，并建立起地表和深部变形的长期监测系统，从而达到全面认识斜坡变形机制，为坝址抉择和水库建设提供科学依据。

参考文献(References):

[1] 汪波, 李渝生, 王运生, 等. 金沙江虎跳峡水电站龙蟠坝区坝肩边坡的稳定性研究[J]. 地质力学学报, 2002, 12(4): 376 - 382. (Wang

- Bo, Li Yusheng, Wang Yunsheng, et al. Study on the dam abutments side slope stability of Longpan dam region of tiger leaping gorge hydroelectric station in Jinsha river[J]. Journal of Geomechanics, 2002, 12(4): 376 - 382.(in Chinese))
- [2] 汪波. 金沙江虎跳峡水电站龙蟠坝址区建坝条件的工程适宜性研究[硕士学位论文][D]. 成都: 成都理工大学, 2003.(Wang Bo. The research on engineering flexibility of longpan dam region of Tiger Leaping Gorge hydroelectric station in Jinsha River[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2003.(in Chinese))
- [3] 向宏发. 金沙江虎跳峡水电站工程场地地震安全评价和水库诱发地震评价报告[R]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2004.(Xiang Hongfa. Report of Earthquake Safety about Tiger Leaping Gorge hydropower Station in Jinsha River[R]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2004.(in Chinese))
- [4] 杜伯辉. 金沙江虎跳峡河段规划工程地质勘察报告[R]. 长沙: 国家电力公司中南勘测设计研究院, 1999.(Du Bohui. Engineering geology survey report of Tiger Leaping Gorge reach programming in Jinsha River[R]. Changsha: Central-South Hydroelectric Investigation, State Power Corporation of China, 1999.(in Chinese))
- [5] 国家电力公司中南勘测设计研究院. 金沙江虎跳峡河段梯级开发方式设计报告[R]. 长沙: 国家电力公司中南勘测设计研究院, 1999.(Central-south Hydroelectric Investigation, State Power Corporation of China. Design and research report of the way of stepping exploitation of the Tiger Leaping Gorge on the Jinsha River[R]. Changsha: Central-South Hydroelectric Investigation, State Power Corporation of China, 1999.(in Chinese))
- [6] 张俾元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994. 314 - 363.(Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. The Analysis Theories of Engineering Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. 314 - 363.(in Chinese))
- [7] 胡广韬, 杨文远. 工程地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1984.(Hu Guangtao, Yang Wenyuan. Engineering Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984.(in Chinese))
- [8] 杨学堂, 哈秋龄, 高希章, 等. 厚层软岩与硬岩互层岩体高边坡卸荷变形与支护研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2 681 - 2 686.(Yang Xuetao, Ha Qiuling, Gao Xizhang, et al. Research on unloading deformation and support of high slope of thick soft rock interlaced with hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 681 - 2 686.(in Chinese))
- [9] 王庚荪. 边坡的渐进破坏及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(1): 29 - 33.(Wang Gengsun. The progressive failure of slope and the stability analyses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1): 29 - 33.(in Chinese))
- [10] 谭儒蛟, 胡瑞林, 刘衡秋, 等. 滑坡稳定性评价和监测预报常用方法综述[J]. 工程地质学报, 2004, 12(增1): 463 - 467.(Tan Rujiao, Hu Ruilin, Liu Hengqiu, et al. Summarization of landslide stability evaluation, monitoring and forecast methods[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(Supp.1): 463 - 467.(in Chinese))
- [11] 许强, 王士天, 李渝生, 等. 河谷岸坡变形破坏的一种特殊模式——论尼泊尔迪河桥桥址区岸坡岩体拉裂变形的成因机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 344 - 350.(Xu Qiang, Wang Shitian, Li Yusheng, et al. Special deformation and failure mode of river bank slope—studies on mechanism of deformation and failure of bank rock slope at Seti Bridge site, Nepal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 344 - 350.(in Chinese))