

川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征及稳定性评价

周洪福,冯治国,石胜伟,王保弟,徐如阁,冉 涛

Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan-Tibet Railway

ZHOU Hongfu, FENG Zhiguo, SHI Shengwei, WANG Baodi, XU Ruge, and RAN tao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103076

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

国家天文台500米口径球面射电望远镜台址球冠型边坡稳定性分析

An analysis of the stability of the spherical-cap shaped slope at the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST), China

陈德茂, 沈志平, 姜鹏, 付君宜, 刘慧 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 116-123

从核心期刊评价指标分析如何提升期刊影响力——以《水文地质工程地质》为例

An analysis on the evaluation indexes of core journal and its improving effect on journal influence: a case study of Hydrogeology & Engineering Geology

汪美华, 范宏喜, 张若琳 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 169-169

基于岩体结构特征和未确知测度评价模型的岩质开挖边坡稳定性研究

A study of the stability of rock excavated slope based on rockmass structure and unascertained measure evaluation models 穆成林,裴向军,裴钻,张引,习朝辉 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 150–158

川藏公路102滑坡后缘平台物质特征及其形成机制新思考

New thoughts on the material characteristics and formation mechanism of the platform at the back edge of the 102 Landslide on the Sichuan—Tibet Highway 杨德定 計道码 黄重 陈兴强 水文地质工程地质 2021 48(4): 133-140

杨德宏, 武博强, 黄勇, 陈兴强 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 133-140

滚石冲击下棚洞破坏动力响应分析及改进对策——以川藏公路(安久拉山南麓)门式棚洞为例

Dynamic response analyses and improvement countermeasures of shed-tunnel destruction under rolling stone impact: a case study of the shed-tunnel in the southern foot of the Anjiula Mountain on the Sichuan-Tibet Highway 袁博, 祝介旺 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 57–66

哀傳, 饥疔吐 小又地顶工性地顶. 2019, 40(0): 57-

湘西陈溪峪滑坡变形机理及稳定性评价

A study of deformation mechanism and stability evaluation of the Chenxiyu landslide in western Hunan 刘磊, 徐勇, 李远耀, 连志鹏, 王宁涛, 董仲岳 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 21-21



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202103076

川藏铁路某特大桥成都侧岸坡工程地质特征 及稳定性评价

周洪福^{1,2}, 冯治国³, 石胜伟⁴, 王保弟⁵, 徐如阁¹, 冉 涛¹

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心,四川成都 610081;2. 山东科技大学地球科学与工程学院,山东 青岛 266590;3. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司,湖北 武汉 430055;4. 中国地质科学院 探矿工艺研究所,四川成都 611734;5. 中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘要: 拟建的川藏铁路某特大桥是一座重要的控制性桥梁,其桥址区的地质安全风险评价具有重要的工程意义。该特大桥成都侧岸坡三面临空,海拔高差大,岩性复杂多变,岩体结构和完整性差,风化卸荷强烈,浅表部危岩体发育,调查表明成都岸八曲侧斜坡曾发生较大规模顺层岩质崩滑。采用遥感解译、剖面测量及稳定性计算等技术方法,调查成都侧岸坡地形地貌、地层岩性、结构面发育及变形破坏等特征,分析评价特大桥成都岸八曲侧顺层岩质斜坡稳定性。结果表明:天然和暴雨工况下,斜坡稳定系数大于1.1;强震(PGA>0.3g)工况下,斜坡稳定系数小于1.0,可能出现局部或整体失稳破坏。建议 在清除斜坡表部危岩体的基础上,进一步深入研究八曲侧顺层岩质斜坡未来可能出现的变形破坏范围和程度,提出针对性工程防治措施建议。

关键词:工程地质;川藏铁路;特大桥;变形破坏;边坡稳定性中图分类号: P642.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2021)05-0112-08

Slope engineering geology characteristics and stability evaluation of a grand bridge to Chengdu bank on the Sichuan-Tibet Railway

ZHOU Hongfu^{1,2}, FENG Zhiguo³, SHI Shengwei⁴, WANG Baodi⁵, XU Ruge¹, RAN tao¹
(1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430055, China; 4. Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan 611734, China; 5. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: The planned grand bridge is an important control bridge along the Sichuan-Tibet Railway. A largescale bedding rock collapse occurred on the slope of the Baqu river side of Chengdu bank, with the protruding ridge, high elevation difference, complex and changeable lithology, poor rock mass structure and integrity, highly weathering and unloading and potential unstable rock mass on the surface of the slope. This paper investigates the topography and geomorphology, stratum lithology, discontinuities development and the characteristics of deformation and failure of the bank slope to Chengdu by remote sensing interpretation, profile measurement and stability calculation. The stability of bedding rock slope of the Baqu river side of Chengdu bank under natural and rainstorm conditions are analyzed and evaluated. The results show that the safety factor of slope stability is greater

收稿日期: 2021-03-14; 修订日期: 2021-06-10

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20211379; DD20160272);四川省重点研发项目(2020YFS0296);第二次青藏高原综合科学考 察研究资助(Grant No.2019QZKK0904)

第一作者:周洪福(1980-),男,博士,教高,硕士研究生导师,主要从事工程地质与地质灾害调查研究工作。E-mail:zhf800726@163.com

than 1.1; under the strong earthquake (PGA>0.3 g) conditions, the safety factor of slope stability is less than 1.0, and local or overall instability may occur. Based on removing the dangerous rock mass on the surface of the slope, it is suggested that the possible failure range and degree of the bedding rock slope on the Baqu river side should be further studied and the engineering prevention measures should be put forward.

Keywords: engineering geology; Sichuan-Tibet Railway; grand bridge; deformation and failure; stability of the slope

受印度板块向北俯冲欧亚板块导致青藏高原快 速隆升的影响^[1],青藏高原东缘构造运动强烈、活动 断裂发育^[2],地质灾害高发、频发^[3-5]。

川藏铁路穿行于青藏高原东缘地形急变带,沿线 山高谷深,加之强烈的内外动力作用以及高原特殊的 气候条件,区内高陡边坡岩体风化卸荷深度变化幅度 大^[6-7],大规模开挖的地质力学响应机理复杂^[8]。前人 研究表明,川藏铁路沿线边坡岩体变形失稳模式多 样^[9-10],成灾机理复杂^[11-12],加固和防治难度较大^[13-15]。 在降雨、强震或人类强烈工程活动影响下易发生崩滑 等地质灾害^[16],对川藏铁路的规划建设和建成后的安 全运营带来很大威胁^[17]。

拟建的川藏铁路某特大桥是一座重要的控制性桥梁,桥梁两侧岸坡特征及稳定性分析评价对特大桥桥址的选择、建成后的安全运营,以及桥梁岸坡防灾 减灾具有重要的工程意义和现实意义。特别是成都 侧岸坡岩性为构造混杂岩,岩性复杂多变,结构面发 育,岩体风化卸荷强烈,斜坡浅表部发育多个规模不 等的危岩体。现场调查发现受八曲的切割作用,在岸 坡上游八曲侧形成顺层岩质斜坡,历史上曾发生较大 规模的顺层下滑移动。

前人采用多种技术方法进行过较多的高山峡谷 区高陡斜坡稳定性分析^[18-20],但是对于川藏铁路沿线 特大桥岸坡的调查评价尚不能完全满足工程规划建 设和安全运营的需要,特别是缺少针对特大桥岸坡不 同工况条件下的稳定性评价及具体的工程防治措施 建议,反映了该方面研究的薄弱性与进一步研究的必 要性。为此,本文在调查特大桥两侧岸坡基本特征的 基础上,选择特大桥成都侧岸坡为研究对象,采用现 场调查、遥感解译、剖面测量以及稳定性计算等技术 手段,对成都侧岸坡地形地貌、地层岩性、结构面发 育以及变形破坏等特征进行调查分析,在此基础上初 步分析评价特大桥成都岸八曲侧斜坡不同工况条件 下的稳定性,最后提出工程防治措施建议,为川藏铁 路规划建设以及后期安全运营提供地质依据和技术 支撑。

1 岸坡基本特征

1.1 地形地貌特征

川藏铁路某特大桥位于西藏自治区八宿县境内, 属于高原构造剥蚀高山峡谷地貌,河谷区为典型的 "V"字型河谷(图1),桥面标高3650m,桥位区江水位 高程约3040m,桥面距离江水位高差超过600m。特 大桥两岸斜坡山高坡陡,地形险峻,地形总体呈下陡 上缓趋势,其中斜坡中下部整体地形坡度超过40°,斜 坡浅表部岩体中裂隙发育,岩体完整性遭到破坏,岩 体结构较差,发育多个危岩体。



图 1 某拟建特大桥两岸高陡斜坡地形地貌(镜向 SE130°) Fig. 1 Topography of high and steep slopes on both sides of the grand bridge (photograph direction: SE130°)

特大桥成都侧(左岸)自然斜坡顶部高程 3 824 m, 整个斜坡垂直高差达 780 m。地形总体呈上缓下陡: 在高程 3 560 m 以下,地形坡度平均 54°;高程 3 560~ 3 650 m 之间,除局部地段地形较陡外,整体地形较 缓,平均坡度 15°;高程 3 650 m 以上,地形进一步变 缓,总体坡度小于 10°。

结合现场调查和遥感影像可知,成都侧岸坡受河 流和冲沟的联合切割作用,形成斜坡南侧、西侧均临 空的地形。根据斜坡地形、地质特点以及桥梁布置方 案,可将成都侧岸坡划分为桥位边坡、八曲侧边坡和 桥位东侧边坡(图 2)。

受八曲和主河的联合切割作用,成都侧岸坡呈三

· 114 ·



图 2 成都侧岸坡分区图 Fig. 2 Zoning characteristic of bank slope to Chengdu

面临空的状态。地质调查发现,八曲侧斜坡从主河与 八曲交汇口往八曲上游方向发育3个陡崖和4个缓 坡,分别为一级陡崖、二级陡崖、三级陡崖。陡崖发 育于各级坡面之间,高20~100m,主要沿着陡倾结构 面发育而成。缓坡则分别命名为一级斜坡、二级斜 坡、三级斜坡和四级斜坡。八曲自北向南流,但从第 三级斜坡时开始偏转:第三级斜坡上游,八曲河谷走 向与片理面倾向夹角约75°,大角度相交;第三级斜坡 下游,八曲河谷走向与边坡片理面倾向夹角约25°~ 40°,小角度相交,局部为顺层斜坡(图3)。



图 3 成都侧岸坡特征以及桥梁主墩和隧道口位置 (镜向 NE50°)

Fig. 3 Characteristics of bank slope to Chengdu and location of the main bridge pier and entrance of tunnel (photograph direction: NE50°)

1.2 地层岩性特征

野外地质调查和钻孔、平硐揭露,特大桥成都侧 岸坡岩性较为复杂,地层岩性主要有2类:斜坡上部 为石英片岩、绿片岩等,斜坡下部为二长花岗岩、花 岗闪长岩(图4)。其中斜坡上部石英片岩、绿片岩主 要由三组岩性组成,分别是怒江岩组、惜机卡岩组和 俄学岩组。怒江岩组为一套灰白色绢云石英片岩、云 母片岩、黑云石英片岩等夹变火山岩岩块。惜机卡岩 组主要为一套二云石英片岩,下部夹变流纹岩,上部 夹大理岩岩块。俄学岩组以碳酸盐化超基性岩与惜 机卡岩组断层接触,随后变为强变形泥质板岩及钙质 板岩等。





1.3 结构面发育特征

受区域构造以及斜坡岩体风化卸荷影响,特大桥 成都侧岸坡浅表部岩体破碎,结构面发育。地面调查 以及勘探平硐揭露,位于斜坡浅表部的结构面普遍张 开,张开宽度1~3mm,最大可达3~5cm,充填少量 岩块、岩屑和夹泥。勘探平硐内结构面可见迹长普遍 在30~80cm之间,少量结构面贯穿平硐壁和洞顶。 地质调查结合平硐资料揭示,斜坡岩体中主要发育 5组优势结构面(图5):①285°∠70°,相对桥位边坡陡 倾坡内,相对八曲侧斜坡陡倾坡外;②345°∠40°,相 对桥位边坡和八曲侧斜坡均为中陡倾坡内;③213°∠ 30°,相对桥位边坡中倾坡内,相对八曲侧斜坡陡 倾坡内;⑤156°∠82°,相对桥位边坡和八曲侧斜坡陡 倾坡内;⑤156°∠82°,相对桥位边坡和八曲侧边坡均 为陡倾坡外。

2 岸坡变形破坏特征

从地形地貌来看,特大桥成都侧为山脊陡倾、单 薄斜坡,岸坡中上部为构造混杂岩带。斜坡岩性为二 云石英片岩、绿片岩,局部夹少量黑云片岩和大理岩 等。河流下切导致斜坡岩体向临空面卸荷回弹,外界 风化营力进入斜坡内部,加上强烈的构造活动,导致 斜坡浅表部岩体风化卸荷强烈,岩体完整性和工程特



Fig. 5 Discontinuities dominant orientation of bank slope to Chengdu (upper projection)

性差。野外地质调查发现成都侧岸坡浅表部发育多 处危岩体(图 6),存在崩滑、落石、滚石等威胁桥梁和 桥基工程安全的隐患。另外拟建桥位上游发育八曲 冲沟,其中左岸(靠拟建桥墩一侧)为顺层斜坡,该斜 坡历史上曾发生多次较大规模滑动,目前在斜坡中下 部仍堆积有最大厚度达 60 余米的崩滑堆积体,在斜 坡顶部发育 2 处较大规模潜在危岩体,如图 6(a)所 示。根据设计资料,特大桥成都岸主桥墩距离斜坡顶 部山脊仅 40~50 m,一旦八曲侧斜坡在地震等工况下 再次发生较大规模顺层下滑垮塌,可能直接破坏或摧 毁大桥桥墩,从而影响特大桥以及整个川藏铁路的安 全运营(图 7)。

基于野外地质调查,总结成都侧岸坡岩体变形破 坏模式主要有以下3种:

①顺层滑移破坏,主要发育在八曲侧顺层斜坡。 这类破坏主要受层间弱面影响控制:斜坡岩体顺层间 弱面蠕变变形,当变形达到一定程度后,受降雨、地震 等外界扰动,斜坡岩体突然发生顺层间弱面的下滑破 坏,如图 6(a)所示。

②坠落式破坏,主要发育在桥位边坡,规模一般 小于 10 m³。这类破坏主要受多组结构面切割以及强 烈卸荷拉张裂隙影响控制,如图 6(b)所示。

③倾倒式破坏,在桥位边坡和桥位东侧边坡均有 发育,规模一般从几立方米至上百立方米不等。这类 破坏和岩体结构、坡体结构以及与临空面的组合关系 密切相关,主要是部分层状或似层状岩体在长期的重 力作用下发生向临空面的弯曲变形破坏,如图 6(c)所示。

3 八曲侧岸坡稳定性分析

3.1 稳定性计算

成都岸八曲侧斜坡历史上曾发生过较大规模下 滑垮塌破坏,目前在坡脚仍堆积有厚数十米的崩滑堆 积体,并且八曲侧斜坡局部地段为顺层斜坡。结合现 场调查、经验判断以及工程类比分析,考虑到斜坡岩 体结构、岩性特征以及构造片理面发育特征,未来在 强震或暴雨工况下,八曲侧岸坡的稳定性相对成都岸 其它两侧岸坡稍差。因此在地质调查的基础上,采用 刚体极限平衡法进一步计算八曲侧斜坡不同工况下







的稳定性,为工程治理以及防灾减灾提供地质依据。

斜坡潜在滑动面的确定是斜坡稳定性分析计算 的一个重要前置条件,也是工程防治设计的重要参 考,直接决定着斜坡稳定性分析计算结果的科学性和 合理性。在本次研究工作中,采用数值模型计算八曲 侧斜坡位移和变形趋势,结合现场调查以及钻探和平 硐揭露情况,综合分析确定八曲侧斜坡潜在滑动面位 置,并进行不同工况条件下的稳定性计算。

采用 PHASE 软件进行数值计算,结果表明:强震 工况下八曲侧斜坡中上部强风化岩体出现明显位移 变形趋势,特别是在斜坡顶部的危岩体出现向临空面 和斜坡下方较大的位移量,斜坡岩体存在顺构造片理 面下滑破坏趋势(图 8)。





根据数值分析结果,结合八曲侧斜坡地质结构和 变形破坏模式、边界条件等,建立相应的刚体极限平 衡法计算模型,如图9所示。计算模型中一共设置 2个潜在非圆弧破裂下滑面,分别为滑面1和滑面2: 滑面1对应的下滑体是斜坡顶部潜在危岩体;滑面 2对应的下滑体是强风化、强卸荷带内潜在的顺层滑 动破坏。





稳定性计算采用商用软件 slide, 计算模型中的材 料分别有堆积体、强风化岩体、弱风化岩体、微风化 岩体以及强风化和弱风化岩体中的顺层片理面。计 算参数参考铁路系统专题报告给出的各类材料物理 力学参数, 具体见表 1。计算工况见表 2。

表 1 八曲侧斜坡稳定性计算参数表 Table 1 Calculation parameters of slope stability

名称	$\gamma_{{ m K}^{m/2}}/{(g\cdot cm^{-3})}$	$\gamma_{\odot}/$	c _{天然} / MPa	c _{饱和} / MPa	$arphi_{ ext{ iny field}} / (\circ)$	$arphi_{饱和}/$ (°)
堆积体	2.0	2.20	0.08	0.05	40	36
强风化岩体	2.5	2.55	0.60	0.5	36	34
弱风化岩体	2.6	2.65	1.50	1.40	40	35
微风化岩体	2.6	2.65	2.00	1.90	47	45
强风化岩体中的 顺层片理面	-	-	0.12	0.095	33	26.3
弱风化岩体中的 顺层片理面	-	-	0.30	0.270	35	33.0

注:γ-密度;c-黏聚力;φ-内摩擦角。

为了对比分析不同计算方法得到的稳定性结果, 采用一般条分法、Bishop法、Janbu法、Spencer法和 Morgenstern法等5种方法计算不同工况条件下八曲 侧斜坡的稳定性,结果见表2。从表2可知,对于斜坡 顶部危岩体(滑面1):

①天然和暴雨工况下的稳定系数分别在1.44~1.46 和1.13~1.15之间,处于稳定状态,这与现场调查斜坡 顶部危岩体稳定性现状吻合。

②地震工况计算结果表明, PGA≤0.2g时, 斜坡顶部危岩体稳定系数在1.07~1.28之间, 整体处于稳定状态; 当PGA进一步增大到0.3g时, 计算得到的稳定系数小于1.0, 危岩体可能发生整体的失稳破坏。

③暴雨+地震工况下,当PGA=0.1g时,危岩体整体稳定系数在0.97~1.00之间,基本处于极限平衡状态;当PGA≥0.15g时,危岩体整体稳定系数小于

表 2 八曲侧斜坡稳定系数计算结果

Table 2FOS calculation results of stability of the Baqu slope											
计算方法工况 -	一般条分法		Bishop法		Janbu法		Spencer法		Morgenstern法		
	滑面1	滑面2	滑面1	滑面2	滑面1	滑面2	滑面1	滑面2	滑面1	滑面2	
天然	1.45	1.54	1.46	1.60	1.44	1.57	1.45	1.57	1.45	1.56	
暴雨	1.15	1.25	1.15	1.29	1.13	1.22	1.15	1.28	1.14	1.27	
地震(PGA=0.1g)	1.26	1.31	1.28	1.36	1.24	1.32	1.25	1.33	1.25	1.33	
地震(PGA=0.15g)	1.18	1.21	1.21	1.26	1.15	1.22	-	1.23	1.17	1.23	
地震(PGA=0.2g)	1.11	1.12	1.13	1.17	1.07	1.13	-	1.15	_	1.14	
地震(PGA=0.3g)	0.98	0.97	1.00	1.01	0.93	0.97	-	0.99	_	0.99	
暴雨+地震(PGA=0.1g)	1.00	1.06	1.00	1.09	0.97	1.03	_	1.09	0.99	1.08	
暴雨+地震(PGA=0.15g)	0.94	0.98	0.95	1.01	0.90	0.98	-	1.01	0.93	1.00	
暴雨+地震(PGA=0.2g)	0.88	0.91	0.89	0.94	0.84	0.90	-	0.94	0.87	0.94	
暴雨+地震(PGA=0.3g)	0.78	0.78	0.79	0.81	0.73	0.77	-	0.82	-	0.81	

0.95,可能出现整体的失稳破坏。

对于强风化、强卸荷带内顺层面滑动体(滑面 2): ①天然和暴雨工况,潜在滑动体的整体稳定系数 大于 1.2,处于整体稳定状态。

②地震工况,当 PGA≤0.2g时,潜在滑动体整体 稳定系数在1.1以上,处于整体稳定状态;当 PGA进 一步增大到0.3g时,潜在滑动体的稳定系数在0.97~1.01 之间,基本处于极限平衡状态。

③暴雨+地震工况,当PGA≤0.15g时,潜在滑动体稳定系数在1.0左右,处于整体稳定状态;当PGA≥0.2g时,潜在滑动体稳定系数小于0.94,可能出现下滑失稳破坏。

本文所述的滑面1和滑面2是根据现场调查结合 理论分析确定的,对应的稳定性计算结果与斜坡岩体 中发育的优势结构面方位和连通率密切相关,特别是 第三组优势结构面(213°∠30°),对八曲侧顺层岩质斜 坡稳定性有较大的影响。建议后续进一步加强勘察, 掌握优势结构面三维空间展布特征以及连通率,分析 不同工况条件下,巴曲侧顺层岩质斜坡不同方位、不 同连通率情况下的稳定性。

根据表 2 的计算结果,将 5 种方法计算得到的稳定系数(FOS)的平均值与计算工况置于同一个坐标系中进行分析,如图 10 所示。总体而言,在相同工况条件下,滑面 1 对应的潜在滑坡体比滑面 2 对应的潜在滑坡体稳定系数稍低,意味着相同工况条件下,八曲侧斜坡顶部危岩体稳定性比强风化、强卸荷带内顺层面滑动体稳定性低一些,这与实际调查情况吻合。另外当斜坡遭遇强烈地震时(PGA≥0.3 g),八曲侧顺层岩质斜坡,特别是斜坡顶部潜在危岩体可能出现较大规模失稳破坏,威胁特大桥塔墩以及火车的安全运行。



图 10 滑面 1 和滑面 2 不同工况稳定性计算结果对比分析 Fig. 10 Stability calculation results of sliding surface 1 and sliding surface 2 under different conditions

3.2 八曲侧岸坡稳定性综合分析

从前面的分析结果可知, 川藏铁路某特大桥成都 岸八曲侧斜坡强震工况以及暴雨+地震工况的稳定性 较差, 可能出现局部(斜坡顶部潜在危岩体)及强风 化、强卸荷带内的顺层滑动破坏。一旦八曲侧斜坡中 上部出现较大规模顺层下滑破坏, 可能直接导致上游 侧特大桥主塔墩出现变形拉裂, 甚至断裂垮塌, 影响 甚至中断川藏铁路的正常通行。另外, 成都岸斜坡中 上部主桥墩和隧道锚位置岩性为二云石英片岩、绢云 石英片岩、石英岩、绿泥钠长片岩等, 岩体中结构面 发育, 岩体结构和完整性差, 导致其工程力学特性较 差, 在斜坡岩体自重以及铁路建成后火车运行形成的 交变荷载长期作用下, 斜坡岩体深层蠕滑变形问题也 不容忽视。

4 结论

(1)川藏铁路某特大桥河谷为典型的"V"字型河

(2)川藏铁路某特大桥成都侧岸坡主要发育顺层 滑移破坏、坠落式破坏和倾倒式破坏等3种变形破坏 模式,其中对桥基稳定性影响最大的是八曲侧顺层岩 质斜坡。历史上该斜坡曾发生大规模顺层崩滑灾害, 拟建的主塔墩距八曲侧斜坡顶部山脊线直线距离最 近处仅40~50m。一旦八曲侧斜坡再次发生较大规 模崩滑,或持续发生多次较小规模崩滑(类似"剥洋 葱"式的持续崩滑垮塌),可能导致特大桥主塔墩出现 拉裂、下沉等变形破坏,直接影响特大桥以及整个川 藏铁路的安全运营。

(3)八曲侧顺层岩质斜坡稳定性计算结果表明: 天然和暴雨工况,斜坡稳定性较好。强震以及暴雨+ 强震工况,斜坡稳定性较差,可能出现局部或整体失 稳破坏,导致主塔墩出现拉裂、倾倒、不均匀沉降等 变形破坏,进而影响或中断特大桥以及铁路的正常安 全运行。

建议对该特大桥成都岸现有危岩体进行清除、加 固后,针对八曲侧顺层岩质斜坡进行深入勘探研究, 特别是重点研究强震、暴雨以及长期蠕滑变形等工 况下八曲侧斜坡可能出现的变形破坏模式、范围和程 度,采取科学、合理、经济的工程措施予以处理,降低 特大桥施工以及运行期间的地质安全风险。

致谢:成都地质调查中心的王冬兵、刘函等人参 与野外地质调查并提供部分图件素材,在此一并表示 感谢!

参考文献(References):

- [1] 张培震,郑德文,尹功明,等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1):5-13. [ZHANG Peizhen, ZHENG Dewen, YIN Gongming, et al. Discussion on late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(1): 5-13. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 彭建兵,崔鹏,庄建琦.川藏铁路对工程地质提出的挑战[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(12):2377-2389. [PENG Jianbing, CUI Peng, ZHUANG Jianqi. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet Railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(12):2377-2389. (in Chinese

with English abstract)]

- [3] 邱鹏,苏培东,郭长宝,等. 川藏铁路规划区K208滑坡数值模拟分析[J].水力发电, 2016, 42(11): 42 46.
 [QIU Peng, SU Peidong, GUO Changbao, et al. Numerical analysis of K208 landslide in planning area of Sichuan-Tibet Railway[J]. Water Power, 2016, 42(11): 42 - 46. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 吴瑞安,郭长宝,杜宇本,等.川藏铁路加查-朗县段地质灾害发育特征研究[J].现代地质,2017,31(5): 956-964. [WU Rui'an, GUO Changbao, DU Yuben, et al. Research on geohazard developing characteristics in Jiacha to Langxian section of Sichuan-Tibet Railway[J]. Geoscience, 2017, 31(5): 956 - 964. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王家柱,高延超,冉涛,等.川藏铁路交通廊道某大型 古滑坡成因及失稳模式分析[J].现代地质,2021, 35(1):18-25. [WANG Jiazhu, GAO Yanchao, RAN Tao, et al. Analysis of genetic mechanism and failure mode of a large paleo-landslide in Sichuan-Tibet Railway transportation corridor[J]. Geoscience, 2021, 35(1):18-25. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 宋章,张广泽,蒋良文,等. 川藏铁路高陡边坡深厚卸荷带特征分析[C]//川藏铁路建设的挑战与对策
 —2016学术交流会论文集. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017: 177-184. [SONG Zhang, ZHANG Guangze, JIANG Liangwen, et al. Analyzed the characteristic of deep unloading fracture zone of high and steep slope of the Sichuan-Tibet Railway[C]//Proceedings of the 2016 Academic Exchange Conference on Challenges and Countermeasures of Sichuan-Tibet Railway Construction. Beijing: China Communication Press Co Ltd, 2017: 177-184. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 蓝康文. 川藏铁路高山峡谷边坡卸荷带变形破坏模式及稳定性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
 [LAN Kangwen. Study on failure modes and stability of unloading zone of slopes in alpine-gorge region along Sichuan-Tibet Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王俊,赵建军,瞿生军,等.卸荷条件下高边坡大规模 开挖的"地质-力学"响应研究——以西藏如美水电站 右坝肩为例[J].水文地质工程地质,2018,45(4):37-44. [WANG Jun, ZHAO Jianjun, QU Shengjun, et al. A study of the geological-mechanical response during largescale excavation of high slope under unloading condition: Exemplified by the right abutment of the Tibet Rumei Hydropower Station[J]. Hydrogeology & Engineering

Geology, 2018, 45(4): 37 – 44. (in Chinese with English abstract)]

- [9] 周洪福,冉涛,陈波,等.川西顺层斜坡破坏模式及层间弱面连通率对斜坡稳定性的影响[J].现代地质,2021,35(1):137-144. [ZHOU Hongfu, RAN Tao, CHEN Bo, et al. Failure modes and influence of interlaminar fracture zone connectivity on slope stability of bedding rock slope in Ya'an, west Sichuan[J]. Geoscience, 2021, 35(1):137-144. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 马文著,徐衍,李晓雷,等.基于黏聚力裂缝模型的反 倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟[J].水文地质工程地 质,2020,47(5):150-160. [MA Wenzhu, XU Yan, LI Xiaolei, et al. A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(5):150-160. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 周洪福,符文熹,叶飞,等. 陡倾坡外弱面控制的斜坡 滑移-剪损变形破坏模式[J]. 地球科学, 2021, 46(4): 1437-1446. [ZHOU Hongfu, FU Wenxi, YE Fei, et al. Study on sliding- shearing deformation and failure mode of rock slope with steep weak structural plane[J]. Earth Science, 2021, 46(4): 1437 - 1446. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 冉涛,周洪福,徐伟,等.川西交通廊道雅安-泸定段典型岩质边坡失稳模式、破坏机理及防治措施[J].自然灾害学报,2020,29(4):200-212. [RAN Tao, ZHOU Hongfu, XU Wei, et al. Research on the instability modes, failure mechanisms, and preventive measures of representative rock slopes within Ya'an-Luding section of the western Sichuan transportation corridor[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(4): 200-212. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 成永刚,赵晓彦. 川藏高速公路雅(安) 康(定) 段玄武 岩边坡工程地质分析与防治[J]. 水利与建筑工程学 报, 2020, 18(5): 165 - 169. [CHENG Yonggang, ZHAO Xiaoyan. Engineering geological analysis and prevention of basalt slope in Sichuan Tibet expressway[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(5): 165 - 169. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 杨志法,张路青,祝介旺.四项边坡加固新技术[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3828-3834.
 [YANG Zhifa, ZHANG Luqing, ZHU Jiewang. Four new techniques in slope reinforcement[J]. Chinese Journal

of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3828 – 3834. (in Chinese with English abstract)]

- [15] 龚建辉. 高陡不稳定路堑边坡加固技术探讨[J]. 高速 铁路技术, 2020, 11(3): 71 - 74. [GONG Jianhui. Discussion on reinforcement technology of high and steep unstable cutting slope[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 71 - 74. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王栋,张广泽,李新坡,等.川藏铁路折多山隧道进口 岩崩运动特征及防治措施[J].科学技术与工程, 2017, 17(34): 118 - 123. [WANG Dong, ZHANG Guangze, LI Xinpo, et al. Movement characteristics and prevention of talus slope in Zheduoshan tunnel of Sichuan-Tibet Railway[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(34): 118 - 123. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 钟卫,李秀珍,崔云,等.崩塌滑坡灾害对川藏铁路康定-昌都段选线的影响[J].铁道标准设计,2018,62(1):34-38.[ZHONG Wei,LI Xiuzhen,CUI Yun, et al. The influence of landslide and collapse hazards on railway alignment in Kangding-Changdu section of Sichuan-Tibet Railway[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(1): 34 38.(in Chinese with English abstract)]
- [18] 赵晓彦,肖典,罗改,等.强降雨条件下碎裂岩质边坡 锚墩式主动网加固机理模型试验[J].工程地质学报, 2021, 29(2): 365 - 374. [ZHAO Xiaoyan, XIAO Dian, LUO Gai, et al. Model testing of anchored active net for cataclastic rock slope stabilizing under heavy rainfall[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 365 - 374. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王鹏. 川藏铁路金沙江特大桥岸坡稳定性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016. [WANG Peng. Study on the slope stability of bridge over Jinsha river in Sichuan-Tibet Railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 杜杰贵, 严松, 李继兴, 等. 考虑卸荷带和岩体软化特性的某桥址边坡稳定性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 12 18. [DU Jiegui, YAN Song, LI Jixing, et al. Slope stability analysis of a bridge site considering unloading zone and rock softening characteristics[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(2): 12 18. (in Chinese with English abstract)]