

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.05.06

深切峡谷区公路桥梁段斜坡崩滑灾害风险评估

程 强

(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司,四川 成都 610041)

摘要: 深切峡谷区边坡高陡,崩滑灾害风险防控对峡谷山区桥梁安全至关重要。针对峡谷山区桥梁斜坡崩滑灾害风险问题,给出了地质灾害易发程度分析、危险性分析、易损性评估、风险等级评定和防治可行性评价各阶段的判别指标和方法。依据边坡岩土体稳定性定量评价指标进行易发程度判别;针对不同运动特征灾害体,采用灾害体规模、运动速度及冲击能量等进行危险等级评定;通过结构力学分析评价构造物易损性,根据受损程度和灾害损失评定桥梁段斜坡崩滑灾害风险等级;根据防治工程实施难度和可靠性评价防治可行性。该方法应用于雅康高速公路泸定大渡河特大桥,根据评估结果选用了风险最低的桥位,采用抗滑桩、锚索等对重点区域系统加固,并结合碎屑流拦截结构,实现对选用桥位边坡地质灾害的防治。

关键词: 深切峡谷山区;大型桥梁;边坡地质灾害;风险评估;防治

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)05-0042-06

Risk assessment of slope failure hazards near bridges of a highway across deep canyons

CHENG Qiang

(Sichuan Provincial Highway Planning, Survey, Design and Research Institute Co., Ltd
Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Risk prevention and control of high cutting slope in deep canyon area is critical to bridge safety. The discriminate indexes and analyzing method of geological hazards in different stage are given, including the susceptibility analysis, hazard analysis, vulnerability assessment, risk rating evaluation and feasibility evaluation. According to the quantitative evaluation indexes of slope stability to assess the susceptibility of geohazards. The degree of hazard is classified according to the scale, speed and impact energy of the hazard. The structural vulnerability is evaluated based on structural mechanics analysis. The risk rating of geological hazard is evaluated according to the damage degree and disaster loss. Then the feasibility of prevention and control are determined by the difficulty and reliability of prevention and control. This method was applied to the large span bridge acrossing Dadu River in Luding on the expressway from Ya'an to Kangding, the position with lowest risk was selected according to the evaluation results. Anti-slide piles combined with anchor cables were used to reinforce the key area, the debris flow interception structure was adopted to prevent and control the geological hazards on bridge site slope.

Keywords: deep canyon; large span bridge; slope failure; risk assessment; prevention and control

收稿日期: 2018-12-04; 修订日期: 2019-01-06

基金项目: 四川省交通科技项目(2013 A1-3, 2014 C-1); 交通运输部建设科技项目(2013 318 800 020)

第一作者: 程 强(1972-),男,河北滦县人,博士,教高,主要从事山区公路工程勘察设计研究。E-mail:chengqiangy@163.com

0 引言

我国西部山区地形复杂,峡谷密布、山高坡陡,在铁路、公路工程建设中,桥梁工程众多。顺峡谷布线的道路工程,线位上方往往有百米级、千米级的斜坡,斜坡高位岩土体一旦失稳,将对桥梁等构造物构成严重威胁。例如汶川地震诱发的高陡边坡崩滑灾害,造成多座桥梁被砸毁^[1]。在高烈度深切峡谷山区修建桥梁工程,评估边坡地质灾害风险,制定灾害防治策略,是桥梁建设中的关键问题。

地质灾害风险研究是自然灾害风险研究的一个分支,近年来国内外在地质灾害风险评估理论和技术流程方面开展了大量研究。FEll R^[2]发表了地质灾害风险评估指南,随后 COROMINAS J 等多位学者进行了细化完善^[3-4]。地质灾害的风险评价主要分为点评价、面评价和区域性评价。区域性评价采用区域性调查和统计分析为主,主要为宏观减灾决策提供依据。例如丁佳佳^[5]根据滑坡编目和影响因素分析,进行了万州区滑坡地质灾害风险评价。杨志华等^[6]考虑震后效应进行青藏高原东缘地质灾害评价。面评价研究方法以调查为主,辅以部分勘探和试验工作。王萌等^[7],徐林荣等^[8]基于各因素统计分析,进行了公路、铁路等线性工程地质灾害评估和危险性区域划分。点评价主要针对单一灾害体和单体工程,需要开展大量的勘探和试验工作。目前地质灾害风险分析研究,区域性评价和面评价研究较多,对于单一灾害点的评价研究较少,针对高陡斜坡区桥梁段斜坡崩滑灾害风险评估问题研究深度不足。

本文针对深切峡谷区特大跨径桥梁工程,采用边坡灾害体稳定性、灾害体规模、运动速度及冲击能量等定量指标分析评价边坡地质灾害危险性,给出了桥梁段斜坡崩滑灾害易发性、危险性、风险等级评定指标,并结合川藏高速公路雅安至康定段泸定大渡河桥这一典型实例进行分析。

1 桥梁段斜坡崩滑灾害风险评估方法

桥梁段斜坡崩滑灾害风险即桥梁段斜坡崩滑灾害发生的可能性(概率)以及其对桥梁产生的后果(损失),可用下式表示:

$$R = P \times C \quad (1)$$

式中:R——风险;

P——地质灾害发生的概率;

C——危害,即灾害可能导致的后果。

桥梁段斜坡崩滑灾害评估属于点评价,评价对象虽然较为单一,但评价的深度和量化的要求较高,其评估过程见图 1。

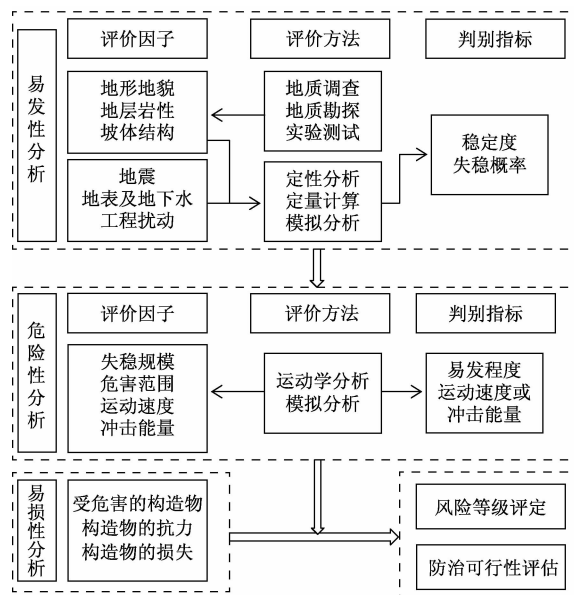


图 1 桥梁段斜坡崩滑灾害风险评估层次结构图

Fig. 1 Flow chart for risk assessment of bridge slope geological hazard

1.1 易发程度分析

通过地质勘探和室内外试验,查明边坡地形地貌、地层岩性(含岩土物理力学性质)和坡体结构特性,综合外部环境因素(降雨、地震、施工等),采用定性定量分析相结合的方法,得出边坡岩土体稳定性的定量评价指标,进而进行易发性判别(表 1)。

表 1 边坡地质灾害易发性判别表

Table 1 Discriminant table for vulnerability of slope geological hazards

易发性等级	定性判别	定量判别
高易发	边坡整体稳定性差,易发生大规模变形失稳	$F < 1.05$
中等易发	边坡基本稳定~稳定,在不利因素作用下易局部或部分变形失稳	$1.05 \leq F < F_{st}$
低易发	边坡稳定	$F \geq F_{st}$

备注:F 为边坡稳定系数, F_{st} 为边坡稳定安全系数,根据边坡规模、工况、工程重要性等级等综合确定。

1.2 危险性分析

边坡地质灾害危险性主要研究分析失稳岩土体危害范围、运动速度、强度等,不同的边坡灾害体其运动特征及危害形式有较大的差异。坡面崩塌滚石,运动过程中在坡面滚动、弹跳,对构造物的危害主要在于滚石的冲击力,其危险性可根据冲击能量判定。蠕变变形以及慢速-中速变形的滑坡,其危害主要在于滑坡推

力作用于构造物,可根据滑坡规模、厚度等对其危险性进行判别。高位岩土体的滑动失稳,运动过程中往往碎屑流化,其对构造物的危害主要在于碎屑流的冲击力,可采用运动学分析^[9]、颗粒流模拟分析^[10]等方法进行计算。

根据对桥梁工程可能造成的危害,边坡地质灾害危险性等级划分为极高、高、中等、低等 4 个等级(表 2)。

1.3 桥梁工程易损性评估

桥梁工程的易损性一般指桥梁在地震、不良地质及各种因素作用下受损害及破坏的程度。李宏男等^[11]总结了国内外学者对桥梁损伤程度的划分和评判指标,将桥梁损伤程度划分为轻度破坏、中度破坏、严重破坏和完全破坏,汶川地震后对于桥梁损伤程度的划分^[2]与之也基本类似。边坡地质灾害对桥梁的损伤,主要表现为岩土压力、冲击力作用下造成的桥梁基础和墩台的变形开裂、冲击损伤,并牵引上部结构产生变形移位,也有落石导致上部结构受损的情况。岩

土压力和冲击力作用下受损害程度,可根据结构分析计算的方法进行评估。不同结构形式的桥梁,易于受损的部位、受损后的危害程度有较大的差异。参考已有研究并结合边坡地质灾害对桥梁危害的特点,给出各种桥梁损伤程度分级的定性评价见表 3。

表 2 边坡地质灾害危险性判别表

危险等级	判别标准
极高	中等~高易发区的大型~巨型滑坡($V > 3 \times 10^5$);大型崩塌($V > 0.5 \times 10^4$);与构造物高差大于 100 m、厚度大于 10 m 的坡面碎屑流;单体冲击能量高于 5 000 kJ 的滚石。
高	中等~高易发区的中型滑坡($4 \times 10^4 < V \leq 3 \times 10^5$);中型崩塌($500 < V \leq 0.5 \times 10^4$);与构造物高差 30~100 m、厚度 5 m~10 m 的坡面碎屑流;单体冲击能量 1 000~5 000 kJ 的滚石。
中等	中等~高易发区的小型滑坡($V \leq 4 \times 10^4$);小型崩塌($V \leq 500$);与构造物高差小于 30 m、厚度小于 5 m 的坡面碎屑流;单体冲击能量 100~1 000 kJ 的滚石。
低	稳定斜坡,仅存在小型岩土体失稳;单体冲击能量小于 100 kJ 的滚石。

备注:表中 V 为滑坡、崩塌等的体积(m^3)

表 3 桥梁损失状态的定性描述

Table 3 Qualitative description of Damage status of bridges

桥梁类型	易受边坡地质灾害危害部位	受损程度			
		轻度破坏	中度破坏	严重破坏	完全破坏
简支/连续梁桥	基础、墩柱、桥台	构造物表面局部受损	墩柱/台、基础轻微变形,墩柱出现轻微弯曲及少量裂缝	墩柱/台、基础明显变形,墩柱出现明显弯曲及裂缝	基础产生较大移位、墩柱剪断或严重变形开裂,甚至桥梁垮塌
拱桥	基础、拱座	构造物表面局部受损	拱座、基础轻微变形,见少量裂缝	拱座、基础明显变形,见大量裂缝	拱座、基础显著变形,见大量裂缝,主体结构变形或垮塌
悬索、斜拉桥	基础、墩柱/塔、桥台、锚碇	构造物表面局部受损	主塔、锚碇完好,引桥墩柱/台轻微变形开裂	主塔、锚碇轻微变形,引桥墩柱/台明显变形开裂	主塔、锚碇严重破坏,引桥墩台严重变形;主体结构严重变形或垮塌

1.4 斜坡崩滑灾害风险等级及防治可行性评定

根据前面边坡地质灾害的易发性、危险性分析和构造物易损性评估,可由式(1)计算边坡地质灾害的风险等级。某个桥梁工程,可能受多个地质灾害体的危害;同一个地质灾害体也可能对同一桥梁造成多种危害,包括不同桥梁构件的损失,以及运营损失、人员伤亡和车辆损失、社会绕行损失等。因此假定有 m 种灾害事件,每种灾害事件对桥梁构成 n 种危害,则式(1)可表达为:

$$R = \sum_{i=1}^m P_i \times \sum_{j=1}^n [l_{i,j} \times f(v_j)] \quad (2)$$

式中, $l_{i,j}$ ——事件 i 对桥梁造成的第 j 种损失;

$f(v_j)$ ——损失价值转换函数;

P_i ——第 i 种灾害发生的概率。

针对运营桥梁工程特点,地质灾害对桥梁造成的损失 $l_{i,j}$ 主要包括:

(1)桥梁构件的损失:主要包括桥梁上部及下部结构的损坏等;(2)桥梁运营期间人员和车辆的损失:指一旦桥梁垮塌,可能造成的人员伤亡,车辆财产损失等;(3)运营损失:指桥梁受损维修期间,通行费的损失;(4)绕行损失:指桥梁受损维修期间,社会车辆绕行其他道路,形成的时间成本、绕行费用成本和社会声誉等损失。

由于桥梁的设计有一定的使用年限,风险评估需要考虑在使用年限内,遇到特定地质灾害的概率,进而计算特定地质灾害事件在一定概率水平下的损失,则式(2)表达为:

$$R[T] = \sum_{i=1}^m P_{i,t} \times \sum_{j=1}^n [l_{i,j} \times f(v_j)] \quad (3)$$

式中: $R[T]$ ——在设计使用年限内的损失;

$P_{i,t}$ ——特定地质灾害事件在设计使用年限内发生的时间概率。

由于不同规模的桥梁,损失的绝对数字差异巨大,因此用下式表达桥梁在设计使用年限内受地质灾害作用的风险概率:

$$R_r = R[T]/R_c \quad (4)$$

式中: R_c ——桥梁建设成本;

R_r ——设计使用年限内全桥价值损失事件发生的风险概率。

桥梁工程受地质灾害作用损失的程度,也可以根据受损程度表达,表 4 为根据 R_r 和桥梁受损程度,进行桥梁段斜坡崩滑灾害风险等级划分。

表 4 边坡地质灾害风险等级判别表

Table 4 Risk grade of slope geological hazard

风险等级	评定指标	风险概率
极高	全桥垮塌,无法修复	$R_r \geq 0.3$
高	桥梁基础构造或桥面系构造物严重受损、修复困难	$0.3 > R_r \geq 0.03$
中等	桥梁基础或桥面系构造物局部受损,可修复	$0.03 > R_r \geq 0.003$
低	轻微受损或无损坏,简易修复或不经修复可继续使用	$R_r < 0.003$

1.5 桥梁段斜坡崩滑灾害防治可行性评估

分析评定桥梁段斜坡崩滑灾害风险等级后,可根据边坡地质灾害的规模、防治工程的可实施性,分析评估地质灾害是否可通过有效工程防治措施,降低风险,从而评价防治可行性(表 5)。

表 5 边坡地质灾害防治可行性判别表

Table 5 Feasibility of prevention and control of slope geological hazard

防治可行性	评定指标
无法防治	灾害体位置极高、规模巨大,采取工程措施无法治理
难于防治	灾害体位置较高、规模较大,防治工程量巨大,实施困难
可防治	灾害体规模有限,可采取工程措施防治,防治后可有效降低灾害风险
易防治	采取简易工程防治措施即可降低灾害风险

根据风险等级和防治可行性的评定,可进行桥位方案选择决策,指导桥梁结构布设和桥梁段斜坡崩滑灾害防治措施的制定。由于桥墩构造物抵抗水平向荷载和变形的能力弱,因此斜坡上布设的桥梁工程应高度重视边坡地质灾害的评估和防治工作。对于灾害风险等级高-极高,边坡地质灾害难于防治-无法防治的区域,应避免进行桥梁工程建设,尤其是特殊结构和大跨桥梁建设。对于灾害风险等级低-中等,边坡地质灾害可防治的桥梁工程,应考虑高位岩土体失稳后可能造成坡面碎屑流、滚石等灾害的防治,确保桥梁构造物安全。

2 典型实例分析

川藏高速公路雅安至康定段泸定大渡河特大桥为千米级悬索桥,桥梁位于泸定县城上游约 6 km,初步设计拟定了上坝、中坝和咱里三个桥位作为桥位比较研究,其中上坝和中坝桥位桥梁主跨 1 200 m,两岸均采用隧道锚;咱里桥位桥梁主跨 1 100 m,雅安岸采用隧道锚、康定岸采用重力锚。图 2 为桥梁地理位置图。

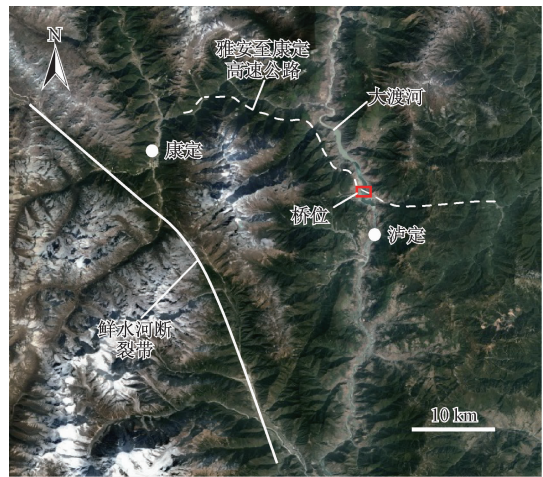


图 2 桥梁地理位置图

Fig. 2 Geographic position of the bridge

2.1 斜坡崩滑灾害风险评估

该桥梁跨越大渡河深切峡谷,距鲜水河活动断裂带直线距离约 22 km, E1 地震作用下地震动峰值加速度 $0.275g$, E2 地震作用下地震动峰值加速度 $0.49g$ 。三个桥位均涉及高陡边坡稳定问题,其中上坝和中坝桥位雅安岸边坡高分别为 550 m、500 m,康定岸边坡高 1 000 m;咱里桥位雅安岸边坡高 500 m,康定岸为冰碛体。针对三个桥位边坡,通过系统工程地质勘探和室内外岩土物理力学性质试验,判定边坡坡体结构、失稳破坏模式,进而通过数值模拟、极限平衡分析等方法分析研究边坡岩土体稳定性^[12],并通过结构分析计算桥梁构造物抗力,得到各桥位边坡岩土体稳定系数、失稳概率,失稳岩土体运动速度、冲击力及危害(表 6)。

根据式(3)和式(4),可计算设计使用年限内全桥价值损失事件发生的风险概率。例如 E1 地震重现期 $T_1 = 475a$,桥梁设计使用年限 $T_d = 100a$,则在 E1 地震作用下,灾害事件概率 $P = P_{31} \times T_d/T_1$ 。

根据受损程度和风险概率计算,可判定各桥位风险等级,进而根据地质灾害处治能力,并考虑经济性、施工难度等因素,进行防治可行性评估(表 7)。

表 6 各桥位边坡碎屑流运动速度
Table 6 Movement velocity of debris flow in each bridge slope

桥位边坡	灾害体形式及特征	稳定系数	失稳概率/%	主塔处碎屑流速度/(m·s ⁻¹)	滚石冲击能量/kJ	碎屑流对主塔冲击力/kN	主塔处滑坡推力/(kN·m ⁻¹)	对主塔的破坏
上坝桥位雅安岸	土层及风化卸荷带失稳,桥面以上高度 166 m,厚 10 m	$F_1 = 1.16, F_2 = 1.10,$ $F_{31} = 0.98, F_{32} = 0.85$	$P_1 = 0.3, P_2 = 2.9,$ $P_{31} = 64.2, P_{32} = 100$	20.0		32 005	13 719	剪断
上坝桥位康定岸	岩体滑移失稳,桥面以上高度 600 m,厚 20 m	$F_1 = 1.53, F_2 = 1.46,$ $F_{31} = 0.96, F_{32} = 0.86$	$P_1 = 0, P_2 = 0,$ $P_{31} = 46.1, P_{32} = 100$	40.7		378 016		剪断
中坝桥位雅安岸	覆盖土层滑移失稳,桥面以上高度 160 m,厚 10~15 m	$F_1 = 1.25, F_2 = 1.16,$ $F_{31} = 0.93, F_{32} = 0.78$	$P_1 = 0, P_2 = 1.3,$ $P_{31} = 96.3, P_{32} = 100$	22.3		72 870	7 927	剪断
中坝桥位康定岸	覆盖土层滑移失稳,桥面以上高度 363 m,厚 10~15 m	$F_1 = 1.24, F_2 = 1.14,$ $F_{31} = 0.94, F_{32} = 0.82$	$P_1 = 0, P_2 = 3.1,$ $P_{31} = 92.5, P_{32} = 100$	39.4		144 415		剪断
	滚石,桥面以上高度 700 m				163 319			剪断
咱里桥位雅安岸	覆盖土层滑移失稳,桥面以上高度 163 m,厚 3~8 m	$F_1 = 1.25, F_2 = 1.13,$ $F_{31} = 0.94, F_{32} = 0.82$	$P_1 = 0, P_2 = 1.1,$ $P_{31} = 98.6, P_{32} = 100$	12.0		6 138		受损

备注: F_1 为天然工况稳定系数, F_2 为暴雨工况稳定系数, F_{31} 为 E1 地震工况稳定系数, F_{32} 为 E2 地震工况稳定系数。 P_1 为天然工况失稳概率, P_2 为暴雨工况失稳概率, P_{31} 为 E1 地震工况失稳概率, P_{32} 为 E2 地震工况失稳概率。

表 7 泸定大渡河特大桥斜坡崩滑灾害风险评估

Table 7 Risk assessment of geological hazards on Dadu River Bridge in Luding

桥位	易发程度	危险等级	受损程度	风险概率	风险等级	防治可行性
上坝桥位	高易发	极高	完全破坏(部分垮塌)	0.25	极高	难于防治
中坝桥位	中等易发	极高	完全破坏(垮塌)	0.31	极高	无法防治
咱里桥位	中等易发	高	中度破坏(雅安岸结构受损)	0.02	中等	可防治

2.2 斜坡崩滑灾害风险防控

(1) 桥位选择

根据边坡地质灾害风险等级防治可行性评定,可见上坝和中坝桥位灾害风险等级极高,难于防治或无法防治。咱里桥位风险等级中等,可采取防治措施消除风险,因此选取咱里桥位。

(2) 咱里桥位边坡地质灾害防控

桥位雅安岸边坡高约 500 m,主墩以上边坡高约 260 m,边坡地质灾害主要为崩坡积土层滑移失稳,厚 3~10 m。设计采取预加固桩、框架锚杆/索(以中风化基岩为锚固段)等对边坡进行加固,平面及典型剖面见图 3 及图 4。还针对边坡高位岩土体失稳形成坡面碎屑流,可能对桥梁构造物构成危害的问题,在泸定隧道洞口上方、隧道锚洞口上方,设置人字形碎屑流拦截结构,拦截结构上方土体在地震作用下失稳时,可实现对碎屑流的拦截和疏排(图 3 及图 4 中所示第 1 道拦截和第 2 道拦截)。

3 结语

(1) 峡谷山区桥梁段斜坡崩滑灾害风险评价包括易发程度分析、危险性分析、易损性评估、风险等级确

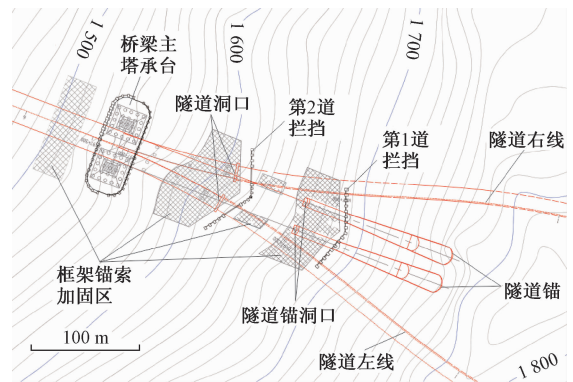


图 3 咱里桥位雅安岸边坡防护措施平面布置图
Fig. 3 Layout plan of protection measures of Zanli Bridge on Ya'an Bank

定和防治可行性评价等内容,本文给出了各阶段评价的等级划分、判别指标和方法,可供类似工程边坡地质灾害评估参考。

(2) 川藏高速公路泸定大渡河特大桥两岸边坡高陡、地震烈度高,根据边坡地质灾害评估结果选用了风险最低的咱里桥位,采用边坡加固和碎屑流拦截结构相结合的方法,实现对边坡地质灾害的防治。

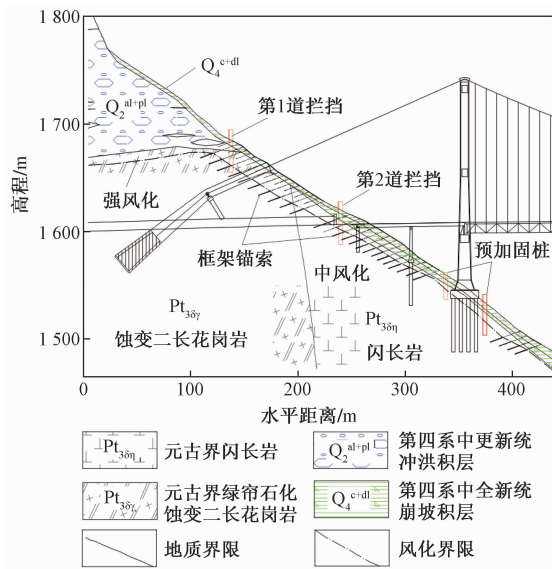


图 4 咱里桥位雅安岸边坡防护措施剖面布置图

Fig. 4 Section plan of slope protection measures for Ya'an Bank of Zanli Bridge on Ya'an Bank

参考文献:

[1] 陈乐生,庄卫林,赵河清,等.汶川地震公路震害调查——桥梁[M].北京:人民交通出版社,2012:14-46.
CHEN Lesheng, ZHUANG Weilin, ZHAO Heqing, et al. Report on highway's damage in the Wenchuan Earthquake: Bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2012:14-46.

[2] FELL R, COROMINASET J, BONNARD C, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning [J]. Engineering Geology, 2008, 102(3/4):85-111.

[3] VAN WESTEN C J, CASTELLANOS E, KURIAKOSE SL. Spatial date for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview [J]. Engineering Geology, 2008, 102(3/4):112-131.

[4] COROMINAS J, MOYA J. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes [J]. Engineering Geology, 2008, 102(3/4):193-213.

[5] 丁佳佳.三峡库区万州区滑坡灾害风险评估研究[D].武汉:中国地质大学,2015.
DING Jiajia. Landslide risk assessment in Wanzhou County, Three Gorges Reservoir [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015.

[6] 杨志华,郭长宝,姚鑫,等.考虑地震后效应的青藏高原东缘地质灾害易发性评价[J].中国地质灾害与防治学报,2017,28(4):103-112.

YANG Zhihua, GUO Changbao, YAO Xin, et al. Geohazard susceptibility assessment considering the long-term seismic effect in the eastern margin of Tibetan Plateau [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(4):103-112.

[7] 王萌,何思明,张小刚. S210 线芦山-宝兴段崩塌灾害危险性分析及防治对策建议[J].中国地质灾害与防治学报,2014,25(3):101-106.
WANG Meng, HE Siming, ZHANG Xiaogang. Study on S210 line Lushan-Baoxing segment collapse hazard assessment and control measures [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(3):101-106.

[8] 徐林荣,罗冠枝,吕大伟,等.枝柳(枝江—柳州)铁路线张家界段线域地质灾害评估[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(2):80-86.
XU Linrong, LUO Guanzhi, LYU Dawei, et al. Assessment on geology hazard of the Zhangjiajie in Zhi-Liu (Zhijiang-Liuzhou) Railway [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(2):80-86.

[9] 顾成壮,胡卸文,罗刚,等.地震滑坡启程动力学机理[J].西南交通大学学报,2012,47(4):567-572.
GU Chengzhuang, HU Xiewen, LUO Gang, et al. Setting-out Mechanism of Landslide Induced by Earthquake [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2012, 47(4):567-572.

[10] OUYANG C J, HE S M, XU Q, et al. A MacCormack-TVD finite difference method to simulate the mass flow in mountainous terrain with variable computational domain [J]. Computers & Geoscience 2013, 52: 1-10.

[11] 李宏男,李超.基于全寿命周期的桥梁结构抗震性能评价与设计方法研究进展[J].中国公路学报,2014,27(10):32-45.
LI Hongnan, LI Chao. Research progress on life-cycle based bridge structural seismic performance evaluation and design method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(10):32-45.

[12] 程强.基于边坡稳定性的雅康高速公路泸定大渡河特大桥桥位方案选择[J].工程地质学报,2014,22(增刊):170-175.
CHENG Qiang. Luding Dadu River Bridge site selection based on the slope stability of the expressway from Yaan to Kangding [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(S):170-175.