

文章编号: 1674—8247(2018)06—0020—06

## 复杂地质因素下神农溪大桥岸坡稳定性研究

何 平 许 胜 杜宇本

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**郑万高速铁路神农溪大桥桥基岸坡工况复杂,受到频繁低震、库水位反复涨落、滑坡浪涌及岩溶的综合影响。文章在宏观地质概念的指导下,采用野外调查、钻探、理论计算及数值模拟方法,综合各因素的影响,分析桥基岸坡的长期稳定性,评估桥基位置的合理性。研究表明:(1)线路规避了右侧大型溶槽及左侧既有高速公路的影响,为最优方案;(2)万州端基底灰岩中有多层溶洞,建议深埋至溶穴很少的泥灰岩层中;(3)由于地震、库水位涨落过程中的水岩作用及动水压力,万州岸主墩基础底部岩体的塑性区与岸坡边坡点的塑性区逐渐靠近。为避免两个塑性区贯通,引发岸坡整体失稳,建议采取一定的工程措施。

**关键词:**郑万高速铁路; 神农溪; 岩溶; 岸坡稳定性

中图分类号:P642

文献标志码:A

## Research on the Stability of Shennongxi Bridge Bank Slope under Complex Geological Environment

HE Ping XU Sheng DU Yuben

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Shennongxi Bridge of Zhengzhou-Wanzhou high speed railway is comprehensively effected by frequent low earthquake, repeated fluctuation of reservoir water level, landslide surge and karst. Based on the macroscopic geological concept and the influencing factors, the long-term stability of bank slope is analyzed and the rationality of the bridge foundation position is evaluated by using field investigation, drilling, theoretical calculation and numerical simulation. The results show that the railway line is optimal scheme because it avoids the large tank on the right side and impact of the existing highway on the left side. There are many layers of karst caves in the basement limestone, it is suggested that the length of the pile be buried into marl layer. The plastic zone of rock mass at the bottom of main pier foundation of Wanzhou bank is close to the plastic zone of slope point gradually because of the water-rock action and hydrodynamic pressure in the process of earthquake, reservoir water level fluctuation. In order to avoid the connection of two plastic zones and the overall instability of bank slope, some engineering measures are suggested.

**Key words:** Zhengzhou-Wanzhou high speed railway; Shennongxi; karst; stability of bank slope

郑万铁路神农溪大桥位于湖北省巴东县,横跨三峡库区神农溪,桥全长 468.9 m,最大跨为 220 m 的钢管混凝土拱,最大桥高约 160 m,最大墩高约 75 m。主桥采用连续刚构-拱桥组合形式,跨度为(109+220+109) m。桥址区为峡谷山区,桥基岸坡受到三峡水库

库水位反复涨落的影响,近年该区的频繁小震级地震也不可忽视。神农溪大桥桥基岸坡岩溶发育,地表溶蚀严重,灰岩中有多层溶洞,同时线路右侧发育有大型溶槽,溶槽蓄水前无水流,蓄水后位于库水位以下。神农溪大桥要尽量规避发育的活动性溶洞溶槽;同时,由

收稿日期:2018-03-13

作者简介:何平(1973-),男,高级工程师。

引文格式:何平,许胜,杜宇本. 复杂地质因素下神农溪大桥岸坡稳定性研究[J]. 高速铁路技术,2018,9(6):20-25.

HE Ping, XU Sheng, DU Yuben. Research on the Stability of Shennongxi Bridge Bank Slope under Complex Geological Environment [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(6): 20-25.

于库水位的整体抬升及反复涨落,地下水位不断改变,加之波浪的作用,这促进了岩溶发育,加大岩溶通道复活的可能性,威胁桥基岸坡的长期稳定性。郑万铁路神农溪大桥桥基岸坡受到地震、库水位涨落、滑坡涌浪及岩溶发育的多因素影响,因素之间又相互叠加或相互作用,影响因素复杂,对其展开安全评价十分必要。

## 1 工程地质条件

神农溪在桥址处流向近正南,175 m 库水位时河面宽约 190 m。桥址区属中山地貌,“V”型陡立峡谷为主,地面高程 460~660 m,相对高差 100~200 m,万州端自然坡度较陡,约为  $60^\circ$ ,郑州端较缓,约为  $30^\circ$ 。斜坡覆土层较薄,地表树木茂密,局部地区基岩裸露,河谷沟槽覆盖卵石土。桥址区的主要地层为三叠系下统嘉陵江组三段( $T_{J^3}$ )中厚层灰岩,岩溶发育。

该区地层呈单斜构造,岩层产状  $175^\circ \angle 40^\circ \sim 60^\circ$ ,发育两组节理,产状分别为:  $30^\circ \sim 60^\circ \angle 76^\circ$ 、 $250^\circ \sim 290^\circ \angle 68^\circ \sim 72^\circ$ 。岸坡坡向近东西,两岸均形成易滑楔形体线路平面如图 1 所示。

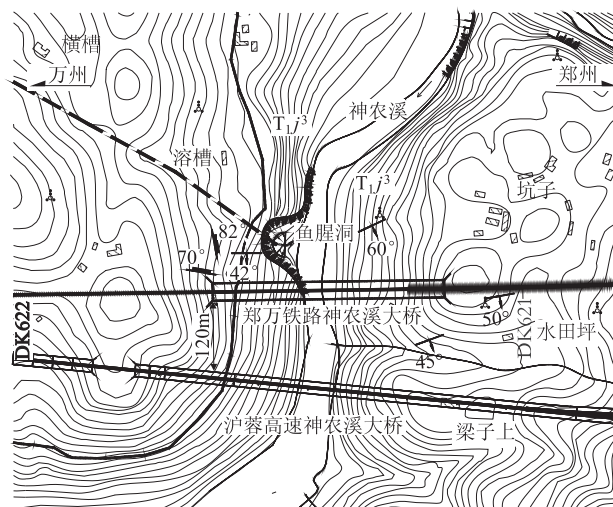


图1 线路平面示意图

## 2 主要地质影响因素分析

### 2.1 地震

根据 GB 18306-2001《中国地震动参数区划图》及其 2008 年第 1 号修改单和 GB 50011-2010《建筑抗震设计规范》划分,桥址地震动峰值加速度为 0.05 g,地震动反应谱特征周期 0.45 s,地震基本烈度 VI 度。但 2013 年巴东发生 5.1 级地震。震中距离神农溪大桥约 13 km,桥址区地震加速度  $1.0 \text{ m/s}^2$ ,桥址区有强烈震感,未造成房屋建筑破坏及损毁。故本次分析中地震加速度按  $1.0 \text{ m/s}^2$  计算。桥址区地震发育如图 2

所示。

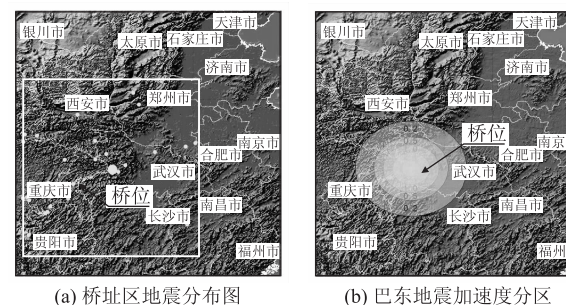


图2 桥址区地震发育图

### 2.2 库水位涨落

三峡库区蓄水前,大宁河水位约 115 m,蓄水后,水位在 175 m、145 m 周期性涨落。库水位的周期性涨落产生两个方面的不利影响,一是岩体强度劣化;二是水位变化产生动静水压力。

库水位涨落条件下的岩体强度劣化问题是典型的水岩作用问题。灰岩在常温纯水中的溶解度很小,当  $\text{CO}_2$  溶于水时,产生的  $\text{H}^+$  通过化学作用,大大提高了灰岩的溶解度。三峡库区水位周期性涨落,地下水剧烈动态变化,且库水位的提升大大拓宽了河道,风浪及行船产生的波浪都更加强烈。这些都使得水的活动性更强,加快了溶解物质的运移速度,大大提升水岩作用的速度。此外,水位的周期性涨落还使得消落带岩石无植被,岩石周期性受日照曝晒,在水岩作用的前期,岩石因曝晒温度升高,可到达  $70^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$  以上,岩石高温膨胀。当水作用于高温岩石时,岩石温度瞬间降低,收缩,微裂隙扩展。微裂隙的扩展加大了水岩作用面积及作用强度,促进了灰岩的腐蚀速度<sup>[1]</sup>。

由于灰岩致密,水难以入渗,灰岩的腐蚀作用主要影响岩石表面的强度。根据巴顿公式,岩石的抗剪强度主要与岩石的粗糙度  $JRC$  和隙壁强度  $JCS$  有关。对于岩石边坡,其应力水平较小,粗糙度  $JRC$  的影响相对较小,隙壁强度  $JCS$  为主要的因素<sup>[2]</sup>。

库水位的涨落还会产生附加的动静水压力,其中以水位降落时产生的动水压力影响最大,如日本大约有 60% 水库滑坡发生在水位骤降时期。动水压力的大小与地下水的水头线性相关,本文通过求解郑万铁路神农溪大桥两岸岸坡岩体顺坡向的渗透系数及流速,得出岸坡岩体的最大动水压力,附加给岸坡岩体,得到库水位降落条件下岸坡的应力特征。

对于岩石岸坡,水往往只在裂隙中流动,根据立方定律,裂隙中流水的渗透系数仅与隙宽有关。本文通过调查岸坡岩体的结构,测试不同结构面的隙宽、粗糙度、产状及节理密度。根据立方定律计算单个裂隙中

流水的渗透系数,再平均到整个岸坡岩体<sup>[3]</sup>。

根据立方定律:

$$q = \frac{ga^3}{12v}J$$
(1)

式中: $q$ ——流量;  
 $g$ ——重力加速度;  
 $a$ ——隙宽或等效隙宽;  
 $v$ ——水的运动粘滞系数;  
 $J$ ——水力梯度。

又有达西定律:

$$q = kAJ$$
(2)

式中: $k$ ——渗透系数;  
 $A$ ——断面面积。

对于含裂隙的岩体, $A$ 为裂隙间距 $B$ ,带入立方公式有:

$$k = \frac{ga^3}{12vB}$$
(3)

$$u = \frac{ga^3}{12vB}J$$
(4)

式中: $u$ ——流速。

扩展到三维状态,可得渗透张量为:

22

$$[K] = \sum_{m=1}^n \frac{ga_m^3}{12b_mv} \begin{bmatrix} 1 - (n_x^m)^2 & -n_x^m n_y^m & -n_x^m n_z^m \\ -n_y^m n_x^m & 1 - (n_y^m)^2 & -n_y^m n_z^m \\ -n_z^m n_x^m & -n_z^m n_y^m & 1 - (n_z^m)^2 \end{bmatrix}$$
(5)

式中: $n_x^m$ 、 $n_y^m$ 、 $n_z^m$ ——第 $m$ 组节理的法向在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的单位方向余弦;

$a_m$ 、 $b_m$ ——第 $m$ 组结构面的隙宽和间距。

郑万铁路神农溪大桥岸坡有三组结构面特征如表1所示。分别以两岸岸坡方向为 $x$ 方向,按照右手法则,水平垂向为 $y$ 方向,竖直方向为 $z$ 方向。将结构面的产状转换为方向余弦,带入公式求解,得到岸坡的岩体的渗透张量。

表1 岩体结构面特征

| 结构面 | 产状       | 间距 $a$ /m | JRC | 隙宽 $b$ /mm | 充填 |
|-----|----------|-----------|-----|------------|----|
| 层理  | 175°∠50° | 1.2       | 4   | 5          | 无  |
| J1  | 45°∠76°  | 1.0       | 6   | 10         | 无  |
| J2  | 270°∠70° | 0.8       | 6   | 10         | 无  |

求得万州岸岩体的渗透系数张量:

$$[K_w] = \begin{bmatrix} 1.43 & 0.21 & -0.24 \\ -0.21 & 1.90 & 0.28 \\ 0.24 & 0.28 & 0.95 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \text{ m/s}$$
(6)

$$[K_z] = \begin{bmatrix} 1.43 & 0.21 & 0.24 \\ -0.21 & 1.90 & -0.28 \\ -0.24 & -0.28 & 0.95 \end{bmatrix} \times 10^{-3} \text{ m/s}$$
(7)

可求得两岸顺坡向的渗透系数分别为:

$$k_{wx} = 1.4 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$k_{zx} = 1.88 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

按照高水位时顺坡向水力梯度0.48,求得两岸顺坡向的渗透速度为:

$$u_{wx} = 0.67 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$u_{zx} = 0.94 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

动水压力是渗透水流作用对土骨架产生的拖曳力,力的大小与水力梯度相关。

$$G_d = i \times \gamma_w$$
(8)

式中: $i$ ——水力坡度;

$\gamma_w$ ——水的重度。

地下水流动均会产生动水压力,力的大小与水力梯度相关。库水位降低时,地下水位随之降低,但如果岩土体的渗透系数较低时,地下水位的降低的速度明显低于库水位,从而地下水位与库水位的水头差加大,形成较大的水力梯度和动水压力,威胁岸坡的稳定性。

收集得到2016年三峡水库泄洪期的水位如图3所示。地下水水位随着库水位的降低而降低,降低速度取顺坡向带入渗流速度,得到地下水位与库水位的水头差的增量如图4所示。

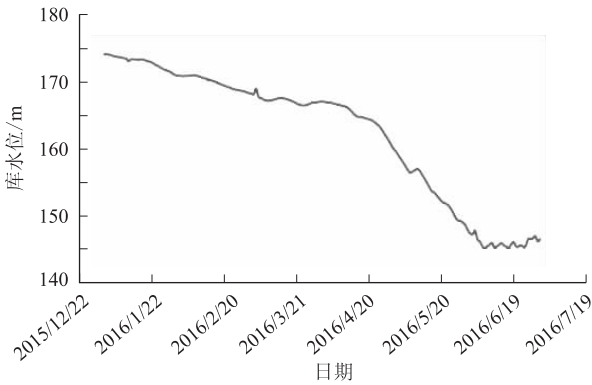


图3 三峡水库泄洪期水位

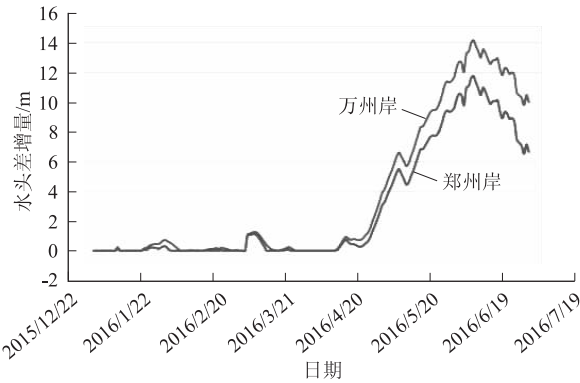


图4 泄洪期岸坡动水压力

从图中可以看出2016年1月1日-4月15日,库水位降低的速度与两岸岸坡地下水降低的速度基本一致。这是由于此时库水位的降低速度较低,地下水位可基本同步降低,水头增量基本为0,表明动水压力与稳定水位时基本一致。2016年4月15日-6月17日,库水位下降速度较快,地下水位来不及降低,导致地下水位与库水位的水头差快速增大,在2016年6月17日时达到最大。其中万州岸的最大水头差增量为14.2 m,郑州岸的最大水头差增量为11.8 m。万州岸的值较大的原因是万州岸的部分结构面反倾,其渗透系数相对较低。

### 2.3 滑坡浪涌

三峡库区滑坡广泛分布,滑坡涌浪作用于桥基岸坡,增大岸坡岩体的重度,并产生静水压力及动水压力,诱发岸坡失稳。桥址区附近马家河滑坡,位于巴东县沿渡河镇舒家村二组,该滑坡为土质滑坡,滑坡面平呈舌形,纵长200 m,均宽150 m,平均厚度8 m,面积 $3 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,体积 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,前缘高程139 m,后缘高程210 m。该滑坡位于神农溪大桥上游约200 m处。

滑体剪切破坏之后的位移过程称为滑动阶段,根据牛顿第二定律,滑体滑动加速度为:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{g}{G} F = \frac{g}{G} (F_r - F_s) = \frac{g F_r}{G} (1 - k) \quad (9)$$

式中: $F$ ——滑体下滑力;

$m$ ——滑体质量;

$F_r$ ——滑动力;

$F_s$ ——抗滑力;

$k$ ——稳定性系数。

设滑动体的滑动距离 $S$ ,则其滑动速度为 $v = 2aS$ ,代入式(9)有:

$$v = \frac{2gSF_r}{G} (1 - k) \quad (10)$$

当稳定性系数小于1时,滑体开始滑动,一旦滑动开始,滑面内聚力 $c$ 将急剧减小,甚至为零,内摩擦角 $\varphi$ 也会减小,则稳定性系数将变得更小,滑坡滑动加速度越来越大,速度越来越快。

本文采用美国土木工程学会提出的推算方法,该方法假定滑体滑落于半无限水体中,且下滑高程大于水深,根据重力表面波的线性理论,推导出一个引起波浪的计算公式。应用该公式直接计算其过程十分复杂,但利用根据该公式计算确定的一些曲线图表,却能较简单地求出距滑体落水点不同距离处的最大浪

高<sup>[4]</sup>,计算步骤如下。

(1) 计算滑动体的下滑速度 $v$ ,由 $v$ 值算出相对滑速 $v_t$ :

$$v_t = \frac{v}{\sqrt{gH_w}} \quad (11)$$

$$x_t = \frac{x}{H_w} \quad (12)$$

式中: $H_w$ ——水深(m)。

(2) 设滑动体的平均厚度为 $H_s$ ,计算 $H_s/H_w$ 值。

(3) 根据 $v_t$ 和 $H_s/H_w$ 值,在图5中确定波浪特性。

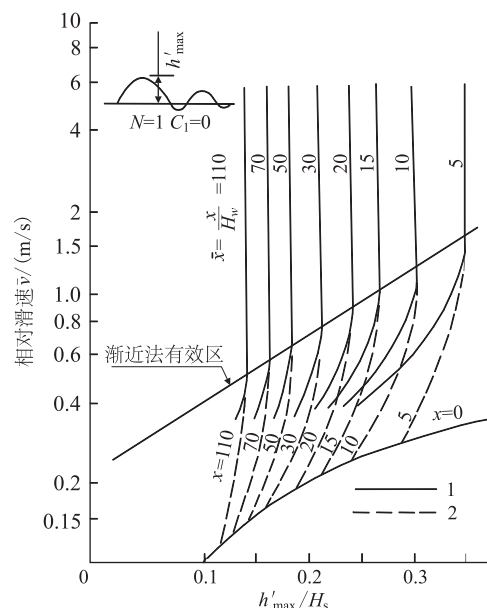


图5 滑坡最大浪高计算图

(4) 根据 $v_t$ 查图6,求出滑体落水点( $x=0$ )处的最大波高 $h_{\max}$ 与滑体平均厚度 $H_s$ 的比值,从而求得 $h_{\max}$ 。

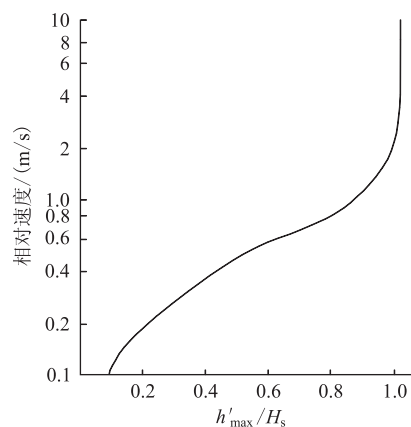


图6 落水点 $x=0$ 处最大波高计算图

(5) 预测距滑体落水点距离 $x$ 处某点的最大波高 $h'_{\max}$ ,方法是先求出相对距离 $x_t$ ,利用 $v_t$ 和 $x_t$ 查图。求



出 $h'_{\max}/H_s$ ,进而求得距离滑体落水点 $x$ 处的最大波高。

按上述计算步骤对马家河滑坡进行涌浪计算,计算断面如图7所示。

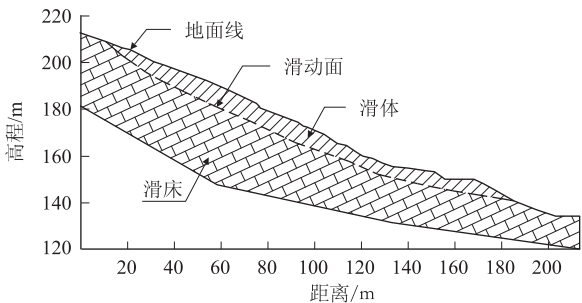


图7 马家河滑坡断面图

表2 滑坡涌浪计算

| 滑体重量<br>/(kN/m) | 平均厚度<br>/m | 滑动距离<br>/m | 剩余下滑力<br>/(kN/m) | 稳定性系数 | 水深<br>/m | 滑动速度<br>/(m/s) | 相对滑动速度<br>/(m/s) | 落水点浪高<br>/m | 岸坡处浪高<br>/m |
|-----------------|------------|------------|------------------|-------|----------|----------------|------------------|-------------|-------------|
| 2 416           | 8          | 50         | 995              | 0.98  | 55       | 8.1            | 0.35             | 3.0         | 2.3         |

处溶洞洞口直径约2 m。120 m处溶洞有两层,上层标高约120 m,下层标高约110 m,两层溶洞直径2~3 m,向坡内展布约50 m,方向与溶槽发育方向一致,即偏离线路主墩方向发育特征如图8所示,目前对神农溪大桥影响不大。根据现有岩溶发育特征,综合考虑大型溶槽及既有平行高速公路桥梁的影响,郑万铁路神农溪大桥的线路位置是桥址区最合理的位置。

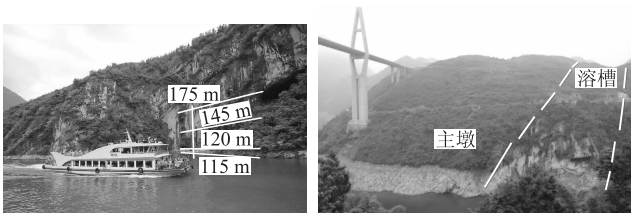


图8 岩溶发育特征

(2) 基底岩溶发育特征

拱座处灰岩层内发育有多层溶洞,拱座桩基设计长度为18 m,依次穿过2个溶洞,洞高分别为2.9 m和0.6 m,均为无充填状态,桩底再往下约1 m处,发育有2.9 m高溶洞,深部无溶洞发育。泥灰岩岩层中无岩溶发育,拱座处距离地面约30 m,考虑到岩溶的影响,建议基础深埋至泥灰岩层中。

(3) 库水位涨落对岩溶的长期影响

根据钻孔资料,得到库水位175 m时的地下水位线,145 m水位的地下水位采用《三峡库区三期地质灾害防治工程勘察技术要求》中规定的方法预测溶穴

计算得到马家河滑坡的涌浪最大高度为3.0 m,运动到桥基岸坡处时最大高度为2.3 m,计算结果如表2所示。结果表明,滑坡涌浪对桥基岸坡有一定的影响,取滑坡涌浪产生的最大顺坡向的水压力为46 kPa。

2.4 岩溶

(1) 地表岩溶发育特征

桥址区以灰岩、泥灰岩为主。郑州端地表岩溶发育,顺岩层面有大量的溶蚀现象;万州端溶蚀洼地、落水洞等岩溶地貌和溶洞、岩溶管道等岩溶类型均有发育。线路右侧50 m附近发育溶洞溶槽,并向线路右前方远离线路方向发展。桥位河流上游方向50 m处,在岸坡上出露溶洞,发育高程在120~175 m附近。175 m

发育特征如图9所示。地下水长期作用于岸坡岩体,桩基附近的可溶性岩体发生溶蚀作用,削弱地基的承载能力,桥基岸坡的长期稳定性较差,建议采取相应的工程措施,施工阶段也需采取相应的工程措施。

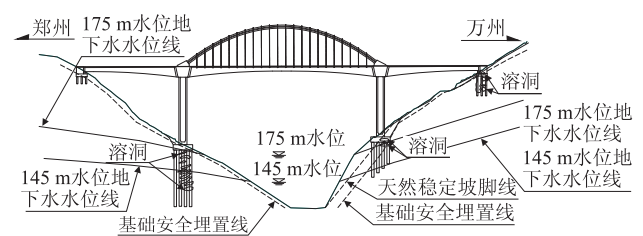


图9 溶穴发育特征

3 稳定性综合分析

神农溪大桥桥基岸坡受到地震、库水位涨落、滑坡涌浪及岩溶的综合影响。滑坡涌浪在桥基岸坡处的高度为2.3 m,水位降落导致万州岸产生动水压力14.2 m,郑州岸11.8 m,滑坡涌浪和库水位下降均导致岸坡岩体产生动水压力,由于滑坡涌浪产生的动水压力小于水位下降,故在稳定性计算中,仅考虑库水位下降的影响,而不用重复考虑滑坡涌浪。

库水位下降产生的动水压力,可等效为渗透力。可在数值分析中作为附加荷载施加给岸坡岩体,以此计算岸坡岩体的应力条件<sup>[5]</sup>。

3.1 经验方法

采用经验方法进行评价,经验方法与文献<sup>[6]</sup>的方

法相同,在稳定坡角线的基础上,根据桥梁荷载强度、桥基宽度、边坡坡度与边坡岩体质量,确定桥梁荷载作用下的安全埋置线。结果表明,万州岸主墩位于安全埋置线以内,其稳定性较好。

### 3.2 数值计算

采用 FLAC3D 建立三维数值模型分析神农溪大桥桥基岸坡的稳定性。模型采用横观各向同性本构模型,由于岩层面为顺层面,各向同性面取岩层面。由于横观各向同性本构模型是一个弹性本构模型,不能反映岸坡岩体的强度特征,故数值计算首先采用 FLAC3D 计算岸坡岩体的力学行为<sup>[7]</sup>,再通过 Mohr 准则二次处理,得到岩体的安全系数及强度特征,评价岸坡的稳定性<sup>[8]</sup>。

根据 Mohr 强度准则,定义安全系数为:

$$K = \frac{\sin\varphi \times (\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \times \text{ctg}\varphi)}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (13)$$

建立的三维数值模型长 1 500 m,宽 200 m,高 565 m。纵向上模型边界距离桥位各 500 m,两侧各延伸 100 m,用于消除边界的影响。模型静力边界条件为法向固定约束边界,动力学边界条件为自由边界条件,模型示意如图 10 所示。模型采用六面体或楔形体实体单元,网格间距 5 m,共划分单元约  $20 \times 10^4$  个,节点  $21 \times 10^4$  个。重力加速度  $9.81 \text{ m/s}^2$ ,桥基荷载作用位置按现行设计的桥基位置。

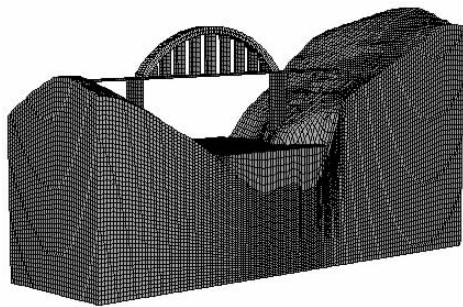


图 10 FLAC3D 数值模型示意图

#### (1) 桥梁荷载

桥梁荷载作用下线路纵断面上的岩体强度特征如图 11 所示。从图中可知,纵向岸坡岩体在桥梁荷载作用下,万州岸主墩基础底部及外侧面进入塑性状态,建议加固处理。万州岸主墩前方地表 180 m 高程附近安全系数整体较低,最凸出处的安全系数小于 1。表明岸坡岩体安全储备不足,随着岸坡的发展或不利工况的发生,可能失稳破坏。

#### (2) 桥梁荷载 + 水位降落

桥梁荷载 + 水位降落下线路纵断面安全系数如图 12 所示。

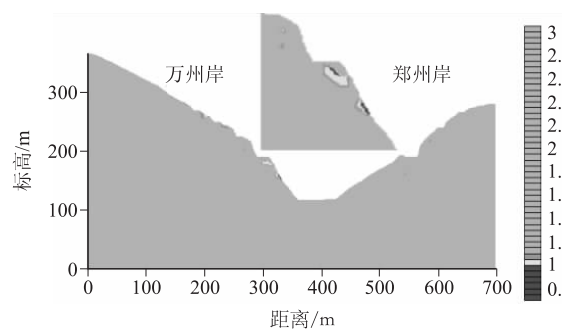


图 11 桥梁荷载下线路纵断面安全系数云图

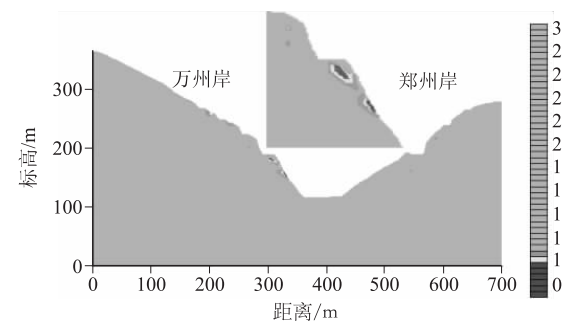


图 12 桥梁荷载 + 水位降落下线路纵断面安全系数云图

由图 12 中可知,万州端拱脚基底塑性区与拱脚前方陡坡塑性区之间的安全系数小于 1.1,两个塑性区靠近,岸坡整体稳定性降低。为避免长期作用下两个塑性区贯通,建议采取一定的工程措施加固。

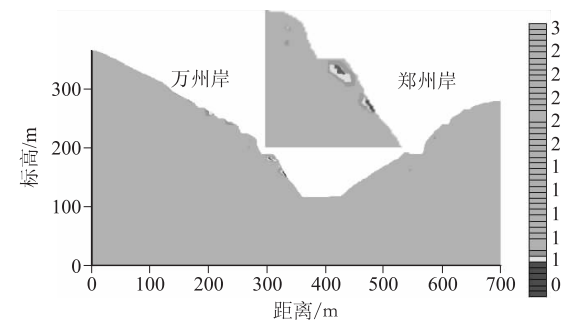


图 13 桥梁荷载 + 地震作用下线路纵断面安全系数云图

#### (3) 桥梁荷载 + 地震

采用动力学模型,分析岸坡在Ⅶ度地震下的动力学响应。取最大应力的 70% 进行地震作用下的应力条件进行强度分析。结果表明,地震工况下万州岸主墩基础底部及外侧面进入塑性状态,建议加固处理。桥梁荷载 + 地震作用下线路纵断面安全系数,如图 13 所示。万州岸主墩前方地表 180 m 高程附近安全系数整体较低,最凸出处的安全系数小于 1。岸坡的塑性状态相交桥梁荷载工况没有明显变化,表明地震对岸坡的稳定性影响小。

(下转第 32 页)

## 4 结束语

铁路系统中枢纽地区研究属于站场设计的重点组成部分和常见工作内容,是典型的系统性设计,新时期站场设计应以运营条件、能力最大化为第一考虑要素,并因地制宜,灵活运用工程类别和措施,优化工程设计<sup>[8]</sup>。研究思路首先应对地区现状进行深层次的理解剖析,包括铁路现状、城市规划、客货需求等方面内容,在剖析过程中发现地区存在的问题,再针对问题提出不同的解决方案,之后在多个方案中从工程投资、运营便利性、适应客货运输需求等方面进行综合比选,本着服务运输,优化系统,着眼发展的理念,进而得出最佳方案。

## 参考文献:

- [1] 班玉英. 广西沿海铁路钦州地区铁路扩能改造方案研究[J]. 科技资讯, 2015, 13(13): 49-51.  
BAN Yuying. Research on Railway Expansion and Reconstruction Scheme in Qinzhou Area of Guangxi Coastal Railway[J]. Science & Technology Information, 2015, 13(13): 49-51.
- [2] 铁道第四勘察设计院. 铁路工程设计技术手册. 站场及枢纽[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.

(上接第25页)

## 4 结论

(1) 神农溪大桥线路规避了线路右侧溶槽及左侧既有公路桥梁的影响, 线路合理。

(2) 神农溪大桥拱座基础底部发育多层溶洞, 基底稳定性差, 建议深埋基础至泥灰岩层中, 且库水位涨落导致消落带岩体溶蚀, 承载能力下降, 长期稳定性差, 建议工程处理。

(3) 经验方法分析表面, 万州岸主墩在基础安全埋置线以内; 数值分析结果表明, 在库水位降落作用及地震作用下, 万州岸主墩基础底部岩体的塑性区与岸坡边坡点的塑性区逐渐靠近。为避免两个塑性区贯通, 引发岸坡整体失稳, 建议采取一定的工程措施。

## 参考文献:

- [1] 梁学战. 三峡库区水位升降作用下岸坡破坏机制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.  
LIANG Xuezhao. Failure Mechanism Research on Bank Slope Under Water Level Fluctuation in the Three Gorges Reservoir Area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [2] 朱红光. 破碎岩体裂隙的流体流动特性研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012.  
ZHU Hongguang. Flow Properties of Fluid in Fracture Rock [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2012.
- [3] 赵志明, 吴光, 王喜华, 等. 金沙江特大桥桥址区主要工程地质问

China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd. Railway Engineering Design Technical Manual. Station and Hub [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.

- [3] TB 10099-2017 铁路车站及枢纽设计规范[S].  
TB 10099-2017 Code for Design of Railway Station and Terminal [S].
- [4] TB 10098-2017 铁路线路设计规范[S].  
TB 10098-2017 Code for Design of Railway Line [S].
- [5] 汪锋华, 高崇华, 赵江林. 高速铁路开行 160 km/h 普速客车对线路状况适应性分析[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(2): 46-49.  
WANG Fenghua, GAO Chonghua, ZHAO Jianglin. Analysis on Adaptability of 160 km/h Common-speed Train Operating on High-speed Railway Line [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(2): 46-49.
- [6] TB 10082-2017 铁路轨道设计规范[S].  
TB 10082-2017 Code for Design of Railway Track [S].
- [7] 彭乾炼. 铁路行车组织(第二版)[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.  
PENG Qianlian. Railway Traffic Organization (Second Edition) [M]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University Press, 2008.
- [8] 杨健. 铁路站场及枢纽设计理念和探讨[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(6): 102-107.  
YANG Jian. Discussion on Design Concept and Method for Railway Station Yard and Terminal [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(6): 102-107.

(编辑: 车晓娟 苏玲梅)

题研究[J]. 人民长江, 2013, 44(1): 38-41.

- ZHAO Zhiming, WU Guang, WANG Xihua, et al. Research of Major Geological Problems of Jinshajiang Bridge [J]. Yangtze River, 2013, 44(1): 38-41.
- [4] 刘艺梁. 三峡库区库岸滑坡涌浪灾害研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.  
LIU Yiliang. Research on Landslide-induced Surge in Three Gorges Reservoir Area [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [5] 蒋爵光, 谢强, 吴光. 北盘江大桥岸坡稳定性及桥基选址的综合分析[J]. 铁道工程学报, 1995, 12(3): 75-81.  
JIANG Jueguang, XIE Qiang, WU Guang. Synthesis Analyses on Stability of River's Bank Slopes and Disposition of Bridge Foundations for Beipanjiang Railway Bridge [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1995, 12(3): 75-81.
- [6] 赵文, 谢强. 宜万线野三河大桥桥基位置选择[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(1): 57-59.  
ZHAO Wen, XIE Qiang. Selection of Foundation Position of Yesan River Bridge on Yichang-Wanzhou Railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(1): 57-59.
- [7] 谢强. 道路岩石边坡坡度确定方法的研究[J]. 中国公路学报, 2000, 13(2): 24-26.  
XIE Qiang. Research on Calculating Method of Rock Slope Angle for Highway and Railway [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(2): 24-26.
- [8] 赵文. 荷载作用下高陡边坡岩体力学行为及桥基位置确定方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.  
ZHAO Wen. Study on Mechanical Behaviour of Rock Mass on High-Steep Slope Under Load and Determination of Bridge Foundation Position [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.

(编辑: 车晓娟 苏玲梅)