

文章编号: 1674—8247(2021)04—0043—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.04.009

瓦厂特大桥桐梓端岸坡稳定性分析

蔡家鹏¹ 贺玉龙² 喻洪平¹ 赵文²

(1. 中铁二院(成都)建设发展有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

摘要:峡谷高陡岸坡稳定性对线路方案和桥基位置的确定具有重要意义,本文在综合地质勘察成果基础上,从岩体结构特征、卸荷裂隙等方面分析了瓦厂特大桥桐梓端的岸坡工程地质条件;在稳定性初步分析基础上,利用考虑地下水作用的岩体质量与稳定边坡坡度之间的关系确定了桐梓端岸坡稳定角;利用应力影响系数与岸坡坡度、荷载强度、桥基宽度之间的关系确定了桐梓端桥基安全距离,为桥位确定和岸坡处理提供依据。经研究发现:(1)根据边坡稳定坡角经验公式,瓦厂特大桥桐梓端天然岸坡稳定角为 72° ,利用桥基安全距离经验公式确定了桥基安全距离为10 m;(2)桐梓岸坡危岩体对11号主墩有重大影响,必须对陡壁危岩进行综合处治。

关键词:瓦厂特大桥;岸坡稳定性;岸坡稳定角;安全距离

中图分类号:U416.1⁺4 **文献标志码:**A

Stability Analysis for Bank Slopes at Tongzi End of Wachang Super Major Bridge

CAI Jiapeng¹ HE Yulong² YU Hongping¹ ZHAO Wen²

(1. CREEC(Chengdu)Construction and Development Co., Ltd., Chengdu 610031, China;
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The stability of high and steep bank slopes is of great significance to the route scheme and the position of bridge foundation. Based on the comprehensive geological survey results, this paper analyzes the geological conditions of the bank slope at Tongzi end of Wachang Super Major Bridge in terms of the structural characteristics of rock mass and the relief joints. On the basis of preliminary stability analysis, the stability angle of bank slope at Tongzi end is determined by using the relationship between rock mass quality and stabilized slope gradient considering the effect of groundwater. The safety distance of the bridge foundation at Tongzi end is determined by using the relationship between stress influence coefficient and bank slope gradient, load intensity, and bridge foundation width, which provides a basis for bridge location determination and bank slope treatment. It is found that: (1) According to the empirical formula of slope stability angle, the natural slope stability angle at Tongzi end of Wachang Super Major Bridge is 72° , and the safe distance of bridge foundation is determined to be 10 m by using the empirical formula of bridge foundation safety distance. (2) The dangerous rock mass on the bank slope at Tongzi end has a great influence on No. 11 main pier, so it is necessary to comprehensively treat the steep dangerous rock.

Key words: Wachang Super Major Bridge; stability of bank slope; stability angle of bank slope; safety distance

新建瓦厂特大桥位于仁怀市,左线桥梁孔跨布置 为 $(8 \times 40) \text{ m} + (95 + 2 \times 180 + 95) \text{ m} + (1 \times 16) \text{ m}$,全

收稿日期:2021-03-29

作者简介:蔡家鹏(1976-),男,高级工程师。

引文格式:蔡家鹏,贺玉龙,喻洪平,等.瓦厂特大桥桐梓端岸坡稳定性分析[J].高速铁路技术,2021,12(4):43-47.

CAI Jiapeng, HE Yulong, YU Hongping, et al. Stability Analysis for Bank Slopes at Tongzi End of Wachang Super Major Bridge[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4):43-47.

长 899.5 m;右幅桥梁孔跨布置为 $(9 \times 40) \text{ m} + (95 + 2 \times 180 + 103) \text{ m} + (1 \times 16) \text{ m}$,全长 941 m。桥梁采用桩基础,主梁采用预应力混凝土连续刚构。桐梓岸 11 号主墩设置在峡谷缓坡地带,12 号桥墩设置在谷深 150 m 的深切峡谷岸坡上。

由于桐梓岸岸坡脚及坡顶均设置桥墩,岸坡稳定性及工程荷载条件下桥基安全距离是制约本桥建设的主要因素,也是岸坡治理工程设计的前提和依据。对该岸坡开展准确的岸坡稳定性分析,将为岸坡工程支护结构及工程荷载条件下桥基的设计参数的选取提供科学依据,对峡谷高陡岸坡线路方案的确定具有重要意义。

1 瓦厂特大桥工程地质概况

1.1 地形地貌

桥址区属低山河谷地貌,地形起伏大,桥梁跨越一深切河谷,相对高差 207 m,桐梓岸岸坡陡峻,悬崖壁立,基岩裸露。

1.2 地层岩性及地质构造

场区上覆第四系冲洪积层(Q_4^{al+pl})黏土、第四系崩坡积层(Q_4^{col+dl})块石土,下伏基岩为二叠系茅口、栖霞组(P_1m+q)灰岩夹泥质类岩、梁山组(P_1l)页岩、炭质页岩,志留系韩家店组(S_1hm)页岩、泥岩夹砂岩、灰岩,志留系石牛栏组(S_1s)灰岩夹泥灰岩、钙质砂岩,如图 1 所示。

区域处于川黔南北向构造带与北东向构造带交接复合部位,南部与早古生代黔中隆起相邻,构造形迹主要为走向北东-南西的挤压面及其相伴的构造形迹,构造线控制测区沟谷、陡崖等地貌发育方向。

桥址区线路左侧约 1 km 近平行线路发育一条区域性逆断层,延伸长度约 10 km,断层产状 $86^\circ \angle 70^\circ$ 。桐梓端左幅左侧约 15 ~ 25 m 近平行线路发育瓦厂断层 F1,为一小型正断层,断层产状 $95^\circ/80^\circ \sim 90^\circ$,延伸长约 530 m,错距约 5 ~ 10 m,断层破碎带宽 2 ~ 5 m,重胶结较好,结合力较好,为局部构造应力场产物。受构造影响,桥区岩层产状略有变化,岩体节理裂隙较发育,延伸性好。

1.3 水文地质

桥址区地下水类型为孔隙水和岩溶水,孔隙水主要赋存于第四系冲洪积层和崩坡积层中,含量甚微。岩溶裂隙水则赋存于灰岩节理裂隙、溶蚀裂隙及溶洞内,富水性与岩溶发育程度密切相关。由于测区溶蚀发育,地表可见岩溶洼地和岩溶溶蚀裂隙,岩溶水属强烈发育。水质类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}、\text{Mg}^{2+}$ 型。

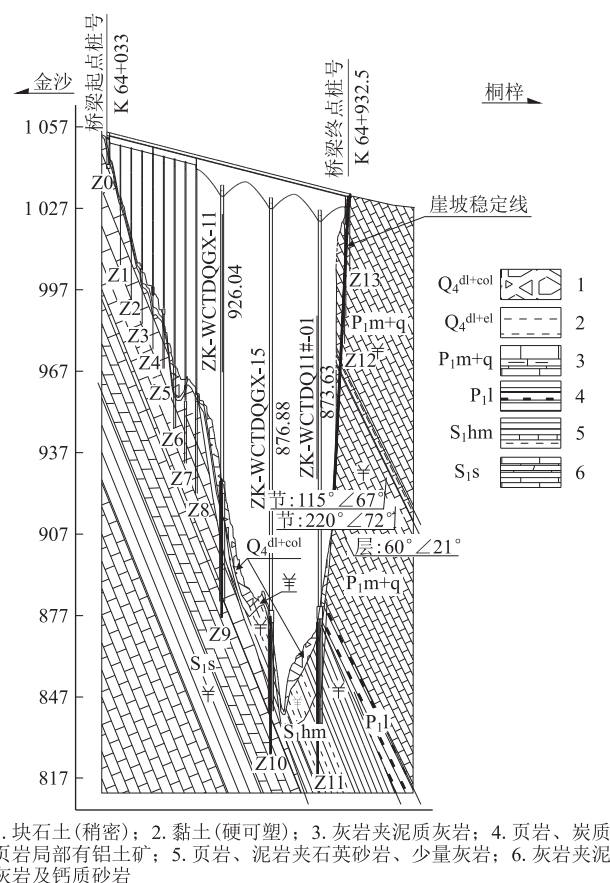


图 1 瓦厂特大桥工程地质纵断面图

1.4 地震

根据桥址区历史地震资料统计,距离桥址区最近的地震是 2015 年 6 月 26 日发生在习水县的 3.0 级地震,距离桥址区约 50 km,对桥位无影响。周边 200 km 范围内最大地震为 2019 年 6 月 17 日发生在四川宜宾长宁县的 6 级地震,同样对桥址区无影响。

根据 GB 18306-2015《中国地震动参数区划图》,场区地震动峰值加速度分区为 0.05g,地震动反应谱特征周期为 0.35 s,抗震设防烈度 6 度,设计抗震分组属第一组,属构造稳定区。

2 桐梓端岸坡工程地质条件分析

2.1 岩体结构特征

瓦厂特大桥桐梓岸陡壁岩性为灰岩夹泥质灰岩,陡壁下方河谷两岸出露砂页岩,具上硬下软的二元结构,其全貌如图 2 所示。陡壁灰岩主要发育有三组贯通度较高的节理 J1、J2、J3。

节理 J1 产状为 $104^\circ \sim 145^\circ \angle 77^\circ \sim 88^\circ$,节理迹长 3 ~ 5 m,间距 120 ~ 180 cm,部分张开,最大隙宽 5 cm,该节理与岸坡面基本垂直。节理 J2 产状为 $168^\circ \sim 174^\circ \angle 75^\circ \sim 85^\circ$,倾向与线路右侧岸坡坡向相近,节理

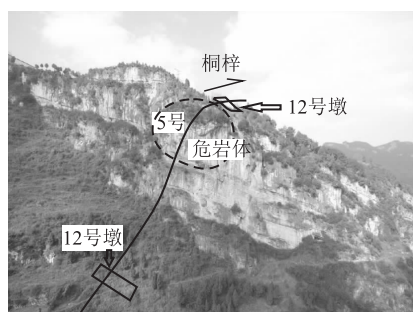


图2 桐梓岸岸坡全貌图

迹长3~5 m,间距120~150 cm,具有卸荷性质。节理J3产状为 $245^{\circ} \sim 265^{\circ} \angle 85^{\circ} \sim 88^{\circ}$,倾向与线路左侧岸坡方向相近,节理迹长2~4 m,间距60~150 cm,具有卸荷性质。J1、J2和J3结构面起伏粗糙,调查期间无水。

受区域陡倾构造节理的影响,岩体沿J2、J3形成陡壁。P₁m地层中发育有数层1~3 m厚泥质灰岩夹层,构成危岩基座。泥质灰岩基座风化溶蚀后形成凹槽,岸坡东侧J1、J2和层理切割出的危岩块体易产生坠落式崩塌破坏。

2.2 卸荷裂隙

桐梓岸左310 m至右300 m段为横断陡崖,陡崖坡度约 $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$,局部呈倒悬状,陡崖最高约110 m。根据地表调查、无人机勘察、地表槽探及物探剖面成果显示,受局部应力场和峡谷卸荷应力影响,在陡崖顶部平行瓦厂断层F1发育有卸荷裂隙,桥址区倾向南方向的结构面多呈张开状态。在本段左侧45 m至右侧30 m范围内地表及陡崖壁上主要发育有数条卸荷裂隙,最深可达20 m、顶部最宽2 m,裂缝发育方向为南西北东向,与线路斜交,近于平行陡崖发育方向,裂缝长3~25 m,普遍贯通性好,大部分裂缝有充填,对坡顶岩体的稳定性影响较大。

2.3 危岩体特征

瓦厂特大桥桐梓岸危岩带位于线路12号墩基础前方陡崖上,由裸露的巨厚层灰岩夹薄层泥质灰岩陡壁构成,陡壁坡度 $80^{\circ} \sim 90^{\circ}$,高度120~140 m,高程912~1 020 m。对桥梁产生影响的宽度为130 m,连续分布,线路左侧约80 m,右侧50 m。危岩体积最小约57 m³,最大约11 000 m³,为5号危岩体。

5号危岩体由厚层至巨厚层灰岩块体构成,块体主要受3组构造节理和层理围切分割。结构面分别为平缓反倾的层理构成危岩块的顶底面,一组与坡面近平行、一组与坡面大角度相交的高陡节理构成危岩体的前后、左右侧面,主要危岩体呈较为规则的六面体,少数块体受坡面变化影响呈后陡前楔的五面体。

3 桐梓端岸坡稳定性初步分析

结合现场调查、资料分析及铁路岩石边坡数据库系统DARS对桐梓岸稳定性进行初步综合评价结果,结合岩体结构特征,生成赤平投影图(下半球投影),如图3所示。

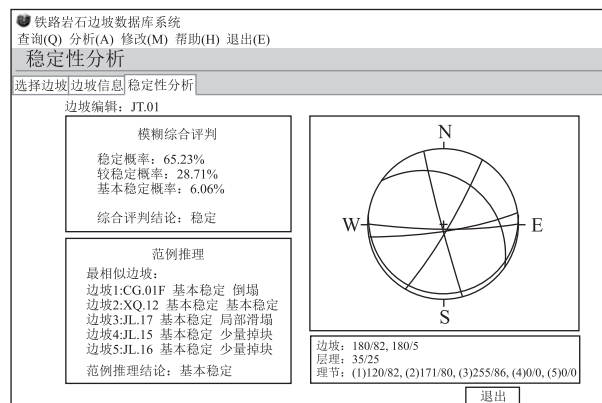


图3 赤平投影图

从图3可以看出,节理J2与边坡坡向一致,J3与边坡坡向垂直。根据DARS软件的分析结果,采用模糊综合评判该边坡稳定概率为65.23%,较稳定概率为28.71%。采用范例推理评判表明,与该边坡最类似的5个边坡均为基本稳定,综合评价桐梓岸边坡整体基本稳定。

桐梓端岸坡陡崖的形成与云贵高原整体抬升及河流下切有关,现场调查表明,陡崖915~1 020 m高程范围发育有危岩带,约16 000 m³,存在崩塌落石的可能性,陡崖下分布岩堆,坡面落石均为该危岩带产生,落石块径最大超过10 m,表明本危岩带稳定性较差。根据危岩带与线路的空间关系,危岩对线路11号主墩有较大影响,对12号墩影响较小。桥基施工加载后,垂直荷载引起的侧向力可能会加剧岸坡岩体的崩塌。

4 岸坡稳定坡角的确定

由于桥基设置于天然岸坡中,桥基岸坡的稳定性与天然岸坡的稳定性密切相关,而天然岸坡的稳定坡角是岸坡在工程使用年限内自然演化后的稳定坡角,在此基础上,可进一步分析在加载条件下,即桥基施工完成后的岸坡稳定性。采用岸坡岩体质量法经验公式确定岸坡在天然状态下的稳定坡角,考虑荷载作用对岸坡岩体应力分布的影响,计算得出荷载作用下桥基安全距离,从而确定桥基安全埋置线^[1-4]。

4.1 天然岸坡稳定坡角的确定

4.1.1 天然岸坡稳定坡角经验公式

西南交通大学蒋爵光教授等人于1989年完成的原铁道部科研课题《铁路岩石边坡坡角的确定及稳定

性分析》研究,提出了铁路岩石边坡稳定坡角的计算公式^[5]:

$$\alpha = \arctan[\gamma_h \times \tan(-40 + 38\lg RQ)] \quad (1)$$

由于岩块的块度与其回弹值的乘积反映了不同强度和组合时的岩体质量,式(1)中将岩体质量定义为: $RQ = R \times \log(D)$ 。

铁路岩石边坡稳定坡角的计算公式在铁路边坡稳定坡角的计算中得到了较多应用,但公式建立时的调查样本较少,主要为铁路岩石边坡,且未考虑地下水等因素的影响。此后,随着边坡样本的积累以及认识的深入,西南交通大学谢强教授等人根据对199个铁路、公路边坡的统计分析、数学拟合,提出了考虑地下水作用的岩体质量 RQ 与稳定边坡坡度之间的经验关系式^[6]:

$$\theta = \gamma_h [14.7 \ln(\gamma_w R \log D) + 13] \quad (2)$$

式中: θ ——岸坡稳定坡角;

γ_w ——地下水折减系数,其取值如表1所示;

γ_h ——高度折减系数,其取值如表2所示;

R ——HT75型回弹仪所测回弹值;

D ——岩石的视块度,由下式求得:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i} \quad (3)$$

式中: d_i ——野外所测岩体的节理间距;

n ——野外所测岩体节理的组数。

表1 地下水折减系数表

含水情况	干燥	潮湿	滴水	线流
γ_w	1~0.9	0.85~0.8	0.8~0.7	0.7~0.5

表2 高度折减系数表

坡高/m	20~30	30~40	40~50	50~60	60~80	>80
γ_h	1.00	0.96	0.90	0.86	0.83	0.80

若野外所测回弹值为岩石风化层的回弹值,则需进行如下转化:

$$R = R_f / f_R \quad (4)$$

式中: R_f ——岩石风化层的回弹值;

f_R ——风化折减系数,其取值如表3所示。

表3 风化折减系数表

等级	未风化	微风化	中风化	强风化
风化系数	>0.95	0.95~0.75	0.75~0.4	<0.4

若回弹仪为HT225型,则要经过下式进行转化:

$$208R_{75} = 194.75R_{225} - 595 \quad (5)$$

自式(2)提出以来,已在水柏铁路北盘江大桥、南昆铁路清水河大桥、成贵高速铁路鸭池河特大桥、朔黄铁路黄河特大桥、郑万铁路大宁河、梅溪河、神农溪特大桥、川藏铁路大渡河、东久曲特大桥等数十座大桥、特大桥工点成功应用。

4.1.2 桐梓端岸坡天然稳定坡角的确定

根据现场调查及测试结构,确定式(2)中的各项参数如表4所示。

表4 岩体平均块度计算表

结构面	产状	结构面间距/cm	岩体块度计算取值/cm
层理	25°~60°∠15°~32°	80~250	160
节理J1	104°~145°∠77°~88°	120~180	
节理J2	168°~174°∠75°~85°	120~150	
节理J3	245°~265°∠85°~88°	60~150	

现场采用HT225型回弹仪测得回弹值,测得桐梓岸基岩的露头的回弹值平均值为41.5。根据式(5),换算得到HT75型回弹仪对应的回弹值为35.9。

岸坡坡面以干燥为主,坡面地下水折减系数 $\gamma_w = 0.9$ 。

高度折减是考虑坡脚应力集中对边坡稳定的影响,但该岸坡岩体为高强度灰岩,天然陡坡经过上百万年地质历史,说明坡脚应力集中对岩体稳定的影响可以忽略,因此可不对高度折减,高度折减系数 γ_h 取1。

汇总上述参数,按照式(2)计算得到瓦厂特大桥桐梓岸坡稳定坡角计算值如表5所示。

表5 岸坡稳定坡角计算汇总表

参数	γ_h	γ_w	R	D/cm	$\theta/^\circ$
取值	1.0	0.9	35.9	160	75.7

考虑坡顶面发育明显的深大卸荷裂隙,需要对稳定坡角计算值进行修正,稳定坡角线应避免卸荷裂隙,修正后的岸坡自然稳定坡度为72°。

4.2 工程荷载条件下桥基安全距离的确定

桥基设置后,在工程荷载作用下,岸坡的整体稳定性取决于桥基工程荷载对岸坡坡面岩体应力状态的影响程度。桥基工程荷载作用所产生的附加应力在高陡岸坡中有一定的影响范围,基于应力影响范围确定桥基位置的基本理论观点认为:若桥基工程荷载对岸坡岩体的应力影响范围未到达岸坡坡面,则岸坡坡面岩体应力不受桥基工程荷载影响,坡面岩体保持原始稳定状态,岸坡不会产生整体破坏,桥基位置是可行的;若桥基工程荷载对岸坡的应力影响范围到达坡面,则认为桥基工程荷载对坡面岩体产生了明显的影响,坡面岩体可能达到不稳定状态,这种情况下,桥基的位置不合理。

大量研究表明,桥基工程荷载作用对岸坡岩体的应力影响范围主要与荷载强度、桥基宽度、岸坡坡度、岸坡岩体质量等因素有关。西南交通大学赵文提出了基于桥基工程荷载作用下岩体应力影响范围确定桥基位置的方法,该方法利用岩体质量与强度参数的关系

及岩体强度与应力影响系数的关系确定应力影响系数的安全限值,并利用应力影响系数与岸坡坡度、荷载强度、桥基宽度之间的关系,提出桥基安全距离经验公式^[7]:

$$S_f = 0.03\alpha^{1.48}[(1 - 0.8655^B)q]^{0.6965} \times (0.5 + RMR/200)^{-0.6965}$$

(6)

式中: S_f ——桥基安全距离,即桥基外缘与坡面的水平距离(m);
 α ——岸坡坡度(°);
 q ——荷载强度(MPa);
 B ——桥基宽度(m);
 RMR ——边坡岩体质量指标。

式(6)适合均质岩体边坡,对于存在卸荷裂隙的岩体高边坡,原则上桥基必须置于卸荷裂隙之后。

作为一种新的高陡边坡桥基位置确定方法,式(6)中的参数在常规勘测中易获取,工程实践中应用较为方便,已在宜万铁路马水河大桥和姚家湾大桥万州岸、水柏铁路北盘江大桥两岸等铁路桥基位置确定中得到了工程验证,如表6所示。

表6 桥基安全距离经验公式应用情况表

工程名称	经验公式值/m	实际设计值/m	岩性
南昆铁路清水河大桥	28.2	32	泥质白云岩
宜万铁路姚家湾大桥万州岸	8.5	7.9	白云质灰岩
宜万铁路马水河大桥万州岸	12	12.5	灰岩

结合现场调查情况和桥基布设位置,通过线路纵剖面或横剖面分析研究桥基是否位于安全距离之内。根据设计资料,桥基桩宽度取3 m,荷载强度取1 MPa。根据现场调查得 $RMR = 52$,由式(6)可得瓦厂特大桥桐梓端桥基安全距离 $S_f = 9.9$ m,取整为10 m。瓦厂特大桥桐梓端岸坡稳定坡角线和桥基安全埋置线如图4所示。

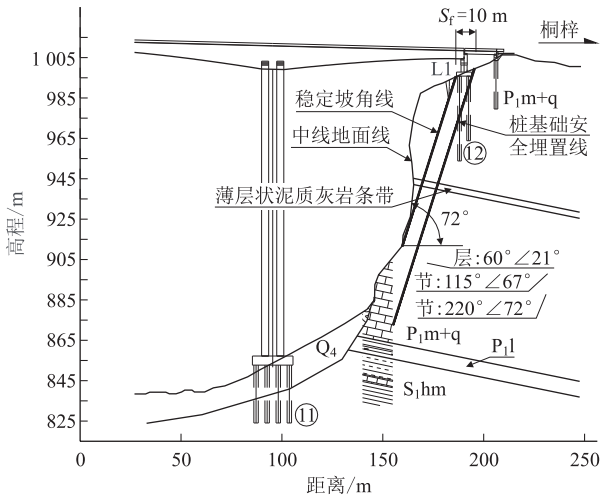


图4 中线纵断面稳定坡角线与桥基安全埋置线图

5 结论

本文通过对瓦厂特大桥桐梓端岸坡稳定性进行分析,得出以下主要结论:

- (1)瓦厂特大桥桐梓端岸自然稳定坡度为72°,12号墩桥基应设置在72°坡度线后安全距离10 m以外,基础应埋置在该安全埋置线以下。
- (2)桐梓岸坡危岩带方量巨大,对11号主墩有重大影响,为确保桥梁安全,不留隐患考虑,危岩陡壁下方不宜设置桥墩。若因线路条件限制,不得不在危岩陡壁下岩堆上设墩时,则必须对陡壁危岩进行综合处治^[8],确保11号主墩安全。

参考文献:

[1] 赵思远. 赤水河特大桥桥基岸坡稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
ZHAO Siyuan. The Research on Bank Slope Stability of Chishui River Grand Bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[2] 李赞. 保腾高速公路龙江特大桥桥基位置的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
LI Zan. Study on Bridge Foundation Position of Longjiang Bridge in Baoteng Expressway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.

[3] 张玲. 朔准线黄河特大桥桥基位置确定及岸坡稳定性分析[D]. 成都: 西华大学, 2007.
ZHANG Ling. Determining of Bridge Foundation Position and Stability Analysis of Huanghe Bridge Slope in Shuo-Zhun Railway[D]. Chengdu: Xihua University, 2007.

[4] 孙春卫, 巫锡勇, 凌斯祥, 等. 深大宽张裂隙条件下岩质桥基边坡稳定性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(11): 2154-2162.
SUN Chunwei, WU Xiyong, LING Sixiang, et al. Analysis of Rock Slope Stability of Bridge Foundation under the Condition of Wide Tension Fissure[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(11): 2154-2162.

[5] 蒋爵光, 等. 铁路岩石边坡[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
JIANG Jueguang. Railway Rock Slope[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1997.

[6] 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.

[7] 赵文, 谢强, 李娅. 高陡边坡桥基安全距离研究[J]. 铁道工程学报, 2006, 23(6): 47-50.
ZHAO Wen, XIE Qiang, LI Ya. Research on the Safe Bridge Foundation Position on High Steep Slope[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006, 23(6): 47-50.

[8] 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.