

# 危岩带下锚碇基坑施工技术及爆破振动监测

胡风明<sup>1,2</sup>, 宋健<sup>1</sup>, 闫磊<sup>2</sup>, 曲振宇<sup>1</sup>, 赵甜甜<sup>1</sup>

(1. 中交一公局重庆万州高速公路有限公司, 重庆市 404100; 2. 重庆三峡学院 土木工程学院)

**摘要:** 万州新田长江大桥北岸锚碇工程位于危岩带下,在爆破开挖扰动下极易出现崩塌,危及施工安全。目前国内外对于危岩带下锚碇基坑施工尚没有可借鉴的经验,鉴于此,该文介绍了危岩带下锚碇基坑的施工技术方案,包括危岩处置和爆破方案设计,并对施工期爆破振动进行了监测。结果表明:所提施工技术方案完全可行,施工期危岩体整体稳定,振动监测指标符合规范要求,确保了锚碇基坑施工期的安全性。

**关键词:** 锚碇; 基坑; 爆破; 危岩带; 振动监测

在跨径 600 m 以上的桥梁中,悬索桥具有很强的竞争优势。悬索桥锚碇是支承主缆、保证全桥主体结构受力稳定的核心部件。锚碇一般分为重力式锚碇、隧道式锚碇两类,相比隧道式锚碇,重力式锚碇对地质条件要求较低,应用更加广泛。基坑支护开挖施工是重力式锚碇基础施工的重要前提。由于锚碇基础庞大,基坑开挖深度可达几十米,且施工周期长,对周边地层形成强扰动,因此,选取合理施工方法,开展施工监控,对保障基坑施工的安全性具有重大意义。

在平原地区,重力式锚碇常采用沉井基础,矩形钢筋混凝土地下连续墙或圆环形钢筋混凝土地下连续墙,基坑开挖难度较小。在长江中上游,多为山岭重丘区,地质情况复杂多变,悬索桥锚碇基坑边坡支护方式和开挖施工方法也因地制宜,多种多样。控制爆破、缓冲爆破、预裂光面爆破以及机械开挖是常用的开挖施工方法。目前,处于危岩带和崩坡积体下的锚碇基坑

较为罕见。该文背景工程北岸锚碇基坑处于危岩带和崩坡积体下,底座岩性为泥岩。为加快施工进度,采用以爆破开挖为主的方式,但是爆破振动易造成周边地层的劣化,诱发边坡失稳和危岩崩塌,对工程安全产生较大威胁。

为了控制爆破的不利影响,毕王乐等研究了水封爆破技术在复杂环境大规模基坑爆破的应用;陈仲超等采用了带缓冲层预裂爆破技术实施深基坑开挖控制爆破,实现了基坑爆破轮廓的平整,取得了良好的破碎效果;廖德川等根据爆破地震波能流密度分布主方向及其大小特征,优化重力式锚碇基坑爆破开挖参数,提出了适宜的爆破施工工艺。该文依托重庆万州新田长江大桥北岸锚碇基坑,开展危岩带下锚碇基坑施工技术和爆破振动监测研究。通过优化施工方案,达到控制爆破的目的,各期振动监测数据符合规范要求,确保了施工期边坡和坡顶危岩体的稳定性。

质量的前提下加快了施工进度,同时零开挖的理念对既有山林进行了有效保护,取得了良好的社会及经济效益。

## 参考文献:

[1] JTG F60—2009 公路隧道施工技术规范[S].  
[2] 张志林. 浅谈山岭区隧道“零开挖单向出洞”施工关键技术[J]. 工程建设与设计,2018(6).

[3] 徐加民. 隧道出洞的设计研究与应用[J]. 铁道工程学报, 2015(3).  
[4] 王鹏,杜文涛,汤明,等. 复杂岩溶区特大断面小净距隧道洞口塌方处治技术[J]. 中外公路,2019(6).  
[5] 韩鑫,叶飞,徐长鑫,等. 钢筋混凝土套拱加固病害隧道安全评价研究[J]. 中外公路,2019(3).  
[6] 黄俊平. 不同地质条件下的隧道初支换拱施工技术及应用[J]. 福建交通科技,2019(2).

收稿日期:2020-05-11

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(编号:2019M663442);重庆市科委、教委研究项目(编号:cstc2018jcsx—msybX0167, KJQN201801223, KJQN201901219)

作者简介:胡风明,男,高级工程师.

## 1 工程概况

新田长江大桥主桥为单跨 1 020 m 钢箱梁悬索桥,桥塔采用门式框架结构,两岸锚碇均采用重力式锚碇,其中北岸锚碇开挖方量约为 11 万  $\text{m}^3$ ,锚碇混凝土体积为 7.03 万  $\text{m}^3$ ,边坡高度为 12.0~52.0 m,临近

危崖侧基坑边坡最大坡度为 1:0.3,单级坡高为 8~10 m,最高处为 6 级边坡。危岩下基坑边坡采用 C30 钢筋混凝土护面墙支护。桥梁总体布置图如图 1 所示,锚碇基坑开挖情况如图 2 所示。

锚碇基坑施工区域上方有一危岩带,崩坡积体上存在有孤石,给锚碇基坑开挖施工带来了安全隐患,需开展排危和安全防护措施后才能进行开挖作业。

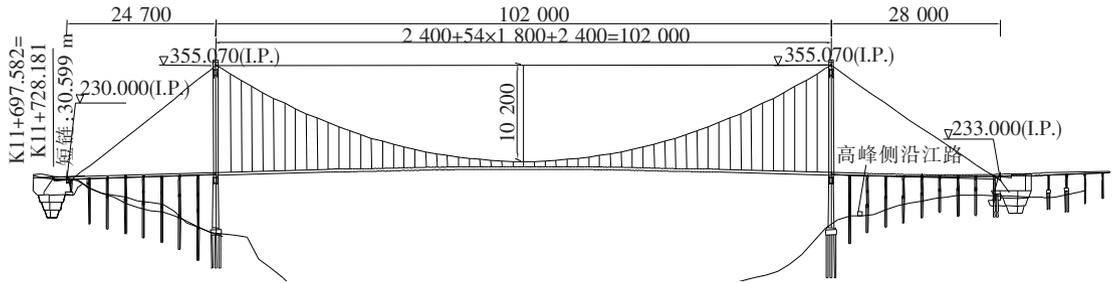


图 1 桥梁立面(除标高单位为 m 外,其余:cm)

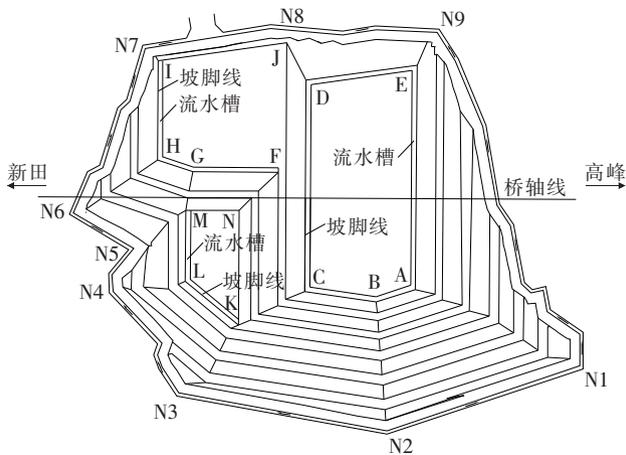


图 2 锚碇基坑开挖平面

该工程地质的特殊性在于:① 地层复杂,砂岩、砂质泥岩、泥岩等均有发育,呈现互层状分布;② 由于泥岩和砂岩的风化差异,砂岩常出现陡崖和危岩带,崖下发育第四系崩坡积体;③ 泥岩为典型的软弱岩层,具有长期流变、遇水软化的特点,且其上覆盖层较厚,三峡库区的地质滑坡常与该层有关。

## 2 施工技术要点

危岩在当前状况下处于平衡状态,但从长期看随着风化的加剧,岩腔逐渐扩大,岩体劈裂逐渐发展,会产生崩塌,形成崩坡积体。即使在当前状态下,在如爆破开挖等强外力扰动下也可能打破平衡状态,形成崩塌灾害,严重危及工程安全。因此,处置危岩病害,控制爆破

振动是避免危岩体崩塌,提高施工期安全性的关键。

### 2.1 危岩处置

危岩处置须在基坑开挖前完成,从源头上提高危岩的抗崩塌能力。危岩处置遵循“松石铲除,岩腔支撑,危石锚固”的原则。

**松石铲除:**危岩体表面由于风化程度较重,往往已经形成较明显的裂隙,块体体积一般不大于 5  $\text{m}^3$ ,虽然在平衡状态,但在外力扰动下极易崩塌,视为松石。对于松石采用人工或机械的方式予以清除。

**岩腔支撑:**危岩体岩性为砂岩,其底座岩性为泥岩。因风化差异,在泥岩层容易形成岩腔,深度为 0.3~2 m。对于小于 0.5 m 的岩腔,在清理完碎屑后灌注 C25 混凝土封闭岩腔;而深度大于 0.5 m 的岩腔,采用 C25 钢筋混凝土立柱支撑,立柱间距 2 m,岩腔高度小于 4 m 时,立柱截面尺寸为 0.3 m×0.3 m,大于 4 m 时,立柱截面尺寸为 0.4 m×0.4 m,并在立柱间增加横撑。

**危石锚固:**由于长期的地质活动,砂岩层易发育形成竖向的裂隙面,进一步发育成孤石体。为确保危崖长期稳定性,采用了锚索加固的方法。单根锚索采用 3× $\phi$ 15.24 钢绞线,斜向下 10°打入岩体内部,深度为 20 m,锚固段长度为 9 m,张拉力为 585 kN。锚索横向间距为 2~3 m,竖向间距为 4 m。

危岩处置完成后在危岩带下设置被动防护网,防止因为降雨、微小振动引起危岩块体滚落基坑施工区域。在一轮爆破完成后,指派专门人员对危岩带进行巡视检查,发现松动的岩石及时处置。

## 2.2 爆破施工技术

基坑遵循自上而下分层开挖方式,表层松散的崩塌积体和强风化泥岩层可采用机械开挖。但是随着深度的增加,岩土体强度不断增大,采用机械凿挖影响开挖效率。为此,采用爆破开挖配合机械凿壁的方式。

炸药产生爆炸后,装药室附近岩石中形成冲击波,随着冲击波的向外传播应力幅值不断衰减,波速不断降低,最后演变成应力波;应力波进一步传播、衰减,演变成地震波。根据周围岩石的破坏程度,将装药爆炸对岩石作用分为以下4个区域:空腔区、破碎区、径向裂缝区和弹性振动区。在弹性振动区,GB 6722—2014《爆破安全规程》对一般工业建筑物爆破振动安全允许标准作出了规定,但是对于危岩体,并没有相关规定,经综合安全评价危岩体的安全振速控制指标确定为1.0 cm/s,民房控制爆破振动速度为0.5 cm/s。

距离危岩带20.0~50.0 m范围内采用机械凿打为主,辅助 $\phi 40$  mm浅孔丝裂爆破,在距离危岩带50.0 m范围外采用 $\phi 70$  mm常规松动控制爆破。均控制危岩体爆破振动速度小于1.0 cm/s。锚碇爆破分层时从北侧中心开始向“三方边沿靠近”,若为泥岩靠近边坡、坡面时预留2.5~3.0 m机械凿打,若为砂岩时预留1.0~1.5 m机械凿打,基底预留1.0 m采用机械凿打。

$\phi 70$  mm孔常规爆破参数如下:钻孔超深 $h=0.3$  m;炮孔深度 $L=H+h=2.3\sim 3.3$  m;炮孔间距 $a=2.3$  m,炮孔排距 $b=1.8$  m;炮孔倾角 $\alpha=80^\circ\sim 90^\circ$ 。2.0 m孔单孔装药量为2.4 kg;2.5 m孔单孔装药量为3.2 kg;3.0 m孔单孔装药量为3.6 kg。炸药选用2号岩石乳化炸药,药卷直径为55 mm。为了提高安全度,采用1、3、5段控制总起爆药量,一次单段最大起爆药量 $Q_{\max}=18.0$  kg。

## 3 爆破振动场模拟

根据爆破振动理论分析,炸药引发的荷载可简化为三角形的荷载曲线。该文在对爆破峰值荷载进行确定时计算方法如下:

(1) 确定不耦合装药条件下炸药爆轰压力

$$P_e = \frac{\rho_0 D_0^2}{4} \times \frac{(d_b/d_c)^6}{2} \quad (1)$$

式中: $\rho_0$ 为炸药密度,对于2号岩石乳化炸药取1 100 kg/m<sup>3</sup>;  $D_0$ 为炸药爆速,对于该例取4 200 m/s;  $d_b$ 为药卷直径;  $d_c$ 为炮孔直径。根据式(1)计算得 $P_e =$

$5.71 \times 10^8$  Pa。

(2) 确定初始波峰压力

$$P_r = \frac{2\rho_r C_{er}}{\rho_r C_{er} + \rho_0 D_0} \times P_e \quad (2)$$

式中: $\rho_r$ 为岩石的密度,该例为2 300 kg/m<sup>3</sup>;  $C_{er}$ 为岩体中纵波波速,该例取值4 000 m/s。根据式(2)计算得 $P_r = 7.60 \times 10^8$  Pa。

(3) 震动圈上的等效压力

$$P = P_r (r_1/r_0)^{-\alpha_1} (r_2/r_1)^{-\alpha_2} \quad (3)$$

式中: $r_0$ 为装药半径; $r_1$ 为冲击波作用半径,取值为3倍炮孔半径,即0.105 m; $r_2$ 为裂隙区半径,取值为3倍炮孔半径,即0.35 m; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 为冲击波和应力波衰减指数, $\alpha_1 = 2 + \mu/(1 + \mu) = 2.23$ ,  $\alpha_2 = 2 - \mu/(1 - \mu) = 1.57$ ,其中 $\mu$ 为岩石泊松比,取值为0.3。根据式(3)计算得 $P = 5.77 \times 10^6$  Pa。

(4) 爆破振动场有限元模拟

岩土计算选用Mohr—Coulomb弹塑性材料模型,计算模型设定边界条件为底部固定,周围四侧为黏性边界以减小边界反射波的影响,采用Midas NX软件,建立有限元模型如图3所示。采用1、3、5段控制总起爆药量。图4为爆破荷载应力时程曲线,最大爆压为9.88 MPa,上升时间为3 ms,下降时间为12 ms,总时长为1 s。爆破荷载施加在一级边坡(靠近危崖侧),监测点定为危岩底部,施加荷载位置与监测点水平距离约为50 m。

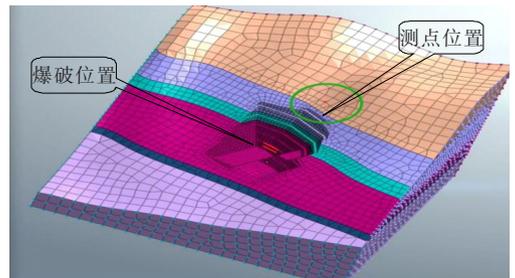


图3 爆破模拟有限元模型

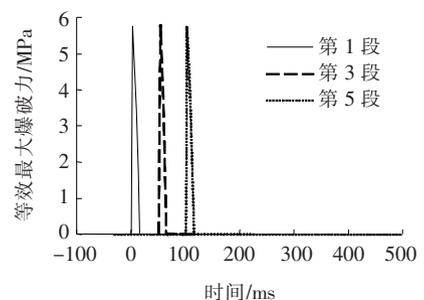


图4 爆破荷载应力时程曲线

计算流程如下:①边坡开挖前进行重力平衡和位

移清零;② 对第 6、5、4、3、2 台阶进行静力开挖支护计算;③ 在第 1 台阶上施加 1、3、5 段爆破荷载,进行振动场反演。

爆破数值计算可以得到任意时刻的边坡振动速度场,提取 250 ms 和 500 ms 边坡振动速度场,如图 5 所示。爆破荷载先升高后降低,振速和荷载基本同步变

化,有所滞后。爆破振动从起爆点开始逐渐向外传播,振动速度先快速提高后逐渐降低。尽管有场地地形的限制,爆破振动形成放射性的圆环振动场。由于自由面的增多和振动波的反射加强,爆破振动波在台阶处振动速度较大。

提取测点处 3 个方向的速度时程曲线,见图 6。

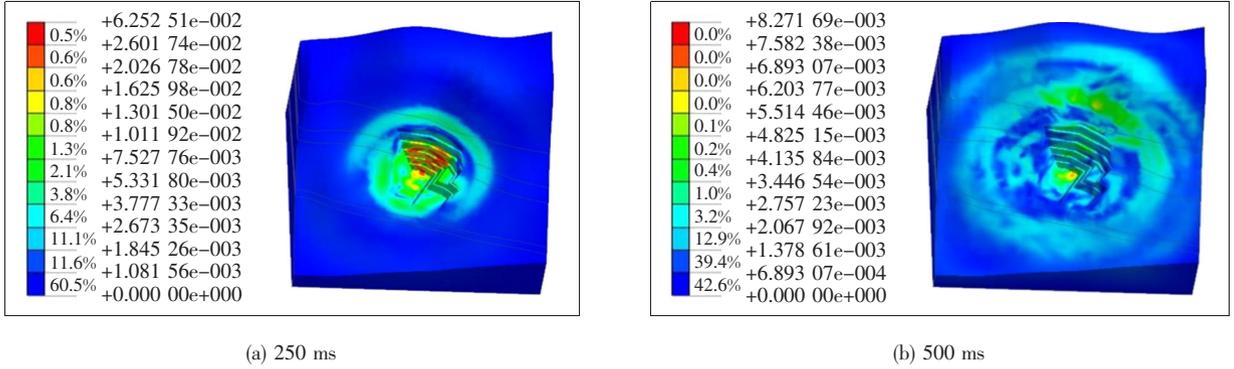
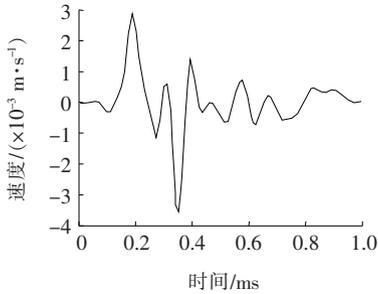
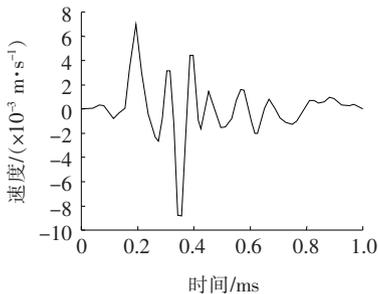


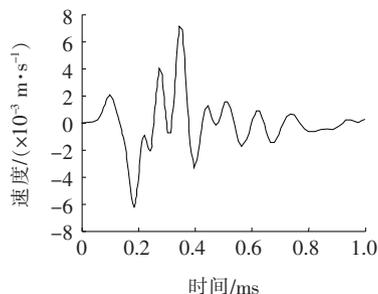
图 5 不同时刻基坑边坡振速云图(单位:m/s)



(a) T1 方向(水平切线方向)



(b) T2 方向(水平法线方向)



(c) T3 方向(垂直方向)

图 6 测点三方向速度时程曲线

T1 为水平切线方向,T2 为水平法线方向,T3 为垂直方向。T1 方向速度最大绝对值为 0.36 cm/s,T2 方向速度最大绝对值为 0.89 cm/s,T3 方向速度最大绝对值为 0.72 cm/s。3 个方向的速度可合成总速度,在 0.36 s 时达到最大值,最大值约为 1.19 cm/s。按照 GB 6722—2014《爆破安全规程》在安全性判定时,取 3 个方向的最大值,由此,数值分析结果表明:该爆破方案引起的危岩振动速度小于 1 cm/s,符合规范要求。

### 4 爆破振动监测

为确保爆破施工的安全性,对基坑高边坡和危岩进行了振动监测,在第 2 级和第 1 级基坑爆破时,自爆破区域向危岩处布置了 2 道测线,共 6 个测点。1# 测点位于 3 级边坡顶,2# 测点位于 5 级边坡顶,3# 测点位于危岩底部。现场测线测点布置见图 7。测试仪器采用符合 GB 6722—2014《爆破安全规程》要求的三向

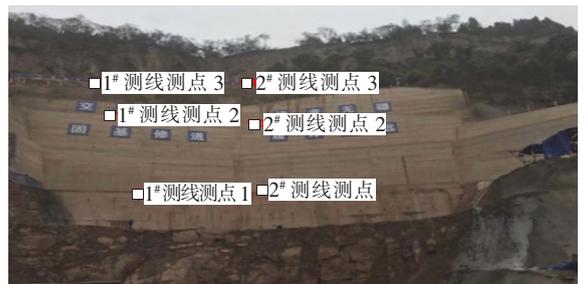


图 7 振动监测测线测点布置

振速仪完成,拾振器的 $x$ 方向指向爆破中心。

1、2级基坑爆破监测共进行7次。图8为7次监测中,1#测线径、切及竖向的速度时程曲线的最大情况。

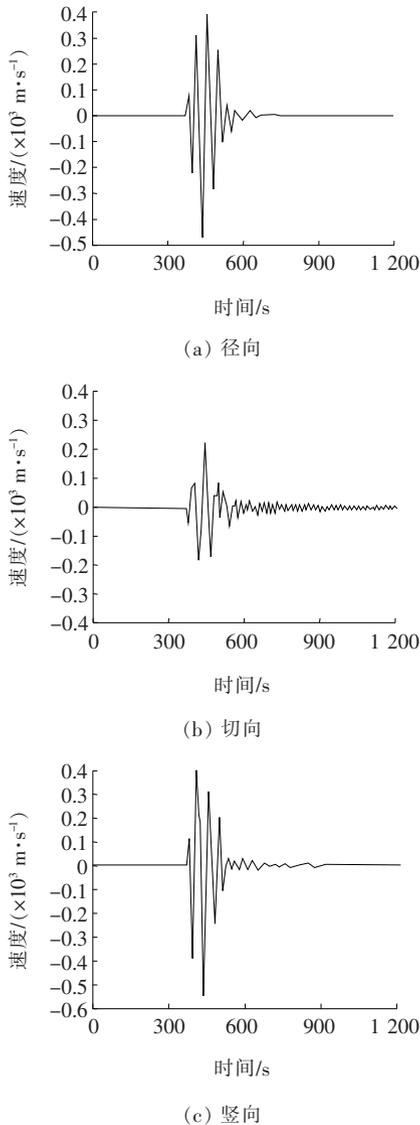


图8 1#测线测点3典型三向振速时程曲线

由图8可知:基岩底部1#测线测点3的径向速度峰值为 $-0.389\sim 0.864$  cm/s,切向速度峰值为 $0.225\sim 0.766$  cm/s,竖向速度峰值为 $0.403\sim 0.916$  cm/s;2#测线测点3的径向速度峰值为 $-0.455\sim 0.897$  cm/s,切向速度峰值为 $0.313\sim 0.827$  cm/s,竖向速度峰值为 $0.397\sim 0.879$  cm/s;振动速度波的主频为 $23\sim 56$  Hz。监测结果表明:基岩底部三向振动速度的最大值均小于 $1$  cm/s,爆破对基岩影响较小。目前,爆破开挖施工已经结束,爆破期间危岩带整体稳定,未产生崩塌落石等不良地质灾害。爆破施工在确保危岩体稳定的前提下,大大加快了基坑开挖进度。

## 5 结语

针对悬索桥锚碇基坑位于危岩带下的特殊情况,提出首先采用“危石铲除、空腔封闭、危石锚固”的处理方案,然后针对施工爆破可能诱发危岩崩塌的不利条件,提出丝裂爆破,常规松动爆破和机械凿壁相结合的方案。安全评价给出危岩的振速控制标准值为 $1$  cm/s,据此设计了单次爆破炸药量不超过 $18$  kg,并通过数值分析方法模拟了爆破振动波的传播,分析结果证实方案合理可行。现场实施爆破时,对基岩底部的振速进行了同步监测,结果表明:多次振速监测的最大值均小于 $1$  cm/s,确保了爆破施工期危岩的稳定性。目前,基坑工程已顺利施工完毕,提出的施工方案既保证了施工速度,也确保了施工安全,效果良好,可为同类工程提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 谢博识,饶建辉.跨越千米圆梦江阴——江阴长江公路大桥通车20周年回顾与展望[J].中国公路,2019(11).
- [2] 郭竞宇.江苏润扬长江公路大桥北锚碇基础围护结构设计优化[D].成都理工大学硕士学位论文,2003.
- [3] 王琨,张太科,陈顺超.广州珠江黄埔大桥悬索桥锚碇基坑支护受力和变形特性分析[J].西南大学学报(自然科学版),2010(7).
- [4] 崖岗,韩冬冬,石海洋,等.虎门二桥坭洲水道桥重力式锚碇基础稳定性研究[J].公路,2017(4).
- [5] 谢辉明.宜昌长江公路大桥北锚碇施工[J].湖南交通科技,2002(3).
- [6] 涂哲,李帅帅,李海瑞,等.清水河大桥锚碇总体施工技术[J].公路,2015(10).
- [7] 马冲,詹红兵,姚文敏,等.爆破振动作用下含软弱夹层边坡稳定性及安全判据[J].爆炸与冲击,2018(3).
- [8] 费鸿禄,苑俊华.基于爆破累积损伤的边坡稳定性变化研究[J].岩石力学与工程学报,2016(S2).
- [9] 邓鲲,谢上飞,贺炜.澧水特大桥危岩稳定性分析及施工监测研究[J].公路工程,2013(5).
- [10] 王智德,马祖遥.爆破荷载作用下顺层岩质边坡的损伤特性研究[J].中国安全科学学报,2018(11).
- [11] 谢福君,张家生,陈俊桦.考虑岩体完整程度影响的爆破破裂范围[J].中南大学学报(自然科学版),2019(6).
- [12] 唐海,易帅,王建龙,等.考虑裂隙岩体爆破损伤的装药结构研究[J].爆破,2019(1).
- [13] GB 6722—2014 爆破安全规程[S].