

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.026

引用格式: 姚涛, 刘坤, 杜红亮, 等. 竖井开挖中溜渣井防堵塞研究[J]. 公路与汽运, 2024, 40(3): 122-127.

Citation: YAO Tao, LIU Kun, DU Hongliang, et al. Research on anti-clogging of slag pit in shaft excavation[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 122-127.

竖井开挖中溜渣井防堵塞研究*

姚涛¹, 刘坤¹, 杜红亮², 傅鹤林³, 常小兵³

(1. 湖南省高速公路集团有限公司, 湖南 长沙 410031; 2. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 361001; 3. 中南大学, 湖南 长沙 410075)

摘要: 竖井开挖中溜渣井堵塞是特长隧道施工迫切需要解决的难题。文中以芷铜(芷江—铜仁)高速公路椿木山特长隧道竖井开挖为例, 分析溜渣井堵塞原因, 从岩块角度分析溜渣井堵塞产生机制; 根据现场爆破块石粒度和爆破参数, 采用 Swebrec 模型对岩体爆破碎片的块度分布进行预测, 并与采用 Split-Desktop 软件对堆石场爆破碎片块度分布的实测结果进行比较, 验证采用 Swebrec 模型进行爆破岩体块度控制的可行性。结果表明, Swebrec 模型可有效指导爆破参数选择, 通过合理选择不同岩体信息参数下爆破参数控制爆破后岩石块度, 避免竖井因块体过大而发生堵塞。

关键词: 隧道; 竖井开挖; 溜渣井堵塞; 爆破工程

中图分类号: U445.92

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)03-0122-06

隧道施工安全风险因素来源众多, 许多学者对隧道施工风险进行了研究^[1-2]。竖井是特长隧道工程建设中的重要组成部分, 竖井施工同样涉及施工安全^[3-4]。竖井开挖方法较多, 其中反井钻机法是一种较有效的方法, 其施工流程为采用较小的钻头从地表向下钻至平洞, 在底部采用较大的钻头扩挖形成溜槽, 然后从上往下分段爆破开挖, 爆破后的岩块通过溜槽下放, 经平洞运到洞外^[5-7]。施工时, 溜槽常出现堵塞, 影响施工安全, 也影响工程进度^[9]。江西洪屏抽水蓄能电站工程 1[#] 竖井开挖中初次爆破就发生堵井事故^[10], 吴庄铁矿 6[#] 溜渣井^[11]、十房(十堰—房县)高速公路通省隧道 1[#] 通风竖井^[12]及厄瓜多尔 CSC 水电站 1[#] 和 2[#] 竖井^[13] 施工中都出现过堵塞现象, 导致施工成本显著增加。溜渣井堵塞处理方法有人工吊渣法^[14]、竹竿爆破法、气球悬挂炸药爆破法^[15]等, 危险系数高, 处置困难, 且多基于工程经验, 多为被动处理, 在问题发生后才开始处理和抢救, 未能做到主动预防、及时预警。这是由溜渣井堵塞原因分析不到位、堵塞机制不明确所致, 有必要对竖井开挖中溜渣井防堵塞技术进行研究。本文依托芷铜(芷江—铜仁)高速公路椿木山特长隧道竖井开挖工程, 分析溜渣井堵塞原因, 从爆破岩块体大

小角度分析堵塞机制, 并对现场爆破块体颗粒进行粒度统计分析, 通过 Swebrec 模型和图像处理软件进行处理, 确定竖井开挖合理爆破参数, 研究溜渣井防堵塞方法。

1 溜渣井堵塞原因分析

在竖井开挖过程中, 爆破形成的岩块大小、尺寸常不易控制, 爆破不够充分时很容易形成具有局部凸起的大型岩块, 这类岩块互相咬合, 从而在狭小的溜渣井内形成咬合拱(见图 1); 咬合拱为后续小型岩石、石灰、水组成的混合物的堆积提供平台, 随着堆积物不断固结与压实, 形成黏性拱; 咬合拱与黏性拱共同作用, 在溜渣井内形成稳定的堵塞体(见图 2)。

咬合拱的形成是溜渣井发生堵塞的前提, 它与

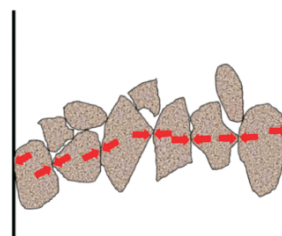


图 1 咬合拱受力示意图

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978668); 中铁一局集团有限公司科技项目(ZT-2022-JS-04)

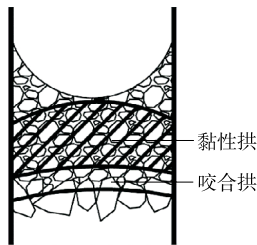


图 2 溜渣井堵塞体模型

爆破岩块与溜渣井的相对尺寸有关。将溜渣井直径 D 与岩块的最大尺寸 d_{\max} 的比值作为堵塞的控制指标 $\rho, \rho = D/d_{\max}$ 。对于常见的圆柱形溜渣井,若爆破形成的岩块为球体, ρ 大于 2.8 时容易发生堵塞;若爆破形成的岩块为立方体, ρ 大于 4.0 时容易发生堵塞。由于爆破所形成块体的形状不易控制,工程中通常将 ρ 的最小值取为 3.0,当溜渣井直径 D 与岩块的最大尺寸 d_{\max} 的比值大于 3.0 时,须加强监控以防溜渣井产生堵塞现象,同时对岩块进行二次破碎。

溜渣井堵塞体的性状主要表现为咬合拱、黏性拱及咬合拱与黏性拱的组合。将溜渣井的堵塞按照溜渣功能划分为排渣区、溜渣区及出渣区 3 个区域,针对不同堵塞部位分析溜渣井堵塞原因(见表 1)。

表 1 溜渣井堵塞原因分析

堵塞区域	堵塞原因	堵塞体的性状
排渣区	爆破排渣量过大	咬合拱
	人工排渣量过大	咬合拱
溜渣区	排渣井壁风化坍塌	先咬合拱后黏性拱
	爆破损坏溜渣井壁	先咬合拱后黏性拱
	岩渣块度过大	先咬合拱后黏性拱
	井壁石灰粘连	黏性拱
出渣区	出渣不及时	咬合拱

表 2 溜渣区与出渣区堵塞时的疏通方法

疏通方法	适用区域	适用范围	方法概述
人工溜渣法	溜渣区	堵塞岩渣较松散,堵塞段长度较小	人工系安全带清理松散的岩渣
爆破振动法	溜渣区	堵塞岩渣较松散,堵塞段长度较小	将单个炸药放于堵塞区域,利用爆破振动疏通岩渣
钢管护筒法	溜渣区	堵塞岩渣较密实或堵塞段长度较大	将钢管打入堵塞段底部,在钢管内放入大量炸药进行爆破,疏通岩渣
正井法	溜渣区	竖井断面较大,可以容纳出渣设备	将溜渣导井堵塞段以上部分扩大开挖至堵塞的岩渣顶部,采用钻孔法或地质钻法进行疏通
钻孔爆破法	溜渣区	堵塞段长度较小,且堵塞较密实	人工系安全带至堵塞区域,钻孔爆破
地质钻法	溜渣区	堵塞段长度较大,且堵塞较密实	将小型钻机运至掌子面钻通堵塞段

2 溜渣井疏通措施

溜渣井是一种细长构筑物,导致其堵塞的因素较多。根据施工经验对竖井堵塞区域和堵塞程度进行划分,竖井堵塞部位一般包括 3 个,分别为上井口、下井口、中间部位,堵塞长度为 3~8 m 属于轻度堵塞,堵塞长度为 8~15 m 属于中度堵塞,堵塞长度在 15 m 以上为重度堵塞。上井口属于排渣区,下井口属于出渣区,中间部位属于溜渣区(见图 3)。石渣经过排渣区进入溜渣井,在自身重力作用下进入溜渣区,最终进入排渣区巷道,由装载机运出底部巷道。溜渣区为爆破后岩渣堆积区域,起堆渣、提供溜渣作业面的功能,溜渣区为溜渣井溜渣的主要功能区,起引导、运输石渣的作用。出渣区的功能是运出岩渣,在平洞中将石渣运出竖井,避免石渣堆积。

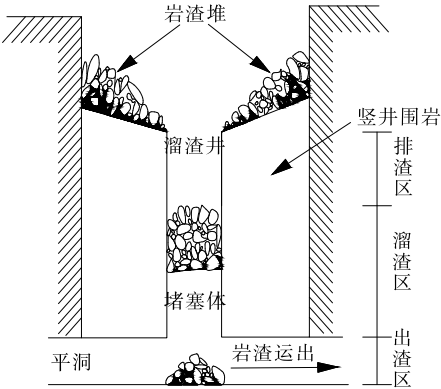


图 3 溜渣井不同区域划分

对于堵塞较浅的溜渣井,其堵塞位置在排渣区,可以通过单管炸药爆破进行疏通。而对于堵塞较深的溜渣井,其堵塞位置通常在溜渣区与出渣区,可采用钢管护筒法、钻孔爆破法、地质钻法、长杆法等方法进行疏通(见表 2)。

续表2

疏通方法	适用区域	适用范围	方法概述
开挖施工支洞法	溜渣区	有平行竖井建设的情况下适用	在平行竖井向堵塞竖井的堵塞段开挖支洞,形成工作面,再人工钻孔爆破
长杆法	出渣区	井底以上 15 m	人工利用长杆顶举炸药包到堵塞面,利用爆破振动疏通岩渣
氢气球法	出渣区	井底以上 15~25 m	将炸药绑在氢气球上,利用气球浮力运至堵塞面,利用爆破振动疏通岩渣
火箭弹法	出渣区	井底以上 15~25 m	采用民用火箭弹发射炸弹疏通岩渣

3 基于图像识别技术的岩石爆破最大块度控制

3.1 岩体块度数据处理

根据现场采集的图片,通过 Split-Desktop 图像处理软件进行分析。Split-Desktop 主要用于爆破后爆堆表面块度统计分析,它可自动校正,提取岩块信息,并给出块度分布曲线。其最大优点是可以对机器预处理照片进行人工处理,准确描绘岩石层叠的边界,得到块度分布数据,且结果较精确。

从隧道口弃石场拍摄爆破岩体碎片的高清照片,使用 Split-Desktop 软件对爆破碎片进行扫描,根据参照物的实际尺寸建立比例尺,自动划分岩体轮廓,方便后续对划分不精确的区域手动进行调整,最终获得碎块累积曲线图。以 V 级竖井围岩为例,根据实地采集的现场照片进行颗粒块度分析,采用的参照物为粉色水杯,长度为 19 cm。图 4 为 V 级围岩爆破碎片现场图像;图 5 为采用自动划分加手动调整方式对识别有误的边界进行删除,同时对遗漏的边界进行补充后的图像;图 6 为对大石块和细颗粒进行颜色填充后的图像。通过收集现场爆破碎片图像可以进一步校准岩石系数,确保模型曲线更有效、更真实。通过软件分析,得到图 7 所示 V 级围岩碎片累积曲线。



图 4 V 级岩体爆破碎片现场图片

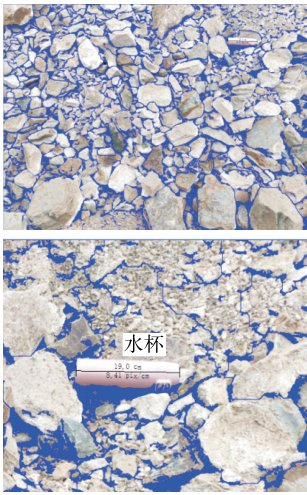


图 5 完善后的岩体碎片及参照物图像

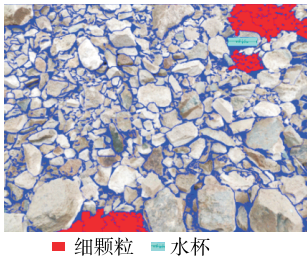


图 6 突出显示的岩块和细颗粒

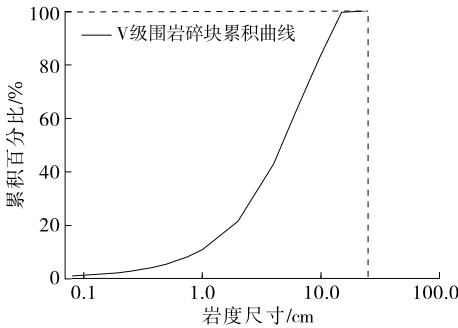


图 7 V 级围岩爆破碎片累积曲线

将图 7 所示碎片累积曲线的详细数据导出到 Excel 软件中进行处理,结果见表 3。

表 3 V 级围岩岩体块度数据

岩体尺寸/cm	通过率/%	岩体尺寸/cm	通过率/%
25.00	100.00	1.00	10.61
15.00	99.39	0.75	7.95
10.00	83.43	0.50	5.29
8.00	73.74	0.38	3.96
6.00	61.07	0.25	2.64
4.00	42.63	0.19	1.97
2.00	21.27	0.08	0.83

3.2 岩体块度预测

岩石爆破碎块尺寸受炸药参数、炸药性能和爆破设计参数等多种因素的影响,较复杂,实际工程中考虑每个方面的因素既不现实也无必要。本文采用预测精度较高、所需参数简单且易获得的 Swebrec 模型对岩体爆破碎片的块度分布进行预测,并通过与实测结果对比验证模型的预测效果。

Swebrec 模型有 3 个参数(Swebrec 模型也称为三参数碎片尺寸分布模型),其中平均碎片大小 X_{50} 和均匀性指数 n 分别按式(1)、式(2)计算。该模型使用 X_{50} 的 50% 作为中心参数,增加了爆破碎片最大块度 X_{\max} 的最大极限值。

$$X_{50} = A \cdot q^{-0.8} \cdot Q^{1/6} \cdot \left(\frac{115}{E}\right)^{19/30} \quad (1)$$

式中: A 为岩体系数,中硬岩取 7,有裂隙的硬岩取 10,无裂隙的硬岩取 13; q 为炸药单耗(kg/m^3); Q 为单孔装药量(kg); E 为炸药的相对威力,铵油炸药取 100,水胶炸药取 110,TNT 炸药取 115。

$$n = \left[2.2 - 1.4 \left(\frac{B}{D}\right)\right] \cdot \left[\frac{1+S/B}{2}\right]^{0.5} \cdot \left(1 - \frac{W}{B}\right) \cdot \left(\frac{|L_B - L_C|}{L} + 0.1\right)^{0.1} \cdot \frac{L}{H} \quad (2)$$

式中: B 为最小抵抗线,一般采用经验公式确定轮廓孔最小抵抗线,计算公式见式(3),也可按经验取 10~12 倍孔径; D 为钻孔直径(mm); S 为孔距(m); W 为钻孔偏差; L_B 为孔底装药长度(超深, m); L_C 为炮孔装药长度(m); L 为底板标高以上的药包长度(m); H 为开挖深度(m)。

$$B = \frac{Q}{qal_b} \quad (3)$$

式中: a 为炮孔间距; l_b 为炮孔长度。

Swebrec 模型的第三个参数 b 为定义曲线波动的计算参数,按式(4)计算。

$$b = \left[2\ln 2 \cdot \ln\left(\frac{X_{\max}}{X_{50}}\right)\right] \cdot n \quad (4)$$

通过 x 尺寸筛网的岩体碎片的百分比 P_x 按下式计算:

$$P_x = \frac{1}{1 + [\ln(X_{\max}/x)/\ln(X_{\max}/X_{50})]^b} \quad (5)$$

爆破碎片最大块度 X_{\max} 可取最小抵抗线与孔距中较小值。

利用 Swebrec 模型可以很好地拟合不同类型的碎片数据,对于两三个数量级的各种碎片大小,拟合相关系数 R^2 可达到 0.997,能有效预测细粒度。

根据表 4 所示椿木山隧道爆破参数,按上述公式计算,得到均匀性指数的计算参数及计算结果(见表 5)。

表 4 椿木山隧道爆破参数(V 级围岩)

炮眼名称	段别	眼数/个	眼深/ m	孔径/ m	装药量/kg 单孔 总量	炸药单耗/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
	1	10	1.3	0.042	0.6 6.0	
辅助眼	3	16	1.2	0.042	0.6 9.6	0.76
	5	26	1.2	0.042	0.6 15.6	
周边眼	7	50	1.2	0.042	0.3 15.0	

表 5 均匀性指数计算参数及计算结果

炮眼名称	段别	计算参数					均匀性 指数 n
		B/D	S/B	W/B	$ L_B - L_C /L$	L/H	
	1	0.019	1.125	0.045	0.58	0.833	1.416 1
辅助眼	3	0.021	1.000	0.033	0.55	0.833	1.388 5
	5	0.021	1.000	0.036	0.55	0.833	1.385 2
周边眼	7	0.017	0.714	0.143	0.55	0.833	1.143 3

参数 X_{\max} 取最小抵抗线与孔距中较小值,取值见表 6。以段位 1 辅助眼为例计算波动参数 b 的值。先按式(1)计算 X_{50} :

$$X_{50} = A \cdot q^{-0.8} \cdot Q^{1/6} \cdot \left(\frac{115}{E}\right)^{19/30} = 10 \times 0.76^{-0.8} \times 0.6^{1/6} \times \left(\frac{115}{110}\right)^{19/30} = 11.765$$

段位 1 的波动参数 b 为:

$$b = \left[2\ln 2 \cdot \ln\left(\frac{X_{\max}}{X_{50}}\right)\right] \cdot n = 2\ln 2 \times$$

$$\ln\left(\frac{0.8}{11.765}\right) \times 1.416 1 = -5.277$$

同理求得段位 3、段位 5 的 $X_{50} = 11.765$,段位 7

的 $X_{50}=10.482$, 其波动参数 b 值见表 6。

采用 Swebrec 预测模型, 运用 MATLAB R2019b 绘制椿木山隧道竖井 4 个段位处岩体爆破碎片粒度曲线, 结果见图 8。

对竖井开挖面不同爆破区粒度曲线进行建模后, 使用每个爆破区的岩体体积(每一循环进尺相同, 只需考虑爆破面面积)进行加权平均, 得段位 1

表 6 Swebrec 模型计算参数及计算结果

炮眼名称	段别	X_{\max}	n	b
辅助眼	1	0.8	1.416 1	-5.277
	3	0.9	1.388 5	-4.948
	5	0.9	1.385 2	-4.936
周边眼	7	0.5	1.143 3	-4.823

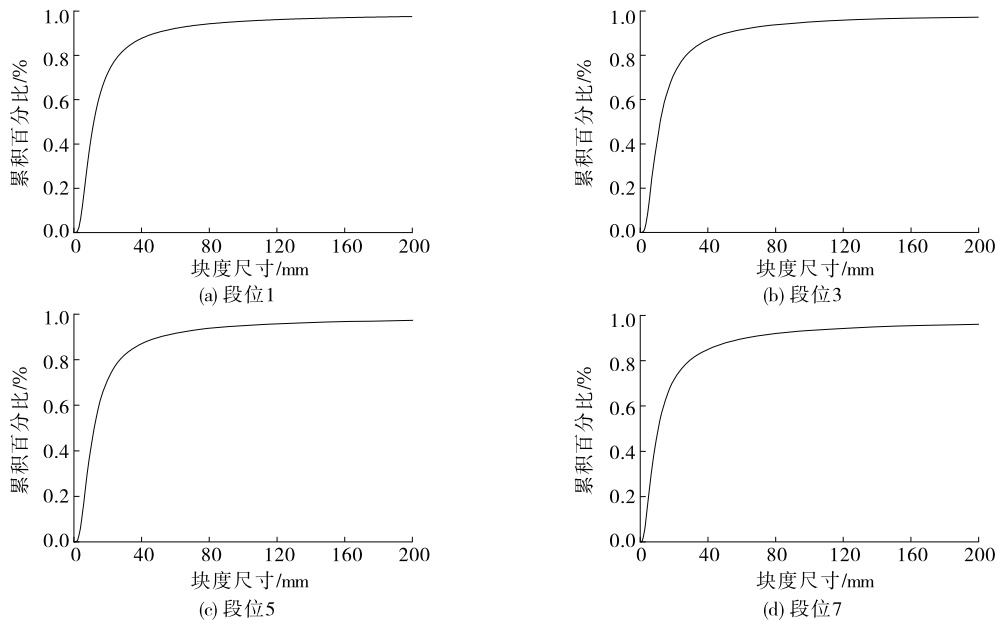


图 8 Swebrec 模型预测的爆破碎片累积曲线

断面面积为 6.16 m^2 (占 7%)、段位 3 断面面积为 15.38 m^2 (占 16%)、段位 5 断面面积为 29.37 m^2 (占 31%)、段位 7 断面面积为 43.15 m^2 (占 46%)。据此得到整个竖井断面 V 级围岩的最终粒度曲线, 它与实测粒度曲线的对比见图 9。

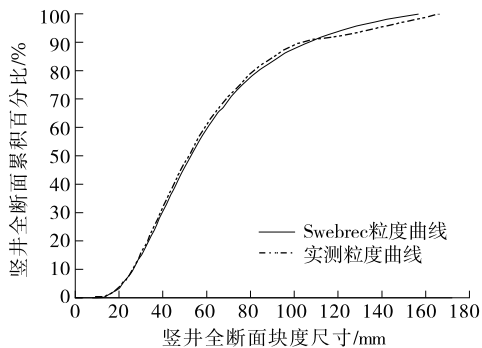


图 9 竖井全断面粒度曲线对比

将 Swebrec 模型预测的粒度曲线与实测粒度曲线进行比较, 两者变化趋势大体一致, 验证了 Swebrec 爆破碎片分布预测模型的适用性。根据图 9, 可将粒度曲线分为三段: 第一段曲线对应的块

度尺寸为 $0.08 \sim 2.50 \text{ cm}$, 属于细颗粒, Swebrec 模型预测累积百分比与实测结果吻合较好; 第二段曲线对应的块度尺寸为 $2.50 \sim 10.00 \text{ cm}$, 属于碎石, 模型预测结果与实测结果较接近; 第三段曲线对应的块度尺寸为 $10.00 \sim 16.00 \text{ cm}$, 模型预测结果略大于实测结果, 但在误差允许范围内。

Ⅳ级、Ⅲ级围岩的爆破碎片分布预测过程同上, 不再赘述。Swebrec 模型定义 X_{\max} 取最小抵抗线与孔距中较小值, 符合爆破岩体碎片小于孔距和最小抵抗线的事实, 预测结果与实测结果接近。实际应用中, 岩土体的物理力学性质可以通过地质勘探资料获得, 工程技术人员通过改变爆破参数(炮眼数、孔深、孔径、孔间距、炸药单耗、单孔炸药量等)可获得一系列碎块累积曲线, 从防止溜渣井堵塞的角度选取最优曲线, 从而逆向确定竖井各级围岩下爆破参数。利用 Swebrec 模型可以很好地进行爆破岩体块度控制。

隧道岩体爆破碎片运输过程中或在弃土场堆积过程中会存在细颗粒沉入粗颗粒底部的情况, 在利

用 Split-Desktop 软件进行块度识别时,可能无法对细粒层进行完整预测,实际的细颗粒占比可能高于软件识别结果。

4 结论

本文以椿木山隧道竖井开挖工程为依托,分析溜渣井堵塞的原因与形成机制,提出防止溜渣井堵塞的控制指标,并根据溜渣井不同位置的堵塞情况提出不同疏通措施。根据现场爆破块石粒度统计资料和爆破参数,采用 Swebrec 模型对岩体爆破碎片的块度分布进行预测,并采用 Split-Desktop 软件对堆石场爆破碎片块度分布进行实测,模型预测结果与实测结果的变化趋势一致,模型预测结果准确,可有效指导爆破参数选择,缓解溜渣井堵塞问题。该方法适用于采用反井钻机法施工的岩质隧道通风竖井建设。

参考文献:

- [1] 王平让,豆海涛.基于风险理念的公路隧道预防性养护管理研究[J].公路与汽运,2022(1):155-158.
- [2] 孙州.基于施工过程的大断面隧道变形动态释放规律分析[J].公路与汽运,2022(2):139-142+157.
- [3] 赵顺义,赵学礼.公路隧道通风竖井及支护施工技术研究[J].公路工程,2017,42(3):192-197.
- [4] 孙臣生.藏山隧道竖井施工技术研究与实践[J].现代隧

道技术,2019,56(4):149-153.

- [5] 程守业.铁路隧道深竖井反井法施工技术研究及应用:以当金山隧道为例[J].隧道建设(中英文),2018,38(9):1560-1565.
- [6] 陈光明,韦薇,胡益华.特长公路隧道斜井、竖井设计技术与经验[J].隧道建设,2015,35(4):342-349.
- [7] 于见水,王新,李维远.反井钻机导孔偏斜机理分析[J].科学技术与工程,2016,16(2):120-124.
- [8] 李佩宁,徐娇,王丽华.反井法在洞宫山隧道通风竖井施工中的应用[J].公路与汽运,2012(6):216-218.
- [9] 朱家林,尹雪保,谢长水.水电站大直径竖井堵井事故处理[J].中国水能及电气化,2014(8):6-9.
- [10] 夏万求.竖井开挖堵井原因、预防措施及处理方案[J].云南水力发电,2014,30(2):52-53+62.
- [11] 刘慎刚,厉洪涛.小直径溜井堵塞治理方案[J].金属矿山,2012(12):156-157.
- [12] 李广健.公路隧道大口径深竖井施工技术及支护参数研究[D].西安:长安大学,2017.
- [13] 杨继华,魏斌,齐三红,等.厄瓜多尔 CCS 水电站超深竖井反井钻机法施工关键问题研究[J].现代隧道技术,2018,55(6):183-190.
- [14] 刘富强,龙益.竖井开挖施工中堵井预防和处理技术[J].中国水运(下半月刊),2010,10(8):169-170.
- [15] 吴波,张欢,王槐鸥.石碌铁矿高深溜井堵塞原因分析及处理实践[J].现代矿业,2019,35(7):108-110+114.

收稿日期:2023-05-20

(上接第 107 页)

范围内,可用于拱桥拱肋吊装中索力预测。

参考文献:

- [1] 陈列勇,陈玉相,闫小军,等.中承式钢箱拱桥缆索吊装关键施工技术研究[J].工程质量,2023,41(11):77-81.
- [2] 孙志伟,邬晓光.基于应力平衡法的系杆拱桥吊杆力的优化[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(5):704-707+713.
- [3] TIAN Z C, PENG W P, ZHANG J R, et al. Determination of initial cable force of cantilever casting concrete arch bridge using stress balance and influence matrix methods[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(11):3140-3155.
- [4] 颜东煌,李学文,刘光栋,等.用应力平衡法确定斜拉桥主梁的合理成桥状态[J].中国公路学报,2000,13(3):49-52.

- [5] 张龙威,尹诗定,陈宁,等.基于迭代加权最小二乘的桥梁动态称重理论与试验研究[J].振动与冲击,2023,42(12):187-193.
- [6] 闫宇,张广超,孙博文,等.滨海桥梁钻孔灌注桩泥浆处理技术及工程应用研究[J].公路与汽运,2023(6):109-113.
- [7] 李加武,张斐,吴拓.桥梁断面颤振导数识别的加权最小二乘法[J].振动工程学报,2017,30(6):993-1000.
- [8] 周泳涛,李毅谦,周军生,等.云南小湾大桥主拱钢箱加工与制造[J].世界桥梁,2005,33(2):16-19.
- [9] 李华健,王旭东,覃鑫林,等.BIM 技术在波形钢腹板 PC 箱梁桥施工新工艺发展中的应用[J].公路与汽运,2023(6):118-122.
- [10] 周泳涛,周军生,周洲,等.云南小湾大桥关键施工工艺[J].桥梁建设,2002,32(6):54-57.

收稿日期:2023-11-23