

大断面蚀变软岩引水隧洞施工方案适宜性研究

闫生存¹, 徐继敏¹, 薛瑞华², 佟强², 何本国²

(1. 四川华能泸定水电有限公司, 四川 泸定 626100; 2. 东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:以甘孜硬梁包水电站超长引水隧洞工程为依托,采用三维 FLAC3D 数值模拟,对不同施工方法进行了对比分析,验证开挖方法的合理性。研究发现蚀变岩隧洞上半洞开挖,以拱顶沉降为主,建议加强拱顶沉降监测。塑性区最大深度在拱肩位置,成为失稳的关键部位,需确保拱肩锚杆的施工质量。根据数值模拟计算结果显示,预留核心土法塑性区厚度 6 m,最大变形为 55 mm,台阶法开挖塑性区厚度 15 m,最大变形为 102 mm。因此确定预留核心土法为合理的施工方法。

关键词:大断面;软岩施工;数值模拟;蚀变岩;方案比较

中图分类号:TV651.3

文献标识码:A

文章编号:1001-2184(2023)01-0001-05

Comparative Study on the Suitability of Construction Scheme of Large Section Altered Soft Rock Headrace Tunnel

YAN Shengcun¹, XU Jimin¹, XUE Ruihua², TONG Qiang², HE Benguo²

(1. Sichuan Huaneng Luding Hydropower Co., Ltd., Luding Sichuan 626100;

2. Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819)

Abstract: Based on the ultra-long headrace tunnel of Yingliangbao Hydropower Project in Ganzi Prefecture, the three-dimensional FLAC3D numerical simulation is carried out to compare and analyze the different construction methods, and verify the rationality of the excavation method. It is found that the arch deformation is the main factor in the excavation of the upper half of the altered rock tunnel. It is suggested to strengthen monitoring of arch deformation. The maximum depth of the plastic zone is at the spandrel position, which becomes the key position of instability, therefore, the construction quality of spandrel bolt needs to be ensured. According to the numerical simulation results, the thickness of the plastic zone of the reserved core soil method is 6 m, and the maximum deformation is 55 mm. The thickness of the plastic zone of the step excavation method is 15 m, and the maximum deformation is 102 mm. Therefore, the reserved core soil method is determined to be a reasonable construction method.

Key words: Large section; Soft rock construction; Numerical simulation; Altered rock; Scheme comparison

0 引言

为防止隧洞大变形灾害的发生,已经有许多学者依托不同的工程项目并分析其特点,研究总结了隧洞围岩大变形的发生机理,并提出相应的控制技术,如孔超等^[1]通过数值模拟分析,计算隧道拱顶及边墙处的围岩特征曲线,并根据隧道变形及破坏特征建立隧道支护变形失稳模型,研究了支护承载及失稳机理。王明胜^[2]通过数值模拟和现场试验两种方式,对三台阶法和超前导洞扩挖法两种方案的大变形控制效果进行对比分析,

确定了合理经济的施工方案。陶志刚^[3]等以木寨岭公路隧道为研究工程背景,利用 FLAC3D 建立具有高恒阻大变形的 NPR 锚索结构单元,计算结果成功应用于施工实践,优化了施工方法与支护方案。戴永浩^[4]等采用现场监测与有限元反演分析的方法,确定了大梁隧道软岩流变力学参数,分析了隧道开挖后的位移、围岩损伤范围,为后续施工、支护过程提供了理论支持,成功解决了大梁隧道内破碎软岩施工、支护的难题。

1 蚀变岩隧洞工程地质环境

引水线路布置于德威闸址~观音崖段之间的大渡河左岸山体中,两条引水隧洞平行布置,平均

收稿日期:2022-08-05

华能集团总部科技项目:HNKJ21-HF246《水岩耦合作用下引水隧洞蚀变岩时效变形规律与衬砌支护动态设计研究》技术研究资助

长度约 14.4 km,洞径 13.1 m。除过沟段隧洞埋深相对较浅外,一般垂直埋深约 500~600 m,最大埋深超过 800 m,隧洞洞身低于地下水位,属超深埋长引水隧洞。

1.1 地质构造

大渡河断裂在工程区内主要发育于右岸。由工区西侧的泸定韧性剪切带和工区右岸得妥脆性断裂组成,二者延伸方向近 SN,大体平行,相距 600~1 200 m,大渡河断裂总体倾向西,在厂区下游花石包附近自右岸斜穿河谷至左岸。综合首部、厂址区、加郡沟平硐勘探揭示及公路沿线、沟内等地表出露统计归纳表明,引水隧洞沿线未发现较大规模的断层,主要以Ⅲ、Ⅳ级结构面为主,走向以 NE、NW 为主,次为 NEE、NWW 向,均以中陡倾角为主,部分沿辉绿岩脉上、下接触面发育。

1.2 地层岩性

引水线路沿线基岩由前震旦系澄江期康定杂岩组成,主要岩性为闪长岩、花岗岩等,属坚硬岩。并伴随辉绿岩脉、花岗细晶岩脉、闪长岩脉等各类脉岩穿插,其中辉绿岩脉在引水隧洞隧址区内分布较广,与围岩接触关系主要有焊接式接触、裂隙式接触和断层式接触三种类型。初期地质勘探显示,脉岩出露宽度最大达到了 26 m,最小只有 0.5 m,但是延伸长度长,最长延伸量达上百米,一般呈现陡倾角产出。

1.3 地形地貌

从引水线路沿线地形地貌整体分析,山体连续、浑厚,V型谷主要出现在海拔 1 600 m 以下,1 600 m 以上呈多级谷肩状,显示 2~3 层宽谷地貌和夷平面地貌特征。隧洞沿线除磨子沟、茶园沟、加郡沟等外的冲沟区及山体基岩露头均远高于隧洞顶高程,没有低于洞顶的埋藏谷。据勘探揭示,引水隧洞穿越数条深切过沟段的上覆基岩厚度均在 60 m 以上。

2 三维隧洞数值模型

施工方法选择多与围岩条件相关,在围岩条件较差的隧道施工中常采用台阶法和预留核心土法。针对蚀变岩软弱围岩的典型工况,采用 FLAC^{3D} 软件对台阶法和预留核心土的施工过程进行了数值模拟。结果表明:采用预留核心土法施工最大拱顶沉降、最大水平收敛均小于采用台

阶法施工,预留核心土法能更好地控制围岩变形,更适合于该工程地质软弱围岩隧道施工。该工法已在硬梁包引水隧洞实际工程中应用,取得了良好效果。

2.1 拟采用的施工方法

为研究大断面软岩区间在不同施工方法下的围岩变形规律,模拟仿真计算采用台阶法、预留核心土法两种不同的开挖方式。

2.2 系统支护方式

系统锚杆内插于两榀钢支撑之间,间距为 1.2 m,排距为 0.75 m,隧洞顶拱 120° 拱脚和 240° 底脚附近左右两侧各设 2 排 $\Phi 32$, $L=9$ m 的锚杆,其余位置布设 $\Phi 28$ mm 长度 $L=6$ m 的锚杆,锚杆外露于喷混凝土表面 0.3 m,蚀变岩洞段初期安全支护均采用 I20 钢支撑支护,根据规范要求及现场实际情况,喷混凝土厚度初喷 5 cm+复喷 22 cm(覆盖钢支撑 2 cm),V 类围岩系统支护方式示意图见图 1。

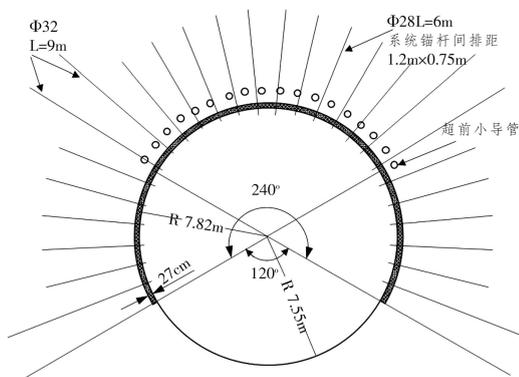


图 1 V 类围岩系统支护方式示意图

2.3 计算模型及参数

对施工期间遇到的蚀变岩体,采用台阶法与预留核心土法进行比较分析,对引水隧洞 2-2 号上游面桩号 2+276m~2+306m 段:开挖揭露围岩软弱蚀变岩体,隧洞埋深 500 m 左右,地应力仅考虑自重应力作用。

台阶法施工将隧洞上层分为 2 层,以隧洞 120° 范围为台阶界限,每一循环进尺取 0.75 m,超前支护方式与系统支护方式与核心土法一致,在上层上台阶开挖 3.0 m 后进行上层下台阶的施工。为避免边界约束效应影响,数值模型计算范围边界控制在左右两侧边界距离隧洞中心轴线 3~5 倍洞径。Y 轴正向规定为隧洞开挖方向,竖

直向上为 Z 轴正向,隧道开挖方向向右为 X 轴正向,整个数值模型在 X、Y、Z 三个方向尺寸为 126 m×30 m×126 m,模型左、右、前、后和下部边界限制位移,上表面设置自重应力边界条件。

预留核心土法施工开挖进尺在 0.75 m,上部弧形导坑与上台阶预留核心土错距 3 m,上台阶预留核心土与下台阶预留核心土同样错距 3 m。

围岩采用摩尔-库伦模型进行分析,初期支护的刚性支护作用采用实体弹性单元模拟^[5],开挖过程中,初期支护主要包括喷射混凝土、钢拱架与系统锚杆,其中对初喷混凝土与钢拱架的支护形式进行一定的简化,钢拱架的支撑作用不进行单独计算,将钢支撑的作用折算在初期喷射的混

凝土中。锚杆单元采用 FLAC3D 自带的 CABLE 单元进行模拟。超前注浆对围岩的加固效果,可通过提高围岩力学参数的方式进行模拟,根据以往隧道工程经验与现场超前支护效果,小导管注浆的作用效果可将围岩力学参数提高 30%。围岩及相关材料物理力学参数见表 1。

初期支护等效公式可采用下式计算:

$$E = E_0 + \left(\frac{S_g \times E_g}{S_c} \right) \quad (1)$$

式中 E 为折算后喷射混凝土弹性模量, GPa; E_0 为原混凝土弹性模量, GPa; S_g 为钢拱架横截面积, m^2 ; E_g 为钢材弹性模量, GPa; S_c 为喷射混凝土截面积, m^2 。

表 1 围岩及材料物理力学参数表

材料类型	密度 / $kg \cdot m^{-3}$	弹性模量 / GPa	泊松比	内聚力 / MPa	内摩擦角 / °
蚀变岩	24 00	0.3	0.35	0.2	26
I20a 型钢	7850	206	0.167	/	/
超前注浆区	3120	0.39	0.35	0.26	33

2.4 计算模型的监测点布置

为了比较两种施工方法的可靠性,在开挖模型 $Y=15$ m 处位置设置监测点位,记录开挖过程中的拱顶沉降与水平收敛变形。

3 模拟结果对比分析

3.1 围岩变形差异性

为了比较不同施工方法的可靠性,选取中间断面 $Y=15$ m 断面的拱顶沉降进行分析。分别监测每一步开挖后对监测点位变形的影响,两种施工方法下的拱顶监测点和水平变形收敛监测点的(A 点及 B 点) 沉降曲线和收敛变形曲线见图

2、3。每一开挖步为一个循环进尺。

两种不同施工方法下的拱顶沉降变形规律相似,其中采用台阶法进行开挖时,隧洞拱顶沉降与水平收敛产生较大的变形量值大,采用预留核心土法开挖时拱顶最大沉降由 10.23 cm 减小至 5.49 cm,数值上减少了近 42%,水平收敛变形量值减少了近 50%;采用预留核心土法时,最大的拱顶沉降发生在拱顶中部,沉降最大值为 55 mm。

根据变形量来看,预留核心土法更适合该蚀变软弱岩体,能有效地控制周围岩体的变形发展。

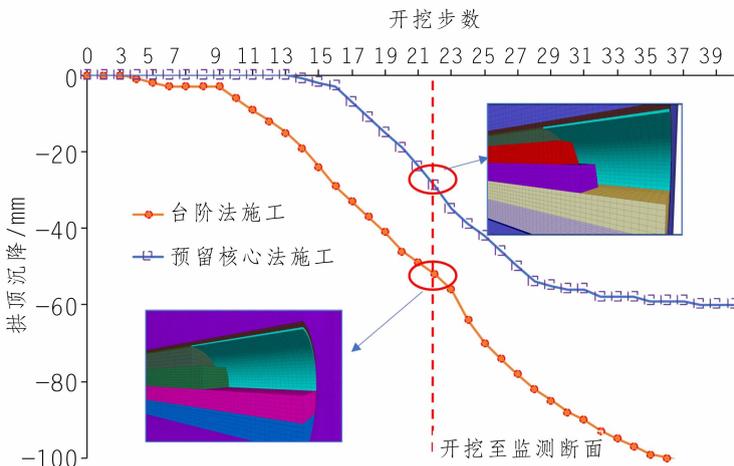


图 2 不同施工方法的拱顶监测点沉降

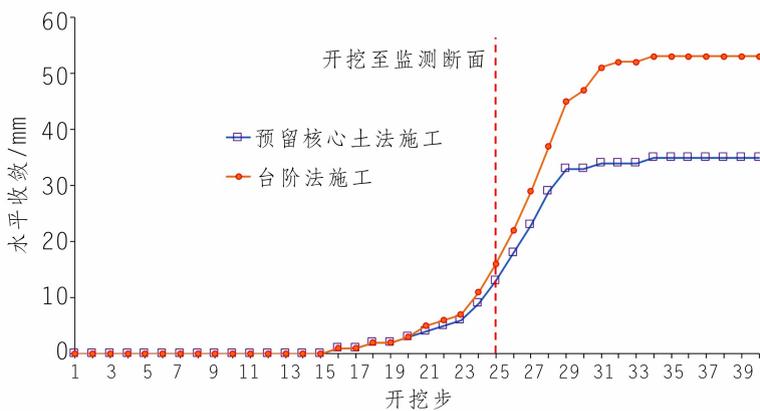


图3 不同施工方法的水平收敛监测点变形

3.2 围岩塑性区的对比分析

不同的开挖方法下,洞周围岩多为塑性剪切破坏,在隧洞周围围岩的塑性区范围发展具有较大的差异性,在上层开挖后,拱肩、拱脚的塑性区范围均较大,利用台阶法开挖时,拱肩的塑性区发育范围达到了15 m,拱脚处塑性区达到了18 m左右。利用预留核心土法进行施工时,拱肩的塑性区深度在6 m左右,拱脚处的塑性区深度约为5 m左右。

相比于台阶法开挖,采用预留核心土法时,由于开挖一步支护一步,施作的初期支护能及早起到支撑受力作用,从而土体应力释放率较小,达到控制围岩变形与限制围岩塑性区进一步扩展的作用。

根据数值模拟计算结果分析来看,针对软弱蚀变岩体,开挖工法尽量采用少扰动,勤支护的方式,但是由于隧洞穿越岩体本身条件差,加上施工过程中的爆破扰动、地下水侵蚀等作用,会使隧洞变形量和塑性区进一步加大,因此隧洞在开挖过程中多次发生塌方失稳,为此,将收集塌方破坏段实际围岩条件、地质因素等实际工况,并根据数值模拟结果塑性区分布特点,分析隧洞开挖后失稳的内在原因,积累的处理经验可为后续施工及类似工程提供指导作用。

4 硬梁包引水隧洞破坏特征与处置措施

4.1 蚀变岩隧洞破坏特征及处置原则

(1)破碎结构失稳。发生条件:结构面较发育是根本因素,爆破振动常为诱因。破坏机制:临空面围岩体在重力主导下,以及重分布应力辅助作用下,围岩塑性区范围内岩体发生破坏,闭合结构

面甚至隐性结构面张裂、塌落进一步影响围岩安全性,支护后也可能发生。破坏位置:洞室顶拱、拱肩等。开挖:在隧洞120°范围内控制超前小导管内插角度在10°左右,超前注浆加固后,采用预留核心土法开挖,短进尺,控制爆破,减小对围岩扰动。支护:采用喷射混凝土与型钢结合的初期支护方式,结合紧跟的系统锚杆,系统锚杆与掌子面距离控制在10 m左右,开挖后并且有台车工作空间时,及时在隧洞120°范围内进行注浆加固;水平层状岩体采用超前锚杆支护,并保证合适的外插角。

(2)散体结构失稳。发生条件:发育力学性质较差的断层、破碎带。破坏机制:岩体强度较低,结构松散,开挖后无法自稳,塑性区范围内岩体发生贯通破坏,在重力作用下极有可能发生塌方。破坏位置:断层、破碎带及影响带内和节理或层面密集发育区域。开挖:在隧洞120°范围内控制小导管内插角度在10°左右,进行超前注浆后,进行预留核心土开挖。根据实际围岩条件,还可采用超前管棚结合小导管的方式进行超前加固,超前管棚内插角度控制在3°左右。针对勘探过程中发现的大断层,在无法绕线避开断层情况下,在选择隧洞位置与开挖方向时,尽量使隧洞与断层大角度相交,减轻对围岩扰动,由于小断层在勘探初期选线时不能及时发现,在开挖过程中揭露的小断层应及时调整开挖进尺与支护参数。支护:采用喷射混凝土与型钢结合的初期支护方式,结合紧跟的系统锚杆,系统锚杆与掌子面距离控制在10 m左右,开挖后并且有台车工作空间时,及时在隧洞150°~180°范围内进行注浆加固,根据现

场实际情况可对超前支护形式进行调整,采用大管棚结合小导管的方式进行加强支护,对小规模的岩体掉落、滑落等情况,采用钢筋混凝土置换破碎岩体方式对围岩变形进行控制。

4.2 塌方破坏处置措施

4.2.1 破碎结构失稳处置措施

2 号引水隧洞 10+097 m~10+110 m 段围岩以“Ⅳ”类为主,岩体以花岗岩蚀变为主,以碎裂结构为主,少量镶嵌结构、围岩稳定性差,洞内地下水较丰富。2021 年 01 月 04 日 5-2 号引水隧洞开挖至 10+100.9 m 桩号时,10+099.2 m~10+100.9 m 段右侧拱顶至 150°范围发生掉块塌方,现场立即组织设备、人员对塌方部位喷厚 10 cm 的 C20 纤维混凝土进行封闭,喷锚过程中拱顶陆续出现掉块现象,现场将左侧石渣扒到右侧形成台阶,扒渣过程中左侧 10+099.2 m~10+100.9 m 段拱顶至 120°范围也出现掉块塌方现象,塌方量共计预估为 150 m³。为防止塌方进一步扩大,承包人及时从 6-1 下游 11+985 m 处拉渣反压。

针对此次塌方采取了如下处理措施:

(1)及时进行反压回填,并喷厚 15 cm 的 C20 混凝土对反压体进行封闭。

(2)在塌方体影响范围内采用多臂钻进行拱顶探孔探测,探明塌方体影响范围和初步状态,探孔布置在掌子面后并兼顾左右侧,孔深至少超设计结构线 2 m 以上,根据探测结果采用回填 C20 混凝土填充。

(3)对塌方体进行固结灌浆处理,灌浆花管暂按长度 4.5 m 控制,可视具体情况做调整。第一排环形布置仰角 30°,孔底应到设计结构线 2 m,间距 0.5 m;第二排环形布置仰角 15°孔深 4.5 m;间距 0.5 m;布置范围为上台阶堆积体。灌浆水灰比 2:1 起灌,灌浆压力控制在 0.5~2.0 MPa,根据具体情况进行现场调整。固结灌浆可根据现场实际情况增加孔位。

4.2.2 散体结构失稳处置措施

1 号引水隧洞 11+716 m~11+706 m 段岩体以灰白色蚀变花岗岩为主,发育一条辉绿岩岩脉和断层,岩体以碎裂结构为主,部分散体结构,蚀变较强,围岩稳定性差以 V 类为主,局部地下水线状发育。2021 年 03 月 03 日在下台阶钢支撑施工时,上台阶拱顶部分出现溜渣,溜渣细碎并

逐渐加大造成小导管和钢拱架被破坏,掌子面后方有掉块现象。

针对该次塌方采取了如下处理措施:

(1)采用石渣反压对掌子面进行约束减少变形,对塌方体及周边喷 C25 混凝土封闭。在变形段由远而近向掌子面逐步推进,采用径向固结灌浆形成应力圈,排距 3.0 m,间距 2.0 m,深 4.5 m,灌浆孔采用 $\phi 42$ 钢管开花孔,灌浆压力控制 0.5~0.8 MPa,灌浆顺序按由低到高,由两侧向顶拱的顺序施工,过程应监控变形情况。

(2)掌子面采用预固结灌浆进行加强支护,固结灌浆完成一定时间后再进行掘进施工,施工按照施工方案台阶法弱爆破进行,保证施工质量。采用探孔法确认顶拱空腔位置,确保顶拱结构线以上 2~4 m 范围固结效果良好。

(3)结合塌方影响范围,提高监控量测频率,采用收敛监测和反光片位移双重监测,并适当加密监测断面。根据渗水位置随机增设 4.5 m 深排水孔。

5 结 语

在蚀变岩体中,采用台阶法开挖时,拱顶沉降最大量值 102 mm,最大水平收敛变形 34.6 mm,塑性区发育范围集中在拱肩,达到了 15 m。

采用预留核心土法开挖时,拱顶沉降最大量值 55 mm,最大水平收敛变形 18 mm,塑性区发育范围集中在拱肩,达到了 6 m。采用预留核心土法可以尽早支护,每步开挖都减少了对围岩的影响,施工方案能够限制围岩变形和围岩塑性区范围扩大,故预留核心土法为可行方法。

硬梁包引水隧洞开挖跨度大,岩体条件差,围岩岩性分布变化频繁,隧洞变形直至发生破坏是地层岩性、地应力场、地下水综合作用下,因开挖卸荷导致产生临空面,围岩塑性区发育范围加大导致的。

参考文献:

- [1] 孔超,张俊儒,王海彦,等.深埋软岩大变形隧道支护变形特征及承载机理研究[J].中国铁道科学,2021,42(6):103-111.
- [2] 王明胜.强风化炭质板岩隧道大变形控制技术研究[J].铁道工程学报,2021,38(7):35-39+47.
- [3] 陶志刚,罗森林,李梦楠,等.层状板岩隧道大变形控制参数优化数值模拟分析及现场试验[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):491-506.

(下转第 13 页)

3.2 应用情况

(1)桩体信息导入。系统导入了桩体的基本信息并展示了桩的布局。

(2)质量管理流程。质量管理流程按照上报—审核—闭环三步环节进行,振冲碎石桩质量管理从施工队质量上报开始,接着系统会向下一级审核人员推送待办事项以提示审核人员及时审核,同时系统会显示当前审核所处于的节点。

(3)施工数据曲线展示。施工数据经由施工机器配套的传感器传输到服务器,可以对传至系统的深度、电流、填料量、瞬时水量等数据的进行展示,施工数据曲线展示见图1。

3.3 应用效果

传统的质量管理信息单向传递,信息流失严重,且传递延时大,传递效率低;提出的振冲碎石桩施工质量管理体系全面的实现了信息化的质量审核流程,提高了质量管理信息传递的效率,降低了信息在传递过程中的流失。对于满足施工质量要求的桩,可以快速高效地完成审核流程;而对于施工质量存疑的桩,则启动相应的评估程序,判断是否需要采取补救措施。振冲碎石桩质量管理体系实现了振冲碎石桩质量闭环验评管理,完成闭环质量检查验评1768次,显著提升了碎石桩质量管理的真实性、便捷性和时效性。

4 结 语

我国西南地区水电开发潜力巨大,但是面临着深厚覆盖层的问题。振冲碎石桩是解决深厚覆盖层的高效手段之一,但是其施工质量管理面临着时效性差,人为因素影响大等不足。

为了提高振冲碎石桩施工质量管理水平,梳理了硬梁包水电站深厚覆盖地基振冲碎石桩施工质量管理流程,从单桩施工完成到多级审核,考虑了可能的施工质量补强措施,至最终完成质量审

(上接第5页)

[4] 戴永浩,陈卫忠,田洪铭,等. 大梁隧道软岩大变形及其支护方案研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 4149-4156.

[5] 徐帮树,杨为民,王者超,等. 公路隧道型钢喷射混凝土初期支护安全评价研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 248-254.

作者简介:

闫生存(1975-),男,四川成都人,四川华能泸定水电有限公司,正

核,形成了完整的闭环质量管理体系

基于振冲碎石桩质量审核流程,开发了振冲碎石桩质量管理体系。系统采用微服务架构,将不同功能拆分为不同应用模块,单独部署,系统稳定性优良;系统可以兼顾工程现场复杂的终端差异,广泛应用于各种平台;系统包括了数据集成平台,可以作为水电工程信息化管理系统的子模块。

振冲碎石桩施工质量管理体系将振冲碎石桩施工质量管理流程固化为系统操作,提高了振冲碎石桩施工质量管理的时效性和真实性。但是目前的审核环节仍然需要人为进行,建议进一步的研究可以探索利用人工智能等技术手段进行智能化审核,向智能化振冲碎石桩质量管理发展。

参考文献:

- [1] 樊启祥,陆佑楣,李果,等. 金沙江下游大型水电工程智能建造管理创新与实践[J]. 管理世界, 2021, 37(11): 206-226+13. DOI:10.19744/j.cnki.11-1235/f.2021.0179.
- [2] 余挺,叶发明,陈卫东. 中国水电关键技术丛书—深厚覆盖层筑坝地基处理关键技术[M]. 2020版. 北京:中国水利水电.
- [3] 王盛源. 振冲法加固松软地基[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(5): 39-49.
- [4] 叶书麟. 地基处理工程实例应用手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.
- [5] 水利水电工程振冲法地基处理技术规范: DL/T 5214-2016[S]. 北京:中国电力出版社, 2017.

作者简介:

马 斌(1973-),男,陕西三原人,本科,高级工程师,注册安全工程师,从事水电工程建设管理工作;

陈道想(1999-),男,安徽六安人,清华大学水利水电工程系在读博士生,本科,从事水工结构与智能建造科研工作;

李 萌(1992-),男,河南漯河人,工程师,从事水利水电工程管理工作;

丁 鹏(1986-),男,河南邓州人,现任中建科技集团有限公司高级经理,高级工程师,博士,从事装配式建筑研发;

林 鹏(1972-),男,湖北黄冈人,清华大学水利水电工程系,教授、博导,博士,从事水工结构与智能建造的教学与科研工作。

(责任编辑:吴永红)

高级工程师,博士,从事水利水电工程方面工作;

徐继敏(1977-),男,四川荣经人,四川华能泸定水电有限公司,高级工程师,学士,从事电气工程及其自动化方面工作;

薛瑞华(1998-),男,辽宁沈阳人,东北大学,硕士,从事采矿工程方面工作;

佟 强(1996-),男,辽宁沈阳人,东北大学,硕士,从事土木水利方面工作;

何本国(1984-),男,辽宁沈阳人,东北大学,教授,博士,从事隧道工程方面工作。

(责任编辑:吴永红)