

# 上游围堰深厚软弱地基处理研究

度晓军, 古小梦, 龚泽鹏

(华电金沙江上游水电开发有限公司拉哇分公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**超深基础振冲碎石桩施工处理后,地基得到明显改善,其抗液化性能、承载和抗变形能力得到提高,并增强了原始地基的渗透性。研究成果在上游围堰地基工程中大规模成功应用,为国内深厚软弱地基处理积累了丰富的设计、施工及检测评价经验,具有一定的推广价值。

**关键词:**水电站;湖相沉积;超深振冲碎石桩;深厚软弱地基

**中图分类号:**[TM622];TV551.3;U655.54+4

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2022)03-0004-05

## Research on Treatment of Deep and Weak Foundation of the Upstream Cofferdam

TUO Xiaojun, GU Xiaomeng, GONG Zepeng

(Lawa Branch of Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development  
Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610041)

**Abstract:** After the construction of ultra-deep vibro-gravel piles, the foundation has been significantly improved, the liquefaction resistance, bearing capacity and deformation resistance of the foundation have been improved, and the permeability of the original foundation has been enhanced. The research results have been successfully applied to a large scale in the upstream cofferdam foundation project. This paper provides rich experience in design, construction, inspection and evaluation on treatment of deep and weak foundation in China, and the experience is also worth of popularizing.

**Key words:** hydropower station; lacustrine deposition; ultra-deep vibro-gravel pile; deep and weak foundation

## 0 引言

在工程建设中,当天然地基不能满足建(构)筑物对地基的要求时,需对天然地基进行加固改良,形成人工地基,以满足建(构)筑物对地基的要求,保证其安全与正常使用,这种地基加固改良称为地基处理。地基处理的目的是利用换填、夯实、挤密、排水、胶结、加筋和热学等方法对地基土进行加固,用以改良地基土的工程特性。

振冲法是一种常见的地基处理方式,该技术起源于德国,我国在 20 世纪 70 年代初期引进了振冲碎石桩施工技术,国外一般施工深度在 20 m 以内。由于地基处理技术应用时间短,复合地基理论相对落后于工程实际,且不成熟,因此,复合地基的作用机理和设计理论还需作进一步研究<sup>[1-3]</sup>。

挂哇水电站上游围堰地基覆盖层最大深度达

71.63 m,其中湖相沉积低液限黏土和粉土层厚约 50 m,需处理的深度国内外罕见,致使工程建设面临巨大难题和挑战,且无工程经验可供借鉴。

本文基于围堰地基的特点,计算了围堰堰坡稳定、应力、变形,对超深振冲碎石桩处理方案进行数值分析验证,并在围堰工程施工中对施工技术、监控技术、检测技术进行创新。通过超深振冲碎石桩的处理应用,总结出设计、施工、检测评价的系列经验,可为其他类似工程提供借鉴。

## 1 上游围堰情况分析

上游围堰是土石围堰,最大堰高约 60 m,采用“塑性混凝土防渗墙+帷幕灌浆+复合土工膜斜墙”进行防渗,地基覆盖层按物质组成由上至下分为四层: $Q^{al-5}$ 、 $Q^{l-3}$ 、 $Q^{l-2}$ 、 $Q^{al-1}$ 。其中  $Q^{al-5}$  为河床冲积砂卵石层夹少量漂石层,厚度 2.15~7.2 m; $Q^{l-3}$  层为堰塞湖相沉积层,含淤泥质粉砂、黏土质砂,厚度 14.7~18.1 m; $Q^{l-2}$  层,堰塞湖相沉

收稿日期:2022-05-06

积层,以砂质低液限黏土为主,层厚为 31.4 m; $Q^{al-1}$ 层为卵石、块石夹砂,堰基区域最深处厚度 18 m。地基中湖相沉积低液限黏土和粉土层厚约 50 m,允许承载力 100~150 kPa,抗剪强度仅 30 kPa 左右,变形模量仅 5~8 MPa,厚度大、承载力低、渗透系数低、抗剪强度低、压缩性高。

上游围堰与大坝基坑形成的联合边坡高达 130 m,围堰及堰基稳定是保障大坝基坑开挖和坝体填筑安全的关键,而工程设计及施工难度国内罕见,所面临的挑战极其复杂。

### 1.1 地质条件复杂

湖相沉积具有“厚度大、承载力低、渗透系数低、抗剪强度低、压缩性高”等特点,边坡稳定问题突出。

### 1.2 工程规模大

围堰挡水库容达 2.8 亿  $m^3$ ,挡水时间长达 5 年之久,是金沙江上游梯级开发中拦蓄泄洪泄水的重要建筑物。

### 1.3 控制竖直沉降及水平变形技术难度大

在天然地基条件下,上游围堰填筑后覆盖层最大沉降量约 3.5 m,下游坡脚最大水平位移约 3.4 m,导致边坡稳定性及防渗墙体、堰体土工膜变形问题突出。

### 1.4 理论研究存在较多技术难题

(1)围堰地基覆盖层纵向、横向分布不均匀,土层特性差别大;

(2)湖相沉积软弱土体本身属于非线性、不连续介质,具有黏弹塑性特征;

(3)《碾压式土石坝设计规范》及《水电水利工程边坡设计规范》对土质边坡推荐采用极限平衡法,但采用极限平衡法计算出的安全系数和采用有限元应力法计算滑弧稳定安全系数对稳定进行判别缺乏依据;

(4)桩与土的结合面特性不易模拟,桩体发生水平变形后,受力特征相应发生变化,以致计算模型不易处理,并且计算工作量巨大;

(5)深度超过 70 m 的超深振冲碎石桩无实施案例,施工技术难度高;

(6)现行规范触探检测杆长修正系数的范围为 20 m,处理深度超过了现行规范,尚无超深处理质量检测及评价方法。

## 2 处理方案优选

上游围堰地基处理主要目的是提高排水效果,加速地基固结,同时提高基础承载力,减少沉降变形。考虑处理深度超 70 m,采用换填垫层法、强夯法和排水固结法等处理深度有限,加筋法适宜于边坡处理,灌浆法对渗透系数较小的黏土处理效果差,高压喷射注浆法、水泥土搅拌法、水泥粉煤灰碎石桩、地下连续墙属于刚性或半刚性处理方式,不适合处理柔性的土石围堰基础。碎石桩既能通过换填和挤密作用提高地基承载力,又能通过桩孔内充填碎石(卵、砾石)等反滤性好的粗颗粒料,在地基中形成渗透性能良好的人工竖向排水减压通道,有效消散和防止超孔隙水压力的增高,并可加快地基的排水固结,选择碎石桩作为本工程地基处理的主要方式<sup>[4-6]</sup>。

2019 年 10 月,上游围堰地基处理现场试验采用 SV70 振冲碎石桩机成功实施了 13 根最大深度 55 m 的振冲碎石桩,并经过检验成桩质量良好。最终,确定上游围堰地基选择振冲碎石桩进行处理。

## 3 处理效应数值分析

### 3.1 处理方案

通过采用极限平衡法计算分析,上游围堰上游边坡受枯水位围堰填筑期控制,下游联合边坡受围堰高水位基坑开挖完成后控制。通过碎石桩不同间排距布置方案计算分析比选,最终确定的碎石桩处理方案为:桩径不小于 1 m,桩长贯穿堰塞湖沉积层;堰基上游部分(防渗墙至堰轴线下游约 30 m)采用 3 m 的桩间排距,处理宽度约为 177 m;堰基下游部分采用 2.5 m 的桩间排距,处理宽度约为 173 m。

### 3.2 分析内容

重点对复合地基孔隙水压力系数、抗剪强度指标选择、上下游堰坡稳定性、复合地基应力及变形等内容进行数值计算,复核选定的加固处理方案和加固处理后地基的应力变形,以保障上下游堰坡稳定的安全性。

### 3.3 计算方法

主要进行孔隙水压力系数、堰坡稳定性分析、复合地基应力变形分析三块计算,其中孔隙水压力系数基于太沙基固结理论或砂井固结理论;堰坡稳定性分析又分为抗滑稳定计算方法及安全系数计算,抗滑稳定计算采用瑞典圆弧法或简化毕

肖普法<sup>[7]</sup>,安全系数的计算采用摩根斯顿—普赖斯法;上游围堰地基采用基于比奥固结理论的数值方法来求解。基于比奥固结理论,通过求解土体平衡方程、孔隙流体流动方程、几何协调条件、土体本构模型和达西定律联立组成的微分方程组,在给定初始条件和边界条件的前提下,可求得计算域内应力变形场和孔隙流体流场的变化过程。

### 3.4 参数研究

#### 3.4.1 复合地基抗剪强度指标

考虑到围堰地基全面加固,在围堰加载及水压力作用下,碎石桩与桩间土联合承载、同步协调变形,按复合地基模式分析围堰及堰基总体结构安全相对较适合本工程特性,同时也符合现行规范,围堰设计方案以复合地基模式下计算出的围堰变形、稳定安全系数为基本依据。

复合地基的有效抗剪强度指标按照 DL/T5214-2016《水电水利工程振冲法地基处理技术规范》第 4.2.4 条的规定计算。

$$\tan\varphi_{sp} = m\mu_p \tan\varphi_p + (1 - m\mu_p) \tan\varphi_s \quad (1)$$

$$c_{sp} = (1 - m\mu_p) c_s \quad (2)$$

式中  $\varphi_{sp}$  和  $c_{sp}$  分别是振冲复合地基的等效内摩擦角和等效黏聚力; $\varphi_p$  是桩体材料的内摩擦角; $\varphi_s$  和  $c_s$  分别是桩间土的内摩擦角和抗剪强度; $\mu_p$  是应力集中系数,按照式(3)计算。

$$\mu_p = \frac{n}{1 + m(n-1)} \quad (3)$$

式中  $n$  为桩土应力比,无实测资料时取 2~4,桩间土强度低时取大值、强度高时取小值。上游围堰堰塞湖沉积层厚度达 50 m,碎石桩较长,缺乏类似工程经验,偏于安全取  $n=2$ 。

$m$  是置换率,定义为:

$$m = \frac{d_0^2}{d_e^2} \quad (4)$$

式中  $d_0$  是桩长范围内的平均桩径; $d_e$  是桩的有效影响圆直径,对于设计梅花型, $d_e = 1.13 s$ , $s$  为相邻桩的中心距。

#### 3.4.2 复合地基邓肯模型(E-B)参数

复合地基的力学指标,可以根据规范建议换算方案及根据桩、桩间土特性用有限元法模拟分析获取。工程覆盖层的深度已超出现行规范约定深度,同时规范未建议 EB 模型参数的换算方法,

因此,本文采用有限元法根据变形协调原理拟合复核地基参数。

假设从地基中截取一块复合地基,对其开展固结排水的三轴试验,施加等向围压后充分固结,再施加竖向荷载,则复合地基的竖向压缩应变记做  $\epsilon_1$ ,由等应变  $\alpha\sigma$  假设可得:

$$\epsilon_1^{col} = \epsilon_1^{soil} = \epsilon_1 \quad (5)$$

式中  $\epsilon_1^{col}$  和  $\epsilon_1^{soil}$  分别为桩和土的竖向压缩应变。

此时复合地基承担的竖向平均应力  $\sigma_1$  为:

$$\sigma_1 = \alpha\sigma_1^{col} + (1 - \alpha)\sigma_1^{soil} \quad (6)$$

式中  $\epsilon_1^{col}$  和  $\epsilon_1^{soil}$  分别为桩和土体承担的竖向应力; $\alpha$  为置换率。

复合地基的体应变为:

$$\epsilon_v = \alpha\epsilon_v^{col} + (1 - \alpha)\epsilon_v^{soil} \quad (7)$$

式中  $\epsilon_v^{col}$  和  $\epsilon_v^{soil}$  分别为桩和土体承担的体应变。

根据邓肯—张模型以及碎石桩料和软土的模型参数,可以计算任意围压下,桩、土对应一定压缩应变  $\epsilon_1$  的偏差应力、 $(\sigma_1^{col} - \sigma_3)$ 、 $(\sigma_1^{soil} - \sigma_3)$ ,以及体应变和。根据邓肯—张模型参数的推求方法,可以求得复合地基的邓肯—张模型参数。

### 3.5 计算成果

上游围堰坝坡稳定安全系数 1.452,大于规范要求的安全系数 1.2,满足土石坝施工工期坝坡稳定的要求。

采用邓肯 E-B 模型,应力变形计算成果见表 1。

表 1 应力变形计算成果表

项目	竣工期	挡水期	基坑开挖后
最大沉降 /m	-4.00	-4.03	-4.48
最大水平位移 /m	向上游	-1.42	-0.89
	向下游	1.33	1.65
堰体及堰基最大大主应力 /MPa	1.4	1.5	2.0
堰体及堰基最大小主应力 /MPa	0.7	0.7	1.1
防渗墙最大水平位移 /m	-0.08	0.70	0.85
防渗墙最大压应力 /MPa	-1.25	-3.29	-6.25
防渗墙最大拉应力 /MPa	0	0	0

计算成果表明,竣工期、挡水期和基坑开挖完成时,堰体及堰基的最大沉降分别为 4 m、4.03 m 和 4.48 m,向上游的最大水平位移分别为 1.42 m、0.89 m 和 0.84 m,向下游的最大水平位移分别为 1.33 m、1.65 m 和 1.7 m。防渗墙在

围堰竣工期向上游移动,向上游的墙顶位移约为0.08 m,挡水后转为向下游移动,墙顶向下游的位移约为0.7 m,基坑开挖后墙顶向下游的位移进一步增大到约0.85 m。防渗墙整体处于受压状态,仅顶部有局部小主应力为负的情况,竣工期、挡水期和基坑开挖完成时防渗墙的最大压应力分别约为1.25 MPa、3.29 MPa和6.25 MPa。

## 4 工程实施

### 4.1 实施情况

上游围堰振冲碎石桩共完成4 552根,其中一期完成1 929根,784根未采用下设护筒工艺,振冲施工平台填筑为水下填筑,无法碾压, $Q^{al-5}$ 层含有漂卵石,地质条件复杂,左岸岸坡坡度大,下部有大块孤石、漂石,造孔难度大;在未下设护筒工艺的施工过程中,多次发生卡钻、造孔困难等问题;进行护筒下设后,成孔顺利,没有发生卡钻等现象,振冲施工顺利。SV70系列振冲碎石桩机在大型旋挖钻机的基础上研发出一种新型振冲碎石桩机,结构简单、体型小巧,使用方便,包含伸缩导杆系统及水气联动防沉沙系统等,伸缩导杆系统具有5层套管,导杆的轴向长度可调,以便改变所述振冲器系统相对地面的下放位置,每层套管的长度为18~20 m;水气联动防沉沙系统主要包括安置于伸缩式导杆内并自上而下延伸到下端的注水管及注气管、连接注水管的水泵、连接注气管的气泵、用来滑动连接伸缩导杆顶层套管。SV70系列振冲碎石桩机对场地要求低,能适应各种狭小施工场所的超深振冲桩施工,解决了现有超深振冲桩的施工设备对场地的限制问题,适用于40~110 m深的振冲碎石桩的施工;二期完成2 623根,全部采用下设护筒工艺。

### 4.2 质量检测及评价

碎石桩填料检测最大干密度为2.26~2.38 g/cm<sup>3</sup>,平均值为2.33 g/cm<sup>3</sup>;碎石桩抗剪强度凝聚力为91~128 kPa,平均值为109 kPa,内摩擦角为40.2°~42.5°,平均值为41.4°,满足设计要求;各级配压缩模量在0.4~0.8 MPa或0.8~1.6 MPa下大于50 MPa,满足设计要求。

重型动力触探检测37根桩,桩身修正后平均重型动力触探击数均大于15击,满足设计要求,合格率100%。

渗透试验检测渗透系数最小值为1.11×

10<sup>-2</sup> cm/s,最大值为9.36×10<sup>-2</sup> cm/s,均满足不小于1×10<sup>-2</sup> cm/s的设计要求,合格率100%。

跨孔CT测试各桩在桩体范围内波速均较高,桩体填充良好,密实度较好。由两侧桩体向内,波速逐渐降低,碎石桩对桩周土体有一定的挤密作用。

基于随钻技术的钻孔过程指数DPI在0~2之间,桩体呈极密~密实状态,与动力触探、渗透试验、CT测试结果一致。

### 4.3 施工技术创新

常规振冲碎石桩施工技术处理软基深度不大于40 m,上游围堰振冲碎石桩施工发明了超深振冲碎石桩机伸缩导杆及水气管同步技术及SV70超深振冲碎石桩机,开发了“超深护筒+上部旋挖引孔+下部振冲器造孔加密”的施工工艺,控制超深碎石桩偏斜度不大于5‰,保证了振冲碎石桩施工质量,最大处理深度达71.63 m。

针对深厚覆盖层超深振冲碎石桩隐蔽工程施工质量控制难题<sup>[8]</sup>,建立了振冲施工过程中桩体质量与工艺参数之间的映射关系,提出了超深振冲碎石桩施工过程的动态化信息监测方法;研发了基于BIM+GIS技术的超深振冲碎石桩施工质量监控系统,实现了施工质量的实时、动态化监测;提出了基于随钻技术的振冲碎石桩施工密实度评价方法。

## 5 结语

通过系统研究超深振冲碎石桩处理深厚堰塞湖沉积物的理论、施工设备特性及施工工法,为国内深厚软弱地基处理积累了大量设计、施工及检测评价经验,具有一定的推广价值。

(1)上游围堰高60 m,基础覆盖层最大深度达71.63 m,碎石桩既能通过换填和挤密作用提高地基承载力,又能通过桩孔内充填碎石(卵、砾石)等反滤性好的粗颗粒料,在地基中形成渗透性能良好的人工竖向排水减压通道,有效消散和防止超孔隙水压力的增高,并可加快地基的排水固结,因此,选择振冲碎石桩作为上游围堰地基处理的主要方式。

(2)超深基础振冲碎石桩施工处理后,地基得到明显改善,其抗液化性能、承载和抗变形能力得到提高,并增强了原始地基的渗透性。工程施工质量检测结果表明,所完成的振冲碎石桩施工质



量均满足既定的技术参数要求。

(3)上游围堰振冲碎石桩大规模成功应用,系统解决了超深基础振冲碎石桩设计、施工、质量评价的难题,效果良好。在以后应用中,需根据水利水电工程实际、工程地质情况、施工条件等因素,对超过 100 m 的深厚覆盖层地基处理进行深入研究、论证;采用新方法对施工、成桩质量等进行多手段、多途径检测,进一步验证地基处理成桩质量以及检测结果的可靠性。

参考文献:

[1] Kuerban F, Li H, Peng Y, et al. Experimental study on the treatment effect of vibroflotation gravel piles for saturated sand foundations in coastal areas[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2021, 36(12): 327.

[2] Chen F, Jiao H, Han L, et al. Real-time monitoring of construction quality for gravel piles based on Internet of Things[J]. Automation in Construction, 2020, (116): 103228.

[3] 李进元. 振冲碎石桩法地基处理在阴坪水电站中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2968-2976.

[4] 曹星, 刘小峰, 定培中. 碎石桩处理深厚层软土地基效果分析[J]. 长江科学院院报, 2000, (3): 47-50.

[5] 蒋学林, 李武, 吴火兵. 锦屏 3 号营地液化地基振冲碎石桩加固处理技术[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(3): 28-31.

[6] 侯卫强. 振冲碎石桩在水利工程中的应用[J]. 科技资讯, 2009, (22): 10.

[7] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析—原理(方法)(程序)[M]. 中国水利水电出版社, 北京, 2003.

[8] 卢鹏云, 张广彪, 臧成新. 实时过程数据在振冲碎石桩全过程质量控制中的应用[J]. 地基处理, 2020, 2(5): 404-413.

作者简介:

庾晓军(1976-),男,四川苍溪人,高级工程师,本科,从事工程建设管理工作;

古小梦(1993-),男,四川泸县人,助理工程师,本科,从事工程建设管理工作;

龚泽鹏(1997-),男,四川成都人,助理工程师,本科,从事工程建设管理工作.

(责任编辑:卓政昌)

(上接第 3 页)

为性因素,解决了传统人工操作水平参差不齐、施工规范性不高等问题,也保证了张拉质量,避免了人为质量事故的发生。同时,降低了人员劳动强度及人工投入。该水电站锚索张拉工程量巨大,以锚索记录仪替代常规人工测量,实现张拉过程物联网化,对控制工程投资、保障工程质量以及提升智能建设水平具有重要意义。

参考文献:

[1] 翟才旺,罗毅,赵宇. 双层保护预应力锚索的设计和施工要点[J]. 水利水电技术, 2001, (7): 32-34.

[2] 李德水. 预应力锚索在水利水电工程中的应用分析[J]. 人民珠江, 2005, (5): 56-58.

[3] 朱安龙,徐建强,王勇. 无黏结预应力锚索孔摩阻力及锚索结构改进的试验研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(4): 115-

118+130.

[4] 陈伟. 预应力锚索在水利工程基坑支护中的应用研究[J]. 内蒙古水利, 2021, (10): 37-38.

[5] 罗建林,贺广龙,李正兵. 预应力锚索自动张拉监控系统研究[J]. 四川水力发电, 2005, (6): 43-44+50.

作者简介:

范雄安(1979-),男,广西贵港人,高级工程师,本科,从事工程建设管理工作;

龚泽鹏(1997-),男,四川成都人,助理工程师,本科,从事工程建设管理工作;

蒋小春(1967-),男,湖南衡阳人,高级工程师,硕士,从事智能装备研发及管理工作;

李 果(1983-),女,湖南衡阳人,经济师,硕士,从事智能装备研发及管理工作.

(责任编辑:卓政昌)

### 金沙江清洁能源基地累计增殖放流鱼苗近 300 万尾

据中新网 2022 年 6 月 2 日报道,在金沙江上游清洁能源基地施工现场,57 万尾珍稀鱼苗在社会各界的共同见证下,欢快地游向金沙江,这已是 2017 年苏洼龙水电站鱼类增殖站投运以来,华电金沙江上游川藏段梯级电站开展的第 11 次鱼类增殖放流行动。

流活动在金沙江上游的叶巴滩、巴塘、拉哇、苏洼龙四级电站同步开展,共放流短须裂腹鱼、长丝裂腹鱼、四川裂腹鱼、裸腹叶须鱼、软刺裸裂尻鱼等金沙江特有珍稀鱼类 57 万尾,其中苏洼龙水电站 25 万尾、叶巴滩水电站 24 万尾、巴塘水电站 5.5 万尾、拉哇水电站 2.5 万尾,目前中国华电在金沙江上游川藏段流域已累计增殖放流各类鱼苗 297 万尾。

(北极星电力网)