

文章编号: 1674—8247(2023)02—0106—07

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2023.02.021

高速铁路站区列车振动荷载影响下人工挖孔桩位移特性及施工技术研究

董欢欢

(中国铁路南昌局集团有限公司, 南昌 330000)

摘要:为分析复杂地质高速铁路采用人工挖孔桩+便梁支护后的安全性,本文以杭深铁路莆田站站区人工挖孔桩工程为依托,采用有限元软件研究了列车振动荷载作用下桩体结构的变形,提出了运营高速铁路站区内人工挖孔桩施工关键技术。结果表明:(1)列车的振动荷载下桩体的位移仍处于安全范围内;(2)高速铁路站区内人工挖孔桩施工技术能够在复杂地质及建筑物环境下有效地缩短施工时间,提高施工效率,降低施工空间要求,保障施工安全;(3)现场应用验证了人工挖孔桩施工关键技术的可行性、安全性,该技术可为类似工程提供参考借鉴。

关键词:人工挖孔桩;振动荷载;高速铁路;施工技术

中图分类号: U445.55⁺1

文献标识码: A

A Study on Displacement Characteristics and Construction Technology of Hand-dug Piles Under the Impact of Train Vibration Load in High-speed Railway Station Area

DONG Huanhuan

(China Railway Nanchang Group Co., Ltd., Nanchang 330000, China)

Abstract: In order to analyze the safety of high-speed railways in complex geological conditions after adopting hand-dug piles + temporary beam support, a case study was conducted based on the hand-dug piles in Putian Station Area of Hangzhou-Shenzhen Railway in this paper, and the finite element software was used to study the deformation of pile structure under the vibration load of trains, and key construction technology of hand-dug piles in the station area of high-speed railways in operation was put forward. The results show that: (1) The displacement of pile body under the vibration load of trains is still within the safe range. (2) The use of hand-dug piles in the station area of the high-speed railway can effectively reduce the construction time, improve the construction efficiency, reduce the construction space requirements and ensure the construction safety in complex geological conditions and building environments. (3) The feasibility and safety of the key technology of hand-dug piles are verified by field application, and the conclusions can provide a reference for similar projects.

Key words: hand-dug pile; vibration load; high-speed railway; construction technology

收稿日期: 2022-04-13

作者简介: 董欢欢(1981-),男,工程师。

引文格式: 董欢欢. 高速铁路站区列车振动荷载影响下人工挖孔桩位移特性及施工技术研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 106-112.

DONG Huanhuan. A Study on Displacement Characteristics and Construction Technology of Hand-dug Piles Under the Impact of Train Vibration Load in High-speed Railway Station Area[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 106-112.

随着我国经济的持续增长和科学技术的不断进步,高速铁路经济发展网越织越密^[1],新建地下工程下穿既有高速铁路线路的情况屡见不鲜。为确保既有高速铁路线路的安全稳定运行,新建工程下穿高速铁路须采取措施对既有线路进行防护^[2],人工挖孔桩架设便梁托举轨道便是最有效的措施之一^[3]。

学者对人工挖孔桩进行了一系列的研究,秦虎^[4]采用数值模拟分析了人工挖孔桩+便梁加固对隧道下穿铁路施工扰动的控制效果;任高峰^[5]总结了人工挖孔桩在土体开挖、列车静、动荷载影响下的变形机制及位移规律;王红霞^[6]针对群桩施工效率慢等问题,提出了人工挖孔桩群桩施工技术;彭建等^[7]提出了预防窜孔的人工挖孔桩护壁设计方法,并依据实际效果给出了施工建议。目前,学者们对于人工挖孔桩的施工工艺及技术的研究已较为深入,而对于复杂地质条件下人工挖孔桩受列车振动的影响仍鲜有研究;同时,运营的高速铁路站区因作业空间有限、地质环境复杂、作业时间有限等因素,人工挖孔桩施工进度较慢、安全风险较高。

综上所述,以杭深铁路莆田站站区人工挖孔桩工程为依托,采用有限元软件研究了列车振动荷载作用下桩体结构及设计参数的合理性,提出了运营铁路站区内人工挖孔桩施工关键技术,通过现场应用验证了该技术的可行性和安全性。

1 工程概况

莆田站位于福建省莆田市秀屿区笏石镇岭美村和刘厝村交界处,融合了杭深铁路、永莆铁路、拟建福厦客专铁路及市内公共交通系统,是莆田市最为重要的对外交通枢纽。为进一步提升车站客流运载能力,拟在莆田站东西两侧修建矩形顶管隧道,隧道轴向与杭深线线路方向基本垂直。

为控制顶管隧道下穿期间对既有铁路结构的扰动,既有杭深铁路股道内拟施工人工挖孔桩以架设便梁,便梁架设完成后列车上覆荷载便作用于便梁与人工挖孔桩。桩体结构在列车振动影响下必将发生偏移,影响列车的行驶安全。

杭深铁路为运营高速铁路线路,设计速度 250 km/h,站区内为有砟轨道,共 3 台 10 线。股道上方 6.4 m 处存在带电接触网,无法使用机械法及爆破法开挖,钢筋笼的吊装也受到限制。人工挖孔桩设计桩身为 15 m、桩径分别为 1.25 m 和 1.5 m 两种,采用分阶段封锁线路施工。受铁路调度限制,每一阶段线路封锁及施工时间固定,无调整空间,时间极其紧迫。西侧

人工挖孔桩布置如图 1 所示(东侧人工挖孔桩结构及地址情况与西侧类似)。

桩身范围内从上至下依次为素填土、粉质黏土、全风化及中风化花岗岩。勘察期间钻孔水位观测结果表明,工程区稳定水位埋深 2.5~8.5 m,主要为孔隙潜水与基岩裂隙水。人工挖孔桩施工中桩身将会经过富水软岩地层和中、微风化花岗岩地层,采用常规的施工方法施工效率较低。

人工挖孔桩的钢筋笼运输及吊装施工均须在低于 6.4 m 的环境下作业,常规的钢筋笼吊装方式难以实施,有必要针对莆田站提出一种新的运营铁路内人工挖孔桩施工技术,以缩短施工时间,提升施工效率、降低安全风险。

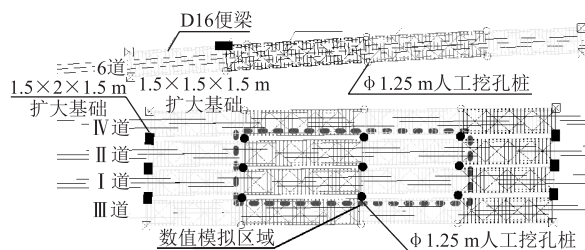


图1 西侧人工挖孔桩布置图

2 列车振动影响下桩体位移特性分析

人工挖孔桩施工结束后在其扩大基础上架设便梁,列车的振动荷载将由 D 型便梁传导至人工挖孔桩。振动荷载作用下人工挖孔桩将产生位移,考虑到莆田站人工挖孔桩所处地层较为软弱,人工挖孔桩将可能发生变形超限,影响列车的正常通行。

采用 Abaqus 有限元分析软件,选取图 1 的数值模拟范围研究人工挖孔桩在列车振动荷载作用下的变形和沉降情况。轨道和人工挖孔桩采用线弹性模型,围岩则采用带阻尼的摩尔-库伦弹塑性本构模型,计算参数如表 1 所示。模型静力计算平衡后再施加动力,分析振动荷载作用下桩体的位移情况。静力计算时,模型的上表面设置为自由边界,其它面施加法向位移约束。动力计算时将静力边界替换为粘弹性边界,在模型底部、四周设置人工粘弹性边界。

为了简化计算模型,提高计算速度,将 D 型便梁结构简化为加载板,列车行车荷载作用于加载板,直接通过承台作用于人工挖孔桩。鉴于地表素填土厚度较小,且桩体本身基本处于中风化花岗岩岩层,将围岩简化为三层结构,即粉质黏土、全风化花岗岩、中风化花岗岩,厚度分别为 5 m、8 m、4 m。

有限元列车振动分析模型如图 2 所示,根据学

表 1 模型计算参数表

材料	弹性模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	摩擦角/(°)	容重/(kg/m ³)
粉质黏土	0.03	0.4	0.05	10	1 900
全风化花岗岩	2	0.35	0.25	27	2 850
中风化花岗岩	20	0.5	2	50	2 800
人工挖孔桩	31	0.2	—	—	2 400
轨道	200	0.2	—	—	7 800
加载板	200	0.2	—	—	7 800

者^[8]提出的计算公式,结合莆田站的实际情况,计算出列车运行期间的振动荷载,如图 3 所示。

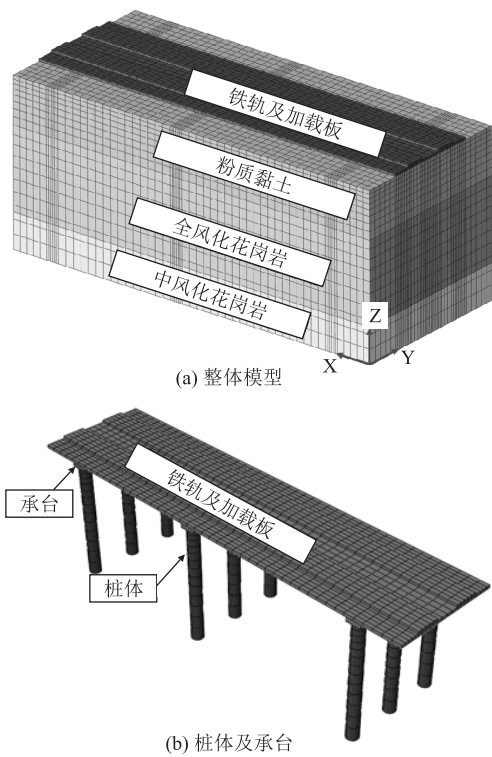


图 2 列车振动分析模型图

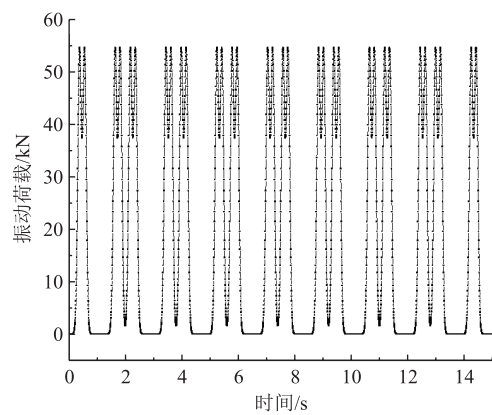


图 3 45 km/h 荷载时程曲线图

数值模拟分析了单向行车和双向会车两种情况。

分别提取了单向行车和双向会车时桩体结构 X、Y、Z 方向的位移,如图 4 和图 5 所示。

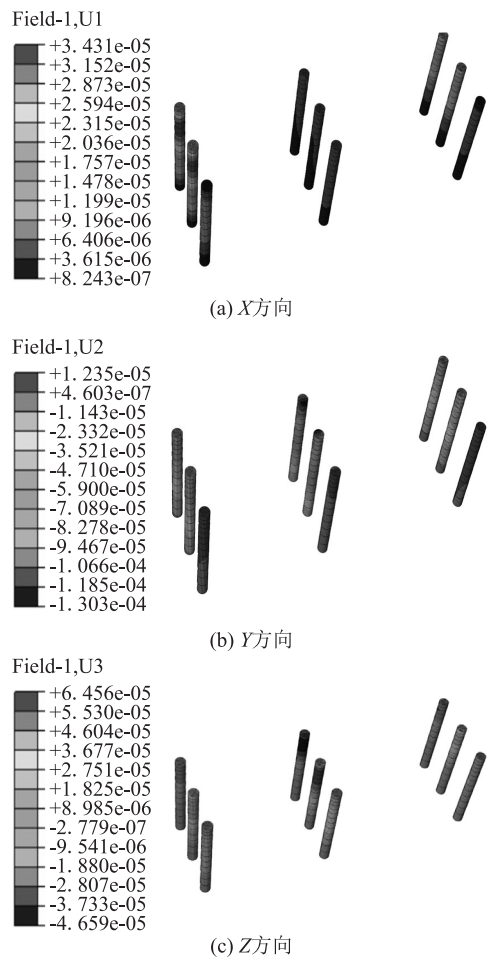


图 4 单向行车时桩体结构位移图

提取模型中心部分桩体(桩 D27)上表面中心点处的沉降位移情况如图 6、图 7 所示,

由图 4~图 7 可知:

- (1)单向和双向列车行车都将引起桩体结构的周期性位移,单向行车期间 X、Y、Z 方向最大位移的绝对值分别为 0.062 mm、0.11 mm、0.25 mm;双向行车期间 X、Y、Z 方向最大位移的绝对值分别为 0.048 mm、0.072 mm、0.51 mm。
- (2)单向行车和双向行车时列车最大位移的绝对值为 $X < Y < Z$,同时列车双向行驶时 X 和 Y 方向的位移比单向行驶小。列车双向行驶时桩体两侧均产生了一定的荷载,扰动相互抵消,列车双向行驶在 X 和 Y 方向上造成的扰动更小。
- (3)列车在 3 个方向上产生的最大位移值为 0.51 mm,即列车双向行驶时桩体的竖向沉降。经过专家分析,桩体的位移处于安全的范围内,不会影响列车的正常运行,桩体的结构和设计参数合理安全。

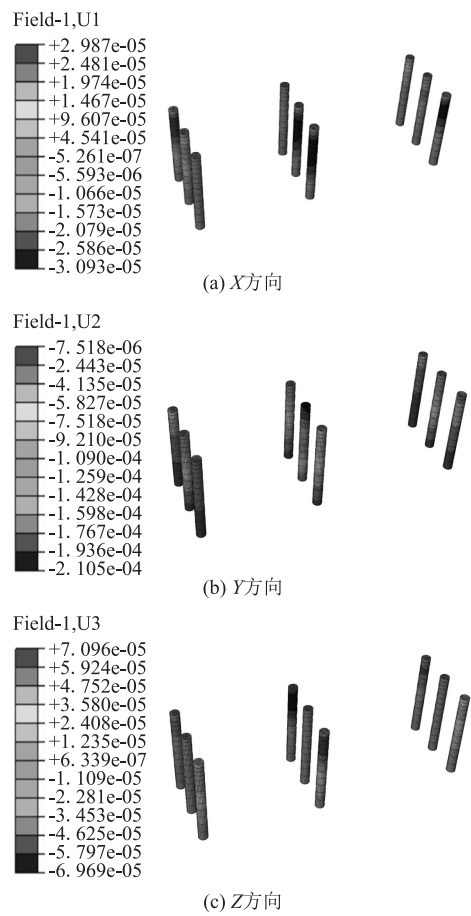


图 5 双向行车时桩体结构位移图

3 运营铁路内人工挖孔桩施工关键技术

运营铁路内人工挖孔桩施工技术包括施工前准备、无水软土地层内护壁施工、富水地层内土方开挖及护壁快速施工、硬岩地层内人工挖孔桩施工、有限空间内钢筋笼运输及安装技术 5 个工序。其中富水地层内土方开挖及护壁快速施工技术、硬岩地层内人工挖孔桩施工技术、有限空间内钢筋笼运输及安装技术为依据莆田站的特点而设计出的特殊施工工法。

3.1 施工前准备

施工前根据设计蓝图提供的坐标布设导线网与水准网,通过全站仪及水准仪将平面坐标与标高传递至施工现场旁的导线点。依据基础平面设计图,明确桩位中心,以桩位中点为圆心,以桩身半径加护壁厚度为半径画出上部的圆周,喷红油漆作为桩孔开挖规格线,采用微小型挖机及专用道砟耙对桩位处道砟进行清理。挖孔桩顶部设置锁口井圈,采用自拌混凝土进行施工锁口井圈施工,宜高出地面 30~50 cm,以防止道砟流失。

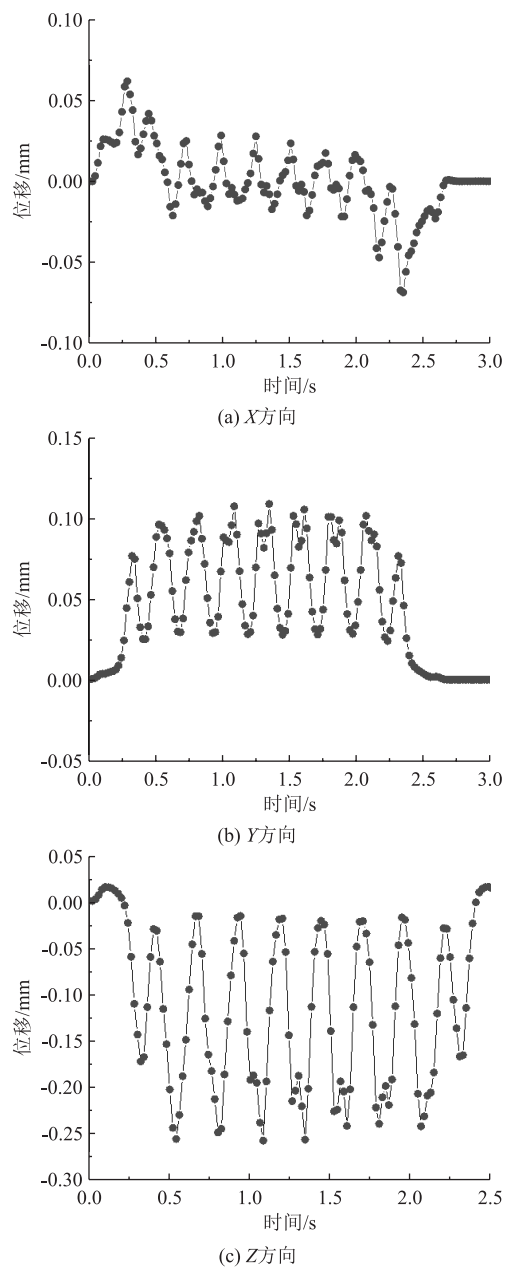


图 6 单向行车时桩体中心点位移图

3.2 无水软土地层内护壁施工技术

人工挖孔桩开挖自上而下进行,当地下水较小时,孔桩护壁采用现浇 C30 混凝土,由上至下,边开挖边分节浇筑。每节护壁厚度采用上大下小不同厚度,上下节搭接长度为 7 cm。护壁模板采用特质木模板,通过扣件连接,待上部混凝土稳定后拆除模板支护下层,循环使用。为节省孔桩内操作空间,模板之间不设水平支撑,在每节模板的上下端各设一道槽钢或角钢制成的内钢圈用于支撑,避免受到张力后模板变形。单一循环护壁必须连续施工完毕,护壁混凝土采用人工锤击的方法振捣密实,根据土层渗水情况添加早强剂,当护壁混凝土达到 1.2 MPa 强度后再开挖下

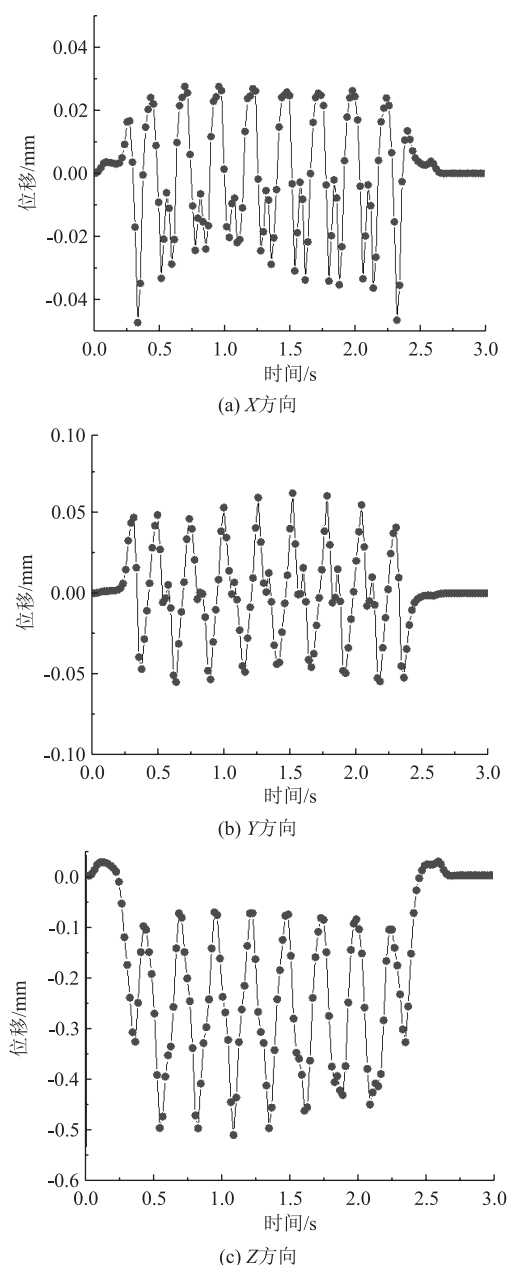


图7 双向行车时桩体中心点位移图

一节段,直到开挖至富水地层。

3.3 富水地层内土方开挖及护壁快速施工技术

在富水地层内进行人工挖孔桩施工时,护壁混凝土达到预期强度的时间大大延长,在极其有限的高速铁路站区施工天窗期内,混凝土护壁施工极大的加剧了施工的时间矛盾。因此,在富水地层内采用钢筒护壁的方式代替了传统的混凝土护壁。钢护壁的施工方式为:人工土方施工完成后,将预制的钢筒护壁吊装至开挖面上,采用钢筒护壁代替混凝土护壁,而后继续进行土方开挖施工。此方式省去了富水地层内混凝土护壁施工的工序,大大缩短了施工时间。钢筒护壁的长1.5 m,厚2 mm。首个钢筒护壁的直径要

略小于上一混凝土护壁的直径,以保证护壁之间相互错开,保持护壁的稳定性。人工土方开挖的半径与钢筒护壁直径相匹配,待护壁吊装至预定位置后,便开始下一阶段土方的施工。每一阶段土方施工时,土方开挖直径减小5 cm,钢筒直径也相应减小5 cm,以此来保证上下护壁之间相对错开,加强护壁结构的稳定性,如此循环往复,直至施工至中风化花岗岩地层,此后地层不再使用钢筒护壁。

3.4 硬岩地层内人工挖孔桩施工技术

软土地层内采用风镐与铁锹能够较快地破碎和清理土方,但是在强度较大的中风化和微风化地层中采用风镐和铁锹施工速度极慢。因此,在硬岩地层内采取了水磨钻破岩的施工方法。水磨钻的施工步骤包括:

(1) 利用混凝土对坑底进行找平。

(2) 钻取四周岩石:在岩面四周进行钻孔,采用直径150 mm的钻杆,按照咬合20 mm进行钻孔,沿孔壁依次钻孔,钻孔之前采用红油漆在岩面上大致定位。单次钻取岩芯长度宜为500~800 mm,单循环需钻孔两次,待所有外围岩芯钻取完成后,桩内岩石四周均与钻孔长度大小的孔壁形成临空面。

(3) 钻取中间岩石:沿桩半径钻取岩芯,设计孔桩直径为1.5 m与1.25 m,根据孔桩直径以及岩石强度将桩芯岩体分成三等分或四等分,以便于岩体破裂。

(4) 风镐打孔:用风镐在桩芯岩体上轴向或者斜向钻眼,将桩岩石分解成6份或8份,再逐一分解破除。

(5) 在钻眼内插入钢楔并通过击打钢楔瓦解岩石:沿桩基轴向风镐钻出的孔内打入钢楔,在水平撞击力作用下岩石沿铅锤面开裂,底部会发生水平剪切破坏。岩石被分层瓦解,直至该层桩芯岩体全部破裂。

(6) 人工装渣,提升系统出渣:一次单循环完成后,将钻取后的芯样放入吊桶内依次出渣。

(7) 桩孔修正及下一循环的施工:水磨钻取芯后人工挖孔桩孔壁四周会呈不规则锯齿状,侵入现有桩基空间,若不及时处理则会造成下一循环有效桩径缩小,导致成孔后偏孔,因此必须采用风镐将侵占桩基空间的岩石破除。

在中风化及微风化花岗岩内进行施工中,鉴于岩石的强度较大,开挖面基本稳定,因此不进行护壁施工。该方法与传统的膨胀破岩技术相比节省了约40%左右的时间。

3.5 有限空间内钢筋笼运输及安装技术

受运营高速铁路站区内线网结构限高的影响,常

规吊装钢筋笼装置不能满足依托工程需求。因此,提出了有限空间内钢筋笼运输及安装技术,具体施工方式包括:

(1)在钢筋加工场分节加工钢筋笼,钢筋笼成型后,将某一主筋全部采用油漆刷白,并依次标注序号,方便后期钢筋笼对接;将成型的钢筋笼分为7节,每节长2.3 m。

(2)在每节钢筋笼顶、底部主筋处预留丝扣,方便各节钢筋笼之间相互连接;钢筋丝扣加工时,上端丝扣加工长度约为35 mm,下端丝扣加工长度为70 mm,将套筒全部旋进下端丝扣中,在下端预留3~5圈箍筋,使用扎丝绑扎在主筋上,待下放钢筋笼,主筋连接完成后拆掉箍筋扎丝进行绑扎。

(3)钢筋笼在场地外加工完成后,运送至作业门处,在天窗点人工通过作业通道搬运。孔口至作业门处采用方木及模板搭设材料及运土通道,钢筋笼搬运至孔口后利用孔口吊装设备垂直下放。

(4)在井口安装钢筋笼的吊装设备采用1.2 m×1.5 m×3 m(高)、1.5 m×1.5 m×3 m(高)可拆卸门式钢管架,上部用5 t手拉葫芦进行吊装,底部用长度1.8 m的16#工字钢进行支撑。钢筋笼依照加工时标识的顺序依次下放,第一节下放至井口时,利用2根 $\phi 50$ 钢管将钢筋笼架空在井口位置,再吊下一节钢筋笼至井口与上一节钢筋笼对齐,将套筒向下拧入,使上下两节钢筋笼连接成一个整体,之后循环往复,便可将全部钢筋笼下放。

(5)钢筋笼全部吊装结束后开始灌注混凝土。线间挖孔桩浇筑混凝土利用天窗点采用地泵输送。待所有浇筑工作完成,养护至混凝土强度达到相应指标时,便可在人工挖孔桩进行便梁架设的后续工作。

钢筋笼运输及安装技术解决高速铁路站区内线路高度对钢筋笼吊装的限制,成功地在受限空间内进行了钢筋笼的运输及安装。

4 现场应用及分析评价

基于提出的运营铁路内人工挖孔桩施工关键技术,莆田站涉铁项目于2021年4月23日开始莆田站西侧轨道内人工挖孔桩的施工。2021年5月12日西侧人工挖孔桩完成土方及岩石开挖,5月13日开始浇筑混凝土,人工挖孔桩工程于当日结束,在预定时间内圆满的完成了施工任务。

该技术现场应用结果证明,提出的高速运营铁路内人工挖孔桩施工关键技术成功突破了复杂地质环境、有限作业时间、受限作业空间等条件的限制,安

全、快速、高效地完成了施工任务,证实了该技术的可行性和安全性。

5 结论

本文以杭深铁路莆田站运营铁路站区人工挖孔桩的施工为依托,采用有限元软件研究了列车振动荷载作用下桩体结构的沉降变形,评估了列车运行期间的安全性,得出如下结论:

(1)列车运行对桩体产生的扰动较小,桩体的变形最大值为0.51 mm,不会影响列车的正常运行,桩体的结构和设计参数是合理安全的。

(2)提出了富水地层内土方开挖及护壁快速施工技术、硬岩地层内人工挖孔桩施工技术、有限空间内钢筋笼运输及安装技术,形成了运营铁路站区内人工挖孔桩施工技术,并成功应用于莆田站的现场施工。

(3)该技术成功突破了复杂地质环境、有限作业时间、受限作业空间等条件的限制,安全、快速、高效地完成了施工任务,验证了该技术的可行性、安全性,也为类似的工程提供了有力的参考。

参考文献:

- [1] 解建超. 新建铁路下穿对运营高铁桥梁变形影响研究[J]. 铁道勘察, 2021, 47(3): 51-55, 60.
XIE Jianchao. Study on the Influence of the Newly-built Railway on High-speed Railway Bridge Deformation [J]. Railway Investigation and Surveying, 2021, 47(3): 51-55, 60.
- [2] 王玉璞,程文明. D24施工便梁有限元分析及优化设计[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 5-8.
WANG Yupu, CHENG Wenming. Finite Element Analysis and Optimization Design of D24 Construction Beams [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(4): 5-8.
- [3] 秦虎,马亢,贾剑青. 隧道下穿对上覆铁路线的影响及风险管控研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(S2): 871-877.
QIN Hu, MA Kang, JIA Jianqing. Influences of Tunnel Underpass on Overlying Railway Lines and Safety Risk Control [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S2): 871-877.
- [4] 任高峰,张卅卅,胡仲春,等. 铁路营业线桥涵施工测斜技术研究及变形机制分析[J]. 施工技术, 2014, 43(11): 40-44.
REN Gaofeng, ZHANG Sasa, HU Zhongchun, et al. Study on Inclinator Technology for Bridge and Culvert Construction on Operating Railway Line and Analysis of Deformation Mechanism [J]. Construction Technology, 2014, 43(11): 40-44.
- [5] 王红霞. 人工挖孔桩群桩施工效率的提升[J]. 施工技术, 2017, 46(S1): 119-121.
WANG Hongxia. Construction Efficiency Improvement of Group Artificially Excavated Piles [J]. Construction Technology, 2017,

46(S1): 119 – 121.

[6] 彭必建. 考虑窜孔效应的人工挖孔桩护壁设计方法研究[J]. 地质与勘探, 2016, 52(2): 307 – 315.

PENG Bijian. A Design Method for Protective Wall of Artificial-dug Pile Hole Considering Effect of Hole Connection [J]. Geology and Exploration, 2016, 52(2): 307 – 315.

[7] BIAN Xuecheng, JIANG Hongguang, CHEN Yunmin, et al. A Full-scale Physical Model Test Apparatus for Investigating the Dynamic Performance of the Slab Track System of a High-speed Railway [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(2): 554 – 571.

(上接第 93 页)

也最小。

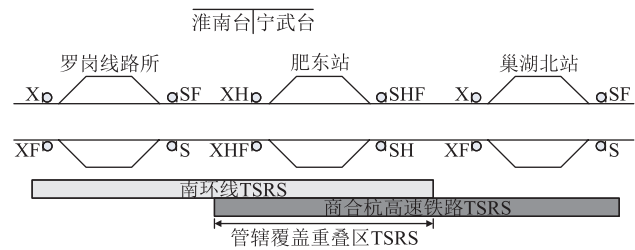


图 6 调度重新划分后临时限速管辖范围示意图

4 结论

本文从工程设计角度出发,依据沿江高铁引入合肥枢纽后工程实际情况,提出枢纽内调度划分方案,分析了各方案的优缺点,经比选提出最为合理的调度划分,不但提高了运输调度能力,还从根本上解决了调度划分引起的临时限速服务器接口容量不满足规范的问题。总结今后枢纽内调度划分及 TSRS 设置时可借鉴的经验如下:

(1)分析枢纽内 TSRS 的设置原则,着重研究枢纽内 TSRS 设置与调度台划分的相互影响及制约关系,如调度区划引起 TSRS 设置原则不满足规范要求的问题。从既能满足运输需求又可合理设置 TSRS 的角度出发,提出枢纽 TSRS 设置原则及对枢纽调度区划调整的建议措施。

(2)为满足运输要求,枢纽内存在 2 站夹 1 短区间或规模较大站场的情况,复杂的站场及线路情况为枢纽内调度划分及 TSRS 设置增加了难度。尤其是新建线路引入既有接轨站时,需结合调度区划与 TSRS 设置间的关联性,对枢纽内 TSRS 设置方案进行综合分析。

参考文献:

[1] 张广军,张博. 高铁接入既有铁路枢纽信号系统改造方案研究

[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(3): 153 – 156, 161.

ZHANG Guangjun, ZHANG Bo. Research on Upgrading Program for Access of High Speed Railway to Existing Railway Hub Signaling System [J]. Railway Standard Design, 2017, 61(3): 153 – 156, 161.

[2] 刘晓奇. 既有客运专线枢纽增设行调台引起的信号相关设计研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(4): 111 – 114.

LIU Xiaoqi. Research on Signal-related Design for Adding Train Operation Dispatching Platform to Existing Dedicated Passenger Railway Terminal [J]. Railway Standard Design, 2016, 60(4): 111 – 114.

[3] 中国铁路设计集团有限公司. 新建铁路沿江高速铁路上海至合肥段可行性研究[R]. 天津: 中国铁路设计集团有限公司, 2018.

China Railway Design Corporation. Feasibility Study of Shanghai-Hefei Section of New Shanghai-Chongqing-Chengdu High-speed Railway [R]. Tianjin: China Railway Design Corporation, 2018.

[4] 汤友富. 长江经济带沿江高速铁路通道规划布局研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(3): 1 – 5.

TANG Youfu. Study on Planning and Layout of Yangtze River Economic Belt High-speed Railway Corridor [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(3): 1 – 5.

[5] 罗宏伟. 合六城际铁路引入合肥枢纽方案研究[J]. 铁道运输与经济, 2017, 39(4): 48 – 52.

LUO Hongwei. Study on the Programs of Introducing Hefei-liuan Inter-city Railway into Hefei Railway Hub [J]. Railway Transport and Economy, 2017, 39(4): 48 – 52.

[6] TB/T3531 – 2018 临时限速服务器技术条件[S].

TB/T3531 – 2018 Technical Specification for Temporary Speed Restriction Server [S].

[7] TB/T3484 – 2017 列控系统应答器应用原则[S].

TB/T3484 – 2017 The Balise Application Principle for the Train Control System [S].

[8] 杨欣,邵林,邵军,等. 基于列车追踪间隔时间的高速动车组制动能力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(6): 99 – 104.

YANG Xin, SHAO Lin, SHAO Jun, et al. Calculation Method for Braking Capacity of High Speed EMU Based on Train Tracking Interval Time [J]. China Railway Science, 2013, 34(6): 99 – 104.