

## 合新高速铁路五河站软基螺纹桩设计的数值模拟试验

杨 雷<sup>1</sup> 白鹏俊<sup>1</sup> 谭 博<sup>1</sup> 周仁战<sup>2</sup> 欧元超<sup>2</sup>

1. 中铁十五局集团第二工程有限公司, 上海 201714

2. 蚌埠学院土木与水利工程学院, 安徽 蚌埠 233030

[摘要]随着我国高速铁路里程的增加, 软土地基变形控制有着更严格要求, 软基处理中螺纹桩因其承载特性优异而被广泛应用, 但螺纹桩的设计较为复杂, 其承载特性与桩径、螺纹占比、螺距和螺纹宽度都有紧密关系, 合理的设计不仅能够减小混凝土用量, 也起到软基加固作用。本篇文章结合合新铁路五河站段工程的软土地质条件, 以螺纹占比、螺距和螺纹宽度等因素开展正交模型试验研究, 结果显示各种因素对桩竖向沉降影响的次序由大到小为: 螺纹占比, 螺距, 螺宽; 最优因素参数组合为螺纹占比 1/2、螺距 0.5m、螺宽 0.05m。根据研究分析, 通过现场试桩静载试验, 满足了工程需求。

[关键词]合新铁路五河站; 软土处理; 螺旋桩; 数值模拟; 正交试验

DOI: 10.33142/aem.v6i10.14369 中图分类号: U448.2 文献标识码: A

## Numerical Simulation Test of Soft Foundation Threaded Pile Design for Wuhe Station of Hexin High Speed Railway

YANG Lei<sup>1</sup>, BAI Pengjun<sup>1</sup>, TAN Bo<sup>1</sup>, ZHOU Renzhan<sup>2</sup>, OU Yuanchao<sup>2</sup>

1. The Second Engineering Co., Ltd. of China Railway 15th Bureau Group, Shanghai, 201714, China

2. College of Civil and Hydraulic Engineering, Bengbu University, Bengbu, Anhui, 233030, China

**Abstract:** With the increase of high-speed railway mileage in China, there are stricter requirements for deformation control of soft soil foundation. Threaded piles are widely used in soft soil treatment due to their excellent bearing characteristics. However, the design of threaded piles is more complex, and their bearing characteristics are closely related to pile diameter, thread ratio, pitch, and thread width. Reasonable design can not only reduce the amount of concrete used, but also play a role in soft soil foundation reinforcement. This article combines the soft soil geological conditions of the Wuhe Station section of the Hexin Railway and conducts orthogonal model experimental research on factors such as thread ratio, pitch, and thread width. The results show that the order of the influence of various factors on the vertical settlement of piles from high to low is: thread ratio, pitch, and thread width; The optimal combination of factor parameters is thread ratio of 1/2, pitch of 0.5m, and thread width of 0.05m. According to research analysis, the on-site pile static load test has met the engineering requirements.

**Keywords:** Wuhe Station of Hexin Railway; soft soil treatment; spiral pile; numerical simulation; orthogonal experimental

### 引言

近年来,随着螺纹桩在工程中的不断应用,其施工效率、适用性、承载力以及沉降控制等方面的优势被工程人员所接受,其在高层建筑、高速铁路等大型工程中备受青睐。国内众多专家学者亦对其承载特性和荷载传递机理进行了深入研究,并探讨其在极限承载状态下桩周土体破坏模式。2002年,我国首根灌注螺纹桩在武汉问世,吴敏和李波扬利用随即开展了现场的静载试验研究,通过与传统直孔桩的对比,认为螺纹桩能够有效节约工程材料,螺纹桩的混凝土用量仅为具有相同外径的直孔灌注桩的60%~70%;根据现场试验得到的螺纹桩荷载-沉降曲线,对螺纹桩的单桩承载力计算进行了初步探讨,对螺纹桩的应用具有指导意义。

董天文等<sup>[1]</sup>基于荷载传递函数法结合地基土的双折线模型与简化竖向受压螺纹桩模型,建立了P-s(荷载-沉降)的关系函数,并通过静载试验进行了验证,得出螺

纹桩的单桩承载力公式,以及桩周土破坏形式,通过分析得到桩身承载力取决于螺距与控制螺距的大小关系,并对螺纹桩承载机理、桩身参数设计等进行了初步探讨。李家华等<sup>[2]</sup>基于双折线模型,采用荷载传递法建立了螺纹桩负摩阻力的基本微分方程,在此基础上研究了桩土相对位移、螺纹宽度、土体性质,以及时间效应等参数对螺纹桩负摩阻力的影响程度,进而推导了桩身轴力、中性点位置以及负摩阻力的计算公式。王国才<sup>[3]</sup>等利用有限单元法软件建立了包括多组具有不同径距比的螺纹桩以及具有不同直径的圆截面桩数值分析模型,经过模型分析,对桩的沉降、轴力以及侧摩阻力进行了讨论,研究表明螺纹的存在改变了桩-土相互作用的模式,径距比是螺纹桩极限承载能力的主要影响因素之一。

但长期以来,由于工程差异与地层的复杂性,理论设计总是存在弊端,而数值模拟方法却能建立符合实际情况的更加复杂的地层结构。徐春华等<sup>[4]</sup>结合静载试验及数值

计算,对桩型参数进行了深入研究,讨论了螺纹桩承载性能的影响因素,研究认为螺纹桩主要由桩侧承载,并提出提高桩侧阻力的螺牙宽厚比以及螺距的设计参数。徐学燕等<sup>[5]</sup>利用试验桩参数确定了建立了数值模拟模型,通过数值模拟分析,得出螺牙宽度增大与螺距减小均可以提高螺纹桩承载能力,并结合现场试验结果发现,螺纹桩极限承载力曲线属于缓变型曲线。冷伍明等结合模型试验和数值模拟,对直孔桩和螺纹桩竖向承载特性进行了对比研究,研究表明,螺纹表现为摩擦桩属性,试验结果得出螺纹桩的极限承载力为直孔桩的 1.48~2.43 倍,材料利用率为直孔桩的 12.19~3.38 倍;螺距和螺纹宽度应为桩身参数设计重点。

综上所述,螺纹占比,螺距,螺宽等因素是螺纹桩承载能力的主要影响因素。本文将基于合新高速铁路五河站软基处理工程为背景,通过数值模拟研究确定最佳的螺纹桩设计参数,并在现场开展工业性试验以验证螺纹桩承载力,为螺纹桩的设计提供技术路径。

## 1 工程概况

新建合肥至新沂铁路自合肥枢纽引出,经定远、明光、五河、泗县和江苏宿迁,至新沂枢纽,全长 343.5km,设计时速 350km,见图 1 所示。其中安徽段 HXZQ-2 标位于安徽省蚌埠市五河县境内,起讫里程为 DK142+480.412~DK172+371.46,沿线水沟分布较多,地下水埋深在 0.3~1.0m,见图 2 所示,软基加固问题迫切。五河站路基填筑段主要工程量包含路基填筑、站场软基处理;站场软基处理措施主要包含 PHC 管桩、水泥搅拌桩、塑料排水板及螺纹桩;其中螺纹桩加固区域为 DK158+996~DK159+060.17、DK159+081.83~DK159+459.78、DK163+493.22~DK163+728.11 段正线及 3、4 线。



图 1 新建合肥至新沂铁路建设工程概况



图 2 地下水埋深浅及工程现场雨季积水情况

因场地内软土地层厚度大,受地下水影响显著,高铁运行存在较大冲击荷载,且对地基沉降变形有严格控制要求,在经过项目管理专家评审后形成相关意见,建议采取螺旋桩加固处理。桩顶设 C35 圆形素混凝土桩帽。螺纹桩上部褥垫层 AB 料回填,为 20cm 中砂垫层及 40cm 的碎石垫层,褥垫层内铺设二层双向经编涤纶土工格栅,褥垫层上部为路基填料填筑层至路床表层。但是,螺纹桩的具体设计成为工程软基处理的关键。为指导施工设计,基于现场地层的勘探资料,建立螺纹桩承载的数值模型,通过正交试验获得螺纹占比,螺距,螺宽等因素对螺纹桩承载特性的影响规律,获得最优设计参数。

## 2 螺纹桩承载的正交试验分析

### 2.1 螺纹桩正交试验设计

模型确定螺纹桩桩身采用 C35 混凝土,桩长 16m,桩径 0.5m,弹性模量为 30GPa,泊松比取 0.2。模型尺寸确定水平方向为 5m,垂直方向为 18.5m。土体材料选取软土,确定弹性模量为 3.5MPa,泊松比为 0.3,土体黏聚力为 20kPa。数值试验采用正交试验的方法,以螺纹桩的螺纹占比(因素 A)、螺距(因素 B)和螺宽(因素 C)试验因素,每种因素设定 3 个水平,开展正交试验的因素和水平列于表 1,最终选用  $L_9(3^3)$  正交试验见表 2。

表 1 正交试验因素-水平表

| 因素/水平 | 螺纹占比 | 螺距/m | 螺宽/m |
|-------|------|------|------|
| 1     | 2/3  | 0.5  | 0.05 |
| 2     | 1/2  | 0.6  | 0.08 |
| 3     | 1/3  | 0.8  | 0.11 |

表 2 正交试验表 $[L_9(3^3)]$

| 编号 | 螺纹占比 (A) | 螺距 (C) /m | 螺宽 (B) /m |
|----|----------|-----------|-----------|
| 1  | 2/3      | 0.5       | 0.05      |
| 2  | 2/3      | 0.6       | 0.08      |
| 3  | 2/3      | 0.8       | 0.11      |
| 4  | 1/2      | 0.5       | 0.08      |
| 5  | 1/2      | 0.6       | 0.11      |
| 6  | 1/2      | 0.8       | 0.05      |
| 7  | 1/3      | 0.5       | 0.11      |
| 8  | 1/3      | 0.6       | 0.05      |
| 9  | 1/3      | 0.8       | 0.08      |

采用有限元软件 Flac3D 开展上述不同螺纹桩结构参数的承载特性模拟研究。鉴于在前处理方面,Flac3D 对于复杂不规则三维模型的建立比较困难,研究采用 Rhino 建立三维几何模型。采用 Rhino 建立几何模型后,通过 Griddle 高级网格插件进行网格剖分,在研究范围内以最大每 0.1m,最小 0.05m 划分网格,将生成后的网格文件导入 Flac3D 中,该模型共有 501331 个单元和 450506 个节点,Flac3D 三维模型如图 3 所示。

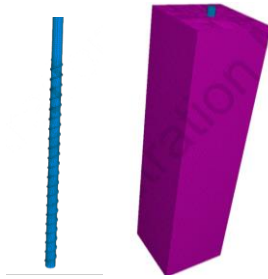


图3 正交试验所建不同螺纹桩的模型

土体模型采用 Mohr-Coulomb, 不考虑塑性流动 (不考虑剪胀)。另外, 螺纹桩受到外荷载, 桩周土体遭到破坏, 而由于桩体自身刚度较大, 在外荷载作用下几乎不会发生破坏, 使用线弹性模型。荷载作用过程中, 桩土的接触面是桩身的外表面和与之接触的土体。相互作用的类型为表面与表面接触, 遵循主从面 (Master-Slave) 接触原

则, 将刚性更大的桩体外表面设置为主面, 土体表面设置为从面。根据实际情况, 需要对模型的边界条件进行设置, 模型的上部边界为自由边界, 左右边界固定  $x$  方向位移, 前后边界固定  $y$  方向位移, 模型底部固定  $z$  方向位移。

## 2.2 螺纹桩正交试验结果分析

在螺纹桩的承载特性正交试验模拟中, 采用分级加载方式, 最大荷载直至 1500kN。据图 4 可知, 螺纹桩桩体的竖向应力分布从桩顶至桩底呈减小趋势, 主要承受压应力, 桩体上部 70% 承担主要的荷载作用。螺纹之间的土体跟随螺纹桩的沉降产生较大的压应力, 附近地层靠上部存在拉应力区, 靠下部为压应力区, 中性点位置受螺纹占比、螺距、螺宽的综合影响, 其中模型 5、6、8、9 中全部受压。模型中设定的各监测点在最大加载的沉降如表 3 所示。

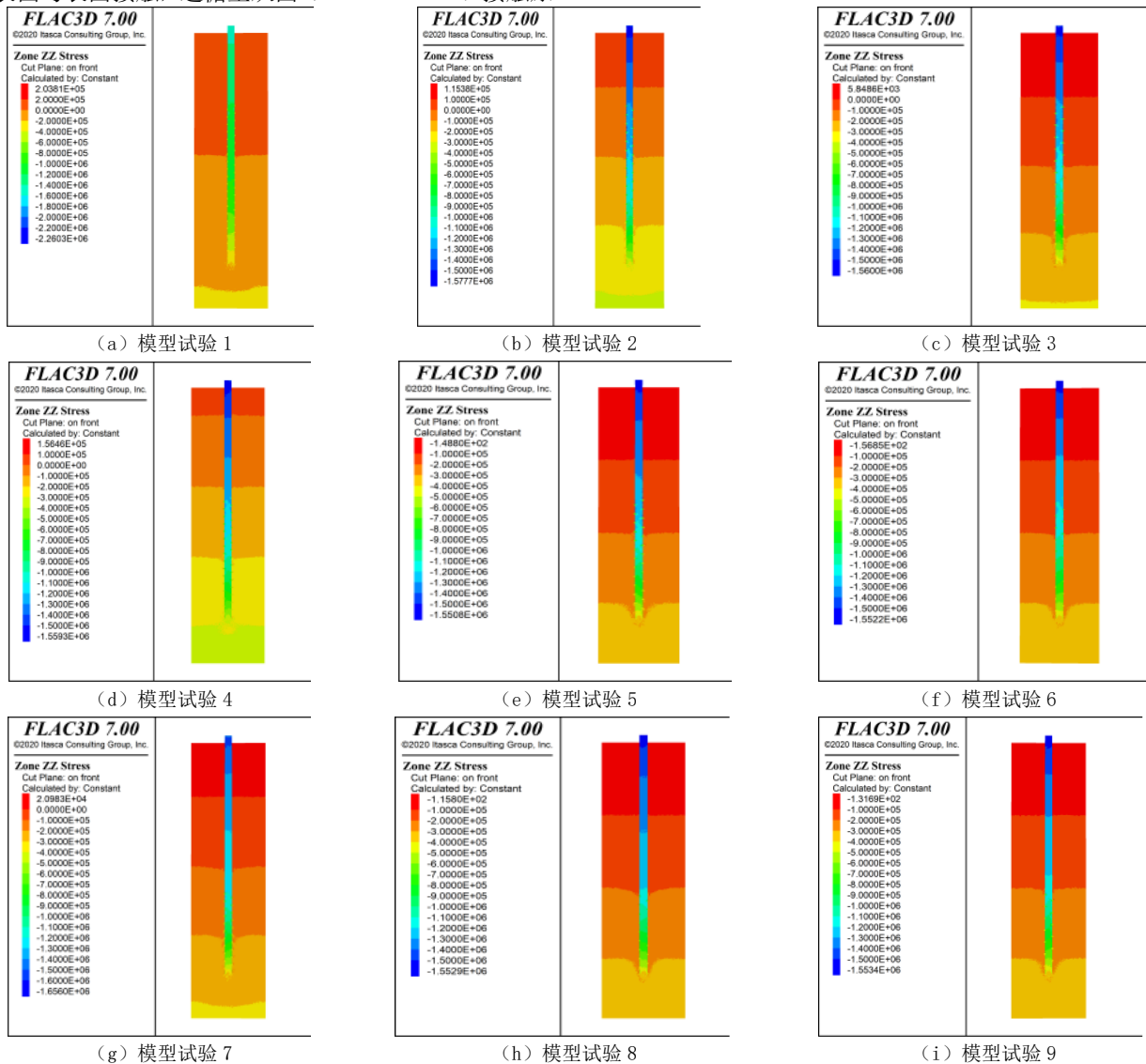


图4 螺纹桩模拟加载下竖向应力云图

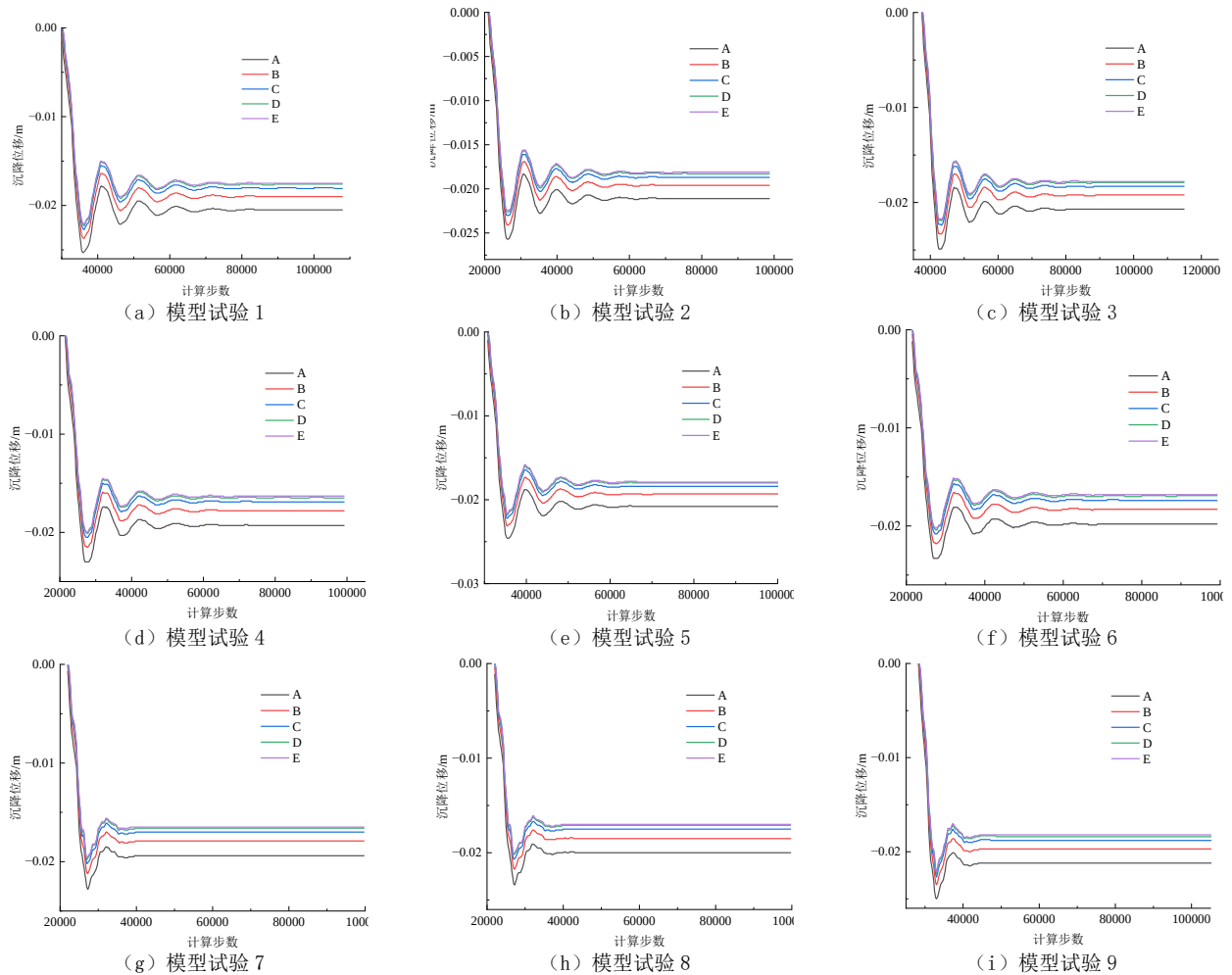


图5 螺旋桩模拟加载下竖向沉降变形云图

表3 正交数值试验的极差与显著性分析

| 试验号 | 有效桩长 H/m | 桩径 D/m | 螺纹占比   | 螺距/m | 螺宽/m | 最大竖直沉降量/m |
|-----|----------|--------|--------|------|------|-----------|
| 1-1 | 16       | 0.5    | 2/3    | 0.5  | 0.05 | 0.0253    |
| 1-2 | 16       | 0.5    | 2/3    | 0.6  | 0.08 | 0.0257    |
| 1-3 | 16       | 0.5    | 2/3    | 0.8  | 0.11 | 0.0249    |
| 1-4 | 16       | 0.5    | 1/2    | 0.5  | 0.08 | 0.023     |
| 1-5 | 16       | 0.5    | 1/2    | 0.6  | 0.11 | 0.0246    |
| 1-6 | 16       | 0.5    | 1/2    | 0.8  | 0.05 | 0.0233    |
| 1-7 | 16       | 0.5    | 1/3    | 0.5  | 0.11 | 0.0228    |
| 1-8 | 16       | 0.5    | 1/3    | 0.6  | 0.05 | 0.0234    |
| 1-9 | 16       | 0.5    | 1/3    | 0.8  | 0.08 | 0.0250    |
| K1  | 0.0253   | 0.0237 | 0.024  |      |      |           |
| K2  | 0.0236   | 0.0246 | 0.0246 |      |      |           |
| K3  | 0.0237   | 0.0244 | 0.0241 |      |      |           |
| R   | 0.0017   | 0.0009 | 0.0006 |      |      |           |

从桩中心至模型边界分别定义监测点标记为 A~E，设置 history 监测步获得地表桩基一定范围内的沉降变

化规律，如图 5 所示。

以最大沉降量为指标进行正交试验极差分析，得到各



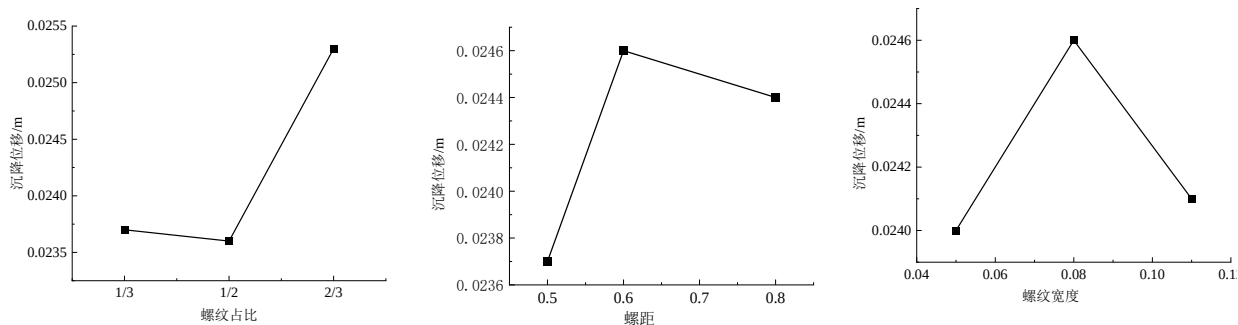


图6 螺紋桩沉降位移随螺紋占比的变化曲线

因素的显著性排序,如表3所示。基于每个水平对应的均值与极差得到各因素下竖向沉降量最小值对应的最佳水平参数值,获得在抗压承载性能为评价指标下的螺旋桩最优设计参数。各种因素对桩竖向沉降量影响三个因素的影响次序由大到小为:螺紋占比,螺距,螺宽。通过正交试验分析可以得到最优因素参数组合为螺紋占比 1/2、螺距 0.5m、螺宽 0.05m。由图6可见,螺紋桩沉降随螺紋占比先减小后增大,随螺距先增大后减小,随螺紋宽度先增大后减小。

### 3 现场试桩分析

根据《铁路工程基桩检测技术规程(TB10218-2019)》的3.1.2基桩检测开始时间对桩基进行了低应变、单桩承载力及钻孔取芯。采用低应变反射波法对螺紋桩进行桩身完整性检测,检测时受检桩桩身混凝土强度不应低于设计强度的70%,且不应低于15MPa,或桩身混凝土龄期不小于14d。混凝土灌注桩单桩静载试验在混凝土浇筑完成28d后进行,桩身混凝土强度达到设计强度要求。通过成桩监测结果发现,该技术方案及施工工艺设计收到较好的施工效果,有效提高了该段厚软土、广分布、浅水位特征的高铁软土路基承载力,施工现场见图7所示,保障了高铁运行安全,可为类似高铁软土路基工程治理提供一定技术参考。



图7 全螺紋桩身施工验证施工效果

### 4 结语

在高速铁路工程中,如何正确处理软土地基问题对保障施工与高铁运行安全有着至关重要的作用。随着螺紋桩的优异特性凸显,其应用越来越广泛。由于工程地质条件的复杂性,数值方法能够建立更加符合实际情况的地层模型,在螺紋桩的承载研究与工程设计中不失为一条有效的路径。本文结合工程地质条件开展螺紋桩的数值模拟正交试验研究,结果表明:各种因素对桩竖向沉降影响的次序由大到小为:螺紋占比,螺距,螺宽;最优因素参数组合为螺紋占比 1/2、螺距 0.5m、螺宽 0.05m。相关研究为螺紋桩的设计提供技术参考。

基金项目:安徽省高校自然科学研究重点项目(2024AH051179);安徽省高等学校省级质量工程“六卓越一拔尖”项目(2023zybj055);安徽省高等学校省级质量工程校企合作实践教育基地项目(2023xqhz075);蚌埠学院校级科学研究项目(2024YYX61QD)。

#### 【参考文献】

- [1]董天文,梁力,黄连壮,等.螺旋群桩基础承载性状试验研究[J].岩土力学,2008,29(4):893-896.
- [2]李家华,窦德功,鲁子爱.螺紋桩负摩阻力计算方法[J].科学技术与工程,2012,20(25):6369-6372.
- [3]王国才,赵志明,奚灵智,等.螺紋桩竖向承载特性研究[J].浙江工业大学学报,2020,48(1):90-97.
- [4]徐春华,张小冬,徐学燕.混凝土灌注螺紋桩设计参数的应用研究[J].工业建筑,2010(10):91-94.
- [5]徐学燕,于琳琳,刘复孝.滚压成型灌注螺紋桩承载性能研究[J].土木建筑与环境工程,2011,33(3):19-24.
- [6]冷伍明,魏广帅,聂如松,等.螺紋桩竖向承载特性及承载机理研究[J].铁道工程学报,2020,37(5):1-6.

作者简介:杨雷(1981.2—),男,安徽宿州,大学本科,高级工程师,专业方向:土木工程施工。