

文章编号: 1674—8247(2024)03—0073—08

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.03.014

# 高压旋喷桩单桩施工挤土效应数值模拟分析

王宇<sup>1</sup> 黄德贵<sup>2</sup>

(1. 成都华丰工程勘察设计有限公司, 成都 610041; 2. 西南交通大学, 成都 610031)

**摘要:**为研究高压旋喷桩加固区域近接既有高速铁路时,高压旋喷桩施工造成周围土体变形的规律,依托杭甬高速铁路198号桥墩所在断面,结合现场试验,采用有限差分软件FLAC3D模拟高压旋喷桩施工,探究高压旋喷桩单桩注浆压力、桩长和土体模量变化对挤土效应范围的影响。结果表明:(1)现场试验中单桩挤土效应影响距离约16.5 m,占桩长的82.5%;(2)高压旋喷桩单桩施工挤土效应影响距离与注浆压力、桩长呈正相关;(3)单桩注浆压力增大,桩长增长,挤土效应影响距离增大;(4)桩周土体模量增大,高压旋喷桩的挤土效应影响距离减小;(5)高压旋喷桩近接既有高速铁路施工时,需确定正确施工参数并进行变形监测,必要时采取变形控制措施。

**关键词:**高压旋喷桩;挤土效应;现场试验;数值模拟

中图分类号:U213.1;TU473.1 文献标志码:A

## A Numerical Simulation Analysis of Soil Displacement Effects Induced by Construction of Single High-pressure Jet Grouted Pile

WANG Yu<sup>1</sup> HUANG Degui<sup>2</sup>

(1. Chengdu Huafeng Engineering Survey and Design Co., Ltd., Chengdu 610041, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** To investigate the pattern of soil deformation around high-pressure jet grouted piles when they are installed in close proximity to an existing high-speed railway, this study focused on the cross-section where Pier No. 198 of Hangzhou-Ningbo High-speed Railway is located. Combining field tests with numerical simulations using the finite difference software FLAC3D, it examined the influence of grouting pressure, pile length, and soil modulus on the extent of soil displacement effects caused by a single high-pressure jet grouting pile. Findings reveal that: (1) In field tests, the soil displacement effect induced by single pile extended up to approximately 16.5 m, accounting for 82.5% of the pile length. (2) There exists a positive correlation between the extent of soil displacement effects induced by a single high-pressure jet grouted pile and both grouting pressure and pile length. (3) As the grouting pressure increases and the pile length grows, the affected distance of the soil displacement effect expands. (4) An increase in the modulus of soil surrounding the pile leads to a decrease in the extent of the soil displacement effect associated with high-pressure jet grouting. (5) During the construction of high-pressure jet grouted piles in close proximity to existing high-speed railways, it is essential to establish appropriate construction parameters and conduct deformation monitoring, implementing deformation control measures if necessary.

**Key words:** high-pressure jet grouted pile; soil displacement effects; field tests; numerical simulation

收稿日期:2023-05-31

作者简介:王宇(1990-),男,工程师。

引文格式:王宇,黄德贵. 高压旋喷桩单桩施工挤土效应数值模拟分析[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(3):73-80.

WANG Yu, HUANG Degui. A Numerical Simulation Analysis of Soil Displacement Effects Induced by Construction of Single High-pressure Jet Grouted Pile[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(3):73-80.

随着高速铁路线路里程的持续增长,线下基础变形问题日趋复杂<sup>[1]</sup>,特别是在遇到承载力不足、变形显著的天然地基时,高速铁路安全和使用条件往往不满足规范要求<sup>[2-3]</sup>。为解决这一问题,高压旋喷桩作为一种施工方法多样、施工成本低的复合地基<sup>[4-5]</sup>,在高速铁路工程中得到广泛应用。

高压旋喷桩喷射高压水泥浆并冲切土体,浆液与土体拌合,在地层中经过化学反应后形成圆柱状固结体以加固地基,在与铁路邻近的工程项目中得到广泛应用<sup>[6-9]</sup>。高压旋喷桩注浆压力一般在 20~30 MPa,注浆量随施工过程的进行而增加,高压旋喷桩施工会导致周围土体产生显著变形。高压旋喷桩加固区域近接既有高速铁路线路时,旋喷桩施工可能对既有高速铁路线路构筑物产生不利影响。为保证既有高速铁路线路高安全性、舒适性和平顺性<sup>[10-12]</sup>,研究高压旋喷桩施工的挤土效应范围意义重大。朱利明<sup>[13]</sup>等使用 Abaqus 模拟不同施工压力对既有高速铁路桥梁桩基础的影响,从动力和静力两个方面评估结构现状,并提出处理措施。何大为<sup>[14]</sup>等设计出一套室内高压旋喷注浆设备,研究高压旋喷注浆过程引起周边土体中孔隙水压力与高速铁路桥墩位移的变化规律。

本文以绍兴市 329 国道智慧快速路改造工程近接杭甬高速铁路段地基加固工程为背景,开展高压旋喷桩单桩试验,以探究单桩施工引起深厚软土地区邻近地层变形的规律;在现场试验基础上,使用有限差分软件 FLAC3D 建立单桩三维模型,研究高压旋喷桩单桩的注浆压力、桩长、土体参数变化对周围地层挤土效应的影响规律。

## 1 工程概况

绍兴市 329 国道智慧快速路改造工程是该市城市智慧道路快速系统和地下管廊工程重要组成部分。工程所在地属我国东南部典型深厚软土地区,粉质黏土层深度超过 50 m,最低基本承载力小于 60 kPa。综合工程成本、施工等因素后采用高压旋喷桩进行地基处理。329 国道智慧快速路主线设计速度 80 km/h,地面道路标准宽度 47.5 m,与杭甬高速铁路近接的涉铁段道路全长 1 892 m。高压旋喷桩地基处理区域与杭甬高速铁路桥墩之间最小距离为 44 m,虽大于工程正常保护距离,但为确保高速铁路安全运行,仍进行了现场试验,以分析高压旋喷桩单桩施工对周围深厚软土地层变形的影响。

拟建场地属萧绍滨海相沉积平原地貌单元,上部为新近堆积填土、湖沼相沉积黏性土层和海相沉积淤

泥质软土层,中、下部为冲湖相、河湖相沉积黏性土层及砂层,下伏基岩为壳山组凝灰岩。根据勘察资料可将杭甬高速铁路 198 号桥墩断面地基土层分为 4 层,分别为黏质粉土夹粉质黏土(-0.0~-10.0 m)、淤泥质黏土(-10.0~-15.3 m)、粉质黏土(-15.3~-23.4 m)和粉质黏土(-23.4~-45.0 m)。工程范围内沿线穿越绍哨线航道,其水位、流量均受气候影响,季节性变化较明显。沿线地下水分为第四系浅层松散岩类孔隙潜水、深部松散岩类孔隙承压水和基岩裂隙水。拟建工程区内土层渗透性试验结果表明,该区域土层均具极低透水性。

## 2 现场试验与监测

### 2.1 试验布置

为探究高压旋喷桩施工过程中周围地层土体变形规律,开展了单桩现场试验。试验需实时采集地层变形数据并分析总结相关规律,单桩试验位置如图 1 所示。综合考虑单桩试验点位、加固区位置及高速铁路桥墩位置,在既有线高速铁路桥墩和单桩之间布设地层水平位移监测点,以实现周围地层水平位移的实时监测,单桩试验监测点与测斜仪布设剖面如图 2 所示。布设 5 个深度同为 31 m 的监测点,水平方向依照距桩从近至远编号监测点 1~监测点 5,距离分别为 3 m、9.4 m、18.4 m、32.3 m、44.6 m;测点竖向按间隔 3 m 深度设置测斜传感器。

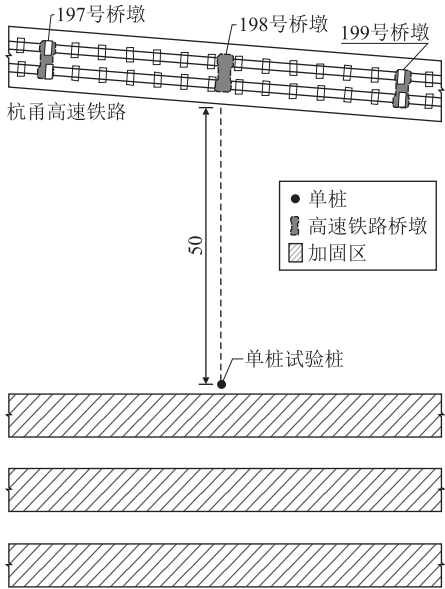


图1 单桩试验平面示意图(m)

### 2.2 试验参数

单桩采用二重管旋喷法施工,具体试验关键技术参数如表 1 所示。

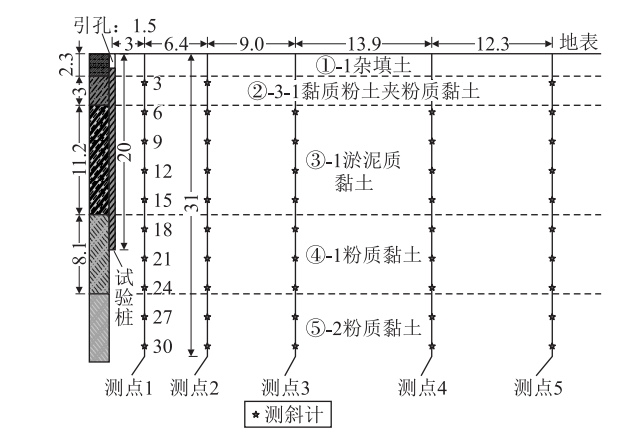


图2 单桩试验监测点与测斜仪布设剖面图(m)

表1 单桩试验关键技术参数表			
项目	参数	项目	参数
旋喷种类	二重管旋喷	桩径/mm	600
浆压/MPa	25	桩长/m	18.5
转速/(r/min)	20	引孔深度/m	1.5
浆液材料及配比	P. 042. 5矿渣硅酸盐水泥, 水灰比1: 1	提升速度/(cm/min)	20

2.3 单桩水平位移监测结果

单桩试验结束时5个测斜点水平位移曲线及测斜点水平位移最大值随水平距离的变化情况如图3所示。单桩试验表明,施工对监测点1、监测点2所在地层范围造成影响较大,且淤泥质黏土层(−5.3~−16.5 m)受侧向挤压较其他土层显著。随着与试验桩水平距离的增大,单桩施工引起土体变形衰减速度很快,监测点1~监测点5最大水平位移实测值分别为12.1 mm、3.6 mm、1.6 mm、1.1 mm、0.5 mm。高速铁路无砟轨道桥梁墩顶横向、纵向及竖向位移均须控制在2 mm以内<sup>[15]</sup>。按照位移2 mm为控制标准可知,施工参数为表1所示参数时,单桩挤土效应影响距离约16.5 m,占桩长的82.5%。

3 数值模拟方法

根据现场单桩试验,采用有限差分软件FLAC3D计算单桩施工造成的邻近地层水平位移。数值模拟假设:①土体不考虑微观结构和内部孔隙,均为各向同性均匀介质;②土体分层时简化起伏变化划分为水平地层;③不考虑地下水及地下管网等工程构筑物。

3.1 单桩数值模拟模型

3.1.1 建立模型及选取参数

单桩数值模型长145 m,宽33 m,深45 m。单桩桩径为0.6 m,桩长18.5 m。既有高速铁路桥台长10 m,

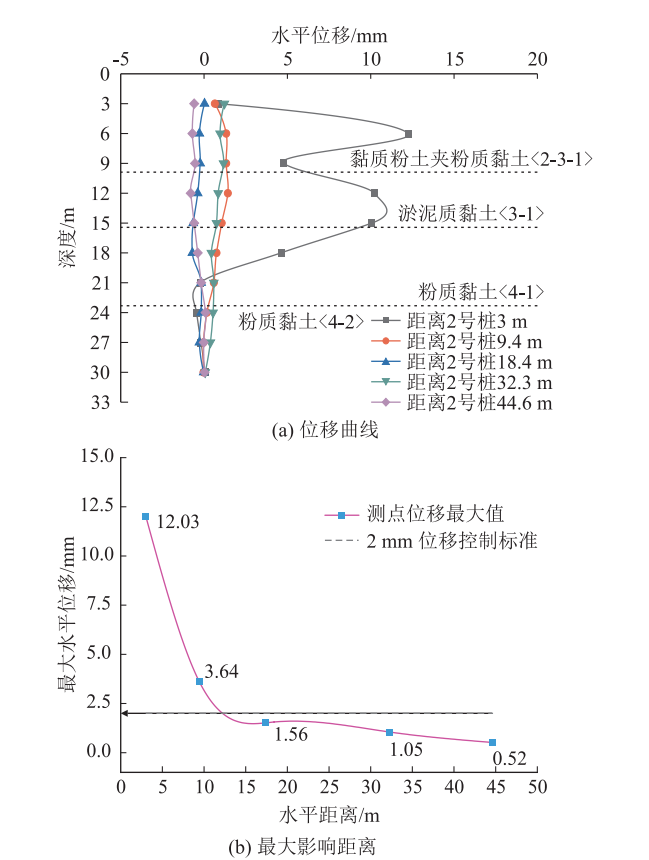


图3 单桩试验结束时测点变形及影响距离图

宽8 m,高2 m,埋深0.5 m;桥墩长6.4 m,宽3.2 m,高9.6 m。考虑到网格尺寸对结果准确性的影响,在高压旋喷桩附近设置加密网格。

假定土体服从摩尔–库伦准则,采用理想弹塑性单元模拟,参数如表2所示。

表2 有限差分模型土体材料参数表					
土层名称	内摩擦角/(°)	黏聚力/Pa	弹性模量/Pa	泊松比	密度/(kg/m <sup>3</sup> )
黏质粉土夹粉质黏土	25.0	13.0×10 <sup>3</sup>	18.9×10 <sup>6</sup>	0.3	1 860
淤泥质黏土	11.0	13.5×10 <sup>3</sup>	5.4×10 <sup>6</sup>	0.42	1 730
粉质黏土<4-1>	13.0	16.0×10 <sup>3</sup>	12.6×10 <sup>6</sup>	0.35	1 830
粉质黏土<4-2>	17.0	36.0×10 <sup>3</sup>	24×10 <sup>6</sup>	0.3	1 930

3.1.2 边界条件及分析步

模型边界条件为:底面边界固定 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 向位移,左右边界固定 $x$ 向位移,前后边界固定 $y$ 向位移,表面为自由面。采用静荷载模拟高压旋喷桩喷射压力,不考虑施工中的其他扰动。设置4个分析步:①天然地层地应力平衡;②节点位移、速度清零,设置桥台和桥墩实体单元,建立桩–土接触;③节点位移清零,开挖



单桩;④在单桩内部面分段加力、回填单桩实体单元,并对各个监测点进行监测。

3.2 结果分析

数值模拟所得土体水平位移如图4所示。由图4可知,高压旋喷桩施工对周围地层会造成不同程度的水平位移,出现非对称水平位移云图。高压旋喷桩施工使邻近既有高速铁路桥墩侧土层产生朝向高速铁路桥墩的水平位移,使得背离高速铁路桥墩侧土层产生远离桥墩的水平位移。由于高压旋喷桩施工对周围地层土体的挤土效应,地层产生远离高压旋喷桩的水平位移。

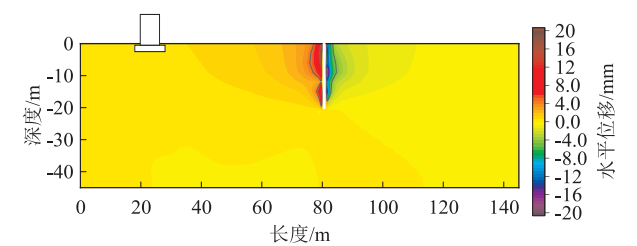


图4 数值模拟土体水平位移云图

3.3 模型验证

单桩现场试验中,为监测地层水平位移,布设5个水平位移监测点,水平方向依照由近至远编号监测点1~监测点5,与桩的距离分别为3 m、9.4 m、18.4 m、32.3 m、44.6 m。单桩现场试验和数值模拟均表明:随着监测点与试验桩水平距离的增加,单桩施工引起土体变形衰减速度很快,监测点3~监测点5处土体水平位移相对监测点1~监测点2处显著减小。

为进行有限差分模型的合理性验证,将监测点2的现场监测和数值模拟结果进行对比,如图5所示。与高压旋喷桩水平距离9.4 m处,土体位移均呈现出表层大、深层小的规律;距地表15 m深度以下,现场监测和数值模拟的地层水平位移吻合度高。因单桩现场试验时会发生冒浆,且现场试验注浆压力小于数值模拟,所以在地表至15 m深度范围内,监测点2数值模拟位移大于现场监测的位移。

综上所述,单桩现场监测和数值模拟的土体位移变化趋势吻合度高,土体位移沿水平方向衰减规律和分布规律基本一致。有限差分法单桩模型及计算参数选择合理,可以进行施工参数对挤土效应影响的分析。

4 施工参数对挤土效应的影响

现场进行高压旋喷桩试验难度大、成本高,故采

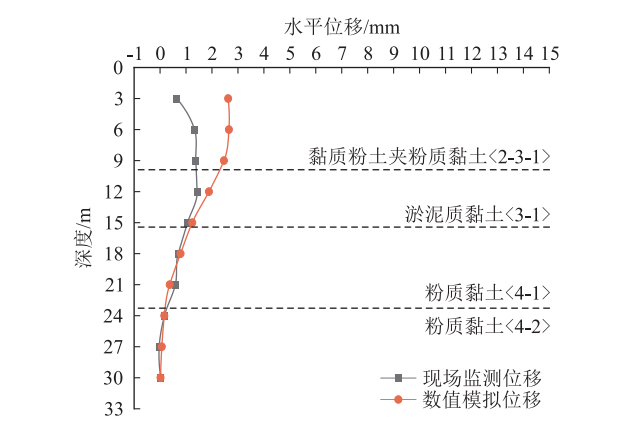


图5 单桩施工完成监测点2位移对比图

用有限差分软件FLAC3D研究施工参数(注浆压力、桩长和土体参数)对高压旋喷桩单桩施工挤土效应的影响。

4.1 施工参数对挤土效应的影响

为研究单桩注浆压力对挤土效应的影响,选取单桩桩径0.6 m,桩长18.5 m,注浆压力分别设置为20 MPa、25 MPa、30 MPa,分析监测点土体水平位移及单桩施工对既有高速铁路桥墩的位移变化规律。

(1) 监测点水平位移

提取监测点1~监测点5水平位移,分析高压旋喷桩施工时土体变形规律,不同注浆压力土体侧向位移曲线如图6所示。

由图6可知,距离2号桩3 m的监测点1的侧向位移对高压旋喷桩注浆压力变化影响最敏感,因存在淤泥质黏土层<3-1>,测点1土体的侧向位移曲线随深度呈双峰型。当注浆压力为20 MPa时,监测点1处土体的侧向位移最大值为5.09 mm,次大值为2.82 mm;当注浆压力为25 MPa时,监测点1处土体的侧向位移最大值为5.72 mm,次大值为3.86 mm;当注浆压力为30 MPa时,监测点1处土体的侧向位移最大值为8.97 mm,次大值为4.77 mm。可知,土体侧向位移变化趋势基本一致,监测点距离桩越近,位移越大。随着与高压旋喷桩距离的增加,土体侧向位移不断减小。监测点距离高压旋喷桩越远,其侧向位移随注浆压力变化越不明显。在距离高压旋喷桩相同位置处,注浆压力增加,土体侧向位移值及其最大值相应增加。

在位移2 mm控制标准下,注浆压力分别为20 MPa、25 MPa、30 MPa时,单桩水平影响距离分别为10 m、12 m、15 m,占桩长的54%、64%、81%。由此可见,单桩影响距离随注浆压力的增大而明显增大。当水平距离超过单桩水平影响距离时,最大水平位移随注浆压力的变化已经不再明显。单桩影响距离如图7所示。

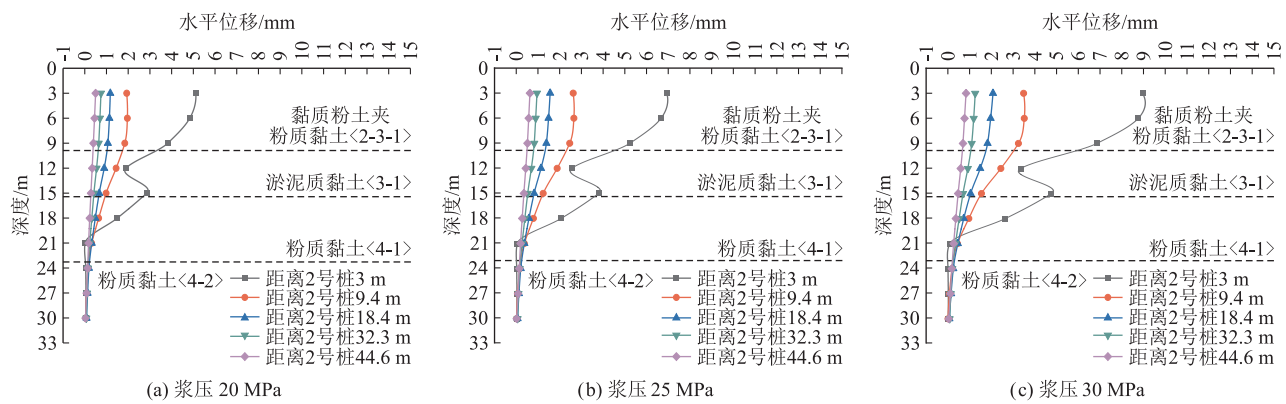


图6 不同注浆压力土体侧向位移曲线图

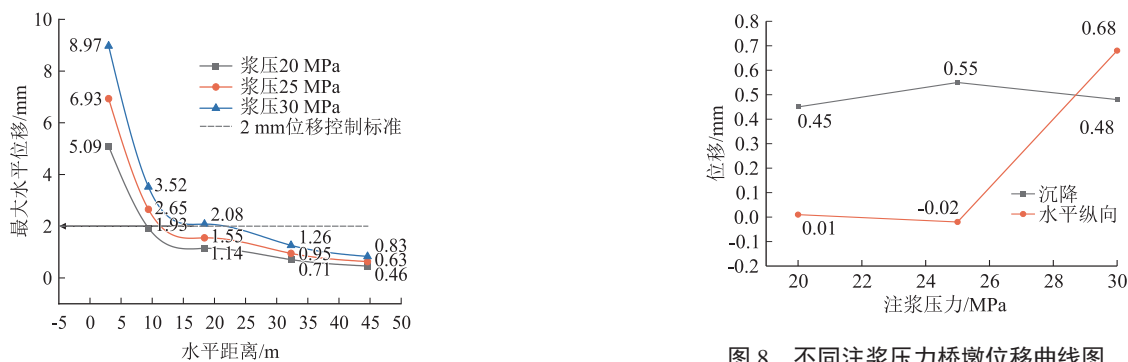


图7 2 mm 位移标准不同注浆压力单桩影响距离图

(2)既有高速铁路桥墩位移

单桩注浆压力为20 MPa、25 MPa、30 MPa时,桥墩沉降、纵向水平位移累积值变化不大,均小于0.8 mm,说明注浆压力变化时高压旋喷桩施工对桥墩沉降和水平位移影响很小,原因是桥墩与高压旋喷桩的距离已超过影响范围。桥墩位移曲线如图8所示。

4.2 桩长对挤土效应的影响

桩长分别取15 m、18.5 m、25 m,研究桩长对于挤土效应的影响。

(1)监测点水平位移

不同桩长土体侧向位移曲线如图9所示,2 mm 位移标准下,不同桩长单桩影响距离如图10所示。

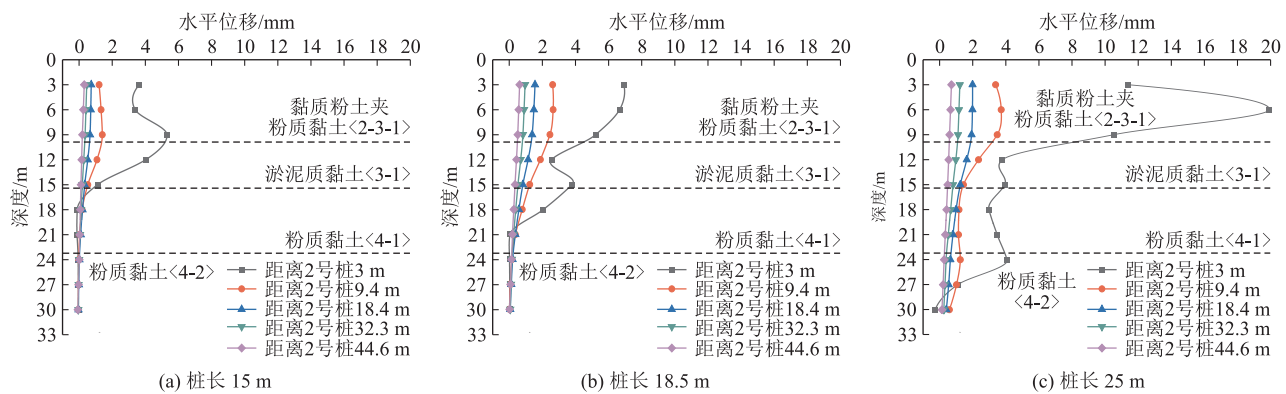


图9 不同桩长土体侧向位移曲线图

由图10可知,监测点1的水平位移受高压旋喷桩长变化的影响最大,土体侧向位移曲线随深度而变化。桩长为15 m、18.5 m、25 m时,监测点1处的

土体侧向位移最大值分别为5.31 mm、6.39 mm和20.0 mm。在与高压旋喷桩相同水平距离处,土体侧向位移值随桩长的增长而增加。

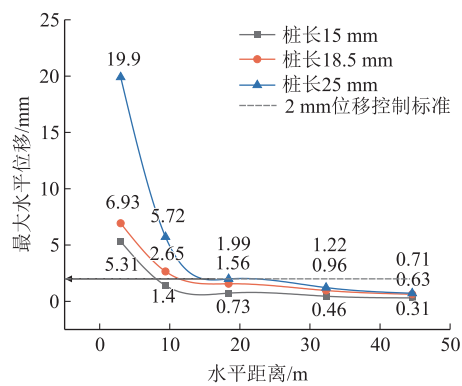


图 10 2 mm 位移标准不同桩长单桩影响距离图

桩长为 15 m、18.5 m、25 m 时,以 2 mm 位移为标准,单桩水平影响距离分别为 8.5 m、12 m、15 m,占桩长的 45%、64%、60%,单桩水平影响距离随桩长的增长而增大,但水平影响距离与桩长比值非线性相关。

(2)既有高速铁路桥墩位移

不同桩长下,既有高速铁路桥墩位移曲线如图 11 所示。

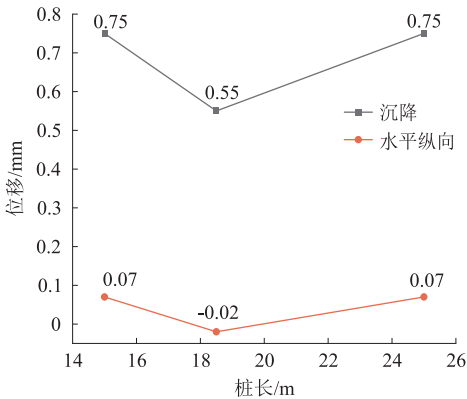


图 11 不同桩长桥墩位移曲线图

由图 11 可知,桩长增加,桥墩的沉降、纵向水平位移累积值变化较小,说明改变桩长对既有高速铁路

桥墩沉降和水平位移影响很小。

4.3 土体参数对挤土效应的影响

为研究土体参数对单桩挤土效应的影响,土体模量取表 3 中参数,土体其他参数与单桩现场试验一致。

表 3 土体模量变化具体取值表 (MPa)

材料名称	土体实测模量			0.75 倍模量			1.25 倍模量		
	弹性模量	剪切模量	体积模量	弹性模量	剪切模量	体积模量	弹性模量	剪切模量	体积模量
黏质粉土夹粉质黏土	18.9	24.2	52.5	14.2	18.2	39.4	23.6	30.3	65.6
淤泥质黏土	5.4	9.3	90	4.05	6.98	67.5	6.75	11.6	113
粉质黏土<4-1>	12.6	12.4	120	9.45	9.3	90	15.8	15.5	150
粉质黏土<4-2>	24	26.2	56.7	18	19.7	42.5	30	32.8	70.9

(1)监测点水平位移

不同桩周土模量下,土体侧向位移曲线如图 12 所示;2 mm 位移标准下,不同土体模量单桩影响距离如图 13 所示。

由图 12 可知,监测点 1 的水平位移受高压旋喷桩桩周土模量变化的影响最大,土体侧向位移曲线随深度而变化。土体模量由 0.75 倍、实测模量和 1.25 倍增加,监测点 1 处的土体侧向位移最大值分别为 7.23 mm、6.93 mm 和 6.62 mm。在距离高压旋喷桩相同位置处,桩周土体模量增大,土体侧向位移值及其最大值减小。

由图 13 可知,桩周土体模量为 0.75 倍、实测模量和 1.25 倍模量时,2 mm 位移标准单桩水平影响距离分别约 12 m、11.5 m、11 m,占桩长的 64%、62%、59%,水平影响距离随桩周土模量增大而略微减小。

(2)既有高速铁路桥墩位移

不同土体模量下,既有高速铁路桥墩位移曲线如图 14 所示。

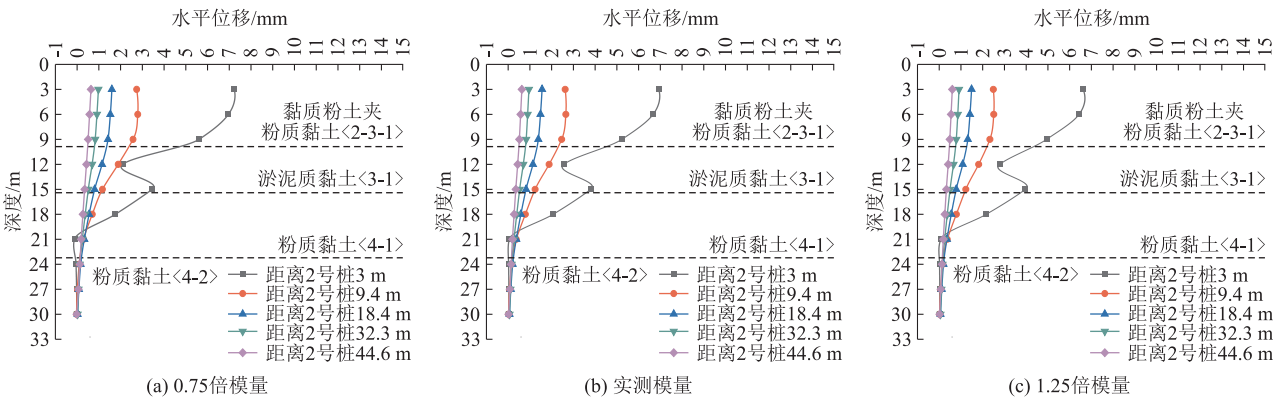


图 12 不同桩周土模量土体侧向位移曲线图

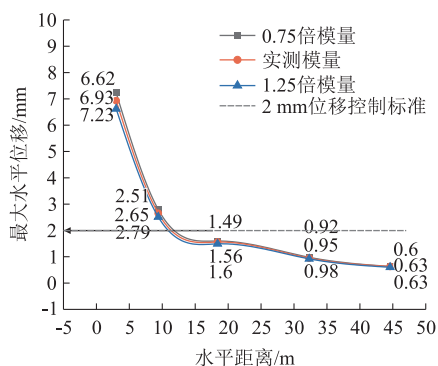


图13 2 mm 位移标准不同土体模量单桩影响距离图

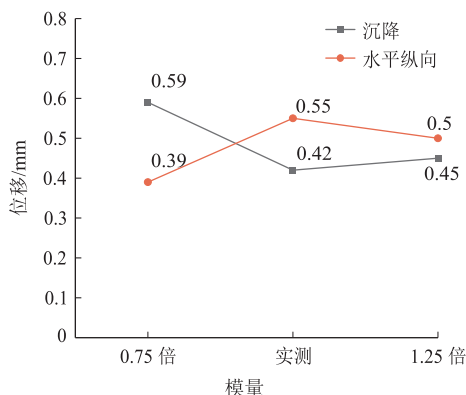


图14 不同土体模量下桥墩位移曲线图

由图14可知,桩周土模量变化时桥墩沉降、纵向水平位移累积值变化不大,土体模量变化不是桥墩沉降和水平位移的主要影响因素。

## 5 结论

本文依托杭甬高速铁路198号桥墩断面,结合现场试验,采用有限差分软件FLAC3D模拟高压旋喷桩单桩施工,研究了注浆压力、桩长和土体参数对高压旋喷桩单桩的挤土效应的影响,得到主要结论如下:

(1) 高压旋喷桩单桩施工产生的挤土效应范围与注浆压力正相关;当桩长和土体参数相同时,土体侧向位移量随着注浆压力的增大而增大。单桩注浆压力为20 MPa、25 MPa、30 MPa时,以2 mm为位移控制标准的单桩水平影响距离分别约10 m、12 m、15 m,占桩长的54%、64%、81%。

(2) 桩长增长时,高压旋喷桩挤土效应范围增大。单桩桩长为15 m、18.5 m、25 m时,以2 mm为位移控制标准的单桩水平影响距离分别为8.5 m、12 m、15 m,占桩长的45%、64%、60%。

(3) 桩周土体模量增大时,高压旋喷桩挤土效应范围略微减小。土体模量分别为土体实测模量0.75倍、

实测模量、1.25倍时,以2 mm为位移控制标准的单桩水平影响距离分别为12 m、11.5 m、11 m,占桩长的64%、62%、59%。

## 参考文献:

- [1] 勾红叶,刘畅,班新林,等. 高速铁路桥梁-轨道体系检测监测与行车安全研究进展[J]. 交通运输工程学报,2022,22(1): 1-23. GOU Hongye, LIU Chang, BAN Xinlin, et al. Research Progress of Detection, Monitoring and Running Safety of Bridge-track System for High-speed Railway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 1-23.
- [2] 王立波. 高速公路和高铁之间新建高铁并行方案研究[J]. 现代交通技术, 2020, 17(1): 89-92. WANG Libo. Research on New High-speed Rail Parallel Route between Expressway and High-speed Rail [J]. Modern Transportation Technology, 2020, 17(1): 89-92.
- [3] 刘汉龙,龙永红,丁选明. 复杂施工环境下高速铁路软土地基浆固碎石桩复合地基加固沉降变形分析[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(4): 8-12, 54. LIU Hanlong, LONG Yonghong, DING Xuanming. Analysis of Settlement and Deformation of Composite Foundation Reinforced by Cement-stabilized Gravel Pile for Soft Soil Base of High-speed Railway under a Complex Construction Environment [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4): 8-12, 54.
- [4] 敖江忠,郑新江,李东,等. 旋喷桩连续施工引起的地表变形现场试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(3): 982-988, 996. AO Jiangzhong, ZHENG Xinjiang, LI Dong, et al. Field-test Study on Ground Deformation in Continuous Construction of Jet Grouting [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(3): 982-988, 996.
- [5] 孙亮,刘鑫磊,宫亚峰,等. 考虑土体不均匀变形和临近结构物力学行为的高压旋喷桩优化研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S2): 86-95. SUN Liang, LIU Xinlei, GONG Yafeng, et al. Optimization of High-pressure Jet Grouting Pile Considering Uneven Deformation of Soil and Mechanical Behavior of Adjacent Structures [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(S2): 86-95.
- [6] 伍伟林,邹育. 隔离桩墙和盾构施工对高铁桥墩影响分析[J]. 广东土木与建筑, 2022, 29(7): 82-85. WU Weilin, ZOU Yu. Analysis of Influence of Isolation Pile Wall and Shield Construction under High-speed Railway Pier [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2022, 29(7): 82-85.
- [7] 罗军,王炳龙,陕耀,等. 邻近高速铁路单根高压旋喷桩施工对周围土体的变形影响[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(1): 13-19. LUO Jun, WANG Binglong, SHAN Yao, et al. Deformation Impact of Construction of a Single High-pressure Jet Grouting Pile in the Vicinity of a High-speed Railway on Surrounding Soil Mass [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(1): 13-19.
- [8] 王淑敏. 软土地区施工对临近高速铁路桥台影响的试验研究



[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(2): 69 – 75.

WANG Shumin. Test Research on Influence of Construction in Soft Soil Area on Abutment of near High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(2): 69 – 75.

[9] 杨泉,高柏松,李井元,等. 新建线临近既有无砟高速铁路路基施工方案研究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(2): 15 – 19.

YANG Quan, GAO Baisong, LI Jingyuan, et al. Research on Subgrade Construction Scheme of Newly Built Railway Close to Ballastless Track High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(2): 15 – 19.

[10] 闫薪宇. 增建二线高压旋喷桩施工对既有城际铁路路基稳定性影响分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.

YAN Xinyu. The Influence of the Construction of the Newly Added Second-line High-pressure Jet Grouting Piles on the Stability of the Existing Intercity Railway Subgrade [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021.

[11] 毛祖夏,杨兰强,李佳明. MJS工法与高压旋喷桩(双重管)挤土效应对比试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(10): 1699 – 1707.

MAO Zuxia, YANG Lanqiang, LI Jiaming. Experimental Study on Compaction Effect between Metro Jet System Method and High-pressure Jet Grouting Pile (Double-tube) [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(10): 1699 – 1707.

[12] 李世安. 高速铁路桥墩差异沉降对列车运行影响研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.

LI Shian. Study on Influence of Pier Differential Settlement on Train Operation of High Speed Railway [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.

[13] 朱利明,余康,张楠. 高压旋喷桩施工对相邻既有高铁基础的影响分析[J]. 世界桥梁, 2016, 44(1): 60 – 63.

ZHU Liming, YU Kang, ZHANG Nan. Analysis of Influence of High-pressure Jetting Piles Construction on Adjacent Existing High-speed Railway Foundation [J]. World Bridges, 2016, 44(1): 60 – 63.

[14] 何大为,杨建辉,张康荣,等. 软土地区高压旋喷桩施工对临近高铁桥墩扰动机理室内模型试验[J/OL]. 桂林理工大学学报, 2023: 1 – 7. (2023 – 03 – 10). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.n.20230307.1636.004.html>.

HE Dawei, YANG Jianhui, ZHANG Kangrong, et al. Indoor Model Test on Disturbance Mechanism of Adjacent High-speed Railway Piers Caused by High-pressure Jet Grouting Pile Construction in Soft Soil Area [J/OL]. Journal of Guilin University of Technology, 2023: 1 – 7. (2023 – 03 – 10). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1375.n.20230307.1636.004.html>.

[15] TB 10182 – 2017 公路与市政工程下穿高速铁路技术规程[S].

TB 10182 – 2017 Technical Specification for Highway and Municipal Engineering under Crossing High Speed Railway [S].

(上接第72页)

[4] 汪岳生. 向蒲铁路雪峰山隧道基础沉降及底鼓处治技术[J]. 铁道建筑, 2015, 55(8): 55 – 57.

WANG Chansheng. Foundation Settlement and Floor Heave Treatment Technology of Xuefeng Mountain Tunnel on Xiangpu Railway [J]. Railway Engineering, 2015, 55(8): 55 – 57.

[5] 袁伟,路军富,刘金松,等. 复杂地应力红层泥岩隧道持续底鼓原因分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(2): 242 – 251.

YUAN Wei, LU Junfu, LIU Jinsong, et al. Cause Analysis of Persistent Heaving of Tunnel Floors in Red-bed Mudstone with Complex Geo-stress [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(2): 242 – 251.

[6] 赵涛,梁庆国,吴飞亚,等. 基底围岩膨胀对泥岩隧道受力特性的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 538 – 546.

ZHAO Tao, LIANG Qingguo, WU Feiya, et al. Impact of Base Surrounding Rock Expansion on the Mechanical Characteristics of Mudstone Tunnel [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(3): 538 – 546.

[7] 路军富,王明胜,王奎,等. 水平层状泥岩铁路隧道底鼓机理及解析方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(5): 1761 – 1773.

LU Junfu, WANG Mingsheng, WANG Kui, et al. Mechanism and Analytical Method of Bottom Drum in Horizontal Layered Mudstone Railway Tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(5): 1761 – 1773.

[8] 杨建民,徐怀仁,舒东利,等. 对隧道发生底鼓机理及对策的思考[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(2): 74 – 79.

YANG Jianmin, XU Huairan, SHU Dongli, et al. Reflection on the Mechanism of Tunnel Floor Heave and Its Countermeasures [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(2): 74 – 79.

[9] 李登峰,谢锦鸿. 隧道底鼓的变形研究及处治措施[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 86 – 90.

LI Dengfeng, XIE Jinhong. Deformation Study and Treatment Measures of Tunnel Floor Heaves [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 86 – 90.

[10] 王茂靖,吴俊猛. 西南地区某隧道底鼓病害原因分析[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(4): 29 – 33, 64.

WANG Maojing, WU Junmeng. Cause Analysis for Floor Bulge of a Tunnel in Southwest China [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(4): 29 – 33, 64.