

文章编号: 1674—8247(2023)01—0013—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.01.003

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

罗 军¹ 王炳龙^{2,3} 陕 耀^{2,3} 张 博^{2,3} 王 宇¹

(1. 中铁二院华东勘察设计有限责任公司, 杭州 310000;

2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804;

3. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘 要:为研究邻近既有高速铁路高压旋喷桩施工引起的周围土体变形规律,本文以实际地基加固工程为背景,采用现场试验与有限元模拟相结合的方法,明确了单根高压旋喷桩的施工影响距离,分析了高压旋喷桩的施工参数对周围土体变形的影响,提出了邻近高速铁路的高压旋喷桩施工注意事项。研究表明:现场试验的单根桩施工影响距离约占桩长的80%,有限元模拟的影响距离占桩长的78.9%,旋喷桩周围土体的最大水平位移及单根桩的影响距离将随着钻杆提升速度减小及注浆压力增大而增大,当邻近高速铁路进行高压旋喷桩施工时,应确定适宜的施工参数,加强对既有高速铁路的变形监测,必要时在施工前采取一定的变形控制措施。

关键词:高压旋喷桩; 水平位移; 现场试验; 数值模拟

中图分类号: U416.1 **文献标识码:** A

13

Deformation Impact of Construction of a Single High-pressure Jet Grouting Pile in the Vicinity of a High-speed Railway on Surrounding Soil Mass

LUO Jun¹ WANG Binglong^{2,3} SHAN Yao^{2,3} ZHANG Bo^{2,3} WANG Yu¹

(1. East China Survey and Design Co., Ltd. of CREEC, Hangzhou 310000, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Rail Transit Structure Durability and System Safety, Shanghai 201804, China;

3. MOE Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The purpose of the paper is to study the deformation law of surrounding soil mass caused by the construction of high-pressure jet grouting piles in the vicinity of existing high-speed railways. Based on a practice case of foundation reinforcement, the results of field test and finite element simulation were combined to recognize the impacted distance of the construction of a single high-pressure jet grouting pile. On this basis, the effect of construction parameters of high-pressure jet grouting piles on the deformation of surrounding soil mass was analyzed, and the precautions were put forward for the construction of high-pressure jet grouting piles in the vicinity of an existing high-speed railway. The results show that: The impacted distance of single pile construction in the field test accounts for about 80% of the pile length, and the impacted distance of finite element simulation accounts for 78.9% of the pile length. The maximum

收稿日期: 2022-04-12

作者简介: 罗军(1981-),男,高级工程师。

基金项目: 国家自然科学基金(51778485)

引文格式: 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.

horizontal displacement of the soil mass around the jet grouting pile and the impacted distance of a single pile will increase with the decrease in the lifting speed of the drill pipe and the increase in the grouting pressure. When the high-pressure jet grouting pile construction is carried out in the vicinity of a high-speed railway, appropriate construction parameters shall be determined, deformation monitoring of existing high-speed railways shall be strengthened, and certain deformation control measures shall be taken before construction if necessary.

Key words: high-pressure jet grouting pile; horizontal displacement; field test; numerical simulation

高压旋喷桩作为一种常用的地基加固形式,在邻近普速铁路工程中得到了泛应用,起到了良好的涉铁工程加固效果^[1-3]。该方法是以特定的压力将浆液通过钻杆末端的喷嘴泵入土体,使钻杆周围的土体受到冲切重塑形成水泥-土结构^[4]。由于喷射流注浆参数及周围土体性质对桩径及承载力的显著影响^[5-6],国内外学者针对土体与喷射流的相互作用进行了大量研究,研究方法主要集中在基于室内与现场试验的理论和实例分析^[7-8]。在一些工程条件下,高压旋喷桩将引起周围土体产生显著的变形^[9],针对高压旋喷桩引起土体变形的研究方法大致可分为两类:(1)基于圆孔扩张理论的解析或半解析法,不同的解析或半解析模型考虑了不同土体性质、加载条件和边界条件^[10-13];(2)可考虑更为复杂的荷载与边界条件的有限元模拟法,通过结合室内或现场试验的实测结果进行验证^[14-16],当难以开展室内或现场试验时,由于理论计算的复杂性,合理的有限元模型将极大方便进行土体变形研究。

邻近高速铁路高压旋喷桩施工时,挤土效应易导致既有铁路产生危险变形^[17],因此,邻近高速铁路的高压旋喷桩施工条件限制较为严格,且目前缺少在邻近高速铁路的情况下高压旋喷桩对周围土体影响的研究。由于不同施工场地的工程地质条件的差异,现有的有限元模拟方法及现场测量数据往往不能直接采用。为探索对邻近高速铁路的高压旋喷桩引起周围土体的变形规律,需基于实际工程开展现场试验,并针对现场试验受客观原因限制,利用有限元模拟开展进一步的研究。

本文以绍兴市329国道智慧快速路改造工程的涉铁地基加固工程为背景,进行现场单根高压旋喷桩试验,研究邻近高速铁路的单根高压旋喷桩引起周围土体变形的规律,并依托现场试验进行有限元模拟。将高压旋喷桩引起周围土体变形问题简化为柱孔膨胀问题,引入膨胀半径与膨胀系数,基于现场监测数据,利用ABAQUS建立三维有限元模型并进行验证,明确单根高压旋喷桩的施工影响距离,分析了高压旋喷桩的施工参数对周围土体变形的影响规律,提出邻

近高速铁路的高压旋喷桩施工的注意事项。

1 工程背景

绍兴市329国道智慧快速路改造工程是绍兴市城市智慧道路快速系统和地下管廊工程的重要组成部分。工程所在地属我国东南部典型深厚软土地区,粉质黏土的深度超过50 m,且最低基本承载力小于60 kPa,出于成本和施工便捷性的考虑,采用高压旋喷桩对地基进行处理。该工程场地与设计速度350 km/h的杭深(杭甬)高速铁路相邻,地基处理区域与杭甬高速铁路桥墩的最小距离为44 m,大于正常保护距离。由于工程地质的特殊性,难以直接利用已有研究的监测数据或有限元来确定高压旋喷桩的施工影响距离。为确保既有高速铁路运营安全,有必要在施工前进行现场试验,分析高压旋喷桩对周围土体的变形影响规律。

2 现场试验及监测

2.1 试验及监测方案

为研究深厚软土地区邻近高速铁路的高压旋喷桩施工中周围土体的变形特性,在施工现场进行了单桩试验,通过布设地层水平位移监测点,实时监测单根高压旋喷桩施工中周围土体的水平位移,试验桩与监测点布置剖面如图1所示。试验桩长18.5 m,桩底标高-20 m,桩径600 mm,采用二重管法进行试验,注浆压力为20~25 MPa,提升速度为20 cm/min,共布设5个深度均为31 m的监测点,按与试验桩的水平距离由近至远编号测点1~测点5,距离分别为3 m、9.4 m、18.4 m、32.3 m、44.6 m。由于试验桩与最近的桥墩距离大于50 m,根据工程经验,试验过程对桥墩位移的影响非常有限,因此单桩试验中未对高速铁路桥墩的位移进行监测。

2.2 监测结果分析

单桩试验结束时5个测斜点的水平位移曲线及各个测点水平位移最大值随水平距离的变化情况如图2所示。

由图2可知,单桩试验主要影响了测点1(距离

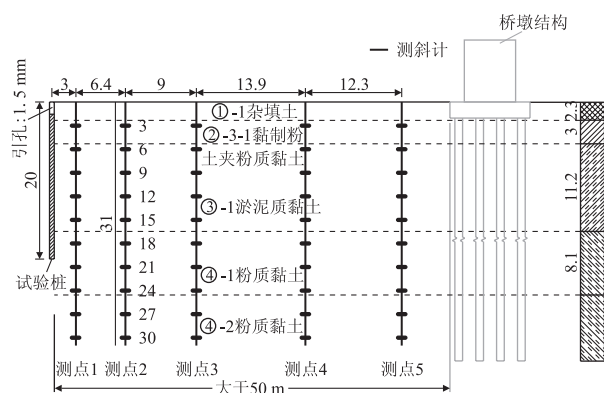
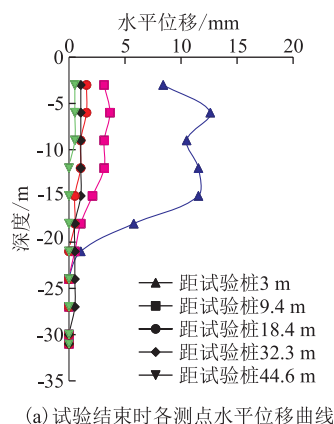
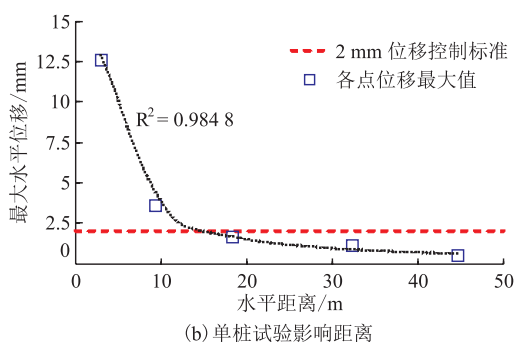


图1 单桩试验点与测斜点剖面示意图(m)



(a) 试验结束时各测点水平位移曲线



(b) 单桩试验影响距离

图2 单桩试验结束时的各测点变形及单桩试验影响距离图

3 m)和测点2(距离9.4 m)所在土层,且淤泥质黏土层(-5.3~-16.5 m)受侧向挤压的影响最为显著。随着水平距离增长,单根桩施工引起的土体变形衰减速度很快,各测点的最大水平位移实测值分别为12.6 mm、3.6 mm、1.6 mm、1.1 mm和0.5 mm。若按照位移2 mm为控制标准,可知在深厚软土地区,当注浆压力为20~25 MPa、提升速度20 cm/min的情况下,单桩试验的影响距离约16 m,占桩长的80%。

水平位移监测以单个测点为单位,难以获得周围土体在相同深度下沿水平距离增长的连续位移曲线,且受限于现场条件,现场并未对地表处变形展开监

测。因此,估算影响距离时以各测点最大位移监测值为基础采用曲线拟合法。为较为精确地获取同深度下地层沿水平方向的位移曲线与地表位移值,拟采用可信度较高的有限元模拟法。

3 有限元模拟

依托现场单桩试验,利用ABAQUS进行三维有限元数值模拟,计算单根高压旋喷桩施工引起的周围土体水平位移,并将其与实测值对比验证数值模拟可行性,进而得到较为精确的单桩试验影响距离。数值模拟基于以下假设:(1)各层土体均为各向同性的均匀介质,不考虑土体的微观结构和内部孔隙;(2)各层水平均匀分布,不考虑实际情况的地层起伏;(3)不考虑地下水及管线的影响。

3.1 成桩过程模拟

高压旋喷桩的成桩本质上是将一定体积的浆液以特定的压力注入土体内部,产生的挤土效应是注浆压力与注浆量共同作用的结果。本文将高压旋喷桩施工过程简化为均匀圆柱的体积膨胀过程,假定膨胀体积与注入土体的浆液量相同,且注浆引起的体积膨胀仅发生在水平方向。该法需引入并确定两个计算参数:膨胀半径与膨胀系数。膨胀半径可决定发生体积膨胀的区域,体现注浆压力的影响半径,其大小受土层性质的影响;膨胀系数可决定体积膨胀的程度,反映注浆量的影响,由注浆量与膨胀半径联合计算得出。

采用ABAQUS可在材料设置中添加膨胀系数,在边界条件通过改变温度荷载以实现膨胀半径范围内的圆柱体膨胀,模拟过程可按以下步骤进行:(1)根据膨胀半径确定发生体积膨胀的区域;(2)根据试验参数计算注浆引起的体积膨胀,联合膨胀半径计算得到膨胀系数;(3)在ABAQUS的材料设置中将膨胀系数赋予发生体积膨胀的区域,在边界条件设置中改变膨胀区域的温度荷载,使圆柱体发生体积膨胀以挤压周围土体。膨胀半径与膨胀系数的计算公式为:

$$R_0 = kR_a \quad (1)$$

$$\alpha = \sqrt{(1 + \Delta V/V)} - 1 \quad (2)$$

$$\Delta V = QL/v \quad (3)$$

$$V = \pi R_0^2 L \quad (4)$$

式中: R_0 ——膨胀半径(m);

a ——成桩半径(m);

k ——反应土层性质的比例系数;

α ——膨胀系数;

ΔV ——膨胀体积(m^3);

V ——膨胀半径 R_0 范围内的体积(m^3);
 Q ——注浆量(L/min);
 v ——旋喷提升速度(cm/min);
 L ——桩长(m)。

由于高压旋喷桩深度范围内土体以黏土为主,各层土体之间的土性差异不大,本文的各层比例系数按相同的大小取值, R_a 取为高压旋喷桩的设计半径;由于比例系数 k 难以确定,膨胀半径 R_0 可通过重复试算不同比例系数下的周围土体水平位移,并结合现场实测进行确定。

3.2 有限元模型建立

(1)模型建立及参数选取

为避免模型尺寸对计算结果影响的同时将现场试验的 5 个测点涵盖其中,考虑到单桩试验具有对称性,按圆柱体的形式建立三维有限元模型:水平方向上是直径为 100 m 的圆,竖直方向的深度为 50 m,旋喷桩区域位于模型正中央,桩顶标高为 - 1.5 m,忽略引孔破除的极小部分土体,桩顶之上按完整土体建模。模型涉及材料包括杂填土、黏质粉土夹粉质黏土、淤泥质黏土、粉质黏土,均采用摩尔库伦弹塑性本构模型,参数设置如表 1 所示。土体部分均采用六面体八结点的线性缩减积分单元(C3D8R),旋喷桩区域采用热耦合六面体八结点的线性缩减积分单元(C3D8T),在划分网格时,水平方向上与单桩距离较近的区域网格密集,竖直方向上测斜深度范围内的网格密集,下部土体的网格稀疏。模型示意如图 3 所示。

表 1 有限元模型土层材料参数表

名称	天然密度/ (kg/m^3)	黏聚力/ kpa	内摩擦 角/ $^\circ$	泊松 比	弹性模 量/ MPa
①-1 杂填土	2 000	15	15	0. 3	30
②-3-1 黏 质 粉 土 夹粉质黏土	1 860	13	25	0. 3	63
③-1 淤泥质黏土	1 730	13. 5	11	0. 45	27
④-1 粉质黏土	1 830	16	13	0. 45	36
④-2 粉质黏土	1 930	36	17	0. 3	68
⑥-2 粉质黏土	1 890	40	16. 5	0. 3	72

(2)边界条件及分析步设置

试验桩与侧边界的水平距离为 50 m,远超影响范围;模型竖向深度超过一倍桩长,可认为模型的侧边界及底部边界不产生变形,且不会因尺寸效应对计算结果产生影响。模型侧边界施加水平约束,底部边界施加完全固定约束。体积膨胀需通过改变温度来实现,对旋喷桩区域设置初始温度荷载边界条件,后续通过改变温度荷载实现体积膨胀。模型共设置两个

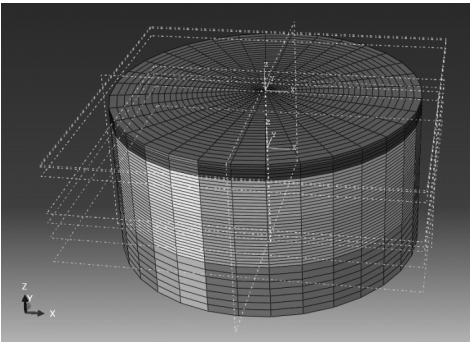


图 3 三维有限元模型示意图

分析步:第一步为地应力平衡步,这一步仅加入重力及预定义场,对模型进行地应力平衡;第二步为体积膨胀步,延续平衡后的重力及预定义场,按等间距的方式改变温度荷载边界条件的大小,使旋喷桩范围内的土体膨胀挤压周围地层。

3.3 有限元模型验证

膨胀半径 R_0 需经过试算确定,选取 $R_0 = 600\text{ mm}$ 、 900 mm 、 $1\,200\text{ mm}$ 代入式(3)~式(6)计算得到相应的膨胀系数 α ,建立 3 个建模参数相同的数值计算模型。现场试验表明单根高压旋喷桩的影响距离有限,因此仅选取距离桩体较近的两个测点进行计算值与实测值的对比以确定合适的膨胀半径。3 种膨胀半径下距离桩体 3 m 和 9.4 m 处的水平位移计算值与实测值的对比如图 4 所示。

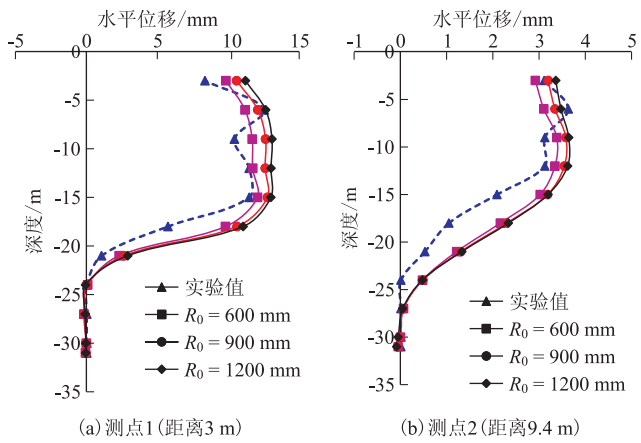


图 4 测点 1 和测点 2 水平位移计算值与实测值对比图

由图 4 可知,当 $R_0 = 600\text{ mm}$ 、 900 mm 、 $1\,200\text{ mm}$ 时,测点 1 的最大水平位移计算值分别为 12.1 mm、12.8 mm、13.1 mm,测点 2 的最大水平位移计算值分别为 3.1 mm、3.6 mm、3.6 mm。综合各个膨胀半径下测点 1 与测点 2 的水平位移曲线,发现当 $R_0 = 900\text{ mm}$ 时,计算结果与实测结果的贴合度最高,且沿测点深度方

向表现出了深层位移小,浅层位移大的特点,与实测结果呈现的规律相同。

现场监测数据表明,5个测点的水平位移最大值出现于-3 m、-6 m处,提取 $R_0 = 900$ mm时周围土体-3 m及-6 m处沿水平方向的位移计算结果,绘制同深度下沿水平方向的位移变化曲线,并与现场各测点的最大位移实测值进行对比,如图5所示。

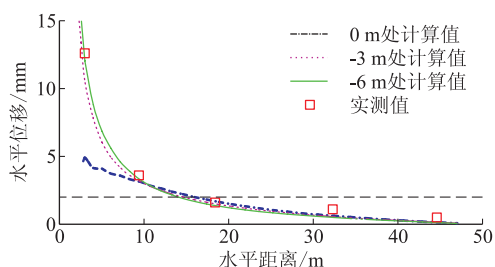


图5 同深度下沿水平方向的地层位移计算值与现场各测点最大位移实测值对比图

由图5可知,-3 m处与-6 m处土体沿水平方向的位移曲线呈现出的位移变化趋势与实测值一致;随着水平距离的增大,水平位移迅速减小,验证了本文进行的数值模拟的可行性。按2 mm的控制标准可计算得到单桩试验的影响距离为14.6 m,占桩长的78.9%,接近实测值经过曲线拟合得到的结果。图5还展示了地表处的地层水平位移计算值,由于桩顶标高为-1.5 m,当水平距离与试验桩较近时,单桩对地表的影响较小;当水平距离增长至桩长的50%后,地表变形与浅埋深处的变形规律趋于一致。

4 施工参数对周围土体变形的影响

高压旋喷桩的施工参数较多,其中对于土体变形影响最显著的为注浆量与注浆压力。由于现场试验具有不可重复性且开展试验的成本较高,为研究深厚软土地区高压旋喷桩施工参数对周围土体变形的影响,需借助本文提出的有限元计算模型,分析注浆量及注浆压力对周围土体变形的影响规律。

4.1 钻杆提升速度对周围土体变形的影响

高压旋喷桩施工的注浆量与注浆流量及钻杆提升速度有关,其中钻杆提升速度可直接影响注浆量的大小,在其他条件保持不变的情况下,提升速度越慢,单位桩长的注浆量越大,引起的周围土体变形也将越显著。由于不同的钻杆提升速度可直接反映不同的注浆量,本文通过改变钻杆提升速度计算不同注浆量下周围土体水平位移。进行数值模拟时,以现场试验的模型为对照,除提升速度外其余参数保持不变,即膨

胀半径仍取 $R_0 = 900$ mm,按提升速度为10 cm/min、30 cm/min、40 cm/min计算出相应的膨胀系数建立模型。四种提升速度下-6 m处沿水平方向的位移计算结果如图6所示。

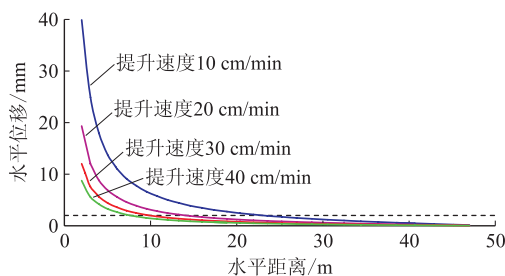


图6 不同提升速度对周围土体变形的影响图

由图6可知,高压旋喷桩引起的周围土体变形随钻杆提升速度增大而减小;当提升速度为10 cm/min、20 cm/min、30 cm/min、40 cm/min时,在距离桩体2~47 m范围内,四种钻杆提升速度引起的最大水平位移分别为40.0 mm、19.3 mm、12.0 mm、8.7 mm;按2 mm的控制标准,对应的影响距离分别为23.6 m、14.6 m、10.7 mm、8.3 m,是桩长的127%、78.9%、57.8%、44.9%。钻杆提升速度每减慢10 cm/min,引起的周围土体变形最大值及影响距离的增长速率逐渐加快。

4.2 注浆压力对周围土体变形的影响

高压旋喷桩的注浆压力关系到桩体的成桩质量及周围土体的变形,在注浆管喷嘴尺寸不变的情况下,压力越大,喷射流初速度越大,单位时间内的注浆量也就越大。以现场试验的模型为对照,按注浆压力为40 MPa建立数值模型。现场单桩试验的模拟结果显示了反应土层性质的比例系数 $k = 3$,建模时仍采用该值。由于较高的注浆压力一般意味着较大的设计直径及成桩直径,当注浆压力为40 MPa时,设计桩径往往不低于800 mm,故数值模拟中按设计桩径800 mm以计算膨胀半径。两种注浆压力下-6 m处沿水平方向的位移计算结果如图7所示。

由图7可知,高压旋喷桩引起的周围土体变形随注浆压力增大而增大;当注浆压力为20~25 MPa、40 MPa时,在距离桩体2~47 m范围内,引起的最大水平位移分别为19.3 mm、29.4 mm;按2 mm的控制标准,对应的影响距离分别为14.6 m、18.9 mm,是桩长的78.9%、102%。对比钻杆提升速度引起周围土体的水平位移,发现注浆压力对变形影响的显著性略低于注浆量。

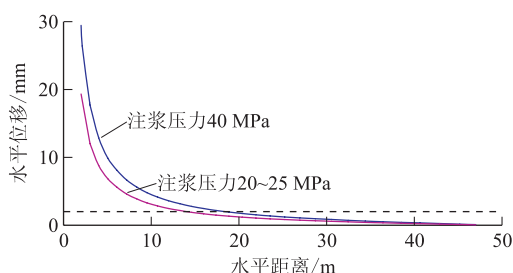


图7 不同注浆压力对周围土体变形的影响图

5 邻近高速铁路的高压旋喷桩施工注意事项

软土地区高压旋喷桩的施工区域邻近既有高速铁路时,需高度重视其挤土效应对既有高速铁路的影响。为最大限度降低施工的不良影响,确保既有线的安全,邻近高速铁路的高压旋喷桩施工应注意的事项包括:

(1) 确定适宜的施工参数:高压旋喷桩的施工参数将直接决定施工效率、成桩质量及引起的土体或构筑物变形大小,因此需在施工效率、质量及安全三者之间寻找平衡点,通过确定适宜的施工参数以做到高质高效实现工程目标的同时确保施工安全。

(2) 加强施工过程中的变形监测:高速铁路的变形控制标准严格,应结合不断发展的测量技术,加强施工全过程中针对既有线的变形监测,根据规范要求设定变形预警值,并根据施工过程中的变形情况考虑对施工方案或施工工艺进行调整,以确保安全。

(3) 必要时在施工前采取一定的变形控制措施:应根据实际工程中高压旋喷桩与既有线之间的距离,确定是否需要在施工前设置一定的变形控制措施,如在施工区域附近设置一定数量的应力释放孔或防挤沟,以达到吸收土体体积应变及挤土位移的目的进而确保安全。

6 结论

为研究深厚软土地区邻近既有高速铁路的高压旋喷桩施工对周围土体的变形影响规律,开展了现场单桩试验及变形监测,依托现场试验实测数据建立并验证了三维有限元模型,得到单根桩引起的周围土体水平位移与单根桩施工的影响距离,分析了施工参数对周围土体变形的影响,得出主要结论如下:

(1) 单根高压旋喷桩对周围土体的影响随水平距离增大而迅速减小,对于淤泥质黏土层的影响最为显著。当注浆压力为20~25 MPa,提升速度20 cm/min的情况下,深厚软土地区单根桩的影响距离经曲线拟

合约为16 m,占桩长的80%。

(2) 通过引入膨胀半径及膨胀系数进行高压旋喷桩施工的数值模拟显示的单桩试验引起周围土体变形的规律与现场实测数据反映出的规律一致,计算结果表明深厚软土地区单根高压旋喷桩施工影响距离为14.6 m,占桩长的78.9%。

(3) 深厚软土地区高压旋喷桩施工引起周围土体的最大变形及影响距离会随着钻杆提升速度减小而增大,钻杆提升速度每降低10 cm/min,引起的周围土体变形最大值及影响距离的增长速率将逐渐加快。

(4) 深厚软土地区高压旋喷桩施工引起周围土体的最大变形及影响距离会随着注浆压力增大而增大,注浆压力对地层变形影响的显著性略低于注浆量。

(5) 当邻近高速铁路进行高压旋喷桩施工时,为确保安全,应确定适宜的施工参数,加强施工过程中对既有线的变形监测,必要时应在施工前采取一定的变形控制措施。

参考文献:

- [1] 张志平. 高压旋喷桩技术在铁路工程施工中的应用[J]. 交通标准化, 2012, 40(21): 101-103.
ZHANG Zhiping. Application of High Pressure Jet Grouting Pile Technology in Railway Engineering Construction [J]. Transportation Standardization, 2012, 40(21): 101-103.
- [2] 张朋. 盘锦地区既有铁路下穿桥涵软土路基处理效果研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2013.
ZHANG Peng. Pan Jin Area beneath Existing Railway Bridge and Culvert in Soft Soil Subgrade Treatment Effect [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2013.
- [3] 狄宏规, 冷伍明, 周顺华, 等. 朔黄重载铁路路基斜向高压旋喷桩加固效果[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(12): 1818-1823.
DI Honggui, LENG Wuming, ZHOU Shunhua, et al. Reinforcement Effect of Inclined High-Pressure Jet Grouting Piles for Shuo-Huang Heavy Haul Railway [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(12): 1818-1823.
- [4] BURKE G K. The State of the Practice of Jet Grouting [C]// Grouting and Deep Mixing 2012. New Orleans, Louisiana, USA. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2012: 74-88.
- [5] MALININ A, GLADKOV I, MALININ D. Experimental Research of Jet-Grouting Parameters in Different Soil Conditions [C]// Geo Shanghai International Conference 2010. June 3-5, 2010, Shanghai, China. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2010: 49-54.
- [6] NI J C, CHENG W C. Quality Control of Double Fluid Jet Grouting below Groundwater Table: Case History [J]. Soils and Foundations, 2014, 54(6): 1039-1053.
- [7] CARNEVALE F, BELLONI L, GRASSI A. Evaluation of Diameter and

- Characteristics of Jet Grouting Columns-Analytical Approach [C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing. February 15 – 18, 2012, New Orleans, Louisiana, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2012: 2061 – 2070.
- [8] SHEN Shuilong, WANG Zhifeng, HORPIBULSUK S, et al. Jet Grouting with a Newly Developed Technology The Twin-Jet Method [J]. Engineering Geology, 2013, 152(1): 87 – 95.
- [9] 翁承显. 地铁盾构隧道受高压旋喷桩挤土作用的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- WENG Chengxian. Study on a Subway Shield Tunnel under the Excess Pore Pressure by High-Pressure Jet Grouting [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [10] CHAI Jinchun, MIURA N, KOGA H. Lateral Displacement of Ground Caused by Soil-Cement Column Installation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 623 – 632.
- [11] ZHOU H, LIU H, KONG G, et al. Analytical Solution for Pressure-Controlled Elliptical Cavity Expansion in Elastic-Perfectly Plastic Soil [J]. Géotechnique Letters, 2014, 4(2): 72 – 78.
- [12] SHEN S L, WANG Z F, CHENG W C. Estimation of Lateral Displacement Induced by Jet Grouting in Clayey Soils [J]. Géotechnique, 2017, 67(7): 621 – 630.
- [13] LIU Hanlong, ZHOU Hang, KONG Gangqiang, et al. High Pressure Jet-Grouting Column Installation Effect in Soft Soil: Theoretical Model and Field Application [J]. Computers and Geotechnics, 2017, 88: 74 – 94.
- [14] 吕若冰, 孔纲强, 沈扬, 等. 既有高速公路高压旋喷桩施工现场监测与数值模拟分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(6): 752 – 757.
- LV Ruobing, KONG Gangqiang, SHEN Yang, et al. Construction Monitoring and Numerical Simulation of Existing Expressway Soft Foundation Treatment by High Pressure Jet Grouted Pile Technique [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(6): 752 – 757.
- [15] 王志丰, 沈水龙, 谢永利. 水平旋喷桩施工引起周围土体变形分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1083 – 1088.
- WANG Zhifeng, SHEN Shuilong, XIE Yongli. Analysis of Soil Deformation Caused by Installation of Horizontal Jet Grout Column [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1083 – 1088.
- [16] 孙晓红, 孔维康, 李晓涛, 等. 双根水平旋喷桩施工地表隆起的计算与模拟[J]. 公路, 2020, 65(7): 320 – 326.
- SUN Xiaohong, KONG Weikang, LI Xiaotao, et al. Calculation and Simulation of Surface Uplift Caused by Construction of Double Horizontal Jet Grouting Piles [J]. Highway, 2020, 65(7): 320 – 326.
- [17] 刘志清. 软土地区铁路桥梁桥墩变位原因分析及整治措施[J]. 现代交通技术, 2014, 11(1): 48 – 50.
- LIU Zhiqing. Cause Analysis and Treatment Measures for Deflection of Railway Bridge Pier in Soft Soil Areas [J]. Modern Transportation Technology, 2014, 11(1): 48 – 50.

(上接第12页)

- 110.
- XIA Yuyun, YAO Chenhui, ZHOU Kui, et al. Deformation Failure Characteristics and Stability of Surrounding Rock of Silty-Slate Tunnel [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(3): 105 – 110.
- [7] 于家武, 郭新新. 木寨岭公路隧道复合型大变形控制技术与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(9): 1565 – 1576.
- YU Jiawu, GUO Xinxin. Composite Large Deformation Control Techniques for Muzhailing Highway Tunnel [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(9): 1565 – 1576.
- [8] 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.
- WANG Mingsheng. Research on the Large Deformation Control Technology of Strong Weathered Carbonaceous Slate Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(7): 35 – 39.
- [9] 郭相武, 李彪, 肖仲红. 基于缝合地带软岩隧道大变形机理研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 99 – 105.
- GUO Xiangwu, LI Biao, XIAO Zhonghong. Study on Large Deformation Mechanism of Soft Rock Tunnel in Suture Zone [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(2): 99 – 105.
- [10] 钟扬, 高超, 张海太. 长时间停工条件下炭质板岩地层隧道围岩变形及支护结构补强研究[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 256 – 260.
- ZHONG Yang, GAO Chao, ZHANG Haitai. Study on Deformation of Surrounding Rock and Reinforcement of Supporting Structure for Carbonaceous Slate Stratum Tunnels during Long-Term Cessation [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(4): 256 – 260.