

注浆对邻近土体水平位移影响的数值模拟

孙九春¹, 许四法², 王旭锋^{2*}, 王瑞¹, 王哲², 奚晓广¹

(1. 腾达建设集团股份有限公司, 上海 200120; 2. 浙江工业大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要: 袖阀管注浆过程会引起周围土体变形, 从而影响邻近建(构)筑物的安全。本文依托杭州某工程现场实测数据, 结合 PLAXIS 有限元软件分析注浆对周围土体位移的影响, 并将实测结果和数值分析结果进行对比, 验证数值模拟分析的有效性。结果表明, 数值模拟分析结果和实测结果拟合良好, 土体水平位移的变化趋势基本一致, 最大位移均发生在注浆所在深度附近。本研究成果对于注浆及类似工程的设计和施工具有一定的参考价值 and 指导意义。

关键词: 袖阀管; 注浆; 数值模拟; 土体变形

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)05-0397-05

Numerical simulation of grouting effects on horizontal displacement of adjacent soil

SUN Jiu-chun¹, XU Si-fa², WANG Xu-feng^{2*}, WANG Rui¹, WANG Zhe², XI Xiao-guang¹

(1. Tengda Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. Geotechnical Engineering Institute, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: The grouting process of the sleeve valve tube may cause deformation of the surrounding soil. This phenomena affects the safety of adjacent structures. This paper is based on the measured data of a project in Hangzhou, combined with PLAXIS finite element software to analyze the influence of grouting on the surrounding soil displacement, and compares the measured results with the numerical analysis results to verify the validity of the numerical simulation analysis. The results show that the numerical results and the measured results fit well; the change trend of the horizontal displacement of the soil is basically the same, and the maximum displacement occurs near the depth of the grouting. The results of this research have certain reference value and guiding significance for the design and construction of grouting and similar projects.

Key words: sleeve valve tube; grouting; numerical simulation; soil deformation

0 引言

袖阀管注浆作为一种较为成熟的地层变形控制技术, 越来越多的应用于地基处理中^[1-3]。其特点是能够小范围、特定地层深度、可重复注浆。在注浆加固时, 合理确定注浆参数是施工的关键。张志沛等^[4]利用 FLAC 3D 对不同注浆方式进行了模拟, 结果表明, 注浆中心地面处发生隆起变形, 且变形量随着注浆压力的增加呈现不断增大的趋势。唐智伟等^[5]采用解析法对注浆进行了模拟计算; 采用有限差分法, 通过施加膨胀压力使单元达到设定的注浆体积应变来模拟注浆, 将解析法模拟注浆以及数值解法模拟注浆的结果进行对比验证。张冬梅等^[6]

提出了采用注浆引起的土体体积应变模拟隧道注浆效果的方法, 利用该方法, 以注浆引起的隧道横向收敛、接头张开和错台变化为指标, 分析了隧道侧向注浆对隧道横向变形的影响规律, 揭示了注浆对隧道横向变形的作用机理; 郑刚等^[7]采用 PLAXIS 3D 软件, 采用体应变法模拟注浆对地铁结构的变形影响, 通过与地铁结构水平位移实测值进行对比, 表明实测与模拟结果较为接近。

由于注浆会引起周边土体发生较大的水平变形, 进而影响邻近建(构)筑物的安全。本文结合实际工程, 通过有限元分析软件对注浆过程产生的土体变形进行分析, 并将现场监测数据与有限元模拟得到的结果进行对比, 分析引起土体变形的原因。

收稿日期: 2021-08-21

作者简介: 孙九春(1979—), 男, 山东潍坊人, 博士, 主要从事桥梁及地下工程施工技术研究工作。E-mail: sjczy999@163.com。

*通信作者: 王旭锋(1994—), 男, 江西上饶人, 学士, 主要从事地基处理研究工作。E-mail: 345880863@qq.com。

1 试验概况

试验场地的土层主要物理力学指标见表 1 所

示, 潜水位埋深一般为 1.80~5.20 m, 对应的标高为 2.88~3.97 m。该地质主要为表层杂填土、黏质粉土和砂质粉土等。

表 1 各土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of each soil layer

土层号	土层名称	土的重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	渗透系数		固结快剪试验		层厚/m
			水平/(cm/s)	垂直/(cm/s)	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	
① ₁	黏质粉土	19.2	4.70×10^{-5}	5.75×10^{-5}	11.0	28.0	1.10~3.90
① ₂	黏质粉土	19.3	3.27×10^{-4}	4.20×10^{-4}	10.0	29.0	4.60~10.30
②	砂质粉土	19.4	4.32×10^{-4}	5.24×10^{-4}	8.3	30.8	5.20~9.90
③	淤泥质粉质黏土	18.3	1.20×10^{-6}	2.30×10^{-6}	13.0	9.0	0.00~6.80
④	粉质黏土夹粉砂	19.8	7.40×10^{-6}	9.70×10^{-6}	15.0	30.0	0.00~5.20

2 注浆对邻近土体水平变形数值分析

2.1 注浆数值模拟方案

(1) 采用 PLAXIS 2D 建立有限元模型。模型边界条件为侧向边界约束水平位移和底部边界固定。在土体与结构之间建立界面单元以考虑土体与结构的相互作用, 界面单元材料强度为相邻土体材料强度的 0.67 倍, 工况 1 的有限元网格如图 1 所示。

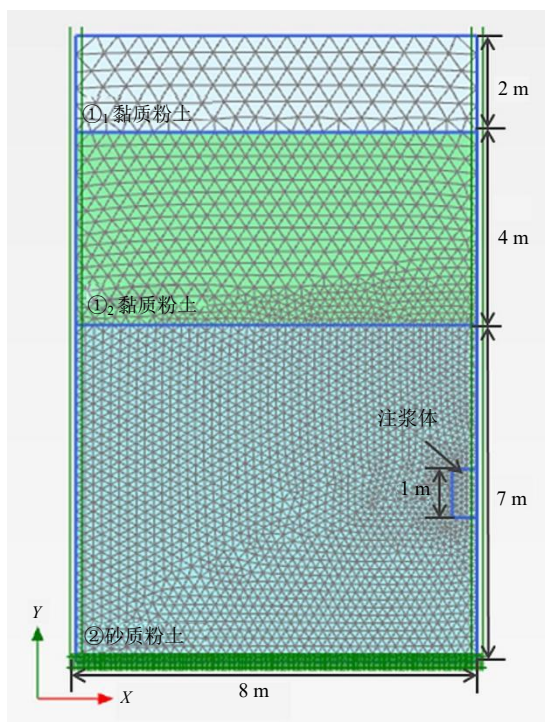


图 1 数值模拟网格划分

Fig. 1 Numerical simulation grids

(2) 采用摩尔-库伦模型模拟土体的弹塑性行为。土体参数来源于地勘检测报告和当地的地质参数, 选取的地质参数如表 1 所示。

(3) 分析注浆参数对邻近土体变形的影响, 注浆参数包括注浆量、注浆长度和注浆深度。分析方案如表 2 所示, 工况 1~3 中考虑的试验变量是注浆量, 探究不同注浆量对周边土体变形的情况; 工况 3~5 中考虑的试验变量是注浆深度, 通过在不同深度进行注浆, 且其他条件相同情况下分析注浆深度对土体变形的影响; 工况 5~7 中考虑的试验变量是注浆长度, 通过只改变注浆长度的方式, 探究不同注浆长度对周边土体变形的情况。

(4) 注浆试验浆液采用水泥-水单液浆, 水灰比均控制在 0.7。

2.2 定义材料属性

本文有限元以现场试验的土体参数和注浆参数为基本, 模拟地层包括杂填土、黏质粉土和砂质粉土, 其中杂填土厚度 2 m, 弹性模量为 3 000 kPa, 黏质粉土厚度 4 m, 弹性模量为 4 500 kPa, 砂质粉土厚度 7 m, 弹性模量为 5 500 kPa。分别模拟注浆体在 10~9 m、7~6 m 和 4~3 m 深度地层注浆对土体产生的位移。由于注浆体介于水泥浆液和混凝土之间, 注浆体的弹性模量依据实际情况采用折减法进行折减, 因此注浆体弹性模量取 10 000 kPa。

2.3 定义施工阶段

(1) 以工况 1~3 为例, 设定注浆初始位置, 注浆开始前地层不变化, 注浆处的土体与所属地层一样, 地下水根据现场实测值确定, 设置在地层 5 m 以下。

(2) 注浆处替换对应的土体, 考虑注浆时产生膨胀效果, 根据结石体体积计算注浆体的半径。

(3) 结合现场结石体开挖情况, 注浆引起的膨胀量是依据实际施工的注浆量和结石体体积之间的关系确定, 注浆模拟过程如下:

表 2 注浆过程模拟方案
Table 2 Simulation plan of grouting process

工况	注浆量/L	注浆长度/m	土层	注浆深度范围/m
1	100	1.0	砂质粉土层	10.0~9.0
2	120	1.0	砂质粉土层	10.0~9.0
3	80	1.0	砂质粉土层	10.0~9.0
4	80	1.0	黏质粉土层	4.0~3.0
5	80	1.0	黏质、砂质粉土层	7.0~6.0
6	120	1.5	黏质、砂质粉土层	7.0~5.5
7	120	2.0	黏质、砂质粉土层	7.0~5.0

a) 从初始位置起, 激活其负向界面并赋予其注浆体的材料属性。

b) 在模拟注浆量 100 L 时, 激活注浆体的体积, 均匀膨胀, 即每个方向膨胀 2.0%, 此为工况 1。

c) 在模拟注浆量 120 L 时, 激活注浆体的体积, 均匀膨胀, 即每个方向膨胀 2.5%, 此为工况 2。

d) 在模拟注浆量 80 L 时, 激活注浆体的体积, 均匀膨胀, 即每个方向膨胀 1.5%, 此为工况 3。

(4) 经过上述步骤, 计算得到模拟效果云图, 注浆体只需在分布施工中进行定义即可实现注浆效果的模拟。

3 试验结果及分析

3.1 注浆量对土体水平位移的影响

本阶段探究注浆量对土体变形的影响, 在工况 1~3 中, 水平向位移云图如图 2 所示, 由图可知在注浆附近土体变形较大, 距离注浆点越远变形越小。土体的水平位移随注浆量的变化情况如图 3~4 所示。

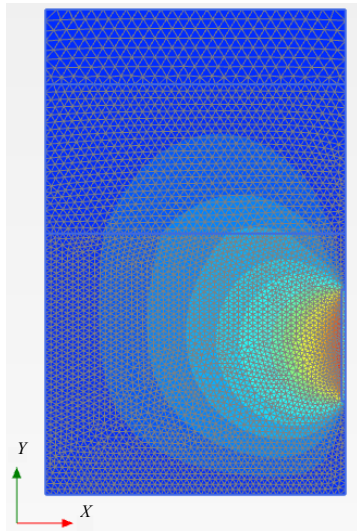


图 2 9~10 m 深度注浆时的土体水平向位移云图
Fig. 2 Nephogram of soil horizontal displacements when grouting at 9-10 m depth

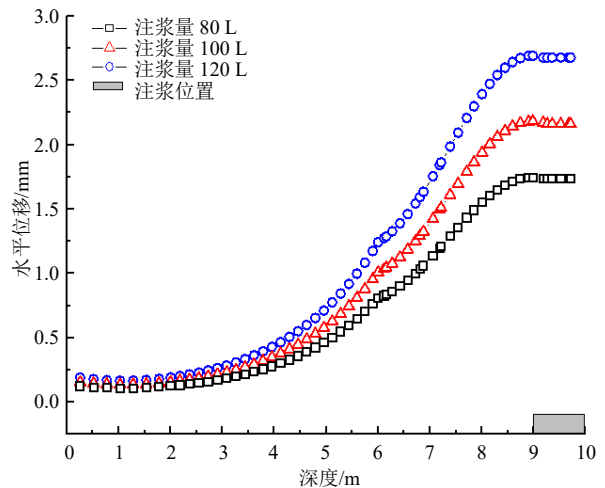


图 3 距注浆孔 2 m 处土体水平位移沿深度的分布
Fig. 3 Distribution of soil horizontal displacements along depth 2 m away from grouting hole

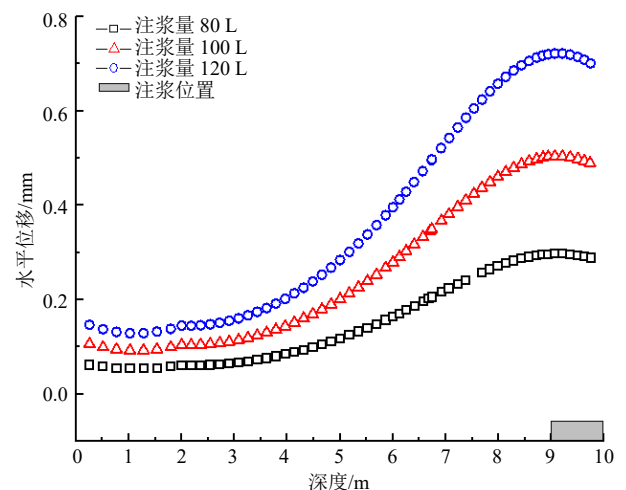


图 4 距注浆孔 4 m 处土体水平位移沿深度的分布
Fig. 4 Distribution of soil horizontal displacements along depth 4 m away from grouting hole

由图 3 和图 4 可知, 位移变化整体呈现下方大上方小的趋势, 地表 3.0 m 以下范围土体变形较大, 表明注浆引起土体的变形不仅仅发生在注浆所在深度处, 还会对注浆上部一定范围内产生较大影

响。当注浆量为 80 L 和 100 L 时，距注浆孔 2 m 处的土体最大位移分别为 1.75 mm 和 2.18 mm；距注浆孔 4 m 处的土体最大位移分别为 0.25 mm 和 0.46 mm，表明在相同注浆量的情况下，土体变形量随着距离的增大迅速减小。当注浆量为 120 L 时，距注浆孔 2 m 的土体最大位移值为 2.75 mm，距注浆孔 4 m 的土体最大位移值为 0.72 mm。土体的水平位移随着注浆量的增大而不断增大，二者呈正相关性。

3.2 注浆深度对土体水平位移的影响

本阶段探究注浆深度对土体变形的影响，在工况 3~5 中，对应的注浆深度分别为 10.0~9.0 m、4.0~3.0 m 和 7.0~6.0 m 处。土体的水平位移随注浆量的变化情况如图 5 所示。由图 5 可知，距注浆孔 2 m 处的测斜孔变形呈现如下规律：注浆深度 4.0~3.0 m 和 7.0~6.0 m 的最大位移分别为 1.16 mm 和 0.83 mm，注浆深度 10~9 m 的土体最大位移为 1.36 mm，且土体水平位移最大值在注浆所在深度的上部或者下部，这符合袖阀管注浆的注浆特性。表明在其他注浆条件一致，只改变注浆深度的情况下，注浆所在深度处土体水平位移也相对较大，土体变形主要集中在注浆位置处。

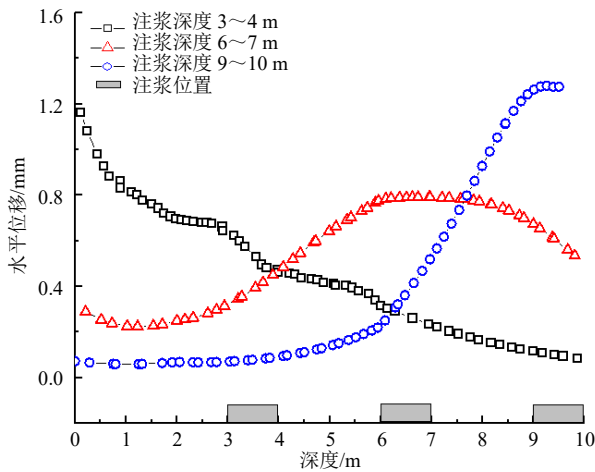


图 5 不同注浆深度下土体水平位移 (2 m 处)
Fig. 5 Horizontal displacement of soil under different grouting depth (2 m away from grouting hole)

3.3 注浆长度对土体水平位移的影响

本阶段探究注浆长度对土体变形的影响，在工况 5~7 中，考虑不同注浆长度对土体水平位移的影响，注浆长度分别为 1.0、1.5、2.0 m。位移云图如图 6 所示，土体的水平位移随注浆长度的变化情况如图 7~8 所示。

图 7 为注浆过程中 X=2.0 m 断面处地层水平位

移的实测值和数值模拟变化规律，图 8 为注浆过程中 X=4.0 m 断面处地层水平位移的实测值和数值模拟变化规律，由图 7 和图 8 可得，注浆所在位置处水平位移最大，数值模拟值和实测值也较为接近，注浆过程引起的土体水平位移值随着注浆长度的增大而不断增大。当注浆长度从 1.0 m 增大至 2.0 m 时，在距离注浆孔 2 m 处，土体最大水平位移值由 0.72 mm 增大至 2.25 mm；在距离注浆孔 4 m 处，土体最大水平位移值由 0.36 mm 增大至 1.72 mm。此外，随着同一距离处土体所在深度的增大，土体水平位移呈现先增大后减小的趋势。

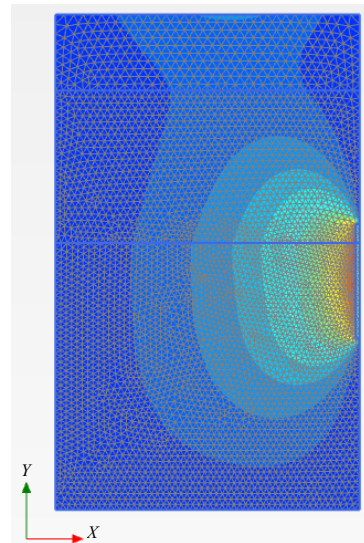


图 6 5~7 m 深度注浆时的土体水平位移云图
Fig. 6 Nephogram of soil horizontal displacements when grouting at 5-7 m depth

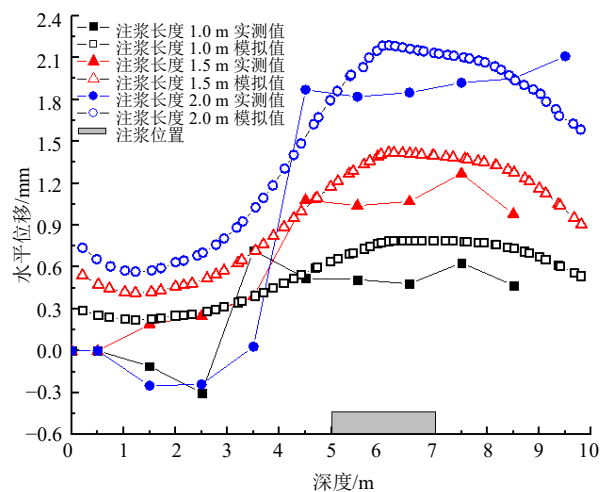


图 7 不同注浆长度时距注浆孔 2 m 处土体水平位移实测值和模拟值对比
Fig. 7 Comparison of measured and simulated values of soil horizontal displacements under different grouting lengths (2 m away from grouting hole)

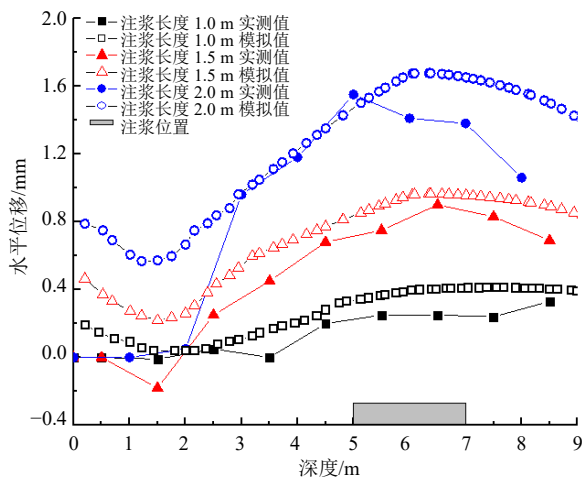


图 8 不同注浆长度时距注浆孔 4 m 处土体水平位移实测值和模拟值对比

Fig. 8 Comparison of measured and simulated values of soil horizontal displacements under different grouting lengths (4 m away from grouting hole)

4 结 论

采用有限元软件分析注浆对邻近土体变形的影响, 讨论了注浆量、注浆长度、注浆深度等注浆参数对土体变形的影响, 得到了土体水平位移和注浆参数之间的关系。随着注浆量的增大, 邻近土体最大水平位移逐渐增大; 随着注浆深度的改变, 土体水平位移最大值发生在注浆所在深度处及其附近; 随着注浆长度增大, 土体的最大水平位移呈现逐渐增大的趋势, 经过数值模拟结果和实测值进行对比分析, 表明拟合效果良好。

参考文献

[1] 赵勇. 袖阀管注浆工艺在深圳地铁地层加固中的应用[J]. 现代隧道技术, 2004(S2): 457-461.
ZHAO Yong. Application of sleeve-valve-pipe grouting technology in ground reinforcement in Shenzhen metro [J]. Modern Tunnelling Technology, 2004(S2): 457-461.

[2] 黄迅, 史吏, 金磊, 等. 软土地基长条形基坑施工对既有邻近隧道的变形影响[J]. 浙江工业大学学报, 2020,

48(3): 261-268, 299.

HUANG Xun, SHI Li, JIN Lei, et al. The construction of soft soil base pit is used in the deformation of both adjacent tunnels[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2020, 48(3): 261-268, 299.

[3] 孙国庆, 彭峰, 邹明波. 刚性袖阀管束注浆新技术的研究与应用[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(3): 186-191.
SUN Guo-qing, PENG Feng, ZOU Ming-bo. Research and application of new technology of rigid cuff valve passenger water grouting[J]. Modern Tunnel Technology, 2019, 56(3): 186-191.

[4] 张志沛, 彭惠, 饶晓. 软土地基注浆扩散过程数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S1): 652-655.
ZHANG Zhi-pei, PENG Hui, RAO Xiao. Simulation of numerical simulation of diffusion process of soft soil base[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 652-655.

[5] 唐智伟, 赵成刚. 注浆抬升地层的机制、解析解及数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1512-1516.
TANG Zhi-wei, ZHAO Cheng-gang. Mechanism, analytical solutions and numerical simulation analysis of grouting landers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1512-1516.

[6] 张冬梅, 邹伟彪, 闫静雅. 软土盾构隧道横向大变形侧向注浆控制机理研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2203-2211.
ZHANG Dong-mei, ZOU Wei-biao, YAN Jing-ya. Study on side grouting control mechanism of shan diverside transformation of soft earth shield tunnel[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2203-2211.

[7] 郑刚, 潘军, 程雪松, 等. 基坑开挖引起隧道水平变形的被动与注浆主动控制研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1181-1190.
ZHENG Gang, PAN Jun, CHENG Xue-song, et al. Study on passive and grouting active control of tunnel level deformation caused by foundation pit excavation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1181-1190.