

富水砂土地层中水平全方位高压喷射(MJS)桩 施工环境影响的数值分析*

赵宝华^{1,2} 谭鑫³ 王光辉^{1,2} 黄明华³ 黎腾龙³

(1. 中铁隧道勘察设计研究院有限公司, 511458, 广州; 2. 广东省隧道结构智能监控与维护企业
重点实验室, 511458, 广州; 3. 湖南大学土木工程学院, 410082, 长沙//第一作者, 高级工程师)

摘要 基于长沙地铁4号线全方位高压喷射(MJS)桩试验,采用流固耦合数值模拟方法研究富水砂土地层中水平MJS桩的施工扰动影响。对各施工阶段引起的地层超静孔隙水压力和地层变形进行分析,揭示水平MJS桩施工对地层环境的影响规律。数值模拟结果与现场实测孔压回归分析获得的趋势线基本一致,验证了数值模型的合理性。通过数值分析表明:在喷浆施工阶段,MJS桩孔扩张引起上覆土层隆起;在喷浆结束成桩阶段,MJS桩体受到地层压力产生压缩引起上覆土层沉降。施工诱发超静孔隙水压力幅值约为50 kPa,影响范围为桩体10 m附近,富水砂土地层中孔压增量消散迅速,能够在桩体施工时间段内基本消散完毕。通过MJS法的主动排泥装置将地内压力限制在可控范围内,能够使其诱发的环境影响较小。

关键词 全方位高压喷射桩;环境影响;富水砂土地层
中图分类号 TU472.3⁺6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.04.014

Numerical Analysis of Environmental Impact of Horizontal MJS Pile Construction in Water-rich Sandy Stratum

ZHAO Baohua, TAN Xin, WANG Guanghui,
HUANG Minghua, LI Tenglong

Abstract Based on the MJS (metro jet system) pile test of Changsha Metro Line 4 as the background, the fluid-mechanical coupling numerical simulation method is adopted to study the environmental disturbance from the horizontal MJS pile construction in water-rich sandy stratum. Excess pore pressure and deformation in stratum induced at each construction stage are analyzed. The pattern of how horizontal MJS pile construction influences stratum environment is revealed. The numerical simulation results and the trend line obtained by pore pressure regression analysis of the field test data are generally consistent, verifying the rationality of the numerical model. The numerical analysis shows that in the shotcrete construction stage, the expansion of the MJS pile hole causes the overlying soil layer to bulge; at the end of the shotcrete stage, the MJS pile is compressed because of stratum pressure and causes the overlying soil layer settlement. The increase of pore pressure induced by construction is about 50 kPa, and the range is within 10 m from the pile. The increment of pore pressure can be dissipated rapidly within the construction period of the MJS pile. The MJS method of active sludge drainage system limits the stratum excess pressure within controllable range, which can make the induced environmental impact smaller.

Key words MJS (metro jet system) pile; environmental impact; water-rich sandy stratum

First-author's address China Railway Tunnel Consultants Co., Ltd., 511458, Guangzhou, China

在建筑密集区施工地下工程时,为保证邻近构筑物物的安全,往往需要采用有效的超前支护手段进行预加固。其中水平旋喷桩预支护施工方法,可在隧道开挖区域上方及周边形成相互搭接且具有较高强度的水平固结体拱棚,从而保证开挖面及地层的稳定性^[1-2]。但水平旋喷桩施工的注浆压力及注浆量较大,易引起地层变形,在变形控制要求严格的工程中其应用受到了限制。日本率先在旋喷桩施工方法的基础上,发明了全方位高压喷射(MJS)施工方法,改进了传统高压喷射注浆的不足。MJS法通过独特的多孔管工艺,增大了喷射压力,增加了排泥装置,并在钻头部位设置土压力监测装置,通过调整排浆量来控制土压力,使施工处于有效控制状态,能有效减少对环境的影响^[3]。国内大多采用MJS法施作竖向加固体来加固基坑工程,并取得较多的研究成果^[4-5]。但水平MJS桩应用案例

* 湖南创新型省份建设专项经费项目(2019GK1010);国家重点研发计划项目(2019YFC1511101)

尚不多见,其施工过程并非对地层没有影响,仍有可能引起上覆地层隆起或沉陷^[6]。理论上可采用研究挤土效应的圆柱形孔穴扩张模型来描述 MJS 桩施工影响^[7-8]。但 MJS 桩体截面并非圆形,加之地层也不是无限弹性空间,因此解析方法的适用性不强。部分学者也倾向于通过数值分析方法研究 MJS 桩施工诱发的环境效应^[5,9]。

长沙地铁 2 号线某区间下新建地铁 4 号线区间隧道,2 条区间线路呈 60°相交。其中,已运营的 2 号线区间段埋深为 9 m;新建 4 号线区间段埋深为 18 m,其与上覆 2 号线最小竖向净距仅为 2.857 m。该新建地铁隧道位于富水砂层,设计采用水平 MJS 桩支护。此施工方法在湖南地区应用尚属首次^[10-11]。为确保工艺安全,特在施工前进行了试验桩施工,监测试验桩施工过程中的孔隙水压力及地层变形。本文结合该试验桩结果,通过数值模拟方法研究富水砂土地层中水平 MJS 桩施工对环境的扰动影响,研究成果可为类似工程提供借鉴。

1 MJS 试验桩参数及地层概况

水平 MJS 桩施工成桩原理见图 1。其施工过程主要包括成孔、喷浆和成桩。喷浆阶段,通过多孔管喷嘴以 40 MPa 左右的压应力喷射水泥浆液,泥土则从多孔管排泥口排出。土体在高压射流切削作用下,和水泥浆液搅拌混合并凝结硬化成具有一定强度的固结体^[12]。通过多孔管可以实时监测喷射点附近地层压力变化,反馈控制特有的排浆管阀门泄压或保压,以减小对地层的影响从而控制地面隆起或沉降。

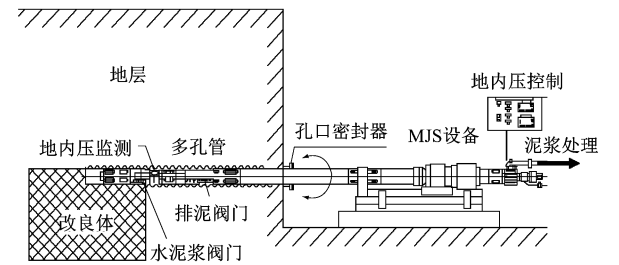


图 1 水平 MJS 桩成桩工作原理

Fig. 1 Working principle of horizontal MJS pile construction

该工程对一根试验桩的施工过程进行了孔压监测,其 MJS 成桩为半圆形,直径为 2 m,桩长为 42 m,埋深为 17 m,主要施工技术参数见表 1。

试桩场地地层大致可分为 3 层:第 1 层为厚 2 m 的杂填土,主要由砂、卵石及粉质黏土组成;第 2

表 1 水平 MJS 试验桩施工技术参数	
Tab. 1 Technical parameters of horizontal MJS test pile construction	
施工技术参数	参数值
设计桩径/m	2.0
注浆压应力/MPa	≤40
空气压应力/MPa	0.7
地内压控制范围/MPa	0.22~0.38
水泥浆用量/(m ³ /m)	约 2
回抽速度/(min/m)	15
回转速度/(r/min)	4
提升步距/mm	25
浆液流量/(L/min)	85~100
浆液类型	纯水泥浆,水灰比为 1:1

层为厚约 2.8 m 的圆砾,其粒径以 10~20 mm 为主;水平 MJS 桩设在第 3 层的粗砂中,其粒径为 0.5~1.0 mm,局部含少许圆砾、卵石,成份主要为石英质,黏粒含量约为 15%,细砂充填约为 15%。室内试验测得中粗砂的不均匀系数为 17.5,其级配良好。其中粒径大于 0.25 mm 的砂土颗粒占 55%,大于 0.50 mm 的砂土颗粒占 23%。测得的中粗砂渗透系数为 1.56 m/d。通过室内试验获得了主要土层的物理力学参数,见表 2。施工区域内地下水位变化主要受气候的控制:每年 4~9 月份为雨季,大气降水丰沛,是地下水的补给期,其水位会明显上升;而 10 月至次年 3 月为地下水的消耗期,地下水位也随之下降;年变化幅度为 2~4 m。试桩施工期间稳定水位埋深为地表以下 3 m 左右。

2 数值模型及施工过程模拟

2.1 模型的建立

水平 MJS 桩施工期间,高压流体通过不断旋转与回拔的喷头喷入土层内,增大了地内压力并引起土体膨胀,从而造成上覆地层隆起变形并产生超静孔隙水压力。当 MJS 桩体完成之后,由于水泥土混合物需要一段凝固时间,又会使桩体产生回缩变形并伴随着超静孔隙水压力消散。本文采用 FLAC 3D 软件建立岩土体流固耦合数值模型进行数值分析。FLAC 3D 软件基于有限差分方法和多孔介质渗流理论,根据运动方程、平衡方程、本构方程和相容方程建立孔隙压力、流体渗流速度及土体应力应变之间的关系,从而实现了对地层应力场与渗流场的

表 2 地层及 MJS 桩基本物理力学参数

Tab. 2 Basic physical and mechanical parameters of stratum and MJS pile

地层材料	饱和重度/ (kN/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比	摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	渗透系数/(m/d)
杂填土	19.00	5.50	0.30	18.50	46.00	
圆砾	20.00	19.00	0.27	37.40	0	12.00
中粗砂	19.50	20.00	0.30	34.00	0	1.560
MJS 桩	23.00	1.00	0.25			0

耦合计算^[13-14]。流固耦合数值模型应服从下列假定:① 地下水流动服从达西渗透定律;② 不考虑土体的非饱和和流动,地层渗透系数采用饱水状态下的参数;③ 土体在自重作用及初始地下水位状态下已完成固结^[15]。参考长沙地铁 4 号线 MJS 试验桩及地层条件,将水平 MJS 桩简化成平面应变问题,且因对称性取其一半建立数值模型,如图 2 所示。

生成初始地应力及孔隙水压力场;② 模拟扩孔并喷浆,开挖桩体并在桩内侧施加 0.3 MPa 地内压应力;③ 模拟超静孔压消散过程,维持地内压力 20 min 并开启渗流计算;④ 模拟成桩,消除地内压应力,生成桩体,开启渗流计算 20 min。

3 数值模拟结果

3.1 MJS 桩施工诱发孔隙水压的变化

图 3 给出了 MJS 桩不同施工阶段沿特定测线监测的孔隙水压增加值分布。在喷浆作业瞬时,由于桩体处地内压应力大于原有地层应力,导致了 MJS 桩体附近孔隙水压应力产生突变。喷浆瞬时沿着模型对称轴(见图 3 a)左边界)孔隙水压应力增量在 MJS 桩孔附近突增到 50 kPa 以上,随着距离迅速衰减;沿着 MJS 桩右侧竖直测线 2(图 3 b))在 MJS 桩孔附近区域由于受到扩孔引起的拉伸效应,孔隙水压增量为负 10 kPa 以上,并随着水平距离增大而迅速衰减而转变为正孔压;MJS 上方水平测线 1(图 3 c))也表现出类似孔压增量分布。

3.2 MJS 桩施工诱发地层变形分析

图 4 给出了 MJS 桩不同施工阶段沿特定测线监测的位移值分布。在喷浆作业瞬时,由于桩体处地内压应力大于原有地层应力,挤压土体产生了较大位移。位移表现为 MJS 桩孔上方土体隆起而下方土体沉降。因此,图 4 a)中竖向位移沿对称轴分布出现了相反的位移,正负位移最大值出现在桩孔上下边界,大约为 4 mm 左右。图 4 c)中竖向位移沿 MJS 桩上方水平测线均表现为隆起,最大位移 2.7 mm 出现在桩体正上方,并沿着远离桩体方向迅速减小,水平距离为 5 m 后降至 0.5 mm 以下。图 4 d)中地表竖向位移表现为整体轻微隆起,隆起量仅为 0.30 ~ 0.45 mm。由于 MJS 桩半圆形态的影响,喷浆阶段地内压应力引起的土层水平位移要小于竖向位移。图 4 b)中水平位移沿 MJS 桩右侧竖直测线表现为向右侧移动,但最大位移值仅为

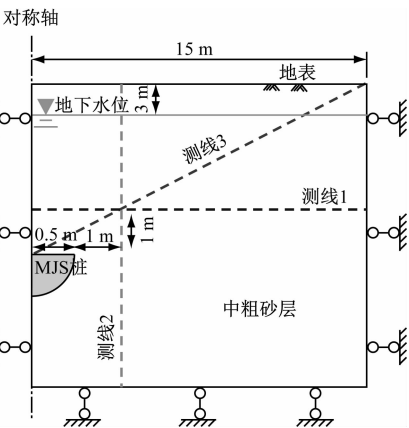


图 2 水平 MJS 桩数值模型示意图

Fig. 2 Diagram of horizontal MJS pile numerical model

模型侧边及底部均为简支约束,地表为透水边界,地下水位位于地表以下 3 m;模型底部为不透水基层,右侧为固定孔压边界,左侧为自由孔压边界。地层土体采用摩尔库伦本构模型,MJS 桩体采用弹性模型,地下水渗流遵循达西渗透定律。模型基本力学参数按地勘试验结果选取(见表 2),其中 MJS 桩体弹性模量考虑到水泥硬化需要较长时间,因此选用尚未达到其稳定强度的较低弹性模量。在模型中设置图 2 所示的测线,以便于在 MJS 施工模拟过程中对地层环境的扰动效应进行实时监测。

2.2 施工过程模拟

因为将水平 MJS 桩简化为二维平面模型,所以根据施工回抽速度按照 40 min/m 的桩体施工时间进行模拟。参考水平 MJS 桩的工作原理及技术参数,将整个施工过程简化为如下数值模拟步骤:①

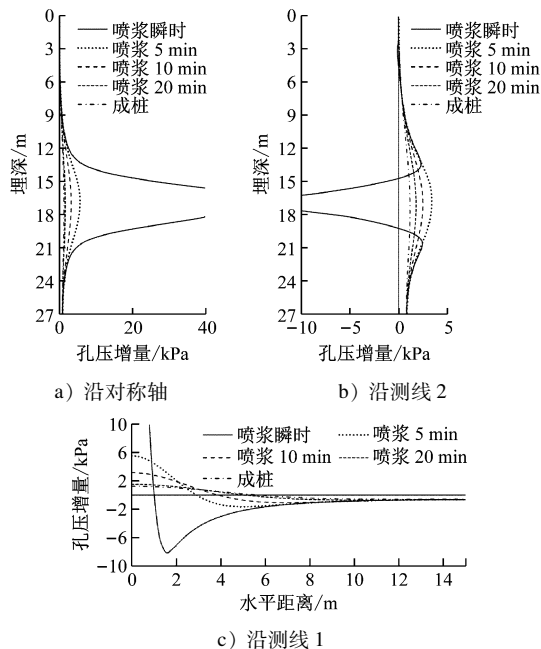


图3 不同施工阶段测线上孔隙水压增量分布

Fig. 3 Distribution of pore pressure increment along monitoring lines at different construction stages

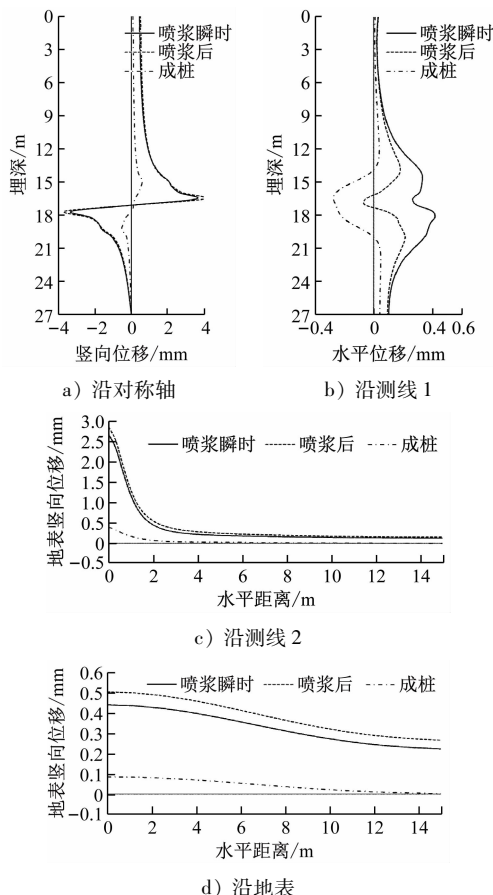


图4 不同施工阶段测线上和地表的位移分布

Fig. 4 Distribution of displacement along monitoring lines and on ground surface at different construction stages

0.4 mm。孔压消散的过程使上覆地层隆起量增加10%左右,喷浆20 min后桩体上方土层整体继续产生0.5 mm左右隆起,测线1监测的水平位移则随着孔压消散产生回移,最大位移值仅为喷浆瞬时的一半。

喷浆结束后 MJS 桩孔内压应力消除,但桩体尚未完全凝固,因此产生了土体回移。此时 MJS 桩体上方土体继续隆起后表现为沉降,各测线上隆起量均迅速减小。MJS 桩体上方地层隆起量降至1.0 mm,地表隆起则降至0.1 mm。测线1上的水平位移甚至出现了局部相反位移。不同施工阶段土体竖向位移分布云图见图5。在喷浆施工阶段,MJS 桩孔扩展引起上覆土层隆起;在喷浆结束成桩阶段,MJS 桩体受到地层压力产生压缩引起上覆土层沉降。

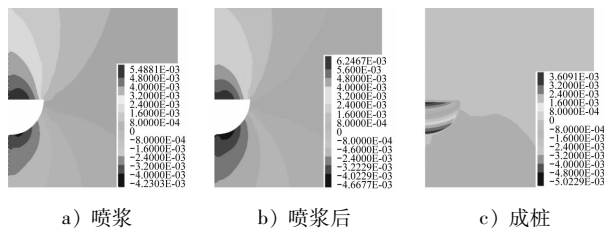


图5 MJS 桩施工过程中土体竖向位移云图

Fig. 5 Vertical displacement nephogram of soil during MJS pile construction

由此可见,水平 MJS 桩体施工过程中对富水地层孔压及变形均有一定影响,且诱发的地层变形会随着施工阶段不同出现隆起或沉降。但由于 MJS 法的主动排泥装置可使地内压应力不会过高,在本试验桩控制的地内压应力范围内(0.1 ~ 0.3 MPa)诱发的环境影响较小,能满足后续工程的要求。

4 数值模拟与实测的结果对比分析

试验桩施工期间通过在地层中埋设孔压传感器,记录了施工过程中诱发的孔隙水压增加值。本文研究采取平面模型计算40 min的施工过程,而实际施工试验桩有42 m长,施工周期达到数天。为了便于对比,将施工阶段孔压计测的孔压波动幅值与施工位置到各传感器的距离关系列入图6,并将本文模型中各测线孔压分布与桩心的距离关系同样列入图6中。

因为实测数据为三维空间的孔压增量最大值,故相较于本文模型单条测线孔压分布值整体较高。但对实测孔压进行回归分析获得的趋势线与本文

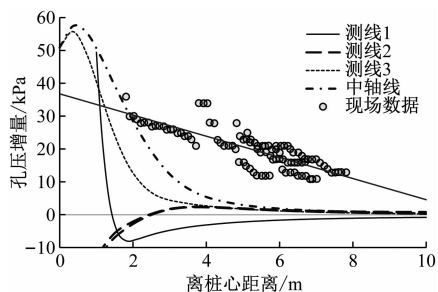


图6 孔压增量实测值与计算值对比图

Fig. 6 Comparison of measured and calculated values of pore pressure increments

数值结果变化趋势线基本一致,这也验证了本文所建立的数值模型的合理性。实测地层中孔压增加幅值与喷浆段距离之间呈线性关系,通过延长趋势线可知,实测地层最大孔压增加值为 40 kPa 左右,而数值计算结果为 50 kPa。实测和数值结果均显示,在距离 MJS 桩喷浆段 10 m 外孔压增量基本为 0。

5 结语

本文基于富水砂土地层中水平 MJS 试验桩施工过程,通过流固耦合数值模拟研究并与现场监测数据进行对比分析,得出如下结论:

1) MJS 桩喷浆施工阶段将引起桩周孔隙水压上升,幅值达到 50 kPa 左右,影响范围为桩体 10 m 范围内;由于试桩地层渗透性较好,孔压增量将迅速消散,在桩体施工时间段内即能基本消散。

2) 水平 MJS 桩体施工过程对富水地层变形有一定影响,且地层会随着施工阶段不同表现出或隆起或沉降的不同趋势。在喷浆施工阶段,MJS 桩孔扩展引起上覆土层隆起;在喷浆结束成桩阶段,MJS 桩体受到地层压力产生压缩而引起上覆土层沉降。

3) 通过 MJS 法的主动排泥装置将地内压应力限制在可控范围内,对环境的影响较小;基于本次试桩的施工参数,水平 MJS 桩诱发地层位移在 mm 级别,能够满足后续工程的要求。

参考文献

[1] 刘勇,孙星亮,朱永全,等. 水平旋喷预支护技术在铁路隧道中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(6): 905.
LIU Yong, SUN Xingliang, ZHU Yongquan, et al. Application of horizontal jet grouting reinforcement technique in railway tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002 (6): 905.

[2] 胡长明,陆征宇,梅源,等. 软土地层地铁盾构施工风险可拓评估方法研究[J]. 安全与环境学报, 2017(1): 21.
HU Changming, LU Zhengyu, MEI Yuan, et al. On the risk evaluation of the metro shield construction in the soft soil condition background with the extension method[J]. Journal of Safety and Environment, 2017(1): 21.
[3] 张帆. 二种先进的高压喷射注浆工艺[J]. 岩土工程学报, 2010(S2): 406.
ZHANG Fan. Two advanced jet grout methods[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(S2): 406.
[4] 张志勇,李淑海,孙浩. MJS 工法及其在上海某地铁工程超深地基加固中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012(7): 41.
ZHANG Zhiyong, LI Shuhai, SUN Hao. MJS engineering method and its application in super deep foundation reinforcement of a metro project in Shanghai[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012(7): 41.
[5] 赵香山,李春涛,王建华. 软土中 MJS 工法桩施工环境效应的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016(5): 1315.
ZHAO Xiangshan, LI Chuntao, WANG Jianhua. Numerical analysis on the installation effect of MJS pile in soft clay[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016(5): 1315.
[6] 王志丰,王亚琼,谢永利. 单根水平旋喷桩施工引起地表隆起变形规律研究[J]. 中国公路学报, 2016(7): 117.
WANG Zhifeng, WANG Yaqiong, XIE Yongli. Investigation on displacement law of ground upheaval caused by installing a horizontal jet grout column [J]. Chinese Journal of Highway and Transport, 2016(7): 117.
[7] 王育兴,孙钧. 打桩施工对周围土性及孔隙水压力的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(1): 153.
WANG Yuxing, SUN Jun. Influence of pile driving on properties of soils around pile and pore water pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(1): 153.
[8] 肖昭然,张昭,杜明芳. 饱和土体小孔扩张问题的弹塑性解析解[J]. 岩土力学, 2004(9): 1373.
XIAO Zhaoran, ZHANG Zhao, DU Mingfang. An elastoplastic closed-form approach of cavity expansion in saturated soil based on modified Cam clay model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(9): 1373.
[9] 赵云建,漆泰岳,钱王革,等. MJS 水平旋喷桩施工过程中的地表沉降分析[J]. 路基工程, 2018(6): 84.
ZHAO Yunjian, QI Taiyue, QIAN Wangping, et al. Analysis of ground settlement during construction of MJS horizontal jet grouting piles[J]. Subgrade Engineering, 2018(6): 84.
[10] 陈仁朋,张品,刘湛,等. MJS 水平桩加固在盾构下穿既有隧道中应用研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018(7): 103.
CHEN Renpeng, ZHANG Pin, LIU Zhan, et al. Application study of MJS horizontal column reinforcement in shield tunneling [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018 (7): 103.