

搅拌桩和钻孔桩先后施工对邻近地铁隧道的影响分析

——采用三维有限元数值计算和现场试验就上海某工程案例的对比分析

汤新春¹, 张 荣¹, 赖允瑾², 谷冠思²

¹上海两港市政工程有限公司, 上海

²同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

Email: 191196247@qq.com, laiynjn@126.com

收稿日期: 2020年8月20日; 录用日期: 2020年9月3日; 发布日期: 2020年9月10日

摘 要

采用三轴水泥土搅拌桩对钻孔桩位置的土体预先进行地基加固是防止灌注桩成孔时发生塌孔的常用方法。众所周知, 由于三轴水泥土搅拌桩在施工过程中的高压注浆和对周边土体的巨大扰动, 其施工会导致邻近土体的位移。钻孔灌注桩成孔施工也会导致土体位移。因此, 当邻近地铁隧道时, 上述的土体位移必须控制在允许范围内, 以免对地铁隧道产生不利影响。作为案例, 针对三轴水泥土搅拌桩和钻孔灌注桩连续施工对邻近土体及已有盾构隧道的影响, 本文就三维有限元数值模拟计算结果和现场试验实测结果进行了比较分析。在上述比较基础上, 本文介绍了三轴水泥土搅拌桩沉桩施工导致周边土体位移的相关认识; 为确保隧道的安全, 就桩基的施工提出了指导性建议。

关键词

三轴水泥土搅拌桩施工, 钻孔灌注桩施工, 现场监测, 盾构隧道, 三维有限元数值模拟

Analysis of the Effect on Existing Subway Tunnel Due to Consecutive Pile Driving of Tri-Axial Cement-Mixing Pile and Bored Pile

—Comparison Analysis between 3D-FEM and *In-Situ* Test of a Case Study in Shanghai

Xinchun Tang¹, Rong Zhang¹, Yunjin Lai², Guansi Gu²

¹Shanghai Lianggan Municipal Engineering Construction Co., Ltd., Shanghai

²Geotechnical Department in Civil Engineering College of Tongji University, Shanghai

Abstract

Tri-axial cement-mixing pile (TCMP) is usually used for soil improvement at the place of bored pile (BP) driving in order to avoid caving. But it is known to all that TCMP shall lead to rather large movement of surrounding soil because of the high grouting pressure and profound disturbance when TCMP driving; the BP driving shall lead to soil movement as well. As such, all these movements must be controlled under allowable level lest it should exert adverse effect on adjacent subway tunnel, if any. As a case history, this paper presents a comparison analysis between three dimensional finite element (3D-FEM) simulation and *in-situ* test, which is focused on the effect of consecutive driving of TCMP and BP on adjacent soil and existing shield tunnel. This paper also presents some knowledge drawn from above comparison about the behavior of surrounding soil due to TCMP driving, and gives some constructive suggestions from the view of tunnel safety.

Keywords

Tri-Axial Cement Mixing Pile, Squeezing Effect of TCMP, Site Monitoring, Subway Tunnel, 3D-FEM

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

对于大直径钻孔灌注桩施工,特别是邻近地铁区间隧道的钻孔桩施工,防止坍孔是沉桩施工的技术难点之一。为了防止坍孔,常采用三轴水泥土搅拌桩对桩周土体进行地基处理。由于三轴搅拌桩施工因为常常伴随着高压注浆,而高压注浆会对周围土层产生很大的挤压作用。因此,对于采用了三轴水泥土搅拌桩地基加固的大直径钻孔灌注桩施工,需要就搅拌桩施工和钻孔桩施工两个过程对隧道结构的不利影响进行分析和评估,当影响不可忽视时,必须提出因应对策,以确保隧道安全。

邻近区间隧道进行三轴搅拌桩施工,由于高压喷浆和桩头下沉会对周围土层产生挤压作用,如此会导致邻近隧道水平位移;邻近区间隧道进行钻孔灌注桩成孔施工,由于成孔取土的卸载作用,会导致周围土层向桩中心移动,也会导致邻近隧道的水平位移,当发生坍孔事故时,这种水平位移达到最大。

本文以上海浦东某跨线桥桩基施工对邻近二号线隧道影响作为案例,采用三维有限元数值计算软件(ABAQUS),就三轴水泥土搅拌桩施工和钻孔桩施工对邻近土体及邻近隧道结构的影响进行了计算,并与试验和监测结果进行了对比分析,得到了桩基施工全过程对周围土体的变形影响的一些规律性认识。在此基础上,针对运营地铁隧道的安全,就桩基的施工提出了指导性建议。

2. 国内外研究现状

关于三轴搅拌桩施工对邻近地铁隧道的影响,国内不少学者和工程技术人员进行了现场监测研究和数值模拟计算分析。王煜(2013) [1]针对苏州某基坑工程的SMW工法三轴水泥土搅拌桩施工,开展了搅拌桩

对邻近盾构隧道的影响的现场试验研究,分析了钻头下钻速度、水灰比、注浆压力和钻头提升速度等因素在沉桩施工中发挥挤土效应的影响程度。沈荣飞(2018) [2]针对上海某基坑工程的地下连续墙护壁用三轴搅拌桩施工,进行了类似的现场试验研究,他发现桩下沉施工阶段和注浆阶段测斜管变形明显,24 小时后逐渐向原位回复,至地下连续墙开挖再进一步回复。孙德安和陈瑶瑶(2012) [3]使用 ABAQUS 有限元计算软件,建立了三维有限元数值模型,对多方位立体双向搅拌桩(MMP)的施工过程进行了数值模拟。在模拟中,通过设置桩孔内壁位移边界来控制扩孔过程,位移量通过每延米增加的泥浆体积来确定。数值模拟结果与现场实测结果得到的规律一致,能够较好地预测施工过程对周围土体产生的应力影响。

关于钻孔灌注桩施工及运营对邻近地铁隧道的影响,近年来,国内不少学者也进行了数值模拟计算分析。路平和郑刚(2013) [4]采用三维有限元数值模型,模拟了立交桥桥墩桩基础的成孔施工、运营期桩基承担荷载在土中产生的应力扩散对既有隧道结构和轨道变形产生的影响,分析了单个承台桩基础及考虑多个承台桩基础叠加效应对临近既有隧道的影响规律,提出了相应的变形控制措施。研究得出,在桩周土中产生以竖向位移为主的附加位移,使隧道发生整体性沉降;土体位移分别沿远离桩方向和沿深度方向逐步衰减传递,这种位移传递差异导致了隧道截面沿逆时针扭曲变形。罗雪贵(2014) [5]通过数值模拟,分析不同水平距离下桩基施工对附近隧道产生的影响,研究了一定桩长下桩基与轨道交通的临界距离。经分析,桩基水平距离对隧道水平变形影响较大,对竖向变形影响较小。

国内以上研究都只限于单一桩型施工对邻近隧道的影响范围,但是针对三轴水泥土搅拌桩加固后套打钻孔灌注桩的情形,即分析搅拌桩和钻孔桩先后连续施工对隧道的耦合情形,国内尚未见相应报道。本文将采用 ABAQUS 三维有限元软件模拟三轴搅拌桩施工和钻孔桩施工全过程,对两种桩连续施工导致的邻近土层位移和隧道变形进行计算分析,并和现场施工监测结果进行对比分析。

3. 案例工程概况

上海市浦东新区创新中路某跨线桥跨越已经运营的地铁 2 号线,跨线桥桥墩邻近地铁区间隧道,桥梁基桩采用钻孔灌注桩,桩直径 1 米,长 56 米和 63 米。盾构隧道的外径为 6.2 米,埋深 9~10 m。基桩和区间隧道最小距离为 3.35 米。

为防止钻孔灌注桩成孔过程中出现坍孔,成孔前拟采用三轴水泥土搅拌桩对钻孔桩桩周地层进行加固,三轴搅拌桩直径 850 mm,搭接 250 mm,加固深度 22 m。桥梁桩基与地铁隧道位置关系如图 1 和图 2 所示。

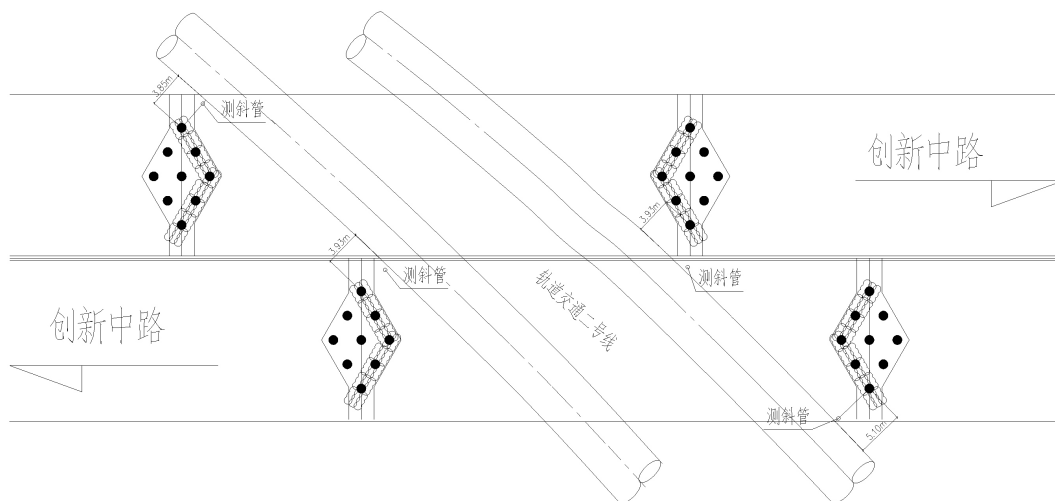


Figure 1. Layout of subway tunnel and pile foundation of bridge
图 1. 桥梁桩基和地铁隧道的平面图

根据地质勘察报告，桩基穿越如下土层：① 层填土，② 层粉质黏土，③ 层淤泥质粉质黏土，③ 夹粉质黏土，④ 层淤泥质粘土，⑤ 1 层粘土，⑤ 3-1 层粉质黏土。如图 2 所示。

各土层的物理力学指标如表 1 所示。

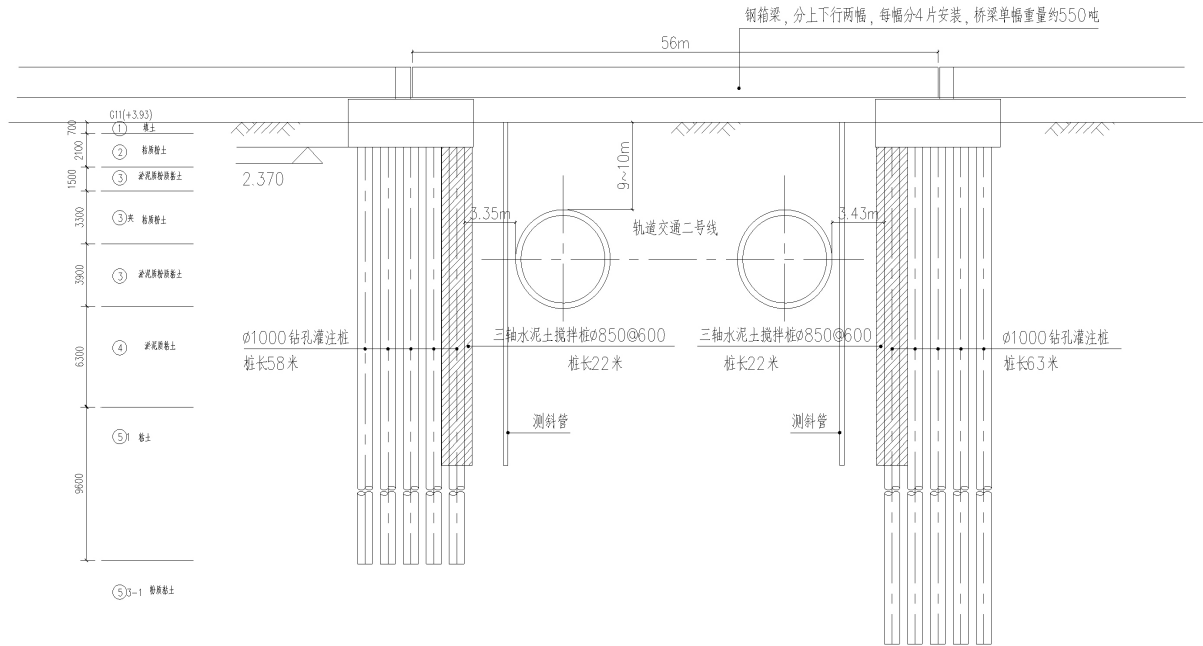


Figure 2. Profile of subway tunnel and pile foundation of bridge
图 2. 桥梁桩基和地铁隧道的剖面图

Table 1. Table of main mechanical properties of each soil
表 1. 各土层的主要力学指标一览表

土层序号及名称	厚度(m)	固快标准值		重度(kN/m ³)	渗透系数(10 ⁻⁶ cm/sec)	
		C (kPa)	φ (°)		Kv	Kh
① 填土	0.9	10.0	11.0	18.0	/	/
② 粉质黏土	1.7	19.0	19.0	18.5	2.74	3.69
③ 淤泥质粉质黏土	5.1	14.0	18.0	17.8	15.4	21.0
③ 夹粘质粉土	4.1	14.0	18.0	18.3	15.4	21.0
④ 淤泥质粘土	6.7	11.0	8.5	16.8	0.158	0.44
⑤ 1 粘土	9.0	18.0	18.0	18.9	2.19	2.95
⑤ 3-1 粉质粘土	23.5	19.0	22.0	18.6	4.23	5.34

4. 三维有限元数值模拟计算

4.1. ABAQUS 有限元分析软件简介

本文采用 ABAQUS 三维有限元分析软件进行相关的数值模拟计算和分析。

ABAQUS 是 SIMULIA 公司开发、维护和更新的大型商业有限元分析软件[6]，在工业界和学术界得

到了广泛的应用, 该软件在非线性有限元分析能力上尤为突出。

ABAQUS 有一个求解大多数线性和非线性问题的分析模块: ABAQUS/Standard, 本论文即采用该模块求解。该分析软件辅以前处理 ABAQUS/Pre 和后处理 ABAQUS/Post 两个模块, 分别对模型建立和结果分析进行相应处理工作。

对于岩土工程相关问题, ABAQUS 拥有着丰富的本构模型可供选择。其内置有摩尔库伦模型、Drucker-Prager 模型、Cam-Clay 模型(修正剑桥模型)等, 可以对大多数土体作出较为准确的描述。因此, ABAQUS 软件得到了工程界和学术界的广泛应用和认可。

4.2. 三维有限元建模

采用三维有限元就搅拌桩施工和钻孔桩施工对邻近土体乃至邻近区间隧道的影响分析, 关键在如何根据实际情况, 在 ABAQUS 软件内置的工具中对施工过程、荷载条件、介质材料属性、接触和约束条件构建符合实际的计算模型。本课题的关键在于如何模拟搅拌桩的施工过程和喷浆荷载; 以及如何模拟钻孔灌注的施工过程。

4.2.1. 土层本构模型

本论文针对依托工程的土体, 采用软件内置的摩尔 - 库伦模型进行模拟。

摩尔 - 库伦准则表述为:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (1)$$

其中, τ ——土体抗剪强度(kPa); c 、 φ ——土体粘聚力(kPa)和内摩擦角($^{\circ}$); σ ——正应力(kPa)。

摩尔 - 库伦模型屈服面函数为:

$$F = \frac{1}{3} I_1 \cdot \sin \varphi + \left(\cos \theta_{\sigma} - \frac{\sqrt{3}}{3} \sin \theta_{\sigma} \cdot \sin \varphi \right) \cdot \sqrt{J_2} - c \cdot \cos \varphi = 0 \quad (2)$$

式中, I_1 ——应力张量第一不变量, J_2 ——偏应力张量第二不变量, θ_{σ} ——洛德角。

4.2.2. 三轴搅拌桩和钻孔灌注桩施工模拟

在数值模拟计算中, 计算范围按隧道直径的 5 倍以上选取, 为 $100 \times 80 \times 63.9$ m 的长方体, 如图 3 所示。土层采用实体单元中的 C3D8R 单元, 即三维八节点减缩积分单元。搅拌桩和钻孔桩范围的土层作为可以开挖激活的独立实体单元。隧道结构采用板壳单元, 土层与隧道结构接触采用接触面单元。为了建模方便, 搅拌桩按面积等效成长方体。

荷载模拟: 内容包括土体自重荷载、衬砌自重荷载、桩机地面堆载、搅拌桩施工的喷浆荷载和钻孔灌注桩泥浆护壁荷载。其中桩机地面堆载按桩机重量 1850 kN 作用在 $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 范围上; 搅拌桩喷浆压力假定为钻头所在处的面荷载, 选取 0.1~0.2 Mpa。搅拌桩喷浆荷载按激活单元, 模拟施工进度而不断变化位置。钻孔桩的护壁泥浆按重度为 12 kN/m^3 。钻孔桩成孔后的孔壁荷载按静水压力荷载处理。

搅拌桩和钻孔桩的施工过程模拟: 在 ABAQUS 6.14 版本中, 开发人员将型号改变(Model Change)这一功能移入相互作用模块中。通过这一功能, 可以对指定区域进行“在该步中无效”或“重激活”的操作, 达到杀死单元或激活单元的操作。在搅拌桩施工过程中, 将需要完成搅拌桩施工的区域设置为可激活单元(或可杀死单元), 如此可完成三种功能: 未施工时是土体单元、在施工时是激活单元、施工后为杀死单元。对于钻孔灌注桩的成孔过程中的模拟也遵循同样的做法。

三维有限元计算网格如图 4 所示。

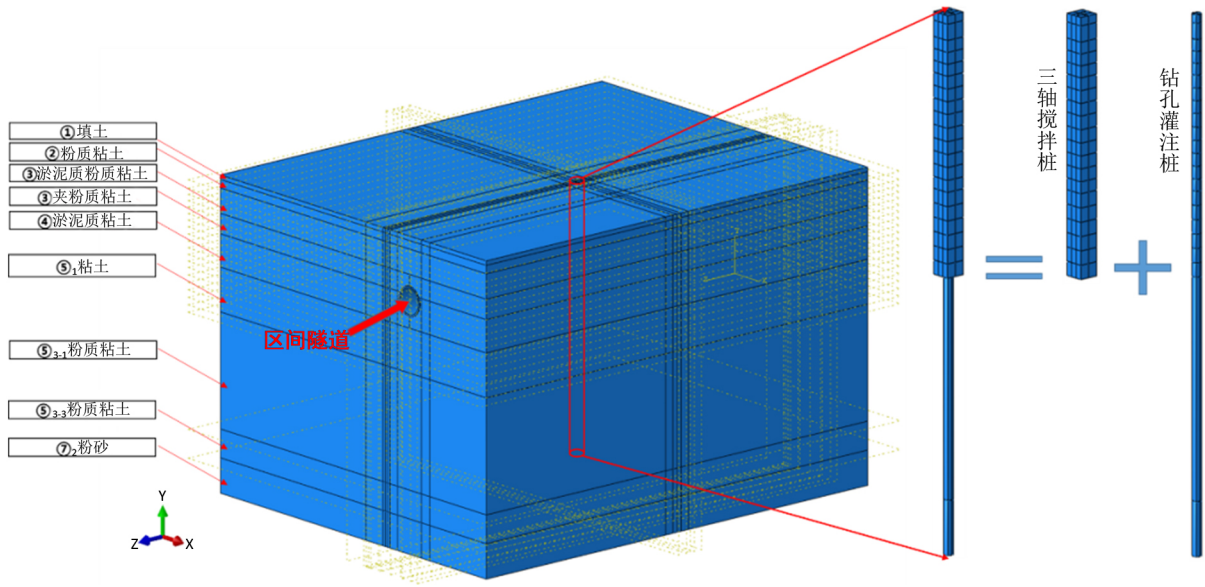


Figure 3. Mesh of property elements
图 3. 材料属性单元组装网格

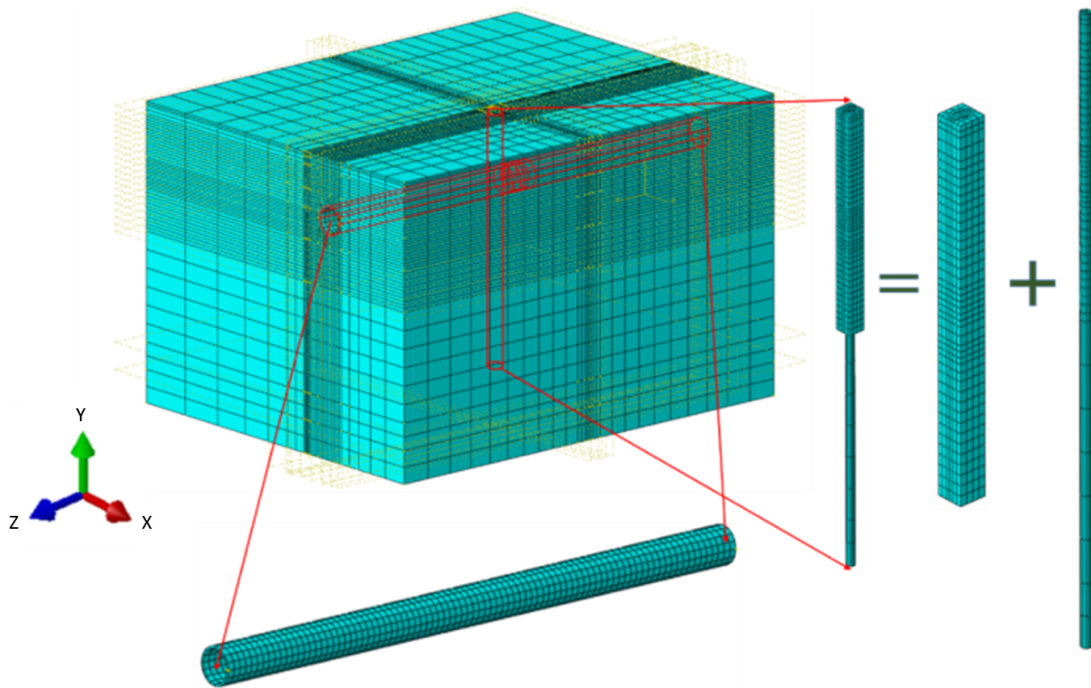


Figure 4. 3D-FEM grid mesh
图 4. 三维有限元计算网格

4.3. 有限元计算结果

4.3.1. 搅拌桩施工导致邻近土体水平位移

三轴搅拌桩深度 22 m，区间隧道顶部埋深 10 m。钻孔灌注桩套打于三轴搅拌桩中央，钻孔桩中心和隧道边缘最小距离为 3.35 m，如图 5 所示。图 5 为搅拌桩施工至 10 米位置时，临近土体的水平位移云图，图 6 为搅拌桩施工至 23 米位置时，临近土体的水平位移云图。

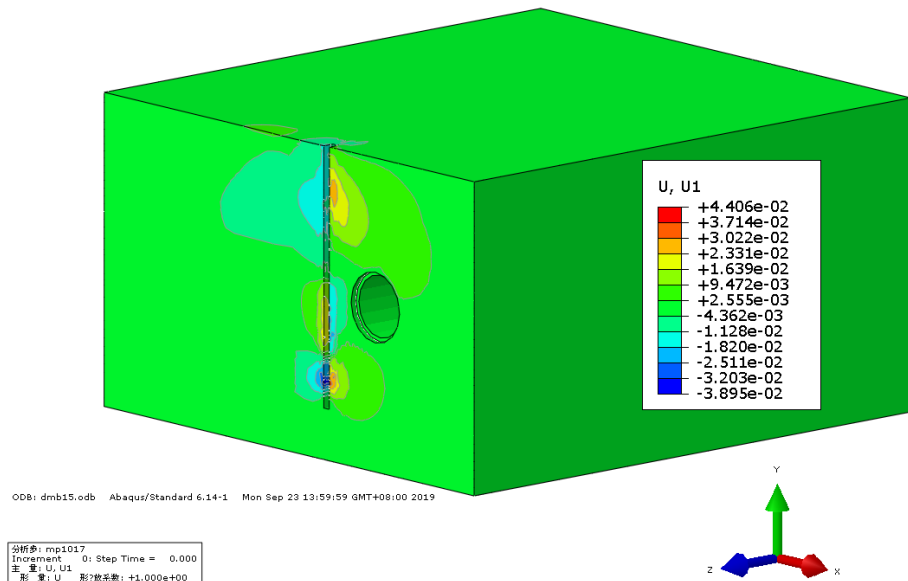


Figure 5. Horizontal displacement of surrounding soil when TCMP piling to the depth of 10 m, unit: m
 图 5. 三轴搅拌桩施工至 10 米深度时临近土体水平位移云图, 单位: m

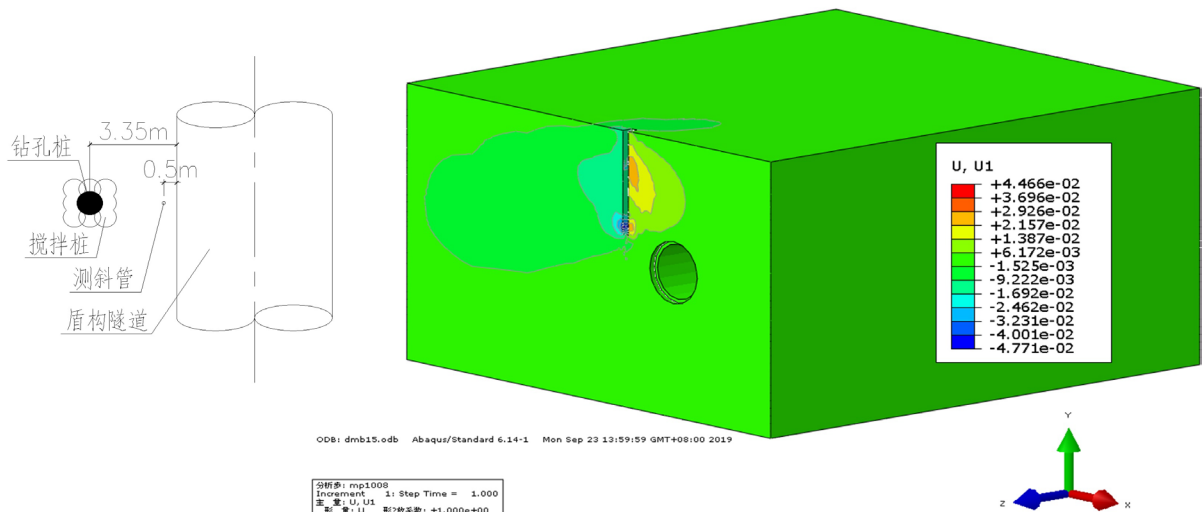


Figure 6. Lateral displacement of surrounding soil due to TCMP piling to the depth of 23 m, unit: m
 图 6. 三轴搅拌桩施工至 23 米深度时临近土体位移云图, 单位: m

从图 5 和图 6 可以看到, 在搅拌桩施工进行到 10 m 深度时, 最大水平位移出现在 5 m 左右, 此时在隧道深度范围内, 土体水平位移较小, 且朝隧道方向; 随着施工继续, 进行到 23 m 深度时, 已经超过隧道结构所在深度, 此时, 在隧道所在深度范围内, 水平位移朝向远离隧道一侧

4.3.2. 搅拌桩施工导致隧道变形

计算得到搅拌桩施工期间邻近隧道的变形情况。以图中测斜管位置作垂直于隧道轴线的平面, 以此为对称面将隧道切开, 截取一半进行观察。得到搅拌桩施工进行至 10 m 深度时的变形图, 如图 7 所示; 以及搅拌桩施工进行至 23 m 深度时的变形图, 如图 8 所示。

从图 7 和图 8 可以发现, 随着施工的推进, 隧道呈现出上下受压收缩, 水平对称面附近向两侧扩张的变形趋势。由于隧道建成之时, 周围土体对隧道的竖向压力 σ_z 大于侧向压力 ($k\sigma_z$, 且 $k < 1$) 隧道已经被

压缩成“扁鸭蛋”状；在搅拌桩以及钻孔桩施工过程中，隧道一侧土体被切割或者移除，导致侧向土压力进一步减弱，使得隧道继续被“压扁”。计算还发现，隧道影响显著的区域位于距离搅拌桩最近处，距离越远，影响越小。

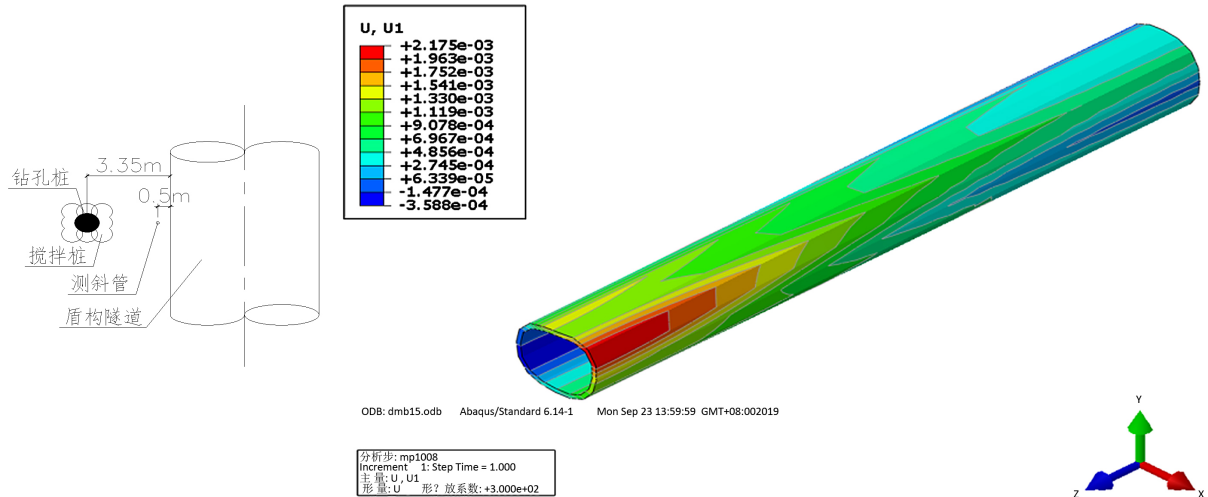


Figure 7. Deformation of tunnel due to TCMP piling to the depth of 10 m, unit: m
图 7. 三轴搅拌桩施工至 10 米深度时隧道变形云图，单位：m

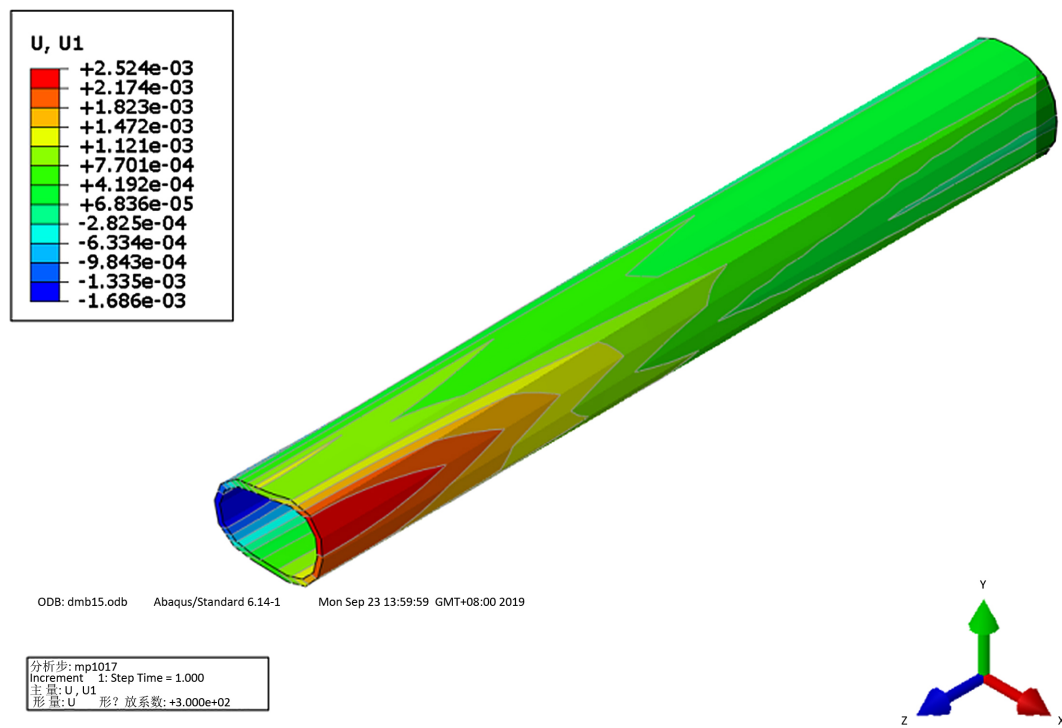


Figure 8. Deformation of tunnel due to TCMP piling to the depth of 23 m, unit: m
图 8. 三轴搅拌桩施工至 23 米深度时隧道变形云图，单位：m

4.3.3. 钻孔桩施工导致邻近土体水平位移

三轴搅拌桩施工完成后，养护 21 天，开始钻孔灌注桩施工。钻孔灌注桩套打于三轴搅拌桩中央，钻孔桩中心和隧道边缘最小距离为 3.35 m，钻孔桩深度取 56 米。计算中，模拟了钻孔灌注桩成孔的卸载和泥浆

护壁加载及混凝土浇筑的加载过程，护壁泥浆的重度为 11.5 kN/m^3 ，混凝土的重度为 24 kN/m^3 。需要指出的是，图 9 为钻孔灌注桩完成时以往各工况(包括桩机重量、搅拌桩施工至钻孔灌注施工)的累计位移云图。

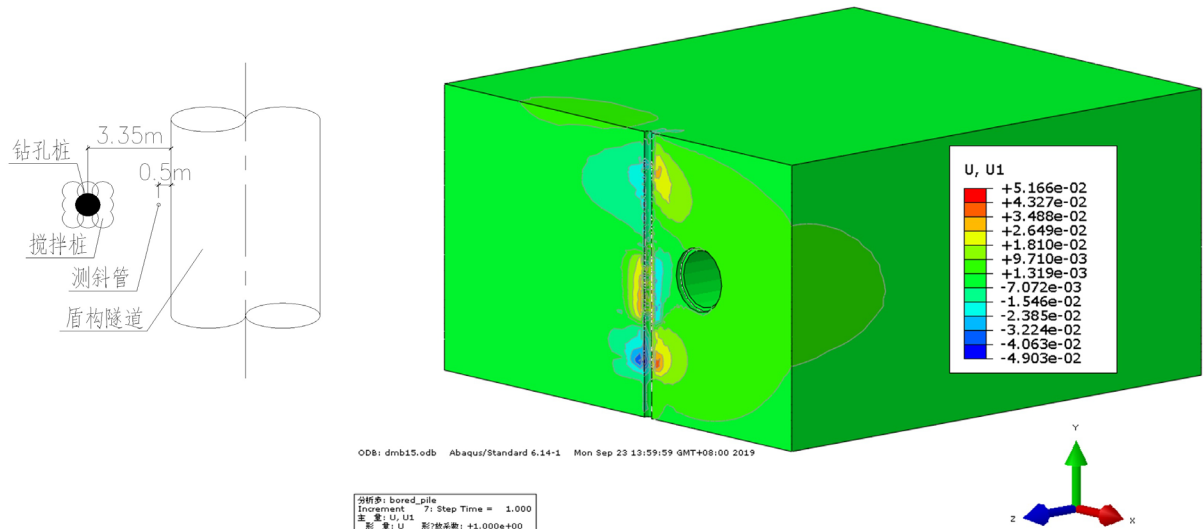


Figure 9. Horizontal displacement of surrounding soil due to BP piling, unit: m
图 9. 钻孔灌注桩施工完成后邻近土体的水平位移云图，单位：m

5. 现场监测与有限元计算对比分析

5.1. 现场的监测内容和测点布置

针对三轴搅拌桩和钻孔灌注桩施工对邻近土体的影响，桩机施工期间在邻近隧道边缘布置了测斜管对深层土体的水平位移进行跟踪监测。测点布置如图 10 所示。测斜管深度同搅拌桩，为 22 米，距离隧道外缘 0.5 m。本依托工程的三轴水泥土搅拌桩的水泥掺量为 10%，其喷浆荷载在计算中取为 0.1 MPa 。

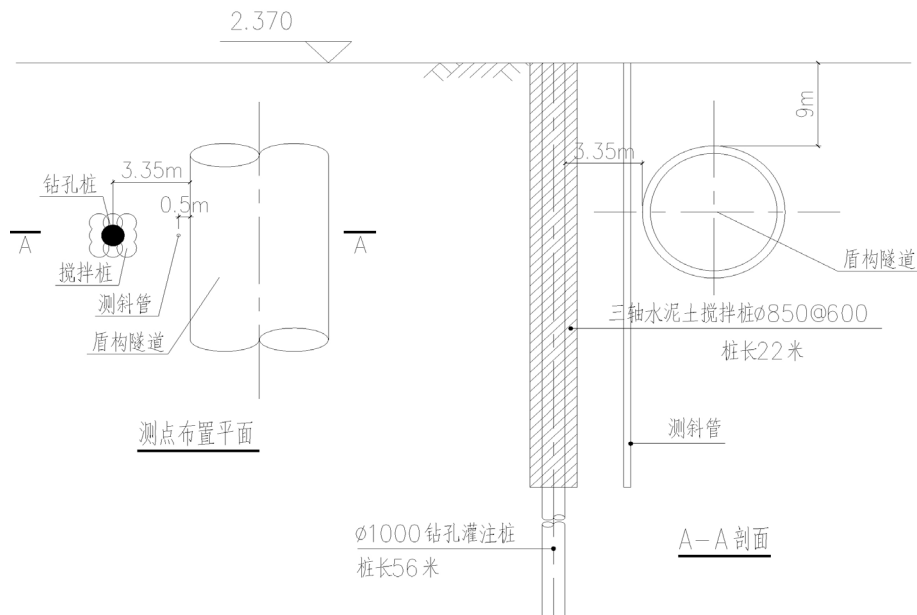


Figure 10. Layout of inclinometer casing
图 10. 测斜管布置示意图

5.2. 监测结果和有限元计算结果的对比分析

搅拌桩施工完成后，监测得到测斜管的水平位移；同时对照有限元计算的结果，得到如图 11 所示的对照曲线。从图 11 可以看出，二者仅位移峰值点略有差距，变化趋势总体吻合。最大值为 5 mm。

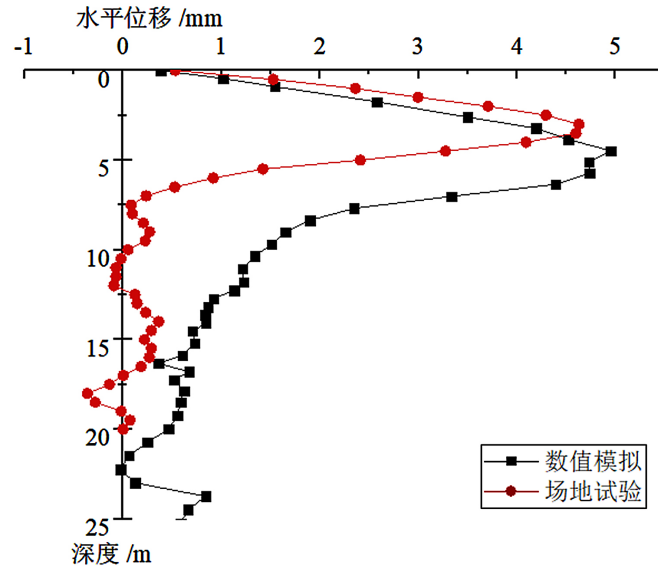


Figure 11. Site measurement and FEM calculation after TCMP piling
图 11. 搅拌桩施工时邻近土体的水平位移的试验值和计算值

钻孔灌注施工完成后，监测得到测斜管的水平位移；同时对照有限元计算的结果，得到如图 12 所示的对照曲线。从图 12 可以看出，二者仅位移峰值点略有差距，变化趋势总体吻合。最大值为 0.7 m。

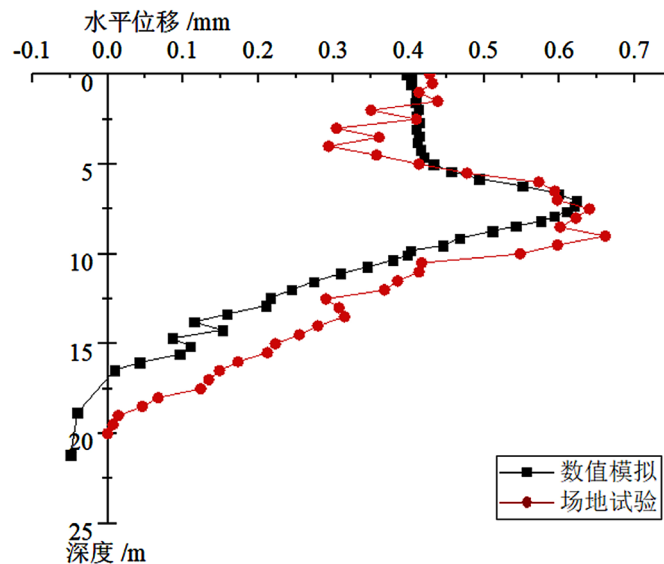


Figure 12. Site measurement and FEM calculation during BP piling
图 12. 钻孔桩施工阶段邻近土体的水平位移的试验值和计算值

从图 11 和图 12 可以看出，本依托工程的搅拌桩施工和钻孔桩施工导致的邻近隧道位置的土体位移极小。自然，其对已建的区间隧道影响也是微小的。

6. 结论和建议

根据前述分析,可以得到如下结论:

1) 大直径钻孔灌注桩施工前采用三轴水泥土搅拌桩对地基进行加固,可以减少钻孔桩成孔施工的坍孔风险,进而减小对邻近土体的扰动及邻近地下结构物如地铁区间隧道的不利影响。

2) 针对三轴水泥土搅拌桩地基加固后施工钻孔灌注桩对周围环境的影响,需要考虑注浆对邻近土体的挤压作用和钻孔桩成孔的卸载作用,这些作用的后果可以采用有限元数值模拟计算得到邻近土体的位移来反映,计算还可得到其导致的邻近地下结构物如地铁隧道的位移。其中有限元计算的关键是对搅拌桩和钻孔桩先后施工过程的正确建模。

3) 本依托工程的实测和计算表明,采用三轴搅拌桩加固后施工钻孔灌注桩,两种桩先后施工对邻近土体影响微小。说明采取三轴搅拌桩进行地基加固,是一种可靠的手段,它可以降低大直径钻孔桩对邻近隧道的不利影响的风险。

基金项目

2019年上海浦东新区城建系统科学技术研究项目,项目编号:2019-015。

参考文献

- [1] 王煜. SMW工法三轴水泥土搅拌桩对周围土体的影响[J]. 建筑施工, 2013(5): 363-365.
- [2] 沈荣飞. 深基坑围护工程施工对邻近运营中地铁的影响分析[J]. 建筑施工, 2018(9): 1650-1652.
- [3] 翁承显. 地铁盾构隧道受高压旋喷桩挤土作用的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 同济大学, 2006.
- [4] 路平, 郑刚. 立交桥桩基础施工及运营期对既有隧道影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 923-927.
- [5] 罗雪贵. 桩基施工对邻近轨道交通的影响分析[J]. 路基工程, 2014(5): 140-143.
- [6] 费康. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.