

文章编号: 1674-599X(2021)02-0014-06

## 钢套筒压入对邻近地铁影响的有限元分析

杨吉新<sup>1</sup>, 王耀东<sup>1</sup>, 张战彪<sup>2</sup>, 马旭超<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063; 2. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010;  
3. 云南基础设施投资股份有限公司, 云南 昆明 650501)

**摘 要:** 为研究桩基施工过程中钢套筒压入对邻近地铁产生的扰动, 利用 Midas GTS 有限元软件, 对钢套筒的压入过程进行数值模拟, 并针对其施工顺序及钢套筒-土界面单元参数的影响进行了分析。研究表明: 钢套筒压入引起的邻近地铁变形在允许范围之内, 全套管灌注桩适用于近地铁的桩基施工; 采用隧道两侧钢套筒对称施工的方法可减小对邻近地铁的扰动; 邻近地铁结构的位移对钢套筒-土界面单元中的摩擦角和黏聚力十分敏感, 地铁隧道的变形量随着二者取值的增大而显著提高。实际工程可采取改善钢套筒与土体边界条件的方法, 从而减小钢套筒施工对紧邻地铁产生的不利影响。

**关键词:** 全套管灌注桩; 近地铁; 有限元; 界面单元参数

**中图分类号:** U 457+.6; TU473.1+2 **文献标志码:** A

**DOI:**10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.003

### Finite element analysis of the influence of steel sleeve pressing on adjacent subway

YANG Ji-xin<sup>1</sup>, WANG Yao-dong<sup>1</sup>, ZHANG Zhan-biao<sup>2</sup>, MA Xu-chao<sup>3</sup>

(1. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430010, China;

3. Yunnan Construction infrastructure investment Co., Ltd., Kunming 650501, China)

**Abstract:** In order to investigate the impact of disturbance of the steel sleeve on adjacent subway during the construction of the pile foundation, the finite element software MIDAS GTS was used to simulate the press-in process of steel sleeve. The influence of construction sequence and the interface parameter of steel sleeve and soil on the deformation of the subway was analyzed. The results show that, the deformation of the adjacent subway caused by the press-in of steel sleeve is permitted and accepted, the full-sleeve caisson pile is a suitable pile foundation near subway. The impact of construction disturbance on adjacent subway can be decreased, when the steel sleeve is constructed symmetrical on the both side of the tunnel. The displacement of the subway structure is sensitive to the friction angle and cohesion of the interface unit of steel sleeve and soil. The deformation of the subway tunnel increases significantly with the increase of those parameters. The adverse effect of steel sleeve construction on tunnel can be reduced, when the interface parameter of steel sleeve and soil was improved.

**Key words:** full-sleeve caisson pile; near subway; finite element; interface parameter

收稿日期: 2020-06-06

作者简介: 杨吉新(1964-), 男, 武汉理工大学教授。

随着城市建设用地日益紧张, 地铁隧道成为城市交通发展的主要方向。如今, 地铁线路纵横交错, 某些高层建筑、城市桥梁的桩基施工需面临在毗邻地铁隧道进行。建筑结构的桩基施工会对周围土体产生扰动, 进而对邻近地铁隧道产生不利影响。丁智<sup>[1]</sup>等人采用了数值分析方法, 建立桩-隧相互作用的三维有限元模型, 通过改变桩-隧相对位置、隧道埋深、水平净距、桩基半径和群桩因素, 研究了静压桩基施工对软土地区既有地铁隧道的影响。徐云福<sup>[2]</sup>等人采用现场试验的方法, 证明了采用全套管钢套管护壁旋挖取土工艺能较好地预警、控制施工风险, 并在施工过程中对盾构隧道和周围土体进行动态信息化监测。全套管灌注桩是一种新型灌注桩, 由于施工工艺独特, 打桩过程对周围地层的扰动较小, 因此, 在工程中被广泛应用于近地铁桩基施工。王永才<sup>[3]</sup>结合既有地铁线路附近的一座高架桥桩基工程, 介绍了全回转全套管钻机施工工艺, 该工艺保证了工程按期进行和地铁正常运营。现有的工程经验和研究成果表明: 全套管灌注桩的施工过程中, 对邻近地下结构最大扰动主要是钢套筒的压入。张超<sup>[4]</sup>等人通过数值模拟, 得到了对隧道影响较大的旋进深度和不同旋进深度作用于钢套筒的最大机械下压力, 并通过旋压机械上的油压表来控制钢套筒旋入过程。邓指军<sup>[5]</sup>对全回转式全套管钻机桩基施工过程中钢套筒压入引起的邻近地铁隧道变形进行了分析, 并采取了相应的改善措施, 保证了地铁的正常运营。王改<sup>[6]</sup>等人采用监测地铁全套管全回转钻机施工过程中引起的隧道水平位移及竖向沉降, 分析了桩基施工过程中净距和桩基类型对地铁变形的影响规律。但国内外关于钢套筒压入对紧邻地铁影响的研究较少, 且主要是通过对具体施工过程中的数据监测进行分析, 而现场试验及监测对人力、物力的消耗较大, 也不能预估施工过程中存在的风险。因此, 作者拟通过 Midas GTS 有限元软件对近地铁钢套筒的压入过程进行模拟, 讨论钢套筒的有关参数、施工顺序等因素对地铁隧道的影响, 并提出减少施工扰动的解决办法, 以期类似工程施工提供借鉴。

## 1 全套管灌注桩施工技术

全套管灌注桩又叫贝诺特灌注桩, 其施工工法也称之为贝诺特工法, 该工法利用全套管全回转钻机的全液压动力传动机制, 带动钢套筒回转, 从而

减小套筒与土体之间的摩擦力, 一边转动钢套筒, 一边将其压入土中, 同时使用冲挖斗挖除土体, 重复该操作直至钢套筒分节压至桩端设计标高为止。挖掘完成后, 立刻测定桩孔深度, 确认持力层。达到合格标准后, 清除孔底虚土, 下放钢筋笼, 灌注混凝土成桩。

正常运营地铁隧道的变形控制要求: 若桩基施工在紧邻运营的地铁隧道范围进行, 周围土体将不可避免地受到扰动, 从而挤压隧道结构, 使得地铁隧道产生附加变形和附加内力。若位移水平较大, 会引起隧道管片开裂及不均匀沉降, 严重影响地铁的正常运营。因此, 针对近地铁的桩基施工, 需要采取针对性的施工工艺, 保证邻近地铁隧道结构的安全与稳定。全套管全回转钻机灌注桩因采用钢套筒护壁, 可以大幅度减小对周围土体的扰动。同时, 该施工工艺具有垂直度高、充盈系数小、环保及可避免坍孔等特点。因此, 适用于邻近地铁打桩的理想施工技术, 现已被广泛应用于实际工程中。

## 2 有限元模型的建立

邻近地铁在全套管灌注桩施工过程中受到的扰动主要来自钢套筒的压入。采用 Midas GTS 有限元软件对紧邻地铁的钢套筒压入过程进行模拟。根据现场地质勘察报告, 将土体划分为 7 层。考虑到钢套筒筒侧及筒端旋进时对周围土体的影响范围, 土层水平分布取 40 m, 深度取 67 m。土体采用三维实体单元, 本构采用莫尔-库伦模型, 对土体侧面和底面分别予以水平和竖向约束。地铁隧道埋深 30 m, 衬砌结构为 C50 混凝土, 内径为 4.75 m, 外径为 5.35 m, 厚度为 0.60 m, 采用板单元进行模拟, 本构为弹性模型。由于本研究建立的模型计算主要获得钢套筒施工时地铁隧道的变形, 因此, 仅下压 4 根钢套筒, 其与既有地铁隧道的位置关系如图 1 所示。钢套筒两两对称, 分别位于隧道的水平两侧, 与地铁隧道的间隔均为 4.25 m, 钢套筒之间的净距为 5 m, 每根钢套筒采用板单元, 厚度为 1 cm, 本构采用弹性模型, 钢套筒的材料为 Q345 钢, 重度为 78.5 kN/m<sup>3</sup>, 弹性模量为 206 GPa, 泊松比为 0.28。每节钢套筒长度为 5 m, 钢套筒与周围接触土体之间设置界面单元, 模拟二者之间的相互作用。地基土的材料计算参数见表 1, 有限元计算模型如图 2 所示。

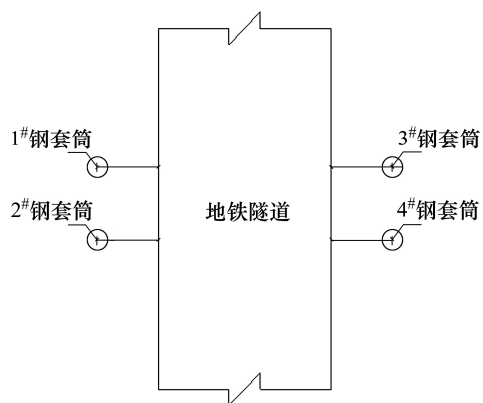


图 1 既有地铁隧道与钢套筒位置关系

Fig. 1 The layout of existing subway tunnel and steel sleeve

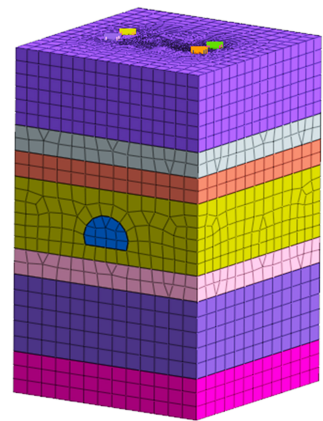


图 2 有限元整体计算模型

Fig. 2 Finite element calculation model

表 1 地基土材料参数表

Table 1 Material parameters of foundation soil

| 土层编号 | 土类别        | 厚度/m | 压缩模量/kPa | 泊松比  | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 容重/(kN·m <sup>-3</sup> ) |
|------|------------|------|----------|------|---------|----------|--------------------------|
| 1    | 粉质黏土       | 15   | 5.3      | 0.30 | 27      | 15.0     | 17.9                     |
| 2    | 粉质黏土       | 5    | 4.1      | 0.30 | 19      | 9.0      | 18.0                     |
| 3    | 黏土         | 5    | 6.0      | 0.35 | 30      | 8.8      | 18.2                     |
| 4    | 黏土         | 10   | 2.9      | 0.35 | 18      | 6.0      | 17.1                     |
| 5    | 含黏性土粉砂     | 5    | 7.2      | 0.30 | 30      | 14.0     | 19.2                     |
| 6    | 粉质黏土夹粉土    | 15   | 5.4      | 0.30 | 20      | 7.0      | 18.3                     |
| 7    | 粉质黏土夹粉土、粉砂 | 5    | 4.5      | 0.30 | 18      | 7.0      | 17.6                     |

由于本次计算只考虑钢套管压入的影响，因此，不考虑土体初始应力场及隧道开挖作用。开挖隧道土体时，添加衬砌单元，地铁隧道结构对整体位移清零。然后，激活钢套简单元及界面单元。通过施加节点强制位移的方法，下压钢套筒，压入过程中钻机对钢套筒的压力为 6 MPa，扭矩为 250 kN·m。分 2 个工况，每次下压 2 根钢套筒，由隧道左侧 1#、2#钢套筒向右侧 3#、4#钢套筒非对称施工，计算得到邻近地铁隧道位移。

3 结果分析

按照有限元模型建立过程，对模型划分网格后进行计算，得到各个工况下现有地铁隧道的变形，计算结果如图 3~6 所示(透明部分为隧道变形前的位置)。施工地铁左侧钢套筒时，隧道竖向最大沉降出现在靠近钢套筒纵向一端拱顶，为 2.17 mm，最大水平位移出现在靠近钢套筒的一端中部，为 0.52 mm，约占竖向位移的 24%；施工地铁右侧钢套筒时，隧道竖向沉降继续增加，最大为 3.95 mm，同

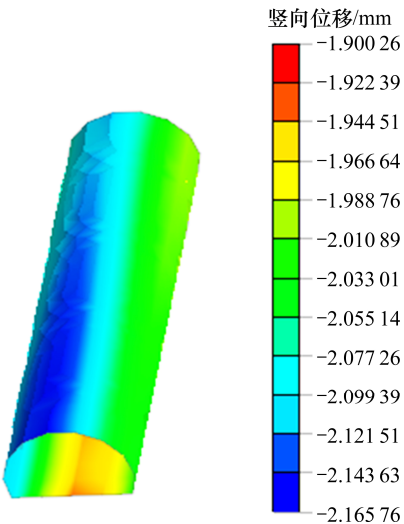


图 3 施工左侧钢套筒隧道竖向沉降

Fig. 3 Vertical settlement of tunnel during the construction of the left steel sleeve

样出现在靠近钢套筒纵向一端拱顶，而水平位移则出现回落，最大为 0.16 mm。这是由于钢套筒下沉时会挤压土体朝着背离钢套筒的方向移动，从而带动隧道产生一定的水平位移，隧道左右两侧钢套筒

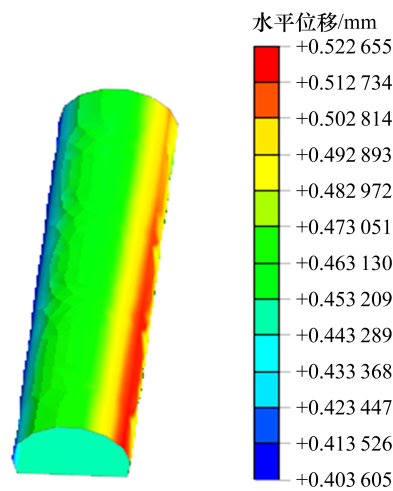


图 4 施工左侧钢套筒隧道水平位移

Fig. 4 Horizontal displacement of tunnel during the constructing progress of the left steel sleeve

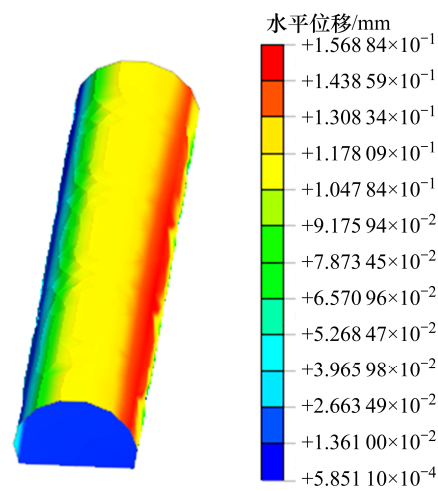


图 6 施工右侧钢套筒隧道水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of tunnel during the constructing progress of the right steel sleeve

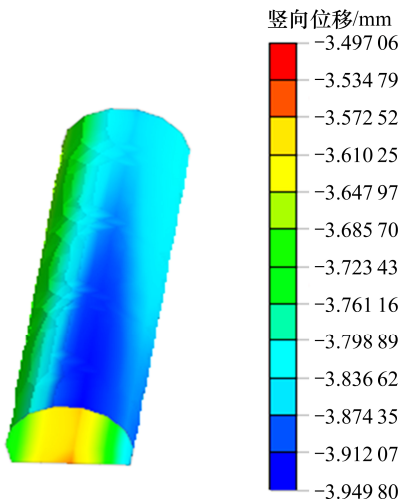


图 5 施工右侧钢套筒隧道竖向沉降

Fig. 5 Vertical settlement of tunnel during the constructing progress of the right steel sleeve

的施工引起邻近地铁水平位移方向相反。因此,下压右侧钢套筒时,地铁结构的水平位移会抵消一部分,从而减小位移。

从图 3~6 中可以看出,钢套筒旋进下压过程,会使得周围土体侧向挤压,邻近隧道的阻挡会增大被挤压土体的挤压应力,该应力水平在短时间内无法消散,因此,隧道会受到较大的土压力。既有地铁隧道在周围土压力的作用下,其变形主要表现为竖向沉降,水平位移较小。两侧钢套筒施工完毕后,最大竖向位移出现在拱顶附近,为 3.95 mm。现有研究表明:地铁结构的最大位移不得超过 20 mm<sup>[7]</sup>,地铁隧道的安全性与稳定性才能够得到保

障。由于隧道的最大沉降发生在拱顶处,实际工程中,可以通过监测隧道拱顶位移,判断隧道的变形是否在允许范围之内,从而保证施工过程中地铁的安全性及稳定性。下压右侧钢套筒时,地铁的水平位移大幅度回落,表明:隧道左右两侧的钢套筒压入对水平位移有抵消作用。因此,可以考虑采取对称施工的方式,减小对地铁的扰动。

3.1 施工顺序对隧道变形的影响

保证每个工况的钢套筒施工数量不变的情况下,改变钢套筒的施工顺序,分析不同施工顺序下隧道的变形情况,有限元计算结果见表 2。

由表 2 可知,①采用左右两侧钢套筒先后压入的非对称施工顺序,即先旋进隧道一侧的钢套筒,后旋进另外一侧。地铁第 1 种工况的 2 个施工阶段的隧道水平位移、竖向沉降、总变形均为最大,此时钢套筒施工对邻近地铁最为不利。因此,这种

表 2 不同施工顺序下隧道变形情况

Table 2 Tunnel deformation under different construction sequences

| 工况序号 | 施工顺序                                                           | 施工阶段                              | 隧道最大水平位移/mm | 隧道最大竖向沉降/mm | 隧道最大总变形量/mm |
|------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| ①    | 1 <sup>#</sup> ,2 <sup>#</sup> →3 <sup>#</sup> ,4 <sup>#</sup> | 1 <sup>#</sup> ,2 <sup>#</sup> 压入 | 0.52        | 2.17        | 2.23        |
| ①    | 1 <sup>#</sup> ,2 <sup>#</sup> →3 <sup>#</sup> ,4 <sup>#</sup> | 3 <sup>#</sup> ,4 <sup>#</sup> 压入 | 0.16        | 3.95        | 3.95        |
| ②    | 1 <sup>#</sup> ,3 <sup>#</sup> →2 <sup>#</sup> ,4 <sup>#</sup> | 1 <sup>#</sup> ,3 <sup>#</sup> 压入 | 0.05        | 2.16        | 2.16        |
| ②    | 1 <sup>#</sup> ,3 <sup>#</sup> →2 <sup>#</sup> ,4 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> ,4 <sup>#</sup> 压入 | 0.10        | 3.55        | 3.56        |
| ③    | 1 <sup>#</sup> ,4 <sup>#</sup> →2 <sup>#</sup> ,3 <sup>#</sup> | 1 <sup>#</sup> ,4 <sup>#</sup> 压入 | 0.08        | 2.02        | 2.02        |
| ③    | 1 <sup>#</sup> ,4 <sup>#</sup> →2 <sup>#</sup> ,3 <sup>#</sup> | 2 <sup>#</sup> ,3 <sup>#</sup> 压入 | 0.11        | 3.49        | 3.49        |

注:表中 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup>代表钢套筒标号



施工方式在实际工程中不宜采用。②当左右两侧同时压入钢套筒,即采用第2种工况时,地铁在2个施工阶段的水平位移、竖向沉降、总变形量较之于第1种施工顺序的均有一定程度减小。尤其是对第1个施工阶段的水平位移,分别由0.52 mm降低至0.05 mm和0.10 mm,再一次验证了隧道两侧钢护筒的压入对彼此产生水平位移的抵消作用。表明:实际工程中,若隧道左右两侧均存在桩基施工时,宜采取左右两侧同时下沉钢套筒的方式,可减小对邻近地铁的扰动,保证隧道结构受力的均匀。③对于钢套筒在地铁附近的布置情况,通过比较3种工况的2个施工阶段对地铁隧道的影响可以发现,采用第3种工况,同时施工隧道左右两侧对角钢套筒,邻近地铁隧道的附加变形最小。表明:工程实践中,采用此方案作为参考进行桩基施工。

### 3.2 钢套筒-土界面参数对隧道变形的影响

钢套筒在下压过程中与周围土体的相互作用是引起邻近地铁隧道附加应力和附加变形的根本原因。钢套筒在旋进土体时,钢套筒外侧土体对钢套筒作用有径向的土压力、垂向摩擦力、切向摩擦力;钢套筒内土柱对套筒有径向土压力、垂向摩擦力、切向摩擦力。钢套筒向下旋进过程中,管壁的端部受到向上的阻力及切向的摩擦力<sup>[4]</sup>。本研究采用Midas GTS有限元软件模拟钢套筒与土的接触问题,界面非线性类型为库仑摩擦,与该界面单元相关的参数有法向刚度模量 $K_n$ 、剪切刚度模量 $K_s$ 、黏聚力 $c$ 、摩擦角 $\varphi$ 和剪胀角 $\psi$ 。 $K_n$ 值取决于接触面的受力特性,接触面受压时应取较大值,数量级为 $100 \times 10^{11} \text{ N/m}^3$ ,防止接触面材料的互相侵入。受拉时,为防止接触面的脱落,应取较小值<sup>[8]</sup>。 $K_s$ 的取值一般和 $K_n$ 为同一数量级。对于参数 $c$ 和 $\varphi$ ,根据有关研究成果,界面单元的黏聚力和摩擦角可取为周围土体对应参数的0.5~0.8倍<sup>[9]</sup>。本次有限元建模计算不计剪胀角的影响,因此剪胀角不予考虑。接触面单元的力学性质取决于接触结构的力学参数,根据土体与钢套筒的材料特性,Midas GTS提供了界面单元参数的自动计算功能,得到钢套筒-土界面单元的法向刚度模量与剪切刚度模量,分别为 $742\,053 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $67\,459 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ,接触类型为摩尔-库伦,其黏聚力和摩擦角分别为 $13.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $7.5^\circ$ ,本研究有限元建模过程均采用了该界面单元。

钢套筒与土界面参数决定了钢套筒在旋进土体过程中的受力特性,桩土界面的摩擦角是影响摩擦桩承载性能的关键因素<sup>[10]</sup>。根据该结论,仅考虑界面单元的黏聚力和摩擦角的作用,即分别以黏聚力和摩擦角作为控制参数,其他界面参数不变。同时,保证参数取值在合理范围内,研究钢套筒施工过程中黏聚力和摩擦角的取值对邻近地铁隧道的影响。为计算简便,只下压1#钢套筒,计算结果如图7所示。

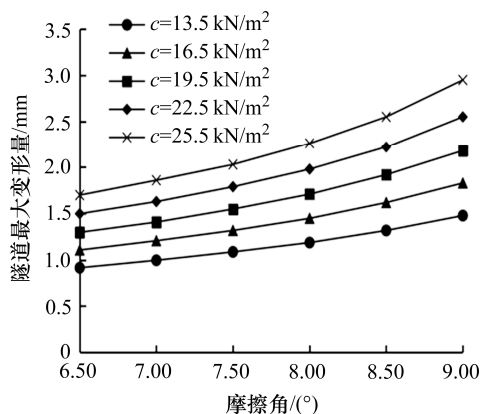


图7 不同黏聚力与内摩擦角下隧道最大位移变化曲线

Fig. 7 Variation curve of the maximum displacement of tunnel under different cohesion and internal friction angle

从图7中可以看出,保证黏聚力不变的情况下,当摩擦角由 $6.5^\circ$ 提高到 $9^\circ$ 时,隧道最大位移增值为 $0.60 \sim 1.25 \text{ mm}$ ,黏聚力越大,隧道变形增量也越大。保证摩擦角不变的情况下,当黏聚力由 $13.5 \text{ kN/m}^2$ 提高到 $25.5 \text{ kN/m}^2$ 时,隧道最大位移增值为 $0.78 \sim 1.47 \text{ mm}$ ,摩擦角越大,隧道变形增量也越大。因此,在钢套筒施工过程中,界面单元黏聚力和摩擦角对邻近隧道的变形影响较大,表现为正相关关系,并且地铁结构的位移对摩擦角的敏感性大于黏聚力的。所以在有限元模拟钢套筒施工的过程中,隧道变形计算结果的准确性对界面单元参数的精确程度要求较高,选择合理的钢套筒参数是正确建模的关键。目前,相关研究表明:周围土参数的基础上,乘以界面接触材料所对应的折减系数,以此作为界面单元参数进行有限元建模计算,得到的结果与实际情况较为一致。因此,界面单元黏聚力与摩擦角取值的准确性最终归结于周围土体材料参数测定的准确性,现场测量人员应严格遵守规范试验流程,减小土体黏聚力与内摩擦角测定的误差。

因为界面单元参数的取值与周围土体的材料

参数是息息相关的,所以针对钢套筒与土体界面参数对隧道变形的影响,在实际工程中可采取钢套筒与土体之间注水或添加润滑材料,改善钢套筒与土体的接触条件,使其接触面更加光滑,从而减小钢套筒旋进过程中受到的侧摩阻力,降低钢套筒施工对邻近地铁隧道的扰动,保证地铁安全性。

## 4 结论

采用 Midas GTS 有限元软件对钢套筒的压入过程进行了模拟,研究了施工过程对邻近地铁隧道的影响,得到结论:

1) 全套管灌注桩钢套筒的施工过程中,邻近地铁隧道的变形主要表现为竖向沉降,水平方向的位移较小,隧道总体变形在容许范围之内。对于邻近地铁打桩,采用全套管灌注桩施工工艺是合理的。

2) 钢套筒施工顺序对邻近地铁的变形有一定的影响,隧道两侧钢套筒的压入对彼此产生的水平位移有抵消作用。对于隧道两侧均存在桩基施工的情况,采用两侧同时对称施工钢套筒的施工顺序,对邻近地铁产生的扰动较小。

3) 钢套筒-土界面的黏聚力与摩擦角对邻近地铁的变形影响较大,隧道位移量对这两个参数的变化十分敏感,总体变形随着界面黏聚力和摩擦角的增大而显著提高。实际工程中,可以通过改善钢套筒与周围土体的接触条件,在钢套筒与土体之间注水或添加润滑剂,减小钢套筒旋进过程中受到的侧摩阻力,降低紧邻地铁结构所受到的扰动。

## 参考文献(References):

- [1] 丁智,张霄.桩基施工对邻近既有地铁隧道影响的数值分析[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(2): 390-399.(DING Zhi, ZHANG Xiao. Numerical analysis of influence of pile foundation construction on adjacent metro tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(2): 390-399. (in Chinese))
- [2] 徐云福,王立峰.近邻桩基施工对城市地铁隧道的影响分析[J].岩土力学,2015,36(S2):577-582.(XU Yun-fu, WANG Li-feng. Analysis of effects on city metro tunnel due to adjacent pile foundation construction[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(S2):577-582.(in Chinese))
- [3] 王永才.全回转全套管钻机成桩施工技术[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2014,27(S1):239-241.

- (WANG Yong-cai. Pile construction technology for full-rotation and full-casing drilling rig[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2014, 27(S1): 239-241. (in Chinese))
- [4] 张超,杨龙才,黄大维,等.钢套管施工对地铁隧道影响分析及变形控制研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S2):3584-3591.(ZHANG Chao, YANG Long-cai, HUANG Da-wei, et al. Effect of steel casing construction on metro tunnel and deformation control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3584-3591. (in Chinese))
- [5] 邓指军.钢套筒压入对邻近地铁隧道的影响分析[J].施工技术,2011,40(13):77-79.(DENG Zhi-jun. Analysis on influence of steel sleeve indentation on adjacent metro tunnel[J]. Construction Technology, 2011, 40(13): 77-79. (in Chinese))
- [6] 王改,王宏涛,陈自海,等.全套管全回转钻桩基施工对运营地铁隧道的影响研究[J].隧道建设,2018,38(S2): 318-323.(WANG Gai, WANG Hong-tao, CHEN Zi-hai, et al. Research on influence of construction of pile foundation by full-sleeve rotary drilling rig on existing operation metro tunnel[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(S2): 318-323. (in Chinese))
- [7] 吉茂杰,刘国彬.开挖卸荷引起地铁隧道位移预测方法[J].同济大学学报(自然科学版),2001,29(5):531-535.(JI Mao-jie, LIU Guo-bin. Prediction method of displacement of subway tunnel due to excavation[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2001, 29(5): 531-535. (in Chinese))
- [8] 吴怀忠,王汝恒,张桂富,等.土与结构接触面的本构关系与数值模拟[J].四川建筑科学研究,2007,33(5):88-90.(WU Huai-zhong, WANG Ru-heng, ZHANG Gui-fu, et al. The stress and strain connection and mathematic model for soil and structure interfaces[J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(5): 88-90. (in Chinese))
- [9] 邱瑞成,艾健森.基于 FLAC<sup>3D</sup> 的单桩静载模拟桩土接触面参数敏感性研究[J].路基工程,2019(2):164-169.(QIU Rui-cheng, AI Jian-sen. FIAC<sup>3D</sup>-based study on sensitivity of pile-soil interface parameters by static load test of single pile[J]. Subgrade Engineering, 2019(2): 164-169. (in Chinese))
- [10] 岳晨雨,马震岳,王伟,等.接触单元在桩-土接触模拟中的应用研究[J].黑龙江大学工程学报,2015,6(3): 1-5.(YUE Chen-yu, MA Zhen-yue, WANG Wei, et al. Application of the interface elements between pile and soil[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2015, 6(3): 1-5. (in Chinese))