

Study of the Deformation of Cross-River Shield Tunnel on the Effect of Uneven Distribution of Grouting Pressure

Jian Zhang, Wuyi Liu

Sinohydro Bureau 8 Co. Ltd. Changsha Hunan
Email: 106925947@qq.com

Received: Jul. 5th, 2018; accepted: Jul. 19th, 2018; published: Jul. 26th, 2018

Abstract

In order to study the influence of synchronous grouting construction of shield tunnel on the deformation of tunnel, based on the Changsha Metro Line 4 Project, the numerical simulation analysis was conducted in this paper to explore the influence of disintegration of grouting pressure caused by uneven distribution of slurry pressure on the deformation of shield tunnel. The results show that: when the grouting volumes were same, the uneven distribution of grouting pressure had a significant impact on the radial pressure of the surrounding rocks, harmful to the stress of lining segments; and it caused tunnel stress of the bottom more than the top, resulting in the float of tunnel, increasing the ground surface upheave. Moreover, the uneven distribution of grouting pressure will reduce the settlement and increase the upheave of the vertical and horizontal ground surface along the tunnel. So the pressure distribution and value of grouting pressure should be strictly controlled in the construction of shield tunnel. And the conclusions can provide some reference for the later shield construction.

Keywords

Shield Tunnel, Grouting Pressure, Numerical Simulation

注浆压力不均匀分布影响下过江盾构隧道变形分析

张 健, 刘五一

中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙
Email: 106925947@qq.com

收稿日期: 2018年7月5日; 录用日期: 2018年7月19日; 发布日期: 2018年7月26日

摘要

为研究盾构隧道同步注浆施工过程中对隧道变形的影响, 本文依托长沙地铁4号线跨湘江段盾构工程, 通过设置四种不同的注浆压力分布方案进行数值模拟分析, 研究注浆压力不均匀分布对盾构隧道变形的影响。模拟结果表明: 相同注浆量下, 注浆压力不均匀分布对隧道围岩所受径向压力有较大影响, 不利于衬砌管片的受力, 使隧道底部受力大于顶部受力, 并引起隧道上浮; 而且注浆压力不均匀分布会使沿隧道的纵向和横向地表沉降值减小, 地表隆起量增大。所以盾构隧道施工过程中需严格控制注浆压力分布和大小, 研究结果可为今后盾构施工技术提供参考。

关键词

盾构隧道, 注浆压力, 数值模拟

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

随着城市地下轨道交通的发展, 盾构法越来越多的运用于城市地铁隧道建设。盾构法施工条件复杂, 为保证安全施工, 施工过程中必须保证隧道衬砌和开挖地层的稳定。由于盾构机刀盘的直径大于衬砌管片的直径, 使得衬砌管片脱离盾尾后在衬砌管片和开挖土体之间形成建筑空隙, 如不及时的填充此部分间隙, 此时周围土体和衬砌管片无支护悬空状态, 很容易导致地层和衬砌管片的失稳, 产生过大的地表沉降以及衬砌结构的破坏, 发生严重的工程事故。

同步注浆是盾构法隧道施工最为关键的一道工序, 同步注浆可以及时地填充衬砌管片和开挖土体之间形成的空隙, 控制土体的应力释放系数, 减小地层的变形, 保证土体的稳定性[1]; 并且注浆浆液会有一定的强度, 可以维护衬砌管片的稳定性。合理的注浆压力和注浆量可以保证施工质量, 极大地提高施工速度, 近几十年来国内外对盾构隧道同步注浆的研究较多, Bezuijen 研究发现注浆压力对施工引起的地表沉降起主要控制作用[2]。Hashimoto 通过现场试验分析发现, 隧道施工阶段管片所受压力由注浆压力决定, 注浆压力的消散与周围地层有关[3]。Eklund D 通过试验对影响注浆渗滤扩散作用的因素进行了分析[4]。周济民、李雪、周顺华总结大量现场试验数据, 归纳不同地层地铁盾构隧道长期稳定注浆压力的分布规律, 并探讨了盾构施工期注浆压力随时空的变化情况[5] [6] [7]。张莎莎通过控制注浆孔位置, 注浆孔数量以及浆液流量分配比, 研究了浆液压力分布情况、浆液流动扩散过程等[8]。张连震、梁禹、邱明明推导了注浆层固结方程, 分析了浆液固结、浆液消散及注浆压力分布规律[9] [10] [11]。

然而现有的文献对盾构隧道注浆压力的研究多停留在注浆压力沿衬砌环向均匀分布对衬砌管片和地层影响方面, 对注浆压力不均匀分布影响的研究不足。本文依托长沙地铁 4 号线下穿湘江段, 利用有限元分析软件模拟施工现场, 通过模拟四种不同的注浆压力分布方案讨论注浆压力分布不均匀程度与注浆压力大小对隧道变形、土体位移的影响。

2. 工程概况

长沙市轨道交通 4 号线阜~碧区间采用两台 $\Phi 6250$ 土压平衡盾构机施工, 盾构机先后从碧沙湖站始发, 下穿湘江后到达阜埠河路站吊出。区间左、右线线间距 13.0~18.5 m。采用预制管片单层衬砌, 管片环采用“3+2+1”模式, 区间采用错缝拼装, 环间采用弯曲螺栓连接, 管片外径 6 m, 内径 5.4 m, 宽 1.5 m, 厚 0.3 m, C50 混凝土。施工区间平面图见图 1, 隧道穿越湘江段地层主要为强风化砾岩、中风化砾岩, 区间过湘江段结构顶板最大埋深约 26.00 m, 两岸河堤处最大埋深 33.14 m。

3. 数值模拟

3.1. 模型参数

本文利用大型有限元分析软件 MIDAS/GTS 进行三维有限元数值模拟, 本模型边界条件选取满足隧道力学分析要求设定。由于隧道横断面宽度相对于隧道纵向长度来说非常小, 可以假定在围岩荷载作用下只有横向及竖向位移, 没有纵向位移(除掌子面位移以外)。为消除模型边界对计算结果的影响, 本模型中横向边界到隧道边界距离约为 3~5 倍洞径, 垂直方向上, 边界向上取至地表, 向下到隧道底部边界的距离大于 3 倍洞径。总模型纵向长度为 80 m, 横向宽度为 80 m, 竖向为 66 m, 隧道上部覆土 18 m, 地层参数见表 1, 数值模拟如图 2、图 3 所示。

3.2. 模拟施工步骤

- 根据盾构施工的流程, 采用 MIDAS/GTS 模拟盾构隧道的施工过程, 其开挖步骤主要如下:
- 1) 初始地应力平衡;
 - 2) 开挖第“n”环土体: 钝化第“n”个掘进环内的土体模拟土体的开挖, 同时激活该段盾壳单元模拟盾壳支撑保护作用, 掘进压力以面压力的形式作用在掌子面防止掌子面失稳, 在“n-1”环管片上施

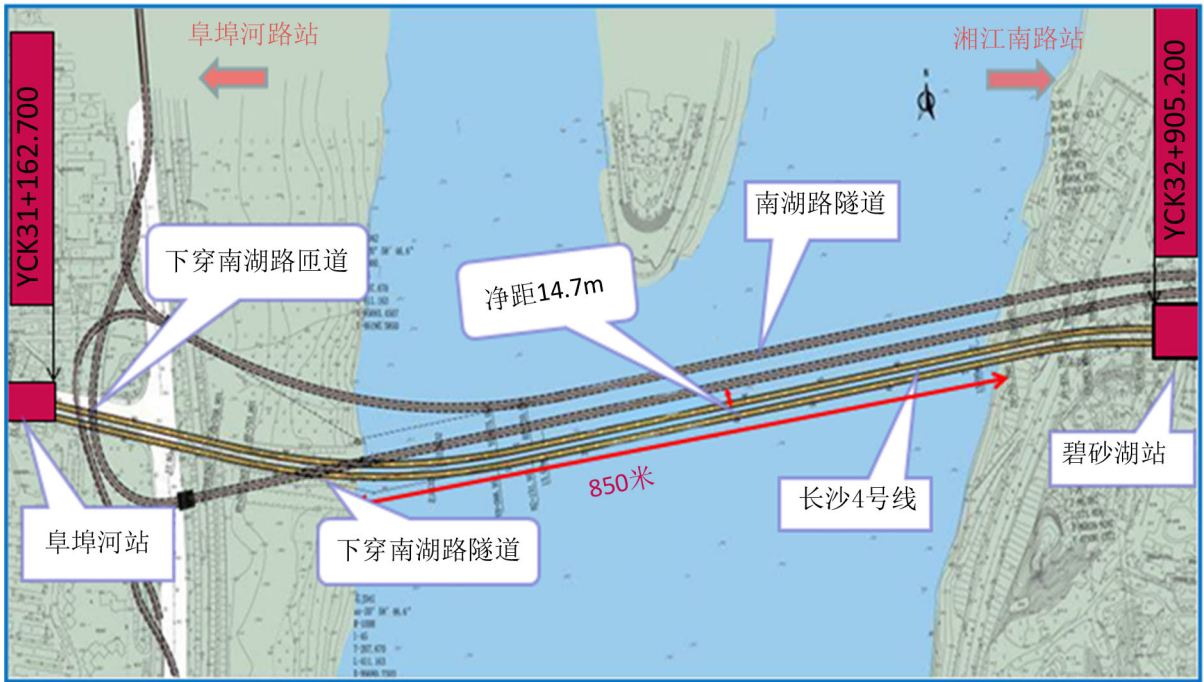


Figure 1. Numerical simulation of construction intervals
图 1. 数值模拟施工区间

Table 1. Stratigraphic and structural material parameters
表 1. 地层及结构材料参数

土层及结构	容重(kN/m³)	粘聚力(kPa)	内摩擦角(°)	泊松比 μ	压缩模量 E (MPa)	单元类型
强风化砾岩	23.7	28	37	0.25	45	实体单元
中风化砾岩	24.7	200	45	0.17	70	实体单元
管片	25	\	\	0.25	34500	板单元
等代注浆层	23	\	\	0.3	200	实体单元
盾壳	78.6	\	\	0.2	210000	板单元

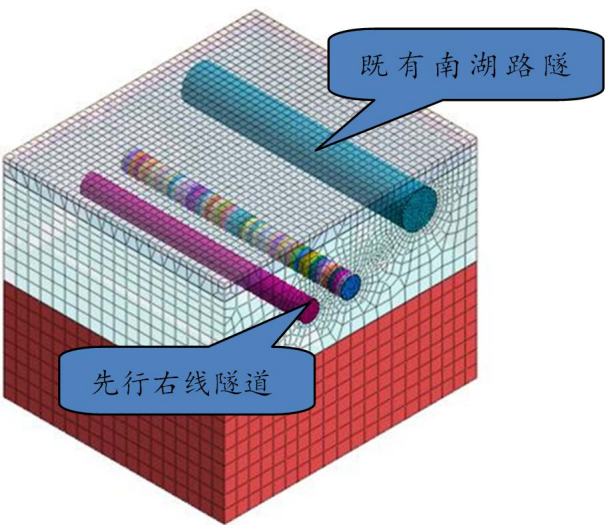


Figure 2. Three-dimensional calculation model grid
图 2. 三维计算模型网格示意图

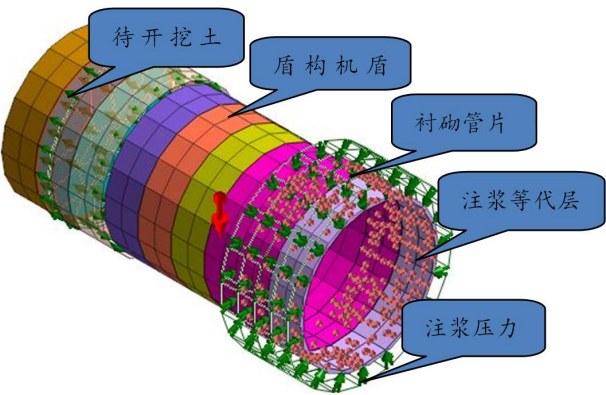


Figure 3. The construction of a new tunnel
图 3. 新建隧道施工过程示意图

加千斤顶推力;

3) 安装第“n”环管片: 钝化第“n”环盾壳单元并激活第“n+1”环盾壳单元模拟盾构机推进通过的过程, 激活第“n”环管片模拟管片安装;

4) 完成第“n”环壁后注浆: 在第“n”环盾构间隙里进行浆液注入, 通过激活盾构间隙里的注浆等代层并施加注浆压力;

5) 待第“n”掘进环的开挖过程计算平衡后, 重复上述步骤开挖下个掘进环, 直至隧道贯通, 完成整个模型的计算。

4. 数值模拟结果分析

4.1. 注浆压力不均匀分布形式

模拟盾构隧道注浆方式为四孔同步注浆, 设在盾构开挖过程形成均匀的环向盾尾间隙。浆液在填充盾尾间隙的过程中由于重力作用及上下注浆孔的注浆压力不同, 衬砌管片所受注浆压力在环向最终呈现上小下大的不均匀分布形式, 注浆压力分布模型如图 4 所示。

本文通过数值模拟不同注浆方案, 讨论注浆压力分布不均匀程度与注浆压力大小对衬砌管片受力变形和土体位移的影响。根据室内模拟盾构隧道施工同步注浆试验[8], 可设置四种注浆压力分布方案, 其中方案一和方案二注浆量相同, 方案三和方案四注浆量相同, 各注浆方案注浆压力分布如下所示。

- 1) 顶部注浆压力为 0.2 MPa, 底部注浆压力为 0.26 MPa;
- 2) 均布注浆压力 0.25 MPa;
- 3) 顶部注浆压力为 0.2 MPa, 底部注浆压力为 0.29 MPa;
- 4) 均布注浆压力 0.265 MPa。

4.2. 注浆压力分布形式对隧道围岩变形影响性分析

在四种不同注浆压力分布情况下, 隧道贯通后, 土层竖向位移图如表 2 所示。

上述图中正表示向上隆起, 负表示下沉, 从上表中可知, 最大竖向隆起量均位于隧道底部, 最大竖向沉降量均位于隧道顶部。当对比方案一与方案二、方案三与方案四, 注浆压力不均匀分布时, 隧道底部与顶部的压力差会使隧道在注浆压力作用下上浮量更大。其中方案一比方案二最大隆起量大 4.33 mm, 方案三比方案四最大隆起量大 6.56 mm。对比方案二与方案四, 在注浆压力均匀分布的情况下, 当注浆压力达到一定量值时, 通过增加注浆压力控制隧道变形与地层沉降的作用有限。对比方案一与方案三, 注浆压力分布不均匀程度越大, 地层最大沉降值减少, 衬砌管片的所受上浮力越大, 从而导致隧道底部上浮量增加。

通过对上述数据分析可知, 隧道开挖对于周边围岩造成的扰动沿着隧道径向减弱。为了研究盾构推进对于地表位移的影响, 本文以盾构推进至模型中心, 对此时的地表位移进行研究。

图 5、图 6 中正表示向上隆起, 负表示下沉, 从上图中可知, 最大竖向隆起量均位于隧道中心偏既有南湖路隧道约 20 m 地表处, 最大竖向沉降量均位于隧道顶部。通过对上述数据分析可知, 注浆压力分

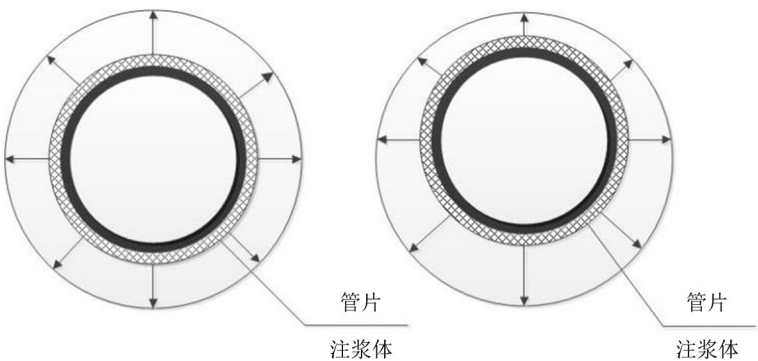
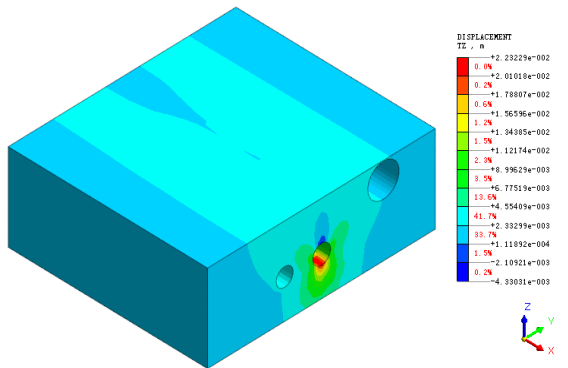
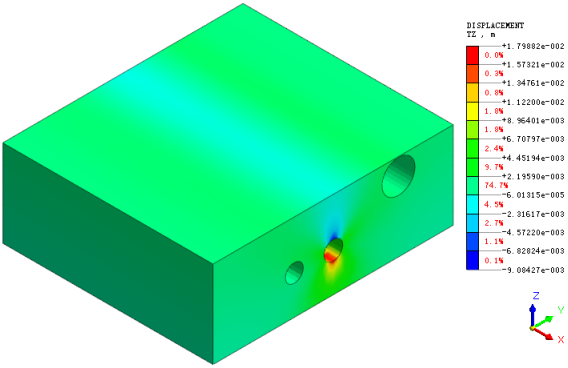
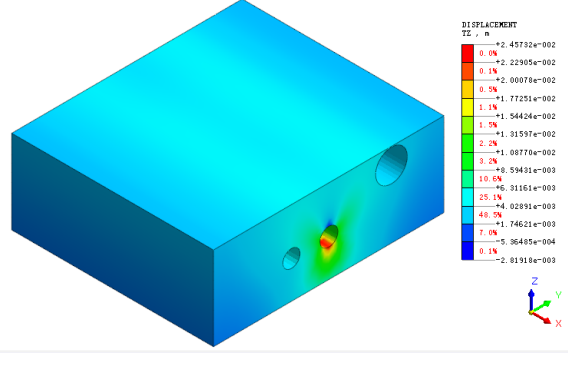
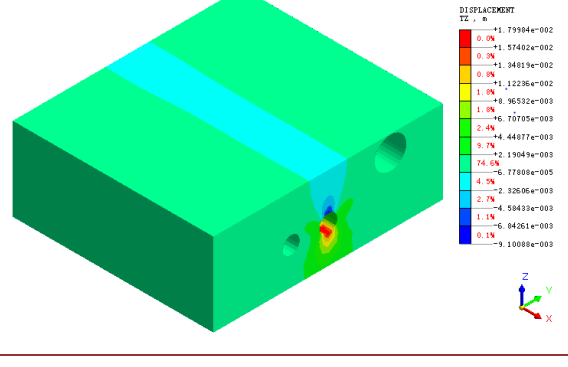


Figure 4. Schematic diagram of grouting pressure distribution
图 4. 注浆压力分布形式示意图

Table 2. Vertical displacement of soil after tunneling
表 2. 隧道贯通后土体竖向位移

方案	位移图	最值
不均匀方案一		最大值: 22.32 mm 最小值: -4.33 mm
均匀方案二		最大值: 17.99 mm 最小值: -9.08 mm
不均匀方案三		最大值: 24.57 mm 最小值: -2.81 mm
均匀方案四		最大值: 18.01 mm 最小值: -9.10 mm

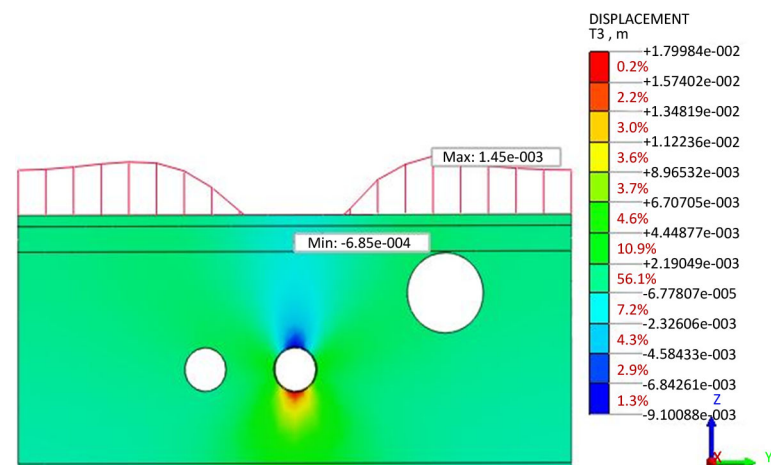


Figure 5. The vertical displacement of the soil
图 5. 隧道开挖至试验环土体竖向位移横截面云图

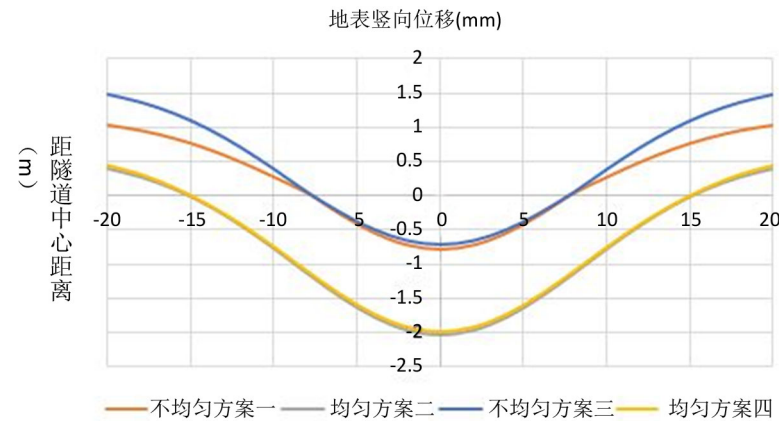


Figure 6. The comparison chart of vertical displacement of soil
图 6. 隧道开挖至试验环土体竖向位移横截面对比图

布形式对土体变形影响十分明显,垂直隧道推进方向地表土体沉降曲线符合 Peck 沉降槽,隧道中心处地表沉降量最大;不均匀注浆压力分布相对于均匀注浆压力分布作用下,垂直隧道推进方向地表土体整体沉降量减小,隆起量增加。

当对比方案一与方案二、方案三与方案四,注浆压力不均匀分布时,盾构开挖造成地表隆起量更大,相同注浆量下注浆压力非均匀分布的最大隆起量是均匀分布的 1.28~2.07 倍。对比方案二与方案四,注浆浆压力均匀分布时,随着注浆压力的增加,地表沉降值分布变化很小;对比方案一与方案三,注浆压力非均匀分布时,注浆压力的增加会使地表沉降量及分布产生较大的变化。

考虑沿隧道纵向注浆压力随时间的消散,盾构开挖至试验环处,地表竖向位移如图 7、图 8 所示。上述图中正表示向上隆起,负表示下沉。从上表中可知,在注浆压力均匀分布情况下(方案二、方案四),不同注浆压力对地表变形量影响不大,地表竖向位移曲线总体以下沉为主,地表隆起量很小,沉降值较大。当注浆压力不均匀分布(方案一、方案三),地表隆起现象明显,地表沉降和隆起分界点在掌子面前方 10 米处,最大隆起量位于掌子面前方 15~20 m 处。通过对上述数据分析可知,相同注浆量条件下,注浆压力分布形式对隧道纵向地表沉降影响十分显著,随着注浆压力不均匀程度的增大,地表隆起量增大,沉降值减小。

总结以上分析结果,注浆压力不均匀分布对地表变形的大小及沉降槽的形式产生很大的影响,均匀

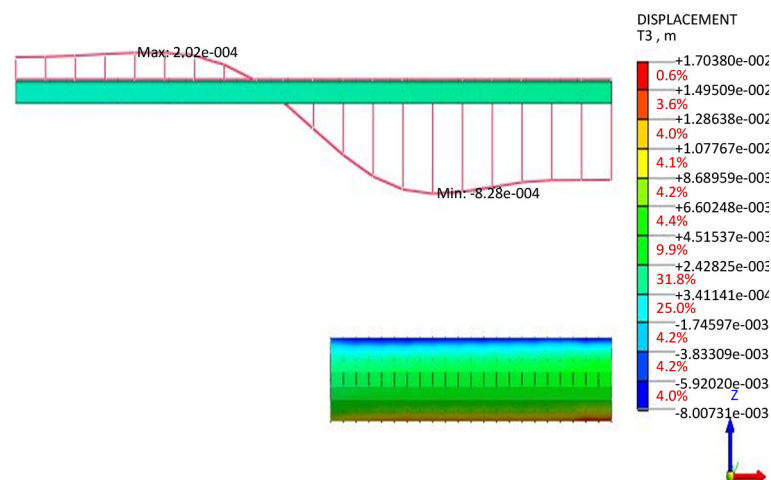


Figure 7. The vertical displacement of the soil
图 7. 隧道开挖至试验环地表竖向位移云图

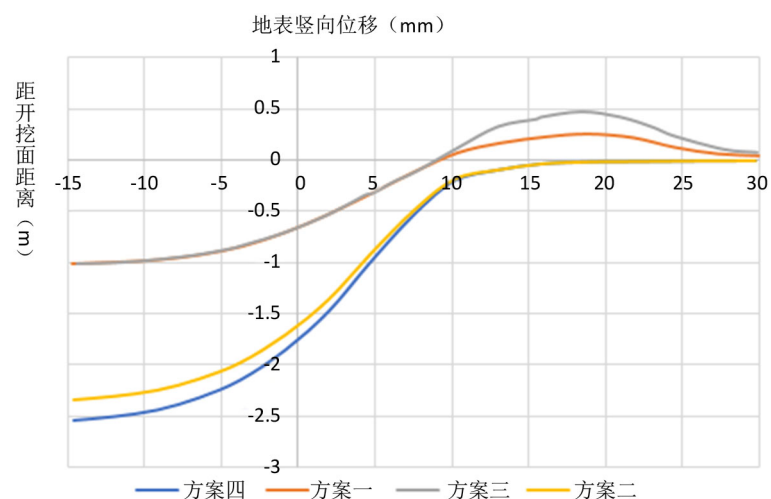


Figure 8. The comparison chart of vertical displacement of soil
图 8. 隧道开挖至试验环土体竖向位移横截面对比图

的注浆压力分布有利于控制地表隆起量。

5. 结论

- 1) 通过设置四种不同的注浆压力分布方案, 分析得出相同注浆量情况下, 注浆压力不均匀分布对隧道围岩所受径向压力有较大影响, 使隧道底部受力大于顶部受力, 不利于衬砌管片的受力;
- 2) 注浆压力不均匀分布会使管片产生很大的上浮力; 注浆压力分布不均匀程度越大, 衬砌管片的所受上浮力越大, 从而导致隧道衬砌上浮量增加。
- 3) 在注浆量相同情况下, 注浆压力不均匀分布会使沿隧道的纵向和横向地表沉降值减小, 地表隆起量增大, 数值分析结果表明注浆压力不均匀分布的地表最大隆起量是注浆压力均匀分布时的 1.28~2.07 倍。

基金项目

在这里非常感谢国家自然科学基金资助项目(50908234)的大力支持, 对水电八局长沙地铁四号线施工现场配合表示感谢, 对文章中引用文献所有者表示感谢。

参考文献

- [1] 叶飞, 朱合华, 何川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1-8.
- [2] Talmon, A.M. and Bezuijen, A. (2009) Simulating the Consolidation of TBM Grout at Noordplaspolder. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, **24**, 493-499.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.12.004>
- [3] Hashimoto, T., Brinkman, J., Konda, T., *et al.* (2004) Simultaneous Backfill Grouting, Pressure Development in Construction Phase and in the Long-Term. *Tunnelling & Underground Space Technology*, **19**, 447.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.02.057>
- [4] Eklund, D. and Stille, H. (2008) Penetrability Due to Filtration Tendency of Cement-Based Grouts. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, **23**, 389-398.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.06.011>
- [5] 周济民, 何川, 肖明清. 狮子洋水下盾构隧道衬砌结构受力的现场测试与计算分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(7): 4-7.
- [6] 李雪, 周顺华, 宫全美. 大断面深埋高水压地铁盾构隧道周边土压力作用模式评价[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 2-7.
- [7] 李雪, 周顺华, 王培鑫. 盾构隧道实测土压力分布规律及影响因素研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(s2): 3-9.
- [8] 张莎莎, 戴志仁, 白云. 盾构隧道同步注浆浆液压力消散规律研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(3): 4-10.
- [9] 张连震, 张庆松, 刘人太. 考虑浆液黏度时空变化的速凝浆液渗透注浆扩散机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 4-6.
- [10] 梁禹, 阳军生, 王树英. 考虑时变性影响的盾构壁后注浆浆液固结及消散机制研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(12): 2-6.
- [11] 邱明明, 杨果林, 姜安龙. 盾构隧道同步注浆的压力分布及其影响因素[J]. 深圳大学学报(理工版), 2015(2): 4-7.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org