

盾构施工盾尾注浆硬化过程数值分析研究

杨春山¹, 吴增伟², 张雅宁¹

(1. 广东工业大学 土木与交通学院, 广东 广州 510006; 2. 广州地铁设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 简要介绍了盾尾注浆的目的及类型. 在假定其他参数已知的条件下, 通过实例, 用有限元程序 GTS 模拟考虑盾尾注浆硬化过程和未考虑硬化过程两种盾构施工情况. 研究表明: 盾构施工过程中, 受浆液长期固结影响, 地表会产生进一步的沉降. 充分考虑浆体硬化作用, 利用监控压注浆液的硬化情况控制后期沉降是一种有效的地层沉降控制手段.

关键词: 盾构施工; 盾尾注浆; 硬化过程; 数值分析

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2011)04-0090-05

近年来, 随着盾构施工技术的不断完善, 盾构法在地铁施工中得到了广泛应用, 上海、北京、南京、广州、深圳、天津等地铁施工中基本都采用盾构法^[1]. 但随着国内盾构施工市场的扩大, 盾构施工的土层条件及掘进环境更为复杂多样, 国内盾构施工过程中出现了许多问题, 其中较为突出的是盾构过程对周围土体的扰动, 即施工地层沉降问题, 目前大部分工作都是围绕着盾构施工对地表扰动大小的控制^[2-5]. 根据盾构法施工过程和特点, 引起地层沉降的主要原因有: 开挖面土体移动和土体挤入盾尾间隙^[6]. 盾构壁后注浆是减小地层损失、控制地层应力释放和地层变形的重要手段, 是盾构施工的必备及关键工序^[7-8]. 许多专家学者进行了盾尾注浆的研究^[9-13], 在盾尾注浆的研究中, 很多都是以等效荷载的方式模拟注浆的作用, 不能很好地模拟出液体浆液的逐渐硬化过程.

本文采用三维有限元程序 GTS 动态模拟了盾尾注浆的硬化过程, 分析浆液硬化过程土体的变形规律和应力场变化, 与未考虑硬化过程的变形和应力比较, 得出一些结论. 为今后国内外地铁盾构施工盾尾注浆的浆液参数设计、施工及理论研究提供理论依据.

1 盾尾注浆的目的及分类

1.1 注浆目的

注浆的目的主要有以下几个方面: 1) 控制地层变形. 依据盾构工法的特性, 拼装好的衬砌脱离盾尾后, 由于盾壳原来占据的空间、为衬砌的拼装操作所留空隙等, 在衬砌环背面与实际开挖洞壁间存在环

形空隙, 使土体暂时处于无支护状态, 该空隙即为盾尾间隙^[14] (如图 1 所示). 注浆的最重要目的就是及时填充盾尾间隙, 防止因盾尾间隙的存在导致地层发生较大变形. 盾尾脱离管片后, 土体与管片存在着间隙, 此时浆液迅速及时填充空隙, 可以有效地控制地层的扰动变形, 减小既有结构沉降^[15]. 2) 提高隧道的抗渗性. 盾尾注浆液凝固后, 一般都有一定抗渗性能, 可作为隧道的第一道止水防线, 从而提高隧道抗渗性能. 3) 隧道是围岩和衬砌的共同体, 具备一定早期强度的浆液及时填充盾尾间隙, 可确保管片衬砌的早期和后期稳定性, 确保围岩与管片相互作用力均匀.

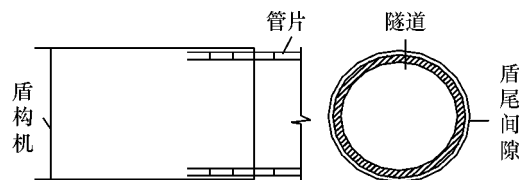


图 1 盾尾间隙示意图

1.2 注浆系统分类

1) 根据盾尾注浆与盾构掘进的关系, 从时效性上可将盾尾注浆分为 3 大类: (1) 同步注浆. 同步注浆是盾构一边向前推进, 一边不停地向盾尾空隙加压注浆材料的一种注浆方法. 用不间断的加压, 使注浆材料在充入建筑空隙后, 没有达到土体相同强度前, 能保持一定的压力和土体压力相当, 从而使地面沉降控制在最小范围. (2) 及时注浆. 掘进一环或数环后, 盾尾已存在大量间隙空间, 才对盾尾间隙进行注浆的方式. 这种注浆方式由于不能迅速对盾尾间隙进行填充, 增大了对土的扰动性, 不利于地面沉降

收稿日期: 2011-05-05

作者简介: 杨春山(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩土工程.

控制。(3) 二次注浆. 一次注浆效果不理想时, 需要通过二次注浆对前期注浆进行补充. 一般在隧道发生偏移、地表沉降异常时或在一些特殊地段(如盾构进出站、联络通道附近)使用.

2) 根据盾尾注浆的位置不同, 可将盾构注浆方式分为两大类: (1) 通过安装在盾构机盾尾上的注浆管注浆(如图2所示). (2) 通过管片上的注浆孔注浆(如图3所示). 这种注浆方式既可进行同步注浆, 也可进行及时注浆和二次注浆.

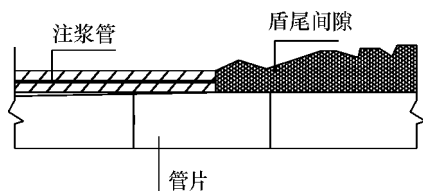


图2 盾尾注浆管示意图

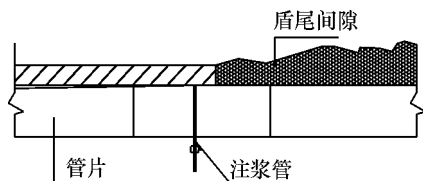


图3 管片注浆孔注浆示意图

2 工程简介及数值模拟

2.1 工程简介

北京地铁某在建区间隧道, 隧道全长约 1 500 m, 中心线标高 18.842 m, 埋深约 18.8 m. 采用相对经济的土压平衡盾构施工. 盾构管片衬砌环内径为 5 400 mm, 外径 6 000 mm, 管片宽为 1 200 mm, 厚为 300 mm. 制备管的混凝土强度等级为 C50, 抗渗等级为 S10. 衬砌管片脱出盾尾后, 配合地面量测进行壁后注浆, 注浆的浆液根据地质、地面超载及变形速度等条件选用, 模型上边界加 20 kPa 均布荷载. 各层土体及支护体力学参数见表 1.

2.2 数值模拟

建立土体模型如图 4 所示, 隧道 X 方向为宽度方向, Z 轴为深度方向, Y 轴为隧道轴线方向. 根据 Peck 沉降槽理论算出地表沉降槽反弯点距离 i 为 31.2 m, 此宽度反映了开挖对地表的影响范围. 模型各方向尺寸选取原则是把隧道开挖影响面都包含在模型里面, 故本模型取 X 方向宽 32 m, Y 方向长 48 m, Z 方向深 36 m. 模型盾构施工共有 40 个阶段, 土体网格各方向划分间距 1.5 m, 共 10 532 个单元. 模型边界条件: 施加 X、Y 方向水平约束及 Z 方向的竖直约束.

表1 土体及管片物理力学参数

类型	弹性模量 E/MPa	容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	内摩擦角 $/(^{\circ})$	各土层的 平均厚度 $/\text{m}$	土的 泊松比 μ	黏聚力 $/\text{kPa}$
人工填土	20	16.2	12.5	2.41	0.35	10
粉粘土与细砂土	26.3	19.4	26.5	7.90	0.30	20.1
中粗砂与圆砾	41.1	20.1	32.2	16.73	0.30	36.3
黏土与卵石层	33.0	19.1	25.1	10.96	0.25	19.5
注浆土体	100.0	20.0	31.0	—	0.30	281.6
衬砌管片	35 000	25.0	—	—	0.15	—

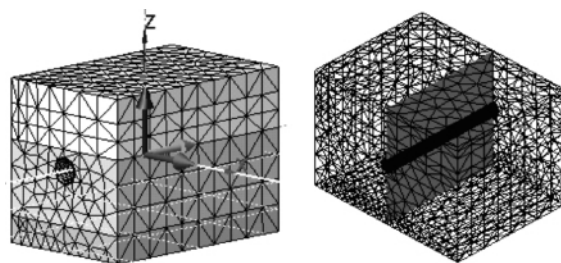


图4 计算模型图

2.3 建模过程

1) 土体采用 Drucker-Prage 模型, 考虑注浆体作用通过改变原状土力学属性的方法, 不考虑地下水作用. 查阅隧道相关资料可知土层初始应力系数分别为 0.5、0.7、1.5、1.0. 假设同一土层各向同性, 土体与结构之间变形协调.

2) 盾构和衬砌在模型中视为一体, 以实体单元来模拟, 如图 5 所示. 在本模型中, 盾尾间隙为 15 cm, 考虑到盾构机对周围土体的扰动, 取盾构机外侧 30 cm 为扰动区, 进行刚度折减^[16]. 本文选取刚度折减系数为 25%.

3) 考虑到衬砌接头对衬砌结构刚度的影响, 根据以前的经验, 把衬砌的材料参数作一定的折减. 本文把衬砌结构刚度折减 0.15, 在有限元模型中, 衬砌单元的弹性模量用实际衬砌弹性模量的 85% 以考虑接头的影响^[17].

4) 盾尾注浆体及考虑硬化过程模拟; 本文开挖面支护压力为 0.2 MPa, 注浆压力采用均布力(如图 6 所示), 开始采用 0.26 MPa 为注浆压力值. 通过降低注浆压力和提高受扰动土体的刚度实现模拟注浆体硬化过程. 考虑硬化时取 0.1 MPa 为注浆压力值, 用注浆后土体单元刚度代替扰动带的土体刚度.

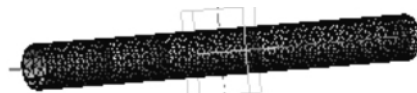


图5 衬砌与隧道整体模拟示意图

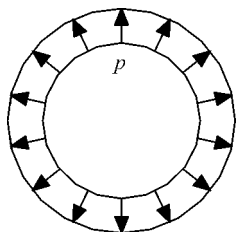


图6 均布注浆压力示意图

3 数值计算结果分析

盾构施工对土体扰动具有明显的三维特征,沿隧道轴向位置隧道周围土体的位移和应力有很大的差别,要充分考虑不同方向的位移及应力场.在计算过程中,沿隧道轴向每4 m设一监测断面,在 $Y=0\sim 48$ m之间,共设11个断面,用以监测地表、拱顶、拱底处的位移和应力变化.

3.1 土体位移分析

通过三维模拟计算,得出如图7所示的位移图,经过40个推进步骤,盾构沿隧道轴向从 $Y=0$ 处推进到 $Y=48$ m处,图8为两种情况隧道轴向剖面拱顶、拱底竖向位移曲线.

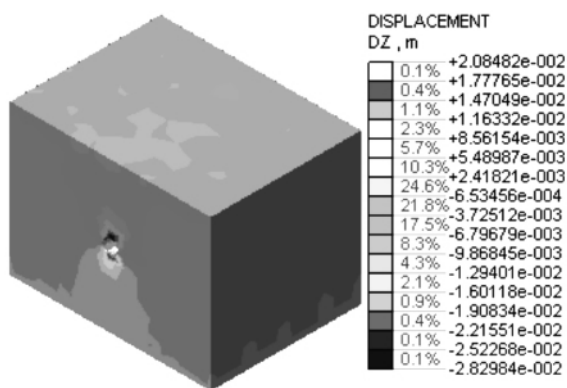


图7 模型位移云图(掘进完成)(单位:m)

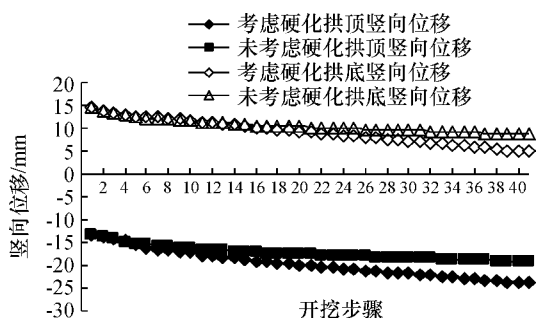


图8 拱顶、拱底竖向位移曲线

从图8中可以看出,考虑注浆体的硬化过程影响,隧道邻近地层会产生进一步的沉降,掘进完成后隧道拱顶土体产生最大硬化沉降为3.5 mm,硬化所引起的进一步沉降为总沉降量的15%.

图9给出了两种情况下开挖完成后沿隧道横向地表沉降曲线.从图可知,考虑浆液硬化过程地表沉降进一步增大了,同时随着离隧道轴线距离增大硬化影响呈现逐渐变小趋势.

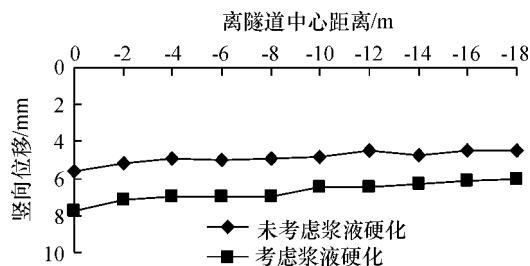


图9 地表竖向位移曲线(初始开挖面地表)

3.2 土体应力场分析

图10给出了模型应力图,从计算结果中提取相应点的应力,作出应力曲线图.

图11和图12给出了两种情况下拱顶、拱底应力曲线.由图可见,考虑硬化与未考虑硬化两种情况,不论拱顶还是拱底各方向上应力值都相差不大.通过对比可知,拱顶、拱底竖向应力值相对水平应力值差别更大,两个应力值的差值分别为0.002 6 MPa及0.002 9 MPa.

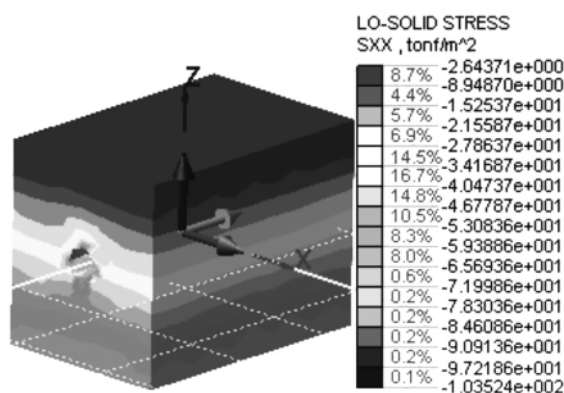


图10 模型实体应力云图

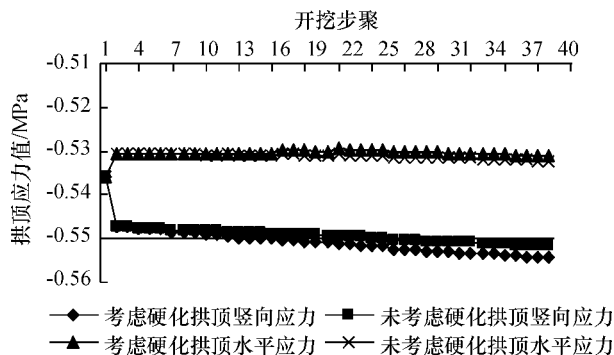


图11 拱顶应力曲线图

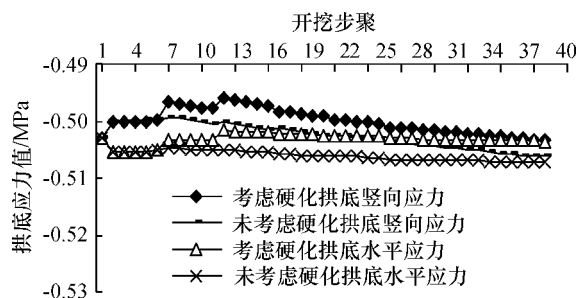


图12 拱底应力曲线图

3.3 模拟结果与实测结果对比分析

图13给出了地表横向监测点模拟与实测结果比较。由图可知,两组数据总体趋势相同,但模拟结果比实测结果小。主要原因是:1) 没有考虑地下水的作用,实际施工中地下水具有很大的不确定性,有一定影响;2) 考虑衬砌接头对衬砌结构刚度的影响及扰动带刚度折减时,取用的刚度折减系数存在误差;3) 在注浆压力的模拟过程中本文用均匀注浆压力代替非均匀注浆压力,使模拟的变形量受到了一定的影响。考虑以上因素的影响,可知本例数值模拟结果还是合理的。

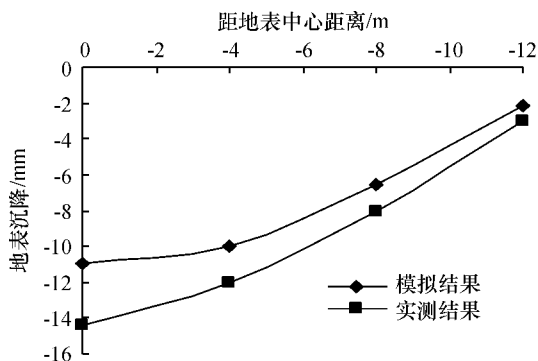


图13 地表横向监测点与实测结果比较

4 结论

通过对实际例子的数值模拟和数据分析,系统研究对比了盾尾注浆考虑与未考虑硬化过程应力、地层沉降值,得出如下结论:

1) 盾构施工过程中,浆液长期硬化影响,地层会产生进一步的沉降,本例中硬化沉降达到15%。考虑浆液硬化过程影响有利于优化浆液参数,提高了注浆效果。

2) 充分考虑浆体硬化作用,利用监控压注浆液的硬化情况控制后期沉降是一种有效的地层沉降控制手段。

3) 在盾构始发和到达段,尽量缩短浆液硬化时间,以便在填充地层的同时能尽早获得浆液固结体强度,保证开挖面安全并防止从洞口处漏浆,减小后

期沉降。

参考文献:

- [1] 孙王永,周顺华,宫全美. 软土地区盾构掘进引起的深层位移场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(3):500-506.
- [2] 付昱凯,陆小龙,丁文其,等. 盾构隧道施工动态扰动特点及控制分析[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(4):810-814.
- [3] 魏纲,黄志义,徐日庆. 土压平衡盾构施工引起的挤土效应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(19):3522-3528.
- [4] Feng Guo-guan. Based on the subway shield tunneling construction of surface subsidence analysis [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010,6(4):80-84.
- [5] 石文广,虞兴福,黄小斌. 浅覆土软弱地层盾构施工地面变形控制[J]. 浙江建筑,2010,27(4):27-34.
- [6] 刘建海. 盾构隧道同步注浆效果对地层沉降的影响预测分析[J]. 铁道建设,2010(3):46-48.
- [7] 朱伟,秦建设,卢廷浩. 砂土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(8):897-902.
- [8] 朱伟,陈仁俊. 盾构隧道施工技术现状及展望(第2讲):盾构隧道技术和施工管理[J]. 岩土工程界,2001,4(12):14-16,20.
- [9] 张志国. 浅析盾构同步注浆施工[J]. 建筑施工,2008(12):142-144.
- [10] 宋天田,周顺华,徐润泽. 盾构隧道盾尾同步注浆机理与注浆参数的确定[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(1):130-133.
- [11] 黄宏伟,杜军,谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆的探地雷达探测模拟试验[J]. 岩土工程学报,2007,29(2):244-248.
- [12] 杜军,黄宏伟,谢雄耀,等. 介电常数对探地雷达检测隧道壁注浆效果研究[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(3):420-429.
- [13] 韩日美,宋战平,吴焕通. 盾尾间隙注浆对地表沉降的影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2010,42(3):353-357.
- [14] 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):1307-1312.
- [15] 张成平,张顶立,王梦恕. 复杂地铁工程施工安全控制技术[J]. 中国安全科学学报,2008,18(8):171-176.
- [16] 王伟,夏才初,朱合华,等. 双线盾构越江隧道合理间距优化与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(增):3311-3316.
- [17] 殷加顺. 盾构施工注浆对地层变形影响的有限元模拟及实验研究[D]. 天津:天津大学建筑工程学院,2009.

Numerical Analysis of Grouting Hardening Process of Shield Tunneling

Yang Chun-shan¹, Wu Zeng-wei², Zhang Ya-ning¹

(1. Faculty of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510010, China)

Abstract: It introduced the purpose and the type of the shield grouting briefly. On the assumption that other parameters are identical, through the example, it used finite element program GTS to simulate the situations considering or not considering hardening process on shield grouting. The main results are as follows: with the advancing of the shield tunneling, because of long-term consolidation effect by grouting, the surface will produce further settlement. With the effect of grout hardening fully considered, sclerosis is monitored to control further settlement, which is an effective means of controlling strata settlement.

Key words: shield tunneling; shield tail grouting; hardening process; numerical analysis

(上接第89页)

Research on the Optimization of the Formulas for Intermittent Domestic Water Flow

Shen Zhi-juan, Mei sheng, Li dong-mei

(Faculty of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510500, China)

Abstract: It focuses on ways of optimizing the formulas to calculate intermittent water usage. By analyzing the conditions and deducing some formulas, it derived optimized formulas, which can curtail the long process of calculation considerably, making the calculation more comprehensible and convenient.

Key words: intermittent water usage; water supply; formula; condition; optimization