

不同预注浆加固范围时盾构机始发稳定分析

侯永峰, 曹瑞琅, 汪宏伟

(北京交通大学土木建筑学院, 北京 100044)

摘要:盾构始发作为盾构法施工的关键技术,其稳定性分析至今基本空白,没有相应的计算分析方法,设计主要依靠经验。以广州地铁六号线天平架盾构始发井的设计和施工为背景,采用有限差分软件 FLAC^{3D}进行三维有限元模拟的手段,对盾构始发稳定性进行了研究,着重分析了纵向与周围厚度不同加固范围组合时始发段的应力场、塑性区破坏场和位移场,探讨合理的加固厚度和强度。研究成果有望对盾构始发的设计和施工提供科学的理论依据和指导。

关键词:盾构;始发;稳定性;竖井;FLAC^{3D};加固

中图分类号:U455.43 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)01-0070-04

Analysis on Stability of Shield-driven in Different Grouting Reinforcement Range/HOU Yong-feng, CAO Rui-lang, WANG Hong-wei (School of Civil and Architecture Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Shield-driven is a key technology of shield-construction, but analysis on its stability is nearly a blank without calculation analysis methods, and the design mainly depends on the experience. Based on the design and construction of Tianpingjia Line 6# of Guangzhou metro, the paper made the analysis on the stability by means of finite difference procedure FLAC^{3D} to simulate shield-driven, emphatically analyzed the stress field, destroyed field, and displacement field in different starting segment reinforcing ranges. The paper also discussed the reasonable thickness and strength. The research result is hopeful to provide theoretical basis and instruction for the design and construction of shield-driven.

Key words: shield tunnel; starting; stability; shaft; FLAC^{3D}; reinforcement

0 引言

经过半个世纪工程实践和技术研究,盾构法隧道施工的许多技术难题,如隧道衬砌管片设计、管片接缝防水、轴线偏差、地表沉降控制等问题得到不同程度的解决,但盾构进出工作井至今是困扰盾构隧道施工的一大技术难题^[1]。盾构机进入区间隧道或是掘进完区间隧道进入接收竖井,必然有一个始发与到达的环节,这个步骤很关键,也是最容易出现问题的,不论是松散的砂土,还是饱和含水软粘土,自身缺少自立性和防水性,一旦有临空面时,土体将产生大量的滑坡坍塌和涌水,因此对封门外土体进行加固处理是不可缺少的^[2]。

通过注浆、深层粉喷桩或水泥搅拌桩井点降水疏干土体、冻结法等,使洞周土体具有自立性、防水性和一定的强度,以满足施工需要。始发、到达部位加固地层的目的如下:

- (1) 消除构筑竖井时造成周围土体的松动;
- (2) 防止拆除临时挡土墙时振动的影响;
- (3) 在盾构机贯入掘削面前或被拉入竖井内前能使地层自稳以及防止地下水流入;

(4) 降低对入口填塞物的压力;

(5) 防止因掘削面压力不足引起的掘削面坍塌(特别是泥水式盾构机);

(6) 防止对地表沉降或对埋设物的影响。

加固后土体也不能太硬,否则会造成盾构机大刀盘切土困难,引发机器故障。在盾构工程中,始发、到达部位的地层加固,以注浆工法为主,本文采用有限差分软件 FLAC^{3D}进行数值模拟,着重分析纵向与周围厚度不同注浆加固范围组合时始发段的应力场、塑性区破坏场及位移场,探讨合理的注浆加固范围和强度。

1 工程概况和土性参数

广州地铁六号线首期工程西起浔峰圩,东至燕塘,全长约 21.7 km,其中首期工程 9 标段,区间从黄花岗站出发,依次经过水荫路站、沙河站、天平架站,到达终点燕塘站。

设在天平架站的盾构始发井,采用明挖顺筑法施工。盾构机刀盘及机身的质量都约为 100 t,盾构机吊装设备为 GMT8350 型 385 t 液压汽车吊车。围

收稿日期:2009-09-06; 修回日期:2009-11-28

作者简介:侯永峰(1973-),男(汉族),河南洛阳人,北京交通大学教务处副处长、副教授,岩土工程专业,博士(后),从事岩土工程、路基工程教学与研究工作,北京市海淀区上园村 3 号, jwchyf@jg.njtu.edu.cn。

护结构是地下连续墙,在底板下插入深度为 3 m,基坑开挖时采用 3 道支撑,在端头采用全斜撑。将实际场地资料概化后,各层的土性计算参数见表 1。

表 1 土性参数表

土层	$\gamma / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	E / MPa	层厚 / m
素填土	1.38	1.84	37.3	15.1	4.08	6
粉土	1.35	1.82	40.0	18.2	4.38	4
粘性土 ¹	1.24	1.74	33.8	19.7	10	9
粘性土 ²	1.38	1.83	36.5	18.5	35	12
全风化花岗岩	1.63	1.95	34.2	20.6	55	4

2 盾构竖井的结构受力特点和施工难点

盾构竖井设计和施工必须科学地解决以下 2 个基本问题,即稳定和变形的问题。竖井施工首先必须保证竖井的稳定。一方面,竖井开挖作业的过程是竖井开挖面上土的卸载的过程,使得坑底的土体产生以向上为主的位移,而竖井周边的土体要产生指向竖井方向的位移,竖井围护墙在两侧压力差的作用下产生水平方向的变位,出现地层损失,周边土体在弥补地层损失中要发生地层移动,引起地表沉降^[3];另一方面,在含水地层中,竖井施工要引起周围土体孔隙水压力发生变化,使地层发生排水固结引起地表沉降。

当盾构机、吊装设备就位后,情况就更加复杂,盾构吊装设备布置平面如图 1 所示。

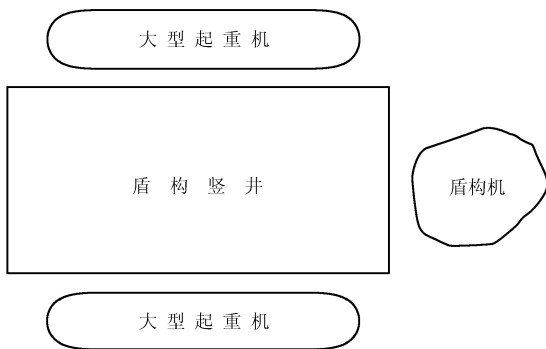


图 1 盾构吊装设备布置平面

盾构机加上吊装设备的质量接近 1000 t,如此大的重力往往要加载在竖井的如图 1 所示的两侧,也就是给竖井加了一很大的局部偏压荷载。另外,已经施工完毕的盾构竖井四周已经做好了主体结构,在主体结构外侧还有钻孔灌注桩或地下连续墙的围护结构,盾构始发推进前,必须先将入口封门凿除,目前主要采取人工挖掘的方式凿除。在做主体结构时预留了比盾构机横断面略大的圆孔,工人只需凿除作为围护结构的钻孔灌注桩或地下连续墙,

随着围护结构的不断凿除,围护结构背后的土体逐渐暴露出来,呈自然状态,对于原状土是很难稳定的,所以必须对土体进行加固。

3 计算模型

为了较好的模拟出盾构始发的受力状态,经过分析建立模型见图 2。具体尺寸为:横向(x 方向)取 72 m,纵向(y 方向)取 100 m,竖向(z 方向)为 35 m。开挖竖井尺寸为 12 m × 16 m × 16 m。整个模型一共划分为 56200 个单元,61328 个节点,且根据需要,施工处网格加密。注浆加固的强度参数在这里取为体积模量 $bulk = 8.3e8$,剪切模量 $shear = 4.2e8$,粘聚力 $coh = 4e5$,内摩擦角 $fri = 30^\circ$ ^[4]。

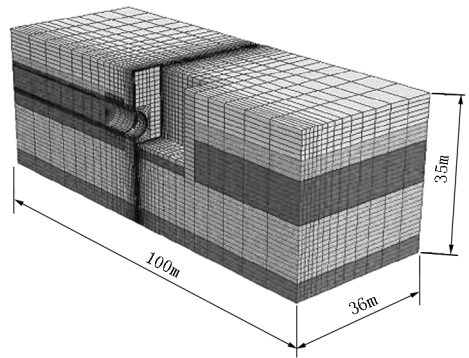


图 2 三维模拟开挖地层分布图

岩土材料的力学行为与应力历史和扰动过程密切相关,为了准确地模拟分析竖井开挖及盾构吊装过程和盾构始发过程中所引起的周围土体变形特征、应力特征以及塑性区发展与分布,分析按以下步骤进行:

- (1) 以工程勘察报告中力学参数为基础,构造初始地应力场;
- (2) 地下连续墙围护结构施工;
- (3) 基坑开挖:开挖上层土体并设置上层钢支撑,然后开挖下层土体并设置下层钢支撑;
- (4) 盾构机吊装:吊车就位、盾构下放、吊车撤离;
- (5) 开凿盾构方向连续墙;
- (6) 盾构隧道始发地层预注浆。

4 不同注浆加固范围时盾构机始发受力分析

盾构始发时对竖井结构稳定性影响主要因素是加固范围和加固强度的大小,目前工程当中一般盾构始发加固范围的大小是沿隧道纵向为 8 m,沿隧道横向为 3 m^[5]。

分析主要包括应力场、位移场以及塑性区分布,由于篇幅限制,这里仅分析最具有代表性的数值:最大主应力、地表沉降、隧道顶沉降等,据此找出合理加固范围并进行针对性的研究。注浆范围分为3类进行讨论:第一类是沿隧道方向加固5 m,周围厚度加固不断变化,即1.5、2.0、2.5、3.0 m;第二类是周围厚度加固为2 m,沿隧道方向加固范围不断变化,即5、6、7、8 m;第三类是沿隧道方向加固8 m,周围厚度加固不断变化,即1.5、2.0、2.5、3.0 m。

对于以上各不同预注浆区,其中重要参量列于表2,对比分析如下。

表2 预注浆区参量列表

预注浆范围	最大主应力/MPa	地表沉降/mm	隧道顶部下沉/mm	破坏区范围
无注浆		650		几乎整体坍塌
深5 m、厚1.5 m	3.5	67	84	很大
深5 m、厚2 m	3.5	62	80	很大
深5 m、厚2.5 m	3.5	56	72	大
深5 m、厚3 m	3.5	43	55	大
深6 m、厚2 m	3.5	38	50	较大
深7 m、厚2 m	2.75	28	39	较大
深8 m、厚1.5 m	3.5	26	35	较小
深8 m、厚2 m	2.5	15.5	25	很小
深8 m、厚2.5 m	2.25	15.5	25	很小
深8 m、厚3 m	2.25	15.5	25	很小

4.1 应力分析

预注浆长度固定时,厚度的适当增加,使土体对管片能起到更有效的支撑作用,开挖断面的最大主应力减小。达到一定数值后,继续增加厚度对改善衬砌周围的应力场效应不明显。厚度为1.5 m时,纵向加固范围从5 m增大到8 m,最大主应力都是3.5 MPa,这说明周围厚度加固范围相对较小时,仅是依靠加大隧道纵向加固长度对应力的减小作用微弱;当厚度为2 m时,纵向加固范围分别为5、6、7 m时最大主应力分别为3.5、3.5、2.5 MPa,说明周围加固厚度达到一定的数值,随隧道纵向的加固范围的增大,应力将减小。

4.2 位移分析

预注浆的范围直接决定隧道上部地表沉降量及隧道顶下沉位移量的大小,根据对位移方面的分析可以得到如下结论:

(1)地层加固对控制地表沉降作用明显:加固范围为0时,地表最大沉降为650 mm,加固范围为深5 m、厚1.5 m时,地表最大沉降减至67 mm。

(2)纵向加固范围一定,周围加固厚度增大,地表沉降将小幅度减小:隧道纵向加固长度为5 m时,

随着周围加固厚度不断增大,分别为1.5、2、2.5、3 m时,地表最大沉降依次减小为67、62、56、43 mm,如图3所示。

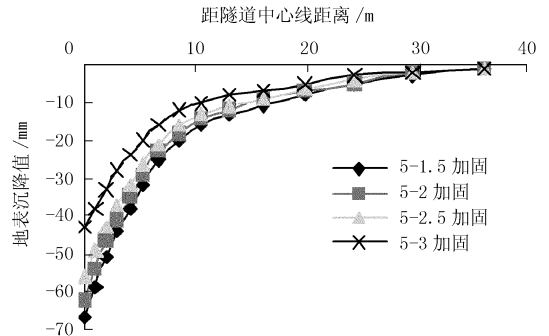


图3 加固长度5 m时,不同加固厚度预注浆加固横向地表沉降曲线

(3)周围加固厚度一定,纵向加固长度增加,地表沉降将大幅度减小:当纵向加固长度为7 m,周围厚度加固范围为2 m时,地表最大沉降为28 mm,比加固范围深5 m、厚2 m和深6 m、厚2 m时的62、38 mm都明显减小,如图4所示。

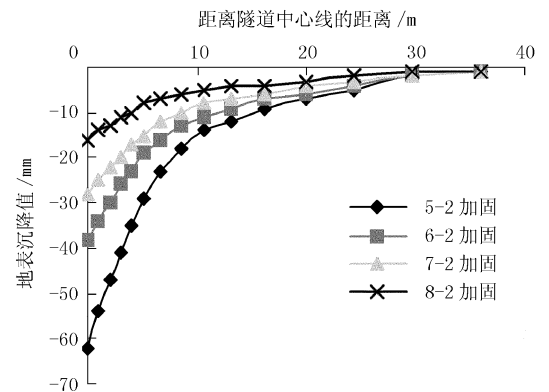


图4 加固厚度为2 m时,不同加固长度预注浆加固横向地表沉降曲线

(4)纵向加固范围的增大比周围加固厚度的增大产生的效果会更好,若持续增大,其产生的效果不明显:当纵向加固长度为8 m,周围加固厚度为1.5 m时,地表最大沉降为26 mm,比加固范围深7 m、厚2 m时的28 mm减小2 mm。

(5)沉降控制到一定数值后,继续增加加固厚度不能减小沉降量:隧道纵向加固长度为8 m时,随着周围厚度加固范围不断增大,分别为2、2.5、3 m时,地表最大沉降均为15.5 mm,这个时候再一味地加大周围厚度加固范围,只是一种资源浪费。

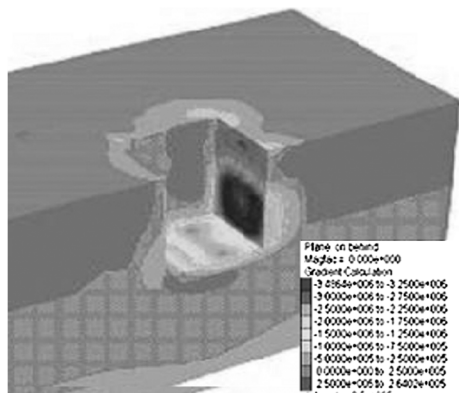
4.3 破坏分析

预注浆量直接决定破坏区的范围大小,具体地说,预注浆长度决定破坏区在纵深方向的大小,而预

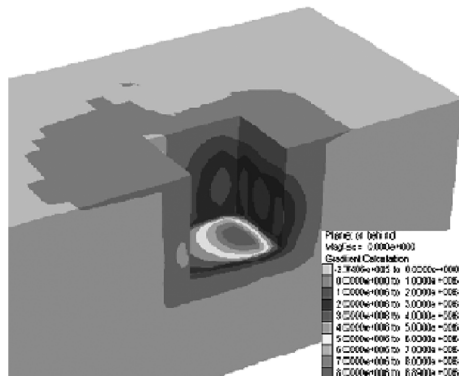
注浆厚度则决定盾构始发开挖横断面破坏区的大小。但是预注浆量达到一定数值,再扩大注浆范围,对减小破坏区的作用不明显。那么此时的纵向 8 m、厚度 2 m 预注浆范围就可以确定为最佳预注浆范围。

4.4 最佳预注浆范围的始发受力分析

图 5 为纵向 8 m、周围厚度 2 m 预注浆盾构始发最大和最小主应力场,与纵向 8 m、周围厚度 1.5 m 的预注浆相比,数值大小和应力的分布上都有明显的改善。盾构始发产生的最大主应力集中在始发隧道周边,由于预注浆的约束作用,应力集中范围较小,最大主应力为 3.8 MPa;竖井底板因盾构的重力作用,其上的应力值较大,最大主应力约 2.5 MPa;竖井背面墙体因千斤顶的反推作用,在墙体及周围土体产生较大的应力集中,这时预注浆的范围加大起到了有效的支撑作用,盾构的后推力效应减小。此外,盾构始发的前推后顶作用将会在竖井墙体上及周围土体产生较大拉应力,拉应力最大值发生在竖井底板处,因底板直接约束竖井的变形,所以底板处竖向压力和横向拉力数值较大,加固时需特别考虑。



(1) 最大主应力场



(2) 最小主应力场

图 5 预注浆盾构始发最大和最小主应力场

图 6 和图 7 为盾构始发的塑性区发展和分布情况,由图可以看出,纵向 8 m、厚度 2 m 的预注浆范

围达到比较理想的效果。首先,掌子面前方的土体仅有小范围破坏,和其他预注浆情况相比破坏范围明显减小。其次,开挖时对土体扰动影响的限制合理,隧道上方的土体发生局部破坏,但向周围延伸的范围不大,有利于开挖的继续推进和地面沉降级破坏的控制,而且管片的所受压力减小,这对工程安全储备有利。

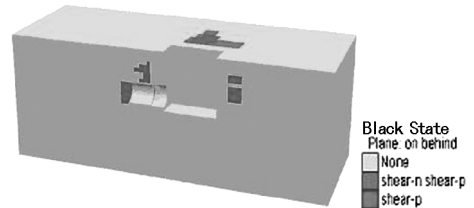


图 6 纵断面塑性区发展和分布图



图 7 横断面塑性区发展和分布图

5 结语

在盾构始发预注浆加固的过程当中,通过改变纵向加固长度与周围加固厚度,对应力、位移、塑性区发展情况进行对比分析,确定最合理注浆范围是纵向 8 m、周围厚度 2 m,此时最大主应力、地表沉降、隧道顶部下沉等均满足工程要求。盾构始发预注浆长度固定和厚度适中时,增加注浆纵深比增加注浆厚度对应力场改善、沉降量控制的效果更明显。预注浆能有效促进土体稳定,但预注浆量达到一定数值,继续增加注浆量对减小破坏区基本不起作用,确定合理的注浆加固范围后施工,既能保证土体的稳定,又能节省资源。

参考文献:

- [1] 杨书江. 地铁隧道竖井施工技术[J]. 隧道建设, 2004, 24(4): 24-27.
- [2] 李东海. 盾构吊装对竖井的实时监控量测[J]. 市政技术, 2005, 23(2): 131-133.
- [3] 张庆贺. 盾构进出洞注浆加固设计与施工技术研究[J]. 地下工程与隧道, 1993, (4): 93-100.
- [4] FLAC^{3D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua in Dimensions) version 2.1 User's Guide[Z]. USA: Itasca Consulting Group Inc., 2002.
- [5] 吴波. 复杂条件下城市地铁隧道施工地表沉降研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.