

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.01.012

盾构隧道穿越河流最小覆土厚度及沉降研究

李凯飞

(中铁十六局集团 北京轨道交通工程建设有限公司,北京 101100)

摘要:为解决盾构隧道穿越河流由于浅覆土层引起的施工地层扰动的问题,以及由于同步注浆量、掘进压力导致地层沉降的问题,基于常州地铁二号线一期工程实际情况,结合抗浮稳定的方法求解盾构隧道下穿河流所需最小覆土厚度,同时运用 ABAQUS 建立三维有限元分析模型,验证计算结果的正确性。基于最小覆土厚度计算结果,通过对不同注浆量、不同掘进压力下的沉降情况对比,提出有效的控制方法。结果表明,该区间所需最小覆土厚度为 9.13 m,且同步注浆量越大,地表沉降越大,掘进压力越大,地表沉降越小。所得结论可为盾构隧道穿越河流施工提供一定的参考。

关键词:盾构;河流;覆土厚度;沉降

中图分类号:TU 93

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2020)01-0079-06

Study on Thickness and Settlement of Minimum Covering Soil of Shield Tunnel Crossing River

LI Kaifei

(Beijing Rail Transit Engineering Construction Co., Ltd., China Railway 16th Bureau Group, Beijing 101100, China)

Abstract: In order to solve the problem of construction stratum disturbance caused by shallow overburden layer of shield tunnel crossing river, and the problem of stratum settlement caused by synchronous grouting volume and tunneling pressure, this paper is based on the actual situation of Changzhou Metro Line 2 Phase I project, combined with the method of anti-floating stability, this paper solves the minimum soil thickness required for the shield tunnel to pass through the river. At the same time, ABAQUS is used to establish a three-dimensional finite element analysis model to verify the correctness of the calculation results. Calculation based on minimum soil thickness, an effective control method is proposed by comparing the settlement conditions under different grouting volumes and different tunneling pressures. The results show that the minimum required soil thickness of this interval is 9.13 m, and the larger the synchronous grouting amount, the larger the ground

收稿日期:2019-11-11。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10272034)。

作者简介:李凯飞(1986—),男,吉林吉林人,工程师。E-mail:578061241@qq.com

引用本文:李凯飞. 盾构隧道穿越河流最小覆土厚度及沉降研究[J]. 常州大学学报(自然科学版),2020,32(1):79-

settlement, the larger the tunneling pressure and the smaller the ground settlement. The conclusions obtained can give a certain reference for the construction of shield tunnels crossing rivers.

Key words: shield; river; covering soil thickness; settlement

目前,地铁施工的首选是盾构施工方法^[1]。但在许多情况下,地铁需要下穿河流^[2],因此盾构隧道穿越河流施工对地表沉降控制的研究越来越受到重视^[3]。鉴于此,国内外大量学者对盾构隧道穿越河流沉降控制展开了研究。

宋克志^[4]以北京河南岸污水盾构隧道工程为例,进行了泡沫改良技术在碎石层中的室内试验和现场应用,结果表明,使用泡沫后,开挖面的土压力平衡很容易建立并且可以大大降低机械负载和刀具磨损。李利军^[5]建立三维有限元模型,研究盾构施工过程中隧道围岩变形稳定性和盾构施工对秦淮河河堤及河床的影响。结果表明,盾构注浆施工对河床产生的扰动较小,只出现轻微隆起,河床仍处于较稳定状态。韩磊等^[6]使用 Gleaves 有限元软件,利用位移控制有限元法基于地层损失率的概念,通过建立 DCM 子程序,进行大直径盾构隧道开挖过程中河堤沉降规律分析,结果表明,在覆土条件下,不同的地层流失率对河堤沉降的影响是不同的。PRENDES-GERO 等^[7]对隧道和河岸结构造成的破坏进行研究,并提供了所采取的措施以及对问题根源的确定,为了确定这一点,在现场和实验室测试数据的基础上,对隧道-河堤-地面联合结构进行了数值模拟,并使用经典方法对研究结果进行了分析补充,该分析证实了在整体结构中检测到的土体沉降是由基础的塌陷引起的。LANGFORD 等^[8]将注浆浆液简化成 Bingham 流体进行了理论推导,设计了盾构尾部同步注浆模型试验,试验结果表明,在松散介质中,注浆流速度与剪切力之间存在一定的关系,并建立了基于动浮力的理论分布模型。HYMAN 等^[9]进行留固耦合分析,系统分析有无渗流作用下土压平衡盾构于河道中进行始发的施工响应和地层加固问题,并基于开挖掌子面稳定系数的概念和方法对盾构始发过程中开挖掌子面的稳定性进行分析与评价,结果表明,地下水渗流作用会大大增加开挖掌子面失稳风险,引起地表发生较大沉降。

已有研究成果均未在保证最小覆土厚度的情况下研究沉降,而实际上确定盾构隧道穿越河流所需安全稳定的最小覆土厚度是控制沉降的重要步骤。因此,本文通过理论计算和数值模拟,计算出最小覆土厚度,并基于最小覆土厚度对盾构穿越河流时产生的地表沉降进行分析,所得结论可为盾构施工提供一定的参考。

1 有限元模型参数设置

采用 ABAQUS 软件对盾构穿越河流的过程进行模拟分析,本次计算模型取在常州地铁二号线勤业站—怀德站之间,模型长 200 m,宽 60.8 m,高 46 m,隧道直径 5.2 m,开挖直径 6.2 m,土体参数见表 1,三维有限元模型如图 1 所示。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layer						
土层	厚度/ m	压缩模量/ MPa	重度/ (kN·m ⁻³)	摩擦角/ (°)	泊松比	黏聚力/ kPa
填土	2.1	5.8	18.5	23.5	0.35	24.2
砂质黏土	7.0	12.4	18.7	28.8	0.33	16.0
黏土	2.9	10.6	20.0	17.0	0.30	20.0
	5.1	14.8	20.0	18.5	0.30	20.0
粉质黏土	7.4	7.3	19.3	14.0	0.34	12.0
	3.4	5.9	19.0	18.0	0.32	15.0
	12.1	7.1	19.6	16.5	0.32	25.0

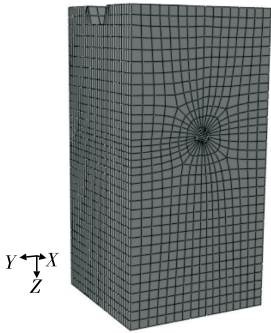


图 1 三维有限元模型
Fig.1 Model of three-dimensional finite element

2 最小覆土厚度

2.1 理论分析计算

对于盾构下穿浅覆土体的水域所需的安全稳定的最小覆土厚度要求,本文将利用简化计算分析法,通过平衡单位长度管件的重力和上覆土的有效重力与管件的浮力之间的平衡,计算所需的最小覆土厚度,计算过程如下:

由力的平衡条件可知,管片稳定的条件为

$$W + G > F_{\text{浮}} \quad (1)$$

单位长度管片重力 G 为

$$G = \pi(R^2 - r^2)\gamma_c \quad (2)$$

单位长度管片所受浮力 $F_{\text{浮}}$ 为

$$F_{\text{浮}} = \pi R^2 \gamma_g \quad (3)$$

单位长度管片上部土体有效重力为

$$W = (\gamma_s - \gamma_w)[2Rd + (2 - \frac{\pi}{2})R^2] \quad (4)$$

可得最小覆土厚度 d 为

$$d = \frac{\pi r^2 \gamma_c - (2 - \frac{\pi}{2})R^2(\gamma_c - \gamma_g)}{2R(\gamma_s - \gamma_w)} \quad (5)$$

式中: R 为管片外径,m; r 为管片内径,m; γ_c 为管片重度,kN/m³; γ_s 为土体饱和重度,kN/m³; γ_w 为水的重度,kN/m³; γ_g 为壁后注浆材料重度,kN/m³。

由式(5)可知,最小覆土厚度与管片尺寸、土体饱和重度、注浆材料重度等密切相关,其计算取值见表 2。由表 2 可知,壁后注浆材料重度越重,所需要最小覆土厚度越深;施工开挖洞径越大,所需要最小覆土厚度也越深。

表 2 最小覆土厚度计算取值表

Table 2 Calculation value table of minimum thickness of covering soil

R/m	r/m	$\gamma_c/(kN \cdot m^{-3})$	$\gamma_g/(kN \cdot m^{-3})$	$\gamma_s/(kN \cdot m^{-3})$	d/m
3	2.65	24.5	10	20	1.53
			12	20	2.47
			14	20	4.36
			10	15	3.71
			12	15	5.59
			14	15	9.36
6	5.60	24.5	10	15	11.61
			12	18	9.13
			14	20	8.93

2.2 数值模拟

根据式(5),计算得出盾构隧道下穿河流所需最小覆土厚度为 9.13 m。利用 ABAQUS 有限元结构分析软件将覆土厚度分别设置为 8,9,10,11 m 进行模拟,分析最小覆土厚度为 7,8,9,10 m 时的地表位移沉降情况,最终得出数值模拟分析下的最小覆土厚度,与理论计算结果对比,验证理论计算最小覆

土厚度的正确性。

由图 2(a)~图 2(d)可得,当覆土厚度为 8,9,10,11 m 时,地表位移沉降分别为 3.857,3.104,3.112,3.116 cm。当覆土厚度为 8,9 m 时,覆土厚度越大,地表位移沉降越小,且当覆土厚度为 8 m 时,各部位位移值较大。当覆土厚度为 9,10,11 m 时,位移值比覆土厚度 8 m 时小很多,且当覆土厚度大于 9 m 后,位移变化和幅度基本相似。可判断数值模拟下盾构隧道穿越河流所需安全稳定的最小覆土厚度为 9 m。

综上,数值模拟下最小覆土厚度结果为 9 m,理论计算下最小覆土厚度结果为 9.13 m,两者误差较小,可判断理论计算结果正确。所以,盾构隧道穿越河流所需安全稳定的最小覆土厚度为 9.13 m。

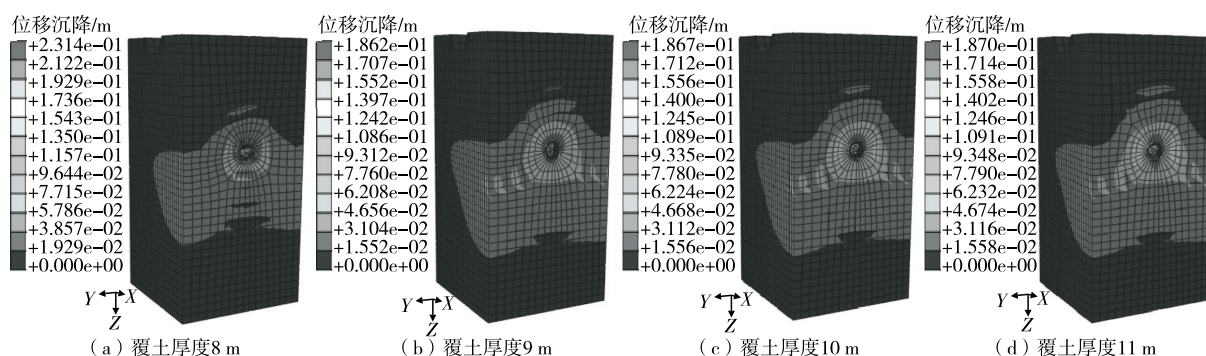


图 2 不同覆土厚度位移云图

Fig.2 Displacement cloud chart of different soil thickness

3 盾构隧道穿越河流沉降规律

3.1 不同注浆量地表沉降规律

基于张云等^[10]提出的等代层的概念将注浆区转化为厚度均等的均质层(包括一部分进入地层和盾构尾部的泥浆),对整个圆周注浆,并控制等代层及其相关层的厚度模拟盾构施工中注浆前后地层变化的参数。利用 ABAQUS 有限元分析软件,基于理论计算结果,将覆土厚度设置为 9.13 m,将等代层厚度设置为 20,40,60 cm 进行模拟,分析等代层厚度为 20,40,60 cm 时的地表位移沉降情况。

由图 3(a)~图 3(c)可见,盾构隧道施工区域为发生位移的最大部位,随着与盾构隧道施工区域的距离逐渐增加,位移逐渐减小。位移沉降区域集中在盾构隧道开挖施工区域,越靠近盾构隧道施工部

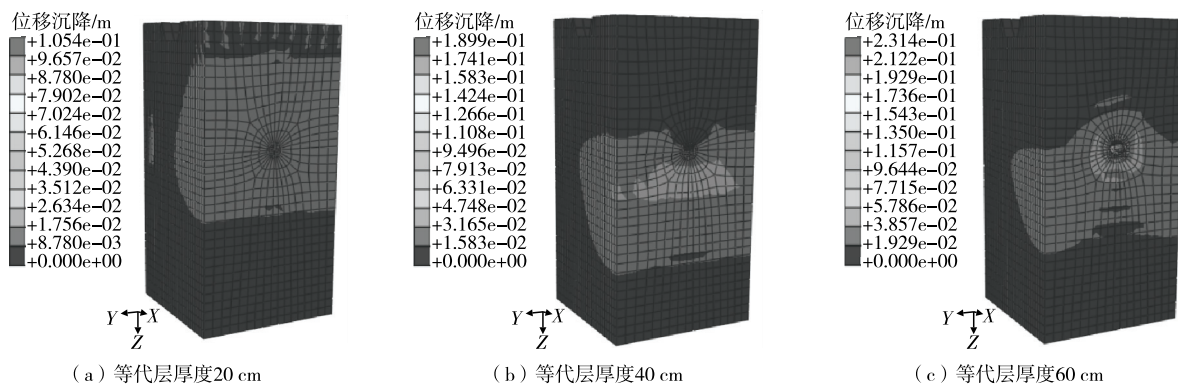


图 3 不同等代层厚度位移云图

Fig.3 Displacement cloud chart of thickness in different generation

位,位移沉降量越大。并且,随着盾构隧道逐步向上,位移沉降逐步减小。当等代层厚度为 20 cm 时,地表中心最大位移沉降量为 2.634 cm;当等代层厚度为 40 cm 时,地表中心最大位移沉降量为 3.165 cm;当等代层厚度为 60 cm 时,地表中心最大位移沉降量为 3.857 cm。

综上,随着盾构超挖量增加,同步注浆量增加,等代层厚度增大,对周围土体扰动增加,地表位移沉降量增加。

3.2 不同掘进压力地表沉降规律

利用 ABAQUS 有限元分析软件,基于理论计算结果,将覆土厚度设置为 9.13 m,将掘进压力设置为 100,300,500 kPa 进行模拟,分析掘进压力为 100,300,500 kPa 时的地表位移沉降情况。

由图 4(a)~图 4(c)可以看出,掘进压力 100 kPa 时,地表沉降峰值是 4.811 cm;掘进压力 300 kPa 时,地表沉降峰值是 3.213 cm;掘进压力 500 kPa 时,地表沉降峰值是 2.432 cm。相比之下,掘进压力越大,地表沉降越小。当掘进压力为 500 kPa 时,地表位移会突然变大,沉降会大大减小。

综上,该区间盾构掘进压力宜设置在 500 kPa。

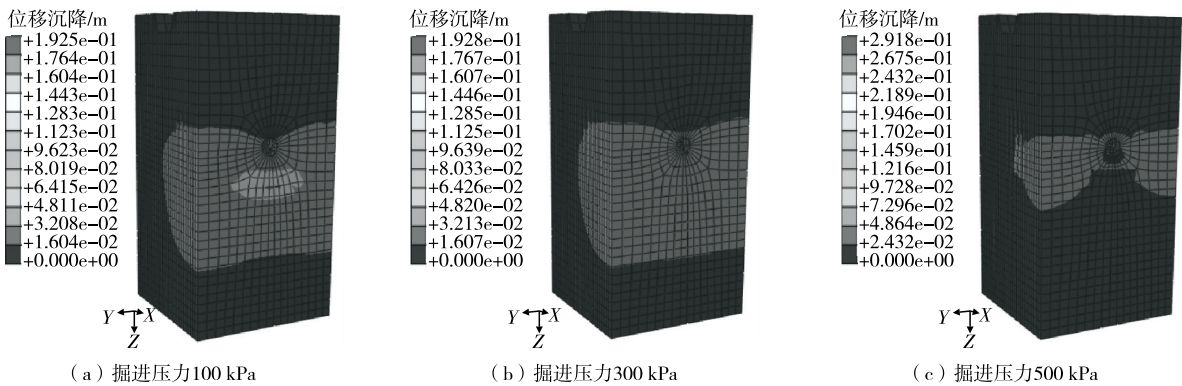


图 4 不同掘进压力位移云图

Fig.4 Displacement cloud map of different tunneling pressure

3.3 实际数据与数值模拟对比

由于本文的数值模拟与实际施工过程相同,因此所选模拟断面的地层分层显然是连续的,与实际情况相吻合,因此可以利用实际监测数据与数值模拟数据进行对比分析,验证数值模拟的正确性。

勤怀区间(SK2+322.158)~(SK3+311.078)下穿河流都设有监测点,用来监测地表沉降,并起到监测预警的作用,在 SK2+322.158 断面设有 3 个监测点,分别为 JC15,JC17,JC18。历史监测数据见表 3 和表 4,实际施工沉降值为 0~4.960 cm,与数值模拟中的 4.831 cm 相近。说明本文采用的数值模拟参数与沉降预测规律具有一定的正确性,可以继续使用。

表 3 上行线实际监测点沉降累计变化量

Table 3 Cumulative change of the settlement of the actual monitoring points on the upward line

监测点	累计变化量/cm						
	2019-09-14	2019-09-15	2019-09-16	2019-09-17	2019-09-18	2019-09-19	2019-09-20
JC15	-3.86	-2.03	-2.57	-1.93	-3.29	-3.29	-3.29
JC17	0.00	0.00	0.00	0.74	1.11	1.11	1.11
JC18	0.00	0.00	0.00	-2.89	-4.64	-4.67	-4.96

表 4 下行线实际监测点沉降累计变化量

Table 4 Cumulative change in settlement of actual monitoring points on the down line

监测点	累计变化量/cm						
	2019-07-18	2019-07-19	2019-07-20	2019-07-21	2019-07-22	2019-07-23	2019-07-24
JC15	-1.95	-1.76	-3.32	-3.00	-2.10	-3.35	-2.09
JC17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.63	-1.02
JC18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.39	0.18

4 结 论

通过对盾构隧道穿越河流所需安全稳定的最小覆土厚度进行理论计算与数值模拟对比分析,以及对盾构隧道穿越河流不同注浆量和不同掘进压力下的沉降进行研究,可得出如下结论:

1) 基于常州地铁二号线一期工程实际情况,该区间盾构隧道穿越河流所需安全稳定的最小覆土厚度为 9.13 m。

2) 随着盾构超挖量增加、同步注浆量增加、等代层厚度的增大,对周围土体扰动增加,地表位移沉降量增加。因此,在盾构掘进时,应尽量减少超挖和对周围地层的扰动。

3) 掘进压力越大,地表沉降越小,当掘进压力为 500 kPa 时,地表位移会突然变大,沉降会大大减小,因此,该区间盾构掘进压力宜设置在 500 kPa。

参考文献:

- [1] 杨文. 城市地铁隧道常用施工方法分析[J]. 科技展望, 2017, 27(6):31.
- [2] 左九如. 城市地铁盾构近距离穿越桥梁、河流综合施工技术探讨[J]. 工程建设与设计, 2019, 11(7):272-273.
- [3] 张振. 地铁下穿河流富水层沉降分析与应对技术[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2018, 20(1):20-23.
- [4] 宋克志, 汪波, 孔恒, 等. 无水砂卵石地层土压盾构施工泡沫技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 24(13): 2327-2332.
- [5] 李利军. 盾构隧道浅覆穿越秦淮河施工稳定性分析[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(4):58-63.
- [6] 韩磊, 叶冠林, 王建华, 等. 浅覆土大直径盾构穿越对河堤影响的有限元分析[J]. 岩石工程学报, 2015, 37(S1): 125-128.
- [7] PRENDES-GERO M B, FLOPEZGAYARRE F. Forensic analysis of the failure of the foundations of a tunnel built to channel the course of a river[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 32:152-166.
- [8] LANGFORD J C, VLACHOPOULOS N, DIEDERICH S. Revisiting support optimization at the Driskos tunnel using a quantitative risk approach[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(2):147-163.
- [9] HYMAN G, MAYHEW L. Toll optimisation on river crossings serving large cities[J]. Transportation Research. Part A: Policy and Practice, 2008, 42(1):28-47.
- [10] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3):388-392.

(责任编辑:李艳)