

超大直径盾构隧道下穿铁路施工的离心机模型试验研究

杨林松¹ 刘继国¹ 舒恒¹ 吴世栋² 宋明¹ 李金¹ 王雪涛^{2,3}

(1 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056; 2 深圳大学土木与交通工程学院, 深圳 518061; 3 深圳大学滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 深圳 518061)

摘要 盾构隧道近接下穿运营高速铁路施工会引起地地下沉、轨道不均匀沉降等病害,严重影响线路的正常运行,甚至会对铁路造成破坏。为研究超大直径盾构隧道动态掘进过程对地表城际铁路沉降影响,文章以武汉两湖超大直径盾构隧道斜下穿城际铁路项目为依托,通过土工离心机模型试验模拟了超大直径盾构隧道近接下穿城际铁路施工中盾构接近-下穿-驶离铁路的整个动态过程。研究表明:(1)盾构掘进对铁路路基的影响主要集中在下穿点前后各25 m范围,距下穿点25 m之外盾构掘进对铁路路基的影响很小;(2)盾构掘进过程中,下穿铁路前由盾构掘进引起的铁路路基沉降约占掘进全过程引起铁路路基总沉降的36%,下穿后约占64%,下穿后铁路路基沉降速率迅速增加,且大于下穿前;(3)以盾构掘进下穿过铁路15 m处为分界点,在此之前在盾构掘进方向左侧的路基沉降大于右侧的路基沉降,在此之后则相反,最终盾构掘进方向右侧的铁路路基沉降大于左侧。

关键词 公路隧道 超大直径盾构 下穿城际铁路 离心机试验

中图分类号:U451+.5 **文献标识码**:A

1 引言

目前,研究隧道开挖影响地表变形或影响轨道变形的的方法主要以Peck经验公式法^[1-4]、数值仿真分析^[2-16]和模型试验^[17-20]为主。在经验公式和数值仿真分析方面,王鸣涛等^[1]通过Peck经验公式反演地表沉降槽宽度,并与现场监测数据相互验证,最终获取适合特定地区的修正经验公式;郑余朝等^[2]借助经验公式预测盾构隧道开挖导致的地表沉降,同时建立数值模型研究路基沉降与轨道高低偏差间的相互作用,提出近接施工影响分区判别准则;吴韬^[3]采用有限元研究了14.27 m超大直径盾构斜交下穿铁路的地层变形规律,将地表列车荷载简化为均布荷载,发现其对地表沉降影响不大,而二次注浆对控制工后沉降效果明显。朱正国等^[5]采用二维有限元方法,分别研究了不同影响条件下新建(单、双)隧道下穿既有铁路的96种工况,最后推导得到新建(单、

双)隧道下穿各等级既有铁路时的地表沉降控制标准。Peck经验公式主要用于预测垂直隧道轴线的横向地表沉降,但是不能考虑地上建构筑物、地表荷载等的影响。此外,还有许多学者先后采用Peck经验公式结合数值模拟的方法研究上覆地质条件、荷载条件等情况改变后盾构隧道开挖对铁路路基、轨道结构变形的影响,并分析不同加固方法的加固效果,获得了许多具有重要参考价值的成果^[5-16],但研究的对象主要集中在小、中、大直径隧道。在模型试验方面,柴元四^[17]建立了室内大型试验模型研究小直径盾构隧道开挖对既有铁路路基变形的影响,但未对铁路沿线地表沉降规律进行分析;马险峰等^[18]利用离心模型试验对超大直径盾构隧道开挖进行了模拟,分三段采用排液法模拟地层损失,研究地层损失与施工期及工后地表沉降的关系;孙兵等^[19]采用室内离心模型试验模拟小直径双孔盾构隧道近接施

修改稿返回日期:2021-02-26

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51938008);国家自然科学基金重大项目(52090084).

作者简介:杨林松(1982-),男,高级工程师,主要从事隧道与地下工程等方面的设计和研究工作,E-mail:simuyang1024@163.com.

工,通过定量控制隧道外套的水囊注放水的方式模拟盾构隧道的地层损失,研究了横断面地表沉降的量值、分布规律以及随盾构推进距离的变化规律,并提出相应防护措施。张冬梅等^[20]基于Kerr地基梁理论,分别将已建隧道和新建隧道简化为梁与荷载,建立了新建隧道施工对上方已建隧道影响的解析分析方法,并利用离心机试验结果进行了验证,同时分析了地层损失率、荷载形状参数和隧道与土体相对抗弯刚度对已建隧道纵向变形的影响。

以上的研究成果主要是针对小、中、大型盾构隧道进行研究获得,对类似工程具有重要参考意义,但是否也适用于超大直径盾构隧道尚需探究。已有研究成果表明,1g室内模型试验操作方便,但由于模型尺寸限制,试验结果与真实情况存在差别;水囊法由于不易控制隧道形状,在地表变形较小的情况下不易获取到精确的地层变形值,且不能很好地反映隧道动态掘进过程及其对地层的影响。随着超大直径盾构隧道的出现,如国内已建成通车的武汉三阳路隧道、南京扬子江隧道、杭州钱江隧道和长江隧道以及在建的深圳春风隧道、南京建宁西路过江隧道和上海北横通道,均存在着下穿地表构筑物或地铁的情况,但是目前国内外超大直径盾构隧道均未涉及到近接(地面)城际铁路的问题。因此,为研究超大直径盾构隧道动态开挖对地表沉降、城际铁路运营的影响,借助一套机载隧道开挖模拟设备,该设备可以在高达50g~100g超重力场下的小比尺模型试验中模拟原型盾构隧道施工过程,开展离心模型试验研究。

2 工程简介

2.1 工程概况

两湖隧道工程位于武汉市长江南岸,工程北端分别起于秦园路和二环线东湖路,沿黄鹄路向东,在湖北省博物馆东侧进入东湖,沿东湖南路东侧湖面布线,下穿东湖后在卓刀泉北路合并,下穿南湖后进入南湖大道、华中农业大学校区,南止于三环线,线路全长约19.25 km。两湖隧道工程是环境敏感区,下穿东湖与南湖,与5条地铁7处区间或车站交叉,下穿武咸城际铁路及三座市政桥梁等。

本文主要的研究对象为隧道下穿武咸城际铁路区段。武咸城际铁路是武汉城市圈内一条连接武汉和咸宁的快速城际铁路,运行有直通货物列车和旅客列车,设计速度为250 km/h,预留300 km/h的提速条件,采用有砟轨道,共计4股,标准轨距1435 mm。本区段隧道为双线六车道,采用盾构法施工,盾构机

直径约为16.2 m,管片外径为15.5 m,管片厚度为0.65 m,与铁路平面夹角约为65°,下穿段位于R=700 m圆曲线上,纵坡为0.5%,盾构距离始发井43 m(图1),铁路距离隧道拱顶约16.5 m(1.02D)。

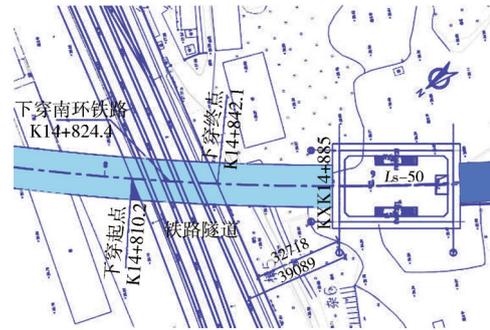


图1 下穿隧道与铁路位置平面图

Fig.1 Plan view of shield tunnel and railway positions

2.2 下穿段地质条件

铁路下方土层依次为素填土(1-2)、碎石土(10-4)、泥岩(20a)、泥岩杂砂岩(20a、20e),素填土和碎石土的平均厚度分别约为0.5 m和4.5 m,盾构隧道穿越地层为泥岩、泥岩夹砂岩(图2)。依据本工程详勘报告,下穿段地层及铁路路基参数见表1。

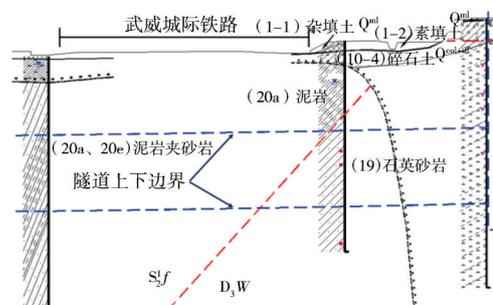


图2 下穿段沿隧道轴剖面图

Fig.2 Sectional view of under-passing section along tunnel axis

3 试验设计

3.1 试验设备

试验所用土工离心机(图3)采用对称转臂、双吊篮、双摆动方式,转动半径为5.03 m,最大加速度300g,最大有效负载1.5 t,有效容量450 g·t,试验吊篮尺寸为1.5 m×1.0 m×1.5 m。模型箱净空尺寸为0.6 m×0.35 m×0.65 m(长×宽×高),安装透明玻璃板的侧壁厚0.08 m,其它侧壁与底板厚均为0.04 m,模

表1 下穿段地层和铁路路基的主要物理力学性质

Table 1 Main physical and mechanical properties of strata at under-passing section and railway subgrade

参数土层	平均厚度 /m	密度 $\rho/(g/m^3)$	变形模量 E_s/MPa	压缩模量 $E_{s,0.1-0.2}/MPa$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	粘聚力 c/kPa	泊松比
素填土(1-2)	0.5	1.92	/	3.8	10	10	0.4*
碎石土(10-4)	4.5	1.95	25×2=50*	$E_0=25$	27	10	0.29
强风化泥岩(20a-1)	—	2.35	60	—	28	150	0.36
中风化泥岩(20a-2)	—	2.61	90	—	29	200	0.35
道砟层	0.35	1.80	120	—	—	—	0.25
基床表层	0.7	2.20	170	—	20	25	0.3
基床底层	2.3	2.10	120	—	27	20	0.3
路基体	2	2.00	80	—	28	25	0.3

注: *为经验值, 压缩模量与变形模量关系按照经验公式 $E_s=(2-5)E_c$ 取值。



图3 LXJ-4-450大型土工离心机

Fig.3 LXJ-4-450 large scale geotechnical centrifuge

型箱内部活动外筒外直径为0.08 m, 模拟盾构开挖; 活动外筒内部嵌套固定内筒, 固定内筒外直径为0.076 m, 模拟隧道管片。

开挖模拟过程见图4, 详细开挖模拟过程为: 在离心加速度水平为60g下, 顶推装置匀速稳定地将活动外筒由A向B推出模型箱, 活动外筒不断推出代表隧道不断开挖, 固定内筒通过A端的固定螺纹固定在模型箱中, 失去活动外筒支撑的土体发生向内的径向位移, 若土体变形较大则接触固定内筒, 此时固定内筒起到支护作用。该开挖机载设备可动态

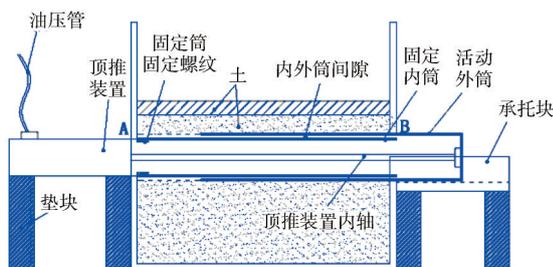


图4 模拟开挖过程示意

Fig.4 Schematic diagram of simulated excavation process

模拟隧道施工接近-下穿-驶离铁路的整个施工过程, 使模型试验能更加精确地模拟实际工况, 最终获取更具参考意义的数据。

3.2 模型简化

受模型箱的尺寸限制, 试验模型小、几何比尺大 ($C_L=16.5/0.08=202$), 几何比尺大会导致原型中较薄的岩土层在缩尺模型中极难准确制模, 且倾斜分布的泥岩夹砂岩也较难制模, 因此, 需要对原型岩土层进行一定简化, 考虑最不利的情况, 如下:

- (1) 用泥岩夹砂岩中性质较差的泥岩(20a-2)代替泥岩夹砂岩, 并视为水平分布;
- (2) 原型铁路四层路基简化为一层, 物理力学参数采用其中力学特性最差的路基体的力学参数;
- (3) 将素填土和碎石土两层土层简化为一层碎石土;
- (4) 列车动荷载难以在试验中模拟, 将轨道自重和列车动荷载视为均布静荷载作用在路基上。根据规范^[21]选取铁路自重和列车荷载分别为17.3 kPa和36.8 kPa, 总荷载为54.1 kPa。

3.3 试验比尺参数

试验涉及的关键比尺参数有几何比尺 C_L 、强度比尺 C_{σ_c} 、应变比尺 C_ε 、变形模量比尺 C_E 、密度比尺 C_ρ 。依据相似理论^[22], 各比尺参数间的关系为:

$$C_\sigma = C_{\sigma_c} = C_E C_\varepsilon = \frac{C_L C_\rho}{N} \quad (1)$$

式中, N 为离心加速度水平。

(1) 模型几何比尺

由几何比尺 C_L 可计算得到其它模型尺寸, 如表2所示。

原型中超挖间隙为0.35 m, 模型中超挖间隙为1.7 mm, 而模型中开挖半径与管片外半径相差2 mm,

表2 原型、模型尺寸

Table 2 Prototype and model sizes

类型	原型/m	模型/mm
横向土体宽度	121.1	600
盾构开挖距离	70.7	350
隧道覆土高度	16.5	80
铁路沿线长度	133.7	662
盾构开挖直径	16.2	80
盾构管片外直径	15.5	76
铁路路基厚度	5.0	25
碎石土厚度	4.5	22
素填土厚度	0.5	2.4
超挖间隙	0.35	1.7

装置不满足几何比尺要求。由于试验所用机载开挖模拟装置设计的固定内筒刚度非常大,在离心试验中可视为刚体,从而无法考虑原型管片与模型管片的相似比,本试验中将管片变形用模型超挖间隙体现,以解决装置不满足超挖间隙几何比尺这一问题。

(2) 岩土体密度、变形模量比尺

经简化,模型中岩土层分布由上到下依次为路基、碎石土、中风化泥岩(20a-2)。为了便于分析试验结果,取应变比尺 $C_\epsilon=1.0$ 、中风化泥岩(20a-2)模型密度 $\rho=2.22 \text{ g/cm}^3$ 、密度比尺 $C_\rho=2.61/2.22=1.18$,将已知量代入公式(1)有:

$$C_E \times 1.0 = \frac{202 \times 1.18}{N} \quad (2)$$

通过试块的单轴压缩试验(图5),最终获得满足强度、变形特性要求的中风化泥岩(20a-2)模拟材料,将其变形模量 $E_e=23.02 \text{ MPa}$ 代入公式(2)得到离心加速度水平 $N=60$ 。此时,计算变形模量比尺 $C_E=4$,根据上述已知量,通过公式(1)计算得到的其它岩土体模拟材料参数见表3,本试验涉及的其它比尺参数见表4(试验比尺=原型/模型)。

图5 $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 试块单轴压缩试验Fig.5 Uniaxial compression test of $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ specimen

表3 岩土体原型、模型参数

Table 3 Parameters of geotechnical prototype and model

类型	原型		模型	
	密度 /(g/cm^3)	变形模量 /MPa	密度 /(g/cm^3)	变形模量 /MPa
路基	2.00	80	1.70	20.46
碎石土	1.95	50	1.66	12.79
中风化泥岩(20a-2)	2.61	90	2.22	23.02

表4 模型比尺

Table 4 Model similarity scale

试验比尺	选用值
几何比尺 C_L	202
变形模量比尺 C_E	4
密度比尺 C_ρ	1.18
应变比尺 C_ϵ	1.0
应力比尺 C_σ	4
位移比尺 C_d	202

为模拟路基所受包括轨道结构自重荷载、列车荷载在内的均布荷载,沿既有线路方向在路基表面进行堆载,堆载体总质量为 2 kg ,在 $60g$ 的离心加速度下作用于路基表面的荷载为 13.5 kPa ,依据应力比尺 $C_\sigma=4$,对应的原型荷载为 54.1 kPa 。

4 模型制备与试验

4.1 模拟材料

试验涉及材料包括福建平潭标准砂、雨虹 G101 防水涂料、粒径 $0.25 \sim 0.425 \text{ mm}$ 铁砂和粒径 $0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$ 细砂。模型中的中风化泥岩按材料重量配比 $0.368 \text{ 9} : 0.548 \text{ 9} : 0.033 \text{ 3} : 0.048 \text{ 9}$ (砂:铁粉:涂料液体:涂料粉粒)制备;模型中的路基、碎石土采用差异化的细砂模拟。

4.2 模型制备过程

(1) 模型制备

模型中土体主要分为上、中、下三层,如图6所示。上层土体厚 20 mm ,仅在路基区域填筑砂土,模拟原型轨道自重和列车荷载;中层土体厚 25 mm ,模拟原型路基及其两侧碎石土层;下层土体厚 297.5 mm ,模拟原型中风化泥岩(20a-2)。隧道轴线位于地表下 122.5 mm 。

模型中风化泥岩分9层填筑夯实,完成第5层时(高度 160 mm)安装模拟管片的固定内筒和模拟开挖的活动外筒,然后继续填筑至设计高度 297.5 mm ,模型泥岩制备完成状态见图7。

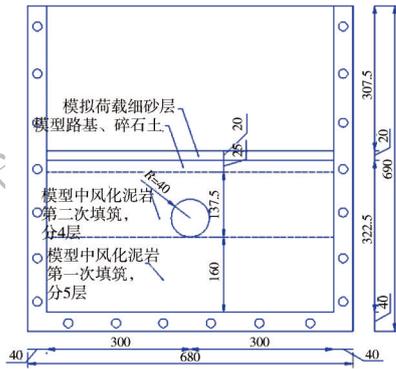


图6 模型剖面图(单位:mm)

Fig.6 Model profile (Unit: mm)

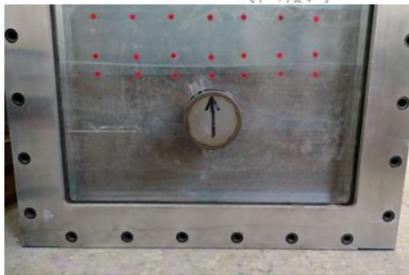


图7 模型泥岩制备

Fig.7 Preparation of mudstone in the model

模型路基、碎石土和模拟荷载砂土体均采用砂雨法制备,依据经验,模型路基制备时撒砂高度为40 cm,模型碎石土和模拟荷载砂土体制备时撒砂高度为5 cm,完成状态见图8。

(2) 测点布设与位移计安装

试验共设置编号为0~6的7个监测点(图9,图10),所用激光位移计量程为5 cm,精度为8 μm,分

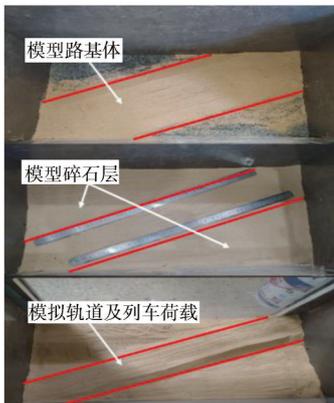


图8 模型路基、碎石土及荷载砂土体制备

Fig.8 Preparation of subgrade, gravel and load in the model

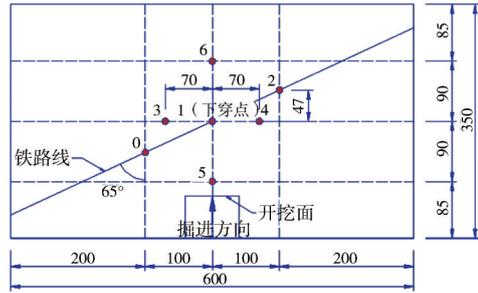


图9 测点布设示意(单位:mm)

Fig.9 Arrangement of measuring points (Unit: mm)

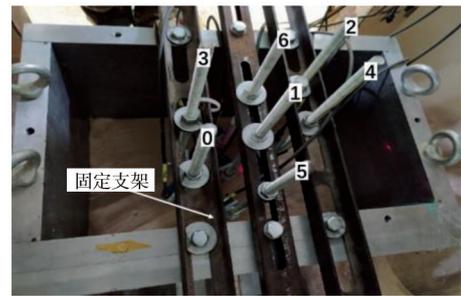


图10 激光位移计安装

Fig.10 Installation of laser displacement meters

别监测铁路沿线地表、垂直隧道轴线的横向地表和沿隧道轴线地表的沉降。测点1称为下穿点,即隧道轴线与铁路线交叉点。

4.3 试验过程

试验离心加速度与时间关系曲线见图11,试验过程主要分为3个阶段,从开始到1 429 s,离心加速度从1g增加到60g并保持不变,直到模型沉降稳定,此时沉降数据包括土体和激光位移计固定支架的变形;从1 429 s到1 596 s,保持离心加速度为60g并开挖模型,用时165 s;之后继续保持加速度60g约240 s,使完成开挖后的土体达到稳定状态;然后降低离心加速度至1g,此阶段时间为1 596~2 750 s。

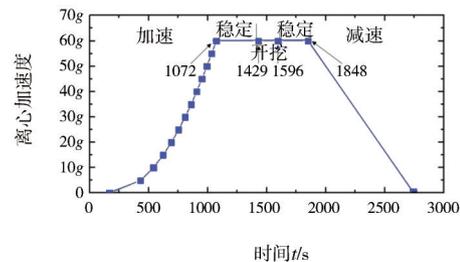


图11 离心加速度-时间曲线

Fig.11 Centrifugal acceleration-time curve

5 试验结果及分析

5.1 激光位移计量测数据

取1 429~1 750 s数据进行分析,将7个位移计量测得到的原始数据换算为原型地表位移,拟合后得到位移-时间曲线,如图12所示,图中下横轴代表离心机运行时间,上横轴代表模型开挖时间对应的实际开挖距离,纵轴代表原型地表产生的竖向位移。从整体上看,从开挖至结束地表持续沉降,最大沉降出现在隧道轴线上方地表处(测点1、5、6),但测点6在1 429 s至1 470 s时出现陡降,在稳定阶段沉降比测点1、5大很多,据分析可能是受到活动外筒推离模型箱时出现上下活动的影响。在稳定阶段,各测点沉降均达到稳定。为分析隧道连续开挖对周边地层的动态影响,分别对铁路沿线地表沉降、横向地表沉降和隧道轴线上方地表沉降的动态响应进行分析。

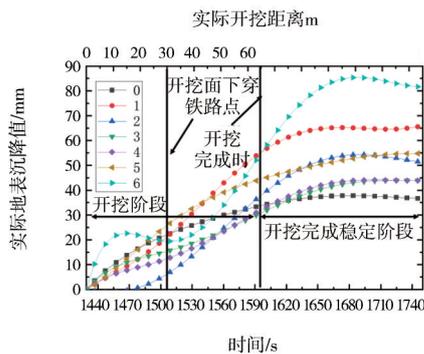


图12 激光位移计量测结果

Fig.12 Measurement results of laser displacement meter

5.2 铁路沿线地表沉降

由图13可知,地表沉降总体上呈中间大两侧小,符合常见隧道开挖引起的地表沉降槽形式,最大沉降值为65 mm,位于隧道轴线上方地表(红色曲线)。开挖面下穿铁路前,测点0、1、2依次先后产生沉降,这是因为开挖面与3个测点的水平距离依次增加;开挖距离为17 m时,测点2受到开挖影响开始出现沉降;开挖面下穿铁路后,测点0沉降速率有所趋缓,测点1沉降速率有所增加,测点2沉降速率几乎不变;开挖完成时,测点1沉降最大,测点0、2沉降基本一致;开挖完成稳定阶段,各测点在一定时间内沉降继续变大,最终稳定后测点0、1、2沉降值分别为35 mm、65 mm、55 mm。从开挖开始,测点0、1就受到开挖影响产生沉降,由于测点0与开挖面水平

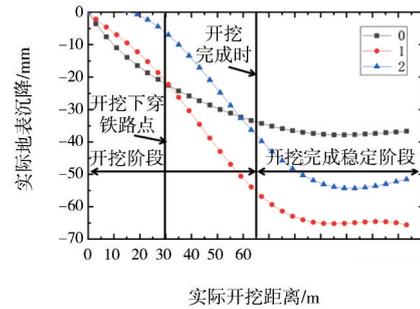


图13 铁路沿线地表沉降曲线

Fig.13 Curves of ground settlement along the railway line

距离小于测点1,所以在开挖面下穿铁路前测点0沉降始终大于测点1。稳定后,测点0、2和测点1沉降值差分别为30 mm/22 m、10 mm/20 m,最终铁路路基沉降表现为隧道右侧大于左侧。

5.3 横向地表沉降

垂直隧道轴线的横向地表沉降曲线见图14,从开挖开始,3个测点均受到影响开始产生沉降,测点3和测点4分别关于隧道轴线对称,所以沉降趋势及大小基本一致;开挖距离为20 m时,即开挖面距离下穿点10 m,测点1沉降开始大于测点3、4,虽然3个测点与开挖面水平距离一样,但由于测点1位于隧道轴线上,在此时受到的影响开始比另外2个测点大;开挖完成后,一定时间内各测点继续发生沉降,最终达到稳定,稳定后测点1、3、4沉降值分别为65 mm、45 mm、45 mm。最终测点3、4和测点1沉降值差为20 mm/14.4 m。

5.4 隧道轴线上方地表沉降

图15为隧道轴线上方地表沉降曲线,在开挖距离为0~10 m时,在测点6处的地表出现陡降,可能是受模拟开挖的活动筒的推离影响,随后变稳定,直

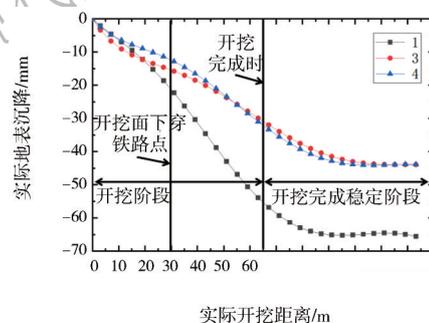


图14 垂直隧道轴线的横向地表沉降曲线

Fig.14 Transverse ground settlement perpendicular to tunnel axis

到开挖面下穿后受到影响开始产生沉降;以开挖距离40 m为节点,在此之前测点5沉降始终大于测点1,之后相反,该节点后测点5沉降稍微变缓;开挖完成时,测点1、6沉降基本一致,均大于测点5;开挖完成后一定时间内测点持续沉降,最终达到稳定,测点1、5、6稳定后的沉降值分别为65 mm、55 mm、85 mm,造成测点6沉降大的原因可能与开挖装置影响有关,若不考虑测点6开始陡降部分的沉降,则其最终沉降约为65 mm,与测点1基本一致。

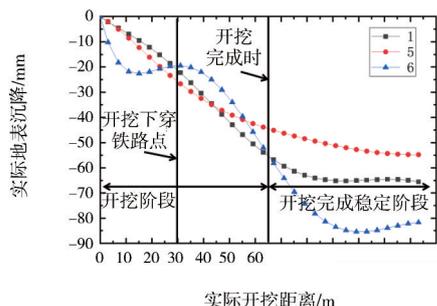


图15 隧道轴线上方地表沉降曲线

Fig.15 Ground settlement above tunnel axis

6 结论

本文对超大直径盾构隧道近距离斜下穿既有铁路进行了离心模型试验,研究盾构开挖对地表沉降

的影响,得到了如下结论:

(1) 隧道开挖面距离铁路25 m左右时,隧道开挖对铁路路基的影响开始明显增加;在开挖面距离铁路约13 m时,隧道侧的铁路路基开始受开挖影响;最终表现为隧道右侧的铁路路基沉降大于隧道左侧。

(2) 在隧道开挖至铁路路基下方之前,隧道轴线左侧地表沉降略大于右侧地表沉降;当开挖沉降稳定后,垂直隧道轴线的横向地表沉降基本关于隧道轴线对称。

(3) 因为考虑了铁路自重和列车荷载,沉降稳定时,隧道轴线上方地表沉降最终表现为有铁路路基段沉降大于无铁路路基段,表明在超大直径浅埋隧道中,轨道和列车产生的荷载对沉降有贡献。

根据本文的研究和所得结论,可为实际施工提供参考。建议如下:

(1) 开挖面下穿铁路前后,地表沉降和沉降差快速增加,此时需要严格控制盾构掘进参数以减小开挖扰动,并需要提前采取相应加固措施;

(2) 在未加固情况下,超大直径盾构隧道开挖影响范围较大,初步估计可达 $2D\sim 2.5D$ (D 为隧道开挖直径),在此范围内的铁路路基需要重点关注;

(3) 由于轨道和列车荷载对沉降有一定的影响,在下穿段施工时,确保安全的前提下应尽快通过。

参考文献

References

- [1] 王鸣涛, 吴波, 张鹏辉. 盾构隧道施工引起铁路路基沉降槽宽度系数计算方法[J]. 福建工程学院学报, 2016, 14(3): 212-217.
WANG Mingtao, WU Bo, ZHANG Penghui. Calculation Method of Width Parameters of Railway Roadbed Settlement Trough Caused by Shield Tunnel Construction[J]. Journal of Fujian University of Technology, 2016, 14(3): 212-217.
- [2] 郑余朝, 蔡佳良, 袁竹, 等. 地铁隧道下穿既有铁路近接影响分区和施工控制研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 202-209.
ZHENG Yuchao, CAI Jialiang, YUAN Zhu, et al. Partitioning of Adjacent Influence Zones and Construction Control Measures for Metro Tunnels Passing under Existing Railways[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 202-209.
- [3] 吴韬. 超大直径土压平衡盾构穿越铁路沉降分析[J]. 低温建筑技术, 2013, 35(7): 124-127.
WU Tao. Analysis of Ground Settlement Induced by Ultra-Large Diameter EPB Shield Driving under Existing Railway[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2013, 35(7): 124-127.
- [4] 齐勇. 盾构下穿既有铁路股道地基沉降控制与加固研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(3): 819-827.
QI Yong. Research on Ground Settlement Control and Ground Stabilization While Shield underneath Pass Existing Railway Track[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(3): 819-827.
- [5] 朱正国, 李兵兵, 李文江, 等. 新建铁路隧道下穿既有铁路施工引起的地表沉降控制标准研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(5): 78-82.
ZHU Zhengguo, LI Bingbing, LI Wenjiang, et al. Study on Ground Surface Settlement Control Standard Induced by Construction of New-Built Railway Tunnel Under-Passing Existing Railway[J]. China Railway Science, 2011, 32(5): 78-82.
- [6] 娄国充. 铁路隧道下穿既有路基沉降规律及控制标准研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
LOU Guochong. Study on the Settlement Law and Controlling Criteria for Railway Tunnel Under-passing Existing Subgrade [D]. Bei-

- jing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [7] 王乐明. 高铁大直径盾构隧道下穿快轨路基结构的影响分析及控制技术研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(9): 109-114.
WANG Leming. Study on Influence Analysis and Control Technology of Large Diameter Shield Tunnel Passing under Fast-track Subgrade Structure[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(9): 109-114.
- [8] 张建安, 刘发前. 超大直径盾构施工对上覆隧道的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(4): 1008-1013.
ZHANG Jian'an, LIU Faqian. Influence Analysis on the Upper Tunnel Affected by the Super-Large Shield Tunneling underneath [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 1008-1013.
- [9] 杨芝璐, 张孟喜, 肖晓春, 等. 超大直径盾构不同角度下穿对既有地铁隧道的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(3): 112-118.
YANG Zhilu, ZHANG Mengxi, XIAO Xiaochun, et al. Analysis on the Influence on the Existing Metro Tunnel by Super-large Shield Tunneling Underpassing at Different Angles[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(3): 112-118.
- [10] 张碧文. 浅埋盾构下穿高速铁路基沉降分析及控制[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(2): 109-113+126.
ZHANG Biwen. Analysis and Control of High-Speed Railway Subgrade Settlement Caused by Shallow-Buried Shield Tunnel Construction[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(2): 109-113+126.
- [11] 蔡小培, 蔡向辉, 谭诗宇, 等. 盾构下穿施工对高速铁路轨道结构的影响研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(7): 11-17.
CAI Xiaopei, CAI Xianghui, TAN Shiyu, et al. Research on the Influence of Under-Passing Shield Tunnel Construction on the Track Structures of High-Speed Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(7): 11-17.
- [12] 徐干成, 李成学, 王后裕, 等. 地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(增2): 269-272+276.
XU Gancheng, LI Chengxue, WANG Houyu, et al. Analysis of Influence of Metro Shield Tunneling Crossing underneath High Speed Railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 269-272+276.
- [13] 马可栓, 丁烈云. 大型泥水盾构隧道下穿武九铁路沉降控制技术[J]. 铁道建筑, 2008(5): 54-56.
MA Keshuan, DING Lieyun. Control over Subsidence of Wuhan-Jiujiang Railway Subgrade during Driving of Large-Cross Section Slurry Shield Tunnel Passing underneath through[J]. Railway Engineering, 2008(5): 54-56.
- [14] 肖龙鸽, 王超峰, 赵运臣. 大直径泥水盾构施工引起的地表沉降分析和对策[J]. 现代隧道技术, 2008, 45(5): 50-53+68.
XIAO Longge, WANG Chaofeng, ZHAO Yunchen. Analysis of Surface Settlements Caused by Large-Diameter Slurry Shield Driving and Countermeasures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008, 45(5): 50-53+68.
- [15] 包雨生, 李策, 梁敏飞, 等. 大直径泥水平衡盾构穿越砂性土层沉降控制分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(12): 136-140.
BAO Yusheng, LI Ce, LIANG Minfei, et al. Research on Ground Settlement Control of Large-Diameter Slurry Shield through Sandy Strata[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(12): 136-140.
- [16] 马相峰, 龚伦, 吴金霖, 等. 地铁盾构下穿多股道铁路路基变形控制优化研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(11): 85-90.
MA Xiangfeng, GONG Lun, WU Jinlin, et al. Study on Optimized Deformation Control of Shield Tunneling Crossing under Railway Subgrade[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(11): 85-90.
- [17] 柴元四. 盾构下穿对既有铁路路基影响的模型试验研究[J]. 路基工程, 2019(2): 120-124.
CHAI Yuansi. Model Test Study on Influence of Shield Tunneling Underpass on Existing Railway Subgrade[J]. Subgrade Engineering, 2019(2): 120-124.
- [18] 马险峰, 王俊淞, 李削云, 等. 盾构隧道引起地层损失和地表沉降的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 942-947.
MA Xianfeng, WANG Junsong, LI Xiaoyun, et al. Centrifuge Modeling of Ground Loss and Settlement Caused by Shield Tunnelling in Soft Ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 942-947.
- [19] 孙兵, 仇文革. 双孔盾构隧道地表位移离心机模型试验研究[J]. 铁道建筑, 2010(2): 38-41.
SUN Bing, QIU Wenge. Study on Ground Surface Settlement Induced by Shield Driving of Twin Tunnels Based on Model Test with Centrifugal Machine[J]. Railway Engineering, 2010(2): 38-41.
- [20] 张冬梅, 宗翔, 黄宏伟. 盾构隧道掘进引起上方已建隧道的纵向变形研究[J]. 岩土力学, 2014(9): 2659-2666.
ZHANG Dongmei, ZONG Xiang, HUANG Hongwei. Longitudinal Deformation of Existing Tunnel due to Underlying Shield Tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(9): 2659-2666.
- [21] 国家铁路局. 铁路路基设计规范: TB 10001—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for Design of Railway Subgrade: TB 10001—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.
- [22] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
YANG Junjie. Similarity Theory and Structural Model Test[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005.

(下转第 184 页)