

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2019.06.005

# 列车荷载对下穿盾构隧道影响的模型试验

李彦民

(中铁十八局集团第一工程有限公司,河北 涿州 072750)

**摘要:**为研究地面线路运营对下穿盾构隧道结构的影响规律,基于相似比理论建立室内大型试验模型,模拟上部列车荷载作用下土层及其内部盾构隧道结构的受力变形过程,总结变形规律。结果表明,模型试验能够较好地反映外部荷载影响下土层以及内部盾构隧道结构的受力和变形特性;地表列车荷载在土层传递过程中,同一层面上沿地面线路方向的土压力大于两侧土压力,远离线路的地层受列车荷载影响相对较小,同一竖向截面土压力变化量由上至下逐渐减小,即外部荷载对浅层土的影响明显大于深层土;盾构隧道在地表列车行驶过程中,环向出现背车面受拉迎车面受压的受力特性,呈斜向压扁,纵向应变从中间交叉点向盾构隧道两侧逐渐减小,呈下凹压弯;盾构隧道埋深越小,受地表荷载影响越显著,增大一倍埋深对应纵向应变最大值减小约 44.5%。

**关键词:**列车荷载;盾构隧道;模型试验;土压力;结构应变

**中图分类号:** U459.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2019)06-0539-06

## Model test study on the influence of train load on shield tunnel

LI Yanmin

(The First Engineering Co., Ltd. of China Railway 18 Bureau Group, Zhuozhou 072750, China)

**Abstract:** In order to study the influence law of ground line operation on the shield tunnel structure, an indoor large-scale test model was established based on the similarity ratio theory to simulate the stress deformation process of the soil layer and its internal shield tunnel structure under the upper train load, and the deformation law was summarized. Results show that the model test can better reflect the stress and deformation characteristics of the soil layer and the internal shield tunnel structure under the influence of external loads. During the transfer of surface train loads in different soil layers, the earth pressure along the surface line is greater than that on both sides on the same level, and the layer far away from the line is relatively less affected by the train load. The amount of earth pressure change in the same vertical section gradually decreases from top to bottom, that is, the external load has a greater influence on the shallow soil layer than on the deeper ones. During the running of the surface train, the shield tunnel is pulled in the circumferential direction of the back, and the bearing surface is compressed, which is obliquely flattened. The longitudinal strain gradually decreases from the middle intersection to the sides of the shield tunnel, and is concavely bent. The smaller the buried depth of the shield tunnel is, the more significantly it is affected by the surface load. Doubling the buried depth corresponds to a decrease of the maximum longitudinal strain of about 44.5%.

**Keywords:** train load; shield tunnel; model test; earth pressure; structural strain

随着城市轨道交通工程建设进程不断加快,盾构隧道建设过程中将穿越各类既有建构筑物,其中下穿地面线路已成为一种典型穿越工况,并

逐渐引起学者们的关注。地面线路运营必将对盾构隧道产生不同程度的影响,为保证盾构隧道正常使用,对地面线路列车动力荷载作用下盾构隧

道的受力及变形特性研究具有重要意义。

理论及数值研究方面,Sheng X 等<sup>[1]</sup>研究发现当列车速度接近和超过岩土临界波速时,准静态激励对邻近岩土动力响应的影响不可忽略。黄晓吉<sup>[2]</sup>建立了结构-土动力耦合计算模型,针对富水地区中浅埋隧道分析了交通荷载作用下衬砌隧道系统的动力响应。谢伟平等<sup>[3]</sup>研究了移动荷载作用下地基土的变形问题,分析了隧道-荷载自振频率、荷载移动速度和地基模型等因素对地基土动力响应的影响。刘维宁等<sup>[4]</sup>采用数值方法研究了车辆荷载下车辆-轨道-地基的动力响应。陈鑫等<sup>[5]</sup>通过所建立的车辆-轨道-隧道耦合动力学仿真模型分析了盾构隧道内部动力荷载与结构的耦合作用及影响。胡婷<sup>[6]</sup>通过数值模拟研究了车辆行驶的冲击荷载对隧道产生的应力波传播规律。贾业明<sup>[7]</sup>应用有限差分法分析了车辆荷载下不同尺寸隧道的变形和应力分布,探讨了车辆荷载作用下隧道的动力响应和破坏机理。陈行等<sup>[8]</sup>研究了高铁和地铁列车不同行驶方式对地基-隧道特性的动力响应。皮映星<sup>[9]</sup>采用 ADINA 软件研究了地面车辆交通荷载对隧道衬砌的影响,得到了隧道衬砌各部位应力和应变。申昊等<sup>[10]</sup>对车辆荷载作用下的软土路基进行了相关分析,研究了此类土层受载作用时的变形特性。

现场测试方面,符宾宾等<sup>[11]</sup>以广惠高速公路为依托,对路面行车荷载作用下隧道二次衬砌进行了监测,并观察了隧道衬砌受力特性。李安杰<sup>[12]</sup>对穿越高速公路的浅埋隧道大管棚施工进行了现场监测量测,研究了管棚的支护效果。

以上研究从不同方面对地面线路荷载作用下地层及其内部盾构隧道结构所受到的影响进行了探讨。本文以某下穿地面线地铁为背景,采用大型室内模型试验针对滨海软土地层中新建盾构隧道在既有铁路动力荷载作用下的受力变形特性进行研究,研究成果可为富水软土地区地表铁路列车运营对盾构隧道的影响与维护提供参考。

1 工程概况

1.1 工程概述

本地铁所处位置环境复杂,区间盾构隧道两侧主要为厂房、铁路、城市道路等,其中地面线路与盾构隧道穿越关系如图 1 所示,两者交角 70°。

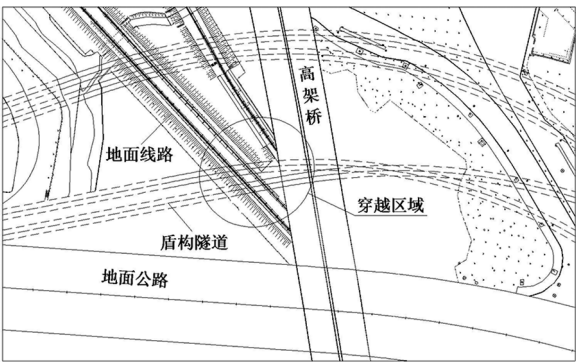


图 1 地表铁路与盾构隧道穿越关系平面图  
Fig. 1 Plan view of relationship between surface railway and shield tunnel

如图 1 所示,地铁区间下穿路基股道长度约 100 m,覆土厚度 16.1~19.6 m。路基下侧盾构地层属于沿海一带常见土层。

1.2 工程及水文地质

现场土层及性状特征如下:人工填土层表面直接出露于地表,薄厚多变;淤泥层该土层平均压缩系数为  $a_v = 1.42 \text{ MPa}^{-1}$ ,属高压压缩性土层;黏土层平均压缩系数为  $a_v = 0.39 \text{ MPa}^{-1}$ ,属中等压缩性土层;淤泥质土夹薄层砂该层平均压缩系数为  $a_v = 0.75 \text{ MPa}^{-1}$ ,属高压压缩性土层。主要软土地层从上到下的分布情况如表 1 所示。

表 1 地层参数表					
Tab.1 Soil layer parameters					
土层	平均层厚/ m	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)	压缩模 量/MPa
淤泥	11.70	1.64	10.4	5.8	1.83
黏土	4.50	1.96	29.6	13.2	5.63
淤泥质土	15.05	1.74	18.0	11.6	3.23
加权平均	30.00	1.81	17.5	10.1	3.18

场地揭示的地下水按埋藏条件包括上层滞水和承压水两种类型,主要相对隔水层包括淤泥、黏土和淤泥质土夹薄层。勘察时测得钻孔中初见水位埋深为 0.50~3.60 m,混合稳定水位埋深为 0.80~3.70 m。勘察时测得承压含水层(泥质)中砂、卵石层的稳定水位埋深为 2.18 m。典型地质断面剖面如图 2 所示。

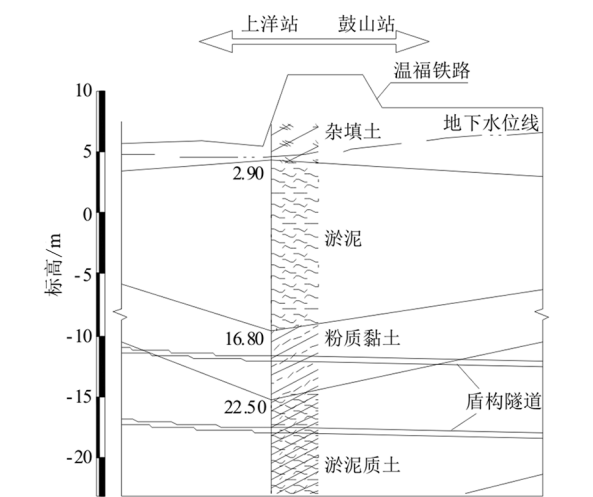


图 2 典型地质断面剖面图  
Fig.2 Typical geological section

2 试验设计

2.1 相似关系

模型试验的理论根据是相似原理,要求模型能够反映原型的情况,除形状相似外还需同类物理量(应力、应变、位移等)按比例相似。根据相似三定理及相似准则结合模型的边界条件、弹性力学平衡方程、几何方程和物理方程,采用量纲分析法模拟该物理现象,推导出该模型的相似比参数关系如下:

$$C_{\sigma} = C_L \times C_r \tag{1}$$

$$C_{\sigma} = C_E C_{\varepsilon} \tag{2}$$

$$C_{\mu} = 1 \tag{3}$$

其中,  $C_{\sigma}$  为应力相似比,  $C_L$  为几何相似比,  $C_r$  为容重相似常数,  $C_E$  为弹性模量相似比,  $C_{\varepsilon}$  为应变相似比,  $C_{\mu}$  为泊松相似比。

本次试验从便于模型制作及保证试验精度角度出发,确定尺寸相似比为 1 : 20,模量相似比为 1 : 20,加速度相似比为 1 : 1,其余参数相似关系如表 2 所示。

2.2 相似材料

为了使试验模型满足相似比要求,需对土质相似材料进行选择 and 配比。现场盾构隧道所在土层主要为淤泥质土夹薄砂层,本次试验以重晶石粉、建筑砂为骨料,膨润土为胶结剂,洗衣液和水为附加添加剂,针对该土层进行模型土配制。选取的 4 个正交设计因素 A、B、C、D 均为质量百分数,其中,骨料以 700 g 为单位 1,重晶石粉的质量/重晶石粉与建筑砂的质量之和为 A 因素,洗

衣液的质量/重晶石粉与建筑砂的质量之和/7 为 B 因素,膨润土的质量/模型土的总质量为 C 因素,水的质量/模型土的总质量为 D 因素,各因素取 5 个水平,因此试验设计中采用了 6 因素 5 水平的正交设计方案  $L_{25}5^6$ ,如表 3 所示。

表 2 各参数相似比		
Tab.2 Similarity ratio of each parameter		
项目	相关参数	相似比
尺寸相关	尺寸 $L$	1/20
	面积 $S$	1/400
	摩擦角 $\varphi$	1/1
	泊松比 $\mu$	1/1
	加速度 $a$	1/1
物理相关	密度 $\rho$	1/1
	质量 $m$	1/8 000
	时间 $t$	1/4.47
	速度 $v$	1/4.47
	模量 $E$	1/20
力学相关	应力 $\sigma$	1/20
	粘聚力 $c$	1/20
	应变 $\varepsilon$	1/1
	集中力 $F$	1/8 000

表 3 土质相似材料正交设计方案				
Tab.3 Orthogonal design scheme of similar soil materials				
水平组数	A/700	B/100	C	D
1	20	10	8	12
2	25	20	12	15
3	30	30	16	18
4	35	40	20	21
5	40	50	25	25

根据以上正交设计方案进行 25 组土工试验,通过直剪试验测得相似土的黏聚力和内摩擦角,通过固结试验测得相似土的压缩模量。最后利用正交试验数据的级差分析和方差分析,结合以上试验数据和分析结果,最终得到理想土的各成分比例为  $m(\text{重晶石粉}) : m(\text{洗衣液}) : m(\text{膨润土}) : m(\text{膨润土水}) = 14 : 3 : 12 : 15$ 。土体模型相似材料参数见表 4。

表 4 模型土与原型土参数表

Tab.4 Model soil and prototype soil parameters

项目	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	压缩模量/ MPa
模型土	1.62	1.38	9.13	0.75
原型土	1.81	17.50	10.10	3.18

本次试验将管片衬砌结构视为一个无缝的筒状完整体。盾构隧道外径 6.2 m,管片厚度 0.35 m,内径 5.5 m,幅宽 1.2 m。衬砌材料选用聚乙烯(PE)管作为隧道衬砌的相似材料,管道外径 31.5 cm,壁厚 1.3 cm,内径 29.5 cm。盾构隧道结构原型与模型参数对比如表 5 所示。

表 5 盾构隧道模型与原型参数表

Tab.5 Shield tunnel model and prototype parameters

项目	外径/cm	厚度/cm	弹性模量/GPa
模型	31.5	1.30	1.38
原型	620	35.00	35.50

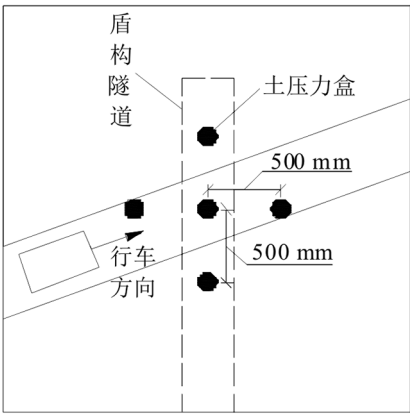
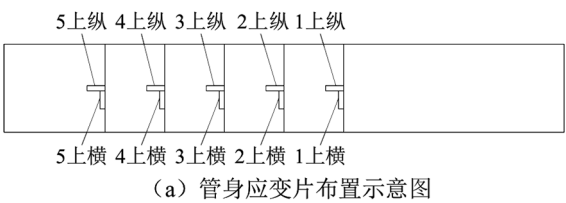
2.3 模型制作

基于相似比原理并考虑到边界条件影响,确定本次模型试验箱尺寸为长×宽×高= 3.0 m × 3.0 m × 1.6 m,盾构机模型由模型箱中间部位开挖进入,距离两侧箱壁均大于 3 倍隧道直径,满足边界条件要求。箱体采用钢板焊接而成,内部放置所配制模型土,上部架设地面线路模型。试验用盾构机械由专门设计所得,前方为切削刀盘,外套金属罩壳,刀盘通过中间传动连杆连接后侧转动盘。上述盾构管片模型架设于刀盘至转动盘外侧。开挖过程中,通过开启驱动电机带动转动盘,从而使前方刀盘旋转,再由后方千斤顶推动机械向前钻进切削钻进。

2.4 测点布置

为获得盾构隧道不同位置受地表列车荷载的影响,选取模型隧道上 5 个测量断面,每个断面在其管壁上下左右 4 个方向各设置横、纵测点贴敷应变片;同时根据不同隧道埋深埋设对应层数的土压力盒,各层土压力盒布置在模型箱正中心及前后左右 500 mm 处,每层 5 个。测点布置如图 3 所示。

根据模型箱尺寸和现场实际运营状况,确定



(b) 模型列车行驶示意图

图 3 测点布置平面图

Fig.3 Layout of measuring points

本试验的研究工况如表 6 所示。考虑 14 t 轴重列车以 45 km/h 速度驶过地表,对应模型车重量 7 kg,速度 2.8 m/s,试验中采用自振频率为 20 Hz 的平板振动器固定在轴距 40 cm 的双轴滚动平台上,如图 3 所示,沿土层表面预设行驶方向自左向右行驶,模型车的起终点均位于盾构隧道 3 倍洞径以外范围,满足边界条件要求。为使模型车荷载在土层中充分传递且作用时间充足,将其重量增加至 10 kg,移动速度控制为 1 m/s。

表 6 模型试验工况

Tab.6 Model test conditions

工况	模型埋深/ cm	压力盒 层数	层间隔/ cm	首层距拱顶 距离/cm
一	80	3	20	20
二	60	4	10	20
三	40	3	10	10

3 试验结果

3.1 土层压力分析

以埋深最小的工况三为例,列车移动荷载作用下,盾构隧道顶面以上 30 cm 土层平面土压力及中心测点各层土压力  $P$  随列车模型行驶距离  $L$



的关系如图 5 所示,图中量值均为测量值。

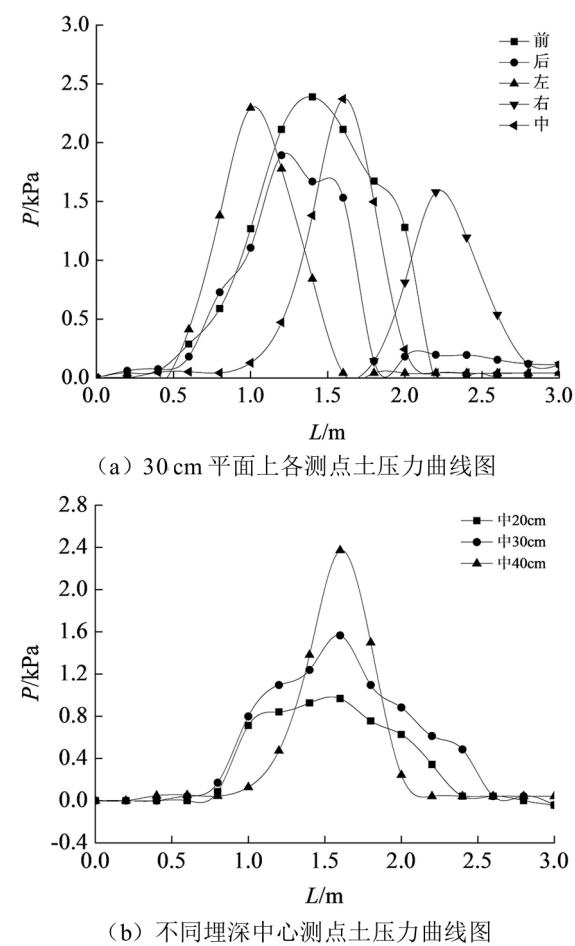


图 4 土压力分布曲线

**Fig.4 Earth pressure distribution curve**

由图 4 可知,随地表列车荷载自左向右移动过程中,左、中、右测点的土压力在列车达到相应位置处出现峰值分别为:2.295、1.580、2.372 kPa。移动荷载引起的附加压力以扩散方式向两侧传递,前后两测点土压力产生较大数值。同一纵截面的中测点在不同的覆土厚度下产生的土压力值存在差别。距离荷载最近的截面处压力值最大值为 2.372 kPa,距离荷载最远处的测点最大压力值为 0.968 kPa。

3.2 管片内力分析

以工况三为例,考虑到地面线路与盾构隧道垂直交叉,且交叉点位于隧道第 3 环测点处,实测可知列车运营引起的盾构管片第 3 环环向应变,以及下侧和右侧纵向应变较为明显,应变值  $\varepsilon$  分布如图 5 所示,其中正值为拉,负值为压。

由图 5 可知,列车自左向右行驶过程中,盾构

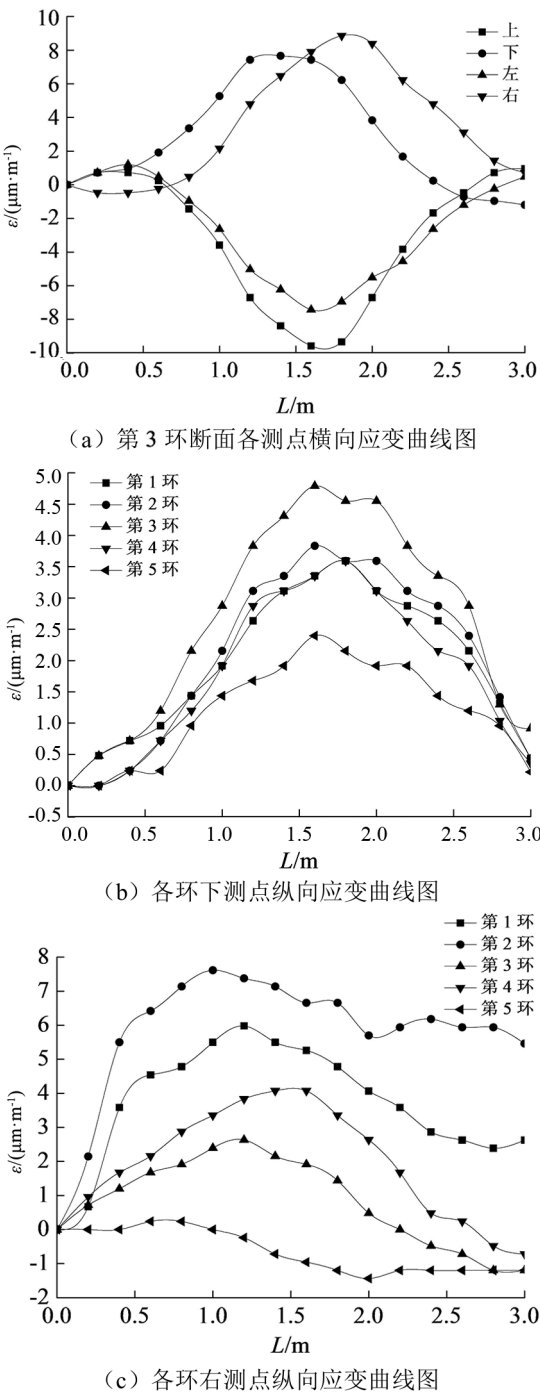


图 5 列车运营引起隧道管片应力分布图

**Fig.5 Stress distribution diagram of tunnel segments caused by train operation**

圆环右下侧背车面受拉,左上侧迎车面受压,隧道呈斜向压扁的变形特性,且随列车驶过,变形逐渐恢复。纵向应变中,下侧变形同样在第 3 环达到最大值,并沿盾构轴线向两侧依次减小,而右侧变形未体现明显规律性,主要原因是上部列车以竖

向荷载为主,横向作用具有较大随机性。

分析可知,盾构隧道结构变形以下侧纵向应变为代表,不同埋深工况对应隧道受列车荷载作用的第 3 环下部纵向应变如图 6 所示。

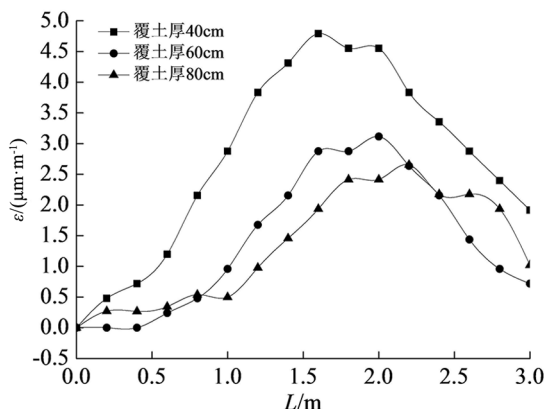


图 6 不同工况第 3 环下测点纵向应变值曲线图

Fig.6 Longitudinal strain value curves of the lower side of the third ring of different working conditions

由图 6 可知,随着盾构隧道结构埋深减小,土层附加应力传递路径变短,各环应变量所受上部土层附加荷载影响越显著。工况三埋深最小时对应应变值为  $4.79 \mu\text{m}$ ,工况一埋深最大时对应应变值为  $2.66 \mu\text{m}$ ,覆土深度增加一倍,盾构隧道纵向应变最大值减小约 44.5%。

## 参考文献:

- [1] SHENG X, JONES C J C, THOMPSON D J. A comparison of a theoretical model for quasi-statically and dynamically induced environmental vibration from trains with measurements[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 267(3): 621-635.
- [2] 黄晓吉. 交通荷载作用下饱和土体中衬砌隧道系统的动力响应研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [3] 谢伟平, 王国波, 于艳丽. 移动荷载引起的土变形计算[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 318-322.
- [4] 刘维宁. 列车荷载作用下黄土隧道的动态响应分析—现场试验与数值分析[D]. 兰州: 兰州铁道学院, 1983.
- [5] 陈鑫, 雷震宇. 盾构隧道—浮置板轨道系统振动分析[J]. 现代城市轨道交通, 2017(12): 29-34.
- [6] 胡婷. 列车移动荷载引起的路堤—地基振动与减振[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [7] 贾业明. 车荷载作用下浅埋管道性能的数值分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2011.
- [8] 陈行, 晏启祥, 黄希. 列车振动荷载作用下高速铁路近距地铁平行隧道的动力响应特性分析[J]. 铁道标准设计, 2017(6): 116-119, 130.
- [9] 皮映星. 交通荷载下浅埋公路隧道衬砌的数值分析[J]. 科学咨询(科技·管理), 2013(12): 77-78.
- [10] 申昊, 唐晓武, 牛犇, 等. 车辆荷载作用下软土地基塑性变形的计算[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3561-3566.
- [11] 符宾宾, 代刚. 软弱围岩下双连拱隧道的衬砌受力分析[J]. 四川建筑, 2005, 25(2): 88-90.
- [12] 李安杰. 浅埋偏压铁路隧道信息化监测施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2014(S1): 208-211, 230.

## 4 结论与建议

1) 在地表列车荷载作用下,同一土层沿列车行进方向上土压力依次变大,两侧土压力逐渐减小,即土压力在地层中呈现斜向扩散特性。且同一竖向截面土压力由上至下依次衰减,从而引起盾构隧道应变在距离地面线路最近的断面较其他位置明显。

2) 从受力角度而言,地铁线路规划时,应尽量加大盾构隧道与地面线路间距离,并增加两者轴线交角,从而在量值和作用范围两方面减小地表动力荷载对下部盾构隧道的影响。

3) 地表列车行驶过程中,盾构隧道环向出现背车面受拉迎车面受压的受力特性,圆环呈现斜向压扁的变形状态。纵向变形由中间交叉点向隧道两侧逐渐减小,呈现下凹式受压变形。盾构隧道结构埋深越小,在地表荷载作用下变形越显著,埋深量增加一倍,对应纵向应变最大值减小约 44.5%。

4) 从变形角度而言,盾构下穿地面线路施工时,若两者间距离较小,可考虑一定程度上加固地面线路下方土体,在保证路基稳定性的前提下,减少由于线路动荷载在土层中的传递引起的下部盾构隧道非均匀环向变形现象。