

DOI: 10.11779/CJGE201707002

# 地表超载作用下盾构隧道劣化机理与特性

黄大维<sup>1</sup>, 周顺华<sup>\*2</sup>, 赖国泉<sup>3</sup>, 冯青松<sup>1</sup>, 刘林芽<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 江西 南昌 330013; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;

3. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 对某软土地区地铁盾构隧道进行了调研与分析, 发现盾构隧道在现有计算理论所允许的地表超载作用下极易发生横向变形超限, 并引发管片纵缝接头破损与渗漏水, 对此展开了模型试验、数值仿真及理论分析。研究表明: 地表均布超载导致的隧道附加竖向土压力并不是均匀分布, 且在隧道中心正上方一定范围内要大于地表均布超载; 隧道的穿越土层越软弱, 地表超载导致的隧道周围附加土压力对隧道结构抵抗横向变形越不利; 隧道发生横椭圆变形过程中, 管片纵缝接头是管片环中的最薄弱部位。最后提出了软土地区盾构隧道采用“刚性衬砌”的设计理念, 并给出了加大管片纵缝接头强度与刚度的建议。

**关键词:** 盾构隧道; 地表超载; 模型试验; 管片接头; 劣化

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)07-1173-09

**作者简介:** 黄大维(1984-), 男, 博士, 讲师, 主要从事地下铁道与岩土工程相关研究。E-mail: 1110604@tongji.edu.cn。

## Mechanisms and characteristics for deterioration of shield tunnels under surface surcharge

HUANG Da-wei<sup>1</sup>, ZHOU Shun-hua<sup>2</sup>, LAI Guo-quan<sup>3</sup>, FENG Qing-song<sup>1</sup>, LIU Lin-ya<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center of Railway Environmental Vibration and Noise, Ministry of Education, East China Jiaotong University,

Nanchang 330013, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai

201804, China; 3. China Railway Northwest Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The metro shield tunnel in soft soil area is investigated and analyzed. It is shown that overlarge transverse deformations of the shield tunnel are induced due to the surface surcharge, which is an allowable magnitude according to the current computational theories, and it brings about problems of breakage and leakage of longitudinal segment joints. Through the scaled model tests, numerical simulations and theoretical analyses, the research results show that the additional vertical earth pressure on shield tunnel induced by the uniform surface surcharge is not the uniform pressure, and the vertical earth pressure on the top of shield tunnel is larger than the uniform surface surcharge. The additional earth pressure around the shield tunnel caused by surcharge is more negative for preventing tunnel deformation as the tunnel passes through softer soil. The longitudinal segment joints are the weakest points on the segment ring in the process of transverse deformation. Finally, the design concept of rigid linings for shield tunnels in soft soil areas is proposed, and some suggestions for enhancing the strength and stiffness of longitudinal segment joints are given.

**Key words:** shield tunnel; surface surcharge; model test; segment joint; deterioration

## 0 引言

对某软土地区运营期地铁盾构隧道调研与分析表明, 在地表超载作用下盾构隧道极易发生横向变形超限, 并由此引发管片接头破损与渗漏水。隧道结构的变形与内力是由隧道结构特性与周围地层特性共同决定的<sup>[1]</sup>, 因此, 对于特定的地层与盾构隧道结构, 有其特定的病害成因机理与结构劣化特性。盾构隧道在设计过程中, 为减小隧道结构的内力以减少管片配筋, 通过减小的盾构隧道横向刚度, 以加大隧道结构

横向变形, 从而使隧道获得水平抗力, 即所谓的“柔性衬砌”设计<sup>[2]</sup> (反之为“刚性衬砌”, 即隧道结构横向刚度较大, 在土压力作用下隧道横向变形较小, 但“柔性衬砌”与“刚性衬砌”并无定量的界定, 均为相对概念); 同时为了标准化施工, 对于同一环管片, 所有的管片纵缝接头采用近似相同的设计。然而, 上

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51608200, 51478353, 51368020)

收稿日期: 2016-06-27

\*通讯作者 (E-mail: zhoushh@tongji.edu.cn)

述设计理念用于软土地区盾构隧道是否合理有待进一步分析。

本文对某软土地区盾构隧道在地表超载作用下导致的结构病害进行了调研与分析,并通过缩尺模型试验、数值仿真及理论分析,对地表超载作用下盾构隧道结构劣化机理与特性进行了分析,并提出了软土地区盾构隧道新的设计理念及相应的结构病害防治建议。论文成果可为已建盾构隧道的管控提供指导,并为新建盾构隧道的设计提供参考与借鉴。

## 1 地表超载导致的盾构隧道病害分析

### 1.1 地表超载导致的隧道病害案例

某软土地区盾构隧道采用通缝拼装,管片宽度为 1.2 m。管片采用高强混凝土模筑,其强度等级为 C55。单环隧道由 6 块管片组成,其分块方式及尺寸如图 1 所示。管片环的环向与纵向均采用 M30 直螺栓连接,其机械性能等级为 5.8 级。该软土地区地铁盾构隧道运营期结构变形与服役状态调研与分析表明,在地表堆载作用下隧道极易发生横断面变形超限,并由此引发隧道结构破损与渗漏水。通过与其他相同设计埋深的盾构隧道进行类比,并结合现有分析计算理论可知,绝大部分地表超载均为现有计算理论所允许的地表超载。类似的工程问题在以往研究中均已证实<sup>[3-8]</sup>,以下通过 4 个工程案例进行说明(工程案例表述均为地铁公司提供的原始材料整理而成,存在个别信息不全现象)。

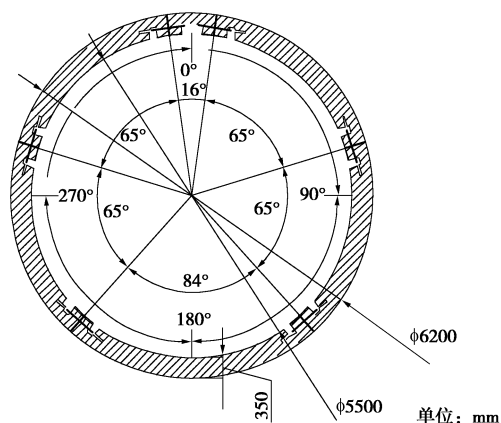


图 1 盾构隧道示意图

Fig.1 Diagram of shield tunnel

案例一：某区间盾构隧道顶部埋深为 7~16.6 m。2010 年 5 月中旬巡视发现地表有约 7 m 高的堆土，其横向与纵向约各为 300 m，导致上行线 560~600 环的隧道顶部纵缝张开，混凝土块脱落，螺栓明显露出；隧道结构内侧腰部纵缝处混凝土挤压开裂，渗漏水明显。隧道的水平向直径变形最大可达 194 mm，竖向直径变形最大可达 147 mm，超出了盾构隧道结构

施工验收变形收要求(施工验收规范的椭圆度规定为 31 mm)。

案例二：某区间盾构隧因地表堆土厚度约 4.1 m 而发生了较大的结构收敛变形(累计的最大水平直径变形达到 128 mm)，并导致管片接缝渗漏水、漏泥漏砂和管片碎裂现象。根据持续监测数据分析表明，结构变形具有继续恶化的趋势。在地表堆载作用下，线路同时发生了约 15 mm 的沉降。

案例三：某区间盾构隧道在车站的一端，隧道穿越土层为④层淤泥质黏土，紧邻隧道的下卧土层总体为⑥层粉质黏土，紧邻隧道的上覆土层为④层淤泥质黏土与③层淤泥质粉质黏土，隧道顶部埋深为 8~12 m。在地表堆土作用下，隧道结构发生了严重的横椭圆变形，并导致盾构隧道发生了破损。

案例四：某地铁区间盾构隧道在施工完成后，且线路未投入运营，因地表堆土约 5~6 m(堆土范围为线路纵向约 86.4 m，垂直线路方向约 50 m)，导致隧道结构发生了较大的横椭圆变形，堆土段的病害发生位置如图 2 所示。隧道的最大累计椭圆度为 103.8 mm，明显大于盾构隧道完成施工后的对椭圆度的要求。

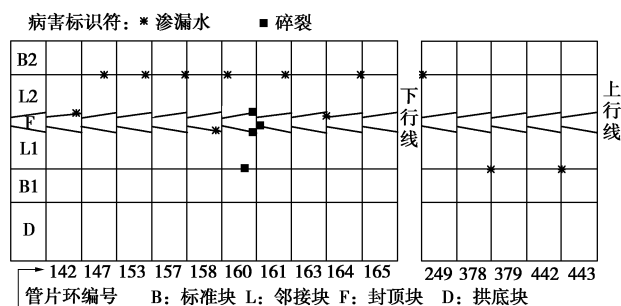


图 2 隧道结构病害位置示意图

Fig.2 Diagram for location of structural disease of tunnel

### 1.2 地表超载导致的隧道病害特点

从上述案例及其他有据可查的资料分析来看，该软土地区通缝拼装盾构隧道在地表超载作用下极易发生横椭圆变形超限，甚至发生了结构破损与渗漏水。盾构隧道发生结构变形与病害主要呈现出如下特点：

(1) 发生病害的盾构隧道主要穿越极软弱土层，其土体具有含水率高、压缩模量小等特点，含水率为 45%~53%，压缩模量为 2~4 MPa。

(2) 盾构隧道拱顶部纵缝接头易出现螺栓外露(如图 3(a)所示)，当变形进一步加大时将导致封顶块发生管片棱角破损(如图 3(b)所示)，并同时发生结构渗漏水。

(3) 盾构隧道在拱腰部的纵缝接头部位极易发生接头渗漏水(如图 3(c)所示)，当变形大到一定程度时，拱腰部的纵缝接头将发生内侧混凝土碎裂。

(4) 拱底部纵缝接头在隧道横断面变形过程中极

少发生结构破损与渗漏水。

上述关于管片纵缝接头的病害规律通过案例四中隧道结构病害统计结果也可以看出, 如图 2 所示。

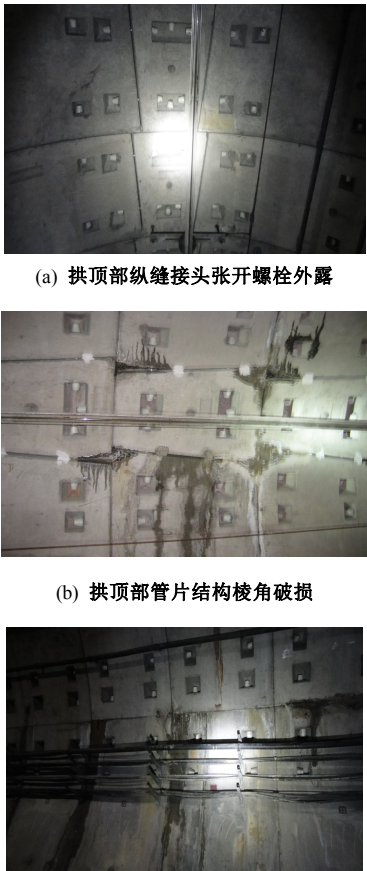


图 3 盾构隧道结构病害

Fig. 3 Disease of shield tunnel

2 盾构隧道变形与纵缝接头内力分析

地表超载作用下盾构隧道发生横椭圆变形与管片接头病害, 主要与超载过程隧道周围土压力及隧道结构内力变化有关。然而, 隧道周围的土压力进行现场量测十分困难, 且管片纵缝接头内力复杂, 为探明地表超载作用下盾构隧道变形机理与结构劣化特性, 采用缩尺模型试验、数值仿真及理论分析相结合开展相关研究。

2.1 室内模型试验

综合权衡试验场地条件、试验尺寸大小对试验测试误差的影响, 以及试验的时间成本与经济成本, 确定了室内模型试验以几何相似常数 $C_l=10$  (对应的几何相似比为 1:10)和重度相似常数 $C_\gamma=1$ 作为相似设计基本量。根据模型试验相似基本定理, 并按弹性力学问题推导模型试验的相似常数, 得到了各物理量的相似常数如表 1 所示。根据图 1 的原型隧道结构, 在满足几何相似比时, 模型隧道外径为 620 mm, 宽度为 120 mm, 而模型隧道管片厚度以满足外力作用下产生相似的变形作为相似条件进行设计, 模型隧道管片环采用弹性模量为 2.7 GPa 的尼龙材料进行加工, 其厚度为 38.3 mm。隧道模型管片环纵缝接头设计见文献[9], 即采用开槽模型接头模拟管片纵缝接头。模型隧道管片环如图 4 所示。



图 4 模型隧道管片环

Fig. 4 Segment rings for shield tunnel model

本次模型试验采用细砂模拟隧道上覆土层与下卧土层, 采用橡胶粒模拟隧道穿越土层, 即模拟盾构隧道穿越软弱地层。因实际的土体的压缩模量是以压力为 100~200 kPa 时对应的压缩模量, 考虑到模型试验的相似比问题, 理论上模型土应该取压力为 10~20 kPa 时的压缩模量保持相似关系。为此, 通过改变压缩试验时的每级加载的质量, 即每级加载为原正常试验加载的 1/10。分别对细砂、橡胶粒进行了压缩试验, 得到细砂与橡胶粒在压力 10~20 kPa 时, 细砂的压缩模量约为 2.65 MPa, 橡胶粒的压缩模量约为 0.35 MPa, 对应代表的原型土的压缩模量分别为 26.5 MPa 与 3.5 MPa, 因此, 隧道穿越土层符合原型土压缩模量为 2~4 MPa。模型土的参数如表 2 所示。本次模型试验主要是分析地表超载作用下, 穿越软土地层盾构

表 1 模型试验相似常数

Table 1 Similarity constants for model tests

物理量	相似关系	相似常数	物理量	相似关系	相似常数
几何尺寸	基本量	10	弯矩	$C_M = C_\gamma \cdot C_l^4$	10000
重度	基本量	1	轴力	$C_N = C_\gamma \cdot C_l^3$	1000
应变	$C_\epsilon$	1	弯曲刚度	$C_{EI} = C_l^4$	10000
应力	$C_\sigma = C_l \cdot C_\gamma$	10	轴向刚度	$C_{EA} = C_l^3$	1000
位移	$C_\delta = C_l$	10	剪切刚度	$C_{GA} = C_l^3$	1000
弹性模量	$C_E = C_l$	10			

隧道的顶部附加竖向土压力，试验时采用橡胶粒模拟隧道穿越土层，其压缩模量接近软土相似比的要求，但其重度不满足相似比的要求，即其重度偏小。因本次试验的目的是分析地表超载导致的隧道竖向土压力增量，因此，穿越土层的重度不满足相似比要求对分析地表超载导致的盾构隧道顶部附加竖向土压力影响较小。同理，隧道上覆土层与下卧土层的力学性能不满足相似比要求对分析地表超载导致的盾构隧道顶部附加竖向土压力影响也较小。

模型槽长为 3 m (约为  $5D$ ,  $D$  为模型隧道的外径); 宽为 1.1 m (约为 9 环隧道模型管片环的宽度); 高度为 2 m (约为  $3D$ )。模型试验时，将隧道下卧土层铺设约为  $0.5D$  的细砂，再将模型隧道吊入模型槽内，随后采用逐层填土方式进行，每层厚度约为  $0.25D$ ，每加完一层土静置时间约为 24 h，即让变形近似稳定。当填土至模型槽顶部后，采用砂袋进行逐层堆载。模型试验如图 5 所示。

表 2 土体参数

Table 2 Parameters of soils

模型土	重度 ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力 / $\text{kPa}$	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )
细砂 (含水率 7.0%)	18.0	10.137	29.20
橡胶粒 (含水率 1%)	7.1	14.570	28.63



图 5 模型试验现场

Fig. 5 Model test field

图 6 (a) 为模型隧道变形实测结果，在隧道上部覆土厚为  $2.75D$  时，水平变形为 16.9 mm，竖向变形为 -19.1 mm，即隧道呈现出横椭圆变形，其椭圆度为  $58D\%$ ，远大于施工验收规范规定的  $5D\%$ 。图 6 (b) 为隧道顶部不同覆土厚度时对应隧道顶层位置的竖向土压力 (所有土压力盒布设在与第 5 环 (共 9 环) 管片的顶部及同一高度的水平位置，由于土压力盒的数量有限，未对称布置土压力盒)。从图中可以看出，在隧道上部逐层堆土的过程中，隧道顶层位置的竖向土压力出现了明显的分布不均匀现象，即出现了“竖向土压力集中”。通过土体中埋设土体沉降刻度板，并与固定在模型槽有机玻璃上的刻度尺对比即可读出土体的沉降，隧道顶层位置 (与上述土压力盒位于同一高

度) 的土体沉降量如图 6 (c) 所示，从图 6 (c) 可以看出，隧道上部逐层堆土过程中，隧道顶部土层出现了明显的不均匀沉降，即隧道正上方土体沉降少，其两侧的土体沉降多。分析表明，导致隧道顶部土层沉降量不一致主要是因为隧道结构的竖向压缩量小于隧道两侧穿越土层的竖向压缩量，也正是因为隧道上覆土层出现了不均匀沉降，导致土体间产生剪应力，从而使堆土荷载向下传递过程中向隧道上部转移，使隧道顶部出现“竖向土压力集中”。由此可见，地表均布超载导致的附加竖向土压力并不是均匀分布。

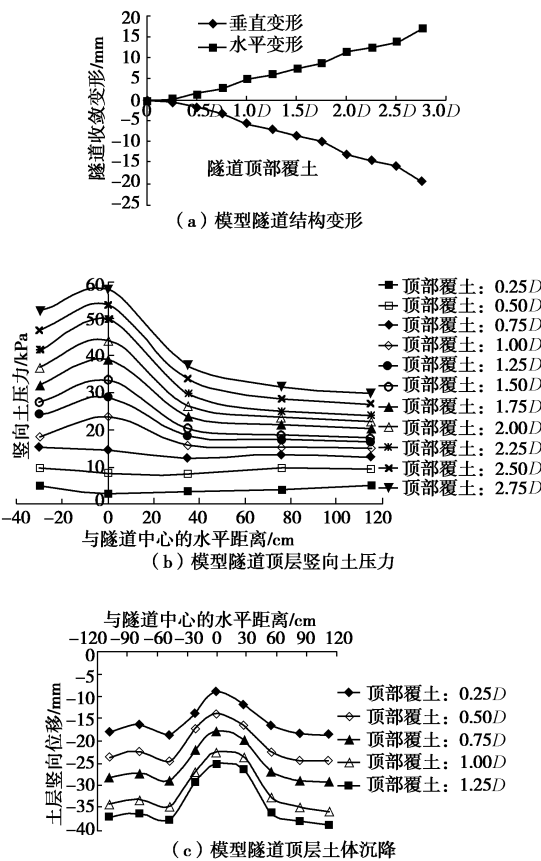


图 6 模型试验测试结果

Fig. 6 Measured results for model tests

2.2 数值仿真分析

利用 PLAXIS 有限元软件，根据相似关系，建立了室内缩尺模型试验对应的原型有限元数值模型。有限元模型中管片采用板单元，管片纵缝接头参考先前发表的文献[9]所述的做法，即采用局部抗弯刚度折减予以设计，数值模型中纵缝接头参数如表 3 所示。管片与土的接触面设置了界面虚拟厚度  $\delta_{\text{inter}}$  为 0.1 m，强度折减因子  $R_{\text{inter}}$  为 0.66 (刚性时强度折减因子  $R_{\text{inter}}$  为 1)。假设隧道周围土体为压缩模量 2.5 MPa 的软土，隧道顶部埋深为  $1.5D$  ( $D$  为隧道直径)，即隧道上覆土层厚度为 9.3 m，隧道下卧土层厚度取约为  $5D$ ，即隧道下卧土层厚度为 30 m。数值模型按室内模型试验



相同的加载方式时, 图 7 (a) 与图 7 (b) 分别为隧道变形与隧道顶层位置的竖向土压力。由表 1 可知, 应力相似常数与位移相似常数均为 10, 图 7 (a)、(b) 分别与图 6 (a)、(b) 比较可知, 数值模型计算结果与室内模型试验实测结果总体保持良好的相似关系, 由此可见, 采用本数值模型展开数值分析是可行的。图 7 (b) 与图 6 (b) 比较可知, 数值模型隧道顶部的竖向土压力相对室内模型试验的 10 倍还稍有偏大, 主要与室内模型试验时模型槽的边界效应有关。

表 3 隧道有限元模型的纵缝接头参数

Table 3 Parameters of longitudinal segment joints for finite element model tunnel			
接头位置	接头刚度 $/(N \cdot M \cdot rad^{-1})$	折减区中心角 $/(^{\circ})$	折减区模量 $/MPa$
拱顶部	$3.4 \times 10^7$	4	2967.9
拱腰部	$2.5 \times 10^7$	4	2231.7
拱底部	$5.0 \times 10^7$	4	4199.4

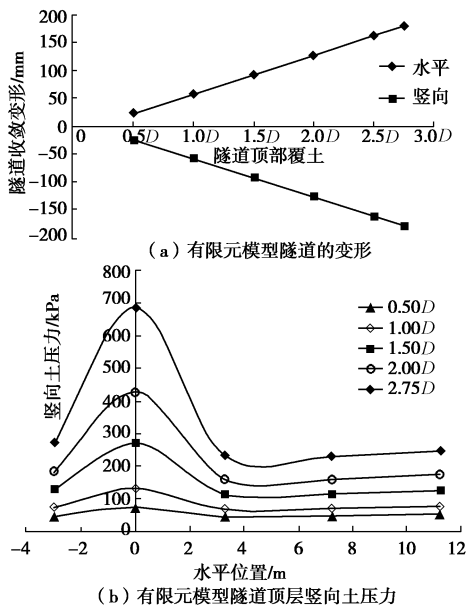


图 7 有限元仿真结果

Fig. 7 Finite element simulation results

为了分析地表超载作用下隧道穿越土层对隧道周围附加土压力的影响, 通过对上述数值模型改变参数, 即隧道上覆土层、穿越土层及下卧土层的厚度分别为 12, 6.4, 30 m。地表堆土按 2 m 考虑, 并换算为均布荷载 (土体重度取为 18 kN/m<sup>3</sup>, 超载对应的均布荷载为 36 kPa)。隧道各土层情况及土体力学参数分别如表 4, 5 所示。

通过数值仿真, 分别得到了在 36 kPa 的地表均布超载作用下导致的隧道附加变形与隧道周围附加土压力。在地表超载作用下, 方案 1 与方案 2 的隧道附加竖向收敛变形分别为 -11.10, -5.90 mm, 附加水平收

敛变形分别 10.87, 5.73 mm。由此可见, 在相同的地表超载作用下, 隧道穿越土层越软弱, 地表超载导致的隧道结构附加横椭圆变形越大。

表 4 地层中的土体情况

Table 4 Information of different soil grounds			
方案	上覆土层	穿越土层	下卧土层
1	①	①	②
2	①	②	②

表 5 各土体的力学参数

Table 5 Parameters of soils					
土体编号	$\gamma / (kN \cdot m^{-3})$	$c / kPa$	$\varphi / (^{\circ})$	$E / MPa$	$\mu$
①	17.6	9	16.5	3.36	0.26
②	18.5	4	30.5	12.26	0.31

图 8 (a) 为两种方案中地表超载导致隧道上半部分的附加竖向土压力 (土压力取自紧贴隧道外壁的土体)。若按现有分析理论, 软土地区盾构隧道的竖向土压力直接取为上覆土重 (即按土柱理论进行计算), 地表超载直接换算为相应的隧道上覆土层, 因此, 由地表均布超载导致的隧道附加竖向土压力则等于地表超载。然而, 从图 8 (a) 可以看出, 地表均布超载为 36 kPa 时, 隧道结构受到的附加竖向土压力并不是传统理论认为的呈均匀分布状态, 而是在隧道中心正上方一定范围内大于 36 kPa, 而两侧小于 36 kPa。两种方案比较可知, 隧道穿越土层越软弱, 地表超载导致的隧道中心正上方一定范围内的附加竖向土压力越大, 也即地表超载导致的“隧道附加竖向土压力集中”现象越明显。图 8 (a) 中竖向土压力分布曲线在隧道中心正上方出现了凹陷, 主要与封顶块管片纵缝接头转动变形导致隧道在顶部出现了不圆滑变形有关, 从而影响到隧道与地层的相互作用力。

地表超载导致的附加水平土压力由两部分组成, 一是竖向土压力增加导致的侧向水平地层压力 (即:  $\sigma_h = \lambda \sigma_v$ ,  $\sigma_h$  为侧向水平地层压力;  $\lambda$  为侧压力系数;  $\sigma_v$  为竖向土压力), 另一部分是隧道水平直径增大导致的水平抗力 (即:  $P = ky$ ,  $P$  为水平抗力;  $k$  为水平抗力系数;  $y$  为隧道在相应位置对侧部土体的水平向挤压量)。图 8 (b) 为地表超载导致隧道侧部的附加水平土压力 (土压力取自紧贴隧道外壁的土体), 从图中可看出, 由于模型隧道并不是采用均质圆环模型, 而是考虑了管片纵缝接头, 因此隧道变形并不是圆滑的, 导致的隧道水平抗力并非圆滑; 此外, 由于图 8 (a) 中隧道中心正上方竖向土压力有“凹陷”现象, 导致对应的侧向水平地层压力从上往下也呈现出“先小后大再小”的趋势。由两种不同的隧道穿越土层方案比较可知, 隧道穿越土层越软弱, 地表超载导致的

隧道附加水平土压力越小。由附加水平土压力组成可知,当隧道穿越软弱地层时,土体的水平抗力系数越小<sup>[10-13]</sup>,对隧道产生水平抗力不利;同时隧道穿越土层越软弱,地表超载导致的“隧道附加竖向土压力集中”现象越明显,对应的隧道侧向水平地层压力将出现上大下小的趋势,对隧道抵抗横向变形更为不利。

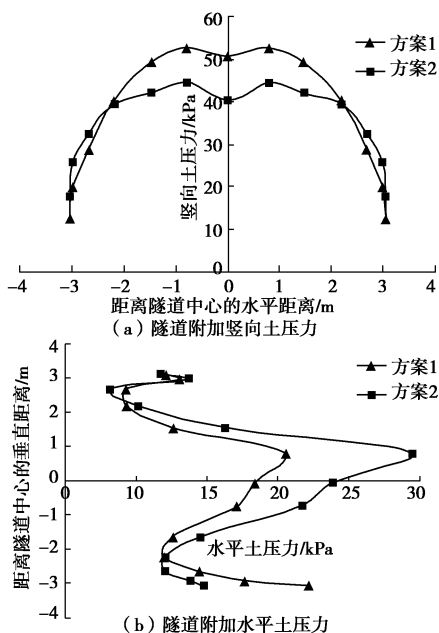


图8 隧道附加土压力

Fig. 8 Additional earth pressures on tunnel

由两种不同的隧道穿越土层方案的隧道附加竖向土压力与水平土压力的比较可知,地表超载作用下,隧道穿越土层越软弱,对隧道结构抵抗横椭圆变形有两方面的不利:①超载导致的隧道中心正上方一定范围内的附加竖向土压力越大;②超载导致隧道中心正侧部一定范围内的附加水平土压力越小,而隧道发生横椭圆变形正是竖向土压力大于水平土压力所致。同时也说明,由于软土地层的水平地层抗力系数小<sup>[10-13]</sup>,通过隧道发生横向变形来增加水平抗力,以减小隧道弯矩从而减少隧道结构配筋(即“柔性衬砌”设计)的设计理念在软弱地区中并不合理。因此,在软土地区盾构隧道设计时,建议加大隧道结构的刚度。

### 2.3 管片纵缝接头内力与变形分析

由于实际工程中的管片纵缝接头位置的应力复杂,加上在数值仿真中管片纵缝接头采用局部刚度折减予以模拟<sup>[9]</sup>,在此利用数值模型中的方案1,隧道上覆层采用分层堆土方法进行,通过数值仿真得到管片纵缝接头位置的弯矩与轴力,再参照文献[14, 15]的计算方法得到螺栓的拉力、受压区混凝土应力及管片纵缝接头张开量。因为假设管片环处于正常使用阶段,因此在结构受力过程中认为混凝土与螺栓均处于

理想的弹性状态。根据管片设计参数可知:管片幅宽 $b$ 为1.2 m,有效接触高度 $h$ 为25 cm;拱顶部与拱底部接头的受压区外缘至管片距离 $h_1$ 为10 cm,螺栓受拉有效高度 $d$ 为15 cm;拱腰部接头受压区外缘至管片距离 $h'_1$ 为15 cm,螺栓受拉有效高度 $d'$ 为10 cm;螺栓总有效截面积 $A_1$ 为1413.7 mm<sup>2</sup>,螺栓有效长度 $l_b$ 为40 cm,管片与螺栓的弹性模量 $E_c$ 和 $E_s$ 分别为 $3.55 \times 10^4$  MPa和 $2.0 \times 10^5$  MPa,螺栓预紧力 $T_0$ 为100 kN(根据单环足尺试验结果反分析所得)。图9为隧道在逐层堆载作用下的弯矩分布总体趋势图,若弯矩以外侧受拉为正,内侧受拉为负,则得到各接头在不同隧道上覆土厚度时的弯矩如图10所示。

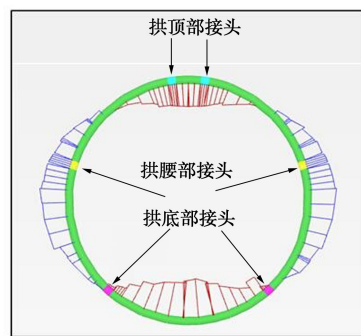


图9 隧道弯矩总体分布图

Fig. 9 Distribution diagram of bending moments on segment ring

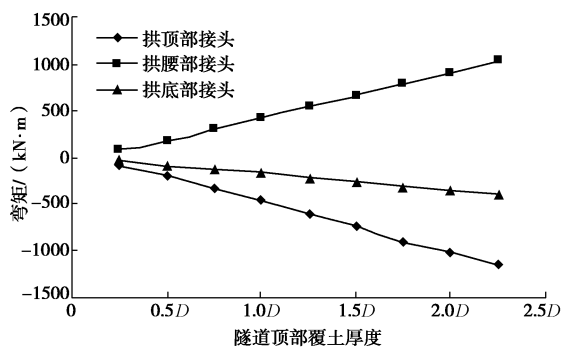


图10 不同覆土厚度时接头处弯矩

Fig. 10 Bending moments on segment joint under surcharge

由图9, 10可知,拱顶部接头与拱腰部接头刚好位于弯矩较大的位置;而拱底部接头所处位置接近正负弯矩拐点,因此拱底部接头在同一阶段承受的弯矩最小。图11为不同隧道上覆土厚度时各接头的螺栓拉力,尽管同一阶段拱顶部接头弯矩绝对值稍大于拱腰部接头弯矩,但由于拱腰部接头属于外张接头,相比拱顶部接头而言,螺栓距离受压区外边缘的距离要小,因此在同一阶段,拱腰部接头的拉力要稍大于拱顶部接头拉力,但总体比较接近。在同一阶段,拱底部接头螺栓拉力最小,且远小于拱顶部与拱腰部接头的螺栓拉力。

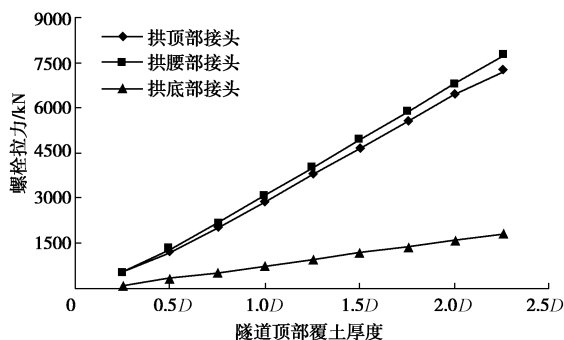


图 11 不同覆土厚度时接头螺栓拉力

Fig. 11 Axial forces on segment joint bolts under surcharge

图 12 为隧道顶部不同覆土厚度时管片纵缝接头张开角,从图中可以看出,同一阶段,拱腰部接头的张开角最大,其次分别为拱顶部接头与拱底部接头。拱腰部接头属于外张接头,且管片采用外侧设置单道防水密封垫,因此,在地表超载过程中,拱腰部接头最容易发生渗漏水。本文所得的计算结果与文献[6]通过数值仿真及几何简易分析方法所得结果较为接近。

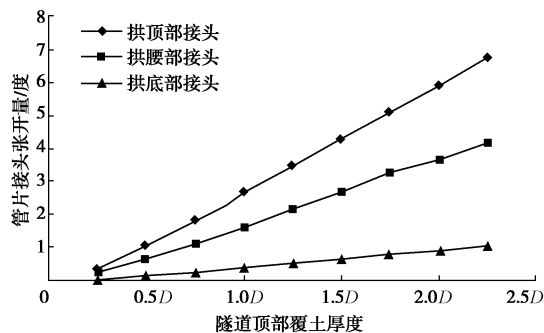


图 12 不同覆土厚度时接头张开量

Fig. 12 Opening of segment joints under surcharge

图 13 为不同上覆土厚度时接头部位的轴力,图 14 为接头受压区混凝土的应力。从图 14 可知,拱腰部接头受压区混凝土压应力最大,主要原因如下:①拱腰部接头轴力最大(由图 13 可知);②拱腰部接头位于弯矩较大的位置;③拱腰部接头为外张接头,螺栓距离受压区外边缘的距离要小于其他接头,即轴力、弯矩及接头构造特点共同导致拱腰部接头受压区混凝土应力最大。而拱底部接头受压区混凝土应力最小,这也是隧道在变形过程中,拱底部接头极少发生破损的原因。

对于受压区混凝土应力,虽然拱顶部接头小于拱腰部接头,但由于拱顶块管片为封顶块,管片采用纵向插入式,为锥形设计,且从图 9 可以看出,拱顶部接头位于弯矩较大位置,因此,在隧道发生横椭圆变形时,封顶块管片与其邻接块管片之间的接头应力复杂,极易导致接头棱角应力集中,从而导致隧道发生横椭圆变形过程中拱顶部接头出现管片棱角破损(如图 3(b)所示)。

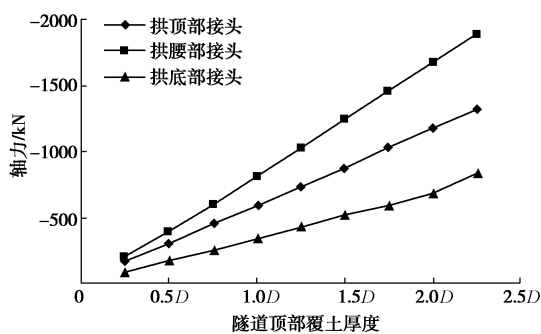


图 13 不同覆土厚度时接头部位的轴力

Fig. 13 Axial forces for segment joint under surcharge

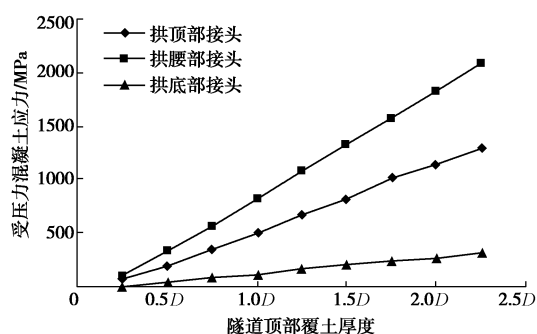


图 14 不同覆土厚度时接头受压区混凝土应力

Fig. 14 Compressive stresses on segment joint concrete under surcharge

### 3 盾构隧道劣化特性与病害防治

#### 3.1 地表超载作用下盾构隧道劣化特性

根据工程案例、缩尺模型试验、数值仿真分析可知,由于软土地层的地层特性,以及该地区盾构隧道的管片分块方式、拼装方法、管片接头的构造特性等,决定了该软土地层的通缝拼装盾构隧道在地表超载过程中隧道的劣化特性,主要如下:

(1) 工程案例分析表明,地表超载作用下软土地层盾构隧道极易发生横椭圆变形超限,并引发结构破损与渗漏水。在盾构隧道横椭圆变形导致结构劣化的过程中,管片纵缝接头是最薄弱部位,即结构渗漏水与棱角破损主要发生在管片纵缝接头,极少发生管片主截面开裂现象。

(2) 室内模型试验与数值分析表明,在地表超载作用下,由于地层的软弱性,隧道结构与其两侧穿越土层竖向压缩不一致导致隧道上覆土层出现了不均匀沉降,使隧道出现了“附加竖向土压力集中”现象,且隧道中心正上方一定范围内的附加竖向土压力要大于地表均布超载。由此可知,传统理论认为地表均布超载导致的隧道附加竖向土压力刚好等于地表均布超载是不合理的。

(3) 数值仿真分析表明,当盾构隧道穿越软弱地层时,在地表超载作用下,隧道周围附加荷载对隧道

抵抗横向变形有两方面的不利：①隧道出现“附加竖向土压力集中”；②地层的水平抗力系数小，隧道水平直径增大过程中导致的水平地层抗力小。由先前的盾构隧道足尺试验反演分析表明，管片的纵缝接头抗弯刚度随着结构变形的增加而呈现出减小的趋势<sup>[16]</sup>，因此，为了减小管片结构的配筋，软土地区盾构隧道采用“柔性衬砌”设计来减小隧道结构的弯矩是不合理的。

(4) 管片纵缝接头内力与变形分析表明，在地表超载作用下，拱腰部接头最容易发生结构渗漏水，在结构变形发展到一定程度时，将发生内侧受压区混凝土压碎；拱顶部接头最易发生棱角破损，进而引发结构渗漏水；拱底部接头是所有接头中受力最佳的管片纵缝接头。

### 3.2 地表超载下盾构隧道病害防治建议

由以上关于地表超载作用下软土地区盾构隧道劣化特性可知，导致结构劣化的因素是多方面的，为此针对性地提出以下病害防治建议：

(1) 隧道的穿越土层越软弱，地表超载作用下隧道周围附加土压力对隧道结构抵抗横椭圆变形越不利。因此，地铁盾构区间选线设计过程中，在条件允许时应尽量使盾构隧道穿越压缩模量大的土层。

(2) 因软土地层具有高压缩性与水平抗力系数小的特点<sup>[10-13]</sup>，隧道水平直径增大的过程中产生的水平抗力非常有限。因此，软土地区盾构应采用“刚性衬砌”设计理念，即尽量增大隧道结构的刚度。

(3) 隧道发生横椭圆变形过程中，管片纵缝接头是最薄弱的部位，因此有必要加强管片纵缝接头设计。因拱腰部纵缝接头属于外张接头，建议通过合理设计将拱腰部纵缝接头防水密封垫改至内侧；同时将拱腰部纵缝连接螺栓孔外移，以提高纵缝接头的抗弯刚度。管片纵缝接头应该要根据管片结构受力特性进行设计，而不应为追求所谓的标准化施工而将所有的纵缝接头设计为构造形式相同。

(4) 封顶块管片采用锥形设计的纵向插入式管片，管片纵缝与隧道纵向轴线不平行，隧道变形过程纵缝受力复杂。为减小封顶块管片纵缝接头弯矩，建议通过调整封顶块管片的大小与管片拼装位置，尽量使封顶块管片纵缝接头位于管片环弯矩较小的位置。

(5) 纵缝接头受压区混凝土因局部应力集中极易发生混凝土碎裂，如图 3 (b)、图 15 (a) 及图 15 (b) 所示，为了加强管片纵缝接头，建议通过型钢对管片纵缝接头的棱边与棱角进行加强。

(6) 管片纵缝接头通常情况下均采用 2 个连接螺栓，在结构内力较大时易发生螺纹拉流现象，如图 15 (c) 所示。建议适当地增加管片纵缝接头的连接螺栓

数量，尤其对幅宽较大的管片，应考虑采用 2 个以上的纵缝连接螺栓。增加管片纵缝连接螺栓，不仅减小了单个螺栓的拉力，增加的接头的刚度与强度，同时对改善纵缝接头位置混凝土的应力也是有利的。



图 15 接头受压区混凝土破坏与螺栓受拉破坏

Fig. 15 Breakage of concrete in pressing area and thread of bolt for segment joints

## 4 结 论

(1) 盾构隧道穿越软弱地层时，地表均布超载导致的隧道附加竖向土压力并不是均匀分布，且在隧道中心正上方一定范围内要大于地表均布超载。隧道的穿越土层越软弱，地表超载作用下隧道周围附加土压力对隧道结构抵抗变形越不利。

(2) 盾构隧道发生横椭圆变形过程中，管片纵缝接头是最薄弱的部位。在地表超载作用下，该软土地区盾构隧道主要表现为拱腰部接头发生结构渗漏水，过大变形时将引发管片内侧棱边混凝土压碎；拱顶部纵缝接头发生棱角破损并引发结构渗漏水；拱底部接头极少发生破损与渗漏水。

(3) 基于软土地层特性与盾构隧道结构特性，建议软土地区盾构隧道采用“刚性衬砌”设计理念，即尽量增大隧道结构的横向刚度，同时提高结构的强度。

(4) 为提高影响盾构隧道使用功能的短板，建议加强管片纵缝接头的强度与刚度，如用型钢加强管片棱边与棱角；增加管片纵缝连接螺栓数量；区别化设计管片的内张接头与外张接头；优化管片环的分块方式与纵缝接头的位置等。

### 参考文献：

- [1] 张明告, 周顺华, 黄大维, 等. 地表超载对地铁盾构隧道的影响分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2271 - 2278. (ZHOU



- Shun-hua, ZHANG Ming-gao, HUANG Da-wei, et al. Analysis of influence on subway shield tunnel under the surface surcharge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(8): 2271 - 2278. (in Chinese))
- [2] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道. 北京: 科学出版社, 1991. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Shield tunnel[M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese))
- [3] 王如路, 张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1092 - 1101. (WANG Ru-lu, ZHANG Dong-mei. Mechanism of transverse deformation and assessment index for shield tunnels in soft clay under surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1092 - 1101. (in Chinese))
- [4] 王如路. 上海软土地铁隧道变形影响因素及变形特征分析[J]. 地下工程与隧道, 2009, **1**: 1 - 6. (WANG Ru-lu. Factors influencing deformation of Shanghai soft soil metro tunnel and deformation analysis[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2009, **1**: 1 - 6. (in Chinese))
- [5] 王如路, 贾 坚, 廖少明. 上海地铁监护实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 2013. (WANG Ru-lu, JIA Jian, LIAO Shao-ming. Shanghai metro monitoring practice[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2013. (in Chinese))
- [6] 黄大维, 周顺华, 宫全美, 等. 钢管压入土体施工挤土机制与案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(1): 176 - 183. (HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei, et al. Analysis of squeezing mechanism for jacked-in construction of steel pipe and project case[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(1): 176 - 183. (in Chinese))
- [7] 黄大维, 周顺华, 刘重庆, 等. 护壁套管钻孔灌注桩微扰动施工分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(4): 1103 - 1108. (HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, LIU Chong-qing, et al. Analysis of small disturbing construction of protective jacket tube for cast-in-situ bored pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(4): 1103 - 1108. (in Chinese))
- [8] 黄大维, 周顺华, 宫全美, 等. 软土地区地铁不同结构间差异沉降特点分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, **41**(1): 95 - 100. (HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei, et al. Characteristic analysis of non-uniform settlement for Different structures of metro in soft soil districts[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, **41**(1): 95 - 100. (in Chinese))
- [9] 黄大维, 周顺华, 王秀志, 等. 模型盾构隧道管片纵缝接头设计方法[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(6): 1068 - 1076. (HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, WANG Xiu-zhi, et al. Design method for longitudinal segment joints of shield tunnel model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(6): 1068 - 1076. (in Chinese))
- [10] 封 坤, 刘四进, 邱 月, 等. 盾构隧道地层抗力系数的修正计算方法研究[J]. 铁道工程学报, 2014(6): 62 - 67. (FENG Kun, LIU Si-jin, QIU Yue, et al. Research on the modified calculation method for ground resistance coefficient of shield tunnel[J]. Journal of Railway Engineering, 2014(6): 62 - 67. (in Chinese))
- [11] MOLLER S. Tunnel induced settlements and structural forces in linings[D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2006.
- [12] SCHMIDT B. Tunnel lining design-do the theories work[C]// Proceedings of the 4th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics. Perth, 1984.
- [13] HE Chuan, WANG Bo. Research progress and development trends of highway tunnels in China[J]. Journal of Modern Transportation, 2013(4): 209 - 223.
- [14] 孙文昊, 焦齐柱, 兰 宇. 盾构管片接头抗弯刚度影响因素研究[J]. 铁道工程学报, 2008(1): 66 - 71. (SUN Wen-hao, JIAO Qi-zhu, LAN Yu. Research on the factors influencing flexural rigidity of duct piece joint of shield tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(1): 66 - 71. (in Chinese))
- [15] 孙文昊, 焦齐柱, 薛光桥, 等. 盾构隧道管片无衬垫接头抗弯刚度研究[J]. 地下空间与工程学报, 2008, **4**(1): 66 - 71. (SUN Wen-hao, JIAO Qi-zhu, XUE Guang-qiao, et al. Study on bending stiffness of no-liner segment joint in shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, **4**(1): 66 - 71. (in Chinese))
- [16] 黄大维, 周顺华, 冯青松, 等. 通缝拼装盾构隧道横向刚度有效率计算方法及其影响因素[J]. 中国铁道科学, 2017, **38**(3): 47 - 54. (HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, FENG Qing-song, et al. Algorithm of transverse effective rigidity ratio for non-staggering installed shield-driven tunnel and its influential factors[J]. China Railway Science, 2017, **38**(3): 47 - 54. (in Chinese))