

文章编号:1005-0523(2018)03-0015-08

# 地铁盾构隧道下穿城市公园地基加固宽度分析

程 茜

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

**摘要:**为改变居住环境和生态环境,往往公园等大型公共用地的规划是动态变化的,例如公园内假山等景观的建造或拆除。对于地铁盾构隧道下穿该区域来说,运营阶段上覆荷载的改变,会使得结构横断面变形过大。后续的建设规划同地铁盾构隧道结构安全性之间存在矛盾。为解决这一矛盾,需要在地铁盾构隧道建设期进行地基加固。通过工程调研,分析了上海地铁盾构隧道在上覆荷载发生变化时,横断面变形现状;采用 ABAQUS 三维有限元,选取某典型软土地区深厚淤泥质土层断面,研究了盾构隧道下穿公园区域内假山建造和穿越土层性质对地基加固宽度的影响。结果表明:地基加固需分段考虑且山体高度不能超过 3.5 m。隧道全断面穿越淤泥土层,山体高度小于 3.5 m 时,拱腰两侧加固 3 m 较为合适;穿越淤泥质粉细砂层,该宽度可减小至 1 m;穿越粉质黏土层,拱腰两侧可无加固宽度。

**关键词:**盾构隧道;收敛变形;加固宽度;数值模拟

**中图分类号:**TU443

**文献标志码:**A

城市区域的情况时刻在发生变化,人口、资源、环境的变化往往使得当前的规划并不适用。一张静态的规划图,一本早先完成的规划报告书,常常不适当当前和以后发展的需要,这就决定了区域规划是不断循环的动态过程。以城市公园为例,随着对人民文化娱乐生活的关注度增加,各个城市进行了大规模的扩建,但是其内部景观匮乏,缺乏整体的设计规划,建成后又成为了改造对象。而反复的改造,势必会对周边已有的建(构)筑物产生影响,从而限定其自身的改造。

在我国沿江、沿湖、沿海等典型软土地区,由于软土具有高含水量、大孔隙比、高压缩性、低抗剪强度、高灵敏度等特点,使得地铁盾构隧道在运营期极易出现较大的差异沉降以及渗漏水、管片开裂等病害问题<sup>[1-4]</sup>,如果周边区域开发或二次开发,则会使得下穿区域的土层受到扰动,造成地铁盾构隧道进一步破坏。因此,为了保证动态规划的城市建设能够顺利进行,应当在盾构隧道周围进行加固,从而避免盾构隧道受到外部荷载变化的影响时,产生过大的变形和结构内力。

目前,关于外部荷载改变对盾构隧道的影响,主要集中在变形和受力分析<sup>[5-7]</sup>,而对于外部荷载变化时,盾构隧道周围加固范围及加固形式的研究较少。本文通过对深厚软土地区盾构隧道变形的分析,给出地基加固的宽度,进而可以为类似地区盾构隧道的建设与运营提供借鉴与参考。

## 1 软土地区盾构隧道横断面变形现状

近年来,已运营的软土地区地铁盾构隧道由于横断面变形过大导致结构安全性能降低的案例时有发生。经现场调研与分析,发现地铁盾构隧道横断面变形过大及承载力降低主要受外部荷载变化的影响。据不完全统计,上海地铁已有多处盾构隧道区间因外部突发荷载作用导致横断面变形过大而不得不采取加固措施,如地铁 7 号线顾村公园区间、7 号线船厂路-后滩区间因上部堆土发生了严重的结构破损,不得不通过内钢圈进行加固;上海地铁 2 号线创新中路-华夏东路区间也因上部堆土,盾构隧道发生严重变形;南京地铁 2

收稿日期:2017-12-25

作者简介:程茜(1992—),女,硕士研究生,主要研究方向为地下结构与岩土工程。

号线马群-金马路区间部分隧道因地面渣土堆土导致了隧道变形,需要对该段隧道结构加固修复,加大了运营维护成本。

### 1.1 盾构隧道横向变形形式及原因<sup>[8]</sup>

由于盾构隧道为具有一定刚度的拼装结构,地铁隧道建成后,隧道外部荷载变化(如周边加卸载等工程活动,图1)会导致结构受力状态发生变化,进而产生结构横断面变形。圆形盾构隧道典型横断面变形形式包括3种:横鸭蛋、竖鸭蛋和斜鸭蛋变形,如图2所示。其中,隧道顶部正上方的加载(卸载)主要使隧道产生横鸭蛋(竖鸭蛋)变形,而斜鸭蛋变形则为隧道侧向的加(卸)载所致。

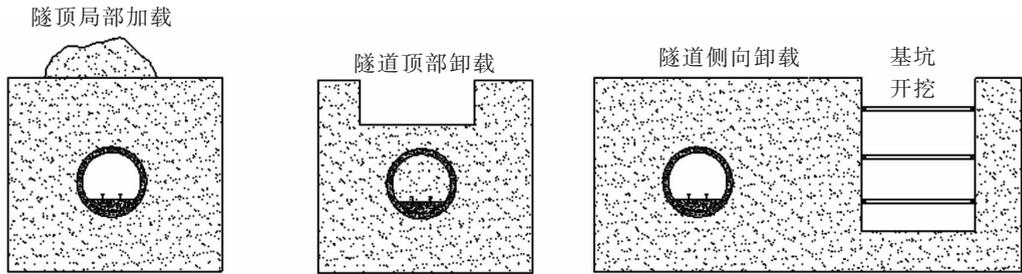


图1 地铁隧道外部荷载形式

Fig.1 External charge change form of subway tunnel

在温克尔假定中,抗力系数与土层软硬程度有关,土层越坚硬,能提供的抗力越大。因此在隧道周边进行加固后,可以提高隧道周围土的侧向抗力和侧土压力,从而避免过大的盾构隧道横断面变形<sup>[9]</sup>。

### 1.2 上海某线上部堆土实例

盾构隧道内径 5.5 m,外径 6.2 m,管片厚度 350 mm,管片宽度 1.2 m。管片采用高强度混凝土模筑,强度等级为 C55。管片环向与纵向采用 M30 弯螺栓连接。采用通缝拼装形式。

该线路区间长度 1.8 km,隧道顶部埋深约 7.0~16.6 m,所处的地质条件如表 1 所示<sup>[10]</sup>。2010 年 5 月中旬,经巡视发现,上行线 560~600 环顶部纵缝张开,混凝土块脱落,螺栓明显露出,有一处螺栓被剪断。盾构隧道结构内侧腰部纵缝处混凝土挤压开裂,渗漏水明显。在隧道上方,沿线路西侧 300 m 左右范围内有 7 m 高堆土(堆土时间不详)。上行线位于堆土正上方,下行线位于山体东侧斜坡下方。在下行线上方存在 3 个卸土点,如图 3 所示。

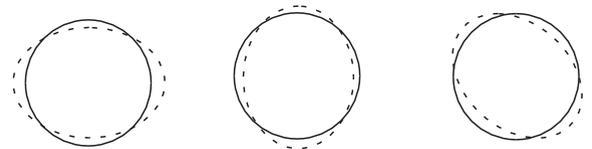


图2 地铁盾构隧道横断面变形形式

Fig.2 Deformation form of subway shield tunnel cross section

表1 上海地层各土层物理力学性质

Tab.1 The soft soil parameters of Shanghai

土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	含水率/%	孔隙比 $e$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	压缩模量/MPa	泊松比 $\mu$
②粉质黏土	18.4	33.2	0.938	17	21.5	5.36	0.29
③淤泥质粉质黏土	17.6	39.7	1.123	9	16.5	3.36	0.26
④淤泥质黏土	16.8	49.4	1.392	13	10.5	2.27	0.30
⑤粉质黏土	18.1	34.8	0.996	17	14.0	4.27	0.31
⑥粉质黏土	19.5	23.3	0.695	44	15.5	6.58	0.30
⑦砂质粉土	18.5	31.1	0.875	4	30.5	12.26	0.31
⑧ <sub>1</sub> 粉质黏土	17.8	36.4	1.051	27	16.5	5.14	0.26
⑧ <sub>2</sub> 粉质黏土	18.1	33.3	0.968	27	18.5	6.63	0.30

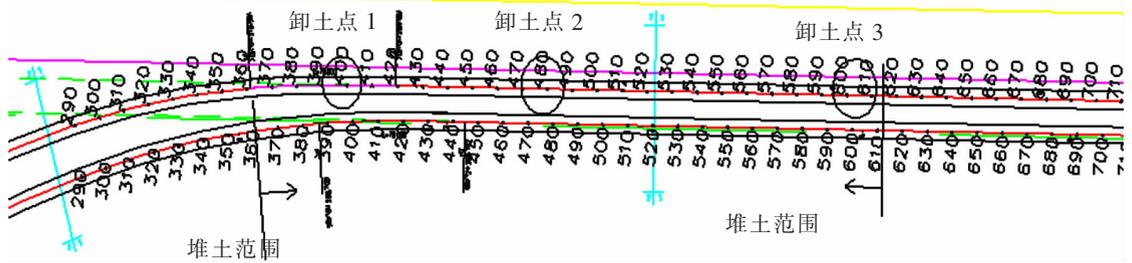


图 3 堆土示意图

Fig.3 The layout of overloading

图 4 是位于堆土正下方的隧道变形,其水平向直径差最大达 19.4 cm, 竖直向直径差最大达 14.7 cm。远远超过规范中所规定:直径累计变化量小于 5% $eD$ ( $D$  为盾构隧道外径)的要求。

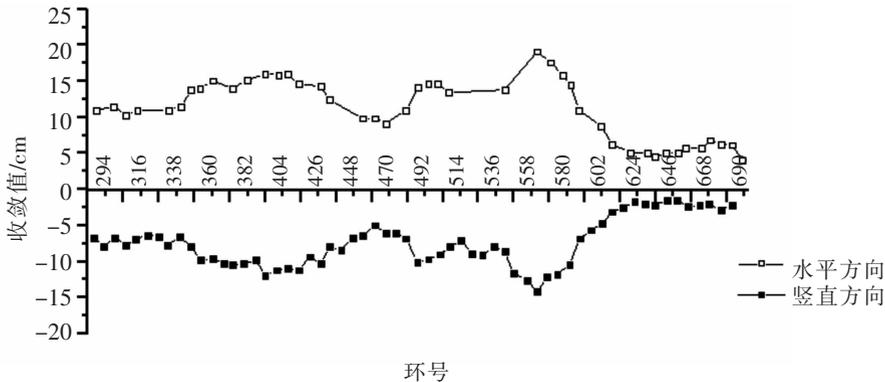


图 4 堆土时全断面直径收敛变化

Fig.4 Variation of diameter convergence when overloading

为减小盾构隧道横断面变形,在图 3 所示 3 个点同时进行卸载。开始卸土时,隧道直径收敛值(与设计标准圆比较)有所减小,如图 5 所示。从监测数据看,卸土后第 1 天到第 25 天,隧道变形量的改善并没有随着时间的发展而减小,处于较为稳定的状态,并且变形量的改善仅仅约 1.0 cm。上部卸载虽然使得收敛变形的发展得到了控制,但是对变形的效果恢复并不理想。

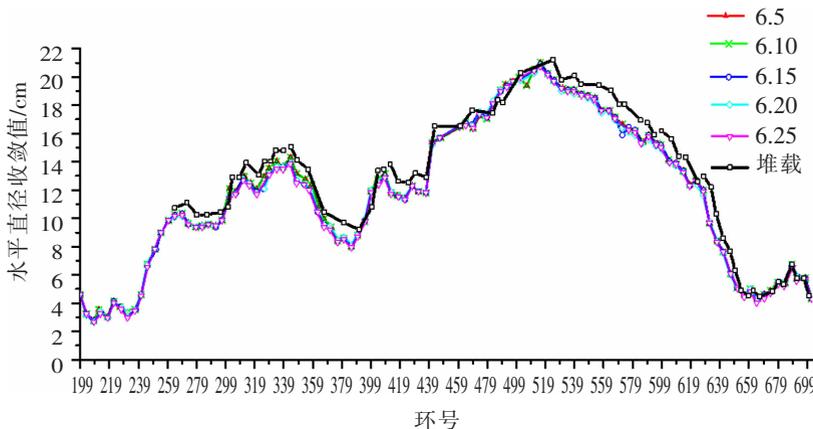


图 5 卸载时直径法水平直径收敛变化

Fig.5 Variation of diameter convergence when unloading

从上述案例总结可知,在隧道上方存在加载时,会使得隧道横断面变形过大,如果不采取任何加固措施,即便卸土也很难使变形回弹。因此,对于盾构隧道下穿城市公园等类似区域,应当做好预防措施,提高结构在外部荷载变化时的抗变形能力,防止后续公园景观改造使得盾构隧道上方不得已进行堆土时,盾构隧道过大变形。

## 2 工程背景

### 2.1 工程概况

某轨道交通沿线涉及到两类典型软弱地层,第四系海陆交互淤泥层<2-1A>和淤泥质土层<2-1B>。根据线路统计分析,一半以上的区间包含以上两类软土,其中隧道穿越厚的软弱层或下卧层为软弱层的情况占 25%左右,穿越不良地层的厚度可达 30 m 之多。

设计隧道内径 6.0 m,外径 6.7 m,管片厚度 0.35 m,1.5 m 宽度错缝拼装。断面里程 YCK10+357.988 处的隧道中心埋深 21 m,淤泥层厚度达 24.5 m,如图 6 所示。各个图层的物理力学指标如表 2 所示。

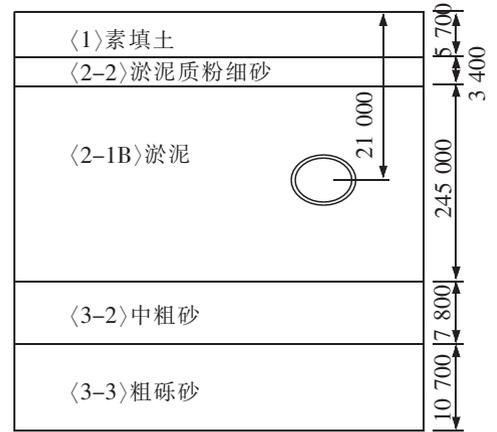


图 6 计算断面(单位:mm)  
Fig.6 Calculation section (mm)

表 2 主要地层物理力学参数  
Tab.2 Parameters of main soil

岩土名称	土层厚度/m	静止侧压力系数	泊松比 $\mu$	天然密度 $\rho/(g/cm^3)$	粘聚力 $c/$ kPa	内摩擦角 $\varphi/$ (°)	压缩模量/ MPa	承载力特征值/kPa
<1>人工填土	5.7	0.60~0.80	0.40~0.50	1.8~1.9	10	15	4.25	70~120
<2-2>淤泥质粉细砂	3.4	0.55~0.60	0.35~0.40	1.8	5	25	4.0	100~120
<2-1B>淤泥质土	24.5	0.60~0.75	0.35~0.42	1.6~1.9	9	10	2.85	60~90
<3-2>中粗砂	7.8	0.45~0.55	0.30~0.40	1.9	-	34	25	170~200
<3-3>粗砾砂	10.7	0.45~0.55	0.30~0.40	1.95	-	36	30	180~230

根据盾构隧道横向变形原因,拱腰两侧的有无加固及加固宽度影响着侧向抗力大小,对减小横向变形有着重要作用。在原加固设计方案中,拱腰两侧无任何加固体,如图 7 所示,这对盾构隧道横断面变形是十分不利的,因此,需要通过有限元计算来确定合理的加固宽度,重新设计加固方案。

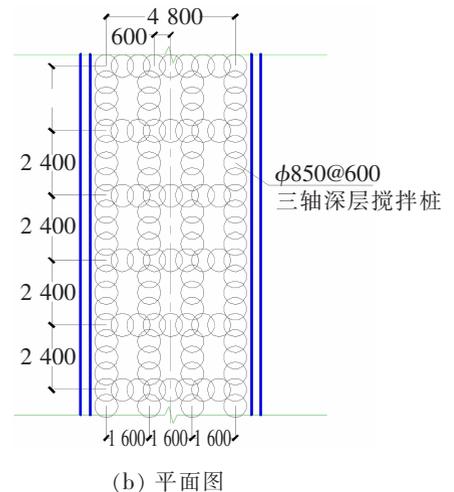
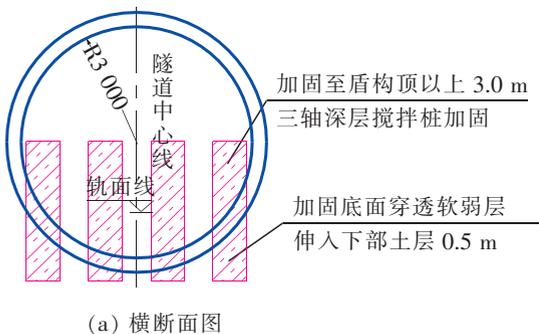


图 7 原设计方案加固体位置  
Fig.7 The position of reinforcement body in original design

### 3 地基加固宽度对横断面变形的影响

#### 3.1 模型概况

计算断面如图 6 所示。在有限元中,为简化模型,根据《基坑工程手册》<sup>[10]</sup>,将排桩按照抗弯刚度相等的原则等效为一定厚度的连续墙,如式(1)所示,加固体选用线弹性本构。土层选用弹塑性本构,相关物理力学参数见表 2。忽略盾构隧道模型细部结构设计,可将接头位置进行开槽,以减小接头连接处管片的抗弯刚度。研究表明,采用内外侧同时开槽的方式,需要开槽的角度宜为 3°~5°<sup>[11]</sup>,如图 8 所示。

$$\frac{1}{12} (D+t)h^3 = \frac{1}{64} \pi D^4 \quad (1)$$

式中: $D$  为钻孔桩桩径; $t$  为桩净距; $h$  为等价后地下墙的厚度。

#### 3.2 计算结果

##### 3.2.1 上部山体量增加

选取 3 种山体高度 2.5、3.5 m 和 5.0 m 条件进行计算,得到不同山体高度下,随着盾构隧道周围地基加固宽度变化,盾构隧道水平直径和竖向直径变形收敛值的变化规律,如图 9 所示。

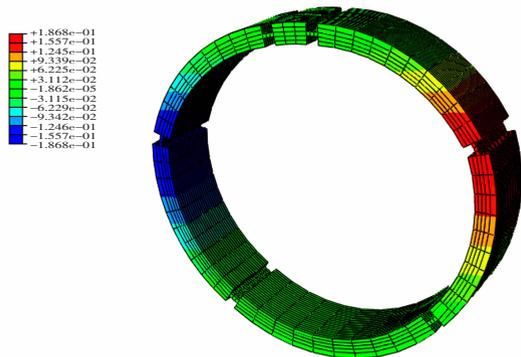


图 8 简化盾构管片模型

Fig.8 Simplified shield segment model

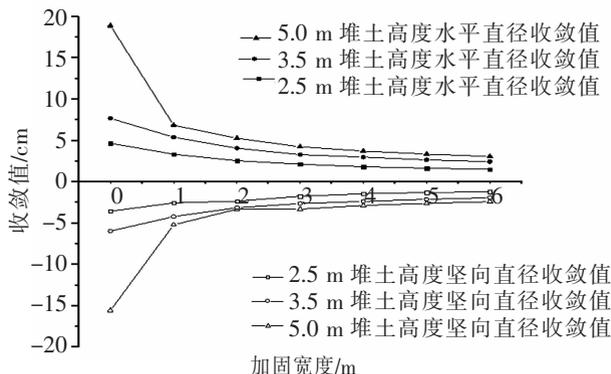


图 9 盾构隧道直径收敛值随隧道两侧加固宽度的变化

Fig.9 The convergence value of shield tunnel diameter changing with the reinforcement width of both sides of tunnel

随着加载量增加,盾构隧道拱腰两侧的加固宽度对减小变形的影响愈发显著,当加载高度为 2.50 m 时,未加固水平收敛变形为 4.68 cm,当拱腰侧加固宽度为 1 m 时,其变形减小至 3.35 cm,减少约 28.42%;当加载高度为 3.5 m 时,未加固水平收敛变形为 7.69 cm,当拱腰侧加固宽度为 1 m 时,其变形减小至 5.4 cm,减少约 35.71%;当加载高度为 5.0 m 时,未加固水平收敛变形为 18.9 cm,当拱腰侧加固宽度为 1 m 时,其变形减小至 6.87 cm,减少约 63.75%。

为将横向收敛变形控制在规范限值内,山体高度为 2.5 m 时,需加固 2 m 宽度;山体高度为 3.5 m 时,需加固 3 m 宽度;山体高度为 5.0 m 时,需加固 6 m 宽度。若定义加固效果每增加 1 m 加固宽度,变形减小比例的增加为评价指标,见式(2)。可以得到不同山体量条件下隧道两侧适宜的加固宽度,如图 10 所示。

$$\eta = \frac{\frac{L_m - L_n}{L_0}}{D_m - D_n} \quad (2)$$

式中: $L_m$  代表拱腰外加固宽度为  $D_m$  时,盾构隧道水平收敛变形大小; $L_n$  代表拱腰外加固宽度为  $D_n$  时,盾构隧道水平收敛变形大小; $L_0$  则是拱腰两侧无加固时,盾构隧道的水平收敛变形。

如表 3 所示,当山体高度 2.5 m 时,加固宽度 1~6 m 时,水平直径收敛变形分别可减少 28.42%, 37.71%, 45.19%, 50.43%, 54.27%, 57.27%。山体高度 3.5 m 时,加固宽度 1~6 m 时,水平直径收敛变形分别可减少 29.77%, 47.01%, 57.08%, 61.37%, 65.27%, 68.14%。山体高度 5.0 m 时,加固宽度 1~6 m 时,水平直径收敛变形分别可减少 63.27%, 72.63%, 77.51%, 80.21%, 82.19%, 83.70%。但是,无论山体高度多高,当加固宽

度大于 3 m 时,每增加 1 m 加固宽度,对减小变形比例的影响越来越小,如果一味的增加加固宽度来满足变形控制指标将会造成工程浪费。

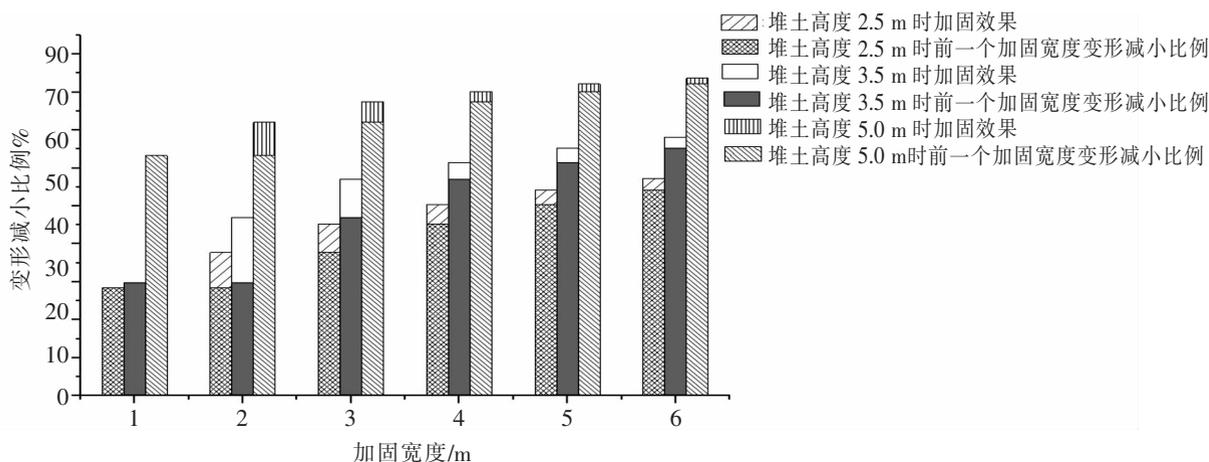


图 10 不同加固宽度的加固效果

Fig.10 Consolidation effect with different consolidation width

表 3 不同山体高度下各加固宽度对水平直径收敛变形的减小效果

Tab.3 Reducing effect of reinforcement width on convergent deformation of horizontal diameter at different mountain heights

填土高度/m	加固宽度/m						%
	1	2	3	4	5	6	
2.5	28.42	37.71	45.19	50.43	54.27	57.27	
3.5	29.77	47.01	57.08	61.37	65.27	68.14	
5.0	63.27	72.63	77.51	80.21	82.19	83.70	

因此,对于盾构隧道下穿城市公园,若公园内需要建造假山等景观,必须保证山体高度不大于 2.5 m 时,地铁盾构隧道拱腰两侧加固宽度不小于 2 m;山体高度大于 2.5 m 小于 3.5 m 时,地铁盾构隧道拱腰两侧加固宽度不小于 3 m;当山体高度大于 5 m 时,盾构隧道拱腰两侧加固宽度取为 3 m 时仍不能满足规范要求,但是继续增加宽度将会造成工程代价和成本的迅速增加,因此,对于山体高度大于 3.5 m 的情况应当予以禁止。

3.2.2 穿越土层影响

根据该地区地铁盾构隧道穿越软弱土层的特点,为了对比不同土层对地基加固宽度的影响,另选取了软土压缩模量较大的<2-2>淤泥质粉细砂土(4 MPa)和压缩模量最大的<2-4>粉质黏土(8 MPa)进行分析。山体高度为 3.5 m,计算结果如图 11 所示。

当隧道穿越<2-1B>土层时,拱腰两侧有无加固宽度对收敛变形的影响十分显著;而穿越<2-2>和<2-4>土层时,加固宽度 2 m 是一个分界点:当加固宽度小于 2.0 m 时,收敛变形随着加

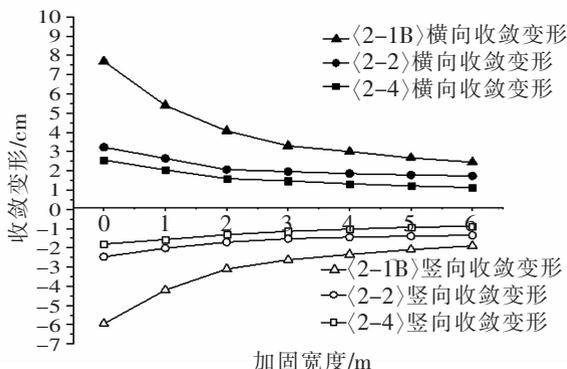


图 11 不同穿越土层对加固宽度的影响

Fig.11 Variation of consolidation width with different soft soil

固宽度的增加线性减小;当加固宽度大于 2.0 m 时,继续增加加固宽度,减小收敛变形的比例将会趋于稳定不变。当穿越土层的压缩模量逐渐增大时,加固宽度可以逐渐减小。

山体高度 3.5 m 时,隧道断面穿越<2-1B>淤泥质土层时,加固宽度需在 3 m 左右;隧道断面穿越<2-2>淤泥质粉细砂土时,加固宽度为 1 m,隧道横断面变形即可满足规范要求;若隧道穿越<2-4>粉质黏土时,即便无加固宽度也同样,隧道横断面变形也可满足要求。当隧道穿越<2-2>淤泥质粉细砂土和<2-4>粉质黏土时,可适当增加山体高度。

## 4 结论

1) 调研得盾构隧道横断面变形对周边活动极为敏感,在隧道上方超载大于 140 kPa 时,最大水平直径变化量可达 19.4 cm,且卸载后隧道收敛无法得到有效改善。土层模量大,能够提供的侧向抗力也大,因此,对于穿越软弱土层的隧道有必要通过改良周围土体来减小运营期盾构隧道变形。

2) 考虑到城市公园景观改造对盾构隧道的影响,拱腰两侧的加固十分必要。假山高度越大,加固对于减小横断面收敛变形的效果越明显。

3) 定义每增加 1 m 加固宽度,变形减小比例的增加为评价加固效果的指标。隧道全断面穿越<2-1B>淤泥质土层,当加固宽度大于 3.0 m 时,宽度对于减小横断面收敛变形的效果趋于稳定,也就是说,继续增加加固宽度,减小变形比例增加的部分将会越来越少。

4) 隧道全断面穿越<2-1B>淤泥质土层,当山体高度小于 3.5 m,拱腰两侧加固宽度为 3 m 时,可以有效的将盾构横断面收敛变形控制在规范限值以内,且不会造成工程浪费;当山体高度大于 3.5 m 时,拱腰两侧的加固宽度必须继续增加才可以使收敛变形控制在规范要求之内,而此时加固效果会逐渐减小,因此在该典型软土地区,当隧道穿越<2-1B>淤泥质土层时,山体高度必须控制在 3.5 m 之下。

5) 当盾构隧道穿越土层的性质提高时,山体高度对结构横断面变形的影响将会大大降低。从变形减小速率来看,存在临界加固宽度:加固宽度小于 2 m 时,横断面收敛变形减小速率大;加固宽度大于 2 m 时,横断面收敛变形减小速率将会降低。

6) 对于轨道交通下穿城市公园的地基加固应当分如下情况考虑:山体高度小于 3.5 m 时,隧道断面穿越<2-1B>淤泥质土层时,加固宽度需在 3 m 左右;隧道断面穿越<2-2>淤泥质粉细砂土时,加固宽度为 1 m;若隧道穿越<2-4>粉质黏土时,无加固宽度也可。但是考虑到后续周边环境开发对软土的扰动,即便穿越地层较好的区段,也应当在拱腰两侧适当加固。

## 参考文献:

- [1] 刘印,张冬梅,黄宏伟. 盾构隧道局部长期渗水对隧道变形及地表沉降的影响分析[J]. 岩土力学,2013,34(1):290-298.
- [2] 朱启银,叶冠林,王建华,等. 软土地层盾构隧道长期沉降与施工因素初探[J]. 岩土工程学报,2010(Z2):509-512.
- [3] 杨兵明. 地铁列车循环荷载下软土地区盾构隧道长期沉降分析[J]. 中国铁道科学,2016,37(3):61-67.
- [4] 葛世平,姚湘静,叶斌,等. 列车振动荷载作用下隧道周边软黏土长期沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(11):2359-2368.
- [5] 黄大维,周顺华,赖国泉,等. 地表超载作用下盾构隧道劣化机理与特性[J]. 岩土工程学报,2017,39(7):1173-1181.
- [6] 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.

- [7] 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(6):1092-1101.
- [8] 狄宏规,周顺华,陕耀,等. 基于改进壳-柱模型的盾构隧道饱和地基动应力解[J]. 同济大学学报:自然科学版,2016,44(9):1384-1390.
- [9] 宫全美,刘建国,丁春林,等. 土的侧向压力对盾构隧道衬砌圆环内力的影响[J]. 城市轨道交通研究,2001,4(2):28-32.
- [10] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [11] 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.

## Analysis on Reinforcement Width of Subway Shield Tunnel Underpassing City Park

Cheng Qian

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** To improve the living and ecological environment, the planning of large-scale public land such as parks is often dynamic, including the construction or demolition of landscapes like rockery in the park. For subway shield tunnel under the area, the overburden changes during the operation phase will make the structure cross-section deformation too large. Therefore, there is a conflict between the follow-up construction plan and the structural safety of subway shield tunnel. To solve this problem, it is necessary to reinforce the foundation in the construction period of subway shield tunnels. Through engineering investigation, the deformation of the cross-section of the shield tunnel in Shanghai Subway was analyzed. The ABAQUS three-dimensional finite element method was adopted to analyze the section of the deep silty soil in some typical soft soil area which was influenced by construction and crossing of soil layers on consolidation width of foundation in park area. The research results show that the foundation reinforcement should be considered in sections and the height of the mountain should not exceed 3.5m. The 3-meter-wide reinforcement for both arch sides is appropriate; through silty fine sand layer, the width can be reduced to 1m; through the silty clay layer, both arch sides do not need reinforcement.

**Key words:** shield tunnel; convergence deformation; width of reinforcement; numerical simulation