

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.01.055

盾构上方填方道路软基浅层处理方式研究

刘 东¹, 杨绍猛²

[1.上海市政工程设计研究总院集团浙江市政设计院有限公司, 浙江 杭州 310000;

2.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司浙江分公司, 浙江 杭州 310000]

摘 要:针对地铁盾构区间上方荷载及变形控制要求,提出一种盾构上方填方道路软基浅层处理方案,结合该方案力学原理,推导出相关计算公式。为了进一步研究路基处理及施工引起的土体及盾构结构变形及受力特点,基于杭州地铁 5 号线上方施工某城市道路工程实例,对盾构上方道路软基处理及施工过程进行数值模拟分析,将分析结果同推导公式计算数据对比分析,验证了计算方法的正确性,研究成果可为类似工程设计提供参考。

关键词:盾构;城市道路;软基;泡沫轻质土;数值模拟

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)01-0213-04

0 引 言

城市基础设施日趋完善,地铁区间隧道等地下构筑物密度不断加大,新建城市道路难免上跨既有地铁盾构,国际隧道协会(ITA)2000 年在《盾构法隧道设计指导》^[1]中将隧道竖向变形对隧道的影响写入荷载类别中的特殊荷载。美国交通运输研究协会在年度报告^[2]中指出,软土地层中的隧道破坏主要是由于软土变形产生的。盾构上方大面积加载或卸载是软土变形的重要原因。

盾构上方软基处理及路基填挖,使得盾构上方竖向荷载变化并产生土体扰动,导致既有盾构隧道结构发生变形,危及隧道安全。对于涉地铁路段,工况及地质特点存在差异,地铁相关单位往往提出不同的荷载控制要求,使得较高填方并存在软土的路基难以采用常规方式处理。目前,关于上跨既有盾构隧道的道路软基处理方式及其受力变形特点的研究还比较少,为保证道路质量和隧道结构安全,有必要对地铁盾构上方软基处理方式进行研究。

以杭州地铁 5 号线上方施工某城市道路为工程依托,首先讨论了常用软基处理方式及原理,然后建立力学模型对软基处理方式受力及变形规律进行分析,最后结合工程实例采用有限元分析软件 ABAQUS 建模分析,将分析结果与推导公式计算数据进行对比验证。成果为既有盾构上方填方道路软基处理方式提供参考。

收稿日期: 2021-05-04

作者简介: 刘东(1990—),男,工学硕士,工程师,从事道路交通设计工作。

1 常规软基处理方式及原理

道路软土地基处理方法可按地基处理层位、方法等进行分类。常见的软基处理方法见表 1。软基处理主要解决承载力和变形两个问题,无论采用何种处理方式,归根结底都是通过一定的措施来减轻路基自重、提高地基承载力或减小沉降量。

表 1 常规软基处理方法

处理层位	处理方法
地面上处理	垫层、堆载预压、粉煤灰路堤、土工泡沫塑料路堤、现浇泡沫轻质土路堤、吹填砂路堤、加筋路堤、反压护道
地面下浅层处理	粒料垫层、灰土垫层、抛石挤淤
地面下深层处理	动力挤密与置换、固结排水、复合地基

泡沫轻质土在建设工程中被广泛应用^[3],具有重量轻、流动性好、强度易控制和保温隔热等优点。泡沫轻质土重量较轻,同时具有较高的屈服应力,当施加荷载不超过其屈服应力时,材料呈弹性变形且变形量很小^[4]。城市道路工程中,泡沫土上方加载大多在 100 kPa 以内,远小于材料屈服应力。因此,在道路改扩建或路基换填中使用泡沫土材料,产生的附加应力较小,能够有效减小道路下方原状土的沉降变形,同时材料自身变形量很小,进而有效控制路基沉降。

2 盾构上方软基处理计算分析

2.1 盾构上方软基处理控制要点

地铁盾构隧道结构变形主要控制值为最大允许变形值和最大允许变形速率^[5]。根据相关规范及工程经验,为了控制新建构筑物对地铁结构的影响,对于

浅层软基处理,一般采用荷载和软土变形两个指标进行控制,不同地质条件及工况下,具体控制指标不尽相同,但本质上都是从限制大面积加载或卸载、控制盾构上方软土变形两个方面进行控制,以降低新建工程对既有盾构结构的不利影响,保证地铁盾构结构稳定及地铁运营安全。

2.2 盾构上方软基处理方案

在上部土体松散软弱的情况下,施工扰动会恶化隧道结构稳定性^[6],盾构区间上方卸载量越小,对保护下方既有隧道越有利,及时加载配重能保护下方的既有隧道不产生结构损坏^[7]。搅拌桩等深层处理方式挤土和扰动作用明显,导致土体中产生较大超孔隙水压力和位移^[8]。

通过开挖换填泡沫轻质土,适当卸载;采用泡沫轻质土路基,减少道路结构自重。以上措施可增加盾构上方道路填方高度,应根据具体荷载控制要求,对允许开挖换填厚度、路基允许最大填高进行计算。

2.3 处理方案计算模型建立

处理方案模型简图如图1所示。假设盾构上方大面积加载或卸载的限值为 a kPa,盾构顶部至路基顶范围软土变形限值为 $[s]$ m。盾构顶部距离地面距离为 H ,每一层压缩模量分别为 $E_{S1}, E_{S2}, \dots, E_{Sn}$,层厚为 $h_1, h_2, \dots, h_n$,路面结构加权平均重度为 $\bar{\gamma}_1$,厚度为 h_1 ,设计路基填方高度为 h_d ,泡沫轻质土重度为 $\bar{\gamma}_2$,现状土加权平均重度为 $\bar{\gamma}_3$ 。一般情况下, $\bar{\gamma}_2=(0.2\sim 0.6)\bar{\gamma}_3$ 。

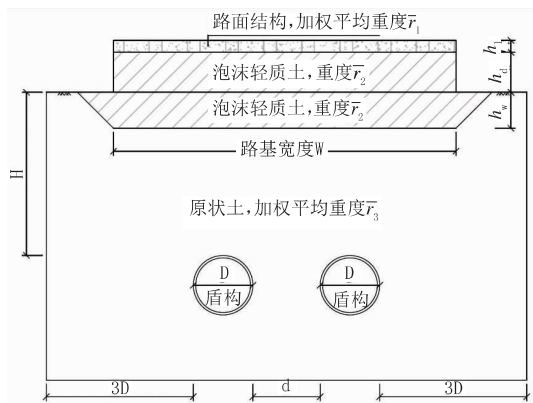


图1 计算模型简图

换填厚度为 h_w 时,卸载荷载大小为 $h_w \bar{\gamma}_3$,应满足 $h_w \bar{\gamma}_3 \leq a$,整理后得浅层处理允许换填厚度 h_w 计算公式(1):

$$h_w \leq \frac{a}{\bar{\gamma}_3} \quad (1)$$

由式(1)可知,最大允许换填厚度 $h_{wmax} = \frac{a}{\bar{\gamma}_3}$,假

设允许路基最大填方高度为 h_{dmax} ,则盾构上方总的附加应力为 $\bar{\gamma}_1 h_1 + \bar{\gamma}_2 (h_{dmax} + h_{wmax}) - \bar{\gamma}_3 h_{wmax}$,应满足 $\bar{\gamma}_1 h_1 + \bar{\gamma}_2 (h_{dmax} + h_{wmax}) - \bar{\gamma}_3 h_{wmax} = a$,整理后得允许路基最大填方高度计算公式(2):

$$h_{dmax} = a(2\bar{\gamma}_3 - \bar{\gamma}_2) / (\bar{\gamma}_2 \bar{\gamma}_3) \quad (2)$$

当路基设计高度 h_d 满足 $h_d \leq h_{dmax}$ 时,盾构上方总的附加应力为 $\bar{\gamma}_1 h_1 + \bar{\gamma}_2 (h_d + h_w) - \bar{\gamma}_3 h_w$,应满足 $\bar{\gamma}_1 h_1 + \bar{\gamma}_2 (h_d + h_w) - \bar{\gamma}_3 h_w \leq a$,结合公式(1),整理得换填厚度 h_w 计算公式(3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{a}{\bar{\gamma}_3} \geq h_w \geq \frac{\bar{\gamma}_1 h_1 + \bar{\gamma}_2 h_d - a}{\bar{\gamma}_3 - \bar{\gamma}_2} \\ h_w \geq h_q \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: h_q 为清表厚度。

当 $h_q \geq h_{dmax}$ 时,需要采取其他措施进行处理,限于篇幅本文不进行讨论。

路基浅层处理后,盾构上方软土变形量 s_d 可通过式(4)进行计算:

$$\begin{aligned} s_d &= \frac{\Delta P}{\bar{E}_s} (H - h_w) \\ &= \frac{\bar{\gamma}_1 h_1 + \bar{\gamma}_2 (h_d + h_w) - \bar{\gamma}_3 h_w}{\bar{E}_s} (H - h_w) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ΔP 为附加荷载, $\bar{E}_s$ 为盾构上方原状土加权平均压缩模量, $\bar{E}_s = \sum_{i=1}^n E_{Si} h_i / \sum_{i=1}^n h_i$, i 为盾构上方岩土分层数。

综上所述,盾构上方软基浅层处理时,首先根据式(2)确定盾构上方允许最大填方高度 h_{dmax} ,当设计路基填方高度 $h_d \leq h_{dmax}$ 时,根据式(3)计算需要破除原状土换填泡沫轻质土的厚度 h_w 取值范围,初步确定换填厚度,根据式(4)验算盾构上方软土变形量 s_d 是否满足 $s_d \leq [s]$,换填厚度确定后,根据软基处理方案复核道路自身地基承载力及工后沉降是否满足规范要求,若不满足则增大换填厚度直 h_w ,若 h_w 增大至 h_{wmax} 仍不能满足所有要求,则需要考虑深层或其他特殊软基处理方式。

3 工程实例分析

本节将具体工程参数代入推导公式计算,确定换填厚度及软基处理方案。同时,利用有限元分析软件ABAQUS对该方案进行施工模拟,分析软基处理及路基填筑过程中盾构上方土体及盾构结构的变形及受力特点。

3.1 工程及地质概况

杭州某城市道路局部路段位于杭州地铁5号线

某盾构区间上方,盾构顶部距离现状地面约 17 m,道路宽度 36 m。该段道路采用填方路基,需考虑大面积加载对既有盾构区间结构的影响。

地面以下 30 m 范围内场地主要分 9 个土层,每层岩土厚度及特性见表 2。

表 2 地面以下 30 m 范围内主要岩土分布表		
土层	土层厚度 /m	岩土特性
① ₁ 杂填土	0.7~1.4	灰~灰褐色,稍湿,稍密,含较多瓦砾,碎石,并含少量有机质
① ₂ 素填土	0.3~1.8	灰黄色,稍湿,稍密,含少量碎砾石,氧化铁质,呈粉质黏土、黏质粉土性
② ₂ 黏土	0.8~3	灰黄色,软塑,含铁锰质物质,无摇震反应,切面较光滑,干强度高,韧性中等
③ ₁₁ 淤泥	1.7~4.2	灰色,流塑,含腐植物及植物残体,灵敏度高,无摇振反应,切面光滑,干强度中等,韧性中等
④ ₁ 粉质黏土	0~2.3	灰黄色,饱和,软塑,含铁锰质物质及有机质,局部含少量粉土,无摇震反应,切面较光滑,干强度中等~高,韧性中等
④ ₂ 黏土	2.4~5.4	褐黄色,可塑,含铁锰质物质及有机质,局部夹少量粉土,无摇震反应,切面较光滑,干强度中等~高,韧性中等
④ ₃ 粉质黏土夹粉土	2.2~6.9	灰黄色,软塑,含铁锰质物质及有机质,局部为黏质粉土,无摇震反应,切面略光滑,干强度中等,韧性中等
⑤ ₁ 淤泥质粉质黏土夹粉土	6.9~12.3	灰色,流塑,含腐植物及植物残体,无摇振反应,切面较光滑,干强度中等,韧性中等
⑥ ₂ 粉质黏土	1.2~7.5	青灰色,硬可塑,局部硬塑,无摇震反应,切面较光滑,干强度高,韧性中等

3.2 软基处理方案

本工程盾构上方大面积加载或卸载的限值 $a=20\text{ kPa}$,盾构顶部至路基顶范围软土变形限值为 $[s]=0.10\text{ m}$ 。盾构顶部距离地面距离 $H=17\text{ m}$,岩土分层厚度及每一层压缩模量见表 3,路面结构加权平均重度为 $\bar{\gamma}_1=22\text{ kN/m}^3$,厚度为 $h_1=0.36\text{ m}$,设计路基填方高度为 $h_d=2\text{ m}$,根据材料物理力学参数表,泡沫轻质土重度为 $\bar{\gamma}_2=10.50\text{ kN/m}^3$,现状土加权平均重度为 $\bar{\gamma}_3=18.70\text{ kN/m}^3$, $\bar{E}_s=4.29\text{ MPa}$ 。将上述参数代入式(1)~(4)中计算得出,需要破除原状土换填泡沫轻质土的厚度 $h_w=1.10\text{ m}$, $s_d=7.72\text{ cm}<[s]$ 。同时,该方案地基承载力及工后沉降均可满足要求。

4 有限元数值模拟分析

4.1 数值分析模型及材料参数

地铁盾构外径 6.2 m,盾构片结构厚度 0.3 m,两个盾构间距 7 m,盾构顶部距离现状地面 17 m。根据上文计算,开挖换填厚度 1.1 m,泡沫轻质土填方路基厚度 2 m。土体模型宽度 50 m,高度 30 m,计算模

表 3 材料物理力学参数表						
序号	厚度 /m	密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	变形模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)	泊松比
1	2.0	1 790	5.2	13.6	9.8	0.40
2	2.0	1 820	6.0	20.4	14.6	0.35
3	3.0	1 700	1.0	7.7	8.5	0.45
4	9.5	1 950	12.0	24.2	16.4	0.30
5	9.0	1 810	5.3	21.4	15.1	0.35
6	4.5	1 980	20.0	28.9	18.2	0.30
7	0.3	2 500	35 000	—	—	0.20
8	3.1	1 050	200	—	—	0.25
9	0.36	2 200	400	—	—	0.24

型与网格划分如图 2 所示。模型左右两面约束其水平位移,底面约束其竖向位移,上表面为自由边界。土体本构模型选用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。

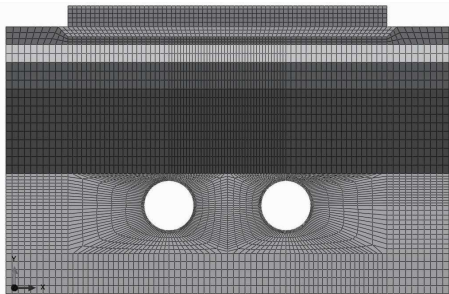


图 2 计算模型与网格划分示意图

为简化模型,对物理力学参数相近的土层进行合并,土层的模型参数取相应土层内参数的加权平均值。合理简化后土体分 6 层,自上而下依次为填土、黏土、淤泥土、黏土、淤泥质粉质黏土夹粉、粉质黏土,加权平均厚度分别为 2.0 m、2.0 m、3.0 m、9.5 m、9.0 m、4.5 m。

材料物理力学参数见表 3(9 种材料:1 填土、2 黏土、3 淤泥土、4 黏土、5 淤泥质粉质黏土夹粉、6 粉质黏土、7 盾构衬、8 泡沫轻质土、9 路面结构)。

4.2 施工过程模拟

利用有限元分析软件 ABAQUS 对盾构上方软基处理及路基填筑,进行多步仿真分析,如图 3 所示。分析过程如下:

- (1)平衡初始地应力场,得到软基处理及路基填筑前的初始应力状态;
- (2)杀死开挖土体单元,模拟现状需换填土体的开挖;
- (3)激活与开挖土面积相同的泡沫轻质土单元,模拟泡沫轻质土的换填;
- (4)激活地面线以上泡沫轻质土路基,模拟路基填筑;
- (5)激活路面结构单元,模拟路面结构填筑。

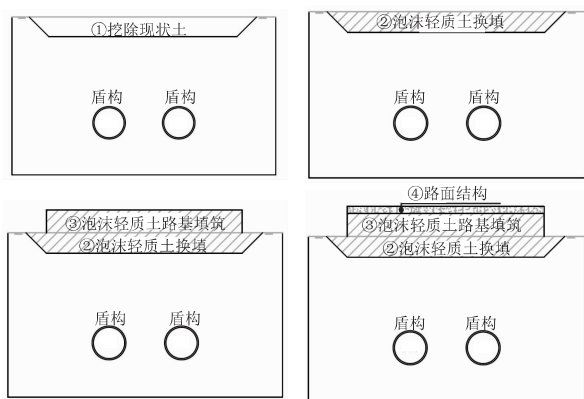


图3 软基处理及道路填筑过程模拟示意图

4.3 数值计算结果分析

本文通过竖向位移对土体进行变形规律分析,通过等效变形对盾构管片变形进行分析,考虑到两个盾构管片应力及变形完全对称,仅选取一个盾构管片(右侧)进行分析。

道路施工完成后,由土体竖向变形及盾构管片等效变形云图(如图4、图5所示),可知盾构管片最大等效变形为1.13 cm,土体最大变形发生在开挖面附近,竖向位移为6.21 cm(↓),与通过上文推导公式计算的 s_d 值7.72 cm较为接近,存在差异主要由于计算公式未考虑土体塑性变形的影响。数值模拟得到的变形值与公式计算得到的结果基本吻合,说明建立的数值模型能够较好地反映施工过程土体扰动规律。

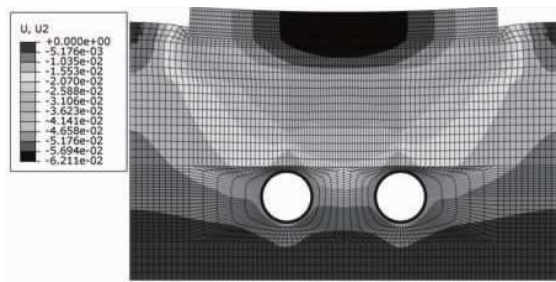


图4 最终土体竖向变形云图

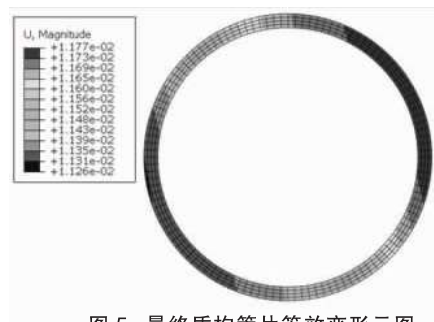


图5 最终盾构管片等效变形云图

5 结语

本文提出了盾构上方填方路基浅层处理方案并推导出相关定量计算公式。依托工程实例,推导公式计算结果与有限元数值分析结果基本一致,验证了本文计算方法及推导公式的合理性。按照本文提出的定量分析方法及计算公式确定的处理方案,可有效控制道路软基处理施工造成的盾构上荷载变化和变形,降低对既有盾构结构的影响。

参考文献:

- [1] Working Group No.2, International Tunnelling Association. Guidelines for the design of shield tunnel lining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(3): 303—331.
- [2] Beaton J L, Burke J E, Sherman G B, et al. Design and construction of transportation facilities[J]. Highway Research Circular, 1972, 134:5.
- [3] 李群. 泡沫轻质土在既有软基道路扩建中的应用及沉降预测研究[D].北京:北京科技大学,2019.
- [4] 姚明, 项小伟. 侧限条件下泡沫轻质土压缩特性研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(2):42-48.
- [5] 吕荔炫. 软土路基堆载下既有隧道变形特性分析 [J]. 路基工程, 2019, 32(3):125-128.
- [6] 唐强森, 刘涛. 近距离上层隧道施工对下层隧道的扰动影响[J]. 地震工程学报, 2018, 40(3):591-603.
- [7] 徐立明. 近距离基坑开挖对下方既有隧道的扰动影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(S2):1603-1611.
- [8] 王道华. 软土地基水泥土搅拌桩施工扰动情况现场测试及分析[J]. 河南科学, 2014, 32(8):1520-1523.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com