

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.01.053

采用轻质填料填筑路堤对其下方盾构隧道的影 响研究

李 阳

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 在城市已运营盾构隧道附近建设新的工程,是城市建设中越来越难以避免的课题。无论在盾构隧道上方加载或者卸载,都将对盾构隧道的结构受力和安全运营产生长期的影响。针对此问题,在填筑路堤时,提出先挖方,后采用轻质填料等荷载置换法,解决填筑路堤施工对盾构隧道的影响这个问题。在分析过程中,以实际工程为依托,采用 Plaxis 有限元软件建立路基-隧道-土耦合模型,考虑位移、超孔隙水压力等方面,研究了路基施工对地铁盾构隧道的影响,并分析变形规律,得到相应的结论。其成果可为同类工程起到参考作用。

关键词: 盾构隧道;超孔隙水压力;固结沉降;地层隆起

中图分类号: U452

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)01-0204-04

0 引 言

我国城市建设经过高速发展,城市内各种各样的存量交通基础设施已经非常密集,随着城市化进程的进一步推进,新建工程难以避免会与既有交通基础设施距离近,甚至在平面关系上相互重叠,对既有交通基础设施或多或少存在影响,有时甚至危及既有设施的结构安全。

特别的,对于城市地铁盾构隧道而言,由于盾构隧道对地层变形非常敏感,过大的变形会导致隧道管片病害,引起隧道出现开裂、渗漏水等问题^[1],危及地铁隧道的运营安全。故须对此问题进行详细地分析,以确保运营结构的安全。

一个重要的思路是采用轻质路基填料填筑路基,如采用泡沫混凝土、EPS 板等^[2]。为尽量减小地层附加应力,需要部分开挖卸载,以轻质填料置换土体,达到等荷载置换的目的。本文基于工程实践,研究在既有地铁盾构隧道上方填筑路基时,采用轻质路基填料情况下,结合理论计算和现场实测数据,分析填筑路基挖方时的卸载与填方时的加载对地铁隧道的作用机理。

1 工程概况

中山南路南浦大桥 W3 上匝道位于黄浦区外滩金融集聚带的核心区域,西侧为黄浦区目前在建规

模最大的董家渡金融城开发项目,东侧为待开发的南外滩滨水区和南浦地块。

因地块开发及现场交通需要,需对 W3 上匝道进行改造。通过对 W3 上匝道纵断面线形的调整实现匝道南移,根据改造方案,在道路落地点须设置填方路基段,最高填土高度为 2.36 m。

W3 匝道改造工程匝道落地点与地铁四号线相毗邻,平面投影距离约 1.5~2 m,盾构隧道在改造终点段埋深 18.5 m,见图 1、图 2。

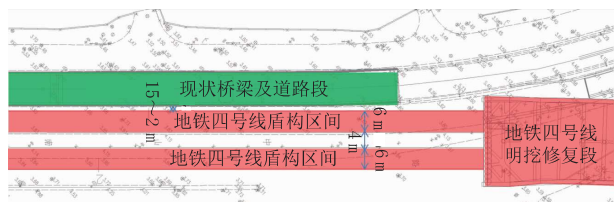


图 1 本项目与地铁 4 号线位置示意图

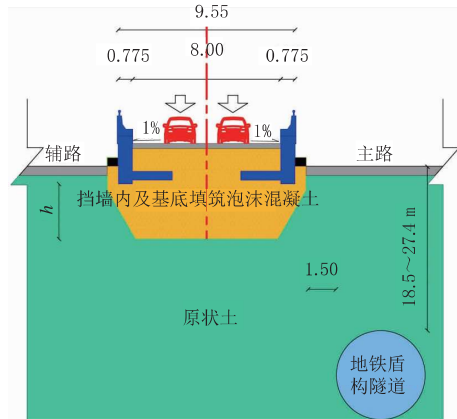


图 2 本项目与地铁 4 号线横断面关系示意图(单位:m)

为消除桥台处新增匝道填土及挡墙荷载对地铁四号线的影响,设计采用先超挖卸载再回填泡沫混凝土填方的设计思路,原则上在填方到路基完成面后,

收稿日期: 2021-08-12

作者简介: 李阳(1979—),男,硕士,高级工程师,从事市政工程设计工作。

地基附加应力不增加。

根据这个原则,填方最高处约为 2.36 m,泡沫混凝土容重约 6 kN/m^3 ,路基开挖土方按 18 kN/m^3 ,考虑需要在泡沫混凝土两侧设置钢筋混凝土挡墙作为泡沫混凝土浇筑的模板及安装防撞墙的基础,综合计算,这段路基按开挖原状 3 m 深度土方换填泡沫混凝土设计。附加荷载计算如下(每延米):

泡沫混凝土重: $6 \text{ kN/m}^3 \times 49 \text{ m}^3 = 294 \text{ kN}$;

混凝土挡墙重: $26 \text{ kN/m}^3 \times 5.1 \text{ m}^3 = 132.6 \text{ kN}$;

土方卸荷: $18 \text{ kN/m}^3 \times 31.7 \text{ m}^3 = 570.6 \text{ kN}$;

只计算恒载,附加荷载为 $294 + 132.6 - 570.6 = -144 \text{ kN}$ 。

考虑 20 kPa 活载,路面宽度为 7 m ,荷载为 140 kN ,基本做到 0 附加应力。

2 模型建立

本次分析采用 Plaxis 有限元计算软件,采用平面应变二维模型,为消除边界条件对计算结果的影响,计算模型平面尺寸取为 70 m (水平向) \times 50 m (竖向);模型深度按实际土层划分,取到第 7 号土层,深度达到 70 m ;隧道采用板单元模拟。考虑到隧道附近会产生应力集中等现象,在隧道区域对网格进行加密,并向远处逐渐增大;兼顾土层分布,模型网格划分见图 3。

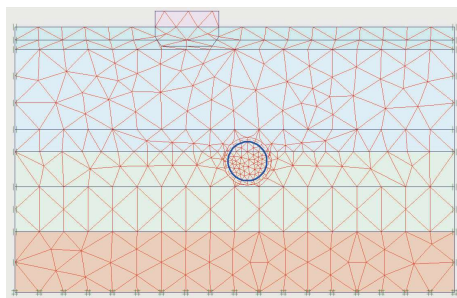


图 3 Plaxis 有限元模型

土体模型采用适合上海地层的 HS 模型^[3],参数根据现场实际土层物理力学性质,结合研究目的,结合地勘单位给出的实际地层参数,得到土层弹性模量或回弹模量,其它地勘报告中没有提供的地层参数则根据上海地区其它工程项目的土层参数及相关规范进行经验取值。考虑堆载固结时,回弹模量取为压缩模量的 3~4 倍。

最终确定各土层的物理力学性质参数见表 1。

本次分析共分成如下几个荷载步,(1)地应力平衡;(2)加入隧道结构,并将位移归零;(3)开挖基坑,开挖基坑的施工时间为 30 d;(4)填筑路基,路基施工时间为 30 d;(5)固结计算,考虑固结时间为 10 a(3 650 d)。

3 施工期地层及隧道位移分析

根据计算结果,基坑开挖后,位移云图见图 4,在挖方区域引起较大的回弹,最大回弹量达到 6 mm 。

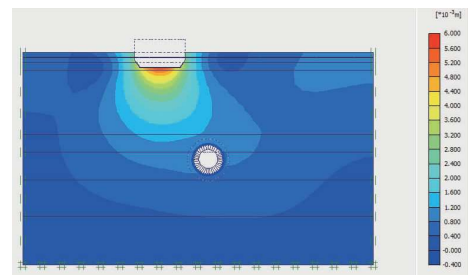


图 4 基坑开挖后地层变形云图

隧道结构随着地层的回弹同时产生了隆起,见图 5,隆起变形量约 1 mm ,变形方向约斜向上 45° ,即向上及向开挖方向变形。

路基开挖回填后,考虑 30 d 的施工期,则施工期内的地层变形见图 6,隧道变形见图 7,此时,路基正下方开挖面处依旧存在部分回弹值,约为 2.8 mm 。

隧道在施工期内依然存在隆起,但由于路基回填加载作用,隆起变形量有了很大的改善,隆起值仅约为 0.5 mm 。

表 1 计算采用的地层参数

层号	土层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	渗透系数		固结快剪		压缩模量 $E_{\text{ed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	弹性模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$
			温度 $20^\circ\text{C}K_V/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	温度 $20^\circ\text{C}K_H/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$		
1	淤泥质粉质黏土	17.6	$3.02\text{e-}6$	$4.24\text{e-}6$	13	15	3.19	9.6
2	灰黄色粉质黏土	18.5	$3.57\text{e-}6$	$5.91\text{e-}6$	18	19	4.24	12.7
3	淤泥质粉质黏土	17.6	$3.02\text{e-}6$	$4.24\text{e-}6$	13	15	3.19	9.6
4	淤泥质黏土	16.9	$2.11\text{e-}7$	$3.07\text{e-}7$	12	10.5	2.27	9.15
5	粉质黏土	17.3	$5.20\text{e-}6$	$5.20\text{e-}6$	18	18.0	4.38	10.8
6	粉质黏土	17.9	$3.80\text{e-}6$	$6.20\text{e-}6$	41	17.5	8.01	24.0
7-1	砂质粉土	19.7	$1.2\text{e-}4$	$1.5\text{e-}4$	4	32.5	12.03	36.1
7-2	粉砂	18.9	$5.0\text{e-}4$	$5.5\text{e-}4$	4	32.5	12.03	36.1

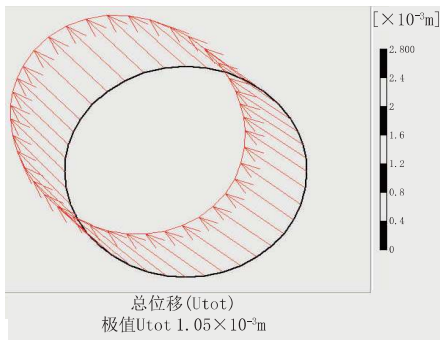


图 5 地铁隧道变形示意图

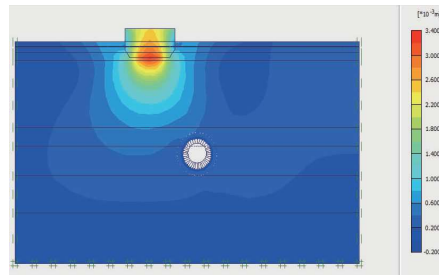


图 6 施工期内路基回填后地层变形云图

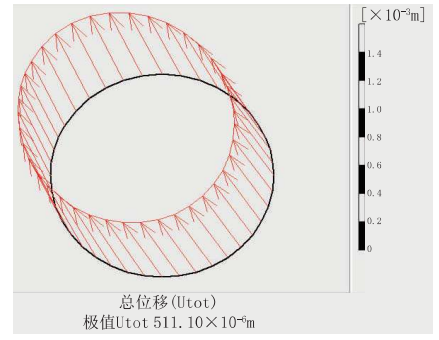


图 7 施工期内路基回填后隧道变形云图

4 隧道及地层长期性态分析

为了了解开挖卸载及填方加载对地层及盾构隧道的长期影响, 首先应该研究地层中超孔隙水压力的消散情况, 图 8 给出了从路基基坑开始开挖卸载, 一直到超孔隙水压力消散完成之后隧道周围的超孔隙水压力随时间的变化情况。从图中可以看出, 0 ~

30 d 卸载期间, 地层隆起出现超静负孔隙水压力, 由于卸载出现在隧道左侧地面, 负孔压分布规律为左侧及上侧较大, 而右侧及隧道下侧较小, 负孔压最大的位置位于 B 点(距开挖面较近处的隧道侧面), 达到 7 kPa, 负孔压最小的位置位于 D 点(距开挖面较远处的隧道侧面), 为 4.5 kPa。

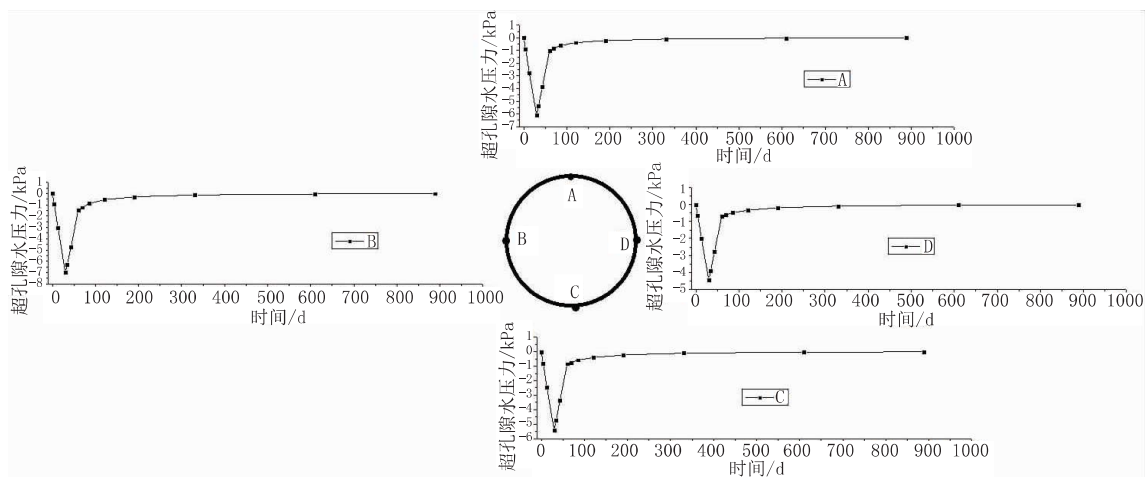


图 8 地道周围超孔隙水压力消散示意图

随着 30 ~ 60 d 开始回填加载, 超静负孔隙水压力急剧减小, 到 60 d 堆载结束时, 负孔压最大的 B 点剩余 1.5 kPa, 减小约 78.5%; A 点负孔压剩余值约 1 kPa, 减小约 83.6%; C、D 两点负孔压消散约 84.5%。

从图中还可以看出, 超静负孔压完全消散大约在路基施工完成后 620 d 左右完成, 而 95% 消散完毕只需要约 140 d, 故随着超孔隙水水压力的减小, 其消散速度快速减缓。

从图 9 中可以看出, 盾构隧道的位移主要发生在施工期, 隧道在地面加载时, 由于加载作用的影响下沉, 但在完工后, 随着超静负孔压的消散, 隧道上浮, 即隧道的工后位移体现为上浮。

以 A 点为例, 在地面挖方卸载时, 30 d 工期内隧道上浮量为 0.74 mm, 随后填筑路堤加载, 隧道沉

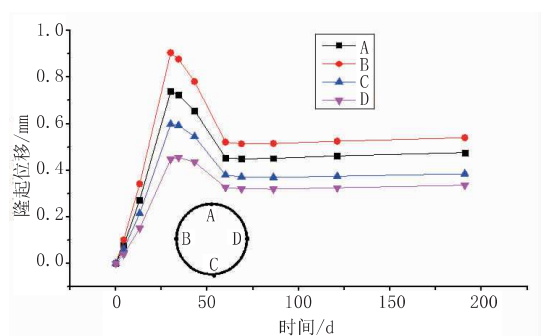


图 9 盾构隧道的位移示意图

降, 沉降量为 0.29 mm, 即上浮总量减小为 0.45 mm, 之后随着超静负孔隙水压力的消散, 隧道上浮约 0.023 mm, 工后位移占隧道总位移的 3.1%。

5 结 语

(1) 利用 Plaxis 建立路基 - 隧道 - 土耦合模型进

行固结分析,分析表明,隧道随着挖方卸载隆起,填方加载沉降,总体位移可以控制在 1 mm 以内,可以满足隧道安全运营的要求。

(2)路基填挖方施工在隧道周围产生的超静负孔隙水压力,超静孔压完全消散大约在路基施工完成后 620 d 左右完成,而 95%消散完毕只需要约 140 d,故随着超孔隙水水压力的减小,其消散速度快速减缓。

(3)隧道的变形主要发生在施工期,施工后的地层固结影响对隧道工后变形的影响较小。

(4)在运营隧道上方进行填筑路基等需要加荷施工时,首先挖方卸载再换填轻质材料的方案是可行的,对运营隧道的影响较小。

参考文献:

- [1] 谢家冲,王金昌,黄伟明.地面堆载作用下盾构隧道管片开裂行为分析[J].铁道科学与工程学报,2021(18):162-171.
- [2] 徐玉锋.地铁隧道上方 EPS 轻质泡沫块桥坡填筑施工技术[J].城市道桥与防洪,2019(1):123-126.
- [3] 刘小丽,马悦,郭冠群,等.PLAXIS2D 模拟计算基坑开挖工程的适用性分析[J].中国海洋大学学报,2012,42(4):20-24.

(上接第 199 页)

表 1 主梁涡振性能

等效模型	1	2	3	4
卓越频率 f/Hz	10.0	10.438	15.426	14.0
斯特哈罗数 $S_r = fD/U$	0.256	0.277	0.409	0.371
发振风速 $V_s = f_s D_s / S_s$	14.825	14.202	9.610	10.589

静力三分力系数影响较小,空间斜腹杆迎风面积大小对静力三分力系数影响较大,升力系数与阻力系数对攻角变化较为敏感。

(4)4 种等效模型中,升力系数功率谱存在较为明显的卓越频率。从时程曲线中也可以看出,4 种等效模型升力系数功率谱存在低频段和高频段,结构在较低风速下可能发生涡振。

参考文献:

- [1] 部门中交公路规划设计院.公路桥梁抗风设计规范[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 沈自力.基于 cfd 的桁架桥气动参数研究[J].铁道科学与工程学报,2015(4),852-858.
- [3] 汪斌,李永乐,郝超,等.大跨度连续刚构桥钝化主梁气动特性数值分析[J].四川建筑科学研究,2008,34(5):19-22.
- [4] 李永乐,安伟胜,蔡宪棠,等.倒梯形板桁主梁 CFD 简化模型及气动特性研究[P].全国结构工程学术会议,2010.
- [5] Menter F R, M.Kuntz, R.Langtry. Ten years of experience with the sst turbulence model Turbulence Heat & Mass Transfer,2003,4.
- [6] 纪兵兵,陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [7] 陈政清.桥梁风工程[M].北京:人民交通出版社,2005.