

DOI: 10.11779/CJGE201908023

大直径盾构下穿越导堤数值分析

杨建刚

(上海隧道工程有限公司, 上海 200032)

摘要: 以上海沿江通道隧道工程为背景, 采用有限差分法模拟超大直径盾构隧道开挖对上海吴淞导堤的影响, 评价堤身加固在控制导堤变形、沉降差、堤顶地表沉降等方面的效果; 分析开挖面土体加固对控制地层损失的有利影响程度、及在泥水盾构隧道中谨慎采用土体加固的原因。结合现场实际施工情况与监测数据, 得出穿越过程中盾构主要施工参数确定的原则及控制措施。

关键词: 大直径; 下穿越盾构隧道; 导堤; 数值分析; 现场监测

中图分类号: U455.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)08-1569-04

作者简介: 杨建刚(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事隧道工程施工等方面的研究工作。E-mail: 276584314@qq.com。

Finite difference analysis of impact of undercrossing super-large-diameter shield tunnel on training jetty

YANG Jian-gang

(Shanghai Tunnel Engineering Construction Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Based on the tunnel project of highway passage along Yangtze River in Shanghai, the impact of undercrossing super-large-diameter shield tunnel on training jetty is analyzed by using the finite difference methods. The deformation of jetty structures, settlement difference and ground settlement of jetty top are used to evaluate the improvement effectiveness of jetty structures. The numerical simulation method in cooperation with the construction experience is employed to study the soil reinforcement at the excavation face of shield tunneling, and its advantages and disadvantages are analyzed. Finally, based on the numerical analysis and in-situ monitoring results, the key construction parameters and control measures of the shield tunnel undercrossing the training jetty are obtained.

Key words: large diameter; undercrossing shield tunnel; training jetty; numerical analysis; in-situ monitoring

0 引言

随着中国城市交通的快速发展, 大直径盾构隧道在越江跨海通道工程中得到了越来越多的应用, 盾构下穿越河堤、海坝成为这类工程很难回避的课题。业界对盾构隧道施工引起堤防沉降过大甚至坍塌的风险进行了大量分析, 并得出了很多有指导性的控制技术。而盾构下穿越两河交汇的导堤却鲜有报道, 导堤虽与堤防有类似之处, 但导堤为满足河道通航与冲刷要求, 通航侧河床比降较堤防河床比降大很多, 另外, 导堤结构形式与所处环境与堤防也有较大差异。因此, 定性分析盾构穿越对导堤的影响, 对盾构穿越前制定针对性的导堤加固方案, 穿越时确定合理的盾构施工参数, 穿越过程中根据监测数据及时调整施工参数、并采取针对性的应对措施, 对保证导堤的安全具有十分重要的意义^[1-2]。

本文以上海沿江通道隧道工程为背景, 采用基于地层损失率的位移控制有限差分法, 分析盾构下穿越

对导堤的影响, 并评价导堤的加固效果。

1 工程概况

上海沿江通道越江隧道是上海市郊环线(G1501)闭合工程越江节点, 位于上海市北部, 连接外环线浦东段和郊环线宝山段, 隧道总长 6.465 km, 采用两台 $\Phi 15.43$ m 超大直径泥水平衡盾构开挖施工, 吴淞导堤处于盾构由长江进入黄浦江下穿越的界线(见图 1)。

始建于 1907 年的吴淞导堤, 称为黄浦江的门户。其作用是阻挡长江落潮水流携带的泥沙, 避免吴淞口淤堵, 确保吴淞口满足通航要求, 具有很高的水利功能和历史文化价值, 是本工程下穿的地面构筑物中最重要的、容错率最小的水工构筑物。导堤自南向北偏东布置, 曲率半径为 2400 m, 总长 1395 m, 为弧形双斜坡式半潜堤, 其土石结构见图 2。



图 1 上海沿江通道隧道工程平面图

Fig. 1 Plan view of tunnel of highway passage along Yangtze River

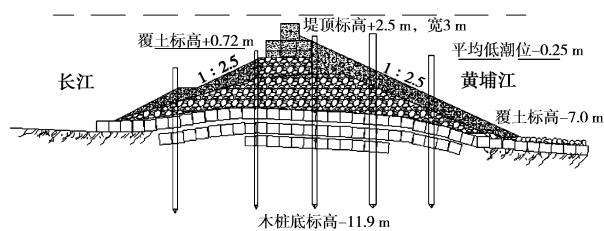


图 2 吴淞导堤结构剖面图

Fig. 2 Schematic of Wusong jetty

2 计算分析

2.1 计算模型及区域

土体采用修正的 Mohr–Coulomb 模型，导堤、管片、注浆层采用弹性模型。模型的计算区域为垂直距离 $3D+H$ ，纵向长度 $5D+H$ ，宽度方向自两隧道圆心连线中点左右各取 $5D$ 。其中， D 指盾构直径， H 为隧道中心埋深，长 \times 宽 \times 高 = 113 m \times 190 m \times 83 m ($D=15$ m, $H=38$ m)，两隧道间水平间距为 30 m。

2.2 材料物理力学参数

土体参数取值依据《沿江通道越江隧道岩土工程勘察报告》（详细勘察）。计算中，上覆表层土和下卧土层采用土层力学参数的加权平均值，权重为各土层的厚度，材料物理力学参数见表 1 所示。

表 1 材料物理力学参数

Table 1 Geotechnical parameters for numerical simulation					
材料	密度 /(kg·m ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比 ν	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
① ₁	1780	13.3	0.32	18.6	19.3
② ₃	1810	25.4	0.30	8.0	27.5
③	1820	12.0	0.35	13.0	16.0
④	1680	8.1	0.35	13.0	11.5
⑤	1800	15.6	0.35	16.0	13.0
导堤土石	2400	2.55×10^4	0.20	—	—
管片	2500	2.55×10^4	0.20	—	—
浆液	2100	2.585×10^3	0.20	—	—

2.3 盾构下穿越对导堤的影响分析

实际施工中，先行施工右侧隧道、后施工左侧隧

道，且右侧隧道较左侧隧道进度快约 100 环（即两台隧道间前后距离约 200 m）。为分析盾构开挖施工对导堤的影响，选取右侧盾构切口距导堤轴线距离 $2D$ （ D 为盾构直径）、右侧盾尾脱离导堤、左侧盾构切口距导堤轴线距离为 $2D$ 、左侧盾尾脱离导堤 4 个工况进行模拟。

图 3、4 分别为导堤底面、顶面轴线处横向沉降计算曲线，由图 3、4 可见：①导堤底面的位移变形量较顶面位移量大约 5%，但两者的变形规律类似；②先行盾构下穿越导堤前（距导堤轴线距离 $2D$ ），盾构施工对前方导堤产生挤压隆起效应，最大隆起值为 7.5 mm，主要影响范围为隧道圆心两侧各 $1D$ 区域；③先行盾构完成穿越、盾尾脱离导堤后，导堤主要表现为沉降，在隧道正上方对应的导堤底沉降量最大、最大值为 44.0 mm；④后行盾构下穿越导堤前（距导堤轴线距离 $2D$ ），后行盾构施工对前方导堤产生挤压隆起效应、最大隆起值为 11.5 mm，先行隧道正上方对应导堤沉降量有所减小、最大沉降量为 37.0 mm；⑤后行盾构脱离导堤后，隧道施工影响范围导堤整体表现为下沉，沉降槽宽度较先行盾构脱离导堤工况下增大 1 倍，但最大沉降量几乎没有增长，最大沉降量为 46.5 mm。

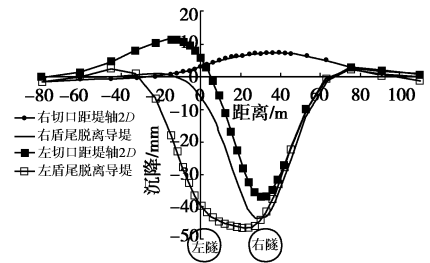


图 3 导堤底面轴线横向沉降计算曲线

Fig. 3 Curves of transverse ground settlement of bottom of jetty

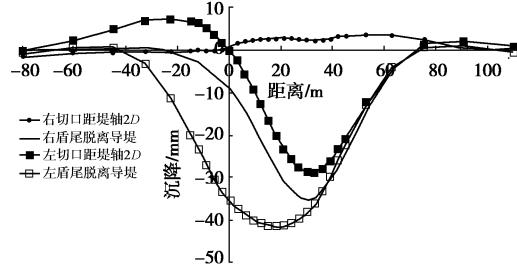


图 4 导堤顶面纵轴线横向沉降计算曲线

Fig. 4 Curves of transverse ground settlement of top of jetty

图 5 为在上述 4 个工况下，左、右隧道正上方导堤底沿隧道纵轴线方向的沉降计算曲线。由图 5 可见：①先行盾构下穿导堤前，导堤底整体呈隆起状态，且沿推进方向隆起值呈递增趋势，最大隆起值约 11.0 mm；②先行盾构盾尾脱离导堤后，导堤底整体呈下

沉状态, 先行隧道侧沉降量明显大于后行隧道侧, 先行侧最大沉降量约为 27.0 mm、后行侧最大沉降量约为 11.0 mm; ③后行盾构下穿导堤前, 先行隧道侧整体呈下沉状态, 最大沉降量为 25.0 mm, 后行隧道侧整体呈隆起状态, 最大隆起量为 14.0 mm; ④后行盾构盾尾脱离导堤后, 导堤底再次呈整体下沉状态, 先行隧道侧最大沉降量为 26.0 mm, 后行隧道侧最大沉降量为 52.0 mm。

综合图 3~5, 可以得出: ①垂直于盾构推进方向, 沉降曲线呈倒“抛物线”型, 在两隧道间正上方对应的导堤, 偏先行隧道侧沉降斜率约为 1.08‰, 偏后行隧道侧沉降斜率约为 0.34‰, 且最大沉降值偏于先行隧道侧, 表明两洞隧道中施工顺序对导堤沉降有较大影响——即先行隧道侧要大于后行隧道侧; ②平行于盾构推进方向, 导堤底沉降随推进方向呈单调递减, 先行隧道正上方导堤底沿推进方向沉降斜率为 0.83‰, 后行隧道正上方导堤底沿推进方向沉降斜率为 0.49‰, 表明盾构下穿越方向对导堤沉降影响也较大——即盾构起始穿越侧的沉降要大于穿越结束侧, 且导堤向起始侧倾斜。

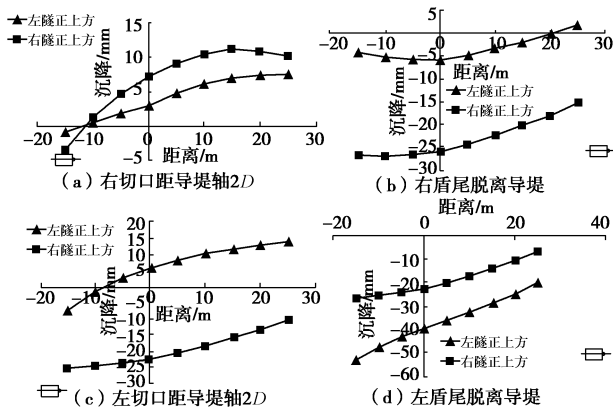


图5 隧道正上方导堤底面纵向沉降计算曲线

Fig. 5 Curves of longitudinal structural settlement of jetty

3 堤身加固效果分析

导堤堤身加固主要是采用抛石灌砌对措施, 导堤底部加宽和放缓坡面坡度, 坡面由 1:2.5 放缓至 1:3 ~ 1:4。

图 6, 7 分别为导堤加固前后底面横向沉降与纵向沉降的对比曲线。由图 6, 7 可见: ①导堤加固后, 盾构推进施工对导堤变形影响要小于加固前, 且隆起变形(加固前、后最大隆起变形分别为 7.4, 1.3 mm)减小的幅度要明显大于沉降变形减小的幅度(加固前、后最大沉降变形分别为 46.5, 42.2 mm), 这是由于导堤加固一方面增加了导堤底的支撑面积, 另一方面也增加了导堤的重量, 加固后的导堤在抑制施工引起的

隆起方面效果非常明显, 但在减缓施工引起的沉降方面效果非常有限; ②导堤加固前后, 其最大隆起变形斜率分别为 0.45‰和 0.40‰, 其最大沉降变形斜率分别为 0.83‰和 0.38‰, 表明加固后导堤的整体稳定性更好, 可显著减小导堤的倾斜变形。

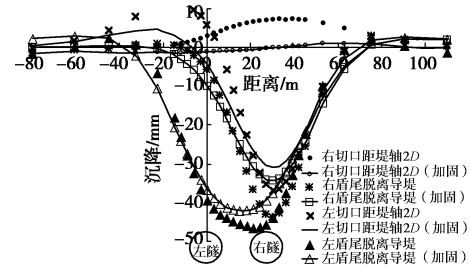


图6 导堤加固前后底面轴线横向沉降对比曲线

Fig. 6 Curves of transverse settlement of pre- and post-reinforcement

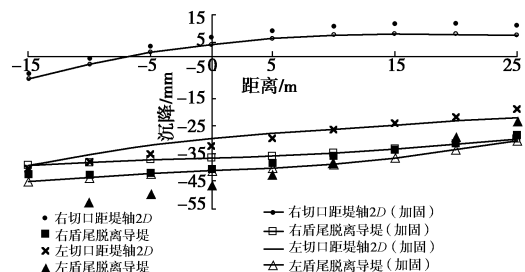


图7 导堤加固前后底面最大纵向沉降对比曲线

Fig. 7 Curves of longitudinal settlement of pre- and post-reinforcement

4 土体加固效果分析

为分析开挖面土体加固对控制导堤变形影响的程度, 采用盾构进出洞类似的土体加固, 分别加固导堤底下两隧道开挖面四周外扩 3 m 的方形区域土体, 使加固土体的无侧限抗压强度不小于 1.0 MPa。计算模拟中参考文献[3], 选取浆体-粉质黏土的弹性模量为 47.2 MPa, 泊松比为 0.26。

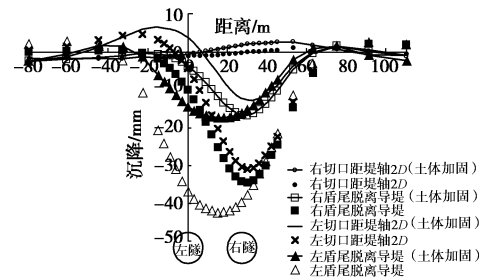


图8 土体加固前后底面轴线横向沉降对比曲线

Fig. 8 Curves of transverse settlement of pre- and post-reinforcement

图 8 为土体加固前后底面横向沉降的对比曲线。由图 8 可见: 土体加固后能显著减小盾构掘进施工引

起的地层损失,左、右两条隧道下穿导堤后,土体加固前、后导堤底的最大沉降量分别为42.3, 17.2 mm,土体加固后最大沉降仅为加固前的1/3。

土体加固虽能显著减小地层损失,但考虑到导堤顶宽度狭窄(宽度约为3~5 m)、大型土体加固设备在导堤上施工作业困难,泥水盾构在加固体中穿越既进行缓慢又对设备损耗风险极大,应慎重选择土体加固措施。在土体未加固的情况下,应结合类似盾构穿越大堤的施工经验、数值分析得到的结论与监测数据反馈的信息,采取优化盾构施工参数与导堤注浆等措施控制盾构下穿越导堤的施工风险。

5 现场监测结果分析

图9为导堤顶面横向计算沉降计算值与监测值对比。由图9可知、导堤顶面最大沉降量为38.0 mm,且偏向先行隧道侧;数值模拟计算曲线与现场沉降监测曲线较为接近,计算量值要大于监测值;采用数值模拟计算结果、按Peck公式计算得到的地层损失率不超过9.0‰。

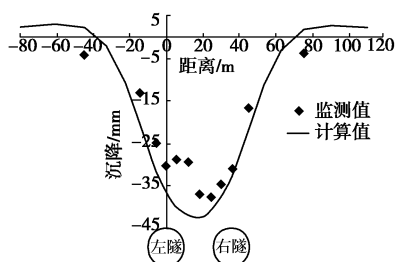


图9 导堤顶横向沉降计算值与监测值对比

Fig. 9 Curves of transverse ground settlement

计算结果和监测数据均反映,大直径盾构隧道下穿导堤施工风险可控,监测结果小于计算值主要与根据数值分析得出的规律与监测数据反馈信息在导堤预留注浆孔及在导堤开裂较大部位开设注浆孔及时压密注浆,及时优化同步注浆量、优化后注浆孔注浆时机、注浆量等有关。

6 结 论

对大直径盾构穿越导堤的施工力学性态进行了三维有限差分数值模拟,并对对比分析了堤身加固与未加固、开挖土体加固与未加固工况下盾构施工对导堤结构的影响,得到如下结论:

(1)导堤的纵、横向沉降曲线反映,盾构穿越导堤的方向,上、下行隧道的施工顺序对导堤结构的位移变形有一定影响。沿盾构推进方向,盾构进入侧的导堤结构沉降要大于盾构脱离侧的沉降;横向方向,

先行隧道侧导堤结构沉降要大于后行隧道侧的沉降。

(2)导堤坡度放缓及加固一方面增加了导堤底的支撑面积,另一方面也增加了导堤的重量,加固后的导堤虽然在减缓施工引起的最大沉降方面效果有限,但在控制施工引起的隆起方面效果非常明显。

(3)沿盾构推进方向,导堤加固前后,其最大隆起变形斜率分别为0.45‰和0.40‰,其最大沉降变形斜率分别为0.83‰和0.38‰,表明加固后导堤的整体稳定性更好,可显著减小导堤的倾斜变形。

(4)开挖面土体加固可显著降低地层损失,如本工程计算案例可将盾构开挖施工引起的地层损失降低至未加固的1/3,但考虑到导堤顶部狭窄(宽度约为3~5 m),大型土体加固设备在导堤上施工作业困难,泥水盾构在加固体中穿越既进行缓慢又对设备损耗风险极大,应慎重选择土体加固措施。在土体未加固的情况下,应结合类似盾构穿越大堤的施工经验、数值分析得到的结论与监测数据反馈的信息,采取优化盾构施工参数与导堤注浆等措施控制盾构下穿越导堤的施工风险。

(5)盾构下穿越导堤的过程中,应根据上覆水、土压力确定泥水压力,并根据数值计算结果与监测反馈信息优化泥水压力、注浆时机与注浆量等因素,并结合在导堤上预留的注浆孔及导堤裂缝处进行压密注浆,可将导堤顶面测点最大沉降控制在38.0 mm,按照数值模拟计算结果,地层损失率可控制在9.0‰以内,达到了较好的控制效果,可保证导堤的结构安全。

参考文献:

- [1] 李宗梁,黄锡刚. 泥水盾构穿越堤坝沉降控制研究[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(1): 103 - 110. (LI Zong-liang, HUANG Xi-gang. Study on settlement control for slurry shields crossing the embankment[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(1): 103 - 110. (in Chinese))
- [2] 韩磊,叶冠林,王建华,等. 浅覆土大直径盾构穿越对河堤影响的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊1): 125 - 128. (HAN Lei, YE Guan-lin, WANG Jian-hua, et al. Finite element analysis of impact of under-crossing of large shallow shield tunnel on riverbank[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S1): 125 - 128. (in Chinese))
- [3] 郭炎伟. 注浆加固土的力学模型及隧道工程应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016. (GUO Yan-wei. Study of mechanical model of reinforced soil by pre-grouting and its application in tunnelling practices[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese))