

土压平衡盾构施工穿越钱塘江大堤沉降控制分析

任瑛楠¹, 王弘琦^{1, 2}, 王建华¹

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240; 2. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 250013)

摘要: 针对杭州地铁 1 号线区间隧道土压平衡盾构穿越钱塘江大堤的施工过程, 建立隧道-土体-大堤三者相互作用的三维非线性有限元模型, 分析了大堤沉降和变形的特点, 得出盾构穿越施工对防洪堤的影响主要是由于土体的变形和位移而造成。考虑到防汛大堤的重要性, 结合工程实践, 提出了土压平衡盾构穿越大堤时有效控制地面沉降的措施。现场测试结果表明数值分析反映了穿越施工的基本性状, 但施工前进行沼气释放的江南大堤沉降明显大于数值分析结果, 表明沼气释放引起的底层损失对于地面沉降和结构安全有巨大影响, 今后同类施工中应加以注意。

关键词: 土压平衡盾构; 越江隧道; 防汛大堤; 地面沉降; 施工控制

中图分类号: TU47; U45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)S2-0936-04

作者简介: 任瑛楠(1989-), 男, 辽宁凌源人, 硕士, 主要从事地基处理及基坑工程等方面的研究。E-mail: ryn1989@126.com。

Settlement control of Qiantang River embankments during undercrossing of EPB shield tunnels

REN Ying-nan¹, WANG Hong-qi^{1,2}, WANG Jian-hua¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: The earth pressure balance (EPB) shield has been widely used in construction of cross-river tunnels, and it is difficult to protect the embankments during crossing. Based on the construction of Hangzhou No. 1 subway tunnel under crossing Qiantang River, a tunnel-soil-levee interaction nonlinear finite element model is established. Through analyzing the characteristics of displacement and deformation, it is found that the settlement of embankment is mainly caused by deformation and displacement of soils when the shield traverses the embankment. Considering the significance of the embankment, some practical and effective measures are suggested for the earth pressure balance shield. The field test results show that the numerical analysis reflects the basic characters of construction. The settlement caused by releasing methane before construction is significantly greater than that of numerical analysis, and the releasing methane has a huge impact on the ground settlement and structural safety. Attention should be paid to similar projects.

Key words: earth pressure balance shield; cross-river tunnel; embankment; ground settlement; construction control

0 引言

随着城市经济的发展和规模的扩张, 交通量日渐增加, 地面交通已经很难满足人们的出行需求, 尤其对于各大沿海城市来说, 穿城而过的河流成为实现城市交通一体化的巨大阻碍。盾构隧道因具有对沿岸设施影响小、不制约航运、不受气象条件影响、抗震性能好等优点, 近年来在越江工程中被广泛采用^[1]。但盾构法仍不可避免会对周围土体产生扰动, 引起地面沉降和周围地层移动, 在穿越江底及两岸防汛结构时会对其产生影响。防洪大堤作为城市防洪体系中最主要的组成部分, 其结构的完整性直接关系到能否有效抑制洪水, 保护沿岸人民每年远离洪灾, 免遭财产损

失。对于过江隧道盾构穿越大堤的施工已有不少相关的工程经验。毛建东^[2]对某盾构穿越钱塘江大堤的监测成果做了分析研究, 沈建奇等^[3]通过基于并行计算的盾构机过大堤三维数值模拟, 预测了盾构机过大堤时对大堤的影响关系, 张忠苗等^[4]对杭州某过江盾构隧道穿越大堤的地层沉降进行了分析, 并提出了相应的控制措施。盾构法越江隧道施工在穿越大堤时, 如何采取有效的控制措施减少对大堤的扰动, 控制地面沉降是非常重要的问题^[5]。

本文通过对杭州地铁 1 号线工程滨江路站—富春

路站穿越钱塘江区间隧道施工穿越大堤过程进行有限元分析, 讨论盾构施工影响防洪堤的主要因素, 并总结盾构施工穿越大堤的沉降控制措施。

1 工程概况及地质条件

1.1 工程概况

滨江站—富春路站区间为杭州地铁 1 号线工程穿越钱塘江全地下区间, 区间总长为 2.946 km。隧道外径为 6.2 m, 内径为 5.5 m, 管片厚度为 35 cm, 环宽 1.2 m, 每环由 6 块管片错缝拼装而成。隧道最小曲线半径 400 m, 最大坡度 28.057%。隧道覆土 9.4~28.1 m (江中段隧道距离冲刷线最小覆土为 5 m)。盾构隧道采用 2 台土压平衡盾构机掘进, 越江段区间左、右行线盾构将四次穿越钱塘江防洪堤。钱塘江北岸防洪大堤为杭州市市区防洪确保线, 堤顶高程为 9.62 m, 堤防结构是在原围堤基础上改建的重力式混凝土挡墙。

1.2 地质条件

沿线场地地貌主要为钱塘江河床及两岸的钱塘江河口冲海积平原, 各土层物理力学指标见表 1。

表 1 主要土层物理力学指标

Table 1 Main physical and mechanical properties of soils

层号	土层名称	γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	w (%)	e	E_s (MPa)	c (kPa)	φ (°)
③1	砂质粉土	18.7	33.2	1.01	7.74	7.3	29.8
③2	砂质粉土	18.7	32.0	0.90	8.81	8.7	29.6
③3	砂质粉土夹粉砂	18.7	28.7	0.82	10.67	5.8	31.9
③4	砂质粉土	18.7	32.1	0.90	8.56	9.0	28.1
③5	粉砂夹砂质粉土	18.7	29.4	0.84	8.18	5.6	31.3
③7	砂质粉土	18.7	31.9	0.90	6.90	9.2	27.5
④3	淤泥质粉质黏土	17.4	43.4	1.23	2.81	18.3	11.1
⑥1	淤泥质粉质黏土	17.4	41.6	1.18	3.15	19.2	13.1
⑥2	淤泥质粉质黏土	17.4	41.0	1.17	2.99	18.8	13.1
⑨1a	粉质黏土	18.2	25.7	0.72	6.79	34.7	19.1
⑨1b	含砂粉质黏土	18.1	23.8	0.67	5.36	21.8	22.6

2 盾构穿越大堤施工计算分析

2.1 模型建立

根据穿越施工方案, 建立模型沿隧道纵向 55.75 m, 沿防洪堤纵向 50 m。为尽可能模拟盾构施工的实际情况, 模型包括防洪堤的复合式斜坡, 混凝土灌砌块石护坡, 钢筋混凝土护坦。整个模型共有 79572 个单元, 76808 个节点。土体参数和结构参数按实际情况选取, 计算时未考虑释放沼气对防洪堤变形及参数的影响。盾构穿越北岸、南岸防洪堤的有限元网格如图 1, 2 所示。

2.2 计算参数与分析工况

土体参数采用莫尔-库仑弹塑性本构模型, 计算参数参考表 1 中土体物理力学指标。计算模型的底部全约束, 各个侧面限制水平方向的位移, 土体、坝体及隧道结构采用实体单元模拟。为了比较准确地模拟开挖过程中地表沉降的变化, 约 2.5~3 m 建立一个开挖步, 每条隧道共开挖 19 步, 算第一步地应力平衡在内, 总分析步为 39 步。

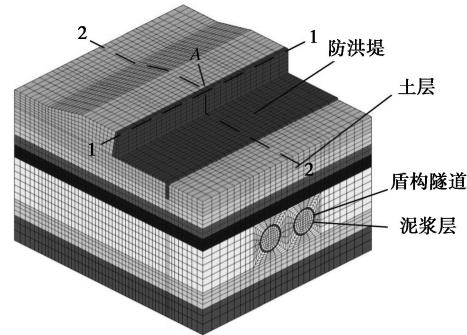


图 1 盾构穿越北岸防洪堤有限元网格

Fig. 1 FE model of tunnel undercrossing north embankment

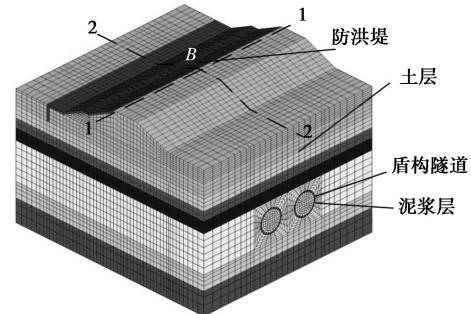


图 2 盾构穿越南岸防洪堤有限元网格

Fig. 2 FE model of tunnel undercrossing south embankment

2.3 计算结果与讨论

图 3, 4 分别为江北大堤和江南大堤在隧道上方 1-1 横断面沉降随盾构推进的变化曲线。从图中可以看出, 随着盾构推进, 地表沉降逐渐增大, 且峰值向两隧道中点靠拢, 地表沉降变形较大区域发生在距离盾构隧道 15~20 m 范围内。

图 5, 6 分别为江北大堤和江南大堤隧道上方 2-2 纵断面沉降随盾构推进的变化曲线。从图中开挖 25 m 的曲线可以看出, 在机头前方开挖面上土压平衡力的作用下, 地表略微隆起, 随着盾构推进, 逐渐变为沉降, 并趋于稳定。

图 7 为隧道上方 A、B 点沉降随隧道开挖的变化曲线。从图中可以看出, 地表沉降主要分为两个阶段, 当左线开挖经过某点下方时沉降最快, 随开挖逐渐完成而趋于稳定; 当右线开始推进时沉降继续增加, 最终趋于稳定, 最大沉降约为 14 mm。

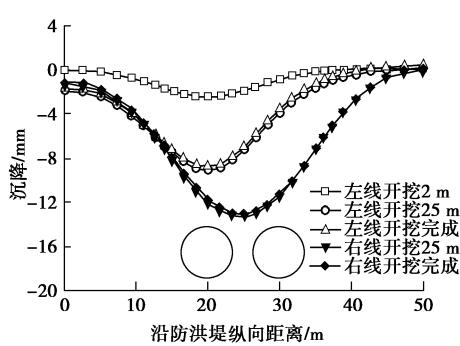


图3 江北大堤纵向沉降变化

Fig. 3 Variation of settlement at longitudinal section of north embankment

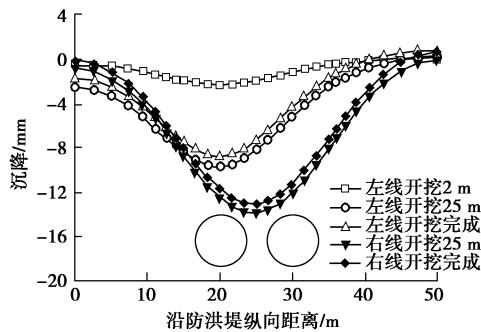


图4 江南大堤纵向沉降变化

Fig. 4 Variation of settlement at longitudinal section of south embankment

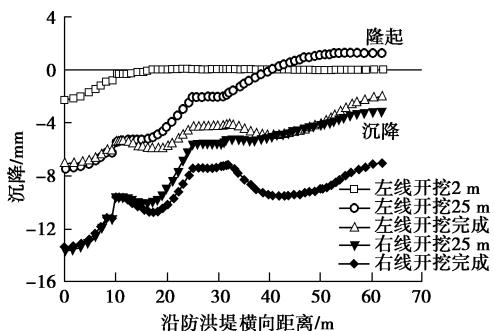


图5 江北大堤横向沉降变化

Fig. 5 Variation of settlement at transverse section of north embankment

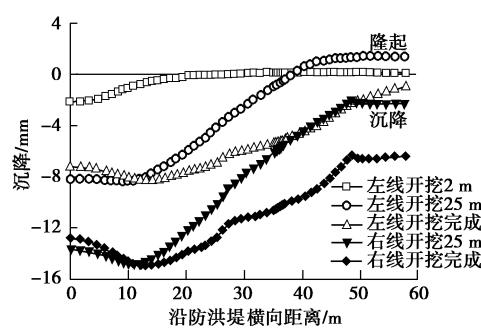


图6 江南大堤横向沉降变化

Fig. 6 Variation of settlement at transverse section of south embankment

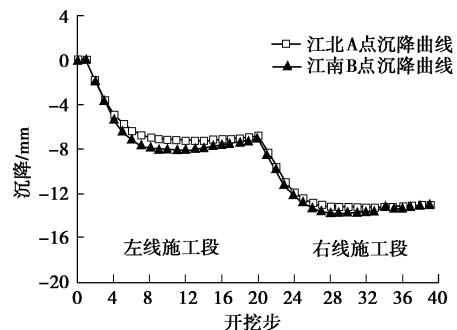


图7 点沉降变化

Fig. 7 Variation of settlement at point A and B

以上结果表明,左右两条隧道施工会相互影响,由两条线开挖造成的地表沉降最后会相互叠加,沉降峰值约出现在隧道中线位置。由于开挖前期开挖面上土压平衡力的作用,会出现地面隆起的现象,建议合理设置推进速度,控制土压平衡压力,减少地面隆起量。

3 穿越施工的控制措施与实施效果

3.1 施工控制措施

由有限元分析结果可见,盾构穿越施工对防洪堤的影响主要是由于土体的变形和位移而造成。该工程以地表沉降为主。因此,对防洪堤的影响也主要为沉降及不均匀沉降。结合实际施工经验,盾构推进引起土层变形的主要因素包括:土压不平衡、盾构纠偏对土体扰动、盾构推进速度、盾尾充填不及时、注浆不充分等。根据试验段测试结果分析土压力、推进速度、出土量、注浆量和注浆压力设定与地面沉降关系,结合前述数值分析结果,确定以下施工控制措施。

(1) 土仓压力值: 推进中建立完全理想状态下的土压平衡非常困难,土仓压力一般设定为静止土压和水压的1.3倍。同时在盾构切口过江堤时应根据预设值及时调整设定土仓压力,减少对土体的扰动。

(2) 推进速度: 在穿越防洪大堤的过程中,盾构推进速度不宜过快,以1~2 cm/min为宜,避免由于推进速度过快对土体造成过分挤压,使防洪堤发生沉降、倾斜。盾构在推进过程中速度保持稳定,确保盾构均衡、匀速地穿越,减少盾构推进对前方土体和上方土体的扰动,减少对防洪大堤的影响。

(3) 同步注浆和壁后注浆: 区间隧道在沼气释放和左右线盾构两次穿越后,下部土体受到扰动会产生固结沉降,直接威胁大堤安全。因此需在盾构机推进过程中进行同步注浆、穿越后需及时根据土体和大堤隆沉情况进行二次补压浆,以保证大堤隆沉值控制在要求范围内。

(4) 盾尾油脂压注: 切实做好盾尾油脂的压注工作,确保施工中盾尾与管片的间隙内充满盾尾油脂。

3.2 实施效果与比较分析

图 8 中空心曲线为江北防洪堤沉降实测曲线与计算曲线。两条曲线非常接近, 有限元模型很好地模拟了土体的沉降过程。且实测数据中最大沉降约为 15 mm, 说明施工控制措施有效地减小了大坝的沉降。实心曲线为江南防洪堤沉降实测曲线与计算曲线。江南区段是沼气蕴藏层, 沼气多为囊状形式存在, 位于淤泥质粉质黏土与粉砂交界处, 若处理不好, 会产生涌水、涌砂及爆炸事故^[6]。从图中看出, 实测沉降值远大于计算沉降值, 这是由于在施工前对沼气进行了释放处理, 造成结构本身在推进之前已经有了一定的沉降量, 建议在推进时略微提高注浆量, 有助于减少沉降进一步扩大。

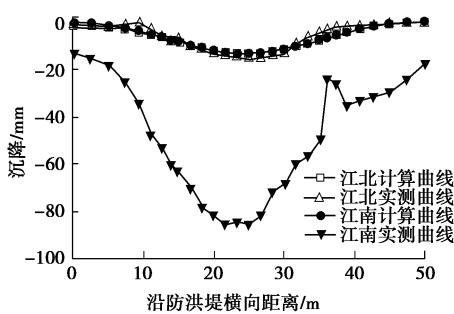


图 8 江南江北沉降对比图

Fig. 8 Comparison of settlement between south and north embankments

4 结 论

本文通过对杭州地铁 1 号线工程滨江路站—富春路站穿越钱塘江区间隧道施工穿越大堤过程进行有限元模拟分析, 指导盾构顺利穿越钱塘江江南、江北大堤, 总结如下:

(1) 盾构穿越大堤的最大沉降约为 14 mm, 受隧道施工叠加效应影响, 峰值出现在两条隧道中线附近, 大堤沉降较小, 两侧土体沉降较大。

(2) 盾构穿越施工对防洪堤的影响主要是由于土体的变形和位移而造成, 通过设立试验段、控制推进速度和土仓压力值、采用同步注浆和壁后注浆能够有效控制沉降发展。

(3) 由于钱塘江大堤地处沼气蕴积地段, 沼气的提前释放对地表沉降有巨大影响, 出于防洪堤使用性

和安全性考虑, 沼气对沉降的影响急需控制。

参 考 文 献:

- [1] 杨红禹, 周建民. 论我国越江隧道的发展[J]. 地下空间, 2000, 20(3): 209 - 213. (YANG Hong-yu, ZHOU Jian-min. On the development of under-river tunnel in China[J]. Underground Space, 2000, 20(3): 209 - 213. (in Chinese))
- [2] 毛建东. 某盾构施工钱塘江大堤监测成果分析[J]. 水利建设与管理, 2011, 5: 58 - 75. (MAO Jian-dong. Monitoring result analysis of Qiantang river levee construction[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2011, 5: 58 - 75. (in Chinese))
- [3] 沈建奇. 基于并行计算的盾构机过大堤三维数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2008, 48(8): 1296 - 1300. (SHEN Jian-qi. Three dimensional numerical simulation of shield tunneling through flood levee based on parallel computing[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 48(8): 1296 - 1300. (in Chinese))
- [4] 张忠苗, 林存刚, 吴世明, 等. 过江盾构隧道穿越大堤的地层沉降分析及控制[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(6): 977 - 984. (ZHANG Zhong-miao, LIN Cun-gang, WU Shi-ming, et al. Analysis and control of ground settlement of embankments in construction of cross-river shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 977 - 984. (in Chinese))
- [5] 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. Subsidence control research of slurry shield through the embankment[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(1): 103 - 110. (in Chinese))
- [6] 徐国庆, 岳丰田, 王弘琦, 等. 杭州地铁 1 号线穿越钱塘江地层沼气释放技术探讨[J]. 隧道建设, 2013(3): 247 - 251. (XU Guo-qing, YUE Feng-tian, WANG Hong-qi, et al. Technology for methane releasing in shield tunneling through Qiantang river formation: Case study on line 1 of Hangzhou metro[J]. Tunnel Construction, 2013(3): 247 - 251. (in Chinese))

(本文责编 明经平)