

宁波轨道交通孔浦站隧道施工力学效应研究

胡欣, 郑荣跃, 闫成文*

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 针对孔浦站地下区间隧道为软土地区及已有人行天桥桩基的工程情况, 进行二维有限元数值模拟的盾构隧道施工力学行为研究. 分析了衬砌隧道施工各个阶段隧道变形、地表及桩基的沉降情况, 并提出工程建议, 对宁波地铁隧道的近接施工有一定的参考价值.

关键词: 隧道施工; 数值模拟; 沉降变形; 施工控制

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2011) 03-0071-05

宁波轨道交通 2 号线一期工程 KC212 标段主要位于大庆南路、环城北路、宁镇公路沿线, 地貌类型属冲湖积平原. 地形开阔平坦, 地面标高一般为 1.93~4.15m, 道路纵横交错. 孔浦站区间工程包括孔浦站后区间盾构段和明挖暗埋段, 孔浦站后暗埋段区间起迄里程为: CK21+074.419~CK22+235.086(右线), 隧道全长 1160.667 m, 其中盾构段与明挖暗埋段分界里程为 CK22+078.030, 盾构段隧道长 1003.611 m, 明挖暗埋段隧道长 157.656 m, 区间最小曲线半径 380 m, 线间距 9.5~13.5 m, 线路最小纵坡 4‰, 最大纵坡 28.8‰, 盾构段隧道顶覆土 5.6~13.3 m. 其中过江北大河段覆土现状覆土 6.87 m (规划覆土 6.3m), 明挖段基坑深度. 线路出孔浦站后, 下穿 DN1500 污水管、江北大河、海力机床制造宁波办事处两层房屋, 以半径 R380 的曲线转到环城北路上东行, 穿越常洪河后到达环城北路与世纪大道交叉口西侧的明挖暗埋段, 线路继续东行到达路林市场站^[1-7].

明挖暗埋段周边管线主要有给水管、电信、110 kV 电缆, 路侧地上有通信电缆和架空电力线, 本区间仅下穿海力机床制造宁波办事处两层房屋和江北大河、常洪河、DN1500 污水管, 主要在环城北路道路下方穿越, 隧道两侧有江北污水泵站、宁波金轮轮胎有限公司、大名牛仔制衣厂、汪洋郭

巨大酒店、孔浦二村住宅楼、宁波市康宁医院、江北招商中心、华业大厦, 甬江宾馆以及多栋 1~4 层居民自建房屋. 根据规划, 江北大河将加宽至 60 m (现状 30 m), 暗埋段与敞口段分界附近有 1 条规划河, 河宽 10 m, 根据与规划沟通, 该河可考虑东移, 避免与轨道交通冲突. 道路交通情况: 明挖暗埋段所处位置, 道路交通繁忙, 其中环城北路为双向 4 车道(南北侧各一非机动车道), 宁镇公路为双向 6 车道(南北侧各一非机动车道), 世纪大道南段双向 4 车道, 北段双向 6 车道(东侧一非机动车道).

1 工程地质条件

孔浦站地势较为平坦, 地面标高约为 2.60~3.50 m 之间. 场地地层均为第四纪沉积地层, 为典型的软土地区, 广泛分布厚层状软土, 具有“含水量大、压缩性高、透水性好”等特点. 根据详勘地质报告揭露的岩土层自上而下有 1 杂填土、2 灰黄色粘土、3 灰色淤泥质粘土、1a 灰色淤泥、2b 灰色淤泥质粘土、3 灰色淤泥质粉质粘土、4 灰色淤泥质粘土、1 灰色粉质粘土夹粉砂、2 灰色粉质粘土、1 灰色淤泥质粉质粘土、2 灰色粘土、1 灰绿、草黄色粉质粘土、3 灰黄色砂质粉土和 1 灰黄色粉质粘土.

根据地下水含水空间介质和水理、水动力特征

收稿日期: 2010-12-30.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金(60874083); 浙江省教育厅科研项目(Y200907622); 宁波大学科技学院预研项目(003-21021003); 宁波市教育局科研项目(SZX11061).

第一作者: 胡欣(1987-), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 结构工程. E-mail: 183043147@qq.com

*通讯作者: 闫成文(1959-), 男, 辽宁锦州人, 教授级高工, 主要研究方向: 建筑节能. E-mail: yanchengwen@nbu.edu.cn

及赋存条件,拟建工程沿线地下水主要为浅层松散岩类孔隙潜水和深部松散岩类孔隙承压水.浅层松散岩类孔隙潜水主要赋存于场区浅部填土和粘土、淤泥质土层中.浅部填土富水性和透水性均较好,水量较大;浅层粘土和淤泥质土富水性、透水性均差,渗透系数为 $5.0 \times 10^{-6} \sim 4.07 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,水量贫乏,单井出水量 $< 5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$.场地内孔隙潜水主要接受大气降水竖向入渗补给和地表水的侧向入渗补给,多以蒸发方式排泄.勘察期间测得沿线潜水埋深 $0.25 \sim 4.80 \text{ m}$ 之间,标高介于 $-1.64 \sim 2.83 \text{ m}$ 之间,变化较大.浅层孔隙潜水水位变化受季节及气候环境影响显著,经调查,水位季节性变化幅度为 1.0 m 左右.

孔隙承压水可分为浅层孔隙承压水及深部承压水,深部土层中承压水对本工程无影响.浅层孔隙承压水主要赋存于 I_1 层粉土,粉砂夹粉质粘土 I_{1a} 层粉砂层中,含水层夹较多粘性土薄层,透水性一般,水量相对较小,单井出水量在 $6 \sim 15 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,在砂质较纯、厚度较大的地段出水量相对较大,水位埋深在 $1.4 \sim 1.9 \text{ m}$ 左右,渗透系数在 $3.12 \times 10^{-5} \sim 2.7 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,水温为 19°C 左右,水质为微咸水,地下水基本不流动.

2 隧道开挖施工模拟

2.1 基本假定

模拟采用 Plaxis 软件,模型做如下假设:计算模型为弹塑性应变,计算中采用摩尔库伦准则;假定岩土体的变形是各项同性的;围岩的初始应力场均由自重应力所构成,不考虑构造应力的影响;隧道受力以及变形为平面应变问题.依照初步设计中所提供的隧道地段地质资料,并结合初步设计隧道断面的相关尺寸(图 1)建立隧道的二维有限元计算模型.本模型中力的计算单位取 kN ,长度单位为 m ,横向 30 m 宽,竖向 25 m 高,左右边界为水平约束,下边界为垂直约束,上边界是自由地表,计算模型见图 2.

2.2 计算参数

通过现场取原状土进行有侧限压缩实验得出各土层压缩模量,而在摩尔库伦土体参数中要求有土的弹性模量 E_s .文献[7]通过 60 多根桩在工作荷载下的试验结果,换算得出土的弹性模量 E_0 和

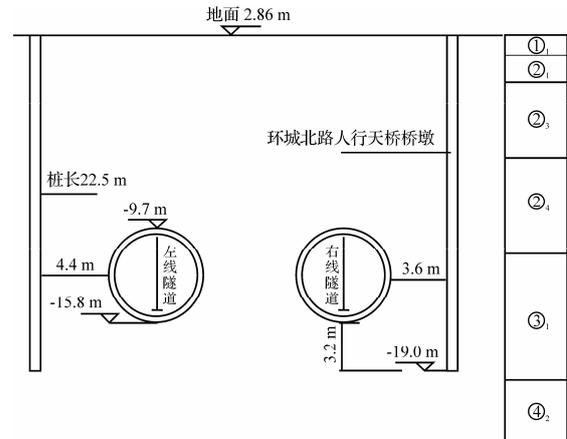


图 1 盾构隧道与人行天桥桥墩桩基关系立面图

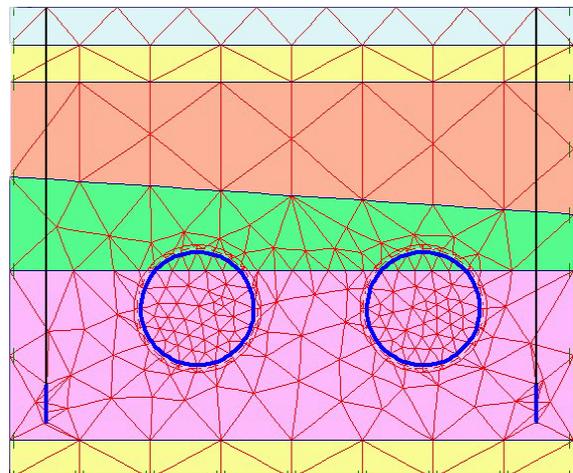


图 2 隧道模型有限元网格

压缩模量 E_s 的比例关系,为 $E_0 = (2.5 \sim 3.5)E_s$.由于宁波地处软土地区,根据宁波地质土体压缩模量和弹性模量实验测量数据的曲线拟合关系,有 $E_0 = 5.0E_s$.因此,文中采用 5 倍的压缩模量来代替土体弹性模量进行数值模拟分析计算,衬砌以及水泥桩的参数保持不变.各土层材料参数见表 1.

根据公路工程技术标准(JTG B01-2003)汽车及人群荷载规定,专用人行桥梁上的人群荷载标准值取为 $3.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}$,安全系数为 1.0.由建筑平面图可知桥梁人行道宽 4 m ,长 12 m ,可按偏安全考虑模型计算,设人群荷载及人行天桥自重荷载由两侧的 2 根水泥柱承受.因此容易计算得到施加在单根柱上的集中荷载为 $27 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$.

2.3 开挖工况

模拟隧道施工使用分步施工计算.

(1) 工况 1: 激活荷载、柱脚、水泥桩,模拟未开挖隧道前土体的初始应力.

表 1 各土层材料参数

摩尔-库伦	2 粘土	3 淤泥质粉质粘土	4 淤泥质粘土	1 粉土粉砂夹粉粘土	2 粘土	填土
水位以上土体容重/(kN·m ⁻³)	19.00	17.70	17.40	18.00	19.10	20.00
饱和容重/(kN·m ⁻³)	20.00	18.70	18.00	19.00	20.00	21.00
水平渗透系数/(m·d ⁻¹)	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1
竖直渗透系数/(m·d ⁻¹)	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.0001	0.000 1
弹性模量/(kN·m ⁻²)	24 000.000	14 500.000	12 500.000	35000.000	15 000.000	30 000.000
Poisson 比	0.350	0.350	0.350	0.350	0.330	0.350
内聚力/(kN·m ⁻²)	26.30	9.70	13.40	11.40	19.30	1.90
内摩擦角/(°)	14.10	11.30	8.70	21.20	11.80	9.80
界面强度折减因子	1.00	1.00	1.00	0.80	0.80	0.80

(2) 工况 2: 开挖左线. 根据土压平衡法原理, 当盾构尾部半径大于管片半径或掘进时压力较小时会导致超挖, 因此在模拟开挖左线隧道时要考虑 0.02 的土层损失率. 将隧道内部土体单元关闭, 模拟隧道开挖.

(3) 工况 3: 左线开挖, 装配管片, 并考虑左线开挖过程的地层损失和盾尾收缩. 在上步开挖步之后的步骤中模拟盾构推进, 通过激活隧道衬砌板单元模拟隧道管片安装, 盾尾收缩以及开挖造成土体损失, 用隧道收缩率来模拟盾尾收缩和土体损失的综合, 由于 Plaxis 推荐为 2%, 但考虑到近年来施工技术的完善, 可定义隧道收缩率为 1%.

(4) 工况 4: 开挖右线. 开挖隧道, 并装配管片, 同工况 2 要考虑 0.02 的土层损失率. 将隧道内部土体单元关闭, 模拟隧道开挖, 定义隧道内部类组为干类组, 模拟隧道内的无水状态.

(5) 工况 5: 右线装配管片并考虑右线地层损失和盾尾收缩. 在上步开挖步之后, 模拟盾构推进, 通过激活隧道衬砌板单元模拟隧道管片安装、盾尾收缩以及开挖造成土体损失, 用隧道收缩率来模拟盾尾收缩和土体损失的综合, Plaxis 推荐为 2%, 但是考虑到近年来施工技术的完善, 定义隧道的收缩率为 1%.

2.4. 隧道施工模拟计算

有限元模型计算所得的网格变形、位移、管片内力结果如图 5~图 12 所示.

通过分析可以判断隧道开挖对地面沉降的影响情况如下: 左线隧道开挖完成后, 人行天桥桩基

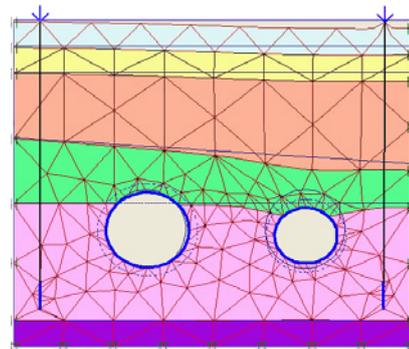


图 5 竣工后网格变形

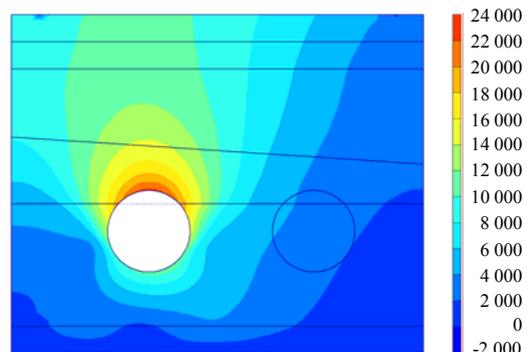


图 6 左线隧道开挖后的位移云图

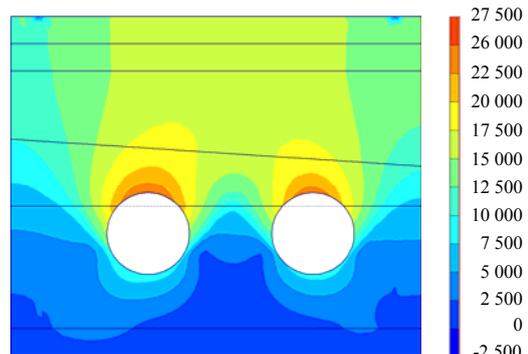


图 7 右线隧道开挖后的位移云图

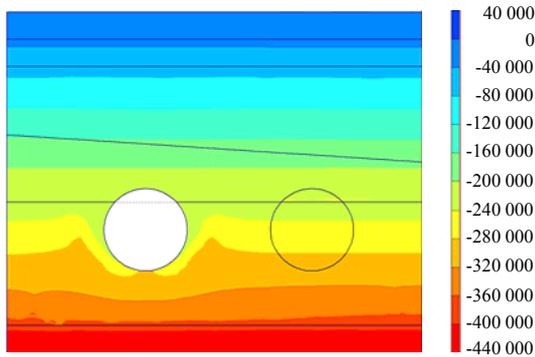


图8 左线隧道开挖后主应力云图

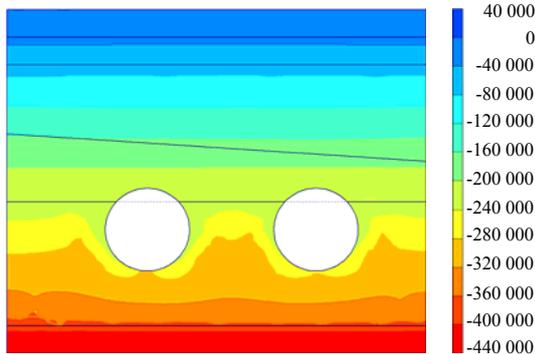


图9 右线隧道开挖后主应力云图

处的地面会下沉 1~2 mm, 桩底连线中点处的地面有隆起趋势, 左线隧道管片顶部产生向下的位移为 23 mm, 而隧道底部会上升 10 mm, 左线隧道上方的地表发生下沉约 14 mm. 待右线开挖完成后, 地面发生下沉变形, 最大变形量达 18 mm, 左线隧道管片底部上抬 12 mm, 顶部下沉 25 mm, 右线隧道管片底部上抬 12 mm, 顶部下沉 28 mm, 引起土体的变形, 从而导致地面发生不均匀竖向位移变化. 从分析可看出, 孔浦人行天桥段隧道开挖会引起周边建筑物或道路产生沉降裂缝, 因此需提高警惕、做好防范措施, 并在隧道开挖施工各工

况阶段要同步关注人行天桥桩基的受力和变形情况.

3 模拟结果分析

针对数值模拟结果的分析及隧道开挖过程中暴露出来的问题, 从设计、施工角度提出相应的控制措施:

(1) 左线隧道开挖完成时最大地表沉降约占最终最大地表沉降的 30%~40%, 可以通过观察先行洞的地表沉降预测双线隧道竣工后的最终地表沉降, 及早进行有效的控制.

(2) 分析隧道的应力图, 随着隧道开挖, 整个地层的大部分区域都处于受压状态. 从整体上分析, 对盾构隧道结构安全产生重大影响的仍然是横向内力及其变化, 而不是纵向内力及其变化. 双线开挖后, 左线管片最大横向弯矩达到 $122.5 \text{ KN}\cdot\text{m}^{-1}$, 右线管片最大横向弯矩达到 $119.7 \text{ KN}\cdot\text{m}^{-1}$. 并且右线隧道开挖对地面的沉降影响比左线开挖所造成的影响要大, 因此后期开挖时要特别注意监测. 严格贯彻信息法施工, 加强监控测量, 综合分析监控测量所得的数据并进行分析, 及时地做好相应的施工方案调整工作, 确保安全顺利进行施工.

(3) 从应力图中还可看到地层原始应力状态的变化引起了地表的下沉或隆起. 盾构在掘进的过程中, 原本处于稳定状态的地层受到一定程度的扰动, 导致地层原始应力状态的改变, 即破坏了土体的极限平衡状态, 土体有发生松动、挤压和坍塌的危险. 因此, 要很好地处理好土仓压力、盾构推进速度和出土量三者的关系, 控制好推进速度

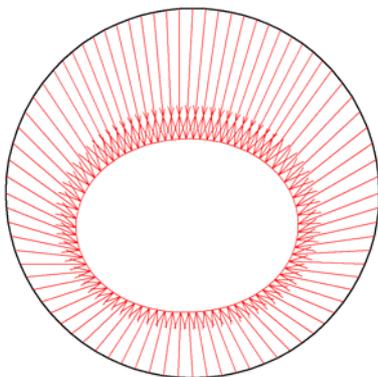


图10 左线隧道开挖后左线管片3位移

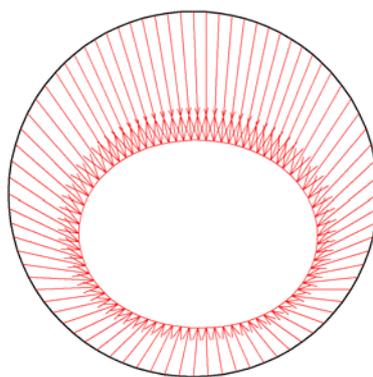


图11 双线隧道开挖后左线管片3位移

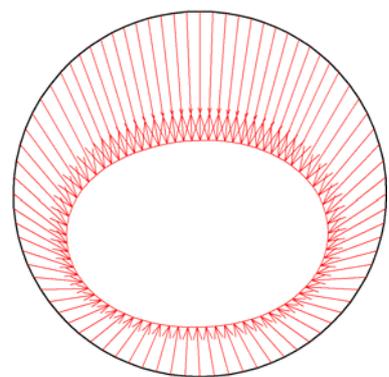


图12 右线隧道开挖后右线管片4位移

在 $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 左右,降低事故发生概率。

4 结论

有衬砌隧道的施工通过挖掘机在前面开挖土体,在它的后面安装衬砌。在施工过程中,土体的开挖一般是超挖的,这意味着最后被隧道占用的横截面总小于开挖的土体区域。尽管一般会采取措施去填充此空隙,但不可能避免隧道施工过程导致的应力再分布和土体的变形。随着开挖面的推进,保持岩土体的初始状态、减少对岩土体初始状态的扰动、保持围岩处于相对稳定状态及不发生过大位移是工程中密切关注的问题。此外,为了避免对开挖土体之上的既有建筑和基础造成破坏,非常有必要预测这些效应并采取恰当的措施。因此,采取数值模拟分析的手段,通过有限元软件模拟隧道施工过程,分析在软土中进行一个有衬砌隧道的施工以及它对周边环境、周边已有桩基的影

响,为宁波市轨道交通的隧道开挖建设工程提供有效的理论性意见。

参考文献:

- [1] JTG B01-2003. 公路工程技术标准[S].
- [2] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] 王毅才. 隧道工程[M]. 北京: 交通出版社, 2006.
- [4] 杨永平,周顺华,庄丽. 软土地区地铁盾构区间隧道近接桩基数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(4): 561-565.
- [5] 于宁,朱合华. 盾构施工仿真及其相邻影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(2):292-296.
- [6] 卿伟宸,廖红建,钱春宇. 地下隧道施工对相邻建筑物及地表的沉降的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6):960-963, 978.
- [7] 杨敏,赵锡宏. 分层土中的单桩分析[J]. 同济大学学报, 1992, 20(4):421-428.

Study on Mechanical Effect of Pedestrian Overpass of Kongpu Tunnel Construction in Ningbo Urban Rail Transit Project

HU Xin, ZHENG Rong-yue, YAN Cheng-wen*

(Faculty of Architectural Engineering, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Due to the fact that Ningbo covers a typical soft soil area, tunnel construction of underground soil is dangerous. So a number of early warnings was issued regarding design, construction, supervision and monitoring in order to strengthen the safe implementation of the project in dangerous situations. This article focuses on building a new tunnel close to an existing building pile foundation in an urban subway project, and gives some helpful technical insights into constructing subway tunnels in Ningbo area.

Key words: tunnel construction; numerical simulation; settlement; construction control

(责任编辑 章践立)