

超大直径泥水盾构隧道施工地面沉降实测分析

赵卉子¹, 李林², 陈有亮¹, 周雪莲¹, 王朋¹, 郜珊珊¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海隧道工程股份有限公司, 上海 200082)

摘要: 随着城市地下交通工程的迅速发展, 盾构隧道在软弱土层及繁华市区地下交通建设中得到越来越广泛的应用。然而, 盾构隧道施工的进步与发展并未能从根本上避免施工过程中的地表变形。本文将以上海实际工程实例为背景, 利用现场监测数据, 对超大直径泥水盾构隧道在不同施工阶段所引起的地表沉降大小、变形规律等问题进行分析探讨, 最后将实测数据与经验公式计算结果进行对比与分析。

关键词: 超大直径; 泥水盾构; 隧道; 地面沉降; 现场监测

中图分类号: U455.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2013)04-0170-04

Analysis of ground settlement in construction of shield tunnel of super-diameter slurry

ZHAO Huizi¹, LI Lin², CHEN Youliang¹, ZHOU Xuelian¹, WANG Peng¹, GAO Shanshan¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd, Shanghai 200082, China)

Abstract: Shield tunnel is more and more widely used in urban underground traffic construction in soft soils and urban cities along with the fast development of urban traffic engineering. However, the progress and development of shield tunnel construction cannot radically avoid the surface subsidence. The paper analyzed the magnitude of surface subsidence and deformation rules in different stages owing to the construction of shield tunnel super-large diameter slurry based on the in-situ monitoring data from a current project in Shanghai. It finally carried out the contract analysis of measured data and calculated results.

Key words: super-diameter; slurry shield; tunnel; ground subsidence; field monitoring

1 概述

随着我国经济迅速发展, 致使城市大规模迅猛发展, 而与此同时, 地上空间匮乏、交通拥挤等问题也日益突出。城市地下交通的发展显然已成为当今城市建设中的重要组成部分, 而城市交通的不断发展, 离不开盾构隧道技术的不断成熟。

自1818年法国工程师 Brunel 发明盾构以来, 经过一百多年的应用与发展, 盾构施工技术已在各种工况下得到了极为广泛的应用。泥水平衡盾构工法是从地下连续墙以及钻孔等泥水工法中发展起来的, 与其他盾构工法相比其显著特点是泥水压力传递速度快而均匀, 开挖面压力的控制精度高, 刀盘所受扭矩小, 刀具磨损轻微, 因此更适合于大直径、长距离的盾构施工^[1]。

然而, 超大直径意味着对土体一次性的大面积

开挖, 加之在软土地区以及繁华市区的施工中一般覆土较浅, 导致对周围土体的影响加大, 因此, 无论泥水盾构技术如何进步发展, 超大直径盾构推进过程中, 还是不可避免地会对周围土层产生扰动, 从而引起地面沉降(或隆起)。

本文针对上海虹梅南路隧道的现场实测结果进行分析, 通过对比不同时间以及盾构机到达不同位置时的地表沉降数据, 依托已有的经验公式方法, 研究了超大直径泥水盾构施工对地层沉降影响的相关问题。

2 地层沉降理论计算

盾构法隧道施工对于周围的环境影响的原因很多, 研究方法多样, 目前盾构隧道施工引起土体位移的计算方法中主要的应用最为广泛的是经典的 Peck 公式^[2], 它是建立在现场观察资料的基础上

的,虽具有一定的经验性,但仅依赖较少的参数即可确定,使用方便。本文将以工程实测数据为依据,在已有的研究方法基础上,进一步对地表以及地表以下地层的横向沉降规律的空间效应以及时间效应进行深入探讨与分析。

2.1 地表沉降理论计算

如图1所示,地表横向沉降槽曲线呈正态分布,原点位于隧道中心线正上方, X 轴沿地表平面与隧道中心线垂直, Z 轴垂直于地表向下。地层损失引起的地面沉降用 $S(x)$ 表示,最大沉降为 S_{\max} ,距离地表 Z 处地层沉降用 $\delta(x)$ 表示,最大沉降为 $\delta_{\max}(Z)$ 。

根据已有的研究成果^[3],对于地表以下至隧道顶部平面以上土层,地层损失的体积假设仍然成立,即地表以下任意土层的沉降槽的体积等于地层损失,沉降槽曲线仍是正态分布曲线,如图1所示。

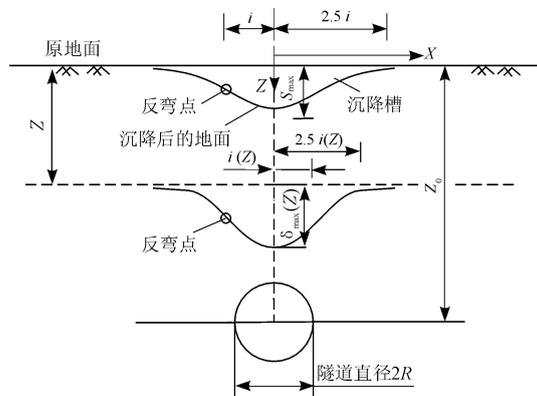


图1 地表及地表以下地层沉降槽正态分布曲线

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}i} \quad (2)$$

$$i = \frac{z_0}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)} \quad (3)$$

$$V_s = V_l \pi R^2 \quad (4)$$

式中: $S(x)$ 为地层损失引起的地面沉降,mm; V_s 为盾构隧道掘进地层损失, m^3/m 。 V_l 为地层体积损失率,即单位长度地层损失占单位长度盾构体积的百分比,其取值与地质条件和施工条件密切相关,现有文献中,一般软粘土隧道施工,实测的体积损失率在0.2%~5.0%之间^[4-6]; x 为距离隧道中心线的距离,m; i 为沉降槽宽度,m,距地表 Z 处地层沉降槽宽度为 $i(Z)$; z_0 为隧道轴线埋深,m。

2.2 地表以下土层沉降计算

随着土层深度 Z 的增大,该土层距离隧道顶部

的距离减小,土层的沉降槽宽度系数将会减小,即 $\delta_{\max}(Z)$ 和 $i(Z)$ 两个系数将会随深度的不同而变化,它们均可表示为土层深度 Z 的函数,即:

$$\delta(x) = \delta_{\max}(Z) \exp\left(-\frac{x^2}{2i(Z)^2}\right) \quad (5)$$

$$\delta_{\max}(Z) = \frac{V_s}{2.5i(Z)} \quad (6)$$

根据前人研究结果^[7]可以用幂函数 $y = x^{-0.3}$ 来描述 $\delta_{\max}(Z)/\delta_{\max}(0)$ 与 $(1 - z/z_0)$ 的关系,即可根据地表最大沉降求得地表以下各土层的最大沉降求得地表以下某地层的最大沉降后,便可利用式(1)求得该地层各点处的竖向沉降:

$$\frac{\delta_{\max}(Z)}{\delta_{\max}(0)} = (1 - z/z_0)^{-0.3} \quad (7)$$

3 实例工程现场监测数据分析

隧道施工中的实时监测在隧道施工中往往起着非常重要的作用。工程中实时监测成果除了为评价施工对建筑的影响服务外,监测成果还可反馈施工,为施工方案、加固参数等的优化提供重要依据。监测研究成果对确保施工安全、加快施工进度、降低施工成本都具有重要意义。

3.1 工程概况

上海虹梅南路-金海路通道越江段新建工程位于闵行区 and 奉贤区,北起于虹梅路永德路交叉口,为东西双线近距离隧道,西线隧道全长3 391.49 m;东线隧道全长3 388.553 m。隧道段采用直径14.93 m泥水平衡盾构施工,是上海目前正在建的规模最大的盾构隧道。该段工程场地地势较为平坦,沿线地面标高在+4.10~+4.98 m。隧道穿越处黄浦江的宽度约为340 m,江底最深处标高约为-18.5 m。场地在95.34 m深度范围内,主要土层主要物理力学指标如表1所示,主要由饱和的粘性土、粉性土、砂性土组成,属第四纪松散沉积物,对地下开挖与围护结构稳定以及盾构机掘进的稳定性都有不利影响。另外,根据勘察资料,本工程场地有暗浜和沼气存在,并且存在众多地下管线。

3.2 现场监测布置情况

为了有效监控盾构施工引起土体的变形规律,工程期间分别对东西线场地布置地表测点以及地下测点,西线自南向北先行施工。本文将着重对西线相关测点的实测结果进行整理分析,测点布置于地表,测量内容为测点的竖向位移。

表1 各土层主要物理力学参数表

%, MPa, kPa, (°)

层号	土层名称	含水量 W	孔隙比 e	压缩模量 E	内聚力 C	内摩擦角 φ
②1	褐黄色粉质粘土	27.3	0.782	5.83	26.0	18.5
③	灰色淤泥质粉质粘土	45.5	1.275	2.90	11.0	17.0
④1	灰色淤泥质粘土	46.2	1.303	2.51	11.0	13.0
⑤1-1	灰色粘土	39.0	1.118	3.40	15.0	16.5
⑥	暗绿-草黄色粉质粘土	24.0	0.692	7.80	45.0	16.5
⑦1-1	草黄色粘质粉土夹粉质粘土	27.5	0.774	8.01	15.0	29.0
⑦2	灰黄~灰色粉砂	26.8	0.770	13.04	4.0	35.0
⑧2	灰色粉砂与粉质粘土层	27.1	0.772	9.13	3.0	34.0
⑨2	灰色含砾粉细砂	29.5	0.843	13.12	2.0	36.0

纵向整体布点以及各横向测点相对隧道中心线位置如图3所示。纵向测点数据沿隧道掘进方向依次进行检测,自2012年5月28日开始依次获得沉降数据。纵向测点间距离为2m(管片宽度),横向测点间距离为5m,各测点以隧道中心线为中心对称分布。

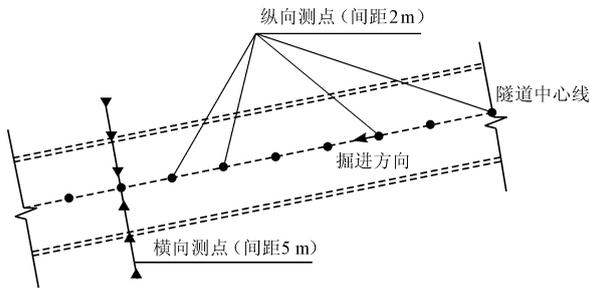


图2 西线隧道纵横测点布置示意图

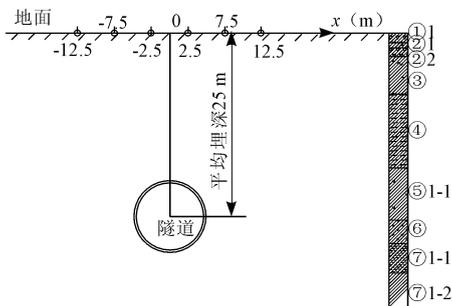


图3 隧道上方横向测点布置剖面示意图

3.3 部分实测数据分析

取编号W96观测点在不同关键观测时间下的横断面沉降数据曲线如图4所示,纵断面沉降观测结果如图5所示。

由图4可以看出,泥水盾构隧道在施工过程中对地面沉降影响,既反映了空间位置效应,又反映了时间效应。空间位置效应,表现在沉降以正态曲线形式分布;时间效应,表现在随着施工阶段的不断变化,横断面监测数据大小、沉降槽的形状以及最大沉降都在发生不断地变化。

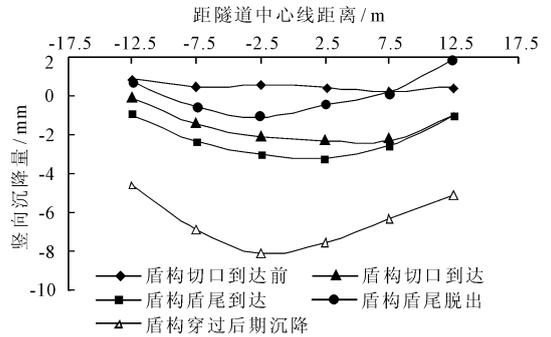


图4 测点横向不同掘进时间累计沉降

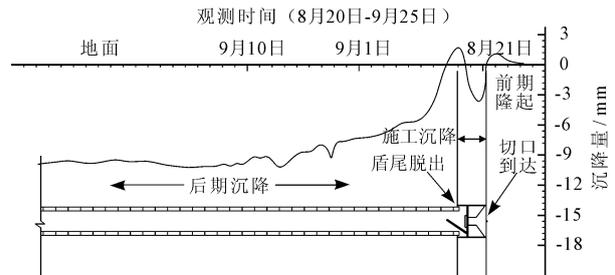


图5 测点纵向随时间累计沉降监测结果

由图5则可看出泥水盾构隧道在施工过程中对地面沉降影响的时间效应。在已有的研究中^[8],将施工后1~2个月成为前期沉降,而此阶段的沉降又可分为三大阶段,即前期隆起、施工沉降以及后期沉降,即:

(1)前期隆起:盾构前方土体受到挤压,如图所示,有明显向前向上运动,从而导致地面微量隆起。

(2)施工沉降:盾构在通过期间,由于地层损失而导致的地面下沉。

(3)后期沉降:起初因盾尾脱出是注浆压力等原因,导致地面短暂的明显隆起;而后则由于管壁及土体间的建筑空隙以及土体部分固结导致地面沉降。

4 实测数据与经验计算值比较

利用前文中提到的经验公式,分别求得参数: $V_i = 0.5\%$, $V_s = 0.875 \text{ m}^3/\text{m}$, $i = 13.356 \text{ m}$,求得地表最大沉降 $S_{\max} = 26.2 \text{ mm}$,其中地层损失率 V_i 取值时考虑到同步注浆等施工措施,取值相对较小。而通过本文中对实测横向沉降数据的整理,得出该测点横断面地表沉降槽最大沉降 $S_{\max} = 8.1 \text{ mm}$,将实测最大沉降值代入式(1)得到一条理论沉降槽曲线。另外由式(1)、(2),计算的经典公式得到的沉降槽曲线,将三者进行对比,如图6所示,可以看出实测沉降槽,由于实际施工中各种因素,其形态并非如 Peck 法中的理论沉降槽对称,但形状几乎吻合,可见施工对横断面沉降影响的空间效应与已有经验法中理论相符合。然而,由经典公式得到的预估沉降槽则比实测沉降槽数值大得多,可见工程中由于采取了同步注浆等一系列沉降控制措施并得到了很好的效果,即经典的公式预估方法已不能很好的适用于泥水盾构施工引起的地层沉降的估算,必须进一步引进影响参数,这也是近年来很多学者就改进经典公式所作的重要工作之一。

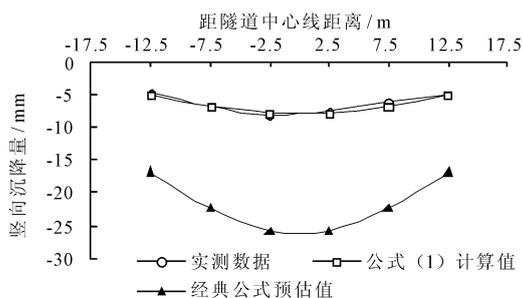


图6 实测沉降槽曲线与 Peck 公式计算沉降槽曲线

5 结语

针对上海虹梅南路-金海路通道越江段新建工程,通过现场监测得到施工过程中部分纵横断面观测情况,对超大直径泥水盾构隧道施工影响下的地表沉降规律进行了分析。实测数据分析结果表明:

(1)地面横向变形与采用经典 Peck 计算的结果相吻合,即呈现正态曲线的沉降槽形态,反映了泥水盾构施工对地表沉降影响的空间效应,并且不同施工阶段下的不同形态的沉降槽也从侧面反映了施

工的时间效应。

(2)地面纵向变形明显体现出泥水盾构掘进过程中重要的四个阶段,即盾构到达前阶段、切口到达盾构通过阶段、盾尾脱出阶段以及盾构远离阶段,从中反映了泥水平衡盾构施工时对地表沉降影响的时间效应。

(3)在实际工程中,超大直径泥水盾构隧道施工对横断面地层位移影响的空间效应与经典经验法理论十分吻合,沉降槽形态几乎一致。但在具体数值上,经典的公式预估方法不能很好的适用于软粘土介质中泥水盾构施工所引起的地层沉降的估算,必须进一步引进影响参数的参数,对公式进行合理优化。

(4)通过对比得出,本工程中实测沉降量明显小于通过经验法求得的最大沉降量,可见工程中采取的一系列沉降控制措施发挥了明显的作用,使得最大沉降量得到了很好的控制。

参考文献:

- [1] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004, 254-257.
- [2] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]// Proceeding of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 1969; 225-290.
- [3] 沈培良, 张海波, 殷宗泽. 上海地区地铁隧道盾构施工地面沉降分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 556-559.
- [4] 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): 103-109.
- [5] Lee K M, Rowe R K. Subsidence owing to tunneling II. Evaluation of a prediction technique[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(6): 941-954.
- [6] 姜忻良, 赵志民, 李园. 隧道开挖引起土层沉降槽曲线形态的分析与计算[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1542-1544.
- [7] Attewell P B, Woodman J P. Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil[J]. Ground Engineering, 1982, 15(8): 13-20+36.
- [8] 唐益群, 叶为民, 张庆和. 上海地铁盾构施工引起地面沉降的分析研究(三)[J]. 地下空间, 1995, 15(4): 250-258.