

# 超大直径盾构施工地表沉降分析

程磊标, 陈有亮, 王苏然, 黄煜

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 结合工程实例对超大直径泥水平衡盾构地铁隧道施工引起地表沉降的实测数据进行了分析。得出了隧道中心线上方地表在盾构推进过程中变形的一般规律及地层损失引起的地表横断面沉降的形态。用 Peck 公式对横向沉降槽实测数据进行拟合, 得出了地表沉降槽宽度系数及地层损失率等特征参数的一般范围。对盾构推进过程中的停机情况对地表沉降的影响进行了分析, 并提出了一些建议。分析成果对于城市超大直径泥水盾构工程有较好的参考价值。

**关键词:** 超大直径; 泥水平衡盾构; 地铁隧道; 地表沉降; 地层损失

中图分类号: TV554; U455.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)01-0226-04

## Analysis of ground surface settlement induced by the super - diameter shield construction

CHENG Leibiao, CHEN Youliang, WANG Suran, HUANG Yu

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Combining with an engineering case, this paper analyzed the measured data of ground surface settlement caused by the super - diameter slurry shield subway tunnel construction. The general rule of the ground displacement happened above the center axis of the subway tunnel during the shield advance as well as the settlement patterns of ground transverse section caused by ground layer loss were obtained. Through fitting Peck formula with the measured data of transverse settlement groove, the general ranges of the characteristic parameters such as width factor of settlement tank and ground layer loss ratio. Advices were given after analyzing the impacts of stop working during the advance of the tunneling shield on ground surface settlement. The findings in this study may provide a good reference to urban super - diameter slurry shield projects.

**Key words:** super - diameter; slurry shield; subway tunnel; ground surface settlement; ground loss

随着我国城市化建设的快速发展,地上空间匮乏、交通拥挤等问题也日益突出。为了解决城市日益拥堵的交通问题,城市地下交通的发展已然成为当今城市建设中的重要组成部分。盾构隧道施工因具有对沿线构筑物影响小且不受气象条件影响等优点,在城市地下隧道建设中得到了越来越广泛的应用。而目前地下隧道的开挖有往大直径盾构方向发展的趋势。地下隧道的开挖必然会对周围的土层产生扰动,进而产生地表变形。若地表变形量过大则会对周边建筑物的安全产生不利影响,目前盾构推进常以地表的隆沉值作为控制指标<sup>[1]</sup>。

魏纲<sup>[2]</sup>根据不同地区盾构隧道施工引起的沉

降实测值,对盾构隧道施工引起的土体损失率的取值和分布进行了研究。林存刚等<sup>[3]</sup>通过对隧道施工中泥水盾构掘进参数及地面沉降的分析,讨论了泥水盾构掘进参数对地面沉降的影响。赵卉子等<sup>[4]</sup>根据实测数据,对泥水盾构隧道在不同施工阶段所引起的地表沉降大小、变形规律等进行了分析。本文在已有成果的基础上,利用上海某超大直径越江隧道的现场实测数据并结合 Peck 公式<sup>[5]</sup>,对盾构推进过程中及停机状态下对地表沉降的影响进行了分析,得出了一些相应的结论,对于城市超大直径泥水盾构工程有较好的参考价值。

收稿日期:2016-06-02; 修回日期:2016-08-24

作者简介:程磊标(1990-),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向:城市地下工程。

通讯作者:陈有亮(1966-),男,河北故城人,博士,教授,博士生导师,研究方向:岩土力学与地下工程。

# 1 工程概况及地质条件

## 1.1 工程概况

工程位于闵行区和奉贤区,盾构从奉贤段工作井始发进行西线隧道施工,到达闵行接收井后再掉头完成东线隧道施工。隧道段采用直径为 14.93 m 泥水平衡盾构施工,盾壳前端外径 14.90 m,盾尾外径 14.87 m,隧道外径 14.50 m,管片厚度 0.6 m,环

宽 2 m。

## 1.2 地质条件

该段工程地貌类型为滨海平原,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 340m,江底最深处标高约为 -18.5 m。工程场地在 95.34 m 深度范围内,主要由饱和的黏性土、粉性土、砂性土组成,属第四纪松散沉积物,隧道穿越地层的主要物理力学指标如表 1 所示。

表 1 隧道穿越地层情况一览表

层号	土层名称	含水量 W/%	孔隙比 $e$	压缩模量 E/MPa	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
②1	褐黄色粉质黏土	27.3	0.782	5.83	26.0	18.5
③	灰色淤泥质粉质黏土	45.5	1.275	2.90	11.0	17.0
④1	灰色淤泥质黏土	46.2	1.303	2.51	11.0	13.0
⑤1-1	灰色黏土	39.0	1.118	3.40	15.0	16.5
⑥	暗绿-草黄色粉质黏土	24.0	0.692	7.80	45.0	16.5
⑦1-1	草黄色黏质粉土夹粉质黏土	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	灰色粉砂与粉质黏土层	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

## 2 地表沉降监测测点布置

为了及时收集、反馈和分析盾构上方环境要素在盾构掘进施工中的沉降变形信息和已施工完成的区间隧道的沉降变形信息,实现信息化施工,确保施工安全,工程期间分别对东、西线场地布置地表测点以及地下测点。本文主要对西线的相关测点数据进行了分析,测点布置于地表,测量内容为竖向位移。在隧道推进方向上,沿轴线每 5 环布置一个沉降监测点,在垂直隧道推进方向上,每个横断面布置 6 个测点,测点关于轴线对称,测点的间距为 5 m。测点布置示意图如图 1 所示。

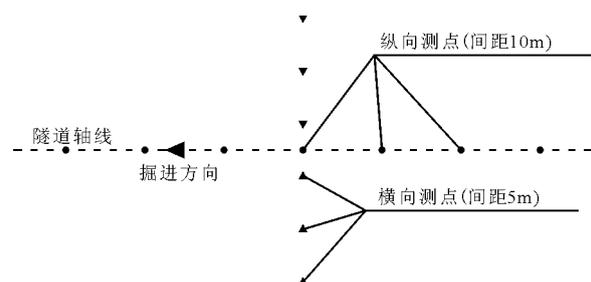


图 1 隧道纵横向测点布置示意图

## 3 地表沉降理论

目前,盾构隧道地表沉降的分析方法主要有经验公式法、数值模拟法、理论解析法以及模型试验法等。在各种方法中,已被工程实践广泛接受的是 Peck 公式,Peck 认为施工引起的地面沉降是在不排水的情况下发生的,沉降槽体积应该等于地层损失的体积,且地层损失在整个隧道长度上均匀分布,地面沉降的横向分布类似正态分布曲线。地表横向沉降槽如图 2 所示。

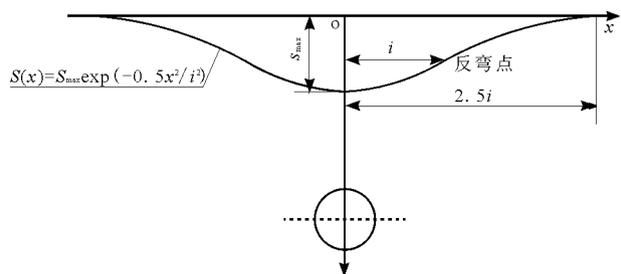


图 2 地表沉降槽正态分布曲线

Peck 公式为:

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

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

$$V_s = \eta\pi R^2 \quad (3)$$

$$i = KZ_0 \quad (4)$$

式中:  $S(x)$  为地层损失引起的地面沉降, m;  $x$  为距离隧道中心线的距离, m;  $S_{\max}$  为隧道中心线处地层损失引起的最大沉降量, m;  $i$  为地表沉降槽宽度系数, m;  $V_s$  为盾构隧道掘进单位长度地层损失,  $\text{m}^3/\text{m}$ ;  $\eta$  为地层体积损失率, 即单位长度地层损失占单位长度盾构隧道开挖体积的百分比;  $R$  为隧道半径, m;  $K$  为沉降槽宽度参数;  $Z_0$  为隧道轴线埋深, m。

## 4 地表沉降监测数据分析

### 4.1 地表纵向和横向沉降变化规律

断面 W795 轴线位置在盾构切口推进过程中得到的纵断面沉降实测结果如图 3 所示, 图中地表隆起记为正值, 地表沉降记为负值。

由图 3 可见, 盾构推进过程中, 当盾构切口距离测量断面前 70 m 至前 30 m 时, 地层已开始受扰动, 地表变形已经开始并产生了一定的沉降, 沉降量很小。当切口距离断面前 30 m 至前 8 m 时, 地表发生了轻微的隆起, 隆起量较小。当切口距离断面前小于 8 m 后, 盾构掘进对地层扰动加剧, 地表沉降明显, 且切口通过断面之后, 由于地层损失, 沉降量和沉降速率都明显加大。当切口通过断面 80 m 之后认为开始固结沉降, 地表沉降趋于平缓但沉降还没有稳定。前期由于刀盘外径与管片之间的差异产生的地层损失会引起较大的沉降, 后期的沉降则主要是由于扰动土体固结产生。

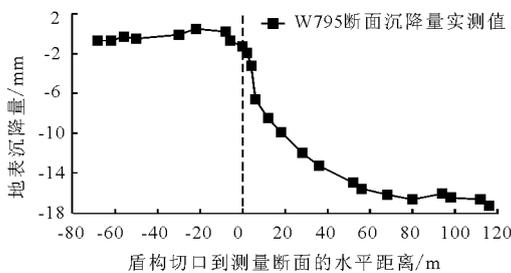


图3 断面 W795 纵向地表沉降曲线

对于测量断面的地表横向沉降, Peck 公式假定沉降是在不排水的情况下发生的, 沉降槽体积应该等于地层损失的体积。断面 W795 处由地层损失引起的地表最大沉降值, 即切口通过断面 80 m 处对应的沉降数据及利用 Peck 公式对实测数据进行拟合

的结果如图 4 所示。

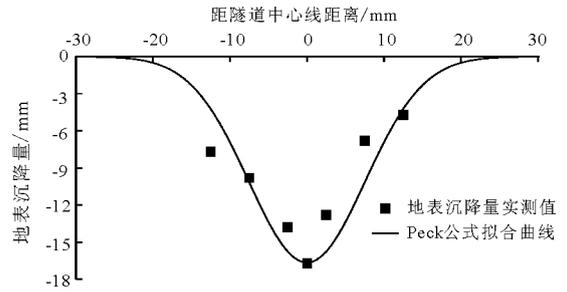


图4 断面 W795 横向沉降数据拟合结果

由图 4 中实测数据可知, 地表横向沉降呈现中间沉降量大, 两边沉降量小, 且最大沉降量出现在隧道轴线上方。由拟合结果可知, 实测值与 Peck 公式拟合较好。断面 W795 处隧道轴线埋深 42 m, 拟合得到的沉降槽宽度系数为 7.55 m, 最大沉降量为 16.64 mm, 由此可以算出地层损失率为 0.18%, 沉降槽宽度参数为 0.18。对于地层损失率和沉降槽宽度参数, 其取值与地质条件和施工条件密切相关。现有文献中, 盾构隧道施工地层损失率在 0.2% ~ 5.0% 之间<sup>[6-10]</sup>, 沉降槽宽度参数砂性土中在 0.2 ~ 0.3, 黏性土中在 0.4 ~ 0.7 之间<sup>[11-12]</sup>。沈培良等<sup>[13]</sup>根据外径 6.34 m 的盾构施工隧道的大量数据推算得出在上海地区的地层损失率在 0.35% ~ 0.7% 之间, 沉降槽宽度参数在 0.15 ~ 0.35 之间。

由本文中的 W795 断面拟合结果对比已有地层损失率和沉降槽宽度参数范围可知, 对于超大直径盾构隧道, 地层损失率和沉降槽宽度参数的取值比已有成果偏小。

对隧道的其他横断面的最大沉降实测值同样用 Peck 公式进行拟合, 如图 5 所示。

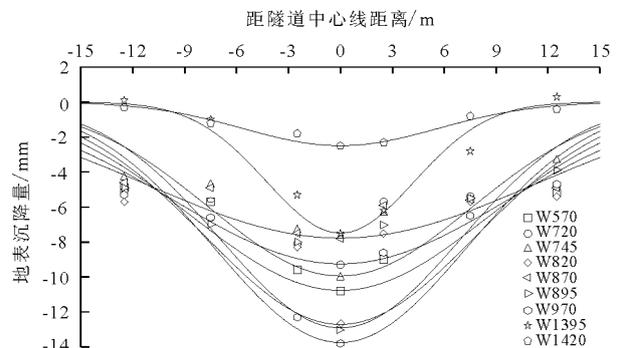


图5 各断面横向沉降数据拟合结果

图 5 中各断面横向实测值与 Peck 公式拟合较好。各测量断面处隧道轴线埋深已知, 见下表中  $Z_0$ , 分别计算分析相应沉降槽宽度和地层损失率等参数, 计算结果见表 2。

表 2 地面沉降参数计算结果

断面 编号	$S_{\max}/$ mm	$i/$ m	$Z_0/$ m	$V_s/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	$K$	$\eta/$ %
W570	10.77	8.59	47.38	0.232	0.18	0.13
W720	9.25	9.64	44.00	0.224	0.22	0.13
W745	9.94	7.58	43.32	0.189	0.18	0.11
W795	16.64	7.55	42.00	0.315	0.18	0.18
W820	12.71	7.79	41.52	0.248	0.19	0.14
W870	7.77	11.20	40.52	0.218	0.28	0.12
W895	12.91	6.95	40.08	0.225	0.17	0.13
W970	13.74	7.29	38.20	0.251	0.19	0.14
W1395	7.49	4.27	27.76	0.080	0.15	0.05
W1420	2.50	5.63	27.32	0.035	0.21	0.02

由表 2 可以看出,对于超大直径泥水平衡盾构施工隧道,盾构正常推进状态下,其地层损失率一般在 0.02% ~ 0.18% 之间,沉降槽宽度参数一般在 0.15 ~ 0.28 之间。由此可以看出,超大直径盾构隧道的地层损失率和沉降槽宽度参数都控制在很小的范围内,这一方面得益于施工技术的提高和合理掘进参数的选取;另一方面也与盾构直径的变化相关,由于盾构直径增大而盾构长度变化不大,盾构机的灵敏度得到了较大的提高,有利于盾构机掘进姿态的控制。

#### 4.2 盾构停机对地表沉降的影响

为了研究盾构停机对地表的影响,对 W145 断面处轴线位置的地表纵向实测沉降值进行分析,如图 6 所示。

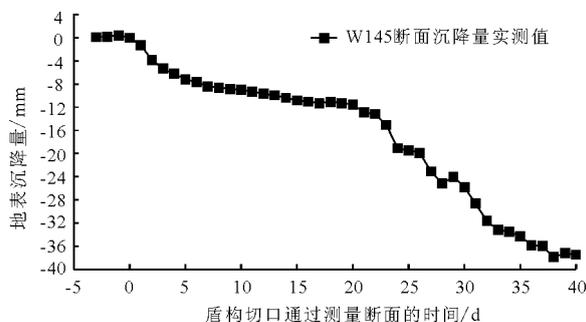


图 6 断面 W145 纵向地表沉降曲线

图 6 中盾构切口于 9 月 9 号通过 W145 断面,9 月 10 号切口到达 W147 断面停机。在切口通过 W145 断面之后的第 1 天至第 22 天盾构机停机,此时 W145 断面位于盾构机正上方。由图 6 可以看出,切口到达前对地面的扰动较小,地面有微小的隆起。切口经过时对地面扰动变大,地面沉降明显,在

盾构机停机期间,由于之前对土体的扰动及盾构和后续拖车对下卧土层的压缩作用,地表继续沉降但是沉降速率明显变慢。当第 23 天盾构机重新推进之后可以看到地表沉降速率重新变大且其最大沉降量明显大于图 3 中盾构没有停机时的最大沉降值。

通过停机对 W145 断面沉降影响的分析,在盾构推进过程中应尽量避免盾构的长时间停机并控制盾构能在均匀稳定的状态下推进。这样可以减少盾构及后续拖车压缩下卧层引起的沉降,并且可以减少盾构施工对土体的扰动从而减少后期土体的固结沉降。

## 5 结 论

通过以上分析,可以得出以下结论:

(1) 盾构切口通过断面之前地表沉降较小,通过期间地表沉降速率和沉降量都较大,远离之后会继续发生较慢的固结沉降。

(2) 横断面的沉降在隧道轴线上方的地面沉降量最大,距离隧道轴线越远的位置地面沉降量越小。

(3) 与已有的研究成果相比,超大直径隧道横断面沉降槽的地层损失率和沉降槽宽度参数的取值都偏小,其地层损失率一般在 0.02% ~ 0.18% 之间,沉降槽宽度参数一般在 0.15 ~ 0.28 之间。

(4) 与盾构正常推进相比,施工过程中长时间停机会引起较大的沉降。在盾构推进过程中应尽量避免盾构的长时间停机并控制盾构在均匀稳定的状态下推进。

#### 参考文献:

- [1] 孙永,周顺华,宫全美. 软土地区盾构推进引起的深层位移场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(3):500-506.
- [2] 魏纲. 盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(9):1354-1361.
- [3] 林存刚,张忠苗,吴世明,等. 泥水盾构掘进参数对地面沉降影响实例研究[J]. 土木工程学报,2012,45(4):116-126.
- [4] 赵卉子,李林,陈有亮,等. 超大直径泥水盾构隧道施工地面沉降实测分析[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(4):170-173.
- [5] 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.

- [6] 王海建. 水电站沥青混凝土心墙三轴试验研究[J]. 土工基础, 2008, 22(6): 57 - 58 + 72.
- [7] 吉林敦化抽水蓄能电站心墙沥青混凝土配合比试验报告[R]. 陕西省水利水电工程西安理工大学质量检测中心, 2016. 3.
- [8] 中华人民共和国电力行业标准. DL/T 5362 - 2006. 水工沥青混凝土试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [9] 余梁蜀, 晋晓海, 丁治平. 心墙沥青混凝土动力特性影响因素的试验研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 194 - 197 + 206.
- [10] 杨华全, 王晓军, 何晓民. 沥青混凝土模量数 K 值的影响因素试验研究[J]. 长江科学院院报. 2007, 24(4): 57 - 59 + 63.
- [11] 丁树云, 毕庆涛, 殷宗泽. 三轴试验测定掺砾心墙料邓肯张模型参数简化方法的探讨[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 763 - 767.
- [12] 梁东跃, 张亮. 风积土邓肯-张 E-B 模型参数试验研究[J]. 山西建筑, 2006, 32(21): 97 - 98.
- [13] Ostle B, Turner K V, Hicks C R, et al. Engineering statistics: the industrial experience[M]. New York: Duxbury Press, 1996.
- [14] 陆健. 最小二乘法及其应用[J]. 中国西部科技, 2007(12): 19 - 21.

(上接第 229 页)

- [6] 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.
- [7] Rowe R K, Lee K M. Subsidence owing to tunnelling II. Evaluation of a prediction technique[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(6): 941 - 954.
- [8] 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.
- [9] Attewell P B, Selby A R. Tunneling in compressible soils: large ground movements and structural implications[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1989, 4(4): 481 - 487.
- [10] Mair R J, Taylor R N, Burland J B. Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling[C] // Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, London: Balkema, 1996: 713 - 718.
- [11] 韩焯, 李宁. 隧道施工引起地层位移预测模型的对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 594 - 600.
- [12] O'Reilly M P, New B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction[C] // Proc. Tunneling 82, Institution of Mining and Metallurgy, London, 1982: 173 - 181.
- [13] 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.