

文章编号: 1000-7598-(2006)02-0313-04

盾构施工引起的地表横向沉降槽分析

璩继立¹, 许英姿²

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 上海交通大学, 上海 200030)

摘 要: 基于龙东路-世纪公园站区间隧道现场实测资料, 对由盾构施工引起的沉降槽的形状进行了深入研究。首先绘出埋深不同的沉降槽的实测形状; 再利用数学拟合方法对沉降槽的形状、影响范围、宽度系数及最大沉降量出现的位置进行的研究, 指出它们均与隧道的埋深有着密切的关系; 最后, 用统计学的方法给出隧道埋深与最大沉降量以及沉降槽宽度系数与隧道埋深之间的定量关系式。

关 键 词: 横向沉降槽; 隧道埋深; 宽度系数; 最大沉降量

中图分类号: TV 554

文献标识码: A

Analysis of ground traverse settlement trough caused by shield construction

QÜ Ji-li¹, XU Ying-zi²

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The settlement trough induced by the shield construction is researched deeply based on the raw test material in situ in metro section between Longdong road and Century Park; the relationships between the shape of settlement, influence scope, width coefficient, the location where the largest settlement appears and the depth of the tunnel, are presented. And the quantitative relations between largest settlement, the width coefficient and the depth of the tunnel are given using the statistical method.

Key words: across settlement trough; tunnel depth; width coefficient; largest settlement

1 前 言

上海地铁二号线是上海市地铁规划网络中一条东西走向线, 与地铁一号线垂直相交, 是上海地铁规划网络中关键线路之一。地铁二号线以虹桥国际机场为起点, 浦东国际机场为终点, 一期工程范围为中山公园站至龙东路站, 共设置11个地下车站。

现场试验研究在上海地铁二号线区间隧道龙东路-世纪公园站进行。盾构通过地层为第四层灰色淤泥质黏土, 如图1所示。该试验的目的是研究盾构施工引起的地面长期沉降, 研究的主要内容有: (1) 隧道埋深与地表最大沉降之间的关系; (2) 隧道埋深与地表沉降槽的宽度系数之间的关系。基本资料和试验布置如下: 该区间隧道由外径为6 200 mm, 内径为5 500 mm的预制钢筋混凝土衬砌组成, 环宽1 000 mm, 厚度为350 mm, 每环由拱底块(D) 1块, 标准块(B) 2 块, 邻接块(L¹, L²) 2 块, 封顶块(F³) 一块拼装而成。预制衬砌钢筋混凝土标号C50, 抗渗

标号S8, 衬砌纵环向联结螺栓共(16+13)×1 620套, 衬砌环缝及纵缝间防水采用弹性密封衬垫。区间隧道采用法国FCB公司生产的土压平衡式盾构掘进机施工, 其外径为6 340 mm, 长度为6 540 mm, 盾构与车架总长度为28 m。

在盾构轴线上布置了一系列地表沉降监测点, 并随时对其进行沉降观测, 上行线于1997年7月18日开始推进, 盾构切口里程为879.859 m, 推进环数为-2环, 1997年11月9日结束, 切口里程为94.962 m, 推进环数为785环。8月21日开始监测地表长期沉降, 此时盾构推进环数为167环。各层土物理力学性质见表1。

2 埋深不同的隧道各断面沉降槽的实测形状研究

从剖面中(图1)可以看出, 世纪公园站至龙东路站区间隧道在龙东路(该站为地面站)时上抬, 使得隧道埋深在整个区间内有明显变化。选取不同

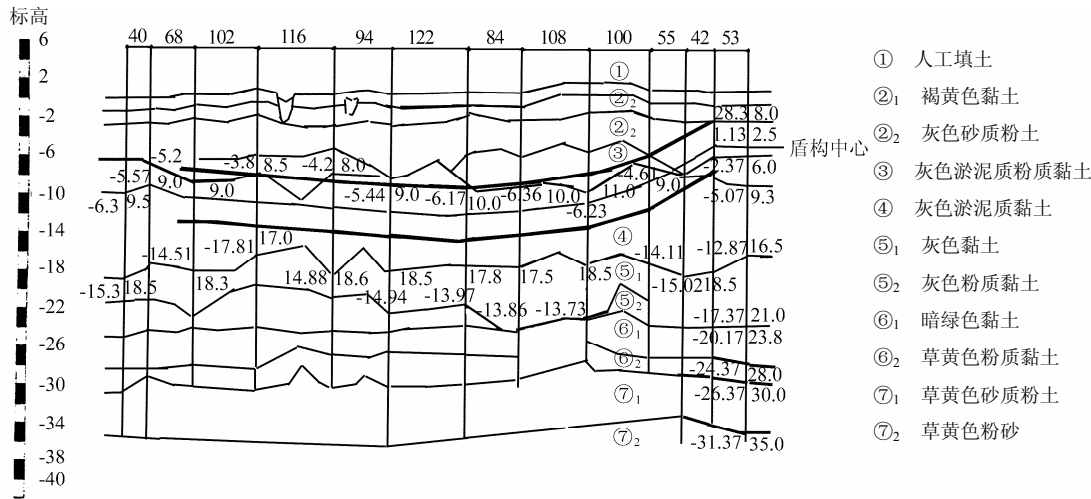


图1 盾构隧道及工程地质剖面(图中数字为地层标高单位: m)
Fig.1 Profile of tunnel and engineering geology (unit: m)

表1 各层土物理力学性质参数
Table 1 Physical and mechanic features parameters of soil strata

土层名称	层厚 /m	含水量 /%	密度 /g·cm ⁻³	孔隙比 <i>e</i>	压缩模量 /MPa	变形模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
人工填土	1.0				4.63	3.52	0.25	18.2	18
褐黄色黏土	1.5	34	1.87	0.967	4.21	3.37	0.27	17.7	17
灰色砂质粉土	3.5	33	1.87	0.917	11.03	6.87	0.25	6.3	21
灰色淤泥质粉质黏土	2.5	45	1.76	1.241	2.21	1.38	0.25	13.2	9
灰色淤泥质黏土	7.5	50	1.72	1.4	2.05	1.28	0.25	12.6	7.3
灰色黏土	4.5	35	1.84	1.02	3.95	3.29	0.25	14.7	10
灰色粉质黏土	2.0	35	1.82	1.02	3.99	3.33	0.25	15.3	9.6
暗绿色黏土	3.0	24	2.01	0.667	7.2	6.31	0.22	25	19
草黄色粉质黏土	1.0	26	1.95	0.769	6.93	5.78	0.25	17.1	20
草黄色砂质黏土	7.0	30	1.89	0.853	10.41	9.25	0.21	2.5	24
草黄色粉砂	12.0	28	1.93	0.781	13.75	12.38	0.2	2.0	25

埋深条件下具有代表性的6条横向断面沉降观测槽所监测到沉降稳定值(90 d后), 如表2、图2、图3所示, 看出有如下简单规律:

(1) 隧道埋深的增大, 地表沉降槽横向影响范围呈增大趋势, 影响明显的范围: 埋深6.09 m时为-6~+6 m, 埋深10.37 m时为-9~+9 m, 埋深12.72 m时为-12~+12 m。

(2) 随隧道埋深的增大, 地表最大沉降值减少。埋深6.09 m时, 轴线处的沉降值为65.41 mm, 埋深增加约1倍, 即12.72 m时轴线处的沉降值减少为24.23 mm, 减少量为41.18 mm。

(3) 一般认为, 隧道埋深(即上覆黏性土厚度)与地表最大沉降值之间存在近似双曲线的关系, 但在上海的实测资料显示它们之间存在近似线性的关系, 从图 3可以看出, 其拟合相关系数为0.987 4, $s=102.48-6.417x$ 。

(4) 综合规律(1)和(2)可知, 土体受盾构

施工扰动在近盾构处的影响较大, 远离盾构处较小, 其扰动程度随与隧道距离加大呈现衰减性和扩展性的特点。因此, 在对盾构施工中临近建筑物采取改善土性的办法来进行保护时, 重要的是要对近盾构周围的土体进行加固处理, 加固范围在盾构周围应包括不小于3 m的土体, 即距盾构中心线6 m范围内的土体(盾构直径为6.34 m)。

表2 隧道不同埋深时地表横向沉降槽实测值
Table 2 Testing data at various depths

隧道埋深	不同距隧道轴线距离 <i>x</i> (m)的沉降值 <i>s</i> /mm								
<i>H</i> /m	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12
6.09	-2	-8.32	-22.93	-55.64	-65.41	-46.62	-12.95	-3.6	-1
8.37	-2.5	-10.58	-38.22	-47.84	48.94	-36.52	-23.11	-6.33	-1.5
9.78	-3	-5.21	-22.42	-32.35	-36.5	-37.56	-19.22	-10.24	-1
10.37	-5.84	-12.32	-23.68	-35.28	-34.52	-30.21	-14.7	-10.55	-1.4
11.37	-2.91	-13.65	-42.38	-26.08	-28.62	-20.63	-13.5	-9.74	-8.33
12.72	-9.76	-13.85	-22.23	-20.75	-24.23	-26.45	-18.25	-16.51	-12.03

注: *x*为距隧道中心线横向距离。

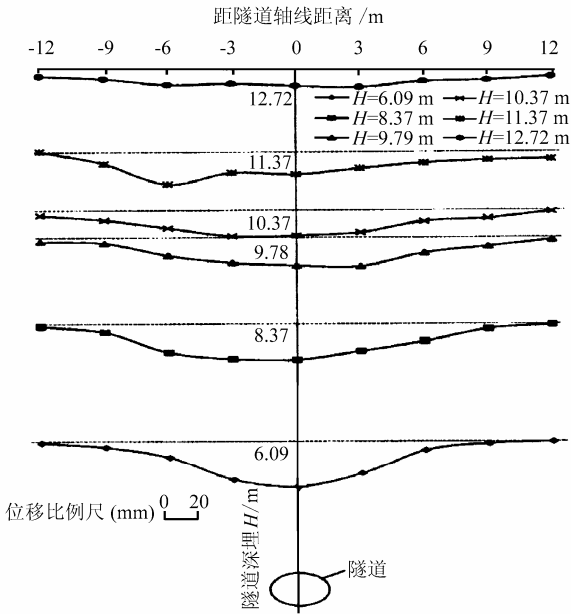


图 2 埋深不同的地表横向沉降槽曲线

Fig.2 Traverse settlement trough at different buried depth

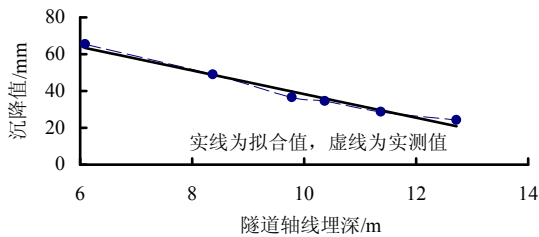


图 3 埋深不同的地表沉降槽轴线处沉降值

Fig.3 Settlement variation of centerline at different depth

3 埋深不同的各断面沉降槽的形状

从表2 隧道埋深不同时（从隧道轴线算起的上覆黏土厚度）地表横向沉降槽实测值可以得出实测值与拟合值及其相关参数的关系见图5、表3，其中*i*为宽度系数；*R*为拟合相关系数，见表3。埋深与宽度系数之间关系如图5所示。

表3 不同埋深拟合关系 Table 3 Fitting relation at various depths			
埋深 /m	拟合关系		
	<i>s</i> (<i>x</i>) /mm	<i>i</i> /m	<i>R</i>
6.09	$55.15e^{-\frac{x^2}{37.88}}$	4.35	-0.971 5
8.37	$55.76e^{-\frac{x^2}{43.1}}$	4.64	-0.980 3
9.78	$42.39e^{-\frac{x^2}{45.45}}$	4.77	-0.964 8
10.37	$37.51e^{-\frac{x^2}{58.14}}$	5.39	-0.923 5
11.37	$30.16e^{-\frac{x^2}{81.97}}$	6.4	-0.849 0
12.72	$24.51e^{-\frac{x^2}{174.52}}$	9.34	-0.957 8

拟合结果 $i = 4.35 + 7.29 \times 10^{-9} s^8$ ，相关系数 $R = 0.998\ 5$ ，即沉降槽宽度系数与隧道轴线埋深之间存在 8 次幂关系，沉降槽宽度系数与隧道轴线埋深的 8 次幂之间具有非常好的线性关系，其拟合过程如表4所示。

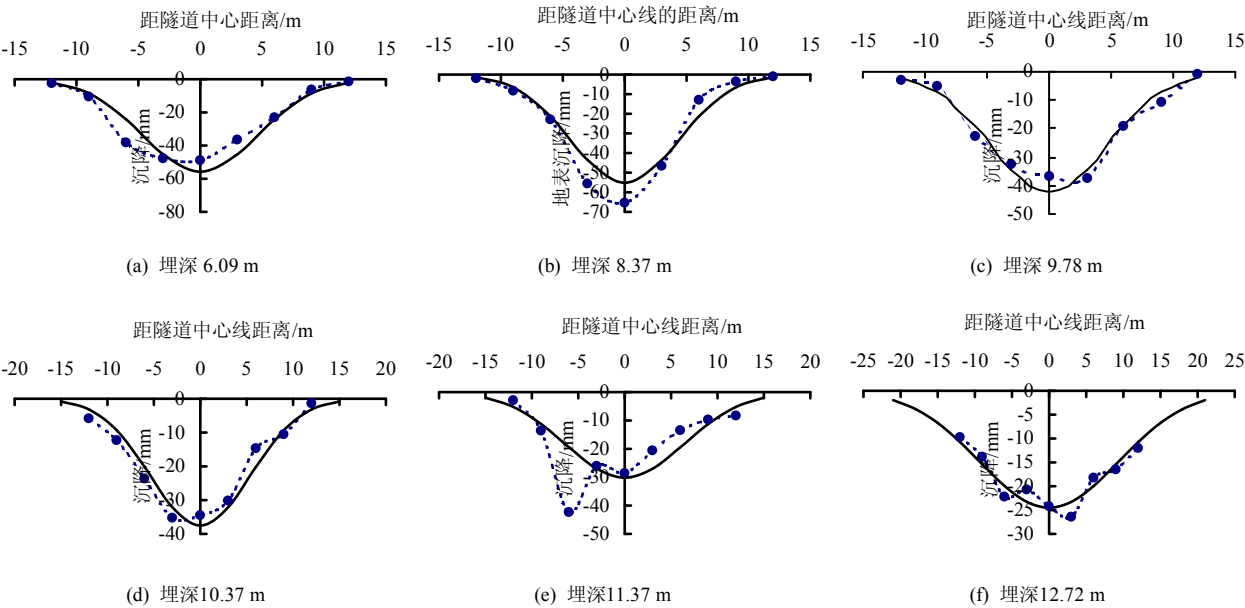


图4 不同埋深时地表横向沉降槽曲线

Fig.4 Traverse settlements trough in different depth difference

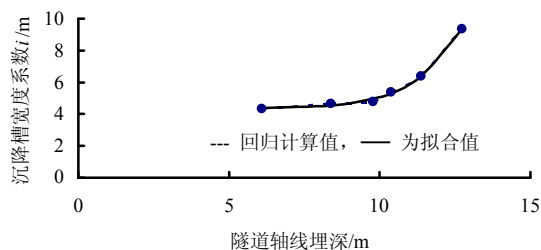


图5 隧道轴线埋深与沉降槽宽度系数之间的关系

Fig.5 Relation between buried depth and width coefficient

表4 宽度系数与轴线埋深关系拟合

Table 4 Fitting between width coefficient and depth

条件	相关系数R	条件	相关系数R
$y = a + bx$	0.830 0	$y = a + bx^7$	0.996 7
$y = a + bx^2$	0.885 3	$y = a + bx^{7.5}$	0.998 0
$y = a + bx^3$	0.928 5	$y = a + bx^8$	0.998 5
$y = a + bx^4$	0.959 2	$y = a + bx^{8.5}$	0.998 3
$y = a + bx^5$	0.979 1	$y = a + bx^9$	0.997 5
$y = a + bx^6$	0.990 9	$y = a + bx^{10}$	0.994 9

从以上回归过程可清楚地看出, 当 $y = a + bx^8$, 相关系数 $R = 0.998 5$ 为最佳。

综上所述可以得出如下几点结论:

(1) 道埋深与地表沉降之间的关系。非常近似于直线, 即隧道轴线埋深越大, 沉降量越小; 反之, 沉降量越大, 其拟合的相关系数为 0.987 4, $s = 102.48 - 6.417x$, 这与盾构施工对地层的扰动范围有关。土体的分层沉降表明, 土体越靠近盾构, 受到的扰动越大, 造成的地层损失沉降和随后的固结沉降也大; 土体越远离盾构, 受到的扰动越小, 造成的地层损失沉降和随后的固结沉降也越小; 盾构埋深越小, 地表离盾构就越近, 地表土体受到的扰动就越大, 因而造成的地层损失沉降和随后的固结沉降也越大; 反之, 盾构埋深越大, 地表离盾构就越远, 地表土体在盾构施工中受到的扰动就越小, 因而造成的地层损失沉降和随后的固结沉降也就越小。

(2) 隧道埋深与地表沉降槽宽度系数之间的关系在 8 次幂关系 (图 5), 即沉降槽宽度系数与隧道轴线埋深的 8 次幂之间具有非常好的线性关系: $i = 4.35 + 7.29 \times 10^{-9} x^8$, 相关系数 $R = 0.998 5$ 。从图 5 也可看出, 当隧道埋深超过 10 m 后, 宽度系数随埋深的增加迅速增加。解释如下: 随埋深的增加, 由于盾构外壳与周围土体的摩擦以及向盾尾空隙的注浆而产生的影响范围也大大地扩展, 即引起地层移动的范围也大大横向扩展, 尤其与土层的横向位移, 土体流变及横向超孔隙水的消散关系密切。

(3) 随着隧道埋深的增大, 地表沉降减小, 但

沉降槽宽度系数则反而增加。从形成的沉降槽形状看, 埋深浅时沉降槽深而窄, 曲线的曲率增加, 横向影响范围也小; 反之埋深大时, 沉降槽浅而宽, 曲线的曲率减小, 横向影响范围大。埋深 6.09 m 时, 其宽度系数 $i = 4.35$ m, 若按 Peck 公式, 则其影响范围为 $2.5i$, 即 $2.5 \times 4.35 = 10.88$ m; 即隧道侧向 11 m 范围内的建筑均会受到不同程度的影响; 埋深为 12.72 m 时, 其宽度系数 i 值为 9.34 m; 若按 Peck 公式, 则其影响范围是 $2.5i$, 即 $2.5 \times 9.34 = 23.35$ m。亦即隧道侧向 23 m 范围内的建筑将会受到不同程度的影响。所以随埋深增加横向影响范围大大扩展了。

(4) 从图 4 还可以看出, 出现最大沉降量的位置往往并不是在隧道中心轴线上, 而是有所偏离。图 4(a), 4(e), 4(f) 偏离值大约为 3 m 左右, 该值正好是盾构的半径, 显示施工时可能由于盾构的“蛇行”和超挖引起土体向盾构一侧的移动和流变, 使得沉降最大值不在中间, 而在两侧, 隧道埋深较浅时尤其明显。而图 5 的偏离量更达 6 m 左右, 埋深较大时这种影响不明显, 见埋深为 12.72 m 的图 4(f)。

(5) 应该说明的是, 上述分析得出的宽度系数与隧道埋深之间的关系, 是在有土体固结作用参与下发生的, 因而该宽度系数远大于 Peck 公式得到的 i 值是可以理解的。因为随着固结沉降的进行, 沉降槽的宽度也在增加, 如按照 Peck 公式的估算 $i = (H + R) / \sqrt{2\pi \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)}$, 并按现场勘测资料, 埋深为 6.09 m 时, $\varphi = 18^\circ$; 埋深 12.72 m 时, $\varphi = 14^\circ$; 按上述公式可分别求出此两种情况下的 i 值分别为 3.34 m 和 6.5 m 与拟合出的值 4.35 m 和 9.34 m 相差甚远, 也从另外一个方面说明了固结和次固结沉降对沉降槽形状的影响, 即不同于完全由于盾构施工初期地层损失引起的沉降。

4 结 论

(1) 在上海地区特殊的软土地层中, 盾构隧道施工除了与其他施工参数有关外, 还与隧道的埋深 (隧道轴线埋深) 有密切的关系。

(2) 国外一些资料显示, 隧道埋深 (即上覆黏性土厚度) 与地表最大沉降值之间存在近似双曲线的关系, 但在上海的实测资料显示它们之间存在近似线性的关系, 这由图 3 可以看出, 其拟合的相关系数为 0.987 4, 关系式为 $s = 102.48 - 6.417x$ 。

(3) 沉降槽宽度系数与隧道轴线埋深之间存在8次幂关系, 即沉降槽宽度系数与隧道轴线埋深的8次幂之间有非常好的线性关系: $i=4.35+7.29 \times 10^{-9} x^8$, 相关系数 $R=0.9985$ 。

(4) 最大沉降量出现的位置, 往往并不是在隧道中心轴线上, 而是有所偏离。

(5) 在考虑固结和次固结沉降时, 沉降槽的宽度系数远远大于只有地层损失参加时的宽度系数。

参 考 文 献

- [1] 侯学渊, 钱达仁, 杨林德. 软土工程施工新技术[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1999.
- [2] 曹志远, 张右启. 半解析数值方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- [3] 孙钧, 汪炳鉴. 地下结构有限元解析[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
- [4] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [5] 王振信. 盾构法的现状与展望[J]. 地下工程与隧道, 1991. 16—22.
- [6] Peck R B. Tunnelling in Soil[A]. 10th ICSMFE[C]. Stockholm: [s. n.], 1981. 607—628.
- [7] Attewell R B, Yeates J. Tunnelling in Soil[A]. Ground Movements and Their Effects on Structures[M]. Edited by Attewell P B. Taylor R K. New York: Survey University Press, 1984. 132—215.
- [8] Attewell P B, Yeates J, Selby A R. Soil Movements Induced by Tunnelling and Their Effects on Pipelines and Structures[M]. Glasgow: [s. n.], 1986.
- [9] 上海市市政工程局. 软土市政地下工程施工技术手册-对构筑物影响预测和防治[M]. 上海: [s. n.], 1990.
- [10] 璩继立. 盾构施工引起的地面长期沉降研究[博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 2002.