

自行车隧道掘进机行进对地表沉降的理论分析

卢清国 张耀庆 牛防桥

(北京工业大学土木工程学院, 北京 100124)

【摘要】 通过对自行车式隧道掘进机在地下爬坡过程中引起的地表变形进行了研究, 结果表明: 掘进机行进轨迹的纵向沉降曲线与随机介质理论预计的沉降曲线接近; 在自行车掘进机埋深较浅时, 横断面沉降曲线与 Peck 理论正态分布曲线误差较大, 周向增阻结构嵌入土体能够造成地表土体的隆起。

【关键词】 自行车掘进机; 行进轨迹; 地表沉降; 随机介质理论; Peck 理论

【中图分类号】 U 455.44

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2012.04.005

Theoretical analysis on the influence of ground surface subsidence caused by the self-walking TBM

Lu Qingguo Zhang Yaoqing Niu Fangqiao

(Beijing University of Technology, The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing 100124, China)

【Abstract】 Through studies on the ground surface deformation that the self-walking TBM drills in the ground by climbing, The relevant results show that: the longitudinal settling tank curve over the self-walking TBM track is similar with the settling tank curve that the stochastic medium theory predicts; There is a large deviation between the transverse settling tank curve being formed when self-walking TBM is covered shallowly and the theory of normal distribution; the earth's surface soil is deformation being embedded of the ring resistance structure on some degree.

【Key words】 self-walking TBM; the drilling track; ground surface deformation

0 引言

随着城市化进程的加快, 城市的用地在不断扩大, 城市在地面的发展空间受到制约。现代城市的可持续发展应走集约化道路, 城市空间必然实行三维式即立体化的拓展^[1]。城市管线的敷设和更新改造是每一个城市在发展过程中所面临的重大问题。由于目前隧道施工技术较难实现长距离小曲率半径施工作业, 一种可自由穿行于地下土体, 具备长距离空间小曲率半径转弯功能的隧道施工技术必在地下隧道工程中突显优势。

1 自行车掘进机的概况及原理

1.1 概况

自行车式隧道掘进机是一种新型隧(管)道掘进技术^[2,3]。相比于顶管、盾构技术, 自行车式隧道掘进机的优势在于: 行走距离不受限制, 无需盾构施工中对支护管片的轴向上的高强度要求^[2], 在隧道掘进施工过程中可实现地下空间小曲率半径行走。

1.2 自行车掘进机的行走原理

自行车掘进机的原理是利用设置在掘进机撑阻

节外部环向的撑阻机构向周围土体撑紧并嵌入土体中。增阻块与土体的相互作用提供了机体掘进前行推进所需的轴向反力, 成为一种全新的不同于目前顶管和盾构施工技术的可在土中实现空间小曲率半径自行车式的隧(管)道掘进施工技术。土中自行车掘进机, 其特有的功能是在土中不依赖管片等人工支撑物实现掘进机的自主行走。掘进机掘进和行进的轴向反力需要掘进机自身提供, 掘进机需要相应的能跟随行进的支撑节并通过该节把轴向反力传递到已掘进的土中。土中自行车掘进机的行走过程: ①中节和后节机身的多组撑阻机构撑阻并保持; ②掘进机前节经计算反解得到四个液压缸的实时伸长控制量, 掘进时实时推进并跟踪掘进轴心的控制目标; ③推进接近行程时, 掘进暂停, 后节多组撑阻机构撑阻并保持, 随后掘进机中节撑阻机构回位完成撑阻交替; ④后节撑阻后推进中节前行; ⑤中节到位后, 中节多组撑阻机构撑阻拉动后节尾节前行; ⑥后节到位后多组撑阻机构撑阻与中节共同保持撑阻, 前节掘进后节拉动尾节到位, 继续循环运行。自行车掘进机的模型见图 1。

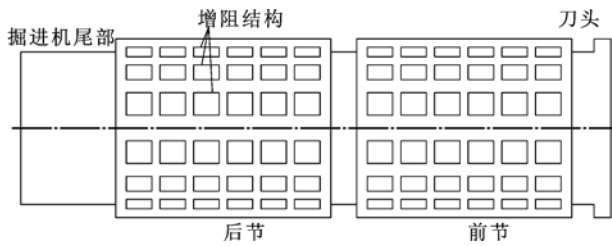


图1 自行走掘进机模型图

2 现场试验方案

为了验证自行走掘进机自行走原理的可行性,于2010年10月在辽宁省灯塔市进行了原理性试验,自行走长24.56 m,爬升3.668 m,最小转弯半径20 m,转弯行走13 m弧长后出土。试验方式及内容如下:

2.1 监测方式

试验现场位于辽宁省辽阳灯塔市某砖厂,试验样机外径1100 mm,隧道初始埋深4.7 m,出洞时埋深0.5 m,属于浅埋隧道;实验样机采用无刀盘切削,以人工开挖的方式掘进;用水准测量作为沉降监测的主要途径。

2.2 监测点布置

隧洞开挖引起的地表沉陷是以沉降槽的形式呈现的,保证沿着掘进机行走轨迹至少有两个测点在掘进机长度范围内,所有检测点布置如下:在地表每隔2 m布置一个监测横断面,每个横断面布置7个监测点,在行进轨迹的正上方布置1个点,行进轨迹两侧各布置3个点,分别距行进轨迹的水平距离为0.5 m,1.5 m,3.5 m。行进轨迹及测点平面布置见图2,V表示行进轨迹轴线上方的测点连线纵断面;沿着X轴方向,行进轨迹的右侧和左侧分别用VR和VL;沿着X轴方向,横断面标号为1~6。基准点选在离行进轨迹20 m远处的土丘上,在场外较远处设立两个控制点,对基准点进行校核。

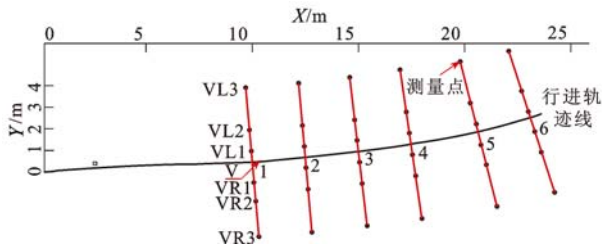


图2 行进轨迹及测点布置平面图

3 试验结果分析

3.1 掘进机行进轨迹顶部沉降曲线

自行走掘进机行进轨迹随着埋深的变化,其相应的地表沉降量也不同,选取掘进机行进轨迹顶部6个监测点的测量数据进行分析,掘进机在爬坡过程中其行进轨迹对地表沉降的影响曲线见图3。

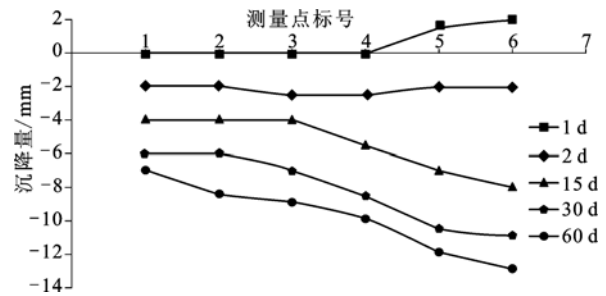


图3 V纵断面监测点的历史沉降曲线

第1~2天的沉降曲线向上倾斜,主要是由于自行走掘进机的增阻结构在行进过程中嵌入土体造成地表的隆起,第2天以后沉降曲线向下倾斜,主要是扰动土体的沉降;测点V5、V6的埋深在1~2 m之间,掘进机的行进轨迹埋深较浅($H/R < 3.5$,其中 H 为掘进机行进轨上覆土层厚度, R 为掘进机外半径,3.5为掘进机在图2中第4横断面时掘进机上覆土层厚度与掘进机半径的比值),增阻结构挤压土体对地表有一定的影响,当掘进机在图2中第6横断面时掘进机上覆土层厚度与掘进机的半径的比值为2.5即 $H/R = 2.5$,增阻结构挤压土体造成的地表隆起值为2 mm。

由图3可知:从测点V1至测点V6掘进机行进轨迹的埋深逐渐变小,其历史沉降量逐渐增加;在2~30 d的时间段内沉降量比较明显,主要是因为支护管片与增阻结构压缩土体之间的空隙造成的;30 d之后地表沉降趋于稳定,支护管片较好的约束了土体的变形收敛,此时的地表沉降主要是由于土体的固结变形和蠕变。第6监测点的沉降量较大,主要是埋深浅且没有设置超前支护。

3.2 历史沉降量与随机介质理论计算值比较

由于常见的城市隧道一般距离地表不深,大都处于表土或风化岩层中,这些介质能被较好地视为随机介质。因而城市隧道施工所引起的地表移动和变形是适宜于采用随机介质理论进行预计的^[4]。土体作为一种复杂的非线性介质,具有许多介质无法相对的不确定性。在盾构法施工中,土体工程性质的随机性包括土体所受荷载的不确定性以及土体反应的随机性^[5]。

根据随机介质理论,隧道开挖对地表的影响可以等效为构成这一开挖的许多无限小微元开挖的影响总和(见图4)。

自行走掘进机行进过程中的断面为 Ω ,支护以后,开挖断面由 Ω 收缩为 ω ,根据叠加原理,地表下沉应当等于初始范围 Ω 引起的下沉与支护后的范

围 ω 引起的地表下沉之差^[5], 即:

$$W(X) = W_{\Omega}(X) - W_{\omega}(X) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp x \left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (X - \epsilon)^2 \right] d\eta d\xi \quad (1)$$

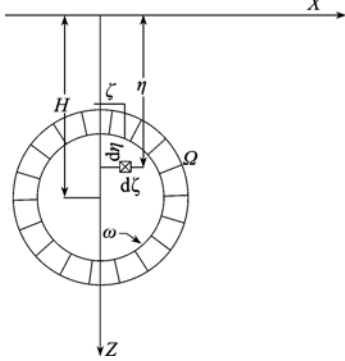


图4 单元开挖示意图

其中 β 为地层主要影响角, 结合隧道设计中荷载计算的太沙基松动土压力理论^[6], 地层主要影响角 β 与地层参数 γ 、 H 、 c 的关系^[7] 确定如下:

$$\beta = 90^\circ - \arctan \left[\tan \left[45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right] + \frac{2c}{rH} \right] \quad (2)$$

式中: φ 为行进轨迹上覆土层的加权内摩擦角, ($^\circ$);

c 为行进轨迹上覆土层的加权粘聚力, kPa;

γ 为土体天然重度, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$;

H 为自行走掘进机行进轨迹埋深, m。

自行走掘进机行进轨迹上覆土层的加权内摩擦角 $\varphi = 17.25^\circ$, 加权粘聚力 $c = 32.89 \text{ kPa}$, 土体加权天然重度 $\gamma = 18.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 计算结果与实测结果对比见图 5:

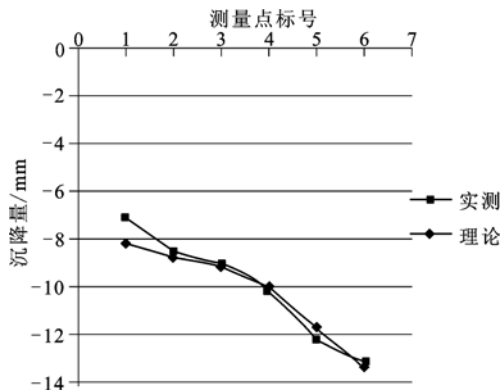


图5 沉降量对比图

通过随机介质理论计算的沉降曲线与实测沉降曲线的对比分析, 可知理论沉降曲线与实测沉降曲线较为接近, 且理论沉降曲线整体略大于实测沉降曲线, 只有第 5 测量点的实测沉降量略大于理论沉降量, 主要是由于第 5 测量点所在的横断面, 在人工开挖时隧道断面上部存在超挖现象, 造成实际的隧

道断面空间 Ω 比理论计算时的断面空间 Ω 略大。随机介质理论能够较好的预计自行走掘进机行进轨迹引起的地表沉降量。

3.2.1 横向沉降曲线历史变化特征

选取 C3 横断面沉降数据进行分析, C3 横断面平均埋深 3 m, 埋深与半径比即 $H/R = 5.5$, 属于浅埋隧道, 图 6 表示了 C3 横断面沉降量随时间的变化规律, 沉降曲线整体较为缓和, 在行进轨迹直径范围内曲率较大。由沉降曲线可知 2~30 d 的沉降比较明显, 掘进机增阻结构嵌入土体, 对初始隧洞径向土体起到了部分压缩加固作用, 减少了土体前期的沉降量, 第 30 d 以后沉降趋于稳定。

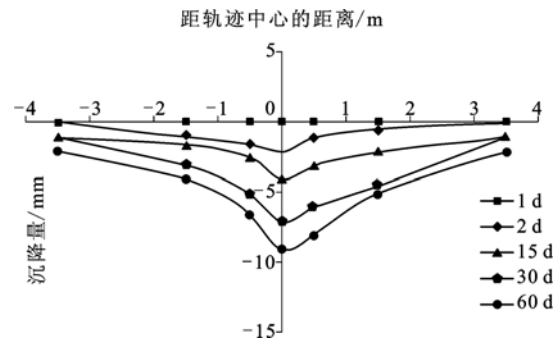


图6 横断面历史沉降曲线

3.2.2 历史沉降量与 Peck 理论计算值的比较

Peck 认为, 在不排水情况下沉降槽的体积应该等于地层损失的体积。根据这个假定并结合 Matros 对采矿引起地面位移的一种估算方法, Peck 提出了地面沉降的横向分布似正态分布曲线^[8]:

$$s(X) = s_{\max} e^{-\frac{x^2}{\pi^2}} \quad (3)$$

$$s_{\max} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2\pi}i} \quad (4)$$

式中: $s(x)$ 为距离隧道中心轴线为 x 处地表沉降值, m;

V_{exc} 为施工引起的隧道单位长度地层损失, m^3/m^{-1} ;

s_{\max} 为隧道中心线处地表最大沉降值, m;

i 为地表沉降槽宽度系数, 即隧道中心线至沉降曲线反弯点的距离, m。

地表沉降槽宽度系数的计算公式^[6]:

$$i = \frac{z}{\sqrt{z\pi} \tan \left[45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right]} \quad (5)$$

式中: φ 为土体内摩擦角加权平均值。

掘进机行进地层土的内摩擦角的加权平均值为 $\varphi = 17.25^\circ$, 地层损失为 $V_{\text{exc}} = 0.037 \text{ m}^3/\text{m}$, 计算所得理论沉降量与实测沉降量的比较见图 7。

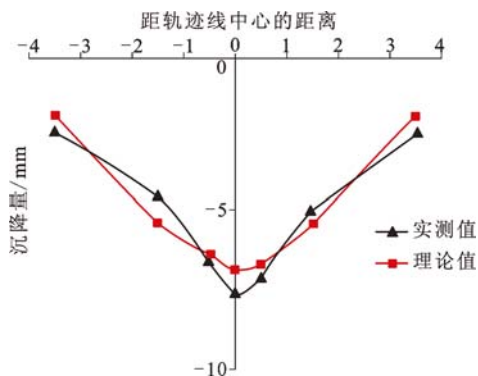


图7 实测沉降与 Peck 理论预计沉降量对比图

通过对理论沉降曲线与实测沉降曲线的比较,可知理论沉降量总体大于实测沉降量,实测沉降曲线与 Peck 正态曲线存在一定误差,平均偏离值为 47%。

实测沉降量与随机介质理论和 Peck 理论预计沉降量得比较见图 8。由图 8 知,实测沉降量与随机介质理论预计的沉降量的平均偏离值为 18%;实测沉降量与 Peck 理论预计的沉降量平均偏离值为 196%,随着自行走掘进机行进轨迹埋深的减少,实测沉降量与 Peck 理论预计沉降量的偏离程度在增大。所以在自行走掘进机的埋深与隧道半径比为 $H/R < 5.5$ (5.5 为掘进机在图 2 中第 1 横断面时掘进机上覆土层厚度与掘进机半径的比值)时不宜用 Peck 理论来预测沉降量。

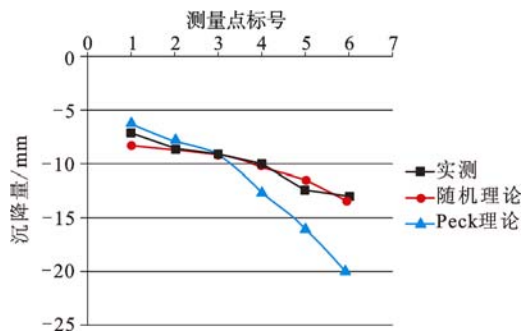


图8 实测沉降量与理论预计沉降量对比图

4 结论

1) 地表沉降量随着掘进机行进轨迹埋深的减少而增加,历史最大沉降量均在行进轨迹的上方,掘进机行进轨迹引起的沉降曲线较为符合用随机介质

理论预计的地表沉降曲线。当掘进机行进轨迹埋深较浅($H/R < 5.5$, 5.5 为掘进机在图 2 中第 1 横断面时掘进机上覆土层厚度与掘进机半径的比值)时,实测沉降曲线与 Peck 正态分布曲线偏离较大。

2) 地表沉降量主要是由于土体的开挖引起的,由于所在场地粘性土结构稳定性较好,加之掘进机增阻结构嵌入土体,对初始隧洞径向土体起到了部分压缩加固作用,减少了土体前期的沉降量。

3) 当自行走掘进机行进轨迹埋深较浅($H/R < 3.5$)时增阻结构挤压土体对地表有一定的影响,当掘进机行进轨迹埋深与掘进机半径之比即 $H/R = 2.5$ 时,增阻结构挤压土体造成的地表最大隆起值达 2 mm。

4) 地表支护机构采用 DN1000 塑料管分片拼装,支护刚度较好,能够较好的约束隧道内壁的收敛变形,控制了地表的最大沉降量。

参考文献

- [1] 马景月. 城市地下空间与开发利用规划[J]. 地下空间学报, 2002, 22(3): 200-208.
- [2] 卢清国. 长距离隧道自驱动前行的可行性[C]. 第三届中日盾构隧道技术交流会论文集, 2005.
- [3] 卢清国. 一种管土间增阻自驱动顶管顶进方法及其顶管装置: 中国, ZL01123509. 8[P]. 2004.
- [4] 阳军生. 城市隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [5] 朱忠隆, 张庆贺, 易宏传. 软土隧道纵向地表沉降的随机预测方法[J]. 岩土力学, 2001, 22(1): 56-59.
- [6] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- [7] 石北啸, 朱才辉. 地表沉降预测的地层主要影响角算法探讨[J]. 水利水电技术, 2011, 42(3): 13-15.
- [8] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground. Proceedings of the 7th International Conference on Soil mechanics and Foundation Engineering, State of the Art Volume, Mexico City, Mexico: Sociedad mexicana de mecanica de Suelos, 1969: 225-290.

收稿日期: 2012-04-09