

文章编号: 1000-7598 (2011) 12-3701-07

管幕预筑隧道地表沉降分析

黎永索^{1,2}, 张可能¹, 黄常波³, 李 钟³, 邓美龙³

(1.中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 2.湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000;

3.中建市政建设有限公司, 北京 100163)

摘 要:沈阳地铁 2 号线某暗挖车站是国内首个采用管幕预筑法施工的地下工程, 对该工法施工引起的地面沉降进行了监测, 并建立了修正的 Peck 模型对沉降进行预测, 结果表明: (1)管幕预筑隧道施工引起的地表沉降预测值与实测值基本吻合; (2)管幕预筑浅埋大断面隧道施工地表沉降表现为整体下沉特点, 沉降值与地下结构基础的沉降值基本相等, 控制管幕预筑隧道结构的墙脚下沉可以有效控制地表的沉降; (3)管幕预筑法隧道施工预先施作的地下永久结构对隧道围岩的约束作用明显, 砂土地层中地层损失率为 0.000 5%~0.002 0%, 沉降槽宽度系数为 0.5; (4)管幕预筑法建造地下空间, 引起的地表沉降较常规施工方法小得多, 环境效益和社会效益明显, 该施工方法适用于修筑中心城区软土地层中地下交通枢纽工程及下穿交通干线的隧道工程, 值得进一步研究和推广。

关 键 词:管幕预筑法; 地面沉降; 隧道; Peck 法; 新管幕法; 管幕法; 顶管

中图分类号: U 25

文献标识码: A

Analysis of surface subsidence of tunnel built by pipe-roof pre-construction method

LI Yong-suo^{1,2}, ZHANG Ke-neng¹, HUANG Chang-bo³, LI Zhong³, DENG Mei-long³

(1. School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Civil Engineering,

Hunan City University, Yiyang, Hunan 413000, China; 3. China Construction Municipal Construction Corporation Limited, Beijing 100163, China)

Abstract: Underground station of Shenyang Metro line 2 is the first underground engineering built by pipe-roof pre-construction method (PPM). The surface subsidence caused by the construction was monitored; and revised Peck model was developed to predict the subsidence. Some conclusions are drawn as follows. (1) The predicted result is consistent well with the monitoring data. (2) Surface subsidence caused by tunnel construction with PPM is characterized by the whole subsidence; and the subsidence value is pretty equal to the one of underground structure foundation, and it is effective to control surface subsidence by controlling the the sink of foundation of tunnel structure with PPM. (3) The underground permanent structure built before constructing tunnel with PPM could obviously constraint the surrounding rock with 0.0005%-0.0020% of stratum loss rate and 0.5 of width coefficient of sinking tank. (4) Surface subsidence caused by PPM is much less than the normal construction method, which has significantly social and environmental benefits; and this method is suitable to construct the underground urban traffic hub and tunnel projects that crossing traffic trunk lines and is worth to be studied and promoted further.

Key words: pipe-roof pre-construction method; surface subsidence; tunnel; Peck method; new tubular roof method; tubular roof method; pipe jacking

1 引 言

沈阳地铁 2 号线某暗挖车站是国内首个采用管幕预筑法 (pipe-roof pre-construction method, 简称 PPM) 施工的工程, 是由新管幕工法 (new tubular

roof method, 简称 NTR 工法)^[1]改进和创新而来。一些学者对该工法进行了研究, 介绍了新管幕工法的来源、施工步骤和关键控制点^[1], 研究了管幕结构抗震数值分析^[2]、钢管在新管幕法中的应用^[3]、管幕预筑地铁车站施工中的顶管间距优化设计^[4]、

收稿日期: 2011-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.50978036); 中国建筑股份有限公司科研项目 (No.CSCEC-2009-Z-19); 湖南省自然科学基金资助项目 (No.11JJ4031); 湖南省教育厅一般研究项目 (No.11JC0246)。

第一作者简介: 黎永索, 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 主要从事隧道及岩土工程研究。E-mail:liyongsuo@126.com

管幕预筑法引起的地面变形数值分析^[5]、管幕预筑结构肋梁结构体系结点受力性能非线性分析^[6]和管幕预筑肋梁结构体系抗弯性能试验^[7]。预测隧道施工引起的地面沉降方法有经验公式法^[8]、解析法^[9-10]、随机介质理论法^[11]、数值方法^[12]和离心模型试验^[13]等,但目前对于管幕预筑法隧道施工引起的地面沉降预测研究较少。因此,在对管幕预筑隧道地表沉降进行监测的基础上,建立了修正的 Peck 地表沉降预测模型,确立适合管幕预筑隧道施工地层损失计算方法和地层损失系数,拟为工程实例提供参考。

2 Peck 法原理

Peck^[8]通过对大量浅埋暗挖隧道施工资料及引起地表位移数据进行统计分析,提出一个隧道开挖地面沉降预测公式,以 Peck 公式为基础的经验公式是基于地层不可压缩假设和不排水(即体积不变)条件下,认为沉降槽体积等于地层损失的体积。设隧道中心线上地表最大沉降值为 $s_{\max}$, 沉降槽曲线可用如下高斯分布曲线来描述:

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

式中: $s(x)$ 为距离隧道中心线 x 处的地表沉降; i 为沉降槽半宽度,为地表沉降曲线反弯点与原点的距离,可以通过回归分析求得,亦可采用如下经验公式计算:

$$i = \frac{H + R}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad (2)$$

式中: H 为隧道埋深; R 为计算半径; φ 为地层内摩擦角,取加权平均值。对于矩形结构,等效半径为 $R = 0.29(a + b)$, 其中 a 、 b 分别为长短边边长;对于其他非圆形结构,其等效半径为 $R = \sqrt{A/\pi}$, A 为非圆形结构面积。 i 的取值与隧道轴线埋深 Z 近似呈线性关系^[14]:

$$i = kZ = k(H + R) \quad (3)$$

式中: k 为沉降槽宽度系数,并建议砂土地层 k 取 0.25~0.45,黏性土层取 0.4~0.6。

隧道中心线上地表最大沉降值 $s_{\max}$ 为

$$s_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}i} \approx \frac{V_s}{2.5i} \quad (4)$$

式中: V_s 为由隧道开挖引起的地层损失量,给定一个土层损失,如果确定了 i 或 $s_{\max}$, 就可以确定沉降

槽。地层沉降损失也可以表示为

$$V_s = \eta \pi R^2 \quad (5)$$

式中: η 为地层损失率,与施工工艺和地质条件有关,黏性土中土压平衡盾构隧道为 0.5%~2.0%。

3 管幕预筑法隧道地表沉降特点

3.1 管幕预筑法工艺原理

管幕预筑法工艺原理如图 1 所示,在地下待建的建筑物端部开挖的竖井或通道内,沿着地下建筑物的结构外轮廓线依次顶入相对刚性的超大直径钢管(管径为 1.8~2.3 m),同时挖除钢管内的土方(见图 1(a)),在顶管过程中对钢管外进行注浆减阻,在顶管结束后对钢管外注浆加固土体,形成止水帷幕,然后在钢管内沿结构轮廓线进行钢管切割、管间防水钢板的焊接和防水钢板间的顶撑等系列措施,使相邻钢管连接并形成一个完整的钢管幕廊道(见图 1(b)),施工人员在钢管幕廊道内进行钢筋绑扎、模板架设和混凝土的浇注,完成地下工程永久结构的所有施工步骤(见图 1(c)),然后经竖井或通道内掏挖地下工程结构内部土方,完成地下工程结构的剩余结构部分施工,形成地下空间(见图 1(d))。

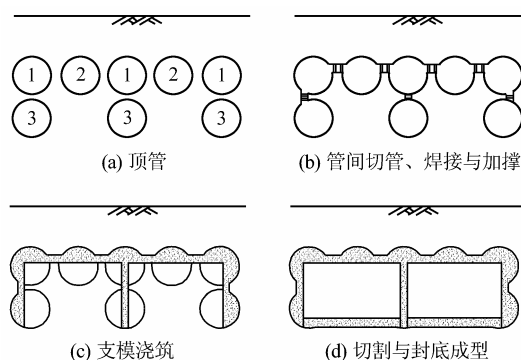


图 1 管幕预筑法主要施工步骤
Fig.1 Main construction steps of PPM

管幕预筑法地下结构形式主要有矩形(见图 1)和拱形(见图 2、3),可以根据需要进行多种断面形式的组合。它是一项利用大口径顶管将地下大空间开挖分块开挖,逆作地下结构再进行大空间开挖,是一种新型的建造大断面地下空间的暗挖施工技术。

3.2 地表沉降特点

管幕预筑法施工工艺复杂,各个关键施工工序都会引起地表沉降和侧向变形,在管幕预筑法施工过程中产生的地面沉降主要有以下 4 部分组成:

(1) 顶管引起的地面变形 δ_1

大密度近距离进行钢管顶管作业是管幕预筑法施工的关键一步, 将大开挖空间分割成小空间, 且利用相对刚性的大管径钢管的保护作用进行小空间的开挖, 增加了施工的安全性, 降低了施工的风险。

由于工艺特点决定了管群之间的距离非常小, 大密度平行顶钢管期间, 顶管先导管与后续管管径差引起的管外空隙及管头和管侧的超挖或欠挖均对地层产生扰动, 且近距离大密度顶管多次对地层扰动且相互影响, 引起地层损失较大, 使地表表现为沉降。每次顶管过程和顶管结束后, 适时从洞内向管外进行注浆加固, 有效减小建筑空隙, 从而有效减小地面变形 δ_1 , 必要时可以提高注浆压力和增加注浆量进行地表抬升。

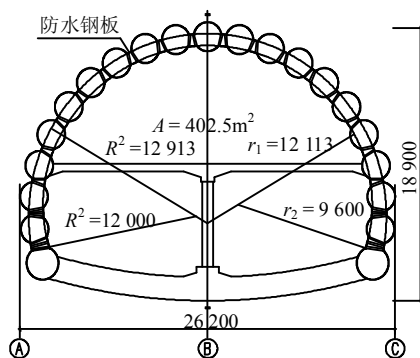


图 2 某地铁车站结构示意图(单位: mm)

Fig.2 Sckth of structure to some subway station (unit: mm)



图 3 某地铁车站施工图

Fig.3 Constructing picture of some subway station

(2) 管间切割引起的地面变形 δ_2

当管群部分或全部完成顶管作业后, 需要将相邻顶管沿结构轮廓线进行分段切割, 挖除管间土体, 将相邻管间用钢板焊接密封, 然后在相邻焊接防水钢板间加剪力构件, 即施加钢管混凝土支撑。管间进行钢管切割, 管间土体支护被切除, 管间局部土

体也被清除, 管间土体向临空面变形引起土体损失。虽然后续管间防水钢板的焊接和管间支撑的施加可控制管间土体的继续变形, 但防水钢板外侧仍然存在超挖, 且管间需全部连通, 土体损失叠加效应比较明显, 引起的地面变形 δ_2 也比较大。在管间切割期间, 管间土体出现超挖时应及时补混凝土, 尽快焊接防水钢板并加钢管混凝土支撑, 加撑时施加预应力, 加撑结束后, 对管间防水钢板外侧进行注浆, 同样可有效减小地面变形 δ_2 , 必要时也可以提高注浆压力和增加注浆量进行地表抬升。

(3) 大开挖引起的地面变形 δ_3

传统的地下结构是先开挖再施做地下永久结构, 管幕预筑法地下结构的施工与传统的地下结构施工方法不同, 是预先在管廊内施作的, 在地下结构发挥作用的前提下进行大开挖。大开挖引起的地层损失主要来自结构的变形和结构的整体下沉。由于地下结构为永久结构, 其弹性变形引起的土体损失比较小, 地下结构的基础沉降引起的整体下沉是大开挖阶段引起的地层沉降的主要原因。

控制大开挖阶段的地面变形 δ_3 主要采取的措施有两个, 其一是增加地下结构的刚度; 其二是在钢管切割后与支撑后, 结构施工前, 在管廊内对地下结构基础下方和结构下部外侧进行花管注浆, 增加基础下方的地基承载能力和增加对基础的位移限制。

(4) 地表固结变形 δ_4

地表固结变形是由于管幕预筑法施工工艺中多次对周围土体扰动及土层疏水固结引起的。前面 3 种地面变形可以通过采取合理的施工方法和施工措施进行控制, 但管幕预筑法多次扰动土体, 后期固结变形是无法消除的。对管幕预筑工法施工后期沉降尚没有实测资料, 其工后沉降尚待进一步研究。

4 地表沉降计算

由管幕预筑法隧道施工地表沉降变形特点可知, 管幕预筑法隧道施工引起的地表变形主要由 δ_3 引起的。在前期顶管阶段和钢管切割阶段引起的地面变形 δ_1 和 δ_2 可以通过钢管内的注浆措施进行控制, 必要时可以通过从顶管管内向外侧注浆抬升, 实现大开挖前地表零沉降或控制性预隆起, δ_1 和 δ_2 可以忽略不计。由于管幕预筑法工后固结沉降 δ_4 缺乏实测数据, 在施工阶段暂不作考虑。因此, 大开挖阶段, 结构的变形和整体沉降引起的地层损失是引起施工阶段地表变形 δ_3 的主要原因, 是沉降预测的重点。

4.1 计算假定

考虑管幕预筑法工艺特点、地层条件和管幕预筑法工后固结沉降缺乏实测数据, 这里仅对大开挖阶段沉降进行预测和分析, 故作如下的假设:

(1) 地层模型采用摩尔-库仑模型, 地下结构采用弹性模型。大开挖阶段之前进行了降水和注浆抬升, 开挖阶段没有考虑地下水位的变化。

(2) 假定前期顶管和钢管切割阶段注浆后土体处于稳定状态, 以结构在钢管廊内施工完成后作为研究的初始状态。

(3) 围岩的土性参数以勘察资料为参考, 以前期顶管作业和钢管切割后注浆信息反馈与现场监测信息, 综合确定。

(4) 由于施工工艺的限制, 不考虑钢管幕在大开挖过程中的作用, 仅考虑钢筋混凝土结构的作用。

(5) 围岩和结构的共同作用比较复杂, 结构内土方开挖过程中空间效应明显, 全部贯通后则表现为平面效应, 计算按照平面结构进行简化分析。

4.2 管幕预筑法隧道大开挖地表下沉

管幕预筑法是一种新的隧道施工方法, 相关研究和实测数据较少, 其预先施作的地下结构是永久结构, 与盾构管片类似, 结构外侧与围岩间的空隙较盾构管片外空隙小得多, 地层沉降与盾构类似, 而 Peck 公式主要是针对盾构隧道施工引起的地层变形规律的统计公式, 因而借用 Peck 公式进行分析。

Peck 公式中地层损失 V_s 和沉降槽半宽度 i 的合理确定对于正确预测地面沉降的量值和分布情况至关重要, 而这两个指标的确定与隧道施工地质条件、施工工艺和支护措施有关。管幕预筑法隧道施工工艺与常用的地铁开挖方法 (NATM、TBM、盾构、冻结) 同, 大开挖前已经做好了地下永久结构, 因而引起的地层损失的机制不一样。

管幕预筑法隧道大开挖阶段管幕预筑法隧道结构位移如图 4 所示, 主要由地下结构的变形图 4(a) 和整体沉降图 4(b) 引起。 ω_i 为结构变形曲线与原结构轴向围成的面积, 结构的变形曲线可以通过计算地下结构在荷载作用下的各个断面的位移求得, 也可以通过监测得到, 从而求出变形曲线与结构原轴线所围的面积。图 4(a) 中结构的变形引起的地层损失为

$$V_1 = \sum \omega_i \quad (6)$$

图 4(b) 中结构整体沉降引起的地层损失近似计算值为

$$V_2 = SB \quad (7)$$

式中: S 为墙底沉降量; B 为隧道结构的最大宽度。由于结构的变形分开计算, 计算整体结构的下沉时可将管幕隧道结构视为刚性的。对于浅埋隧道, 结构顶部受到的换算均布荷载为

$$q = \gamma H \left(1 - \frac{H}{B\lambda \tan \theta} \right) \quad (8)$$

式中: γ 为岩土重度; λ 为侧压力系数; θ 为滑面摩擦角。

则墙底受到的竖向压力为

$$p = qB/2 \quad (9)$$

墙底在竖向荷载 p 作用下的沉降量 S 可以采用分层总和法计算。

管幕预筑法隧道大开挖阶段引起的地层损失为

$$V_s = V_1 + V_2 = \sum \omega_i + SB \quad (10)$$

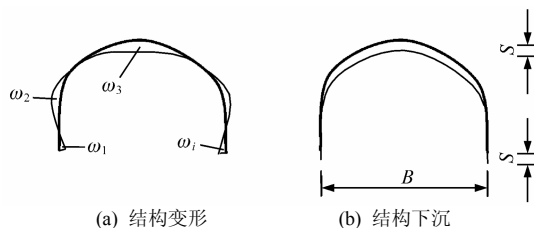


图 4 管幕预筑法结构位移
Fig.4 Structural displacements of PPM

5 工程实例

5.1 工程概况

沈阳地铁 2 号线某车站总长为 179.8 m, 标准段宽度为 26.2 m, 高度为 18.9 m, 横断面总开挖面积 402.5 m²; 结构顶部覆土为 7.6~11.2 m, 底板埋深为 26.5~30.1 m。车站主体结构型式为单拱钢筋混凝土结构, 该地铁暗挖车站是国内首次应用管幕预筑法工艺施工的地下工程, 此车站是目前世界上建造的最全断面开挖的单拱暗挖隧道。

5.2 岩土工程条件

本区间地势平坦, 地貌单元属浑河冲洪积扇, 第四系地层沉积韵律较为明显, 地层组成自上而下为杂填土、粉质黏土、中粗砂、砾砂、圆砾、中粗砂、圆砾、泥砾。地面标高为 44.65~51.94 m 左右, 结构所处地层属于第四系地层, 土层基本以中粗砂和砾砂为主; 地下水埋深为 8.7~14.2 m, 水位标高为 32.53~37.94 m, 地下水位年变幅为 0.5~2.0 m, 纵向地质剖面如图 5 所示。

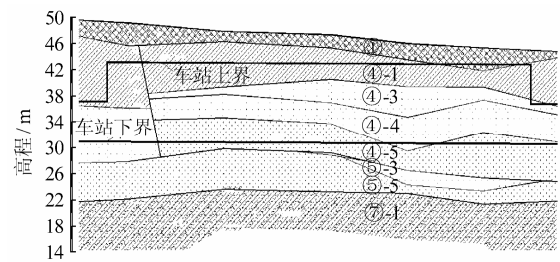


图 5 纵向地质剖面图
Fig.5 Longitudinal geological section

5.3 车站结构设计与施工工序

车站结构如图 2、3 所示，拱壳结构为钢筋混凝土结构，拱壳结构内外均为异形钢管幕结构，钢管幕结构为防水层，不考虑钢管幕结构的作用。拱壳结构自拱顶至站厅层板段为厚度 0.8 m 等厚度拱壳，自站厅层至拱脚，厚度逐渐增加至 1.2 m。站厅板厚为 0.5 m，站台底板厚度为 1.6 m。如图 3 所

示，盾构在车站结构做完之前先过站，站厅范围盾构管片需要拆除，故站厅板采取逆作法施工，在车站底板施工完成后，拆除盾构管片后依次现浇中柱和站厅板。混凝土采用 C35 自密实混凝土。从车站两端往中间开挖土方贯通站厅层后，从北往南分段开挖站台层土方，在距底板高度为 2.2 m 处加水平支撑后施作底板。

5.4 Peck 公式预测

为了验证 Peck 公式在管幕预筑法暗挖隧道的实用性，分别计算离洞口 79 m 处站厅层和站台层土方开挖横断面稳定后的沉降槽。由于上覆土层主要为砂土，砂土地层损失率按照 0.5%~2.0%下限值计算，沉降槽宽度系数为 0.25~0.50，采用此参数用修正的 Peck 公式预测地表沉降槽半宽度和最大沉降值与实测结果如表 1 所示。

表 1 地表沉降预测值与实测值
Table 1 Prediction and values of surface subsidences

开挖位置	隧道埋深 H / m	开挖高度 h / m	开挖跨度 B / m	开挖面积 A / m^2	隧道中心埋深 Z / m	变形面积 ω / cm^2	墙脚沉降 S / mm	地层损失 V_s / cm^2	地层损失率 η / $10^{-4} \%$	沉降槽半宽度 i / m	地表最大沉降 S_{max} / mm
站厅层开挖	预测值					1.2	0.01	3.7	0.53	10.2	6.8
	实测值	9.4	11.2	24.6	170.2	15.6	0.8	3.3	0.33	15.3	9.2
站台层开挖	预测值					2.0	9.20	4.3	1.90	13.4	11.3
	实测值	9.4	17.3	24.6	315.3	18.8	1.8	10.50	1.90	15.6	12.2

将计算出的最大沉降值带入 Peck 公式，绘制出站厅层和站台层开挖时的地表沉降预测图形如图 6 所示。从图中可以看出，对于管幕预筑法施工，由于预先施工的地下外围结构的作用，地表沉降最大值在可控范围内，随着站台层的开挖，地表最大沉降增量不大，仅为 3.5 mm。

示，从图中可以发现，在站厅层土方开挖时，地表沉降曲线缓慢变化，地表沉降值较小，在站厅层贯通后，沉降曲线有个突变，达到最大沉降值 12.2 mm。在站台层土方施工阶段，地表沉降缓慢变化，地表沉降曲线有回弹趋势。

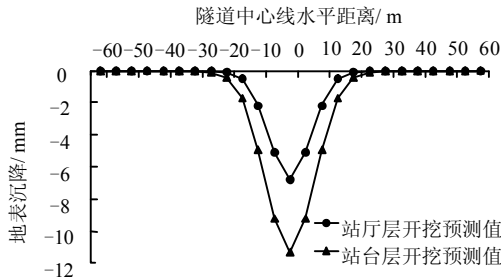


图 6 地面沉降槽预测图
Fig.6 Prognostic chart of Ground settling tank

5.5 实测数据分析

5.5.1 地表沉降历时曲线

地表典型监测断面测点沉降历时曲线如图 7 所

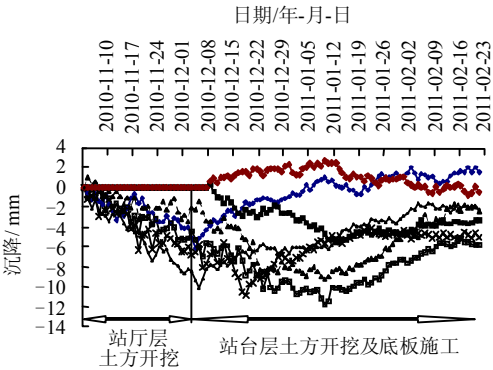


图 7 典型断面测点沉降历时曲线
Fig.7 Diachronic curve settlement of measuring typical sections

从图 7 可知，实测地表沉降曲线中最大沉降值

与表 1 中实测墙脚沉降值比较接近。由于管幕预筑法地下结构的施工是先于地下大开挖前施做的, 地下结构对大开挖提供了有效的安全保障和地层沉降控制, 管幕预筑法引起的地表沉降主要由地下结构的整体下沉引起。

5.5.2 实测地表沉降槽

从站厅层土方开挖到底板浇筑完工的不同时期第 1 个监测断面的实测沉降槽曲线如图 8 所示, 由图可知, 实测沉降值整体比较小, 地表沉降表现为整体塌落特征。在车站跨度范围上方沉降较大, 最大沉降值在隧道轴向上方, 同一测点在不同时间的沉降差较小, 后期施工时的沉降槽曲线 (2011-02-27) 较前期施工的沉降槽曲线 (2011-01-19) 有所回弹。将图 8 实测曲线与图 6 Peck 公式预测结果进行比较可知, 实测值比预测结果稍大, 且实测沉降槽曲线更平缓。两种情况下的沉降槽均表现为整体沉降, 原因在于该隧道为超大断面和超浅埋隧道。

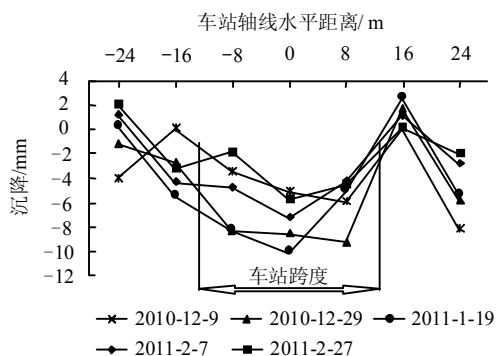


图 8 不同施工期实测沉降槽曲线
Fig.8 Measurement settling tank curve of different construction stages

5.5.3 实测结构变形

管幕预筑法结构施工期间的变形如图 9 所示, 由图可知, 拱顶下沉, 拱脚收敛, 拱腰向外变形, 根据变形曲线可以推知管幕预筑法曲墙衬砌结构外侧土压力的性质和结构变形引起的土层损失。由表 1 和图 8 可以求得结构变形引起的地层损失非常小, 结构变形引起的地层损失率在 0.000 1%~0.000 6% 之间, 约占地层损失的 30%。

5.5.4 Peck 公式参数修正

管幕预筑法隧道施工地表沉降预测与实测值比较接近, 但其地层损失率与传统方法比较存在几个数量级的差别, 沈阳地铁某车站地层以砂土地层为主, 表明在砂土地层条件下采用管幕预筑法施工时地层损失率为 0.000 5%~0.002 0%。

比较图 5、7 可知, 实测沉降槽宽度与地铁车站

的最大跨度基本相等, 地表沉降表现为整体塌落特征, 沉降槽宽度系数 k 取值约为 0.5。

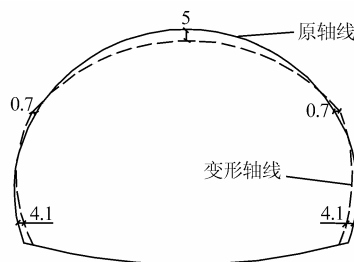


图 9 实测结构变形图 (单位: mm)
Fig.9 Measured structural deformations (unit: mm)

6 结论与讨论

管幕预筑法在国内是首次应用, 施工工序多, 各工序相互影响复杂, 其研究尚处于初期阶段, 这里仅对大开挖阶段施工阶段沉降进行了预测和分析, 需要进行系统研究。

(1) 提出以 Peck 公式预测管幕预筑法隧道施工引起的地表沉降时的地层损失计算公式, 采用该公式预测地表沉降与实测值基本吻合。由于工程案例较少, 相关数据积累不多, 在以后的工程实践当中, 不断积累各种工程地质条件的数据, 建立适用于管幕预筑法隧道施工地表沉降预测公式, 对管幕预筑法建造地下空间引起的地面沉降值给出合理的建议值。

(2) 管幕预筑法建造的浅埋大断面隧道施工引起的地表沉降表现为地层的整体沉降, 地表沉降值与地下结构的基础的沉降值基本相等。控制管幕预筑法结构墙脚下沉可以有效控制地表的沉降, 而管幕预筑法工艺形成的钢管廊道为墙脚下方和外侧围岩加固提供了便利, 可以从廊道内向外注浆以控制墙脚的下沉, 从而控制地表沉降。

(3) 管幕预筑法隧道施工预先施作的地下永久结构对隧道围岩的约束作用明显, 结构变形和墙脚下沉引起的地层损失很小, 与传统暗挖隧道引起的地层损失率相差几个数量级, 砂土地层中地层损失率为 0.000 5%~0.002 0%, 沉降槽宽度系数为 0.5。大开挖施工阶段引起的地面沉降很小, 该阶段施工容易确保施工安全和控制地表沉降。

(4) 管幕预筑法预建造地下空间, 引起的地表沉降较常规施工方法小得多, 环境效益和社会效益明显, 该施工方法在修筑中心城区软土地区地下交通枢纽工程及下穿交通干线隧道工程时优势明显, 值得进一步研究和推广。

致谢: 参加本项研究工作的有中南大学的彭环云、杨仙、许庆伟、常宝和中建市政建设有限公司的钱洪福、罗泽华、黄种发等, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 邢凯, 陈涛, 黄常波. 新管幕工法概述[J]. 城市轨道交通研究, 2009, (8): 63—67.
XING Kai, CHEN Tao, HUANG Chang-bo. On new tubular roof method[J]. **Urban Mass Transit**, 2009, (8): 63—67.
- [2] KWAK C W, PARK I J, KIM S H, et al. Seismic behavior of tubular roof & trench method (T. R. & T) by numerical analysis[C]//33rd ITA-AITES World Tunnel Congress Underground Space—The 4th Dimension of Metropolises. Prague: Czech Republic, 2007: 513—518.
- [3] KIM J Y, PARK I J, KIM K G. A study of the applicability of underground structure using steel tubular in Korean geotechnical condition[J]. **Tunneling Technology (Korean)**, 2003, 5(4): 401—409.
- [4] 杨仙, 张可能, 李钟, 等. 地铁车站新预筑法施工中顶管间距的优化设计[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(2): 61—66.
YANG Xian, ZHANG Ke-neng, LI Zhong, et al. Optimal design of distance between jacking pipes of new pre-construction method in metro station[J]. **China Railway Science**, 2011, 32(2): 61—66.
- [5] LI Yong-suo, ZHANG Ke-neng, HUANG Chang-bo, et al. Numerical simulation on the ground deformation by pipe-roof pre-construction method[C]//The International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. Xianning, China, IEEE, 2011: 3291—3294.
- [6] 金春福, 阎石, 钮鹏, 等. 新管幕肋梁结构体系结点受力性能非线性分析[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(9): 226—300.
JIN Chun-fu, YAN Shi, NIU Peng, et al. Nonlinear finite element analysis of mechanical behavior of joints during NTR construction[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2010, 32(9): 226—300.
- [7] 阎石, 王健, 金春福, 等. 新管幕肋梁结构体系抗弯性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(2): 242—246.
- [8] YAN Shi, WANG Jian, JIN Chun-fu, et al. Experimental study of flexural behavior of NTR structures[J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)**, 2011, 27(2): 242—246.
- [9] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: State of the Art Report, 1969: 225—290.
- [10] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124(9): 846—856.
- [11] PARK K H. Elastic solution for tunneling-induced ground movements in clays[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2004, (12): 310—318.
- [12] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 浅埋隧道施工引起的纵向地层移动与变形[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(4): 87—91.
SHI Cheng-hua, PENG Li-min, LIU Bao-chen. Longitudinal stratum movement and deformation caused by shallow tunnel construction[J]. **China Railway Science**, 2003, 24(4): 87—91.
- [13] 张培森, 施建勇, 颜伟. 小应变条件下隧道开挖引起的横向沉降槽分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 411—415.
ZHANG Pei-sen, SHI Jian-yong, YAN Wei. Analysis of tunneling-induced traverse settler under small strain[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(2): 411—415.
- [14] 凌昊, 仇文革, 孙兵, 等. 双孔盾构隧道近接施工离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2849—2853.
LING Hao, QIU Wen-ge, SUN Bing, et al. Study of adjacent construction of two tube shield tunnels by centrifugal model test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2849—2853.
- [15] 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.
SHEN Pei-liang, ZHANG Hai-bo, YIN Zong-ze. Ground settlement due to shield construction in Shanghai metro tunnel project[J]. **Journal of Hohai University(Natural Sciences)**, 2003, 31(5): 556—559.