

doi:10.3969/j.issn.1672-6073.2014.04.020

分层总和法在地铁盾构隧道长期沉降预测中的应用

周立波¹ 王伟华² 陈继云³

(1. 无锡地铁集团有限公司 江苏无锡 214131; 2. 上海山河建设工程有限公司 上海 200434; 3. 中铁建设集团装饰分公司 北京 100131)

摘 要 在总结分析现有沉降计算方法的基础上,采用分层总和法及太沙基理论对地铁盾构隧道长期静力沉降进行计算分析,并总结出沉降规律:由于隧道埋深、隧道上覆土层与下卧土层性质的差异,沿线路方向的沉降在空间和时间方面是不均匀的,各断面在前5年完成绝大部分固结沉降,后续沉降继续发展,逐渐趋于最终沉降值。

关键词 城市轨道交通;盾构隧道;长期沉降;分层总和法;不均匀沉降

中图分类号 U456.3 **文献标志码** A

文章编号 1672-6073(2014)04-0090-03

1 地铁隧道沉降研究概述

地铁盾构隧道运营一段时间后会 产生较大的沉降^[1-2],隧道沉降会严重影响轨道的平顺性,这种不顺的产生会使车辆-轨道耦合系统的振动越来越强烈,机车车辆运行的平稳性不断降低,轨道结构承受的动荷载会不断增大,增加运行时的噪声,缩短轨枕及道床结构的使用寿命,增加维修的难度和费用^[3]。此外,当纵向变形或曲率较大时,隧道即可能出现环缝张开过大而漏水、漏泥或管片纵向受拉破坏^[4]的问题。为了保证地铁列车长期运行的安全性,预测地铁隧道长期沉降就显得非常重要。

有关预测长期沉降或工后沉降的方法,可分为经验方法、理论研究方法、数值分析方法和基于实测资料的预测方法,理论研究方法主要是运用固结理论^[5]。笔者采用分层总和法太沙基理论对某城市地铁盾构隧

道长期沉降进行研究。

2 地铁盾构隧道沉降预测

某城市地铁1号线自北向南穿中心城区,线路全长约30 km,其中高架线7.3 km,地下线23.2 km(含敞开段),地面线0.1 km,共设有车站24座,其中高架站5座、地下站19座,盾构区间17个,明挖段与敞开区间1个,明挖区间一个。主要地层分布为杂填土、③₁层黏土、③₂层粉质黏土、③₃层粉土夹粉质黏土、⑤₁层粉质黏土、⑥₁层黏土、⑥₂层粉质黏土、⑦₁层粉质黏土。

2.1 断面选取原则

隧道沉降与下卧土层的性质密切相关^[6],由于盾构隧道沿线各土层性质和隧道埋深差异较大,为分析其隧道下卧层土体的变形规律,每个区间选取较为典型的断面进行分析。断面选取的原则为:1)上覆土厚度最大或最小处;2)隧道下卧软土性质改变处;3)隧道下卧软土厚度改变处。以广石路站—江海路站区间为例,选取该区间中4个典型断面进行沉降预测,其中断面1符合原则2,断面2符合原则1和3,断面3符合原则2,断面4符合原则1,同时兼顾各断面间距。

2.2 分层总和法

采用分层总和法计算基础沉降时,首先应确定作用在基础上的荷载。利用分层总和法计算盾构隧道的沉降时,因隧道修建后结构底面土的总应力一般都比原自重应力要小,因此不能采用“附加应力”这一概念,而一般分层总和法地基应力采用的是附加应力^[7];盾构隧道的施工过程是多个加卸载过程,本文研究方法仅考虑隧道管片施工后产生的沉降。隧道下卧土层的总沉降为

收稿日期:2013-11-09 修回日期:2014-02-17

作者简介:周立波,男,硕士,工程师,主要从事地下工程与地铁设计管理工作,liberty521@126.com

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i = \varphi_s \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{E'_{si}} h_i \tag{1}$$

式中, ΔP_i 为第 i 层土层中由隧道结构质量引起的应力与上覆土压之和; h_i 为第 i 层土层厚; E'_{si} 为第 i 层土再压缩模量, $E'_{si} = (3 \sim 5) E_s$; φ_s 为沉降修正系数。

为了考虑沉降的发展过程, 利用太沙基一维固结理论计算出地基固结度随时间的变化, 然后可求出地基沉降随时间的变化过程, 直至固结完成。具体计算步骤如下:

1) 先求出地基土的固结度

$$U_t = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v} \tag{2}$$

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} = \frac{k E_s}{r_w} \frac{t}{H^2}$$

式中, k 为土的渗透系数, E_s 为土的压缩模量, γ 为土的容重, t 为时间, H 为土的厚度, T_v 为时间因数。

式(2)是单一土层下固结度的计算公式, 但实际中并非如此, 因此计算参数是按照不同类型土层及其厚度进行加权平均获得的。

2) 再求出各时间段对应的沉降

$$S_t = S_{\infty} U_t \tag{3}$$

式中, S_t 为某时刻土的沉降, 为土的最终沉降量, 即式(1)计算所得的 S 值。

但当埋深相对于直径增加到一定程度时, 由于土拱的存在, 结构上的竖向土压力比按土柱理论计算的结果要小, 从而产生了考虑土柱两侧摩擦力和黏聚力的修正理论, 此时竖向土压力的计算采用太沙基理论。

地下工程的深埋与浅埋可以根据 H (埋深)/ h (塌落高度) 等于 2.5 来确定, 塌落高度按照太沙基理论计算。由于浅埋与深埋的情况都存在, 因此在计算时需合理选用计算公式。

2.3 考虑土拱效应的隧道土压力理论

考虑土拱效应时, 可采用 Terzaghi 理论及其计算公式。松动圈土压力如图 1 所示, 在计算时忽略阴影部分的质量。

$$P_e = \frac{B(\gamma - C/B)}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{-K_0 \tan \varphi \frac{H}{B}}) + W_0 e^{-k_0 \tan \varphi \frac{H}{B}} \tag{4}$$

$$B = \frac{D}{2} \cot \left(\frac{45^\circ + (\varphi/2)}{2} \right) \tag{5}$$

式中, P_e 为松动土压, D 为隧道外径, $2B$ 为隧道顶部松动圈幅, K_0 为水平土压和垂直土压之比, C 为土的内聚力, φ 为土的内摩擦角, H 为覆土深度, W_0 为地面荷载。

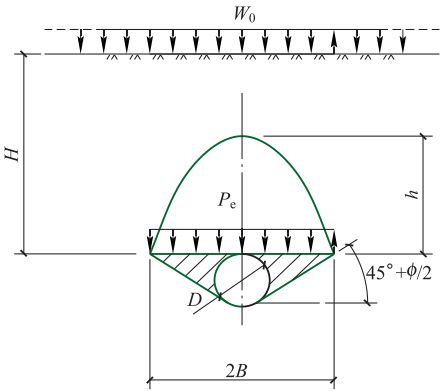


图 考虑土拱效应时上覆土压力的计算示意

2.4 计算结果

根据所选取的 4 个典型断面处的隧道埋深, 上覆土压力采用有效重度和太沙基土压力理论进行计算, 计算结果见表 1。

表 1 各断面基底应力

断面	上覆土压/kPa	上覆土重/kN	结构自重/kN	浮力/kN	基底反力/kN	基底应力/kPa
1	51.3	317.9	203.4	-295.9	225.4	36.4
2	72.3	450.6	203.4	-295.9	358.1	57.8
3	52.3	324.3	203.4	-295.9	231.8	37.4
4	56.1	347.5	203.4	-295.9	255.0	41.1

根据式(1) ~ (3), 分别计算出不同断面固结度随时间的变化曲线(见图 2)和固结完成过程中各年的沉降数值及各年沉降值占最终沉降量的百分比(见表 2)。

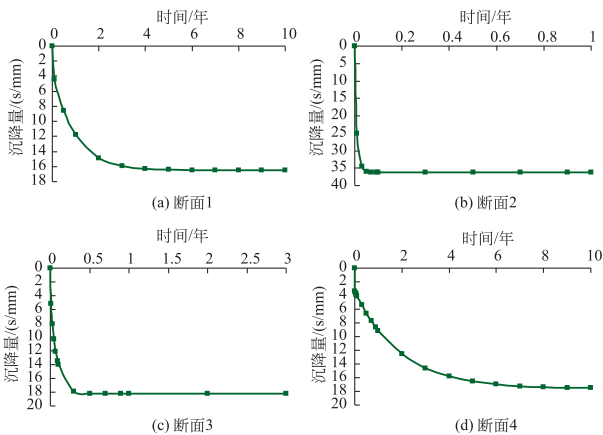


图 2 固结曲线

从图 2、表 2、表 3 可以看出, 广石路站—江海路站

区间各断面 10 年后最大沉降为 36.26 mm,最小沉降为 16.50 mm。并且,各断面在 2 年内均完成 70% 以上固结沉降,2 年累积沉降分别占总沉降量的 90.03%、100%、100%、71.29%。各断面在前 5 年完成绝大部分固结沉降,后续沉降继续发展,逐渐趋于最终沉降值。

表 2 各断面的隧道下卧层土体沉降量

断面 编号	时间									
	第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 4 年	第 5 年	第 6 年	第 7 年	第 8 年	第 9 年	第 10 年
1	11.81	14.86	15.92	16.30	16.43	16.48	16.49	16.50	16.50	16.50
2	36.26	36.26	36.26	36.26	36.26	36.26	36.26	36.26	36.26	36.26
3	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2
4	9.11	12.55	14.59	15.81	16.53	16.97	17.22	17.38	17.47	17.52

表 3 各断面的隧道下卧层土体沉降所占百分比

断面 编号	时间									
	第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 4 年	第 5 年	第 6 年	第 7 年	第 8 年	第 9 年	第 10 年
1	71.58	90.03	96.51	98.77	99.57	99.85	99.95	99.98	99.99	100.00
2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3	99.99	100	100	100	100	100	100	100	100	100
4	51.76	71.29	82.91	89.83	93.95	96.40	97.86	98.72	99.24	99.55

3 结论

运营后的长期沉降,由于影响因素较多,如施工扰动引起的地基土未完成的固结变形^[8]、隧道邻近范围内的各种建筑施工活动扰动隧道周围土体、地铁列车振动荷载引起的地基土振陷^[9]、隧道漏水^[10]、城市地面沉降的综合影响、隧道上方地面超载^[11]、隧道所处地层的水位变化、下卧土层水土流失等,所以很难对其进行较准确的预测。

本文采用分层总和法,对盾构隧道的工后静力沉降进行分析,按隧道埋深、隧道下卧层土层性质等原则分别在每个区间选取了典型断面进行计算,由于隧道埋深、隧道上覆土层与下卧土层性质的差异,沿线路方向的沉降在空间和时间方面是不均匀的,各断面在前 5 年完成绝大部分固结沉降,后续沉降继续发展,逐渐趋于最终沉降值。该方法可为运营期隧道长期沉降预测提供参考,同时为类似工程提供借鉴。

参考文献

[1] 黄大维,周顺华,宫全美,等.软土地区地铁不同结构间差异沉降特点分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2013,

41(1):95-100,158.

[2] 叶耀东,朱合华,王如路.软土地铁运营隧道现状及成因分析[J]. 地下空间与工程学报,2007,3(1):157-166.

[3] 宫全美,徐勇,周顺华,等.地铁运行荷载引起的隧道地基土动力响应分析[J]. 中国铁道科学,2005,26(5):47-51.

[4] 郑永来,韩文星.软土地铁隧道纵向不均匀沉降导致的管片接头环缝开裂研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(24):4552-4558.

[5] 韦凯,宫全美,周顺华,等.基于蚁群算法的地铁盾构隧道长期沉降预测[J]. 铁道学报,2008,30(4):79-83.

[6] 马险峰,余龙,李向红.不同下卧层盾构隧道长期沉降离心模型试验[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(1):14-20.

[7] 陈仲颐,周景星,王洪谨.土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994.

[8] 朱启银,叶冠林,王建华,等.软土地层盾构隧道长期沉降与施工因素初探[J]. 岩土工程学报,2010(S2):509-512.

[9] 刘明.饱和软粘土动力本构模型研究与地铁隧道长期振陷分析[D]. 上海:同济大学,2006.

[10] 庄丽,张银屏.软土地层盾构隧道渗漏水与沉降关系的模拟分析[J]. 中国建筑防水,2006(6):13-15.

[11] 张宇旭,占鸮.某地铁区间隧道在地面超载作用下的沉降分析[J]. 黄石理工学院学报,2011,27(3):37-40.

(编辑:郝京红)

Application of Layer-wise Summation Method in Long-term Settlement Prediction of Subway Tunnel

Zhou Libo¹ Wang Weihua² Chen Jiyun³

- (1. Wuxi Metro Group Co.,Ltd.,Wuxi, Jiang Su 214131;
2. Shanghai Shanhe Construction Engineering Co.,Ltd., Shanghai 200434; 3. China Railway Construction Group Decoration Company, Beijing 100131)

Abstract: On the basis of existing settlement calculation method, layer-wise summation method combined with Terzaghi Theory is used to predict long-term settlement of shield tunnel of subway and settlement law is hence summarized. Because of the differences of burial depth and characteristics of surrounding soil layer, the settlement in longitudinal is uneven in both space and time. The main settlement finishes in the first 5 years and the remaining settlement develops until it reaches the final settlement.

Key words: urban rail transit; shield tunnel; longterm settlement; layer-wise summation method; uneven settlement