

基于实测数据的盾构电缆隧道沉降规律与预测

聂卫平, 金晓华

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 以实测数据分析了盾构电缆隧道施工引起的地面沉降规律。通过实测值与地面沉降预测的经验公式对比, 分析了实测值与经验值差异的原因, 给出沉降预测的修正方法。首先对盾构施工引起地面沉降和发展规律进行分析, 然后介绍了地面沉降预测的经验公式, 并以实际工程为依据, 分析了经验预测公式与实测值的差异原因; 最后给出了沉降预测的修正方法。研究表明: 通过沉降监测数据分析可了解盾构施工状态和获取沉降预测参数, 从而更好的指导施工, 对保障类似工程施工质量和安全具有重要借鉴意义。

关键词: 沉降曲线; 沉降发展阶段; 盾构施工; 实测数据; 沉降预测和修正

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)02-0086-04

Shield Cable Tunnel Settlement Subsidence Regulation and Prediction Based on Measured Data

NIE Weiping, JIN Xiaohua

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd, Guangzhou, 510663, China)

Abstract: Shield cable tunnel settlement subsidence regulations are analysed based on measured data. The reasons for differences of measured data and experience data are analysed after comparing the measured data with experience formulas, the correction methods of settlement prediction are provided. First, the subsidence and the law of its development caused by shield construction are analysed. Secondly, the experience formulas for subsidence prediction are given, the reasons for differences of measured data and experience data are obtained according to the characteristics of the actual project. Finally, the correction methods of settlement prediction are obtained. The results show that the shield construction status and the settlement prediction parameters could be obtained through analysing measured data, which could provide technical guidance to the shield construction, they could also provide references to the similar construction.

Key words: settlement curve; settlement developmental stage; shield construction; measured data; settlement prediction and correction

近年来,我国北京、上海、广州、深圳、福州等市已经开始了较大规模的城市电缆隧道建设,积累了较为丰富的设计和施工经验^[1-5],盾构法以其对周边环境影响小的特点,已成为现代化电缆隧道最常用的施工方法。随着盾构的开挖,地层沉降随

着时间推移逐渐增大^[6]:一般经历前期微小变形、变形急剧增大、缓慢变形三个阶段。诱发地层变形的基本原因^[7]是盾构施工引起的地层损失和周围围岩受扰动或受剪切破坏的重塑土的再固结。目前,隧道施工对地层变形的影响研究主要有随机介质方法及Peck公式法、理论解析法、数值模拟法、模型试验法和神经网络、支持向量机等系统预测方法^[8-14]。

本文在已有研究理论的基础上,对现有工程地层沉降曲线和发展规律进行分析,同时对沉降值进行预测分析,最后给出地面沉降预测公式的修正

收稿日期: 2016-12-16

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(15QA1403800)

作者简介: 聂卫平(1982)男,江西临川人,高级工程师,硕士,主要从事边坡、隧道及岩土结构工程方面的研究工作(e-mail) nie-weiping@gedi.com.cn。

方法。

1 盾构施工沉降规律分析

以汕头某电缆隧道工程(以下称本工程)地表监测数据为基础,分析实践工程的沉降规律,该工程采用水力网格式盾构掘进。地表测点布置与隧道管片上下对照图如图 1 所示。

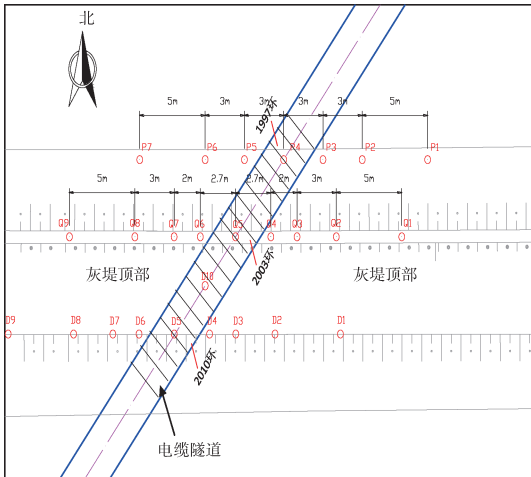


图 1 测点布置与隧道管片上下对照图

Fig. 1 Upper and lower contrast figure of measuring points and segments of tunnel

1.1 沉降曲线分析

盾构掘进至 2003 环和 2006 环时的纵向沉降曲线如图 2 所示。

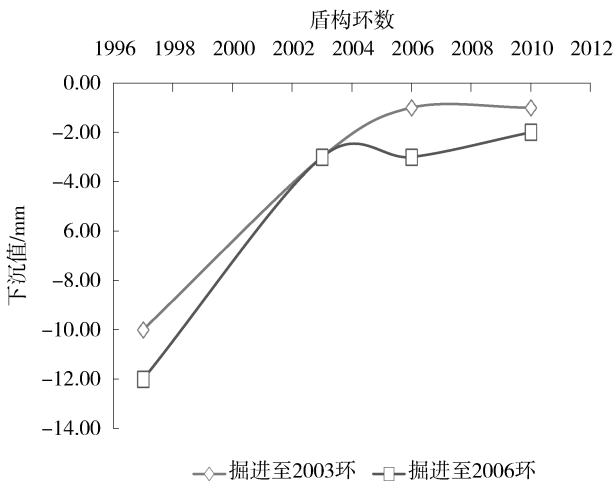


图 2 盾构掘进至不同位置时的纵向沉降曲线

Fig. 2 Longitudinal settlement curves of different locations shield arrived of Huayue line

1)纵向曲线中都存在着明显的下沉阶段,不像传统纵向沉降曲线(如图 3 所示)有隆起阶段,说明本工程盾构正面压力小于水土压力。

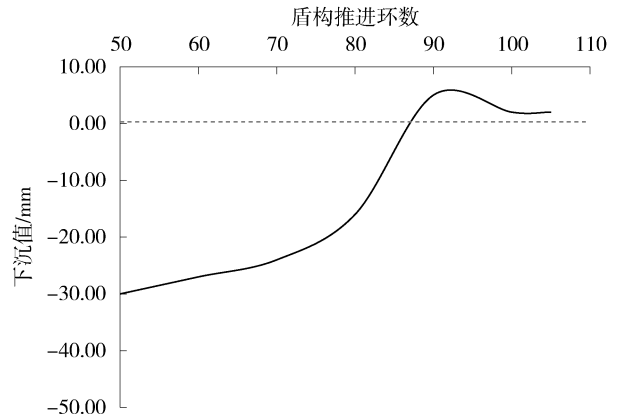


图 3 传统纵向沉降曲线

Fig. 3 Traditional longitudinal settlement curve

2)掘进至 2003 环和 2006 环时,盾构切口前方地表沉降均小于切口正上方,说明盾构到达 2003 环和 2006 环时,盾壳侧向土体摩阻力加正面压力小于上方水土压力。

1.2 沉降发展阶段分析

盾构的施工过程主要包括开挖、操纵与纠偏、衬砌拼装以及注浆等。盾构推进施工过程中必然对周围土体产生扰动,表现为地层沉降,主要分为切口到达前、切口到达、切口到达后至盾尾脱出和盾尾脱出后等发展阶段。本工程盾构机长 6 m,每节管片长 1 m,据实测数据,盾构掘进至 2006 环各测点沉降如图 4 所示,不同阶段各测点沉降占总沉降的比重,如表 1(选取测点 P4、Q5、D10、D5 为例)所示。

表 1 盾构掘进至 2006 环各测点沉降值占总值的比重

Tab. 1 Proportion of gross of settlement value of each measuring point while shield arrive the 2006th segment %

测点编号	切口前 3 m	切口前 3 m 至切口后 1 m	切口后 1 m 至盾尾脱出	盾尾脱出约 100 h	盾尾脱出约 10 d 后	盾尾脱出约 30 d 后	盾尾脱出约 60 d 后	盾尾脱出约 107 d 后
	P4	20.00	28.00	22.00	29.00	42.00	60.00	96.00
Q5	8.89	15.56	11.11	20.00	42.22	64.44	93.33	100.00
D10	2.00	4.44	2.22	8.89	24.44	31.11	97.78	100.00
D5	2.00	8.00	6.00	12.00	38.00	64.00	100.00	100.00

从上面曲线可知:

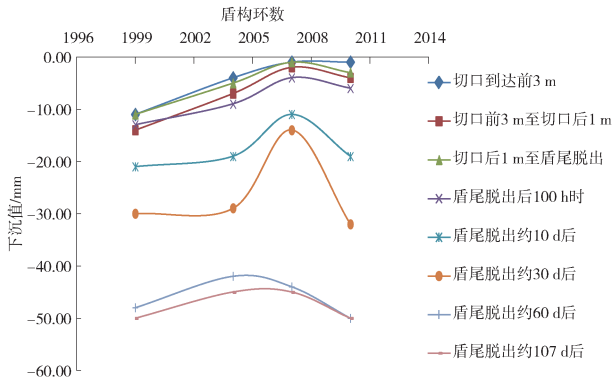


图4 盾构掘进至2006环各阶段纵向沉降曲线

Fig. 4 Settlement of each development stage while shield arrive the 2006th segment

上述图表分析可知:

1) 盾尾脱出前后, 各测点的沉降值约占总值比例与传统曲线一致。

2) 盾构切口到达后1 m至盾尾脱出阶段沉降所占比例要比前一阶段要小, 说明在该阶段地表发生了隆起现象, 且隆起点在切口后方, 与传统曲线的隆起最高点的位置出现在切口正上方不同, 分析可知, 传统曲线隆起是由盾构正面压力过大而导致的, 而对于本工程隆起点出现在切口后方, 说明是盾壳侧向土体摩阻力引起的地表隆起。

3) 盾尾脱出约60 d后沉降值占总值的93.33%~100.00%, 说明此时地表已经趋于稳定。

综上分析, 通过对地表沉降数据的监测, 可对盾构正面压力、盾构姿态、是否超挖、不同发展阶段地表沉降稳定性等情况进行判别, 从而更好的指导和控制施工方法, 保证施工质量和安全。

2 盾构施工沉降预测和修正

盾构施工引起的横向沉降理想状态为一沉降槽曲线, 在以轴线为对称的沉降槽宽度*i*范围内为压缩区, 最大压应变位于隧道的正上方; 在*i*~ $3i$ 范围内为拉伸区, 最大拉应变位于 $1.732i$ 处。见图2所示。

2.1 横向沉降公式预测

美国 R. B. Peck [7] 对大量地表沉降数据及工程资料分析, 首先提出地表沉降槽似正态分布的概念。地层移动由地层损失引起, 并认为沉降是在不排水情况下, 所以沉陷槽体积应等于地层损失体积, 计算公式如下:

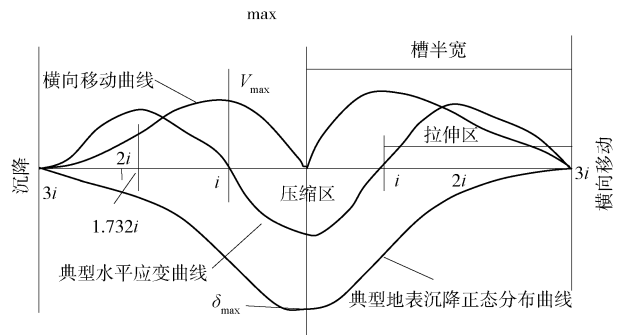


图5 纵向沉降槽曲线

Fig. 5 Vertical curve of subsider

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

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

$$i = \frac{h}{\sqrt{2\pi}\tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})} \quad (3)$$

$$V_s = V_1\pi R^2 \quad (4)$$

式中: $\delta(x)$ 为沉降量, mm; V_s 为盾构隧道单位长度地层损失, m^3/m ; x 为距隧道中心线的距离, m; δ_{\max} 为隧道中心线处的最大沉降量, mm; i 为沉降槽宽度, m; h 为隧道中心线埋深, m; φ 为地层摩擦角, °; R 为盾构外径, m; V_1 为地层体积损失率, 即单位长度地层损失占单位长度盾构体积的百分比, 范围一般在 0.5%~2.0% 之间。

上述公式计算得到 2006 环管片处横断面沉降稳定后的沉降槽与实测数据比较如图 3 所示, 从图中可以看出, 计算结果与实测沉降槽分布大致相同, 量值有差异。

2.2 隧道轴线方向沉降公式预测

隧道轴线方向沉降常用的计算公式有 Attewell 等提出的累积概率曲线公式, 其表达式为:

$$\delta(y) = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \left\{ G\left[\frac{y-y_i}{i}\right] - G\left[\frac{y-y_f}{i}\right] \right\} \quad (7)$$

$$G(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\alpha} \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) d\beta \quad (8)$$

式中: y , y_i , y_f 为分别为地面点沿盾构掘进方向的坐标, 盾构推进起始点坐标和盾构开挖面位置坐标; G 为与隧道埋深有关的误差函数。可通过标准概率表得到, $G(0) = 0.5$, $G(\infty) = 1.0$ 。由上式可知, 切口正上方沉降等于 $0.5 \delta_{\max}$ 。

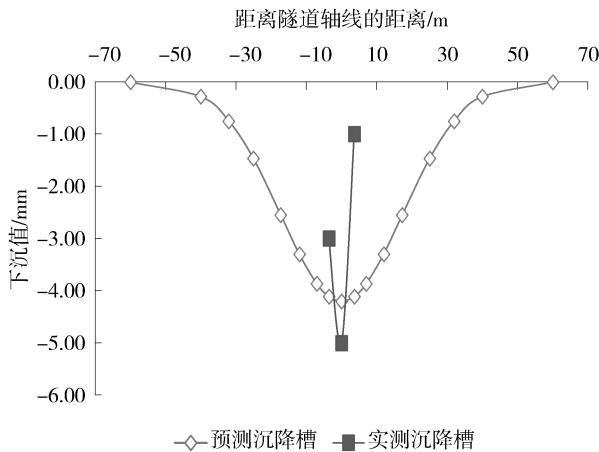


图6 横断面计算与实测沉降槽比较

Fig. 6 Settlement contrast between cross-section calculation and subsider observation

盾构掘进至2006环时,采用上述公式计算得到第1997—2010环轴线地表沉降与实测数据对比见图4所示,可知,在开挖面附近累积概率曲线与实测沉降在分布形式上比较接近,但随着开挖面的远离两者差异变大,且切口正上方的实测沉降等于 $0.25\delta_{\max}$,这说明用累积概率曲线来预测盾构隧道轴线方向沉降有较大误差。

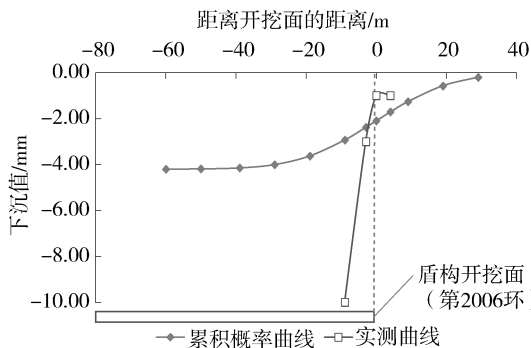


图7 用累积概率曲线来描述隧道轴向地面沉降分布

Fig. 7 Vertical ground settlement distribution by cumulative relative curve

2.3 沉降预测差异原因分析

1) 横向沉降差异原因:上文Peck公式预测横断面沉降分布时,差异原因是公式参数的取值与实际工程不符,不能反映汕头地区的地质和现代盾构隧道工艺现状。

2) 隧道轴线方向沉降差异原因:累积概率曲线要求开挖面上方地表处的沉降值总等于 $0.5\delta_{\max}$,而盾构法隧道由于开挖面处具有良好的支护条件,使得上述值 $0.25\delta_{\max}$ 。

2.4 沉降公式修正方法

1) 对于横向沉降公式,可通过对横断面的实测沉降曲线进行拟合,由拟合曲线得到沉降槽宽度 i ,并根据Peck公式反算出不同观测断面上的体积损失率 V_1 ,从而可以得到工程区合理的横向沉降公式,为后续施工管理提供参考。

2) 对应隧道轴线沉降,可通过对隧道轴线实测沉降进行统计和拟合,获得适合本地区的轴向沉降预测公式,从而预测盾构隧道施工引起的地面轴向沉降。

3 结论

1) 以实测沉降曲线分析了汕头某电缆隧道工程地表沉降规律,对比分析了实测沉降和传统沉降曲线的不同之处,表明本工程盾壳侧向土体摩阻力以及正面压力小于上方水土压力。

2) 由实测沉降发展阶段分析表明,盾尾脱出前后,各测点的沉降值约占总值比例与传统曲线一致;盾壳侧向土体摩阻力是本工程地表隆起在切口后方的原因;盾尾脱出约60d后沉降值占总值的93.33%~100.00%,说明实测地表已经趋于稳定。

3) 因经验公式参数取值不符合实际,造成公式预测结果与实测值有较大较大差异;应根据实测数据对沉降公式进行拟合,得到的预测公式可用来预测隧道施工造成的地表沉降,从而指导施工。

4) 通过监测数据分析,可对盾构施工状态判别,从而更好指导施工,保证施工质量和安全。

参考文献:

- [1] 刘思南,黎伟.大断面电力隧道内电缆敷设方案设计[J].广州建筑,2016,44(5):2-5.
- [2] 包海龙.上海电力隧道建设的初步设想[J].上海电力,2003(3):219-223.
- [3] 陈文通,游健龙.超高压地下电缆潜盾隧道新技术之应用实例[J].隧道建设,2010,30(增刊1):324-332.
- [4] 周辉,方浩,张永降.新型电缆支架在长距离500kV电力隧道中的应用[J].华东电力,2010,38(4):549-551.
- [5] 周金海,周虹霞,王鑫等.城市电力隧道规划及结构设计研究[J].铁道建筑,2012(1):69-72.
- [6] 魏纲,周洋,魏新江.盾构隧道施工引起的工后地面沉降研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊1):2891-2896.
- [7] 施成华.城市隧道施工地层变形时空统一预测理论及应用研究[D].长沙:中南大学,2007.

点板重量和降低塔身风荷载,即可降低铁塔重量,具有一定的经济意义。

2)变坡以上斜材偏心时,应考虑偏心产生的节点弯矩对主材控制应力的影响;变坡以下斜材偏心时,主材控制应力基本不受影响。

3)辅助材与塔身主材或塔身斜材连接时,建议节点偏心 $1/2$ 主管径。塔身斜材或辅助材偏心后,其自身控制应力基本不受影响,但需验算节点板焊缝强度是否满足受力需求。

4)本文给出的钢管塔偏心节点计算和设计建议,简单易操作,可为工程提供参考。

参考文献:

- [1] 吴静,邓洪洲,傅俊涛.输电塔圆钢管相贯节点强度分析[J].特种结构,2006,23(3):63-65.
WU J, DENG H Z, FU J T. Strength analysis of steel tubular intersection k-joint for transmission line [J]. Special Structures, 2006, 23(3): 63-65.
- [2] 高翔,邹相国,王勇.输电钢管塔相贯节点非线性分析[J].机械设计,2009,26(9):70-72.
GAO X, ZOU X G, WANG Y. Nonlinear analysis on intersection node of the steel pipe tower of power transmission [J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(9): 70-72.
- [3] 邓洪洲,黄誉,金晓华.钢管塔新型内外法兰节点试验研究与有限元分析[J].建筑结构学报,2009,30(5):140-148.
DENG H Z, HUANG Y, JIN X H. Experimental research and finite element analysis on a new-type flange joint used in steel tube towers [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 140-148.
- [4] 鲍佩袁,沈国辉,孙炳楠,等.高耸钢管塔K型结点极限承载力的试验研究与理论分析[J].工程力学,2008,25(12):114-122.
BAO K Y, SHEN G H, SUN B N, et al. Experimental study and theoretical analysis of ultimate strength of steel tubular k-

joints of tall tower [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(12): 114-122.

- [5] 潘峰,应建国.1000 kV钢管塔十字插板连接K型节点的非线性分析[J].电力建设,2010,31(12):38-42.
PAN F, YING J G. Nonlinear analysis of steel tube tower k-joints with cross flashboard for 1000 kV UHV lines [J]. Electric Power Construction, 2010, 31(12): 38-42.
- [6] 电力规划设计标准化技术委员会.架空送电线路杆塔结构设计技术规定:DL/T 5154-2002[S].北京:中国电力出版社,2002.
Technical Committee for Standardization of Electric Power Planning and Design. Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line: DL/T 5154-2002 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [7] 电力规划设计标准化技术委员会.架空送电线路钢管塔设计技术规定:DL/T 5254-2010[S].北京:中国电力出版社,2010.
Technical Committee for Standardization of Electric Power Planning and Design. Technical regulation of design for steel tubular tower structures of overhead transmission line: DL/T 5254-2010 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [8] 中华人民共和国建设部.钢结构设计规范:GB 50017-2003[S].北京:中国计划出版社,2003.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structure: GB 50017-2003 [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.
- [9] 黄誉.输电线路钢管塔节点强度理论与试验研究[D].上海:同济大学,2010.
HUANG Y. Studies on steel tubular joints of transmission tower [D]. Shanghai: Tongji University, 2010.
- [10] ANSYS, Inc. ANSYS release 11.0 documentation [M]. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2007.

(责任编辑 郑文棠)

(上接第89页 Continued from Page 89)

- [8] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground, state of the art report [C]//7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 1969: 225-290.
- [9] FUJITA K. On the surface settlement caused by various methods of shield tunneling [J]. Proc. 11th ICSMFE, 1981(4): 609-610.
- [10] 朱才辉,李宁.隧道施工诱发地表沉降估算方法及其规律分析[J].岩土力学,2016,37(增刊2):533-542.
- [11] 陈春来,赵城丽,魏纲,等.基于Peck公式的双线盾构引起的土体沉降预测[J].岩土力学,2014,35(8):

2213-2218.

- [12] 张顶立,李鹏飞,侯艳娟,等.城市隧道开挖对地表建筑群的影响分析及其对策[J].岩土工程学报,2010,32(2):296-302.
- [13] 王海林,彭芳乐,徐正良,等.气压沉箱施工对周边地层环境影响的现场监测与数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2):3941-3951.
- [14] 赵洪波.支持向量机在隧道围岩变形预测中的应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(4):649-652.

(责任编辑 高春萌)