

基于机场跑道道面结构完整性的盾构施工控制

杜 浩¹, 张 宏², 凌建明³, 钱劲松³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 内蒙古大学 交通学院, 内蒙古 呼和浩特 010070;

3. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 根据盾构穿越机场飞行区地基的沉降变形规律和保证道面结构完整性的条件下, 令道面结构与地基保持相互接触、共同协调变形, 推导了盾构穿越机场飞行区所允许的最大沉降量 δ_{\max} 公式。根据此公式可建立机场道面安全承受标准, 进而对盾构施工等主要参数进行有效控制, 保证工程安全顺利进行。

关键词: 道面结构; 盾构施工; 地基; 不均匀变形

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

Shield Construction Control Based on Integrity of Pavement Structure of Airport Runway

DU Hao², ZHANG Hong², LING Jianming³, QIAN Jingsong³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Transportation Institute of Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China; 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to ensure the integrity of pavement structure, and to maintain the pavement structure and foundation to be in contact and in co-deformation, the formula of the accepted maximum settlement δ_{\max} is derived according to the law of foundation settlement while the shield goes through the flight zone, therefore, the safety standards for airport pavement structure are proposed. As a result, the shield construction parameters can be controlled effectively to ensure the safety of the construction.

Key words: pavement structure; shield construction; foundation; differential deformation

力问题, 越来越多的已建隧道延伸至或新建隧道穿越机场飞行区、停机坪等重要“沉降敏感区域”^[1]。

盾构施工将不可避免地扰动业已处于平衡状态的土层, 导致周围土层变位、地基发生不均匀沉降变形^[2]。水泥混凝土道面结构刚度大, 协调变形能力差, 对于不均匀沉降比较敏感^[3]。当地基出现不均匀沉降变形时(如软弱地基的不均匀沉降、填挖交替或新老填土交替、季节性冰冻地区的不均匀冻胀、填土因压实不足而引起的压密变形, 受湿度变化影响而产生的膨胀收缩变形及地下工程活动导致的差异沉降), 在面层板无法跟随地基变形, 道面与地基不能协同工作时, 则导致面层板内产生比较可观的附加应力, 使其处于不利受力状态, 甚至可导致道面开裂、断板等相关病害发生, 并最终引起道面结构完整性受损, 不能满足使用性能的要求^[4-12]。

在盾构施工地下工程活动引起地基不均匀沉降条件下, 从地基差异沉降对道面结构性能影响的角度, 分析机场飞行区道面的变形控制标准及依据。

1 盾构施工的地基沉降断面形态

关于盾构施工引起的地基横向沉降断面曲线形态, 目前应用最为广泛、得到工程界普遍认可的经典方法仍为 Peck 提出的高斯方程式^[13]。Peck 在分析大量盾构施工地表沉降观测数据的基础上, 认为地层变形由地层损失引起, 施工引起的地面沉降是在不排水的条件下发生的, 且地表沉降槽体积等于地层损失体积, 并进一步提出了地表沉降槽符合正态分布曲线的概念, 如图 1 所示。

地基沉降断面曲线形态为

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

随着中国城市化水平的提高, 各大城市为了解决日益紧张的特大型、大型城市机场客流量疏散能

收稿日期: 2012-05-07

基金项目: 上海市科委项目(0923120060)

第一作者: 杜 浩(1981—), 男, 工学博士, 主要研究方向为机场工程。E-mail: kgduhao@163.com

通讯作者: 张 宏(1978—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为路基变形控制及废物利用。E-mail: zhanghong3537@126.com

式中: $\delta(x)$ 为距隧道中心线横向距离 x 处的沉降量, mm; x 为距隧道中心线的横向距离, m; i 为曲线反弯点横坐标, 也称沉降槽宽度系数, m; δ_{\max} 为隧道

中心线上方最大地面沉降量, mm; V_s 为隧道单位长度沉降槽体积, 在不排水条件下隧道单位长度地层损失量, $\text{m}^3 \cdot (\text{m})^{-1}$.

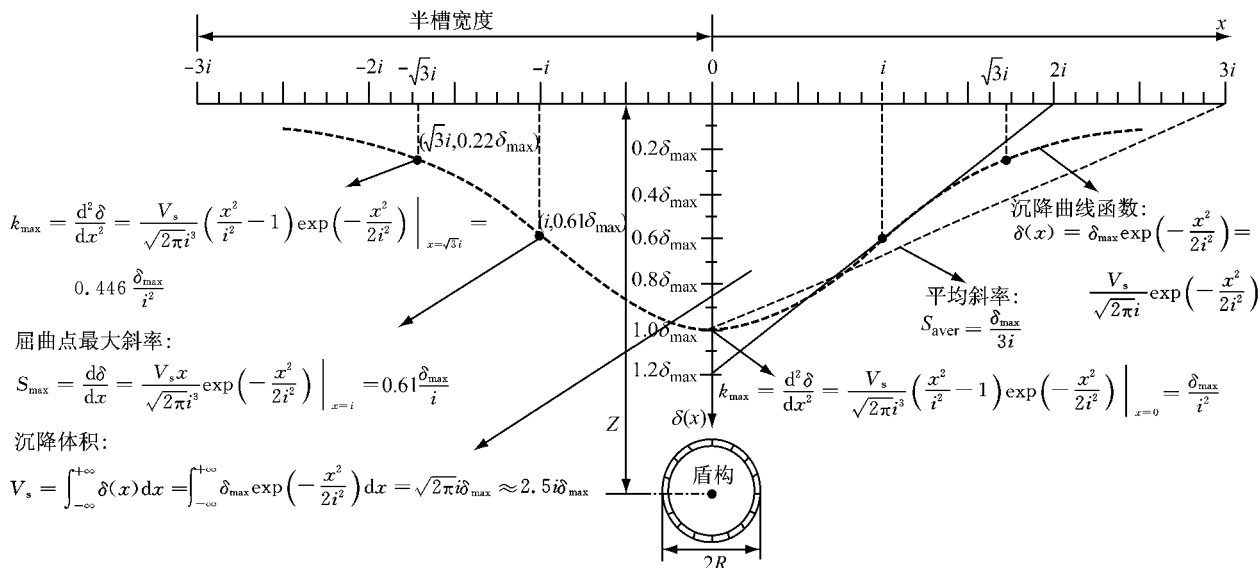


图 1 Peck 法盾构施工引起的沉降槽断面形状^[18]

Fig.1 Shape of settlement trough section induced by tunnel excavation with Peck methods^[18]

2 基于道面结构完整性的变形分析

运营中的机场飞行区对道面的功能要求主要有以下五个方面^[14]: ①排水、飞行员视距等对道面使用性能的要求; ②机场道面对不协调变形控制的要求; ③最大沉降符合相关规范对道面标高的要求; ④道面平整度, 保证飞机起降、车辆行驶的安全性和舒适度; ⑤跑道受力安全, 保证道面结构的完整性。

显然, 机场飞行区对道面沉降有着极其严格的控制要求, 符合前三项功能要求的沉降控制标准, 远远高于满足后两项功能要求的控制标准。换言之, 如果地下隧道施工造成的沉降变形导致道面结构不能符合上述前三项功能要求, 则后两项的功能要求必然不能满足, 因此从建立道面的沉降控制标准角度, 前三项因素可不作为重点考虑。对于第四项功能要求, 道面平整度涉及飞机和车辆性能等其他因素, 确定起来也比较复杂, 目前还没有统一的标准, 因此本文中此项功能要求予以忽略, 不加以考虑。本文主要考虑第五项的功能要求, 即保证道面结构的完整性, 使得基层受力状态在其材料强度的允许范围内, 以此作为临界状态分析建立沉降控制标准与依据。

将水泥混凝土道面下的结构体系转化为等效地基, 令面层和等效地基相互接触、共同协调变形, 即

由地下盾构施工导致的土基表面不均匀沉降变形直接反映到与其接触的面层中, 土基的沉降和曲率变化即为面层的变化, 见图 2 所示。分析地基表面土体沉降和变化曲率是否会导致面层开裂就可得到此状态下的道面变形控制指标。

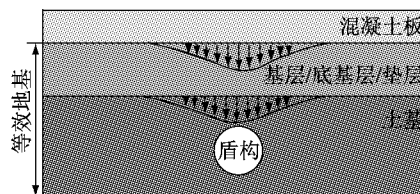


图 2 相互接触、协调变形示意图

Fig.2 Schematic of contact, coordination deformation

从面层变形体中取 dx 微段进行力学分析, 见图 3。由材料力学知识可得^[15]

$$\begin{aligned} dx &= \rho d\theta \\ \epsilon &= \frac{\gamma}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

由虎克定律可得

$$\sigma = E\epsilon = \frac{E\gamma}{\rho} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_z}{EI_z} \quad (4)$$

由式(3)及(4)可得

$$\sigma = \frac{M_z y}{I_z} \quad (5)$$

令 $\frac{I_z}{y_{\max}} = W_z$, 则可得

$$\sigma_{\max} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{EI_z}{\rho W_z} \quad (6)$$

式中: σ 为横截面正应力, kPa; ρ 为曲率半径, m; W_z 为 z 方向抗弯截面模量, m^3 ; M_z 为对 z 轴弯矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; E 为弹性模量, kPa; I_z 为对 z 轴的惯性矩, m^4 .

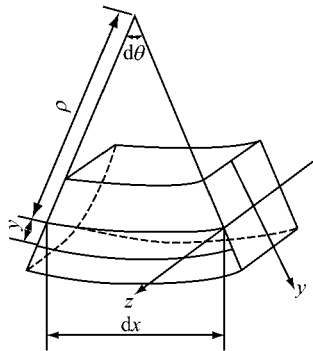


图3 微段变形示意图

Fig.3 Schematic of micro-segment deformation

当材料容许强度为 $[\sigma]$, 厚度为 h 时, 由式(6)可得变形曲率半径, 且为最小曲线半径

$$\rho_{\min} = \frac{EI_z}{\sigma_{\max} W_z} = \frac{EI_z}{[\sigma] W_z} = \frac{E y_{\max}}{[\sigma]} = \frac{Eh}{2[\sigma]} \quad (7)$$

式中: y_{\max} 为横截面上距中心轴的最远距离。

考虑到材料参数的离散性及飞行区对沉降的严格控制要求等实际情况, 建议对材料的容许强度乘以一定的安全系数 K_s , 由式(7)得

$$\rho_{\min} = K_s \frac{Eh}{2[\sigma]} \quad (8)$$

根据前提假设条件, 面层与等效地基保持相互接触、共同协调变形时, 由地下盾构施工引起的地基顶面沉降变化形态, 即反映了面层的沉降变化形态, 面层结构的沉降和曲率变化与地基顶面的沉降和曲率变化相一致。故分析由地下盾构施工引发的土基顶面的沉降变形规律, 即可求得曲率半径公式, 然后进一步求得最小曲率半径极限值(见式(9)), 进而建立基于道面结构完整性条件下的道面变形控制标准。

$$\rho = \frac{1}{k} = \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{3/2}} \quad (9)$$

地下盾构施工引起的地基顶面沉降变形规律见第1节。由 Peck 沉降预测式可得沉降槽分布曲线的最大沉降曲率, 进一步得到曲率和曲率半径的关系,

求得地表沉降曲线的最小曲率半径, 对式(9)求二阶导数得到曲率公式

$$k = \frac{d^2 \delta}{dx^2} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} i^3} \left(\frac{x^2}{i^2} - 1 \right) \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (10)$$

对式(10)求导可知, 当 $x = \sqrt{3}i$ 或 $x = 0$ 时, 曲率可得最大值

$$k_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} i^3} \left(\frac{x^2}{i^2} - 1 \right) \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \Big|_{x=0} = \frac{\delta_{\max}}{i^2} \quad (11a)$$

$$k_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} i^3} \left(\frac{x^2}{i^2} - 1 \right) \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \Big|_{x=\sqrt{3}i} = 0.446 \frac{\delta_{\max}}{i^2} \quad (11b)$$

由曲率半径与曲率的关系可得最小曲率半径

$$\rho_{\min} = \frac{1}{k_{\max}} = \frac{i^2}{\delta_{\max}} \quad (12)$$

将式(12)代入式(7)和(8)可得

$$\frac{i^2}{\delta_{\max}} = K_s \frac{Eh}{2[\sigma]} \Rightarrow \delta_{\max} = \frac{2[\sigma] i^2}{K_s Eh} \quad (13)$$

根据式(13), 只要知道材料弹性模量 E 、材料的容许强度 $[\sigma]$ 、横截面上距中心轴的最远距离 y_{\max} 、沉降槽宽度系数 i 、道面板厚度 h 以及所要考虑的安全系数 K_s , 就可以得出满足基于道面结构完整性的沉降控制标准, 即可制定隧道施工引发的沉降槽宽度系数对应的地表最大沉降值 δ_{\max} 。

3 盾构施工控制

从式(13)中显然可见, 除道面结构参数之处, 式中与盾构施工控制密切相关的参数为沉降槽宽度系数 i 及最大沉降量 δ_{\max} 。根据前人的研究成果, 沉降槽宽度系数 i 和最大沉降量 δ_{\max} 与盾构隧道半径 R 及隧道中心埋深 Z 之间具有一定的规律性, 它们之间符合一定的数学关系。文献[16-19]中提出了目前工程实践中应用比较普遍的方法, 并给出了 i, R, Z, K_s 之间的数学关系式, 将这些数学式代入式(13)中, 可得

$$\delta_{\max} = \frac{2[\sigma] i^2}{K_s Eh} = Cf(Z, R) \quad (14)$$

式中: $C = \frac{2[\sigma]}{K_s Eh}$, $f(Z, R)$ 为文献[16-19]中提出的各种方法关于 Z 与 R 间的函数。

从式(14)中可以得出只要给出既定道面结构参数及盾构隧道相关参数, 就可得出保证道面结构完整性条件下所允许的最大沉降量 δ_{\max} 。同理, 当已知最大沉降量, 可推导道面结构参数与盾构施工参数,

从而可有效地指导盾构施工、优化施工参数,保证工程安全顺利进行。

4 结语

盾构法穿越地基,不可避免地要扰动业已处于平衡状态的土层,原有的自然状态被破坏,引起地基不均匀沉降,并进一步导致道面开裂、断板等病害,引起的后果轻则机场停航,重则引起机毁人亡的重大飞行事故。因此,根据盾构施工引起的土体变形规律以及保证道面结构完整性的条件下,建立机场道面安全承受标准公式,进而对盾构设计、施工等主要参数进行有效控制,对保证工程的安全性等方面具有重要的理论与工程实践指导意义。

参考文献:

- [1] 张宏. 机场飞行区盾构穿越土体变形与道面结构行为[D]. 上海: 同济大学, 2011.
ZHANG Hong. Behavior of pavement and soil deformation during shield construction[D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [2] 徐永福, 孙钧, 傅德明, 等. 外滩观光隧道盾构施工的扰动分析[J]. 土木工程学报, 2002, 35(2): 70.
XU Yongfu, SUN Jun, FU Deming, et al. Disturbance analysis of shield tunnel construction in Shanghai Huangpu River[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(2): 70.
- [3] 谈至明, 姚祖康. 软土地基不均匀沉降对铺面结构影响分析[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(2): 54.
TAN Zhiming, YAO Zukang. Structural analysis of concrete pavements on soft subsoils with differential settlement[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(2): 54.
- [4] 王铁行, 胡长顺, 李宁. 冻土路基应力变形数值模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 193.
WANG Tianxing, HU Changshun, LI Ning. Stress-strain numerical model for frozen soil subgrade[J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 193.
- [5] 张嘉凡, 张慧梅. 软土地基路基不均匀沉降引起道面结构附加应力[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2003, 23(3): 21.
ZHANG Jiafan, ZHANG Huimei. Additional stress in pavement structure due to asymmetrical settlement of soft subgrade[J]. Journal of Changan University: Natural Science Edition, 2003, 23(3): 21.
- [6] 邓卫东, 张兴强, 陈波, 等. 路基不均匀沉降对沥青道面受力变形影响的有限元分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 12.
DENG Weidong, ZHANG Xingqiang, CHEN Bo. Nonlinear FEM analysis of influence of asphalt pavement under non-homogenous settlement of roadbed [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 12.
- [7] 李强, 周志刚, 郑健龙. 填挖交界处路基不均匀沉降对道面结构的影响[C]// 第四届国际道路和机场道面技术大会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2002: 139-143.
LI Qiang, ZHOU Zhigang, ZHEN Jianlong. Influence of pavement structure under differential settlements of subgrade in junction of cut-fill[C]// The 4th Conference of International Road and Airport Pavement Technology. Beijing: China Communications Press, 2002: 139-143.
- [8] 周志刚, 郑健龙, 李强. 土工格网处理填挖交界路基非均匀沉降的机理分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 576.
ZHOU Zhigang, ZHEN Jianlong, LI Qiang. Analysis of the mechanism of using geonets to treat the unequal settlement of subgrade at the cut to fill location [J]. China Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 576.
- [9] 蒋鑫, 邱延峻. 半填半挖式路基差异沉降对沥青道面结构影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2006(4): 16.
JIANG Xin, QIU Yanjun. Calculating geothermal water amount with the method of finite state mixed cell model in Tianjin geothermal area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, (4): 16.
- [10] 侯曙光. 多年冻土路基融沉机理及道面结构对策研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
HOU Shugang. Study on mechanism of subgrade thawing and countermeasures against pavement structure distress in permafrost region [D]. Nanjing: Nanjing Southeast University, 2006.
- [11] Vos E. Thickness design of plain cement concrete pavements on soils sensitive to differential settlements[C]// Proceedings, 3rd International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation. West Lafayette: Purdue University, 1985: 245-251.
- [12] Wilk, N. Cement concrete pavements on soft soils sensitive to differential settlements [C]// Proceedings, 2nd International Conference on Concrete Pavement Design. West Lafayette: Purdue University, 1981: 201-210.
- [13] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: Mexico University Press, 1969: 275-290.
- [14] 吴念祖. 虹桥国际机场飞行区地下穿越技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.
WU Nianzu. The underground technology of Hongqiao international airport flight area [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2010.
- [15] Gere J M, Goodno B J. Strength of materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [16] Clough G W, Schmidt B. Design and performance of excavations and tunnels in soft clay [C]// International Symposium on Soft Clays. Bangkok: [s. n.], 1977: 85-163.
- [17] Attewell P B. Engineering contract, site investigation and surface movements in tunneling works [C]// Soft Ground Tunneling. Rotterdam: A A Balkeman, 1981: 5-12.
- [18] Mair R J, Gunn M J, Oreilly M P. 软粘土中浅埋隧道周围地层运动 [J]. 隧道译丛, 1983, 10(7): 47.
Mair R J, Gunn M J, Oreilly M P. Ground movement around the shallow tunnel in soft clay [J]. Tunnel Translations, 1983, 10(7): 47.
- [19] O'Reilly M P, New B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom—their magnitude and prediction [C]// Tunnelling'82 Symposium. London: IMM, 1982: 173-240.