

考虑盾构隧道渗水的富水软弱 地层地表长期沉降计算研究

穆永江¹ 袁大军^{2,3} 王 将^{2,3} 刘 博⁴ 王承震⁵

(1. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300; 2. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044;
3. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 4. 天津铁道职业技术学院, 天津 300000; 5. 中铁十四局集团有限公司, 山东济南 250101)

摘要: 富水软弱地层中盾构隧道渗水的情况时有发生, 对盾构施工引起超孔隙水压力的消散造成影响。在地表长期沉降的计算中, 隧道渗水的工况是不容忽视的。对此, 以富水软弱地层盾构隧道渗水为背景, 将超孔隙水压力的消散视为地下水向低水头位置和向隧道渗流共同作用的结果, 在前人研究的基础上推导了长期沉降计算式。针对 3 个实际工程, 采用提出的计算方法与不考虑隧道渗水的方法、实测结果进行对比, 结果表明: 对于黏土占比较高的地层, 不考虑隧道渗水的方法计算结果偏小, 与实测值存在一定的偏差; 隧道渗水量越大, 引起的地表沉降量越大; 考虑隧道渗水可有效提高长期沉降的计算精度, 验证了所提计算方法的可靠性。

关键词: 盾构隧道; 地表长期沉降; 富水软弱地层; 隧道渗水

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-131X(2020)S1-0007-06

Calculation model of the long-term settlement in the weak watery stratum considering leakage of shield tunnel

Mu Yongjiang¹ Yuan Dajun^{2,3} Wang Jiang³ Liu Bo⁴ Wang Chengzhen⁵

(1. China Railway Construction Bridge Engineering Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China;

2. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of the Education Ministry, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

4. Tianjin Railway Technical and Vocational College, Tianjin 300000, China; 5. China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: Seepage of shield tunnel occurs occasionally in the weak and water-rich stratum after long-term use, which has impact on the dissipation of excess pore water pressure caused by shield construction. Thus, tunnel seepage conditions cannot be ignored in the calculation of long-term surface settlement. On the basis of the previous research, a calculation method that can evaluate long-term consolidation settlement in the weak and water-rich stratum was proposed, considering that the dissipation of excess pore pressure is caused by the seepage of groundwater towards the lower head position in stratum and the position of shield tunnel. For three actual projects, the proposed calculation method is compared with the method that does not consider the tunnel seepage as well as the actual measurement results. The results show that computed result by the method without considering tunnel leakage is smaller than the measured value in the stratum with high clay content. Additionally, the larger the seepage volume, the greater the surface settlement; Considering tunnel seepage can effectively improve the calculation accuracy of long-term settlement, which verifies the reliability of the proposed calculation method.

Keywords: shield tunnels; long-term ground settlement; weak watery stratum; tunnel leakage

E-mail: wangjiang_bjtu@126.com

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB057800)、
国家自然科学基金(51678037)和国家自然科学基金联合基金(U1834208)

作者简介: 穆永江, 硕士, 高级工程师

通讯作者: 王将, 博士研究生

收稿日期: 2020-06-15

引 言

富水软弱地层中, 盾构隧道建设诱发的长期地表沉降主要是由于施工期的扰动和工后超孔隙水压力的消散引起土体固结, 如何有效的预测盾构掘进

引起的长期沉降,是盾构隧道建设所面临的一个重要问题。盾构隧道施工中会使隧道周围土体中产生初始超孔隙水压力,其消散过程伴随着渗流的现象,若在此期间盾构隧道出现渗流通道,改变土体中原有的渗流场,这会影响到土体的固结过程,对于长期地表沉降预测是不容忽视的。

学者们采用现场测试法、数值模拟法、理论解析法等手段,对盾构隧道施工扰动引起地表长期沉降的预测开展了相关的研究。理论解析法方面^[1-7],张冬梅等^[1]基于黏弹性理论,对盾构隧道的工后沉降进行了计算分析;魏刚等^[2,3]在工后沉降预测中考虑应力释放率这一概念,基于太沙基一维固结理论提出了长期沉降的计算方法;敖日汗等^[4]应用Henkel超孔隙水压力理论计算了初始超孔隙水压力,并采用数值分析方法分析了盾构施工引起的固结沉降;Cao等^[5]基于隧道完全不透水的假设推导了超静孔隙水压力的消散解和固结沉降解。上述的这些研究,采用的边界条件是隧道完全不透水的情况。

考虑隧道渗水的长期沉降解析方面,张冬梅等^[6]引入管片等效渗透系数,基于径向稳态渗流的假定,推导了隧道周围土体内的孔隙水压力解析式和长期沉降的计算方法,但在研究中未考虑盾构施工期的扰动影响;张治国等^[7]采用Terzaghi-Rendulic固结理论,计算分析了隧道渗水过程中超孔隙水压力的消散和土体固结沉降,但是其解析过程和结果较为复杂,且在推导中假定孔隙水只向隧道方向渗流,欠缺实用性。

对此,考虑盾构掘进的扰动和隧道在建成后产生了渗水的现象,在前人研究的基础上,结合苏州地铁2号线某富水软弱地层盾构段的现场测试,对富水软弱地层盾构隧道地表长期沉降的计算方法开展研究,并将理论结果与实测结果进行对比验证。

1 研究思路与基本假定

盾构隧道施工过后长期沉降主要由施工期间沉降和工后固结沉降组成。在施工过程中,盾构掘进到衬砌的拼装用时较短,而超静孔隙水压力的消散是一个缓慢的过程,因此可认为施工过程中衬砌是不排水的^[8];隧道完成后,考虑管片衬砌在长期使用过程中发生渗水情况,加速了超孔隙水压力的消散。则盾构隧道轴线上方地面总的长期沉降量 S 可假定为:

$$S=S_1+S_2' \quad (1)$$

式中: S_1 为施工期间沉降,可取盾尾通过后约2天时的实测地表沉降量^[2]; S_2' 为隧道渗水情况下工后地面固结沉降量。

在工后长期固结过程中,若盾构隧道发生漏水情况且渗水量较小时,地下水不仅会向隧道方向渗流,也会向地层中的低水头位置渗流,这种复杂的情况很难直接推导出孔隙水压力的消散解。为了便于计算,本文将工后固结过程中的超孔隙水压力的消散拆分为独立的两个部分:一部分是孔隙水向土体中低水头位置渗流产生的消散,这部分可认为隧道衬砌是完全隔水的^[3];另一部分是只考虑孔隙水向隧道方向渗流,如图1所示。综上,隧道渗水情况下盾构隧道轴线上方地面的工后固结沉降量 S_2' 为:

$$S_2'=S_n+S_f \quad (2)$$

式中: S_n 为衬砌隔水部分的固结沉降量; S_f 为隧道渗水部分的固结沉降量。

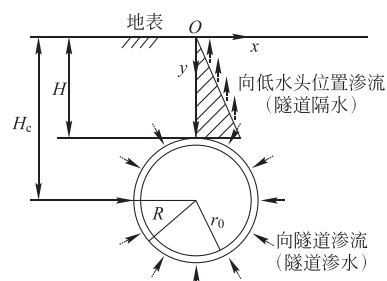


图1 渗流假设

Fig. 1 Assumption of seepage

基于上述思路,给出计算模型的基本假设:

(1) 假土体总应力不随时间改变,初始超孔隙水压力值等价于开挖卸荷引起的土体应力释放值^[3];

(2) 假设土体和管片为均质且各向同性,且土体的弹性参数保持不变;

(3) 当盾构隧道位于富水地区,由于隧道的盾构隧道的渗水量一般较小,可认为水位保持恒定^[6];

(4) 盾构隧道的渗水多发生于管片接缝、螺栓孔等位置,根据文献[9-11]对管片渗水情况的分析,可将管片等效为具有有限渗透性^[10]的均向渗水介质;

(5) 基于文献[6]与文献[12]对管片结构渗流状态的分析,可假定隧道处于稳态径向渗流且管片边界处于等水头状态。

2 长期沉降计算

(1) S_n 的计算

均质土体的假定条件下,根据分层总和法,砌

隔水部分的固结沉降量 S_n 可表示为^[2]:

$$S_n = \frac{u_0 H}{E_s} = \frac{\overline{\alpha\gamma} H^2}{E_s} \quad (3)$$

式中: u_0 为初始超孔隙水压力; $\overline{\gamma}$ 为土层的平均加权重度; H 为覆土厚度; E_s 为隧道上覆土层加权平均压缩模量; α 为应力释放率, 可采用短期固结沉降的实测值反分析得出。

固结开始后 t 时刻的隧道轴线上方地面固结沉降量 $S_n(t)$ 可表示为:

$$S_n(t) = U_z S_n \quad (4)$$

式中: U_z 为土层固结度。

根据文献[3], 若衬砌隔水, 可将隧道覆土范围内的初始超孔隙水压力简化为三角形分布(如图 1), 则在土体为单向排水的条件下, 土层固结度 U_z 可按下列式计算:

$$\begin{cases} U_z = \sqrt{\frac{4}{\pi} T_v}, & U_z \leq 60\% \\ U_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v}, & U_z > 60\% \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_v 为时间因数, 其计算式为

$$\begin{cases} T_v = \frac{c_v t}{H^2} \\ c_v = \frac{k_s(1+e)}{\gamma_w a} \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_s 为土体渗透系数; e 为土的孔隙比; γ_w 为水的重度。

(2) S_t 的计算

长期固结过程中隧道持续渗水, 可假设已经达到了稳定渗流状态。基于前文假定, 建立图 2 所示的渗流模型。图中, H_0 为地下水位距地表的距离; H_c 为地表到盾构隧道中心点的距离, R 为隧道外径, r_0 为隧道内径, H_L 为隧道外边界水头相对于地表的高度。

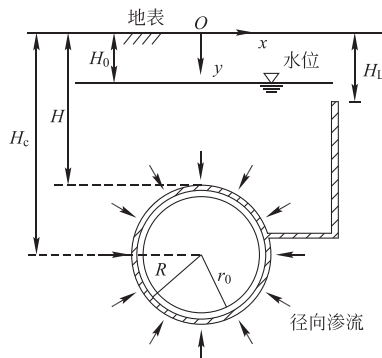


图 2 隧道渗流模型

Fig. 2 Calculation model of tunnel seepage

稳态渗流控制微分方程为:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

式中: h 为水头势函数。

由前文的假设, 得到边界条件:

$$\begin{cases} h_{y=0} = H_0 \\ h_{x^2+(y-H_c)^2=R^2} = H_L \end{cases} \quad (8)$$

管片衬砌外边界的渗流水头 H_L , 可表示为^[13]:

$$H_L = \frac{(k_s/k_L) \ln(R_2/R) \cdot H_0 - \ln \alpha \cdot H_{10}}{(k_s/k_L) \ln(R_2/R) - \ln \alpha} \quad (9)$$

$$k_L = \frac{k_s Q \ln(R/r_0)}{Q \ln \alpha + 2\pi k_s (H_0 - H_{10})} \quad (10)$$

式中: k_s 为土体的渗透系数; k_L 为管片的等效渗透系数; Q 为隧道渗流量, 本文取 $Q = q \cdot t$, q 为单位时间渗水量; H_{10} 为隧道内侧水头。

根据文献[12]的解析方法, 可得出土中任一点的水头势函数表达式为:

$$h(x, y) = H_0 + \frac{H_0 - H_L}{\ln(R_2/R)} \ln \left[\frac{R}{R_2} f(x, y) \right] \quad (11)$$

式中:

$$f(x, y) = \sqrt{\frac{x^2 + (H_c - y - \alpha R)^2}{(R + \alpha y - \alpha H_c)^2 + \alpha^2 x^2}} \quad (12)$$

$$\alpha = (H_c - \sqrt{H_c^2 - R^2}) / R \quad (13)$$

$$R_2 = \frac{R^2}{H_c - \sqrt{H_c^2 - R^2}} \quad (14)$$

根据伯努利方程, 隧道周围土体中任一点点的渗流孔压为:

$$u(x, y) = \gamma_w (H_0 + y) + \frac{\gamma_w (H_0 - H_L)}{\ln(R_2/R)} \ln \left[\frac{R}{R_2} f(x, y) \right] \quad (15)$$

施工扰动后, 若覆土中的初始超孔隙水压力为图 1 中的三角形分布形式, 采用应力释放率^[2]来计算盾构施工扰动后的初始超孔隙水压力 u_0 , 其表达式为:

$$u_0 = \overline{\alpha\gamma} y \quad (16)$$

根据式(15)和(16), 可得出孔压的减量:

$$\Delta u(x, y) = u_0 + \gamma_w y - u(x, y) \quad (17)$$

若土体的总应力是不变的, 根据有效应力原理, 有效应力的增量即为孔隙水压力的减量, 则土中任意一点的应变增量为:

$$\Delta \varepsilon_y = \frac{(1 - \nu - \nu K_0)(1 + \nu)}{(1 + K_0)E} \Delta u(x, y) \quad (18)$$

式中： E 为土的弹性模量； ν 为土的泊松比； K_0 为静止土压力系数。

对式(18)，取 $x=0$ ，并在竖向方向上积分可得隧道轴线上方地表最大沉降量：

$$S_f = \int_0^H \frac{(1 - \nu - \nu K_0)(1 + \nu)}{(1 + K_0)E} \Delta u(0, y) dy \quad (19)$$

(3) 长期固结沉降的计算

盾构隧道轴线上方地面总的长期沉降量主要由 S_1 和 S_2 组成，基于前文的推导，可得隧道轴线上方地面长期沉降计算式为：

$$S_{\max}(t) = S_1 + S_n(t) + S_f(t) \quad (20)$$

式中： t 从固结开始后计算，一般取施工后 2d。

3 工程算例分析

为验证本文方法的准确性，以苏州地铁 2 号线富水软弱地层盾构隧道为例，将本文方法计算结果与不考虑渗水方法^[2]的结果及实测结果进行对比分析。

3.1 工程概况

现场测试的位置分别位于广三区间、石广区间和三劳区间。区间采用 $\Phi 6340$ 土压平衡盾构机掘进，衬砌采用预制钢筋混凝土管片，管片宽度为 1.2m，外径 6.2m，内径 5.5m。为探明长期沉降规律，进行了隧道施工期沉降和工后长期沉降监测，三个区间的监测周期分别为 91d、90d 和 160d。本文针对三个区间分别各取一个测试断面进行计算分析，三个测试断面地层的物理力学参数如表 1 所示。具体的工程、地质情况与计算参数的选取如下所述：

表 1 地层的物理力学参数

Table. 1 Physico-mechanical parameters of stratum

土层	重度 (kN/m^3)	压缩模量 (MPa)	泊松比	渗透系数 (cm/s)
① ₁ 填土	19.3	4.20	0.15	1.2×10^{-6}
② ₁ 黏土	19.5	4.67	0.31	2.0×10^{-7}
③ ₂ 粉质黏土	19.5	5.64	0.35	1.9×10^{-5}
④ ₁ 黏土	19.4	7.16	0.35	2.7×10^{-7}
⑤ ₂ 粉质黏土	19.4	5.99	0.32	2.1×10^{-5}
④ ₃ 粉砂	19.0	12.28	0.27	3.1×10^{-4}
⑤ ₁ 粉质黏土	20.3	6.79	0.36	3.4×10^{-7}

(1) 测试断面 1：广三区间

此处隧道覆土厚度约为 15.1m，地下水位距地表约 1.1m，隧道全断面穿越黏土层，上覆土层具体情况如图 3 所示。

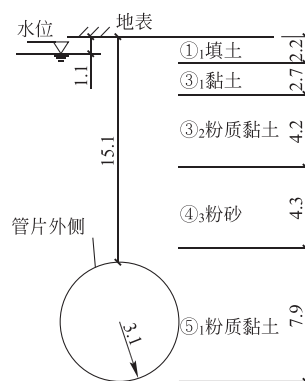


图 3 测试断面 1 地层情况(单位: m)

Fig. 3 Stratum condition of test section 1 (unit: m)

根据测试断面 1 的具体工程情况，计算参数选取如下：土的平均加权重度 $\bar{\gamma} = 19.6 kN/m^3$ ；加权平均压缩模量 $\bar{E}_s = 7.52 MPa$ ；渗透系数 $\bar{k} = 6.7 \times 10^{-5} cm/s$ ；泊松比 $\bar{\nu} = 0.31$ ；根据实测资料，可取固结系数 $C_v = 243.4 cm^2/d$ ；盾构通过断面 2d 后，测得隧道轴线上方地表沉降为 12.4mm，则通过式(3)可得应力释放率 $\alpha = 2.02\%$ 。

(2) 测试断面 2：石广区间

隧道拱顶埋深为 13.1m，地下水位距地表约 2.8m，隧道洞身位于④₃砂层和⑤₁粉质黏土层中，上覆土层具体情况如图 4 所示。

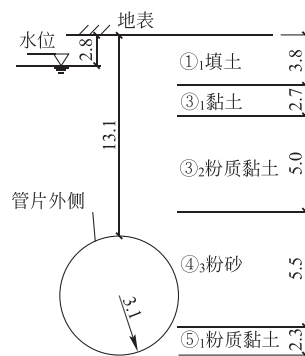


图 4 测试断面 2 地层情况(单位: m)

Fig. 4 Stratum condition of test section 2 (unit: m)

根据测试断面 2 的具体工程情况，计算参数选取如下：土的平均加权重度 $\bar{\gamma} = 19.4 kN/m^3$ ；加权平均压缩模量 $\bar{E}_s = 7.69 MPa$ ；渗透系数 $\bar{k} = 9.4 \times 10^{-5} cm/s$ ；泊松比 $\bar{\nu} = 0.28$ ；根据实测资料，可取固结系数 $C_v = 308.0 cm^2/d$ 。盾构通过断面 2d 后，测得隧道轴线上方地表沉降为 15.8mm，可得应力释放率 $\alpha = 3.65\%$ 。

(3) 测试断面 3：三劳区间

覆土厚度约为 12.7m，地下水位距地表约 1.5m，隧道主要穿越④₃粉砂层和⑤₁粉质黏土层，上覆土层

具体情况如图 5 所示。

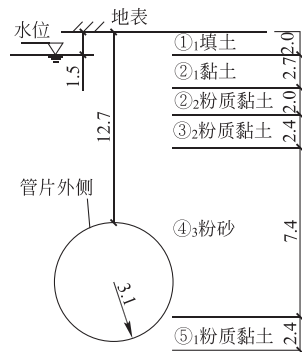


图 5 测试断面 3 地层情况 (单位: m)

Fig. 5 Stratum condition of test section 3 (unit: m)

根据测试断面 3 的具体工程情况, 计算参数选取如下: 土的平均加权重度 $\bar{\gamma} = 19.4 \text{ kN/m}^3$; 加权平均压缩模量 $\bar{E}_s = 8.14 \text{ MPa}$; 渗透系数 $\bar{k} = 1.7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$; 泊松比 $\bar{\nu} = 0.28$; 根据实测资料, 可取固结系数 $C_v = 390.9 \text{ cm}^2/\text{d}$ 。盾构通过断面 2d 后, 测得隧道轴线上方地表沉降为 21.7mm, 可得应力释放率 $\alpha = 5.65\%$ 。

3.2 结果分析

三个算例的计算中, 考虑隧道渗流时分别选取单位渗流量 q 为 $0.001 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.01 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.05 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.2 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 这几种工况进行分析。分别计算了三个测试断面在固结 89 天、88 天和 158 天后, 隧道轴线上方的地表沉降量, 并与实测结果对比, 具体结果如图 6~8 所示。

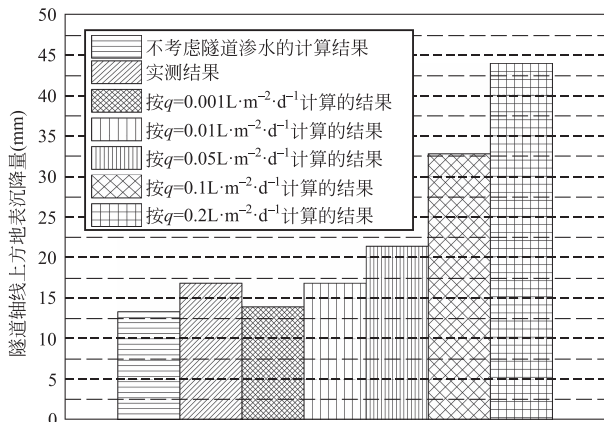


图 6 测试断面 1 计算结果

Fig. 6 Calculation result of test section 1

根据图 6~7, 可得隧道渗水的出现会加大隧道轴线上方的地表沉降量, 且渗流量越大, 地表沉降量越大。对于测试断面 1, 不考虑渗水时沉降量的计算结果为 13.3mm, 小于实测值 16.8mm, 考虑隧道渗水且取 $q = 0.01 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 工况时计算结果为 17.1mm,

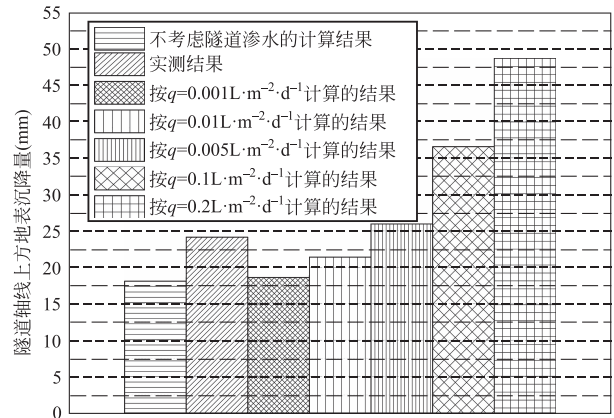


图 7 测试断面 2 计算结果

Fig. 7 Calculation result of test section 2

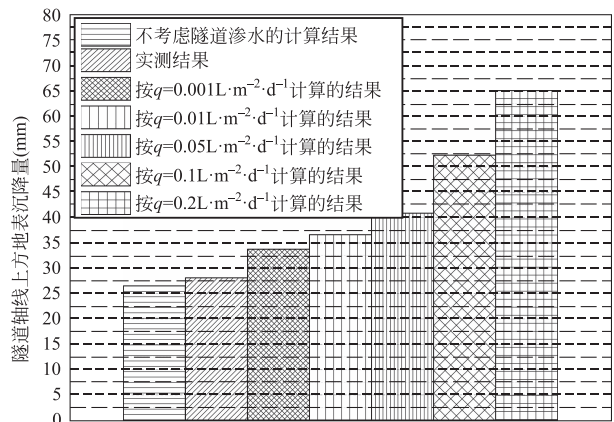


图 8 测试断面 3 计算结果

Fig. 8 Calculation result of test section 3

与实测结果接近; 对于测试断面 2, 不考虑渗水时沉降量的计算结果为 18.1mm, 与实测值 (24.3mm) 相差较大, 接近于 $q = 0.05 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 工况时计算结果 25.9mm; 从测试断面 1 和测试断面 2 的结果分析可看出, 隧道的渗水特性在地表沉降预测中是不可忽视的, 不考虑隧道渗水所得结果会低估地表沉降量, 且隧道渗水量越大, 按传统计算方法造成的误差也越大。

根据图 8 所示的测试断面 3 的对比结果, 实测沉降值约为 28.3mm, 考虑隧道渗水情况下, 沉降计算结果均大于实测结果, 不考虑渗水的计算结果 (26.5mm) 与实测值更为接近。这主要是由于测试断面 3 的粉砂层占比较大, 且隧道洞身主要位于粉砂层中, 粉砂层的地层渗透性相对较高, 固结完成时间较短, 而隧道的渗水多发生于长期运营之后。由此可知, 对于砂层占比较高地层, 本文方法适用性较差。

另外, 从图 6~8 可看出, 地层沉降对隧道渗流量的变化较为敏感, 由于隧道渗流量的变化不易被觉察, 由此引发的沉降也可能被忽视, 影响安全。因此在盾构隧道运营期间, 应加强对隧道渗漏水

检测, 及时采取补漏措施。

4 结 论

(1) 将超孔隙水压力的消散视为地下水向低水头位置和向隧道渗流共同作用的结果, 且假设两种渗流互不干扰, 在前人研究的基础上推导了长期沉降计算式。

(2) 理论计算结果与实测结果的对比表明: 对于黏土占比较高的地层, 不考虑隧道渗水的方法计算结果偏小; 隧道渗水量越大, 引起的地表沉降量越大; 考虑隧道渗水可有效提高长期沉降的计算精度, 验证了所提计算方法的可靠性。砂层占比较大的地层中, 固结完成时间较短, 而隧道渗水多发生于隧道长期运营之后, 按本文的方法计算结果偏大。

(3) 地表沉降对渗流量的变化较为敏感, 由于隧道渗流量的变化不易被觉察, 由此引发的沉降也可能被忽视, 影响安全。因此, 在隧道运营期应加强隧道渗漏水的检测并及时补漏。

参 考 文 献

- [1] 张冬梅, 黄宏伟, 王箭明. 软土隧道地表长期沉降的粘弹性流变与固结耦合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增1): 2359-2362 (Zhang Dongmei, Huang Hongwei, Wang Jianming. Analysis of long-term settlements over tunnels using visco-elastic constitutive model coupled with consolidation theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S1): 2359-2362 (in Chinese))
- [2] 魏纲. 盾构施工引起地面长期沉降的理论计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 2960-2966 (Wei Gang. Research on theoretical calculation of long-term ground settlement caused by shield tunneling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 2960-2966 (in Chinese))
- [3] 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1): 2891-2896 (Wei Gang, Zhou Yang, Wei Xinjiang. Research on post-construction surface settlement caused by shield tunneling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2891-2896 (in Chinese))
- [4] 敖日汗, 张义同. 盾构施工引起的固结沉降分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2157-2161 (Ao Rihan, Zhang Yitong. Analysis of consolidation settlements caused by shield tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2157-2161 (in Chinese))
- [5] Cao Y, Jiang J, Xie K H, et al. Analytical solutions for nonlinear consolidation of soft soil around a shield tunnel with idealized sealing linings [J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61: 144-152
- [6] 张冬梅, 刘印, 黄宏伟. 软土盾构隧道渗流引起的地层和隧道沉降[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41(8): 1185-1190, 1212 (Zhang Dongmei, Liu Yin, Huang Hongwei. Leakage-induced settlement of ground and shield tunnel in soft clay [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(8): 1185-1190, 1212 (in Chinese))
- [7] 张治国, 黄茂松, 杨轩. 基于衬砌长期渗漏水影响的隧道施工扰动诱发超孔隙水压消散及地层固结沉降解[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3135-3144 (Zhang Zhiguo, Huang Maosong, Yang Xuan. Analytical solution for dissipation of excess pore water pressure and soil consolidation settlement induced by tunneling under the influence of long-term leakage [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3135-3144 (in Chinese))
- [8] Mair R J. Tunnelling and geotechnics: new horizons [J]. Géotechnique, 2008, 58(9): 695-736
- [9] O' Reilly M P, Mair R J, Alderman G H. Long-term settlements over tunnels: an eleven-year study at Grimsby [C]// Proceedings of Conference Tunnelling. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1991
- [10] Wongsaroj J, Soga K, Mair R J. Modelling of long-term ground response to tunnelling under St James' s Park, London [J]. Géotechnique, 2007, 57(1): 75-90
- [11] 刘印, 张冬梅, 黄宏伟. 盾构隧道局部长期渗水对隧道变形及地表沉降的影响分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 290-298, 304 (Liu Yin, Zhang Dongmei, Huang Hongwei. Influence of long-term partial drainage of shield tunnel on tunnel deformation and surface settlement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 290-298, 304 (in Chinese))
- [12] 王将, 袁大军, 金大龙, 等. 稳态渗流条件下盾构隧道松动土压力计算模型研究[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2019, 52(增1): 92-98 (Wang Jiang, Yuan Dajun, Jin Dalong, et al. Calculation model for loosening earth pressure of a shield tunnel based on the influence of steady seepage [J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2019, 52(S1): 92-98 (in Chinese))
- [13] 童磊. 软土浅埋隧道变形、渗流及固结性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010 (Tong Lei. Studies on land subsidence, seepage field and consolidation behavior of soft soil around a shallow circular tunnel [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010 (in Chinese))

穆永江(1973—),男,硕士,高级工程师。主要从事盾构隧道施工方面的工作。

袁大军(1961—),男,博士,教授。主要从事盾构隧道方面的教学与研究工作。

王将(1990—),男,博士研究生。主要从事盾构隧道施工方面的研究。

刘博(1989—),男,硕士研究生,讲师。主要从事隧道施工方面的教学与研究工作。

王承震(1980—),男,学士,教授级高级工程师。主要从事隧道与地下工程施工管理与技术研究。