

# 软土盾构隧道渗流引起的地层和隧道沉降

张冬梅<sup>1,2</sup>, 刘 印<sup>1,2</sup>, 黄宏伟<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** 基于复变函数的映射变换, 在考虑衬砌作用的前提下, 推导了稳定渗流时浅埋隧道周围土体中孔隙水压力分布、地层和隧道长期沉降的解析表达式, 并将其运用到上海地铁盾构隧道中, 重点分析了不同渗流条件下的孔隙水压力分布及地层和隧道长期沉降发展规律. 研究表明, 土体与衬砌的相对渗透系数对隧道和地层沉降发展影响显著, 不同相对渗透系数引起的渗流量不同, 渗流量不同是影响隧道周围孔压分布及沉降发展的关键因素; 地表和隧道的沉降随渗流量的增加线性增加, 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.

**关键词:** 盾构隧道; 渗流; 孔压; 长期沉降

**中图分类号:** TU921

**文献标志码:** A

## Leakage-induced Settlement of Ground and Shield Tunnel in Soft Clay

ZHANG Dongmei<sup>1,2</sup>, LIU Yin<sup>1,2</sup>, HUANG Hongwei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** An analytical solution is proposed based on the conformal mapping of the complex variable methods to study the distribution of pore pressure around the tunnel. The tunnel lining is taken into account in the analytical solution. The accuracy of the analytical solution is verified by the numerical solutions. The leakage-induced behavior of Shanghai shield tunnel is studied by using the proposed analytical solution. The results indicate that the relative permeability between soil and lining is essential for water inflow. The water inflow into the tunnel increases with the decrease of the relative permeability of soil and tunnel lining. The settlements of tunnel and ground increase linearly with the increase of water inflow. Therefore, the leakage of the shield tunnel should be monitored carefully and the

corresponding waterproof measures should be adopted for operation tunnel to control the tunnel deformation and ground settlement.

**Key words:** shield tunnel; leakage; pore pressure; long-term settlement

饱和软土地层中, 渗漏水是地铁盾构隧道最主要的病害之一, 是引起地表及隧道长期沉降的主要原因<sup>[1-2]</sup>. 隧道渗流使周围土体孔压不断减小、有效应力逐渐增大, 进而导致土体和隧道沉降<sup>[2]</sup>. 因此, 如何求得隧道周围孔隙水压力分布是求解隧道和地层沉降的关键问题. 针对该问题, 很多学者展开了相关研究, 如: Harr<sup>[3]</sup>、Ming<sup>[4]</sup> 和 Lei<sup>[5]</sup> 在不考虑衬砌影响的条件下, 求解了隧道周围的孔压分布; Arjoui<sup>[6]</sup> 假定衬砌与土体的渗透系数相等, 推导了土中的孔压公式. 但是上述研究忽略了隧道衬砌的作用, 而在盾构隧道中, 衬砌的防水作用非常关键, 因此在研究盾构隧道渗流对地表沉降的影响时, 不考虑隧道衬砌的作用会影响研究成果的合理性和准确性. Shin<sup>[7]</sup>、王秀英等<sup>[8]</sup> 考虑了隧道衬砌的影响, 但是由于缺乏对隧道周围孔隙水压力发展的分析, 因此, 同样不适用于解决隧道渗流导致的地层和隧道沉降问题.

本文以隧道渗流引发的地层和隧道沉降为研究对象, 建立了隧道周围孔隙水压力、地层及隧道长期沉降解析计算方法. 探讨了隧道不同渗流量对孔压及地层和隧道长期沉降的影响规律. 并利用数值方法验证了解析方法的合理性. 得到了隧道渗流对地表和隧道沉降的影响规律.

## 1 隧道渗流形式及渗流等效

### 1.1 隧道渗流的形式

收稿日期: 2012-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(51278379); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB013800); 上海市自然科学基金(12ZR1433600); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1029)

第一作者: 张冬梅(1975—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为软土盾构隧道长期性态及结构安全. E-mail: dmzhang@tongji.edu.cn

当隧道埋深  $h$  远大于隧道直径  $D$  时,隧道周围渗流场受水位边界影响较小,可以直接将渗流路径简化成轴对称形式<sup>[9]</sup>,如图 1 所示,而地铁盾构隧道一般埋深较浅,隧道周围的渗流路径受水位线的影响较大,不能直接简化成轴对称形式.浅埋隧道的渗流可以分为两种形式<sup>[10]</sup>:① 当隧道周围的土体和衬砌渗透系数较大且隧道周围的地下水没有充分补给时,土体中的水位会随着渗流的发生不断降低,如图 2a 所示;② 当隧道周围的土体和衬砌渗透系数较小且隧道处于丰富的地下水区域时,隧道发生渗流对地下水位几乎没有影响,可以认为水位线处于恒定状态,如图 2b 所示.对于地下水非常丰富的上海地区,在不考虑其他因素的影响下,可假设隧道的渗流对水位线不产生影响,即为图 2b 所示的渗流形式.

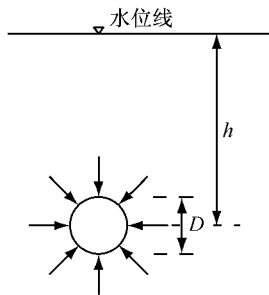


图 1 深埋隧道的渗流形式  
Fig.1 Flow pattern of deep tunnel

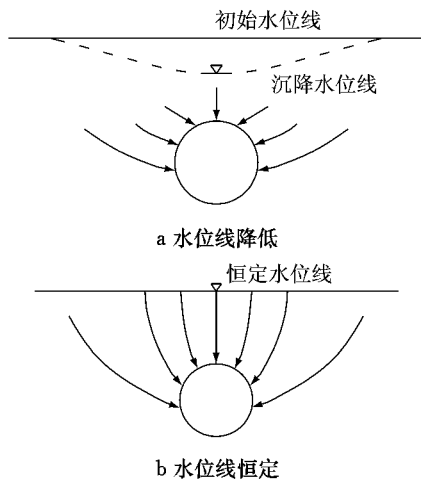


图 2 浅埋隧道渗流的两种形式  
Fig.2 Flow patterns of shallow tunnel

1.2 盾构隧道渗流的等效处理

由于地铁盾构隧道是在管片拼缝、手孔等处发生局部渗漏水<sup>[1]</sup>,隧道衬砌的局部渗透性通常采用 O'Reilly 等<sup>[11]</sup>提出的有限渗透性的概念来描述.有限渗透特性在盾构隧道渗流分析中应用广泛,如:Wongsaroj<sup>[12]</sup>利用该方法对伦敦 St James's 公园下地铁盾构隧道周围的孔压与地表沉降进行了有效分

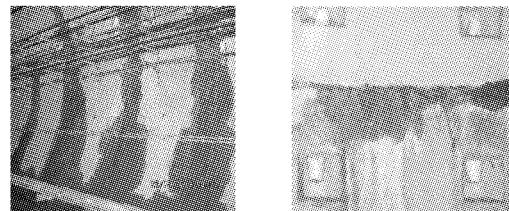
析.工程实践中,盾构隧道衬砌的等效渗透系数难以直接测得,可以通过渗流量或孔压反求得到,如 Li<sup>[13]</sup>给出了渗流速度和衬砌渗透系数之间的关系为:

$$q_l = k_l(p_2 - p_1) / [\gamma_w r_2 \ln(r_2 / r_1)] \quad (1)$$

式中: $q_l$  为衬砌单位时间的渗流量; $p_1$  和  $p_2$  分别为衬砌内、外的孔隙压力; $r_1$  和  $r_2$  分别为衬砌的内、外半径; $k_l$  为隧道衬砌渗透系数; $\gamma_w$  为水的容重.

1.3 影响衬砌等效渗透系数变化的原因

盾构隧道衬砌的等效渗透系数并不是恒定的常数.隧道的施工质量、地质条件、结构变形等因素导致各区间渗漏水情况相差较大(图 3),从而导致各区间衬砌的等效渗透系数变化较大.另一方面,由于地铁隧道运营时间的增加、季节的变化以及人为的修补,同一区间衬砌的等效渗透系数也会有所改变<sup>[14]</sup>.



a 渗水严重      b 渗水不严重  
图 3 盾构隧道的渗漏水

Fig.3 Leakage of shield tunnel

2 渗流计算模型及解析推导

本文利用衬砌等效渗流的方法,假设土体为饱和和各向同性的均匀介质,且隧道经过长期渗流后达到稳定状态.由于衬砌渗透性低且相对厚度较小,假定衬砌内渗流方向以径向为主且衬砌内边界处于等水头状态.计算模型如图 4 所示,其中  $H$  为水位距地面的高度( $H \geq 0$  或  $H < 0$ ), $R$  为隧道外径, $r_0$  为隧道内径.

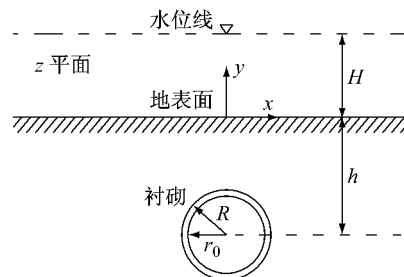


图 4 计算模型

Fig.4 Computational model

在二维平面渗流条件下,均匀各向同性介质的

渗流微分方程为

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

式中,  $\varphi$  是总水头, 为压力水头和位势水头之和, 即:

$$\varphi = p/\gamma_w \quad (3)$$

其中,  $p$  是孔隙压力。

水头边界条件如下: ① 在地表边界, 即  $y=0$  处,  $\phi_{(y=0)} = H$ ; ② 在隧道衬砌内边界,  $\phi_{(r_0)} = h_{r_0}$ , 其中  $\phi_{(r_0)}$  是隧道衬砌内水头。Lei<sup>[5]</sup> 和 El<sup>[15]</sup> 认为隧道衬砌内边界处于等水头状态, 即假设衬砌边界条件为恒定水头, 为简化计算,  $h_{r_0}$  取  $(x = \pm r_0, y = -h)$  处的水头。

### 2.1 土体的渗流计算

浅埋隧道中, 土体的渗流微分方程的求解难以直接利用现有的边界条件, 需采用复变函数将土体区域和对应的边界条件进行转换。复变函数的优势是利用保角变化, 把边界形状复杂的区域变换成边界形状简单的区域并进行求解。对隧道周围的土体, 通过映射函数变换成图 5 所示的圆环区域, 即将  $Z$  平面内的土体区域映射成  $\zeta$  平面内由  $|\zeta|=1$  和  $|\zeta|=\alpha_s$  围成的圆环区域 ( $\alpha_s$  为映射变换后圆环内圆的半径)。其中,  $Z$  平面内表示地表边界的直线  $y=0$  以及表示衬砌外壁土体边界的圆  $x^2+(y+h)^2=R^2$  分别对应  $\zeta$  平面内的圆  $|\zeta|=1$  和圆  $|\zeta|=\alpha_s$ 。  $\rho_s$  是  $\zeta$  平面内的渗流半径。

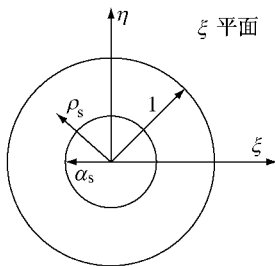


图 5 共型映射区域

Fig.5 Plane of conformal mapping

根据复变函数理论, 取映射函数为<sup>[16]</sup>

$$z = w(\zeta) = -iA(1 + \zeta)/(1 - \zeta) \quad (4)$$

式中:  $i$  表示虚数;  $A = h(1 - \alpha_s^2)/(1 + \alpha_s^2)$ ;  $z$  为  $Z$  平面内纵向坐标。

$$\alpha_s = h/R - \sqrt{(h/R)^2 - 1} \quad (5)$$

$Z$  平面内的渗流微分方程转化为  $\zeta$  平面内的渗流微分方程, 在  $\zeta$  平面内根据平面问题的对称性, 可得:

$$\frac{\partial^2 \phi_s}{\partial \rho_s^2} + \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial \phi_s}{\partial \rho_s} = 0 \quad (6)$$

式中:  $\phi_s$  为  $\zeta$  平面内的总水头。

式(6)对应的边界条件为: ① 在地表边界:  $|\zeta|=1$ , 即  $\phi_{s(\rho_s=1)} = \phi_{s(y=0)} = H$ ; ② 在土体与隧道交界处:  $|\zeta|=\alpha_s$ , 即  $\phi_{s(\rho_s=\alpha_s)} = h_R$ , 其中,  $h_R$  是土体与衬砌交界处的水头高度。

方程(6)的解为:

$$\phi_s = C_1 \ln \rho_s + C_2 \quad (7)$$

式中:  $C_1$  和  $C_2$  为方程求解时产生的常数, 可以通过边界条件确定。代入相应的水头边界条件得:

$$\phi_s = (h_R - H) \ln \rho_s / \ln \alpha_s + H \quad (8)$$

根据复变函数的原理可知,  $\zeta$  平面与  $Z$  平面内参数的相互关系为

$$x = \frac{2\eta a}{(1 - \zeta)^2 + \eta^2} \quad (9a)$$

$$y = \frac{a(\eta^2 + \zeta^2 - 1)}{(1 - \zeta)^2 + \eta^2} \quad (9b)$$

$$\zeta = \frac{x^2 + y^2 - a^2}{x^2 + (y - a)^2} \quad (10a)$$

$$\eta = \frac{2ax}{x^2 + (y - a)^2} \quad (10b)$$

式(9)–(10)中, 取  $a = \sqrt{h^2 - R^2}$ 。则:

$$\rho_s = \sqrt{\zeta^2 + \eta^2} = \sqrt{\frac{x^2 + (y + \sqrt{h^2 - R^2})^2}{x^2 + (y - \sqrt{h^2 - R^2})^2}} \quad (11)$$

式中,  $R^2 \leq x^2 + (y + h)^2$ 。将式(11)代入式(8), 得土体中任意点的总水头为

$$\phi_s = \frac{h_R - H}{\ln \alpha_s} \cdot \ln \sqrt{\frac{x^2 + (y + \sqrt{h^2 - R^2})^2}{x^2 + (y - \sqrt{h^2 - R^2})^2}} + H \quad (12)$$

隧道边界处土体每延米的渗流量为

$$Q_s = k_s \int_0^{2\pi} \frac{\partial \phi_s}{\partial \rho_s} \rho_s d\theta = \frac{2\pi k_s}{\ln \alpha_s} (h_R - H) \quad (13)$$

式中:  $k_s$  为土体的渗透系数。

由于  $\phi_s = p_s/\gamma_w + z$ ,  $z = y$ , 求得隧道周围土体任意点的孔压为

$$p_s(x, y) = \frac{(h_R - H)\gamma_w}{\ln \alpha_s} \ln \sqrt{\frac{x^2 + (y + \sqrt{h^2 - R^2})^2}{x^2 + (y - \sqrt{h^2 - R^2})^2}} + (H - y)\gamma_w \quad (14)$$

式中,  $R^2 \leq x^2 + (y + h)^2$

### 2.2 衬砌的等效渗流计算

由于假定衬砌的等效渗流方向以径向为主, 故衬砌的渗流可以简化为轴对称形式, 渗流微分方程为

$$\frac{\partial^2 \phi_L}{\partial \rho_L^2} + \frac{1}{\rho_L} \frac{\partial \phi_L}{\partial \rho_L} = 0 \quad (15)$$

式中:  $\phi_L$  和  $\rho_L$  分别为  $Z$  平面衬砌内的总水头和渗流半径。

衬砌对应的水头边界条件为: ① 当  $\rho_L = R$  时,  $\phi_L$

$=h_R$ ; ② 当  $\rho_L=r_0$  时,  $\phi_L=h_{r_0}$ .

根据渗流微分方程解的形式及相应的边界条件可得:

$$\phi_L = \frac{h_R - h_{r_0}}{\ln(R/r_0)} \cdot \ln(\rho_L/r_0) + h_{r_0} \quad (16)$$

则每延米的渗流量为

$$Q_L = k_1 \int_0^{2\pi} \frac{\partial \phi_L}{\partial \rho_L} \rho_L d\theta = 2\pi k_1 \frac{h_R - h_{r_0}}{\ln(R/r_0)} \quad (17)$$

式中:  $k_1$  是盾构隧道衬砌的等效渗透系数.

### 2.3 孔压分布

由于土体和隧道衬砌渗流量相等, 由  $Q_L=Q_s$  可得:

$$2\pi k_1 \frac{h_R - h_{r_0}}{\ln(R/r_0)} = \frac{2\pi k_s (h_R - H)}{\ln \alpha_s} \quad (18)$$

由式(18)可得  $h_R$ , 所示如下:

$$h_R = \frac{(k_s/k_1) \ln(R/r_0) \cdot H - \ln \alpha_s \cdot h_{r_0}}{(k_s/k_1) \ln(R/r_0) - \ln \alpha_s} \quad (19)$$

进而可得隧道的渗流量为:

$$Q = 2\pi k_s k_1 (H - h_{r_0}) / [k_s \ln(R/r_0) - k_1 \ln \alpha_s] \quad (20)$$

从式(20)可以看出, 相对渗透系数( $k_s/k_1$ )会影响隧道的渗流量, 另一方面, 根据渗流量也可求得衬砌的等效渗透系数  $k_1$ . 通过式(14)和(19)可得土中任意点的孔压为

$$p_s(x, y) = \frac{(h_R - H)\gamma_w}{\ln \alpha_s} \cdot \ln \sqrt{\frac{x^2 + (y + \sqrt{h^2 - R^2})^2}{x^2 + (y - \sqrt{h^2 - R^2})^2}} + (H - y)\gamma_w$$

其中,

$$h_R = \frac{(k_s/k_1) \ln(R/r_0) \cdot H - \ln \alpha_s \cdot h_{r_0}}{(k_s/k_1) \ln(R/r_0) - \ln \alpha_s} \quad (21)$$

由此可知, 隧道周围的孔压分布公式  $p_s(x, y)$  是土体与衬砌相对渗透系数的函数.

## 3 渗流引起的沉降

根据有效应力原理, 假设土体变形为弹性变形且土体均质各向同性, 对平面应变问题, 由广义胡克定律得:

$$\varepsilon_x = (1 + \nu)[(1 - \nu)\sigma'_x - \nu\sigma'_y]/E \quad (22a)$$

$$\varepsilon_y = (1 + \nu)[- \nu\sigma'_x + (1 - \nu)\sigma'_y]/E \quad (22b)$$

式中:  $\nu$  为泊松比;  $E$  为土体弹性模量;  $\sigma'_x$ 、 $\sigma'_y$  分别为土体水平和竖直方向的有效应力.  $\sigma'_x = K_0\sigma'_y$ , 其中  $K_0$  为静止侧压力系数, 进而可得:

$$\varepsilon_y = (1 - \nu - \nu K_0)(1 + \nu) \cdot (\sigma'_x + \sigma'_y) / [(1 + K_0)E] \quad (23)$$

从式(23)可以看出, 渗流导致有效应力发生改

变, 进而造成土体沉降, 由此得出土体任一点的竖向应变:

$$\varepsilon_h = \frac{1 - \nu - \nu K_0}{1 + K_0} \frac{(1 + \nu)}{E} (\Delta\sigma'_x + \Delta\sigma'_y) \quad (24)$$

假设外荷载不变, 土体任意点的总应力不因渗流固结而改变, 即  $\sigma = \sigma' + p$  恒定( $\sigma'$  为有效应力,  $p$  为孔隙水压力). 隧道经过长期渗流稳定后, 有效应力的增加量与孔隙水压力的减小量相等, 即  $\Delta\sigma' = -\Delta p$ .

对土体任意位置, 由渗流引起的孔压变化量为

$$\Delta p = p_s(x, y) - p_0(x, y) \quad (25)$$

式中,  $p_0$  为该点的静水压力,  $p_0 = -\gamma_w y$ . 假设固结渗流过程中  $K_0$  保持不变且  $H=0$ , 由此可得  $\varepsilon_h$  为

$$\varepsilon_h = - \frac{(1 - \nu - \nu K_0)(1 + \nu)}{E} [p_s(x, y) - p_0] \quad (26)$$

则对应的地表沉降为

$$S = \int_0^{h_y} \varepsilon_h dy = - \frac{(1 - \nu - \nu K_0)(1 + \nu)}{E} \cdot \int_0^{h_y} \left[ \frac{(h_R - H)\gamma_w}{\ln \alpha_s} \ln \sqrt{\frac{x^2 + (y + \sqrt{h^2 - R^2})^2}{x^2 + (y - \sqrt{h^2 - R^2})^2}} \right] dy \quad (27)$$

其中,  $h_y$  为地表沉降的影响深度.

对式(27), 若取  $x=0$ , 可以近似得到地表最大沉降量; 若取  $x=0$  且从隧道底部坐标开始积分, 可近似得到隧道的沉降量.

## 4 渗流量对孔压及沉降影响规律

### 4.1 工程背景

上海地铁 2 号线人民公园站—石门路站区间盾构隧道中心埋深  $h=15$  m, 隧道外径为 6.2 m, 内径为 5.5 m, 管片厚度为 0.35 m. 隧道渗流计算采用图 4 所示的计算模型, 且假设  $H=0$ . 为简化计算, 取土的加权平均弹性模量为 6.8 MPa, 泊松比为 0.3, 隧道周围土体的渗透系数为  $3 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 具体的土体参数见相关研究<sup>[17]</sup>.

### 4.2 渗流量的确定

根据《地下工程防水技术规程》(GB108—87), 上海地铁隧道防水等级为二级, 隧道容许渗水量为  $0.1 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . 但考虑到实际地铁隧道渗水情况的多样性, 本文分析了隧道渗流量  $q$  分别为 0.01、0.05、0.10 和 0.15  $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  时, 隧道周围的孔压及地表沉降发展. 根据渗流解析式(20)可得到不同渗流量对应的隧道等效渗透系数及土体与隧道

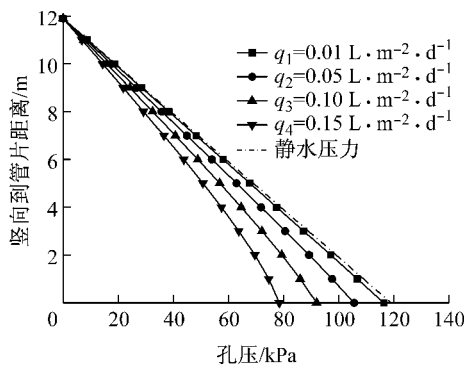
的相对渗透系数,见表 1.从表 1 中可以看出,相对渗透系数对隧道的渗流量影响显著.

表 1 计算工况  
Tab.1 Study cases

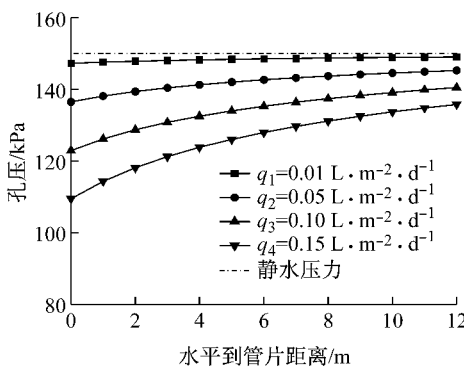
工况	渗流量/ ( $L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ )	土体渗透 系数/ ( $10^{-9} m \cdot s^{-1}$ )	衬砌等效渗透 系数/ ( $10^{-11} m \cdot s^{-1}$ )	相对渗透 系数 ( $k_s/k_l$ )
1	0.01	3.00	2.92	1 028
2	0.05	3.00	1.57	191
3	0.10	3.00	3.50	86
4	0.15	3.00	5.89	51

### 4.3 孔压分布规律及对比较证

不同渗流量条件下计算得到的隧道周围土体的孔压分布如图 6 所示.图 6a 表示隧道中心竖向不同深度处的孔压,图 6b 表示隧道中心水平向不同位置处的孔压.由此可见,由于隧道渗流的影响,隧道周围的孔压出现明显下降.



a 隧道中心竖向对应的孔压



b 隧道中心水平向对应的孔压

图 6 隧道周围土体的孔压分布

Fig.6 Development of pore pressure around tunnel

当  $q=0.01 L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  时,隧道渗流并不明显,土体中的孔压近似等于静水压力;当  $q=0.15 L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  时,隧道渗流严重,孔压明显减小,此时隧道周围的孔压明显小于静水压力.由此可见隧道周围的孔压分布与渗流量密切相关.

从表 1 可以看出,渗流量不同时,衬砌的等效渗

透系数相差较大,土体与衬砌的相对渗透系数亦变化较大.根据孔压解析式(21)可知,土体与衬砌的相对渗透系数是影响  $h_R$  的关键因素, $h_R$  决定了土体孔压分布.可见,土体与衬砌的相对渗透系数越小,隧道的渗流量越大,对隧道周围孔压的影响也较明显.

### 4.4 渗流导致的沉降及对比较证

当渗流量  $q$  分别为  $0.01, 0.05, 0.10$  和  $0.15 L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  时,计算得到的地表沉降如图 7 所示.由图 7 可见,渗流可以导致地表发生较大沉降,且沉降量随渗流量的增加明显增大.当  $q=0.10 L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  时,隧道中心处的地表沉降为  $-51 mm$ ;当渗流量  $q=0.15 L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  时,隧道中心处的地表沉降达到  $-77 mm$ .可见,地表沉降对渗流量的增加非常敏感.由于混凝土本身散湿量为  $0.012 \sim 0.024 L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ,衬砌渗流量的增加不易被觉察,但却对隧道沉降影响显著,这不利于运营隧道的维护.

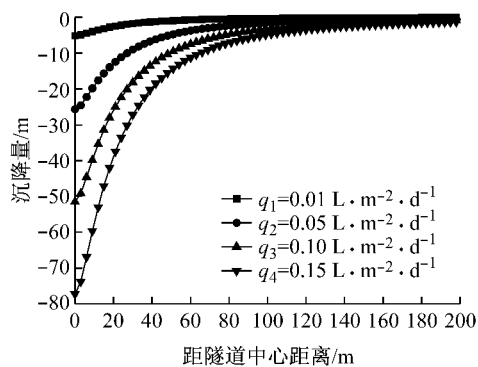


图 7 渗流量对地表沉降的影响

Fig.7 Influence of water inflow on ground surface settlement

渗流量也会影响地表沉降的分布范围.当  $q=0.15 L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  时,地表沉降的影响范围可以延伸到距隧道中心约 200 m 处;当  $q=0.01 L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  时,由于地表沉降较小,沉降的影响范围也相对很小.

Lee 等<sup>[17]</sup>对此区间隧道进行了长期监测,测得的地表长期沉降量约为  $47 mm$ ,与本文计算的  $q=0.1 L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  的地表沉降量相近.因此,将隧道的渗流量取为  $0.1 L \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$  是合理的,对应的隧道等效渗透系数约为  $3.5 \times 10^{-11} m \cdot s^{-1}$ .《地铁设计规范》(GB50157—2003)要求盾构隧道管片混凝土的渗透系数不宜大于  $5 \times 10^{-13} m \cdot s^{-1}$ ,但由于接缝、注浆孔等局部渗水导致隧道的等效渗透系数远大于管片本身的渗透系数.

由于地层中往往埋设管线,隧道渗流引起的不

同深度的地层沉降也应引起重视. 图 8 表示距隧道水平距离分别为 0、5 和 20 m 不同深度处的地层沉降. 从图 8 可以看出, 在隧道中心竖向方向, 地层沉降最显著, 而离隧道水平距离越远, 地层沉降越不明显. 当渗流量较大时, 这种差异更加明显.

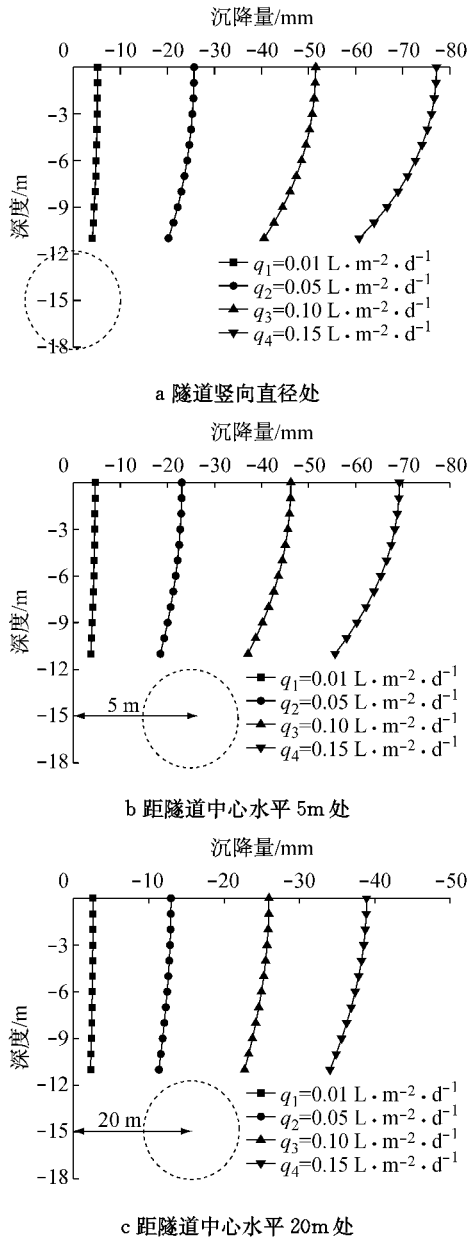


图 8 不同渗流量时不同深度处地层沉降  
 Fig.8 Influence of water inflow on ground settlement profile

隧道中心地表沉降量、隧道沉降量与渗流量的关系如图 9 所示. 从图中可以看出, 渗流量对隧道沉降的影响非常显著, 地表沉降量、隧道沉降量与渗流量成正比例关系.

根据式(27)可以计算隧道沉降, 经对比发现, 渗流量不同时, 隧道沉降  $S$  与地表沉降  $S_c$  的比值相

同, 约为 0.74. 由于地表沉降和隧道沉降计算的差异仅仅体现在积分区间不同, 即  $S/S_c$  的比值只与  $h$  和  $R$  有关. 因此, 由渗水导致的隧道沉降与地表沉降的比值与隧道的埋深和直径密切相关, 与土体其他物理力学特性无关.

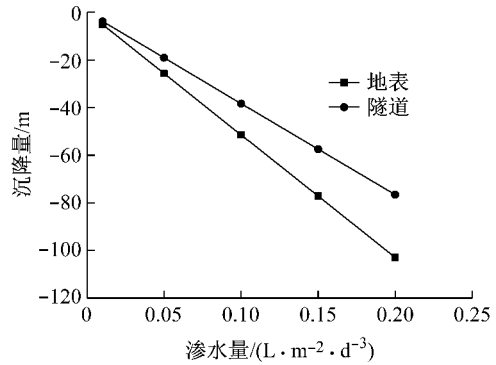


图 9 不同渗水量时地表、隧道沉降的关系  
 Fig.9 Surface and tunnel settlements ratio with water inflow

### 5 结 语

本文利用解析方法分析了盾构隧道的渗流对隧道周围孔压及地表和隧道的长期沉降的影响, 得到如下主要结论:

- (1) 土体与衬砌的相对渗透系数决定了隧道周围的孔隙水压力分布、地层及隧道沉降发展.
- (2) 渗流量越大, 隧道周围的孔隙水压力越小, 地层及隧道沉降越明显; 地表沉降和隧道沉降对渗流量非常敏感. 由于隧道渗流量的变化不易被觉察, 由此引发的隧道沉降也可能被忽视, 影响隧道结构安全.
- (3) 地表沉降量、隧道沉降量与隧道渗流量成线性关系. 而且隧道沉降量与地表沉降量的比值仅与隧道的埋深和直径有关.

### 参考文献:

[1] 张冬梅, 黄宏伟, 杨俊. 衬砌局部渗流对软土隧道地表长期沉降的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1430.  
 ZHANG Dongmei, HUANG Hongwei, YANG Jun. Influence of partial drainage of linings on long-term surface settlement over tunnels in soft soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1430.  
 [2] Mair R J, Taylor R N. Bored tunnelling in the urban environment: state-of-the-art report and theme lecture [C]// Proceeding of 14th International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam: Balkema A A, 1997: 2353-2385.