

# 注浆作用下渗漏水对隧道和地层沉降影响

张冬梅<sup>1,2</sup>, 冉龙洲<sup>2</sup>, 闫静雅<sup>3</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 土木工程学院, 上海 200092;  
3. 上海地铁维护保障有限公司, 上海 200070)

**摘要:** 基于衬砌-注浆层-土层相对渗透系数, 提出了能够综合反映注浆体和隧道衬砌共同作用的相对渗透系数. 通过数值模拟, 建立了该系数与隧道渗漏水引起的衬砌受力、变形和地层位移之间的关系. 在此基础上, 建立了能够考虑注浆影响的评价方法, 该方法能够基于隧道完全渗水和完全不渗水两种极端条件预测隧道有限渗水对地层和隧道结构的影响.

**关键词:** 软土; 盾构隧道; 渗漏水; 注浆

**中图分类号:** TU94

**文献标志码:** A

## Leakage-Induced Ground and Tunnel Response Considering the Effect of Grouting

ZHANG Dongmei<sup>1,2</sup>, RAN Longzhou<sup>2</sup>, YAN Jingya<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Maintenance Management of Shanghai Metro Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

**Abstract:** The effect of grouting on tunnel leakage was studied in terms of the leakage-induced settlements of ground and tunnel, and the convergence and internal forces of tunnel, using FEM simulation. Based on the numerical results, a dimensionless parameter  $R$  integrating the permeability and geometry of grouting and tunnel lining was suggested to study the effect of grouting. Using this parameter, the effect of grouting on tunnel leakage can be predicted. Moreover, the permeability state of fully impermeable, infinite permeable and fully permeable could be defined in terms of the values of  $R$ . The numerical simulation indicates that the leakage-induced internal forces is negligible and may not affect the tunnel safety from the point of view of tunnel bearing capacity.

**Key words:** clay; shield tunnel; tunnel leakage; grouting

对于建造在饱和软黏土中的隧道, 地下水会通过管片接头、混凝土裂缝和注浆孔渗流到隧道内部, 造成隧道渗漏水. 为了研究隧道渗漏水对地层和隧道结构的影响, 文献[1-8]对此展开了理论研究, 发现软土地层中的盾构隧道渗漏水会导致隧道周围孔隙水压力下降, 土体有效应力增加, 造成隧道和地层附加沉降, 增加隧道结构的内力, 并引起隧道结构横向变形, 影响盾构隧道结构安全. 为了控制隧道渗漏水, 注浆成为工程上控制隧道渗漏水的常用方法之一. 而作为控制地表沉降的盾构隧道施工过程中的同步注浆也常常被认为是盾构隧道渗漏水的第一道防线. 刘志春等<sup>[9]</sup>采用数值模拟对注浆在岩石隧道防水中的应用展开了研究, 指出注浆对岩石隧道防水和受力具有双重作用. 而目前对盾构隧道注浆的研究主要集中在注浆对沉降的影响方面<sup>[10-12]</sup>, 注浆对软土盾构渗漏水影响研究较少, 其影响规律和影响程度还没有得到充分的认识, 缺乏相关的预测和评价方法.

基于此, 本文旨在通过理论分析和数值模拟, 揭示考虑注浆影响下的隧道渗漏水对地层和隧道沉降、隧道结构受力和变形的影响规律, 建立能综合考虑注浆体影响的隧道渗漏水预测方法, 为盾构隧道渗漏水治理提供技术支撑. 论文首先借助理论分析方法, 提出了能够考虑注浆体和隧道衬砌共同作用的相对渗透系数; 利用数值模拟, 分析了考虑注浆体影响下渗漏水引起的地层和隧道沉降、隧道结构受力和变形特点和规律, 提出了隧道渗漏水对地层和隧道结构影响的预测方法.

收稿日期: 2016-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51278379, 51478344); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB013800); 上海青年科技启明星计划(14QB1401100)

第一作者: 张冬梅(1975—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为盾构隧道长期性态及运营隧道结构安全.  
E-mail: dmzhang@tongji.edu.cn

# 1 考虑注浆和隧道衬砌共同作用的相对渗透系数

文献[4,5,8,13]研究表明,衬砌和土体的相对渗透系数是影响地层沉降和隧道变形、受力的关键因素,因此,在目前关于隧道渗透特性的研究中,通常采用隧道衬砌和土体的相对渗透系数来衡量隧道的渗漏特性,但这种方法无法考虑注浆的影响.考虑注浆体影响下的隧道渗漏水示意图如图 1 所示.当注浆层具有止水效果时,根据达西定律,孔隙水在土体、注浆层和衬砌三层介质中的渗流连续性方程可以表示为

$$k_s \frac{L_c \gamma_w - u_g}{C_{clay} \gamma_w} = k_g \frac{u_g - u_1}{\gamma_w t_g} = k_1 \frac{u_1 - 0}{\gamma_w t_1} \quad (1)$$

式中: $t_1$  为衬砌厚度; $t_g$  为注浆体厚度; $k_g$  为注浆体渗透系数; $k_1$  为隧道衬砌渗透系数; $k_s$  为土体渗透系数; $\gamma_w$  为水的重度; $u_g, u_1$  分别为注浆层外和衬砌外的孔隙水压力; $L_c$  与  $C_{clay}$  的定义如图 1 所示.

公式(1)表明,在隧道渗漏水发展过程中,隧道的渗漏水程度取决于  $u_1$  的大小,而  $u_1$  则受到  $u_g$  的影响,因此,考虑注浆影响条件下,根据式(1), $u_g$  可以表示为式(2)所示的形式.

$$\frac{u_g}{L_c \gamma_w} = \frac{k_s / C_{clay}}{k_g \left( t_g + \frac{t_1}{k_1} k_g \right) + k_s / C_{clay}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{t_g / k_g + t_1 / k_1} \frac{C_{clay}}{k_s}} \quad (2)$$

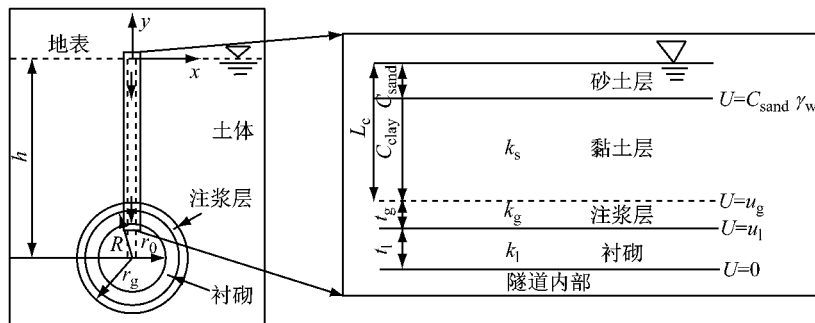


图 1 考虑注浆影响的隧道渗水  
Fig.1 Schematic of tunnel leakage

由式(2)可知,当注浆体具有止水效果时,注浆层外侧的孔隙水压力  $u_g$  取决于隧道和注浆层的几何参数以及土体、注浆体和隧道衬砌之间的相对渗透特性.为了表示上述因素的影响,定义了如式(3)所示的参数  $R$ .量纲一参数  $R$  是一个能综合反应土体、衬砌、注浆层三者相对渗透系数影响的参数.当注浆层的渗透系数  $k_g$  大于或者接近隧道周边土体渗透系数  $k_s$  时,可以忽略注浆层的影响.

$$R = \begin{cases} \frac{C_{clay}/k_s}{t_1/k_1 + t_g/k_g} & k_g < k_s \\ \frac{C_{clay}/k_s}{t_1/k_1} & k_g \geq k_s \end{cases} \quad (3)$$

公式(3)中的相对渗透系数  $R$  不仅反映了土体、注浆层、衬砌相对渗透系数的影响,还反映了隧道上覆黏性土厚度、衬砌厚度和注浆层厚度等几何参数的影响.

上述分析中,隧道衬砌的渗透系数  $k_1$  采用了等效的均匀渗透系数.事实上,隧道的渗漏水通常发生在管片接头、混凝土裂缝和注浆孔等位置,隧道为局部有限渗漏水.Zhang 等<sup>[14]</sup>对隧道接头局部渗漏水特性进行数值模拟,发现局部有限渗漏水对隧道周围孔隙水压力的分布影响较大,而对于地层位移和隧道位移而言,采用等效均匀的渗透系数分析方法,在工程上是偏于安全的,因此,在隧道渗漏水影响研究中,采用隧道等效均匀渗透系数是可行的.隧道等效均匀的渗透系数可以通过隧道单位面积的渗水速率进行确定<sup>[15]</sup>.

# 2 注浆对隧道渗漏水引起的隧道和地层沉降影响分析

## 2.1 计算模型

隧道渗漏水分析中,将无限长的管状隧道简化

为二维平面应变模型进行考虑.二维平面应变模型在隧道渗漏水分析中已经得到广泛的应用.Zhang 等<sup>[14]</sup>对隧道渗漏水的二维平面计算结果与解析解结果和现场实测数据进行了对比,验证了二维平面模型在分析渗漏水对隧道沉降、变形和受力影响方面具有合理性.本文以隧道渗漏水对地层和隧道的影响

为分析重点,数值模拟中没有考虑隧道施工过程中对隧道沉降、变形和受力的影响。

数值模拟的计算模型如图 2 所示,隧道中心的埋深为 15 m,隧道外径 6.2 m,内径 5.5 m,管片厚度 0.35 m,根据黄宏伟等<sup>[16]</sup>对地铁盾构隧道注浆层探测成果,注浆层厚度取为 0.10 m.采用 ABAQUS 进行数值计算.为了减小数值模拟边界的影响,模型在横向上取 100 m,纵向上取 60 m.土体、衬砌和注浆层均采用实体单元进行模拟,土体和注浆层之间、注浆层和衬砌之间的接触均采用 ABAQUS 有限元提供的“tie”接触。

数值模拟中有两种边界条件,一是位移边界条件,另一种为渗流边界条件.位移边界条件设置为:地表自由;模型侧向限制水平位移,竖向位移自由;模型底面约束竖向位移.渗水边界条件为:模型底面不渗水;模型侧边保持为静止水压力;隧道衬砌内边界及地表处的孔压设置为零。

### 2.2 计算参数

Zhang 等<sup>[14]</sup>通过研究发现,隧道渗漏水在控制标准内时,仍会引起土体塑性区的发展,因此,隧道渗漏水分析中,土体采用摩尔-库伦弹塑性本构模型,土体的物理力学参数如表 1 所示。

对盾构隧道而言,考虑到接头对隧道管片抗弯

刚度的降低影响,隧道采用具有等效抗弯刚度的连续梁来表示,其等效刚度可表示为  $\eta EI$ ,  $EI$  为不考虑隧道接头影响的管片横向抗弯刚度,  $\eta$  为隧道横向抗弯刚度有效率。文献[17-19]对隧道横向刚度有效率开展了研究,徐凌<sup>[19]</sup>针对上海盾构隧道开展了模型试验,分别研究了错缝拼装和通缝拼装下隧道的横向刚度有效率,得到错缝及通缝拼装下刚度有效率分别为 0.75 和 0.67.在本文的研究中,取隧道横向刚度有效率为 0.67.隧道衬砌采用弹性本构模型,物理力学参数如表 2 所示.根据水泥注浆体材料特性,可硬性浆液注浆体的弹性模量取 400 MPa,泊松比为 0.2。

由于隧道有不同程度的渗漏,根据公式(3),隧道的渗漏水可以采用  $R$  来表示.为了揭示注浆条件下渗漏水对隧道和地层沉降的影响规律,建立能够考虑注浆影响的隧道渗漏水影响预测方法,隧道和注浆体的渗透系数选取了较大的范围,隧道的相对渗透系数  $k_1/k_s$  从 10 变化到 0.001,注浆体的渗透系数  $k_g/k_s$  从 10 变化到 0.01.除此之外,数值计算中还考虑了两个极端状态,隧道完全渗水和完全不渗水.完全渗水时注浆体和隧道衬砌的渗透特性与土体相同;完全不渗水时,注浆体和衬砌为不渗水边界。

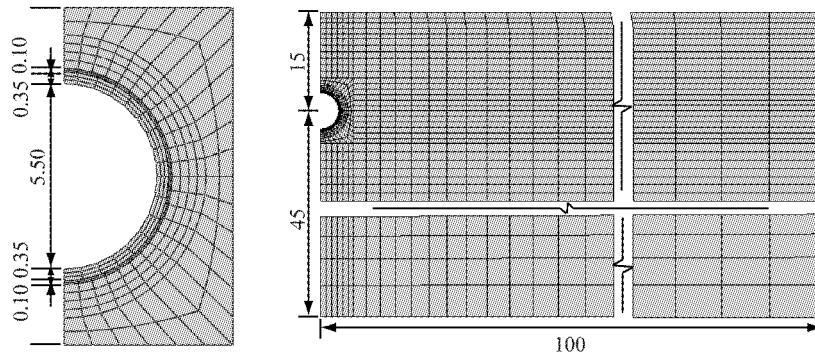


图 2 数值计算模型(单位:m)  
Fig.2 FEM mesh(unit:m)

表 1 土体物理力学参数<sup>[6]</sup>  
Tab.1 Parameters of soil

土体编号	名称	厚度/m	重度/( $kN \cdot m^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比	孔隙比	渗透系数/( $m \cdot s^{-1}$ )	黏聚力/kPa	内摩擦角/( $^{\circ}$ )
②	粉质黏土	2.4	18.7	8.6	0.32	0.97	$3.30 \times 10^{-9}$	13.0	14.8
③	淤泥质粉质黏土	1.6	18.0	6.5	0.34	1.13	$2.70 \times 10^{-9}$	7.0	18.7
④	淤泥质黏土	4.0	17.0	6.5	0.36	1.44	$1.82 \times 10^{-9}$	10.0	9.8
⑤-1	粉质黏土	12.0	18.3	10.6	0.33	1.01	$3.00 \times 10^{-9}$	10.0	15.9
⑤-2	夹薄砂层粉质黏土	10.0	18.3	10.6	0.29	0.98	$2.50 \times 10^{-7}$	10.0	19.1
⑥	粉质黏土	3.0	19.9	42.1	0.30	0.70	$3.00 \times 10^{-9}$	12.8	30.0
⑦	粉砂夹黏土层		20.1	56.1	0.30	0.64	$2.00 \times 10^{-7}$	26.3	6.0

表 2 隧道管片物理力学参数

Tab.2 Parameters of tunnel lining

隧道外径/m	隧道内径/m	管片厚度/m	管片重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
6.2	5.5	0.35	25.0	23.115	0.167

Zhang 等<sup>[14]</sup>对隧道均匀渗漏条件下,隧道周围孔隙水压力的变化进行了详细的分析,因此,本文不再对此展开,而重点通过分析隧道渗漏水对地层和隧道沉降、隧道结构受力和变形的影响规律,确定注浆对隧道渗漏水的影响。

### 2.3 注浆对渗漏水引发的对地层和隧道沉降的影响

不同渗漏条件下,渗漏引起的隧道和地表沉降亦不同.隧道渗漏程度越严重,引起的地表沉降也就越大,不同程度的渗漏水引发的地表沉降在量值上位于完全渗水和完全不渗水之间,而不同程度的渗漏水引起的地表沉降槽分布是相似的<sup>[15]</sup>.工程实践中,由于隧道渗漏条件各不相同,地层条件也有较大的差异,因此,依据某一特定地层和渗漏条件得到的隧道渗漏水引发的地层和隧道沉降、变形和受力绝对值缺乏普遍的指导意义.因此,隧道渗漏对地层和隧道影响的绝对值不是本文关注的重点,而揭示注浆-衬砌耦合作用下隧道渗漏水对隧道结构和地层沉降的影响规律,建立能够考虑注浆影响的隧道渗漏水预测方法是本文研究的核心。

考虑到隧道在有限渗水条件下对地层和隧道的影响在量值上位于完全渗水和完全不渗水之间,而影响规律相同的特点,将有限渗水条件下的地层沉降采用量纲一的相对值来表示<sup>[6]</sup>,如式(4)和图3所示,地层的相对沉降为

$$D_s = (\delta - \delta_{imp}) / (\delta_{per} - \delta_{imp}) \quad (4)$$

式中: $\delta$ 为隧道渗漏水引起的地表最大沉降; $\delta_{imp}$ 为隧道完全不渗水时的地表最大沉降; $\delta_{per}$ 为隧道完全渗漏水时的最大地表沉降。

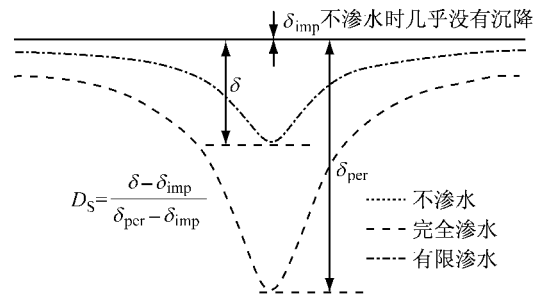
隧道渗漏产生的隧道相对沉降 $D_{ss}$ 如式(5)所示。

$$D_{ss} = (S_t - S_{timp}) / (S_{tper} - S_{timp}) \quad (5)$$

式中: $S_t$ 为隧道渗漏水引发的隧道沉降; $S_{timp}$ 为完全不渗水条件下的隧道沉降; $S_{tper}$ 为完全渗水条件下的隧道沉降。

因为没有考虑施工引起的地层位移,根据公式(4)可知,对于衬砌完全不渗水的情况, $D_s$ 和 $D_{ss}$ 为0;对于衬砌完全渗水的情况, $D_s$ 和 $D_{ss}$ 则为1,如图3所示。

不同注浆渗透特性条件下计算得到的 $D_s$ 和 $R$ 关系如图4所示.为了验证上述数值计算和参数 $R$

图 3  $D_s$  的定义<sup>[6]</sup>Fig.3 Normalized ground surface settlement  $D_s$  under various tunnel leakage conditions

的合理性,利用 Wangsaroj<sup>[6]</sup>和 Mair<sup>[13]</sup>中关于伦敦地铁渗漏水引发的地层沉降资料,采用本文的方法进行分析对比,结果见图4.由图4可知,采用 $R$ 能够很好地模拟隧道渗漏水特性,验证了本文分析方法的可靠性。

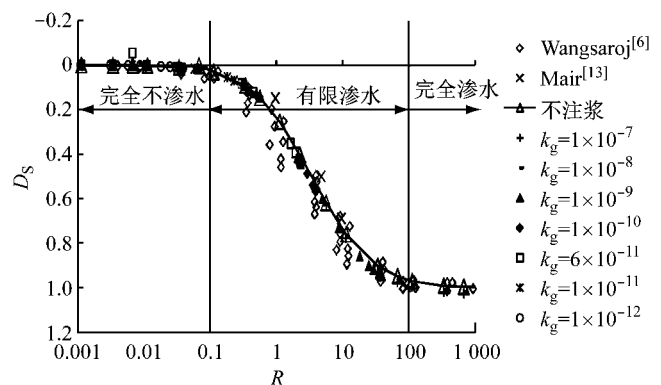
图 4  $D_s$  与  $R$  的关系Fig.4 Normalized ground surface settlement  $D_s$  versus relative permeability parameter  $R$ 

图5所示为隧道渗水引起的隧道相对沉降 $D_{ss}$ 与相对渗透系数 $R$ 的关系.可以看出,隧道相对沉降 $D_{ss}$ 和地层相对沉降 $D_s$ 有相似的变化规律.根据图4和图5中 $D_s$ 和 $D_{ss}$ 的分布特性,可以看出,当 $R \leq 0.1$ 时,隧道可以当作完全不渗水状态;当 $R \geq 100$ 时,隧道可以当作完全渗水状态;当 $0.1 < R < 100$ 时,隧道为有限渗水状态。

根据式(4),当不考虑注浆体的影响时, $R$ 增大, $D_s$ 和 $D_{ss}$ 也相应增加,隧道渗漏引起的地层沉降也相应增加.由此可知,根据注浆对 $R$ 的影响,可以分析注浆体对隧道渗漏水的影响。

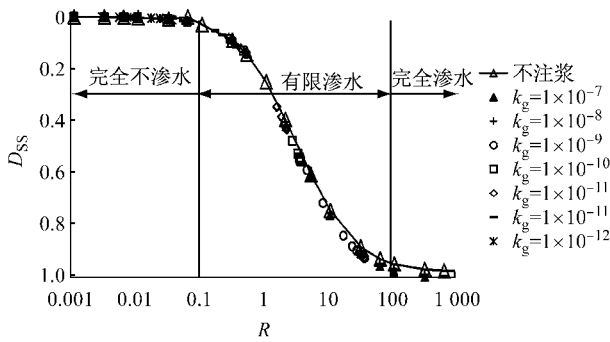


图 5  $D_{SS}$ 与  $R$  的关系

Fig.5 Normalized tunnel settlement  $D_{SS}$  versus relative permeability parameter  $R$

2.4 注浆对渗漏水引发的隧道受力和变形的影响

隧道渗漏水必然引起隧道弯矩和轴力的变化,为了反映隧道渗水引起的轴力和弯矩的相对变化,采用量纲一化的参数进行分析<sup>[6]</sup>,如式(6)和式(7)所示.

$$\chi = N/f_{ck}bt_1 \quad (6)$$

$$\beta = M/f_{ck}bt_1^2 \quad (7)$$

式中: $N, M$ 分别为轴力和弯矩; $f_{ck}$ 为混凝土轴心抗压强度标准值; $b$ 为所取宽度; $t_1$ 为管片衬砌厚度.对于C50混凝土, $f_{ck}$ 取  $3.24 \times 10^4$  kPa,轴力和弯矩为单位长度上的取值,因此, $b$ 取 1.0 m,衬砌厚度  $t_1$ 取 0.35 m.

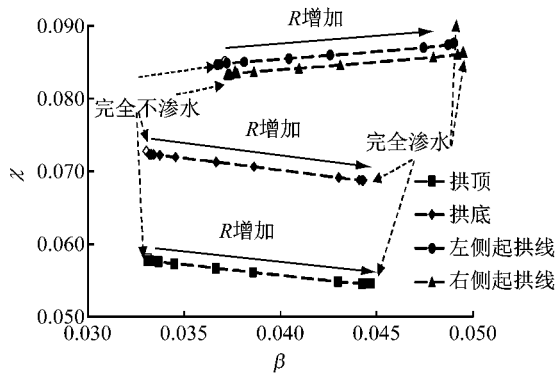


图 6 注浆层对隧道渗漏水引起的隧道内力变化的影响

Fig.6 Effect of grouting on tunnel leakage-induced change of internal force

图 6 为不同相对渗透系数  $R$  下隧道的弯矩和轴力发展变化规律.随着相对渗透系数  $R$  的增加,拱顶和拱底的弯矩增大,轴力降低,起拱线位置衬砌弯矩(负弯矩)增大,轴力略有增加.当隧道从完全不渗水发展到完全渗水状态时,拱顶处,轴力降低了 5.81%,弯矩升高了 35.01%;拱底处,轴力降低了 5.55%,弯矩升高了 34.17%;拱腰处,轴力升高了 2.97%,弯矩升高了 32.11%.由此看出,渗水对隧道

弯矩的影响较大,完全渗水时,拱顶弯矩增加了 35.01%,同时,还引起轴力的降低.弯矩增加带来混凝土裂缝和压碎的风险,轴力降低带来接头防水垫片压缩量降低的问题,给隧道防水带来威胁.

渗漏引起的隧道相对变形  $D_F$  采用式(8)表示.

$$D_F = (\Delta_t - \Delta_{\text{timp}})/(\Delta_{\text{tper}} - \Delta_{\text{timp}}) \quad (8)$$

式中: $\Delta_t$ 为有限渗透条件下的隧道横向变形; $\Delta_{\text{timp}}$ 为完全不渗水条件下的隧道横向变形; $\Delta_{\text{tper}}$ 为完全渗水条件下的隧道横向变形.隧道的横向变形  $\Delta$  采用  $\Delta D/D$  表示( $\Delta D$ 为隧道横向直径变化, $D$ 为隧道直径).

图 7 所示为隧道横向变形与相对渗透系数  $R$  的关系.可以看出,隧道横向相对变形  $D_F$  和地层相对沉降  $D_S$  有相同的变化规律,当  $R \leq 0.1$  时,隧道横向变形很小,可忽略不计;当  $R \geq 100$  时,隧道横向变形增加;当  $0.1 < R < 100$  时,隧道有限渗水,隧道横向变形随着  $R$  的增大而增大.以本文计算工况为例,完全渗水引起的隧道横向变形最大值为 2.28 mm,因此,渗漏水引起的隧道横向变形对隧道的影响较小,不会影响隧道结构安全.

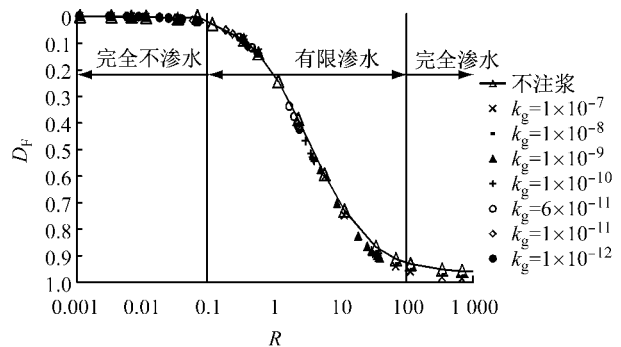


图 7  $D_F$ 与  $R$  的关系

Fig.7 Effect of  $R$  on normalized tunnel convergence  $D_F$

2.5 计算结果讨论

通过数值计算,得到了不同渗漏水条件下,注浆层对隧道渗漏水引发的地层和隧道沉降以及隧道受力的影响规律.隧道渗漏水条件通过土体-注浆层-隧道的相对系数来表达,而国内外的研究<sup>[1-8]</sup>也表明,相对渗透系数是影响隧道渗透特性的首要因素.本文分析中,相对渗透系数取值范围较大,保证了计算结果的合理性.而公式(3)同时也表明,除相对渗透系数外,上覆土层厚度  $C_{\text{clay}}$ 、注浆层厚度  $t_g$  和衬砌厚度  $t_1$  对隧道渗漏水也产生一定的影响.为保证本文计算结果具有普遍意义,对上述参数的影响展开讨论.对于软土盾构隧道而言,由于隧道衬砌厚度变化范围

较小,根据公式(3),衬砌厚度变化的影响较之渗透系数变化的影响,可忽略不计,因此,本文数值计算中将其确定为定值。

根据文献[15],在注浆层可能的厚度范围内(0.10~0.25 m),注浆层厚度对隧道渗漏水引发的地层和隧道变形、受力的影响较小;而且不同厚度条件下,其影响规律一致。因此,在上述条件下,隧道渗漏水引发的地层和隧道沉降以及隧道受力可采用相对指标  $D_S, D_{SS}$  和  $D_F$  来表示。

文献[20]对上覆土层厚度和相对渗透系数变化对隧道渗漏水特性影响进行了研究,发现隧道上覆土层厚度和相对渗透系数,尤其是相对渗透系数对隧道渗漏水引发的地层和隧道沉降产生非常重要的影响,但是对隧道横向变形和受力的影响较小(从本文图 6 中也可以看出)。隧道渗漏水条件下,在上覆土层厚度增加、相对渗透系数不变的情况下,渗漏水引起的隧道和地层的沉降呈线性增加。地层和隧道沉降随相对渗透系数的增加亦呈现线性增加的趋势。但是相对渗透系数对地层和隧道沉降的影响程度比上覆土层厚度的影响显著。考虑到上述线性关系,而且在不渗水条件下,  $\delta_{imp}, S_{imp}$  和  $\Delta_{imp}$  近似为零,因此,根据公式(4),(5)和(8)的定义,不同上覆土层厚度条件下,隧道渗漏水引发的沉降和变形的相对指标  $D_S, D_{SS}$  和  $D_F$  取决于相对渗透系数对其的影响。因此,上覆土层厚度变化的影响最后归结为相对渗透系数变化的影响。由于相对渗透系数的取值范围很大,保证了本文计算结果的普遍适用性。

## 2.6 注浆对隧道渗漏水影响的预测方法

图 4、图 5 和图 7 表明,无论隧道和注浆层渗透系数如何变化,  $D_S, D_{SS}, D_F$  随  $R$  均分布在一个较小的范围内。以  $D_S$  为例,  $D_S$  与  $R$  之间的关系可以采用式(9)所示的函数来表示。

$$D_S = \Phi(\lg R) = \int_{-\infty}^y \frac{1}{i_R \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{\lg R - S}{i_R})^2} d(\lg R) \quad (9)$$

式中:  $S$  为  $D_S = 0.5$  对应的  $R$  的对数值(以 10 为底);  $i_R$  为地层高斯分布函数的反弯点与均值之间的距离。

公式(9)中,  $S = 0.532, i_R = 0.736$ 。同样的,  $D_{SS}, D_S$  与  $R$  之间的关系也具有和式(9)相同的函数关系。因此,  $R$  不仅能综合反映注浆层和衬砌对隧道渗漏水的影响,而且为隧道渗漏水影响分析提供了简便的预测方法。在对隧道进行完全渗漏水分析和完全不渗漏水分析的基础上,就可以预测隧道有限渗漏水的影响。通

过比较注浆条件下和不注浆条件下  $R$  参数的变化就可以预测和评价注浆对隧道渗漏水的影响。而隧道完全渗水和完全不渗水两种极端渗流条件下,地层和隧道沉降以及隧道受力和变形特性的理论分析方法简单成熟,在此基础上建立的有限渗漏水对地层和隧道影响的预测方法便于工程应用。

## 3 结论

通过理论分析和数值模拟,揭示了注浆体对盾构隧道渗漏水引起的地层和隧道沉降、隧道结构受力和变形的影响规律;建立了注浆条件下隧道渗漏水对地层和隧道影响的预测方法。得到如下结论:

(1) 提出了能够综合考虑注浆体和隧道衬砌共同作用相对渗透系数  $R$ , 该参数综合反映了注浆体和衬砌渗透特性,以及隧道埋深、衬砌厚度、注浆层厚度对隧道渗漏水的影响。并据此可以判断隧道渗漏水状态:当  $R \leq 0.1$  时,隧道表现为完全不渗水;当  $0.1 < R < 100$  时,隧道表现为有限渗水;当  $R \geq 100$  时,隧道表现为完全渗水。

(2) 建立了能够综合考虑注浆体和隧道衬砌共同作用隧道渗漏水预测方法,该方法能够基于隧道完全渗水和完全不渗水两种极端条件来预测隧道有限渗水对地层和隧道结构的影响。

(3) 减小注浆体的渗透系数,能有效减小隧道渗漏水引发的地层和隧道沉降及衬砌附加内力。

(4) 渗漏水引发的地层和隧道沉降不容忽视,但对隧道横向变形和受力的影响较小,可忽略不计。

## 参考文献:

- [1] WARD W H, THOMAS H S H. The development of earth loading and deformation in tunnel linings in London Clay[C]// Proc 6th Int Conf Soil Mech Found Engng. Toronto: University of Toronto Press, 1965: 432-436.
- [2] PALMER J H L, BELSHAW D J. Deformations and pore pressure in the vicinity of a precast, segmented, concrete-lined tunnel in clay [J]. Can Geotech, 1980, 17(2): 174.
- [3] GOURVENEC S M, MAIR R J, BOLTON M D. Ground conditions around an old tunnel in London Clay[J]. Proc Instn Civ Engrs Geotech Engng, 2005, 158(1): 25.
- [4] 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: 55-64.
- [5] SHIN J H, ADDENBROOKE T I, POTTS D M. A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behavior [J]. Geotechnique, 2002, 52(6): 1585.

- [6] WONGSAROJ J. Three-dimensional finite element analysis of short and long-term ground response to open-face tunnelling in stiff clay [D]. Cambridge: University of Cambridge, 2005.
- [7] 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.
- [8] WONGSAROJ J, SOGA K, MAIR R J. Modelling of long-term ground response to tunnelling under St James's Park, London [J]. Geotechnique, 2007, 57(1):75.
- [9] 刘志春, 万良勇. 地层注浆加固对隧道与地下水相互作用过程中的“双赢”影响效应分析[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(2): 87.  
LIU Zhichun, WAN Liangyong. Win-win effect of ground consolidation grouting on the interaction between tunnel and groundwater [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(2): 87.
- [10] KOMIYA K, SOGA K, AKAGI H. Soil consolidation associated with grouting during shield tunneling in soft clayey ground [J]. Geotechnique, 2001, 51(10): 835.
- [11] AU S K A, SOGA K, JAFARI M R, *et al.* Factors affecting long-term efficiency of compensation grouting in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 19(3): 254.
- [12] SOGA K, AU S K A, JAFARI M R. Laboratory investigation of multiple grout injections into clay [J]. Geotechnique, 2004, 54(2):81.
- [13] MAIR R J. Tunnelling and geotechnics: new horizons [J]. Geotechnique, 2008, 58(9): 695.
- [14] ZHANG D M, MA L X, ZHANG J, *et al.* Ground and tunnel responses induced by partial leakage in saturated clay with anisotropic permeability [J]. Engineering Geology, 2015, 189: 104.
- [15] 冉龙洲. 复杂渗流条件下考虑注浆层影响的盾构隧道长期性态研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.  
RAN Longzhou. Leakage-induced long-term behavior of shield tunnel in soft soil under complicated environments [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [16] 黄宏伟, 刘遥剑, 谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆效果的雷达探测研究 [J]. 岩土力学, 2003, 24(增):353.  
HUANG Hongwei, LIU Yujian, XIE Xiongyao. Application of GPR to grouting distribution behind segment in shield tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S):353.
- [17] LEE K M, GE X W. The equivalence of a jointed shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure [J]. Journal of Canadian Geotechnical Engineering, 2001, 38(3): 461.
- [18] 唐志成, 何川, 林刚. 地铁盾构隧道管片结构力学行为模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 85.  
TANG Zhicheng, HE Chuan, LIN Gang. Study on mechanical behavior of segment of shield tunnel of metro with model test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1):85.
- [19] 徐凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究 [D]. 上海: 同济大学, 2005.  
XU Ling. Longitudinal settlement of shield tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2005.
- [20] 马龙祥. 基于孔隙水压力变化的软土盾构隧道长期性态研究 [D]. 上海: 同济大学, 2013.  
MA Longxiang. Tunnel leakage-induced long-term behavior of shield tunnel in soft soil [D]. Shanghai: Tongji University, 2013.