

DOI: 10.11779/CJGE202106013

考虑降雨因素影响的隧道施工扰动地层响应分析

张治国^{1,2,3,4}, 张洋彬¹, 张孟喜², 赵其华³, 马伟斌⁴

(1. 上海理工大学环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 3. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 4. 中国铁道科学研究院高速铁路轨道技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 目前关于降雨影响在土建工程上的应用研究一般是针对边坡稳定性, 还较少考虑对隧道开挖的土工影响, 尤其是力学解析机理研究还非常少见。基于分层假定 Green-Ampt 模型来模拟降雨入渗过程, 采用复变函数理论对雨浸地层进行分区映射计算, 尝试提出了降雨影响下隧道开挖引起的周围地层位移场和应力场理论分析方法。此外, 利用既有工程监测数据与理论解析结果进行对比, 验证了所提出方法的可靠性。最后, 通过参数分析, 获取降雨强度、降雨历时、饱和渗透系数以及饱和层基质吸力等主要降雨参数对降雨区域隧道开挖诱发地层变形的影响规律。结果表明: 所提出的理论方法可以较好反映降雨作用下隧道施工对扰动地层响应的影响。降雨强度和饱和层基质吸力对地层变形影响显著, 而饱和渗透系数对雨浸地层入渗速率及变形速率有较大影响; 随着降雨历时的增长, 湿润锋发展深度不断增大且最终趋于稳定, 而发展速率呈现出逐渐衰弱直至为零的规律, 隧道开挖引起的地层变形也随之越来越大, 其位移变化速率呈现出逐渐减小收敛至某一特定值的规律。研究成果对多雨地区、降雨灾害气候下隧道施工控制具有一定理论指导意义。

关键词: 隧道开挖; 降雨; 地层响应; Green-Ampt 模型; 湿润锋; 复变函数理论

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)06-1097-12

作者简介: 张治国(1978—), 男, 博士后, 副教授, 主要从事地下工程等方面的教学与研究工作。E-mail: zgzhang@usst.edu.cn。

Response of disturbed strata in tunnel construction considering influences of rainfall

ZHANG Zhi-guo^{1,2,3,4}, ZHANG Yang-bin¹, ZHANG Meng-xi², ZHAO Qi-hua³, MA Wei-bin⁴

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. State Key Laboratory for Track Technology of High-Speed Railway, China Academy of Railway Science, Beijing 100081, China)

Abstract: At present, the researches on the application of rainfall influences in civil engineering are generally on the slope stability, and the geotechnical impact on tunnel excavation is less considered, especially the theoretical analytical method is relatively rare. Based on the Green-Ampt model under the assumption of stratification to simulate the rainfall infiltration process, the complex function theory is used to calculate the partition mapping for the rainfall infiltration region. The theoretical analysis method for displacement and stress fields of the surrounding soils caused by tunnel excavation is firstly proposed considering the influences of rainfall. In addition, the reliability of the proposed analytical solution is verified by comparing the monitoring data from the existing projects. Finally, the sensitivity analysis of parameters, such as the rainfall intensity, rainfall duration, saturated permeability and matric suction, is carried out to observe the influences of soil deformation induced by tunneling in rainy days. The results show that the proposed theoretical method can better reflect the influences of tunnel excavation on the response of the surrounding soil under the action of rainfall. The rainfall intensity and matric suction have significant influences on the soil deformation, while the saturated permeability coefficient has great influences on the infiltration rate and deformation rate in the rainfall infiltration region.

With the increase of the rainfall duration, the development depth of the wetting front continues to increase and eventually stabilizes, and its development rate shows a

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772331, 1977247); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室基金项目(SKLG2015K015); 高速铁路轨道技术重点实验室基金项目(2018YJ181)
收稿日期: 2020-08-17

gradual weakening law until it reaches zero. The vertical displacements of ground caused by tunnel excavation also increase, and the change rate of displacement shows the law of decreasing gradually and converging to a certain value. The research results can give a reference for the control of tunnel construction under the climate of rainfall disasters or in abundant rainy areas.

Key words: tunnel excavation; rainfall; stratum response; Green-Ampt model; wetting front; complex function method

0 引 言

中国是一个自然灾害频发的国家，在一些多雨地区，隧道施工往往受降雨因素的影响而导致周围地层过大变位，甚至造成隧道破坏以及一些施工安全事故。由于降雨入渗会使得施工扰动岩土体含水率增大，岩土体重度增加，进而会使地层抗剪强度降低，促使隧道开挖引起的地层沉降产生变化，给施工预估带来一定困难。为了保证多雨地区隧道施工能够安全有效地进行，有必要针对降雨影响下的隧道施工诱发地层响应问题进行深入研究。

关于降雨入渗理论，1911 年 Green 等^[1]基于毛细管理论提出了一种土壤水分入渗模型，即传统的 Green-Ampt 模型。该模型参数较少，便于求解且物理意义明确，对研究降雨入渗问题方面提供了理论模型基础。但由于该模型将湿润锋以上土体全部假定为饱和区，忽略了非饱和区的影响，这样会导致计算结果与实际偏差较大。在此基础上，1945 年 Bodman 等^[2]提出了一种土体分层假定，他们认为在入渗过程中根据不同含水率应将入渗区土体分为饱和层、过渡层和初始层，研究结果表明这种土体分层假定更加符合实际。彭振阳等^[3]在研究了不同入渗条件下的土体含水率和渗透系数的分层变化规律，基于此规律对传统的 Green-Ampt 模型加以改进，但其试验采用有机玻璃柱的方式来模拟土壤中水分入渗过程，无法考虑降雨强度的影响。Mein 等^[4]根据传统的 Green-Ampt 模型分析了降雨入渗过程，考虑了降雨强度的影响。Yao 等^[5]基于土体分层假定并考虑了降雨强度的影响，提出了一种改进后的 Green-Ampt 模型，研究结果表明该模型可以较好地模拟降雨入渗过程。此外，多数学者基于分层假定下的 Green-Ampt 模型研究了降雨入渗对边坡稳定性的影响^[6-7]。上述研究^[1-7]针对降雨入渗理论及其在边坡工程上的应用做了积极探索，但对于降雨入渗在隧道施工影响方面还鲜有研究。

不考虑降雨影响下隧道开挖扰动地层响应问题，目前既有研究主要包括经验法^[8-9]、数值模拟法^[10-13]和理论解析（半解析）法^[14-25]。理论解析（半解析）法经过严密的推导，具有速度快，精度高等优点，主要有镜像法^[14-15]，弹性力学的 Mindlin 解法^[16]，随机介质理论^[17]和复变函数法^[18-23]。针对降雨影响下的地

下工程（包括隧道，基坑等施工）开挖扰动地层响应问题，研究还不多见，目前方法主要分为：现场监测^[24-29]和数值模拟分析^[30-31]两大类。在现场监测方面，Wang 等^[24]以杭州紫之隧道为研究对象对隧道施工段进行了现场监测，根据现场监测结果，分析其影响既有施工因素，其结果表明持续降雨增加了上部土体自重，同时降低了上部土体强度，会使地表沉降显著增大。Lei 等^[25]对 50 个高塑性黏土层隧道段进行了现场试验，根据监测数据分析了施工期隧道变形与降雨的相关性。刘畅等^[26]针对天津市某基坑进行了现场实测，同时对降雨的入渗深度及对非饱和黏土物理力学性质影响进行了室内试验，分析了降雨对软土基坑支护结构变形的影响。在数值模拟方面，侯福金等^[30]依托京沪高速济南连接段老虎山隧道，采用 Flac^{3D}建立了有限差分模型，分析了降雨条件下隧道洞口浅埋段渗流场演化规律。可见目前针对降雨影响下隧道开挖方面的理论研究还远远不够，降雨所带来的隧道施工扰动机理还不明确。

本文尝试将降雨入渗力学解析机制引入地下工程施工领域，基于 Bodman 等^[2]提出的土体分层假定，重点参考 Yao 等^[5]改进后 Green-Ampt 降雨入渗模型，运用复变函数理论提出了降雨入渗影响下的隧道施工扰动地层位移和应力解答。其中，通过分层假定下的 Green-Ampt 模型来模拟降雨入渗过程，运用映射函数将湿润锋以下半无限地层区域映射成单位圆环，建立了可以表达此地层区域内任意一点任意降雨时刻的位移和应力的解析函数，使得隧道所在地层区域满足湿润锋面应力边界条件和洞周位移边界条件，以求解上述解析函数的各项系数；之后根据位移协调条件求解湿润锋以上地层区域内的解析函数；最后利用求解的解析函数，得到降雨影响下隧道施工扰动地层响应问题解答。通过与工程实测数据对比，验证了本文解析解可靠性和实用性。此外，着重分析了降雨强度、饱和渗透系数、饱和层基质吸力对湿润锋特性以及扰动位移场的影响规律。

1 降雨入渗模型

1.1 土体分层假定

1945 年，Bodman 等^[2]提出了一种土体分层假

定, 即在入渗过程中根据不同含水率将土体分为饱和层、过渡层和初始层, 湿润锋以上地层为湿润层(包括饱和层、过渡层), 如图1所示, 各土层的含水率为

饱和层,

$$\theta(h) = \theta_r \quad (0 \leq h \leq h_r) , \quad (1)$$

过渡层,

$$\begin{aligned} \theta(h) = \theta_d &= \theta_r - (\theta_r - \theta_s) \cdot \sqrt{1 - (h - h_r)^2 / h_d^2} \\ &\quad (h_r \leq h \leq h_w) , \end{aligned} \quad (2)$$

初始层,

$$\theta(h) = \theta_s \quad (h \geq h_w) , \quad (3)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} h_w &= h_d + h_r , \\ h_r &= (1 - \chi) h_w , \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, h 为土层距地表深度, $\theta(h)$ 为 h 处土体含水率, θ_r , θ_d 和 θ_s 分别为饱和层、过渡层和初始地层含水率, h_r , h_d 分别为饱和层厚度和过渡层厚度, h_w 为湿润层厚度(即湿润锋深度), χ 为过渡层占湿润层的比例。

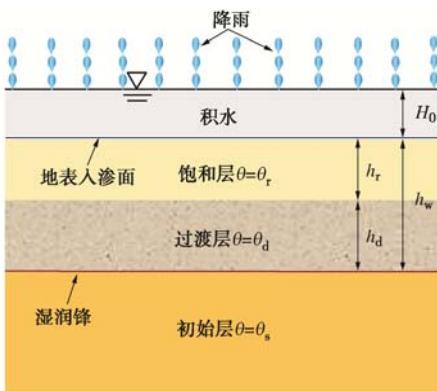


图1 降雨入渗分层模型示意图

Fig. 1 Diagram of stratified hypothesis model for rainfall infiltration

随着降雨历时的增加, 入渗过程不断进行, 湿润锋逐渐向下推移, 各土层的厚度也随之变化, 同时过渡层厚度占湿润层厚度比例逐渐减小, 并且所占比例与湿润层厚度呈现出线性关系^[5],

$$\chi = Mh_w + N , \quad (5)$$

式中, M , N 为系数, 其中 $M < 0$, $0 < N < 1$ 。 h_w 为湿润层厚度(即湿润锋深度)。

由式(5)可得, 存在某一时刻 $t=t_w$ 使得 $\chi=0$, 此时湿润层土体全部达到饱和状态, 即 $h_w=h_r$, $h_d=0$ 。

当 $\chi > 0$ 时, 将式(5)代入式(4)可得

$$h_w = \frac{(1 - N) - \sqrt{(1 - N)^2 - 4Mh_r}}{2M} , \quad (6)$$

$$h_d = \frac{(1 - N) - \sqrt{(1 - N)^2 - 4Mh_r}}{2M} - h_r . \quad (7)$$

1.2 分层假定 Green-Ampt 模型

基于上述土体分层假定提出的渗透过程中土体含水率随土层分布变化规律, 对传统 Green-Ampt 模型中关于土体含水率的部分加以改进, 得到分层假定 Green-Ampt 模型^[5]。

传统的 Green-Ampt 模型在计算总入渗量时, 假设湿润锋以上土体为完全饱和状态, 则总入渗量为

$$Q = (\theta_r - \theta_s)h_w , \quad (8)$$

式中, Q 为总入渗量, θ_r , θ_s 分别为饱和土体含水率和初始土体含水率, h_w 为湿润层厚度。

根据式(1)~(5)对总入渗量表达式(8)进行变换:

$$Q = \int_0^{h_w} [\theta(h) - \theta_s] dh . \quad (9)$$

根据土体分层假定, 将土体中的雨水入渗分为3个区域, 其中总入渗量全部来自湿润层, 而湿润层由饱和层和过渡层2部分组成, 因此对各层分别进行计算, 之后将其叠加即可得到总入渗量。

饱和层中的累积入渗量为

$$Q_r = (\theta_r - \theta_s)h_r , \quad (10)$$

式中, Q_r 为饱和层累积入渗量。

由于过渡层的形态较为复杂, 一般只有通过近似方式等效。本文采用 Yao 等^[5]的方法通过椭圆形曲线来模拟过渡层中含水率的分布规律, 如图2所示。其中拟合椭圆的水平半轴长度为 $\theta_r - \theta_s$, 纵向半轴长度为 h_d , 其拟合结果与 Richards 方程计算结果具有较好的吻合度, 由此可得过渡层中的累积入渗量为 1/4 椭圆面积,

$$Q_d = \frac{\pi}{4} (\theta_r - \theta_s) h_d , \quad (11)$$

式中, Q_d 为过渡层累积入渗量。

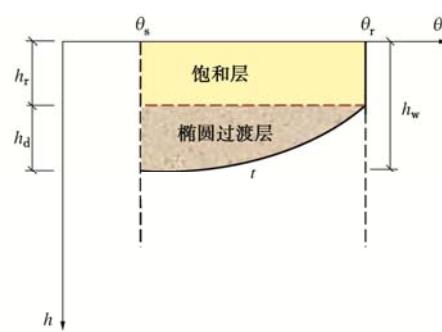


图2 分层假定含水率分布

Fig. 2 Distribution of stratified hypothetical water content

根据叠加原理, 改进后的总入渗量可表示为

$$Q = Q_r + Q_d = (\theta_r - \theta_s)h_r + \frac{\pi}{4} (\theta_r - \theta_s) h_d$$

$$= (\theta_r - \theta_s) \left(1 - \chi + \frac{\pi}{4} \chi \right) h_w . \quad (12)$$

将式(6)代入式(12)得

$$Q = I h_r + P \sqrt{(1-N)^2 - 4Mh_r} + T , \quad (13)$$

式中,

$$I = \frac{(\theta_r - \theta_s)(4 - \pi)}{4} , \quad (14)$$

$$P = -\frac{\pi(\theta_r - \theta_s)}{8M} , \quad (15)$$

$$T = \frac{\pi(\theta_r - \theta_s)(1 - N)}{8M} . \quad (16)$$

Mein 等^[4]和 Yao 等^[5]根据 Green-Ampt 模型分析了降雨入渗过程, 并将其分为 3 大阶段。第一阶段中, 假设降雨强度稳定为 F , 降雨初期, 地表入渗面土体处于非饱和状态, 土体入渗能力大于降雨强度, 降雨全部渗入土体, 此时, 降雨入渗率 k_1 为

$$k_1 = F . \quad (17)$$

第二阶段中, 随着降雨历时的增长, 入渗过程不断进行, 饱和区土体达到饱和状态, 土体入渗能力逐渐减小, 当小于降雨强度时, 地表将会产生积水, 存在临界积水时刻 t_q 。根据达西定律和分层假设^[2], 此时, 降雨入渗率 k_2 为

$$k_2 = K_r \left(1 + \frac{H_0 + S_r}{h_r} \right) , \quad (18)$$

式中, K_r 为饱和渗透系数, S_r 为下层土体作用于饱和层的平均基质吸力, h_r 为饱和层厚度, H_0 为地表积水深度, 在降雨产生积水前 $H_0=0$ 。

第三阶段中, 湿润区土体全部达到饱和状态, 过渡层消失, 湿润区全部为饱和层, 由于入渗率仍由土体入渗能力控制, 则这一阶段降雨入渗率 k_3 为

$$k_3 = K_r \left(1 + \frac{H_0 + S_r}{h_w} \right) , \quad (19)$$

式中, h_w 为湿润锋深度, 在这一阶段 $h_w = h_r$ 。

由于篇幅所限, 省略部分推导, 可得降雨历时与饱和层深度关系为

$$t = \begin{cases} \frac{Ih_r}{F} + \frac{P}{F} \sqrt{(1-N)^2 - 4Mh_r} + \frac{T}{F} & (t < t_q) \\ t_q + I - \frac{2PM}{\sqrt{(1-N)^2 - 4Mh_r}} / K_r \left\{ \left[h_r - h_{rq} - (S_r + H_0) \ln \left(\frac{h_r + S_r + H_0}{h_{rq} + S_r + H_0} \right) \right] \right\} & (t_q \leq t < t_w) \\ t_q + \frac{\theta_r - \theta_s}{K_r} \left[h_r - h_{rq} - (S_r + H_0) \ln \left(\frac{h_r + S_r + H_0}{h_{rq} + S_r + H_0} \right) \right] & (t \geq t_w) \end{cases} , \quad (20)$$

式中, h_{rq} 为临界积水 t_q 时刻饱和层深度。

同时可得, 湿润锋深度 h_w 随降雨历时 t 增长的动态变化规律:

$$t = \begin{cases} \frac{Ih_w(1-\chi)}{F} + \frac{P}{F} \sqrt{(1-N)^2 - 4Mh_w(1-\chi)} + \frac{T}{F} & (t < t_q) \\ t_q + I - \frac{2PM}{\sqrt{(1-N)^2 - 4Mh_w(1-\chi)}} / K_r \left\{ \left[h_w(1-\chi) - h_{rq} - (S_r + H_0) \ln \left(\frac{h_w(1-\chi) + S_r + H_0}{h_{rq} + S_r + H_0} \right) \right] \right\} & (t_q \leq t < t_w) \\ t_q + \frac{\theta_r - \theta_s}{K_r} \left[h_w - h_{rq} - (S_r + H_0) \ln \left(\frac{h_w + S_r + H_0}{h_{rq} + S_r + H_0} \right) \right] & (t \geq t_w) \end{cases} \quad (21)$$

2 降雨影响下隧道开挖扰动土体位移场和应力场解析解答

2.1 受降雨影响的隧道开挖力学模型

图 3 为受降雨影响的隧道开挖力学模型图。其中, H 为隧道中心距地表深度, h_w 为湿润锋深度。隧道洞周存在椭圆收敛位移 U_r 来模拟隧道开挖影响效应。 A, B, C, D 为 z 平面上的点, 令湿润锋面作为 z 平面 x 轴, 隧道竖轴中心线作为 z 平面 y 轴, 建立一个平面直角坐标系, 其中, A 为坐标原点, B 为无穷远处点, C, D 分别为隧道拱顶与拱底位置。

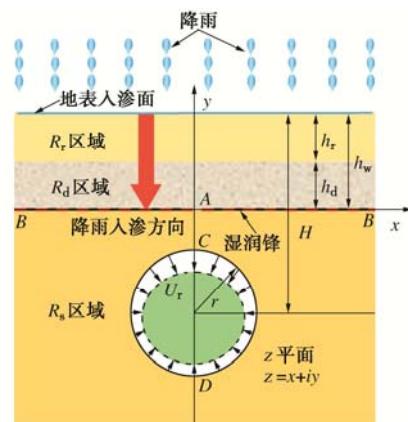


图 3 受降雨影响的隧道开挖力学模型

Fig. 3 Mechanical model for tunnel excavation under influences of rainfall

2.2 各地层区域的解析函数

基于分层假定, 各地层区域内的土体物理参数不同。如图 3 所示, 将湿润锋以下的初始层区域设为 R_s 区域, 设 R_d 区域和 R_f 区域分别为过渡层区域和饱和层区域, h_r 为饱和层厚度, 可由式(20)共同确定; h_d 为过渡层厚度, 可由式(7), (20)共同确定; h_w 为

湿润锋深度, 且 $h_w = h_r + h_d$ 。

采用复变函数理论, 根据弹性力学平面问题基本方程^[32]与平面问题复变函数解法^[33], 降雨影响下隧道开挖引起的土体位移场和应力场可通过解析函数 $\phi(z, t)$ 和 $\psi(z, t)$ 表示。

R_j 地层区域,

$$2G_j[U_x(t) + iU_y(t)] = \kappa_j \phi_j(z, t) - z \cdot \overline{\phi'_j(z, t)} - \overline{\psi_j(z, t)}, \quad (22)$$

$$\sigma_x(t) + \sigma_y(t) = 2[\phi'_j(z, t) + \overline{\phi'_j(z, t)}], \quad (23)$$

$$\sigma_y(t) - \sigma_x(t) + 2i\sigma_{xy}(t) = 2e^{2i\theta} [\bar{z}\phi''_j(z, t) + \psi'_j(z, t)]. \quad (24)$$

式中 $j=r$ 代表饱和层区域; $j=d$ 代表过渡层区域; $j=s$, 代表湿润锋以下隧道扰动区域。故 $\phi_s(z, t)$ 与 $\psi_s(z, t)$, $\phi_d(z, t)$ 与 $\psi_d(z, t)$, $\phi_r(z, t)$ 与 $\psi_r(z, t)$ 分别为 R_s , R_d , R_r 区域内的解析函数, $U_x(t)$ 和 $U_y(t)$ 分别为 t 时刻 x 方向与 y 方向上土体位移分量, $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$ 分别为 t 时刻 x 方向与 y 方向上土体正应力分量, $\sigma_{xy}(t)$ 为 t 时刻土体切应力, $\overline{\phi'(z, t)}$ 和 $\overline{\psi(z, t)}$ 分别是 $\phi'(z, t)$ 和 $\psi(z, t)$ 的共轭函数, \bar{z} 为 z 的共轭坐标, G_s , G_d , G_r 分别为 R_s , R_d , R_r 区域内土体剪切模量; 由于本文研究的是平面应变问题, 故 $\kappa_s = 3 - 4\nu_s$, $\kappa_d = 3 - 4\nu_d$, $\kappa_r = 3 - 4\nu_r$, 其中 ν_s , ν_d , ν_r 分别为 R_s , R_d , R_r 区域内土体泊松比。

2.3 R_s 湿润锋以下隧道扰动区域解析求解

在 R_s 区域内, 存在隧道洞周 $|z + i(H - h_w)| = r$ 处有已知的位移, 同时在湿润锋面受来自上方土体的自重作用, 则边界条件如下:

$$z = \bar{z}: F_0(z, t) = \phi_s(z, t) + z \cdot \frac{\partial \phi_s(z, t)}{\partial z} + \overline{\psi_s(z, t)}, \quad (25)$$

$$|z + i(H - h_w)| = r: 2G_s[(U_x(t) + iU_y(t))] \\ = \kappa_s \phi_s(z, t) - z \cdot \frac{\partial \phi_s(z, t)}{\partial z} - \overline{\psi_s(z, t)}. \quad (26)$$

根据复变函数理论, 应用保角映射将土体 z 平面 R_s 区域, 映射到 ζ 平面 Θ 圆环区域, 如图 4 所示, 原 z 平面上 A , B , C , D 各点通过保角映射到 ζ 平面上 A' , B' , C' , D' , 其映射函数如下:

$$z = \omega(\zeta) = -i(H - h_w + r) \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2} \frac{1 + \zeta}{1 - \zeta}, \quad (27)$$

式中, $\alpha = (H - h_w + r - \sqrt{(H - h_w + r)^2 - r^2})/r$, $\omega(\zeta)$ 为解析函数, h_w 为湿润锋深度, 可由式 (4), (21) 共同确定。通过保角映射, z 平面 R_s 区域内的解析函数 $\phi_s(z, t)$ 和 $\psi_s(z, t)$ 转化为

$$\phi_s(z, t) = \phi_s(\omega(\zeta), t) = \Phi(\zeta, t), \quad (28)$$

$$\psi_s(z, t) = \psi_s(\omega(\zeta), t) = \Psi(\zeta, t). \quad (29)$$

由于 $\phi_s(z, t)$ 和 $\psi_s(z, t)$ 在 z 平面 R_s 区域是解析函数, 则 $\Phi(\zeta, t)$ 和 $\Psi(\zeta, t)$ 在 ζ 平面 Θ 圆环域里进行解析, 可以将其展开为 Laurent 级数形式:

$$\Phi(\zeta, t) = a_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} a_k(t) \zeta^k + \sum_{k=1}^{\infty} b_k(t) \zeta^{-k}, \quad (30)$$

$$\Psi(\zeta, t) = c_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} d_k(t) \zeta^k + \sum_{k=1}^{\infty} d_k(t) \zeta^{-k}, \quad (31)$$

式中, a_0 , a_k , b_k , c_0 , c_k , d_k 均为待定系数, 可以通过边界条件确定。

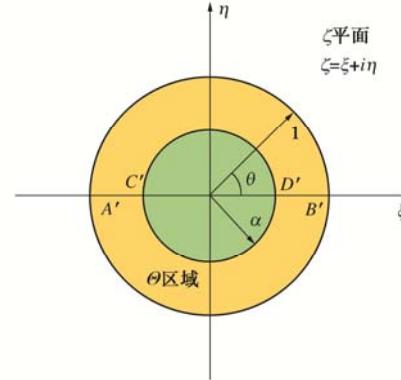


图 4 共形映射区域

Fig. 4 Conformal transformation

由于 $z \cdot \frac{\partial \phi_s(z, t)}{\partial z} = \frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} \cdot \frac{\partial \Phi(\zeta, t)}{\partial \zeta}$, 将 ζ 用复平面

极坐标表示, 即 $\zeta = \rho \sigma$ (ρ 为 ζ 平面半径, $\sigma = e^{i\theta}$), 则

$$\frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} = -\frac{1}{2} \frac{(1 + \rho\sigma)(\sigma - \rho)^2}{(1 - \rho\sigma)\sigma^2}. \quad (32)$$

z 平面 R_s 区域内的边界条件由式 (25), (26) 改写为

$$|\zeta| = 1: F_1(\zeta, t) = \Phi(\zeta, t) + \frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} \frac{\partial \Phi(\zeta, t)}{\partial \zeta} + \overline{\Psi(\zeta, t)}, \quad (33)$$

$$|\zeta| = \alpha: T_1(\zeta, t) = 2G_s[U_x(t) + iU_y(t)] = \kappa_s \Phi(\zeta, t) - \frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} \frac{\partial \Phi(\zeta, t)}{\partial \zeta} - \overline{\Phi(\zeta, t)}. \quad (34)$$

将 $F_1(\zeta, t)$ 按照 Laurent 级数展开:

$$F_1(\sigma, t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} B_k(t) \sigma^k, \quad (35)$$

式中, 系数 B_k 可为

$$B_k = \begin{cases} \gamma_r h_r + \gamma_d h_d & (t < t_q, k = 0) \\ \gamma_r h_r + \gamma_d h_d + \gamma_w H_0 & (t \geq t_q, k = 0) \\ 0 & (k \neq 0) \end{cases}, \quad (36)$$

式中, γ_w 为雨水重度, H_0 为地表积水高度, t_q 为降雨产生积水时刻, γ_r 为 R_r 区域土体饱和重度, γ_d 为 R_d 区域土体重度, 假设过渡层中非饱和土体重度和含水率呈

线性关系，则椭圆过渡层内不同深度的土体重度为

$$\gamma_d = \gamma_s + (\gamma_r - \gamma_s) \sqrt{1 - \frac{(h - h_r)^2}{h_d}} \quad (h_r \leq h \leq h_w) , \quad (37)$$

式中， γ_s 为土体初始重度， γ_r 为土体饱和重度， h 为土层距地表深度， h_r 为饱和层厚度， h_w 为湿润锋深度。

将式 (30) ~ (32)、(35)、(36) 代入式 (33) 可得

$$\left. \begin{aligned} c_0 &= \overline{B_0} - \overline{a_0} - \frac{1}{2}a_1 - \frac{1}{2}b_1 , \\ c_k &= B_k - \overline{b_k} + \frac{1}{2}(k-1)a_{k-1} - \frac{1}{2}(k+1)a_{k+1} , \\ d_k &= \overline{B_k} - \overline{a_k} + \frac{1}{2}(k-1)b_{k-1} - \frac{1}{2}(k+1)b_{k+1} \end{aligned} \right\} \quad (k=1,2,3,\dots) . \quad (38)$$

将式 (34) 两边同乘 $(1-\alpha\sigma)$ 得到

$$T_i(\zeta, t)(1-\alpha\sigma) = (1-\alpha\sigma) \left[\kappa_s \Phi(\zeta, t) - \frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} \cdot \frac{\partial \Phi(\zeta, t)}{\partial \zeta} - \overline{\Phi(\zeta, t)} \right] . \quad (39)$$

令 $Y(\zeta, t) = T_i(\zeta, t)(1-\alpha\sigma)$ ，将 $Y(\zeta, t)$ 按照 Laurent 级数展开：

$$Y(\alpha\sigma, t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} A_k(t) \sigma^k = A_0(t) + A_1(t)\sigma + \sum_{k=2}^{\infty} A_k(t)\sigma^k + \sum_{k=1}^{-\infty} A_{-k}(t)\sigma^{-k} . \quad (40)$$

将式 (30) ~ (32), (38), (39) 代入式 (40)，可得 \overline{a}_1 , b_1 , $\overline{a_{k+1}}$ 和 b_{k+1} 相应系数。

本文针对隧道开挖的土工影响采用位移控制手段体现。Park^[34]研究表明隧道开挖面土体变形由均匀径向收缩、椭圆化变形以及整体下沉组成。在 z 平面上，以隧道圆心为原点的极坐标系下，隧道径向初始位移边界条件为^[34]

$$U_r = -\frac{1}{4}u_0(5 + 3\sin\theta - 3\cos^2\theta) , \quad (41)$$

式中， u_0 为初始开挖断面与衬砌断面的半径差，根据已知地层损失率计算 u_0 为

$$u_0 = \frac{8}{7}r_0(1 - \sqrt{1 - V_L}) , \quad (42)$$

式中， V_L 为地层损失率。

将式 (41) 通过坐标变换转换至到 xoy 直角坐标系下，再通过共形映射公式 (27) 转换至 ζ 平面上，即可得到 $|\zeta|=\alpha$ 时的位移边界条件：

$$U \Big|_{\rho=\alpha} = -\frac{1}{4}u_0 \frac{\alpha - \sigma}{1 - \alpha\sigma} i \left\{ 5 + 3 \left[\frac{1 + \alpha^2}{2\alpha} - \frac{(1 - \alpha^2)^2}{2\alpha} \right. \right. \\ \left. \left. \frac{1}{(1 - \alpha\sigma)(1 - \alpha\sigma^{-1})} + \frac{3}{4} \frac{(1 - \alpha^2)^2(\sigma^{-1} - \sigma)^2}{(1 - \alpha\sigma)^2(1 - \alpha\sigma^{-1})^2} \right] \right\} . \quad (43)$$

将其代入式 (40) 可得

$$2G_s U \Big|_{\rho=\alpha} (1 - \alpha\sigma) = T_i(\alpha\sigma)(1 - \alpha\sigma) \\ = A_0 + A_1\sigma + \sum_{k=2}^{\infty} A_k\sigma^k + \sum_{k=1}^{-\infty} A_{-k}\sigma^{-k} , \quad (44)$$

式中，

$$\left. \begin{aligned} A_0 &= -\left(\frac{3}{4}\alpha^2 + \frac{5}{2}\alpha + \frac{3}{4} \right) u_0 i G_s , \\ A_1 &= \left(\frac{7}{4} + \frac{9}{4}\alpha + \frac{3}{2}\alpha^2 - \frac{3}{4}\alpha^3 - \frac{3}{4}\alpha^4 \right) u_0 i G_s , \\ A_k &= -\frac{3}{8}(1 - \alpha^2)^2 \alpha^{k-3} [(k+1)\alpha^2 + (2-k) + 2\alpha] u_0 i G_s , \\ A_{-k} &= \frac{3}{8}(1 - \alpha^2)^2 \alpha^{k-1} u_0 i G_s . \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

至此，通过系数 A_0 , A_1 , A_k , A_{-k} 可以得到待定系数 a_0 , a_k , b_k , c_0 , c_k , d_k ，从而解出 ζ 平面上的解析函数 $\Phi(\zeta, t)$ 与 $\Psi(\zeta, t)$ ，将其通过映射函数逆变换即可得到 z 平面上 R_s 区域内的解析函数 $\phi(z, t)$ 和 $\psi(z, t)$ ，随后将其代入式 (22) ~ (24)，即可求得 R_s 区域内扰动土体位移场和应力场。

2.4 R_d 过渡层区域的解析求解

在直角坐标系中设 R_d 区域土体内的解析函数为

$$\phi_d(z, t) = e_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} e_k(t) z^k + \sum_{k=1}^{-\infty} f_k(t) z^{-k} , \quad (46)$$

$$\psi_d(z, t) = g_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} g_k(t) z^k + \sum_{k=1}^{-\infty} l_k(t) z^{-k} , \quad (47)$$

式中， e_0 , e_k , f_k , g_0 , g_k , l_k 均为待定系数，其值由边界条件确定。

R_d 区域解析函数的计算不通过共形映射，可在 z 平面上根据边界条件直接计算。在 z 平面上 R_d 区域内的土体在上表面承受来自 R_r 区域内的土体自重应力边界条件，而在湿润锋面上部与下部土体满足位移协调条件，即

应力边界条件，

$$y = h_d : F_2(z, t) = \phi_d(z, t) + z \cdot \frac{\partial \phi_d(z, t)}{\partial z} + \overline{\psi_d(z, t)} . \quad (48)$$

位移协调边界条件，

$$y = 0 : \kappa_s \phi_s(z, t) - z \cdot \frac{\partial \phi_s(z, t)}{\partial z} - \overline{\psi_s(z, t)} = \\ \kappa_d \phi_d(z, t) - z \cdot \frac{\partial \phi_d(z, t)}{\partial z} - \overline{\psi_d(z, t)} . \quad (49)$$

式中 $\phi_d(z, t)$, $\psi_d(z, t)$ 为 R_d 区域土体内的解析函数， $\kappa_d = 3 - 4\nu_d$, ν_d 为 R_d 区域土体的泊松比。

由于 R_s 区域在 ζ 平面上的解析函数 $\Phi(\zeta, t)$, $\Psi(\zeta, t)$ 通过映射函数逆变换得到 R_s 区域在 z 平面上的解析函数 $\phi_s(z, t)$, $\psi_s(z, t)$ ，则 z 平面上 R_s 区域内的解析

函数为

$$\phi_s(z, t) = a_0^w(t) + \sum_{k=1}^{\infty} a_k^w(t) z^k + \sum_{k=1}^{\infty} b_k^w(t) z^{-k}, \quad (50)$$

$$\psi_s(z, t) = c_0^w(t) + \sum_{k=1}^{\infty} c_k^w(t) z^k + \sum_{k=1}^{\infty} d_k^w(t) z^{-k}. \quad (51)$$

式中 $a_0^w, a_k^w, b_k^w, c_0^w, c_k^w, d_k^w$ 均为待定系数, 其值由系数 $a_0, a_k, b_k, c_0, c_k, d_k$ 可得。联立式 (48) ~ (51) 可得

$$\begin{aligned} e_0 + \sum_{k=1}^{\infty} e_k z^k + \sum_{k=1}^{\infty} f_k z^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} k e_k z \bar{z}^{k-1} + \\ \sum_{k=1}^{\infty} (-k) f_k z \bar{z}^{-k-1} + g_0 + \sum_{k=1}^{\infty} g_k \bar{z}^k + \sum_{k=1}^{\infty} l_k \bar{z}^{-k} = \sum_{k=1}^{\infty} C_k z^k, \quad (52) \\ \kappa_d(e_0 + \sum_{k=1}^{\infty} e_k z^k + \sum_{k=1}^{\infty} f_k z^{-k}) - \sum_{k=1}^{\infty} k e_k z \bar{z}^{k-1} - \\ \sum_{k=1}^{\infty} (-k) f_k z \bar{z}^{-k-1} - (g_0 + \sum_{k=1}^{\infty} g_k \bar{z}^k + \sum_{k=1}^{\infty} l_k \bar{z}^{-k}) = \\ \kappa_s(a_0^w + \sum_{k=1}^{\infty} a_k^w z^k + \sum_{k=1}^{\infty} b_k^w z^{-k}) - \sum_{k=1}^{\infty} k a_k^w z \bar{z}^{k-1} - \\ \sum_{k=1}^{\infty} (-k) b_k^w z \bar{z}^{-k-1} - (c_0^w + \sum_{k=1}^{\infty} c_k^w \bar{z}^k + \sum_{k=1}^{\infty} d_k^w \bar{z}^{-k}), \quad (53) \end{aligned}$$

式中,

$$C_k = \begin{cases} \gamma_r h_r & (t < t_q, k = 0) \\ \gamma_r h_r + \gamma_w H_0 & (t \geq t_q, k = 0) \\ 0 & (k \neq 0) \end{cases}, \quad (54)$$

其中, γ_r 为饱和土重度, h_r 为 R_r 区域内饱和层厚度, 由式 (20) 共同确定, γ_w 为雨水重度, H_0 为地表积水高度, t_q 为降雨产生积水时刻。

通过联立式 (52), (53) 可以求解待定系数 $e_0, e_k, f_k, g_0, g_k, l_k$, 根据式 (46), (47), 可得 R_d 区域土体内的解析函数 $\phi_d(z, t)、\psi_d(z, t)$, 将其代入式 (22) ~ (24), 可得 R_d 区域土体位移场与应力场。

2.5 R_r 饱和层区域的解析求解

在直角坐标系中设 R_r 区域土体内的解析函数为

$$\phi_r(z, t) = m_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} m_k(t) z^k + \sum_{k=1}^{\infty} o_k(t) z^{-k}, \quad (55)$$

$$\psi_r(z, t) = p_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} p_k(t) z^k + \sum_{k=1}^{\infty} w_k(t) z^{-k}, \quad (56)$$

式中, $m_0, m_k, o_k, p_0, p_k, w_k$ 均为待定系数, 其值由边界条件确定。

在一般情况下, R_r 区域与上述 R_d 区域一样不通过共形映射, 可在 z 平面内根据边界条件进行计算。当降雨历时 $t < t_q$ 时, 在 z 平面 R_r 区域内的土体在地表界面上处于自由状态, 当降雨历时 $t \geq t_q$ 时, 地表开始产生积水, 在 z 平面 R_r 区域内的土体在地表界面上受积水自重应力边界条件, 而在与 R_d 区域连接面上部与下部土体满足位移协调条件,

应力边界条件:

$$y = h_w: F_3(z, t) = \phi_r(z, t) + z \cdot \frac{\partial \phi_r(z, t)}{\partial z} + \overline{\psi_r(z, t)}. \quad (57)$$

位移协调边界条件:

$$y = h_d: \kappa_r \phi_r(z, t) - z \cdot \frac{\partial \phi_r(z, t)}{\partial z} - \overline{\psi_r(z, t)} = \kappa_d \phi_d(z, t) - z \cdot \frac{\partial \phi_d(z, t)}{\partial z} - \overline{\psi_d(z, t)}. \quad (58)$$

式中 $\phi_r(z, t), \psi_r(z, t)$ 为 R_r 区域土体内的解析函数, $\kappa_r = 3 - 4\nu_r$, ν_r 为 R_r 区域土体的泊松比。

联立式 (71) ~ (74) 可得

$$\begin{aligned} m_0 + \sum_{k=1}^{\infty} m_k z^k + \sum_{k=1}^{\infty} o_k z^{-k} + \sum_{k=1}^{\infty} k m_k z \bar{z}^{k-1} + \\ \sum_{k=1}^{\infty} (-k) o_k z \bar{z}^{-k-1} + p_0 + \sum_{k=1}^{\infty} p_k \bar{z}^k + \sum_{k=1}^{\infty} w_k \bar{z}^{-k} = \sum_{k=1}^{\infty} D_k z^k, \quad (59) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \kappa_r(m_0 + \sum_{k=1}^{\infty} m_k z^k + \sum_{k=1}^{\infty} o_k z^{-k}) - \sum_{k=1}^{\infty} k m_k z \bar{z}^{k-1} - \\ \sum_{k=1}^{\infty} (-k) o_k z \bar{z}^{-k-1} - (p_0 + \sum_{k=1}^{\infty} p_k \bar{z}^k + \sum_{k=1}^{\infty} w_k \bar{z}^{-k}) = \\ \kappa_d(e_0 + \sum_{k=1}^{\infty} e_k z^k + \sum_{k=1}^{\infty} f_k z^{-k}) - \sum_{k=1}^{\infty} k e_k z \bar{z}^{k-1} - \\ \sum_{k=1}^{\infty} (-k) f_k z \bar{z}^{-k-1} - (g_0 + \sum_{k=1}^{\infty} g_k \bar{z}^k + \sum_{k=1}^{\infty} l_k \bar{z}^{-k}). \quad (60) \end{aligned}$$

式中,

$$D_k = \begin{cases} 0 & (t < t_q, k = 0) \\ \gamma_w H_0 & (t \geq t_q, k = 0) \\ 0 & (k \neq 0) \end{cases}, \quad (61)$$

其中, γ_w 为雨水重度, H_0 为地表积水高度, t_q 为降雨产生积水时刻。

通过联立式 (59), (60) 可以求解待定系数 $m_0, m_k, o_k, p_0, p_k, w_k$, 根据式 (55), (56), 可得 R_d 区域土体内的解析函数 $\phi_r(z, t), \psi_r(z, t)$, 将其代入式 (22) ~ (24), 可得 R_r 区域土体位移场与应力场。

至此, 各土体区域内的位移场与应力场均得以求解。

3 算例验证

文献[29]对北京地铁 8 号线二期南段工程中的鼓楼—什刹海区间进行了沉降监测, 基于相关工程监测数据与本文解析解作对比。图 5 为监测断面隧道剖面图, 其中隧道埋深为 19.7 m, 隧道直径为 6.0 m, 盾构机开挖直径为 6.18 m。隧道穿越层土质主要为粉质黏土, 弹性模量为 28 MPa, 泊松比为 0.31。

鼓楼—什刹海区间分层监测^[29]从 2012 年 7 月 3 日开始进行首次监测, 此时盾构掌子面开挖至监测点处, 而在 7 月 4 日, 盾构掌子面刚通过监测断面便由

于故障停机,直至7月6日恢复。监测记录时间为2012年7月3日—2012年7月6日,通过当地天气记录查询可知,在此期间7月3日和7月5日没有下雨,7月4日和7月6日均有降雨,降雨强度平均约为1.22 mm/h(中雨)。

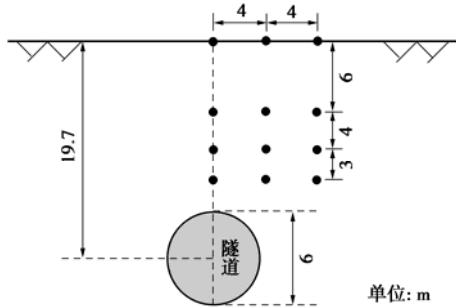


图 5 监测断面隧道剖面图

Fig. 5 Tunnel profile of monitoring section

图6为解析解与现场监测地表沉降对比结果,其中图6(a), (b), (c), (d)分别为地表、地下6 m、地下10 m、地下13 m处的沉降对比结果。图6(b)所示,7月3日(初始日期)在x为0, 4, 8 m处的地下6 m沉降监测结果分别为-1.83, -1.65, -1.3 mm, 相应的解析结果分别为-2.1, -1.9, -1.5 mm, 而7月4日(降雨日期)在x为0, 4, 8 m处的地下6 m沉降监测结果分别增长为-3.6, -2.9, -2.3 mm, 相应的解析结果分别增长为-3.7, -3.2, -2.1 mm, 监测结果较7月3日分别增大了96.7%, 75.8%, 76.9%, 解析结果较7月3日分别增大了76.2%, 68.4%, 40.0%。由此可知降雨对隧道开挖引起的地层变形影响显著,总体上看解析计算结果与工程监测结果吻合度较好,说明本文解析解具有良好的适用性。

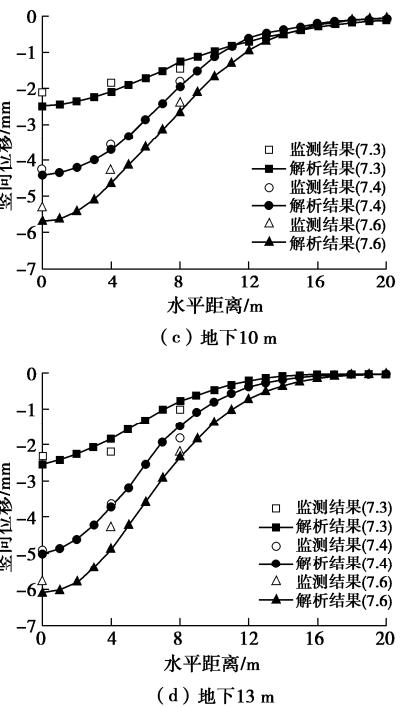
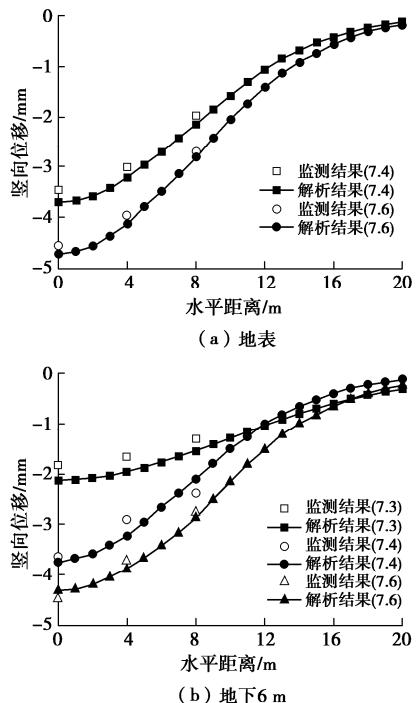


图 6 地层沉降对比

Fig. 6 Comparison of stratum subsidences

4 降雨敏感参数分析

本节对降雨强度(基本工况取6 mm/h)、饱和渗透系数(基本工况取 5×10^{-5} cm/s)、饱和层基质吸力(基本工况取20 cm)等参数进行影响因素分析,设置9个对比工况,每个参数分析对应3个工况。其中, R_s 隧道区域土体弹性模量为30 MPa, 泊松比为0.3; R_d 过渡层区域土体弹性模量为28 MPa, 泊松比为0.33; R_f 饱和层区域土体弹性模量为25 MPa, 泊松比为0.35。隧道半径为3 m, 埋深为9 m, 地层损失率为1.0%, 土体饱和重度为21.7 kN/m³, 饱和土体含水率为45%, 初始含水率为15%, 系数M, N分别取-0.028, 0.600。

4.1 降雨强度F的影响

图7为不同降雨强度下湿润层特性随降雨历时变化规律。计算结果表明,降雨强度F为2.5 mm/h(大雨), 6 mm/h(大暴雨), 10 mm/h(特大暴雨)时, 对应积水点 t_q 分别为9.3 h, 2.3 h, 0.6 h, 而湿润层达到完全饱和点 t_w 分别为14.8 h, 8.4 h, 6.1 h。由此可以看出,降雨强度越大,地表更快开始产生积水,且湿润层更早达到完全饱和状态。

4.2 饱和渗透系数 K_r 的影响

图8为不同饱和渗透系数 2×10^{-5} , 5×10^{-5} , 8×10^{-5} cm/s数值下地表沉降对比结果,其中图8(a)为各工况降雨影响隧道开挖引起x=0 m处地表沉降及

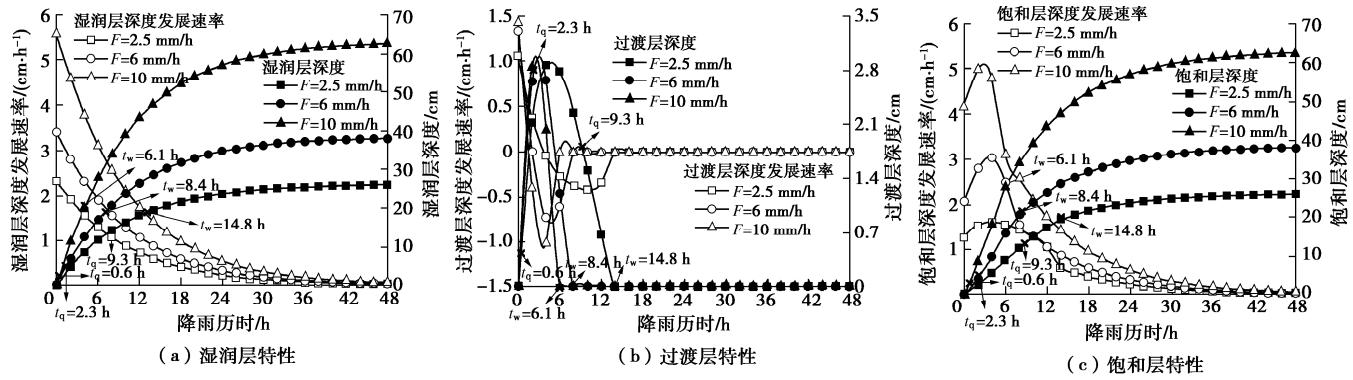


图 7 不同降雨强度下入渗区特性随降雨历时变化曲线

Fig. 7 Variation curves of characteristics in infiltration zone with rainfall duration under different rainfall intensities

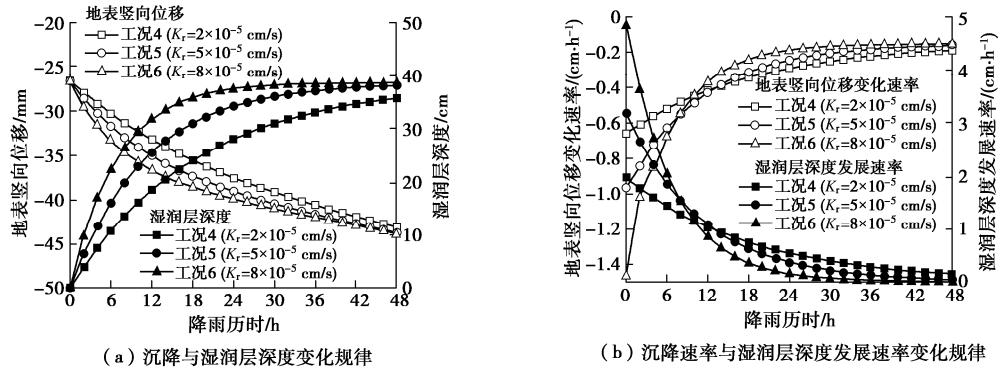
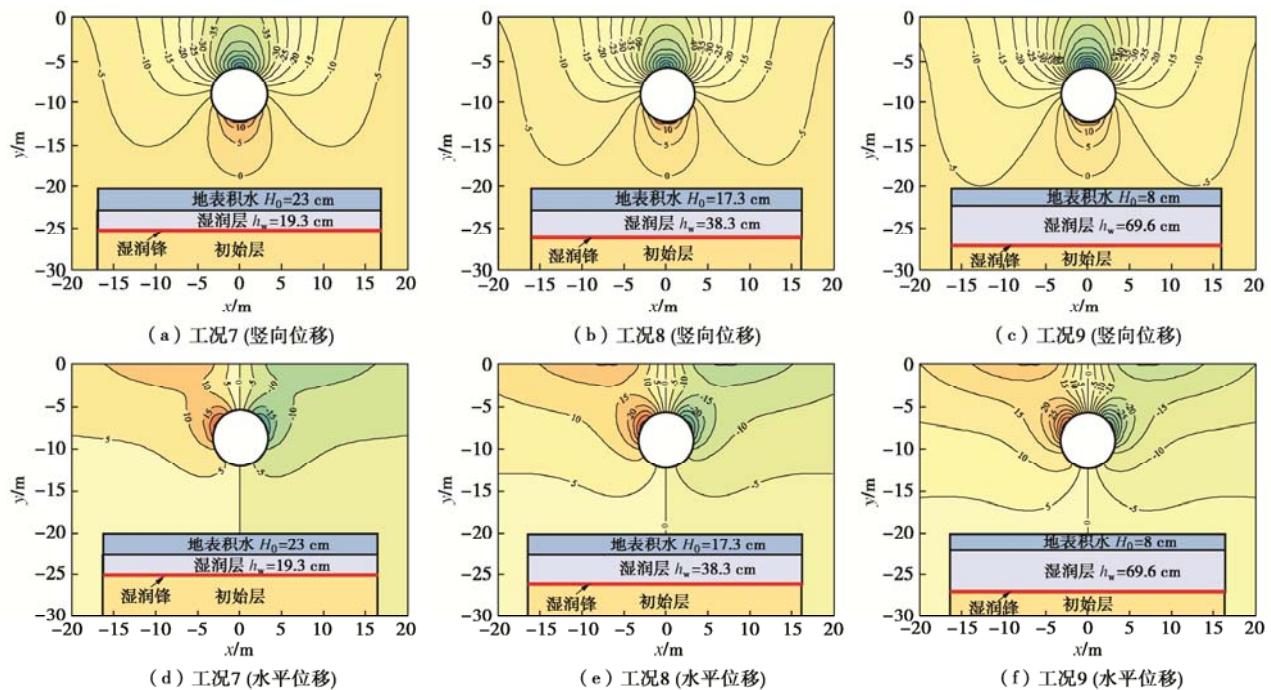
图 8 不同饱和渗透系数下地表 $x=0 \text{ m}$ 处沉降与湿润层特性对比Fig. 8 Comparison of surface settlements at $x=0 \text{ m}$ and characteristics of wetting front under different saturated permeabilities

图 9 48 h 不同饱和层基质吸力下地层位移等值线图

Fig. 9 Contour maps of displacement of strata under different matric suctions after 48 h

湿润层深度随降雨时间变化情况, 图 8 (b) 为各工况降雨影响隧道开挖引起 $x=0 \text{ m}$ 处地表沉降变化速率及湿润层深度发展速率随降雨时间变化情况。可以看

出, 降雨对地层变形影响显著, 随着降雨历时增加, 地层沉降越来越大。同时可以发现饱和渗透系数不影响最终沉降, 只影响达到最终沉降的速率, 饱和渗透

系数越大，其达到最终沉降的速率越快。由此可以得出饱和渗透系数影响降雨入渗速率，其值越大代表更快速达到最大入渗深度。

4.3 饱和层基质吸力 S_r 的影响

图 9 为降雨历时 48 h 时不同饱和层基质吸力 10, 20, 40 cm 数值下地层位移等值线图，其中图 9 (a), (b), (c) 分别为工况 7、工况 8、工况 9 的地层竖向位移等值线图，图 9 (d), (e), (f) 分别为工况 7、工况 8、工况 9 的地层水平位移等值线图。从中可以发现饱和层基质吸力对地层位移分布有显著影响，在降雨历时 48 h 时，饱和层基质吸力为 10, 20, 40 cm 下的湿润锋深度分别为 19.3, 38.3, 69.6 cm，同时随着饱和层基质吸力越大，地层竖向位移和水平位移越大，地层位移等值线图呈现出的“漏斗形”形态产生了明显扩大。由此可以得出，饱和层基质吸力影响降雨的最大入渗深度，其值越大代表最终能达到更大的入渗深度。

5 结 论

本文基于分层假定降雨入渗 Green-Ampt 模型，采用复变函数法，提出了降雨影响下隧道开挖引起的周围地层位移场和应力场解析解答。通过与工程实测数据对比，验证了其解析解的可靠性和实用性。此外，着重分析了降雨强度、饱和渗透系数、饱和层基质吸力对湿润锋特性以及扰动位移场的影响规律。研究成果可为降雨区域隧道工程施工影响作初期预估，主要得出 3 点结论。

(1) 本文理论解可以清晰解析降雨入渗的力学影响过程，可以详细揭示湿润锋动态、饱和层以及过渡层的动态演化历程，从而互补数值模拟方法的缺陷，并最终获取雨浸地层隧道施工扰动位移场和应力场的解析解。同时分层假定 Green-Ampt 模型能较好反映降雨入渗过程，且降雨入渗对隧道开挖引起的地层变形影响显著。经计算在降雨强度平均为 6 mm/h (大暴雨) 时，考虑降雨影响下隧道开挖引起降雨历时 48 h 后的竖向位移和水平位移较初始时刻分别增加了约 61% 和 56%，因此降雨影响不容忽略。

(2) 降雨强度、饱和层基质吸力、饱和渗透系数对隧道开挖引起的地层位移影响显著，其中降雨强度使得地面更快地产生积水使得地面水压力增大导致隧道开挖引起的土体位移增大，饱和层基质吸力反映了降雨入渗的最大深度，从而使得隧道上方湿润区增大，而饱和渗透系数对地层最终位移均无明显影响，而对变化速率影响显著。

(3) 随着降雨历时的增加，隧道扰动地层湿润锋

发展深度不断增大最终趋于稳定，其发展速率呈现出逐渐衰弱直至为零的规律；饱和层发展深度也随之增大，其深度曲线在完全饱和点之前呈现线性增长，在完全饱和点之后与湿润锋发展曲线完全一致；过渡层发展深度在饱和点之前呈现先增大后减小直至为零的规律，其深度曲线呈抛物线形态。隧道开挖扰动地层位移等值线图呈现出“漏斗形”形态。

致 谢：降雨强度分类以及降雨参数参考了中央气象局及地方气象资料，特此表示感谢！

参 考 文 献：

- [1] GREEN W H, AMPT G A. Studies on soil physics: 1. flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911, **4**(1): 1 - 24.
- [2] BODMAN G B, COLMAN E A. Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1944, **8**(1): 116 - 122.
- [3] 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 基于分层假设的 Green-Ampt 模型改进[J]. 水科学进展, 2012, **23**(1): 59 - 65. (PENG Zhen-yang, HUANG Jie-sheng, WU Jing-wei, et al. Modification of Green-Ampt model based on the stratification hypothesis[J]. Advances in Water Science, 2012, **23**(1): 59 - 65. (in Chinese))
- [4] MEIN R G LARSON C L. Modeling infiltration during a steady rain[J]. Water Resources Research, 1973, **9**(2): 384 - 394.
- [5] YAO W M, LI C D, ZHAN H B, et al. Time-dependent slope stability during intense rainfall with stratified soil water content[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, **78**(1): 4805 - 4819.
- [6] ZHANG J, HUANG H W, ZHANG L M, et al. Probabilistic prediction of rainfall-induced slope failure using a mechanics-based model[J]. Engineering Geology, 2014, **168**(1): 129 - 140.
- [7] 张洁, 吕特, 薛建峰, 等. 适用于斜坡降雨入渗分析的修正 Green-Ampt 模型 [J]. 岩土力学, 2016, **37**(9): 2451 - 2457. (ZHANG Jie, LÜ Te, XUE Jian-feng, et al. Modified Green-Ampt model for analyzing rainfall infiltration in slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(9): 2451 - 2457. (in Chinese))
- [8] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. Géotechnique, 1993, **43**(2): 361 - 362.
- [9] CELESTINO T B, GOMES R A M P, BORTOLUCCI A A.

- Errors in ground distortions due to settlement trough adjustment[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, **15**(1): 97 – 100.
- [10] 潘雨, 郑俊杰, 崔岚. 流变性软土隧道施工与运营期群桩响应分析[J]. 现代隧道技术, 2018, **55**(5): 112 – 120. (PAN Yu, ZHENG Jun-jie, CUI Lan. Analysis of responses of pile groups due to tunnelling during excavation and operation periods considering rheological behavior of soft soils[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, **55**(5): 112 – 120. (in Chinese))
- [11] 张成平, 张顶立, 骆建军, 等. 地铁车站下穿既有线隧道施工中的远程监测系统 [J]. 岩土力学, 2009, **30**(6): 1861 – 1866. (ZHANG Cheng-ping, ZHANG Ding-li, LUO Jian-jun, et al. Remote monitoring system applied to the construction of metro station undercrossing existing metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(6): 1861 – 1866. (in Chinese))
- [12] JALLOW A, OU C Y, LIM A. Three-dimensional numerical study of long-term settlement induced in shield tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **88**(6): 221 – 236.
- [13] 郑刚, 张扶正, 张天奇, 等. 盾构隧道开挖及补偿注浆对地层扰动影响的室内试验及数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(10): 1741 – 1753. (ZHENG Gang, ZHANG Fu-zheng, ZHANG Tian-qi, et al. Disturbance of shield tunnel excavation and compensation grouting to surrounding soil: laboratory tests and numerical simulations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(10): 1741 – 1753. (in Chinese))
- [14] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(9): 846 – 856.
- [15] 叶飞, 荀长飞, 陈治, 等. 盾构隧道同步注浆引起地表变形分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(4): 618 – 624. (YE Fei, GOU Chang-fei, CHEN Zhi, et al. Ground surface deformation caused by synchronous grouting of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(4): 618 – 624. (in Chinese))
- [16] 梁荣柱, 夏唐代, 林存刚, 等. 盾构推进引起地表变形及深层土体水平位移分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(3): 583 – 593. (LIANG Rong-zhu, XIA Tang-dai, LIN Cun-gang, et al. Analysis of ground surface displacement and horizontal movement of deep soils induced by shield advancing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(3): 583 – 593. (in Chinese))
- [17] 魏纲, 周杨侃. 随机介质理论预测近距离平行盾构引起的地表沉降[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊2): 113 – 119. (WEI Gang, ZHOU Yang-kai. A simplified method for predicting ground settlement caused by adjacent parallel twin shield tunnel construction based on stochastic medium theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S2): 113 – 119. (in Chinese))
- [18] VERRUIJT A, BOOKER J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane[J]. Géotechnique, 1996, **46**(4): 753 – 756.
- [19] 王立忠, 吕学金. 复变函数分析盾构隧道施工引起地基变形[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(3): 319 – 327. (WANG Li-zhong, LÜ Xue-jin. A complex variable solution for different kinds of oval deformation around circular tunnel in an elastic half plane[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(3): 319 – 327. (in Chinese))
- [20] LÜ A Z, ZHANG L Q, ZHANG N. Analytical stress solutions for a circular pressure tunnel at pressure and great depth including support delay[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, **48**(3): 514 – 519.
- [21] 傅鹤林, 张加兵, 袁维, 等. 基于复变理论的盾构隧道围岩位移预测分析[J]. 现代隧道技术, 2016, **53**(2): 86 – 94. (FU He-lin, ZHANG Jia-bing, YUAN Wei, et al. Elastic complex variable theory based prediction of shield tunnel surrounding rock displacement[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, **53**(2): 86 – 94. (in Chinese))
- [22] 王华宁, 张玉栋, 蒋明镜. 流变岩土体中浅埋隧道围岩力学响应的理论解[J]. 力学季刊, 2016, **37**(1): 22 – 32. (WANG Hua-ning, ZHANG Yu-dong, JIANG Ming-jing. Analytical solutions for shallow tunnel excavated in rheological geomaterial[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2016, **37**(1): 22 – 32. (in Chinese))
- [23] 王华宁, 蒋明镜, 何平. 流变岩体中椭圆洞室断面开挖过程的力学分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(11): 1979 – 1987. (WANG Hua-ning, JIANG Ming-jing, HE Ping. Analytical solutions for elliptical tunnels in rheological rock considering excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(11): 1979 – 1987. (in Chinese))
- [24] WANG Z, YAO W J, CAI Y Q, et al. Analysis of ground surface settlement induced by the construction of a large-diameter shallow-buried twin-tunnel in soft ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, **83**(1):

- 520 – 532.
- [25] LEI M F, LIU J Y, LIN Y X, et al. Deformation characteristics and influence factors of a shallow tunnel excavated in soft clay with high plasticity[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, **5**(7): 1 – 14.
- [26] 刘 畅, 季凡凡, 郑 刚, 等. 降雨对软土基坑支护结构影响实测及机理研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(3): 447 – 456. (LIU Chang, JI Fan-fan, ZHENG Gang, et al. Measurement and mechanism of influences of rainfall on supporting structures of foundation pits in soft soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(3): 447 – 456. (in Chinese))
- [27] FANG Q, TAI Q M, ZHANG D L, et al. Ground surface settlements due to construction of closely-spaced twin tunnels with different geometric arrangements[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, **51**(1): 144 – 151.
- [28] XIE X Y, WANG Q, SHAHROUR I, et al. A real-time interaction platform for settlement control during shield tunnelling construction[J]. *Automation in Construction*, 2018, **94**(11): 154 – 167.
- [29] 韩 煊, 王 法, 雷崇红, 等. 盾构隧道施工引起的土层分层沉降规律实测研究 [J]. *隧道建设*, 2017,
- [30] 侯福金, 韩现民, 李术才, 等. 降雨对隧道浅埋段施工力学效应影响研究[J]. *土木工程学报*, 2019, **52**(增刊 2): 139 – 148. (HOU Fu-jin, HAN Xian-min, LI Shu-cai, et al. Research on construction mechanical effect of shallow buried tunnel under rainfall condition[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, **52**(S2): 139 – 148. (in Chinese))
- [31] GATTINONI P, CONSONNI M, FRANCANI V, et al. Tunnelling in landslide areas connected to deep seated gravitational deformations: An example in Central Alps (northern Italy)[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, **93**(11): 103100.
- [32] MUSKHELISHVILI N I. *Mathematical Theory of Elasticity*[M]. Leyden: International Publishing, 1954.
- [33] TIMOSHENKO P, GOODIER J N. *Theory of Elasticity*[M]. New York: Mc Graw-Hill, 1970.
- [34] PARK K H. Analytical solution for tunnelling-induced ground movement in clays[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, **20**(3): 249 – 261.

彩色插图索引

- DOI: 10.11779/CJGE202106001 一文彩色插图 (后插 1~3)
- DOI: 10.11779/CJGE202106002 一文彩色插图 (封 2)
- DOI: 10.11779/CJGE202106004 一文彩色插图 (后插 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202106006 一文彩色插图 (后插 4, 封 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202106008 一文彩色插图 (封 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202106010 一文彩色插图 (封 2, 封 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202106011 一文彩色插图 (封 2)
- DOI: 10.11779/CJGE202106012 一文彩色插图 (封 3)
- DOI: 10.11779/CJGE202106018 一文彩色插图 (后插 4)