

# 岩土复合地层盾构隧道对地表变形及应力分析的研究

杨海涛<sup>1</sup>, 晏莉<sup>1</sup>, 严志伟<sup>2</sup>, 吴昊<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 西南交通大学 隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

**摘要:** 考虑到岩体与土体力学性质的差异, 利用复变函数结合随机介质理论建立岩土复合地层隧道开挖的力学解析模型, 将理论计算结果与数值模拟、现场实测结果进行对比。结果表明: 解析解、数值解与实测值三者的吻合度相对较高, 且数值解与理论解的沉降槽宽度保持一致, 说明该理论计算方法具有较高的可信度。随后讨论了作用于岩、土层分界面不同竖向荷载、岩层隧道埋深与其半径之比以及岩体泊松比等参数对地表变形及洞周应力的影响。结果表明: 随着岩、土层分界面竖向荷载的增加, 地表沉降也不断增大, 洞周环向压应力在隧道拱腰附近显著增大而拱顶环向拉应力变化相对缓慢; 随着深径比  $h/r$  的减小, 地表沉降逐渐增大, 当  $h/r \geq 3$  时, 增大深径比对洞周环向应力的影响相对较小; 岩体泊松比越大, 则地表沉降越小, 洞周环向应力分布越均匀。

**关键词:** 岩土复合地层; 盾构隧道; 土体变形; 洞周应力; 应力分析; 复变函数; 随机介质理论

中图分类号: U456.3<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)03-0165-09

## Ground deformation and stress analysis of shield tunnel in rock and soil composite stratum

YANG Haitao<sup>1</sup>, YAN Li<sup>1</sup>, YAN Zhiwei<sup>2</sup>, WU Hao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Considering the difference of mechanical properties between rock and soil mass, the mechanical analytical model of tunnel excavation in geotechnical composite stratum is established using the complex variable function combined with stochastic medium theory. Then the theoretical calculation results are compared with numerical simulation and field measurement results. The results show that the analytical solution and numerical solution are in good agreement with the measured values, and the settlement trough width of numerical solution and theoretical solution are consistent, which indicates that the theoretical calculation method has high reliability. Then the effects of different vertical loads acting on rock – soil interface, the ratio of buried depth to radius of rock tunnel and Poisson's ratio of rock mass on surface deformation and stress around tunnel are discussed. The results show that with the increase of the vertical load of the rock – soil interface, the surface settlement also increases, and the circumferential compressive stress around the tunnel increases significantly near the arch waist, while the circumferential tensile stress of the vault changes relatively slowly. With the decrease of the depth – diameter ratio  $h/r$ , the surface subsidence also increases. When  $h/r \geq 3$ , the increase of the depth – diameter ratio has a relatively small impact on the circumferential stress around the cave. The greater the Poisson's ratio of the rock mass, the smaller the surface settlement, and the more uniform the circumferential stress distribution around the cave, and vice versa.

**Key words:** soil and rock composite stratum; shield tunnel; soil deformation; stress around the cave; stress analysis; complex variable function; stochastic medium theory

收稿日期: 2022-07-04; 修回日期: 2022-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408067); 湖南省教育厅优秀青年项目(18B136)

作者简介: 杨海涛(1995—), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要从事隧道与岩土工程的研究工作。

通讯作者: 晏莉(1979—), 女, 湖南株洲人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事隧道与岩土工程方面的教学与研究工作。

## 1 研究背景

天然地层一般呈层状分布,硬岩层与软土层的物理力学性质有较大的差异,而城市地层多以“上软下硬”类的岩土复合地层居多<sup>[1]</sup>。在岩土复合地层中开挖隧道会引起上部软土层产生较大的变形甚至塌陷,给隧道施工带来挑战。因此,研究岩土复合地层由隧道施工引起的地表沉降规律具有一定的工程意义。

隧道开挖会打破原有地层的应力平衡,导致洞周一定范围内的围岩发生应力变化,并伴随着围岩变形。准确预测隧道开挖引起的地层变形及应力是隧道设计的关键,为此国内外研究人员展开了大量的研究,主要研究方法有数值分析法<sup>[2-3]</sup>、模型试验<sup>[4-5]</sup>、现场实测<sup>[6-7]</sup>、解析法等。解析法是通过数学、力学理论严密推导得到精确解,尽管对所求问题进行了一定的数学简化,但其计算速度快,成本低,易于编程,计算过程中仅需要输入少量参数即可获得模型问题的精确解,因此解析法也被广泛运用于地层变形和应力计算。张治国等<sup>[8]</sup>通过建立弹性层状半空间地基模型,采用 Laplace 积分变换和矩阵递推技术获得了多层地基盾构隧道开挖对既有隧道影响的连续弹性方法;李涛等<sup>[9-10]</sup>考虑了岩土物理力学性质的差异,将岩土视为两种不同的随机介质,利用随机介质理论获得了岩土分层的地表沉降计算方法;Zhang 等<sup>[11]</sup>根据城市地下水位变化,将水位上下两种土层视为两种不同弹性体,利用复变函数获得了双层弹性介质盾构隧道受水位变化影响的解析解;傅鹤林等<sup>[12]</sup>利用当层法和 Loganathan 修正公式建立了复合地层中浅埋盾构隧道开挖的位移场预测分布模型。

综上,目前求解岩土复合地层浅埋盾构隧道的地表沉降理论计算方法有多种,并取得了许多有价值的成果,然而大部分研究均是将其复合地层视为一种材料,如弹性材料、散体介质,鲜有考虑岩体与土体物理力学性质的本质差异。实际上,许多试验已经证明,岩石(如花岗岩、玄武岩、白云岩等)的应力-应变为线弹性关系,而土体是由土颗粒、液相、气相组成,是一种分散体。因此在理论研究中不能简单地将岩土体视为同一种材料进行分析,基于此,针对现有理论分析的不足之处,本文考虑将岩体视为弹性材料,将土体视为散体介质,提出利用复变函数结合随机介质理论的计算方法,获得岩土复合地层盾构隧道开挖的力学解析解,计算过程为:首先利

用复变函数获得岩层区域开挖隧道的解析解,从而获得岩土分界面的沉降,随后将岩土分界面沉降曲线与分界面所组成的区域视为“不等厚层开挖”,利用随机介质理论获得最终地表沉降。将本文理论计算方法求得的结果与数值模拟、现场实测值进行对比分析,进一步验证该方法的合理性。最后讨论了不同岩层分界面竖向荷载、隧道岩层埋深与半径之比以及岩体泊松比等参数对地表变形和洞室应力变化的影响规律。

## 2 问题描述

由于复变函数与随机介质理论的局限性,岩土复合地层盾构隧道力学解析模型采用如下基本假设:

- (1) 隧道在纵向方向上无限长,符合平面应变问题;
- (2) 岩层为均质线弹性体,土层为散体材料;
- (3) 上覆土层自重对岩土分界面的荷载视为竖向均布荷载  $q_s$ ;
- (4) 岩土层分界面的变形为小变形,且岩层与土层紧密接触,无脱空。

图1为直角坐标系下岩土复合地层隧道开挖的计算简图。图中: $h$ 为隧道中心至岩土层分界面的垂直距离,m; $H$ 为岩土层分界面到地表的垂直距离,m; $r$ 为盾构隧道开挖的半径,m;K、A点分别为 $x_1o_1y_1$ 坐标系和 $x_2o_2y_2$ 坐标系的原点;B、G点表示无穷远处; $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 分别为土体、岩体的重度, $\text{kN/m}^3$ ; $E_1$ 、 $E_2$ 分别为土体、岩体的弹性模量,MPa; $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 分别为土体、岩体的泊松比。R区域为岩石层隧道开挖以外的区域,且不包含土层区域;Q区域为土层区域。

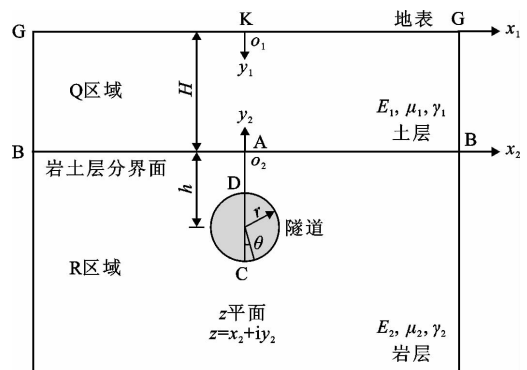


图1 岩土复合地层盾构隧道开挖计算简图

## 3 基本理论和求解

### 3.1 半无限平面开孔问题的求解

本文将岩层视为均质线弹性体,故可以将隧道

在岩层中开挖问题视为半无限弹性平面开孔问题,其计算模型如图 2 所示。

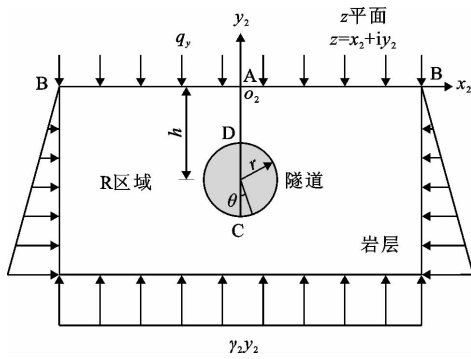


图 2 岩层隧道开挖计算模型

根据 Muskhelishvili<sup>[13]</sup> 提出的复变函数求解方法,平面区域 R 的应力与位移可以表达为:

$$\sigma_x + \sigma_y = 4 \operatorname{Re} \varphi'(z) \quad (1)$$

$$\sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} = 2[z\varphi''(z) + \psi'(z)] \quad (2)$$

$$2G(u_x + iu_y) = (3 - 4\mu)\varphi(z) - z\overline{\varphi'(z)} - \overline{\psi(z)} \quad (3)$$

式中: $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$  分别为直角坐标系下的 3 个应力分

量,Pa;  $u_x$ 、 $u_y$  分别为直角坐标系下的位移分量,m;  $\varphi(z)$ 、 $\psi(z)$  为解析函数; $\mu$  为岩体的泊松比; $G$  为岩体的剪切模量,Pa。

在计算半无限平面岩土复合地层隧道开挖过程中,由于土层与岩层的物理力学性质不同,所以在计算分析时需要将土层与岩层分开计算。根据有关研究,可以将土层自重荷载  $q_y$  施加于岩土层分界面上, $q_y$  的大小与上覆土层性质以及隧道开挖半径与上覆岩层深度的比值有关<sup>[14]</sup>。

对于图 2 所示的浅埋隧道开挖模型,可以将其分解成 3 个部分进行计算,如图 3 所示。第 1 部分解是初始状态的应力解,即隧道尚未开挖,在上部土层荷载和岩体自重作用下的围岩应力场,其作用于洞周的表面力记为  $F_1$ ;第 2 部分为作用于隧道圆心处竖直向上的集中荷载  $P(P = \pi r^2 \gamma_2)$ ,此部分为平衡开挖隧道内部岩体自重效应,其作用于洞周的表面力记为  $F_2$ ;第 3 部分为平衡隧道开挖洞周的应力边界条件,由于第 1、第 2 部分解线性叠加满足岩土层分界面应力边界条件而不满足隧道洞周应力边界条件,因此需要在洞周作用应力  $F_3$ ,其值为  $F_3 = -F_1 - F_2$ 。

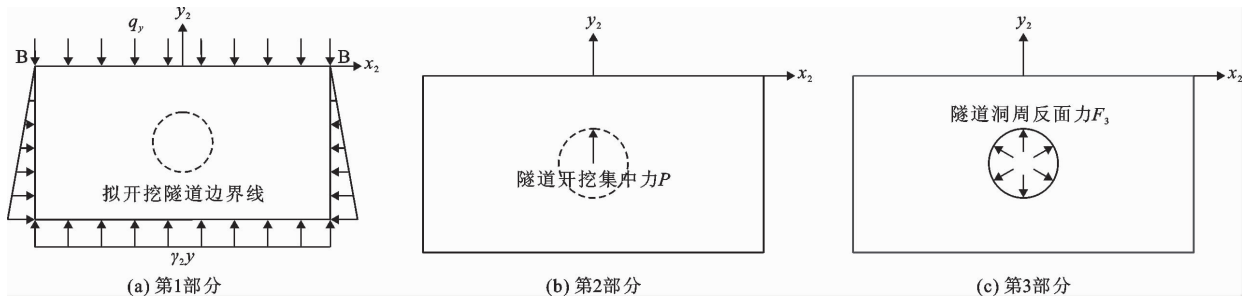


图 3 岩层隧道开挖计算模型分解应力边界条件

3.1.1 第 1 部分应力解 隧道开挖前仅受到上覆土层荷载和岩体重力作用时的应力场,可以表示为:

$$\begin{cases} \sigma_x = k_0(-q_y + \gamma_2 y) \\ \sigma_y = -q_y + \gamma_2 y \\ \tau_{xy} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $k_0$  为岩体的静止压力系数。

初始应力在隧道洞周产生的表面力为<sup>[15]</sup>:

$$F_1 = \gamma_2 y \left( -\frac{1}{2}\gamma_2 \theta - \frac{1}{4}r \sin 2\theta - h \sin \theta \right) - ik_0 \gamma_2 r \left[ h(1 - \cos \beta) + \frac{1}{4}r(1 - \cos 2\beta) \right] + qr(ik_0 \cos \theta - \sin \theta - ik_0) \quad (5)$$

3.1.2 第 2 部分应力解 第 2 部分解可以视为半无限平面内作用集中力  $P = \pi r^2 \gamma_2$  作用的应力场,其应力解析函数为<sup>[16]</sup>:

$$\varphi_2(z) = -\frac{iP}{2\pi} \log(z - ih) + \frac{iP}{8\pi(1 - \mu)} \log\left(\frac{z - ih}{z + ih}\right) + \frac{P}{4\pi(1 - \mu)} \cdot \frac{h}{z - ih} \quad (6)$$

$$\psi_2(z) = -\frac{iP}{2\pi} \log(z - ih) + \frac{iP}{8\pi(1 - \mu)} \left[ (3 - 4\mu) \log\left(\frac{z - ih}{z + ih}\right) + \frac{z}{z - ih} - \frac{z}{z + ih} \right] - \frac{P(1 - 2\mu)}{4\pi(1 - \mu)} \cdot \frac{h}{z - ih} + \frac{P}{4\pi(1 - \mu)} \cdot \frac{hz}{(z - ih)^2} \quad (7)$$

3.1.3 第3部分应力解 第3部分应力解与  $F_1$ 、 $F_2$  大小有关,为了获得第3部分应力解析函数,需要采用保角映射将图2中  $z$  平面区域映射成  $\zeta$  平面的圆环区域  $R'$  (如图4所示),其中映射函数为<sup>[17]</sup>:

$$z = \omega(\zeta) = -ih \cdot \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2} \cdot \frac{1 + \zeta}{1 - \zeta} \quad (8)$$

式中: $\alpha = (h - \sqrt{h^2 - r^2})/r$ ,  $\omega(\zeta)$  为映射函数。

图2所示  $z$  平面中  $R$  区域内的 A、B、C、D 各点分别对应  $\zeta$  平面中  $R'$  区域内的 A'、B'、C'、D' 点。

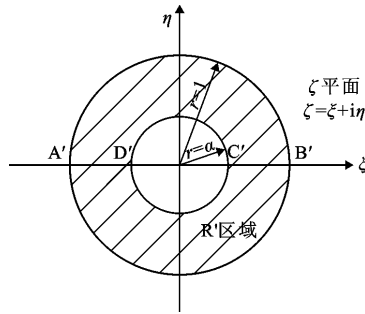


图4 岩层隧道开挖计算模型映射后区域

假设隧道洞周在表面力  $F_3$  作用下的解析函数为  $\varphi_3(z)$ 、 $\psi_3(z)$ ,共形映射不改变解析函数的性质,故  $\varphi_3(\zeta)$ 、 $\psi_3(\zeta)$  在映射后  $R'$  区域也是处处解析的,将其展开为洛朗级数形式:

$$\varphi_3(\zeta) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \zeta^k + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \zeta^{-k} \quad (9)$$

$$\psi_3(\zeta) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \zeta^k + \sum_{k=1}^{\infty} d_k \zeta^{-k} \quad (10)$$

式中:  $a_0$ 、 $a_k$ 、 $b_k$ 、 $c_0$ 、 $c_k$ 、 $d_k$  为待定系数,其值由地表和隧道边界条件确定。

此时地表边界无应力,地表对应圆环的边界  $\rho = 1, \zeta = \sigma$ ,应力边界条件的复变函数可以表示为:

$$\varphi_3(\zeta) + \frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} \overline{\varphi_3(\zeta)} + \overline{\psi_3(\zeta)} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} = \frac{1}{2}(1 - \sigma^{-2}) \quad (12)$$

将公式(9)、(10)代入公式(11)可得:

$$c_0 = -\bar{a}_0 - \frac{1}{2}a_1 - \frac{1}{2}b_1 \quad (13)$$

$$c_k = -\bar{b}_k + \frac{1}{2}(k-1)a_{k-1} - \frac{1}{2}(k+1)a_{k+1} \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (14)$$

$$d_k = -\bar{a}_k + \frac{1}{2}(k-1)b_{k-1} - \frac{1}{2}(k+1)b_{k+1} \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (15)$$

隧道洞周对应圆环的内边界  $\rho = \alpha, \zeta = \alpha\sigma$ ,此

时洞周边界的表面力为  $F_3$ ,洞周表面力与复变应力函数的关系为:

$$F_3(\zeta) = \varphi_3(\zeta) + \frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} \overline{\varphi_3(\zeta)} + \overline{\psi_3(\zeta)} + C \quad (16)$$

其中  $F_3 = -F_1 - F_2$ ,可以将  $F_3$  展开为洛朗级数表达式,即:

$$F_3(\zeta) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k \sigma^k \quad (17)$$

式中:  $B_k$  与第1、2部分应力作用于隧道洞周表面力大小有关,其具体表达式可参考文献[18]。

此时有:

$$\frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} = \frac{-\alpha\sigma - (1 - 2\alpha^2) + \alpha(2 - \alpha^2)\sigma^{-1} - \alpha^2\sigma^{-2}}{2(1 - \alpha\sigma)} \quad (18)$$

为了去掉公式(18)中的分母  $(1 - \alpha\sigma)$ ,将等式两边同时乘以  $(1 - \alpha\sigma)$ ,且令  $A_k = B_k(1 - \alpha\sigma)$ ,代入公式(18)可得:

$$(1 - \alpha^{2k+2})a_{k+1} + (1 - \alpha^2)(k+1)\bar{b}_{k+1} = \alpha^2(1 - \alpha^{2k})a_k + (1 - \alpha^2)k\bar{b}_k - A_{k+1}\alpha^{k+1} \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (19)$$

$$(1 - \alpha^2)\alpha^{2k}(k+1)a_{k+1} + (1 - \alpha^{2k+2})\bar{b}_{k+1} = (1 - \alpha^2)\alpha^{2k}ka_k + (1 - \alpha^{2k})\bar{b}_k - \bar{A}_{-k}\alpha^k \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (20)$$

$$(1 - \alpha^2)(a_1 + \bar{b}_1) + \bar{C} = -\bar{A}_0 \quad (21)$$

$$(1 - \alpha^2)(a_1 + \bar{b}_1) - C\alpha^2 = -A_1\alpha \quad (22)$$

通过公式(21)~(22)可以求得  $C$  以及  $a_1 + \bar{b}_1$ ,然而对于  $a_1$  和  $b_1$  并不能确定。 $\varphi_3(\zeta)$ 、 $\psi_3(\zeta)$  在  $R'$  区域是收敛的,因此可以根据  $\varphi_3(\zeta)$ 、 $\psi_3(\zeta)$  的收敛性确定相关系数,具体过程如下:先假设  $a_1 = 0$ ,进而获得  $b_1$ ,最后根据公式(19)~(20)可以获得  $a_k$ 、 $b_k$ 。当  $k$  足够大时,  $a_k$  会趋于一个不为零的常数,最后将所有的  $a_k$ 、 $b_k$  减去这个常数,即可获得实际的  $a_k$ 、 $b_k$ ,随后根据公式(13)~(15)获得  $c_k$ 、 $d_k$ 。

至此,岩层盾构隧道开挖的解析函数已经求得,将这3部分应力解析函数线性叠加,根据公式(1)~(2)可以获得岩层盾构隧道开挖引起的围岩应力。而围岩位移与应力的求解并不相同,由于自重产生的先期变形已经基本稳定,因此利用公式(3)求解围岩位移时,仅需要叠加第2、3部分的位移即可。

隧道开挖后位移变化显著的范围仅局限于隧道周围部分区域,当超过一定范围后,隧道施工引起的

位移变化可以忽略不计,然而大部分学者在利用复变函数理论求解隧道施工引起的地层位移解时<sup>[17,19]</sup>,均将无穷远点视为约束参考点,这显然与实际并不相符。研究表明,在半无限平面中荷载作用下的围岩只有相对位移并无绝对位移<sup>[20]</sup>,且相对位移会随着与位移约束参考点距离的增大而增大。本文在计算隧道施工产生的岩土层分界面沉降时,参考实际工程经验,考虑隧道施工对围岩的实际影响范围大致为(3~5)*D* (*D*为隧道直径),故在距离隧道中心点以下 3.5*D* 处的下部边界设置竖向位移约束边界,如图 5 所示。在计算地表任意一点(*x*,0)处的相对竖向位移时,其对应的竖向位移约束边界应为(*x*, -*h* - 7*r*),将(*x*,0)处的竖向位移计算值减去(*x*, -*h* - 7*r*)的竖向位移计算值,即可获得(*x*,0)处的相对竖向位移<sup>[21-22]</sup>。

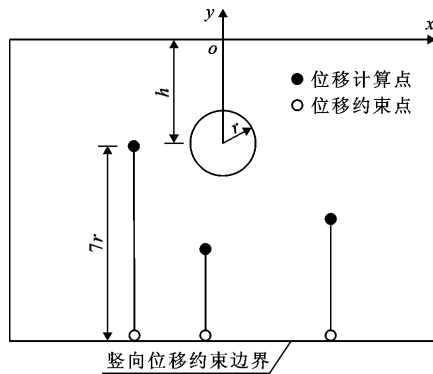


图 5 半无限平面竖向位移约束布置图

### 3.2 土层地表沉降的求解

随机介质理论假定土体为散体介质,将岩土层变形分解成多个介质的变形,在求解地表变形计算式时,地层选取整体坐标系 *xoy*,变形部分采用局部坐标系  $\varepsilon, \eta$ ,取长度、宽度方向为无限小单元,定义为  $d\varepsilon, d\eta$ ,如图 6 所示。根据随机介质理论,在单元变形  $d\varepsilon d\eta$  的作用下,距离单元中心为 *x* 的地表沉降  $W_e(x)$  为<sup>[23]</sup>:

$$W_e(x) = \frac{\tan \beta}{\eta} \exp\left[-\pi \frac{\tan^2 \beta}{\eta^2} x^2\right] d\varepsilon d\eta \quad (23)$$

式中: $\eta$ 为开挖单元距地表的距离,m;角度参数 $\beta$ 与土层的影响角有关。

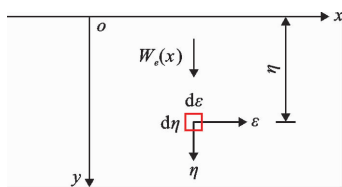


图 6 岩土层单元变形模型示意图

利用复变函数理论可以获得隧道开挖引起岩土层分界面的沉降,将分界面沉降与分界面所围成的区域记作 *M*,如图 7 所示。在整个变形范围 *M* 内假定每个随机介质均发生变形,利用叠加原理可以获得最终地表沉降  $W(x)$  为:

$$W(x) = \iint_M \frac{\tan \beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x - \varepsilon)^2\right] d\varepsilon d\eta \quad (24)$$

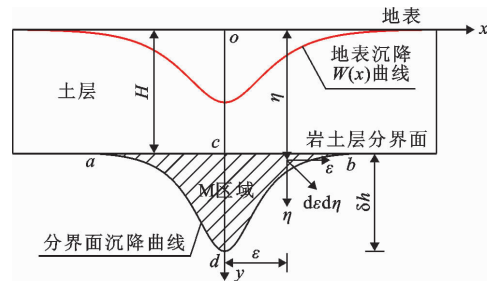


图 7 复合地层沉降传递示意图

因此只要确定 *M* 区域的积分上下限 *a*、*b*、*c*、*d*,代入式(24),即可获得任意一点的地表沉降  $W(x)$  为:

$$W(X) = \iint_{a,c}^{b,d} \frac{\tan \beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x - \varepsilon)^2\right] d\varepsilon d\eta \quad (25)$$

岩土分界面沉降曲线与作用在岩土层分界面的荷载大小、岩体物理力学参数、隧道开挖半径等相关,根据有关建议,可以利用抛物线拟合岩土分界面沉降曲线<sup>[9-10]</sup>,即:

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (26)$$

公式(26)中的参数 *A*、*B*、*C* 均可由 3.1 节所求得的岩土层分界面沉降曲线拟合得到。最终可得:

$$a = -\frac{B}{2A} - \sqrt{\frac{H-C}{A} + \frac{B^2}{4A^2}}$$

$$b = -\frac{B}{2A} + \sqrt{\frac{H-C}{A} + \frac{B^2}{4A^2}} \quad (27)$$

$$c = H$$

$$d = H + C$$

土层影响角 $\beta$ 与土层的摩擦角有关。根据有关学者的建议<sup>[24]</sup>,可以将其写为:

$$\tan \beta = \frac{20}{50 - \varphi} \quad (28)$$

式中: $\varphi$ 为土层的内摩擦角,(°)。

### 3.3 岩土复合地层盾构隧道程序计算流程

本文基于 MATLAB 计算语言编制了上述问题的计算程序,计算流程如图 8 所示。在计算程序中,需要输入以下参数:

*h*、*H*分别为岩层厚度、土层厚度,m;*r*为隧道的开挖半径,m;*E*<sub>1</sub>、*E*<sub>2</sub>分别为土体、岩体的弹性模量,MPa;

$\mu_1$ 、 $\mu_2$  分别为土体、岩体的泊松比;  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  分别为土体、岩体的重度,  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $\varphi$  为土体内摩擦角, ( $^\circ$ )。

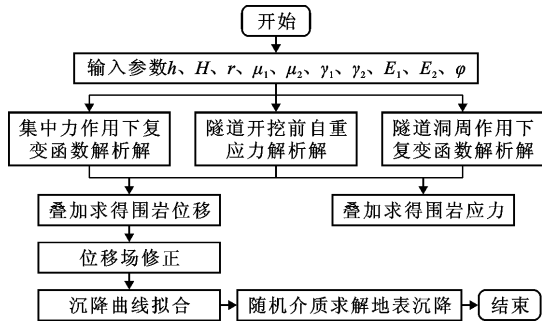


图8 岩土复合地层盾构隧道计算流程图

## 4 算例分析

为了验证上述岩土复合地层盾构隧道理论计算方法的可行性,本文以大连地铁5号线某“上软下硬”地层盾构区间隧道工程为例<sup>[25]</sup>,同时建立有限差分二维平面模型进行分析联合验证该方法的可行性。土层本构关系选用摩尔-库伦模型,土体弹性模量为30 MPa,泊松比为0.35,重度为20  $\text{kN}/\text{m}^3$ ,内摩擦角取为 $10^\circ$ 。岩体本构关系选用线弹性模型,岩体弹性模量为80 MPa,泊松比为0.25,重度为22  $\text{kN}/\text{m}^3$ 。此外,土层厚度为8 m,隧道中心到基岩面的距离为12 m,半径为3 m,底部固定约束,左、右两侧水平约束,地表为自由边界,数值计算模型简图如图9所示。

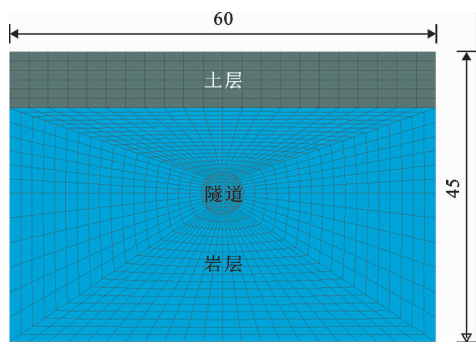


图9 算例分析数值计算模型简图(单位:m)

通过本文理论计算方法获得地表沉降,并与数值模拟结果和现场实测值进行比较,如图10所示。

从图10中可以看出,盾构隧道开挖后的地表沉降曲线呈现出典型的“V”型分布,地表沉降最大实测值为8.4 mm,而理论解、数值解的最大地表沉降分别为8.0、7.6 mm,二者与实测值的相对差值分别为4.7%和9.5%,且二者的地表沉降槽影响宽度基本保持一致,可见数值解与理论计算解吻合度较高,

表明本文所提出的理论计算方法具有较高的可信度。图10表明隧道开挖后的主要影响范围集中在 $-10\text{ m} < x < 10\text{ m}$ 处,因此在实际工程中需要重点关注此区段不均匀变形对临近建筑物或地下管线安全的影响。

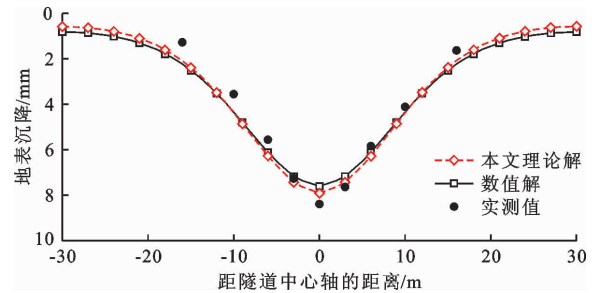


图10 盾构隧道地表沉降理论解、数值解与实测值对比

## 5 参数分析

假定岩体的弹性模量为80 MPa,岩体重度为22  $\text{kN}/\text{m}^3$ ,盾构隧道半径为3 m,上覆土层厚度为定值,土层影响角 $\beta$ 不变,研究作用于岩层分界面的上覆土层自重荷载、隧道在岩体中的埋深与半径比值、岩体泊松比对地表变形及洞周应力的影响分布规律。

### 5.1 上覆土层自重荷载的影响

隧道开挖后在上覆岩土层会形成压力拱<sup>[26]</sup>,上部围岩自重由于拱效应会使部分围岩自重应力转移至两侧支撑岩体,因此作用于岩土层分界面的实际荷载会小于上覆软土层的自重荷载。为了探讨上覆土层自重荷载对地表变形的影响,假设岩体隧道中心埋深 $h$ 为6 m,上部土层厚度 $H$ 为10 m,土层重度为20  $\text{kN}/\text{m}^3$ ,根据有关学者<sup>[14]</sup>的建议,可以将作用于岩土层分界面的荷载 $f$ 分别取为50、100、150、200 kPa,获得岩土复合地层隧道开挖后的地表沉降曲线及隧道洞周环向应力变化曲线,如图11所示。

从图11(a)可以看出,4种不同土层自重荷载作用下岩土层分界面的地表沉降均呈现“V”型分布,并在隧道正上方达到最大值;随着土体自重荷载的增大,地表沉降也随之增大,岩土层分界面荷载从50 kPa增加至200 kPa时,地表最大沉降增加了16.3 mm,说明上覆土层自重荷载对地表变形有着重要的影响,并且由此可以推断出,隧道开挖后上部土层若能形成“拱”效应,则可以有效地减少隧道开挖引起的地表沉降。从图11(b)可以看出,由于保角映射的性质,图2中隧道两侧拱腰 $\theta$ 对应的角度分别为 $60^\circ$ 和 $300^\circ$ ,拱底和拱顶 $\theta$ 分别对应 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ ,隧道开挖后,随着作用于岩土层分界面竖向荷载的增

加,洞周拱腰附近处的环向压应力显著增大,而在隧道拱顶处的环向应力为拉应力,并随着岩层分界面荷载的增加而缓慢增大,说明岩土分界面的荷载越大,拱顶附加出现环向拉应力的可能性就越大。

### 5.2 深径比的影响

为了研究岩层隧道埋深与半径之比对地表位移

及洞周应力的影响,将隧道在岩体中的埋深与隧道半径的比值  $h/r$  定义为深径比。在岩层分界面作用荷载大小为 150 kPa 的条件下,设隧道半径  $r$  不变,通过改变隧道在岩体中的中心埋深  $h$ , 获得不同深径比隧道开挖引起的地表沉降及洞周环向应力的变化曲线,如图 12 所示。

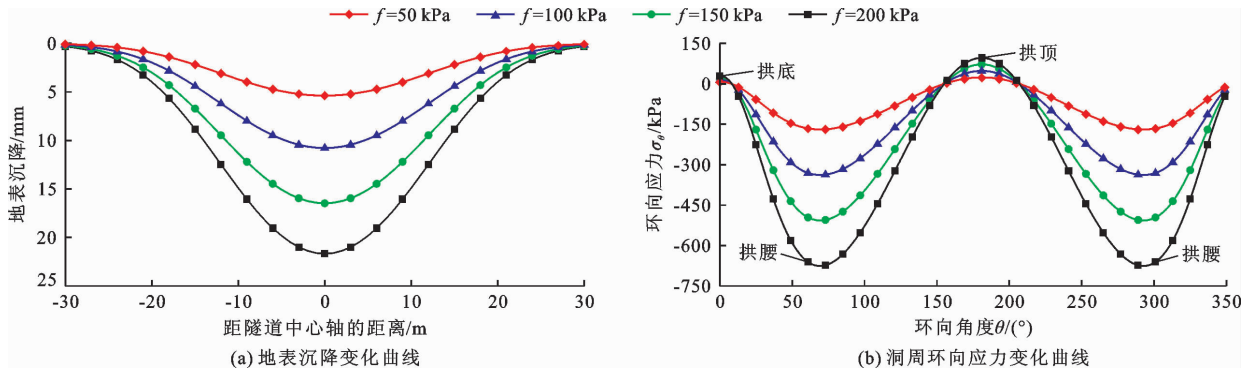


图 11 盾构隧道岩土层不同分界面荷载下的地表沉降及洞周环向应力变化曲线

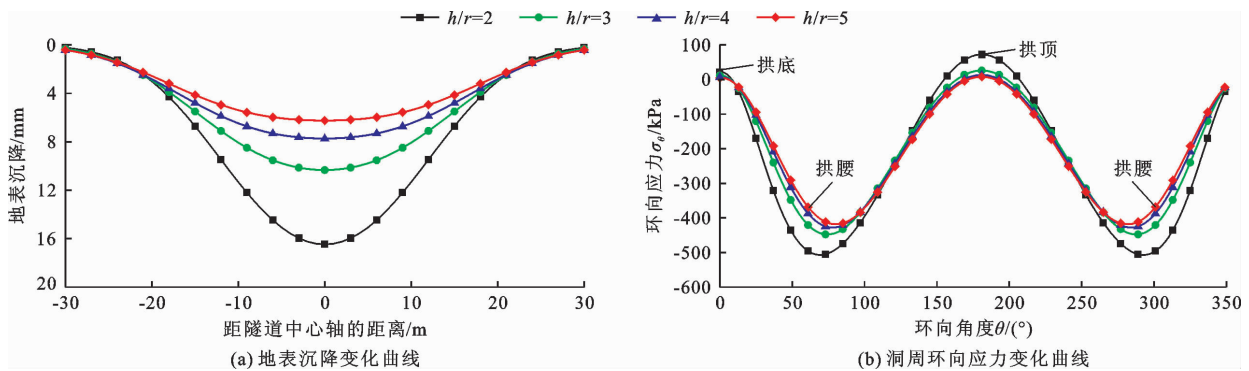


图 12 盾构隧道不同深径比的地表沉降及洞周环向应力变化曲线

从图 12(a)可以看出,随着深径比  $h/r$  从 2 增加至 5,地表最大沉降从 16.5 mm 减少至 6.2 mm,说明增加深径比可以有效减少地表沉降;深径比越大,隧道中心附近处的地表沉降变化越小,地表沉降曲线主要表现为“宽而浅”,随着深径比的减小,地表沉降在隧道中心附近变化显著,沉降曲线呈现为“窄而深”,主要原因是:随着隧道埋深的增加,岩层内部产生“拱”效应,地层曲线由“窄而深”演化成“宽而浅”。从图 12(b)可以看出,随着深径比的增加,洞周拱腰附近处的环向压应力随之减少,并且可以看出当  $h/r \geq 3$  时,增大深径比对拱腰环向压应力的变化影响相对较小,而在隧道拱顶处随着深径比的增加,拱顶的环向拉应力随之减小,由此表明隧道埋深越大,拱顶出现环向拉应力的可能性就越小。

### 5.3 岩体泊松比的影响

分别取岩体的泊松比  $\mu$  为 0.20、0.30、0.40 和 0.45,讨论不同岩体泊松比对地表沉降及洞周环向

应力的影响。假设岩层分界面荷载为 150 kPa,隧道在岩体的中心埋深  $h$  为 12 m,其余参数不变。利用分层计算理论得到不同岩体泊松比的地表沉降曲线和洞周环向应力曲线图,如图 13 所示。

由图 13(a)可知,增加岩体泊松比  $\mu$  可以有效减小地表沉降,而对沉降槽宽度的变化影响不大,在岩体泊松比  $\mu$  从 0.45 减小到 0.20 的过程中,地表最大沉降依次分别增加了 0.75、1.32、1.12 mm。由图 13(b)可知,在其余参数不变的条件下,随着岩体泊松比的减小,隧道拱腰附近处的环向压应力会随之增加,而隧道拱底、拱顶处由于岩体泊松比的减小极容易出现环向拉应力;岩体泊松比越小,则隧道洞周的环向应力变化越明显,随着泊松比的增加,洞周环向应力变化逐渐变得缓慢,隧道拱顶与拱腰附近处的环向应力差值显著减小,表明隧道开挖后洞周的环向应力变化整体相对均匀。

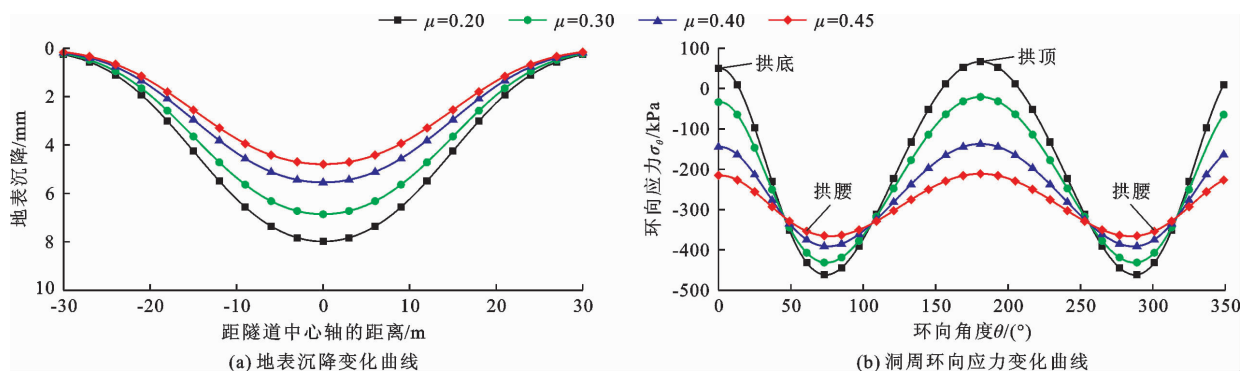


图13 盾构隧道岩体不同泊松比的地表沉降及洞周环向应力变化曲线

## 6 结论

本文考虑岩土体两种不同材料物理力学性质的差异,提出利用复变函数和随机介质联合求解岩土复合地层盾构隧道开挖的计算方法,对岩体和土体两种力学性质完全不同的材料进行分析,最后获得能够预测岩土复合地层隧道开挖的地表变形和洞周应力的力学解析模型,并通过与数值模拟、现场实测数据进行对比分析,验证了解析方法的准确性。主要得到以下结论:

(1)利用复变函数求解了岩土分界面受到上覆土层自重荷载,且同时受到隧道开挖自重效应下的应力解析函数,随后利用该解析函数获得了岩土分界面的沉降变形,将岩土分界面与沉降变形所围成的区域视为“不均匀等厚开挖”,利用二次抛物曲线拟合获得积分区域的上下限,最后利用随机介质理论获得地表沉降,经验证发现理论解、数值解与实测值三者的吻合度较好,表明岩土复合地层隧道开挖的力学解析模型具有较高的可信度。

(2)岩土复合地层隧道开挖引起的地表变形随着上部土体荷载的增加而增加,岩土层分界面竖向荷载从50 kPa增加至200 kPa时,地表最大沉降增加了16.3 mm。隧道洞周最大环向压应力位于隧道拱腰附近,并随着岩土分界面荷载的增加而增加,洞周拱顶、拱底的环向拉应力随着岩土分界面荷载的增加而缓慢增大。

(3)随着隧道深径比的减小,地表沉降曲线从“宽而浅”演化成“窄而深”的形式,深径比 $h/r$ 从5减小至2时,地表最大沉降由6.2 mm增加至16.5 mm。洞周拱腰环向压应力随着深径比的增加而增大,当 $h/r \geq 3$ 时,深径比对拱腰环向压应力的影响相对较小,而在拱顶处,随着隧道在岩层埋深的变浅,出现拱顶环向拉应力的可能性则越大。

(4)当隧道岩体泊松比从0.45减小至0.40、0.30、0.20时,地表最大沉降依次分别增加了0.75、1.32、1.12 mm,然而对地表沉降槽宽度的影响可以忽略不计。随着岩体泊松比的减少,隧道拱腰附近处的环向压应力会随之增大,而在隧道拱底、拱顶处容易出现环向拉应力。

### 参考文献:

- [1] 计月华,李惠丽,史培新,等.复合地层土压平衡盾构施工技术[J].水利水电技术,2018,49(11):93-102.
- [2] 曹洋,林向荣,李子路.软土地层浅埋盾构施工的精细化数值模拟[J].工程科学与技术,2022,54(3):149-158.
- [3] 张治国,黄茂松,王卫东.隧道开挖对层状地基中邻近管道影响的DCBEM-FEM耦合方法[J].岩土工程学报,2011,33(10):1554-1561.
- [4] 王俊,何川,胡瑞青,等.土压平衡盾构掘进对上软下硬地层扰动研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(4):953-963.
- [5] YANG Shengqi, CHEN Miao, FANG Gang, et al. Physical experiment and numerical modelling of tunnel excavation in slanted upper-soft and lower-hard strata[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82: 248-264.
- [6] 李炜明,任虹,孙义涛,等.上软下硬地层盾构施工多源沉降数据演化规律[J].铁道工程学报,2020,37(9):78-84.
- [7] 吴昌胜,朱志铎.不同隧道施工方法引起地层损失率的统计分析[J].浙江大学学报(工学版),2019,53(1):19-30.
- [8] 张治国,黄茂松,王卫东.层状地基中隧道开挖对临近既有隧道的影响分析[J].岩土工程学报,2009,31(4):600-608.
- [9] 李涛,崔远,刘波,等.岩-土复合地层隧道施工引起建筑物沉降计算[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(3):86-91.
- [10] 李涛,崔远,曹英杰,等.岩-土复合地层暗挖隧道施工引起地表沉降计算方法[J].中国铁道科学,2020,41(2):73-80.
- [11] ZHANG Zhiguo, PAN Yutao, ZHANG Mengxi, et al. Complex variable analytical prediction for ground deform-



- ation and lining responses due to shield tunneling considering groundwater level variation in clays[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 120: 103443.
- [12] 傅鹤林,张加兵,黄震,等. 复合地层中浅埋盾构隧道开挖引起的地层位移及应力预测分析[J]. *现代隧道技术*, 2017, 54(4): 97-106.
- [13] MUSKHELISHVILI N I. *Mathematical theory of elasticity* [M]. Leyden: International Publishing, 1954.
- [14] 汤伏全. 西部厚黄土层矿区开采沉陷预计模型[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(S1): 74-78.
- [15] 宋浩然,张顶立,房倩. 地面荷载及围岩自重作用下浅埋隧道的围岩应力解[J]. *中国铁道科学*, 2015, 36(5): 54-60.
- [16] STRACK O E, VERRUIJT A. A complex variable solution for a deforming buoyant tunnel in a heavy elastic half-plane[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2002, 26(12): 1235-1252.
- [17] VERRUIJT A. Deformations of an elastic half plane with a circular cavity [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1998, 35(21): 2795-2804.
- [18] FANG Qian, SONG Haoran, ZHANG Dingli. Complex variable analysis for stress distribution of an underwater tunnel in an elastic half plane [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2015, 39(16): 1821-1835.
- [19] 宋文杰,项彦勇,刘毅,等. 盾构隧道变位复变函数解的验证与参数分析[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(6): 1751-1761.
- [20] 雷国辉,孙华圣,吴宏伟. 半无限平面问题的相对位移[J]. *岩土力学*, 2014, 35(5): 1224-1230+1240.
- [21] 晏莉,杨海涛. 盾构隧道施工引起地层位移的复变函数修正解[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(4): 192-201.
- [22] 李亚勇. 浅埋圆形隧道力学行为理论分析及应用[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- [23] 阳军生,刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京:中国铁道出版社, 2002.
- [24] 韩焯,李宁. 隧道施工引起地层位移预测模型的对比分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(3): 594-600.
- [25] 贾宝新,高宗贤,惠鹏飞. 上软下硬地层隧道盾构施工引起的地表沉降研究[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(3): 1083-1088.
- [26] 马乾瑛,业嘉超,蒋小慧. 考虑土拱效应的盾构隧道施工地表沉降预测研究[J]. *现代隧道技术*, 2021, 58(6): 148-154.

(上接第157页)

- [15] 王常明,鲁鋈,马栋和. 土石围堰中混凝土防渗墙设计方案的数值优化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(3): 857-865.
- [16] 段玲玲,邓华锋,支永艳,等. 某土石坝悬挂式混凝土防渗墙深度优选[J]. *人民黄河*, 2019, 41(12): 83-88+92.
- [17] 高江林,严卓. 土石坝加固工程中缺陷防渗墙渗流特性研究[J]. *人民黄河*, 2017, 39(9): 125-128+134.
- [18] 毛海涛,侍克斌,王晓菊,等. 土石坝防渗墙深度对透水地基渗流的影响[J]. *人民黄河*, 2009, 31(2): 84-86.
- [19] 黄梅琼,柴军瑞,白勇,等. 深覆盖层地基防渗措施对渗流场影响数值分析[J]. *长江科学院院报*, 2009, 26(10): 126-128.
- [20] 袁帅,冯德旺. 考虑渗透系数各向异性的盾构隧道开挖面稳定性数值极限分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(12): 1717-1725.
- [21] 杨旭亮,季日臣,陈晨,等. 分层碾压的填方渠坡稳定渗流分析[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(10): 119-122.
- [22] 王铁行,杨涛,鲁洁. 干密度及冻融循环对黄土渗透性的各向异性影响[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S1): 72-78.