

文章编号:1673-9469(2026)02-0054-11

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.02.007

## 矩形隧道下穿对既有隧道受力变形的计算方法

冯乐乐<sup>1</sup>,段世雄<sup>1</sup>,于建<sup>1</sup>,王柏文<sup>2\*</sup>

(1. 国能铁路装备有限责任公司沧州分公司,河北 沧州 062350;2. 湖南工程学院 智慧建造与能源工程学院,湖南 湘潭 411100)

**摘要:** 为研究矩形隧道下穿施工对既有隧道变形的影响规律,提出了关于矩形隧道下穿既有隧道的半解析解。首先,基于矩形隧道开挖后断面收敛变形的特点,基于随机介质理论推导出矩形隧道开挖诱发的地层变形规律,将既有隧道视为搁置在 Kerr 地基模型上的 Euler-Bernoulli 梁,最终获得既有隧道的纵向受力平衡微分方程,并采用有限差分获得矩形隧道下穿对既有隧道受力变形的计算方法。通过与室内模型试验值进行对比,验证了本文计算结果的准确性。最后,针对矩形隧道宽度、埋深、土体内摩擦角、既有隧道抗弯刚度和地层损失率等关键参数展开影响分析。结果表明:矩形隧道半宽和地层损失率增大会导致既有隧道的竖向变形线性增加;隧道埋深减小会导致既有隧道竖向峰值显著增大,但会缩小对隧道沉降的影响范围;增大土体内摩擦角会导致既有隧道的竖向变形显著增大,同时使隧道变形槽略微减小;随着既有隧道抗弯刚度的增加,隧道的竖向变形会明显减小。

**关键词:** 矩形隧道;收敛变形;随机介质;地基模型;隧道变形;参数分析

中图分类号:U456.31

文献标识码:A

## Calculation Method of Stress and Deformation of Existing Tunnel Caused by an Undercrossing Rectangular Tunnel Excavation

FENG Lele<sup>1</sup>, DUAN Shixiong<sup>1</sup>, YU Jian<sup>1</sup>, WANG Bowen<sup>2\*</sup>

(1. Cangzhou Locomotive and Rolling Stock Maintenance Branch of China Energy Railway Equipment Co., Ltd., Cangzhou, Hebei 062350, China; 2. School of Smart Construction and Energy Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan, Hunan 411100, China)

**Abstract:** In order to study the influence of a rectangular tunnel undercrossing construction on the deformation of the existing tunnel, a semi-analytical solution for the rectangular tunnel undercrossing the existing tunnel is proposed. Firstly, based on the characteristics of the convergence deformation of the section after the excavation of the rectangular tunnel, the law of the ground deformation induced is derived by using the random medium theory. The existing tunnel is regarded as an Euler-Bernoulli beam on the Kerr foundation model. Consequently, the differential equation of longitudinal force equilibrium of the existing tunnel is obtained, and the finite difference method is used to obtain the calculation method of the stress and deformation of the existing tunnel caused by the undercrossing rectangular tunnel excavation. By comparing with the experimental values of the indoor model, the accuracy of the calculation results in this paper is verified. Finally, the influence of key parameters such as rectangular tunnel width, tunnel depth, internal friction angle of soil, bending stiffness of the existing tunnel and ground loss rate is analyzed. The results show that the increase of half-width and ground loss rate of the rectangular tunnel leads to the linear increase of vertical deformation of the existing tunnel. The decrease of the tunnel depth leads to a significant increase in the vertical peak deformation of the existing

收稿日期:2024-07-04 修回日期:2024-08-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408067)

第一作者:冯乐乐(1986—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士,主要从事隧道与岩土工程的研究工作。

\*通信作者:王柏文(1993—),男,湖南长沙人,博士,讲师,主要从事土木工程方向的研究工作。

tunnel, but narrows the influence range on the tunnel settlement. The increase of the internal friction angle of soil leads to a significant increase in the vertical deformation of the existing tunnel and a slight decrease in the tunnel deformation trough. With the increase of the bending stiffness of the existing tunnel, the vertical deformation of tunnel is significantly reduced.

**Key words:** rectangular tunnel; convergence deformation; random medium; foundation model; tunnel deformation; parameter analysis

目前,盾构法已被广泛应用于城市地铁建设中。盾构隧道断面一般为圆形,主要原因是圆形隧道断面结构受力合理。然而,圆形隧道空间利用率低,矩形、马蹄形等断面隧道的空间利用率更高<sup>[1-2]</sup>。因此,近年来,我国自主研发了矩形等断面形式的盾构机,用于城市地铁隧道开挖。相较于圆形盾构机,矩形盾构机在掘进过程中对周边地层的“拱效应”减弱。这一特性使得矩形盾构机在施工过程对既有隧道施加较大的荷载,严重威胁既有隧道的安全<sup>[3-4]</sup>。因此,研究矩形盾构机施工对既有隧道变形的影响具有重要的现实意义。

准确预测隧道开挖引起地层变形是隧道设计的关键。为此,国内外学者展开了大量的研究,研究方法主要有:数值模拟、模型试验、现场监测、解析法。卢聚强等<sup>[5]</sup>利用 GDEM 构建双隧下穿既有铁路三维耦合数值模型,系统分析了双线盾构隧道下穿既有铁路路基的纵向沉降规律,并分析影响因素对路基沉降的影响。Wang 等<sup>[6]</sup>利用有限元方法模拟了矩形隧道掘进引起的地表沉降变形规律;吴垠龙等<sup>[7]</sup>以某大断面矩形顶管隧道上跨既有隧道为背景,利用 ABAQUS 动态模拟了矩形隧道顶进过程中对地层变形及既有隧道的影响;柳献等<sup>[8]</sup>提出了适用于不同断面盾构隧道结构的原型试验平台以及模拟复杂工况下的试验荷载设计方法;张治国等<sup>[9]</sup>基于矩形截面隧道收敛变形模式,建立了矩形隧道模型试验系统,得出矩形隧道开挖引起地层自由位移场的分布规律;魏纲等<sup>[10]</sup>采用室内缩尺模型试验,分析了管隧垂直工况下类矩形盾构隧道开挖对既有隧道及地层沉降的影响;邓长茂等<sup>[11]</sup>以上海软土地层 3 个不同矩形顶管隧道为例开展研究,得出矩形隧道施工引起地表变形的一般规律;司金标等<sup>[12]</sup>以宁波地铁 3 号线软土层隧道工程为背景,依据现场实测地表变形、土体分层沉降数据,探究了类矩形隧道施工引起的地层竖向位移;魏纲等<sup>[13]</sup>基于 Mindlin 位移解研究了类矩形隧道施工引起的土体竖向位移;张治国等<sup>[14]</sup>采用镜像法分析了类矩形隧道开挖引

起的地表变形,并基于 Winkler 地基模型,提出了类矩形开挖对既有隧道的力学计算方法。

综上所述,现有研究大多聚焦于矩形隧道开挖引起的地表变形,关于矩形隧道开挖对既有隧道变形的研究还较为少见。基于此,本文基于随机介质理论,分析了矩形隧道开挖引起的地层变形,并将理论值与实测值进行对比分析以验证其可靠性;最后,基于 Kerr 地基模型,提出矩形隧道开挖引起既有隧道变形的计算方法,并进一步讨论矩形隧道宽度、埋深、土体内摩擦角、既有隧道抗弯刚度和地层损失率对既有隧道变形的影响。

## 1 矩形隧道开挖引起地层变形理论解

### 1.1 随机介质基本理论

随机介质理论是将岩土体视为一种“随机介质”,基于概率积分原理和土颗粒移动概率模型将隧道开挖导致的变形分解成多个土层介质的变形,最后利用积分运算对多个土层介质变形引起的地层位移进行求解<sup>[15]</sup>。在求解地表变形计算公式时,地层选取整体坐标系  $xoz$ ,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 1 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  $X$  处的地表沉降  $W_e(X)$  为<sup>[16]</sup>

$$W_e(X) = \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\pi \frac{\tan^2\beta}{\eta^2} X^2\right] d\varepsilon d\eta \quad (1)$$

式中: $\eta$  为开挖单元至地表距离, m;  $\beta$  为上覆土层的影响角, ( $^\circ$ )。

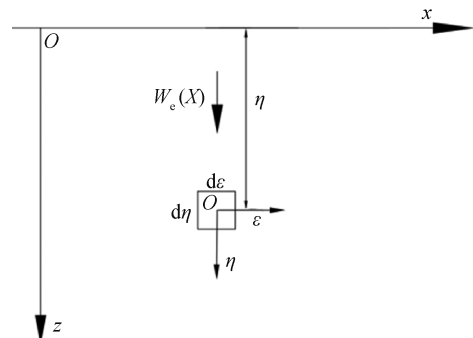


图 1 单元变形模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the element deformation model

在距地表一定深度处开挖任意形状断面的隧道,隧道中心距离地表的深度为  $H$ ,如图 2 所示。假定隧道开挖后全部坍塌,可将其分解为无限多个单元变形。在单元发生微变形  $d\varepsilon d\eta$  的影响下,最终基于积分原理可获得距离单元中心  $X$  的地表沉降值  $W_\Omega(X)$  为

$$W_\Omega(X) = \iint_\Omega \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2}(X-\varepsilon)^2\right] d\varepsilon d\eta \quad (2)$$

施工完成后,隧道断面仅发生微小变形。如图 2 所示,隧道开挖断面为  $\Omega$ ,隧道建成后开挖断面收缩为  $\omega$ ,依据叠加原理可得地表变形为两者之差,即

$$W(X) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2}(X-\varepsilon)^2\right] d\xi d\eta \quad (3)$$

假定变形前后隧道断面的积分界限均已知,式(3)可表示为

$$W(X) = \iint_{a\ c}^{b\ d} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2}(X-\varepsilon)^2\right] d\varepsilon d\eta - \iint_{e\ g}^{f\ h} \frac{\tan\beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2\beta}{\eta^2}(X-\varepsilon)^2\right] d\varepsilon d\eta \quad (4)$$

式中: $a, b, c, d$  为隧道开挖前断面面积积分界限, $e, f, g, h$  为变形后隧道断面面积积分界限。

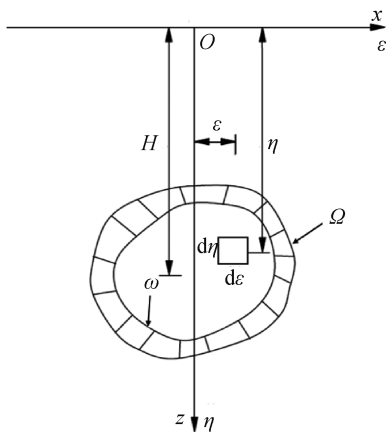


图 2 隧道开挖收缩变形

Fig. 2 Shrinkage deformation of tunnel excavation

由于式(4)中的被积函数不可积,因此需要采用数值积分的方法求解,根据计算公式,可采用 Legendre-Gauss 编制相关计算程序,具体参考文献[17]。

### 1.2 基于随机介质理论的矩形盾构隧道开挖引起的地层变形

隧道开挖后断面变形受多种因素的影响,如土层性质、施工工艺等,考虑到矩形隧道断面变形的分析相对较少,因此本文借鉴 Park 等归纳的圆形隧道开挖断面 4 种典型变形模式<sup>[18]</sup>,假定矩形隧道断面收敛变形如图 3 所示,其中  $A$  为矩形隧道半宽, $B$  为矩形隧道半高, $u_c$  为隧道断面收敛变形。

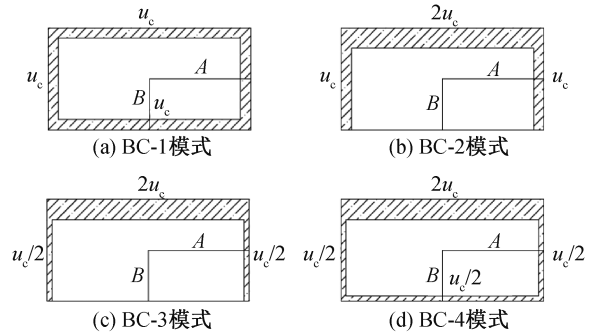
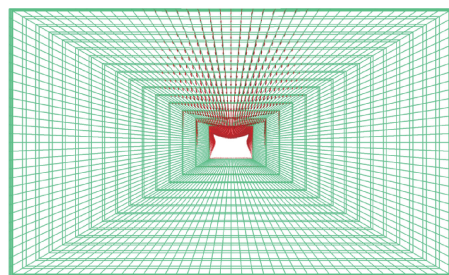


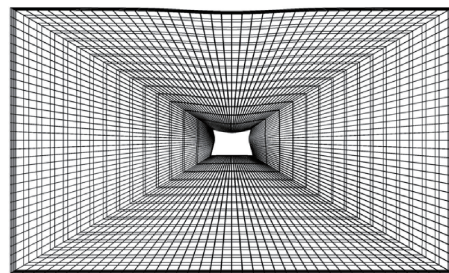
图 3 矩形隧道收敛变形模式

Fig. 3 Convergence deformation modes of the rectangular tunnel

为了进一步验证矩形隧道开挖断面变形的特点,本文采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件进行数值模拟。数值模型模拟的是一个轴线埋深为 12 m、宽为 6 m、高为 3 m 的无衬砌隧道开挖情况。通过改变隧道开挖后不同应力释放系数,分析矩形隧道开挖后的变形特征。土层的本构模型选用摩尔-库伦模型,其强度参数选用典型的上海软土地层参数。计算结果如图 4 所示。



(a) 位移矢量图(局部)



(b) 隧道断面变形

图 4 数值模型结果

Fig. 4 Numerical model results

图 4(a)为矩形隧道开挖后地层位移矢量图。从图中可以看出,由于矩形隧道开挖卸荷,导致上部土体向矩形隧道方向发生变形,从而引起地表沉降。另外,从图 4(b)可以清晰看出,矩形隧道断面发生非均匀变形,这也进一步表明非均匀变形更符合实际情况。

根据数值模拟计算所揭示的矩形隧道断面收敛变形规律可知,矩形隧道断面与圆形隧道类似,可分为均匀收敛变形和非均匀收敛变形。根据圆形隧道 4 种断面收敛变形模式,矩形隧道 4 种不同收敛模式的二重积分界限  $a-h$  作如下推导,如表 1 所示。

### 1.3 随机介质理论模型参数的确定

#### 1.3.1 地层影响角 $\beta$

在运用随机介质理论求解隧道开挖后的地层位移时,需要确定两个基本参数  $\beta$  和  $u_c$ ,而随机介质理论地层影响角  $\beta$  与 Peck 公式中的  $i$  均是控制计算隧道开挖后地表沉降槽宽度,二者可能存在一定的联系。因此,韩焯等<sup>[19]</sup>利用大量现场实测数据建立了地层影响角  $\beta$  与沉降槽宽度  $i$  之间的关系:

$$\tan\beta = \frac{H}{\sqrt{2\pi}i} \quad (5)$$

式中: $H$  为隧道埋深, m;  $i$  为沉降槽宽度, m; 文献<sup>[19]</sup>基于实测数据对 Peck 公式进行了修正:

$$i = K(H - bz) \quad (6)$$

$$K = 1 - 0.02\varphi \quad (7)$$

式中: $K$  为沉降槽宽度参数; $b$  与地层土质相关,取值范围为 0~1,黏性土取 0.65,砂性土取 0.5; $z$  为隧道上覆地层任意埋深, m;  $\varphi$  为隧道拱顶以上各层土内摩擦角加权平均值, ( $^\circ$ )。

#### 1.3.2 隧道断面收敛变形 $u_c$

随机介质理论中断面收敛  $u_c$  和 Peck 经验公

式中地层损失率  $V_1$  均以某种形式反映了隧道开挖前后断面收敛变形情况,因此,二者可通过面积建立一定的关系。地层损失率  $V_1$  为单位长度内地层损失与开挖体积的比值。地层损失率  $V_1$  与矩形隧道断面收敛  $u_c$  关系可表示为<sup>[19]</sup>

$$\begin{cases} V_1 = \frac{(A+B) \cdot u_c - 4u_c^2}{AB} \\ u_c = \frac{(A+B) - \sqrt{(A+B) - 4ABV_1}}{4} \end{cases} \quad (8)$$

## 2 地层与隧道之间的相互作用

Kerr 模型是基于 Pasternak 地基模型提出的,该模型在 Pasternak 地基模型的基础上增加了一个土体弹簧,能较好地反映土体变形,更符合实际工况。因此,Kerr 模型成为隧道-土相互作用研究中常见的模型<sup>[20]</sup>,如图 5 所示,其中, $p(x)$  为附加荷载、 $D$  为隧道直径、 $c$  为上层弹簧刚度、 $k$  为下层弹簧刚度、 $w$  为隧道变形。

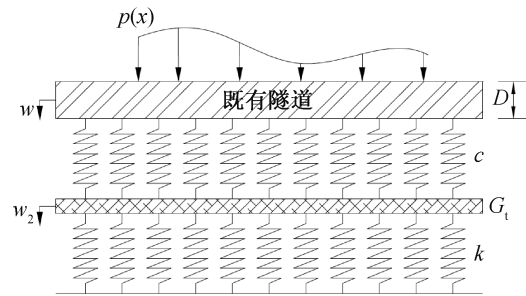


图 5 隧道-土相互作用模型

Fig. 5 Tunnel-soil interaction model

针对本文研究的问题,模型假定如下:(1)既有隧道为无限长的 Euler-Bernoulli 梁,搁置在 Kerr 地基模型上;(2)既有隧道与周围土体发生协调变形,二者无相对位移;(3)地基模型参数主要由  $k$ 、 $G$ 、 $c$  组成。

表 1 四种不同收敛模式下随机介质理论积分界限

Tab. 1 Theoretical integral boundaries for random medium theory under four different convergence modes

隧道变形坐标点	BC-1	BC-2	BC-3	BC-4
$a$	$H-b/2$	$H-b/2$	$H-b/2$	$H-b/2$
$b$	$H+b/2$	$H+b/2$	$H+b/2$	$H+b/2$
$c$	$-a/2$	$-a/2$	$-a/2$	$-a/2$
$d$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$
$e$	$H-(B-u_c)$	$H-(B-2u_c)$	$H-(b/2-2u_c)$	$H-(b/2-2u_c)$
$f$	$H+(B/2-u_c)$	$H+B/2$	$H+b/2$	$H+(b/2-u_c/2)$
$g$	$-(A/2-u_c)$	$-(A/2-u_c)$	$-(a/2-u_c/2)$	$-(a/2-u_c/2)$
$h$	$-g$	$-g$	$-g$	$-g$

由 Kerr 地基模型理论可知,在竖向附加分布荷载  $p(x)$  作用下的既有隧道纵向变形  $w(x)$  为

$$w(x) = w_1(x) + w_2(x) \quad (9)$$

式中: $w_1(x)$ 为第一层弹簧变形量, $m$ ;  $w_2(x)$ 为第二层弹簧的变形量, $m$ 。

由两层弹簧的受力特性可得  $p_1, p_2$ :

$$p_1(x) = cw_1(x) = c\{w(x) - w_2(x)\} \quad (10)$$

式中: $p_1(x)$ 为第一层弹簧的提供的地基反力,  $kPa$ ;  $c$ 为第一层弹簧刚度,  $kPa/m$ 。

$$p_2(x) = kw_2(x) \quad (11)$$

式中: $p_2(x)$ 为剪切层下方弹簧的提供的地基反力,  $kPa$ ;  $k$ 为第二层弹簧刚度,  $kPa/m$ 。

对于剪切层受力特性,有:

$$p_1(x) = -G \frac{d^2w_2(x)}{dx^2} + kw_2(x) \quad (12)$$

联立式(9)和(12)可得:

$$w(x) = \left(1 + \frac{k}{c}\right)w_2(x) - \frac{G}{c} \frac{d^2w_2(x)}{dx^2} \quad (13)$$

对既有隧道任意微元体进行受力分析,如图 6 所示。图 6 中的  $Q, M$  分别为隧道单元体所受的剪力与弯矩;  $dQ$  和  $dM$  分别为隧道单元体沿隧道轴线方向的剪力和弯矩增量。

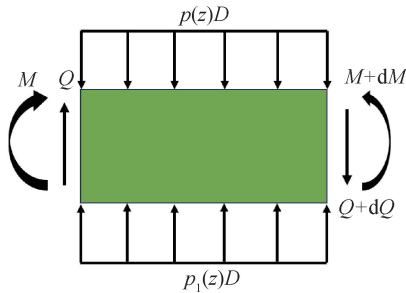


图 6 单元受力分析示意图

Fig. 6 Force analysis diagram of the element

因此,可建立单元体平衡微分方程如下:

$$p(x)Ddx - p_1(x)Ddx + dQ = 0 \quad (14)$$

$$p(x)D \frac{(dx)^2}{2} + Qdx - p_1(x)D \frac{(dx)^2}{2} - dM = 0 \quad (15)$$

$$p(x) = \eta \left[ \frac{\xi k_2}{\xi + 1} W(x) - \frac{\xi^2 G}{(\xi + 1)^2} W''(x) \right] \quad (16)$$

式中: $p(x)$ 为地层位移产生的荷载;  $W(x)$ 为新建隧道开挖引起土体的竖向变形,可根据式(4)计算;  $\xi$ 为地基弹簧参数,其值为  $\xi = c/k$ ;  $\eta$ 为荷载修正系数,一般取值为  $0.4 \sim 1.0$  [21]。

根据 Timoshenko 梁理论,既有隧道竖向总变形  $w$  满足如下曲率方程:

$$\frac{d^2w(x)}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (17)$$

式中: $EI$ 为既有隧道抗弯刚度。

假设 Kerr 地基模型剪切层受力变形满足:

$$\frac{d^2w_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_r}{EI} \quad (18)$$

式中: $M_r$ 为剪切层的弯矩。

结合式(13)~(15)及式(17)即可得:

$$p(x) = -\frac{EIG}{Dc} \frac{d^6w_2(x)}{dx^6} + \frac{EI(c+k)}{Dc} \frac{d^4w_2(x)}{dx^4} - G \frac{d^2w_2(x)}{dx^2} + kw_2(x) \quad (19)$$

式中: $D$ 为既有隧道的直径,根据有关文献[22]可知,  $c, k, G$  的取值分别为  $c = 7k, k = 4E/3Z, G = 2 \frac{EZ}{9(1+\mu)}$ 。其中,  $E$ 为土体弹性模量,  $\mu$ 为土体的泊松比,  $Z$ 为既有隧道轴线埋置深度,  $m$ 。

式(19)为隧道开挖引起既有隧道竖向变形的控制方程,考虑到其为六阶微分方程,难以获得解析解。因此,本文拟采用有限差分法获得其数值解,将既有隧道等分成  $n$  段微元体,每段微元的长度为  $l=L/n$ ,为了便于有限差分运算,在隧道两端增加 6 个虚拟的节点,将既有隧道离散为  $n+7$  个单元,如图 7 所示。

最后,将式(19)写成有限差分的形式:

$$\alpha(w_2)_{i+3} + \beta(w_2)_{i+2} + \gamma(w_2)_{i+1} + \delta(w_2)_i + \gamma(w_2)_{i-1} + \beta(w_2)_{i-2} + \alpha(w_2)_{i-3} = p_i \quad (20)$$

$$\text{式中: } \alpha = -\frac{EIG}{Dcl^6}, \beta = \frac{6EIG}{Dcl^6} + \frac{EI(c+k)}{Dcl^4},$$

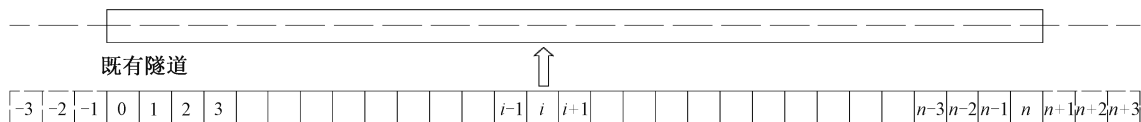


图 7 既有隧道离散图

Fig. 7 Discrete diagram of the existing tunnel



工<sup>[24]</sup>,根据地质勘察,该地区的土层主要由杂填土、素填土、黏土和白云质灰岩构成,如图9所示。

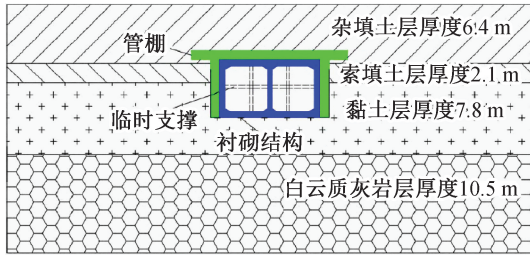


图9 矩形隧道横断面地质图

Fig. 9 Geological map of rectangular tunnel cross section

隧道开挖尺寸为 11.6 m×7 m(宽×高),矩形隧道上覆土层厚度约为 6.0 m。具体岩土体参数如表 2 所示。

表 2 土层主要物理力学指标

Tab. 2 Main physical and mechanical indexes of soil layer

土层	埋深 $h/\text{m}$	重度 $\gamma$ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	黏聚力/ $\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	压缩模量 $E_s/\text{MPa}$
杂填土	6.4	18.8	9.8	8	28.97
素填土	2.1	19.2	10.6	10	33.02
黏土	7.8	19.7	19.8	12.1	16.69

韩焯等<sup>[25]</sup>研究的表明,地下水位以上的黏性土在隧道开挖过程中的地层损失率较小,大约为 0.22%~0.75%,本文取地层损失率  $V_1=0.22\%$ ,利用本文计算方法得出矩形顶管隧道不同收敛变形下的地表变形预测值,并与实测值对比,结果如图 10 所示。

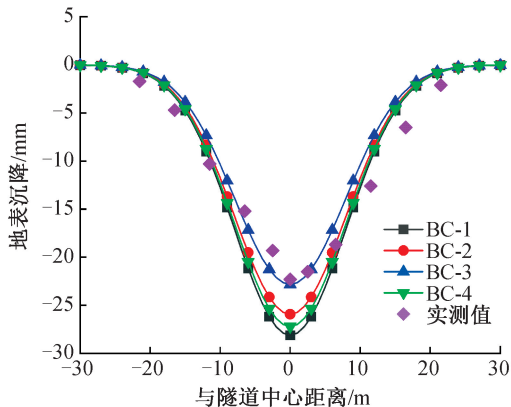


图 10 地表竖向位移实测值与理论值对比

Fig. 10 Comparison of measured values and theoretical values of vertical displacement of ground surface

从图 10 中可知,4 种不同收敛变形的地表沉降槽宽度基本保持一致。然而,不同收敛变形对应的地表沉降最大值有较大区别。BC-3 对应的地

表最大沉降最小,为 22.83 mm,BC-1 对应的地表沉降最大值为 28.12 mm,两者相差 5.29 mm,可以看出 BC-3 与实测值的吻合度最高。

### 3.3 矩形隧道下穿既有隧道模型试验

魏纲等<sup>[26]</sup>采用 1:20 的相似比进行室内缩尺模型试验,模拟新建矩形隧道垂直下穿既有隧道的工况。其中,既有隧道埋深  $h_1=310\text{ mm}$ ,新建矩形隧道埋深  $h$  为 720 mm,隧道间距为 100 mm,地层损失率为 5%,干砂的压缩模量为 6.28 MPa,泊松比  $\mu$  为 0.35,内摩擦角  $\varphi$  为 34.3°。

由图 11 可见,本文计算结果与模型实测值变化趋势基本一致,既有隧道沉降均呈现“V”形分布。对于隧道竖向位移最大值,四种不同位移边界的计算结果分别为 23.22、21.43、18.86、22.48 mm。可以看出,BC-1 收敛变形模式下对应的既有隧道竖向变形最大,主要原因是 BC-1 收敛变形模式的地层位移越大,从而导致对既有隧道的附加应力最大。此外,可以看出在距离矩形隧道 25 m 以外,既有隧道变形基本不受矩形隧道开挖的影响。

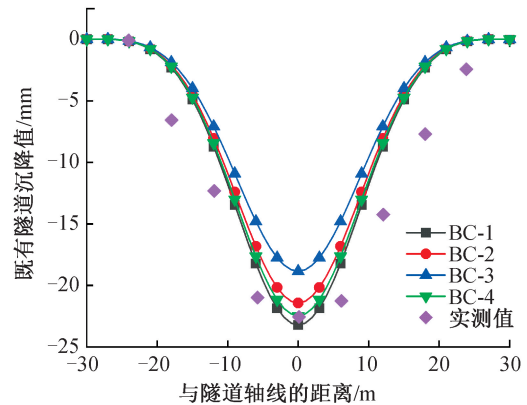


图 11 既有隧道沉降实测值与理论值对比

Fig. 11 Comparison of measured values and theoretical values of settlement of the existing tunnel

## 4 参数分析

为研究矩形隧道半宽  $A$ 、埋深  $h$ 、土体内摩擦角  $\varphi$ 、隧道抗弯刚度  $G_p$  和地层损失率  $V_1$  对既有隧道的影响,本文采用 BC-4 模式计算。其中,矩形半高  $B=3\text{ m}$ ,土体泊松比  $\mu=0.32$ ,弹性模量  $E=20\text{ MPa}$ ,黏聚力  $c=20\text{ kPa}$ 。既有隧道埋深 3 m,隧道直径 0.6 m。设定如表 3 所示的 11 种工况。

### 4.1 不同矩形隧道半宽对既有隧道变形的影响

保持其他参数不变的条件下,本文选取矩形

表 3 11 种工况下的参数取值

Tab. 3 Parameter values under 11 working conditions

工况	隧道半宽 $A/m$	隧道埋深 $h/m$	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	隧道抗弯刚度 $G_p/(kN \cdot m^2)$	地层损失率 $V_l/\%$
工况 1	3	12	8	$8 \times 10^7$	0.75
工况 2	4	12	8	$8 \times 10^7$	0.75
工况 3	5	12	8	$8 \times 10^7$	0.75
工况 4	3	9	8	$8 \times 10^7$	0.75
工况 5	3	15	8	$8 \times 10^7$	0.75
工况 6	3	12	16	$8 \times 10^7$	0.75
工况 7	3	12	32	$8 \times 10^7$	0.75
工况 8	3	12	8	$8 \times 10^8$	0.75
工况 9	3	12	8	$8 \times 10^9$	0.75
工况 10	3	12	8	$8 \times 10^7$	1.25
工况 11	3	12	8	$8 \times 10^7$	1.75

半宽  $A=3, 4, 5$  m 条件下的矩形隧道开挖对既有隧道的变形进行对比分析,如图 12 所示。

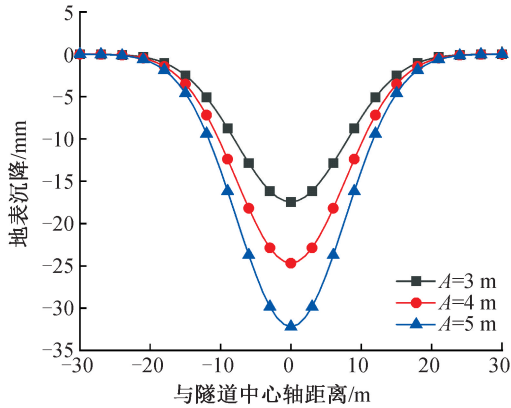


图 12 矩形隧道不同半宽下既有隧道沉降图

Fig. 12 Settlement diagram of the existing tunnel under different half-widths of the rectangular tunnel

由图 12 可知,既有隧道的变形会随着矩形半宽的增大而不断增大,二者呈线性变化。由随机介质理论可知,随着隧道开挖面积的增大,隧道开挖引起临近既有隧道轴线处的地层竖向变形会随之线性增大,导致既有隧道的附加应力线性增大,从而引起既有隧道竖向变形线性增长。

#### 4.2 不同隧道埋深对既有隧道变形的影响

保持其他参数不变的条件下,本文选取新建隧道埋深  $h=9, 12, 15$  m 条件下矩形隧道开挖对既有隧道的变形进行分析,如图 13 所示。

从图 13 中可以看出,当其他参数不变的情况下,新建隧道埋深越浅,隧道的沉降槽宽度越窄,其沉降值越大,且在隧道中心线附近沉降值受埋深的影响较大,在远离隧道中轴线区域受其影响相对较小。

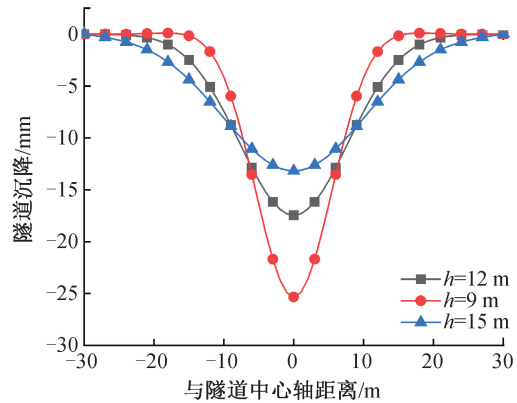


图 13 不同隧道埋深既有隧道沉降图

Fig. 13 Settlement diagram of the existing tunnel at different tunnel depths

#### 4.3 不同土体内摩擦角对既有隧道变形的影响

保持其他参数不变的条件下,本文选取土层内摩擦角  $\varphi=8^\circ, \varphi=16^\circ, \varphi=32^\circ$  这三种情况,对矩形隧道开挖引起既有隧道变形进行分析,如图 14 所示。

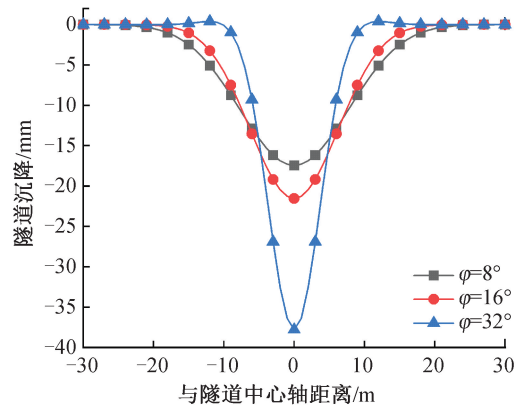


图 14 不同土体内摩擦角下既有隧道沉降图

Fig. 14 Settlement diagram of the existing tunnel under different internal friction angles of soil

从图 14 中可以看出,随着土体内摩擦角的增大,既有隧道的沉降变形呈现增大的变化趋势,且最大值均出现在矩形隧道正上方。同时,内摩擦角越大,隧道沉降槽宽度越小。

#### 4.4 不同隧道抗弯刚度对既有隧道变形的影响

保持其他参数不变的条件下,本文选取既有隧道抗弯刚度为  $8 \times 10^7$ 、 $8 \times 10^8$ 、 $8 \times 10^9$   $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ ,对矩形隧道开挖引起既有隧道变形进行分析,如图 15 所示。

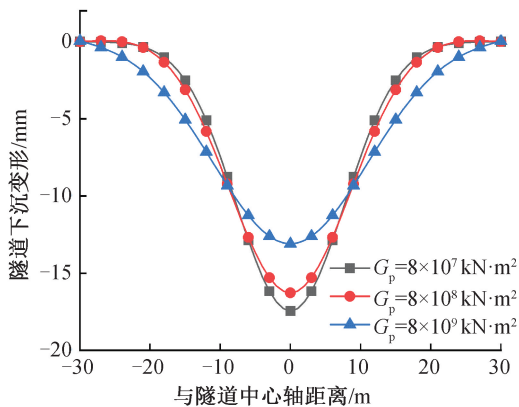


图 15 不同隧道抗弯刚度下隧道沉降图

Fig. 15 Tunnel settlement diagram under different bending stiffness of tunnel

从图 15 中可以看出,随着既有隧道抗弯刚度的增加,隧道竖向变形逐渐减少,且这种变化呈现非线性关系,这是由于既有隧道的抗弯刚度增大,其抵抗外部变形的能力越强,使得既有隧道在外部荷载作用下产生较小的变形。在实际工程中,为避免新建隧道开挖对既有隧道产生较大变形而影响其正常功能,应通过采用合适的材料控制隧道的抗弯刚度。

#### 4.5 不同地层损失率对既有隧道变形的影响

在保持其他参数不变的条件下,本文选取地层损失率为 0.75%、1.25%、1.75% 这三种情况,对矩形隧道开挖引起既有隧道变形进行分析,结果如图 16 所示。

由图 16 可知,随着地层损失率从 0.75% 增大至 1.75%,隧道竖向变形峰值从 17.44 mm 增加至 40.63 mm,增幅约 1.3 倍且增速保持不变。这是由于地层损失率增大导致地层的竖向变形增大,从而导致既有隧道所受的附加应力线性增大。这与文献[27]所得的结论是一致的,因此在隧道实际开挖过程中,应尽可能减少隧道开挖引起的地层损失,以降低对既有隧道的影响。

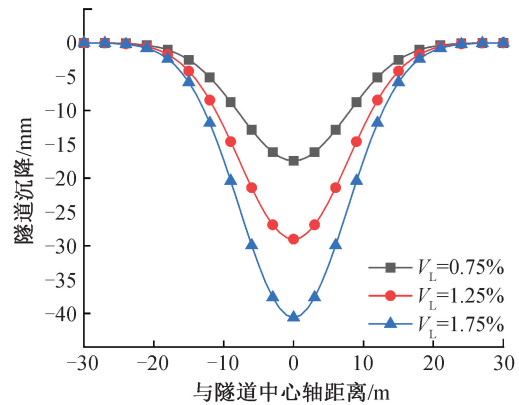


图 16 不同地层损失率下既有隧道的变形

Fig. 16 Deformation of the existing tunnel under different ground loss rates

## 5 结论

1) 本文基于随机介质理论获得矩形隧道下穿引起既有隧道轴线处土体竖向位移,将既有隧道简化为搁置在 Kerr 地基模型上的 Euler-Bernoulli 梁,最终获得既有隧道的纵向受力平衡微分方程,并采用有限差分求得矩形隧道下穿引起既有隧道变形的理论模型,结果表明实测值与模型计算值吻合度较好。

2) 增加矩形隧道半宽和地层损失率会导致既有隧道的竖向变形线性增加;减少隧道埋深会导致既有隧道竖向变形峰值显著增大,但对隧道的沉降影响范围会有所减少;增大土体内摩擦角会导致既有隧道的竖向变形显著增大,隧道变形槽略微减小;随着既有隧道的抗弯刚度增加,既有隧道的竖向变形明显减小。

#### 参考文献:

- [1] LIU X, LIU Z, YE Y H, et al. Mechanical behavior of quasi-rectangular segmental tunnel linings: further insights from full-scale ring tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 79:304-318.
- [2] 马鹏, 岛田英树, 马保松, 等. 矩形顶管关键技术研究现状及发展趋势探讨[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(10):1677-1692.
- [3] MA P, DAOTIAN Y S, MA B S, et al. Research status and development trends of key technologies of rectangular pipe jacking[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(10):1677-1692.
- [4] 高毅, 冯超元, 程鹏. 浅埋矩形顶管的“整体背土效应”研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10):1936-1942.
- [5] GAO Y, FENG C Y, CHENG P. Overall-carrying-soil

- effect of shallow buried rectangular pipe jacking[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1936-1942.
- [4] 徐日庆,徐叶斌,程康,等.有限土体下考虑土拱效应的非极限主动土压力解[J].岩土工程学报,2020,42(2):362-371.  
XU R Q, XU Y B, CHENG K, et al. Method to calculate active earth pressure considering soil arching effect under nonlimit state of clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 362-371.
- [5] 卢聚强,王志国,高博,等.双隧下穿既有铁路的路基纵向沉降分析[J].华北理工大学学报(自然科学版),2026,48(2):72-78.  
LU J Q, WANG Z G, GAO B, et al. Longitudinal settlement analysis of subgrade induced by twin-tunnel underpassing existing railway[J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2026, 48(2): 72-78.
- [6] WANG Y C, HUANG J H, YANG L M. Study on the mechanical properties of large rectangular and shallow embedded pipe-jacking during pushing-process[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 358(5): 052034.
- [7] 吴垠龙,刘维,贾鹏蛟,等.矩形顶管近距离上穿既有隧道施工扰动分析[J].地下空间与工程学报,2022,18(6):1968-1978.  
WU Y L, LIU W, JIA P J, et al. Construction disturbance analysis of jacked box tunneling overcrossing existing tunnel at short distance[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(6): 1968-1978.
- [8] 柳献,刘震,叶宇航,等.复杂受荷下盾构隧道原型结构试验平台的研发与实证[J].岩土工程学报,2024,46(5):927-937.  
LIU X, LIU Z, YE Y H, et al. Development and demonstration of prototype test platform for shield tunnel linings under complex loading scenarios[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(5): 927-937.
- [9] 张治国,方蕾,马少坤,等.类矩形软土隧道开挖引起地层沉降物理模型试验研究[J].现代隧道技术,2020,57(S1):762-771.  
ZHANG Z G, FANG L, MA S K, et al. Model test study on ground settlement caused by excavation of quasi-rectangular tunnels in soft soils [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 762-771.
- [10] 魏纲,赵得乾麟,齐永洁.类矩形盾构隧道下穿引起既有隧道竖向位移计算方法研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(6):960-966.  
WEI G, ZHAO D Q K, QI Y J. Determination of vertical displacement of an existing tunnel caused by underpass of quasi-rectangular shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(6): 960-966.
- [11] 邓长茂,彭基敏,沈国红.软土地区矩形顶管施工地表变形控制措施探讨[J].地下空间与工程学报,2016,12(4):1002-1007.  
DENG C M, PENG J M, SHEN G H. Discussion on control methods of ground surface settlement caused by rectangular pipe jacking construction in soft soils [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 1002-1007.
- [12] 司金标,朱瑶宏,季昌,等.软土层中类矩形盾构掘进施工引起地层竖向变形实测与分析[J].岩石力学与工程学报,2017,36(6):1551-1559.  
SI J B, ZHU Y H, JI C, et al. Measurement and analysis of vertical deformation of stratum induced by quasi-rectangular shield tunneling in soft ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(6): 1551-1559.
- [13] 魏纲,张鑫海,徐银锋.考虑多因素的类矩形盾构施工引起土体竖向位移研究[J].岩石力学与工程学报,2018,37(1):199-208.  
WEI G, ZHANG X H, XU Y F. Deriving vertical displacement of ground due to quasi-rectangular shield tunneling considering multiple factors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(1): 199-208.
- [14] 张治国,师敏之,张成平,等.类矩形盾构隧道开挖引起邻近地下管线变形研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):852-864.  
ZHANG Z G, SHI M Z, ZHANG C P, et al. Research on deformation of adjacent underground pipelines caused by excavation of quasi-rectangular shields[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 852-864.
- [15] LITWINSZYN J. The theories and model research of movements of ground masses[C]//Proc of the European Congress Ground Movement. Bangalore: University of Leeds, 1958:202-209.
- [16] XU Q, ZHU Y Q, LEI S X, et al. A simplified 3D theoretical model for calculating the surface settlement induced by tunnel undercrossing excavation[J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(10): 04023185.
- [17] 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.  
YANG J S, LIU B C. Ground movement and deformation caused by urban tunnel construction[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.
- [18] PARK K H. Elastic solution for tunneling-induced

- ground movements in clays[J]. *International Journal of Geomechanics*,2004,4(4):310-318.
- [19] 韩焯. 隧道施工引起地层位移及建筑物变形预测的实用方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2007.
- HAN X. The analysis and prediction of tunnelling-induced building deformations[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2007.
- [20] KERR A D. A study of a new foundation model[J]. *Acta Mechanica*,1965,1(2):135-147.
- [21] 张治国,鲁明浩,徐晨,等. 基于 Kerr 地基模型的隧道开挖诱发桩基变形简化方法[J]. *现代隧道技术*,2016,53(6):55-66.
- ZHANG Z G, LU M H, XU C, et al. Simplified solution for tunnelling-induced pile foundation deformation based on the Kerr foundation model[J]. *Modern Tunnelling Technology*,2016,53(6):55-66.
- [22] MORFIDIS K. Research and development of methods for the modeling of foundation structural elements and soil [D]. Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki, 2003.
- [23] 林强强. 矩形顶管引起地面变形的实测分析与控制研究[D]. 上海:同济大学,2008.
- LIN Q Q. Analysis and control of the surface deformation caused by rectangular pipe jacking construction [D]. Shanghai: Tongji University,2008.
- [24] 申玉生,何永辉,赵乐,等. 软土地区矩形隧道地表施工沉降的 Peck 公式修正[J]. *铁道科学与工程学报*,2017,14(6):1272-1279.
- SHEN Y S, HE Y H, ZHAO L, et al. Improvement of Peck formula of surface construction settlement of rectangular tunnel in soft soil area[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*,2017,14(6):1272-1279.
- [25] 韩焯,李宁,STANDING J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. *岩土力学*,2007,28(1):23-28+35.
- HAN X, LI N, STANDING J R. An adaptability study of Gaussian equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2007,28(1):23-28+35.
- [26] 魏纲,王辰,丁智,等. 邻近管线的类矩形盾构隧道施工室内模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2019,38(S2):3905-3912.
- WEI G, WANG C, DING Z, et al. Indoor model test study on construction of rectangular shield tunnel adjacent to pipeline[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2019,38(S2):3905-3912.
- [27] 冯国辉,徐长节,郑茗旺,等. 侧向土体影响下盾构隧道引起上覆管线变形[J]. *浙江大学学报(工学版)*,2021,55(8):1453-1463.
- FENG G H, XU C J, ZHENG M W, et al. Deflection of overlying pipeline induced by shield tunneling considering effect of lateral soil[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*,2021,55(8):1453-1463.
- (责任编辑 周雪梅)