

黄晓林,周志刚,刘齐建. 浅埋隧道开挖引起的高铁轨道变形与内力分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(1):42-48. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.007

Huang X L, Zhou Z G, Liu Q J. Study on Internal Forces and Deformation of the High-speed Rail by the Excavation of the Shallow Tunnel [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(1): 42-48. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.01.007

浅埋隧道开挖引起的高铁轨道变形与内力分析

黄晓林^{1,2},周志刚¹,刘齐建^{3*}

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南长沙 410076;2.中交二公局第四工程有限公司,河南洛阳 471000;
3.湖南大学 土木工程学院,湖南长沙 410082)

摘要:为求得浅埋隧道开挖引起的高铁轨道位移和内力,在 Osman 等得到的地表沉降曲线和地表水平位移的基础上,考虑高铁轨道为一弹性地基梁,将地表位移当作外荷载作用于轨道上.根据弹性地基梁模型,分别建立轨道水平位移和位移方向的平衡微分方程.采用 Fourier 级数求解微分方程,得到轨道的位移和内力.通过与已有结果比较,验证本文方法的正确性.在参数分析阶段,讨论影响轨道位移和内力的关键参数.

关键词:隧道开挖;地表沉降曲线;高铁轨道;弹性地基梁;Fourier 级数

中图分类号:TU473.1;TU475.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)01-0042-07

Study on Internal Forces and Deformation of the High-speed Rail by the Excavation of the Shallow Tunnel

Huang Xiaolin^{1,2}, Zhou Zhigang¹, Liu Qijian³

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;
2. CCCC-SHEC Forth Engineering Co., Ltd., Luoyang 471000, China;
3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to obtain the deformation and internal forces of high-speed rail caused by excavation of shallow tunnel, on the base of the ground settlement curve and horizontal displacement obtained by Osman et al., the ground displacement was acted as the external load on the rail by considering the high-speed rail as an elastic foundation beam. The differential equations for horizontal and vertical displacements were established according to the elastic foundation beam, respectively. The displacements and internal forces were obtained by solving the differential equations using the Fourier series. The model was validated by comparison with the obtained solutions. The key parameters affected the rail displacements and internal forces were investigated in parameter analysis.

Keywords: tunnel excavation; ground settlement curve; high-speed rail; beam on elastic foundation; Fourier series

隧道掘进使原有的地层应力平衡状态发生改变,进而导致地层变形.当地层变形较大时,将会影响上部建筑(构筑物)以及地下管线的正常使用,甚至引发工程事故.研究浅埋盾构隧道掘进引起的地层变形具有重要的理论价值和工程意义.

针对隧道开挖引起的地表沉降,许多学者进行了大量的研究.最早,Peck^[1]于1969年提出了隧道开挖引起的地表沉降经验公式,该公式能够简便有效的估计地表沉降,被工程界广泛接受.然而,Peck曲线不能反映地表沉降范围、曲率变化和地层沉降,因而被研究人员不断修正.Klar等^[2]在Peck曲线的基础上,引入了曲率参数,从而能够反映地表沉降曲线曲率对地表沉降变形的影响.Klar等^[2]修正曲线不能反映地表沉降范围以及地层沉降.Mair等^[3]通过观测和分析隧道引起的地表沉降实测数据,得到了地层沉降范围半宽为2.5倍地表沉降曲线至隧道中心距离的结论.在Mair等的基础上,Osman等^[4]对Peck曲线进行了沉降盆范围以及深度上的修正,从而可以反映地层变形.刘建航和侯学渊^[5]在分析现场实测结果和理论研究的基础上,提出了考虑土的固结效应的地表沉降曲线.

Attewell等^[6]基于Winkler地基模型,采用Peck曲线分析了下穿隧道对地表构筑物的影响.Klar等^[7]分别采用弹性连续介质模型和Winkler地基模型,分析了这2种方法计算的下穿隧道对上部管线的变形内力的异同.郑明新^[8]等采用FLAC^{3D}分析了引水隧道下穿铁路线路基的沉降规律.李涛等^[9]采用FLAC^{3D}分析了双线盾构施工对附近建筑物的影响.

1 计算模型与控制方程

本文拟在Osman等^[4]修正曲线的基础上,将隧道开挖引起的地层变形作为竖向外荷载施加在高铁轨道上.同时,将隧道开挖引起的地表水平位移作为水平外荷载施加在高铁轨道上,计算高铁轨道在上述竖向以及水平外荷载作用下的变形内力,并且分析关键参数对高铁变形与内力的影响.

1.1 计算假定

本文采用如下假设:

- 1) 高铁轨道视为地基表面弹性地基梁.
- 2) 高铁轨道与地基土始终完全接触,没有脱离.
- 3) 隧道开挖引起的地层变形不受高铁轨道的影响,且其地层变形按Osman等^[4]修正曲线计算.
- 4) 考虑隧道开挖引起的地层水平变形.
- 5) 在分析高铁轨道的受力变形时,不考虑水平和竖向的耦合作用.

1.2 控制方程的建立

图1为Osman等^[4]得到的隧道开挖引起的地表沉降曲线示意图.图中 z_m 为AC或BD与隧道竖向中心线交点至地面的距离, z_0 为隧道中心至地面的距离,地表沉降槽半宽为 $2.5i_z$.地层竖向沉降 S_v 曲线数学表达式为

$$S_v = \frac{AS_{\max}}{2K_z} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{i_z} \right)^2 \right] - \exp \left(-\frac{B^2}{2} \right) \right\}. \quad (1)$$

式中: $K_z = 0.5 \left(1 - \frac{z}{z_m} \right)^\alpha$; $i_z = K_z z_0$ (α 为控制地层沉降边缘线AC和BD曲率的参数).

考虑土的饱和和不排水条件,土的体应变为0,可以得到:

$$\frac{\partial S_u}{\partial x} + \frac{\partial S_v}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

式中: S_u 为地表水平位移.

将式代入式(2)中,有

$$S_u = -\frac{\alpha AS_{\max} x}{2K_z(z_m - z)} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{i_z} \right)^2 \right] - \exp \left(-\frac{B^2}{2} \right) \right\}. \quad (3)$$

图2为隧道开挖引起高铁轨道受力变形的计算模型示意图.高铁轨道视为弹性地基梁,其承受竖向荷载和水平荷载的集度分别为 $K_v S_v(x)$ 和 $K_u S_u(x)$.浅埋隧道开挖同时会引起土体变形和应力变化,从而使其参数发生变化,本文取开挖后土的参数,其中地基梁弹性模量为 E ,截面惯性矩为 I ,横截面积为 A_b .土

为各项同性弹性介质,其弹性模量为 E_s , 泊松比为 ν . 土对轨道受力变形的作用按 Winkler 模型来考虑,竖向 Winkler 弹簧模量为 K_v , 水平 Winkler 弹簧模量为 K_u .

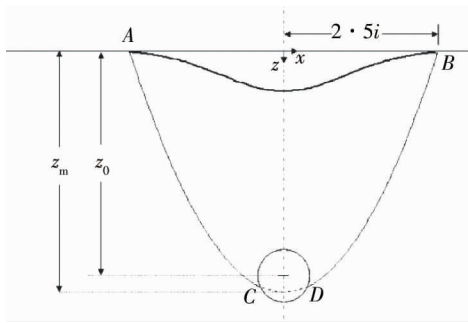


图1 地表沉降曲线^[4]

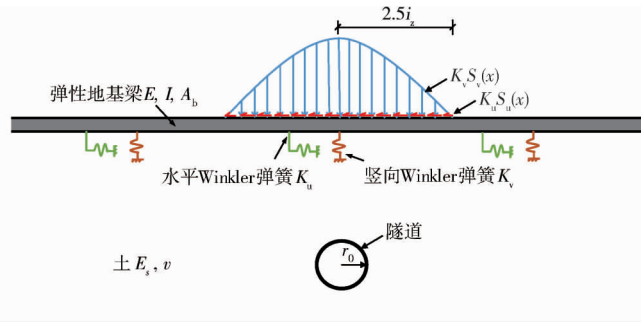


图2 弹性地基梁模型

K_u 可取 Klar 等按照弹性连续介质理论获得的 Winkler 模量, K_v 可取 Mylonakis 关于 Winkler 模型的研究结果^[11] 如下:

$$K_v = \frac{12E_s r_0}{i_z}; \tag{4}$$

$$K_u = 1.3G_s \left(\frac{E}{E_s}\right)^{-\frac{1}{40}} \left[1 + 7\left(\frac{L}{d}\right)^{-0.6}\right]. \tag{5}$$

式中: G_s 为土的剪切模量: $G_s = \frac{E_s}{2(1 + \nu)}$; d 可按横截面积相等求得: $d = 2\sqrt{\frac{A_b}{\pi}}$.

弹性地基梁在竖向荷载集度 $K_v S_v$ 作用下,其竖向挠曲平衡微分方程为^[10]

$$\frac{d^4 v}{dx^4} + 4\lambda^4 v = 4\lambda^4 S_v(x). \tag{6}$$

式中: v 为轨道的竖向位移; $\lambda = \sqrt[4]{\frac{K_v}{4EI}}$.

考虑弹性地基梁模型的对称性,取半结构进行分析.弹性地基梁在 $x = 0$ 时,转角为 0;在 $x \rightarrow \infty$ 时,位移和转角为 0;弹性地基梁在 $[0, \infty]$ 上的地基反力与梁上荷载平衡.

$$\left. \frac{dv}{dx} \right|_{x=0} = 0; \tag{7}$$

$$v|_{x \rightarrow \infty} = 0; \tag{8}$$

$$\left. \frac{dv}{dx} \right|_{x \rightarrow \infty} = 0; \tag{9}$$

$$\int_0^\infty u(x) dx = \int_0^{2.5i_z} S_v(x) dx. \tag{10}$$

弹性地基梁在水平荷载集度 $K_u S_u$ 的作用下,其水平受力平衡微分方程为

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \chi^2 u = -\chi^2 S_u(x). \tag{11}$$

式中: u 为梁的水平位移; $\chi = \sqrt{\frac{K_u}{EA_b}}$.

考虑弹性地基梁模型的对称性,取半结构进行分析.弹性地基梁在 $x = 0$ 时,水平位移为 0;在 $x \rightarrow \infty$ 时,水平位移为 0.

$$u|_{x=0} = 0, \quad u|_{x \rightarrow \infty} = 0. \tag{12}$$

2 控制方程求解

一般情况下,可取 $x = L = 20i_z$ 近似表示 $x \rightarrow \infty$. 将 $S_v(x)$ 和 $S_u(x)$ 按在 $[0, L]$ 上的正交函数:

$$\cos(\alpha_n z), \quad \alpha_n = \frac{(2n+1)\pi}{2L}, \quad (n=0, 1, 2, \dots). \quad (13)$$

展开,于是

$$S_v(x) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n \cos(\alpha_n z); \quad (14)$$

$$S_u(x) = \sum_{n=0}^{\infty} g_n \cos(\alpha_n z). \quad (15)$$

式中: f_n 与 g_n 分别为

$$f_n = \frac{2}{L} \int_0^{2.5i_z} S_v(x) \cos(\alpha_n x) dx; \quad (16)$$

$$g_n = \frac{2}{L} \int_0^{2.5i_z} S_u(x) \cos(\alpha_n x) dx. \quad (17)$$

式(6)和式(11)的解位移 v 和 u 可分别由通解和特解组成:

$$v = v^h + v^p; \quad (18)$$

$$u = u^h + u^p. \quad (19)$$

式(18)和式(19)中特解 v^p 和 u^p 可分别设为

$$v^p = \sum_{n=0}^{\infty} F_n \cos(\alpha_n z); \quad (20)$$

$$u^p = \sum_{n=0}^{\infty} G_n \cos(\alpha_n z). \quad (21)$$

将式(20)和式(14)代入式(6),以及将式(21)和式(15)代入式(11),得

$$F_n = \frac{4\lambda^4 f_n}{\alpha_n^4 + 4\lambda^4}; \quad (22)$$

$$G_n = \frac{\chi^2 g_n}{\alpha_n^2 + \chi^2}. \quad (23)$$

式(18)和式(19)的通解 v^h 和 u^h 分别为

$$v^h = e^{\lambda x} [C_1 \cos(\lambda x) + C_2 \sin(\lambda x)] + e^{-\lambda x} [C_3 \cos(\lambda x) + C_4 \sin(\lambda x)]; \quad (24)$$

$$u^h = D_1 e^{\lambda x} + D_2 e^{-\lambda x}. \quad (25)$$

联合式(7)~式(10),式(12)和式(18)~式(23),及无穷远处位移为0,可确定 $C_1 \sim C_4, D_1$ 和 D_2 , 于是

$$v = C e^{-\lambda x} [\cos(\lambda x) + \sin(\lambda x)] + \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(\alpha_n x); \quad (26)$$

$$u = D e^{-\lambda x} + \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos(\alpha_n x). \quad (27)$$

式中:

$$C = \lambda \left[\int_0^{2.5i_z} S_v(x) dx - \sum_{n=0}^{N_{\max}} (-1)^n \frac{F(n)}{\alpha(n)} \right]; \quad (28)$$

$$D = - \sum_{n=0}^{\infty} B_n. \quad (29)$$

在式(26)与式(27)基础上,梁的弯矩、剪力和轴力可分别计算为

$$M = EI \left\{ -2C\lambda^2 e^{-\lambda x} [\cos(\lambda x) - \sin(\lambda x)] - \sum_{n=0}^{\infty} A_n \alpha_n^2 \cos(\alpha_n x) \right\}; \quad (30)$$

$$Q = -EI \left[-4C\lambda^3 e^{-\lambda x} \cos(\lambda x) + \sum_{n=0}^{\infty} F_n \alpha_n^3 \sin(\alpha_n x) \right]; \tag{31}$$

$$N = -DXe^{-\lambda x} - \sum_{n=0}^{\infty} G_n \alpha_n \sin(\alpha_n x). \tag{32}$$

3 结果验证

图3为高铁轨道的无量纲位移和弯矩曲线与Klar等的计算结果对比图,其中 $R = \frac{EI}{(i^3 r_0 E_s)}$. 由图3可知,本文方法与Klar等^[7]的计算结果十分吻合.由图3a可知,和地表沉降槽类似,高铁轨道的变形主要位于 $0 \sim 2.5i_z$ 范围内,且当 $x = 5i_z$ 时,高铁轨道竖向位移基本为0.由图3b可知,高铁轨道最大正弯矩以及最大负弯矩分别发生在隧道中心上方相应的轨道处和 $x = 2.5i_z$ 轨道附近处,且当 $x = 5i_z$ 时,高铁轨道弯矩基本上为0.

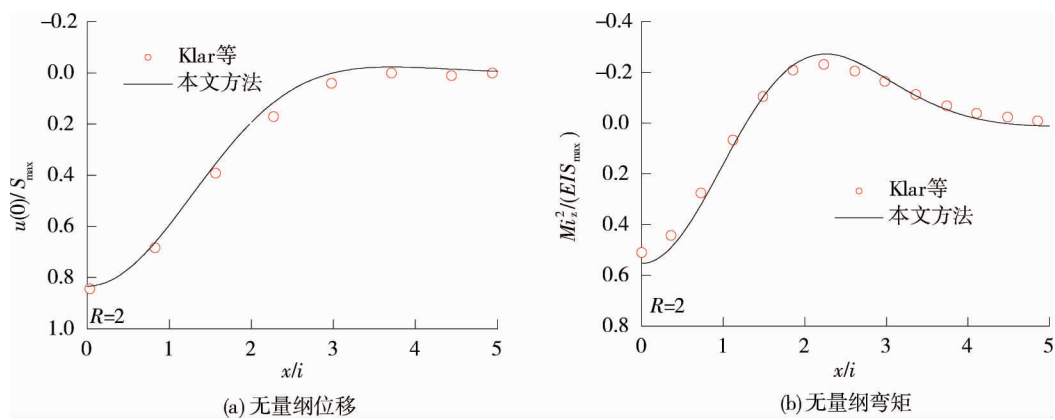


图3 高铁轨道的无量纲位移与弯矩曲线

4 高铁轨道变形和内力分析

图4为在不同的轨道相对于土的刚度的条件下,轨道的沉降分布规律.当轨道抗弯刚度较低时,其最大沉降接近于地表最大沉降.这意味着轨道抗弯刚度对轨道沉降的影响较小,轨道沉降主要由地表沉降槽决定.随着轨道相对于土的刚度增大,轨道的沉降逐渐减小.这是因为随着轨道相对于土的刚度的增大,轨道抵抗弯曲变形的能力加大.与地表沉降槽类似,轨道沉降曲线的反弯点近似为 i_z , 且当 $x = 5i_z$ 时,轨道沉降基本上为0.图5为在不同轨道相对于土的刚度不同的条件下,轨道的弯矩变化规律.随着轨道相对于土的刚度的增大,轨道“上拱”和“下拱”弯矩均减小.弯矩曲线的反弯点近似位于 $x = i_z$ 处,最大正弯矩位于隧道中心上相应轨道处,最大负弯矩位于 $x = 2i_z$ 附近.当 $x = 5i_z$ 时,轨道弯矩基本上为0.轨道最大绝对值弯矩在 $x = 0$, 这控制着隧道开挖引起的地表沉降对轨道抗弯性能的设计.

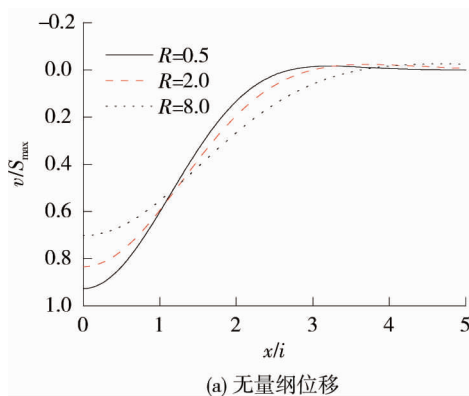


图4 不同轨道刚度对轨道沉降的影响曲线

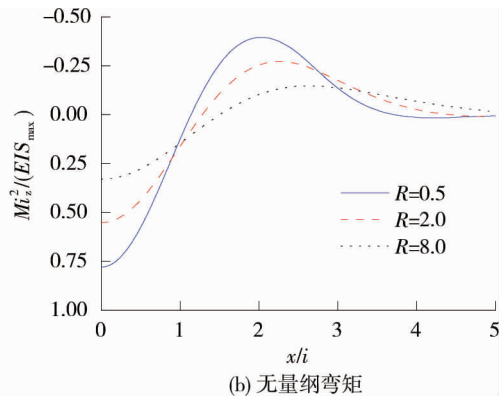


图5 不同轨道刚度对轨道弯矩的影响曲线

图 6 为在轨道相对于土的刚度不同的条件下,轨道剪力的分布曲线图.由于本模型的对称性,在 $x = 0$ 处,轨道剪力为 0.随着轨道相对于土的刚度的增大,轨道的最大负剪力和正剪力均增大.轨道的最大正弯矩近似位于 $x = i_z$,且最大正弯矩亦为轨道最大绝对值弯矩,此剪力控制着隧道开挖引起的地表沉降对轨道抗剪性能的设计.当 $x = 5i_z$ 时,轨道剪力基本上为 0.

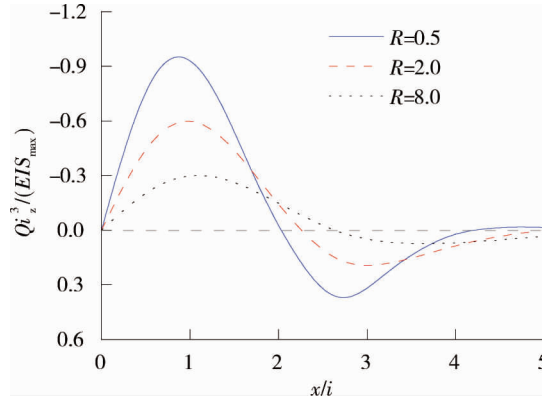


图 6 不同轨道刚度对轨道剪力的影响曲线

在分析轨道水平位移和轴力变化规律时,引入沉降槽形状参数 ζ 和轨道轴向刚度参数 ξ 这 2 个参量:

$$\zeta = \frac{\beta i_z}{z_m}; \tag{33}$$

$$\xi = i_z \sqrt{\frac{K_u}{EA_b}} = i_z \lambda. \tag{34}$$

图 7 为当 ζ 和 ξ 不同时,轨道水平位移沿轨道的分布曲线.由于本模型的对称性,在 $x = 0$ 时,水平位移为 0.水平位移小于 0,这意味着轨道的位移方向指向轨道中心线.当 ζ 给定时,随着 ξ 的增大,最大水平位移绝对值增大,但是其对应的轨道位置在 $x = 1.5i_z$ 附近.当 ξ 给定时,随着 ζ 的增大,最大水平位移绝对值增大.当 ξ 较小时,轨道水平位移接近于 0.当 $x = 5i_z$ 时,轨道的水平位移接近于 0.图 8 为当 ζ 和 ξ 不同时,轨道轴力沿轨道的分布曲线.当 ξ 较小时,轨道的轴力近似为 0.在靠近轨道中心线附近,轨道轴力为负,即为压力.在稍远离轨道中心线的位置,轨道轴力为正,即为拉力.最大压力位于轨道中心线位置,最大拉力大约位于 $x = 2i_z$,且最大压力较最大拉力大.在 ζ 和 ξ 均最大时,轨道的最大压力和最大拉力取最大值.当 $x = 5i_z$ 时,轨道的轴力接近于 0.

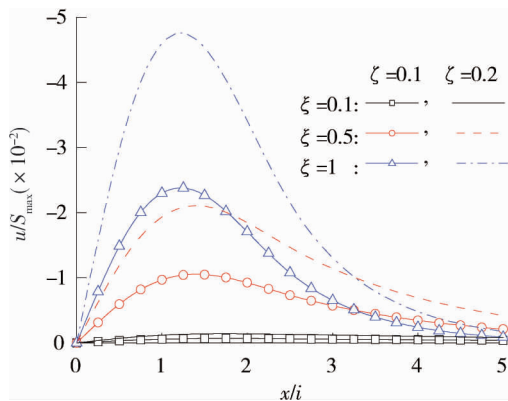


图 7 水平位移沿轨道变化曲线

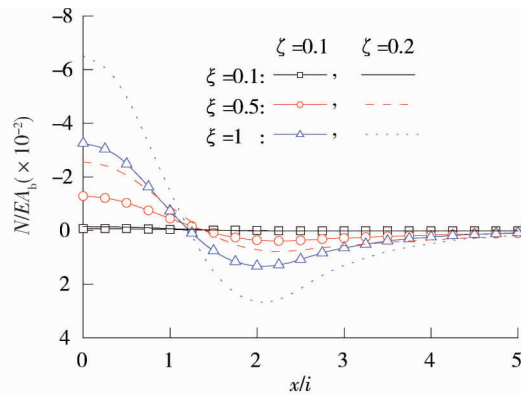


图 8 轴力沿轨道变化规律

5 结论

1) 轨道的最大沉降和最大弯矩绝对值位于轨道中心线位置,且随轨道相对于土的刚度的增大而减

小.轨道的最大剪力绝对值大约在地表沉降曲线反弯点位置,且随轨道相对于土的刚度的增大而减小.地表沉降对轨道沉降和弯矩轴力的影响大约在 $5i_z$ 范围内.

2) 轨道的水平位移在 $1.5i_z$ 位置附近最大,其随沉降槽形状参数或轨道轴向刚度参数的增大而增大.轨道的最大压力在轨道中心线位置,最大拉力在 $2i_z$ 附近,且最大压力和最大拉力随其随沉降槽形状参数或轨道轴向刚度参数的增大而增大.地表沉降对轨道水平位移和轴力的影响大约在 $5i_z$ 范围内.

参考文献:

- [1] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]//Proc of Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City:State of the Art, 1969:225-290.
- [2] Vorster T E B, Klar A, Soga K, et al. Estimating the effects of tunneling on existing pipelines[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(11): 1399-1410.
- [3] Mair R J, Taylor R N, Bracegirdle A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. Géotechnique, 1993, 43(2): 315-320.
- [4] Osman A S, Mair R J, Bolton M D. On the kinematics of 2D tunnel collapse in undrained clay[J]. Géotechnique, 2006, 56(9): 585-595.
- [5] 刘建航,侯学渊. 盾构法隧道[M]. 第一版. 北京:中国铁道出版社, 1991
- [6] Attewell P B, Yeates J, Selby A R. Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures[M]. Glasgow: Blackie and Son Ltd., 1986.
- [7] Klar A, Vorster T E B, Soga K, et al. Soil-pile interaction due to tunneling; comparison between Winkler and elastic continuum solutions[J]. Géotechnique, 2006, 55(6): 461-466.
- [8] 郑明新, 陈养强, 郑少弘, 等. 引水隧道下穿铁路线路基沉降的数值分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2014, 29(2): 36-41.
- [9] 李涛, 陈慧娴, 刘波, 等. 双线隧道盾构施工对临近高层建筑物的影响分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2013, 28(4): 43-48.
- [10] Hetényi M. Beams on elastic foundation[M]. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1952.
- [11] Mylonakis G. Winkler modulus for axially loaded piles [J]. Géotechnique, 2001, 51(5): 455-461.