

田晓艳,朱熹育,代建波,等. 隧道开挖对建筑物条形基础效应的简化解析解[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2020, 35(3):39-44. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.03.006

Tian X Y, Zhu X Y, Dai J B, et al. The Simplified Calculation on the Strip Foundation Effect of the Buildings Induced by the Tunnel Excavation [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 35(3):39-44. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.03.006

隧道开挖对建筑物条形基础效应的 简化解析解

田晓艳^{1*}, 朱熹育¹, 代建波¹, 李源²

(1.西安石油大学 机械工程学院, 陕西 西安 710065;2.中国建筑西北设计研究院有限公司, 陕西 西安 710018)

摘要:本文针对隧道开挖引发的地表沉降槽曲线特点,首先利用反分析法研究隧道开挖对浅基础效应的影响,利用微元体的平衡条件建立条形基础与地基的协同作用微分方程,然后采取概念明确的初参数法求解,根据平截面假定,结合材料力学基本理论,考虑双曲线三角函数的微分特点,得出隧道穿越条形基础的位移与内力的理论计算表达式,公式简单便于工程应用,最后结合工程算例分析,研究了条形基础不同位置处效应的曲线变化特点。

关键词:反分析法;协同作用微分方程;初参数法;条形基础的位移与内力

中图分类号:TU459 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2020)03-0039-06

The Simplified Calculation on the Strip Foundation Effect of the Buildings Induced by the Tunnel Excavation

Tian Xiaoyan¹, Zhu Xiyu¹, Dai Jianbo¹, Li Yuan²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyu University, Xi'an 710065, China;

2. China Northwest Building Design Research Institute, Xi'an 710018, China)

Abstract: In view of the ground settlement trough curve caused by the tunnel excavation, the inverse analysis method was used to study the effect of the shallow foundation induced by the tunnel excavation. Firstly the synergy differential equation was founded by using the balance condition of the infinitesimal body. Then the initial parameter method of the definite concept was used to solve the differential equation. By means of the flat section assumption and combining with the theory of the mechanics of materials and considering the differential characteristics of the hyperbolic trigonometric function, the theoretical calculation formula of the displacement and internal force of the strip foundation were drawn. Moreover the formulas were simple and convenient for engineering application. Lastly the curves features of the strip foundation on the different location were studied by combining with engineering case.

Keywords: inverse analysis method; synergy differential equation; initial parameter method; displacement and internal force of the strip foundation

收稿日期:2018-01-15

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51808446);陕西省重点研发计划项目资助(2019SF-266);陕西省自然科学基金基础研究计划企业联合基金资助项目(2018JQ5184)

*通信作者, E-mail: tianxy365@163.com

隧道开挖扰动围岩土层,必然危害周边环境^[1],其主要原因是地表出现较大的沉降甚至塌陷.根源^[2]是地铁开挖引起隧道边缘土层损失以及土体受剪失效后再固化效应.由于受城市地面交通压力以及建设用地紧张限制,城市地下工程必须在已有的建筑物基础下或侧向附近修建,且迄今为止国内外诸多研究者研究的重点在隧道开挖对建筑物^[3-5]或桥梁桩基^[6-7]的效应问题,即主要研究的是深基础的内力与变形,涉及浅基础研究很少,据统计地下开挖浅基础的研究主要在数值模拟^[8-9]方面,尚未见理论研究的报道,基于此本文以西安地铁三号线太白小区站—吉祥路站区间浅埋暗挖隧道为依托,研究隧道垂直穿越上部四层钢筋混凝土框架住宅楼的条形基础的效应问题.

1 隧道开挖引发条形基础的效应分析

1.1 微分方程的建立

由图1取一半结构进行分析,条基所受的荷载有建筑物上部荷载和基础反力,为便于建立微元体的平衡方程,引入如下假定:

- 1) 地表横向沉降槽曲线采取 Peck 公式;
- 2) 隧道开挖对基础的作用,可采取反分析法将荷载 $q_1(x) = kbw_1(x)$ 作用在条基上^[10];
- 3) 条形基础的顶面作用于地表上;
- 4) 基础梁底面与地基表面紧密接触;
- 5) 平截面假定.

$$kbw(x) dx - kbw_1(x) - qb dx = dQ(x); \quad (1)$$

$$[Q(x) + dQ(x)] d(x) + kbw(x) (dx)^2/2 - kbw_1(x) (dx)^2/2 - qb(dx)^2/2 = dM(x). \quad (2)$$

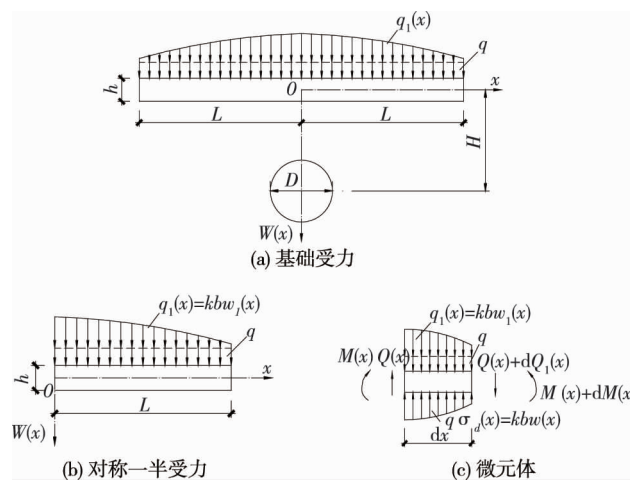


图1 隧道穿越条形基础计算简图

联立式(1)和式(2),并略去高阶微量得

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + kbw(x) = qb + kbw_1(x). \quad (3)$$

式中:EI为条基抗弯刚度; $w(x)$ 为条基任一点 x 的沉降; $w_1(x)$ 为隧道开挖诱发地表任一点 x 的沉降; q 为上部结构的竖向均布荷载; k 为基床系数; b 为基础宽度.

1.2 微分方程的求解

式(3)为非齐次线性四阶常系数微分方程,其解由通解和两类特解组成,即

$$w(x) = w_{11}(x) + w_{21}(x) + w_{31}(x). \quad (4)$$

式(3)可分解为

$$EI d^4 w_{11}(x)/dx^4 + kbw_{11}(x) = 0; \quad (5)$$

$$EI d^4 w_{21}(x)/dx^4 + kbw_{21}(x) = qb; \quad (6)$$

$$EI d w_{31}^4(x)/d x^4 + kb w_{31}(x) = kb w_1(x); \quad (7)$$

齐次方程的通解 $w_{11}(x)$ 则借助初参数来表示:

$$w_{11}(x) = w_0 \varphi_1(\alpha x) + \theta_0 \varphi_2(\alpha x) / 2\alpha - 2\alpha^2 M_0 \varphi_3(\alpha x) / kb - \alpha Q_0 \varphi_4(\alpha x) / kb. \quad (8)$$

式中: α 为弹性地基梁的柔度特征系数,且 $\alpha = \sqrt[4]{kb/4EI}$; $\varphi_1(\alpha x)$, $\varphi_2(\alpha x)$, $\varphi_3(\alpha x)$, $\varphi_4(\alpha x)$ 为双曲三角函数,且 $\varphi_1(\alpha x) = \text{ch}(\alpha x) \cos(\alpha x)$, $\varphi_2(\alpha x) = \text{ch}(\alpha x) \sin(\alpha x) + \text{sh}(\alpha x) \cos(\alpha x)$, $\varphi_3(\alpha x) = \text{sh}(\alpha x) \sin(\alpha x)$, $\varphi_4(\alpha x) = \text{ch}(\alpha x) \sin(\alpha x) - \text{sh}(\alpha x) \cos(\alpha x)$.

特解 $w_{21}(x)$ 为

$$w_{21}(x) = q[1 - \varphi_1(\alpha x)] / kb. \quad (9)$$

由假定(1)且令 $m = -\frac{1}{2i^2}$ 得

$$w_1(x) = S_{\max} \exp(-x^2/2i^2) = S_{\max} \exp(-mx^2). \quad (10)$$

特解 $w_{31}(x)$ 为文献[11]根据实测数据得出由于隧道开挖引发的条形基础沉降曲线近似服从 Peck 曲线分布规律,故而本文假设 $w_{31}(x) = n \exp(-lx^2)$, 则

$$d w_{31}^4(x)/d(x)^4 = -4nl^2(12lx^2 - 4l^2x^4 - 3) \exp(-lx^2). \quad (11)$$

指数函数可采取泰勒级数展开,即

$$\exp(-mx^2) = 1 - mx^2 + m^2x^4/2 + \dots; \quad (12)$$

$$\exp(-lx^2) = 1 - lx^2 + l^2x^4/2 + \dots. \quad (13)$$

利用方程系数相等的原则,得

$$l = 0.6 \text{ m}; \quad (14)$$

$$n = kb s_{\max} / (4.32EI m^2 + kb). \quad (15)$$

则条形基础的转角、弯矩、剪力:

$$\theta(x) = -\alpha w_0 \varphi_4(\alpha x) + \theta_0 \varphi_1(\alpha x) - 2\alpha^3 M_0 \varphi_2(\alpha x) / kb - 2\alpha^2 Q_0 \varphi_3(\alpha x) / kb + \alpha q \varphi_4(\alpha x) / kb - 2nlx \exp(-lx^2); \quad (16)$$

$$M(x) = kb w_0 \varphi_3(\alpha x) / 2\alpha^2 + kb \theta_0 \varphi_4(\alpha x) / 4\alpha^3 + Q_0 \varphi_2(\alpha x) / 2\alpha + M_0 \varphi_1(\alpha x) - q \varphi_3(\alpha x) / 2\alpha^2 + 2EI nl(1 - 2lx^2) \exp(-lx^2); \quad (17)$$

$$Q(x) = kb w_0 \varphi_2(\alpha x) / 2\alpha + kb \theta_0 \varphi_3(\alpha x) / 2\alpha^2 + Q_0 \varphi_1(\alpha x) - \alpha M_0 \varphi_4(\alpha x) - q \varphi_2(\alpha x) / 2\alpha + 4EI nl^2(2lx^3 - 3x) \exp(-lx^2). \quad (18)$$

1.3 初参数的确定

w_0, θ_0, M_0, Q_0 为初参数,其中 2 个参数可由原点端的两个边界条件直接求出,另 2 个待定参数通过另一端的边界条件确定,即

$$\theta(x)|_{x=0} = 0; Q(x)|_{x=0} = 0; M(x)|_{x=L} = 0; Q(x)|_{x=L} = 0; \text{ 得其值为}$$

$$w_0 =$$

$$\frac{2\alpha^2 \varphi_1(\alpha L)}{kb(\alpha \varphi_1(\alpha L) \varphi_2(\alpha L) - \varphi_3(\alpha L) \varphi_4(\alpha L))} \left\{ \frac{q}{2\alpha} \left[\varphi_2(\alpha L) - \frac{\varphi_3(\alpha L) \varphi_4(\alpha L)}{\varphi_1(\alpha L)} \right] + \right. \\ \left. 2EI nl \exp(-lL^2) \left[\frac{\alpha \varphi_4(\alpha L)}{\varphi_1(\alpha L)} (1 - 2lL^2) - (4l^2L^3 - 6lL) \right] \right\};$$

$$\theta_0 = 0;$$

$$Q_0 = 0;$$

$$M_0 =$$

$$- \frac{\varphi_3(\alpha L)}{\alpha(\alpha \varphi_1(\alpha L) \varphi_2(\alpha L) - \varphi_3(\alpha L) \varphi_4(\alpha L))} \left\{ \frac{q}{2\alpha} \left[\varphi_2(\alpha L) - \frac{\varphi_3(\alpha L) \varphi_4(\alpha L)}{\varphi_1(\alpha L)} \right] + \right. \\ \left. 2EI nl \exp(-lL^2) \left[\frac{\alpha \varphi_4(\alpha L)}{\varphi_1(\alpha L)} (1 - 2lL^2) - (4l^2L^3 - 6lL) \right] \right\} +$$

$$\frac{q\varphi_3(\alpha L)}{2\alpha^2\varphi_1(\alpha L)} - \frac{2EI\ln(1-2L^2)\exp(-LL^2)}{\varphi_1(\alpha L)}$$

2 算例分析

以西安地铁 3[#] 吉祥路站—太白小区站工程背景为例,上部为 4 层框架的条形基础,参数: C30, $2L=40\text{ m}$, $b=1\ 200\text{ mm}$, $h=400\text{ mm}$, $q=100\text{ kN/m}^2$, $k=40\ 000\text{ kN/m}^3$,实测地表最大沉降 $S_{\max}=0.021\text{ m}$, $i=5.53$, $H=12.85\text{ m}$,求隧道开挖及相应参数变化对其基础效应的影响.

2.1 最大沉降对基础效应的影响

由图 2 可知,隧道开挖引发的地层沉降对基础竖向位移、转角、弯矩和剪力的影响较大,所以工程上应尽可能采取措施减小地层沉降,如控制隧道断面尺寸、增大隧道埋深、减小地层损失率等.

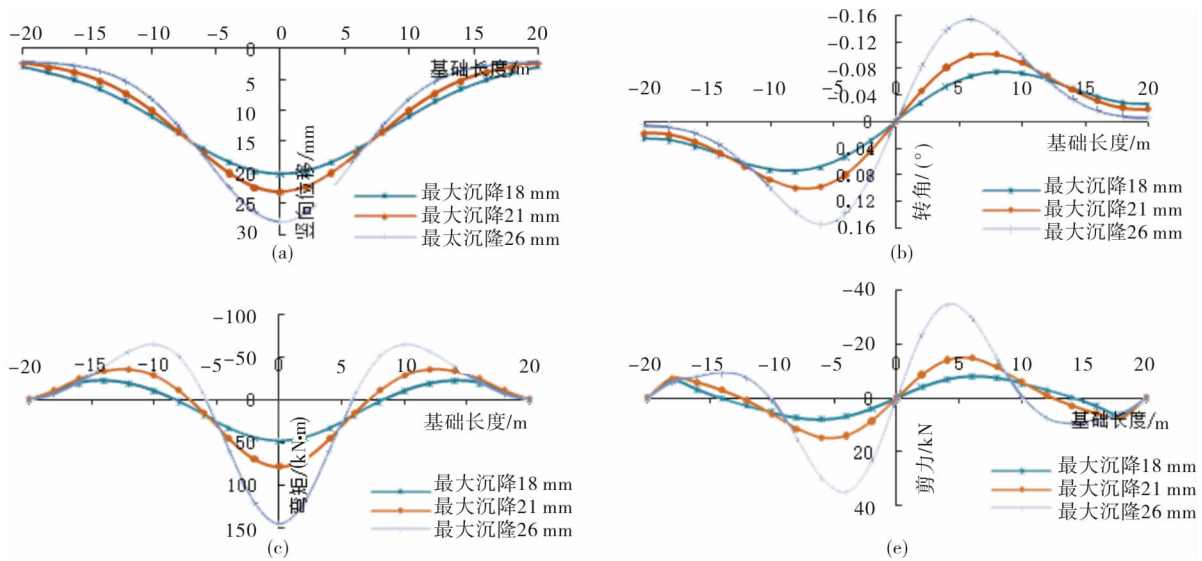


图 2 最大沉降对条形基础影响的效应曲线

2.2 基础宽度对其效应的影响

由图 3 可知,基础宽度的变化几乎不影响竖向位移和转角,对其弯矩和剪力的影响稍大.

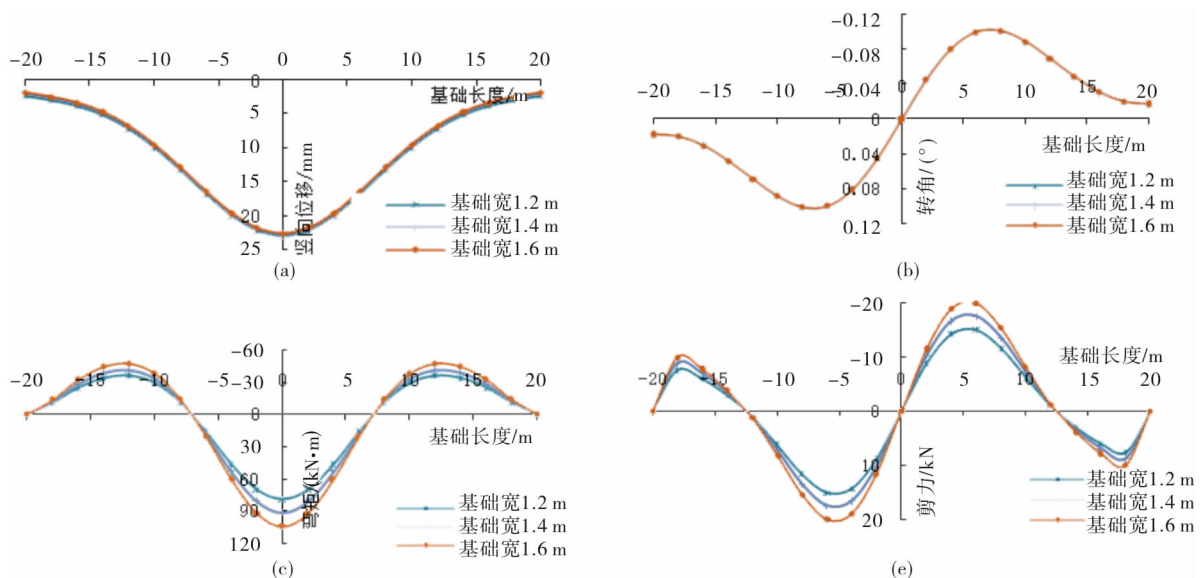


图 3 基础宽度对条形基础影响的效应曲线

2.3 基础高度对其效应的影响

由图 4 可知,基础高度的变化对其变形无影响,但对其弯矩和剪力的影响很大,究其原因是基础刚度

变化较大,且刚度是高度的 3 次方.

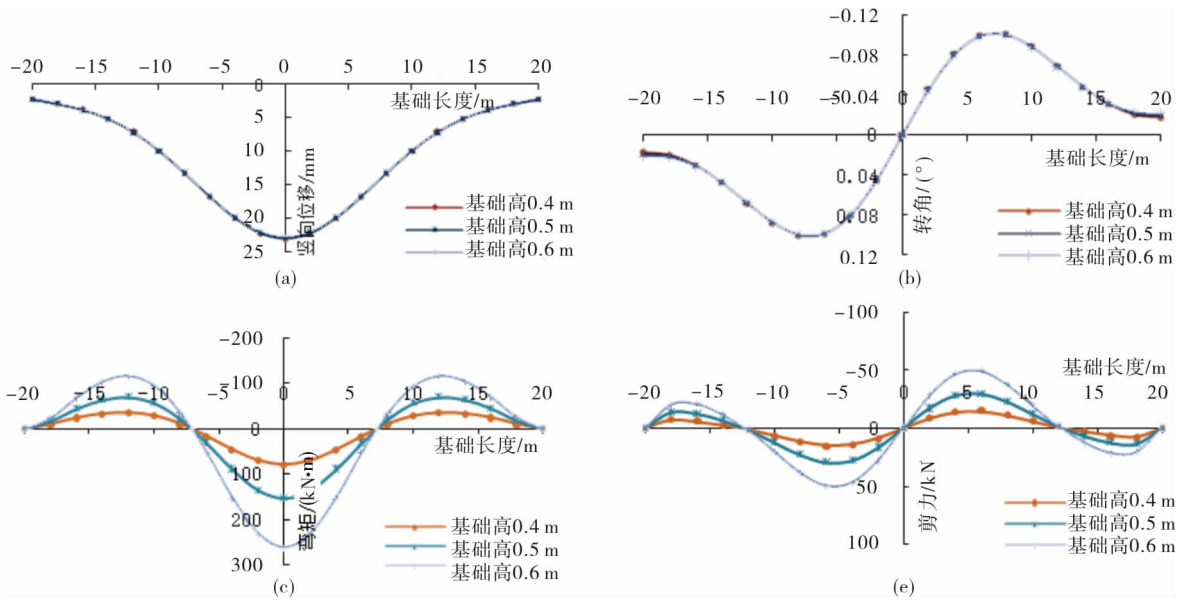


图 4 基础高度对条形基础影响的效应曲线

2.4 混凝土强度等级对基础效应的影响

由图 5 可知,基础混凝土标号对其效应的影响非常小,所以工程上一般建筑物的浅基础采用标号为 C30 的混凝土即可.

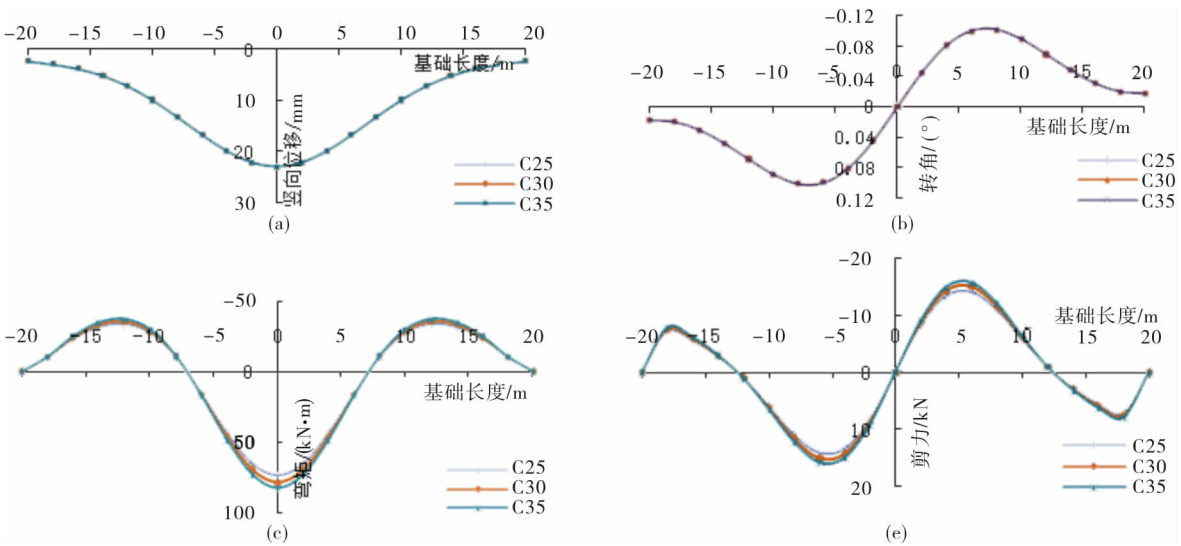


图 5 混凝土强度等级对条形基础影响的效应曲线

2.5 基床系数对基础效应的影响

图 6 知:基床系数对其效应的影响非常小,所以每种土质的基床系数规范给定是一定范围.

3 结论

1) 本文基于 Winkler 地基理论,将隧道开挖引发的地面沉降采取反分析法作用于条形基础顶面,考虑基础与地基的共同作用,建立了相应微分方程,利用物理意义明确且有独特性质的初参数法进行求解,获得便于工程应用的计算条基效应的简单解析表达式.

2) 参数分析结果表明:隧道开挖引起的地层沉降对基础效应的影响较大;基础宽度和高度对基础位移的影响很小,但基础高度变化对弯矩和剪力影响很大;混凝土强度等级不影响基础的变形,且对基础内

力影响较小;基床系数对基础效应影响较小.

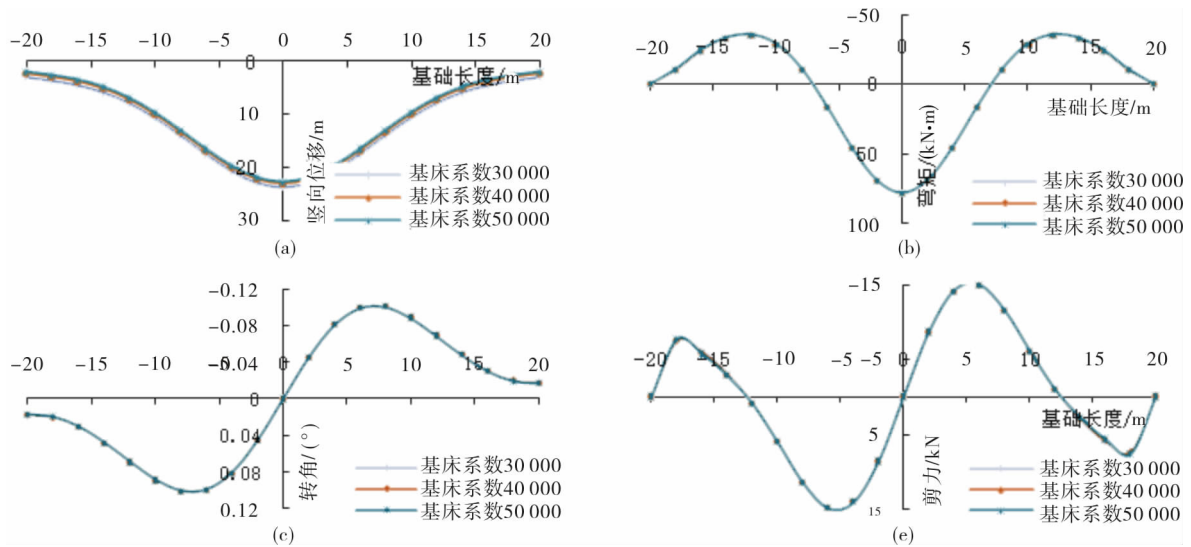


图6 基床系数对条形基础影响的效应曲线

3) 本文在研究期间假定隧道开挖断面位于条形基础的中心,未考虑隧道和基础的偏心比变化对其效应的影响.

参考文献:

- [1] 田晓艳,刘静.隧道开挖引起的深层土体水平位移的简化分析方法[J].科学技术与工程,2016,16(11):232-233.
- [2] 刘建航.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991:329-330.
- [3] 田晓艳,谷拴成.土体竖向位移对被动单桩影响的简化分析方法[J].科学技术与工程,2016,16(7):255-259.
- [4] Morton J D, King K H. Effect of tunneling on the bearing capacity and settlement of piled foundation[J]. Proceedings Tunneling 79, London: IMM, 1979: 57- 6.
- [5] Gordon T K, NG C W W. Effects of advancing open face tunneling on an existing loaded pile[J]. Geotech Geoenviron Eng. ASCE, 2005, 131(2): 193-201.
- [6] 杨广武,赵江涛,苏洁.地铁施工对既有桥梁桩基的影响研究[J].都市轨道交通,2014,6(3):70-74.
- [7] 吴波,刘维宁,索晓明,等.城市地铁施工邻近短桩桥基加固效果研究[J].土木工程学报,2006(7):99-103.
- [8] 周艳坤.地下通道开挖对邻近条形基础的影响[D].上海:上海大学硕士学位论文,2015.
- [9] 丁智,魏新江,魏纲,等.邻近不同基础建筑物地铁盾构施工相互内力影响研究与分析[J].岩土力学,2011,32(s1):749-754.
- [10] 张云,殷宗泽,徐永福.盾构法隧道引起的地表变形分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(3):388-392.
- [11] 孙曦源,衡朝阳,周智.北京地铁隧道下穿砌体结构建筑物诱发基础沉降规律实测研究[J].土木工程学报,2015,7(48):304-305.