

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2016.03.002

# 盾构隧道施工引起铁路路基沉降槽宽度系数计算方法

王鸣涛<sup>1</sup>, 吴波<sup>1,2</sup>, 张鹏辉<sup>1</sup>

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;  
2. 福建省土木工程新技术与信息化重点实验室, 福建 福州 350118)

**摘要:** 盾构隧道施工不可避免地对隧道周围地层产生扰动, 从而产生地层损失和路基沉降, 路基沉降分析是盾构隧道的一个重要方面。基于 Peck 公式, 逐步推导出单洞盾构隧道下穿铁路轨道路基沉降槽宽度系数的计算公式, 从而对 Peck 公式进行修正, 并结合福州地铁一号线的监测数据进一步验证了修正后的 Peck 公式的合理性和适用性。

**关键词:** 盾构隧道; 路基沉降; Peck 公式; 沉降槽; 宽度系数

**中图分类号:** TU45      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-4348(2016)03-0212-06

## Calculation method of width parameters of railway roadbed settlement trough caused by shield tunnel construction

Wang Mingtao<sup>1</sup>, Wu Bo<sup>1,2</sup>, Zhang Penghui<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;  
2. Fujian Provincial Key Laboratory of Advanced Technology and Informationization in Civil Engineering, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Shield tunnel construction inevitably disturbs the surrounding strata, thus producing formation loss and roadbed settlement. The analysis of roadbed settlement is an important aspect of shield tunnel. Based on Peck equation, calculation formula of width parameters of roadbed settlement trough of single-tube shield tunnel passing under the railway track were gradually deduced, which modified the Peck equation. The rationality and applicability of the modified Peck equation was further verified combined with the monitoring data of Fuzhou city subway line 1.

**Keywords:** shield tunnel; roadbed settlement; Peck equation; settlement trough; width parameter

铁路隧道穿越既有建(构)筑物是盾构施工的重大难题之一<sup>[1]</sup>, 隧道开挖会引起地表沉降, 并导致地表建(构)筑物出现不均匀沉降<sup>[2]</sup>, 因此, 对盾构隧道施工引起的地表沉降计算方法研究具有深远意义。很多专家、学者通过理论分析<sup>[3-4]</sup>、数值计算<sup>[5-6]</sup>和监控量测<sup>[7-8]</sup>进行了相关

研究。美国著名学者 Peck 基于大量的实测数据, 经过统计分析, 建立了地表沉降最大值与地层损失的关系式, 即 Peck 公式。目前大多数学者对盾构法隧道施工引起地表沉降规律的研究都是基于 Peck 公式深入分析的。

在所有的计算与评价新建隧道开挖引起地表

收稿日期: 2016-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478118); 福建省自然科学基金项目(2014J01170)

第一作者简介: 王鸣涛(1989-), 男, 河南安阳人, 硕士研究生, 研究方向: 隧道与地下工程技术。

沉降的经验公式中,Peck 公式最简便,也应用最普遍。但由于 Peck 公式只是基于有限地区的实测数据提出的经验公式,其预测地表沉降的机理尚不明确,适用性与适用范围也需要进一步分析探讨;其次,以 Peck 法为代表的经验公式法并没有考虑地下建(构)筑物与土体的相互作用以及地表静动荷载的影响。Peck 公式中的参数沉降槽宽度系数  $i$  和地层损失率  $\eta$  较难精确确定,对计算结果影响较大<sup>[9]</sup>,这两个参数与隧道埋深、施工断面面积和地质情况等密切相关,特别是  $i$  值不仅对地面沉降曲线的形状有直接影响,还对地表最大沉降量  $S_{\max}$  值有影响,是一个极其重要的参数。本文通过对单洞盾构隧道穿越铁路轨道群施工引起的  $i$  值影响因素的分析,采用 Peck 公式对有限元数值模拟得出的路基沉降曲线进行拟合,通过反分析得到  $i$  值。经过统计分析,提出新的包含路基荷载  $P$  的  $i$  值计算公式。

# 1 沉降槽宽度系数修正

## 1.1 现有 $i$ 计算公式

Peck 公式假定:因隧道开挖在地表以下地层中形成的沉降槽体积等于地体损失体积;地表沉降槽曲线可以采用正态分布函数表示:

$$S_x = S_{\max} \exp(\frac{-x^2}{2i^2})$$

(1)

$$S_{\max} = \frac{V_i}{i\sqrt{2\pi}} = \frac{\pi R^2 \eta}{i\sqrt{2\pi}} \approx \frac{\pi R^2 \eta}{2.5i}$$

(2)

式中: $S_x$ 为距隧道中心线处地表沉降值; $S_{\max}$ 为隧道施工引起的地表最大沉降量; $\eta$ 为地层损失率,取值 0.39%~1.41%; $x$ 为距隧道轴线横向水平距离; $R$ 为隧道外半径; $V_i$ 为施工引起的隧道单位长度地层损失; $i$ 为沉降槽宽度系数,即隧道中线至沉降曲线反弯点的距离。

关于地表沉降槽宽度系数  $i$ ,国内外学者对相关参数取值进行了大量研究,给出了许多经验取值,目前应用较多的有式(3)、(4)和(5)<sup>[9]</sup>:

$$i = \frac{h}{\sqrt{2\pi} \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}$$

(3)

$$i = kh$$

(4)

$$i = R [h/(2R)]^n$$

(5)

式中: $h$ 为隧道轴线埋深; $R$ 为隧道计算半径; $k$ 为系数,主要与地层条件和施工方法有关,取值在

0.40~0.65 之间; $n$ 为参数,取值在 0.8~1.0 之间,土越软, $n$ 取值越大。

## 1.2 有限元模型

该隧道为单线隧道,隧道轴线埋深  $h$ ,由于大多数使用盾构法开挖的隧道,其半径均保持在一定范围之内,故本次模型的隧道外半径取固定值 3.15 m;计算模型宽 66 m,高 37 m;模型横向取至距隧道轴线 5 倍盾构隧道直径。管片厚 0.30 m,混凝土等级为 C50,盾构钢壳厚 0.15 m,超开挖等代层厚 4 mm。网格单元中围岩划分采用映射划分法,最大尺寸为 2 m,最小 0.5 m;隧道内部网格采用自动划分法。整体概化模型见图 1。

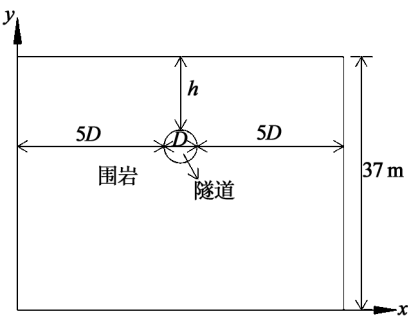


图1 盾构施工计算模型

Fig.1 Calculation model of shield construction

围岩力学、物理参数按 TB10003—2005《铁路隧道设计规范》中相关数据取值。采用摩尔库伦弹塑性本构模型,具体围岩及支护物理力学参数见表 1。

表 1 围岩及结构参数表

Tab.1 Parameter of surrounding rock and structure					
部位	容重 $\gamma /$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 $E /$ GPa	泊松比 $\nu$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	黏聚力 $c /$ kPa
围岩	20.0	$1.3 \times 10^{-2}$	0.39	25	36
注浆层	18.5	$1.0 \times 10^{-2}$	0.38	15	15
管片	25.0	$2.4 \times 10^{-2}$	0.20	—	—
盾壳	78.0	$2.4 \times 10^{-2}$	0.20	—	—
等代层	0	$1.0 \times 10^{-8}$	0.05	—	—

## 1.3 有限元模拟的正确性验证

在计算地表沉降槽宽度系数  $i$  之前,要对本模型模拟盾构开挖的正确性进行验证,取隧道轴线埋深  $h$  为 13.5 m,隧道半径  $R$  为 3.15 m,地表无

荷载的模型为验证对象,见图 2。

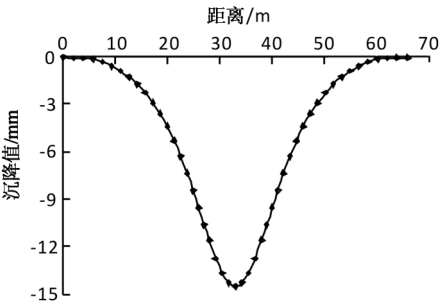


图 2 单线隧道横向沉降曲线

Fig.2 The lateral settlement curve of single-line tunnel

由图 2 可知,地表横向沉降曲线呈正态分布,隧道中心处沉降值达最大值 6.17 mm,距离隧道中心越远,沉降值越小,且变化均匀,沉降曲线与 Peck 曲线可以很好吻合;取隧道中心对应的地表点沉降值进行验证,该处沉降值 6.17 mm,采用式

(2)和(5),当  $n$  取 0.9,地层损失率  $\eta$  取 0.778% 时,计算结果与本模型最大沉降值一致。可认为本模型得出的沉降曲线符合 Peck 公式。

1.4 本工地表沉降槽宽度系数  $i'$  的确定

1.4.1 对现有方法探讨

由式(3)可知,随着  $\varphi$  的增大,  $i$  值随之增大,得到逐渐增宽的沉降槽,这与实测结果恰好相反,因此不宜使用。对于常用公式(4)和(5),本文采用隧道半径  $R$  为固定值 3.15 m,隧道轴线埋深  $h$  均匀变化的 9 个模型,对 9 个模型分别进行施工阶段分析、提取地表横向沉降值、画地表沉降曲线,把地表沉降曲线与 Peck 曲线用 OriginPro8.0 软件进行拟合进而反分析得到 9 个和不同  $h$  对应的  $i$  值,然后把 9 组组合( $h$  和  $R$  的组合)分别带入式(4)和(5)中( $k$  取值 0.7,  $n$  取值 0.9), $n$  得到理论值  $i_1$  以及  $i_2$ ,与  $i$  值最接近的就是本文要用的公式,计算结果见表 2。

表 2 有限元计算结果与经验公式计算结果的比较

Tab.2 Comparison between calculation results via finite element analysis and empirical formula

埋深/m	有限元	经验公式		$(i - i_1)/i$	$(i - i_2)/i$
	$i$	$i_1$	$i_2$		
7.0	5.75	4.90	3.43	0.15	0.40
8.5	6.33	5.95	4.12	0.06	0.35
10.0	6.96	7.00	4.77	-0.1	0.31
11.5	7.52	8.05	5.41	-0.1	0.28
13.0	8.10	9.10	6.05	-0.01	0.25
14.5	8.66	10.15	6.67	-0.17	0.23
16.0	9.22	11.20	7.29	-0.22	0.21
17.5	9.77	11.25	7.90	-0.25	0.19
19.0	10.29	13.30	8.51	-0.29	0.17

从表 2 可以看出,有限元计算结果与  $i_1$  得出的结果最接近,最大误差为 0.293,且误差值均匀浮动;而  $i_2$  得出的结果最大误差为 0.403,且误差值均为正值,综合比较本文取式(4)为最终的经验公式。

1.4.2 考虑路基荷载  $P$  时的地表沉降槽宽度系数  $i'$

对以上 9 个模型分别加上逐渐增大的路基荷载  $P$ (荷载值  $P$  为 0~200 kPa,梯度为 30 kPa,共 8 个),再次进行施工阶段分析、提取地表横向沉降

值、画地表沉降曲线、采用 Peck 公式对地表沉降曲线进行拟合,通过反分析得到  $i'$  值,以隧道轴线埋深  $h$  为 7 m 为例,当隧道轴线埋深  $h=7$  m,隧道半径  $R=3.15$  m 时,对  $i' - i$  与路基荷载  $P$  以及  $i'/i$  与  $P$  进行曲线拟合,发现曲线成指数关系,如图 3、4。

拟合公式:  $i' - i = -1.135 + 1.135e^{\frac{-P}{118.161}}$  (6)

拟合公式:  $i'/i = 0.802 + 0.198e^{\frac{-P}{118.161}}$  (7)

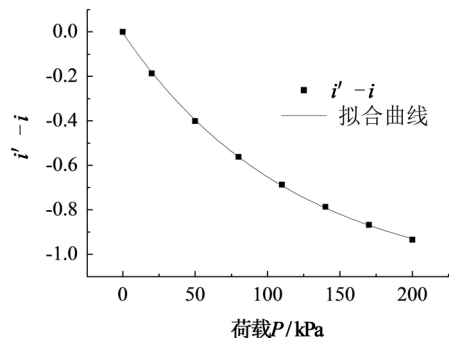


图 3  $i' - i$  与路基荷载  $P$  的拟合曲线

Fig.3 Fitting curve between  $i' - i$  and subgrade load

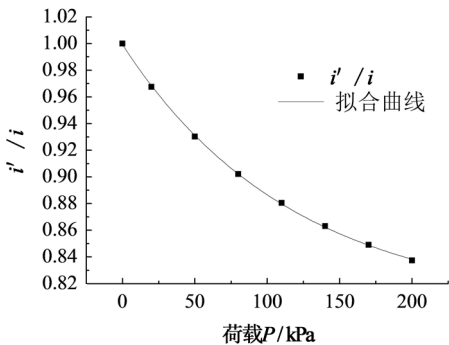


图 4  $i' / i$  与路基荷载  $P$  的拟合曲线

Fig.4 Fitting curve between  $i' / i$  and roadbed (subgrade) load  $P$

当隧道轴线半径  $h$  取其他值时,  $i' - i$  与路基荷载  $P$  以及  $i' / i$  与  $P$  均成指数关系, 且拟合公式与式(6)和(7)相似, 不同的是式中的参数。将公式中的参数用  $a$ 、 $a_1$  和  $b$  来表示,  $a = -1.135$ ,  $a_1 = 0.802$ ,  $b = -1/118.16$ 。代入式(6)得

$i' - i = a - ae^{bP}$ , 进一步整理得  $i' = i + a(1 - e^{bP})$ ;

代入式(7)得  $i' / i = a_1 + (1 - a_1)e^{bP}$ , 进一步整理得  $i' = a_1 i + (1 - a_1)ie^{bP}$ ;

比较整理后的两式可以看出,  $i' = i + a(1 - e^{bP})$  明显比  $i' = a_1 i + (1 - a)ie^{bP}$  简单, 故本文采用  $i' = i + a(1 - e^{bP})$ 。

1.4.3 计算埋深不同时的参数  $a$  和  $b$

对隧道轴线埋深  $h$  取其他值时均进行  $i' - i$  与路基荷载  $P$  的曲线拟合, 得出不同的参数  $a$  与参数  $b$ , 令  $b' = -1/b$  整理得表 3。

分别对参数  $a$  与隧道轴线埋深  $h$ 、参数  $b$  与隧道轴线埋深  $h$  进行曲线拟合, 拟合曲线分别如图 5 和 6 所示。

拟合公式:  $a = 0.034 - 2.734e^{-\frac{h}{8.167}}$

拟合公式:  $b = -0.004 - 0.024e^{-\frac{h}{4.406}}$

表 3 所有工况中参数  $a$  与  $b'$  的汇总

Tab.3 Summary of parameters  $a$  and  $b'$  in all working conditions

参数	7	8.5	10	11.5	13	14.5	16	17.5	19
$a$	-1.14	-0.92	-0.77	-0.63	-0.53	-0.43	-0.36	-0.29	-0.23
$b'$	118.16	143.85	168.54	187.77	206.91	224.56	241.68	253.45	262.39

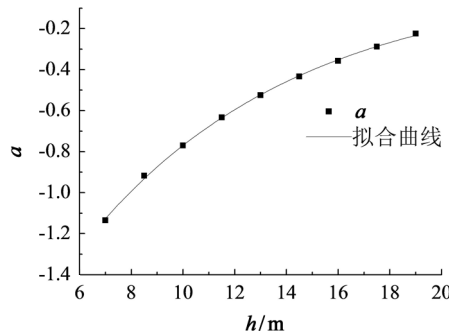


图 5 参数  $a$  与隧道轴线埋深  $h$  的拟合曲线

Fig.5 Fitting curve between parameters  $a$  and tunnel axis buried at a depth of  $h$

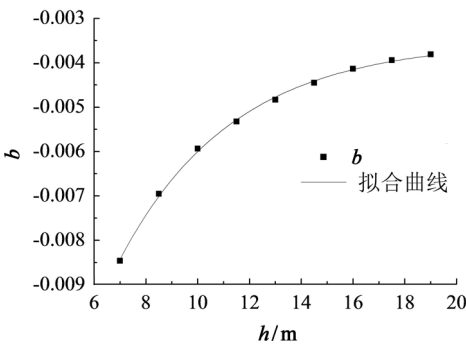


图 6 参数  $b$  与隧道轴线埋深  $h$  的拟合曲线

Fig.6 Fitting curve between parameters  $b$  and tunnel axis buried at a depth of  $h$

根据以上分析, 可以得出最终的考虑路基荷  
载  $P$  因素的路基沉降槽宽度系数  $i'$  的表达式:

$$i' = i + a(1 - e^{bP}) \tag{8}$$

式中,  $i = kh$ , 对于砂性土,  $k$  为 0.2~0.3; 对于软黏土,  $k = 0.7$ ; 对于中性粘土,  $k = 0.5$ ; 对于硬黏土,  $k = 0.4$ ; 参数  $a = 0.034 - 2.734 e^{-\frac{h}{8.167}}$ ; 参数  $b = -0.004 - 0.024e^{-\frac{h}{4.406}}$ 。

2 工程实例

2.1 工程概况

福州市轨道交通 1 号线工程土建 02 合同段位于福州市晋安区, 主要包括两个车站两个盾构区间: 秀山站、罗汉山站; 秀山站~罗汉山站区间、罗汉山站~福州火车站区间的土建工程。其中罗汉山站~福州火车站区间盾构始发井为 2<sup>#</sup>矿山法工作井。

2<sup>#</sup>竖井~福州火车站区间采用矿山法加盾构法施工, 区间上行线起止里程为: SK3+712.8~SK4+223.7, 长 510.9 m, 下行线里程为 XK3+722.01~XK4+223.7, 长 501.69 m。2<sup>#</sup>竖井~福州火车站区间隧道总长 1 012.59 m。其中盾构段施工总长度为 451.745 m。

盾构区间隧道下穿地表铁路轨道, 沿规划西路向南下穿福州火车站咽喉区(车站正线 14 股道, 其中新建 7 股道为客运专线, 2 组道岔, 铁路路堤高 2 m, 有砟道床), 平面与其约成 60°, 线间距 11~14.65 m。穿越段里程: XK4+020~XK+049、SK4+010~SK4+062, 盾构区间隧道下穿排洪涵管桩, 所在咽喉区距铁路站台 1 股道最近 20 m, 最远的 14 股道 138 m。隧道与铁路平面关系图和隧道与铁路断面关系图分别见图 7 和 8。

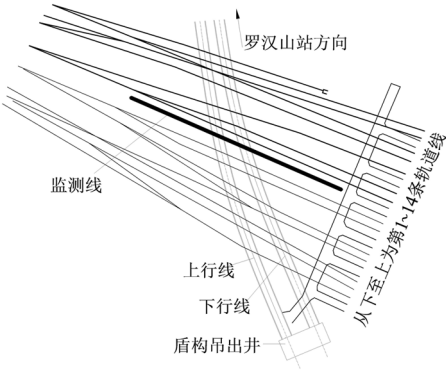


图 7 隧道与铁路平面关系图

Fig.8 The relationship between tunnel and railway plane

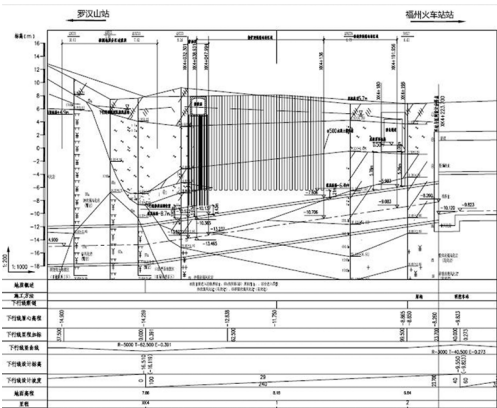


图 8 隧道与铁路断面关系图

Fig.9 The relationship between tunnel and railway section

2.2 沉降分析

施工时上行线隧道先开挖, 通过铁路股道到达接收井后, 随即进行下行线隧道的开挖。选取图 7 中标注的路基为监测对象, 根据盾构隧道开挖过程中监测线在不同时期内的监测情况, 绘制如图 9 的上行线开挖地表沉降槽曲线。

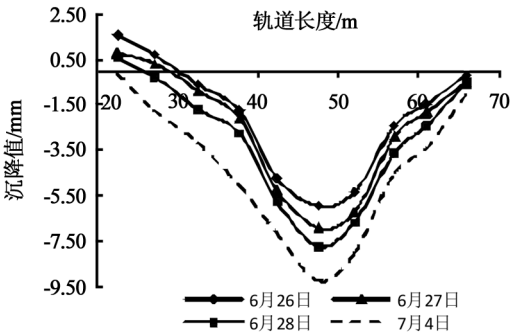


图 9 监测线 1 不同时期的沉降曲线图

Fig.9 Subsidence curve of monitoring line 1 in different periods

从图 9 可知, 随着时间的推移, 盾构机逐渐穿越铁路轨道群且路基沉降量逐渐增大, 最大沉降值为 9.28 mm, 位于上行线隧道正上方处, 取最大沉降曲线与 Peck 曲线进行拟合, 如图 10 所示。

由图 10 可知, 检测线的最大沉降曲线与 Peck 曲线吻合良好, 路基沉降槽宽度  $i = 10.659$  m。由图 9 可知, 路基下有一层淤泥, 故盾构开挖段地质属于软粘土, 取  $k = 0.7$ ; 经测量  $h = 15.3$  m, 参数  $a = -0.386$ ,  $b = -4.745$ ; 根据 TB10001—2005《铁路路基设计规范》附录 A 的规定, 按换算土柱法, 路基面承受的静荷载为 60 kPa。采用式(8)计算,



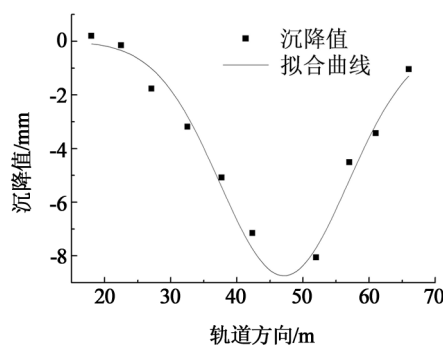


图 10 最大路基沉降曲线与 Peck 曲线拟合

Fig.10 Fitting between the largest roadbed settlement curve and Peck curve

得到修正后地表沉降槽宽度系数 $i'=10.614$ ,采用式(2)计算,得到路基最大沉降值 $S_{\max}=9.139\text{ mm}$ 。

以上分析可知,实测曲线沉降槽宽度与本文修正后的理论值很接近,且最大沉降值也很接近,进一步验证了本文结论的合理性。

### 3 结论

1)取一计算模型(隧道轴线埋深 $h=13.5\text{ m}$ ,

隧道半径 $R=3.15\text{ m}$ ),当式(5)中参数 $n$ 取 $0.9$ ,地层损失率 $\eta$ 取 $0.778\%$ 时,沉降曲线与 Peck 曲线形状相似且最大值相同,验证了数值模拟的正确性。

2)提出目前在国内外对于地表沉降槽宽度系数 $i$ 常用的3个公式,发现式(3)的 $i$ 变化规律与数值模拟结果相反;由式(5)计算的结果与数值计算结果差距太大,不宜使用,只有式(4)与有限元计算结果最为接近,误差最小,可靠性较强。

3)当存在路基荷载时,通过路基沉降曲线与 Peck 曲线拟合反分析得出的地表沉降槽宽度系数 $i'$ 和无路基荷载得到的 $i$ 值的差( $i'-i$ )、商( $i'/i$ )均与隧道轴线埋深 $h$ 存在指数关系,且通过 $i'-i$ 得出修正后的 $i'$ 更简单,实用性更好。

4)在得到修正后的 $i'$ 中发现参数 $a$ 、 $b$ 与隧道轴线埋深存在指数关系,进一步得到最终修正后的路基沉降槽宽度系数 $i'$ 。

5)通过实际工程,福州地铁一号线的监测数据与式(8)进行拟合,进一步证实了结论的合理性和实用性。

### 参考文献:

[1] 周松,荣建,陈立生,等.大直径泥水盾构下穿机场的施工控制[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):806-813.

[2] 黎永索,杨军生,邓宗伟,等.盾构隧道下穿地下建筑物时的地表沉降分析[J].防灾减灾工程学报,2013,33(6):705-711.

[3] 伍振志,杨国祥,杨林德,等.上海长江隧道过民房段地表变位预测及控制研究[J].岩土力学,2010,31(2):582-587.

[4] 施成华,彭立敏,雷明锋.盾构法施工隧道地层变形时空统一预测方法研究[J].岩土力学,2009,30(8):2379-2384.

[5] 夏元友,张亮亮,王克金.地铁盾构穿越建筑物施工位移的数值分析[J].岩土力学,2008,29(5):1411-1418.

[6] 姜忻良,贾勇,赵保建,等.地铁隧道施工对邻近建筑物影响的研究[J].岩土力学,2008,29(11):3048-3052.

[7] 吴为义,孙宇坤,张土乔.盾构隧道施工对邻近地下管线影响分析[J].中国铁道科学,2008,29(3):58-62.

[8] 贺美德,刘军,乐贵平,等.盾构隧道近距离侧穿高层建筑的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(3):603-608.

[9] 魏纲.盾构法隧道地面沉降槽宽度系数取值的研究[J].工业建筑,2009,39(12):74-79,109.

(责任编辑:陈雯)