

深基坑开挖空间效应对周围土体及邻近隧道的 影响研究

吴才德, 曾婕, 成怡冲, 龚迪快
(浙江华展工程研究设计院有限公司, 宁波 315012)

[摘要] 基于宁波软土地区典型土层分布和经工程反演的计算参数,通过 MIDAS/GTS 有限元分析软件对不同开挖面积和开挖深度的 18 个三维基坑有限元模型进行数值计算。根据数值模拟结果,提出了确定宁波地区地铁隧道控制保护区范围的修正方法。通过对工程实例的实测结果进行分析,证明了该修正方法的可行性和必要性。进一步对比分析了基坑的开挖面积与深度对邻近隧道位移的影响;通过建立两类不同分坑措施的基坑模型,比较了不同分坑措施在控制基坑和隧道位移方面的效果。结果表明,隧道最大位移随邻近基坑开挖面积的增加呈非线性递增;采用分隔墙与隧道垂直的分坑措施对隧道位移控制更为有利。研究成果可为宁波软土地区地铁隧道控制保护区内的基坑设计提供参考。

[关键词] 隧道保护; 基坑工程; 空间效应; 控制保护区; 数值模拟

中图分类号: TU753 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2016)02-0091-05

Influence study of spatial effect of deep foundation pit excavation on around soil and adjacent tunnel

Wu Caide, Zeng Jie, Cheng Yichong, Gong Dikuai

(Zhejiang Huazhan Institute of Engineering Research & Design Co., Ltd., Ningbo 315012, China)

Abstract: Based on the typical soil layer distribution and parameters by engineering back analyses in Ningbo soft soil area, 18 three-dimensional foundation pit finite element models with different excavation areas and depths were numerically calculated by finite element analysis software MIDAS/GTS. According to the numerical simulation results, a modified method was proposed for determining the control and protection area of the subway tunnel in Ningbo. The method's feasibility and necessity was proved by analyzing field measured results of a practical project. The influences of the excavation area and depth of foundation pits on the displacement of the adjacent tunnel were analyzed. Two foundation pit models with different pit division measures were established to compare the different effects of pit division measures on the displacement control of the foundation pit and tunnel. Results show that maximum displacement of the tunnel increases nonlinearly along with the increase of excavation area adjacent to the tunnel, pit division measure of division walls being in vertical direction to the tunnel is more effective in displacement control of the tunnel. The research achievements can provide references for the foundation pit design in the control and protection area of the subway tunnel in Ningbo soft soil area.

Keywords: tunnel protection; foundation pit engineering; spatial effect; control and protection area; numerical simulation

0 引言

实际工程中,基坑的平面形状、尺寸、开挖深度和开挖步骤等均会对基坑变形及稳定产生较大影响。许多学者根据现场实测和三维有限元分析,验证并研究了基坑的坑角效应^[1-3],比较分析了不同形状和深度基坑的抗隆起性能^[4,5],提出了多种考虑空间效应的分析方法^[6,7]。目前,考虑基坑空间效应的设计理念已被广大岩土设计师所接受并采用^[8]。但是,以上研究与设计成果多关注于基坑本身的变形及稳定控制,关于基坑的空间作用对周围地层位移以及邻近建(构)筑物影响的研究较少。

轨道交通系统是现代城市不可缺少的组成部

分,如何在深基坑施工中保证邻近隧道的安全是一个亟待解决的问题。上海作为我国最先开展地铁轨道建设的城市之一,已制定了相关的地区性保护条例,而针对相应工程的研究也有了许多的成果^[9,10]。宁波软土的工程性质要劣于上海、天津的软土,考虑到宁波软土的特殊性,有必要对地铁保护区内的深基坑工程的设计与施工问题展开研究。本文将根据宁波地区土层特点,采用 MIDAS/GTS 有限元软件对基坑的空间效应进行分析研究,研究内容包括:基坑开挖的影响范围、基坑的开挖面积和开挖深度对

邻近隧道位移的影响以及采取分坑措施施工的空间效应等。

1 研究方案

为研究基坑开挖引起周边土体位移场变化的范围和基坑的平面尺寸、开挖深度对基坑支护变形的影响,建立了不同开挖面积和开挖深度的 18 个三维有限元模型。由于实际工程中基坑形状多样,为方便对比,本文仅以正方形基坑为例进行分析,具体的基坑规模参数见表 1。

基坑规模参数 表 1

开挖深度 h/m	开挖面积 $S/万 m^2$					
	0.3	0.5	1	2	4	6
7	0.3	0.5	1	2	4	6
12	0.3	0.5	1	2	4	6
17	0.3	0.5	1	2	4	6

基于修正 Mohr-Coulomb 模型^[11],通过对宁波地区数十个基坑工程(围护结构为桩、墙+内支撑)的监测数据的整理统计以及土层参数的反演分析,确定了宁波地区典型的土层分布及相应的土层参数取值,具体见表 2,本文 18 个基坑三维有限元模型均穿越这些土层。

宁波软土地区典型土层分布及土层参数取值 表 2

参数	①黏土	②淤泥质黏土	③淤泥质粉质黏土	④粉质黏土	⑤粉质黏土	⑥黏土
土层厚度/m	2	3	16	4	10	45
重度 $\gamma/(kN/m^3)$	17.6	16.8	17.2	18.3	19	18.7
黏聚力 c/kPa	18.2	11.8	13.7	20.5	38.2	47.2
内摩擦角 $\varphi/^\circ$	12.5	11	12.4	14.8	16.1	15.5
切线刚度 E_{oed}^{ref}/kPa	3 860	2 340	2 570	4 200	7 200	9 140
割线刚度 E_{50}^{ref}/kPa	3 860	3 510	3 850	4 200	7 200	9 140
卸载/加载刚度 E_{ur}^{ref}/kPa	11 580	7 020	7 710	29 900	43 200	54 800
泊松比 ν	0.38	0.42	0.41	0.33	0.35	0.34

有限元模型中的基坑支护结构均采用弹性模型,截面尺寸及材料见表 3,其中支护桩按等刚性地连墙进行建模。为减小不同规模尺寸基坑中采用不同支护形式所带来的刚度差异,支撑体系均考虑为对撑+角撑形式。另外,在基坑西侧外 20m 处设置一个隧道,隧道与基坑边平行且在基坑施工前已完成,隧道埋深 16m,外径 6.2m,衬砌厚度为 350mm,采用 C50 混凝土,用弹性模型模拟。土体采用修正 Mohr-Coulomb 模型^[11]模拟。土体模型的尺寸设置满足坑边至模型侧边的距离为 10 倍坑深,而坑底至模型底边的距离为 4 倍坑深,以使模型大小超过基坑开挖影响范围。模型底边界约束水平和竖直方向位移,左右侧边界约束水平位移,顶部边界自由。图 1 为最终建立的三维有限元模型之一。

基坑支护结构参数 表 3

开挖深度 h/m	结构构件	截面尺寸/mm	材料
7	钻孔灌注桩	$\phi 700$	C25
	围梁	$1\ 200 \times 600$	C25
	支撑	600×700	C25
12	钻孔灌注桩	$\phi 900$	C25
	第一道围梁	$1\ 300 \times 700$	C30
	第二道围梁	$1\ 400 \times 800$	C30
	第一道支撑	700×700	C30
	第二道支撑	800×800	C30
17	地下连续墙	墙厚 900	C30
	第一道围梁	$1\ 300 \times 800$	C30
	第二道围梁	$1\ 500 \times 1\ 000$	C30
	第三道围梁	$1\ 600 \times 1\ 000$	C40
	第一道支撑	900×800	C30
	第二道支撑	$900 \times 1\ 000$	C30
	第三道支撑	$900 \times 1\ 000$	C40

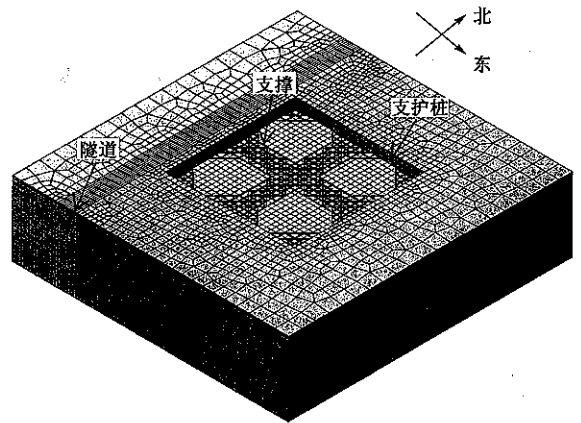


图 1 三维有限元模型

2 基坑开挖对周围土体位移场的影响范围

根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202—2013)^[12](简称轨道交通保护技术规范)以及宁波地区轨道交通区间隧道的相关保护要求,隧道绝对沉降量及水平位移量控制值取为 10mm。考虑到隧道在建设过程中自身的位移,本文将隧道埋深处土体最大水平位移等于 5mm 作为划分基坑外土体位移场影响范围的界限值。该处至坑边的距离为基坑开挖导致的位移场的影响范围;换言之,这也是本文所研究的隧道控制保护区的范围。根据研究方案中三维有限元模型计算的结果,基坑开挖所引起的周围土层位移场影响的范围与基坑的开挖面积(S)及深度(h)的关系曲线分别见图 2 和图 3(因基坑开挖面积在 0.3 万 m^2 时,土体位移场的影响范围较小,故图 2,3 中不考虑此开挖面积下的土体位移场影响范围)。

从图 2 和图 3 可以看出,基坑开挖面积越大,坑外土体位移场影响范围越大。基坑开挖面积从 0.5 万 m^2 增大到 6 万 m^2 ,对于开挖深度 $h=7m$ 的基坑,

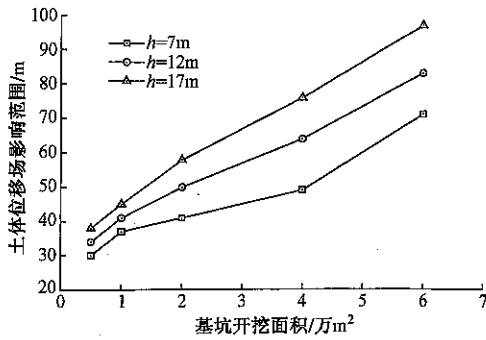


图 2 位移场影响范围与基坑开挖面积关系

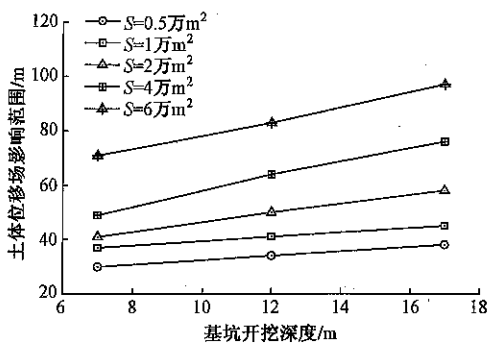


图 3 位移场影响范围与基坑开挖深度关系

土体位移场影响范围从 30m (约为 4h) 增大到 71m (约为 10h), 增长率约为 136%; 对于开挖深度 $h = 12m$ 的基坑, 土体位移场影响范围从 34m (约为 3h) 增大到 83m (约为 7h), 增长率约为 144%; 对于开挖深度 $h = 17m$ 的基坑, 土体位移场影响范围从 38m (约为 2h) 增大到 97m (约为 6h), 增长率约为 155%。另外, 基坑开挖深度越深, 基坑平面尺寸对土体位移场影响范围越大。

轨道交通保护技术规范规定的地下车站和隧道的控制保护区范围是其结构外边线外侧 50m 内。考虑到当基坑开挖体量超出一定范围后, 本文计算获得的基坑开挖影响范围要大于这一标准, 故笔者建议宁波地区应根据不同基坑开挖深度和开挖面积对标准控制保护区范围进行修正, 修正后的控制保护区范围为基坑开挖体量修正系数 ζ 乘以标准控制保护区范围。笔者建议的基坑开挖体量修正系数取值见表 4。对标准控制保护区范围 (50m) 进行修正获得的建议控制保护区范围与本文通过有限元计算获得的控制保护区范围比较见表 5。由表 5 可知, 修正的控制保护区范围的建议值能基本包络计算值 (仅当基坑开挖面积为 6 万 m^2 且开挖深度为 7m 和 12m 时, 计算值略大于建议值), 证明本文所提出的修正方法是可行的。

以下通过工程实例进一步证明对宁波地区隧道的标准控制保护区范围进行修正的必要性。宁波国

际金融服务中心南区工程的地下室为三层, 其基坑为规则四边形, 开挖面积为 4.5 万 m^2 左右, 沿基坑周边支护结构长约 860m; 基坑周圈开挖深度超过 16.4m, 基坑剖面图见图 4。为研究基坑开挖对基坑周边深层土体位移的影响, 在基坑西侧布设了 4 个测斜孔, 编号分别为 CX1, CX2, CX3, CX4, 4 个测斜孔距离基坑坑边的实际距离分别为 11.59, 35.79, 54.29, 77.69m。对 4 个测斜孔共进行了 12 次测试, 累计的测斜结果见图 5, 图中 0m 深度为坑外地坪面, 水平位移朝坑内方向为正。

基坑开挖体量系数 ζ 取值 表 4

$S/万 m^2$	$h \leq 7m$	$S/万 m^2$	$7m < h \leq 12m$	$S/万 m^2$	$12m < h \leq 17m$
$S \leq 3.0$	$\zeta = 1.0$	$S \leq 2.0$	$\zeta = 1.0$	$S \leq 1.0$	$\zeta = 1.0$
$S = 6.0$	$\zeta = 1.3$	$S = 6.0$	$\zeta = 1.6$	$S = 6.0$	$\zeta = 2.0$
$3.0 < S < 6.0$	线性插值	$2.0 < S < 6.0$	线性插值	$1.0 < S < 6.0$	线性插值
	确定 ζ		确定 ζ		确定 ζ

注: 当基坑开挖深度 $h > 17m$ 或开挖面积 $S > 6 万 m^2$ 时, 控制保护区范围根据现场实际情况另行研究确定。

控制保护区范围建议值与计算值比较 表 5

$S/万 m^2$	$h = 7m$		$h = 12m$		$h = 17m$	
	计算值 /m	建议值 /m	计算值 /m	建议值 /m	计算值 /m	建议值 /m
0.5	30	50	37	50	38	50
1	37	50	41	50	45	50
2	41	50	50	50	58	60
4	49	55	64	70	76	80
6	71	65	83	80	97	100

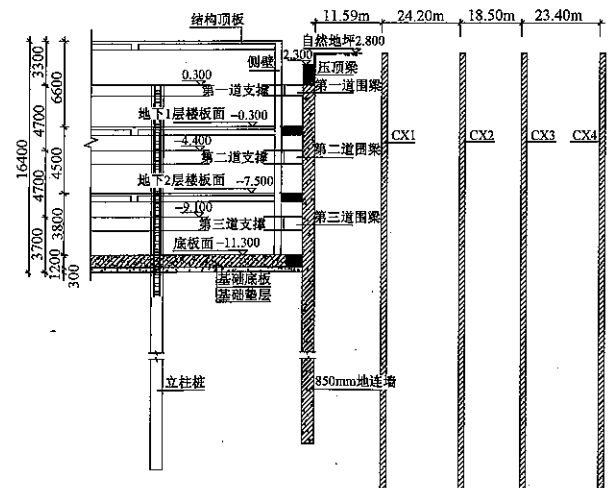


图 4 基坑支护结构与测斜孔位置关系图

从图 5 可以看出, 随着距离坑边距离的增大, 土体沿深度方向的水平位移曲线由弓形形态向悬臂形态过渡, 且水平位移值也逐渐减小。对于最接近隧道控制保护区边界的测斜孔 CX3, 其最大水平位移大于 10mm, 而在一般隧道埋深处 (16m) 仍产生了约 6mm 的水平位移; 对于最远端测斜孔 CX4, 土体沿深度方向仍存在微小位移, 其负方向水平位移

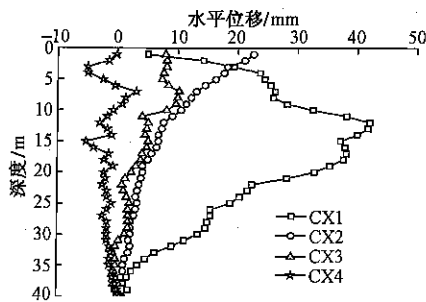


图5 坑外土体沿深度方向的水平位移实测值

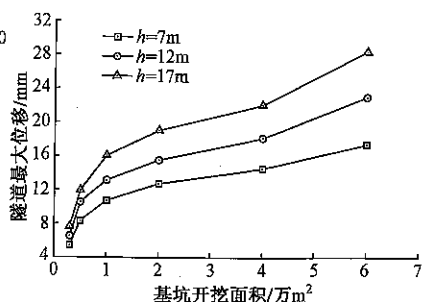


图6 隧道最大位移与基坑开挖面积关系

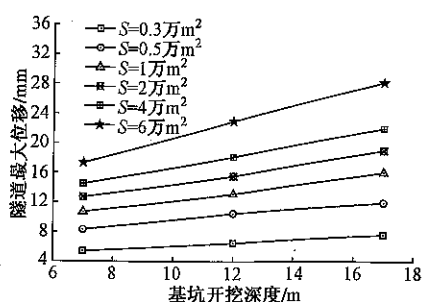


图7 隧道最大位移与基坑开挖深度关系曲线

的产生与该测斜孔所在区域为工程的施工主材堆放场地有关。由以上数据可知,距离该工程基坑坑边50m外产生的土体水平位移仍大于5mm的限值,即使在距离坑边约80m处,土体仍会产生位移,故该工程的控制保护区范围宜大于80m。根据该基坑的开挖深度和面积,以开挖深度 $h=17\text{m}$ 为例,查表4来确定的基坑开挖体量修正系数 $\zeta=1.7$,即扩大后的控制保护区范围是85m($>80\text{m}$),这表明本文修正方法是合理的。

3 基坑空间效应对隧道位移的影响

从图6可以看出,隧道最大位移(本文隧道最大位移为水平与竖向位移的矢量和)随基坑开挖面积的增加呈非线性递增,对于开挖面积小于1万 m^2 的基坑,隧道最大位移增大较快,对于开挖面积大于1万 m^2 的基坑,隧道最大位移增大变缓,但并没有呈现趋于平稳的趋势。基坑开挖面积从0.3万 m^2 增大到6万 m^2 ,对于开挖深度 $h=7\text{m}$ 的基坑,隧道最大位移从5.4mm增大到17.3mm,增加了约2.2倍;对于开挖深度 $h=12\text{m}$ 的基坑,隧道最大位移从6.5mm增大到22.9mm,增加了约2.5倍;对于开挖深度 $h=17\text{m}$ 的基坑,隧道最大位移从7.6mm增大到28.3mm,增加了约2.7倍。

从图7可以看出,隧道最大位移随基坑开挖深度的增加而增大,而且基坑开挖面积越大,基坑开挖深度对隧道最大位移影响越大。当开挖面积 $S \leq 0.3\text{万}\text{m}^2$ 且开挖深度 $h \leq 17\text{m}$ 时,隧道最大位移小于10mm。

4 基坑分坑对隧道位移和支护结构变形的影响

大体量基坑的一次性施工往往对支护结构变形及基坑周边环境产生较大影响,特别是对于轨道交通控制保护区内的基坑,有必要在基坑内设置分隔墙,采取分坑施工措施,并且先行施工的基坑应待其地下室结构完成后方能开挖相邻基坑。

以开挖深度 $h=12\text{m}$ 、开挖面积 $S=1\text{万}\text{m}^2$ 的基坑为例,采取两种分坑措施进行分析。第一类分坑

措施为分隔墙与隧道方向垂直,如图8(a)所示,在施工过程中,先施工A区基坑,待A区地下室结构完成后再施工B区基坑;第二类分坑措施为分隔墙与隧道方向平行,如图8(b)所示,在施工过程中,先施工C区基坑,待C区地下室结构完成后再施工D区基坑。

对两种分坑措施的基坑模型的计算结果进行整理,并与原不采取分坑措施的基坑模型的计算结果进行比较,对比结果见表6。从表6可以看出,与不采取分坑措施的基坑开挖相比,采取第一类分坑措施施工后,支护桩水平位移减小了9.8mm,减小率为22.4%,隧道最大位移减小了4.8mm,减小率为36.6%;采取第二类分坑措施施工后,支护桩水平位

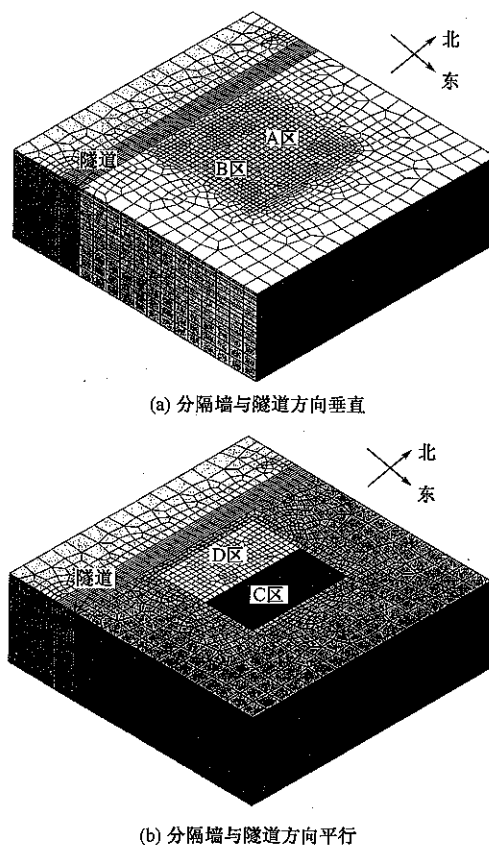


图8 两种基坑分坑示意图

移只减小了1.3mm,减小率为3.0%,隧道最大位移几乎没有变化。由此可知,采取第一类分坑措施,即分隔墙与隧道方向垂直,对支护桩水平位移及隧道最大位移的控制是有利的;而采取第二类分坑措施,即分隔墙与隧道方向平行,对支护桩水平位移及隧道最大位移影响较小。可见,基坑空间效应除了与基坑的开挖体量有关外,还与基坑的形状(长宽比)相关联,合理的分坑施工是保护基坑邻近隧道及周边环境的有效措施。

分坑措施与不分坑措施的计算结果对比 表6

指标	不分坑	第一类分坑	第二类分坑
支护桩水平位移/mm	43.8	34.0	42.5
隧道最大位移/mm	13.1	8.3	13

5 结论

本文根据宁波地区土层分布及特性,采用有限元法分析基坑的空间效应对周边环境及邻近隧道的影 响,主要结论有:

(1)基坑开挖深度和开挖面积的增大使坑外土体位移场影响范围增大,宁波地区大体量基坑开挖的影响范围可能超出轨道交通保护技术规范规定的地铁隧道控制保护区范围,为保证地铁隧道安全,建议采用本文所提出的修正方法对标准控制保护范围进行修正。

(2)隧道最大位移随邻近基坑开挖面积的增加呈非线性递增,小于1万m²的基坑,其开挖面积变化对隧道最大位移的影响更为显著;隧道最大位移随基坑开挖深度的增加而增大,而且基坑开挖面积越大,基坑开挖深度对隧道最大位移影响越大。

(3)基坑平面形状是影响邻近隧道位移的又一重要因素,合理的分坑施工可有效减小隧道位移;采用分隔墙与隧道垂直的分坑措施对隧道位移控制更为有利。

参 考 文 献

- [1] OU C Y, SHIAU B Y. Analysis of the corner effect on excavation behaviors [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, 35(3): 532-540.
- [2] BLACKBURN J T, FINNO R J. Three-dimensional responses observed in an internally braced excavation in soft clay [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(11): 1364-1373.
- [3] 俞建霖, 龚晓南. 软土地基基坑开挖的三维性状分析[J]. *浙江大学学报:工学版*, 1998, 32(5): 552-557.
- [4] EIDE O, BJERRUM L. Stability of strutted excavation in clay[J]. *Geotechnique*, 1956, 6(1): 32-47.
- [5] 陆培毅, 余建星, 肖健. 深基坑回弹的空间性状研究[J]. *天津大学学报:自然科学版*, 2006, 39(3): 301-305.
- [6] 陈页开, 徐日庆, 任超, 等. 基坑开挖的空间效应分析[J]. *建筑结构*, 2001, 31(10): 42-44.
- [7] 沈健, 王卫东, 王建华. 深基坑工程考虑时空效应的计算方法研究[J]. *建筑结构*, 2007, 37(5): 117-119.
- [8] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [9] 况龙川, 李志敏, 殷宗泽. 地下施工影响地铁隧道的实测分析[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2000, 40(S1): 79-82.
- [10] 蒋洪胜, 候学渊. 基坑开挖对临近软土地铁隧道的影 响[J]. *工业建筑*, 2002, 32(5): 53-56.
- [11] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. Beyond 2000 in computational geotechnics [M]. Rotterdam: Balkema, 1999.
- [12] CJJ/T 202—2013 城市轨道交通结构安全保护技术规范[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2014.