

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.07.068

城市大断面浅埋暗挖隧道施工与既有建筑物的响应分析研究

毛化冰¹,张涛²,张文¹,郑召怡¹,王晓¹

[1.济南市市政工程设计研究院(集团)有限责任公司,山东 济南 250003; 2.济南城市建设集团,山东 济南 250014]

摘要:城市地下道路具有断面大、埋深浅、施工环境复杂等特点,常对地表既有建筑物造成不利影响。以济南市玉函路隧道工程为依托,利用现场监测数据分析和数值模拟方法,对城市大断面超浅埋暗挖隧道施工与不同走向的既有建筑物的响应作用进行研究,研究结果如下:既有建筑长边垂直隧道走向时,发生靠近隧道的柱基差异性沉降造成建筑破坏。既有建筑物长边平行于隧道走向,破坏形式为倾斜破坏,平行于隧道走向的建筑柱基不均匀沉降相对最大值发生在隧道掘进过程中,垂直于隧道走向的建筑柱基不均匀沉降相对最大值则有概率发生在全过程中的每个阶段。当地表建筑物存在时,特征点沉降变化趋势与天然地面沉降变化趋势基本一致,但是在建筑物荷载的作用下进行隧道开挖施工,应力释放过程变长,后期的固结沉降量也相应增加,导致地表沉降要明显大于天然地表的沉降。

关键词:城市隧道;建筑物沉降;数值模拟;监控量测

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)07-0286-06

0 引言

城市交通拥堵问题目前是限制城市发展的关键因素。近年来,许多城市通过修建轨道交通等方式提高公共交通的运输能力,但目前小汽车保有量仍不断提升,拥堵问题仍未改善。

修建城市快速路是解决小汽车拥堵的有效手段。目前常用的快速路形式有地面快速路、高架桥、地下快速路等。地下快速路由于占地少、噪声小、不影响地面景观的优点受到各大城市的广泛关注。但地下快速路同样具有断面大、埋深浅、距离建筑物近、下穿道路多等特点,致使其施工工艺复杂,地面和邻近建筑物沉降控制要求高。因此,城市狭窄空间超浅埋暗挖隧道施工与既有建筑物的相互响应具有很高的研究价值。

国内外学者针对上述问题做了大量研究,Bur-land等^[1-2]基于模型试验,研究了砖砌墙在受上凸、下凹变形时的变形和破坏模式,提出了目前广为应用的“深梁模型”。Boscardin & Cording^[3]也采用深梁模型,将建筑物模拟为弹性深梁,进而提出由角度扭曲 β 及水平应变来评估结构破坏级别。皮亮等^[4]通

过现场监控量测和数值模拟手段提出建筑物基础对减小为掩体横向水平位移有一定控制作用。郭靖等^[5]基于广义层间位移谱研究了地下隧道对距隧道不同距离的地表建筑结构的层间位移的影响。张自光等^[6]结合青岛地铁M3号线区间隧道工程选取了建筑荷载、隧道跨度、位置关系、基底宽度4种因素,对穿越基岩的地铁隧道近接建筑施工工程影响分区进行了综合探讨。徐泽民等^[7]通过对基坑开挖与降水、端头加固、盾构掘进等阶段的监测数据进行分析,研究了不同施工阶段对历史风貌建筑物变形影响的规律及特点。陈瑜嘉等^[8]采用有限元极限分析法对不同覆岩厚度与隧道近接建筑施工破坏机制的关系进行了探讨。彭立敏等^[9]通过隧道不同穿越角度和偏心比条件下的数值仿真计算,分析隧道穿越方式对地表建筑基础及结构变形形态的影响。吴锋波等^[10]根据建筑沉降曲线基本符合正态分布的特点,对隧道工程地表沉降预测Peck公式进行推导和参数修正,建立建(构)筑物沉降预测公式。路平等^[11]对平行盾构隧道下穿砌体结构时,隧道和建筑物交角与倾斜率的关系进行了研究。

上述取得了一些成果,但在城市大断面隧道近接建筑方面仍缺乏研究。本文依托济南市玉函路隧道建设,对城市狭窄空间超浅埋暗挖隧道施工与既有建筑物的响应进行分析研究。

收稿日期: 2022-08-08

作者简介:毛化冰(1972—),男,本科,高级工程师,从事市政道路交通工程设计工作。

1 工程概况

济南市顺河高架南延二期工程北起经十路,南至七里山路以南 362.07 m,全长 3 628.3 m。工程主线采用地下道路(玉函路隧道)在现状玉函立交南端下穿马鞍山路,沿现状玉函路居中布设,依次下穿济大路、舜玉路,在七里山路交叉口南侧穿出地面,接南段高架桥上跨土屋路与英雄山路立交相连。地下道路总长 2 755 m,其中,北出入口明挖段长 190 m,南出入口明挖段长 350 m,暗挖段总长 2 215 m;北端接线段长 230 m,南端接线段长 215 m。红线用地以居住为主,少量办公及教育用地。建筑基本以 4~6 层居民楼为主。

本文选取地下道路(玉函路隧道)下穿玉函路,侧穿电信器材厂宿舍和华国宾馆段进行研究。定义东侧隧道为左洞,西侧隧道为右洞。下穿段为小净距隧道,隧道左右两洞间净距为 6.6 m,为马蹄形隧道,高 8.98 m,宽 10.95 m,采用台阶法开挖,初期支护采用 28 cm C25 早强喷射混凝土,间距 100(环向)×100(纵向)中空注浆锚杆,工程平面图如图 1 所示。



图 1 工程平面图

2 数值计算模型与参数

2.1 计算模型

依托济南市顺河南延二期地下道路工程,选取地下道路近距离侧穿邻近建筑物段,基于 MIDAS/GTS NX 三维有限元软件,建立三维有限元模型。其中,模拟土体部分横向长 148.5 m,延隧道纵向宽 100 m,高 40 m。为保证计算速度和精度,对地层建模采用简化处理,如图 2 所示。图中左侧隧道(右线隧道)和右侧隧道(左线隧道)采取相同的断面形式,为马蹄形断面,隧道宽 11.15 m,高 9.23 m,为直线隧道。隧道埋深 10.58 m,隧道间距 2.3 m,地层和隧道土体采用三维实体混合单元剖分网格。用一维梁单元和二维板单元模拟地表建筑,左侧建筑物长

53.5 m,宽 11.5 m,长边与隧道走向垂直,右侧建筑物长 76 m,宽 13~16 m,长边与隧道走向平行。建筑基础埋深 2 m,采用条形基础样式。建筑物、道路与隧道的关系如图 3 所示。地表路面宽 30 m。模型节点数为 84 179,单元数为 143 926。

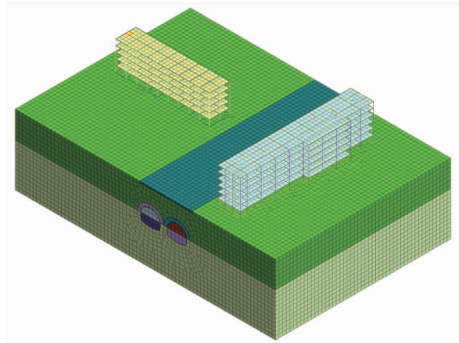


图 2 整体有限元模型示意图

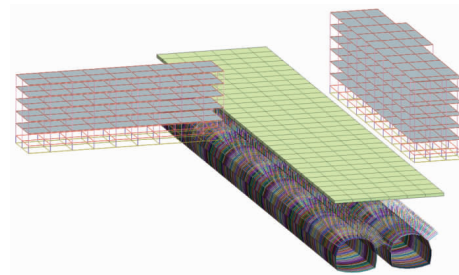


图 3 隧道与建(构)筑物位置关系图

选取区域地层岩土体采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,道路和建筑采用弹性屈服准则,路面厚度取 80 cm,施加 20 kN 的均布荷载,楼板施加 2 kN/m² 的均布荷载,暂时不考虑地下水的影响。模拟 2 m 的超前加固区,隧道采用生死单元模拟开挖,采用上下台阶法进行开挖,喷混支护采用二维板单元模拟,锚杆采用一维植入式桁架模拟。

2.2 计算参数

选取段隧道穿越地层上方主要为黏土,下伏中风化石灰岩,V 级围岩。地层、地表建(构)筑物 and 支护结构物理力学参数见表 1。

3 计算结果分析

3.1 地层沉降变形分析

3.1.1 地层竖向沉降变形分析

选取左侧建筑物横向第二排柱断面做竖向位移云图,如图 4 所示,地层竖向沉降最大点位于隧道拱顶位置,沉降量较大,但竖向沉降量等值线影响范围较小,拱顶深度地层沉降分布呈现双波峰曲线。随着地层深度的变浅,地层沉降值减小,但沉降影响范围变大。模拟过程先开挖图中左侧隧道(右线隧道),后开挖图中右侧隧道(左线隧道),造成左线隧道前期

表 1 不同结构的力学参数

不同结构物	弹性模量 /MPa	泊松比	天然重度 / (kN·m ⁻³)	直接快剪		厚度 /m	模型类型
				黏聚力 / kPa	摩擦角 / (°)		
黏土	10	0.42	19.1	55	20	15.76	M-C
中风化石灰岩	1.3 × 10 ³	0.45	22	100	25	24.24	M-C
喷混	2.8 × 10 ⁴	0.2	24	—	—	—	ELASTIC
超前加固区	7.5 × 10 ²	0.3	20	75	35	2	M-C
路面	1.2 × 10 ³	0.2	25	—	—	—	ELASTIC
建筑混凝土结构	2.8 × 10 ⁴	0.2	24	—	—	—	ELASTIC
锚杆	2.5 × 10 ⁵	0.3	78.5	—	—	—	ELASTIC

沉降量过大,最终结果左线隧道地层沉降量明显大于有线隧道地层沉降量。该界面最大沉降值位于右侧拱顶,沉降值为 34.4 mm,最大隆起值为 2.1 mm,位于右侧建筑物右侧基础处。

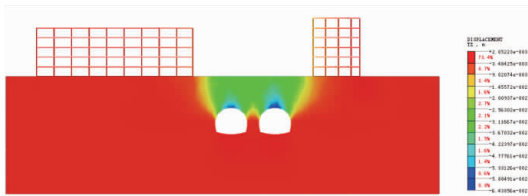


图 4 断面竖向沉降云图

3.1.2 地表总沉降量分析

提取地表各点沉降值做三维地表沉降云图,如图 5 所示。地表沉降槽延隧道开挖方向呈现单凹槽分布,地表沉降最大值为 63 mm,位于模型边界处,但应考虑模型边界的影响,模型中间位置地表沉降量约为 35 mm。

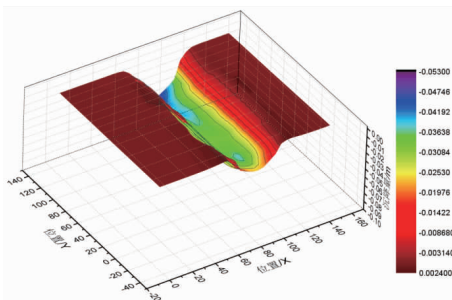


图 5 地表沉降云图

3.1.3 地表横向变形规律分析

提取上述左侧建筑第二排柱断面地表沉降数据做沉降横向分布图,如图 6 所示。图中曲线显示,两隧道开挖引起的地表沉降量最大值位于两隧道之间偏右的位置,最大沉降值为 38.3 mm。由于两隧道净距很小,横向沉降曲线并未表现出双洞隧道常见的双波峰曲线,两隧道沉降槽叠加效应极其明显,左右洞开挖互相影响较大,此处未考虑施工、地下水、施工等因素的影响,计算值较监测值略大,但围岩整体沉降趋势一致。

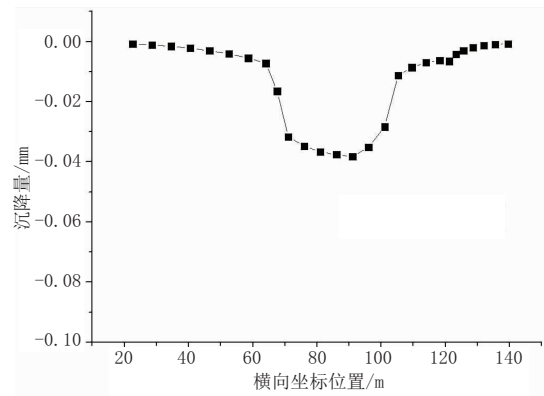


图 6 地表横向沉降曲线

3.2 建筑物不均匀沉降分析

建筑物结构计算完成时产生的竖向变形云图如图 7 所示,右侧建筑邻近隧道处沉降量 9.2 mm,远离建筑处向上位移 2.1 mm,左侧建筑邻近隧道柱沉降 3.9 mm。左侧建筑靠近隧道三排柱地表位置位移量分别为 3.9 mm、2.2 mm、0.9 mm。右侧建筑靠近隧道的三排柱地表位置位移量分别为 8.2 mm、4.7 mm、1.7 mm。两建筑柱间差异沉降最大的柱位于靠近隧道位置,相邻柱基础最大差异沉降量分别为 1.7 mm 和 3.5 mm。最终沉降量满足《建筑地基基础设计规范》的要求。

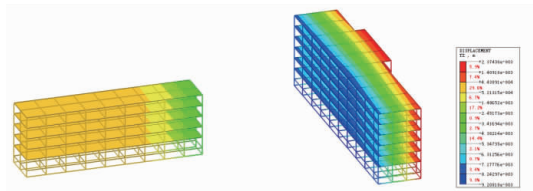


图 7 建筑竖向变形云图

隧道开挖是一个动态的过程,不仅应考虑开挖完成后建筑物是否产生破坏,还应考虑施工过程中建筑物的动态变化,建筑基础沉降随开挖推进竖向变化曲线如图 8 所示,建筑物柱下基础沉降规律与地表变形规律基本相似,变形稳定需要较长的时间。由于地表变形的时空性,在隧道开挖的方向,处于前期变形、开挖变形和后期固结变形各不同阶段的柱

基础可能产生较大的差异沉降,特别是处于开挖变形阶段的相邻基础,其下方往往需要4~5个开挖循环才能施工完成。因此,时间效应对建筑物基础差异沉降的影响不可忽视。

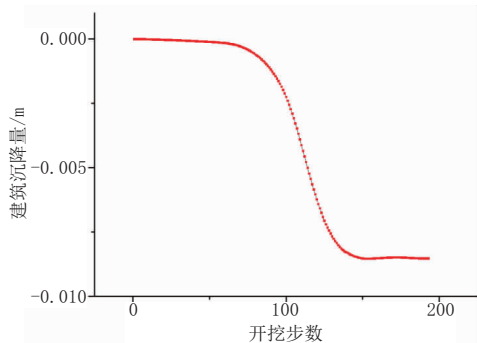


图8 建筑基础沉降随开挖变化曲线

图9为隧道开挖至100步(即先行隧道完成一半开挖)的地表沉降云图。由前文得到的沉降规律可知,平行于隧道走向的一排柱基在地层条件、隧道形状埋深走向等施工条件不变的情况下,地表沉降槽与隧道走向一致,距离隧道相同的一排柱基最终差异沉降量应为一个较小的值。

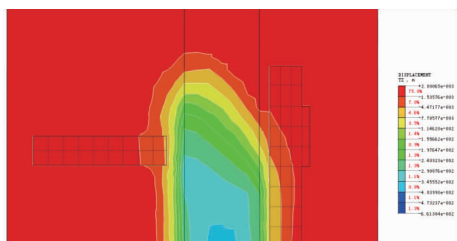


图9 地表沉降云图

但在开挖过程中,隧道开挖引起的地层沉降在纵向上符合S形皮尔曲线数学模型^[12],建筑物与隧道走向平行的一排柱基在开挖过程中存在较大差异。图10为开挖过程中建筑竖向变形云图,最大柱间沉降量大于最终柱间沉降量。因此,与隧道走向平行的柱基不均匀沉降破坏发生在开挖过程中,在计算过程中需要考虑地层沉降的时空效应。

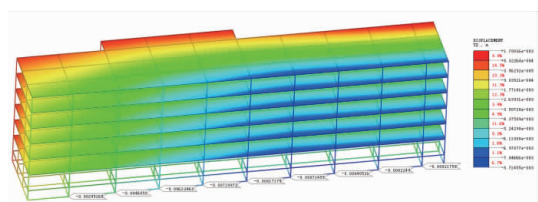


图10 开挖过程中建筑竖向变形云图

横向上,沉降稳定后沉降量最大,沉降槽发展到最大值。因此,与隧道走向垂直的柱基最大不均匀沉降破坏发生在沉降稳定后。

3.3 建筑物倾斜分析

根据现行国家标准《建筑地基基础设计规范》对

建筑倾斜的要求,建筑物高度小于24m的多层和高层建筑物的整体倾斜应不大于0.004(倾斜指基础倾斜方向两端点的沉降差与其距离的比值)。

图11为建筑横向变形云图,右侧建筑发生较大的横向位移,最大横向位移位于右侧建筑顶层,横向位移量为17.9mm。基础处建筑横向位移量为3.1mm。建筑顶面和基础横向位移差异较大,建筑产生向隧道方向的整体倾斜。此时根据最内侧和最外侧柱基沉降量求得的建筑整体倾斜为 5.6×10^{-4} ,满足规范要求。

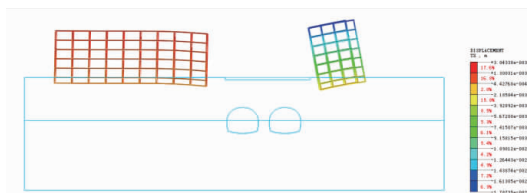


图11 建筑横向变形云图

左侧建筑横向位移量仅为3.0mm,最大值点位于顶层靠近隧道的位置。

分析两侧建筑不同的倾斜规律,可以得到:(1)左侧建筑在垂直隧道开挖方向上长度较长,主要受靠近隧道一侧基础不均匀沉降影响。(2)右侧建筑长边平行于隧道开挖方向,但在垂直与隧道开挖方向上延伸较短,整个建筑位于隧道开挖引起的沉降槽内,不但受一侧基础不均匀沉降影响,更应考虑建筑物倾斜造成的结构破坏。

3.4 有无建筑物计算结果对比分析

为了分析隧道开挖时建筑物的存在对地表沉降产生的影响,分别建立无地表建筑物和有地表建筑物时的隧道开挖模型,并取地表靠近建筑位置监测点做累计沉降曲线,特征点随着隧道开挖过程的沉降变形如图12所示。

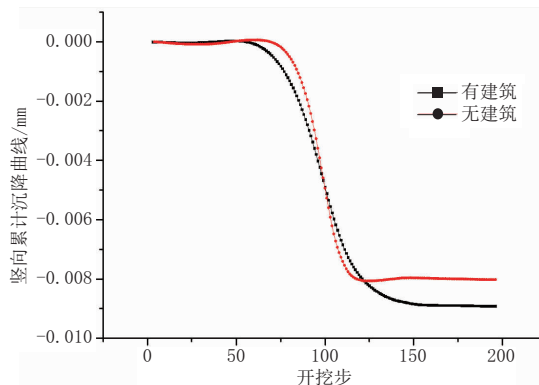


图12 地面变形累计沉降曲线

由图12可知,当地表存在建筑物时,特征点沉降变化趋势与天然地面沉降变化趋势基本保持一致,但是在建筑物荷载的作用下进行隧道开挖施工,

应力释放过程变长,后期的固结沉降量也相应增加,导致地表沉降要明显大于天然地表的沉降。同时,由于建筑物刚度对地表沉降的调整作用,在掌子面通过特征点下方一定距离(约1~2倍洞径)时,地表沉降反而小于天然地面时的地表沉降。直到掌子面通过特征点一段距离后,地表沉降才明显增长,从而超过天然地面时的地表沉降。建筑物底部与顶部沉降发展趋势一致,由于结构对变形的调整作用,可能会造成建筑物各位置处沉降的微弱差距。

4 监测数据分析

4.1 拱顶监测数据分析

选取的顺河高架南延二期地下道路侧穿建筑物部分工程右线隧道拱顶累计沉降曲线如图13所示。其中,YK2+389断面拱顶累计沉降30.4 mm,YK2+396断面累计沉降53.4 mm,YK2+397断面累计沉降43.6 mm,YK2+400断面累计沉降59.1 mm。

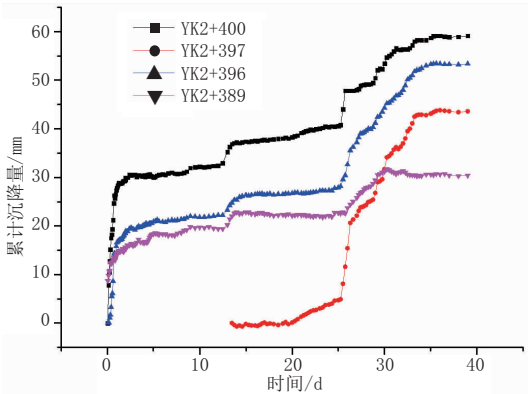


图13 右线拱顶沉降曲线(沉降为正)

由于拱顶沉降监测布点时间是上台阶开挖以后,所以拱顶沉降曲线呈现两段J形规律,经历快速变形-变形减缓-快速变形-变形稳定4个阶段。

监测数据与数值计算结果有一定差异,但总体趋势一致。

4.2 地表沉降分析

图14为地表道路中心线位置沉降随时间变化曲线。其中,YK2+390断面地表最大沉降量为15.9 mm,YK2+395断面地表最大沉降量为30.8 mm,YK2+400断面地表最大沉降量为33.7 mm,YK2+405断面地表最大沉降量为33.4 mm。地表沉降曲线呈现明显的S形规律,经历前期沉降-上台阶开挖沉降-沉降稳定-下台阶开挖沉降-沉降稳定5个阶段。由于施工因素和监测时间的影响,各监测点最终沉降值存在一定差异,但总体与数值模拟

结果保持一致。

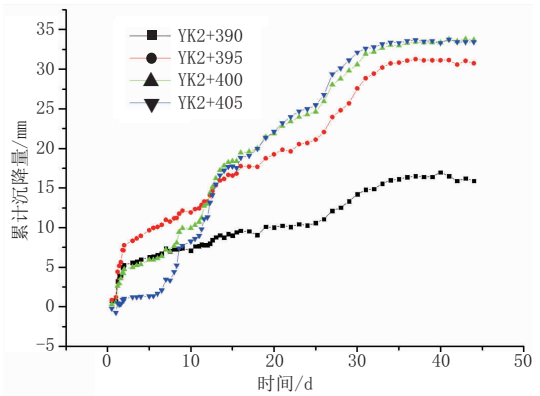


图14 地表沉降曲线(沉降为正)

图15为建筑物沉降监测曲线,对左右两侧建筑物各放置两个监测点进行较长时间的监测,随着掌子面的推进,左侧建筑编号为FW129的监测点最大沉降量为7.3 mm,编号为FW131的监测点最大沉降量为4.2 mm,右侧建筑编号为FW137的监测点最大沉降量6.1 mm,右侧编号为FW125的监测点最大沉降量为3.9 mm,各曲线变化趋势与前文地表变化趋势大致相同。

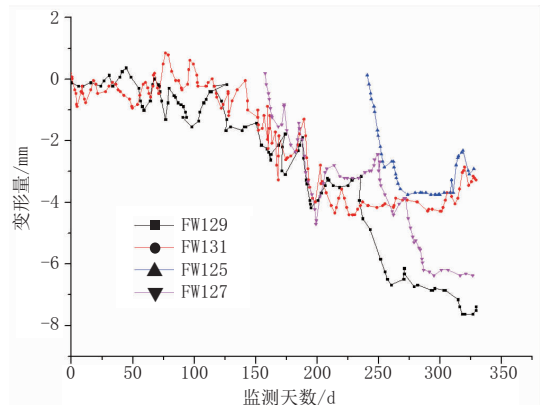


图15 建筑基础累计监测沉降曲线(沉降为负)

根据现行国家标准《建筑地基基础设计规范》,高压压缩土条件下的民用建筑相邻柱基础沉降差为 $0.001 \times l$ 。此处左侧建筑取 $l=5.5$ m,右侧建筑取 $l=4.3$ m,得到左侧建筑不均匀沉降控制值为5.5 mm,右侧建筑不均匀沉降控制值为4.3 mm。监测点差异沉降可满足要求。

5 结论

(1)对不同建筑物位置与隧道开挖方向的关系,与建筑物破坏形式进行讨论,提出了倾斜破坏和柱间沉降破坏的发生条件:a.既有建筑长边垂直隧道走向时,易发生靠近隧道的柱基差异性沉降造成建筑破坏。b.既有建筑物长边平行于隧道走向,易发生倾斜,造成建筑破坏。

(2)平行于隧道走向的建筑柱基不均匀沉降相对最大值发生在隧道掘进过程中。垂直于隧道走向的建筑柱基不均匀沉降相对最大值则有概率发生在全过程中的每个阶段,但柱基沉降绝对最大值发生在后期固结沉降阶段。

(3)对隧道开挖与建筑物荷载的相互作用进行分析,得到相互影响规律:当地表存在建筑物时,特征点沉降变化趋势与天然地面沉降变化趋势基本保持一致,但是在建筑物荷载的作用下进行隧道开挖施工,应力释放过程变长,后期的固结沉降量也相应增加,导致地表沉降要明显大于天然地表的沉降。

参考文献:

[1] BURLAND J B, WROTH C P. Settlement of buildings and associated damage. [C]//SOA Review,Conference of Settlement of Structures Cambridge,Pentech Press,London,1974:611-654.

[2] BURLAND J B, BROMS B B, MELLO V F B D. Behavior of foundations and structures[J]. Proc.inc.conf Soil Mech, 1977(2):495-546.

[3] BOSCARDIN M D, CORDING E J. Building response to excava-

tion-induced settlement [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(1):1-21.

[4] 皮亮,蒋树屏.穿越高层建筑大跨隧道施工力学与支护结构研究[J].地下空间与工程学报,2017(5):1303-1310.

[5] 郭靖,陈健云,余流.隧道对地表临近既有建筑物层间位移影响分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(3):765-772.

[6] 张自光,仇文革.地铁区间隧道近接建筑施工工程影响分区研究[J].现代隧道技术,2016,53(1):75-82.

[7] 徐泽民,韩庆华,郑刚,等.地铁隧道下穿历史风貌建筑影响的实测与分析[J].岩土工程学报,2013,35(2):364-374.

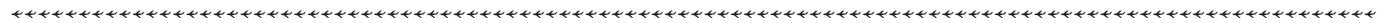
[8] 陈瑜嘉,张自光,杨树桐.地铁隧道近接建筑施工破坏机制分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(s1):198-204.

[9] 彭立敏,丁祖德,黄娟,等.隧道穿越方式对地表建筑物变形影响的数值分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(1):313-319.

[10] 吴锋波,金淮,尚彦军,等.城市轨道交通隧道周边建(构)筑沉降预测方法研究[J].岩石力学与工程学报,2013(s2):3535-3544.

[11] 路平,耿艳,张稳军,等.平行隧道穿越形式对砌体建筑变形的影响研究[J].隧道建设(中英文),2019(1):60-67.

[12] 张文. 地铁隧道穿越既有市政道路的地层变形规律与控制方法研究[D].山东大学,2017.



(上接第 243 页)

渐下降,其中延度指标变化速率在老化初期的下降最快。

(4)提出了 SBS 改性沥青老化过程中性能预测方程建立的方法,并初步探究了基于红外光谱微观试验快速测定评估 SBS 改性沥青老化程度的可行性。尚需进一步研究不同类型 SBS 改性沥青老化过程非线性性能预测方程的适用性问题以及老化 SBS 改性沥青红外光谱测试精度及其影响因素问题。

参考文献:

[1] 张争奇,梁晓莉,李平.沥青老化性能评价方法[J].交通运输工程学报,2005,5(1):1-5.

[2] 汪双杰,台电仓.改性沥青结合料低温性能评价指标[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(3):25-30.

[3] 吴传海,袁玉抑,王选仓.重交通道路沥青老化规律及评价方法[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(5):35-39.

[4] No rman W Garr ick. Nonlinear Differential Equation fo r Modeling Asphalt Ag ing [J],Journal of Materials in Civil Eng ineering, 1995, 7(4):265-268.

[5] 郑南翔,纪小平,侯月琴.沥青紫外线老化后性能衰减的非线性预测 [J].公路交通科技,2009,26(4):33-36,41.

[6] 王宗贤,阙国和,梁文杰.用微波和红外光谱研究沥青的热老化性质 [J].石油沥青,1992(2):1-6.

[7] 王杰,曾蔚,秦永春,等.SBS 改性沥青回收影响因素及改进措施[J].武汉大学学报(工学版),2019(1):46-50,88.