

## 不同地下水位下地铁车站施工沉降对比分析

戴文亭, 王琦\*, 罗传英, 王振, 王宇放, 孙思博

(吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 为了对比分析不同地下水位下地铁车站在施工过程中的沉降变化情况, 以长春地铁2号线解放大路车站为实际依托工程, 建立了该地铁车站的有限元模型, 并且将有限元计算结果与现场实测的施工沉降数据进行对比分析, 验证了有限元模型的可靠性。分析了地铁车站中轴线上方的地表沉降在施工过程中的变化情况, 并对上导洞、中导洞及1、2洞室拱顶沉降在施工过程中的变化情况进行了分析。通过定义3种不同地下水位工况, 将不同地下水位下地铁车站的施工沉降曲线进行对比分析。结果表明: 地铁车站中轴线上方地表沉降的有限元计算结果和实测数据的最大误差仅为5.6%, 地铁车站中轴线上方的地表沉降量呈现出阶梯式的变化趋势, 随着地下水位高度的下降, 拱顶沉降量的增长幅度存在突变情况。

**关键词:** 地铁车站; 地下水; 有限元分析; 施工沉降

近年来, 中国城市轨道交通发展迅猛, 但是在城市地铁建设过程中, 存在着很多与地下水有关的工程技术难题。地铁在施工过程中, 土层失水会产生固结沉降, 而基坑开挖及卸载也会使土体产生沉降, 并且地铁的周边具有较为集中的构筑物及城市交通线路, 因此在施工过程中应该将施工沉降控制在合理的范围内, 否则后果不堪设想。中国诸多学者对其进行了研究, 毕焕军建立了胡麻岭的水文地质数学模型, 根据此数

学模型研究了胡麻岭隧道水敏性砂岩地下水渗流效应; 易小明等以厦门海底隧道陆域段为实际工程依托, 研究了其在流固耦合作用下的力学响应情况; 孙明志等以某地铁施工项目为实际工程依托, 将数值模拟的计算结果与现场实际监测的数据进行对比验证, 分析施工阶段的地表沉降等因素, 提出了合理的导洞施工顺序; 侯伟等根据太沙基一维固结理论, 推导出能够综合评价各类复杂水位环境下地表沉降的计算公式, 并

[J].现代隧道技术, 2004(6).

- [2] 张庆贺, 王慎堂, 严长征, 等. 盾构隧道穿越水底浅覆土施工技术对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(5).
- [3] 赵永明, 杜守继, 张强. 盾构隧道通缝拼装管片上浮的监测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007(增1).
- [4] 叶飞, 何川, 王士民. 盾构隧道施工期衬砌管片受力特性及其影响分析[J]. 岩土力学, 2011(6).
- [5] 叶飞, 朱合华, 丁文其, 等. 大断面盾构隧道施工抗浮计算研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007(5).
- [6] 魏纲, 洪杰, 魏新江. 盾构隧道施工阶段管片上浮的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(6).
- [7] 王其炎, 杨建辉, 薛永利, 等. 盾构在软土地层掘进过程中的管片上浮研究[J]. 现代隧道技术, 2014(1).
- [8] 肖明清, 孙文昊, 韩向阳. 盾构隧道管片上浮问题研究[J].

岩土力学, 2009(4).

- [9] 朱令, 丁文其, 杨波. 壁后注浆引起盾构隧道上浮对结构的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(增2).
- [10] 戴志仁. 盾构隧道盾尾管片上浮机理与控制[J]. 中国铁道科学, 2013(1).
- [11] TALMON A.M., BEZUIJEN A. Calculation of Longitudinal Bending Moment and Shear Force for Shanghai Yangtze River Tunnel: Application of Lessons from Dutch Research[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2013, 35(3): 161-171.
- [12] 梁禹, 阳军生, 林辉. 大直径盾构隧道施工阶段管片上浮与受力研究[J]. 现代隧道技术, 2016(3).
- [13] 张鸣远, 景思睿, 李国君. 高等工程流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.

收稿日期: 2018-06-18

基金项目: 吉林省科学技术厅项目(编号: 3R1133142417)

作者简介: 戴文亭, 男, 教授. E-mail: daiwt@jluedu.cn

\* 通信作者: 王琦, 男, 硕士研究生. E-mail: 757911899@qq.com

且开发出一套适用于大范围超采地下水情况下地表沉降的计算程序;戴文亭等以长春地铁车站为实际工程依托,根据建立的有限元模型,对比分析了3种不同施工工法下(6导洞PBA工法、8导洞PBA工法及一次扣拱暗挖逆作法)的中轴线上方地表沉降、拱顶沉降及拱顶应力;李国和等通过对京沪高速铁路沿线各个地区的沉降中心进行了大量的数据监测工作,建立了地表沉降与地下水位变化的相关关系式,分析预测了该地区的地表沉降发展趋势。

该文以长春地铁2号线解放大路车站为实际依托工程,建立该地铁车站的有限元模型。通过定义3种不同地下水位工况,将不同地下水位下地铁车站的施工沉降曲线进行对比分析。

## 1 工程概况

长春地铁2号线的走向是沿解放大路的東西方向,解放大路具有双向六车道。地铁2号线解放大路车站采用的施工工法为6导洞PBA工法,施工主体全长206.7 m,车站站台宽度6.8 m,底板埋深25.94~27.94 m,车站的覆土厚度7.5~9.5 m,车站结构图如图1所示。施工地层为黏性土层、砂土层、人工填土层及泥岩层,不良地质体主要有松软土体、地下人防结构,车站周边分布有复杂的管线,并且大部分管道存在渗漏水的不利现象。地下水位为地表下方1.8 m(开挖面的水头边界有两个水头,其中水头1为地表下方16.5 m,水头2为地表下方30.6 m)。该项目共划分15个施工阶段:①初始位移;②抽水1变形;③上边导洞施工;④上中导洞施工;⑤抽水2变形;⑥下边导洞施工;⑦下中导洞施工;⑧挖孔桩施工;⑨加固层;⑩1、2洞室施工;⑪二衬施工;⑫上部土体开挖;⑬中楼板施工;⑭下部土体开挖;⑮底板施工。

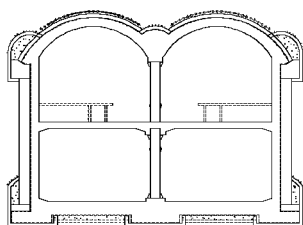


图1 地铁车站结构图

## 2 有限元模型

运用Midas/GTS建立该地铁车站的有限元模

型。由于地铁车站周围的工程地质状况良好,因此对地表进行简化并假定各土层呈现出水平且均匀的分布情况,该文有限元模型中的混凝土材料选择弹性模型模拟分析,而对岩土体材料的模拟分析则采用摩尔-库仑本构模型。地层结构被划分为4层,从上往下分别为填土层(1.8 m)、黏土层(13.2 m)、粗砂层(3.5 m)和最下层的泥岩层。通过相关检测单位开展的现场原位试验及室内土工试验,分析试验测试数据并结合当地工程经验对材料参数进行选取,各结构层的力学性能参数如表1所示。考虑到尺寸效应,该有限元模型的总宽度选取80 m,高度选取60 m。地铁车站的净宽度为27.4 m,其上方覆土厚度为9.5 m,底板的埋深为29 m。

表1 各结构层的力学性能参数

材料	$E/$ MPa	$\nu$	$c/$ kPa	$\varphi/$ (°)	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
填土层	5	0.31	19.0	10	1 800
黏土层	10	0.29	42.0	15	1 900
粗砂层	39	0.26	0.1	34	2 000
泥岩层	207	0.30	84.0	31	2 000
初期支护	16 000	0.20	—	—	2 500
二次衬砌	30 000	0.20	—	—	2 500
加固层	193	0.20	156.0	25	2 200

## 3 地铁车站施工沉降分析

### 3.1 有限元模型验证分析

为了验证有限元模型的可靠性,将有限元计算结果与现场实测的施工沉降数据进行对比分析。各施工阶段车站中轴线上方地表沉降的有限元计算结果和实测数据的变化趋势如图2所示。

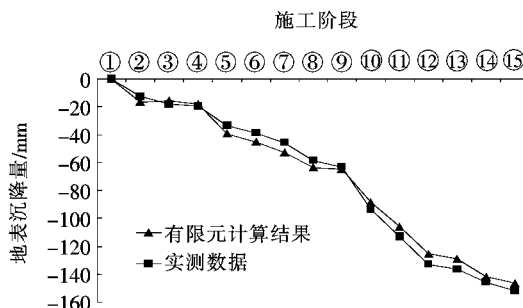


图2 各施工阶段车站中轴线上方地表沉降的有限元计算结果和实测数据比较

分析图2可以得出:有限元计算结果和实测数据

的变化趋势基本一致。有限元计算结果和实测数据存在的差异较小,两者的最大误差仅为 5.6%,最大差值仅为 7.48 mm,该误差值在合理误差范围内,并且两者的整体变化趋势也基本一致,因此可以验证有限元模型具有一定的可靠性。

### 3.2 地铁车站中轴线上方地表沉降分析

通过对各施工阶段下的有限元模型进行计算求解,可以很直观地发现各施工阶段下地铁车站中轴线上方的沉降量最大,为了更清晰地分析地表沉降变化规律,绘制出各施工阶段下该地铁车站中轴线上方的地表沉降统计图,如图 3 所示。

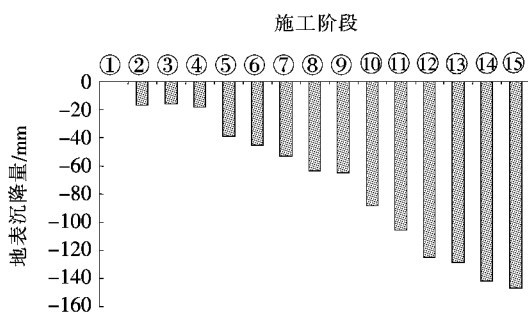


图3 各施工阶段地铁车站中轴线上方地表沉降统计图

由图 3 可知:地铁车站中轴线上方的地表总沉降量为 146.62 mm。结合图 2 可知:在整个施工过程中,地铁车站中轴线上方的地表沉降量呈现出阶梯式的变化趋势。在上边导洞施工和上中导洞施工的过程中,地铁车站中轴线上方的地表沉降量的变化较为平缓,而当在抽水 2 变形的施工阶段,中轴线上方的地表沉降量出现突变,相比前一个施工阶段,沉降量增加了 20.96 mm。同理,可以发现另外两个沉降突变点,一个发生在 1、2 洞室施工的过程中,其沉降量增加了 23.85 mm,同时也是相邻施工阶段的最大施工沉降差,另一个发生在下部土体开挖的过程中,其沉降量增加了 12.58 mm。

### 3.3 地铁车站拱顶沉降分析

拱顶沉降量可以充分反映整体结构的安全性,为了更为清晰地表现各施工阶段下拱顶沉降量的变化情况,该文提取边导洞、中导洞及 1、2 洞室的拱顶(拱顶的正上方分析点)沉降数据,绘制各施工阶段拱顶沉降统计图如图 4 所示,各施工阶段拱顶沉降变化趋势图如图 5 所示。

由图 4 可知:边导洞拱顶总沉降量为 63.64 mm,中导洞拱顶总沉降量为 69.72 mm,1、2 洞室拱顶总沉降量为 75.48 mm,1、2 洞室的拱顶总沉降量最大。结合图 5 可得,在整个施工过程中,边导洞拱顶相邻施工

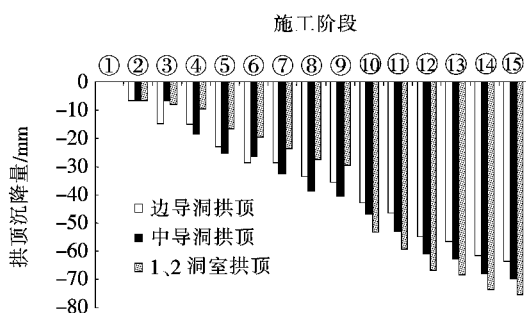


图4 各施工阶段拱顶沉降统计图

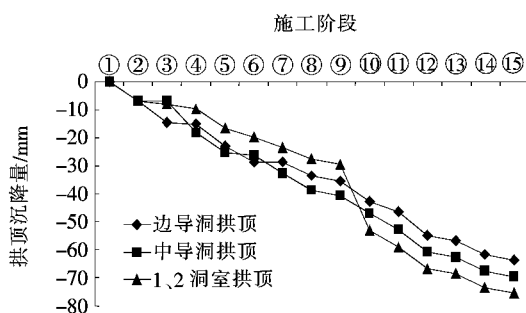


图5 各施工阶段拱顶沉降变化趋势图

阶段的沉降量的最大增量为 8.53 mm,出现在上部土体开挖的施工阶段;中导洞拱顶沉降量呈现出较为明显的阶梯式变化,在抽水 1 变形和上边导洞施工的过程中,中导洞拱顶沉降量的变化较为平缓,而在上中导洞施工的过程中,中导洞拱顶沉降量发生突变,相比前一个施工阶段,沉降量增加了 11.54 mm,同理,可以发现其余 3 个沉降突变点,其沉降量分别增加了 6.33、6.29、5 mm,因此,中导洞拱顶相邻施工阶段的沉降量的最大增量为 11.54 mm;1、2 洞室拱顶沉降量呈现出更为明显的阶梯式变化,共有两个沉降突变点,一个是发生在抽水 2 变形的施工阶段,其沉降量增加了 7 mm,另一个则发生在 1、2 洞室施工的过程中,其沉降量增加了 23.55 mm,因此,1、2 洞室拱顶相邻施工阶段的沉降量的最大增量为 23.55 mm。

## 4 不同地下水位下地铁车站施工沉降对比分析

为了对比分析不同地下水位下地铁车站的施工沉降情况,将上述有限元模型定义为 3 种不同地下水位工况。水位 1 为地表下方 1.8 m,是地铁工程中的实际地下水位;水位 2 为地表下方 18.5 m 的位置;水位 3 为地表下方 30 m 的位置。

### 4.1 不同水位下地铁车站地表施工沉降对比分析

通过对不同地下水位下地铁车站的有限元模型进

行计算求解,可以得到地表上各个沉降分析点的沉降数据,绘制出不同水位下地铁车站地表施工沉降图,如图 6 所示。

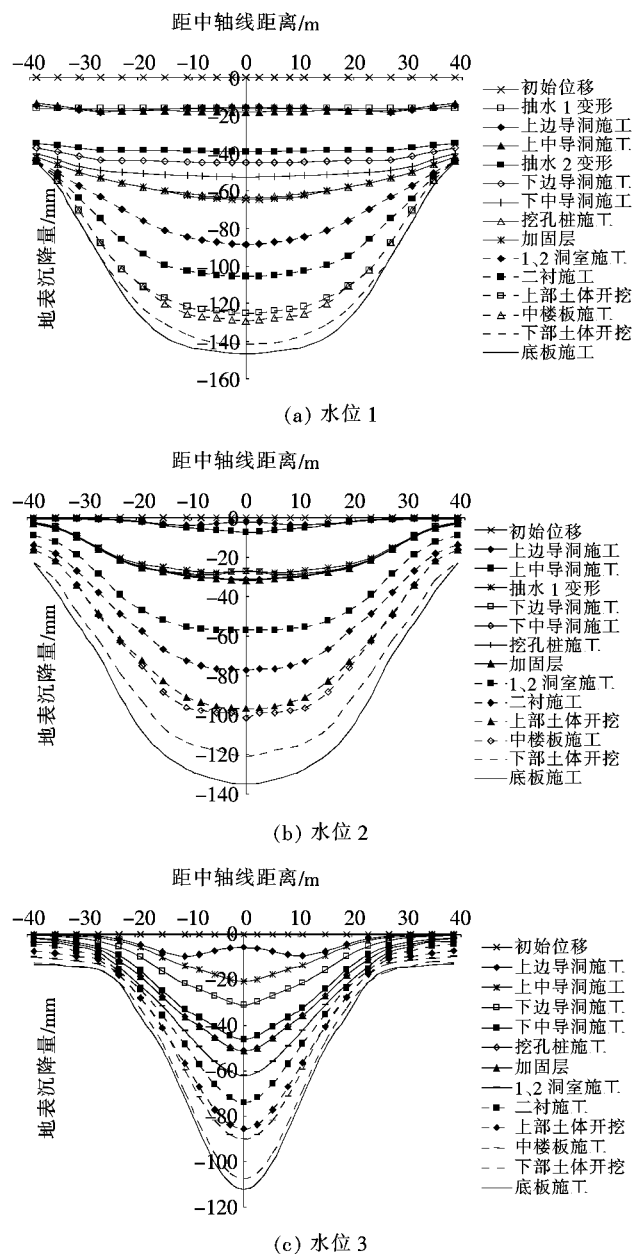


图 6 不同地下水位下地铁车站地表施工沉降图

由图 6 可知:①在这 3 种不同地下水位环境下,只有当上边导洞施工的时候,地铁车站的地表沉降曲线产生了两侧凹陷的变化,其他阶段均为中轴线产生凹陷,分析原因是施工过程中先进行上边导洞的施工,由于上中导洞施工阶段产生的沉降较大,因此下边导洞施工阶段的沉降曲线未出现两侧凹陷的变化;②3 种不同地下水位环境下,水位 1 下地铁车站中轴线处的地表沉降量最大,最终沉降量也最大(146.62 mm)。

对于地铁车站中轴线上方的地表最终沉降量而言,随着水位高度的下降,沉降量随之减少,水位 2 下的沉降量为水位 1 下沉降量的 92.18%,水位 3 下的沉降量为水位 1 下沉降量的 76.53%;③随着水位高度的增加,地铁车站中轴线两侧的地表沉降量随之减小,在水位 1 条件下,距中轴线最远处地表最终沉降量最大(44.17 mm)。对于距中轴线最远处地表最终沉降量而言,水位 2 下的沉降量为水位 1 下沉降量的 40.00%,水位 3 下的沉降量为水位 1 下沉降量的 30.02%。由此可见,当地下水位处于某一高度范围内时,地下水位的下降对距中轴线最远处地表沉降的影响十分显著。

#### 4.2 不同水位下地铁车站拱顶施工沉降对比分析

通过对不同地下水位下地铁车站的有限元模型进行计算求解,可以得到拱顶各个沉降分析点的沉降数据,绘制出不同水位下地铁车站拱顶施工沉降图,如图 7 所示。

由图 7 可知:3 种不同水位环境下地铁车站拱顶沉降曲线均产生了反弯现象,沉降曲线从“M”形变化成“W”形,这一变化均出现在 1、2 洞室施工阶段,并且 1、2 洞室拱顶的沉降量在这个施工阶段中产生了显著的增长,增长幅度也是整个施工过程中最大的,由此可知,在整个施工过程中,1、2 洞室施工对拱顶沉降的影响最大。各个水位下拱顶沉降量的最大增长幅度分别为 23.55(水位 1)、23.03(水位 2)、18.97 mm(水位 3),对比分析可知,水位 1 和水位 2 下拱顶沉降量的最大增长幅度仅相差 0.52 mm,而水位 1 与水位 3 下拱顶沉降量的最大增长幅度却相差 4.58 mm。对比分析 3 种不同水位下地铁车站拱顶沉降曲线可知,水位 1 下地铁车站拱顶的最终沉降量最大(75.48 mm)。对于地铁车站拱顶最终沉降量而言,随着水位高度的下降,沉降量随之减小,水位 2 下的沉降量为水位 1 下的 85.88%,水位 3 下沉降量为水位 1 下的 61.10%。

## 5 结论

通过对地铁车站进行施工沉降分析,并将不同地下水位下地铁车站的施工沉降曲线进行对比分析,得到以下结论:

(1) 各施工阶段车站中轴线上地表沉降的有限元计算结果和实测数据的变化趋势基本一致,两者的最大误差仅为 5.6%,说明该文所建立的有限元模型是可靠的。

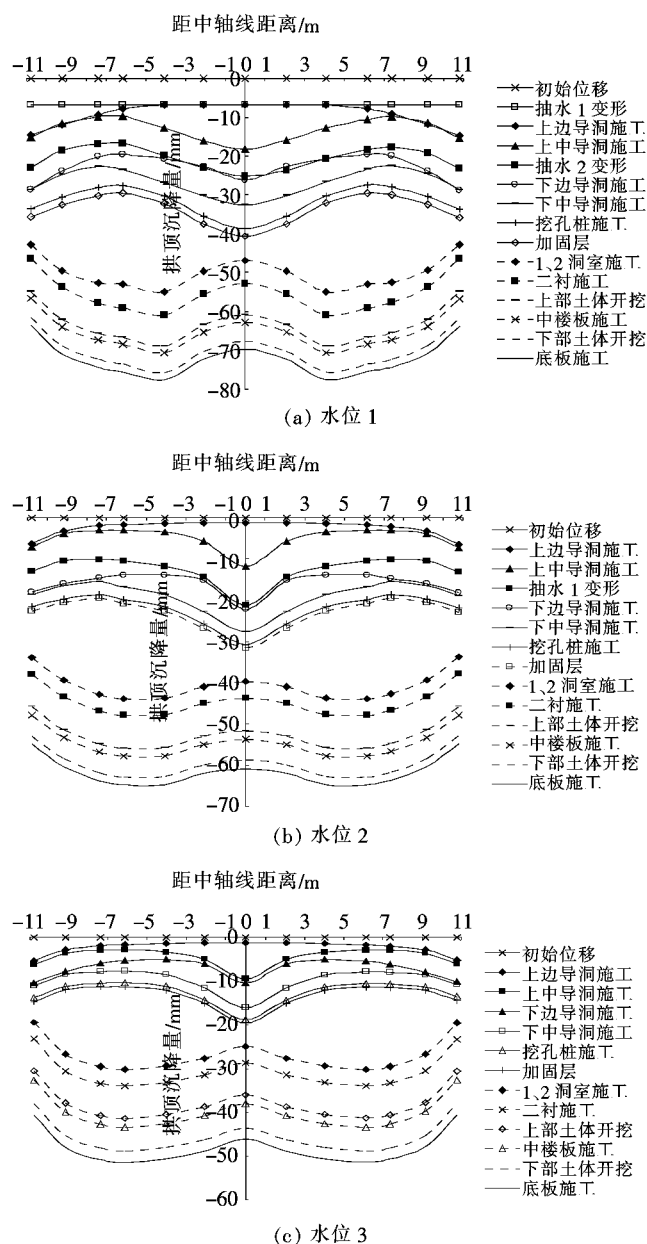


图7 不同水位下地铁车站拱顶施工沉降图

(2) 在整个施工过程中,地铁车站中轴线上方的地表沉降量呈现出阶梯式的变化趋势,沉降量的最大增量为23.85 mm,出现在1、2洞室施工阶段;1、2洞

室的拱顶总沉降量最大(75.48 mm),1、2洞室拱顶的沉降量呈现出最为明显的阶梯式变化,沉降量的最大增量为23.55 mm,出现在1、2洞室施工阶段。

(3) 当地下水位处于某一高度范围内时,地下水位的下陷对距中轴线最远处地表沉降的影响十分显著;水位1和水位2下拱顶沉降量的最大增长幅度基本一致,仅相差0.52 mm,而水位1与水位3下拱顶沉降量的最大增长幅度却相差4.58 mm,说明随着地下水位的下陷,拱顶沉降量的增长幅度存在突变情况。

#### 参考文献:

- [1] 毕焕军.胡麻岭隧道水敏性砂岩地下水渗流场模拟研究[J].铁道工程学报,2013(12).
- [2] 易小明,张顶立,陈铁林.厦门海底隧道地层变形监测与机制分析[J].岩石力学与工程学报,2007(11).
- [3] 孙明志,戴文亭,郝佰洲,等.十导洞CRD工法地铁风道结构流固耦合数值分析[J].隧道建设,2015(1).
- [4] 侯伟,罗文林,韩焯.抽取地下水引起地面沉降的实用计算方法研究[J].工业建筑,2015(2).
- [5] 戴文亭,武皓,孙明志,等.长春地铁解放大路站基于三维数值模拟的地铁车站施工工法优化分析[J].隧道建设,2016(1).
- [6] 李国和,荆志东,许再良.京沪高速铁路沿线地面沉降与地下水位变化关系探讨[J].水文地质工程地质,2008(6).
- [7] 卢廷浩,刘祖德,等.高等土力学[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [8] 刘汉东,姜彤,刘海宁,等.岩土工程数值计算方法[M].郑州:黄河水利出版社,2011.
- [9] 苑莲菊,李振栓,武胜忠,等.工程渗流力学及应用[M].北京:中国建材工业出版社,2001.
- [10] 王海涛.MIDAS/GTS岩土工程数值分析与设计:快速入门与使用技巧[M].大连:大连理工大学出版社,2013.
- [11] 张学文.建筑密集区地铁车站深基坑施工关键技术研究[J].中外公路,2018(2).
- [12] 王家祥.昆明地铁1号线盾构隧道穿越密集居民区施工控制技术研究[J].中外公路,2018(1).