

# 危岩带下深基坑开挖关键技术及仿真分析

胡风明<sup>1</sup>, 宋健<sup>1</sup>, 闫磊<sup>2</sup>, 曲振宇<sup>1</sup>, 赵甜甜<sup>1</sup>

(1. 中交一公局重庆万州高速公路有限公司, 重庆市 404100; 2. 重庆三峡学院 土木工程学院)

**摘要:**针对危岩带下深基坑开挖易发生安全事故的问题,以一在建悬索桥锚碇深基坑为研究对象,探讨该基坑的开挖关键技术,采用有限元软件对危岩带下深基坑坑底位移、锚杆、锚索的受力情况、护壁墙受力、位移情况及边坡稳定系数等进行仿真研究。结果表明:采用边坡分级分区开挖的施工方案进行基坑开挖,各项验算指标均满足开挖需求,取得了良好的施工控制效果,可保证该项目的顺利实施。

**关键词:**危岩带; 深基坑; 关键技术; 仿真分析

## 1 前言

随着城市化建设进程的稳步推进,越来越多的基坑开挖项目出现,且规模越来越大,在面积和深度上不断有新的增长。伴随着基坑用途的改变,其周边环境也日趋复杂,这就要求在基坑施工过程中,提前对基坑开挖后的位移、支护结构的受力情况以及基坑开挖的稳定性等开展研究。陈涛等对软土地区深基坑开挖过程中不同工况下支护桩深层水平位移、支护桩竖向位移等现场监测数据进行了研究,结果表明:基坑开挖施工对支护桩及周边环境具有显著的时空效应影响;周冠南等依托宁波地铁1号线东门口站深基坑工程,结合现场监测数据,对逆作开挖基坑的时空效应进行了研究;章新等以南京某基坑工程为例,采用数值模拟方法对基坑围护结构变形进行计算,并与现场监测数据进行对比,总结了开口环形基坑围护结构变形的规律;

曹一龙等分析深基坑施工监测数据,并与数值模拟结果进行对比,结果表明,遵循时空效应原理,加快施工速度、减少基坑暴露时间是控制基坑变形的重要措施。

该文以重庆三峡库区腹地某红层泥岩地区悬索桥深基坑工程为背景,对其开挖施工过程中深基坑坑底位移、锚杆、锚索的受力情况,护壁墙受力、位移情况及边坡稳定系数等进行仿真分析,总结其变形规律。

## 2 工程背景

### 2.1 工程概况

拟建工程为悬索桥锚碇基坑,一侧紧邻高陡边坡,另一侧毗邻长江。高峰岸(北岸)锚碇区位于斜坡中部地带,地面高程为210~250 m,基坑底面设计高程为198 m(锚块底面)。锚碇基坑开挖占地面积为5 958 m<sup>2</sup>,基坑底面面积为1 026 m<sup>2</sup>,边坡面积为5 633 m<sup>2</sup>,锚碇基坑开挖总方量为110 400 m<sup>3</sup>。锚碇基坑基底位于中

\*\*\*\*\*

- 极限拉拔力试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2017(1).
- [3] 张丽娟,丁燕飞,明恩农,等. 玄武岩纤维筋连续配筋混凝土路面冲断破坏力学分析[J]. 中外公路,2018(3).
- [4] 郭成鹏,林学军,李涛,等. 玄武岩纤维筋用作锚杆的适宜性研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版),2012(4).
- [5] 赵文,王浩,陈云,等. BFRP 筋锚杆土质边坡支护应用研究[J]. 工程地质学报,2006(5).

- [6] 高先建,谢强,赵文,等. 非预应力 BFRP 锚杆加固土质边坡设计参数确定试验研究[J]. 公路交通科技,2017(7).
- [7] 冯君,王洋,吴红刚,等. 玄武岩纤维复合材料土层锚杆抗拔性能现场试验研究[J]. 岩土力学,2019(7).
- [8] 王安福,赵文,李勇,等. 公路岩质边坡 BFRP 锚杆(索)支护设计及应用研究[J]. 湖南交通科技,2017(3).
- [9] JTG D30-2015 公路路基设计规范[S].

收稿日期:2020-03-18

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(编号:2019M663442);重庆市科委、教委研究项目(编号:cstc2018jscx-msybX0167, KJQN201801223, KJQN201901219)

作者简介:胡风明,男,高级工程师.

风化泥岩上,基底容许承载力不小于 1.35 MPa。锚碇区基坑开挖后,边坡高度为 12.0~52.0 m,主要为泥岩和砂岩组成的岩质边坡,上覆少量块石土。基坑开挖设计情况如图 1 所示。

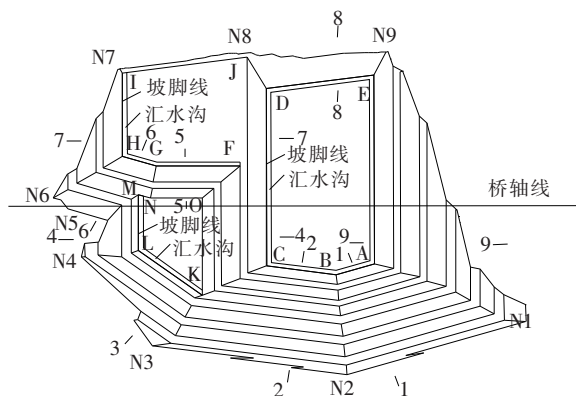


图 1 拟建工程悬索桥锚碇基坑平面图

## 2.2 工程地质水文条件

工程所在地地形呈阶梯状,总体发育有两级陡崖和两段陡坡,陡崖有砂岩出露,地形坡度为  $70^{\circ}\sim 85^{\circ}$ ,陡坡区域主要被第四系崩坡积体覆盖,局部基岩出露,自然坡角为  $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ,总体地形坡度为  $40^{\circ}$ 。根据现场调查及勘察成果,桥址区出露地层岩性主要有填土、残坡积层粉质黏土、冲洪积层卵石土夹砂、崩坡积层块石土及侏罗系中统沙溪庙组泥岩、泥质砂岩、粗砂岩、粉砂岩、页岩、砂岩。

施工场地所处松散岩类上层滞水主要接受大气降水补给,季节性变化明显,该岸土层以崩坡积块石土和人工填土为主,呈松散一稍密状态,为含水层,在雨季可能存在水量较大;该岸基岩裂隙水受大气降雨补给,临江区域受长江水位影响,由于该岸地表基岩主要以泥岩为主,为相对隔水层,仅陡崖位置为砂岩,故该岸基岩裂隙水总体较贫乏。

## 2.3 基坑开挖关键技术

根据设计图纸要求,基坑开挖边坡竖向最多分为 6 个大层,每个大层开挖完成后进行边坡防护施工,如图 2 所示。基坑设计边坡中最大坡度为  $1:0.3$ ,最小坡度为  $1:1$ ,最高处边坡有 6 级,最低处为 1 级,单级边坡高度为 8、10 m 两种。针对不同地层及边坡坡度采用锚喷支护、锚杆护面墙或锚索护面墙防护。

按照场地整体标高,从高往低,进行土石方开挖。每个大层边坡在具体开挖时,可结合地质情况分成不同厚度的小层,为方便开挖,一般以最大开挖深度为 3 m 进行控制。

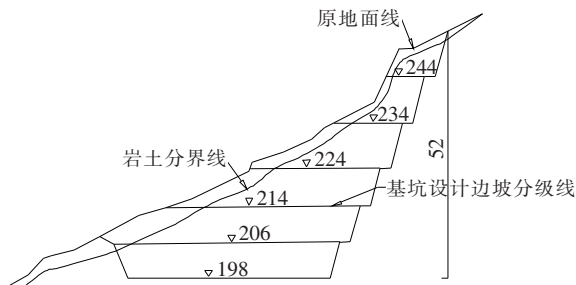


图 2 基坑设计边坡标高示意图(单位:m)

## 2.4 工程特点及难点

(1) 锚碇基坑占地面积大、开挖土石方量大,使得现场施工组织 and 施工难度增大,需合理配备施工机械,科学组织,流水作业。

(2) 锚碇基坑施工区域上方有一危岩带,崩坡积体上存在有孤石,给锚碇基坑开挖施工带来了安全隐患,需进行排危和安全防护措施后才能进行开挖作业。

(3) 锚碇开挖时需要配合爆破施工,爆破施工过程中的震动对边坡稳定性影响较大,为保证边坡的稳定,需要编制全面可行的爆破专项施工方案,并采取相应的安全防护措施。

(4) 地表高差大,导致基坑开挖过程出渣便道选取困难,现场采用便道随开挖高程的调整而变化的方式。

(5) 锚碇基坑施工范围采用永久排水加临时排水的方式,以减少锚碇基坑施工范围水流的侵蚀,同时设置集水井,配备抽水泵,预防大雨对基坑浸泡及边坡的冲刷。

(6) 由于锚碇位置地形坡度大、基坑深,施工过程中需对边坡进行动态监控,以保证施工的安全。

## 3 有限元模型的建立

借助 MIDAS NX V2018 R1 有限元分析软件进行模拟分析与计算。岩土计算选用莫尔-库仑弹塑性材料模型,需要输入的岩石力学参数为黏聚力、内摩擦角、体积模量、剪切模量、抗拉强度,如表 1、2 所示,模型共划分为 32 463 个节点和 57 080 个单元。对模型的建立和分析计算提出了以下假设:模型初始地应力平衡只考虑自重应力,忽略构造应力的影响;边坡开挖暂不考虑地下水和降雨的作用。岩体及数值计算时的参数分别如表 1、2 所示。

## 4 有限元计算结果

### 4.1 开挖过程基坑位移分析

基坑位移大小直接关系着开挖的安全性,对所建

表 1 岩土层主要物理力学参数

岩土类别	天然重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	饱和抗压 强度/MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	泊松比	弹性模量/ GPa
泥岩	25.4	5.65	430	30.23	0.32	1.0
砂岩	25.1	24.40	1720	34.90	0.25	6.7
砂质泥岩	25.4	11.20	830	32.39	0.31	2.3

表 2 数值计算时支护结构材料参数

材料类型	模型单元	弹性模量/ MPa	泊松比	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	尺寸/ m
锚杆	植入式桁架单元	200 000	0.2	7.85	4、6、9
锚索	植入式桁架单元	200 000	0.2	7.85	长 40, 灌浆长度 9
护壁墙	板单元	30 000	0.3	2.50	厚 0.5

立的有限元模型进行仿真分析,得到不同级边坡开挖时基坑位移如图 3 所示。

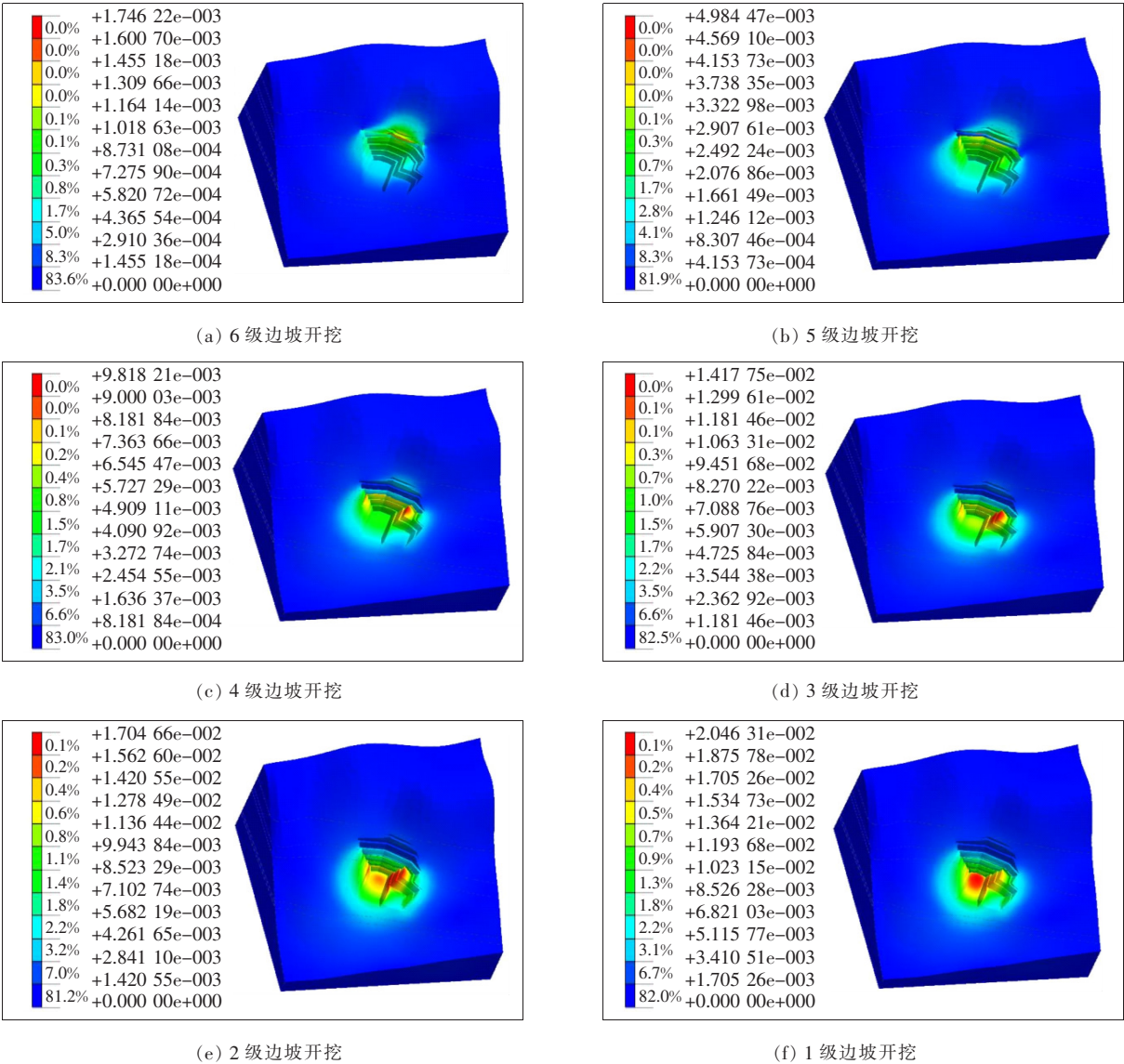


图 3 基坑开挖坑底位移云图(单位:m)



由图 3 可知:1 级边坡开挖完成最大位移发生在底板,为 2.04 cm。第 4、3、2 级边坡开挖时,随着开挖卸荷和岩体回弹,边坡侧壁位移值分别为 0.98、1.42、1.70 cm。

#### 4.2 锚杆、锚索受力情况

对锚杆、锚索的内力图进行分析可以确定基坑支护结构的安全性,根据有限元模型进行仿真分析,得到锚杆、锚索的轴力情况如图 4、5 所示。

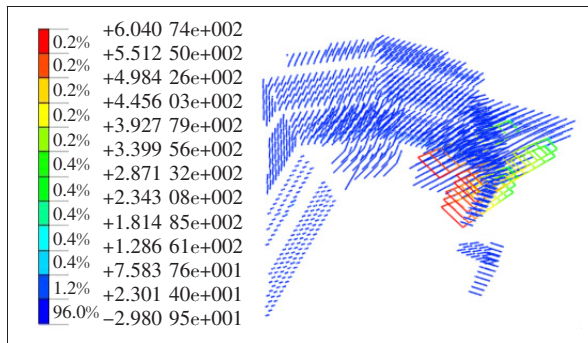


图 4 基坑锚杆、锚索轴力云图(单位:kN)

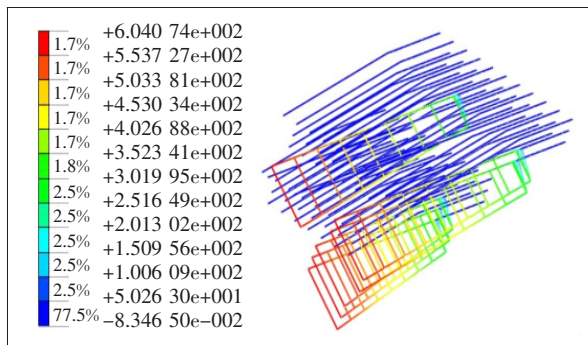


图 5 基坑锚杆、锚索局部轴力云图(单位:kN)

由图 4、5 可知:锚杆受力均较小,符合设计要求。但是第 2 级边坡锚索轴力为 605 kN,略高于施加的预应力 600 kN;分析其原因主要是锚索受力情况和边坡岩层位移直接相关,锚索应力增加主要是由边坡侧壁岩体的水平回弹引起的。但是,从总体上看锚杆及锚索的受力仍处于安全范围内。

#### 4.3 护壁墙受力及位移情况

基坑护壁墙的受力及位移情况如图 6、7 所示。

由图 6 可知:坡顶侧护壁墙在折角处剪切应力较大,尤其是台阶底缘出现应力集中,最大剪切应力为 2.35 MPa。护壁墙采用 C30 混凝土,φ6 mm 钢筋网配筋,C30 混凝土抗剪强度标准值约为 2.85 MPa(具体值通过试验确定)。模拟计算最大剪切应力小于

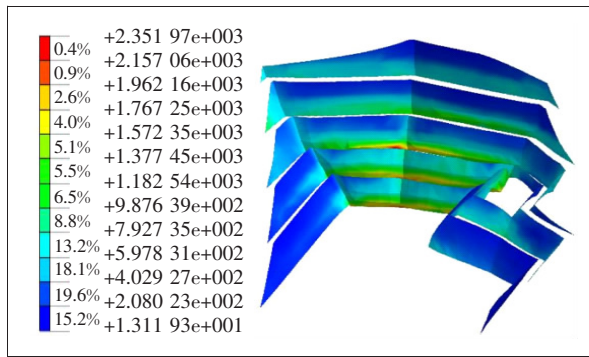


图 6 最大剪应力(单位:kPa)

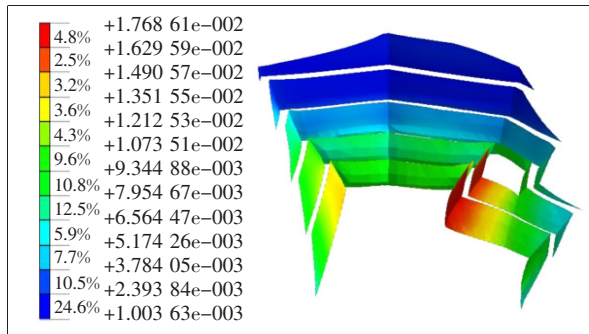


图 7 护壁墙的总位移(单位:m)

C30 混凝土抗剪强度标准值,护壁墙在静力条件下强度满足要求。由图 7 可知:除了基坑底板外,基坑第 2 级、3 级边坡护壁墙位移最大,主要表现为向基坑中心收敛,变形值为 1.07~1.76 cm。

#### 4.4 边坡稳定系数

通过对有限元模型进行仿真分析得出边坡的体积应变云图、塑性应变云图、等效应变云图、最大剪切应变及边坡总体位移云图如图 8~12 所示。

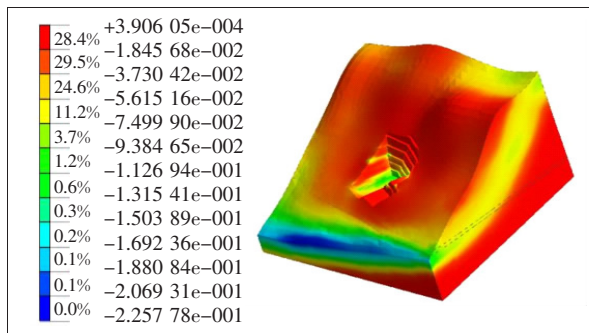


图 8 边坡体积应变

由图 8~12 可知:通过体积应变、有效塑性应变、最大剪切应变、位移等计算指标,可判断出北锚碇基坑潜在滑移面的位置。经计算,开挖支护后(第 1 级边坡尚未支护)时边坡安全系数为 2.27。

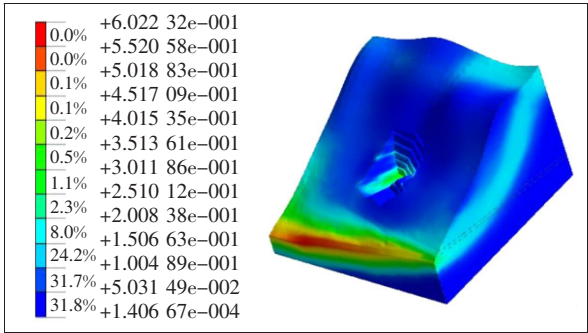


图 9 边坡塑性应变

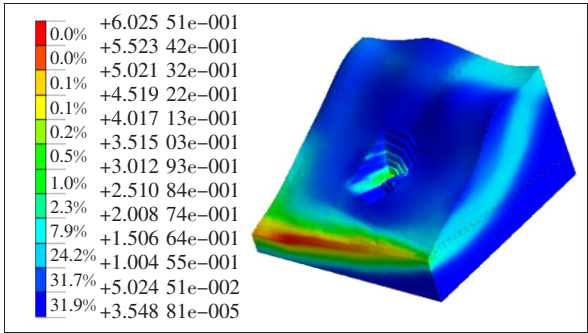


图 10 边坡等效应变

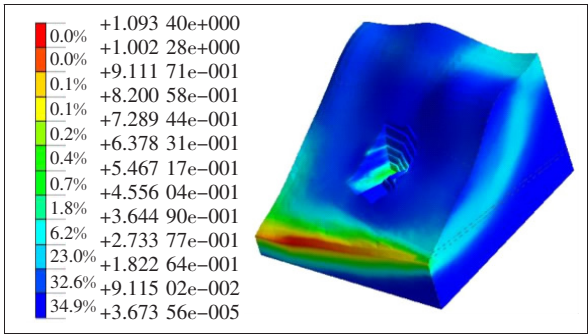


图 11 边坡最大剪切应变

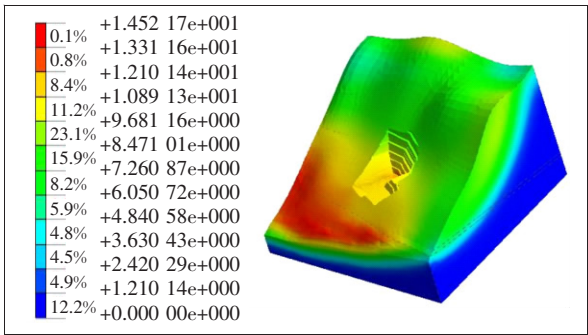


图 12 边坡总体位移(单位:m)

5 结语

以重庆市三峡库区腹地危岩带下某大桥锚碇深基坑施工为例,通过对危岩带下深基坑开挖及支护的关键技术进行分析,明确提出边坡分级、分区域开挖的施工方法可以有效减小基坑的变形,对确保基坑开挖的安全性至关重要,施工时应严格按照施工顺序有序推进,合理开挖。有限元分析结果表明:开挖最不利工况为第 1 级边坡(靠近坡顶侧),开挖完成后最大位移在底板,这为保证施工过程的安全奠定了坚实的基础。护壁墙及锚杆、锚索在开挖支护过程中的作用不可忽略,由分析结果可以看出:施工中部分锚杆的应力、位移临近设计值,因此开挖过程中支护结构的强度及位移应重点保证。

参考文献:

[1] 黄茂松,王卫东,郑刚. 软土地下工程与深基坑研究进展[J]. 土木工程学报,2012(6).

[2] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[J]. 岩土力学,2004(12).

[3] 付红梅,张岩岩. 深基坑空间效应研究综述[J]. 土工基础,2019(4).

[4] 谢乐,钱德玲,杨昱,等. 合肥地区地铁车站深基坑稳定性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2019(11).

[5] 刘志刚. 软土地区地铁深基坑监测分析及控制措施研究[J]. 公路,2019(10).

[6] 秦坤元,刘五一,肖育斐,等. 深基坑开挖对邻近边坡稳定性影响与控制[J]. 中外公路,2019(4).

[7] 徐中华,宗露丹,沈健,等. 邻近地铁隧道的软土深基坑变形实测分析[J]. 岩土工程学报,2019(S1).

[8] 陈鸿志,简文彬,汪振峰. 深基坑土方开挖对基坑稳定性的影响分析[J]. 土工基础,2019(3).

[9] 陈涛,宋静,翟超. 考虑时空效应软土地区深基坑开挖变形分析[J]. 岩土工程技术,2019(3).

[10] 周冠南. 软弱地层深基坑开挖时空效应分析及控制[J]. 地下空间与工程学报,2014(S1).

[11] 章新,赵升峰,黄广龙. 开口环形深基坑围护结构变形监测与数值分析[J]. 岩土工程技术,2014(3).

[12] 曹一龙. 基于监测与数值模拟的基坑围护结构水平位移分析[J]. 施工技术,2019(15).