

文章编号: 1007-2993(2022)04-0334-06

# 逆作法墩式挡墙在土岩结合深基坑 支护中的应用

邓超 杜应平 田朋飞

(十堰城控建筑设计有限公司,湖北十堰 442000)

**【摘要】** 在山区河漫滩地段,常遇到上部土层相对较薄、强度较低,而下伏基岩强度高、厚度大且分布稳定的地质情况。在该类地质情况下开挖深基坑,当基坑周围环境复杂、放坡空间有限时,采用传统的排桩体系施工难度大、造价高;嵌固深度较浅的“吊脚桩”支护体系也经常由于桩体中上部拉锚受阻而失去适用性。为解决上述问题,结合鄂西北土岩结合深基坑支护经验,提出一种逆作法墩式挡墙支护的设计、施工方法。工程实践表明,逆作法墩式挡墙对此类土岩结合深基坑的适用性较好,计算理论清晰,且具有施工便利、造价经济等显著优势。相关成果可为类似深基坑工程提供技术参考。

**【关键词】** 墩式挡墙;逆作法;土岩结合深基坑;竖向锚杆

**【中图分类号】** TU 476+.4

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.04.014

## Design and Application of Top-down Construction Method Pier Type Retaining Wall in Soil-rock Combined Deep Foundation Pit Support

Deng Chao Du Yingping Tian Pengfei

(Shiyan Architectural Design Institute, Shiyan 442000, Hubei, China)

**【Abstract】** In the floodplain area of mountainous areas, the upper soil layer is relatively thin and low in strength, while the underlying bedrock has high strength, thick thickness and stable distribution. Excavation of deep foundation pits under such geological conditions, when the surrounding environment of the foundation pit is complicated and the space for grading is limited, it is difficult and expensive to use the traditional pile row system to construct; and the supporting system of "hanging foot pile" with shallow embedded depth often loses its applicability due to the blocking of anchor pulling in the middle and upper part of the pile. In order to solve the above problems, combining the experience of deep foundation pit support combined with soil and rock in northwest Hubei, a design and construction method of top-down pier type retaining wall support is proposed. The engineering practice shows that the calculation theory of the top-down pier type retaining wall is clear, and it has obvious advantages such as convenient construction and economical cost. Relevant results can provide important technical reference for similar deep foundation pit engineering.

**【Key words】** pier type retaining wall; top-down construction method; deep foundation pit combined with soil and rock; vertical anchor rod

### 0 引言

在东部沿海城市以及中西部山区河漫滩地段,工程建设时经常遇到土岩结合基坑边坡。此类基坑边坡往往具有明显的“上软下硬”特点,即上覆土层一般厚度不大,强度相对较低,但下部岩石较为完整,强度较高。当基坑场地放坡受限,采用传统的落底式排桩(桩锚、桩撑)体系支护时,支护桩在下部基岩中

成孔难度大,工程代价高。考虑到工程经济性与施工难度问题,很多地区的基坑工程技术人员开始尝试将桩底只嵌入稳定基岩顶部<sup>[1-2]</sup>;当基坑开挖到底时,支护桩桩脚将“悬吊于”基坑中上部位置,称之为“吊脚桩”<sup>[3]</sup>。支护结构桩底岩肩预留宽度一般有限,当“嵌固力”不足时,往往需在底部施加“锁脚”锚杆(索)。同时,桩体中上部也需要多道锚拉结构来解决桩体抗

作者简介:邓超,1979年生,湖北十堰人,硕士研究生,高级工程师,注册土木工程师(岩土),主要从事岩土工程勘察、设计工作。E-mail: 33003413@qq.com

倾覆(变形)问题,常见的构造形式如图1所示。

随着深层地下室建筑物爆发式增长,“吊脚桩”支护体系在土岩结合深基坑工程中取得了较大发展。刘红军等<sup>[4-5]</sup>、吴腾<sup>[6]</sup>、李洪晓<sup>[7]</sup>运用有限元方法结合基坑监测技术,阐释了“吊脚桩”支护结构的受力特点、变形规律;毕经东等<sup>[8]</sup>、赵文强<sup>[9]</sup>、岳建国等<sup>[10]</sup>认为“吊脚桩”支护体系计算时,可按“零嵌固”桩体进行弹性抗力分析,下部岩体按传统岩石喷锚结构计算;赵文强<sup>[9]</sup>、刘江<sup>[11]</sup>、郭鹏举<sup>[12]</sup>结合实际工程案例,阐述了“吊脚桩”的适用地层、施工方法及工程风险等问题。

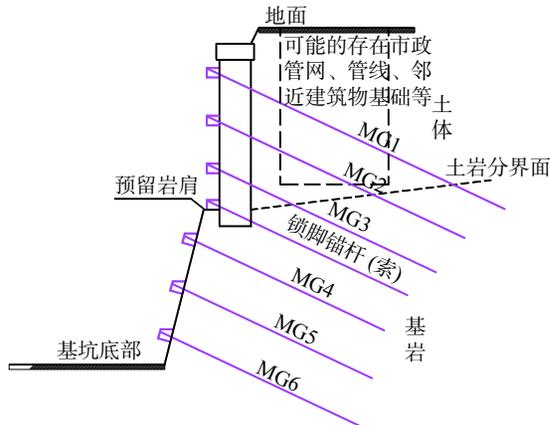


图1 “吊脚桩”支护结构剖面示意图

同时,“吊脚桩”支护结构的应用也存在明显的局限性。首先是计算理论尚不清晰,目前相关的国家标准或行业规范中还没有对此类“上下组合型”支护结构进行规定和说明。岩土设计人员只能依靠经验,通过传统“等值梁法”、“弹性抗力法”等理论进行简化设计,导致支护设计或偏于保守,或安全储备不足。再者,当前城市工程建设中,深基坑周围限制因素较多,如当上部土层中存在“地下管网”、“临近建筑物基础”等障碍物时(如图1所示),桩体中上部锚拉体

系无法进行施工,上部土体安全便无法保证。若桩体改用内支撑方式,同样存在竖向支承桩(柱)施工困难,支护代价较大等问题,因此将失去适用性。

为解决上述土岩结合深基坑支护问题,本文以鄂西北十堰市城区某超高层建筑的深基坑支护工程为例,介绍一种逆作法墩式挡墙的设计、施工方法。墩墙支护结构的施工表现形式为排墩(桩),但其受力形式、设计原理、构造方式均为重力式混凝土挡墙,因此称为逆作法墩式挡墙。工程实践表明,逆作法墩式挡墙计算原理清晰,对周边环境保护较好,且具有施工便利、造价经济等显著优势。

### 1 工程概况

某深基坑工程位于十堰市城区百二河(汉江支流水系)河漫滩区域,基坑开挖深度19.6 m,周围环境如图2所示。



图2 某深基坑工程平面位置图

根据岩土工程勘察成果,基坑上覆第四系覆盖层厚5.0~6.5 m,由上至下地层分别为:素填土厚1.5~2.0 m,砂卵石厚3.0~4.5 m。以下为分布稳定的强风化—微风化钠长石英片岩,其中强风化—中等风化岩分布较薄,厚度不足1 m,其下即为深厚坚硬的微风化岩层,各岩土层设计参数见表1。

表1 基坑边坡支护参数一览表

地层编号	地层名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	岩土层与锚固体极限黏结强度标准值 $f_{\text{tk}}/\text{kPa}$	基底摩擦系数 $\mu$
①	素填土	20	5	22	40	0.4
②	砂卵石	21.5	0	32	70	0.45
③-1	强风化片岩	25	40	20	160	0.5
③-2	中等风化片岩	26	70	22	360	0.57
③-3	微风化片岩	26	90	25	560	0.57

基坑四周紧邻重要市政道路(路肩下部存在管线)和已建多层住宅(含地下室),无放坡空间,且上部土体锚拉受限。若采用常规支护桩结构,桩底须深入基坑底5~8 m,则桩长至少需要25 m;在坚硬岩层中

开挖成孔,施工极其困难,周期长,代价高。若按“吊脚桩”理论设计,基坑边坡下部微风化片岩自稳性好,传统喷锚方案即可解决整体稳定性问题;但桩体中上部因基坑侧壁土层存在障碍物,无法施工斜向锚杆,

桩体位移无法保证。通过对基坑周围情况的综合分析,并结合本地区类似工程经验,最终选取逆作法墩式挡墙+岩石喷锚方案进行支护,取得了较好的支护效果。

## 2 逆作法墩式挡墙的设计与施工

### 2.1 逆作法墩式挡墙的设计原理

从20世纪60年代起,重力式挡墙就开始在我国铁路、公路工程的边(滑)坡治理中得到充分运用<sup>[13]</sup>,多以路肩(路堤)墙、路堑挡墙的形式出现。随着各级城市大规模基建活动的兴起,各类重力式挡墙被引入建筑边坡治理领域,相关的设计理论和构造措施要求均比较完善。与建筑边坡不同,城区深基坑支护中,周围环境相对复杂,重力式挡墙截面尺寸相对较大,加之采用正作法施工需解决临时边坡开挖及其稳定问题,因而不适用于基坑工程。

而此次设计采用的墩式挡墙方案能够有效解决挡墙逆作法问题,从而保证基坑的开挖安全。深基坑上部采用逆作法墩式挡墙,即先采用人工或机械方式成孔,开挖墩底进入基岩50 cm即可;随后按设计要求施工竖向抗倾覆锚杆和抗滑移锚杆,再绑扎钢筋笼,浇筑墩体。墩体浇筑完成后,用冠梁连接成为整体,等达到设计强度后,再按逆作法分层开挖基坑,由上至下用素混凝土(也可适当加入插筋)置换墩间土体,使墩与墩间置换体共同组成一道等宽的重力式混凝土挡墙。

受限于支护空间问题,此类墩式挡墙一般厚度不会太大,一般在1.5 m以内。一般情况下,基坑边线转折弧度较大时( $\geq 90^\circ$ ),墩式混凝土挡墙的截面强度和地基承载力均易满足规范要求。但由于墙体宽度有限,抗倾覆和抗滑移稳定性往往难以满足验算要求。为解决墩墙稳定性问题,借鉴“吊脚桩”的加固方法,采用岩石锚杆弥补逆作法墩式挡墙抗滑移和抗倾覆不足问题。锚杆采用墩底竖向锚杆,也可以在墩墙底部打斜向锁脚锚杆。简言之,此类方法在深基坑上部土层采用逆作法墩式挡墙结合锚杆解决土层局部稳定性问题,下部岩体采用岩石锚杆方案解决边坡整体稳定性问题。

### 2.2 逆作法墩式挡墙的构造特点

与传统重力式挡墙不同,墩式挡墙的构造形式可总结为“地面开挖成墩、墩间置换成墙”,其组合形式与公路、铁路中常见的“桩+墙”支挡结构也有一定相似性。当周边建(构)筑物较为重要时,基坑支护施工时可充分结合基坑变形监测要求,按逆作法逐

层开挖、置换,通过冠梁形成连续、完整的混凝土墙体,其构造特点参见图3。

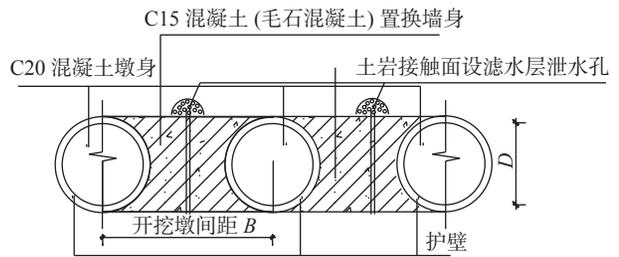


图3 逆作法墩式挡墙构造平面图

与“吊脚桩”构造形式不同,墩式挡墙的墩长度一般不超过6 m,墩体直径一般不超过1.5 m,墩身只需按基本构造配筋即可,相关稳定性验算及截面验算均按墩间重力式混凝土墙体进行。与传统重力式挡墙相比,墩式挡墙抗滑移、抗倾覆验算时还应考虑墩底竖向锚杆以及斜向锁脚锚杆的加固效果。同时,为加快施工进度,当墩底竖向锚杆能解决抗倾覆和抗滑移稳定性时,可不采用斜向锁脚锚杆。墩底竖向锚杆施工后,应与墩体钢筋笼焊接一体后,再进行墩体浇筑,如图4所示。

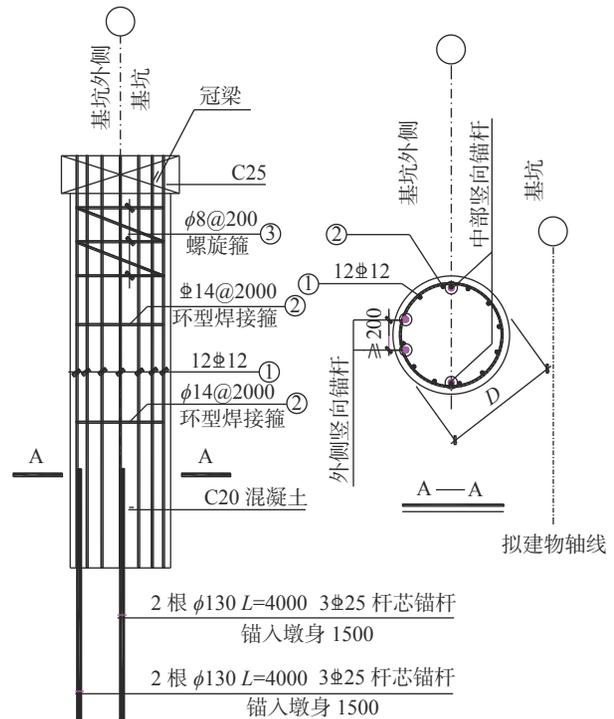


图4 逆作法墩式挡墙竖向锚杆构造示意图

### 2.3 逆作法墩式挡墙的计算方法

以上述深基坑工程为例,选取逆作法墩式挡墙的代表性计算剖面(见图5)。根据《建筑边坡工程技术规范》<sup>[14]</sup>中重力式挡墙的相关规定,同时考虑锚杆加固效果,墩式挡墙的计算(验算)流程如下:

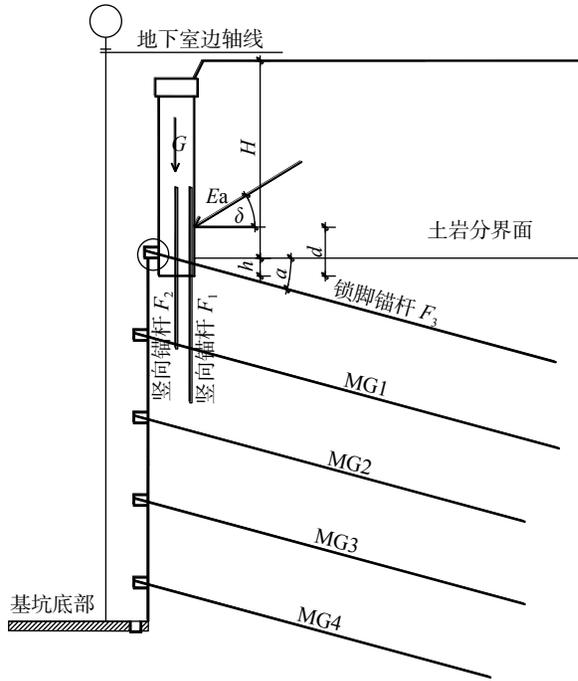


图5 逆作法墩式挡墙计算剖面图

## (1) 土压力计算

挡墙侧向土压力按直立式墙背考虑,纵向计算宽度  $B$  取两墩中心距。主动土压力计算公式如下:

$$E_a = \left( \frac{1}{2} \gamma H^2 K_a - 2cH \sqrt{K_a} + \frac{2c^2}{\gamma} \right) B \quad (1)$$

$$K_a = \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

式中:  $E_a$  为主动土压力合力, kN;  $\gamma$  为墙后土体重度, kN/m<sup>3</sup>;  $c$  为墙后土体黏聚力, kPa;  $\varphi$  为墙后土体内摩擦角, (°);  $H$  为墙后土体高度, m;  $K_a$  为主动土压力系数;  $B$  为土压力计算宽度, m。

## (2) 抗滑移稳定性验算

挡墙抗滑稳定性验算截面为土岩交界面, 滑移力为主动土压力水平分力, 抗滑力为墙底摩擦力及锁脚锚杆锚固力的水平分力, 验算公式如下:

$$F_s = \frac{(G + E_{an})u + F_v + F_3 \cos \alpha}{E_{at}} \geq 1.3 \quad (3)$$

$$E_{an} = E_a \sin \delta \quad (4)$$

$$E_{at} = E_a \cos \delta \quad (5)$$

式中:  $F_s$  为挡墙抗滑移稳定性系数;  $G$  为挡墙自重, kN;  $F_v$  为竖向锚杆的抗剪容许承载力, kN;  $F_3$  为锁脚锚杆的轴向设计锚固力, kN;  $\alpha$  为锁脚锚杆锚入角度, (°);  $\delta$  为主动土压力与水平方向夹角, (°)。

## (3) 抗倾覆稳定性验算

挡墙抗倾覆稳定性验算中心点取为墩底边缘(靠

近基坑侧), 验算公式如下:

$$F_t = \frac{(G + F_2)D'/2 + (E_{an} + F_1)D' + F_3 \cos \alpha \cdot h}{E_{at} \cdot d} \geq 1.6 \quad (6)$$

式中:  $F_t$  为挡墙抗倾覆稳定性系数;  $F_1$  为外侧竖向锚杆的设计锚固力, kN;  $F_2$  为中部竖向锚杆的设计锚固力, kN;  $D'$  为钢筋笼直径, m;  $h$  为墩体嵌固深度, m;  $d$  为主动土压力作用点与墩底距离, m。

## (4) 地基承载力验算

墩式挡墙基础应置于基坑下部稳定岩体之上, 验算公式如下:

## ① 偏心距验算

$$e = \frac{D}{2} - \frac{M}{W} \quad (7)$$

$$M = (G + F_2)D/2 + (E_{an} + F_1)D + F_3 \cos \alpha \cdot h - E_{at} \cdot d \quad (8)$$

$$W = G + E_{an} + F_1 + F_2 + F_3 \sin \alpha \quad (9)$$

式中:  $e$  为挡墙底面偏心距, m;  $M$  为挡墙全部荷载对墙趾的弯矩, kN·m;  $W$  为挡墙全部竖向力之和, kN。

## ② 承载力验算

$$P_k \leq f_a \quad (10)$$

$$P_{kmax} \leq 1.2f_a \quad (11)$$

$$P_k = \frac{W}{A} \quad (12)$$

$$P_{kmax} = \frac{W}{A} + \frac{M}{G} \left( |e| \leq \frac{D}{6} \right) \quad (13)$$

$$P_{kmax} = \frac{3W}{2 \left( \frac{D}{2} - |e| \right)} \left( |e| > \frac{D}{6} \right) \quad (14)$$

式中:  $P_k$  为挡墙基础底面平均压力值, kPa;  $P_{kmax}$  为挡墙基础底面最大压力值, kPa;  $D$  为挡墙宽度, m;  $A$  为计算底面积, m<sup>2</sup>,  $A = B \times D$ 。

## (5) 挡墙截面强度验算

挡墙验算截面为土岩交界面, 验算公式如下:

## ① 抗压承载力验算

若墩间墙填筑毛石混凝土, 按式(15)验算:

$$\gamma_0 N \leq \varphi f A \quad (15)$$

若墩间墙填筑素混凝土, 按式(16)验算:

$$\gamma_0 N \leq \varphi f_{cc} A_c = \varphi f_{cc} (B - 2e) \quad (16)$$

式中:  $\gamma_0$  为边坡重要性系数;  $N$  为挡墙计算截面处轴力值, kN;  $f$  为砌体抗压强度设计值, kPa;  $f_{cc}$  为素混凝土

土抗压强度设计值, kPa。

### ②抗剪承载力验算

若墩间墙填筑毛石混凝土,按式(17)验算:

$$\gamma_0 V \leq (f_v \alpha' \mu \delta_0) A \quad (17)$$

若墩间墙填筑素混凝土,按式(18)验算:

$$\gamma_0 V \leq \frac{1.75}{\lambda + 1} f_{cc} B D + 0.07 N \quad (18)$$

式中:  $V$ 为挡墙计算截面处剪力值, kN;  $f_v$ 为砌体抗剪强度设计值, kPa;  $\delta_0$ 为水平截面平均压应力, kPa;  $\alpha'$ 为砌体修正系数;  $\lambda$ 为计算截面处的剪跨比。

下部基岩按岩石喷锚方案进行设计,计算时可将上部挡墙、土体及地面荷载均按等效超载法考虑,相关方法较为常规,不再赘述。

## 2.4 逆作法墩式挡墙的施工流程

(1)预先平整场地,间隔跳挖墩孔,墩底施工竖向锚杆;然后及时下钢筋笼浇筑低标号混凝土,全部墩孔浇筑完毕后,施工墩顶冠梁。

(2)待墩体混凝土强度达到70%以上即可分层分段开挖基坑土体,并加强基坑位移监测;使用低标号混凝土(土体自稳性好时可使用毛石混凝土)置换墩间土体,使墩与墩间置换体形成整体。

(3)待墩间置换体强度达到70%后,方可分层分段开挖岩体,施工岩石锚杆及锚杆围圈,直至开挖至基坑底设计标高。简要施工流程参见图6—图8。



图6 墩体施工



图7 墩间土体置换



图8 基岩拉锚施工

## 3 墩式挡墙支护效果及对比分析

上述深基坑工程按逆作法墩式挡墙+岩石喷锚

方案进行支护,在基坑开挖及基础施工期间,支护结构安全稳定,且挡墙顶部位移得到了有效控制(最大位移<30 mm),较好地保护了周围重要市政道路及邻近建筑物安全,支护效果实拍如图9所示。类似墩式挡墙支护结构先后在鄂西北多个土岩结合深基坑工程中成功应用。



图9 逆作法墩式挡墙整体支护效果图

与传统排桩(桩撑、桩锚)支护形式相比,逆作法墩式挡墙施工快、造价低。排桩在深厚坚硬微风化岩体中成孔非常困难,单台班旋挖机械成桩速度约为2 d/根;而墩式挡墙只需嵌岩50 cm,钻进速度快,单台班旋挖机械成墩速度约0.5 h/根。在支护代价方面,传统排桩支护每延米需要5.5万元(初期方案预估价),而逆作法墩式挡墙+岩石喷锚方案每延米综合造价不足2.5万元,工程造价优势明显。

与“吊脚桩”支护形式相比,逆作法墩式挡墙能解决上部土层因障碍物无法锚固的问题,设计原理有规可循,计算方法成熟、明确。且墩间土体置换成墙,与墩体连接连为一体,避免了常见的桩(墩)间土体挤出(变形过大)问题,对周围环境复杂的土岩结合深基坑适用性更好。

同时,应当指出,逆作法墩式挡墙墙体宽度相对较小,当墙体中上部不进行拉锚时,抗倾覆能力有限,多适用于上覆土层7 m以内的土岩结合基坑。

## 4 结论

逆作法墩式挡墙设计方案已在鄂西北多个土岩结合深基坑工程中成功应用,相关成果可为我国其他地区土岩结合深基坑的设计、施工提供重要的方案参考,其基本特点和优势如下:

(1)支护施工便利:墩式挡墙结合了重力式挡墙设计方法以及“吊脚桩”的加固形式,采取“地面开挖成墩、墩间置换成墙”的构造形式,施工过程快捷、便利。

(2)计算理论清晰:墩式挡墙设计时只需考虑墩底竖向锚杆及斜向锁脚锚杆的加固效果,在传统重力式挡墙计算理论的基础上稍加改进即可,相关计算方

法较为成熟、明确。

(3)支护安全性好:墩式挡墙采用逆作法施工,对上部土体的变形控制效果较好,能够有效解决上部土层因障碍物无法拉锚的情况,可适用于基坑周边环境复杂、上覆土层7 m以内的土岩结合深基坑。

(4)工程造价较低:墩柱只需按基本构造配筋,墩间墙体可采用素混凝土或毛石混凝土填充;相比于传统排桩(桩撑、桩锚)支护方法,墩式挡墙工程造价较低,优势明显。

#### 参 考 文 献

- [1] 陈志伟. 基坑围护结构吊脚桩施工处理实例[J]. 广东土木与建筑, 2005, (6): 5-6.
- [2] 陈俊生, 莫海鸿, 刘叔灼, 等. 某基坑工程施工方案可行性分析[C]. 三亚: 中国岩石力学与工程实例第一届学术会议, 2007.
- [3] 刘红军, 李东, 张永达, 等. 加锚双排桩与“吊脚桩”基坑支护结构数值分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(S1): 225-230.
- [4] 刘红军, 李东, 孙涛, 等. 二元结构岩土基坑“吊脚桩”支护设计数值分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(5): 43-48.
- [5] 刘红军, 王亚军, 姜德鸿, 等. 土岩组合双排吊脚桩桩锚支护基坑变形数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S2): 4099-4103.
- [6] 吴腾. 土岩二元结构盖挖法地铁车站深基坑“吊脚桩”支护体系数值分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [7] 李洪晓. 土岩组合地层深基坑“吊脚桩”支护体系变形规律及稳定性研究[D]. 广州: 广州大学, 2020.
- [8] 毕经东, 张自光. “吊脚桩”支护型式应用及计算方法分析[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2013, 12(1): 28-32.
- [9] 赵文强. 上软下硬复合地层条件下深基坑支护设计探析[J]. 隧道建设, 2014, 34(2): 153-157.
- [10] 岳建国, 齐云龙. 深基坑吊脚桩的理论计算及数值模拟研究[J]. 路基工程, 2016, (1): 96-101.
- [11] 刘江. 土岩组合地层盖挖车站基坑吊脚桩支护适用性研究[J]. 铁道建筑, 2016, (5): 120-125.
- [12] 郭鹏举. 吊脚桩在地铁围护结构中的应用及注意事项为以徐州某地铁基坑为例[J]. 工程建设与设计, 2019, (18): 76-77.
- [13] 郑颖人. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [14] GB 50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

收稿日期: 2021-05-25