

文章编号:1673-9469(2023)02-0015-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.02.003

## 边坡治理中h型支挡结构的应用与分析方法研究

张海洋<sup>1,2,3</sup>, 刘润<sup>3</sup>, 宋绪国<sup>1,2</sup>, 李成凤<sup>3</sup>

(1. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308; 2. 城市轨道交通数字化建设与测评技术国家工程研究中心, 天津 300308;  
3. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300372)

**摘要:** 边坡h型支挡结构桩土协同作用机理复杂, 尚未形成一套科学的工程设计评价方法, 基于刚性联系梁假定以及前、后桩与桩间土协同作用机理, 建立了h型支挡结构受荷分析模型, 根据Euler-Bernoulli梁理论结合桩周线性土弹簧提出了前、后桩全桩挠曲微分控制方程, 保证了桩身变形在滑面处的变形协调关系, 利用中心差分格式及矩阵运算方程组对h型结构全桩内力及变形进行了求解, 最后基于克枯滑坡h型支挡结构工程设计案例, 通过有限元模型与理论分析模型对比, 发现二者计算的桩身最大弯矩与剪力误差在5%以内, 验证了文中所提方法的可靠性, 可满足h型支挡结构的工程设计需求。

**关键词:** 边坡治理; h型支挡结构; 中心差分; 内力及变形; 有限元

**中图分类号:** TG333.17

**文献标识码:** A

## Analytical Method and Application of H-type Retaining Structure in Slope Engineering

ZHANG Haiyang<sup>1,2,3</sup>, LIU Run<sup>3</sup>, SONG Xuguo<sup>1,2</sup>, LI Chengfeng<sup>3</sup>

(1. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China; 2. National Engineering Research Center for Digital Construction and Evaluation Technology of Urban Rail Transit, Tianjin 300308, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300372, China)

**Abstract:** The pile-soil interaction mechanism of h-type retaining structures is complicated. As a result, a reasonable engineering design method has not been developed yet. The deflection differential equations of the front and rear piles are established on the basis of the Euler-Bernoulli beam theory and a series of soil springs around piles. It ensures the deformation compatibility of pile at sliding surface, a matrix equation set using the finite difference method was conducted to evaluate the internal force and deformation of h-type retaining structure. A finite element model was established based an h-type retaining structure engineering in Keku landslide. The two methods are used for evaluating the internal force and deformation of piles, the difference in the maximum bending moment and shear force between the finite difference method and FEA method is less than 5%, which indicates that the proposed method is reasonable for evaluating the h-type retaining structure in slope design engineering.

**Key words:** slope treatment; h-type retaining structure; central difference scheme; internal force and deformation; finite element method

h型支挡结构作为一种新型边坡支挡型式, 包括前排桩、后排桩及联系梁三个部分, 通过联系梁连接前排桩顶与后排桩身, 形成一个后排桩存在悬臂段的组合式抗滑结构<sup>[1]</sup>, 因其横断面形状类

似英文字母“h”, 因此称之为h型支挡结构。h型支挡结构一般沿线路方向等间距布置, 其水平刚度大、占地范围小, “收坡”与“固脚”作用明显<sup>[2-3]</sup>, 适用于填方路基、深大路堑、山区陡坡及大型滑坡

收稿日期: 2023-04-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2603400); 中国国家铁路集团有限公司科技开发计划项目(K2022G058, L2022G014); 中国铁路设计集团有限公司科技开发重点课题(2021A241013)

作者简介: 张海洋(1991-), 男, 天津人, 博士, 博士后, 主要从事边坡支挡工程方面的研究。

等复杂地质条件下的边坡治理工程<sup>[4]</sup>。对于一些大推力滑坡,传统的单排抗滑桩只能通过不断增大截面尺寸或设置预应力锚索满足工程建设要求<sup>[5-6]</sup>,但当遇土质滑坡工况滑床内不存在锚索可以稳定嵌固的坚硬地层时,采用h型支挡结构治理边坡成为了最佳解决方案,也符合目前轨道交通建设小空间解决大高差的理念。

h型支挡结构由于型式特殊,前、后桩与桩间土体协同作用机理复杂,相关研究成果尚未形成一套科学合理的设计评价方法,现有工程设计往往依据经验确定,造成了目前理论研究落后于工程实践的现状。h型支挡结构作为一种超静定体系,当前大多数学者<sup>[7-11]</sup>的分析方法为以滑面为界,人为划分成上、下两部分,上部受荷段简化为两端底端固定,且后桩承受滑坡推力的超静定框架结构,由结构静力法求得上部结构的内力分布与固定端反力 $M_1$ 、 $Q_1$ 与 $M_2$ 、 $Q_2$ ;下部锚固段简化为顶部承受集中荷载 $M$ 与 $Q$ 的两根单桩,由地基反力法<sup>[12-14]</sup>求解锚固段的内力及变形。考虑h型支挡结构在滑面处需满足变形协调条件,上述假定计算的上部结构内力较为准确,但求得的前、后桩变形可能存在偏差。

其他学者则主要通过数值模拟和模型试验手段对h型支挡结构的受荷特点展开研究,Liu等<sup>[15]</sup>、欧孝夺等<sup>[16]</sup>基于有限元软件ABAQUS,对h型结构的最优前、后桩排距、嵌固深度及联系梁长度等因素进行了分析;李兵等<sup>[17]</sup>、吕俊磊<sup>[18]</sup>、廖超<sup>[19]</sup>基于有限元软件Midas和现场实际工程,对h型结构的布置方式、截面形状、联系梁位置等因素进行了分析;Zhao等<sup>[20]</sup>通过模型试验手段发现,h型结构相比单排抗滑桩支挡能力更强、空间受力更加合理且比其他支挡结构型式经济性更高。

鉴于上述研究,本文在分析时为避免将h型支挡结构在滑面处人为划分成上、下两部分,通过刚性联系梁假定以及h型结构前、后桩与桩间土协同作用机理,基于Euler-Bernoulli梁理论建立了前、后桩全桩身挠曲微分方程,确保了前/后桩在滑面处的变形协调关系,并利用有限差分法对h型结构全桩内力及变形进行求解,最后基于某滑坡h型支挡结构治理工程及有限元法对建立的计算模型进行验证。

## 1 边坡h型支挡结构受荷分析模型

### 1.1 基本假设

为方便边坡h型支挡结构受荷分析模型的推

导,现作出如下假定:

- (1)不考虑联系梁以上的悬臂段部分,等效为作用于底部的集中荷载 $Q_l$ 与弯矩 $M_l$ ;
- (2)联系梁视为刚体,不产生压缩或拉伸变形,即与前、后桩的连接处为刚结点;
- (3)考虑h型支挡结构主要承受水平荷载作用,忽略桩身竖向轴力的存在。

### 1.2 受荷分析模型

如图1所示,h型支挡结构后桩悬臂段长度为 $l$ ,前、后桩受荷段长度均为 $H_1$ ,滑面以下后桩锚固段长度为 $H_2$ ,前桩锚固段长度为 $H_3$ ,联系梁长度为 $s$ ,前、后桩的抗弯刚度均为 $EI$ 。

后桩在桩后滑坡推力 $q_1(z)$ 作用下,荷载通过刚性联系梁及桩间土体传递给前桩,h型支挡结构受荷力学分析模型见图1,刚性联系梁与前、后桩连接处均为刚结点,联系梁以上承受水平荷载的悬臂段部分,等效为集中荷载 $Q_l$ 与弯矩 $M_l$ 作用于刚结点处;由刚结点平衡条件可知,联系梁右侧弯矩 $M'_0$ 和剪力 $Q'_0$ 与前桩桩顶相等,联系梁左侧刚结点处平衡条件为: $M_0+M'_0=M_l$ 和 $Q_0+Q'_0=Q_l$ 。

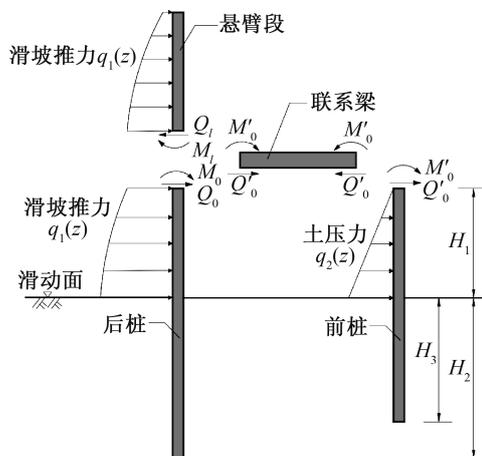


图1 h型结构受荷分析模型

Fig. 1 Mechanical model of h-type structures

### 1.3 桩间土压力

h型支挡结构在后桩滑坡推力 $q_1(z)$ 作用下挤压桩间土体,桩间土体作用于后桩的土压力可取为被动土压力,作用于前桩的土压力可取为主动土压力;出于工程安全设计考虑,分析时桩间土体忽略后桩桩前被动土压力作用,仅考虑前桩桩后主动土压力 $q_2(z)$ 作用,按三角形分布,由库伦土压力公式计算。

## 2 h 型支挡结构内力及变形计算

### 2.1 前、后桩挠曲微分控制方程

h 型支挡结构分析模型后桩受荷段承受滑坡推力,前桩受荷段承受主动土压力,前、后桩滑面以下锚固段(长度  $H_3$ 、 $H_2$ )的桩-土间相互作用(土抗力作用),采用线性土弹簧模拟。将后桩受荷段与锚固段( $H_1+H_2$ )离散为  $n$  段,前桩受荷段与锚固段( $H_1+H_3$ )离散为  $p$  段,各分段长均为  $h$ ,后桩、前桩顶部至底部按序划分节点依次为 3,4,5 $\cdots$ , $n+3$  与 3,4,5 $\cdots$ , $p+3$ ;二者滑动面处的桩身节点编号均为  $m$ ,顶部以上和底部以下各添加 2 个虚节点<sup>[21]</sup>,后桩共  $n+5$  个节点,前桩共  $p+5$  个节点,如图 2 所示。

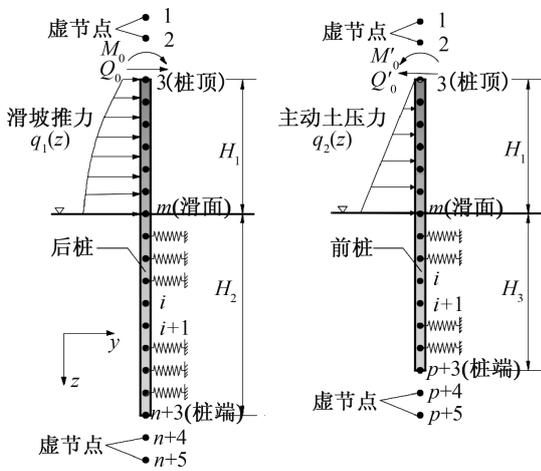


图 2 前、后桩离散化模型示意图

Fig. 2 Discrete model of front pile and rear pile

基于欧拉-伯努利 (Euler-Bernoulli) 梁理论结合桩周线性土弹簧<sup>[22-23]</sup>,前、后桩受荷段与锚固段的挠曲微分控制方程可表示为

$$\text{后桩} \begin{cases} EI \frac{d^4 y_i}{dz_i^4} = q_1(z_i) & (3 \leq i \leq m) \\ EI \frac{d^4 y_i}{dz_i^4} + k_{hi} b_0 y_i = 0 & (m < i \leq n+3) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{前桩} \begin{cases} EI \frac{d^4 y'_i}{dz_i^4} = q_2(z_i) & (3 \leq i \leq m) \\ EI \frac{d^4 y'_i}{dz_i^4} + k_{hi} b_0 y'_i = 0 & (m < i \leq p+3) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $y$  与  $y'$  分别后桩与前桩的水平变形; $z$  为距联系梁的垂直距离; $q_1(z_i)$  为后桩桩后滑坡推力的分布荷载, $q_2(z_i)$  为前桩桩后主动土压力的分布荷载,滑

面以下  $q_1$ 、 $q_2$  均为 0; $k_{hi}$  为锚固段桩身节点  $i$  处的水平地基反力系数,可由“ $m$  法”或“ $K$  法”计算; $b_0$  为桩的计算宽度,可按式计算:

$$\text{矩形桩: } b_0 = \begin{cases} b+1 & (b \geq 1) \\ 1.5b+0.5 & (b < 1) \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{圆形桩: } b_0 = \begin{cases} 0.9(d+1) & (d \geq 1) \\ 0.9(1.5d+0.5) & (d < 1) \end{cases} \quad (4)$$

### 2.2 有限差分求解

上述 4 阶微分控制方程由解析法得到精确解较为困难,文中采用有限差分法进行数值求解,将微分控制方程式(1)和(2)采用有限差分格式<sup>[24-25]</sup>表示如下:

$$\text{后桩} \begin{cases} y_{i-2} - 4y_{i-1} + 6y_i - 4y_{i+1} + y_{i+2} = \frac{q_1(z_i)h^4}{EI} & (3 \leq i \leq m) \\ y_{i-2} - 4y_{i-1} + (6 + \frac{k_{hi}b_0h^4}{EI})y_i - 4y_{i+1} + y_{i+2} = 0 & (m < i \leq n+3) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{前桩} \begin{cases} y'_{i-2} - 4y'_{i-1} + 6y'_i - 4y'_{i+1} + y'_{i+2} = \frac{q_2(z_i)h^4}{EI} & (3 \leq i \leq m) \\ y'_{i-2} - 4y'_{i-1} + (6 + \frac{k_{hi}b_0h^4}{EI})y'_i - 4y'_{i+1} + y'_{i+2} = 0 & (m < i \leq p+3) \end{cases} \quad (6)$$

前、后桩受荷段顶部作用有集中荷载与弯矩  $M_0$ 、 $M'_0$ 、 $Q_0$ 、 $Q'_0$ ,由图 1 可知,联系梁左侧刚结点处满足平衡条件: $M_0+M'_0=M_l$  和  $Q_0+Q'_0=Q_l$ ,采用有限差分格式表示为

$$\begin{cases} y_2 - 2y_3 + y_4 + y'_2 - 2y'_3 + y'_4 = \frac{M_l h^2}{EI} \\ y_1 - 2y_2 + 2y_4 - y_5 + y'_1 - 2y'_2 + 2y'_4 - y'_5 = -\frac{2Q_l h^3}{EI} \end{cases} \quad (7)$$

由于刚性联系梁不产生压缩或拉伸变形,故前、后桩受荷段顶部的转角和位移相等,即

$$\begin{cases} y_3 - y'_3 = 0 \\ y_2 - y_4 - y'_2 + y'_4 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

前、后桩锚固段桩端自由,即桩底弯矩  $M$ 、剪力  $Q$  为零,其桩底边界条件为

$$\begin{cases} y_{n+2} - 2y_{n+3} + y_{n+4} = 0 \\ y_{n+1} - 2y_{n+2} + 2y_{n+4} - y_{n+5} = 0 \end{cases} \quad (9)$$



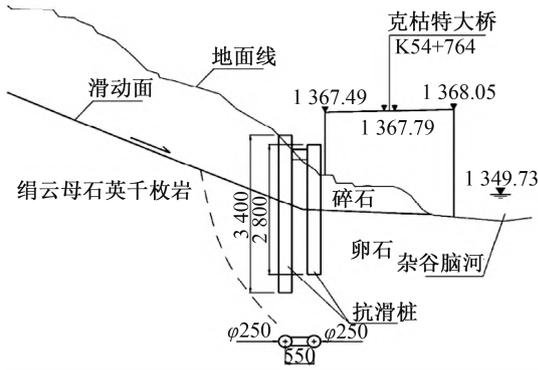


图 3 h 型支挡结构横断面图(单位:mm)<sup>[17]</sup>  
Fig. 3 Cross section of h-type retaining structures(unit:mm)

滑坡滑体主要为碎石地层,滑坡推力按三角形分布作用于后桩悬臂段( $l=3\text{ m}$ )与受荷段( $H_1=10\text{ m}$ ),三角形分布最大荷载为  $1\,200\text{ kN/m}$ 。滑动面以下滑床为卵石地层,水平地基系数的比例系数  $m=1\times 10^4\text{ kN/m}^4$ ,具体参数详见表 2。

表 2 地层参数

Tab. 2 Parameters of landslide soil				
类型	地层	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	综合摩擦角/ $(^\circ)$	比例系数 $m/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-4})$
滑体	碎石土	20	30	—
滑床	卵石土	21	33	10

### 3.2 有限元模拟

为与文中提出的 h 型支挡结构分析模型进行对比,采用有限元软件 Midas 进行分析,建立的杆系有限元计算模型如图 4 所示,桩基及联系梁均由梁单元模拟,单元长度  $\Delta h$  按  $0.1\text{ m}$  划分,采用 C30 混凝土材料,弹性模量  $30\text{ GPa}$ ,截面尺寸及长度参数详见表 1;锚固段桩-土间相互作用由节点弹性支承模拟,各节点的土弹簧刚度  $k_s$  根据下式计算:

$$k_s = mzb_0\Delta h \quad (16)$$

式中: $z$  为锚固段节点埋深, $m$ ;  $m$  为卵石地层水平地基系数的比例系数,取  $10\text{ MN/m}^4$ 。

h 型支挡结构前、后桩均作用有梁单元荷载,后桩滑坡推力范围  $13\text{ m}$  按三角形分布,底部荷载  $1\,200\text{ kN/m}$ ;前桩主动土压力范围  $10\text{ m}$ ,按库伦土压力公式计算,底部荷载  $315.46\text{ kN/m}$ 。

### 3.3 分析结果

分别采用文中提出的理论分析模型(差分

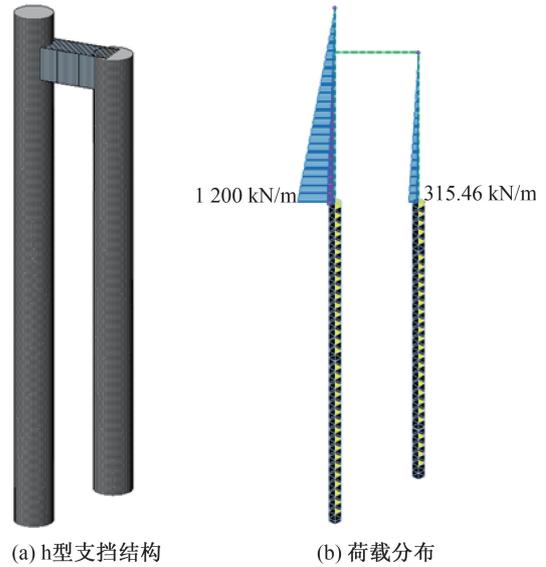


图 4 h 型支挡结构有限元模型  
Fig. 4 Finite element model of h-type retaining structures

长  $h=0.1\text{ m}$ )与有限元模型进行了计算,对比结果如图 5 所示。

由图 5 可知,本文提出的 h 型支挡结构受荷分析模型计算的前、后桩桩身内力及变形结果,与有限元法分析结果吻合良好;但也发现两种方法在距桩顶  $3\text{ m}$  处计算的桩身弯矩与剪力略有偏差,这可能是由于理论模型中假定联系梁为刚性,而有限元方法则按实际情况将联系梁设置为 C30 混凝土材料,因此联系梁刚度的不同导致二者结果出现差别。

两种方法计算的桩身最大剪力均发生在滑面处(距桩顶  $13\text{ m}$ ),分别为  $-5\,656.29\text{ kN}$ (有限元法)和  $-5\,467.34\text{ kN}$ (理论模型),桩身最大弯矩则发生在滑面以下  $8\text{ m}$  位置左右,分别为  $32\,271.87\text{ kN}\cdot\text{m}$ (有限元法)和  $32\,106.23\text{ kN}\cdot\text{m}$ (理论模型);因此,理论分析模型由于假定联系梁为刚性,计算的前/后桩刚结点处弯矩与剪力与实际情况可能略有差别,但得到的桩身最大剪力与弯矩有限元方法差别在  $5\%$  以内,验证了文中所提分析模型应用于 h 型支挡结构工程设计的合理性。

## 4 结论

本文基于合理假定建立了 h 型支挡结构受荷分析模型,基于有限差分法对前、后桩全桩内力及变形进行了求解,最后通过现场工程案例及有限元法对文中所提模型的可靠性进行了验证。主要结论如下:

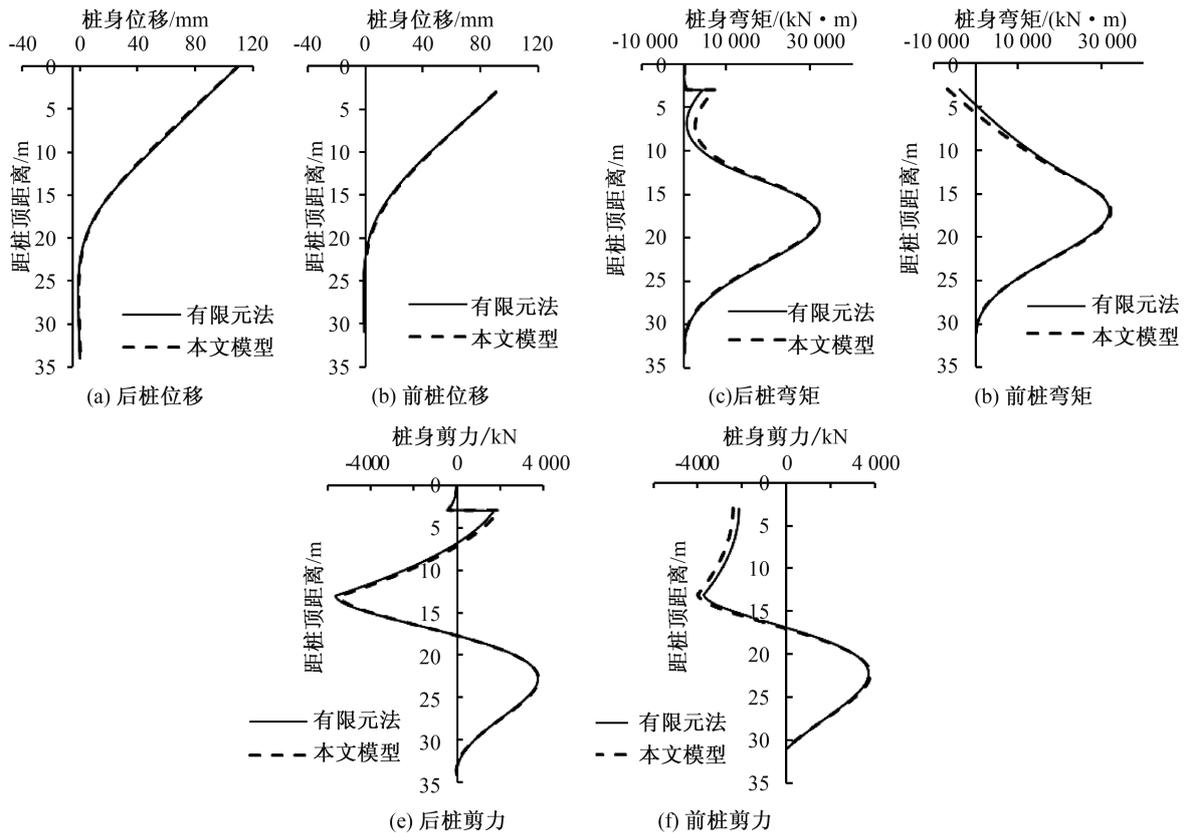


图5 两种方法分析结果对比

Fig. 5 Calculated results of FEM and FDE methods

1) 基于刚性联系梁假定并将悬臂段受力等效为集中荷载作为边界条件,建立了h型支挡结构前、后全桩挠曲微分方程,保证了桩身在滑面处的变形协调。

2) 与有限元结果对比可知,假定刚性联系梁虽然对桩身刚结点处的弯矩与剪力略有影响,但计算的桩身最大弯矩与剪力误差在5%以内,可满足h型支挡结构的工程设计需求。

3) h型支挡结构前、后桩最大剪力截面均位于滑面处,最大弯矩截面则位于滑面以下8m,且后桩剪力值明显大于前桩。

#### 参考文献:

- [1] 欧孝夺,唐迎春,崔伟,等. h型抗滑桩模型试验及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1936-1943.
- [2] ZHAO B, WANF Y S, WANG Y, et al. Retaining Mechanism and Structural Characteristics of h Type Anti-slide Pile (hTP Pile) and Experience with its Engineering Application [J]. Engineering Geology, 2017, 222: 29-37.
- [3] 李永辉,张信,张鼎浩,等. 曲面滑坡条件下h型抗滑

桩受力性状模型试验研究[J/OL]. 工程力学: 1-12 [2023-05-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20221202.1550.002.html>.

- [4] 欧明喜. h型抗滑桩力学机理及其工程应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [5] 万雪林,张鹏. 长短组合双排桩基坑支护体系分析及应用[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2023, 40(1): 9-14.
- [6] 胡聪,张永攀. 横观各向同性在抗滑桩加固边坡中的应用[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2018, 35(3): 34-38.
- [7] 肖世国. 边(滑)坡治理中h型组合抗滑桩的分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2146-2152.
- [8] 张永杰,李侑军,曹文贵,等. 大型滑坡预应力锚索h型抗滑桩处置方法研究[J]. 水平地质工程地质, 2014, 41(5): 57-63.
- [9] 张永杰,周欢,冯夏庭,等. h型抗滑桩简化计算方法及其影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 2935-2943.
- [10] 王羽. h型抗滑桩设计计算方法研究[D]. 成都:成都理工大学, 2011.
- [11] 郭璐遥. h型抗滑桩内力分析及工程应用[D]. 成都:成都理工大学, 2019.

(下转第76页)

- [6] PROVIS J L, PALOMO A, SHI C. Advances in Understanding Alkali-Activated Materials [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 78:110-125.
- [7] ZHENG X Y, LIU H H, YOU S J, et al. Cracking Resistance and Sustainability Assessment of Alkali-Activated Slag Concrete Incorporating Lightweight Aggregate [J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 131:104556.
- [8] 王强,黎梦圆,石梦晓.水泥-钢渣-矿渣复合胶凝材料的水化特性[J].硅酸盐学报, 2014, 42(5):629-634.
- [9] 仪桂兰,史永林.钢渣和高炉渣微粉技术研究[J].中国资源综合利用, 2017, 35(2):90-94.
- [10] 林旭健,季韬,黄丹青,等.混凝土新型环形约束收缩试验装置的研制及应用[J].福州大学学报:自然科学版, 2010, 38(1):110-115.
- [11] JI T, CHEN C Y, CHEN Y Y, et al. Effect of Moisture State of Recycled Fine Aggregate on the Cracking Resistance of Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 44:726-733.
- [12] HOSSAIN A B, WEISS J. Assessing Residual Stress Development and Stress Relaxation in Restrained Concrete Ring Specimens [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(5):531-540.
- [13] JI T, ZHANG B B, CHEN Y B, et al. Evaluation Method of Cracking Resistance of Lightweight Aggregate Concrete [J]. Journal of Central South University, 2014, 21(4):1607-1615.
- [14] ZHUANG Y Z, CHEN C Y, JI T. Effect of Shale Ceramsite Type on the Tensile Creep of Lightweight Aggregate Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 46:13-18.
- [15] FAVRE R, CHARIF H. Basic Model and Simplified Calculations of Deformations According to the CEB-FIP Model Code 1990 [J]. ACI Structural Journal, 1994, 91(2):169-177.
- [16] ROSALES J, CABRERA M, AGRELA F. Effect of Stainless Steel Slag Waste as a Replacement for Cement in Mortars. Mechanical and Statistical Study [J]. Construction and Building Materials, 2017, 142(1):444-458.
- [17] 张涛,陈铁军,陈永亮,等.机械活化和不锈钢渣掺量对矿渣胶凝材料性能的影响[J].硅酸盐通报, 2022, 41(2):553-561.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第20页)

- [12] 铁道部第二勘察设计院.抗滑桩设计与计算[M].北京:中国铁道出版社, 1983.
- [13] HASSIOTIS S, CHAMEAU J L, GUNARATNE M. Design Methods for Stabilization of Slopes with Piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(4):314-323.
- [14] ITO T, MATSUI T, HONG W P. Design Method for Stabilizing Piles Against Landslide-One Row of Piles [J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1):21-37.
- [15] LIU X R, KOU M M, FENG H, et al. Experimental and Numerical Studies on the Deformation Response and Retaining Mechanism of H-type Anti-sliding Piles in Clay Landslide [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(5):1-14.
- [16] 欧孝夺,唐迎春,崔伟,等. h型抗滑桩模型试验及数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9):1936-1943.
- [17] 李兵,赵如雄,马洪生,等.圆截面 h型抗滑桩受力与变形分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S2):1023-1027.
- [18] 吕俊磊.陡坡填方路基 h型桩板墙受力机理研究 [J]. 路基工程, 2020, 3:140-145.
- [19] 廖超.高速铁路陡坡路基 h型桩板墙关键设计参数分析 [J]. 铁道标准设计, 2021, 65(2):36-41.
- [20] ZHAO B, WANG J L, WANG Y, et al. Retaining Mechanism and Structural Characteristics of h Type Anti-slide Pile (hTP Pile) and Experience with its Engineering Application [J]. Engineering Geology, 2017, 222:29-37.
- [21] HASSIOTIS S, CHAMEAU J L, GUNARATNE M. Design Method for Stabilization of Slopes with Piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(4):314-323.
- [22] 横山幸满.桩结构物的计算方法和计算实例 [M].北京:中国铁道出版社, 1984.
- [23] 张海洋,刘润,袁宇,等.海上大直径单桩基础  $p-y$  曲线修正 [J]. 水利学报, 2020, 51(2):201-211.
- [24] 徐芝纶.弹性力学 [M]. 第4版.北京:高等教育出版社, 2006.
- [25] 张海洋,刘润,贾沼霖.自升式平台插桩对邻近平台桩基础的影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5):867-876.

(责任编辑 周雪梅)