

# 大型顺层岩石滑坡中多排组合桩加固的数值模拟

张阳阳\*

(安徽省地质环境监测总站(安徽省地质灾害应急技术指导中心), 安徽 合肥 230001)

**摘要:**为探究大型顺层岩石滑坡的合理支挡防护体系,确保顺层岩石边坡的稳定性,依托安徽某顺层滑坡,基于数值模拟方法,分析“单排桩(或锚拉桩)+h型抗滑桩”联合支护体系在顺层岩石滑坡中的受力特性及支挡防护效果。研究表明:滑坡下部临空面支护与中上部h型桩相关联,且下部单排桩增设锚索后,h型桩桩顶和滑面处位移明显降低,最大弯矩和剪力也有下降趋势;h型桩连梁与后排桩的连接方式对抗滑桩的支护效果有一定影响,固接效果强于铰接,连梁固/铰接方式对h型桩支护结构的弯矩和剪力的影响远小于单排桩有无锚索对h型桩支护结构的弯矩和剪力的影响;“单排桩(或锚拉桩)+h型抗滑桩”联合支护体系可以有效地控制坡体变形,确保顺层滑坡支挡后处于稳定状态。研究成果可为此类岩石边(滑)坡的支护治理提供一定的理论借鉴。

**关键词:**顺层岩石滑坡;抗滑桩;锚索;h型抗滑桩;数值模拟

中图分类号:TU473.1

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2024)03-0070-09

## Numerical Simulation of Reinforcement of Multi-row Composite Piles in Large Bedding Rock Landslides

ZHANG Yangyang

(Anhui Provincial Geological Environment Monitoring Station (Anhui Geological Disaster Emergency Technology Guidance Center), Hefei 230001, China)

**Abstract:** In order to explore the reasonable support and protection system of large-scale bedding rock landslides and ensure the stability of bedding rock slopes, based on a bedding landslide in Anhui Province, based on the numerical simulation method, the stress characteristics and retaining protection effect of the combined support system of “single row pile (or anchor pile) + h-type anti-slide pile” in bedding rock landslide are simulated and analyzed. Results show that the support of the free surface at the lower part of the landslide is related to the h-type pile in the middle and upper part of the landslide, and after the anchor cable is added to the lower single row pile, the displacement of the top and sliding surface of the h-type pile are obviously reduced, and the maximum bending moment and shear force also have a downward trend. The connection mode between the coupling beam of the h-type pile and the rear row pile has a certain influence on the supporting effect of the anti-slide pile, and the fixed connection effect is stronger than that of the hinged connection. The influence of the fixed / hinged connection mode of the coupling beam on the bending moment and shear force of the h-type pile supporting structure is much smaller than that of the single row pile with or without anchor cable on the bending moment and shear force of the h-type pile supporting structure; the combined support system of “single row piles (or anchor piles) + h-type anti-slide piles” can effectively control the deformation of the slope, and ensure that the bedding landslide is in a stable state after retaining. The research findings can provide some theoretical references for the support management of such rock edge (sliding) slope.

**Keywords:** bedding rock landslide; anti-slide pile; anchor cable; h-type anti-slide pile; numerical simulation

随着工程建设的不断推进,在修建基础设施的过程中,不可避免地会遇到一些工程地质条件比较复杂的顺层岩石高边坡.时有一些顺层岩石边坡由于支挡防护不当而灾变成顺层滑坡,顺层滑坡往往具有滑坡规模大、滑坡时间不确定、破坏后果严重等特点<sup>[1]</sup>.在山区,为获得建设场地,通常会采用垂直开挖方式,并在最下一级边坡设置悬臂式抗滑桩进行支挡<sup>[2]</sup>.抗滑桩作为边坡常用的支挡结构,与挡土墙、锚杆(索)、格构梁等相比,具有设桩位置灵活、对坡体扰动小、抗滑能力强等优点,抗滑桩不仅可先做桩后开挖,而且桩坑可进一步验证地质条件,由于抗滑桩的优点和特性使其被广泛应用于各类边坡工程的支挡活动中<sup>[3]</sup>.针对含软弱夹层的缓倾顺层岩质边坡,陈权川<sup>[1]</sup>提出将抗滑键应用于顺层边坡的加固中,并对抗滑键的承载机理、受力特性、破坏模式以及工程应用进行系统研究,证明抗滑键应用于顺层边坡中的可行性;刘新荣等<sup>[4]</sup>采用有限差分、双参数、改进的悬臂桩和有限元等方法对比分析抗滑桩的受力特性,同时对抗滑桩的工作机理进行研究,阐述了抗滑桩的优化设计研究进展情况;郑颖人等<sup>[5]</sup>创新性地提出采用有限元强度折减法求边坡支挡时抗滑桩的内力,并证实该方法在结构设计时的可靠性和经济性.针对一些大型顺层岩石滑坡,采用悬臂式抗滑桩支挡时,其设计截面通常会比较大,而大截面抗滑桩的受力状态和破坏模式与传统抗滑桩不一致,其支护效果往往达不到预想的效果<sup>[6-10]</sup>;若采用锚索抗滑桩支护,可能需要布置多排锚索共同作用,其施工过程相对复杂且实施难度大,还可能会造成锚固失效、预应力损失及多排锚索共同作用效果不佳等新的问题<sup>[11-15]</sup>.

针对顺层岩石边(滑)坡支挡防护存在的一些问题,本文以安徽某滑坡为依托,开展顺层滑坡支挡防护的数值模拟研究.基于该滑坡已局部成灾这一固有工程地质背景,提出采取“单排桩(或锚拉桩)+h型抗滑桩”联合支护体系对其进行加固处理,从滑坡的整体模型和局部模型两个方面分析不同结构处理方式中桩身内力特征和坡体变形情况,探讨单排桩是否需加锚索及h型桩支护体系中连接方式对桩身内力的影响.研究成果对大型顺层岩石滑坡的支挡防护具有借鉴意义.

## 1 工程概况

安徽某建筑场地受不可预见的不良地质(层间泥化夹层)的影响,在暴露地表情况下沿层间泥化夹层发生顺坡向位移.根据施工监测,边坡首次发生顺层滑移剪出时,剪出口影响长度仅为15 m,剪出口产状为 $210^{\circ} \angle 16^{\circ}$ ,剪出处为泥化层,厚度为3 cm,剪出1 cm,边坡变形当天立即进行反压卸载处理.半个月后,边坡变形持续加剧,坡顶裂隙累计宽度为5~10 cm,在边坡后缘影响长度65~70 m处发现竖向裂缝,估计深度6~9 m,累计剪出约3 cm,滑坡纵向长约70 m,主滑动方向长约60 m,滑动面深度6~9 m.滑坡属于中层牵引式滑坡,工程小型滑坡,滑坡自然坡度为 $13^{\circ} \sim 22^{\circ}$ .场区地层为第四系素填土,下伏地层为三叠系( $T_2$ )紫红色薄层白云岩及灰褐色中厚层状泥质白云岩,岩层产状主要为倾向 $210^{\circ}$ ,倾角 $16^{\circ}$ ,岩芯局部见缝合线构造,岩层上部层间存在泥化软弱夹层及揉皱现象,岩层下部溶蚀局部发育呈蜂窝状,较平整,结合度差.结合边坡场地钻探岩、土芯及外围观察情况,该建筑场地的岩土特性、岩体完整程度及风化程度等岩土特征从上至下分述如下:

1) 素填土( $Q_4^{ml}$ ):杂色,主要由拆迁废弃砖石夹杂少量生活垃圾组成,结构松散.该层仅在个别钻孔有分布,清表已挖除.

2) 中风化泥质白云岩( $T_2$ ):上部呈紫红色、黄色,底部为灰褐色,薄至中厚层状构造,节理裂隙较发育.岩体较破碎,岩芯较多呈5~15 cm柱状,少呈碎块状,有局部呈砂状,最大节长约25 cm,灰褐色岩芯多发育有溶蚀小孔,局部呈蜂窝状,岩质较新鲜,部分暴晒有开裂现象,岩质较软.该地层属均匀地层.典型地质剖面如图1所示,图中 $L_f$ 表示锚索自由段长度, $L_a$ 表示锚固段长度.

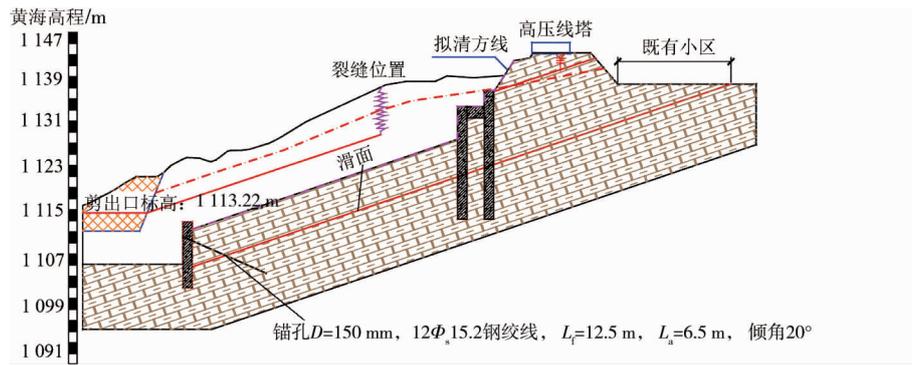


图1 典型地质剖面

## 2 支护设计方案

鉴于既有滑坡二次成灾后果严重,对滑体分2段进行支护.靠近建筑场地边线处采用单排桩或者单排桩加锚索支护结构,单排桩桩长12.1 m,潜在滑面以下4.0 m,桩型为圆桩,直径1.8 m,桩间距4.5 m;桩顶矩形冠梁尺寸为1.8 m×1.2 m.滑体中段采用h型桩支护结构,桩型为圆桩,前排桩桩长20.83 m,潜在滑面以下8.0 m,直径2.0 m,桩间距4.5 m;后排桩桩长23.83 m,潜在滑面以下9.72 m,直径2.0 m,桩间距4.5 m;桩顶矩形冠梁尺寸为2.0 m×1.2 m;前后排桩距离6.0 m,采用矩形连梁连接,连梁断面尺寸为2.0 m×1.8 m.

## 3 模型建立

### 3.1 网格划分

依据实际工程情况,考虑到滑坡体系,建立2个三维数值模型进行分析.对整个滑坡体进行数值分析的模型称为“整体模型”,整体模型尺寸长×宽×高为148 m×13 m×(前端11.75 m,后端51.60 m),整体计算模型如图2所示;以分割线为准,仅对h型桩支护部分进行数值分析的模型称为“局部模型”,局部模型尺寸长×宽×高为74 m×13 m×(前端33.22 m,后端51.60 m).由于模型尺寸大、规整程度差,为了便于计算,模型网格划分主要采用六面体渐变混合网格,网格尺寸为0.5~4.0 m,层面周围进行局部加密处理.X, Y, Z分别表示横向、纵向和竖向.

### 3.2 边界条件及本构模型

模型的左右前后边界约束水平向位移,下边界约束竖向位移,地表为自由边界;坡顶有电塔和房屋荷载,荷载大小为20 kN/m<sup>2</sup>,模型边界条件如图3所示.岩体依据摩尔-库伦弹塑性本构模型进行参数赋值,支护结构为弹性体.

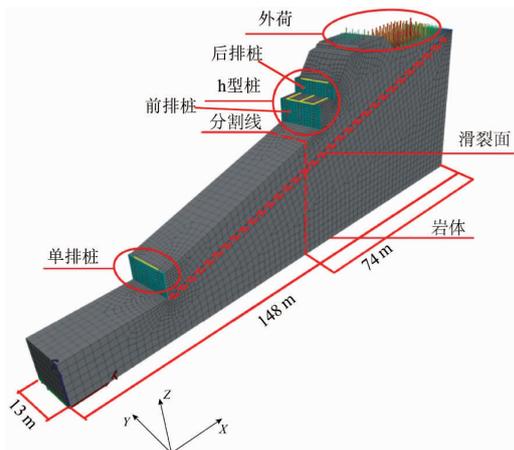


图2 计算模型

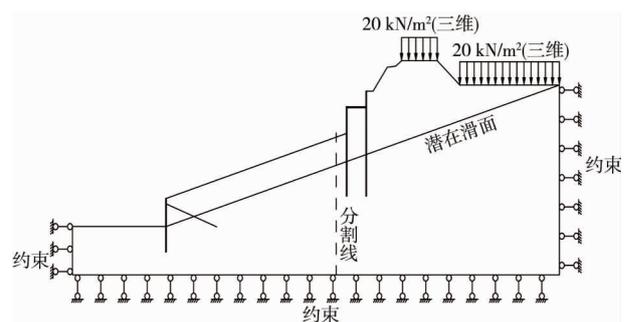


图3 模型边界条件

### 3.3 材料参数

计算参数结合本项目地勘报告、《工程岩体分级标准》《工程地质手册》及相关文献等综合确定.岩体材料参数如表 1 所示,支护材料参数如表 2 所示.

表 1 岩体材料参数

名称	状态	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/Pa
白云岩	泥质	2 410	60.00	0.35	0.110	26.00	0.10
滑面	饱和	2 410	6.00	0.35	0.022	6.35	0.10

表 2 支护材料参数

名称	弹性模量/GPa	泊松比	横截面积/m <sup>2</sup>	Y 轴惯性矩/m <sup>4</sup>	Z 轴惯性矩/m <sup>4</sup>	极惯性矩/m <sup>4</sup>
单排桩冠梁	69.60	0.3	2.16	0.259 2	0.583 2	0.842 4
h 型桩冠梁	98.70	0.3	2.40	0.288 0	0.800 0	1.088 0
连梁	34.10	0.3	3.60	0.972 0	1.200 0	2.172 0
桩间板	30.00	0.3				
单排桩	35.40	0.3	2.54	0.259 2	0.515 3	0.515 3
h 型桩	35.80	0.3	3.14	0.785 4	0.785 4	1.570 8

### 3.4 结构处理

在数值模拟软件中,桩、梁、锚索采用线性结构单元进行模拟.为了实现桩间板与桩之间更好地建立连接,桩间板采用实体单元弹性体.单排桩与冠梁、锚索与单排桩以固接方式进行连接.h 型桩支护体系中,桩与连梁分别采用两种连接方式进行模拟分析,第一种:连梁与前、后排桩分别采用固、铰接方式(“固铰”);第二种:连梁与前、后排桩分别采用固、固接方式(“固固”).结构单元连接方式如图 4 所示.

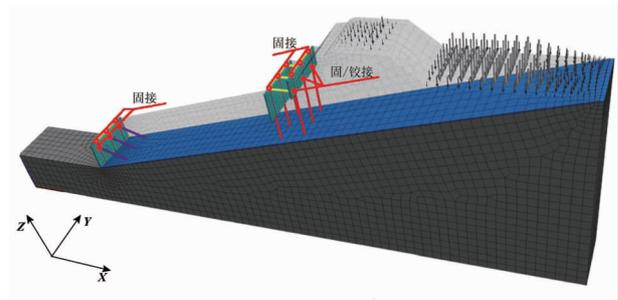


图 4 结构单元连接方式

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 初始地应力平衡

保留初始地形,使初始地形在重力作用下计算至收敛,初始地形计算收敛表示重力和内力已经达到平衡状态.清零位移、速度和塑性区后,整体模型开挖如图 5 所示,局部模型开挖如图 6 所示,然后建立支护结构进行计算.局部开挖模型需要说明一点的是模型之所以保留了桩前小部分岩体,是考虑桩间板的嵌固,如果全部挖去,桩间板临空侧嵌入段将失去法向约束,桩间板失去效用.

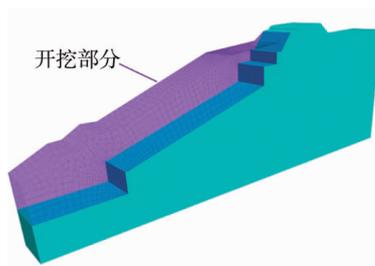


图 5 整体模型卸荷部分

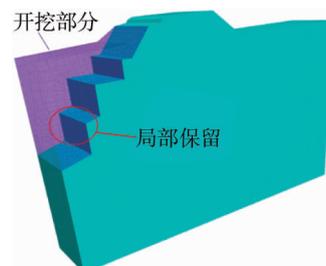


图 6 局部模型卸荷部分

### 4.2 计算结果分析

以下主要对比分析整体模型与局部模型中单排桩和 h 型桩的弯矩、剪力和位移,以及连梁与 h 型桩后排不同连接方式(固接/铰接)下 h 型桩的弯矩、剪力和位移.

4.2.1 整体模型

通过模拟计算得到整体模型中支护桩的最大弯矩、最大剪力、桩顶位移和滑面水平位移,结果见表 3.由表 3 可以看出,整体模型中单排桩是否加锚索与中上部 h 型桩受力相关联.单排桩加锚索后,h 型桩桩顶和滑面处位移明显降低,最大弯矩和剪力也有下降趋势,这主要是受锚索加固的影响.而单排桩无锚索时,对比分析连梁与 h 型桩后排桩固/铰接的计算结果,铰接方式下,支护桩顶和滑面位移更大,h 型桩整体刚度降低.

表 3 整体模型计算结果

有无锚索	连接方式	桩位	桩的受力性能及变形			
			桩底最大弯矩/(kN·m)	桩底最大剪力/kN	桩顶最大位移/mm	滑面处水平位移/mm
单排桩无锚索	连梁与前排桩固接,与后排桩铰接	前排桩	4 499.63	1 562.09	10.67	6.73
		后排桩	4 603.27	1 925.79	10.66	4.34
	单排桩	3 259.48	1 500.87	25.10	6.15	
单排桩有锚索	连梁与前排桩固接,与后排桩固接	前排桩	4 435.41	1 561.50	10.44	6.61
		后排桩	4 616.22	1 949.88	10.36	4.25
	单排桩	3 252.60	1 504.71	24.60	6.00	
单排桩有锚索	连梁与前排桩固接,与后排桩铰接	前排桩	3 300.34	1 440.72	6.48	4.05
		后排桩	3 663.78	1 760.79	6.48	2.68
	单排桩	2 617.86	1 317.94	13.74	3.27	
单排桩有锚索	连梁与前排桩固接,与后排桩固接	前排桩	3 315.13	1 449.76	6.44	4.05
		后排桩	3 661.76	1 782.66	6.43	2.66
	单排桩	2 648.69	1 357.32	13.66	3.24	

单排桩的内力变化趋势如图 7 所示.由图 7 中可知,有锚索时单排桩的弯矩和剪力较无锚索时均有所减小.有锚索和无锚索的单排桩的最大弯矩均出现在滑面处,即出现在距桩底 4.0 m 处,最大弯矩出现的位置对应的剪力值发生突变.

单排桩锚索轴力变化趋势见图 8.由图 8 可知,在固铰、固固两种连接方式下,单排桩的锚索轴力变化趋势一致,且数值大小也一致,说明 h 型桩中连梁与桩的连接方式对单排桩锚索轴力基本无影响.

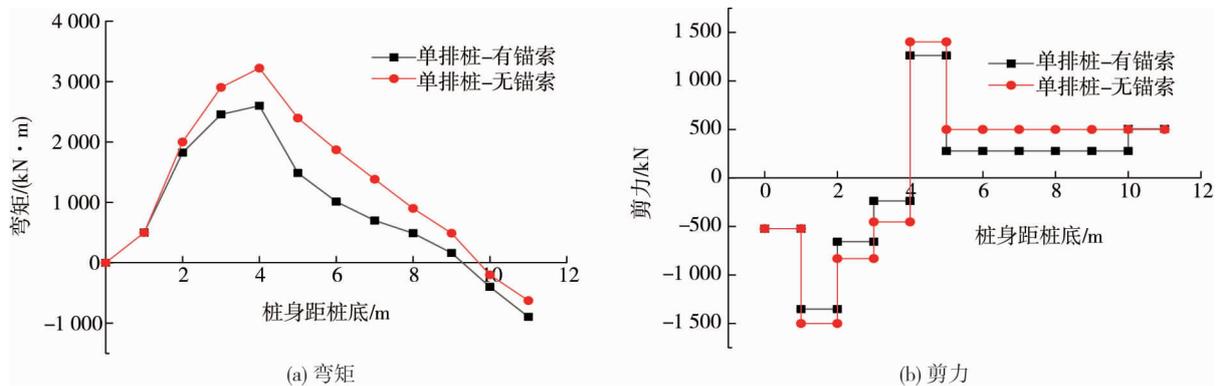


图 7 单排桩内力

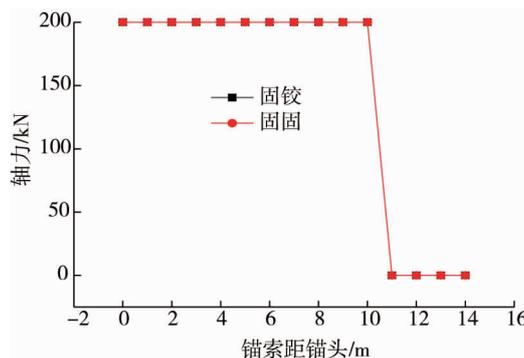


图 8 单排桩锚索轴力

h 型桩的前排桩、后排桩及连梁的受力情况见图 9~图 11。由图 9~图 11 可知:h 型桩前排桩的最大负弯矩出现点距桩底 12.5 m 左右,最大正弯矩出现在距桩底 2.5 m 左右,最大剪力出现在距桩底 7.5 m 左右,且桩端剪力不为 0;h 型桩后排桩的最大负弯矩出现在距桩底 15.0 m 左右,最大正弯矩出现在距桩底 5.0 m 左右,最大剪力出现在距桩底 10.0 m 左右,且桩端剪力为 0;h 型桩后排桩与连梁连接处剪力突变,连梁的反弯点距前排桩 2.0 m 左右。单排桩未施加锚索时,最大弯矩在连梁与前排桩的连接处,最小弯矩在距前排桩 4.0 m 左右;单排桩施加锚索后,最小弯矩处靠近后排桩方向,剪力为 0 的点在前排桩 3.0~6.0 m 位置处。由于连梁固/铰接方式对 h 型桩支护结构弯矩和剪力的影响远小于单排桩有无锚索对 h 型桩支护结构弯矩和剪力的影响,因此单排桩施加锚索有利于 h 型桩弯矩和剪力的调整。

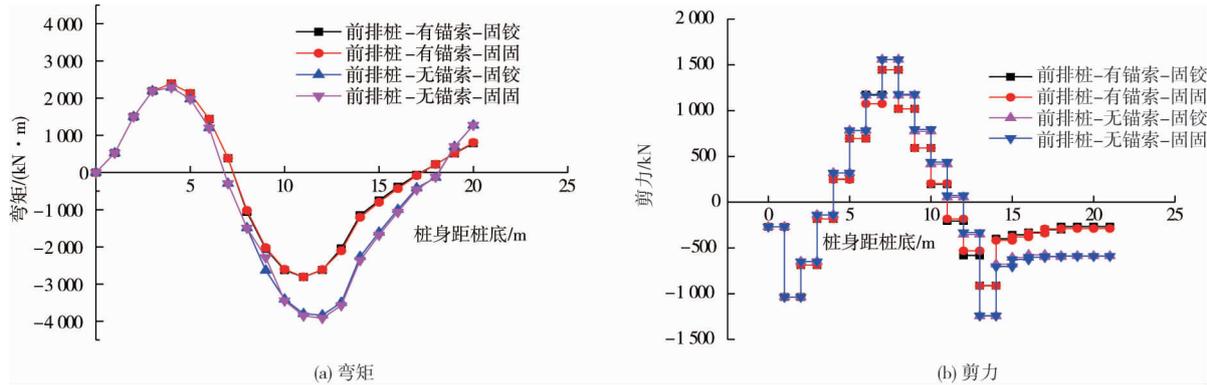


图 9 h 型桩前排桩

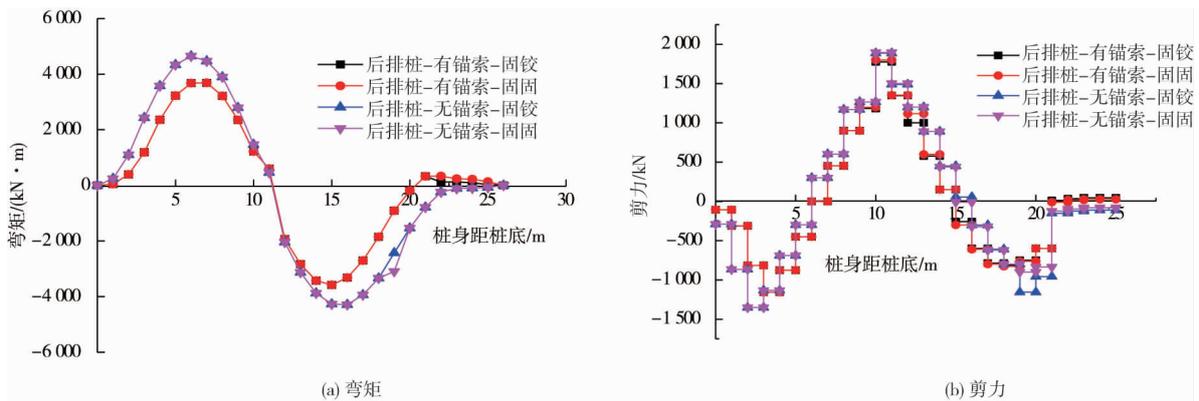


图 10 h 型桩后排桩

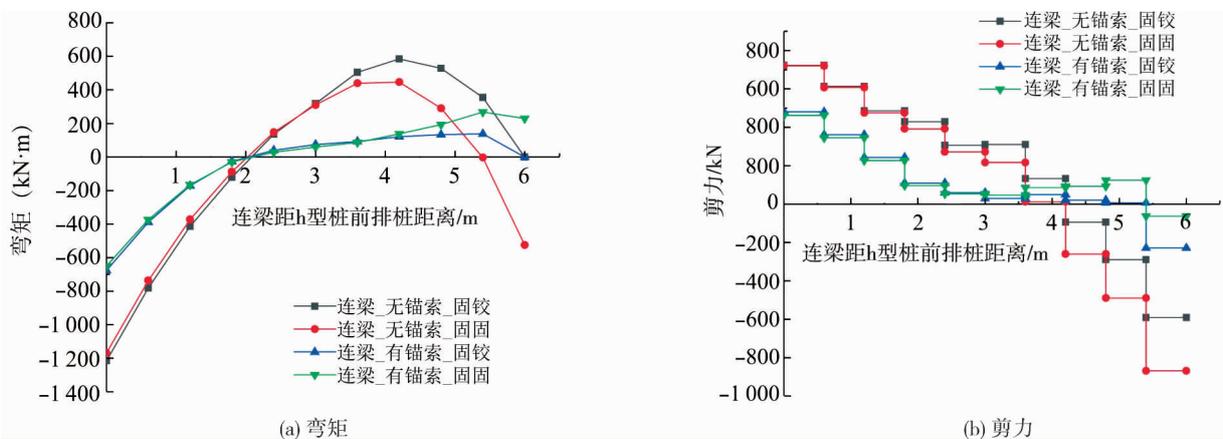


图 11 h 型桩连梁

整体模型的位移云图如 12 所示。在大型模型中细微调整对位移云图的影响很小,因此单排桩有无锚索、h 型桩与连梁的连接方式对位移云图的影响不大,故选取单排桩不加锚索且 h 型桩后排桩与连梁以固铰方式连接,有支护下的位移云图(图 12b)与不加任何支护时的位移云图(图 12a)进行对比,分析发现,

无支护时的最大位移为 11 cm, 支护后最大位移稳定在 2.4 cm 左右, 位移减小的幅度较大, 说明支护的加固效果明显.

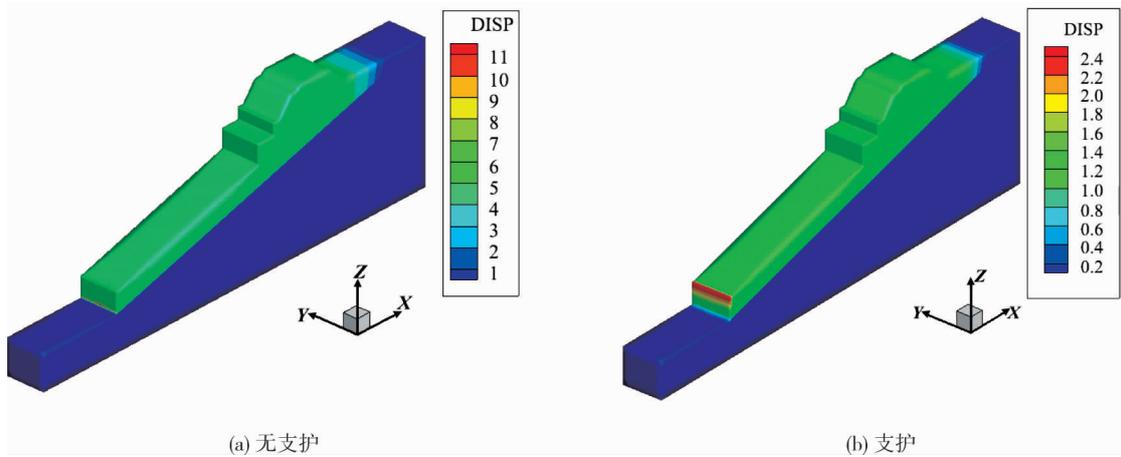


图 12 整体模型位移云图(单位:cm)

#### 4.2.2 局部模型

通过模拟计算得到局部模型中 h 型支护桩的最大弯矩、最大剪力、桩顶位移及滑面处水平位移如表 4 所示.由表 4 可以看出,连梁与前后排的 2 种连接方式中,以“固固”方式连接时,h 型桩前排桩和后排桩的最大弯矩、桩顶位移及滑面处水平位移明显减小.

表 4 局部模型计算分析结果

连接方式	桩位	桩的受力性能及变形			
		桩底最大弯矩/(kN·m)	桩底最大剪力/kN	桩顶最大位移/mm	滑面处水平位移/mm
连梁与前排桩固接, 与后排桩铰接	前排桩	21 173.92	6 022.29	53.60	38.90
	后排桩	8 831.73	2 607.39	64.45	17.63
连梁与前排桩固接, 与后排桩固接	前排桩	17 354.88	5 615.37	34.78	27.65
	后排桩	8 598.39	2 683.37	37.39	12.79

h 型桩前排桩、后排桩和连梁的受力结果见图 13~图 15,由图 13~图 15 可知:前排桩的最大负弯矩在距桩底 10.0 m 左右,最大正弯矩在桩顶,最大剪力在距桩底 7.5 m 左右,且桩端剪力不为 0;后排桩的最大负弯矩在距桩底 17.5~22.0 m,最大正弯矩在距桩底 5.0 m 左右,最大剪力在距桩底 10.0 m 左右,且桩端剪力在连梁固接时为 0,铰接时不为 0;h 型桩与连梁连接处弯矩和剪力突变;h 型桩与连梁固接时不存在反弯点,h 型桩与连梁铰接时反弯点距前排桩 1.0 m 左右;连梁固/铰接方式对 h 型桩支护结构中连梁的弯矩和剪力影响复杂,尤其是“固铰”方式连接时.

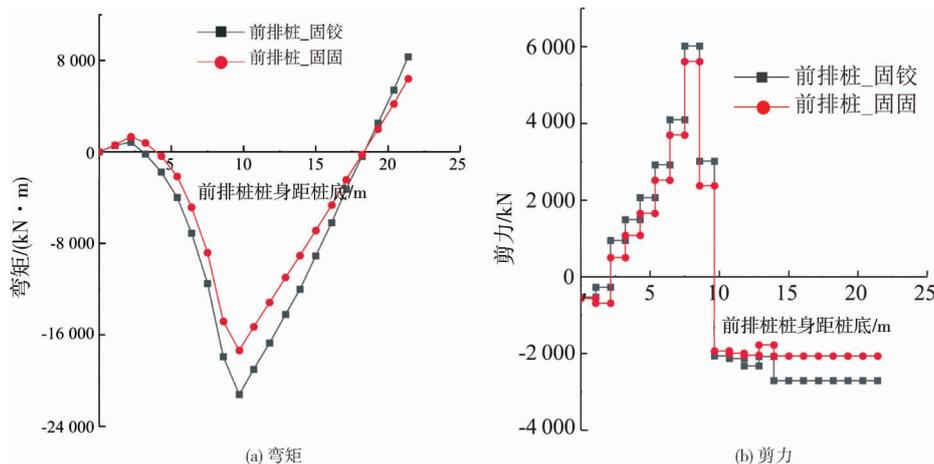


图 13 h 型桩前排桩

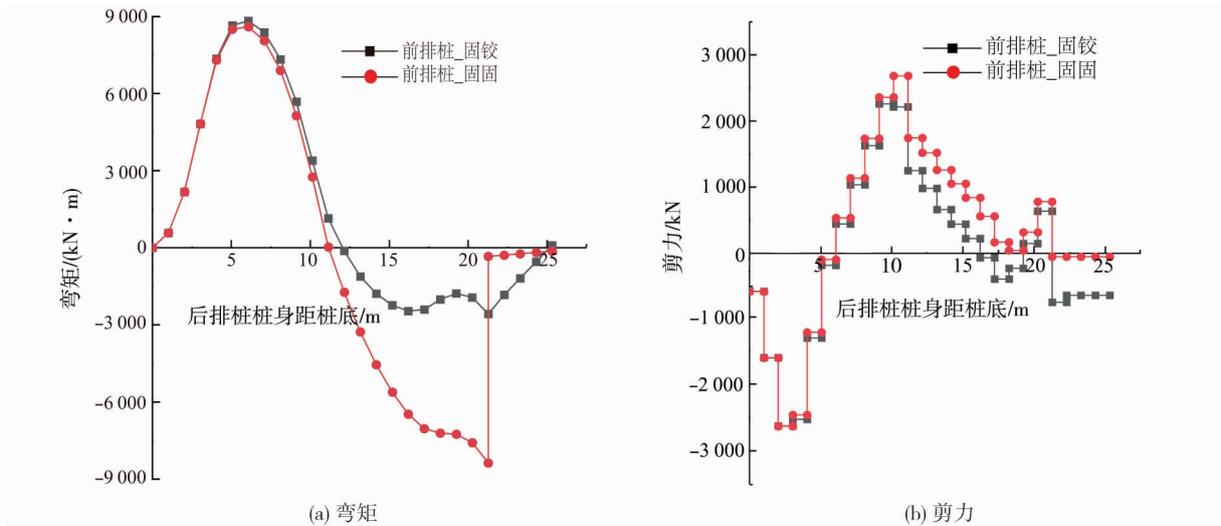


图 14 h 型桩后排桩

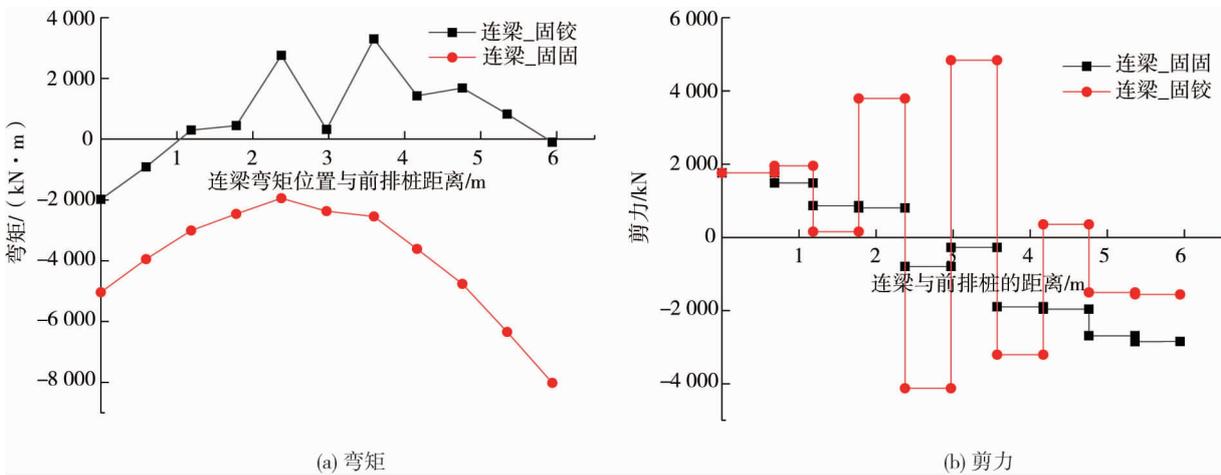


图 15 h 型桩连梁

局部模型的位移云图如图 16 所示.与整体模型相同,主要分析了单排桩有无锚索、h 型桩与连梁的连接方式,通过对比有支护情况下的位移云图(图 16b)与不加任何支护时的位移云图(图 16a)可知,局部模型无支护时的位移达到 20.0 cm,h 型桩支护且连梁与前后桩采用“固铰”方式连接时,最大位移稳定在 5.5 cm(图 16b),位移显著减小,说明支护效果明显.

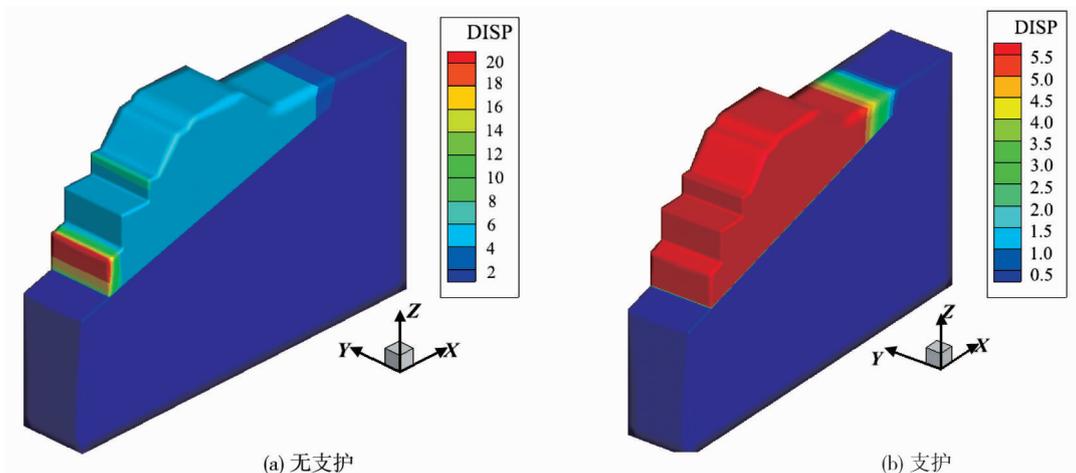


图 16 局部模型位移云图(单位:cm)

## 5 结论

1)大型顺层岩石滑坡在支护加固下,其下部临空面支护与中上部h型桩相关联,单排桩增设锚索对滑坡变形控制有明显作用.h型桩连梁与后排桩的连接方式对抗滑桩的支护效果具有加强作用,且固接效果强于铰接.

2)h型桩前后排桩与连梁的连接方式对h型桩支护结构的弯矩和剪力影响较小,单排桩施加锚索对h型桩前后排桩的弯矩和剪力影响均较大.

3)“单排桩(或锚拉桩)+h型抗滑桩”联合支护体系可以有效控制顺层岩石滑坡的变形,确保顺层滑坡支挡后处于稳定.

### 参考文献:

- [1] 陈权川.缓倾顺层岩质边坡抗滑键支护承载性能研究[D].贵阳:贵州大学,2021.
- [2] 肖世国,周德培,宋从军.岩石高边坡工程中埋入式抗滑桩的应用[J].岩土工程学报,2003,25(5):638-641.
- [3] 吴顺川.边坡工程[M].北京:冶金工业出版社,2017.
- [4] 刘新荣,梁宁慧,黄金国,等.抗滑桩在边坡工程中的研究进展及应用[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(1):56-62.
- [5] 郑颖人,赵尚毅.用有限元强度折减法求边(滑)坡支挡结构的内力[J].岩石力学与工程学报,2004,23(20):3552-3558.
- [6] 宋文婷.滑坡工程中截面抗滑桩承载能力研究[D].贵阳:贵州大学,2019.
- [7] 李兰,陈权川,邬忠虎,等.岩石高边坡加固中抗滑桩-内支撑联合支护的数值模拟研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(5):166-173.
- [8] 李寻昌,门玉明,张涛,等.锚杆抗滑桩破坏模式的试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(5):803-807.
- [9] 李寻昌,门玉明,翟越,等.锚杆抗滑桩受力特性的光弹试验研究[J].水文地质工程地质,2011,38(2):63-66.
- [10] 张涛,门玉明,石胜伟,等.锚杆抗滑桩与普通抗滑桩加固黄土滑坡的对比试验研究[J].长江科学院院报,2017,34(7):70-76.
- [11] 陈新泽.基于FLAC<sup>3D</sup>预应力锚拉桩作用机制和加固效果研究[J].岩土力学,2009,30(增刊2):499-504.
- [12] 吴润泽,周海清,胡源,等.基于FLAC<sup>3D</sup>的锚索抗滑桩滑坡推力分布规律研究[J].防灾减灾工程学报,2013,33(5):548-555.
- [13] 陈建峰,陈思贤,杜长城,等.抗滑桩-锚索框架组合结构受力机制研究[J].铁道工程学报,2021,38(5):7-12.
- [14] 周云涛,石胜伟,蔡强,等.预应力锚索修复变形抗滑桩模型试验与数值模拟分析[J].中国地质灾害与防治学报,2020,31(3):58-64.
- [15] 王成汤,王浩,张玉丰,等.锚索抗滑桩加固堆积型滑坡的受力特性模型试验与数值模拟研究[J].岩土力学,2020,41(10):3343-3354.