#### doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.319

引用格式: 尹东,王尚洁. 川南某换流站复杂堆积体边坡开挖变形机制及抗震加固效果评价[J]. 中国地质调查,2024, 11(4): 101-113. (Yin D, Wang S J. The excavation deformation mechanism and the seismic reinforcement effect evaluation of complex accumulation slope of a converter station in Southern Sichuan[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(4): 101-113.)

# 川南某换流站复杂堆积体边坡开挖变形机制及 抗震加固效果评价

## 尹东<sup>1</sup>,王尚洁<sup>2</sup>

(1. 国网四川电力建设分公司,四川 成都 610065; 2. 四川蜀能电力有限公司,四川 成都 610066)

**摘要:**西南山区广泛分布的复杂堆积体边坡开挖变形机制对换流站建设具有重大制约作用。为解决白鹤滩—江 苏某特高压输电工程换流站建设的紧迫需求,以拟建站址区堆积体边坡为研究对象,采用深部位移监测、原位试 验和 FLAC3D 数值模拟相结合的手段,对该堆积体边坡开挖变形机制及不同设计方案、不同桩参数条件下的抗震 加固效果进行评价,并分析其抗震加固机理。结果表明:①换流站"多成因类型土体"的复杂堆积体边坡开挖极 易产生变形,失稳模式为"牵引式蠕滑 - 拉裂";②开挖过程中形成的高陡临空面是导致此类堆积体边坡变形的 主控因素,堆积体边坡土体的高水敏性是短历时强降雨后坡体变形加剧的内在诱因;③经过圆形抗滑桩和矩形 抗滑桩两种边坡加固方案治理后,坡体变形量均显著降低,坡体内最大变形位置位于坡体中后部,堆积体边坡在 天然、地震工况下的稳定系数均符合设计要求,采用矩形抗滑桩对此类型堆积体边坡的治理具有更高的抗滑支挡 效益和经济效益;④地震工况下,抗滑桩桩顶变形最大,剪力和弯矩随着地震波的增加呈先增加后减小,最终达 到最大值的变化趋势,最大弯矩值位于抗滑桩桩身约 1/2 处,边坡的支挡设计应结合桩身剪力、弯矩等分布规律 进行。研究成果可为类似工程的设计和施工提供参考。

**关键词**: 多成因类型土体; 复杂堆积体边坡; 开挖变形机制; 抗滑桩优化设计; 抗震加固效果评价 中图分类号: P643.3 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095 – 8706(2024)04 – 0101 – 13

## 0 引言

随着我国基础设施建设的不断推进,人为切坡 开挖而引起的边坡失稳问题越来越突出,人类的工 程活动已经成为边坡失稳的主要诱发因素之 一<sup>[1-4]</sup>。国内外学者对于切坡开挖影响下的边坡 失稳机制已开展过诸多相关研究,并取得了较系统 的研究成果<sup>[5-10]</sup>。前人通过强降雨诱发缓倾堆积 体边坡失稳离心模型试验,认为在降雨过程中,孔 隙水向基覆界面逐渐汇聚,但是当降雨停止后,基 覆界面的孔隙水将逐渐消散<sup>[11-14]</sup>。总体来说,对 于堆积体边坡开挖变形机制研究较少,尤其是对 "复杂成因类型土体组合结构"堆积体边坡开挖变 形机制的研究,但其对重特大输电工程换流站站址 区安全建设极为重要,因此,迫切需要探明其开挖 变形机制。抗滑桩作为一种常见的边坡加固手段, 具有抗滑能力强、桩体可灵活布置、施工工艺简单、 污工工程量少等技术优势,在边坡防护工程中应用 广泛<sup>[15-32]</sup>。有研究以有限元强度折减法为理论基 础,得出了桩周土压力的分布规律与弯矩沿抗滑桩 桩长方向上的分布规律<sup>[25-33]</sup>。但对于复杂堆积体 桩参数的优化设计,尤其是抗震加固机理研究仍有 待进一步完善。

本文以四川省凉山州某换流站复杂堆积体边 坡为例,通过现场调查、深层位移监测和数值模拟

收稿日期: 2023-11-20;修订日期: 2024-07-05。

基金项目:国网四川电力建设分公司"白鹤滩—江苏±800千伏特高压直流输电工程(编号:BHT-JS2024TGYSD-001)"项目资助。 第一作者简介:尹东(1975—),男,高级工程师,主要从事电力工程建设及边坡稳定性评价研究工作。Email: cdutlar@163.com。

等手段,对"多成因类型土体"的复杂堆积体边坡失 稳机制进行深入研究。同时,借助有限差分元软 件,对不同抗滑桩加固方式下的堆积体坡体变形及 稳定性变化情况、加固效果以及经济合理性进行评 价,研究旨在为类似复杂堆积体边坡的加固设计提 供科学参考依据。

1 研究区工程概况

白鹤滩—江苏某特高压输电工程换流站拟建 站址区位于四川凉山州布拖县,站址区堆积体边坡 总体呈 SW—SE 方向,南侧较高,顶部高程约2 490 m, 站址场坪标高为2448~2454 m,高差为36~42 m (图1)。堆积体边坡开挖高度>10 m 的坡段约 720 m,最大高度约36 m,位于边坡南侧,开挖整体 坡度为16°~20°。2020年4月19日,换流站拟建 站址区西侧挖方区边坡开挖过程中,边坡出现明显 变形(图2)。据现场调查,该变形体边坡后缘发育 多条横向拉张裂缝,前缘坡脚产生隆起鼓胀变形,两 侧均发育剪切裂缝。变形发生后,立即对变形体后 缘削方减载,削方土体用于变形体前缘坡脚回填反 压,处理后变形体的变形速率明显降低,但深部位移 监测数据显示,该变形体仍存在蠕滑变形,尤其是在 坡脚回填土体开挖后,仍存在整体失稳的可能性。



Fig. 1 Topography of the site area of the proposed converter station and the engineering geological plan of the excavation slope



图 2 研究区开挖边坡变形特征 Fig. 2 Deformation characteristics of the excavation slope in the study area

研究区内地层主要由全新统冲洪积层黏土、上 更新统一全新统湖相沉积层黏土、下一中更新统湖 相沉积层黏土和下一中更新统湖相沉积层粉砂交 叠组成(图3),最终形成"多成因类型土体"的复杂 堆积体边坡。



1.下一中更新统湖相沉积层粉砂; 2.下一中更新统湖相沉积层黏 土; 3.上更新统一全新统湖相沉积层黏土; 4.全新统冲洪积层黏 土; 5.滑带; 6.深部位移监测点及深度,m; 7.钻孔编号及高程,m

## 图 3 换流站站址区堆积体边坡 BB' 剖面

# Fig. 3 *BB'* section of the accumulation slope in the converter station site area

2 换流站复杂堆积体边坡开挖失稳模式

## 2.1 边坡变形破坏特征

该堆积体边坡变形体于 2020 年 4 月 19 日

开始发现产生变形裂缝,其变形迹象主要表现为 边坡坡顶后缘发育一系列平行的横向拉张裂缝, 走向为125°,裂缝宽度基本为1~3 cm,延伸长 度最大可达30 m。边坡左右两侧均发育剪切裂 缝。坡体变形由前缘的局部变形逐渐向整体变 形发展,随着坡体前缘隆起范围的不断增大,变 形范围也逐渐由前向后、由中部向两侧扩展推 进,由此在边坡的两侧边界开始出现剪切错动 带,并产生侧翼剪张裂缝。边坡前缘因局部未完 全开挖,坡体在一级放坡前缘底部产生隆起鼓胀 变形,并由此形成横向的鼓胀裂缝。变形体整体 呈"圈椅"状,总体变形方向为354°,纵向长约 180 m,横向宽约260 m,平均厚度约15 m,总方 量约70 万 m<sup>3</sup>,属中型规模土质斜坡(图4)。

#### 2.2 滑面(带)范围的确定

变形体范围内设置 6 个深部位移监测点。监 测数据(图 5)表明:监测点 BN01 ~ BN03 在 8 d 内的累计位移量分别为 - 0.14 mm、5.58 mm 以 及 0.77 mm,深部位移曲线未见明显的突变; BN04 ~ BN06 监测点深部位移曲线则出现的明显 的突变,突变深度分别在 21 m、21.5 m 和 12.5 m 的位置, 8 d 累 计 位 移 量 分 别 为 7.74 mm、 11.88 mm和 7.47 mm。



(a) 地下水锈蚀钢筋

(b) 地下水渗出

(c) 坡体后缘拉张裂缝



(d) 坡体后缘拉张裂缝

(e) 坡体中部剪切裂缝图 4 换流站堆积体边坡变形特征

(f) 坡体前缘鼓胀裂缝





Fig. 5 The monitoring cumulative displacement-hole depth curve of the slope deep displacement in each point

根据钻孔 ZK4 和 ZK5 揭露,结合深部位移监测结果,认为该变形体潜在滑面上部穿过场地内的 全新统冲洪积层黏土和上更新统—全新统湖相沉 积层黏土,而底部位于上更新统—全新统湖相沉积 层黏土和中—下更新统湖相沉积层黏土的交界面, 潜在滑面埋深约 12.5~21.5 m。

#### 2.3 边坡开挖失稳过程

"多成因类型土体"的复杂堆积体边坡开挖改 变了斜坡原有的应力平衡条件,平衡状态被打破, 导致边坡发生变形失稳。堆积体边坡开挖后,主要 经历以下几个阶段:①坡体开挖初始阶段,产生应 力释放与重分布,由于该阶段开挖深度浅,整体变 形不大(图6(a));②坡体开挖应力增高阶段,开 挖段坡体内部一定深度范围内应力增高,坡表局部 产生剥落(图6(b));③坡体开挖局部变形阶段, 随着开挖的持续进行,坡脚局部出现剪应力集中,并 向坡体中后部发展,坡体后缘出现张拉裂缝,坡体中 应力的重新调整难以使坡体达到新的平衡状态,开 挖坡面局部产生滑塌,临空面发生明显变形,并向坡 体内部发展(图6(c));④坡体开挖整体变形阶段, 降雨入渗导致堆积体土体含水率增大,在继续开挖 后坡体应力重分布的过程中,坡脚前缘产生剪切应 力带,并发生隆起现象,带动坡体后部土体产生整 体运动,坡体周缘产生多组张拉裂缝(图6(d))。





3 边坡加固效果

#### 3.1 加固方案设计

根据该换流站堆积体边坡变形体发育特征,并 参考类似的滑坡治理工程经验,设计了两种类型的 抗滑桩支护方案:方案一为"坡体中部埋入式矩形 抗滑桩+坡脚矩形双排抗滑桩",坡体中部抗滑桩 截面为2.0 m×2.5 m,桩长 22 m,坡脚双排抗滑桩 截面为2.0 m×2.5 m,桩长 35 m;方案二为"坡体 中部埋入式圆形抗滑桩+坡脚圆形双排抗滑桩", 坡中部抗滑桩截面直径为1.8 m,桩长 22 m,坡脚 双排抗滑桩截面直径为1.8 m, 桩长35 m。

## 3.2 计算模型及边界条件

为验证加固治理方案的有效性,对加固前后的坡体变形情况进行数值计算。采用典型剖面 建立数值计算模型,共划分为8251个单元体, 8456个节点(图7)。抗滑桩采用一维桩单元, 桩采用线弹性模型,岩土体采用土体硬化模型。 两种类型抗滑桩均采用线弹性模型:矩形抗滑 桩弹性模量 E = 34 GPa, 泊松比  $\mu = 0.23$ ; 圆形 抗滑桩弹性模量E = 30 GPa, 泊松比  $\mu = 0.20$ 。 模型底部为固定边界, 顶部为自由边界, 其他面 限制法向位移。



#### 3.3 加固模拟计算结果

加固前坡体变形主要集中在坡脚部分,最大 位移量位于一级马道以下,最大值可达到 55.4 cm,坡体后缘位移量约15 cm(图8),这与现 场调查及深部位移监测结果所揭示的坡体前缘位 移量大、后缘位移量小的结果基本一致。加固前 坡体内部最大剪应变集中在已存在的滑带范围 内,于坡体后缘以及坡脚处剪应变值最大,坡体中 部稍小。边坡变形主要表现为坡体前缘变形带动 后部土体下滑,为典型的"牵引式蠕滑 – 拉裂"滑 动模式。



大剪应变增量位于抗滑桩桩周土体内部,并在桩底

集中,其中坡体中部的抗滑桩周围剪应变增量较

大,加固方案一和方案二下最大剪应变增量分别为

1.99 和1.49。经过抗滑桩加固后,坡体内部已无

明显的剪应变增量带,滑带土体位移量和剪应变增

量明显降低,抗滑桩也无明显位移。

图 8 边坡加固前数值模拟计算结果



经过两种加固方案治理后,从变形体的位移云 图(图9)可以看出,滑动变形均出现在坡体中部, 最大变形位于抗滑桩后坡表。方案一治理后坡体 变形量最大约2.9 cm,方案二治理后坡体变形量最 大约2.1 cm。两种加固方案下变形体坡脚均无明 显位移,变形体保持基本稳定。变形体在加固后最



Fig. 9 Numerical simulation results after slope reinforcement

经过抗滑桩加固后,堆积体边坡位移主要集中在 坡体中后部,进而挤压坡体中部抗滑桩产生位移,通过 其变形云图可以发现,两种方案下中部抗滑桩的变形 主要在顶端,桩底没有明显的位移。坡脚双排桩则在 桩底处产生较大的变形,并且在扭矩作用下使得双排



桩顶部向反方向位移,双排桩前桩位移量要显著大于 后桩(图10)。两种方案下的抗滑桩虽未深入到下伏 基岩,但均发挥了良好的嵌固作用,有效地限制了土体 位移。对比两种加固方案,矩形抗滑桩位移量要低于 圆形桩,阻止上部土体滑动的效果更好。



位移/mm

(a) 坡体中部抗滑桩位移云图及位移量

(b) 坡脚双排桩位移云图及位移量

图 10 不同支护方案下支护结构位移云图和位移曲线

Fig. 10 Displacement cloud map and displacement curve of the supporting structure under different support schemes

4 双排抗滑桩参数对边坡加固效果的影响

为进一步明确矩形双排抗滑桩参数对堆积体 边坡加固效果的影响,本节仍然通过数值模拟中强 度折减的方法,对抗滑桩不同排距、桩截面尺寸、桩 长、桩间距对边坡加固效果的影响评价进行深入探 究。边坡土体折减模型参数如下(表1)。

(1)双排抗滑桩排距。将双排抗滑桩排距分别 设定为±1倍桩径、±2倍桩径、±3倍桩径、±4倍 桩径、±5倍桩径、±6倍桩径,分析其对堆积体边 坡的加固效果,基准桩排距左侧为负,右侧为正。 经建模计算,堆积体边坡安全系数随桩排距变化曲 线结果表明,当第二排抗滑桩布置在-5倍桩径处, 加固效果最好,安全系数为1.765(图11(a))。

(2)双排抗滑桩桩径。基于前文确定的抗滑桩 排距,即在-5倍桩径的基础上进行桩径的优化,本 节选用桩截面尺寸分别为2.0m×2.5m,每级增减 0.1m。经建模计算,堆积体边坡安全系数随桩截 面尺寸变化曲线结果表明,堆积体边坡安全系数随桩截 面尺寸变化曲线结果表明,堆积体边坡安全系数在 一定范围内随着桩截面尺寸的增加而逐渐增大,当 桩截面尺寸为2.0m×3.0m时,安全系数为 1.436,采用此方案加固堆积体边坡可以保持边坡 处于稳定状态(图11(b))。 表1 换流站堆积体边坡土体折减模型参数

### Tab. 1 Parameters of the accumulation slope soil reduction model in the converter station

	参数				
土体类型	折减亥粉	折减摩擦	折减黏聚力/		
	川枫尔奴	角/(°)	kPa		
	0.50	4.78°	2.61		
全新统冲洪积层黏	0.75	7.16°	3.91		
土	1.00	9.55°	5.21		
	1.25	11.94°	6.51		
	0.50	6.09°	3.91		
上更新统—全新统	0.75	9.13°	5.87		
湖相沉积层黏土	1.00	12.17°	7.82		
	1.25	15.21°	9.78		
	0.50	9.17°	5.27		
下—中更新统湖相	0.75	13.76°	7.90		
沉积层黏土	1.00	18.34°	10.53		
	1.25	22.93°	13.16		
	0.50	3.06°	1.05		
下—中更新统湖相	0.75	4.59°	1.58		
沉积层粉砂	1.00	6.12°	2.10		
	1.25	$7.65^{\circ}$	2.63		

(3)双排抗滑桩桩长。基于前文所述,在桩截面 尺寸为2.0m×3.0m的基础上,对桩长进行优化,减 少桩的长度,分析的桩长分别为31~40m,每级减少 1.0m。经建模计算,堆积体边坡安全系数随桩长变 化曲线(图11(c))表明,当桩长为31m时,堆积体边 坡的安全系数为1.352,边坡处于稳定状态。

(4)双排抗滑桩间距。基于前文所述桩参数,桩

坡安全系数随桩间距的变化曲线(图 11(d))表明,当

桩间距减少至4.0 m时,安全系数为1.41,或者当桩间

双排桩抗震加固机理,进行了堆积体边坡的动

力计算<sup>[35-39]</sup>。模型岩体参数见表 2,选用弹塑 性模型,抗滑桩长为 35 m。FLAC3D 中 2 个结

构节点之间的直线段表示桩的单元组件,桩可

以由多个结构单元组合形成,抗滑桩结构参数

距增加至少7.0 m时,也满足要求。

排距为-5倍桩径,桩截面尺寸为2.0m×3.0m,桩长 为31m,在此将双排抗滑桩桩间距设定为3~9m,由 6m增减桩间距,每级0.5m。经建模计算,堆积体边

1.44 1.8 1.42 1.7 1.40 1.6 1.38 1.5 1.36 銰 WK 1.34 安全 1.32 1.3 1.30 1.2 1.28 1.26 1.1 1.24 2.0 10+2.2 10 2.0 m+2.4 m ··· 2.0 m+2.5 m 2.0117.811 1. 2.0 m+2.9 m 2.0m<sup>2</sup>,0m 2.011+2.011 ,0m<sup>+2,3m</sup> 2.010+2.1 2,010+2,6 -6 -4 -2 0 2 4 6 2.010+2. 双排抗滑桩排距/m 双排抗滑桩截面尺寸 (a) 安全系数随桩排距的变化规律 (b) 安全系数随抗滑桩截面尺寸的变化规律 1.70 1.55 1.65 1.50 1.60 1.45 1.40 系数 1.35 安全 1.45 1.30 1.40 1.25 1.35 1.20 1.15 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0 8.5 9.0 1.30 31 30 32 33 35 37 38 40 34 36 39 双排抗滑桩桩间距/m 双排抗滑桩桩长/m (c) 安全系数随抗滑桩桩长的变化规律 (d) 安全系数随抗滑桩桩间距变化规律

图 11 双排抗滑桩参数对堆积体安全系数的影响规律

Fig. 11 Influence law of double - row anti - slide piles parameters on the safety factor of the accumulation body

5 地震工况下双排抗滑桩抗震加固 机理

#### 5.1 计算方案

为明确地震工况下换流站复杂堆积体边坡



见表3。

#### Tab.2 Rock mass parameters of the complex accumulation slope in the converter station

上体光刑	参数					
工体失望	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/kPa	密度/(g・cm <sup>-3</sup> )
全新统冲洪积层黏土	0.113	0.096	5.21	9.55°	1.38	1.693
上更新统—全新统湖相沉积层黏土	0.354	0.173	7.82	12.17°	1.74	1.709
中一下更新统湖相沉积层黏土	0.444	0.251	10.53	18.34°	2.23	1.825
中一下更新统湖相沉积层粉砂	0.057	0.032	2.10	6.12°	0.00	1.802

	表 3	双排抗滑桩结构参数	

Tab. 3	Structure	parameters	of the	double - row	anti – slide	pile
--------	-----------	------------	--------	--------------	--------------	------

		-		-	
密度/(g・cm <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	截面积/m <sup>2</sup>	Y 轴惯性纲	毛/m <sup>4</sup> 极惯性矩/m <sup>4</sup>
2.68	34	0.23	5	1.28	2.57
切向耦合弹簧刚度/(GPa・	m <sup>-1</sup> ) 切向耦合弹簧黍	は聚力/(GPa・m <sup>-2</sup> )	法向耦合弹簧刚	度/(GPa・m <sup>-1</sup> )	法向耦合弾簧黏聚力/(GPa・m <sup>-2</sup> )
12 000		12	1	2	12 000

#### 5.2 地震工况设计

地震工况下的抗震加固机理研究关键在于地 震波的选取,本文选取汶川地震波前10s的加速度 时程曲线,对堆积体边坡模型进行动力加载,模型 边界条件设定为自由场,阻尼比的设置取临界阻尼 比 *D* 为 0.05,局部阻尼 α, 为 0.157 1。

#### 5.3 边坡动力响应

地震条件下堆积体边坡水平方向位移对比: 支护前,水平方向最大位移约为98.71 cm;支护 后,水平方向最大位移减小至12.17 cm。通过堆积 体边坡塑性区位置对比,支护后的坡表、坡体前缘 等部位的塑性区面积明显减小,且支护后堆积体边 坡的局部塑性区消失。堆积体边坡最大主应力对 比:支护前的最大主应力主要集中于坡体内部;支 护后坡面的主应力明显减小。总体而言,抗滑桩支 护后堆积体边坡的变形减小,稳定性提升,边坡抗 震性得到提高。

受地震效应的影响,堆积体边坡的坡顶处易形成地震动峰值加速度(seismic peak ground acceleration,PGA)的放大效应,导致堆积体边坡坡顶处产 生应力集中,更易变形。通过对堆积体边坡监测点 PGA放大系数的监测(图 12(a))可以得知:支护 前,随着坡度的增加,PGA放大系数逐渐降低;支 护后,堆积体边坡坡体整体 PGA放大系数有所改 善。说明抗滑桩能有效降低其附近岩土体的加速 度,提升堆积体边坡抗震性能。





研究对双排抗滑桩的内力进行了分析,以施加 地震荷载前的剪力作为起点,且只考虑动力影响效 应。由抗滑桩监测点处剪力动力的变化规律(图 12 (b))可以看出,地震波输入1.0 s之后,剪力由负变 正,且迅速增大至 681.83 kN。当地震作用1~4 s 期 间,剪力又逐渐从正值变为负值,且波动变化,这是 由于反向地震波加速度正在对冲抵消引起的。4 s 之后剪力逐渐累计增加,一直到地震作用结束为止, 剪力最大值达到约1031.93 kN。根据剪力数据分析,可以获知地震作用不仅能引起抗滑桩剪力正负方向的波动,而且能够使剪力最终达到最大正值。

研究对双排抗滑桩的弯矩进行了监测(图 12(c))。当地震波作用 0~1 s时,监测点的弯 矩在 0~-10 kN/m 附近波动,且有略微增大为 正值的趋势;当地震波作用 1~4 s时,弯矩正值 逐渐增加,而后逐渐降低为负值;当地震波作用 4 s 后,弯矩从负值到正值逐渐增大,最大值达到 48.96 kN/m。

此外,还对地震作用后双排抗滑桩的桩身弯矩随桩体埋深的变化规律(图12(d))进行了深入探讨。随着桩体埋深的增加,弯矩呈"右凸"曲线形态,从桩体顶部到底部,弯矩沿桩身先逐渐增加,而后逐渐减少,弯矩的最大值出现在埋深约15m处,为87.21 kN/m,该位置处应为抗滑桩受弯最危险断面,有必要时,可以在此处增设受弯钢筋,可防止抗滑桩受弯破坏。

#### 5.4 双排抗滑桩抗震加固机理探讨

地震波在"多成因类型土体"的复杂堆积体边 坡中传播极易产生反射和折射现象,同时,由于不 同地层对地震波的差异化响应,导致坡体出现拉 伸、变形甚至失稳等现象。与此同时,地震波在经 过堆积体内部不同土层的分界面时,也会产生反 射、折射等现象,进一步加剧边坡的不稳定状况。 由地震工况下堆积体边坡地震响应数值模拟结果 分析可知: 双排抗滑桩支护前, 坡顶的水平位移和 大小主应力均较大,塑性变形区域也较大,PGA的 放大系数也大于1.25: 双排抗滑桩支护后,各测点 的各项指标均显著降低,堆积体边坡的整体稳定性 明显提高。这是因为抗滑桩具有挤实和刚度支撑 作用,能明显改善周围堆积体土体的力学性质。当 地震波以面波的形式传播时,部分将直接到达抗滑 桩桩身,另一部分则是先到达抗滑桩桩间的土体, 再传播到桩身,最终通过抗滑桩桩身将地震波消散 于锚固段的岩土体中。

由此可知,抗滑桩的剪力与弯矩,均是随着地 震波的增加呈先增加后减小,最终达最大值的变化 趋势。因此,在抗滑桩支护时,需要加强对桩身、桩 顶等位置的箍筋布置,最大弯矩值位于抗滑桩桩身 约1/2处,在最大弯矩处增设抗弯钢筋,使得抗滑 桩不易产生失效破坏。尤其需要注意,在地震作用 下,要对抗滑桩采取保守设计,建议取最大弯矩的 1.2~1.3倍进行计算,同时,也应结合桩身内力的 分布规律以及在剪力较大部位增设箍筋,增强抗剪 性能及提升抗震效果,合理增大安全系数。

## 6 结论

(1)白鹤滩—江苏某特高压输电工程换流站堆 积体为"多成因类型土体"的复杂堆积体边坡,换流 站堆积体边坡已存在连续滑带,深度约12.5~ 21.5 m。开挖过程中形成的高陡临空面是导致此类 堆积体边坡变形的主控因素,换流站堆积体边坡土体 的高水敏性是短历时强降雨后坡体变形加剧的内在诱 因,堆积体边坡失稳模式为"牵引式蠕滑-拉裂"。

(2)矩形抗滑桩对堆积体边坡的加固效果优于 圆形抗滑桩,具有更高的抗滑支挡效益和经济效 益。双排抗滑桩最优加固参数为,第二排抗滑桩布 置在-5倍桩径处,桩截面尺寸为2.0m×3.0m, 当桩长约为31m,双排抗滑桩间距约为5.0m时, 加固效果最好。

(3)地震工况下,抗滑桩桩顶变形最大,剪力和 弯矩随着地震波的增加呈先增加后减小,最终达到 最大值的变化趋势,最大弯矩值位于抗滑桩桩身约 1/2处。边坡的支挡设计应结合桩身剪力、弯矩等 分布规律,在剪力较大部位增设箍筋,增强抗剪性 能及提升堆积体边坡抗震效果,合理增大安全系 数,确保工程安全。

#### 参考文献(References):

 [1] 廖红建,韩波,殷建华,等.人工开挖边坡的长期稳定性分析
 与土的强度参数确定[J].岩土工程学报,2002,24(5):560-564.

Liao H J, Han B, Yin J H, et al. The long term stability of cut slope and determination of effective strength index of soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5):560 – 564.

[2] 胡明鉴,汪稔,张平仓.蒋家沟流域松散砾石土斜坡滑坡频发 原因与试验模拟[J].岩石力学与工程学报,2002,21(12): 1831-1834.

Hu M J, Wang R, Zhang P C. Cause of frequent occurrence of gravel slope landslide and experiment simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (12): 1831 – 1834.

- [3] Kwon S, Wilson J W. Deformation mechanism of the underground excavations at the WIPP site[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, 32(2):101-122.
- [4] Suh M, Koo M H, Choi S W, et al. Instability of an underground ancient tomb due to excavation and its relationship to the temperature and ground water[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 22(2):269 – 283.
- [5] 房浩,李媛,杨旭东,等. 2010 2015 年全国地质灾害发育分布 特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2018,29(5):1-6.
  Fang H,Li Y,Yang X D, et al. Distribution characters of geo - hazards in China during the period of 2010 - 2015[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2018,29(5):1-6.
- $\left[\,6\,\right]$   $\,$  Malan D F. Manuel Rocha medal recipient simulating the time –

dependent behaviour of excavations in hard rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2002, 35(4):225-254.

- [7] 冯君,周德培,李安洪.顺层岩质边坡开挖稳定性研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(9):1474-1478.
  Feng J,Zhou D P,Li A H. Research on stability of rock bedded slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(9):1474-1478.
- [8] 文奎,王根,晏长根.地下水与边坡开挖对滑坡稳定性影响的 分析[J].铁道建筑,2014(2):80-82,118.
   Wen K, Wang G, Yan C G. Analysis of influence of groundwater and slope excavation on landslide stability[J]. Railway Engineering,2014(2):80-82,118.
- [9] 侯晓坤,李同录,李萍.开挖黄土高边坡的应力路径及变形破坏机制分析[J].岩土力学,2014,35(S2):548-555.
  Hou X K,Li T L,Li P. Analysis of stress path and deformation failure mechanism of high cutting loess slope[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(S2):548-555.
- [10] 钟雨奕,苏海,潘皇宋.成仁高速红层分布区开挖边坡变形特征及机制[J].煤田地质与勘探,2017,45(2):96-100.
  Zhong Y Y, Su H, Pan H S. Deformation characteristics and mechanism of an excavation slope in red bed area of Chengren highway[J]. Coal Geology & Exploration,2017,45(2):96-100.
- [11] 王维早,许强,郑光,等. 强降雨诱发缓倾堆积层边坡失稳离 心模型试验研究[J]. 岩土力学,2016,37(1):87-95.
  Wang W Z, Xu Q, Zheng G, et al. Centrifugal model tests on sliding failure of gentle debris slope under rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(1):87-95.
- [12] 吴庆华,王珂.细/粗二元结构边坡角度与岩性特征对其阻隔 降雨入渗的影响规律研究[J/OL].地球科学:1-10.(2023-09-12).https://www.doc88.com/p-97647644202007.html. Wu Q H, Wang K. Effect of angle and lithology on infiltrating to fine/coarse dual - structure slope under rainfall condition[J/OL]. Earth Sciences:1-10.(2023-09-12).https:// www.doc88.com/p-97647644202007.html.
- [13] 程强,黄绍槟,周永江.公路深挖路堑边坡工程施工监测与动态设计[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1335-1340.
  Cheng Q, Huang S B, Zhou Y J. Construction monitor and dynamic design of highway deep road cut slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(8):1335-1340.
- [14] 董治军,徐聪,施季红.某换流站边坡变形机理及应急治理设计[J]. 土工基础,2015,29(1):8-12.
  Dong Z J,Xu C,Shi J H. Mitigation of the excessive deformation

of a slope for the electricity transformation station [J]. Soil Engineering and Foundation, 2015, 29(1): 8 - 12.

- [15] 徐聪,胡新丽,沙玉,等.填方边坡变形机制研究[J].安全与 环境工程,2015,22(1):39-44.
  Xu C,Hu X L,Sha Y, et al. Study on deformation mechanism of a fill slope [J]. Safety and Environmental Engineering, 2015,
- [16] 杨明钰,陈红旗,祁小博,等.基于可靠度理论的地震滑坡运动距离预测模型[J].中国地质调查,2023,10(3):102-109.

22(1):39-44.

Yang M Y, Chen H Q, Qi X B, et al. Prediction model for the landslide movement distance induced by earthquake based on the reliability theory[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(3): 102 - 109.

Tianchigong landslide in Tongzi county of Guizhou Province [J]. Geological Survey of China,2023,10(2):87 – 93.

- [18] 刘腾,任蕊,匡野,等.四川省北川县崩滑灾害孕灾地质条件 分析[J].中国地质调查,2022,9(6):59-66.
  Liu T, Ren R, Kuang Y, et al. Analysis on the disaster - pregnancy geological conditions of collapse and landslide in Beichuan County, Sichuan Province [J]. Geological Survey of China, 2022, 9(6):59-66.
- [19] 涂义亮,陈晓虎,王星驰,等. 基于连续 离散耦合强度折减 法的边坡稳定性分析[J/OL]. 工程力学:1 - 12. http://engineeringmechanics. cn/cn/article/doi/10. 6052/j. issn. 1000 -4750. 2022. 12. 1047.

Tu Y L, Chen X H, Wang X C, et al. Slope stability analysis by strength reduction method upon continuous – discrete coupling method [J/OL]. Engineering Mechanics: 1 – 12. http://engineeringmechanics. cn/cn/article/doi/10. 6052/j. issn. 1000 – 4750. 2022. 12. 1047.

- [20] 魏云杰,王俊豪,胡爱国,等. 澜沧江拉金神谷滑坡成灾机理 分析[J]. 中国地质调查,2022,9(4):19-26.
  Wei Y J, Wang J H, Hu A G, et al. Analysis of formation mechanism of Lajinshengu landslide in Lancang River[J]. Geological Survey of China,2022,9(4):19-26.
- [21] 田凯,姚品品,铁永波,等. 地下水渗流场对库区滑坡稳定性 影响的数值模拟——以白马库区羊角滩滑坡为例[J]. 中国 地质调查,2022,9(4):74-81.

Tian K, Yao P P, Tie Y B, et al. Numerical simulation study of the influence of groundwater seepage field on the stability of landslide in reservoir: A case study in Yangjiaotan landslide of Baimaku area[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(4): 74-81.

 [22] 胡庆安,夏永旭,赵子胜.抗滑桩滑坡治理工程数值模拟研究[J].长安大学学报:建筑与环境科学版,2003,20(4): 8-12.

Hu Q A, Xia Y X, Zhao Z S. Finite element numerical simulation of slipping slope treatment by anti – slipping piles [J]. Journal of Chang'an University: Architecture and Environmental Science Edition, 2003, 20(4):8–12.

 [23] 朱安龙,张胤,戴妙林,等. 基于 FLAC3D 数值模拟的让压锚索 边坡加固机理研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(4):713 -719.

Zhu A L, Zhang Y, Dai M L, et al. Reinforcement mechanism of slopes with yielding anchor cables based on numerical simulation of FLAC3D [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017,39(4):713-719.

- [24] 唐晓松,刘明维,叶海林. 基于 ABAQUS 的抗滑桩三维有限元 分析[J].地下空间与工程学报,2010,6(S2);1614-1618. Tang X S,Liu M W,Ye H L.3 - dimension FEM analysis on antislide piles based on ABAQUS [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2010,6(S2);1614-1618.
- [25] 戴自航,徐祥. 边坡抗滑桩设计计算的三维有限元法[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(12);2572-2578.
  Dai Z H,Xu X. 3D finite element method for design computations of anti slide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(12);2572-2578.
- [26] 肖洪伟,黄兴,肖兵. 输电线路含碎石粘性土边坡滑坡特性及 预防措施[J]. 电力建设,2007,28(10):64-66,70.
  Xiao H W, Huang X, Xiao B. Land slide characteristics of gravel containing cohesive soil side slopes and its preventive measures [J].
  Electric Power Construction,2007,28(10):64-66,70.
- [27] 唐勇,余鑫,孙智慧. 基于 FLAC3D 的抗滑桩抗震加固机理及 模式研究[J]. 水力发电,2019,45(7):33-37. Tang Y,Yu X,Sun Z H. Study on seismic reinforcement mechanism and model of anti - slide piles based on FLAC3D[J]. Water Power,2019,45(7):33-37.
- [28] 陈富坚,黄世斌,包惠明.抗滑桩加固工程的体系可靠度及其 计算模型[J].工程抗震与加固改造,2009,31(6):15-18.
  Chen F J, Huang S B, Bao H M. The system reliability of antislide pile and their calculating models[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2009,31(6):15-18.
- [29] 冼进业,陈建林,李长冬,等.复合多层顺倾岩质边坡最优锚

固角研究[J]. 人民长江,2023,54(10):221-227,242.

Xian J Y, Chen J L, Li C D, et al. Optimal anchor angle of anchor in composite multi – layer bedding rock slope using unified strength theory[J]. Yangtze River, 2023, 54(10):221–227, 242.

- [30] 王存智,张炜,李晨冬,等. 基于 GIS 和层次分析法的沙溪流域滑 坡地质灾害易发性评价[J]. 中国地质调查,2022,9(5);51-60.
  Wang C Z, Zhang W, Li C D, et al. Susceptibility evaluation of landslide hazards of Shaxi river basin based on GIS and AHP[J].
  Geological Survey of China,2019,9(5):51-60.
- [31] 黄艳琴,李为乐,许洲,等. 国道 213 汶川 松潘段滑坡隐患遥感 识别与易发性评价[J]. 中国地质调查,2022,9(4):121-133.
  Huang Y Q, Li W L, Xu Z, et al. Remote sensing identification and susceptibility evaluation of landslide hazards in Wenchuan Songpan section of National Highway 213[J]. Geological Survey of China,2022,9(4):121-133.
- [32] 周毅,丁明涛,黄涛,等. 芦山县滑坡灾害影响因素的空间分 异性[J].中国地质调查,2022,9(4):45-55. Zhou Y,Ding M T,Huang T, et al. Spatial heterogeneity of influencing factors of landslide disasters in Lushan county[J]. Geological Survey of China,2022,9(4):45-55.
- [33] 杨峰,薛桂澄,柳长柱,等.海南省澄迈县福山镇高铁站前道路土体滑坡的 GEO5 数值模拟研究[J].中国地质调查,2020, 7(4):104-111.

Yang F, Xue G C, Liu C Z, et al. GEO5 numerical simulation research on the soil landslide in the front road of Fushan high – speed railway station in Chengmai county of Hainan province[J]. Geological Survey of China,2020,7(4):104 – 111.

## The excavation deformation mechanism and the seismic reinforcement effect evaluation of complex accumulation slope of a converter station in Southern Sichuan

YIN Dong<sup>1</sup>, WANG Shangjie<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Construction Company, Sichuan Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Shuneng Electric Power Co., Ltd., Sichuan Chengdu 610066, China)

Abstract: The excavation deformation mechanism of the widely distributed complex accumulation slopes in the southwestern mountainous areas has a significant restriction effect on the construction of converter stations. To address the urgent needs of the converter station construction in Baihetan – Jiangsu UHV transmission project, the authors in this paper took the accumulation slope in the proposed station site as the research object, and adopted the deep displacement monitoring, in – situ test and FLAC3D numerical simulation methods to evaluale the excavation deformation mechanism of this accumulation slope and the seismic reinforcement effect under different design schemes and different pile parameters. Then the seismic reinforcement mechanism is analyzed. The results are as follows. ① The excavation of the complex accumulative slope of "multi – genetic type soil" in the converter station is prone to deformation, and the instability mode is "traction creep and tension failure mode". ② The high and steep free face formed in the excavation process is the main factor leading to the accumulation slope deformation, and the high – water sensitivity of the accumulation slope soil is the internal inducement of the slope deformation.

ation aggravation after short duration heavy rainfall. ③ Under the two slope reinforcement schemes of circular anti – slide pile and rectangular anti – slide pile, the deformation amount of the slope body is significantly reduced, and the maximum deformation position in the slope body is located in the middle and back of the slope body. The stability coefficient of the accumulation body slope under natural and seismic conditions meets the design requirements. The use of rectangular anti – slide pile in the treatment of the accumulation body slope has higher anti – slide retaining and economic benefits. ④ The top deformation of the anti – slide pile is the largest under seismic condition, and the shear force and bending moment increase first and then decrease with the increase of seismic wave, and finally reach the maximum change trend. The maximum bending moment value is about 1/2 of the anti – slide pile body. The retaining design of slope should be combined with the distribution law of pile shear force and bending moment. The research results of this paper could provide some references for the design and construction of similar projects.

**Keywords**: multi – genetic type soil; complex accumulation slope; excavation deformation mechanism; anti – slide pile optimization design; evaluation of seismic reinforcement effect

(责任编辑:刘丹)