

# 抗滑桩加固边坡物理模型试验研究进展

陈自炫<sup>1\*#</sup>, 李冲<sup>1</sup>, 赵玉凯<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

<sup>2</sup>中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年11月10日; 录用日期: 2024年12月6日; 发布日期: 2024年12月11日

## 摘要

目的: 为了分析抗滑桩加固边坡的研究现状, 厘清抗滑桩加固边坡的作用机制及效果, 文章综述了国内外关于抗滑桩加固边坡物理模型试验的文献。方法: 首先, 在静力、振动、离心受力作用下阐述了抗滑桩加固边坡模型试验的过程, 并分析了不同类型抗滑桩在不同岩土体边坡中的作用机制及受力情况; 其次, 对比分析三类模型试验的优缺点; 最后, 探究了锚索抗滑桩组合体系在边坡支护中的作用机制及优点。结果: 结果表明: 抗滑桩加固边坡稳定性高, 效果好, 锚索抗滑桩组合体系能减小桩身弯矩。结论: 三类模型试验均有明显缺点, 需要加强模型试验中相似材料的选取、施加荷载途径的优化、监测仪器的精准度, 以保证更准确地还原边坡变形破坏的实际过程, 获取更有参考意义的实验结论和规律。

## 关键词

抗滑桩支护边坡, 物理模型实验, 地震响应, 边坡破坏

# Research Progress of Physical Model Test on Slope Reinforcement by Anti-Slide Pile

Zixuan Chen<sup>1\*#</sup>, Chong Li<sup>1</sup>, Yukai Zhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

<sup>2</sup>Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang Guizhou

Received: Nov. 10<sup>th</sup>, 2024; accepted: Dec. 6<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 11<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

**Purposes:** In order to analyze the research status of slope reinforcement by anti-slide pile and clarify

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 陈自炫, 李冲, 赵玉凯. 抗滑桩加固边坡物理模型试验研究进展[J]. 土木工程, 2024, 13(12): 2207-2214.

DOI: 10.12677/hjce.2024.1312243

the mechanism and effect of slope reinforcement by anti-slide pile, the literature on the physical model test of slope reinforcement by anti-slide pile at home and abroad is reviewed. Method: Firstly, the model test process of slope reinforcement by anti-slide piles under static, vibration, and centrifugal forces is described, and the action mechanism and force of different types of anti-slide piles in different rock and soil slopes are analyzed. Secondly, the advantages and disadvantages of the three model tests are compared and analyzed. Finally, the action mechanism and advantages of the combined system of anchor cable anti-slide pile in slope support are discussed. Findings: The results show that anti-slide pile reinforcement has high stability and good effect, and the combination system of anchor cable anti-slide pile can reduce the pile bending moment. Conclusions: The three types of model tests have obvious shortcomings. It is necessary to strengthen the selection of similar materials in the model test, the optimization of loading channels, and the accuracy of monitoring instruments so as to ensure that the actual process of slope deformation and failure can be more accurately restored, and more meaningful experimental conclusions and rules can be obtained.

## Keywords

Anti-Slide Pile Supporting Slope, Physical Model Test, Seismic Response, Slope Failure

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

20 世纪 80 年代以后, 抗滑桩因侧向弯矩刚度大、施工简便、抗滑效果好, 在滑坡治理工程中得到广泛应用[1]。针对抗滑桩加固边坡稳定性的研究以理论计算、数值模拟和模型试验为主, 其中物理模型试验可以精确地控制边坡的边界条件、抗滑桩和岩土体的材料特性, 因此在研究桩-土相互作用时具有针对性和目的性, 同时物理模型试验也具有时效性, 可以研究其稳定性随时间的变化规律[2]。边坡的破坏因素并不是单一的, 是多种作用耦合导致滑坡破坏, 例如降雨、地震、人工开挖及堆填等等, 且近年来, 针对不同工况的边坡, 抗滑桩的类型也多元化, 例如单排桩、双排桩、h 型桩、承台式桩、组合板抗滑桩等, 所以对于不同工况, 不同类型抗滑桩加固边坡的作用机制及受力情况的研究对工程施工有重大指导意义。因此, 本文系统地阐述了抗滑桩加固边坡模型实验的过程, 在不同加载方式下的作用机制、效果及不同类型抗滑桩在不同岩土体边坡中的加固效果和受力情况, 对比分析了三类模型试验的优缺点, 并探究锚索抗滑桩体系的作用机制及优点, 希望对读者了解抗滑桩加固边坡模型试验有所帮助。

## 2. 抗滑桩支护边坡物理模型实验

边坡在长期及突发自然条件和人工工程扰动情况下会进入失稳状态, 如: 降雨、侵蚀剥削、地震及人工开挖堆填。抗滑桩凭借其适用范围广, 抗滑能力优, 安全性高等优点在边坡支护工程中被广泛应用。但其抗弯能力弱, 成本高等缺点引起大量学者对抗滑桩支护边坡的安全性、抗滑桩类型、受力特征、经济性及优化等方面进行研究。其研究多通过室内物理模型实验的方法, 主要包括静力模型实验、振动台模型试验和离心模型实验。

### 2.1. 静力模型试验

静力模型试验是研究抗滑桩支护边坡稳定性研究中最经典、最经济的实验方法之一。依据相似理论, 按照一定的相似比建立等比例缩小的边坡物理模型, 并在 1 g 的重力场下施加外荷载, 通过观察边坡的变形破坏形式、抗滑桩的受力变形过程, 进而分析抗滑桩加固边坡的受力与作用机制, 为后续抗滑桩支

护设计及优化提供实验依据。学者对抗滑桩支护边坡的静力模型试验参数设置见表 1。

在大型和特大型滑坡下,双排抗滑桩相对于单排抗滑桩能提供更大的阻滑力,且比较大截面的单排抗滑桩更加经济,但在结构受力方面,双排抗滑桩相对于单排抗滑桩更为复杂,前桩、后桩、桩架及土之间相互作用问题使得技术推广困难,但因其刚度大整体稳定性好等优点引起学者进行展开研究。其中在双排抗滑桩中,有无连梁、连梁形式等对桩周土压力分布和桩身弯矩分布都有影响。李阳等[3]采用分层填筑法搭建边坡模型,通过千斤顶进行竖向分级加载(加载分别为 6, 8, 10, 12 kPa)直至抗滑桩破坏,观察对比单排桩、无连梁双排抗滑桩、平行连梁抗滑桩和梅花连梁抗滑桩的桩周土压力分布和桩身弯矩分布规律,得出实验结论为:相对于单排桩,双排桩能提高将近 1 倍的抗滑力;单排抗滑桩桩身弯矩呈三角形分布,最大弯矩位于滑面附近,双排抗滑桩桩身弯矩呈 S 型分布,后排抗滑桩桩身弯矩最大值大于前排抗滑桩,最大弯矩位于距滑面 1/4 桩长附近。景彬余等[4]对红砂岩风化土路基进行物理模型试验,得出单排抗滑桩相关结论与李阳等相似。实验结果表明:对于单排抗滑桩,桩前土压力随埋深呈三角形分布,桩后土压力两端大中部小;桩身弯矩在达到受荷段长度 2/5 处开始随埋深增大,最大值出现在受荷段底端附近。

**Table 1.** Static model test of anti-slide pile supporting slope

**表 1.** 抗滑桩支护边坡静力模型实验

作者	边坡			抗滑桩			相似比	试验方法
	土质	坡高/m	坡度	材料	锚固深度/m	类型		
李阳等	黄土	—	—	石膏铝棒	—	双排桩	1:20	竖向加载
景彬余等	红砂岩	2	1:0.93	空心钢管	滑面下 0.6	单排桩	1:20	竖向加载
欧孝夺等	黏土	0.52	1:0.7	不锈钢空心管	滑面下 0.18	h 型桩	1:20	横向加载
时步炯	黄土	0.9	1:0.75	有机玻璃板	—	组合板	—	横向加载
邓明园等	细砂	1.5	—	空心碳钢管	滑面下 0.5	承台桩	1:13	横向加载

h 型抗滑桩是由双排抗滑桩发展而来,受力复杂,连梁提高了结构刚度,增加了抗滑承载力,不同桩间距、不同连梁位置及不同锚固深度对其抗滑效果和经济性均有较大影响,然而目前对 h 型抗滑桩的桩-土共同作用机制仍未有确切定论,在设计优化方面也是由具体工程而定。欧孝夺等[5]采用分层填筑法搭建边坡模型,通过千斤顶进行横向分级加载(加载分 7 级,分别为 11.82, 15.46, 19.11, 22.75, 26.39, 30.04 和 33.68 kPa),观察不同桩间距(分别为 6d 和 8d, d=25 mm, 为模型实验桩径),不同连梁位置(连梁距桩底位置,分别为 0.5 H, 0.7 H, H 为后排桩长度)时桩的受弯情况,分析研究了抗滑桩支护边坡的安全性和机制。实验结果表明:1, 2, 3 桩的前排桩最大弯矩出现在连梁稍下位置,最小弯矩分布于滑动面以下,弯矩形状为反 S 型,后排桩最小弯矩出现于连梁附近位置;最优桩排距为 5 倍桩径;最优嵌固深度为前排桩长度的 3/8。

组合板式复合抗滑桩由钢筋混凝土板拼接而成,与土体形成空间复合结构共同承受滑坡推力。此类抗滑桩能避免传统抗滑桩大量打孔、挖土、配筋等所造成的人力财力的损耗等缺陷。时步炯等[6]对门字形、工字型 2 种组合板抗滑桩做了模型试验,通过千斤顶分级施加横向力,每级加载 1.2 kN,加载间隔 30 min,对比分析素土边坡、门字形组合板抗滑桩加固边坡、工字型组合板抗滑桩加固边坡的桩顶位移、土压力和组合板抗滑桩内力,得出结论如下:组合板抗滑桩加固边坡提高了边坡的弹性变形过程和屈服极限,破坏承载力最大提高 33.3%,工字型组合板抗滑桩比门字形的破坏承载力高 20%;工字型与门字形极限状态桩后土压力峰值之比为 1:1.40~1:1.58,内外板峰值弯矩最大比为 1:4.54 和 1:3.82,工字型结构更加可靠安全。

传统承台式抗滑桩是用顶部承台连接多个桩基础，形成整体共同抗滑。与双排桩、h型桩都属于框架式结构，所以在复杂地质条件下，将面临小间距多排桩的桩孔相互干扰，排桩与系梁联结点难以保证连续性等问题。邓明园等[7]在高路堤工程案例中对传统承台式抗滑桩进行改良，既保障桩身整体浇筑连续性，又发挥了承台的卸荷作用，并采用分层填筑边坡，千斤顶分级加载，在桩顶位移达到受荷桩长度的1%时，终止的方法进行物理模型实验。通过观察桩身弯矩实验结果，发现基础桩顶端弯矩较传统截面抗滑桩减小56%~63%，改善了嵌固段受力的情况，证明了此改良具有突出的力学性能优越性。

## 2.2. 振动台模型实验

地震是引起边坡破坏的重要因素之一，其特点是滑坡速度快、范围广、规模大，有震史和地震频发区域需更加重视边坡的支护设计。因此，国内外学者利用振动台能够真实模拟地震效果的特点，对抗滑桩支护边坡的抗震效果进行了振动台模型试验，主要包括抗滑桩加固边坡动力破坏过程、动力响应规律、桩身应变和桩身弯矩变化规律等方面，抗滑桩支护边坡的振动台模型试验参数设置见表2。

**Table 2.** Shaking table model test of anti-slide pile supporting slope  
**表 2.** 抗滑桩支护边坡振动台模型实验

作者	边坡			抗滑桩			相似比	加速度 g
	土质	坡高/m	坡度	材料	桩间距/m	类型		
Zhang 等	砾石	1.44	46°	混凝土	—	双排桩	1:70	0.2~0.6
WU 等	砂土	1.14	30°	石膏粉	0.75	双排桩	1:50	0.1~0.4
Lai 等	相似材料	1.8	—	水泥	0.25	长-短桩	1:20	0.1~1.0
姚爱军等	相似材料	0.685	—	松木	—	悬臂桩	1:20	0.1~0.4

以高地应力、高地震烈度的城兰高铁沿线的桥梁基础碎石滑坡为工程原型，采用分层填筑堆坡，重力浇筑成桩，输入0.2、0.4、0.6g的EI Centro地震波进行大型振动台模型实验，通过监测碎石滑坡加速度、动土压力、应变分布，阐述抗滑桩加固桥梁基础碎石边坡的抗震机理。如[8]所示，发现后排抗滑桩加固桥梁基础可以减小滑坡推力对桥梁基础的影响，保持桥梁基础后方土压力均匀分布，减轻地震作用；动土压力在桥梁基础顶部达到峰值，然后沿深度减小；在桥梁基础和碎石滑坡的抗震加固设计中，充分考虑地震对倾斜松散堆积体的共振耦合作用，对碎石边坡应采取预加固措施(如高压注浆和喷锚)。

为了针对了解抗滑桩加固边坡在地震作用下的破坏特性及桩前桩后动土压力分布规律，开展了振动台模型试验。试验结果发现[9]，边坡整体变形机制源于土体中的张拉破坏；边坡后部平台为地震沉陷引起，峰值加速度比与相对桩高呈正相关；前排桩动土压力呈倒“K”形分布，后排桩动土压力呈“S”形分布。Lai等[10]通过对长-短复合抗滑桩的振动台模型试验，发现地震作用下桩基边坡的破坏是一个渐进的过程：裂缝首先出现在边坡顶部，此处桩的支撑作用较弱；随着输入地震作用的增加，裂缝沿边坡向下发展；由于长-短抗滑复合桩的支护作用，裂缝的传递路径发生了变化，裂缝沿复合桩顶部发展，最终导致上部破坏。

为研究悬臂抗滑桩加固边坡的地震响应和抗滑桩桩身弯矩分布规律，在抗滑桩桩身高度不同位置分别布置应变计，将加速度最大峰值控制在0.1g、0.2g、0.3g、0.4g并分别进行振动台模型试验。实验结果表明：无抗滑桩加固自然边坡在0.1g加速度的地震波作用下被破坏；抗滑桩加固边坡在地震波加速度不超过0.3g时，边坡处于稳定状态，超过0.3g时，两侧斜坡出现裂缝，少量土体下滑，但达到0.4g时被破坏，证明了抗滑桩加固边坡的作用明显；抗滑桩的嵌固端与悬臂部分分界面随着地震波的输入应变

急剧增大，而悬臂部分随着高度增加应变减小，反映了悬臂抗滑桩弯矩的“凸”形分布规律[11]。

### 2.3. 离心模型实验

离心模型试验是利用离心机所产生的离心力模拟重力作用，解决了物理模型试验中难以模拟自重应力场的难题，所得实验数据更加符合工程实际。针对抗滑桩加固边坡离心模型试验的研究，主要包括模拟抗滑桩支护边坡在荷载作用下抗滑机制、水位变化对抗滑桩支护边坡受力稳定性影响及抗滑桩支护边坡在地震作用下的稳定性等方面，抗滑桩支护边坡的离心模型试验参数设置见表 3。

**Table 3.** Centrifugal model text of anti-slide pile supporting slope

**表 3.** 抗滑桩支护边坡离心模型实验

作者	边坡			抗滑桩			相似比	试验方法
	土质	坡高/m	坡度/°	材料	桩间距/m	类型		
Zhang 等	土石混合	0.512	30	空心铝管	0.15	h 型桩	1:50	重力加荷
Zhang 等	砂岩	0.49	—	钢管	0.2	多排桩	1:200	重力加荷
孙志亮等	灰岩砾石	0.49	40	铝合金管	0.12	单排桩	1:50	振动加载

Zhang 等[12]通过离心模型试验，在 50 g 恒定离心下监测了 h 型抗滑桩在荷载作用下前后桩应力分布和桩侧土压力分布，分析了桩弯矩的变化规律并用数值模拟了最优桩间距、锚固深度和横梁刚度。试验结果如下：后桩弯矩分布呈“w”型，在 1/4 桩长处达到峰值，前桩弯矩分布呈“v”型，在深度 6/7 桩长处达到峰值，对比后桩与前桩之间的弯矩，可以发现 h 型抗滑桩的完整性由于横梁的存在而大大提高，且前后桩的应力分布和变形规律相同；离心机加速度不影响弯矩的分布形状，但随离心机加速度的增大而增大；桩间距、锚固深度和横梁刚度的推荐值分别为 4.0d、2.0d 和 2.0EI，其中 d 和 EI 分别为 h 型抗滑桩的直径和抗弯刚度。

在水库岸边，以三峡水库为例，因库水位的升降而引起的浮力诱发型和渗流诱发型滑坡屡见不鲜。其主要原因是库水位的升高，导致孔隙水压力迅速上升，有效应力迅速下降和库水位快速下降期间 PWP 不易释放，产生高的向外渗透力。为了探明抗滑桩加固边坡在库水位变化过程中的加固效果，Zhang 等[13]以塔平滑坡为原型对未加固边坡和抗滑桩加固边坡进行了离心模型试验，将离心机逐渐加速到 100g 下持续运行，再通过顶部和底部水箱将模型水位从 18~33 cm，33~18 cm 进行演化，对比分析实验结果发现由于库水位下降导致的下坡驱动力的快速增加显著加剧了施加在抗滑桩上的侧土压力，反之，抗滑桩对水库滑坡具有相当的加固作用，将整体破坏转化为位于抗滑桩上方和前方的局部变形和破坏；在抗滑桩中观察到的力学传递行为显示出与库水位波动相关的渐进式变化，随着库水位的升高，抗滑桩之间的力学状态表现出越来越大的不平衡。

孙志亮等[14]为研究抗滑桩加固上覆堆积体—下伏基岩二元结构边坡的抗震机制，利用离心机，输入 4 级加速度的 El Centro 波进行抗滑桩加固前后的离心模型试验，监测抗滑桩上静、动弯矩分布。实验结果表明：抗滑桩一方面加固了上覆堆积滑体，另一方面在坡体内产生了地震波的反射叠加效应，使得边坡水平响应加速度放大系数，出现了桩前增大桩后减小的现象；抗滑桩动力响应弯矩变化幅值明显大于地震作用后的静弯矩增量，且静弯矩与动弯矩变化幅值的分布均在基岩面附近达到峰值，易在基岩面附近造成抗滑桩的破坏，类似工况下抗滑桩的抗震配筋设计应充分考虑这一特点。

### 3. 模型试验对比分析

现如今，国内外学者针对抗滑桩加固边坡的物理模型实验研究成果颇多，研究手段也逐渐多样化并

逐步改进以获得更加准确的实验数据。针对模型试验方法的优缺点对比分析如表 4 所示。

**Table 4.** Comparative analysis of model test  
**表 4.** 模型试验对比分析

试验方法	实验设备	加载方式	优点	缺点
静力模型实验	千斤顶	横向、纵向加载在承压板上施加均布推力	操作简单、控制变量简便、实验材料可重复利用、监测仪器测量结果准确可靠	受限于单一的加载方式,无法准确无误还原工程岩土体的受力情况,对实验数据准确性还有一定的影响且无法模拟动荷载及地震滑坡
振动台模型试验	振动台	模拟地震动力,施加地震力	能够有效模拟不同级别的振动及地震波,揭示边坡及抗滑桩地震响应的一定规律	难以解决自重应力场问题,且在振动台模型试验过程中对测量仪器的测量结果精确性有较大影响,需要纳入结果分析考虑范围之内
离心模型实验	离心机	高速转动,模拟自重应力场	解决模型试验中难以模拟自重应力场的难题,获取数据更加准确	设备昂贵,受限于离心机的大小,模型尺寸十分有限

#### 4. 锚索抗滑桩模型试验

锚索抗滑桩是由普通抗滑桩和锚索组合而成的一种新型支挡结构,由于该结构能够有效改善桩的受力状态,大幅减小桩长和桩身截面尺寸,从而降低工程造价,因而近年来在库区滑坡治理中得到了广泛的应用。学者对锚索抗滑桩模型试验研究参数设置见表 5。

**Table 5.** Model test of anchor cable anti-slide pile  
**表 5.** 锚索抗滑桩模型试验

作者	边坡			抗滑桩		锚索		相似比	加载工具
	土质	坡高/m	坡度/ $^{\circ}$	材料	桩间距/m	材料	角度/ $^{\circ}$		
王成汤等	相似材料	1.2	10	聚乙烯	0.08	钢绞线	30	1:50	千斤顶
周云涛等	黏性土	2.0	30	混凝土	1	钢绞线	10	1:1	千斤顶
王贵华	砂、泥岩	0.8	—	聚氨酯	0.16	聚氨酯	20 30 40	1:100	千斤顶

分级推力荷载作用下锚索抗滑桩加固滑坡的室内物理模型试验,分析了模型滑坡从加载到破坏过程中桩顶位移、桩身前后土压力、桩身弯矩、锚索轴力的变化规律,研究锚索抗滑桩加固堆积型滑坡的受力特性及其联合抗滑机制,发现桩顶位移、桩身弯矩及锚索轴力随推力荷载的变化曲线均呈现明显的三阶段特征,对应的桩-锚荷载分担比呈先增大、后减小和最后趋于稳定的规律,锚索的设置能够有效限制桩身变形[15]。

为了验证锚索预应力修复加固变形抗滑桩机制,进行大型野外模型试验,实验结果为:采用锚索预应力修复加固变形抗滑桩存在预应力上限值,此上限值随滑坡推力的增加三次抛物线降低,随桩顶位移的增大负指数降低,随距桩顶位置增加近似线性降低;在滑坡推力作用下,桩后土压力为正三角形分布,在预应力锚索修复荷载作用下,呈现为折线型分布。研究成果对于变形抗滑桩的修复加固工程设计具有指导意义[16]。

针对软硬相间地层条件下锚索抗滑桩的受力与变形特征,开展了锚索抗滑桩加固滑坡的物理模型试验,对比研究了布锚方式对桩-锚受力与变形的影响规律,试验结果为:在滑坡-锚索抗滑桩体系中,桩身各点位移和滑体深部位移均随桩身深度的增加而减小,滑体后部位移速率大于中部,且滑体位移速率大于桩身位移速率;单锚点抗滑桩的桩-锚推力分担比经历了 4 个阶段的变化,趋于稳定时,桩-锚

推力分担比约为 9:1, 锚索拉力作用下桩身弯矩呈“S”型分布, 正负弯矩非对称; 锚固角度越大, 锚索拉力的增速越大, 不同锚固角度对桩身内力的影响主要体现在受荷段; 多锚点抗滑桩结构的锚索分担更多的推力, 与单锚点抗滑桩相比, 双锚点与三锚点抗滑桩的最大桩身弯矩分别减小了 22.41% 和 40.55% [17]。

预应力锚索抗滑桩支护结构具有节省占地、结构稳定、形式美观、同时可以取得良好的支护与加固效果的特点[18], 在边坡加固治理工程中得到了广泛应用。预应力锚索是预应力锚索抗滑桩的重要组成部分, 但其布设角度对预应力锚索抗滑桩抗震性能的影响尚不清晰, 设计并完成了考虑锚索水平布设和倾斜布设的两组离心振动台模型试验, 对比分析了不同布锚角度时坡体地震变形和加速度放大特征以及桩-锚结构的受力特性以及不同布锚角度时锚索锚固点附近坡体均存在加速度异常放大现象, 放大系数随输入地震动强度增加而增大; 倾斜布锚时坡体沉降幅度和加速度放大程度明显减小; 倾斜布锚有利于改善桩身的地震受力, 桩身峰值动弯矩和动土压力相比水平布锚时显著降低; 倾斜布锚可以有效减缓锚索内力的增长, 降低桩-锚-坡体体系地震失效的风险[19]。此外对各排锚索施加相同的预应力值不合理, 存在锚索框架和抗滑桩顺序破坏的风险, 应根据各排锚索随桩顶位移的变化规律, 设置差异化的预应力值, 使锚索框架和抗滑桩两种支护形式同时达到最佳支护效果; 靠近桩顶位置, 应设置较低的预应力值, 远离桩顶位置, 应设置较高的预应力值。提出基于变形协调条件下的锚索预应力值计算方法, 得到的锚索预应力值与数值模拟计算结果误差在 6% 以内, 满足设计精度要求[20]。

## 5. 结论与展望

抗滑桩加固边坡稳定性的静力、振动、离心实验已日渐成熟, 观测的实验数据, 总结的现象规律为工程实践提供可靠的理论依据。

1) 静力模型试验可模拟不同岩土体边坡和不同类型抗滑桩, 试验操作简单, 实验数据可靠, 但由于千斤顶等加载方式, 无法真正跟现实工况的滑坡推力相符合, 应力无法对应传播到滑坡前沿, 对边坡破坏过程及抗滑桩弯矩的研究有一定影响, 也无法模拟动荷载对滑坡变形失稳的影响效应; 振动台模型实验虽然能模拟地震工况, 但对各类传感器的精度要求较高; 离心机能补足模型试验无法还原自重应力场的缺陷, 但价格昂贵, 模型尺寸受限。

2) 抗滑桩加固边坡的破坏形式、作用机制等因不同工况而异, 虽能揭示一定规律, 但也要依据工程实际。比如滑坡岩土体类型、嵌固端基岩种类、滑坡规模等对抗滑桩加固效果均有影响。总的来说, 抗滑桩加固边坡模型试验是分析工程实际的重要手段之一, 同时也需要重视模型相似材料的选取, 实施路径的方法要更接近实际工程情况, 才能获取更加准确的实验数据和规律, 对工程实践的指导更有意义。

## 参考文献

- [1] 王恭先, 徐峻龄, 刘光代, 等. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道科学出版社, 2004.
- [2] 宋英杰, 陈文强, 李长冬. 抗滑桩加固后边坡稳定性评价与桩位优化研究进展[J]. 安全与环境工程, 2016, 23(5): 43-49+54.
- [3] 李阳, 南亚林, 贺海超, 张鹏. 黄土双排抗滑桩模型试验[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1315-1322.
- [4] 景彬余, 温树杰. 抗滑桩加固红砂岩风化土路基边坡模型试验[J]. 桂林理工大学学报, 2022, 42(1): 109-114.
- [5] 欧孝夺, 唐迎春, 崔伟, 李结全, 潘鑫. 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.
- [6] 时步炯, 郑静, 吕昌明, 安孟康. 组合板抗滑桩抗滑特性模型试验研究[J]. 铁道建筑, 2017, 57(10): 96-100.
- [7] 邓明园, 杨泉, 肖世国, 李安洪. 高路堤承台式抗滑桩力学行为的模型试验[J]. 应用力学学报, 2024.
- [8] Zhang, C., Jiang, G., Lei, D., Asghar, A., Su, L. and Wang, Z. (2020) Large-Scale Shaking Table Test on Seismic Behaviour

- of Anti-Slide Pile-Reinforced Bridge Foundation and Gravel Landslide: A Case Study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **80**, 1303-1316. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-02006-3>
- [9] Wu, H. and Pai, L. (2022) Shaking Table Test for Reinforcement of Soil Slope with Multiple Sliding Surfaces by Reinforced Double-Row Anti-Slide Piles. *Journal of Mountain Science*, **19**, 1419-1436. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-7046-2>
- [10] Lai, J., Liu, Y., Liu, Y. and Xu, J.B. (2024) Experimental Study on Seismic Characteristics of Slope Supported by Long-Short Composite Anti-Slide Piles. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 15137. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65848-x>
- [11] 姚爱军, 史高平, 梅超. 悬臂抗滑桩加固边坡地震动力响应模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(S2): 53-58.
- [12] Zhang, H., Xing, H., Xue, D. and Tannant, D. (2023) Centrifuge and Numerical Modeling of H-Type Anti-Slide Pile Reinforced Soil-Rock Mixture Slope. *Journal of Mountain Science*, **20**, 1441-1457. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7446-y>
- [13] Zhang, C., Yin, Y., Yan, H., Zhu, S., Zhang, M. and Wang, L. (2024) Centrifuge Modeling of Unreinforced and Multi-Row Stabilizing Piles Reinforced Landslides Subjected to Reservoir Water Level Fluctuation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **16**, 1600-1614. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.09.025>
- [14] 孙志亮, 孔令伟, 郭爱国. 下伏基岩堆积体边坡抗滑桩加固前后地震响应特征离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(6): 1413-1423.
- [15] 王成汤, 王浩, 张玉丰, 覃卫民, 闵弘. 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.
- [16] 周云涛, 石胜伟, 蔡强, 李乾坤, 王林峰. 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.
- [17] 王贵华, 李长冬, 贺鑫, 张永权, 姚文敏, 宋成彬, 张华伟. 不同布锚方式对锚索抗滑桩受力与变形影响的物理模型试验研究[J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 262-277+315.
- [18] 桑伟宁, 江山. 锚索抗滑桩在高边坡支护中的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(10): 60-61+63.
- [19] 王宇, 郑桐, 孙锐, 齐文浩, 李领贵, 程阳, 张一鸣. 不同布锚角度锚索抗滑桩抗震性能的离心振动台试验对比[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(S2): 110-115.
- [20] 郭鹏辉. 高速公路顺层边坡锚索框架梁和抗滑桩联合支护体系变形特征研究[J]. 路基工程, 2024(1): 60-66.