

排水抗滑桩技术研究现状及展望

王文沛, 殷跃平, 王立朝, 沈亚麒, 石鹏卿, 李瑞冬, 何清, 陈亮, 殷保国

Studies on status and prospects of anti-slide shaft technology

WANG Wenpei, YIN Yueping, WANG Lichao, SHEN Yaqi, SHI Pengqing, LI Ruidong, HE Qing, CHEN Liang, and YIN Baoguo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

抗滑桩应变特征与内力非线性研究

A study of the strain characteristics and internal force nonlinearity of anti-slide pile

任青阳, 赵梦园, 谢忠伟, 吴鑫培, 陈斌 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 114-124

大型滑坡抗滑桩-桩板结构受力变形研究

A study of the deformation of anti-slide pile and pile-plate structure in large landslide

向俐蓉, 陈伟志, 郭在旭, 叶丹, 姜雷 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 125-131

预应力锚索修复含微裂纹抗滑桩模型试验研究

Model test of anti-slide pile with micro-crack repaired by prestressed anchor cables

周云涛, 石胜伟, 蔡强, 张勇, 李乾坤, 梁炯, 程英建 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 104-111

临夏盆地巴谢河流域晚更新世以来滑坡发育历史重建

Reconstruction of the landslide history since late Pleistocene of the Baxie River Catchment in Linxia Basin

侯圣山, 李昂, 陈亮, 王立朝, 刘艺璇, 朱玉晶, 王惠生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 26-33

基于无人机的滑坡地形快速重建与稳定性分析

Rapid remodeling of three-dimensional terrain and stability analyses of landslide based on UAV

张欢, 巨能攀, 陆渊, 万勋, 蹇志权 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 171-179

冻融作用下污泥固化轻质土动力特性及结构演化

Dynamic and structural characteristics of sludge solidified light soil under freezing-thawing action

杨爱武, 王斌彬, 钟晓凯 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 57-65



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206028

王文沛, 殷跃平, 王立朝, 等. 排水抗滑桩技术研究现状及展望 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 73-83.

WANG Wenpei, YIN Yueping, WANG Lichao, *et al.* Studies on status and prospects of anti-slide shaft technology[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 73-83.

排水抗滑桩技术研究现状及展望

王文沛¹, 殷跃平¹, 王立朝¹, 沈亚麒^{1,2}, 石鹏卿³, 李瑞冬³, 何 清¹, 陈 亮¹, 殷保国²

(1. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害防治技术指导中心), 北京 100081; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 排水抗滑桩技术一方面可以克服传统抗滑桩不利于坡内渗流排水这一问题, 另一方面也减少了竖向排水、抗滑等结构单独施作时的开挖工程量, 并可充分提供水化热散热面, 确保整体结构的质量, 因此成为现代滑坡防治工程中重要的技术手段, 也是近年来地质灾害、水文地质及地下工程等学科持续关注的新型技术。排水抗滑桩技术涉及流体力学和固体力学, 以及水动力模型、结构模型、工程地质模型等, 理论体系尚不够成熟, 且存在空间结构组合相对复杂、施工技术难度较大等问题, 其进一步推广应用受到制约, 需要开展有针对性的现状总结研究。在查阅大量国内外相关文献、专利和实际工程应用的基础上, 对现有排水抗滑桩结构(抗液化桩、空心排水抗滑桩、箱型排水抗滑桩等)特征及分类进行系统归纳, 发现: 结构上通常与集排水结构形成“渗-集-排”抗滑组合立体结构系统, 主体抗滑形式多为桩型或键型, “渗-集-排”结构通常包括透水孔、辐射状渗水孔和排水花管; 通过对典型应用实例的综合分析, 指出排水抗滑桩虽已具有显著提高稳定性的优势, 但距离其广泛应用和多元化发展还有一定距离。据此提出目前排水抗滑桩研究中施工工艺复杂、力学性能和排水特性不明晰、抗滑稳定性计算理论不完善、平面布置优化方法待加强等是今后该领域需要关注的重要科学问题和主要发展趋势, 这些科学问题的解决不仅有利于完善排水抗滑桩力学和排水理论, 而且有利于提升排水抗滑桩整体应用水平。

关键词: 排水抗滑桩; 滑坡; 地下水; 结构特征; 应用实例; 施工技术

中图分类号: U443.15

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)02-0073-11

Studies on status and prospects of anti-slide shaft technology

WANG Wenpei¹, YIN Yueping¹, WANG Lichao¹, SHEN Yaqi^{1,2}, SHI Pengqing³, LI Ruidong³,
HE Qing¹, CHEN Liang¹, YIN Baoguo²

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-hazards, MNR), Beijing 100081, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 3. Gansu Institute of Geo-Environmental Monitoring, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: On one hand, anti-slide shaft technology can overcome the problems of blocking the seepage and drainage path in the slope by traditional anti-slide piles. On the other hand, it can reduce the excavation quantities when the vertical drainage and anti slide structures are separately constructed. Besides, it can fully provide the hydration-heat dissipation surface to ensure the overall structure quality. It has been an important technology in modern landslide prevention engineering, and the novel one of geological disaster, hydrogeology and underground

收稿日期: 2022-06-08; 修订日期: 2022-10-15

投稿网址: www.swdggcdz.com

基金项目: 甘肃省自然资源厅重点科学技术研究项目(2021-001); 国家自然科学基金项目(41977258; 41731287); 中国地质调查局地质调查项目(DD20221748)

第一作者: 王文沛(1985-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事地质灾害防治工作。E-mail: jcywangwenpei@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 陈亮(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查评价工作。E-mail: 64482586@qq.com

engineering in recent years. The anti-slide shaft technology involves hydrodynamic mechanics and solid mechanics, as well as hydrodynamic model, structural model, engineering geological model, *etc.* Besides, its promoted application is restricted by some problems, such as the lack of mature theoretical system, the relatively complex of this spatial structural combination, and the difficulty of the construction technology. Thus, it is necessary to carry out targeted current status summary research. Based on a large number of relevant documents, patents and practical engineering applications at home and abroad, we summarize the characteristics and classification of anti-slide shaft structure (anti-liquefaction pile, hollow anti-slide shaft, box anti-slide shaft, *etc.*), and find that the anti-slide shaft structure are mostly pile-type or tie-type, forming a 3-D structure system with the combination characteristics of seepage, collection, drainage and anti-slide. This kind of seepage-collection-drainage structures usually include water permeable holes, radiant seepage holes and drainage pipes. The demonstration of typical application examples show that although the anti-slide shafts have the advantage of significant improvement on the stability, there is still a large optimization space from its extensive use and diversification. Thus, the current complex construction process, unclear mechanical properties and drainage characteristics, imperfect stability calculation theory, plane layout optimization method to be improved in anti-slide shaft technology are important scientific issues and research trend, which need to be paid attention in the future. The solutions of these scientific problems are not only beneficial to improving the mechanical and drainage theory, but also beneficial to improving the overall application level of anti-slide shaft technology.

Keywords: anti-slide shaft; landslide; ground water; structural characteristics; application examples; construction technology

抗滑桩作为主要的抗滑支挡手段,已广泛应用于大型滑坡治理工程中。自 20 世纪 50 年代以来,随着抗滑桩设计理论的不完善,多种抗滑桩结构类型相继被提出,并得到大规模应用,如:预制抗滑桩、钻孔灌注桩、锚索抗滑桩、埋入式抗滑桩等^[1-2]。上述抗滑桩在提高滑坡体抗滑稳定性的同时,往往减少了坡体内部水的渗流通道,从而抬高了滑体内水位,增加了滑体自重,并使滑体、滑床的黏聚力和内摩擦角下降,导致滑坡稳定性下降^[3]。如:湖北十堰二汽抗滑桩工程,由于设置抗滑桩后,滑面底部水极难排出,导致防治工程失效^[4];湖北香溪河左岸的石佛寺滑坡,抗滑桩施工后阻断了大部分通过该处向下排泄的地下水,改变了地下水径流和排泄条件,造成当地居民用水严重困难^[5];重庆忠县至万州高速公路 K38 滑坡治理工程中,抗滑桩施工前未先行施工排水设施,导致下滑力在降雨过程中急剧增大,最终在滑面附近剪断抗滑桩^[6]。需注意的是,库水变动区堆积层滑坡治理受地下水位影响尤甚,此类滑体往往结构松散,水力连通性好,渗透系数大,若用常规的大尺寸抗滑桩,可能阻碍滑坡体内地下水排泄和渗流^[7]。

排水抗滑桩是指上部为中空排水段、下部为实心嵌固段,兼具地下水集排水和抗滑的新型结构^[1],英文为

“anti-slide shaft/well”或“anti-slide pile box”或“hollow anti-slide pile”。排水抗滑桩集竖向排水井和抗滑桩功能于一身,减少了竖向排水、抗滑等加固工程单独施作时的开挖工程量,并为桩身大体积混凝土浇筑提供了水化热散热面,确保了混凝土结构质量^[8]。排水抗滑桩通过“渗-集-排”联通结构,对滑体内尤其是滑面处水量的排导有明显作用,有助于克服传统抗滑桩对坡内渗流通道的不利影响^[2-3]。此外,排水抗滑桩由于具备完好的竖向排水构造,易与排水孔、辐射集水孔、排水隧洞、截水墙(帷幕)等地下排水结构组合成综合集排水体系^[9]。其嵌固抗滑段确保了地下综合集排水体系的整体稳定性,避免因滑坡变形对排水体系造成不利影响。众所周知,地下结构一旦发生变形破坏,修复相当困难且昂贵^[10]。

虽然排水抗滑桩具有上述诸多优点,然而,目前排水抗滑桩的工程应用并不常见,相应的计算理论还处于上升发展阶段,此类研究文献也较少。基于此,本文在查阅相关文献、专利和实际工程应用的基础上,初步归纳和总结了排水抗滑桩技术研究的发展现状,探讨了目前研究中的难点,并对未来的研究进行了展望,希望对今后应用研究有些许的参考价值。

1 排水抗滑桩结构特征及分类

目前提出的排水抗滑桩类型很多,如抗液化桩^[11]、空心排水抗滑桩^[4, 12]、箱型排水抗滑桩^[8]、排水抗滑拱圈^[13]、排水锚拉抗滑桩^[14]、虹吸排水抗滑桩^[15]、热力耦

合抗滑桩^[16]、真空排水抗滑桩等^[17],其主体形式多为桩型或键型,可从集排水结构特征、排水方式及抗滑受力断面特征等方面进行分类,详见表 1。当然,本文所述排水抗滑桩也可按照圆形机械成孔、矩形人工挖孔等传统的桩型分类方法进行进一步细化分类。

表 1 排水抗滑桩特征、分类及代表类型
Table 1 Characteristics, classification and representative types of anti-slide shaft

分类	集排水结构特征		抗滑段断面特征	排水方式	代表类型
	集水结构	排水结构			
抗滑桩型	桩周预制凹槽	—	实心	重力	抗液化桩 ^[11]
	空心	排水管、排水隧洞	空心	重力	空心排水抗滑桩 ^[4, 12] 、箱型排水抗滑桩 ^[8] 、排水抗滑拱圈 ^[13] 、排水锚拉抗滑桩 ^[14] 等
		—	实心	真孔泵抽水、虹吸排水、电磁电热排水等	虹吸排水抗滑桩 ^[15] 、热力耦合抗滑桩 ^[16] 、真空排水抗滑桩 ^[17] 等
	充填透水材料	—	—	真孔泵抽水、虹吸排水	虹吸排水抗滑桩、真空排水抗滑桩等
抗滑键型	实心桩芯外套集水结构	—	实心	真孔泵抽水	自适应排水抗滑桩 ^[18] 、集水防液化抗滑桩 ^[19] 等
其他型式	空心管片外周护壁桩	排水管、排水隧洞	抗滑键外周护壁桩	重力	护壁排水抗滑组合桩 ^[20-22]
	截水墙	排水隧洞	实心	重力	截水导流式桩板墙 ^[9, 23]

除表 1 提到的集排水结构特征外,排水抗滑桩在渗水结构方面也有一定的构造要求。目前,排水抗滑桩大都采用混凝土空心结构壁上预设透水孔(图 1),透水孔一般在迎流面呈梅花形分布,外部由土工布包裹反滤,防止透水孔堵塞。当然,为进一步增加渗水效果,可在透水孔外部增设辐射状渗水孔,内置排水花管(内衬反滤土工布)。

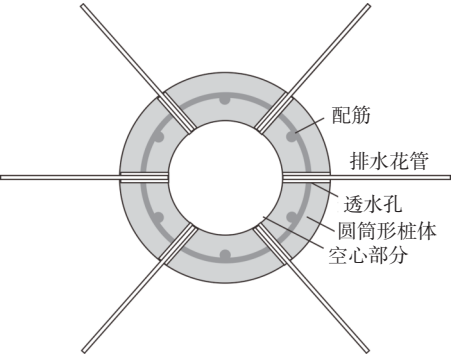


图 1 排水抗滑桩剖面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the profile of the anti-slide shaft

除上述排水抗滑桩之外,“渗-集-排”抗滑组合型式还可以有更多新型组合或耦合联通型式,如异形断面排水抗滑桩、预应力排水抗滑桩、预应力箱型抗滑桩、装配式排水抗滑桩等^[24-27],这些类型也基本上是表 1 所述结构类型的丰富或拓展,本文不再赘述。

2 典型排水抗滑桩工程应用实例

早在 20 世纪 90 年代,空心抗滑桩因兼具排水抗

滑作用,并能节约造价,引起工程技术人员的注意。池淑兰等^[28]1996 年在成昆线白果号隧道出口至波洛隧道进口段之间的 K351 滑坡治理中使用了 7 根空心抗滑桩,桩深最深达 56 m,截面尺寸为 3 m×4 m,空心部分尺寸 1.8 m×2.4 m,桩底以上 2 m 范围内为实心桩,空心部分在施工后利用施工过程中的碎石进行回填。几乎在同一时期,刘志贵等^[29]在嘉陵江南岸李子坝滑坡治理过程中进行了技术革新,提出圆形空心抗滑桩结合弧形挡板结构形式,共使用 62 根桩,桩径 2.0~2.5 m,空心直径 1.0~1.5 m,最大桩长 33.1 m。

在国外,据 Pulko 等^[22]的文献,斯洛文尼亚 Slano blato 深层流状滑坡在 2004 年 10 月使用排水竖井群进行滑坡治理时,短时强降雨导致滑坡滑动,竖井随之移动并损毁,最大移动距离达到 20 m。为防止竖井再次被破坏,工程人员提出使用护壁排水抗滑组合桩,利用 8 根直径 1 500 mm 护壁桩(上部环梁连接),内部衬砌管片,并在滑面附近增设厚度达 30 cm 的阻滑键。治理后,滑坡一直处于稳定状态。

近些年在国内,排水抗滑桩也有卓有成效的应用。例如:云南省永善县城东特大型深层滑坡治理工程,该滑坡地下水位高,渗流速度快,导致滑坡稳定性日益降低,活动性增强。工程技术人员针对滑坡变形特征和抗滑排水的需求,于 2015 年提出上部圆形排水抗滑桩与下部排水隧洞相连接联通的设计方案,避免了施工期间的安全风险,并缩短了施工工期^[9]。

西藏樟木镇福利院特大滑坡受巨大降水量威胁

(年降水量多达 2 500 ~ 3 000 mm), 减少滑体内地下水成为滑坡防治的首选工程措施之一。陈颖骐等^[23]提出截水导流式桩板墙, 该结构施工包括 3 个主要工序: (1) 在人工开挖形成超过 60 m 的大截面钢筋砼底部预设空心断面的过水抗滑桩; (2) 随后在抗滑桩之间开挖矩形墙, 重新充填透水滤料; (3) 从滑坡侧缘掘进排水隧洞, 利用截水墙和透水桩将滑坡体中地下水引走。该方法为坡体内部排水抗滑、提高坡体整体稳定性提供了新思路。

如前所述, 虽然排水抗滑桩在实际工程中得到一定的运用, 但距离其广泛使用和多元化发展还有一定距离, 仍需在实践中不断积累经验, 以期使设计更优化合理, 施工更方便安全。

3 研究进展

排水抗滑桩相关理论及试验经历了 3 个阶段: 萌芽阶段(20 世纪 50—90 年代)、摸索阶段(20 世纪 90 年代—21 世纪初)、体系阶段(21 世纪初至今)。

3.1 萌芽阶段

本阶段已尝试运用预制空心管桩进行抗滑设计, 但并没有进一步考虑管桩的排水功能。在这一时期, 国内掀起修筑铁路、公路、水利工程等基础设施的高潮, 钢筋混凝土管桩批量生产, 但管径一般都不大, 以 $\phi 400$ 、 $\phi 500$ 居多。较著名的如在 1965 年, 工程人员在修建川黔铁路时, 采用钢筋混凝土圆管打入桩与沉井相结合的工程措施对楚米铺堆积层滑坡进行治理^[30]。

虽然这一时期借鉴了国外抗滑桩的经验, 理论研究发展迅速, 但显然没有将排水抗滑桩作为单独的结构类型进行针对性的试验与计算研究。

同时期, 集水井及与滑坡排水系统也突飞猛进地发展。如日本大阪龟之瀬滑坡防治, 利用集水井和排水隧道的综合立体排水系统, 集水井底部高于滑面, 通过排水管穿透滑面与下部排水隧道联通; 排水隧道顶部还单独设置辐射状渗水孔, 用以引排更多的地下水^[31-32]。

此外, 虹吸排水、电渗析排水、真空排水等具有创造性的新型排水技术在国外成功应用后, 也逐渐被引用到国内, 为其后的排水抗滑桩排水方式研究奠定了基础^[33]。

3.2 摸索阶段

在这一时期, 针对推力巨大的大型滑坡, 大直径、深长抗滑桩逐渐被更广泛地运用到防治工程中^[34]。但

此类号称百吨钢材、千方混凝土的大截面抗滑桩也给施工、造价带来了严峻挑战, 引发工程技术人员思考。1990 年北京地质工程新进展国际会议后, “地质工程”概念引起广泛关注, 也为地质体的控制与改造引入了工程力学理念^[35]。此后, 各种优化型式与组合方式的抗滑桩纷纷被提出, 例如预应力锚索抗滑桩、微型桩群、抗滑键、排水抗滑桩等。排水抗滑桩在该阶段主要进展有:

(1) 等效刚度理论和截面计算

工程人员仍将其视为传统抗滑单桩的延伸, 只是在计算桩截面惯性矩中将空心部分扣除。矩形空心排水抗滑桩配筋时, 工程人员通常将其换算成等效“工字形”截面计算。用“T 形梁”方法判别式判断受压区混凝土高度是否进入空心处, 即需要判明是第几类“T 形梁”, 以便正确进行配筋^[4, 36]。

圆环形空心抗滑桩设计主要参照了建筑桩基配筋的做法。需注意的是, 由于考虑抗剪的要求, 因此桩的壁厚不能过薄, 需保证足够的抗剪面积和受压区高度。考虑受压区高度时, 若受压区未超过壁厚, 可仍按照圆形截面计算(“弓形”区域); 若超过壁厚, 可按照环形截面计算^[37]。

(2) 附加外力理论

附加外力理论认为桩身自重与桩身所在同体积土重之差为附加外力。李晋等^[38]通过数值模拟, 从荷载-沉降曲线证明了空心桩在减少桩身自重时, 较混凝土用量相同的实心桩, 提高桩竖向承载力甚至到 50% 以上, 这个结论对于抗滑桩嵌固段设计计算非常重要。

(3) 内力及变形对比规律

除上述提高竖向承载力外, 石庆瑶等^[39]通过数值试验, 对比了桩截面面积相同的空心圆环桩和实心圆桩的内力及变形规律, 发现在砂土、黏土和风化岩等不同地质条件下, 相同水平推力作用下空心桩的抗滑能力、变形、裂缝等几乎全面优于实心桩对应值; 其原因为空心桩表面积更大, 桩土间相互作用显著, 导致其承受水平荷载的能力更强。

(4) 立体网络排水体系

在该阶段, 排水方式虽未成为空心抗滑桩设计考虑的主要因素, 但相关滑坡立体网络排水体系模式已日臻成熟, 在国内得到进一步应用, 包括辐射渗水孔-集水井-排水孔模式、辐射渗水孔-廊道排水模式、集水井-廊道排水模式等, 上述模式又可进一步组合集成, 形成了洞、孔、井相结合的立体网络排水体系, 也

为今后与空心抗滑桩进一步结合形成“渗-集-排”排水抗滑结构提供了借鉴^[40-41]。

3.3 体系阶段

在上述研究基础上,排水抗滑桩理论与试验研究进入了体系建立阶段。相关研究成果被纳入国家标准《滑坡防治设计规范》(GB/T 38509—2020)^[1], (以下简称《规范》)并进行推广使用。该阶段的研究进展有:

(1)破坏性试验

针对目前的设计计算在排水抗滑桩极限承受荷载的相关力学特性方面描述不多的问题,易靖松等^[42-43]利用室内滑坡侧向加载模型试验,对矩形截面空心桩和圆形截面空心桩桩身受力和破坏形式进行研究,结果表明,圆形截面空心桩最终沿滑面受剪破坏,而矩形截面空心桩最终并未剪断,而是沿着内部空心矩形边界出现两条纵向裂缝,且与表层透水孔布置形式相关,交错布置时桩身峰值应力高于竖排直线布置对应值。此外,魏宏超^[44]则通过试验发现高强混凝土空心桩的抗裂和抗弯承载力较普通混凝土有较大提升。Akiyama等^[45]则发现空心桩外表层包碳纤维布和使用素混凝土填芯可以明显提高桩身的抗弯能力,防止脆性破坏。郭杨等^[46]则利用配置玻璃纤维筋改善了空心桩的弯剪性能。

(2)预张拉技术

刘雨松等^[47]在空心桩弯曲受拉侧布置高强度、高延性预应力钢绞线,利用先张法施加预应力,发现施加预应力钢绞线的空心桩改善了结构性能,由先弯(压溃)后剪(剪断)破坏提升为剪压破坏,从而提高了整体抗弯和抗剪极限值。侯小强^[26]则认为受拉侧偏心布置后张拉预应力高强钢绞线调整了桩身结构的应力分布,使预应力桩身坡侧的受拉区混凝土预先施加较大的压应力,同时桩身发生弹性挠曲变形并向桩后(坡体侧)偏转的趋势,为抗滑桩承担抗滑力后,桩身结构发生由桩后变形调整为向桩前逐渐弯曲提供了受力变形裕度。

(3)填芯补偿理论

很多排水抗滑桩在使用中有回填补芯的需要,如防冻裂充填碎石、充填混凝土补偿刚度等,但其力学特性研究一直是困扰设计人员的难题。唐孟雄等^[48]通过抗弯性能试验证明了素混凝土填芯圆形截面空心桩的抗裂和极限弯矩,并提出了考虑内芯刚度和截面积的弯矩计算公式。王铁成等^[49]则进一步通过双向拉压千斤顶试验,提出了填芯能够提高空心桩在往复荷载作用下耗能能力和承载力。柳炳康等^[50]通过

试验发现填芯空心桩的延性系数、抗弯承载力均大于非填芯空心桩。刘彦超^[51]通过理论分析和数值模拟证明了在抗滑桩空心位置回填开挖土方对抗滑桩整体刚度有补偿效果。

(4)排水效果

易靖松等^[43]通过试验发现排水抗滑桩的排水效果与滑坡内裂隙贯通程度正相关,即裂隙贯通程度越好,裂隙水就能更方便进入排水抗滑桩内,起到减压排水的效果。陈颖骐等^[23]则利用流-固耦合数值模拟方法证明了新型排水抗滑结构在排水范围、长期排水效果等方面均优于传统排水方式。Pulko等^[22]通过降雨和排水抗滑桩内水位曲线对比发现,水位在每次强降雨短时增加后,能迅速降低恢复至原来位置,排水效果明显。

(5)配筋计算方法

《规范》中规定箱型排水抗滑桩截面受压混凝土高度以不进入空心区域为宜。因此,在设计时不能仅依靠混凝土抗压能力,还需考虑抗压钢筋^[8]。在进行配筋计算时,应在剪力最大的2个剖面处进行抗剪验算和在滑面附近处进行抗滑抗弯拉验算。

除此之外,侯小强等^[8]进一步发展了等效刚度理论,提出排水抗滑桩面积、惯性矩不变的原则,并联立求得排水抗滑桩矩形空心尺寸。

针对排水抗滑桩中抗剪强度配筋要求,《规范》也从混凝土最大剪力抗剪强度满足设计值和不满足并需考虑箍筋作用分别进行了表述。

4 研究难点和问题

总结上述国内外研究成果可以发现,排水抗滑桩仍存在着一些难点和问题,主要体现在以下四点:

(1)施工工艺复杂

较常规抗滑桩结构成熟的施工技术和工艺,排水抗滑桩的难点之一就是施工技术较为复杂。首先,仅桩身就得考虑空心成模、桩壁透水孔和辐射集水管,桩下部排水管及与排水隧洞、排水孔等其他主要地下排水设施连接等一系列问题,并带来不同地质结构滑坡条件下地下立体交叉施工风险。而这些问题与工程安全、质量保证和造价密切相关,不能轻视。其次,据表1和本文总结的已应用案例可发现,排水抗滑桩由于综合了“渗-集-排”多种功能,型式较为丰富多变,而现有的滑坡治理施工技术完全涵盖这些类型确实有一定难度,也给排水抗滑桩的推广运用带来了一定的制约。

(2) 力学性能和排水特性不明晰

排水抗滑桩本身的力学性能和排水特性尚不完全明晰,亟待加强相关试验和模拟。首先,目前试验和理论研究还非常少,有限的研究大都集中于给定水平侧向力的预制管桩试验^[52],以此参考类推排水抗滑桩的力学性能还存在一定的差异。而真正意义上的排水抗滑桩的试验和数值模拟还很零星,且未能考虑堆积层、黄土、反倾、库水变动等多种类型滑坡和水位条件下的排水抗滑桩的力学和排水性能^[7,53-57],也未能从不同壁厚、透水孔数量及分布、抗滑段断面截面特征、空心段充填情况等方面进行平行规律试验及破坏试验。其次,力学和排水条件耦合试验目前几乎未有见刊,而这正是证明排水抗滑桩是否同时具有排水、抗滑优点的关键,也是排水抗滑桩计算理论的重要问题,亦是排水抗滑桩进一步优化和升级的难点^[58-62]。

(3) 抗滑稳定性计算理论不完善

排水抗滑桩加固条件下滑坡稳定性分析理论模型的研究需加以足够重视。传统抗滑桩在防治设计稳定性计算上是明确的,但是耦合叠加排水的稳定性计算并没有^[63-64]。现在一般做法是仅考虑排水抗滑桩的抗滑设计,而排水只作为强度储备,这样偏保守的设计理念势必造成排水抗滑桩截面过大,或因“超安全”考虑而增大配筋量,导致“肥桩”的产生,反而使得相应的施工难度和工程造价提升,限制了排水抗滑桩的广泛应用;此外,部分设计人员看到桩表层有贯穿性透水孔,往往判断一定有应力集中现象,从而增加相关截面尺寸和配筋率,进一步增加了设计的保守性,这其实本质上还是源于理论模型不完善。

(4) 平面布置优化方法待加强

排水抗滑桩的平面布置优化方法及空间立体结构体系动力特性的相关研究不容忽视。首先,目前排水抗滑桩主要是按照常规抗滑桩结构平面布置形式进行考虑,未着重考虑地下水的分布状况,进而从提高排水效果角度进行优化。其次,由于排水抗滑桩与排水隧洞等其他排水结构存在地下立体连接的情况,在地震区其动力响应和破坏特征需作为新的科学问题加以考虑^[65-66]。该科学问题与一般的地下结构抗震问题还有差别,还需着重考虑不同滑坡条件下的复杂性。

5 建议及展望

排水抗滑桩作为兼具抗滑与排水功能的新型治

理结构,若要取得突破性进展,必须从以下三个方面进行加强:

(1) 流体力学和固体力学耦合。目前的研究主要偏重固体力学方面的计算分析,缺少流体力学(包括渗透力学、管道流体力学、计算流体力学)的模拟。而事实证明,二者对于排水抗滑桩整个理论体系的建立同样重要,尤其是二者之间的耦合研究。因此有必要将二者耦合起来研究,目前流行的有限元-流体力学和有限差分-流体力学耦合模型(FEM-CFD和FDM-CFD耦合模型)为解决二者之间的耦合分析提供了可供参考的解决方法^[67]。

(2) 水动力模型与结构模型、工程地质模型耦合。目前主要还是地质工程师从本领域角度结合工程地质模型、单一结构模型进行研究。实际上排水抗滑桩还与水动力模型、“渗-集-排”抗滑组合的地下复杂结构体系息息相关,只是在不同的滑坡条件下,各模型比重不尽相同。因此,有必要把上述3种模型耦合起来进行整体研究。

(3) 进一步开展专门针对排水抗滑桩的模型试验研究,全面系统地分析影响排水抗滑桩结构性能的各类因素,及其对滑坡稳定性的控制因素,充分考虑引入防锈蚀、防腐蚀、高强度新材料进行物理模型试验,并发展更为全面的施工、监测成套技术方法,优化比选排水抗滑桩的平面布置方式和立体空间施工工序,协同组合渗流、集排水、抗滑多种单一结构施工工法,着实提高施工效率,使其具有示范推广的实质价值。

6 结论

(1) 排水抗滑桩技术一方面可以克服传统抗滑桩不利坡内渗流排水的问题,另一方面也减少了竖向排水、抗滑等结构单独施作时的开挖工程量,并可充分提供水化热散热面,确保整体结构的质量,因此成为现代滑坡防治工程中重要的技术手段,也是近年来地质灾害、水文地质及地下工程等学科持续关注的新型技术。

(2) 排水抗滑桩现有种类较多,系统归纳特征发现:结构上通常与集排水结构形成“渗-集-排”抗滑复合立体结构系统,主体抗滑形式多为桩型或键型,“渗-集-排”结构通常包括透水孔、辐射状渗水孔和排水花管。

(3) 该领域目前存在的重要科学问题包括:施工工艺复杂、力学性能和排水特性不明晰、抗滑稳定性计算理论不完善、平面布置优化方法待加强等。

参考文献 (References):

- [1] 国家标准化管理委员会. 滑坡防治设计规范: GB/T 38509—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. [Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for the design of landslide stabilization: GB/T 38509—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020. (in Chinese)]
- [2] 卢应发, 周盛沛, 罗先启, 等. 渗流对抗滑桩加固滑坡后的影响效果评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1840 - 1846. [LU Yingfa, ZHOU Shengpei, LUO Xianqi, et al. Evaluation of effects of seepage on landslide reinforced by anti-sliding piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1840 - 1846. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李新强, 杨健, 陈祖煜. 渗流与抗滑桩的抗滑稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(3): 66 - 68. [LI Xinqiang, YANG Jian, CHEN Zuyu. Stability analysis of slope with seepage and anti-sliding piles effect[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004, 31(3): 66 - 68. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 李明镇. 关于空心抗滑桩的研究[J]. 铁道建筑, 1993, 33(11): 9 - 12. [LI Mingzhen. Research on hollow anti-slide pile[J]. Railway Engineering, 1993, 33(11): 9 - 12. (in Chinese)]
- [5] 孙云志. 抗滑桩对滑坡地下水径流影响分析——以湖北省兴山县石佛寺滑坡为例[J]. 人民长江, 2010, 41(14): 62 - 64. [SUN Yunzhi. Analysis on influence of anti-slide pile to slide groundwater runoff[J]. Yangtze River, 2010, 41(14): 62 - 64. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 陈中学, 邵树强, 李文广. 抗滑桩支挡边坡失效实例分析[J]. 公路交通技术, 2016, 32(3): 31 - 34. [CHEN Zhongxue, SHAO Shuqiang, LI Wenguang. Analysis for failure examples of anti-slide pile support slope[J]. Technology of Highway and Transport, 2016, 32(3): 31 - 34. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 殷跃平, 张晨阳, 闫慧, 等. 三峡水库蓄水运行滑坡渗流稳定和防治设计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(4): 649 - 659. [YIN Yueping, ZHANG Chenyang, YAN Hui, et al. Research on seepage stability and prevention design of landslides during impoundment operation of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(4): 649 - 659. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 侯小强, 姚正学, 豆昕. 箱形抗滑桩设计计算分析及工程应用研究[J]. 水利规划与设计, 2018, 12(1): 128 - 132. [HOU Xiaoqiang, YAO Zhengxue, DOU Xin. Design, calculation and application of anti-slide pile box[J]. Water Resources Planning and Design, 2018, 12(1): 128 - 132. (in Chinese)]
- [9] 殷跃平, 朱赛楠, 李滨, 等. 青藏高原高位远程地质灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2021. [YIN Yueping, ZHU Sainan, LI Bin, et al. High-position and long-runout geological disaster on the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)]
- [10] 陶连金, 刘硕, 韩学川, 等. 临近地上高层结构的地铁车站地震响应[J]. 黑龙江科技大学学报, 2019, 29(5): 569 - 574. [TAO Lianjin, LIU Shuo, HAN Xuechuan, et al. Seismic response analysis of subway stations with above-ground high-rise structures[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2019, 29(5): 569 - 574. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王翔鹰, 陈育民, 江强, 等. 抗液化排水刚性桩沉桩过程的土压力响应[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2184 - 2192. [WANG Xiangying, CHEN Yumin, JIANG Qiang, et al. Soil pressures of the anti-liquefaction rigid-drainage pile during pile driving[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2184 - 2192. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 黄达, 石林, 岑夺丰. 一种具有排水抗滑作用的半空心桩及其施工方法: 201611268913.7[P]. 2017-05-31 [2022-06-02]. [HUANG Da, SHI Lin, CEN Dufeng. Semi-hollow pile having drainage and skid resistance effects and construction method of semi-hollow pile: 201611268913.7[P]. 2017-05-31 [2022-06-02]. (in Chinese)]
- [13] 殷跃平, 闫金凯, 王文沛, 等. 一种流状滑坡智能型排水抗滑拱圈加固方法: 201710655718.8[P]. 2017-10 - 10 [2022-06-02]. [YIN Yueping, YAN Jinkai, WANG Wenpei, et al. Arch ring reinforcing method for intelligent drainage and slipping resistance of flow-type landslide: 201710655718.8[P]. 2017-10-10 [2022-06-02]. (in Chinese)]
- [14] 王俊杰, 武立清, 梁越, 等. 中空排水锚拉抗滑桩及其施工方法: 201810078596.5[P]. 2018-07-20 [2022-06-02]. [WANG Junjie, WU Liqing, LIANG Yue, et al. Hollow drainage anchor and anti-sliding pile and its construction method: 201810078596.5[P]. 2018-07-20 [2022-06-02]. (in Chinese)]
- [15] 匡希彬. 三峡库区藕塘滑坡复活机制及治理措施研

- 究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019. [KUANG Xibin. Study on revival mechanism and prevention measures of Outang landslide in the Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing University. 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈光富, 张国栋, 熊彬, 等. 热力耦合抗滑桩: 202010049477.4[P]. 2020-05-12[2022-06-02]. [CHEN Guangfu, ZHANG Guodong, XIONG Bin, et al. Thermally coupled anti-slide pile: 202010049477.4[P]. 2020-05-12 [2022-06-02] (in Chinese)]
- [17] 杨宇友, 宫大辉, 王建强, 等. 便于真空降水的抗滑桩: 201320879351.5[P]. 2014-06-18[2022-06-02]. [YANG Yuyou, GONG Dahui, WANG Jianqiang, et al. Anti-slide pile for vacuum precipitation: 201320879351.5[P]. 2014-06-18[2022-06-02]. (in Chinese)]
- [18] 孙强, 贾海梁, 刘福钧, 等. 一种膨胀土边坡用变形自适应排水抗滑桩及施工方法: 201811332042. X[P]. 2019-01-04[2022-06-02]. [SUN Qiang, JIA Hailiang, LIU Fujun, et al. Deformation self-adaptive drainage anti-slide pile for expansive soil slide slope and construction method: 201811332042. X[P]. 2019-01-04[2022-06-02]. (in Chinese)]
- [19] 董建华, 胡邦弼, 于小燕, 等. 集排水防液化抗滑桩及施工方法: 201710851300.4[P]. 2018-01-19 [2022-06-02]. [DONG Jianhua, HU Bangbi, YU Xiaoyan, et al. Water collection and drainage and anti-liquidation slide-resistant pile and construction method: 201710851300.4[P]. 2018-01-19[2022-06-02]. (in Chinese)]
- [20] 黄达, 罗世林, 宋宜祥, 等. 一种内嵌桩柱的排水抗滑桩结构及其施工方法: 201910782865.0[P]. 2019-12-03 [2022-06-02]. [HUANG Da, LUO Shilin, SONG Yixiang, et al. Pile column embedded drainage slide-resistant pile structure and construction method: 201910782865.0[P]. 2019-12-03 [2022-06-02]. (in Chinese)]
- [21] PETKOVŠEK A, MAČEK M, MIKOŠ M, et al. Mechanism of Active Landslides in Flysch[C]//SASSA K, ROUHBAN B, BRICEÑO S, et al. Landslides: Global risk preparedness. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 149 – 165.
- [22] PULKO B, MAJES B, MIKOŠ M. Reinforced concrete shafts for the structural mitigation of large deep-seated landslides: An experience from the Macenik and the Slano blato landslides (Slovenia)[J]. *Landslides*, 2014, 11(1): 81 – 91.
- [23] 陈颖骐, 王全才. 新型截水导流式锚拉桩板墙排水抗滑性能分析[J]. *人民长江*, 2019, 50(1): 141 – 147. [CHEN Yingqi, WANG Quancai. Research on performance of drainage and anti-sliding of anchored plate-pile retaining wall with cut-off diversion[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(1): 141 – 147. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 王卫中, 杜战军, 刘福顺, 等. 异形排水抗滑桩: 201920066384.5[P]. 2019-10-25[2022-06-02]. [WANG Weizhong, DU Zhanjun, LIU Fushun, et al. Special-shaped drainage anti-slide pile: 201920066384.5[P]. 2019-10-25[2022-06-02]. (in Chinese)]
- [25] 康舜, 刘长武, 袁勋, 等. 一种梯形加趾排水抗滑桩及其施工方法: 202010490762. X[P]. 2021-12-07 [2022-06-02]. [KANG Shun, LIU Changwu, YUAN Xun, et al. Trapezoidally toe-shaped drainage anti-slide pile and construction method: 202010490762. X[P]. 2021-12-07[2022-06-02]. (in Chinese)]
- [26] 侯小强. 基于滑坡治理工程新型抗滑桩桩土关系及结构研究[C]//第十六次中国岩石力学与工程学术年会论文集, 2019. [HOU Xiaoqiang. Research on soil relationship and structure of new anti-slide pile pile based on landslide stabilization project[C]//Symposium of the 16th China Annual Conference of Rock mechanics and Engineering, 2019. (in Chinese)]
- [27] 周云涛, 石胜伟, 蔡强 等. 装配式排水预应力抗滑桩: 201821598491.4[P]. 2019-08-16[2022-06-02]. [ZHOU Yuntao, SHI Shengwei, CAI Qiang, et al. Prefabricated drainage prestressed anti-slide pile: 201821598491.4[P]. 2019-08-16[2022-06-02]. (in Chinese)]
- [28] 池淑兰, 刘昌清, 游敏清. 成昆线K351抗滑桩设计及施工[J]. *路基工程*, 1997(3): 46 – 50. [CHI Shulan, LIU Changqing, YOU Mingqing. Design and construction of K351 anti-slide pile of Chengdu—Kunming Line[J]. *Subgrade Engineering*, 1997(3): 46 – 50. (in Chinese)]
- [29] 刘志贵, 李俊雄. 圆形空心抗滑桩在滑坡治理中的运用及成效[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1995, 6(3): 63 – 66. [LIU Zhigui, LI Junxiong. Application of circular hollow slide-resistance pile on regulation of the landslide and its effect[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1995, 6(3): 63 – 66. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 杨云飞. 膨胀土滑坡抗滑桩设计与施工[D]. 成都: 西南交通大学, 2003. [YANG Yunfei. Anti-slide pile design and construction of swelling soil landslide[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003. (in Chinese with English abstract)]

- English abstract)]
- [31] 刘颖. 日本滑坡和边坡稳定的设计与处理工程[J]. 四川水力发电, 1987, 6(4): 66 – 72. [LIU Ying. Design and treatment for landslide and slope stability in Japan[J]. Sichuan Water Power 1987, 6(4): 66 – 72. (in Chinese)]
- [32] 田志坤. 日本滑坡防治技术现状[J]. 国外地质勘探技术, 1990, 12(10): 7 – 13. [TIAN Zhikun. The present status of landslide control technology in Japan[J]. Foreign Geoexploration Technology, 1990, 12(10): 7 – 13. (in Chinese)]
- [33] 张倬元. 滑坡防治工程的现状与发展展望[J]. 地质灾害与环境, 2000, 11(2): 89 – 97. [ZHANG Zhuoyuan. The present status, technical advance and development trends of landslide remedial measures[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2000, 11(2): 89 – 97. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 王恭先. 抗滑桩的应用与发展[C]//第九届全国桩基工程学术会议论文集, 2009: 92 – 96. [WANG Gongxian. Application and development of anti-slide pile[C]// Proceedings of the Ninth Symposium of National Pile Foundation Engineering, 2009: 92 – 96. (in Chinese)]
- [35] 成永刚. 近二十年来国内滑坡研究的现状及动态[J]. 地质灾害与环境, 2003, 14(4): 1 – 5. [CHENG Yonggang. Current situation and developments of landslide study in China in recent twenty years[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2003, 14(4): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 吴新星. 边坡抗滑桩受力分析与结构优化[D]. 宜昌: 三峡大学, 2010. [WU Xinxing. Mechanism of anti-slide pile and its structural optimization[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 陈富坚, 刘均利, 景天虎. 圆形和环形截面抗滑桩的非均布配筋计算方法[J]. 公路交通科技, 2006, 23(9): 32 – 35. [CHEN Fujian, LIU Junli, JING Tianhu. Method for computation of non-uniform distribution of reinforcement of slide-resistant piles with round or annular section[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(9): 32 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 李晋, 冯忠居, 谢永利. 大直径空心桩承载性状的数值仿真[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(4): 36 – 39. [LI Jin, FENG Zhongju, XIE Yongli. Numerical simulation of large diameter hollow pile bearing performance[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2004, 24(4): 36 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 石庆瑶, 王成. 水平荷载作用下长桩的合理截面形式优化研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊 1): 650 – 654. [SHI Qingyao, WANG Cheng. Research on reasonable section type of long pile loaded laterally[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup 1): 650 – 654. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 刘加龙, 姚春雷, 孔建. 立体排水网络在大型富水覆盖层滑坡治理中的应用[J]. 土工基础, 2007, 21(6): 43 – 46. [LIU Jialong, YAO Chunlei, KONG Jian. Application of three-dimensional drainage network in large-scale water-soaked overburden landslide treatment[J]. Soil Engineering and Foundation, 2007, 21(6): 43 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 陈崇希, 成建梅. 关于滑坡防治中排水模式的思考——以长江三峡黄腊石滑坡为例[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1998, 23(6): 628 – 630. [CHEN Chongxi, CHENG Jianmei. A new idea about drainage pattern in landslide prevention and treatment: By example of Huanglashi landslide at the Three Gorges[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1998, 23(6): 628 – 630. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 易靖松, 张世林, 孙金辉, 等. 不同截面形态的空心抗滑桩支挡效果对比研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(5): 121 – 128. [YI Jingsong, ZHANG Shilin, SUN Jinhui, et al. A comparative study of the retaining effect of hollow pile in different sections[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(5): 121 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 易靖松, 石胜伟, 张世林, 等. 基于大型现场试验的空心桩抗滑支挡加复合排水技术研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 95 – 99. [YI Jingsong, SHI Shengwei, ZHANG Shilin, et al. Research of the hollow anti-sliding pile retaining wall composite drainage technique based on large scale field test[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 95 – 99. (in Chinese with English abstract)]
- [44] 魏宏超. 钢纤维高强混凝土的配制及其在先张法预应力高强混凝土管桩中的应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2002(3): 28 – 30. [WEI Hongchao. Preparation of high-strength steel fiber reinforced concrete and the application of it in prestressed concrete piles[J]. China Concrete and Cement Products, 2002(3): 28 – 30. (in

- Chinese with English abstract)]
- [45] AKIYAMA M, ABE S, AOKI N, et al. Flexural test of precast high-strength reinforced concrete pile prestressed with unbonded bars arranged at the center of the cross-section[J]. *Engineering Structures*, 2012, 34: 259 – 270.
- [46] 郭杨, 吴平. 玻璃纤维筋与钢筋复合配筋预应力混凝土管桩承载性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(2): 162 – 167. [GUO Yang, WU Ping. Experimental study on bearing capacity of compositely reinforced with GFRP prestressed concrete pipe pile[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(2): 162 – 167. (in Chinese with English abstract)]
- [47] 刘雨松, 陈刚, 徐铨彪, 等. 复合配筋预制混凝土管桩的抗弯抗剪性能试验研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2021(4): 36 – 41. [LIU Yusong, CHEN Gang, XU Quanbiao, et al. Experimental study on flexural and shear performance of precast concrete piles with composite reinforcement[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2021(4): 36 – 41. (in Chinese with English abstract)]
- [48] 唐孟雄, 戚玉亮, 周治国, 等. 空心与填芯PHC管桩抗弯试验及其理论计算研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增刊2): 1075–1080. [TANG Mengxiong, QI Yuliang, ZHOU Zhiguo, et al. Comparative study on bending performance between hollow PHC pipe piles and PHC pipe piles with concrete core[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Sup 2): 1075 – 1080. (in Chinese with English abstract)]
- [49] 王铁成, 王文进, 赵海龙, 等. 不同高强预应力管桩抗震性能的试验对比[J]. *工业建筑*, 2014, 44(7): 84 – 89. [WANG Tiecheng, WANG Wenjin, ZHAO Hailong, et al. Seismic performance of different prestressed high strength concrete pipe piles[J]. *Industrial Construction*, 2014, 44(7): 84 – 89. (in Chinese with English abstract)]
- [50] 柳炳康, 李建宏, 张星宇, 等. 预应力填芯管桩抗弯性能与延性特征的试验[J]. *工业建筑*, 2007, 37(3): 46 – 49. [LIU Bingkang, LI Jianhong, ZHANG Xingyu, et al. Test of moment bearing capacity and ductility performance of filled prestressed concrete pipe pile[J]. *Industrial Construction*, 2007, 37(3): 46 – 49. (in Chinese with English abstract)]
- [51] 刘彦超. 抗滑桩空心截面优化与最优拱形平面布置研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017. [LIU Yanchao. Hollow cross-section optimization and optimal arching plane arrangement for stabilizing piles[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [52] 高文生, 刘金砺, 赵晓光, 等. 关于预应力混凝土管桩工程应用中的几点认识[J]. *岩土力学*, 2015, 36(增刊2): 610 – 616. [GAO Wensheng, LIU Jinli, ZHAO Xiaoguang, et al. Some understanding of prestressed concrete pipe pile in engineering application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(Sup 2): 610 – 616. (in Chinese with English abstract)]
- [53] 周保, 马涛, 魏正发, 等. 黄河上游曲哇加萨滑坡“9·20”动力学过程模拟与分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(2): 9 – 15. [ZHOU Bao, MA Tao, WEI Zhengfa, et al. Dynamic simulation and analysis of “9·20” sliding process of Quwajiasa landslide in the upper reaches of Yellow River[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 9 – 15. (in Chinese with English abstract)]
- [54] 孙鸿昌, 郝喆, 杨青潮. 精细地形下的尾矿坝稳定性及溃坝模拟分析[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(3): 136 – 144. [SUN Hongchang, HAO Zhe, YANG Qingchao. Combined simulation analysis of the tailings dam stability and dam break under fine terrain[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(3): 136 – 144. (in Chinese with English abstract)]
- [55] 胡爱国, 周伟. 地震与强降雨作用下堆积体滑坡变形破坏机理及防治方案分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(1): 27 – 34. [HU Aiguo, ZHOU Wei. Deformation and failure mechanism and analysis on prevention measures of colluction landslide under earthquake and heavy rainfall[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 27 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [56] 张永双, 郭长宝, 李向全, 等. 川藏铁路廊道关键水文地质问题: 现状与发展方向[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(5): 1 – 12. [ZHANG Yongshuang, GUO Changbao, LI Xiangquan, et al. Key problems on hydro-engineering-environmental geology along the Sichuan-Tibet Railway corridor: Current status and development direction[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(5): 1 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [57] 李滨, 殷跃平, 高杨, 等. 西南岩溶山区大型崩滑灾害研究的关键问题[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 5 – 13. [LI Bin, YIN Yueping, GAO Yang, et al. Critical issues in rock avalanches in the Karst Mountain areas of southwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 5 – 13. (in Chinese with English abstract)]

- [58] 张军舰, 李鹏, 殷坤宇, 等. 基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 117 – 125. [ZHANG Junjian, LI Peng, YIN Kunyu, et al. An experimental study of the dynamic compaction method based on relay drainage in foundation treatment of the coastal backfill area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 117 – 125. (in Chinese with English abstract)]
- [59] VU B T, PHAM V M, NGUYEN Q D, et al. Analyses on drainage capacity and sliding resistance of large diameter vertical wells for deep-seated landslide stabilization [C]//CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure, 2020: 659 – 664.
- [60] ISHII Y, OTA K, KURAOKA S, et al. Evaluation of slope stability by finite element method using observed displacement of landslide[J]. *Landslides*, 2012, 9(3): 335 – 348.
- [61] XIE Haijian, LV Henglin. Simulation of slightly degraded reinforced concrete shaft lining in thick topsoil[J]. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 2020, 27(2): 611 – 617.
- [62] PENG Shilong, RONG Chuanxin, CHENG Hua, et al. Mechanical properties of high-strength high-performance reinforced concrete shaft lining structures in deep freezing wells[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019: 2430652.
- [63] HAJIAZIZI M, MAZAHARI A, ORENSE R P. Analytical approach to evaluate stability of pile-stabilized slope[J]. *Scientia Iranica*, 2017, 25(5): 2525 – 2536.
- [64] LI Changdong, YAN Junfang, WU Junjie, et al. Determination of the embedded length of stabilizing piles in colluvial landslides with upper hard and lower weak bedrock based on the deformation control principle[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(2): 1189 – 1208.
- [65] ZHUANG Haiyang, WANG Xu, MIAO Yu, et al. Seismic responses of a subway station and tunnel in a slightly inclined liquefiable ground through shaking table test[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 116: 371 – 385.
- [66] ZHENG Jun, WANG Jiongchao, GUO Jichao, et al. A siphon drainage system with variable diameters for landslides: Concept, calculation, and validation[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 126305.
- [67] YASHIMA A, MORIGUCHI S, UZUOKA R, et al. Large deformation analysis for costal geo-disasters using continuum and discrete modeling[C]//New Frontiers in Engineering Geology and the Environment. Beilin: Springer, 2013: 13 – 29.

编辑: 汪美华
刘真真