

土石坝深厚覆盖层坝基帷幕灌浆防渗技术研究

张 鹏

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】：土石坝由于取材方便、价格便宜，在水利水电工程中得到大量使用，但是它厚覆盖层坝基透水性大、结构疏松，容易出现渗漏问题，对坝体的安全构成很大隐患。帷幕灌浆是防治土石坝厚覆盖层坝基渗漏的主要方法，而灌浆的质量直接影响到防渗的效果。目前在实际施工中存在着灌浆参数不合理、施工工艺不当以及缺乏有效的质量控制等现象。本文介绍了帷幕灌浆防渗的作用及意义，指出了其中存在的问题并提出了相应的解决方案，旨在提高土石坝厚覆盖层坝基防渗的能力，保证工程长久安全。

【关键词】：土石坝；深厚覆盖层；帷幕灌浆；防渗技术；坝基处理；施工质量

DOI:10.12417/3083-5526.25.07.029

引言

在水利水电工程建设中，由于土石坝具有适应性强、施工方便的优势，在所有大坝类型中使用最为广泛。但是大多数土石坝坝基覆盖层较厚，主要由松散砂土、卵石等构成，透水性较强，如果防渗不当就会出现坝基渗漏、管涌等问题，严重时会引起大坝滑坡。帷幕灌浆是将浆液灌入大坝基础中，形成完整的防渗帷幕，以阻挡水流路径，提高坝基防渗性能的一种方法，在目前深厚覆盖层坝基治理方面还面临许多困难，本文就土石坝深厚覆盖层坝基帷幕灌浆防渗技术进行研究，提出设计理念、施工工艺和技术要求，解决相关问题，为实际工作奠定基础。

1 土石坝深厚覆盖层坝基帷幕灌浆防渗技术的核心意义

对于土石坝深厚覆盖层坝基防渗而言，是保证工程安全的重要措施，而帷幕灌浆是目前最常用的方法，它具有很大的经济性和实用性。从坝体安全角度分析，深厚的覆盖层结构疏松、孔隙度高、透水性好，水容易从其中穿过形成渗流路径，长时间的渗流会使坝基扬压力增大、土质颗粒流失，产生管涌、流土等渗漏问题，严重会造成坝体下沉、滑坡乃至溃坝^[1]。帷幕灌浆通过浆液胶结松散土体，形成致密、连续的防渗帷幕，可有效阻断渗流路径，降低坝基渗透系数，控制渗流量，防范渗透灾害发生，保障坝体安全稳定。

从工程运维角度讲，科学使用帷幕灌浆可以减少坝基渗漏量，减轻坝体排水负担，节约运维费用，使工程寿命更长久。而且，帷幕灌浆施工简单方便，适用范围广，在不同的地层条件下可以采取不同的方法进行帷幕灌浆，满足各种深厚的覆盖层坝基需要，防止由于坝基防渗不彻底而造成工程建设返工或加固，提高工程质量。从行业发展角度看，加强对帷幕灌浆防渗的研究，改进和完善其设计及施工方法有利于提高我国土石坝坝基处理的技术水平，为类似工程起到良好的参考作用。

2 土石坝深厚覆盖层坝基的工程特性及帷幕灌浆技术难点

深厚覆盖层下土石坝帷幕灌浆防渗存在的问题及其原因，对合理选择帷幕灌浆防渗方案及提高防渗效果有重要意义。深厚覆盖层一般为第四系松散沉积物，厚度在10m以上，颗粒组成不均匀、孔隙率高、透水性差异较大，有的覆盖层中含有砂层、砾石层，还有一些覆盖层中存在断层破碎带等不良地质条件，使渗流路径复杂，防渗困难；另外，深厚覆盖层强度低，在施工过程中容易发生孔壁坍塌、灌浆不饱满等情况，不利于灌浆效果^[2]。

帷幕灌浆技术的应用难题有三方面：一是灌浆参数的选择困难，厚覆盖层内颗粒大小、透水性差别较大，在不同地段所需灌浆的压力、浆液的稠度、灌浆的速度等都不同，如果参数不当会造成灌浆不足或者过量灌浆从而影响防渗的效果；二是施工方法不适应，在松散覆盖层中孔壁的稳固性较差，容易产生塌孔或者卡钻的现象，而且浆液的扩散也很难控制，这样就会造成帷幕不连续以及防渗效果差的问题；三是难以保证施工的质量，在厚覆盖层中的灌浆是隐蔽工程，在灌浆的过程中浆液如何流动是看不见的，对于灌浆的质量检查也是比较困难，很容易产生灌浆的质量问题，给以后的安全带来隐患。

3 土石坝深厚覆盖层坝基帷幕灌浆防渗技术设计要点

3.1 灌浆方案整体设计

帷幕灌浆方案设计应结合深厚覆盖层坝基地质情况、工程规模以及防渗要求而定，在“因地制宜、以堵为主”基础上进行合理的设计。首先进行详细地质勘探工作，查明深厚覆盖层厚度、粒径组成、渗透性、各岩层位置关系以及水文地质条件等，了解其渗流路径，为其提供参考；其次选择合适的帷幕型式，根据坝基宽度、渗透系数及防渗要求，可采用单排或者双排帷幕，帷幕轴线与坝轴线一致，帷幕深度要穿过深厚覆盖层进入下面不透水层至少1.5m，保证完整防渗作用。

3.2 核心灌浆参数设计

灌浆参数是否合理直接影响帷幕灌浆防渗效果，在深厚覆盖层情况下，应合理选择灌浆压力、浆液浓度、灌浆速度以及灌浆段长等因素。灌浆压力要依据覆盖层厚度、颗粒大小以及透水情况而定，一般从小到大分步进行，起始压力一般不超过0.3~0.5MPa，逐渐增加至目标压力，防止过大压力造成孔壁坍塌或者浆液流失，设计压力一般为坝前水头的1.5~2.0倍^[3]。浆液浓度也要视情况而变化，在初期用较稀浆液，然后慢慢加大其浓度，使浆液能够很好填充孔隙并固结土体，对透水性强的砂层、砾石层等则要用较高浓度浆液提高防渗效果。

灌浆速度一般为1~5L/min，根据地层吸浆能力而定，不宜过大以免造成浆液分布不均匀，也不宜过小降低工作效率。灌浆长度按覆盖层厚度以及孔壁稳定情况决定，一般以3~5m为一节段，在松散易塌孔地层中可适当减小到2~3m，保障钻孔、灌浆顺利进行。

3.3 灌浆材料选型设计

灌浆材料对防渗帷幕质量和寿命起着至关重要的作用，在深厚覆盖层坝基情况下，根据具体工程地质情况以及防渗要求，选择合适的灌浆材料，保证材料性能符合工程需要。常用的灌浆材料主要有水泥浆液、水泥-膨润土浆液、水泥-水玻璃浆液等。对于渗透性强、孔隙大的砂砾石地层，采用水泥-膨润土浆液，因其流动性好、析水率低，可以较好地充填孔隙，形成良好的防渗帷幕；而对于渗透性差、要求较高防渗地段，则使用水泥-水玻璃浆液，由于其硬化快、抗压强度高，能迅速建立一道较好的防渗墙，提高防渗能力。

灌浆材料质量必须保证，采用强度等级不低于42.5级的普通硅酸盐水泥，膨润土应满足相应标准，保证材料纯净及质量。并且根据现场情况可加入一定量的辅助材料，例如缓凝剂、减水剂等，以调节浆液凝结速度、流动性和强度，适应不同的地层条件。

4 土石坝深厚覆盖层坝基帷幕灌浆防渗施工工艺优化

4.1 钻孔施工工艺

钻孔施工是帷幕灌浆的前提条件，也是影响灌浆效果的关键环节，在深厚覆盖层条件下要合理选择钻孔方法保证钻孔质量。在钻孔之前按照设计要求确定各孔位置用全站仪放出孔位，偏差不大于5cm。钻孔设备根据松散地层情况选择适合回转式或冲击式钻机，在易发生塌孔砂层、砾石层中使用套管护壁法施钻，套管直径比钻孔直径大一级，并随着钻孔加深而不断下放，以防孔壁坍塌^[4]。

钻孔时要严格控制钻进速度以及钻孔倾斜度，钻进速度依据不同地层而定，不能太快造成孔壁破坏或者塌孔，垂直度不超过1%，保证钻孔垂直有利于浆液均匀扩散。钻到设计标高

后需要清洗孔，用高压水把孔里面泥渣等冲洗干净，防止浆液和地层之间粘结不良。清洗完毕之后检查孔深、孔径是否符合要求，符合要求才可以进行下一步施工。

4.2 灌浆施工工艺

灌浆施工采用自上而下分段灌浆法，在深厚覆盖层条件下分段完成钻孔、清孔、灌浆、封孔等工作以保证灌浆效果，灌浆之前检查灌浆设备是否完好，使设备处于良好工作状态，灌浆管路无堵塞现象，压力表准确无误。灌浆时，采用分段升压法，逐步加大灌浆压力至设计压力，每升高一个等级的压力后保持30分钟，在确认无异常情况后再进行下一步的工作，以防压力突然增加造成孔壁坍塌或者浆液流失；并且要控制好浆液浓度及灌浆速度，根据土质对浆液吸收程度适当改变浆液浓度以保证浆液完全充填孔隙。

对于吸浆量较大的地层，使用间歇式灌浆方法，在一定时间内停止灌浆，让浆液凝固一定时间之后，再继续灌浆，使浆液得到最大程度扩散及胶结。灌浆时做好施工记录，详细记录灌浆压力、浆液浓度、灌浆速度以及吸浆量等参数以便日后检查和分析。当灌浆满足设计要求后，停灌并及时进行封孔工作，封孔用水泥浆液自下而上分段进行封孔，以防有空隙存在造成漏水。

4.3 特殊地层施工处理

对于深厚覆盖层中存在砂层、砾石层、断层破碎带等地质条件较差地段，应根据实际情况选择合理施工方法，采取相应措施保证灌浆质量。对松散砂层进行套管跟进钻孔+浓浆灌注以防止孔壁坍塌并提高浆液浓度以及缩短浆液凝固时间使浆液能够牢固粘接砂粒从而形成防渗帷幕；对砾石层使用高压灌浆法增大灌浆压力以便将浆液注入到砾石缝隙中填满空隙提高防渗性能。

对断层破碎带，首先用高压水枪冲洗破碎带，清洗出破碎岩石以及泥土等杂物，然后用水泥-水玻璃浆液进行灌注，加快凝固速度，封堵断层破碎带内漏水通道。其次，在断层破碎带附近增设一些灌浆孔，增加帷幕厚度及致密度，保证防水效果。施工期间密切关注特殊地带情况，一旦发现异常立即采取措施处理，保证施工顺利进行和工程质量。

5 土石坝深厚覆盖层坝基帷幕灌浆质量控制与检测

5.1 施工全过程质量控制

帷幕灌浆质量控制是整个施工过程中的重要环节，应建立有效的质量管理体系，把握重点，保证工程质量。首先是对原材料的质量控制，在灌注前对所用的材料进行检验，如水泥、膨润土、外加剂等都要满足相应标准的规定，不符合要求的材料一律不准入场；其次是对成孔质量的检查，要检查各孔的位置、倾斜角度、深度以及清孔情况，每一孔钻完之后都要经过检查确认无误才能开始灌浆；最后就是对灌浆的各项指标进行

把控,按设计规定的灌浆压力、浆液浓度、灌浆速度及灌浆长度来实施灌浆工作并随时纠正偏差以达到设计要求^[5]。

四是在施工过程中加强管理,在灌浆施工时加强对现场施工情况监督,做好施工记录,以便于施工过程可以追溯;对于施工过程中出现塌孔、漏浆等现象,应立即采取相应对策防止其对灌浆造成不良影响。此外,还应制定质量管理体系,定期检查灌浆工程质量,发现问题及时纠正,保证帷幕灌浆施工质量达到设计标准。

5.2 灌浆质量检测方法

灌浆结束后,应采取合理手段,对帷幕灌浆质量进行检查验收,保证其防渗要求满足设计标准。一般采用压水试验、钻孔取芯检查、声波法等几种方式。压水试验是最重要的一种方法,在灌浆结束7天以后,随机抽取一定数量灌浆孔进行压水试验,测定帷幕透水率,如果透水率小于设计规定值,则表明灌浆质量良好;否则需要补灌。

钻孔取芯检测,在有代表性的灌浆孔内进行钻孔取芯,检查芯样的胶结情况,测量帷幕的厚度及密实度,如果芯样胶结良好、帷幕连续密实,则表明灌浆良好;声波检测,使用声波检测仪,对帷幕灌浆区进行声波检测,根据声波的传输速度来评价帷幕的密实度及连续性,如果声波的速度一致,就说明帷幕良好。在检测的同时要做好检测记录,对于不合格的地方要立即给出补灌措施,进行补灌工作以保证帷幕灌浆的质量。

参考文献:

- [1] 张文辉,李三喜,刘加丽.深厚覆盖层上坝基混凝土防渗墙施工工期优化研究[J].东北水利水电, 2025(6).
- [2] 狄圣杰,张莹,王有林,等.深厚覆盖层坝址区渗流场智能反演与渗控分析[J].水力发电, 2025(9).
- [3] 刘志强,王凯,谢坤.水利枢纽工程中的混凝土防渗技术及施工方案[J].工程建设与设计, 2025(18):206-208.
- [4] 沈振中,邱莉婷,周华雷.深厚覆盖层上土石坝防渗技术研究进展[J].水利水电科技进展, 2015, 35(5):9.
- [5] 郭江涛,张爱军.深厚覆盖层上土石坝的渗流控制方案研究[J].干旱地区农业研究, 2012, 30(2):7.

5.3 质量缺陷处理措施

对于质量问题检查出的灌浆问题,如帷幕不连续、渗透系数过大、局部灌浆量不够等,需要采取相应措施进行修补,及时整改,保证防渗效果。对于帷幕不连续或者局部灌浆量不够的地方,可以进行补孔灌浆,在缺陷处增加灌浆孔数,用高压浓浆灌入,使帷幕连贯紧密;而对于渗透系数过大的地方,则要查明原因,如果是由于浆液浓度过低造成的,则可增大浆液浓度后重新补灌;如果是因为孔洞周围土体流失严重造成,则需重新钻孔,并采用套管跟进法灌浆以达到要求。

对于严重质量问题,例如大面积帷幕破损、渗流通道未封闭等问题,应编制专门处理措施,拆除不合格帷幕,重新进行灌浆工作,保证处理后达到设计标准。缺陷处理完毕,须再做检查,直到检查合格为止,防止出现安全问题,使土石坝深厚覆盖层坝基防渗满足要求。

6 总结

帷幕灌浆是土石坝深厚覆盖层坝基防渗主要方法,在帷幕灌浆过程中存在参数不合理、施工工艺不当以及质量管理不到位问题,应针对深厚覆盖层特点进行帷幕灌浆方案及施工工艺优化,合理确定帷幕灌浆参数,选择适合灌浆材料,做好帷幕灌浆全过程质量管理及检查工作,及时解决质量问题,经工程应用表明,改进后的帷幕灌浆能够很好地切断渗流路径,提高坝基抗渗性能,防止发生渗透破坏事故,对土石坝深厚覆盖层坝基防渗起到良好作用,促进水利水电事业健康发展。