

水利水电工程中土石坝施工技术研究

白钢 张小玲

四川路航建设工程有限公司，四川成都，610000；

摘要：随着工程需求不断提升，传统的土石坝施工方法面临着许多挑战。如何优化施工技术，确保坝体的稳定性，成为当前土石坝施工领域亟待解决的问题。基于此，本文探讨了土石坝施工技术在水利水电工程中的应用，然后分析了精确选用坝体材料、采用分层填筑技术以及严格监测施工过程等五项方法，希望能够为未来的水利水电工程提供一定的参考。

关键词：水利水电工程；土石坝施工；施工技术

DOI：10.69979/3060-8767.25.03.010

1 土石坝施工技术在水电工程中的作用及其特点

在古代水利工程中土石坝有着广泛的应用，我国现役水坝约90%为土石坝。随着施工技术的发展，土石坝的质量控制越来越精细，施工工艺的改进使得大坝能够承受更大的水压力，具备更好的抗渗性。

相较于混凝土坝，土石坝的造价较低，土石坝施工过程中以土体和砾石为主要原材料，大量采用就地取材的方式，减少了钢材、水泥等昂贵材料的消耗，降低了运输成本和采购成本，减少了施工过程中的碳排放，进一步契合绿色可持续发展的要求，这对于大多数水利水电工程项目来说具有重要的经济意义和社会效益。此外，土石坝的施工适应性较强，能适应丘陵、山区等复杂地形，尤其适合在地震区、高烈度地震带等特殊环境。土石坝施工技术简单，无需复杂设备和高技术人员，适合机械化快速施工作业，施工周期短，整体工程进度较快。因土石坝结构简单且受力均匀，后期维护方便，维护工作量小且费用较低。

此外，土石坝在施工过程中，因依赖于天然防渗体，易受到渗流、管涌等不利影响，需要设置专用溢流道并进行防渗处理，防渗漏风险较高。土石坝坝基处理不当极易发生沉降、裂缝等问题，中间防渗体因黏性土易受到温度、湿度、含水率等变化的影响，对气候条件及土体质量要求较高。施工期导流较为复杂，需要单独设置导流方案，施工难度较大，且易受到水文、气象等汛期不利因素的影响。

2 水利水电工程中土石坝施工技术的应用

2.1 料场规划

实施料场规划的策略需要综合考虑地形条件、土石

料性质、开采方式、运输组织、环境影响及长期利用等因素，使料场的选址、开发、管理及恢复都符合工程要求。料场选址必须符合工程地质和水文条件，确保所选区域具有充足的土石料储量，同时具备良好的开采条件，以满足坝体填筑施工的长期需求。土石料的质量直接影响坝体的力学性能，因此在料场规划阶段，需要对料源区进行充分勘察，分析不同区域土石料的物理力学特性，并根据坝体填筑区域的不同要求进行合理分区，使各类材料的开采、加工及堆存均符合工程设计标准。在料场规划的实施过程中，开采方式的确定是关键，必须结合土石料的分布特征、地质结构及施工工艺要求，使开采过程能够高效进行，并确保料源的质量稳定性。料场的剥离、开采及加工工艺需要进行科学设计，以减少对料源的破坏，优化土石料的利用率，同时降低施工过程中不必要的资源浪费。土石料的堆存与管理直接影响施工进度和质量，因此需要在料场内合理布置堆场，使不同类别的土石料能够分类存放，避免因混杂导致材料性能下降。运输组织是料场规划的重要组成部分，运输路径的合理设计能够减少运输损耗，提高施工效率，使填筑材料能够及时、稳定地供应至坝体填筑区域。运输方式的选择需要结合施工进度、地形条件及施工设备的能力，使运输过程既经济又高效，同时减少对周围环境的影响。

环境保护是料场规划中不可忽视的环节，科学合理的规划能够降低对生态环境的破坏，使施工过程符合可持续发展的要求。料场的开采、运输及堆存过程中需要采取有效的环保措施，减少扬尘、噪声及水土流失，使施工活动对周围环境的影响降到最低。料场的恢复与再利用同样是规划中的重要内容，开采完成后，需采取工程措施和生态修复手段，使料场区域能够恢复至稳定状态，减少因施工造成的长期环境影响。料场规划的实施

还需要结合工程的总体进度,使料源的开采、储备及供应始终与坝体填筑施工保持同步,避免因料场管理不当影响工程进展。

2.2 土石料的质量要求

土石料的选择需综合考虑颗粒级配、含水量、力学特性、渗透系数、有机质含量以及抗风化能力等多方面因素,任何一项不达标均可能引发坝体沉降、裂缝或渗透破坏等工程隐患。土石料的颗粒级配是决定压实效果的关键参数。用于防渗体的黏土料要求粒径小于0.005mm的颗粒含量不低于15%,而反滤料则需严格控制不均匀系数在5以下,且粒径小于0.075mm的颗粒占比不得超过5%。对于坝壳砂砾料,最大粒径不宜超过铺筑层厚度的2/3,通常控制在150mm以内,其中粒径大于5mm的颗粒含量需占30%~70%以保证骨架结构。级配曲线应连续平缓,避免出现局部缺失或富集现象,否则容易导致压实不均匀。含水量控制直接影响压实密度。黏性土料的最优含水量需通过标准击实试验确定,施工时实际含水量与最优值的偏差应控制在±2%范围内。当含水量过高时,土体易形成弹簧土;含水量不足则会导致颗粒间摩阻力增大,难以达到设计干密度。砂砾料的含水量允许范围较宽,但需保持在3%~8%之间以利于振动压实。对于风化岩渣料,施工前需通过晾晒或洒水调节含水量,使其接近塑限的90%。力学性能方面,黏土料的塑性指数应介于7~17之间,液限不宜超过50%,以保证足够的抗剪强度。坝壳料的内摩擦角需大于 38° ,渗透系数需大于 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 以确保排水性能。防渗料的渗透系数必须小于 $1 \times 10^{-6} \text{cm/s}$,28天饱和无侧限抗压强度不低于150kPa。对于软岩填料,其软化系数应大于0.7,碾压后的压缩模量需达到20MPa以上。有机质和可溶盐含量是影响长期稳定性的潜在因素。防渗料中有机质含量不得超过2%,水溶盐总量需小于3%,其中硫酸盐含量需低于0.5%,以防止化学侵蚀造成的结构破坏。对于坝壳料,石膏含量需控制在1%以下,避免遇水后发生溶解塌陷。所有土石料均不得含有树根、草皮等腐殖质,且pH值应在6~9范围内。用于护坡的块石料需满足冻融循环25次后的质量损失率小于5%,饱和单轴抗压强度不低于30MPa。砂砾料中的软弱颗粒含量需小于10%,云母含量不得超过2%。对于高寒地区工程,填料需通过-20℃低温冻胀试验,冻胀率小于1%。在湿热气候条件下,易崩解岩类的崩解率应小于30%,且崩解后颗粒不得形成泥化夹层。

2.3 土石料的开挖及运输

开挖作业前需进行料场表土清理,清除厚度不小于30cm的腐殖层及植被根系,避免有机杂质混入填料。对于黏土料,一般采用正铲或反铲挖掘机分层开挖,每层厚度控制在1.5~2m以内,以减少对原状土的扰动。若遇高塑性黏土,需避免在雨季施工,防止含水量超标导致土料结块。砂砾料的开挖多采用装载机或斗轮式挖掘机,最大开挖深度不宜超过6m,以维持边坡稳定。对于风化岩或软岩料场,需采用松动爆破或裂石器进行预破碎,确保块径不超过填筑层厚的2/3,通常控制在80cm以下,以便后续碾压密实。开挖过程中需实时监测土石料含水率,若偏离最优值超过±2%,需采取晾晒或洒水措施调整。对于防渗料,开挖面应保持3%~5%的坡度以利排水,避免局部积水导致土体软化。硬岩料场需控制爆破振动速度在15cm/s以内,防止过度破碎影响级配。

开挖后的土石料应分类堆放,不同料源需间隔5m以上,并设置排水沟防止交叉污染。运输环节的关键在于减少土石料离析及水分损失。自卸车车载重宜控制在20~30t,车厢密闭性良好,防止细料在运输途中散失。黏性土料运输时间不宜超过2h,夏季高温时段需覆盖防雨布减少水分蒸发。砂砾料运输时应避免从高于3m处卸料,以防粗细颗粒分离。对于大块石料,车厢底部需铺设10~15cm厚的细料缓冲层,减少运输碰撞导致的破碎。运输道路的纵坡不宜超过8%,弯道半径需大于15m以保证行车安全。路面应铺设30~40cm厚的碎石垫层,定期洒水抑尘并修复车辙。重载车辆行驶速度控制在20km/h以下,急弯及陡坡路段需设置警示标志。当运距超过5km时,宜采用中转料场分段运输,减少车辆磨损及油耗。在填筑区卸料时,自卸卡车应沿坝轴线方向后退铺料,卸料堆间距控制在3~5m,推土机及时摊铺以减少粗细料分离。防渗料卸料高度不得超过1.5m,坝壳料卸料高度可放宽至2m,但需避免形成局部堆积。运输车辆进入填筑区前需清洗轮胎,防止夹带杂质污染填料。若采用带式输送机运输砂砾料,皮带宽度不应小于80cm,运行速度控制在1.5~2m/s,并在转运点设置缓冲挡板降低冲击力。

2.4 土石坝填筑施工

2.4.1 基础处理

对于覆盖层基础,首先需清除表层腐殖土和松散沉积物,清理深度一般不小于50cm,遇有机质含量高的区域应加大清除深度至100cm。清理后采用20t振动碾进行基底压实,要求压实度达到90%以上,对于砂砾石基础需通过相对密度控制,目标值不低于0.7。当基底存

在软弱夹层时,需采用挖除换填处理,换填料宜采用级配良好的砂砾石,分层厚度控制在30cm以内,每层压实后需进行动力触探试验,保证地基承载力大于200kPa。岩基处理重点解决裂隙发育和透水问题。表层强风化岩体需全部挖除,弱风化岩面采用高压水枪冲洗后,灌注水泥浆液封闭裂隙,灌浆压力控制在0.3-0.5MPa,浆液水灰比0.8:1。对于断层破碎带,应开挖至完整基岩以下1m,回填混凝土或水泥改性土,回填体28d抗压强度不低于15MPa。基岩面起伏较大时需修整成台阶状,台阶高度差不超过50cm,宽度大于100cm,以增强坝体与基岩的结合力。防渗处理根据地质条件选择不同措施。砂砾石地基采用混凝土防渗墙时,墙厚不小于60cm,嵌入基岩深度大于50cm,墙体渗透系数需小于 1×10^{-7} cm/s。当采用帷幕灌浆时,孔距按2-3m布置,灌浆段长5-8m,透水率控制标准为3Lu以下。黏土地基需设置排水盲沟,沟宽80-100cm,内填粒径20-50mm的碎石,纵向坡度不小于1%。

2.4.2 坝体填筑

坝体填筑是土石坝施工的核心工序,填筑前需完成碾压试验确定施工参数,不同分区填料必须严格区分运输和堆放,避免混杂。防渗体填筑采用黏土或砾石土时,铺料厚度严格控制在25-30cm范围内,推土机摊铺后采用平地机精平,平整度偏差不得超过 ± 3 cm。填筑时保持2%-4%的横坡以利排水,相邻填筑层结合面需刨毛处理,刨毛深度3-5cm。碾压采用20t凸块振动碾,行进速度2-3km/h,振动频率25-30Hz,碾压遍数6-8遍,压实度检测采用环刀法取样,每层取样不少于3点,要求压实度达到98%以上。坝壳料填筑根据材料类型采用差异化施工。砂砾石料铺厚40-50cm,采用18t自行式平碾碾压4-6遍,相对密度控制标准为0.75-0.85。堆石料铺厚80-100cm,选用25t拖式振动碾碾压4遍,加水碾压时加水量控制在填方体积的15%-20%,碾压后孔隙率不大于23%。过渡层填筑需与防渗体和坝壳料同步上升,高差控制在1-2层以内,铺料厚度30-40cm,采用小型振动碾补充碾压接缝部位。每层填筑前测量放样确定边界线,填筑过程中采用GPS定位系统监控铺料厚度,碾压机械安装压实度实时监测装置。雨后复工需清除表层5-10cm松散料,冬季施工时填料温度不低于5℃,冻土块粒径小于5cm且含量不超过10%。填筑至坝坡位置时需超填30-50cm,待削坡后采用斜坡碾压设备补压,保证边坡压实度不低于95%。

2.4.3 接缝处理

土石坝施工中的接缝处理是确保坝体整体性和防

渗性能的关键环节,主要包括层间结合面、施工分段缝以及坝体与岸坡连接部位的处理。这些薄弱环节若处理不当,极易成为渗流通道或结构弱点,直接影响工程安全。当填筑间歇超过12h时,必须对已压实表面进行刨毛处理,刨毛深度根据填料类型调整:黏性土料控制在3-5cm,砂砾料为5-8cm,堆石料需达到8-10cm。刨毛采用平地机配专用齿耙,形成均匀的锯齿状沟槽,单位面积刨毛痕迹不少于15条/ m^2 。新填料铺筑前,需用高压水枪冲洗结合面,冲水量控制在5-8L/ m^2 ,冲除表面松散颗粒后保持湿润状态1-2h。对于防渗体部位在结合面喷洒水泥浆液,浆液水灰比0.6:1,喷洒量3-5kg/ m^2 。施工分段缝处理采用台阶式搭接法。各施工段高差不得超过3层,相邻段接缝坡度不陡于1:3。接缝处超填宽度不小于1.5m,采用专门振动碾进行骑缝碾压,碾压遍数比正常区域增加2-3遍。填筑至设计高程后,沿接缝线开挖梯形槽,槽深50cm,底宽80cm,回填同标号防渗料并特殊压实。对于重要工程,还需在接缝处铺设土工膜,膜厚不小于1mm,搭接宽度100cm,采用双焊缝热合连接。岩质岸坡开挖成不陡于1:0.75的稳定坡度,表面凿毛处理后涂抹黏土浆,浆层厚度2-3cm。填筑时先铺30cm厚过渡料,再分层填筑防渗料,每层厚度减半,采用小型振动碾贴边碾压。土质岸坡需开挖结合槽,槽深100cm,宽度不小于200cm,槽内回填塑性指数高于坝体2-3个点的改良黏土。在连接部位每升高2m布置一道观测仪器,监测位移和渗压变化。雨季施工时,接缝面需覆盖防水布,防止雨水浸泡;冬季低温环境下,接缝部位采用蒸汽加热维持5℃以上,加热深度不小于20cm;大风天气需设置临时挡风墙,防止结合面快速失水。

3 结束语

总之,在水利水电工程中,土石坝作为重要的水工建筑物,承担着重要功能。随着施工技术的不断发展,未来的土石坝建设将更加注重施工过程中的技术细节。施工单位要加强施工管理,优化施工方法,并结合现代化的监测技术,有效提升土石坝的施工效率,为水利水电工程的顺利推进提供保障。

参考文献

- [1]黄炫博. 水利工程中土石坝施工质量控制要点分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (03): 207-209.
- [2]李万银. 水利工程土石坝坝体施工技术探析[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(12): 112-114+131.