

三合水库粘土心墙风化料坝坝体填筑施工关键技术及技术要求优化

饶文旺

云南能投缘达建设集团有限公司 云南 昆明 650101

【摘要】：粘土心墙风化料坝凭借工程造价低、取材便捷、适应地形能力强等优势，在中小型水利工程中应用广泛。三合水库大坝为粘土心墙风化料坝，最大坝高 56.50m，工程地处南亚热带高原季风气候区，地质条件复杂，施工难度较大。本文结合三合水库工程实际，系统梳理坝体填筑施工中的关键技术，分析现有施工技术要求存在的不足，提出针对性优化措施，旨在提升坝体填筑施工质量和效率，保障大坝长期运行安全，为同类工程施工提供参考。

【关键词】：三合水库；粘土心墙；风化料坝；坝体填筑；关键技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.013

1 引言

水利工程是保障水资源合理调配、防洪减灾、农业灌溉的重要基础设施，大坝作为水利枢纽的核心建筑物，其施工质量直接关系到工程整体安全和使用寿命。粘土心墙风化料坝以当地风化岩料为坝壳、粘土为防渗心墙，兼具防渗性和经济性，适合在地形复杂、建筑材料匮乏的地区建设。坝体填筑是粘土心墙风化料坝施工的核心工序，其施工质量直接影响大坝的防渗性能、抗滑稳定性和耐久性。本文结合三合水库工程施工实际，深入探讨坝体填筑施工关键技术，针对现有技术要求的不足进行优化，为工程施工质量控制提供技术支撑，同时为同类粘土心墙风化料坝施工提供借鉴。

2 三合水库工程概况

2.1 工程基本信息

三合水库枢纽主要由大坝、溢洪道及导流输水放空隧洞组成，坝址以上径流面积 23.4km²，多年平均径流量 1943 万 m³，设计灌溉面积 2.44 万亩，设计供水量 1158.3 万 m³。大坝为粘土心墙风化料坝，河床建基面高程 1452.00m，最大坝高 56.50m，坝顶宽 8.0m，上游坝坡坡比自上而下为 1:2.25、1:2.4，下游坝坡坡比自上而下为 1:2.0、1:2.2、1:2.2。大坝防渗采用粘土心墙，心墙顶高程 1508.00m，顶宽 3.0m，上下游坡比 1:0.2，底最大宽度 25.08m，最低建基面高程 1452.00m。心墙上下游均设置两层反滤料，上游护坡采用 C25 混凝土预制块及现浇混凝土护坡，下游采用网格梁植草护坡及干砌块石护坡，形成完整的防护体系。

2.2 施工环境条件

工程区属于南亚热带高原季风气候，冬无严寒、夏无酷暑，多年平均气温 18.5℃，最高温度 37.3℃，最低温度 -1.4℃；多年平均降雨量 1113.3mm，87%的降水量集中在 5 至 10 月，11 月至次年 4 月降水量稀少，属于枯期洪水时段。坝址区河谷呈 U 字型，两岸地形基本对称，岸顶较平缓，主要出露三迭系石

钟山组上段岩层，表层由第四系地层覆盖，存在 f1 逆断层，断层带宽度 1.5~2.2m。坝址区岩体风化程度差异较大，左岸全风化带下限深度 2.6~13m，强风化带下限深度 9.88~20.5m；右岸全风化带下限深度 6.4~9m，强风化带下限深度 18.5~22m；河床强风化带下限深度 0~5.5m。

2.3 筑坝材料概况

大坝工程所需天然建筑材料主要包括防渗土料、坝壳料、反滤料及垫层料，具体参数见表 1。防渗土料取自土 I、土 II 两个料场，均为地表第四系残坡积层浅黄色砂质粘土，土 I 料场运距 4.3km，有用储量 7.20×10⁴m³，剥采比 0.26；土 II 料场运距 7.5km，有用储量 20.63×10⁴m³，剥采比 0.31。坝壳料取自花石岩坝壳料场，采用强烈溶蚀风化~裂隙性溶蚀风化上带灰岩和强弱风化砂板岩，堆石料采用裂隙性溶蚀风化上带灰岩。反滤料及混凝土粗细骨料均从花石岩坝壳料场开采加工，质量和储量均能满足工程要求。

表 1 三合水库坝体填筑主要筑坝材料参数表

筑坝材料类型	设计用量 (×10 ⁴ m ³)	主要来源	关键指标
防渗土料	11.4	土 I、土 II 料场	粘粒含量偏高，渗透系数小
灰岩坝壳料	15.98	花石岩坝壳料场	强烈溶蚀风化~裂隙性溶蚀风化上带
砂板岩坝壳料	50.03	花石岩坝壳料场	强弱风化，最大粒径 ≤600mm
反滤料及垫层料	9.63	花石岩坝壳料场	碾压后粒径 < 0.075mm 含量 ≤5%

3 三合水库坝体填筑施工关键技术

3.1 施工前期准备技术

3.1.1 料场复核与规划

施工前需对选定的土料场、坝壳料场进行复勘,了解料场边界、有用层厚度、剥采比和材料质量等,并划定开采区域,埋设界桩。土料场开挖之前要先剥离表层含较多植物根系的腐殖土,剥离层平均厚度约为0.5m,剥离料堆放附近,待开挖完成后覆土复垦。根据料场地形、地质及运距确定开采顺序,土I料场优先开采,不足部分从土II料场补充,土II料场优先开采质量好、剥采比小的C区和A区,最后开采B区。坝壳料场采取台阶钻孔爆破分层开采方式,爆破前先做爆破试验,选择合适的爆破参数,保证开采出来的石料具有较好的级配、粒径。

3.1.2 碾压与爆破试验

施工前应做石料场爆破试验及坝壳料、粘土料、反滤料碾压试验,编制试验大纲,并经监理工程师审核同意后执行。爆破试验采用分台梯段爆破,不得洞室爆破,通过对试验结果进行分析,得到最优的爆破参数,保证开采出的石料满足坝体填筑的要求,爆破后产生的超径石料要及时运往料场处理。碾压试验在具有代表性场地选择,模拟实际施工条件,确定各种坝料压实机具、铺料厚度、碾压遍数、加水量等参数。粘土料碾压试验主要控制含水率,坝壳料主要控制孔隙率、干密度,反滤料主要控制颗粒级配、渗透系数。试验结束后整理出成果报告,报监理工程师和设计单位审查,确定施工控制指标。

3.1.3 坝基处理技术

坝基处理是坝体填筑的基础,对坝体稳定性有影响。施工前应将坝基、岸坡上的树木、草皮、树根、乱石、表层砂土及腐质土清除干净,并按设计要求对风化岩石和残坡积物进行处理。心墙基础开挖应清除第四系残坡积层及结构松散的全风化岩体,河床部位清除砂卵石层和变形松动岩体,均以强风化、弱风化岩体为建基面。坝基开挖由上至下,有边坡支护措施的地段边开挖边支护,保证边坡稳定。开挖时要做好临时排水工作,配置足够数量的排水设施来排走地下渗透水以及地表径流,从而避免因渗透而造成地基破坏。心墙部位的勘探钻孔清孔后用M20水泥砂浆回填封堵密实,勘探平洞用C15混凝土回填并回填灌浆,灌浆压力为0.2~0.3MPa,防止形成渗漏通道。

3.2 粘土心墙填筑关键技术

粘土心墙填筑应与相应的固结灌浆、帷幕灌浆施工同时完成并验收合格之后再行进行,填筑控制指标根据碾压试验结果确定。铺筑前检查填筑基面是否有水,若有地下水应及时排出,灌浆盖板等混凝土层表面应清理干净,并涂刷一层厚度为3~5mm的浓粘土浆,泥浆比重控制在1:2.5~1:3.0之间,提高

心墙与混凝土结构的结合性。粘土料铺筑采用定点测量方式,严格控制铺土厚度,不得超厚,应与上下游反滤料及部分坝壳料平起填筑,跨缝碾压,采用先填反滤料后填土料的平起填筑法。碾压机械的选择应根据填筑厚度来确定,第一层到1.0m厚的采用轻型碾压机械,不得用凸块碾;1.0m以上的采用振动凸块碾,边角部位1.5~2.0m范围内的采用蛙式夯机或手扶式振动碾夯实。碾压方向平行于坝轴线,特殊部位需要垂直坝轴线碾压时,监理和施工质检人员应现场监督,禁止铺料超厚、漏压或者欠压。已压实表面呈光面时,铺土前应洒水湿润并刨毛光面,分层取样检验合格后方可铺筑。填筑时出现弹簧土、松土层、干土层或剪切破坏等状况,应立即处理并由监理工程师验收合格之后,才能继续填筑新土。



图1 灌浆盖板凿毛工作参考图

3.3 反滤料与坝壳料填筑关键技术

3.3.1 反滤料填筑

反滤料的作用就是防止粘土心墙颗粒的流失,保证坝体渗透稳定,在施工时必须严格控制颗粒级配和铺设质量。反滤料用人工轧制法从花石岩坝壳料场开采加工,碾压后小于0.075mm的粒径含量不大于5%,渗透系数控制在I反 $\geq 5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、II反 $\geq 2 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 。反滤料铺设与粘土心墙同时进行,分层铺设,每层厚度根据碾压试验确定,铺设后及时碾压,保证压实度合格。加工好的反滤料应分别堆放在干净的场地,保持湿润,采取有效的防泥水、土块等杂物进入的方法。每200~500m³取样一次测定颗粒级配,不合格料严禁使用。

3.3.2 坝壳料填筑

坝壳料选用花石岩坝壳料场强烈溶蚀风化~裂隙性溶蚀风化上带灰岩和强弱风化砂板岩,堆石料选用裂隙性溶蚀风化上带灰岩,填筑时石料最大粒径不大于600mm,小于5mm的颗粒含量不大于15%,小于0.075mm的颗粒含量不大于5%。坝壳料填筑分层铺筑、分层碾压,铺料厚度按碾压试验确定,碾压机械用振动碾,碾压方向平行于坝轴线,碾压遍数按试验参数控制。碾压后堆石料孔隙率控制在23%,干密度2.10g/cm³,渗透系数 $5 \times 10^{-1} \text{cm/s}$;坝壳料孔隙率控制在24%,干密度

1.95g/cm³，渗透系数 2×10⁻³cm/s。坝壳料的填筑要同粘土心墙、反滤料同步进行，防止造成施工干扰，保证各个部位之间接合良好。上游坝基两岸清除第四系残坡积层及结构松散全风化岩体，清基深度 3~8m，河床清除冲洪积层，清基深度 3~4m；下游坝基两岸清除第四系残坡积层，清基深度 3~4m，河床清除冲洪积层，清基深度 2~3m，均以相应风化岩体作为建基面。

4 三合水库坝体填筑施工技术要求优化

4.1 料场开采技术要求优化

现有土 II 料场防渗土料天然含水率与最优含水率相差较大，占样品总数的 60%。优化措施为提前做好备料计划，土 II 料场开采矿材前留有足够时间进行晾晒，用翻晒、挖沟增大蒸发面积等方式来调节含水率，必要时使用洒水湿润的方式来调节，保证土料的含水率在最佳含水率±2%范围内。对坝壳料开采过程中边坡稳定性的不足进行改进，即料场开挖边坡设分级马道，马道宽度不小于 2.0m，坡比按岩体风化程度来定，全风化岩体边坡坡比不大于 1:1.5，强风化岩体边坡坡比不大于 1:1.2，弱风化岩体边坡坡比不大于 1:1.0；开采过程中及时清除边坡松动岩体，定期检查边坡稳定性，必要时采用锚杆支护，防止边坡坍塌。

4.2 坝料填筑技术要求优化

4.2.1 粘土心墙填筑优化

优化粘土心墙铺料厚度控制要求，根据碾压机性能及土料特性，铺料厚度控制在 20~30cm 之间，采用梅花形布点测量，保证铺料厚度均匀。优化碾压工艺要求，对边角部位、难以用振动碾碾压到位的区域，使用小型手扶式振动碾配合蛙式夯机夯实，夯实遍数不少于 3 遍，压实度符合要求。针对粘土心墙和反滤料之间容易产生渗漏隐患的问题，优化衔接施工要求，心墙和反滤料同步铺设、同步碾压，衔接处反滤料铺筑宽度加宽 0.5m，碾压时重点压实，保证衔接紧密，无空隙。

4.2.2 坝壳料与反滤料填筑优化

优化坝壳料粒径控制要求在料场设置筛分设备，对开采的坝壳料进行筛分，保证最大粒径不大于 600mm，小于 5mm 和 0.075mm 的颗粒含量满足设计要求，防止超径石料进入填筑区。优化坝壳料碾压参数，根据不同风化程度的岩料改变碾压遍数及碾压速度，强风化岩料碾压遍数不小于 8 遍，弱风化岩料碾压遍数不小于 8 遍，碾压速度控制在 2~3km/h，保证压实质量。反滤料铺筑优化要求分层铺筑、分层碾压，每层铺料厚度 15-20cm，碾压轻型振动碾碾压不少于 6 遍，保证反滤料压

实度≥95%。反滤料保护层的要求是，在反滤料铺设之后立即铺设坝壳料，防止反滤料受到污染或者破坏。

4.3 优化效果对比

通过对施工技术要求的优化，三合水库坝体填筑施工质量和效率得到显著提升，具体优化效果对比见表 2。

表 2 施工技术要求优化效果对比表

优化项目	优化前	优化后	优化效果
土料含水率控制	差异较大样品占 60%，影响压实质量	含水率控制在最优±2%，差异较大样品占 5%以下	粘土心墙压实度合格率提升至 98%以上
坝壳料压实质量	孔隙率偶尔超标，干密度不稳定	孔隙率、干密度均符合设计要求	坝壳料压实合格率提升至 99%以上
检测效率	检测频次不足，数据整理繁琐	检测频次合理，建立质量追溯体系	质量问题处理及时，检测效率提升 30%
施工安全	安全警示不足，爆破作业风险较高	完善安全防护，规范爆破作业	无安全事故发生，施工安全性显著提升

粘土心墙风化料坝在中小型水利工程中具有广阔的应用前景，随着水利工程施工技术的不断发展，未来可进一步探索智能化施工技术在坝体填筑中的应用，如采用无人机监测坝体填筑轮廓、智能碾压设备控制碾压参数等，提升施工智能化水平。同时，可加强筑坝材料改性技术研究，改善土料和风化料的性能，进一步提高坝体的防渗性和稳定性。

5 结论

三合水库粘土心墙风化料坝坝体填筑施工受地质条件、气候因素和筑坝材料特性影响较大，施工关键技术主要包括施工前期准备、粘土心墙填筑、反滤料与坝壳料填筑及质量控制等环节。通过严格执行料场复核、碾压与爆破试验、坝基处理等前期准备工作，规范粘土心墙、反滤料、坝壳料的填筑工艺，加强施工全过程质量控制，能够有效保障坝体填筑质量。针对现有施工技术要求存在的不足，从料场开采、坝料填筑、质量控制、施工安全与环境保护等方面提出的优化措施，能够有效解决土料含水率控制不佳、坝壳料压实质量不稳定、质量检测效率低等问题，显著提升施工质量和效率，确保大坝长期运行安全。优化后，粘土心墙和坝壳料压实合格率均提升至 98%以上，施工安全和环境保护水平得到明显改善，为工程顺利竣工奠定了坚实基础。

参考文献：

[1] 赵剑.粘土心墙坝填筑过程质量检测与控制途径[J].价值工程,2025,44(09):37-40.

- [2] 冯细霞,张旭,陈雷,等.粘土心墙-混凝土防渗墙土石坝三维非稳定渗流分析[J].水利技术监督,2025,(04):179-182.
- [3] 曾涛.东方红水库粘土心墙坝渗漏原因分析及处理措施[J].福建水力发电,2024,(02):60-62.
- [4] 李连胜,郑福杰,谢兴华,等.抽蓄电站粘土心墙坝浸润线及坝坡稳定变化特性[J].水电能源科学,2024,42(11):121-125.
- [5] 冯细霞,张旭,陈雷,等.粘土心墙-混凝土防渗墙土石坝渗流稳定分析[J].水利规划与设计,2024,(10):75-78.