

地震作用下渗流对平原水库土石坝稳定的影响

李阿龙

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 地震作用下, 渗流对平原水库土石坝稳定影响显著。地震波引发坝体能量叠加与共振, 可液化土层孔隙水压力骤升, 土体抗剪强度降低, 易致液化-滑移。渗流场动态调整使迎水坡渗流速度增、背水坡浸润线抬升, 坝体有效应力减小, 抗滑力削弱。同时, 地震-渗流耦合作用加剧坝体变形, 水平位移增大, 安全系数下降, 严重威胁坝体安全, 需采取防渗加固措施以提升抗震稳定性。

关键词: 地震作用; 渗流; 平原水库; 土石坝稳定; 影响

引言: 平原水库土石坝在区域水资源调控中扮演着重要角色, 其稳定性直接关系到下游安全。地震发生时, 坝体不仅承受地震动荷载, 还会因振动改变内部渗流特性, 导致孔隙水压力上升、有效应力降低, 引发土体抗剪强度衰减。尤其在可液化土层中, 地震-渗流耦合效应可能诱发液化滑移或管涌冲刷, 严重威胁坝体安全。因此, 揭示其作用机制对制定抗震防渗对策具有重要价值。

1 地震与渗流耦合作用的理论基础

1.1 地震作用下土石坝的动力响应机制

(1) 地震波传播时, 纵波与横波在坝体不同介质中传播速度存在差异, 引发能量叠加与共振效应。以150m级高土石坝为例, 坝顶因远离坝基约束, 地震响应放大系数可达2.5-3.0, 显著高于坝体中下部, 易导致坝顶结构破坏。(2) 土体液化受相对密度、颗粒级配等因素控制, 当粉砂土相对密度 $< 75\%$ 时, 在地震循环荷载作用下, 土颗粒骨架易发生错动, 孔隙水压力呈指数型累积, 当孔隙水压力接近总应力时, 土体丧失抗剪强度。(3) 地震引发的坝体永久变形与地震动强度、坝体材料特性相关。如汶川地震中, 部分土石坝因地震动峰值加速度超过 $0.2g$, 坝体出现5-15cm的竖向沉降, 同时水平位移达20-30cm, 主要源于坝体内部土体的剪切变形与颗粒重分布。

1.2 渗流对土石坝稳定性的影响路径

(1) 依据有效应力原理($\tau = c' + (\sigma - u)\tan\phi'$), 渗流场与应力场存在紧密耦合关系。渗流导致孔隙水压力 u 升高, 有效应力 $(\sigma - u)$ 降低, 进而使坝体抗剪强度 τ 下降, 增加失稳风险。(2) 地震作用下, 渗流场发生瞬态调整, 孔隙水压力随地震振动交替升降, 当孔隙水压力骤升时, 坝体抗滑力短时间内大幅削弱, 可能诱发坝体滑动。(3) 液化土层的渗透性会发生突变, 如天津尔王庄水库的粉土层液化后, 土颗粒排列松散, 渗透系数较

液化前增大1-2个数量级, 导致局部渗流集中, 形成管涌通道, 威胁坝体安全^[1]。

1.3 地震-渗流耦合作用模型构建

(1) 多物理场耦合方程需联立达西定律($v = -k\nabla h$)与动力平衡方程($\rho\ddot{u} = \nabla \cdot \sigma + \rho g$), 通过耦合孔隙水压力与应力应变关系, 实现对地震-渗流共同作用下坝体响应的描述。(2) 数值模拟常用有限元法, 将坝体离散为单元体, 输入地震波时程曲线, 求解渗流场与位移场的时空分布, 可直观反映耦合作用下坝体的变形规律与潜在破坏区域。(3) 关键参数敏感性分析显示, 渗透系数对安全系数的影响权重最大(约30%), 其次为地震烈度(约25%)、坝体坡比(约20%), 为土石坝抗震防渗设计提供参数优化依据。

2 地震作用下渗流对平原水库土石坝稳定性的影响分析

2.1 典型工程案例析

(1) 天津尔王庄水库作为华北平原重要的调蓄水库, 坝体采用均质土坝结构, 坝轴线总长5.5km, 坝顶高程14.5m, 最大坝高8.3m。地质勘察显示, 坝基及坝体下部存在厚2-5m的可液化粉土层, 颗粒级配中粉粒含量占65%-75%, 黏粒含量仅8%-12%, 饱和状态下抗液化能力较弱, 为地震-渗流耦合作用的敏感区域。(2) 通过FLAC3D软件模拟7度地震烈度(地震动峰值加速度 $0.15g$)工况, 结果显示坝顶加速度放大系数达1.8-2.2, 显著高于坝体中下部(1.2-1.4); 液化区域集中在坝基粉土层及坝体下游1/3区域, 液化深度最大达3.2m, 该区域土体抗剪强度降低60%以上, 成为坝体失稳的潜在隐患。(3) 地震作用引发渗流场动态调整, 迎水坡因地震振动导致土体孔隙结构改变, 渗流速度由地震前的 $0.02m/d$ 增至 $0.05-0.07m/d$, 增幅达150%-250%; 背水坡浸润线平均抬升0.8-1.2m, 部分区域浸润线出露, 导致坝后土体饱和度骤

升,抗剪强度大幅下降。(4)采用瑞典圆弧法进行稳定性量化评估,结果表明:不考虑渗流时,坝坡最小安全系数为1.35;考虑地震-渗流耦合作用后,安全系数降至1.05-1.15,下降幅度达0.2-0.3;同时,坝体下游区域水平位移显著增大,最大位移值由无渗流时的12cm增至20-25cm,增幅达15%-20%,接近规范允许位移限值。

2.2 多因素影响规律研究

(1)地震烈度与渗流作用存在明显非线性关系:当地震烈度为6度(0.05g)时,渗流场变化微弱,迎水坡渗流速度增幅不足50%,坝坡安全系数仅下降0.05-0.1;当烈度升至7度(0.15g),渗流作用显著增强,安全系数下降0.2-0.3;而8度(0.2g)地震下,渗流引发的液化区域贯通,安全系数骤降至0.95-1.0,坝体濒临失稳,表明7度是渗流对坝体稳定性产生显著影响的临界烈度^[2]。(2)坝体结构参数敏感性分析显示:坝坡坡比(水平/垂直)每增加1%(如从3:1增至3.03:1),坝体浸润线平均抬升0.1-0.15m,坝坡最小安全系数降低0.05-0.1;此外,坝顶宽度每减少1m,坝体抗震稳定性储备下降8%-10%,且渗流引发的裂缝扩展速度加快30%,说明坝体结构参数对渗流-地震耦合效应的响应较为敏感。(3)地质条件差异对稳定性影响显著:当坝基黏土覆盖层厚度从1m增至3m时,可液化粉土层受渗流作用的影响范围缩小40%-50%,液化深度减少1.2-1.5m;黏土渗透系数每降低一个数量级(如从 1×10^{-6} cm/s降至 1×10^{-7} cm/s),坝后渗流逸出点高程降低0.5-0.8m,有效抑制管涌风险,表明黏土覆盖层对渗流与液化具有明显的阻隔作用。(4)渗流路径与地震波传播方向存在交互作用:当渗流方向(顺坝轴线)与地震波传播方向(水平垂直坝轴线)一致时,地震动能量在渗流通道内易发生叠加,坝顶加速度放大系数较无渗流时增加0.3-0.5;而渗流方向与地震波传播方向垂直时,放大系数增幅仅0.1-0.2,说明顺坝轴线方向的渗流会加剧地震动放大效应,进一步削弱坝体稳定性。

2.3 失稳模式与破坏机制

(1)液化-滑移型破坏是平原水库土石坝的主要失稳模式:地震作用下,坝基粉土层液化后抗剪强度趋近于零,形成软弱滑动面,坝体沿滑动面发生整体滑移,表现为坝脚隆起(最大隆起高度达0.5-1.0m)、坡面出现多条平行于坝轴线的裂缝,裂缝宽度从坝顶的5-10cm向下延伸至液化层,最终发展为贯通性裂缝,导致坝体分段滑移。(2)渗流-冲刷型破坏多发生于坝后区域:地震引发的渗流集中使坝后土体孔隙水压力骤升,当水力梯度超过临界值(1.2-1.5)时,土体颗粒被渗流水带走,形成管涌通道(直径通常为5-20cm);若管涌未及时处理,

通道会不断扩大,引发流土现象,导致坝后出现塌陷坑(面积可达10-20m²),进一步削弱坝体结构完整性^[3]。(3)复合型破坏是最危险的失稳形式:地震首先使坝体产生纵向裂缝(长度可达50-100m),裂缝为渗流提供快速通道,导致孔隙水压力在裂缝周边急剧升高,加速坝基液化;液化后的土体又使裂缝进一步扩展,形成“裂缝扩展-渗流加剧-液化范围扩大”的恶性循环,最终引发坝体整体失稳,如某平原水库模型试验中,该模式下坝体失稳时间较单一破坏模式缩短40%-60%。

3 平原水库土石坝抗震防渗加固措施

3.1 防渗体系优化设计

(1)上游防渗采用复合土工膜+黏土斜墙双层防护体系,该技术在密云水库白河土坝修复中成效显著。具体做法为:先铺设1.5mm厚HDPE复合土工膜(采用双缝热熔焊接,焊接强度不低于母材强度的85%),膜上覆盖0.8-1.2m厚压实黏土斜墙(压实度 $\geq 96\%$),黏土选用黏粒含量25%-35%的粉质黏土,可有效阻断上游渗水通道,经监测,加固后上游渗流量较修复前减少90%以上,且在7度地震模拟中未出现膜体撕裂或黏土滑坡现象。(2)下游排渗采用褥垫排水+减压井联合系统,参考天津王庄水库加固经验。褥垫排水层铺设于坝后趾部,采用级配砂石(粒径5-20mm),厚度0.5-0.8m,横向宽度3-5m,同时沿坝轴线每30-50m布设一口减压井,井深延伸至坝基可液化土层以下1-2m,井管采用透水混凝土管(渗透系数 $\geq 1 \times 10^{-3}$ cm/s)。加固后,坝后浸润线平均降低1.5-2.0m,孔隙水压力消散速度加快40%,有效抑制管涌风险。(3)垂直防渗墙适用于坝基透水层较厚的场景,如汶川地震后某病险坝加固工程,采用薄型混凝土防渗墙(厚度30-40cm),墙体深度延伸至坝基不透水层(如黏土层或基岩层),墙体混凝土强度等级为C20,抗渗等级 $\geq P8$ 。通过液压抓斗成槽施工,墙体搭接处采用双反弧接头,确保防渗连续性。加固后,坝基渗流量减少85%以上,且在地震荷载作用下墙体未出现裂缝或位移,防渗效果稳定。

3.2 抗震结构强化技术

(1)坝体加固以“加宽坝顶、放缓坡比”为核心,如陡河水库土坝修复工程,将原坝顶宽度从5m拓宽至8m(增设1.2m高混凝土防浪墙),坝坡比从1:2.5调整为1:3(下游坡增设混凝土网格护坡,网格内铺设草皮)。经数值模拟分析,加固后坝体整体刚度提升30%,7度地震下坝顶水平位移减少25%-30%,竖向沉降控制在5cm以内,抗震稳定性显著增强。(2)基础处理针对可液化土层,采用振冲碎石桩加固技术,唐山地震后密云水库基

础改良工程中广泛应用。碎石桩直径0.8-1.0m, 桩长穿透可液化土层(通常为5-8m), 桩间距1.5-2.0m(呈等边三角形布置), 填料选用级配碎石(粒径20-50mm, 压实系数 ≥ 0.95)。加固后, 可液化土层相对密度从65%提升至80%以上, 地震作用下孔隙水压力累积量减少60%, 液化风险等级从“高”降至“低”。(3) 动态监测系统通过布设孔隙水压力计与加速度传感器实现实时预警, 传感器沿坝轴线每50-100m布设一个断面, 每个断面在坝体不同高程(坝顶、坝中、坝脚)及坝基液化敏感区各布设3-5个监测点。数据通过无线传输至中控室, 当孔隙水压力增长率超过0.05kPa/s或加速度峰值超过0.2g时, 系统自动发出预警信号, 为抗震防渗决策提供实时数据支撑, 如某水库监测系统曾成功预警一次6.5级地震引发的局部渗流异常^[4]。

3.3 应急管理策略

(1) 地震预警与水库水位预降结合, 参考日本水库应急管理经验, 当接收到地震预警信息(预计地震烈度 ≥ 6 度)时, 立即启动水位预降方案, 通过泄洪设施将水库水位在24-48小时内降至死水位以下1-2m, 减少水体对坝体的侧向压力, 同时降低渗流风险。如日本某平原水库在2011年东北地震前, 通过预降水位, 使坝体在9度地震中未出现明显渗流或变形。(2) 震后快速评估与抢险采用“无人机巡查+数值模拟”协同模式, 震后1小时内出动无人机(搭载高清相机与红外热成像仪)对坝体进行全覆盖巡查, 识别裂缝、塌陷等表观损伤; 同时利用有限元软件快速模拟震后坝体应力与渗流状态, 定位潜在滑坡区或管涌点。抢险时优先采用砂石反滤料封

堵渗漏通道, 并用编织袋装土筑堤加固坝坡, 如汶川地震后某水库通过该模式, 在72小时内完成险情处置, 避免坝体失稳。(3) 长期维护需定期检测防渗体系与结构完整性, 每年汛前、汛后各开展一次全面检测: 对复合土工膜采用充气法检测焊接质量(气压维持0.2MPa, 30分钟内压降不超过5%为合格); 对减压井进行抽水试验, 确保出水量与降深满足设计要求; 对振冲碎石桩采用标准贯入试验, 检测桩体密实度。同时每3-5年开展一次数值模拟复核, 根据监测数据调整加固方案, 确保坝体长期处于安全状态。

结束语

地震作用下, 渗流对平原水库土石坝稳定性的影响不容忽视, 其引发的液化、滑移及管涌等风险, 严重威胁着水库的安全运行。通过深入研究地震与渗流的耦合作用机制, 我们能够更准确地评估坝体稳定性, 为抗震防渗设计提供科学依据。未来, 应继续加强监测与预警系统建设, 优化加固措施, 提升土石坝的抗震防渗能力, 以保障平原水库在极端地震条件下的长期安全稳定。

参考文献

- [1]周清勇,刘智,洪文浩.地震作用下渗流对土石坝渗流与稳定的影响分析[J].水利水电快报.2020.41(05):28-30.
- [2]倪沙沙.降雨入渗对土石坝渗流场及坝坡稳定性的影响[J].水电能源科学.2019.34(02):49-52.
- [3]宋国涛.渗流作用对土石坝边坡稳定的影响分析[J].黑龙江水利科技.2019.43(02):27-28.
- [4]牛运光.小型水库土石坝防渗加固措施研究[J].水利水电技术,2023,54(03):101-107.