

挡墙结构稳定性评估方法及其在水利工程中的应用

李兴华

广东粤水电勘测设计有限公司, 中国·广东 佛山 528000

摘要: 水利工程中的挡墙结构广泛承担岸坡支护与渠道稳定任务, 其稳定性直接关系运行安全, 设计阶段多依托极限平衡法进行静态验算, 然现场条件往往复杂, 水位波动、地基非均质与施工扰动等易诱发失稳。为增强响应能力, 部分项目引入数值模拟、多因素耦合计算及动态安全系数修正机制, 以某渠一处重力式挡墙改造为例, 在地下水位偏高 1.6 米、回填速率超限 30% 的条件下, 墙体第 9 天出现向外鼓胀与裂缝扩展, 经现场数据反馈修正模型并调整工序, 成功避免结构破坏, 此案例表明, 稳定性评估不应限于静态验算, 又在于动态识别现场偏差、提前干预设计盲区。

关键词: 挡墙结构; 水利工程; 稳定性评估; 极限平衡; 数值模拟; 现场反馈机制

Methods for Evaluating the Stability of Retaining Wall Structures and Their Application in Hydraulic Engineering

Li Xinghua

Guangdong Yue Hydropower Survey and Design Co., Ltd., China Guangdong Foshan 528000

Abstract: Retaining wall structures in hydraulic engineering widely undertake tasks of bank slope support and channel stability, and their stability is directly related to operational safety. During the design stage, static verification is often based on the limit equilibrium method; however, site conditions are often complex, and fluctuations in water level, heterogeneous foundations and construction disturbances can easily trigger instability. To enhance responsiveness, some projects have introduced numerical simulation, multi-factor coupled calculations, and dynamic safety factor correction mechanisms. Taking the renovation of a gravity retaining wall in a certain canal as an example, under conditions where the groundwater level was 1.6 metres high and the backfill rate exceeded the limit by 30%, the wall bulged outward and cracks extended on the ninth day. The model was corrected based on onsite data and the construction sequence adjusted, successfully avoiding structural damage. This case indicates that stability assessment should not be limited to static verification but should also involve dynamic identification of onsite deviations and early intervention in design blind spots.

Keywords: Retaining wall structure; Hydraulic engineering; Stability assessment; Limit equilibrium; Numerical simulation; Field feedback mechanism

0 引言

挡墙在各类水利工程中被广泛设置于边坡、水渠、堤岸等关键区域, 其首要作用是承受来自土体或水体的侧向压力, 保障工程实体在长期运行中保持稳定。与一般市政或交通工程不同, 水利挡墙所处环境常伴随高水位差、季节性渗流波动及地质不确定性, 一些原本处于边界稳定状态的挡墙在运行中出现位移突变、裂缝加宽甚至整体倾覆的情况, 特别是在降雨集中时段, 墙后回填压实不良区域往往成为破坏的引爆点, 设计部门与施工单位在应对此类问题时, 面临的不仅限于模型参数误差, 又在于对“结构—地基—水文”耦合行为缺乏动态认知机制。此背景下, 稳定性评估的方式正在从单一静态计算, 向兼顾数据反馈与过程响应的多维系统演化。

1 挡墙结构稳定性影响因素及破坏模式分析

1.1 影响挡墙稳定性的主要因素

挡墙的稳定状态受控于一系列结构性与环境性变量, 其中地基土体的物理—力学性质居于主导地位^[1]。在典型水利工程中, 如渠道岸坡和堤防侧墙, 常见地基类型包括中密粉质黏土、碎石夹层及粉砂饱和层, 其内摩擦角 ϕ 通常在 $18^\circ \sim 30^\circ$ 之间, 黏聚力 c 范围为 $12 \sim 45$ kPa。对于墙背填土, 一旦压实度低于 92%, 土压力分布将偏离设计假设, 增加滑动风险。

挡墙结构形式也显著影响其稳定边界。重力式挡墙依靠自重抵抗滑动与倾覆, 常采用 C30 混凝土浇筑, 墙底宽度 B 约为墙高 H 的 $0.5 \sim 0.7$ 倍; 而悬臂式或扶壁式挡墙则通过背肋板和底板延展增加抗力, 但对地基刚度要求更

高,在水利场景中,常遇到回填土层湿陷性强、压缩模量低的问题,尤其在渠道衬砌下方,地基变形模量 E_s 低于 10 MPa 时,常出现结构接缝处开裂^[2]。

外部荷载方面,除静态土压力外,水压力变化是影响较大的动态因子。墙后存在自由水面或渗流路径时,应计入静水压力与渗透升力,采用双线法或三角压力分布估算,若遇洪水调度或暴雨突袭,渗流比降可达 0.6~1.2,此时反滤结构不完善将导致细颗粒迁移,引发管涌或局部隆起。

1.2 常见的挡墙失稳模式

滑动失稳是水利挡墙常见破坏类型,表现为整体向下游方向移动,滑移面通常位于墙底与垫层交界处,摩阻力不足为其主要诱因,在某三等水库南坝段改造工程中,原设计底宽 1.2m、墙高 3.8m 的重力式挡墙,在运行第四年雨季滑移总位移达 47mm,实测滑动安全系数仅为 1.05,远低于规范下限(1.30)。

倾覆失稳多发生于墙体顶部重载或回填土堆置不对称情况下,若挡墙基础埋深小于 $H/3$,抗倾覆力矩不足容易引发前缘抬起,例如某渠道段,在施工期间将大量建材集中堆放于右岸挡墙背后,引起墙趾前缘瞬时离缝、底板前翘 12° ,墙体瞬时前倾,被迫加设锚杆体系稳固。

地基承载力破坏则常由软弱层、回填杂填土或老滑坡体引发。某堤防挡墙因地基持力层位于 2.8m 深度以下,表层为粉质杂填土层,经原位载荷板试验测得承载力特征值仅为 65 kPa,低于设计要求值的 50%,最终造成挡墙向内沉降形成墙顶纵向裂缝。

1.3 水利工程中典型挡墙结构的特点

与城市挡墙或边坡防护墙不同,水利工程中挡墙需长期面对变水位、饱和浸润及流速冲刷三重耦合作用^[3]。在东南沿海高地下水位区域,常采用双层反滤+排水管的复合排水结构,防止墙后水压积聚;材料方面,为减少渗流作用力对结构稳定影响,墙后反滤料推荐采用粒径 2~10mm 碎石混合料,并设置下排水盲沟。

另一个关键特征是水利挡墙结构常需与其他设施(如溢洪道、消力池、引水渠)融合施工,基础处理方式需因地制宜,例如在某水库副坝施工中,因挡墙基础紧邻原岩基,采用浅层削坡+浆砌片石压脚+帷幕灌浆联合处理,既满足强度要求,也有效封闭可能渗流路径。

2 挡墙结构稳定性评估方法

2.1 极限平衡法(LEM)

极限平衡法是目前设计阶段最常使用的稳定性检算法。其核心在于选取潜在滑动面,对滑动体与抗滑力矩进

行力矩平衡分析。经典的库仑-朗金理论适用于重力式结构,以土压力主动区倾角 α 、背坡坡度 β 、内摩擦角 ϕ 为主要参数,可估算主动土压力 $P_a=0.5 \gamma H^2 K_a$ (γ 为土重, H 为墙高, K_a 为主动土压系数)。

在挡墙倾覆验算中,采用 $M_o/M_r \geq 1.5$ 为判据,滑动安全系数通常要求大于 1.3。但此法存在显著局限:不考虑结构变形、不适用于非均质地基、无法反映墙体裂缝及局部应力集中等现象,实际应用中,常结合试验得出折减系数修正理论值。

2.2 数值模拟方法

随着计算能力增强,数值模拟在稳定性评估中应用愈发普遍。以有限元法(FEM)为例,可建立墙体-地基-水域三元体模型,材料参数如弹性模量 E 、泊松比 μ 、渗透系数 k 等均可自定义输入,在某引水渠挡墙加固项目中,利用 MIDAS GTS NX 建立模型,通过分步加载模拟回填过程,最终墙体最大水平位移控制在 14mm,符合设计限值(20mm)。

数值模拟优点在于可评估不同工况下的响应变化,如突遇超标降雨、快速蓄水等,但精度依赖于输入参数质量与边界条件设定,岩土材料非线性、接触面模型精细度都会影响结果,对此,工程中往往辅以监测数据修正模型,实现“现场-模型”双向闭环。

2.3 稳定性安全系数法

除力学模型外,经验性安全系数评估法也被广泛使用。现行《水工建筑物设计规范》中推荐的安全系数值:滑动 1.30,倾覆 1.50,承载力 1.80,评估方法多基于简化假设进行经验修正,如设定墙背土压沿高度线性分布、水压作用为恒定。

近年来,一些工程引入动态安全系数调整机制,如某堤治理工程,在施工阶段布设倾斜计、土压计与孔压计组合传感系统,实时获取结构响应数据,并以此反推安全储备区间,通过动态评估,避免过度保守设计,节省约 18% 的混凝土用量。

2.4 多方法联合分析趋势

为克服单一评估方式的局限,工程实践中正逐步采用极限平衡+数值模拟联合分析策略。典型做法是在初步设计阶段采用极限平衡法快速筛选不利断面,再选取代表性断面进行数值建模精算,此方法在该堤防工程中取得良好效果,项目团队使用 GeoStudio 进行稳定性模拟,将墙体抗滑条带设计宽度精度从 $\pm 20\text{cm}$ 控制至 $\pm 5\text{cm}$ 。

软件工具的融合使用也更为普遍。例如在 PLAXIS 中

调用用户自定义材料本构模型模拟高液限黏土蠕变行为,或在 ABAQUS 中引入弹塑性接触算法分析挡墙—土界面剪切特性,提高模拟真实度。

3 稳定性评估方法在水利工程中的实际应用

3.1 典型水利工程案例分析

在某渠扩建项目中,设计单位原采用 C30 重力式挡墙,基础坐落于天然粉质黏土层上,地基承载力特征值约为 110 kPa,墙体结构高为 3.6m,底宽设计为 2.1m。墙背设置双层碎石反滤垫层,排水系统包含盲管+竖向碎石通道组合,春节前夕施工单位为压缩工期,在未完成墙后反滤和排水系统贯通施工的情况下,安排大型自卸车连续卸土,48 小时内非分层碾压的回填厚度已达 1.8m,与设计压实节奏存在严重偏差^[4]。因地表积水排导不畅,渗入墙后回填区形成饱和区,第四天利用便携式地质雷达进行检测时,操作员反馈扫描波形出现多处异常回波,分析判定墙后已局部出现高含水率团块。

第 6 天凌晨遭遇连续降雨,累计雨量达 42.7mm,早上 6:40 巡查人员在墙体中部发现约 1.2 米长的裂缝,裂缝口宽达 12mm,并伴随局部反弯鼓起现象。项目设立的自动化位移监测系统数据显示,墙体水平位移速率在 48 小时内从 0.03mm/d 突升至 0.42mm/d,监理单位随即组织应急技术小组对现场作业全面停工,施工方紧急启动深层卸载操作,采用人工挖除墙后局部高位填土,减少堆载,结构咨询单位在现场条件基础上依托 PLAXIS 建立二维剖面模型,输入实测土层参数、水头条件及施工时序数据,模拟结果显示滑动安全系数已降至 1.12,逼近极限临界状态,后续又对模型进行微调,评估不同卸载速率下土压力扩散趋势,为后续措施提供决策依据,此类案例揭示出,稳定性评估若仅限于静态图纸层面的验算,将难以捕捉临时扰动或积水导致的快速风险积累,工程安全保障需依托现场数据驱动的动态模型快速响应,形成“结构—地基—水文”联动机制。

3.2 评估结果在设计优化中的指导作用

在某渠续建工程中,设计初期为节省成本,将挡墙背面采用粒径 5~15mm 石屑进行回填处理,垂直排水通道间距设计为 6.5m,施工单位使用 PVC 波纹管,埋设深度为墙高 2/3 处。经施工单位配合进行的数值模拟评估显示,在连续蓄水 5 日后的运行状态下,墙后最大孔隙水压力接近 30 kPa,显著高于设计阶段预测的 18~20 kPa,且孔压中心偏离预期位置,下移近 0.6m,导致土压力异常集中于墙体中部偏下区域,墙背鼓胀趋势明显。对此,设计单位将

回填料调整为中粗砂,并严格分层碾压控制填土含水率,排水通道间距缩小至 4.0m,同时在墙顶增设泄水孔以释放滞留水压^[5]。新方案实施后,项目运行第一年内,自动化监测系统记录的墙体最大水平位移为 6.7mm,远低于限值 15mm,且各测点位移曲线平稳,无突跳变化,结构运行状态稳定。

在某河综合整治项目中,原设计采用悬臂式挡墙结构,基础位于回填粉土上层,地勘资料显示持力层分布存在不连续带,深浅差异最大处达到 1.5m,结构稳定边界随之波动。评估技术团队现场勘核后建议更换为重力式挡墙+预应力锚杆组合形式,锚杆采用 HRB400 钢筋,长度控制在 4.8~6.0m 之间,锚固段进入风化岩层,入岩深度不小于 0.8m,采用水泥—水玻璃双液浆注浆封孔,设计抗拔力 60kN。在相同填土荷载条件下,模型计算结果显示此方案下的倾覆安全系数由原先的 1.44 提升至 1.88,墙体水平位移最大值降低 27%,结构响应更均匀,安全储备空间得到有效增强。

3.3 结合监测与物联网的动态评估探索

近年来,水利挡墙工程开始尝试引入物联网系统实现数据实时采集与模型同步修正。在福建宁德某小型水库除险加固工程中,项目布设了 18 套土压力传感器、孔压计和倾角传感器,数据实时上传至数据中台,每 5 分钟一次采集更新。系统通过设定“评估门限值”,一旦某点位压力突变超过 15%,即触发模型自动修正并更新安全系数评估结果。

例如 2023 年 7 月,台风“杜苏芮”过境期间,该系统提前 4 小时识别下游段某墙体孔压值异常上升至 42kPa,快速演算模拟结果后确认滑动风险升高,施工方立即启动预案,封堵墙后明沟、临时加设卸荷反压块,成功避免结构破坏,此模式构建了“监测—识别—演算—响应”的闭环体系,代表了评估从设计阶段走向全周期实时响应的新趋势。

4 结语

挡墙结构在水利工程中的安全性维持依赖于对稳定状态的精准掌握与动态应对。传统的极限平衡法虽在初步设计中具备简便高效优势,但面临现场工况多变性时常显不足,数值模拟技术的引入,在材料非线性、地基不均匀、水文扰动等方面提供了更为精细的认知通道,尤其是在嵌入监测数据之后,其动态预测能力具备实践意义。案例表明,评估工作不应局限于静态验算,而需贯穿施工至运营全过程,尤其在多源不确定性共存的背景下,评估模型的

“适应性”成为关键，未来水利工程中的挡墙设计与运维，应更多依托联合分析机制与数据反馈系统，在保障结构稳定的同时，实现技术手段与工程管理的双向耦合。

参考文献：

[1] 陈飞. 水位下降对挡墙及灌注桩堤防结构稳定性影响分析[J]. 水利技术监督, 2024,(08):189-191+214.

[2] 甄天宇, 肖成志, 王子寒等. 顶部基础荷载作用下加筋土挡墙的稳定性的分析[J]. 河北工业大学学报, 2024,53(06): 92-100.

[3] 陈飞. 不同挡墙结构型式在枢纽工程的应用[J]. 水利技术监督, 2024,(04):202-205+237.

[4] 李燕. 基于提升抗震稳定性的框架剪力墙结构主体连梁施工技术[J]. 四川水泥, 2024,(03):137-139.

[5] 何昭宇, 李翔, 崔旭东等. 组合扶壁式挡土墙结构设计及稳定性分析[J]. 工程勘察, 2024,52(04):31-37.

作者简介：李兴华（1995.09-），男，汉族，江西九江人，硕士，研究方向：水利工程。