

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.016

库岸桥梁受库水位周期性涨落影响研究

王子健¹, 李胤坤¹, 王小荣¹, 武黎明², 凌玲³, 罗文杰¹

(1. 重庆科技大学 土木与水利工程学院, 重庆 401331);

2. 重庆工商职业学院 城市建设工程学院, 重庆 400052;

3. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 为了探究库岸桥梁受库水位波动影响条件下桥梁的稳定性,以巫山县江东片区白羊溪至神女庙的某典型库岸桥梁为例,通过地质环境调查,采用有限元分析软件模拟库水位升降过程中边坡渗流场的变化,并结合现场监测数据验证模型可靠性,进而分析库水位变化对桥梁稳定性的影响机制,探讨库水位对库岸桥梁稳定性的影响以及相应的优化策略。结果表明:库水位升降速率越快,岸坡内部浸润线的变化速率也随之加快,渗流效应更为显著,从而导致桥梁位移量增大;而在库水位升降速率相同的情况下,升降幅度越大,桥墩产生的位移也相应增加;在防治措施方面随着防渗膜的覆盖高度的增加,桥梁桥墩的竖向位移也会呈逐渐减小的趋势。

关键词: 坡岸桥梁;库水位变化;渗流分析;位移分析

中图分类号: TV697.25;U448.21 文献标识码: A 文章编号: 1672-1144(2025)06-0117-07

Analysis on the Influence of Reservoir Bank Bridge on Reservoir Water Level

WANG Zijian¹, LI Yinkun¹, WANG Xiaorong¹, WU Liming², LING Ling³, LUO Wenjie¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

2. School of Urban Construction Engineering, Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 400052, China;

3. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to investigate the stability of the reservoir bank bridge under the influence of reservoir water level fluctuation, a typical reservoir bank bridge from Baiyangxi to Shennu Temple in the Jiangdong area of Wushan County was taken as an example, this work conducted geological surveys and employed finite element analysis software to simulate changes in the slope seepage field during reservoir water level fluctuations. The model's reliability was validated using field monitoring data (error < 6%) to analyze the mechanism by which reservoir water level fluctuations affect bridge stability. The impact of reservoir water levels on the stability of embankment bridges and was analyzed and corresponding optimization strategies were proposed. The research results are as follows. Faster reservoir water level fluctuation rates accelerate changes in the internal wetting line of the slope, intensifying seepage effects and increasing bridge displacement. Under identical fluctuation rates, larger amplitude fluctuations correspondingly increase pier displacement, providing a basis for further seepage-deformation coupling analysis. Regarding mitigation measures, increasing the coverage height of the impermeable membrane progressively reduces the vertical displacement of bridge piers.

Keywords: slope-retaining bridges; reservoir water level fluctuations; seepage analysis; displacement analysis

我国山地广布、河流密集。受复杂地形制约,这类地区为保障交通通行,常在山地地形中架设桥梁,

致使库岸桥梁成为库区及沿江城市的重要工程特征^[1]。近年来,为统筹防洪减灾、水资源调配及能

收稿日期:2025-06-11

修稿日期:2025-07-23

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0208)

作者简介:王子健(1979—),男,博士,教授,主要从事桥梁与隧道结构防灾减灾等方面的研究工作。E-mail:zijianwang2016@163.com

通讯作者:罗文杰(1998—),男,硕士研究生,主要从事桥梁结构防灾减灾方面研究工作。E-mail:1458111690@qq.com

源开发需求,我国在主要流域实施了大规模水库枢纽建设^[2-3]。尽管此类工程显著提升了经济社会效益,却改变了河道的原生水文地质系统^[4]。水库运营阶段,为实现航运调度与发电效能优化,库区水位呈现周期性涨落。如三峡水利枢纽,其汛期蓄水位上限达 175 m,枯水期最低运行水位调至 145 m,其中 4—5 月间水位骤降幅度可达 30 m。研究表明,库区水位的周期性升降是控制岸坡稳定状态的重要变量,通过改变土体力学性能及水动力状态,造成岸坡变形累积,最终对库岸桥梁的服役安全造成潜在危险^[5-9]。轻微的岸坡变形可能引发隆起、沉降或水平位移,导致桥梁结构受损;严重时则可能引发边坡失稳,造成更大的灾害风险,进而造成桥梁的坍塌。库水位的涨落会导致坡岸桥梁的变形以及位移,水的浮力和冲击力会导致桥梁基础的移位,使得桥墩发生位移,在陡峭坡岸或土质较为疏松的地方,强烈的水流冲刷会导致土体的局部及整体失稳,造成库岸桥梁发生结构性破坏^[10-13]。

因此,在当前的坡岸研究领域,库岸桥梁受库水位的影响也成为最重要和最前沿的研究热点之一,其中包括对库岸桥梁受库水位周期性涨落的影响研究。

根据《水利工程边坡设计规范》(SL/T 803—2020)第 5.2.3 条规定,库水位骤降工况下岸坡稳定安全系数普遍降低 15%~25%;当水位变幅超过 10 m 时,黏土质岸坡的变形量可达水位变幅的 0.3%~0.8%。监测数据表明,约 65% 的库岸失稳事故发生在水位以日均 0.5 m 以上速率下降的工况期间,在库岸桥梁受边坡影响研究方面,国内外学者针对库水位变动引发的岩土工程问题开展了系列研究: Jones 等^[14]对 Roosevelt 湖岸坡失稳事件进行统计分析,数据显示库水位动态调整阶段边坡失稳事件发生概率显著上升,其中水位骤降期滑坡占比达 30%。中村浩之等^[15]通过全域性水库滑坡数据库构建,揭示 76% 的库区滑坡集中于水位骤降阶段,证实库水快速消落是岸坡失稳的关键因素;Corean 等^[16]研究表明,库岸失稳事件呈现显著的阶段性特征——蓄水初期事故率达峰值,蓄水后 3—5 年为次高风险期。研究进一步指出,水位周期性涨落通过改变岩土体渗透系数及孔隙水压力场分布,显著弱化岸坡稳定性。在渗流-变形耦合机理研究方面,刘毅^[17]依托高精度监测系统,采用特征点法的分析,定量揭示了万州麻地湾滑坡地下水位对库水位涨落的滞后效应。Strozzi^[18]创新性地采用合成孔径

雷达干涉测量技术(InSAR),实现了毫米级边坡位移场的全域动态监测。吴琼等^[19]基于非饱和渗流理论,构建了具有隔水底板约束条件的缓倾角岸坡三维有限元模型,其浸润线计算值与实测数据的拟合度达 92%。彭响龙^[20]通过建立地基-基础-上部结构共同作用模型,揭示了地基两端以及中间的沉降对建筑结构附加内力的影响规律。当前库岸桥梁水致灾变机理研究仍处于探索阶段,系统性成果相对匮乏。黄立^[21]以现浇库岸桥梁为研究对象,指出在降雨或泄洪条件下,库岸边坡地下水位的变化对库岸的稳定性产生了显著影响。Neuman^[22]开创性地将有限元数值模拟技术引入饱和-非饱和渗流耦合分析领域,为后续研究奠定理论基础。杨金等^[23]基于 Geo-Studio 平台构建了黄土坡滑坡水土岩体相互作用模型,深入探讨了库岸坡内地下水位的动态变化规律。汪过兵^[24]同样采用 Geo-Studio 软件,结合地下水位监测数据,对库水位变化下黄土坡滑坡的地下水变化进行了模拟研究。吴铁营^[25]通过金安桥工程案例研究,揭示了水位波动会改变浸润线的变化,从而导致土体有效应力重分布的机制。唐晓松等^[26]对比了不同软件计算浸润线时的误差。李晓莲等^[27]采用敏感性分析法,在不考虑地下水影响的情况下,研究了均质边坡在自然状态下黏聚力、内摩擦角、弹性模量、泊松比、土体密度、坡角及抗拉强度等因素对边坡稳定系数的影响,并通过稳定系数的变化规律分析了土质边坡的稳定性。

以上这些研究成果为坡岸桥梁的地基施工、加固和维护提供了理论依据,但是库岸桥梁病害的形成机理与演化规律尚未明确,不同水位工况下桥梁应力-变形分布特征缺乏系统研究,库水位升降对边坡稳定性的影响机制需进一步量化,针对性防治措施的科学性与有效性亟待验证,因此对库岸桥梁受库水的影响研究很有必要,可为提高库岸桥梁的稳定性、延长其使用寿命的研究工作提供参考。

1 工程概况

巫山县江东片区白羊溪至神女庙的某典型库岸桥梁,桥梁左幅起讫点桩号为 K3+243.800—K3+463.800,跨径组成 7 m×30 m 预应力混凝土简支 T 梁,桥梁全长 210 m;桥梁右幅起讫点桩号为 K3+213.800—K3+493.800,跨径组成为(2×30) m+2×(3×30) m+30 m 预应力混凝土简支 T 梁,桥梁全长 280 m。该大桥桥型布置图如图 1。

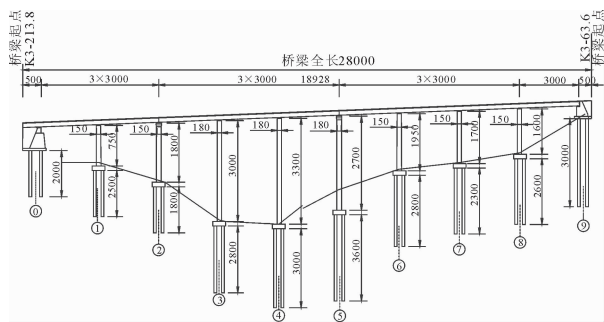


图 1 库岸桥梁桥型布置图

该区处于 II 级构造巫山复式向斜核部至南翼转换带,主构造线呈 $70^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 方向分布。构造包括龙门峡背斜、高唐观向斜及长梁子倒转背斜等三级构造。勘察区处于巫山东北部地区,岩层为三叠系下统嘉陵江组四段 (T_1j^4) 碳酸盐岩,倾角变化梯度显著,如图 2 所示。

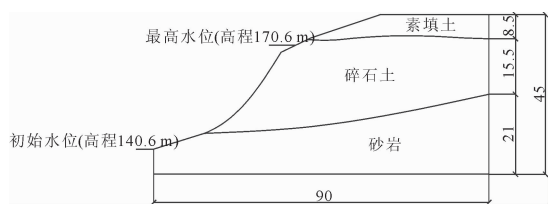


图 2 大桥周边地质构造纲图

2 建立有限元计算模型

基于上文边坡地质特征与桥梁结构特性,构建有限元计算模型。受复杂地形影响,为提升模型收敛性,采用图 3 所示勘探剖面作为基准几何形态(底边 $95 \text{ m} \times$ 高度 45 m),通过轴向拉伸形成三维坡体结构。基于勘探数据,将坡体岩土划分为三个地质层(参数见表 1),建立边坡模型。

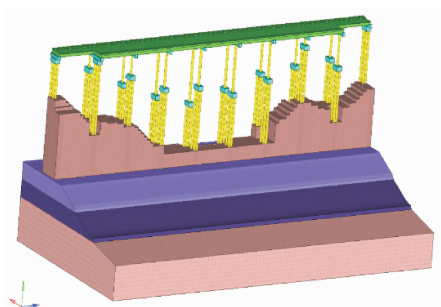


图 3 整体模型

采用有限元对边坡模型进行单元划分,共有 53 594 个节点及 22 486 个单元。基于勘探数据,将模型中黄海高程 156 m 的水平基准面确定为库区初

始渗流基准面。构建上部桥梁模型。桥梁结构采用 C30 混凝土,模型材料选用摩尔-库仑本构模型^[28-30],具体参数参照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)第 4.1.5 条,详见表 2。桥梁的网格划分时选择六面体单元,桥梁的基础网格划分为 188 100 个节点,174 242 个单元,桥梁的网格划分为 209 400 个节点,146 059 个单元。坡岸桥梁整体模型图如图 3 所示。

表 1 岩层参数表

材料	密度 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	内摩擦 角/ $(^{\circ})$	弹性模 量/MPa	深度 /m	泊松比
素填土	1832	11.6	7.42	0~5	0.38
碎石土	2080	24.2	50.00	5~15	0.25
砂岩	2510	32.9	3121.00	>15	0.17

表 2 材料参数表

构件	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/MPa	泊松比
上部结构	2500	30000	0.20
下部结构	2500	30000	0.18
基础	2500	30000	0.18

3 库水升降作用下坡岸渗流分析

库水位的急剧升降会引发边坡表层水压力、土体基质吸力及渗流力场的重构,进而引发边坡变形。基于此,本节结合岸坡浸润线动态分布特征,分析坡岸地基的应力变化。根据地下水渗流作用遵循质量守恒原理,可推到渗流连续方程。鉴于渗流速度和方向受多方面影响,需构建微分方程表现渗流场的质量守恒。如图 4 所示,选取六面体微分单元,设定 t 时刻单元中心速度为 v ,密度为 ρ ^[31]。

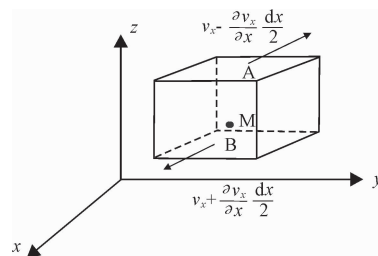


图 4 渗流作用下的单元体

在 dt 时间内,由 x 方向流进以及流出该微小单元的流体质量可表示为:

$$\left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dydzdt - \left(v_x - \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) \left(\rho - \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) = \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx dy dz dt \quad (1)$$

式中: ρ 为单元体的密度, kg/m^3 ; v_x 为 x 轴方向水流经单元体的速度, m/s 。

同样, 得到 y, z 方向上流进及流出单元体的流体质量, 其计算公式为:

$$\left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{dy}{2}\right) \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{dy}{2}\right) dx dz dt - \left(v_y - \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{dy}{2}\right) \left(\rho - \frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{dy}{2}\right) = \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} dx dy dz dt \quad (2)$$

$$\left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{dz}{2}\right) \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{dz}{2}\right) dx dy dt - \left(v_z - \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{dz}{2}\right) \left(\rho - \frac{\partial \rho}{\partial z} \frac{dz}{2}\right) = \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} dx dy dz dt \quad (3)$$

式中: v_y, v_z 分别为 y 轴和 z 轴方向水流经单元体的速度, m/s 。

根据质量守恒定律, 可得单元体流体质量差等于单元体自身的质量变化, 即:

$$\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}\right] dx dy dz dt = \frac{\partial}{\partial t} (\rho dx dy dz) dt \quad (4)$$

库水位的升降会在岸坡内部引发渗流现象, 进而产生渗流力, 并改变土体的基质吸力。当地下水位存在高度差时, 会形成动水压力, 即渗流力, 其渗流力的计算公式为:

$$G_D = \gamma_w I \quad (5)$$

式中: G_D 为渗流力, kN/m^3 ; γ_w 为水的重度, N/m^3 ; I 为水头梯度。

在 ABAQUS 的 Property 模块中, 可在 Sorption 中定义吸湿曲线控制基质吸力; 结合 Cho S E 等^[32] 提出的经验公式计算公式如下:

$$K_w = a_w K_{ws} / [a_w + (b_w (\mu_a - \mu_w))^c] \quad (6)$$

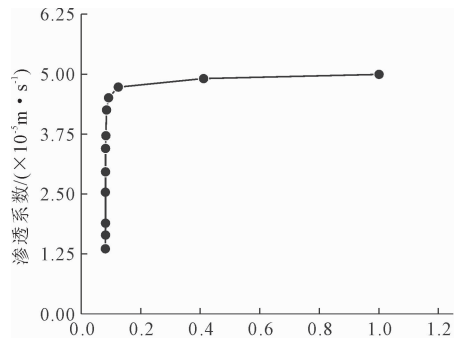
$$S_r = S_i + (S_n - S_i) a_s / [a_s + (b_s (\mu_a - \mu_w))^c] \quad (7)$$

式中: K_w 为非饱和土渗透系数; K_{ws} 为土体的饱和渗透系数; μ_a 为孔隙气压力; μ_w 为孔隙水压力; $\mu_a - \mu_w$ 为基质吸力, kPa ; a_w, b_w, c_w, a_s, b_s 为材料系数; S_r 为饱和度; S_i 为残余饱和度; S_n 为最大饱和度。

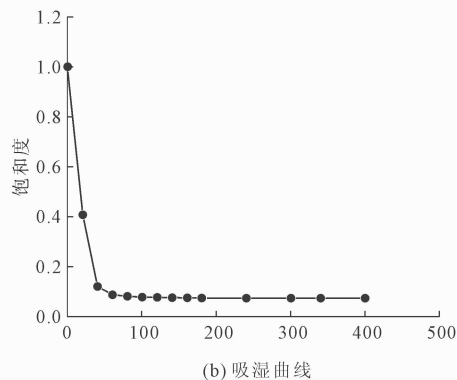
结合以上公式及工程勘察土工试验获得了本文所用到的沿途的水土特征曲线, 如图 5 所示。

浸润线作为边坡饱和区与非饱和区的分界, 其上方为非饱和土体, 下方为饱和土体。其动态变化能够直观表现边坡地下水位的变化特征。通过提取库水位升降过程中边坡浸润线的变化规律发现: 库水位上升期内, 浸润线高差呈现增长特性, 其增幅与

水位上升的幅度呈正相关; 当库水位达到峰值 170 m 时, 浸润线高差达到最大值。这一现象是因为地下水水位响应的滞后特性, 主要源于渗流过程中水流阻力对地下水水位动态响应的迟滞作用。



(a) 饱和度关系曲线



(b) 吸湿曲线

图 5 水土特征曲线

4 库水位升降对坡岸桥梁影响

库区水位升降会改变边坡内部的应力分布, 导致边坡变形响应, 并逐渐向上部累积, 最终导致桥梁地基发生位移。地基位移必然引起桥梁基础的位置变化, 而边坡不同区域的位移差异性会导致各桩基的变形位移不一致。桩基间的不同位移可能导致上部结构的附加应力, 特别是竖向沉降的不均易造成桥梁结构的局部损伤甚至整体失稳。

4.1 桥梁的竖直位移分析

为系统研究桥梁水平位移变化特征, 选取具有显著水平位移的桥墩 QD3—QD6 基底位移监测值, 绘制位移时程曲线(图 6)。分析表明: 库水位上升阶段, 各桥墩均呈现向上的竖向位移(隆起现象), 且位移量随水位抬升呈正相关性增长。监测曲线在 72 h 附近出现小幅变化, 水位上升后, 位移量又回到稳定增长趋势。至 203 h, 库水位达到峰值(对应洪峰过境时段), 桥梁竖向位移同步达到峰值, 随后迅速衰减。值得注意的是, 位移回弹速率呈现先急后缓的趋势, 这与库水位的非线性消退过程密切相关。

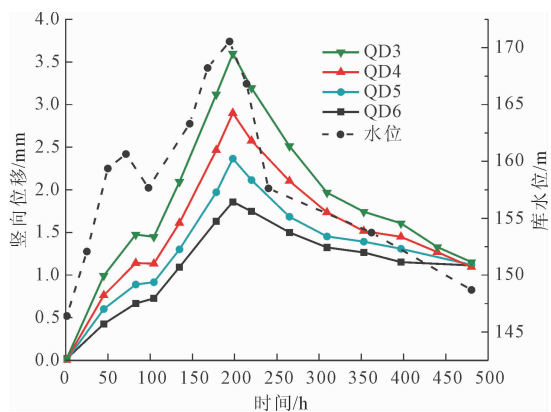


图 6 桥墩 QD3—QD6 竖向位移时程曲线

4.2 桥梁位移监测

4.2.1 监测方案

采用科维 NTS332RION 全站仪(精度 $\pm 1\text{ mm}$) 进行监测,确保数据可靠性。以建设方提供的已知水准点作为基准点,其布设于地基变形影响区外,可规避施工活动及库水位波动对基准数据的干扰。通过全站仪将场外已知高程水准点引测至场内,完成控制网基准点的布设。水平控制网采用闭合导线法,其中包含水平角观测与距离测量。现场监测过程中,采用多测回测角程序,每个测站完成三个测回监测。图 7、图 8 分别为三维变形监测水平控制网及现场监测图。

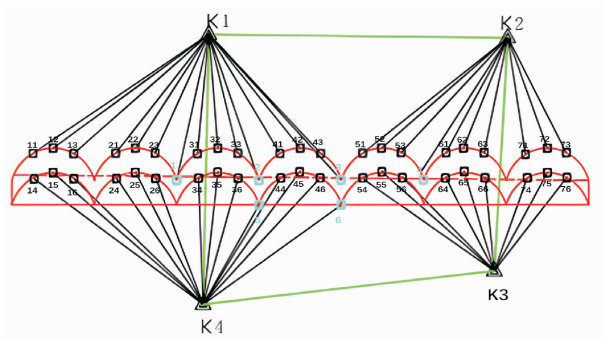


图 7 三维变形监测水平控制网



图 8 工程现场检测

4.2.2 监测结果与数值模拟的对比

基于洪水来临前的监测数据分析,桥梁沉降已进入稳定阶段,表明其变形量不受上部结构荷载增加的影响。监测期内每日于 8:30 与 16:30 进行两次位移数据采集,为消除昼夜温差引起的结构热胀冷缩效应对监测精度的影响,最终位移值取两次观测数据的平均值。鉴于临库区桥墩受水位波动影响更为显著,选取临库侧首排桥墩(编号 QD1、QD6、QD10)作为监测对象,构建以桥梁竖向位移为纵坐标、监测时长为横坐标的时间-位移关系曲线(图 9)。曲线对比表明:监测值与数值模拟结果在量值上存在偏差,但整体变化趋势呈现较高吻合度-库水位上升期位移量持续增加,回落期则逐步减小,且各时段监测位移均低于模拟值。

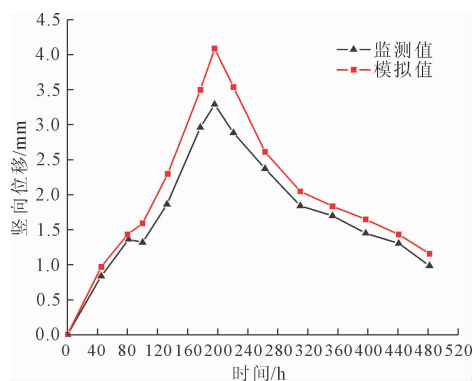


图 9 模拟监测对比图

选取观测周期内 QD1、QD6、QD10 三个桥墩的竖向位移峰值进行监测数据与数值模拟结果的对比分析(详见表 3)。当库水位在 203 h 达到峰值时, QD6 桥墩的模拟位移峰值为 3.9 mm,实测值则为 3.6 mm,二者绝对偏差 0.3 mm,相对偏差为 5.3%。表 3 数据显示,临库侧桥墩(QD1、QD6、QD10)在库水位峰值阶段的位移模拟值与监测值误差率均低于 6%。需说明的是,本模型未考虑土体软化及力学参数时变劣化等复杂因素,故存在理论误差,但 6% 以内的偏差范围符合工程精度要求。综合表明,本文采用的数值模拟方法具有较好可靠性。

表 3 竖直位移对比表

桥墩编号	QD1	QD6	QD10
模拟值/mm	3.8	3.9	3.4
监测值/mm	3.4	3.6	3.3
误差率/%	4.7	5.3	2.8

4.3 库水位升降速度与桥梁位移关系式

前文表明,在库水位变幅相同的条件下,升降速

率与库岸桥梁最终位移量呈负相关。但需特别指出,在相同观测时段内,库水位快速上升阶段(如上升工况),边坡渗流力增量显著、坡面库水压力加载效应增强、土体吸水弱化基质吸力效应引发的膨胀变形更为突出,从而导致桥墩位移量增大,此现象与前文结论存在矛盾。究其原因,桥梁位移响应受多因素协同作用,除升降速率外,还与水位变化的持续时间存在关联。为消除时间变量的干扰,本节研究通过提取各工况等时段位移监测值位移曲线,如图 10 所示。

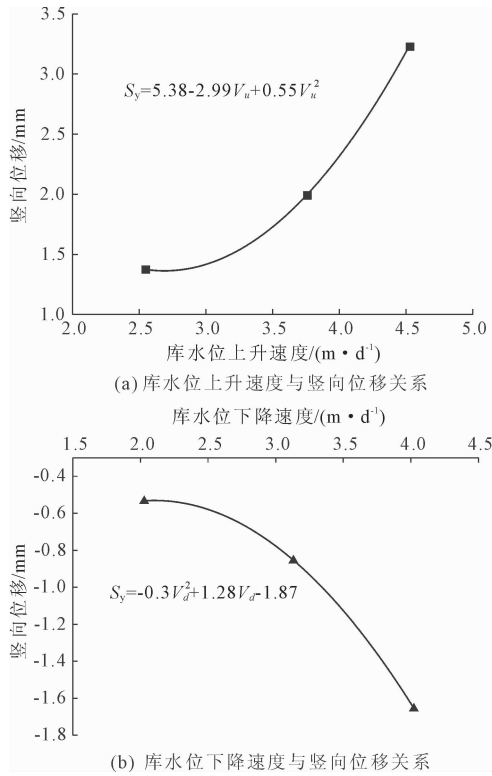


图 10 库水位升降速度与竖向位移关系曲线

水位的升降速度与库岸桥梁的位移关系拟合公式如下:

$$S_y = 0.55V_u^2 - 2.99V_u + 5.38 \quad (8)$$

$$S_y = -0.3V_d^2 + 1.28V_d - 1.87 \quad (9)$$

式中: S_y 为桥梁桥墩的竖向位移,mm; V_u 、 V_d 为库水位上升速度和下降速度,m/d。

5 防治措施

5.1 岸坡表面增设防渗材料

可以通过模拟来设置防渗材料,在 ABAQUS 中,通过调整表层土体的渗透系数模拟防渗膜,设置渗透系数为 0.003 8 m/h。库岸表层渗透系数对岸坡地下水动态及渗流力分布具有关键性作用。通

过控制表层渗透系数可有效抑制地下水水位变化幅度,从而削弱渗流力对岸坡的渗流效应,最终实现对库岸桥梁的保护目的。工程实践表明,酒泉循环经济产业园区大泉水库^[33]、黑龙江台马沟赤泥湾库^[34]等工程采用土工膜防渗技术后,地下水调控效果显著。为定量评价不同防渗措施的工程效益,本研究设置多组对比工况以评估最优防渗方案,如表 4 所示。

表 4 防渗措施

工况	工况变量	防渗膜渗透系数/($m \cdot h^{-1}$)	覆盖高度/m
1	防渗膜	0.0038	8
2	加设高度	0.0038	12
3		0.0038	16
4	无防渗膜	0.011	0

在坡岸增加防渗膜高度后,根据有限元模拟结果,当防渗膜覆盖高度为 16 m、12 m、8 m、0 m 时,桥梁桥墩中最大竖向位移分别为 6.27 mm、6.48 mm、6.76 mm、6.89 mm,由此可知,防渗膜覆盖高度与桥墩的最大位移呈负相关。

为定量评估岸坡桥墩位移变化规律,以位移变化最显著的 QD6 作为研究对象,绘制其位移时程曲线(图 11)。其中,图 11(a)为不同工况下 QD6 位移

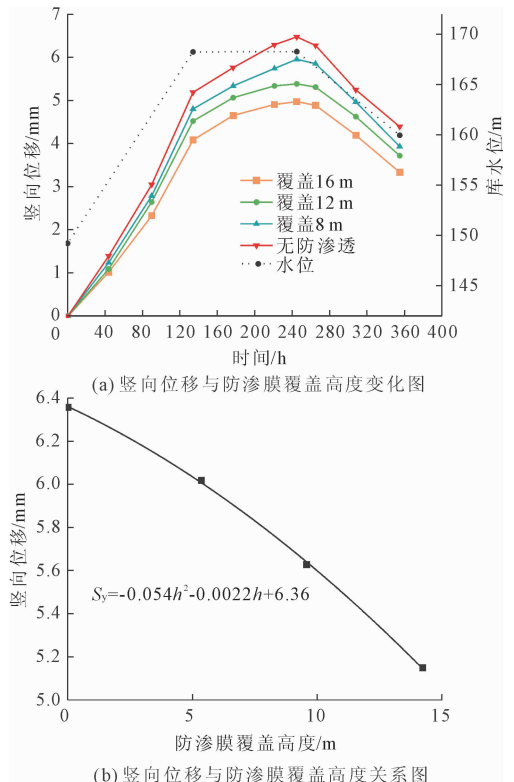


图 11 桥墩位移与防渗膜覆盖高度关系曲线

对比曲线,图 11(b) 反映防渗膜覆盖高度与竖向位移的关系。结果表明:桥墩水平与竖向位移峰值均随防渗膜覆盖高度的增加呈现负相关趋势。其作用机理在于,防渗膜覆盖范围的扩大可显著提升对边坡渗流效应的抑制效能——通过降低坡体内部渗流场强度,有效削弱水位变化对桥墩位移的影响。

以上桥墩位移与防渗膜覆盖高度关系式如下:

$$S_y = -0.054h^2 - 0.0022h + 6.36 \quad (10)$$

式中: h 为防渗膜覆盖高度, m。

5.2 防治效果评价

通过上文可知,在坡岸增设防渗膜可以减小库水升降对库岸桥梁的影响。图 12 可以看出不同防治效果,其中效果最佳为 17.92%。

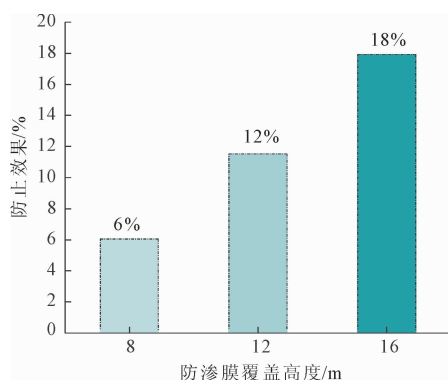


图 12 防治效果对比图

此外,本文所用材料参数均是在依托工程地质报告的基础上设定,该库区还存在大量由砂土、黏土等构成的坡岸,这类坡岸上的桥梁会受库水位升降的影响比较大,所以在该库水桥梁工程采用加设防渗膜的防治效果会比较明显。

6 结论

(1) 库水位的涨落会对库岸内部的浸润线产生影响。随着库水的上升,库岸内部的浸润线会随着上升,形成左右高差明显的趋势;随着库水的下降,会形成浸润线呈两端比中间低的形状。

(2) 库水位升降导致库岸桥梁产生竖向位移,桥墩的最大位移值与其距库区的距离呈负相关。库水位上升时,桥墩隆起值逐渐增加;库水位下降时,桥墩隆起值逐渐减小。

(3) 通过对现场竖向位移的监测与数值模拟的对比,发现误差均小于 6%,所以本文采用的数值模拟方法具有较高的准确性和可靠性。

(4) 防渗膜可有效减小桥墩位移,覆盖高度与位移呈负相关,且应用于工程上防治效果也较明显。

参考文献:

- [1] 彭钦帮,谢树荣,赵华祥,等. 基于库岸再造影响的公路总体设计研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017,13(7):173-174.
- [2] 石珊珊. 为中国经济破浪前行贡献水利力量[N]. 中国水利报,2025-01-07(1版).
- [3] 王艳. 水利枢纽安全生产标准化建设措施及成效[J]. 中国标准化,2022(12):136-138.
- [4] 胡小柯,魏怀东,李亚,等. 水坝建设对石羊河流域水资源生态环境的影响[J]. 中国农村水利水电,2014(9):28-30,34.
- [5] 周振凯. 金沙江白鹤滩水库蓄水初期岸坡变形破坏规律、机制与稳定性研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2023.
- [6] 赵守良,刘品. 水库水位变化对临近桥梁岸坡的影响分析[J]. 交通科技,2022(2):56-60.
- [7] 潘少华,路瑞利,蒋舒. 考虑蠕变劣化效应的库岸边坡变形机制与预测研究[J/OL]. 人民长江,1-10[2025-09-11]. <http://link.cnki.net/urlid/42.1202.TV.20250721.1559.005>.
- [8] 刘鑫松,王林峰. 考虑边坡角度和水位变速升降的库岸浸润线计算方法研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2025,47(5):11-18.
- [9] 刘飞飞,汤华,秦雨樵. 不同水位升降速率对库岸桥基边坡稳定性影响分析[J]. 皖西学院学报,2024,40(2):121-128.
- [10] 叶子. 库水位变化对桥梁岸坡稳定性的影响研究[J]. 海河水利,2022(5):101-103.
- [11] 刘昂. 跨越库区桥梁基础受力性能研究[J]. 公路,2022,67(7):243-248.
- [12] 丁安娜. 不同坡高条件下河道水下礁石爆破对库岸构筑物的振动效应[J]. 东北水利水电,2022,40(5):53-57,72.
- [13] 梁为邦,张钧,张正平. 某水库库岸稳定性与坍岸对公路桥墩和路基影响研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2019,41(S1):91-96.
- [14] Jones F O, Embody D R, Peterson W L, et al. Landslides along the Columbia River Valley, descriptions of landslides and statistical analyses of data on some 200 landslides in Pleistocene sediments[S]. US Government Printing Office, 2006.
- [15] 中村浩之,王恭先. 论水库滑坡[J]. 水土保持通报,1990,10(1):53-64.
- [16] Cojean R, Cai Y. Analysis and modeling of slope stability in the Three-Gorges Dam Reservoir (China)——the case study of Huangtupo landslide[J]. Journal of Mountain Science, 2018(2):166-175.

- [31] Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. The JRA-55 re-analysis: general specifications and basic characteristics [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2015,93(1):5-48.
- [32] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO irrigation and drainage paper 56. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO, 1996.
- [33] Sheffield J, Wood E, Roderick M. Little change in global drought over the past 60 years [J]. Nature, 2012,491:435-438.
- [34] Liu Yujie, Chen J, Pan Tao. Analysis of changes in reference evapotranspiration, pan evaporation, and actual evapotranspiration and their influencing factors in the North China Plain during 1998—2005 [J]. Earth and Space Science, 2019,6:1366-1377.
- [35] Abtew W, Obeysekera J, Iricanin N. Pan evaporation and potential evapotranspiration trends in South Florida [J]. Hydrological Processes, 2011,25:958-969.
- [36] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968,63(324):1379-1389.
- [37] Xu Jinqin, Zeng Yan, Qiu Xinfa, et al. Aridity changes and related climatic drivers in the drylands of China during 1960—2019 [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2021,60:607-617.
- [38] 王开存. 全球大气再分析及其在中国的适用性[J]. 大气科学学报,2025,48(4):529-555.

(上接第 123 页)

- [17] 刘毅. 三峡库区万州区堆积体滑坡地下水响应及稳定性研究[D]. 北京:中国地质大学,2021.
- [18] Strozzi T, Farina P, Corsini A. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry [J]. Landslides, 2005,2(3):193-201.
- [19] 吴琼,唐辉明,王亮清. 库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J]. 岩土力学, 2009,30(10):3025-3031.
- [20] 彭响龙. 地基不均匀沉降对多层混凝土框架结构的影响分析[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.
- [21] 黄立. 库岸边坡稳定性特征及边坡房屋不均匀沉降裂缝分析[D]. 长沙:中南大学,2022.
- [22] Neuman S. Saturated-unsaturated seepage by finite elements[J]. Journal of Hydraulics Division Asce, 2003,99(12):2233-2250.
- [23] 杨金,简文星,杨虎锋. 三峡库区黄土坡滑坡浸润线动态变化规律研究[J]. 岩土力学,2022,33(3):853-858.
- [24] 汪过兵. 湿陷性黄土地基不均匀沉降对砌体结构影响的研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2022.
- [25] 吴铁营. 库水对桥梁基础的影响分析及防护研究[D]. 长沙:中南大学,2020.
- [26] 唐晓松,郑颖人,林成功. 浸润面位置的确定方法对涉水边坡稳定性分析的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(S1):2814-2819.
- [27] 李晓莲,郭亚兵. 岩土体材料特性对土质边坡稳定性影响的敏感性分析[J]. 四川水泥,2023(3):48-50.
- [28] 张瑞金,胡奇凡. 摩尔库伦和修正摩尔库伦本构有限元模拟结果对比分析[J]. 中国房地产业,2015(8):256-258.
- [29] 吴强,吴章利. 摩尔库伦本构模型参数敏感性分析及修正[J]. 陕西水利,2012(2):148-149.
- [30] 董林伟. 数值模拟中常用岩土本构模型及其参数研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2011.
- [31] 李翠兰,王冶志. 基于 Geo-Studio 与渗流试验的寒区堤防工程安全性研究[J]. 水利科技与经济,2024,30(6):79-84.
- [32] Cho S E, Lee S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration [J]. Computers and Geotechnics, 2001,28(3):185-208.
- [33] 刘英杰,韩秀娟,库永慧,等. 甘肃河西地区山前洪积扇地段水库全库盘土工膜防渗关键技术研究与应用[J]. 水利规划与设计,2019(1):113-115,142.
- [34] 李斌. 尾矿库环保防渗措施设计探讨[J]. 有色冶金设计与研究,2009,30(1):10-11.