



库水位循环作用下 架空斜坡式码头力学性能研究^{*}

尚明芳^{1,2}, 刘小强¹, 周世良³

(1. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071;
2. 武汉中交交通规划设计有限公司, 湖北 武汉 430021; 3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 依托云南省富宁港一期工程, 建立架空斜坡式码头三维有限元模型。基于水岩相互作用, 考虑岸坡岩土体在库水位循环作用下的劣化损伤, 定性分析得到架空斜坡式码头桩基及轨道梁的弯矩、剪力及轴力变化特点, 为进一步研究库水位循环作用下架空斜坡式码头整体性能及力学退化特性提供基础, 为实际工程中库区码头运营后的监测及防护提供建议。

关键词: 库水位循环; 架空斜坡式码头; 岸坡; 桩基; 弯矩; 剪力; 轴力

中图分类号: U 656.1⁺39 文献标志码: A 文章编号: 1002-4972(2015)04-0106-07

Mechanical properties of overhead sloping wharf under water level cycles

SHANG Ming-fang^{1,2}, LIU Xiao-qiang¹, ZHOU Shi-liang³

(1. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China;
2. CCCC Traffic Planning and Design Co., Ltd., Wuhan 430021, China;
3. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Relying on the first-stage project of Funing port in Yunnan province, we establish a three-dimensional finite element model of the overhead sloping wharf. Based on the water-rock interaction, considering the degradation damage of bank slope's rock and soil mass under water level cycles circulation in the mountainous rivers, we obtain the bending moment, the shear and axial force of the pile and track beam qualitatively. The result can be a basis for further studying the whole performance and mechanical degradation characteristics of the overhead sloping wharf. It can also provide recommendations for monitoring and protection practical engineering after operation of the terminal at the reservoir area.

Keywords: water level cycles; overhead sloping wharf; bank slope; pile foundation; bending moment; shear stress; axial force

山区河流库岸边坡在高水位长期浸泡及库水位周期性循环作用下, 岩土体与库水位之间将发生一系列的物理、化学及力学作用^[1]。在这一复杂的水岩相互作用条件下, 岩体力学性能将产生一定的劣化损伤, 岸坡整体稳定及码头结构物的力学性能也将表现出显著的时变特性^[2-3]。

根据作用对象的不同, 库水位循环作用可分为 3 大类: 水对岩(石)土体的劣化损伤作用; 水对岸坡时变稳定性的影响; 水与岸坡及码头结构物之间的综合作用。

1) 水与岩(石)土体相互作用。许宏发^[4-5]根据软岩的单轴压缩蠕变试验, 探讨了软岩强度和弹性模量的时效性特点。刘新荣等^[6-7]通过室内

收稿日期: 2014-06-09

^{*}基金项目: 交通运输部应用基础研究项目 (2014329814070); 云南省交通运输厅科技项目 (702237)

作者简介: 尚明芳 (1986—), 女, 硕士, 助理工程师, 从事港口、海岸工程设计及研究。

试验,以“饱水-风干”的循环作用方式模拟了岸坡岩体在库水位周期性涨落下抗剪强度劣化损伤过程。

2) 水对岸坡时变稳定性的影响。周世良^[12]以某泥岩库岸为例,探讨了库水位周期性循环条件下岸坡稳定性的时变特点及破坏模式。刘新荣^[8]通过对岩石材料的室内试验及库岸边坡的数值模拟,得到了岸坡在库水位循环作用下的累积性损伤及渐进性破坏的基本过程。

3) 水与岸坡及码头结构物之间的综合作用。梁丰收^[9]在未考虑岸坡岩土体力学性能劣化的前提下,通过工程实例,分析了岸坡与斜坡道桩基之间的相互作用。邓方明^[10]通过有限差分法对库区码头桩基的变形特点进行相关分析,但未对其力学性能做进一步研究。刘春华^[11]探讨了三峡库区架空斜坡式码头在一个蓄水周期下桩基的位移变化曲线。刘小强^[12]通过二维有限元分析,得到山区河流架空斜坡式码头桩基及轨道梁结构力学性能变化特点。但该研究忽略了码头结构物与岸坡相互作用的空间特性。

综上所述,库区码头结构物力学性能研究中,传统的二维、静态研究方法未考虑库水位周期性循环造成岩土体力学特性的劣化损伤,计算结果并不能真实地反映码头结构物的力学性能。因此,开展库水位循环作用下码头结构物整体性能研究具有一定的意义。文献[3]依托云南省富宁港一期工程,对库区码头的变形特点进行了相应研究,但未对其力学特性进行系统分析。本文作为文献[3]的延伸部分,将对库水位循环作用下架空斜坡式码头力学性能予以进一步研究。

1 工程概况

富宁港位于广西百色水利枢纽库区、云南省文山壮族苗族自治州富宁县境内。港区按“一次规划、分期实施”的原则进行建设。一期工程建设架空斜坡式客运泊位及多用途泊位各1个。工程区覆盖第四系残坡积黏土,下卧基岩为三叠系中统百逢组第三及第四段泥岩、砂岩地层。黏土

层总体分布厚度较小,局部泥岩、砂岩外露。随着广西百色水利枢纽的调度运行,库水位每年1—5月从228.5 m降至203 m,6月开始蓄水,7—9月保持在214 m,10月继续蓄水,12月达到228.5 m。根据文献[13],库区码头及岸坡承受每年1次的库水位循环作用。

2 库水位循环作用下桩基与岸坡相互作用实现过程及基本假设

2.1 实现过程

1) 基于室内试验的水岩相互作用,得到岩石时变特性模型 $f_r(x)$,其中参数 x 为水岩相互作用次数。

2) 考虑岩石与岩体之间的尺寸效应、岩体节理、裂隙等因素影响,经工程变换得到岩体强度参数及变形参数衰变模型 $f_s(x)$ 。

3) 构建架空斜坡式码头与岸坡相互作用三维数值模型 $f_a(x)$ 。

4) 岩体强度劣化损伤模型 $f_s(x)$ 与码头岸坡相互作用三维数值模型 $f_a(x)$ 的耦合计算。

5) 统计分析架空斜坡式码头结构力学特性时变特点。

2.2 基本假设

岸坡岩土体力学性能劣化基于岩石试样的室内水岩相互作用试验得到,故需满足如下假设:

1) 水岩相互作用能模拟实际情况下库水位循环的基本特性。

2) 水岩相互作用不考虑岩石与水之间的化学及力学因素的影响。

3) 库水位循环对岩石(体)的损伤不考虑空间上由表及里的渐进性影响,而将岩石(体)视为一种材料,其材料性能随水岩相互作用次数的增加而劣化。

3 架空斜坡式码头基本特征

架空斜坡道水平投影长度68.5 m,共5跨,每樨排架水平间距13.5 m,宽度26.8 m。斜坡道坡度1:2.5,上部结构由C30钢筋混凝土T型轨道

梁及联系梁组成。每跨轨道梁上分别设置 2 根联系梁，共 20 片，置于 C30 钢筋混凝土墩台上。斜坡道结构中，每榀排架设置 4 根 $\phi 1.2$ m C30 钢筋混凝土钻孔灌注桩。斜坡岩体上层为黏性土及强

风化泥岩，下层为中风化砂岩，桩基平均嵌岩深度约 5.5 m。陆域平台区域接岸结构采用 C20 混凝土重力式挡土墙，其基础嵌入中风化砂岩，墙后回填 10 ~ 100 kg 块石。其断面见图 1。

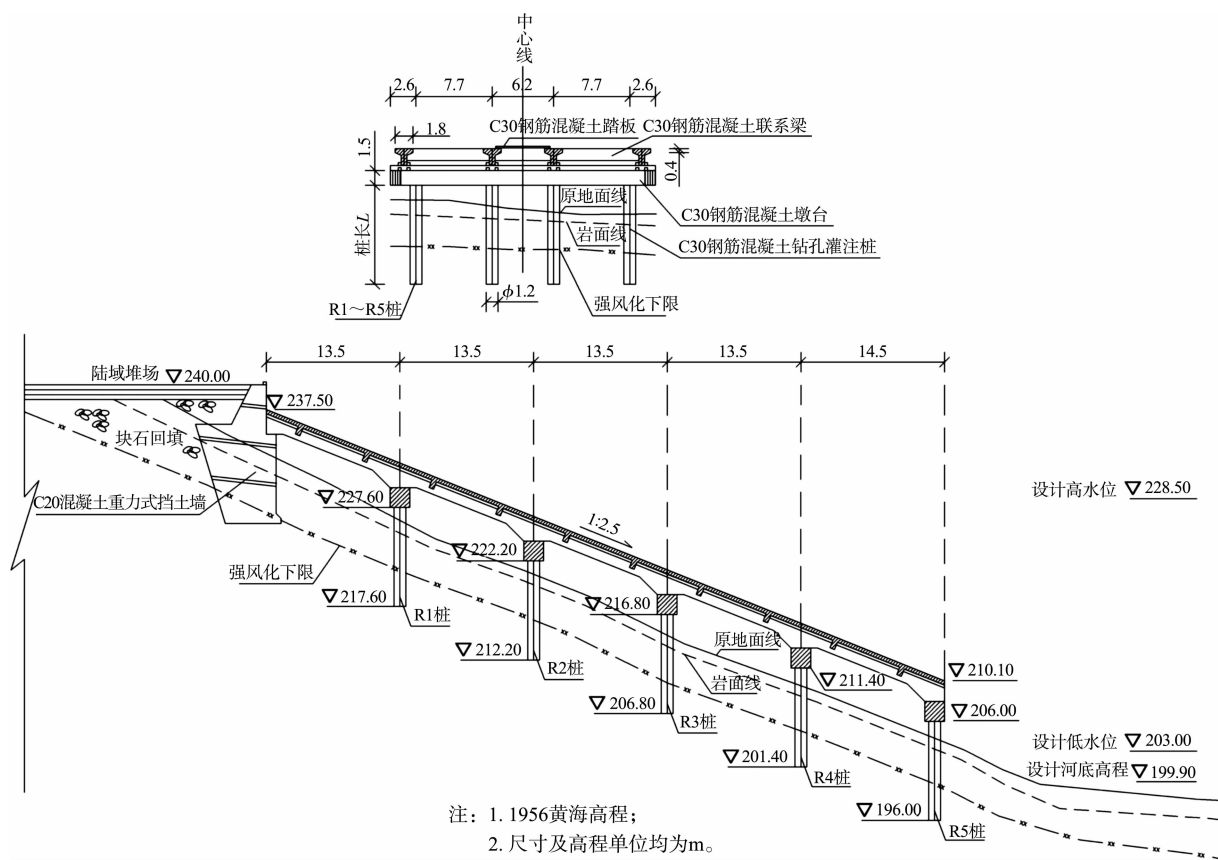


图 1 架空斜坡式码头断面

4 架空斜坡式码头基本模型

4.1 模型特征

根据图 1 可知，架空斜坡式码头为对称结构。为节约计算资源，笔者以码头对称面（平行于斜坡道轨道梁方向）为基础，通过有限元软件 ANSYS 建立该码头的三维空间模型。在模型对称面中施加相应的对称约束，其他模型基面约束岩土体的水平位移。本模型中，岩土体采用弹塑性模型，钢筋混凝土材料采用线弹性模型，单元类型均为 8 节点 Solid45 实体单元。

4.2 计算准则

岩体计算模型中不考虑温度变化的影响，其

屈服准则采用与 Mohr-Columnb 相匹配、适用于颗粒状材料的 Drucker-Prager 准则。

4.3 计算参数

岩体计算参数由岩石试样在室内进行水岩相互作用试验后，经工程转换得到。本工程岩体力学性能的劣化不考虑由表及里的空间渐进性影响，即同一类别的岩体劣化损伤变化特性相同。计算参数见表 1^[14]。依据文献[15]，堆场荷载取 60 kPa。实际工程中码头结构与岩体之间的相互作用通过有限元模型中设置对应的“接触对”实现。在不考虑岸坡渗流、码头结构的缆车荷载等因素影响下，分别计算库水位周期性循环 0、10、20、30、40、50 次后岸坡与码头结构物相互作用下的码头结构物力学特征。

表 1 岩体参数取值

名称	x	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
泥岩	0	0.168	32.1	1.496	0.256
	10	0.064	16.7	0.542	0.278
	20	0.061	16.3	0.518	0.279
	30	0.060	16.0	0.503	0.280
	40	0.058	15.7	0.488	0.281
	50	0.057	15.4	0.474	0.281
砂岩	0	0.293	41.9	2.985	0.241
	10	0.157	30.1	1.472	0.257
	20	0.138	28.4	1.267	0.260
	30	0.126	26.9	1.139	0.262
	40	0.116	25.6	1.035	0.264
	50	0.108	24.3	0.943	0.266

5 架空斜坡式码头力学特性

库水位周期性循环将对构筑在岩体上的桩基及其上部结构产生影响，这种影响作用形式为：岩体劣化—地基承载力下降—外部因素作用下（受桩基传递荷载等影响）岩土体产生一定位移—桩基础及其上部结构发生变形—改变初始受力状态—码头结构物弯矩、剪力及轴力随库水位循环次数不同而发生变化。

5.1 弯矩变化特点

根据图 1，以靠近岸侧桩基定义为第 1 排（R1 桩），靠近河侧桩基定义为第 5 排（R5 桩）。该架空斜坡式码头各桩基及轨道梁弯矩 M 随库水位循环次数 x 的变化特点见图 2。

根据图 2，库水位循环作用下的各桩身弯矩变化基本呈现出平躺“V”字型。由于本文模型将桩基上部结构中的轨道梁设计为连续梁，并与桩基上的墩台形成固结，构成框架式整体结构。在堆场荷载传递及岸坡水平推力作用下，桩顶端存在一定量的水平位移，故出现较大弯矩值，沿桩顶往下，桩身的水平位移值逐步变小，桩身弯矩也近似呈抛物线减小，在桩基进入岩土层附近，弯矩近似为 0，然后反向增大，在岩土分界面以下约 0.5 m 处、靠近桩身中部附近，由于岸坡位移及推力增大，故出现弯矩极大值。自桩身中部至桩底端，弯矩逐渐减小，并在桩底端出现反弯。桩底端考虑桩与基岩的接触作用，近似为铰接的约束形式，故弯矩较小并近似为 0。

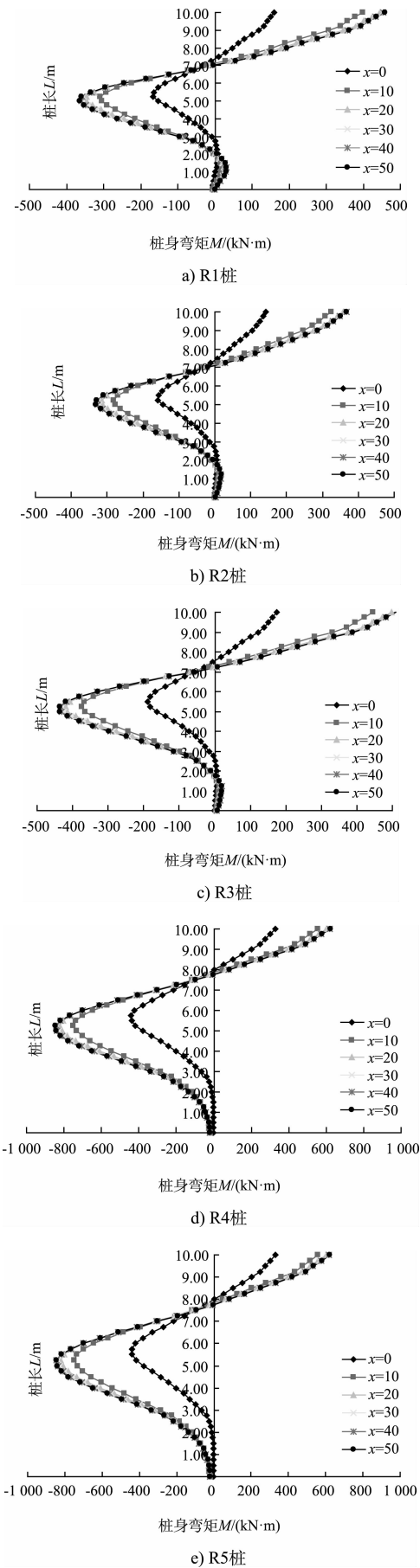


图 2 不同桩的弯矩

根据图 3，对于架空斜坡式码头桩基结构，其桩身最大弯矩随着库水位循环次数的增加而增大，且变化幅度由快至慢，即前 10 次库水位循环过程中，桩身最大弯矩变化较为显著，后期变化缓慢并趋于稳定。出现这一现象主要由于库岸边坡在前 10 次库水位循环过程中，岩土体力学性能劣化明显，岸坡变形及由此产生的水平推力也显著增加，故桩身最大弯矩值增长率也表现出由快到慢、直至稳定的变化特性。因此，实际工程中应加强库区码头运营初期阶段的桩基力学性能监测。

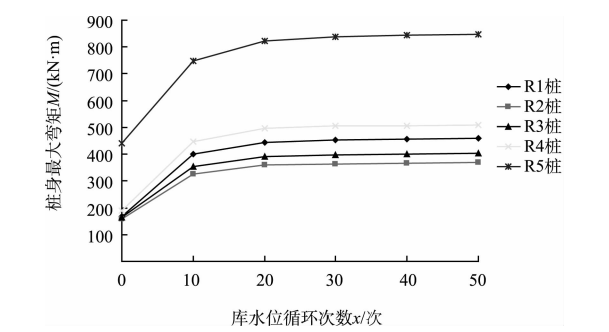


图 3 桩身最大弯矩变化特点

根据计算结果，结合图 2、3，R1 ~ R5 桩的最大弯矩在库水位循环作用下的变化特点具有相似性，但由于岸坡失稳滑动特性及桩基对岸坡的遮帘作用，致使 R5 桩承受较大的滑坡推力，故其最大弯矩值均较其他桩基要大，在类似码头设计、施工及后期运营过程中应予以充分重视。

对于轨道梁弯矩，在各跨中部出现正弯矩极值，各支座处出现负弯矩极值。受堆场荷载传递影响，斜坡道与岸坡挡土墙的接岸处将产生最大位移，同时，挡土墙也将整体往河侧移动^[3]，故轨道梁在第一跨附近存在较大变形，其最大正弯矩也将出现在第一跨跨中位置。另外，由于墩台对轨道梁计算跨度影响，故负弯矩极值处均为对应的峰值，实际工程中应注意结合规范要求，进行修正。轨道梁弯矩分布规律见图 4。

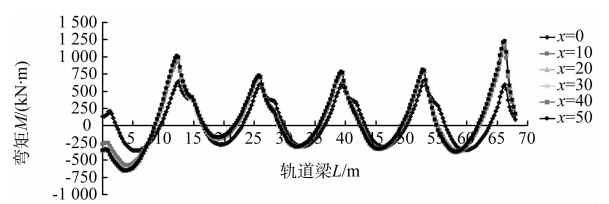
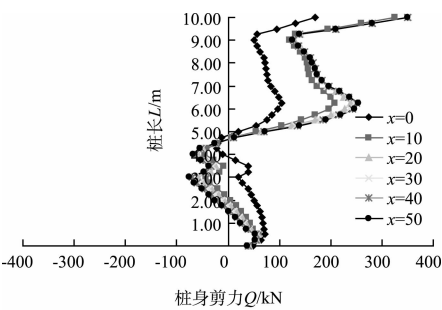


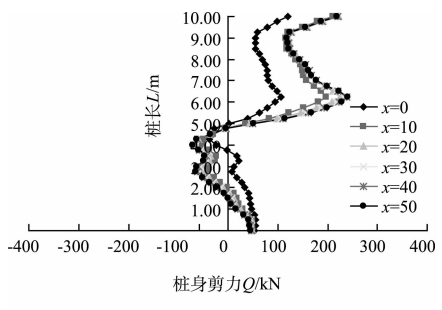
图 4 轨道梁弯矩

5.2 剪力变化特点

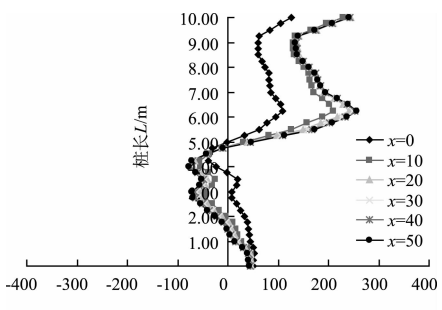
根据图 5，桩身剪力沿桩顶端至底端近似呈折线形式分布，且桩身上部剪力较大，下部剪力较小。其剪力较大值通常位于桩顶端以及泥面以下约 1 m 范围处，且各桩基剪力分布模式基本相同。这一现象主要由于桩顶随墩台位移而产生的剪切以及桩身中部岩土体之间的相对滑动而产生截桩力综合作用而成。



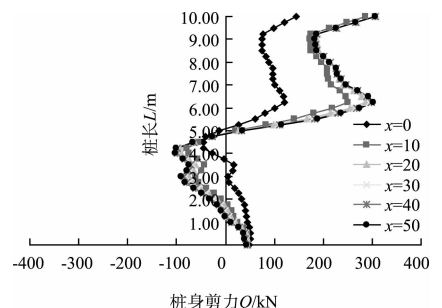
a) R1桩



b) R2桩



c) R3桩



d) R4桩

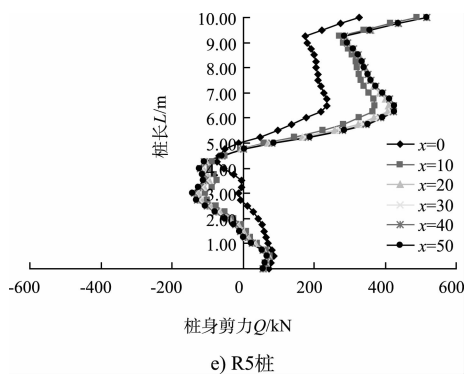


图 5 不同桩的剪力

库水位循环作用前期 ($x \leq 10$), 各桩身剪力变化明显, 后期变化趋于稳定, 这一过程与岩土体劣化特性相近, 在此不再赘述。

轨道梁在设计中按连续梁考虑, 其剪力变化特征见图 6。由于受横向联系梁影响, 在轨道梁的剪力图中存在部分波动特性, 但整体趋势为折线型变化, 其剪力较大值通常产生于各排桩偏左位置, 最大剪力值则位于 R1 桩和 R5 排顶端附近。

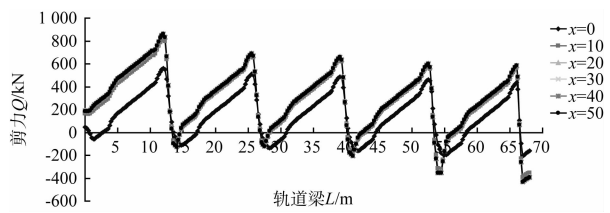


图 6 轨道梁剪力

5.3 轴力变化特点

桩基承受码头上部结构及桩身自重作用, 其轴力自桩顶往下, 有微量的增大趋势, 在原始地面附近, 各桩身轴力值达到最大值。随着嵌入岩土深度的增加, 桩身轴力通过桩侧摩阻力逐步传递给桩周的岩土体。因此, 轴力随深度递减, 桩底轴力即为桩端总阻力, 其变化特性如图 7 所示。

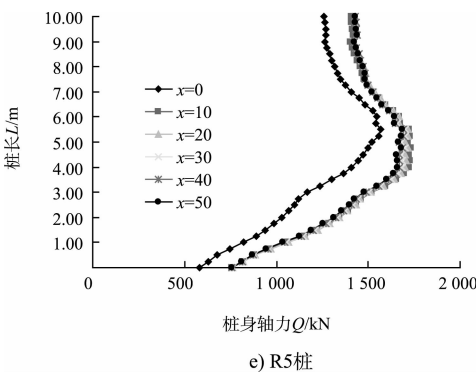
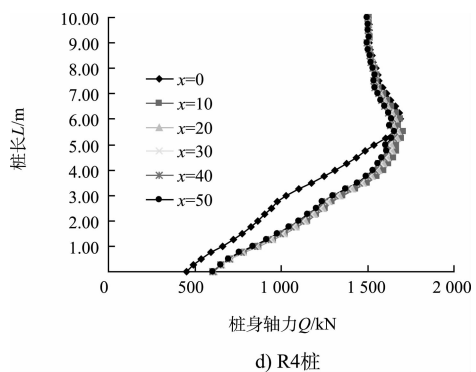
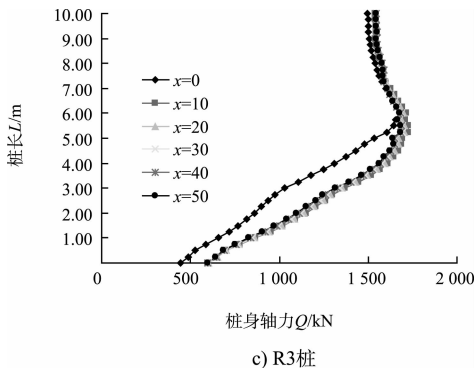
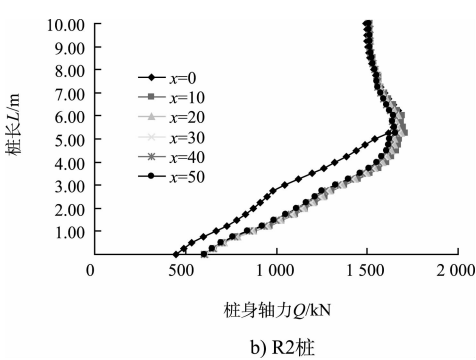
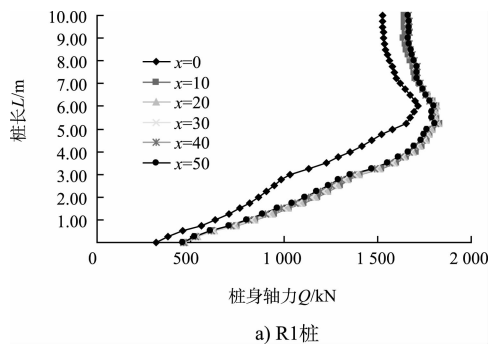


图 7 不同桩的轴力

如图 R1 桩及 R5 桩轴力变化特性具有一致性, 主要表现为: 前 10 次水位循环中变化明显, 后期则趋于稳定。R2 ~ R4 桩轴力变化特性基本相似, 主要特点为: 岩土分界层以上轴力受库水位的变化影响很小, 而岩土分界层以下桩基轴力则与 R1

及 R5 桩轴力变化特征相似。因此,库水位循环作用使得岩土体性能劣化,其侧摩阻力也将降低,进而影响桩基(岩土层下部)的轴力分布。

根据图 8,各跨轨道梁轴力基本呈对应的定值。由于受到与轨道梁相连的接岸挡土墙倾斜破坏模式及轨道梁自身的压缩变形影响,其轴力从第 1 跨至第 5 跨逐渐变小。这一现象表明轨道梁轴力在靠近接岸处较大,靠近河侧较小,实际工程中应有针对性地进行相关设计及后期维护。

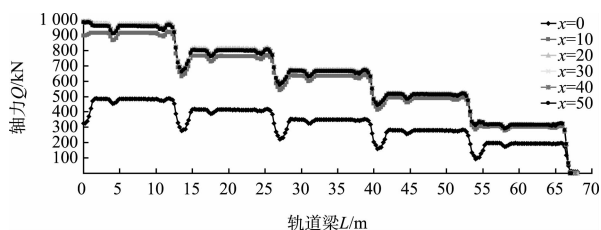


图 8 轨道梁轴力变化

6 结语

1) 通过三维数值模型,在堆场荷载及码头结构物自重作用下,随着库水位循环次数的增加,桩身弯矩、剪力及岩土分界面以下桩基轴力在前 10 次库水位循环过程中变化显著,后期变化缓慢,最终趋于稳定。其变化趋势与岩土体劣化特性及岸坡稳定性变化特点具有相似性,因此,在库区码头运营初期,应加强岸坡稳定及码头结构性能监测。

2) 桩顶端与桩身中部易产生较大弯矩,且随着库水位循环次数的增加,桩身弯矩最大值也随之增大,增大趋势由快至慢,其最大值位于桩身中部、岩土分界面以下约 0.5 m 处。对于轨道梁,负弯矩较大值通常产生于第 1 排桩及第 5 排桩桩顶,最大正弯矩通常产生于第 1 跨跨中部分。

3) 桩身剪力近似呈折线形式分布,其最大剪力值位于桩顶端及泥面以下约 1 m 处。对于轨道梁,剪力较大值通常产生于各排桩桩顶偏左位置,最大剪力值则位于第 1 和第 5 排桩顶左侧。

4) 在岩土分界面附近,桩身存在轴力的最大值,分界面以上桩身轴力自上而下略有增大趋势,分界面以下,桩身轴力为近似线性地减小。对于连续设置的轨道梁,由于墩台设置的影响,各跨轴力值并不相等,且靠近岸侧轨道梁轴力较大,

靠近河侧轨道梁轴力较小。

5) 库水位循环作用中的岩土体性能劣化仅局限于单一的物理干湿循环作用模式下而得到,在后期研究中,对水岩相互作用下的物理、化学及力学的综合作用需有待进一步研究,并合理地应用到相关工程实践中。

参考文献:

- [1] 张明,胡瑞林,崔芳鹏,等.考虑水岩物理化学作用的库岸堆积体边坡稳定性研究——以金沙江下咱日堆积体为例[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3 699-3 704.
- [2] 周世良,刘小强,尚明芳,等.基于水-岩相互作用的泥岩库岸时变稳定性分析[J].岩土力学,2012,33(7):1 933-1 939.
- [3] 刘小强,尚明芳,周世良,等.库水位循环作用下架空斜坡式码头变形研究[J].水运工程,2013(4):76-82.
- [4] 许宏发.软岩强度和弹模的时间效应研究[J].岩石力学与工程学报,1997,16(3):246-251.
- [5] 许宏发,陈力新.岩石时效特性与节理模型[M].上海:上海交通出版社,2009.
- [6] 刘新荣,傅晏,王永新,等.(库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J].岩土工程学报,2008,30(9):1 298-1 302.
- [7] 傅晏,刘新荣,李永兴.水岩相互作用对砂岩单轴强度的影响研究[J].水文地质工程地质,2009,36(6):54-57.
- [8] 刘新荣,傅晏,王永新,等.水-岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究[J].岩土力学,2009,30(3):613-616.
- [9] 梁丰收,何光春,罗建美.岸坡与斜坡道桩基相互作用及桩基减载措施[J].水运工程,2011(11):211-217.
- [10] 邓方明,何光春.岸坡对库区码头桩基变形影响分析[J].水运工程,2009(11):70-76.
- [11] 刘春华,汪承志,王多垠.三峡蓄水对内河大水位差架空斜坡道码头的影响研究[J].交通科技,2009(2):98-100.
- [12] 刘小强,周世良,尚明芳,等.基于水岩相互作用的岩石力学性能研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2012,31(2):268-273.
- [13] 四川省交通厅交通勘察设计研究院.云南富宁港建设一期工程地质勘察报告[R].成都:四川省交通厅交通勘察设计研究院,2008.
- [14] 刘小强.基于水岩相互作用的库岸边坡稳定性及架空斜坡式码头结构性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [15] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)