



库水位循环作用下架空斜坡式码头变形研究*

刘小强¹, 尚明芳^{1,2}, 周世良³, 李 怡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: 为研究山区河流库水位循环作用下码头结构变形特点, 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。以水岩相互作用为基础, 重点研究库水位循环作用下架空斜坡式码头整体变形特点、桩基水平位移、桩顶沉降、挡土墙失稳模式; 得到码头结构物变形发展趋势, 同时预测架空斜坡式码头在库水位循环作用下的破坏方式, 为进一步研究山区河流码头结构与库岸边坡相互作用及其时变特性提供基础。

关键词: 库水位循环; 架空斜坡式码头; 库岸边坡; 桩基; 变形; 失稳模式

中图分类号: U 656.1⁺39

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0076-07

Deformation of overhead sloping wharf under water level cycles

LIU Xiao-qiang¹, SHANG Ming-fang^{1,2}, ZHOU Shi-liang³, LI Yi³

(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: In order to research the wharf structures deformation characteristics under water level cycles circulation in the mountain rivers, the paper relies on the first-stage project of Funing port in Yunnan Province and establishes a three-dimensional finite element model of the overhead sloping wharf. Based on the water-rock interaction, it mainly studies the overall deformation characteristics of overhead sloping wharf, the horizontal displacements of piles, the piles top settlements and the retaining wall instability mode under the water level cycles circulation. It also obtains the wharf structures deformation development trends, meanwhile, the paper predicts the failure modes and features of overhead sloping wharf under the action of water level changes. The results can provide a reference for further studying the interaction between wharf structures and bank slope located in the mountainous rivers and its time-varying characteristics.

Key words: water level cycle; overhead sloping wharf; bank slope; pile; deformation; unstable mode

库水位周期性涨落形成了水与岩土体之间力学、物理及化学作用, 这种水岩相互作用破坏了库岸边坡原有的自然平衡条件, 其水文及工程地质条件将发生较大改变, 对库岸边坡稳定性极为不利^[1]。根据作用对象及产生影响的不同, 库水位循环作用可分为三大类: 水对岩土体的劣化损伤

作用、水对库岸坡边坡稳定性影响、水与岸坡及码头结构物之间的综合作用。

现有研究中, 一些学者对水岩相互作用下岩石力学性能做了较为系统研究。如汤连生等^[2]分析了裂纹岩体中水压力的作用及类型, 认为岩体断裂强度主要受控于静水压力、动水压力以及水化

收稿日期: 2012-09-03

*基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(210176); 云南省交通运输厅科技项目(702237); 重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC2010BB7084)

作者简介: 刘小强(1987—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事港口、海岸工程设计及研究。

学损伤等因素,并提出了考虑水作用下岩体断裂强度的新准则。姚华彦等^[3]对红砂岩进行干湿交替后的常规单轴及三轴压缩试验研究,得到砂岩在不同条件下的力学软化规律及变形特点。刘新荣等^[4]对库水位涨落情况下三峡库区典型砂岩“饱水-风干”过程进行模拟,通过室内试验得到岩石粘聚力和内摩擦角随水岩相互作用次数的劣化规律,为后续库岸边坡在库水位循环作用下的稳定性研究提供基础。在水与岸坡相互作用方面,王明华等^[5]以鄂西南某水库为例,对库水位变化下的库岸滑坡变形模式进行了模拟分析,认为水库蓄水不仅影响滑坡稳定性,同时也会改变滑坡的变形模式。刘会^[6]在前人研究基础上,对三峡库区水位变动所产生的各种作用效应及岸坡稳定性进行讨论,简述了岸坡稳定性评价的计算模型。刘新荣等^[7]通过对岩石材料的室内试验及库岸边坡的数值模拟,认为库区消落带岩土体材料力学性质在库水位循环作用下的不断劣化会影响岸坡稳定性。周世良等^[8]对云南富宁港区泥岩库岸在水岩相互作用下的稳定性演变规律进行了相关研究,得到该库岸的安全系数及可靠度变化规律,为进一步研究库水位循环作用下码头结构力学性能变化特点奠定基础。在岸坡与码头结构相互作用方面,梁丰收等^[9]通过有限元计算分析了三峡库区某码头岸坡与斜坡道桩基的相互作用,讨论了岸坡稳定与桩基之间的相互影响,并对比了桩顶自由和桩顶受连续轨道梁约束两种情况下的桩基受力特性。邓方明等^[10]采用有限差分法,考虑桩土相互作用,对重庆市涪陵港区黄旗码头的桩基变形进行了分析,并与现场观测结果进行对比,得到库区码头桩基出现大变形的基本原因。上述研究对优化码头结构形式,改善码头受力特性具有一定指导意义,但同时也缺乏对库水位周期性循环下岸坡与桩基之间相互作用特性的考虑,研究结果也仅局限于静态模式。现有研究中,考虑库水位循环作用的同时,对码头整体结构性能研究相对较少。刘春华等^[11]采用简化的二维有限元模型对三峡库区架空斜坡道码头在一个蓄水周期影响下桩基的变形特性进行了相关研究。刘小强等^[12]

结合依托工程,通过室内试验,得到水岩相互作用下岩石及岩土体力学性能变化特点,通过二维有限元分析,得到架空斜坡式码头桩基及轨道梁结构力学性能变化特点。但上述研究缺乏对码头整体变形的深入系统分析,并忽略了码头结构与岸坡相互作用的空间特性。

综上所述,受水库调度影响,库岸边坡在库水位周期性涨落下,各种力学、物理及化学等因素将产生综合作用。岩土体力学性能劣化,岸坡稳定性降低,构建于库岸边坡之上的码头结构物也由于各种相互作用而产生不同程度的劣化特点。因此,开展库水位循环作用下架空斜坡式码头变形特点研究对预测码头结构失稳破坏模式,整体稳定性变化特点等具有一定参考价值。本文基于现有研究,结合云南省富宁港一期工程,对库水位循环作用下架空斜坡式码头变形特点进行相关研究。

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,地处云贵高原向桂东溶原过渡的斜坡地带。港区地形错综复杂,高原型季风气候垂直变化显著,干湿季节分明。广西百色水利枢纽运行后,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。库区码头及岸坡承受每年一次的库水位循环作用。受水库调度影响,库水位周期性涨落将导致港区的水文地质条件发生重大变化。库岸边坡岩土体在干湿循环的作用下,其力学性能呈现不同程度的衰变,库岸原有的平衡状态将遭到破坏,而构建于岸坡之上的码头结构物也将产生不同的变形特征。码头结构物的变形特性随着库水位循环次数的增加而发展,最终影响码头结构的安全和整体稳定性。

2 库水位循环作用下桩基与岸坡相互作用基本理论及实现过程

以试验为基础,依据文献[8,13]对岩石试样

进行常规三轴压缩试验，得到岩石在水岩相互作用下强度参数和变形参数。考虑岩石与岩体之间的尺寸效应、库岸边坡开挖扰动、岩体内部节理裂隙等因素影响，岩石力学强度参数经工程变换后得到对应岩体强度参数及变形参数衰变模型 $M_1(x)$ 。 $M_1(x)$ 为包含岩体粘聚力 c 、内摩擦角 φ 、弹性模量 E 及泊松比 ν 的多因素综合模型。为便于研究，将 $M_1(x)$ 中各因素分解成强度参数和变形参数衰变模型，即得到 c 、 φ 、 E 、 ν 各自随水岩相互作用次数（库水位循环次数） x 的变化形式，具体变化形式见文献[14]。考虑码头结构与岩土体的相互作用，将岩土体各力学参数输入有限元计算模型，分析码头结构与岸坡体系的变形特点，最终得到解决方案并优化原码头结构形式。文章实现的基本流程见图1，其中应满足如下假设：

- 1) 室内水岩相互作用能模拟实际情况下的库水位循环；
- 2) 水岩相互作用仅受到物理及力学因素影响。

3 架空斜坡式码头基本特征

架空斜坡道坡度1:2.5，总宽度26.60 m。水平投影长68.25 m，共5跨，每跨13.5 m。斜坡道上部

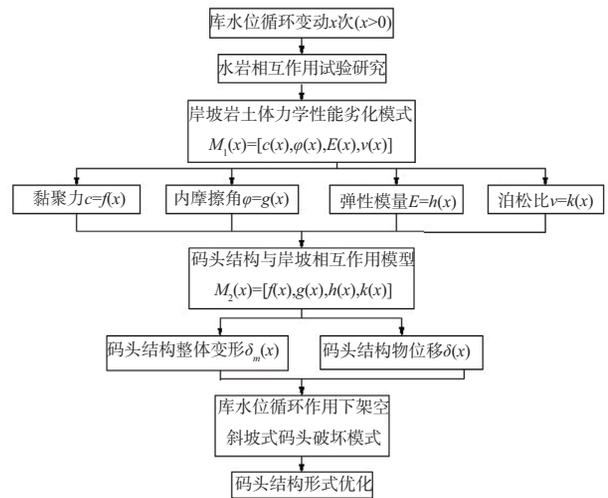


图1 库水位循环作用下码头结构与岸坡相互作用实现流程

结构采用C30钢筋混凝土T型轨道梁，梁高1.70 m，腹板宽0.6 m，梁上设置有2根联系梁。轨道梁共20片，置于C30钢筋混凝土墩台上，墩台长26.8 m；下部基础采用C30钢筋混凝土钻孔灌注桩，靠近河侧桩径1.5 m，其他桩径均为1.2 m。斜坡道中间设置宽为4.3 m的检修梯步。陆域平台前沿采用C20混凝土重力式挡土墙。斜坡岩体上层为强风化泥岩，下层为中风化砂岩，挡土墙基础嵌入中风化砂岩，墙后约1倍墙高范围内回填10~100 kg块石。其断面见图2。

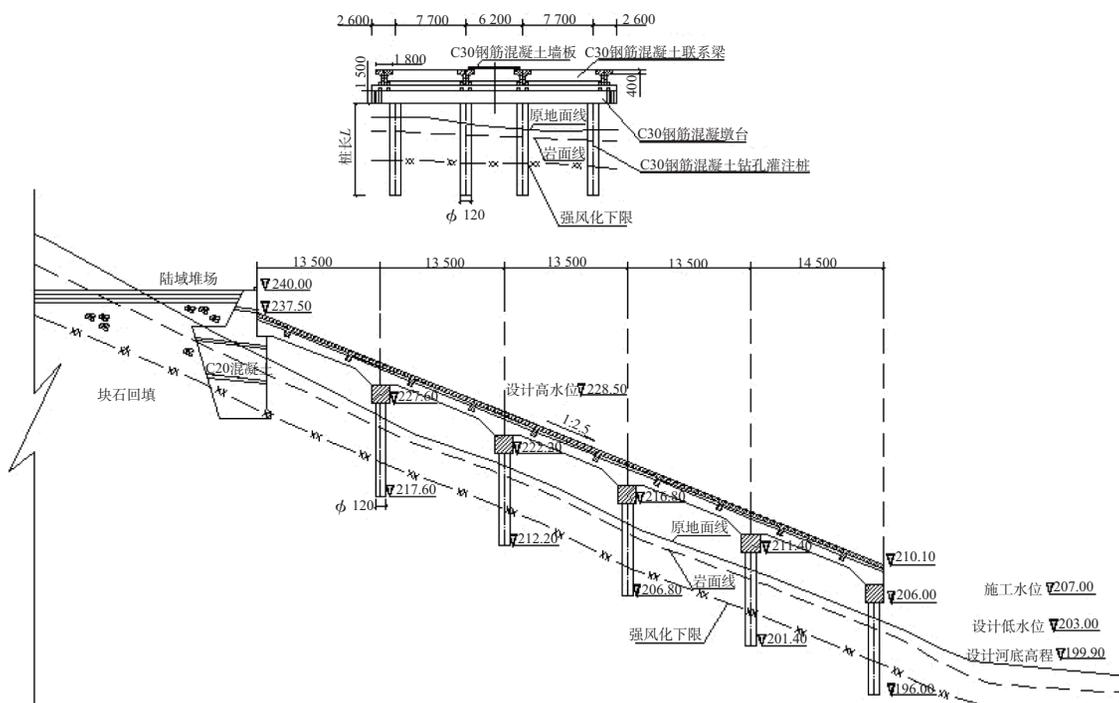


图2 架空斜坡式码头断面

4 架空斜坡式码头基本模型

采用有限元软件ANSYS建立三维空间模型, 单元类型为8节点Solid45实体单元。码头结构中岩土体采用弹塑性模型, 钢筋混凝土等材料按照线弹性予以考虑。实体码头属对称结构, 有限元模型中仅建立实体一半, 并忽略斜坡道中间设置的检修梯步, 在对称面施加轴对称约束。根据连接形式, 架空斜坡道按照连续梁考虑。模型采用与Mohr-Column准则匹配的Drucker-Prager准则作为岩土体的屈服准则, 岩土体计算参数见表1^[12-13]。依据文献[15], 堆场荷载取为60 kPa。实际工程中码头结构与岩土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。在不考虑库岸边坡渗流、码头结构的缆车荷载、人行荷载以及降雨等因素影响下, 分别计算库水位周期性循环作用0次、10次、20次、30次、40次、50次后库岸边坡与码头结构物相互作用下的码头变形特征。

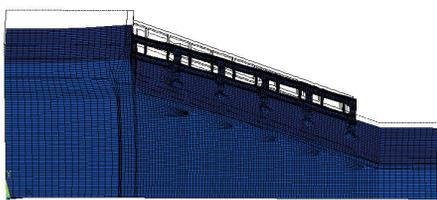
表1 岩体参数取值

岩体	x	c/MPa	$\phi/(\text{°})$	E/GPa	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

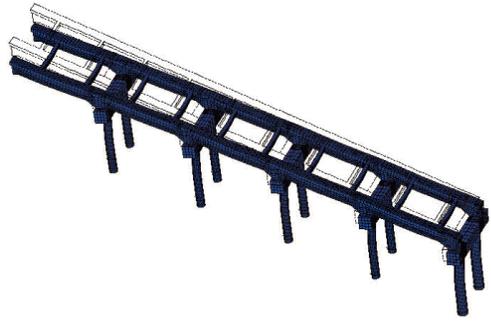
5 架空斜坡式码头变形特点

5.1 架空斜坡式码头整体变形特点

不同次数的库水位循环作用将使码头结构产生不同的变形特征, 限于篇幅, 本文仅给出 $x=0$ 时该架空斜坡式码头的整体变形云图, 见图3和4。



注: 放大500倍, $x=0$
图3 码头整体变形图



注: 放大500倍, $x=0$
图4 码头结构物变形图

在堆场荷载作用下, 码头堆场区域发生较大沉降。受堆场荷载及自重影响, 挡土墙底部基础产生沉降且外侧表层土体滑动, 如图3。架空斜坡道接岸处位移受到挡土墙影响, 相应地产生了不均匀的竖向位移, 其值随着斜坡道向河侧逐渐减小(图4)。

蓄水初期, 架空斜坡道最大变形量 δ_{max} (斜坡道与岸坡挡土墙的接岸处)为6.956 mm。随着库水位循环次数 x 的增加, 堆场区域最大变形量 δ_{max} 和接岸处的码头结构最大变形量 δ_{max} 呈非线性增大, 当 $x \geq 20$ 时, δ_{max} 值近似为定值, 此时可认为 $x=20$ 对应的 δ_{max} 为其对应的临界值, 即分别为22.80 mm和16.89 mm, 其变化结果见图5。

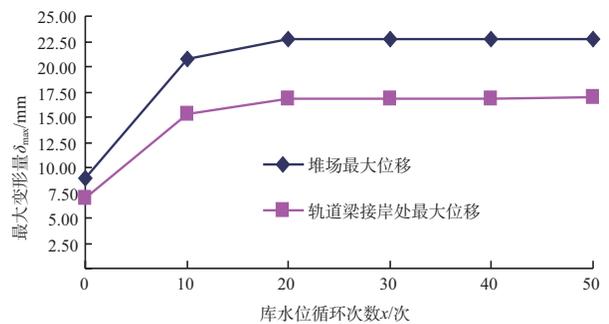


图5 堆场及码头结构接岸处最大变形量

5.2 架空斜坡式码头桩基水平位移

库岸边坡岩土体力学性能随着库水位循环次数的增加而劣化, 在码头结构与岸坡相互作用下, 码头桩基将产生不同程度的水平位移。

根据图2, 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水平位移值 δ_{xx} 随库水位循环次数 x 的变化特点见图6~10。

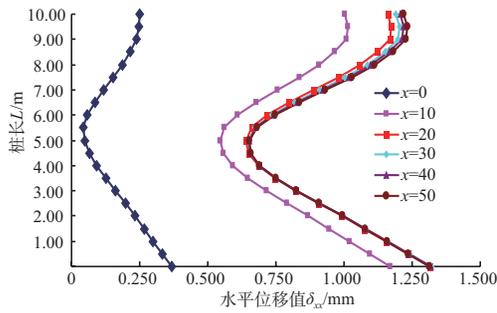


图6 R1桩的水平位移

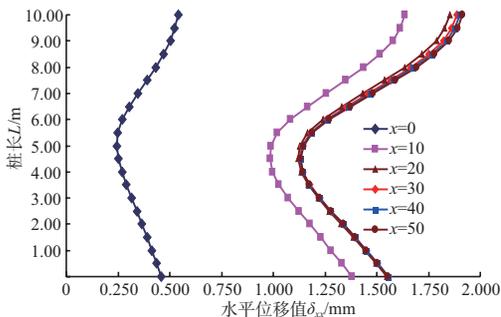


图7 R2桩的水平位移

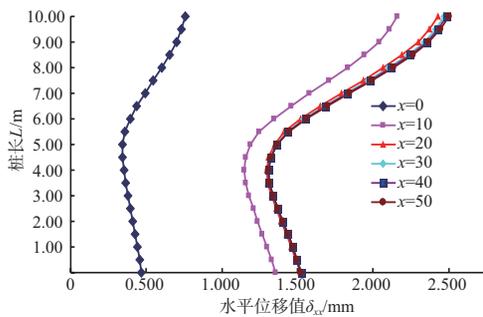


图8 R3桩的水平位移

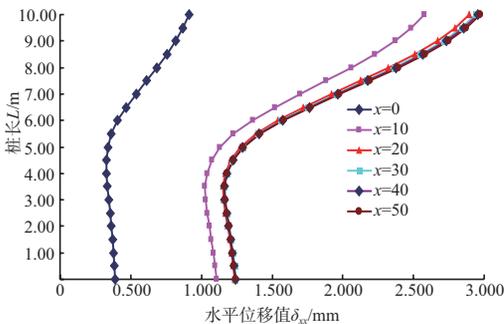


图9 R4桩的水平位移

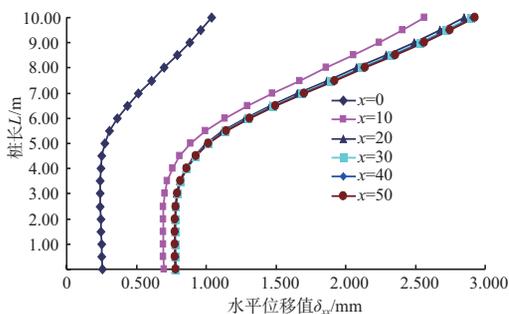


图10 R5桩的水平位移

根据图6~10，桩基变形模式呈现如下特点：

1) R1桩位移较大值位于桩顶及桩端部。由于桩顶处与墩台整体浇注，其变形呈现反弯，且反弯程度随着库水位循环次数的增大而明显。另外，在库水位循环作用和堆场荷载传递影响下，斜坡道及斜坡岩土体产生水平位移，桩基与库岸边坡相互作用使桩身变形呈现“两头大，中间小”特点。随着库水位循环次数增加，桩身各段水平位移值 δ_{xx} 变化趋势基本相同，且前20次变化明显，后期变化缓慢并趋于稳定。

2) R2桩变形特点与R1桩较为相似，不同之处在于R2桩同一时期水平位移值均大于R1桩，且R2桩桩顶反弯程度较R1桩有所减小。该现象表明库水位循环作用下，岸坡表层岩土体存在向下滑动趋势，在桩基与岸坡土体相互作用中，靠近斜坡道中部桩基承受较大土体推力，产生较R1桩更大的变形。

3) R3桩桩顶反弯程度及桩身下半段变形较R2桩有所减小，其水平位移变化曲线近似成折线型，表现出与R1桩及R2桩不同的变形特点。但泥面以下，R2桩与R3桩水平位移值相近，且均较R1桩水平位移大。

4) R4桩变形趋势与R3桩相似，顶部反弯逐步减小，近似成折线变化。随着库水位循环次数增加，R4桩顶部水平位移变化较端部更为明显。

5) R5桩顶部反弯消失，桩身上部呈斜直线变化，桩身下部成垂直直线型。库水位循环作用时，R5桩基桩身下半段变形较R4桩小，但上部变形大。

5.3 桩顶沉降特点

库水位前20次循环作用中，桩顶沉降变化明显，后期变化趋于稳定。各桩基桩顶沉降特点见图11。

1) 随着x的增大，桩顶沉降随之增大。其中，近岸侧R1桩桩顶沉降较大，近河侧R5桩桩顶沉降较小，这一变化趋势与码头整体变形相符。

2) 当 $x \leq 20$ 时，各桩桩顶沉降值变化明显，随后变化趋于稳定。这一变化模式与库岸边坡岩土体强度及变形参数在水岩相互作用下的劣化特点具有一定的相似性。当 $x=50$ 时，各排桩最小及

最大沉降量分别为2.27 mm (R5桩)和11.56 mm (R1桩)。这种不均匀沉降将导致安装在墩台上的轨道梁产生不同幅度的变形,继而产生不同程度的弯矩及剪力,对码头结构将产生不利影响。

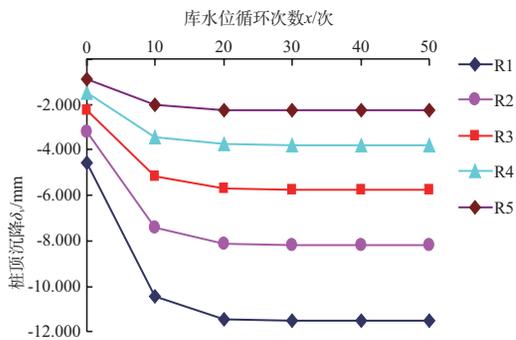


图11 桩顶沉降曲线

5.4 挡土墙位移变化特点

随着库水位周期性涨落,岩土体劣化,接岸处挡土墙失稳模式为:顶部内倾(位移为负值),底部外倾。其变化趋势如图12。随着x的增大,挡土墙顶部及底部水平位移逐渐变化。当 $x \geq 20$ 时,挡土墙倾斜程度趋于稳定。当 $x=50$ 时,挡土墙顶部内倾位移值为17.7 mm,挡土墙底部外倾位移值为6.6 mm。此现象表明挡土墙底部覆盖岩土层在库水位循环作用下力学性质的劣化将导致挡土墙底部的滑移破坏。实际工程中应注意挡土墙底部外侧覆盖层的加固。

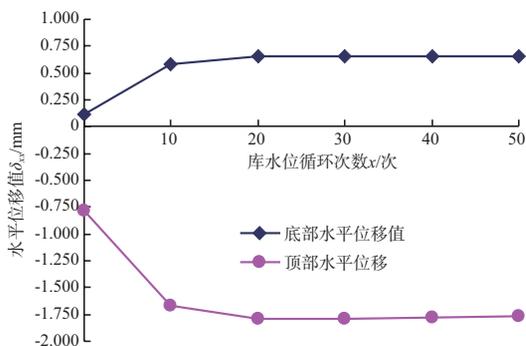


图12 挡土墙水平位移曲线

在库水位循环初期,挡土墙均匀沉降,即顶部及底部沉降量基本相同。 $x \geq 20$ 时,挡土墙顶部及底部出现差异沉降,这一特点将使挡土墙自身产生内部应力,加速挡土墙失稳进程;同时挡土墙过大沉降将导致斜坡道轨道梁接岸处应力及变

形的增加,接岸处出现拉裂破坏。根据图13,最终总沉降量为16.85 mm。因此,实际工程中应控制挡土墙沉降以避免产生次生的码头结构破坏效应。

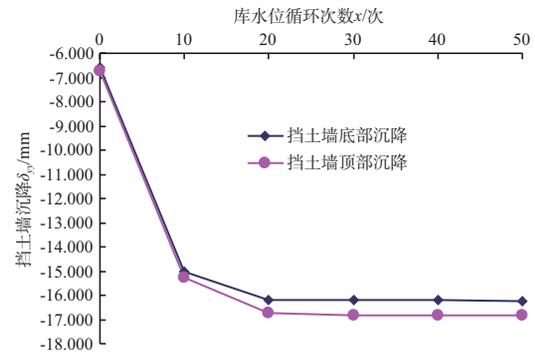


图13 挡土墙沉降曲线

6 架空斜坡式码头失稳进程及结构形式优化

堆场在荷载作用下产生沉降,挡土墙在荷载传递及地基沉降影响下,产生内倾及差异沉降。挡土墙底部外侧岩土体失稳破坏,斜坡岩土层随之失稳滑动。桩基与岩土相互作用下,桩身产生不同程度水平位移及差异沉降,进而引发次生应力导致码头接岸处,河侧桩基顶部产生破坏。库水位循环作用加速岩土体力学性能劣化,间接加速架空斜坡式码头的失稳进程。

针对码头失稳模式及变形特点,可进行如下优化:

1) 为避免挡土墙整体式内倾,工程许可情况下应加强挡土墙底部宽度,加大前趾外伸量,达到扩散地基应力,维持挡土墙稳定作用。同时,可结合工程特点改变挡土墙结构形式,如采用短卸荷板式挡土墙。卸荷板的遮帘作用将有效减小板下墙身所受的土压力,使作用于挡土墙墙身上的水平推力减小,倾覆力矩相应减小,从而达到改善挡土墙内倾效应。

2) 架空斜坡道接岸处在堆场荷载作用下产生过大变形,实际工程中应加固处理,如增大T型轨道梁截面等。

3) 由于R1桩及R2桩嵌岩深度小而出现“两头大,中间小”的水平位移模式,工程中可增加R1桩及R2桩桩长,改善于桩身变形,有效避免桩身反弯。

4) 轨道梁采用连续型结构能较好地抵抗各桩基顶部墩台的不均匀沉降, 提高整体刚度。

5) 河侧桩基顶部水平位移值较大, 且考虑靠泊、装卸等影响因素, 应适当增大该排桩基的桩长桩径。

7 结论

1) 挡土墙整体的差异沉降及内倾导致码头接岸处产生过大变形, 产生次生应力而加速码头结构的失稳进程。实际工程中应加强挡土墙底部外侧覆盖岩土层的加固处理, 对斜坡道结构接岸处应加强检测加固, 防止架空斜坡式码头结构物产生过大变形而破坏。

2) 库水位循环作用下, 桩基水平位移前20次变化明显, 后期变化相对缓慢。R1桩与R2桩存在变形相似性, R3桩与R4桩存在变形相似性。

3) 可采用优化后的挡土墙结构形式改善码头接岸处的位移破坏特性; 另外, 可针对不同岩土介质采用不同桩长、桩径, 以达到合理充分利用桩基承载性能的目的; 对斜坡道轨道梁采用连续梁的结构形式能较好地增加码头结构物整体刚度, 有效防止码头结构物整体的过大变形。

4) 文章以水岩相互作用为基础, 对库水位周期性循环作用下的码头结构变形进行分析。模型仅考虑堆场荷载作用, 未对工程中复杂工况进行组合分析, 实际工程中条件许可时应建立更为全面的数学及有限元模型, 但本文分析思路、方法及结果为后续码头的结构力学性能随库水位变化研究奠定基础。

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] 汤连生, 张鹏程, 王洋. 水作用下岩体断裂强度探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 337-3 341.

[3] 姚华彦, 张振华, 朱朝辉, 等. 干湿交替对砂岩力学特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3 704-3 708.

[4] 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.

[5] 王明华, 晏鄂川. 水库蓄水对库岸滑坡的影响研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2 722-2 725.

[6] 刘会. 三峡库区水位变化对库岸影响的探讨[J]. 人民长江, 2008, 39(16): 91-93

[7] 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.

[8] 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, 32(7): 1 933-1 939.

[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. 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.

[13] GB/T 50266—1999 工程岩体试验方法标准[S].

[14] 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.

[15] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)