

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.026

不同工况下双排钢板桩围堰内力变形研究

杨琴¹,方忠强²,刘毅²,涂齐亮²

(1.中交隧道工程局有限公司,江苏南京 211100;2.华设设计集团股份有限公司水下隧道智能设计、建造与养护技术与装备交通运输行业研发中心,江苏南京 210014)

摘要:为了了解双排钢板桩围堰在复杂受力条件下的内力、变形产生机理,确定最不利工况,该文采用有限元法对钢板桩围堰在不同水位、不同类型荷载下各施工阶段的位移、钢拉杆轴力和钢板桩弯矩进行分析。研究表明:围堰的变形和内力受水位高低、填土自重、竖向施工荷载、水平向波浪荷载、风荷载等多种作用综合影响,位移最不利工况为高水位-水平荷载,钢拉杆最不利工况为低水位-竖向荷载,钢板桩最不利工况需考虑多种情况取最大值。

关键词:双排钢板桩围堰;内力;变形;有限元

中图分类号:U452.2

文献标志码:A

0 引言

钢板桩围堰是一种应用广泛、形式多变、布置灵活的围堰结构,其中:双排钢板桩围堰形式由于刚度较大、插打方便、可回收重复利用、占地面积小、造价较低等优点,应用越来越多。

钢板桩围堰处于复杂工作环境中。围堰外侧水位随时间变化幅度大,导致水压力差异显著;近年来极端天气频发,台风、波浪、流水冲击作用不容忽视;填筑阶段的施工荷载、使用阶段外界移动物体可能发生的撞击等,不同作用产生的效应不同。目前双排钢板桩围堰内力变形的计算方法仍以半经验半理论为主,工程中使用较多的方法有:变位法、弹性地基梁法、数值模拟法^[1],已有研究更多的是分析双排钢板桩围堰的计算理论和模型^[2-6]。但无论采用何种方法,都需明确围堰受到的各种荷载对围堰作用机理,从而判断围堰施工和工作过程中最不利工况。

目前已有学者对带内支撑的单排钢围堰或广泛应用于桥梁深水基础施工的双壁钢围堰所受的波浪荷载、流水荷载等进行研究^[7-15],但关于悬臂式双排钢板桩围堰受力机理的研究较少。吴留伟等^[16]建议

围堰设计对水压力和浪压力进一步研究,确定最不利工况;崔春义等^[17]分析围堰外水位变化条件下钢板桩围堰加载过程中的力学特征,认为水位越低,外侧钢板桩和钢拉杆变形越大、应力越大;陈香月等^[18]对砂卵石中钢板桩围堰所受水平荷载进行现场试验。

为了确定复杂受力条件下围堰的受力变形产生机理,明确最不利工况,合理进行荷载组合,确保围堰的安全性,指导工程设计。本文采用有限元法,以太湖隧道临时围堰工程为例,改变水位、荷载工况,对钢板桩围堰施工使用全过程的内力和变形规律进行分析,根据计算结果,分析围堰受力和变形机理,为双排钢板桩围堰设计提供理论指导。

1 工程概况

太湖隧道采用六车道高速公路标准建设,从无锡马山镇向东下穿太湖梅梁湖段至南泉镇接地,隧道全长10.79 km,为堰筑隧道,线位如图1所示。

隧道路线所经之处,湖底标高为-1.3~-0.2 m,基坑开挖深度为11~16 m,临时围堰大致沿路线方向平行布置,离基坑边线距离控制在2倍基坑深度之外,以避免围堰和围护结构相互影响。

收稿日期:2022-01-13

基金项目:2020年江苏省省级战略性新兴产业发展专项资金资助项目(编号:苏发改高技发[2020]645号)

作者简介:杨琴,女,硕士,工程师.E-mail:1499375570@qq.com

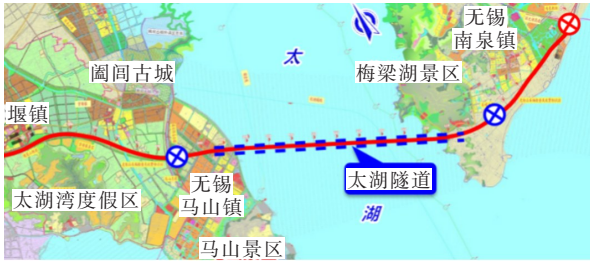


图1 太湖隧道平面线位

本项目的土层划分、各土层的物理力学参数指标以及选取的计算断面土层厚度如表1所示,整体性能较好。

表1 土层划分及物理力学参数

| 岩土名称 | 天然重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 天然孔隙比 | 黏聚力/ kPa | 内摩擦角/ ($^{\circ}$) | 压缩模量/ MPa | 计算断面厚度/m |
|------|--|-------|-------------|-------------------------|--------------|----------|
| 淤泥 | 17.0 | 1.578 | 5.6 | 0.7 | 1.98 | 0.5 |
| 黏土 | 19.8 | 0.743 | 46.7 | 16.5 | 7.58 | 2.5 |
| 粉质黏土 | 19.2 | 0.847 | 24.6 | 13.7 | 5.53 | 2.5 |
| 粉土 | 19.4 | 0.771 | 13.0 | 27.0 | 10.08 | 4.5 |
| 黏土 | 19.9 | 0.712 | 46.2 | 16.8 | 7.47 | 5.5 |

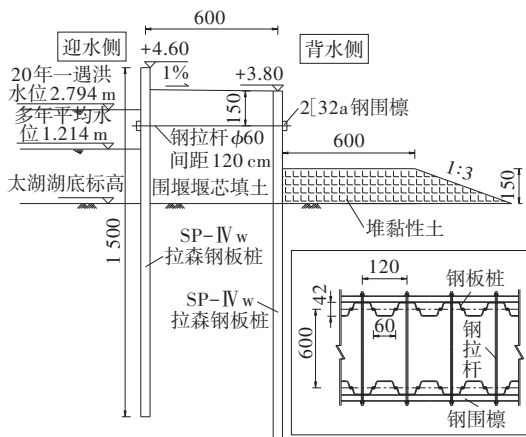


图2 双排钢板桩围堰横剖面图(单位:cm)

2 有限元模型

2.1 工况分析

本文旨在研究水位和各类荷载对围堰的内力、变形影响,水位主要体现在高低不同;由于永久荷载不变,所以荷载差异在可变荷载,主要为方向的差异,而设计阶段需考虑最不利条件,所以水平向可变荷载的方向按与水压力方向一致考虑。根据项目水文资料,高水位取+2.794 m,低水位取+1.214 m。本隧道考虑实际条件,不会出现冰压力,通过采取措

本项目围堰结构安全等级为一级,设计时水位重现期为20年,设计洪水位为+2.794 m,多年平均水位为+1.214 m。钢板桩采用15 m长SP-IVw拉森钢,按外高内低形式布置,迎水侧桩顶标高+4.6 m,背水侧桩顶标高+3.8 m。钢板桩围堰两排桩中心距6.0 m,堰芯黏性填土顶高程+3.8 m。拉杆采用GLG345-50 mm圆钢拉杆,位于填土面以下1.5 m处;围堰均为双拼[32a槽钢。背水侧堰脚处填筑黏性土,顶端宽6 m。双排钢板桩围堰横剖面如图2所示。

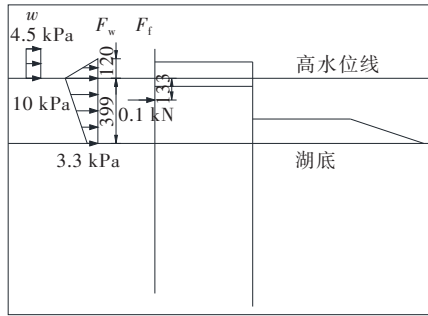
施,避免冲击力、撞击力的出现,本文考虑的可变荷载如表2所示。

表2 临时围堰所受荷载

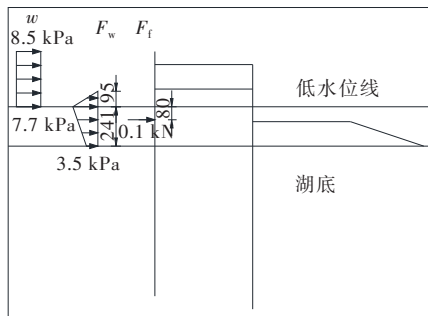
| 荷载类型 | 方向 |
|----------------|----|
| 施工荷载 F_c | 竖向 |
| 堰顶临时堆土荷载 F_s | |
| 风荷载 w | 水平 |
| 波浪荷载 F_w | |
| 流水荷载 F_l | |

竖向施工荷载 F_c 为填土阶段围堰顶施工车辆荷载及碾压作用,取20 kPa;堰顶临时堆土荷载 F_s 为考虑100年一遇洪水时通过堆填1 m高袋装土加高围堰产生的荷载,取20 kPa。水平可变荷载包括风荷载 w 、波浪荷载 F_w 和流水荷载 F_l ,根据《钢围堰工程技术标准》(GB/T 51295—2018)附录A.2.1、A.2.2和A.2.5条款以及《港口与航道水文规范》(JTS 145—2015)10.1.4条款进行计算,高水位和低水位下计算结果如图3所示。

本文分别对高水位-水平向可变荷载、高水位-竖向可变荷载、低水位-水平向可变荷载、低水位-竖向可变荷载4种工况各施工阶段下钢板桩围堰的内力变形规律进行研究。



(a) 高水位



(b) 低水位

图 3 水平可变荷载分布图(尺寸单位:cm)

2.2 模型建立

本文使用Midas GTS NX软件,因为隧道围堰纵向距离较长,整体呈长条状,因此选取典型断面,建立平面模型如图4所示。双排钢板桩围堰构件和土层的材料参数、属性参数根据表1设置,土层用平面应变单元模拟,采用Mohr-Coulomb模型,钢板桩和钢拉杆用1D梁单元模拟,采用弹性模型。根据围堰周边受影响土体范围确定计算地层范围,宽54 m、深15.5 m,围堰位于模型中心。整个模型共计3 348个单元,模型两个侧边法向约束,底面固定约束,水位根据实际工况设置。

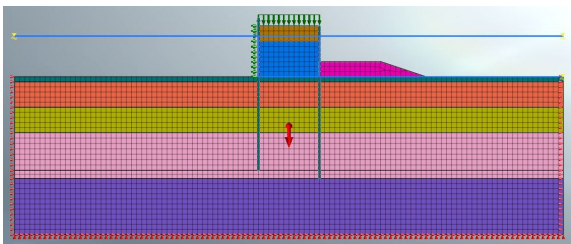


图 4 有限元模型

本文模型划分为7个施工阶段,如表3所示。根据实际情况,施工阶段S4,需考虑 F_c ;施工阶段S7,施加的竖向可变荷载仅为考虑100年一遇洪水时堆填

袋装土产生的堰顶临时堆土荷载 F_s ;水平荷载包括风荷载 w 和波浪荷载 F_w 等。施工阶段S5,抽水后背水侧水位高程等于湖底高程。

表 3 施工阶段划分情况

| 施工阶段 | 施工操作 |
|------|-----------------------------|
| S1 | 施工前 |
| S2 | 打设内、外侧钢板桩 |
| S3 | 施工钢拉杆,然后分层填筑黏土至钢拉杆处 |
| S4 | 下部填土沉降稳定后,填筑钢拉杆以上黏土至设计标高并压实 |
| S5 | 围堰封闭后抽水 |
| S6 | 施工围堰背水侧堰脚处堆土 |
| S7 | 施加水平向或竖向可变荷载 |

3 结果分析

打设钢板桩,未填筑黏土之前,钢板桩的内力、变形较小,可忽略不计,从S3阶段开始分析。

3.1 围堰变形计算结果分析

不同工况和施工阶段下钢板桩围堰的迎水侧和背水侧钢板桩水平位移结果如图5、6所示。填土至钢拉杆位置时,高水位条件下,钢板桩变形最大值位于湖底以下,迎水侧为1.42 cm,背水侧为-1.47 cm;低水位条件下,钢板桩最大位移迎水侧为0.75 cm,背水侧为-0.97 cm,比高水位下位移小,钢板桩向填土侧挤压。填筑拉杆以上黏土时,高水位条件下,迎水侧水平位移计算值最大值为0.90 cm,背水侧为-1.05 cm,变形减小;低水位条件下,迎水侧最大位移为1.09 cm,背水侧为-1.34 cm,均位于钢板桩顶部,钢板桩明显向两边鼓出。

抽水后,高水位条件下迎水侧钢板桩最大位移增加到11.13 cm,围堰整体向背水侧偏移约3 cm;低水位条件下迎水侧钢板桩最大位移增加到6.04 cm,围堰整体向背水侧偏移约2 cm。抽水施工导致双排钢板桩围堰产生较大的偏向背水侧的位移,并且高水位下位移大于低水位下。抽水后围堰内侧堰脚处的堆土对围堰位移影响不大,位移增量为0.5 cm左右。

考虑100年一遇洪水时竖向堰顶临时堆土荷载20 kPa后,钢板桩的水平位移增量较小。若考虑风荷

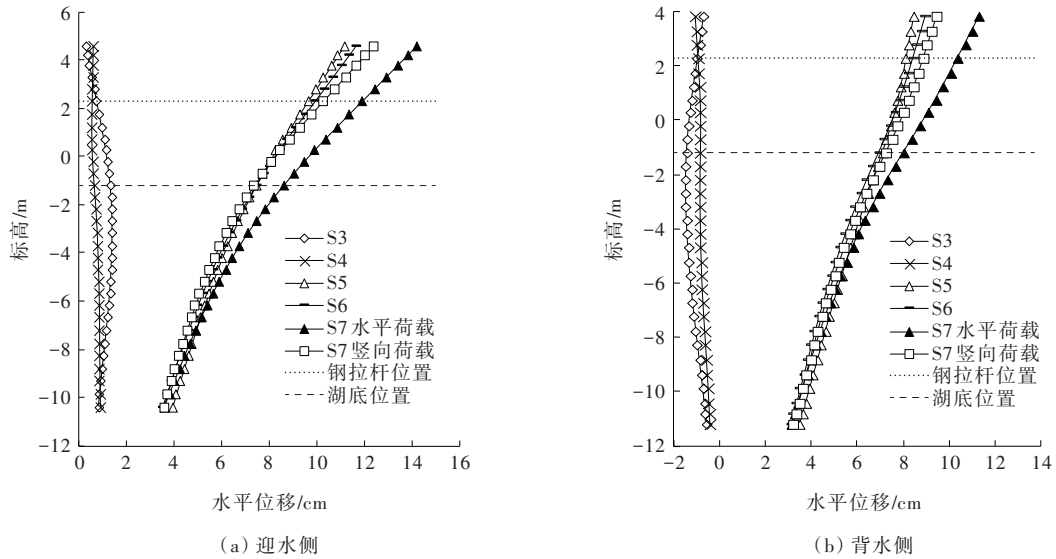


图5 高水位下钢板桩水平位移

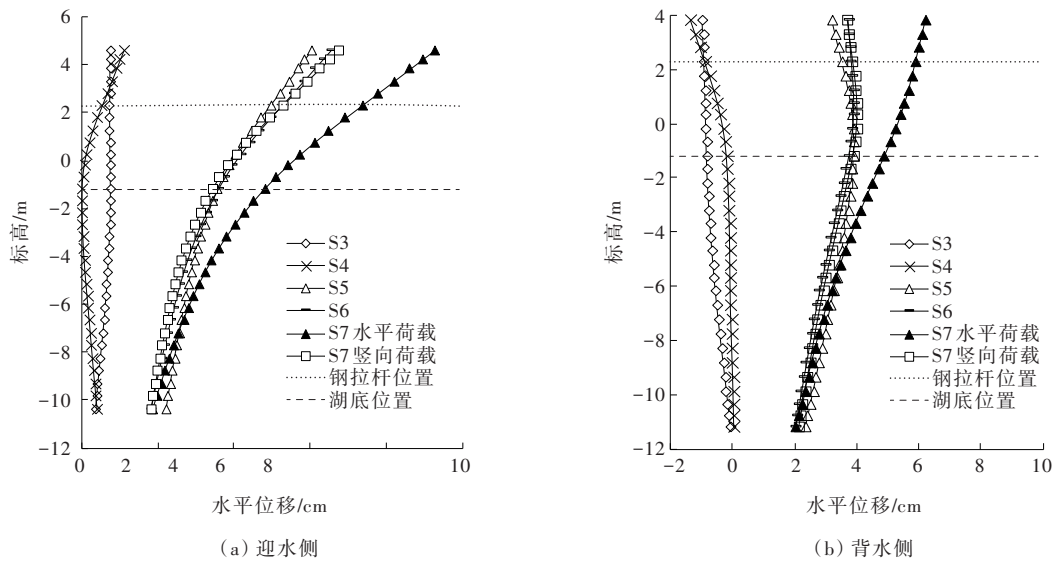


图6 低水位下钢板桩水平位移

载、波浪荷载等水平向荷载,相对于S6堰脚堆土阶段,钢板桩顶部产生较大变形,高水位下迎水侧钢板桩顶部位移增大到14.22 cm,背水侧增大到11.33 cm;低水位下迎水侧钢板桩增大到9.26 cm,背水侧增大到6.19 cm。水平荷载作用使双排钢板桩上部发生较大位移,尤其是高水位下。

对上述结果进行分析,地层条件都一样,围堰位移受水位高低和荷载工况影响。双排钢板桩围堰填土阶段水平位移较小,若水位较高,在围堰两侧水压力 P_w 作用下,两侧桩相向变形,填土受挤压,水压力 P_w 分布示意如图7(a)所示;若水位较低,围堰两侧水压力小,在填土自重、施工荷载和钢拉杆约束下,钢

板桩呈鼓出形状,水压力 P_w 和竖向荷载 F_c 示意如图7(b)所示。抽水后,在外部水压力的作用下,双排钢板桩围堰整体向基坑侧发生侧移,水位越高,水平位移越大,水压力 P_w 和竖向荷载 F_c 示意如图7(c)所示。围堰背水侧堰脚堆土和竖向可变荷载对围堰水平位移影响很小,但水平向荷载对围堰变形影响很大。双排钢板桩围堰位移的最不利工况为高水位-水平向可变荷载(围堰抽水后的阶段)。

3.2 钢拉杆轴力计算结果分析

不同工况和施工阶段下钢板桩围堰的钢拉杆轴力计算结果如表4所示。填土至钢拉杆处时,钢拉杆处于受压状态,并且高水位下压力更大。填土至设

计标高,同时施工荷载条件下,钢拉杆轴力陡增处于受拉状态,并且低水位下拉力大于高水位下。抽水工况导致高水位下拉杆拉力增大,低水位下拉杆拉力减小。背水侧堰墩堆土对钢拉杆轴力影响小。考虑水平向荷载后,钢拉杆的拉力减小;考虑竖向荷载后,钢拉杆的拉力明显增大。低水位下拉杆拉力大于高水位下,钢拉杆的最大拉力出现在低水位-竖向可变荷载工况。

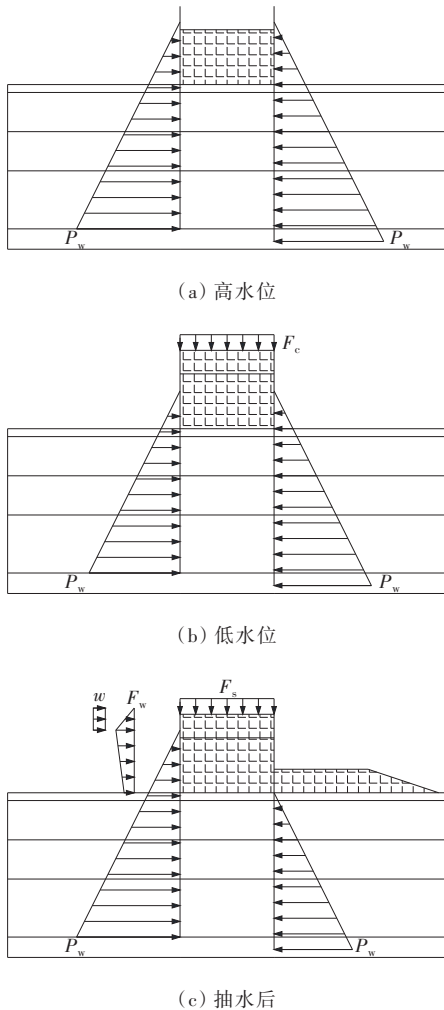


图 7 围堰所受水平向、竖向可变荷载示意图

表 4 钢拉杆轴力计算结果

| 施工阶段 | 轴力/kN | |
|--------|-------|------|
| | 高水位下 | 低水位下 |
| S3 | -58 | -18 |
| S4 | 84 | 131 |
| S5 | 96 | 122 |
| S6 | 97 | 122 |
| S7水平荷载 | 78 | 102 |
| S7竖向荷载 | 130 | 147 |

经分析,堰芯填土和竖向荷载对双排钢板桩围堰钢拉杆拉力有较大的影响。S4阶段填筑钢拉杆以上黏土时,在填土自重和施工荷载作用下,以及S7阶段考虑100年一遇洪水时堰顶临时堆土荷载作用下,钢拉杆上部黏土产生较大的竖向变形,钢拉杆随之产生较大的向下弯曲变形,如图8所示。钢拉杆的弯曲变形导致钢拉杆拉力增大。

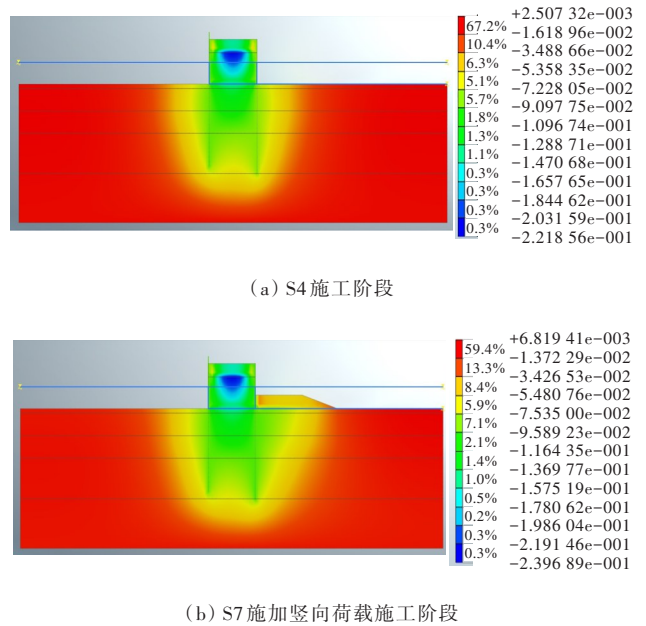


图 8 低水位下竖向位移云图(单位:m)

另外,水压力和水平荷载通过平衡填土侧向土压力有利于减小钢拉杆拉力。低水位时,外侧水压力较小,对围堰双排桩之间的填土产生的侧向土压力平衡作用小,正如上一节位移计算结果所示,低水位时在填土作用下,钢板桩会向两侧隆起,而钢拉杆对钢板桩产生约束作用,从而钢拉杆的拉力也随之增大。高水位下抽水后,背水侧水压力消失,导致钢拉杆拉力增大;而低水位钢拉杆降低是卸掉填土阶段施工荷载和卸掉水压力的叠加结果。钢拉杆计算的最不利工况为低水位下仅考虑竖向可变荷载作用。

3.3 钢板桩弯矩计算结果分析

不同工况和施工阶段下钢板桩围堰的迎水侧和背水侧钢板桩弯矩结果如图9、10所示。填土至钢拉杆阶段,最大弯矩出现在高水位下,两侧钢板桩出现向内侧弯曲情况,最大弯矩约66 kN·m,位于湖底附近。填土至设计标高并碾压,最大弯矩出现在低水位下,两侧钢板桩向外弯曲,最大弯矩约100 kN·m,

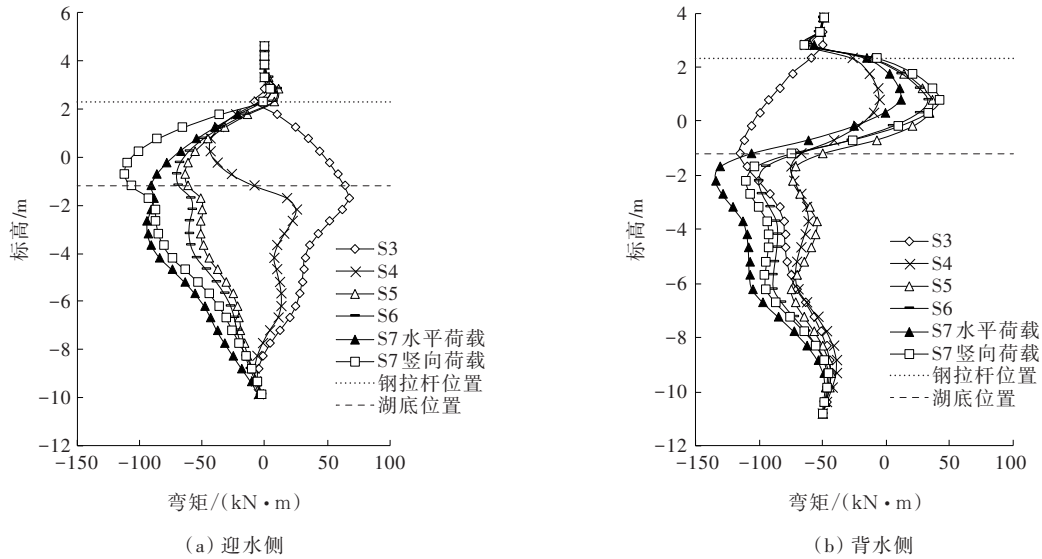


图9 高水位下钢板桩弯矩图

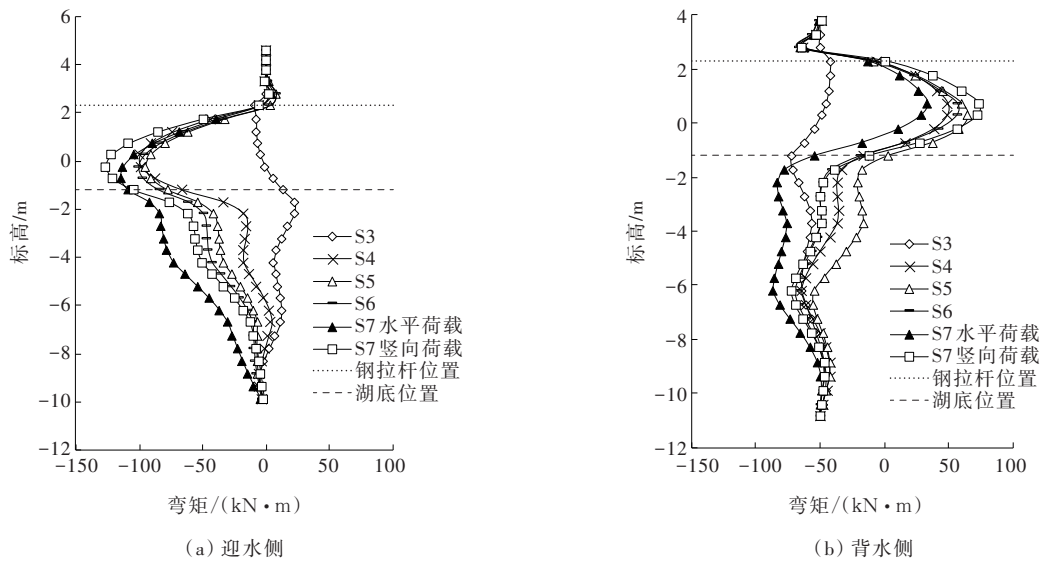


图10 低水位下钢板桩弯矩图

位于湖底以上。抽水后,迎水侧钢板桩外侧受弯且弯矩增大,背水侧钢板桩在高水位时上部外侧受弯,下部填土侧受弯;低水位下外侧受弯为主。S6堰脚堆土阶段对弯矩的影响较小。

添加水平荷载后,迎水侧钢板桩弯矩愈发增大,背水侧钢板桩湖底以上向外侧弯曲,弯矩减小,湖底以下部分向填土侧弯曲,弯矩增大。施加竖向荷载后,两侧钢板桩弯矩都增大,尤其是围堰堰芯填土层范围内。

分析上述结果发现,钢板桩湖底以上部分弯矩主要来自堰芯填土自重、竖向附加荷载产生的侧向土压力,湖底以下部分弯矩主要来自围堰侧向变形

产生的地基反力作用,钢板桩弯矩同时也受水位影响。当围堰内部填土少,侧向土压力小,而外侧水位高,产生的水压力大,导致钢板桩向填土侧弯曲。当围堰内部填土较高自重大以及施加竖向附加荷载,都会导致填土对钢板桩的侧向土压力加大,钢板桩向两侧弯曲,上部弯矩增大。如上述水平位移结果显示,抽水工况会使得围堰向背水侧变形,从而两侧钢板桩插入土中部分均受到朝向围堰迎水侧的地基反力,迎水侧钢板桩弯矩进一步增大,而且湖底以下钢板桩向外侧受弯的范围进一步扩大;而背水侧钢板桩由于上部水压力减小和下部地基反力增大综合作用,导致弯矩分布和大小有差异。其中,高水位条

件下,由于围堰侧向位移大,地基反力更大,导致湖底以下背水侧钢板桩向填土侧弯曲,同时由于水压力卸去,上部钢板桩向基坑方向的弯矩增幅更大。水平向风荷载、波浪荷载同样引起围堰侧向变形增大,土体对钢板桩的地基反力随之增大,导致钢板桩下部弯矩越大。竖向堰顶临时堆土荷载产生的侧向土压力主要作用范围在钢板桩上部,引起上部钢板桩向两侧受弯的弯矩增大。

4 结论

本文通过有限元计算,研究双排钢板桩围堰在不同水位、不同类型荷载工况下各施工阶段的变形和受力规律,并进行机理分析,得到以下结论:

(1) 填土阶段两侧钢板桩位移基本对称,位移方向和大小受水位高低、堰芯填土和施工荷载影响,填土自重和施工荷载产生的侧向土压力使两侧钢板桩向外侧变形,水压力则相反。抽水使得围堰整体向背水侧产生较大位移,与水压力同向的水平荷载会加大位移,竖向荷载对位移影响较小。

(2) 竖向荷载对钢拉杆拉力影响很大,荷载使得堰芯填土产生沉降,进而引起钢拉杆弯曲变形,从而导致拉力增大;水压力和水平荷载通过平衡填土侧向土压力作用有利于减小钢拉杆拉力。

(3) 钢板桩弯矩可分为湖底以上和湖底以下两大部分,上部钢板桩弯矩主要来自堰芯填土自重、竖向附加荷载产生的侧向土压力,下部钢板桩弯矩主要来自抽水和水平荷载导致围堰变形挤压土体产生的地基反力。

(4) 钢板桩围堰变形和受力最不利阶段处于抽水后使用阶段,水平位移最大值发生在高水位且受到与水压力同向的水平荷载工况;钢拉杆拉力最大值发生在低水位-竖向可变荷载工况;钢板桩弯矩最不利工况需分迎水侧、背水侧单独考虑,计算多种工况取最不利结果。

参考文献:

- [1] 张玉成,杨光华,姜燕,等.软土地区双排钢板桩围堰支护结构的应用及探讨[J].岩土工程学报,2012,34(S1):659-665.
- [2] 江杰,顾倩燕,胡何,等.双排钢板桩围堰的冗余度分析[J].岩土力学,2015,36(S1):518-522.
- [3] 汤劲松,熊保林.钢板桩围堰设计的土压力计算方法探讨[J].岩土工程学报,2014,36(S2):36-41.
- [4] 彭常青,贺金仁,林日练.软土地基上钢管桩围堰的基础理论研究[J].水运工程,2015(6):152-155.
- [5] 蔡龙.漳州大桥8#墩钢板桩围堰施工方案计算及土弹簧简化计算方法研究[D].湘潭:湘潭大学,2015.
- [6] 何勇.大型泵站进水口双排钢板桩围堰设计与安全性分析[J].浙江水利科技,2014,42(6):50-52,55.
- [7] 陈浩.淮河超深双壁钢围堰荷载组合作用及力学特性分析[D].西安:长安大学,2017.
- [8] 涂静兰.大圆筒围堰在波浪荷载作用下的稳定性数值模拟[J].中国水运,2019,19(6):45-46.
- [9] 张凯,张程然,曹政,等.基于三维数值模拟的洪水期组合围堰结构水流作用研究[J].中外公路,2020,40(1):120-125.
- [10] 魏凯,徐博,李义强.基于实测水压力的跨海桥梁围堰波浪力计算[J].桥梁建设,2018,48(3):50-54.
- [11] 刘菁,戎贤,梁栋.波流组合作用下钢板桩围堰的受力分析[J].防灾减灾工程学报,2017,37(6):855-862.
- [12] 陈从睿.潮汐作用下围堰与支护结构受力特性研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- [13] 姚德波,殷新锋.基坑锁口钢管桩围堰的受力行为分析[J].中外公路,2017,37(2):27-32.
- [14] 邵学.矩形钢围堰波浪荷载数值模拟研究[J].中国水运(下半月),2018,18(4):81-83.
- [15] 冯谊武.跨海大桥圆端形施工钢围堰的波浪力特性研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [16] 吴留伟,郑国兵,吴蕾,等.双排钢板桩围堰在超深厚软土地基中的应用[J].水运工程,2018(3):143-148.
- [17] 崔春义,黄建,孙占琦,等.不同水位下钢板桩围堰工作性状有限元分析[J].广西大学学报(自然科学版),2010,35(1):187-192.
- [18] 陈香月,徐光黎,田华通,等.砂卵石地层中单、双排钢板桩围堰现场水平荷载试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(1):91-96,103.