

基于有限元法的钢板桩围堰结构分析

丁巍, 金乾明

(中交一公局桥隧工程有限公司, 湖南 长沙 410205)

摘要:为了确保钢板桩围堰施工的安全性,以湖北 215 省道毛市大桥 14[#]墩钢围堰为工程背景,分别采用了平面有限元和空间有限元分析法对钢板桩围堰多个工况下的受力情况进行了分析,并与实测值进行了对比讨论。结果表明:14[#]墩钢板桩围堰刚度和强度满足规范要求,可以安全施工;采用的两种分析方法均能满足工程需求,平面有限元法相对简单,计算结果较为保守,而空间有限元法计算结果更接近实测值,但分析方法相对复杂。

关键词:钢板桩;围堰;有限元;应力

如今采用钢板桩围堰施工桥梁深水基础已经非常普遍,该围堰结构形式具有施工简便、造价较低、防水性好等优点,并且随着施工技术的进步,钢板桩围堰的开挖深度也越来越大,这就对其结构的计算分析提出了更高的要求。传统的计算方法是采用等值梁法结合平面结构有限元简化计算,而围堰结构实际是空间受力体系,简化计算的结果必定存在偏差。事实上,水下桩土作用复杂,无论采用哪种方法计算都会与实际有一定的偏差,只有通过不断地优化计算方法和计算模型才能使计算结果更加可靠。

该文以湖北 215 省道毛市大桥 14[#]主墩钢板桩围堰为背景,分别采用平面有限元法和整体空间有限元法进行计算分析。为确保结构安全,对围堰进行施工过程的应力及位移监测,将两种方法的计算结果与监测结果进行对比,分析方法的优缺点,为以后类似钢板桩围堰的设计与施工提供借鉴。

1 工程概况

湖北 215 省道毛市大桥项目位于荆州市监利县,其主桥上部结构为(75+125+75) m 预应力混凝土连续梁,基础采用桩基础和矩形承台,承台尺寸为 13.2 m×13.2 m×3.5 m,两主墩均位于河道边缘,现场先进行回填土方搭建施工平台,然后采用钢板桩围堰法施工主墩承台,钢板桩采用拉森Ⅳ型钢板桩,材质为 Q295p,桩长 18 m,围堰平面尺寸为 15.6 m×15.6 m,其中 14[#]墩地质条件相对较差,开挖深度更大,围堰顶标高为+25.000 m,底标高为+7.000 m,最大开挖深度为 10.34 m,共设置 4 道内支撑。4 道内支撑的标高分别为 +24.180、+21.450、+19.010、+16.990 m。其中第 4 层支撑在垫层浇筑完并达到强度后仅拆除斜撑保留围图,承台施工完成后,回填砂土再将围图

用锚拉板索梁锚固系统的大跨径斜拉桥,采用精确求解方法是非常必要的。

参考文献:

- [1] Gimsing N J. Cable Supported Bridges—Concept & Design[M]. New York: John & Wiley, 1997:100—104.
- [2] Irvine H Max. Cable Structure [M]. Cambridge: The MIT Press, 1981.
- [3] 魏建东,车惠民.斜拉索静力解及其应用[J].西南交通大学学报,1998(5).

- [4] 陈太聪,马海涛,苏成.拉索静力状态的高精度无迭代求解方法研究[J].工程力学,2013(3).
- [5] 李传习,夏桂云.大跨度桥梁结构计算理论[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [6] 李传习,夏桂云,张建仁,等.斜拉索静力分析综述[J].中南公路工程,2001(2).
- [7] 吕颖慧,张红量,王水林. Newton 下山法的改进及其应用[J].地下空间与工程学报,2006(5).
- [8] 湖北省交通规划设计院股份有限公司.香溪长江公路大桥施工图设计[Z],2014.

拆除,其余支撑在墩身施工完成后围堰内回填土时拆除。14#墩钢板桩围堰布置图如图 1、2 所示。

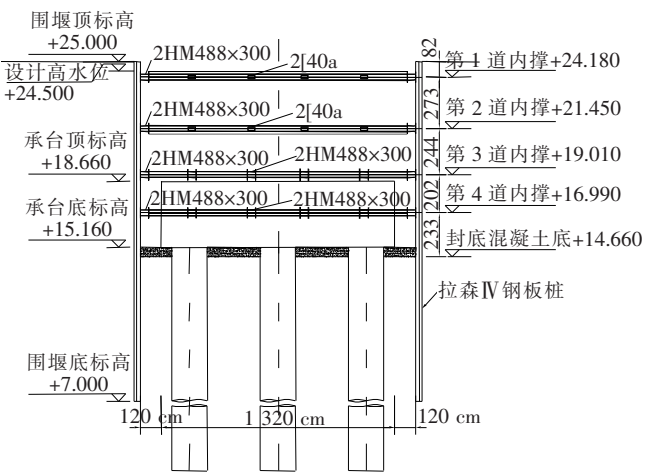


图 1 钢板桩围堰立面布置图(除标高单位为 m 外,其余:mm)

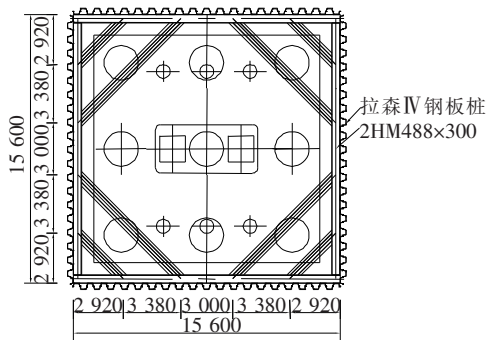


图 2 围堰平面布置图(单位:mm)

2 计算参数

2.1 工程地质

根据现场地勘报告及项目附近类似工程经验,14#墩地质参数见表 1。

表 1 14#墩土层参数

土层名称	土层标高/m	重度/(kN·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
填筑黏土	25.00~20.62	19.4	13.0	27.0
淤泥质粉质黏土	20.62~17.62	17.5	6.0	12.0
粉质黏土夹粉土	17.62~13.92	18.2	11.0	18.5
黏土	13.92~8.52	19.5	12.0	25.5
粉砂	8.52~4.92	19.5	21.4	14.0
粉砂	4.92~-4.68	19.5	20.5	13.5
细砂	-4.68~-31.88	18.0	12.6	22.0

2.2 主要计算工况

毛市大桥 14#墩钢板桩围堰主要施工步骤为:①桩基施工完成后插打钢板桩;②围堰内开挖至+23.68 m,在+24.18 m 处安装第 1 道内支撑;③围堰内开挖至+20.95 m,在+21.45 m 处安装第 2 道内支撑;④围堰内开挖至+18.51 m,在+19.01 m 处安装第 3 道内支撑;⑤围堰内开挖至+16.49 m,在+16.99 m 处安装第 4 道内支撑;⑥围堰内开挖至+14.66 m,浇筑 50 cm 厚 C25 封底混凝土;⑦待封底混凝土达到强度后拆除第 4 道支撑的斜撑,破除桩头进行承台施工;⑧围堰内回填砂土,拆除第 4 道支撑围堰,并在承台顶位置用型钢填充承台与钢板桩间隙;⑨完成墩身施工,围堰内回填并拆除内支撑;⑩最后依次拔出钢板桩。

根据施工工序,该围堰主要考虑以下 3 个较危险的计算工况:

- (1) 工况 1:第 3 道支撑安装完成后,围堰内开挖至+16.49 m。
- (2) 工况 2:第 4 道支撑安装完成后,围堰内开挖至+14.66 m(最大深度)。
- (3) 工况 3:封底混凝土达到强度后拆除第 4 层支撑的斜撑。

该文着重分析上述 3 个工况下的钢板桩及内支撑的受力情况,并且假定围堰内部始终处于干施工状态,这样的计算结果更为保守。

2.3 荷载计算

由于采用筑岛方法搭建施工平台,钢板桩主要荷载为土压力。围堰处土层中,粉质黏土、粉砂、细砂均为透水性土层,土压力计算时按照水土分算法进行计算。黏土层为不透水层,按水土合算法计算。

土压力计算采用朗肯主被动土压力公式计算,对于水土合算的土层:

$$P_a = \gamma z \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (1)$$

$$P_b = \gamma z \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

对于水土分算的土层:

$$P'_a = (\gamma - \gamma_w) z \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \gamma_w h_{wa} \quad (3)$$

$$P'_b = (\gamma - \gamma_w) z \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + \gamma_w h_{wb} \quad (4)$$

式中: $P_a(P'_a)$ 、 $P_b(P'_b)$ 分别为主动土压力和被动土压力; γ 为土的天然重度; γ_w 为地下水重度; c 为土的黏聚力; φ 为土的内摩擦角; h_{wa} 、 h_{wb} 分别为基坑外侧和内侧地下水位深度,参数取值见表1。

以最大开挖深度工况即工况2为例,计算得其土压力分布如图3所示。

3 平面有限元法计算

3.1 钢板桩受力计算

根据地质参数,取钢板桩为1 m板宽,利用理正深基坑软件计算,选用“m法”对围堰各个施工工况的内力进行分析,计算得到各层支撑位置最大反力以及板桩结构内力位移包络图,如图4所示。

拉森Ⅳ型钢板桩每延米的截面抗弯模量约为

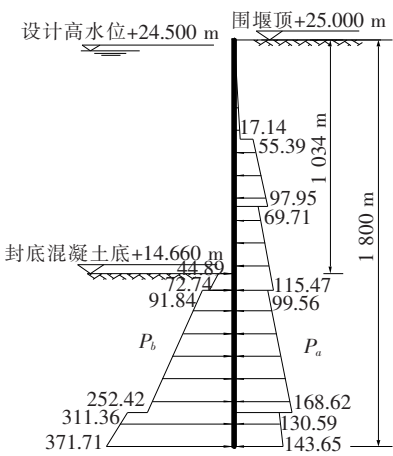


图3 工况2钢板桩土压力分布图(单位:kPa)

$2.27 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,钢板桩最大弯矩为 $272.94 \text{ kN} \cdot \text{m}$,则最大弯曲应力为 120.2 MPa 。

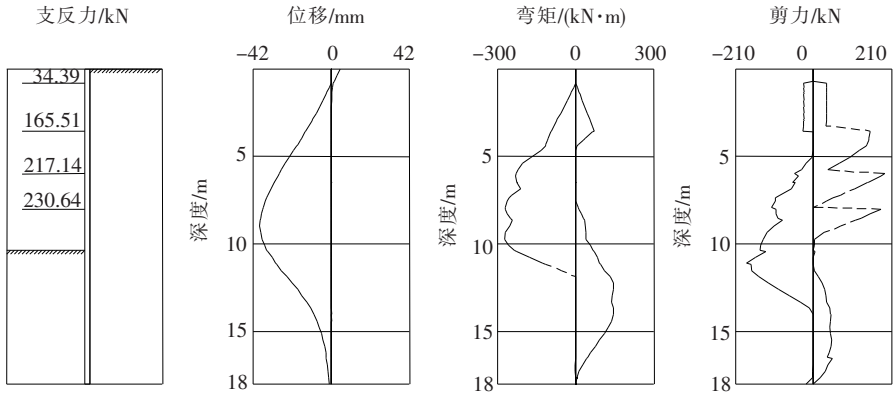


图4 钢板桩内力包络图

3.2 内支撑计算

根据图4计算结果,支反力最大值为第4层的230.64 kN,以第4层内支撑为例,利用Midas Civil建立内支撑平面模型,在围图上施加230.64 kN/m的线荷载,计算得到内支撑最大组合应力为 -121.5 MPa ,其他支撑计算方法类似。

将所有支撑计算结果汇总于表2。

表2 内支撑应力极值计算结果				MPa
支撑位置	最大轴应力	最大剪应力	最大弯曲应力	最大组合应力
第1层	-11.5	6.3	34.7	-45.7
第2层	-55.2	30.3	34.7	-88.0
第3层	-51.4	40.3	43.1	-116.0
第4层	-54.6	42.8	43.1	-121.5

由表2可知:越往底层的内支撑应力越大,内支撑采用Q235钢,其各项应力极值均小于规范GB 50017—2017《钢结构设计标准》表4.4.1中规定值。

4 空间有限元法计算

采用Midas Civil建立钢板桩围堰的空间有限元模型,钢板桩和内支撑均采用梁单元模拟,模型共2 064个节点,2 016个单元。相邻钢板桩之间,钢板桩与围堰之间均采用铰接,钢板桩底部为铰支座约束,采用土弹簧模拟被动土压力,封底混凝土与钢板桩之间采用双向土弹簧模拟。

4.1 工况1计算结果

第3道支撑安装完成后,围堰开挖至+16.49 m。此时围堰开挖深度为8.51 m,此时第3道支撑位于最底层,受力较为不利。钢板桩和内支撑的变形和应力

计算结果如图 5 所示。

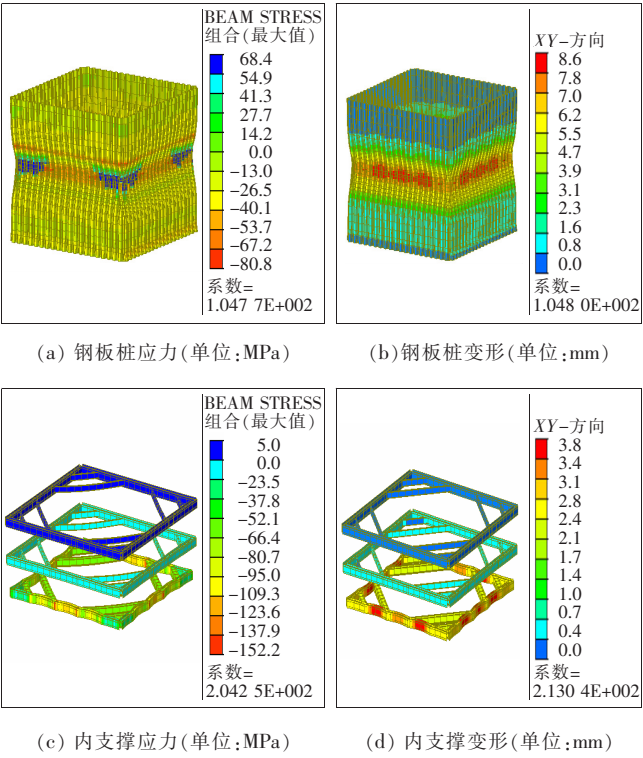


图 5 工况 1 计算结果

由图 5 可知:工况 1 下,钢板桩最大组合应力为 80.8 MPa,最大变形量为 8.6 mm;内支撑的最大组合应力为 152.2 MPa,最大变形量为 3.8 mm。

4.2 其他工况计算结果

其他工况计算过程与工况 1 基本相同,不再赘述,表 3 为所有工况钢板桩及内支撑的应力和位移计算结果。

表 3 钢板桩围堰计算结果

计算工况	钢板桩应力/MPa	钢板桩位移/mm	内支撑应力/MPa	内支撑位移/mm
1	-80.8	8.6	152.2	3.8
2	100.8	15.2	145.9	3.7
3	109.0	15.2	171.5	4.4

由表 3 可以看出:毛市大桥 14# 墩钢板桩围堰施工过程中钢板桩最大组合应力为 109.0 MPa,内支撑最大组合应力 171.5 MPa。钢板桩材质为 Q295P,内支撑材料为 Q235 钢,根据 GB/T 20933—2014《热轧钢板桩》及 GB 50017—2017《钢结构设计标准》其屈服强度分别为 295、235 MPa,均考虑 1.35 倍安全系数,则钢板桩允许应力为 218.5 MPa,内支撑允许应力为 174.1 MPa,结构强度满足要求。钢板桩最大水平位

移为 15.2 mm,工况 3 内支撑水平位移最大值为 4.4 mm。其中,钢板桩允许最大挠度为 $L_1/400=18\,000/400=45\text{ mm}$,内支撑最大挠度发生在围堰跨中位置,跨中位置允许最大挠度为 $L_2/400=3\,000/400=7.5\text{ mm}$ 。因而,围堰的刚度满足规范要求。

从计算结果云图可以看出:钢板桩最薄弱位置位于围堰每边跨中位置,内支撑受力较大位置主要位于围堰上,并且与平面有限元计算得出的规律相同:下层受力较上层大,因而设计时,靠下层的内支撑选用较大截面型钢。

5 围堰监测及比较分析

5.1 钢围堰监测

围堰监测主要包括水位监测、围堰结构位移监测以及围堰应力监测 3 个方面。其中围堰外水位通过在河道边设置带有标高数据的固定标尺进行监测,实际施工过程中围堰内几乎无地下水冒出,无需进行内部水位监测。

围堰结构位移监测主要为钢板桩顶部水平位移和沉降监测,监测点布置在钢板桩顶部围堰 4 个角点及各边中点位置。水平位移采用测边交会法进行监测,沉降量采用电子精密水准仪监测。结构应力监测选用正弦式钢板应变计进行监测,测点布置在围堰靠河侧边中间部位钢板桩上,竖向布置 6 个测点,所有监测点布置如图 6 所示。

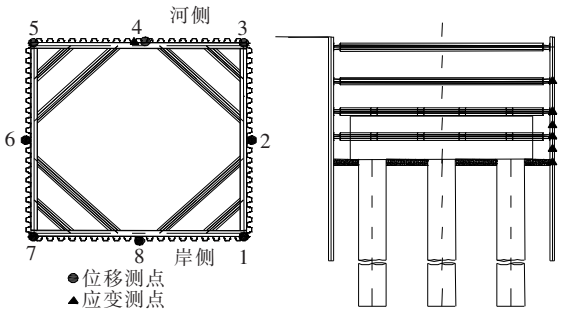


图 6 围堰监测点布置图

实际位移监测结果如图 7 所示。由图 7 可知:钢围堰整体位移较小,随着开挖深度的增加,位移值也逐渐增加,且围堰整体有向河侧倾斜的趋势。开挖至最大深度后,结构逐渐稳定,最大位移约为 3 mm,发生在与河道平行的边中点位置,这是由于该位置垂直于河道方向刚度相对较低,且河侧的回填土相对于原状土对围堰的支撑作用小,施工过程中在河侧刻意进行

了放坡加高处理,从而减小了整体倾斜趋势。

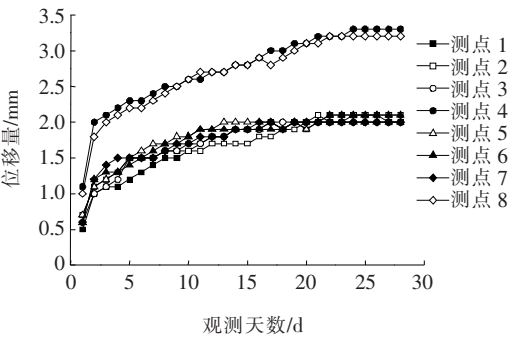


图7 围堰顶部位移监测结果

5.2 应力对比

由于钢板桩上部受力较小,从第2层支撑位置开始布置应力测点,并在底部进行测点加密,共6个有效测点。将钢板桩实测应力极值与理论计算值进行对比,结果见表4。工况2即开挖至最大深度时,应力实测值与空间有限元理论计算值对比如图8所示。

表4 钢板桩实测应力与理论值对比

方法	应力极值/MPa	与实测值偏差/%
现场实测	88.1	—
空间有限元法	109.0	23.7
平面有限元法	120.2	36.4

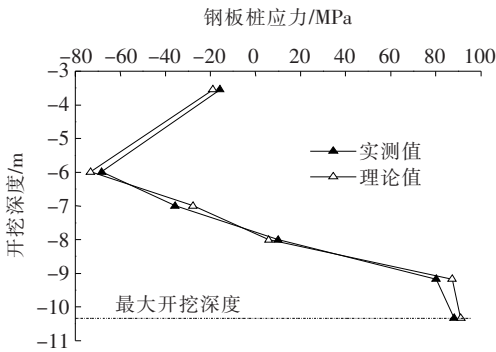


图8 工况2下钢板桩实测应力与理论值对比

由表4可知:钢板桩理论计算应力极值均比实测值大,其中,平面有限元计算结果更为保守。由图8可看出:钢板桩空间有限元计算值与实测应力分布规律基本相同,计算结果具有一定的可靠性,应力极值偏差为23.7%,这是由于实际土层分布并不均匀,且现场围堰加工情况也与图纸存在一定的偏差造成的。

6 结论

(1) 通过有限元分析能直观地展现出钢围堰的整体受力变形情况,计算时,考虑了多种不利工况进行分析。计算结果表明该钢围堰的整体刚度及强度均满足规范要求。

(2) 钢板桩围堰采用有限元计算时,其计算结果均大于实测值,其中采用空间有限元法计算结果与实际结果更为接近,应力分布规律也和实测结果一致。实际施工同时需要进行位移监测,该围堰整体位移很小,但由于实际地层的不均匀分布产生了一定的倾斜趋势。

(3) 采用两种有限元分析方法均能满足工程需求,空间有限元法计算相对复杂,但与实测结果更为接近。平面有限元分析方法相对简单,计算结果较为保守,综合考虑现场施工因素,采用该方法计算具有一定的可靠性。

参考文献:

[1] 阮泽莲,吴炜. 厦漳跨海大桥Ⅱ标主墩钢板桩围堰设计[J]. 水运工程,2011(8).

[2] 田仲初,谢彬,蒋田勇,等. 基于等值梁法的单层钢板桩围堰有限元分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017(2).

[3] 刘跃武. 拉森钢板桩围堰在海河春意桥水中墩施工中的应用[J]. 桥梁建设,2012(S1).

[4] 潘泓,王加利,曹洪,等. 钢板桩围堰在不同施工工序下的变形及内力特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013(11).

[5] 陈长明. 强涌潮地区拉森Ⅵ型钢板桩围堰施工计算[J]. 桥梁建设,2009(5).

[6] 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(S2).

[7] 刘陕南,侯胜男,蔡忠祥. m法计算单桩水平承载力在上海地区的适用性分析[J]. 岩土工程学报,2013(S2).

[8] 孙焕重. 基于不同施工阶段的桥梁钢板桩围堰检算[J]. 山西建筑,2017(13).

[9] 张骏. 桥梁深水基础钢板桩围堰受力分析与应用[J]. 桥梁建设,2012(5).

[10] 朱浩,王通. 超大陆地沉井信息化施工监控技术[J]. 施工技术,2018(24).

[11] 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(2).