

抚河特大桥钢板桩围堰设计与验算

*邵俊虎^{1,2}, 占玉林³, 李世春⁴, 蒋海军⁵

(1. 四川师范大学土木工程系, 四川, 成都 610101; 2. 四川省安全工程虚拟仿真实验教学中心(四川师范大学), 四川, 成都 610101;
3. 西南交通大学土木工程学院, 四川, 成都 610031; 4. 北京中交桥宇科技有限公司, 北京 100102;
5. 青岛市市政工程设计研究院有限责任公司, 山东, 青岛 266071)

摘要: 钢板桩围堰受到较大的内外水头差, 所受荷载复杂, 其刚度较小, 保证施工过程中钢板桩围堰结构的整体刚度和稳定性极为重要。本文采用有限元软件 ANSYS, 考虑了风荷载、静水压力荷载、流水压力荷载、土压力荷载等外荷载的作用, 基于 ANSYS 中的生死单元技术, 模拟了整个施工过程, 对结构的效应值进行了合理的模拟, 最后根据得出的受力结果, 结合相关规范, 对结构进行了验算。结果表明, 结构的强度、整体稳定性、支撑系统的局部稳定性均满足要求, 按照该施工过程可保证结构安全。

关键词: 连续梁; 钢板桩; 围堰; 应力; 稳定

1 工程概况

抚河特大桥以 48+6×80+48m 连续梁形式跨抚河河道, 施工水位为 20.13m, 承台有 24 个, 墩柱 24 个。其中 134~138 号墩位于内抚河河内, 承台为直径 16.3m、厚度 3m 的圆形双层承台, 桥墩为坡比 35:1 的连续梁桥墩, 其 127~138 号基础施工采用钢板桩围堰。桥区汇水面积为 $F=15811\text{km}^2$, 百年设计流量 $Q=14700\text{m}^3/\text{s}$, 百年设计水位 $H_1\%=25.98\text{m}$, 施工水位为 20.13m, 设计流速 $V=1.722\text{m/s}$, 流向为自左向右, 线路法线与水流夹角为 14° 。127~133 号桥墩均位于抚河浅滩内, 承台为 $10.2\times 6.7\times 2.5\text{m}$ 的方形承台, 桥墩为坡比 45:1 的简支梁桥墩, (其中 133 号承台为 $12.3\times 8.2\times 2.5\text{m}$ 的方形承台, 桥墩为坡比 35:1 的连续梁桥墩), 其基础施工采用筑岛围堰或砂袋围堰。134~138 号墩位于内抚河河内, 承台为直径 16.3m、厚度 3m 的圆形双层承台, 桥墩为坡比 35:1 的连续梁桥墩。

钢板桩是一种自带锁口的钢板, 施工时, 可将已成型的钢板桩单独打入土体, 不同的钢板桩之间通过锁口连接, 锁口具有不同方式, 锁口具有防水性能好, 强度高, 并且施工完成后, 可拔出钢板桩, 在其他的工程项目中重复使用, 近年来, 受到了广泛的使用^[1]。虽然钢板桩有许多优点, 但在施工过程中, 钢板桩需要承受风力, 水流力, 土压力, 水浮力等荷载, 受力情况复杂, 钢板桩与支撑系统必须保证强度满足要求, 并且钢板桩围堰属于柔性结构, 较容易发生失稳破坏^[2]。钢板桩围堰的计算方法主要有空间有限元分析法, 平面有限元分析法和等值梁法, 这些方法在实际工程中均有应用, 有文献对这些方法进行了对比研究^[3-6]。本工程项目在施工过程中内外水头差大, 基础尺寸也较大, 围堰受力大, 为了解决各个施工阶段中结构的强度与稳定性安全问题, 本文采用 ANSYS 软件建立了有限元模型, 并采用生死单元技术模拟各施工阶段, 计算了施工阶段的应力及稳定性系数, 结果表明, 按照当前的施工工序, 结构安全性能能够得到有效保证。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208431); 国家重点研发计划项目(2016YFB1200401); 四川省科技计划项目(2017GZ0366); 四川省科技计划项目(2017JY0514)

作者简介: *邵俊虎(1986—), 男, 湖北仙桃人, 讲师, 博士, 主要从事桥梁船撞及结构可靠度研究(E-mail: shaojunhuss@qq.com);

占玉林(1978—), 男, 湖北罗田人, 副教授, 博士, 主要从事混凝土桥梁结构行为研究;

李世春(1981—), 男, 山东曹县人, 工程师, 硕士, 主要从事桥梁隧道检测及加固设计研究;

蒋海军(1980—), 男, 江苏人, 高级工程师, 硕士, 主要从事桥梁工程设计研究。

2 有限元模型及结果分析

2.1 结构设计及计算工况

钢围堰由钢板桩、围檩、内撑三大部分组成。钢板桩壁体主要由拉森 IV 型钢板拼接构成，钢板桩由 188 块拉森钢板构成。承台以上围檩和内撑共布置 4 层，与钢板桩一起构成平面框架，从而增强结构的整体稳定性。围檩与内撑均采用 Q235 钢材，第一道围檩采用 H400×400mm 型钢，内撑用 609×16mm 钢管；第二三道围檩采用 2×H500×300mm 型钢焊接，内撑用 609×16mm 钢管；第四道围檩采用 2×H700×300mm 型钢焊接，内撑用 609×16mm 钢管。钢板桩的整体长度为 15m，入土深度为封底混凝土底面以下 2.5m。钢板桩围堰的结构图见图 1~图 2 所示。

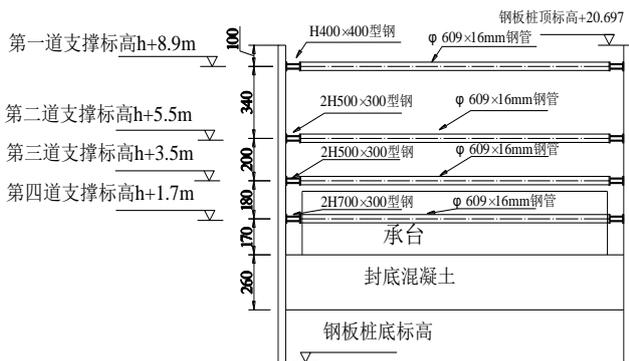


图 1 钢板桩围堰的结构立面图(cm)

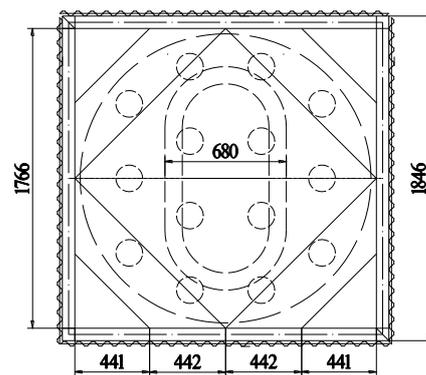


图 2 钢板桩围堰的结构平面图(cm)

施工中，先将预制的钢板运至现场，然后将钢板依次打入预设深度，打桩过程中应加强钢板桩定位控制。钢板桩按照指定位置打入后，此时先安装第一道围檩及内撑，然后进行水下土的开挖。水下土开挖完成后，在钢围堰内浇筑水下封底砼；封底砼达到设计强度后，开始在围堰内抽水，凿桩头，封底砼顶面找平。完成封底混凝土后并架设撑杆和围檩后，开始进行承台等的施工。为模拟实际施工过程，本文对以下 7 个工况进行了模拟：

- 1) 工况一：钢板桩全部就位，安装第一道支撑；
- 2) 工况二：开挖围堰内土，并浇筑混凝土；
- 3) 工况三：抽水至第三道支撑处，准备安装第二道支撑；
- 4) 工况四：抽水至第四道支撑处，准备安装第三道支撑；
- 5) 工况五：围堰内抽水完成，且第三道支撑安装完毕，准备安装第四道支撑；
- 6) 工况六：安装第四道支撑，荷载考虑围堰内外水头差；
- 7) 工况七：围堰施工完成后，洪水位时结构验算。

2.2 有限元模型

文中采用 ANSYS 有限元计算分析软件建立了钢板桩围堰的整个结构模型，其中钢板桩采用 SHELL63 单元进行模拟，支撑采用 BEAM188 单元进行模拟，有限元模型见图 3。根据地质条件，对钢板桩最底部采用固结处理，并假设钢板桩的各块钢板之间的连接牢固，按照刚接处理，钢板桩与支撑之间也按照刚接处理。为考虑实际施工过程，采用 ANSYS 中的生死单元来模拟，从而合理的考虑施工过程中力和位移的累积效应。

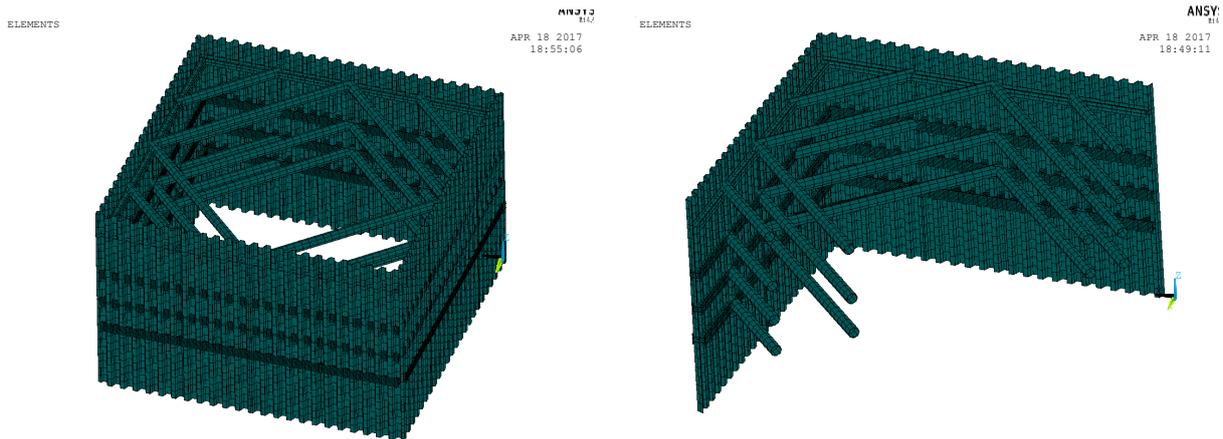


图3 有限元模型

根据设计资料，围堰施工阶段受力分析计算中主要考虑的荷载包括风荷载、静水压力荷载、流水压力荷载、土压力荷载、水浮力等。各施工阶段所受外荷载见图4~图10。

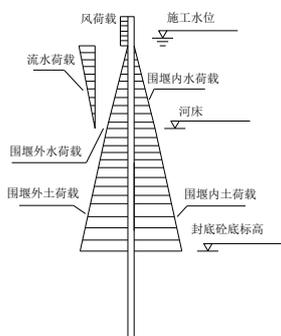


图4 工况1

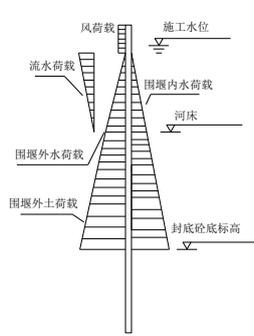


图5 工况2

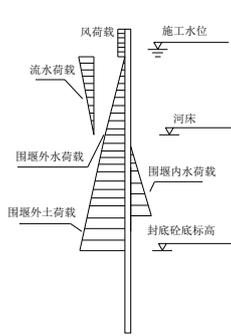


图6 工况3

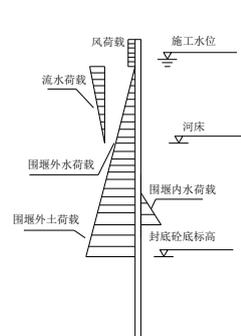


图7 工况4

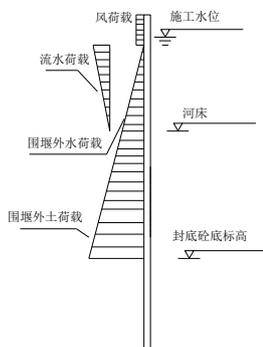


图8 工况5

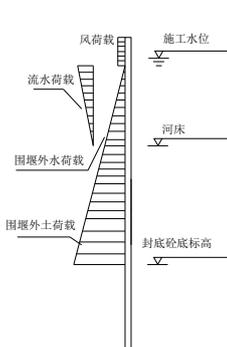


图9 工况6

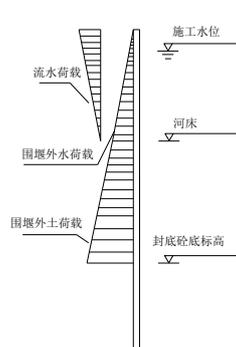


图10 工况7

2.3 计算结果及验算

经过计算，钢板桩桩身的第一主应力和第三主应力最大值见表1，各阶段均小于设计强度210MPa，满足强度要求。最大应力出现在工况三，应力大小为178MPa。工况三的第一主应力云图和第三主应力云图见图11~图12。

表1 钢板桩的第一主应力以及第三主应力 /MPa

工况	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五	工况六	工况七
第一主应力	35.8	27.5	172	92.9	103	80.6	83.3
第三主应力	-37.6	-29.4	-178	-104	-114	-87	-89.8

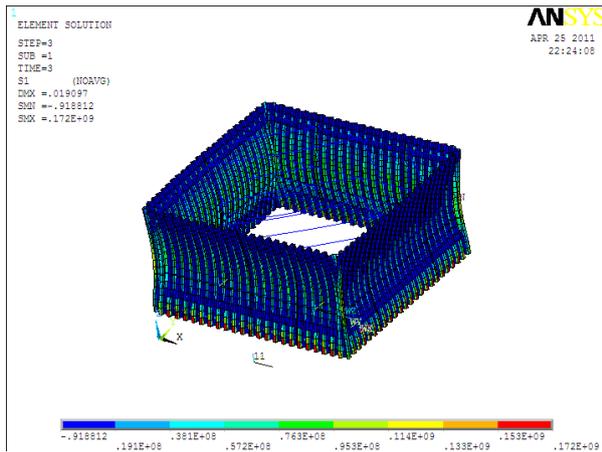


图 11 钢板桩第一主应力(MPa)

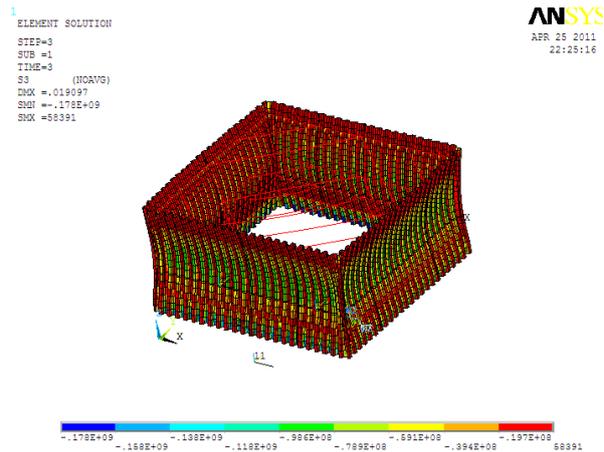


图 12 钢板桩第三主应力(MPa)

撑杆及围檩的强度根据《铁路桥梁钢结构设计规范》^[7]计算:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \left(\frac{M_z}{W_z} + \frac{M_y}{W_y} \right) \frac{1}{c} \quad (1)$$

在计算过程中,将公式采用 ANSYS 的 APDL 语言在软件中编程,得到各工况下撑杆和围檩的组合应力值,见表 2。由表 2 可以得出,最大法向应力发生在工况三阶段,各构件的法向应力云图见图 13,大小为 93.7MPa,满足设计强度要求。

表 2 按强度计算的撑杆及围檩的法向应力

/MPa

工况	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五	工况六	工况七
法向应力	-	17.3	93.7	79.1	55.7	48.8	54.8

注:工况一撑杆及围檩还未施工,故没有应力。

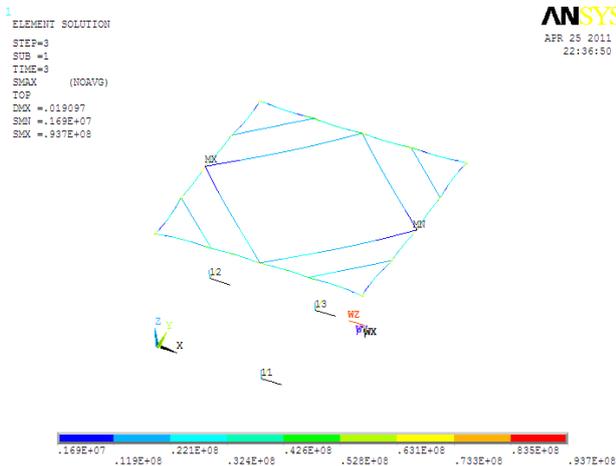


图 13 撑杆及围檩组合应力(MPa)

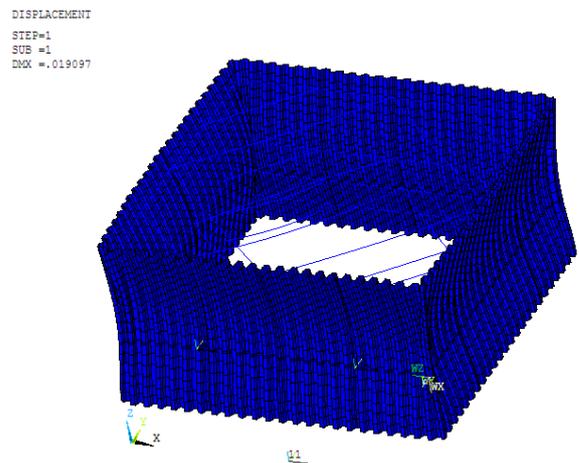


图 14 一阶屈曲模态(工况三)

撑杆的局部稳定性根据《铁路桥梁钢结构设计规范》^[7],可用式(2)对压弯构件进行稳定性计算:

$$\frac{N}{A} + \frac{\phi_2}{\mu_1 \phi_1} \frac{M}{W} \leq \phi_1 [\sigma] \quad (2)$$

计算结果见表 3,由表三可得,各阶段撑杆及围檩的法向应力均小于容许值 121.5MPa,结构处于安全状态。

表3 按稳定性计算的撑杆及围堰的法向应力

/MPa

工况	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五	工况六	工况七
法向应力	-	7.6	29	46	30.3	27.5	30.8
法向应力	-	12.4	22.5	25	16.1	15.9	16.8

注：工况一撑杆及围堰还未施工，故没有应力。

钢板桩围堰在工况三下稳定系数最低，位移云图见图 14，为 2.42，由于在工况三下，只有第一道支撑对其有约束作用，自由长度最长，且承受较大水压，必然导致屈曲系数降低，但稳定系数大于 1，对于临时施工结构，参照目前已有工程实例，所以围堰整体稳定性满足要求。

在工况六作用，由于围堰在围堰内水抽完后，围堰内自重荷载最小，此时从抗倾覆稳定性来说，围堰处于最不利工况，这种工况下，围堰将承受很大的上浮力，上浮力主要靠围堰、封底混凝土自重以及桩基的摩阻力共同克服。考虑围堰整体上浮稳定性时，其总抗倾覆力为 44531.4kN，大于钢围堰内抽完水后的总上浮力 42197.20kN；考虑封底砼上浮稳定性时，其总抗倾覆力为 46339kN，大于钢围堰内抽完水后的总上浮力 42197.20kN。钢围堰内抽水后，抗浮稳定性满足要求。

3 结论

本文采用 ANSYS 有限元分析软件，在考虑各种荷载的情况下，建立了有限元模型，并基于生死单元技术对施工阶段进行了模拟，得到了以下结论：

1) 钢板桩围堰板单元最大应力出现在工况三中，为 178MPa。其余各阶段均小于设计强度，满足强度要求。

2) 经过验算，钢板桩围堰在工况三下稳定系数最低，为 2.42，但稳定系数大于 1，对于临时施工结构，参照目前已有工程实例，可认为围堰整体稳定性满足要求。

3) 支撑系统的强度与稳定性按照《铁路桥梁钢结构设计规范》均满足要求。

4) 通过验算确定了钢板桩的入土深度为封底混凝土底面以下 2.5m，在这种条件下，钢板桩在浮力的作用下抗倾覆承载力能满足要求，但安全储备相对较小，应注意施工过程中水位变化和地质不良的影响，一旦出现异常，及时采取加强处理。

参考文献：

- [1] 李迎九. 钢板桩围堰施工技[J]. 桥梁建设, 2011, (02): 76—79.
Li Yingjiu. Construction techniques of steel sheet pile cofferdams [J]. Bridge Construction, 2011, (02): 76—79. (in Chinese)
- [2] 曾庆敦, 姚双龙. 钢板桩围堰及支撑系统的稳定安全性分析[J]. 中外公路, 2009, 29(06): 174—177.
Zeng Qingdun, Yao Shuangfei. The stability safety analysis of steel sheet pile cofferdam and support systems [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29(06): 174—177. (in Chinese)
- [3] 吴清, 尹浩辉. 模拟施工过程的官洲河特大桥钢板桩围堰分析计算[J]. 铁道建筑, 2010, (05): 8—11.
Wu Qing, Yin Haohui. The analysis of guan zhou river bridge steel pile cofferdam considering the construction process [J]. Railway Engineering, 2010, (05): 8—11. (in Chinese)
- [4] 潘泓, 曹洪, 尹一鸣. 广州猎德大桥钢板桩围堰的设计与监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2242—2248.
Pan Hong, Cao Hong, Yin Yiming. Design and monitoring of steel sheet pile cofferdams of liede bridge in Guangzhou [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2242—2248. (in Chinese)
- [5] 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, 42(5): 74—81.
Jun Zhang. Force condition analysis and application of steel sheet pile cofferdam for bridge deepwater foundation [J]. Bridge Construction, 2012, 42(5): 74—81. (in Chinese)
- [6] 王玉果. 海河特大桥钢板桩围堰设计与验算[J]. 公路, 2013, (09): 95—100.
Yuguo Wang. Design and calculation of Haihe Bridge steel sheet pile cofferdam highway [J]. Highway, 2013, (09): 95—100. (in Chinese)
- [7] TB10002.1-2005, 铁路桥涵设计基本规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
TB10002.1-2005, Fundamental code for design on railway bridge and culvert [S]. BeiJing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese)