

基于有限元的桥梁水中基础钢板桩围堰结构设计与分析

文 / 叶 健 四川路桥桥梁工程有限责任公司

摘要：随着迈达斯 Civil、迈达斯 FEA NX 等有限元系列软件的普及，基于有限元分析的结构设计在桥梁工程施工临时结构设计中得到了广泛应用，为临时结构安全适用提供了量化数据，促进了桥梁施工单位的大型临时结构设计标准化的发展和进步。围堰作为桥梁水中基础施工常用的一种大型临时结构，其作用主要是形成敞口封闭结构隔绝外部水流，为水中基础施工提供作业空间。常采用钢围堰，钢板桩围堰是其中一种，防水性能好，整体刚度较大。通过专项设计对围堰结构进行验算和优化，确定经济合理的结构构造，保证围堰受力满足各工况要求，有限元分析软件在此起到了关键作用。

关键词：有限元；水中基础；钢板桩围堰；结构设计与分析

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.049

引言

钢板桩围堰应通过专项设计，能够承受施工全过程的各种荷载组合，适应各种工况，其强度、刚度及稳定性满足要求。首先利用迈达斯 Civil 建立整体模型，根据构件材料和截面参数输入模型，模拟实际工况合理建立边界条件，划分工况添加荷载，运行分析进行荷载组合，查看整体模型应力、变形及屈曲稳定等指标判断围堰结构整体受力情况。然后利用迈达斯 FEA NX 对围堰结构上设置的钢牛腿、钢围檩、钢支撑等细部构造进行仿真分析，验算受力性能。最后参阅相关规范标准手册，对基坑稳定性、封底混凝土、管涌、渗水量等项目进行验算。下面系统阐述钢板桩围堰设计和验算过程，公式和参数见相应规范标准手册。

一、熟悉围堰设计条件

水文条件（施工期间高、低水位、流速、泥面高程等），地质条件（各层岩土厚度、名称、地层 c 、 ϕ 值等），主桥承台尺寸、高程等。

二、围堰的主要尺寸拟定

围堰平面尺寸：根据支立模板及操作空间的需要，一般内边尺寸多数比承台边缘外扩 1~2m，视具体需要而定。

立面尺寸：围堰顶部高程较设计高水位高出 0.5m 为宜。围堰底部高程取决于板桩入土深度，根据计算才能确定，可先按照经验参照类似工程初拟。按照经验，多数情况围堰内基坑底部以上/基坑底部以下的板桩长度在 2/1~1/1 之间。土质较差（淤泥），桩底高程稍深；土质较好（硬粘土、砂、强风化岩等），桩底高程较浅。后期计算嵌固稳定、抗隆起稳定以及渗透稳定时予以修正，且应满足规范构造要求。也可先按抗隆起要求计算嵌固深度，再验算其他条件。还可采用等值梁法、盾恩近似法初步计算入土深度，后期再修正。

三、围堰结构初步设计

（一）选择板桩型号

根据工程地质、水文、施工环境、现场核查资料、结构物构造等综合确定钢板桩型号。

（二）初步拟定围檩以及内支撑的高程、型号

围堰结构的平、立面尺寸决定了内支撑的布置，直接影响板桩的弯矩和结构内部施工的难易度。为了确保主体结构的完整性，支撑布置必须与永久结构施工统筹考虑，尽可能减小对主体结构的干扰，总体原则是尽可能简化。围堰设置两道水平支撑体系，围檩结构为 2HM450×300，采用 $\varnothing 529 \times 10$ 钢管支撑（按照 $\varnothing 529 \times 8$ 计算）。

统计若干承台施工的项目，中间层板桩竖向间距在 2.5m~3.5m 之间，底层支撑距离基坑底部竖向间距在 3.5m 到 6.5m 之间。

为了施工承台的方便，如果承台是一次浇筑，底层支撑底面距离承台顶面不宜小于 20cm。如果承台分次浇筑，底层支撑底面距离第一次浇筑的承台顶面不宜小于 20cm。

顶层支撑高程距离围堰顶部高程通常在 1~2m。

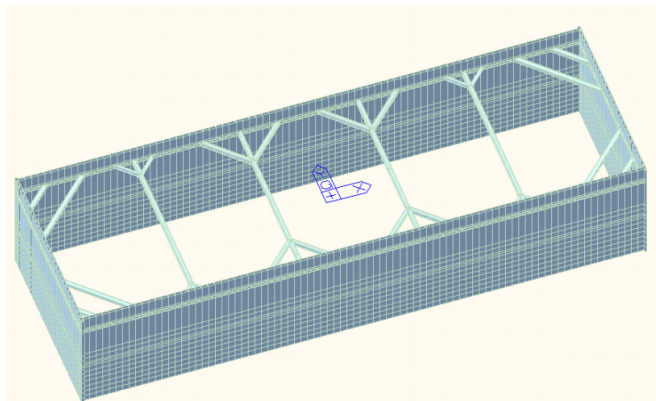


图 1 钢板桩围堰迈达斯 Civil 计算模型

四、围堰结构验算

(一) 荷载计算

1) 结构自重：有限元软件自动计入；

2) 静水压力 $P = \gamma h$ ；

3) 水压力：根据《港口工程荷载规范》，作用于港口工程结构上的水压力标准值应按下列公式计算： $F_w = C_w \frac{\rho}{2} V^2 A$

4) 土压力：土压力和水压力的分、合算根据《建筑基坑支护技术规程》规定执行。

① 钢板桩围堰内、外侧的主动、被动土压力强度标准值按下列公式计算：

地下水位以上或水土合算的土层：

$$p_{ak} = \sigma_{ak} K_{a,i} - 2c_i \sqrt{K_{a,i}}; K_{a,i} = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_i}{2});$$

$$p_{pk} = \sigma_{pk} K_{p,i} + 2c_i \sqrt{K_{p,i}}; K_{p,i} = \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi_i}{2})$$

对于水土分算的土层：

$$p_{ak} = (\sigma_{ak} - u_a) K_{a,i} - 2c_i \sqrt{K_{a,i}} + u_a; p_{pk} = (\sigma_{pk} - u_p)$$

$$K_{p,i} + 2c_i \sqrt{K_{p,i}} + u_p$$

② 土中竖向应力标准值 (σ_{ak} 、 σ_{pk}) 应按下列公式计算：

$$\sigma_{ak} = \sigma_{ac} + \sum \Delta \sigma_{k,j}; \sigma_{pk} = \sigma_{pc}$$

(二) 工况组合

典型施工工序介绍：工况一：钢板桩插打到位，第一道围檩未安装；工况二：安装第一道围檩；工况三：基坑内挖泥至标高 +1m；工况四：浇筑封底砼至标高 +4.5m；工况五：封底砼强度达到设计强度；工况六：基坑内抽水至标高 13.0m；工况七：安装第二层围檩；工况八：基坑内抽水至标高 10.5m；工况九：安装第三层围檩；工况十：基坑内抽水至标高 7.5m；工况十一：安装第四层围檩；工况十二：基坑内抽水至标高 4.5m(封底顶面)；工况十三：浇筑 3m 高承台，待达到设计强度；工况十四：拆除第四层围檩；工况十五：继续浇筑 3m 高承台，待达到设计强度；工况十六：拆除第三层围檩；工况十七：拆除第二层围檩；工况十八：浇墩身 3.5m，待达到设计强度；工况十九：拆除第一层围檩，继续浇墩身。

荷载组合：

标准值 = 土压力标准值 + 水压力标准值 + 流水压力标准值
设计值 = 1.3 × 土压力标准值 + 1.3 × 静水压力标准值 + 1.5 × 流水压力标准值。

(三) 边界条件确定

建立围堰整体模型时，钢板桩、围檩、内支撑等构

件采用梁单元模拟，钢板桩底部只提供竖向支撑，用只受压土弹簧模拟被动土压力，用只受压弹簧模拟围檩与钢板桩之间的连接，支撑与围檩共节点，牛腿处板桩与围檩间约束竖向位移。

(四) 建立整体模型、进行强度及刚度验算

使用软件整体建模完成结构验算，为结构调整优化和最终方案敲定提供帮助。

1) 将围堰结构分解为挡土的板桩、内支撑以及围堰结构两部分分别进行计算。这种方法建模简单，但是难以考虑板桩与内支撑以及围堰之间的变形协调。

2) 建立整体模型、分工况计算。

对板桩、内支撑体系分别进行分析，板桩结构为平面杆系，施加弹性支点进行分析，内支撑体系按平面结构分析，钢板桩传至内支撑的荷载取钢板桩分析得出的支点力。在分别进行分析时，应考虑结构构件间的协调变形。

3) 建立整体模型、考虑施工过程(施工路径)进行计算，此方法优点是计算精度高，缺点是较为繁琐，需要设计人员具有较强的软件建模基础和理论基础。

在实际工程中，钢板桩在安装内支撑的过程中其受力是连续的，即当前工况的应力和变形总是发生在上一工况应力和变形的基础之上。而常用的简化计算由于是按不同工况单独计算的并未考虑每道内支撑相应位置处钢板桩已发生的累积变形。钢板桩围堰在施工过程中结构、荷载及边界条件是不断变化的。考虑这一变化过程效应的计算结果与常用的一次性加载计算结果存在差异。

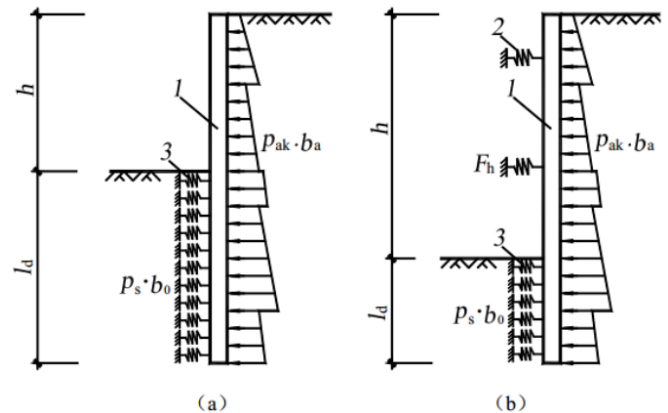


图 2 钢板桩围堰土弹簧计算简图

(五) 构件稳定性及细部结构计算

$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{1x} (1 - 0.8 \frac{N}{N_{EX}})} \leq f$ ，相关参数根据规范计算或查询。内力设计值通过迈达斯 Civil 模型计算结果直接查询。

(六) 封底混凝土计算

封底混凝土的作用：a) 防止外部水渗漏进入围堰

结构内；b) 抵抗水头差在围堰区域的浮托力；c) 作为承台施工时的底胎。

考虑两种工况：1) 高水位抽水至封底混凝土顶面；2) 低水位条件下浇筑承台。

$G_0 + F_p \geq F_a$ ，封底混凝土自重 G_0 ，水的浮托力 F_a ，混凝土与护筒的握裹力 F_p 。浮力 = 封底砼底面水压强 \times (围堰内边包围的面积 - 所有钢护筒截面积)；向上的力 = 浮力 - 封底砼的重力；向上的力 \div 封底砼与钢护筒间的握裹面积 = 握裹力。要求握裹力 $<$ 容许握裹力，容许握裹力取 135kPa。封底混凝土自重

封底混凝土抗弯根据钢护筒间距按四边简支板进行计算。弯矩设计值 = 弯矩系数 $\times q_0 l^2$ 。其中弯矩系数参考《路桥施工计算手册》附表。

根据现行《水运工程混凝土结构设计规范》，矩形截面素混凝土受弯构件正截面承载力计算公式为：

$$M_u = \frac{1}{6\gamma_d} \gamma_m f_t b h^2, \text{ 相关参数详见规范。}$$

(七) 基坑抗隆起稳定计算

按带水开挖施工工况考虑，根据住建部现行《建筑基坑支护技术规程》，支撑式支挡结构，其嵌固深度应满足坑底隆起稳定性要求，抗隆起稳定性按下列公式验算：

$$F_s = \frac{\gamma_{m2} D N_q + c N_c}{\gamma_{m1} (h + D) + q} \geq K_{hc}; N_q = \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) e^{\pi \tan \varphi};$$

$$N_c = (N_q - 1) / \tan \varphi$$

钢板桩底面以下有软弱下卧层时，底面土的抗隆起稳定性验算部位应包括软弱下卧层， γ_{m1} 、 γ_{m2} 取软弱下卧层顶面以上土的重度，D取基坑底面至软弱下卧层顶面的土层厚度。

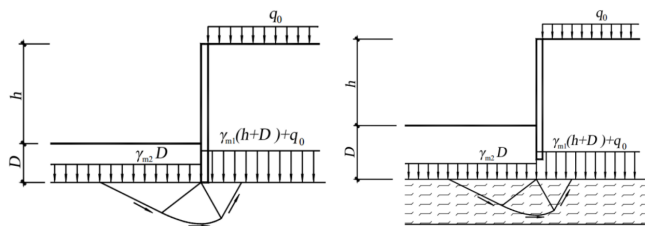


图3 基坑抗隆起计算简图

(八) 基坑嵌固稳定计算

钢板桩的嵌固深度应符合： $\frac{E_{pk} Z_{p1}}{E_{ak} Z_{a1}} \geq K_{em}$

单层内支撑的钢板桩嵌固深度应符合： $\frac{E_{pk} Z_{p2}}{E_{ak} Z_{a2}} \geq K_{em}$

需要注意的是，对于多层支撑体系的围堰结构，仍然应当按照单层结构验算嵌固稳定。

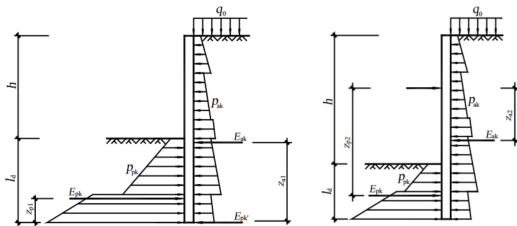


图4 基坑嵌固稳定性计算简图

(九) 管涌、渗水量验算

按《建筑施工计算手册（第二版）》式(2-143)及其条文说明计算钢板桩需要插入的深度为 t ： $t = \frac{Kh' \gamma_w - h' \gamma'}{2\gamma'}$

按《建筑施工计算手册（第二版）》式(2-146)及其条文说明计算渗水量： $Q = \frac{KAh'}{h' + 2t}$

(十) 绘制施工图、编制计算书

如果结构验算合格，则方案确定，绘制最终施工图以及编制计算书。

如果结构验算不合格，修改方案，重新进行验算，直至验算合格。方案确定，绘制最终施工图以及编制计算书。

施工图应包含平面、立面、剖面、必要的文字说明及施工注意事项等。计算书应包括工程概况、计算依据及各项验算过程等。

结语

钢板桩围堰作为跨越江河桥梁水中基础施工常用的一种辅助施工大型临时结构，其平面布置应满足功能需求，构造尽量简单，便于制造、运输和安装。需要借助有限元分析软件通过系统的设计和验算，达到上述目的。本文旨在通过系统阐述钢板桩围堰的设计方法，明确验算工况及验算指标，为读者进行类似工程设计提供参考和帮助。通过进行专项设计和优化，整理形成企业标准化施工资料，为企业标准化管理助力，具有较大实用价值。

参考文献

- [1] 段志博. 深基坑钢板桩围堰设计的探讨 [J]. 四川水泥, 2024, (07).
- [2] 袁淑霞, 裴龙瑶, 齐文娇, 吴松, 张宇鹏, 段育轩. 钢板桩围堰结构设计及稳定性分析 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (08).
- [3] 蔡德亮. 基于 MIDAS 的钢板桩围堰结构施工设计计算分析 [J]. 安徽建筑, 2023, 30 (09).
- [4] 甘采华, 宁怡豪. 钢板桩围堰封底混凝土厚度优化设计分析 [J]. 西部交通科技, 2021, (12).
- [5] 张伟. 袁河特大桥筑岛钢板桩围堰有限元分析及施工关键技术 [J]. 中国水运, 2024, 24 (08).
- [6] 丁巍, 金乾明. 基于有限元法的钢板桩围堰结构分析 [J]. 中外公路, 2021, 41 (04).