

双壁钢围堰设计与施工关键工况分析

李大伟

(广州市高速公路有限公司,广东 广州 510000)

摘要: 为了提高双壁钢围堰在桥梁深水承台施工中的安全性与可靠性,以官洲河特大桥北引桥为工程背景,对深水双壁钢围堰施工过程中的关键工况进行模拟分析。通过数值模拟与结构受力分析,探讨不同施工阶段围堰结构的应力与应变变化情况。结果表明:在围堰下放过程中,吊耳板所承受的应力最大;而在封底阶段,结构的整体应力和应变较小;抽水及承台浇筑阶段,壁板承受的应力和应变达到最大值。本文成果可为类似工程的设计与施工提供理论支持与实践借鉴。

关键词: 深水承台; 双壁钢围堰; 模拟; 应力; 应变

中图分类号:U445.556

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)09-0058-08

doi:10.13402/j.gcjs.2025.09.115

Analysis of key working conditions in design and construction of double-walled steel cofferdam

LI Dawei

(Guangzhou Expressway Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China)

Abstract: In order to improve the safety and reliability of the double-walled steel cofferdam in the construction of bridge deepwater pier cap construction, the key working conditions in the construction process of deep-water double-walled steel cofferdam are simulated and analyzed based on the north approach bridge of Guangzhou river grand bridge. Through numerical simulation and structural stress analysis, the stress and strain changes of cofferdam structures in different construction stages are discussed. The results show that the lug plate is subjected to the greatest stress during the lowering process of the cofferdam, while in the backcover stage, the overall stress and strain of the structure are small; During the pumping and pier cap pouring stages, the stress and strain of the siding reach the maximum value. The results can provide theoretical support and practical reference for the design and construction of similar projects.

Key words: deepwater pier cap; double-walled steel cofferdam; simulation; stress; strain

随着我国基础设施建设的快速发展,越来越多的跨江、跨海大桥工程陆续开工。这些工程普遍具有水深较大、施工安全风险较高的特点,其中深水承台施工是关键技术难点之一。与干船坞工程类似^[1-2],水中承台施工通常采用围堰作为辅助结构来实现无水作业环境^[3-5]。围堰形式多样,包括截短哑铃形圆筒结构、单排钢板桩围堰、双排钢板桩围堰、圆形或矩形双壁钢围堰、混凝土箱型围堰等^[6-8],其材料和结构形式可根据不

同工程需求灵活选用。

双壁钢围堰因其良好的承载性能和适应性,在深水承台施工中应用最为广泛。其施工流程:将预制完成的双壁钢围堰运送至桥墩位置,下沉至河床一定深度后浇注封底混凝土;待混凝土强度达到设计要求后,通过抽水形成无水作业环境,从而进行承台施工。由于围堰属于高风险分项工程,施工过程中必须确保结构的安全性和稳定性^[9-10]。双壁钢围堰的结构强度、刚度及密水性

收稿日期:2024-12-28

作者简介:李大伟(1992—),男,工程师,从事路桥项目建设管理工作。

能是保障施工安全的关键要素，而围堰的下沉与封底技术则是决定施工成败的核心环节。研究表明，对于底板、底板主梁和钢管支撑这3个主要构件而言，底板厚度对整体结构的最大应力影响最为显著^[11]。此外，焊接质量也是影响双壁钢围堰施工成败的重要因素，特别是在压杆、挡土墙、连接板与板桩之间的焊缝区域易出现破坏^[12]。通过对整体柔性止水方案、分盘胶囊止水方案和无内支撑锁定式双壁钢围堰方案的综合比选可知，双壁钢围堰在止水效果方面表现最优，能有效提升现浇混凝土施工质量^[13]。围堰下沉方式可根据现场条件选择整体吊装下沉或分节段接高下沉^[14]。若河床上下游存在较大高差，可采用下游先下沉、上游配合下沉的方式完成着床^[15]。为确保抽水后围堰能够承受水头差引起的巨大压力，必须从封底混凝土的设计厚度和浇筑工艺两个方面严格控制施工质量，以保障结构安全^[16]。

综上所述，尽管目前已有大量关于双壁钢围堰设计与施工的研究成果，但鲜有研究针对不同工况下各受力单元及封底混凝土的整体力学性能进行系统分析。本文依托官洲河特大桥北引桥工程，针对双壁钢围堰施工过程中的关键工况，划分板单元、梁单元、杆单元及实体单元，对结构各部分(包括吊耳和封底混凝土)的应力与应变情况进行综合模拟分析，验证设计方案的可行性，以期为类似工程提供理论支持与实践参考。

1 双壁钢围堰设计与施工

1.1 工程概况

官洲河特大桥北引桥起点里程为 K1 + 928.6，终点里程为 K2 + 806.2，桥梁全长约为 877.6 m。上部结构采用预应力混凝土简支 T 梁，桥梁分左右两幅布置。其中，22[#]~24[#]墩下部结构为圆形墩柱，直径为 3.5 m。北引桥水中 22[#]~24[#]桥墩的桩基础采用钻孔灌注桩和分离式承台。单幅桥中，22[#]~24[#]桥墩的桩基础由 4 根直径为 2.2 m 的钻孔灌注桩组成，承台为圆形结构，直径为 10.0 m，厚度为 3.5 m，采用 C30 混凝土浇筑，共计设置 6 个圆形承台。为满足承台水下施工要求，需制作并安装 6 个双壁钢围堰进行无水作业施工。

1.2 双壁钢围堰设计与施工

官洲河特大桥北引桥 22[#]~24[#]墩承台采用双壁钢围堰进行施工，共计 6 个钢围堰，且各钢围堰结构形式一致。22[#]~24[#]墩范围内的双壁钢围堰高度为 11.50~13.52 m。每个钢围堰分为两节，其中顶节高度为 7.0 m，底节高度为 6.5 m(含防浪板部分)。钢围堰整体采用双壁结构设计，底节的内、外侧面及顶节的内侧钢板均采用厚度为 5 mm 的钢板。为便于钢围堰的下放与定位，其内径设计为 5.1 m，壁厚为 1.0 m。

根据最不利深度条件选取计算对象，以 23[#]墩右幅钢围堰为例：该围堰顶部标高为 +8.5 m，底部标高为 -5.02 m。钢围堰为圆形结构，内部不设置内支撑，在满足结构受力要求的同时，尽可能增大承台施工的操作空间。钢围堰通过水下封底形成干作业环境，封底厚度为 2 m。在封底层底部抛填片石，以提高基底承载力；承台高度为 3.5 m，混凝土采用一次性浇注方式完成。为确保钢围堰在下沉过程中的稳定性，尽量减小围堰内外水位差，每个钢围堰设置 4 根连通管，采用 $\varnothing 273 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 钢管，中心标高设为 +7.0 m。因 23[#]墩右幅钢围堰高度最大，且承台底部距水面高度也最高，选其作为结构验算的典型代表。钢围堰总体布置如图 1 所示。

施工内容主要包括：施工前准备(包括钢围堰的制作与拼装)→钻孔平台拆除及基坑水下清淤→钢围堰安装与下沉→封底导管布设及施工平台搭设→封底混凝土浇筑→养护等强及抽水作业→桩头破除→测量放样→钢筋绑扎与安装→承台混凝土浇筑→墩身结构施工→钢围堰拆除。

1.3 计算参数确定

1.3.1 材料特性

钢材的物理力学性能如表 1 所示，其中 t 为钢材厚度，mm。钢筋混凝土容重取 26 kN/m^3 ，素混凝土的容重取 24 kN/m^3 ，封底混凝土与钢护筒之间的最大摩阻力取值为 100 kPa ，混凝土的力学性能如表 2 所示。双壁钢围堰顶标高为 8.5 m，承台顶标高为 0.98 m，承台底标高为 -2.52 m，承台浇筑厚度为 3.5 m，封底混凝土底标高为 -5.02 m，封底混凝土厚度为 2 m。混凝土与钢护筒黏结强度

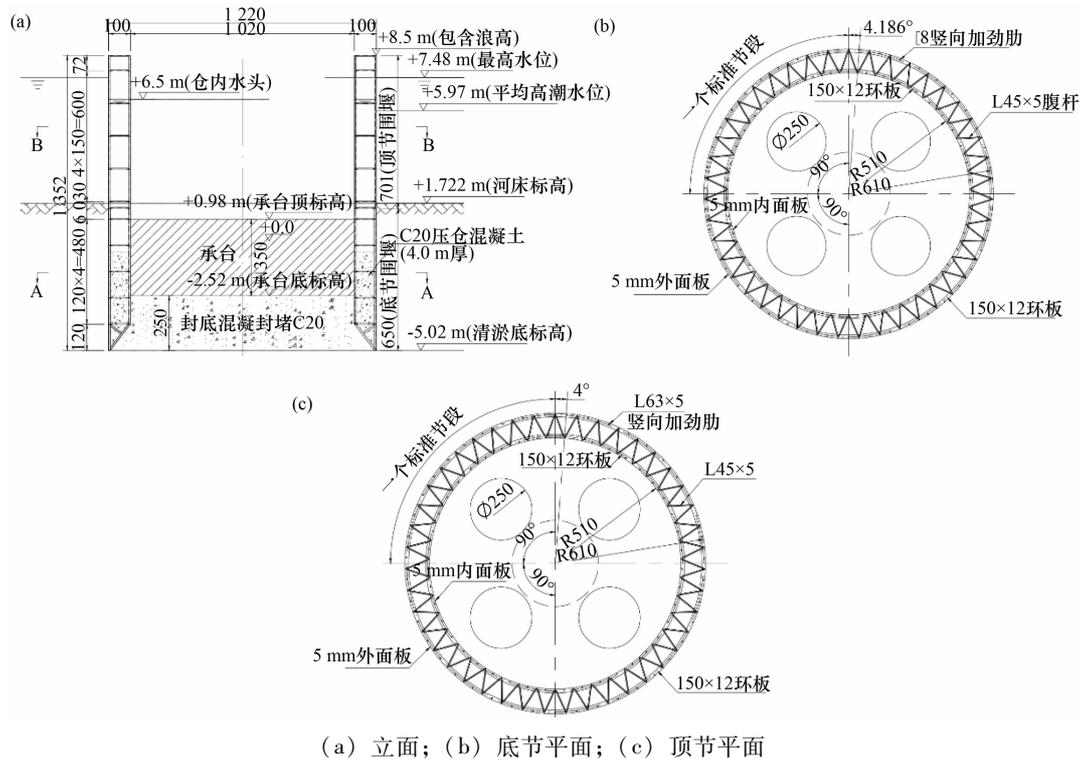


图 1 钢围堰总体布置

cm

为 0.1 MPa, 封底混凝土强度等级为 C20, 压舱混凝土等级为 C25, 素混凝土容重为 24 kN/m^3 , 钢筋混凝土容重为 25 kN/m^3 , 钢材容重为 78.5 kN/m^3 。

表 1 钢材物理力学性能 MPa

构件名称	材料类型	拉、压、弯强度设计值	剪切强度设计值
钢材	Q235 B	205 ($16 \text{ mm} < t < 40 \text{ mm}$)	120
		215 ($t \leq 16 \text{ mm}$)	125

表 2 混凝土力学性能 MPa

结构类型	混凝土标号	轴心强度设计值	
		抗压	抗拉
压舱混凝土	C25	11.9	1.27
封底混凝土	C20	9.6	1.1
承台	C30	14.3	1.43

1.3.2 土层计算信息

根据地勘资料选取土层参数。依据设计资料中提供的最高通航水位为 +7.48 m、平均高潮水

位为 +5.97 m, 以及水文站的勘测数据, 确定双壁钢围堰的计算水位为 +7.5 m, 钢围堰顶标高设置约为 +8.5 m。承台范围内河床自上而下依次为淤泥层、粗砂层和强风化泥质粉砂岩层, 其物理力学参数: 淤泥层容重为 16.1 kN/m^3 , 内摩擦角为 3.4° ; 粗砂层容重为 20.5 kN/m^3 , 内摩擦角为 35° ; 强风化泥质粉砂岩层容重为 23.8 kN/m^3 , 内摩擦角为 20.4° , 黏聚力为 40.9 kPa 。

1.3.3 设计荷载

钢围堰及混凝土的自重由软件自动计算。风荷载按照最高水位对钢围堰进行计算, 钢围堰下沉就位后, 其顶部标高比设计最高水位高出 1.02 m, 因此在计算中可以忽略风荷载对钢围堰的影响。水流力根据《港口工程荷载规范》(JTS 144—1—2010) 进行计算, 混凝土侧压力根据《建筑工程大模板技术规程》(JGJ 74—2003) 进行计算, 土压力根据朗肯土压力理论进行计算, 计算结果如表 3 所示。

表 3 设计荷载计算结果

水水力		混凝土侧压力		混凝土有效压头高度		土压力	
水水力/kN	水流压强/kPa	水下浇筑封底混凝土/kPa	浇筑承台/kPa	水下浇筑封底混凝土/m	浇筑承台/m	朗肯土压力强度/kPa	作用高度/m
174.1	2.48	15.9	15.9	0.66	0.64	29.0	5

2 关键工况分析

2.1 计算模型及关键工况

2.1.1 计算模型

根据设计图纸，采用 ABAQUS 软件建立有限元模型并进行计算。所采用的单元类型包括板单元、梁单元、杆单元及实体单元。双壁钢围堰的有限元模型如图 2 所示，总计包含 36 990 个单元，其中桁架单元 1 080 个，梁单元 15 030 个，板单元 20 880 个。

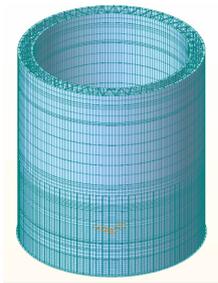


图 2 双壁钢围堰有限元模型

2.1.2 关键工况

工况 1：双壁钢围堰下沉吊耳计算。

工况 2：双壁钢围堰封底阶段的结构强度计算。

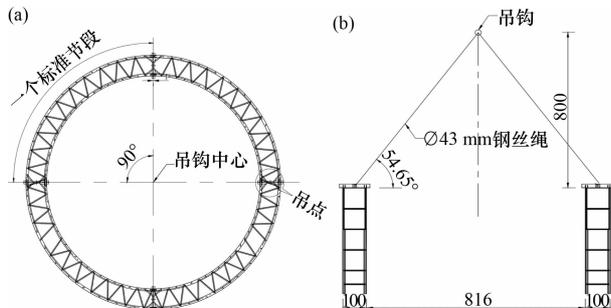
工况 3：抽水工况下钢围堰结构强度计算及封底混凝土承载力计算。

工况 4：承台浇筑混凝土阶段钢围堰结构强度计算及封底混凝土承载力计算。

2.2 模拟结果分析

2.2.1 工况 1 分析

双壁钢围堰每节由 4 个标准弧段分块拼装组成整体。经水密性检验合格后，采用 50 T 履带吊将钢围堰整体浮吊至承台已开挖完成的基坑水域。吊点布置如图 3 所示。



(a) 平面；(b) 立面

图 3 吊点布置示意

钢围堰分为两节，考虑到吊装高度、重量限制及运输便利性，每节均分为 4 块圆弧加工段。单个承台的双壁钢围堰共计 8 块，其中顶节每块重 9.5 t，底节(含刃脚)每块重 9.0 t。顶节总重为 38 t。钢围堰共设置 4 个吊耳，采用 Q235 钢材制作。这 4 个吊耳承担顶节围堰的自重，每个吊耳所承受的竖向力为 9.5 t，水平力为 6.74 t，吊索对吊耳的拉力为 11.65 t。图 4 为吊耳板应力云图，图 5 为吊耳板变形云图。由图 4、5 可知：吊耳板在吊索拉力作用下，最大拉应力为 106.4 MPa，最大变形为 3.53×10^{-10} mm。由此可见，吊耳板能满足正常吊装需求。

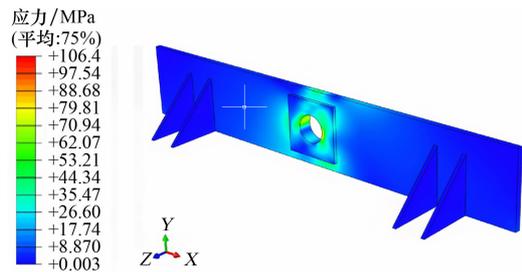


图 4 吊耳板应力云图

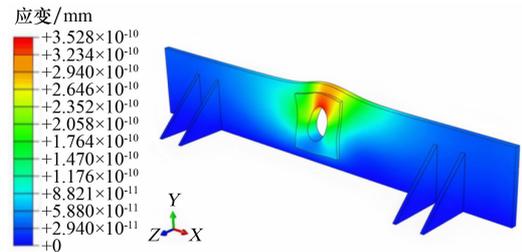


图 5 吊耳板变形云图

2.2.2 工况 2 分析

计算钢围堰在浇筑 2 m 封底混凝土时的墙体结构强度(取封底阶段高水位为 +7.48 m，夹壁内水位为 +6.50 m)。钢围堰承受的荷载包括自重、静水压力、水压力、土压力及浇筑封底混凝土产生的侧压力等，各种荷载：1) 围堰夹壁外侧水对壁板的静水压力为 125 kPa；2) 围堰夹壁内侧水对壁板静水压力为 125 kPa；3) 围堰夹壁内注水对壁板的静水压力为 70 kPa；4) 围堰外壁板迎水面受到水流力为 2.48 kPa；5) 围堰外壁板所受土压力为 29 kPa；6) 围堰内壁板所受浇筑混凝土土压力为 15.9 kPa。

该工况下，钢围堰墙体所受荷载的简图如图 6 所示(图中仅绘制了迎水面围堰部分)。在模型中，

对围堰底部节点进行固定约束。由于钢围堰底部设有 4.5 m 高的压舱混凝土, 对该区域钢围堰的平动自由度进行约束。

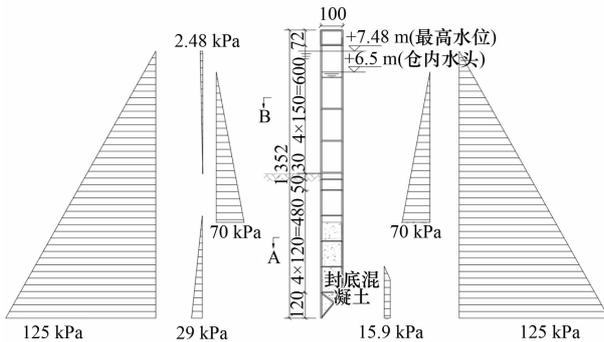


图 6 工况 2 围堰受载简图

双壁钢围堰各部件的计算结果如表 4 所示。由表 4 可知: 在双壁钢围堰封底阶段, 最大应力为 34.6 MPa, 出现在钢围堰顶节加劲肋外侧; 最小应力为 6.4 MPa, 出现在水平主桁内侧环板; 最大变形为 0.88 mm, 出现在钢围堰外壁板; 最小变形为 0.05 mm, 出现在水平主桁外侧环板。各构件的最

大应力均未超过钢材的设计强度 215 MPa。

2.2.3 工况 3 分析

计算双壁钢围堰在抽水时的结构强度(抽水水位为 +7.48 m, 夹壁水位为 +6.5 m)。在抽水过程中, 夹壁内侧的静水压力消失, 此时钢围堰主要承受自重、外壁静水压力、水流力以及浮力, 其荷载简图如图 7 所示。

除浮力(125 kPa)外, 其他荷载与工况 2 中的相同。考虑到抽水时封底混凝土已达到设计强度的 80%, 因此其对钢围堰内壁具有较强的约束作用。在计算模型中, 对钢围堰底部节点的自由度进行约束, 并对内壁高度 0 ~ 2.5 m 范围内(封底混凝土顶部距清淤底标高为 2.5 m)的节点施加固结约束。计算过程中分别对钢围堰结构和封底混凝土进行单独建模分析。

(1) 双壁钢围堰结构计算。双壁钢围堰各部件的计算结果如表 5 所示。由表 5 可知: 在双壁钢围堰的抽水阶段, 最大应力为 81.9 MPa, 出现

表 4 工况 2 计算结果

名称	位置	规格/mm	最大应力/MPa	最大变形/mm
壁板	内壁板	厚度为 5	19.8	0.54
	外壁板	厚度为 5	25.5	0.88
顶节加劲肋	内侧	L63 × 5 角钢	26.9	0.29
	外侧	L63 × 5 角钢	34.6	0.37
底节加劲肋	内侧	[8 槽钢	10.1	0.12
	外侧	[8 槽钢	9.7	0.15
水平主桁	内侧环板	150 × 12 扁钢	6.4	0.07
	外侧环板	150 × 12 扁钢	9.4	0.05
	斜杆	L45 × 5 角钢	7.4	0.07

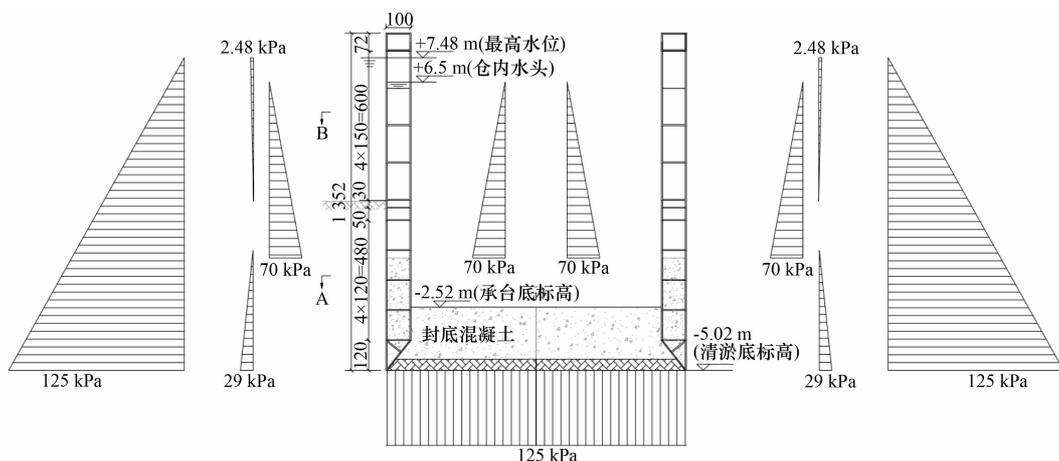


图 7 工况 3 受载示意

表 5 工况 3 计算结果

名称	位置	规格/mm	最大应力/MPa	最大变形/mm
壁板	内壁板	厚度为 5	25.5	0.88
	外壁板	厚度为 5	81.9	2.09
顶节加劲肋	内侧	L63 × 5 角钢	61.2	1.05
	外侧	L63 × 5 角钢	30.8	0.57
底节加劲肋	内侧	[8 槽钢	59.6	1.01
	外侧	[8 槽钢	39.4	0.57
水平主桁	内侧环板	150 × 12 扁钢	40.0	0.68
	外侧环板	150 × 12 扁钢	31.8	0.57
	斜杆	L45 × 5 角钢	15.3	0.66

在钢围堰外壁板；最小应力为 15.3 MPa，出现在水平主桁斜杆；最大变形为 2.09 mm，出现在钢围堰外壁板；最小变形为 0.57 mm，出现在顶节加劲肋外侧。各构件的最大应力均未超过钢材设计强度 215 MPa。

(2) 封底混凝土强度计算。采用 ABAQUS 软件建立有限元模型，封底混凝土采用 C3D8R 单元进行模拟，假设封底混凝土与钢围堰完全黏结，两者通过共节点实现连接。计算中约束封底混凝土四周的法向和切向位移，施加的荷载包括封底混凝土自重及水的上浮力 125 kPa。工况 3 的封底混凝土计算结果如表 6 所示。由表 6 可知：封底混凝土的设计符合工程要求。

2.2.4 工况 4 分析

该工况下，钢围堰承受自重、浮力、静水压力和水流力，这些荷载与工况 3 中的相同，模型中仅增加了承台浇筑时的混凝土侧压力，根据上述计算结果，混凝土侧压力为 15.9 kPa，有效压

表 6 工况 3 封底混凝土计算结果 MPa

应力类别	最大拉应力	最大压应力	是否满足要求
X 方向	0.68	0.64	是
Y 方向	0.68	0.63	是
Z 方向	0.06	0.14	是
等效应力	0.69	0	是

头高度为 0.64 m。

在承台浇筑过程中，钢围堰在工况 3 的基础上增加了承台混凝土侧压力，荷载简图如图 8 所示。

此时封底混凝土已完成固结，计算模型中对钢围堰底部节点的自由度进行约束，并对内壁高度 0 ~ 2.5 m 范围内(即封底混凝土的高度)的节点施加固结约束。在计算过程中，分别对钢围堰结构和封底混凝土进行单独建模分析。

(1) 围堰结构计算结果。双壁钢围堰各部件的计算结果如表 7 所示。由表 7 可知：在承台浇筑阶段，最大应力为 77.3 MPa，出现在钢围堰内壁板；最小应力为 11.5 MPa，出现在水平主桁斜

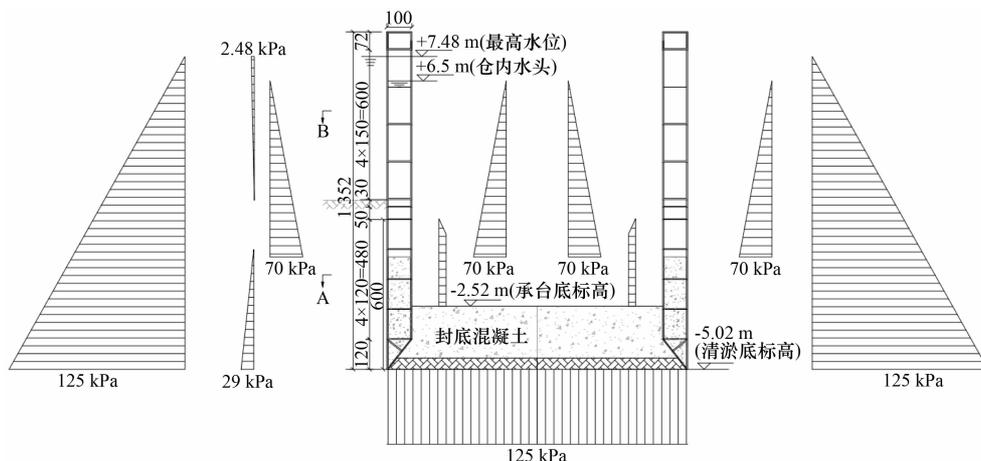


图 8 工况 4 加载示意

表 7 工况 4 计算结果

名称	位置	规格/mm	最大应力/MPa	最大变形/mm
壁板	内壁板	厚度为 5	77.3	2.06
	外壁板	厚度为 5	46.1	0.88
顶节加劲肋	内侧	L63 × 5 角钢	60.1	1.05
	外侧	L63 × 5 角钢	26.2	0.53
底节加劲肋	内侧	[8 槽钢	46.9	0.81
	外侧	[8 槽钢	32.7	0.53
水平主桁	内侧环板	150 × 12 扁钢	36.6	0.63
	外侧环板	150 × 12 扁钢	29.1	0.53
	斜杆	L45 × 5 角钢	11.5	0.61

杆;最大变形为 2.06 mm,出现在钢围堰内壁板;最小变形为 0.57 mm,出现在顶节加劲肋外侧。所有构件的最大应力均未超过钢材的设计强度 215 MPa。

(2) 封底混凝土强度计算。浇筑承台后,相当于在封底混凝土上施加恒载。此时封底混凝土承受自重、水的浮力及承台的压力,承台对封底混凝土的压力为 87.5 kPa。计算模型及边界条件与工况 3 相同。工况 4 下封底混凝土计算结果如表 8 所示。由表 8 可知:封底混凝土的设计符合工程要求。

表 8 工况 4 封底混凝土计算结果 MPa

应力类别	最大拉应力	最大压应力	是否满足要求
X 方向	0.09	0.06	是
Y 方向	0.09	0.07	是
Z 方向	0.02	0.01	是
等效应力	0.15	0	是

5 结 论

(1) 根据关键工况的分析结果可知,最大应力出现在钢围堰下放过程中吊耳板部位,最大变形则发生在双壁钢围堰抽水阶段的外壁板和内壁板。因此,在进行双壁钢围堰设计时,应特别注意保证吊耳板材料的强度要求和双壁钢围堰壁板材料的刚度要求。

(2) 在抽水阶段和承台浇筑阶段,双壁钢围堰壁板的应力均较大;封底混凝土在双壁钢围堰抽水阶段所承受的拉应力及压应力达到最大值。因此,在进行双壁钢围堰设计时,应特别注意满足壁板材料的强度要求;在进行封底混凝土设计时,则尤其要确保其抗拉强度满足工程要求。

(3) 各种工况下的最小应力均出现在水平主桁部位。因此,在进行双壁钢围堰设计时,为节约施工成本,在满足结构受力要求的前提下,可适当减少水平主桁的数量或优化其尺寸。工程中 22[#]~24[#]墩承台已顺利完成施工,验证了上述计算方法的可靠性。

参考文献:

- [1] SUNDARAVADIVELU R,SANNASIRAJ S A,SAKTHIVEL S,et al. Temporary cofferdam structure for new dry dock [C]//Proceedings of the Fifth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2019). Singapore: Springer Singapore,2021:329-341.
- [2] 潘越,时伟,孟兆凯,等. 波浪力作用下考虑时空效应坞口围堰钢板桩优化设计研究[J]. 工程建设,2013,45(6):22-25.
- [3] LI Z M. Deepwater pile foundation construction technology of Xiaoyi Reservoir bridge [J]. Applied Mechanics and Materials,2013,405/406/407/408:252-255.
- [4] 舒昌信. 浅析独塔斜拉桥深水中超大型承台的施工控制[J]. 工程建设,2021,53(12):50-56.
- [5] ZHANG X S,LI W Y,ZENG B S. Design and construction of double-wall steel cofferdam in deep water foundations [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2021,631(1):012054.
- [6] KANG A Z,ZHU B,LIN P Z,et al. Experimental and numerical study of wave-current interactions with a dumbbell-shaped bridge cofferdam[J]. Ocean Engineering,2020,210:107433.
- [7] 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(增刊1):5.
- [8] 杨齐海,何加江. 公安长江公铁两用特大桥 4 号墩钢

- 围堰施工技术[J]. 桥梁建设,2015,45(5):99-104.
- [9] 戴良军,朱大勇. 基于增量法钢板桩围堰的安全性计算方法[J]. 交通运输工程学报,2016,16(6):39-47.
- [10] ZHU H Q,ZHANG X D. Floating stability analysis of steel boxed cofferdam of dongtinghu long-span bridge[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,395/396:897-900.
- [11] LIANG S J,XU W,XU Z Y. Optimization analysis of steel suspension box cofferdam [C]//2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering. Piscataway: IEEE, 2011: 1392-1395.
- [12] 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,2013,32(11):2316-2324.
- [13] 孙国光. 港珠澳大桥浅水区非通航孔桥埋置式承台止水方案比选[J]. 桥梁建设,2017,47(6):117-122.
- [14] 金红岩. 武汉青山长江公路大桥钢套箱围堰下沉施工技术[J]. 桥梁建设,2018,48(2):7-12.
- [15] 金武. 安庆长江铁路大桥4号桥塔墩基础施工技术[J]. 桥梁建设,2013,43(2):40-45.
- [16] 许鑫,王同民. 宜昌香溪河大桥4号桥塔墩钢围堰封底技术[J]. 桥梁建设,2018,48(2):105-110.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国-知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵,不再另行支付),对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明,如有异议请来稿说明,本刊将作适当处理。