

文章编号:1672-9331(2020)04-0047-08

钢吊箱围堰三维模拟分析及结构改进

周 锋¹,高向宇¹,程刚杰¹,王光辉²

(1. 中交一公局第八工程有限公司,天津 300000;2. 湖南理工学院,湖南 岳阳 414000)

摘 要:以龙溪嘉陵江特大桥 9[#]墩双壁钢吊箱围堰为例,系统研究了在水位落差大、河床洲滩冲淤变化大、水流流速急等复杂水文地质条件下,钢吊箱围堰设计的三维模拟分析方法。研究结果显示:钢吊箱围堰设计方案在各工况下稳定性指标均满足要求,结构设计合理;与 3 356 组相同工况下的实测数据进行对比分析,本研究建立的三维模拟模型计算值的平均误差为 3.37%,最大误差为 29.85%,计算结果较精确,可为同类工程的研究和应用提供一定的借鉴。

关键词:钢吊箱围堰;复杂水文地质条件;结构设计;三维有限元计算;深水桥梁基础

中图分类号: U445

文献标志码: A

3D simulation analysis and structural improvement of steel box cofferdam

ZHOU Feng¹, GAO Xiang-yu¹, CHENG Gang-jie¹, WANG Guang-hui²

(1. CCCC First Highway Eighth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300000, China;

2. Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414000, China)

Abstract: The double-wall steel box cofferdam at pier 9[#] of Longxi Jialingjiang grand bridge was taken as an example to systematically study 3D simulation analysis method for steel box cofferdam design under complex hydrogeological conditions of the big drop in water level, the great change in river bed erosion and the rapid flow velocity. The research results show that the design scheme of the steel box cofferdam meets the requirements of the stability index under all working conditions, and the structural design is reasonable. Compared with 3 356 groups of measured data under the same working conditions, the average error of the calculation results of the 3D model is 3.37%, and the largest error is 29.85%. So the calculation results of the 3D model are accurate relatively, which can provide some reference for the research and application of similar projects.

Key words: steel box cofferdam; complex hydrogeological condition; structural design; 3D finite element calculation; bridge foundation in deep water

深水环境对施工作业的影响是深水工程建设
的一大难题,严重制约着跨江、跨海桥梁等工程的

建设。随着止水桩基础技术的日益进步,这一难
题逐渐被解决^[1-2]。在国内有关桥梁深水基础的

收稿日期:2020-03-11

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(19A208)

通讯作者:王光辉(1979—),男,湖北英山人,湖南理工学院副教授,主要从事路桥工程方面的研究。

E-mail: wgh325@hnist.edu.cn

研究中,多推荐钢围堰作为深水桥梁施工的主要围堰形式;在长江上游高水位差施工条件下围堰形式的比选中,多推荐采用钢吊箱围堰来克服围堰内外的渗透水压^[3-4]。

钢吊箱围堰通过吊箱围堰侧板和底板上的封底混凝土进行围水,为承台施工提供无水的干燥环境,是目前桥梁深水基础常用的围堰形式之一。与传统钢围堰、板桩围堰相比,钢吊箱围堰具有施工工期短、水流阻力小、不需要沉入河床、利于通航、钢结构及混凝土用量少等优点^[5-8]。因钢吊箱围堰支撑在桥梁深水桩基上,体形巨大,且受水流冲击力、水压力、浮力等多重荷载的影响,所以设计出安全稳定可靠和施工质量合格的钢吊箱围堰是桥梁深水基础施工的重点和难点^[9]。

本研究以龙溪嘉陵江特大桥 9[#] 墩钢吊箱围堰工程为例,在水位落差大、河床洲滩位置冲淤变化大、水流流速急等复杂水文地质条件下,利用有限元三维模拟模型计算并分析钢吊箱围堰结构设计的可靠性,利用分析结论提出改进方案,并对照现场工程实测数据进行验证,这将为今后同类工程的结构设计提供一定的参考。

1 实例工程概况

1.1 实例工程

龙溪嘉陵江特大桥主桥为(108+200+108)m 预应力混凝土连续刚构梁,桥面设计为双向四车

道高速公路+双向四车道市政道路+人行道,设计速度为 80 km/h(高速)、40 km/h(市政),桥梁宽度为 43.5 m,是重庆市首座高速公路、市政道路合建桥梁,也是目前该市最宽的公路桥梁。

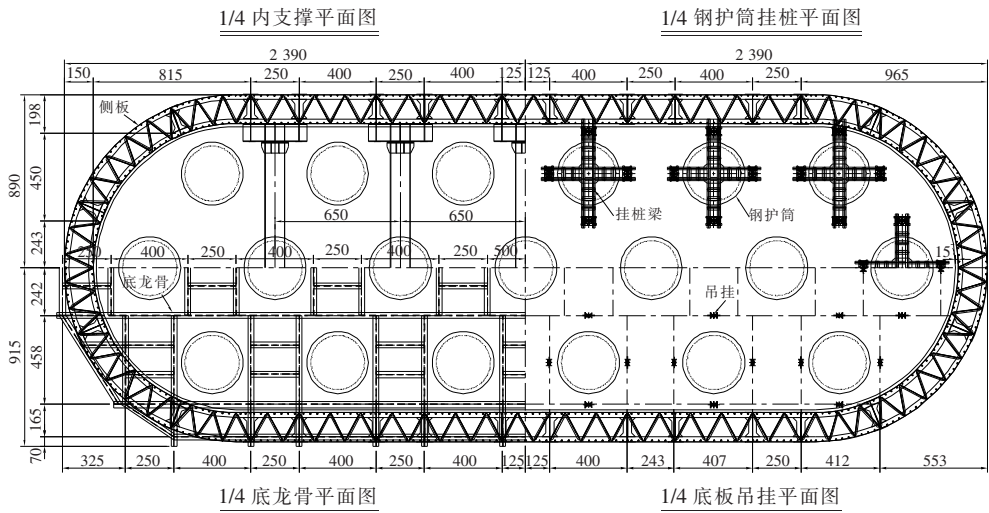
1.2 龙溪嘉陵江特大桥 9[#] 墩围堰

龙溪嘉陵江特大桥 9[#] 墩基础采用群桩承台结构。钻孔灌注桩直径为 2.8 m,按嵌岩桩设计。桩长 48 m,共 19 根,梅花形布置。承台为圆端形,平面尺寸为 44.5 m×14.5 m,承台厚度为 5.0 m,承台顶部高程为 194.20 m,承台底部高程为 189.20 m。

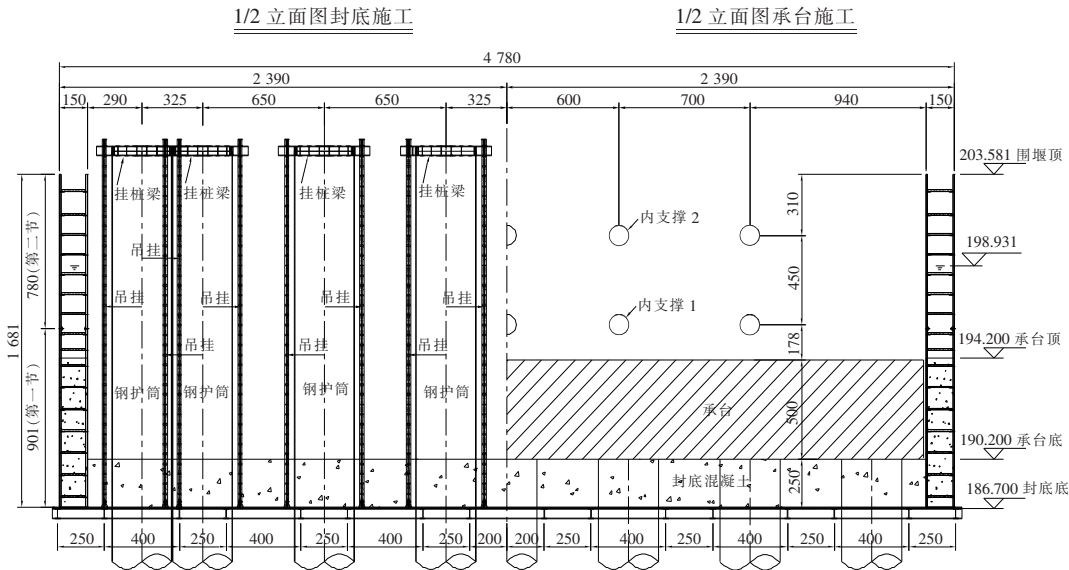
9[#] 墩基础施工采用先平台后围堰的整体施工方案,其中承台施工挡水围堰采用双壁钢吊箱围堰结构形式,设防水位为 203.5 m。在钻孔桩施工完毕后在墩位处拼装围堰底节,拼完后将其整体下放至自浮状态,然后接高第二节围堰。在完成体系转换后浇筑封底混凝土和壁仓混凝土,为承台及墩身混凝土施工提供干燥的作业环境。围堰总布置图见图 1。

1.3 水文地质条件

据实例工程所在河段的实测资料,桥位处历年最高水位为 208.500 m,最低水位为 185.100 m,多年平均水位为 191.200 m,最大水位差为 23.4 m。在桥位处,尤其是在 9[#] 墩处年际间冲淤变化较大。在 9[#] 墩处水流全年平均流速为 0.51 m/s,夏季最大流速为 3.50 m/s。本项目施工设计最高水位为 203.500 m。



(a) 钢吊箱围堰平面图



(b) 钢吊箱围堰立面图

单位/cm

图 1 龙溪嘉陵江特大桥 9# 墩钢围堰总布置图

Fig. 1 General layout of steel cofferdam at pier 9# of Longxi Jialingjiang grand bridge

2 围堰结构模拟分析

2.1 工况选择

根据实例工程 9# 墩钢吊箱围堰的施工过程,需对以下 6 个工况进行模拟分析:

- 1) 工况 I: 围堰在自浮状态接高。
- 2) 工况 II: 挂桩后浇筑封底混凝土。
- 3) 工况 III: 填充壁仓混凝土。
- 4) 工况 IV: 围堰抽水。
- 5) 工况 V: 承台施工完毕后, 拆除第一层内支撑。
- 6) 工况 VI: 第一节桥墩施工完毕后, 支临时支撑, 拆除第二层内支撑。

2.2 主要荷载选择

在围堰施工期间, 围堰结构承受的荷载主要有结构自重、静水压力、水流力等。由于上述工况处于高水位期间, 故不考虑风荷载的影响。

2.3 模拟模型

借助 MIDAS/Civil 建立龙溪嘉陵江特大桥 9# 墩钢围堰结构的三维模拟模型, 如图 2 所示。

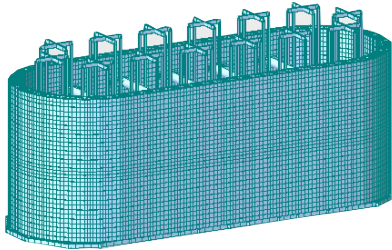


图 2 龙溪嘉陵江特大桥 9# 墩钢围堰模拟模型

Fig. 2 Simulation model of steel cofferdam at pier 9# of Longxi Jialingjiang grand bridge

2.4 各工况模拟分析

2.4.1 工况 I: 围堰在自浮状态接高

在下放围堰首节至自浮状态后, 通过灌水调整其姿态, 并完成围堰接高, 接高后围堰总高为 16.8 m。经计算, 自浮状态吃水深度约为 7.0 m, 此时围堰双壁侧板承受静水压力, 需对围堰双壁侧板的承载力进行验算。

对于工况 I, 实例工程围堰竖向隔舱板有效应力分布见图 3。

对于工况 I, 通过模拟分析可知: ① 内外壁板、水平环板组合应力的分布明显呈现出外围大、中间小, 以钢围堰形心为中心, 由外部向内部收缩的特点。水平环板最大组合应力为 53.21 MPa,

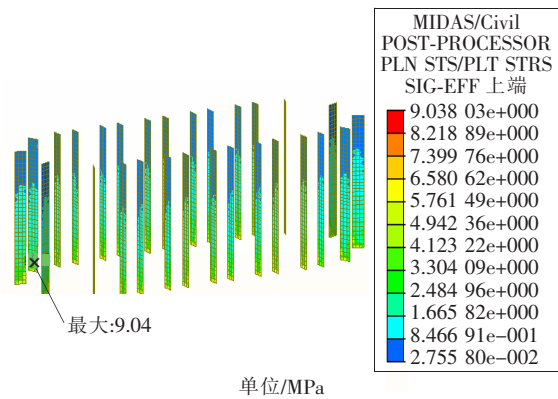
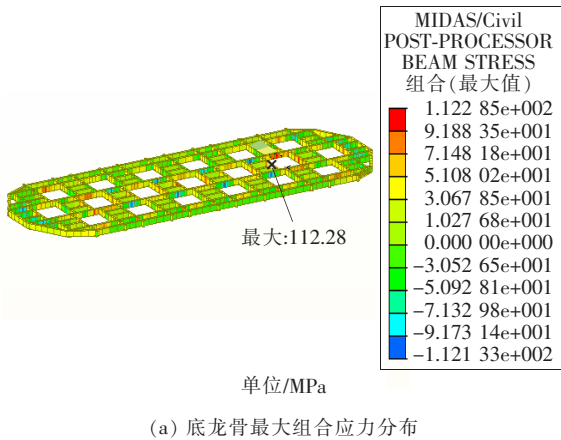


图 3 围堰竖向隔舱板有效应力分布(工况 I)
Fig. 3 Effective stress distribution of vertical bulkhead of cofferdam(working condition I)

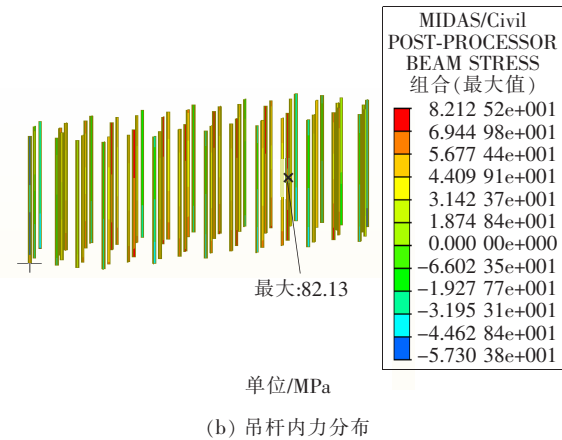


(a) 底龙骨最大组合应力分布

小于 Q235B 的容许应力 170 MPa。② 每块围堰竖向隔舱板有效应力的分布规律基本一致,均由板上端向下端逐渐增大。围堰竖向隔舱板的最大有效应力约为 9.04 MPa,小于容许应力 170 MPa。

2.4.2 工况 II:挂桩后浇筑封底混凝土

在下放围堰至设计标高后进行封底混凝土施工,封底混凝土厚度为 2.5 m。由于此工况相对于工况 I 围堰壁板受力无变化,故只需对围堰底龙骨及吊杆承载力进行验算。通过对水位区间 199.0~203.5 m 进行参数化模拟分析,得到在最不利情况下实例工程围堰底龙骨最大组合应力、最大剪力、吊杆内力的分布,如图 4 所示。



(b) 吊杆内力分布

图 4 钢吊箱围堰承载力验算(工况 II)

Fig. 4 Checking calculation of bearing capacity of steel box cofferdam(working condition II)

分析图 4 可知:1) 底龙骨的应力分布整体上(82.4%的区域)呈拉应力,局部区域(17.6%的区域)为压应力。最大组合拉应力约为 112.28 MPa,最大组合压应力约为 112.13 MPa。吊杆最大组合应力约为 82.13 MPa,小于容许值 170 MPa;最大剪力约为 82.42 kN,小于容许值 100 kN。2) 由于桩群采用梅花形布置,顺桥向净桩间距仅有 0.45 m,使底龙骨在顺桥向无法通长布置。且在局部分析中发现底龙骨发生了扭转变形,并产生了很大的应力。因此,需在底龙骨的钻孔桩预留孔内增加斜向杆件,改善结构受力。

2.4.3 工况 III:填充壁仓混凝土

在浇筑完围堰封底混凝土后,需浇筑壁仓混凝土,壁仓混凝土高度 7.5 m。此时,围堰双壁侧板承受静水压力和混凝土侧压力,需对围堰双壁侧板进行验算。通过对水位区间 199.0~203.5 m

进行参数化模拟分析,得到水平环板最大组合应力为 118.68 MPa,围堰竖向隔舱板最大有效应力为 17.61 MPa,均小于容许值 170 MPa。

2.4.4 工况 IV:围堰抽水

在围堰封底混凝土及壁仓混凝土达到设计强度后,进行围堰抽水及承台施工。此时,围堰外壁承受静水压力,需对围堰双壁侧板、内支撑承载力进行验算。通过对水位区间 199.0~203.5 m 进行参数化模拟分析,得出最不利工况为高水位工况。相对于前面三种工况,该工况需要分析内支撑承载力的分布,其受力云图见图 5。

分析图 5 可知:1) 对于工况 IV,水平环板最大组合应力为 81.74 MPa,围堰竖向隔舱板最大有效应力为 79.86 MPa,小于容许值 170 MPa。内支撑承受的最不利组合为: $N \approx 1\,255\text{ kN}$, $M \approx 73.5\text{ kN} \cdot \text{m}$,内支撑长 14.0 m。回转半径 $i_x = i_y$

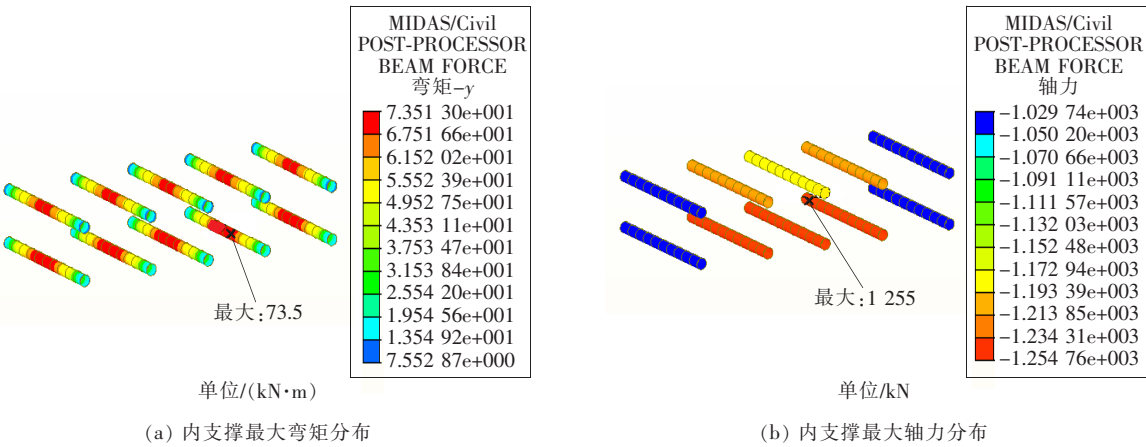


图 5 钢吊箱围堰承载力验算(工况Ⅳ)

Fig. 5 Checking calculation of bearing capacity of steel box cofferdam(working condition Ⅳ)

=357 mm,长细比 $\lambda_x = \lambda_y = 14\,000\text{ mm}/357\text{ mm} \approx 39$ 。截面稳定系数 $\varphi_x = \varphi_y = 0.902\,6$ 。内支撑最大荷载为 53.69 MPa,小于容许值 170 MPa。2)最大弯矩基本分布在每一根内支撑的中间部分,最大轴力出现在内支撑的前后两圆端处,内支撑中间处的轴力相对较小。

2.4.5 工况Ⅴ和工况Ⅵ:模拟分析

工况Ⅴ为承台施工完毕后,拆除第一层内支撑;工况Ⅵ为第一节桥墩施工完毕后,支临时支撑,拆除第二层内支撑。这两种工况仅围堰外壁承受静水压力,防洪水位按最高水位 203.500 m 考虑。模拟分析结果见表 1 和表 2。

表 1 钢吊箱围堰双壁侧板和内支撑承载力验算结果(工况Ⅴ)

Table 1 Checking calculation results of bearing capacity of double-wall side plate and inner support of steel box cofferdam(working condition V)

项目	水平环板组合 应力/MPa	竖向隔舱板有 效应力/MPa	内支撑最大组 合应力/MPa	内支撑分配梁最 大组合应力/MPa	内支撑分配梁最 大组合剪力/kN
模型计算值	77.1	53.2	45	34.2	28.1
规范要求值	170.0	170.0	170	170.0	100.0
是否符合规范	符合	符合	符合	符合	符合

表 2 钢吊箱围堰双壁侧板和内支撑承载力验算结果(工况Ⅵ)

Table 2 Checking calculation results of bearing capacity of double-wall side plate and inner support of steel box cofferdam(working condition VI)

项目	水平环板组合 应力/MPa	竖向隔舱板有 效应力/MPa	内支撑最大组 合应力/MPa	内支撑分配梁最 大组合应力/MPa	内支撑分配梁最 大组合剪力/kN
模型计算值	75.4	101.2	71.6	56.3	48.7
规范要求值	170.0	170.0	170.0	170.0	100.0
是否符合规范	符合	符合	符合	符合	符合

2.5 模拟分析结论

- 1) 对于前述 6 个工况,由有限元模拟分析可知,实例工程钢吊箱围堰各项结构承载力指标均满足要求。
- 2) 参考传统圆形围堰施工过程中承载力的验算情况^[10-13],对圆端形围堰与传统圆形围堰受力

特性的异同分析如下:

- ① 相似性:两种形式围堰的受力相似。均是通过环板传递轴力,抗压能力强,结构稳定性高,不容易发生变形。因此,在一般情况下,不需要额外设置内支撑。
- ② 差异性:圆端形围堰的中间段为矩形板,其

受力特点为两边为弹性支撑、下部为刚性支撑,受力稳定性较差^[14]。因此,需要设置内支撑维持结构稳定。

③ 圆端形围堰在局部区域出现了应力集中现象,尤其是在前后两圆端处,建议进行环形加筋处理。底龙骨的钻孔桩预留孔内也需增加斜向杆件,以改善结构受力。

3 围堰整体变形验算

根据模型计算结果,钢吊箱围堰变形分析如下:

1) 对于工况Ⅱ至工况Ⅵ,钢吊箱围堰最大变形值分别为 0.7,1.3,2.6,3.4,7.3 mm,变形值较小,均小于类似工程 16.5~30.0 mm 的变形经验值,也小于本工程钢吊箱围堰最大变形阈值 10.0 mm,因此满足施工要求。

2) 对于工况Ⅱ至工况Ⅴ,钢吊箱围堰最大变形值出现在围堰中部,而工况Ⅵ最大变形值出现在围堰顶部。这是因为在拆除第二层内支撑后,钢吊箱顶部内支撑力减小,而围堰顶部变形值增大,并超过了围堰中部的变形值。

限于篇幅,本研究仅给出实例工程钢吊箱工况Ⅴ和工况Ⅵ的围堰变形值分布图,见图 6。

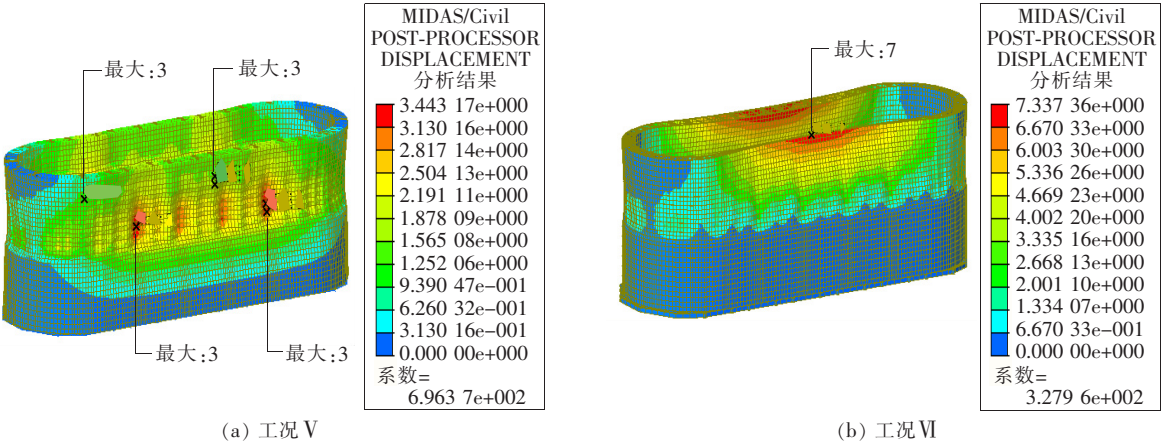


图 6 钢吊箱围堰变形值分布图
Fig. 6 Deformation distribution of steel box cofferdam

4 封底混凝土局部模拟分析

实例工程封底混凝土底部标高为 186.70 m,厚为 2.5 m,采用 C30 水下封底混凝土进行浇筑。围堰内抽水完成后,需对封底混凝土与护筒之间的黏结力、封底混凝土主拉应力及围堰整体抗浮、抗沉安全系数进行模拟分析,主要分为承台未施工和浇筑混凝土两种工况。通过对水位区间 199.0~203.5 m 参数化模拟分析,得到最不利工况下的模拟结果,见图 7。

4.1 工况Ⅰ:围堰内抽水完成,承台未施工

对围堰进行抽水处理后,作用在围堰封底混凝土上的力主要包括封底混凝土自重、围堰内外水头差产生的浮力、封底混凝土与护筒壁之间的摩擦力。

分析可知:① 在高水位时,封底混凝土内部主

拉应力比较大,86.7%区域的拉应力为 0.015~0.100 MPa,13.3%区域的拉应力介于 0.100~0.221 MPa。② 封底混凝土内部最大主拉应力为 0.22 MPa,小于水下 C30 素混凝土容许抗拉应力 1.0 MPa,满足要求。最大应力值位于封底混凝土与钢护筒接触的底部。

对于工况Ⅰ,根据计算结果得到每根桩基所需承受的黏结力,见表 3。

由表 3 可知,工况Ⅰ各桩基的黏结应力为 37.0~99.6 kPa。根据本工程实际材料参数,封底混凝土与钢护筒之间的平均黏结应力按 150 kPa 控制,则上述各桩基所承受的平均黏结力均满足要求。

4.2 工况Ⅱ:承台浇筑混凝土

围堰内承台施工时,作用在围堰封底混凝土上的力主要包括封底混凝土自重、围堰内外水头差产生的浮力、承台混凝土自重、钢吊箱围堰自重、封底混凝土与护筒壁之间的摩擦力。

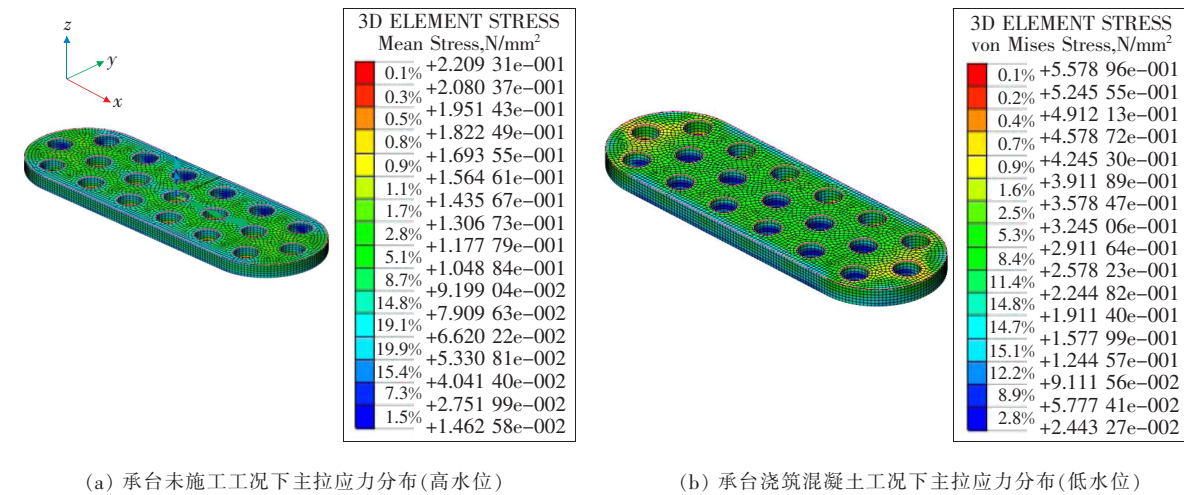


图 7 封底混凝土承载力模拟

Fig. 7 Simulation of bearing capacity of concrete at the back cover

表 3 各桩基黏结力符合性验算(工况 I)

Table 3 Checking calculation of cohesion compliance of each pile foundation(working condition I)

桩号	桩基黏结力/ kN	黏结应力计算值/ kPa	黏结应力限值/ kPa
1	2 380	97.9	150
2	2 420	99.6	150
3	2 400	98.8	150
4	900	37.0	150
5	1 450	59.7	150
6	1 540	63.4	150
7	990	40.7	150

分析可知:① 在低水位,封底混凝土内部主拉应力较大,84.4%区域的拉应力为 0.024~0.300 MPa,15.6%区域的拉应力为 0.30~0.56 MPa,主拉应力普遍比工况 I 大幅增加。② 封底混凝土内部最大主拉应力为 0.56 MPa,小于水下 C30 素混凝土容许抗拉应力 1.0 MPa,满足要求。最大应力值位于封底混凝土与钢护筒接触的底部,最大应力值的位置与工况 I 一致。

对于工况 II,根据计算结果可知:各桩基的黏结应力为 2.7~87.2 kPa,根据本工程实际材料参数,封底混凝土与钢护筒之间的平均黏结应力值按 150 kPa 控制,则上述各桩基所承受的平均黏结力均满足要求。

5 应用情况分析

截至 2019 年 11 月下旬,实例工程已顺利完

成钢吊箱围堰封底施工,整个施工过程经历了 2019 年完整汛期的考验,且 9#墩已开始进行桥墩承台施工。根据现场监测,在施工过程中,实例工程钢吊箱围堰变形值较小(最大值为 6.77 mm),整体稳定性较好,各项指标均符合规范要求。同时,在相同工况下,本研究共有 3 356 组计算值和监测值的对比数据。对比结果显示:本研究三维模拟模型计算值的平均误差为 3.37%,最大误差为 29.85%。误差小于 5%的数据共有 2 766 组,占样本数据的 82.42%;误差小于 10%的数据共有 3 101 组,占样本数据的 92.40%。可见,本研究建立的三维模拟模型计算精度较高,能很好地反映实例工程的实际情况。

6 结论

本研究以龙溪嘉陵江特大桥 9#墩双壁钢吊箱围堰工程为例,研究在水位落差大、河床洲滩位置冲淤变化大、水流流速急等复杂水文地质条件下钢吊箱围堰设计的三维模拟分析方法,结论如下:

1) 充分利用有限元软件的快速分析能力,对围堰施工全过程的各个工况进行模拟分析,得出了最不利的荷载状况;在围堰施工过程中,局部区域出现了应力集中现象,尤其是在前后两圆端处;因桩群过密导致底龙骨局部受扭,进而引起了应力增大。

2) 截至 2019 年 11 月下旬,实例工程 9#墩的

基础施工基本完成,且已经历了一个完整汛期的考验,由此可证明钢吊箱围堰能够在大水头差的水域成功施工。同时,钢吊箱围堰适用于各种地质情况,且不受水位限制,能保证桥梁深水基础施工的安全与可靠。

3) 经过与实测数据对比分析,得出本研究三维模型计算值的平均误差为 3.37%,最大误差为 29.85%,说明该三维模拟模型对钢吊箱围堰稳定性的分析较为精确,可为同类工程的结构验算提供方法借鉴和技术支持。

【参考文献】

[1] 王秀丽,舒丽红. 韩江特大桥双壁钢围堰结构有限元分析[J]. 铁道建筑,2017(7):14-16.
WANG Xiu-li, SHU Li-hong. Finite element analysis of double-wall steel cofferdam structure of Hanjiang bridge[J]. Railway Architecture, 2017(7):14-16.

[2] 刘小波,刘益平,姜兴模,等. 江安长江公路大桥主 6 号墩基础钢围堰施工[J]. 公路,2014(8):17-21.
LIU Xiao-bo, LIU Yi-ping, JIANG Xing-mo, et al. Construction of foundation steel cofferdam for pier 6 of Jiang'an Yangtze River highway bridge [J]. Highway, 2014(8):17-21.

[3] 刘自明,王邦楣,陈开利. 桥梁深水基础[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
LIU Zi-ming, WANG Bang-mei, CHEN Kai-li. Bridge foundation in deep water[M]. Beijing: People's Communications Press, 2003.

[4] 翟世鸿,杨炎华,张照霞. 桥梁深水主墩基础的现状与发展趋势探讨[J]. 中外公路,2017(6):116-119.
ZHAI Shi-hong, YANG Yan-hua, ZHANG Zhao-xia. Discussion on the current situation and development trend of bridge deep-water main pier foundation[J]. China & Foreign Highway, 2017(6):116-119.

[5] 黄剑飞. 单双壁组合型钢围堰结构在桥梁深水基础施工中的应用[D]. 上海:上海交通大学,2015.
HUANG Jian-fei. Application of single and double wall composite steel cofferdam structure in the construction of bridge deep-water foundation [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.

[6] 张中齐. 黔桂铁路东江大桥 3# 墩双壁钢围堰设计与

施工[J]. 国防交通工程与技术,2010(4):63-66.
ZHANG Zhong-qi. Design and construction of pier 3# and double-wall steel cofferdam of Dongjiang bridge of Qiangui railway[J]. National Defense Traffic Engineering and Technology, 2010(4):63-66.

[7] 康福军,练伟雄. 浅谈桥梁中围堰的应用[J]. 黑龙江交通科技,2016,33(4):111-117.
KANG Fu-jun, LIAN Wei-xiong. Discussion on the application of cofferdams in bridges[J]. Heilongjiang Transportation Technology, 2016, 33(4):111-117.

[8] Krajcinovic D, Silva M A. Statistical aspects of the continuous damage theory[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 18(7):551-562.

[9] 谢小松,徐伟,王旭峰. 特大型桥梁主墩承台哑铃状钢套箱的动力性能研究[J]. 桥梁建设,2015(2):72-75.
XIE Xiao-song, XU Wei, WANG Xu-feng. Study on dynamic performance of dumbbell-shaped steel casings for bearing caps of oversize bridge main piers[J]. Bridge Construction, 2015(2):72-75.

[10] Banerjee S, Muleshkov A. Analytical solutions for steady seepage into double-walled cofferdams[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 118(3): 525-539.

[11] Sunirmai B. Design charts for double-walled cofferdams [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 119(2):214-222.

[12] 李杰,张其云. 混凝土随机损伤本构关系[J]. 同济大学学报:自然科学版,2001,29(10):1 135-1 141.
LI Jie, ZHANG Qi-yun. The constitutive relation of random damage of concrete [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2001, 29(10):1 135-1 141.

[13] 孙旻,徐伟. 苏通大桥 6 号墩钢吊箱施工阶段有限元分析[J]. 施工技术,2015(1):12-14.
SUN Min, XU Wei. Finite element analysis of steel crane box in construction stage of pier 6 of Sutong bridge[J]. Construction Technology, 2015(1):12-14.

[14] 李胜臣,朱东生. 围堰施工中封底混凝土厚度的有限元法求解[J]. 兰州交通大学学报,2006(3):30-32.
LI Sheng-chen, ZHU Dong-sheng. Finite element method for calculating the thickness of seal concrete in cofferdam construction [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2006(3):30-32.