

# 装配式钢管-拉森钢板桩围堰结构数值模拟分析

陈百玲, 牛金辉, 王连广, 许刚  
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 为解决常规钢板桩围堰遇坚硬土层插打难度大及锁口钢管桩围堰止水效果差的问题, 提出一种装配式钢管-钢板桩围堰, 充分利用了钢管桩刚度大、钢板桩止水效果好的优点. 通过ABAQUS对该结构进行数值分析表明, 角部的钢管桩极大改善了钢板桩围堰角部剥脱以及对支撑依赖度高的不足, 增加钢管桩数量可以改善结构受力情况. 3道支撑尤其是封底混凝土对抑制钢板桩变形的发展最有效. 同时, 该结构可以有效抑制河床土体的变形. 土体最大水平和竖向变形集中在抽水初始阶段和清淤阶段, 分别占最大变形的89.9%和65.2%, 结构的3道支撑与封底混凝土可以很好地抑制抽水与清淤阶段变形.

**关键词:** 钢管-拉森钢板桩围堰; 数值模拟; 受力性能分析; 封底混凝土; 模型对比

**中图分类号:** TU 398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)06-0102-11

## Numerical Simulation Analysis of Prefabricated Steel-Tubular and Larsen Steel-Sheet Pile Cofferdam Structure

CHEN Bai-ling, NIU Jin-hui, WANG Lian-guang, XU Gang

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: NIU Jin-hui, E-mail: 2036485516@qq.com)

**Abstract:** To address the challenges faced by conventional steel-sheet pile cofferdams when driving into hard soil layers and the poor water-stopping effect of interlocking steel-tubular piles, a prefabricated steel-tubular and steel-sheet pile cofferdam was proposed, which fully utilized the advantages of high stiffness of steel-tubular piles and good water-stopping effect of steel-sheet piles. The numerical analysis of the structure using Abaqus shows that the steel-tubular piles at the corners greatly improve the peeling of the steel-sheet pile cofferdam corners and the high dependence on support. Increasing the number of steel-tubular piles can greatly improve the structural stress condition. Three supports, especially the bottom sealing concrete, are the most effective in suppressing the development of steel-sheet pile deformation. At the same time, this structure can effectively suppress the deformation of the riverbed soil. The maximum horizontal and vertical deformation of the soil occur mainly during the initial pumping stage and the dredging stage, accounting for 89.9% and 65.2% of the maximum deformation, respectively. The three supports and bottom sealing concrete of the structure can effectively suppress deformation during the pumping and dredging stages.

**Key words:** steel-tubular and Larsen steel-sheet pile cofferdam; numerical simulation; stress performance analysis; bottom sealing concrete; model comparison

钢板桩围堰是目前极具优势的围堰结构形式, 在桥梁建设中广泛应用, 具有施工简便快捷、锁口止水技术成熟且回收率及重复使用率高的优点, 适用于水深5 m左右的河道. Sadeghi等<sup>[1]</sup>研究了结构类型、截面模量等因素对板桩稳定性质

和水平抗力的影响, 同时确定了钢板桩对于最大限度降低项目成本和工期的积极意义. Li等<sup>[2]</sup>研究了潮位、土体参数、支撑刚度和施工顺序对超长钢板桩围堰稳定性的影响, 结果表明支撑对限制围堰水平位移起到关键作用. Xu等<sup>[3]</sup>研究了流

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51808100).

作者简介: 陈百玲(1972—), 女, 山东龙口人, 东北大学副教授; 王连广(1964—), 男, 辽宁鞍山人, 东北大学教授, 博士生导师.

水压力作用下钢板桩围堰周围土体破坏机理并对围堰进行优化,提高了围堰的稳定性.Wang等<sup>[4]</sup>针对施工中难以平衡结构安全和成本的问题,以长江中下游某支护结构为例,研究了U型钢板桩RMA在一般情况下的不确定性问题,提出了U型钢板桩支护结构设计的优化策略.Jiang等<sup>[5]</sup>采用有限元方法对软土地基条件下双排钢板桩围堰结构进行了分析,结果表明了钢板桩围堰结构在软土地基条件下的实用性,结构满足安全要求.Qian等<sup>[6]</sup>研究了降水过程中钢板桩围堰的水平位移情况,结果表明在围堰降水过程中需要采用一定围堰加固措施以保证围堰的稳定性.张玉成等<sup>[7]</sup>结合工程案例,采用简化土压力进行计算,为今后类似工程提供有益的借鉴.针对逆作法施工内支撑现场工作量大、存在高空作业等问题,贺文波<sup>[8]</sup>提出了采用内支撑多点分层叠加下放的施工方法,仅需2台履带式起重机即可完成内支撑的下放,施工投入少,受力和变形满足规范和设计要求.对于钢管桩围堰的研究,主要集中于各因素对结构的影响及不同岩土条件下的优化设计,钢管桩-钢板桩组合结构也是一个值得研究的问题.

钢管桩围堰主要适用于河道深度在8~18 m之间的水下基础施工,由于钢管桩的强度和刚度比钢板桩要大,因此围堰内部的支撑可以相应地减少.Fang等<sup>[9]</sup>依托港珠澳大桥具体分析了大口径钢筒围堰的干法作业、采用外接式矩形钢箱围堰以及双壁互锁矩形钢箱围堰3种围堰方法适用的地质条件及经济范围,研究表明3种围堰结构形式均适用于深水区.He等<sup>[10]</sup>以杭州富春江新建人行桥项目为依托,首先对钢管桩围堰周围土体进行卸载,根据数值模拟以及现场监测,钢管桩围堰各项监测数据均符合规范要求,为类似工程项目提供参考.Wu等<sup>[11]</sup>依托太湖隧道提出双排钢板桩围堰,为软质矿床隧道的施工提供了新思路.Zhu等<sup>[12]</sup>通过大型水槽模型试验研究了双排钢板桩围堰在破波和驻波作用下的动力特性.Ye等<sup>[13]</sup>通过实验与数值模拟分析了超载作用下基坑双排桩围护结构的力学响应,结果表明,堆载对围护结构的稳定性及变形与加载距离呈负相关.Ti等<sup>[14]</sup>通过ANSYS分析波浪荷载对钢管桩围堰受力变形的影响,并给出了围堰所能承受的极限波浪压力.Park等<sup>[15]</sup>通过分析钢管围堰的动力响应对大型圆钢管围堰船舶碰撞动力稳定性进行了研究.

钢板桩围堰止水效果较好,但其本身刚度小、变形大,对内支撑要求较高.钢管桩围堰则对锁扣加工和施工精度要求高.魏鹏飞等<sup>[16]</sup>验证了软土地基深基础开挖采用“锁口钢管桩+拉森钢板桩”组合结构的可行性.针对钢板桩围堰角部脆弱,而在转角架设斜撑效果并不明显的情况下,本文提出了一种新型钢管-钢板桩组合围堰,在围堰转角处设置钢管桩,以充分发挥钢板桩和钢管桩各自承力优势,极大改善了钢板桩围堰角部剥脱以及对支撑依赖度高的不足.

## 1 结构设计

围堰结构主要由钢管桩、拉森钢板桩、H型钢围檩、钢管支撑、支撑连接件组成,如图1所示.为改善钢板桩围堰角部薄弱以及对支撑依赖度较高的状况,在转角处设置钢管桩.另外,为解决锁口不对称而容易发生倾斜的问题,对钢管桩锁口进行优化.该结构适用于水深5~12 m,可以满足坚硬岩层、淤泥地质等复杂地质条件的施工要求.

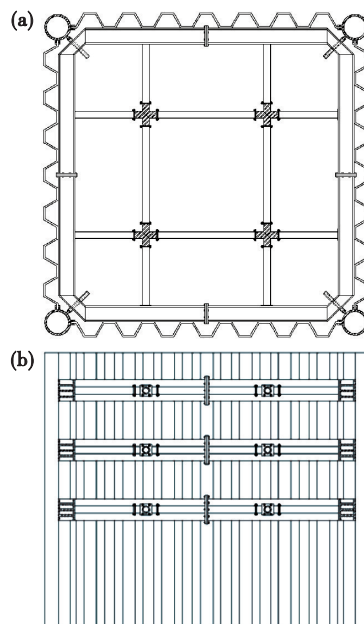


图1 钢管-拉森钢板桩围堰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of steel-tubular and Larsen steel-sheet pile cofferdam

(a)—平面图;(b)—立面图.

设计中所有构件均为预制构件,结构主体由拉森钢板桩以及角部的预制钢管桩构成.结构内部由预制围檩和预制钢管支撑支持围堰,提高结构水平承载能力.其中,通过将3个并列围檩H型钢的翼缘焊接在一起,并在两端焊接预留螺栓孔的法兰盘,可以实现围檩的加长和固定.钢管支

撑的加长和固定也通过在钢管两端焊接法兰盘来实现.钢管的预制连接件则是将与钢管支撑相同直径的钢管焊接形成四通连接件,并在4个方向焊接预留螺栓孔的法兰盘,使其可以与钢管支撑连接固定.

## 2 模型建立

模型 A1 为装配式钢管-拉森钢板桩围堰,结构形式为矩形,平面尺寸 20 m×20 m,水深 10 m,钢板桩为拉森 IV 型钢板桩,桩长 20 m,在转角处设 4 根  $\phi 950$  mm×70 mm 热轧无缝钢管桩.围堰共设有 3 道支撑体系,距桩顶间距分别为 1.5, 4.5 和 7.5 m,每一道支撑体系由围檩、围檩连接件、钢管支撑、支撑连接件组成.其中,围檩及围檩连接件采用 HN500×200 型钢,钢管支撑以及支撑连接件均采用  $\phi 300$  mm×20 mm 钢管.同时采用 C30 混凝土浇筑 2 m 厚的封底.

由于围堰结构为规则的矩形,故取整体结构的 1/4 进行计算,结构如图 2 所示.降水会对河床产生一定的扰动,因此需要对围堰附近的河床土体进行模拟分析,选取河床土体的尺寸为 20 m×20 m×20 m,土体模型如图 3 所示.

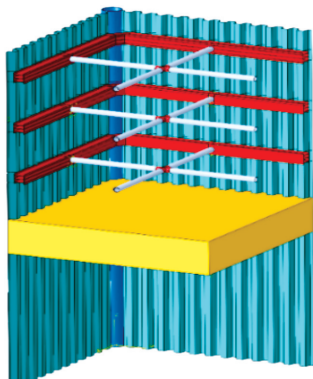


图 2 1/4 围堰结构

Fig. 2 1/4 of cofferdam structure

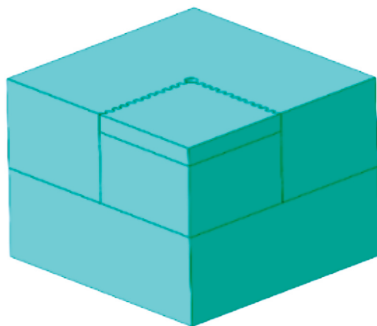


图 3 20 m×20 m×20 m 河床

Fig. 3 Riverbed of 20 m×20 m×20 m

在模型 A1 的基础上,采用均匀分布的形式在每一侧拉森钢板桩上分别增加 2 根和 3 根钢管桩,建立模型 A2 和 A3,其余模型参数均与模型 A1 相同.结构形式见图 4.

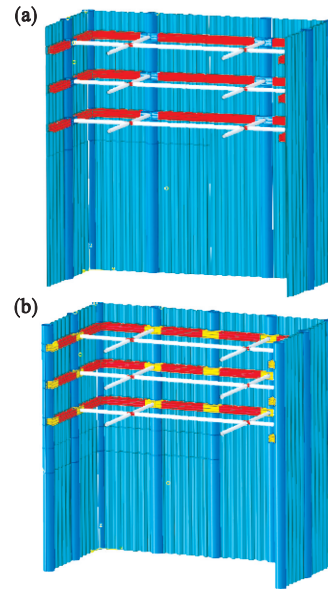


图 4 1/2 围堰结构

Fig. 4 1/2 of cofferdam structure

(a)—模型 A2 立面布置; (b)—模型 A3 立面布置.

围堰中所用钢构件采用 Q355 钢,采用双折线模型定义构件的材料属性,其弹性模量为  $2.10 \times 10^5$  MPa,屈服强度为 355 MPa,抗拉强度为 565 MPa,屈服应变为  $1.69 \times 10^{-3}$ ,极限应变为  $1.02 \times 10^{-1}$ .

为反映围堰施工不同阶段的受力变形情况,需要对围堰的施工流程进行模拟.根据施工中常用的先降水后架设支撑的顺序,将施工过程划分为 10 个工况,见表 1.利用 ABAQUS 的生死单元控制可实现工况的模拟.

表 1 围堰施工工况

Table 1 Working conditions of cofferdam

施工工况	深度/m	施工概况
工况 1	—	地应力平衡
工况 2	2.0	降水至 2.0 m 深处
工况 3	1.5	在 1.5 m 深处安装第 1 道支撑
工况 4	5.0	降水至 5.0 m 深处
工况 5	4.5	在 4.5 m 深处安装第 2 道支撑
工况 6	8.0	降水至 8.0 m 深处
工况 7	7.5	在 7.5 m 深处安装第 3 道支撑
工况 8	10.0	降水至 10.0 m 深处
工况 9	12.0	清淤至 12.0 m 深处
工况 10	12.0	浇筑 2.0 m 厚封底混凝土

### 3 结果分析

#### 3.1 河床土体受力性能

在对土体进行地应力平衡、消除重力影响后,进行数值模拟研究.随着降水的进行,土体原

有的平衡状态被破坏,河床土体最大变形云图见图 5.

围堰内部降水,会导致河床土体卸荷,释放土体应力,由模拟结果可知,河床土体水平位移最大值出现在跨中,最大隆起出现在河床土体的中心位置.

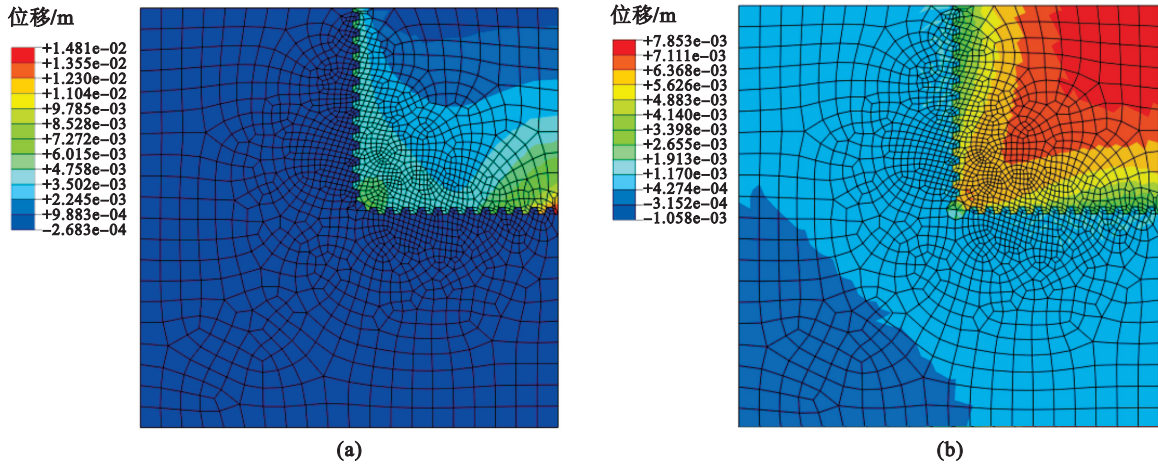


图 5 河床土体最大变形云图

Fig. 5 Maximum deformation nephograms of riverbed soil

(a)—最大水平位移; (b)—最大竖向位移.

模型 A1 每一工况水平位移均为之前工况位移的叠加,最大水平位移与最大隆起位移随施工工况的变化曲线见图 6.

撑以及封底混凝土对抑制土体的水平变形起着重要作用.河床土体产生竖向变形主要是因为降水产生竖直向上的应力,引起土体发生隆起.

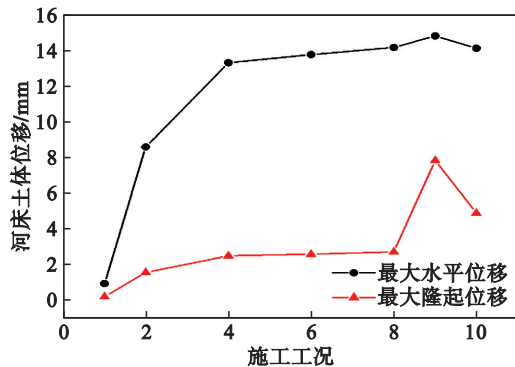


图 6 不同施工工况下土体最大位移变化曲线

Fig. 6 Curves of maximum displacement of soil under different working conditions

在工况 4 阶段之前,土体位移增长迅速,在工况 4 之后,位移增长速率明显放缓.工况 3 和工况 5 架设的 2 道支撑共同作用,有效限制了土体水平位移的发展.工况 9 阶段水平位移增加趋势又有所增加,其原因在于清淤工作的完成,破坏了原有系统的应力平衡,应力释放导致了位移的发生,但此时位移总体增长水平较低.在工况 10 阶段,封底混凝土浇筑完毕,此时最大水平位移降低 4.6%,工况 10 功能作用相当于第 4 道支撑.由此可知,围堰支

与水平位移发展类似,在工况 4 阶段之前,坑底隆起发展迅速.工况 4 阶段,增长速率放缓,是因为第 1 道支撑抑制了土体的水平变形,土体向围堰内部挤压趋势减弱,导致底部竖直向上的应力增长趋势减缓,进而竖向变形趋势减弱.工况 5 阶段和工况 6 阶段完成的第 2 道支撑与第 1 道支撑共同抑制土体的水平变形,土体向围堰内部挤压趋势继续减弱,竖向变形增长更加缓慢.工况 8 阶段,围堰内部所有水已排出,土体的最大隆起为 2.73 mm,增加 5%,此时共有 3 道支撑共同抑制土体的水平变形,进而将竖向变形控制在比较低的水平.工况 9 阶段,完成清淤工作.由于土的密度大于水的密度,坑底最大隆起位移增加趋势明显,清淤后河床土体释放的竖向应力大于降水阶段释放的应力,导致竖向变形增加较大.工况 10 阶段,封底混凝土浇筑完成,最大隆起位移相比工况 9 降低 37.6%.

工况 9 和工况 10 的坑底隆起变形曲线见图 7.硬化后的封底混凝土与 3 道支撑共同抑制土体的水平变形,减小土体向内部的挤压;混凝土的自重以及与围堰侧壁的摩擦阻力同样抵消了土体向上的应力,因此竖向变形明显减小.

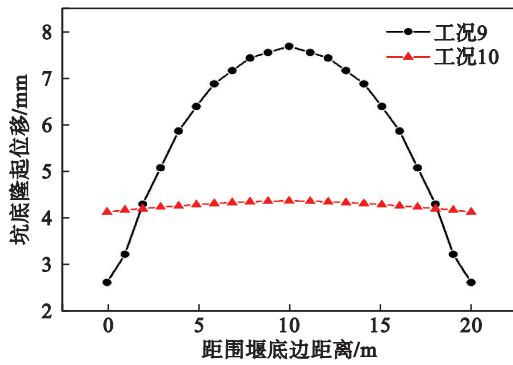


图 7 坑底隆起位移随工况变化曲线

Fig. 7 Curves of uplift displacement at the bottom of the pit under different working conditions

### 3.2 拉森钢板桩受力性能

拉森钢板桩是围堰的重要组成部分,分析钢板受力与变形有助于了解该新型围堰的受力特性.该模型施工工序为先降水后进行支撑,以第1道支撑为例,工况3阶段,架设第1道支撑完毕后,该支撑会在下一工况发挥作用,因此,可将工况3与工况4一起分析.同理,工况5与工况6、工况7与工况8也将一起分析.

模型 A1 各工况下,拉森钢板的变形曲线如

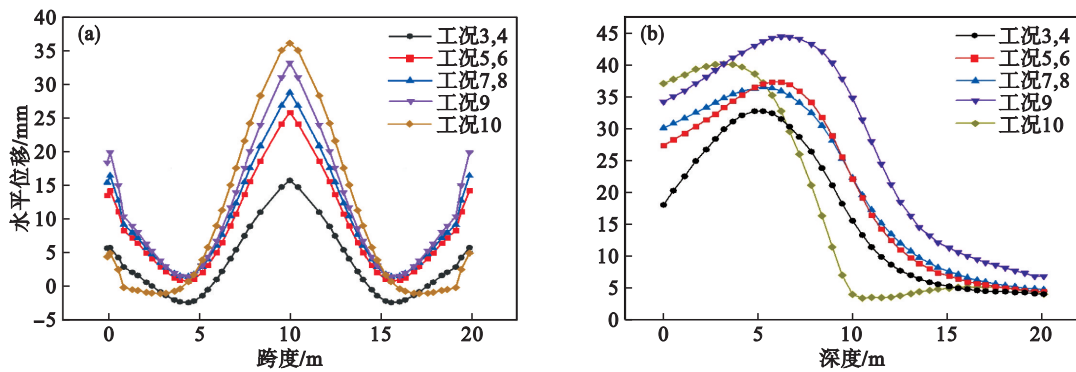


图 8 各工况下钢板变形曲线

Fig. 8 Deformation curves of steel plates under different working conditions

(a)—钢板沿跨度变形曲线; (b)—钢板沿深度变形曲线.

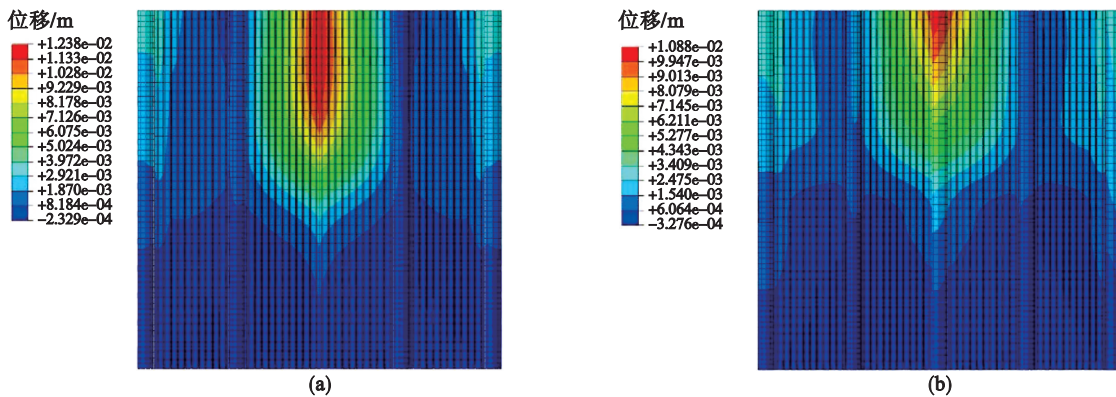


图 9 钢管桩以及钢板桩沿深度位移变化云图

Fig. 9 Displacement nephogram of steel-tubular pile and steel-sheet pile along depth

(a)—模型 A2; (b)—模型 A3.

图 8 所示,钢板中部在 y 方向的变形趋势沿跨度先减小后增大,沿深度先增大后减小.

在图 8b 中,随施工进行,钢板桩各处位移逐渐增大.工况 5,6 阶段,第 2 道支撑架设完毕,围堰内部水位下降到 2 m 深,此时钢板桩位移增长速率较大,但位移值总体处于一个比较低的水平.工况 7,8 阶段,围堰内部水全部排出,钢板最大水平位移增加 11.4%,竖向最大位移降低 2.8%.在 3 道支撑的作用下,钢板的变形趋势明显降低,说明 3 道支撑可以有效地抑制变形的发展.工况 9 阶段由于清淤至深 12.0 m,外部会产生额外的土压力作用在钢板上,变形速率较大.工况 10 阶段,封底混凝土浇筑完毕,此时封底混凝土与围堰结构形成统一整体,其作用可以看作第 4 道支撑,大幅抑制了变形的发展.

对于模型 A2 和 A3,由于各构件变形协调,故围堰的最大变形只选取拉森钢板以及钢管桩进行分析.工况 7 阶段拉森钢板桩以及钢管桩在 y 方向沿深度位移变化云图见图 9,沿深度位移变化曲线见图 10.

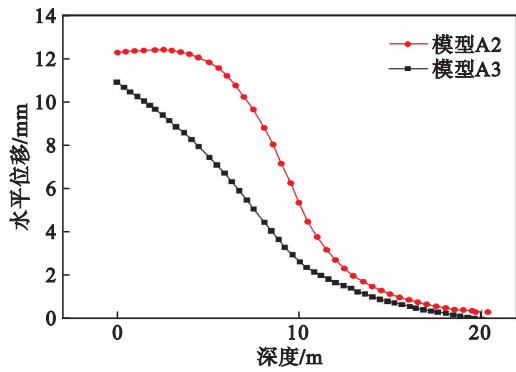


图 10 钢管桩以及钢板桩沿深度位移变化曲线  
Fig. 10 Displacement curves of steel-tubular pile and steel-sheet pile along depth

围堰的变形主要集中在跨中以及拐角处,变形分布状况与模型 A1 相比发生改变,位移最大值位于桩顶,分别为 12.38 和 10.88 mm,相较于采用模型 A1,最大位移减小 10.8% 和 20.8%。在跨中设置 1 根钢管桩,位移较大的区域明显缩小,且集中在跨中 2 根钢管桩之间,与跨中未设置钢管桩的模型 A2 相比,最大位移降低 11.2%。

随着工况的进行,钢板的受力状况发生改变,3 道支撑尤其是封底混凝土对抑制变形的发展最为有效。虽然施工工序为先降水、后架设支撑,变形和应力是各工况累积的,但并非下一工况的变形一定比上一工况的变形大,如果围堰内部没有设置支撑,则随着工序进行,围堰的整体变形会累积,当设置第 1 道支撑后,支撑以上的围堰仍然符合严格意义上的变形累积,但支撑以下的围堰的变形趋势发生改变,因此当支撑越来越

多时,就会出现在某一位置下一工况的变形比上一工况的变形小的情况。

钢板桩最大应力随施工工况变化曲线如图 11 所示,架设支撑前后,应力变化速率明显。同时,封底混凝土相当于围堰的第 4 道支撑,且分担的钢板应力相较于前 3 道支撑更大。拉森钢板所用钢为 Q355,屈服强度为 355 MPa,荷载分项系数为 1.35,则拉森钢板材料强度设计值为 263 MPa。各施工工况中,钢板最大应力为 167.70 MPa,低于钢板桩的强度设计值。

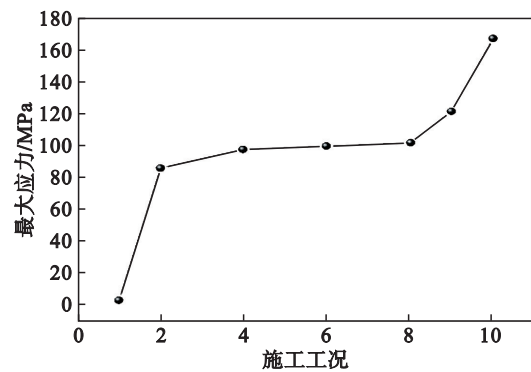


图 11 钢板桩最大应力随施工工况变化曲线  
Fig. 11 Maximum stress of steel-sheet pile under different working conditions

模型 A2 与模型 A3 的应力云图见图 12。应力最大的区域为跨中 2 根钢管桩之间,且模型 A3 应力分布较模型 A2 更为均匀,模型 A2 与 A3 应力最大值分别为 78.53 和 75.96 MPa。相较于模型 A1 最大应力分别增加 17.9% 和 14.0%。

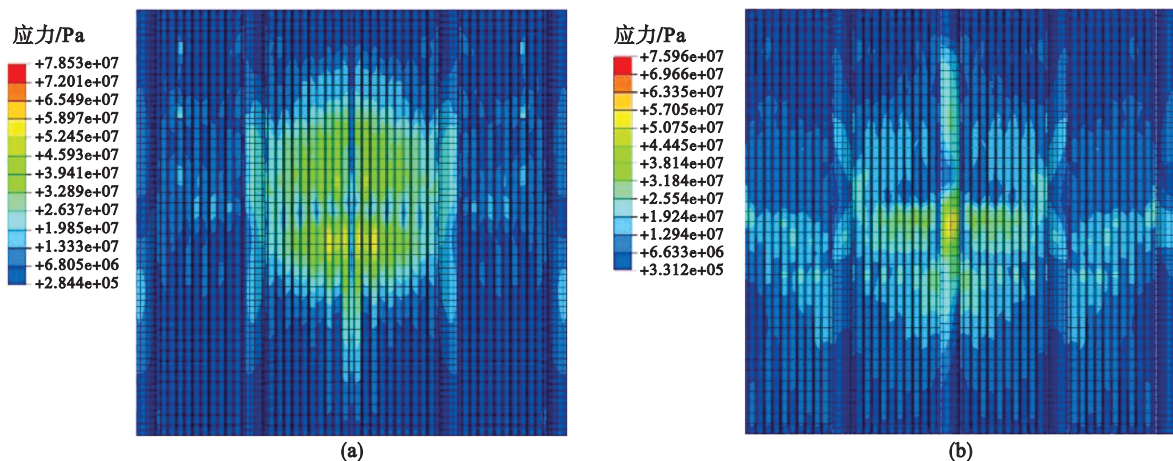


图 12 钢管桩和钢板桩应力云图  
Fig. 12 Stress nephogram of steel-tubular pile and steel-sheet pile  
(a)—模型 A2; (b)—模型 A3。

### 3.3 围堰受力性能

支撑能够减缓应力的发展趋势,抑制钢板变形的发生,因此有必要分析支撑中围堰的受力变

形,这样才能确保围堰整体的稳定。第 1 道围堰在工况 3 中激活,从工况 4 开始发挥作用,因此从工况 3,4 阶段开始分析围堰的受力与变形。模型 A1

围堰变形随施工工况变化曲线见图 13.

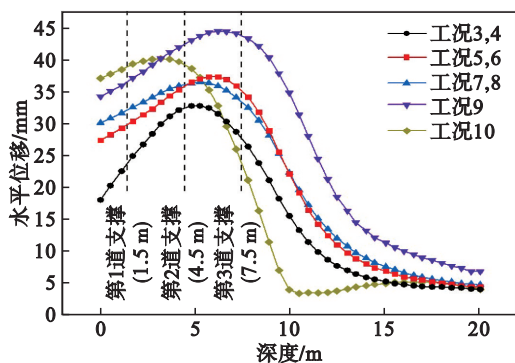


图 13 不同工况下围堰变形随深度变化曲线

Fig. 13 Purlin deformation along depth under different working conditions

各施工工况中除了清淤阶段,其余各阶段围堰在 $y$ 方向的最大变形始终出现在第2道围堰上.主要是因为除了工况9阶段,第2道支撑所处的深度对应的钢板位移始终大于其余2道支撑所对应的钢板位移,在工况9阶段所对应的曲线上,第3道支撑所在深度对应的钢板位移大于第2道和第1道支撑所在深度对应的钢板位移,故在这一工况中,第3道围堰变形最大.

围堰在产生变形的同时必然会产生应力,当应力超过屈服强度时会导致钢板局部产生屈服,外荷载继续增大,应变明显增加,当超过钢板的抗

拉强度时,会引起整个围堰的破坏.分析围堰应力的分布及随工况的变化趋势可避免围堰发生破坏,并在后续对围堰结构以及施工工况进行优化.

不同施工工况下围堰应力云图见图 14.从图 14中可以看出,围堰应力主要集中于围堰与钢管支撑接触位置,同时围堰连接件处的应力相较于周围区域也比较大.随着围堰数量的增加,最大应力也逐渐增大,但是其增长速度则明显减小.

工况 5,6 阶段第 1 道围堰应力最大值较上一阶段增加 120.4%,此时降水至 8 m,原来的受力平衡被打破,释放的应力由钢板桩传递到围堰,由此造成围堰应力激增.2 道围堰同时工作,与钢板桩接触的围堰分担了钢板桩的应力,能够有效抑制钢板桩应力的发展.工况 7,8 阶段,围堰内部水全部排出,3 道围堰受力均匀,第 2 道围堰和第 3 道围堰受力状况也有所减小.工况 9 阶段,清淤后围堰外部会产生额外的土压力,导致坑底周边的围堰结构产生变形,因此应力较大的区域下移,使最大应力位置出现在第 3 道围堰上,此时 3 道支撑共同发挥作用,应力变化较均匀.工况 10 的 3 道围堰受力均匀且相较于上一阶段分别降低 44.6%, 52.5% 和 47.1%,封底混凝土能够有效降低围堰的应力,改善围堰的受力状况.

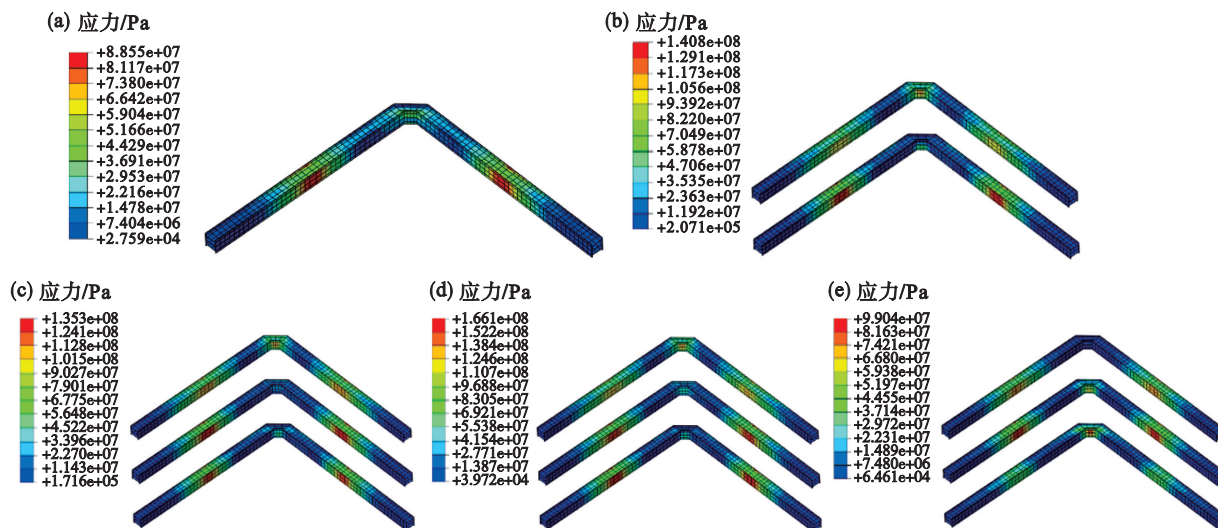


图 14 不同施工工况下围堰应力云图

Fig. 14 Stress nephogram of purlin under different working conditions

(a)—工况 3,4; (b)—工况 5,6; (c)—工况 7,8; (d)—工况 9; (e)—工况 10.

### 3.4 钢管支撑受力性能

钢管支撑用于抵抗围堰结构的变形,是围堰的重要组成部分.本模型中钢管支撑形式采用对口撑,分析钢管支撑的受力和变形,有助于了解

围堰整体的受力特性,确保围堰结构的安全稳定.围堰属于完全对称结构,在 $x$ 方向和 $y$ 方向一致,选取支撑在 $y$ 方向的变形进行分析,模型 A1 不同施工工况下钢管支撑变形云图见图 15.

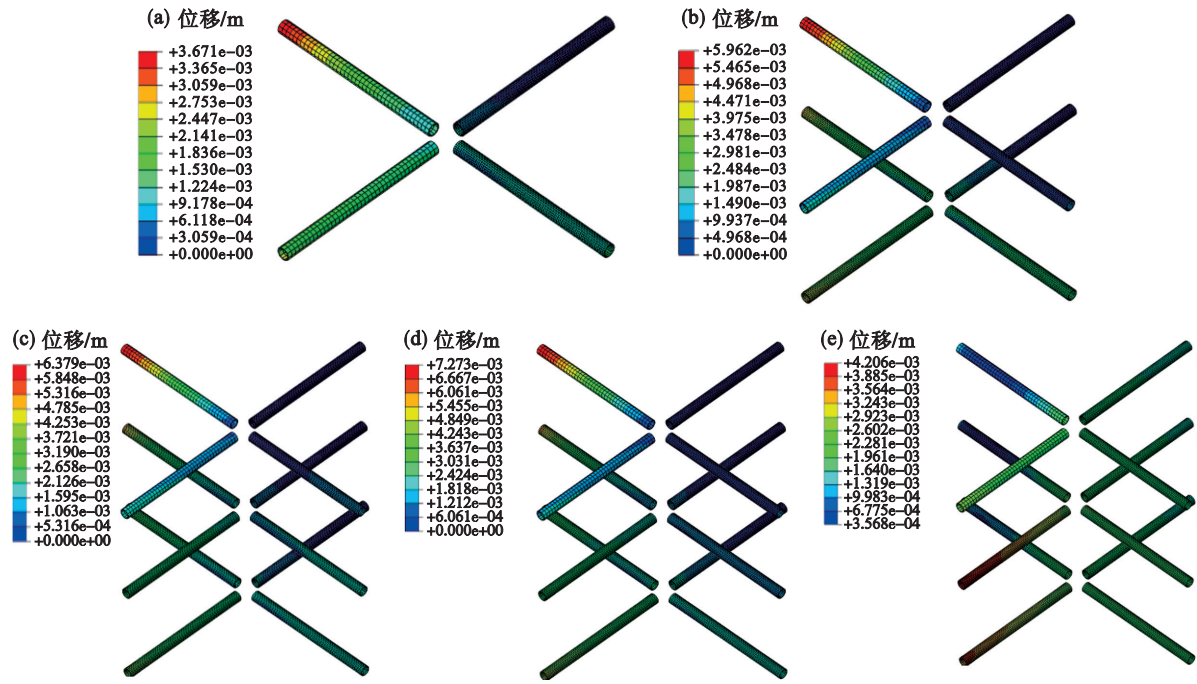


图15 不同施工工况下钢管支撑变形云图

Fig. 15 Deformation nephogram of steel-tubular support under different working conditions

(a)—工况3,4; (b)—工况5,6; (c)—工况7,8; (d)—工况9; (e)—工况10.

钢管支撑较大变形的区域主要集中在与围堰接触的位置附近.工况3,4阶段,第1道支撑开始发挥作用.工况5,6阶段,2道支撑共同抵抗结构的变形,在跨度方向的最大变形为5.96 mm,位于第1道钢管支撑,相较于上一工况变形增加62.4%.工况7,8阶段,3道支撑共同抵抗结构的变形,在y方向的最大变形为6.38 mm,位于第1道钢管支撑,第2道钢管支撑的最大变形为5.00 mm,相较于上一工况分别增加7.0%和8.0%.工况9阶段,在y方向的最大变形为7.27 mm,3道钢管支撑变形相较于上一工况分别增加13.9%,15.4%和26.5%.工况10阶段,在y方向的最大变形为4.21 mm,3道钢管支撑变形相较于上一工况分别降低42.1%,58.7%和28.3%.可见由于围堰内部封底混凝土的浇筑,结构整体性大大提高,使最大位移下降.

钢管支撑在y方向的最大变形出现在工况9阶段,为7.27 mm.主要是因为围堰内一部分土压力消失,对拉森钢板的约束作用减小,在支撑数量不增加的情况下,坑底与第3道支撑之间的距离增大,围堰在这一阶段发生的变形也会随之增大,因此钢管支撑的最大位移发生在该阶段.

各施工阶段中,钢管支撑最大竖向变形分别为4.81,7.71,2.87,6.77,6.81 mm.根据《钢结构设计标准》(GB50017—2017)规定,钢构件的位移容许值不允许超过构件长度的1/400.模型A1中钢管支撑的长度为4.15 m,位移容许值为10.38 mm,

模拟结果符合规范要求.

钢管支撑的受力情况对于围堰结构的整体安全稳定性起着关键作用.如果钢管支撑发生屈服甚至达到极限强度,围堰的变形会迅速增大,整个围堰失稳.不同施工工况下钢管支撑应力云图见图16.

工况3,4阶段钢管支撑的最大应力为86.54 MPa,位于钢管支撑与支撑连接件相连处.工况5,6阶段,钢管支撑的最大应力增加78.2%,位于第2道钢管支撑与支撑连接件相连处,较上一阶段,第2道钢管支撑的最大应力降低33.6%.工况7,8阶段,钢管支撑的最大应力出现在第3道支撑与支撑连接件连接处,并相较于上一阶段降低12.2%;第2道钢管支撑的最大应力降低27.7%;第1道钢管支撑的最大应力增加14.2%.工况9阶段,钢管支撑的最大应力位置不变,并相较上一阶段增加25.8%,第2道钢管支撑的最大应力降低6.0%,第1道钢管支撑最大应力增加4.4%.工况10阶段,钢管支撑的最大应力为96.13 MPa,最大应力相较于上一阶段降低43.6%,位于第2道钢管支撑与支撑连接件相连处;第3道钢管支撑的最大应力为77.79 MPa,降低了54.3%;第1道钢管支撑的最大应力为61.19 MPa,降低了10.7%.

由以上分析可知,各阶段最大应力均出现在钢管支撑与支撑连接件连接处,对支撑连接件单独分析,其应力分布状况随工况变化云图见图17.

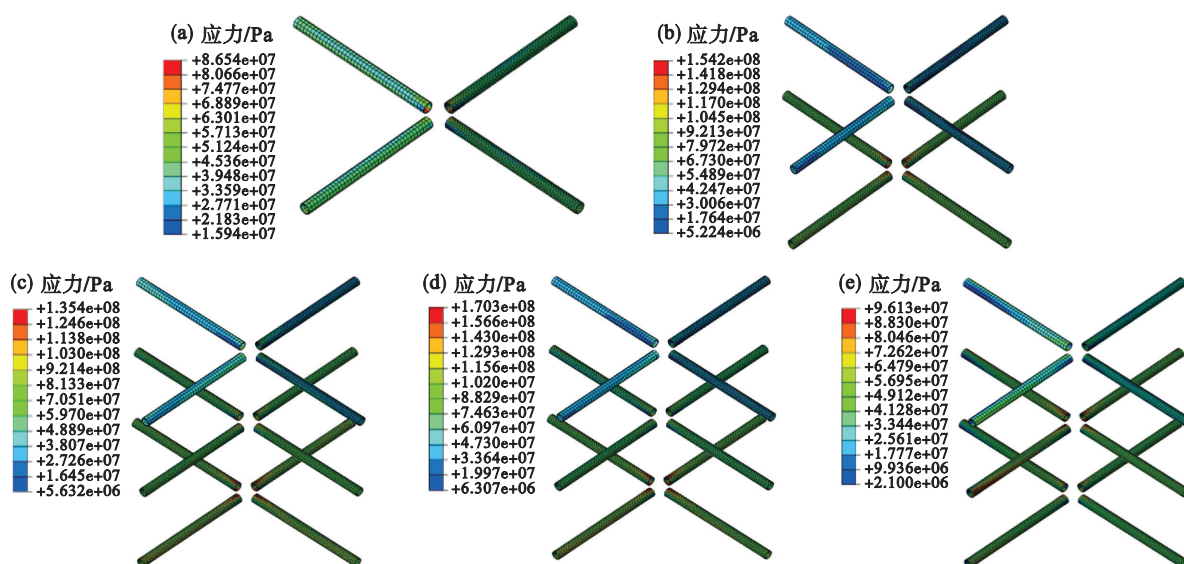


图 16 不同施工工况下钢管支撑应力云图

Fig. 16 Stress nephogram of steel-tubular support under different working conditions

(a)—工况 3,4; (b)—工况 5,6; (c)—工况 7,8; (d)—工况 9; (e)—工况 10.

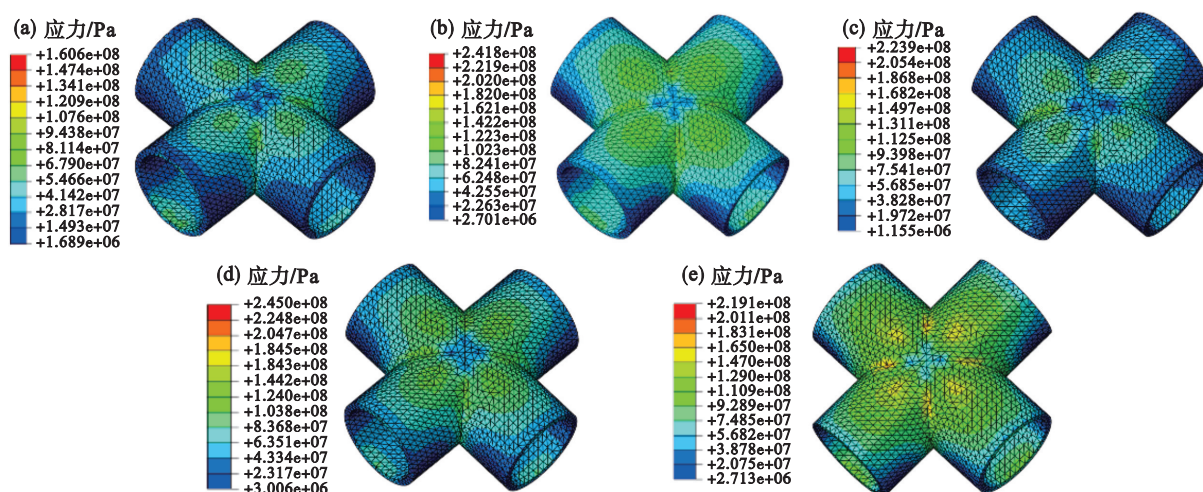


图 17 不同施工工况下支撑连接件应力云图

Fig. 17 Stress nephogram of supporting connectors under different working conditions

(a)—工况 3,4; (b)—工况 5,6; (c)—工况 7,8; (d)—工况 9; (e)—工况 10.

支撑连接件最大应力出现在工况 9 阶段,为 245 MPa, 低于强度的设计值 263 MPa. 支撑连接件应力普遍较大, 主要是因为该处有 4 根钢管支撑连接, 容易发生应力集中.

### 3.5 钢管桩受力性能

本文模型中在转角处各设置了 1 根钢管桩, 用于连接两侧的拉森钢板桩, 钢管桩受力与变形直接关系到围堰整体的稳定. 各工况下钢管桩在  $y$  方向的变形以及总应力云图见图 18 和图 19.

随施工工况的进行, 钢管桩的变形主要集中在钢管桩的中上部, 最大位移为 21.00 mm, 根据《钢结构设计标准》(GB50017—2017) 规定, 钢构件的位移容许值不允许超过构件长度的 1/400,

即不允许超过 50 mm, 模拟结果满足规范要求. 应力较大的区域整体呈下移的趋势, 最大应力出现在工况 5,6 阶段, 为 22.51 MPa, 远小于强度设计值 263 MPa.

### 3.6 封底混凝土受力性能

封底混凝土变形和应力云图见图 20 和图 21. 与钢管桩接触的位置以及完整混凝土的中心位置变形较大, 变形最大值为 4.43 mm, 在  $y$  方向的变形最大值为 1.51 mm, 混凝土的应力最大值为 27.01 MPa, 应力与变形都处于比较低的水平. 硬化后的封底混凝土可以理解为围堰的第 4 道支撑, 与前 3 道支撑一起抵抗围堰的变形, 改善受力状况.

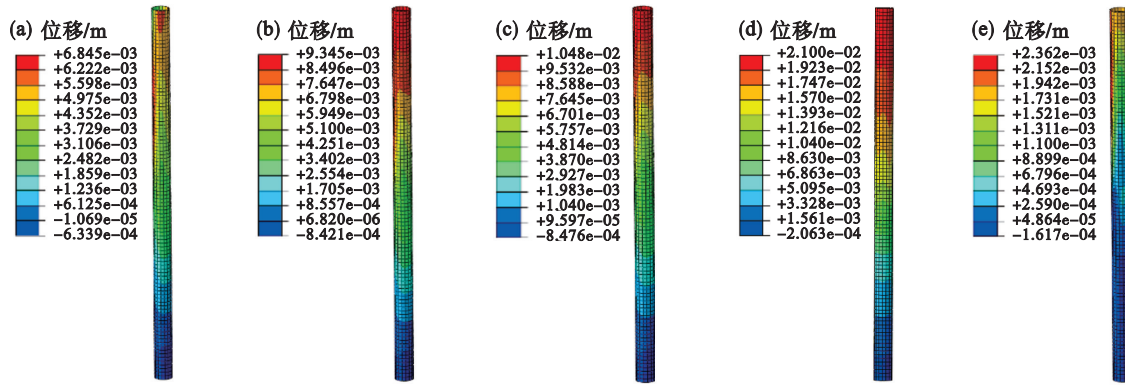


图 18 不同施工工况下钢管桩变形云图

Fig. 18 Deformation nephogram of steel-tubular pile under different working conditions

(a)一工况 3,4; (b)一工况 5,6; (c)一工况 7,8; (d)一工况 9; (e)一工况 10.

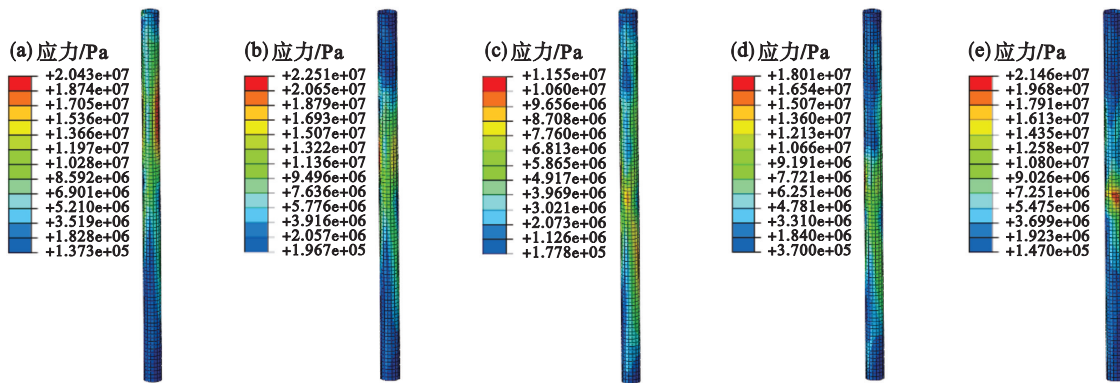


图 19 不同施工工况下钢管桩应力云图

Fig. 19 Stress nephogram of steel-tubular pile under different working conditions

(a)一工况 3,4; (b)一工况 5,6; (c)一工况 7,8; (d)一工况 9; (e)一工况 10.

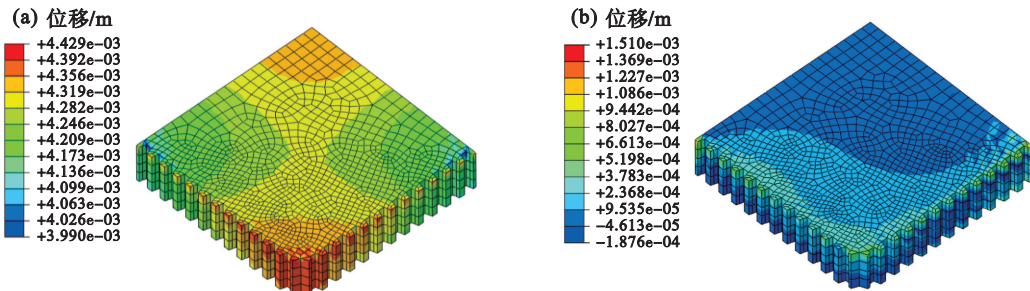


图 20 封底混凝土变形云图

Fig. 20 Deformation nephogram of the bottom sealing concrete

(a)一总变形量; (b)一在y方向的变形.

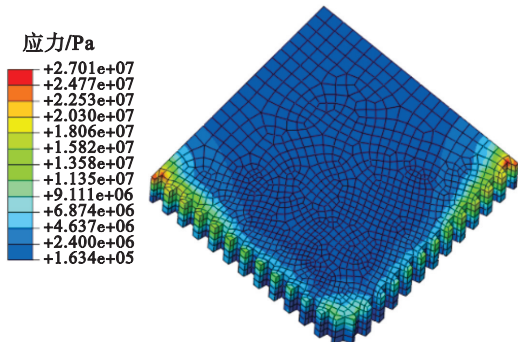


图 21 封底混凝土应力云图

Fig. 21 Stress nephogram of the bottom sealing concrete

### 4 结 论

1) 围堰支撑以及封底混凝土能够有效抑制河床土体的变形. 土体最大水平和竖向变形集中在抽水初始阶段和清淤阶段, 分别占最大变形的 89.9% 和 65.2%, 变形较为剧烈, 在围堰施工过程中需加强对降水及清淤阶段的监测.

2) 结构各构件最大位移、最大竖向变形和最大应力分别位于拉森钢板桩、钢管支撑以及支撑连接件, 因此需重视节点连接处的施工.

3) 在每一侧拉森钢板增加钢管桩数量可以降低结构变形,相较于模型 A1,增加 2 根和 3 根钢管可使最大位移减小 10.8% 和 20.8%,最大应力也满足材料设计强度要求.相较于在角部设置钢管桩,在结构中部设置钢管桩的模型 A2, A3 对结构变形降低幅度较小,因此设计时可优先考虑在角部设置钢管桩,在角部钢管桩无法满足设计要求时可以考虑在中部设置钢管桩以继续提高结构性能,经济高效地完成承载目标.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Sadeghi K, Sofy S, Baiz Z. Application of sheet piles in onshore and marine structure[J]. *Asian Journal of Natural & Applied Sciences*, 2018, 7(1): 10-18.
- [ 2 ] Li P, Sun X F, Chen J J, et al. Effects of new construction technology on performance of ultralong steel sheet pile cofferdams under tidal action [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2021, 27(6): 561-571.
- [ 3 ] Xu F, Li S C, Zhang Q Q, et al. Analysis and design implications on stability of cofferdam subjected to water wave action [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2016, 34(2): 181-187.
- [ 4 ] Wang J F, Xiang H W, Yan J G. Numerical simulation of steel sheet pile support structures in foundation pit excavation [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2019, 19(4): 05019002.
- [ 5 ] Jiang Y, Guo F, Wang W L, et al. Stability study of a double-row steel sheet pile cofferdam structure on soft ground[J]. *Water*, 2023, 15(14): 2643.
- [ 6 ] Qian J C, Zhang J. Monitoring and analysis of horizontal displacement of a single-rowed steel sheet pile cofferdam [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2020, 34(2): 261-264.
- [ 7 ] 张玉成, 杨光华, 姜燕, 等. 软土地区双排钢板桩围堰支护结构的应用及探讨[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(sup1): 659-665.  
(Zhang Yu-cheng, Yang Guang-hua, Jiang Yan, et al. Application and discussion of double-row steel sheet pile cofferdam supporting structure in soft soil area[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34 (sup1): 659-665.)
- [ 8 ] 贺文波. 高深水区钢板桩围堰逆作法施工技术研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2018, 40(3): 59-64.  
(He Wen-bo. Reverse construction technology for steel-sheet-pile cofferdam in high-water area [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2018, 40 (3): 59-64.)
- [ 9 ] Fang M S, Yu L Z, Tan Y. Methods used to construct underwater pile caps on the Hong Kong—Zhuhai—Macao Bridge[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering*, 2021, 174(1): 3-12.
- [ 10 ] He M, Xu Q B, Chen S X. Design and practice of underwater steel pipe pile cofferdam [J]. *Science Discovery*, 2022, 10 (2): 41-47.
- [ 11 ] Wu J, Zhou Z F, Xia W J, et al. A novel excavation and construction method for an extra-long underwater tunnel in soft soils [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021 (1): 6184411.
- [ 12 ] Zhu Y, Li X J, Shi Z M, et al. Dynamic behavior of double steel sheet pile cofferdam under different wave actions[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 861(7): 072019.
- [ 13 ] Ye J B, He X L. Response of dual-row retaining pile walls under surcharge load [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, 29(11): 1614-1625.
- [ 14 ] Ti Z L, Qin S Q, Li Y L, et al. Extreme wave monitoring and in situ wave pressure measurement for the cofferdam construction of the pingtan strait bridge [C]// Structures Congress. Denver, 2017: 629-642.
- [ 15 ] Park M C, Lee J S, Kim D, et al. Small-scaled laboratory experiments for dynamic stability monitoring of large circular steel pipe cofferdam of marine bridge foundation [J]. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 2019, 35 (12): 123-134.
- [ 16 ] 魏鹏飞, 刘杰. 软土地基深基础组合结构支护技术研究 [J]. *公路*, 2019, 64(1): 136-140.  
(Wei Peng-fei, Liu Jie. Study on supporting technology of deep foundation composite structure in soft soil foundation [J]. *Highway*, 2019, 64 (1): 136-140.)