

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0116

姜露露, 曹邱林, 李贝. 泵站工程结构布置方案比选分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 202-208. JIANG L L, CAO Q L, LI B. Comparison of structural arrangement schemes of pumping station project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 202-208. (in Chinese)

泵站工程结构布置方案比选分析

姜露露¹, 曹邱林¹, 李 贝²

(1. 扬州大学 水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 南京市滁河河道管理处, 南京 210000)

摘要: 刘山北站在改造时有三种结构布置型式, 即主站身与虹吸式出水流道分开布置、主站身与平直管出水流道整体布置以及主站身与虹吸式出水流道整体布置, 每种方案都有各自的优缺点。对各方案进行比选研究并选择最优方案是该泵站工程在设计中的一项重要工作。首先对刘山北站的三种结构布置方案进行初步比选, 然后对不同工况下的三种方案进行三维有限元结构计算与分析, 分析比较不同方案的水平和竖直位移, 比较底板、闸墩、流道的应力状态, 为刘山北站工程的结构布置方案比选提供理论依据。分析结果表明: 分离式底板与虹吸式流道结合方式布置的结构的位移、应力状态较好, 推荐设计时采用该方案。

关键词: 刘山北站; 方案比选; 有限元; 位移; 应力

中图分类号: TU991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0202-07

Comparison of structural arrangement schemes of pumping station project

JIANG Lulu¹, CAO Qulin¹, LI Bei²

(1. College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Nanjing Chuhe River Management Bureau, Nanjing 210000, China)

Abstract: There are three structural arrangement schemes in the reconstruction of Liushan North Pumping Station: separate arrangement of the main body and the siphon outlet passage, integrated arrangement of the main body and the straight pipe outlet passage, and integrated arrangement of the main body and the siphon outlet passage. Each scheme has its own advantages and disadvantages. Comparing the schemes and selecting the optimal one is an important work in the design of the pumping station. In this paper, we first compared the three structural arrangement schemes of Liushan North Pumping Station, then conducted three dimensional finite element structural calculation and analysis of the three schemes under different working conditions. We compared the horizontal and vertical displacement and the stress states of the floor, gate pier, and flow channel in different schemes, so as to provide a theoretical basis for the selection of a structural arrangement scheme of Liushan North Pumping Station. The results showed that separate arrangement of the floor and siphon passage would present satisfactory displacement and stress state, so we recommend this scheme for the design.

Key words: Liushan North Pumping Station; scheme comparison; finite element; displacement; stress

刘山北站多年来在抗御洪、涝、旱等自然灾害, 保障人民生命财产安全, 改善农业生产条件, 促进农业的增产丰收, 改善生态环境及城镇防洪、农村经济等起到了重要作用, 取得了重大经济社会效益和生

态环境效益, 但是经过多年的运行后, 存在严重的安全隐患, 难以发挥其效益, 必须对其进行改造。在刘山北站可研报告中, 从工程量、施工复杂程度、工程投资、效率等方面已经对进水流道、底板型式、出水

收稿日期: 2017-12-12 修回日期: 2018-03-26 网络出版时间: 2018-04-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180411.1403.001.html>

作者简介: 姜露露(1993-), 女, 江苏淮安人, 主要从事水工结构工程研究。E-mail: 1968893157@qq.com

通讯作者: 曹邱林(1965-), 男, 江苏南通人, 副教授, 博士, 主要从事水工结构工程教学与研究。E-mail: cqlysh@163.com

流道、水泵型号等不同的选择方案进行了初步比选,但没有从结构方面进行考虑。本文则采用 ABAQUS 三维有限元^[13] 软件对刘山北站几种结构布置型式在不同工况下的结构进行计算^[45], 分析比较不同方案在各工况下的位移、应力^[6] 状态, 从而从结构方面选择最优方案。

1 工程概况

刘山北站建于 1984 年, 设计流量 $50 \text{ m}^3/\text{s}$, 位于邳州市宿羊山境内京杭运河北岸, 是江苏省江水北调第七级泵站, 除翻水灌溉、保证航运外, 还兼具排除车辐山洼地 53.1 km^2 涝水的功能。2013 年 8 月 20 日, 江苏省水利厅在南京组织召开刘山北站安全鉴定会议, 评定刘山北站的安全类别: 建筑物为四类建筑物、机电设备为四类设备, 金属结构评定为四类设备, 综合评定刘山北站安全类别为四类泵站。受地形条件及现有建筑物的限制, 在满足刘山北站功能的前提下, 刘山北站只能在原址拆除重建。主要由进水涵洞、排涝闸、清污机桥、前池、主泵房、检

修间、控制室、出水池等部分组成。下游为正向进水, 上游为正向出水, 上下游连接段采用直墙连接。主泵房两侧分别设检修间和控制室, 主泵房长 29.3 m , 宽 10.5 m , 检修间长 5.7 m , 宽为 10.5 m , 控制室长 22.0 m , 宽 13.0 m 。泵站设计流量 $48.3 \text{ m}^3/\text{s}$, 站室安装 5 台 1800ZLQ 立式轴流泵机组, 配套 TL900-28 型高压电机 5 台套, 单机功率 900 kW , 总装机容量 4500 kW 。

2 方案初步比选

刘山北站建筑物结构型式比选方案主要有以下三种, 具体情况见表 1, 布置图见图 1。

表 1 刘山北站结构布置型式比选方案

Tab. 1 Structural arrangement schemes of Liushan North Pumping Station

方案	底板型式	出水流道型式	断流方式
方案一	分离式	倒虹吸式	真空破坏阀
方案二	整体式	平直管	快速闸门或拍门
方案三	整体式	倒虹吸式	真空破坏阀

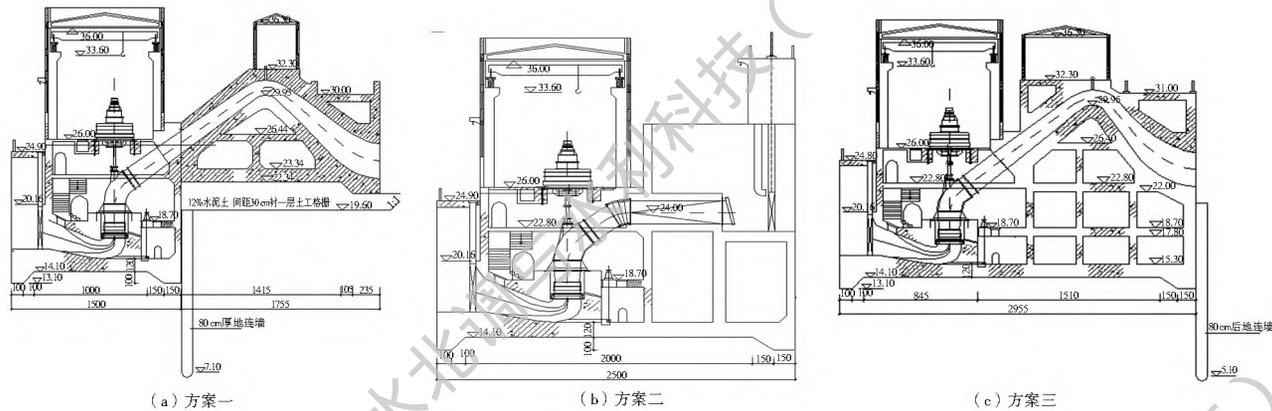


图 1 各方案布置图

Fig. 1 Arrangement plan of each scheme

方案一的优点是采用分离式底板^[7], 可以减少工程投资, 虹吸式出水流道^[8] 可靠性高, 设备运行简单, 管理运行方便, 装置效率相对较高。缺点是站身底板和流道分开布置易出现不均匀沉降, 并且虹吸式流道工程投资大, 施工复杂。

方案二的优点是采用整体式底板^[9] 可以避免站身和流道之间出现不均匀沉降, 布置也比较紧凑, 直管式流道施工简单, 工程投资较小。缺点是整体式底板工程投资较大, 采用直管式流道水头损失较大, 装置效率较低。

方案三结合了方案一虹吸式管道和方案二整体式底板的优点, 但同样存在整体式底板工程投资较大、虹吸式流道施工复杂等缺点。

三个方案都存在一定的利弊问题, 但是对三种

方案的应力、位移情况的比较, 还需要进一步分析研究^[10]。

3 结构位移、应力分析

为了对三种不同结构布置方案的应力、位移有一个更加全面的了解, 从结构方面分析各方案的利弊从而选择最优方案, 现对刘山北站三种结构布置进行 ABAQUS 三维有限元分析^[11-13]。

3.1 计算模型

刘山北站各构件除交通桥材料为 C50 混凝土外, 其余构件材料均为 C30, 地基材料为含砂壤土。为了较好地反映体系的相互作用^[14], 地基模型的计算范围要足够大^[15]。计算时取地基的长度、宽度为站身长、宽的 3 倍, 地基的高度为站身高度的 2

倍,底板与地基相互作用方式为接触^[16-17]。刘山北站结构采用线弹性材料模拟^[18-19],土体为弹性材料^[20],由于土体自重产生的变形已基本完成^[21],故计算中不计入土体自重引起的应变。划分网格时网格单元类型采用标准的四节点线性四面体减缩积分

单元^[22],最终三种方案站身和流道的网格模型见图 2。其中方案一单元总数为 429 738 个,结点总数为 293 079 个;方案二单元总数为 316 492 个,结点总数为 213 015 个;方案三单元总数为 268 496 个,结点总数为 399 073 个。

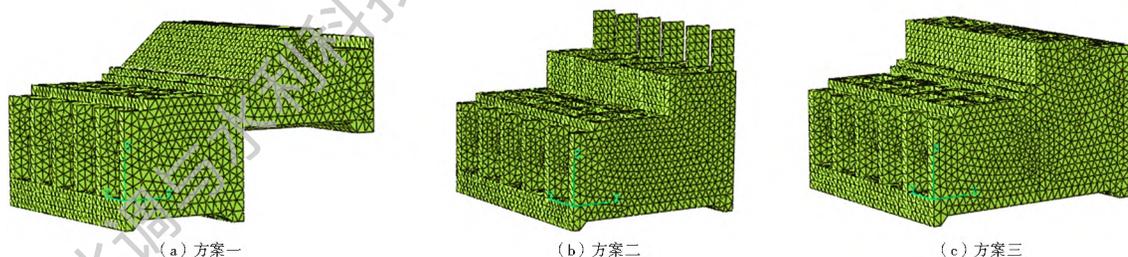


图 2 刘山北站结构布置图网格模型

Fig. 2 Grid model of structural arrangement schemes of Liushan North Pumping Station

3.2 基本荷载

模型施加的荷载主要包括固定荷载、回填土荷载、水荷载。

固定荷载主要是站身、流道等结构的自重;土荷载根据《水工建筑物荷载设计规范》(SL

744-2016)^[23]墙后水平土压力按主动土压力计算,边荷载按垂直土重计算;水荷载根据刘山北站可行性研究报告提供的情况进行加载,主要加载工况见表 2,计算水压力和扬压力(浮托力和渗透压力)。

表 2 水位组合表

Tab. 2 Water level combinations

工况	水位/m		备 注
	站上水位	站下水位	
工况一	22.7	27.30	排涝设计水位 站下水位按地面高程确定,站上为刘山闸上 10 年一遇洪水位
工况二	21.20	26.70	补水设计水位 站上为解台下最低通航水位与不牢河水通过设计流量时推算至站上的水位;站下水位为骆马湖北调控制水位推算至站下的水位
工况三	20.20	26.00	补水最低水位 上下游为保证率 95% 最低通航水位
工况四	23.20	27.00	补水最高水位 刘山北站全部开机运行,站下水位为骆马湖最高蓄水位
工况五	21.53	26.44	补水平均水位 刘山北站全部开机运行多年日平均水位
工况六	22.70	29.50	防洪设计水位 不牢河三十年一遇行洪水位
工况七	22.70	29.75	防洪校核水位 不牢河百年一遇行洪水位

3.3 计算结果

三种方案的模型均在 7 种工况下进行运行,根据计算结果对结构的位移、应力分别进行研究。

3.3.1 结构位移分析

分析各方案在不同工况下的位移云图,选取工

况七作为典型工况,

典型工况下的水平位移、竖直位移(沉降)云图见图 3、图 4。根据各方案不同工况下的位移云图,对结构水平位移、竖直位移以及沉降差进行统计,绘制出三种方案在 7 种工况下位移最大值的变化曲线并分析,具体见图 5。

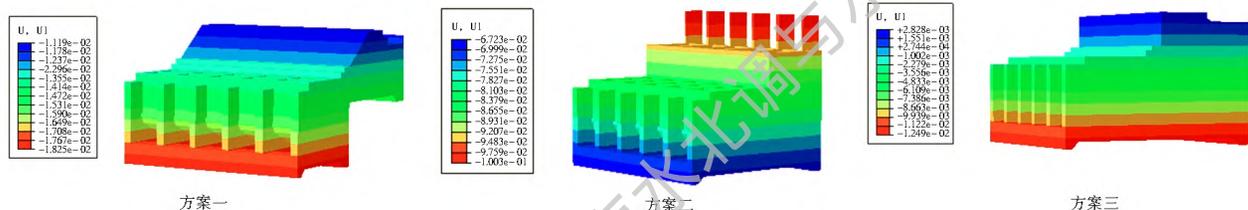


图 3 刘山北站水平位移分布云图(单位:m)

Fig. 3 Horizontal displacement distribution cloud map of the Liushan North Pumping Station (Unit: m)

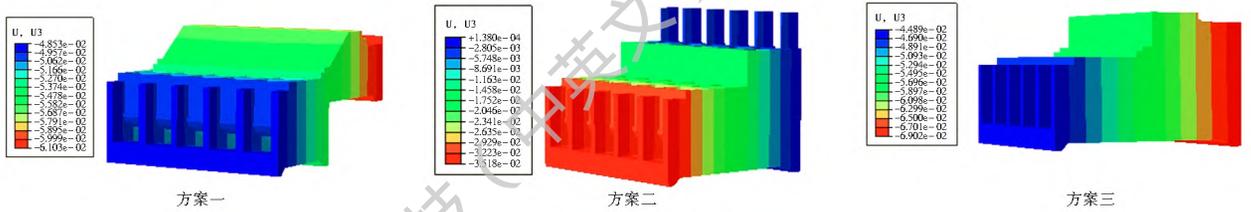


图4 刘山北站竖直位移(沉降)分布云图(单位: m)

Fig. 4 Vertical displacement (settlement) distribution cloud map of the Liushan North Pumping Station (Unit: m)

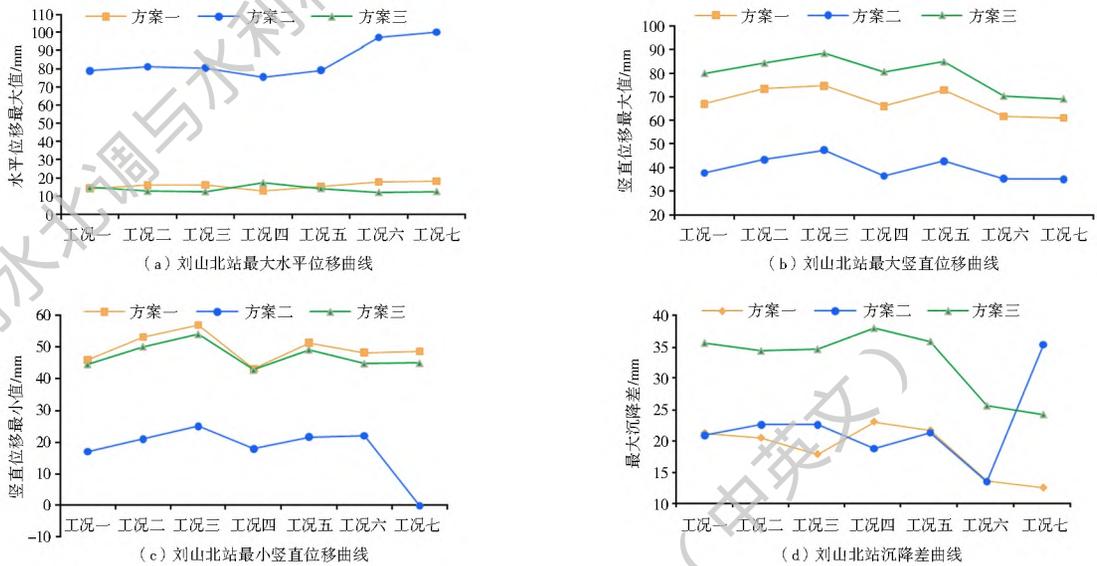


图5 刘山北站位移曲线

Fig. 5 Displacement curve of Liushan North Pumping Station

由图5可知,方案一的最大水平位移值为18.25 mm,最大沉降值为74.65 mm,未超过规范^[21]允许最大沉降值150 mm,满足要求。方案二的最大水平位移值为100.3 mm,最大沉降值为47.47 mm,未超过规范允许最大沉降值150 mm,满足要求。方案三的最大水平位移值为17.36 mm,最大沉降值为88.53 mm,未超过规范允许最大沉降值150 mm,满足要求。

由图5(a)可知,由于方案二的底板在顺水流方向上的长度以及流道段的高度比较小,因此方案二结构布置型式的固定荷载即结构自重较小,故方案二的水平位移最大,位移值基本维持在70~100 mm之间,最大值达到100.3 mm。方案一与方案三的水平位移在各工况下的值变化不大且均比方案二的值小,位移值基本在20 mm以内。

由图5(b)可知,同样由于自重的原因,方案二的沉降最大值相比较方案一、方案三而言较小。并且由

图可以看出,三种方案在7种工况下沉降值的变化趋势一样,因工况三的站下水位为最低水位20.20 m,引起的扬压力最小,导致沉降值为几种工况下最大,相反,工况四站下水位为最高水位23.20 m,沉降值最小。

结合图5(b)至5(d)可知方案二在各工况下的沉降值都最小。方案三的最大沉降值最大,最小沉降值与方案一基本一致,故方案三的沉降差值最大。方案二沉降差值的变化幅度较大,相对不稳定。

经分析比较,方案二在各工况下的沉降值最小,但水平位移值、沉降差变化值较大,方案一、方案三在各工况下的最大水平位移值都较小,且位移值变化幅度较小,结构较稳定。

3.3.2 结构应力分析

分析各方案在不同工况下的应力云图,选取工况七作为典型工况,典型工况下的主拉应力、主压应力云图见图6、图7。

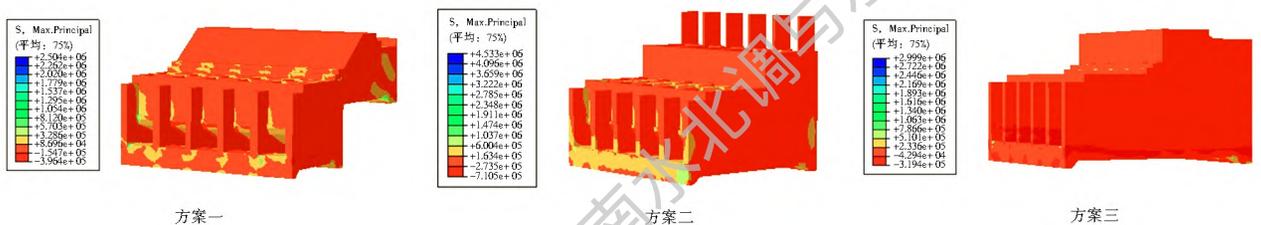


图6 刘山北站主拉应力分布云图(单位: Pa)

Fig. 6 Main tensile stress distribution cloud map of the Liushan North Pumping Station (Unit: Pa)

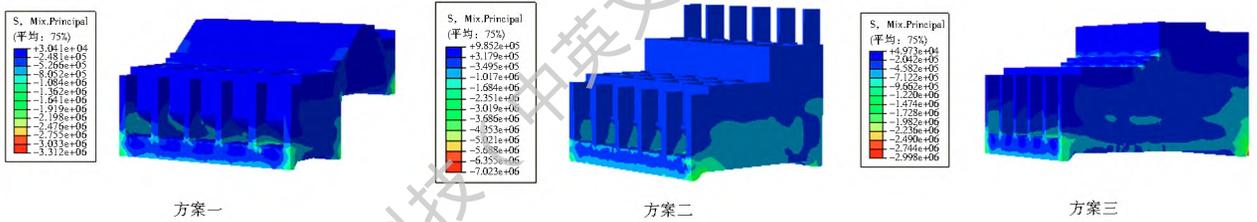


图 7 刘山北站主压应力分布云图(单位: Pa)

Fig. 7 Main compressive stress distribution cloud map of the Liushan North Pumping Station (Unit: Pa)

根据各方案不同工况下的应力云图, 对结构底板、闸墩、流道等构件的主拉应力、主压应力值进行

统计, 绘制出三种方案在 7 种工况下主拉应力、主压应力变化曲线并分析, 具体见图 8。

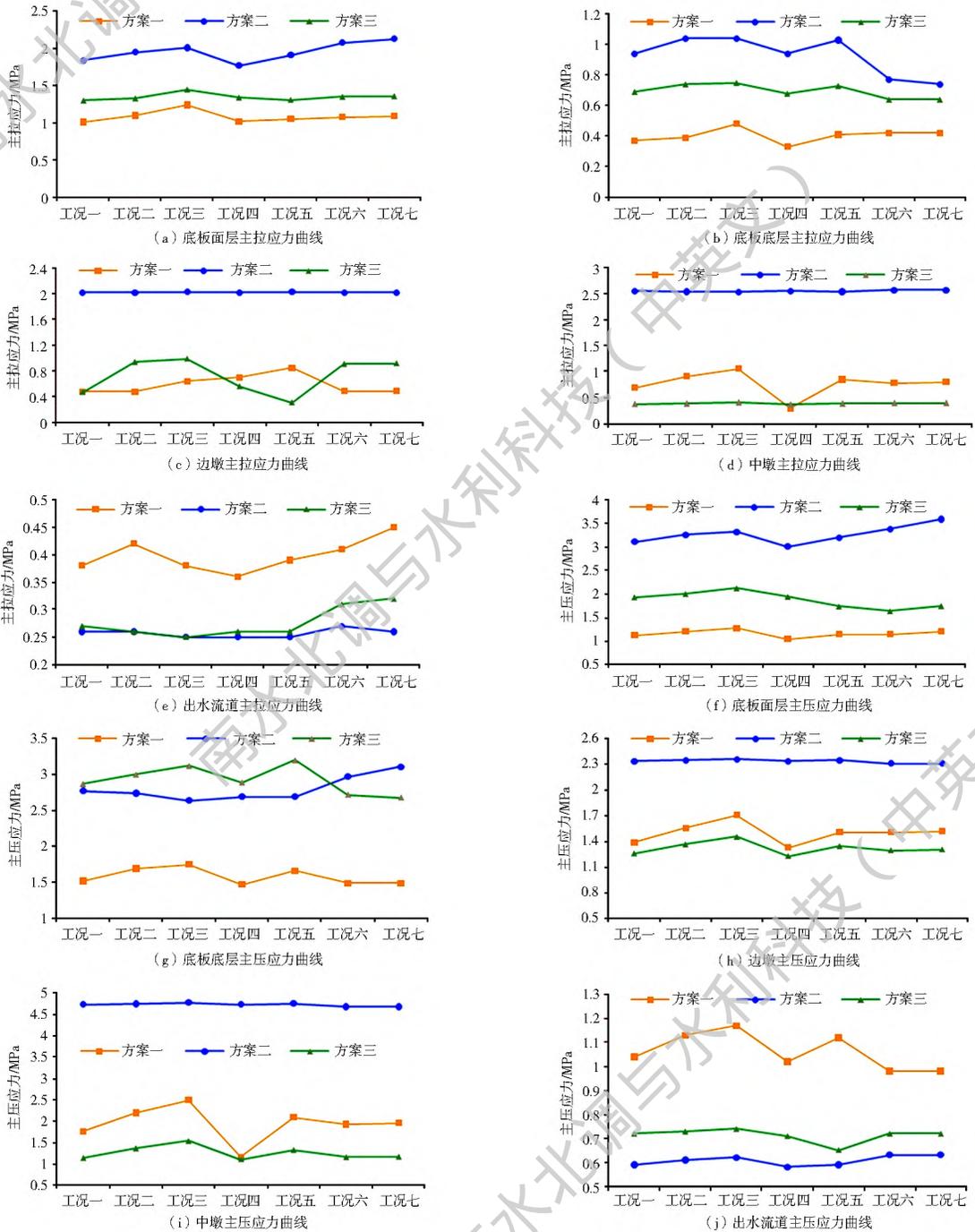


图 8 刘山北站应力曲线

Fig. 8 Stress curve of Liushan North Pumping Station

由图 8(a) 至图 8(e) 可知, 方案一各部件的最大主拉应力在底板面层处为 1.24 MPa, 在底板底层处为 0.48 MPa, 在边墩处为 0.85 MPa, 在中墩处为 1.06 MPa, 在流道处为 0.45 MPa; 方案二各部件的最大主拉应力在底板面层处为 2.13 MPa, 在底板底层处为 1.04 MPa, 在边墩处为 2.03 MPa, 在中墩处为 2.57 MPa, 在流道处为 0.27 MPa; 方案三各部件的最大主拉应力在底板面层处为 1.45 MPa, 在底板底层处为 0.75 MPa, 在边墩处为 0.99 MPa, 在中墩处为 0.41 MPa, 在流道处为 0.32 MPa。其中各方案的底板面层最大主拉应力值、边墩最大主拉应力值均超过了 C30 混凝土允许抗拉强度^[25], 方案二、方案三的底板底层最大主拉应力值、方案一、方案二的中墩最大主拉应力值也都超过了 C30 混凝土允许抗拉强度, 但各方案的流道主拉应力值均未超过材料允许值, 满足规范要求。

由图 8(a)、8(b) 可知, 三种方案的底板主拉应力均是方案二应力值最大, 方案三其次, 方案一最小, 且三种方案在 7 种工况下应力值变化趋势基本一致; 方案一的底板底层主拉应力值在 0.37~0.48 MPa, 未超过材料允许拉应力值, 满足规范要求, 而方案二、方案三底板底层主拉应力分别为 0.74~1.04 MPa、0.64~0.75 MPa, 均超过材料允许拉应力值; 三种方案底板面层主拉应力值均较大, 超出允许抗拉强度, 但可以通过配筋来提高底板面层结构承载力。

由图 8(c)、8(d) 可知, 方案二边墩、中墩的最大主拉应力值均超过 2.0 MPa, 比其他两种方案在各工况下的应力值都大, 三种方案 7 种工况下闸墩应力值除方案三中墩应力值在 0.37~0.41 MPa, 未超过允许值外, 其余情况下的应力值都较大, 超出允许抗拉强度, 但可以通过配筋来提高闸墩结构承载力。

由图 8(e) 可知, 方案一、方案三由于都采用虹吸式出水流道, 故两种方案的流道应力值在各工况下变化趋势一致, 而方案二、方案三的流道应力值接近, 均比方案一应力值小, 但方案一的流道应力值为 0.33~0.45 MPa, 未超过材料允许拉应力值, 满足规范要求。

结合以上分析, 方案一、方案三的主拉应力相对较小, 且分布较均匀。

由曲线图图 8(f) 至 8(j) 可知, 方案一各部件的最大主压应力发生在中墩处, 最大值为 2.50 MPa; 方案二各部件的最大主压应力发生在中墩处, 最大值为 4.78 MPa; 方案三各部件的最大主压应力发生在底板底层处, 最大值为 3.20 MPa。各方案各部件

在各工况下的最大主压应力值均未超过材料允许值, 满足规范要求。

由图 8(f)、8(h)、8(i) 可知, 方案二的底板面层主压应力为 3.01~3.59 MPa, 边墩主压应力为 2.31~2.36 MPa, 中墩主压应力为 4.68~4.78 MPa, 均比方案一、方案三相应部件在各工况下的应力值大, 且方案二应力值变化趋势相对稳定, 方案一、方案三应力变化趋势基本一致。

由图 8(g) 可知, 方案一底板底层的主压应力为 1.47~1.75 MPa, 小于方案二、方案三底板底层应力。由图 8(j) 可知, 方案一出水流道的主压应力最大, 方案三其次, 方案二流道应力值最小。

综上所述, 三种方案各部件在各工况下的最大主压应力值都较小且均未超过材料允许值, 满足规范要求。

4 结论

(1) 本文利用 ABAQUS 三维有限元软件对刘山北站的三种结构布置型式进行位移、应力计算, 可较全面地反映各部件的位移、应力状态。

(2) 三种方案在各工况下的最大水平位移、最大沉降值均未超过规范允许值, 其中方案一的水平位移值较小, 沉降值变化较小, 结构较稳定。

(3) 方案一的应力条件较好, 底板、闸墩最大主拉应力值都较小且在各工况下应力值较均匀, 部分部件的主拉应力超过材料允许应力值, 可采取一定的措施来提高各部件的承载力。

(4) 三种方案的最大主压应力值均未超过混凝土允许抗压强度值, 满足规范要求。

(5) 结合结构的位移、应力状态, 方案一的结构布置型式最优, 推荐使用方案一的布置型式。

参考文献(References):

- [1] 梁景奇. 基于 ABAQUS 的水闸闸室三维有限元分析[D]. 石河子: 石河子大学, 2014. (LIANG J Q. Three dimensional finite element analysis on Sluice chamber based on the ABAQUS [D]. Shihezi: Shihezi University, 2014. (in Chinese))
- [2] 曹邱林, 孟怡凯. 微桩群复合地基水闸闸室结构有限元分析[J]. 人民长江, 2013, 44(4): 31-34, 47. (CAO Q L, MENG Y K. FEM analysis on sluice structure with composite foundation of Micro piles[J]. The Changjiang River, 2013, 44(4): 31-34, 47. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2013.04.008.
- [3] 王丽英. 基于 ABAQUS 的船闸闸首结构有限元分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011. (WANG L Y. Finite element analysis of the lock head structure based the ABAQUS [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y1902013.

- [4] 曹邱林, 陈蕾. 涵洞洞首结构的三维有限元分析[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2011, 14(4): 73-77. (CAO Q L, CHEN L. Three dimensional finite element analysis of the structure of culvert hole[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2011, 14(4): 73-77. (in Chinese)) DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.90-93.2546.
- [5] 颜天佑. 大型泵站结构三维有限元内力分析研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (YAN T Y. The study of FEM for internal force analysis of the large pumping station[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y843287.
- [6] 彭志荣. 某水闸闸室结构布置方案比较分析与初步设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2014. (PENG Z R. Comparative analysis of sluice chamber structure layout scheme and preliminary design of some sluice[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014. (in Chinese))
- [7] 孙卫东. 某双曲线冷却塔整体式底板和分离式底板结构方案比较[J]. 特种结构, 2013, 30(1): 66-68. (SUN W D. Comparison and selection of integral bottom plate and separated bottom plate structure for a hyperbolic cooling tower[J]. Special structure, 2013, 30(1): 66-68. (in Chinese))
- [8] 陆林广, 刘荣华, 梁金栋, 等. 虹吸式出水通道与直管式出水通道的比较[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(1): 91-94. (LU L G, LIU R H, LIANG J D, et al. Comparison between siphon outlet conduit and straight outlet conduit[J]. South to North Water Transfers and Water Science and Technology, 2009, 7(1): 91-94. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2009.01.018.
- [9] 周鑫. 整体式闸室底板应力有限元分析[J]. 红水河, 2008(4): 63-65. (ZHOU X. Finite element analysis of stress on integral chamber floor[J]. Hongshui River, 2008(4): 63-65. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001408X.2008.04.018.
- [10] 王洁, 曹邱林, 高蓓蓓. 闸站结合工程布置方案比选研究[J]. 人民长江, 2017, 48(15): 66-70, 95. (WANG J, CAO Q L, GAO B B. Comparative study on schemes of combined sluice pump project layout[J]. The Changjiang River, 2017, 48(15): 66-70, 95. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2017.15.015.
- [11] CAO Q L, MENG Y K, CHEN L, et al. Nonlinear finite elements analysis on structure of pumping station in the joint hub of sluice and pumping station [C]. // Advances in Civil Engineering. p. 4. 2011: 2546-2552. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.90-93.2546.
- [12] 宋焰龙. 某水闸闸室结构在不同工况下的三维有限元分析[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(1): 159-160. (SONG Y L. Three dimensional finite element analysis of a sluice chamber structure under different working conditions[J]. China Water Transport (the second half of the month), 2017, 17(1): 159-160. (in Chinese))
- [13] 梁一飞, 李国宁, 王文强. 一种新型水闸的结构布置及三维有限元分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2014, 35(4): 95-102. (LIANG Y F, LI G N, WANG W Q. A new sluice's structural arrangement and its 3-d finite element analysis[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2014, 35(4): 95-102. (in Chinese)) DOI: 10.16853/j.cnki.1009-3575.2014.04.019.
- [14] 王明明. 闸站结合工程结构有限元分析研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2013. (WANG M M. Finite elements analysis on the combination of sluice and pumping station engineering[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y2419404.
- [15] 徐刚, 邵琳玉, 徐莉萍. 奔牛枢纽上闸首结构有限元分析[J]. 江苏水利, 2016(4): 5-9. (XU G, SHAO L Y, WANG L P. Analysis of finite element on Benniu lock head structure[J]. Jiangsu Water Resources, 2016(4): 5-9. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-7839.2016.04.002.
- [16] 龚思楚, 张宪政, 梅李霞, 等. 基于 ABAQUS 接触算法结构强度分析[J]. 教练机, 2016(4): 28-31. (GONG S C, ZHANG X Z, MEI L X, et al. Structure strength analysis based on ABAQUS contact arithmetics[J]. Trainer, 2016(4): 28-31. (in Chinese))
- [17] 李路华. 基于 ABAQUS 的水闸与地基相互作用分析[D]. 济南: 山东大学, 2014. (LI L H. Study on the interaction between sluice and foundation by using ABAQUS[D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese))
- [18] 常虹. 采动区地基与水闸结构相互作用机理及加固技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013. (CHANG H. Study on the foundation sluice interaction mechanism and reinforcement technology within subsidence areas[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2013. (in Chinese))
- [19] 王振华. 岩基上水闸结构分析计算[D]. 扬州: 扬州大学, 2016. (WANG Z H. Study on structure analysis and calculation of the sluice on the batholith[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016. (in Chinese))
- [20] 陶军. 水闸反拱底板的有限元分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2014. (TAO J. Finite element analysis of Anti arch floor of sluice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.Y2632022.
- [21] 王观琪. 基于 ABAQUS 的混凝土面板堆石坝三维应力和变形分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2004. (WANG G Q. 3D Nonlinear Analysis of Stress and Deformation for CFRD by Using ABAQUS-based Redevelopment[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004. (in Chinese))
- [22] 郑圣义, 俞人杰, 滕楷. 钢闸门定轮存在锈坑时轮轨接触的有限元分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(4): 99-103. (ZHENG S Y, YU R J, TENG K. Finite element analysis on the contact between fixed wheel with rust pit and track for plane steel gate[J]. Yellow River, 2017, 39(4): 99-103. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.04.022.
- [23] SL 744-2016 水工建筑物荷载设计规范[S]. (SL 744-2016 Code for design of load of hydraulic structures[S]. (in Chinese))
- [24] SL 265-2016, 水闸设计规范[S]. (SL 265-2016, Specification for sluice design[S]. (in Chinese))
- [25] SL 191-2008: 水工混凝土结构设计规范[S]. (SL 191-2008: Design Specifications for Hydraulic Concrete Structure [S]. (in Chinese))