Hans Journal of Civil Engineering 土木工程, 2017, 6(1), 38-50
Published Online January 2017 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/hjce
http://dx.doi.org/10.12677/hjce.2017.61005

Hans汉斯

Study on the Reinforcements of Shuxin Sluice

Haipeng Dong[1], Xiaofei Ren[2]

[1]The Water Resources Bureau of Dafeng, Yancheng Jiangsu
[2]School of Hydraulic Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu
Email: cqlshy@163.com

Received: Jan. 3rd, 2017; accepted: Jan. 18th, 2017; published: Jan. 23rd, 2017

Abstract

Since sluices in service have been running for many years, affected by the natural conditions and human factors for a long term, there are serious security problems hidden in the buildings. It is necessary to put forward reinforcement schemes for diseased sluices in order to maintain the safe operation. According to the actual condition of Shuxin Sluice, different reinforcement schemes are formulated. Different reinforcement schemes of lock chamber structure stress field are analyzed by three-dimensional finite element software ABAQUS for verifying the rationality of the reinforcement schemes. The analysis results show that these reinforcement measures, like anti-arch filled, seismic brace beam, could reduce the tensile and compressive stress of the chamber structure greatly and have an important role on its safety.

Keywords

Reinforcement, Finite Element, Anti-Arched Floor, Supporting Beam

沭新闸工程加固方案研究分析

董海鹏[1]，任小飞[2]

[1]盐城市大丰区水利局，江苏 盐城
[2]扬州大学水利与能源动力工程学院，江苏 扬州
Email: cqlshy@163.com

收稿日期：2017年1月3日；录用日期：2017年1月18日；发布日期：2017年1月23日

摘 要

在役水闸运行多年，在外界自然条件和人为因素的长期作用下，建筑物存在严重的安全隐患。为了水闸

文章引用: 董海鹏, 任小飞. 沭新闸工程加固方案研究分析[J]. 土木工程, 2017, 6(1): 38-50.
http://dx.doi.org/10.12677/hjce.2017.61005

的安全运行，有必要对病险水闸进行除险加固。本文根据沭新闸工程的实际状况，拟定不同加固设计方案，借助三维有限元软件ABAQUS对不同加固方案闸室结构的应力场进行分析，验证加固方案的合理性，分析结果表明，反拱底板的填平、加撑梁等加固措施能大大降低闸室结构的拉、压应力，对水闸的安全有着重要的作用。

关键词

除险加固，有限元，反拱底板，撑梁

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 前言

沭新闸工程建于 20 世纪 70~80 年代，为了节省钢筋、水泥等建筑材料，水闸底板结构采用反拱式底板，这种结构虽然能充分发挥混凝土的抗压性能，大大节省了钢筋等建筑材料[1]，但是，反拱底板其内力主要为轴向压力，在均布荷载作用下，轴向压力一般不起控制作用，起控制作用的是反拱底板由于地基变形而产生内力，从而导致底板开裂，也就是说反拱底板对地基不均匀沉降较为敏感，降低了水闸的整体稳定性及其可靠性，同时，经过多年运行，闸室结构出现不同程度的安全隐患，沭新闸底板、闸墩多处出现裂缝，同时经过承载能力分析可知，底板、闸墩在地震荷载作用下，其承载能力不满足要求，严重影响了水闸的安全运行。因此，有必要对该类闸进行加固方案研究。

2. 闸室原结构形式

沭新闸底板采用四孔一联整体式反拱底板，两端悬出，作为岸墩底板，沭新闸原闸室结构形式见图 1。

3. 闸室结构加固方案研究

3.1. 反拱底板填平方案研究

鉴于连续反拱结构是底板开裂的主要诱因，从改变反拱结构特征出发，由于反拱底板对地基的不均匀沉降较为敏感，工程中一般采用将反拱填平的方案进行底板抗裂加固，为保证新老混凝土接合面强度，将底板表面打毛清洗，拱内用 C20 混凝土填平[2]。底板加固方案示意图见图 2。

反拱底板填平方案闸室结构应力场分析

从结构角度出发，采用 ABAQUS 有限元软件建立三维闸室结构模型[3] [4]，分析研究闸室结构应力场，探讨该同类加固方案选择。填平反拱底板的闸室结构计算模型见图 3，填平后的反拱底板模型见图 4。

闸底板经填平，对模型进行网格剖分，主要采用结构化网格剖分技术和扫掠网格剖分技术[5] [6]，模型采用六面体减缩线性积分单元，闸室离散为 19,110 个单元，28,223 个结点。分别对闸室结构的三种工况进行了空间有限元计算[7] [8]，从应力角度对闸室结构进行分析并作出安全评价。接触模拟中依旧采用单纯主从接触算法以及硬接触的法向模型[9]。

根据计算结果的应力云图进行分析，具体计算的闸室最大主拉应力云图见图 5，闸室最大主压应力云图见图 6。

闸室结构应力计算成果见表 1、表 2。

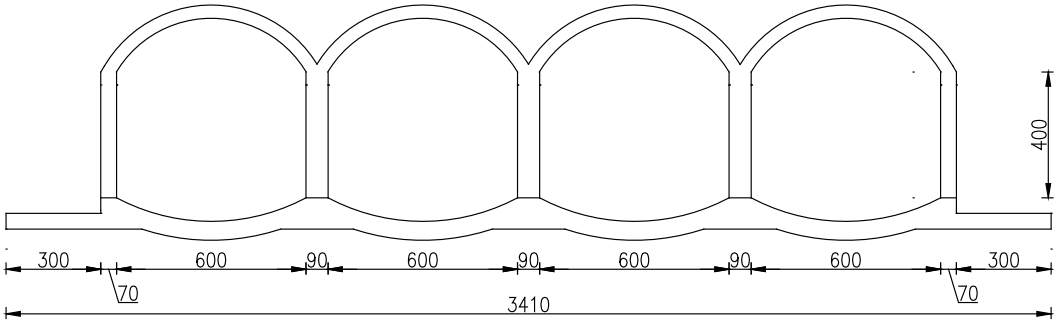


Figure 1. Original structural form of the lock chamber of Shuxin Sluice
图 1. 沭新闸原闸室结构形式

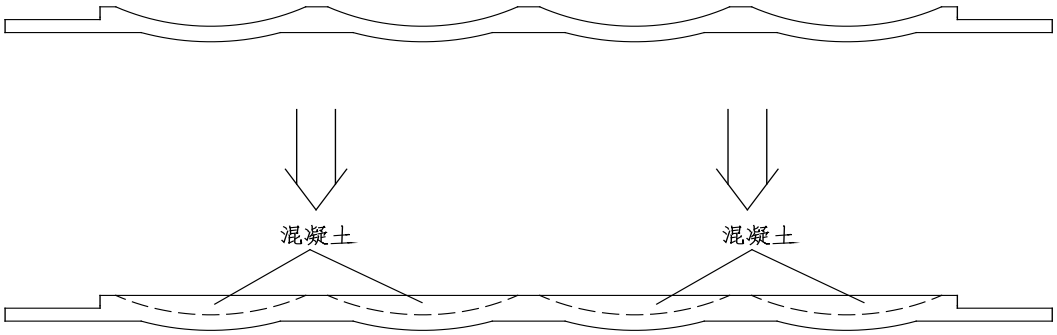


Figure 2. Schematic diagram of baseboard consolidation for Shuxin Sluice
图 2. 沭新闸底板加固示意图

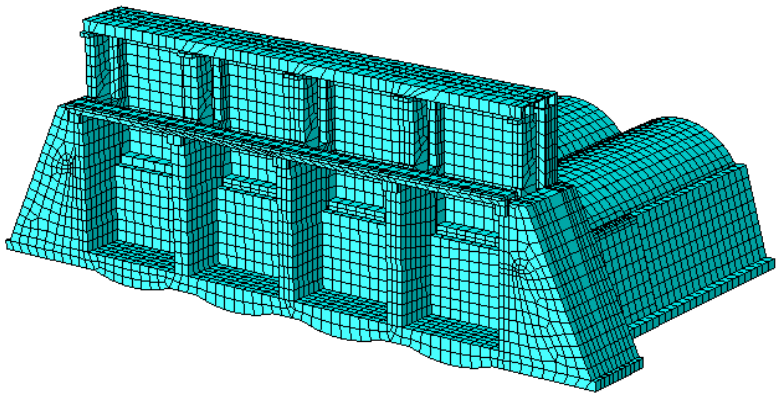


Figure 3. Calculation model figure of the lock chamber structure of Shuxin Sluice
图 3. 沭新闸闸室结构计算模型图

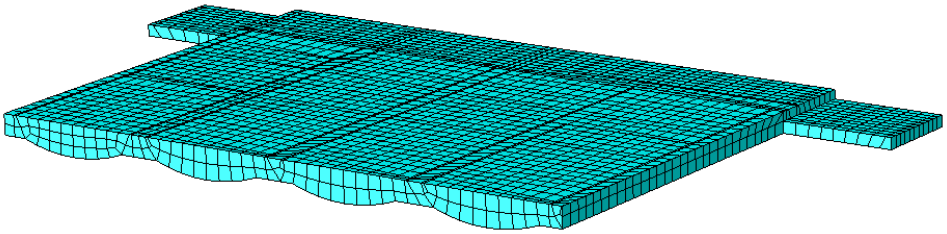


Figure 4. Inverted arch floor
图 4. 填平后的反拱底板模型图

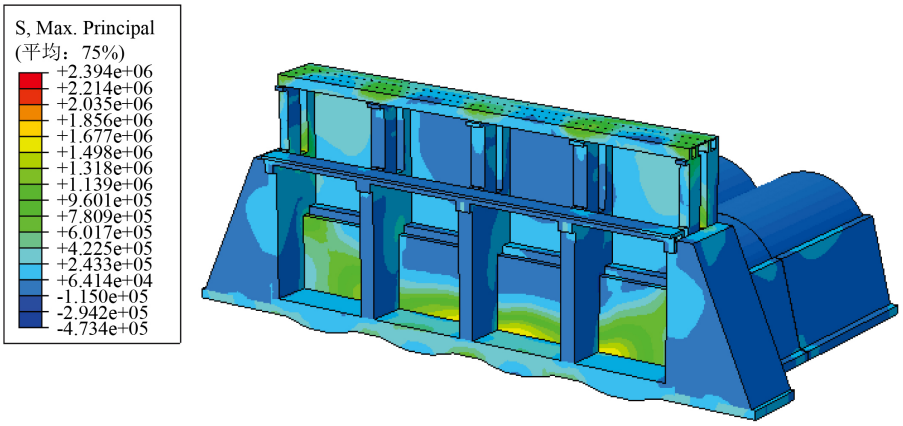


Figure 5. Distribution figure of maximum principle tensile stress
图 5. 闸室最大主拉应力分布图(Pa)

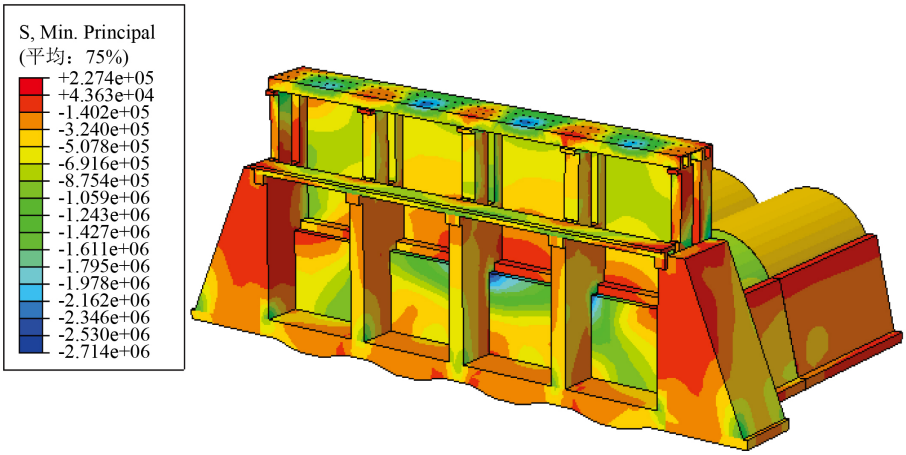


Figure 6. Distribution figure of maximum principle compressive stress
图 6. 闸室最大主压应力分布图(Pa)

Table 1. Calculation results of structural stress of Shuxin lock chamber
表 1. 沭新闸闸室结构应力计算成果表

计算工况	最大拉压应力(MPa)			
	底板面层	底板底层	闸墩	交通桥拱板
设计期	0.69	0.60	1.23	0.43
校核期	0.73	0.67	1.30	0.47
地震期	0.83	0.77	1.41	0.58

Table 2. Calculation results of structural stress of Shuxin lock chamber
表 2. 沭新闸闸室结构应力计算成果表

计算工况	最大主压应力(MPa)			
	底板面层	底板底层	闸墩	交通桥拱板
设计期	1.61	2.07	2.23	2.20
校核期	1.89	2.10	2.32	2.38
地震期	2.09	2.20	2.39	2.47

由应力云图及表可知，在各工况下闸室底板的最大主拉应力主要分布在与边墩连接处的面层，最大值为 0.83 MPa，最大主压应力主要分布在与边墩连接处的面层以及闸室底板底层，最大值为 2.20 MPa；闸墩的最大主拉应力主要分布在边墩与底板连接处的临土侧，最大值为 1.41 MPa，最大主压应力主要分布在边墩与底板连接处的临水侧，最大值为 2.39 MPa；交通桥拱板的最大主拉应力主要分布在上游段拱板底层，最大值为 0.58 MPa，最大主压应力主要分布在上游段拱板底层，最大值为 2.47 MPa。

反拱底板填平后，底板、闸墩、交通桥拱板的拉、压应力与加固前相比均有所减小，相对闸墩来说，反拱底板的填平对底板的应力场影响更为明显。

3.2. 闸墩加撑梁方案研究

在此方案中，反拱底板不填平，在 π 型拱拱脚处增设 0.4 × 0.6 m (宽 × 高)矩形撑梁，通过改变撑梁的数目分析闸室结构应力场，本次分别对增设 6 根撑梁与 11 根撑梁的闸室结构应力进行分析比较。

闸墩加固方案示意图见图 7。

3.2.1. 加撑梁(6 根)闸室结构应力场分析

加 6 根撑梁的闸室结构计算模型见图 8。

根据计算结果的应力云图进行分析，具体计算的闸室最大主拉应力云图见图 9，闸室最大主压应力云图见图 10。

闸室结构应力计算成果见表 3、表 4。

由应力云图及表可知，在各工况下闸室底板的最大主拉应力主要分布在与边墩连接处的面层，最大值为 0.90 MPa，最大主压应力主要分布在与边墩连接处的面层以及闸室底板底层，最大值为 2.25 MPa；闸墩的最大主拉应力主要分布在边墩与底板连接处的临土侧，最大值为 1.40 MPa，最大主压应力主要分布在边墩与底板连接处的临水侧，最大值为 2.39 MPa；交通桥拱板的最大主拉应力主要分布在上游段拱板面层，最大值为 0.40 MPa，最大主压应力主要分布在上游段拱板底层，最大值为 2.40 MPa。

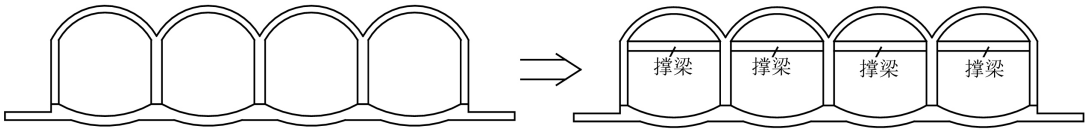


Figure 7. Schematic diagram of pier with support beams of Shuxin Sluice
图 7. 沭新闸闸墩加撑梁加固示意图

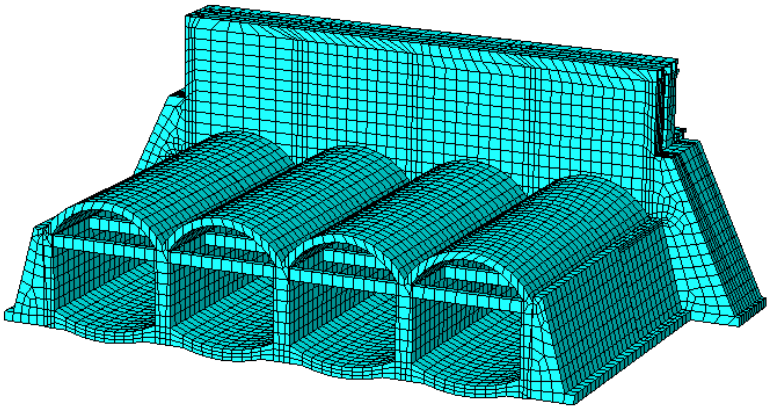


Figure 8. Calculation model figure of Huaishu lock chamber with support beams
图 8. 加撑梁闸室结构计算模型图

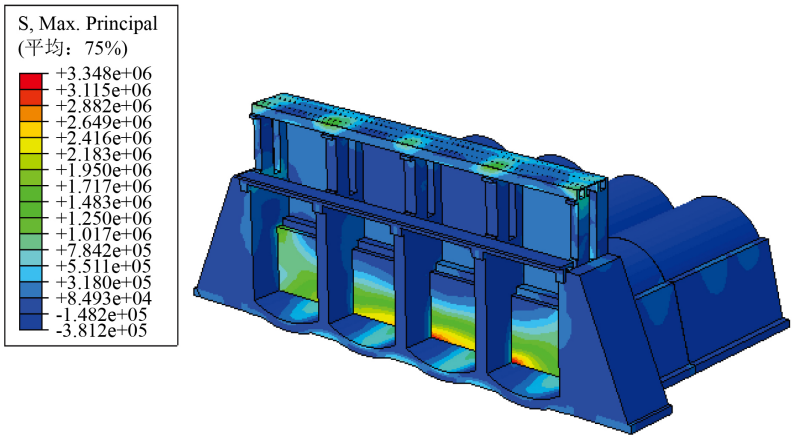


Figure 9. Distribution figure of maximum principle tensile stress
图 9. 闸室最大主拉应力分布图(Pa)

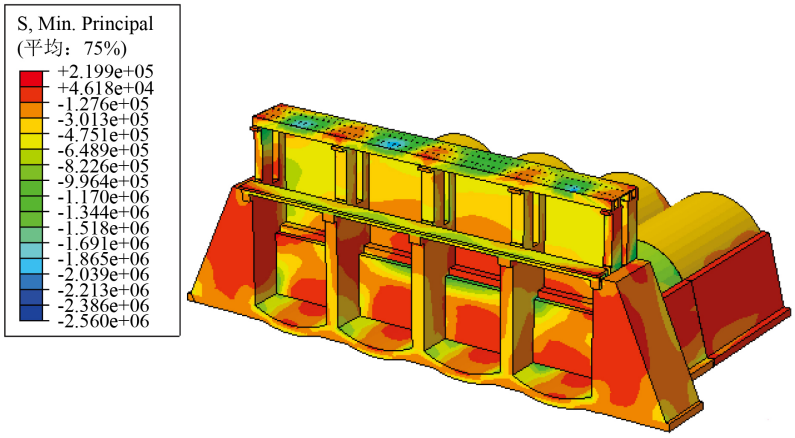


Figure 10. Distribution figure of maximum principle compressive stress
图 10. 闸室最大主压应力分布图(Pa)

Table 3. Calculation results of structural stress of Shuxin lock chamber
表 3. 沭新闸闸室结构应力计算成果表

计算工况	最大主拉应力(MPa)			
	底板面层	底板底层	闸墩	交通桥拱板
设计期	0.73	0.67	1.02	0.31
校核期	0.80	0.75	1.18	0.36
地震期	0.90	0.86	1.40	0.40

Table 4. Calculation results of structural stress of Shuxin lock chamber
表 4. 沭新闸闸室结构应力计算成果表

计算工况	最大主压应力(MPa)			
	底板面层	底板底层	闸墩	交通桥拱板
设计期	1.92	1.96	2.18	2.26
校核期	2.11	2.18	2.32	2.36
地震期	2.19	2.25	2.39	2.40

在交通桥拱脚处增设撑梁后，底板、闸墩、交通桥拱板的拉、压应力与加固前相比均有所减小，相对底板来说，闸墩加撑梁后，对闸墩的应力场影响更为明显。

3.2.2. 加撑梁(11 根)闸室结构应力场分析

加 11 根撑梁的闸室结构计算模型见图 11。

根据计算结果的应力云图进行分析，具体计算的闸室最大主拉应力云图见图 12，闸室最大主压应力云图见图 13。

闸室结构的应力计算结果见表 5、表 6。

由应力云图及表可知，在各工况下闸室底板的最大主拉应力主要分布在与边墩连接处的面层，最大值为 0.87 MPa，最大主压应力主要分布在与边墩连接处的面层以及闸室底板底层，最大值为 2.21 MPa；闸墩的最大主拉应力主要分布在边墩与底板连接处的临土侧，最大值为 1.35 MPa，最大主压应力主要分布在边墩与底板连接处的临水侧，最大值为 2.35 MPa；交通桥拱板的最大主拉应力主要分布在上游段拱板面层，最大值为 0.43 MPa，最大主压应力主要分布在上游段拱板底层，最大值为 2.33 MPa。

撑梁的数目不同对闸室结构的应力影响也就不同，撑梁越多，对闸室结构越有利，尤其对闸墩的应力场影响更为明显。经承载能力分析，仅在拱脚处增设撑梁，底板的承载能力无法满足要求，但闸墩的承载能力基本能满足要求。

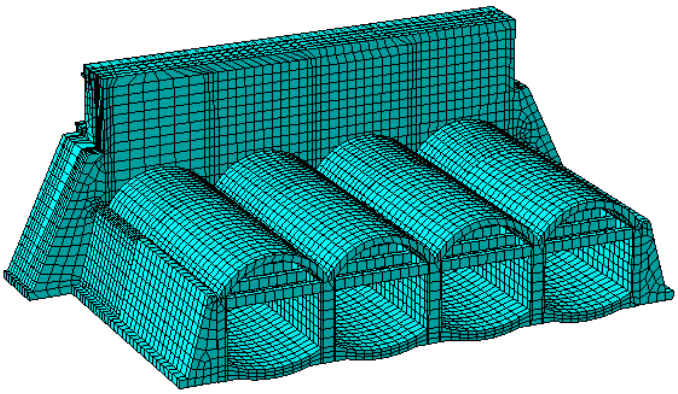


Figure 11. Calculation model figure of lock chamber with support beams
图 11. 加撑梁闸室结构计算模型图

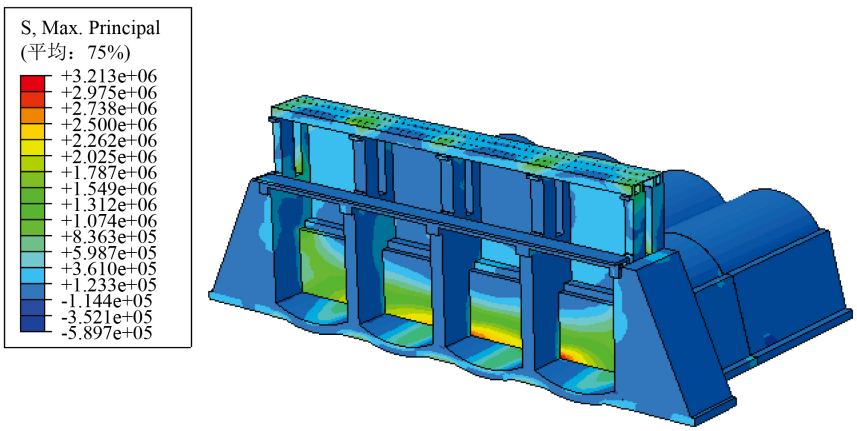


Figure 12. Distribution figure of maximum principle tensile stress
图 12. 闸室最大主拉应力分布图(Pa)

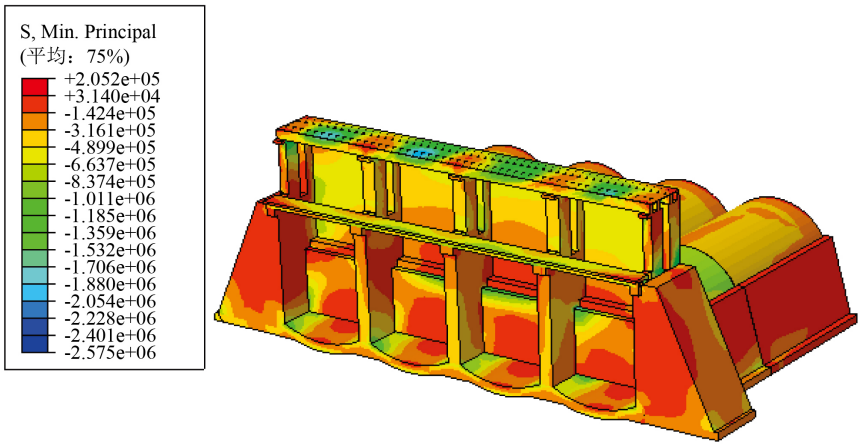


Figure 13. Distribution figure of maximum principle compressive stress
图 13. 闸室最大主压应力分布图(Pa)

Table 5. Calculation results of structural stress of Shuxin lock chamber
表 5. 沭新闸闸室结构应力计算成果表

计算工况	最大主拉应力(MPa)			
	底板面层	底板底层	闸墩	交通桥拱板
设计期	0.70	0.65	0.96	0.24
校核期	0.77	0.72	1.15	0.32
地震期	0.87	0.82	1.35	0.43

Table 6. Calculation results of structural stress of Shuxin lock chamber
表 6. 沭新闸闸室结构应力计算成果表

计算工况	最大主压应力(MPa)			
	底板面层	底板底层	闸墩	交通桥拱板
设计期	1.89	1.93	2.15	2.16
校核期	2.08	2.15	2.28	2.32
地震期	2.16	2.21	2.35	2.33

3.3. 反拱底板填平、加撑梁方案研究

在此方案中，反拱底板填平，同时在交通桥 π 型拱拱脚处增设 11 根 0.4 × 0.6 米(宽 × 高)矩形抗震撑梁，分析闸室结构应力场。闸墩加固方案示意图见图 14。

反拱底板填平、加撑梁闸室结构应力场分析

填平反拱底板、加 11 根撑梁的闸室结构计算模型见图 15。

根据计算结果的应力云图进行分析，具体计算的闸室最大主拉应力云图见图 16，闸室最大主压应力云图见图 17。

闸室结构应力计算成果见表 7、表 8。

由应力云图及表可知，在各工况下闸室底板的最大主拉应力主要分布在与边墩连接处的面层，最大值为 0.73 MPa，最大主压应力主要分布在与边墩连接处的面层以及闸室底板底层，最大值为 2.15 MPa；闸墩的最大主拉应力主要分布在边墩与底板连接处的临土侧，最大值为 1.12 MPa，最大主压应力主要分

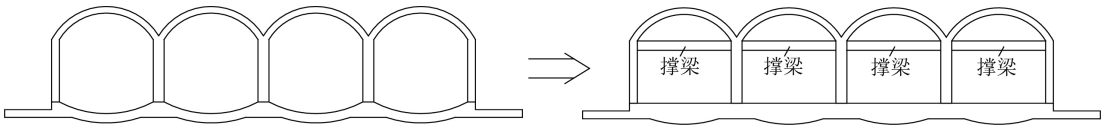


Figure 14. Schematic diagram of pier with support beams of Shuxin Sluice
图 14. 沭新闸闸室加固示意图

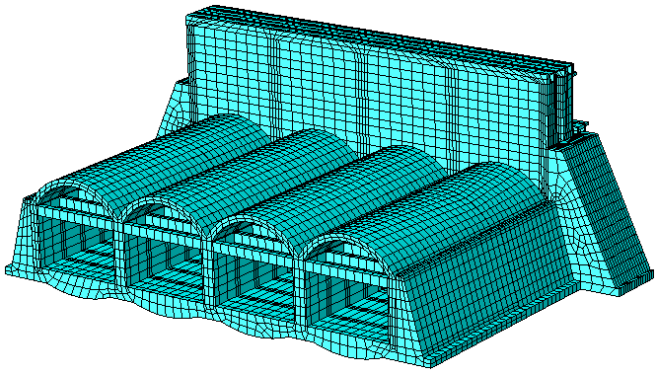


Figure 15. Calculation model figure of lock chamber filled with support beams
图 15. 反拱底板填平、加撑梁闸室结构计算模型图

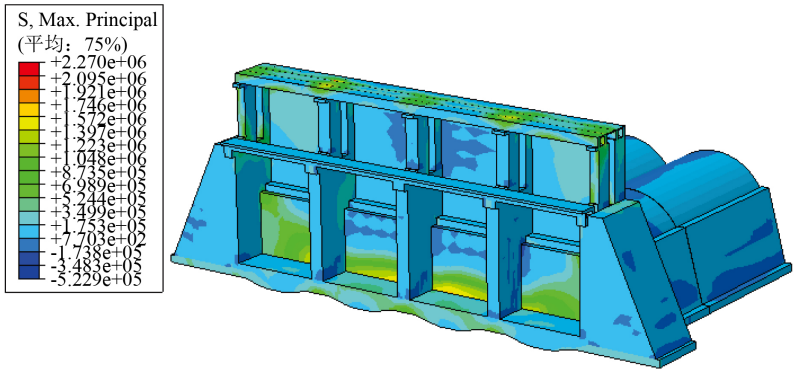


Figure 16. Distribution figure of maximum principle tensile stress
图 16. 设计期最大主拉应力分布图(Pa)

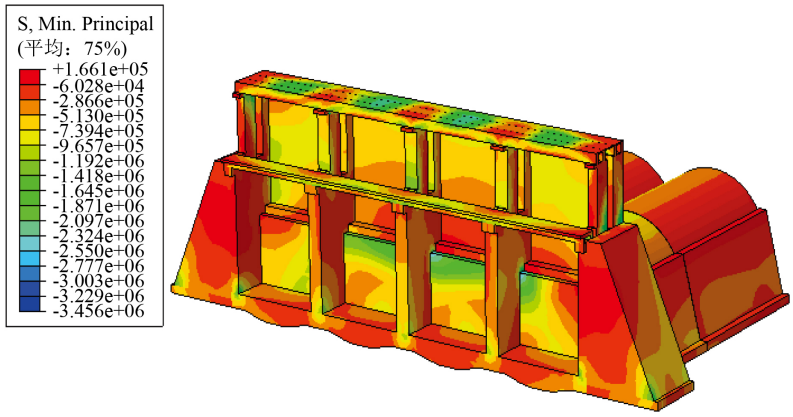


Figure 17. Distribution figure of maximum principle compressive stress
图 17. 校核期最大主拉应力分布图(Pa)

Table 7. Calculation results of structural stress of Shuxin lock chamber
表 7. 沭新闸闸室结构应力计算成果表

计算工况	最大主拉应力(MPa)				
	底板面层	底板底层	闸墩	交通桥拱板	撑梁
设计期	0.61	0.52	0.87	0.18	1.92
校核期	0.72	0.55	0.91	0.26	2.01
地震期	0.73	0.63	1.12	0.34	2.29

Table 8. Calculation results of structural stress of Shuxin lock chamber
表 8. 沭新闸闸室结构应力计算成果表

计算工况	最大主压应力(MPa)				
	底板面层	底板底层	闸墩	交通桥拱板	撑梁
设计期	1.42	1.87	2.10	1.87	2.56
校核期	1.76	2.00	2.23	2.00	2.72
地震期	1.89	2.15	2.28	2.15	2.92

布在边墩与底板连接处的临水侧，最大值为 2.28 Mpa；交通桥拱板的最大主拉应力主要分布在上游段拱板面层，最大值为 0.34 Mpa，最大主压应力主要分布在上游段拱板底层，最大值为 2.15 Mpa；撑梁的最大主拉应力主要分布在闸身上游段第一根撑梁与闸墩连接处，最大值为 2.29 MPa，最大主压应力主要分布在闸身下游段撑梁的底层，最大值为 2.92 MPa。

经过承载能分析，闸室底板、闸墩、撑梁、交通桥拱板的结构承载力满足要求，最大主压应力均未超过混凝土的允许压应力，故混凝土抗压强度满足要求。

4. 不同加固方案闸室应力场比较分析

为了更加直观地分析沭新闸加固方案中填平反拱底板与增加混凝土撑梁对闸室结构应力场影响，分别考虑以下三种情形：1) 反拱底板、无撑梁闸室结构应力场分析；2) 填平反拱底板、无撑梁闸室结构应力场分析；3) 反拱底板、加撑梁闸室结构应力场分析；4) 填平反拱底板、加撑梁闸室结构应力场分析。通过这四种闸室结构形式结构应力的分析比较，从而验证反拱底板的填平以及正拱桥顶板脚增设撑梁对水闸的稳定有着重要的作用。

为了能够清晰直观地反映出此次加固方案对闸室不同部位的应力变化情况，现将上述四种情形在不同工况下闸室结构的应力场用柱状图表示，设计工况拉压应力场见图 18、图 19，校核期拉压应力场见图 20、图 21，地震期拉压应力场见图 22、图 23。

5. 结论

1) 反拱底拉应力较大，底板的底层与面层以及闸墩在水压力等荷载作用下受到较大的拉应力，易导致底板产生不同程度的裂缝，影响水闸安全性。

2) 反拱底板填平可以减小闸墩与底板的拉压应力，尤其对底板的应力影响比较明显，反拱底板填平是从其本身结构特点进行加固，有效地改善了闸室底板的应力状态，但是对闸墩的应力场影响不太明显。

3) 在拱脚处增设撑梁，撑梁的作用主要影响闸墩与底板的主拉应力与主压应力，撑梁的存在分担了闸墩与底板在受到水压力等荷载作用下的弯矩，主要承担了闸墩的拉压应力，但对底板的应力影响不太明显。

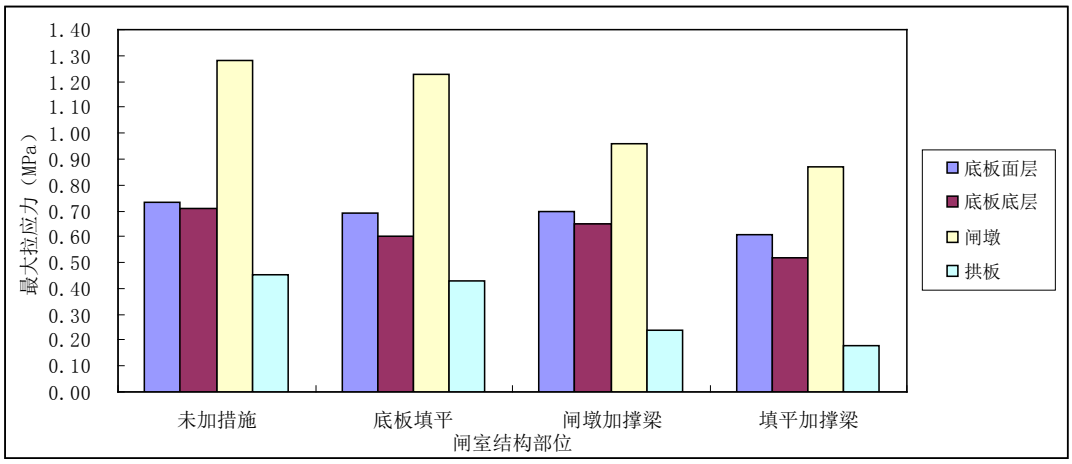


Figure 18. Tensile stress field in design working condition (Pa)
图 18. 设计期拉应力场(Pa)

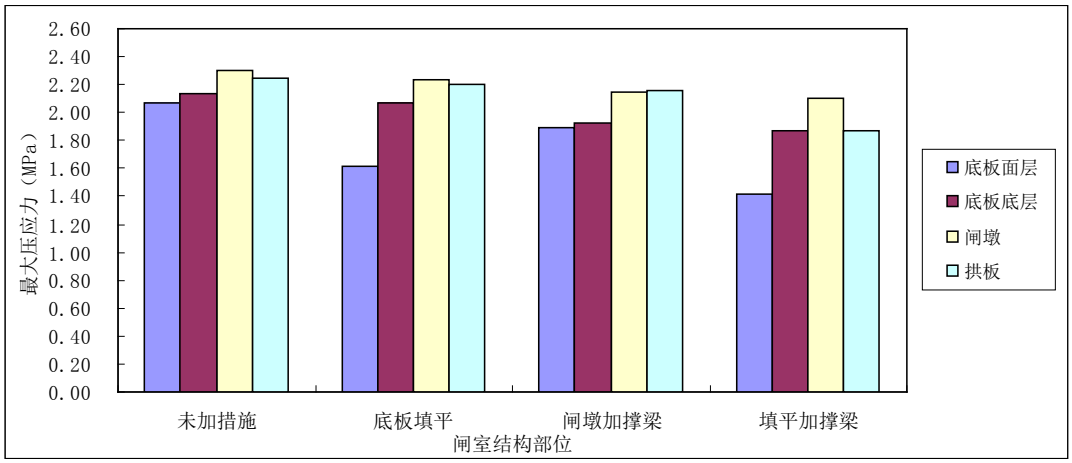


Figure 19. Pressure stress field in design working condition (Pa)
图 19. 设计期压应力场(Pa)

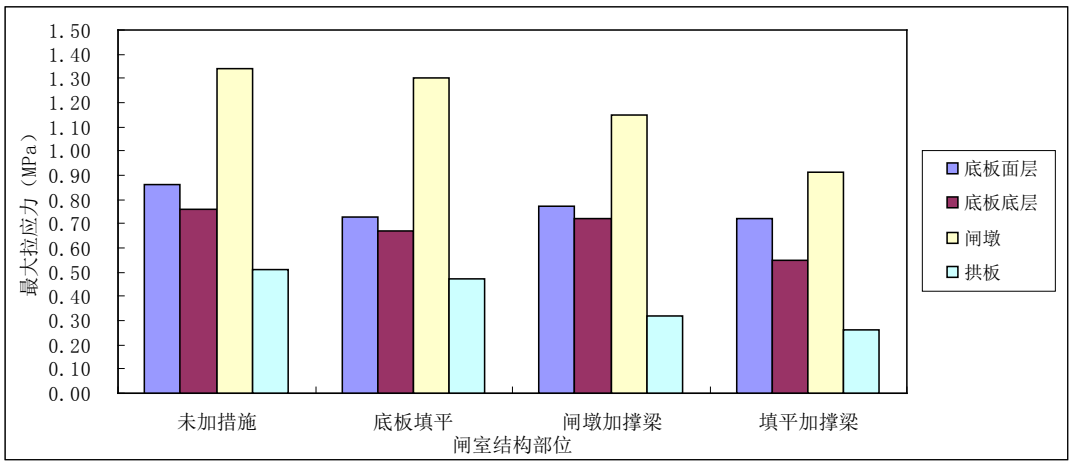


Figure 20. Tensile stress field in check working condition (Pa)
图 20. 校核期拉应力场(Pa)

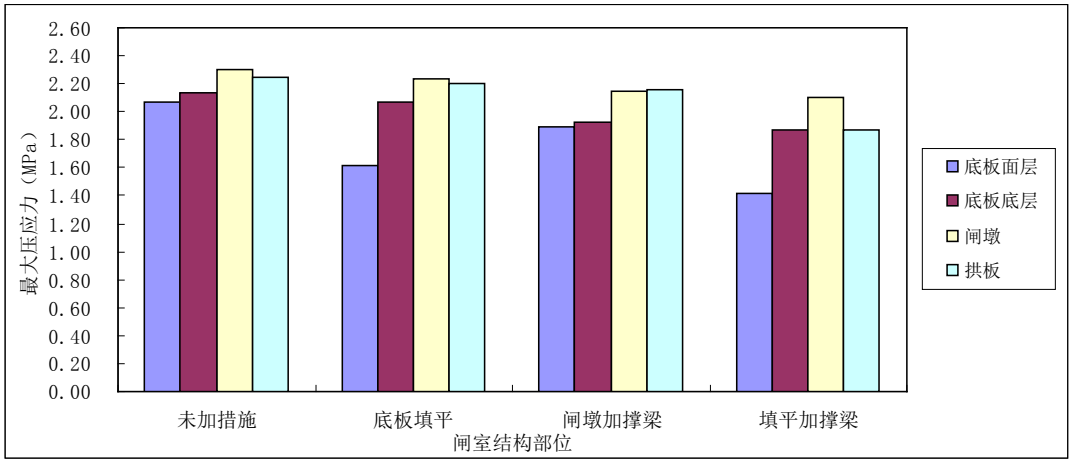


Figure 21. Pressure stress field in check working condition (Pa)
图 21. 校核期压应力场(Pa)

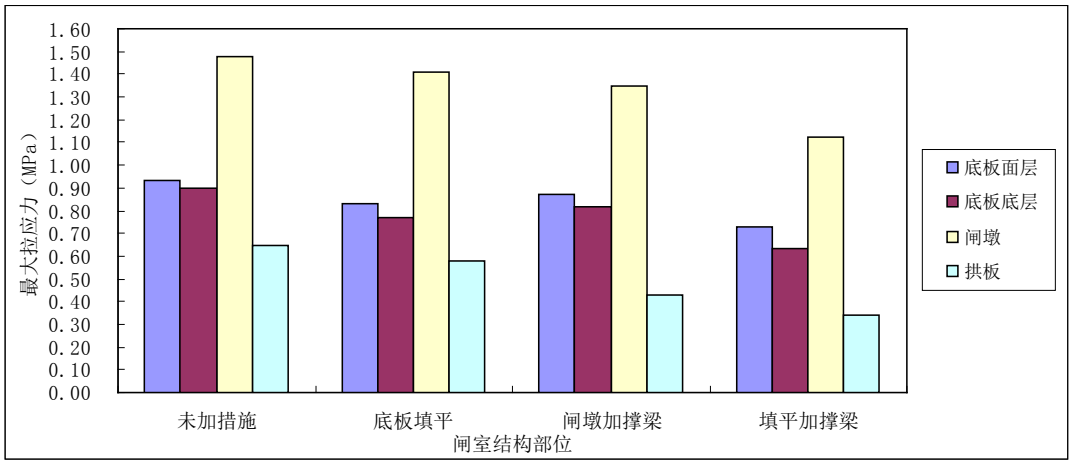


Figure 22. Tensile stress field in earthquake working condition (Pa)
图 22. 地震期拉应力场(Pa)

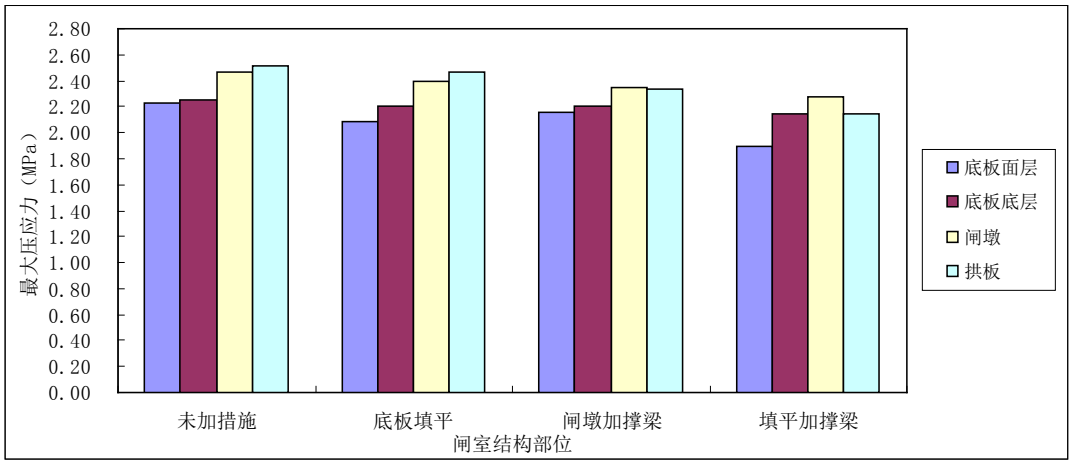


Figure 23. Pressure stress field in earthquake working condition (Pa)
图 23. 地震期压应力场(Pa)

4) 反拱底板填平，同时增设撑梁能够相互弥补上述两种加固方案的不足，能最大程度上改善闸室结构的应力状态。

因此，在这类水闸的除险加固时，将反拱底板填平，以及在正拱桥拱脚处增设撑梁，对增加整个闸室的整体结构安全性至关重要。

参考文献 (References)

[1] 李品宝. 反拱底板水闸在软弱地基上的作用[J]. 浙江水利科技报, 1988(2): 30-31.

[2] 周灿华, 樊旭, 蔡平. 大型水闸连续反拱底板加固技术研究[J]. 中国水利, 2012(12): 18-20.

[3] 费康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

[4] 庄茁, 由小川, 廖剑晖, 岑松, 沈新普, 梁明刚. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

[5] Ho-Le, K. (1988) Finite Element Mesh Generation Methods: A Review and Classification. *Computer-Aided Design*, **20**, 27-38. https://doi.org/10.1016/0010-4485(88)90138-8

[6] Eriksson, L. (1985) Practical Three-Dimensional Mesh Generation, Using Transfinite Interpolation SIAM. *Journal on Scientific and Statistical Computing*, **6**, 712-741. https://doi.org/10.1137/0906049

[7] 孔庆阳, 曹邱林. 基于有限元的反拱底板结构应力分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(4): 46-49.

[8] 陈敏, 曹邱林. 基于有限元船闸结构应力分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1): 114-119.

[9] 曹邱林, 孟怡凯. 桩基础泵站结构非线性有限元分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(2): 57-60.

Hans汉斯

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：http://www.hanspub.org/Submission.aspx
期刊邮箱：hjce@hanspub.org