100 米级巨型省水船闸关键技术研究*

田建柱[1]，郝　岭[2]，汤建宏[1]，吴礼国[2]
（1. 中交水运规划设计院有限公司，北京 100007；2. 四川省交通勘察设计研究院有限公司，四川 成都 610017）

摘要：中西部地区很多水利枢纽的设计水头超过 100 m，以当前的技术水平，单级船闸已无法承担这些枢纽的通航功能。针对提升单级船闸设计水头的重大技术难题，依托金沙江向家坝枢纽，对 100 米级船闸进行研究。根据枢纽地形和地质等实际情况，按照规范要求和相关模型试验结果，完成总平面布置，并初步拟定水级的划分及省水池相关参数、灌泄水时的峰值流量、闸室内的消能设施等；采用有限元数值计算对水工结构的稳定、强度、位移和地基承载力进行求解。结果表明：100 米级巨型省水船闸方案总平面布置合理；输水系统具备可行性；在控制工况下结构是稳定的，地基应力小于基岩承载力，地震时结构变形在允许范围内、应力在剔除局部奇异点之后能通过配筋实现，总体而言水工结构是可实施的；单级船闸通航水头从 40 米级突破到 100 米级在总平面布置、输水系统和水工结构等方面具备可行性。

关键词：100 米级；巨型省水船闸；总平面布置；输水系统；水工结构
中图分类号：U641.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0113-07

Key technology of 100-meter class giant water-saving ship lock

TIAN Jianzhu[1], HAO Ling[2], TANG Jianhong[1], WU Liguo[2]
(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
2. Sichuan Communication Surveying & Design Institute, Chengdu 610017, China)

Abstract: Many hydropower hubs in the central and western regions have design heads above 100 m, making single-stage ship locks unable to meet their navigation requirements with current technology. To address this major technical challenge of increasing the design head of single-stage ship locks, we conduct a study on 100-meter class ship locks on the basis of the Xiangjiaba hydropower hub on the Jinsha River. In accordance with the actual terrain and geological conditions of the site, as well as the requirements of relevant codes and model test results, we complete the general layout, make preliminary plans for the division of water levels, the parameters of water-saving basins, peak flow rates during filling and emptying, and energy dissipation facilities within the ship lock chamber, and use finite element numerical calculations to analyze the stability, strength, displacement, and foundation bearing capacity of the hydraulic structures. The results indicate that the general layout of the 100-meter class giant water-saving ship lock is reasonable, and the conveyance system is feasible. Under controlled conditions, the structure is stable, with foundation stresses less than the bearing capacity of the bedrock. During earthquakes, structural deformation remains within allowable limits, and stresses (after excluding local singular points) can be achieved with reinforcement. Overall, the hydraulic structure is implementable. The navigation head of single-stage ship locks has been successfully increased from the 40-meter class to the 100-meter class, demonstrating feasibility in terms of general layout, water conveyance systems, and hydraulic structures.

Keywords: 100-meter class; giant water-saving ship lock; general layout; water conveyance system; hydraulic structure

近年来，内河航运蓬勃发展，新建船闸呈现出明显的大型化发展趋势[1]；另外，随着内河航运开发由平原向山区、由大江大河的中下游向上游拓展，船闸高运行水头的需求随之显现，一批

收稿日期：2025-11-25　　**录用日期：**2025-12-31
***基金项目：**国家重点研发计划项目(2023YFC3206104)
作者简介：田建柱(1979—)，男，高级工程师，从事港航工程设计工作。

水运工程

运行水头在 30 m 以上的船闸已经涌现，如江西万安枢纽二线船闸、广西大藤峡枢纽船闸，其中大藤峡枢纽船闸最大运行水头为 40.25 m，为目前全世界运行水头最高的单级船闸。相对于多级船闸和升船机，超高水头单级省水船闸在通过能力、节水和性价比等方面拥有较大优势[2]。然而，现有 40 米级水头船闸相关技术已无法满足如三峡、沙沱、向家坝、白鹤滩等超高水头枢纽的通航需求，亟须实现通航水头的跨越式提升。针对此问题，众多学者已开展相关研究：张丽媛等[3]依托三峡新通道工程，对 56 m 水头省水船闸进行研究，提出省水池布置、输水系统的选取等方法论；唐铁明[4]对高水头船闸闸室结构内力对墙后回填土高程变化和闸基弹性模量变化的敏感性进行分析；陈明等[5]研究 60 米级船闸闸底廊道侧支孔输水系统闸室明沟消能特性；刘力侨等[6]对地震波斜入射时不同水深超高水头船闸地震反应进行研究；张利鹏[7]对高水头船闸的闸室水流条件进行研究；其他研究也多集中于输水系统、水力学领域[8-9]，而针对 100 米级超高水头船闸的系统研究尚属空白。为此，本文依托金沙江下游 800 km 黄金水道建设项目中的向家坝枢纽船闸，开展 100 米级巨型省水船闸关键技术研究，提出总平面布置、输水系统以及水工结构方案，创新性地应用八级巨型省水池及超大空间省水池刚度保障措施。通过对提出的方案开展论证和分析、计算，证明了 100 米级巨型省水船闸具备可行性，可为相关后续研究提供借鉴。

1　工程概况

金沙江地处长江干流上游，全长 2 326 km，其下游约 800 km 河段水运潜力巨大。随着梯级水电枢纽的蓄水，库区已具备通行 3 000~8 000 吨级船舶的条件。然而，由于历史原因，4 座水电枢纽仅向家坝建有 500 吨级升船机，制约了航运发展。预测显示，该河段未来单向运量将超 1 亿 t/a，建设通航设施迫在眉睫。

向家坝水电站正常蓄水位 380 m，死水位 370 m。下游 12 000 m^3/s 流量对应水位为 277.25 m，1 200 m^3/s 流量对应水位为 265.8 m。向家坝水电站最大通航水位差 114.2 m，上游库水位变幅 10 m，下游通航水位变幅约 11 m。

2　总体方案设计

2.1　总平面布置

经比选，推荐将双线船闸布置于枢纽左岸。该方案通航水流条件较好，对现有枢纽干扰小，征地拆迁难度低。船闸中心线与坝轴线夹角 97°，坝轴线处与已建升船机中心线距离为 476 m。上闸首长 63 m，闸室长 280 m，下闸首长 55 m。双线船闸共用引航道，采用“曲线进闸、直线出闸”方式。主导航墙以 1:6 斜率扩宽，导航、调顺段长 177 m，停泊段长 300 m，共设 12 个靠船墩，墩距 25 m。下游引航道以 650 m 半径、43°转角与主航道衔接。向家坝船闸平面布置见图 1。

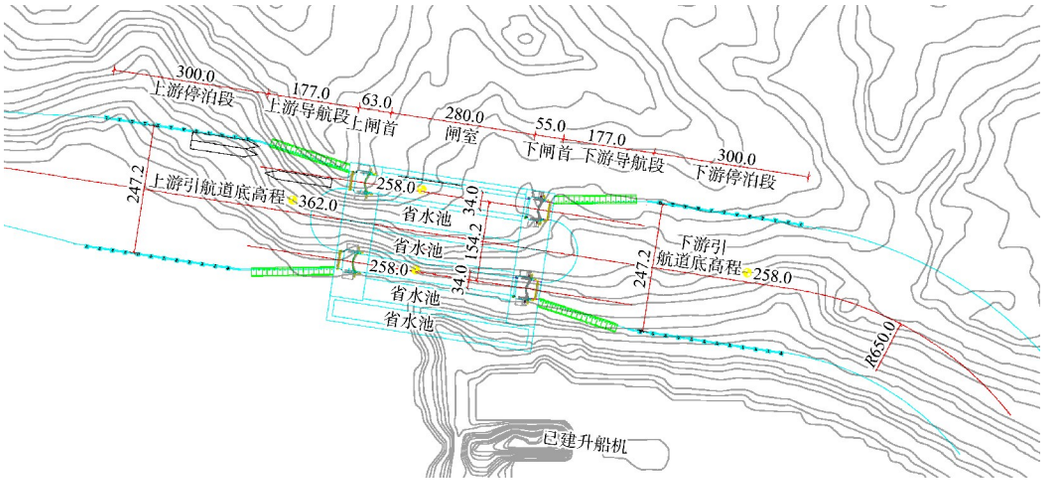

图 1　向家坝船闸平面布置(单位：m)

Fig. 1　Planar layout of Xiangjiaba ship lock(unit：m)

2.2　输水系统设计

2.2.1　水级划分与省水池布置

闸室有效尺度为 280 m×34 m×8 m(有效长度×有效宽度×最小门槛水深)。为适应超过 11 m 的水位变幅，采用不对称的封闭式省水池布置，在闸室两侧各布置 4 个交错上升的省水池，共 8 个。省水池与闸室面积比为 1.1∶1，高度为 18.79～21.23 m，其间设厚 2 m 水平分层板，由直径 1.5 m、间距 7 m 的圆柱支撑，见图 2。当最大设计水头 115 m 时，每充/泄一个省水池可使闸室水位变化约 11.6 m，8 个省水池泄空后，剩下的 22.2 m 水体由船闸上游对闸室进行灌水。

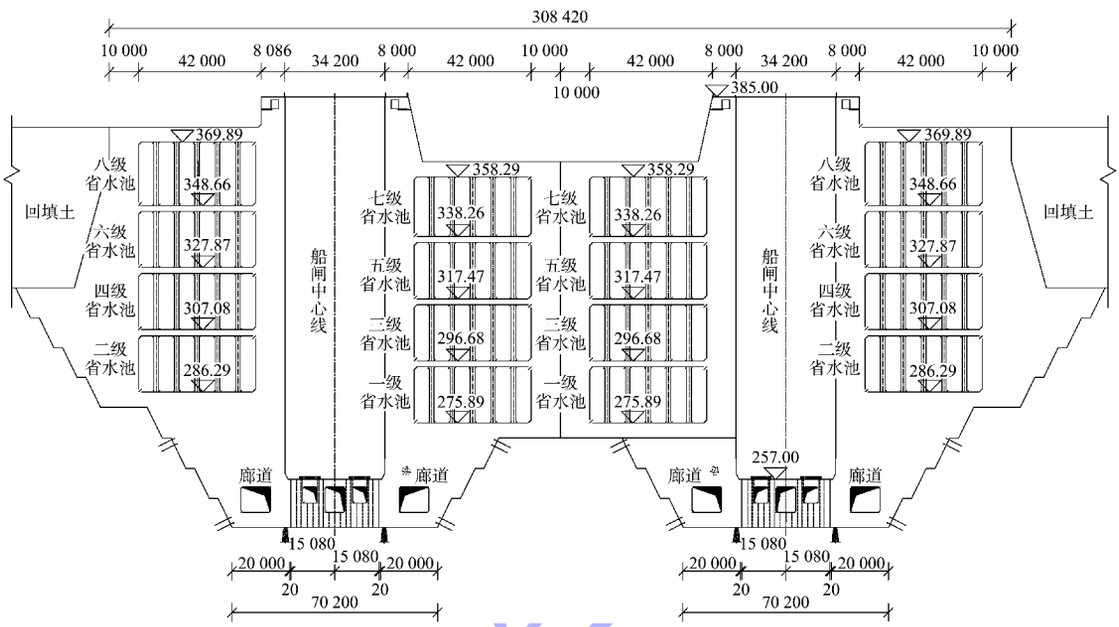

图 2　省水池布置(尺寸：mm；高程：m)

Fig. 2　Water-saving basins layout(dimension：mm；elevation：m)

2.2.2　闸室消能系统

为满足约 1 100 m^3/s 的峰值输水流量要求，保障闸室内船舶安全，提出了“明沟+格栅”分层消能输水系统，见图 3。该系统结合了明沟消能和盖板消能优点，通过在闸室有限水域内进行垂向与横向双向分层消能，有效解决了 34 m 宽闸室的高效消能难题。输水系统工作阀门由闸室主廊道阀门和省水池阀门两部分组成；通过分流口将省水池的水体均匀地分配至闸底相应的出水区段，以形成水力平衡的复杂分散输水系统。

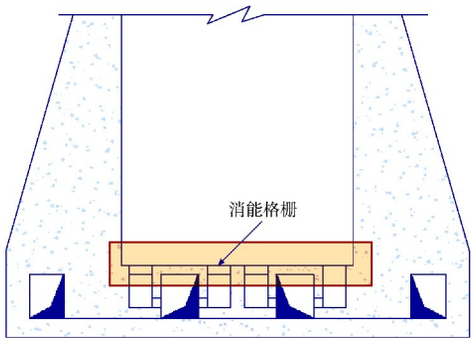

图 3　“明沟+格栅”分层消能输水系统概化图

Fig. 3　Generalization map of layered energy-dissipation water conveyance system with “open channel + grating”

3　水工结构设计方案

3.1　闸首结构

下闸首采用两线合一的整体式结构，顶高程 385 m、底高程 241 m，顺河向长度为 55 m，横河向顶部宽度为 313 m。各省水池均采用 ϕ1.5 m 立柱作为顶板支撑，见图 4。

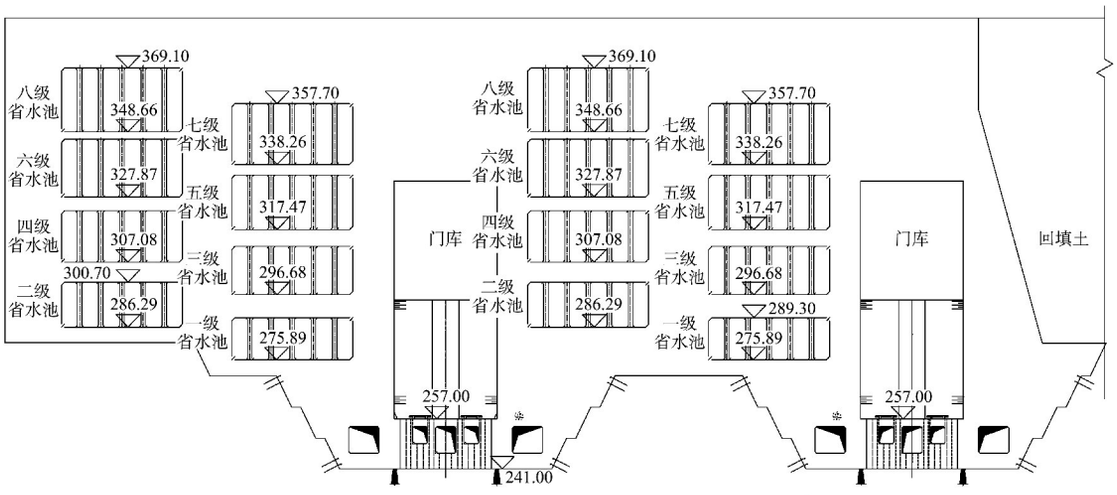

图 4　下闸首下游视图(单位：m)

Fig. 4　Downstream view of lower ship lock head(unit：m)

3.2　闸室结构

闸室靠岸一线的岸侧闸墙采用混合式结构，其余部分采用整体式结构，顶高程 385 m、底高程 241 m，顺河向长度为 18 m，横河向顶部宽度为 313 m；各省水池均采用 ϕ1.5 m 立柱作为顶板支撑，见图 5。

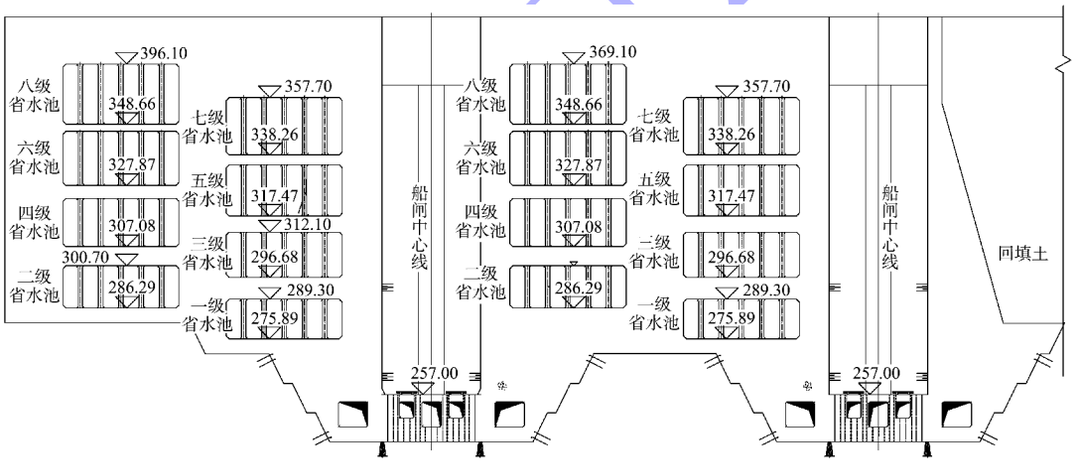

图 5　双线闸室下游视图(单位：m)

Fig. 5　Downstream view of double-line ship lock chamber(unit：m)

4　结构计算分析与讨论

4.1　稳定性分析

依据 JTJ 305—2025《船闸总体设计规范》[10]和 JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》[11]，对闸首及闸室进行抗滑、抗倾及地基承载力验算，结果见表 1~3。所有工况下，结构抗滑、抗倾安全系数均满足规范要求，地基最大应力未超过 1.2 倍承载力，正常工况下无拉应力，地震工况下拉应力控制在 200 kPa 以内，结构整体稳定。

表 1　闸首稳定性计算结果

Tab. 1　Stability calculation results of ship lock head

部位	方向	工况	抗滑系数	抗滑安全系数	抗倾系数	抗倾安全系数
上闸首	顺河向	灌水工况	3.37	3.0	3.40	1.6
		地震高水头运行工况	2.34	2.3	3.25	1.4
下闸首	顺河向	灌水工况	3.61	3.0	2.75	1.6
		地震高水头运行工况	2.55	2.3	2.39	1.4
上闸首	横河向	灌水工况	1.95	1.1	3.80	1.6
		地震高水头运行工况	1.48	1.0	2.71	1.4
		止水破坏工况	1.39	1.05	3.23	1.5

表 2　闸室稳定性计算结果

Tab. 2　Stability calculation results of ship lock chamber

部位	工况	抗滑系数	抗滑安全系数	抗倾系数	抗倾安全系数
中墩	完建工况	-	1.05	-	1.5
	两灌工况	-	1.10	6.52	1.6
	两泄工况	-	1.10	-	1.6
	一灌一泄	1.67	1.10	2.82	1.6
	一灌一检修	1.57	1.05	2.80	1.5
	校核工况	-	1.05	-	1.5
	两灌工况+地震	4.58	1.00	4.05	1.4
	两泄工况+地震	5.04	1.00	10.43	1.4
	一灌一泄+地震	1.22	1.00	2.23	1.4
	一灌一检修+地震	1.27	1.00	2.38	1.4
边墩	完建工况	-	1.05	-	1.5
	灌水工况	1.49	1.10	2.63	1.6
	泄水工况	-	1.10	-	1.6
	检修工况	19.60	1.05	206.50	1.5
	校核工况	-	1.05	-	1.5
	灌水工况+地震	1.12	1.00	2.12	1.4
	泄水工况+地震	5.04	1.00	10.77	1.4
	检修工况+地震	4.77	1.00	12.71	1.4

表 3　闸室地基承载力验算结果

Tab. 3　Bearing capacity verification results of foundation of ship lock chamber

部位	工况	地基承载力/MPa	最小地基应力/MPa	最大地基应力/MPa	平均值/MPa
中墩	完建工况	6.100	2.195	2.213	2.204
	两灌工况		1.782	2.226	1.977
	两泄工况		2.170	2.188	2.179
	一灌一泄		0.436	3.463	1.950
	一灌一检修		0.425	3.463	1.944
	校核工况		0.844	0.861	0.853
	两灌工况+地震		1.101	2.854	1.977
	两泄工况+地震		1.560	2.798	2.179
	一灌一泄+地震		-0.192	4.091	1.950
	一灌一检修+地震		0.003	3.885	1.944
边墩	完建工况	6.100	1.856	2.335	2.096
	灌水工况		0.430	3.245	1.837
	泄水工况		1.809	2.322	2.065
	检修工况		1.470	2.002	1.736
	校核工况		0.367	1.056	0.718
	灌水工况+地震		-0.170	3.844	1.837
	泄水工况+地震		1.722	2.409	2.065
	检修工况+地震		1.547	1.925	1.736

4.2　有限元数值模拟分析

4.2.1　闸首结构应力与位移

选取上游最高通航水位+下游最低通航水位+地震作为控制工况，建立下闸首有限元模型进行计算，见图 6。

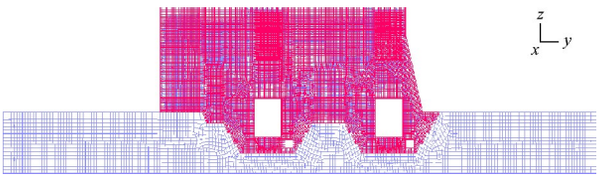

图 6　下闸首有限元模型

Fig. 6　Finite element model of lower ship lock head

计算结果见表 4。可以看出：地基和下闸首结构超限应力基本出现在上游或下游边缘，条带状宽度一般在一个单元长度，即 1.5 m 左右；通过加大下闸首长度，这部分应力会有比较明显的改善。结构和基岩在基岩面折角处、结构尺度突变处均有不同程度的应力集中，通过设置尺度过渡措施，比如倒角等，可以改善这部分应力状况。闸首位移和关键应力云图见图 7~9。

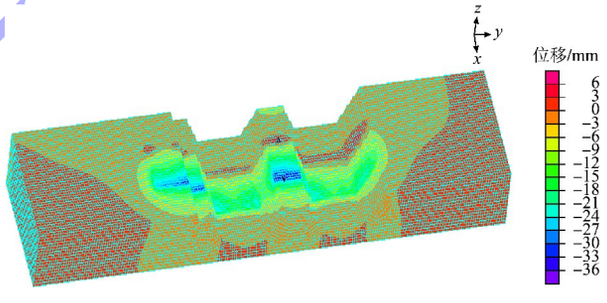

图 7　闸首基岩顶部位移云图

Fig. 7　Cloud map of displacement at bedrock top of ship lock head

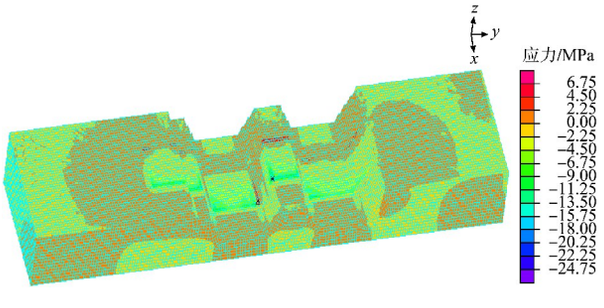

图 8　闸首基岩顶部竖向应力云图

Fig. 8　Cloud map of vertical stress at bedrock top of ship lock head

表 4　闸首位移和关键应力

Tab. 4　Displacement and critical stress of ship lock head

类型	地基顶面竖向位移/mm	地基顶面竖向应力/MPa	墙体主应力/MPa	立柱主应力/MPa	隔板主应力/MPa	结构顺河向应力/MPa	结构竖向应力/MPa	结构顶最大位移/mm
最大值	0. 43	0. 800	7. 000	3. 500	8. 000	5. 000	4. 700	23
最小值	-16. 01	-8. 000	-10. 000	-18. 000	-8. 500	-5. 500	-13. 000	-

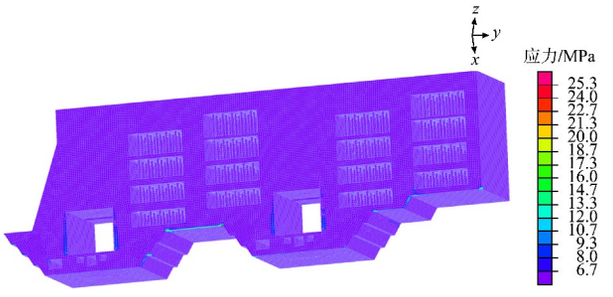

图 9　闸首结构应力大于 6. 7 MPa 的区域

Fig. 9　Area of structure stress above 6. 7 MPa of ship lock head

4. 2. 2　闸室结构应力与位移

对闸室结构进行有限元分析，计算工况选取上游最高通航水位+下游最低通航水位+地震工况，闸室模型见图 10。

计算结果见表 9，其中应力结果剔除了局部区域的奇异点数据。可以看出：地基的超限应力仅出现在闸墙临江侧边缘，条带状宽度约一个单元长度，即 1. 5 m 左右，通过增加小前趾结构或采用固结灌浆提高基岩模量，这部分应力应该会有比较明显的改善。运行工况下结构主应力大于 2. 5 MPa 的区域较有限，中底板廊道处、第 2 和第 4 池的隔板和立柱处有 3~4 m 的条带状分布，通过增大断面面积或设置倒角的方式能降低高应力区；地震工况下结构主应力大于 4. 5 MPa 的区域同样分布在中底板的廊道处和省水池的隔板、剪力墙等部位(5~6 m 宽)，后续经过结构形式、布置、尺度等方面的深化研究能进一步降低应力，结构配筋方面预计不会有制约性因素。闸室位移和关键应力云图见图 11~13。

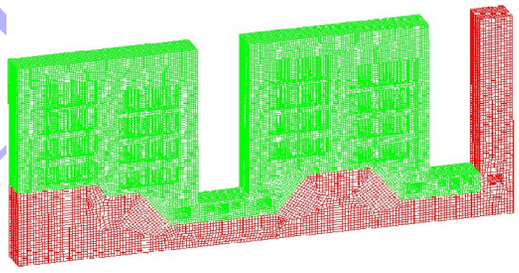

图 10　闸室模型

Fig. 10　Model of ship lock chamber

表 5　闸室位移和关键应力

Tab. 5　Displacement and critical stress of ship lock chamber

类型	地基顶面竖向位移/mm	地基顶面竖向应力/MPa	结构最大主应力/MPa	结构横河向应力/MPa	结构竖向应力/MPa	结构顶最大位移/mm
最大值	0	1. 000	8. 000	8. 000	6. 000	90
最小值	-36	-6. 000	-7. 000	-14. 000	-16. 000	-

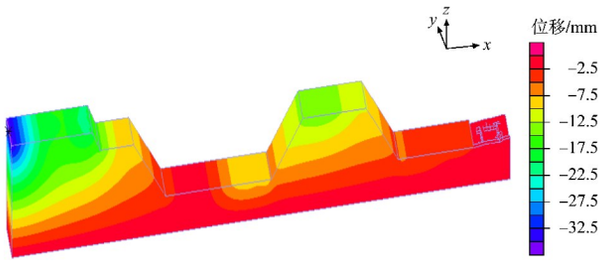

图 11　闸室基岩顶部位移云图

Fig. 11　Cloud map of displacement at bedrock top of ship lock chamber

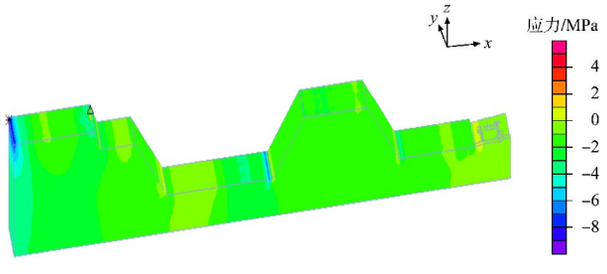

图 12　闸室基岩顶部竖向应力云图

Fig. 12　Cloud map of vertical stress at bedrock top of ship lock chamber

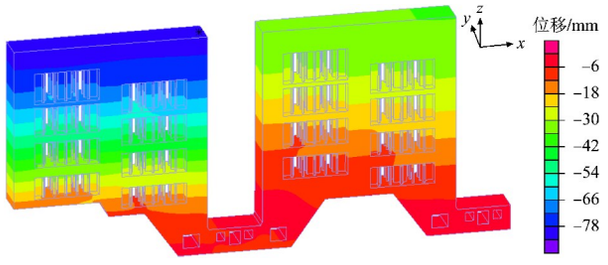

图 13　闸室横河向位移云图

Fig. 13　Cloud map of transverse displacement of ship lock chamber

5　结论

1）100 米级巨型省水船闸总平面布置方案合理，并经过了初步的通过能力复核，未来还需要根据运量预测、输水系统和闸阀门相关试验的结果等进一步完善。

2）输水系统的布置是 100 米级巨型省水船闸的一个重点和难点，目前通过工程类比和理论分析，完成了输水系统的初步布置方案，能够满足最大流量 1 100 m^3/s 左右的输水要求；后续还应通过模型试验或数值仿真对该方案进行验证和完善。

3）根据闸首闸室的稳定性计算、有限元计算结果，100 米级巨型省水船闸在控制工况下结构是稳定的，地基应力小于基岩承载力；承受八级地震烈度时，结构顶最大位移为 23 mm，变形在允许范围内；结构应力在剔除局部奇异点之后是能通过配筋承担，总体而言省水船闸水工结构是可实施的。

4）结构墙体与基岩相交处及省水池柱底、柱顶与隔板相交处存在局部应力集中，后续可通过完善结构体形、优化建基面形状及优化省水池立柱布置等进行解决。

5）由于本项目的 100 米级省水船闸是位于高地震烈度区的高耸结构，本文采用拟静力法进行模拟计算，建议后续采用动力时程法开展仿真分析，对拟静力法加以复核与验证。

6）建议后续研究结合对闸阀门方案的深入研究，进一步完善水工结构方案。

参考文献：

[1] 王仕民, 江耀祖, 吴英卓, 等. 超高水头大型船闸输水系统研究[J]. 人民长江, 2017, 48(24): 75-79, 100.
WANG S M, JIANG Y Z, WU Y Z, et al. Research on water conveyance system of large ship lock with super-high head[J]. Yangtze River, 2017(24): 75-79.

[2] 吴澎, 曹凤帅, 刘晓玲. 我国内河航运建设发展与展望[J]. 水道港口, 2025, 46(3): 313-318.
WU P, CAO F S, LIU X L. Development and prospect of inland navigation construction in China[J]. Journal of waterway and harbor, 2025, 46(3): 313-318.

[3] 张丽媛, 汤建宏. 高水头省水船闸水工结构及输水系统研究[J]. 水运工程, 2016(10): 146-151.
ZHANG L Y, TANG J H. Research on structure and water-conveyance system in high water head water-saving ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2016(10): 146-151.

[4] 唐铁明. 高水头船闸闸室结构内力分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
TANG T M. Analysis on internal force of lock chamber of high head ship lock [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.

[5] 陈明, 陈沿吉, 苗健康, 等. 超高水头大型船闸闸室明沟消能特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2022(5): 69-77.
CHEN M, CHEN Y J, MIAO J K, et al. Energy dissipation characteristics of the open ditch located in a large-scale ship lock chamber with an extreme high water head [J]. Hydro-science and engineering, 2022 (5): 69-77.

[6] 刘力侨, 曹周红, 李贤, 等. 地震波斜入射时不同水深超高水头船闸地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(2): 194-207.
LIU L Q, CAO Z H, LI X, et al. Analysis of the seismic response of ultra-high head lock at different water depths under oblique incidence of seismic waves[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2024, 44 (2): 194-207.

（下转第 128 页）

水运工程