

新型空间网格潜水门结构创建及受力性能研究

张庆民¹, 杜文风¹, 张昔飞²

(1. 河南大学 建筑工程学院, 河南 开封 475004; 2. 开封安利达绿色装配建筑有限公司, 河南 开封 475004)

摘要:【目的】挡水坝和闸门是水利枢纽的重要组成部分, 现有水工建筑物常面临开裂、施工周期长以及阻碍鱼类洄游等问题。开展新型空间网格潜水门结构创建及受力性能研究, 提出由空间钢网格与钢筋混凝土体组合而成, 集成传统挡水坝与闸门功能, 同时具备生态鱼道的可升降式新型潜水门结构。【方法】通过 3D3S 钢结构设计软件对潜水门进行三维建模, 利用 Fluent 软件优化溢流曲线参数以提升结构的过流能力和溢流面压力分布特性, 在有限元软件 ANSYS 中进行受力性能分析。【结果】①潜水门结构在正常使用状态下的最大位移为 28.7 mm, 最大应力为 267 MPa; ②湿模态自振频率为 3.65 Hz, 结构抗震性能良好; 在升降过程中, 结构位移和应力在规范允许的范围内有所增大。【结论】与传统挡水坝和闸门相比, 提出的新型空间网格潜水门结构不仅受力性能良好, 而且施工周期短、综合成本低, 还可兼作生态鱼道, 有助于减轻水利工程对河流生态系统的影响, 展现出较高的工程应用价值和环境友好性。

关键词:潜水门结构; 挡水坝; 有限元模拟; 受力性能分析

中图分类号:TU393.3

文献标识码:A

文章编号:2096-6792(2026)04-0020-09

作为重要的水工建筑物, 挡水坝通过拦截江河水流以调节水位和储水量, 广泛应用于全球各地。根据结构材料, 挡水坝可分为土坝、石坝、土石坝、混凝土坝、橡胶坝等^[1-4]。

土石坝因结构简单、材料易得而被广泛应用, 是历史最悠久的一种坝型。但渗流问题是土石坝的主要安全隐患, 约占 30%~40% 的土石坝事故与渗流问题直接相关。李卓等^[5-6]研究表明, 渗流不仅导致水量损失, 还削弱土体强度, 增加滑坡风险。聂相田等^[7]通过渗流场与应力场耦合分析发现, 耦合作用显著影响土石坝的稳定性。

混凝土坝凭借优异的抗渗漏、抗洪水漫顶和抗震性能, 成为仅次于土石坝的第二大坝型。然而, 大体积混凝土结构施工过程中易因温度应力不均产生裂缝, 需要长时间养护以防开裂, 从而延缓了施工进度。刘涛等^[8]分析了混凝土重力坝裂缝的形成机制。牛玉坤等^[9]利用 ANSYS 仿真模拟不同分层厚度的温度场和应力场, 提出优化设计方案, 有效降低了内部温差和温度应力。总体而言, 混凝土

坝施工复杂且对地基要求较高, 在一定程度上限制了其发展。

随着高分子合成材料技术的发展, 橡胶坝作为一种新型柔性薄壁水工结构逐渐被应用。橡胶坝兼具活动坝和溢流堰的功能, 主要用于防洪、水力发电、水体治理和生态修复等工程, 有利于生态环境保护。橡胶坝的应用范围通常局限于低水头、大跨度的闸坝工程, 其高度一般不超过 5 m。针对橡胶坝刚度较低的问题, 郭伟等^[10]对橡胶坝的抗震性能和破坏机制进行了相关研究, 结果表明, 增加坝刚度、优化防浪设施等可以有效提升其抗震能力。然而, 受其独特弹性特性的影响, 橡胶坝在承受一定程度的位移和形变时, 更易发生破裂、滑动、倾倒等形式的破坏。

空间网格结构在大跨空间结构中具有显著优势, 尤其是在应对复杂荷载和维持结构稳定性方面^[11]。其优异的载荷分布使其在承受巨大的静水压力时, 能够通过空间网格结构有效地分散压力, 从而提高结构的整体稳定性。此外, 空间网格结构

收稿日期/Received: 2024-09-09

修回日期/Revised: 2024-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1704141, 52178172); 河南省高校科技创新团队支持计划项目 (22IRTSTHN019); 河南省自然科学基金项目 (232300421133)。

第一作者: 张庆民 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事结构工程方面的研究。E-mail: 1910991058@qq.com。

通信作者: 杜文风 (1981—), 男, 教授, 博导, 博士, 从事结构工程方面的研究。E-mail: dwf@henu.edu.cn。

的自重也有助于增强结构的抗倾覆能力。

综上所述,传统挡水坝结构存在施工进度慢、易开裂和维护成本高等问题,在一定程度上阻碍了河湖联通。河湖水系连通工程中潜水门结构研究对优化区域水资源配置、修复河湖生态环境与防灾减灾具有重要意义^[12]。为此,本研究将受力性能良好的空间网格结构与混凝土结构相结合,提出了一种新型可升降式潜水门结构,集成传统挡水坝与水闸功能,同时具备生态鱼道的作用。该结构通过模块化和装配式施工方式,大幅提高了施工速度,

减少了资源消耗和碳排放。本研究首先介绍潜水门结构的创建思路,其次通过 3D3S 软件建立模型,最后在 ANSYS 中进行静力分析、模态分析、抗震分析,验证结构的合理性和可靠性。

1 结构创建

1.1 创建思路

该潜水门内部主体采用空间网格结构,通过 3D3S 软件生成网格、添加角锥和建立壳单元等来完成主体结构的创建,网格结构如图 1(a)、(b)所示。

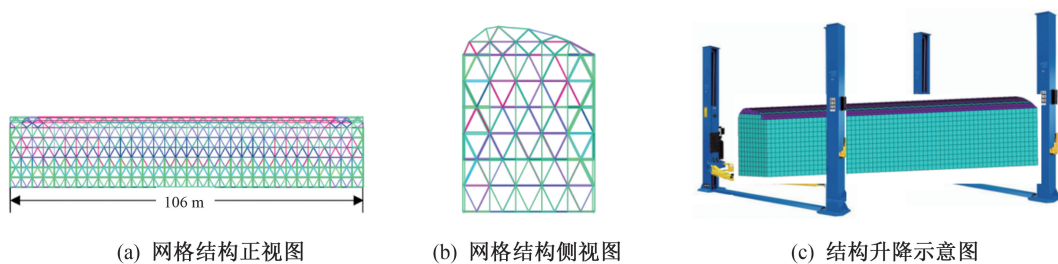


图 1 潜水门模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of submerged gate model

网格结构采用螺栓球节点连接,便于实现装配式施工。网格结构净跨 100 m、总高 21.25 m,两端通过特定措施将网格结构约束在混凝土结构上。在正常运行状态下,钢结构始终保持至少有两层网格在混凝土结构内部发挥作用来保证整体结构的稳定性。钢结构底部配置了若干台举升机,通过多柱举升机和结构内布置的气囊共同实现结构的升降,结构升降如图 1(c)所示。当有泄洪需求时,可以将结构全部降至下部混凝土结构内以实现快速泄洪。钢结构所用材料为 Q355 钢,整体钢结构总重约 2 500 t,相比传统挡水坝结构,自重较轻,具有可升降、成本低等优势。

1.2 溢流曲线参数分析

该潜水门集挡水、调节水流和生态鱼道等多功能于一体。在丰水期时,可以通过门顶过流实现快速泄洪,同时可通过多区域潜水门联动满足江豚过流条件,实现江湖连通的重要功能。门顶溢流曲线对结构过流能力、流场流速分布以及溢流面的压力分布起着关键作用。为满足江豚过流要求和优化溢流面压力分布,需要对溢流曲线进行参数分析。根据相关研究,一个较为理想的曲线应满足以下三个条件:①曲线应与上游垂直壁面相切;②曲率半径沿程无突变;③曲率半径不宜过小。

基于经验分析,采用圆弧段和抛物线段相结合的溢流曲线设计能够实现水流平滑过渡,减少湍流

的产生。此组合通过圆弧段来调控水流速度,水流过渡到抛物线段,使水流能量逐步释放。调整结构圆弧段半径 R 、弧顶高度 H 、水平段长度 L_1 和 L_2 的大小,调整后的溢流曲线,如图 2 所示。

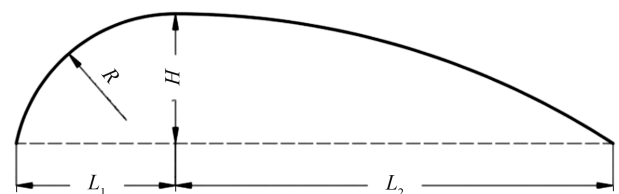


图 2 组合线图(单位:mm)

Fig. 2 Combined line graph

在不同流量条件下,溢流曲线参数的取值范围呈现出一定的规律性,见表 1。由表可知:当跨度为 100 m 的潜水门结构在调控期最大来水量 $Q > 1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的高流量工况下,宜采用较大的 H 值,这既能有效控制水流,又能确保结构的受力合理性;同时,较大的 R 值可平稳过渡水流,降低水流对闸门结构的冲击;当跨度为 100 m 的潜水门结构在调控期最大来水量 $Q < 1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的相对低流量工况下,宜采用较低的 H 值,这可以有效降低水头压力,减轻结构应力负载;较小的 R 值则能够有效控制水流,避免水流速度过快或不均匀流动;当 L_1/H 保持在 1.0~1.5 范围内时,溢流曲线的拟合效果得到进一步改善。在满足上述条件的情况下,溢流曲线的设计更接近理想状态。

表1 溢流曲线参数取值表

Tab. 1 Parameter values of overflow curve

Q/m^3	R/mm	H	L_1/H
$Q > 1\,000$	$4\,000 < R < 5\,000$	$5/L < H < 4/L$	$1.0 < L_1/H < 1.5$
$Q < 1\,000$	$2\,500 < R < 3\,500$	$6/L < H < 5/L$	

1.3 参数验证

针对跨度为 100 m 的潜水门结构,在调控期最大来水量 $Q > 1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 工况下的性能进行研究。采用 Fluent 软件对三维模型进行流场数值模拟与分析。通过对多组参数的测试与优化,得出了一组相对较优的参数配置,如图 3 所示。

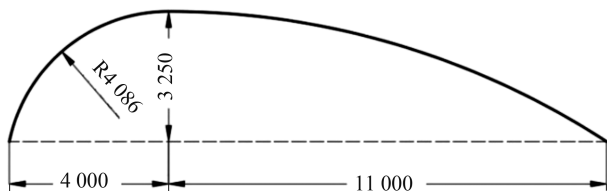


图3 具体参数图(单位:mm)

Fig. 3 Detailed parameter diagram

1.3.1 计算方法

由于潜水门顶部的过流流态复杂,常伴随水跃等现象的出现,因此准确追踪自由表面尤为重要。体积追踪 (Volume of Fluid, VOF) 法^[13]是目前处理自由液面的理想方法之一,并在水工水力学领域得到了广泛应用。VOF 法通过求解独立的动量方程组并跟踪每个计算区域内各流体的体积分数来建立两相或多相互不相溶流体模型。对气液两相流模型,自由面的追踪可通过求解相应的输运方程来实现:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_w) + \nabla \cdot (\alpha_w \mathbf{u}) = 0. \quad (1)$$

式中: α_w 为水的体积分数; $\mathbf{u}$ 为流体的速度矢量,决定了流体的运动趋势。

对于每个计算网格单元,都满足:

$$\sum \alpha_q = 1. \quad (2)$$

式中 α_q 为第 q 相气体体积分数。

对于气液两相流而言:

$$\alpha_w + \alpha_q = 1. \quad (3)$$

通过求解方程 (3) 可得出气液二相在各自网格单元内的体积分数。在整个计算区域内求解该方程,即可获得每个计算网格单元内气液两相各自的体积分数。当 $\alpha_w = 1$, 表示网格单元完全为水相; 当 $\alpha_w = 0$ 时, 表示网格单元内无水相; 当 $0 < \alpha_w < 1$ 时, 则表示网格单元为混合单元。结合实际,采用 VOF 法对潜水门结构的溢流过程进行自由水面的

追踪模拟。

1.3.2 计算设置

采用 ICEM 软件进行结构化网格划分。结构化网格通过规则的拓扑结构将结构内部节点相互连接,生成尺寸均匀的四面体或六面体单元。相比其他类型的网格,结构化网格具有以下优势:能够紧密贴合物体边界,有利于流体和应力集中的模拟;生成速度较快,并在处理大量数据时表现出更高的计算效率等^[14]。模型局部结构化网格划分结果如图 4 所示。



图4 局部结构化网格

Fig. 4 Locally structured mesh

采用 VOF 明渠模型计算,上游进口设置水深与流速。上游水位 14.2 m、下游设计水位 11.2 m,上部采用压力出口边界,水体体积分数为 0,压力为大气压。其他区域设置壁面边界,壁面粗糙高度为 0.5 mm。

1.3.3 验证结果

在以上溢流参数下,过流流场较为平顺,溢流面水舌入水在门后形成大尺度的漩涡。门顶过流后,出现射流及水跃流态。溢流水舌流速分布均匀,向下游流速增大,最大流速区基本脱离闸门溢流面,流速对结构影响相对较小,流速如图 5 所示。

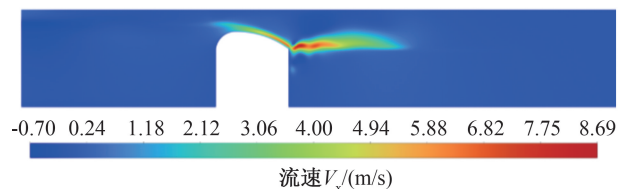


图5 某时刻流速图

Fig. 5 Velocity contour map at a specific time

结构上游面、溢流面以及下游面压力分布存在明显区别。在上游面,压力呈静压分布且流速小。由于下游出现了漩涡,下游靠近截面的水压力会有所减小^[15]。在下游面,压力基本呈静压分布,受溢流水舌分离以及门后漩涡的影响,下游门顶附近压力较小。

经计算,100 m 跨后的潜水门流量约为 $1\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 。在溢流过程中,上游面及溢流面形成向下游的水压力为 $157\,928\text{ kN}$ 。在底部密封不漏水的情况下,下游面形成向上游的水压力为 $97\,079\text{ kN}$ 。因而,上下游面产生的水压力差为 $60\,849\text{ kN}$ 。如图 6 所示,溢流面上游水面的压力(Y)大于下游水面的压力,由此产生的压力差值有利于抑制下游漩涡引起的结构振动。

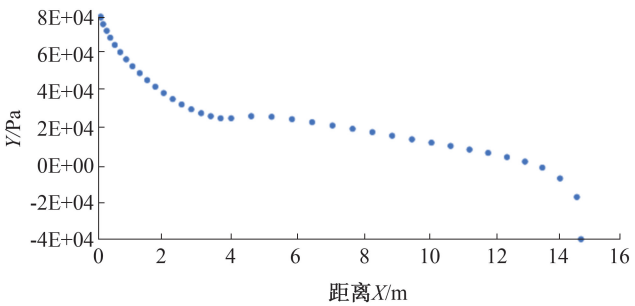


图 6 某时刻溢流面压力散点图
Fig. 6 Pressure scatter plot on overflow surface

2 工程实例分析

2.1 工程背景

鄱阳湖作为长江流域重要的通江湖泊,直接影响长江下游的生态环境和水资源调配。为了灵活应对不同季节的水情变化。在丰水期,枢纽工程通

过调节水流、协助泄洪来减少下游洪涝压力;在枯水期,蓄水功能保障鄱阳湖及周边地区的供水与水资源利用。鄱阳湖枢纽工程采用可调式全闸工程,不仅有助于生态环境保护,还能兼顾供水、灌溉和航运等功能。

根据《鄱阳湖水利枢纽工程环境影响报告书》,该枢纽通过一个或多个潜水门的溢流设计,优化江豚通行路径,以实现调控期不隔断或缩短隔断时间,从而达到全连通或更长时间连通的目的。深槽区域布置有两个净跨度 100 m、60 m 的潜水门结构,布置如图 7 所示。深槽部位 2 为跨度 100 m、宽度 15.0 m、高度 21.25 m 的潜水门结构。

根据运行调度原则,100 m 跨度的潜水门在上游水位为 6.6~14.2 m 和上下游水位差不超过 3.00 m 时运行。当下泄流量 $Q\leq 598\text{ m}^3/\text{s}$ 时,60 m 跨度潜水门运行,100 m 跨度潜水门处于挡水状态;当下泄流量 $Q>598\text{ m}^3/\text{s}$ 时,100 m 跨度潜水门开始运行。如上所述,100 m 潜水门运行的上游水位为 6.6~14.2 m,允许上下游水位差不超过 3.00 m。下游河道最低水位 3.00 m。为研究结构最不利受力情况下的性能,选择潜水门处于极限挡水状态时的工况,即上游水位 15.25 m(结构完全浸没),下游水位 3.00 m,进行正常使用状态下的受力性能分析。

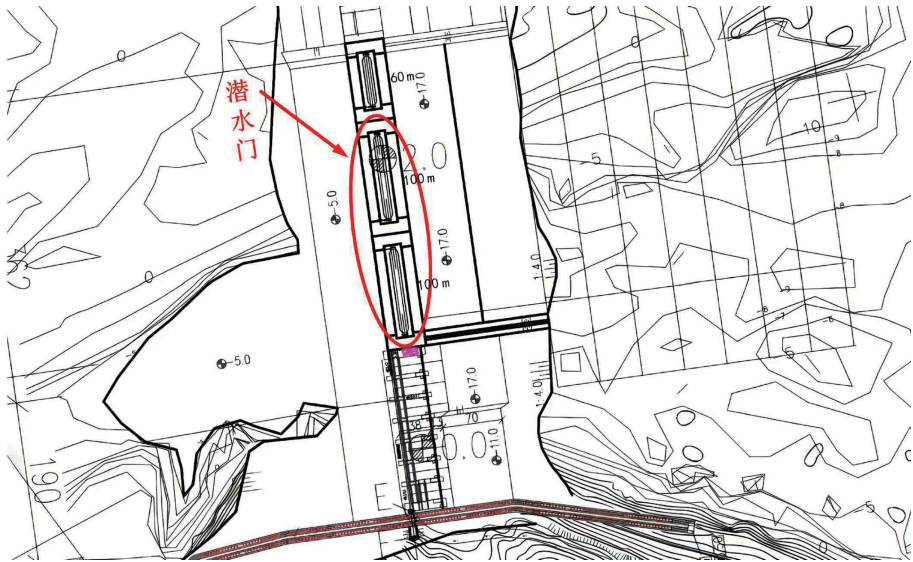


图 7 结构布置图
Fig. 7 Structural layout drawing

2.2 荷载工况

结合《空间网格技术规程》(JGJ 70—2010),结构分析时考虑以下荷载:

1)恒荷载包括结构自重以及节点自重。其中节点自重通过螺栓球节点设计后回代计算得出。

2)活荷载主要考虑静水压力对结构的影响。根据 $F=\rho gh$ 和节点相应的附属面积,进而转换为节点荷载进行计算,其中: ρ 为海水的密度,取值为 $1\,025\text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度,取值为 9.8 m/s^2 ; h 为对应节点处的水头高度, m;

3)地震荷载。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010),选取8度0.2g,场地类别为一类,设计地震分组为一组,阻尼比取0.02。根据《空间网格结构技术规程》(JGJ 70—2010),对8度设防地区,应进行水平地震和竖向地震的计算。

4)温度荷载。温度荷载对结构的影响较为显著,因此计算时应考虑其作用。通常情况下,计算时考虑温度正增量和负增量两种温度工况。两个温度增量分别表示结构安装时的温度与全年最高与最低温度的差值。各种荷载的工况组合见表2。表中,“恒0”为恒荷载,“活1”为活荷载,“温度1”和“温度2”为温升和温降荷载,“水平地震”和“竖向地震”为不同方向下的地震作用荷载。荷载工况前的数字为对应荷载的分项系数。

表2 工况组合
Tab.2 Load case combinations

组合号	名称
1	1.3 恒0+1.5 活1
2	1.3 恒0+1.5 温度1
3	1.3 恒0+1.5 温度2
4	1.3 恒0+1.5 活1+1.5×0.6 温度1
5	1.3 恒0+1.5 活1+1.5×0.6 温度2
6	1.3 恒0+1.5×0.7 活1+1.5 温度1
7	1.3 恒0+1.5×0.7 活1+1.5 温度2
8	1.3 恒0+0.5 活1+1.4 水平地震
9	1.3 恒0+0.5 活1+1.4 竖向地震
10	1.2 恒0+1.2×0.5 活1+1.3 水平地震+ 0.5 竖向地震
11	1.2 恒0+1.2×0.5 活1+0.5 水平地震+ 1.3 竖向地震

2.3 网络结构受力性能分析

2.3.1 静力分析

在钢结构设计软件3D3S中建立模型后,导入有限元软件ANSYS进行受力性能分析。利用ANSYS对上述不同工况组合的静力分析结果来评估结构在各种工况下的性能。图8为在正常使用状态下,最不利工况组合5情况下的位移云图和等效应力云图。

根据《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—2019)的要求,受弯构件的最大挠度与计算跨度之比不超过1/750。对于跨度100m的钢坝闸,结构在正常使用状态下的最大位移为28.74mm,远小于规范允许的最大挠度133.33mm,满足规范要求。根据《空间网格结构技术规程》(JGJ 7—2010)的规定,网格结构的容许挠度为 $L/400$ (L 为结构跨度),潜水门结构的最大位移是28.74mm,约为跨度的1/3479,远小于容许挠度。此外,结构的最大应力为267MPa,小于允许应力。应力云图(图8(b))显示,结构整体应力分布比较均匀,具有良好的刚度。

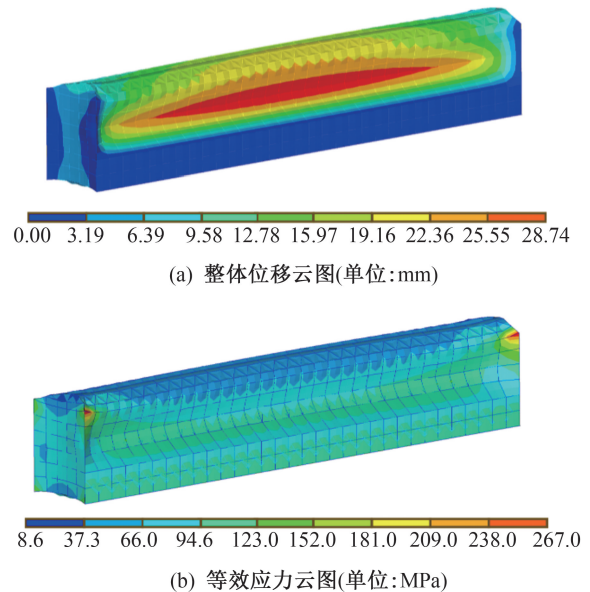
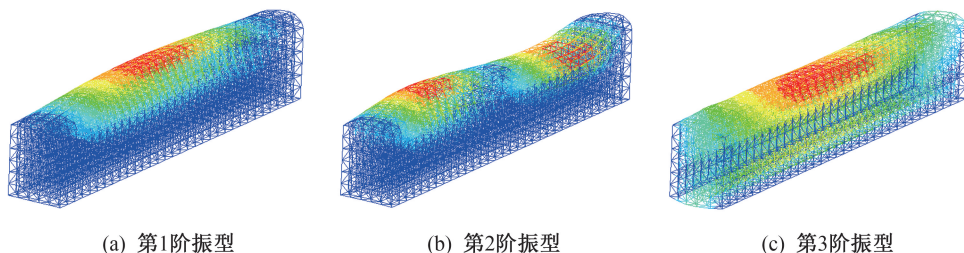


图8 静力计算云图

Fig.8 Static analysis contour maps

2.3.2 干模态分析

干模态分析是指在不考虑流体介质存在的情况下进行的模态分析,主要用于研究固体结构的振动特性,进而检查网格结构的薄弱部位。通过使用有限元软件ANSYS中的Block Lanczos对潜水门结构进行模态分析,提取前20阶固有模态,扩展模态阶数至20阶,观察结构的动力响应。干模态前6阶振型如图9所示,表3为网格结构干模态前6阶的自振频率。



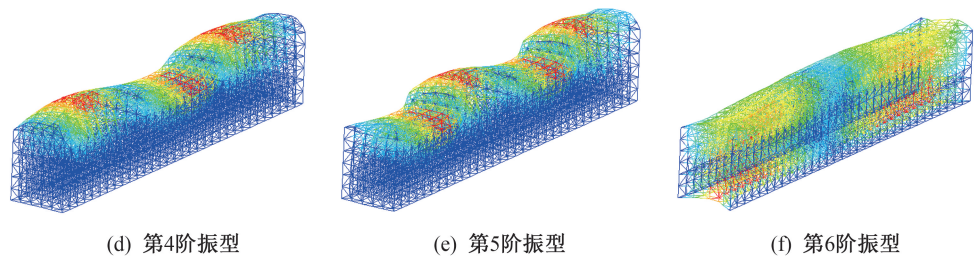


图 9 干模态振型图

Fig. 9 Dry modal shapes

表 3 干模态自振频率

Tab. 3 Dry modal natural frequency

阶数	前 1 阶	前 2 阶	前 3 阶	前 4 阶	前 5 阶	前 6 阶
频率/Hz	20. 624 0	21. 484 0	22. 608 0	23. 311 0	25. 812 0	27. 801 0

根据图 9 所示的前 6 阶振型,结构振动主要表现为整体性振动,无明显局部振动。其中,第 1 阶振型为水平振动,第 2、4、5 阶为水平振动伴随扭转,第 3、6 阶为沿跨度方向的水平振动。总体而言,水平振动和扭转是主要的振动形式,对结构影响较为显著。由结构干模态自振频率(表 3)可知,结构的自振频率呈递增趋势。考虑到水流的脉动频率主要分布在 0~20. 000 0 Hz,当结构自振频率接近该范围时可能发生共振。分析结果显示,结构的第一阶自振频率为 20. 620 0 Hz,其余各阶自振频率均高于 20. 000 0 Hz,因此潜水门主体结构发生共振的可能性较小。

2. 3. 3 湿模态分析

湿模态分析是针对浸没在液体中的结构或受到液体作用的结构进行的模态分析。在这种分析中,除了考虑结构本身的振动特性,还考虑液体与结构之间的耦合作用。特别在水工结构领域,液体对结构的动水压力不容忽视。现行规范通常将动水压力以附加质量的形式进行考虑^[16]。

附加质量法是由 Westergaard H M^[17]提出的,其基本假设是:流体为不可压缩且具有无限延展性,该方法的核心思想是将动水压力等效为附加在结构上的质量,从而简化流体对结构的复杂作用过

程。据此方法,可以将潜水门等水工结构在动水压力作用下的控制方程表示为:

$$\begin{aligned} & (M_0+M_f)\ddot{u}(t)+(C_0+C_f)\dot{u}(t)+ \\ & (K_0+K_f)u(t)=F(t)。 \end{aligned} \tag{4}$$

式中: M_0 、 C_0 、 K_0 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; M_f 、 C_f 、 K_f 分别为流体对结构的附加质量矩阵、附加阻尼矩阵和附加刚度矩阵; $\ddot{u}(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 、 $u(t)$ 分别为结构的加速度矩阵、速度矩阵和位移矩阵; $F(t)$ 为水流脉动压力作用引起的外部荷载矩阵。

对附加质量矩阵 M_f ,可以对结构与流体交界面上的节点施加附加质量单元,每个单元的数值根据式(5)赋予。

$$M_i=\frac{7}{8}\rho_f A_i\sqrt{Hh_i}。 \tag{5}$$

式中: M_i 为对应节点 i 的附加质量; ρ_f 为流体密度; A_i 为流体作用下对应节点 i 关联单元的有效面积; H 为水头高度; h_i 为对应节点 i 与水面之间的距离。

通过将附加质量施加在结构的流体接触面上,模拟液体对结构的动态作用。湿模态振型图如图 10 所示,对应的自振频率见表 4。

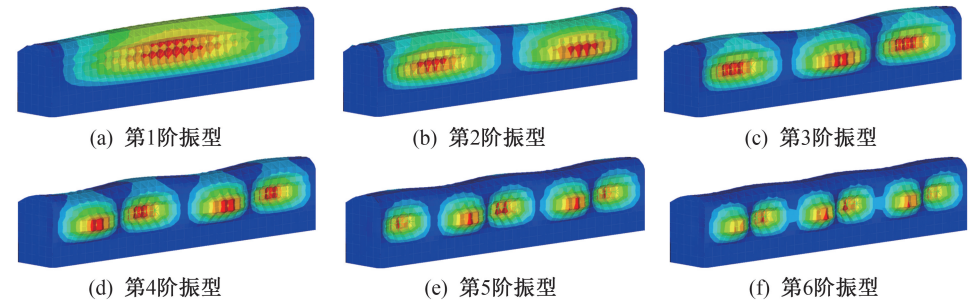


图 10 湿模态振型图

Fig. 10 Wet modal shapes

表4 湿模态自振频率

Tab. 4 Wet modal natural frequency

阶数	前1阶	前2阶	前3阶	前4阶	前5阶	前6阶
频率/Hz	3.650 4	4.180 9	4.558 8	4.796 6	4.972 0	5.122 9

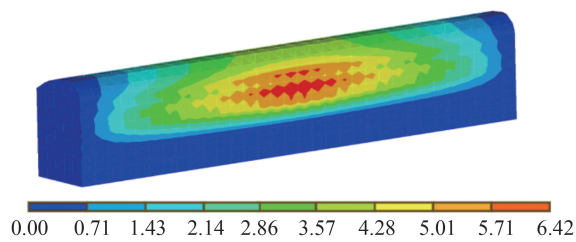
与干模态分析结果相比,由于水的附加质量影响,湿模态频率有所降低。考虑流固耦合效应后,结构的第1阶频率为3.650 4 Hz,高于地震加速度反应谱的峰值频率(约2 Hz),因此地震作用对结构影响相对较小。从湿模态振型图(图10)中可看出水与潜水门结构相互作用的过程。相比干模态分析,湿模态分析能够更准确地模拟结构在实际环境中的振动特性,并为后续的反应谱分析提供更可靠的基础。

2.3.4 反应谱分析

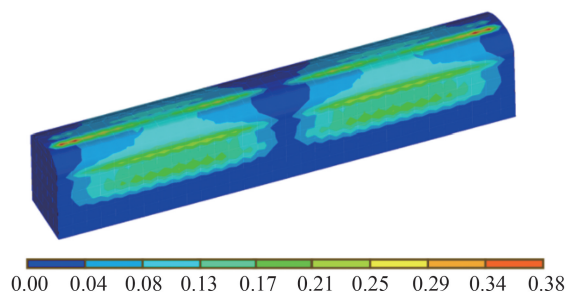
振型分解反应谱法是目前水工结构抗震设计规范中广泛应用的一种分析方法^[18]。基于湿模态分析,考虑结构周围水体对结构振动特性影响的基础上,通过单点响应谱分析对结构进行多向地震激励分析。

正常挡水条件下结构的边界条件:①约束条件。结构两侧自由度约束: $U_x=0$ 、 $U_y=0$ 、 $U_z=0$;底部两层网格的节点处约束: $U_x=0$ 、 $U_z=0$ 。②荷载条件,在面板上施加水压强梯度荷载。

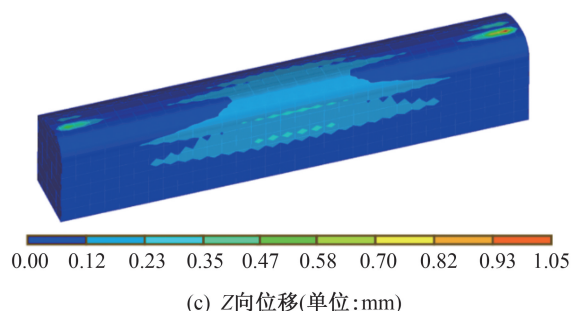
地震效应下结构的边界条件:在正常挡水工况下,在面板上施加动水压力荷载,并对结构分别施加3个方向的地震惯性加速度。结构的阻尼比设定为0.02,采用SRSS法对模态进行组合,分析结果如图11所示。



(a) X向位移(单位:mm)



(b) Y向位移(单位:mm)



(c) Z向位移(单位:mm)

图11 地震位移图

Fig. 11 Displacement contour maps under seismic loading

反应谱分析结果(图11)显示,在正常使用状态下,结构在X向地震激励下的响应最为显著,最大位移为6.42 mm,位于迎水面的中部区域,且位移分布较为均匀;在Y向和Z向地震激励下,结构最大位移分别为0.38 mm和1.05 mm,均发生在顶部区域。所有位移均满足规范规定的容许挠度限值($L/750$),符合工程安全运行要求。在正常使用状态下,由于结构的刚度较大,地震影响通常不构成主要控制因素。

2.4 升降过程中受力性能分析

在升降过程中,潜水门结构受力状态会发生显著变化,使得升降过程成为相对不利的受力阶段。在此过程中,约束和外界因素的变化都可能引发受力状况的显著波动。例如,升降瞬间由于底部两层约束释放导致结构的受力状态出现变化。对此时的受力状况进行分析,静力分析结果如图12所示。

根据《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—2019)的要求,受弯构件的最大挠度与计算跨度之比不应超过 $1/750$ 。对于跨度100 m的钢坝闸,结构整体位移为122.40 mm,小于规范允许的最大挠度133.33 mm。依据《空间网格结构技术规程》(JGJ 7—2010),静力分析结果(图12)表明,潜水门结构在升降过程中的最大位移是122.4 mm,小于容许挠度 $L/400$;结构的最大应力为314 MPa,小于材料的屈服强度。尽管相比正常使用状态下,结构的位移和应力有所增大,但整体表现出较高的刚度和稳定性。目前,针对升降过程中的动力响应及影响机制研究,尚不充分。特别是在升降启动和停止阶段,水流惯性效应可能引发瞬态冲击荷载;升降过程中,门体扰动水流,导致流体静压和动压

不均,并诱发剧烈水面波动等。这些水动力效应可能对潜水门的运行稳定性和结构安全性构成潜在威胁,还需进一步深入研究和分析。

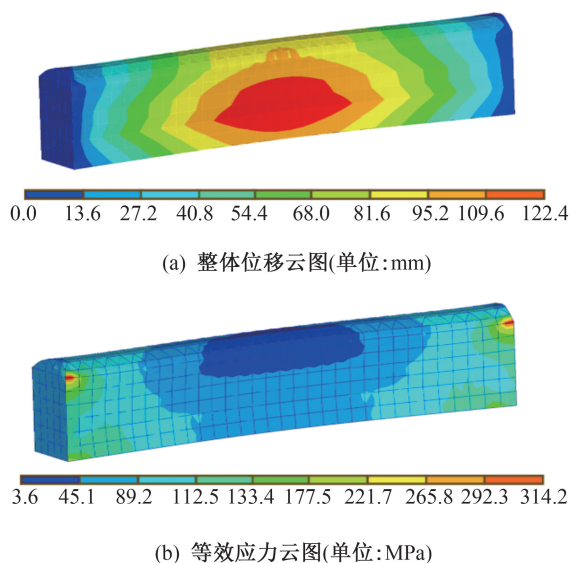


图 12 静力计算云图

Fig. 12 Static analysis contour maps

3 结论

提出了一种新型可升降式潜水门结构,并对其合理性进行验证。首先,通过对潜水门结构流场进行三维数值模拟分析,确定了相对较优的溢流曲线。然后,对结构在正常使用状态下的最不利工况进行了静力分析,分别计算了结构在干模态和湿模态两种情况下的振型及其频率,并基于湿模态分析结果进行反应谱分析。最后,对结构在升降过程中可能出现的不利情况进行了初步研究。主要得到以下结论:

1) 溢流面上游压力呈静压分布,流速较低。压力沿溢流面向下游逐渐降低,末端达到最低值并伴随分离流现象。压力差随水流向下游逐步增大,形成向上的压力梯度,有效抑制下游漩涡引起的振动。表明该溢流曲线在水流调控方面具有较好的适用性。

2) 对于结构变形而言,在上游水位 15.25 m、下游水位 3.00 m 的不利情况下,结构最大变形 28.74 mm、最大应力 267.0 MPa,均符合规范要求,表明结构具备良好的刚度。

3) 结构在正常使用状态下,考虑水的附加质量后,结构的自振频率有所降低。基于湿模态的反应谱分析结果显示,结构主要以 X 向变形为主,变形为 6.42 mm,满足规范要求,说明结构具备良好的抗振性能。

4) 在升降过程中,结构的受力状态会发生显著变化,最大位移增至 122.4 mm,最大应力增至 314.2 MPa,均高于正常使用状态下的位移和应力。表明升降过程中各种因素的变化对结构的安全性和稳定性具有重要影响。

5) 本文采用空间网格结构作为主要受力主体,具有施工便捷、造价较低、受力性能较好等优势,具有广阔的应用前景和环境友好性。此外,该结构在启动和关闭时产生的惯性力、水体振动对结构的影响以及结构面临反复升降出现的疲劳问题等需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 钟启明,陈生水,梅世昂.均质黏性土坝漫顶溃决机理及溃坝过程模拟[J].工程科学与技术,2019,51(5):25-32. [Zhong Qiming, Chen Shuisheng, Mei Siang. Breach mechanism and breach process simulation of homogeneous cohesive earthen dam due to overtopping[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(5): 25-32.]
- [2] 朱安龙,廖洁,沈超敏,等.大角度折线型高面板堆石坝三维数值模拟分析及应用[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(5):45-52. [Zhu Anlong, Liao Jie, Shen Chaomin, et al. Three-dimensional numerical simulation analysis and application of high concrete face rockfill dam with large angle broken line[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(5): 45-52.]
- [3] 刘辉,朱梦源,赵文飞,等.基于 PS-InSAR 的小浪底土石坝形变监测与稳定性模拟[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(1):1-10. [Liu Hui, Zhu Mengyuan, Zhao Wenfei, et al. Deformation monitoring and stability simulation of Xiaolangdi soil and rock dam based on PS-InSAR[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(1): 1-10.]
- [4] 朱伯芳.混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望[J].水利学报,2006,37(12):1424-1432. [Zhu Bofang. Current situation and prospect of temperature control and cracking prevention technology for concrete dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1424-1432.]
- [5] 李卓,方艺翔,鲁洋,等.前期降雨与库水位变化对土石坝渗流及稳定特性影响研究[J].岩土工程学报,2022,44(12):2177-2186. [Li Zhuo, Fang Yixiang, Lu Yang, et al. Influences of antecedent rainfall and change of reservoir water level on seepage and stability characteristics of earth rock dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(12): 2177-2186.]
- [6] 岳庆河.基于 ANSYS 的土石坝渗流与稳定分析研究

- [D]. 泰安: 山东农业大学, 2008. [Yue Qinghe. Seepage and stabilization study with ANSYS on earth rock-fill dam [D]. Taian: Shangdong Agricultural University, 2008.]
- [7] 聂相田, 庄濮瑞, 焦延涛, 等. 考虑渗流-应力耦合的均质土坝边坡稳定分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 54-58. [Nie Xiangtian, Zuang Purui, Jiao Yantao, et al. Slope analysis of homogeneous earth dam considering seepage stress coupling [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 54-58.]
- [8] 刘涛, 卢冰华. 某混凝土重力坝裂缝分类及产生原因综述[J]. 水利水电技术, 2011, 42(7): 48-51. [Liu Tao, Lu Binghua. Review on classification of cracks on a concrete gravity dam and their causations [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(7): 48-51.]
- [9] 牛玉坤. 永定桥水库碾压混凝土重力坝施工分层研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017. [Niu Yukun. Research on construction stratification of RCC gravity dam in Yongdingqiao reservoir [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017.]
- [10] 郭伟, 李嘉骏, 高鑫, 等. 基于有限差分方法的橡胶坝挡水性能分析及简化设计[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2022, 55(4): 411-418. [Guo Wei, Li Jiajun, Gao Xin, et al. Water resistance analysis of rubber dam and its simplified design method based on finite difference method [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(4): 411-418.]
- [11] 董石麟. 我国大跨度空间钢结构的发展与展望[J]. 空间结构, 2000(2): 3-13. [Dong Shilin. The development and prospect of long-span steel space structures in China [J]. Spatial Structures, 2000(2): 3-13.]
- [12] 黄草, 陈叶华, 李志威, 等. 洞庭湖区水系格局及连通性优化[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 661-672. [Huang Cao, Cheng Yehua, Li Zhiwei, et al. Optimization of water system pattern and connectivity in the Dongting Lake area [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 661-672.]
- [13] 张健, 方杰, 范波芹. VOF 方法理论与应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 67-70. [Zhang Jian, Fang Jie, Fan Boqin. Advances in research of VOF method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(2): 67-70.]
- [14] Menter F R. Performance of popular turbulence model for attached and separated adverse pressure gradient flows [J]. AIAA Journal, 1992, 30(8): 2066-2072.
- [15] 董家, 严根华, 杨兴义, 等. 月牙肋岔管群水力损失模型试验与数值模拟结果的比较[J]. 水电能源科学, 2016, 34(10): 60-64. [Dong Jia, Yan Genhua, Yang Xingyi, et al. Experimental research and numerical simulation comparison of unsymmetrical Y-type penstock for hydraulic loss [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(10): 60-64.]
- [16] 李居庆, 何艳丽. 拱形气肋结构干、湿模态分析及附加质量简化公式研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(1): 49-55. [Li Juqing, He Yanli. Dry and wet analysis of air-inflated arch structure and simplified formula study for additional mass [J]. Building Structure, 2022, 52(1): 49-55.]
- [17] Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes [J]. Transactions of the American society of Civil Engineers, 1933, 98(2): 418-433.
- [18] 孔剑, 朱召泉, 董顾春. 基于 ANSYS 的钢闸门地震反应谱分析[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(2): 206-208. [Kong Jian, Zhu Zhaoquan, Dong Guchun. Seismic response spectrum analysis of steel gates based on ANSYS [J]. Sichuan Building Science, 2014, 40(2): 206-208.]

Construction and Mechanical Performance of a New Spatial Grid Submerged Gate Structure

ZHANG Qingmin¹, DU Wenfeng¹, ZHANG Xifei²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China;

2. Kaifeng Anlida green assembly construction Co., Ltd., Kaifeng 475004, China)

Abstract: [Objective] Dams and gates are important components of hydraulic engineering hubs, but existing hydraulic structures often face problems such as cracking, long construction periods, and obstruction of finless porpoise migration. To address these problems, this study proposes a new liftable submerged gate structure composed of spatial steel grids and reinforced concrete, integrating the functions of traditional water-retaining dams and sluice gates while also serving as an ecological fish passage. **[Methods]** A three-dimensional model of the submerged gate was established using 3D3S steel structure design software. Fluent was used to optimize the overflow curve parameters to improve flow capacity and pressure distribution on the overflow surface, and finite element analysis was performed in ANSYS to evaluate mechanical performance. **[Results]** (1) Under normal service conditions, the maximum displacement of the submerged gate structure was 28.7 mm and the maximum

(下转第 38 页)

- on bearing capacity of mucky clay foundation improved by sand piles[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(23): 276–280.]
- [19] 周越洲, 李重阳, 李国清, 等. 软土地基倾斜桩竖向承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(8): 274–281. [Zhou Yuezhou, Li Chongyang, Li Guoqing, et al. Research on vertical bearing capacity of inclined piles in soft soil foundation[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(8): 274–281.]
- [20] 李超杰, 朱洪泽, 苏浩然, 等. 海上风电单桩基础轴向承载特性及软弱土层影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2023(2): 185–191. [Li Chaojie, Zhu Hongze, Su Haoran, et al. Analysis on axial bearing characteristics of monopile foundation for offshore wind turbines and influence of soft soil layer[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(2): 185–191.]

Model Verification and Reinforcement Optimization of Hollow Concrete Dams

CHEN Zhuanzhuan¹, YANG Gui^{2,3}, LIU Luyang¹, WU Liangjie¹, SUN Yin¹

(1. Department of Seismic Risk Assessment, Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Dam Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Institute of Safety and Disaster Prevention Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the dynamic response laws of hollow concrete dams under weak dam foundations and the influence mechanisms of key control parameters, providing a reference for seismic design of similar dams. **[Methods]** Based on shaking table test results, a numerical model reflecting pore pressure growth characteristics was established using PLAXIS finite element software, and the model accuracy and reliability were verified. The dam was proportionally scaled up to a height of 12 m, and the seismic dynamic responses of the dam under relatively weak and hard dam foundation conditions were compared and analyzed. Taking the foundation condition corresponding to the peak horizontal displacement of the dam as the benchmark, the effects of rockfill size behind the dam, transverse pile spacing, and foundation reinforcement depth were quantitatively studied. **[Results]** (1) Compared with rigid dam foundation conditions, under weak dam foundations, the hollow concrete dam showed overall sliding deformation, with the most significant horizontal displacement response. The maximum dynamic displacement of the dam was 31.1 cm, and the residual horizontal displacement was 14.8 cm. (2) Under weak dam foundations, among various reinforcement measures, rockfill behind the dam had the most obvious restraint effect on dam horizontal displacement, followed by foundation reinforcement, while reducing transverse pile spacing had the weakest effect. (3) Considering the stress responses of the cut-off wall and piles, foundation reinforcement was the optimal scheme, and the reinforcement depth needed to penetrate the soil layer interface. **[Conclusions]** This study clarifies the action mechanisms of different foundation conditions and key parameters on the dynamic response of hollow concrete dams, and the conclusions can provide a reference for seismic design and foundation reinforcement of hollow concrete dams on soft foundations.

Keywords: hollow concrete dam; weak dam foundation; dynamic response; shaking table test; dam reinforcement; numerical simulation

(编辑:杜明侠)

(上接第28页)

stress was 267 MPa. The wet-mode natural frequency was 3.65 Hz, indicating good seismic performance. (2) During lifting, structural displacement and stress increased but remained within the allowable range specified by relevant standards. **[Conclusions]** Compared with traditional water-retaining dams and gates, the proposed spatial grid submerged gate structure has good mechanical performance, a shorter construction period, and lower overall cost, and it can also serve as an ecological fish passage, helping to reduce the impact of hydraulic engineering on river ecosystems. These advantages indicate high engineering application value and environmental friendliness.

Keywords: submerged gate structure; water-retaining dam; finite element simulation; mechanical performance analysis

(编辑:韩小燕)