

大跨度水工渡槽结构力学性能分析与抗震设计优化

翟文涛

云南新大成人力资源服务有限公司 云南 昆明 650035

摘要: 大跨度水工渡槽结构力学性能复杂,其抗震设计至关重要。本文先分析结构体系与受力特征,明确力学性能分析核心指标;接着开展静力、动力及复杂工况下力学性能专项分析;阐述抗震设计核心要素,包括基本原理、荷载规律等;最后提出抗震设计优化策略,涵盖结构体系、关键构件优化及加固措施优化。通过这些研究,为大跨度水工渡槽的抗震设计提供科学依据,保障在地震等灾害下的安全稳定运行。

关键词: 大跨度水工渡槽;结构力学性能;抗震设计;优化策略

引言: 大跨度水工渡槽作为水利工程的关键设施,在区域水资源调配中发挥着不可替代的作用。其结构力学性能受多种因素影响,在地震等动力荷载作用下,受力情况更为复杂。一旦发生破坏,将严重影响水资源的正常供应,给受灾地区带来巨大损失。因此,深入分析大跨度水工渡槽的结构力学性能,开展科学合理的抗震设计优化研究,对于提高渡槽的抗震能力,保障在复杂环境下的安全稳定运行,具有重要的现实意义和工程价值。

1 大跨度水工渡槽结构力学性能分析基础

1.1 结构体系与受力特征

大跨度水工渡槽的典型结构形式包括梁式、拱式及桁架式等,不同形式在力学构成上呈现显著差异。梁式渡槽以简支或连续梁体系为主,主要承受弯矩与剪力,其受力路径清晰,跨中弯矩随跨度增大呈非线性增长趋势。拱式渡槽通过拱肋将荷载传递至支座,轴向压力占主导,拱脚处存在较大水平推力,需通过重力式墩台或拉锚系统平衡。桁架式渡槽采用空间杆系结构,通过杆件轴向力传递荷载,具有较高的材料利用率,但节点连接构造复杂,对施工精度要求较高。恒载作用下的受力分布主要由结构自重与水体重力决定^[1]。自重荷载沿跨度方向均匀分布,导致梁式渡槽跨中弯矩最大,拱式渡槽拱脚轴力集中。可变荷载包括风荷载、温度荷载及地震荷载等,其中风荷载对高耸渡槽的侧向稳定性影响显著,温度荷载通过约束变形引发结构内力重分布,地震荷载则通过惯性力作用激发结构动力响应。水体与结构的耦合作用是力学分析的关键难点。静水压力沿槽壁呈三角形分布,对侧墙产生水平推力,通过槽底传递竖向荷载。动水压力由水体晃动产生,其幅值与频率与结构自振特性密切相关,可能导致共振风险。流固耦合效应还会改变结构动力刚度,降低系统固有频率,放大位移响应,尤其在地震或强风工况下需重点考虑。

1.2 力学性能分析核心指标

强度相关指标是评估结构承载能力的基础。混凝土抗压强度、钢筋抗拉强度及节点连接强度需满足设计规范要求,重点校核跨中截面、支座附近及节点区域的应力水平,防止局部破坏引发整体失效。混凝土抗压强度设计值一般不低于30兆帕,钢筋抗拉强度设计值不低于335兆帕。刚度与变形指标反映结构抵抗变形的能力。挠度控制是关键,梁式渡槽跨中挠度需限制在跨度的1/500以内,若跨度为200米,跨中挠度应不超过400毫米,拱式渡槽拱顶变形需满足拱轴线偏离允许值。振动频率与振型分析用于评估结构动力特性,避免与外部激励频率接近导致共振。稳定性指标涵盖局部与整体稳定性。薄壁侧墙需验算屈曲临界荷载,防止局部失稳;整体稳定性需考虑侧向刚度与扭转刚度,防止空间失稳模式发生。在复杂荷载组合下,稳定性分析需结合非线性有限元方法,准确模拟结构失稳路径与极限承载力。

2 大跨度水工渡槽关键力学性能专项分析

2.1 静力力学性能分析

大跨度水工渡槽静力力学性能分析聚焦结构在恒载与准静态可变荷载作用下的力学响应特征。整体结构静力响应规律呈现显著的空间分布差异,纵向受弯变形主导结构位移场,横向受扭效应引发截面应力重分布,需通过三维有限元模型精确捕捉。在满水工况下,结构纵向最大位移可达300毫米,横向最大应力可达15兆帕。关键构件静力性能分析表明,槽身作为主要承重构件,在满水工况下底部混凝土承受拉应力,顶部受压,需通过预应力技术平衡应力分布;支座作为传力枢纽,竖向承载力需满足结构自重与水体重力叠加效应,水平向需具备足够刚度以限制位移;基础作为结构锚固体系,沉降差控制是关键,需通过地基处理与基础形式优化确保均匀沉降。支座竖向承载力设计值需达到50000千牛,水平

向刚度应保证在水平力作用下位移不超过50毫米。边界条件对静力性能的影响体现在支座约束方式与地基弹性模量两方面，固定铰支座约束全部位移但释放转动自由度，活动铰支座允许纵向位移但限制横向位移，不同约束组合将显著改变结构内力分布；地基弹性模量直接影响基础刚度，软土地基需采用桩基础或筏板基础增强整体性。

2.2 动力力学性能分析

动力力学性能分析围绕结构在地震、风振等动力荷载作用下的响应特征展开。结构动力特性参数分析表明，大跨度渡槽固有频率较低，易与地震卓越频率耦合，需通过质量分布调整与刚度优化改变动力特性；阻尼比是影响振动衰减的关键参数，混凝土材料本身阻尼较小，需通过附加阻尼装置提升能量耗散能力。大跨度渡槽一阶固有频率通常在0.5-2赫兹之间，阻尼比设计值一般不低于0.05。动力荷载作用下的响应规律显示，地震作用下结构产生水平向与竖向双向振动，水平向以平动为主，竖向因水体惯性力作用产生附加振动；风振作用下结构产生涡激振动，需通过气动外形优化降低风振系数。水体-结构动力耦合效应分析揭示，槽内水体在地震作用下产生晃动，通过动水压力与结构相互作用，放大结构振动响应，耦合效应强度与水体深度、结构频率密切相关，需通过流固耦合数值模拟方法量化。当水体深度为10米，结构频率为1赫兹时，动水压力可使结构振动响应放大1.5倍。

2.3 复杂工况下力学性能耦合分析

复杂工况下力学性能耦合分析聚焦多荷载组合与环境因素交互作用下的结构响应特征。荷载组合作用下的力学响应表明，地震与水荷载组合工况下结构内力显著增大，需通过能力设计原则确保关键构件承载力储备；温度与收缩荷载组合引发结构开裂风险，需通过温度钢筋配置与构造措施控制裂缝宽度^[2]。环境因素与力学性能的耦合影响体现在冻融循环导致混凝土强度退化、氯离子侵蚀引发钢筋锈蚀、水流冲刷削弱结构局部刚度等方面，需通过材料耐久性设计与定期维护保障结构长期性能。

3 大跨度水工渡槽抗震设计核心要素

3.1 抗震设计基本原理与性能目标设定

大跨度水工渡槽抗震设计以结构动力学与地震工程学原理为基石，这一原理体系犹如坚固的框架，为整个抗震设计提供了坚实的理论支撑。通过科学分配结构刚度与延性，达成地震能量有效耗散与结构损伤合理控制的目标。设计遵循“小震不坏、中震可修、大震不倒”的多级设防理念，将结构抗震能力划分为弹性、弹塑性与极限承载三个阶段。在抗震性能目标设定时，需综合考

量工程重要性、场地条件及地震危险性等因素，明确结构在遭遇不同强度地震时的功能连续性要求。例如，重要渡槽需满足震后能够快速恢复通水的需求，以确保在地震灾害发生后，水资源供应能迅速恢复正常，保障受灾地区的基本生活与生产需求，这对于维持社会稳定和灾后重建工作至关重要。

3.2 地震作用传递路径与荷载分布规律

地震荷载在大跨度水工渡槽中的传递路径具有多向性特征。这种多向性特征使得地震作用对渡槽的影响更为复杂，增加了抗震设计的难度。水平地震作用经支座传递至基础，而竖向地震作用则直接作用于结构顶部。为准确模拟这一复杂过程，需采用三维空间分析模型。通过对荷载分布规律的研究发现，渡槽跨中部位弯矩与剪力较大，支座附近轴力与扭矩集中。这些关键部位的受力特点要求在设计和施工过程中，通过截面强化或采取合理的构造措施，提升局部承载能力，防止在地震作用下因局部破坏引发整体结构的失效，从而保障渡槽在地震中的安全性和稳定性。

3.3 关键构件抗震薄弱环节识别与应对

在大跨度水工渡槽抗震设计中，识别关键构件的抗震薄弱环节至关重要。这些薄弱环节犹如木桶的短板，决定了整个结构抗震能力的上限。槽身与支座连接部位由于应力集中现象明显，在地震作用下易发生破坏。支座本身在强震作用下可能因位移超限而失效，影响结构的整体稳定性。此外，基础在复杂地质条件下易产生不均匀沉降，进而对上部结构造成不利影响。针对这些薄弱环节，需在设计阶段采取针对性措施，如加强连接部位的构造设计、优化支座类型与性能、合理选择基础形式并进行地基处理等，以提高结构的整体抗震性能，确保渡槽在地震中能够保持完整，发挥其应有的功能。

3.4 水体-结构-地基耦合抗震响应分析

水体-结构-地基耦合作用是大跨度水工渡槽抗震设计中的关键因素。这一耦合作用如同一个复杂的系统，各部分相互影响、相互制约。地震波传播至地基时引发结构振动，结构振动又导致槽内水体晃动，水体晃动产生的动水压力反作用于结构，形成复杂的耦合振动体系。这种耦合效应会显著影响结构的抗震性能，需通过流固耦合数值模拟方法进行量化分析。通过研究不同参数（如水体深度、结构频率等）对耦合效应的影响程度，能够更准确地评估结构在地震作用下的响应，为抗震设计提供科学依据，确保结构在地震等动力荷载作用下的安全性与可靠性，从而保障渡槽在长期运行中的稳定性和可靠性。

4 大跨度水工渡槽抗震设计优化策略

4.1 结构体系抗震优化

整体结构布置抗震优化需遵循“规则、对称、均匀”原则，通过调整跨度比例与立面高差降低结构扭转效应。平面布置应避免出现明显凹凸或长宽比失衡，立面布置需控制刚度突变，防止地震作用下形成应力集中^[3]。支撑体系抗震优化设计需结合结构形式选择合理支撑方式，梁式渡槽可采用多道横梁增强横向刚度，拱式渡槽需优化拱肋间距与横撑布置，桁架式渡槽应通过增加斜腹杆提升空间抗扭能力。支撑体系与主体结构连接部位需进行局部加强，确保地震作用下传力路径清晰。

4.2 关键构件抗震优化

槽身结构抗震性能优化需从截面形式与配筋方式两方面入手，采用变截面设计使刚度沿跨度方向渐变，避免刚度突变引发局部破坏。纵向钢筋配置需满足抗弯承载力要求，横向钢筋需形成闭合箍筋约束混凝土，提升结构延性。纵向钢筋配筋率不宜低于0.8%，横向箍筋间距不宜大于200毫米。支座与连接节点抗震优化需根据支座类型制定针对性措施，固定铰支座需增强锚固螺栓抗剪能力，活动铰支座需设置限位装置防止地震位移超限。连接节点需通过增加加劲肋或采用高强螺栓提升节点刚度，避免地震作用下发生螺栓松动或节点撕裂。高强螺栓预紧力需达到设计值的1.1倍，加劲肋厚度不宜小于10毫米。基础结构抗震优化需结合地质条件选择合理基础形式，软土地基宜采用桩基础或筏板基础增强整体性，岩石地基需控制基础埋深防止倾覆。基础混凝土强度等级应适当提高，配筋率需满足抗冲切与抗剪要求。桩基础桩径不宜小于1米，筏板基础厚度不宜小于1.5米。

4.3 抗震加固措施优化

被动抗震加固措施优化需根据结构损伤模式选择加固方式，对裂缝开展区域可采用碳纤维布粘贴或钢板加固提升抗裂性能，对刚度不足区域可通过体外预应力技术增强结构整体性。加固施工需控制新增构件与原结构协同工作性能，避免因刚度突变引发二次损伤。碳纤维布粘贴层数不宜超过3层，钢板厚度不宜大于10毫米。耗能减震装置应用优化需结合结构动力特性选择装置类型，金属阻尼器适用于多遇地震下的能量耗散，黏滞阻尼器适用于罕遇地震下的位移控制。装置布置位置需通过时程分析确定，通常设置在结构振动能量集中区域，如跨中或支座附近。装置参数需通过迭代优化确定，确保在地震作用下既能有效耗能又不影响结构正常使用功能。

结束语

大跨度水工渡槽的结构力学性能分析与抗震设计优化是一个系统而复杂的工程。通过对结构体系、力学性能的深入剖析，明确抗震设计核心要素，并针对性地提出优化策略，能够有效提升渡槽的抗震能力。在实际工程中，需综合考量各种因素，将理论分析与实际需求紧密结合，确保抗震设计优化措施的有效实施，从而保障大跨度水工渡槽在各种工况下都能安全可靠地运行，为水利工程的稳定发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]吴炜.大跨度中承式飞鸟拱渡槽抗震设计研究[J].水利规划与设计,2024(4):151-155.
- [2]赵春艳,刘孝龙.桥梁结构附属构件抗震性能研究综述[J].四川建材,2023,49(01):155-156.
- [3]戎绍金,王彩云.大跨度钢结构体育馆抗震性能分析[J].江苏大学学报:自然科学版,2021,43(04):377-385.