

水工结构抗震设计探讨

唐尧 邓卓然

中水珠江规划勘测设计有限公司 广东 广州 510610

摘要: 在全球地震频发的当下,水工结构的抗震安全至关重要。本文聚焦于水工结构抗震设计展开深入探讨。先阐述了地震的基本知识、水工结构的地震响应及抗震设计基本原理等理论基础。接着介绍了拟静力法、反应谱法、时程分析法等设计方法。随后分析了场地条件、结构类型、材料选择等对水工结构抗震设计的关键影响因素。最后探讨了加强结构整体性、提高结构延性以及抗震构造细节设计等构造措施。旨在为水工结构的合理抗震设计提供理论参考与实践指导,增强水工结构在地震作用下的安全性与稳定性。

关键词: 水工结构;抗震设计;探讨

引言: 水工结构作为重要的基础设施,其安全性直接关系到人民生命财产和社会稳定。在地震频发的背景下,水工结构的抗震设计至关重要。然而,当前水工结构抗震设计面临诸多挑战,如不同场地条件下结构的响应差异、多种设计方法的合理选择等。为了有效提升水工结构的抗震能力,有必要深入研究其抗震设计的理论、方法和关键因素。将系统阐述水工结构抗震设计的相关内容,以推动该领域的技术发展和应用。

1 水工结构抗震设计的理论基础

1.1 地震的基本知识

地震是一种极具破坏力的自然现象,其本质是地壳板块相互运动、挤压,导致岩石圈能量急剧释放而引发的剧烈振动。按成因,主要有构造地震、火山地震、塌陷地震等。构造地震因板块构造运动产生,是最常见且危害最大的类型。地震的关键参数包括震级,它直观反映地震释放能量的量级,每增加一级,能量释放约增大32倍;震源深度决定了地震波到达地面的距离,深度越浅,地面震动越强烈。地震波频谱特性也极为重要,不同频率的地震波对水工结构作用效果不同,高频波易引发结构局部破坏,低频波则可能致使结构整体大幅晃动,这些知识是水工结构抗震研究的基石。

1.2 水工结构的地震响应

水工结构在地震来袭时,响应过程复杂。地震波携带的能量通过地基传递给结构,引发结构的整体振动。不同类型的水工结构,像重力坝依靠自身重力维持稳定,在地震中主要承受水平方向地震力,坝体底部承受巨大的弯矩和剪力,易出现开裂、滑移等破坏;拱坝则借助拱的作用将水平地震力传递至两岸坝肩,坝肩岩体的稳定性成为关键。同时,库水与结构相互作用显著,库水的附加质量会增大结构惯性力,改变结构自振频率

和阻尼等动力特性,使地震响应分析难度大增。深入了解这些响应特性,对保障水工结构在地震中的安全至关重要。

1.3 抗震设计的基本原理

水工结构抗震设计的核心目标是确保结构在不同强度地震下维持相应的安全性能。首要原则是选址,优先选择抗震有利的场地与地基,远离地震断裂带、软弱地基等不利区域。在结构设计上,合理选型与布置,保证结构整体性良好,刚度和质量分布均匀,减少应力集中现象。充分利用结构延性,在弹性阶段控制变形,当地震作用超限时,允许结构部分区域进入塑性,通过塑性变形消耗地震能量,同时保持一定承载和变形能力。另外,采取有效的抗震构造措施,如强化构件连接、增设耗能元件等,进一步提升结构抗震性能,全方位保障水工结构在地震中的可靠性与安全性^[1]。

2 水工结构抗震设计方法

2.1 拟静力法

拟静力法是水工结构抗震设计中较为基础且简单的方法。该方法将地震作用等效为静态的水平或竖向力,作用于结构上进行力学分析。其核心原理是依据地震震级、场地条件等,确定一个地震影响系数,再乘以结构的重力荷载代表值,得到作用于结构的地震力。计算时,先明确结构各部分重力,结合场地类别、设计地震分组等确定地震影响系数,进而算出地震作用。这种方法适用于结构形式简单、对计算精度要求不高的小型水工结构。其优点是计算简便、易于理解和应用;缺点是忽略了结构的动力特性以及地震过程的复杂性,无法准确反映结构在地震中的真实响应,在地震作用强烈或结构复杂时,计算结果的可靠性较低。

2.2 反应谱法

反应谱法基于单自由度弹性体系在给定地震动作用下的最大反应,通过统计分析得到反应谱曲线,以此来确定多自由度结构的地震作用。计算时,先将水工结构简化为多自由度体系,根据结构自振周期、阻尼比等参数,在相应的反应谱曲线上查取地震影响系数,再结合结构质量分布,计算各质点的地震作用。此方法考虑了结构的动力特性,相比拟静力法更为精确,广泛应用于各类水工结构设计。优点是能综合反映地震动特性和结构动力特征,计算相对简便;然而,它采用的反应谱是统计意义上的平均结果,不能考虑地震动的随机性和结构在地震过程中的非线性行为,在处理复杂结构或特殊场地条件下的结构抗震设计时存在一定局限性。

2.3 时程分析法

时程分析法直接将地震加速度时程曲线输入结构动力方程,对结构进行动力分析,求解结构在整个地震过程中的位移、速度、加速度反应。计算流程为,先选取合适的地震波,如实际强震记录或人工合成地震波,然后利用结构动力学方法对结构运动方程进行逐步积分求解。该方法能真实反映结构在地震全过程中的响应变化,适用于重要的、复杂的水工结构以及对结构抗震性能要求较高的情况。其优势在于能精确模拟结构在地震中的动态行为,充分考虑地震动的随机性和结构非线性;但缺点是计算过程复杂、计算量庞大,对计算设备要求高,且地震波的选取对结果影响较大,需要专业人员具备丰富经验进行合理选择与分析^[2]。

3 水工结构抗震设计的关键因素

3.1 场地条件对抗震设计的影响

场地条件是水工结构抗震设计不可忽视的关键因素。场地土类型对地震波传播影响显著,软土地基会放大地震波幅值,延长其周期,增加水工结构的地震响应。例如在软弱粘性土场地,地震时可能产生较大的地面沉降与不均匀变形,威胁水工结构的稳定性。而坚硬场地土能使地震波传播速度加快、幅减小,对结构抗震相对有利。场地的地形地貌同样重要,孤立突出的地形,如山顶、陡崖等,在地震时易引发局部地形放大效应,加剧结构的震动。此外,地震断裂带附近,地震动强度大且可能出现复杂的地面运动,水工结构若建于其上,极有可能遭受严重破坏。

3.2 结构类型与抗震性能的关系

不同结构类型的水工结构,其抗震性能存在明显差异。重力坝依靠自身重力维持稳定,在地震中主要承受水平地震力,因其体积大、质量重,整体稳定性较好,但坝体底部在地震作用下易产生较大弯矩和剪力,若设

计不当,可能出现开裂、滑移等破坏。拱坝利用拱的作用将水平地震力传递至两岸坝肩,对坝肩岩体的稳定性要求极高,坝肩岩体的地质条件与完整性直接关乎拱坝的抗震安全。水闸结构相对复杂,上部结构与下部基础连接部位在地震时容易因受力不均产生破坏。框架式水闸的节点处若未进行合理加固,易成为抗震薄弱点。薄壁结构的渡槽在地震中对扭转振动较为敏感,需特别考虑其抗扭性能。

3.3 材料选择与抗震性能

材料的选择对水工结构抗震性能有着决定性作用。混凝土作为水工结构常用材料,其强度等级和质量直接影响结构的承载能力与抗震性能。高强度混凝土可提高结构的抗压、抗弯能力,增强结构在地震作用下的稳定性。同时,混凝土的延性也至关重要,具备一定延性的混凝土能在地震时通过塑性变形耗散能量,避免脆性破坏。钢材具有良好的强度和延性,在水工结构中用于加强构件连接、制作支撑体系等,能有效提高结构的整体抗震性能,如在框架结构的节点处采用钢连接件,可增强节点的耗能能力。此外,新型材料如纤维增强复合材料,因其轻质、高强、耐腐蚀且具有良好的耗能特性,逐渐应用于水工结构抗震加固中,能在不显著增加结构自重的前提下,大幅提升结构的抗震性能^[3]。

4 水工结构抗震构造措施

4.1 加强结构整体性的措施

对于水工结构而言,加强其整体性是提升抗震性能的重要途径。在重力坝设计中,设置横缝止水与坝体廊道连接系统。横缝止水可有效阻止库水渗漏,避免因渗漏导致坝体结构的削弱;坝体廊道则加强了坝体各部位的联系,在地震时协同受力,增强坝体整体稳定性。在水闸结构中,采用整体式底板与翼墙连接构造。整体式底板将闸室各部分紧密相连,使水闸在地震作用下作为一个整体抵抗外力;翼墙与底板牢固连接,能有效传递水平地震力,减少结构局部变形。同时,通过增加构造钢筋的布置密度与合理设置钢筋锚固长度,增强混凝土结构的协同工作能力。在节点部位,如框架结构的梁柱节点,增设箍筋加密区,提高节点的抗剪强度与约束能力,使梁、柱在地震中更好地协同变形,不发生节点破坏而导致结构整体性丧失。此外,在大型水工结构群,如梯级水电站中,通过设置连接栈桥、拉杆等构造措施,将各个独立的水工建筑物连接成一个整体,使地震力能够在结构群内合理分配,提升整个水利枢纽的抗震能力,有效应对地震灾害。

4.2 提高结构延性的方法

提高水工结构延性,是增强其抗震能力的关键策略。在结构形式选择上,优先采用具有良好延性的体系,如采用曲线型拱坝替代直线型重力坝,拱坝的曲线外形能在地震时更好地分散应力,通过自身变形吸收地震能量,展现出优越的延性。从材料角度出发,合理使用钢材与纤维增强材料。在混凝土中加入适量的钢纤维,能有效改善混凝土的抗拉性能,使结构在受拉破坏前产生较大变形,提高延性。钢材因其良好的塑性变形能力,可用于制作耗能支撑。在水工结构中设置钢支撑构件,当地震发生时,支撑先于主体结构进入塑性变形阶段,通过自身的反复变形耗散大量地震能量,保护主体结构。在构造设计方面,优化构件配筋方式。对于水工结构的梁、柱等构件,采用适当增加纵向钢筋配筋率与合理配置箍筋的方法。纵向钢筋可提高构件的抗弯承载能力,箍筋则对核心混凝土形成约束,增强混凝土的抗压强度与变形能力,使构件在地震作用下能承受较大的变形而不发生脆性破坏。同时,在结构中设置耗能装置,如粘滞阻尼器。阻尼器通过自身的粘滞耗能作用,消耗地震输入结构的能量,降低结构的地震响应,进一步提升结构的延性,保障水工结构在地震中的安全性。

4.3 抗震构造细节设计

在水工结构抗震设计中,构造细节起着至关重要的作用。对于节点设计,以重力坝坝段间的连接节点为例,采用键槽与灌浆连接构造。键槽的齿状结构增加了坝段间的咬合力,灌浆则填充缝隙,使坝段紧密结合,地震时协同受力,有效防止坝段间的错动。基础设计方面,对于软土地基上的水闸,可采用桩基础结合筏板基础的形式。桩基础深入坚实土层,提供竖向承载与抗拔能力,筏板基础则将上部结构荷载均匀分布,增强基础的整体稳定性,减少地震时的不均匀沉降。同时,在基础与上部结构连接处设置加强层,通过增加钢筋配置与提高混凝土强度等级,提升连接部位的抗剪与抗弯性能。在结构连接部位,如渡槽的槽身与支撑结构连接节点,使用橡胶垫与螺栓连接。橡胶垫具有良好的弹性与耗能能力,可缓冲地震作用,螺栓则保证连接的可靠性,防止槽身在地震中脱落。此外,对于水工隧洞的衬砌结构,在衬砌分缝处设置止水带与传力杆。止水带防止渗漏,传力杆则保证分缝两侧衬砌在地震时能有效传递应力,维持隧洞结构的整体性。这些抗震构

造细节虽小,却能极大提升水工结构在地震中的稳定性与安全性。

4.4 抗震隔离与减震技术应用

在水工结构抗震领域,抗震隔离与减震技术已成为提升结构安全性的重要手段。抗震隔离技术的核心是在结构与基础之间设置隔震层,如采用橡胶隔震支座。以水库大坝为例,橡胶隔震支座能延长结构的自振周期,减小地震力向上部结构的传递。在地震发生时,隔震层发生较大变形,像一个缓冲器,吸收并耗散地震能量,大幅降低大坝主体结构所承受的地震作用,有效保护坝体安全。减震技术则通过在结构中安装各类耗能装置来实现。在水闸结构中,可安装粘滞阻尼器。当水闸遭遇地震,粘滞阻尼器内部的粘性流体产生阻尼力,阻碍结构的振动。这种阻尼力与结构的运动速度相关,速度越快,阻尼力越大,从而消耗大量地震输入能量,降低水闸的振动响应,防止闸体构件因过大振动而损坏。此外,在水工隧洞的进出口部位,可设置金属屈服型阻尼器。当地震波传入,阻尼器率先进入塑性变形阶段,通过自身的屈服耗能,减少地震对隧洞衬砌结构的冲击,保障隧洞的正常运行^[4]。

结束语

综上所述,水工结构抗震设计涵盖从理论基础、设计方法,到关键因素考量与构造措施制定,以及抗震隔离和减震技术应用等多方面内容。地震灾害的复杂性与水工结构的重要性,决定了其抗震设计需精准把控每个环节。通过对场地条件、结构类型、材料选择等关键因素的深入分析,配合合理的抗震构造与先进技术应用,能有效提升水工结构抗震性能。

参考文献

- [1]孙帮新,曹枚根.特高压新松换流站直流场设备抗震设计及能力考核[J].高压电器,2022,54(12):24-35.
- [2]柴尚锋.浅议桥梁抗震设计要点及减隔震技术的应用[J].四川水泥,2022(12):85.
- [3]张利军.高层建筑结构抗震设计要点解析[J].建材技术与应用,2022(06):12-14.
- [4]李以友.水工建筑物抗震设计探讨[J].城市建设理论研究(电子版).2022,(14):2065-2065.