

水工结构设计的探讨

杜普 尹恒乙

四川水发勘测设计研究有限公司

摘要：近年来我国不断加大水利工程建设力度，对水利工程的设计水平和质量也提出了更高的要求。在水利工程建设中，水工结构设计是一项较为复杂的系统性工作，不仅直接关系到水利工程的安全性，而且也是水利工程各项功能是否能够正常发挥的重要前提。因此在水工结构设计中应严格遵守各项设计规范要求，科学运用先进的设计方法，充分考虑各项设计要素，不断优化水工结构设计方案，确保水工结构设计方案具有较高的可行性和合理性，从而为水利工程建设奠定良好的基础。

关键词：水工结构；设计方法；可靠性分析；设计要点

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.20.093

水利工程是促进社会经济发展、对水资源进行科学开发利用的重要基础性工程，不仅工程建设的投资规模较大，而且需要在长期连续运行在复杂工况条件下，因此在水工结构设计，保证结构安全是设计工作的基本出发点。设计人员在水工结构设计中首先对可能影响结构可靠度的各种因素进行科学的分析，准确掌握水工结构的几何尺寸、结构材料、荷载以及初始和边界条件等对水工结构安全的具体影响，并构建相关计算模型，以便在此基础上开展水工结构设计工作。混凝土结构是目前水利工程中较为常见的结构类型，设计人员应科学运用可靠度分析等设计方法，按照设计规范要求，结合工程的实际情况合理确定混凝土配筋率等各项设计参数，不断提高水工结构设计的质量和水平，防止水工结构出现裂缝等问题，从而保证水工结构安全。

一、概述水工结构设计方法

保证水工结构的安全可靠是水工结构设计的关键，因此设计人员应科学运用可靠度分析等方法，提高水工结构设计质量。结构可靠度分析主要指的是在水工结构设计中为对工程结构安全性、经济性以及适用性进行综合性分析的设计方法^[1]。水工结构抗力与不同荷载作用于水工结构而产生的相关荷载效应是可靠性分析中的两个基本变量参数，当结构抗力超过荷载效应时，能够保证水工结构的安全性；而当结构抗力小于荷载效应时，会出现结构失稳的情况；如果结构抗力与荷载效应相同时，水工结构就将处在极限状态下。在水工结构设计实践中，设计人员可以采用分项系数极限表达等方法来进行可靠度设计，科学分析水工结构的几何尺寸、结构材料的物理力学性质特征等因素对水工结构安全的影响。

可靠度分析也就是在水工结构的设计中，在结构可靠性与经济性之间取得最佳平衡点。目前在水工结构可靠性设计中可以根据不同情况采用不同的设计分析方法。

同时，设计人员在设计中还应合理确定水工结构的目标可靠指标。影响目标可靠指标的因素较为复杂，设计人员应在水工结构安全性和经济性之间取得一个科学的平衡点，在保证水工结构安全的基础上合理控制工程造价。设计人员可以采用事故类比分析、经验校准以及经济优化等多种方法来对目标可靠指标值进行优化，并合理运用概率分析等计算方法来确定目标可靠指标参数。

此外，设计人员在计算水工结构可靠度时应根据工程特点等实际情况选择相应的计算方法，目前在设计实践中较为常用的可靠度计算方法主要包括高阶高次矩阵法、Monte Carlo法以及遗传算法等^[2]。设计人员应充分了解不同计算方法的适用条件和特点，以确保计算结果客观准确。

二、混凝土水工结构设计分析

钢筋混凝土结构是最为常见水工结构形式，如大部分水闸、坝体结构等均采用了钢筋混凝土结构。混凝土结构的质量性能对于水工结构的承载能力以及防渗性能均会产生较大的影响，这也是水工结构设计中需要重点考虑的问题。在混凝土水工结构的设计工作中，设计人员除了要严格按照设计规范标准合理控制结构强度外，还应充分考虑水工结构在水下环境中长期连续运行时的结构耐久性问题，科学开展水工结构可靠度分析，合理选择结构材料，准确确定各项设计参数，避免水工结构出现裂缝等安全隐患，保证水工结构的稳定性以及安全性符合设计标准要求。

（一）混凝土水工结构特点分析

在水工结构设计中如采用的是混凝土结构时，设计人员应准确把握混凝土结构特点。水利工程设计中的水工混凝土结构往往需要呈大尺寸、大体积特点，如设计为短杆件时则会使跨高比相对减小。而在大体积混凝土的设计中则必须注意水化热问题，一旦大体积混凝土构建内外温差较为明显时就有可能产生温度裂缝问题，因此，在水工混凝土结构的设计中需要合理确定配筋率来控制裂缝问题的出现。同时，由于一些水工结构会处于全浸水或者干湿交替的运行工况下，比较容易受到冲刷、汽蚀以及冻融等多种因素的影响，因此在水工混凝土结构设计中应高速重视耐久性设计问题^[3]。此外，在混凝土水工结构设计中，分布结构件属于非杆件结构，

在配筋设计中不能直接按照极限强度理论来计算分析，客观上也加大了设计难度。设计人员应合理运用有限元分析等方法来开展水工结构设计工作，保证设计质量。

（二）总体结构设计要点

设计人员应首先按照水工结构设计规范以及水利工程所在地区的相关要求等合理确定水工工程等级和通航标准等。之后应结合水利工程区域的地质水文条件以及现场的实际情况确定水利工程堤防高程、闸顶高程、设计控制高程等各项指标参数。

（三）钢筋混凝土型式水工结构可靠度设计

在混凝土水工结构设计的可靠度分析中，设计人员应根据可靠度理论，对混凝土结构特征进行科学的研究。受水工结构运行工况等因素的限制，水工混凝土结构中大体积混凝土强度往往会与实验室条件下所测得的试块强度存在一定的差异，因此在可靠度分析和水工结构设计中必须注意水保和条件下强度降低、后期强度增长、尺寸效应以及持久强度等问题对水工结构设计强度的影响。同时，设计人员还应充分考虑围岩结构以及土压等荷载对水工结构荷载的影响，科学分析地基反力以及渗透压等参数的计算结果与实测值之间的偏差。同时，设计人员在对闸门以及溢洪等水工结构进行可靠性分析时，还应结合挡水压力设定极值等因素来取得其分布概型，以确保可靠度分析全面客观。在分析水工结构荷载以及其荷载效应关系时，不同的分析方法会对可靠度分析结构产生较大的影响。因此设计人员应结合水工结构的具体特点合理选择分析方法，此外，在水工结构的可靠度分析中，设计人员还应安全风险的危害程度对混凝土结构的安全等级进行合理的划分，以准确取得其可靠性指标，为水工结构设计提供可靠的参考依据。

（四）钢筋混凝土型式水工结构耐久性设计分析

由于水工结构需要在恶劣工况条件下长期连续运行，其混凝土构件以及钢筋比较容易受到外界因素的影响而出现锈蚀、碳化等现象，如在设计工作中未能充分考虑水工结构的耐久性问题，就有可能对水工结构的安全性和稳固性产生较大的影响，甚至引发重大安全事故。因此在混凝土水工结构设计中，设计人员应从耐久性角度出发，合理确定水工结构形式、科学选择具有较抗耐腐蚀抗氧化性以及防渗性能的结构材料类型型号，准确计算钢筋保护层厚度、混凝土配合比等各项关键性设计参数，以确保混凝土水工结构的抗渗性能、抗冲刷性能、结构强度、耐腐蚀性以及抗冻性能等各项指标参数均符合水工结构耐久性设计要求。

（五）合理选择钢筋混凝土型式水工结构材料

设计人员在混凝土水工结构设计中还应合理选择结构材料。裂缝是水工结构设计工作中需要重点解决的问题。造成结构裂缝的原因有很多，其中混凝土混合料的性质特点是其中的主要因素之一。因此设计人员在选择

水工结构材料时应尽量选择低水化热的水泥类型型号，也可以采取在混凝土混合料中加入适量掺料、纤维或者外加剂的方式来避免裂缝的形成。

同时，在水工钢筋混凝土结构的设计中，设计人员还应严格按照设计规范要求来选择相应强度等级的钢筋材料，既要避免为降低工程造价而用低强度等级钢筋替代高强度钢筋，也不能随意用高强度钢筋来取代低强度钢筋。设计人员要准确计算水工结构中钢筋的受拉承载力值，以确保钢筋的型号规格以及强度选用科学合理，从而在保证水工结构安全的前提下合理控制工程造价。

近年来在水工结构设计实践中一些新材料工艺也逐渐得到了推广应用。例如在混凝土土混合料中掺入一些活性化学物质、聚合物或者少量乳胶材料等，通过使用改性混凝土可以有效提高混凝土结构的防水性能、抗渗性以及防腐防冻能力，并能够更好的满足水下灌浆等施工要求。设计人员在选择采用新型材料工艺时应充分了解其性质特点，并应开展现场试验，以准确测定其各项物理力学性质参数，从而提高水工结构设计的质量。在采用新材料时，设计人员还应考虑其环保性能，尽量采用绿色无污染型的结构材料，以减少水利工程建设对周边环境和水体环境的污染，为水利事业的可持续性发展奠定良好的基础。

（六）混凝土水工结构极值的合理确定

在混凝土水工结构设计中，设计人员还应合理确定结构极限承载能力，避免水工结构承载能力超出其极限范围而产生过度变形，对水工结构产生破坏。设计人员在确定水工结构极限状态时，除应考虑结构强度和承载能力外，还应准确计算应力约束极值，以便控制混凝土结构中的不连续点，这样可以有效降低混凝土水工结构出现裂缝的概率。

（七）合理确定水工混凝土结构配筋率

在混凝土水工结构的设计工作中，配筋率的合理控制是一个关键性的设计环节，其不仅直接关系到水工结构的稳定性和安全性，也会对工程造价产生较大的影响。因此设计人员应严格遵守水工结构设计规范要求，综合分析各种设计要素，在保证水工结构安全的基础上确定其配筋率。水工结构配筋率与混凝土构件的尺寸规格密切相关，设计人员可以根据统一截面内极限内力变化来确定其具体的配筋率。在水工结构设计中，设计人员应严格按照设计规范要求来确定纵向受力钢筋的强度等级，且应充分考虑水工结构的抗震设计要求，按照强柱弱梁原则来优化最小配筋率设计值。在配筋率设计中还应注意防止出现超筋破坏现象。例如在受弯构件的设计中，当荷载以及截面尺寸设计值相同时，设计人员应以根据相关计算公式来确定其正截面承载力，并在此前提下确定最大配筋率。

另外，在钢筋混凝土型式的水工结构设计中，部分

结构件的形体或者受力情况较为复杂,在对其进行配筋设计时不能直接按照杆件体系来进行截面内力的计算和分析,因此应将水工结构中的大坝空口、蜗壳结构以及弧形闸墩等结构视为非杆件体系,并采用相应的配筋设计方法。在此类非杆件体系的配筋设计实践中主要包括经验类比法、以承载力试验数据为依据确定配筋率法、弹性应力图法以及有限元非线性分析法等。设计人员应充分了解不同设计方法的适用条件和范围,以提高配筋的合理性。在采用经验类比法时,设计人员应准确把握水工结构的具体特点,不得简单照搬其他工程的设计数据,避免由于不同工程结构之间的特点差异而产生配筋率不足的问题。而在采用以承载力试验数据为依据对配筋率进行计算的方法时,一般只能用于对水利工程的弧门支座、牛腿以及深受弯构件等水工结构构件的配筋率计算,该方法的应用范围相对有限。与之相比,弹性应力图法则能够对所有非杆系水工结构构件的配筋率进行计算,是一种应用范围较广的设计方法。此外,在应用有限元非线性分析法时,设计人员也需要首先利用应力图法来确定配筋率,之后再通过该方法对水工结构件的承载能力以及裂缝形态等加以复核算。

(八) 水工结构保护层结构设计要点

在钢筋混凝土型式的水工结构设计中,设计人员还应合理确定钢筋保护层厚度,以达到有效控制结构裂缝的目的。在水工结构设计规范中给出了不同保护层厚度条件下的裂缝宽度的控制极值标准,设计人员应按照相关要求对设计参数进行取值。通常在水工结构中的混凝土构件厚度较厚,且体积也相对较大,因此钢筋保护层的厚度往往超过了50mm,设计人员应在按表取值时综合考虑水力梯度以及承受水压等因素,确保取值科学合理。

同时,在设计实践中为有效控制结构裂缝,当所设置的保护层厚度为满足裂缝宽度验算标准要求时,在不增加工程造价的前提下,设计人员可以采用适当将钢筋间距缩小、或者采用直径较小的带肋港口以及将受拉区范围内纵向钢筋的截面面积适当加大等方法来进行设计。如需加大钢筋截面面积时,设计人员应将截面增加面积控制在纵向钢筋按照承载力要求所需截面面积的30%以内,且应充分考虑应力集中问题。

在设计受拉区混凝土表面的防护层时,设计人员可以采用施加预应力以及预埋隔离片等方法来提高混凝土结构的安全性,避免水工结构出现裂缝。

(九) 充分考虑温湿度等参数对混凝土结构的影响

在钢筋混凝土型式的水工结构设计中,设计人员还应科学计算温湿度等环境参数,以提高水工结构的安全性。这主要是由于温度是导致水工结构产生裂缝的重要因素,因此设计人员应采用有限元分析以及差分法等设计分析方法来准确计算温度场参数,以避免大体积混凝土构件表面出现温度裂缝。同时,设计人员还应结合混

凝土松弛系数、混凝土徐变等计算应力松弛,并合理确定弹性温度应力的折减率,以确保相关设计参数取值合理、计算结果客观准确。

(十) 水工配套结构设计要点

水闸是水利工程中止水以及排水的主要水工建筑,是水工结构设计中的核心内容之一。本文将水闸结构设计为例,对其配套结构设计要点进行分析。在水闸结构设计中,消力池排水孔是影响水闸排水能力的主要部分,因此设计人员应合理确定护坦后方排水孔的设置数量,且应垂直布设排水孔,以合理控制流经水闸的水流压强,确保水流能够在压力作用下顺利经由排水孔流出。设计人员还应准确计算池底渗透压等各项设计参数,并在水平护坦后部设置排水孔以及滤层,在消力池后半段底板上也应设置排水孔,以避免消力池底板在水流吸出过程中被掏空。同时,在水闸结构设计中,设计人员还应合理设置止水伸缩缝,以防止水工结构产生渗漏问题。设计人员应根据水工结构型式特点确定止水伸缩缝位置、宽度等各项设计参数,并应充分了解不同止水片的质量性能,以确保所选择止水片的尺寸规格以及各项指标参数均符合水工结构设计规范要求^[4]。此外,如水闸采用的是单向水头的设计方式时,还应在其下游翼墙以及护坡位置设置翼墙排水孔,并将反滤层设置与挡土墙侧的孔口下方。设计人员应严格按照水工结构设计规范标准准确控制渗径大小,可以采取在井口翼墙处设置水孔的方法来确保渗径达到设计标准要求。设计人员还应在多孔闸闸室的底板上沿水流方向设置永久缝,以保证水工结构功能能够正常发挥。

三、总结

在水工结构设计中,设计人员应积极学习先进的设计理论和设计方法,严格遵守水工结构设计规范,充分了解水利工程区域的地质水文特点和自然环节条件,灵活运用各种设计方法和设计手段,准确计算确定各项设计参数,全面提高水工结构设计质量。同时,设计人员还加强对水工结构设计实践的总结,并借鉴国内外水工结构设计成功经验,对水工结构设计方案进行优化,从而为保证水工结构的安全性、可靠性以及耐久性奠定良好的基础,推动我国水利事业的现代化发展。

参考文献

- [1]符安兵.探讨水工建筑物结构设计中的相关问题[J].轻松学电脑,2019,000(034):P.1-1.
- [2]岳克栋,罗贝尔,刘慧.水工结构工程中的耐久性设计探讨[J].建筑工程技术与设计,2018.
- [3]秦亚楠.水工建筑设计部分关键问题探讨[J].新商务周刊,2018,000(013):216.
- [4]侯建国,安旭文.结构可靠度理论在水工结构设计标准中的应用[J].长江科学院院报,2019,36(8):9.