

水上指导和监督。

2 检测依据和内容

2.1 腐蚀检测与评估依据标准

混凝土结构耐久性设计理念在结构设计和工程实践中不断进步和发展,1990年日本发布了《混凝土结构耐久性设计建议》,1989年欧洲出版了《CEB耐久混凝土结构设计指南》,RILEM于1990年出版的《混凝土结构的耐久性设计》,欧盟在2000年出版了《混凝土结构耐久性设计指南》。我国在总结国内外研究成果的基础上,2000年交通部颁布了行业标准JTJ275-2000《海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范》,2004年中国土木工程学会编制了CCES01-2004《混凝土结构耐久性设计与施工指南》,2006年交通部颁布了行业标准JTG/TB07-01-2006《公路工程混凝土结构防腐蚀技术规范》、JTJ302-2006《港口水工建筑物检测与技术评估规范》;2007年,中国工程建设标准化协会组织了西安建筑科技大学、中冶集团建筑研究总院、武汉钢铁(集团)公司、上海交通大学、同济大学和清华大学等共同编制了CECS220:2007《混凝土结构耐久性评定标准》,该标准适用于既有房屋、桥梁及一般构筑物的混凝土结构耐久性评定,不适用于轻骨料混凝土及特种混凝土结构,不适用于液相化学腐蚀、疲劳荷载、火灾等混凝土结构耐久性评定;不涉及由设计、施工、荷载变化等非耐久性损伤引起的结构安全性、适用性鉴定。适用于混凝土中性化(碳化)及氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀、冻融损伤等混凝土结构耐久性评定。

为保证混凝土结构的耐久性达到规定的设计使用年限,确保工程的合理使用寿命要求,2008年建设部颁布了GBT50476-2008《混凝土结构耐久性设计规范》,该标准适用于常见环境作用下房屋建筑、城市桥梁、隧道等市政基础设施与一般构筑物中普通混凝土结构及其构件的耐久性设计,不适用于轻骨料混凝土及其他特种混凝土结构;主要内容为混凝土结构耐久性设计的基本原则、环境作用类别与等级的划分、设计使用年限、混凝土材料的基本要求、有关的结构构造措施以及一般环境、冻融环境、氯化物环境和化学腐蚀环境作用下的耐久性设计方法。2010年铁道部颁布了TBT3228-2010《铁路混凝土结构耐久性修补及防护》规定了铁路混凝土结构耐久性修补及防护的技术要求、试验方法和检验规则,适用于铁路混凝土结构的裂缝修补和耐久性防护,不适用于承载力不足的加固性修补。2013年上海市颁布了DGTJ08-2128-2013《轨道交通及隧道工程

混凝土结构耐久性设计施工技术规范》,规范了上海市轨道交通及隧道工程混凝土结构耐久性设计和施工要求,保证混凝土结构的耐久性达到设计使用年限,改善轨道交通及隧道工程混凝土结构质量,该标准适用于本市轨道交通及隧道工程混凝土结构在一般环境或氯化物环境作用下的耐久性设计和施工。

2010年国家能源局颁布了DL/T5241-2010《水工混凝土耐久性技术规范》,标准在总结国内外近20年水工混凝土耐久性方面的研究成果和先进经验的基础上,参考国内外相关标准,针对水工混凝土的特点编制而成,突出了水工混凝土材料的耐久性设计、施工工艺、质量评定及相关技术措施,主要内容包括冻融、环境水侵蚀、冲磨与空蚀、混凝土中钢筋的锈蚀、碱-骨料反应等;同年DL/T5251-2010《水工混凝土建筑物缺陷检测和评估技术规程》颁布,对于做好水工混凝土建筑物维护管理工作,规范其缺陷检测、评估程序和方法,保证水工混凝土建筑物运行的安全和延长其使用寿命具有重要意义,标准还吸取了国内外相关标准中的检测与评估的有关内容,突出水工建筑物的特点,并与其他相关标准衔接。2014年水利部颁布了SL654-2014《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》,该标准适用于新建的水利水电工程的合理使用年限确定和耐久性设计,但对于特别重要的工程或有特殊要求的工程,其合理使用年限和耐久性要求应进行专门论证,经主管部门批准确定;对已建水利水电工程进行改建、扩建,可参照执行。2015年水利部颁布了SL713-2015《水工混凝土结构缺陷检测技术规程》,该标准适用于已建和在建水利水电工程混凝土结构质量和缺陷检测,技术内容包括混凝土外观缺陷调查、内部缺陷检测、裂缝深度检测、强度检测、结构厚度检测、钢筋分布及锈蚀检测、水下缺陷与渗漏检测等;同时,规范了水利水电工程混凝土结构缺陷检测方法和技术要求,保证了检测结果的可靠性和提高检测结果的可比性。

上述标准对改善我国混凝土结构耐久性状况将起到非常好的作用,也为混凝土结构的耐久性设计和延长工作寿命明确了方向。但由于水工混凝土结构形式多样,运行条件和环境和普通钢筋混凝土结构也有较大差别,大体积水工混凝土广泛应用,新型特种混凝土(如碾压混凝土、堆石混凝土)、发电洞混凝土结构等,因此腐蚀检测与评估依据标准应以现场水工混凝土结构相关的标准为主体,突出水工混凝土结构腐蚀环境和结构应力等因素,又需要结合其他建设行业标准。目前水利水电水工混凝土结构腐蚀检测与评估依据一方面可参照DL/T5241-2010《水工混凝土耐久性技术规范》、

DL/T 5251-2010《水工混凝土建筑物缺陷检测和评估技术规程》和SL 713-2015《水工混凝土结构缺陷检测技术规程》，另一方面由于建筑物类型不同等原因，依据的具体标准也有所不同。如水库大坝工程依据DL/T 5313-2014《水电站大坝运行安全评价导则》或SL258-2000《水库大坝安全评价导则》，水闸工程依据SL214-2015《水闸安全评价导则》，泵站工程依据SL 316-2015《泵站安全鉴定规程》，水工钢闸门和启闭机安全依据SL101-2014《水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程》，船闸工程等港口水工建筑物则依据JTJ302-2006《港口水工建筑物检测与技术评估规范》。

2.2 腐蚀检测主要内容

根据DL/T5251-2010《水工混凝土建筑物缺陷检测和评估技术规程》，水工混凝土结构腐蚀检测可分为一般检查和现场安全检测两种，其中一般检查包括外观缺陷、裂缝分布、混凝土损伤状态、渗漏状态、伸缩缝的工作状态及变形情况、资料调查等，水下检测还包括建筑物外观的完整性、附着物和沉积埋没状态等，必要时调查腐蚀的变化过程、基础和结构的变形情况等；现场安全检测项目包括混凝土裂缝性状、混凝土强度、冻融情况、碳化、钢筋锈蚀、侵蚀性、抗渗性、混凝土内部缺陷、钢筋保护层厚度和锈蚀程度、结构位移和变形等。

2.2.1 一般检查

水工混凝土结构外观缺陷是指可能对混凝土外观质量和结构使用功能造成影响的蜂窝、麻面、孔洞、露筋、裂缝、疏松脱落等外在形式的欠缺或不完整。外观缺陷调查方法通常采用普查方式，结合资料调查、描述、目测、简单量测、照片和录像记录等方法。

(1) 调查主要内容

根据SL 713-2015《水工混凝土结构缺陷检测技术规程》，调查主要包括以下内容：

①外观缺陷：蜂窝、麻面、露石、孔洞、露筋、裂缝、疏松区等；

②裂缝情况：部位、数量、走向、长度、宽度，并了解裂缝的变化情况；

③混凝土损伤状态：压碎、冻融、剥蚀、脱落及冲蚀（空蚀和磨蚀）等情况；尤其是钢筋锈蚀引起的锈迹、裂缝、起鼓、剥落和露筋等的位置、数量、宽度、长度和面积。

④渗漏状态：点、线或面渗漏情况；

⑤伸缩缝的工作状态及变形情况；

⑥水工混凝土结构的形体尺寸、基础和整体位移和变形情况。

外观缺陷调查需要并根据缺陷分布情况绘制缺陷

分布图，蜂窝、麻面、孔洞等分布图。

2.2.2 现状调查

腐蚀现状调查一般包括三大内容：首先，应查看水工混凝土结构现场，并进行结构现状调查，了解工程所在场地特征和周围环境情况，检查工程施工过程中各项原始记录和验收记录，掌握施工初始状况，对工程有初步了解和把握；其次，应进一步查阅施工图纸资料，复核地质勘察报告与实际地基情况相符程度，检查结构布置和设计方案是否合理，设计计算是否正确，构造措施是否得当；再者，应调查水工混凝土结构使用情况，使用过程中有无超载现象，结构构件是否受到人为伤害，使用环境是否变化、水流是否存在不稳定等。

收集的技术资料，应真实、完整，力求满足腐蚀检测和评估需要。现状检查应在原有检查观测成果基础上进行，应特别注意检查水工混凝土结构的薄弱部位和隐蔽部位。对检查中发现的工程存在问题和缺陷，应初步分析其成因和对工程安全运用的影响。

技术资料收集涵盖设计资料、施工资料和技术管理资料的收集等，设计资料包括工程地质勘测和水工模型试验、可行性研究和初步设计资料，工程（包括新建、改建或加固）的施工设计文件和图纸。施工资料包括混凝土的原材料调查、设计配合比和施工配合比，浇筑及养护情况（包括搅拌、运输、浇筑、养护和施工环境条件）；混凝土试验资料包括塌落度、含气量、抗压强度、抗拉强度、极限拉伸值、弹性模量、绝热温升，变形性能等；施工技术总结资料，包括基础情况（包括基岩种类、岩性、变形模量、断层及基础处理等）、使用模板情况（包括模板种类、制作与安装、拆模时间等）；工程质量监督检测，包括施工单位自检记录、监理单位旁站检测资料和第三方检测抽查检测等涉及工程质量的技术资料；观测设施的考证资料及施工期观测资料；工程竣工图和验收交接文件；施工监理资料。

技术管理资料，包括运行技术管理的规章制度、控制运用技术文件及运行记录、历年定期检查、特别检查资料、历次安全鉴定报告；观测资料成果包括水工结构变形、渗流、应力、温度、水位等的变化；工程大修和重大工程事故处理措施等技术资料。

工程资料分析和比较包括复核地质勘察报告与实际地基情况相符程度；检查结构布置和设计方案是否合理；设计荷载和运行荷载的比较，分析计算参数是否正确，设计参数取值是否合理；水工混凝土结构构造措施是否得当，运行维护是否达到设计要求。

2.2.3 现场安全检测

(1) 水工混凝土结构抗压强度的检测

水工混凝土结构抗压强度检测可采用回弹法、超声法、超声回弹综合法或钻芯法等方法。建议优先采用无损的回弹法、超声法、超声回弹综合法等。当被检测混凝土表层质量不具有代表性,混凝土抗压强度、龄期或粗骨料最大粒径超过相关技术规程规定的范围,或者需要对混凝土强度进行复核验证时,可采用钻芯法进行。

(2) 混凝土裂缝深度检测

混凝土裂缝深度用超声波法测量混凝土中裂缝深度有平测法和对、斜测法。平测法只适用于裂缝深度不大于 50 cm 的裂缝,大于 50 cm 的裂缝只能采用对、斜测法,但对、斜测法只能适用于有条件两面对测或可钻孔对测的水工混凝土结构。对于仍在发展的裂缝应进行定期观测,并提供裂缝发展情况的数据。

(3) 混凝土内部缺陷的检测

混凝土内部缺陷的检测可采用超声法、探地雷达、冲击回波法和弹性波 CT 法等非破损方法。其中探地雷达利用高频电磁脉冲波的反射原理来实现探测目的,探地雷达^[5]利用电磁波以宽频带短脉冲形式,由混凝土表面通过天线发射器发送至混凝土内部,经内部目的体或地层的界面反射后返回表面,为雷达天线接收器接受。当电磁波在介质中传播时,其路径、电磁强度与波形将随所通过介质的电性和几何形态而变化。因此,根据接受到波的旅行时间(亦称双程走时)、幅度与波形等资料,可探测介质结构、构造与埋设物体,混凝土内部均质性的变化会在雷达图像上有不同的反映。当混凝土内部存在某种缺陷(如孔洞、松散物、异物等)时,雷达图像将呈现出异常变化。

冲击回波法^[6]是基于应力波的一种检测结构厚度、缺陷的无损检测方法。该方法原理是使用冲击产生的应力波(声波)迅速地在结构内部传递,然后在结构内部的缝隙和外表面反射回来。因此不仅能够快速确定混凝土、砌体结构中的孔洞、蜂窝、裂缝、剥离以及其它缺陷,而且能够确定结构构件的厚度以及缺陷的深度。目前已有 IES 扫描式冲击回波系统、带表面波的冲击回波系统、超薄冲击回波检测系统等多种类型。

弹性波层析成像技术^[7](简称 CT 技术)根据检测对象的弹性波速度与其物理力学参数有较好的相关性,在不损伤“检测对象”的情况下,利用检测剖面上的弹性波速,结合 CT 技术进行反演成像,以“图像”的方式完整地反映层析面上的内部结构特征,以实现混凝土内部缺陷检测的目的。目前弹性波 CT 技术的应用已拓展到科学和工程等诸多领域,特别是在工程地质勘探、混凝土构件和堤坝隐患探测、防渗墙质量检测、地基处理和加固的效果评价等方面得到广泛应用。在对弹性

波 CT 图像进行反演成像过程中发现,对同一个试件四侧进行的声波测试时,可实现试件剖面左右、上下方向的透射。当射线足够密时,CT 成像将生成出较高分辨率的 CT 图像。

(4) 钢筋分布、保护层厚度和锈蚀检测

钢筋位置、保护层厚度、直径、数量等项目的检测可采用雷达法或电磁感应法进行,常用的仪器有探地雷达及钢筋定位仪。对检测部位是否存在钢筋的锚固与搭接进行检测可采用电磁感应法。必要时可凿开混凝土进行钢筋直径或保护层厚度的验证。混凝土结构中钢筋的锈蚀程度可采用半电池法进行检测,评判标准可参照相关文献^[8,9]。

(5) 混凝土冻融和剥蚀

冻融破坏的发生与发展取决于混凝土的抗冻性、饱水程度、混凝土所处环境的最低气温、冻融速率、最大冻深和年冻融循环次数等因素。冻融破坏的程度一般通过现场检测确定,包括冻融剥蚀的范围、深度及钢筋是否暴露锈蚀等。如要具体地确定冻融破坏的原因,除进行现场情况调查外,还需对混凝土进行抗压强度、动弹性模量、抗冻等级、抗渗等级等检测。

(6) 过流面磨损和空蚀检查

当溢洪道或泄水孔等抗冲磨区域的混凝土存在严重的磨损和空蚀,在高速水流作用下,会加速冲刷破坏,危及水工结构的安全运行。易遭受冲磨与空蚀破坏的水工结构部位主要有闸门槽与底槛、溢流堰面、坡降突变部位、底板与边墙的交界部位、不同类型衬砌材料的连接部位、鼻坎、消力墩、消力池(塘)、护坦与基础连接部位等。

检查需要查明遭受磨蚀破坏的状况,分析破坏类型与原因,判别磨损和空蚀的主要原因;检查判断消能工内残积物数量、分布范围及特征;检查判断水工结构与基岩连接部位的破坏状况,并做详细记录和描绘。当泄水建筑物经短期运行即发生较严重磨蚀破坏,或长期运行发生周期性、重复性破坏时,要重新审查与评估结构布置与体形设计的合理性、溢流面体形和施工不平整度、护面材料的抗磨蚀性能以及不同护面材料间的接缝合理性。

(7) 结构位移和变形检测

结构的位移和变形检测可采用全站仪、激光测距仪、水准仪、激光定位仪和三轴定位仪等进行。水工混凝土结构的基础不均匀沉降,可以用水准仪检测;当需要确定基础沉降发展的情况时,应在混凝土结构上布置测点进行观测,沉降观测点可结合长期位移监测设施,并选择在能反映地基变形特征及结构特点的位置,测点

数满足腐蚀评价工作需要为准。观测周期和频次可根据水工混凝土结构腐蚀评价需要而定。

3 腐蚀评估方法

我国水利水电工程水工混凝土结构传统上多以强度设计为主的模式,主要考虑荷载作用下结构承载力(强度)安全性与适用性的需要,较少考虑结构长期使用过程中由于环境作用引起结构材料性能劣化、腐蚀对结构安全性与适用性的影响。根据调查,我国不少水工结构耐久性不良,状况差,尤其在侵蚀性环境下的使用寿命更短。

水工混凝土结构腐蚀评估作为结构安全评估的重要组成部分,重点评估因腐蚀对水工结构耐久性影响,即结构构件的局部损伤(如裂缝、剥蚀等)不得影响水工混凝土结构规定的耐久性,构件、结构表面被侵蚀、磨损(如钢筋锈蚀、冻融损坏、冲磨等)的对水工混凝土合理使用年限的影响,明确水工结构腐蚀后的剩余使用寿命;同时,建筑物总体及其构件的变形、建筑物地基不得产生影响正常使用的过大沉降或不均匀沉降、渗漏,严重影响水工混凝土结构安全,从而造成水工混凝土结构无法满足规划、设计时预定的各项预定功能。

4 腐蚀评估指标及标准

可参照 DLT 5251 - 2010《水工混凝土建筑物缺陷检测和评估技术规程》,腐蚀按其结构的安全性和耐久性影响程度的大小可分为以下四类:

I类腐蚀:属轻微腐蚀,对建筑物安全性和耐久性无影响;

II类腐蚀:属一般腐蚀,对建筑物安全性和耐久性有轻微影响;

III类腐蚀:属严重腐蚀,对建筑物安全性和耐久性有一定影响,但进一步发展危害严重;

IV类腐蚀:属特别严重的腐蚀,危及建筑物安全的重大缺陷。

水工混凝土结构腐蚀评估中,通常以检测参数为基础,以定量和定性分析为手段,结合行业标准、经验性专业知识判断进行腐蚀评估。其中检测内容包括混凝土外观缺陷,混凝土强度、碳化深度、保护层厚度、钢筋分布和锈蚀程度和裂缝分布为主,辅以混凝土密实度、内部缺陷探测等,在沿海和盐碱地区的水工混凝土结构还需要检测氯离子含量。

4.1 合理使用年限和环境条件评估

水工混凝土结构在设计、施工和运行过程中,难以

避免出现混凝土开裂、外观缺陷、内部缺陷和环境腐蚀等因素作用,都会直接或间接影响水工混凝土结构的合理使用年限。SL654 - 2014《水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范》给出的水利水电工程各类永久水工建筑物的合理使用年限在水工混凝土结构腐蚀评估中可按照执行。水工混凝土结构所处的环境条件评估根据 SL/T191 - 2008《水工混凝土设计规范》水工混凝土结构所处的环境条件分为五类。

4.2 混凝土外观缺陷

混凝土外观缺陷包括裂缝、渗漏、冻融剥蚀、磨损和空蚀等。可根据 SL/T191 - 2008《水工混凝土设计规范》、DLT 5251 - 2010《水工混凝土建筑物缺陷检测和评估技术规程》、SL 632 - 2012《水利水电工程单元工程施工质量验收评定标准 - 混凝土工程》和 DL/T 5207 - 2005《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》等行业标准进行分类评价。

4.3 混凝土强度

根据结构受力和所处的环境确定,可参照 SL191 - 2008《水工混凝土结构设计规范》和 DL/T5207 - 2005《水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术规范》进行评价。

4.4 混凝土保护层厚度、钢筋分布和锈蚀

允许偏差参照 DL/T5169 - 2013《水工混凝土钢筋施工规范》,混凝土保护层厚度参照 SL191 - 2008《水工混凝土结构设计规范》,混凝土内部钢筋锈蚀程度的评级可根据外露钢筋状况并结合该部位混凝土表面开裂情况进行评估^[8]。

4.5 抗渗透性能评估

对于有抗渗性要求的水工混凝土结构,可参照 SL191 - 2008《水工混凝土结构设计规范》,实体混凝土抗渗等级,并根据所承受的水头、水力梯度以及下游排水条件、水质条件和渗透水的危害程度等因素综合评价。

4.6 抗氯离子渗透性能评估

参照 SL191 - 2008《水工混凝土结构设计规范》进行评估。

4.7 抗冻性能评估

参照 SL191 - 2008《水工混凝土结构设计规范》,实体混凝土抗冻等级的试件采用快冻试验方法测定,对有抗冻要求的水工混凝土结构抗冻评估标准根据气候分区、冻融循环次数、表面局部小气候条件、水分饱和程度、结构重要性和检修条件等评定抗冻等级。

4.8 混凝土碳化

参照 DL/T 5251 - 2010《水工混凝土建筑物缺陷检