

水闸工程病害分析及安全鉴定

鄢丽丽，张旭辉，吕文丽，李凌

(广东省水利水电科学研究院；广东省水利重点科研基地，广州，510610)；

摘要：水闸是水利工程中常见而又重要的水工建筑物，它依靠可以升降启闭的闸门控制水位、调节流量，具有挡水和泄水的双重作用，在平原地区运用广泛。由于时间因素、自然因素、设计施工及管理等方面的影响，已建水闸出现了一系列的病害症状，影响到水闸工程正常功能的发挥，通过开展水闸安全鉴定工作，可以充分了解水闸工程的工作性态并为其除险加固的规划及实施提供依据。本文在详细分析水闸病害原因的基础上，结合南海区某水闸的安全检测，对该水库进行安全鉴定，用于指导水闸的运行管理工作。

关键词：水闸工程；病害分析；安全检测；安全鉴定

1 引言

水闸是水利工程中常见而又重要的水工建筑物。它依靠可以升降启闭的闸门控制水位、调节流量，具有挡水和泄水的双重作用，在平原地区运用广泛。水闸在运行过程中，由于受到空气、负荷、冻融、水流、污染等自然和人为因素的长期作用，呈现出老化和局部破损等病害现象，其安全性下降，影响到正常功能的发挥。

据资料分析，目前全国有近一半数量的大中型水闸存在各种各样的病险情况。这些水闸大多数修建于 20 世纪 50~70 年代，由于受当时技术、经济等条件限制，设计、施工不尽合理。不少工程标准低，质量差，有的水闸刚建成就存在不少质量问题，有的水闸没有进行竣工验收就投入使用。经过几十年的运行，许多水闸频繁抵御洪水和暴风雨的袭击，致使工程老化，损毁严重。不少水闸设施落后、简陋，年久失修，外观破烂不堪，不能安全运行。

2 水闸病害及原因

由于时间因素、自然因素、设计施工及管理等方面的影响，已建水闸的老化程度一步步加深，多数水闸出现了一系列的病害症状，其病害类型主要有：结构整体变位与混凝土开裂；地基渗流破坏；上下游消能防冲设施的破坏；闸门及其启闭设备的老化与破坏；混凝土表面劣化，主要表现为混凝土碳化及钢筋锈蚀、表面剥蚀破坏；水闸上下游河道淤积、地震灾害等。

2.1 结构整体变位与混凝土开裂

结构整体变位主要表现为闸室、岸墙、翼墙的水平位移、沉降与倾斜。水闸的这些变位将严重影响水闸的安全使用

结构整体变位与混凝土的开裂、结构缝的张开常常构成因果关系，混凝土开裂、结构缝的张开实属于结构局部变位。但是，除结构整体变位特别是不均匀沉降会引起沉降裂缝和结构缝张开外，还有其它原因会引起混凝土开裂^[1]，主要包括：温度裂缝、干缩裂缝、钢筋锈蚀裂缝、碱骨料反应裂缝、施工裂缝。混凝土裂缝往往是多种因素联合作用的结果。裂缝对水工混凝土建筑物的危害程度不一，严重的裂缝不仅危害建筑物的整体性和稳定性，而且还会产生大量的漏水，使闸坝及其他水工建筑物的安全运行受到严重威胁。另外，裂缝往往会引起其他病害的产生与发展，如渗漏溶蚀、环境水侵蚀、冻融破坏及钢筋锈蚀等等。这些病害与裂缝形成恶性循环，会对水工混凝土建筑物的可靠性产生很大危害。

2.2 地基渗流破坏

由渗流引起的渗透变形是水闸破坏的主要形式之一，称之为渗流破坏。水闸的渗流包括闸下渗流和侧向渗流两种途径。渗透变形主要包括管涌、流土和接触破坏三种形式，常常发生于渗流出口。渗流破坏的破坏性是很大的。首先是增大闸底板的扬压力，减小闸室的有效重量，对闸室的稳定不利；渗流破坏会淘空闸基或两岸连接处，严重危及水闸的安全，因闸底板下的地基和护坦下的地基被淘空而引起沉陷的较多，更为严重的是造成闸室的倾斜和护坦的坍塌破坏。引起水闸渗流破坏的原因很多，其主要原因有：提高水位差运行；防渗止水设施失效；排水反滤设施失效；地基土本身的特性与缺陷等。

地基的渗流破坏和闸室的不均匀沉降、止水失效之间会相互影响，形成恶性循环。如闸室产生不均匀沉降，伸缩缝止水失效，将可能产生渗漏通道、管涌、跌窝、流土等严重险情反过来又促使地基下沉加速，基础更趋不稳定。

2.3 上下游消能防冲设施的破坏

水闸消能防冲设施的破坏往往会造成大面积冲刷坑，这些冲刷坑的存在将使水闸翼墙，甚至闸室发生倾斜，严重危及水闸安全运行。上下游消能防冲设施破坏是比较复杂的问题，形成破坏的原因也是多方面的，往往是一种或几种因素共同作用的结果，归纳起来，大致有如下几种原因：

(1) 设计不当。原设计标准偏低，随着水闸运行时间的增加，河道的水力条件发生了一系列的变化，使得水闸现有消能防冲设施的尺寸及结构形式不能满足要求。另外原设计消能防冲设施不合理，如未设置足够长的海漫，海漫末端没有加固措施等。

(2) 运行管理不善。运行管理不善是造成冲刷破坏的主要原因。各种消能工型式都有其一定范围的水力条件，很难有一种消能措施能适应各级水位流量和任意的闸门开启方式。而长期以来，许多水闸管理制度不够完善，缺少足够的工程技术人员，水闸的启闭未严格按合理的调度方式进行，对闸门的操作未做到均匀、分档、间隙性地进行，从而产生集中水流、折冲水流、回流、漩涡等不良流态，造成了下游消能防冲设施的破坏。同时，维修养护不及时，往往也会造成冲刷破坏的恶性循环。

(3) 基础软弱，处理不当。

(4) 人为破坏。由于管理制度不完善，水闸常常受到人为破坏，如河床过度采沙，破坏了水沙平衡，改变原有河床形状，降低下游河床高程，增加上、下游水头差，加大了水流破坏力。

2.4 闸门及其启闭系统的老化

闸门的主要问题包括：面板、主梁、次梁变形与剥落、止水橡皮的老化破损、闸门及其细部构件的锈蚀等；一般说来，闸门的破坏往往是在闸室过水时发生的，特别是在某些水力条件下，闸门将产生强烈振动，甚至产生共振和动力失稳现象。闸门振动破坏的原因十分复杂，目前对于闸门振动的研究还处于探索阶段，但总的来说是由于动水作用的不平稳引起的。闸门在运行时，一般情况下振动是很轻微的。但当闸门产生共振时，振幅剧增，振动强烈，在门叶结构内出现异常的应力和应变，引起闸门金属构件疲劳、变形、焊缝开裂、紧固件松动，止水损坏，以致使闸门整体结构遭到破坏。此外，闸门强烈振动常使门槽损坏，甚至危及整个闸身安全。启闭设备及设施存在严重老化和不配套等问题。对于手电两用螺杆启闭机，闭门时由于闸门卡阻、强行顶压或制动失效，常常产生螺杆压弯。设计启闭力不足或闸槽变形，导致闸门摩阻加大，造成铜螺母牙磨损；对于双吊点的卷扬式启闭机，经常由于两边松紧程度不一致，导致两边拉力不平衡产生闸门开启时卡阻。

2.5 混凝土表面劣化

(1) 混凝土碳化和钢筋锈蚀

混凝土的碳化是空气中的二氧化碳与水泥石中的碱性物质相互作用的一种复杂的物理化学过程。影响混凝土碳化的因素大致有两方面，一是外界的侵蚀，如空气中 CO_2 浓度、环境温度、

湿度等，二是混凝土本身对碳化侵蚀的抵抗能力，也就是混凝土的质量，包括混凝土的密实度、水泥的品种、用量以及施工质量等。

混凝土钢筋锈蚀是一种在特定条件下的电化学腐蚀。在通常情况下，混凝土中的钢筋表面形成了一层致密的保护薄膜是不易锈蚀的，但混凝土碳化和氯离子的影响会破坏保护膜，引起钢筋锈蚀。沿海闸中大多数的情况是，碳化深度小于保护层厚度，钢筋就已经锈蚀了。两种因素引起沿海闸钢筋锈蚀的比例，氯离子占 55%，氯离子和碳化共同作用占 45%。

(2) 混凝土表面剥蚀破坏

这种破坏就内在混凝土的性能而言，20 世纪 60 年代有关混凝土耐久性的应用技术规范不甚完善，混凝土耐久性不良是造成表面剥蚀破坏的内在原因；就外在而言，水工混凝土产生剥蚀破坏主要是由于环境因素(包括水、气、温度、介质)与混凝土及其内部的水化产物、砂石骨料、掺和物、外加剂、钢筋相互之间产生一系列机械的、物理的、化学的复杂作用，从而形成大于混凝土抵抗能力(强度)的破坏应力所致。造成混凝土表面剥蚀的原因主要有：环境水的冻融破坏。混凝土产生冻融破坏，从宏观上看是混凝土在水和正负温度交替作用下而产生的疲劳破坏。在微观上，其破坏机理较有代表性的是美国学者 T.C.Powers 的冻胀压和渗透压理论。过流部位的冲刷与空蚀。钢筋的锈蚀。水质的侵蚀。

2.6 水闸上下游河道淤积

由于自然、历史、工程、潮汐水道变化及围垦减少了滩面水等多种因素的影响，水闸往往会在上下游河道中产生泥沙淤积，影响水闸的过水能力。上游淤积多出现在节制闸和分洪闸上，下游淤积多在泥沙河道两侧的排水闸以及入海河口的挡潮闸下。例如，沿海的淤泥质海岸带，沿岸的淤积细粒泥砂具有较强的流动性，在风浪和潮流的作用下，产生迁移，导致海岸被侵蚀退缩或淤积延伸，以致造成了一些沿海闸下的淤积。

2.7 地震灾害

根据近年来我国历次强烈地震后的震害调查，水闸震害主要表现为：底板、护坦、消力池等底部结构裂缝，各部位伸缩缝错动或破坏，闸墩裂缝、翼墙倾斜、工作桥断裂甚至倒塌等。主要原因：地基失稳，引起结构位移、裂缝甚至陷落；由于附加地震惯性力的作用使结构的强度或稳定性破坏，从而产生裂缝、倾斜、甚至倒塌。

2.8 水闸安全鉴定组织

通过开展水闸安全鉴定工作，可以充分了解水闸工程的工作性态并为其除险加固的规划及实施提供依据。

1998 年，水利部颁发了水利行业标准《水闸安全鉴定规定》(SL214-98)，规定水闸安全鉴定的基本程序、方法与步骤，初步规范了水闸安全鉴定工作。根据规定，水闸投入运用后每隔 15 ~ 20 年，应进行一次全面安全鉴定；单项工程达到折旧年限，应适时进行安全鉴定，对影响水闸安全运行的单项工程，必须及时进行安全鉴定。

水闸安全鉴定工作应由水闸管理单位向其上级主管部门申报。水闸上级主管部门应负责主持并组织实施。水闸管理单位应承担工程现状的调查分析工作，在申报要求安全鉴定时，必须将工程现状调查分析报告报上级主管部门。在开展安全鉴定工作过程中，应积极配合安全检测、复核计算单位和安全鉴定专家组的各项工作。

水闸上级主管部门组织实施水闸安全鉴定时，应承担下列各项工作：审批水闸管理单位的安全鉴定申请报告，下达安全鉴定任务；聘请有关专家，组建水闸安全鉴定专家组；编制水闸安全鉴定工作计划；委托或组织有关单位进行现场安全检测和工程复核计算；组织编写安全鉴定工作总结。

水闸安全鉴定专家组应根据工程等级、水闸级别和鉴定内容，由有关设计、施工、管理、科研或高等院校等方面的专家和水闸上级主管部门及管理单位的技术负责人组成。安全鉴定专家组

人数一般为 5~11 名，其中高级职称人数比例不少于三分之二。

水闸上级主管部门在编制安全鉴定工作计划时，应根据工程情况和现状调查分析报告中提出的工程存在问题，征询安全鉴定专家组意见，拟定现场安全检测和工程复核计算项目，提出鉴定工作进度计划、资金安排和分工等具体意见和要求。

3 广东省某水闸安全鉴定

3.1 水闸工程概况

水闸位于南海东部，黄岐雅瑶水道出口处，1995 年 6 月完成主体。该水闸为 III 等中型水利水电工程，主要建筑物等级为 3 级，船闸航道等级为 4 级。水闸设计洪水标准采用 50 年一遇设计、100 年一遇校核。内江排涝标准按 10 年一遇 ($P=10\%$) 24 小时暴雨径流量 1 天排干，并遭遇珠江 5 年一遇洪水。

工程建有水闸一座八孔，每孔净宽 10m，设计流量 482m³/s，闸门采用平板提升钢闸门，卷扬式启闭机启闭，闸底板高程-3.50m，闸顶高程 4.30m，挡水墙底高程 1.40m。船闸一座，闸首净宽 10m，船室长 80m，门顶高程 3.50m，最高和最低通航水位为 2.69m 和-0.70m，设计通行船队 100t 级，闸门采用升卧式液压启闭平面钢闸门。交通桥一座，桥宽 12.5m，桥长 140.4m，设计荷载为汽超 - 20 级。

3.2 水闸现状调查

工程现状调查分析一般由水闸管理单位负责实施和报告编写。水闸工程现状调查分析的内容，应包括技术资料的收集，工程现状全面检查和对工程存在的问题进行初步分析。收集的技术资料，应真实、完整，力求满足安全鉴定的需要。工程现状安全检查应在原有检查观测成果的基础上进行，应特别注意检查工程的薄弱部位和隐蔽部位。对检查中发现的工程存在的问题和缺陷，应初步分析其成因和对安全运用的影响。

调查结果显示，该水闸存在的主要问题及需要进一步复核检测的问题有： 闸室稳定性和抗渗稳定性复核； 工程抗震能力复核； 工程消能防冲与水闸过水能力实验复核； 混凝土结构检测； 闸门启闭机和机电设备检测； 观测设施检测。

3.3 水闸安全检测

水闸的现场安全检测应以下列规程规范为主要依据： SL214-98《水闸安全鉴定规定》； JGJ/T23-2001《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》； CECS21:90《超声法检测混凝土缺陷技术规程》； DB/T 08-002-98《钻芯法检测混凝土强度技术规程》； SU101-94《水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程》； DBJ08-223-96《超声回弹综合法检测混凝土技术规程》； ANSI 从 SMC76-80《混凝土中钢筋的半电池电位试验标准》； SDJ105-82《水工混凝土试验规程》等。

水闸现场安全检测项目，应根据工程情况、管理运用中存在的问题和具体条件等因素综合研究确定。根据规范，水闸现场安全检测包括混凝土结构检测、金属结构及启闭系统检测、地基与基础工程检测和其他专项测试等。

3.3.1 混凝土结构检测

混凝土结构检测的目的是评定混凝土结构工程质量现状，为复核计算和安全评价提供基础数据。主要涉及混凝土构件外观质量检查以及混凝土构件强度、缺陷、和损伤等检测。

构件强度检测包括混凝土强度、混凝土碳化深度和钢筋锈蚀情况的检测。构件缺陷检测分外部缺陷和内部缺陷的检测。外部缺陷是指混凝土表面风化、冲蚀、蜂窝、麻面、剥落等外显型缺陷；内部缺陷是指混凝土内部疏松、狗洞、夹杂异物等缺陷。构件损伤检测主要针对混凝土裂缝分布、裂缝长度，宽度和深度的调查；混凝土构件缝(伸缩缝和沉降缝)检测主要检查相邻结构段之间有无错动，结构缝开合和止水工作情况的调查与分析。

对水闸的闸墩、胸墙、立柱和启闭机房的横梁、柱、楼板的混凝土构件用回弹法进行检测，共检测 40 个构件，每个构件 10 个测区，单个构件抗压强度推定值 29.1MPa~38.7MPa。混凝土碳

化深度 6.0mm~10.0mm，小于保护层厚度，未见保护层开裂，部分混凝土构件出现开裂、漏筋，钢筋锈蚀。

3.3.2 金属结构及启闭系统检测

金属结构及启闭系统检测主要内容有外观检查、锈蚀检测、外形尺寸与变形检测、焊接和零部件的无损检测、材料特性检测、电机检测、液压系统检测和钢丝绳检测等。检测结果显示水闸的金属设备及启闭系统使用良好。

3.3.3 地基与基础工程检测

地基与基础工程检测以外观检查为主，辅以沉降观察。外观检查包括：基础有无挤压、错动、松动和鼓出；结构与基础结合处有无错动、开裂、脱落和渗漏水情况；建筑物两侧岸坡有无裂缝、滑坡、溶蚀、绕渗和水土流失情况；基础排水设施的渗漏水量和水质有无变化，扬压力是否超限，有无溶蚀现象；消能防冲设施有无冲刷和剥蚀，尾水渠有无淤积。沉降观察包括：沉降变形观测设施的考证；观测设施的完好率检查；基础累积沉降、月平均沉降和不均匀沉降观测。

现场检查发现船闸两端导航堤沉降与中岛沉降不同步，挡土墙分缝填充物损坏，部分有沙土流失，虽已进行处理，但水下部分较难根治。据水闸管理部门介绍，水闸内江南岸挡土墙为木桩基础，部分堤段已出现一定的变形位移。由于水闸工程没有安装相关的观测设施，建议水闸管理部门增设相关设施，加强管理。

3.3.4 专项测试

专项测试包括结构动力试验、荷载试验、材料特性试验、结构受力特征试验、启闭机启闭力试验和水质试验。结构动力试验包括结构动力特征、高速水流和冲击荷载作用下金属结构的振动特征等；荷载试验主要指地基承载力、结构承载力检测；材料特性试验包括混凝土和金属在动荷载作用下的疲劳强度试验、碱活性骨料试验、混凝土孔隙率及微观结构试验等；结构受力特征试验包括混凝土与金属结构在荷载作用下的变形、应力、裂缝变化情况；启闭机启闭力试验是测定不同上、下游水位条件下的启闭力大小，推定在设计水位和校核水位条件下的闸门启闭力；水质试验主要测定有无腐蚀性的环境介质及其含量。

3.4 水闸过流能力和消能防冲复核

水力复核计算主要分析研究：(1) 不同开启度对水闸内外消能防冲效果影响；(2) 上、下游水位变化对水闸、船闸的运行的影响；(3) 消能防冲的水力计算。基本结果如下：

3.4.1 闸孔泄流能力

该水闸的主要功能是排涝和挡潮，按当地排涝标准，10 年一遇 ($P=10\%$) 24 小时暴雨径流量 1 天排干，遭遇外江珠江水口水道 5 年一遇洪水计算。由蓄排涝计算成果，本次复核水闸 10 年一遇排涝洪水最大过闸流量为 $501.6\text{m}^3/\text{s}$ ，大于原设计的 $482\text{m}^3/\text{s}$ ，过流能力满足规范要求。

3.4.2 消能防冲

水闸现状外江消力池长 12.0m，池深 0.5m，海漫长度 20.8m。从实测水下地形图可见，内江侧消能设施正常，两端稍有淤积。外江侧消力池有部分淤积，淤积厚度 0.06~0.50m 不等。在设计工况下泄水流在消力池内形成淹没水跃，消能防冲设施符合《水闸设计规范》(SL265-2001)的要求。

3.5 稳定性复核计算

水闸稳定性复核包含闸室稳定、抗渗稳定和抗震稳定，采用理论计算的方法，对工程结构在各设计运行工况下的稳定性进行计算分析。

3.5.1 闸室稳定

水闸共 8 孔，闸室承受荷载主要包括结构自重、水压力、扬压力、浪压力和闸顶活荷载等。和分离式底板抗浮稳定。计算结果显示：(1) 地基应力均为压应力，最大压应力小于地基承载能力；(2) 抗滑、抗倾稳定安全系数大于设计工况的 1.25 和非常校核工况的 1.0。

3.5.2 抗渗稳定

据钻探资料,闸基坐落在强风化~弱风化泥质粉砂岩。水闸在闸基处未设防渗帷幕和排水孔来降减渗透压力,扬压力较大;闸基岩体渗透性能为弱透水层,基本满足防渗要求;现场检查情况,水闸暂无渗流异常征兆;相比类似工程,水闸的渗流稳定安全可以认为满足规范要求。

3.5.3 抗震稳定

水闸设计抗震能力为7度地震,在水闸挡水工况,闸外水位为设计水位,闸内为正常水位或低水位时遭遇7度地震,水闸的抗震和抗滑稳定系数均满足规范要求。

3.6 安全鉴定结论

综合检测 results 和复核计算,根据《水闸安全鉴定规定》的评价标准,该水闸安全评价为二类工程,运用指标基本达到运行标准。

4 结语

通过对水闸病害类型及其成因的分析发现,水闸的病害往往都不是单独存在的,它们之间或多或少地存在着某些必然的联系。在对各类水闸进行病害评估的过程中,发现水闸的各种病害、缺陷,大多始发于或显露于外表面,病害的起因比较简单,根据现场仔细检查、测绘病害的形态、范围和程度,就可以分析清楚并作出判断。但也有一些病害较复杂,其病因亦很多,需要结合具体工程条件进行多方面的检测、试验或调查工程的设计、施工资料,经过综合分析后,才能得出比较清楚的认识和做出恰当的评估。

通过本次安全鉴定工作,建议在今后的水闸工程管理中,管理单位应建立工程安全检测与评估制度,严格按照有关规定进行检测与评估;此次检测与评估暴露出工程安全观测数据不足的问题,建议管理单位加强工程观测,特别是安全观测,认真做好观测资料的收集和分析工作。

参考文献:

- [1] 任旭华, 刘丽. 水闸病害分析及其防治加固措施[J]. 水电自动化与大坝监测. 2003(27),6
- [2] 倪言波. 水闸健康综合诊断理论与方法研究[D]. 扬州大学.