

国家自然科学基金
金资助项目论文

水闸老化状态实用评估方法

张 志 俊

合肥工业大学土木系
一九九四年十月

目 录

- 1、水闸老化状态评估的目的
- 2、对评估方法的基本要求
- 3、评估前的前期工作
- 4、评估指标及其量化
- 5、单个部件或构件的评估
- 6、对整个水闸及其枢纽的评估

水闸老化状态实用评估方法

张 志 俊

一、水闸老化状态评估的目的

国家水利部门需要掌握,当前全国水利设施的完好情况和可靠程度,为制定水利建设的方针政策提供依据,从宏观上确定兴建与维修加固的比例,使财力、物力、人力的安排更加科学合理。在调查研究的基础上,用统一的老化评估方法,去衡量全国各地水闸的老化状况,便可以掌握我国现有水闸老化的地域分布情况,各地存在的主要问题,以便在宏观上给予指导,正确地确定水利资金的投向和投入的比重。

地方水利部门对本地区的水闸评估之后,就可以知道,那些水闸存在什么问题,老化到什么程度,把自己管理的水闸,根据老化程度,排列一个秩序,根据轻重缓急,合理安排建设项目,使有限的资金得到合理的使用,因为对每个水闸老化的状况心中有数,就可以控制资金投入的数额。

因为评估结论是以检测为基础的,既有水闸各个构件或部件的评估结论,又有整个水闸的评估结论,还有整个水闸枢纽的评估结论,设计部门就可以,以评估结论为依据,进行加固设计,或者提出防护措施或维修方案。

施工部门在进行维修加固时,对每个部件或构件存在的问题心中有数,就会对施工有指导作用。

二、对评估方法的基本要求

水利部门要求评估结论不要太细,只要能为修补加固提供决策依据,便于立项就行了。适应目前水利部门工程技术人员的习惯,就水闸的老化状况划分出大的类别,能在众多的水闸中区分出轻重缓急,并提出对于不同老化级别的水闸及其部件或构件,应该采取什么样的维修加固措施,评估的级别搞的太多,评估结论过细,检测工作量就会很大,使得检测费用过于昂贵,在维修加固费用中,占去了不合理的份额,使管理单位考虑,是否还需要检测。检测的时间拖的太长,脚手架等必需的设施长期不能拆除,影响水闸的管理运用。从评估工作本身讲,检测资料受仪器精度,人员操作水平的限制,本身就有一定的误差,有些部位还无法检测到,如果评估级别划的太多,级差过小,容易出现不合理的结论。

水利管理部门要求在划分级别的时候,能反映出水闸的重要性,以及失事后的严重性,如内河上的水闸与长江黄河淮河上的水闸应该不一样。评估结论应该能反映出那些部位需要修,那些部位不需要修,那些部位要重点修、要求要高,那些部位可以不修,或者要求低一些。

加固设计单位要求能指出病害的类型及部位,严重程度以及它的发展趋势。

无论那个部门,都要求评估方法简便易行,便于操作,同时又要求评估结论客观真实可信。评估方法应该使不同结构型式的水闸之间具有可比性,最重要的是,不应在被评水闸之

间出现级别颠倒的现象。

更要求提出在目前运用条件变化,水闸自身老化及原设计施工存在遗留缺陷的情况下,被评水闸的可靠度如何。

三、评估前的前期工作

本评估方法适用于河道上的节制闸、进水闸和分洪闸及排水闸。

根据评估的任务、目的和范围,确定调查的内容。一般来说,应该作如下的前期工作。

初步调查,收集被评水闸的原始设计图、竣工图,工程地质报告,历次加固和改造的设计图、事故处理的报告,竣工验收文件和检查观测记录,原始施工情况,水闸的使用条件,根据已有资料与实物进行初步核对、检查与分析。

详细调查,一般包括水闸各部位的结构型式,如翼墙的挡土墙型式,铺盖所用的材料,闸室的结构型式,是开敞式、胸墙式还是涵洞式,工作桥、公路桥的结构型式,构件的结构构造和连接构造。

在详细调查的基础上,确定必要的检测项目,目前可以进行构件现有几何尺寸的测量,混凝土现有强度及内部缺陷的推定,混凝土中钢筋位置及保护层厚度的探查,混凝土内钢筋锈蚀程度的估计,结构沉陷和变形的测量,结构的动力检测,混凝土裂缝宽度、深度、长度及位置的测量,混凝土表面碳化深度的测量,结构表面冻融、冲刷、磨损的部位、面积、最大深度、平均深度的测量,混凝土中氯离子含量的测量,大气及环境水中侵蚀介质的检测,不同时间、结构不同部位气温、水温、混凝土表面温度的检测,碱——骨料反应情况的调查。上述项目不一定都要做,对于某一个被评的水闸,根据具体需要选取其中的一部分。除了上述无损检测的项目之外,还可以取样,在室内作必要的试验和分析化验项目。

地基基础的检查,必要时钻孔取样,测定当前土或岩石的物理力学指标。水闸基础一般都比较浅,建筑物本身高度不大,取样并不费事,不一定要复杂的机具。

作用在建筑物上的各种外力的调查,如水闸结构及其上部填料和永久设备的自重,正常挡水位组合或设计洪水位组合时的静水压力,相应于正常挡水位组合或设计洪水位组合时的扬压力、土压力、泥沙压力,相应于正常挡水位组合或设计洪水位组合时的波浪压力。

建筑物总位移的测量,包括垂直位移(沉陷),水平位移,建筑物倾角的测量,建筑物相邻部分相互位移的测量。

水闸功能的调查,如过水能力,闸门的漏水量,闸门的启闭系统,闸门支座、滚轮、沉降缝、止水、排水孔、反滤层、伸缩缝及其它设施的完好情况。

检测与试验项目的多少,工作的深度,根据被评水闸的重要性和对检测结构的要求而定。对于重要的水闸,检测与试验的项目应该多一些,相应地投入的人力物力和时间就多一点,取得的资料,数量多质量高,评估结论自然更加接近实际。对于不太重要的水闸,检测和试验的项目可以少一点,这样在分析计算中,就会缺一些数据,无法进行计算。这时,可以在原设计值的基础上,经过分析判断,打一个折扣,以此估计值代入公式进行计算。这样得出的评估结论,当然是和这样的原始资料相对应的,随着工作深度的不断深入,评估结论会逐渐接近实际情况。

四、评估指标及其量化

把水闸枢纽分解成各个组成建筑物,如节制闸、进水闸、冲砂闸、分洪闸等。再把建筑物分解成各个部件,如水闸底板、中墩、边墩、工作桥、排架、公路桥、上游翼墙、铺盖、护底、护坡、消力池、下游翼墙、海漫等等。把每个部件再分解成构件,如排架由立柱、横梁等组成。评估首先从部件或构件开始,就每一个部件或构件的安全性、适用性和耐久性三个方面分别选取若干个评估指标。由于部件和构件的评估是类似的,有些部件可以分解成若干构件,而有的部件不能再分解,如上游翼墙,若是重力式挡土墙,就没有再分解的必要,本身就是一个构件,为了叙述的方便,我们以后把部件和构件统称为部件。

部件的安全性,主要是承载能力,要计算一个部件的承载能力,需要知道三方面的资料,即作用在部件上的荷载,或者更广泛的讲,部件上所受的作用。再就是部件本身的抗力。还有为计算出,在荷载作用下,部件上所产生的内力或称作用效应,而需要的结构计算简图。

水闸部件上所受的荷载,根据“水闸设计规范 SD133—84”确定。水闸结构及其上部填料的自重应按当前的几何尺寸及材料容重计算,当前的几何尺寸由检测报告提供,材料容重由现场取样测定。闸门、启闭机及其它永久设备应尽量采用当前的实际重量。作用在水闸上的静水压力应根据水位组合条件计算,对于多泥沙河流,应考虑含沙量对水的容重的影响。作用在水闸基底上的扬压力,应根据观测资料确定,扬压力的实际分布和理论计算值可能有很大的不同,对于没有敷设观测设备的水闸,用点式测压管可以测出渗透水头,进而绘出渗透压力分布图。用接触式测压管可以测出地基和建筑物底部之间接触处的水头,点式测压管还可以测出混凝土接缝处的渗透水头。上述测压管是在基底上钻孔后埋入的。

作用在建筑物底部基础上的土压力,在软土地基上可以使用土压计测量,岩基上最好采用应变计,并把它埋设在地基钻孔不深的膨胀水泥中,为了从测量出的应变换算为应力,应该在棱柱形或圆柱形的试件上测定地基的弹性特性,该试件在待测的地基中选取,并在单轴向受压的条件下进行试验,当然直接在地基中确定岩石的弹性特征要更好一些。

作用在上下游翼墙、边墩和其它部件表面上的回填土压力,决定于回填土的特性,容重和含水量,同时也决定于墙的刚度和位移。土压力是挡土墙的基本荷载,水闸经过长期使用之后,回填土的物理——力学性质可能发生变化。一般情况下,在墙后取土样(深的部件用钻机取土样),经土工试验取得容重、内摩擦角及凝聚力等数据后,通过计算确定土压力。作用在土基上的土压力,一般按主动土压力计算,岩基上一般按静止土压力计算。对于要求较高的比较重要的水闸,可以用土压计测定土压力的实际分布。

对于多泥沙的河流上的水闸,应根据实际的泥沙淤积情况,计算泥沙压力。

作用在水闸上的波浪压力及其它荷载,按“水闸设计规范 SD133—84”确定。

计算闸室稳定和应力时的荷载组成,按“水闸设计规范 SD133—84 表 6.1.9 的规定采用。计算岸墙、翼墙稳定和应力时的荷载组合,也按“水闸设计规范 SD133—84”表 6.1.9 的规定采用,但应着重验算检修期墙前无水时的情况。

部件横截面上的抗力,由混凝土的强度,钢筋的强度(混凝土部件,不考虑钢筋的强度)和部件及截面的几何特性决定。混凝土的强度由无损检测推定,混凝土强度的检测,在部件上是分区进行的,一般沿部件的长度方向每 1~2 米,划分为一个测区,根据检测的结果,每个测区内的混凝土强度是不相等的。在钢筋锈蚀并不严重的情况下钢筋的强度与设计强度相等,当锈蚀很严重时,钢筋的材料性质发生了变化,与原牌号钢筋的设计强度不相等,这时应用钢筋测力计,实测作用在钢筋上的力,用锈蚀钢筋的残留截面积,经分析计算后,确定钢

筋的强度。部件的横截面积在竣工之后,各个截面的几何尺寸就不相同,经过冲刷磨损、冻融剥蚀及人为损坏之后,截面几何尺寸之间的差异更大,因此横截面上的抗力,应该分测区来计算,测每个测区内的几何特征,混凝土强度,钢筋强度和钢筋的残留截面计算抗力。

结构计算简图应符合当时的实际受力与构造状况。老化以后的部件,其结构构造和连接构造与原来的已不一样,由于约束条件的改变,计算简图也跟着相应的改变。例如,由于贯穿性的深大裂缝,可以把固定端变成简支端,把固接变成铰接。计算简图的选取主要靠专家的经验,而专家的经验又来自大量的实践。例如对大量的不同老化模式的工程结构,进行原型荷载试验之后,根据检测资料以各种可能的计算简图去计算其位移(水平位移,垂直挠度),然后与实测的位移值进行对照,计算值与实测值最接近的那种计算简图,就是应该选取的计算简图。当这种反分析工作做的多了,有了一定的经验之后,专家就可以根据结构的实际受力与构造状况,作出计算简图的正确判断。

根据荷载与计算简图,可以计算出部件各个截面上的内力。由于部件各个截面上的抗力不一样,所以各个截面上的承载能力也不一样,计算时先取最不利内力组合的截面计算,再取抗力最小的截面计算,然后再取安全系数可能是最小的截面计算,在上述各断面中,最小的安全系数,就是该部件的安全系数。

部件的承载能力用其计算得出的强度和稳定安全系数被规范规定的安全系数除,所得之商,作为评估指标。首先,把部件的承载能力划分为4个等级,第1级是符合国家现行标准规范要求,安全可靠,不必采取措施,只须正常养护的部件;第2级是略低于国家现行标准规范要求,基本安全,只需进行表面防护修补的部件,即所谓只有“小毛病”的部件;第3级是不符合国家现行标准规范,影响安全,不太可靠的部件,即所谓有“大毛病”的部件,必须进行小修或加固;第4级是严重不符合国家现行标准规范、危及安全,很不可靠的部件,即所谓“危险”的部件,必须彻底大修或加固改造的部件。

凡是计算得出的安全系数被规范规定的安全系数除,其商大于等于1的,就认为是1级部件。至于2、3、4级部件的计算得出的安全系数被规范规定的安全系数除,所得之商应该是多少,原则上应该通过实际工程的调查分析和集中专家的意见加以确定。在全国范围内,选取代表性的工程,进行现场检测,并做必要的野外试验和室内试验,根据国家现行的规范,计算其安全系数,请水利主管部门、工程管理部门、施工、设计和科研部门的专家会审,就大家一致的意见,作为水闸部件的某个级别的标准值。2、3、4级部件的标准值,与当前国家的方针政策有关,与国家的经济发展水平有关,并且和当前的管理、施工、设计、检测的水平有关,也不是一成不变的,第一次确定的级别标准值,可能不太恰当,经过试行一段时间后,发现有问题的还可以修改调整。

用 η 表示部件的强度评估指标

$$\eta = \frac{\bar{K}}{K} \quad (1)$$

式中 $\bar{K}$ ——部件根据当前所受的荷载和实际的抗力,计算得出的强度安全系数;

K ——规范规定的强度安全系数。

通过实际工程的调查分析和集中专家的意见,就 η 指标,对应部件老化的4个级别,规定出 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ 4个值,就 η 这一个指标而言,1级老化部件应为 η_1 , 2级老化应为 η_2 , 3级老化应为 η_3 , 4级老化应为 η_4 。

闸室、上下游翼墙等,既有强度问题,又有稳定问题。其安全性评估指标,除了强度安全系数之外,还有稳定安全系数,其中包括基底压力的最大值与最小值之比不大于规范规定的容许值(见“水闸设计规范”SD133—84 附录五附表 5·1),抗滑稳定安全系数不小于 SD133—84 表 6·2·4 规定的容许值。

用 θ 表示基底压力分布均匀性的评估指标

$$\theta = \frac{\bar{P}}{P} \quad (2)$$

式中 $\bar{P}$ ——部件计算所得基底压力最小值与最大值之比;

P ——规范规定的基底压力最小值与最大值之比。

同样的,1 级老化应为 θ_1 ,2 级老化应为 θ_2 ,3 级老化应为 θ_3 ,4 级老化应为 θ_4 。

用 ϵ 表示被评水闸部件,抗滑稳定性的评估指标。

$$\epsilon = \frac{\bar{K}_c}{K_c} \quad (3)$$

式中 $\bar{K}_c$ ——计算所得被评水闸抗滑稳定安全系数;

K_c ——规范规定的抗滑稳定安全系数。

同样的,1 级老化应为 ϵ_1 ,2 级老化应为 ϵ_2 ,3 级老化应为 ϵ_3 ,4 级老化应为 ϵ_4 。

把水闸每个部件下面,对应的那一块地基也看作是部件。

用 κ 表示地基承载力的评估指标

$$\kappa = \frac{\bar{R}}{R} \quad (4)$$

式中 $\bar{R}$ ——地基当前所具有允许承载力,该值按“水闸设计规范 SD133—84”,第 26 页公式(7·2·2)计算,公式中的,基础底面以下土的容重 γ_b ,基础底面以上土的容重 γ_0 ,地基土的凝聚力,地基土的内摩擦角,应取当前的实际值。

R ——当前地基所承受竖向荷载的压应力。

同样的,1 级老化的地基应为 κ_1 ,2 级老化的应为 κ_2 ,3 级老化的应为 κ_3 ,4 级老化的应为 κ_4 。

用 λ 表示,在竖向荷载和水平向荷载共同作用的情况下,地基整体稳定性的评估指标。

$$\lambda = \frac{\bar{C}_k}{C_k} \quad (5)$$

式中 $\bar{C}_k$ ——地基核算点,当前具有的凝聚力;

C_k ——在当前竖向荷载和水平向荷载共同作用的情况下,满足极限平衡条件所必需的最小凝聚力。

C_k 值可按“水闸设计规范 SD133—84”第 26 页公式(7·2·3)计算,公式中的地基土的内摩擦角,取当前实测值,在竖向荷载或水平向荷载作用下的竖向应力、水平向应力和剪应力,按该规范附录六附表 6·8~附表 6·11 计算。

岸墙和翼墙的地基整体稳定及护坡工程的边坡稳定可按圆弧滑动法计算,参照上述办法制定相应的评估指标。

同样的,1 级老化的应为 λ_1 ,2 级老化的应为 λ_2 ,3 级老化的应为 λ_3 ,4 级老化的应为 λ_4 。

用 μ 表示地基沉降量(或沉降差)的评估指标。

$$\mu = \frac{\bar{S}_\infty}{S_\infty} \quad (6)$$

式中 $\bar{S}_\infty$ ——地基容许最大沉降量(或沉降差),该值应以保证水闸安全和正常使用为原则,根据工程具体情况研究确定;

S_∞ ——地基当前实际的沉降量(或沉降差)。

同样的,1级老化的应为 μ_1 ,2级老化的应为 μ_2 ,3级老化的应为 μ_3 ,4级老化的应为 μ_4 。用 ν 表示地基抗渗稳定性的评估指标。

$$\nu = \frac{\bar{J}}{J} \quad (7)$$

式中 $\bar{J}$ ——地基水平段或出口段允许的渗流坡降值,该值从“水闸设计规范 SD133—84”附录三表 3·1 查取;

J ——地基实测渗流坡降值。

同样的,1级老化的应为 ν_1 ,2级老化的应为 ν_2 ,3级老化的应为 ν_3 ,4级老化的应为 ν_4 。

部件的适用性用相对挠度、水平位移、倾斜角度和扭角 4 个指标评估。

用 γ 表示部件挠度(垂直位移)的评估指标。

$$\gamma = \frac{f_{\max}}{l_0} \quad (8)$$

式中 γ ——部件的实测最大挠度;

l_0 ——部件的计算跨度。

同样的,1级老化的应为 γ_1 ,2级老化的应为 γ_2 ,3级老化的应为 γ_3 ,4级老化的应为 γ_4 。

用 δ 表示部件水平位移的评估指标。 δ 以 mm 计, δ 同样可分为 4 个级别,1级老化的应为 δ_1 ,2级老化的应为 δ_2 ,3级老化的应为 δ_3 ,4级老化的应为 δ_4 。

用 ϵ 表示部件倾斜角度的评估指标。 ϵ 定义为部件顶部水平位移与部件高度的比值,例如闸墩顶部的水平位移值与闸墩高度的比值。同样的, ϵ 可分为 4 个级别,1级老化的应为 ϵ_1 ,2级老化的应为 ϵ_2 ,3级老化的应为 ϵ_3 ,4级老化的应为 ϵ_4 。

用 ζ 表示部件扭角的评估指标。 ζ 定义为部件同一平面上,两端的棱线所夹的空间角度。 ζ 同样可以划分为 4 个级别,1级老化的应为 ζ_1 ,2级老化的应为 ζ_2 ,3级老化的应为 ζ_3 ,4级老化的应为 ζ_4 。

部件的耐久性用裂缝、碳化深度、钢筋锈蚀率和体积损失率等指标来评估。

裂缝是混凝土与钢筋混凝土部件常见的病害,钢筋混凝土部件受拉区微小裂缝的出现是正常的,不影响它的承载能力,但是却为氧气、水份、氯离子和其它侵蚀性物质进入混凝土内部提供了通道,当裂缝超过一定的宽度之后,就会加速钢筋的锈蚀和混凝土的碳化。一般来说,部件表面裂缝的数目越多、长度越长、深度愈深,防御有害物质侵入的能力就越差,耐久性自然就要差一些。

用 ξ 表示混凝土部件表面,每平方米的裂缝长度。

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{A} \quad (9)$$

式中 $\sum_{i=1}^n l_i$ ——部件表面可见部份裂缝的总长度;

A —— 部件表面可见部分的总面积。

ξ 同样可以划分为 4 个级别, 1 级老化的应为 ξ_1 , 2 级老化的应为 ξ_2 , 3 级老化的应为 ξ_3 , 4 级老化的应为 ξ_4 。

用 ω 表示裂缝的平均宽度。在水上部分, 水位变动区和水下部分的裂缝平均宽度标准值应该规定的不同, 每一区域内的裂缝平均宽度都要划分成 4 个级别, 1 级老化部件应为 ω_1 , 2 级老化应为 ω_2 , 3 级老化应为 ω_3 , 4 级老化应为 ω_4 。

用 π 表示混凝土碳化的评估指标

$$\pi = \frac{d_c}{S} \quad (10)$$

式中 d_c —— 部件表面混凝土的碳化深度;

S —— 钢筋混凝土部件, 钢筋的保护层厚度。

以检测得到的很多碳化深度数据, 求 π 的平均值 π_a , 作为评估指标。

把 π_a 划分成 4 个级别, 1 级老化部件应为 π_{a1} , 2 级老化部件应为 π_{a2} , 3 级老化部件应为 π_{a3} , 4 级老化部件应为 π_{a4} 。

用 ρ 表示钢筋混凝土部件中, 受力钢筋的锈蚀程度。受力钢筋的锈蚀会引起其混凝土保护层的鼓裂, 即通常所说的顺筋裂纹, 该裂纹的出现加速了混凝土内部钢筋的锈蚀、混凝土的碳化, 严重时还引起混凝土保护层的脱落。钢筋的锈蚀程度可以用半电池法检测, 该法不需要敲掉混凝土保护层, 施测方法简便, 可以在部件的表面测出许多的点, 该法用电位水平判断混凝土内钢筋的锈蚀程度, 目前世界各国都有一些自己的判据, 我国交通部公路所也提出了自己的判据。我们根据半电池电位法测得的电位水平也可以把钢筋的锈蚀程度划分成 4 个级别, 1 级老化部件为 ρ_1 , 2 级老化部件为 ρ_2 , 3 级老化部件为 ρ_3 , 4 级老化部件为 ρ_4 。

用 σ 表示部件的体积损失率。

$$\sigma = \frac{G_L}{G_0} \quad (11)$$

式中 G_L —— 混凝土部件由于水流冲刷、磨损、冻融剥蚀以及人为损坏等原因损失掉的混凝土体积;

G_0 —— 混凝土部件原来的总体积。

我们可以把 σ 划分成 4 个级别, 1 级老化的部件应为 σ_1 , 2 级老化的部件应为 σ_2 , 3 级老化的部件应为 σ_3 , 4 级老化的部件应为 σ_4 。

五、单个部件或构件的评估

水闸部件的老化评估, 应从安全性、适用性、耐久性三个方面进行。单就安全性而言, 把部件划分为 4 个级别, 它们的评估指标已如前述。对于混凝土部件, 标准的 1 级老化部件, 关于安全性的评估指标取值应该是 $\eta_1, \theta_1, \iota_1$, 标准的 2 级老化部件, 其安全性评估指标的取值应该是 $\eta_2, \theta_2, \iota_2$, 3 级老化的应该是 $\eta_3, \theta_3, \iota_3$, 4 级老化的应该是 $\eta_4, \theta_4, \iota_4$ 。写成矩阵的形式, 标准部件的数据矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \eta_1 & \eta_2 & \eta_3 & \eta_4 \\ \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ \iota_1 & \iota_2 & \iota_3 & \iota_4 \end{bmatrix}$$

对于地基,标准的1级老化地基,关于安全性的评估指标取值应该是 $\kappa_1, \lambda_1, \mu_1, \nu_1$, 标准的2级老化地基,其安全性评估指标的取值,应该是 $\kappa_2, \lambda_2, \mu_2, \nu_2$, 3级老化的应该是 $\kappa_3, \lambda_3, \mu_3, \nu_3$, 4级老化的应该是 $\kappa_4, \lambda_4, \mu_4, \nu_4$ 。写成矩阵的形式,标准部件的数据矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \kappa_1 & \kappa_2 & \kappa_3 & \kappa_4 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 \\ \mu_1 & \mu_2 & \mu_3 & \mu_4 \\ \nu_1 & \nu_2 & \nu_3 & \nu_4 \end{bmatrix}$$

对于适用性而言,标准部件的数据矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 \\ \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 \\ \epsilon_1 & \epsilon_2 & \epsilon_3 & \epsilon_4 \\ \zeta_1 & \zeta_2 & \zeta_3 & \zeta_4 \end{bmatrix}$$

对于耐久性而言,标准部件的数据矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \xi_1 & \xi_2 & \xi_3 & \xi_4 \\ \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 & \omega_4 \\ \pi_1 & \pi_2 & \pi_3 & \pi_4 \\ \rho_1 & \rho_2 & \rho_3 & \rho_4 \\ \sigma_1 & \sigma_2 & \sigma_3 & \sigma_4 \end{bmatrix}$$

为了叙述的方便,把各种评估指标用评估指标集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 代表,把部件的老化级别用老化级别集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 代表,对于水闸的各个标准老化部件的数据矩阵,无论是混凝土部件或者地基,不论是关于安全性,或者是关于适用性,还是关于耐久性,可以统一的写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & a_{n4} \end{bmatrix} \quad (12)$$

评估指标 $u_i (1 \leq i \leq n)$, 老化级别 $v_j (1 \leq j \leq 4)$, a_{ij} 为 j 级老化的标准部件关于第 i 个评估指标的取值。矩阵(12)中的第 i 行

$$a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4} \quad (13)$$

分别表示1至4级标准部件,关于第 i 个评估指标的取值。设某个被评部件,关于评估指标 $u_1, u_2, \dots, u_n$ 的取值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 仅就其中一个评估指标 $u_i (1 \leq i \leq n)$ 而言,被评部件对应的实测数据 x_i 可以取任意值,可能不是任何一个级别 V_j 的标准值(当然也可能碰巧是某一个级别 V_j 的标准值)。部件的老化是一个随时间连续变化的过程,现在1级老化的部件,过若干年后可能变成2级老化。因此某一时刻,某个部件的老化状态,只能用属于某一级别的隶属度来表示,部件的老化状态是对许多评估指标的综合反映,它在每个评估指标方面都有自己的表现,同一老化级别的部件,在各个评估指标方面的表现是各不相同的,因此只能用对于各个评估指标的综合隶属度来量度。所以老化的评定级别问题不是非此即彼,而是亦此亦彼的。

当我们以 X_i 表示水闸上全体部件对应于第 i 个评估指标的取值的集合时,所谓仅就第 i 个评估指标而言的第 j 级部件所构成的集合,就应当是论域 X_i 上的一个模糊子集,记作 C_{ij} ,这时,我们所讨论的就某一评估指标进行评估的问题,就应按以下方式提出:设某部件第 i 个评估指标的取值为 $x_i, x_i \in X_i; C_{ij}$ 为 X_i 上的这样一个模糊子集,它表示仅就第 i 个评估指标而言,该部件属于第 j 级老化。试求 x_i 对 C_{ij} 的隶属度,也就是求与 x_i 对应的部件,仅就第 i 个评估指标而言,可评为第 j 级的程度。根据模糊集合论,论域 X_i 上的模糊子集 C_{ij} 完全由它的隶属函数 $\mu = \mu_{C_{ij}}(x_i), x_i \in X_i$ 所确定, $\mu_{C_{ij}}(x_i)$ 之值就是 x_i 隶属于 C_{ij} 的程度,考虑一切 $i=1, 2, \dots, n$ 与 $j=1, 2, 3, 4$, 就应当有 $4 \times n$ 个这类隶属函数。

隶属函数 $\mu_{C_{ij}}, x_i \in X_i$ 应满足如下条件:(1)当 $x_i = a_{ij}$ 时, $\mu_{C_{ij}}(x_i) = 1$, 因为 j 级标准部件应 100% 地隶属于第 j 级,(2)当 j 级部件(非标准部件)关于第 i 个评估指标取值为 x_i 时,在数组 $\mu_{C_{1j}}(x_i), \mu_{C_{2j}}(x_i), \mu_{C_{3j}}(x_i)$ 和 $\mu_{C_{4j}}(x_i)$ 中,应以 $\mu_{C_{ij}}(x_i)$ 为最大。反之,当数组中以 $\mu_{C_{ij}}(x_i)$ 为最大时,则认为该部件仅就 i 评估指标而言应为第 j 级。一般来说,隶属函数 $\mu_{C_{ij}}(x_i)$ 除了满足 $\mu_{C_{ij}}(a_{ij}) = 1$ 外,当 x_i 远离 a_{ij} 时,函数值应变小,如下形式

$$\mu_{C_{ij}} = e^{-\left(\frac{x_i - a_{ij}}{\sigma_i}\right)^2}, x_i \in X_i \quad (14)$$

是可供选择者之一,其中 σ_i 为(13)式中各数据的标准差。当然也可以构造成其它的函数形式,经过不断试验和总结经验,会构造得比较合理。

根据(14)式,由标准部件数据矩阵(12),可以构造出 $4 \times n$ 个隶属函数。

设某个被评部件为 Pe , 设它关于评估指标 $u_1, u_2, \dots, u_n$ 的取值分别为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 可记为:

$$Pe(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

把其中任一分量 $x_i (1 \leq i \leq n)$ 代入(14), 可以获得 4 个隶属度

$$\left. \begin{aligned} \mu_{C_{1j}}(x_i) &= e^{-\left(\frac{x_i - a_{1j}}{\sigma_1}\right)^2} \\ \mu_{C_{2j}}(x_i) &= e^{-\left(\frac{x_i - a_{2j}}{\sigma_2}\right)^2} \\ \mu_{C_{3j}}(x_i) &= e^{-\left(\frac{x_i - a_{3j}}{\sigma_3}\right)^2} \\ \mu_{C_{4j}}(x_i) &= e^{-\left(\frac{x_i - a_{4j}}{\sigma_4}\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

它们分别表示被评部件 Pe 仅就评估因素 u_i 而言,可评为第 1 级(v_1),第 2 级(v_2),第 3 级(v_3)和第 4 级(v_4)的程度。考虑一切 $i=1, 2, \dots, n$, 就得对应于部件 Pe 的一个隶属度矩阵:

$$\begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \mu_{14} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \mu_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \mu_{n3} & \mu_{n4} \end{bmatrix} \quad (16)$$

如果(16)式中第 i 行某一元素与同行其余元素相比显著地大,则可认为部件 Pe 仅就评估因素 u_i 而言,属于该最大元素相应的级别。

一般来说,矩阵(16)各行元素之和常常差别较大,这就难以在不同因素之间作隶属度的比较,因此,需要把矩阵(16)各行进行归一化。

令

$$\gamma_{ij} = \frac{\mu_{ij}}{\mu_{i1} + \mu_{i2} + \mu_{i3} + \mu_{i4}}$$

$$i=1, 2, \dots, n;$$

$$j=1, 2, 3, 4.$$

γ_{ij} 是被评部件 Pe 仅就第 i 个评估指标(u_i)而言属于第 j 级别(v_j)的归一化隶属度,满足 $\gamma_{i1} + \gamma_{i2} + \gamma_{i3} + \gamma_{i4} = 1, i=1, 2, \dots, n$, 表

	v_1	v_2	v_3	v_4
u_1	γ_{11}	γ_{12}	γ_{13}	γ_{14}
u_2	γ_{21}	γ_{22}	γ_{23}	γ_{24}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
u_n	γ_{n1}	γ_{n2}	γ_{n3}	γ_{n4}

令

$$R = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \gamma_{14} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} & \gamma_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \gamma_{n3} & \gamma_{n4} \end{bmatrix}$$

$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 称为评估指标论域;

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 称为老化级别论域。

直积 $U \times V = \{(u_i, v_j) | i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, 3, 4\}$ 是个二元论域。这样, R 就可看作二元论域 $U \times V$ 上的一个模糊子集, 其隶属函数是 (u, v) 的如下二元函数

$$\mu_R(u_i, v_j) = \gamma_{ij} \quad (u_i, v_j) \in U \times V$$

据此, 又可把 R 看作 U 到 V 的一个模糊关系或模糊映射 $f: U \rightarrow V$, 即 $R \Leftrightarrow v = f(u), u \in U, v \in V$, 当 $u = u_i$ 时, 通过映射 f , 所得的 V 并不确定, 而是可取 V 中任一元素 v_j , 只是取 v_j 的程度为 γ_{ij} , 它将随 j 的不同而可能改变。故称 R 为 U 到 V 的一个模糊关系矩阵, 它与被评部件 Pe 相对应, 完全反映了被评部件分别按各单个评估指标对各级别的归一化隶属程度。

各个评估因素(以评估指标来出现)在部件的老化中所起的作用有大小之分, 我们把它称之为相应因素的权重。在这种情况下, 就需要既考虑各个评估指标的权重, 又考虑各单个评估指标的作用, 这样得到的被评部件评定为 v_1, v_2, v_3, v_4 各级的程度, 才是评估的最终指标。这就是我们所需要的 Pe 分别对 v_1, v_2, v_3, v_4 级的综合隶属度。假定 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 分别是评估指标 $u_1, u_2, \dots, u_n$ 的权重, 满足 $a_1 + a_2 + \dots + a_n = 1$, 令 $\hat{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $\hat{A}$ 可看作评估指标论域 U 上的一个模糊子集, 其隶属函数为

$$\mu_A(u_i) = \alpha_i, \quad u_i \in U$$

它说明 A 是一个考虑到各评估指标权重的评估指标模糊集, u_i 对 A 的隶属度就是评估指标 u_i 的权重, 考虑到各评估指标权重的, 单个评估指标隶属度矩阵

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & t_{n3} & t_{n4} \end{bmatrix}$$

t_{ij} 表示既考虑各评估指标权重, 又考虑单个评估指标 u_i 作用, 使被评部件 pe 为第 j 级的程度。令 $B_j = \{t_{1j}, t_{2j}, t_{3j}, t_{4j}\}$, 其隶属函数为 $\mu_{B_j} = t_{ij}, v_i \in V$ 。它说明, B_j 是个既考虑各评估指标权重, 又考虑单个评估指标 u_i 的, 被评部件 Pe 的级别模糊集, 论域为 V 。很明显, $B_1, B_2, \dots, B_n$ 之并集 $B = B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_n$ 是个既考虑各评估指标权重, 又考虑各个评估指标作用的, 被评部件 Pe 的级别模糊集, 论域为 V 。其隶属函数之值。

$$b_1 = \mu_B(v_1)$$

$$b_2 = \mu_B(v_2)$$

$$b_3 = \mu_B(v_3)$$

$$b_4 = \mu_B(v_4)$$

是被评部件 Pe 对 1, 2, 3, 4 老化级别的综合隶属度。为了获得 $b_j (j=1, 2, 3, 4)$ 的计算公式, 考虑矩阵 T 的第 j 列, 令

$$T_j = \begin{bmatrix} t_{1j} \\ t_{2j} \\ \vdots \\ t_{nj} \end{bmatrix}$$

可以把 T_j 看作论域 U 上的一个模糊子集, 其隶属函数 $\mu_{T_j}(u_i) = t_{ij}, u_i \in U$ 。它说明, T_j 是个既考虑各评估指标权重, 又使被评部件 Pe 为 j 级的因素模糊集, 论域为 U 。且满足 $\mu_B(v_j) = t_{ij} = \mu_{T_j}(u_i)$, 由上面的讨论可知 $T_j = A \cap S_j$, 其中 $S_j = (\gamma_{1j}, \gamma_{2j}, \dots, \gamma_{nj})^T$ 。

于是有

$$\begin{aligned} b_j &= \mu_B(v_j) = \mu_{\bigcup_{i=1}^n B_i}(v_j) = \bigvee_{i=1}^n \mu_{B_i}(v_j) \\ &= \bigvee_{i=1}^n \mu_{T_j}(u_i) = \bigvee_{i=1}^n (\mu_A(u_i) \wedge \mu_{S_j}(u_i)) \text{ 故} \\ b_j &= \bigvee_{i=1}^n (\alpha_i \wedge \gamma_{ij}) \quad j=1, 2, 3, 4. \end{aligned}$$

这就是求综合隶属度 b_j 的计算公式。注意到 $B = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ 还可以将所得结果写成

$$B = A \circ R \quad (17)$$

反映评估指标权重的模糊子集 A , 可以通过求解模糊关系方程:

$$X \circ R = B \text{ 或 } R \circ X = B \quad (18)$$

的方法求得。用经验评估方法, 对某一资料完备、管理、设计、科研、施工各方面专家看法一致的部件, 首先给出综合决策 $B \in M_{1 \times 4}$, 通过解方程 (18), 就可以解出 B 所赖以产生的评估指标

权重 $\underline{A}$, 方程(18)可能有解, 也可能有无穷多组解或者无解, 若有无穷多组解或者无解, 可以从一组备择的权分配方案中, 按照择近原则, 通过取贴近度的方法, 找出最佳方案。设 $\underline{a}_i \in M_{1 \times 4}$, ($i=1, 2, \dots, n$) 称 $\underline{J} = \{\underline{a}_1, \underline{a}_2, \dots, \underline{a}_n\}$ 为权重分配的备择集, 它仍为 U 上的一组模糊子集。从 $\underline{J}$ 中选出最佳权重, 即若有 i , 使得

$$(\underline{a}_j \circ \underline{R}, \underline{b}) = \max(\underline{a}_j \circ \underline{R}, \underline{b}) \quad (19)$$

$$1 \leq j \leq n$$

利用上述方法, 可以评出水闸中的任何一个部件(包括地基), 分别关于安全性、适用性和耐久性三个方面的老化级别。

但是在水闸老化状态的评估中, 人们还需要知道某一个部件, 综合安全性、适用性和耐久性之后, 应该属于哪一个级别。以便决定对该部件采用防护维修或者加固的相应措施。

根据上述评估结果, 取被评部件 Pe 关于安全性的综合隶属度

$$\underline{B}' = (\underline{b}_1', \underline{b}_2', \underline{b}_3', \underline{b}_4') \quad (20)$$

关于适用性的综合隶属度

$$\underline{B}'' = (\underline{b}_1'', \underline{b}_2'', \underline{b}_3'', \underline{b}_4'') \quad (21)$$

关于耐久性的综合隶属度

$$\underline{B}''' = (\underline{b}_1''', \underline{b}_2''', \underline{b}_3''', \underline{b}_4''') \quad (22)$$

以(20)、(21)、(22)构成模糊关系矩阵 $\underline{R}$

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} \underline{b}_1' & \underline{b}_2' & \underline{b}_3' & \underline{b}_4' \\ \underline{b}_1'' & \underline{b}_2'' & \underline{b}_3'' & \underline{b}_4'' \\ \underline{b}_1''' & \underline{b}_2''' & \underline{b}_3''' & \underline{b}_4''' \end{bmatrix}$$

根据国家现行的方针政策, 国民经济的发展水平, 对部件安全性、适用性和耐久性的要求, 定出其权重的模糊集 $\underline{A} = (\underline{a}_1, \underline{a}_2, \underline{a}_3)$ 由

$$\underline{B} = \underline{A} \circ \underline{R} = (\underline{b}_1, \underline{b}_2, \underline{b}_3, \underline{b}_4) \quad (23)$$

求出部件关于 4 个老化等级的综合隶属度。 $\underline{b}_1, \underline{b}_2, \underline{b}_3, \underline{b}_4$ 中的最大者所对应的老化级别, 就是被评部件 Pe 的老化级别。

六、对整个水闸及其枢纽的评估

水闸是由许多部件按一定目的组合起来的系统, 它的功用是控制流量和水位。水闸的可靠性, 取决于部件的可靠性和部件之间的连接。在部件的可靠度已知的前提下, 应用系统可靠性分析的方法, 就可以确定水闸的可靠度。

首先根据常用水闸的结构型式画出它的部件系统图, 图 1 是根据“水闸设计规范 SD133—84”图 3·0·1, 土基上的水闸纵剖面图画出的。各个水闸的型式各有不同, 在评估时可据被评水闸的具体型式, 同此方法画出部件系统图。

图 2 是沿水闸纵剖面, 表示部件及其地基的系统图。图 3 是沿垂直方向, 闸室上下部件系统图。沿水流方向也可以画出上游护坡、上游翼墙、下游翼墙、下游护坡及其地基的系统图, 因为分析方法和图 2 一样, 就不赘述了。

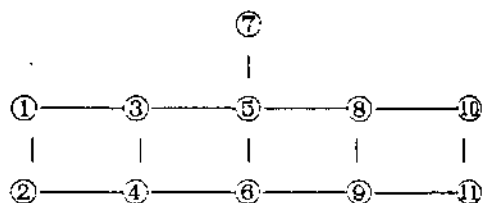


图1 水闸顺水流方向部件系统图

- 1——护底; 2——上游护坡; 3——铺盖; 4——上游翼墙;
5——底板; 6——边墩; 7——中墩; 8——消力池;
9——下游翼墙; 10——海漫; 11——下游护坡

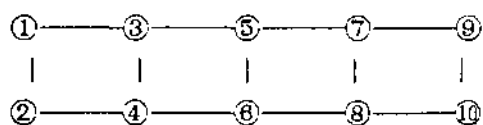


图2 沿水闸纵剖面部件及其地基系统图

- 1——护底; 2——护底地基; 3——铺盖; 4——铺盖地基;
5——底板; 6——底板地基; 7——消力池;
8——消力池地基; 9——海漫; 10——海漫地基

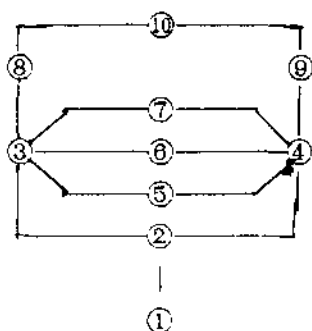


图3 沿垂直方向闸室上下部件系统图

- 1——闸底板地基; 2——闸底板; 3——边墩; 4——中墩;
5——闸门; 6——胸墙; 7——交通桥; 8——排架左立柱;
9——排架右立柱; 10——工作桥

在各种荷载作用下,部件与其地基组成一个部件对,对于每一个部件对,在安全性方面,如果部件与其地基的老化级别相等,则部件对的老化级别与部件(或者其地基)相等。如果部件与其地基的老化级别不等,则部件对的级别为部件与其地基二者之中,较低的级别。在垂

进水流方向,把上游护坡和护底组合成一个部件单元,上游翼墙和铺盖组合成一个部件单元,底板和闸墩及其上部结构组合成一个部件系统,消力池和下游翼墙组合成一个部件单元,海漫和下游护坡组合成一个部件单元。在部件单元内,如果所有部件对的老化级别相等,则部件单元的老化级别等于部件对的老化级别,如果部件单元内,部件对的老化级别不等,则部件单元的老化级别等于各部件对中,最低的那一个级别。每个最低级别部件的综合隶属度 $B = (b_1, b_2, b_3, b_4)$ 就是部件单元的综合隶属度。这样,沿水流方向,可以把水闸划分为 5 个部件单元(或部件系统),它们分别是护底单元 p, 铺盖单元 s, 闸室部件系统 b, 消力池单元 c 和海漫单元 d。

从图 3 可以看出,闸室部份传力系统,组成一棵树,闸底板地基是树根,闸底板是树干下部,边墩与中墩是树干的两个分支,闸门、胸墙和交通桥是树枝上的叶,排架左右立柱是树枝,工作桥是树叶。如果树根坏了,树就倒了,如果树干坏了,树枝便不能存留,树枝断了,树叶就掉了。应用失效树理论,就可以评估出这棵树的综合隶属度。

和部件老化级别评估的方法一样,用护底单元 p, 铺盖单元 s, 闸室部件系统 b, 消力池单元 c 和海漫单元 d 的综合隶属度,可以作出模糊关系矩阵 R ,从防止冲刷破坏和渗透破坏的观点,作出各单元的权重模糊集 A ,利用 $B = A \circ R$,就可以计算出,就安全性而言水闸对于 4 个老化级别的综合隶属度 $B = (b_1, b_2, b_3, b_4)$, b_1, b_2, b_3, b_4 中,最大值所对应的级别,就是被评水闸关于安全性的老化级别。

用和上述水闸安全性评估的方法一样,可以评出水闸关于耐久性的老化级别。

水闸的适用性评估,用相对过水能力,相对漏水量,闸门启闭系统的可靠度,止水的失效率,排水孔的失效率作为评估指标。

用 Q 表示闸门相对过水能力的评估指标

$$Q = \frac{Q_d}{Q_a} \quad (24)$$

式中 Q_d ——水闸的设计流量;

Q_a ——水闸的实际流量。

用 q 表示水闸相对漏水量的评估指标

$$q = \frac{q_1}{Q_d} \quad (25)$$

式中 q_1 ——水闸的漏水流量;

Q_d ——水闸的设计流量。

用 S 表示止水失效的评估指标

$$S = \frac{l_i}{l_t} \quad (26)$$

式中 l_i ——从铺盖首端到消力池末端失效止水的长度;

l_t ——从铺盖首端到消力池末端止水的总长度。

用 d 表示排水孔失效的评估指标

$$d = \frac{n_d}{n_t} \quad (27)$$

式中 n_d ——失效的排水孔个数;

n_i ——总的排水孔个数。

用前述部件老化级别评估的方法,就可以评出被评水闸关于适用性的老化级别。

用水闸安全性老化评估的综合隶属度,适用性的综合隶属度,耐久性的综合隶属度,可以作出模糊关系矩阵 R_i ,用和部件评估的方法一样,作出关于水闸安全性,适用性和耐久性的权重模糊集 A_i ,利用公式 $B_i = A_i \circ R_i$,可以计算出整个水闸的综合隶属度 $B_i = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4})$,在 $b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}$ 中,最大值所对应的级别,就是被评水闸的老化级别。

一个水闸枢纽,可能有节制闸、进水闸、分洪闸、冲沙闸等很多建筑物组成。当计算出水闸枢纽中,每个建筑物的老化级别的综合隶属度 $B_i = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4})$ 后,可以作出模糊关系矩阵 R_i ,根据各个建筑物的重要性可以作出权重模糊集 A_i ,利用 $B_i = A_i \circ R_i$,可以计算出水闸枢纽的综合隶属度 $B = (b_1, b_2, b_3, b_4)$,在 b_1, b_2, b_3, b_4 中,最大值所对应的级别,就是水闸枢纽的老化级别。

参 考 文 献

- 1、水闸设计规范 SD133—84,水利电力部,1984。
- 2、C·Я埃杰利曼,混凝土水工建筑物的原型观测,科学出版社,1975。
- 3、汪培庄,模糊集合论及其应用,上海科学技术出版社,1983。
- 4、曹晋华,程侃,可靠性数学引论,科学出版社,1986。
- 5、潘仲立,可靠性分析的理论基础,水利电力出版社,1988。
- 6、王朝瑞,图论,高等教育出版社,1981。