

混凝土坝基防渗帷幕体老化的基本模式及识别指标

余波¹, 郑克勋¹, 王建平², 宋汉周²

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;

2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:采用综合分析方法,对混凝土坝基防渗帷幕体的老化模式以及识别指标进行了系统的探讨。基于相对防渗效率,把帷幕体老化分为相对稳定型、缓慢变化型以及阶段性变化型 3 种基本模式;在分析时段内,不同的模式具有不同的防渗效率。用于识别帷幕体老化的指标有 3 类:第一类为渗流的微观动态要素,包括析钙量、TDS 值、pH 值、无机质和有机质等,可用于揭示帷幕体的老化机制;第二类为渗流的宏观动态要素,包括扬压力、排水量等,可用于判断帷幕体的老化程度及其基本模式;第三类为数值分析指标,包括饱和指数和渗漏水源比例系数等,可用于量化分析帷幕体的老化过程。3 类指标的识别有助于构建混凝土坝基防渗帷幕体老化评估体系。

关键词:坝基防渗帷幕体;老化模式;渗流;识别指标

中图分类号:TV223.4⁺3

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2017)06-0048-06

Basic patterns and identification indexes for ageing behavior of anti-seepage curtains under a concrete-dam foundation//YU Bo¹, ZHENG Kexun¹, WANG Jianping², SONG Hanzhou²(1. Power China Guiyang Engineering Co., Ltd., Guiyang 550081, China; 2. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The long-term safe operation of a dam can be influenced by the ageing of anti-seepage curtains under its foundation. Based on a synthetic analysis method, basic ageing patterns and some indexes of identification are presented. Three kinds of patterns, including a relatively stable pattern, a slow-weakening pattern and a weakening in stage pattern were classified in terms of the relative anti-seepage efficiency. Each pattern has its unique anti-seepage efficiency during the analysis time. Three types of indexes can be used to identify the ageing. The first type is the micro dynamic elements of seepage, including Ca^{2+} , TDS, pH, inorganic and organic matters, which can be used to reveal the ageing mechanisms. The second one is the macro dynamic elements, including the uplift pressure and flow rate, which can be used to identify the ageing degrees and the basic aging patterns. The third type is the numerical analysis indexes, including the saturation index and ratios of the different seepage sources, which can be used to quantify the ageing process. Evaluation systems for the aging behavior of anti-seepage curtains under a concrete-dam foundation can be constructed based on the 3 types of identification indexes.

Key words: anti-seepage curtains under a dam foundation; ageing patterns; seepage; identification indexes

据 21 世纪初统计,我国在岩溶地区及非岩溶地区已建有各类大坝约 8.4 万座,其中在国际大坝委员会登记的坝高大于 15 m 的达 1.9 万座,居世界首位^[1]。其中,坝龄小于 20 a 的占已建大坝总数的 34%,在 20~30 a 之间的占 44%(与 20 世纪 70 年代大坝建设高峰期相符),在 30 a 以上的占 21%,平均坝龄为 22.87 a。从运行年龄上看,我国多数大坝已进入中老年阶段,与之相伴的老化问题逐趋突出,而成为一个需要深入研究的问题。

近年来,不少学者针对大坝老化现象从不同的方面开展了研究。一些较早兴建混凝土坝的发达国家,对大坝老化问题相当关注,如在 2003 年第 21 届国际大坝会议上,将老化问题列为专题进行研究;我国对于大坝老化的诊断及治理虽相对滞后,但也取得了一定的进展。在老化诊断方面,认为一般经过 30 多年运行的混凝土坝,显露的各种老化病害主要表现为渗流变异、溶蚀加重、碳化累进、冲磨空蚀加剧以及裂缝增生扩展等^[2-4]。在老化评估及大坝安

基金项目:中国电力建设股份有限公司科技项目(DJ-ZDXM-2014-21);国家自然科学基金(41272265)

作者简介:余波(1972—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水利水电工程地质研究。E-mail:yubo079@126.com

通信作者:宋汉周(1954—),男,教授,主要从事大坝环境水文地质研究。E-mail:songhz@hhu.edu.cn

全评价方面,具有代表性的是基于室内试验成果,比较系统地提出了水工建筑物不同的表层病害对于整体老化的评价指标^[5];也有以特征时段为区间,根据多效应量来获取指标的隶属度,结合信息熵理论和专家评估法确定指标权重,采用统计方法进行时段类比^[6]。而在老化治理方面,相关技术方法以及新材料方面的研究均取得了一定的进展^[7-8]。相对而言,对于一定龄期混凝土坝基防渗帷幕体(以下简称帷幕体)老化的研究显得弱一些。究其原因,一方面与其特有的隐蔽性以及复杂多变的影响因素有关,另一方面也与相关检测资料的相对零散有关。

本文采用综合分析方法,建立运行工况下坝基非岩溶裂隙介质帷幕体老化的基本模式,依据渗流动态监测/检测资料,提出用于识别帷幕体老化的3类指标,并分析其指示意义,旨在为构建帷幕体老化的评估体系提供支持。

1 帷幕体老化的基本模式

坝基非岩溶裂隙介质帷幕体实际上是由天然岩体以及灌入其中的水泥浆液经凝固和硬化后形成的,岩体中发育的结构面及其网络是硅酸盐类水泥结石充填的主要部位。因此,当使用的材料以及施工工艺一定时,所形成的帷幕体的完整性程度及其防渗效果,很大程度上取决于待灌岩体中结构面及其网络的空间分布特征。

坝基不同部位岩体结构面的力学性质、发育程度等方面存在的差异性,决定了由施工阶段形成的帷幕体的完整程度以及防渗效果也存在相应的不均一性,从而导致其在运行阶段发生老化及老化程度的差异性。

为进一步分析帷幕体的老化随时间演变的不一致性,参照相对防渗效率这一物理量,可把运行工况下帷幕体老化的基本特征,大致分为相对稳定型(I类)、缓慢变化型(II类)和阶段性变化型(III类)3种模式,其相关帷幕体防渗性能的时效变化如图1所示。

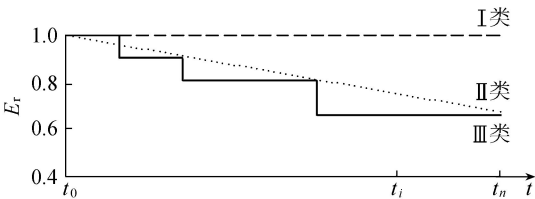


图1 帷幕体老化基本模式示意图

相对防渗效率定义如下：

$$E_r = \frac{E_t}{E_{t_0}} \tag{1}$$

式中： E_r 为相对防渗效率，数值上在 0 ~ 1 之间变

化，当 $E_r \rightarrow 1$ 时，表明帷幕体的防渗效率稳定，而当 $E_r \rightarrow 0$ 时，则表明帷幕体的防渗效率趋于丧失； E_t 为帷幕体于运行期 t 时刻的实际防渗效率； E_{t_0} 为帷幕体于运行初期 t_0 时刻的实际防渗效率，在数值上有： $E_{t_0} = (Q_b - Q_a) / Q_b$ ，其中 Q_b 为不设帷幕时的单宽流量， Q_a 为设置帷幕后的单宽流量，两者均可根据达西定律求得。由达西定律基本定义可知，当帷幕体的厚度一定且当帷幕上下游侧基岩的渗透性一定时，帷幕体的渗透性越低，或远低于基岩的渗透性，则其防渗效率越高 ($E_{t_0} \rightarrow 100\%$)；反之，若帷幕体的渗透性仍保持一定，或相似于基岩的渗透性，则其防渗效率就很低 ($E_{t_0} \rightarrow 0$)。

根据式(1)，可知帷幕体的不同老化模式具有不同的防渗性能：对于 I 类帷幕体，在分析时段内有 $E_t \rightarrow E_{t_0}$ ，或有 $E_t \approx E_{t_0}$ ，帷幕体的防渗效率保持了相对的稳定；对于 II 类 III 类帷幕体，在分析时段内均有 $E_t < E_{t_0}$ ，可见，这两类型帷幕体的防渗效率是随时间趋于减弱的。

显然，3 种类型帷幕体中，对 I 类 $E_r \approx 1$ ，对 II 类与 III 类 $E_r < 1$ 。II 类与 III 类之间的区别仅在于：前者的防渗效率在分析时段内的减弱是随时间呈线性变化的，而后者的防渗效率在分析时段内的减弱是随时间呈“台阶”状变化的，即呈非线性变化。

在实际工作中，可根据分析时段内幕后渗漏水宏观和微观多要素的动态特征，对帷幕体的老化模式进行判定。

2 帷幕体老化识别的若干指标

基于幕后渗漏水宏观和微观动态监测/检测资料系列，认为渗流的微观、宏观动态要素和数值分析 3 类指标对于识别帷幕体可能发生的老化过程具有相对显著的指示意义。

2.1 渗流的微观动态要素

2.1.1 渗流水质

与补给源(通常为坝前库水)相比，坝基幕后渗漏水水质复杂多变，但总体上具有如下特征：①普遍呈碱性，局部甚至呈强碱性 (pH 值大于 10.0)；②钙、镁硬度(以下简称硬度)以及重碳酸盐碱度(简称碱度)有所增大；③总溶解性固体量(TDS)显著增大，一般为补给源 TDS 值的 1 ~ 2 倍或以上，见表 1。另外，从表 1 也可以看出：在我国南方以及东部的大中型水电站，坝前库水多为极软水(硬度低于 1.50 meq/L)、极低矿化淡水(TDS 值小于 500 mg/L)，另一方面此类水电站库水的碱度也比较低 (HCO_3^- 浓度小于 1.07 mmol/L)，存在对于普通硅酸盐水泥

表 1 部分水电站坝址环境水主要水化学特征统计

水电站	pH 值		硬度/(meq · L ⁻¹)		碱度/(mmol · L ⁻¹)		TDS 值/(mg · L ⁻¹)	
	坝前库水	幕后渗漏水	坝前库水	幕后渗漏水	坝前库水	幕后渗漏水	坝前库水	幕后渗漏水
新安江	7.40	7.45 ~ 10.00	0.92	0.30 ~ 1.70	0.86	0.02 ~ 5.08	51.00	68.00 ~ 293.00
池 潭	7.48	6.60 ~ 11.90	0.34	0.32 ~ 5.02	0.40	0.02 ~ 8.09	51.07	97.25 ~ 497.11
水 东	7.50	6.60 ~ 10.94	0.78	0.43 ~ 4.34	0.79	0.02 ~ 4.98	69.23	88.98 ~ 174.29
陈 村	7.78	7.25 ~ 10.27	0.82	0.55 ~ 6.04	0.63	0.02 ~ 6.56	61.20	61.50 ~ 338.00
龙羊峡	8.35	7.73 ~ 8.94	3.81	0.43 ~ 14.96	3.14	1.90 ~ 2.95	281.83	381.00 ~ 3 578.00
李家峡	8.34	7.41 ~ 11.52	3.37	1.28 ~ 55.20	2.75	0.02 ~ 2.80	216.35	650.79 ~ 8 758.65

的溶出型侵蚀(或腐蚀)作用。而在我国西北地区如黄河中上游地区的大中型水电站,坝前库水的水质特征显著有别于其他地区(如南方及东部),多为硬水(硬度大于 3.0 meq/L)及低矿化淡水(TDS 值在 500 ~ 1 000 mg/L),虽不存在对于普通硅酸盐水泥的溶出型侵蚀作用,但此类水电站坝址区基岩中相对普遍的含有硫酸盐类及岩盐类可溶性矿物,以致坝址地下水相对普遍地呈现“矿化”(TDS 值大于 1 000 mg/L)且存在对于帷幕体的硫酸盐类侵蚀作用^[9]。

在幕后渗漏水的水化学指标中,认为析钙量、TDS 值和 pH 值 3 个指标对于揭示帷幕体的老化过程更具有指示意义。

2.1.1.1 析钙量

与同期补给源(通常为坝前库水)相比较,幕后渗漏水中钙离子(也可以用 CaO 表示)含量的增量,即为该组分通过坝基帷幕后新增的迁移量。对此,通常存在两个“源”:一是帷幕体;二是与帷幕体相邻的基岩。根据材料学,形成常规帷幕的普通硅酸盐水泥中的 CaO 质量分数一般在 65% ~ 67% 之间,经过水化后形成的水泥结石中,Ca(OH)₂ 类水化产物在一般的软水中仍具有一定的溶解性,而当渗漏水含有一定量的 CO₂ 时,其溶解性将得到显著提高。显然,帷幕体中的此类水泥结石在渗漏水作用下不断被溶蚀,将导致此类常规帷幕体的密实度降低,而弱化其防渗性能。另一方面,与帷幕体相邻的天然岩体(这里不考虑碳酸盐类岩石)中多含有钙质组分,所不同的只是含量方面或形式方面存在差异。此类组分在渗漏水作用下,通过全等溶解(如结构面中的钙质充填物)或不全等溶解(如含钙质的硅酸盐类矿物)作用进入水溶液中。

在实际工作中,可采用折减系数法或化学计量法,对幕后渗漏水中析钙量的不同来源加以量化分析^[10]。

另外,也可根据流量资料以及形成某坝段帷幕体的具体灌浆资料,包括所用的水泥材料等,推求幕后地下水中源于帷幕体的累计析钙量占上述坝段形成帷幕体所用水泥中 CaO 总量的百分比,以此可推

求帷幕体防渗性能弱化的程度,以及失效的年限。

2.1.1.2 TDS 值

TDS 值的大小反映了水溶液与其相接触的固相介质之间反应状态的综合饱和程度,即若 TDS 值低,表明水溶液相对远离饱和态;反之,TDS 值高,则表明水溶液相对接近饱和态。在一定的条件下,水动力条件是重要的影响因素。

如表 1 所示,幕后渗漏水 TDS 值普遍大于作为其主要补给源的坝前库水,局部达 1 ~ 2 个数量级。在我国南方及东部、西北地区(如黄河中上游地区)的大中型水电站坝址区,均具有这种分布特征。由此表明,发生于液-固相系列之间的溶解作用(包括全等溶解和不全等溶解作用)是导致幕后渗漏水水质形成和演变的主要水化学作用。

幕后渗漏水 TDS 值具有反映帷幕体老化时空特征的指示意义。就空间而言,沿坝轴线方向不同坝段幕后渗漏水 TDS 值往往呈现一定的变化,即便当坝址区一定范围内具有相同或相似的岩性、岩相条件时,亦如此。由此从一个侧面反映了不同坝段间帷幕体防渗性能弱化程度方面的差异性:在具有相对高 TDS 值的坝段,帷幕体仍具有较好的防渗性能,即其弱化(或老化)程度不明显;而在相对低 TDS 值的坝段,帷幕体的防渗性能已发生了相对明显的弱化。而就时间而言,在同一测点位通过对比发现:若后期水的 TDS 值明显低于前期,则表明该时段内相邻部位帷幕体的防渗性能发生了一定的弱化;若不同时期这一物理量的大小保持了基本稳定,则表明该时段内相邻部位帷幕体的防渗性能未发生相对明显的弱化。

2.1.1.3 pH 值

作为水化学的另一个综合指标,pH 值不仅反映了水溶液的酸碱性,而且也反映了部分化学元素在水溶液中的存在形式(如碳酸存在形式)及迁移的难易程度。由于该指标对于水环境的变化,如温度、压力(包括 CO₂ 等气体的分压)等有着敏感的反应,故宜在现场测量。

已有的水质化验资料表明,坝前库水在向坝基幕后运移过程中普遍呈现了碱性化的趋势。当坝址

区具有相同或相似的岩性、岩相时,幕后不同部位渗漏水 pH 值的差异可归为幕后不同部位间水动力条件的差异所致,即滞缓的水动力条件(或水交替条件)有利于水质的碱性化,而活跃的水动力条件则不利于水质的碱性化。因此,可以根据幕后不同部位(如不同坝段)渗漏水 pH 值的分布特征来判定上游侧帷幕体防渗性能(优劣)的空间分布特征;在 pH 值较高(如大于 10.0)的部位,其防渗性能相对优一些;在 pH 值较低(如小于 8.0)的部位,其防渗性能则显得劣一些,而在 pH 值大于 9.0 的部位,标志着相邻帷幕体中的水泥水化产物受到了明显的溶蚀。由此,也反映了该帷幕体沿坝轴线方向所发生的老化及其差异性程度。

另外,幕后同一部位水的 pH 值随时间往往也会呈现一定的变化。其中,有两种情形可以识别:①随时间保持了相对的稳定;②随时间趋于减小。对于前者,表明帷幕体的防渗性能在分析时段内保持了相对的稳定;对于后者,表明帷幕体的防渗性能在分析时段内发生了相对明显的弱化,即有老化的症状。

2.1.2 渗水析出物

作为渗流微观动态的另一要素,开展对于幕后渗水析出物的基本特征及其时空演变分析,对于识别基础帷幕体的老化特性也具有指示意义。

2.1.2.1 析出物中的无机质

多批次样品的化验结果^[10]表明,幕后渗水析出物具有复杂的无机质组成,其中,白色者以 CaO 为主,棕红色者以 Fe₂O₃ 为主,黑色者以 MnO 为主。

关于渗水析出物中的钙质,认为与幕后渗漏水中的钙质具有相同的物质来源:一是帷幕体中 Ca(OH)₂ 一类水泥结石的溶解作用;二是岩体中碳酸盐类矿物的溶解作用。对此,也可用折减系数法来量化析出物钙质中源自帷幕体的相关组分所占的份额。

关于渗水析出物中钙质的形成机理,通常有两种:一是由水溶液与碳酸盐类矿物间的反应状态呈饱和/过饱和状态时发生的沉淀作用所致;二是由水环境的显著变化(如压力的降低或温度的升高)所致。由前一种析钙机制形成的析出物部位,一般流量比较小(小于 5 mL/s),有时仅滴水而已;而在由后一种析钙机制形成的析出物部位,流量相对大一些(大于 10 mL/s),有时还处于压力渗流状态下。由此显示,相邻于后一部位的帷幕体的防渗性能要弱于前一部位,即发生的老化程度相对显著于前一部位。

2.1.2.2 析出物中的有机质

据了解,多座水电站(如表 1 中的池潭、陈村、

龙羊峡以及李家峡等)在大坝基础或坝肩主帷幕形成之后,因局部防渗效果不佳,均在运行期进行了化学材料的局部补强。这些化学材料包括丙凝(陈村)、中化-798(龙羊峡、李家峡等)以及 LW_HW 水溶性聚氨酯(池潭)等。由此形成的化学灌浆补强帷幕在形成初期均收到了较好的防渗补强效果。

对幕后渗水析出物中可能出现的与上述化学灌浆材料有关的有机质(如糠醛、环氧树脂等)进行检测,有助于判定此类化学灌浆补强帷幕的防渗性能可能潜在的弱化。若此类有机质被检出,则表明相邻部位帷幕体中的有关化学灌浆材料,已通过浸析作用而发生了析出,这是帷幕体防渗性能发生弱化或老化的重要标志。可采用红外光谱测试方法,对此类析出物试样中可能含有的有机质进行测定^[11]。如池潭大坝 6 坝段幕后渗水析出物的光谱特征(图 2)显示:波数在 3 400 cm⁻¹ 附近,为仲酰胺(RCONH⁻)中 N—H 伸缩振动产生;在 2 925 cm⁻¹ 附近,为亚甲基(CH₂)的 C—H 不对称伸缩振动产生;而在 1 440 cm⁻¹ 附近,则由 C—H 变角振动产生。据此认为,该孔位析出物中诸如 N—H、C—H 等基团的检出与上游侧加强帷幕体中化学灌浆材料的析出有关。由此,也为评价所在坝段此类加强帷幕体的防渗耐久性提供了来自相关物质方面的直接证据。

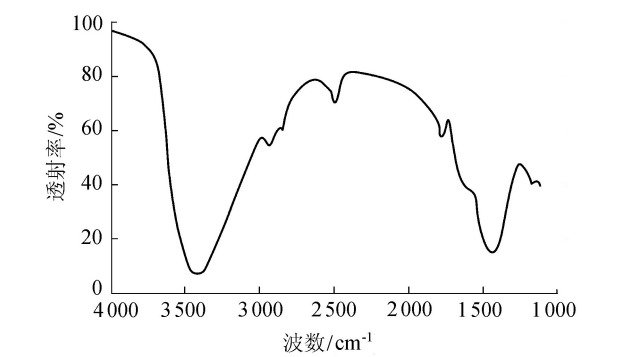


图 2 池潭大坝 6 坝段幕后 G6-4 孔析出物的红外光谱

2.2 渗流的宏观动态要素

2.2.1 排水量

已有的渗流原型监测资料表明:①幕后不同部位(包括不同坝段甚至相邻的排水孔之间)往往具有大小不等的排水量,呈现不均一的分布特征,表明不同部位帷幕体往往具有不同的防渗效率。②不同部位排水量与坝前库水位之间具有不同程度的相关性,在部分孔位这两个物理量之间虽具有一定程度的相关性,但随时间保持了相对的稳定;而在另外部分孔位两者之间的相关性程度,在不同时段内可能呈现一定的变化,如由前期的“弱相关”转变为后期的“较显著相关”或“显著相关”^[12]。前一种情形反映了帷幕体的防渗性能在分析时段内保持了相对的

稳定,后一种情形则反映了相邻部位帷幕体的防渗性能发生了一定的弱化。

在实际工作中,根据实测资料,也可分时段分别建立多元统计模型,通过求解可以将影响排水量这一效应量变化的相关环境量(如坝前库水位等)因子进行量化解析^[1],并通过对比分析,可以判定帷幕体防渗性能发生弱化的部位以及弱化程度,或老化程度。

2.2.2 扬压力

也可采用相似于幕后排水量分析的若干方法,如图示法、模型分析法等,对扬压力的时、空变化特征开展分析,以获取能够揭示帷幕体防渗性能弱化的相关信息。

另外,必要时可在现场做一些原位测试等工作。如对于扬压力测值异常(即实测值大于设计值)的测点,采用现场“卸压法”以及随后的“憋压法”^[13],以原位观测测点位压力变化的速率判断该测点位传递渗压的相关路径及其通畅程度,以及传递渗压路径的几何形态。由此,来进一步判定帷幕体防渗性能发生弱化的大致部位以及发生弱化的程度。

2.3 其他指标

此外,根据渗流动态监测/检测资料,借助数值分析方法对帷幕体可能发生的老化作进一步的诊断。相关指标包括饱和指数 S_1 和渗漏水源比例系数 R 等。

就化学热力学而言,饱和指数可用于反映水溶液与目标矿物(如碳酸盐)之间的反应状态,具有与反应自由能变化(ΔG)相似的物理意义。由此判定:①当 $S_1 < 0$ ($\Delta G < 0$) 时,表明水溶液与目标矿物之间处于非饱和状态,即处于溶解状态;②当 $S_1 = 0$ ($\Delta G = 0$) 时,表明水溶液与目标矿物之间处于溶解-沉淀平衡状态;③当 $S_1 > 0$ ($\Delta G > 0$) 时,表明水溶液与目标矿物之间处于饱和状态,即处于沉淀状态。

若坝址区具有相同或相似的岩性条件,可根据幕后渗漏水的 S_1 值沿某一方向(如沿坝轴线方向)的断面,判定帷幕体的防渗性能沿此方向的分布特征^[14]。同样,可根据幕后渗漏水某测点于不同时刻(如不同年份)的 S_1 值,通过对比来判定相邻帷幕体防渗性能可能发生的弱化或老化。

渗漏水源比例系数则反映了不同渗漏水源所占的份额。应该说,幕后地下水的混合作用也是水化学的一种重要的形成作用。这种作用多发生在左、右坝肩部位,即在这样的部位,幕后渗漏水中可能既含有坝前库水,也含有来自侧向的岸坡地下水;若坝前库水所占的百分比为 R ,岸坡地下水则为 $1-R$ 。

根据质量守恒定律,并结合对区内水-岩相互作用

用系统(多为灰色系统)的认知,可建立水文地球化学反向模拟模型;依据系统中初始液与溶出液的水化学检测资料,采用数值方法进行求解,可得到系统中“可能矿物相”发生的迁移量以及不同渗漏水源所占的比例(R 值)^[15]。通过对比分析,可判定相邻部位帷幕体的防渗性能可能发生的弱化/老化。

3 结 论

a. 运行工况下,帷幕体老化现象具有的时空差异性分布特征是由其基本结构决定的。按照相对防渗效率,可把帷幕体的老化模式分为相对稳定型、缓慢变化型和阶段性变化型 3 种。在分析时段内,不同的模式具有不同的防渗效率:相对稳定型具有相对稳定的防渗效率;而缓慢变化型和阶段性变化型均趋于缓慢的衰减,之间的区别在于,缓慢变化型呈近于线性变化,而阶段性变化型则呈非线性变化。这种分类具有实用性,并具有普遍意义。

b. 幕后渗漏水宏、微观动态要素中,隐含着多个可用于识别帷幕体老化的指标。其中,微观动态要素中包括析钙量、TDS 值、pH 值以及渗水析出物中的无机质和有机质 5 个指标;而宏观动态要素则主要包括扬压力及排水量 2 个指标。前一类指标可用于揭示帷幕体老化的形成机制;而后一类指标则用于判断帷幕体老化的程度以及老化的基本模式。第三类指数值分析指标,包括饱和指数和渗漏水源比例系数等,可用于量化分析帷幕体的老化过程。这 3 类指标可用于建立帷幕体老化的评估体系。

参考文献:

- [1] 吴中如,顾冲时. 重大水工混凝土结构病害检测与健康诊断[M]. 北京:高等教育出版社,2005.
- [2] 钮新强. 大坝安全诊断与加固技术[J]. 水利学报, 2007, 38(增刊 1): 60-64. (NIU Xinqiang. Technique for diagnosing and strengthening dam safety[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (Supl): 60-64. (in Chinese))
- [3] 邢林生. 混凝土坝老化性状分析研究[J]. 大坝与安全, 2005 (3): 4-8. (XING Linsheng. Study on the ageing condition of concrete dams[J]. Dam and Safety, 2005 (3): 4-8. (in Chinese))
- [4] 刘计山. 水工防渗帷幕方案论证及后评价技术[J]. 岩土力学, 2010, 31 (增刊 2): 360-365. (LIU Jishan. A hydraulic anti-seepage curtain scheme and post-evaluation technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (Sup2): 360-365. (in Chinese))
- [5] 杨华舒,王洪,李明. 水工混凝土建筑物的表层病害与整体老化[J]. 水力发电, 2001 (2): 57-60. (YANG

- Huashu, WANG Hong, LI Ming. Surface disease on hydraulic concrete structure and its general ageing[J]. Hydropower, 2001(2): 57-60. (in Chinese))
- [6] 张瀚,陈建康,高策,等. 基于熵权集的大坝分部位动态健康评价方法研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(6): 56-62. (ZHANG Han, CHEN Jiankang, GAO Ce, et al. A dynamic health evaluation method research of dam division based on entropy weight set[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, 46(6): 56-62. (in Chinese))
- [7] 邢林生. 七座大坝老化病害工程治理特点分析[J]. 大坝与安全, 2008(3): 20-24. (XING Linsheng, Analysis on treatment of seven ageing diseased dams[J]. Dam and Safety, 2008(3): 20-24. (in Chinese))
- [8] 宋恩来. 东北几座混凝土坝老化与加固效果分析[J]. 大坝与安全, 2006(1): 46-49. (SONG Enlai. Ageing on several concrete dams in northeastern China and reinforcement analysis[J]. Dam and Safety, 2006(1): 46-49. (in Chinese))
- [9] 马保国,高小建,何忠茂,等. 混凝土在 SO_4^{2-} 和 CO_3^{2-} 共同存在下的腐蚀破坏[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(10): 1119-1124. (MA Baoguo, GAO Xiaojian, HE Zhongmao, et al. Corrosion damage of concrete in presence of SO_4^{2-} and CO_3^{2-} [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(10): 1119-1124. (in Chinese))
- [10] 宋汉周,朱旭芬,彭鹏,等. 坝址渗水析出物及其潜在影响研究[J]. 水利学报, 2011, 42(4): 454-460. SONG Hanzhou, ZHU Xufen, PENG Peng, et al. Study on seepage colloid around dam-site and its potential effects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 454-460. (in Chinese)
- [11] 宋汉周. 大坝坝址地下水析出物检测方法[J]. 水电能源科学, 2004(4): 43-46. (SONG Hanzhou. Methods for monitoring of elute from groundwater around dam-site[J]. Water Resources and Power, 2004(4): 43-46. (in Chinese))
- [12] 宋汉周,王凤波,周剑. 某水电站大坝6坝段化灌加强帷幕防渗耐久性分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(5): 69-74. (SONG Hanzhou, WANG Fengbo, ZHOU Jian. Analysis of anti-seepage durability with chemical materials in dam section 6 of a hydroelectric station[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(5): 69-74. (in Chinese))
- [13] 包腾飞,顾冲时,吴中如. 李家峡大坝6号坝段坝基扬压力异常成因综合分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1460-1466. (BAO Tengfei, GU Chongshi, WU Zhongru. Analysis of uplift pressure anomaly of Lijiaxia Dam foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1460-1466. (in Chinese))
- [14] 彭鹏,单治钢,王永明,等. 基于饱和指数模型的坝基帷幕体防渗效果及耐久性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 221-226. (PENG Peng, SHAN Zhigang, WANG Yongming, et al. Anti-seepage effect of curtain under dam foundation and its durability based on saturation index model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 221-226. (in Chinese))
- [15] HUO J X, SONG H Z, LUO L. Investigation of groundwater chemistry at a dam site during its construction: a case study of Xiangjiaba Dam, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3): 1-11.
- (收稿日期: 2016-12-21 编辑: 熊水斌)

(上接第 47 页)

- [8] SAHAY R R, DUTTA S. Prediction of longitudinal dispersion coefficients in natural rivers using genetic algorithm[J]. Hydrology Research, 2009, 40(6): 544-552.
- [9] 邓志强,褚君达. 河流纵向分散系数研究[J]. 水科学进展, 2001, 12(2): 137-142. (DENG Zhiqiang, CHU Junda. Longitudinal dispersion coefficient in natural rivers [J]. Advances in Water Science, 2001, 12(2): 137-142. (in Chinese))
- [10] 陈永灿,朱德军. 梯形断面明渠中纵向离散系数研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 511-517. (CHEN Yongcan, ZHU Dejun. Study on longitudinal dispersion coefficient in open channel trapezoidal cross-section [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 511-517. (in Chinese))
- [11] WANG Y, HUAI W. Estimating the longitudinal dispersion coefficient in straight natural rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(11): 04016048.
- [12] ZENG Yuhong, HUAI Wenxing. Estimation of longitudinal dispersion coefficient in rivers [J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2014, 8(1): 2-8.
- [13] DENG Zhiqiang, SINGGH V P, BENGTSSON L. Longitudinal dispersion coefficient in straight rivers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(11): 919-927.
- [14] LIU H. Predicting dispersion coefficient of streams [J]. Journal of the Environmental Engineering Division, 1977, 103(1): 59-69.
- (收稿日期: 2016-12-11 编辑: 熊水斌)