

渗漏溶蚀混凝土坝力学性能的空间变异性研究综述

胡江, 马福恒, 李子阳, 霍吉祥

(南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:概述了国内外混凝土坝渗漏溶蚀的现状;从材料学的角度,基于已有试验和理论研究成果,综述了水工混凝土的溶蚀及力学性能衰变特性;从工程结构学的角度,总结了渗漏溶蚀影响下的坝体混凝土力学性能的空间变异规律;归纳了渗漏溶蚀混凝土坝物理力学参数的空间变异性,论述了可描述坝体力学性能空间变异性的随机场模型,及可评价坝体动力性态的随机有限元动力分析方法的研究进展;指出水工混凝土结构渗漏溶蚀机理、渗漏溶蚀混凝土坝力学性能的空间随机场模型、渗漏溶蚀对混凝土坝动力性态的影响评价方法等方面亟待深入研究。

关键词:混凝土坝;渗漏溶蚀;力学性能;空间变异性;评价方法

中图分类号:TV642

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2017)04-0087-08

Review of spatial variability of mechanical properties of concrete dams impacted by leakage dissolution//HU Jiang, MA Fuheng, LI Ziyang, HUO Jixiang (*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: A summary of the current status of concrete dams impacted by leakage dissolution is provided. In view of material science, the leakage dissolution process and the degradation of mechanical properties of concrete in hydraulic structures are reviewed based on results of experimental and theoretical research. In view of engineering structures, the spatial evolution law of mechanical properties of concrete for dam bodies impacted by leakage dissolution is summarized. Furthermore, the spatial variability of physical and mechanical parameters of concrete dams is analyzed, and advances in the random field model for description of the spatial variability of dam body mechanical performance and the random finite element method for evaluation of dam body dynamic performance are discussed. Finally, three important topics for further research, including the mechanism of leakage dissolution causing damage to concrete structures under multiple environmental and load factors, the spatial random field model for description of the mechanical performance of concrete dams impacted by leakage dissolution, and the seismic safety analysis method for assessment of the dynamic performance of aged concrete dams under the influence of leakage dissolution, are proposed.

Key words: concrete dam; leakage dissolution; mechanical property; spatial variability; assessment method

实践证明,合理设计、良好施工和科学维护下的混凝土坝使用寿命能远超 $100\text{ a}^{[1]}$ 。美国 1933 年建造的胡佛大坝,至今性能良好,且坝体混凝土强度仍在增长^[2]。然而,当施工质量差、管理不善和运行环境恶劣时,坝体材料和结构性能老化衰退严重。格鲁吉亚 1984 年完工的英古里大坝,由于内战原因缺少应有的管理和维护,1994 年对其检测时发现,大坝老化病害严重,已处于不安全状态^[3]。进入 21 世纪后,我国的一些混凝土坝逐渐出现裂缝、溶蚀和冻融冻胀等老化病害,其中渗漏及其引起的坝体混凝土的溶出性侵蚀较为普遍^[4]。运行多年的丰满、

佛子岭、新安江、陈村、古田溪(一、二、三级)和安砂大坝,及坝龄较短的南告、水东和石漫滩大坝都出现了不同程度的溶蚀病害^[5-6]。

渗漏溶蚀是混凝土坝的一种本质性病害,既取决于坝体本身结构状况,又与环境有着密切关系。严重渗漏溶蚀将影响大坝的承载力和稳定性,缩短大坝使用寿命,是一种导致大坝可靠度降低的时变不可逆过程。因此,开展渗漏溶蚀混凝土坝力学性能的空间变异性及其影响评价方法的相关研究十分必要,以便采取针对性的恢复大坝运行能力的措施,限制溶蚀发展,降低其对大坝造成的危害。

1 水工混凝土溶蚀特性

自混凝土被用于涉水工程以来,国内外学者便开始了其溶蚀特性的研究^[7]。此类研究多在材料学的范畴内进行,相关研究与试验条件和分析手段密切相关,从硬化水泥浆体的溶蚀试验研究逐渐发展到多因素影响下水工混凝土溶蚀试验和数值模拟研究。

1.1 硬化水泥浆体的溶蚀特性

细观上,水工混凝土是由粗细骨料、硬化水泥浆体以及界面过渡区组成。水化程度良好的水泥浆体中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和水化硅酸钙(C-S-H)凝胶体积分分数分别为20%~25%和70%,是水泥的最主要水化产物^[8]。其中,C-S-H内部结构复杂,在一定程度上决定了硬化水泥浆体的强度、体积稳定性和渗透性等主要物理力学性质; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 则对水泥浆体的衰减过程和提高碱性起重要作用。

国外针对硬化水泥浆体的溶蚀特性研究较早,根据溶蚀过程中所受水压力大小可将其分为接触溶蚀和渗透溶蚀两种。主要研究成果^[9-11]有:硬化水泥浆体溶蚀受孔隙溶液和不同水化物相间的热动力平衡等内外因素影响,是一个非线性的动力过程,其实质是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在孔隙液和外部环境的摩尔浓度梯度下随着渗漏不断流失,进而引起C-S-H、单硫型硫酸盐(AFm)、钙矾石(Aft)逐渐脱钙溶出,导致孔隙液中 Ca^{2+} 摩尔浓度随之下降,pH值减小。随着溶蚀过程的继续发展,水化产物从表层向内部逐渐溶解,呈现出溶蚀和未溶蚀2个差异明显的区域,两者的界线即为溶解峰。溶蚀导致硬化水泥浆体的孔隙率不断增大,密度不断减小。

1.2 多因素影响下的水工混凝土溶蚀特性

随着现代试验技术的发展,相关研究向多因素影响下的水工混凝土溶蚀特性的力学试验及理论分析、数值模拟方向发展。

le Bellégo等^[12-13]最早开展了化学-力学耦合下砂浆梁体的溶蚀试验研究,结果表明,化学-力学耦合作用下砂浆梁的强度损失明显大于化学溶蚀单一因素作用下梁的强度损失,荷载诱发的毛细孔和裂缝增大了 Ca^{2+} 的扩散速率从而加速了化学溶蚀过程;溶蚀与砂浆抗渗性及水力梯度有很大关系。Nguyen等^[14-15]对混凝土的溶蚀特性进行了多尺度的试验研究和理论分析,对比试验结果发现,骨料在一定程度上影响了溶蚀速率,即硬化水泥浆、砂浆和混凝土的溶蚀速率依次递减,25 d时砂浆的溶蚀深度约是混凝土的1.15倍。

国内学者对工程实际情况更为关注,研究集中

在水灰比和各种外加剂等自身材料因素对水工混凝土的抗溶蚀性能的影响等方面。徐文雨等^[16]通过试验发现,水灰比和水泥品种对硬化水泥浆体的抗溶蚀性能有明显影响,水灰比越大,硬化水泥浆体密实性越差,其抗溶蚀性能越低。李新宇等^[17]试验研究了软水环境下的水工碾压混凝土的渗透溶蚀特性,得出溶蚀的主要通道是硬化水泥浆体,影响混凝土溶蚀性能的主要因素是渗透系数;在水灰比相同的条件下,外加剂改善了水泥浆体的孔结构,对溶蚀性能有一定的影响,粉煤灰砂浆试件表面劣化情况更为严重,掺入粉煤灰加快了溶蚀速率;矿渣硅酸盐水泥具有较密实的浆体结构,抗溶蚀性能好。

1.3 溶蚀对水工混凝土力学性能的影响

硬化水泥浆体和界面中存在大量微裂纹和孔洞,在荷载和不利环境作用下这些初始缺陷发生扩展、弯折和汇合,对混凝土宏观性质产生显著影响。溶蚀过程对水工混凝土宏观力学性能的影响是国内学者关心的核心问题。

Carde等^[9-10]开展了大量溶蚀对水泥浆体力学性能的影响研究,得到 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和C-S-H溶蚀程度各异的试验样本,试验结果表明,抗压强度和孔隙率都与溶蚀过程呈较好的线性关系,拟合得到了不同溶蚀区域的孔隙率计算公式,且微观孔隙结构改变导致水泥浆体塑性增大。le Bellégo等^[11]的试验获得了溶蚀程度分别为48%、59%和74%的砂浆试样,得到相应宏观刚度损失分别为23%、36%和53%。Ulm等^[18-19]对溶蚀硬化水泥浆体进行了三轴实验,发现较整体强度的衰减,剪切性能对溶蚀更为敏感; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶蚀导致孔隙增多,压缩实验中出现塑性剪胀,延缓剪切面上的失效,C-S-H脱钙则只导致力学软化,且C-S-H对宏观力学性能的影响要超过 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,C-S-H析出是导致宏观力学性能衰减的主因。Nguyen等^[14-15]的试验发现硬化水泥浆体、砂浆和混凝土各尺度上溶蚀样本强度和刚度等力学性能均随溶蚀程度增加而下降,且峰值后曲线渐趋平缓,韧性增加,呈强相关性。

孔祥芝等^[20]进行了大尺寸水工混凝土试件溶蚀试验,溶蚀初期混凝土强度和刚度性能的衰减与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的溶出率基本呈线性关系,掺粉煤灰混凝土 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶出5.13%时,混凝土抗压强度、劈拉强度和弹性模量分别下降2.24%、7.95%和4.10%,掺火山灰混凝土 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶出7.28%时,则分别下降14.8%、27.8%和15.7%;可以看出,溶蚀导致混凝土变脆,强度、刚度降低,且劈拉强度衰减最快,相比而言,掺火山灰混凝土性能衰减更快。王海龙等^[21]试验研究了接触溶蚀后混凝土宏观力

学性能的变化,结果表明劈拉强度下降较轴心抗压强度更明显,边长 100 mm 的立方体试件在软水和硝酸溶液中侵蚀 60 d 后,劈拉强度分别降为溶蚀前的 74.8% 和 77.7%。黄蓓等^[22]通过试验研究,得到了不同溶蚀程度的混凝土单轴应力-应变的关系式。

由于混凝土的复合多尺度性质,试验操作难度较高。近年来,国内外一些学者开始采用数值分析方法研究溶蚀现象,如 Bernard 等^[23-24]建立了溶蚀水泥浆体和砂浆的表征元模型,采用有限元模拟分析了拉压试验,得到的结果与 Ulm 等^[18-19]的试验结果一致;胡江^[25]基于 Nguyen 等^[14-15]的成果,开展了溶蚀混凝土的多尺度数值模拟,分析认为骨料的存在在一定程度上降低了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶蚀对宏观力学性能的影响,但由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶蚀导致凝胶的胶结能力下降,宏观力学性能仍然对 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶蚀有很高的敏感性。基于各尺度信息数字成像的多尺度数值仿真分析,采用显式方法重构材料结构,可用于变形、有效力学性能和老化过程分析等,为水工混凝土老化及其影响研究提供了新的途径。

2 渗漏溶蚀对混凝土坝力学性能空间分布的影响

2.1 混凝土坝的老化与渗漏溶蚀

国际大坝委员会 (ICOLD) 第 1 届会议 (1933 年) 的一个重要议题就是材料老化引起的大坝性态恶化,之后,第 8 届 (1964 年)、第 9 届 (1967 年)、第 13 届 (1979 年)、第 17 届 (1991 年) 和第 21 届 (2003 年) 会议分别包含了老化对坝体混凝土特性的影响、大坝行为与恶化、大坝恶化与破坏、大坝老化与补救措施、混凝土坝和砌石坝以及附属建筑物的老化与修补等专题或主题。1986 年 ICOLD 大坝老化专业委员会正式成立,专业委员会^[26]总结了各类大坝的老化问题及其原因、修复和预防措施。ICOLD 还总结了混凝土坝失效的主要原因,包括蓄意破坏行为、筑坝材料导致的结构失效、基岩滑移失效、裂缝和维护不当等,对于筑坝材料导致的结构失效,主要原因是混凝土老化、衰减及其引起的强度不足等。

除 ICOLD 外,一些国际著名机构也有针对性地研究了大坝的老化行为,获得了许多突破性的成果。ICOLD 欧洲分会 (ICOLDEC)^[27]通过现场试验,提出了大坝混凝土老化报告。美国内务部垦务局 (USBR)^[28]专门针对老化混凝土材料的特性进行了研究,建立了老化混凝土特性数据库。我国水利和电力部门对所属的大坝开展安全定期检查,检查结果表明,除防洪标准偏低外,裂缝、溶蚀、冻融与碳化等是混凝土坝的主要老化病害,分别占老化病害总

数的 72.9%、33.3% 和 10.4%^[1]。渗漏溶蚀是混凝土坝结构老化和病变的主要反应,对结构安全的危害很大。

2.2 渗漏溶蚀混凝土坝强度参数空间变化规律

局部材料的老化病害引起混凝土坝坝体力学性能的空间变化,但相关试验和理论研究较少,主要为实测结果。

丰满大坝为混凝土重力坝,1942 年蓄水,1953 年建成。坝体为普通硅酸盐水泥,内部分布着低强度混凝土,有较多裂缝和空洞,水平施工缝未处理,为坝体渗漏提供了便捷通道,运行初期渗漏便非常严重。同时,库水属软水水质,经多年运行后,坝体外部和内部混凝土均遭到明显溶蚀破坏。1991 年钻孔检查发现,坝体内部混凝土强度表现出极强的空间变异性,一般在 15 MPa 以上,但局部无法取芯,低于 10 MPa^[29];进一步推算,坝体混凝土强度在发生渗漏部位损失可达 20%,局部区域能达 70%,甚至完全失去强度成为疏松体^[30]。罗湾大坝为混凝土重力坝,1981 年建成,运行至 1990 年,廊道内部分排水孔口 CaCO_3 晶体呈瀑布状,现场检测发现,溶蚀部位的混凝土后期强度不仅未增长,反而明显下降,挡水运行 10 a 后仅为设计强度的 83%,而其他部位已达到设计要求^[31]。

碾压混凝土坝每立方米混凝土水泥用量少,溶蚀作用对混凝土的强度降低效应更显著,对坝体的危害更大^[5]。水东大坝为碾压混凝土重力坝,1993 年蓄水,坝体部分碾压混凝土质量较差,存在骨料架空、砂浆不均、蜂窝、孔洞、碾压不均、层面胶结不理想等现象,透水率大于 3 Lu;坝体蓄水不久即渗漏析钙严重,下游坝面距坝顶约 8 m 以下常年处于湿润状态,至 1999 年 CaCO_3 晶体覆盖满廊道内壁,取芯除少部分呈柱状或短柱状外,基本呈块状或散体状,综合芯样获得率为 55%,质量指标值仅 30% 左右^[4]。复建后的石漫滩大坝为碾压混凝土重力坝,1997 年完工,由于温差大,坝体产生了较多裂缝,廊道内渗流明显,下游面多处长期渗水、射水,坝体渗水析钙严重;2005 年对大坝进行了钻孔压水试验,试样强度离差系数大,质量较差处钻孔芯样基本不能成型^[32]。

相对混凝土重力坝,混凝土轻型坝更易受渗漏溶蚀影响。如古田溪二、三级平板支墩坝面板渗漏溶蚀严重。以古田溪三级大坝为例,该坝 1961 年蓄水,环境水质对混凝土具有中等溶出型侵蚀作用,1990 年有 4 个坝段渗水严重,7 个坝段共 18 处渗白浆,2000 年有 8 个坝段渗水严重,20 个坝段共 36 处渗白浆,渗水析钙现象明显加重,面板整体强度由

49.6 MPa 降为 37.91 MPa, 下降 23.6%, 面板的强度和抗渗能力已不能满足设计要求, 局部强度为设计强度的 74%, 下降幅度大^[33]。

2.3 混凝土坝坝体渗漏与溶蚀的关系

从渗漏溶蚀混凝土坝强度参数空间变化规律可看出, 混凝土坝溶蚀与渗漏相生相成, 一方面, 坝体不同部位遭受溶蚀破坏的程度取决于坝体结构状况, 浇筑密实、缺陷较少的部位渗漏量较小, 溶蚀程度有限; 浇筑不密实、多孔疏松的部位渗漏量较大, 溶蚀将较严重; 另一方面, 溶蚀导致混凝土孔隙率高、结构疏松, 因此渗漏也将更为严重。如丰满大坝, 1950 年库水位为 255 m 时, 坝体总渗漏量高达 22 380 L/min, 渗漏非常严重, 廊道内壁、排水管孔口均可见大量析出物。为改善混凝土结构状况, 增强坝体防渗能力, 曾持续不断地对坝体进行灌浆, 但直至 1988 年大规模防渗处理前, 坝体 Ca^{2+} 年溶蚀量约为 3.3 t, 以此推算, 坝体凝胶产物年溶蚀量大于年平均灌浆量。至 1995 年, 坝体平均渗漏量显著降低为 24.98 L/min, 相应地 Ca^{2+} 年溶蚀量也减少为 419 kg。又如水东大坝, 经坝体灌浆后, 1996 年的渗漏量仍达 1068 L/min, 坝体 Ca^{2+} 年溶蚀量为 2.1 t, 后又对坝体多次灌浆, 至 1999 年渗漏量降为 391.8 L/min, Ca^{2+} 年溶蚀量减少为 998 kg^[4]。可见, 溶蚀与渗漏互为条件、相互促进。溶蚀的持续发生使得凝胶产物不断流失, 甚至完全失去胶结能力, 混凝土强度和刚度显著下降, 进一步加剧了坝体物理力学性能的空间非均质性和变异性。

3 渗漏溶蚀对混凝土坝力学性能空间变异性影响的评价

3.1 渗漏溶蚀对坝体性态的影响

由前文可知, 在环境、荷载等多因素影响下, 坝体遭受接触和渗透溶蚀危害, 随服役时间增长, 渗漏溶蚀导致坝体结构性能空间变异性显著, 力学性能衰退, 渗透性提高, 坝体扬压力增大; 同时, 局部混凝土强度的衰减、坝体扬压力的增大将加剧坝体某些部位拉应力的产生或增大, 导致坝体出现裂缝, 影响大坝的整体使用性能和动力安全性, 严重的会导致混凝土结构彻底破坏。

3.2 渗漏溶蚀混凝土坝分区力学参数反演识别

反演分析可有效利用实测数据识别混凝土坝坝体物理力学参数。Ardito 等^[34-35] 针对运行多年后混凝土坝可能遭受的渗漏溶蚀、碱集料反应等本质性病害导致的局部损伤和强度参数的空间变异性, 开展了大量研究, 利用人工神经网络模型, 提出了基于实测变形资料的分区材料参数反演方法, 以识别坝

体局部因老化引起的损伤。

弹性模量能反应混凝土的疲劳性能、柔度、承载能力和抗裂能力, 是衡量坝体结构刚度的指标^[36]。因此, 对老化病害坝体物理力学参数反演分析主要集中在弹性模量方面。吴中如等^[36-37] 较早提出用不同坝段的实测变形资料估算各坝段混凝土弹性模量, 之后, 又采用混沌遗传优化算法, 建立了分区弹性模量反演分析方法。李守巨等^[38-40] 针对丰满大坝渗漏溶蚀引起的坝体混凝土弹性模量空间变异性开展了大量研究, 以获取坝体性能参数分布。李守巨等^[38] 基于大坝坝顶水平位移监测资料, 采用混合模型, 综合高斯牛顿法和遗传算法对不同坝段坝体混凝土的弹性模量进行了反演分析, 结果在 17.97 ~ 31.4 GPa 间, 与现场取芯试验结果 17.0 ~ 32.0 GPa 基本一致。冯新等^[39-40] 利用改进模拟退火-单纯形法, 建立了分区弹性模量反演的正则化方法, 基于大坝脉动测试数据, 得到了大坝各分区的弹性模量; 此后, 又采用梯度搜索法, 提出更为稳定的反演方法, 反演结果的均值分布在 14.75 ~ 25.79 GPa 间, 实际取芯试验结果为 9.2 ~ 43.2 GPa; 反演和实际取芯试验结果总体均值分别为 19.08 GPa 和 21.1 GPa, 两者相差不大, 反演结果都在合理区间内, 反演参数能反映坝体的工作状态。

参数反演是一种基于实测数据的坝体性态等效方法, 且分区只能是概化性的, 并不能完全反映坝体的实际物理力学参数的空间变异性。

3.3 渗漏溶蚀混凝土坝力学性能空间变异性的随机场模型

已有关于老化病害混凝土坝的研究多假定坝体混凝土力学性能退化过程是空间均匀的, 综合蒙特卡罗法与勘察试验、无损检测和现场试验等离散信息的统计特性, 得到坝体力学性能参数的完全随机模型^[41-43]。这与工程实际不符, 老化病害引起的大体积混凝土结构力学性能参数的空间变异性并不是完全随机的, 而是存在一定的内部规律性。

目前, 老化病害混凝土结构空间变异性的研究主要集中在海洋和桥梁工程^[44-45]。针对氯离子侵蚀, 黄侨等^[46] 基于大量实测数据, 拟合了某桥梁的混凝土强度随机场的相关函数, 得到相关距离为米级, 并认为这一相关距离也可应用于其他类似结构。石雪飞等^[47] 采用相关矩阵法量化空间变异性, 建立了基于各测区无损检测数据的材料参数相关系数矩阵确定方法, 分析了参数空间相关性对功能失效的敏感性, 结果表明评估在役钢筋混凝土梁桥性态须考虑空间变异性。彭建新等^[48] 基于随机场理论, 考虑混凝土强度和氯离子扩散系数的空间分布特性,

建立了承载力的自相关函数,在无维修加固和海岸线大气区环境下,结构服役 100 a 后考虑比不考虑空间变量时的弯曲抗力要低 143 kN·m。Schneider 等^[44]通过动态贝叶斯模型考虑侵蚀引起的参数空间演变规律,研发了基于实测信息的评估软件。可见,确定结构性能参数的相关距离函数,以空间相关性描述力学参数指标的方差,利用随机场模型描述力学参数的空间变异性,分析老化病害在役混凝土结构的性能,更接近工程实际。渗漏溶蚀混凝土坝物理力学性能的空间变异性与上述结构类似,溶蚀受溶解和扩散过程控制,所引起的不确定性包含在坝体复杂的化学-力学-水力耦合作用中,具有随机性和内在结构性双重特征,渗漏溶蚀混凝土坝力学性能是受多因素影响的随机场,局部区域性能相关性较强^[25]。

然而,工程现场勘察取样间距较大,能反映空间变异性的资料有限。为此,将点特性和空间平均特性有机融合的条件随机场应运而生。吴振君等^[49]提出了基于克里金方法的随机场模型,充分考虑了勘察试验数据有限数据点和未知区域的相互关系,降低了随机场的模拟方差,体现了随机性和内在空间相关性的统一。张社荣等^[50]考虑重力坝材料参数的内在随机性,基于贝叶斯方法,建立了区域结构的约束随机有限元力学模型,分析区域材料参数随机特性对工程结构性态的影响,工程实例结果表明,约束随机场模型得到的抗滑稳定性明显降低。

由以上研究可以看出,随机场理论为渗漏溶蚀混凝土坝力学参数空间变异性模拟提供了理论基础。但相关研究还处于初步阶段,渗漏溶蚀混凝土坝坝体强度参数的相关距离函数的建立、基于勘察信息的坝体随机场模型化等方面仍有大量问题亟待解决。

3.4 老化病害混凝土坝动力性态的分析和预测

对老化病害混凝土坝抗震性能评估,有利于采用相应的抗震措施,使破损程度和经济损失控制在预期范围^[51]。Zhang 等^[52-53]融合损伤力学、有限元分析和材料衰变评价方法,提出了基于损伤力学的数值模型,以印度的戈伊纳坝为例,分析了老化病害引起的初始损伤对坝体性能的影响,结果发现,老化病害损伤引起的性能劣化对戈伊纳坝的抗震性能影响较显著。Burman 等^[54]研究了渗漏溶蚀等病害引起的微观空隙导致的混凝土强度衰减,基于前 50 a 的抗压强度试验成果拟合了混凝土强度的时变曲线,结合损伤力学,分析预测了混凝土的老化效应及其对老龄期大坝性能的影响,在此基础上,以戈伊纳坝为例研究了老化因素下坝体抗震性能,得到了类似 Zhang 等^[52-53]的结果。

王进廷等^[55]基于混凝土强度增强和化学溶蚀的动力过程的经验公式,采用非线性有限元分析了老化对混凝土坝抗震性能的影响,分析结果表明老化明显影响坝体的抗拉强度。王怀亮等^[56]考虑了由于溶蚀、冻融等老化衰减因素对坝体动力损伤的影响,采用动力有限元-边界元混合法对丰满大坝进行了计算分析,结果亦表明,老化损伤对结构动力性态影响很大,相同的地震条件下,若处于设计状态时坝体抗震安全,而考虑渗漏溶蚀引起的老化性能衰减,当混凝土孔隙率达到 20% 时坝体结构抗震不安全。针对外部动荷载和内部强度参数的不确定性,杜成斌等^[57]研究了重力坝地震响应,认为参数不确定性对大坝的地震响应有较大影响,关键部位的响应基本接近正态分布。

总体上看,老化病害混凝土坝的动力性态研究还处于探索阶段,以定性结论为主,亟需提出更符合工程实际的老化病害混凝土坝动力性态分析和验证方法。

4 研究展望

由于渗漏溶蚀混凝土坝力学性能空间变异的复杂性,已有研究尽管已取得了一定成果,但相关理论和方法仍滞后于工程需要,仍有不少方面需要进一步探讨和开展深入研究:

a. 多因素耦合下水工混凝土结构渗漏溶蚀机理。已有研究主要集中在混凝土自身的溶蚀特性,然而水工混凝土溶蚀不但受施工质量、配合比和外加剂等内部因素的影响,还受到环境、荷载、坝型、结构状况等外部因素的作用,有必要开展上述多因素耦合下的水工混凝土结构渗漏溶蚀机理的试验研究。

b. 渗漏溶蚀混凝土坝力学性能的空间随机场模型。基于有限信息的约束随机场模型为老化病害混凝土结构物理力学参数的空间变异性辨识、描述提供了理论基础,并已在其他在役大体积混凝土结构腐蚀老化问题研究中取得了一定成果。借鉴现有成果,建立渗漏溶蚀混凝土坝力学性能空间约束随机场模型,可为渗漏溶蚀混凝土坝性态的数值模拟分析提供基础。

c. 渗漏溶蚀对混凝土坝动力性态的影响评价。坝体动力性态对老化病害引起的局部损伤敏感。现阶段,混凝土坝的随机有限元动力分析方法还处于初步研究阶段。为此,须考虑混凝土渗漏溶蚀引起的坝体物理力学参数的空间变异性,提出渗漏溶蚀混凝土坝动力响应的随机有限元动力分析方法,以进一步揭示老化病害对混凝土坝动力性态的影响。

5 结 语

渗漏溶蚀混凝土坝力学性能的空间变异性涉及环境与荷载耦合作用下工程结构性能演变机理、工程结构寿命全过程精细化分析理论与性能评定理论及方法等多个研究方向。本文仅论述了水工混凝土溶蚀特性、渗漏溶蚀混凝土坝力学性能空间分布规律及力学性能空间变异性的影响评价等3个方面的研究现状。当前,全球范围内结构工程学科突破了传统的研究思路,“时变结构”的概念不断外延,空间多尺度的理念继续拓展,材料(微观、细观、宏观)-结构多尺度的结合得到全面加强;老化阶段的不确定性及其影响引起广泛重视。借助前沿学术思想,开展多因素耦合下水工混凝土结构渗漏溶蚀机理、渗漏溶蚀混凝土坝力学性能的空间随机场模型、渗漏溶蚀对混凝土坝动力性态的影响评价等3个问题的深入研究,揭示渗漏溶蚀混凝土坝力学性能空间变异机理及其对坝体性态的影响,以指导混凝土坝长效安全运行,具有较高的科学意义与广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 吴中如,顾冲时. 重大水工混凝土结构隐患检测与健康诊断[M]. 北京:高等教育出版社,2005.

[2] BARTOJAY K, JOY W. Long-term properties of Hoover Dam mass concrete [C]//Proceedings of Hoover Dam: 75th Anniversary History Symposium. Reston, VA: ASCE, 2010:74-84.

[3] WIELAND M, MUELLER R. Dam safety, emergency action plans and water alarm systems [J]. International Water Power and Dam Construction, 2009(9):32-38.

[4] 邢林生, 聂广明. 混凝土坝坝体溶蚀病害及治理[J]. 水力发电, 2003(11):60-63. (XING Linsheng, NIE Guangming. Corrosion and treatment of concrete dam body [J]. Water Power, 2003(11):60-63. (in Chinese))

[5] 吴中如. 老坝病变和机理探讨[J]. 中国水利, 2000(9):55-57. (WU Zhongru. Analysis on pathological change and mechanism of old dams [J]. China Water, 2000(9):55-57. (in Chinese))

[6] 顾冲时, 苏怀智. 混凝土坝工程长效服役与风险评定研究述评[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5):1-12. (GU Chongshi, SU Huaizhi. Current status and prospects of long-term service and risk assessment of concrete dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5):1-12. (in Chinese))

[7] 胡江, 苏怀智, 马福恒, 等. 基于三维微-细观尺度模型的混凝土力学性能研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(4):321-326. (HU Jiang, SU Huaizhi, MA

Fuheng, et al. Mechanical properties of concrete based on 3D micro-meso scale numerical models [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(4):321-326. (in Chinese))

[8] 杨虎, 蒋林华, 张研, 等. 基于溶蚀过程的混凝土化学损伤研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(1):83-89. (YANG Hu, JIANG Linhua, ZHANG Yan, et al. Summary of researches on chemical damage of concrete based on leaching process [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(1):83-89. (in Chinese))

[9] CARDE C, FRANCOIS R. Effect of the leaching of calcium hydroxide from cement paste on mechanical and physical properties [J]. Cement & Concrete Research, 1997, 27(4):539-550.

[10] CARDE C, FRANCOIS R, TORRENTI J M. Leaching of both calcium hydroxide and C-S-H from cement paste: modeling the mechanical behavior [J]. Cement & Concrete Research, 1996, 26(8):1257-1268.

[11] GERARD B, LE BELLEGO C, Bernard O. Simplified modelling of calcium leaching of concrete in various environments [J]. Materials and Structures, 2002, 35(10):632-640.

[12] LE BELLÉGO C, GERARD B, PIJAUDIER-CABOT G. Chemo-mechanical effects in mortar beams subjected to water hydrolysis [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(3):266-272.

[13] LE BELLÉGO C, PIJAUDIER-CABOT G, GERARD B. Coupled mechanical and chemical damage in calcium leached cementitious structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, 129(3):333-341.

[14] NGUYEN V H, COLINA H, TORRENTI J M, et al. Chemo-mechanical coupling behaviour of leached concrete: part 1 experimental results [J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(20/21):2083-2089.

[15] NGUYEN V H, NEDJAR B, TORRENTI J M. Chemo-mechanical coupling behaviour of leached concrete: part 11: modelling [J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(20, 21):2090-2097.

[16] 徐文雨, 关英俊, 李金玉. 大坝混凝土渗漏溶蚀的研究 [J]. 水利水电技术, 1990(7):43-47. (XU Wenyu, GUAN Yingjun, LI Jinyu. Research on leakage dissolution of dam concrete [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1990(7):43-47. (in Chinese))

[17] 李新宇, 方坤河. 软水溶蚀作用下水工碾压混凝土渗透特性研究 [J]. 长江科学院院报, 2008, 25(4):81-84. (LI Xinyu, FANG Kunhe. Permeability of hydraulic roller compacted concrete under soft water [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(4):81-84. (in Chinese))

[18] ULM F J, LEMARCHAND E, HEUKAMP F H. Elements

- of chemomechanics of calcium leaching of cement-based materials at different scales [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70(7/8): 871-889.
- [19] HEUKAMP F H, ULM F J, GERMAINE J T. Mechanical properties of calcium-leached cement pastes; triaxial stress states and the influence of the pore pressures [J]. *Cement & Concrete Research*, 2001, 31(5): 767-774.
- [20] 孔祥芝, 陈改新, 纪国晋. 大坝混凝土渗透溶蚀试验研究 [J]. *混凝土*, 2013 (10): 53-56. (KONG Xiangzhi, CHEN Gaixin, JI Guojin. Research on leaching of dam concrete [J]. *Concrete*, 2013 (10): 53-56. (in Chinese))
- [21] 王海龙, 郭春伶, 孙晓燕, 等. 软水侵蚀混凝土的性能劣化细观机理 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(10): 1887-1892. (WANG Hailong, GUO Chunling, SUN Xiaoyan, et al. Degradation mesomechanism of concrete deteriorated by soft water [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2012, 46(10): 1887-1892. (in Chinese))
- [22] 黄蓓, 钱春香. 溶蚀混凝土的表征及应力-应变关系 [J]. *硅酸盐学报*, 2011, 39(1): 87-91. (HUANG Bei, QIAN Chunxiang. Characterization and stress-strain relationship of leached concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2011, 39(1): 87-91. (in Chinese))
- [23] BERNARD F, KAMALI-BERNARD S. Performance simulation and quantitative analysis of cement-based materials subjected to leaching [J]. *Computational Materials Science*, 2010, 50(1): 218-226.
- [24] KAMALI-BERNARD S, BERNARD F. How to assess the long-term behaviour of a mortar submitted to leaching? [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2011, 15(7): 1031-1043.
- [25] HU Jiang. Multi-scale numerical simulation analysis for influence of combined leaching and frost deteriorations on mechanical properties of concrete [J]. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2016, 12(4): 648-671.
- [26] ICOLD. Ageing of dams & appurtenant works: review and recommendations; ICOLD Bulletin 93 [R]. Paris: International Commission On Large Dams, 1994.
- [27] DEL HOYO FERNÁNDEZ-GAGO R, MANUEL ALONSO MUÑOZ J, MARTÍNEZ-ABELLA F, et al. Ageing of concrete in dams [R]. [S. l.]: ICOLD European Club, 2004.
- [28] TIMOTHY P, DOLEN P E. Materials properties model of aging concrete [R]. Denver, Colorado: U. S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center, 2005.
- [29] 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): 44-49. (SONG Enlai. Aging on several concrete dams in northeastern China and reinforcement analysis [J]. *Dam & Safety*, 2006(1): 44-49. (in Chinese))
- [30] 李金玉. 必须重视我国水工混凝土建筑物的耐久性 [J]. *大坝与安全*, 1990(1): 19-30. (LI Jinyu. More attention must devote to the durability of hydro-concrete building in China [J]. *Dam & Safety*, 1990(1): 19-30. (in Chinese))
- [31] 邢林生, 周建波. 在役混凝土坝耐久性研探 [J]. *大坝与安全*, 2012(2): 9-18. (XING Linsheng, ZHOU Jianbo. The durability of concrete dams in service [J]. *Dam & Safety*, 2012(2): 9-18. (in Chinese))
- [32] 马福恒, 李子阳, 戴群. 河南省石漫滩水库大坝安全综合评价报告 [R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2012.
- [33] 邢林生, 徐世元. 古田溪三级大坝老化病害及其治理 [J]. *水力发电*, 2005, 31(9): 69-71. (XING Linsheng, XU Shiyuan. Deterioration and its treatment of Gutianxi Cascade-III Dam [J]. *Water Power*, 2005, 31(9): 69-71. (in Chinese))
- [34] ARDITO R, MAIER G, MASSALONGO G. Diagnostic analysis of concrete dams based on seasonal hydrostatic loading [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30: 3176-3185.
- [35] FEDELE R, MAIER G, MILLER B. Health assessment of concrete dams by overall inverse analyses and neural networks [J]. *International Journal of Fracture*, 2006, 137(1): 151-172.
- [36] 吴中如, 陈继禹, 范树平. 用反演分析法推求连拱坝混凝土的力学参数和断裂韧度 [J]. *大坝观测与土工测试*, 1986(1): 3-11. (WU Zhongru, CHEN Jiyu, FAN Shuping. The calculation of mechanical parameter and fracture toughness of concrete in multiple-arch dam with inverse analysis method [J]. *Dam Observation and Geotechnical Tests*, 1986(1): 3-11. (in Chinese))
- [37] GU Hao, WU Zhongru, HUANG Xiaofei, et al. Zoning modulus inversion method for concrete dams based on chaos genetic optimization algorithm [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, Article ID 817241, doi: 10.1155/2015/817241.
- [38] 李守巨, 刘迎曦, 陈昌林, 等. 基于混合遗传算法的混凝土大坝力学参数反演 [J]. *大连理工大学学报*, 2004, 44(2): 195-199. (LI Shouju, LIU Yingxi, CHEN Changlin, et al. Inversion procedure for mechanical parameters of concrete dam with hybrid genetic algorithm [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2004, 44(2): 195-199. (in Chinese))
- [39] 冯新, 周晶, 陈健云, 等. 一种混凝土重力坝分区弹模反演新方法 [J]. *大连理工大学学报*, 2002, 42(4): 480-484. (FENG Xin, ZHOU Jing, CHEN Jianyun, et al. A new method for inversion of sub-regional elastic modulus of concrete gravity dam [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2002, 42(4): 480-484. (in Chinese))

- [40] ZHANG D D, FENG X, ZHOU J. An inversion method of the material parameters for gravity dams [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 580/581/582/583: 1799-1802
- [41] WESTBERG M. Reliability-based assessment of concrete dam stability[D]. Lund: Lund University, 2010.
- [42] SU H, HU J, WEN Z. Service life predicting of dam systems with correlated failure modes [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 27(3): 252-269.
- [43] 熊晟欣, 胡江, 马福恒, 等. 重力坝多失效模式系统失效概率计算和老化效应分析[J]. 水力发电, 2013, 39(9): 30-34. (XIONG Shengxin, HU Jiang, MA Fuheng, et al. System failure probability calculation and aging effect analysis of gravity dams with several failure modes [J]. Water Power, 2013, 39(9): 30-34. (in Chinese))
- [44] SCHNEIDER R, FISCHER J, BÜGLER M, et al. Assessing and updating the reliability of concrete bridges subjected to spatial deterioration; principles and software implementation [J]. Structural Concrete, 2015, 16(3): 356-365.
- [45] SAASSOUH B, LOUNIS Z. Probabilistic modeling of chloride-induced corrosion in concrete structures using first-and second-order reliability methods [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(9): 1082-1093.
- [46] 黄侨, 李莹, 郭宏斌. 混凝土桥梁结构随机场的相关距离分析 [J]. 公路交通科技, 2006, 23(1): 44-47. (HUANG Qiao, LI Ying, GUO Hongbin. Correlation distance calculation on random field of the concrete bridge structures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(1): 44-47. (in Chinese))
- [47] 石雪飞, 王晓明, 阮欣, 等. 考虑空间变异性的在役钢筋混凝土梁桥失效概率评估 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(6): 74-79. (SHI Xuefei, WANG Xiaoming, RUAN Xin, et al. Failure probability assessment of existing RC beam bridges considering spatial variability [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(6): 74-79. (in Chinese))
- [48] 彭建新, 胡守旺, 张建仁. 考虑空间变量的氯盐环境下 RC 简支梁桥失效概率分析 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(12): 115-121. (PENG Jianxin, HU Shouwang, ZHANG Jianren. Analysis on failure probabilities of RC simply-supported beam under chloride environment with spatial variables considered [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(12): 115-121. (in Chinese))
- [49] 吴振君, 王水林, 葛修润. 约束随机场下的边坡可靠度随机有限元分析方法 [J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3086-3092. (WU Zhenjun, WANG Shuilin, GE Xiurun. Slope reliability analysis by random FEM under constraint random field [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3086-3092. (in Chinese))
- [50] 张社荣, 王超, 孙博. Bayes 约束随机场下坝基溶蚀区随机模拟方法及其影响分析 [J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2337-2346. (ZHANG Sherong, WANG Chao, SUN Bo. Stochastic simulation and influence analysis of dissolution dam foundation under Bayes constraint random field [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2337-2346. (in Chinese))
- [51] 顾培英, 邓昌, 汤雷. 基于重整化群方法的三棱柱单元整体破坏概率模型 [J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(3): 16-19. (GU Peiying, DENG Chang, TANG Lei. A model of overall damage probability of triangular prism unit based on renormalization group method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(3): 16-19. (in Chinese))
- [52] ZHANG W H, VALLIAPPAN S. Continuum damage mechanics theory and application; part I theory [J]. International Journal of Damage Mechanics, 1998, 7(3): 250-273.
- [53] OMIDIA O, VALLIAPPAN S, LOTFIA V. Seismic cracking of concrete gravity dams by plastic-damage model using different damping mechanisms [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2013, 63: 80-97.
- [54] BURMAN A, MAITY D, SREEDEEP S. Long term influence of concrete degradation on dam foundation interaction [J]. International Journal of Computational Mechanics, 2010, 8(3): 397-423.
- [55] WANG J T, JIN F, ZHANG C H. Seismic safety of arch dams with aging effects [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(3): 522-530.
- [56] 王怀亮, 周志宇. 长期运行老化混凝土重力坝地震反应分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(1): 183-188. (WANG Huailiang, ZHOU Zhiyu. Seismic analysis of concrete gravity dams with aging effects [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35(1): 183-188. (in Chinese))
- [57] 杜成斌, 洪永文. 带有参数不确定性的重力坝地震响应的直接数值模拟 [J]. 世界地震工程, 2006, 22(3): 46-52. (DU Chengbin, HONG Yongwen. Direct numerical simulation of seismic response of gravity dam with parameter uncertainties [J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(3): 46-52. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-08-08 编辑: 熊水斌)

