

声发射技术在土木工程中的应用研究综述

王 岩¹, 路桂娟¹, 王 瑶², 徐郑郑¹, 姚金鑫¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 金陵科技学院建筑工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要 简单介绍声发射技术的定义与原理, 在对国内外相关文献进行分类、归纳和总结的基础上, 从桥梁工程、水利和岩土工程、建筑工程以及其他特种工程 4 个方面综述了声发射技术在土木工程相关领域中的应用现状和研究进展, 总结了该领域的研究热点, 并就声发射技术的发展前景和需要进一步研究的问题提出了自己的看法。

关键词 声发射技术; 土木工程; 安全监测; 无损检测; 综述

中图分类号 TH878 **文献标志码** B **文章编号** 1006-7647(2012)04-0089-06

Research review of applications of acoustic emission technique in civil engineering // WANG Yan¹, LU Gui-juan¹, WANG Yao², XU Zheng-zheng¹, YAO Jin-xin¹ (1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of Architecture & Civil Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract Acoustic emission, applied in the field of civil engineering and life assessment of safety monitoring, is a real-time, dynamic, nondestructive testing technology. This paper briefly introduces the definition and principle of acoustic emission technique. Based on classification and summary of the domestic and foreign literature, the key issues, research status, and progress of this technique are reviewed from four aspects: bridge engineering, geotechnical and underground engineering, hydraulic engineering, and other special engineering. Finally, the authors put forward their own opinions on the prospects of this technique and problems that need to be investigated in the future.

Key words acoustic emission technique; civil engineering; safety monitoring; nondestructive testing; review

近年来,声发射技术作为一种新型动态无损检测技术已经应用于土木工程中,其技术优势在于可以在未知混凝土损伤状态的物理参数情况下,了解混凝土内部损伤和裂缝形成与发展的过程,进而实现判定混凝土曾经承受的最大应力历史和动态评估混凝土损伤程度等目标。在对国内外相关文献进行分类、归纳和总结的基础上,首先介绍声发射技术的定义与基本原理,然后针对声发射技术在桥梁工程、水利及岩土工程、建筑工程以及其他特种工程中的应用对声发射技术在土木工程中的应用现状和研究成果进行综述,并对该领域的研究热点和需要进一步研究的关键问题进行归纳和总结。

1 声发射技术的定义与原理

狭义的声发射(acoustic emission,简称 AE)是指材料受外力或内力作用而出现变形或裂纹扩展,所产生的瞬态能量以弹性波的形式快速释放的现象。

将流体泄漏、摩擦、撞击、燃烧等与变形和断裂机制无直接关系的另一类弹性波源称为广义声发射^[1]。更多的声发射现象很微弱,人耳不能听见而需要借助灵敏的电子仪器,用仪器采集、显示、分析声发射信号并利用其推断声发射源的位置和特征的技术为声发射技术^[2]。

声发射技术涉及声发射源、波的传播、声电转换、信号处理、数据显示与记录、解释与评定等,其基本原理为声发射源产生弹性波在材料中传播,引起被监测试件表面的振动,这些振动被耦合在试件上的传感器感应到时,所产生的压电效应将弹性波引起的表面振动转换成电压信号,再经仪器放大处理后以参数或者波形的形式采集而后对其进行信号处理^[2]。声发射技术的基本原理如图 1 所示^[3]。

2 声发射技术在桥梁工程中的应用

近年来,世界范围内的各类桥梁陆续处于需要

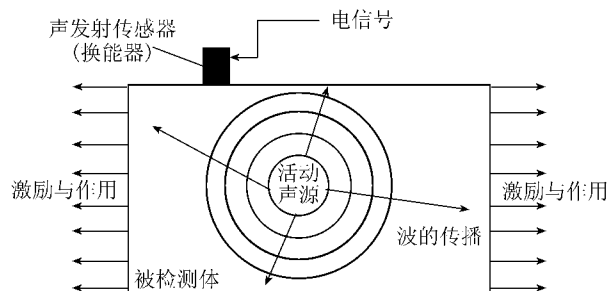


图1 声发射技术基本原理

维修和加固的老龄化阶段,因此,迫切需求能够为实际结构提供长时间连续监测的技术和方法。声发射技术作为一种重要的无损检测技术,在现代大容量计算机的支持下,其对桥梁等大型建筑物实施动态监测已成为现实^[4-5]。

2.1 桥梁结构寿命和损伤评估

人们对桥梁结构声发射与损伤之间的关系进行了诸多研究。Shigeishi 等^[6]应用声发射技术对英国一座古老的砌体拱桥进行了完整性评价,试验分别对拱桥的砌体部分和钢筋混凝土部分进行监测,发现了结构早期裂缝的发展,并根据不同位置处声发射传感器所接收到的声发射撞击累计数对声发射事件进行定位。除了上述定性研究之外,Yoon 等^[7-8]通过对韩国首尔 Dang-san 铁路桥的疲劳裂纹开展过程进行监测,得到了由焊缝开裂所产生的声发射信号,并对开裂位置进行定位。此外,他们还研究了2座钢筋混凝土桥梁在车辆荷载作用下结构的声发射参数与结构损伤水平之间的对应关系,发现借助声发射技术可以了解结构已发生的损伤。Mc Keefry 等^[9]研究了桥梁工程中H型钢梁的疲劳开裂声发射特征,发现声发射技术在定位型钢的裂缝开展及确定声发射信号与车辆荷载之间关系方面的潜力。

Suzuki 等^[10]基于声发射速率过程理论对混凝土桥墩的损伤情况进行定量评估,论证了声发射技术监测桥梁结构的可行性。朱宏平等^[11]利用损伤力学与声发射速率过程理论导出声发射特征参数与混凝土损伤量之间的关系,并通过对轴压状态下实际桥梁混凝土芯样进行声发射试验,分析了声发射凯塞(Kaiser)效应和费莉希蒂(Felicity)效应,得到混凝土的实际损伤量并评价了其受载历史。薛云亮等^[12]通过对轴压状态下岩石和混凝土材料进行声发射特性试验,研究损伤变量与声发射参数之间的关系,给出了基于Weibull分布的损伤本构模型及损伤变量与声发射计数之间的经验公式,推导出应力、应变与声发射特征参数的耦合模型,最终验证了轴压状态下岩石和混凝土的应力、应变与声发射的耦合关系。蒋志^[13]和 Roberts 等^[14]分别通过对钢筋混

凝土高架桥进行现场监测和试验研究,认为声发射技术具有监测结构破坏过程和评估结构寿命的巨大潜力。千力等^[15]通过在狮河桥现场钻取混凝土芯样,利用混凝土单轴受压时的声发射监测试验计算混凝土损伤量,论证了声发射技术在混凝土损伤定量评估中的可行性。Nair 等^[16]应用声发射技术分别对预应力混凝土桥梁和钢桥展开研究,并通过研究连续荷载作用下所累积的声发射数据来估计结构损伤情况,得出声发射作为一项无损检测技术可以连续监测和追踪桥梁等结构的健康状况的结论。

在桥梁结构损伤声发射信号滤噪处理方面,邢云等^[17]在混凝土斜拉桥工程中应用声发射技术实时监测结构的内部损伤,对裂缝的形成与发展进行观察,论证了声发射技术监测混凝土结构内部损伤的可行性。贾莉莉等^[18]采用固定阈值方式对小波分解系数进行软阈值的量化处理,发现声发射信号的小波去噪技术在提高结构健康监测准确性方面的作用。

虽然声发射技术具有良好的工程应用前景,但其应用于实际工程中还存在技术上的难题。Gong 等^[19]对几十座铁路钢桥进行声发射监测,发现了声发射技术在监测和定位裂缝等方面的潜力,同时指出声发射技术在评估钢结构构件疲劳寿命时仍面临着巨大挑战。Shigeishi 等^[20]在钢筋混凝土桥板上进行声发射监测,发现冲击载荷可产生较强的声发射活动,故在对现有混凝土桥梁进行监测时应考虑车辆运行速度的影响,同时发现移动荷载的振动模式可能会影响桥梁结构个别部位的声发射活动。

综上所述,声发射技术在桥梁结构中的应用研究主要集中在应用声发射速率过程理论对在役结构进行寿命评估,对结构损伤进行定位,以及研究声发射参数与损伤之间的关系等。研究者们都认识到声发射技术应用于桥梁工程领域的广阔前景和潜力,但也意识到该技术应用于实际工程中需要解决的具体问题,例如噪音和交通引起的振动等。

2.2 桥梁关键构件的损伤监测

各类桥梁的钢索、主缆、钢筋等是桥梁的生命线。除了对桥梁主体结构进行声发射监测之外,研究者们对钢筋混凝土桥梁内部钢筋、桥梁的悬索等关键构件损伤的监测也进行了尝试和探索。Fricker 等^[21]应用声发射技术对瑞士一座预应力钢筋混凝土桥梁的预应力筋的损伤状况进行监测,发现监测结果与结构的实际损伤状况一致。Yuyama 等^[22]采用声发射技术进行后张预应力梁的损伤监测试验,通过对声发射信号的分析,识别并精确定位了钢筋的腐蚀断裂等损伤。Mohammed^[23]在实验室进行了桥梁吊杆和拉索的钢丝断裂试验,将声发射技术与

其他方法进行比较,并制作了一种置于拉索中动态监测钢丝变化的装置。Paulson^[24]研究了应用声发射技术对悬索桥主缆和斜拉索进行长期监测的方法,并将断铅声发射信号与其他信号及噪声信号成功分离,为桥梁拉索长期损伤的声发射监测研究提供了参考依据。Piervincenzo等^[25-26]采用声发射技术对碳纤维拉索的损伤进行监测,结果发现声发射技术能够更精确地监测损伤的诱发和发展,对平行碳纤维束和碳纤维绞线的测试结果表明,声发射活性与损伤程度在达到完全破坏之前具有良好的对应关系。李冬生等^[27-29]研究了钢绞线拉伸过程中的声发射特征,推导了基于声发射参数的钢绞线损伤演化方程。另外,他们还应用声发射技术对某拱桥实际工程的所有吊杆进行了全面实时监测,并通过声发射参数和波形分析法初步得到了不同损伤类型的声发射特征。

2.3 桥梁结构声发射监测系统的布置和操作规程的研究

由于实际工程结构的体量形式各不相同,因此在声发射监测过程中必须考虑声发射采集系统的合理设置和传感器阵列的合理布置。Stepinski等^[30]采用圆形声发射传感器阵列对实际桥梁进行监测并取得了良好的效果,研究了阵元数目及声发射模拟信号频率变化对波束模式的影响。Ge等^[31]对铁路钢桥进行声发射监测,通过模拟声发射信号试验确定声发射监测阈值,设置定时参数并研究声发射信号的特征。

实际工程结构的声发射监测是一项复杂的技术工作,陈喜强等^[32]为了提高声发射技术在桥梁结构监测中的规范性,从准备工作、仪器的设置、传感器的选择和固定以及加载程序的确定等方面总结了监测规程的技术要点。Shigeishi等^[33]为了建立一套适用于长度为10~100 m的实际桥梁的声发射监测规程,应用声发射技术评估了一座已服役45 a的钢筋混凝土桥梁。

在声发射监测设备的研发方面,Grosse等^[34]认为可通过应用无线信号传输技术以及研发新型声发射传感器来降低桥梁结构声发射监测成本。Grosse等^[35]还在德国斯图加特一座钢筋混凝土桥梁中应用了无线声发射技术和声发射阵列技术,这些技术的应用进一步提高了工作效率。单宁^[36]建立了基于光纤声发射传感技术的监测系统,实现了实时在线监测混凝土桥梁健康状况的目标,并将该系统应用于结构承载能力的评估。Stajano等^[37]应用基于声发射技术的无线传感器网络系统对英国2座桥梁和伦敦1个地下隧道进行监测,通过设置网络节点实现对桥梁隧道工程的实时监测,最终发现声发射

监测实际工程具有巨大潜力。针对钢筋混凝土桥梁的健康监测,Grosse等^[38-39]研发了一种基于MEMS的无线传感网络节点——Mote,该系统集成了测试和传输功能,被应用于监测德国斯图加特1座钢筋混凝土桥梁,这种经特别设计的基于声发射技术的桥梁无线监测系统为在役公路桥梁的疲劳开裂监测提供了可行性。

由上述文献可知,研究者们已经开始将声发射技术应用于桥梁工程的健康监测,并对其可行性和可靠性进行了论证。虽然声发射技术应用于桥梁结构的实时监测还是一个挑战,但是在意识到它所具有的动态、无损伤、保持完整性等优点后,研究者们正在探索操作规程、研发新型仪器和技术方法方面仍做出了许多卓有成效的研究工作。

3 声发射技术在水利和岩土工程中的应用

在水工建筑物的安全监测方面,Minemura等^[40]应用声发射技术对混凝土拱坝冬季施工和灌浆安全进行了评价。考虑到正常频率范围的声发射信号在混凝土坝体中会有较大的衰减,采用低频的传感器(谐振频率为15 kHz)探测声发射活动。通过判断分布在混凝土坝体12个部位的传感器是否探测到异常声发射活动来评估坝体在二次冷却和灌浆过程中的安全性。

除了对水利工程中的主体结构进行安全监测之外,更多的研究者将声发射技术应用于水利工程中的边坡与护坡等岩土工程中。澳大利亚等国的一些水电大坝通过建立声发射监测系统对坝基和坝肩进行监测,为声发射技术在水利工程中的应用提供了参考依据^[41]。陈炳瑞等^[42]为了研究施工过程中的岩石损伤演化规律,在锦屏二级水电站进行声发射监测试验,论证了其应用于评价岩围损伤范围、设计现场支护措施及选取支护时机的可行性。严明等^[43]对向家坝水电站马步坎高边坡进行了声发射监测,并根据声发射监测数据对边坡岩体的稳定性进行了研究。李金河等^[44]将声发射技术应用于永久船闸爆破开挖过程的稳定性监测,指出声发射事件与开挖过程的关系,从而实现了应用声发射技术对边坡岩体稳定的评估。尹贤刚等^[45]首先通过声发射进行现场监测和预报,证实岩体在变形或破坏时都会产生声发射,继而论证了声发射技术应用于采场稳定性监测的可行性。蔡美峰等^[46]基于声发射智能耦合监测,对矿区支护的主运巷塌陷区结构失稳过程进行监测分析,分析塌陷区结构失稳过程中微破裂和声发射之间的内在联系,同时利用固体断裂非平衡统计理论进行分析与预报。

从以上文献可以看出,声发射技术已经应用于水利和岩土工程中,主要集中在施工期和运行期混凝土坝体和船闸等结构的安全监测,护坡、边坡岩体等的稳定性监测与预报,以及借助声发射技术了解岩石内部力学性质等问题。

4 声发射技术在建筑工程中的应用

声发射技术应用于建筑工程的案例并不多见,主要集中于对年代久远的建筑物进行监测评估等方面。Carpinteri 等^[47]应用声发射技术监测钢筋混凝土结构和石材古建筑,得出压应力和声发射累计数随时间的变化曲线,他们还应用声发射技术识别钢筋混凝土结构和砌体建筑物的缺陷和损伤,并基于断裂力学提出了一种分形多尺度的方法论来预测损伤和评估结构失效的时间,最终实现了对建筑物寿命的评估。Grosse 等^[35]为实现一个古老的钢筋混凝土建筑的重建,经过为期 7 d 的连续实时声发射监测,对声发射速率值以及平均频率等参数进行分析。蒋志^[13]通过对居民住宅楼进行声发射监测,利用声发射计数评估裂缝开展速度并预测裂缝的发展状况,发现在各阶段声发射计数与裂缝开展成比例关系,当裂缝发展速度最快时,声发射计数率也达到了最大值,声发射分布函数的局部极值与裂缝发展的最剧烈阶段相对应。

5 声发射技术在其他工程中的应用

Bureau 填海工程广泛使用了预应力混凝土管 (PCP),Travers^[48]采用声发射技术监测由钢绞线失效和随后滑脱所引起的 PCP 的失效过程,对被埋置管段的劣化区域进行定位。陈祥森^[49]以某核电站混凝土结构为例,不仅应用声发射技术对其进行安全性监测,还对将来其可能发生的损伤进行定位、分析和监视,以此确定各种类型的混凝土在复杂受力过程中的力学行为。Shinomiya 等^[50]将铁路混凝土结构损伤评估技术应用于一种连续的砖混拱桥结构,并在存在裂纹扩展的砖混结构中成功监测到了声发射活动,显示了声发射技术评估墩台等下部子结构的潜力。

6 结 语

纵观土木工程各领域,声发射技术已经应用于桥梁工程、水利和岩土工程、建筑工程以及其他特种工程等诸多领域,其中以桥梁工程、水利工程等大型工程中的应用居多,从中可以看到声发射技术应用于土木工程的前景和潜力,但同时也存在难题和挑战。笔者认为声发射技术在相关领域的研究热点包

括:采用声发射速率过程分析理论、声发射凯塞效应等进行结构损伤评估与寿命预测;研究声发射活动率和特征参数与结构损伤变量之间的相关性;采用声发射技术进行边坡、护坡等岩体结构的稳定性监测与预报;采用声发射源定位技术研究损伤的空间位置演化规律。声发射技术应用于土木工程所存在的问题包括:声发射传感器的布设方案和光纤、无线等新型传感器技术以及新型监测设备有待进一步研究;应用于工程实践的声发射监测操作规程不够完善,缺乏可参照的技术规程;对现场环境噪音和振动等干扰源的认识和重视不足,在如何识别背景噪音和非平稳噪音进而提高信噪比方面还需要深入研究。

参考文献:

[1] 国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材编审委员会. 声发射检测[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.

[2] 欧阳利军. 基于声发射技术的锈蚀钢筋混凝土构件黏结性能研究[D]. 南宁:广西大学, 2007.

[3] GROSSE C U. Special issue on acoustic emission[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2005, 40(1): 1-3.

[4] BENIN A V. Analysis of the acoustic emission technique used in laboratory tests of reinforced concrete structures[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2006, 42(12): 790-793.

[5] 沈建中, 李宗津, 张之勇. 土木工程中的无损检测技术及其应用[J]. 无损检测, 2000, 22(11): 497-500, 504.

[6] SHIGEISHI M, COLOMBO S, BROUGHTON K J, et al. Acoustic emission to assess and monitor the integrity of bridges[J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(1): 35-49.

[7] YOON D J, JUNG J C, PARK P, et al. AE characteristics for monitoring fatigue crack in steel bridge members[C]// AKTAM A E, STEPHEN R. Nondestructive Evaluation of Highways, Utilities, and Pipelines. Newport Beach, California: International Society for Optical Engineering, 2000: 153-162.

[8] YOON D J, PARK P, JUNG J C, et al. Assessment of integrity of concrete bridge structures by acoustic emission technique[C]// GYEKENYESI A L, SHEPARD S M, HUSTON D R, et al. Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aerospace Materials and Civil Infrastructures. San Diego: SPIE Press, 2002: 206-214.

[9] Mc KEFFRY J, SHIELD C. Acoustic emission monitoring of fatigue cracks in steel bridge girders[R]. St Paul: University of Minnesota, 1999.

[10] SUZUKI T, OBTSU M. Quantitative damage evaluation of structural concrete by a compression test based on AE rate process analysis core test of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(3): 197-202.

[11] 朱宏平, 徐文胜, 陈晓强, 等. 利用声发射信号与速率过程理论对混凝土损伤进行定量评估[J]. 工程力学, 2008, 25(1): 186-191.

- [12] 薛云亮,李庶林,林峰,等.类岩石材料声发射参数与应力和应变耦合本构关系[J].北京科技大学学报,2011,33(6):665-670.
- [13] 蒋志.声发射技术在混凝土结构探伤和评估的应用[J].沿海企业与科技,2007(9):22-26.
- [14] ROBERTS T M,TALEBZADEH M. Acoustic emission monitoring of fatigue crack propagation[J]. Journal of Constructional Steel Research,2003,59(6):695-712.
- [15] 千力,朱宏平.基于声发射技术的混凝土损伤评估[D].武汉:华中科技大学,2005.
- [16] NAIR A,CAI C S. Acoustic emission monitoring of bridges: review and case studies[J]. Engineering Structures,2010,32(6):1704-1714.
- [17] 邢云,杨玉泉,翁思熔.采用声发射无损检测混凝土索塔抗裂性能研究[J].中国市政工程,2008,133(3):37-39.
- [18] 贾莉莉,王汝笠.钢筋混凝土材料损伤的声发射信号处理[J].科学技术与工程,2009,9(14):4234-4237.
- [19] GONG Z, NYBORE E O, OOMMEN G. Acoustic emission monitoring of steel railroad bridges[J]. Materials Evaluation, 1992,50(7):883-887.
- [20] SHIGEISHI M, MAKIZUMI T, JO H, et al. AE monitoring of a reinforced concrete road bridge[R]. Edinburgh:Transportation Research Board,2003.
- [21] FRICKER S, VOGEL T. Site installation and testing of a continuous acoustic monitoring[J]. Construction and Building Materials,2007,21(3):501-510.
- [22] YUYAMA S, YOKOYAMA K, NIITANI K, et al. Detection and evaluation of failures in high-strength tendon of prestressed concrete bridges by acoustic emission[J]. Construction and Building Materials,2007,21(3):491-500.
- [23] MOHAMMED R. An insight into the NDT of steel cables by acoustic emission [C]//NAIR C G K. Trends in NDE Science and Technology:Proceedings of the 14th World Conference on Non-Destructive Testing. New Delhi:Pennsylvania State University,1996:201-210.
- [24] PAULSON P O. Continuous acoustic monitoring of suspension bridges and cable stays [C]//MEDLOCKR D, LAFFREY D C. Structural Materials Technology III. San Antonio:SPIE Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers,1998:205-213.
- [25] PIERVINCENZO R, FRANCESCO L S. Acoustic emission monitoring of CFRP cables for cable-stayed bridges [C]//CHASE S B, AKTAN A E. Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems. Newport Beach, California: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers,2001:129-138.
- [26] PIERVINCENZO R, FRANCESCO L S. Acoustic emission monitoring of carbon-fiber-reinforced-polymer bridge stay cables in large-scale testing [J]. Experimental Mechanics, 2001,41(3):282-290.
- [27] 李冬生,欧进萍.钢绞线拉伸过程中的声发射特征及其损伤演化模型[J].公路交通科技,2007,24(9):57-60.
- [28] LI D S, OU J P. Acoustic emission monitoring and critical failure identification of bridge cable damage [C]//SHULL P J, WU H F, DIAZ A A, et al. Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security. San Diego:SPIE Press, 2008:1-5.
- [29] 李冬生,欧进萍.声发射技术在拱桥吊杆损伤监测中的应用[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2007,23(1):7-10.
- [30] STEPINSKI T, ENGHOLM M. Uniform circular array for structure health monitoring of composite structures [C]//KUNDU T. Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2008. San Diego:International Society for Optical Engineering,2008:1-11.
- [31] GE Ruo-dong, YU Ai-ping, LU Hai-bo. The setting of acoustic emission detecting parameters in running of steel structured [C]//WEI Zhang, LIN Li, GE Ruo-dong, et al. 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Hohhot:United States Institute of Electrical and Electronics Engineers,2011:3696-3699.
- [32] 陈喜强,王志强.桥梁结构声发射现场检测方法探讨[J].科技创新导报,2009,32:244-245.
- [33] SHIGEISHI M, OHTSU M. Applicability of damage estimation based on acoustic emission activity under loading to a practical reinforced concrete bridge [C]//Proceeding of IABMAS: Bridge Maintenance, Safty, Management and Cost. London:Taylor & Francis Group,2004:797-798.
- [34] GROSSE C U, FINCK F, KURZ J H, et al. Monitoring techniques based on wireless AE sensors for large structures in civil engineering [C]//EWGAE 2004 Proceedings Session: Calibration of Sensors, Equipment. Berlin:EWGAE,2004:691-698.
- [35] GROSSE C U, OHTSU M. Acoustic emission testing [M]. Berlin:Springer Berlin Heidelberg,2008.
- [36] 单宁.基于光纤声发射传感技术的桥梁监测实验研究[J].压电与声光,2011,33(2):183-187.
- [37] STAJANO F, HOULT N, WASSELL I, et al. Smart bridges, smart tunnels:transforming wireless sensor networks from research prototypes into robust engineering infrastructure[J]. Ad Hoc Networks,2010,8(8):872-888.
- [38] GROSSE C U, GEHLEN C, GLASER S D. Advances in construction materials 2007[M]. Berlin:Springer Berlin Heidelberg,2007:549-561.
- [39] GROSSE C U, GLASER S D, KRUGER M. Condition monitoring of concrete structures using wireless sensor networks and MEMS [C]//TOMIZUKA M, YUN Chung-bang, VICTOR G, et al. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems. San Diego:SPIE Press, 2006:1-12.
- [40] MINEMURA O, SAKATA N, YUYAMA S, et al. Acoustic emission evaluation of an arch dam during construction cooling and grouting[J]. Construction and Building Materials,1998,12

[41] 王明,李庶林.声发射技术在结构安全监测中的研究与应用概述[C]//梁益,陆新征,缪志伟,等.第六届全国工程结构安全防护学术会议论文集.洛阳:中国力学学会,2007:201-207.

[42] 陈炳瑞,冯夏庭,肖亚勋,等.深埋隧洞 TBM 施工过程围岩损伤演化声发射试验[J].岩石力学与工程学报,2010,29(8):1562-1569.

[43] 严明,苗放,王士天,等.岩体声发射监测在马步坎高边坡岩体稳定研究中的应用[J].地质灾害与环境保护,1998,9(1):29-33.

[44] 李金河,玉国进.永久船闸边坡稳定性声发射监测[J].岩土力学,2001,22(4):478-480.

[45] 尹贤刚,李庶林.声发射技术在岩土工程中的应用[J].采矿技术,2002,2(4):39-42.

[46] 蔡美峰,来兴平.声发射在复合材料支护采空区非线性

动力失稳监测中的应用[C]//窦林名,刘祖典,李银平,等.中国岩石力学与工程学会第7次学术大会论文集.西安:中国岩石力学与工程学会,2002:672-675.

[47] CARPINTERI A, LACIDOGNA G, PUGNO N. Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006,74(1/2):273-289.

[48] TRAVERS F A. Acoustic monitoring of prestressed concrete pipe [J]. Construction and Building Materials, 1997, 11 (3): 175-187.

[49] 陈祥森.混凝土缺陷无损检测技术发展现状综述[J].福建建材,2007,2(1):36-37.

[50] SHINOMIYA T, NAKANISHI Y, MORISHIMA H, et al. Damage diagnosis technique for brick structures using acoustic emission [J]. Journal of Acoustic Emission, 2003, 20: 145-152.

(收稿日期 2012-12-01 编辑 骆超)

(上接第 62 页)

的温度分量影响程度介于上述两种类型之间,其中温度分量对 PRC9 的影响幅度为 20.6 ~ 29.6 MPa。可见温度分量对各锚杆应力计均产生不同程度的影响,且定量分析的结果与前述定性分析一致。

c. 时效分量影响分析。时效分量在各锚杆应力回归模型中所占比例均相对较高,但时效分量的变化趋势随锚杆应力计的类型不同而有所不同。在温度应力为主型的锚杆应力计埋设初期,时效分量有所增长,但其随时间推移逐渐稳定并收敛,且不断衰减。而对于变形应力为主型和变形与温度共同作用型的锚杆应力计,时效分量逐月增大,其中锚杆应力计 PRC7 及 PRC9 的时效分量已开始表现出收敛趋势,而锚杆应力计 PRC2 及 PRC3 的时效分量仍处在不断增大状态,说明其岩体有轻微滑移趋势,尚未稳定,因此建议加强这些测点部位岩体的监测。

4 结 语

坝后厂房高边坡的稳定与否直接关系到电站厂房的安全,采用多元线性回归方法对高边坡锚杆应力进行分析,是对常用边坡数值分析方法的有效补充,可以在资料分析初期快速查找锚杆应力主要成因,有效判断边坡岩体稳定状态,及时发现和排除隐患。分析结果表明 龙江水电站坝后厂房高边坡总体趋于稳定,但部分以变形应力为主型锚杆应力计所在岩体存在轻微滑移趋势,建议加强监测,且着重关注锚杆应力变化是否逐渐减弱或趋于收敛稳定。

参考文献:

[1] 梁茂田,黎勇.非连续变形计算力学模型在岩体边坡稳定性分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2000,19

(3):289-294.

[2] 王庚荪.边坡的渐进破坏及稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2000,19(1):29-33.

[3] 张季如.边坡开挖的有限元模拟和稳定性评价[J].岩石力学与工程学报,2002,21(6):843-847.

[4] 赵尚毅,邓卫东.用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(2):254-260.

[5] 朱维申,程峰.能量耗散本构模型及其在三峡船闸高边坡稳定性分析中的应用[J].岩石力学与工程学报,2000,19(3):261-264.

[6] 黄润秋.岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J].岩石力学与工程学报,2008,27(8):1525-1544.

[7] 庄晓莹,蔡永昌,朱合华.锚固边坡稳定性分析有限元模型及锚固效应的探讨[J].岩土工程学报,2008,30(7):1099-1104.

[8] 夏元友,李梅.边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2002,21(7):1087-1091.

[9] 高大水,曾勇.三峡永久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析[J].岩石力学与工程学报,2001,20(5):653-656.

[10] 云南龙江水电站枢纽工程第一次阶段性蓄水安全鉴定报告[R].南京:南京水利科学研究院,2009.

[11] 云南龙江水电站枢纽工程第二次阶段性蓄水安全鉴定报告[R].南京:南京水利科学研究院,2010.

[12] 龙江水电站枢纽工程大坝安全监测设施及监测资料分析报告[R].南京:南京水利科学研究院,2010.

[13] 刘祖强,廖勇龙,朱全平.三峡永久船闸一期高边坡监测锚杆应力分析[J].长江科学院院报,2004,21(1):40-42.

[14] 何晓群,刘文卿.应用回归分析[M].北京:中国人民大学出版社,2001.

[15] 吴中如.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].北京:高等教育出版社,2003.

(收稿日期 2011-11-28 编辑 周红梅)