

# 水工混凝土结构检测与评估技术

科海利 岳跃真、黄昊、李萌、孟丽娟

## 1 学科方向

国际上,主要发达国家的水利水电工程开发已达到很高的水平,如美国、加拿大等国家的水电开发程度均超过 70%,现阶段研究的重点已转移到在役大坝的安全评估、寿命预测、风险分析与管理、溃坝的风险预测与评估等<sup>[1-2]</sup>。水工混凝土结构的检测技术与方法涉及到声波、弹性波、电磁学、CT 技术、代数重建技术(ART)、图像学技术等,水工结构的安全评估则涉及到弹性力学、塑性力学、损伤力学、数值计算、模糊数学、神经网络、基于知识的专家系统、工程地质等。因此,水工混凝土结构的检测与评估已成为一门紧密结合水利水电工程实践、交叉性很强的综合应用学科领域,近年来已引起了世界多个发达国家的重视,并被列入优先发展的研究领域和优先培育的高新技术产业之一。因此,如何通过一定的检测手段来判断和评估结构的健康状况、安全水平及预测剩余寿命是当前国际上的一个研究热点。

## 2 调研背景概述

目前,全国已建成水库 98002 座,其中坝高 15m 以上的大坝 25000 余座,建成大中型水闸近 4000 座及其它众多的水工建筑物。在已建的大坝及水闸中,混凝土建筑物数量众多,混凝土建筑物的安全和耐久性影响着枢纽工程的安全。因此,迫切需要对服役水工混凝土建筑物的运行状况、结构性态等进行检测与监测,探清其存在的安全隐患及缺陷,正确分析缺陷的成因,对大坝等结构的安全状况予以评估,为工程的安全和持久的运用提供技术支撑。

近年来,国际上对大坝的老化、安全评估、修复及风险分析与管理给予了高度重视,国际大坝会议多次将其列为重要议题进行交流<sup>[3-7]</sup>。过去我国较多关注大坝等水工混凝土结构的设计和施工质量,对在役大坝等水工混凝土建筑物的老化与病变机理、诊断与安全保障技术的研究方面则相对落后。随着建于上世纪 50~70 年代水工工程运行年限的延长,工程的老化病害不断加剧,对工程安全的影响和效益的发挥影响越来越大。水工混凝土建筑物老化的性状、老化的过程及寿命预测、老坝的安全评估引起了越来越多的关注<sup>[8-10]</sup>。

在水工混凝土建筑物混凝土质量与老化性状的检测方面,目前国内广泛开展的工作包括混凝

土的强度、内部质量均匀性、混凝土内部缺陷、裂缝深度、混凝土碳化深度、钢筋保护层厚度、钢筋锈蚀及混凝土耐久性的检测，特殊情况下，还进行混凝土弹性模量、抗拉强度、极限拉伸等力学性能的检测及混凝土结构脱空的检测等。这些检测的方法大多已列入规范<sup>[11]</sup>，并在水利水电工程建设的质量控制方面和对混凝土建筑老化病害的检测与评定方面发挥了重要作用。但这些检测方法在应用中存在着检测范围有限、检测精度不高和检测效率低等问题，不能满足评估水工混凝土建筑物老化病害状态和程度、从而评估结构安全水平的需要。近年来，随着现代科学技术的发展，特别是检测技术与计算机技术、图像技术的耦合，国际上新的混凝土结构无损检测手段和检测方法不断涌现，我国的技术人员在不断地学习、引进和吸收，以期不断提高我国水工混凝土结构的检测技术和水平。

水工混凝土建筑物的安全评估贯穿于结构的设计、施工及运行的整个过程中。在施工阶段，当工程的地质条件、材料强度、施工质量等与设计要求不同时，对这些条件的改变是否影响结构的安全需进行必要的评估；在运行期，每隔一段时间，要根据对建筑物状况检测的成果结合建筑物的运行条件等实际情况对建筑物的安全性进行评估。

服役水工混凝土建筑的安全评估包括进行正常使用性评估、安全性评估、耐久性评估等 3 个方面。安全性评估是对结构承载能力极限状态的评估，即对结构构件达到最大承载能力状态的评估；正常使用性评估是对水工结构特别是钢筋混凝土结构正常使用极限状态的评估，即对结构构件达到正常使用的某项规定的限值的评估；结构耐久性指结构抵抗老化的能力。老化是指随着时间的推移，材料因物理过程（如混凝土开裂、磨损、冻融循环等）、化学过程（如混凝土碳化、钢材锈蚀等）导致的性能劣化。水工结构耐久性评估指对结构构件的某项耐久性指标规定的限值的评估。

对水工钢筋混凝土结构，目前安全性评估的通常做法是采用现行的规程规范进行复核算，这样的评估不能反映建筑物真实的应力状态。水工钢筋混凝土结构的耐久性评估涉及因素众多，对单因素的评估有些规程规定<sup>[12]</sup>，但缺乏综合因素的耐久性安全评估的方法，需借鉴国内其它行业的有关成果<sup>[13]</sup>和国外的成果逐步建立。

对混凝土大坝的安全评估，国内高度重视。混凝土坝的安全评估涉及因素众多，包括设计因素、施工质量、运行条件、地质条件、基础处理情况、老化病害程度、地震等。问题很复杂，研究方法手段众多。我国在水工程结构性态和病变机理分析与模拟的理论与数值分析的研究方面，处于国际先进水平。目前常用的研究方法是在监测与检测及室内外试验成果的基础上，采用弹性力学、断裂力学、损伤力学、强度理论、仿真分析与反分析等方法对混凝土大坝的结构性态

及安全状况进行分析与评估,取得了丰富的成果<sup>[14~17]</sup>,基于并行计算的大规模结构分析技术和虚拟现实等图像技术也开始了应用。

综上所述,我国在水工混凝土结构的检测技术和安全评估技术研究方面取得了较大的进步,但在某些方面,如新检测方法与设备的开发、大坝的安全耐久性评估、大坝的风险分析与控制等,尚有一定的差距。为在基本理论与分析方法、检测与监测、试验等方面开展水工混凝土结构病变机理分析与安全评估的自主创新研究,促进我国水工程安全技术的进步,有必要全面了解在这些方面国际上的发展状况及其新思想、新概念、新理论和新技术,以期为我所借鉴。

本次调研材料的主要来源如下:

- (1) Proceedings of ICOLD.
- (2) Journal of Nuclear Engineering and Design
- (3) ACI Materials Journal
- (4) 2000 Annual Book of ASTM Standards
- (5) Journal of NDT&E International
- (6) Journal of Construction and Building Materials
- (7) Journal of Cement and concrete research
- (8) Journal of Corrosion science
- (9) Journal of Computer & Structures
- (10) Magazine of Concrete Research
- (11) Journal of Structural Engineering
- (12) ASCE(American Society of Civil Engineers) International Workshop on Computing in Civil Engineering; 20070724-27; Pittsburgh, PA(US)
- (13) ACI Structural Journal
- (14) Journal of Materials in Civil Engineering
- (15) Journal of Bioscience
- (16) US Society for dams & Acres International [C]
- (17) 大坝与安全
- (18) 工程力学
- (19) 水利水电技术
- (20) 中国水运

- (21) 公路交通技术
- (22) 铁道建设
- (23) 工程质量
- (24) 计算机工程与应用
- (25) 大坝观测与土工测试
- (26) 仪器仪表学报
- (27) 声学技术
- (28) 水力发电技术
- (29) 人民长江
- (30) 岩石力学与工程学报
- (31) 水利学报
- (32) 计算力学学报
- (33) 水利水运工程学报
- (34) 计算机辅助设计与图形学学报
- (35) 水电能源科学
- (36) 水力发电学报
- (37) 中国科学技术科学
- (38) 国内会议论文集及博士、硕士论文等。

### 3 当前学科发展新动向和值得关注点

#### 3.1 本学科发展的新方向和值得关注点

水工混凝土结构的老化病害及缺陷检测的检测技术及检测设备不断发展。针对钢筋混凝土结构,检测主要的关注点为钢筋锈蚀程度、混凝土强度及侵蚀性介质的侵蚀;对大体积混凝土结构,如大坝,重点关注的是混凝土强度、深层裂缝深度及发展趋势、混凝土内部的缺陷等。这些方面不仅仅是涉及到结构耐久性的问题,主要是关系到结构的承载能力。下面重点介绍这些方面的研究进展情况。

##### 3.1.1 混凝土坝裂缝的检测

混凝土坝的裂缝普遍存在,几乎是无坝不裂。严重裂缝会破坏结构的整体性,影响结构的耐

久性，还会引起渗漏等，因此，工程界对混凝土裂缝、特别是混凝土坝的深层裂缝非常重视。裂缝的检测包括裂缝的分布、走向、宽度及深度，其中裂缝的深度对工程安全影响较大，且检测困难。

混凝土坝的裂缝检测目前国内外主要采取钻孔取芯结合无损检测的方式进行，钻孔取芯是最直观、最有效的方法，检测时沿裂缝骑缝钻孔取芯、压风、注水、孔内电视录像、物探，追踪裂缝的发展。取芯法检测裂缝深度及发展对结构破坏较大，且费时费力，另外，需要在相邻钻孔之间对裂缝的性态进行推断。混凝土裂缝的无损检测方法有超声波法、表面波法、声波、物探方法等。无损检测方法的特点是快速、方便、省事省力，对结构不造成损伤，但无损检测的结果受钢筋、缝内填充物、缝内干湿状况等的影响，因此，目前还无法完全依靠无损检测的手段检测混凝土坝的深层裂缝。在今后一段时间内，国内外仍将采取钻孔取芯结合无损检测的方式检测混凝土大坝的深层裂缝，但随着无损检测技术和设备的发展，钻孔取芯的数量将不断减少。

在国际上近期发表的刊物中，有 4 篇文章涉及到混凝土裂缝的检测<sup>[18-21]</sup>。Ichiro Komura<sup>[18]</sup>采用相控天线超声和电磁技术检测核电站混凝土壳的裂缝，相对于传统的超声波技术，该方法采用具有 256 相的天线超声技术，被测区域具有更好的射束转向和聚焦 (beam steering and focusing)，实时形成光束扫描图像，而不是进行机械扫描 (mechanical scanning)，裂缝测量速度更快速、精度更高。M. Goktepe<sup>[19]</sup>采用巨型磁阻传感器 (giant magnetoimpedance) 无损测量裂缝深度。堤知明、吴家晔<sup>[20]</sup>提出了一种基于弹性波的混凝土裂缝的无损检测技术，该方法也简称为瞬态表面波法，该方法除了利用弹性波的传播时间外，更重要的是有效的利用了瑞利波的衰减特性，并采用了特殊的误差处理技术，大大地提高了测试范围和测试精度。作为 McGill 大学与 Quebec 电力研究机构的 (IREQ) 长期研究项目，Guevremont, Philippe Gregory (Canada)<sup>[21]</sup>提出小型地震反射系统 (MSR 冲击回波) 的理论和实践方法，通过一个检测面的检测能评估出裂缝的剖面 and 混凝土质量，主要用于检测大体积混凝土结构的裂缝，在某混凝土重力坝上进行了试验检验。Jason D<sup>[22]</sup>比较了采用非线性超声试验方法与 ASTM 试验方法在检测混凝土早期损伤方面的有效性，研究表明非线性超声方法在发现混凝土早期损伤方面是一个很好的无损方法。

在国内混凝土裂缝深度的无损检测中，超声波法是最早应用，目前也是应用最广泛的方法，在国内有关规范中<sup>[11]</sup>作为混凝土裂缝深度的检测方法。超声波检测裂缝深度有平测法、对测法、斜测法及钻孔测法。平测法适用于只有一个检测面，对、斜测法测量混凝土裂缝深度适用于有条件开展两面对测或可钻孔对测的混凝土建筑物。对于有条件两面对测的结构，如梁、墩、墙体，可采用两面斜测法，对于没有条件两面对测但可钻孔对测的结构，如坝体、底板、廊道等，可采

用钻孔对测法。肖国力<sup>[23]</sup>在水东大坝坝顶裂缝检测中,采用超声波平测法、钻孔对测法,结合孔内压水试验和孔内电视,进行了裂缝深度检测,检测的代表性裂缝的深度为3.8m、3.1m及4.6m,检测的另一条裂缝的深度大于5.0m。

影响超声波检测混凝土裂缝深度精度的因素主要有两个:一个是裂缝内充有水或其它杂质,裂缝基本处于闭合状态;另一因素是缝内有钢筋穿过。这样脉冲波经缝内杂质或钢筋耦合后直接穿过裂缝到达接收换能口,因此,采用超声波法测量具有这两种情况的裂缝深度时其结果会有一定的偏差,对于充分水饱和的裂缝,超声波测试甚至是无效的。

表面波法是国内近年来开发的检测混凝土裂缝深度的一种方法。表面波是指介质表面受到冲击时产生的沿介质表面传播的弹性波,也称瑞利波(Rayleigh Wave)或R波。在理想半无限弹性体表面点震源发振时,所产生的各成分弹性波的分配比率大概是P波(纵波)7%,S波(横波或剪切波)26%,R波(瑞利波)67%。R波能量最大,相比P波和S波,R波的衰减要小得多。吕小彬<sup>[24]</sup>、刘锋<sup>[25]</sup>对该法进行了研究,采用该法检测了国内几个水利水电工程混凝土裂缝的深度。该方法的测试原理是打击锤在结构物上激振产生的弹性波传播时,经过裂缝尖端衍射通过,通过测试衍射波在裂缝左右能量的衰减大小来确定裂缝的深度。能量衰减越大,裂缝深度越大。瞬态表面波法检测混凝土裂缝深度一般在2m以内。

姚成林、张震夏<sup>[26]</sup>开发的单脉冲表面波法(稳态表面波法)检测混凝土裂缝的技术,该法既能检测开口缝,也能检测平面接合缝(裂缝在混凝土内部,与混凝土表面平行或近似平行)。与传统的超声纵波散射法相比,应用表面波检测混凝土裂缝深度具有一系列的优越性。检测深度大大提高;检测结果不受缝中有水及其它充填物的影响;可以检测各种不同类型的缝。和瞬态面波相比,采用可控震源及单频脉冲波,检测精度大大提高。该方法已在丰满水电站<sup>[27]</sup>、陈村水电站<sup>[28]</sup>等混凝土坝的裂缝检测中得到成功应用,检测的裂缝深度为3.7~7.0m。

国内近年来亦采用物探方法检测混凝土坝的裂缝深度,声波穿透法是主要采用方法。声波穿透法是采用脉冲波在同等混凝土中的传播,测试声波在混凝土中的波速,首波振幅和频率等声学参数的相对变化,通过其参数的变化来判断混凝土中的裂缝等缺陷及发展的部位。扬正刚<sup>[29]</sup>研究了采用声波穿透法检测大坝裂缝深度及分布的方法,包括检测布置、检测中声波波速、波幅和声波频率的判断问题,并结合四川武都水库大坝震后裂缝的深度进行了检测。采用声波穿透法检测裂缝深度时钻孔的布置与超声钻孔对测法有些类似,声波穿透钻孔间距宜小于1.5m,否则声波波速对裂缝不敏感。丹江口大坝加高前在对老坝裂缝的检查中<sup>[30]</sup>,对深度大于4m的裂缝,亦采用声波穿透与孔内电视相结合的方式检测裂缝的深度与分布。声波孔直径一般为76mm,钻孔

完成后在孔内同高程安设声波发射和接收探头,采用专门设备进行裂缝检测。对于坝体深部裂缝,为观察检查孔内揭示的裂缝状况,采用孔内电视方法探测裂缝深度及宽度,孔内电视检查孔孔径一般为91~150mm。

混凝土坝上游面的裂缝对大坝的安全影响较大,其裂缝深度的检测更有意义。水下裂缝的检测一般选择在枯水期降低水位时进行。但对有些工程,无法通过降低库水位实施检测,检测只能在水下进行。水下检测难度较大,目前国内外普遍采用通过人工检测配合水下摄像的方式检测裂缝的位置、长度等,裂缝深度检测国内外尚无成熟可靠的方法,一般通过上游面裂缝的分布特征、廊道渗水析钙等情况及排水孔渗水情况判断裂缝的发展深度。在近期外文文献中,未看到有关的研究成果。张震夏<sup>[31]</sup>提出了水下裂缝深度的检测方法,该方法采用横波VSP法检测,研究了用横波检测水平裂缝的机理,证明了用横波检测比用纵波检测明显提高分辨率,再与VSP结合即可检测混凝土坝上游面的水下裂缝。研发了电火花声波检测系统,该系统发射头能同时发射P波及SV波。应用此声波系统在丰满大坝上进行了试验性检测,检测出三条水平裂缝的深度分别为8m、3.7m及4m。此系统存在的主要缺点是声波发射频率较低,需进一步提高声波震源的发射频率。

三峡大学的王健<sup>[32]</sup>在其硕士论文中亦研究了基于图像处理的混凝土坝水下表面裂缝检测技术。水下图像具有低对比度和成像质量差的特点,欲从水下图像中准确获得混凝土坝水下表面裂缝信息,需要开发满足水下环境的图像去噪-增强-分割-裂缝识别算法。通过研发,开发了一种自适应加权滤波算法,具有更好的去噪和保护图像细节的能力;改进了一种巴特沃兹同态滤波增强算法,能有效地提高图像对比度;开发了一种多结构多尺度形态学边缘检测方法,检测的边缘信息更多且更连续;提出了一种裂缝识别方法。实验结果表明,该方法裂缝识别率可以达到98.3%,裂缝识别效果比较好。该方法主要是检测与识别大坝上游面水下裂缝,但无法检测裂缝的深度。

综上所述,混凝土坝裂缝深度的检测在今后一段时间仍将采用无损检测与钻孔检测相结合的方法进行,今后关注的重点和研发方向是改进无损检测的技术,完善设备,提高混凝土坝裂缝深度检测的精度和适应性;另外,进一步发展与完善混凝土坝水下裂缝检测的技术,并争取通过实际工程中应用进行检验。

### 3.1.2 混凝土强度和内部质量的检测

对服役大坝等混凝土结构,其安全评估的基础是了解混凝土的强度、内部质量状况。对混凝

土强度与质量状况的检测最早采用取芯的方法,对钻取的芯样开展抗压、抗拉及弹性模量等试验。目前,钻芯法检测混凝土的强度仍是工程上最常用的方法,丹江口大坝的质量检测(2010)<sup>[30]</sup>及陈村拱坝的质量检测(2005)<sup>[28]</sup>均大量采取钻孔取芯的方式评估混凝土的强度和内部质量。钻孔取芯法虽可准确、直观检测混凝土的强度及质量状况,但毕竟是点的检测,且对坝体造成损伤,不宜取芯太多,因此难以对大坝全面的质量(强度及内部缺陷)进行检测与评估。随着检测技术与计算机技术的发展,未来大坝混凝土全面的质量检测与评定将更多依据无损检测技术。

对国际文献进行检索,关于混凝土质量检测所收集到的文献有7篇,发表时间集中于2000年~2005年,涉及的检测技术有:利用剪切波的反射方法监控Portland水泥砂浆的特性<sup>[33]</sup>,采用超声波反射技术研究温度对水泥基材料强度评估的影响<sup>[34]</sup>,Hoi-Keun Lee<sup>[35]</sup>采用冲击回波的方法研究普通混凝土和高强混凝土早龄期的强度,通过对不同水灰比(0.27~0.58)混凝土试验进行抗压强度试验和采用冲击回波的方式测试波速,根据试验结果,提出了考虑水灰比影响及养护龄期的混凝土波速与强度的关系,孙其臣与吕小斌<sup>[43]</sup>开展了类似的工作,采用不同的骨料级配及水灰比进行试验,建立了混凝土强度与冲击弹性波波速之间的关系。文献<sup>[36]</sup>通过试验建立了预测混凝土脉冲波速的数学模型,试验中考虑了骨料含量及水灰比的变化,分析了配合比及水泥石、砂浆及骨料脉冲波速对混凝土波速的影响。文献<sup>[37,39]</sup>论述冲击回波法检测的基本方法,Yu-Feng Lin<sup>[38]</sup>采用冲击回波的方法评估钢筋混凝土中钢筋与混凝土界面的粘结强度,试验中制备了5种不同粘结情况的试件,首先采用冲击回波试验无损评估钢筋-混凝土的粘结,然后通过荷载试验确定试验的粘结强度,试验结果表明钢筋与混凝土界面正常与非正常粘结情况时冲击回波的相应有很大差异,冲击回波技术能定量的检测钢筋与混凝土界面间的破坏情况。Takeshi Watanabe<sup>[40]</sup>则论述了采用冲击回波法检测混凝土板内的孔洞。我国近年来对采用冲击回波法检测混凝土的质量进行了大量的研究,文献<sup>[44~46]</sup>采用冲击回波法检测了预应力孔道灌浆的质量,徐教宇<sup>[47]</sup>采用冲击回波法检测地下连续梁的厚度及成墙质量。冲击回波法主要用于检测非大体积混凝土结构的厚度及内部质量,对大坝等不适用。

文献<sup>[41,42]</sup>则采用地质雷达CT检测大坝隐患。探地雷达是利用高频电磁脉冲波的反射原理来探测地下目的物及地质现象,国内地质雷达检测主要采用反射成像方法,而CT方法还处于研究之中。国外已经开始将地质雷达CT用于大坝隐患检测<sup>[34,35]</sup>。地质雷达CT发射高频电磁波,高频电磁波在介质中衰减较快,尤其是当介质含水率较高时,其衰减非常快,因而地质雷达CT的探测距离有限。探地雷达的成像方法也可分为基于射线理论的图像重建技术和基于波动方程反演的散射(或衍射)图像重建技术。由于电磁波在介质中的传播非常复杂,目前,人们主要采用射



线理论进行图像重建。地质雷达 CT 以振幅反演成像为主，辅之以走时反演成像。地质雷达 CT 的分辨率较高，但是，电磁波的相关物理量不能与大坝材料强度等物理量直接建立起关系，因而，探地雷达 CT 仅可探测其内部的空洞、蜂窝等，不能直接用于检测大坝材料强度较低的区域。高频电磁波的衰减系数和速度不仅与材料特性相关，而且受材料含水率的影响很大。材料含水率较小的变化，能引起电磁波衰减系数和波速较大的变化。因而，可以将地质雷达 CT 用于大坝坝体及坝基渗漏、破碎带和裂隙发育程度等检测。

超声法亦用于检测混凝土强度与内部质量，已列入规程规范<sup>[48]</sup>，超声波（ $\geq 20\text{kHz}$ ）可得到较高的分辨率，但高频衰减严重，传播距离受到限制，为提高传播距离而加大功率，又会引起余振加大，造成首波难以读取，因此，对大体积混凝土如大坝等的检测，常规的超声波检测方法无法应用。陈卫宏<sup>[49]</sup>将超声波速度层析成像技术应用于混凝土内部缺陷检测中，论证了超声波技术在缺陷检测中的可行性。王浩全<sup>[50]</sup>针对超声波在混凝土检测中存在的问题，采用了一种新的超声 CT 阵列检测方法。在研究超声在混凝土中传播特性的基础上，将射线追踪算法引入到层析成像中，对线阵式 SIRT 重建算法进行了改进，实现了环绕面阵式 SIRT 算法重建。通过数值仿真表明：采用上述方法能够明显改善层析成像效果。

近年来国内外广泛开展 CT (Computerized Tomography) 检测技术的研究与开发。CT 检测技术是指在不破坏物体结构的前提下，根据在物体周边所获取的某种物理量（如波速、X 线光强）的一维投影数据，运用一定的数学方法，通过计算机处理，重建物体特定层面上的二维图像，并依据一系列二维图像构成三维图像的技术。它可以定量地反映出物体内部材料性质分布的结构图像<sup>[52]</sup>。大坝 CT 是利用某种波在坝体中传播的若干条射线束，在探测区内部构成切面，根据切面上每条穿过探测区的波初至信号，利用计算机进行数学方法处理，重建探测区大坝混凝土弹模分布或强度分布，以定量地反映坝体混凝土材料性质的分布情况和老化、病害及缺陷部位，达到大坝检测的目的<sup>[54]</sup>。根据 CT 的物理原理分类，可将大坝 CT 分为大坝弹性波 CT、电磁波 CT<sup>[55,59]</sup>。弹性波 CT 相对较成熟，20 世纪 80 年代，意大利率先将弹性波 CT 技术用于大坝性态诊断，目前已完成一百多座大坝的 CT 成像，初步建立了大坝 CT 体系。日本、美国等也开展了大坝 CT 的研究。我国上世纪 90 年代开始大坝 CT 的研究，并对丰满大坝进行了实验性 CT 诊断。大坝弹性波 CT 目前仍处于研究开发的初期，在实际工程应用进行实验性应用。电磁波 CT 包括大坝地质雷达 CT 和大坝常规电磁波 CT，常规电磁波 CT 与大坝地质雷达 CT 的区别主要是检测设备及频率范围不同，常规电磁波 CT 的电磁波频率一般低于 50MHz，探测深度可达几十米，但精度较低。如前所述，电磁波 CT 无法用于检测大坝混凝土材料强度等材料力学性能。

大坝弹性波 CT 根据震源的不同, 又分为声波 CT、地震波 CT、冲击弹性波 CT 等。各种 CT 检测技术均是通过测定混凝土内的波速分布, 利用波速分布的均匀性及波速与混凝土强度、弹性模量的相关关系, 评价混凝土内部质量的均匀性及推求混凝土的强度、弹性模量, 诊断混凝土坝内的质量缺陷。

大坝声波 CT 是基于声波在坝体中传播时, 其传播速度与坝体老化程度、损害及缺陷等受损程度密切相关来进行隐患检测的。在大坝适当位置布置若干发射点(震源)和若干接收点(震源监视器), 依次激发各震源后, 在各接收点记录声波从各发射点到各接收点的走时(即传播时间), 然后通过两点间的已知距离计算坝内各点上的波速。由于波速与材料弹性有关, 因此可以通过波速了解坝体材料性态和老化缺陷分布情况。大坝地震波 CT 及冲击回波 CT 的原理基本相同。

大坝声波 CT 系统包括检测设备和计算机设备, 其中检测设备包括发射、接受和记录三个主要部分, 计算机设备包括计算机硬件及软件。发射部分由动能源和驱动装置组成, 动能源用于产生弹性波, 它根据检测目标, 可布置在坝面、钻孔内等, 起震后能立即产生弹性波在被测物体中传播。大坝 CT 的主要动能源是电雷管或炸药, 也可采用电火花发生器或锤击产生。接受设备是能感知震波的拾震传感器以及水下测音器。计算机软件是大坝 CT 检测关键技术, 它具有检测控制、反演计算、图形输出及成果处理的功能。CT 软件开发采用射线追踪技术和图像重构算法<sup>[56]</sup>。

大坝 CT 的图像重构就是通过对波的走时反演, 重建波速分布图像。根据 Radon 变换公式, 令  $L_i$  为波激发点与接收点之间的路径,  $T_i$  为波的初至时间, 即投影值, 则有:

$$T_i = \int_{L_i} s(x, y) dl \quad (1)$$

式(1)中,  $s(x, y)$  为探测区内点  $(x, y)$  的慢度, 它是波速  $v(x, Y)$  的倒数。式(1)中,  $s(x, y)$  是未知的, 由于射线(波)是一条与材料不均匀性有关的曲线。因此,  $L_i$  也是未知的。为此, 将反演区域离散为  $n$  个小方块单元(像元), 并把每个像元内射线路径看作直线。设  $L_{ij}$  表示第  $i$  条射线穿过第  $j$  个像元的长度, 则:

$$T_i = \sum_{j=1}^n s_j l_{ij} \quad (2)$$

设有  $m$  条射线穿过反演区域, 则式(2)为一个关于未知量  $S_j$  的线性方程组:

$$AS = T \quad (3)$$

$A=(a_{ij})_{m \times n}$  称为距离矩阵,  $T=(T_j)_{m \times 1}$  为走时向量,  $S=(S_j)_{n \times 1}$  为慢度列向量。

射线上各点的慢度  $s(x, y)$  是不同的, 走时  $T$  是慢度在射线上的一维投影值。所谓图像重构技术, 实质就是采用一定的数学方法。提取射线上的各点的慢度, 然后根据多个方向上的一维投影

值来建立二维慢度（或波速）的图像，进而利用二维图像构造三维图像，因此，大坝 CT 图像重构技术的关键是确定射线路程的射线追踪技术和算法。

目前所使用的射线追踪技术主要有：直射追踪、最小走时射线追踪和波前法射线追踪等。其基本思路都是将图像重构区（探测区）离散为若干网格，然后按一定的原理或假设计算各网格内射线的长度，从而确定方程组（3）中的距离矩阵  $A$ 。

直射追踪是假设探测区介质是均匀的，波在图像重构区沿直线传播；对非均匀介质，则采用弯曲追踪法。最小走时射线追踪是利用数学上的最短路径理论，将射线追踪问题转化为求解速度网络模型中的最小走时问题。波前法是基于动力学的波阵面理论，认为空间某点的振动是波阵面上每个面源发出的次级波在该点的相干叠加。

图像重构就是求解方程（3）其算法主要有三类：直接法、间接法和耦合法。直接法是直接计算线性方程组（3）系数的方法，包括逆矩阵法、消元法、迭代法等。其中迭代法采用较多，如代数重建法、图像重建外插算法等。间接法包括傅立叶变换法、卷积反投影法等。耦合法是在计算机内存较小的条件下进行数值计算的方法，包括分割推算法、区域分裂法、多重子结构法、小波法及分行几何法等。目前，在大坝 CT 图像重构中，主要采用代数重建法（Algebraic Reconstruction Technique. ART）。

大坝 CT 技术在国内水利水电工程中的应用还处于初期阶段，除 1998 年在丰满大坝进行实验性 CT 诊断外，梁国前（2002）<sup>[57]</sup>采用利用高频率、大功率的声波震源来探测某拱坝 150 号细石混凝土砌块石层的施工质量，检测时在坝体内垂直布置了两个剖面（检 1~2，检 3~4），为防止孔距太小会增大系统观测的相对误差，而孔距太大会降低方法本身的垂直分辨率，故孔距采用 10m，孔深约 23m，通过检测获得了检 1~2 和检 3~4 两检测断面的波速等值线图。宋先海等（2003）<sup>[58]</sup>也采用弹性波 CT 的检测方法，对某大型水电工程的混凝土质量进行了探测研究，获得较好的检测结果。吕小彬<sup>[46]</sup>2011 年采用冲击弹性波 CT 技术对南水北调某渡槽混凝土的质量进行了全面的检测，检测时的现场布置及检测断面的弹性波分布如图 3-1、图 3-2 所示，检测时沿槽墩的两个相对面激振点和接受点，采用锤击的方式产生冲击弹性波，通过对检测断面的层析扫描，确定了弹性波波速的等值线图，较准确评估混凝土的质量及缺陷产生的位置和范围。

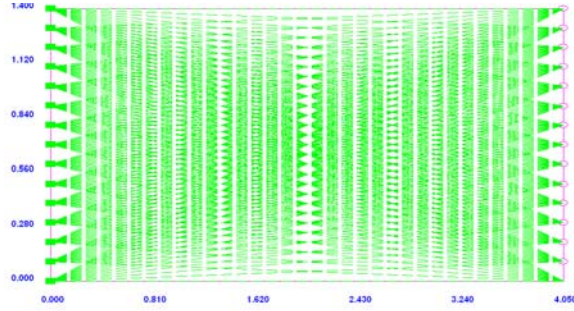


图 3-1 某渡槽槽墩冲击弹性波现场检测及断面测线布置

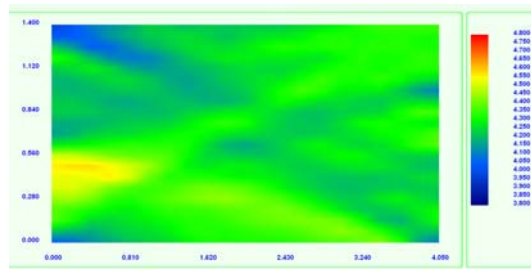


图 3-2 某渡槽槽墩二维检测断面内弹性波波速分布

地震波 CT 是弹性波 CT 的一种，图 3-3 是地震波仪 Summit II plus 工作原理示意图，其检测形成的波速 CT 断面如图 3-4 所示。通过波速的分布的分析，可确定大坝断面内混凝土的质量状况。

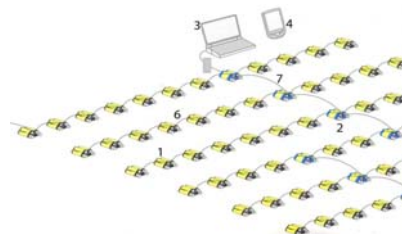


图 3-3 Summit II plus 地震仪三维排列组成

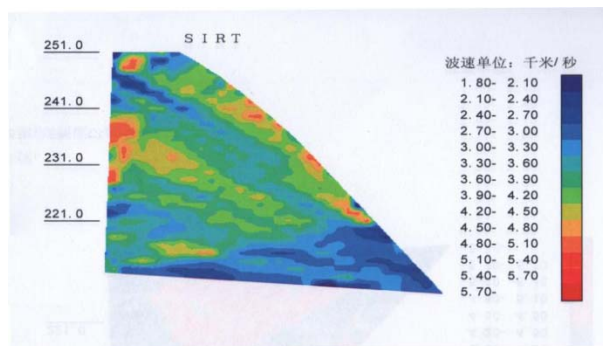


图 3-4 某大坝 CT 检测的波速分布

大坝 CT 技术的研究历史不长，目前尚处于发展初期。但其作为交叉的综合性学科分支，随着 CT 检测设备的完善、计算机技术的发展和图像技术的深入研究，必将在水利水电工程的检测中发挥更大作用。目前，我国在大坝 CT 的研究方面，无论设备还是基础理论，均有较大的差距，需加强研发。

随着大坝 CT 技术的发展与完善，将来在水利水电工程中可解决以下问题<sup>[38]</sup>：

- (1) 大坝内部材料特性（如混凝土弹模、强度等）分布状况监测；
- (2) 大坝内部材料老化、病害及裂缝部位、程度及进程检测；
- (3) 大坝施工质量检测、补强加固效果检测。如大坝混凝土蜂窝、空洞、不密实区检测，大坝接缝、裂缝灌浆效果检测，预应力锚固效果检测等；
- (4) 大坝基础特性及处理效果检测，如帷幕工作特性检测、断层破碎带及软弱夹层成像及处理效果检测，基础灌浆效果检测等<sup>[60,61]</sup>；
- (5) 大坝内部预埋件（如钢筋、金属埋件等）部位及状态检测；
- (6) 施工爆破及洞室开挖对大坝结构的影响监测；
- (7) 高边坡及近坝库岸库区稳定性监测。

### 3.1.3 钢筋混凝土结构评估

国际上发达国家的基本建设历史沿革大体分三个阶段：第一阶段为大规模新建，第二阶段为新建与维修改造并重，第三阶段重点逐渐转向旧建筑物的维修改造。根据美国土木工程学会 2001 年的调查，现全美 29% 以上的桥梁、1/3 以上的道路老化，2100 座水坝不安全。估计美国在五年内需投入 13000 亿美金改善基础设施的不良安全状态。我国早期建设的水利水电工程中的一部分，由于老化病害需要进行维修加固或因安全度过低而面临退役的威胁。因此，在役钢筋混凝土结构的安全评估、寿命预测及剩余寿命预测近年来为国际研究的热点。

水工钢筋混凝土结构的安全评估包括安全性和耐久性评估。安全性评估是对结构承载能力的评估，耐久性评估是评估混凝土材料抵抗大气作用、化学侵蚀、磨损或其它劣化过程而维持其原有形状、质量和使用性能的能力。混凝土耐久性评估关注的是结构的使用寿命和剩余寿命，有多原因可造成混凝土结构使用寿命的终结，例如：因材料劣化导致承载力降低而不能满足安全需要；因氯离子渗透到钢筋表面且其浓度超过一定阈值使锈蚀的危险性达到难以捉摸的地步；因继续进行维修的费用过大达到难以承受的程度等。

国际上对钢筋混凝土结构安全性与耐久性的研究极为重视，发表了一系列的研究成果。本次

检索到的论文有 15 篇，主要集中在以下四个方面：（1）钢筋混凝土结构钢筋与混凝土粘结强度及其退化的研究<sup>[38,61-64]</sup>；（2）采用非线性有限元计算分析钢筋混凝土结构<sup>[65-67]</sup>；（3）考虑混凝土碳化、氯离子等影响因素，分析与评估钢筋混凝土结构的服役寿命及剩余寿命<sup>[68-73]</sup>；（4）研究钢筋混凝土结构的疲劳强度及长期运行后的微观结构及界面结合情况<sup>[74,75]</sup>。

钢筋混凝土结构的安全评估方法应能将服役历史、材料与几何特性、当前损伤、结构分析和综合的损伤模型融合为一体。对钢筋混凝土结构安全性影响较大的因素是钢筋锈蚀及引起的混凝土保护层开裂、保护层崩落引起的断面尺寸减小。因此，对钢筋混凝土结构锈蚀程度的检测、锈蚀率的评估、锈蚀程度与混凝土保护层开裂的关系、锈蚀后钢筋混凝土本构关系及承载力计算为研究的重点和热点。HAKAN YALCINER（2012）<sup>[62]</sup>通过试验研究了钢筋与混凝土粘结强度的关系，并将混凝土与钢筋间的粘结强度表述为混凝土保护层厚度、混凝土强度及钢筋锈蚀程度的函数。ZHAO YUXI（2012）<sup>[63]</sup>研究了钢筋锈蚀引起开裂的混凝土结构的裂缝性状及锈蚀分布。Kapilesh Bhargava<sup>[64]</sup>提出了钢筋锈蚀引起钢筋与混凝土粘结强度退化的简化模型与分析模型，简化模型考虑了大量已发表的有关钢筋锈蚀引起粘结强度退化的试验成果，锈蚀钢筋粘结强度的分析模型则考虑了钢筋膨胀产生的锈胀压力、开裂混凝土抗拉强度、锈蚀钢筋与混凝土间粘结剂摩擦系数等。Yu-Feng Lin<sup>[38]</sup>研究了采用冲击回波的方法检测和评估钢筋与混凝土结合面间的粘结质量。赵羽习（2003）<sup>[76]</sup>建立了由于钢筋锈蚀导致的混凝土保护层胀裂时的钢筋混凝土构件的力学模型，应用弹性力学理论得到了混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率的解析表达式，并讨论了与混凝土保护层胀裂时的钢筋锈蚀率有关的各个影响因素。

水工结构一般体积庞大，受力条件复杂，目前，钢筋混凝土有限元法是这类结构配筋设计或结构安全评估分析的一种有效方法。按照钢筋模拟方法的不同，钢筋混凝土有限元模型可以分为三类，即分离式、组合式和整体式<sup>[78]</sup>。分离式模型将钢筋和混凝土作为不同单元处理，混凝土一般采用实体单元，钢筋采用杆单元，两者之间的黏结滑移可用黏结单元来模拟，也可以认为两者间黏结良好，不存在滑移<sup>[79]</sup>。在非线性计算中，混凝土、钢筋、混凝土-钢筋接触面可以采用不同的本构模型<sup>[65-67,77]</sup>，但因混凝土单元的划分受到钢筋分布和方向的限制，会导致三维分析时单元划分困难，而且会导致网格过密、计算量过大，使计算难以实现。组合式和整体式模型都假定钢筋与混凝土之间结合良好，不存在滑移。组合式模型将混凝土和钢筋包含在一个单元之内，分别计算它们对单元刚度矩阵的贡献，再叠加得到单元的刚度矩阵。整体式模型将钢筋弥散于混凝土单元之中，把钢筋混凝土材料作为等效均质材料，钢筋对结构的贡献通过调整单元的材料参数来体现，根据混凝土和钢筋分别在结构中所占体积的大小进行综合，并最终反映在单元的刚度

矩阵中。这两种模型的优点在于网格剖分方便，计算量小，但不能考虑钢筋与混凝土之间的黏结滑移，其中整体式模型不能求出钢筋应力的分布，一般只用在大体积混凝土结构的分析中，与分离式模型相比，这两种模型未考虑混凝土与钢筋之间的黏结关系。

三维情况下常用的组合式模型是含钢筋膜的模型<sup>[80]</sup>，将单元中的钢筋折算成“等效薄膜”，并假定薄膜只能承担轴向拉力，不能承担横向切力与弯矩，因薄膜较薄，所以又忽略了垂直于薄膜中面的变形。在网格划分时，要求钢筋必须平行于混凝土单元的一个面，这给网格划分带来了困难。

另一种组合式模型为埋置组合式模型，它将钢筋看成埋置在混凝土单元中的杆件。巫昌海<sup>[81]</sup>2000年提出的三维埋置组合式有限元模型及相应的网格自动生成算法，对于任意钢筋混凝土结构，可先划分混凝土单元，此时不必考虑钢筋的具体位置，然后给定钢筋直线段的起点与终点坐标，即可求得埋置在等参单元内各钢筋段的坐标信息，该模型能考虑穿过混凝土单元任意方向的钢筋，总体来说，这个方法形成网格需要输入的信息较少，对提高大型钢筋混凝土结构的有限元分析效率具有较大的实用意义。

张晓英<sup>[82]</sup>对水闸结构受力的典型构件板在运用过程中常存在的钢筋锈蚀问题，采用钢筋混凝土非线性有限元分析理论，建立了考虑钢筋与混凝土黏结滑移力变化的分离式模型，模型中考虑了钢筋锈蚀后性能的变化、钢筋与混凝土粘结滑移力，混凝土采用考虑应变软化的本构关系，破坏准则采用 Willam-Warnke 五参数的破坏准则和最大拉应力准则的组合模式，对钢筋锈蚀后构件截面抗力的变化按照《水工钢筋混凝土结构设计规范》中规定的公式和平截面假定、非平截面假定两种假设分别进行了分析，通过分析得出了一些有益的结论。

钢筋混凝土结构安全评估和耐久性评估的另一方面工作是结构服役寿命评估。服役寿命评估通过计算结构当前损伤、退化机理和退化反应速率预测结构的服役寿命。因此，结构可靠度及服役寿命预测的方法是将设计要求、材料与结构退化、累积损伤、环境因子、无损检测技术等信息，整合为供结构可靠性定量化决策的工具。

制约钢筋混凝土结构服役寿命的主要因素包括：氯离子侵蚀、碳化作用、化学物质侵蚀（酸性物质及硫酸盐）、冻融循环、荷载（疲劳、振动、局部超载）、裂缝、渗漏等。特殊情况下，上述单一因素决定混凝土结构的寿命，多数情况下，多个因素交叉作用影响混凝土结构的寿命。

目前预测钢筋混凝土结构材料服役寿命的方法包括：基于经验的估计方法、以相似的材料性能进行推测的方法、加速试验方法、基于化学或物理的预期劣化过程的数学模型方法以及应用可靠度与随机概念的方法。

预测钢筋混凝土结构寿命的数学模型方法及服役寿命的可靠度预测方法是目前国际及国内研究的热点<sup>[68,69,83-86]</sup>。目前已有预测处于腐蚀、硫酸盐侵蚀、溶蚀作用、冻融循环等劣化过程中的混凝土服役寿命的数学模型,在这些预测混凝土服役寿命的数学模型中,大部分包含与传输过程相关的数值变量,如腐蚀模型中的氯离子扩散系数等,比较成熟的模型有钢筋锈蚀模型、硫酸盐侵蚀模型、混凝土碳化模型。钢筋混凝土的寿命与混凝土老化的过程及特征密切相关,如混凝土碳化的深度、混凝土保护层的开裂等,建立这些老化特征量与寿命的关系,从而实现对结构寿命的预测。**Chun Qing Li**<sup>[69]</sup>针对钢筋混凝土结构由于钢筋锈蚀产生的劣化评估提出了一个基于服役性能的评估方法,根据试验结果导出了用强度与适用性表征的结构退化模型,利用该模型可较好的预测结构不安全或不适宜使用而需要加固或维修的时间。研究表明对处于海洋环境条件下的钢筋混凝土受弯结构,在变得不安全之前,首先变得不满足正常使用条件。**H W Song**<sup>[70]</sup>提出的钢筋混凝土服役寿命预测模型包含评估锈蚀的开始的氯离子渗透模型和混凝土碳化模型、对开裂混凝土保护层评估钢筋锈蚀率及锈蚀累积量的钢筋锈蚀模型,在有限元程序中考虑这些模型,就可以对遭受氯离子和碳化作用的钢筋混凝土结构随时间与空间变化的锈蚀进行分析,同时探讨了裂缝宽度和碳化程度对钢筋锈蚀及寿命的影响。**K.Y. Ann**<sup>[71]</sup>针对碳化作用下钢筋混凝土的寿命进行了研究,马光述<sup>[87]</sup>根据不同的理论背景将钢筋混凝土结构混凝土保护层锈胀开裂耐久寿命的代表性理论预测方法进行了分类评述,分析了每种方法的特点,通过实例对比分析发现,基于断裂理论的预测方法与实验结果吻合程度相对更好。刘春诚<sup>[88]</sup>基于钢筋混凝土结构的锈胀过程表现为裂纹的萌生、发展和失稳破坏过程,提出的腐蚀钢筋混凝土锈胀力的公式,利用断裂力学理论推导了锈蚀钢筋混凝土构件裂缝尖端应力强度因子  $K$  的表达式,应用双  $K$  断裂准则对锈蚀钢筋混凝土结构的裂纹扩展寿命进行了预测,分析了裂纹扩展寿命与混凝土强度等级,保护层厚度和钢筋直径的定量关系,这对于钢筋混凝土结构的耐久性分析与设计具有重要意义。

大量影响混凝土结构使用寿命的因素及它们间的相互作用是未知的,包括依赖特定设计要求的程度、硬化混凝土的多变特性、服役环境的随机性及材料对微气候的反应。因此,基于可靠度方法及统计和确定性组合方法的两种随机预测方法近年来成为耐久性和钢筋混凝土结构寿命预测研究的热点,取得了系列的成果。耿大新<sup>[84]</sup>通过对碳化速率和钢筋保护层施工偏差实测数据的统计分析,以混凝土碳化深度大于钢筋保护层厚度的概率超过 5% 对应的时间为结构寿命,结合正态分布的相关性质,建立了钢筋混凝土结构寿命预测与评估概率模型和计算方法。

孟静(2009)<sup>[51]</sup>根据混凝土建筑物老化现状和评估经验,在确立评价指标和评价体系基础上建立了 BP 神经网络系统模型评估混凝土老化建筑物使用性能,并结合灌区渡槽评估样本对混



混凝土建筑物使用性能进行了模拟和评估。结果表明，神经网络能较真实地反映各评价指标（或影响因素）与总评估结果间的关系，评估结论符合工程实际。

预测既有钢筋混凝土结构的剩余服役寿命的方法与预测新拌制混凝土的服役寿命是一样的，但既有结构却得益于另外的可获取信息，如推定的材料特性与环境影响。预测既有混凝土结构的剩余寿命的方法通常包括以下程序：

- ① 确定混凝土状况；
- ② 识别单一混凝土损伤因素；
- ③ 确定混凝土服役结束期的环境组成；
- ④ 采用从混凝土现状到服役结束期状况的推断来确定剩余服役寿命。

预测在役钢筋混凝土结构剩余寿命的方法与预测寿命的方法基本相同，目前也是重点研究的领域。王廷臣<sup>[86]</sup>在对工程实例大量试验及分析的基础上提出了判别钢筋混凝土构件剩余寿命的两个标准以及现状检测、采用钢筋锈蚀产生体积膨胀和钢筋混凝土有限元分析的方法来预测其剩余寿命。实例证明本方法的预测结果与实际情况符合的较好。吕大纲<sup>[85]</sup>基于原始设计资料和检测数据对钢筋混凝土梁桥承载能力的时变可靠度进行了分析和评定，同时进行了承载能力的风险率分析，分别采用时间综合法、时间离散法和首次超越概率法计算了构件承载能力的可靠指标，根据等超越概率原则和使用荷载基准期，由设计目标可靠指标导出已有桥梁的目标可靠指标并进行可靠度评定。最后基于安全性寿命准则计算了构件的剩余寿命。

尽管钢筋混凝土结构耐久性的研究开展了大量的工作，取得了丰硕的成果。但由于影响因素众多，问题十分复杂，目前的研究成果距工程应用的要求尚有不小的差距。相对于桥梁、工民建钢筋混凝土结构，水工钢筋混凝土结构的使用条件、使用环境有其特殊性，因此，更需要结合混凝土的特点，对钢筋混凝土结构的耐久性开展进一步的研究工作。

### 3.1.4 混凝土坝的安全评估

混凝土坝的安全评估不同于钢筋混凝土结构，钢筋混凝土结构的承载能力与寿命主要受钢筋锈蚀的影响，而钢筋是否锈蚀主要取决于碳化的深度、氯离子侵蚀等因素。影响混凝土坝安全的因素众多，包括基础的特性、渗压的大小与变化、混凝土材料的老化与劣化、混凝土裂缝、荷载及环境条件、地震等。在役大坝的安全评估主要针对上述影响因素开展工作。

近年来我国水工程建设方面堪称世界一流，建成了世界上最高的混凝土拱坝、最高的碾压混凝土重力坝及碾压混凝土拱坝，一批超大型工程正在建设中。工程建设中遇到了高地震区、坝址

地质条件复杂、坝址区气候条件恶劣、坝体结构复杂及施工极其困难等，提出了一系列具有挑战性的课题。我国科研人员和技术人员针对工程中遇到的问题，进行了研究，取得了一系列成果。国际发达国家近期完建或正在建设的工程相对较少，对大坝安全问题的研究成果亦较少。根据查询的文献，2010年~2012年的文献中，涉及大坝安全的文件较少，与大坝的安全有关的文章仅有4篇，另有2006~2007年的文章6篇。Jin-Ting Wang<sup>[90]</sup>采用子结构和计算程序对拱坝进行了地震响应的分析，分析中不仅考虑坝-水-地基岩体的相互作用，坝地基及水体看成半无限区域，而且在分析中考虑了峡谷周围场地运动的空间分布，使分析结果更接近工程实际情况。Benjamin Miquel<sup>[91]</sup>提出了一个简化的评估大-水系统基本震动周期、附加阻尼、力、质量及评估地震特性的所有参数的实用方法，建议的方法考虑坝体几何体型和柔度、坝与水库相互作用、水可压缩性及水库水位变化等因素的影响。Mehmet Akkoese<sup>[92]</sup>针对断层附件场地运动，在考虑坝-水-泥沙-地基相互作用的情况下，分析了混凝土重力坝的非线性相应。Chen Zaitie<sup>[93]</sup>则借助于风险分析的方法建立了高拱坝风险评估系统，影响大坝失事的自然因素、结构因素及人为因素均在统计基础上进行考虑，通过定性和定量的分析，确定了高拱坝的5种失事破坏模式，即坝肩岩体失稳、特别严重的裂缝、拱坝和坝基整体失稳、坝顶过度溢流和坝体沿建基面失稳。建议使用风险率、经济损失风险值及生命损失风险评估高坝的风险。Q. Cai<sup>[94]</sup>提出了一个基于非线性断裂力学的弥散裂纹模型，可以在混凝土重力坝中实施裂纹扩展的分析，从而对大坝的安全予以评估。

美国、加拿大早期建设的大坝中，有些已经因混凝土碱骨料的反应出现严重破坏，因此，比较重视对混凝土碱骨料问题的研究。文献<sup>[95~99]</sup>均涉及混凝土碱骨料反应的分析。Victor Saouma<sup>[95]</sup>提出了混凝土碱骨料反应的本构模型及如何长期预测混凝土结构的碱骨料反应，对参数的敏感性进行了分析，计算了两个坝和一个钢筋混凝土结构的碱骨料反应的影响。Victor Saouma<sup>[96]</sup>提出了一个基于热学-化学-力学的碱骨料膨胀反应的本构模型，采用二维有限元对拱坝遭受碱骨料反应的安全状况进行了分析评估。Etienne Grima<sup>[97,98]</sup>针对混凝土的碱骨料反应提出了基本的物理原则，形成了粘-弹-塑-正交损伤的模型，该模型模拟了湿度对碱骨料反应及混凝土收缩变形的影响。基于建立的碱骨料反应的本构模型，发展出的各项异性损伤构架可以很好的模拟开裂的异性及膨胀。我国早期所建的工程一般未考虑混凝土的碱骨料反应问题，近期则高度重视混凝土骨料的减活性和总含碱量的控制，对骨料存在活性的工程，采用掺粉煤灰的措施进行抑制。刘晨霞、陈改新<sup>[100]</sup>依据试验结果，提出了混凝土碱骨料反应的本构关系及影响因素。截至目前，国内尚未看到关于混凝土坝碱骨料反应分析的研究成果。尽管我国的混凝土坝目前尚未发生碱骨料反应引起的损伤与破坏，但早期所建的工程随着运行年限的增长，存在发生碱骨料反应的风险，在这方面

应开展相关研究。

近期国内有关混凝土坝安全评估的研究成果较多，主要分为以下几个方面：

(1) 混凝土坝的抗震分析和震后损伤评估：文献<sup>[101~111]</sup>均为近两年来发表的有关混凝土抗震分析及抗震研究方面的文章，徐艳杰<sup>[101]</sup>采用三维有限元模拟分析了汶川地震中宝珠寺重力坝的地震响应；牛志国（2012）<sup>[103]</sup>进行了地震作用下混凝土坝的老化损伤分析，为合理评价现役混凝土老坝的抗震安全性，基于线弹性理论，结合衰减函数建立了老化损伤模型，分析了某水电站现役混凝土坝的动力响应，论证了老化对坝体的动力损伤影响显著；潘建文（2012）<sup>[104]</sup>用改进有限元法研究了重力坝强震断裂过程，即引入虚结点的 XFEM，在静力功能基础上实现了动力断裂分析功能，并用于强震中结构多条裂缝的同时扩展分析，这一方法在求解混凝土 I 型和 I-II 混合型动力断裂问题方面具有良好精度，其避免了网格不断重剖分的问题，也无需采用开裂单元的子域积分来描述非连续位移场，即可实现单元内连续断裂过程的模拟。马来贵（2011）<sup>[106]</sup>通过损伤力学理论对混凝土重力坝的损伤机制进行分析，运用有限元软件对混凝土重力坝发生损伤现象进行数值模拟。李艳杰<sup>[107]</sup>在考虑混凝土材料细观非均匀性影响的基础上，探讨了在材料参数和地震动等不确定性因素影响下混凝土重力坝的破坏过程和破坏形态。通过对金安桥混凝土重力坝的 180 个样本的非线性数值模拟统计分析，得到了不同水平地震作用下的大坝损伤破坏情况，并提炼出 4 种典型的破坏形态，除了坝头折断、坝踵开裂以外，还发现了下游面起裂、贯穿至上游的情况，且随着地震峰值加速度的增大而越发明显。王海波<sup>[111]</sup>采用全坝段三维有限元模型、计入地基辐射阻尼、坝段间动态接触等影响混凝土重力坝地震响应的关键因素，研究分析高烈度区混凝土重力坝地震响应，并与坝段三维模型、无质量地基模型、无横缝整体坝模型的分析结果进行对比，揭示各种因素对混凝土重力坝地震响应的影响，并提出提高坝体抗震能力的工程措施。

在坝体抗震及地震作用的分析方面，与国际的研究趋势一致，研究的重点内容、采用方法基本相似或各有侧重，但总体而言，我国的研究水平与国际的研究水平处于相似的水平。

(2) 采用大坝安全监测对大坝的安全进行监控和评估。文献<sup>[112,113]</sup>介绍了相关的研究方法与研究成果。

(3) 采用数值计算的方法分析大坝的抗滑稳定、大坝裂缝的扩展及大坝的应力与变形。顾冲时<sup>[114]</sup>提出了混凝土坝裂缝转异诊断的动力学模糊互相关因子指数法，采用动力学模糊互相关因子指数法可以直接依据实测的裂缝开合度序列对大坝裂缝进行转异诊断；苏怀智<sup>[118]</sup>针对高重力坝坝基存在抗剪强度与正应力呈非线性关系的特点，重点研究了二次抛物线形的抗剪强度包络

线。在此基础上，建立了基于二次抛物线形抗剪强度包络线的功能函数。结合改进的 JC 法，提出了高坝坝基失稳可靠度的计算方法。雷鹏<sup>[119]</sup>研究了应用数值仿真和最小二乘支持向量机反馈混凝土坝控制荷载的方法。对带缝混凝土坝进行数值仿真分析，计算不同荷载组合下的缝端应力强度因子，用最小二乘支持向量机对荷载组合与效应量进行模式训练和网络泛化，结合裂缝稳定性判别准则，确定控制荷载组合。

(4) 采用非线性有限元及超载或降强的分析方法，确定大坝的安全度或极限承载能力<sup>[120~122]</sup>。姜亚洲<sup>[120]</sup>研究几何非线性和包含应变软化的材料非线性对其极限承载能力的影响，给出双重非线性即包含应变软化的材料非线性和几何非线性对重力坝系统整体极限承载能力的影响。宋冬仿<sup>[121]</sup>采用有限单元法对光照碾压混凝土重力坝施工期和运行期的温度场、渗流场、应力应变场等进行仿真分析，采用超载法和强度折减法相结合的方法模拟坝体（坝基）系统的渐进破坏过程和可能的失稳模式，并根据特征点位移突变、屈服区贯通等方法判断大坝的整体安全度，同时对坝基浅层面进行抗滑稳定计算。

(5) 全过程仿真分析，评估大坝的安全度和进行寿命预测<sup>[124~127]</sup>。朱伯芳<sup>[17]</sup>认为目前工程上采用设计规范中的方法进行安全评估存在诸多不足，主要表现为：①在抗滑稳定分析中采用的极限平衡法只考虑了力的平衡条件而没有考虑应力状态及坝体与基础的相互影响。②目前在混凝土坝的安全评估中，坝体和基础是分别进行计算的，用拱梁分载法计算拱坝应力，用材料力学方法计算重力坝应力，用极限平衡法计算基础抗滑稳定，完全忽略了坝体与基础的相互作用，实际上坝体与基础是一个整体，密不可分。③目前在拱坝设计中只考虑了作用于坝面的水压力，没有考虑作用于基础的水荷载对坝体应力的影响，也没有考虑地应力及基础开挖和处理对基础变形和坝体应力的影响。④目前在混凝土坝设计中，坝体应力的控制没有考虑施工期的温度应力，实际上施工期温度应力是要延续到运行期的；也没有考虑施工过程对坝体应力的影响。⑤目前混凝土坝设计中没有考虑运行期非线性温差的影响。⑥目前拱坝应力分析中采用的拱梁分载法存在着一些缺点：用十分粗略的 Vogt 系数计算基础变形、在建基面结点上缺乏变形协调条件、不同程序计算结果相差较大、不能计算孔口影响等。⑦目前拱坝和重力坝设计都是先用线弹性方法计算应力，再按点应力控制，即最大拉应力和最大压应力不超过允许应力，如果在应力计算中考虑各种荷载，拉应力一般难以过关，实际上只要考虑非线性温差，拉应力就很难过关。鉴于存在上述不足，因此建议采用有限元全程仿真与强度递减法（简称 SR 法）进行混凝土坝的精细安全评估，该方法有两大特点：一是全程仿真；二是强度递减。全程仿真是为了求得真实应力状态，强度递减法可求得结构整体的安全性。

有限元全程仿真与强度递减法可实现混凝土坝安全评估的 6 个统一<sup>[17]</sup>：①坝体分析与基础分析的统一；②应力分析与稳定分析的统一；③拉、压、剪等各种破坏形式分析的统一；④施工期分析与运行期分析的统一；⑤设计、施工、运行各阶段评估方法的统一；⑥正分析与反分析的统一。

SR 法中的全程仿真是从基础开挖开始，考虑基础开挖、基础处理、地应力场、渗流场的改变、混凝土浇筑过程对自重的影响、温度场变化、接缝的开与合、接缝灌浆、分期蓄水、运行期荷载和各种条件的变化等，因此，应力状态符合实际。用有限元强度递减法进行安全评估，把应力分析和稳定分析统一起来，把拉裂、剪切与压坏等各种破坏形式的分析统一起来。在分析滑动稳定时，不但考虑力的平衡条件，同时考虑了基础和坝体的应力状态及其相互影响。在分析坝体应力时也考虑了基础变形影响，包括地应力场、渗流场的改变与软弱构造面的局部移动，在计算运行期坝体应力时，不仅反映了运行期各种荷载的影响，也反映了施工期的各种影响。

从基础开挖开始到投入运行，不断进行反分析，在基础开挖和基础处理阶段，对地应力及基岩变形、基岩粘滞系数、渗透特性等进行反分析，在混凝土浇筑阶段，对混凝土热学参数进行反分析，蓄水以后，对坝与地基整体变形特性进行反分析，根据反分析结果，不断修改计算参数，使计算结果越来越符合实际。对混凝土坝的安全评估，贯穿设计、施工和运行的全过程，不断更新、不断深化、不断完善。

(6) 数字大坝及大坝全生命周期的数字监控<sup>[128,129]</sup>。朱伯芳提出了混凝土数字大坝监控的理论，考虑到目前大坝仪器监测点少且不能给出大坝应力场与安全系数等缺点，在仪器监控的基础上增加数字监控，基于仪器监测观测资料进行反分析，利用大坝全过程仿真分析，可预报大坝施工期、运行期的温度场、应力场及安全系数。实现对大坝全程的安全监控和评估。

从上述 5 个方面的近期的研究成果可以看出，对新建混凝土坝及在役混凝土坝的安全评估，我国目前走在国际的前列，研究方法先进，成果丰富。混凝土坝的安全度随时间变化，混凝土材料与岩体的结构衰变、控制性结构面疲劳损伤、关键防渗体系衰变、关键加固体系的衰变均引起混凝土坝安全度的降低。因此，在今后应加强混凝土运行过程中对大坝混凝土质量及材料性能的检测与评估，确定混凝土真实材料性能，利用监测的资料，结合反分析和多种方式的有限元分析，评估大坝的安全状况。

## 3.2 结论与建议

随着水工混凝土建筑物服役年限的增加，结构的老化病害及缺陷在不断发展，混凝土结构安

全性和耐久性随时间不断劣化,有必要采用先进的检测手段和评估方法对结构的安全性和耐久性进行评估。水工混凝土结构的检测和评估涉及各种力学、结构有限元计算、检测技术及检测设备、计算机技术、神经网络、基于知识的专家系统等,属于交叉学科领域,近年来已引起了世界各发达国家的重视,并被列入优先发展的研究领域和优先培育的 21 世纪高新技术产业之一。

针对混凝土坝的检测的 CT 技术在我国尚处于发展初期,仅在工程上进行过试验性测试,相比国外,有较大差距,不能满足工程实际的需要,需加大研究的力度。

对钢筋混凝土结构的安全性和耐久性评估是国内外研究的热点,取得了大量的成果,包括钢筋与混凝土界面强度的模拟、开裂的模拟、计算分析的方法,但目前的研究成果尚不能真正解决工程中的实际问题,包括结构的安全度、服役寿命等。

我国现阶段正在进行大规模的水利水电工程建设,一系列工程不仅在工程规模而且在工程建设的复杂性、难度方面均为世界之最,因此,需要对大坝的安全评估给予更高的重视,加大研究的力度。目前,在混凝土坝的安全评估方面,我国已处于世界先进水平,某些方面处于领先水平。但在对在役混凝土坝病变机理与模拟、健康诊断与病变预警方面应加强研究工作,将检测与监测的成果与数值分析方法相结合,通过对工程仿真分析成果的不断校正和改进,进行老化与病变的识别与定位;采用非线性断裂力学、损伤力学等分析多因素作用下混凝土坝的整体安全度,提出病变的容度;开展健康性态的综合诊断和评估理论与方法研究,开展工程灾变预警指标体系的研究,提出合理的预警阈值。

### 3.3 对水利水电学科及行业发展的建议,未来发展思路和新兴增长点

对水工混凝土结构检测与评估的未来发展,本人认为应该在以下方面开展重点研究,力争取得突破:

#### (1) 大坝内部裂缝的检测与监测

碾压混凝土重力坝蓄水后内部温度还比较高,降温持续时间长,在降温的过程,温度应力不断积累及增大,特别是靠近基础部位,基岩的约束较大,混凝土的温度拉应力较大,是温控防裂研究的重点部位,该部位如产生裂缝,将对大坝的整体性影响较大。碾压混凝土重力坝基础部位的温度常常高于设计允许的最高温度,而降温持续时间达几年甚至几十年,后期降温过程中是否会产生贯穿性裂缝尤其令人关注。内部的贯穿性裂缝不像外部裂缝易于发现,并引起重视,但对坝体安全的影响却很大。目前,国际上对内部裂缝的检测与监测越来越重视,已有报道采用光纤监测混凝土内部裂缝的报道<sup>[130]</sup>,这方面的技术尚处于研究的初期,需要作为重点方向进行研发。

另外，应研究采用无损检测的方法检测大坝内部的裂缝。

#### (2) 大坝等水工混凝土结构耐久性的检测评估

混凝土的碱骨料反应、冻融、荷载反复作用下的损伤、温度等环境因素等均会造成混凝土结构的老化与损伤，混凝土坝等结构的老化损伤状况及其分布是评估大坝的安全性、诊断其寿命的依据，目前对混凝土坝老化病害损伤、真实性能及其劣化尚无有效的检测与诊断体系，需开展进一步的研究工作。

大体积混凝土结构如大坝在碱骨料反应作用下的模拟，国内尚未看到类似的方法与模型，国外虽开展了一些工作，如加拿大，但尚不成熟。国内早期建设的混凝土工程未考虑骨料的碱活性，存在发生碱骨料反应的可能性，需加强监控，并尽早开展对其危害性评估的研究工作。

#### (3) 钢筋混凝土结构耐久性的综合评估技术

对钢筋混凝土结构，如水闸、渡槽、倒虹吸、暗涵等结构，影响其安全性与耐久性的因素有混凝土剥蚀、混凝土强度、混凝土碳化、渗漏及渗漏溶蚀、冻融破坏、钢筋锈蚀、钢筋保护层厚度等，需根据检测的成果，综合评定其耐久性状况，目前尚未有综合性评估的方法与标准，应进行建立。

#### (4) 大坝的安全评估的指标的确定

目前的趋势是在大坝的安全评估中采用全级配混凝土的性能指标，考虑温度引起的非线性应力，实际上混凝土的性能参数如混凝土的弹模、强度等均与温度有关，对运行多年的大坝，通过现场取芯或其它检测手段获得的坝体混凝土的弹性模量、强度、极限拉伸等指标均是混凝土实际的性能指标，按此参数进行结构分析计算，求得的安全系数或安全度，不能按现有规范的安全系数指标进行控制，如何控制，需进行大量分析研究。

## 参考文献

- [1] Ed Whitelaw, Ed MacMullan. A framework for estimating the costs and benefits of dam removal, Bioscience [J], 2002,52(8):724.
- [2] Robin G, Charlwood. The main questions about dam – removal in USA, US Society for dams & Acres International [C], Seattle, 2004.
- [3] Concrete dams- an old problem always present: cracking; a new technology: rolled concrete, Fifteenth Congress on Large Dams, Lausanne, 1985.
- [4] Ageing and dams and remedial measures, Seventeenth Congress on Large Dams, Vienna, 1991.

- [5] Safety assessment and improvement of existing dams; Eighteenth Congress on Large Dams, Durban, 1994.
- [6] The use of risk analysis to support dam safety decisions and management; Twentieth Congress on Large Dams, Beijing, 2000.
- [7] Ageing and rehabilitation of concrete and masonry dams and appurtenant works, Twenty-first Congress on Large Dams, Montreal, 2003.
- [8] 宋恩来.混凝土坝的老化与评估.大坝与安全, 2008 年第 4 期
- [9] 宋恩来.混凝土坝老化过程及预期寿命的探讨.大坝与安全, 2010(1)
- [10] 邢林生.混凝土坝老化性状的研究. 大坝与安全, 2005(3)
- [11] 《水工混凝土试验规程》(SL 352-2006)
- [12] 《水工混凝土建筑物病害缺陷检测评估规程》(SD-2011)
- [13] 《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21-2001)
- [14] Q. Cai, C. Oosthuizen.混凝土坝安全评估—非线性断裂力学方法.水电 2006 国际研讨会
- [15] 杜成斌,苏擎柱.混凝土坝地震动力损伤分析.工程力学, 2003 年 10 月, 第 20 卷第 5 期
- [16] 朱伯芳,张国新,郑瑾莹,贾金生. 混凝土坝运行期安全评估与全坝全过程有限元仿真分析.大坝与安全, 2007 (6)
- [17] 朱伯芳. 混凝土坝安全评估的有限元全程仿真与强度递减法.水利水电技术, 2007(01)
- [18] Ichiro Komura, Taiji Hirasawa, Satoshi Nagai. Crack detection and sizing technique by ultrasonic and electromagnetic methods. Nuclear Engineering and Design, 2001, 206
- [19] M. Goktepe, Y. Ege, N. Bayri, S. Atalay. Non-destructive Crack detection using GMI sensor. Physical Status Solidi. C, Conferences and critical reviews, 2004
- [20] 堤知明, 吴家晔, 吴家尔等. 用表面波测定裂缝新测定技术及其在大坝监视中的应用。
- [21] Guevremont, Philippe Gregory. Application of the MSR Impact-Echo system for crack detection in concrete dams. PHD thesis, McGill University (Canada),1997
- [22] Jason D, Stauffer, Clinton B, Woodward, Kenneth R. White. Nonlinear Ultrasonic Testing with Resonant and Pulse Velocity Parameters for Early Damage in Concrete, ACI Materials Journal, 2005,102(02)
- [23] 肖力国,何金平. 水东大坝坝顶裂缝检测与分析. 中国水运, 2012(01)
- [24] 吕小彬,黄昊. 公伯峡面板裂缝检测报告. 中国水利水电科学研究院, 2011



- [25] 刘锋. 基于弹性波法的裂缝深度检测的试验研究. 汕头大学硕士论文, 2009
- [26] 姚成林,程利华,张震夏,李平. 稳态表面波法检测混凝土裂缝. 2005 年大坝安全与堤坝隐患探测国际学术研讨会论文集
- [27] 张震夏,李平,姚成林等.丰满电厂溢流坝面裂缝安全检测. 中国水利水电科学研究院,2001
- [28] 陈村拱坝混凝土质量的检测. 中国水利水电科学研究院, 2005
- [29] 扬正刚,徐波,韩道林,楼家丁. 声波穿透在大坝混凝土裂缝检测中应用. 贵州省岩石力学与工程学会 2010 度学术交流讨论会, 2010
- [30] 南水北调中线一期丹江口大坝加高工程初期大坝混凝土缺陷检查与处理报告.长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2010.1
- [31] 张震夏,李平.大坝水下裂缝的检测技术. 中国水利水电科学研究院, 2011。
- [32] 王健. 基于图像处理的混凝土坝水下表面裂缝检测技术研究.三峡大学硕士论文, 2012
- [33] Thomas Voigt, Surendra P. Shah. Properties of Early-Age Portland Cement Mortar Monitored with Shear Wave Reflection Method. ACI Materials Journal,2004, 102(04)
- [34] Zhihui Sun, Thomas Voigt, Surendra P. Shah, Temperature Effects on Strength Evaluation of Cement-Based Materials with Ultrasonic Wave Reflection Technique. ACI Materials Journal, 2005,102(04)
- [35] Hoi-Keun Lee, Hyunjune Yim, Kwang-Myong Lee. Velocity-Strength Relationship of Concrete by Impact-Echo Method. ACI Materials Journal,2003,100(01)
- [36] Yiching Lin, Chao-Peng Lai, Tsong Yen. Prediction of Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) in Concrete. ACI Materials Journal, 2003,100(01)
- [37] ASTM C 1383. Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates using the Impact—Echo Method [S]. 2000 Annual Book of ASTM Standards, 2000
- [38] Yu-Feng Lin, Yiching Lin, Bo-Yau Tsai. Evaluating Bond Quality at Interface between Reinforcing Bars and Concrete Using Impact-Echo Method. ACI Materials Journal,2004,102(02)
- [39] K.Mori,A.Spagnoli, Y.Murakami, G.Konclo,I.Torigoe. A new non-contacting non-destructive testing method for defect detection in concrete. NDT&E International 35(2002):399-406.
- [40] Takeshi Watanabe, Takashi Morita, Chikanori Hashimoto, Masayasu Ohtsu. Detecting voids in reinforced concrete slab by SIBIE. Construction and Building Materials, v.18,2004: 225–231
- [41] MALA GeoScience. Introduction to RAMAC/GPR borehole radar [S], Sweden; 2000.

- [42] MALA GeoScience. RAMAC/GPR radar systems [R], Sweden; 2000
- [43] 孙其臣.冲击弹性波技术在水工混凝土结构无损检测中的应用研究.中国水利水电科学研究院硕士学位论文, 2013 年
- [44] 姚华,黄福伟,唐钰升.扫描式冲击回波法检测预应力管道灌浆质量的模型试验研究.公路交通技术,2009 (01)
- [45] 谭献良.冲击回波法检测预应力孔道灌浆质量技术研究.铁道建设, 2010 (8)
- [46] 吕小斌等.南水北调工程浙川 7 标渡槽#4 墩混凝土内部缺陷检测与评估.中国水利水电科学研究院, 2012 年
- [47] 徐教宇,李鹏等.冲击回波法测量地下连续墙厚度及成墙质量.工程质量,2008 (02)
- [48] 《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS 21-2000)
- [49] 陈卫红,王维刚,黄靓,黄政宇.超声波速度层析成像技术在混凝土内部缺陷检测中的应用.第十届全国建设工程无损检测技术学术会议论文集,2008
- [50] 王浩全,韩焱,殷黎.基于超声 CT 的混凝土质量阵列检测方法研究.计算机工程与应用, 2010,46 (15)
- [51] 樊瑶.超声 CT 技术在混凝土无损检测中的应用研究.长安大学硕士学位论文,2008
- [52] 李珍照.国外大坝监测几项新技术.大坝观测与土工测试, 1997,21 (1): 16~18
- [53] 张宇旭,熊文.弹性波 CT 在混凝土缺陷检测中的试验研究.建筑技术,2012,43(3)
- [54] 何金平,李珍照等.大坝 CT 技术.仪器仪表学报, 2004(8)
- [55] 王伍平,宋人心等.声波 CT 测试系统及其在大坝混凝土质量探测中的应用[J].水利水电技术, 2004,35 (10), 56-57。
- [56] 朱昌平,殷东梅,王琦.大坝 CT 研究进展.声学技术, 2007(8)
- [57] 梁国钱,苏全等.层析成像技术在拱坝质量检测中的应用.水力发电, 2002(5)
- [58] 宋先海,黄荣荣.弹性波 CT 在大体积混凝土无损检测中的应用, 人民长江, 2003(1)
- [59] 余志雄,薛桂玉,周洪波,苏玉杰.大坝 CT 技术研究概况与进展.岩石力学与工程学报, 2004(4)
- [60] 孙文怀,刘伟,李长征等.地震波 CT 在塑性混凝土防渗墙检测中的应用.华北水利水电学院学报, 2013,34(1)
- [61] 李霞.CT 技术在坝基溶蚀检测中的应用.人民长江, 2011,42(17)
- [62] HAKAN YALCINER, OZGUR EREN,SERHAN SENSOY. An experimental study in the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and

- corrosion level [J]. *Cement and concrete research*, 2012(01)
- [63] ZHAO YUXI,JIANG YU,HU BINGYAN, et al. Crack shape and rust distribution in corrosion-induced cracking concrete [J]. *Corrosion science*, 2012, 55:385-393
- [64] Kapilesh Bhargava, A. K. Ghosh, Yasuhiro Mori, S. Ramanujam. Models for Corrosion-Induced Bond Strength Degradation in Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, 2007, 104 (06)
- [65] Minh Kwon, Enrico Spacone. Three dimensional finite element analysis of reinforced concrete columns [J]. *Computer & Structures*, 2002, 80 (2): 199-212
- [66] Wang Taijun, Thomas T C H. Nonlinear finite element analysis of concrete structures using new constitutive models. [J].*Computer & Structures*, 2001, 79 (32): 2781 - 2791.
- [67] H. Broo, M. Plos, K. Lundgren, B. Engstroem. Simulation of shear-type cracking and failure with non-linear finite-element method. *Magazine of Concrete Research*, 2007,59(09).
- [68] M. S. Cheung, B. R. Kyle. Service life prediction of concrete structures by reliability analysis. *Construction and Building Materials*, 1996, 10: 1
- [69] Chun Qing Li. Reliability Based Service Life Prediction of Corrosion Affected Concrete Structures. *Journal of Structural Engineering*, 2004,130(10)
- [70] H W Song, H J Kim, S J Kwon, C H Lee, K J Byun. C K Park, Prediction of Service Life in Cracked Reinforced Concrete Structures Subjected to Chloride Attack and Carbonation. *Cement Combinations for Durable Concrete*, 767-775
- [71] K.Y. Ann, S.-W. Pack, J.-P. Hwang, H.-W. Song, S.-H. Kim. Service life prediction of a concrete bridge structure subjected to carbonation. 2010, 24 :8, 1494-1501
- [72] K. Henchi, E. Samson, F. Chapdelaine, J. Marchand. Advanced finite-element predictive model for the service life prediction of concrete infrastructures in support of asset management and decision-making. *ASCE(American Society of Civil Engineers) International Workshop on Computing in Civil Engineering*; 20070724-27, Pittsburgh, PA(US).
- [73] Chun Qing Li, Robert E. Melchers. Time-Dependent Risk Assessment of Structural Deterioration Caused by Reinforcement Corrosion. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(05).
- [74] Trisha Sain, J. M. Chandra Kishen. Prediction of Fatigue Strength in Plain and Reinforced Concrete Beams. *ACI Structural Journal*, 2007,104(05)
- [75] Tarek Uddin Mohammed, Hidenori Hamada, Toru Yamaji. *Concrete After 30 Years of*

Exposure-Part I : Mineralogy, Microstructures, and Interfaces. ACI Materials Journal,2004,101(01).

- [76] 赵羽习,金伟良. 混凝土构件锈蚀胀裂时的钢筋锈蚀率.水利学报, 2004(11)
- [77] 高向玲,李杰. 钢筋与混凝土粘结本构关系的数值模拟[J].计算力学学报,2005,22(1): 73-77
- [78] 强晟,张扬.水工钢筋混凝土数值模型与应用综述.水利水运工程学报, 2007(3)
- [79] 田双珠,方自虎、孙璨.钢筋混凝土结构的三维有限元非线性分析[ J ].计算力学学报,2006, 23(3): 377-380
- [80] 周昕,沈蒲生.钢筋混凝土板三维非线性有限元分析[J].湖南大学学报, 2003,30 (3):124-126
- [81] 巫昌海,汪基伟. 混凝土三维钢筋埋置组合式有限单元模型及其网格自动生成[J].计算机辅助设计与图形学学报,2000,12(10):761-764
- [82] 张晓英,宋力,韩江水.基于锈蚀的钢筋混凝土偏心受压板抗力变化规律的初步研究.南水北调与水利科技, 2009(2)
- [83] 李连军.钢筋混凝土结构耐久寿命评估的随机可靠度法.建筑科学, 2012.No14
- [84] 耿大新,李辉.钢筋混凝土结构寿命预测与评估方法研究.混凝土, 2007(10)
- [85] 吕大刚,蒋伟,樊学平,杨跃新.退化钢筋混凝土梁桥承载能力的时变可靠度评定.工程结构设计安全与可持续发展研讨会 2010 年
- [86] 王廷臣.基于可靠度的现役钢筋混凝土结构剩余寿命预测.工业建筑,2005 年第 35 卷增刊
- [87] 马光述,王显利,王淋. 混凝土保护层锈胀开裂理论预测方法比较. 北华大学学报(自然科学版),2011(10)
- [88] 刘春城,石磊,杨杰,徐健.基于断裂力学的钢筋混凝土结构锈胀寿命预测.
- [89] 孟静,朱崇诚. 基于神经网络的混凝土建筑物使用性能评估,水电能源科学, 2008,26(5)
- [90] Jin-Ting Wang,Anil K. Chopra. Linear analysis of concrete arch dams including dam-water-foundation rock interaction considering spatially varying ground motions. 2010(07)
- [91] Benjamin Miquel, Najib Bouaanani. Simplified evaluation of the vibration period and seismic response of gravity dam-water systems. 2010(08)
- [92] Mehmet Akkoese, Erman Simsek. Non-linear seismic response of concrete gravity dams to near-fault ground motions including dam-water-sediment-foundation interaction, 2011(11)
- [93] Chen Zaitie.Study of Risk Evaluation System of High Arch Dam Based on Failure Mechanism, 2010

- [94] Q.Cai,C.Oosthuizen.混凝土坝安全评估-非线性断裂力学方法.水电 2006 国际研讨会
- [95] Victor Saouma, Luigi Perotti, Takashi Shimpo. Stress Analysis of Concrete Structures Subjected to Alkali-Aggregate Reactions. ACI Structural Journal, 2007,104(05)
- [96] Victor Saouma, Luigi Perotti. Constitutive Model for Alkali-Aggregate Reactions. ACI Materials Journal ,2006,103(03)
- [97] Etienne Grimal, Alain Sellier, Yann Le Pape, Eric Bourdarot. Creep, Shrinkage, and Anisotropic Damage in Alkali-Aggregate Reaction Swelling Mechanism-Part I:A Constitutive Model. ACI Materials Journal,2008(03)
- [98] Etienne Grimal, Alain Sellier, Yann Le Pape, Eric Bourdarot. Creep, Shrinkage, and Anisotropic Damage in Alkali-Aggregate Reaction Swelling Mechanism-Part II:Identification of Model Parameters and Application. ACI Materials Journal , 2008(03)
- [99] Stephane Multon, Francois-Xavier Barin, Bruno Godart, Francois Toutlemonde. Estimation of the Residual Expansion of Concrete Affected by Alkali Silica Reaction. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008(01)
- [100] 刘晨霞,陈改新.混凝土的碱骨料反应,中国水利水电科学研究院学报,2012 年
- [101] 徐艳杰.汶川地震宝珠寺重力坝地震响应的三维有限元模拟.地球物理学报,2012 (01)
- [102] 张艳红.混凝土坝地震损伤分析.水利水电技术. 2012 (01)
- [103] 牛志国.地震作用下混凝土坝的老化损伤分析. 水电能源科学,2012 (01)
- [104] 潘坚文.用改进有限元法研究重力坝强震断裂过程. 水利学报,2012 (02)
- [105] 程恒.沙牌拱坝整体抗震安全性评价.水电能源科学, 2012 (01)
- [106] 马来贵,马乐,张立林.地震荷载作用下混凝土重力坝损伤分析.水资源与水工程学报,2011 (06)
- [107] 李艳杰.地震作用下重力坝破坏过程与破坏形态数值模拟. 水利学报, 2011 (10)
- [108] 李昇.强震作用下混凝土重力坝破坏模式研究.水利水电技术, 2010 (02)
- [109] 杜荣强.大岗山和溪落渡高拱坝地震损伤比较分析.水力发电学报,2010 (05)
- [110] 杜荣强,林皋,王德信.混凝土坝地震安全评价的非线性损伤力学方法研究.首届全国水工抗震防灾学术会议论文集,2006 年
- [111] 王海波,杨会臣.混凝土重力坝段三维动力分析.水力发电学报, 2011 (06)
- [112] 包腾飞.混凝土裂缝转异监控数学模型研究. 中国科学技术科学, 2011 (09)

- [113] 方军棋,黄立波,王毅.江垵水利枢纽大坝监测与安全评估.中国水能电气化,2012 (03)
- [114] 顾冲时等.基于动力学结构突变的混凝土坝裂缝转异诊断方法研究.中国科学技术科学, 2011 (07)
- [115] 雷鹏,肖峰,苏怀智.混凝土坝运行期控制荷载分析.水利水电技术,2011 (02)
- [116] 唐旭升.坝踵裂缝深度对混凝土重力坝可靠度的影响.人民黄河,2011 (06)
- [117] 张冲.高拱坝开裂危险性分析.水电站设计,2011 (04)
- [118] 苏怀智.高重力坝抗滑稳定度分析.水利水电科技进展,2011(04)
- [119] 雷鹏.高混凝土坝空间变形预警指标研究.中国科学技术科学,2011 (07)
- [120] 姜亚洲,任青文,吴晶,杜小凯.基于双重非线性的混凝土坝极限承载力研究.工程力学,2011 (11)
- [121] 宋冬仿.有限元超载法在坝基抗滑稳定分析中的应用.人民长江,2012 (01)
- [122] 苏培芳.碾压混凝土重力坝安全度评价方法的研究.人民长江, 2012 (02): 78-82
- [123] 任威威,苏超,陈丽,王璞东.某混凝土高拱坝整体安全度评估.水力发电,2012(04)
- [124] 陈胜宏.混凝土坝服役寿命仿真分析的研究现状与展望.武汉大学学报,2011 (03)
- [125] 朱伯芳.论混凝土坝的使用寿命及实现混凝土坝超长期服役的可能性.[J].水利学报, 2012 (01) 1-9
- [126] 李文丽.碾压混凝土重力坝整体三维仿真分析.水利设计与规划,2011 (03)
- [127] 张国新,刘毅,朱伯芳,王仁坤.高拱坝真实工作性态仿真的理论与方法.水力发电学报,2012 (08)
- [128] 刘毅,张国新,王继敏,周钟.特高拱坝施工期数字监控方法、系统与工程应用.水利水电技术, 2012 (03)
- [129] 朱伯芳,张国新,贾金生等.混凝土坝的数字监控-提高大坝监控水平的新途径[J].水利发电学报, 2009 (01)
- [130] Mohamed Saafi, Lanouar Kaabi, Monica McCoy, Peter Romine. Wireless and embedded nanotechnology-based systems for structural integrity monitoring of civil structures: a feasibility study, 2010