

中国水电工程的抗震安全

陈厚群

中国水利水电科学研究院

摘要 中国的西部大开发战略正顺利实施中。占全国 80% 储量的丰富的水能资源是该地区的优势资源。水电的可持续发展之所以十分重要, 不仅为满足国家经济发展对电能不断增长的需求提供安全和清洁能源, 也有利于根除该地区的贫困。该地区有不少地质和地形条件适合修建有很好调节性能的高坝大库的坝址, 且其移民数量也较有限。但该地区也是我国主要的地震区, 地震强度和发震频度都很高。因此, 政府和公众对大型水电工程高坝的抗震安全都十分关注。为迎接 21 世纪我国水电建设高潮的到来, 对高坝抗震开展了广泛深入的研究, 已经取得了一系列在概念上有所突破的新的进展。本文简要介绍我国在水电开发中包括高坝抗震和水库触发地震在内的技术前景。

关键词 抗震安全 水电工程 拱坝 地震动输入 大坝混凝土动态特性

1 引言

水和能源及其对环境影响是我国经济发展和改善环境的制约因素。研究表明, 未来 20 年我国能源需求将翻一番。目前我国全国能耗的 77% 有赖于燃煤。煤的直接燃烧导致严重的环境问题。我国正致力于在能源供应结构中减少燃煤的比例。迄今, 风力、太阳能、地热、生物质和波浪能等的发电, 由于地理、经济和技术方面的限制, 只能作为辅助性能源。而储量占世界首位的水能资源, 对我国能源可持续发展和环境安全保障至关重要^[1]。我国西部集中了全国 80% 的水能资源, 是该地区的优势资源。但其开发程度却相当低, 至今还不足 10%。“实现可持续的高速、健康发展”以及“西部大开发”是我国政府对经济发展的根本的和宏观的战略。因此, 水电的快速和可持续发展不仅为满足国家经济发展不断增长的电力需求提供安全和清洁的能源, 也有利于西部地区的脱贫。该地区有不少地质和地形条件适合修建有良好调节性能的高坝大库的坝址, 且其移民数量也较少。但该地区是我国主要地震区, 地震的强度和发震频度都很高。据中国地震局统计, 近代我国 82% 的强震都发生在该地区。修建于该地区的大坝设计地震加速度 (a_g) 都很高, 诸如: 锦屏 ($H=305\text{m}$, $a_g=0.197g$), 二滩 ($H=240\text{m}$, $a_g=0.20g$), 龙羊峡 ($H=178\text{m}$, $a_g=0.23g$), 小湾 ($H=292\text{m}$, $a_g=0.308g$), 溪洛渡 ($H=273\text{m}$, $a_g=0.321g$), 白鹤滩 ($H=275\text{m}$, $a_g=0.325g$), 虎跳峡 ($H=278\text{m}$, $a_g=0.408g$), 大岗山 ($H=210\text{m}$, $a_g=0.542g$), 这些都是高拱坝。图-1 给出中国水电基地和大型电站位置图, 图-2 为 2001 年颁布的中国地震动参数区划图。此外, 高坝大库也易于导致水库触发地震, 其对环境的冲击和风险也深受坝工界关切^[2]。

鉴于高坝大库遭受强震损坏可能对周围地区造成严重的次生灾害, 因而为政府和公众所高度关注。面对中国水电发展中的这个关键技术问题的特殊挑战, 在高坝抗震方面已开展了广泛深入的研究, 并已取得了一系列在概念上有突破的新进展, 以迎接 21 世纪我国水电建设高潮的到来。



图一1 中国水电基地和大型电站位置图



图一2 中国地震动参数区划图 (2001年)

2 我国高坝抗震中的关键问题

在大坝抗震安全性评价中,坝址的地震动输入、坝体地震作用效应的分析计算,以及大坝混凝土的动态抗力是三个相互配套的主要因素。得益于中国西部的有利条件,拱坝常是首选坝型。因此,本文着重讨论高拱坝的抗震安全问题。

2.1 场地相关的地震动输入

输入地震动的选择是地震安全性评价的前提。通常以峰值加速度 (PGA)、反应谱 (有时还包括持续时间) 作为输入地震动的主要参数。但它们都有一些值得探讨的关键问题^[3]。

- 众所周知,对于高坝坝址至关重要的强地震峰值加速度 (PGA) 在近场区常难以预测。而且它主要取决于对高坝抗震的工程意义并不太大的地震波高频分量。
- 至今仍常沿用的所谓一致概率反应谱,体现了来自不同震级和震中距的各个地震反应的包络效

应，它并不能反应坝址实际可能发生地震的反应谱真实特性。

• 目前，以区分运行基本地震（OBE）和最大可信地震（MCE）的二级设防水准在大坝抗震设计中常被建议采用。实际上，大坝如果不能满足回归期 100~200 年一遇的（OBE）地震抗震要求，还能经受坝址可合理预测的最大地震（MCE）而不溃决，是难以想象的。更何况，目前（MCE）地震和它的相应抗震功能目标还是含糊不清和难以定量确定的。

2.2 坝体地震作用效应

至今，在高拱坝抗震设计对下列各个相当重要的问题，常难以作合理考虑^[4]：

- 强震时坝体横缝的局部张开和错动；
- 能量向远域地基逸散的地基辐射阻尼；
- 在邻近坝体的近域地基内的地形影响和包括两岸拱座潜在滑动块体在内的各类地质构造影响；
- 坝体—地基—库水的动态相互作用；
- 沿坝基各点地震动输入的差异。

尤其是对高拱坝抗震安全而言，其坝肩岩体的抗震稳定性是有决定意义的。但在目前的坝工设计中，仍沿用传统的“刚体极限平衡方法”进行校核。这个方法将坝肩岩体视作刚体，既不能计及坝体和坝肩岩体间的动态相互作用，也不能反映两岸坝肩岩体的动力放大效应。

2.3 大坝混凝土的动态性能

由于缺乏足够的大坝混凝土动态特性的试验和研究，它已成为高坝抗震安全评价中的“瓶颈”问题。目前在坝工界基本上还都采用筛去粒径 40mm 以上的粗骨料的湿筛小试件，而实际高坝施工中早已采用最大粒径为 150mm 的多级配大坝混凝土了。特别是，虽然大坝总是在其各部位已经受了不用静载作用应力的运行情况遭遇强震的，但静态预载时大坝混凝土动态性能的影响却一直都是被忽略的^[5]。

以上这些关键问题是当前中国水电开发中在抗震安全方面需要面对的特殊挑战。

3 我国高拱坝抗震设计和研究中的最新进展

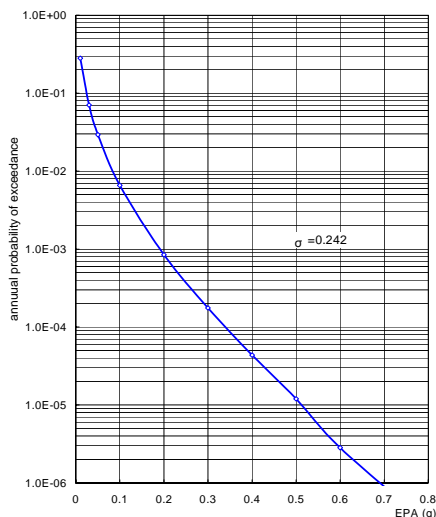
针对上述关键问题，反映高拱坝抗震安全评价最新进展的技术前景，也按其三个主要方面分述如下：

3.1 场地相关的地震动输入

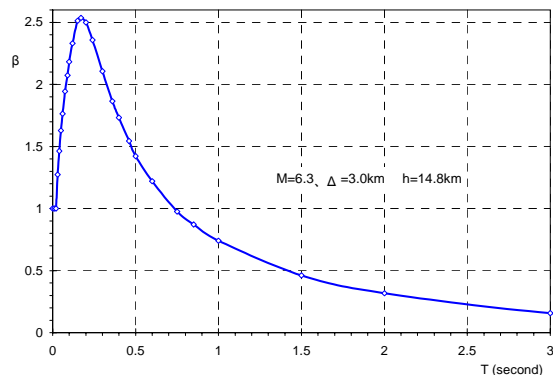
• 为取代现行的峰值加速度（PGA），在坝址地震危险性分析中采用了与反应谱相关联的有效峰值加速度（EPA）。基于对美国西部 145 个基岩上记到的强震加速度记录的谱分析，将（EPA）定义为 0.2s 周期处的加速度反应谱值除以其平均放大系数 2.5。从 Abrahamson 归纳的加速度反应谱衰减模型求得（EPA）的衰减规律。图—3 给出坝高为 292m 的小湾拱坝地震危险分析的（EPA）超越概率曲线。

• 为取代一致概率（或等震害）反应谱，提出了一种结合概率法和确定性方法的设定地震方法。该设定地震定义为在坝址产生与设计水准相应的（EPA）值的实际可能发生地震中概率最大者。由设定地震得出的场地相关设计反应谱更切合实际并具有明确的超越概率。图—4 给出其应用于小湾拱坝工程的实例。

- 同样，（MCE）可作为具有所在潜源震级上限和距坝址最短距离的设定地震而明确给出。



图一3 小湾拱坝地震危险性分析的超越概率曲线



图一4 小湾拱坝的场地相关设计反应谱

从而提出以 (MDE) 和 (MCE) 替代传统的 (OBE) 和 (MCE) 的双水准抗震功能设计的框架。

- 已形成更系统和实用的确定水库触发地震 (RTS) 的方法, 并在中国重大水电工程中应用。目前水库触发地震的数字式监测台网已在不少水电工程中建立。一个有 22 个固定台站和 8 个流动台站的大型数字式遥测台网已在三峡工程初期蓄水前投入运行。地理信息系统 (GIS) 平台也已在水库触发地震研究中被成功应用。

3.2 坝体地震作用效应

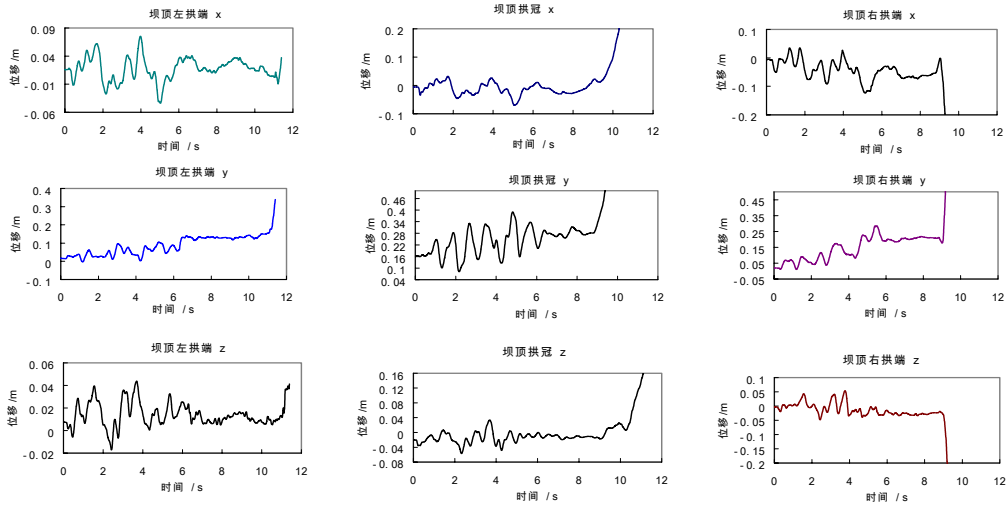
近年来, 在同时考虑前述各项关键因素时对高拱坝地震作用效应分析方面取得显著进展。在我国开展了一个更切合实际的高拱坝动力分析模型及其较有效的实用分析方法, 并已在工程实践中被广泛采用。

这个模型中的远域地基采用由廖振鹏院士提出的人工透射边界模拟^[6]。坝体内的伸缩横缝及坝肩各潜在滑动块体的边界都基于动接触理论作为具有摩擦力和粘滞力的接缝处理。使之能计入各接缝局部张开和滑移的影响。此外, 沿坝底与基岩交界面也设置了以各部位大坝混凝土强度作为初始强度的接触缝。这样既可考虑这些计入横缝影响后大坝抗震的最薄弱部位的局部开裂也改善了有限元方法导致在坝址难以避免的应用集中影响。

坝体和地基整个系统的模型在空间上以有限单元离散, 在时间上以中心差分法离散。运动方程作为波动问题在时域中显式求解^[7]。

在 (MDE) 地震作用下的功能目标是: 坝体的静动态综合最大主应力值在大坝混凝土允许强度范围内。但在 (MCE) 地震作用下库水失控下泄的极限状态, 则需通过整个坝和地基系统的动态失稳来判断。而在坝肩岩块稳定分析中, 传统采用的“刚体极限平衡”方法实质上是一个不计时间影响的静态方法, 无法考虑坝体和坝肩岩体间的动态变形耦合效应, 导致其结果难以反映整个体系在强震时的实际动态稳定状态。为此, 从工程实际出发, 提出了以整个体系位移反应出现突变作为失稳评定准则的新的概念。导致体系失稳的地震作用和 (MDE) 地震作用的比值可定义为地震超载安全系数。显然, 对 (MCE) 地震作用下的损伤准则可取其超载安全系数不小于 1.0。图一5 给出了小湾拱坝在假定的 EPA=0.540g 的极限地震作用下开始失稳时, 坝顶拱冠和两岸拱座的位移时间历程曲线。以此与小湾拱坝工程在 (MDE) 和 (MCE) 地震作用下的 (EPA) 分别为 0.300g

和 0.408g 比较, 相应的超载安全系数分别为 1.8 和 1.3。

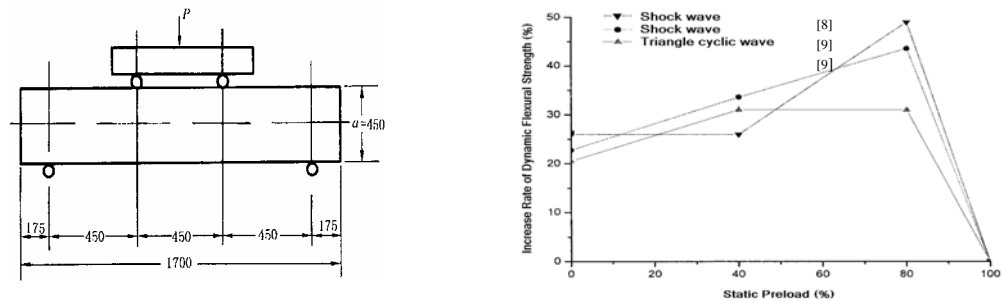


图—5 小湾拱坝在假定的 EPA=0.540g 的极限地震作用下开始失稳时坝顶拱冠和两岸拱座的位移时间历程曲线

3.3 大坝混凝土动态性能

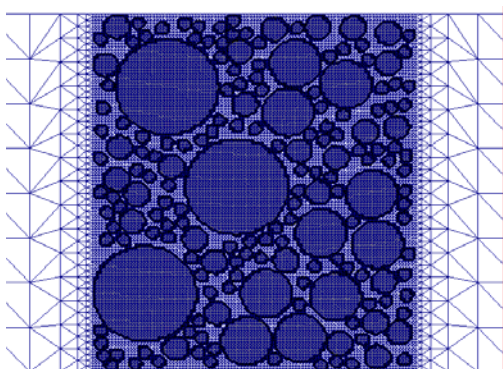
大坝混凝土以其多级配骨料导致更大的不均匀性而有别于一般混凝土。迄今, 大坝混凝土的动强度研究主要通过湿筛小试件试验, 比较在单纯的静态和动态加载时的强度。最近, 通过简支梁三点加载抗折试验, 比较了大坝混凝土在单纯静载作用下、及在不同静态预载下的脉冲型和循环三角形波动态加载下的弯拉强度。并且对于 150×150×1100mm 的湿筛小试件和 450×450×1700mm 的全级配大试件的结果进行了比较。

在试验结果中发现一个出乎通常预料的现象, 即由应变率效应引起的动强度增长随静态预载而提高, 见图—6 [8][9]。

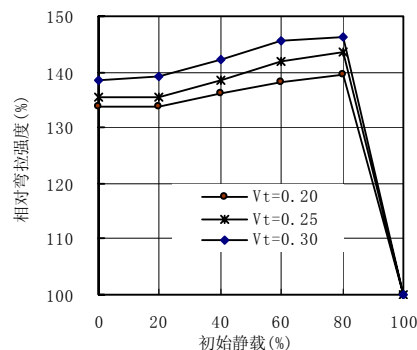


图—6 试验简图及不同静态预载下的全级配混凝土动态弯拉强度增长

为了对这些现象进行解释，并探讨大坝混凝土在动态弯拉加载时的破坏机制，采用细观力学和损伤本构模型对试件进行了动态数值分析。在细观力学模型中，全级配混凝土的各级骨料、



图一七 混凝土骨料颗粒分布及单元剖分



图一八 界面强度的离散性对静动弯拉强度的影响

水泥砂浆及两者胶结面都以有限单元离散。它们的空间位置和抗拉强度都按随机分布处理。根据诸多已发表的前人研究资料，对抗拉强度和弹性模量分别引入与应变率 ($\dot{\epsilon}$) 有关的动态增长函数 $H_t(\dot{\epsilon})$ 和 $H_e(\dot{\epsilon})$ 。图一八给出了试件简化为二维状态下的分析结果，其中 V_t 为胶结面抗拉强度随机分布的变异系数值。结果揭示：初强度随应变率的增长，会由于静态预载的损伤软化效应而加强。这个经细观力学分析合理解释的试验结果，可能会对大型混凝土坝的抗震安全评价有重要意义。目前，正对试件进行三维细观力学的分析，并应用了对颗粒随机分布的复合材料分析的多尺度渐近分析有限元解法。

4 结论

1. 为在我国西部开发丰富的水能资源并进行脱贫，在高地震区进行高坝大库的建设是难以避免的。
2. 高拱坝的抗震安全是我们必须面对的特殊挑战和应予高度重视的关键技术。
3. 由于缺乏先例，应基于持续而深入的科研成果，对一些并不适应高拱坝抗强震的传统概念要有所突破和取代。
4. 在中国水电发展中，对高拱坝的抗震安全，并不存在难以逾越的技术障碍。

[参考文献]

- [1] Zhang Jinshen. The WCE Report with respect to China's Dams, Paper of Symposium ICOLD-69th Annual Meeting Dresden, Sept. 2001.
- [2] Jiazheng Pan, Jing He. Large Dams in China; A Fifty-year Review, China waterpower Press, Beijing. 2000.
- [3] Chen Houqun, Li Min, Zhang Boyan. Input ground motion selection for Xiaowan high arch dam, Proc. of 13th world conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 2633. August 1-6, 2004.

- [4] Chen Houqun, Tu Jin, Zhang Boyan. Study on seismic behavior of Xiaowan high arch dam, Proc. of 21st International Congress on Large Dams, Montreal-Canada, Q.83, R.68, 16-20, June 2003.
- [5] Chen Houqun, Ma Huaifa, Mu Shengxing. An Attempt to Explain Dynamic Behavior of Dam Concrete. Paper submitted to Workshop of 73rd Annual Meeting of International Commission on Large Dams, Tehran, May 2005.
- [6] Liao Z.P. Introduction to wave motion theories for engineering, Science Press, Beijing, Chian, 2000.
- [7] Chen Houqun. On the performance-based seismic design of high arch dams, Invited paper for International Symposium “Earthquake Engineering in the past and future 50 years ”. Harbin, China, August 2004.
- [8] 候顺载、李金玉、曹建国, 高拱坝全级配混凝土动态性能的试验研究, 水力发电, 2002 年第 1 期, 51—53。
- [9] Wu Shengxin, Zhou Jukai, Shen Dejian, Chen Houqun. Flexual-tensile testing of full-graded concrete in static and dynamic states for high arch dam, Paper submitted to 4th International Conference on Dam Engineering, 18-20, October, Nanjing, China, 2004.