



Research
Hydro Projects—Review

水库大坝的安全问题和已建大坝的抗震安全性

Martin Wieland^{a,b}

^a Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams, Paris 75116, France

^b Poyry Switzerland Ltd., Zurich 8048, Switzerland

ARTICLE INFO

Article history:

Received 7 April 2016

Revised form 29 June 2016

Accepted 24 August 2016

Available online 19 September 2016

关键词

大坝
抗震设计
地震安全性
已建坝
设计标准
地震灾害
可持续性
使用寿命

摘要

对任何蓄水大坝工程的基本性能要求都是安全性，它包括以下安全要素：①结构安全性；②大坝安全监控；③运行安全和维护；④应急计划。长期安全包括：首先，分析影响项目的灾害，即自然灾害、人造环境灾害、特定项目和特定场地灾害。本文讨论的是大坝地震安全的特点。大坝是自20世纪30年代以来最早开始进行系统性抗震结构设计的建筑物，但由于多数大坝设计采用的是现今认为已过时的地震设计标准和动态分析方法，因此无法了解那些老坝的地震安全性。因此，需要基于当前最新做法，重新评估已建坝的地震安全性，并改造有缺陷的大坝。通常建议对大坝进行特定场地的地震危险性分析。当前的大坝以及用于控制强震后水库安全的设施必须能承受安全评估地震的地面运动。地震动参数可以利用概率或确定性地震危险性分析确定。强震作用下，大坝可能发生非弹性变形，因此需要在时域内进行地震分析。此外，地震对大坝造成的危害包括地面震动、断层移动、块体移动等。工程师所需的地面运动并非实际的地震地面运动，而是地面运动模型，用以进行大坝的抗震安全设计。同时必须牢记，在大坝较长的生命周期内，需要进行多次大坝安全评估。

© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

任何结构或基础设施的基本性能是安全性。因此，对于蓄水大坝，关注重点必须是大坝的长期安全性。现今，大坝安全性需要一个整体的概念，包括以下要素：

- (1) 结构安全；
- (2) 大坝安全监控；
- (3) 运行安全和维护；
- (4) 应急计划。

大坝的长期安全包括：分析影响项目的灾害，即自然灾害、人造环境灾害、特定项目和特定场地灾害。由于现今大坝的结构安全性通常受地震荷载状况

控制，因此，我们主要讨论大坝地震安全特性。

对于大坝，通常建议进行特定场地的地震危险性分析，而这些分析是由地震学家进行的。重要的是，大坝工程师作为地震灾害分析结果的最终用户，清楚规定了大坝工程所需的地震安全概念，但这是地震学家不熟悉的。当前的大坝和用于控制震后水库安全的相关设施(如溢洪道闸门和底部泄水孔闸门)必须能够承受安全评估地震(SEE)工况。SEE地震动参数可以通过基于概率方法的地震危险性分析，或考虑最不利地震情形的确定性分析方法确定。SEE期间，大坝可能发生非弹性变形，因此需要在时域内进行地震分析。一般情况下，可由地震学家提供反应谱或一致概率反应谱作为其地震灾害研

E-mail address: martin.wieland48@gmail.com

2095-8099/© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: Engineering 2016, 2(3): 325–331

引用本文: Martin Wieland. Safety Aspects of Sustainable Storage Dams and Earthquake Safety of Existing Dams. *Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2016.03.011>

究结果,但是对于大坝的非弹性分析则需要加速度时程。此外,地震对大坝的危害包括:地面震动、断层移动、块体移动及其他对特定工程和特定场地的影响。同时也需要考虑水库触发地震活动(RTS)。

大坝工程师所需的地面运动(加速度时间历程)并非实际的地震地面运动,而是地面运动模型,它将用于大坝安全设计。

同时必须牢记,在大坝较长的生命周期内,需进行多次大坝安全评估。

大坝地震分析和设计的最新实践记录在国际大坝委员会(ICOLD)针对大坝地震设计编制的技术公报和导则[1-5]中,即

- (1) 公报112,新构造学与大坝[1];
- (2) 公报120,有效抵抗地震地面运动的大坝设计特点[2];
- (3) 公报123,大坝附属结构抗震设计和评估[3];
- (4) 公报137,水库和地震活动状态知识[4];
- (5) 公报148,大型坝地震动参数选择[5]。

公报112和137分别与建于断层上的大坝和水库触发地震相关,即大坝地震灾害的特点。公报120和121提供在强震期间表现良好的大坝抗震设计概念和抗震设计结构特点的相关导则。公报148提供大坝、相关安全设施和附属结构的最新地震设计导则。

相关安全设施是指溢洪道闸门和底部泄水孔,其在地震后必须发挥作用,以便控制水库水位,并在大坝损坏的情况下,降低水库水位,以便对大坝进行修复和(或)加固。

本文基于国际大坝委员会大坝抗震专委会针对大坝设计编制的出版物[1-5]和作者已发表的论文[6-9],提供关于地震灾害、地震设计、性能标准、已建坝地震安全和大坝的可持续性的概况。

2. 地震灾害

地震灾害属于多元性灾害,包括针对大坝的以下主要灾害[9]:

- (1) 地面震动;
- (2) 坝基沿断层或不连续面错动;
- (3) 块体移动进入水库,形成冲击波,致使水库水位上升、输电线路受损、道路堵塞等;
- (4) 特定项目和特定场地灾害(如地面变形、渗漏、液化等)。

地面震动通常被视为主要的地震灾害。但是,混凝土坝的坝基移动比地面震动更加危险,因为任何移动将导致高度超静定的拱坝,产生复杂且无法用数字模型进行可靠预测的开裂。当坝基移动和地面震动同时发生,造成大坝开裂,坝的动态性状变得相当复杂。因此,需要认真研究坝基移动的可能性。即使没有震源断层通过坝基,附近断层的强震也可能导致坝基沿不连续面移动。不连续面是指断层、剪切区、裂缝、接缝和层理面。由于地基移动取决于场地条件和地震活动断层与最大表面移动的距离,因此,地基移动的状况是难以预估的。某些断层甚至可能在地表附近裂开,造成不连续面。

相对于拱坝易受坝基错动损害,经适当设计的土心墙堆石坝可以应对此类移动。因此,在可能存在断层移动的情况下,适当设计的土心墙堆石坝将成为合适的解决方案[1,2]。

块体移动进入水库将形成可能漫过坝顶的涌浪。与土石坝相比,混凝土坝更加适于抵抗有限的漫顶。然而,借助充足的超高、较宽的坝顶和(或)上游护墙或防浪墙,可以减少甚至消除漫顶导致的灾害。

此外,块体移动进入水库将增加库区沉积量,可能堵塞底部泄水孔。但是这通常在地震后数月或数年内发生,有时间采取补救措施。

山区岩崩可能损坏输电塔,导致发电厂自动停机。但更重要的是,岩崩将损坏闸门控制结构、设备、应急电源发电机、控制装置等,这些是操作溢洪道和底部泄水孔闸门所需的。必须保证强震后这些闸门仍可操作,以便用于控制或降低水库水位,并适当泄洪。如果这些闸门被堵塞,可能导致漫顶,将使土石坝比混凝土坝面临更严重的安全问题。

因此,可以得出结论,需要从地震学家和地质学家处获取以下相关资料:①地面震动;②坝基移动(如果计划建造整体式混凝土坝,此点至关重要);③坝和水库区内临界比降。

通常,地震危险性分析仅与地面运动参数估算相关,如峰值地面加速度(PGA)和反应谱。

可利用Wieland [9]和ICOLD公报148 [5]论及的概率方法和(或)确定性地震灾害分析方法确定地面运动参数。因此,坝体和相关安全构件必须能够承受1万年重现期(概率性分析)或最不利地震情形(确定性分析)下安全评估地震(SEE)的地面运动。在概率性分析中,应使用地面运动参数的平均值,而在确定性分析中,应使用平均值加一个 σ 值。如果同时采用概率性分析和确定性

分析(推荐做法), 应使用最大地面运动参数。

在观察100个以上大坝的水库触发地震活动(RTS) [4]后认为, 尽管可能与地震预报一样困难, 但地震学家有必要研究此类灾害, 并对事态有所预判。一般情况下, 由于大坝抗震设计已采用最大设计地震, 因此, RTS并不控制大坝安全问题, 但是可能影响大坝和水库区内采用较低设计地震值(与大坝相比)的建筑物和基础。此外, 中级地震的频率噪声可能对人员有所干扰。

3. 地震设计标准

对于大坝工程的不同结构和构件的抗震设计[5,9], 需要采用以下内容设计地震:

(1) 安全评估地震(SEE): SEE的设防目标是保证大坝能够抵御不受控的库水泄放。SEE用于大坝及安全相关构件的安全评估和抗震设计。在SEE后, 大坝及安全相关构件必须能够发挥作用。

(2) 设计基准地震(DBE): DBE重现期为475年, 为许多国家采用, 是附属结构的参考设计地震。DBE地面运动参数是基于概率性地震危险性分析(PSHA)得出的, 可以采用DBE地面运动参数的平均值(注: 可依据工程所在区域建筑物或桥梁的地震规范和规定, 确定DBE的重现期)。

(3) 运行基准地震(OBE): OBE是预计在大坝生命周期内可能发生的, 要求大坝必须无损坏或功能损失。在100年的大坝生命周期内, 其发生概率约为50%。重现期取145年[5]。OBE地面运动参数基于PSHA估算, 可以采用OBE地面运动参数的平均值。

(4) 施工地震(CE): CE用于临时结构物(如围堰)设计, 并考虑临时结构的使用寿命。目前, 存在若干不同的计算方法。对于临时导流设施, 假定其设计寿命存在10%的超越概率。此外, 施工导流设施的CE重现期可以采用导流设计洪水的重现期。

可以利用概率法或确定性地震灾害分析法确定SEE地面运动, 即

(1) 最大可信地震(MCE): MCE是根据地震历史和区域地震构造, 预计在坝址区发生的最大地面运动, 基于确定性地震情形进行估算。根据ICOLD [5]规定, MCE地震动参数应当取84百分位数(平均值+标准差)。

(2) 最大设计地震(MDE): 对于大坝而言, MDE的重现期为1万年。对于小的或有限损坏的大坝, 规定

的重现期可能缩短。MDE地面运动参数可基于PSHA估算。根据ICOLD [5]规定, 应当采用MDE地面运动参数平均值。在单一地震源(断层)成为主要地震灾害的情况下, 可将一致概率反应谱用于此地震设计。否则, 可以根据地震危险性按照潜源的震级与震源距分解, 确定不同的地震情形。

对于主要大坝而言, SEE可视为MCE或MDE地面运动。通常情况下, 必须采用上述两种地震的最不利地面运动参数。如果无法对MCE进行实际评估, 则SEE至少应等同于MDE。

通常用概率方法(推荐采用地面运动参数平均值)确定MDE、DBE、OBE和CE地面运动参数; 对于MCE地面运动, 通常使用确定性地震情形(应当使用地面运动参数值的84百分位数)。但是, 对于MDE、DBE、OBE和CE, 也可以定义确定性情形。

不同设计地震由以下地震动参数定义:

(1) 水平和垂直地震分量的峰值地面加速度(PGA)。

(2) 典型的水平和垂直地震分量的加速反应谱为5%阻尼, 即从概率性地震危险性分析中获取CE、OBE、DBE和MDE的一致概率反应谱(平均值), 以及用不同衰减模型从确定性分析中获取MCE加速反应谱值的84百分位数。

(3) 通过随机过程或记录地震地面运动的缩放比例, 确定MCE地面运动水平和垂直分量的反应谱拟合加速度时程。水平和垂直地震分量的人工加速度时程应属于随机独立变量。考虑到余震, 建议增加地面强震的持续时间。

在断层移动的情况下, 需要对地面震动进行类似估算。由于地震灾害分析主要与地面震动相关, 因此, 大坝设计师似乎难以对不同类型设计地震的断层移动进行定量估算。

对于地下结构物, 其外加变形作用比惯性效应影响更大, 也需要不同设计地震的位移地面运动参数或位移时程。

通过加速度时程可更好地描述地面运动。大坝及其附属设施的任何非线性动态分析均需要地震动时程。可以预计, 在SEE地面运动下大坝将发生非弹性变形。根据ICOLD [5]规定, 应考虑“设计加速度时程”的以下几个方面:

(1) 反应谱拟合的加速度时程的三个分量必须分别统计。

(2) 可假定顺河向和横河向的水平地震分量的加速度时程。若采用其他方向, 亦无需修改。

(3) 应以涵盖余震的方式选择地面强震的持续时间，即应选择具有较长地面强震持续时间的记录。

(4) 对于易受损坏过程影响及与地面强震持续时间相关的大坝(如孔隙压力积聚)，应使用具有较长地面强震持续时间的地震记录。

(5) 对于大坝的安全复核，至少应考虑SEE地面运动时三种不同的地震。

延长的地面强震持续时间(用于大坝抗震分析和设计)的反应谱拟合加速度时程，可能与实际时程截然不同；尽管不熟悉大坝抗震设计的地震学家和其他专家难以理解或接受，但它们将用于安全设计。

应当指出的是，在任何结构(包括大坝)设计中，设计师将使用简化荷载和分析模型进行安全设计，即使荷载模型与实际灾害性质不相符，这也适用于地震灾害和地震地面运动。

对于某些大坝，针对水库触发地震活动(RTS)或水库诱发地震活动(RIS)，确定附加地震荷载状况[†]。观察到100座以上水库，在水深超过100 m处发生过RTS。RTS最大震级达6.3；但是，多数情况下，此类浅源地震的震级往往较小。如果大型坝工程可能或预计存在RTS，那么，DBE和OBE地面运动参数应涵盖假定在水库蓄水后几年内发生RTS时的参数[4]。

4. 地震性能标准

ICOLD公报148 [5]针对坝体和安全相关构件及设备给出的一般性能标准可理解如下[9]：

(1) OBE期间的坝体性能：大坝和水库不出现影响运行的结构性损坏(裂缝、变形、渗漏等)，可修复的轻微损坏亦可接受。

(2) SEE期间的坝体性能：结构破坏(裂缝、变形、渗漏等)是可接受的，只要确保坝体稳定性，且不会出现大量库水下泄，造成大坝下游区域洪水泛滥。

(3) OBE期间及之后的安全相关部件和设备的性能：在OBE之后，这些部件和设备应完全可以操作，且OBE期间，其应保持弹性状态。

(4) SEE期间及之后的安全相关部件和设备：在SEE后，这些部件和设备必须完全可操作。可接受轻微变形和损坏(如闸门密封件渗漏)，只要不影响部件和设备的相关功能。

对于SEE，防渗心墙堆石坝的主要安全标准如下：

(1) 超高损失，即地震后，水库水位应低于大坝防渗心墙顶部。

(2) 内部侵蚀，即地震后，细反滤区至少50%的初始厚度必须可用。

(3) 地震后边坡的滑动安全系数(考虑到填筑材料的孔隙压力积聚和残余强度参数)应大于1。

第二个标准同样适用于坝基位于强震期间可能移动的断层或不连续面的土心墙堆石坝。此外，此类场地仅适宜修建土心墙堆石坝。

混凝土坝的主要地震安全标准如下：

(1) 坝基稳定性，即拱坝坝肩楔体和重力结构沿潜在滑动面滑动的稳定性。

(2) 由伸缩缝和水平裂缝形成的混凝土块的滑动和倾覆稳定性，即大坝中心顶部附近的混凝土块需经受的最大绝对加速度响应。

可以得出结论，发生强震后，当发电厂停机，水无法通过发电水道泄出时，只要底部泄水孔和溢洪道闸门可操作，便可安全泄放适量的洪水。为了控制强震后的水库水位，无需所有溢洪道孔口均发挥作用。

5. 地震安全和大坝的风险分类

5.1. 整体大坝安全概念

安全概念的两个主要目标是使所有风险最小化，并以可能的最佳方法控制剩余风险。为达到这些目标，大坝工程采用整体安全概念，主要包括以下要素：

(1) 结构安全性(主要要素：地质、水力和抗震设计标准；当出现新数据，或制定了新导则、规定或规范时，设计标准和分析方法可能必须更新)。

(2) 大坝安全监控(主要要素：大坝监测仪器、坝工专家定期安全评估)。

(3) 运行安全性(主要要素：正常和异常水文条件下水库运行的可靠运用曲线、人员培训、大坝维护、清淤、工程支持。较长使用寿命的最重要要素是维护所有结构和构件)。

(4) 应急计划(主要要素：应急行动计划、洪水淹没图、水位报警系统、疏散计划等)。

因此，只要根据整体安全概念确保上述安全要素得到适当执行，大坝即可视为安全的。

[†] 注：过去经常使用的术语“水库诱发地震活动”并不正确，因为水库无法诱发地震，而是触发地震。因此，正确的技术术语为“水库触发地震活动”。

定期进行安全评估是必不可少的, 可据此得知为了维护或改善安全性, 或者延长使用寿命需要采取的措施。试运行后, 必须尽快纠正观察到的不足之处。不同大坝安全要素的详细描述请参见文献[9]。

如果一座大坝不符合当前大坝安全标准或出现异常状况, 则降低风险的最有效方式是降低水库水位。

必须指出的是, 新建和已建大型大坝必须满足当前的适用安全标准。因此, 不推荐采用基于风险的考虑剩余使用寿命的方法。总之, 对于住在新建或已建大坝下游的人员, 其安全性应无差异。这意味着不得推迟安全更新。

5.2. 应急计划

在许多国家, 应急计划仍然是大坝行业较新型的事务, 因此, 在此进行额外讨论。在应急计划概念中, 假定每座坝都可能倒塌或损毁, 尽管设计师、业主和管理机构对这一假定难以接受。因此, 必须分析水库失控洪水下泄引起的大坝失事的后果。

可以考虑众多大坝失事的情形, 但是应急计划的主要目的是挽救生命, 因此, 必须将重点放在发生最坏情形和最严重后果时的报警和人员疏散。这些情形不考虑大坝失事概率。最坏的情形是军事行动造成的蓄满水的水库大坝瞬间溃决。

在紧急情况下, 大坝业主负责监控, 确定相应的报警级别, 发出通知, 在大坝实施紧急行动, 确定紧急情况解除时间, 并记录所有活动。在紧急情况下, 大坝业主立即通知负责报警和疏散受影响人口的管理机构。

使用专用水位报警系统进行报警。疏散计划是依据溃坝洪水波分析, 其显示最坏失事情形下的淹没区域, 即大坝瞬间溃决。此外, 从分析中获取洪水波到达时间、流动速度和水深。

瑞士的65座大型坝均配备有功能齐全的洪水报警系统。第一个报警系统安装于50多年前。幸运的是, 到目前为止, 这些洪水报警系统从未使用过。

5.3. 大坝风险分类

什么是大型坝? 这似乎是一个微不足道的问题, 但如果谈及大坝(风险)分类, 实际上没有统一答案。根据ICOLD标准, 大型坝是至少15 m高的蓄水坝。

在中国, 蓄水坝根据水库库容分类, 库容大于 10^9 m^3 的为1级, $10^8 \sim 10^9 \text{ m}^3$ 的为2级, 小于 10^8 m^3 的为3级, 依此类推。在瑞士, 大坝分类按法律法规进行, 大坝高度至少10 m, 库容超过 10^6 m^3 的大坝被归入高风险级别。

其他的大坝主管部门、组织和业主采用其他定义。因此, 瑞士最高风险类别的160座大型坝中, 只有12座属于中国的2级坝, 多数是3级以下甚至更低的坝。

大坝的风险分类对(地震)设计标准、性能标准和其他规范或规定的设计要求有深远的意义。因此, 在不同国家和业主的大坝抗震安全评估中, 有必要首先调查大坝的风险分类。

可接受风险是风险分类的主要问题。任何定量风险分析的前提条件都是大坝失事概率计算。由于每座坝都是特定的, 只能通过各种大量计算, 包括大量敏感性分析来大致完成。由于这些困难, 要求建坝时更明确地专注于尽可能减小大坝溃决库水失控下泄形成洪水的可能性, 比如在瑞士。

总之, 大坝的风险分类是一个悬而未决的问题, 不同国家和业主之间的差异非常大。

6. 大坝的可持续性

一个可持续的大坝项目需以下述条件为基础: ①安全方面; ②环境方面; ③经济方面; ④社会方面。大坝是基础设施, 必须向利益相关方提供利益(食品生产、供电、供水、防洪、水产养殖、休闲娱乐、通航等)[8]。

技术安全是一切技术的决定条件, 任何不安全的技术都是没有前途的。一些老坝的建坝历史已超过2000年, 但仍然在使用。大坝可持续的主要前提是大坝安全。尽管其他要求也很重要, 但是首先必须确保大坝安全。为了多用途坝的设计和施工, 要求大坝工程管理者必须是大坝或土木工程师, 而不是技术背景和经验不足的人。

建坝产生的水库必须适当管理, 大坝也需要持续维护。许多大型水库用于发电和防洪。然而在未来, 水库将成为更有价值的生活和工业供水来源。因此, 对大坝和水库的需求将继续存在。不论其他的特定用途如何, 对所有大坝的可持续性和安全性要求将持续存在。

私营业主和基础设施开发人员使用特许期作为大坝项目的设计寿命。例如, 瑞士的水电站项目特许期为80年, 其他国家特许期可能短至30年。大坝业主将保证所有的结构和设备的设计满足特许期的要求。特许期满时, 项目的所有权通常被移交给政府。因此, 特许权和特许期结束时, 授予特许权和特许期满后拥有该项目的主管部门必须特别关注还剩余很多使用年限的大坝。

此外, 大坝的试运行费用通常被忽视, 不得不由未

来的业主承担。这意味着，政府应规定，大坝的设计需符合已发布的国际导则，如ICOLD发布的规定。机电设备和控制设备可能是唯一在特许期结束时，需要进行更换的构件。因此，对于一个可持续的大坝项目，坝体以及与大坝安全相关的设施和组成部分均应设计为具有长使用寿命，而不考虑特许期。因此，大坝项目的最终所有者必须在授予特许权期间便考虑到这些问题。

任何大坝在其生命周期内都应是技术上安全和可操作的。鉴于大型蓄水坝的潜在破坏力，必须按照第4部分中讨论的完整安全概念进行安全评估。

一般情况下，如果一个大坝以及安全相关设施(底孔、溢洪道)都得到适当的维护，其老化过程可以控制，则大坝的状态能得以保护。因此，可以得出结论，即适当维护可保证大坝寿命，也就是说，大坝可能具有几百年的使用寿命。

泥沙淤积严重将影响水库使用寿命。适当的泥沙管理策略可以使水库泥沙淤积维持正常，这些策略必须立足于对河流的详细研究以及泥沙输移、流域特点和冲沙装置等。

7. 已建坝的抗震安全性

虽然大型水坝是自20世纪30年代以来最早进行系统性抗震设计的建筑物，但由于多数老坝的设计采用的是现今认为已过时的地震设计标准和分析方法，所以这些坝的地震安全性是未知的。因此，需要采用现行抗震设计标准和现代的动态分析方法，重新评估已建坝的抗震安全性，修复有缺陷的大坝。

已建坝在抗震安全性方面面临的一个重要问题是，大多数有关大坝的规范、规定、建议和导则主要是针对新大坝的设计[7]。

试运行时被认为是安全的大坝设计未必永远安全，这可能与大多数建筑业主和用户的看法不一致。由于地震工程学仍然是一个相对年轻的学科，因此，设计标准、分析方法、设计理念等可能会发生变化，尤其是按照当前水准设计的大坝在地震中遭受损坏时。因此有必要定期检查大型坝的抗震设计标准和地震安全性(其他结构也一样)，即必须考虑定期抗震检查的预算。

一般情况下，大坝业主和经营者都不愿意执行这种检查，除非有法律、规定和大坝安全监管机构制约，该机构有权利和方法确保规则得到遵守执行。一般来说，当大坝业主为其项目申请新的特许权时，应对设计标准

进行全面评估。

再者，一旦被视为安全的东西将永远保持安全，这种看法是危险的错误观念。因此，在大坝漫长的生命周期内，需要进行多次地震安全性评估。

到现在为止，只有一座高18.5 m的土石坝在2011年日本东北大地震中损毁，大坝失事引发的洪水造成8人丧生。这件事给人的印象是，精心设计的大坝经历地震还是安全的。如果有必要，应该按照现行最先进的做法重新评估已建坝的抗震安全性和改善已建坝。

首要的是，必须重新评估坝址区的地震危险性，确保符合现行抗震设计标准。

笔者1999年负责国际大坝委员会大坝抗震专委会时，就一直关注调查已建坝的地震安全性。从那时起，一些国家一直在积极调查已建坝的抗震安全性。20世纪90年代，在加州大型坝的综合地震安全性检查中，发现116座大坝需要改进，包括控制(降低)水库水位。瑞士大坝业主对政府管理的所有大型坝的地震安全性进行了评价，安全报告于2013年年底前提交。报告显示：大坝的平均年龄为65年，其中大部分使用0.1的地震系数和拟静力分析方法进行抗震设计。对于地震安全检查，政府部门已规定了一个10年的期限。然而，大多数国家的报告只在给定的截止期限前不久才完成。

国际大坝委员会大坝抗震专委会强烈建议，世界各地都要对年限较久的大坝进行抗震安全性检查。

8. 结论

在大坝的抗震设计和地震安全性评价中，主要关注下列项目：

(1) 对大多数大坝工程来说，地震灾害是多元灾害。地震动是所有大坝地震准则中需要考虑的主要危害，然而，落石和断层移动可能比地震动更为危险。

(2) 当附近发生强烈地震时，坝基中活动断层的移动或不连续面(断层、节理、层理面)的运动可能是活跃的，这对于混凝土坝是最严重的危害。如果没有其他位置可以选作坝址，那么正确的解决方案就是，设计一座土心墙堆石坝，并设宽反滤区和过渡区。

(3) 现今大型坝的地震安全性包括以下要素：①结构安全；②大坝安全监测；③运行安全和维护；④应急计划。所有要素都是同样重要的。

(4) 抗震安全并不是大坝固有的性质，但可以利用能安全抵抗地面强震影响的抗震设计和建造技术，来保

证大坝及附属结构物的安全。

(5) 由于安全是可持续性的先决条件，多数大坝设计将地震荷载作为临界荷载，对地震灾害(洪水)的各种安全管理已经成为大坝可持续的基本要求。

(6) 即使一个土木结构在建设时是安全的，但不能保证其在生命周期内永远安全，这是不现实的。在大坝的生命周期内，需要对其进行多次地震安全评估，因为可能出现下述情况：得到地震灾害新信息，有新的设计和安全标准被采用，下游山谷的发展导致地震危险性增强。

(7) 保持大坝处于安全状况需要对设备、设施及土木结构进行妥善保养。对土木结构维护的关注少于对电厂设施维护，因为后者的好处可以直接体现在发电量上，而土木结构维护和大坝安全不产生可见的效益。因此，需要适当的平衡。

(8) 有关新坝型(混凝土面板堆石坝、沥青心墙坝、土工膜面板土石坝、碾压混凝土坝等)和高坝经受强烈地震时的动态性状，迄今几乎没有得到任何观测数据。

(9) 为在发生强烈地震后控制和降低水库水位，溢洪道和底孔闸门在震后必须能够操作。这些闸门系统的抗震设计准则与坝体采用的准则是相同的；然而，性能标准必须是能保证地震后闸门的功能。设计师和闸门系统的供应商尚不熟悉这些地震安全性要求。

为了进行抗震分析、设计和安全评估，需要世界各国科学家提供下列信息：

(1) 坝基中活动断层或不连续面的情况，在强震时

可能被激活，并产生最大的动力。

(2) 坝址遭受最强烈地震的参数(断层、位置、震源深度、震源机制、最大震级、最大断层错动)。

(3) 鉴定在强震时可能被破坏或移动的坝址处或者水库边坡。

(4) 加速度时程是大坝的非弹性地震分析必需的输入参数。表现这些理想化时程曲线的荷载模型，与实际记录的加速度时程的共同点很少。

References

- [1] ICOLD. Bulletin 112: neotectonics and dams. Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams; 1998.
- [2] ICOLD. Bulletin 120: design features of dams to effectively resist seismic ground motion. Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams; 2001.
- [3] ICOLD. Bulletin 123: earthquake design and evaluation of structures appurtenant to dams. Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams; 2002.
- [4] ICOLD. Bulletin 137: reservoirs and seismicity —state of knowledge. Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams; 2011.
- [5] ICOLD. Bulletin 148: selecting seismic parameters for large dams, guidelines. Paris: Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams; 2016.
- [6] Wieland M. Seismic aspects of dams, general report, Q.83 seismic aspects of dams. In: Proceedings of the 21st International Congress on Large Dams; 2003 Jun 16–20; Montreal, Canada; 2003.
- [7] Wieland M. Earthquake safety of existing dams, keynote lecture. In: Proceedings of the 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of the 13th European Conference on Earthquake Engineering & 30th General Assembly of the European Seismological Commission); 2006 Sep 3–8; Geneva, Switzerland; 2006.
- [8] Wieland M. Safety aspects of sustainable storage dams. In: Proceedings of the 3rd International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Mini-Symposium on Sustainable Dams and Embankments; 2012 Oct 3–6; Vienna, Austria; 2012.
- [9] Wieland M. Seismic hazard and seismic design and safety aspects of large dam projects. In: Proceedings of the 2nd European Conference on Earthquake Engineering; 2014 Aug 24–29; Istanbul, Turkey; 2014.