

文章编号: 1672-3031(2009)02-0126-08

水工抗震学科国际科学技术发展动态跟踪

王海波

(中国水利水电科学研究院 工程抗震研究中心, 北京 100048)

摘要: 结合国内水工结构抗震研究的发展, 对近年发表于相关领域的国际期刊杂志的工程抗震研究最新发展进行调研。伴随实际强震、近震地震动记录及震害资料的不断丰富, 工程抗震研究也得到了不断深入, 近期国内外在工程抗震的关注点主要包括基于性能的抗震设计、设计地震动参数的确定、近断层地震动的脉冲特征、地震动持时对结构地震损伤的影响、增量动力分析、混凝土大坝开裂后的动力稳定、地震动时空非均匀性对拱坝地震响应的影响等方面, 本文对上述关注点进行了概括总结。

关键词: 抗震设计; 地震动参数; 抗震性能

中图分类号: TU352

文献标识码: A

1 研究背景

水工抗震学科重点研究对象是水工结构, 特别是大坝等壅水建筑物在地震作用下的安全。地震是发生频度低但破坏力巨大的突发性自然灾害, 地震时大坝一旦遭到严重破坏而导致库水失控下泄, 对水库下游的生命财产造成的次生灾害损失将远远超出大坝自身的损失。我国水力资源集中的西南地区正是我国地震频度高、烈度强的区域, 因此水工抗震研究是我国水利水电建设的关键问题之一。进行工程结构抗震安全设计涵盖地震学、地震构造学、工程地质、岩土工程、结构动力学、工程材料、计算力学、随机过程等诸多学科的理论及成果。在进行结构抗震设计与抗震评价的过程中, 首先必须根据结构物的重要性及抗震设防目标确定结构场地的设计地震动及相应的地震动参数。地震对结构的作用十分复杂, 不仅受地震所产生的地表振动特性及地表永久变形影响, 还与结构物自身的动态特性、复杂的动态相互作用等诸多因素相关。因此, 对于大坝这类复杂结构进行地震响应计算过程必须力求真实反映场地振动特性、结构、基础的动态力学特性, 结构与基础、结构与库水的动态相互作用, 以及构造面和材料动态特性等复杂因素。抗震设计随工程设计阶段的各种资料信息的不断完善而逐步深化, 最终给出能够反映工程结构实际的抗震安全性评价。

2 调研背景

本调研涉及 2006 年和 2007 年工程抗震学科国际权威学术刊物, 地震工程与结构动力学 (Earthquake Engineering and Structural Dynamics)、土动力学与地震工程 (Soil Dynamics And Earthquake Engineering)、地震谱 (Earthquake Spectra) 等 11 种主要期刊上发表的相关论文, 2006 年召开的第 1 届欧洲地震工程与地震学会议 (First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology)、第 13 届世界地震工程会议 (13th World Conference on Earthquake Engineering) 等国际会议的会议论文。美国联邦应急情况管理机构 (Federal Emergency Management Agency)、美国联邦能源管理委员会 (Federal Energy Regulatory Committee) 等国外机构有关研究报告也作为主要信息来源。根据相关论文的研究成果, 总结分析了当前国际工程抗震领域主要研究动向、新的观点及理论、研究方法手段、抗震技术及最新研究进展。

收稿日期: 2009-04-10

作者简介: 王海波 (1961-), 男, 山东人, 教授级高级工程师, 从事水工结构抗震研究。E-mail: wanghb@iwahr.com

3 学科发展新动向和关注点

水工结构抗震属于工程抗震的一部分,主要特点在于水工结构形式及其构筑材料与其它土木结构的显著不同以及静水荷载对结构的作用。而抗震设计的主要理念、目标、方法有更多共同之处。

近年工程抗震学科受关注最多的是基于性能抗震设计(Performance-based seismic design, PBSBD),简称为性能设计。性能设计所包含的内容也在不断完善之中,在国内外的一些土木及建筑抗震设计规范中已经部分采用了性能设计(例如, Eurocode 8),而进一步发展的性能设计目标将要求给出结构性和非结构性损伤所造成的生命及财产损失评估(FEMA-445, 2006)。由于水工结构十分复杂,目前世界各国的大坝抗震安全设计均未采用性能设计,但美国、欧洲等发达国家和地区正在进行向性能设计过渡的研究工作(FEMA-65, 2005)。

地震对工程结构的作用存在着其它作用无法相比的不确定性,同一震源的地震再现周期很长,可达数千年甚至上万年,目前对地震发生的预测精度(规模、地点、时间)还远未达到与结构设计相当的水平,因此分级设防得到了越来越多的认同。抗震性能设计设定的准则(criteria)与目标(objectives)是小震不坏、中震可修、大震不倒。在性能设计中包括了结构强度校核以及结构整体变形能力(倒塌)校核。

抗震设计中检验性能设计的目标是否达到要求,需定量比较结构自身的抗震性能(seismic capacity)是否大于给定地震动作用下对结构的要求性能(demanded capacity)。如何定义作用于结构的地震动在抗震设计中始终是一个关键问题,也是工程抗震学科研究相对滞后的领域。目前多数规范中采用的PGA和弹性反应谱的定义存在许多不足,因此,工程抗震研究中有相当多的研究工作集中于如何确定性能设计中的地震动特征。Luco(2007)总结了如何确定有效且充分的地震动强度指标(efficient and sufficient intensity measure)的研究成果,这样可以提高计算结构需要性能(structural demand measure)的效率。主要结果是对目前较多采用的与结构基本周期点对应的弹性加速度响应值指标,引入高阶振型和非线性响应的影响系数。美国的Liao和Zerva(2006)研究使用条件概率密度函数法(conditional probability density function, CPDF)生成空间相关地面运动,之前川上(Kawakami),田和盛川(Kameda and Morikawa)及Abrahamson等也进行过相关研究。Sasani(2006)的研究提出采用一个等效矩形加速度脉冲作为近断层地震动的强度指标,该指标与一般采用的PGA、EPA、PGV、EGV、Sa等强度指标相比较,对基本周期1s以下的钢筋混凝土结构的非线性响应具有较好的相关性。Riddell(2007)的研究也是关于地震动的强度指标。新西兰的Dhakal(2006)及中国的翟长海(Zhai, 2007)的研究是如何确定最不利地震动,本质上也是要确定出一个有效的地震动的强度指标。美国的Kempton(2006)、意大利的Iervolino(2006)以及英国的Hancock(2006, 2007)等对地震动持时进行了研究。Kempton是考虑断层破坏过程、应力降、地震矩、震源距、场地特征等得到地震持时的回归公式。对于地震动持时对结构地震损伤的影响, Hancock(2006)对数百篇文章进行总结的结论为:累计能量损伤指标对地震持时较为敏感,而最大响应(变形)损伤指标对地震持时并不敏感。Iervolino(2006)的研究也给出了相同的结论。

Bommer(2006)的文章详述了为达到性能设计目标Eurocode 8中关于地震作用的确定方法而需要改进的地方,对目前多数规范采用的以给定再现周期定义地震动水平的做法提出了质疑,并认为单一参数的hazard map是不符合时代要求的,目前Eurocode8中2个设计谱(50年10%和2%概率水平)的形式一定会被放弃。文章建议采用地震损失模型(earthquake loss modeling)研究的最新成果校核设定再现周期地震动水平对已建或新建的建筑结构产生的风险水平是否合理,是否能为社会所接受,如果地震损失风险水平高于预期值则需要调整规范中采用的再现周期。Malhotra(2006)的文章也认为2003 International Building Code(IBC2003)中的基于2475年再现周期确定的地震动对不同地区的地震风险水平是非均匀的,主要因为反应谱的形状在美国的不同地区是有显著差异的,特别在长周期部分。此外,即使不同地区2475年再现周期的地震危险水平相同,其他再现周期的地震危险水平也可能存有较大差异。这些研究主要是针对建筑结构,对于水工建筑物,特别是大坝的地震风险分析很少见。

结构本身的抗震性能(seismic capacity)分析方面,对于质量较为集中和变形位置较为明确的结构可

以使用 Pushover 方法进行计算,目前在一些桥梁建筑类规范中已广泛采用。对于大坝等复杂结构类型,需要采用增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)得到结构抗震能力。Incremental dynamic analysis 最早见于 Vamvatsikos and Cornell (2004) 发表于 Earthquake Spectra 的文章(Dhokal, 2006)。在增量动力分析中,对一组地震记录进行多种从低到高逐级增加地震动水平的时域非线性分析计算,得到结构从弹性直至整体动力破坏失稳的响应,从中可以得到结构性能,如最大变形,与地震强度指标(intensity measure, IM),如 PGA 或加速度反应谱值之间的关系。中国水利水电科学研究院在小湾拱坝与溪洛渡拱坝的抗震性能分析中也采用了增量动力分析方法。大坝结构的安全除坝体结构自身因素外,还与坝体周围的基岩(坝肩)条件密切相关,特别是大坝的稳定。与坝体结构相比,天然形成的基岩(坝肩)的力学特性、渗透压力、裂隙节理构造面都难以探测清楚,存在很大的不确定性。在分析小湾拱坝与溪洛渡拱坝的抗震性能中还采用了强度降低法(Strength reduction),即对一特定水平地震动输入逐步减少基岩(坝肩)滑裂面上的抗力参数进行时域非线性分析计算,得到结构从弹性直至整体动力破坏失稳的响应,从中可以得到结构性能与抗力参数之间的关系。这种坝体与基岩耦合动力分析(Coupled dam and foundation analysis)能够更准确地反映坝体与基岩间的动力相互作用,更准确地反映大坝结构安全的实际工作状态。

混凝土大坝开裂后在地震作用下的稳定问题直接关系到是否导致库水失控下泄, Malla (2006) 和 Pekau (2006) 分别针对拱坝和重力坝进行了相关的研究工作。Alves (2006) 的研究是针对拱坝建基面非均匀地震运动对坝体地震响应和坝体应力的影响。主要是根据美国 Pacoima 拱坝在 2001 年 1 月 13 日一次 4.3 级地震得到的地震加速度纪录,分析坝基不同测点间位移反应谱值之比、地震传播时间滞后等。然后将结果应用于替换 1994 年 Northridge 地震时一些测点的缺失记录,作为输入分析 Pacoima 拱坝的地震响应并与观测结果进行了比较。王海波和李德玉(Wang 2006, 2007)在振动台上开展了拱坝动力破坏模型试验研究,研究者开发了多种方法模拟影响拱坝地震响应的各种复杂因素,对模型拱坝系统采用逐级加大地震输入的方式确定拱坝的地震超载能力。

Birk (2007), Millan (2007) 及 Bougacha (2006) 的研究关注大坝-库水动力相互作用,这是一个许多研究者长期关注的问题。Millan 用边界元方法研究了水库形状对重力坝地震响应的影响,除水库形状向上游逐渐变窄条件外,三维分析得到的坝体位移响应较二维计算结果要大。Bougacha 进行了二维大坝-库水-库底淤积-基岩的动力相互作用的分析计算,库底淤积采用基于 Biot 理论的饱和和多孔质固体单元,结果主要是对大坝自振频率的影响。Zkan (2007) 的研究报告了高 68m 的 Gld rcek 黏土心墙坝地震响应分析结果,该坝在 2000 年 6 月经历了距坝址约 15km 的里氏 5.9 级地震,震源深度 10.5km。地震在坝顶产生了小于 2cm 的纵向裂缝。Proulx (2006) 的研究报告了拱坝地震观测记录与计算分析结果的比较。进行地震观测的拱坝在瑞士,一座高 180m 的 Emosson 双曲拱坝,记录到的坝顶最大地震响应加速度 0.75g,另一座为高 250m 的 Mauvoisin 双曲拱坝,记录到的坝顶最大地震响应加速度 0.014g,坝体均未发现任何损伤。

Das (2007) 对结构生命周期内数次地震引起的累积损伤进行了分析,显而易见,其结果依赖于采用的地震发生模型,关键就是两次地震的间隔或静止期如何确定。Johansson 和 Konagai (小长井)进行了断层错动位移对位于干或湿土中地下结构影响的试验研究工作。Karamitros (2007) 提出了断层错动时地下管线的应力分析方法,较以往的方法更接近实际。

水库触发地震(Reservoir-triggered Seismicity)是与水库蓄水相关的地震活动,最初被称之为水库诱发地震(Reservoir-Induced Seismicity)。从世界范围的统计结果,只有少数水库蓄水后触发了地震,大约 40 多个水库。国际大坝委员会于 2004 年颁布了 水库触发地震知识概论 (Reservoir Triggered Seismicity, State of Knowledge)。根据目前的研究成果,人们普遍接受的观点是水库蓄水后触发的地震震级不会超过该地区可能发生的构造地震震级,因为水库蓄水不会对位于地下数公里至十几公里的发震断层的能量积蓄产生显著影响(FEMA-65, 2005)。因此,对于抗震设计所确定的最大地震动,也不会有任何变化。水库蓄水对地震活动的主要影响是可能在短时间内改变水库周边地区地震的发生频度与震级关系。尽管在所有水利工程建设前期的调查中都会开展水库触发地震的相关调查与评估,但近年相关的文献不

多。

结构抗震性能与结构材料特性特别是动态材料特性密切相关,这是抗震设计的一个重要方面。大坝混凝土材料动态特性方面的研究工作相对滞后,但近年有关大坝全级配混凝土动态特性试验和数值模拟也取得了一些进展。对于混凝土这类复合材料研究的文章多见于 *Cement and Concrete Research*、*Materials and Structures*、*Theoretical and Applied Fracture Mechanics*、*Applied Mechanics Reviews*、*Engineering Fracture Mechanics* 等期刊。混凝土材料特性研究与工程抗震属不同学科,因此,大坝全级配混凝土动态特性试验和数值模拟是一项跨学科的研究工作。中国水利水电科学研究院在大坝全级配混凝土动态特性的数值模拟中采用细观力学(Computational mechanics at the mesoscale, 或 micro-mechanical model)方法开展了一些研究工作。马怀发和陈厚群(2004)在 *中国水利水电科学研究院学报* 上发表的 *混凝土细观力学研究进展及评述* 可供参考。

4 点评与分析

美国 Loma Prieta 地震(1989)、美国 Northridge 地震(1994)、日本阪神地震(1995)和中国台湾地震(1999)造成的巨大财产损失使人们逐渐认识到,按现行技术标准正常设计、施工和使用的建筑物,地震时仍可能遭受破坏,这些建筑结构的破坏或失效对社会正常生活及经济活动产生深刻影响并造成巨大间接经济损失。大坝结构地震时的安全始终受到社会高度关注,与其它结构相比,到目前为止大坝结构尚维持较好的地震安全记录,即使在 2008 年 5 月 12 日发生的里氏 8.0 级汶川地震中,也未发生因地震而发生的溃坝,造成次生灾害。但是伴随高烈度地区 200m 以上高坝的不断增多,这个记录能维持多久尚难以预见。2005 年日本新 地震造成日本新干线脱轨,中止了新干线开通以来安全运行 40 年的记录,从中我们应得到深刻的教训与启示。当前水利水电工程抗震中的迫切问题是防止高坝大库严重地震灾变评估的研究,这需要建立准确实用的评价大坝极限抗震能力的理论、方法及手段。

伴随中国西部地区水利水电工程的建设,对水工抗震研究提出了迫切的需求。中国水利水电科学研究院的水工抗震研究也十分活跃,在大坝结构地震响应数值分析、动力模型试验研究、大坝混凝土动力特性研究等方面均与国际先进水平保持同步。水工全级配混凝土材料动态特性、损伤模型、水工结构地震破坏机理是深入分析研究大坝抗震安全的突破点和基础性研究,同时也是实现水工结构抗震向性能设计过渡的基础,国内外这方面的研究工作十分活跃。

国际上对已有大坝的抗震安全和损失评估等开展了一些研究工作,而我国这方面的研究相对较少。随着我国大坝使用时间的增加,这方面的需求也将增加。遭遇强震时大坝实际地震响应是检验水工抗震设计理论与方法的关键,国内外的观测资料均十分匮乏,与国外相比,我国水工结构强震观测仪器的布设量还非常少,因此获得大坝地震响应记录的机会就更少。5.12 汶川地震中,地震影响显著的 4 座百米以上的大坝中,仅在紫坪铺大坝坝体上取得了一些记录。缺少实际观测地震记录使得震后大坝震损原因分析不得不引入许多人为的假设。由此可见,加大水工结构强震观测的投入和管理十分必要。

5 学科发展的建议,未来发展思路和新兴增长点

结合我国水工抗震学科发展的具体情况,建议在以下几个方面开展研究工作:(1) 加强地震动特性及地震输入机制的研究。(2) 加强大规模动力非线性数值计算技术的开发与应用研究。(3) 加强大坝混凝土材料动态特性、损伤及破坏机理的研究。(4) 加强对防止高坝大库严重地震灾变的评估研究。(5) 建立水工结构分级抗震设计体系及相应的设计目标。(6) 加强水工结构强震观测建设。(7) 加强大坝动力模型试验技术研究。(8) 开展老坝抗震安全评价及大坝地震损失评估的研究。(9) 开展老坝抗震加固措施的研究。

参 考 文 献:

- [1] Alves S W. System identification of a concrete arch dam and calibration of its finite element model[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(15): 1321– 1337.
- [2] Alves S W. Generation of spatially nonuniform ground motion for nonlinear analysis of a concrete arch dam[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(11): 1339– 1357.
- [3] Amador T. Energy demands for seismic design against low-cycle fatigue[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(3): 383– 404.
- [4] Apostolou M, Gazetas G. Seismic response of slender rigid structures with foundation uplifting[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 2007, 27(7): 642– 654
- [5] BAIRR O Rog rio. NEFOREEE-Performance benchmark of three major european shaking tables[C]. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Geneva, 2006.
- [6] Baker J W. Which spectral acceleration are you using? [J] Earthquake Spectra, 2006, 22(2): 293– 312.
- [7] Bathurst R J. Shaking table testing of geofoam seismic buffers[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 2007, 27(4): 324– 332
- [8] Bathurst R J. A simple displacement model for response analysis of EPS geofoam seismic buffers[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 2007, 27(4): 344– 353.
- [9] Bazyar M H. Song Chongmin, Time-harmonic response of non-homogeneous elastic unbounded domains using the scaled boundary finite-element method[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(3): 357– 383.
- [10] Bernardie S. Non-linear site response simulations in Chang-Hwa region during the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 2006, 26(11): 1038– 1048.
- [11] Birk C. A symmetric time-domain model for 3D dam-reservoir interaction including radiation damping[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(5): 661– 682.
- [12] Bommer Julian J. Adapting earthquake actions in Eurocode 8 for performance-based seismic design[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(1): 39– 55.
- [13] Bostrom A. Earthquake mitigation decisions and consequences[J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(2): 313– 327.
- [14] Bougacha S, Tassoulas J L. Dam-water-sediment-rock systems: Seismic analysis[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 2006, 26(6– 7): 680– 693.
- [15] Das S. Damage-based design with no repairs for multiple events and its sensitivity to seismicity model[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(3): 307– 325.
- [16] Debasis K, Vinay K G. Estimation of strength reduction factors via normalized pseudo-acceleration response spectrum[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(6): 751– 763.
- [17] Dhakal R P. Identification of critical ground motions for seismic performance assessment of structures[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(8): 989– 1008.
- [18] Dupuis D J. Modelling peak accelerations from earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(8): 969– 987.
- [19] Eurocode 8[EB OL] <http://www.eurocodes.co.uk/EurocodeDetail.aspx?Eurocode=8> [S].
- [20] Federal Emergency Management Agency, Next-Generation Performance-Based Seismic Design Guidelines[S], FEMA-445 August 2006.
- [21] Federal Emergency Management Agency, Federal Guidelines for Dam Safety-Earthquake Analyses and Design of Dams [S], FEMA-65 May 2005.
- [22] Federal Emergency Management Agency, Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures[S]. FEMA 440 June 2005.
- [23] Gerolymos N. Development of Winkler model for static and dynamic response of caisson foundations with soil and interface nonlinearities[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 2006, 26(5): 363– 376.
- [24] Gerolymos N. Static and dynamic response of massive caisson foundations with soil and interface nonlinearities-validation and results[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 2006, 26(5): 377– 394.

- [25] Gicev V, Trifunac M D. Permanent deformations and strains in a shear building excited by a strong motion pulse[J]. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 2007, 27(8): 774– 792.
- [26] Guyader A C. Detemining Equivalent Linear Parameters for use in a capacity spectrum method of analysis[J]. *Struct. Engrg.*, 2006, 132(1): 59– 67.
- [27] Han Sang Whan. Approximate incremental dynamic analysis using the modal pushover analysis procedure[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006, 35(15): 1853– 1873.
- [28] Hancock J. A State-of-knowledge review of the influence of strong-motion duration on structural damage[J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(3): 827– 845.
- [29] H fner S. A Multigrid finite element method for themesoscale analysis of concrete[C]. *Fourth European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS*, 2004.
- [30] H fner S, S Eckardt, T Luther, C K nke. Mesoscale modeling of concrete: Geometry and numerics[J]. *Computers and Structures*, 2006, 84: 450– 461.
- [31] Hancock J. Using spectral matched records to explore the influence of strong-motion duration on inelastic structural response[J]. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 2007, 27(4): 291– 299.
- [32] Haukaas T. Efficient computation of response sensitivities for inelastic structures[J]. *Struct. Engrg.*, 2006, 132(2): 260 – 266.
- [33] Iervolino I, Manfredi G. Ground motion duration effects on nonlinear seismic response[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006, 35(1): 21– 38.
- [34] Jaiswal O R. Review of seismic codes on liquid-containing tanks[J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(1): 239– 260.
- [35] Jarenpraset S. Inelastic spectrum-based approach for seismic design spectra[J]. *Struct. Engrg.*, 2006, 132(8): 1284– 1292.
- [36] Johansson J. Fault induced permanent ground deformations— an experimental comparison of wet and dry soil and implications for buried structures[J]. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 2006, 26(1): 45– 53.
- [37] Kajiwara Koichi. Shaking table and activities at E-defense[C]. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Geneva, 2006.
- [38] Kalkan E. Coupled tilt and translational ground motion response spectra[J]. *Struct. Engrg.*, 2007, 133(5): 609– 619.
- [39] Karamitros D K. Stress analysis of buried steel pipelines at strike-slip fault crossings[J]. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 2007, 27(3): 200– 211.
- [40] Karl L, Haegeman W. Determination of the material damping ratio and the shear wave velocity with the seismic cone penetration test[J]. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 2006, 26(12): 1111– 1126.
- [41] Kempton J. Prediction equations for significant duration of earthquake ground motions considering site and near-source effects[J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(4): 985– 1013.
- [42] Kokusho T, Motoyama R. Wave energy in surface layers for energy-based damage evaluation[J]. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 2007, 27(4): 354– 366.
- [43] Kouretzis G P. 3-D shell analysis of cylindrical underground structures under seismic shear wave action[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 26(10): 909– 921.
- [44] L ger P, Javanmardi F. Seismic stability of concrete gravity dams strengthened by rockfill buttressing[J]. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 2007, 27(3): 274– 290.
- [45] Liao S, Zerva A. Physically compliant, conditionally simulated spatially variable seismic ground motions for performance-based design[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006, 35(7): 891– 919.
- [46] Lua Jian-Fei. Dynamic response of a piecewise circular tunnel embedded in a proelastic medium[J]. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 27(9): 875– 891.
- [47] Luco N. Structure-specific scalar intensity measures for near-source and ordinary earthquake ground motions[J]. *Earthquake Spectra*, 2007, 23(2): 357– 392.
- [48] Malhotra P K. Seismic risk and design loads[J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(1): 115– 128.
- [49] Malhotra P K. Return period of recorded ground motion[J]. *Struct. Engrg.*, 2006, 132(6): 833– 839.
- [50] Malla Sujan. Dynamic stability of detached concrete blocks in arch dam subjected to strong ground shaking[C]. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Geneva, 2006.

- [51] Memari A M. Architectural glass panels with rounded comers to mitigate earthquake damage[J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(1): 129– 150.
- [52] Millan M A. The effects of reservoir geometry on the seismic response of gravity dams[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(11): 1441– 1459.
- [53] Miura H. Updating GIS Building Inventory Data Using High-Resolution Satellite Images for Earthquake Damage Assessment: Application to Metro Manila, Philippines[J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(1): 151– 168.
- [54] Molnar S. A comparison of site response techniques using weak-motion earthquakes and microtremors[J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(1): 169– 188.
- [55] Mosqueda G. Real-Time Error Monitoring for Hybrid Simulation. Part I: methodology and experimental verification[J]. Struct. Engrg., 2007, 133(8): 1100– 1108.
- [56] Mosqueda G. Real-Time Error Monitoring for Hybrid Simulation. Part II: structural response modification due to errors [J]. Struct. Engrg., 2007, 133(8): 1109– 1117.
- [57] Mylonakis G. An alternative to the Mononobe-Okabe equations for seismic earth pressures[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 2007, 27(10): 957– 969.
- [58] Nasser+Moghaddam A. Effects of underground cavities on Rayleigh waves-Field and numerical experiments[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 2007, 27(4): 330– 313.
- [59] Negro Paolo. Performance-based engineering concepts: past, present and future [C] First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Geneva, 2006.
- [60] zkan M Y. An evaluation of G ld reek dam response during 6 June 2000 Orta earthquake[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 26(5): 405– 419.
- [60] Pavese Alberto. Shaking table and research activites at EUcentre pavia [C] First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Geneva, 2006.
- [62] Pekau O A. Seismic behaviour of cracked concrete gravity dams[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(4): 477– 495.
- [63] Pegalani F. Evaluation of site effects using numerical and experimental analyses in Citt di Castello (Italy) [J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 2006, 26(10): 941– 951.
- [64] Phung V. Methodology for site classification estimation using strong ground motion data from the Chi+Chi, taiwan, earthquake[J]. Earthquake Spectra, 2006, 22(2): 511– 531.
- [65] Porter K. Fragility of hydraulic elevators for use in performance-based earthquake engineering[J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(2): 459– 469.
- [66] Porter K. Creating fragility functions for performance-based earthquake engineering[J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(2): 471– 489.
- [67] Priestle N. Initial stiffness or secant stiffness for seismic design which is more appropriate? [C] First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Geneva, 2006.
- [68] Prouk Jean. A comparison of recorded and computed earthquake motions of large concrete dams [C] First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Geneva, 2006.
- [69] Riddell R. On ground motion intensity indices[J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(1): 147– 173.
- [70] Rivera J L. Design approach based on UAFR spectra for structures with displacement-dependent dissipating elements[J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(2): 417– 439.
- [71] Roull a A. The strong ground motion in Mexico City: Analysis of data recorded by a 3D array[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 2006, 26(1): 71– 89.
- [72] Sasani M. New measure for severity of near-source seismic ground motion[J]. Struct. Engrg., 2006, 132(12): 1997– 2005.
- [73] Spanosa P D, Giaralis A. Time-frequency representation of earthquake accelerograms and inelastic structural response records using the adaptive chirplet decomposition and empirical mode decomposition[J]. Soil Dynamics And Earthquake Engineering, 2007, 27(7): 675– 689.
- [74] Taniguchi T, Miwa T. A simple procedure to approximate slip displacement of freestanding rigid body subjected to earthquake motions[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(4): 481– 501.

- [75] Toms J, Miller T M. Comparative review of theoretical models for elastic wave attenuation and dispersion in partially saturated rocks[J]. *Soil Dynamics And Earthquake Engineering*, 2006, 26(6- 7): 548- 565.
- [76] Villaverde R. Methods to assess the seismic collapse capacity of building structures: state of the art[J]. *Struct. Eng.*, 2007, 133(1): 57- 66.
- [77] Wang Haibo, Li Deyu. Experimental study of seismic overloading of large arch dam[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006, 35(2): 199- 216.
- [78] Wang Haibo, Li Deyu. Experimental study of dynamic damage of an arch dam[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007, 36(3): 347- 366.
- [79] Wieland Martin. Earthquake safety of existing dams[C]. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Geneva, 2006.
- [80] Wieland M. Investigating stress concentration[J]. *International Water Power and Dam Construction*, 2006, 7.
- [81] Zhai Chang-Hai. A new approach of selecting real input ground motions for seismic design: The most unfavourable real seismic design ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2007, 36(8): 1009- 1027.

A state-of-art report on aseismic design of hydraulic structure

WANG Hai-bo

(*Earthquake Engineering Research Center, IWHR, Beijing 100048, China*)

Abstract: Recent developments and attractive research areas in aseismic design of hydraulic structure are summarized upon reviewing papers published on journals abroad in the field of earthquake engineering. The main attentions are given to the performance-based design, determination of seismic parameters, pulse characters of near field strong ground motion, influence of duration of strong ground motion on structure damages, incremental dynamic analysis, dynamic stability of detached concrete dam, and responses of arch dams to non-uniformly distributed ground motion.

Key words: aseismic design; ground motion; aseismic performance

(责任编辑:李琳)