重力坝砂土液化阻尼器减震技术

刘天云*, 李庆斌, 王兵见

清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084

* E-mail: liuty@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2015-06-20; 接受日期: 2015-09-06

国家自然科学基金(批准号: 11334007)资助

摘要 探索一种新型砂土液化阻尼器的特性及对混凝土重力坝的减震效果. 振动台试验表明液化砂土不存在惯性力和弹性力, 仅具有与速度同步、反向的阻尼力; 同时液化砂土具有高达 500~1000 kPas 的动力黏度系数, 可采用黏滞阻尼模型表示砂土液化阻尼器性能. 应用有限元数值分析, 混凝土重力坝采用砂土液化阻尼器坝顶将产生约 0.3 MPa 的阻尼应力, 坝顶位移峰值降幅达 1/3; 参数敏感性分析表明液化砂土波速为阻尼器减震的主要因素. 砂土液化阻尼器不但构造简单, 而且效果明显, 是混凝土大坝等建筑物减震的新技术.

关键词重力坝
阻尼器
砂土液化
振动台试验
减震技术

中国水电开发修建的大坝数量和规模均居世界之首, 其中不少已建、在建和拟建的高坝大库都位于峰值加速度 0.2~0.3 g 的强震区, 特别是大渡河上的大岗山拱坝, 设计峰值加速度达到 0.557 g. 如何解决大坝抗震安全问题一直是工程与科研面对的难题^[1].

土木建筑的抗震理论与应用得到了长足发展, 从开始通过加大结构的刚度和延性来提高建筑物的抗震能力到近年来采用隔震、消能减震等技术措施^[2]. 特别是汶川地震中采用减震措施的建筑物都经受了强震的检验. 与之相比, 水工建筑物由于体积巨大, 尤其是承受高水头压力, 土木建筑成功的抗震减震技术措施并不适用水工大体积建筑物^[3].

多年来, 国内外一直探索大坝抗震措施与减震方法^[4~6]. 目前大坝设计除采用常规抗震构造外, 也采用了坝体配筋、设置阻尼器等减震措施. 配置钢筋可明显改善裂缝开度, 提高大坝整体性, 是一种常规的加强坝体刚度的抗震措施, 但不能消耗地震输入的能量; 坝体横缝间设置黏滞或摩擦阻尼器装置也

得到了较多关注. 增设阻尼器能限制缝张开, 也能消耗地震输入能量, 但模型计算结果不理想, 减震效果有待实践检验^[7~10].

不同于黏滞、摩擦、调谐质量阻尼器^[11~13], 调谐液体阻尼器(TLD)利用水波动原理, 通过调整液体自振频率等于建筑物频率来降低建筑物的振动. 为了使 TLD 具有较高的阻尼效果, 可增加孔网措施. TLD 技术在建筑物抗风防灾中得到广泛应用, 但在建筑物抗震中应用较少, 原因之一是强震导致结构自振频率发生改变. 为了克服 TLD 不足, 饱水海绵阻尼器利用孔隙流体流动原理, 消耗建筑物振动能量. 这种孔隙介质阻尼器不需要调谐频率, 已应用于建筑物环境减振. 但到目前为止还未见类似的液体阻尼器应用于水工建筑物减震的报道.

针对大坝抗震安全需要, 本文改进饱水海绵阻尼器, 提出了一种砂土液化阻尼器减震装置. 这种新型阻尼器利用不排水饱和砂土振动液化原理, 通过液化砂土耗能、降低大坝强震响应. 振动台试验验证

引用格式: 刘天云, 李庆斌, 王兵见. 重力坝砂土液化阻尼器减震技术. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 1098~1104

Liu T Y, Li Q B, Wang B J. Seismic reduction with liquefied sand damper for gravity dams (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 1098~1104, doi: 10.1360/N092015-00014

了砂土液化阻尼器具有期望的阻尼特性; 有限元模拟安装砂土液化阻尼器的重力坝也表明坝顶位移幅值减震达 1/3. 砂土液化阻尼器减震装置不但构造简单, 使用方便, 是大体积建筑物减震的一种新措施.

1 砂土液化阻尼器振动台试验

试验用的砂土液化阻尼器模型为内置饱和砂土的钢质箱体, 长×宽×高分别为 0.8 m×0.6 m×0.4 m; 试验在清华大学水利系 MTS 振动台进行(图 1). 模型阻尼器安装在有导向滑轨的振动台上, 并通过 20 kN 测力传感器与振动台连接, 应用压电传感器采集加速度信号. 试验用砂土为一般河砂, 装料高度 0.3 m 并锤击密实; 饱和水由砂土顶面缓慢渗入. 振动台试验采用加速度控制, 频率 5 Hz, 幅值 0.3 g. 图 2 和 3 为砂土液化阻尼器液化前后砂土状况.

砂土液化阻尼器振动台试验结果示于图 4, 其中加速度为模型阻尼器加速度测量值, 力为测力传感

图 1 (网络版彩图)砂土液化模型阻尼器振动台试验

图 2 (网络版彩图)砂土液化前阻尼器

图 3 (网络版彩图)砂土液化后阻尼器

器结果. 图 5 为阻尼器速度与受力关系图, 速度为测量加速度积分结果.

从图 4 可知, 砂土液化过程外力与加速度不同步: 加速度最大时, 外力最小; 相反加速度最小时, 外力最大. 因此, 由振动力学可知阻尼器外力不是惯性力, 也不会是恢复力. 将测量加速度时程积分得到速度时程, 并与阻尼器外力对比发现: 外力与速度二者同步但反方向(图 5). 因此, 砂土液化阻尼器的外力为阻尼力, 并没有体现惯性力和弹性力效应. 特别由图 5 可知, 液化的砂土动力粘黏度系数可达 0.5~1.0 MPas, 与以往砂土液化试验结果一致^[14,15].

2 重力坝砂土液化阻尼器减震效果模拟

考虑一座高 150 m 的混凝土重力坝, 应用二维动力有限元分析砂土液化阻尼器的减震效果.

2.1 计算模型

几何模型范围取坝基深度 500 m(大于 3 倍坝高), 上游、下游方向长度均大于 1.5 倍坝高(图 6); 采用四节点平面应变单元离散形成有限元计算模型, 模型材料参数如表 1 所示, 地基简化为无质量地基.

2.2 砂土液化阻尼器模型

针对砂土液化阻尼器安装在重力坝顶, 有限元模型采用坝顶每个节点都有水平、竖向阻尼器单元, 阻尼器单元采用黏弹性模型, 但弹簧刚度系数均为 0, 节点阻尼力按下式计算:

$$f = d \times v, \quad (1)$$

其中, v 为坝顶节点速度, d 为阻尼力系数, 按下式确定:

图 4 加速度与力时程

图 5 速度与力时程

图 6 有限元计算模型(单位: m)

表 1 重力坝与地基计算参数

	弹模(Pa)	泊松比	密度(kg/m ³)	阻尼比
坝体 135 m 以下	2.9×10^{10}	0.17	2500	0.05
坝体 135 m 以上	2.5×10^{10}	0.17	2500	0.05
坝基	2.9×10^{10}	0.3	2600	0.05

$$d = \rho \times c \times A, \quad (2)$$

其中, ρ 为阻尼器液化砂土的密度, 取为 2000 kg/m^3 ; c 为引入的砂土液化特征波速:

$$c = \mu / (\rho h), \quad (3)$$

其中, μ 为液化砂土动力黏性系数, h 为阻尼器液化砂土层有效高度, A 为计算模型的节点控制面积, 取为节点相关单元的有效面积。

2.3 计算方案

有限元计算时水平向地震动输入 El-centro 加速度, 竖向加速度幅值取为 $2/3$ 水平向幅值, 地震动时程为 40 s , 采用 Newmark 平均加速度法进行坝体动力时程分析. 计算采用以下 4 种方案:

- 方案 A, 无阻尼器;
- 方案 B, 施加特征波速 300 m/s 的阻尼器;
- 方案 C, 施加特征波速 100 m/s 的阻尼器;
- 方案 D, 施加特征波速 30 m/s 的阻尼器。

2.4 结果分析与讨论

表 2 为重力坝前 5 阶自振频率和周期。

4 种计算方案选择坝顶上游节点为特征节点, 图 7~9 分别对应 3 种特征波速的特征点水平位移响应时程, 同时图中也提供了无阻尼器方案特征点位移时程. 很明显, 特征波速高的阻尼器减震效果明显. 为了清晰表示减震, 图 10 对比了 3 种安装阻尼器减震方案效果对比, 图中纵坐标为相应方案位移响应与方案 A 的位移响应差. 由此可见砂土液化阻尼器地

表 2 重力坝自振频谱与周期

阶数	频率(Hz)	周期(s)
1	2.0916	0.4781
2	2.7259	0.3669
3	3.0296	0.3301
4	3.1026	0.3223
5	3.4314	0.2914

震响应消峰效果十分明显. 图 11 为方案 A 坝下游折线处主拉应力时程, 图 12 为方案 A 与方案 D 相应位置拉应力降幅时程. 应力降幅达 60%. 图 13 为坝顶设置砂土液化阻尼器产生的特征点内力时程, 也就是阻尼器对坝顶施加的阻尼力. 重力坝安装砂土液化阻尼器具有以下特点:

图 7 特征点位移时程(波速 30 m/s)

图 8 特征点位移时程(波速 100 m/s)

图 9 特征点位移时程(波速 300 m/s)

图 10 坝顶特征点位移减震效果

图 11 无阻尼器方案下游坝面折线处主拉应力

图 12 阻尼器应力减震效果

1) 当阻尼器液化波速为 300 m/s 时, 坝顶位移减振效果达到 32%; 当阻尼器液化特征波速降至 1/3 时, 坝顶位移减振效果达 10%, 也相应降低为 1/3; 当阻尼器液化波速降到 1/10 时, 坝顶位移减振效果约降

至 1/10. 因此, 砂土液化特征波速是影响阻尼器减振效果的关键因素.

2) 当阻尼器液化波速为 300 m/s 时, 下游坝面折线处拉应力减少达到 60%, 能有效降低混凝土开裂

图 13 坝顶阻尼力时程

风险;当阻尼器液化特征波速分别降至 $1/3$ 与 $1/10$ 时,坝体相应位置应力的减震效果也相应降低。

3) 砂土液化阻尼器施加在坝顶节点的阻尼力幅值约为 30 kN, 相当应力 0.3 MPa, 远小于混凝土强度。

3 结论

1) 振动台试验表明砂土液化阻尼器具有理想的阻尼特性, 可近似用线性阻尼模型表示, 液化黏度系

数是阻尼器关键因素。

2) 重力坝有限元分析表明安装砂土液化阻尼器的坝顶位移降幅近 $1/3$, 应力降幅更为明显。

3) 砂土液化阻尼器工作原理简单, 安装方便, 且不需要日常维护。

4) 为了更好发挥水箱阻尼器的性能, 需要进一步加强砂土液化阻尼器布置优化方案以及现场振动监测研究, 同时进一步开展水箱阻尼器振动台不同尺度模型试验也是需要的。

参考文献

- 1 陈厚群. 混凝土高坝抗震研究. 北京: 高等教育出版社, 2011
- 2 中华人民共和国国家标准. 建筑抗震设计规范(GB 50011-2010). 北京: 中国建筑出版社, 2010
- 3 中华人民共和国行业标准. 水工建筑抗震设计规范(SL 203-97). 北京: 中国水利水电出版社, 1997
- 4 Zhang C H, Jin F, Wang J T, et al. Nonlinear behavior and seismic safety evaluation of concrete dam. Beijing: Tsinghua University press, 2012
- 5 迟世春, 林皋. 拱坝的动力控制研究. 世界地震工程, 2002, 18: 1-8
- 6 刘浩吾, 张少杰, 陈江, 等. 高混凝土坝气幕隔震控制的模拟分析理论与试验验证. 中国科学: 技术科学, 2011, 41: 1417-1429
- 7 王海波, 李德玉. 拱坝抗震设计理论与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2006
- 8 倪汉根, 金崇磐. 大坝抗震特性与抗震计算. 大连: 大连理工大学出版社, 1994
- 9 罗秉艳, 徐艳杰, 王光纶. 大岗山拱坝考虑阻尼器抗震措施的非线性动力反应分析. 水力发电学报, 2007, 26: 67-70
- 10 梁通, 周元德. 强震区高拱坝的两种抗震措施效果研究. 水电能源科学, 2011, 29: 100-104
- 11 Soong T T, Dargush G F. Passive energy dissipation systems in structural engineering. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 1997
- 12 Taylor D P. The application of energy dissipation damping devices to an engineered structure or mechanism. <http://www.taylordevices.com/Technical literature.htm>
- 13 Chung L L, Wu L Y, Huang H H, et al. Optimal design theories of tuned mass dampers with nonlinear viscous damping. Earthq Eng Vib, 2009, 8: 547-560
- 14 陈育民, 刘汉龙, 周云东. 液化及液化后砂土流动特性分析. 岩土工程学报, 2006, 28: 1139-1143
- 15 Towhata I, Vargas-Monge W, Orence R P, et al. Shake table tests on subgrade reaction of pipe embedded in sandy liquefied subsoil. Soil Dyn Earthq Eng, 1999, 18: 347-361

Seismic reduction with liquefied sand damper for gravity dams

LIU TianYun, LI QingBin & WANG BingJian

State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

This paper presents a new seismic reduction approach to concrete gravity dams with the liquefied sand damper installed on the upper surface, similar to civil buildings with viscous dampers employed. The shaking table tests on the liquefied sand damper show the new damper is only of damping force, without spring and inertia forces existing. In particular, the liquefied sand damper is of the dynamic viscosity with range from 500 to 1000 kPa s. Hence, the linear viscos damping model is developed to the performance of the liquefied sand damper. With one 150-m-high gravity dam model using the new damper, the finite element simulation is carried out, with the seismic reduction of one third displacements obtained together with about 0.3 MPa damping shear stress existed. The parameter sensitivity analysis results in the seismic reduction of the liquefied sand damper linear to the wave velocity of liquefied sand. The proposed liquefied sand damper is of simple structure and of high damping efficiency, being suitable for gravity dams excited by potential strong earthquake.

gravity dam, damper, liquefied sand, shaking table test, seismic reduction measure

doi: 10.1360/N092015-00014