

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.06.015

强震作用下渡槽 TLD 效应模型试验研究

黄研昕,钱向东

(河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

摘要:通过对矩形截面渡槽的单跨模型进行动力试验研究,探讨了渡槽在刚性地基强震条件下的调谐液体阻尼器(TLD)效应;通过调节槽内水位,研究了水体横向减震作用与深宽比的关系。试验结果表明,水体的晃动及水波破碎对渡槽的横向动力响应起到了 TLD 减震作用。渡槽内水位增加会改变结构的动力特性,使渡槽结构自振频率下降。在强震作用下,TLD 横向减震效果随水位变化发生波动,当槽内水体晃动频率与渡槽结构自振频率接近时,减震作用最为显著。

关键词:强震;渡槽结构;模型试验;TLD 效应

中图分类号:TV672.3 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2014)06-0547-06

Model test of TLD effect on aqueduct structure subjected to strong vibration

HUANG Yanxin, QIAN Xiangdong

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on tests of a rectangular one-span simply supported aqueduct, the tuned liquid damper (TLD) effect on the aqueduct under the condition of a rigid foundation subjected to strong vibration was analyzed. The relationship between the transverse damping effect and the ratio of depth to width were studied by adjusting the water level. The test results demonstrated that water sloshing and wave breaking had a TLD effect on the aqueduct structure; the increase of the water level in the aqueduct changed the dynamic properties of the structure, causing the self-vibration frequency of the structure to decrease; during strong vibration, the TLD effect fluctuated with the change of water level; and the most significant TLD effect occurred when the water sloshing frequency was close to the self-vibration frequency of the structure.

Key words: strong vibration; aqueduct structure; model test; TLD effect

渡槽又称输水桥,是跨越山川、河谷、道路的架空输水建筑。渡槽运行时,槽内水体的质量往往大于槽身结构的质量,将显著影响渡槽结构的动力特性和动力响应。因此,在渡槽结构的抗震分析和设计时必须考虑水体的影响。

目前,渡槽的抗震分析常采用 2 种简化模型方法考虑水体的动力影响:一种是忽略水体与结构的动力相互作用,只考虑水体的质量效应;另一种则以弹簧连接的方式简化水体与结构的动力相互作用。大部分研究者认为^[1],强震作用下,水体的大幅度晃动将加剧渡槽结构的动力反应,忽略水体与结构的动力相互作用不利于渡槽的安全。近年来,随着调谐液体阻尼器(TLD)理论的研究发展^[2-6],有学者将 TLD 概念引入渡槽结构体系中,认为渡槽中的水体对排架支撑渡槽结构起到了 TLD 减震效应,水体的晃动越强,水体对渡槽结构的 TLD 减震作用越强^[7-8]。蔡丹绎等^[9]认为水体晃动作用随水位深宽比的增加而减少;吴轶等^[10]提出渡槽内既存在激励水位也存在减震水位,并通过计算验证了减震效果随着水位的增加而变得显著。目前,渡槽中水体是否能像高耸结构中的 TLD 阻尼器一样起到减震作用仍充满争议^[11]。张多新等^[12-14]认为渡槽存在 TLD 效应,且减震效应随水位变化;李遇春等^[15]则认为水体会较大地改变渡槽结构的基频,TLD 理论不适用

收稿日期:2014-01-15

基金项目:国家自然科学基金(11132003)

作者简介:黄研昕(1988—),男,安徽徽州人,硕士研究生,主要从事工程抗震与振动控制研究。E-mail:hyx593522035@126.com

通信作者:钱向东,教授。E-mail:xdqian@hhu.edu.cn

于渡槽结构。

由于 TLD 理论认为液体晃动作用与水体深宽比紧密相关,因此水体深宽比对渡槽槽墩地震响应的影响也十分重要。季日臣等^[16-17]通过 Housner 模型数值模拟,提出深宽比分别在 0.7 和 0.5 时渡槽槽墩的地震响应达到最大值和最小值;段秋华等^[18]提出水体在频率共振区有最佳减震效果;楼梦麟等^[19-20]通过排架支撑渡槽试验分析了不同地基下水体对渡槽结构横向、竖向的动力性能影响。

然而,现有试验所选工况还不够详尽,不能很好地描述结构动力特性随水体深宽比变化的详细过程,且试验往往采用过水工况与空槽比较,缺少相同条件下盛水渡槽与等效质量模型的对比分析。本文通过控制横向地震激励的峰值加速度,利用扫频法分析渡槽结构在不同工况下的反应,并通过设计对比试验,研究了强震作用下水体的减震效果,明确了水体对渡槽槽墩结构横向响应的影响。

1 试验模型及工况

1.1 试验模型

本文设计了一套比对模型振动台试验方案。试验系统由一个水平振动台、控制系统、传感器、2 个比对渡槽结构以及数据采集器、振动分析软件组成。两个比对渡槽结构中一个盛水,另一个在跨中加载等效质量块,两个结构几何特性完全相同,且固定在同一水平振动台上。

渡槽结构采用矩形截面排架支撑渡槽结构,槽墩高度和单槽跨度均为 600 mm。为使模型更接近单自由度系统(尽量减小槽墩的质量),槽墩采用轻质高强的碳纤维管制作,尺寸为 $\varnothing 5\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,一跨共 4 根槽墩,单跨的抗侧刚度 $k=800\text{ N/m}$ 。盖梁和槽身采用有机玻璃制作,盖梁尺寸为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}\times 120\text{ mm}$,质量为 250 g ,槽身尺寸为 $90\text{ mm}\times 180\text{ mm}\times 600\text{ mm}$,水槽内室尺寸为 $80\text{ mm}\times 175\text{ mm}\times 590\text{ mm}$,槽身质量 4.3 kg 。试验将渡槽结构直接与振动台固结,模型结构可简化采用单自由度体系。简化模型质量考虑单跨槽身、盖梁质量和,用 m 表示,其自振频率 f 为

$$f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m}{k}}$$

(1)

式中: k ——单跨抗侧刚度。

1.2 传感器布置

试验采用应变式 MEMS 传感器。在振动台表面布置一个加速度传感器观测渡槽结构底部输入信息;在 2 个渡槽结构的槽底及槽顶分别布置位移传感器和加速度传感器,获取结构输出信息。试验装置及传感器布置如图 1 所示。

1.3 试验工况

实际工程中矩形渡槽满槽时深宽比通常在 0.6~0.8 之间,最大不超过 1.2;其 1/2 槽甚至 1/4 槽过水工况时,实际深宽比可能小于 0.2。试验将最高水位设计为深宽比 1.589,并将 0.05 深宽比设为初始工况。考虑到浅水区域内可能出现较复杂的流固耦合现象,试验在浅水位区域设置较多工况。

为便于等效质量砝码的加载,试验将加载等级设为 0.2 kg,盛水渡槽结构每级加载对应质量水体,考虑到试验设备条件,读取水深时精确到 0.1 mm。在等效质量达到 2 kg 后,试验将加载等级调整为 1 kg。具体工况见表 1,对每个工况进行 10 次振动。

1.4 输入信号

采用正弦稳态扫频法分析渡槽结构模态,通过振动台输入幅值稳定、频率为 0~10 Hz 变化的正弦信号,获得渡槽结构的时域信息,然后对扫频时域信息进行傅里叶变换,获得功率谱输出信息以对渡槽结构进行评估。由于计算得到渡槽结构基频信息在 2 Hz 附近,为避免扫频时高频噪声对结构的影响,在信号筛选时采用滤波器滤去 3 Hz 以上的信号,以降低干扰。

在测量渡槽结构动力响应时采用调频调幅的输入信号,信号的加速度幅峰值介于 0.25~0.35g 之间,频

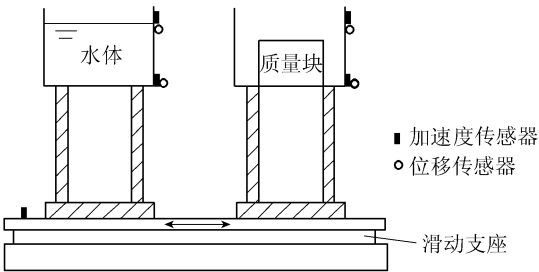


图1 模型立面
Fig. 1 Vertical view of model

率在 0~10 Hz 之间。每次采样时间设为 200 s,其中前 100 s 为激振时间,后 100 s 为自由衰减过程。

为尽量完整地获得渡槽结构的输入及响应信号,使绘制波形时更光滑平整,设计数据采集器的采样频率为 1 000 Hz。通过 Labview 语言编制分析模块软件读取数据并实时计算所需参数。

2 试验结果分析

2.1 减震系数

借鉴已有的地震动强度指标^[21-23],选取 2 类共 4 种结构动力响应数据作为减震系数评价指标:加速度减震系数,包括加速度峰值比,加速度均方根比;位移减震系数,包括位移峰值比,位移均方根比。采用 2 种均方根指标评价结构的能量差异以判断水体是否存在消能作用,利用 2 种峰值相关信息进一步评价水体对渡槽结构瞬态动力响应的影响。

试验选取渡槽槽底为监测点,观察各工况下减震系数的变化。加速度峰值比、加速度均方根比、位移峰值比、位移均方根比表达式分别为

$$A_{\max} = \frac{\max |a_w(t)|}{\max |a_m(t)|}$$

$$A_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [a_w(t)]^2 dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [a_m(t)]^2 dt}}$$

(2)

$$D_{\max} = \frac{\max |d_w(t)|}{\max |d_m(t)|}$$

$$D_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [d_w(t)]^2 dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [d_m(t)]^2 dt}}$$

(3)

式中: $a_w(t)$ 、 $a_m(t)$ ——盛水渡槽结构和等效质量渡槽结构的加速度时程; T ——激振时间; $d_w(t)$ 、 $d_m(t)$ ——盛水渡槽结构和等效质量渡槽结构的位移时程。

2 种渡槽结构的减震系数随水体深宽比的变化如表 1 所示,位移减震系数及加速度减震系数与水体深宽比的变化关系见图 2。

表 1 各工况减震系数

Table 1 Damping coefficients in various conditions

工况	液体深度/mm	等效质量/kg	水体深宽比	位移均方根比	位移峰值比	加速度均方根比	加速度峰值比
1	4.2	0.2	0.053	0.680	0.872	0.743	0.878
2	8.5	0.4	0.106	0.601	0.638	0.672	0.595
3	12.7	0.6	0.156	0.611	0.646	0.639	0.593
4	16.9	0.8	0.212	0.506	0.469	0.609	0.647
5	21.2	1.0	0.265	0.594	0.620	0.652	0.602
6	25.4	1.2	0.318	0.632	0.642	0.669	0.642
7	29.7	1.4	0.371	0.719	0.698	0.741	0.721
8	33.9	1.6	0.424	0.837	0.788	0.850	0.646
9	38.1	1.8	0.477	0.832	0.781	0.824	0.817
10	42.4	2.0	0.529	0.851	0.781	0.864	0.724
11	63.6	3.0	0.795	0.836	0.844	0.872	0.567
12	84.7	4.0	1.059	0.850	0.849	0.896	0.631
13	105.9	5.0	1.324	0.862	0.851	0.850	0.586
14	127.1	6.0	1.589	0.871	0.852	0.870	0.586

结合图 2 和表 1 可以看出,利用位移均方根比或位移峰值比作为减震系数其变化趋势一致,由空槽开始都随着水位的增加逐步降低,在水体深宽比 0.2 附近时位移减震系数达到最小值,在 0.4 深宽比之后逐步平稳,位移均方根比和位移峰值比分别在 0.837~0.871、0.844~0.852 间小幅波动。随着水体深宽比的增加,加速度均方根比和加速度峰值比分别从 0.743、0.878 迅速下降,分别在水体深宽比为 0.212 和 0.265 时达到最低值,之后加速度均方根比随水体深宽比略有上升,最终稳定在 0.85 左右,变化趋势与位移均方根比一致。而加速度峰值比在 0.529 的深宽比处经历较大的波动,最后稳定在 0.6 左右。

试验表明,在输入加速度达 0.25~0.35g 的强震作用下,刚性地基上水体对渡槽槽墩的影响始终表现为

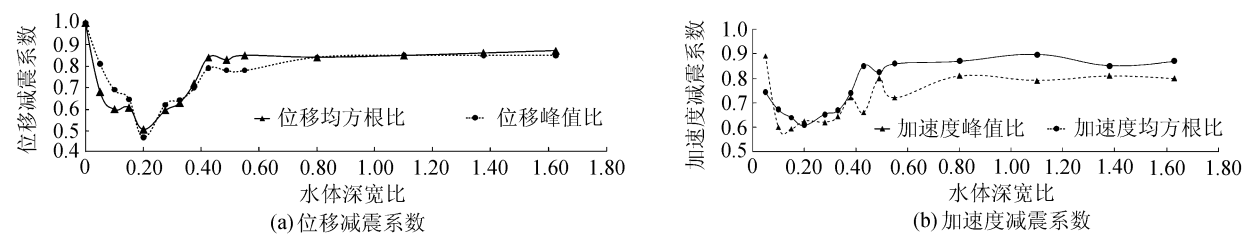


图2 减震系数-水体深宽比实测曲线

Fig. 2 Observed relationship between damping coefficients and ratio of depth to width

减震作用,并且试验设计的各种减震系数均在水体深宽比 0.2 附近达到最小值,减震效果表现得最为明显。随后减震系数随水体深宽比的增加逐渐增大,在水体深宽比超过 0.5 后,不再大幅度变化。减震效果趋于减弱。

2.2 水体晃动频率

在试验过程中发现,低水位振动过程中渡槽槽内液体大幅度晃动,剧烈撞击槽壁后产生水波碰撞甚至破碎的情况。而水位增加之后,水体在试验过程中趋于稳定,震荡作用十分微弱。另外,在停止激励的衰减过程中,浅水位时盛水渡槽结构可以迅速返回平衡状态,衰减速率明显快于等效质量渡槽结构。而深水位情况下盛水渡槽结构的衰减速度虽然始终大于等效质量渡槽结构,但是两者间隔时间较低水位时大幅度减少。根据水体表面的波动情况对水体晃动频率进行监测,并将试验值与理论值比较。水体晃动频率根据深水理论计算:

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g \tanh\left(\frac{\pi h}{a}\right)}{a}}$$

(4)

式中: g ——重力加速度; a ——渡槽内壁宽度; h ——渡槽中的水深。试验结果与比较如图 3 所示。

从图 3 可发现,水体晃动频率随着深宽比的增加而上升,而渡槽结构振动频率则下降,水体晃动频率的理论值与试验值趋势大体一致,但是在水体深宽比小于 0.2 的浅水区域试验值存在明显的波动,这可能与浅水时渡槽结构的能量传递有关。在水位很浅时振动能量迅速传递给水体而导致晃动,而水位略微加深后,振动需要首先带动底部水体才能导致上层水体的晃动。而理论值则随着深宽比的增加单调增长,并没有体现这一区域的变化。

试验测得的水体晃动频率及渡槽结构振动频率在 0.2 深宽比附近发生重叠,之后水体晃动频率进一步增加,与渡槽结构振动频率相差逐渐增大,在深宽比达到 0.8 后逐渐趋于稳定,最后稳定在 2.7 Hz 左右,而水体晃动频率的理论值最终稳定在 3.1 Hz。在这一过程中,当水体晃动频率与渡槽结构自振频率接近时,振动台的激励频率又覆盖了渡槽结构的基频,即此时激励频率、水体晃动频率、渡槽结构振动频率十分接近,从而使渡槽内水体发挥了接近阻尼减震器的作用。容器中的水体大幅度激荡,破碎的水波可以形成液体的惯性和黏性耗能。而当水体频率与渡槽结构基频逐渐远离时,水体的减震效果也随之减弱。

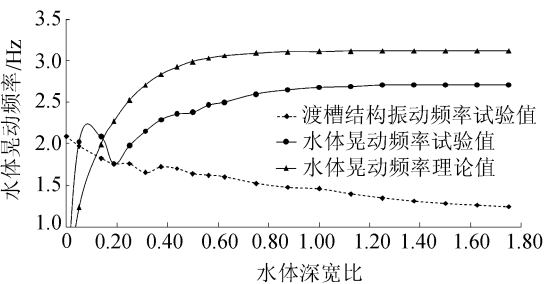


图3 水体晃动频率、渡槽结构振动频率与
水体深宽比关系曲线

Fig. 3 Relationships between water sloshing frequency, aqueduct vibration frequency, and ratio of depth to width

3 结 论

- a. 在刚性地基强震作用下渡槽存在 TLD 减震效应。
- b. 水体对槽墩横向位移的位移减震系数和加速度减震系数变化趋势相近,都在水体深宽比为 0.209 时减震效果最明显,最大减振幅度可达 40%。当水体深宽比大于 0.45 后,减震效果趋于稳定。
- c. 渡槽结构基频计算值与实测值趋势一致,数值误差稳定在 10% 以内,基本吻合。
- d. 水体晃动频率的试验值与理论值分布趋势大体一致,理论计算没考虑浅水位的数据波动。当振动频率覆盖渡槽结构基频且水体自振频率与渡槽结构基频率接近的时候,减震作用尤其明显。

上述结论还需计算各工况下结构的阻尼比和动力放大系数来判断。

参考文献:

- [1] 邵岩,赵兰浩,李同春. 考虑流固耦合的渡槽动力计算方法综述[J]. 人民黄河,2005,27(11):59-60. (SHAO Yan,ZHAO Lanhao,LI Tongchun. Summary of dynamic calculation methods of fluid-solid coupled aqueduct[J]. Yellow River,2005,27(11):59-60. (in Chinese))
- [2] 董平,陈招平. 矩形 TLD 在结构振动控制中的性能试验研究[J]. 工业建筑,2006,36(2):8-10. (DONG Ping, CHEN Zhaoping. Experimental investigation on the performance of the rectangle tuned liquid damper in structural vibration control[J]. Industrial Construction,2006,36(2):8-10. (in Chinese))
- [3] 楼梦麟,牛伟星,宗刚,等. TLD 控制的钢结构振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2006,26(1):145-151. (LOU Menglin,NIU Weixing,ZONG Gang,et al. Shaking table model test for a steel structure under control oftuned liquid damper[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2006,26(1):145-151. (in Chinese))
- [4] MODI V J,MUNSHI S R. An efficient liquid sloshing damper for vibration control[J]. Journal of Fluids and Structures, 1998,12(8):1055-1071.
- [5] REED B D,YU J,HARRYET Y,et al. Investigation of tuned liquid dampers under large amplitude excitation[J]. Journal of Engineering Mechanics,1998,124(4):405-413.
- [6] LIVAOĞLUA R,DOANGÜNB A. Simplified seismic analysis procedures for elevated tanks considering fluid-structure-soil interaction[J]. Journal of Fluids and Structures,2006,22(3):421-439.
- [7] 吴轶,莫海鸿,杨春. 大型矩形渡槽-水耦合体系的动力性能分析[J]. 地震工程与工程振动,2004,24(4):137-142. (WU Yi, MO Haihong,YANG Chun. Dynamic characteristics of large rectangular aqueduct-water coupling system[J]. 2004,24(4):137-142. (in Chinese))
- [8] 吴轶,莫海鸿,杨春. U 形渡槽水体大幅晃动的 ALE 有限元模拟[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2003,31(9):90-93. (WU Yi,MO Haihong,YANG Chun. ALE simulation of large sloshing of water in U-shaped aqueduct[J]. Journal of South China University of Technology:Natural Science,2003,31(9):90-93. (in Chinese))
- [9] 蔡丹绎,李爱群,程文. 调频液体阻尼器(TLD)的等效力学模型研究[J]. 地震工程与工程振动,1998,18(1):80-87. (CAI Danyi,LI Aiqun,CHENG Wen. Study on equivalent mechanical model of tuned liquid damper[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,1998,18(1):80-87. (in Chinese))
- [10] 吴轶,莫海鸿,杨春. 三维排架渡槽中水的调频液体阻尼效应[J]. 水利学报,2005,36(9):1115-1120. (WU Yi, MO Haihong,YANG Chun. Analysis on tuned liquid damper effect of 3-D frame supported aqueduct [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2005,36(9):1115-1120. (in Chinese))
- [11] 张多新,王清云,白新理. 大型渡槽结构动力学研究进展[J]. 自然灾害学报,2011(4):22-30. (ZHANG Duoxin,WANG Qingyun,BAI Xinli. Research progress in structural dynamics of large scale aqueduct[J]. Journal of Natural Disasters,2011(4):22-30. (in Chinese))
- [12] 张多新,王清云,白新理. 大型 U 形薄壳渡槽动力分析[J]. 人民长江,2008,39(16):69-72. (ZHANG Duoxin,WANG Qingyun,BAI Xinli. Dynamic analysis of large U-type thin shell aqueducts [J]. Yangtze River,2008,39(16):69-72. (in Chinese))
- [13] 王清云,张多新,白新理. 大型矩型水工渡槽三维流固耦合动力分析[J]. 水利水运工程学报,2008(4):55-60. (WANG Qingyun,ZHANG Duoxin,BAI Xinli. 3D dynamic analyses of fluid-solid-interaction of large-sized rectangular hydraulic aqueduct [J]. Hydro-Science and Engineering,2008(4):55-60. (in Chinese))
- [14] 王清云,孙元元,周生通,等. 水体作用下 U 形薄壁渡槽的振动特性[J]. 噪声与振动控制,2012(4):25-30. (WANG Qingyun,SUN Yuanyuan,ZHOU Shengtong,et al. Dynamic characteristics research of U-shape thin-wall aqueduct under the action of fluid[J]. Noise and Vibration Control,2012(4):25-30. (in Chinese))
- [15] 李遇春,李锦华. 关于大型渡槽结构设计的几个问题[J]. 中国农村水利水电,2006(7):57-60. (LI Yuchun,LI Jinghua. Several problems related to large-sized aqueduct structure design[J]. China Rural Water and Hydropower,2006(7):57-60. (in Chinese))
- [16] 季日臣,夏修身,陈尧隆,等. 考虑流-固耦合梁式矩形渡槽横向地震响应研究[J]. 地震学报,2007(3):328-334. (JI Richen,XIA Xiushen,CHEN Yaolong,et al. Transverse seismic response of beam aqueduct considering fluid-structure coupling [J]. Acta Seismologica Sinica,2007(3):328-334. (in Chinese))
- [17] 季日臣,夏修身,陈尧隆. 水体晃荡作用对渡槽横向抗震影响的研究[J]. 水力发电学报,2007,26(6):30-34. (JI Richen,

XIA Xiushen, CHEN Yaolong. Research on influence of water shake acting on aqueduct transverse seismic response[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(6): 30-34. (in Chinese))

[18] 段秋华, 楼梦麟, 杨绿峰. 槽内水深对渡槽-水体耦合结构抗震性能的影响[J]. 水力发电, 2011, 37(9): 42-45. (DUAN Qiuhua, LOU Menglin, YANG Lyufeng. Effects of water depth on seismic performance of the aqueduct-water coupling structure [J]. Water Power, 2011, 37(9): 42-45. (in Chinese))

[19] 楼梦麟, 段秋华. 排架式渡槽竖向地震反应的振动台模型试验[C]//首届全国水工抗震防灾学术会议论文集. 南京: 河海大学, 2006: 225-231.

[20] 段秋华. 大型渡槽结构振动台模型试验及抗震性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.

[21] 叶列平, 马千里, 缪志伟. 结构抗震分析用地震动强度指标的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 9-22. (YE Lieping, MA Qianli, MIAO Zhiwei. Study on earthquake intensities for seismic analysis of structures[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 9-22. (in Chinese))

[22] 杨迪雄, 赵岩. 近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对隔震建筑结构抗震性能的影响[J]. 地震学报, 2010, 32(5): 579-587. (YANG Dixiong, ZHAO Yan. Effects of rupture forward directivity and fling step of near-fault ground motions on seismic performance of base-isolated building structure[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(5): 579-587. (in Chinese))

[23] 耿方方, 丁幼亮, 谢辉, 等. 近断层地震动作用下长周期结构的地震动强度指标[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(1): 203-208. (GENG Fangfang, DING Youliang, XIE Hui, et al. Ground motion intensity indices for long period structures subjected to near-fault ground motion [J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2013, 43(1): 203-208. (in Chinese))

· 简讯 ·

《河海大学学报(自然科学版)》、《水利水电科技进展》和
《水资源保护》获中国高校科技期刊奖

“第五届中国高校精品·优秀·特色科技期刊奖”颁奖大会于2014年11月11日在广州市召开,河海大学主办的《河海大学学报(自然科学版)》及《水利水电科技进展》被评为第五届中国高校优秀科技期刊,《水资源保护》被评为第五届中国高校特色科技期刊。这次评奖活动是教育部科技司委托,由中国高校科技期刊研究会承办的,目的是为推动高校科技期刊出精品、创特色,促进高校科技期刊提高学术影响力和竞争力。通过对科技期刊在科学活动和文献交流中所起的作用及其质量做出客观、全面的评价,以促进高校科技期刊的发展,提高期刊的学术质量和编辑出版质量,扩大我国高校科技期刊在国内外的影响。经专家评审,这次共评出精品科技期刊49种,优秀科技期刊108种,特色科技期刊30种。

(本刊编辑部供稿)