

文章编号:1004-4574(2010)03-0126-06

基于 NetSLab 远程协同试验平台的多跨桥梁抗震研究

范云蕾¹, 郭玉荣¹, 肖岩^{1,2}

(1. 湖南大学 土木工程学院, 教育部建筑安全与节能重点实验室, 湖南长沙 410082; 2. 南加利福尼亚大学 土木系, 洛杉矶, CA 90089, 美国; 3. 哈尔滨工业大学 土木学院, 黑龙江 哈尔滨, 150090)

摘要:利用远程协同试验平台 NetSLab, 对一个多跨的桥梁结构进行了抗震试验研究。该平台是基于客户机/服务器概念开发的, 提出了供结构拟动力远程试验用的数据模型和应用协议。它能够在远程结构实验室或计算机之间通过互联网传送控制和反馈数据。桥梁系统由 3 个柱子组成, 分别在湖南大学、哈尔滨工业大学和清华大学之间模拟。湖南大学站点试验模型为 GFRP 约束弯曲型钢筋混凝土桥墩柱, 哈尔滨工业大学站点试验模型为 CFRP 约束剪切型钢筋混凝土桥墩柱, 清华大学站点则进行数值模拟。对该桥梁进行了 3 个水准地震作用下的远程协同拟动力试验, 地震动加速度选用 El Centro 波。试验结果表明, GFRP 加固柱具有良好的延性及抗震性能, CFRP 加固可阻止柱子的脆性剪切破坏, 有效地提高其滞回性能及能量耗散能力, 从而可大大地提高整个桥梁系统的抗震能力。

关键词:加固; 远程协同; 试验平台; 桥梁结构

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

Seismic research into a multi-span bridge based on remote concerted testing platform NetSLab

FAN Yun-lei¹, GUO Yu-rong¹, XIAO Yan^{1,2}

(1 MOE Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency, College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2 Dept. of Civil Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA90089, USA; 3 School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Seismic response of a multi-span bridge is investigated in this study using an Internet based testing platform. The platform, NetSLab, was developed based on client/server concept along with a proposed data model and communication protocols. The platform is capable of transferring control and feedback data and signals among remotely located structural testing laboratories or computers connected by Internet. In these tests, a three-pier bridge system was simulated in which a glass fiber reinforced plastic (GFRP) retrofitted reinforced concrete pier was tested physically in Hunan University and a carbon fiber reinforced plastic (CFRP) reinforced concrete retrofitted pier was tested physically in Harbin Institute of Technology and the third one was simulated numerically in Tsinghua University. The bridge was loaded to simulate the responses under ground motions corresponding to earthquake hazards for a highly seismic location with 63%, 10% and 2% exceedance probabilities in 50 years. The experiments demonstrate that retrofitted column with GFRP has good ductility and energy dissipation capability, CFRP can prevent brittle shearing damage of RC short column, make ductility and the energy dissipation capacity of the column increase greatly thus improving the seismic behavior of the bridge system.

收稿日期: 2008-09-23; 修订日期: 2009-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90715036, 50778068); 长江学者创新团队项目(IRT0619)

作者简介: 范云蕾(1982-), 女, 博士研究生, 主要从事远程协同拟动力试验研究. E-mail: fanyunlei@163.com

Key words: retrofit; remote collaboration; testing platform; bridge structures

随着计算机网络的应用普及和结构工程领域对大比例复杂结构试验需求的增加,近些年出现了一种新的试验方法,即远程协同试验。这种将异地多个试验室的试验资源通过互联网连接在一起协同进行结构试验的方法比不断提高单个结构实验室的设备能力更实用,它可以减少实验室的重复建设,实现现有资源共享。为了研究这种方法在拟动力实验中实现的可能,国内外已有一些通过互联网进行协同试验的尝试,如美国 NESS^[1-2],台湾 ISEE^[3-4],日本 ED-Net^[5],韩国 KOCED^[6],中国 NetSLab^[7-8]。本文利用远程协同试验平台 NetSLab 在中国 3 所高校之间对 CFRP 和 GFRP 加固圆截面独柱式钢混柱桥梁进行整桥的远程协同拟动力试验,目的是研究地震荷载作用下整体桥梁结构的抗震状况。

1 远程试验平台 NetSLab

为了促进南加州大学与湖南大学及其他高校之间的合作研究,湖南大学开发了基于互联网的远程协同试验平台 NetSLab。NetSLab 是基于客户机/服务器概念开发,提出了供结构拟动力远程协同试验用的数据模型和通讯协议,能够在远程结构试验室或计算机之间通过互联网传送控制和反馈数据。为了适应中国的互联网环境,NetSLab 采用了一些配置以保证在不同试验室间通过防火墙和代理服务器有效联络,如直接 socket 通讯、虚拟私有网络等。如图 1 所示,该平台还包括 4 个不同功能的模块:控制中心 Controller、真实试验机 Physical Tester、虚拟试验机 Virtual Tester 及远程观察器 Observer。Controller 实际上是平台的核心部分,负责所有模块的进程。因此,在一次试验中,只能有一个 Controller,但是可以有多个 Physical Tester, Virtual Tester 及 Observer。对于试验机,所有的信息和数据都必须通过 Controller 来发送或接收。这样做的目的是为了简化网络拓扑,以便简化通讯流程。

Controller 相当于平台的服务器。它负责整个试验进程的控制、与各个试验机之间进行通讯、存储及公布试验结果。Physical Tester 指利用试验设备获取试验子结构恢复力及其它试验结果的模块。它负责与控制中心及实验室控制系统进行通讯。Virtual Tester 指不连接试验设备进行真实试验,直接模拟计算子结构非线性特性的模块。它将尽可能地模拟真实设备的各种特性来进行虚拟试验。Observer 主要是提供对远程试验感兴趣的人实时获得试验结果的模块,可在试验过程中随时加入或退出。

如图 2 所示,在一次试验中,首先 Controller 读取地震波。根据试验结构的基本信息,Controller 计算出每步试验构件和分析构件的位移,然后通过网络通讯平台 NetSLab 发送位移指令给 Physical Tester 和 Virtual Tester。Physical Tester 再施加位移给作动器,一旦作动器达到位移指令的位置,将发送反馈力给 Controller。同时,Virtual Tester 根据假定的滞回模型进行模拟,并将反馈力结果通过网络通讯平台发送给 Controller。然后 Controller 再决定下一步的位移指令。

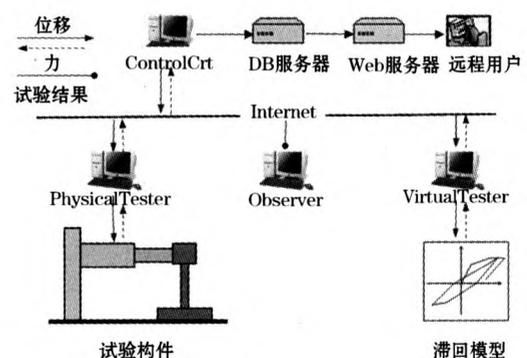


图 1 NetSLab 构架图

Fig. 1 Framework of Netslab

2 试验设计

2.1 试验设计

桥梁模型设计参照 Fairfax-Washington Under-crossing of I-10 Freeway (Santa Monica) 原型桥梁^[9],该桥曾在北岭(Northridge)地震中遭受严重破坏。实验中假设上部桥面结构为无限刚度并将整体桥梁沿桥面方向假设为一单自由度模型。上部结构在每一桥墩处的支撑形式视为固定铰结,暂不考虑桥墩基础与土的相互作用。如图 3 所示,桥梁系统由 4 跨组成,每跨长 24m。上部结构采用箱形截面,桥面宽度为 8m。Controller 放在湖南大学网络化结构实验室的控制室,在哈尔滨工业大学和湖南大学运行两个 Physical Tester,对 P1 和

P2 墩进行试验测试,模型比例取 1/4,湖南大学站点试验模型为 GFRP 约束弯曲型钢筋混凝土桥墩柱,如图 4 所示。哈尔滨工业大学站点试验模型为 CFRP 约束剪切型钢筋混凝土桥墩柱。另外在清华大学运行一个 Virtual Tester,对 P3 墩柱进行数值模拟。地震输入方向为桥的轴向。试件信息见表 1。

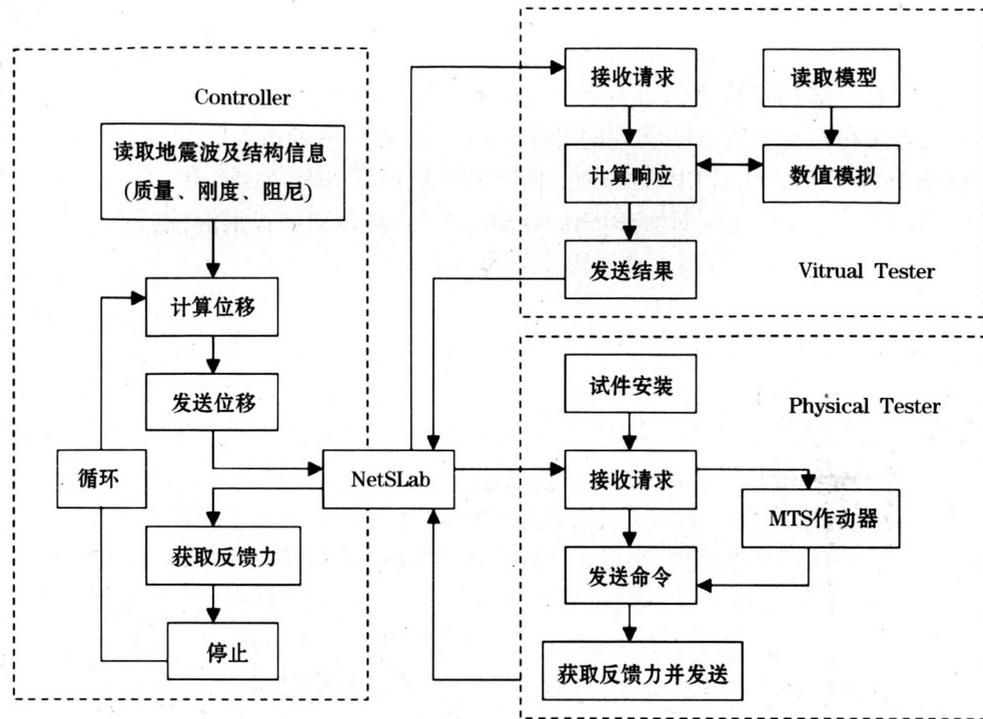


图 2 远程协同拟动力试验控制流程图

Fig. 2 Flowchart of controlling remote concerted pseudo-dynamic test

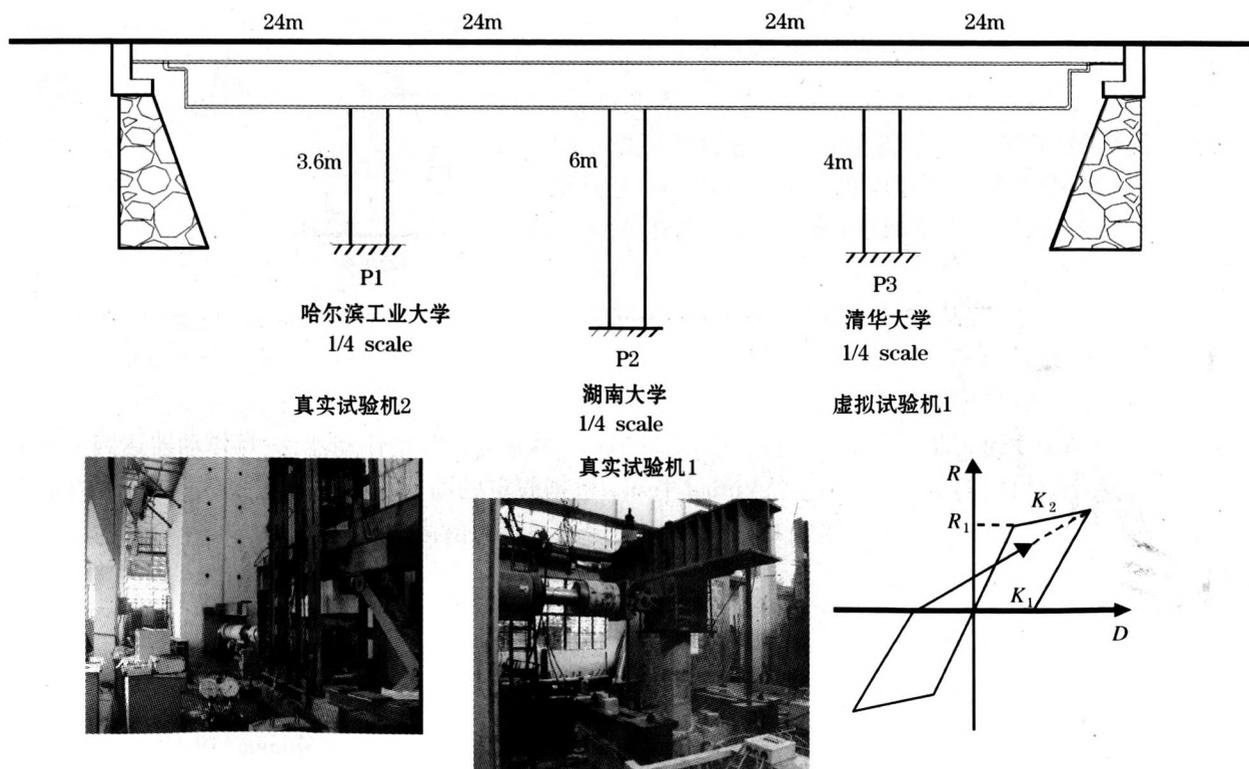


图 3 整体结构模型

Fig. 3 Integral structure model

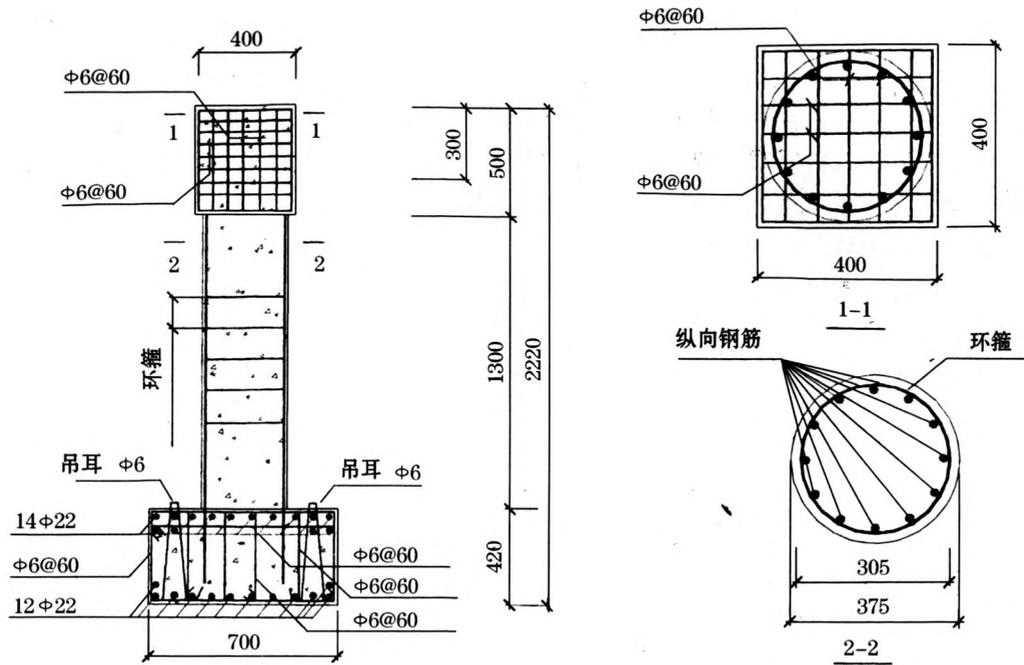


图 4 湖南大学构件平面图

Fig. 4 Plain view of component in Hunan University

2.2 地震波输入

试验共进行了 5 个水准地震作用下的远程协同拟动力试验,地震动加速度选用 EL Centro 地震动加速度记录,试验加速度峰值取为 0.035g,0.11g,0.22g,0.4g 和 0.62g,分别相当于实际地震 7 度的小震、中震、大震及 8 度和 9 度大震。地震波信息见表 2。

2.3 试验结果及分析

针对已建的桥梁短柱不能满足现有抗震规范设计要求的现状,对墩柱 1 进行 CFRP 加固,以防止桥梁短柱发生脆性剪切破坏。墩柱 2 采用 GFRP 加固,以防止弯曲破坏或者过早的剪切破坏。试验结果表明,CFRP 加固钢混短柱不仅阻止了柱子的脆性剪切破坏,而且大大地提高了柱子的延性及能量耗散能力。从图 5(a) - 7(a)中可以看出,墩柱 1 在屈服以前地震响应较稳定,刚度变化不大;但是在屈服以后,滞回环变得饱满,转化为反 S 形,刚度逐渐减小。说明 CFRP 对内部核心混凝土具有较强的约束效应,延性性能得到了良好的改善,能有效的改善钢混短柱的抗震性能,从而提高了桥梁系统的抗震能力。虽然图 5(b) - 7(b)中墩柱 2 出现了少许滞回,但是可以看出 GFRP 加固柱具有良好的延性和耗能能力。在地震波加速度峰值为 0.035g 和 0.11g 输入下,柱子基本保持在弹性范围内,这里不详细列出。

表 1 试件信息

Table 1 Information on specimens

	P1	P2	P3
试验站点	哈工大	湖南大学	清华大学
模型比	1/4	1/4	1/4
原型结构高度/m	3.6	6	4
原型桥墩直径/m	1.2	1.5	1.2
缩尺构件高度/m	0.9	1.5	1
直径 d /m	0.3	0.375	0.3
应力模型比	100%	100%	100%
力模型比	1/16	1/16	1/16
位移模型比	1/4	1/4	1/4
轴压比	0.2	0.2	0.2

表 2 地震波输入

Table 2 Input of seismic waves

地震强度	7 度	7 度	7 度	8 度	9 度
超越概率/%	63	10	2	2	2
地震波	EL - Centro 波				
加速度幅值/g	0.035	0.11	0.22	0.4	0.62
调整系数	0.1	0.32	0.65	1.18	1.83

3 结论

为了解决各个实验室难以操作各种不同的试验设备及装置等问题,湖南大学开发了一个标准的远程协同试验平台,该平台可以有效地传输数据、远程控制试验设备并可协同进行多站点混合试验。为了评估该平台的有效性,在湖南大学、哈尔滨工业大学及清华大学之间进行了四跨桥梁结构系统的协同试验研究。平台的开发应用初步实现了异地分布式协同拟动力试验理论,从而有可能将现有结构实验室整合为功能强大的网络结构实验室以提高试验能力及资源共享。

致谢:本次远程协同试验是在哈尔滨工业大学、清华大学协助下完成的,田石柱教授以及研究生王大鹏、蔡新江和傅炳为本次试验付出了辛勤劳动,在此表示感谢。

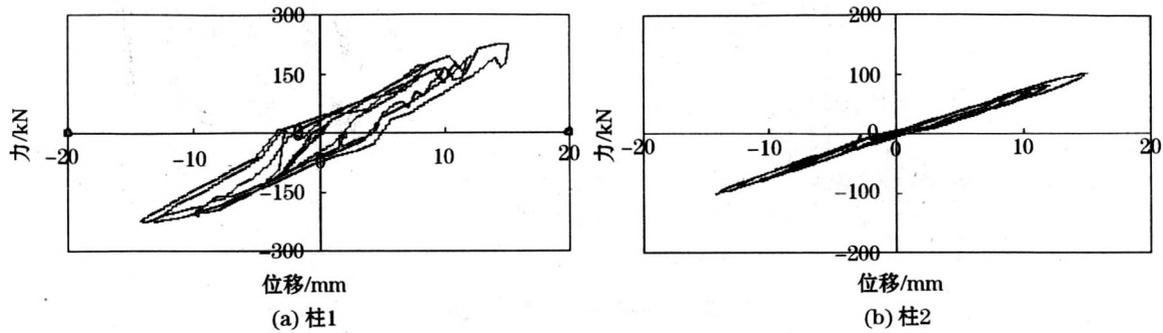


图 5 0.22g 输入时柱子滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curves of column under input of 0.22g

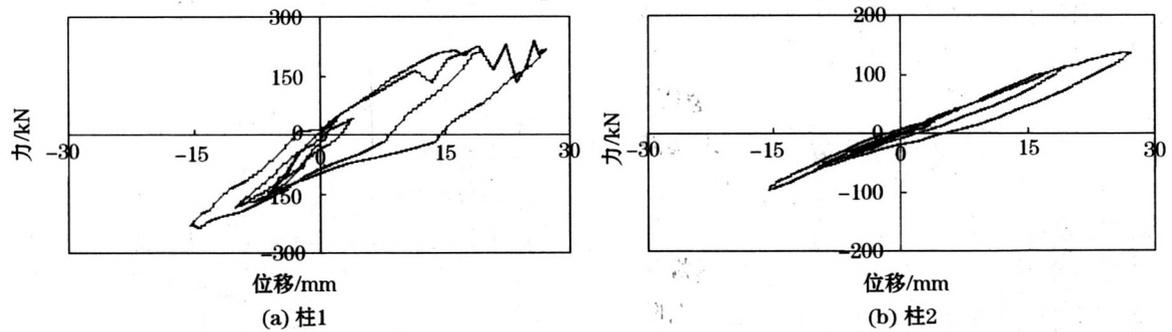


图 6 0.4g 输入时柱子滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curves of column under input of 0.4g

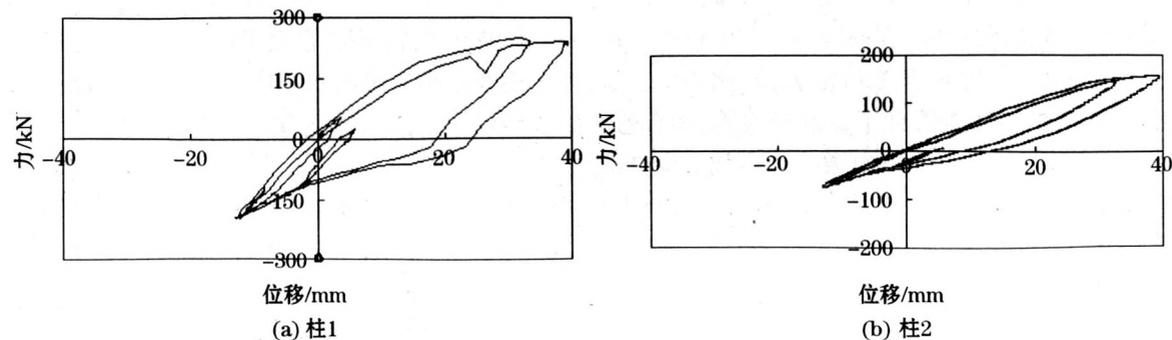


图 7 0.62g 输入时柱子滞回曲线

Fig. 7 Hysteretic curves of column under input of 0.62g

参考文献:

- [1] Information on <http://www.nees.org/>
- [2] Pauschke J, Anderson T,L, Goldstein S,N, et al. Construction status of the George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation. Proceedings of the Seventh U. S. National Conference on Earthquake Engineering ,2002.
- [3] Yang Y. S, Wang S. J, Wang J, et al. ISEE: Internet - based Simulations for earthquake engineering, Part I: the database approach [C]//. 13th world conference on Earthquake Engineering, 2004; 1910
- [4] Wang K. J, Wang S. J, Yang Y. S, et al. ISEE: Internet - based simulations for earthquake engineering, Part II: the application protocol approach [C]//. 13th world conference on Earthquake Engineering ,2004;1548
- [5] Ohtani K, Ogawa N, Katayama T, Shibata H. 3 - D Full - Scale Earthquake Testing Facility and Earthquake Engineering Network [C]// Proceedings of the Third World Conference on Structural Control ,2002: 1019 - 1024.
- [6] Kim J. K. KOCEC Collaboratory Program [C]// Proceedings of the 2004 ANCER Annual Meeting: Networking of Young Earthquake Engineering Researchers and Professionals, 2004.
- [7] Xiao Y, Hu Q, Guo Y. R, et al. Development of a network platform for remote hybrid dynamic testing. [C]//13th world conference on earthquake engineering, 2004;3048.
- [8] Xiao Y, Hu Q, Guo Y. R, et al. Networked platform for remote structural testing and shared use of laboratories [J]//. Progress in natural science, 15 (12) 2005: 1135 - 1142.
- [9] Priestley M. J. N, Xiao Y, Holombo J, et al; The Northridge Earthquake of January 17, 1994 - Damage Analysis of Selected Freeway Bridges [R]//, Chapter, 3, Priestley, Seible and Uang, Structural Systems Research Report, I - 10 - Fairfax/ Washington Undercrossing, No. SSRP - 94/06, 1994.