

基于 Pushover 分析的刚构桥抗震设计方法研究

王占飞, 庞 辉, 李帼昌, 杨 阳

(沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁, 沈阳 110168)

摘 要: 为了确立基于弹塑性 Pushover 分析的桥梁抗震设计方法, 该文以三跨连续刚构桥为对象, 进行 E2 地震动作用下的抗震分析。在弹塑性分析中, 考虑桥梁的建设场地为 II 类场地, E2 地震动的烈度为 8 度。为了考察水平加载形式对桥梁抗震性能及设计的影响, 在顺桥方向和横桥方向均采用 2 种加载形式, 即基本模态加载和等加速度加载。分析结果表明, 水平加载形式对刚构桥抗震性能影响较小。通过研究表明, Pushover 能够很好的探明桥梁整体结构的弹塑性状态, 进行 E2 地震作用下的抗震设计。

关键词: 弹塑性; 抗震性能; 刚构桥; Pushover 分析; E2 地震动

中图分类号: U441.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.05.S090

SEISMIC DESIGN OF RIGID FRAME BRIDGE BASED ON PUSHOVER ANALYSIS APPROACH

WANG Zhan-fei, PANG Hui, LI Guo-chang, YANG Yang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China)

Abstract: In order to establish the seismic design method for the bridge on the basis of Pushover analysis, continuous rigid frame bridge with 3 spans was exemplified to perform seismic analysis under earthquake action E2 in the paper. In the elastio-plastic analysis, the construction site of the bridge was defined as class II and the seismic intensity was 8 degree. Two loading types, namely, fundamental mode loading and uniformly acceleration loading, were applied along the longitudinal and lateral directions to demonstrate the effect of the horizontal loading type on the seismic performance and design of the bridge. The analysis results show that the type of the horizontal loading has little influence on the seismic performance of the rigid frame bridge. The method in the paper can investigate the elastic-plastic condition of the overall structure and perform the seismic design for the bridge under earthquake action E2.

Key words: elastio-plastic behavior; seismic performance; rigid frame bridge; Pushover analysis; earthquake action E2

刚构桥被广泛的应用在我国交通工程桥梁的建设中。但纵观近些年国内外的研究, 关于这类桥梁抗震性能的研究相对较少, 尤其是对刚构桥基于性能的抗震设计方法。历次震害表明, 桥梁结构破坏的主要原因是构件变形过大, 超过了结构构件的承载和变形能力。因此, 在罕遇地震作用下的桥梁结构抗震验算是有必要的。为此, 我国的铁路桥梁、

公路桥梁以及城市桥梁都相应的提出了 2 阶段抗震设计^[1-3]。并且国内外研究学者对桥梁结构的抗震分析及设计方法进行了大量研究工作^[4-5]。目前, 桥梁的抗震设计分析方法主要有静力分析方法和动力分析方法两种。动力分析方法能够很好的把握桥梁的动力性能, 但计算时间较长, 主要应用在复杂的桥梁如拱桥、斜拉桥、悬索桥等的抗震设计中;

收稿日期: 2012-05-01; 修改日期: 2012-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(50005016)

通讯作者: 王占飞(1976—), 男, 辽宁法库人, 副教授, 博士, 主要从事桥梁抗震研究(E-mail: wzf9522@hotmail.com)。

作者简介: 庞 辉(1988—), 女, 吉林梅河口人, 硕士生, 主要从事组合结构研究(E-mail: panhui0615@163.com);

李帼昌(1964—), 女, 辽宁沈阳人, 教授, 博士, 主要从事结构工程的研究(E-mail: liguochang0604@sina.com);

杨 阳(1987—), 男, 山东聊城人, 硕士生, 主要从事组合结构研究(E-mail: 564165981@qq.com)。

静力分析方法是把地震作用考虑成惯性力,以静荷载的形式施加在结构中,考察结构的弹塑性性能及破坏形式。虽然这种方法对地震荷载进行了一定的简化,但由于能够很好的把握结构的弹塑性性能,了解结构的破坏形式,计算时间大大减少,在普通规则的桥梁如梁桥、刚构桥等的抗震设计中常采用该方法。在静力抗震设计方法中,对于罕遇地震作用的高层建筑结构主要采用弹塑性 Pushover 分析进行第 2 阶段的抗震设计,得到了国内外建筑行业的认可^[6]。但是,在桥梁工程中还很少采用这种方法进行 E2 地震动(相当于建筑抗震中的罕遇地震)作用下的桥梁抗震设计^[7-10]。

为了确立基于弹塑性 Pushover 分析的桥梁抗震设计方法,本文首先介绍弹塑性 Pushover 分析方法及进行抗震设计的流程、评价指标。然后以三跨连续刚构桥为例,分别在顺桥方向和横桥方向进行 E2 地震动作用下的抗震分析。在弹塑性 Pushover 分析中,考虑桥梁的建设场地为 II 类场地, E2 地震动的烈度为 8 度。为了考察水平加载形式对桥梁抗震设计的影响,在顺桥方向和横桥方向都分别采用了 2 种加载形式即基本模态加载和等加速度加载。

1 弹塑性 Pushover 方法及抗震评价

1.1 弹塑性(Pushover)分析方法

静力弹塑性分析也称 Pushover 分析方法,是指在竖向荷载保持不变的情况下,在结构上施加某种分布的水平荷载,该水平荷载单调增加,使构件逐步屈服,从而得到结构在横向静力作用下的弹塑性性能。弹塑性 Pushover 抗震设计方法分两步:第 1 步是对结构进行 Pushover 推倒分析,第 2 步根据结构 Pushover 分析结果来对结构进行抗震性能评估。

其方法的基本假定为:1) 结构的响应与等效单自由度体系相关,即结构响应仅由结构的第一振型控制;2) 结构沿高度的变形由振型向量表示,即在整个地震响应过程中,惯性力按着结构质量分布保持不变或振型保持不变。

另外,目标位移的确定是影响 Pushover 分析方法评价结构抗震性能准确性的重要因素,常用的目标位移确定方法主要有以下几种:1) 对结构进行推覆分析,得到结构的底部剪力-顶点位移曲线,即能力谱曲线。将结构等效为 SDOF 体系,然后用弹塑性时程分析法或者弹塑性位移谱求出等效 SDOF 体系的最大位移,从而计算出结构的目标位移;2) 根

据能力谱方法确定结构的目标位移;3) 利用 FEMA-273^[9]推荐的位移影响系数方法确定结构的目标位移。

1.2 抗震评价

本文中采用的抗震性能评价方法是美国 ACT-40 能力谱法^[10]。其基本思路是建立能力谱曲线和需求谱曲线,并将 2 条曲线放在同一个坐标系中,两者的交点定为性能点。以下是 2 条谱曲线的转换公式。

1) 将静力推覆分析曲线从力-位移坐标系转到谱加速度-谱位移坐标系的能力谱形式,其转化公式如下:

$$S_a = \frac{V_b}{M_1^*}, \quad S_d = \frac{U_T}{\tau_1 \phi_{N1}} \quad (1)$$

$$M_1^* = \frac{(\sum_{j=1}^N m_j \phi_{ji})^2}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{ji}^2}, \quad \tau_1 = \frac{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{ji}}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{ji}^2} \quad (2)$$

其中: S_a 是谱加速度; S_d 是谱位移; V_b 是剪力; U_T 是位移; M_1^* 是相对于基本振型的有效质量; τ_1 为基本振型的参与系数; ϕ_{N1} 为基本振型下在结构顶端的位移; m_j 为节点处的集中质量; ϕ_{ji} 为在 i 振型 ϕ_i 中 j 节点的位移。

图 1 为能力谱坐标系的转化示意图,由图 1(a)底部剪力-顶点位移曲线转化为图 1(b)能力谱曲线,即体现了体系抵抗横向力的能力,称为能力曲线。

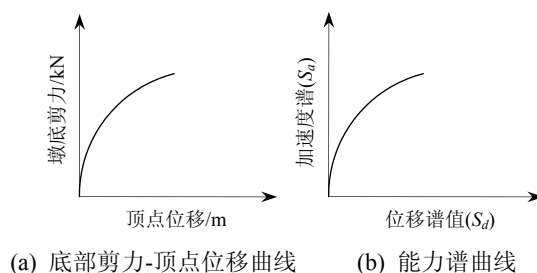


图 1 能力谱

Fig.1 Capacity spectrum

2) 将水平设计加速度反应谱曲线转换为横坐标为谱位移,纵坐标为谱加速度。其转化公式见式(3),其中, T 为结构基本周期。该曲线称为需求谱曲线,如图 2 所示。

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (3)$$

根据公路桥梁抗震设计细则,当阻尼比为 0.05 时的水平设计加速度谱:

$$S = \begin{cases} S_{\max}(5.5T + 0.45), & T < 0.1s \\ S_{\max}, & 0.1s \leq T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g / T), & T > T_g \end{cases} \quad (4)$$

式中： T_g/s 为特征周期； T/s 为结构自振周期； $S_{\max}$ 为水平设计反应谱最大值。

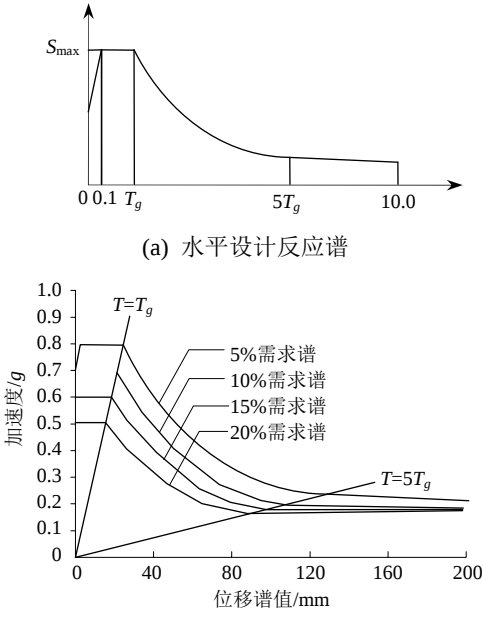


图 2 需求谱

Fig.2 Demand spectrum

水平设计加速度反应谱最大值 $S_{\max}$ 由下式确定：

$$S_{\max} = 2.25C_i C_s C_d A \quad (5)$$

式中： C_i 为抗震重要性系数； C_s 为场地系数； C_d 为阻尼调整系数； A 为水平向设计基本地震动加速度峰值。

需求谱曲线和能力谱曲线在同一坐标系下，称能力需求谱曲线，如图 3。

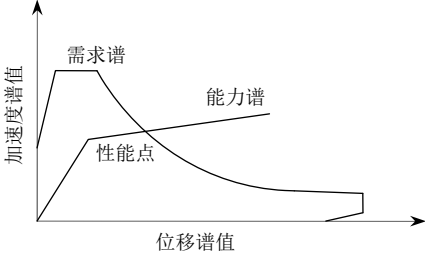


图 3 能力谱方法示意图

Fig.3 Capacity spectrum method schematic diagram

3 模型建立以及固有值分析

3.1 模型建立

本文以三跨连续预应力混凝土刚构桥为研究

对象，采用 Midas 有限元软件分析，分别进行了横桥方向和顺桥方向的弹塑性 Pushover 分析。桥梁跨度为 30m+50m+30m，如图 4(a)。主梁为 C50 的混凝土。梁截面形式为变截面单箱单室结构，尺寸如图 4(b)、图 4(c)所示。桥墩为双柱式钢筋混凝土桥墩，墩高 15m，截面形式是边长为 1.5m 的实腹正方形。桥墩主筋采用 HRB335。箍筋采用直径为 $\phi 12$ 的 HPB235 钢筋，桥墩中部箍筋间距为 0.15m，桥墩根部箍筋间距为 0.10m。桥墩主筋布置如图 4(d)、图 4(e)所示。

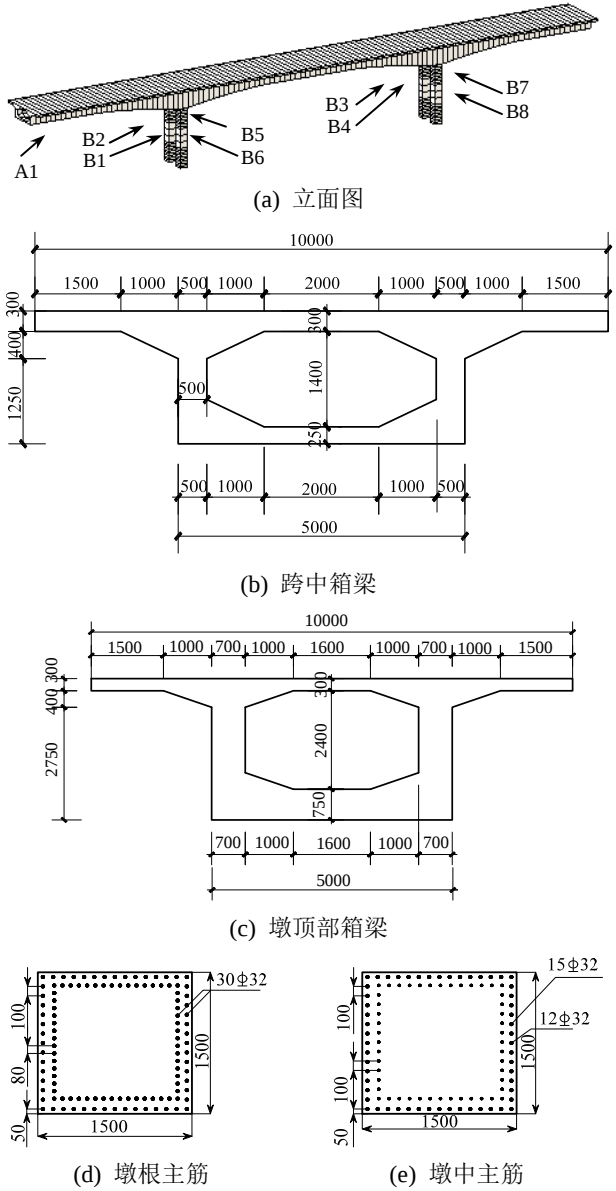


图 4 桥梁概况 /mm

Fig.4 Bridge profile

桥梁的边界条件是桥台处为滑动支座，即为活动支座，桥墩底部桩基础简化为节点弹性支撑，具体各边界条件及参数设置见表 1。

表 1 边界条件

Table 1 Boundary condition

边界位置	支撑类型	平动			转动		
		x	y	z	R_x	R_y	R_z
桥台 A1A2	滑动支座	自由	固定	固定	自由	固定	固定
		$SD_x/$	$SD_y/$	$SD_z/$	$SR_x/$	$SR_y/$	$SR_z/$
桥墩	节点	(kN/	(kN/	(kN/	(kN · mm/	(kN · mm/	(kN · mm/
底部	弹簧	mm)	mm)	mm)	rad)	rad)	rad)
		81000	14300	9950	2.03×10^{11}	2.03×10^{11}	2.03×10^{11}

3.2 固有值分析

在进行 Pushover 分析前,为了把握桥梁的动力特性,首先对该桥进行固有值分析。在固有值分析中,采用子空间迭代法进行计算。表 2 为该桥前十阶振型及相应周期、质量参与系数。由表 2 可知,顺桥方向,该桥的基本振型为第 1 振动模式,横桥方向的基本振型为第 2 振动模式,竖向的基本振型为第 6 振动模式。

表 2 固有值分析结果

Table 2 Eigenvalue analysis results

振动模式	周期/s	质量参与系数		
		顺桥方向/(%)	横桥方向/(%)	竖向方向/(%)
1	0.732	96.74	0.000	0.000
2	0.416	0.000	78.23	0.000
3	0.400	0.000	0.000	6.73
4	0.213	0.000	0.000	8.520
5	0.202	0.001	0.000	0.000
6	0.161	0.000	0.000	58.56
7	0.119	0.000	10.90	0.000
8	0.116	0.000	0.000	0.000
9	0.073	0.000	0.000	0.000
10	0.069	0.000	0.000	12.50

3.3 Pushover 分析及抗震性能评价

该桥在进行弹塑性 Pushover 时,为了考察水平加载形式对结构弹塑性性能的影响,在顺桥向和横桥向水平加载形式采用了等加速度加载形式(工况 1)和基本模态加载形式(工况 2)。两种加载形式均采用跨中节点位移控制。

1) 顺桥方向。

该桥在顺桥方向采用上述两种工况进行弹塑性 Pushover 分析得到的桥墩底部总剪力-跨中位移曲线见图 5 所示。由图 5 可知,在桥梁跨中最大控制位移 0.8m 范围内,桥墩明显进入弹塑性状态。并且桥墩在弹性阶段两种工况作用下的反应基本一致,只有桥墩进入弹塑性阶段才有微小的差异。表明对于以基本振动为主的刚构桥,在弹塑性 Pushover 分析中,加载形式对桥梁抗震性能影响很小。

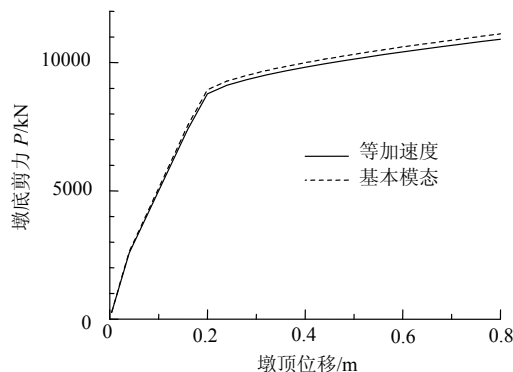


图 5 底部剪力-顶点位移曲线

Fig.5 The bottom shear-vertex displacement curve

将两种工况下结构能力曲线和地震需求曲线画在谱坐标内,能力谱与需求谱的交点即为性能点。在进行抗震需求谱转换时,考虑桥梁的建设场地为第 II 类场地, E2 地震动的设计烈度为 8 度,根据公路桥梁抗震设计细则,通过式(3)~式(5)求得的需求谱和能力谱如图 6 所示。从图 6 可知,能力谱和需求谱出现了性能点,表明该桥抗震性能满足 E2 地震动作用下的要求。

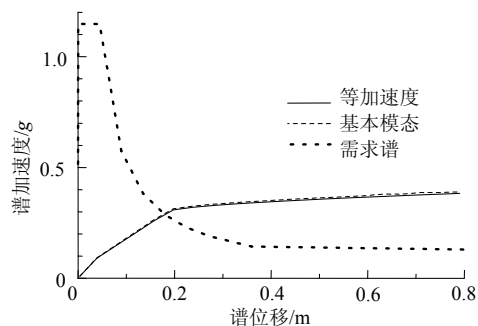


图 6 能力需求曲线

Fig.6 Capacity-demand spectrum curves

2) 横桥方向。

对该桥进行横桥向 Pushover 推倒分析。由图 7 可知,两种工况下桥梁的弹塑性性能基本一致。在横桥方向,对刚构桥进行抗震性能评价。如图 8 所

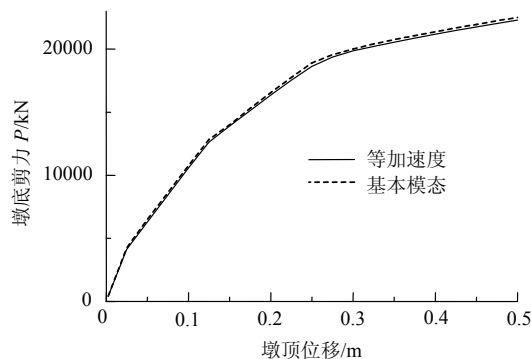


图 7 底部总剪力-顶点位移

Fig.7 The bottom shear-vertex displacement curve

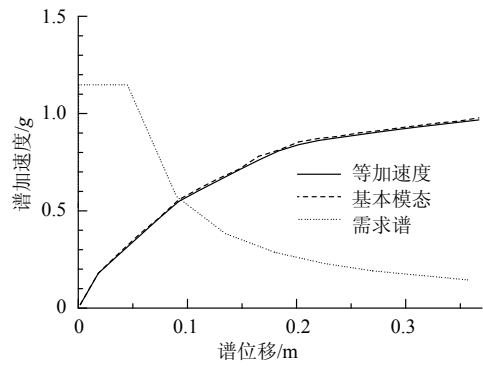


图 8 能力需求曲线

Fig.8 Capacity-demand spectrum curves

示,能力需求谱出现性能点,表明该桥抗震性能满足 E2 地震动作用下的要求。

顺桥方向和横桥方向具体的抗震评价结果见表 3。从表 3 可知,无论顺桥方向还是横桥方向,水平加载形式对抗震性能验算结果影响很小,对桥墩出现塑性铰的顺序等没有影响。同时也发现该桥在 E2 地震动作用下桥墩出现性能点时桥墩没有达到屈服状态。

表 3 横桥和顺桥方向两种加载形式下桥梁抗震验算结果
Table 3 Seismic checking calculation results of bridge under two loading types along the longitudinal and lateral directions of bridge, respectively

加载工况 与形式	顺桥方向		横桥方向	
	等加速度 加载	基本模态 加载	等加速度 加载	基本模态 加载
谱加速度/g	0.32	0.32	0.5	0.5
谱位移/m	0.18	0.18	0.09	0.09
墩底总剪力/kN	6235	6235	7012	7012
控制点位移/m	0.178	0.178	0.085	0.085
桥墩进入 屈服状态的 先后顺序	B1,B2,B3,B4 同时出现 塑性铰	B1,B2,B3,B4 同时出现 塑性铰	(B6,B8)→ (B2,B4)→ (B5,B7)→ (B1,B3)	(B6,B8)→ (B2,B4)→ (B5,B7)→ (B1,B3)
屈服时桥墩剪力/kN	9262.5	9262.5	13455	13455

4 结论

通过以上研究得到如下结论:

(1) 明确了基于弹塑性 Pushover 分析进行刚构桥抗震设计的方法及流程。通过研究侧向水平力加载形式对刚构桥抗震性能的影响,表明等加速度加载形式和基本模态加载形式对刚构桥无论顺桥方向还是横桥方向弹塑性性能影响都较小。

(2) 基于弹塑性 Pushover 进行三跨连续刚构桥抗震设计表明,无论是顺桥方向还是横桥方向均出

现性能点,满足 E2 地震动作用下的抗震要求。但是在出现性能点时桥墩没有达到屈服。

参考文献:

[1] 中国交通运输部. JTG/T B02-01-2008, 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
China's Traffic Department of Transportation. JTG/T B02-01-2008, Guidelines for seismic design of highway bridges [S]. Beijing: China Communications Press, 2008. (in Chinese)

[2] 中国建设部. GB 50111-2006, 铁路工程抗震设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
China's Ministry of Communications. GB 50111-2006, The railway engineering anti-earthquake design code [S]. Beijing: China Planing Press, 2006. (in Chinese)

[3] 中国建设部. CJJ 166-2011, 城市桥梁抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
China's Ministry of Communications. CJJ 166-2011, City bridge seismic design code [S]. Beijing: China Architecture or Building Press, 2011. (in Chinese)

[4] Liu Zhihao, Tsutomu Usami, Ge Hanbin. Seismic performance evaluation of steel arch bridges against major earthquakes. Part 2: Simplified verification procedure [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2004(33): 1355—1372.

[5] 王克海, 李茜. 基于模态分析的 push-over 方法在桥梁抗震分析中的应用[J]. 铁道学报, 2006, 28(2): 79—83.
Wang Kehai, Li Qian. Based on the modal analysis push-over method in the application of bridge seismic analysis [J]. Railway Journal, 2006, 28(2): 79—83. (in Chinese)

[6] 中国建设部. JGJ 3-2010, 高层建筑结构设计规[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
China's Ministry of Communications. JGJ 3-2010, High-rise building structure design codes [S]. Beijing: China Architecture or Building Press, 2011. (in Chinese)

[7] 王克海. 桥梁抗震研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
Wang Kehai. Bridge seismic research [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007. (in Chinese)

[8] Zheng Y, Usami T, Ge H B. Seismic response predictions of multi-span steel bridges through pushover analysis [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32: 1259—1274.

[9] Federal Emergency Management Agency. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings [S]. Commentary Washington (DC): FEMA, 1995.

[10] Applied Technology Council. Seismic evaluation and retrofit of existing concrete building [S]. Redwood City (CA): Applied Technology Counlil (ATC), 1996.