

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.02.012

基于能量平衡的桥梁结构抗震性能分析

柳春光^{1,2}, 焦伟玲¹, 张士博¹

(1.大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;

2.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于能量平衡的静力弹塑性方法是将能量平衡的概念引入到 Pushover 方法中,对结构进行抗震性能评价的新方法。该方法在建筑领域已有一定的应用,但是在桥梁领域相关的研究仍比较缺乏。利用该方法对三条典型地震动作用下桥梁的桥墩进行基于能量平衡的推覆分析,并将计算结果同倒三角分布模式、均匀分布模式下的传统 Pushover 方法以及时程分析的结果进行比较。最后,利用量化性能水准对基于能量平衡的 Pushover 方法的结果和时程分析的结果进行抗震性能评估。结果表明,基于能量平衡的 Pushover 方法和非线性时程分析方法所得到的结果更加接近,这两种方法对桥墩破坏程度的评估结果相同,因此,基于能量平衡的 Pushover 方法能够对桥梁结构进行更有效地抗震性能评估。

关键词: 能量平衡; Pushover 方法; 桥梁结构; 抗震; 性能水准

中图分类号: U442.5+5

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)02-0061-06

Seismic Performance Analysis of Bridge Structure Based on Energy Balance

LIU Chunguang^{1,2}, JIAO Weiling¹, ZHANG Shibo¹

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The static elastic-plastic method based on energy balance is a new method of seismic performance evaluation which introduces the concept of energy balance to the Pushover method. This method has already been used in the construction field, but it is still lack of research in the field of bridge. In this paper, first the bridge piers are pushed by three typical ground motions. Second, the results of calculation are compared to two traditional Pushover methods using linear distribution, the uniform distribution and nonlinear dynamic response analysis. Last, quantified performance levels are used to evaluate the seismic response of bridge structure. It shows that the results obtained from this method are more similar to the results from the nonlinear dynamic response analysis. The results of damage state estimation of two methods are uniform. Therefore, Pushover method based on energy balance can be used effectively to estimate the seismic response of bridge structure.

Keywords: energy balance; pushover method; bridge structure; anti-seismic; performance level

近年来,在结构抗震方面,静力弹塑性分析方法由于其概念简单,操作方便,能够清晰的反映结构局部的塑性变形机制等优点,受到了广泛的关注。但是,常规的 Pushover 方法要求结构的地震响应由第一振型控制为主,不能考虑高阶振型的影响,这大大限制了该方法的应用范围。同时,传统的 Pushover

方法采用固定不变的侧向荷载分布模式,这和真正的地震过程相差甚远。

为了克服这些局限性,国内外的学者纷纷对 Pushover 方法进行了改进^[1-3]。在此基础上,Leelataviwat 等^[4-5]提出了基于能量平衡的静力非线性分析方法,利用非弹性系统相应的弹性系统去估计

收稿日期:2015-12-05

修稿日期:2016-01-14

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助“973 计划”项目(2011CB013605-4);国家自然科学基金项目(51178079);辽宁省优秀人才基金(2014020012);高等学校博士学科点专项科研基金(20130041110036)

作者简介:柳春光(1964—),男,黑龙江牡丹江人,博士,教授,主要从事生命线地震工程及城市防灾减灾信息技术研究。

E-mail: liucg@dlut.edu.cn

系统的能量需求,并通过能量系数来考虑系统进入非线性后对地震能量需求的影响。之后,江义等^[6-7]通过算例验证了基于能量平衡的 Pushover 方法对单向偏心结构的适用性。尽管基于能量平衡的 Pushover 分析在结构抗震方面已有一定的应用,但在桥梁相关领域的研究仍比较缺乏。因此本文首先验证基于能量平衡的 Pushover 方法适用于桥梁结构,然后利用该方法对桥梁结构进行抗震性能评价。

1 基于能量的 Pushover 方法的提出

1.1 能量平衡的概念

Housner 最早把能量平衡的概念应用到抗震设计,由于地震对结构的作用是一种能量的输入、转化、存储和耗散的过程^[8],因此把能量和抗震联系起来似乎是更加合理的。地震作用下能量平衡是指地震输入能量与结构的需求能量是相等或平衡的。当时提出的单自由度系统的能量平衡的表达式为:

$$\frac{1}{2}MS_v^2 = E_e + E_p \quad (1)$$

式中: E_e 和 E_p 分别为单自由度系统的弹性能量和塑性能量; M 为系统的质量; S_v 为地震作用下该单自由度系统的速度谱。

这个能量平衡关系仅在某种特定周期范围内是有效的,因此, Lee S S 等^[9]提出了能量系数的概念。单自由度系统的能量平衡方程可表示为:

$$\frac{1}{2}\gamma MS_v^2 = E_e + E_p \quad (2)$$

式中: γ 为能量系数。平衡方程可表示为图 1 形式。

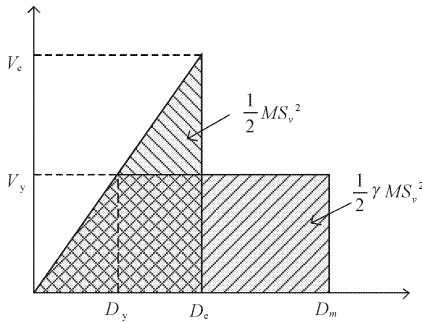


图 1 能量平衡概念示意图

1.2 基于能量的能力曲线的建立

基于能量的 Pushover 曲线是在常规 Pushover 分析的基础上由侧向荷载做功得到的,和常规的 Pushover 一样,侧向荷载模式选用不变的加载模式。

第 n 阶模态的侧向荷载为:

$$S_n = m\phi_n \quad (3)$$

式中: m 为结构的质量矩阵; ϕ_n 为结构的第 n 阶阵型

向量。在第 n 阶模态荷载的作用下结构的变形如图 2(a) 所示,图 2(b) 显示了某一节点的侧向荷载和位移的关系曲线。

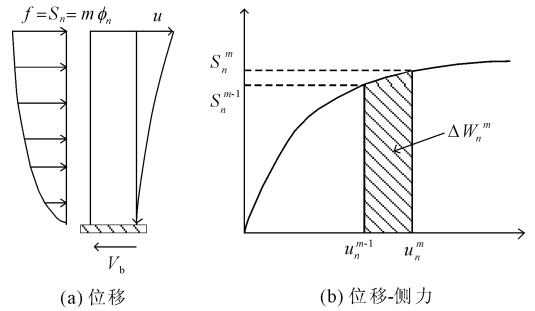


图 2 结构位移图第 n 阶模态荷载作用下结构的位移 - 侧力曲线

加载步第 m 步侧向荷载 S_n 做功的增量 ΔW_n^m 可以表示为:

$$\Delta W_n^m = \frac{1}{2}(s_n^{m-1} + s_n^m)(u_n^m - u_n^{m-1}) \quad (4)$$

则加载到第 m 步侧向荷载做功为

$$W_n^m = W_n^{m-1} + \Delta W_n^m \quad (5)$$

我们把侧向荷载所做的功定义为结构第 n 模态的能量能力,即:

$$E_c^m = W_n^m \quad (6)$$

基于能量的位移增量可表示为:

$$\Delta D_n^m = \frac{\Delta W_n^m}{V_{bn}^{m-1} + V_{bn}^m/2} \quad (7)$$

式中: V_{bn}^m 为第 n 阶模态第 m 加载步的基底剪力。则第 m 加载步的位移可表示为:

$$D_n^m = D_n^{m-1} + \Delta D_n^m \quad (8)$$

1.3 基于能量的需求曲线的建立

基于能量的需求曲线由公式(2)等号左边得到,即:

$$E_{dn} = \frac{1}{2}\gamma_n M_n^* S_{vn}^2 \quad (9)$$

式中 M_n^* 为结构的有效模态质量,表达式为 $M_n^* = \frac{(\phi_n^T \cdot m \cdot 1)^2}{\phi_n^T \cdot m \cdot \phi_n}$, S_{vn} 为第 n 阶周期对应的速度谱值, γ_n

为第 n 阶模态对应的能量系数。由能量平衡的公式可知能量系数就是在地震作用下系统的弹塑性耗能与相应的弹性系统的能量的比值,即:

$$\gamma_n = \frac{E_e + E_p}{\frac{1}{2}M_n^* S_{vn}^2} \quad (10)$$

现在针对理想弹塑性系统和双线性系统来推导能量系数的表达式。

对于理想弹塑性系统:

$$\gamma_n = \frac{\frac{1}{2} V_y D_y + V_y (D_m - D_y)}{\frac{1}{2} V_e D_e} = \frac{2\mu - 1}{R_y^2} \quad (11)$$

式中: V_y 为屈服强度; D_y 为屈服位移; D_m 为最大的弹塑性位移; V_e 为相应的弹性系统的最大剪力; D_e 为相应的弹性系统的最大位移。 μ 为位移延性系数, 为结构的最大位移与屈服位移的比值, 即, $\mu = D_m/D_y$; R_y 为强度折减系数, 是弹性强度与屈服强度的比值。

对于一般线性系统:

$$\gamma_n = \frac{2\mu - 1}{R_y^2} + \alpha \left(\frac{\mu - 1}{R_y^2} \right) \quad (12)$$

由能量系数的关系式可知, 对于给定的结构, 能量系数 γ_n 是位移延性系数 μ 和强度折减系数 R_y 的函数。因此要想求 γ_n , 必须首先知道系统的 $R_y - \mu - T$ 关系。有很多研究者建立了考虑不同影响因素的 $R_y - \mu - T$ 关系, 如 Newmark&Hall、Vidic 和范立础^[10-12] 等。由于能量平衡方程的等号两边都有和地震动有关的参数, 因此本文采用特定的地震动来考虑 $R_y - \mu - T$ 关系。这个分析过程通过地震非线性分析软件 Bispec 来完成。

1.4 性能点的获取

把得到的基于能量的能力曲线和需求曲线绘制在同一个坐标下, 两曲线的交点就是性能点(图 3)。性能点的横坐标值 $D_{n, target}$ 就是目标位移, 将该目标位移根据公式 $U_{n, target} = \Gamma_n \phi_n D_{n, target}$ 换算成结构的顶点位移。就可以对结构进行抗震性能评价。

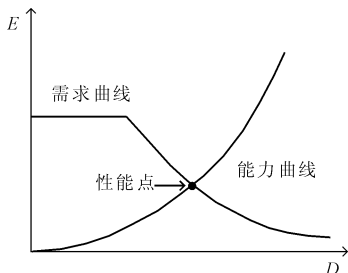


图 3 确定性能目标点

1.5 基本步骤

基于能量平衡的 Pushover 方法的基本步骤如下:

(1) 通过模态分析, 计算结构的周期、振型和模态质量等动力特性;

(2) 对于第 n 阶振型, 采用不变的侧向荷载分布 $S_n = m \phi_n$ 对结构进行 Pushover 分析, 得到 Pushover

分析的数据库, 由式(3)~式(8)得到基于能量的 Pushover 能力曲线;

(3) 考虑系统的 $R_y - \mu - T$ 关系求出结构的能量系数 γ_n , 构建结构第 n 阶振型的基于能量的需求曲线;

(4) 把(2)和(3)得到的能力曲线和需求曲线画在同一个坐标下获得性能点, 将该目标位移根据公式 $U_{n, target} = \Gamma_n \phi_n D_{n, target}$ 换算成结构的顶点位移;

(5) 重复(2)~(4)考虑足够多的模态, 根据 SRSS 规则进行模态组合, 得到结构的总的地震响应。

2 算例分析

震害研究表明, 地震作用下桥梁结构的上部结构一般处于弹性阶段, 弹塑性破坏主要集中在下部结构, 通常选用桥墩进行抗震弹塑性分析^[13]。

2.1 工程概况

以某桥梁^[13]第 6 号墩为例, 该桥墩为钢筋混凝土双柱桥墩, 墩高 12 m, 墩柱截面为圆形截面, 采用桩基础, 桥墩简图见图 4。该桥为 B 类桥梁, 桥址位于 II 类场地。

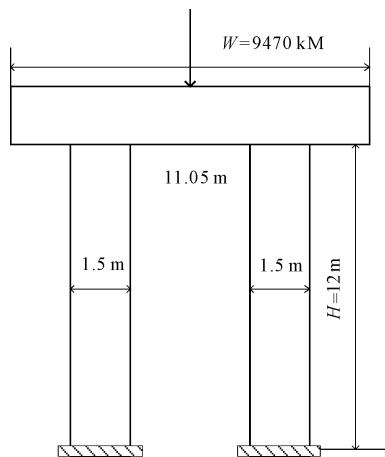


图 4 桥墩简图

2.2 动力特性分析

使用有限元软件 SAP2000 进行建模, 模型中的梁和柱采用梁单元模拟, 并在其端部设置塑性铰, 墩底固定连接。SAP2000 中, 当混凝土构件截面为矩形或圆形时可以采用默认的铰属性, 因此本算例采用默认的塑性铰^[14]。桥墩的有限元模型见图 5。

抗震分析时, 根据具体桥墩的结构特点及受力特点, 桥墩的简化计算模型一般分为三种: 单质点单振型模型、多质点单振型模型和多质点多振型模型^[15]。本算例的桥墩墩高 12 m, 为中低墩, 因此等



图 5 桥墩有限元模型

效成多质点单振型体系。采用独立桥墩进行地震反应分析时,通常把桥梁上部结构的质量等效到桥墩

的顶部,顶部的质量相对较大。

在 Pushover 分析之前首先对结构进行模态分析,获得结构基本周期、振型、模态质量等动力特性。由于本算例墩高较低,高阶模态响应不明显,因此只考虑基本模态。

2.3 Pushover 分析

首先对桥墩进行 Pushover 分析,分析过程中施加的侧向力做功便得到能量能力曲线。

然后求基于能量的需求曲线。选取 El Centro 波、Taft 波、天津波三条典型的地震波,对桥墩进行非线性时程分析。地震动的峰值加速度调整到地震烈度分别为 7 度、8 度和 9 度罕遇地震时的数值,三条典型地震动的调整系数见表 1。桥墩的基本周期 $T = 0.4025$ s 所对应的不同强度下的伪速度谱值同样列于表 1 中。

表 1 计算结果的比较

| 地震波 | 地震烈度 / 度 | 地震调整系数 | 速度谱值 / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | 能量平衡位移 / cm | 时程分析位移 / cm | 误差 / % |
|-------------|----------|--------|--|-------------|-------------|--------|
| El Centro 波 | 7 | 0.64 | 23.95 | 1.65 | 1.70 | 2.94 |
| | 8 | 1.17 | 43.51 | 2.96 | 3.48 | 14.90 |
| | 9 | 1.81 | 67.23 | 4.52 | 4.86 | 7.00 |
| Taft 波 | 7 | 1.44 | 33.58 | 2.34 | 2.40 | 2.50 |
| | 8 | 2.62 | 61.10 | 3.96 | 4.11 | 3.65 |
| | 9 | 4.06 | 94.64 | 5.38 | 5.29 | 1.70 |
| 天津波 | 7 | 1.51 | 31.77 | 2.20 | 2.26 | 2.65 |
| | 8 | 2.74 | 57.69 | 4.36 | 3.67 | 18.80 |
| | 9 | 4.25 | 89.48 | 7.36 | 7.95 | 7.42 |

为求能量系数,首先求 $R_y - \mu - T$ 的关系。这个分析过程通过地震非线性分析软件 Bispec 来完成,三条地震动的 $R_y - \mu$ 关系如图 6 所示。最后把能力曲线和需求曲线放到同一个坐标下,两曲线的交点就是性能点,如图 6 所示。表 1 列出了三条地震作用下基于能量平衡求出的最大位移和时程分析得到的结果的对比情况。

从图 6 可以看出,结构在相同地震动不同强度下需求曲线的形状基本是一致的,只是随地震强度的增强,需求的能量不断增加。可以看到,7 度地震下桥墩都仍处于弹性阶段,9 度地震时,桥墩完全进入塑性阶段。

从表 1 中的数据可以看出,不同地震作用下结构的峰值反应相差很大。例如 9 度罕遇地震时,输入天津波时的桥墩的峰值位移最大,为 7.36 cm,输入 El Centro 波时峰值位移最小,为 4.52 cm,比天津

波的结果小 38%。

从表 1 可以看出,除了 8 度时 El Centro 波和天津波的位移误差分别为 14.9% 和 18.8% 外,其余的误差都在 10% 以内,在可接受的范围内。从图 6 可以看出,El Centro 波和天津波的 $R_y - \mu$ 关系都是在 μ 位于 1.5 ~ 2.5 之间时拟合的误差最大,因此求得的峰值位移和时程分析的结果相差较大。由此可知,只要 $R_y - \mu$ 关系求得足够精确,便可得到要求的理想的结果。

2.4 和其他方法的对比

图 7 给出了在三种典型地震动作用下,峰值加速度调整到 7 度罕遇地震和 9 度罕遇地震时,用能量平衡的方法、倒三角分布模式、均布分布模式和非线性时程分析计算得到的最大节点位移对比的情况。从图 7(a)中可以看出在弹性阶段时,基于能量平衡 Pushover 方法和时程分析的结果非常接近,几

乎是重合的。但是在进入到塑性阶段图 7(b)后,结果开始出现偏差。不过和倒三角加载模式以及均布

荷载加载模式下的 Pushover 方法的结果相比,基于能量平衡 Pushover 分析方法和时程分析方法更加接近。

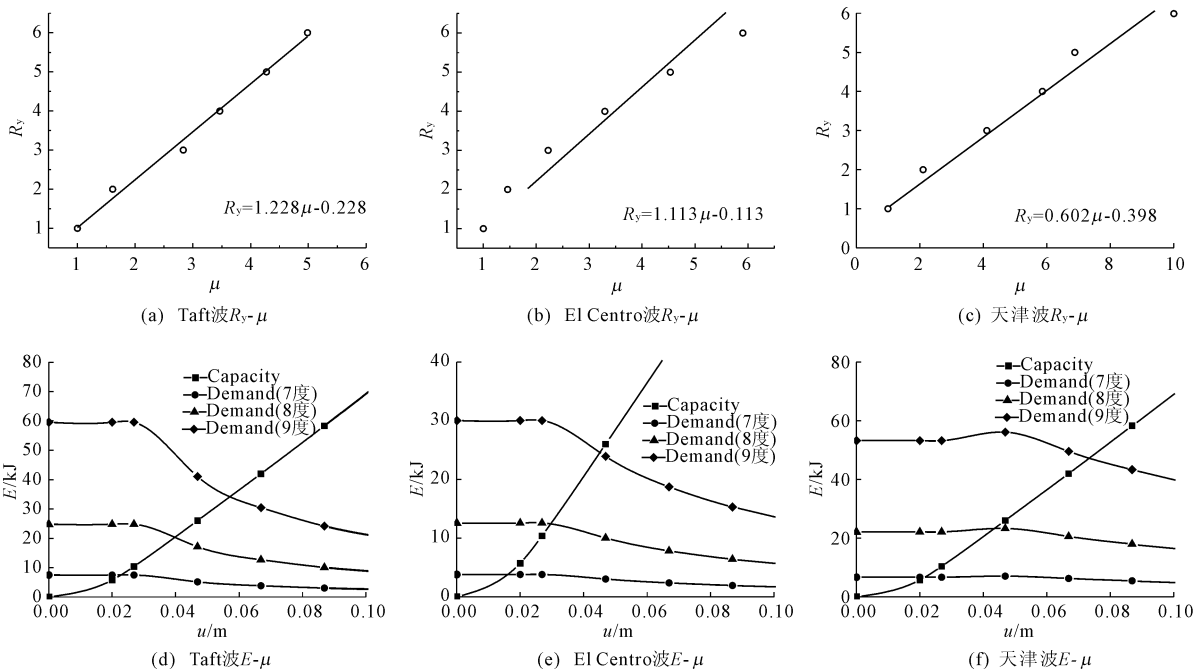


图 6 $R_y - \mu$ 关系和能力需求曲线

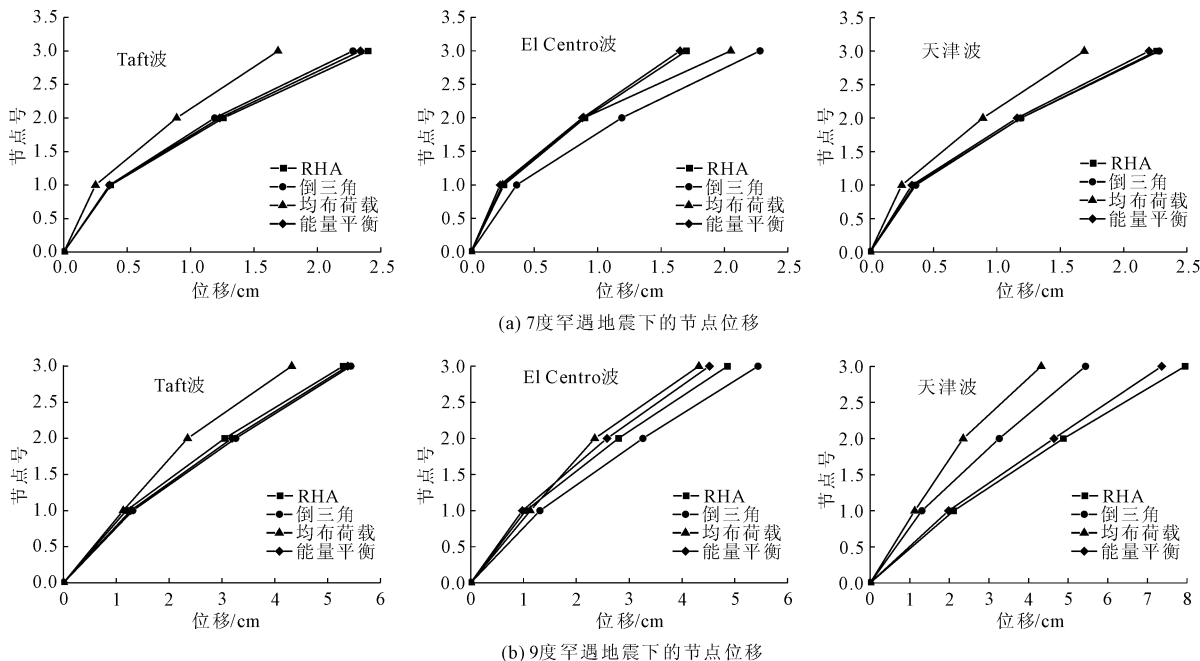


图 7 节点位移的比较

3 抗震性能评价

世界各国的规范对桥梁结构的抗震性能水准规定不尽相同,不过大体上都是定性描述,并没有对性能水准进行量化,这对于工程实际的应用不太方便^[16]。我国的孙颖等^[17]对国内外 64 组规则 RC 桥

梁墩柱的实验数据进行统计分析,发现各目标墩顶漂移率基本上服从对数正态分布,从而确定了具有 95% 保证率的最小目标墩顶漂移率限值,最终实现了对性能水准的量化,结果见表 2 和表 3。表中 D 为墩顶漂移率,墩顶最大位移与墩高的比值。本文利用孙颖的结论以及前面计算得出的数据,对算例

桥墩进行 7 度、8 度、9 度罕遇地震作用下的抗震性能进行评价,结果见表 4。

表 2 规则桥梁的目标墩顶漂移率限值

| $D_{cr}/\%$ | $D_y/\%$ | $D_m/\%$ | $D_u/\%$ |
|-------------|----------|----------|----------|
| 0.11 | 0.38 | 0.84 | 2.23 |

表 3 量化的性能水准

| 性能水准 | 破坏程度 | 量化水准 |
|------|------|--------------------|
| 水准 1 | 完好无损 | $D < D_{cr}$ |
| 水准 2 | 轻微破坏 | $D_{cr} < D < D_y$ |
| 水准 3 | 中等破坏 | $D_y < D < D_m$ |
| 水准 4 | 严重破坏 | $D_m < D < D_u$ |
| 水准 5 | 倒塌破坏 | $D > D_u$ |

表 4 抗震性能分析结果

| 地震烈度 | El Centro 波 | | | Taft 波 | | | 天津波 | | |
|------|-------------|------|------|--------|------|------|------|------|------|
| | 7 | 8 | 9 | 7 | 8 | 9 | 7 | 8 | 9 |
| 能量平衡 | 轻微破坏 | 轻微破坏 | 轻微破坏 | 轻微破坏 | 轻微破坏 | 中等破坏 | 轻微破坏 | 轻微破坏 | 中等破坏 |
| 时程分析 | 轻微破坏 | 轻微破坏 | 中等破坏 | 轻微破坏 | 轻微破坏 | 中等破坏 | 轻微破坏 | 轻微破坏 | 中等破坏 |

参考文献:

- [1] Gupta B, Kunnath S K. Adaptive spectra-based method pushover procedure for seismic evaluation of structure[J]. Earthquake Spectra, 2000, 16(2):367-392.
- [2] 柳春光,秦泗凤,林 皋,等.改进的适应谱 Pushover 方法评价桥梁结构的抗震性能[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(10):1644-1648.
- [3] Chopra A K, Goel R K. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 561-582.
- [4] Leelataviwat S, Saewon W, Goel S C. Application of energy balance concept in seismic evaluation of structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(2):113-121.
- [5] Leelataviwat S, Liao WC, Goel S C. An Energy Spectrum Method for Seismic Evaluation of Structures[M]. Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures, 2009:765-776.
- [6] Jiang Yi, Li Gang, Yang Dixiong. A modified approach of energy balance concept based multimode pushover analysis to estimate seismic demands for buildings[J]. Engineering Structures, 2010, 32(5):1272-1283.
- [7] 江 义.基于能量平衡的建筑结构非线性静力方法及分灾设计谱的研究[D].大连:大连理工大学,2013.
- [8] 滕 军,董志君,容柏生,等.弹性单自由度体系能量反应谱研究[J].建筑结构学报,2009(S1):129-133.
- [9] Lee S S, Goel S C. Performance - based design of steel moment frames using a target drift and yield mechanism[J]. Civil Environmental Engineering, 2001:1-17.
- [10] Newmark N M, Hall W J. Earthquake Spectra and Design [M]. California: Earthquake Engineering Research, 1982.
- [11] Vidic T, Fajfar P, Fischinger M. Consistent inelastic design spectra: strength and displacement[J]. Earthquake Engineering & Structure Dynamics, 1994, 23(5):507-521.
- [12] 卓卫东,范立础.结构抗震设计中的强度折减系数研究[J].地震工程与工程振动,2001,21(1):84-88.
- [13] 高依强,陈永锋,李青宁.桥梁双柱式桥墩的 Pushover 分析[J].交通科技与经济,2014,16(4):40-43.
- [14] 北京金土木软件技术有限公司.SAP2000 中文版使用指南[M].2 版.北京:人民交通出版社,2012.
- [15] 盛光祖,李建中,陈 亮.桥梁单墩不同侧向力分布模式 Pushover 分析方法[J].振动与冲击,2010,29(2): 170-174.
- [16] 柳春光,张士博,柳英洲.基于“投资 - 效益”准则的 RC 桥墩全寿命总费用[J].水利与建筑工程学报, 2015, 13(1):16-19.
- [17] 孙 颖,卓卫东,房贞政.规则桥梁抗震性能水准的定义及其量化描述[J].地震工程与工程振动,2011, 31(5):104-112.

4 结 语

(1) 本文把基于能量平衡的 Pushover 方法引入到桥梁结构抗震分析中,并通过算例把该方法和两种传统加载模式的 Pushover 方法以及非线性时程分析方法进行对比,验证了该方法在桥梁抗震分析中的有效性。最后利用孙颖等人提出的量化的性能水准对桥梁进行抗震性能评价。

(2) 该方法中获得能量需求曲线时是利用某次特定的地震,这样选择不同的地震会有不同的需求曲线。如果能像利用规范中的加速度反应谱一样,把统计得到的速度谱用于获取需求曲线,减小地震动随机性对结构响应的影响,将会大大提高该方法的精确性和适用性。