

公路减隔震桥梁的地震反应简化分析

李闯¹, 叶爱君¹, 余茂峰²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 采用单自由度反应谱方法对满足一定条件的减隔震桥梁进行地震反应分析可以简化计算过程, 但需要解决精度问题。针对规范反应谱阻尼修正方法对计算精度的影响进行了分析并提出了改进方法。为了验证改进方法的合理性, 对一座常规减隔震桥梁分别采用不同计算方法进行了比较分析, 结果表明采用改进的阻尼修正公式后, 简化反应谱方法的计算精度得到很大提高, 且结果偏于安全。

关键词: 公路桥梁; 地震反应; 减隔震设计; 单自由度反应谱法; 阻尼修正方法

doi: 10.3969/j.issn.1006-7043.201305051

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1006-7043.201305051.html>

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2014)11-1339-06

Simplified analysis on seismic response of seismically isolated highway bridges

LI Chuang¹, YE Aijun¹, YU Maofeng²

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou 310006, China)

Abstract: When using the single-degree-of-freedom (SDOF) response spectrum method to analyze the seismic response of some isolated bridges, it can simplify the calculation process. However, it needs to improve the accuracy in engineering as well. In this paper, the effects of the modification method for response spectrum damping on computation accuracy are analyzed and improvements are proposed. Specially, the objective is to aim at the seismic design code for highway bridges. In order to verify reasonability of the improved method, different methods are used to analyze earthquake responses of a regular bridge with isolation bearings. The results indicated that based on the improved damping modification formula, the calculation precision of the simplified SDOF response spectrum method is greatly increased and the computational results are safer.

Keywords: highway bridges; seismic response; seismic isolation design; SDOF response spectrum method; damping modification method

我国《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB02-01-2008)^[1](以下简称“08 细则”)于 2008 年 10 月 1 日开始实施。该细则与 89 版《公路工程抗震设计规范》(JTJ044-89)相比,一个明显的变化是将减隔震桥梁的抗震设计纳入其中。

国内外的桥梁抗震设计规范中,桥梁结构的地震反应分析主要采用的是较为简单易懂的反应谱方

法,对于比较复杂的结构才要求采用相对复杂的时程分析方法。对于减隔震桥梁的地震反应分析,08 细则^[1]也认为反应谱方法是十分重要的分析方法。

实际上,在一定的条件下,比如,桥梁外形属于规则桥梁,而且减隔震装置能提供足够的柔性,从而使下部结构的变形可以忽略等,采用单自由度反应谱方法进行减隔震桥梁的地震反应简化分析,其结果还是较为理想的。现行美国 AASHTO 规范^[2]和我国的城市桥梁抗震设计规范^[3]均采用了这样的简化方法。在该简化方法的分析过程中,设计反应谱要根据等效阻尼比进行修正,而规范反应谱对应的阻尼比是 5%,在进行减隔震桥梁地震反应分

收稿日期: 2013-05-22. 网络出版时间: 2014-09-29.
基金项目: 国家 973 计划资助项目(2013CB036302); 国家自然科学基金资助项目(51278375).
作者简介: 李闯(1987-),男,硕士研究生;
叶爱君(1970-),女,教授,博士生导师.
通信作者: 李闯, E-mail: 5577lichuang@tongji.edu.cn.

析时, 必须对反应谱进行阻尼修正, 而 08 细则^[1] 给出的反应谱阻尼修正方法不尽合理, 会导致计算结果误差太大。

有关阻尼对反应谱的影响已经有很多研究成果, 基本可以分为两类: 一类是采用只与阻尼比相关的修正系数, 修正系数不随周期变化而变化, 这主要反映在较早的研究上; 另一类是修正系数不仅与阻尼比有关, 而且随周期的变化而变化^[4]。

08 细则^[1] 给出的反应谱阻尼修正方法属于第一类, 未考虑周期的影响, 显得过于粗略。现有的研究^[5-9] 表明, 阻尼对反应谱的影响与周期是密切相关的, 因而周期对设计反应谱阻尼修正系数的影响应予以考虑。

为此, 对规范反应谱阻尼修正方法进行分析并提出改进方法, 以提高减隔震桥梁单自由反应谱方法的计算精度, 显得很有必要。

1 简化的单自由度反应谱方法

目前 08 细则^[1] 采用的设计反应谱曲线如下

$$S = \begin{cases} S_{\max}(5.5T + 0.45), & T < 0.1s \\ S_{\max}, & 0.1s \leq T \leq T_g \\ S_{\max}(T_g/T), & T > T_g \end{cases} \quad (1)$$

$$S_{\max} = 2.25C_i C_s C_d A \quad (2)$$

$$C_d = 1 + \frac{0.05 - \xi}{0.06 + 1.7\xi} \geq 0.55 \quad (3)$$

式中: T 为结构自振周期, T_g 为特征周期, S_{\max} 为水平设计加速度反应谱最大值, C_i 为抗震重要性系数, C_s 为场地系数, A 为水平向设计基本地震动加速度峰值, C_d 为阻尼调整系数, ξ 为阻尼比。

由于减隔震装置是非线性的, 在分析开始时, 减隔震装置的位移反应是未知的, 因而其等效刚度、等效阻尼比也是未知的, 所以反应谱法分析过程是一个迭代过程。具体的迭代过程可以参考《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166-2011)^[3] 条文说明。

按照这个迭代计算过程, 利用 Matlab 平台编写了计算程序, 并采用这一程序, 对桥梁结构的地震反应进行迭代求解。

然而, 并非所有的减隔震桥梁都可以采用单自由度反应谱法进行抗震分析, 《城市桥梁抗震设计规范》(CJJ 166-2011)^[3] 也给出了减隔震桥梁单自由度反应谱法的适用条件。

1.1 反应谱阻尼修正改进方法

从反应谱分析的迭代求解过程可知, 以非线性时程反应分析结果为基准, 在地震动输入等价的情况下, 反应谱法分析结果的误差主要来自 2 个方面:

1) 迭代过程自身产生的误差; 2) 规范反应谱的阻尼

修正方法产生的误差。然而, 迭代过程是无法避免的, 但规范反应谱的阻尼修正方法可以进行改进。因此, 本文试图通过改进细则中反应谱的阻尼修正公式来提高单自由度反应谱方法的精度。

为便于比较分析, 引入反应谱阻尼修正系数 η :

$$\eta = \frac{S(i\%, T)}{S(5\%, T)} \quad (4)$$

式中: $S(i\%, T)$ 是周期为 T , 阻尼比为 $i\%$ 时的反应谱值; $S(5\%, T)$ 是周期为 T , 阻尼比为 5% 时的反应谱值。

我国 08 细则^[1] 中的反应谱阻尼修正公式直接引自《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001) 的有关规定^[1]。然而, 08 细则中的阻尼修正公式(式(1)~(3)) 仅与阻尼比有关, 没有考虑周期的影响。图 1 给出了一条人工时程波在阻尼比为 25% 时的真实反应谱和经 08 细则阻尼修正后的反应谱; 可见, 对于长周期、大阻尼比结构, 按 08 细则^[1] 阻尼修正公式得到的反应谱值小于经真实阻尼修正的反应谱值, 使计算结果偏于不安全, 这显然是不合理的。因此, 结合前人的研究成果, 通过分析, 提出适合 08 细则^[1] 的反应谱阻尼修正公式是非常必要的。

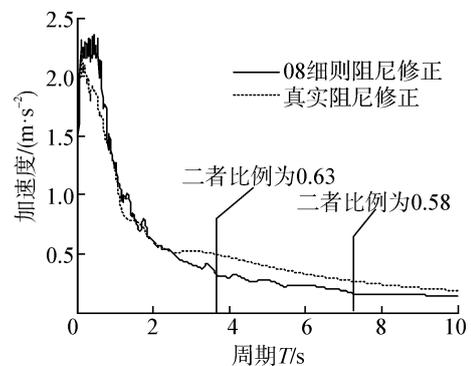


图 1 阻尼比为 25% 时的反应谱曲线

Fig. 1 Response spectra corresponding to damping ratio 25%

研究^[10] 表明, 各类场地地震记录的反应谱值随阻尼比的变化趋势基本相同。限于篇幅, 本文仅以 III 类场地人工地震波的分析结果为例进行讨论。图 2 给出了人工时程波在各阻尼比时的真实反应谱及对应的阻尼修正系数曲线。从图 2(b) 中可以看出, 当阻尼比大于 5% 时, 在短周期部分, 由 08 细则^[1] 所得的阻尼修正系数与真实的阻尼修正系数较为接近, 而在长周期部分, 由 08 细则^[1] 得到的阻尼修正系数小于真实的阻尼修正系数, 这就使得经 08 细则^[1] 阻尼修正后的反应谱值小于真实的反应谱值, 从而使得计算结果偏于不安全。

由图 2 发现如下趋势: 1) 随着阻尼比的增大, 不同阻尼比反应谱值相差越来越小; 2) $T \rightarrow \infty$ 时各阻尼比时的加速度反应谱均趋于 0, 相互之间的差

异越来越小; 3) $T=0$ $\eta=1$; 4) 阻尼修正系数曲线在反应谱特征周期处有一近似平台段。当周期大于特征周期之后 $\xi > 5\%$ 时 η 函数逐渐增大趋向于 1, 曲线曲率近似为正值; 当 $\xi < 5\%$ 时 η 函数逐渐减小趋向于 1, 曲线曲率近似为负值。

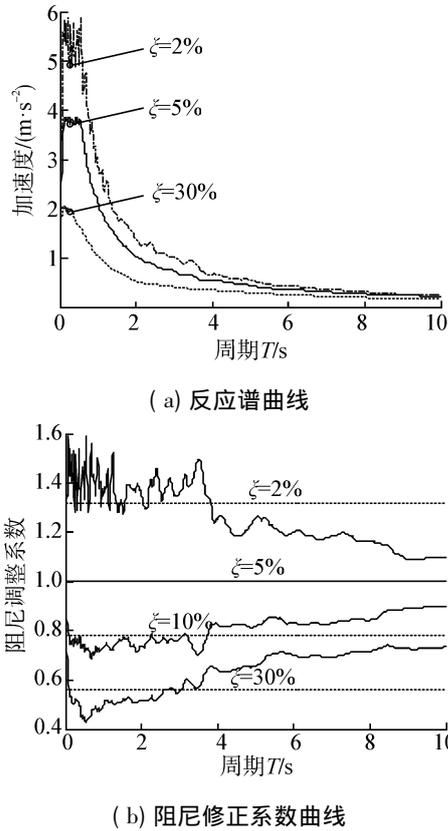


图 2 实际反应谱曲线和阻尼修正系数曲线

Fig. 2 Actual acceleration response spectra curves and damping reduction factors curves

从规范的延续性及偏于安全的角度, 同时考虑场地和周期的影响, 本文的阻尼修正公式采用三段式, 在反应谱平台段的阻尼修正系数仍采用 08 细则^[1]中的阻尼修正系数; 而在反应谱上升和下降段, 其阻尼修正系数随周期呈线性变化。

基于前述规律, 本文采用了如下所示公式进行回归, 回归并取整后得到 A 为 20:

$$\eta = \begin{cases} 1, & T = 0 \\ 1 + 10(\gamma - 1)T, & 0 \leq T < 0.1s \\ \gamma, & 0.1s \leq T \leq T_g \\ \frac{1 - \gamma}{A - T_g}(T - T_g) + \gamma, & T > T_g \end{cases} \quad (5)$$

$$\gamma = 1 + \frac{0.05 - \xi}{0.06 + 1.7\xi} \geq 0.55 \quad (6)$$

1.2 改进方法的精度检验

分别针对 I 类场地、III 类场地和 1994 年北岭地震 24389 站点测得的实际加速度时程, 图 3(a)、4(a)、5(a) 对按照本文提出的阻尼修正公式修正后的反应谱

曲线与对应阻尼比的真实反应谱曲线进行了比较, 可见经式(5)、(6)修正后的反应谱曲线与人工波和实际地震波在对应阻尼比时的真实反应谱曲线比较吻合。图 3(b)、4(b)、5(b) 则对本文提出的阻尼修正系数曲线与基于时程曲线拟合得到的真实阻尼修正系数曲线进行了比较, 可见, 本文式(5)、(6)的反应谱阻尼修正系数曲线与真实反应谱阻尼修正系数曲线吻合较好, 反映了反应谱阻尼修正系数随周期变化这一规律, 且结果偏于安全, 而且, III 类场地的阻尼修正系数受周期的影响比 I 类场地大。

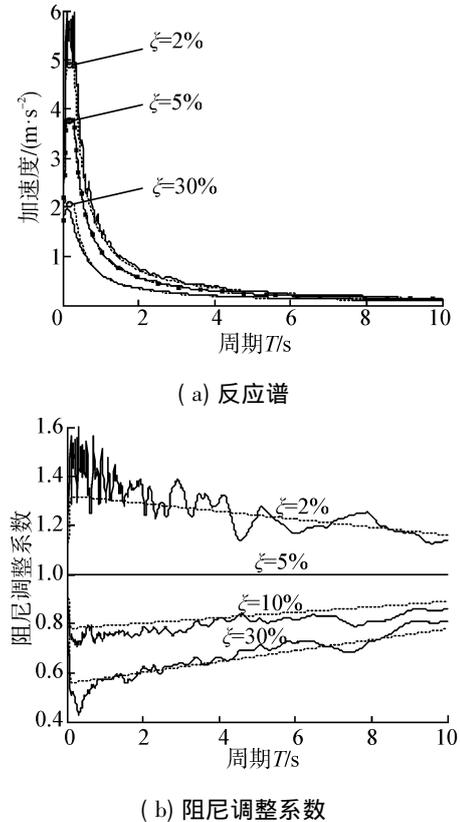
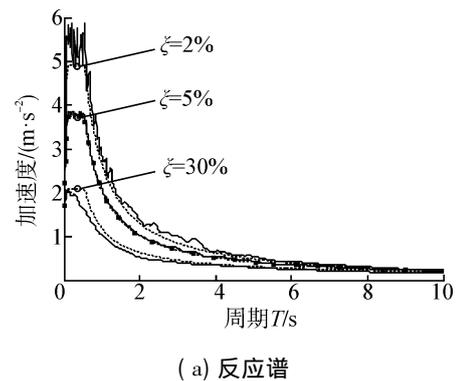
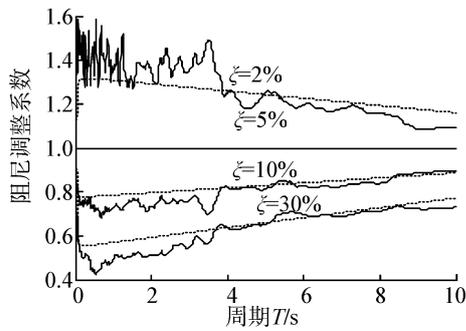


图 3 改进后的反应谱曲线和阻尼修正系数曲线与对应的实际值比较 (I 类场地)

Fig. 3 Comparison of improved acceleration response spectra curves and damping reduction factors curves and correspondingly actual ones (Soil profile type I)

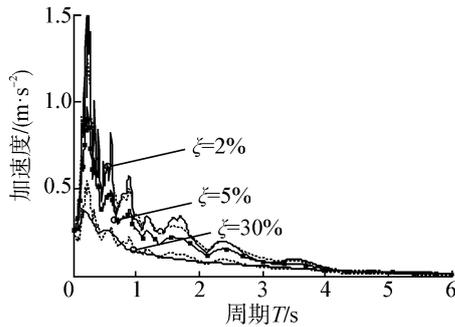




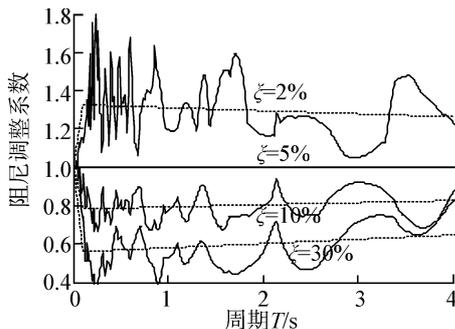
(b) 阻尼调整系数

图4 改进后的反应谱曲线和阻尼修正系数曲线与对应的实际值比较(Ⅲ类场地)

Fig. 4 Comparison of improved acceleration response spectra curves and damping reduction factors curves and correspondingly actual ones (Soil profile type III)



(a) 反应谱



(b) 阻尼调整系数

图5 改进后的反应谱曲线和阻尼修正系数曲线与对应的实际值比较(北岭1994 24389 站点)

Fig. 5 Comparison of improved acceleration response spectra curves and damping reduction factors curves and correspondingly actual ones(Beiling 1994 24389 Station)

2 工程实例验证

2.1 桥梁结构及减隔震设计方案简介

某城市高架连续梁桥^[11],跨径组合为4×29 m,一联总长116 m,属于规范规定的规则桥。桥墩为带系梁双柱墩,墩高为10 m,截面尺寸为1.3 m(横桥向)×1.8 m(纵桥向),墩柱轴线横向间距为

5.7 m;矩形承台,尺寸为11.6 m(横桥向)×7.2 m(纵桥向)×2.5 m(高),重522 t;群桩基础,桩长40 m,桩数12根,桩径1 m,单桩配筋率1%。横断面布置如图6所示。

上部结构、立柱、基础分别采用C50、C40、C35混凝土。上部结构和二期恒载总质量为6375 t,中墩、次边墩以及边墩上每个支座的支座反力分别为7693.8 842.3 248 kN。

采用的减隔震设计方案为,每个墩柱上均采用摩擦摆式支座,支座的参数为:滑动曲面的半径为5 m,动摩擦系数取0.02,其恢复力模型如图7所示。支座屈服力为 $F_y = \mu_d W$,屈服后刚度 $K_d = W/R$,等效刚度 $K_{eff} = W/R + \mu_d W/D_d$,等效阻尼比 $\zeta_{eff} = 2/\pi(\mu_d/(D_d/R + \mu_d))$ 。其中, W 为恒载作用下支座竖向反力, R 为滑动面的曲率半径, D_d 为支座设计水平位移, μ_d 为滑动摩擦系数。

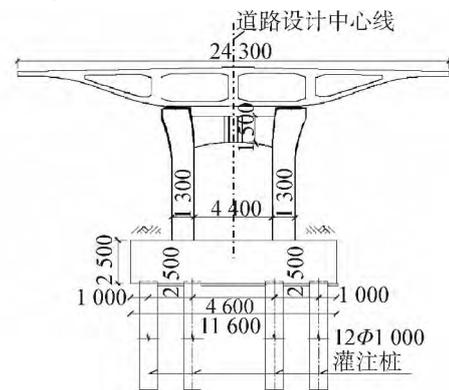


图6 桥梁横断面

Fig. 6 Cross section of the bridge

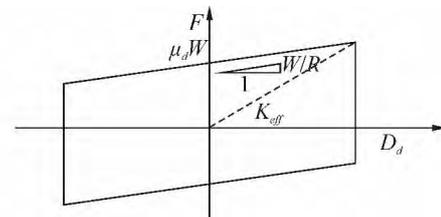


图7 摩擦摆式支座的恢复力模型

Fig. 7 Restoring force model of friction pendulum bearing

2.2 地震动输入

通过《中国地震动参数区划图》查得,桥梁所在场地的设计基本地震加速度峰值为0.1g,抗震设防烈度7度,地震分区第2区,场地类型为I类(或Ⅲ类)场地,反应谱特征周期为0.55 s。

按照08细则^[1],该桥梁类别为B类,E2地震下抗震重要性系数 C_i 为1.3,场地系数 C_s 为1.3,阻尼调整系数 C_d 为1.0。依据上述参数,得到了08细则^[1]在E2地震下阻尼比为5%的反应谱。将阻尼比5%的加速度反应谱值乘以阻尼调整系数(式(1))

~(3)) 就可得到其他阻尼比的加速度反应谱。将以上反应谱曲线及对应的阻尼修正公式参与迭代运算 就可得到反应谱法的计算结果。

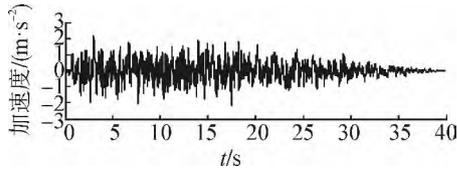


图 8 人工地震加速度时程

Fig. 8 Artificial earthquake acceleration time history

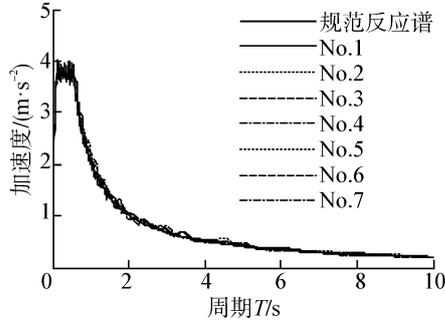


图 9 规范反应谱与人工加速度反应谱

Fig. 9 Acceleration response spectra in code JTG/TB02-01-2008 and artificial acceleration response spectra

以阻尼比 5% 的设计加速度反应谱为目标 ,拟合 7 条人工地震加速度时程作为非线性动力时程分析的地震动输入 ,图 8 为其中的一条。图 9 对 III 类场地的每条人工加速度时程对应的反应谱与目标反应谱做了比较 ,可见 ,人工加速度时程的加速度反应谱与规范加速度反应谱有较好的吻合 ,基于这些时

程波所进行的减隔震桥梁时程分析的结果 ,和该桥基于反应谱法迭代运算的结果将具有切实的可比性。

2.3 非线性时程反应分析方法

采用前述由规范反应谱为目标合成的人工地震加速度时程作为地震动输入 ,建立三维非线性有限元模型 ,对减隔震桥梁进行时程反应分析。对 7 条时程均进行了纵向地震反应计算 ,分析结果取平均值。

减隔震桥梁的空间有限元动力分析模型如图 10 所示 ,其中 ,主梁和桥墩用梁单元模拟 ,摩擦摆式减隔震支座采用非线性连接单元模拟 ,支座纵桥向的恢复力模型如图 7 所示 ,支座单元上节点与主梁 6 个自由度主从连接 ,桩基础采用等效的土弹簧单元模拟桩 - 土的相互作用 ,墩底与承台中心 6 个自由度主从。

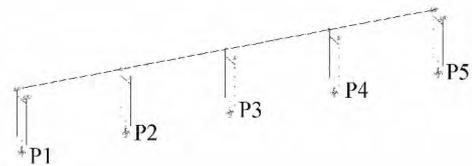


图 10 连续梁桥计算模型

Fig. 10 Computational model of continuous bridge

2.4 计算结果比较

按照前面介绍的弹性反应谱法 ,采用本文提出的阻尼修正公式 ,针对 2 类场地情况 ,重新对上述典型减隔震桥梁进行迭代求解 ,并与非线性时程分析结果进行了比较 ,见表 1。

表 1 2 种方法计算结果比较

Table 1 Comparison of results corresponding to two methods

| 场地类型 | 计算项目 | 弹性反应谱法 | | 时程分析法 | 弹性反应谱法与时程分析法结果比值 | |
|---------|-----------------|--------|-------|-------|------------------|------|
| | | 改进前 | 改进后 | | 改进前 | 改进后 |
| I 类场地 | 支座位移 /m | 0.104 | 0.122 | 0.110 | 0.95 | 1.11 |
| | 支座剪力 /kN | 314 | 343 | 327 | 0.96 | 1.05 |
| | 墩底剪力 /kN | 314 | 342 | 330 | 0.95 | 1.04 |
| | 墩底弯矩 / (kN · m) | 3 142 | 3 431 | 3 325 | 0.94 | 1.03 |
| III 类场地 | 支座位移 /m | 0.092 | 0.134 | 0.128 | 0.72 | 1.05 |
| | 支座剪力 /kN | 297 | 392 | 385 | 0.77 | 1.02 |
| | 墩底剪力 /kN | 297 | 392 | 386 | 0.77 | 1.02 |
| | 墩底弯矩 / (kN · m) | 3 057 | 4 007 | 3 974 | 0.77 | 1.01 |

从表 1 可以看出 ,对 2 类场地情况 ,采用本文提出的阻尼修正公式后 ,弹性反应谱法的计算精度都得到了有一定的改善 ,2 种方法的计算结果吻合较好 ,且结果偏于安全。说明对减隔震桥梁进行简化分析时 ,本文建议的阻尼修正公式能有效提高简化反应

谱法的计算精度 ,且计算结果偏于安全。

3 结论

本文将以一座常规减隔震桥梁为例 ,对简化自由度反应谱方法进行了误差分析 ,并着重对 08 细

则设计反应谱的阻尼修正方法进行了改进,以提高简化反应谱方法的计算精度。得到了以下结论:

1) 基于08细则的反应谱阻尼修正公式,用简化单自由度反应谱法对常规减隔震桥梁进行地震反应分析,可能会低估结构的地震反应,且某些情况下误差较大。

2) 采用本文提出的08细则反应谱阻尼修正公式后,减隔震桥梁简化反应谱法的计算精度得到较大提高,且偏于安全。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 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.
Ministry of Transport of P. R. China. JTG/T B02-01-2008 guidelines for seismic design of highway bridge[S]. Beijing: China Communications Press,2008.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD bridge design specification[S]. 4th Ed. WashingtonDC: AASHTO Publication Staff,2007.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ 166-2011 城市桥梁抗震设计规范[S]. 北京:中国工业建筑出版社,2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P. R. China. CJJ 166-2011 code for seismic design of urban bridges[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011.
- [4] 马东辉,李虹,苏经宇,等. 阻尼比对设计反应谱的影响分析[J]. 工程抗震,1995(4):35-40.
MA Donghui,LI Hong,SU Jingyu et al. Analysis of effect of damping ratio on response spectrum for design[J]. Earthquake Engineering,1995(4):35-40.
- [5] 周雍年,周正华,于海英. 设计反应谱长周期区段的研究[J]. 地震工程与工程振动,2004,24(2):15-18.
ZHOU Yongnian,ZHOU Zhenghua,YU Haiying. A study on long period portion of design spectre[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2004,24(2):15-18.
- [6] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,2006:135-138.
HU Yuxian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Seismological Press,2006:135-138.
- [7] LIN Yuyuan,CHANG Kuochung. Study on damping reduction factor for building under earthquake ground motions[J]. Journal of Structural Engineering,2003,129(2):206-214.
- [8] LIN Yuyuan, TSAI Menghao, CHANG Kuochung. On the discussion of the damping reduction factors in the constant acceleration region for ATC-40 and FEMA 273[J]. Earthquake Spectra,2003,19(4):1001-1006.
- [9] LIN Yuyuan, EDUARDO M, CHANG Kuochung. Evaluation of damping reduction factors for estimating elastic response of structures with high damping[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,2005,34(11):1427-1443.
- [10] 罗开海,王亚勇. 关于不同阻尼比反应谱的研究[J]. 建筑结构,2011,41(11):16-21.
LUO Kaihai,WANG Yayong. Researches about the response spectra with different damping ratio[J]. Building Structure,2011,41(11):16-21.
- [11] 叶爱君,管仲国. 桥梁抗震[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
YE Aijun,GUAN Zhongguo. Seismic design for highway bridge[M]. Beijing: China Communications Press,2011.