

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.005

结构滞回阻尼比计算方法的改进研究*

杜东升, 李威威, 贲 驰, 王曙光, 冯无忌

(南京工业大学, 江苏 南京 211816)

摘要: 目前计算结构滞回阻尼比常用的方法是能量比法,该方法在给定滞回模型的基础上采用滞回耗能与结构总弹性应变能的比值求得结构滞回阻尼比,但该方法是在建立在简谐激励下结构稳态响应的基础之上,对于真实地震下结构滞回阻尼比计算并不完全适用。考虑到这一不足,本文提出一种新的迭代计算结构滞回阻尼比的方法,在 Carlos 提出的结构滞回阻尼比计算方法的基础上,考虑地震激励频率对阻尼比的影响,通过改进 Carlos 迭代计算方法,得到了考虑地震激励频率影响的滞回阻尼比计算公式,通过该公式分析得出了不同延性系数和周期比对滞回阻尼比的影响规律,结果表明不同延性系数的结构滞回阻尼比会随着周期比的增大先增大再减小。本研究可为结构进入非线性状态后减震结构总体阻尼比的计算提供理论依据。

关键词: 滞回阻尼比; 地震激励周期; 延性系数; 非线性滞回

中图分类号: TU312⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0878-06

Study on Improvement of Calculation Method for Structural Hysteretic Damping Ratio

DU Dongsheng, LI Weiwei, BEN Chi, WANG Shuguang, FENG Wuji
(Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

Abstract: The energy ratio method is the commonly used technique for calculating the hysteretic damping ratio of structures, in which the ratio of hysteretic energy to the total elastic strain energy is obtained based on the hysteresis model. However, the method is based on the steady-state response of the structure under harmonic excitation, so it is not extensively applicable to calculate the damping ratio of the structure under a real earthquake. This paper proposes a new method for iteratively calculating the hysteretic damping ratio of the structure. Based on the structural hysteresis damping ratio calculation method proposed by Carlos, and considering the frequency of earthquake wave, the improved formula for hysteresis damping ratio calculation is proposed. The influences of different ductility coefficients and period ratios of seismic to structure on the hysteretic damping ratio are obtained. The results show that the hysteretic damping ratio of different ductility coefficients increases firstly and then decreases with the increase of the period ratio. This study can provide a method for the calculation of the damping ratio of the damaged shock-absorbing structure.

Keywords: hysteretic damping ratio; seismic excitation period; ductility coefficient; nonlinear hysteresis

* 收稿日期:2019-08-05;修回日期:2019-09-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51678301;51808291;51678302)、江苏省六大人才高峰项目(JY-022)资助

作者简介:杜东升(1977-),男,教授,博士。主要从事建筑结构抗震及振动控制方面的研究。Email:ddshy@163.com

引言

结构进入非线性状态后构件的损伤造成结构性能退化的同时,也会对结构提供一定的附加阻尼比,准确计算该值可为评估结构非线性状态的地震反应提供重要依据,也为减震结构总阻尼比的计算提供基础数据。

阻尼器阻尼比的计算研究较多,但结构滞回阻尼比的研究起步较晚, Jacobsen 最早提出了类比能量比法求得结构滞回阻尼比,通过类比黏滞阻尼器阻尼比的求解方法求得结构非线性行为下的滞回阻尼比。1974年, P. Gulkan 等^[1]基于有限的实验结果提出了替代黏滞阻尼(SVD)的概念,通过平衡单自由度体系的输入能量和线性阻尼器消耗能量得到等效黏滞阻尼的计算公式, 1976年, A. Shibata 等^[2]提出了一个替代结构的概念,将结构的非线性行为通过一个线性等效单自由度体系替代即等效线性化。2005年, C. A. Blandon 等^[3]基于 Jacobsen 能量比法高估了结构滞回阻尼比这一点,提出了一个考虑结构有效周期的修正公式计算结构滞回阻尼比,这个公式的特点是考虑了结构有效周期对于结构滞回阻尼比的影响,但是未考虑地震激励平均周期对于结构滞回阻尼比的影响,该研究为结构在非线性行为下阻尼比的计算方法提供了新思路。2007年, H. M. Dwairi 等^[4]认为 Jacobsen 的方法高估了结构的滞回阻尼,且结构的固有周期、地震特性以及延性系数是结构滞回阻尼的关键影响因素。2014年, L. Landi 等^[5]提出了一个基于能力谱-需求谱的两步法,用于计算配置有非线性阻尼器结构非线性行为下的抗震反应,第一步是直接计算结构弹性行为下的附加阻尼比,第二步是将该方法扩展到结构非线性行为,并给出了图形和解析方法,但是,用该方法计算的结果与非线性时程分析的结果对比发现误差较大。2017年, T. Liu 等^[6]基于单自由度双线性滞回体系研究了结构固有弹性阻尼比对滞回阻尼比的影响,前人的研究都是对滞回阻尼比的定义,而忽略了结构固有阻尼比对滞回阻尼比的影响,而 T. Liu 等^[6]的研究结果表明结构固有阻尼比对等效线性化方法的精确度有重要影响,并提出了考虑该影响的等效阻尼比计算公式。

从这些研究中可以发现对于滞回阻尼比的研究依然有待深入,特别是目前的研究都没有考虑激

励特性对滞回阻尼比的影响,激励的频率必然会影响结构进入非线性的状态,进而影响结构的滞后阻尼比,本文在考虑上述影响的情况下提出了结构滞回阻尼比的改进计算方法。

1 结构滞回阻尼比的计算

目前计算滞回阻尼比的常用方法是由 Jacobsen 提出的能量比法公式,根据给定的滞回模型便可以根据滞回耗能与结构总的弹性应变能的比值求得结构的滞回阻尼比。基于 Jacobsen 的能量比法,有学者对不同结构体系的滞回行为进行了大量研究并提出了相应的滞回阻尼比计算公式, C. A. Blandon 等^[3]提出的滞回阻尼比计算公式都有一个固定形式:

$$\zeta_{\text{hys}} = \alpha_1 \left(1 - \frac{1}{\mu^{\beta_1}}\right) \quad (1)$$

式中, ζ_{hys} 为结构滞回阻尼比; μ 为延性系数; α_1 和 β_1 为常数。

目前大量研究表明 Jacobsen 能量比法高估了结构的滞回阻尼比,且该方法是建立在简谐激励下结构稳态响应的基础之上,对于真实地震下结构的滞回阻尼比计算并不适用。基于此, 2004年, C. A. Blandon 等^[3]通过修改和调整滞回阻尼比与延性系数的关系提出一个应用更广泛和更加符合实际的滞回阻尼比计算公式。该方法首先确定一个有效周期 T_{eff} 和延性系数,然后根据延性系数,利用给定的滞回模型对应的滞回阻尼比计算公式得到滞回阻尼比,并作为迭代初始值,在得到第一次迭代计算结果后,通过改变滞回阻尼比使得在下次迭代中等效线性结构位移峰值与时程分析位移峰值的匹配度得到提高;基于规范设计谱得到不同阻尼比下的非弹性设计位移反应谱,再根据给定的有效周期 T_{eff} ,在非弹性设计反应谱中确定目标位移 D_{spec} ,可以用目标位移 D_{spec} 、质量 m 、有效周期 T_{eff} 、延性系数 μ 和屈服后刚度系数 r 来确定滞回模型的屈服刚度 K_y 和屈服力 F_y ,然后通过时程分析得到结构的最大位移 D_{hys} ,如果 D_{spec} 与 D_{hys} 的误差在 3% 以内则可以停止迭代,迭代流程如图 1 所示,迭代过程中所有参数的具体参数含义如图 2 所示。

通过上述迭代方法可以求出不同等效周期情况下滞回阻尼比随延性的变化规律,具体结果如图 3 所示,为了对比,图中也给出了 Jacobsen 能量比法

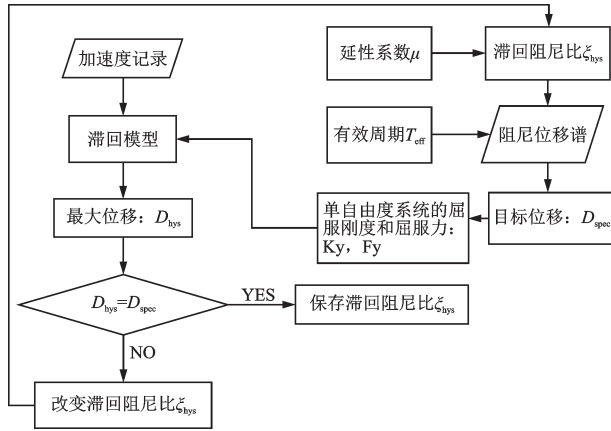


图1 Carlos提出的结构滞回阻尼比的迭代计算方法^[3]
Fig.1 Iterative calculation method proposed by Carlos for structural hysteretic damping ratio

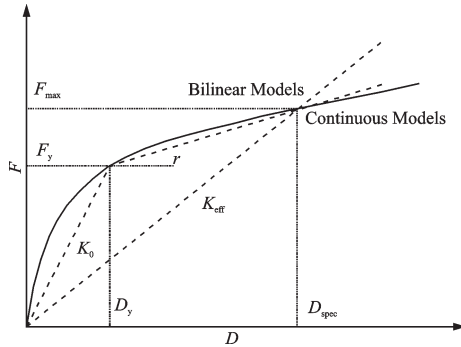


图2 单自由度体系的特征参数
Fig.2 Characteristic parameter value of SDOF system

的结果,如图中黑色粗实线所示,从图中可以看出,对于大部分滞回模型 Jacobsen方法的确高估了结构的滞回阻尼比。

2 考虑结构有效周期的滞回阻尼计算公式

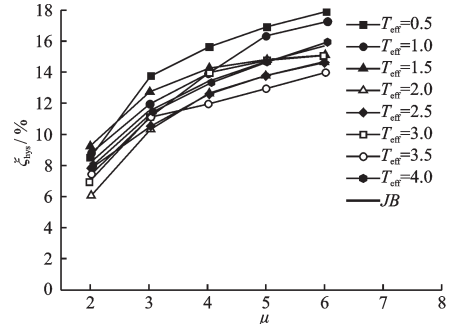
在上述迭代算法的基础上,Carlos提出一个考虑结构有效周期的结构滞回阻尼比计算公式,该公式的计算结果取决于滞回模型、延性系数和有效周期。以公式(1)作为该滞回阻尼比计算公式的基础,得到的修正方程为^[3]:

$$\zeta_{hys} = f(u) f(T_{eff}) \frac{1}{N} \quad (2)$$

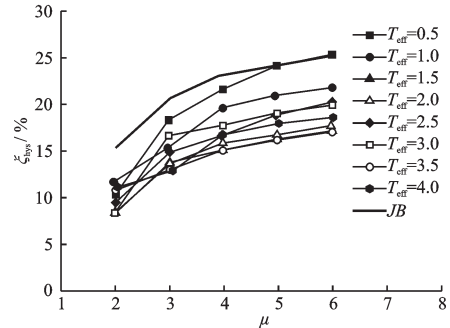
$$\zeta_{hys} = \frac{a}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\mu^b}\right) \left(1 + \frac{1}{(T_{eff} + c)^d}\right) \frac{1}{N} \quad (3)$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 为不同滞回模型的修正系数; μ 为延性系数; T_{eff} 和 N 分别为有效周期和标准化系数。

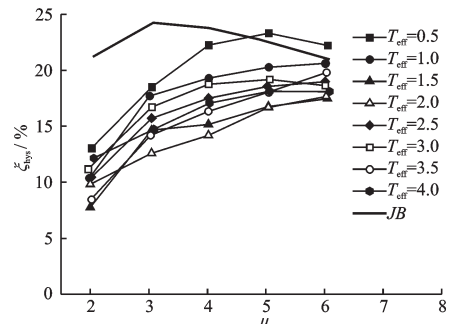
公式(2)与公式(1)的一个重要区别是增加了



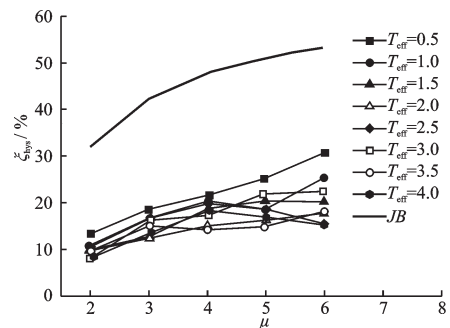
(a) Takeda 窄模型($\alpha=0.5, \beta=0.0$)



(b) Takeda 宽模型($\alpha=0.3, \beta=0.6$)



(c) 完全弹性滞回模型($r=0$)



(d) Ramberg-Osgood 滞回模型

图3 不同滞回模型的滞回阻尼比

Fig.3 Hysteresis damping ratio of Ramberg-Osgood hysteresis model

一项 $f(T_{eff})$, $f(T_{eff})$ 是关于结构有效周期的方程。以结构有效周期为0.5 s时通过前述迭代法计算的结构滞回阻尼比为基准,先确定修正系数 a 、 b 的值使得 $f(\mu)$ 尽可能接近基准滞回阻尼比,然后再确定修正系数 c 、 d 的值使 $f(T_{eff})$ 对 $f(\mu)$ 的计算结果进行修

正进而得到其他有效周期 T_{eff} 下的结构滞回阻尼比。标准化系数 N 的计算表达式是根据结构有效周期为 0.5 s 推导出来的, 即 $N = f(0.5)$, 该表达式为:

$$N = 1 + \frac{1}{(0.5 + c)^d} \quad (4)$$

研究发现, 参数 c 变化范围为 0.85~1, 参数 d 的变化范围为 2~4。表 1 给出了不同滞回模型下修正系数 a 、 b 、 c 、 d 的取值。

表 1 不同滞回模型对应修正系数值

Table 1 Correction coefficient values of 5 hysteresis models

修正系数	Takeda 窄模型	Takeda 宽模型	双线性模型	完全弹性塑性滞回模型	Ramberg-Osgood 滞回模型
a	95	130	160	140	150
b	0.50	0.50	0.50	0.50	0.45
c	0.85	0.85	0.85	0.85	1.00
d	4	4	2	2	4

利用公式(3)在已知结构延性系数 μ 、有效周期 T_{eff} 和滞回模型的情况下可以求得结构滞回阻尼比, 图 4 给出了该公式和迭代求解在不同延性系数 μ 下结构滞回阻尼比 ζ_{hys} 与有效周期 T_{eff} 的变化曲线, 图中公式(3)的计算结果为虚线。从图中可以看出, 公式计算的结果与迭代法计算结果比较吻合。

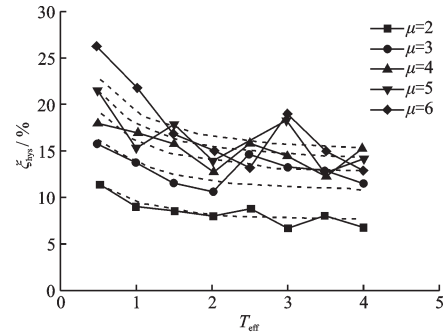
3 考虑地震激励平均周期的滞回阻尼比计算方法

结构在不同频率特征的强震激励下, 进入非线性的状态应该是不同的, 从而造成结构滞回阻尼比的不同, 所有地震动的频率对于滞回阻尼的影响不可忽略, 而 Carlos 提出的滞回阻尼比计算公式仅与结构周期和延性系数有关, 未考虑地震激励周期 T_g 对滞回阻尼的影响。考虑到这一不足之处, 本文提出一种新的迭代计算结构滞回阻尼比的方法, 并给出关于延性系数 μ 和周期比 T_g/T_{eff} 的滞回阻尼比计算公式。

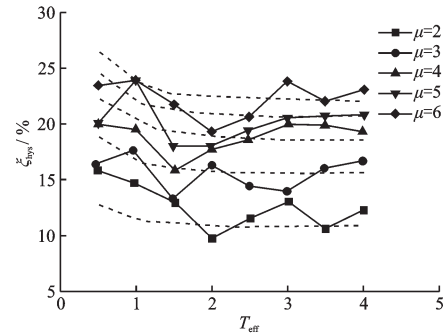
参照 Carlos 迭代过程, 本文提出了如下能够考虑地震动激励频率影响的滞回阻尼比计算的迭代过程:

第一步: 给定一个有效周期 T_{eff} 和延性系数 μ 。

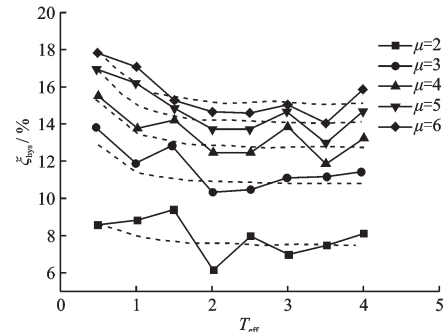
第二步: 对于给定的滞回模型, 以 Takeda 模型



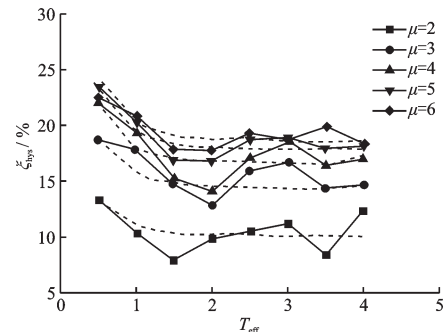
(a) Takeda 窄模型($\alpha=0.5, \beta=0.0$)



(b) Takeda 宽模型($\alpha=0.3, \beta=0.6$)



(c) 完全弹性塑性滞回模型



(d) Ramberg-Osgood 滞回模型

图 4 公式法(虚线)与迭代法(实线)计算结果的对比

Fig.4 Comparison of results by iterative method(continuous) and formula method(dashed)

为例, 根据延性系数 μ 、卸载刚度系数 α 、屈服后刚度比 r 和再加载刚度系数 β 求出对应的滞回阻尼比, 该公式得到的滞回阻尼比作为迭代初始值, 在得到第一次迭代计算的结果后, 通过改变滞回阻尼比使得

在下次迭代中等效线性结构的位移峰值与时程分析位移峰值的匹配度得到提高。

第三步:根据给定的有效周期 T_{eff} ,可以得到不同频率地震波激励下等效线性体系的响应最大值 D_{spec} 。

第四步:可以用目标位移 D_{spec} 、质量 m 、有效周期 T_{eff} 、延性系数 μ 和屈服后刚度系数 r 来确定滞回模型的屈服力 F_y 、屈服位移 d_y 、结构所承受的最大力 F_m 。

第五步:输入滞回模型的屈服力 F_y 、屈服位移 d_y 、结构最大位移 d_m 和结构所承受的最大力 F_m ,然后通过非线性时程分析得到结构的最大位移 D_{hys} 。

第六步:对比第三步和第五步得到的位移峰值,如果 D_{spec} 与 D_{hys} 的误差在 3% 以内,则保存滞回阻尼比,否则,修改滞回阻尼比从第二步重复迭代过程。

第七步:根据各条地震波对应的平均周期 T_g ,可以得到滞回阻尼比与周期比 (T_g/T_{eff}) 的关系曲线,通过数值拟合得到与周期比和延性系数有关的

滞回阻尼比计算公式。

利用迭代算法可以得到每一条地震波对应的结构滞回阻尼比,图 5 给出了迭代法得到延性为 2,3,4,5,6 时,结构滞回阻尼比随周期比的变化(图中圆圈所示)。通过数值拟合得到结构滞回阻尼比的计算公式:

$$\zeta_{\text{hys}} = \frac{a}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\mu^b}\right) \times c \times \sin\left(d \times \frac{T_g}{T_{\text{eff}}}\right) \quad (5)$$

公式(3)、(5)的计算结果也一同放在图 5 中,公式(3)的结果不随激励周期变化,称为“文献公式”,公式(5)称为“拟合公式”,随着周期比的增加呈先增加后减小的趋势。从图中可以看出,在延性小的情况下,不同地震波的计算结果受地震动激励的影响较小,公式(3)基本可以反应真实结果,但随着延性增加,结构的滞回阻尼比出现随着周期的增加先增大后减小的趋势,用公式(3)已经很难准确计算,当延性 $\mu=7$ 时,公式(3)的计算结果 $\zeta_{\text{hys}}=20.98\%$,但当 $T_g/T_{\text{eff}}=0.5$ 时,迭代计算出结果 $\zeta_{\text{hys}}=44.26\%$ 。

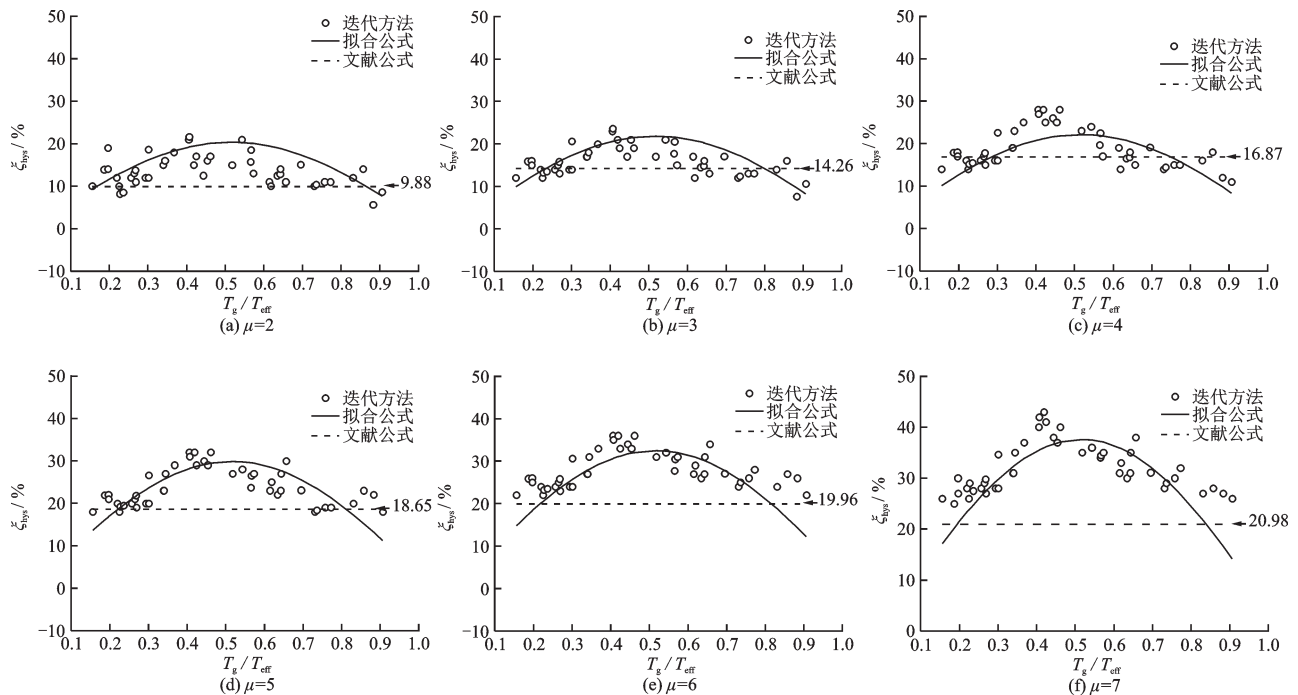


图 5 不同延性系数情况下结构滞回阻尼比与周期比 (T_g/T_{eff}) 的关系曲线 ($T_{\text{eff}}=1.165$ s)

Fig.5 Hysteresis damping ratio versus period ratio (T_g/T_{eff}) ($T_{\text{eff}}=1.165$ s)

4 结论

(1) 分别利用 Jacobsen 能量比法和 Carlos 迭代

法计算出不同等效周期情况下滞回阻尼比随延性的变化规律,结果表明对于大部分的滞回模型, Jacobsen 方法高估了结构的滞回阻尼比。

(2) 分析了 Carlos 提出的考虑有效周期 T_{eff} 的结

构滞回阻尼比的计算公式,通过对不同延性系数 μ 下,该公式和迭代求解在结构滞回阻尼比与有效周期 T_{eff} 的变化曲线,表明该公式的计算结果与迭代法计算结果比较吻合。

(3)在 Carlos 迭代法的基础上提出了能够考虑激励频率影响的结构滞回阻尼比的迭代方法,并通过该方法计算出了不同延性情况下,结构滞回阻尼比随周期比的增加呈先增加后减小的趋势,最后给出了能够考虑激励频率影响的结构滞回阻尼比计算公式,能够较好反应出上述趋势。

参考文献:

[1] Gulkan P, Sozen M A. Inelastic responses of reinforced concrete structures to earthquake motions[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1974, 71 (12) : 604-610.
 [2] Shibata A, Sozen M A. Substitute-structure method for

seismic design in R/C[J]. Journal of the Structural Division, 1976, 102(1):1-18.

[3] Blandon C A, Priestley M J N. Equivalent viscous damping equations for direct displacement based design [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, 9(SI2) : 257-278.
 [4] Dwairi H M, Kowalsky M J, Nau J M. Equivalent damping in support of direct displacement-based design [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2007, 11(4) : 512-530.
 [5] Landi L, Fabbri O, Diotallevi P P. A two-step direct method for estimating the seismic response of nonlinear structures equipped with nonlinear viscous dampers[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2014,43(11):1 641-1 659.
 [6] Liu T, Briseghella B, Zhang Q, et al. Equivalent damping of bilinear hysteretic sdf system considering the influence of initial elastic damping[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017,97:74-85.

(本文责编:池营营)



(上接第 866 页)

[15] 严福章,王思敬,徐瑞春.清江隔河岩水库蓄水后茅坪滑坡的变形机理及其发展趋势研究[J].工程地质学报,2003,11(1):15-24.
 Yan F Zh, Wang S J, Xu R Ch. Deformation mechanism and development tendency of maoping landslide after impounding of geheyan reservoir Qingjiang River [J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(1) : 15-24. (in Chinese)
 [16] Yin Y P, Sun P, Zhang M, et al. Mechanism on apparent dip sliding of oblique inclined bedding rockslide at Jiweishan, Chongqing, China [J]. Landslides, 2011, 8 (11) :49-95.
 [17] 喻章.杉树槽滑坡滑带土强度衰减特性及失稳机理研究[D].北京:中国地质大学,2018.
 Yu Zh. Study on strength attenuation characteristics of slip soil and failure mechanism of Shanshucao Landslide

[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018. (in Chinese)

[18] 许强,范宣梅,李园,等.板梁状滑坡形成条件、成因机制与防治措施[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):242-250.
 Xu Q, Fan X M, Li Y, et al. Foration condition genetic mechanism and treatment measures of plate-shaped landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2) : 242-250. (in Chinese)
 [19] 范宣梅,许强,张倬元,等.平推式滑坡成因机制研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增2):3 753-3 759.
 Fan X M, Xu Q, Zhang Zh Y, et al. Study on genetic mechanism of translational landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup 2):3 753-3 759. (in Chinese)