

文章编号: 1000-4750(2011)10-0093-08

计算结构非线性地震峰值响应的等价线性化模型

曲 哲,*叶列平

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘 要: 多自由度体系的等价线性化方法是预测结构的非线性地震峰值响应的有效方法。单自由度等价线性化模型是该方法的基础。该文在前人研究的基础上, 从定性和定量的两个方面综合分析了结构周期、延性系数以及恢复力模型等因素对单自由度等价线性化模型的影响, 并通过对大量地震动记录下动力弹塑性分析结果的拟合回归, 提出了能够综合反映各方面参数影响的单自由度等价线性化模型。与现有代表性的等价线性化模型相比, 该文模型所反映的参数最为全面, 预测峰值位移的平均相对误差最小, 且略偏于保守。

关键词: 建筑结构; 等价线性化; 单自由度体系; 非线性地震响应; 等价阻尼比

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A

AN EQUIVALENT LINEAR MODEL TO ESTIMATE MAXIMUM INELASTIC SEISMIC RESPONSES OF STRUCTURAL SYSTEMS

QU Zhe, *YE Lie-ping

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The equivalent linear analysis of a multi-degree-of-freedom system is an effective method in predicting the maximum inelastic seismic responses of building structures, in which the equivalent linear models for single-degree-of-freedom systems are of essential importance. The influence of structure's period of vibration, ductility ratio and hysteretic models over the equivalent linear parameters is examined both conceptually and quantitatively. A comprehensive model taking all the above-mentioned factors into account is proposed through regressions of the results of extensive nonlinear dynamic analyses. By comparing with typical existing models, the proposed model shows superior performance in terms of the influencing factors as well as mean relative errors.

Key words: building structure; equivalent linearization; single-degree-of-freedom system; nonlinear seismic response; equivalent damping ratio

在允许损伤的结构抗震设计中, 线弹性结构分析方法已无法胜任。为此, 弹塑性时程分析、静力弹塑性分析等更加复杂的分析方法日益受到重视。等价线性化方法同样是一种计算结构非线性地震响应的有效方法。该方法首先根据设计者对结构受力模式和合理损伤机制的判断, 预设结构的预期损伤机制和损伤程度, 为预期损伤部位赋予等价刚度, 为整体结构赋予等价阻尼比, 建立结构的等价

线性化模型, 并将该等价线性化模型的地震峰值响应作为原非线性模型的近似。该方法以等价的线弹性结构为分析对象, 可以直接利用振型分解反应谱法计算结构的地震响应, 从而具有以下两方面特点: 1) 与动力弹塑性分析相比, 可以采用设计反应谱作为地震输入, 避免了因选用地震动记录不同而引起的分析结果的离散性; 2) 与静力弹塑性分析相比, 该方法可以方便的应用于空间结构, 并可方便

收稿日期: 2010-01-26; 修改日期: 2010-04-23

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目(200800030001); 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90815025); 长江学者和创新团队发展计划(IRT0736)

作者简介: 曲 哲(1983—), 男, 陕西西安人, 博士生, 主要从事工程结构抗震和 FRP 加固混凝土结构的研究(E-mail: m.quzhe@gmail.com);

*叶列平(1960—), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士, 博导, 主要从事混凝土结构、地震工程的研究(E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn).

地考虑高阶振型的参与，也可用于不规则结构，具有更强的适用性；3) 线弹性反应谱分析的计算成本低，难度小，适于在工程抗震设计中推广应用。

对于多自由度体系等价线性化的研究，比较著名的是 Shibata 等(1976)提出的“等代结构法”(Substitute structure method)^[1]。该方法被用于估计强震下钢筋混凝土框架结构中各个构件的承载力需求。随着性能化抗震设计思想的发展，多自由度体系的等价线性化方法得到越来越多的认可。美国 ATC-40 将等价线性化方法作为静力弹塑性方法的补充^[2]。作为多自由度等价线性化法的基础理论性问题，本文在总结前人研究成果的基础上，将对单自由度等价线性化模型展开深入的讨论。

假设非线性单自由度体系由阻尼系数为 c_0 的粘滞型阻尼器和具有非线性滞回特性的弹簧组成。单自由度等价线性化模型的任务是建立一个具有等价刚度 k_{eq} 和等价阻尼比 ζ_{eq} 的线弹性体系，使该体系的地震峰值位移响应与原非线性模型在统计意义上接近。

等价阻尼比 ζ_{eq} 与等价刚度 k_{eq} 是等价线性化模型中的两个关键参数，通常被表达为假设的或已知的最大位移延性系数 μ 的函数。根据确定等价刚度的原则的不同，现有等价线性化模型可以分为以下两类：

1) 割线刚度模型：采用最大位移对应的割线刚度(以下简称“割线刚度”)作为等价刚度，如 Gulkan (1974)等^[3]和 Kowalsky(1994)^[4]等提出的模型。

2) 非割线刚度模型：采用割线刚度与初始刚度之间的某个刚度作为等价刚度，如 Gates(1977)^[5]，Iwan(1980)^[6]和 Kwan(2003)^[7]等建议的模型。

经典的等价线性化模型为割线刚度模型。假设非线性体系在一个对称的加载循环中的滞回耗能与等价线性化体系在相同位移幅值下的粘滞耗能相等，从而可以按下式计算附加的等价阻尼比 (Jacobsen, 1930^[8])。

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_h}{E_s} \quad (1)$$

式中： E_h 是非线性体系在一个对称的加载循环内的滞回耗能； E_s 是等价线性化体系的弹性应变能。

对于双线型弹塑性滞回模型，按照这种方法得到的等价刚度与等价阻尼比的计算公式如式(2)和式(3)所示(Rosenblueth, 1970^[9])。

$$k_{eq} = k_0 \left[\frac{1}{\mu} + \alpha \left(1 - \frac{1}{\mu} \right) \right] \quad (2)$$

$$\zeta_{eq} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{(\mu - 1)(1 - \alpha)}{\mu(1 + \alpha\mu - \alpha)} + \zeta_0 \quad (3)$$

式中： k_{eq} 和 k_0 分别为等价刚度和初始刚度； μ 为延性系数，即为最大位移与屈服位移之比，即 u_{max}/u_y ； α 为屈服后刚度系数，即屈服后刚度与初始刚度 k_0 的比值。

在利用等价线性化方法确定结构构件的能力需求时，除了关心结构的位移响应，还需要计算结构的内力。非割线刚度模型在准确估计结构位移响应的同时将高估结构的内力。为了避免出现这种情况，在利用等价线性化方法计算结构的抗震能力需求时，应采用割线刚度模型。对于双线型弹塑性滞回模型，等价刚度应按式(2)计算。

等价刚度确定之后，下文将集中讨论与之相匹配的等价阻尼比。首先，定性讨论结构的滞回模型和自振周期对等价阻尼比的影响；接着，通过大量的动力弹塑性分析定量地计算具有不同动力特性与滞回特性的非线性单自由度体系的等价阻尼比，得到统计规律，建立相应的等价阻尼比计算公式。

1 对主要影响因素的定性讨论

1.1 滞回模型的影响

当式(1)用于具有不同的滞回模型的体系时，等价阻尼比将与滞回环包围的面积成正比。以图 1 中的 4 种滞回模型为例，当延性系数 μ 相同时，不同滞回模型对应的等价阻尼比的大小关系应为

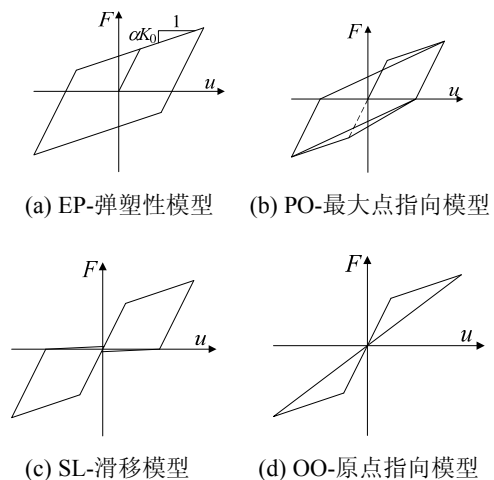
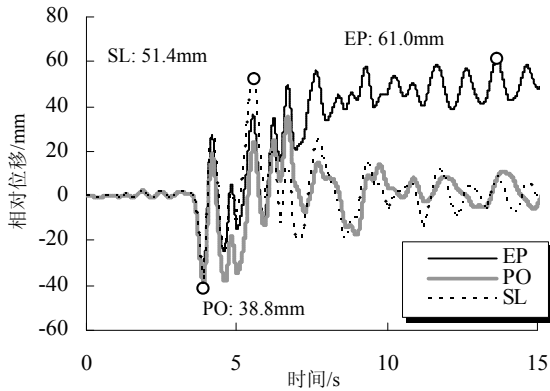


图 1 本文讨论的滞回模型

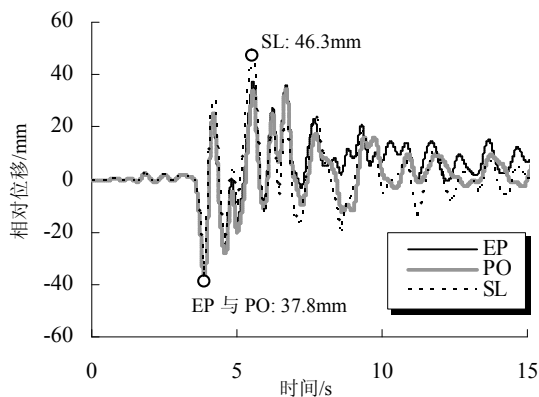
Fig.1 Hysteretic models included in this study

EP>PO>SL>OO。下面以具有不同滞回模型的单自由度体系(SDOF 体系)在一条地震动记录作用下的位移响应为例, 定性地揭示这一规律的限制性。

所选用的地震动记录为 1976 年意大利 Friuli 里氏 6.5 级地震中 Tolmezzo 台站记录到的强震记录 (PEER, 2006^[10])。图 2(a)为等延性 $\mu=6.0$ 的条件下屈服后刚度系数 $\alpha=0$ 的具有不同滞回模型的 SDOF 体系的位移响应, 空心圆圈表示最大位移响应点。结构初始周期均为 1.0s。



(a) 屈服后刚度系数 $\alpha=0.0$



(b) 屈服后刚度系数 $\alpha=0.1$

图2 具有不同滞回模型的 SDOF 体系的地震位移响应

Fig.2 Response time histories of SDOF systems with various hysteresis

具有 EP 模型的 SDOF 系统在经历了两个较大加速度脉冲后, 振动表现出非常显著的不对称性, 即体系屈服后质点不再在 origin 附近振动, 而是偏于一侧振动。该体系的最大位移发生在 13.7s, 即在体系屈服并偏于一侧振动之后。与之相比, 具有最大点指向模型(PO)的 SDOF 体系则能基本保持在 origin 附近振动。由于该体系具有较大的耗能能力, 前面的加速度脉冲引起的结构振动衰减较快, 不会与后面的加速度脉冲引起的结构振动相叠加而引起过

大的结构变形。具有滑移模型(SL)的 SDOF 体系的振动也具有较好的对称性, 但其耗能能力较低, 其最大位移不是发生在第 1 个位移极值处, 而是出现在第 5.6s。在这个等延性的例子中, 3 个滞回模型对应的等价阻尼比与其最大位移成反比, 其大小关系 PO>SL>EP, 这并非与各自滞回环面积成比例。

对屈服后刚度较大的强化型结构, EP 模型在屈服后振动的不对称性得到有效的抑制。如图 2(b)所示, 当 $\alpha=0.1$ 时, EP 模型与 PO 模型一样, 最大位移均出现在第 1 个极值处, 即 3.9s。SL 模型仍因耗能能力不足, 最大位移大于 EP 或 PO 模型。这时, 三者对应的等价阻尼比的大小关系应为 EP=PO>SL。

以上结果说明, 滞回模型对等价阻尼比的影响不能简单地归结为滞回环面积的大小。如果振动的对称性没有得到有效的控制, 饱满的滞回环未必具有较大的耗能能力, 从而不一定对应于较大的等价阻尼比。

1.2 结构自振周期的影响

在计算等价刚度和等价阻尼时, 应将二者一起考虑, 单独研究其中的某一个参数并不能得到精确的等价线性化模型。当等价刚度的计算公式确定之后, 等价阻尼比的取值将不仅取决于滞回模型对结构地震响应的影响, 还不可避免受到刚度改变的影响。

图 3 定性地给出了符合 Newmark 等(1971)提出的等能量准则和等位移准则的位移谱^[11]。虽然经过了几十年的发展, 人们对于非线性反应谱有了更加深入的认识, 但这两条准则不但非常简洁, 而且从整体上把握了非线性单自由度体系的地震位移响应的特点, 有助于从概念上理解结构的非线性地震响应规律。

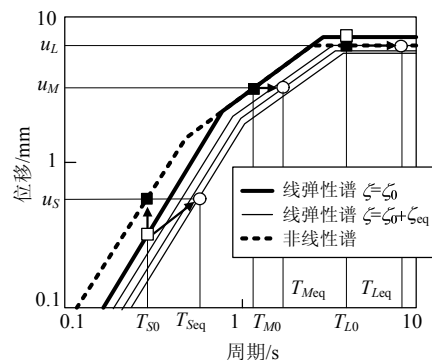


图3 等价阻尼比与结构自振周期的相关性

Fig.3 Dependences of equivalent damping on vibration periods

在图3中,空心方块表示线弹性体系的位移响应,实心方块表示非线性体系的位移响应,空心圆圈表示等价线性化体系的位移响应。在图示的0.1s~10s的周期范围内均需通过一定的等价阻尼比使等价线性化体系与非线性体系具有相同的最大位移响应。但由于在不同的周期区段上非线性位移谱与线弹性位移谱具有不同的相对关系,等价阻尼比也有所不同。

1) 在短周期段,非线性体系的位移大于线弹性体系,且基本遵循等能量准则。同时这一区段内结构周期的延长(从 T_{S0} 到 T_{Seq})会显著增大结构的位移响应。在这两方面因素的共同影响下,短周期段往往需要较大的等价阻尼比以使等价的线弹性最大位移与非线性最大位移 u_s 相等。

2) 在中长周期段,非线性体系的位移基本等于线弹性体系的位移,即符合等位移准则。这意味着结构的屈服基本不改变结构的位移响应 u_M ,而结构周期的延长(从 T_{M0} 到 T_{Meq})则会使结构的位移响应增大。因此,这一区段内的等价阻尼比主要用于抵消因结构周期延长而增大的位移。

3) 在长周期段,结构的位移响应基本不再随周期变化(从 T_{L0} 到 T_{Leq}),并且非线性体系的位移响应 u_L 甚至会小于线弹性响应。因此,这一区段内的等价阻尼比可能非常小,如图3所示。

由此可见,等价阻尼比与结构的自振周期之间有明显的相关性。这一点在以往的等价线性化模型中均没有反映。下面以大量非线性动力响应分析为基础,定量地讨论等价阻尼比的取值规律。

2 等价阻尼比的定量计算

2.1 地震动数据库

美国 PEER/NGA 强震记录数据库收集了自1935年至今的三千多条地震动记录^[10]。中国强震动台网中心(CSMNC)在2008年汶川地震中也获得许多宝贵的强震记录。本文以这两个地震记录数据库为基础,按以下规则挑选定量计算等价阻尼比所用的地震波:1) 地震震级 $M>6.5$,以排除破坏性不强的地震中记录到的地震波;2) 断层距大于10km,以减小近场地震的影响;3) PGA 大于0.04g,PGV 大于5cm/s,以排除不太可能对建筑结构造成损坏的地震记录;4) 30m 土层平均剪切波速介于200m/s~500m/s之间,大致对应于我国抗震规范中的II类场地;5) 仪器位于自由场地或较小建筑物的地面层。

挑选出的436条水平地震记录的震级分布在6.5级~8级之间;断层距从10km~180km不等,且绝大部分记录的断层距不大于100km;地面峰值速度分布在5cm/s~70cm/s之间,且大部份小于30cm/s;能量持时从几秒到上百秒不等,但绝大多数小于40s。

2.2 等价阻尼比的计算流程

在给定的延性系数 μ 下,对于给定恢复力模型和初始周期的SDOF体系,通过以下流程直接计算等价阻尼比。

1) 预设某一承载力,计算非线性SDOF体系在某一地震波作用下的最大位移 u_{nl} ,并得到相应的延性系数 μ_t 。

2) 当计算得到的 μ_t 与给定的 μ 不相等时,调整结构的承载力,重复第1)步,直到 μ_t 与 μ 足够接近(设容差为2%)。

3) 按上文的式(2)计算等价刚度 k_{eq} ,并假设一个等价阻尼比 ζ_{eq} ,得到等价线性化体系,并计算其在同一地震波下的最大位移 u_{eq} 。

4) 当 u_{eq} 与 u_{nl} 不相等时,假设新的等价阻尼比 ζ_{eq} ,重复上述第3)步,直到 u_{eq} 与 u_{nl} 足够接近(设容差为0.5%)。

通过以上流程,对于一个给定恢复力模型和初始周期的SDOF体系,对436条地震波可以得到436个等价阻尼比。为了研究等价阻尼比对结构周期的依赖性以及恢复力模型对等价阻尼比的影响,本文对以下参数进行讨论:1) 结构周期:所计算的SDOF体系的周期分布在0.1s~6.0s之间;2) 滞回模型:本文考虑图1所示的4种滞回模型;3) 屈服后刚度:本文考虑0.00、0.02、0.05和0.10等4个屈服后刚度系数 α 的取值;4) 延性系数:考虑2.0、4.0、6.0和8.0等4个延性系数的取值。

本文把按上述流程得到的等价阻尼比转化为式(3)形式,并引入修正系数 β 以反映等价阻尼比与式(3)之间的差异,从而得到形如式(4)的等价阻尼比计算公式。在以下的讨论中,等价阻尼比将以修正系数 β 的形式出现,它包含了结构周期、滞回模型、屈服后刚度和延性系数等多种因素的综合影响。

$$\zeta_{eq} = \beta \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{(\mu-1)(1-\alpha)}{\mu(1+\alpha\mu-\alpha)} + \zeta_0 \quad (4)$$

2.3 自振周期

上文讨论的等价阻尼比与自振周期的相关性在图4中更加直观地体现了出来。图4中给出了

$\alpha=0.05$ 的具有EP模型的SDOF体系在等延性 $\mu=6.0$ 情况下的 β 平均值与自振周期 T 之间的关系。在短周期段, 等价阻尼比随着周期的增大迅速减小; 在中长周期段, 等价阻尼比随周期的变化比较平缓。将 0.1s、1.0s 和 6.0s 对应的 β 分别记为 $\beta_{0.1}$ 、 β_1 和 β_6 , 并以式(5)作为等价阻尼比系数 β 曲线的偏于安全的近似, 如图4中的粗实线所示。这样, 只要确定了 $\beta_{0.1}$ 、 β_1 和 β_6 , 就可以求出任意其他周期对应的 β 值。

$$\beta = \begin{cases} \frac{(10\beta_1 - \beta_{0.1})T + \beta_{0.1} - \beta_1}{9T}, & T \leq 1.0 \\ 0.2(\beta_6 - \beta_1)T + 1.2\beta_1 - 0.2\beta_6, & T > 1.0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, T 为结构初始周期。

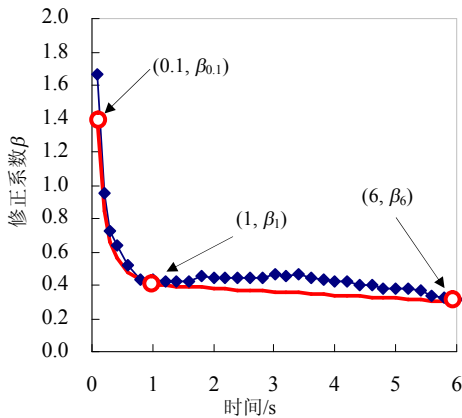


图4 等价阻尼比系数 β 随周期的变化($\mu=2.0, \alpha=0.05, EP$)
Fig.4 Relationship between factor β and initial period T
($\mu=2.0, \alpha=0.05, EP$)

2.4 延性系数的影响

统计结果显示, β 仍会随着延性系数的变化而变化, 这说明式(3)的等价阻尼比公式并不能完全代表延性系数对等价阻尼比的影响。以屈服后刚度系数 $\alpha=0.05$ 的EP模型为例, 在短周期段和中长周期段, β 随延性系数的增大而增大(图5)。

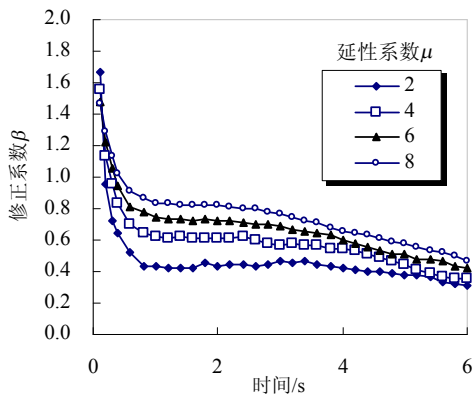


图5 延性系数对等价阻尼比的影响($\alpha=0.05, EP$)
Fig.5 Influence of ductility factor on β ($\alpha=0.05, EP$)

2.5 滞回模型的影响

图6给出的 β 平均值的变化规律进一步支持了上文对于“等价阻尼比与滞回环包围的面积成比例”这一规律局限性的讨论。当结构的屈服后刚度系数 α 较小时, 在中长周期段, PO模型和SL模型的等价阻尼比均略大于EP模型; 在长周期段, PO模型的等价阻尼比仍略大于EP模型(图6(a))。这说明, 不同滞回模型对应的等价阻尼比与各自滞回环的面积并不成比例。而当结构的屈服后刚度较大时, 不同滞回模型的等价阻尼比之间的差别比较明显, 且为 $EP > PO > SL > OO$, 在相对大小关系上与各自滞回环的面积相一致(图6(b))。

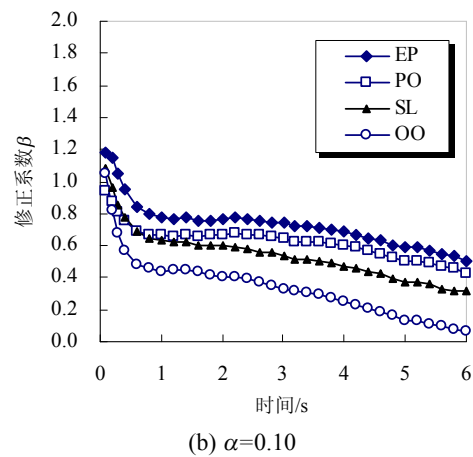
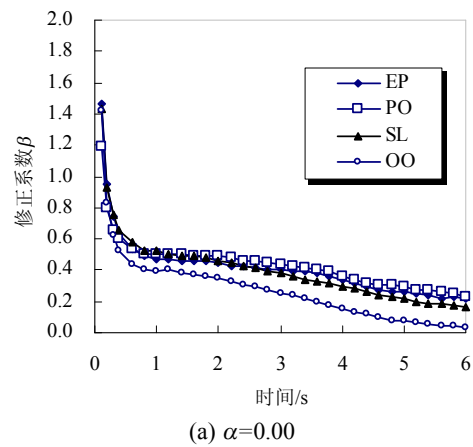


图6 滞回模型对等价阻尼比的影响($\mu=6.0$)
Fig.6 Influence of hysteresis model on β ($\mu=6.0$)

2.6 屈服后刚度的影响

屈服后刚度对于控制某些SDOF体系屈服后振动的对称性非常有效, 而体系屈服后振动的对称性往往又对结构的最大位移响应有较大影响, 从而影响等价阻尼比的取值, 如图6所示。文献[12]深入讨论了屈服后刚度对于控制结构地震响应, 保证结构在地震作用下安全的重要意义。

3 建议的等价阻尼比模型

通过拟合计算分析得到的不同情况下的 $\beta_{0.1}$ 、 β_1 和 β_6 ，建立能够同时考虑周期、延性系数、滞回模型和屈服后第2阶段刚度等影响的等价阻尼比计算模型。拟合得到的有关计算公式列于表1。 $\beta_{0.1}$ 只控制短周期段的等价阻尼比，而对于短周期结构，一般抗震设计不建议考虑结构的延性或耗能能力，而宜采用基于承载力的设计。因此这里对于短周期段的等价阻尼比给出了比较保守的估计值，即在所有情况下 $\beta_{0.1}$ 均取1.0。对于 β_1 和 β_6 ，则采用表1中的指数函数对计算分析得到的数据点进行拟合。

表1 修正系数 β 在0.1s、1s和6s处的建议取值
Table 1 Proposed values of β at 0.1s, 1s and 6s

滞回模型	$\beta_{0.1}$	β_1	β_6
EP	1.0	$0.29\mu^{\alpha^{0.50}+0.25}$	$0.25\mu^{\alpha^{0.36}-0.08}$
PO	1.0	$0.34\mu^{\alpha^{0.79}+0.23}$	$0.27\mu^{\alpha^{0.47}-0.08}$
SL	1.0	$0.32\mu^{\alpha^{0.87}+0.27}$	$0.24\mu^{\alpha^{0.50}-0.17}$
OO	1.0	$0.24\mu^{\alpha+0.27}$	$0.15\mu^{\alpha^{0.68}-0.6}$

图7以屈服后刚度系数 $\alpha=0.05$ 的EP模型为例，比较了按表1公式和式(4)计算得到的修正系数 β 与大量计算分析得到的 β 值的对比。由图7可见，建议的模型能够反映计算结果的规律，且偏于保守，对于短周期且延性系数较大的情况尤其保守。

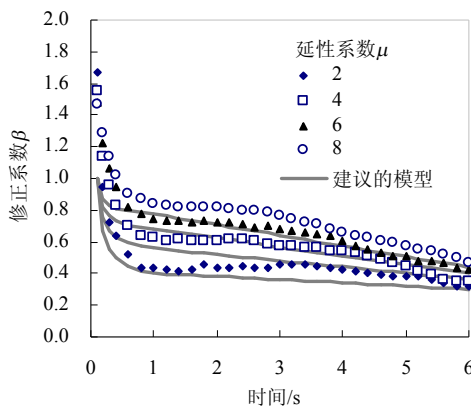


图7 建议模型与不同延性系数下计算结果的对比
($\alpha=0.05$, EP)

Fig.7 Comparison between the proposed model and the mean values of β at various ductility ($\alpha=0.05$, EP)

将本文模型与现有比较有代表性的SDOF等价线性化模型进行比较。参与比较的包括Iwan^[6]、Kowalsky^[4]和Kwan^[7]提出的模型。其中Iwan模型是非割线刚度模型的代表，而Kowalsky模型则是割线刚度模型的代表。Kwan模型是已有的唯一考虑了不同滞回模型的。这3个模型的基本公式如表2

所列。

表2 现有等价线性化模型的计算公式
Table 2 Equations of typical models in literature

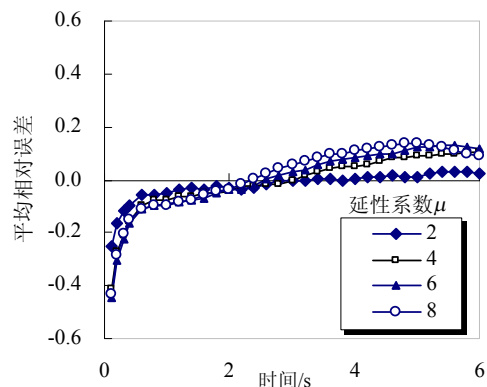
来源	等价刚度 k_{eq}	等价阻尼比 ζ_{eq}
文献[6]	$k_0[1+0.121(\mu-1)^{0.939}]^{-2}$	$0.0587(\mu-1)^{0.371} + \zeta_0$
文献[4]	$k_0 \left[\frac{1}{\mu} + \alpha \left(1 - \frac{1}{\mu} \right) \right]$	$\frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{1-\alpha}{\sqrt{\mu}} - \alpha\sqrt{\mu} \right) + \zeta_0$
文献[7]	$\frac{k_0}{(0.8\mu^{C_1})^2}$	$\frac{2C_2}{\pi} (0.8\mu^{C_1})^2 \frac{\mu-1}{\mu^2} + 0.55(0.8\mu^{C_1})^2 \zeta_0$

需要指出的是，Kwan模型通过引入 C_1 和 C_2 等两个参数考虑了不同滞回模型的影响，具有一定的先进性，但在某些情况下该模型会得到不尽合理的结果。比如对于延性较好的结构，Kwan建议 $C_1=0.5$ 。这时，当延性系数 $\mu < 1.7$ 时，等价刚度 k_{eq} 将反而大于初始刚度 k_0 。

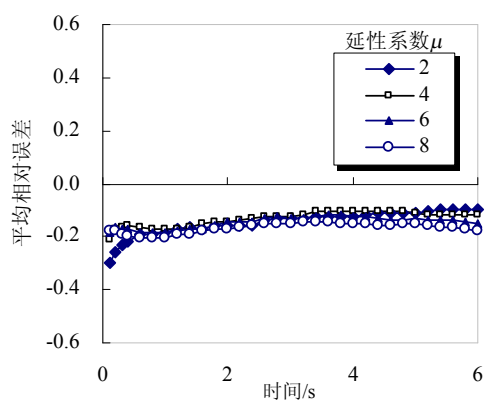
在给定的延性系数 μ 的情况下，对于具有一定恢复力模型(这里均以 $\alpha=0$ 的PO模型为例)和初始周期的SDOF体系，按以下步骤计算由上述3个模型以及本文模型预测的最大位移响应的相对误差：

- 1) 预设某一承载力，计算非线性SDOF体系在某一地震波作用下的最大位移 u_{nl} ，并得到相应的延性系数 μ_t ；
- 2) 当计算得到的 μ_t 与给定的 μ 不相等时，调整结构的承载力，重复第1)步，直到 μ_t 与 μ 足够接近(设容差为2%)；
- 3) 按上述不同等价线性化模型确定等价刚度和等价阻尼比，并计算其在同一地震波下的最大位移 u_{eq} ；
- 4) 计算最大位移的相对误差，即 $err=(u_{eq}-u_{nl})/u_{nl}$ 。

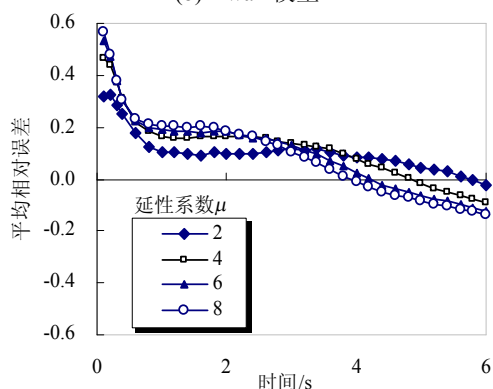
图8和图9给出了各等价线性化模型相对误差的统计结果。由图8可见，在中长周期段，对于不同的延性系数，各模型的平均相对误差均不超过20%，本文建议模型的平均相对误差可控制在10%以内。然而在短周期段，Iwan模型和Kowalsky模型的平均相对误差明显增大，本文建议模型则没有



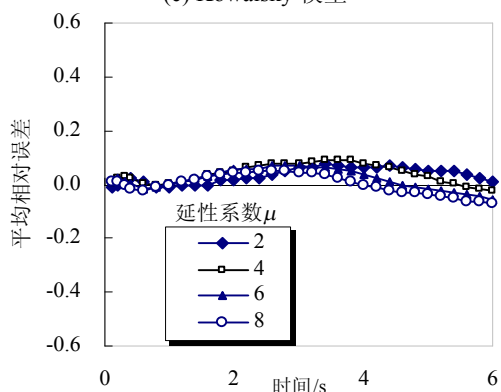
(a) Iwan模型



(b) Kwan 模型

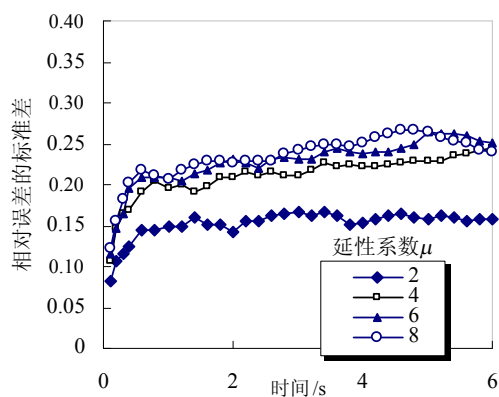


(c) Kowalsky 模型

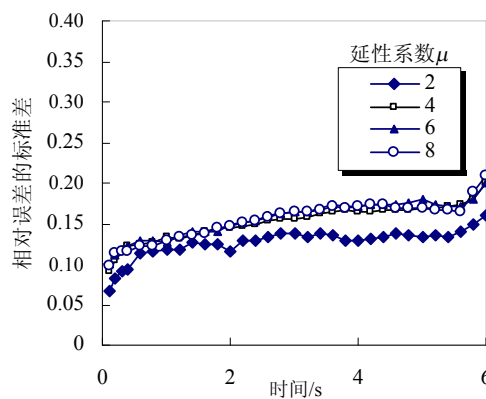


(d) 本文模型

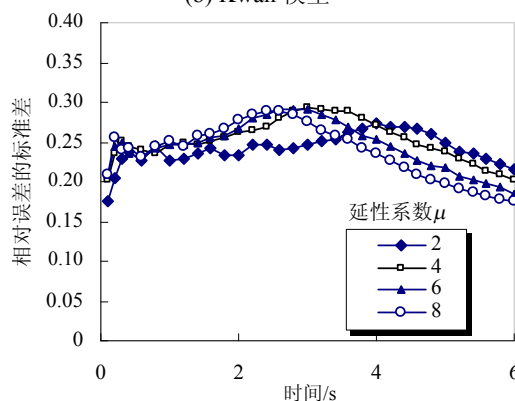
图 8 最大位移的相对误差的平均值(PO 模型)
Fig.8 Mean relative errors of estimated peak displacement estimated (PO model)



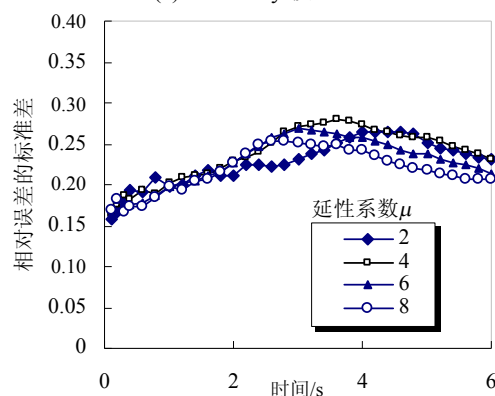
(a) Iwan 模型



(b) Kwan 模型



(c) Kowalsky 模型



(d) 本文模型

图 9 最大位移相对误差的标准差(PO 模型)

Fig.9 Standard deviation of relative errors of estimated peak displacement (PO model)

这个问题。另外值得注意的是，Iwan 模型和 Kwan 模型在较长的周期段内的平均相对误差均为负值，意味着等价线性化模型预测的最大位移小于实际的非线性系统的最大位移，是偏于不安全的。Kowalsky 模型和本文建议模型则基本上是偏于保守。

由图 9 可见，各模型的相对误差的标准差都均分布在 0.1~0.3 之间，差别不大，其中 Kwan 模型的标准差最小。

由以上分析可见, 本文建议的模型在统计意义上具有较高精度, 离散性与现有模型相当。与现有模型相比, 本文模型在考虑等价阻尼比关于周期的依赖性以及滞回模型对等价阻尼比的影响等方面有明显的进步。

4 结论

本文从基本概念上阐述了等价线性化模型中等价阻尼比的物理意义及其与滞回耗能的关系, 定性地指出了等价阻尼比的取值对于结构周期的依赖性。在此基础上, 针对大量地震动记录, 通过单自由度体系的动力弹塑性分析定量地研究了结构周期、延性系数、滞回模型以及屈服后刚度对等价线性化模型参数的影响, 得出以下结论:

(1) 当采用最大位移对应的割线刚度为等价刚度时, 结构的等价阻尼比随结构周期的增大而减小。在短周期段, 即当周期约小于 1.0s 时, 等价阻尼比减小得比较剧烈; 在中长周期(大约为 1.0s~3.0s)以及长周期(约大于 3.0s)变化得比较平缓。

(2) 等价阻尼比的取值并非总与滞回环的面积成比例, 还受到结构振动的对称性以及地震动特性的影响。当屈服后刚度较小时, 滞回饱满的弹塑性模型的等价阻尼比有可能小于最大点指模型或滑移模型的等价阻尼比。

(3) 对于滞回饱满的弹塑性模型, 一定的屈服后刚度可以显著增大结构振动的对称性, 有利于发挥结构的耗能能力, 减小结构的最大位移响应, 使结构在地震过程中不会偏向一侧振动而增加结构倒塌的危险, 在地震结束后也不会产生过大的残余变形, 有利于震后修复。

本文提出了能够综合考虑各主要结构参数影响的单自由度等价线性化模型。与现有比较有代表性的模型相比, 本文模型不但考虑的影响因素最为全面, 而且平均相对误差最小且略偏于保守, 具有一定的优越性。

参考文献:

- [1] Shibata A, Sozen M A. Substitute-structure method for seismic design in R/C structures [J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1976, 102(1): 1—18.
- [2] ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings [S]. Redwood City, 1996.
- [3] Gulkan P, Sozen Mete A. Inelastic response of reinforced concrete structures to earthquake motions [J]. ACI Journal, 1974, 71(12): 601—609.
- [4] Kowalsky M J. Displacement-based design—A methodology for seismic design applied to RC bridge columns [D]. La Jolla: University of California at San Diego, 1994.
- [5] Gates N C. The earthquake response of deteriorating systems [D]. Pasadena, California: California Institute of Technology, 1977.
- [6] Iwan W D. Estimating Inelastic response spectra from elastic spectra [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1980, 8(4): 375—388.
- [7] Kwan W P, Billington S L. Influence of hysteretic behavior on equivalent period and damping of structural systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(5): 576—585.
- [8] Jacobsen L S. Steady forced vibrations as influenced by damping [J]. ASME Transactions, 1930, 52: 169—181.
- [9] Rosenblueth E, Herrera I. On a kind of hysteretic damping [J]. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 1964, 90: 37—48.
- [10] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). PEER NGA database [DB]. <http://peer.berkeley.edu/nga/>, 2009-09-22.
- [11] Newmark N M, Rosenblueth E. Fundamentals of earthquake engineering [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1971.
- [12] 叶列平, 陆新征, 马千里, 程光煜, 宋世研, 缪志伟, 潘鹏. 屈服后刚度对建筑结构地震响应影响的研究 [J]. 建筑结构学报, 2009, 30(2): 17—29.
Ye Lieping, Lu Xinzhen, Ma Qianli, Cheng Guangyu, Song Shiyuan, Miao Zhiwei, Pan Peng. Study on the influence of post-yielding stiffness to the seismic response of building structures [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(2): 17—29. (in Chinese)