地震反应谱的特性

崔济东（JiDong Cui)

（华南理工大学 土木与交通学院，广东广州，510640）

1 反应谱的基本概念（Introduction to Response Spectra）

地震动反应谱：单自由度弹性系统对于某个实际地震加速度的最大反应（可以是加速度、速度和位移）和体系的自振特征（自振周期或频率和阻尼比）之间的关系。前一篇博文《Earthquake Response Spectra 地震反应谱》介绍了反应谱和伪反应谱的基本概念，并编制了相应的反应谱计算程序——SPECTR。本文利用该软件，通过几个实测地震记录的反应谱分析，总结地震反应的一般谱特性。

2 本文用到的地震加速度记录（Acceleration Time History Records）

2.1 1999 年台湾集集地震记录的加速度记录：

（1）加速度记录信息：

The Chi-Chi (Taiwan) earthquake of September 20, 1999.

Source: PEER Strong Motion database

Recording station: TCU045

Frequency range: 0.02-50.0 Hz

Maximum Absolute Acceleration: 0.361g

（2）加速度时程与相应的速度和位移

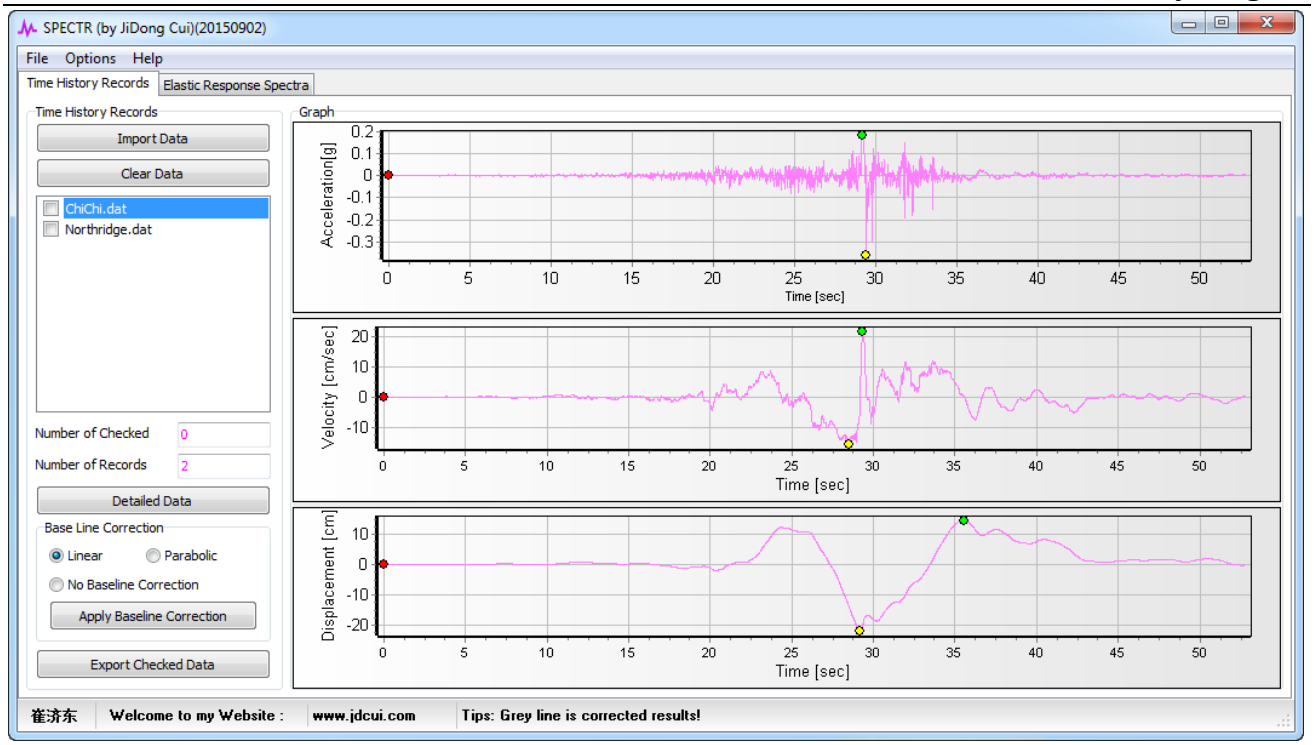


图 2-1 ChiChi 地震加速度时程

2.2 1994 年美国北岭地震记录的加速度时程：

（1）加速度记录信息：

The Northridge (USA) earthquake of January 17, 1994.

Source: PEER Strong Motion Database

Recording station: 090 CDMG STATION 24278

Frequency range: 0.12-23.0 Hz

Maximum Absolute Acceleration: 0.5683g

（2）加速度时程与相应的速度和位移

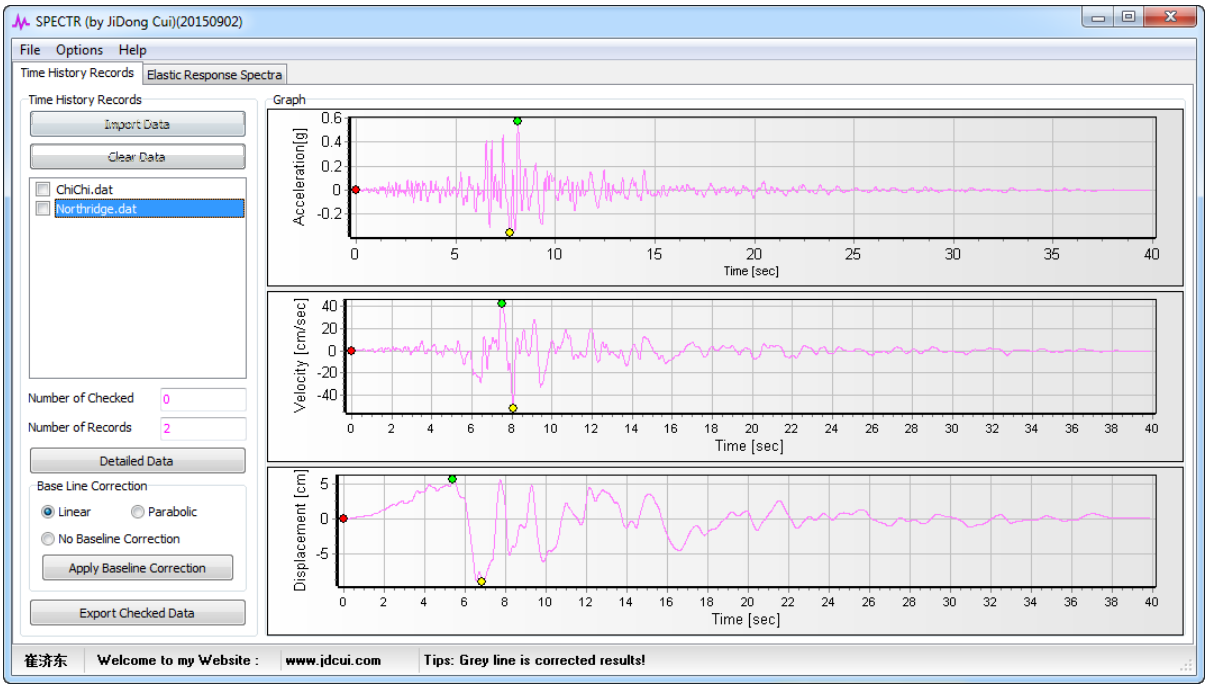


图 2-2 Northridge 地震加速度时程

3 位移反应谱（Displacement Response Spectra）

常说的位移反应谱指的是相对位移反应谱。利用 SPECTR 分别计算两个地震记录的位移反应谱，每个地震记录分别选取 9 个阻尼比：5%、10%、15%、20%、30%、35%、40%、50%、60%，反应谱的最大周期为 6 秒和 60 秒。

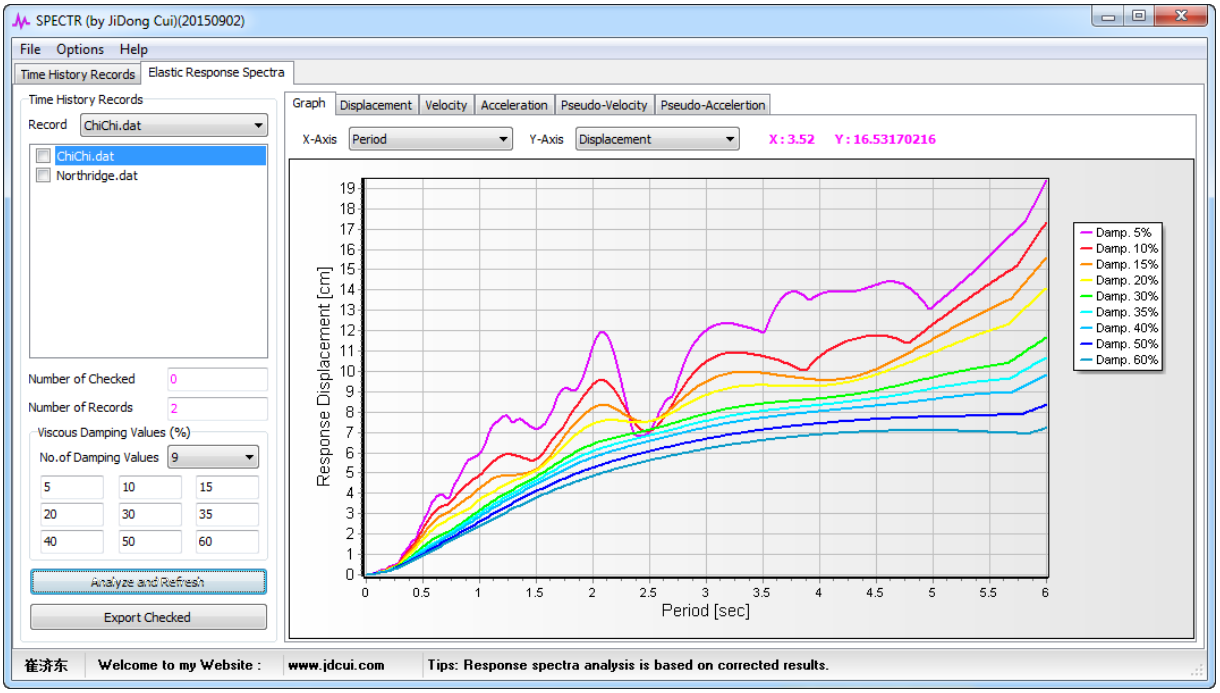


图 3-1 ChiChi 地震相对位移反应谱（Tmax = 6s）

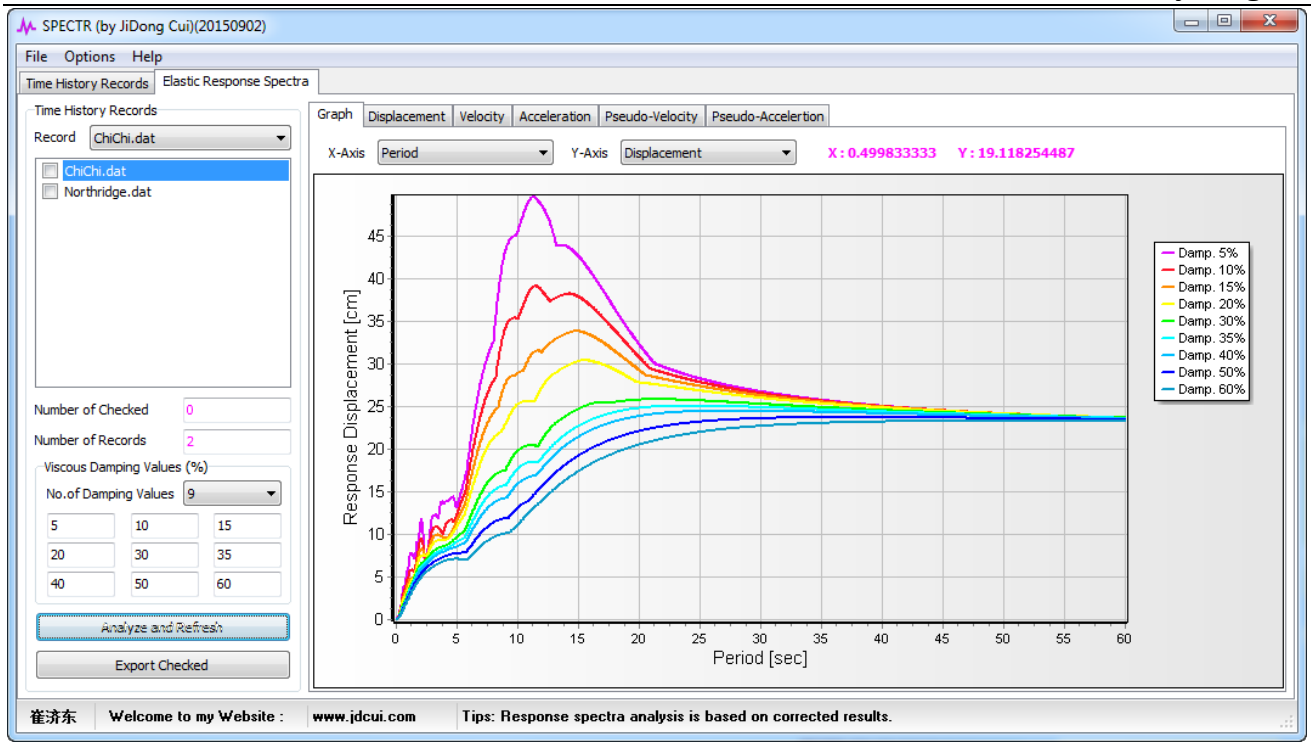


图 3-2 ChiChi 地震相对位移反应谱（Tmax = 60s）

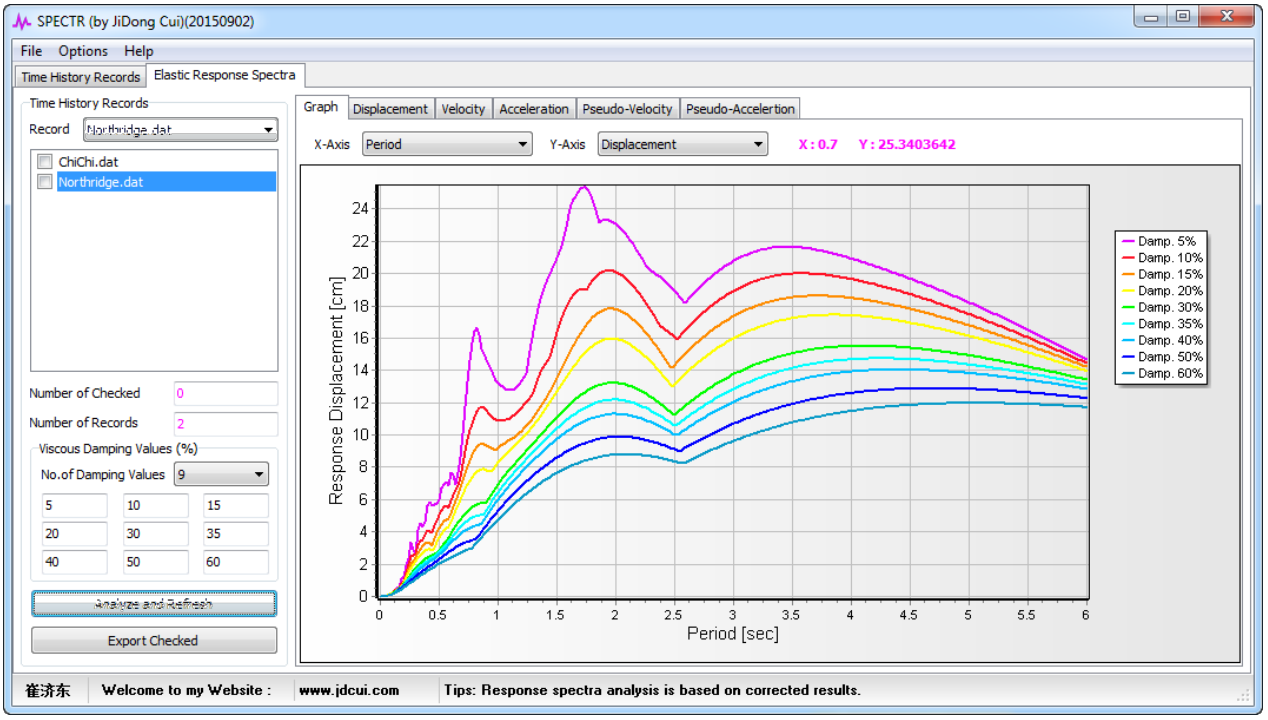


图 3-3 Northridge 地震相对位移反应谱（Tmax = 6s）

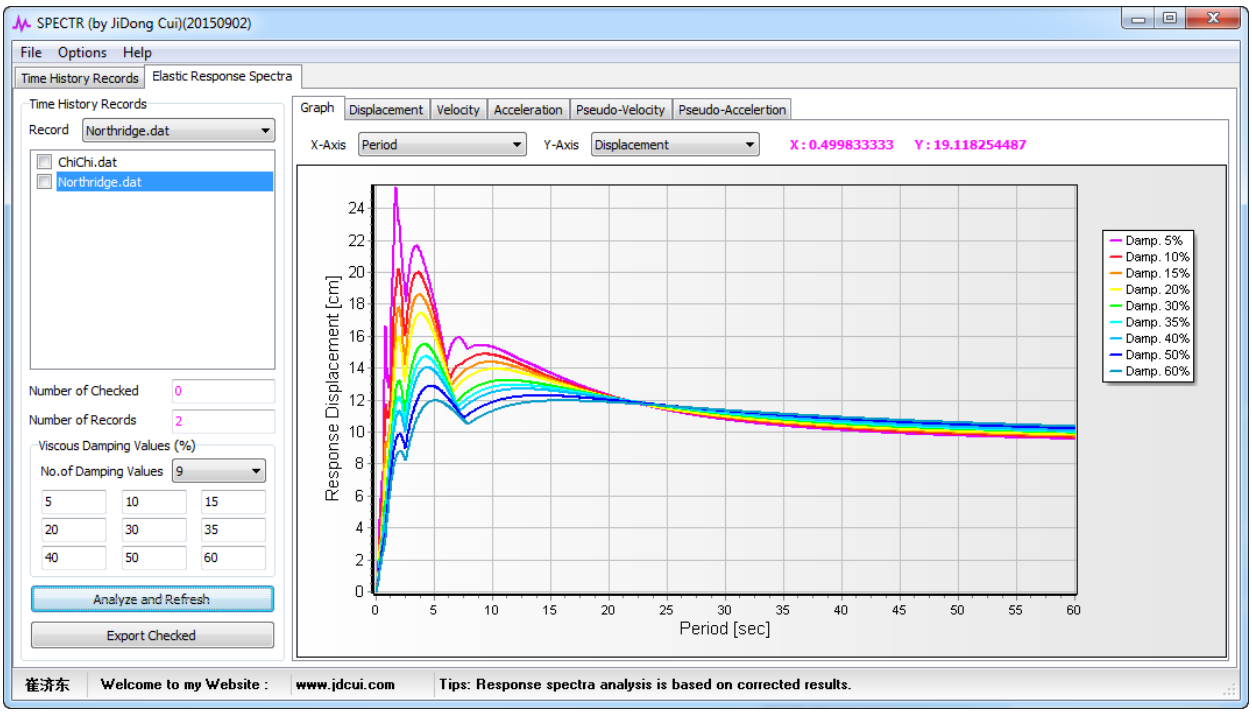


图 3-4 Northridge 地震相对位移反应谱（Tmax = 60s）

从上述图可看出：

（1）不同地震波的相对位移谱不相同。但是相对位移反应谱都随着周期的增大整体成上升趋势，且不是一直增大，当周期增大到一定的范围后，位移谱值趋向于地震动的峰值位移值。位移谱呈现一个先“整体上升”后“整体下降”并趋向于地震动位移值的趋势。

（2）不同阻尼比的位移谱曲线可能出现明显的交汇现象。如图（图 3-4）所示北岭地震的位移反应谱曲线在 22 秒附近出现交汇。22 秒前，小阻尼比位移谱曲线在上，大阻尼比位移谱曲线在下面，22 秒之后则相反。

（3）位移谱随着周期整体增大的过程中，存在一些周期点的位移谱值突然出现减少的现象，形成谱曲线的波峰和波谷，不同地震波均有类似的现象。该现象表明，地震波在这些特殊的周期点上的能量相对于其它周期小。当阻尼比增大时，反应谱变得平滑，谱曲线的波峰和波谷也减少了。

（4）在位移谱的“整体上升”段，随着阻尼比的增大，位移谱值减少，而且可以观察到，随着阻尼比的增大，这种减少趋势变得缓慢，并不是无限的减少。如图（3-2）所示，以周期 12s 附近的点为例，阻尼比从 5%增到 10%引起的位移谱值的下降比阻尼比从 10%增到 15%引起的下降大。

4 速度反应谱（Velocity Response Spectra）

利用 SPECTR 分别计算两个地震记录的相对速度反应谱，每个地震记录分别选取 9 个阻尼比：5%、10%、15%、20%、30%、35%、40%、50%、60%，反应谱的最大周期为 6 秒和 60 秒。

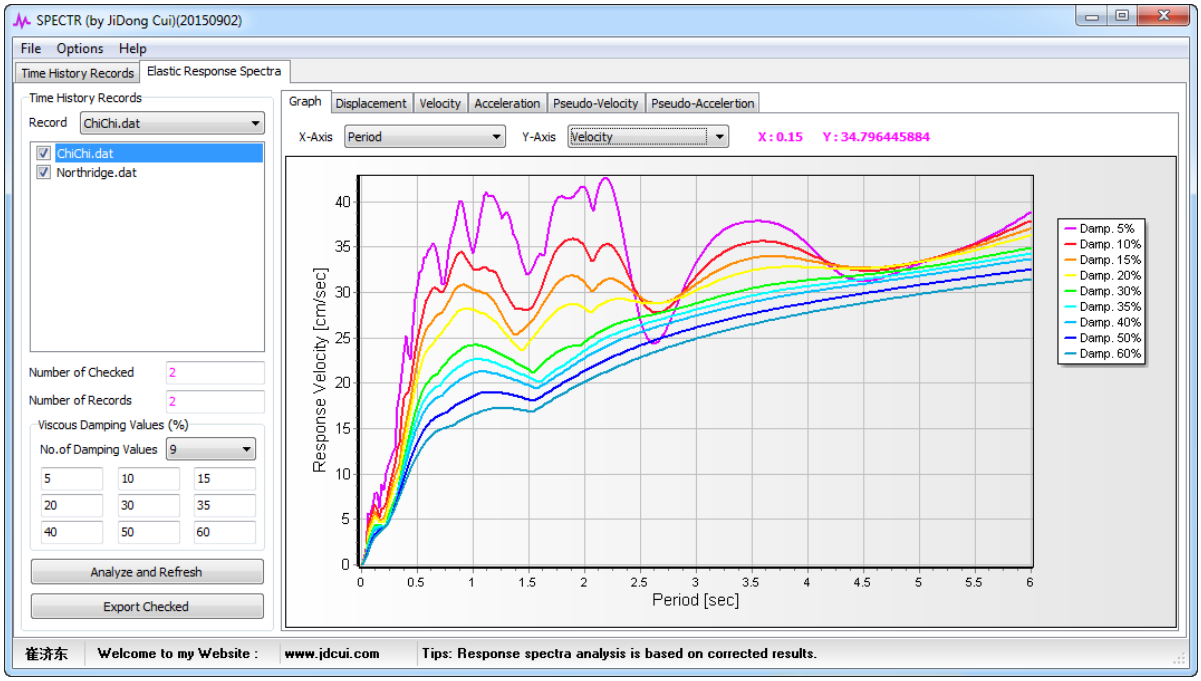


图 4-1 ChiChi 地震相对速度反应谱（Tmax = 6s）

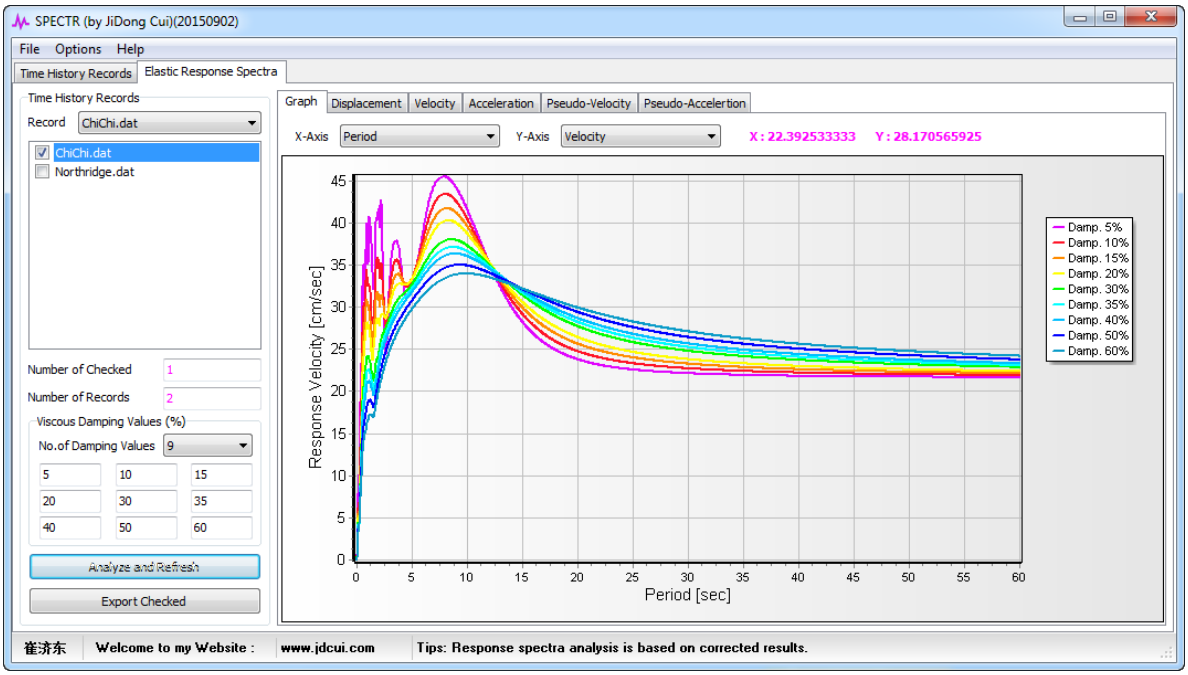


图 4-2 ChiChi 地震相对速度反应谱（Tmax = 60s）

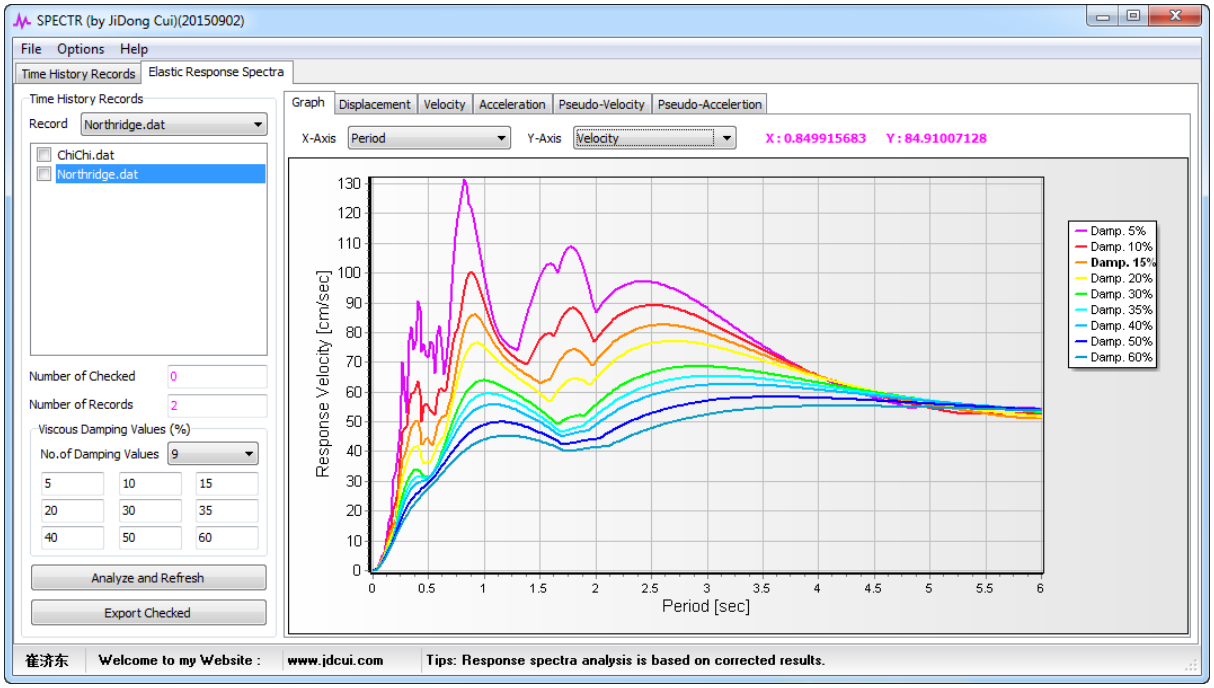


图 4-3 Northridge 地震相对速度反应谱（Tmax = 6s）

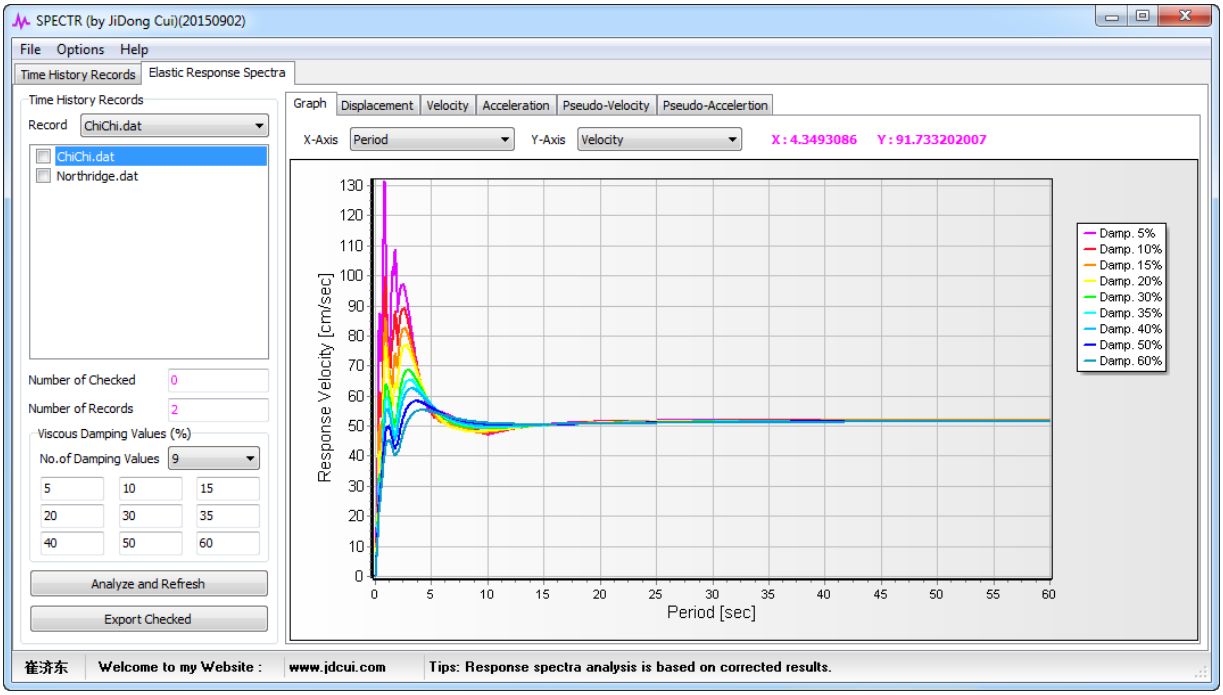


图 4-4 Northridge 地震相对速度反应谱（Tmax = 60s）

从上述图可看出：

（1）不同地震波的相对速度谱不相同。相对速度反应谱都随着周期的增大整体成上升趋势，且不是一直增大，当周期增大到一定的范围后，速度谱值趋向于地震动的峰值速度。速度谱呈现一个先“整体上升”后“整体下降”并趋向于地震动位移值的趋势。整体上看，与

位移谱类似。

（2）与位移谱相似，不同阻尼比之间的速度谱曲线可能出现明显的交汇现象。如图（4-2）所示，台湾集集地震在周期为 12s 附近速度谱曲线出现交汇。北岭地震的速度反应谱曲线则在 5 附近出现交汇，如图（4-4）。

（3）与位移谱相似，速度谱随着周期整体增大的过程中，存在一些周期点的速度谱值突然出现下降的现象，形成谱曲线的波峰和波谷，不同地震波均有类似的现象。当阻尼比增大时，这种现象减少，反应谱变得平滑。

（4）与位移谱相似，在速度谱的“整体上升”段，随着阻尼比的增大，速度谱值减少，而且可以观察到，随着阻尼比的增大，这种减少趋势变得缓慢，并不是无限的减少。

5 加速度反应谱（Accelation Response Spectra）

利用 SPECTR 分别计算两个地震记录的绝对加速度反应谱，每个地震记录分别选取 9 个阻尼比：5%、10%、15%、20%、30%、35%、40%、50%、60%，反应谱的最大周期取 6 秒和 60 秒。

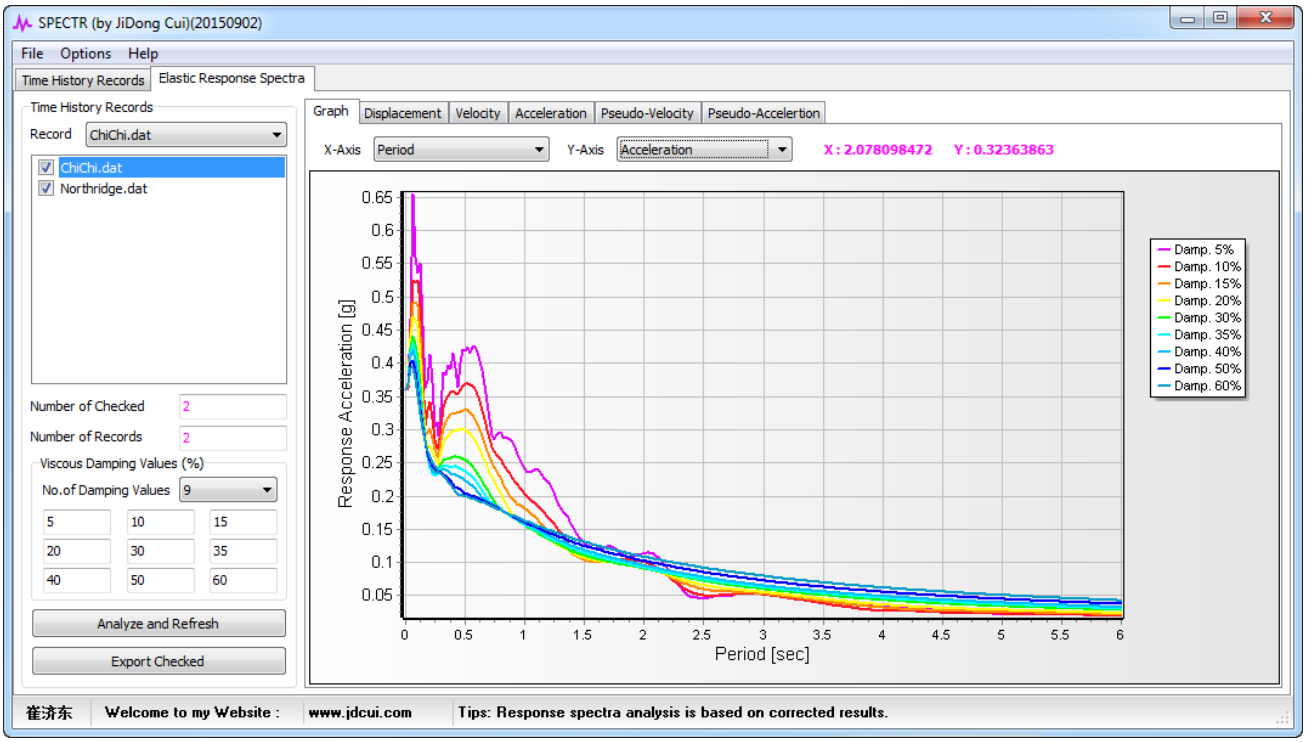


图 5-1 ChiChi 地震绝对加速度反应谱（Tmax = 6s）

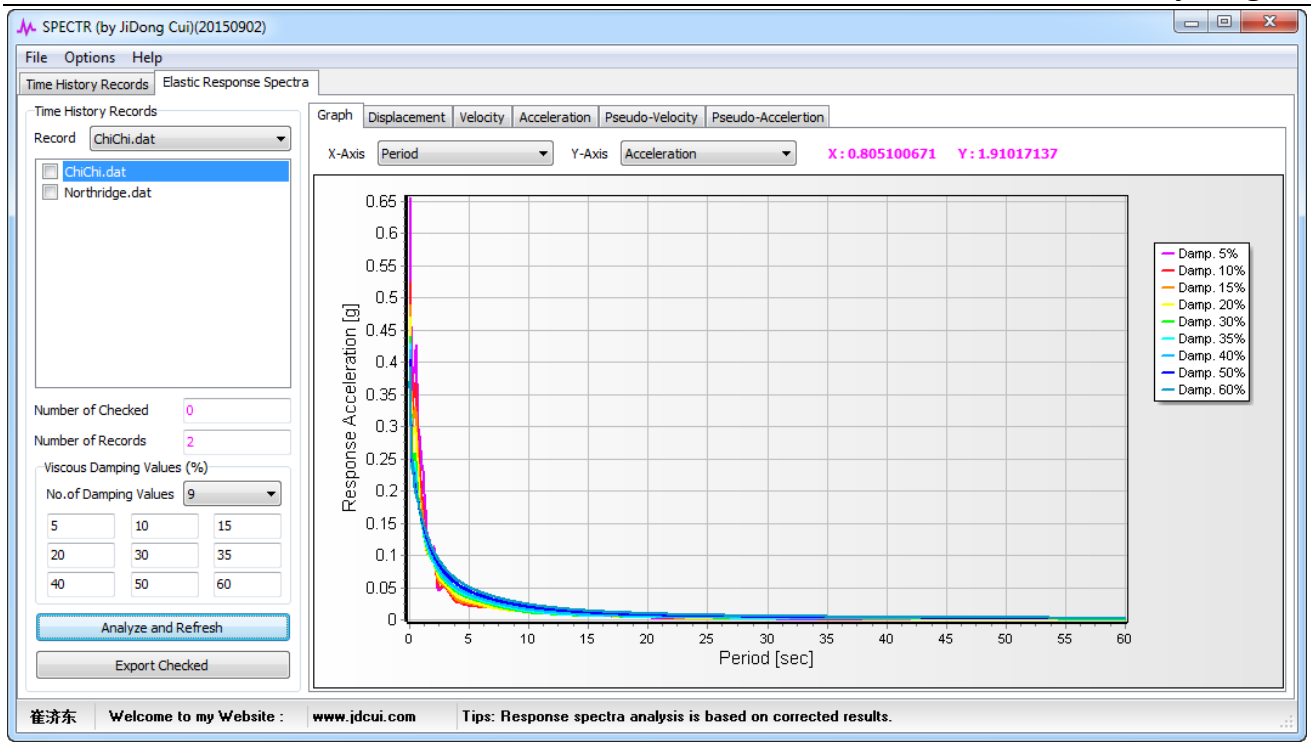


图 5-2 ChiChi 地震绝对加速度反应谱（Tmax = 60s）

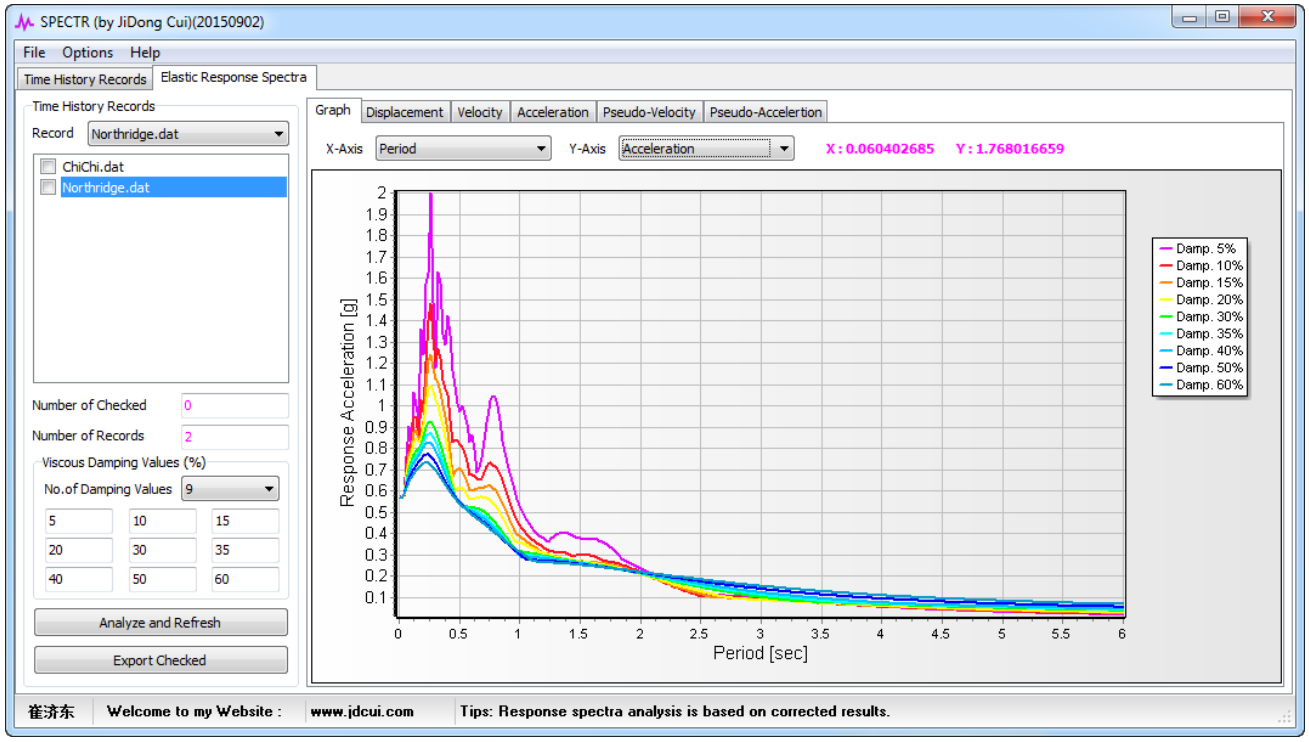


图 5-3 Northridge 地震绝对加速度反应谱（Tmax = 6s）

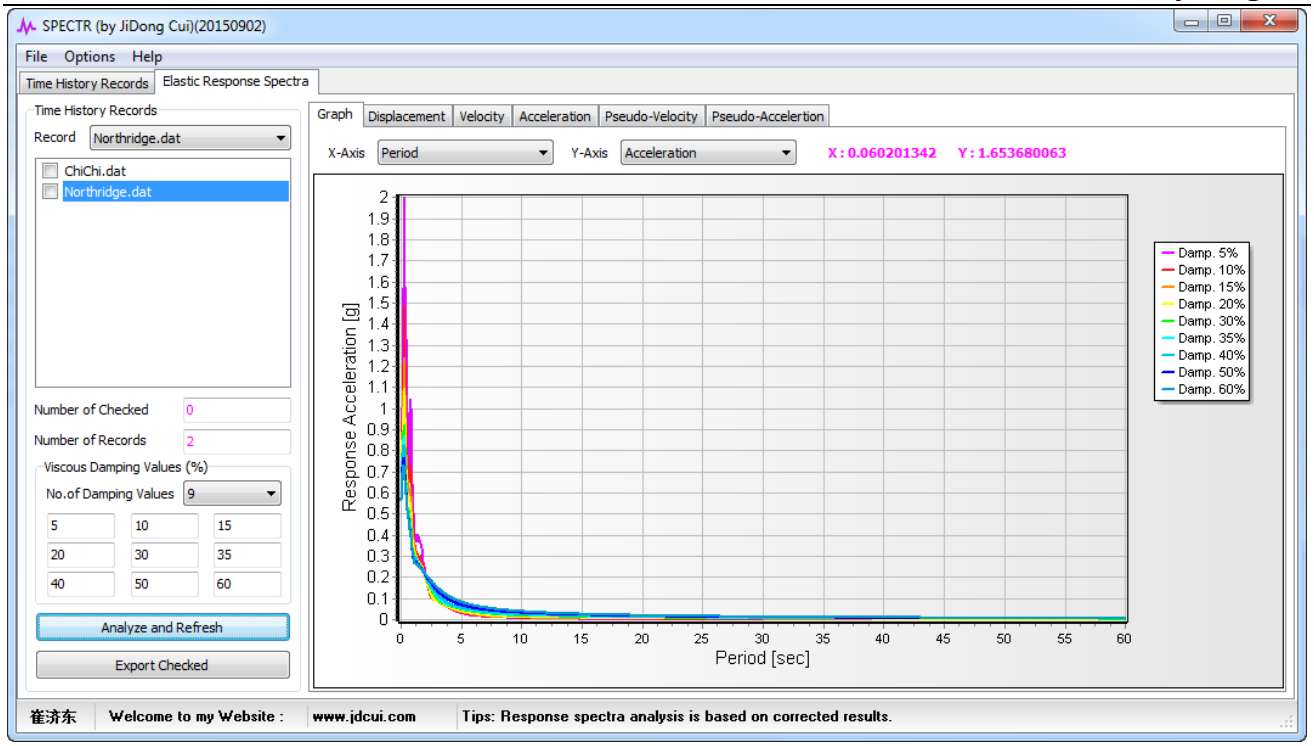


图 5-4 Northridge 地震绝对加速度反应谱（Tmax = 60s）

从上述图可看出：

（1）不同地震波的绝对加速度谱不相同，绝对加速度反应谱都随着周期的增大先出现一个短范围的增大过程，然后逐渐减少。当结构周期趋于无穷大时，绝对加速度谱值趋于 0。

（2）不同阻尼比之间的绝对加速度谱曲线可能出现明显的交汇现象。

（3）绝对加速度谱随着周期整体增大的过程中，存在一些周期点的谱值突然出现下降的现象，形成谱曲线的波峰和波谷，不同地震波均有类似的现象。当阻尼比增大时，这种现象减少，反应谱变得平滑。

（4）在加速度谱曲线交汇前，随着阻尼比的增大，加速度谱值减少，而且可以观察到，随着阻尼比的增大，这种减少趋势变得缓慢。

6 伪速度反应谱（Pseudo-Velocity Response Spectra）

考虑不同的阻尼比：5%、10%、15%、20%、30%、35%、40%、50%、60%，绘制伪速度反应谱曲线。

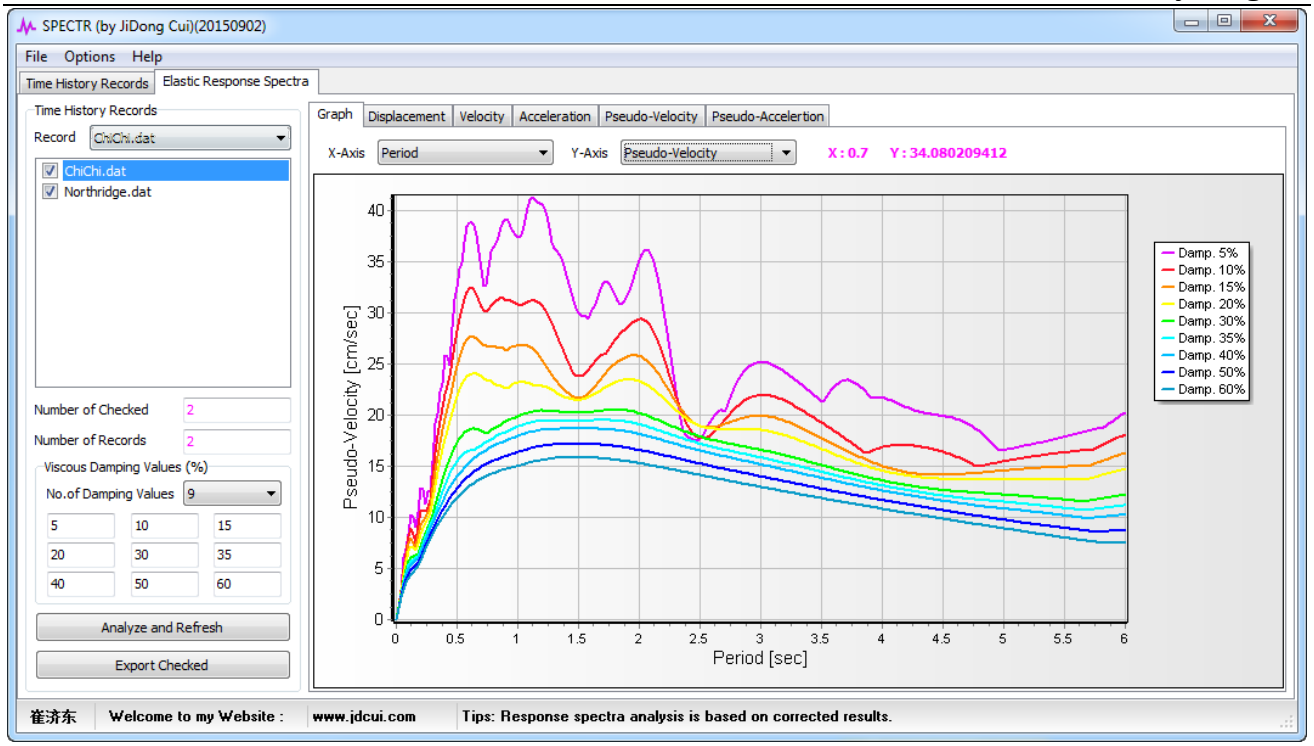


图 6-1 ChiChi 伪速度反应谱（Tmax = 6s）

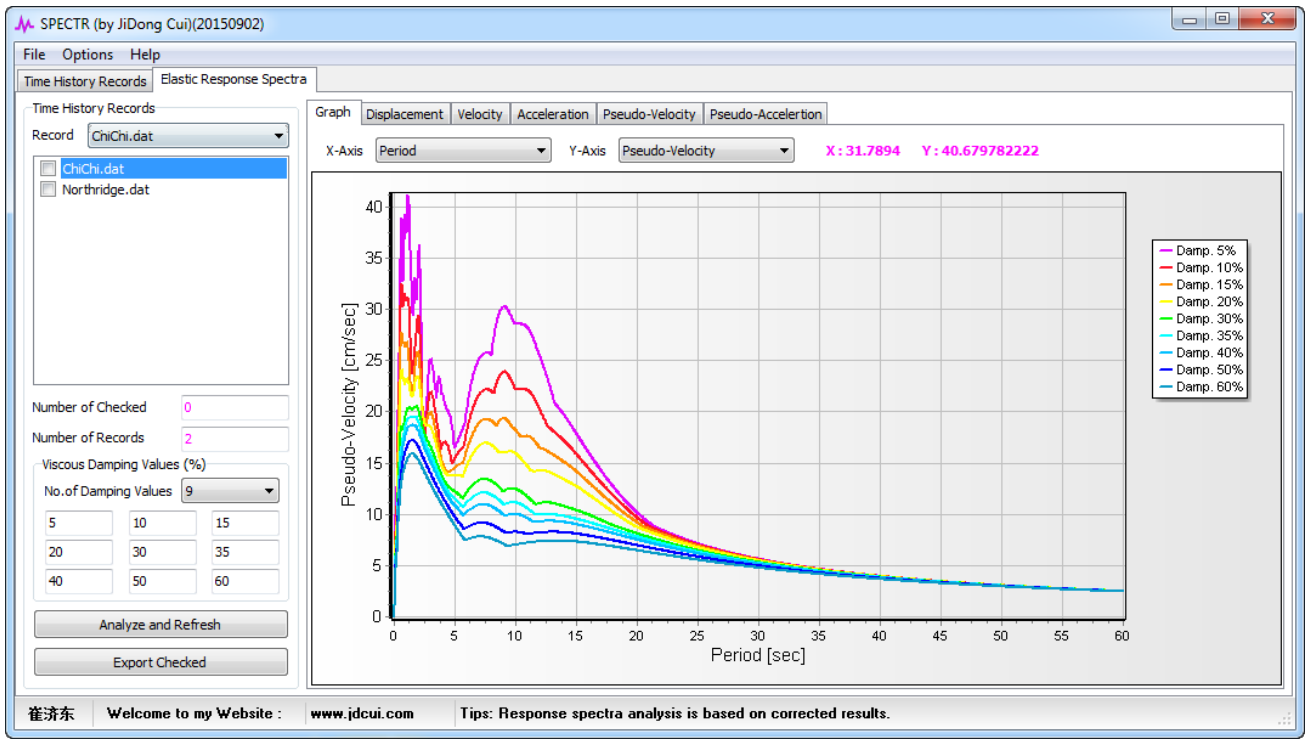


图 6-2 ChiChi 伪速度反应谱（Tmax = 60s）

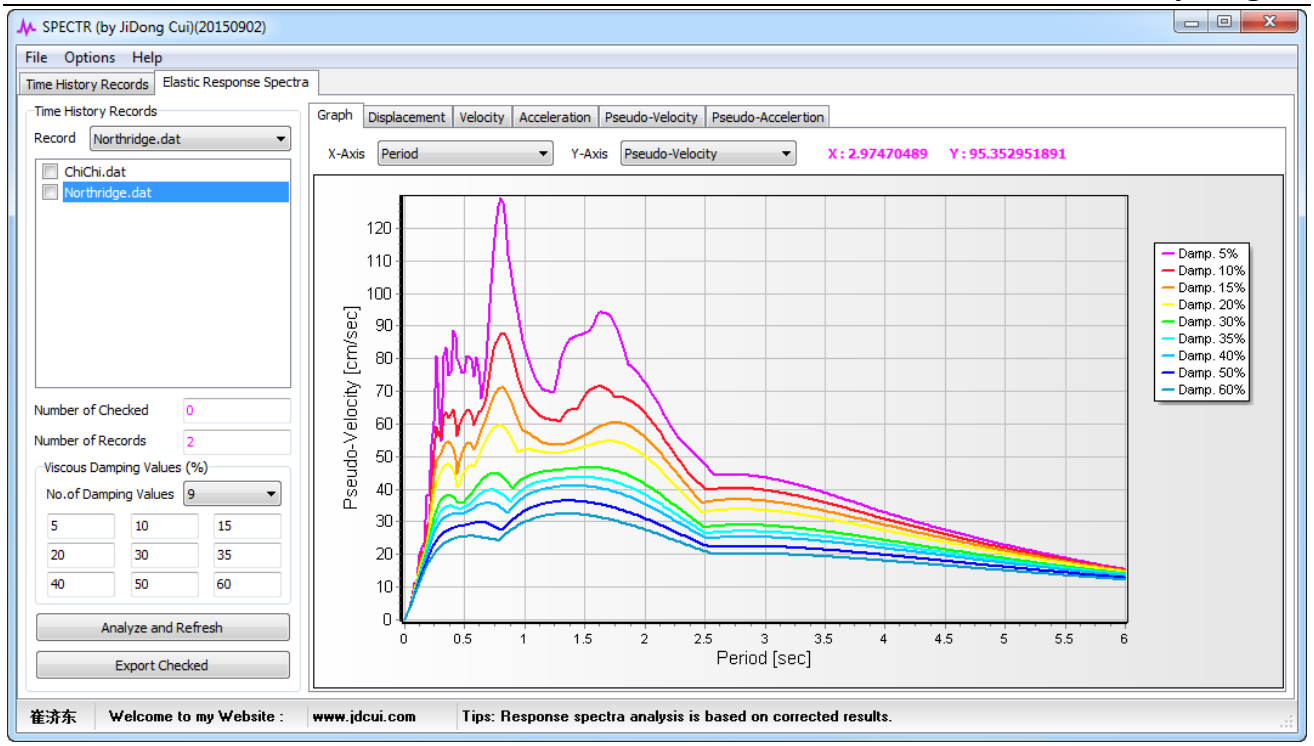


图 6-3 Northridge 伪速度反应谱（Tmax = 6s）

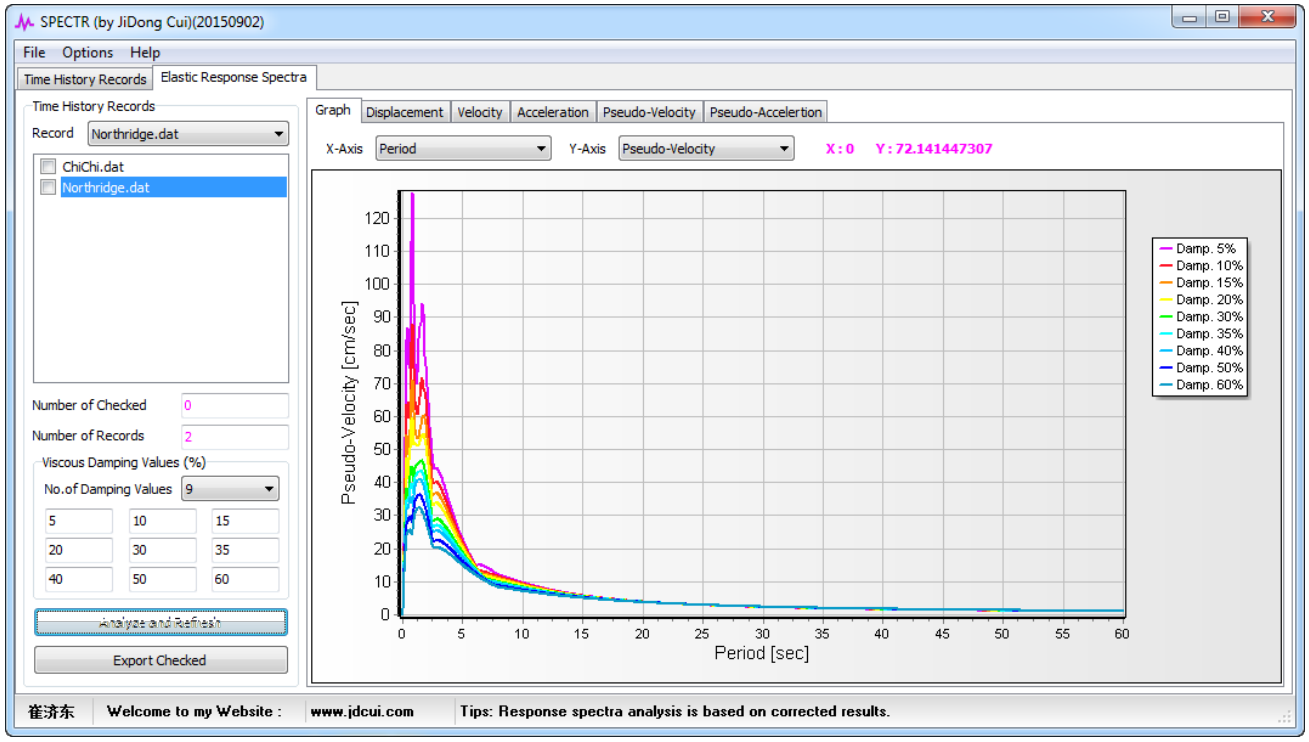
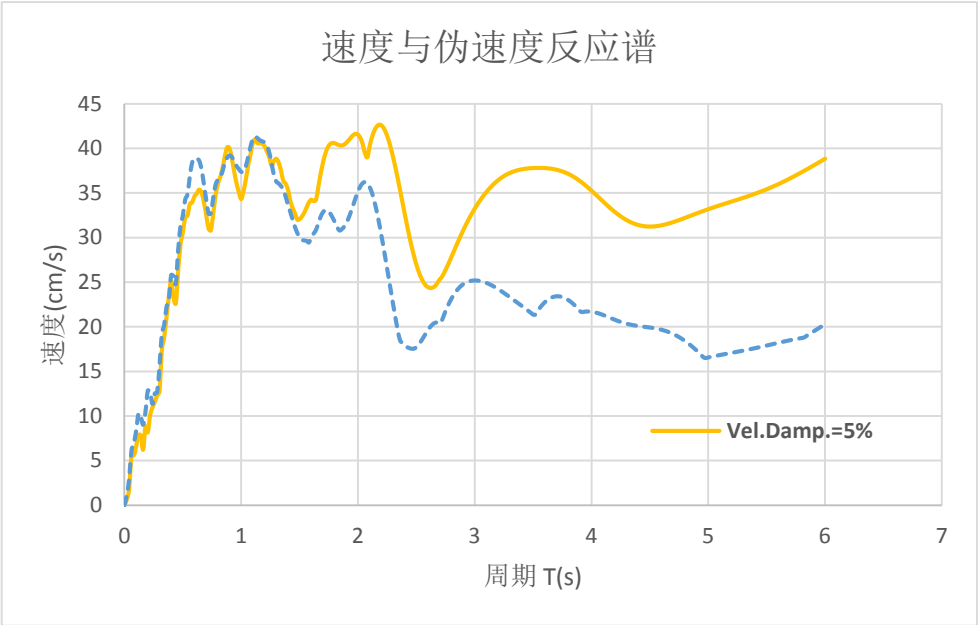
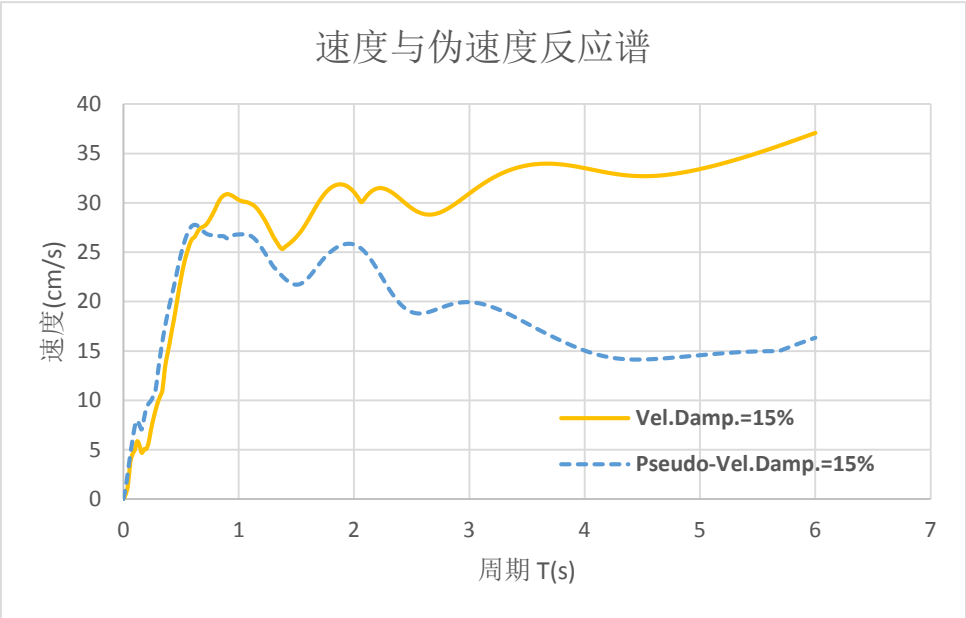


图 6-4 Northridge 伪速度反应谱（Tmax = 60s）

伪速度反应谱的特性与相对速度反应谱的特性存在类似，为对比伪速度反应谱和相对速度反应谱的关系，将阻尼比 5%和 15%的伪速度反应谱和相对速度反应谱作图。

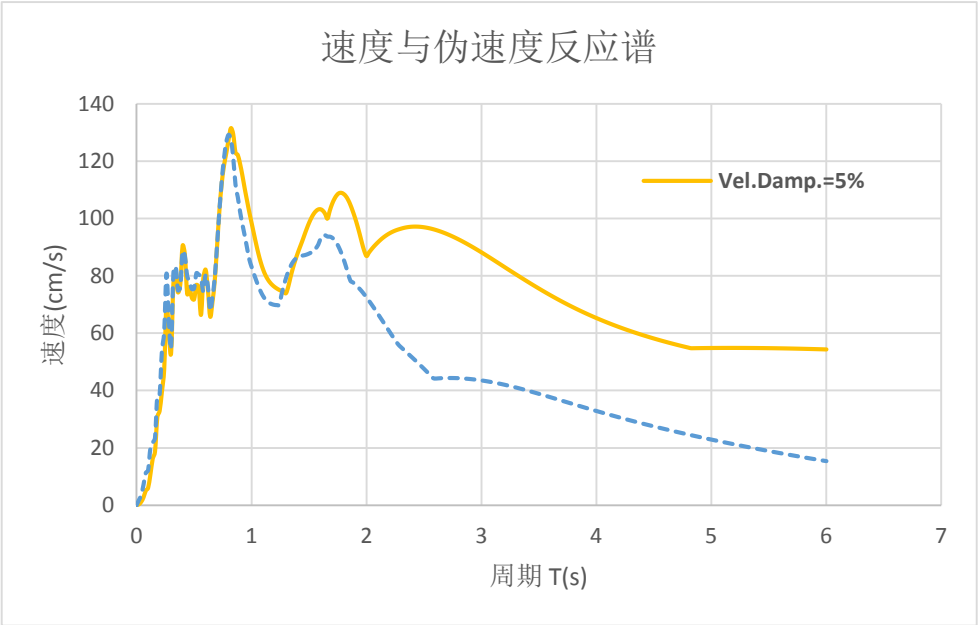


(a) 阻尼比 5%

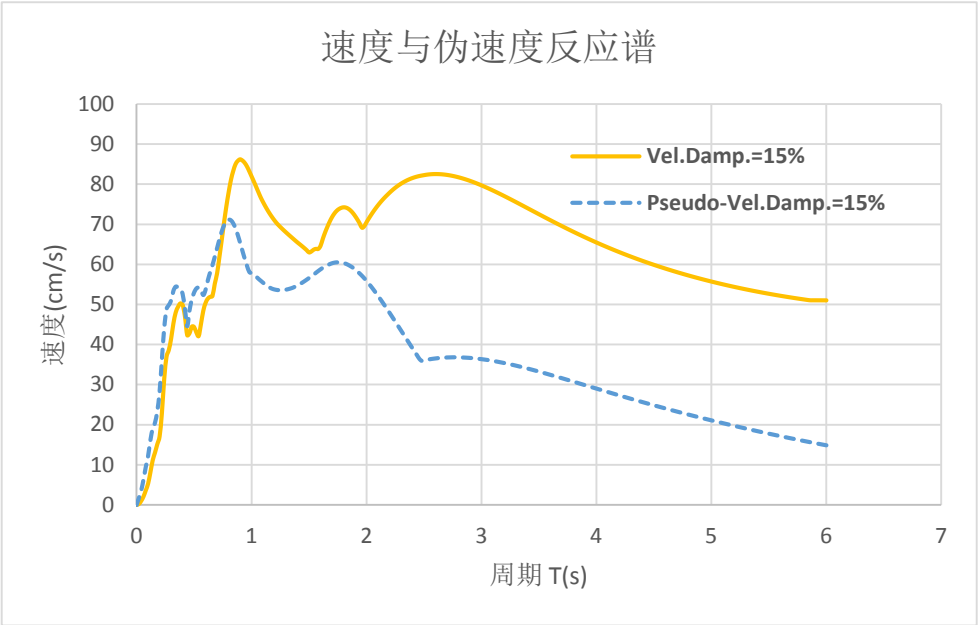


(b) 阻尼比 15%

图 6-5 ChiChi 速度反应谱与伪速度反应谱对比



(a) 阻尼比 15%



(b) 阻尼比 15%

图 6-6 Northridge 速度反应谱与伪速度反应谱对比

从上述图可看出：

（1）相对速度反应谱和拟速度反应谱在短周期段比较吻合，随着周期的增大，相对速度反应谱和拟速度反应谱的差别增大。

（2）阻尼比越大，相对速度反应谱和拟速度反应谱的差别越大。

7 伪加速度反应谱（Pseudo-Acceleration Response Spectra）

考虑不同的阻尼比：5%、10%、15%、20%、30%、35%、40%、50%、60%，绘制伪加速度反应谱曲线。

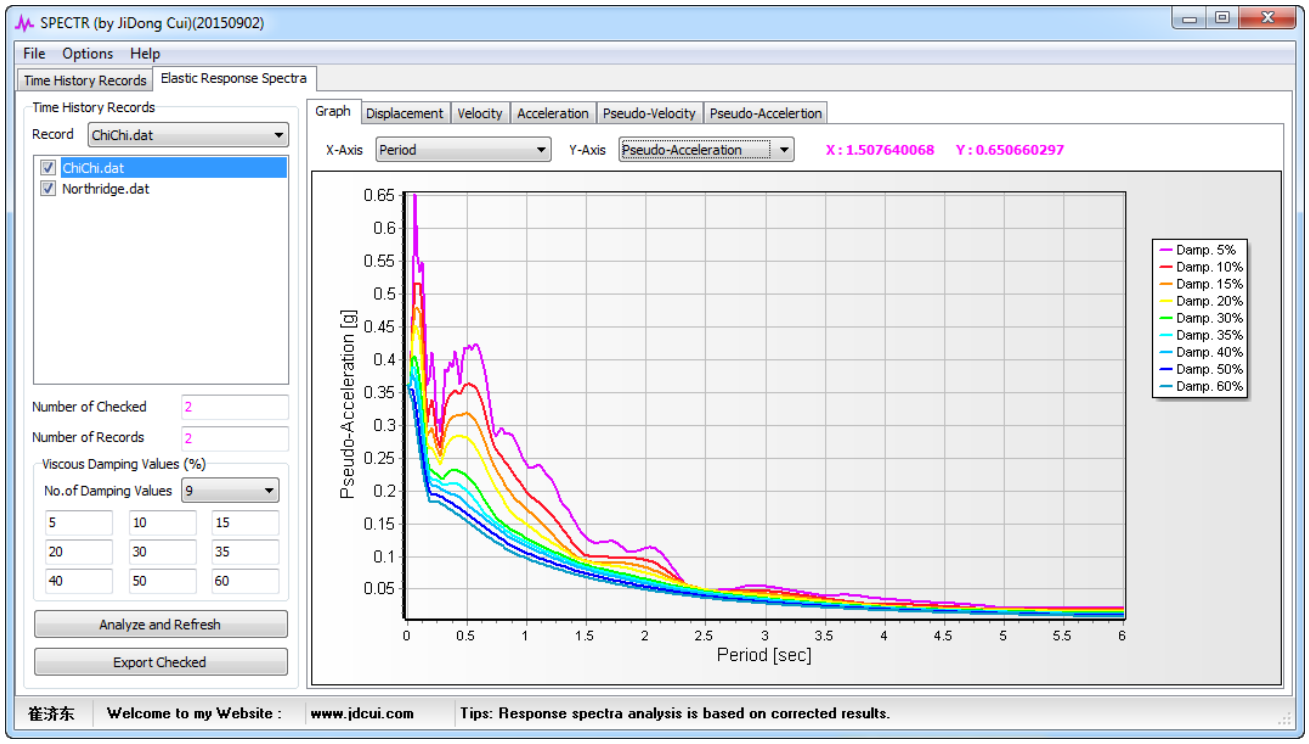


图 7-1 ChiChi 伪加速度反应谱（Tmax = 6s）

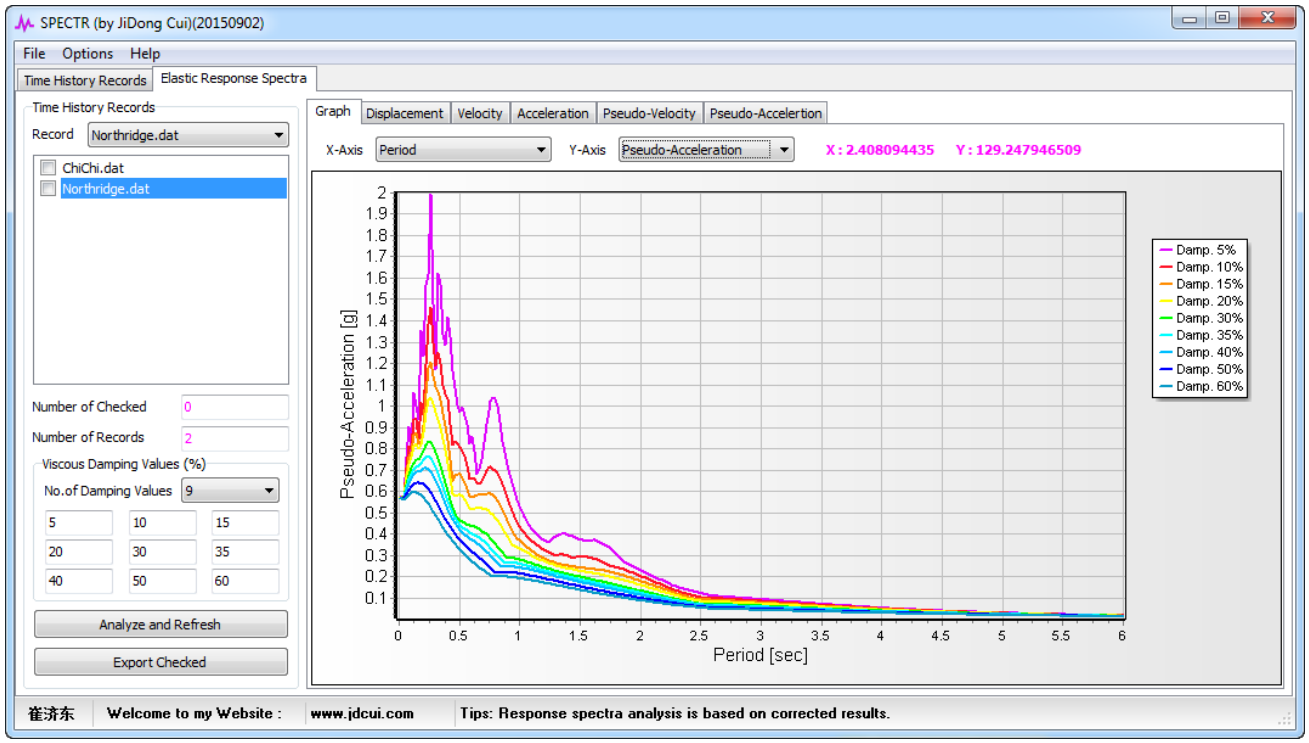
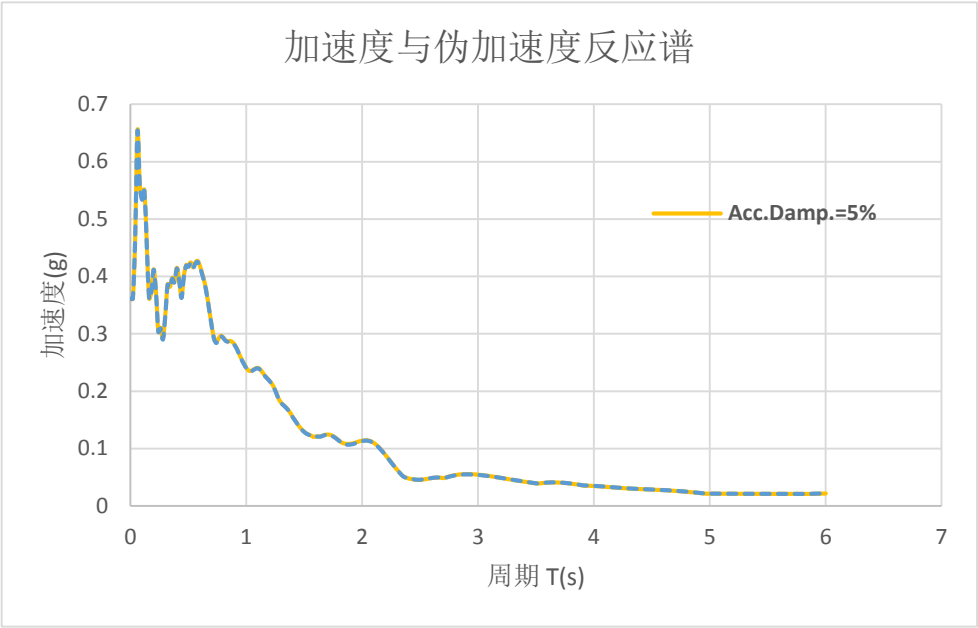
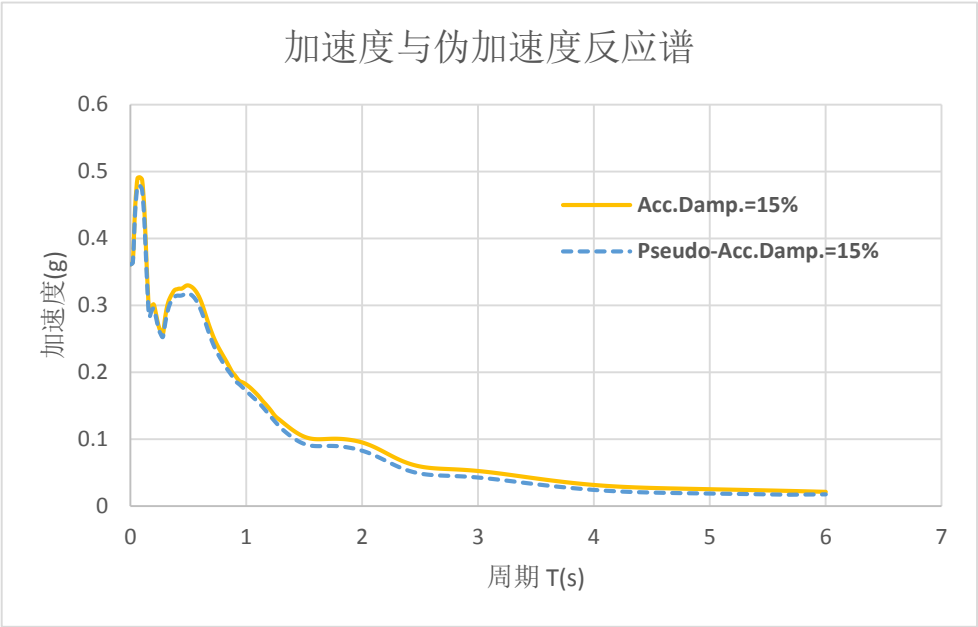


图 7-2 Northridge 伪加速度反应谱（Tmax = 60s）

伪加速度的特性与绝对加速度反应谱的特性存在类似，为对比伪加速度反应谱和绝对加速度反应谱的关系，将阻尼比为 5%、15%的伪加速度反应谱和绝对加速度反应谱作图。

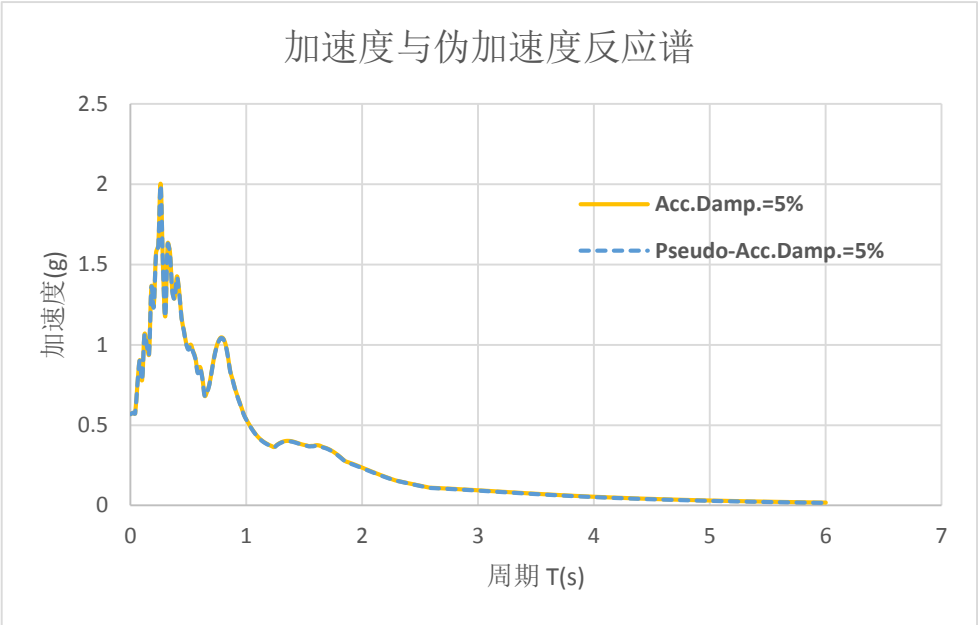


(a) 阻尼比 5%

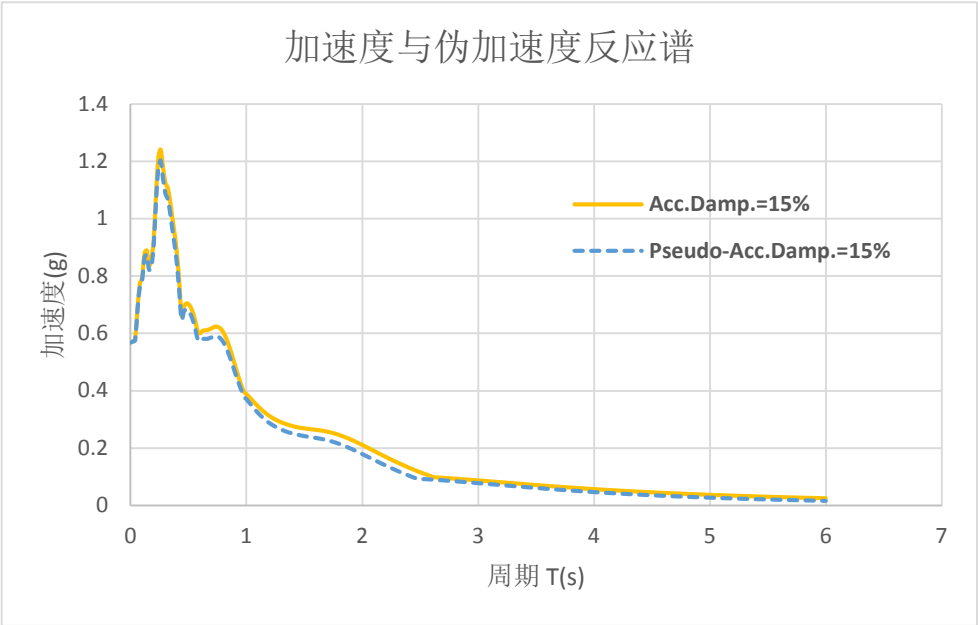


(b) 阻尼比 15%

图 7-3 ChiChi 加速度反应谱与伪加速度反应谱对比



(a) 阻尼比 5%



(b) 阻尼比 15%

图 7-4 Northridge 加速度反应谱与伪加速度反应谱对比

从上述图可看出：

（1）绝对加速度反应谱和拟加速度反应谱在长周期段的吻合比短周期段强。小阻尼比的情况下，绝对加速度反应谱和拟加速度反应谱之间的差异可忽略不计。

（2）随着阻尼比的增大，绝对加速度反应谱和拟加速度反应谱的差别变大。

（3）与相对速度反应谱和拟速度反应谱的关系相比，在同样阻尼比的情况下，绝对加速度反应谱和拟加速度反应谱之间的差异远小于相对速度反应谱和拟速度反应谱之间的差异。

8 小结（Conclusions）

利用软件 SPECTR 两条地震动记录的反应谱进行计算，总结了地震反应谱的基本特性：

（1）随着周期的增大，相对位移反应谱、相对速度反应谱曲线先整体呈现一个上升趋势，后逐步下降并趋于稳定，绝对加速度反应谱曲线则先经历一个短暂的上升，然后迅速下降。当周期趋于无限大时，相对位移反应谱值趋向于地震动的峰值位移，绝对加速度反应谱值趋于 0。

（2）不同阻尼比之间的相对位移反应谱、相对速度反应谱、绝对加速度反应谱曲线均可能存在交汇点。在交汇点之前，阻尼比越小，反应谱值越大。

（3）相对位移反应谱、相对速度反应谱、绝对加速度反应谱曲线为锯齿形，在某些特殊的周期点存在波峰或波谷。

（4）相对速度反应谱和拟速度反应谱在短周期段吻合较好，随着周期的增大，相对速度反应谱和拟速度反应谱的差别增大。阻尼比越大，相对速度反应谱和拟速度反应谱的差别越大。

（5）绝对加速度反应谱和拟加速度反应谱在长周期段的吻合比短周期段强。小阻尼比的情况下，绝对加速度反应谱和拟加速度反应谱之间的差异可忽略不计。随着阻尼比的增大，绝对加速度反应谱和拟加速度反应谱的差别变大。

（6）与相对速度反应谱和拟速度反应谱的关系相比，在同样阻尼比的情况下，绝对加速度反应谱和拟加速度反应谱之间的差异远小于相对速度反应谱和拟速度反应谱之间的差异。

参考文献（References）

[1] Chopra AK. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. Prentice-Hall: New Jersey, 2012.

[2] Clough RW, Penzien J. Dynamics of Structures. McGraw-Hill: New York, 1993

作者：崔济东（1988- ），男，结构工程专业，博士研究生。
网站：www.jdcui.com Email:jidong_cui@163.com。

备注：

如有错误或遗漏，欢迎大家批评指正。

我的邮箱：**jidong_cui@163.com**

我的博客：**www.jdcui.com**