

文章编号:1671-6833(2012)04-0018-05

基于移动平均分解的近断层地震动弹性反应谱研究

赵志航, 车伟, 冯群

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要:抗震设计规范中的设计反应谱是通过大量的中、远场地震记录统计回归分析的结果,而近场地震记录因观测资料缺乏,导致对近场地震动的频谱特性考虑不够.近断层地震动有一些显著区别于远场地震动的特点,其中之一就是近断层地震动包含高频部分和低频脉冲部分.采用一种移动平均滤波器将近断层地震动分解为低频脉冲部分和高频部分,并采用这个方法分解了一些近断层地震动记录,同时研究了近断层地震动弹性反应谱的特性.结果表明,对于单脉冲记录,采用脉冲部分基本可以代表采用原始记录对结构的响应;对于多脉冲记录,因存在一个或多个次高峰,其脉冲部分不能有效代表原始记录对结构的响应,若仅考虑脉冲部分而忽略高频部分将对短周期结构相当不利.

关键词:近断层地震动;低频脉冲;高频部分;移动平均滤波器;弹性反应谱

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2012.04.005

0 引言

近断层地震动大多是短持时脉冲运动,当断层以接近剪切波的速度破裂时,在破裂的前方形成一个大的速度脉冲,称为前方向性效应.近断层地震动短持时脉冲运动以前方向性效应为主,这种脉冲运动方向主要垂直于断层方向^[1].此外,近断层地震动记录多为高频波,因为高频波在短距离传输中不会衰减,而在远距离传输中会衰减^[2].滑移是在地层错动方向上地震构造变形产生的永久地面位移,它是近断层地震动的另一个重要特点.因此,对于走滑断层地震,它与方向性脉冲并不紧密耦合,对于倾滑断层地震,滑移脉冲与方向性脉冲一致,所以会产生更强的低频地震动.脉冲效应已经引起人们的广泛关注,在近断层区域的结构抗震设计方面成为一个重要内容.为了量化脉冲效应、制定适当的设计指导准则,人们已经对脉冲效应下结构的弹性和非弹性抗震分析与评价进行了大量研究.一些学者提出了等效脉冲模型来模拟脉冲型地震动.Makris^[3]将近断层地震动长周期脉冲分为三类,并分别用一个三角函数表示.Agrawal和He^[4]利用衰减正弦波模拟长周期速度脉冲.Baker^[5]用小波分析来分解方向

性速度脉冲,把分离出的脉冲振幅与原始纪录振幅的比值作为近断层地震动分类的标准.

所以,目前有许多模型能够模拟近断层地震动记录中的长周期速度脉冲,这些模型被广泛用于研究近断层结构响应,但是,它们在模拟近断层地震动时忽略了震动中的高频部分.虽然在一般情况下与方向性效应及滑冲效应相关的强脉冲决定着结构的响应,但是,高频部分的作用也不能忽视,尤其对于短周期结构.

因此,笔者采用了一个由短时傅里叶变换得到的有适当截止频率的移动平均滤波器^[5],将近断层地震动分为具有不同频率的两部分,即低频脉冲部分和高频部分.通过研究低频脉冲部分和高频部分分别作用下结构的响应,探究近断层加速度地震中结构的响应.

1 记录分解方法

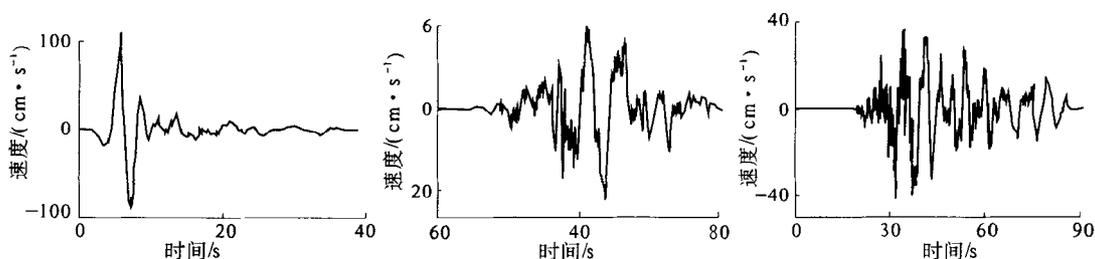
移动平均滤波器把近断层地震动分为低频脉冲部分和高频部分.第一部分是地震原始记录中提取出的低频平滑部分;另一部分是原始记录剩余的高频部分.移动平均滤波器过滤后会得到许多连续的长周期脉冲,而剩余的高频部分不包含

收稿日期:2012-01-05;修订日期:2012-02-20

基金项目:中央高校基本科研业务费专项基金资助(2011CX037)

作者简介:赵志航(1990-),男,河南周口人,本科,研究方向为工程地震与结构抗震,E-mail:zhaozhihang0422@163.com.

长周期脉冲.图 1 中列举了几个典型的单脉冲和多脉冲地震动速度时程.



(a)北岭地震 El Centro Array #6 波(1979) (b)集集地震 ILA001 波(1999) (c)集集地震 CHY026 波(1999)

图 1 近断层脉冲型地震动时程曲线

Fig.1 Examples of near-fault ground motion velocity traces

移动平均滤波器是一种采用平均窗函数的形式对信号波形进行低通过滤的滤波器^[5],该平均窗函数的结构原理为:用某点相邻一定范围内点的平均值取代该点的方法平滑数据.假设 $x[n]$ 是一个有 N 个样本的输入信号,在移动平均滤波器中输入一个实数 m (m 是一个奇数),输出信号 $y[n]$ 由下面的方法得到:

$$y[n] = \begin{cases} x[n], & n < \frac{m+1}{2} \text{ 或 } n > N - \frac{m-1}{2}; \\ \frac{1}{m} \sum_{k=-\frac{(m-1)}{2}}^{\frac{(m-1)}{2}} x[n+k_2], & \frac{m+1}{2} \leq n \leq N - \frac{m-1}{2}. \end{cases} \quad (1)$$

该滤波器的频率响应为

$$H(f) = \frac{1}{m} \left| \frac{\sin(m\pi f)}{\sin(\pi f)} \right|. \quad (2)$$

图 2 为 m 分别取 7、13、19 时的滤波器的频率响应.从图中可以看到,该滤波器具有从通带到阻带没有急剧转折的过渡的特点.滤波器中 $H(f) = 1/m$ 时的有效截止频率为

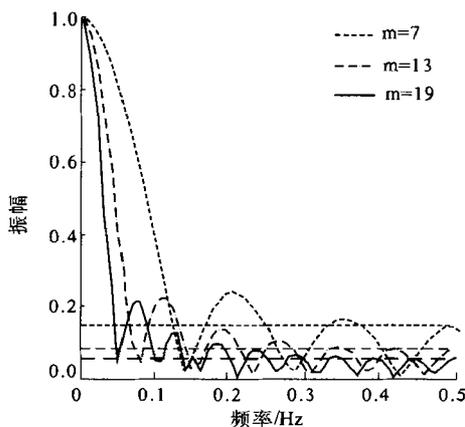


图 2 移动平均滤波器的频率响应

Fig.2 Frequency response of Moving Average filter

$$f_c = \frac{1}{dt} \frac{1}{m-1}, \quad (3)$$

式中: dt 为输入信号的时间间隔.从频率响应与有限周期信号的傅里叶变换的相似性可以说明:移动平均滤波器是一种从包含不同周期的近断层地震动记录中提取长周期脉冲的有效工具.移动平均滤波器的关键是确定适当的范围进行平滑,这决定了滤波器的截止频率.移动平均滤波器的 m 由下式得到

$$m = \alpha \frac{T_p}{dt}, \quad (4)$$

式中: T_p 是速度时程中主脉冲的周期; α 是一个经验系数,取 0.33.式(4)中为了求得 m ,需要知道主脉冲周期 T_p .为此,需要用到短时傅里叶变换(STFT).反过来,由于 STFT 的结果对时间窗口的长短非常敏感,这里需要运用迭代法.首先,把时间窗口长度设为一个很小的数,比如 0.5 s,最大振幅对应的目标周期由短时傅里叶变换(STFT)确定.逐渐增大时间窗口长度,同时要满足两个条件:① 目标周期比时间窗口长度小;② 随着时间窗口的增大,目标周期也要增大.满足上述两个条件的最大时间窗口对应的周期就是目标周期.得到了目标周期, m 就由式(4)计算得到.最终,用移动平均滤波器分解原始地震动记录得到低频脉冲部分和高频部分.

除了利用短时傅里叶变换(STFT)确定主要脉冲周期,也可以利用震级与脉冲周期的统计经验公式近似计算脉冲周期.结果表明,短时傅里叶变换(STFT)与这些方程吻合得很好.笔者采用文献[6]的强震记录统计经验公式确定脉冲周期

$$\log(T_p) = 1.00M_w - 5.65. \quad (5)$$

2 分解结果

移动平均滤波器能分解地震动记录的低频脉

冲部分,不受其振幅大小和在时程中的位置的影响.因此,该方法不仅适用于分解单脉冲地震动记录,而且适用于分解多脉冲地震动记录.图3列出

了北岭地震单脉冲和集集地震多脉冲地震动记录及其分解结果.从图3(a),(b)可以看出,北岭地

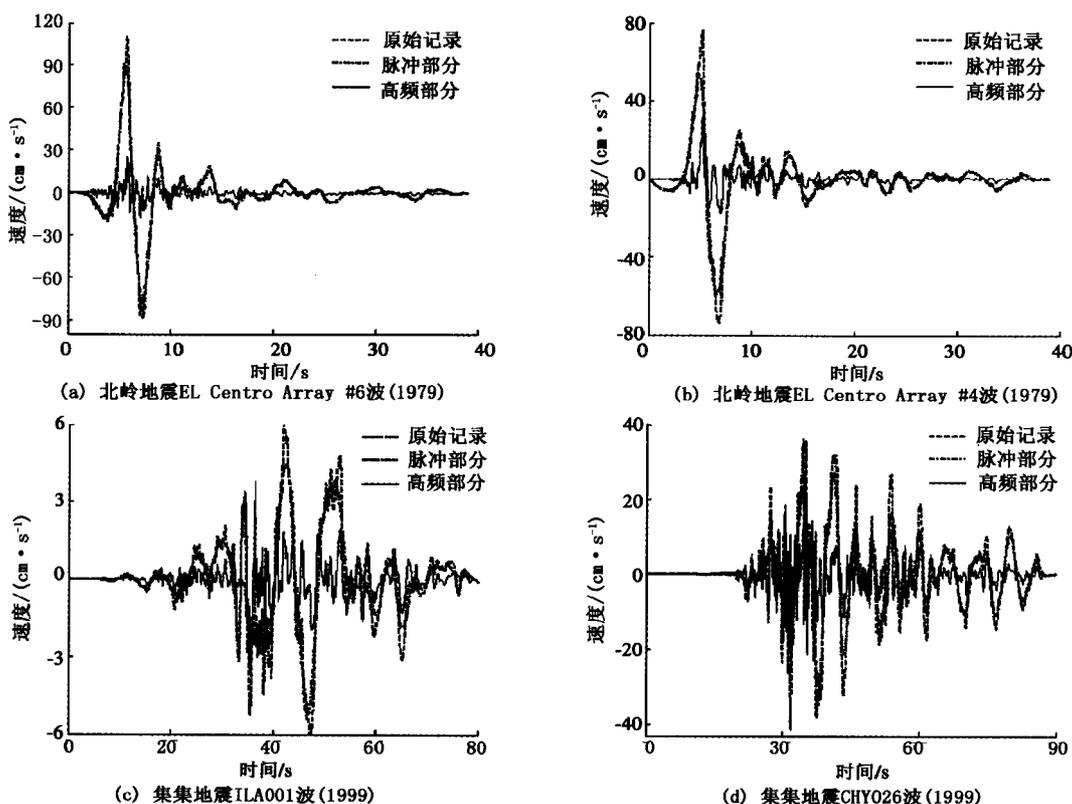


图3 近断层单脉冲、多脉冲地震动记录及过滤结果

Fig. 3 Examples of near-fault earthquake motion records with one main velocity pulse and multiple velocity pulses, and their extracted results

震单脉冲地震动记录过滤后分别得到一个平滑的长周期、峰值较大的脉冲,剩余的部分是比较尖锐的周期较短的高频部分,其中不包含脉冲部分.从图3(c),(d)可以看到,移动平均滤波器可以有效地从集集地震多脉冲地震动记录中过滤得到光滑的长周期、峰值较大的脉冲部分,剩余的是比较尖锐的短周期高频部分.

3 结构响应

利用移动平均滤波器过滤近断层地震动原始记录得到低频脉冲部分和高频部分,北岭地震单脉冲和集集地震多脉冲的原始记录、脉冲部分和高频部分的速度和加速度弹性反应谱分别见图4和图5.

从图4(a),(b)可以看出,北岭地震单脉冲记录脉冲部分和高频部分的曲线相交于一点.在交点左侧,高频部分形成一个小波峰,但不是十分突出;在交点右侧,脉冲部分形成一个大波

峰,可以很好地拟合原始记录反应谱曲线.图4(c),(d)集集地震多脉冲记录脉冲部分和高频部分也相交于一点.在交点左侧,高频部分形成一个波峰,能够很好的拟合原始记录产生的次波峰;在交点右侧,脉冲部分形成一个大波峰,能够很好地拟合原始记录反应谱曲线.

从图5的加速度反应谱曲线可以明显的看到,北岭地震单脉冲波的加速度反应谱只有一个波峰,其谱峰值在周期4s左右,与脉冲部分的谱峰值周期及谱值基本相近,且脉冲部分的加速度反应谱曲线其余谱值都与原始记录差别不大,而高频部分的谱值自始至终都比较小.这说明对于单脉冲记录,采用脉冲部分基本可以代表原始记录对结构的响应.对于集集地震多脉冲记录,脉冲部分加速度反应谱峰值周期及谱峰值与原始记录加速度谱峰值周期和谱峰值也基本相近.由于双脉冲和多脉冲波的原始记录加速度反应谱存在大于谱峰值一半的一个或多个次波峰,而这两个记

录的高频部分加速度谱峰值周期及谱峰值与原始记录的次波峰的加速度谱峰值周期及谱峰值基本相近,而且这些谱峰值均在0~2 s范围内.若仅

考虑脉冲部分而忽略高频部分对结构的影响,将对短周期结构相当不利.

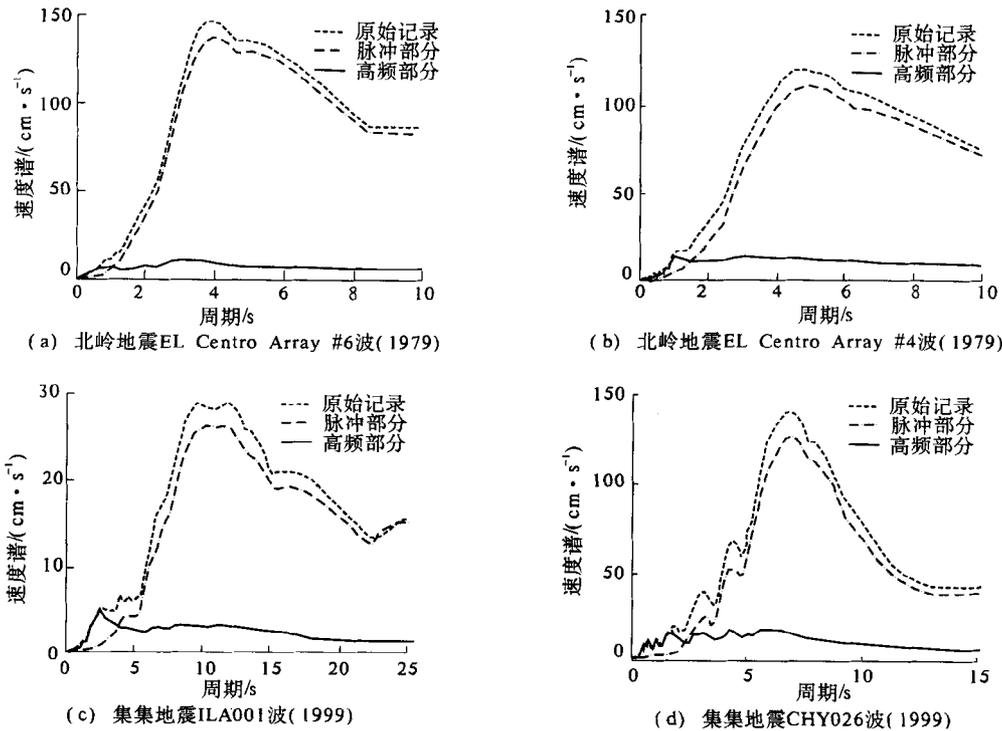


图4 原始记录、脉冲部分和高频部分速度反应谱

Fig. 4 Velocity response spectra of original record, pulse component and high-frequency component

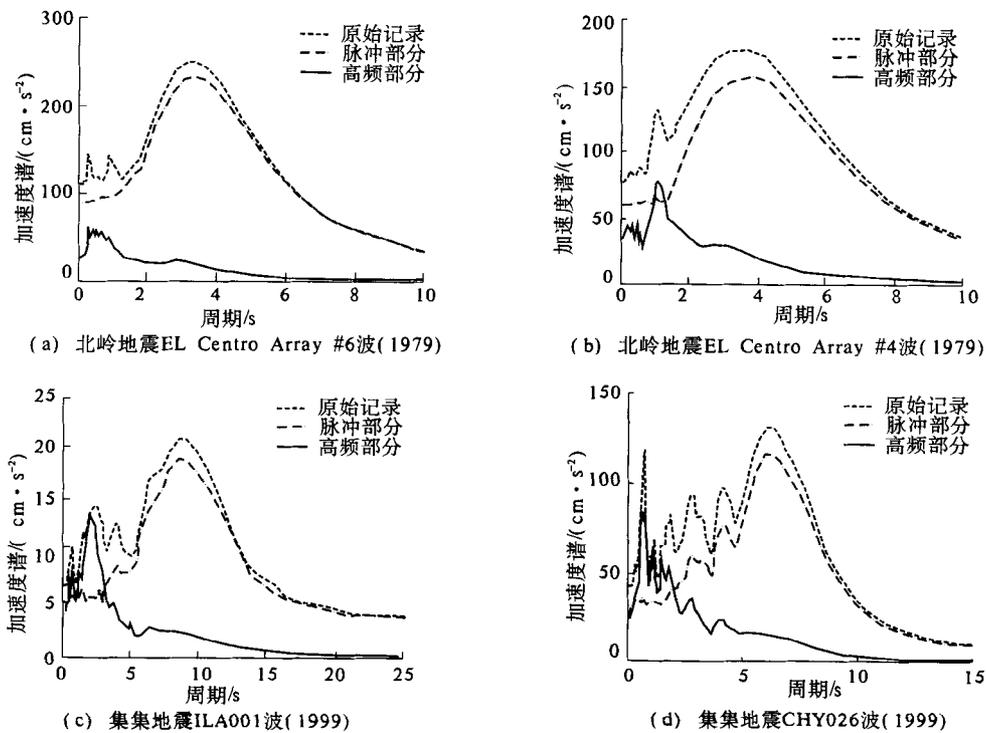


图5 原始记录、脉冲部分和高频部分的加速度反应谱

Fig. 5 Acceleration response spectra of original record, pulse component and high-frequency component

4 结论

采用移动平均滤波器将近断层地震动分解为低频脉冲部分和高频部分. 这种方法简单方便, 能够直接应用于地震记录的时程分析, 可以将地震记录中的脉冲部分有效分离, 使剩余的高频部分不再含有低频分量. 由原始记录、低频脉冲和高频部分的弹性反应谱可知, 对于单脉冲记录, 采用脉冲部分基本可以代表采用原始记录对结构的响应. 而对于多脉冲记录, 因存在一个或多个次高峰, 其脉冲部分不能有效代表原始记录对结构的响应, 若仅考虑脉冲部分而忽略高频部分将对短周期结构相当不利.

参考文献:

- [1] 胡进军. 近断层地震动方向性效应及超剪切破裂研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2009.
- [2] BOLT B A. Earthquakes[M]. New York: W. H. Freeman, 1993.

- [3] MAKRIS N. Rigidity-plasticity-viscosity: can electrorheological dampers protect base-isolated structures from near-source ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1997(26): 571 - 591.
- [4] AGRAWAL A K, HE W L. A closed-form approximation of near-fault ground motion pulses for flexible structures[J]. In: *Proceedings of the 15th ASCE engineering mechanics conference*, Columbia University, New York, NY, 2002: 843 - 845.
- [5] BAKER J W. Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis[J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 2007, 97(5): 1486 - 1501.
- [6] FARID G, HOSSEIN J, GHANNAD M A GHANNAD. Study on elastic response of structures to near-fault ground motions through record decomposition[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010(30): 536 - 546.

Study on Elastic Response of Structures to Near-fault Ground Motions Through Record Decomposition

ZHAO Zhi-hang, CHE Wei, FENG Qun

(School of Engineering & Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The design response spectrum in seismic design code is the result of a large number of mid-field and far-field seismic records statistical regression analysis. As a result of the lack of observation data, the percent of near-field seismic records is small, which leads to the insufficient consideration of the frequency spectrum characteristic of near field ground motions. Near-fault ground motions have some important characteristic that make them different from far-fault ground motions. High-frequency components and low-frequency pulses of near-fault ground motions are among notable specifications. In this paper, a moving average filtering has been designed to decompose the near-fault ground motions into two components having different frequency contents: low-frequency pulses component and high-frequency component. The method is applied to decompose a few selected near-fault records and the elastic response of structure is examined through their response to the decomposed parts. The results emphasizes that for single pulse record the pulse component can effectively represent the response of the structure under the original records. But for multi-pulse record, owing to the existence of one or more peaks, the pulse component can not effectively represent the structure response under the original records. The sole consideration of the pulse component and ignoring the high frequency component is very bad for short cycle structure.

Key words: near-fault ground motion; low-frequency pulse; high-frequency component; moving average filter; elastic response spectra