DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201901170

基于山东省场地的沂沭断裂带地震动高频消减作用

郑 旭[1],胡进军[2,3],谢礼立[2,3],周少辉[1],鹿子林[1]

(1.山东省地震局,济南 250014;2.中国地震局工程力学研究所,哈尔滨 150080;
3.地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所),哈尔滨 150080)

摘 要: 郯庐断裂带是中国东部一条地震活动频繁的断裂带,发生过多次4.0级以上的地震,沂沭断裂带位于郯庐断裂带中段,曾发生过震级大于6.0级的地震.为了解场地条件对沂沭断裂带地震动的影响,探讨缺乏地震数据区域的地震动估计方法,以沂沭断裂带的地震动波形数据为基础,通过对数据傅里叶谱分析,研究了山东省内场地对沂沭断裂带地震动的高频消减作用,获得了场地高频消减参数Kappa,分析了Kappa与场地平均剪切波速V_{S30}之间的关系,探讨了Kappa对PGA及反应谱(S_a)等地震动参数的影响.研究表明:作为一种表征场地条件的参数,Kappa具有区域性差异,且随着相应的V_{S30}的增大而减小;震级相同时,Kappa只对PGA及反应谱的数值大小产生影响,而不影响二者随距离的衰减趋势.本文所得的高频消减参数可以为研究山东省场地对沂沭断裂带地震所受场地效应及模拟该断裂带地震动并分析其特点提供参考.

关键词: 郯庐断裂带;沂沭断裂带;场地;地震动;高频消减
中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)12-0055-08

High frequency reduction effect of ground motion in Yi-Shu fault zone based on sites of Shandong

ZHENG Xu[1], HU Jinjun[2,3], XIE Lili[2,3], ZHOU Shaohui[1], LU Zilin[1]

(1. Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 3. Key Lab of Earthquake Engineering and Engineering Vibration (Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration), Harbin 150080, China)

Abstract: Located in the east of China, Tancheng-Lujiang fault zone is a region with frequent seismic events. Earthquakes above 4.0 occur multiple times there, most of which concentrate in its middle and northern segments. Yi-Shu fault zone is located in the middle of Tancheng-Lujiang fault zone, where earthquakes above 6.0 have occurred. To study the influence of sites on the ground motion of the Yi-Shu fault zone and explore groud motion estimating method for regions lack of seismic data, the ground motion wave form of Yi-Shu fault zone is analyzed by Fourier spectrum, and the high frequency reduction effect of sites in Shandong on Yi-Shu fault zone ground motion is studied. The high frequency reduction parameter Kappa is obtained, whose relationship with the site average shear wave velocity V_{S30} is subsequently discussed. Kappa's influence on seismic parameters such as PGA and response spectrum S_a is also investigated. Results show that as a parameter characterizing site conditions, Kappa exhibits regional differences, which decrease with the increase of corresponding V_{S30}. Under the same earthquake magnitude, Kappa only affects the numerical value of PGA and response spectrum, while their respective decay trends remained unaffected. The high frequency reduction parameter Kappa attains in this study can provide reference for research on the site effect in Shandong for earthquakes of Yi-Shu fault zone, as well as the simulation of the Yi-Shu fault zone ground motion and the analysis of its characteristics.

Keywords: Tancheng-Lujiang fault zone; Yi-Shu fault zone; site; strong ground motion; high frequency reduction

郯庐断裂带是一条横亘在中国东部呈NNE走向的巨大断裂带.经历了自中生代以来的构造演化后,郯庐断裂带可以划分为三段,即苏皖段断裂带,沂沭断裂带(山东段),以及营潍断裂带(沈阳-渤海段)[1].有历史地震记录以来,郯庐断裂带曾多次发生震级大于4.0级的地震,其中,震级大于6.0级的破坏性地震主要集中于郯庐断裂带中北段[2],即郯城至海城段,给这一区域带来了巨大的人口及财产损失.

本文主要研究郯庐断裂带位于山东境内的区段,即沂沭断裂带.针对沂沭断裂带断层的构造及场

收稿日期: 2019-01-24
基金项目: 国家自然科学基金(51578516);
国家重点研发计划(2017YFC1500403);
山东省地震局一般科研项目(YB1908)
作者简介: 郑 旭(1990—),男,助理工程师;
胡进军(1978—),男,研究员,博士生导师;
谢礼立(1939—),男,博士生导师,中国工程院院士
通信作者: 胡进军,hu-jinjun@163.com

地特点,张鹏等[3]指出,沂沭断裂带在构造演化过程中具有显著地左旋走滑特征,这一发现对中国东部地区新生代地质构造意义重大;通过 GPS 测量、深部震源机制的研究,张鹏等[4]认为沂沭断裂带目前的活动性表现为顺时针压扭性,该研究为该段断裂带在地质活动性方面的研究补充了资料;田洪水等[5]在沂沭断裂带的安丘地区,发现了地震扰动岩土层,认为强震对地基土的破坏方式有液化作用、地震裂隙充填等;窦海岳[6]在分析了山东地区的地震环境后,着重研究了场地条件对于地震动参数如反应谱等的影响;为研究基岩场地中剪切波速与土层深度的关系,葛孚刚[7]以山东地区 86 个钻孔资料为基础,给出了不同岩性条件下的剪切波速与土层深度的关系.

目前,沂沭断裂带的研究主要集中在断层构造方面,对于场地条件的研究相对较少. 本文以山东省场地为基础,重点研究场地对沂沭断裂带地震的高频消减作用,获得表征高频消减作用的参数,即 Kappa. Kappa 可以反应场地对于地震动在高频条件下的消减作用,Anderson 等[8]以地震动加速度傅里叶谱为基础,给出了 Kappa 的计算原理和方法. 在地震动衰减关系区域性差异的研究中,张齐[9]以中国西部、日本、美国、新西兰等区域为例指出,场地的高频消减作用具有区域性差异.

虽然目前针对场地高频消减作用的研究国内外已有一定的成果,但是当前针对沂沭断裂带地震的场地高频消减作用的研究仍相对匮乏,这主要是受限于沂沭断裂带的地震动数据相对较少且震级较小. 近年来沂沭断裂带发生了多次 3.0 级左右的地震,本研究基于这些地震数据,计算得到山东省场地对沂沭断裂带地震的高频消减参数,并探讨该参数与场地参数之间的关系,为沂沭断裂带地震动特征的研究提供参考.

1 场地高频消减参数

场地高频消减参数是表征地震动高频消减作用的重要参数,被认为是模拟近地表高频消减效应的高频截止滤波器,表示近地表高频谱幅的快速衰减. 在这里,高频谱指的是加速度傅里叶谱,地震动加速度傅里叶谱是在考虑地震动不同频率之间的相互影响后,描述地震动频谱特性的物理量. Brune[10]在研究中指出,地震动幅值存在一个拐角频率,可将地震动傅里叶谱分为高频和低频两个部分,在低频阶段可以用 ω^2 谱模型进行描述,而高频阶段,ω^2 谱则存在较大误差,不再适用. 在 Anderson 等[8]的研究中,当频率高于一定值后,地震动波形的傅里叶谱值会随着频率的增大而减小,因此,可用式(1)来描述高频时地震动傅里叶谱幅值随着频率变化的规律.

$$A(f) = A_0(f)\mathrm{e}^{-\pi\kappa f}, f \geqslant f_0. \quad (1)$$

式中:$A(f)$ 表示地震动任意频率时的傅里叶谱,$A_0(f)$ 表示傅里叶谱的幅值,与震源和路径相关,f_0 即动力拐角频率,将地震动加速度傅里叶谱分为高频和低频两段,κ 表示高频消减参数,即 Kappa.

2 地震数据集的选用

根据历史地震记载[11],自公元前 70 年至 2014 年 6 月,郯庐断裂带 $M_w \geqslant 6.0$ 的地震共发生了 21 次,1900 年以来,发生在郯庐断裂带及其附近区域的 $M_w > 4.0$ 的地震共有 9 次,真正发生在郯庐断裂带上的地震有 6 次,且主要集中在郯城 – 渤海 – 海城段. 本文的重点研究对象是位于山东境内的沂沭地震带,范围是 117.0° ~ 120.2°E,34.0° ~ 37.0°N. 为提高结论的精确性,尽量选择发生在沂沭断裂带震级较大的数据. 自 2008 年以来,山东地震台网中心共记录到 5 次发生于该断裂带且震级大于 2.9 级地震,共计 600 余条波形记录,地震信息见表 1.

表 1 郯庐断裂带地震信息

Tab. 1 Seismic information of the Tancheng-Lujiang fault zone

日期	经度/(°)	纬度/(°)	震级	震源深度/ km
2011/05/20	118.9E	36.2N	3.7	6
2013/01/31	117.8E	36.6N	3.1	8
2015/03/15	118.9E	35.7N	3.0	10
2016/01/08	118.5E	34.9N	3.6	9
2018/04/11	117.7E	35.6N	3.1	10

山东境内共有测震台站 128 个,表 1 中的 5 次地震发生时,大部分台站都记录到了有效的波形数据,受限于篇幅,表 2 只列出了其中的部分台站信息,以及表 1 中所列举的前三次地震对应的台站断层距.

表 2 山东省内部分台站及断层距

Tab. 2 Stations and fault distances in Shandong

台站	经度/(°)	纬度/(°)	断层距 1/ km	断层距 2/ km	断层距 3/ km
安丘	119.2E	36.4N	5.5	23.3	28.1
北隍城	120.9E	38.4N	113.2	264.6	255.1
滨城	118.0E	37.4N	74.1	52.7	18.2
长岛	120.7E	37.9N	68.1	219.3	210.3
临沭	118.7E	35.0N	11.0	6.8	122.8

3 Kappa 的确定及分析

以表 1 所列 2011 年 5 月 20 日地震数据为基础,分别作出表 2 台站 NS 和 EW 方向的加速度单轴

对数傅里叶谱,见图 1. 无论是 NS 方向还是 EW 方向的加速度傅里叶谱,当频率在 10 ~ 40 Hz 之间时,加速度傅里叶谱幅值的变化趋势可以看作线性变化,这一现象与 Anderson 等[8] 的研究一致. 对该频率范围内地震动加速度傅里叶谱值进行线性拟合并假定所拟合直线的斜率为 k,由式(1)两边取对数并做变换后可得到 Kappa 值与该斜率之间的关系为

$$\kappa = -\frac{k}{\lg e}, \tag{2}$$

式中 κ 表示高频消减参数.

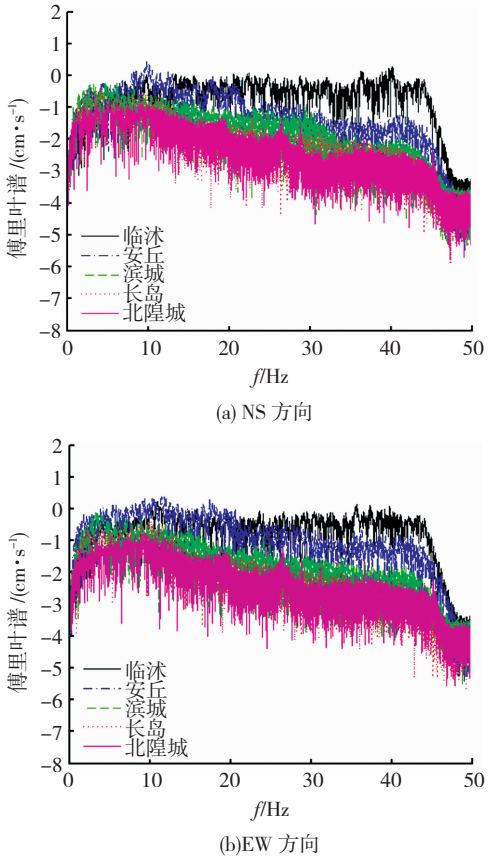


图 1　地震动加速度傅里叶谱值

Fig. 1　Fourier spectrum of the ground motion acceleration

表 3　部分台站 Kappa 值

Tab. 3　Kappa value of the stations

台站名称	断层距/ km	NS 方向	EW 方向
安丘	5.5	0.043 4	0.035 7
北隍城	113.2	0.040 0	0.035 1
滨城	74.1	0.039 6	0.038 0
长岛	68.1	0.035 2	0.041 3
临沭	11.0	0.000 3	0.001 4

由表 3 列举的台站 Kappa 值可看出,不同场地的高频消减作用具有一定差异,为获得山东地区平均高频消减参数,本研究给出了山东境内各台站高频消减参数与相应断层距(R)的对应关系,见图 2,图中公式 κ 表示高频消减参数 Kappa.

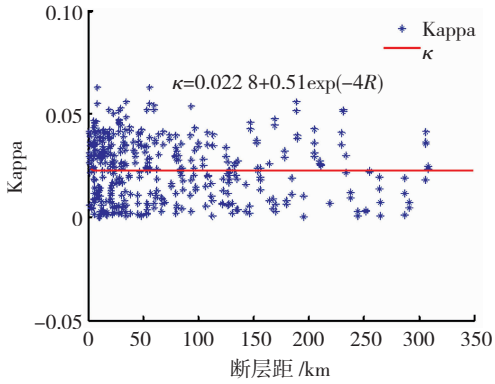


图 2　山东高频消减参数与断层距相关性

Fig. 2　Correlation between the Kappa of Shandong and fault distances

根据 Anderson 的研究,Kappa 与断层距具有一定的相关性,通过对图 2 所示数据的回归分析,当断层距为 0 时,Kappa 的取值 κ_0 表示该场地条件下土层对地震动的平均高频消减作用. κ_0 与 Kappa 的区别在于,当地震发生时,将地震影响区域看做一个整体,可得到地震影响场地范围内高频消减作用的平均水平,即 κ_0. κ_0 反应了一个区域场地对地震动的平均高频消减作用,与用于回归分析的数据震级大小并无太大相关性,可用于后续各震级地震动的数据模拟;而 Kappa 则是地震影响区域内某一场地或区域的高频消减作用,显然,不同的场地或区域之间 Kappa 存在差异性.

在利用沂沭断裂带地震动波形数据进行加速度傅里叶谱分析时,地震震源深度均在基岩场地范围内,因此,本文所得到的沂沭断裂带平均高频消减参数主要适用于基岩场地. 通过对图 2 中各台站 Kappa 值的回归分析,最终计算得到了山东省场地对沂沭断裂带地震的平均高频消减参数,将该参数与张齐地震动衰减关系区域性差异研究中得到的日本、美国西部、中国西部等区域的高频消减参数作对比,见表 4.

表 4　不同区域的 κ_0 对比

Tab. 4　Comparison of κ_0 in different regions

山东地区	中国西部	日本	美国西部
0.022 8	0.035 3	0.038 0	0.030 3

表 4 显示山东省场地的 κ_0 相对于其他区域数值较小,表明该场地高频消减作用较其他区域偏小. 造成这一现象的原因是,在计算山东省场地的 Kappa 时,采用的数据均来自基岩场地,而张齐[9] 在计算中国西部等几个区域的高频消减参数时,数据来源包括软土、基岩等场地,高频消减参数是这几种场地的平均水平,因此,从单一场地类型高频消减作用角度分析,基岩场地相对于软土场地的高频消减作用较弱.

4 Kappa 与 $V_{S_{30}}$ 的关系分析

关于场地对地震动加速度傅里叶幅值高频消减作用的研究，目前国内外仍存在一定的争议. 文献[12]认为，高频消减现象与震源相关，如震级大小、震源深度等因素；文献[13]认为高频消减现象与场地性质有关；文献[14]已经证明，震级大小、震源深度对 Kappa 的影响可以忽略. 因此，为了分析场地因素对高频消减现象的影响，本文将以沂沭断裂带地震动波形数据为基础，来探讨 Kappa 与场地因素之间的关系，以便于了解场地条件对高频消减参数的影响，并提出一种根据场地参数估计高频消减参数的方法.

表征场地条件的参数，包含场地放大系数及平均剪切波速（$V_{S_{30}}$）等，为将高频消减参数与场地参数之间的关系量化处理，本研究采用了山东地区部分台站场地的平均剪切波速. 在这里，$V_{S_{30}}$ 是根据山东地区钻孔获得的剪切波速资料，利用简单延拓方式得到的. 简单延拓的基本假定是：从钻孔底部至地表以下 30m 处介质相同，进而构造计算平均剪切波速的经验公式[15-16]：

$$V_{S_{30}} = 30/t, \tag{3}$$

$$t = \sum_{i=1}^{n} (d_i/V_{S_i}) . \tag{4}$$

式中：t 表示等效时间，d_i 表示人为将土层分层后，每一层的土层厚度，V_{S_i} 表示对应每一层土层厚度的剪切波速.

在得到山东地区台站的场地平均剪切波速后，为方便探讨 $V_{S_{30}}$ 与 Kappa 之间的关系，在研究中作出了图 3 所示的关系图.

由图 3 可知，无论是采用线性拟合还是采用对数拟合，山东境内场地的 Kappa 随着场地平均剪切波速 $V_{S_{30}}$ 的增大呈减小趋势，这一点与文献[17-18]的研究结论一致. 为方便对 Kappa 与 $V_{S_{30}}$ 关系的描述，基于本文所采用的数据，有以下 3 种模型可以来拟合山东省高频消减参数与场地平均剪切波速之间的数量关系.

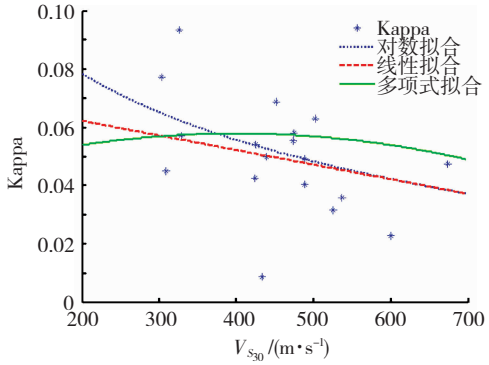


图 3 山东地区 $V_{S_{30}}$ 与 Kappa 的关系

Fig. 3 Relations between $V_{S_{30}}$ and Kappa in Shandong

线性拟合所采用的模型为

$$\kappa = aV_{S_{30}} + b, \tag{5}$$

对数拟合方式所采用的模型为

$$\kappa = a\lg(V_{S_{30}}) + b, \tag{6}$$

多项式拟合采用的模型为

$$\kappa = aV_{S_{30}}{}^2 + bV_{S_{30}} + c, \tag{7}$$

根据式(5)~(7)分别拟合得到 Kappa 与 $V_{S_{30}}$ 之间的定量关系系数见表 5.

表 5 山东地区 Kappa 与 $V_{S_{30}}$ 之间的关系

Tab. 5 Relations between Kappa and $V_{S_{30}}$ in Shandong

拟合方式	a	b	c	σ
线性拟合	-0.000 050 0	0.072 20		0.252 6
对数拟合	-0.022 000 0	0.180 50		0.233 3
多项式拟合	-0.000 000 1	0.000 08	0.041 9	0.266 0

表 5 可知，对数拟合的标准差相比于其他两种拟合方式数值最小. 为进一步比较 3 种拟合方式的效果，分别对拟合方式进行了残差分析，从而确定拟合结果的优劣，残差分析原理为

$$\varepsilon = \ln(\kappa_p) - \ln(\kappa_t), \tag{8}$$

式中：ε 表示由估计值与实测值确定的残差，κ_p 表示 Kappa 的估计值，κ_t 表示 Kappa 的实际值，残差估计结果见图 4.

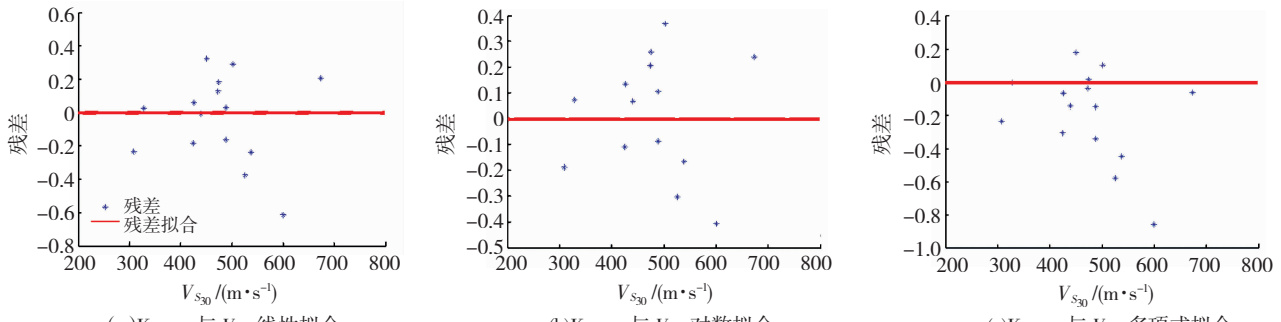


图 4 Kappa 与 $V_{S_{30}}$ 拟合残差对比

Fig. 4 Comparison of regress residual between Kappa and $V_{S_{30}}$

图 4 残差分析结果显示,对于 Kappa 与场地 $V_{S_{30}}$ 之间的相关关系,采用对数拟合方式拟合时,残差在零线附近呈[0,0.05]的正态分布,范围在[-0.4,0.4]之间,而线性拟合的残差虽然在零线附近分布,但分布均匀程度差于对数形式,且在表 5 中可以看到,线性分布的标准差要大于对数拟合方式,更加说明线性拟合效果要差于对数方式拟合效果;而采用多项式拟合的方式,残差主要分布在零线以下,拟合结果较差. 因此,在获得了山东地区的场地平均剪切波速后,可以通过对数关系来描述场地高频消减参数与场地平均剪切波速之间的关系,并通过该关系对无法直接获取场地高频消减参数的区域进行估计.

5　Kappa 对地震动的影响分析

本文在计算山东省场地高频消减参数时,采用了式(1)表示的加速度傅里叶谱随频率变化的原理,此外,表征地震动特点的参数还包括峰值加速度以及加速度反应谱等. 为全面了解 Kappa 对地震动的影响,本节仍以沂沭断裂带地震数据为基础,通过对地震动峰值加速度及反应谱的分析,探讨了 Kappa 对两种地震参数大小、衰减趋势等方面的影响. 本节内容在采用沂沭断裂带的地震波形数据进行加速度傅里叶谱分析时,受限于所发生地震的震级大小、次数以及技术条件等因素,地震震级主要集中在在 3.0 级左右,震级大于 4.0 级的波形数据目前无法获得. 然而,震级大于 4.0 级的地震由于破坏性更大,造成的损失更多,是更为关注的,因此,本文为丰富沂沭断裂带的地震动数据库,在获取山东省场地高频消减参数之后,采用 Atkinson 等[19] 基于 Boore[20] 的随机有限断层模型提出的随机有限断层法(EXSIM)程序,按照高频消减参数取值不同的情况,合成沂沭断裂带的地震动,来分析 Kappa 对地震的影响.

首先,对随机有限断层法(EXSIM)进行介绍. 采用随机有限断层法模拟地震动时,首先将发生地震的断层人为地划分为 N 个子断层,并将这些子断层看作点源,当其中一个子断层发生地震时,其他子断层按照波动的传播顺序,依次产生相应的加速度,最终该断层的加速度可以看作每个子断层加速度以一定时间间隔叠加的过程[21],表示为

$$a(t) = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} a_{ij}(t + \Delta t_{ij}), \tag{9}$$

式中:$a_{ij}(t)$ 是第 ij 个子断层所引起的场点的地震动加速度,$a(t)$ 表示该断层的加速度时程.

在随机有限断层法模拟地震动所采用的参数中主要有 3 种参数[22],分别是震源参数包括震级、震源深度及应力降,路径参数如路径品质因子[23] 及几何扩散形式,场地参数如高频消减参数、路径放大因子等.

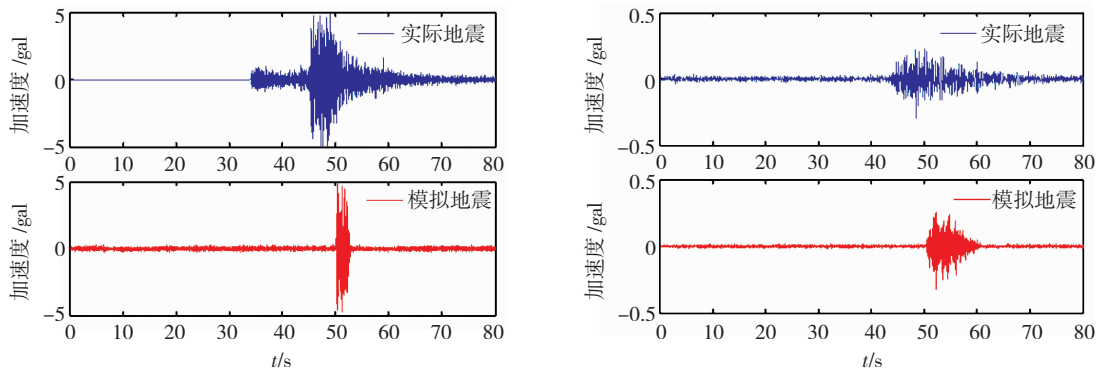
根据随机有限断层法的 3 种参数类型,沂沭断裂带的地震动参数设定见表 6[24-25].

表 6　沂沭断裂带地震动参数设置

Tab. 6　Seismic parameters of Yi-Shu fault zone

参数类型	取值
断层类型	走滑
走向及倾角/(°)	[232,10]
剪切波速/(km·s^{-1})	3.5
介质密度/(g·cm^{-1})	2.7
破裂速度/(km·s^{-1})	2.8
应力降/kPa	6 000 ~ 20 000
Kappa	0.022 8
品质因子 Q	$382f^{0.443}$
几何扩散形式	$1/R$($R \leqslant 40$ km) $1/R^{0.5}$($R > 40$ km)

根据表 6 的地震动参数,采用 EXSIM 程序来合成发生在沂沭断裂带上的地震动,并通过地震动加速度时程等参数来分析该断裂带的地震动特点.



(a)断层距 46 km　　(b)断层距 120 km

图 5　EXSIM 模拟地震与实际地震加速度时程对比

Fig. 5　Time history comparison between simulated earthquake by EXSIM and actual ones

采用 EXSIM 程序获得沂沭断裂带地震动波形数据后,将模拟所得的加速度时程与山东地震台网记录的地震动波形数据进行了对比. 受限于篇幅,图 5 只给出了震级为 3.2 级,断层距分别为 46 km 和 120 km 时,两种数据加速度时程的对比. 可以看到,两种工况下,实际地震与模拟地震的加速度幅值范围分别为[-5,5]和[-0.3,0.3](gal),且大幅值均在周期 50 s 附近出现,这一现象表明,通过随机有限断层法模拟所得的沂沭断裂带地震动数据的精确性能够满足要求.

本研究已获得山东省场地对沂沭断裂带地震的场地平均高频衰减参数为 0.022 8,该参数值可以直接在 EXSIM 程序中用于地震动的模拟. 为了分析由于高频消减参数的不同对地震动的影响,本研究假定沂沭断裂带的高频消减参数有一定的取值范围,如 Kappa = [0.01,0.02,0.03,0.04,0.05],进而合成该断裂带的地震动,并分析由于 Kappa 的差异性带来的影响. 图 6 给出不同 Kappa 对地震动峰值加速度(PGA)及不同周期反应谱(S_a)的影响.

由图 6 可知,Kappa 的大小对地震动峰值加速度及反应谱的影响主要表现为:在震级相同时,随着 Kappa 的增大,PGA 及各周期反应谱的值会相应减小. 但 Kappa 的取值并未改变 PGA 及各周期反应谱随断层距增大而衰减的趋势,这一特性间接表明 Kappa 作为一种场地参数,与地震动路径传播特点相关性很小.

随着周期的增大,Kappa 取值的变化对反应谱大小的影响逐渐减弱,特别是在长周期,随着 Kappa 变化,同震级、同断层距时,反应谱数值大小仍比较接近. 这就表明,Kappa 对短周期反应谱产生的影响要大于长周期.

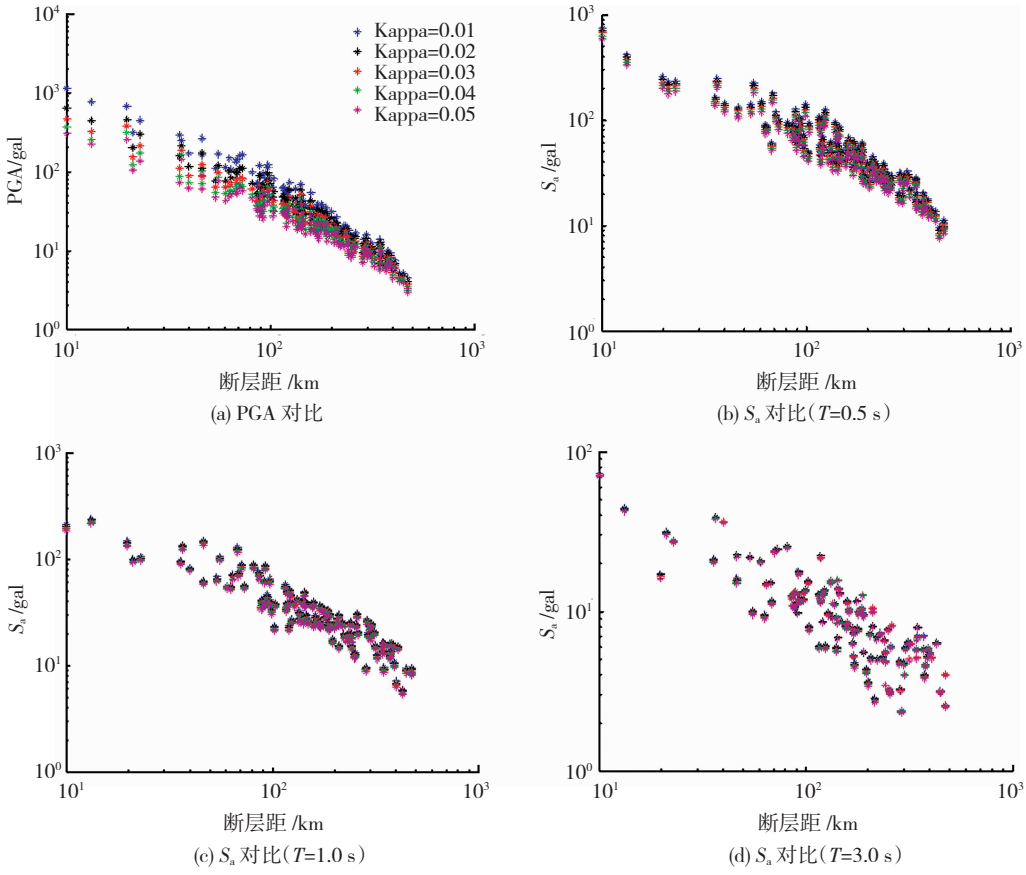


图 6 Kappa 取值对 PGA 及 S_a 的影响对比

Fig. 6 Comparison of the effect of different Kappa values on PGA and S_a

图 6 定性展示了地震动峰值加速度及反应谱随 Kappa 的变化特点. 为定量的描述这一特点,利用 EXSIM 程序模拟沂沭断裂带 6.0 级地震,并设定断层距为 50 km,同时假定不同场地 Kappa 取值不同,得到相应模拟地震动峰值加速度及反应谱,通过统计分析,建立不同场地 Kappa 比值和相应 PGA 及反应谱比值的对应关系,见图 7.

图 7 中 y 表示地震动参数(PGA、S_a)比值,k 表示 Kappa 比值. 随着不同场地 Kappa 比值的增加,相应地震动峰值加速度及反应谱的比值呈指数形式减小并可以建立明确的数量关系. 这一数量关系可以用于地震发生后,若某区域没有地震台站或者其他测定地震波形的手段时,首先估计该区域的 Kappa,进而对地震动参数值进行估计.

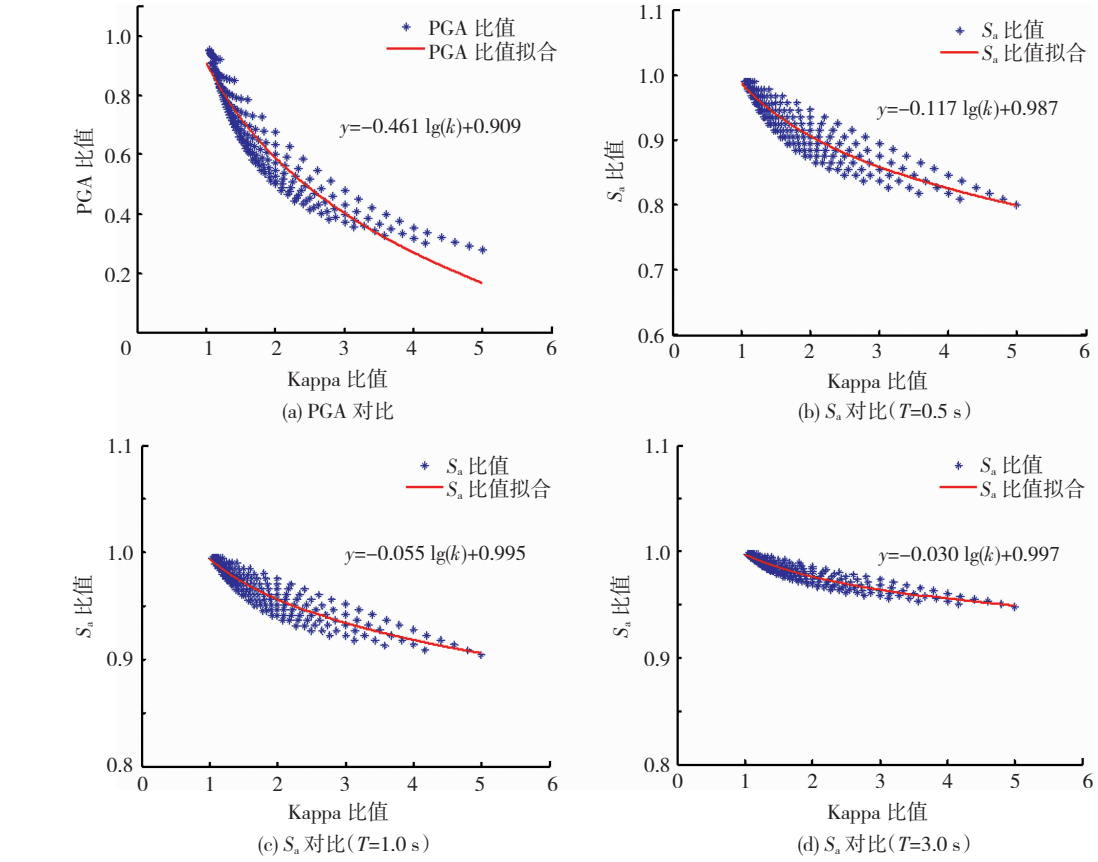


图 7　不同 Kappa 值时 PGA 及 S_a 数量关系对比

Fig. 7　Quantitative comparison of PGA and S_a with different values of Kappa

6　结　论

本文以沂沭断裂带为研究对象,采用该断裂带自 2008 年以来的地震动波形数据进行了加速度傅里叶谱的分析,探讨了该区域场地的高频消减作用,获得了高频消减参数,并以山东地区的 86 个钻孔剪切波速资料为基础,研究了场地高频消减作用与场地平均剪切波速之间的关系,同时探讨了高频消减参数对地震动参数(PGA、S_a 等)的影响,得到以下结论:

1)在研究沂沭断裂带场地对地震动的高频消减作用时,本文最终得到该断裂带高频消减参数 κ_0 的大小为 0.022 8. 与中国西部、日本及美国西部相比,该断裂带的高频消减参数数值相对较小,表明场地高频消减作用具有区域性差异. 此外,与地震数据来源包括基岩、软土等场地类型时所得的高频消减参数相比,本文的地震波形数据来自基岩,且高频消减参数相对较小,因此,单一场地类型情况下,基岩场地高频消减作用要小于软土场地.

2)在研究山东省境内场地 Kappa 与相应场地 V_{S30} 之间的关系时,通过分析得到,随着 V_{S30} 的增大,Kappa 逐渐变小. 同时,根据二者之间的特点,采用对数模型将 Kappa 与 V_{S30} 进行了拟合,建立了二者之间的数量关系,并通过残差分析,验证了该数量关系可以用于在获得场地剪切波速的条件下,对高频消减参数的定量估计.

3)在 Kappa 对地震动峰值加速度及反应谱的影响分析中得到,无论断层距大小,随着 Kappa 的增大,PGA 及 S_a 的数值不断减小,但二者随着距离的衰减趋势不变,这一结论表明,Kappa 是一种场地参数,对地震动参数的衰减形式几无影响. 通过建立不同场地高频消减参数比值与峰值加速度及反应谱比值之间的关系,为 Kappa 已知但无法获取地震波形数据的区域的峰值加速度及反应谱估计拓展了一种新的思路.

参考文献

[1] 孙晓猛,王书琴. 郯庐地震带北段构造特征及构造演化序列[J]. 岩石学报,2010,26(1):165
SUN Xiaomeng, WANG Shuqin. The structural feature and evolutionary series in northern segment of Tancheng-Lujiang fault zone[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010,26(1):165

[2] 熊振,李清河,张元生,等. 郯庐断裂带鲁苏皖段未来强震可能发生地段初探[J]. 地震地质,2016,38(4):965
XIONG Zhen, LI Qinghe, ZHANG Yuansheng, et al. Preliminary discussion on the possible area of strong earthquake occurrence in future along the Shandong-Jiangsu-Anhui segment of Tancheng-Lujiang fault zone[J]. Seismology and Geololgy, 2016, 38(4): 965

[3] 张鹏,王良书,石火生,等. 郯庐断裂带山东段的中新生代构造演化特征[J]. 地质学报, 2010,84(9):1316
ZHANG Peng, WANG Liangshu, SHI Huosheng, et al. The Mesozoic-Cenozoic tectonic evloution of Shandong segment of the Tan-Lu fault zone[J]. Acta Geologica Sinica, 2010,84(9):1316

[4] 张鹏,秦向辉,丰成君,等. 郯庐断裂带山东段深孔地应力测量及其现今活动性分析[J]. 岩土力学,2013,34(8):2330
ZHANG Peng, QIN Xianghui, FENG Chengjun, et al. Insitu stress measurement of deep borehole in Shandong segment of Tan-Lu fracture belt and analysis of its activity [J]. Rock and Soil mechanics, 2013, 34(8): 2330

[5] 田洪水,张增奇. 从郯庐地震带安丘地区地震成因土层构造认识地震破坏作用[J]. 岩土工程学报, 2005,27(12):1454
TIAN Hongshui, ZHANG Zengqi. Understanding failure functions caused by earthquakes on the basis of seismgenesis soil layer structures in Anqiu area, Tancheng-Lujiang seismic zone [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1454

[6] 窦海岳. 山东地区场地条件对地震动参数影响的研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所, 2009
DOU Haiyue. Study on influence of site conditions to ground motion parameters in Shandong area [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, 2009

[7] 葛孚刚. 山东地区基岩剪切波速与深度的关系[J]. 工程建设与设计,2017(15):62
GE Fugang. Relationship between shear wave velocity and depth of bedrock in Shandong[J]. Construction and desgin for projcet, 2017 (15): 62

[8] ANDERSON J G, HOUGH S E. A model for the shape of the fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1984, 74: 1969

[9] 张齐. 地震动衰减关系的区域性差异研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2016
ZHANG Qi. Study on regional differentiation of ground motion attenuation relationship [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, 2016

[10] BRUNE J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75 (26): 4997

[11] 林怀存. 郯城 – 海城地震带的地震活动特征[J]. 高原地震, 1994,6(1):47
LIN Huaicun. The fearute of earthquake activity in Tancheng-Haicheng fault zone[J]. Plateau Earthquake Research, 1994, 6 (1): 47

[12] PAPAGEOGIOU A S, AKI K A. Specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion, part Ⅱ: Application of the model[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73: 953

[13] HANKS T C. Fmax[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982,72:1867

[14] HOUTTE V C, DROUET S. Analysis of the origins of κ(Kappa) to compute hard rock to rock adjustment factors for GMPEs[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2011,101(6):2926

[15] 喻烟,李小军. 四川_甘肃地区 $V_{S_{30}}$ 经验估计研究[J]. 地震工程学报,2015,37(2):525
YU Dian, LI Xiaojun. Empirical estimation of $V_{S_{30}}$ in the Sichuan and Gansu provinces[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 525

[16] 胡进军,郑鹏. 基于日本滨海强震数据的不同震源类型的衰减关系比较[J]. 建筑结构,2017,47:669
HU Jinjun, ZHENG Peng. Comparison of attenuation relationships of different seismic types based on strong earthquake data in coastal areas Japan[J]. Building Structure, 2017, 47: 669

[17] YENIER E, ATKINSON G M. Equivalent point source modeling of moderate-to-large magnitude earthquakes and associated ground motion saturation effects[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104: 1458

[18] YENIER E, ATKINSON G M. An equivalent point source model for stochastic simulation of earthquake ground motions in California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105 (3): 1435

[19] ATKINSON G M, BOORE D M. Stochastic point source modeling of ground motions in the Cascadia region [J]. Seismological Research Letters, 1997, 68: 74

[20] BOORE D M. SMSIM-Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: version 1.0, U.S. A modified version of OFR[J]. Geological Survey,1996,56:1

[21] ATKINSON G M, BOORE D M. Earthquake ground motion prediction equations for eastern north American[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2006,96(6): 2181

[22] 胡进军,郑旭,谢礼立. 基于混合方法的南海海域地震动衰减关系研究[J]. 土木工程学报,2018,51(7):36
HU Jinjun, ZHENG Xu, XIE Lili. Derivation of ground motion attenuation relation for earthquake in the South China Sea areas based on a hybrid method[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(7): 36

[23] KENNETHE W C. Estimates of shear wave Q and for unconsolidated and semiconsolidated sediments in Eastern North America [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(4): 2365

[24] 周少辉,曲均浩,苗庆杰,等. 山东长岛地区地震波非弹性衰减 Q 值、场地响应及震源参数研究[J]. 地震工程学报,2018,40 (6):1324
ZHOU Shaohui, QU Junhao, MIAO Qingjie, et al. Inelastic attenuation Q value, site response and seismic source parameters in Chang Dao region, Shandong[J]. China Earthquake Engineering Journal,2018,40(6):1324

[25] 周少辉,蒋海昆,曲均浩,等. 应力降研究进展综述[J]. 中国地震,2018,34(4):1
ZHOU Shaohui, JIANG Haikun, QU Junhao, et al. A review on research of stress drop[J]. China Earthquake Journal, 2018, 34 (4): 1

(编辑 赵丽莹)