

郑旭,周少辉.马尼拉海沟俯冲带板缘地震特征及衰减关系研究[J].华南地震,2022,42(1):86-96. [ZHENG Xu,ZHOU Shaohui. Study on the Characteristics and Attenuation Relationship of Plate Margin Earthquakes in the Subduction Zone of Manila Trench[J]. South China journal of seismology,2022,42(1):86-96]

马尼拉海沟俯冲带板缘地震特征及衰减关系研究

郑旭^{1,2}, 周少辉¹

(1.山东省地震工程研究院, 济南 250021; 2.山东省地震局, 济南 250014)

摘要: 俯冲带通常位于陆地板块与海洋板块或者海洋板块之间的交界处,地质构造复杂,地震活动频繁。在南海海域,马尼拉海沟俯冲带对中国海洋战略及近海重大工程的实施位置至关重要。在缺少实际地震数据的前提下,为分析马尼拉海沟俯冲带地震动及其衰减关系特征,通过采用随机有限断层法模拟该俯冲带地震动,分析地震动加速度时程及反应谱特点,同时分别基于模拟数据和衍生方法,建立了马尼拉海沟俯冲带板缘地震动衰减关系。结果表明:峰值加速度(PGA)及短周期反应谱(Sa)的衰减关系模拟方法与衍生方法差异较小,都能适用,长周期反应谱的地震动衰减关系以衍生方法结果为准。由此建立的俯冲带板缘地震动衰减关系可以为南海海洋战略中近海工程建设提供重要依据。

关键词: 马尼拉海沟; 俯冲带; 板缘地震; 衰减关系

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2022)01-0086-11

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.01.12

Study on the Characteristics and Attenuation Relationship of Plate Margin Earthquakes in the Subduction Zone of Manila Trench

ZHENG Xu^{1,2}, ZHOU Shaohui^{1*}

(1. Shandong Institute of Earthquake Engineering, Jinan 250021, China; 2. Shandong Earthquake Agency, Jinan 250014, China)

Abstract: Subduction zone usually has complex geological structure and frequent seismic events which is located in the junction of the land plate and the ocean plate or ocean plates. Manila Trench subduction zone is crucial to the implementation of China's marine strategy and offshore engineering in the South China Sea. In the absence of actual seismic data, in order to analyze the characteristics of ground motion and its attenuation relationship in Manila trench subduction zone, stochastic finite fault model is used to simulate the ground motion in this subduction zone, and analyzes the characteristics of ground motion acceleration time history and response spectrum. At the same time, based on the simulation data and derivative method, the attenuation relationship of ground motion at the plate edge of Manila trench subduction zone is established. The results show that the difference between the

收稿日期: 2021-06-18

基金项目: 山东省地震局一般科研项目(YB2011)

作者简介: 郑旭(1990-),男,硕士,工程师,研究方向: 地震动衰减关系。

E-mail: zhengxu0110@163.com

通信作者: 周少辉(1991-),男,硕士,工程师,研究方向: 数字地震。

E-mail: 674891062@qq.com

simulation method of attenuation relationship and the derivative method for peak acceleration (PGA) and short-period response spectrum (S_a) is small, which can be applied, and derivative method is more accurate for long period than simulative ones. The attenuation relationship of slab-subduction ground motion in subduction zone established in this paper can provide an important basis for offshore engineering construction in the South China Sea.

Keywords: Manila Trench; Sbduction zone; Plate margin earthquake; Attenuation relationship

0 引言

俯冲带是由陆地板块与海洋板块或者海洋板块之间通过俯冲作用^[1]形成的地质构造复杂,地震活动频繁的区域。根据板块俯冲角度、岩石层厚度以及震源深度等因素,俯冲带地震包含板内、板缘地震两种类型。板缘地震通常是浅角插入事件,震源深度一般为15~50 km^[2],如发生于智利1984年Valpariso 8.0级、2014年西北部海域8.2级地震及2003年日本东北部俯冲带8.1级地震等。在中国南海海盆东侧,菲律宾板块俯冲至欧亚板块后形成了一条南北方向弧形西凸的俯冲带,即马尼拉海沟俯冲带,全长约1000 km,位于118°~123°E,12°~22°N之间^[3]。按照活动构造分类,板缘活动构造分为汇聚型、离散型及转换型活动构造^[4],马尼拉海沟俯冲带位于南海海盆与菲律宾群岛边界,属于汇聚型活动构造,由于板块之间俯冲作用,该区域以逆断层为主。

目前,俯冲带地震的研究主要集中在美国西部Cascadia地区俯冲带、日本东北部俯冲带、台湾东北部俯冲带等,在中国南海区域,由于港珠澳大桥等重大近海交通工程的建设,马尼拉海沟、琉球海沟等俯冲带地震的研究也有了一定的进展^[5]。对俯冲带板缘地震的研究,Atkinson^[6]采用随机有限断层模型模拟了Cascadia俯冲带矩震级7.5~9.0级的板缘地震时程和反应谱;Si Hong Jun^[7]在统计了日本东北部俯冲带20余次地震数据后得出,板缘地震的地震动效应要大于浅地壳及板内地震;Atkinson等^[8]通过上千条5.0~8.3级的俯冲带板缘、板内地震记录的分析指出,板缘地震在震级为8.0级左右时,要考虑300×500 km的矩形地震危险区域;郝彦春^[9]以2003年9月26日日本东北部俯冲带8.1级地震及2014年4月1日智利8.2级地震作对比,得出俯冲带板缘地震存在高频衰减及90%能量持时随着震中距的增加而增长等现象;胡进军等^[10]通过日本东北部俯冲带地震与汶川、庐山等浅地壳地震相比较得出,俯冲带板缘地震PGA随距离衰减速率慢于板内地震及浅地壳地震。

对于俯冲带地震动衰减关系的研究,

Youngs^[11]以日本、美国、智利以及墨西哥等国家的俯冲带记录为基础,建立了俯冲带板缘地震动衰减关系,并应用到地震动加速度峰值的预测中;Chang^[12]等利用台湾地震动加速度记录建立了台湾东北部俯冲带及地震动活跃的浅地壳地震动衰减关系,提高了地震动预测的准确性;Lin等^[13]以台湾东北部俯冲带板缘地震记录为基础,建立了该俯冲带板缘地震峰值加速度及反应谱的衰减关系;在南海俯冲带的研究中,胡进军等^[14]建立了基于混合方法的南海俯冲带板内地震动衰减关系。

综上所述,对于俯冲带板缘地震的特点及衰减关系的研究已有一定的成果,但是特殊的地理位置决定了在俯冲带地震近场区建立台站来记录地震波形数据较为困难,因此直接采用实际数据来系统研究板缘地震动仍有很长的路要走。面对这一问题,在分析马尼拉海沟俯冲带地质构造及类比其他区域板缘地震的前提下,通过数值模拟数据来分析俯冲带板缘地震动特点并探讨板缘地震动衰减规律将是有效的方式。

1 马尼拉海沟俯冲带地震分布及特点分析

马尼拉海沟位于南海海盆东侧,由菲律宾板块俯冲至欧亚板块以下形成。据史料记载,该俯冲带发生过多级震级大于4.5级的破坏性地震。图1给出了马尼拉海沟所在区域(10°~25°N, 110°~125°E)的历史地震震中分布,其中,震级在5.0~6.9级之间的地震占比较大,并发生了数次震级大于7.0级的强破坏性地震,且海沟北段的地震频次要明显大于南段,因此,马尼拉海沟对南海海域及中国东南沿海地震灾害所产生的影响不容忽视。

图2给出了马尼拉海沟所在区域震级大于4.5级的历史破坏地震震源深度三维分布图。图中可以看到,震源深度在0~50 km范围内不间断分布,15~50 km之间,随震源深度增加,地震频次有逐渐增加的趋势。从位置来看,主要集中在马尼拉海沟及其东侧,说明该区域的地质和构造满足地震易发多发的条件。

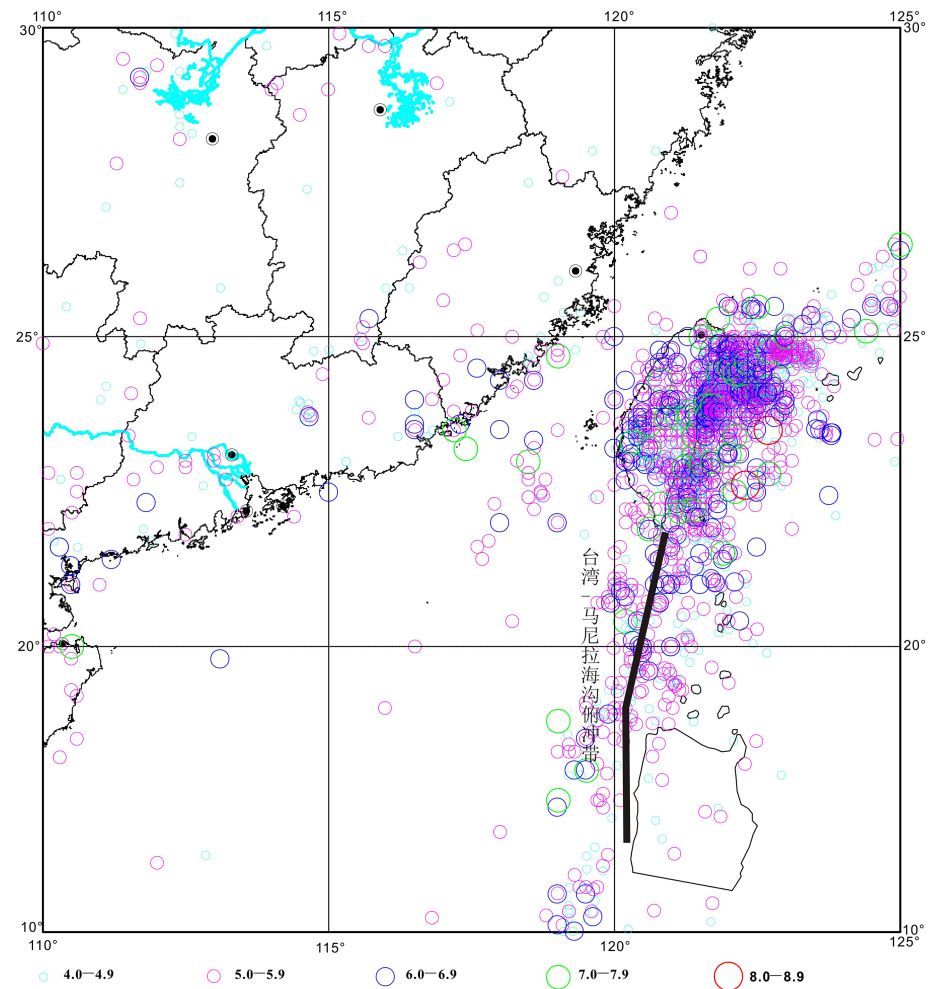


图1 历史破坏地震震中分布

Fig.1 Epicenter distribution of historical destruction earthquakes

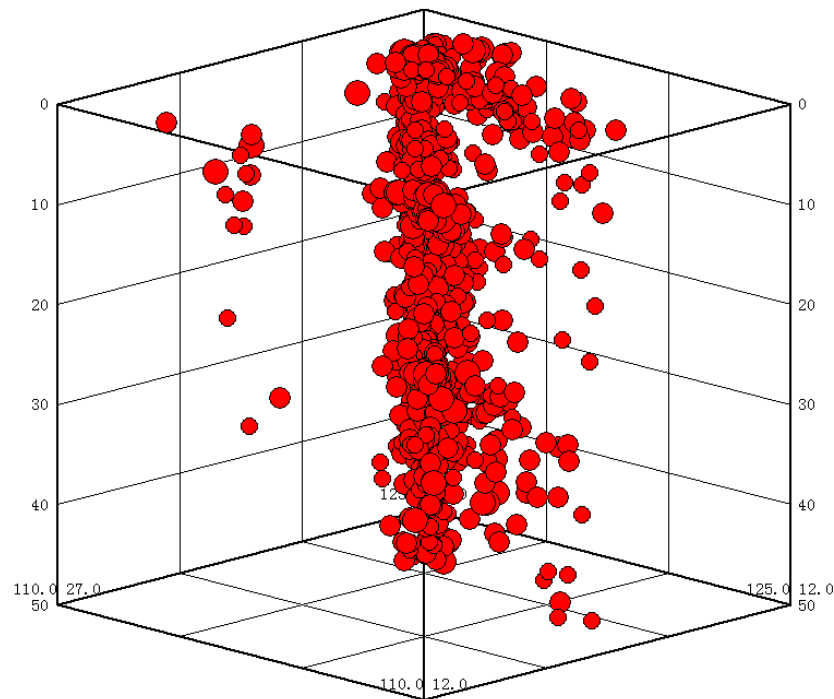


图2 历史破坏地震震源深度分布

Fig.2 Depth distribution of historical destruction earthquakes

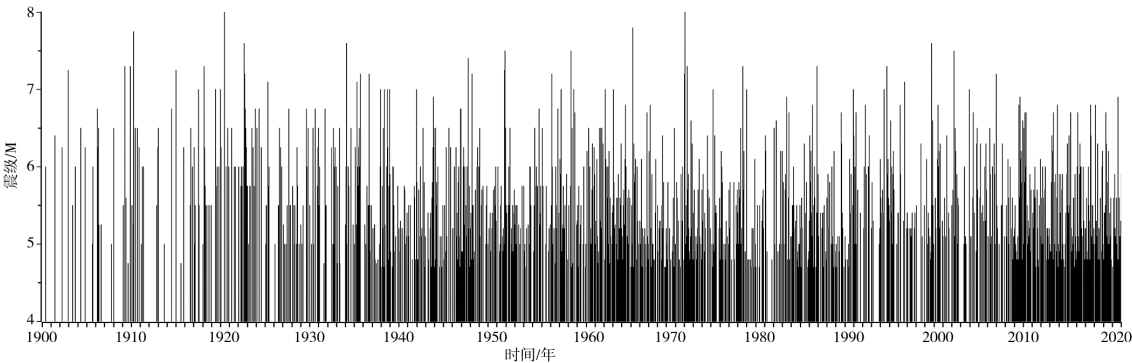


图3 历史破坏地震 $M-t$ 图
Fig.3 $M-t$ diagram of historical destruction earthquakes

图3展示了自1901年以来,发生于马尼拉海沟及其附近海域震级大于4.5级的破坏性地震的时间分布。图中可以看到,自1901年以来,该区域破坏性地震发生次数按时间分布比较均匀,且每10年左右会发生一次震级大于7.0级的地震,地震活动性强,破坏性大。

鉴于无法直接用该俯冲带地震数据来分析板缘地震动及其衰减规律的状况,本文采用随机有限断层模型^[15]来模拟发生于马尼拉海沟俯冲带的地震,分析地震动特点并探讨地震衰减特征。

随机有限断层法是将震源所在断层划分为 N 个子断层,每个子断层看作点源,地震发生后,以一定的破裂速度向外辐射传播,每个子断层对场点有差异的贡献经过叠加即可得到所求场点的地震动,该过程可以公式(1)来表示

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

式中, $a(t)$ 表示子断层地震动加速度。

模拟时,震源所在断层尺寸采用 Wells^[16](1994)等提出的经验公式计算

$$\log S = -3.49 + 0.91M_w \tag{2}$$

$$\log L = -2.44 + 0.59M_w \tag{3}$$

式中, S 为断层面积; L 为断层长度; M_w 为矩震级。

经过多次地震动模拟的探索, Beresnev^[17]提出了子断层长度 ΔL 与震级之间的关系

$$\log \Delta L = 0.4M_w - 2 \tag{4}$$

随机有限断层模型合成地震动时主要包含三种参数:震源参数、路径传播效应参数以及场地效应参数。

(1)震源参数

根据 Brune^[18]提出的震源谱模型

$$S(M_0,f)=\frac{M_0}{(1+(\frac{f}{f_0})^a)^b} \tag{5}$$

式中, M_0 是地震矩, f 为频率, f_0 动力拐角频率。此外,震源参数中还包含震源深度及应力降 $\Delta\sigma$ 等。

(2)路径效应参数

路径效应参数主要包含路径品质因子 Q ^[19]和几何扩散函数的形式,在数值模拟过程中,对加速度时程随震中距的传播产生影响。

(3)场地效应参数

场地效应参数包含高频消减参数 Kappa^[20],场地放大效应参数等,反映了局部场地对地震的影响。

根据随机有限断层法参数类型,结合马尼拉海沟俯冲带地质构造、地震动活动性的特点,表1设定了该俯冲带板缘地震参数。

表1 马尼拉海沟俯冲带板缘地震参数
Table 1 Seismic Parameters of Plate Margin of Manila Trench subduction zone

参数类型	取值
矩震级	5.5 ~ 8.0
震源深度/km	[15 ~ 50]
断层类型	逆断层
应力降/kpa	14000
几何扩散形式	$1/R(R\leq 40\text{ km})$
	$1/R^{0.5}(R>40\text{ km})$
路径品质因子 Q	$120f^{0.40}$
Kappa	0.057
剪切波速/($\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$)	3.5
介质密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	3.3
窗函数	saragoni-Hart
路径放大因子	NEHRP C; $i=45.0^\circ$

在模拟马尼拉海沟俯冲带地震之前,为检验模拟效果,对实际板缘地震动不同台站的地震波形与相近地震参数下的模拟地震进行了对比,在此以日

本东北部俯冲带板缘地震为例，在KiK-net，K-net获取2011年3月28日发生于该俯冲带震源深度为31 km的6.5级板缘地震MYG003台站数据，该台站震中距为95 km，最大加速度为133 gal，然后通过数值模拟方法合成发生于该俯冲带的震级6.5级板缘地震，震中位置及震源深度等数据与上述日本地震相同，比较两种数据的加速度时程及反应谱 S_a ，见图4。

据图4所示，虽然在强震动出现时间方面有所差异，但加速度时程的模拟结果与实际地震动在峰值范围及强震动持时方面比较接近，且模拟数据的最大加速度为125 gal，接近实际地震，因此模拟效果较好；两种形式地震动加速度反应谱的峰值范围相当，且在周期大于1.0 s以后，反应谱值趋于平稳，但模拟结果要略小与实际地震动，鉴于加速度峰值在地震动特点研究、工程应用等方面更有价值，加速度反应谱的模拟结果是可靠的。综上所述，日本东北部俯冲带利用随机有限断层的模拟结果是合理的。

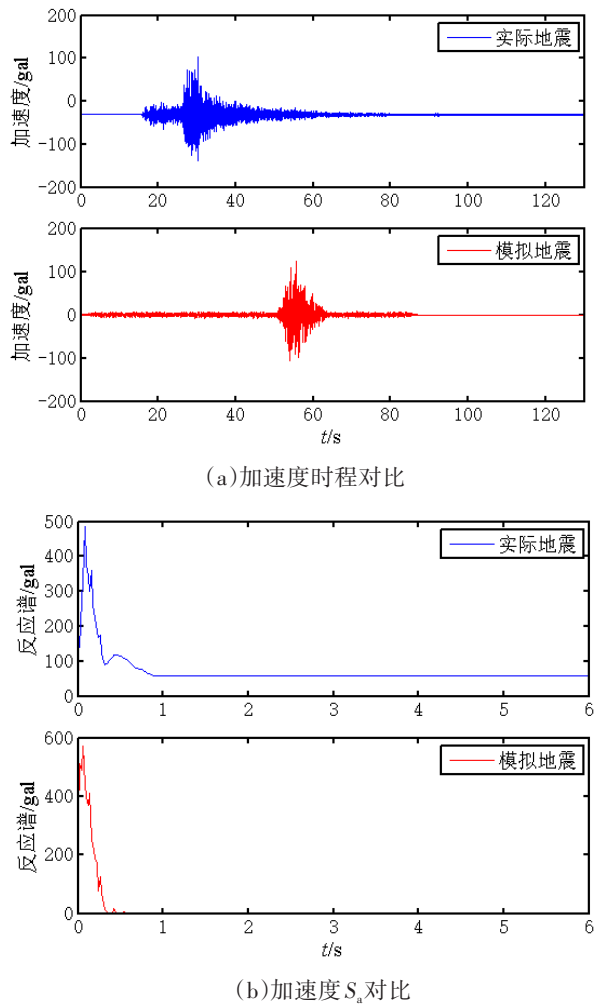


图4 日本东北部俯冲带加速度时程及 S_a 对比

Fig.4 Comparison of acceleration time history and S_a of the subduction zone in northeastern Japan

随机有限断层法经日本东北部俯冲带验证可靠后，根据表1马尼拉海沟俯冲带板缘地震参数，进一步模拟了该俯冲带震级为5.5、6.5及7.5级的板缘地震，震源深度设置为30 km，加速度时程及反应谱见图5。

图5所示，马尼拉海沟俯冲带加速度时程中强震动出现在50~60 s区间内，且震级每增加一级，大震级加速度峰值为小震级的2.0~2.5倍，而震级变化并未改变加速度时程特点。在加速度反应谱图中，破坏性大的反应谱值主要在0~0.5 s，之后反应谱值趋于平稳(谱值>0)，这一现象表明该俯冲带地震发生时，工程结构对地震波反应最为强烈的时间为0~0.5 s。

2 衰减关系的建立

地震动衰减关系即地震动参数(PGA及 S_a)随震级、距离(断层距或震中距)、震源深度及场地条件等因素变化的关系。在研究南海海域地震动衰减关系时，胡进军等^[14]采用了赵兴权等^[21]建立日本东北部俯冲带地震动衰减关系时的模型，经过南海海域板内地震动衰减关系建立过程的验证，本模型在描述地震动衰减规律时精确度高，适用性强，因此本文将该模型修改为适合板缘地震动的形式，见公式(6)

$$\log_e[y_{ij}(T)] = aM_w + bx_{ij} - \log(x_{ij} + d\exp(eM_w)) + f(h - h_c) + S_1 + S_k + \sigma$$

式中， $y_{ij}(T)$ 表示地震动参数，如PGA及 S_a 等； M_w 为矩震级； x_{ij} 为震中距； S_1 为板缘地震动参数； S_k 表示场地系数，表示场地条件对衰减关系的影响； σ 是标准差。

根据表1中马尼拉海沟俯冲带附近震源、场地及传播路径等地震参数合成地震动加速度时程后，利用公式(6)对数据进行随机效应回归，建立了该俯冲带PGA及各周期 S_a 的衰减关系，系数见表2，在这里，所模拟的地震震级范围为5.5~8.0级，震源深度为15~40 km。

获得马尼拉海沟俯冲带板缘地震动模拟衰减关系后，在无法利用实际地震数据来验证数值模拟所得板缘地震动衰减关系准确性的前提下，为提高模拟数据建立的地震动衰减关系的可靠性，本文采用胡进军等南海俯冲带板内地震动时衰减关系衍生方法的思路，建立马尼拉海沟俯冲带板缘地震动衰减关系。

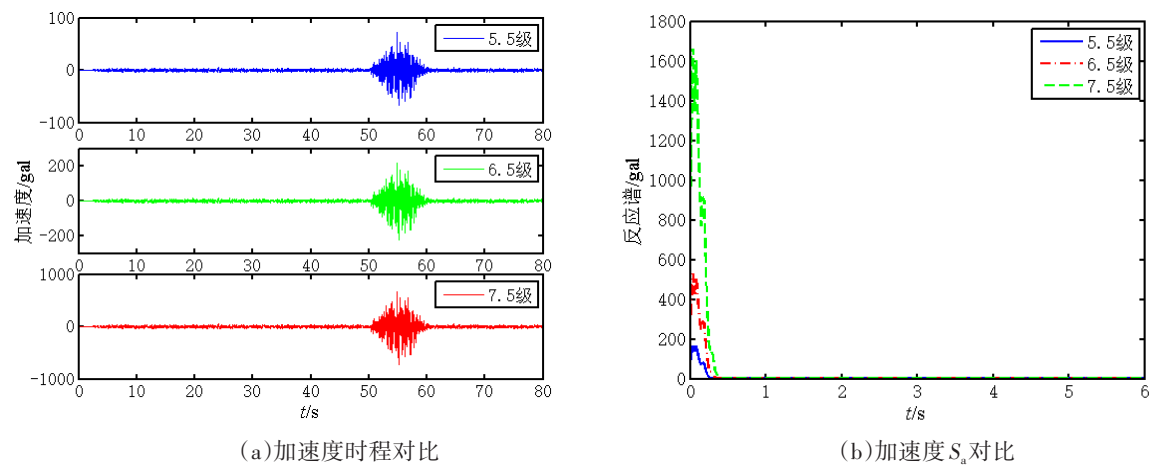


图5 马尼拉海沟俯冲带加速度时程及S_a对比
Fig.5 Comparison of acceleration time history and S_a of Manila Trench subduction zone

首先通过模拟地震数据建立日本东北部俯冲带的模拟衰减关系，并建立与马尼拉海沟俯冲带板缘模拟衰减关系之间的数量关系；然后以日本东北部俯冲带经验衰减关系为基础，衍生得到马尼拉海沟俯冲带板缘地震动衰减关系，其中，日本东北部俯冲带经验衰减关系为以日本东北部俯冲带板缘、板内地震动以及部分浅地壳的地震动记录为基础，通过衰减关系模型回归得到的包括板缘地震、板内地震及浅地壳地震在内的地震衰减关系系数。

表2 马尼拉海沟俯冲带板缘地震动模拟衰减关系系数
Table 2 Simulated attenuation relation coefficient of ground motion at the plate edge of the Manila Trench subduction zone

周期	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>S_l</i>	<i>S_k</i>	<i>σ</i>
PGA	0.920 60	-0.010 05	0.000 00	4.646 32	0.011 89	2.781 91	-1.093 99	0.118 31
0.10	0.810 79	-0.012 20	0.000 00	4.663 86	0.013 60	3.304 36	-0.145 52	0.170 66
0.25	0.837 74	-0.011 30	0.000 00	4.552 66	0.013 93	3.032 41	0.035 13	0.158 24
0.50	0.929 13	-0.009 15	0.000 00	4.565 66	0.013 33	2.409 25	-0.362 26	0.141 68
1.00	1.108 55	-0.007 13	0.000 00	2.915 17	0.011 94	1.541 95	-1.278 59	0.124 97
1.50	1.252 71	-0.006 04	-0.000 01	1.955 95	0.011 90	0.402 42	-1.578 99	0.129 71
2.00	1.397 24	-0.005 62	0.000 00	4.446 51	0.011 09	-0.224 44	-2.207 09	0.130 48
2.50	1.508 35	-0.004 95	-0.001 12	1.257 98	0.011 80	-0.782 87	-2.769 73	0.131 09
3.00	1.633 86	-0.004 88	-0.000 76	1.254 99	0.011 36	-1.299 29	-3.280 70	0.134 83
4.00	1.806 53	-0.004 38	-0.011 30	0.928 48	0.009 17	-2.092 12	-4.073 54	0.139 10
5.00	1.964 13	-0.004 00	-0.173 43	0.542 11	0.009 43	-2.814 91	-4.796 33	0.140 20

以衰减关系的对数形式表示表示衍生过程，见公式(7)

$$\log \frac{Y_T}{M_T} = \log \frac{E_J}{M_J} \tag{7}$$

式中， E_J 、 M_J 分别表示日本东北部俯冲带板缘地震动经验、模拟衰减关系； M_T 表示马尼拉海沟俯冲带地震动模拟衰减关系。对公式(7)数学变换，得到马尼拉海沟俯冲带板缘地震动衍生衰减关系为

$$\log Y_T = \log E_J + (\log M_T - \log M_J) \tag{8}$$

用公式(6)分别表示公式(8)中的 $\log M_T$ 、 $\log M_J$ 及 $\log E_J$ 并合并同类项，最终马尼拉海沟俯冲带板缘地震衍生衰减关系表示形式为

$$\log Y_T = aM_w + bx_{ij} - \log_e \left(\frac{x_{ij} + d_{M_T} \exp(e_{M_T} M_w)}{x_{ij} + d_{M_J} \exp(e_{M_J} M_w)} \right) [x_{ij} + d_{E_J} \exp(e_{E_J} M_w)] + f(h - h_c) + S_l + S_k \tag{9}$$

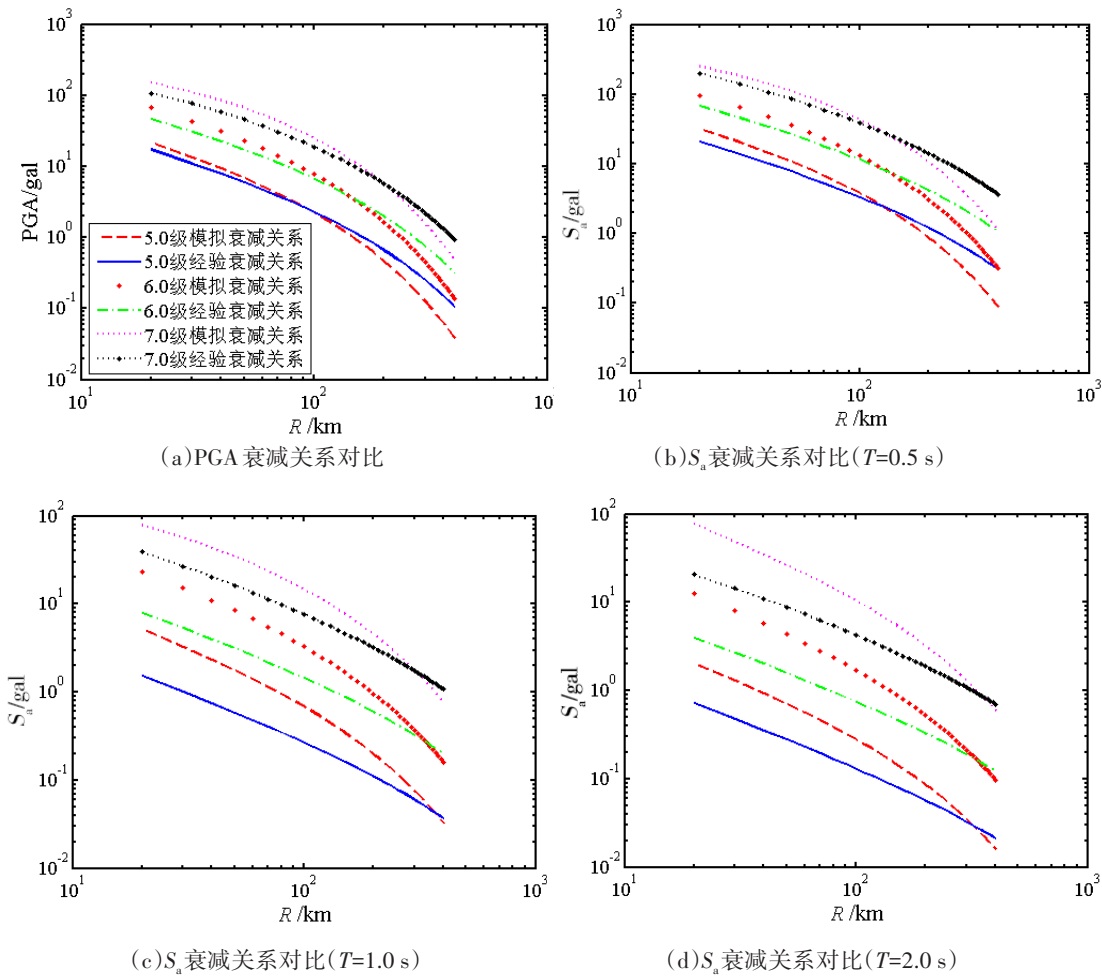
根据日本东北部俯冲带板缘地震动地震参数，

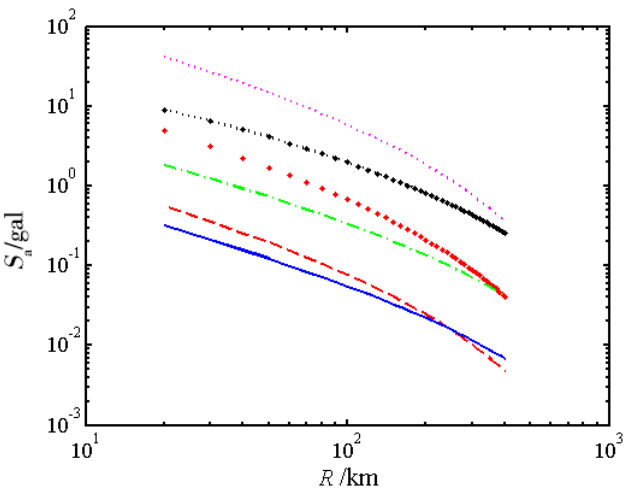
采用随机有限断层法模拟了该俯冲带地震动加速度时程后，首先建立了该俯冲带的板缘地震动PGA及 S_a 的衰减关系，衰减关系系数见表3。

表3显示，PGA及各周期反应谱的衰减关系模拟结果，标准差均小于0.15，表明数值模拟板缘地震动加速度时程时设定的参数及回归得到的板缘

地震动衰减关系比较合理；通过数值模拟方法建立日本东北部俯冲带板缘地震动模拟衰减关系之后，为进一步验证模拟结果的适用性，作出震级为5.0、6.0及7.0级时PGA以及周期分别为0.5 s，1.0 s，2.0 s，3.0 s，5.0 s的 S_a 经验及模拟衰减关系曲线，见图6。

表3 日本东北部俯冲带板缘地震动模拟衰减关系系数								
Table 3 Simulated attenuation relation coefficient of ground motion in the subduction zone of northeast Japan								
周期	a	b	d	e	f	S_l	S_k	σ
PGA	1.287 73	-0.008 96	0.001 83	1.328 99	0.025 95	0.806 31	-1.313 94	0.063 76
0.10	1.264 19	-0.010 48	0.004 38	1.201 99	0.026 50	0.951 77	-0.439 73	0.071 17
0.25	1.250 59	-0.009 23	0.015 94	1.012 20	0.027 75	0.809 84	-0.225 60	0.072 78
0.50	1.289 03	-0.007 96	0.035 16	0.897 05	0.026 37	0.035 67	-0.118 37	0.077 41
1.00	1.372 14	-0.006 90	0.019 43	1.013 78	0.024 61	0.524 35	-1.687 66	0.089 65
1.50	1.503 28	-0.006 30	0.011 33	1.097 24	0.024 33	-0.123 37	-2.335 37	0.102 29
2.00	1.595 57	-0.005 52	0.000 10	1.683 05	0.023 92	0.450 84	-4.011 16	0.103 73
2.50	1.710 21	-0.005 13	0.000 00	2.152 75	0.021 61	-0.819 76	-3.806 76	0.118 75
3.00	1.810 47	-0.004 90	0.000 00	2.129 50	0.020 61	-1.279 57	-4.266 57	0.122 04
4.00	2.008 43	-0.004 77	0.000 00	2.175 73	0.019 03	-2.118 61	-5.105 63	0.130 18
5.00	2.159 97	-0.004 69	0.000 00	2.508 18	0.017 37	-2.779 20	-5.766 20	0.135 61





(f) S_a 衰减关系对比 ($T=5.0$ s)

图6 日本东北部俯冲带经验与模拟衰减关系对比

Fig.6 Comparison of the empirical attenuation relationship and the simulated one in the subduction zone of northeastern Japan

图6表示日本东北部俯冲带板缘地震动经验衰减关系与模拟衰减关系的PGA以及部分周期反应谱的对比结果。图中显示：①PGA以及短周期 S_a 的衰减关系中，采用数值模拟所得结果与经验衰减关系从量值及衰减规律的角度来看都比较接近，随着周期变大，二者间的差距会增大^[22]，但是经验衰减关系与所模拟的加速度数据仍然具有很强的相关性；②无论是PGA还是各周期 S_a ，模拟衰减关系的衰减速率在远场均大于经验衰减关系，造成此现象的原因主要是模拟情况下考虑的场地条件相对简单，而实际情况下场地条件比较复杂，对衰减的影响较大；③震级越大，两种类型衰减关系数值的差值会越大，这一现象表明随机有限断层法对中小震得模拟效果要优于大震。

表4 震级及距离综合项系数			
Table 4 Coefficient of magnitude and distance			
周期	c'	d'	e'
PGA	0.990 95	0.000 000	3.218 93
0.10	0.997 80	0.000 000	4.285 54
0.25	0.991 35	0.000 000	3.887 10
0.50	0.984 63	0.000 000	3.567 03
1.00	0.985 69	-0.000 053	1.784 77
1.50	0.987 63	-0.001 099	1.391 23
2.00	0.993 20	0.000 000	2.779 45
2.50	0.995 23	-0.000 023	1.860 47
3.00	0.996 33	-0.000 011	1.943 54
4.00	0.993 11	-0.000 021	1.882 42
5.00	0.990 89	-0.000 001	2.245 14

在马尼拉海沟俯冲带板缘地震动模拟衰减关系以及与日本东北部俯冲带板缘地震动模拟衰减关系之间的数量关系建立之后，公式(9)所示衍生衰减关系建立过程中，震级、距离综合项所表示的形式较为复杂，且除该项之外，其他项在合并同类项时，均可通过系数作差来完成，而该震级、距离综合项是对数形式，作差运算不符合合并同类项规律，因此将该项进行以简化形式为目的的拟合，使形式更为简洁，该过程可以表示为公式(10)，拟合结果见表4。

$$\frac{x_{ij} + d_{M_T} \exp(e_{M_T} M_w)}{x_{ij} + d_{M_j} \exp(e_{M_j} M_w)} [x_{ij} + d_{E_j} \exp(e_{E_j} M_w)] =$$
$$c' x_{ij} + d' \exp(e' M_w) \tag{10}$$

在表4中将震级、距离项通过回归分析简化后，马尼拉海沟俯冲带板缘地震动的衍生衰减关系也可以作相应的简化，见公式(11)，最终衍生得到的马尼拉海沟俯冲带带板缘地震动衰减关系系数见表5。

$$\log_e [y_{ij}(T)] = aM_w + bx_{ij} - \log_e (c' x_{ij} + d' \exp(e' M_w))$$
$$+ f(h - h_c) + S_l + S_k + \sigma \tag{11}$$

3 衰减关系性质的讨论

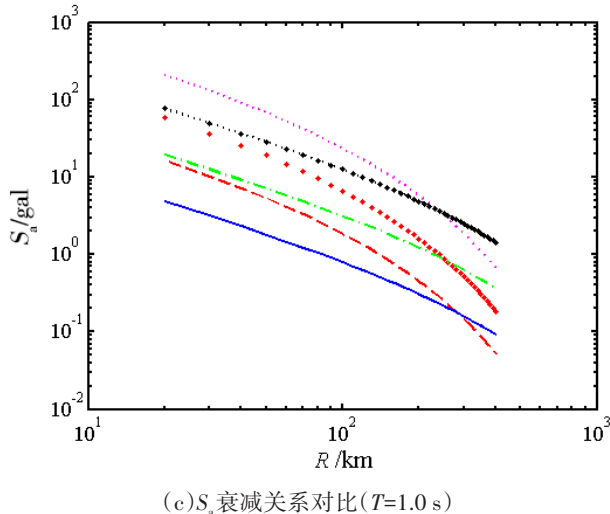
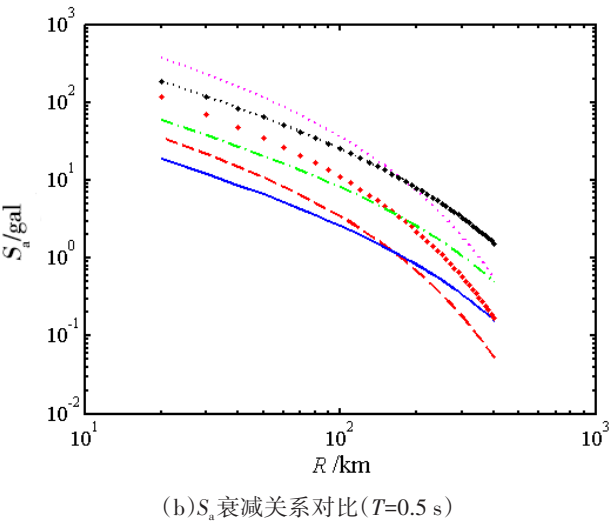
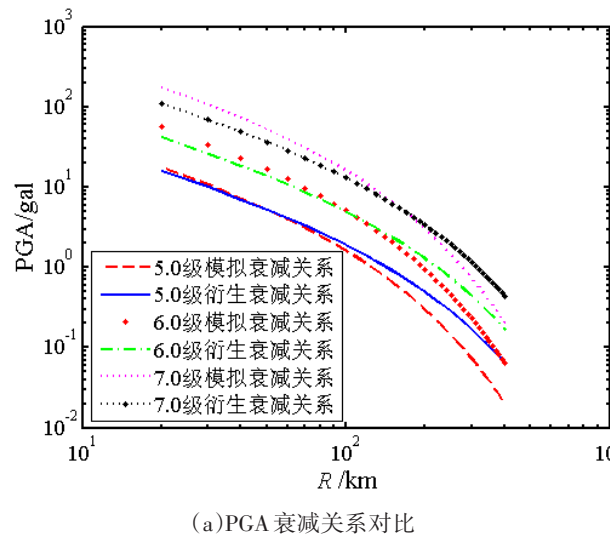
对于衰减关系的性质，主要关注随震级、震源深度的变化以及随震中距的衰减速率或趋势等特性，图7中作出了不同震级，震源深度为40 km时，马尼拉海沟板缘地震动PGA及部分周期反应谱衰减关系。

表 5 马尼拉海沟俯冲带板缘地震动衍生衰减关系系数

Table 5 Derivative attenuation coefficients of ground motions in the sbduction zone of the Manila Trench

周期	a	b	c'	d'	e'	f	S_1	S_k
PGA	0.733 86	-0.006 73	0.990 95	0.000 000	3.218 93	0.000 06	1.975 60	0.512 95
0.10	0.664 60	-0.009 58	0.997 80	0.000 000	4.285 54	0.001 32	2.352 59	1.793 20
0.25	0.736 15	-0.007 97	0.991 35	0.000 000	3.887 10	0.000 77	2.222 57	1.381 73
0.50	0.890 10	-0.004 57	0.984 63	0.000 000	3.567 03	-0.001 89	2.320 58	-0.450 90
1.00	1.215 40	-0.002 43	0.985 69	-0.000 053	1.784 77	-0.002 62	0.778 60	-2.041 93
1.50	1.370 43	-0.001 98	0.987 63	-0.001 099	1.391 23	-0.003 15	0.219 79	-3.131 62
2.00	1.495 67	-0.002 11	0.993 20	0.000 000	2.779 45	-0.004 51	-0.996 28	-2.978 93
2.50	1.546 15	-0.001 69	0.995 23	-0.000 023	1.860 47	-0.002 05	-0.300 11	-4.406 97
3.00	1.582 39	-0.001 45	0.996 33	-0.000 011	1.943 54	-0.002 81	-0.350 71	-4.853 13
4.00	1.624 10	-0.001 57	0.993 11	-0.000 021	1.882 42	-0.003 97	-0.363 51	-5.565 90
5.00	1.629 15	-0.001 68	0.990 89	-0.000 001	2.245 14	-0.002 84	-0.533 70	-5.782 12

据图 7 所示，PGA 及短周期反应谱的模拟衰减关系与衍生衰减关系结果比较接近，但模拟衰减的 PGA 及反应谱随震中距的衰减速率要快于衍生衰减关系，并且随着震级增大，两种类型衰减关系 PGA 或反应谱等值点的震中距不断减小，这一现象表明，在短周期时，通过衍生方法得出的衰减关系更多考虑了场地条件、传播路径等因素，衰减关系更接近实际，但在短周期模拟衰减关系与衍生衰减关系差异较小，精确性可以满足要求；在长周期，两种方法所得的衰减关系差距较大，且模拟衰减关系所得的反应谱值更大，鉴于随机有限断层法模拟地震数据对短周期比长周期更有效的特点，在给定马尼拉海沟俯冲带板缘地震动衰减关系时，以衍生衰减关系为准。



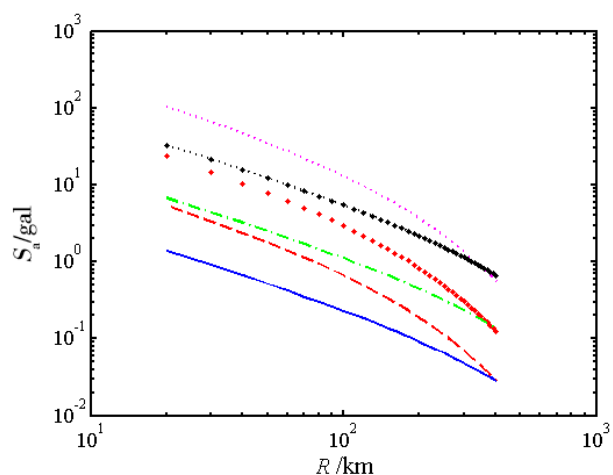
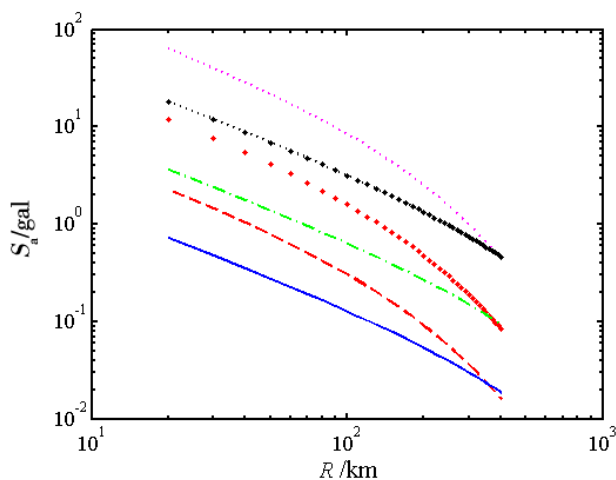
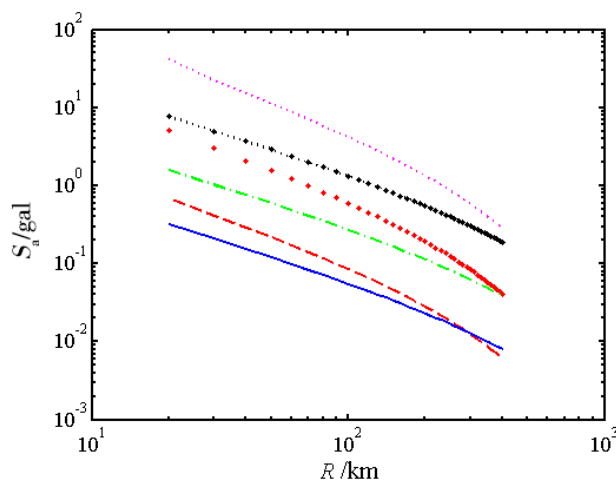
(d) S_a 衰减关系对比 ($T=2.0$ s)(e) S_a 衰减关系对比 ($T=3.0$ s)(f) S_a 衰减关系对比 ($T=5.0$ s)

图7 板缘地震动模拟与衍生衰减关系对比

Fig.7 Comparison of simulated attenuation relationship and derived one of ground motion at the plate edge

4 结论与讨论

本文以马尼拉海沟俯冲带为研究对象,分析了该俯冲带所在区域自1901年来历史破坏性地震的分布,并采用数值模拟方法合成了该俯冲带板缘地震,分析了地震特点,分别通过模拟数据及衍生方法建立了板缘地震动衰减关系,得到以下结论:

(1)俯冲带所在区域地震震中主要集中在马尼拉海沟及其东侧,多次发生震级大于7.0级的地震,破坏性很强,对南海海域的影响不容忽视;

(2)在地震动加速度时程中,强震动主要集中在50~60 s左右,加速度反应谱中,0~0.5 s谱值较大,对建、构筑物影响较大;

(3)在PGA及短周期 S_a 的衰减关系中,衍生方法得出的衰减关系更多考虑了场地条件、传播路径等因素,衰减关系更接近实际,但模拟衰减关系与衍生衰减关系差异较小,精确性可以满足要求;在长周期,两种方法所得的衰减关系差距较大,且模拟衰减关系所得的反应谱值更大,鉴于随机有限断层法模拟地震数据对短周期比长周期更有效的特点,在给定马尼拉海沟俯冲带板缘地震动衰减关系时,以衍生衰减关系为准。

参考文献

- [1] 吕川川,郝天珧, Rawlinson N,等. 苏拉威西俯冲带结构与俯冲起始机制的三维地震观测[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(5): 131-137.
- [2] Tichelaar B W, Ruff L J. Seismic coupling along the Chilean subduction zone[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(B7): 11997-12022.
- [3] 陈传绪,吴时国,赵昌垒. 马尼拉海沟北段俯冲带输入板块的不均一性[J]. 地球物理学报, 2014, 57(12): 4063-4073.
- [4] 王霄飞,余珊,李三忠,等. 板缘与板内活动构造与地震触发机制对比[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(2): 160-175.
- [5] 胡进军,杨泽西,谢礼立. 海域地震动研究现状分析[J]. 世界地震工程, 2019, 35(3): 28-36.
- [6] Atkinson G M. Empirical ground motion relations for earthquakes in the Cascadia region[J]. Civil Engineering, 1997(24): 64-77.
- [7] Si H J, Midorikawa S. New attenuation relations for peak ground acceleration and velocity considering effects of fault

- type and site condition[C]//12WCEE.Auckland, New Zealand: 12WCEE, 2000.
- [8] Atkinson G M, Boore D M. Empirical ground-motion relations for subduction zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(4): 1703–1729.
- [9] 郝彦春. 俯冲带地震动特性及衰减规律初步研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2015.
- [10] 胡进军, 郑旭, 郝彦春, 等. 俯冲带地震动特征及其衰减规律探讨[J]. 地球物理学报, 2017, 60(5): 1773–1787.
- [11] Youngs R R. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 68(1): 58–73.
- [12] Chang T Y, Cotton F, Angelier J. Seismic attenuation and peak ground acceleration in Taiwan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(5): 1229–1246.
- [13] Lin P S, Lee C T. Ground-motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes in northeastern Taiwan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(1): 220–240.
- [14] 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(6): 36–49.
- [15] Boore D M. SMSIM-Fortran programs for simulating ground motions from earthquake: version 1.0, U. S. A modified version of OFR[J]. Geological Survey, 1996(56): 1.
- [16] Wells D L, Coppersmiths K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(4): 974–1002.
- [17] Beresnev I A, Atkinson G M. Modeling finite-fault radiation from the ω^n spectrum[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(1): 67–84.
- [18] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(26): 4997–5009.
- [19] 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、场地效应及震源参数研究[J]. 地震工程学报, 2018, 40(6): 1313–1324.
- [20] 郑旭, 胡进军, 谢礼立, 等. 基于山东省场地的沂沭断裂带地震动高频消减作用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(12): 55–62.
- [21] Zhao J X, Zhang J, Asano A, et al. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(3): 898–913.
- [22] 姜明秀, 张潇男, 康莉莉. 俯冲带板内地震水平加速度谱的阻尼比修正系数模型研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(4): 126–138.