

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231120003

海域地震动强度包络模型研究*

张超^{1,2}, 陈 隳¹, 武 程¹, 杜修力³, 赖志超², 王丕光³

(1. 福州大学先进制造学院, 福建 泉州 362200; 2. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 3. 北京工业大学城建学部建筑工程学院, 北京 100124)

摘要: 人工模拟地震动是目前开展海洋工程结构抗震分析的主要地震输入分析。强度包络函数是人工模拟地震动的重要参数, 决定了地震动的强度非平稳性特性, 并对地震动持时起控制作用。目前的地震动强度包络模型均是基于陆域地震动记录统计分析得出, 无法准确反应海域地震动的强度特性。因此, 基于日本 K-Net 强震动观测台网的实测地震数据库, 分析海域地震动在时域中强度分布特性; 提出适用于海域地震动的三段式强度包络模型, 回归得到震级 M 、震中距 R 及关键参数上升段 t_1 、强震平稳段 t_s 、下降段衰减率 c (无量纲) 的计算表达式; 研究震级、震中距对海域地震动强度包络模型的影响规律, 并探讨海域地震动与陆域地震动强度包络模型的异同。研究结果表明: 海域地震动强度包络模型中关键参数上升段 t_1 、强震平稳段 t_s 、下降段衰减率 c 的取值范围分别为 $[13\sim 52\text{ s}]$, $[12\sim 79\text{ s}]$, $[0.037\sim 0.173]$; 震级对关键参数 (t_1 、 t_s 、 c) 的影响要大于震中距; 与陆域地震动相比, 海域地震动的强度包络模型的下降段衰减率 c 相差显著, 且各关键参数的分布范围更大。

关键词: 海域地震动; 强度包络模型; 衰减关系; 三段式模型; 相模湾地区

中图分类号: P314.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)03-0506-12

Study on Intensity Envelope Models for Offshore Ground Motion

ZHANG Chao^{1,2}, CHEN Long¹, WU Cheng¹, DU Xiuli³, LAI Zhichao², WANG Piguang³

(1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362200, China; 2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 3. School of Architectural Engineering, Department of Urban Construction, Beijing Institute of Technology (BIT), Beijing 100124, China)

Abstract: Artificially simulated earthquake motion is currently the main seismic input for seismic analysis of marine structures. The intensity envelope function, a crucial parameter for artificial simulation of ground motions (GMs), determines the non-stationary intensity characteristics of GMs and controls the duration. Existing intensity envelope models, derived from a large amount of onshore earthquake GM records, cannot accurately reflect the intensity distribution characteristics of offshore GMs. Therefore, this study focuses on intensity envelope models for offshore GMs. Firstly, an offshore earthquake GM database was established based on the records selected from the K-Net strong motion observatory network in Japan. The intensity distribution characteristics of offshore ground motions in the time domain were studied. Secondly, this study proposed a three-stage intensity envelope model suitable for offshore GMs. Computational expressions for earthquake magnitude M , epicentre distance R , and key parameters including the rising segment t_1 , the steady segment t_s , and the decay rate of the de-

* 收稿日期: 2023-11-20; 修回日期: 2024-01-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178464)资助

作者简介: 张超(1985—), 男, 教授, 博士。主要从事近海梁抗震防灾研究。E-mail: zhangchao1985@fzu.edu.cn

scending segment c (dimensionless) were derived through regression analysis. Thirdly, the impact of earthquake magnitude and epicentre distance on the intensity envelope model for offshore GMs was investigated. At last, the similarities and differences between the intensity envelope models suitable for offshore and onshore GMs were compared. The research results indicate that: the key parameters, including the rising segment t_1 , the steady segment t_s , and the decay rate of the descending segment c , have ranges of [13 s~52 s], [12 s~79 s], and [0.037~0.173], respectively, for the intensity envelope model of offshore ground motions. The effect of magnitude on key parameters (t_1 , t_s , c) is greater than that of epicentre distance. Compared with onshore ground motions, the intensity envelope model for offshore GMs differs significantly in the attenuation rate c in the descending segment, and the distribution range of each key parameter is larger.

Keywords: offshore ground motions; intensity envelope model; attenuation relationship; three-stage model; Sagami Bay area

0 引 言

人工合成地震波因其在满足需求的地震动强度、频谱及持时方面具有任意性,被广泛应用于工程结构抗震设计。在工程中,所采用的人工合成地震动主要是通过包络函数来模拟地震波的强度非平稳特性^[1]。强度包络函数参数的选取一定程度上决定了人造地震动时程曲线的形状,对强震动持续时间和地震动总持时起控制作用,同时强度包络函数对结构的时程响应和随机响应具有显著影响^[2-3]。可见,强度包络函数在人工合成地震动和地震动随机模型化等方面发挥着重要作用。

国内外学者针对地震动包络函数已开展系统的研究工作。霍俊荣等^[4]研究了包络函数与震级、震中距和场地条件的关系及其变化特征;杨文政等^[5]基于我国地震震动参数区划图,推导出区域地震活动性加速模型基本公式;S.Sgobba等^[6]提出了一致 Husid 包络函数,预测与给定地震情景相对应的峰值地面加速度值的分布;P.J.Stafford等^[7]提出了一种基于能量的包络函数,其包络函数与地面运动的阿里亚斯强度以及阿里亚斯强度随时间积累的方式直接相关;P.Cacciola^[8]提出了一种产生谱相容的完全非平稳地震的新方法,通过由记录的地震模拟的完全非平稳对应和校正随机过程来叠加模拟。但是,已有针对地震动强度包络函数的研究均是针对陆域地震动记录得到。

已有研究表明,相较于陆域地震动,海域地震动在诸多特性方向有明显的不同。陈苏等^[9]利用美国加州及日本相模湾附近海域地震台站采集的地

震动记录,计算得到近海域地震动时频分布特征,经研究发现海域地震动的竖向与水平峰值加速度比明显小于相邻陆域地震动;X.Cui等^[10]通过分析 Off-Fukushima 地震的地震动幅值、频谱和持时特征,比较了海域与陆域地震动衰减特性的异同,还与俯冲带地震动模型(GMM)进行了对比分析;H.Diao等^[11]通过理论方法研究海水对垂直地震动的影响,用统计方法分析实际的海域地震动记录,得出海域运动的 V/H 可能小于陆域地面运动的结论。Q.Zhang等^[12]提出近海地震地震动的独特特征,可以通过峰值地面加速度(PGA)和 $(V/H)PGA$ 比率来解决;G.M.Atkinson等^[13]采用全球范围内的俯冲带地震强震动观测数据,建立了全球性俯冲带地震动衰减关系,并区分板缘与板内地震在衰减特性上的不同;荣棉水等^[14]发现海域场地对地震动影响的特征,即地震动峰值加速度竖向与水平向的比值,海域场地明显小于陆域场地;吕悦军等^[15]研究得出渤海海底表层软弱土对峰值加速度和反应谱的影响;缪涵等^[16]研究海床场地地震动特性,考虑海床非线性场地效应程度。综上,海域地震动在幅值、频谱、场地条件等方面均与陆域地震动有显著区别。

随着我国海洋战略的推进,对海洋结构抗震安全日益重视,海域地震的地质环境以及传播机制不同,导致不同地震事件的地震动特性差异很大。因此,进行海域地震动拟合时采用的强度包络函数也应有所差别^[17]。但是,目前已有的地震动强度包络函数的研究均是基于陆域地震动记录得到,并不适用于海域地震动拟合。现如今,全球已建成多个海域强震台网(日本海沟地震和海啸海底观测网(S-Net)、

SEMS台网、日本K-Net强震动观测台网海底观测台阵等),极大程度地丰富海域地震动实测记录数据库,也为学者们开展海域地震动的包络函数的研究提供基础数据。

为研究适用于海域地震动的强度包络函数,本文拟建立海域地震动记录数据库,开展海域地震动强度分布特性的规律研究,探讨适用于表征海域地震动强度分布特性的包络模型,提出相应关键参数的取值建议,并揭示海域地震动强度包络模型与现有陆域模型的差异。

1 海域地震动数据库及特性分析

1.1 海域地震动记录数据库建立

日本K-Net强震动观测台网由1 000多个观测站组成,每20公里分布一次,均匀覆盖日本^[18]。K-Net强震动观测台网自1996年6月以来一直由国家地球科学和抗灾研究所(NIED)运营,且由各机构运作的地震台网的高灵敏度数据已传送给日本气象厅,并由日本气象厅处理,以监测日本境内和周围地区的地震活动。此外,观测井在挖掘时调查得到的地质柱状图和钻井测试数据也能在防灾科研

的网站^[18]直接下载。

为了科学合理地研究海域地震动的特性,本文从日本K-Net强震动观测台网数据库选取了6个海底强震台站的地震记录。为了对比海域地震动与陆域地震动之间的差异,同时从K-Net强震动观测台网数据库选取了12个陆地台站。此12个陆地台站的选取原则如下:(1)位于相模湾区域,且较靠近6个海底台站;(2)在不同地震事件中尽可能选取相同的陆地台站;(3)尽可能选取场地土为中硬土的陆地台站,土层平均剪切波速为180~380 m/s。图1(a)为6个海底强震台站和12个陆地强震台站分布图。

本文选取了2000~2023年,矩震级大于5.0级、震中距在950 km以内的301次地震事件,包括193次海域地震事件(震源位置为海底)和108次陆域地震事件(震源位置为陆地)。在301次地震事件中,根据海底台站与陆地台站的位置,划分为1 273条海域地震动记录与1 163条陆域地震动记录如图1所示。其中,每条记录均包含2条水平向地震动与1条竖向地震动。根据参考文献[20],本文将震级4.9~6.5级划分为中震,6.6~9.0级划分为强震;将震中距0~29 km划分为近场,将震中距30~139 km划分为中近场,将震中距140 km以上划分为远场。

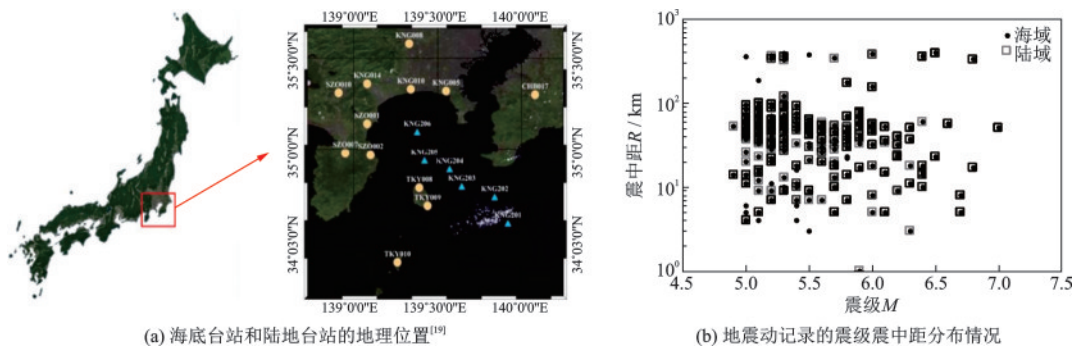


图1 日本K-Net强震动观测台站地震动数据的选取

Fig.1 Selection of ground motion records from K-Net stations in Japan

1.2 海域地震动记录预处理

K-Net强震动观测台网数据库下载得到的地震动信息可能包含了背景噪声或仪器噪声,因此需要对下载的地震动记录进行滤波和基线校正等预处理。

由于仪器倾斜等原因,原始地震动记录可能存在基线偏移,积分运算后对速度时程和位移时程的影响将十分显著^[21],所以需要从未经过处理的地震

动数据进行基线校正。根据D.M.Boore^[22]提出的处理方法对选定的地震动数据进行基线校正。由于受到背景噪声或仪器噪声的污染,还需要对校正后的地震动记录进行滤波处理^[21]。滤波采用4阶Butterworth带通滤波器,截止频率为0.1~35 Hz。

以地震动记录KNG2012106070311的EW向为例,图2为该地震动记录基线校正前后的加速度、速度和位移时程曲线。

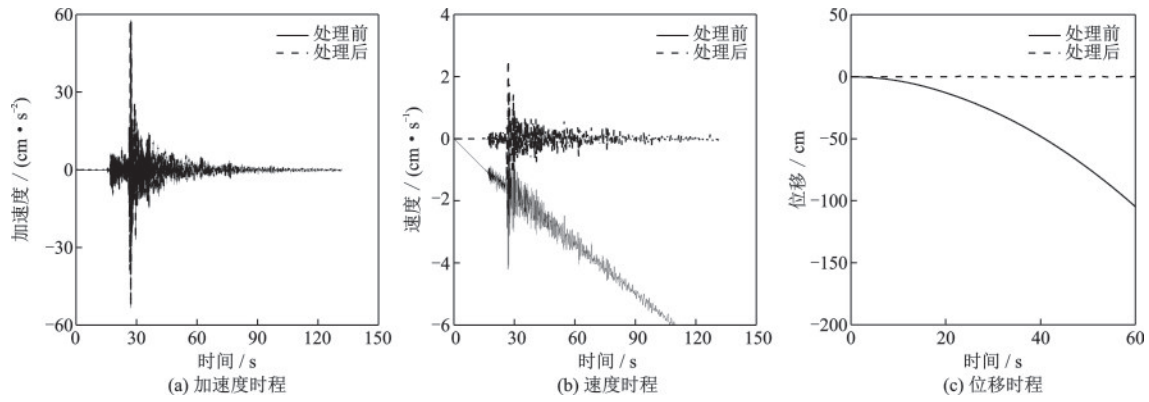


图2 基线校正前后时程对比

Fig.2 Time history comparison before and after baseline correction

1.3 海域地震动特性分析

相比于陆域地震动,海域地震动受到的影响因素更多更复杂,水深、震中距、海底场地条件和地形条件都可能造成海域与陆域地震动的差异,分析实际地震动记录是研究海域地震动特性及影响因素最直接的方法。

图3、图4分别给出了海域与陆域地震动的峰值加速度PGA与震级M和震中距R的分布图。

由图3的(a)、(b)可得,在不同震级下,海域与陆域地震动记录的水平向PGA在0~250 gal分布较均匀,相差较小;由图3(c)可得,在不同震级下,陆域地震动记录的竖向PGA主要分布在0~60 gal,而海域地震动的竖向PGA分布范围较小,主要集中在0~25 gal。

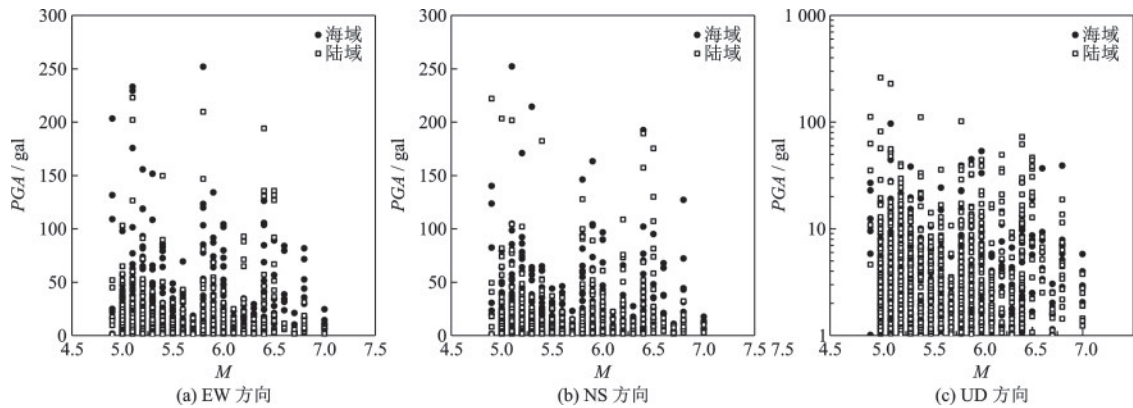


图3 不同震级下PGA分布

Fig.3 Distribution of PGA for different earthquake magnitude

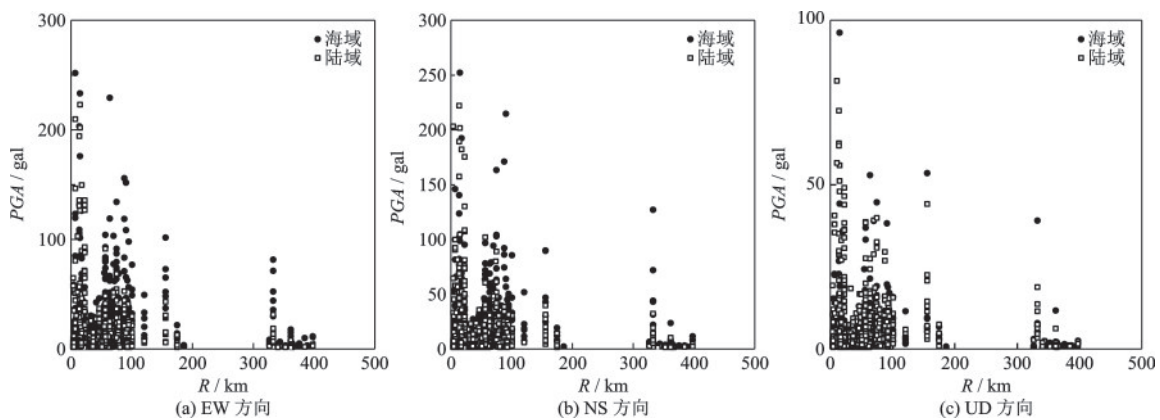


图4 不同震中距下PGA分布

Fig.4 PGA Distribution for different epicenter distances

由图4可知,海域与陆域地震动的水平向PGA和竖向PGA主要集中在震中距200 km以内,现有数据库缺少震中距在200~300 km的地震动记录。

图5比较了本文地震动数据库中海域与陆域的竖向与水平向PGA之间的关系。对海域与陆域地震动记录PGA数据点进行线性拟合,拟合曲线的斜率即为平均竖向与水平向PGA比值,记为 V/H ,拟合结果见图5(a)。竖向与水平EW向的PGA比值、竖向与水平NS向的PGA比值分别记为 V/H_{EW} 、 V/H_{NS} 。经过拟合与统计可得,陆域地震动记录的平均竖向与水平向PGA比值 $V/H=0.474$,而海域地震动记录的平均竖向与水平向PGA比值 $V/H=0.187$ 。可以发现:海域地震动记录的竖向与水平向PGA的比值明显小于陆域地震动记录。

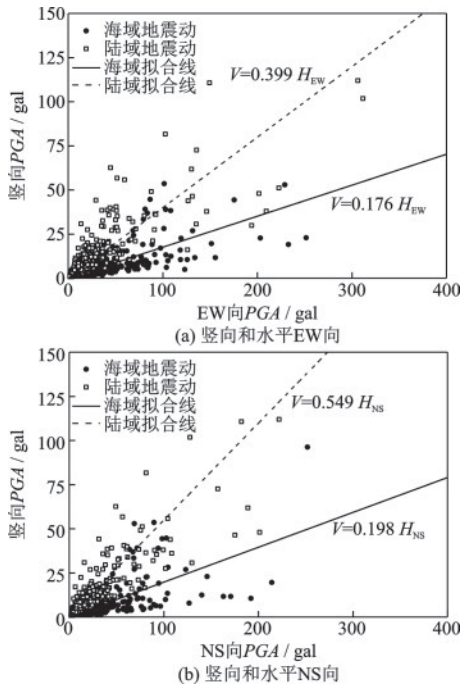


图5 竖向和水平分量的PGA比值

Fig.5 Ratios of PGA between vertical and horizontal components

2 海域地震动的强度包络函数模型

2.1 强度包络函数模型

在人造地震动过程中,必须用一个随时间不断变化的函数过程才能较完整地描述地震动时程强度的变化特性,强度包络函数恰好能够表现这种非平稳特性,在原有平稳随机过程 $x(t)$ 基础上附加了

一个确定性的随时间变化的强度包络 $f(t)$ (又称强度包络函数),从而体现出地震动 $y(t)$ 的幅值非平稳特性,即:

$$y(t)=f(t) \times x(t) \quad (1)$$

一般地,将此处确定性函数近似看成强度包络函数^[2]。

三段式包络函数模型充分考虑了地震动时程平稳段持续的首末时间以及下降段衰减的快慢程度。相比较其他模型,三段式模型能够在每个阶段考虑到地震波的不同动态特性,可较为简化地模拟实际地震波的特征,并可根据具体的工程需求进行参数调整^[23]。目前,三段式模型被现行抗震规程推荐使用,如日本和美国的核电站抗震设计规范^[24-25],以及我国的《建筑抗震设计规范》^[26]。图6是典型的三段式包络函数模型^[27],包括由弱到强的上升阶段、相对平稳的强震动持续阶段和由强减弱的下降阶段^[27-29]。因此,本文针对海域地震动强度包络模型的研究也基于三段式包络函数进行开展。

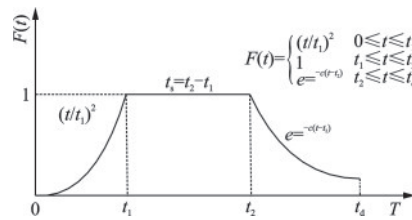


图6 强度包络函数

Fig.6 Intensity envelope function

2.2 包络模型中关键参数的确定方法

2.2.1 上升段参数 t_1 和平稳段参数 t_s

从上升段参数 t_1 开始,这里考虑为自相对地面振动开始明显区别于白噪声时至达到平稳振动段之间的时间差。

地震动记录的能量主要集中在平稳段,这部分能量对结构振动有明显的作用。其中,能量持时 t_s 被广泛应用于工程实践中,即 $t_s=t_2-t_1$ 。因70%的能量持时可包含更多的非强震持时,且其对应地震动振动最强和最具有破坏力的持时^[30]。故本文采用70%的能量持时进行研究具有一定的实践意义^[31]。由于本文选用了中强地震记录,因此选用10%~80%作为70%能量持时的阈值是相对合适的^[32-33]。

2.2.2 下降段衰减率 c

下降段衰减率 c 控制着地震动下降过程的衰减

速率,经过大能量的释放之后,逐渐减小了振幅。参数 c 值一般不会影响到强度包络函数的前两个参数,只影响强度包络函数下降段的形状和幅度。

本文采用多峰值搜索法^[3]对包络函数衰减 $f(t)=exp-c(t-t_2)$ 采用最小二乘法拟合,通过得到的包络线进行归一化处理,从而得到 c 值。图7为实际地震动记录CO2_KNG2012106070311^[11]中利用多峰值搜索法所获得的峰值点和包络线。

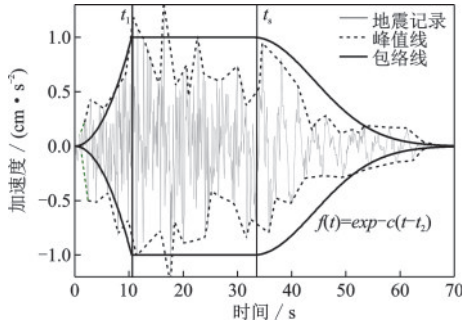


图7 多峰值搜索法拟合包络线(CO2_KNG2012106070311地震记录)

Fig.7 Envelope fitting using multi-peak search method (Recording named CO2_KNG2012106070311)

3 回归结果及验证分析

3.1 关键参数衰减规律

强度包络函数受到震级 M 、震中距 R 、场地 S 以及方向等多种因素的影响,本文参考霍俊荣^[2]的强度包络函数衰减模型,剔除了场地条件不明的记录后,采用日本K-Net强震动观测台网数据库中的记录,采用回归方法拟合三段式强度包络函数衰减模型中的参数,公式如下:

$$\lg Y = k_1 + k_2 M + k_3 \lg(R + R_0) + \epsilon \quad (2)$$

式中, Y 为强度包络函数的模型参数,分别代表 t_1 、 t_s 、 c ; k_1 、 k_2 、 k_3 为回归系数; M 为震级; R 为震中距; R_0 为与震级相关的近场距离饱和因子,做回归分析时,根据先前的研究成果及经验,这里的震源深度 R_0 一般取成10 km; ϵ 为回归残差标准差。因其每个样本点都有其对应的残差(e_i),所以应对残差(e_i)进行极大似然法估计得到残差标准差(ϵ),当 ϵ 值越接近0,则其回归方程越接近观测值,拟合效果越好。

由于本文选用的数据在震级和震中距空间分布不均匀,这样势必“稀释”了数量不多的大震样本数据,回归系数主要体现数据密集区间的震级和震

中距的特征,而压制了稀疏区间的震级和震中距对统计回归的作用^[34]。因此,本文考虑在震级和震中距两个方向应用单随机变量加权最小二乘法^[35-36],统计回归强度包络函数参数,以达到大震不失其规律性的目的。

3.2 各参数回归分析结果

图8是基于EW分量地震记录拟合得到的强度包络函数中关键参数 t_1 的衰减模型。图中, X 轴 Y 轴分别代表着震级、震中距, Z 轴代表着强度包络函数中 t_1 。拟合得到的回归系数 k_1 、 k_2 、 k_3 分别为0.122 5、0.197 5、0.062 4。

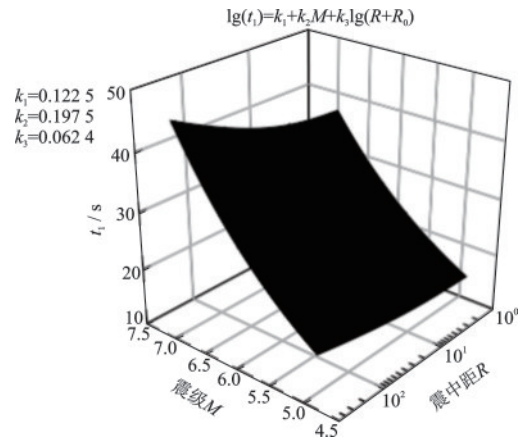


图8 参数 t_1 的衰减模型回归曲线(EW分量)

Fig.8 Regressed attenuation model for parameter t_1 (EW component)

基于日本K-Net强震动观测台网数据库,通过非线性最小二乘法对强度包络函数的衰减模型进行统计回归分析。如表1所示,分别根据震级、震中距的影响因素,对海域地震动和陆域地震动的关键参数进行统计回归分析,得到各参数不同分量下的回归系数 k_1 、 k_2 、 k_3 、 ϵ 。

为了确定因变量与自变量之间是否有明显的关系,我们需要对衰减函数的回归方程进行检验。本文采用 F 检验方法,检验所有自变量对因变量影响是否显著,即检验回归方程模型是否成立。 F 值的计算公式为:

$$F = \frac{SSE/df1}{SSE/df2} = \frac{MSR}{MSE} \quad (3)$$

式中, SSR 为回归平方和,它反应了数据观测值(θ)与估计值($\hat{\theta}$)之间变化; SSE 为残差平方和,它反应了随机因素导致的观测值(θ)的变化; $df1$ 、 $df2$ 分别是回归平方和和残差平方和的自由度; MSR 、 MSE

分别代表回归均方和、残差均方和。

F 值越大,两个变量的线性关系越强,如果散点完全在同一条直线上, F 值为无穷大。本文的回归问题,查文献[37],当显著水平 $\alpha=0.05$ 时, $F_{\alpha}=2.996$,此时方程的可信度为 95%。当 $F>2.996$ 时,

方程有效,此时因变量与自变量具有十分显著的相关性。表 2 为方差分析表,以海域地震动 EW 向强度包络函数中的参数 t_1 为例,进行 F 检验。从表 2 可知,计算得到的 F 统计量为 579.520,经查方差表可知临界值 $F_{0.05}=2.996$,则 $F\geq F_{0.05}$,即回归方程成立。

表 1 地震动强度包络模型中关键参数的回归系数

Table 1 Regression coefficients for key parameters of the intensity envelope model

分量	参数	海域地震动				陆地地震动			
		k_1	k_2	k_3	ϵ	k_1	k_2	k_3	ϵ
EW	t_1	0.122 5	0.197 5	0.062 4	0.162 7	0.506 9	0.105 7	0.086 5	0.199 1
	t_s	0.293 6	0.235 0	-0.129 8	0.215 7	-0.363 7	0.230 4	0.156 1	0.271 2
	c	-0.149 2	-0.182 8	0.092 5	0.255 1	0.092 7	-0.160 2	-0.026 8	0.253 5
NS	t_1	0.070 9	0.206 1	0.066 5	0.160 4	0.567 1	0.091 9	0.097 9	0.194 5
	t_s	0.380 3	0.226 1	-0.146 8	0.211 1	-0.390 7	0.239 1	0.145 0	0.267 1
	c	0.179 6	-0.246 0	0.107 1	0.270 5	0.183 9	-0.146 4	-0.111 1	0.256 1
UD	t_1	0.042 9	0.246 9	-0.050 2	0.177 8	0.310 6	0.112 0	0.060 3	0.323 9
	t_s	0.591 5	0.195 2	-0.057 3	0.199 4	-0.202 8	0.227 5	0.145 9	0.196 1
	c	0.251 4	-0.207 1	-0.052 3	0.316 1	-0.021 6	-0.140 5	-0.003 2	0.256 6

表 2 方差分析表

Table 2 Table of variance

	平方和	自由度	均方和	F 统计量	临界值 $F_{0.05}$
回归(S_R)	26.774	2.000	13.387	579.520	2.996
残差(S_E)	29.320	1 270.000	0.023		

3.3 关键参数回归分析

为了探讨震级、震中距对强度包络函数三个参数的影响,把震级分档为 4.9~5.5、5.5~6.5 和 6.5 以上,分别取震级 $M=5、6、7$ 对强度包络函数衰减模型进行拟合回归,研究强度包络函数三参数,随着震级、震中距变换的取值情况。

图 9 是在震级(M)、震中距(R)的影响下,海域地震动强度包络函数上升段参数 t_1 进行拟合回归的结果。从图中可以看出,上升段参数 t_1 的取值范围为 13~52 s,并且海域数据计算结果都具有明显的规律性,海域 EW 与 NS 向地震动,参数 t_1 随着震级、震中距的增加表现出逐渐递增趋势,而海域 UD 向地震动,参数 t_1 随着震级增加表现出逐渐递增的趋势,但其随着震中距增加表现出逐渐递减的趋势;海域地震动在水平向对于震级、震中距的平均回归系数分别为 0.201 8、0.064 5,可以看出震级上的影响要大于震中距对 t_1 影响。

图 10 是在震级(M)、震中距(R)的影响下,海域

地震动强度包络函数强震平稳段参数 t_s 进行拟合回归值的结果。从图中可以看出,平稳段参数 t_s 的取值范围为 12~79 s;当震中距一定时,平稳段参数 t_s 在三个方向上,随着震级增大而增大;当震级一定时,参数 t_s 随着震中距的增加而呈现下降的状态;相比较震级与震中距对参数 t_s 的影响情况,从表 1 可得出,震级对参数 t_s 的平均回归系数绝对值为 0.218 8,而震中距对参数 t_s 的平均回归系数绝对值为 0.111 3,可得出震级的影响性比震中距来的更大;参数 t_s 在水平 EW 向和 NS 向上的数值相差不大,竖直 NS 向上的数值却普遍比水平向的数值要大。

图 11 是在震级(M)、震中距(R)的影响下,海域地震动强度包络函数下降段衰减率 c 进行拟合回归值的结果。从中可以看出,下降段衰减率 c 的取值范围为 0.037~0.173;在震级 $M=6$ 条件下,衰减率 c 在 EW 向上的计算结果从 0.067 上升到了 0.105,在 NS 向从 0.063 上升到了 0.103,而在 UD 向计算结果从 0.092 下降到 0.072。可以看出震中距在水平向对参数 c 的增幅比竖直向更大;在震中距不变的情况下,震级对衰减率 c 的影响是负相关的。

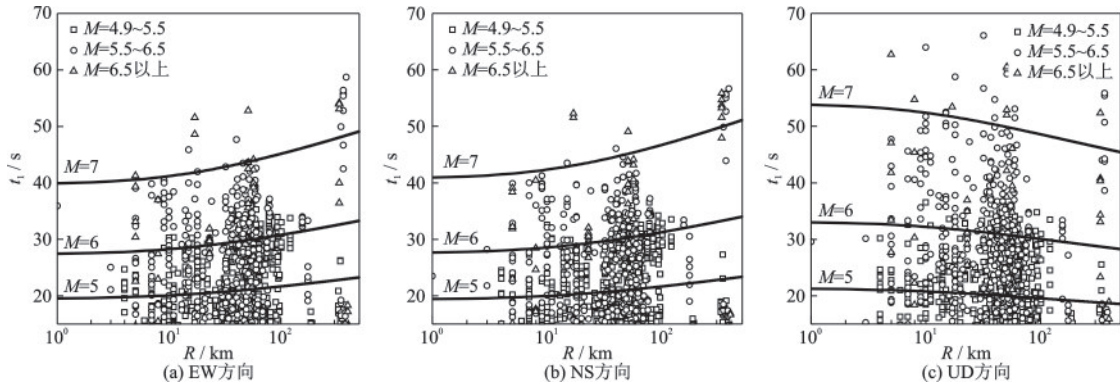


图9 参数 t_1 的回归拟合

Fig.9 Regression fitting of parameter t_1

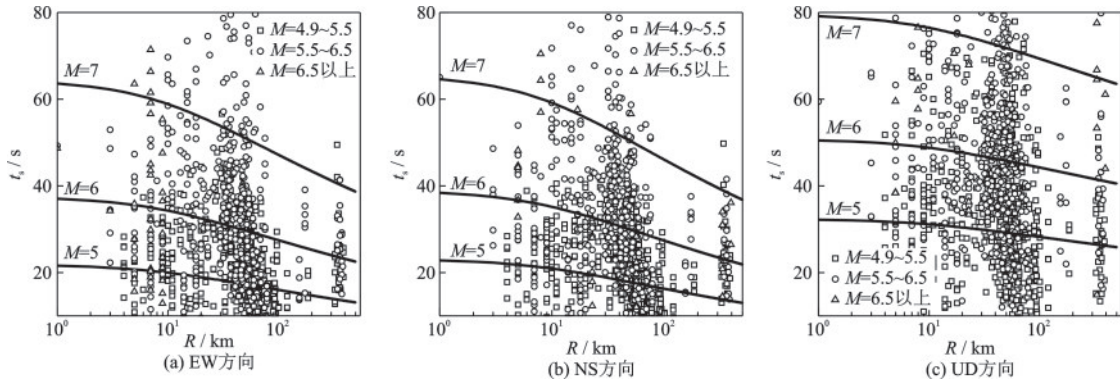


图10 参数 t_2 的回归拟合

Fig.10 Regression fitting of parameter t_2

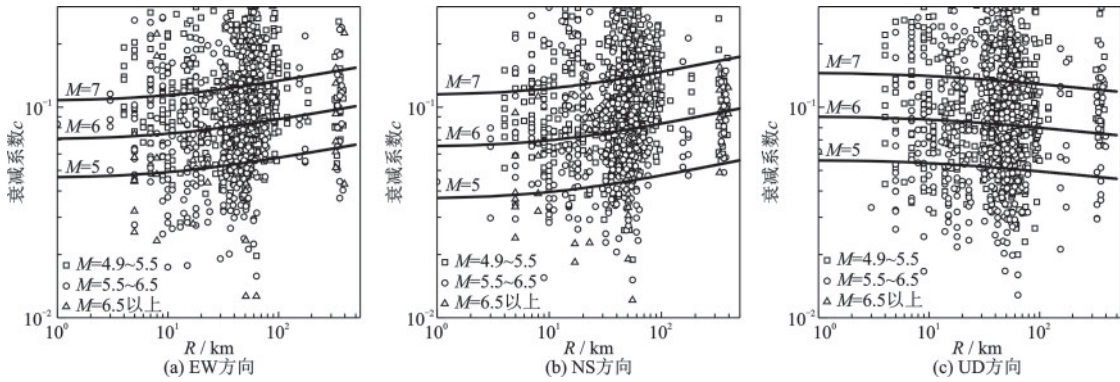


图11 参数 c 的回归拟合

Fig.11 Regression fitting of parameter c

4 海域与陆域对比分析

4.1 包络函数上升段 t_1 的结果

图12是海域地震与陆域地震在EW、NS、UD向上对强度包络函数上升段 t_1 的对照图,当 $M=5、6、7$ 时,上升段 t_1 在震中距的影响下的拟合回归情况。从图中可以看出,海域地震上升段 t_1 的值比陆域地震上升段 t_1 时间更长,海域地震与陆域地震在

EW、NS向上都呈现随着震级、震中距的增大而递增趋势,因海域和陆域在震级上的平均水平回归系数分别为0.2018、0.0988,从图12(a)、(b)中可以明显地看出海域地震在震级方向上的上升趋势比陆域地震更显著,而在UD向上,海域地震震中距的回归系数为-0.0540,呈现递减趋势,而陆域地震为0.1120,呈现递增趋势,其原因在于海域地震水平分量几乎不受海水介质的影响,但竖向分量随着海水深度的增加有减小的趋势^[38]。

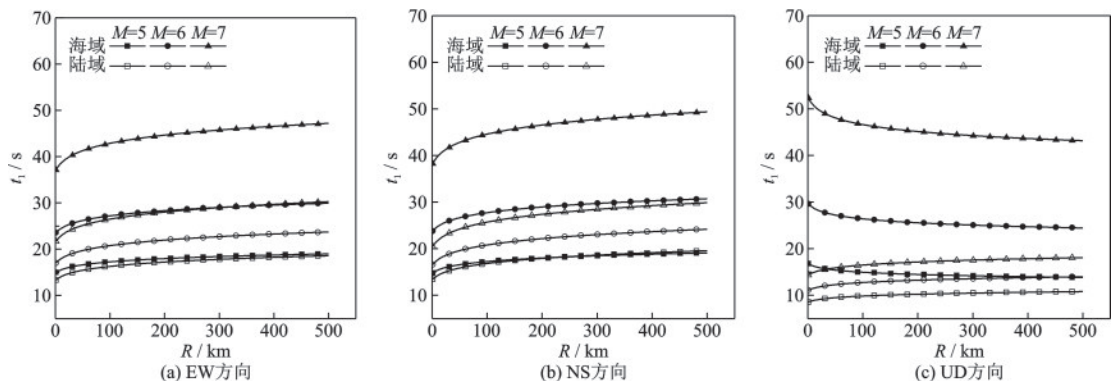


图12 海域与陆域场地中参数 t_1 对比

Fig.12 Comparison of t_1 between offshore site and onshore site

4.2 强震平稳段 t_s 的结果

图13是海域地震与陆域地震在EW、NS、UD向上对强度包络函数强震平稳段 t_s 的对照图,当 $M=5、6、7$ 时,平稳段 t_s 在震中距影响下的拟合回归情况。从图中可以看出,当震中距一定时,海域地震与陆域地震强震平稳段 t_s 都与震级有明显的正相关性,其由于大震震源破裂时间比小震长,通常其记录总是会伴随较长的持时和平稳的波形;当震级一定时,海域地震强震平稳段 t_s 三方向上

都随着震中距的增大而下降,与陆域地震强震平稳段 t_s 的拟合情况相反,且海域地震强震平稳段 t_s 比陆域地震强震平稳段 t_s 的计算结果要更大,其原因为海底环境非常复杂,包括海水、沙子、淤泥、碎石等,且土层一般是饱和土或接近饱和土,海底与陆地土层较大差异,导致传播路径不同^[39],且K-Net强震动观测台网提供了大部分陆域台站的场地条件,但是没有提供海底台站的场地条件,场地条件根据其他台站推算出来,也可能是导致这一结果的原因。

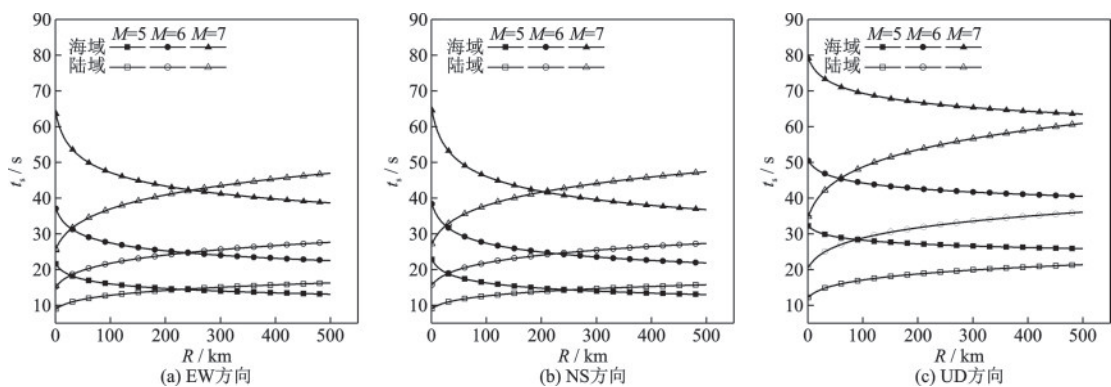


图13 海域与陆域场地中参数 t_s 对比

Fig.13 Comparison of t_s between offshore site and onshore site

4.3 下降段衰减率 c 的结果

图14是海域地震与陆域地震在EW、NS、UD向上对强度包络函数下降段衰减率 c 的对照图,当 $M=5、6、7$ 时,下降段衰减率 c 在震中距的影响下的拟合回归情况。从图中可以看出,海域地震与陆域地震在下降段参数 c 的取值接近,当震级一定时,海域地震EW、NS向对震中距平均回归系数为0.1318,

随震中距的增加呈现递增趋势,与陆域地震所呈现的趋势相反;对于UD方向,下降段参数 c 在海域地震与陆域地震的趋势相同,因在同一地震事件中,海域地震动与相邻陆域地震动的频带能量分布不同,陆域地震动的水平和竖向分量的能量谱分布特征相似,且在高频段有明显的能量分布,能量传递性强,使其衰减速度下降缓慢,而海域地震动低频带能量占优势,能量会在短时间内释放,衰减也是在短时间内完成^[40]。

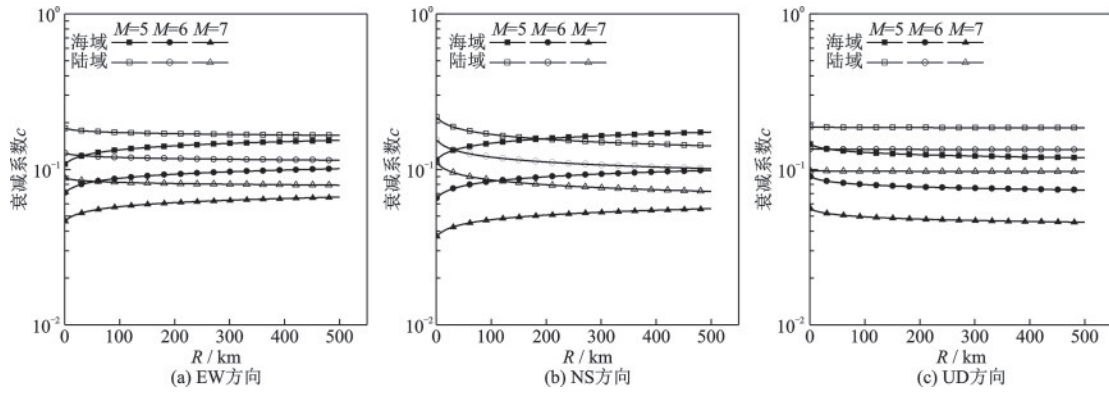


图14 海域与陆域场地中参数 c 对比

Fig.14 Comparison of c between offshore site and onshore site

5 结论

本文基于日本 K-Net 强震动观测台网实测记录, 建立在海域地震数据库, 并分析了海域地震竖向与水平向的特性关系, 提出了适合海域地震动的强度包络函数模型, 得出强度包络函数中的关键参数, 分析基于不同震级、震中距情况下的衰减规律分布特征。主要结论如下:

(1) 通过建立海域地震动数据库, 得到其分布规律: 不同震级下, 海域地震动竖向分量 PGA 的分布范围较陆域地震动的更小, 为 $0\sim 25$ gal; 海域地震动 PGA 的 V/H 值为 0.187 , 明显小于陆域地震动 PGA 的 V/H 值。

(2) 提出了基于三段式模型的海域地震动强度包络模型, 回归得到了强度包络模型关键参数 t_1 、 t_s 、 c 与震级 M 、震中距 R 的计算表达式。海域地震动包络模型的关键参数分析表明: 上升段参数 t_1 的取值范围为 $13\sim 52$ s, 平稳段参数 t_s 的取值范围为 $12\sim 79$ s, 下降段衰减率 c 的取值范围为 $0.037\sim 0.173$ 。

(3) 震级、震中距对海域地震动强度包络函数影响规律研究表明: 震级对于上升段参数 t_1 和平稳段参数 t_s 都是呈现正相关, 对于下降段衰减率 c 则呈现负相关。震中距对平稳段参数 t_s 呈现负相关, 但对于上升段参数 t_1 和下降段衰减率 c , 震中距拟合结果在水平向上呈正值, 竖直向上则呈现负值; 震级对关键参数 t_1 、 t_s 、 c 的平均回归系数要大于震中距对关键参数的平均回归系数, 即海域地震动强度包络函数在震级方面的影响性要大于震中距对其的影响性。

(4) 海域和陆域地震动强度包络函数对比表明: 首先, 海域强度包络函数相比于陆域地震动, 不仅在上升段参数 t_1 和平稳段参数 t_s 规律相似, 在下降段衰减率 c 则差异显著, 而且海域强度包络模型中各关键参数的分布范围较比陆域地震动更大; 其次, 在震级、震中距影响性方面, 海地地震动表现出震级影响性要大于震中距, 与陆域地震动强度包络函数特性相差较大。

参考文献:

- [1] 王恒知, 石玉成, 卢育霞, 等. 人工拟合地震动时程参数对场地反应的影响分析[J]. 西北地震学报, 2009, 31(2): 126-130.
Wang H Z, Shi Y C, Lu Y X, et al. Analysis on the influence of artificial fitting time-history parameters of seismic ground motion to site earthquake response [J]. Northwest Seismological Journal, 2009, 31(2): 126-130. (in Chinese)
- [2] 霍俊荣. 近场强地面运动衰减规律的研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 1989.
Huo J R. Review of the attenuation law of near-field intensity ground motion [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 1989. (in Chinese)
- [3] 张美玲, 李山有, 卢建旗, 等. 中国大陆地区地震动时程强度包络函数研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(4): 60-70.
Zhang M L, Li S Y, Lu J Q, et al. The study in time history envelope function of ground motion in mainland of China [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(4): 60-70. (in Chinese)
- [4] 霍俊荣, 胡聿贤, 冯启民. 地面运动时程强度包络函数的研究[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(1):

- 1-12
Huo J R, Hu Y X, Feng Q M. Study of the time-range intensity envelope function of ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 1991, 11(1): 1-12.(in Chinese)
- [5] 杨文政, 马丽. 地震活动加速模型及其在中国的应用[J]. 地震学报, 1999, 21(1): 32-41.
Yang W Z, Ma L. Seismic activity acceleration modeling and its application in China[J]. Acta Seismologica Sinica, 1999, 21(1):32-41.(in Chinese)
- [6] Sgobba S, Stafford P J, Marano G C. A seismologically consistent husid envelope function for the stochastic simulation of earthquake ground-motions[J]. Computational Methods in Stochastic Dynamics, 2011 (22) : 229-246.
- [7] Stafford P J, Sara S, Marano G C. An energy-based envelope function for the stochastic simulation of earthquake accelerograms[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(7): 1123-1133.
- [8] Cacciola P. A stochastic approach for generating spectrum compatible fully nonstationary earthquakes [J]. Computers & Structures, 2010, 88(15/16): 889-901.
- [9] 陈苏, 周越, 李小军, 等. 近海域地震动的时频特征与工程特性[J]. 振动与冲击, 2018, 37(16): 227-233.
Chen S, Zhou Y, Li X J, et al. Time-frequency and engineering characteristics on offshore ground motion[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(16) : 227-233.(in Chinese)
- [10] Cui X, Hu J J, Tan J Y, et al. Characteristics of sea-floor ground motions of the S-net strong ground motion from the 2021 MW7.1 off-fukushima earthquake, Japan [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66 (1) : 260-271.
- [11] Diao H, Hu J, Xie L. Effect of seawater on incident plane P and SV waves at ocean bottom and engineering characteristics of offshore ground motion records off the coast of southern California, USA[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13 (2) : 181-194.
- [12] Zhang Q, Zheng X Y. Offshore earthquake ground motions: Distinct features and influence on the seismic design of marine structures[J]. Marine Structures, 2019, 65: 291-307.
- [13] 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.
- [14] 荣棉水, 喻烟, 王继鑫. 基于强震观测的海域和陆域场地效应的对比研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(增2) : 345-349.
Rong M S, Yu Y, Wang J X. Comparative study of site effects in marine and terrestrial areas based on strong seismic observations [J]. Building Structure, 2018, 48(Sup2): 345-349.(in Chinese)
- [15] 吕悦军, 彭艳菊, 施春花, 等. 渤海海底表层软弱土特征及其对地震动的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2008,28(3) : 368-374.
Lyu Y J, Peng Y J, Shi C H, et al. Study on site classification and seismic parameters for the soft soil of Bohai seabed surface layer[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008,28(3) : 368-374.(in Chinese)
- [16] 缪涵, 王彦臻, 方怡, 等. 海湾深厚海床场地二维非线性远场强地震反应特征[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(4) : 637-649.
Liao H, Wang Y Z, Fang Y, et al. 2D Nonlinear site response characteristics of a cross-bay deep seabed subjected to far-field strong earthquakes[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43 (4) : 637-649.(in Chinese)
- [17] 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.
Hu J J, Yang Z X, Xie L L. Review on the research of offshore ground motions [J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(3) : 28-36.(in Chinese)
- [18] National research institute for earth science and disaster resilience, NIED K-NET [EB/OL]. (2023-09-27) [2024-02-13]. <http://www.kyoshin.bosai.go.jp>.
- [19] 宋健, 师黎静, 党鹏飞, 等. 考虑海域衰减特性的日本相模湾海底场地放大研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(12): 74-84.
Song J, Shi L J, Dang P F, et al. Study on site amplification of strong ground motion stations considering attenuation characteristics of the sea area in the Sagami Bay area, Japan[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(12): 74-84.(in Chinese)
- [20] 陈宝魁, 王东升, 李宏男, 等. 海底地震动特性及相关谱研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2016,36(1): 38-43.
Chen B K, Wang D S, Li H N, et al. Study on the characteristics of offshore ground motion and its response spectra [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36 (1) : 38-43.(in Chinese)
- [21] Boore D M, Bommer J J. Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences [J].

- Soil Dynamics and Earthquake Engineering-Southampton, 2005, 25(2): 93-115.
- [22] Boore D M. On pads and filters: Processing strong-motion data [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(2): 745-750.
- [23] 张美玲. 地震动强度包络函数相关参数确定[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014.
Zhang M L. Determination of related parameters for intensity envelope function of ground motion[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2014.(in Chinese)
- [24] Gupta A K. Response spectrum method in seismic analysis and design of structures[M]. London: Routledge, 2017.
- [25] American Society of Civil Engineers. Seismic analysis of safety-related nuclear structures[S]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2017.
- [26] 余文正, 吴宗谦, 杨瑞欣, 等. 基于《建筑抗震设计规范》强度包线函数参数取值研究[J]. 地震工程学报, 2022, 44(5): 1151-1159.
Yu W Z, Wu Z X, Yang R X, et al. Parameter determination of intensity envelope function based on the code for seismic design of buildings [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(5): 1151-1159. (in Chinese)
- [27] Trifunac M D, Brady A G. A study on the duration of strong earthquake ground motion [J]. Bull Seismological Society of America, 1975, 65(3): 581-626.
- [28] Housner G W, Jennings P C. Generation of artificial earthquakes [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1964, 90(1): 113-152.
- [29] Amin M, Ang A H S. Nonstationary stochastic models of earthquake motions [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1968, 94(2): 559-584.
- [30] 袁峰, 邱卓, 钟菊芳. 能量持时阈值的选取分析[J]. 南昌航空大学学报: 自然科学版, 2017, 31(2): 7-11.
Yuan F, Qiu Z, Zhong J F. Selection of 70% energy duration threshold values [J]. Journal of Nanchang Hangkong University: Natural Science, 2017, 31(2): 7-11.(in Chinese)
- [31] Takizawa H, Jennings P C. Collapse of a model for ductile reinforced concrete frames under extreme earthquake motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1980, 8(2): 117-144.
- [32] Bolt B A. Duration of strong ground motion [C]//Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering. Rome: [s.n.], 1973: 1304-1313.
- [33] Shoji Y, Tani K, Kamiyama M. A study on the duration and amplitude characteristics of earthquake ground motions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(7-10): 505-512.
- [34] 卢建旗, 李山有, 李伟. 中强地震活动区地震动衰减关系的确定[J]. 世界地震工程, 2009, 25(4): 33-43.
Lu J Q, Li S Y, Li W. Study on ground motion attenuation relationship of moderate earthquake risk areas [J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(4): 33-43. (in Chinese)
- [35] 董志荣. 纯方位系统 TMA 非线性最小二乘法——理论数学模型与常规算法 [J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005(1): 4-8.
Dong Z R. Nonlinear least-squares algorithms used for TMA in bearings-only system—The theoretical mathematic model and conventional algorithms [J]. Information Command Control System and Simulation Technology, 2005(1): 4-8.(in Chinese)
- [36] 刘志平, 石林英. 最小二乘法原理及其 MATLAB 实现 [J]. 中国西部科技, 2008(17): 33-34.
Liu Z P, Shi L Y. The principle of least square algorithm and its achievement by matlab [J]. Western China Science and Technology, 2008 (17): 33-34. (in Chinese)
- [37] Johnson R A, Wichern D W. 实用多元统计分析 [M]. 北京: 清华大学出版社有限公司, 2001.
Johnson R A, Wichern D W. Practical multivariate statistical analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press Co., 2001.(in Chinese)
- [38] 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.
Hu J J, Yang Z X, Xie L L. Review on the research of offshore ground motions [J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(3): 28-36.(in Chinese)
- [39] 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]. 土木工程报, 2018, 51(7): 36-49.
Hu J J, Zheng X, Xie L L. 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): 36-49.(in Chinese)
- [40] 周越, 陈苏, 李小军. 基于小波方法的近海域地震动时频特性分析 [J]. 土木工程学报, 2016, 49(增1): 7-12.
Zhou Y, Chen S, Li X J. Wavelet-based time-frequency characteristic analysis on offshore ground motion [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(Sup1): 7-12.(in Chinese)

(本文编辑: 池营营)