DOI:10.11918/201909194

海陆地震动的时频域工程特性对比

张 琪[1,2], 郑向远[2], 李 炜[3]

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084;2. 清华大学 深圳国际研究生院海洋科学与技术学部, 广东 深圳 518055;
3. 中国电建华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122)

摘 要: 海洋工程抗震几乎还沿用陆上土木工程的规范和成果,为了指出在海洋工程抗震设计和安全评估中使用海底地震动的重要性,选取多个地震事件,关注同一地震下震中距相似的海陆地震动记录. 对比分析了传统地震动三要素,并且考虑到地震动属于非平稳信号,利用希尔伯特-黄谱分析了海陆地震动的能量在时频分布上的差异. 结果表明:海底水平地震动加速度峰值比陆地的大很多,总体上其持时也较长,同时其加速度反应谱向中低频偏移,这些特征会对海洋结构动力响应造成更不利的影响;对于时频谱,海底地震动的主要能量所对应的频率比陆地的低,而其最大能量所对应的频率更接近峰-谷频率,而不是傅里叶谱上的卓越频率.

关键词: 海洋工程;海底地震动;地震动三要素;希尔伯特-黄谱;峰-谷频率

中图分类号: P315.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2020)08-0038-08

Comparison of temporal and spectral features of offshore and onshore ground motions

ZHANG Qi[1,2], ZHENG Xiangyuan[2], LI Wei[3]

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;2. Division of Ocean Science and Technology, Tsinghua University, Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, Guangdong, China;
3. POWERCHINA HUADONG Engineering Co. Ltd., Hangzhou 311122, China)

Abstract: The seismic design of marine structures so far still relies on civil engineering design codes. The objective of this study was to point out the importance of using offshore ground motion for seismic design and safety assessment of marine engineering. Several earthquakes in history were selected, and the focus was on paired offshore and onshore accelerations with identical epicenter distances. Three key elements of seismic motions were discussed, and Hilbert-Huang spectrum was adopted to distinguish energy distributions in terms of temporal and spectral characteristics. Results show that the peak ground acceleration of offshore horizontal motion was larger than that of onshore horizontal motion. The duration was generally longer, and the response spectrum shifted to moderate and low frequencies. These features may have unfavorable effects on structural dynamic response. As revealed by the Hilbert-Huang spectral analysis, the frequency corresponding to the main energy of offshore ground motion was lower than that of onshore ground motion, and the frequency corresponding to the largest instantaneous energy was almost identical to peak-to-trough frequency rather than predominant frequency in Fourier spectrum.

Keywords: marine engineering; offshore ground motion; three key elements of a seismic motion; Hilbert-Huang spectrum; peak-to-trough frequency

海洋资源的开发以及区域海上交通的建设离不开海洋工程的兴建,如海洋平台、海上风机、水下油气生产系统、海底隧道和跨海大桥等,保证海洋结构使用的安全性和可靠性尤为重要. 坐底式海洋结构若建在地震活跃海域,其服役期内除了经受风、浪、流等环境荷载外,还会受到海底地震动的影响. 然而,由于海底强震观测台网布设的欠缺以及海底场地条件复杂性等影响,针对海底地震动工程特性的研究相对较少,在中国尤其如此.

在早先的国外研究中,Boore 等[1]选取了从美国 SEMS(seafloor earthquake measurement system)系统中记录的9条海底地震动数据进行相关研究. 由于数据量太少,缺乏统计意义,他们只对竖向(V)和水平向(H)地震动的傅里叶谱和反应谱(5%阻尼比)的谱比(V/H)进行了对比分析,结果发现由于

收稿日期: 2019-09-25
基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFC0303706);
国家自然科学基金(51579227)
作者简介: 张 琪(1992—),男,博士研究生;
郑向远(1975—),男,教授,博士生导师
通信作者: 郑向远,zheng.xiangyuan@sz.tsinghua.edu.cn

海水层对 P 波高频能量的削弱作用,海底地震动的竖向成分比陆地竖向地震动的能量小,尤其是在短周期部分. 刁红旗等[2]首先从地震学角度研究了海水对海底地震动竖向成分的影响,并在 Boore 等[1]的基础上分析了海底地震动的工程特性. 研究表明海底竖向地震动受到海水的影响,高频能量被削弱,而在海底软土层影响下加速度反应谱的长周期成分会被放大. Dhakal 等[3]搜集了日本 K－NET(Kyoshin network)强震观测网中海底台站记录的海底地震动,研究了非线性场地条件对地震动的影响. 他们将地震动根据峰值加速度 PGA(peak ground acceleration)的大小分为强地震动和弱地震动,分析发现土层的非线性响应会造成地震动卓越频率成分向低频移动. 陈宝魁等[4]对比分析了从 SEMS 和 K－NET 中获取的若干海陆地震动的 PGA 和反应谱. 结果表明近海竖向 PGA 比陆地 PGA 低,而且在短周期部分海底反应谱比(V/H)低于陆地地震动. 由于实测海底地震动数据有限,无法像研究陆地地震动特性一样充分考虑各种因素的影响,因此针对海底地震动特性的研究还不是十分成熟,尤其是海底地震动的时频域特性. 另一些学者通过建立数值模型的方法研究影响海底地震动的因素. Nakamura 等[5]使用有限差分法模拟了海底走滑震源的地震波场,研究结果强调了在进行地震动模拟中综合考虑海水和海底地形对地震动的影响很重要. Todoriki 等[6]建立一维土层结构模型,利用有限差分法计算分析海水层对海底地震动的影响. 发现海水层类似于低通滤波器,高频能量被削弱,所以在海底地震的模拟中考虑海水层的影响非常必要. 然而数值模拟的方法始终是一种理论化方法,无法完全符合真实的震源特性或场地条件等,所得到的地震动特性与实际数据还有差距.

已有的研究表明海底地震动和陆地地震动具有不同的动力特性,然而目前针对海洋结构物的抗震设计和安全评估仍然是参考陆地地震动的有关性质和规范开展的,比如美国著名的 API 规范[7]. 由于海陆不同土层结构以及海底上覆水层等的影响,造成海陆地震动工程特性的不同,利用陆地地震动记录指导海洋结构物抗震设计是不尽合理的. Smith[8]指出由于海底土层和地质条件、海水层的影响,海底地震动的特性与陆地地震动有区别. 另外,因为海洋结构构造的特殊性(如深桩基、质量集中在结构顶端等),会使得海洋结构物的地震响应呈现出与陆地结构不同的特征. 吕悦军等[9]通过获取渤海 PL19－3 油田的工程场地土层结构,分析了海底土层的动力特征,结果表明海底表层软弱土对地震动反应谱有显著影响,而现行规范中针对陆地场地土类型划分标准不能反映海底淤泥层的特征. 因此,海洋结构抗震设计以及动力响应分析需要使用海底地震动作为荷载输入才能获得准确的结果,从而合理地进行结构设计以及安全性校核.

将海底地震动与陆地地震动加以区分,并将海底地震作为独立课题进行研究,揭示海底地震动独特的时频域工程特性,并且利用真实的海底地震记录作为地震荷载输入,进行结构的动力响应时程分析,这对于海洋结构物的抗震设计和安全评估具有重要意义. 基于此目的,本文收集了 K－NET 地震观测系统中 6 个海底观测台站记录的 23 场地震的海底地震动,以及相应的陆地地震动,形成了一个含有一千多条地震动的数据库,并从中选出 69 对海陆地震动数据. 每一对海陆地震动记录来源于同一场地震,且它们的震中距基本相同,由此分析了它们地震动三要素[10](PGA、持时和反应谱)的差异,以及能量在时间－频率分布上的特性.

1　数据选取

日本 K－NET 系统[11－12]基本遍布日本陆地,其中也包含了位于相模湾海域的 6 个海底观测台站,SR1 － SR6,见表 1. 这 6 个台站间距不超过 20 km,且近似直线分布[13],它们的平均海拔为 －1 500 m 左右. 本文从中选取了 K－NET 系统中 23 场地震的海底地震动,以及相应的 10 个附近陆地台站(LR1 － LR10)记录到的陆地地震动,并对原始数据进行了基线校正和滤波处理[14],共组成了 1 086 条地震动数据库. 这 23 个地震活动中包括 18 个震源在海底的海底地震(SE)以及 5 个震源在陆地的陆发地震(LE),大部分地震的震源深度不超过70 km,其中包括了 2011 年 3.11“东日本大地震”,震级为 M_w9.0[15].

表 1　日本 K－NET 系统中 6 个海底台站

Tab. 1　Six offshore stations selected in K-NET

编号	台站名称	纬度	经度	海拔/m
SR1	KNG201	34.60N	139.92E	－2 197
SR2	KNG202	34.74N	139.84E	－2 339
SR3	KNG203	34.80N	139.64E	－902
SR4	KNG204	34.89N	139.57E	－933
SR5	KNG205	34.94N	139.42E	－1 486
SR6	KNG206	35.10N	139.38E	－1 130

由于地震动特性受震级和震中距影响很大,为了研究场地条件对海底地震动动力特性的影响,本文从数据库中选取了 69 对数据进行对比分析. 其中每一对包含了同一场地震中分别从一个海底台站和一个陆地台站记录到的三方向地震动,即两条水平

向(EW 和 NS)以及一条竖向记录,且这两个台站所对应的震中距基本相同.

表 2 给出了 23 场地震的相关信息以及从每一场地震中选出来的数据对的数量.

表 2 23 场地震相关信息及所选数据对的数量

Tab. 2 Data of 23 earthquakes and the number of the chosen pairs

编号	日期	纬度	经度	震源深度/km	震级	组数
SE #1	12/09/2015	35.55N	139.83E	57	5.2	4
SE #2	30/05/2015	27.86N	140.68E	682	8.1	3
SE #3	17/06/2014	34.00N	139.82E	121	5.3	4
SE #4	05/05/2014	34.95N	139.48E	156	6.0	4
SE #5	11/02/2014	34.19N	140.16E	91	5.3	3
SE #6	17/04/2013	34.05N	139.35E	9	6.2	2
SE #7	01/01/2012	31.43N	138.56E	397	7.0	2
SE #8	11/03/2011	38.10N	142.86E	24	9.0	2
SE #9	26/02/2011	34.44N	140.37E	56	5.0	2
SE #10	05/02/2011	34.85N	140.62E	64	5.2	4
SE #11	18/12/2009	34.96N	139.13E	5	5.1	4
SE #12	13/08/2009	32.87N	140.82E	57	6.6	3
SE #13	11/08/2009	34.78N	138.50E	23	6.5	2
SE #14	10/02/2008	34.79N	140.24E	95	5.0	2
SE #15	14/10/2006	34.89N	140.30E	64	5.1	4
SE #16	02/05/2006	34.92N	139.33E	15	5.1	3
SE #17	21/04/2006	34.94N	139.19E	7	5.8	5
SE #18	30/07/2000	33.97N	139.40E	18	6.4	3
LE #1	03/07/2012	35.00N	139.87E	88	5.2	3
LE #2	28/01/2012	35.49N	138.98E	18	5.4	3
LE #3	15/03/2011	35.31N	138.71E	14	6.4	2
LE #4	01/10/2007	35.23N	139.12E	14	4.9	4
LE #5	20/09/2003	35.22N	140.30E	70	5.8	1
总和 = 23						总:69 对

2 PGA 和持时

2.1 PGA

图 1 给出了 69 对海陆地震动的 PGA 数值大小的对比,其中水平向结果为 EW 和 NS 方向算术平均值. 图中横坐标表示陆地地震动 PGA(PGA_{ons}),纵坐标表示海底地震动 PGA(PGA_{off}),虚线为表示 $PGA_{ons} = PGA_{off}$的等分线,实线是 69 对数据的线性拟合,而圆点表示海底地震产生的地震动 PGA,三角点表示陆发地震产生的地震动 PGA. 由图 1(a)可知,陆发地震对应的数据点全部在等分线上方,而海底地震对应的数据点绝大部分也都在等分线上方. 这表示无论震源是在陆地还是海底,同一地震的激发下,震中距相近的海底台站记录的海底水平地震动 PGA 大于陆地台站记录的陆地水平地震动 PGA. 然而对于竖向地震动而言(图 1(b)),约 61% 数据点在等分线下方,意味着这些数据所对应的海底竖向 PGA 小于陆地竖向 PGA. 线性拟合虽然比较粗糙,$PGA^{V}_{off} = 0.57\ PGA^{V}_{ons}$,但大致反映了数据的趋势.

从对比结果来看,海陆不同的场地条件对地震动 PGA 有很大的影响. 海底的场地条件放大了海底地震动的幅值,尤其是水平向地震动. 水平地震动对于结构物的抗震设计有着决定性的影响,所以这一发现表明若利用陆地水平地震动直接作为海洋结构得地震荷载输入进行地震响应分析,将会低估地震荷载的作用.

而对于竖向地震动,因其主要由 P 波构成,而 P 波可以在海水中传播,由于海水削弱了 P 波中与海水共振频率处的能量成分[2],竖向地震动幅值相应地衰减. 在海底沉积层放大和海水削弱共同作用的情况下,海陆竖向地震动 PGA 对比没有明显的规律,见图 1(b).

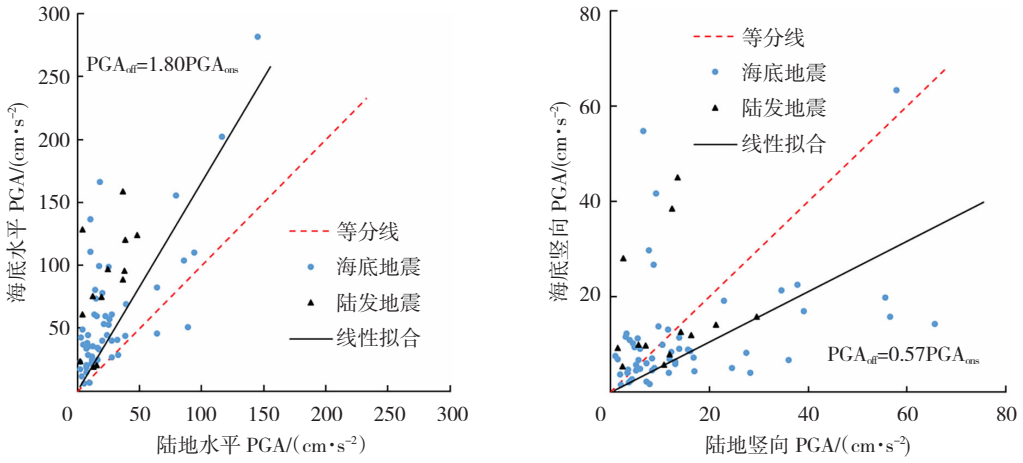


图 1　69 对海陆地震动 PGA 的对比(依照震源所在,考虑海底地震与陆发地震)

Fig. 1　PGA comparison of 69 pairs of ground motions: offshore versus onshore

2.2　持时

持时也是地震动重要特征之一,因其衡量了振动的循环次数,所以关系到结构的线性和非线性响应分析[16-18]. 有研究表明中等强度但持时很长的地震动可能会比高强度而持时较短的地震动造成的结构非线性响应更大[19].

对于地震动持时的定量化描述方法,目前工程界尚未统一. 常用的持时定义方法有绝对持时[20]、等效持时[21]和能量持时[17,22]等. 本文采用 90% 能量持时[17]来确定地震动持续时间,是由于这种方法能够更充分反映地震动的原始特征. 该持时定义为地震动能量从总能量的 5% 累积到 95% 所经历的时间:

$$T_{\mathrm{d}} = T_2 - T_1, \tag{1}$$

$$\frac{\int_0^{T_1} a^2(t)\,\mathrm{d}t}{\int_0^{T} a^2(t)\,\mathrm{d}t} = 5\%, \quad \frac{\int_{T_1}^{T_2} a^2(t)\,\mathrm{d}t}{\int_0^{T} a^2(t)\,\mathrm{d}t} = 90\%. \tag{2}$$

式中:T_{d} 表示 90% 能量持时,T_1、T_2 分别是总能量的 5% 和 95% 所对应的时间点.

由图 2(a)可知,大约 65% 的数据点在等分线上方,线性拟合斜率为 1.2,总体上表明海底水平地震动的能量持时 $T^{\mathrm{H}}_{\mathrm{d,\,off}}$ 比陆地 $T^{\mathrm{H}}_{\mathrm{d,\,ons}}$ 长. 而对于竖向地震动(图 2(b)),绝大部分海底竖向地震动能量持时 $T^{\mathrm{V}}_{\mathrm{d,\,off}}$ 大于陆地 $T^{\mathrm{V}}_{\mathrm{d,\,ons}}$,线性拟合的斜率为 1.80. 这表明,海底场地条件增长了地震动的能量持时,尤其是竖向地震动. 这是因为海底沉积层增大了地震动中长周期成分,然而这对自振周期较长的海洋结构物(如海洋风机和跨海大桥等)的动力响应更加不利[23-24].

2.3　PGA 和能量持时的平均值对比

本文计算了所有 69 对海陆地震动数据 PGA 和能量持时 T_{d} 的统计平均值 μ 和标准差 σ. 从结果对比来看,这两个特征参数的统计平均同样验证了上述分析. 海底水平地震动 PGA 平均值为 63.56 cm/s^2,约是陆地 PGA 平均值 25.73 cm/s^2 的 2.5 倍, 而海底

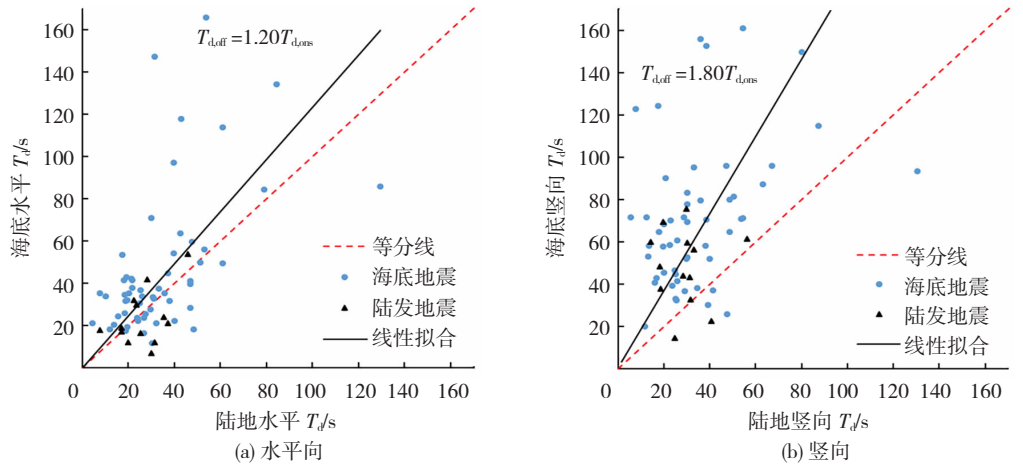


图 2　69 对海陆地震动的持时 T_{d} 对比

Fig. 2　Duration T_{d} of 69 pairs of ground motions: offshore versus onshore

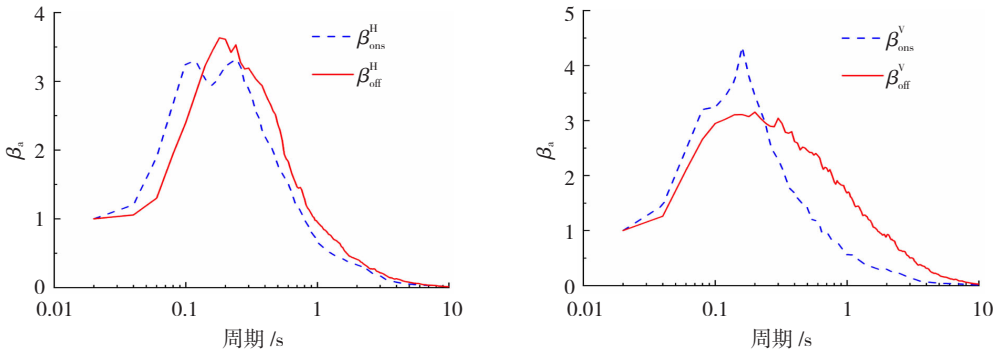
竖向地震动 PGA 平均值(12.51 cm/s^2)略小于陆地竖向 PGA 平均值(14.18 cm/s^2). 另外,海底地震动 T_d 均比陆地地震动 T_d 长,尤其竖向 T_d 平均值(73.90 s)超过陆地 T_d 平均值(33.84 s)的 2 倍.

3 加速度反应谱

地震动的加速度反应谱常被用于结构的频域反应分析[25]. 加速度放大系数 β_a 则是加速度反应谱与地震动 PGA 的比值. 考虑到对于大部分海洋结构物,如海洋平台和海上风机等,其阻尼主要由结构自身阻尼和水动力阻尼构成,本文选择较为保守的 2% 阻尼比作为结构受到的总阻尼来进行反应谱计算[26].

图 3(a)、(b)分别表示 69 对海陆水平和竖向地震动的加速度放大系数谱的平均. 从图中可看出,在短周期 $T<0.1$ s 时,海底水平地震动反应谱值 β^{H}_{off} 小于陆地 β^{H}_{ons}. 随着周期变长,β^{H}_{off} 逐渐超过 β^{H}_{ons},β^{H}_{off} 的峰值平台向中长周期移动,且 β^{H}_{off} 的峰值大于 β^{H}_{ons} 的峰值. 对于海陆竖向地震动,同样对于短周期 $T<0.25$ s,$\beta^{V}_{off}<\beta^{V}_{ons}$,而对于中长周期 $T>0.25$ s 时,$\beta^{V}_{off}>\beta^{V}_{ons}$,且 β^{V}_{off} 的峰值平台也同样往长周期移动. 与水平反应谱不同的是,β^{V}_{off} 的峰值小于 β^{V}_{ons} 的峰值,但在 $T>0.5$ s 却明显偏大.

从反应谱的结果可以看出,由于海底沉积土层的影响,地震动的长周期成分被放大,使得反应谱整体向中长周期移动. 然而对于竖向地震动而言,由于海水层对高频地震动成分的削弱与压制,处于高频段的加速度反应谱峰值也相应变小,这与文献[1,2,4,27]中的研究结果一致. 值得注意的是,很多重要的海洋工程,如跨海大桥、单桩风机等,自振周期都在 1 s 以上,故而海底场地条件对地震动长周期成分的放大作用会对海洋结构物的地震反应造成不利的影响.



(a) 水平向 (b) 竖向

图 3 海陆地震动平均加速度放大系数谱

Fig. 3 Average acceleration amplification factor spectra: onshore versus offshore

4 时 - 频分析

4.1 希尔伯特 - 黄变换(HHT)

由于地震动记录的幅值和频率成分不断随时间变化,在严格意义上是一个非平稳随机过程[28]. 传统的频域分析方法只适用于平稳随机过程,即幅值和频率不随时间而变化,如傅里叶变换[29],无法对地震动特性进行精细化研究. 为了较好地描述地震动从开始激发到强震段,然后衰减结束的全过程,本文采用希尔伯特 - 黄变换(HHT)获取 HHT 谱,进一步研究海陆地震动的能量在时间 - 频率分布上的差异. HHT 变换首先利用经验模态分解方法(EMD)将复杂信号变成一系列符合特定条件的固有模态函数(IMF),而后对每一个 IMF 进行希尔伯特变换并得到相应的希尔伯特谱,最后综合所有 IMF 的希尔伯特谱得到原信号的时频特征谱[30-31].

考虑到所有 69 对数据呈现相近的结论,受限于篇幅,本文选取了表 2 中的 SE #17 地震中海底台站 SR5 和陆地台站 LR6 记录的地震动数据作为代表,详细讨论海陆地震动时 - 频谱特征.

4.2 HHT 谱分析

图 4(a)给出了该地震下海陆两个台站东西方向(EW)记录的地震动加速度时程. 其中,海底 PGA = 253.74 cm/s^2 大于陆地 PGA = 146.47 cm/s^2. 图 4(b)、(c)分别展示了对应于这两条地震动的 HHT 时频谱,谱值的大小用颜色的不同显示在时间 - 频率坐标平面中. 从图中可看出,在地面运动触发的早期,无论是海底还是陆地地震动均包含丰富的频率成分,在地面运动后期,很多高频成分逐渐被削弱甚至消失.

对于图 4(b)中的陆地水平地震动,HHT 谱给出了主要能量的时频域分布,能量主要集中在 $t=$

19.74 s 到 t = 20.10 s 左右,对应的主要频率成分是从 8.40 Hz 到 12.44 Hz 的高频. 另外,最大的瞬时能量 E_{inst} = 151.28 cm^2/s^4 发生在台站记录时刻 t = 20.05 s,该时间点同样对应于该地震动 PGA 发生的时刻. 该瞬时能量对应的瞬时频率 f_{inst} = 10.61 Hz. 由于在地震动频域分析中,人们通常更关注傅里叶谱中卓越频率对结构动态响应的影响,主要是共振等问题. 本文利用傅里叶变换同样也计算了各地震动的卓越频率. 对于图 4(b)中的陆地地震动,其卓越频率 f_p = 9.80 Hz,虽然 f_{inst} 和 f_p 同样对应于最大的能量幅值,但是由于傅里叶变换基于平稳信号,在整个时段对所有频率成分进行平均化处理,使得所获取的卓越频率与利用 HHT 方法得到的非平稳信号的瞬时频率 f_{inst} 在本质上存在着差别. 本文进一步在时程上计算了各地震动 PGA 所在那个循环的峰 - 谷周期 T_{pt},发现该地震动 T_{pt} = 0.1 s,或 f_{pt} = 10 Hz,比卓越频率更接近 f_{inst}. 这一结论适用于其他 68 对地震动数据. 所以考虑到时程的峰 - 谷周期中包含了 PGA,对结构强度影响很大,除了关注卓越频率外,本研究认为还应该在抗震设计中考虑 f_{inst} 或者 f_{pt} 对结构地震反应的影响.

对于图 4(c)中的海底水平地震动,主要能量集中在 t = 19.83 s 到 t = 20.84 s 左右,这与图 4(b)中的陆地水平地震动主要能量时段类似,这主要是两个台站震中距相似引起的. 不同点是图 4(c)对应的主要频率成分来自于 1.54 Hz 到 3.84 Hz 的中低频. 该海底地震动最大的瞬时能量 E_{inst} = 227.81 cm^2/s^4,比图 4(b)陆地地震动大 50%,发生于时刻 t = 20.29 s,相应的瞬时频率 f_{inst} = 2.69 Hz,远低于陆地对照组的瞬时频率. 这一结果与反应谱分析类似. 希尔伯特谱也反映出,相比于陆地地震动,海底地震动的低频成分被放大. 对于该海底地震动,其卓越频率为 1.88 Hz,而峰 - 谷频率为 2.33 Hz,后者同样更接近于 f_{inst}.

从图 4(b)、(c)对比还可看出,陆地地震动的能量在大约 t = 40 s 之后即消失,而海底地震动能量的衰减持续到 t = 100 s 之后. 这与两条地震动的能量持时长短关系一致,因海底地震动能量持时 T_d = 16.56 s 是陆地地震动 T_d = 5.01 s 的三倍多.

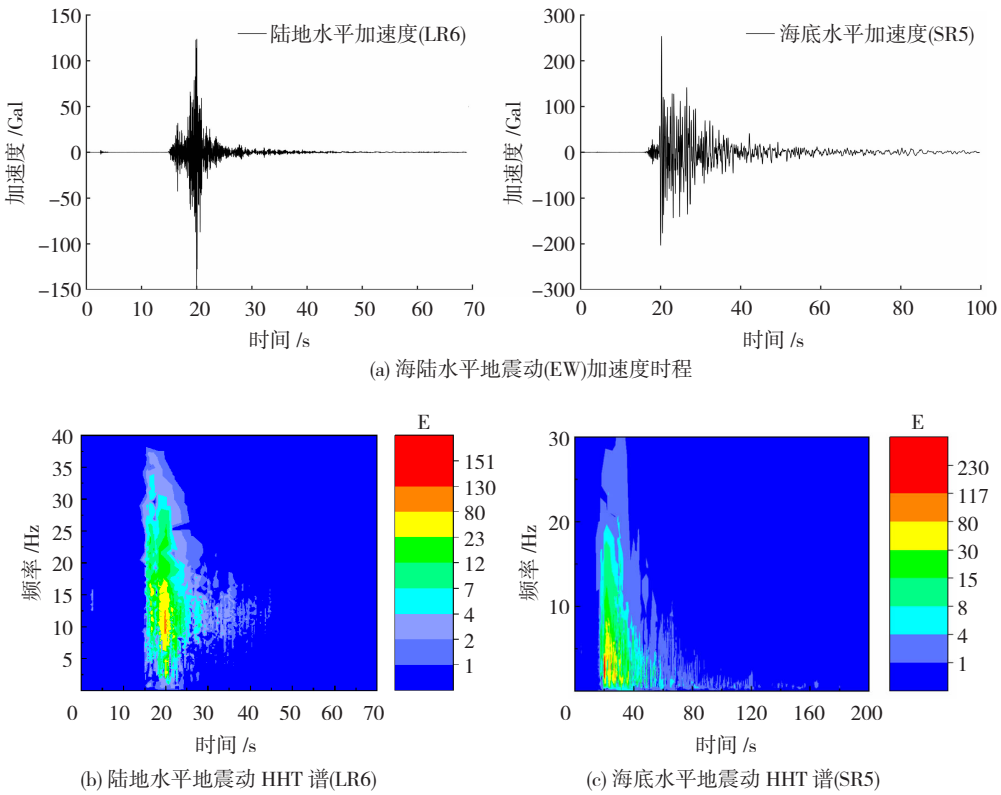
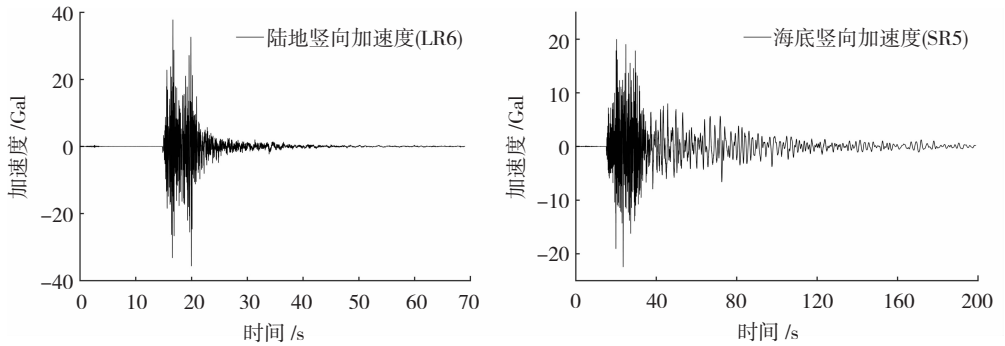


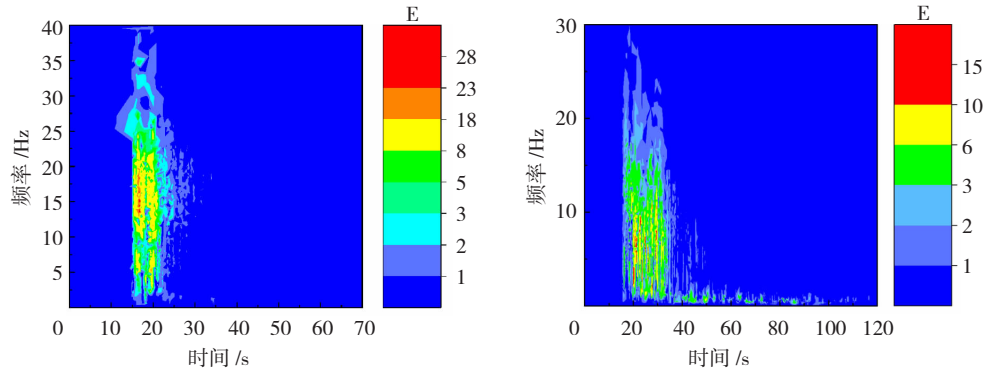
图 4　SE #17 中海陆水平地震动 HHT 谱特征(台站:LR6 和 SR5)

Fig. 4　Characteristics of HHT spectra of offshore and onshore horizontal ground motions from SE #17 (Stations: LR6 & SR5)

图 5 分别给出了该地震下海陆两个台站竖向记录的地震动加速度时程以及 HHT 谱. 和水平向地震动不同的是,海底竖向地震动 PGA 以及 HHT 谱中最大能量值小于陆地竖向地震动,而其他 HHT 谱特征的对比结果与图 4 中的分析一致,即海底竖向地震动中主要能量所对应的瞬时频率低于陆地竖向地震动,且地震动最大瞬时能量所对应的瞬时频率更接近峰 - 谷频率,而不是卓越频率.



(a) 海陆竖向地震动加速度时程



(b) 陆地竖向地震动 HHT 谱(LR6)　　(c) 海底竖向地震动 HHT 谱(SR5)

图 5　SE #17 中海陆竖向地震动 HHT 谱特征(台站:LR6 和 SR5)

Fig. 5　Characteristics of HHT spectra of offshore and onshore vertical ground motions from SE #17 (Stations: LR6 & SR5)

5　结　论

1)同一地震下,震中距接近的海底水平地震动 PGA 通常大于陆地水平地震动 PGA. 鉴于水平地震动是进行结构抗震设计的关键性动力荷载,工程上在进行海洋结构地震动态响应分析时,如果依然使用陆地水平地震动的 PGA 结果,很有可能会低估地震动的作用. 而对于相应的竖向地震动,总的来说海底竖向地震动 PGA 比陆地竖向地震动 PGA 值小. 当然,需要注意的是对于水平和竖向 PGA 的对比结果是针对本研究数据条件而获得的,而影响地震动 PGA 的因素有很多,对海底地震动 PGA 今后还应开展更深入广泛的研究. 海底地震动的能量持时比陆地地震动更长,尤其是竖向地震动.

2)海底场地条件放大了地震波中长周期成分的能量,使得海底地震动反应谱向中低频偏移. 海底水平向地震动反应谱峰值比陆地的大,而海底竖向地震动中高频部分被海水层削弱,其反应谱峰值比陆地的小. 使用海底地震动进行海洋工程抗震设计和安全评估是非常重要的.

3)相比于传统的傅里叶变换,希尔伯特 - 黄变换(HHT)更加适合用来分析非平稳信号的时频特征. 海底地震动主要能量成分所对应的频率分布低于陆地地震动. HHT 谱中最大瞬时能量所对应的瞬时频率值更接近 PGA 峰 - 谷频率,而不是傅里叶谱的卓越频率. 因此在地震反应分析时除了考虑卓越频率的影响,还需要考虑 PGA 峰 - 谷频率的影响.

参考文献

[1] BOORE D M, SMITH C E. Analysis of earthquake recordings obtained from the Seafloor Earthquake Measurement System (SEMS) instruments deployed off the coast of southern California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(1): 260

[2] DIAO Hongqi, HU Jinjun, XIE Lili. 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. DOI: 10.1007/s11803-014-0222-4

[3] DHAKAL Y P, AOI S, KUNUGI T, et al. Assessment of nonlinear site response at ocean bottom seismograph sites based on S-wave horizontal-to-vertical spectral ratios: a study at the Sagami Bay area K-NET sites in Japan[J]. Earth, Planets and Space, 2017, 69(1): 29. DOI: 10.1186/s40623-017-0615-5

[4] CHEN Baokui, WANG Dongsheng, LI Hongnan, et al. Characteristics of earthquake ground motion on the seafloor[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2015, 19(6): 874. DOI: 10.1080/13632469.2015.1006344

[5] NAKAMURA T, TAKENAKA H, OKAMOTO T, et al. Seismic wavefields in the deep seafloor area from a submarine landslide source[J]. Pure and Applied Geophysics, 2014, 171(7): 1153.

DOI: 10.1007/s00024 - 013 - 0717 - 3

[6] TODORIKI M, FURUMURA T, MAEDA T. Effects of seawater on elongated duration of ground motion as well as variation in its amplitude for offshore earthquakes [J]. Geophysical Journal International, 2016, 208:226. DOI: 10.1093/gji/ggw388

[7] API RP2A-WSD. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design[M]. 21st ed. USA: American Petroleum Institute, 2000

[8] SMITH C E. Response of a steel-jacket platform subject to measured seafloor seismic ground motions [C]//Proceedings of Offshore Technology Conference. Houston: Offshore Technology Conference, 1996: 803. DOI: 10.4043/8110 - MS

[9] 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
LYU Yuejun, PENG Yanju, SHI Chunhua, 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

[10] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 第 2 版. 北京:地震出版社, 2006: 150
HU Yuxian. Earthquake engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press, 2006: 150

[11] AOI S, KUNUGI T, FUJIWARA H. Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net [J]. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 2004, 4(3): 65. DOI: 10.5610/jaee.4.3_65

[12] KINOSHITA S. Kyoshin net (K-net) [J]. Seismological Research Letters, 1998, 69(4): 309. DOI: 10.1785/gssrl.69.4.309

[13] EGUCHI T, FUJINAWA Y, FUJITA E, et al. A real-time observation network of ocean-bottom-seismometers deployed at the Sagami trough subduction zone, central Japan [J]. Marine Geophysical Researches, 1998, 20(2): 73. DOI: 10.1023/A: 1004334021329

[14] BOORE D M, BOMMER J J. Processing of strong-motion accelerograms: needs, options and consequences [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(2): 93. DOI: 10.1016/j.soildyn.2004.10.007

[15] LAY T, AMMON C J, KANAMORI H, et al. Possible large near-trench slip during the 2011 M_w 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake[J]. Earth, Planets and Space, 2011, 63(7): 32. DOI: 10.5047/eps.2011.05.033

[16] 谢礼立,张晓志. 地震动记录持时与工程持时[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(1): 37
XIE Lili, ZHANG Xiaozhi. Accelerogram-based duration and engineering duration of ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1988, 8(1): 37

[17] TRIFUNAC M D, BRADY A G. A study on the duration of strong earthquake ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(3): 626

[18] NOVIKOVA E, TRIFUNAC M. Duration of strong ground motion in terms of earthquake magnitude, epicentral distance, site conditions and site geometry [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1994, 23(9): 1023. DOI: 10.1002/eqe.4290230907

[19] ANDERSON J C, BERTERO V V. Seismic performance of an instrumented six-story steel building[M]. California: Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1991

[20] BOLT B A. Duration of strong ground motion[C]//Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering. Rome: Editrice Libraria, 1973: 1304

[21] VANMARCKE E H, LAI S - S P. Strong-motion duration and RMS amplitude of earthquake records[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1980,70(4): 1293

[22] 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. DOI: 10.1002/eqe.4290080204

[23] MIAO Feng. Dynamic model scheme optimization based on fuzzy decision theory of self-anchored cable-stayed suspension bridge[J]. Advanced Materials Research, 2014, 919: 538

[24] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5 - MW reference wind turbine for offshore system development: NREL/TP - 500 - 38060[R]. United States: National Renewable Energy Laboratory, 2009. DOI: 10.2172/947422

[25] BIOT M A. A mechanical analyzer for the prediction of earthquake stresses[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1941, 31(2): 151

[26] NIGAM N C, JENNINGS P C. Calculation of response spectra from strong-motion earthquake records[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1969, 59(2): 909

[27] ZHANG Qi, ZHENG Xiangyuan. Offshore earthquake ground motions: distinct features and influence on the seismic design of marine structures[J]. Marine Structures, 2019, 65: 291. DOI: 10.1016/j.marstruc.2019.02.003

[28] 欧进萍,牛荻涛,杜修力. 设计用随机地震动的模型及其参数确定[J]. 地震工程与工程振动, 1991, 11(3): 45
OU Jinping, NIU Ditao, DU Xiuli. Random earthqauke ground motion model and its parameter determination used in aseismic design[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1991, 11(3): 45

[29] BRACEWELL R N. The Fourier transform and its applications [M]. New York: McGraw-Hill, 1986

[30] HUANG N E, SHEN Zheng, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193

[31] HUANG N E, CHERN C C, HUANG K, et al. A new spectral representation of earthquake data: Hilbert spectral analysis of station TCU129, Chi-Chi, Taiwan, 21 September 1999[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2001, 91(5): 1310. DOI: 10.1785/0120000735

(编辑　赵丽莹)