

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2016.01.004

海底地震动特性及相关谱研究^{*}

陈宝魁¹, 王东升², 李宏男¹, 孙治国²

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 大连海事大学道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026)

摘要: 利用日本 K-NET 与美国 SEMS 台网中海底强震记录研究了海底地震动特性。通过分析水平反应谱、竖向与水平加速度反应谱的比谱和弹性反应谱, 比较了海底与陆地地震动的区别。发现海底竖向地震动的峰值加速度明显更低。在大于 0.2 s 的周期段, 海底水平地震动反应谱大于陆地谱值, 而且海底谱具有更长的特征周期, 并随震中距增长而增大。此外, 海底地震动的竖向与水平加速度反应比谱与陆地地震动的差异很大, 在小于 1 s 的中短周期段海底地震动的比谱明显更小。根据不同的震级与震中距的真实地震动记录, 提出了中等地震下不同震中距海底地震动比谱的简化设计方程。最后, 比较了海底与陆地地震动的弹性反应谱, 可知总体上海底与陆地的等延性强度折减系数谱差异不大。

关键词: 海底地震动; 弹性反应谱; 竖向与水平加速度反应比谱; 等延性强度折减系数谱

中图分类号: P315.63; P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2016)01-0038-06

Study on the Characteristics of Offshore Ground Motion and Its Response Spectra

CHEN Baokui¹, WANG Dongsheng², LI Hongnan¹, SUN Zhiguo²

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: The characteristics of offshore ground motions were studied on the basis of the records from the Kyoshin network (K-NET) in Japan and Seafloor Earthquake Measuring System (SEMS) in the USA. The horizontal response spectra, the vertical-to-horizontal response spectral ratios (V/H RS ratios), and the inelastic response spectra were analyzed to compare the differences in offshore and onshore ground motions. It is found that the PGA of vertical components for offshore ground motions is lower. The horizontal response spectral values for offshore ground motions are higher for periods longer than 0.2 s. The characteristic periods of offshore ground motions is longer than that of onshore ground motions, the larger the epicentral distance, the longer the characteristic period will be. Moreover, it is very different in the V/H RS ratios between offshore and onshore ground motions. The V/H RS ratios for offshore ground motions are obviously higher than that for onshore ground motions at short to middle periods lower than 1 s. Further more, the simple design equations of V/H RS ratios for offshore ground motions are derived on the basis of the real ground motion recordings with different earthquake magnitudes and epicentral distances. At last, to compare the inelastic response spectra, the difference in strength reduction factor spectra between offshore and onshore ground motions is slight in general.

Keywords: offshore ground motion; elastic response spectra; vertical-to-horizontal response spectral ratio; strength reduction factor spectra with constant ductility

^{*} 收稿日期: 2015-08-19; 修回日期: 2015-12-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB013605)、国家自然科学基金项目(51178071、51008041)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12-0751)、辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LJQ2013053)、中央高校基本科研业务费项目(3132015225)资助

作者简介: 陈宝魁(1982-), 男, 博士研究生。主要从事桥梁及结构抗震研究。Email: baokui_2000@163.com

通讯作者: 王东升(1974-), 男, 教授, 博导。主要从事桥梁及结构抗震研究。Email: dswang@dlnu.edu.cn

引 言

近年来,伴随着石油开发、跨海交通的需要,诸如海底石油平台、海洋人工岛和跨海桥梁等大型海洋结构物在我国沿海快速建设。对比海洋结构物建设的迅猛发展,其抗震性能研究尚不成熟,特别是缺少海底地震动特性的相关研究,其抗震分析一般仍采用陆上强震记录。由于我国近海处于地震高发的环太平洋地震带,并且国外已存在海洋结构在地震中破坏的案例^[1-2],因此海底地震动特性的相关研究亟待补充。

地震反应谱的研究对于结构抗震设计至关重要^[3-5]。由于缺少海底地震动记录,目前海洋结构的设计反应谱只能参考陆地地震动记录,而海底地震动的相关研究也无法顺利开展。美国 1977 年在南加利福尼亚地区建立了海底地震观察系统(SEMS)^[6]。利用收集到的海底强震记录,Sleepe^[7]和 Boore 等^[8]分析了地震动记录的加速度时程曲线、反应谱、竖向与水平比谱,发现海水对海底地震动的竖向分量影响明显,海底地震动反应谱在低频范围与陆地软土地场地的地震动特性相似。然而,由于台站布设等原因,SEMS 台网未能在一次地震中同时收集到海底与陆地地震动记录,缺少海底与陆地地震动在相同地震中的直接对比。日本在临近东京湾的相模海湾附近安装了 6 个海底台站,由 K-NET 台网提供维护、数据收集与公布等工作,并且在 2006 年以后的多次地震中采集到高质量的海底地震动记录^[9-10],也包括临近的陆地台站记录。本文利用 K-NET 与 SEMS 中海底台站收集的地震动记录,通过比较海底与陆地地震动的加速度时程曲线、水平向弹性反应谱、竖向与水平地震动的比谱和

弹塑性反应谱,初步揭示了海底地震动的若干特性,为今后海洋工程结构物抗震设计及研究提供参考。

1 海底强震观测数据

1.1 K-NET 强震台网

日本 K-NET 强震台网由国家地震科学与防灾减灾研究所建立,在日本全境安装了 1000 多台强震仪。其中 6 个海底台站(KNG201-KNG206)位于水深 900~2300 m 的相模湾^[9-11](图 1)。其建成于 2006 年,目前已经获得了包括 2011 年 3·11 东北近海大地震在内的海底强地震动记录。本文取其中的 6 次地震数据进行分析,相关地震信息见表 1,详细的台站情况见文献^[9]。

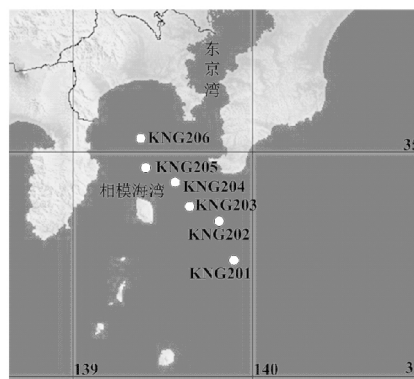


图 1 日本 K-NET 强震台网的海底台站(KNG201-KNG206)

Fig. 1 Offshore stations (KNG201-KNG206) in the K-NET in Japan

1.2 SEMS 强震观测系统

美国海底地震观察系统(SEMS)于 1977 年在南加利福尼亚地区布置了多个海底地震动台站^[6]。本文选取 SEMS 中 5 个海底台站在 8 次地震中的海

表 1 K-NET 中地震事件信息

Table 1 Information of earthquake events in the K-NET

震源位置	日期	时间	纬度	经度	震级/ M_w	震源深度/km	震中场地类型
Izu Peninsula	2006-04-21	02:50	34.940N	139.195E	5.8	7	海底
Sagami Bay	2006-05-02	18:24	34.917N	139.330E	5.1	15	海底
Suruga Bay	2009-08-11	05:07	34.785N	138.498E	6.5	23	海底
Tohoku	2011-03-11	14:46	38.103N	142.860E	9.0	24	海底
Mount Fuji	2011-03-15	22:31	35.308N	138.713E	6.4	14	陆地
Tokyo Bay	2012-07-03	22:31	35.000N	139.870E	5.2	88	陆地

底地震动数据^[9]。由于没有在一次地震中同时收集到海底与陆地的地震动,本文只选取了 SEMS 中的海底地震动数据以对比 K-NET 中的海底地震动特性,相关地震信息见表 2。

2 海底地震动时程与加速度峰值

图 2 比较了在 K-NET 台网某次地震中随机选

取的两个海底与陆地台站的三向加速度时程曲线。海底台站的 2 个水平与 1 个竖向加速度时程曲线的峰值加速度 PGA 分别为 34、35、6 gal;而陆地三向时程曲线的 PGA 为 51、73、38 gal。可以发现,陆地地震动竖向 PGA 是水平 PGA 的 50%左右,而海底地震动的竖向 PGA 只有水平 PGA 的 20%左右。经统计研究,海底与陆地地震动记录^[9]的平均竖向与水平的峰值加速度比值分别为 0.223 和 0.429。

表 2 SEMS 台网中地震事件信息
Table 2 Information of earthquake events in the SEMS

编号	震源位置	日期	时间	纬度	经度	震级/ M_w	震中场地类型
SB81	Santa Barbara	1981-09-04	15:50	33.66N	119.10W	5.95	海底
NP86	North Palm	1986-07-08	09:20	34.00N	116.61W	6.10	陆地
OS86	Oceanside	1986-07-13	13:47	32.97N	117.87W	5.84	海底
UP90	Upland	1990-02-28	23:43	34.14N	117.70W	5.63	陆地
RC95	Ridgecrest	1995-09-20	23:27	35.76N	117.64W	5.56	陆地
CL97	Calico	1997-03-18	15:24	34.97N	116.82W	4.85	陆地
S97A	Simi Valley	1997-04-26	10:37	34.37N	118.67W	4.81	陆地
S97B	Simi Valley	1997-04-27	11:09	34.40N	118.64W	4.72	陆地

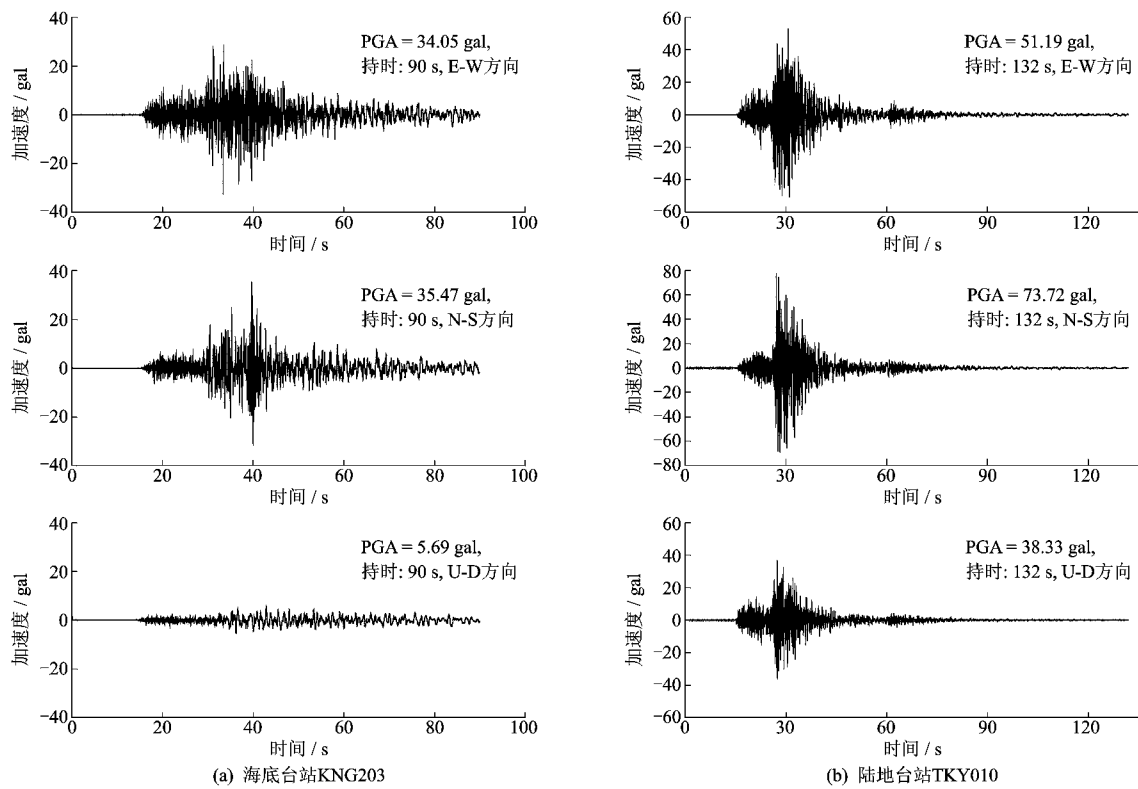


图 2 K-NET 台网在 2009-08-11 地震中海底台站 KNG203 与陆地台站 TKY010 的三向加速度时程曲线

Fig. 2 Two suits of acceleration time histories for offshore station KNG203 and onshore station TKY010 in 2009-08-11 earthquake

图3对比了海底与陆地地震动竖向与水平分量的峰值加速度,同样可以发现海底地震动的竖向峰值加速度明显更小。

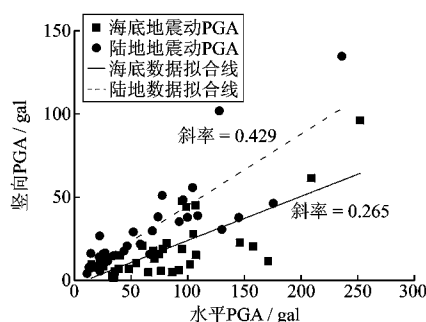


图3 K-NET中海底与陆地地震动竖向与水平(南北方向)分量的峰值加速度

Fig. 3 Relationship between vertical and horizontal (N-S) PGA values for onshore and offshore ground motions in the K-NET

3 海底地震动弹性反应谱

3.1 水平反应谱

图4比较了K-NET台网中海底、陆地和SEMS中海底3组水平向地震动的平均放大系数谱(归一化反应谱)。反应谱的计算周期 T 为 $0.04 \sim 5$ s,阻尼比取5%,被选地震动记录的详细信息参见文献[9,11]。从图中可以发现,在小于 0.1 s的周期内海底地震动反应谱小于陆地谱,在周期 $0.1 \text{ s} < T < 0.2 \text{ s}$ 时海底与陆地反应谱存在一个交叉点,在大于 0.2 s 周期范围内海底反应谱大于陆地反应谱。海底反应谱的特征周期大于陆地谱,且前者存在一个明显的峰值平台。另外,K-NET与SEMS中海底地震动反应谱的特征基本相近。研究发现,在所选K-NET台网的各次地震事件的独立统计结果中,海底与陆地反应谱也均表现出上述特征。

将K-NET海底地震动数据,根据震级和震中距 R 分为中震近距MSR($5.0 < M_w < 6.5, R < 30 \text{ km}$)、中震中距MMR($5.0 < M_w < 6.5, 30 \text{ km} \leq R < 140 \text{ km}$)及大震远距LFR($M_w = 9.0, R \geq 400 \text{ km}$)3组^[9]。SEMS海底地震动大部分属于中震中远距($4.7 < M_w < 6.1, 70 \text{ km} < R < 200 \text{ km}$)数据。图5比较了4组海底水平向地震动的放大系数谱,发现震中距对海底反应谱的影响明显,并且随着震中距的增大,反应谱的长周期成分更丰富。

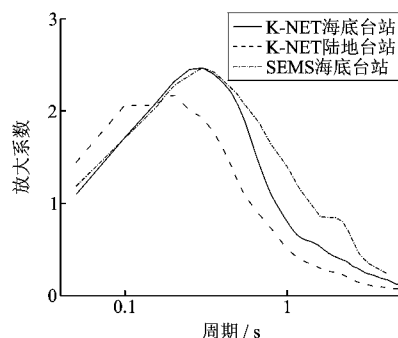


图4 K-NET与SEMS中水平向海底与陆地地震动的平均反应谱

Fig. 4 Average horizontal response spectra for offshore and onshore ground motions from the K-NET and SEMS

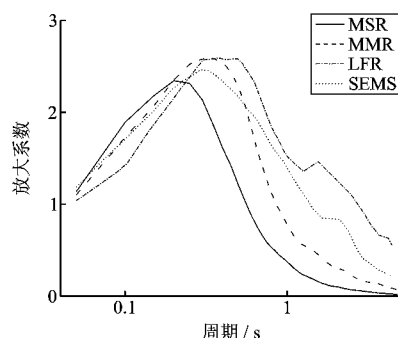


图5 不同震级与震中距分组海底地震动的平均放大系数谱

Fig. 5 Average response spectra for offshore ground motions with different earthquake magnitudes and epicentral distances

3.2 竖向与水平反应比谱

图6比较了K-NET与SEMS中海底与陆地地震动的平均竖向与水平反应谱的比谱(V/H 反应比谱):在小于 1 s 的周期范围内海底地震动的比谱远低于陆地比谱,特别在周期小于 0.5 s 段,海底比谱只是陆地比谱的30%~50%;在大于 2 s 周期段海底地震动的比谱等于或超过陆地比谱。另外,K-NET与SEMS海底地震动的比谱相差不大。

海洋工程中一些高耸、悬臂式结构可能需要考虑竖向地震动的影响,依据真实的地震动数据,针对中等地震尝试提出不同震中距海底地震动比谱的简化设计方程,由于本研究的海底地震动大多记录的是中等地震($5.0 < M_w < 6.5$),至于是否适用于更强地震要等待更多数据积累。震中距小于 150 km 的海底地震动竖向与水平加速度反应比谱的简化设计方程为:

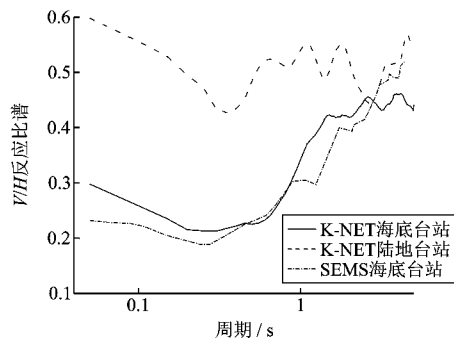
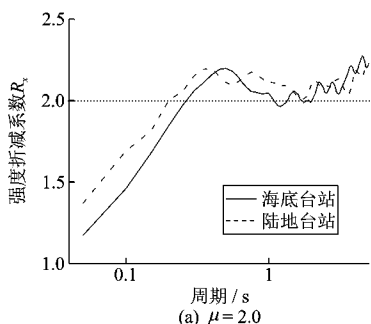


图 6 K-NET 和 SEMS 中海底与陆地地震动的平均反应比谱

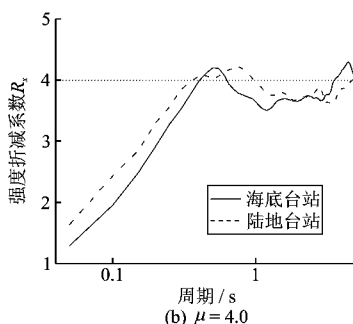
Fig. 6 The average V/H RS ratios for offshore and on-shore motions in the K-NET and SEMS

$$V/H(R \leq 150 \text{ km}) =$$

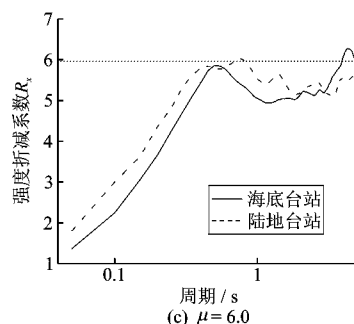
$$\begin{cases} 0.3 & T \leq 0.5 \text{ s} \\ 9/80 + 3/8T & 0.5 \text{ s} < T < 0.9 \text{ s} \\ 0.45 & 0.9 \text{ s} \leq T < 5 \text{ s} \end{cases} \quad (1)$$



(a) $\mu = 2.0$



(b) $\mu = 4.0$



(c) $\mu = 6.0$

图 7 K-NET 中海底与陆地地震动的平均等延性强度折减系数谱

Fig. 7 Average strength reduction factor spectra with constant ductility for offshore and onshore ground motions in the K-NET

5 结 论

(1) 海水对海底地震动的竖向分量影响较大, 海底地震动的竖向与水平峰值加速度比明显小于相邻陆地地震动。

(2) 水平向海底地震动反应谱(放大系数谱)的特征周期(0.5~0.6 s)明显大于相邻陆地反应谱的特征周期(0.2~0.3 s), 并且有一个更宽的峰值平台。另外, 震中距对海底地震动反应谱的影响明显, 随着震中距的增大, 海底反应谱有更多的长周期成分。

(3) 海底地震动的竖向与水平反应谱的比谱小于相邻陆地比谱, 特别在小于 1 s 的周期内, 海底地

震中距大于 300 km 的海底地震动比谱的简化设计方程为:

$$V/H(R \geq 300 \text{ km}) =$$

$$\begin{cases} 0.3 & T \leq 0.5 \text{ s} \\ 0.15 + 0.3T & 0.5 \text{ s} < T < 1.5 \text{ s} \\ 0.6 & 1.5 \text{ s} \leq T < 5 \text{ s} \end{cases} \quad (2)$$

4 海底地震动弹塑性反应谱

弹塑性反应谱包括等延性强度折减系数谱和等强度延性需求谱两类, 相关理论在文献[5]中已有简单总结。图 7 比较了延性系数 μ 为 2.0、4.0、6.0 时 K-NET 中海底与陆地地震动的平均等延性强度折减系数谱^[11]。在等位移准则成立前周期小于 1.5 s 范围内, 不同位移延性系数的陆地地震动的等延性强度折减系数均大于海底地震动的值, 但总体差距不大。

震动的比谱远低于相邻陆地比谱。建立了中等地震海底地震动比谱简化设计方程。

(4) 海底与相邻陆地地震动的等延性强度折减系数谱差异不大, 但在周期小于 1.5 s 时, 陆地上的强度折减系数略大于海底的强度折减系数。

参考文献:

- [1] Tanaka Y. The 1995 great Hanshin Earthquake and liquefaction damages at reclaimed lands in Kobe Port [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2000, 10(1): 64-72.
- [2] Nolen-Hoeksema S, Morrow J. A prospective study of depression and posttraumatic stress symptoms after a

- natural disaster; the 1989 Loma Prieta Earthquake [J]. Journal of Personality and Social Psychology, 1991, 61(1): 115-121.
- [3] Chopra A K. Elastic response spectrum; a historical note[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2007, 36(1): 3-12.
- [4] 陈清军, 陈小燕, 吴 琼. 汶川地震和东日本大地震反应谱比较与结构 Pushover 分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(5): 656-662.
- Chen Q J, Chen X Y, Wu Q. Spectrum comparison of Wenchuan earthquake and the great east Japan earthquake and pushover analysis of frame structures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(5): 656-662. (in Chinese)
- [5] 王东升, 李晓莉, 孙治国, 等. 汶川地震动弹性和弹塑性反应谱分析[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(2): 43-54.
- Wang D Sh, Li X L, Sun Zh G, et al. Elastic and elastoplastic response spectra of the Wenchuan earthquake ground motions[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(2): 43-54. (in Chinese)
- [6] 胡进军, 刁红旗, 谢礼立. 海底强地震动观测及其特征的研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(6): 1-8.
- Hu J J, Diao H Q, Xie L L. Review of observation and characteristics of seafloor strong motion [J], Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(6): 1-8. (in Chinese)
- [7] Sleaf G E. The long-term measurement of strong-motion earthquakes offshore southern California [C] // Proceedings of the 22nd Annual Offshore Technology Conference. Houston, Texas: [s. n.], 1990: 561-568.
- [8] 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): 260-274.
- [9] Chen B K, Wang D S, Li H N, et al. Characteristics of earthquake ground motion on the seafloor[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2015, 19(6): 874-904.
- [10] Diao H Q, Hu J J, Xie L 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.
- [11] 陈宝魁, 李宏男, 王东升, 等. 海底地震动的等延性强度折减系数谱[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(2): 1-11.
- Chen B K, Li H N, Wang D Sh, et al. Strength reduction factor spectra with constant ductility for offshore ground motions[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(2): 1-11. (in Chinese)
-
- (上接第 30 页)
- [11] 何建涛, 马怀发, 张伯艳, 等. 黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 960-969.
- He J T, Ma H F, Zhang B Y, et al. Method and realization of seismic motion input of viscous-spring boundary [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 960-969. (in Chinese)
- [12] 梁建文, 于军港, 张 季, 等. 基于黏弹性边界的地铁双隧道地震响应分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增 1): 274-279.
- Liang J W, Yu J G, Zhang J, et al. Seismic response analysis of metro twin tunnels by the viscous-spring boundary[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup1): 274-279. (in Chinese)
- [13] 梁建文, 于军港, 张 季, 等. 基于黏弹性边界的地下隧道非线性地震响应分析模型[J]. 地震工程学报, 2014, 36(3): 434-440.
- Liang J W, Yu J G, Zhang J, et al. A model for non-linear seismic response analysis of underground tunnels based on the viscous-spring boundary [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 434-440. (in Chinese)
- [14] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] 梁建文. 非平稳地震动过程模拟(II)[J]. 地震学报, 2005, 27(3): 346-351.
- Liang J W. Simulation of non-stationary ground motion processes (II) [J]. Acta Seismologica Sinica, 2005, 27(3): 346-351. (in Chinese)
- [16] Liang J W, Chaudhuri S R, Shinozuka M. Simulation of nonstationary stochastic processes by spectral representation [J], Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2007, 133(6): 616-627.