

# 海底地震动的等延性强度折减系数谱

陈宝魁<sup>1</sup> 李宏男<sup>1</sup> 王东升<sup>2</sup> 孙治国<sup>2</sup>

(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:**为了解海底与陆地地震动弹塑性地震反应谱的差别,本文选取日本K-NET强震台网近年收集的部分海底及陆地强震记录,总计6个海底台站与相邻8个陆地台站在6次地震中的67组(双向水平)强震记录,以统计分析的方法研究了海底台站及其相邻的陆地台站强震记录的等延性强度折减系数谱的特性。进一步选取美国“海底地震动观测系统项目(SEMS)”的7个台站在8次地震中的9组(双向水平)海底强震记录与K-NET海底强震记录的等延性强度折减系数谱进行了对比,以探求震中距、水深等对海底地震动等延性系数强度折减系数谱的影响。总体上看,海底与陆地地震动的等延性强度折减系数谱相差不大,震中距对海底地震动等延性强度折减系数谱有一定影响,特别在周期 $T < 1.5$  s时,震中距越大其谱值越小,而水深对其影响不大。

**关键词:**海底地震动;弹塑性反应谱;强度折减系数;K-NET强震台网;震中距;水深  
**中图分类号:**P315.63; P315.9 **文献标志码:**A

## Strength reduction factor spectra with constant ductility for offshore ground motions

CHEN Baokui<sup>1</sup>, LI Hongnan<sup>1</sup>, WANG Dongsheng<sup>2</sup>, SUN Zhiguo<sup>2</sup>

(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:** In order to study the differences in inelastic response spectra between offshore and onshore ground motions, the characteristic of the strength reduction factor spectra with constant ductility for offshore ground motions and their adjacent onshore ground motions were statistically analyzed. 67 ground motion records with two horizontal components at 6 offshore and 8 adjacent onshore stations in 6 earthquake events were selected from Japanese K-NET strong-motion network in recent years. Further, 9 offshore ground motion records with two horizontal components at 7 offshore stations in 8 earthquake events were selected from the SEMS in the USA, and the strength reduction factor spectra with constant ductility for offshore ground motions from the K-NET were compared with the offshore ground motions from the SEMS. The influences of epicentral distance and water depth on the spectra were also discussed. In general, the differences in strength reduction factor spectra between offshore and onshore ground motions are little. The epicentral distance has some influence on the strength reduction factor spectra for offshore ground motions, especially for periods less than 1.5 s, the larger the epicentral distance, the lower spectral value will be. It is found that the water depth has little effect on the spectra for offshore ground motions.

**Key words:** offshore ground motion; inelastic response spectrum; strength reduction factor; K-NET strong-motion network; epicentral distance; water depth

收稿日期:2013-12-29; 修订日期:2014-02-09

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资助项目(NCET-12-0751);辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2013053)

作者简介:陈宝魁(1982-),男,博士研究生,从事桥梁及结构抗震研究。E-mail: baokui\_2000@163.com

通讯作者:李宏男(1957-),男,教授,博士,主要从事地震工程、结构健康监测与控制等研究。E-mail: hnli@dlut.edu.cn

## 引言

近些年,我国海洋石油平台、跨海桥梁、海底隧道与人工岛等海洋构造物的建设蓬勃发展。然而中国近海工程建设起步相对较晚,未经历过强震考验。事实上,世界范围内近海工程已有强震破坏实例,如1989年Loma Prieta地震中San Francisco-Oakland海湾大桥发生落梁<sup>[1]</sup>,1995年Kobe地震中两个人工岛液化等<sup>[2]</sup>。对地震动特性充分认识是结构抗震设计的基础,海洋工程尤为重要。

由于缺少足够的海底强震记录,目前关于海底地震动的认识仍很贫乏。幸运的是日本K-NET强震台网于2006年1月在日本东部的相模湾海域布置了6台强震仪,并在近年(2006-2012)收集到了一些高质量的海底地震动数据。本文主要利用K-NET台网中的强震数据,比较了海底与陆地地震动弹塑性反应谱(等延性强度折减系数谱)的区别。弹塑性反应谱的研究可上溯到20世纪60年代,Newmark和Veletsos<sup>[3,4]</sup>首先提出了关于单自由度体系弹塑性反应谱的概念,其核心观点为位移延性系数与强度折减系数关系的等位移准则和等能量准则,此研究至今在结构抗震领域仍然被广泛应用,是结构延性抗震的重要基础。到目前为止,众多学者对基于强度折减系数、位移延性系数建立的弹塑性反应谱进行了深入的研究<sup>[5-12]</sup>。随着世界范围内大量实际地震记录被采集并发布,陆地地震动弹塑性反应谱被更加详细地研究,如吕西林等<sup>[13]</sup>研究了不同场地类别与设计分组的延性需求谱和弹塑性位移反应。翟长海等<sup>[14]</sup>利用大量强震记录的弹塑性动力时程分析,对等延性地震抗力谱进行了深入的研究。王东升等<sup>[15]</sup>利用2008年汶川地震中获得的强震记录研究了汶川近场含速度脉冲与不含速度脉冲和远场地震动考虑盆地效应的弹塑性反应谱。

本文希望借助日本K-NET强震台网获得的有限海底强震记录,通过统计分析手段获得海底地震动弹塑性反应谱特性,为已建成或正在建设的近海工程项目提供有价值的参考。

## 1 海底地震动数据库

中国目前发展的近海工程项目主要分布于环太平洋地震带,其地震类型以板块边缘地震为主。由于我国尚缺少此类海底地震动的实测数据,本文引入日本K-NET强震台网进行统计分析。日本位于环太平洋地震带,并在近年收集到了一些高质量的海底地震动数据。

### 1.1 K-NET强震台网及海底地震动观测

K-NET (Kyoshin network)是一个布设在日本全境的强地震台网,它安装了超过1 000台的高性能三分量数字加速度强震仪。在大多数K-NET台网覆盖的区域,台站布设间距不超过20 km。K-NET台网中海底地震动观测台站位于日本东海岸相模湾,由KNG201-KNG206共6个海底台站组成,这6个台站呈近似的直线排列,间距为10~20 km,布设于水深为900到2 200 m的海底,海底台站具体信息参见表1。本研究在K-NET中所选的6个海底与8个陆地台站的位置见图1。其中白色圆点代表海底台站,黑色圆点代表陆地台站。

表1 海底台站信息

Table 1 Information of offshore stations

台站编号	台站名称	纬度	经度	水深(m)
KNG201	HIRATSUKA-ST1	34.5956°N	139.9183°E	2 197
KNG202	HIRATSUKA-ST2	34.7396°N	139.8393°E	2 339
KNG203	HIRATSUKA-ST3	34.7983°N	139.6435°E	902
KNG204	HIRATSUKA-ST4	34.8931°N	139.5711°E	933
KNG205	HIRATSUKA-ST5	34.9413°N	139.4213°E	1 486
KNG206	HIRATSUKA-ST6	34.0966°N	139.3778°E	1 130

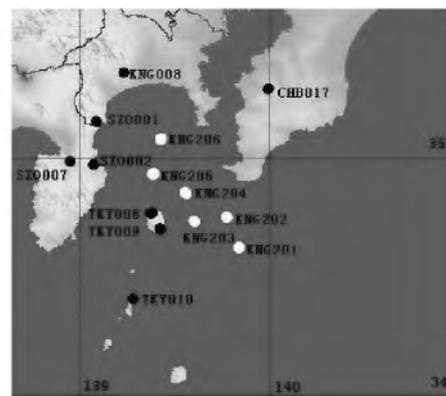


图1 本文利用的K-NET中海底与陆地台站位置

Fig. 1 Locations of offshore and onshore stations used in this study from the K-NET

从 1996 年至今 K-NET 强震台网中全部地震动数据和大多数台站的场地信息均可在 <http://www.k-net.bosai.gu.jp> 网站查询。这里选取了 2006~2012 年的 6 次地震事件,为了确保海底与相邻陆地台站均记录到高质量的地震动数据,所选震级为  $M_s 5.1 \sim 9.0$ ,震源深度为 7~88 km(其中除 2012-7-3 地震,其它地震的震源深度均小于 25 km)。表 2 列出了上述地震事件的详细信息。

表 2 K-NET 地震数据库选取的 6 次地震事件信息  
Table 2 Information of six earthquake events in the K-NET database

震中位置	日期	时间	纬度	经度	震级 ( $M_s$ )	震源深度 (km)	震源位置
伊豆半岛 - 东京	2006-04-21	02:50	34.940°N	139.195°E	5.8	7	海底
相模湾	2006-05-02	18:24	34.917°N	139.330°E	5.1	15	海底
駿河湾	2009-08-11	05:07	34.785°N	138.498°E	6.5	23	海底
東北太平洋	2011-3-11	14:46	38.103°N	142.860°E	9.0	24	海底
富士山	2011-03-15	22:31	35.308°N	138.713°E	6.4	14	陆地
东京湾	2012-07-03	22:31	35.000°N	139.870°E	5.2	88	陆地

每次地震事件均选取 6 个海底台站与 5~6 个与其相邻的陆地台站的强震记录。为了准确地比较海底与陆地地震动弹塑性谱的差异,选取的陆地台站符合以下要求:(1)与海底台站位置邻近;(2)场地条件为中硬土,平均剪切波速为 180~360 m/s;(3)水平地震动的加速度峰值大于 30 Gal;(4)每次地震尽量选取相同的陆地台站。由于海底台站数量较少且位置集中,为保证陆地台站与之临近的条件,少量陆地台站加速度峰值不满足要求的地震动也在选择之列。本文共选取 6 次地震事件中 14 个台站的 67 组强震记录,每组强震记录包含 2 个水平和 1 个竖向分量。附录 A 给出了 K-NET 中所选强震记录的详细信息。

### 1.2 海底台站的场地条件

K-NET 强震台网提供了陆地台站场地的土层信息与地质构造,但遗憾的是 K-NET 台网没有提供海底台站的场地条件。本文尽量通过查找有限的文献资料,列出相关的地质信息并为推测相模湾附近的海底台站的场地条件提供线索。

日本相模湾海域的海底构造复杂,海沟与海丘交错分布<sup>[16,17]</sup>,相关勘查确定相模地质层群为第四纪洪积期岩层,且上部覆盖深厚的沉积层<sup>[18]</sup>。考虑相模湾海底存在较厚的淤泥层等因素<sup>[19,20]</sup>,推测 K-NET 台网中海底台站场地的平均剪切波速应小于附近近岸陆地场地平均剪切波速,其值可能是  $\bar{V}_s \approx 160 \sim 230$  m/s。K-NET 强震台网信息表明,海底台站附近陆地和岛屿上的台站场地的平均剪切波速  $\bar{V}_s = 90 \sim 380$  m/s,其平均值约为 230 m/s。从发表的文献看,美国加利福尼亚南部海域<sup>[21]</sup>及中国渤海海域<sup>[22]</sup>海底场地平均剪切波速  $\bar{V}_s = 220 \sim 280$  m/s。应该指出,由于海底一般覆盖有深厚的软土沉积层,其场地分类可能与陆地不同。由于无法确定海底台站准确的场地条件,本文没有分析其对海底地震动弹塑性反应谱的影响。

### 1.3 美国 SEMS 海底地震动记录

为验证 K-NET 海底地震动统计分析得到的弹塑性反应谱(等延性强度折减系数谱),本文进一步选取了美国“海底地震动观测系统”SEMS(the Seafloor Earthquake Measurement System)获得的海底强震记录进行了对比分析。SEMS 项目在美国加利福尼亚南部海域的海床下布置了若干三分量强震仪,在 1981~1997 年间收集到 8 次地震中 7 个海底台站的 9 组强震记录,每组强震记录均包含 2 个水平向分量和 1 个竖向分量。SEMS 中海底台站的详细信息参见表 3,地震事件的信息见表 4,表 5 列出了每次地震事件中海底台站所收集地震动的震中距。更多关于 SEMS 海底台站或地震动的信息参见 Boore 的文献[21]。

## 2 弹塑性反应谱的基本方程

弹塑性单自由度系统地震作用下运动方程为:

表3 SEMS 中海底台站的数据

Table 3 Data of offshore stations in the SEMS

台站名称	纬度	经度	水深(m)
S1HN	34.3367°	-119.5600°	50
S2EE	33.5867°	-118.1233°	73
S3EE	33.5700°	-118.1300°	64
S31R	34.6117°	-120.7317°	76
S4EU	33.5617°	-118.1167°	217
S4GR	34.1800°	-119.4700°	99
S4IR	34.6117°	-120.7300°	76

表4 SEMS 中地震事件信息

Table 4 Information of earthquake events in the SEMS

地震编号	名称	年/月/日	时间	震中纬度	震中经度	震级( $M_s$ )
SB81	Santa Barbara	81/09/04	15:50	33.66°	-119.10°	5.95
NP86	North PalmS	86/07/08	09:20	34.00°	-116.61°	6.10
OS86	Oceanside	86/07/13	13:47	32.97°	-117.87°	5.84
UP90	Upland	90/02/28	23:43	34.14°	-117.70°	5.63
RC95	Ridgecrest	95/09/20	23:27	35.76°	-117.64°	5.56
CL97	Calico	97/03/18	15:24	34.97°	-116.82°	4.85
S97A	Simi Valley	97/04/26	10:37	34.37°	-118.67°	4.81
S97B	Simi Valley	97/04/27	11:09	34.40°	-118.64°	4.72

表5 SEMS 中海底台站的震中距(震中距单位:km)

Table 5 Epicentral distances (km) of the stations in the SEMS

台站	地震事件							
	SB81	NP86	OS86	UP90	RC95	CL97	S97A	S97B
S1HN	86.0							
S2EE		147.5	72.5					
S3EE				74.4				
S31R								
S4EU								
S4GR						258.1	76.7	79.3
S4IR					309.1		191.2	

$$m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + f(x, t) = -m_x \ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

式中  $m_x$  是系统的质量;  $c_x$  是系统的阻尼系数;  $x(t)$ 、 $\dot{x}(t)$  和  $\ddot{x}(t)$  分别是系统的位移反应、速度反应和加速度反应;  $f(x, t)$  是系统的恢复力;  $\ddot{x}_g(t)$  为输入地震动; 下标  $x$  表示地震动输入方向。

一些文献<sup>[23, 24]</sup>已经给出了基于强度折减系数的弹塑性反应谱方程的推导过程, 本文不再做具体介绍。等强度延性需求谱及等延性强度折减系数弹塑性反应谱的基本方程可表示为:

$$\ddot{\mu}_x(t) + 2\xi_x \cdot \omega_x \cdot \dot{\mu}_x(t) + \omega_x^2 \frac{f(x, t)}{f_{x,y}} = -\frac{\omega_x^2 \cdot R_x}{\beta_x(\omega_x, \xi_x) \max(|\ddot{x}_g|)} \ddot{\mu}_g(t) \quad (2)$$

若假定式(2)中位移延性系数  $\mu_x$  保持恒定, 则通过一定迭代算法就可获得等延性的强度折减系数谱<sup>[24]</sup>, 它是结构延性抗震设计中弹性地震力进行强度折减的重要依据。

### 3 等延性系数的强度折减系数谱

图 2 为 K-NET 在 6 次地震中海底与陆地台站的强震记录,分别取延性系数  $\mu_x = 2.0, 4.0$  和  $6.0$  时计算的平均等延性强度折减系数谱。分析中周期范围取  $0.05 \sim 5.0$  s,阻尼比为  $5\%$ ,恢复力模型采用理想弹塑性形式。可以看出:在等位移准则成立前  $T < 0.5$  s 的短中周期直至  $T < 1.5$  s 的长周期段,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。在  $T = 1.5 \sim 3.5$  s 时,海底与陆地地震动的强度折减系数较为一致;在  $T > 3.5$  s 后,海底地震动与陆地地震动的强度折减系数谱曲线存在交叉,前者开始略大于后者。总体上认为,海底地震动与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一般大于海底的强度折减系数。

图 2 为等延性强度折减系数谱的变异系数,在  $\mu_x = 2.0$  时,基本小于  $30\%$ ;在  $\mu_x = 4.0$  时,基本小于  $50\%$ ;在  $\mu_x = 6.0$  时,基本小于  $60\%$ 。不同的延性系数下,海底地震动谱的变异系数均明显小于陆地地震动,它可能与海底台站相距较近有关。

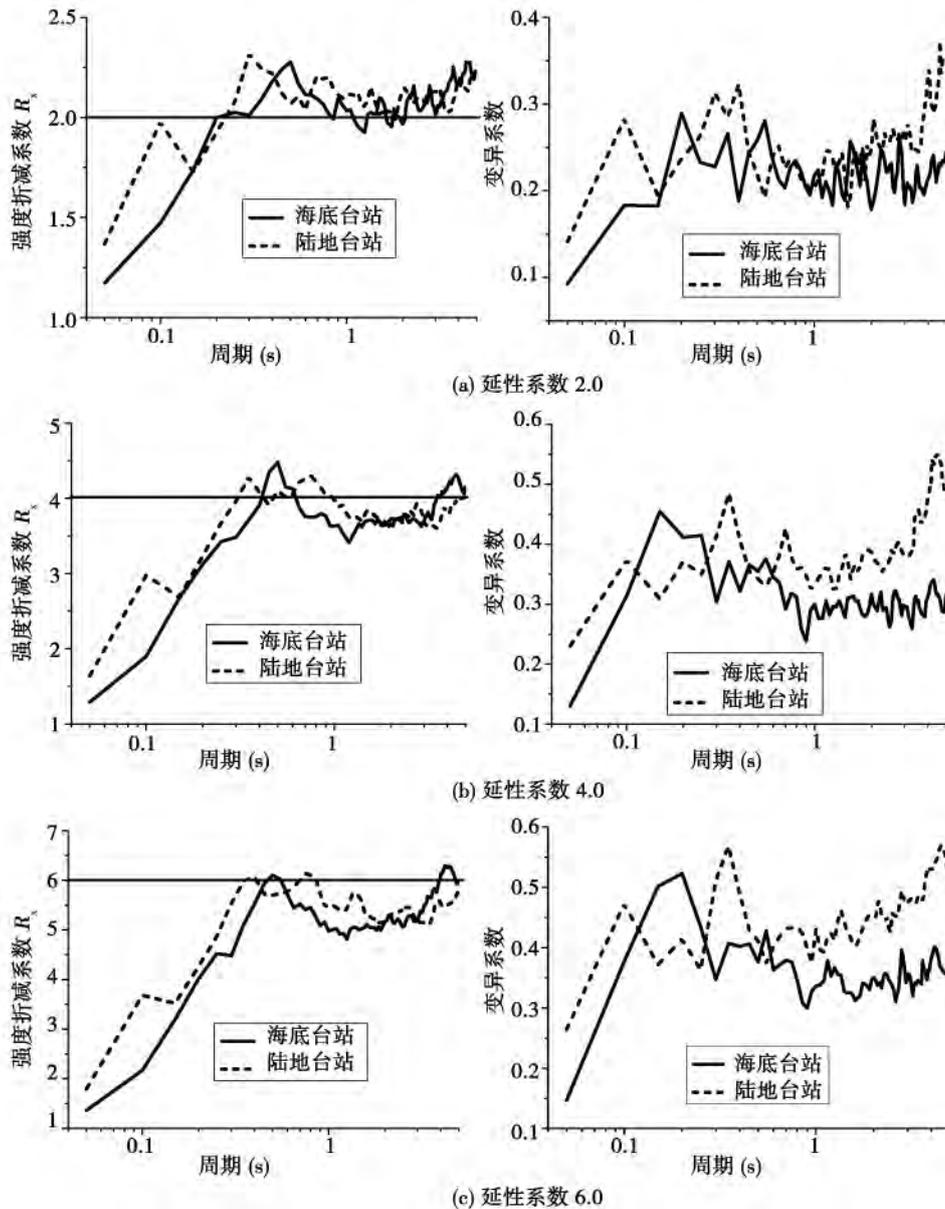


图 2 K-NET 中全部海底与陆地地震动的平均等延性强度折减系数谱

Fig. 2 Average strength reduction factor spectra with constant ductility for all the offshore and onshore ground motions in the K-NET

#### 4 震中距对海底地震动等延性强度折减系数谱的影响

将海底地震动按震中距分为3组:震中距  $R < 30$  km 的地震动为 SR;震中距  $30 \text{ km} \leq R < 140$  km 的地震动为 MR;震中距  $R \geq 400$  km 的地震动为 LR。图3比较了 K-NET 中不同震中距组别下海底地震动的等延性强度折减系数谱。可以看出,震中距对海底地震动等延性强度折减系数谱有一定影响,特别是在短中周期阶段,震中距影响更大。当  $T < 1.5$  s 时,LR 地震动的强度折减系数要显著小于 SR 和 MR 地震动,特别是延性系数较大时。注意到,LR 地震动均来自日本东北太平洋 2011-3-11 地震( $M_s 9.0$ ),而海底一般覆盖有深厚的软土沉积层及淤泥层,从弹塑性反应谱看这种大震远场效应仍存在,此时对周期  $T < 1.5$  s 的海洋工程结构在弹性反应基础上应采用更低的强度折减系数;当  $T > 1.5$  s 之后,不同震中距下海底地震动的强度折减系数谱的差别已不大。

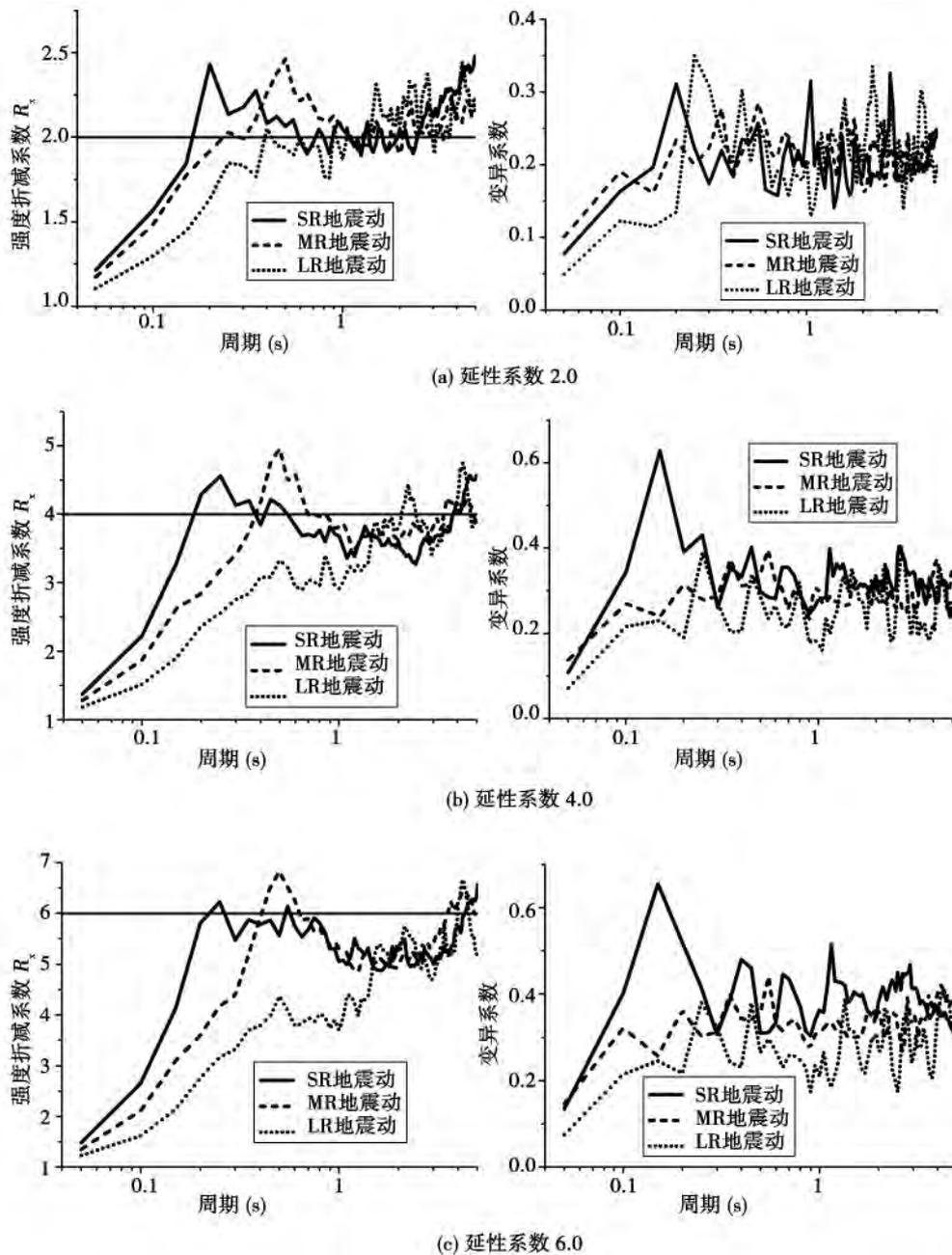


图3 K-NET 台网中不同震中距的海底地震动的平均等延性强度折减系数谱

Fig.3 Average strength reduction factor spectra with constant ductility for offshore ground motions with different epicentral distances in the K-NET

### 5 K-NET 与 SEMS 中海底地震动等延性强度折减系数谱比较

本节进一步比较 K-NET 与 SEMS 中海底地震动的等延性强度折减系数谱。这里 SEMS 中的海底地震动依据震中距均为 MR 或 LR 组。图 4 比较了 K-NET 和 SEMS 中 MR 与 LR 海底地震动的等延性强度折减系数谱。SEMS 中海底强震仪型号较旧(上世纪 70 年代末),强震记录存在长周期成份缺失,因此图 4 中强度折减系数谱周期范围为 0.05 ~ 3 s。在相同震中距情况下(同一组别),K-NET 与 SEMS 海底地震动的等延性强度折减系数谱非常一致,特别在  $T < 1.5$  s 时。比较结果进一步验证了震中距对等延性强度折减系数谱的影响。另外,注意到 K-NET 与 SEMS 中海底台站的水深相差很大(见表 1 和表 3),但其海底地震动的等延性强度折减系数谱较为一致,因此初步判断水深对海底地震动弹塑性反应谱的影响可能不大。

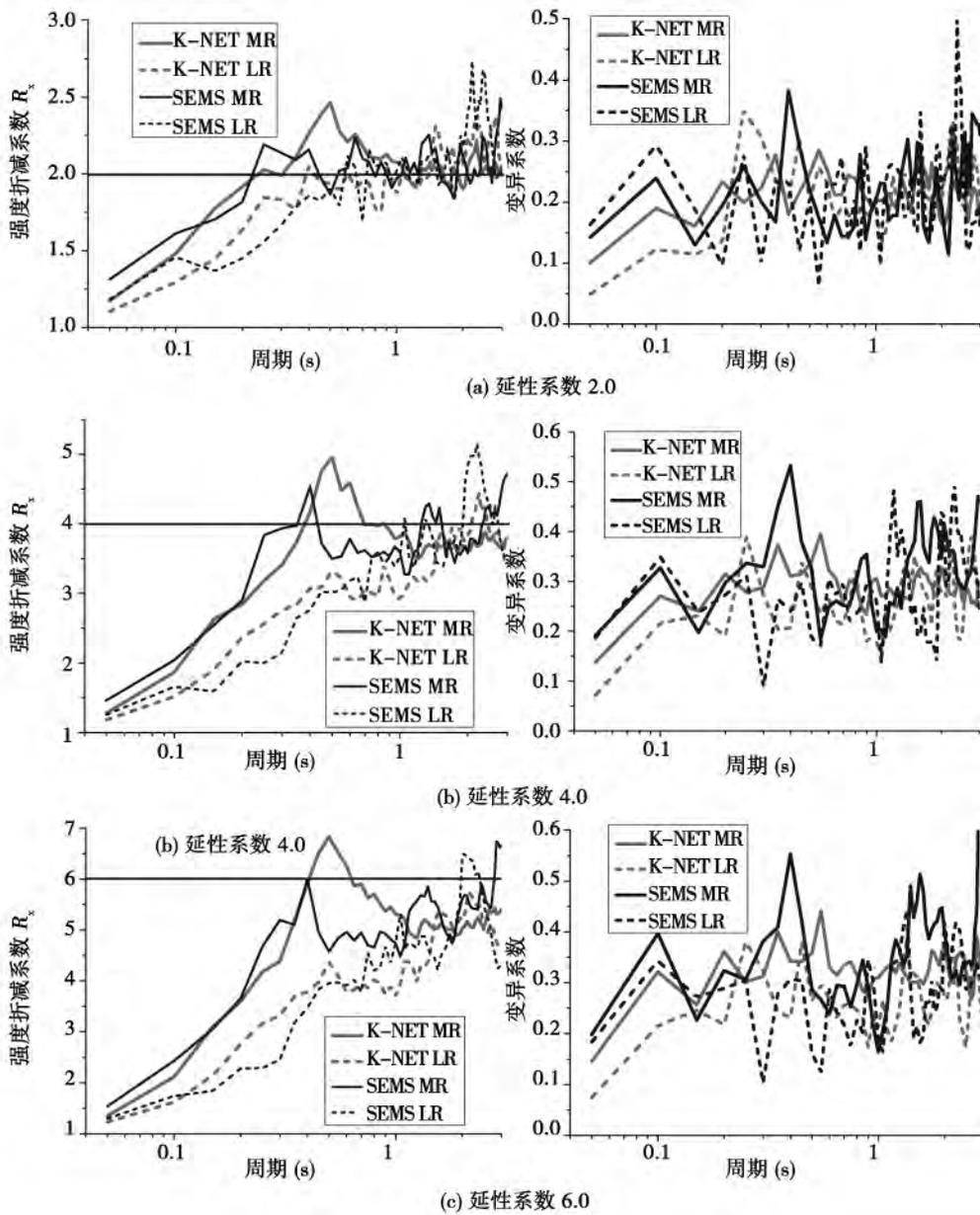


图 4 K-NET 与 SEMS 数据库中不同震中距海底地震动平均等延性强度折减系数谱

Fig. 4 Average strength reduction factor spectra with constant ductility for offshore ground motions with different epicentral distances in K-NET and SEMS databases

## 6 结论

本文基于统计分析的方法研究了日本 K-NET 与美国 SEMS 海底强震记录的等延性强度折减系数谱,从工程应用的角度初步获得如下认识:

(1) 海底与陆地地震动的等延性强度折减系数谱相差不大,但应该注意当  $T < 1.5$  s 时,海底地震动的强度折减系数略偏小,此时若以陆地地震动代替海底地震动计算强度折减系数谱会导致偏于不安全的结果。

(2) 震中距对海底地震动等延性强度折减系数谱有一定的影响,特别在  $T < 1.5$  s 时。K-NET 中 LR 地震动均来自东北太平洋地震(2011-3-11  $M_s 9.0$ ),并且海底一般覆盖有深厚的软土沉积层及淤泥层,从弹塑性反应谱看陆地场地存在的大震远场效应在海底场地仍存在。

(3) 通过对 K-NET 与 SEMS 海底地震动的等延性强度折减系数谱的比较,初步认为水深对海底地震动的弹塑性反应谱的影响不大。

由于目前海底地震动数据比较有限,研究结果需要收集更多的海底地震记录进一步验证和发展,并且场地条件对海底地震动弹塑性谱的影响也需要更多的研究。

### 参考文献:

- [1] Bruneau M. Preliminary report of structural damage from the Loma Prieta (San Francisco) earthquake of 1989 and pertinence to Canadian structural engineering practice[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1990, 17(2): 198-208.
- [2] 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.
- [3] Newmark N M, Hall W J. Earthquake spectra and design[M]. Berkeley: EERI, California, 1982.
- [4] Veletsos A S, Newmark N M. Effect of inelastic behavior on the response of simple systems to earthquake motions[C]// Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering. Japan: Science Council of Japan, 1960: 895-912.
- [5] Miranda E, Bertero V V. Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design[J]. Earthquake Spectra, 1994, 10(2): 357-379.
- [6] Riddell R. Inelastic design spectra accounting for soil conditions[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 1995, 24(11): 1491-1510.
- [7] Miranda E, Ruiz-Garcia J. Evaluation of approximate methods to estimate maximum inelastic displacement demands[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2002, 31(3): 539-560.
- [8] Bozorgnia Y, Hachem M M, Campbell K W. Deterministic and probabilistic predictions of yield strength and inelastic displacement spectra[J]. Earthquake Spectra, 2010, 26(1): 25-40.
- [9] 卓卫东, 范立础. 结构抗震设计中的强度折减系数研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(1): 84-88.  
ZHUO Weidong, FAN Lichu. On strength reduction factors used for seismic design of structures[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 84-88. (in Chinese)
- [10] 周颖, 卜一, 吕西林等. 考虑我国场地土类型的弹塑性反应谱法在高层混合结构中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(2): 57-65.  
ZHOU Ying, BO Yi, LU Xilin, et al. The application of elasto-plastic response spectrum analysis to a hybrid structure[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(2): 57-65. (in Chinese)
- [11] 周雍年, 周正华, 于海英. 设计反应谱长周期区段的研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(2): 15-18.  
ZHOU Yongnian, ZHOU Zhenghua, YU Haiying. A study on long period portion of design spectra[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(2): 15-18. (in Chinese)
- [12] 王东升, 李宏男, 王国新. 统计意义一致的弹塑性设计位移谱[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(1): 87-92.  
WANG Dongsheng, LI Hongnan, WANG Guoxin. Statistical property-consistent elastic-plastic displacement design spectra[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(1): 87-92. (in Chinese)
- [13] 吕西林, 周定松. 考虑场地类别与设计分组的延性需求谱和弹塑性位移反应谱[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(1): 39-48.  
LU Xilin, ZHOU Dingsong. Ductility demand spectra and inelastic displacement spectra considering soil conditions and design characteristic periods[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(1): 39-48. (in Chinese)
- [14] 翟长海, 公茂盛, 张茂花等. 工程结构等延性地震抗力谱研究[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(1): 22-29.  
ZHAI Changhai, GONG Maosheng, ZHANG Maohua, et al. On seismic resistance spectra of constant ductility of structures[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(1): 22-29. (in Chinese)
- [15] 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(002): 43-54.  
WANG dongsheng, LI Xiaoli, SUN Zhiguo, et al. Elastic and elastoplastic response spectra of the Wenchuan earthquake ground motions[J].

Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration ,2013 ,33(002): 43 -54. (in Chinese)

[16] 森慎一,藤岡換太郎,有馬眞. 相模トラフ北部の海底地形と断層系の形成[J]. 地学雑誌 2010 ,119(4): 585 -614.

[17] Fukuyama E. Analysis and interpretation of the heterogeneous rupture process: Application of the empirical Green's function method and nonlinear inversion technique to large earthquakes[J]. Tectonophysics ,1991 ,197(1): 1 -17.

[18] 木村政昭. 南関東周辺の地質構造[M]. 奈須紀幸編: 海洋地質. 東京大学出版会 ,1976: 155 -181.

[19] 大塚謙一. 活動的トラフの埋積過程と堆積相: 相模トラフ北端域および駿河トラフ北端域の上部第四系[J]. 静岡大学地球科学研究報告 ,1985 ,11 :57 -117.

[20] Ikehara K ,Ashi J ,Machiyama H ,et al. Submarine Slope Response to Earthquake Shaking Within Western Sagami Bay ,Central Japan [M]. Submarine Mass Movements and Their Consequences. Springer Netherlands ,2012: 539 -547.

[21] 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.

[22] 兰景岩,刘红帅,吕悦军. 渤海土类动力非线性参数及合理性[J]. 哈尔滨工程大学学报 2012 ,33(9): 1079 -1085.  
LAN Jingyan ,LIU Hongshuai ,LYU Yuejun. Dynamic nonlinear parameters of soil in the Bohai Sea and their rationality [J]. Journal of Harbin Engineering University ,2012 ,33(9): 1079 -1085. (in Chinese)

[23] 王东升,李宏男,王国新. 双向地震动作用的拟等延性系数谱[J]. 地震工程与工程振动 2004 ,24(4): 25 -31.  
WANG Dongsheng ,LI Hongnan ,WANG Guoxin. Pseudo-constant ductility inelastic spectra for bi-directional ground motions [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration ,2004 ,24(4): 25 -31. (in Chinese)

[24] 王东升,李宏男,王国新,等. 弹塑性地震反应谱的长周期特性研究[J]. 地震工程与工程振动 2006 ,26(2): 49 -55.  
WANG Dongsheng ,LI Hongnan ,WANG Guoxin ,et al. Study on characters of long period portion of inelastic spectra [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration ,2006 ,26(2): 49 -55. (in Chinese)

附录 A 地震动记录详细资料

表 A1 2006-04-21 地震中地震动信息(附:A 组为海底台站,B 组为陆地台站)  
Appendix table A1 information of ground motions for the earthquake on April 21 ,2006  
(A group: offshore stations; B group: onshore stations)

编号	台站号	PGA (Gal)		震中距 (km)	$\bar{V}_s$ (m/s) 与计算深度 (m)	台站位置	
		EW 水平	NS 水平			纬度 (°)	经度 (°)
A1	KNG201	123.268	65.005	76	无记录	34.595 6	139.918 3
A2	KNG202	37.017	22.455	63	无记录	34.739 6	139.839 3
A3	KNG203	84.955	38.873	44	无记录	34.798 3	139.643 5
A4	KNG204	52.418	39.795	35	无记录	34.893 1	139.571 1
A5	KNG205	251.703	145.940	21	无记录	34.941 3	139.421 3
A6	KNG206	119.569	81.320	24	无记录	35.096 6	139.377 8
B1	SZ0001	209.613	99.552	25	292/10	35.142 4	139.079 5
B2	SZ0002	311.747	127.688	8.8	243/12	34.965 2	139.103 1
B3	SZ0007	130.721	144.957	23	343/10	34.977 1	138.946 6
B4	TKY008	80.523	92.359	25	377/20	34.785 2	139.390 9
B5	TKY010	44.237	21.609	63	258/20	34.377 9	139.257 3

表 A2 2006-05-02 地震中地震动信息(附:A 组为海底台站,B 组为陆地台站)  
Appendix table A2 information of ground motions for the earthquake on May 2 ,2006  
(A group: offshore stations; B group: onshore stations)

编号	台站号	PGA (Gal)		震中距 (km)	$\bar{V}_s$ (m/s) 与计算深度 (m)	台站位置	
		EW 水平	NS 水平			纬度 (°)	经度 (°)
A1	KNG201	36.367	34.106	65	无记录	34.595 6	139.918 3
A2	KNG202	24.845	22.287	51	无记录	34.739 6	139.839 3
A3	KNG203	175.713	98.423	32	无记录	34.798 3	139.643 5
A4	KNG204	101.279	104.738	22	无记录	34.893 1	139.571 1

续表 A2

编号	台站号	PGA (Gal)		震中距 (km)	$\bar{V}_s$ (m/s) 与计算深度 (m)	台站位置	
		EW 水平	NS 水平			纬度 (°)	经度 (°)
A5	KNG205	418.672	252.064	8.8	无记录	34.941 3	139.421 3
A6	KNG206	233.129	77.748	20	无记录	35.096 6	139.377 8
B1	KNG008	22.613	11.104	73	275/20	35.575 1	139.326 5
B2	SZO001	126.390	66.322	34	292/10	35.142 4	139.079 5
B3	SZO002	222.863	77.238	21	243/12	34.965 2	139.103 1
B4	TKY008	59.621	104.257	16	377/20	34.785 2	139.390 9
B5	TKY010	13.947	12.933	60	258/20	34.377 9	139.257 3

表 A3 2009-08-11 地震中地震动信息 (附:A 组为海底台站, B 组为陆地台站)  
Appendix table A3 information of ground motions for the earthquake on August 11, 2009  
(A group: offshore stations; B group: onshore stations)

编号	台站号	PGA (Gal)		震中距 (km)	$\bar{V}_s$ (m/s) 与计算深度 (m)	台站位置	
		EW 水平	NS 水平			纬度 (°)	经度 (°)
A1	KNG201	27.571	34.850	132	无记录	34.595 6	139.918 3
A2	KNG202	17.477	15.402	123	无记录	34.739 6	139.839 3
A3	KNG203	34.050	35.467	105	无记录	34.798 3	139.643 5
A4	KNG204	20.806	25.566	99	无记录	34.893 1	139.571 1
A5	KNG205	56.366	47.886	86	无记录	34.941 3	139.421 3
A6	KNG206	89.002	94.936	87	无记录	35.096 6	139.377 8
B1	KNG008	36.134	26.921	116	275/20	35.575 1	139.326 5
B2	SZO001	135.626	129.990	66	292/10	35.142 4	139.079 5
B3	SZO002	131.382	175.297	59	243/12	34.965 2	139.103 1
B4	TKY009	66.717	57.996	87	283/20	34.687 4	139.441 2
B5	TKY010	51.187	73.723	83	258/20	34.377 9	139.257 3

表 A4 2011-3-11 地震中地震动信息 (附:A 组为海底台站, B 组为陆地台站)  
Appendix table A4 information of ground motions for the earthquake on March 11, 2011  
(A group: offshore stations; B group: onshore stations)

编号	台站号	PGA (Gal)		震中距 (km)	$\bar{V}_s$ (m/s) 与计算深度 (m)	台站位置	
		EW 水平	NS 水平			纬度 (°)	经度 (°)
A1	KNG201	123.835	107.079	471	无记录	34.595 6	139.918 3
A2	KNG202	149.993	94.919	462	无记录	34.739 6	139.839 3
A3	KNG203	90.94	69.20	467	无记录	34.798 3	139.643 5
A4	KNG204	65.196	59.817	463	无记录	34.893 1	139.571 1
A5	KNG205	150.154	157.687	467	无记录	34.941 3	139.421 3
A6	KNG206	367.516	208.749	457	无记录	35.096 6	139.377 8
B1	CHB017	90.356	108.531	399	218/20	35.298 8	140.075 5
B2	KNG008	115.522	95.731	422	275/20	35.575 1	139.326 5
B3	SZO001	49.694	28.325	472	292/10	35.142 4	139.079 5
B4	SZO002	74.741	43.712	485	243/12	34.965 2	139.103 1
B5	TKY009	23.855	23.885	488	283/20	34.687 4	139.441 2
B6	TKY010	213.399	235.792	526	258/20	34.377 9	139.257 3

表 A5 2011-3-15 地震中地震动信息(附:A 组为海底台站,B 组为陆地台站)  
Appendix table A5 information of ground motions for the earthquake on March 15, 2011  
(A group: offshore stations; B group: onshore stations)

编号	台站号	PGA (Gal)		震中距(km)	$\bar{V}_s$ (m/s) 与计算深度(m)	台站位置	
		EW 水平	NS 水平			纬度(°)	经度(°)
A1	KNG201	46.500	33.376	136	无记录	34.595 6	139.918 3
A2	KNG202	24.063	14.840	121	无记录	34.739 6	139.839 3
A3	KNG203	84.538	76.398	102	无记录	34.798 3	139.643 5
A4	KNG204	40.794	22.652	91	无记录	34.893 1	139.571 1
A5	KNG205	105.443	101.926	76	无记录	34.941 3	139.421 3
A6	KNG206	103.410	70.254	65	无记录	35.096 6	139.377 8
B1	CHB017	12.639	13.655	124	218/20	35.298 8	140.075 5
B2	KNG008	37.373	51.832	63	275/20	35.575 1	139.326 5
B3	SZO001	194.106	68.706	38	292/10	35.142 4	139.079 5
B4	SZO002	36.836	46.340	52	243/12	34.965 2	139.103 1
B5	TKY008	29.184	29.180	85	377/20	34.785 2	139.390 9

表 A6 2012-07-03 地震中地震动信息(附:A 组为海底台站,B 组为陆地台站)  
Appendix table A6 information of ground motions for the earthquake on July 3, 2012  
(A group: offshore stations; B group: onshore stations)

编号	台站号	PGA (Gal)		震中距(km)	$\bar{V}_s$ (m/s) 与计算深度(m)	台站位置	
		EW 水平	NS 水平			纬度(°)	经度(°)
A1	KNG201	83.132	91.948	45	无记录	34.595 6	139.918 3
A2	KNG202	135.746	106.527	29	无记录	34.739 6	139.839 3
A3	KNG203	70.773	86.059	31	无记录	34.798 3	139.643 5
A4	KNG204	56.191	54.516	30	无记录	34.893 1	139.571 1
A5	KNG205	155.703	170.789	41	无记录	34.941 3	139.421 3
A6	KNG206	118.567	74.272	46	无记录	35.096 6	139.377 8
B1	CHB017	44.213	25.101	38	218/20	35.298 8	140.075 5
B2	KNG008	12.006	14.327	81	275/20	35.575 1	139.326 5
B3	SZO001	38.964	22.274	74	292/10	35.142 4	139.079 5
B4	SZO002	52.635	22.212	70	243/12	34.965 2	139.103 1
B5	TKY009	36.363	34.030	52	283/20	34.687 4	139.441 2