

日本长周期地震动业务体系概述

王 帅, 谢志南

Overview of long-period ground motion professional works in Japan

Wang Shuai and Xie Zhinan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-045>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

上海及周边潜在震源区对上海长周期基岩地震动参数影响分析

Analysis of the influence of Shanghai and its surrounding potential seismic sources on long-period bedrock ground motion parameters in Shanghai

地震科学进展. 2022(8): 382–387

场地地震动特征周期对高层建筑结构工程材料用量和破坏状态影响的研究

Research on the influence of site characteristic period on engineering material usage and damage states of high rise buildings

地震科学进展. 2024(8): 497–505

2020年7月12日唐山古冶5.1级地震揭示的北京城区地震动场地效应分析

Analysis on site effect of ground motion in Beijing urban area revealed by strong-motion records in $M_{5.1}$ Guye, Tangshan earthquake on 12th July, 2020

地震科学进展. 2020(7): 14–19

基于Matlab的地震动参数综合确定

Comprehensive determination of ground motion parameters based on Matlab

地震科学进展. 2024(8): 515–522

龙江特大桥场地强震动观测系统设计

Design of site strong motion observation system for the Longjiang bridge

地震科学进展. 2020(6): 8–13

2015年11月22日广东徐闻 M_L 4.2地震强震动记录分析

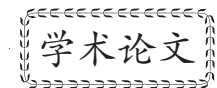
Analysis on strong ground motion records of Guangdong Xuwen M_L 4.2 earthquake on November 22, 2015

地震科学进展. 2022(8): 355–360



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王帅, 谢志南. 日本长周期地震动业务体系概述 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(5): 267-278. doi:10.19987/j.dzkkjz.2024-045
Wang S, Xie Z N. Overview of long-period ground motion professional works in Japan[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(5): 267-278. doi:10.19987/j.dzkkjz.2024-045



日本长周期地震动业务体系概述

王 帅^{1, 2)} 谢志南^{1, 2)*}

1) 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江哈尔滨 150080

2) 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080

摘要 长周期地震动可导致自振周期长的结构和基础设施出现长持时振动乃至破坏和倒塌。随着我国高层建筑、大型油罐等柔性结构的不断涌现, 有效防范长周期地震动震害已十分迫切。然而, 我国当前地震烈度速报和预警工程建设未涉及长周期地震动的预警和相关信息发布。为此, 本文拟详细介绍日本长周期地震动业务体系的建设过程, 介绍其业务体系建设的提出, 业务体系的研发和完善过程。阐述业务体系建设涉及的重要关键技术, 如长周期地震动危害等级的确定, 长周期地震动预测技术的建立。而后总结其长周期地震动业务体系的落地应用和配套减灾设施的研发。最后结合日本长周期地震动业务体系的建设思路“观测业务先落地、预测技术再研讨、预测业务后开展”, 给出了我国未来建设长周期地震动业务体系的若干建议。

关键词 日本气象厅; 长周期地震动; 长周期地震动预报; 长周期地震动观测

中图分类号: P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7780(2025)05-0267-12

doi: 10.19987/j.dzkkjz.2024-045

Overview of long-period ground motion professional works in Japan

Wang Shuai^{1, 2)}, Xie Zhinan^{1, 2)}

1) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Heilongjiang Harbin 150080, China

2) Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Heilongjiang Harbin 150080, China

Abstract Long-period ground motion (LPGM) can result in prolonged vibration and even damage or collapse of structures and infrastructure with long natural vibration periods. With the emergence of flexible structures such as high-rise buildings and large oil tanks in our country, there is an urgent need to effectively mitigate LPGM-related damage. However, the national intensity rapid reporting and early warning project currently does not include early warning or related information dissemination for LPGM. This paper introduces in detail the development of Japan's LPGM business system, including the initial proposal, system construction, and its continuous improvement. It describes key technologies involved in the development of this system, such as the classification of LPGM and the establishment of LPGM prediction

收稿日期: 2024-03-12; 采用日期: 2024-08-26。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2039209)资助。

第一作者: 王帅(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事强地震动模拟及预测方面的研究。E-mail: 1277720784@qq.com。

* 通信作者: 谢志南(1984-), 男, 研究员, 主要从事地震波数值模拟, 强地震动预测等研究。E-mail: wla_2012@163.com。



technology. The paper also summarizes the application of the LPGM business system and the research and development of supporting disaster reduction facilities. Finally, based on Japan's experience in constructing a long-period ground motion service system "Observe business first, then develop predictive technologies, and finally implement predictive services", some suggestions are proposed for the future construction of China's long-period ground motion service system.

Keywords Japan Meteorological Agency; long-period ground motion; long-period ground motion prediction; long-period ground motion observation

0 引言

在地震工程研究领域,长周期地震动一般指卓越周期为 2 s 及以上的地震动,卓越周期上限大于工程关心长周期结构的基阶自振周期。与常规地震动相比,长周期地震动低频成分丰富且持时长,较易导致自振周期较长的结构和基础设施发生共振和长时间振动并造成损伤或破坏。目前尚未有公认的长周期地震动的定义和识别(或界定)方法。已识别长周期地震动大致分两类:近场脉冲型长周期地震动和远场长周期地震动^[1-2]。已揭示的近场脉冲型长周期地震动的成因包括近断层方向性效应和滑冲效应。远场长周期地震动的成因则更为复杂,已揭示成因包括强震情形震源激发的长周期地震动成分丰富、深厚沉积平原场地和深大盆地场地效应等因素。

相较于远场长周期地震动,近断层脉冲长周期地震动因其对建筑物结构的强破坏性备受关注。1968 年, Aki 首次在 1964 年 Parkfield $M_w 6.1$ 地震记录中观测到近断层长周期地震动^[1]。1978 年, Bertero 等在研究 1971 年 San Fernando 强震记录时首次识别了近断层大脉冲长周期地震动记录并分析了其致灾机理^[3]。1994 年美国北岭 $M_w 6.7$ 地震和 1995 年日本阪神 $M_w 6.9$ 地震,这两次地震均发生在人口密集的城市区域,结构较普遍采用了现代抗震措施,但面对脉冲型地震动作用,较多建筑仍未能经受住考验^[4]。如阪神地震大开地铁站破坏^[5],主跨 252 m 的西宫港大桥的引桥因相对位移过大导致落梁^[6],东神户大桥边墩的抗风支座、摆动支座和阻尼器出现严重损坏^[7]。已有的研究表明,结构出现大的结构层间位移常与这种长周期速度脉冲型记录密切相关^[3]。

远场长周期地震动常因其幅值小破坏性相对较弱而长期不被研究人员和工程人员重视。1968 年北海道 $M_w 8.2$ 大地震首次观测到并确定了远场长周期地震动^[1]。1985 年墨西哥米却肯(Michoacan)发生 8.0 级地震,墨西哥城下古代湖泊沉积物放大和延长了长周期地震动分量^[5],在距离震中 400 km 的墨西

哥城,由于主震周期约为 2~4 s 的长周期地震动,造成约 300 栋建筑物倒塌,800 多座建筑由于无法修复随后被拆除,墨西哥城的浅埋供水系统和浅埋管道遭到严重破坏,2 万人伤亡^[5,8](图 1a)。此次地震后,远场长周期地震动开始受到了广泛关注。1999 年中国台湾集集 $M 7.5$ 地震中,台北市远离震中 150 km 以上,因盆地效应有部分十几层的高层建筑发生破坏^[9]。2004 年纪伊半岛 $M_w 7.3$ 地震中,距离震中 300~450 km 的关东平原产生了与 1985 年墨西哥米却肯地震相似的震害^[10]。2008 年汶川地震,西安市一座 100 m 高的钢筋混凝土烟囱发生垮塌^[6];市内高层建筑产生了比较严重的破坏,部分高层建筑的剪力墙连梁出现交叉斜裂缝,空心砖填充墙出现开裂,受损严重^[11];陕西全省 50 座水塔顶部断裂掉落,600 多座水塔裂缝变形。在这几次地震之前还出现过类似震害,如 1957 年墨西哥格雷罗海湾 $M 7.5$ 地震中,距震中 360 km 的墨西哥市上千栋建筑破坏^[10];1983 年日本海中部发生的 $M_w 7.7$ 地震,距离震中 270 km 的新潟市,13 个储油罐在地震作用下发生剧烈晃动造成溢流和附属设施破坏^[10]。上述长周期地震动震害的成因后续被归总为局部深厚沉积和深大沉积盆地对长周期地震动的放大所致。另外,远场长周期地震动引发的小范围长周期结构的震害和长持时晃动也逐渐得到了重视。1989 年美国 Loma Prieta 发生的 7.0 级地震使距离震中 140 km 的奥克兰海湾大桥引桥脱落^[6]。1999 年土耳其地震使 TÜPRA 炼油厂 6 个油罐发生火灾^[12]。2003 年日本十胜冲 $M_w 8.0$ 地震,在距震中约 250 km 的苦小牧市内由于长周期地震动致使石油储存罐内液体大幅晃动、溢流进而诱发火灾^[13](图 1b)。2011 年日本 3·11 大地震中,东京塔顶部天线弯曲^[2](图 1c);东京市中心新宿区的一栋 29 层钢结构支撑框架结构的电梯电缆、非结构构件、设备等损坏,极大影响了震后的正常使用^[14];在距震中约 700 km 的大阪府政府大楼(日本气象厅烈度 $I_{JMA} 3$)摇晃持续 10 min,顶部一侧

摇晃超过 1 m, 剧烈摇晃导致 4 部电梯故障, 共 5 人被困, 最长 5 h 后才得以救出; 51 层的消防水管破裂

造成 48 层浸水, 加上隔墙破坏等共损失 1 亿日元^[2]。大阪政府大楼观测结果见图 2 及表 1^[15]。



图 1 长周期地震动震害图

Fig. 1 Damage map of long-period ground motion

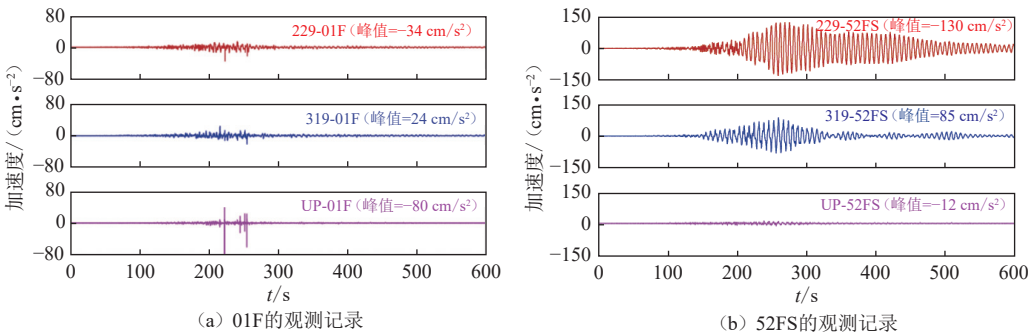


图 2 日本 3·11 地震时大阪府政府大楼加速度记录图^[15]

Fig. 2 Acceleration records of the Osaka prefectural government building during the 2011 Tōhoku earthquake^[15]

表 1 日本 3·11 地震时大阪府政府大楼观测结果

Table 1 Observation results of the Osaka prefectural government building during the 2011 Tōhoku earthquake

楼层	加速度/(cm·s ⁻²)		
	水平向1	水平向2	竖向
52FS	130	85	12
52FN	126	88	13
38F	86	56	18
18F	41	39	61
01F	34	33	80

根据日本气象厅的调查结果^[18], 截止到 2012 年底, 日本国内尚未出现由远场长周期地震动致使高层结构出现严重损坏以及大面积人员伤亡的案例。除墨西哥等少数国家外, 世界范围内政府和公众对长周期地震动的危险认知存在不足。然而, 日本 3·11 地震后, 日本政府深刻认识到高层等柔性结构迅速发展致使受长周期地震动影响的人数急剧增加, 而相应长周期信息的缺失, 相关受长周期地震影响人

员的震时应急不足, 可能引发一系列人员伤亡及经济损失。因此, 有必要在震时向公众发布相关长周期地震动信息, 以减弱长周期地震动的震害。2011 年日本 3·11 大地震后, 日本气象厅着手长周期地震动业务, 截止目前已形成一套完整的国际领先的长周期地震动预警、预报和观测体系。

与之对比, 当前部分国家/地区已建成的地震预警系统, 但未涉及长周期地震动的内容^[19-20](表 2)。如中国、美国、欧洲等虽然在长周期地震动方面也进行了大量研究, 但尚未见政府向公众提供震时有效的长周期地震动信息, 且长周期的相关预测、观测信息系统建设并不完善。为此本文聚焦介绍日本长周期地震动业务体系工作, 详细阐述其业务筹备、研发及运营情况。以期为我国有效防范长周期地震动提供一定的借鉴。

1 日本长周期地震动业务体系的发展

日本长周期地震动业务是经过逐年积累、沉淀, 历经各专业人士反复研讨、业务试行、业务改善等多

表 2 部分国家地震预警及烈度速报系统基本信息

Table 2 Basic information on earthquake early warning and intensity reporting systems in selected countries

序号	国家/地区	负责单位	系统名称	亮点/差异 ^[19-20]
1	日本	日本气象厅	紧急地震速报	典型的现地预警,体系最为完善,测点最密集,测震台约20 km/点,强震台约2.5 km/点,面向日本全国,信息简明扼要,信息发布方式多样,同时国内科普宣传力度大,民众意识较高
2	美国	美国地质调查局	ShakeAlert	主要面向加州地区,但不包含烈度信息,多震区人群避震意识较高;现针对大数据预警进行研发
3	中国大陆	中国地震局	地震预警与烈度速报系统	由区域预警向全国预警过渡,布设监测仪器最多,范围最广,但尚无国家预警标准,宣传方式较传统,群众避灾意识有待增强
4	墨西哥	墨西哥国家地震局	墨西哥地震预警系统	典型的异地预警系统,面向墨西哥各主要城市,但不包含烈度信息,民众信任度高

个阶段后才逐步形成的一套较为完整的自动化运营体系。其业务研发流程大致可分为4个阶段:业务提

出及预研、业务研发、业务试运行和业务运营。总体时间脉络见图3。

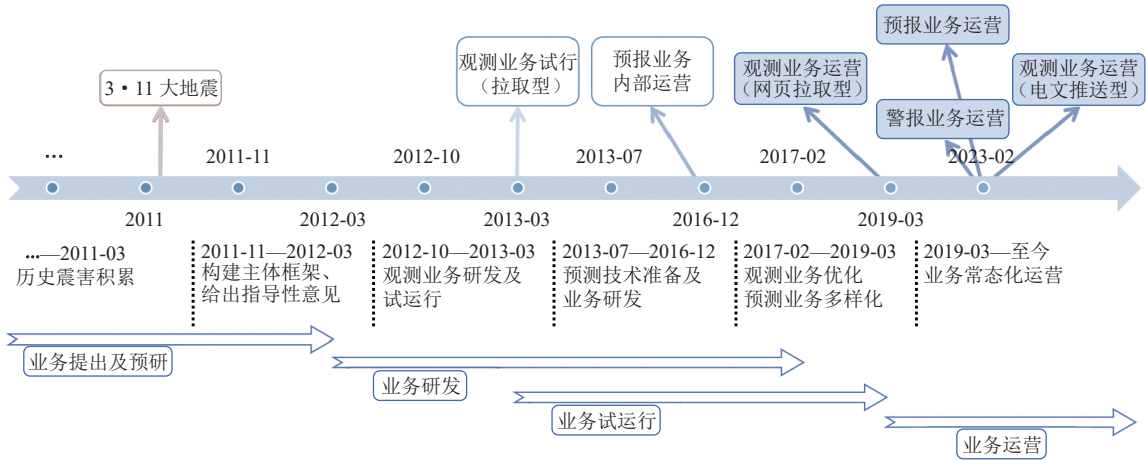


图 3 日本长周期业务化工作开展时间脉络图

Fig. 3 Timeline of LPGM business development in Japan

1.1 业务提出及预研

1.1.1 业务提出

20 世纪 70 年代以来,日本高层结构数量激增,尤其是在东京都市圈(又称首都圈)、名古屋都市圈(又称中部圈)和大阪都市圈(又称近畿圈)区域,高层结构长周期地震动震害逐步凸显。2000 年鸟取县西部地震中出现了高层建筑居民的“晕船”现象。2003 年十胜冲地震储油罐火灾。2004 年新泻地震东京市区高层电梯损坏等。最为突出的是 2011 年 3•11 大地震,远场长周期地震动导致大量高层建筑出现长时间大幅度晃动,大楼内的商家和人员无视大楼管理人员的指示,冲向紧急楼梯,造成区域混乱以及人群大面积恐慌。3•11 大地震后,日本气象厅意识到,虽然在震后立即发布了相关烈度信息,但由于烈度与长周期地震动相关性弱,基于烈度信息难以给

出有用的高层结构地震应急信息。3•11 大地震的发生也让日本政府担忧正在酝酿的日本南海海槽大震($M>8.0$)带来的潜在严重震害。根据日本地震本部调查,南海海槽大震平均发生间隔约为 110 年,最近一次是 1946 年昭和南海地震,下次南海地震的发生概率在今后 30 年内将达到 60% 左右^[21]。相比 3•11 大地震,届时日本东京、名古屋、大阪等地的大型建筑物可能会发生更加剧烈地摇晃。为了在震时更早掌握高层建筑物的人员伤亡、物资损失信息,并在震后迅速建立起准确、针对性强的灾害应急体制等,气象厅提出长周期信息业务研发提案,面向大众、专业人士发布长周期信息,以支撑震时应急及震后救援。

1.1.2 业务预研

日本气象厅于 2011 年 11 月召集各相关领域的

专业人士并成立长周期地震动相关信息讨论组^[18]，针对长周期地震信息的基本要求、面向对象、发布时

间及内容、后续待深入工作等方面给出相应指导意见，具体见表 3。

表 3 长周期地震动工作框架及指导性意见

Table 3 Framework and guidelines for LPGM professional work

基本信息要求	面向对象	发布内容与发布时机	后续课题
群众、设施管理者、防灾机构能够共同理解并广泛使用有助于震时应急	高层建筑(14层以上)、长大桥梁、石油储存罐等工程结构(基本周期在 1~2 s 以上)	PUSH 型观测信息(主动推送型),震后 5~10 min PULL 型观测信息(用户自取型),震后 10 min 左右	确定与烈度类似的长周期地震指标、具体发布方法、发布对象地区、发布手段 强化在大都市圈如东京 23 区等地的强震动观测体制以获取更详细的长周期地震动信息 进一步调查研究长周期地震动作用下高层建筑内的人的体感和物品跌倒情况等 将长周期地震动的摇晃特性和室内安全对策等必要信息向公众说明 着手长周期地震预报研究

1.2 业务研发

2012 年 10 月起,日本气象厅成立了长周期地震动信息研究小组以接替长周期地震动相关信息讨论组^[22],继续进行长周期地震动业务化研究,明确长周期地震动观测信息的基本分析方法、发布标准、内容

等。考虑到长周期地震动预测业务研发需要观测数据的大幅积累以及研究人员的进一步深入研究,研究小组采用“观测业务先落地→预测技术再研讨→预测业务后开展”的研发思路开展长周期业务化工作,初期工作开展具体见表 4。

表 4 长周期业务初期工作开展梳理

Table 4 Overview of initial LPGM business development in Japan

工作内容描述	备注
明确长周期信息发布原则、观测信息种类	见表 7
确定定量评估指标及提高计算效率	$S_{va}(T)$ 、计算周期间隔步长增加 0.1 s→0.2 s
编制长周期地震动等级解说表	见表 5 及表 6
构建 PULL 型观测信息发布框架	PULL 型信息
提案加密强震观测网	东京圈区域加密(增设 7 处)

1.2.1 长周期等级解说表编制

新成立的长周期地震动信息研究小组首先针对长周期评估指标展开研讨,根据既往经验选取多个指标,如 PGV、PGD、组合烈度指标、绝对加速度反应谱值 $S_{aa}(T)$ 、绝对速度反应谱 $S_{va}(T)$ 等。在对各个指标进行对比分析后指出,就地震动观测数据而言,楼面最大速度最易区分震时个人行动困难程度以及室内物体翻倒情况;此外,不同周期的楼面最大速度值基本恒定(详见图 4)。不同周期和阻尼比的建筑物顶层的最大楼面速度可通过反应谱 $S_{va}(T)$ 来近似表示。因此,将 $S_{va}(T)$ 确定为发布长周期地震动信息的指标。随后,研究小组开始编制长周期地震动等级解说表,类比地震烈度表,从定量、定性两个方面,即:绝对速度反应谱值 $S_{va}(T)$ 以及体感进行说明,并于 2013 年 3 月第 4 次长周期信息研讨会后正式发布,具体见表 5 及表 6。

1.2.2 观测业务研发

在编制长周期等级表的同时,小组针对观测信息发布进行梳理并细化(表 7),并开始构建观测信息发布框架,创建观测信息专属网页界面,面向专业人士以相关事业人员提供加速度以及速度波形图像、不同阻尼比下绝对加速度以及绝对速度反应谱图像、PGA/PGV/PGD 数据,逐步推动 PULL 型观测业务落地。此外,气象厅于 2013 年末额外增设 7 个地震动观测点,以更好观测首都圈区域地震动,丰富区域观测记录。

1.2.3 预测业务研发

观测业务落地之后,气象厅在长周期地震动信息研究小组的框架下设立长周期地震预测技术专题研究小组,针对 4 种不同的长周期预测方案进行了详细研讨,具体见表 8。最后决定采用利用地震动参数衰减关系预测长周期地震动。

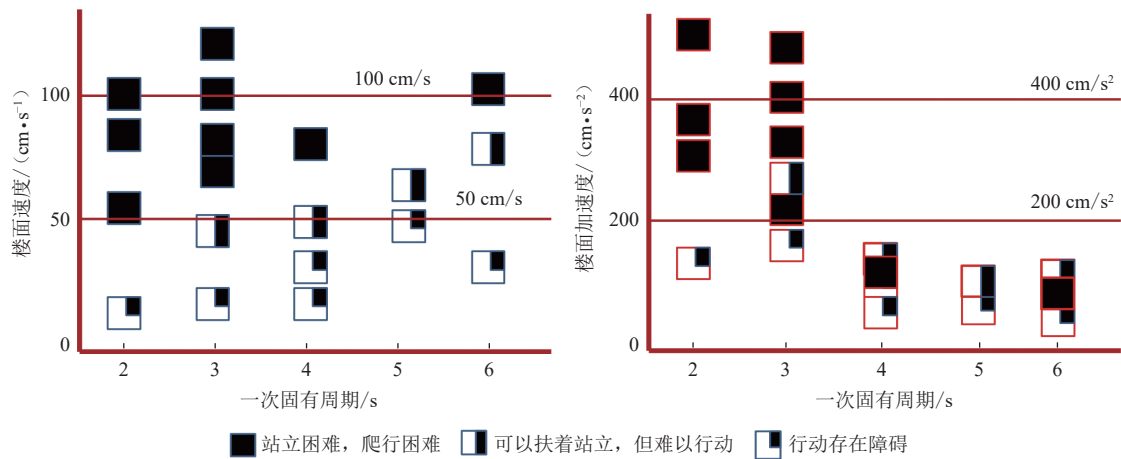


图 4 个人行动困难程度与楼面最大加速度、最大速度的关系

Fig. 4 Relationship between degree of individual mobility difficulty and maximum floor acceleration or velocity

表 5 长周期地震动等级解说表
Table 5 Explanation of LPGM classification

等级	对应的室内情形 示意图	绝对速度反应谱 (客观参数) $S_{va}(T, \zeta=5\%)$ $1.6\text{ s} \leq T \leq 7.8\text{ s}^*$	体感 (主观参数)		
			人的感受与行动	室内家具情况	备注
1		$5\text{ cm/s} \leq S_{va} \leq 15\text{ cm/s}$	室内几乎所有人都感觉到摇晃, 也有人感到惊慌(等同 I_{JMA} 3~4)	天花板等悬挂物剧烈摇晃	
2		$15\text{ cm/s} \leq S_{va} \leq 50\text{ cm/s}$	在室内感到剧烈的摇晃, 想抓住东西; 不抓东西走路会有行动困难等感觉(等同 I_{JMA} 5弱~5强)	带脚轮的家具微动; 架子上的餐具、书架上的书有时会掉下来	
3		$50\text{ cm/s} \leq S_{va} \leq 100\text{ cm/s}$	站立变得困难(等同 I_{JMA} 6弱)	带脚轮的家具剧烈移动; 隔墙等有未固定的家具可能移动; 开裂、龟裂不稳定的家具可能翻倒的情况	
4		$S_{va} \geq 100\text{ cm/s}$	无法站立, 任由摇来摇去(等同 I_{JMA} 6强)	带脚轮的家具大幅度移动, 有些东西会翻倒; 未固定的家具大部分移动, 增多部分翻倒	

注: * “ $S_{va}(T, \zeta=5\%)$ $1.6\text{ s} \leq T \leq 7.8\text{ s}$ ”是指地表自由场观测点地震动作用下, 阻尼比5%, 单自由度体系1.6~7.8 s周期带的绝对速度反应谱值, 取其最大值对应的长周期等级作为观测点的长周期地震动等级。公式表达为: $S_{va}(T, \zeta=5\%) = \max |v_a(t)| = \max |v_r(t) + v(t)|$ 。 $v_a(t)$ 表示单自由度体系绝对速度时程; $v_r(t)$ 表示单自由度体系相对速度时程; $v(t)$ 表示地面运动速度时程

长周期地震预测技术专题研究小组选取并对比了4种衰减关系(表9), 其中, 防灾科研式2(青井真式)的预测可靠度最高。青井真式是唯一直接预测绝对速度反应谱 $S_{va}(T)$ 的, 而绝对速度反应谱是日本长周期地震动等级的评价指标, 其余衰减关系需要先计算绝对加速度反应谱 $S_{aa}(T)$ 而后再计算伪速度

反应谱 $S_{pva}(T)$ 或直接计算相对速度反应谱 $S_{vr}(T)$, 通过 $S_{pva}(T)$ 、 $S_{vr}(T)$ 进行近似代替 $S_{va}(T)$ 进行预测, 是导致预测可靠度相对低的原因之一; 同时青井真式也是4式中唯一可以直接利用气象厅震级 M_J 进行预测, 避免了矩震级转换进一步增加误差, 相比其他3个公式更简明直接。鉴于上述优势, 讨论组决定

表 6 浮顶式储油罐长周期等级参考表
Table 6 Reference table for LPGM classification of floating-roof oil tanks

等级	浮顶式储油罐内部状况	伪速度反应谱 $S_{pva}(T, \zeta=0.5\%)$
3	可能会发生一定程度的晃动	$50 \text{ cm/s} \leq S_{pva}(T) \leq 100 \text{ cm/s}$
4	可能会发生严重晃动	$S_{pva}(T) \geq 100 \text{ cm/s}$

注： $S_{pva}(T, \zeta=0.5\%) = \omega^{-1} S_{paa}(T, \zeta=0.5\%) = \omega^{-1} S_{aa}(T, \zeta=0.5\%)$ 。 $S_{paa}(T, \zeta=0.5\%)$ 是 1.6~7.8 s 周期带 (间隔 0.2 s) 的伪加速度反应谱， $S_{aa}(T, \zeta=0.5\%)$ 是 1.6~7.8 s 周期带 (间隔 0.2 s) 的绝对加速度反应谱

表 7 长周期观测信息梳理
Table 7 Overview of LPGM observation information

发布原则	信息分类	发布时间	发布对象	信息性质
信息简明扼要 易于理解 便于震时使用 与烈度联动	PUSH 型 (主动推送型)	震后 5~10 min	日本 188 个 地区	及时通知观察到影响高层结构的长周期地震运动 保持信息简洁，避免因信息过多而造成混乱 信息自动化生成，以实现地震发生后几分钟内发布
	PULL 型 (用户自取型)	震后 10~20 min	气象厅观 测点	向高层建筑管理人员通报高层建筑发生摇晃的程度及造成损坏的可能性，以便高层建筑管理人员采取适当的应对措施 由图形、数据构成的详细信息，便于使用者根据需求灵活使用

表 8 不同长周期地震动预测技术的优点和缺点
Table 8 Advantages and disadvantages of different LPGM prediction techniques

类型	名称	描述	优点	缺点
基于震源信息	距离衰减关系预测	根据地震预警估计的震级以及震中与预测对象观测点之间的距离，利用距离衰减公式、场地信息等预测绝对速度反应谱	可以从任意震中位置和震级预测长周期地面运动等级 可以预测任何地点的长周期地面运动等级 可以使用简单的公式进行计算，且计算速度快	取决于地震预警估计震中位置和震级的准确性 对于比创建距离衰减公式时更远的距离，需要进行外推
	既有数据库提取预测	根据地震预警估算的震级和震中，利用基于数值模拟预测和历史地震观测数据形成的数据库，预测各点的绝对速度反应谱	在进行理论地震运动预测时，可以考虑地面和传播路径的影响 可以预测任何地点的长周期地面运动等级 预测结果的计算速度很快，但依赖于已有数据库	取决于地震预警估计震中位置和震级的准确性 需要模拟大量的工况，并且创建数据库需要时间 如果发生同模拟地震或历史地震中不同规模、震中过程等的地震，预测值可能会存在显著差异
基于实测记录	实测数据+波场理论预测	利用波场理论等根据实时观测数据预测目标观测点波形的技术	不依赖于地震预警的震中位置或震级推算的准确性 使用实际观察到的波形，提高了精度 不易受传播路径假设的影响	波形预测精度取决于可以实时接收地震波形的地震观测点的数量 (需要更高的观测点密度) 由于是在地震波接近后进行预测，因此即使在远离震中的观测点，提前时间也不会变长
	两点传递函数预测	利用地震预警估计的震中位置、实时观测数据确定的地震波到达方向以及观测点之间的传递函数来预测长周期地震动等级的技术	不依赖于紧急地震预警震级估计的准确性 使用实际观察到的波形，提高了精度	唯一可以进行预测的地点是过去获得地震波形的观测点 需要在多个观测点之间创建传递函数，这取决于过去地震的观测结果 需要假设传播路径的影响相同

将青井真式作为正式预测式进行 $S_{va}(T)$ 的预测。

1.3 业务试运营

1.3.1 观测业务试行及改善

日本气象厅于 2013 年 3 月 28 日 14:00 在气象厅

网页上开始发布有关长周期地震动的观测信息 (试行)。试运营期间，气象厅通过问卷调查、对象探访、集中讨论等方式搜集各方优化建议与改善意见，针对 Web 网页显示、信息获取等方面进行更新，逐步

表 9 预测业务备用的 4 种距离衰减关系
Table 9 Four alternative ground motion models (GMMs) for LPGM prediction

简称	震级	震源深度/km	震中距/km	预测可靠度/%	衰减关系选择
建筑研式	海沟地震 $M_W \geq 6.5$ 内陆地震 $M_W \geq 6.0$	≤ 60	≤ 400 ≤ 350	80	Satoh等 ^[23-24]
防灾科研式1	$M_W \geq 5.5$	最深108	≤ 200	60~70	Morikawa和Fujiwara ^[25]
内阁式	$M_W \geq 5.5$	地壳内 ≤ 20 板块边界 ≤ 60	无说明	60~70	Takashi等 ^[26]
防灾科研式2	$M_J \geq 6.3$	≤ 60	≤ 800	80~90	Dhakai等 ^[27]

注:

建筑研式:

$$\log_{10} S_{aa}(T) = a_1(T)M_W + a_2(T)M_W^2 + b_{(e \text{ or } W)}(T)R - \log_{10}(R^{p(T)} + d(T)10^{0.5M_W}) + c_0(T) + c_{j(e \text{ or } W)}(T) \text{ (海沟地震)}$$

$$\log_{10} S_{aa}(T) = a(T)M_W + b(T)R - \log_{10}(R^{p(T)} + d(T)10^{0.5M_W}) + c(T) + c_j(T) \text{ (内陆地震)}$$

防灾科研式1:

$$\log_{10} S_{aa}(T) = a_1(T)(M_{W1'} - M_{W1})^2 + b_{1k}(T)R + c_{1k}(T) - \log_{10}(R + d_1(T) \cdot 10^{e_1(T)M_{W1'}}) + Gd + Gs$$

$$M_{W1'} = \min(M_W, M_{W01}), Gd = p_d \log_{10}[\max(D_{lmin}, D_1/D_0)], Gs = p_s \log_{10}[\min(v_{Smax}, v_S/v_0)]$$

内阁式:

$$\log_{10} S_{vr}(T) = a(T)M_W - bR - c \log_{10} R + d(T_{dg}, T) + e(T)$$

防灾科研式2(青井真式):

$$\log_{10} S_{va}(T) = c(T) + a(T)M_J - \log_{10} R - b(T)R + \text{场地因子}(T)$$

$S_{aa}(T)$ 为绝对加速度反应谱值; $S_{vr}(T)$ 为相对速度反应谱值; $S_{va}(T)$ 为绝对速度反应谱值。预测可靠度是指长周期地震震动等级的预测等级与实际观测等级差异在±1区间的百分比

形成了可视化云图、观测点总表、单点详细的阶梯型信息网页,并附加各类数据下载链接以供他人使用。

1.3.2 预测业务试行

在2016年12月8日第11次长周期信息研讨会中,气象厅事务局提交了长周期预报业务运营提案。面向专业人士(如从事预报人员)提供长周期地震动预报信息,暂时命名为紧急地震动预报。

另外,为实现精准减灾,针对特殊大楼、储油罐、桥梁等快速给出有效可靠详细的预测信息,日本气象厅在长周期地震动信息研究小组的框架下设立应对多样化需求的预测信息研究小组进行专题研究,专题组针对多种需求的预测信息应用进行梳理并给出相应指导信息。多样化预测信息具体利用方案见表10。

1.4 业务运营

2019年3月后,日本长周期业务开始逐步正式运行。首先是2019年3月PULL型观测业务正式运营,震后10~20 min区间气象厅在网页上发布长周期等级大于1的各观测点观测信息。而后在2023年2月开始其余长周期业务正式运营,如预测业务、PUSH型观测业务。

至此,日本长周期地震动观测及预测体系建设工作总体完成,长周期业务化工作开始进入常态化

运营阶段。

2 日本长周期地震动业务体系的运营

2.1 预测业务

长周期地震动预测信息可以在震时敦促人群采取及时有效的避险措施,相关预测信息已于2023年2月追加到日本紧急地震速报信息之中并在震后几秒到几十秒内一同发布。与原发布信息相同,长周期预测信息也分为警报和预报2个部分。其中,气象厅以外机构和人员不得发布地震动警报,获得气象厅许可方可发布地震动预报信息。

长周期地震动警报与预报的区别在于发布阈值不同,长周期地震动预报的阈值相对更低。具体见表11。

2.2 观测业务

长周期观测信息可以支撑专业人员对建筑物的健康状况进行紧急诊断。如果安全,则可以立即报告安全信息,进而为恢复使用准备,以减少人群焦虑和由此产生的混乱;如果存在风险,可以进行进一步详细检查和诊断。

为尽早处理长周期影响较严重的区域,日本气象厅对PUSH型观测信息细分为2类。第1类为电文速报,震后7~8 min发送,目的是尽早发出观测长

表 10 长周期预测信息多样化具体使用方案
Table 10 Detailed applications of diversified LPGM forecast information

需求类别	第1类 (气象厅预警信息)	第2类 (民间的预测信息)	第3类 (民间利用观测进行预测等)
高层内人群	馆内广播(避免恐慌,减少不安感) 防灾中心、设施管理者 电梯停运的预告	为第1类信息的再跟进,信息更加可靠(警报内容根据楼层变化。预测长周期地震动级别和到达时间通过内部广播、数字标牌等传达)	类似第1、2类,但预警更可靠
高层周边的人群和用户	躲避坠落物	提醒检查具备隔震功能设备的运行情况 固定脚轮型医疗设备	与第2类相同
高层内设备、机器等的控制	电梯的控制(确保使用者的安全,防止损坏和被困) 防止漏电、切断煤气栓	针对各个建筑物和设备专门控制 通过可变阻尼器改变基本周期来抑制晃动	相比第1、2类更可靠(例如,根据建筑物监控取消电梯停靠)
高层等的受灾诊断	—	粗略的损失估计	详细的损伤预测(部件等的损伤预测、检查优先顺序的判断、避难引导等)
高层以外的利用	确保塔吊操作员、高空作业人员安全	相比第1类更可靠	相比第1、2类更可靠

表 11 长周期地震动警报和预报基本信息表
Table 11 Basic information of LPGM earthquake early warning and forecast

类别	发布主体	发布条件	发布内容	面向对象
警报	气象厅	预测最大长周期地震动等级为3级以上	地震发生时间、地点、震级、震源深度以及预测长周期地震动等级3级以上的地区名称	所有人群
预报	气象厅、民间预报从业者	最大预测长周期地震震级达到1级以上(追加)	地震发生时间、震源、预测最大烈度、预测长周期地震动阶级1以上的地区名及其烈度、终端用户所在地预测烈度、长周期地震动等级以及预测地震动到达时间等	专业人士、相关事业从业者、专用接收终端

周期地震动等级大于等于 3 的地区,减少人员恐慌;第 2 类为电文推送,震后约 10 min 发布,信息涵盖日本全国长周期观测等级大于 1 的区域。

两类信息的组成结构大体相似,均包含震源、震级、发震时间、影响区域等基本信息,不同之处是电文速报仅包含长周期等级 3 级以上的区域。

在震后的 20 min 左右,日本气象厅将基于布置在全国范围的地震记录仪器(目前约 670 个点)得到的实际地震动记录进行绝对速度反应谱的计算,而后在气象厅网站上发布 PULL 型观测信息(即长周期地震动等级大于等于 1 级的观测点信息,包含图形、表格、单点详细信息,见图 5),具体信息可登录日本气象厅网站(www.jma.go.jp)进行查询^[28]。

3 日本长周期业务拓展应用

3.1 国家政策

为应对不久的将来极可能发生的日本南海强震,日本国土交通省于 2016 年 6 月 24 日发布针对南海海槽沿岸的巨大地震引起的超高层建筑物等结构

的长周期地震动对策。如:对新建高层、隔震建筑强化认证,增设家具防移动掉落设计;对既有建筑进行检查,如有必要则进行加固,并为日本关东、静冈、名古屋、大阪等地的超高层建筑以及隔震建筑进行减隔震加固改造提供政府补助。

3.2 企业应用

(1)三菱地产。2018 年初,三菱地产和白山工业联合利用三菱地产的丸之内大厦(37 层)开发了基于长周期预测信息、观测信息的电梯控制系统。通过实时接收 JMA 的长周期预测信息进行电梯紧急停止,疏散箱内人员操作;并结合大楼实测数据以及 JMA 发布的长周期观测等级进行后续电梯恢复流程。

2024 年春,三菱地产开始在其他高层逐步引入该电梯控制系统。

(2)森大厦公司。2018 年,森大厦公司在六本木新城森大厦(东京圈)对 JMA 长周期预测信息进行试验验证。通过与大楼自有的损伤评估系统(e-Daps)对比确认,气象厅的预测数据可提前约 50 s;且长周期地震动预测等级合理,对大楼提前启动长周期地震

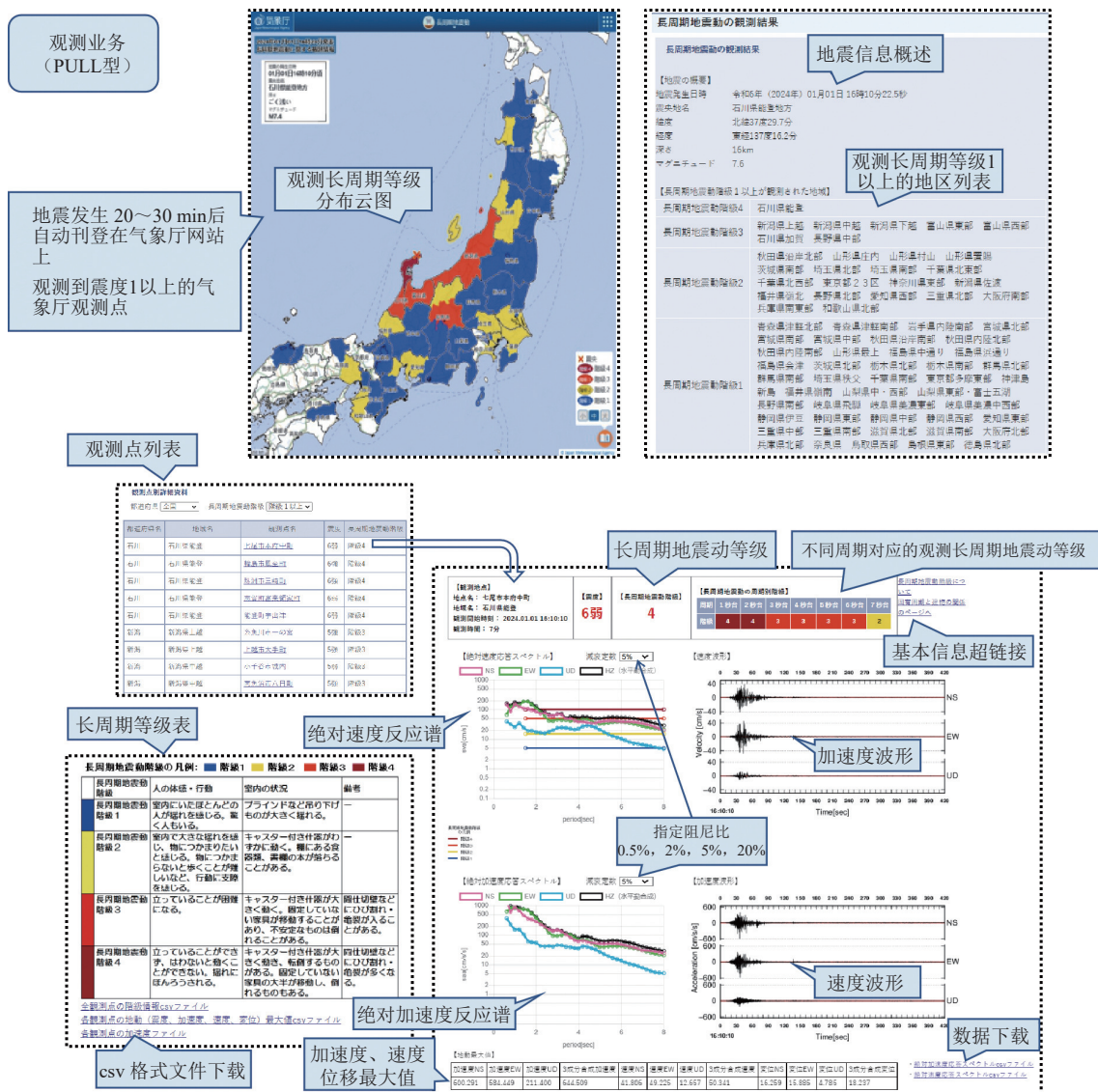


图5 PULL型观测信息示例

Fig. 5 Example of PULL-type LPGM observation information

动应对有显著作用。

(3) 清水公司。清水公司研发了基于气象厅地震动烈度和长周期预测信息的电梯控制系统。在预测烈度4级以上或长周期等级3以上时, 电梯自动停靠至最近楼层并释放箱内人员。2018年7月7日千叶县东方冲地震时预测地震烈度为4级, 长周期预测等级为1, 此时电梯自动停止运行并释放乘客。

4 小结与展望

本文详细介绍了日本气象厅领衔建设长周期地震动业务体系的全过程, 其建设的总体思路为, 观测业务先落地→预测技术再研讨→预测业务后开展。2011年11月开始, 历经12年时间, 4个主要阶段, 最终建成了长周期地震动警报、预报及信息发布的

全链条业务体系。最为关键的是, 该体系已经开始被日本政府和相关企业所采用用于普查可能遭遇的长周期地震动风险并给出风险应对措施, 有力提升了日本防范长周期地震动灾害的能力。

随着我国长周期结构和基础设施的快速涌现和我国城市的高地震风险现状, 建设适用于我国的长周期业务建设迫在眉睫。基于对日本长周期地震动业务体系和我国相关地震研究工作的认识, 本文建议:

(1) 目前已完成的第1次全国自然灾害综合风险普查工作主要针对的是区域整体进行地震灾害风险普查, 没有明确给出具体某类结构的地震灾害风险。对于长周期结构这类破坏影响较大, 震害影响因素有一定特异性的结构, 第1次自然灾害综合风险普

查工作尚未做到单栋单类结构的具体分析评估和结果展示。

同时,全国第1次自然灾害综合风险普查工作采用的地震危险性估计方法仍是基于我国已公布的地震动参数预测方程进行的。这一方程建立时大量采用了由地震烈度转换得到地震动的参数信息,对具体地震动的频谱特性考虑不足,容易忽略远场长周期地震和深厚软弱场地地震对长周期结构的影响,对其地震灾害风险评估结果产生不利影响。此外,全国第1次自然灾害综合风险普查工作在结构的地震灾害数值分析过程中采用规范设计反应谱,经过人为调整导致长周期段失真,与实际地震动特性不完全符合,会导致对长周期结构的地震风险评估结果与实际情况存在一定的偏差。

(2)建议建立适用我国的长周期地震动预测方

程,开展长周期地震动参数区划。这里必须注意的是,与以往地震动参数预测方程适用的震源距范围不同,这一预测方程的震源距适用范围应在千公里量级。

(3)推进长周期地震动特性及预测的相关研究项目开展。如,国内长周期地震动危害等级的量化,基于三维数值模拟及数据同化的长周期地震动模拟与预测^[29-30],基于人工智能的长周期地震动特性分析及预测^[13]等。

致谢

感谢中国地震局工程力学研究所张桂欣副研究员针对第1次全国地震灾害风险普查工作做的有意义的讨论。感谢两位审稿专家对文章完善给出的有价值的建议。

参考文献

- [1] Koketsu K, Miyake H. A seismological overview of long-period ground motion[J]. *Journal of Seismology*, 2008, 12(2): 133-143
- [2] 周福霖,崔鸿超,安部重孝,等.东日本大地震灾害考察报告[J]. *建筑结构*, 2012, 42(4): 1-20
Zhou F L, Cui H C, Shigetaka A B E, et al. Inspection report of the disaster of the East Japan earthquake by Sino-Japanese joint mission[J]. *Building Structure*, 2012, 42(4): 1-20
- [3] 陈波,谢俊举,温增平.汶川地震近断层地震动作用下结构地震响应特征分析[J]. *地震学报*, 2013, 35(2): 250-261
Chen B, Xie J J, Wen Z P. Analysis of the seismic response characteristics of building structures subjected to near-fault ground motions from Wenchuan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, 35(2): 250-261
- [4] 陈笑宇,王东升,付建宇,等.近断层地震动脉冲特性研究综述[J]. *工程力学*, 2021, 38(8): 1-14
Chen X Y, Wang D S, Fu J Y, et al. State-of-the-art review on pulse characteristics of near-fault ground motions[J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(8): 1-14
- [5] Cabangon L T, Elia G, Rouainia M, et al. Seismic vulnerability of shallow tunnels subjected to far-field long-period ground motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 176: 108313
- [6] 乔洪义.远场地震动作用下大跨径悬索桥抗震研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016
Qiao H Y. Research on the seismic behavior of long-span suspension bridge under the far-field ground motion[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016
- [7] 李帅.近断层地震动工程特性及其作用下大跨斜拉桥地震响应分析[D].南京:东南大学,2018
Li S. Characteristics of near fault ground motions and its influence on the seismic performance of long-span cable-stayed bridge[D]. Nanjing: Southeast University, 2018
- [8] Zhou Y, Ping T Y, Gong S M, et al. An improved defining parameter for long-period ground motions with application of a super-tall building[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 113: 462-472
- [9] 王冲,齐文浩,党鹏飞,等.基于盆地效应的抗震设防研究之若干进展[J]. *世界地震工程*, 2022, 38(3): 221-235
Wang C, Qi W H, Dang P F, et al. Some advances in research on seismic fortification based on basin effect[J]. *World Earthquake Engineering*, 2022, 38(3): 221-235
- [10] Dai M H, Li Y M, Liu S Y, et al. Identification of far-field long-period ground motions using phase derivatives[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 1065830
- [11] 杨伟林,朱升初,洪海春,等.汶川地震远场地震动特征及其对长周期结构影响的分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2009, 29(4): 473-478
Yang W L, Zhu S C, Hong H C, et al. Characteristics of far-field ground motion of Wenchuan earthquake and the effect on long-

- periodic structures[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2009, 29(4): 473-478
- [12] Liu W, Xiao C, Zhou H, et al. Experimental investigation of liquid-tank interaction effects on full containment LNG storage tanks through shaking table tests[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 196: 111527
- [13] Furumura T, Oishi Y. An early forecast of long-period ground motions of large earthquakes based on deep learning[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(6): e2022GL101774
- [14] 杜东升, 宋宝玺, 许伟志, 等. 高层钢结构考虑长周期地震动的减震加固研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(7): 189-200
Du D S, Song B X, Xu Z W, et al. Seismic retrofit of a high-rise steel structure considering long-period and long-duration ground motions[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(7): 189-200
- [15] BRI strong motion network[EB/OL]. [2024-03-11]. <https://smo.kenken.go.jp/ja/report/201103111446>
- [16] 高孟潭. 警惕来自远方大地震的威胁[J]. *防灾博览*, 2021(5): 16-19
Gao M T. Be alert to the threat of large earthquakes from far away[J]. *Overview of Disaster Prevention*, 2021(5): 16-19
- [17] 2003 Tokachi-oki earthquake oil storage tank in the Yufutsu basin of Hokkaido damage and fire[EB/OL]. [2024-03-11]. <https://images.app.goo.gl/VmMx3EiHVt6HaCZQ7>
- [18] Japan Meteorological Agency. Information review committee on long-period ground motion[EB/OL]. [2024-03-11]. https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/study-panel/tyoshuki_kentakai/index.html
- [19] 曾露, 田兵伟, 王瞰. 地震预警服务进展及其国际比较[J]. *灾害学*, 2022, 37(2): 138-144
Zeng L, Tian B W, Wang T. The progress and international comparison of earthquake early warning service[J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(2): 138-144
- [20] 冯锐. 趣味地震学(9): 地震预警三部曲[J]. *国际地震动态*, 2019(9): 32-40
Feng R. Interesting seismology (9): The trilogy of earthquake warning[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2019(9): 32-40
- [21] The Headquarters for Earthquake Research Promotion. Reports on evaluation of seismic activities in Japan[EB/OL]. [2024-03-11]. https://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/lte_summary/
- [22] Japan Meteorological Agency. Committee on information on long-period ground motion[EB/OL]. [2024-03-11]. https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/study-panel/tyoshuki_joho_kentakai/index.html
- [23] Satoh T, Okawa I, Nishikawa T, et al. Prediction of waveforms of long-period ground motions for hypothetical earthquakes using empirical regression relations of response spectra and phase spectra[J]. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2010, 75(649): 521-530
- [24] 佐藤智美, 大川出, 西川孝夫, 等. 長周期地震動の経験式の改良と2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション[J]. *日本地震工学会論文集*, 2012, 12(4): 354-373
Satoh T, Okawa I, Nishikawa T, et al. Revisions of empirical ground motion models and the simulations of long-period strong motions of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake[J]. *Journal of JAEE*, 2012, 12(4): 354-373
- [25] Morikawa N, Fujiwara H. A new ground motion prediction equation for Japan applicable up to $M9$ Mega-earthquake[J]. *Journal of Disaster Research*, 2013, 8(5): 878-888
- [26] 横田崇, 池内幸司, 矢萩智裕, 等. 長周期地震動の距離減衰および増幅特性[J]. *日本地震工学会論文集*, 2011, 11(1): 81-101
Takashi Y, Ikeuchi K, Yahagi T, et al. Attenuation and amplification of long-period component of ground motion[J]. *Journal of JAEE*, 2011, 11(1): 81-101
- [27] Dhakal Y P, Suzuki W, Kunugi T, et al. Ground motion prediction equations for absolute velocity response spectra (1~10 s) in Japan for earthquake early warning[J]. *Journal of JAEE*, 2015, 15(6): 91-111
- [28] Japan Meteorological Agency. Long-period ground motion Information[EB/OL]. [2024-03-11]. <https://www.jma.go.jp/bosai/map.html#5/39.893/137.637/&contents=ltpgm>
- [29] Oba A, Furumura T, Maeda T. Data assimilation-based early forecasting of long-period ground motions for large earthquakes along the Nankai trough[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(6): e2019JB019047
- [30] Furumura T, Maeda T, Oba A. Early forecast of long-period ground motions via data assimilation of observed ground motions and wave propagation simulations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(1): 138-147