

# 深厚软土非线性地震效应：震害启示、百年认知与未来挑战\*

陈国兴<sup>1,2</sup>, 方怡<sup>1</sup>, 吴双兰<sup>1,2</sup>, 吴琪<sup>1,2</sup>, Charng Hsein JUANG<sup>3</sup>

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009; 2. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏 南京 210009;  
3. Emeritus College, Clemson University, SC 29634, USA)

**摘要:** 局部场地条件会显著改变地震动特性, 尤其是深厚软土地场放大效应, 是加剧结构破坏并可能导致大城市巨灾的关键因素。本文系统阐述了场地地震效应的典型宏观现象与启示、百年认知及科学挑战。首先, 基于旧金山湾区(1906年 $M_w$ 7.8和1989年 $M_w$ 6.9地震)、墨西哥城盆地(1985年 $M_w$ 8.1和2017年 $M_w$ 7.1地震)、渭河盆地(2008年汶川 $M_s$ 8.0地震)及东京湾区(如1923年 $M_w$ 7.9与2011年 $M_w$ 9.1地震)等典型深厚软土沉积区的宏观震害现象与强地震动记录, 揭示了深软场地地震效应非线性放大的共性特征, 包括长周期地震动的显著放大、强震动持时的明显延长、场地-结构双重共振以及盆地边缘效应等。其次, 系统阐述了场地反应分析方法及相应软件的演进脉络, 从一维频域等效线性方法到时域非线性方法(总应力与有效应力法), 再到复杂的二维/三维非线性波动数值模拟方法, 评述了各类方法的理论基础、基于竖井台站记录的验证及适用性。最后, 针对我国海河平原、长江三角洲等极厚软土区城市群所面临的潜在极端地震风险, 指出了当前研究亟待突破的三大基础性问题: 有效表征极深厚软土强非线性行为的本构模型, 合理表征区域尺度极深厚软土复杂场地空间变异性及相关参数不确定性的数值模型构建方法, 以及高效高精度的二维和三维非线性波动模拟方法。攻克这些难题, 对于深化场地地震效应的科学认知, 发展城市地震韧性理论, 并有效防控未来大震巨灾风险, 具有至关重要的科学与工程意义。

**关键词:** 场地地震效应; 深厚软土; 盆地效应; 长周期地震动放大效应; 非线性; 强震动记录; 场地反应分析方法  
**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2026)02-0211-80

## Nonlinear Site Effects in Deep Soft Deposits: A Century of Observations, Insights, and Future Challenges

CHEN Guoxing<sup>1,2</sup>, FANG Yi<sup>1</sup>, WU Shuanglan<sup>1,2</sup>, WU Qi<sup>1,2</sup>, Charng Hsein JUANG<sup>3</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;  
2. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China;  
3. Emeritus College, Clemson University, SC 29634, USA)

**Abstract:** Local site conditions, particularly those involving thick sedimentary layers that are susceptible to the amplification effects, can significantly modify seismic ground motions, often exacerbating structural damage and posing catastrophic risks to major cities. To advance risk assessment and mitigation for future mega-earthquakes, this paper presents a systematic and critical review of the global observations and insights from the past century on nonlinear site effects in deep soft soil deposits. It fo-

\* 收稿日期: 2026-01-17; 修回日期: 2026-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52578410)资助

作者简介: 陈国兴(1963—), 男, 教授, 博士。主要从事土动力学与岩土地震工程研究。E-mail: gxc6307@163.com

cuses on the evolution, current state, and persistent challenges in site response analysis methodologies. First, drawing on macroseismic site effect phenomena and strong-motion records from regions such as the San Francisco Bay Area (1906  $M_w$ 7.8 and 1989  $M_w$ 6.9 earthquakes), the Mexico City Basin (1985  $M_w$ 8.1 and 2017  $M_w$ 7.1 earthquakes), the Weihe Basin (2008 Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake), and the Tokyo Bay Area (e.g., 1923  $M_w$ 7.9 and 2011  $M_w$ 9.1 earthquakes), we reveal characteristic features of nonlinear site amplification in deep alluvial plains and sedimentary basins. These include pronounced amplification of long-period ground motions from far-field large earthquakes, prolongation of strong shaking, site-structure double resonance effect, and basin-edge effects, among others. Next, we outline the development of site response analysis methods and corresponding software, from one-dimensional frequency-domain equivalent linear analysis to time-domain nonlinear methods (total stress and effective stress approaches), and further to complex two- and three-dimensional nonlinear wave propagation simulations. The theoretical principles, validation against downhole array recordings, applicability, and limitations of these approaches are extensively discussed. Finally, considering potential extreme earthquake risks facing metropolitan regions in China's alluvial plains composed of deep soft soil deposits (e.g. the Haihe Plain and Yangtze River Delta), we identify three fundamental issues: (1) constitutive models capable of capturing the strong nonlinear behavior of very deep soft soil deposits; (2) the construction of regional-scale numerical models that reasonably represent not only the inherent spatial variability of extremely deep, complex deposits, but also the associated parameter uncertainties; and (3) the development of efficient yet high-precision 2D and 3D nonlinear wave simulation methods. Addressing these challenges is crucial for deepening the fundamental understanding of site effects and establishing a robust scientific basis for enhancing urban seismic resilience against future mega-earthquakes.

**Keywords:** seismic site effects; deep soft deposits; basin effects; long-period ground motion amplification; soil nonlinearity; strong motion records; site response analysis techniques

## 0 引言

中国是世界上地震活动最强烈、地震灾害最严重的国家之一,历史上曾多次遭受极具破坏性的地震事件。例如,1556年华县  $M_s$ (面波震级)8¼地震、1903年洪洞-赵城  $M_s$ 8.0地震、1920年海原  $M_s$ 8½地震以及1976年唐山  $M_s$ 7.8地震,均导致超过20万人死亡;尤其华县地震“奏报有名者83万有奇,不知名者复不可数”<sup>[1]</sup>。纵观古今文献数据,早期历史地震年表虽时间精度较高,但地震影响数据匮乏且存在高度不确定性<sup>[2]</sup>。以葡萄牙1755年里斯本  $M_w$ (矩震级)8.7-9.0地震为例,其伤亡人数至今仍有争议,最新估计约为8 000~20 000人,约占当时里斯本人口的10%,而经济损失高达国民生产总值的30%~50%。J. Macmurdo<sup>[3]</sup>对印度1819年Kutch  $M_w$ 8.0地震进行了详细记录,该地震形成了一条长达100 km、高3 m的断层陡坎,被C. F. Rich-

ter<sup>[4]</sup>称为“首次有详细地质记录的同震地表破裂”。此外,该地震还首次明确揭示了“场地效应”:建于岩石地基上的建筑物表现远优于冲积层上的建筑物。R. Mallet和J. W. Mallet<sup>[5]</sup>对意大利1857年那不勒斯  $M_w$ 7.0-7.2地震开展实地调查,以如今所习惯的样式绘制了第一张等震线图。日本的地震科学研究可追溯到1880年或更早。至19世纪末,地震所致人文与经济影响的数据精度显著提高。美国1906年旧金山  $M_w$ 7.8地震和日本1923年关东  $M_w$ 7.9地震,不仅提供了局部场地条件(包括土层条件、地质构造与地形地貌特征)对地震破坏影响的宝贵数据,使人们认识到深厚软土地层会显著放大地震波,也成为最早被详细记录的土壤液化案例之一<sup>[6]</sup>。1921年,翁文灏等<sup>[1]</sup>对海原大地震开展了我国首次大规模地震现场科学考察,并编制了国内第一张等震线图,标志着中国现代地震科学研究的起步。1960年代初,中国地震局工程力学研究所成立了场地影响研究组,研究场地条件对地震动的影

响,提出了应区分场地失效和振动效应这两种影响,同时将场地分成四类<sup>[7-9]</sup>。1964年日本新潟 $M_s7.5$ 地震、美国阿拉斯加 $M_w9.2$ 地震以及1966年中国邢台 $M_s6.8$ 与 $M_s7.2$ 地震期间的震害现象唤起了土木与地震工程界对土壤液化问题的广泛关注,并由此开启了土壤液化对场地反应影响的相关研究。

全球发生的灾难性地震充分表明,由于局部场地条件因素放大了地震效应,特定区域会集中出现严重破坏及相应的人员伤亡。因此,局部场地效应(如高频滤波与低频放大、共振效应、局部聚焦及盆地边缘效应)对结构及环境的地震反应具有重要影响<sup>[10]</sup>。H. O. Wood<sup>[11]</sup>首次印证了局部场地条件是地震动放大与建筑物破坏程度的主要控制因素;B. Gutenberg<sup>[12]</sup>通过研究不同场地类型的微震和地震记录,提出了不同场地的地震动放大系数,开启了地震波特性和局部场地条件对地震动放大影响的定量研究。历次地震(如中国1976年唐山 $M_s7.8$ 和2008年汶川 $M_s8.0$ 、智利1985年Valparaíso $M_w8.0$ 、墨西哥1985年Michoacán $M_w8.1$ 、美国1989年Loma Prieta $M_w6.9$ 、日本1995年神户 $M_w6.9$ 和2011年 $M_w9.1$ 地震,以及土耳其2020年Samos $M_w7.0$ 和2023年Kahramanmaraş $M_w7.7/M_w7.6$ 地震)观测数据与现场调查表明,位于盆地与周边裸露岩层,以及盆地/平原不同位置的地震动强度或建筑(结构)物破坏程度存在显著差异<sup>[13-22]</sup>。2015年智利Illapel $M_w8.3$ 地震期间,远离震中1280 km的阿根廷首都布宜诺斯艾利斯,地震动持时超4 min,几栋建在300 m厚沉积土层上的高层建筑内人员自发疏散。其原因是地震动卓越周期 $T_b$ 、场地基本周期 $T_g$ 和高层建筑基本周期 $T_s$ 三者均约为2.5 s,“双重共振”效应致使高层建筑的水平向峰值加速度放大10倍,超过风致振动的可接受阈值<sup>[23]</sup>。这表明远场特大地震对深厚场地上大都市的影响不可忽视。值得注意的是,全球许多大城市位于河谷、盆地或深厚冲积平原地区,这些区域沉积环境复杂,更易因场地效应导致地震动空间变异与严重震害。远场大地震引起的地震动以破坏深厚场地的长周期结构而著称<sup>[24-25]</sup>。

场地效应通常可归因于由局部场地条件引起的地震动放大。场地反应分析(Site response analysis, SRA)作为评估场地效应的关键环节,在地震工程研究与实践中具有至关重要的作用。SRA可用

于评估局部场地效应特征(如场地放大效应,场地基本频率 $f_g$ 或周期 $T_g$ )、识别地质灾害(如场地液化势,地面位移),并定义结构或岩土系统的地震输入(基岩或地表地震动),进而确定场地相关的设计地震动参数<sup>[26-35]</sup>。地震动强度指标的评价是基于性能的工程抗震设计的重要组成部分。因此,科学合理的SRA方法是防止大地震袭击下结构物倒塌、提升城市地震韧性的基础。

土的动力性质研究始于1930年代,M. Ishimoto和K. Iida<sup>[36-37]</sup>研发了共振柱试验的理论与装置。1970年代是岩土地震工程发展的重要阶段,实验技术的进步深化了对循环加载下土的应力-应变行为、超静孔隙水压力( $u_e$ )的增长规律与抗液化强度的理解,推动了土的动力本构模型与SRA方法的发展。目前大多数SRA方法起源于该时期,或沿用了当时提出的土动力本构模型。土的动力非线性(Nonlinear, NL)大致分为两类。第一类是土的动力学性能退化,表现为剪切刚度和强度降低,并伴随能量耗散增加;第二类与饱和粒状土中的 $u_e$ 变化有关,涉及土骨架在剪切作用下的体积变化,并可能引起土的液化。研究表明,当循环剪应变幅值 $\gamma_a$ 超过 $10^{-5}$ ~ $10^{-4}$ 时,土会表现出显著的非线性与滞回特性<sup>[38]</sup>。强震记录证实了该现象:与强地震动相比,弱地震动通常引起更大的场地放大效应<sup>[39]</sup>。例如,1985年Michoacán $M_w8.1$ 和1989年Loma Prieta $M_w6.9$ 地震及台湾罗东大型地震试验(large-scale seismic test, LSST)场地地震记录均表明,随着水平向基岩峰值加速度(Horizontal peak bedrock acceleration,  $PBA_H$ )的增大,场地放大效应减弱,共振频率随之降低。当 $PBA_H$ 超过约100~200  $\text{cm/s}^2$ 时,场地土的非线性行为尤为显著<sup>[38]</sup>。对日本KiK-net台网记录的统计分析指出:当水平向地表(出露基岩)峰值加速度(Horizontal peak ground acceleration,  $PGA_H$ )超过0.75  $\text{m/s}^2$ 时,有40%几率观测到土的非线性反应<sup>[40]</sup>。

1960年代末,H. B. Seed与I. M. Idriss<sup>[41]</sup>开创性地将等效线性(Equivalent linear, EQL)方法引入场地反应分析技术。该EQL法为描述土的第一类NL行为提供了重要思路。该方法通过初始(或最大)剪切模量 $G_0$ ( $G_0 = \rho V_s^2$ ;其中 $\rho$ 为密度, $V_s$ 为剪切波速)、等效割线剪切模量( $G$ )和阻尼比( $\lambda$ )随 $\gamma_a$ 的变化,近似表征土在地震作用下的非线性反应。目前,SRA通常基于水平成层场地假设,采用一维

(1D)频域 EQL 或时域 NL 分析方法。其中, 1D EQL 法因其参数物理意义明确、易于理解与获取, 在实践中应用最为广泛, 所需参数仅需土的  $V_s$ 、 $\rho$ , 以及  $G/G_0$ - $\gamma_a$  和  $\lambda$ - $\gamma_a$  曲线<sup>[42-43]</sup>。然而研究表明, 频域 EQL 法用于深软场地的强非线性地震反应分析存在一定局限性<sup>[44]</sup>。相比之下, 时域 NL 法能更准确地表征土的真实非线性行为<sup>[45-46]</sup>, 但由于参数选取与软件使用缺乏系统规范, 目前在实际工程中应用仍比较有限。此外, 已有研究系统探讨了土的 EQL 参数对 SRA 结果的敏感性<sup>[47]</sup>, 但对于 NL 参数的类似认知尚待深入。

局部场地条件会显著改变输入地震动的强度、持时与频率特征, 也即“滤波效应”。场地效应可分为三类: 地层效应、盆地或谷地效应以及地形效应<sup>[48-49]</sup>。地层效应主要指因表层土与较深土层的波阻抗差异引起的地震动放大; 盆地效应涉及二维(2D)或三维(3D)地层结构对地震动的影响, 包括盆地边缘波反射与面波生成; 地形效应则与地形起伏对波的反射和散射有关。此外, 2D 效应也可能源于沉积土空间分布的几何形态, 如倾斜地层或透镜体等。近年针对 2D 效应的研究日益增多, 但场地效应本质上是一个 3D NL 地震波动问题。

G. W. Housner<sup>[50]</sup>曾指出:“地震工程学是 20 世纪才发展起来的学科, …此时对地震工程学的发展进行一次历史性的回顾是恰当的, 让我们了解过去、现在以及未来…”。为此, 在唐山大地震 50 周年之际, 本文旨在对非线性场地地震效应研究的发展历程与现状作一历史性综述。通过总结深厚软土场地对代表性大地震引发的地表地震动的影响及其灾难性后果, 以期增进对冲洪积平原和盆地场地反应的理解; 系统梳理场地反应数值模拟方法的发展, 描述场地反应分析的基本方法, 为对场地效应感兴趣的研究者与工程师提供基础性参考。最后, 针对城市大震巨灾防控与工程抗震需求, 对极端地震作用下的非线性场地效应研究提出未来面临的挑战与展望。

## 1 深厚软土场地非线性地震效应的现象与特征

### 1.1 旧金山湾区场地效应

历史记录表明, 旧金山湾区在 19 世纪后三分之二时期的地震活动极为频繁。在 1906 年之前的 70

年间, 该地区共发生了 18 次 6.0 级或更大的地震<sup>[39]</sup>。旧金山湾沉积盆地是一个西北走向的地堑(图 1)<sup>[51]</sup>, 东北和西南边界分别为 Hayward 和 San Andreas 活动断裂。旧金山湾位于盆地中央, 大部分为沼泽地与冲积平原, 外围(1~15 km 范围内)为海岸山脉。基岩出露于山脊, 构成海湾沉积物之下的不规则凹陷底部。海湾边缘处基岩面起伏显著, 整体呈现向海湾中心逐渐加深的趋势, 最显著的深度增加在西缘, 通常深达 90~240 m<sup>[52-53]</sup>。

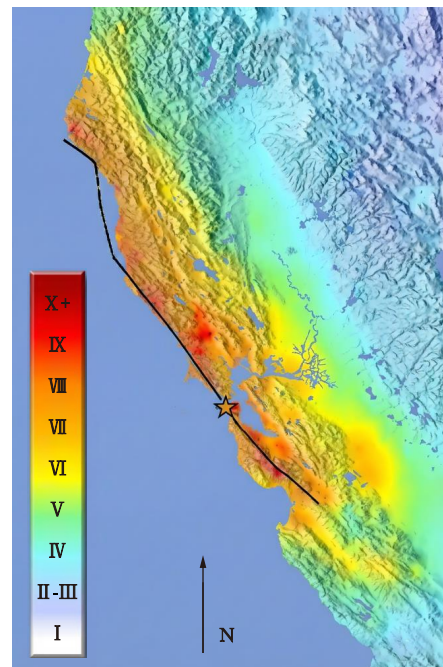


图 1 旧金山湾区 1906 年  $M_w$ 7.8 地震的 MMI 分布图<sup>[51]</sup>

Fig.1 ShakeMap showing modified Mercalli intensity of the 1906  $M_w$ 7.8 earthquake<sup>[51]</sup>

旧金山湾区的主要地质单元大致可归类为三类: 基岩和坚硬浅土层; 冲积层; 近湾边海湾泥沉积层<sup>[16, 52, 54-55]</sup>。冲积层单元包含晚第四纪形成的洪泛区沉积物, 以粉砂和黏土为主, 夹有冲积扇和河床砂砾沉积层。海湾泥为全新世时期的沉积物, 以饱和、富含有机质的粉砂和黏土为主, 偶尔夹有砂质沉积层。旧金山东侧与北侧广泛覆盖有 4.5~10 m 厚的砂质填土, 其下为约 3~18 m 软至中硬的海湾泥, 再下层为更坚硬、密实的沉积物, 包括硬黏性土和中密-密实砂性土。基岩面形态呈向海湾开口的半碗状构造, 北部海湾沿岸处基岩最大埋深约 100 m<sup>[52, 56]</sup>。

北加州地震所致破坏与人员伤亡的主要原因之一是地震震动所引发的地表破坏。1906 年与

1989年两次大地震在旧金山湾区造成的破坏均集中分布于填土/海湾泥区域,且旧金山 Marina 区在两次地震中均表现出最高烈度<sup>[57]</sup>。这一现象明确反映出局部场地条件对地震动特性的显著影响。

#### 1.1.1 1906年旧金山大地震场地效应

1906年,旧金山发生 $M_w$ 7.8(里氏震级 $M_L$ 8.25)地震,震中位于金门海峡以西近海(37.75°N, 122.55°W)<sup>[58]</sup>。地震及其引发的次生火灾将旧金山大部分城区夷为废墟。震后数分钟内,在约12.17 km<sup>2</sup>区域内,全市发生52处火灾,超过28 000座建筑被烧毁,包括490个城市街区和32个部分街区(约占该市已开发区域的60%),估计80%~85%的破坏由火灾造成<sup>[39, 59-60]</sup>。这场灾难是美国历史上最严重的自然灾害之一,导致至少3 000人丧生,仅在旧金山,约40万居民中就有22.5万人无家可归<sup>[61]</sup>。这次地震不仅是加州历史上的标志性事件,更被铭记为美国现代地震科学的起源<sup>[39]</sup>。

在A. C. Lawson教授领导下,科学家和工程师组成的调查团队系统收集了与这次地震相关的物理现象,其成果体现于里程碑式的《州地震调查委员会报告》<sup>[6, 62]</sup>及美国地质调查局(U.S. Geological Survey, USGS)的补充报告<sup>[63]</sup>。该报告引领了关于地震成因与影响的多项重大发现。该团队汇编了600多个地点的震害和地震烈度资料,并成功区分了地震破坏与更为普遍和严重的火灾破坏区。该报告收录了310余张照片和大量草图,细致记录了地表破裂的细节、人文景观特征的错动及建(构)筑物损坏模式,形成了有史以来规模最大的单次地震烈度数据集。研究发现,地震动强度通常随离断层距离增加而衰减,并受近地表土层及局部地质构造(如大型深盆地)影响。H. O. Wood<sup>[11]</sup>编制了1:24 000的旧金山地震烈度图,定义了五个烈度等级,并通过与经过校准的日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)烈度表对比,为每个等级赋予了近似的 $PGA_H$ 值。对比该烈度图与A. C. Lawson<sup>[62]</sup>的地质图发现:地震破坏程度主要受场地条件控制;坚硬岩石上破坏轻微,而人工填土与沼泽地上破坏强烈。同时注意到,在软土上采用深桩与格床基础的现代建筑表现良好,并未因土壤液化而坍塌。W. Thatcher<sup>[64]</sup>重新分析了原报告中的三角测量数据,确定了地震破裂带沿断层走向的滑动量变化(金门以北平均4~5 m,以南2~3 m)。W. Thatcher等<sup>[65]</sup>进一步研究提出,破裂向北延伸穿过San An-

dreas断层近海段,直至门多西诺角(40.44°N, 124.41°W),总长达477 km。这一结论(破裂向北延伸)被USGS采纳<sup>[59]</sup>,且与修正麦卡利烈度(MMI, Modified Mercalli Intensity)分布相符(图1)。

1906年旧金山地震是北美最早被系统研究的液化案例之一。A. C. Lawson<sup>[62]</sup>的报告首次系统地描述了液化现象,成为理解地震地质灾害的里程碑式文献。T. L. Youd和S. N. Hoose<sup>[66-67]</sup>系统地研究识别并考察了1906年地震中液化引起的地面破坏。一个长560 km、向内陆延伸64 km的带状区域内,多处发生了液化破坏,尤以全新世冲积物及填土区最为严重。主要损害包括桥梁、道路、铁路、管道及建筑物的破坏。旧金山市内市场街南端等三个填土区发生了严重的侧向滑移;Merced湖边亦发生了侧向滑移和流滑,导致道路桥梁损坏。奥克兰填土区发生大规模开裂、沉降与滑移,通往阿拉米达市的堤道及铁路因严重液化而下沉<sup>[59]</sup>。更严重的是,断层错动或土壤液化导致旧金山的三条主干供水管道(Pilarcitos管道、San Andreas管道和Crystal Springs管道)同时发生故障,加上跨越三个广阔“沼泽地”(现识别为极高液化潜势区)的栈桥破坏,致使供水中断,极大地阻碍了控制大火蔓延,致使大火吞噬了旧金山490个街区(11.5 km<sup>2</sup>)<sup>[59, 68]</sup>。

A. C. Lawson<sup>[62]</sup>的报告中还详细记录了注入蒙特利湾的Salinas河和Pajaro河沿岸低地、注入旧金山湾Alameda溪、Colma溪、Coyote溪和Tomales湾南缘附近的Lagunitas溪、三角洲;以及Russian河、Eel河等河流沿岸的液化侧向滑移和滑塌。G. K. Gilbert等<sup>[69]</sup>指出Salinas河谷的破裂和扰动比州内任何其他地区都严重。值得注意的是,尽管Salinas河谷的地震烈度很高,但河谷两侧丘陵地区烈度要低得多<sup>[62]</sup>。这表明河谷内的较高烈度主要源于液化引起的地面破坏及可能的地震动放大。也即,基岩地震动处于中等水平的区域,也可能产生严重的场地液化效应。

D. J. Wald等<sup>[70]</sup>通过类比现代地震数据,提出1906年地震破裂带存在一个大的凹凸体,以解释距断层40 km的圣罗莎镇所遭受的极强震动及最严重的人均损失<sup>[63]</sup>。D. J. Wald等<sup>[71]</sup>通过对比加州八次强震(1971年San Fernando  $M_w$ 6.7、1979年Imperial Valley  $M_w$ 6.6、1986年North Palm Springs  $M_w$ 5.9、1987年Whittier Narrows  $M_w$ 5.9、1989年Loma Prieta  $M_w$ 6.9、1991年Sierra Madre  $M_w$ 5.8、1992年Land-

ers  $M_w$  7.3 及 1994 年 Northridge  $M_w$  6.7 地震)的观测数据,建立了 MMI 与地表  $PGA_H$  的经验关系:Ⅷ度区对应的地表  $PGA_H$  介于  $0.34g \sim 0.65g$  ( $g$  为重力加速度)之间。J. Boatwright 和 H. Bundock<sup>[51]</sup> 采用 ShakeMap 格式重绘了本次地震的 MMI 分布图,清晰揭示了其巨大破坏潜力:旧金山市中心和圣罗莎镇的烈度达Ⅸ-Ⅹ度,奥克兰达Ⅷ度(图 1)。距断层 18~26 km 的旧金山东湾区烈度为Ⅷ度,奥克兰海滨达Ⅷ $\frac{1}{2}$ 度。东湾区场地通常属于 NEHRP 场地分类 D/E 类,其地表以下 30 m 范围内的走时平均剪切波速( $V_{s30}$ )约 180 m/s,推测地表  $PGA_H$  介于  $0.31g \sim 0.41g$ <sup>[68]</sup>。

1906 年地震在旧金山湾区的破坏不仅源于高震级,更与近断层效应、软土场地地震动放大效应及砂土液化密切相关。该地震首次确凿地证实了局部场地条件是控制地震动放大与破坏集中分布的主导因素。为探究软土地场地的地震动强于基岩场地的现象,H. G. Rogers 进行了砂土的振动箱试验<sup>[62]</sup>,H. F. Reid<sup>[6]</sup> 进而通过数学分析,指出盆地地震反应取决于其尺寸与地震波波长的关系,盆地内地震波的放大效应与冲积土层特性及厚度的差异有关。

R.D. Borcherdt<sup>[54]</sup> 首次定量评估了旧金山湾区的场地效应。基于内华达核爆炸在旧金山湾附近 37 个地点引发的地震动与 1906 年地震的烈度分布、1957 年旧金山  $M_w$  5.3 地震记录的对比,研究发现位于海湾泥或填土上的测点,其水平向峰值地面速度(Horizontal peak ground velocity,  $PGV_H$ )可达邻近基岩记录的 10 倍,地震动频谱放大曲线清晰地显示了海湾泥场地基本周期( $T_g$ )约为 1 s。核爆炸记录所揭示的爆炸震动显著放大区域与 1906 年地震的烈度相关性、1957 年地震的频谱放大曲线特征一致性表明,由弱震确定的场地放大特性可用于预测未来强震中潜在的高烈度区域。

#### 1.1.2 1989 年 Loma Prieta 大地震场地效应

1989 年美国加州 Loma Prieta  $M_w$  6.9 地震造成了约 70~90 亿美元的经济损失,导致至少 63 人死亡、2 400 余人受伤,是美国历史上损失最惨重的自然灾害之一<sup>[52]</sup>。震中位于圣克鲁斯市东北约 11 km 处、圣何塞市西南约 16 km 处的莱克星顿水库(又称 Elsmann 湖)附近( $37.04^\circ N, 121.88^\circ W$ )。

距该地震破裂带以北 50~100 km 的旧金山湾海滨区,因深厚软土对地震动的显著放大效应,引发了大规模砂土液化与严重震害,涉及旧金山 Mari-

na 区、Embarcadero 滨海大道、Mission 湾和金银岛,以及奥克兰、阿拉米达和埃默里维尔市<sup>[57, 72-73]</sup>。

场地条件对理解地震的影响至关重要。旧金山湾区部分场地的 MMI 达到 9 度,深厚沉积层及海湾泥区域的 MMI 较其他区域高 1-3 度,导致旧金山北海岸 Marina 区的严重破坏<sup>[57]</sup>。1906 年地震的 MMI 图与 1989 年地震严重建筑损坏情况的对比表明,无论是自然沉积土或人工填土,地震动均被明显放大,其中基岩面的形态、填土层下伏沉积土层位置与厚度起到关键作用,其强度远超常用地震动衰减关系的预测值<sup>[52]</sup>。Marina 区的严重震害不仅与人工填土有关,更主要归因于其天然软土沉积层对地震动的放大作用。Marina 区场地显著放大了中等强度的基岩地震动,尤其是长周期分量,与该区域层数 5~15 层及 15 层以上建筑物的基本自振周期  $T_s$  (0.5~1.5 s 及更长)相符<sup>[56-57, 74]</sup>,从而加剧了结构破坏。在旧金山 Mission 湾沼泽区,第六街和 Folsom 街周边区域超过半数建筑物受损,280 号州际高架公路桥穿越该区时发生损坏并因此关闭。这两个区域也是 1906 年旧金山地震中破坏最严重的区域。沿旧金山以南海岸线的许多结构物因其下软质海湾泥而受到强烈震动和损坏。长周期地震动的放大还导致旧金山-奥克兰海湾大桥塔身过大差异位移而引发部分坍塌,同时也是埃默里维尔和奥克兰港海岸线、阿拉米达市以及奥克兰国际机场区域发生液化,以及埃默里维尔和西奥克兰地区的多层和高层建筑强烈震动的主要原因。

880 号州际公路 I-880 Cypress 高架桥的坍塌是局部场地效应致灾的代表性案例<sup>[52]</sup>。该桥位于海湾大桥引桥和分流结构的南侧。坍塌桥段下方为 40 m 厚的软质海湾泥,其下为以黏性土为主的深厚第四纪沉积物,基岩埋深约为 160~170 m。根据附近场地的强震/余震记录及场地反应分析推断,该桥坍塌北端地表  $PGA_H$  约为  $0.25g \sim 0.33g$ 、地震动卓越周期  $T_p$  约 1.2~2.0 s,与 Cypress 高架桥结构的未知但很可能较长的基本自振周期( $T_s$ )一致而发生共振反应,最终导致灾难性破坏。

强震观测数据表明<sup>[72]</sup>,旧金山-奥克兰地区出露基岩的  $PGA_H$  约为  $0.06g \sim 0.12g$ ,而深厚沉积土层将其放大 2~3 倍,使地表  $PGA_H$  达到  $0.16g \sim 0.33g$ ;其中全新世海湾泥等软土地场的放大效应最为显著,其  $PGA_H$  普遍超过常用地震动衰减关系的预测值,且土层台站与最邻近出露基岩台站的  $PGA_H$  比值随

土层平均  $V_s$  降低而增加。这种场地放大在中长周期 (0.5~5.0 s) 地震动分量上尤为突出, 导致较高、较柔的结构遭受更严重破坏<sup>[56-57, 72, 74]</sup>。位于旧金山-奥克兰海湾大桥中段水域、相距 2.5 km 的金银岛 (TRI, 软土) 和 Yerba Buena 岛 (YBI, 基岩) 台站记录的对比提供了直接证据<sup>[72]</sup>: 在 1989 年 Loma Prieta 主震中, 相对于 YBI 台站, TRI 台站记录在 0.5~2.0 Hz 频段的平滑傅里叶幅值谱放大约 3 倍; 而在余震中, 近 1 Hz 处的地震动分量更被放大达 12~25 倍, 表明该软土地在强震中表现出强烈的非线性反应。此外, 大范围砂土液化进一步加剧了旧金山湾滨海区的震害<sup>[52]</sup>。

图 2 展示了 I. M. Idriss<sup>[75]</sup> 基于 Loma Prieta 主震记录和 1D EQL 法 (SHAKE 软件) 模拟总结的软土地表  $PGA_H$  与出露基岩  $PGA_H$  或基岩输入  $PBA_H$  的关系, 并对比了 1985 年 Michoacán 地震期间墨西哥城的地震记录 (详述见下文)。结果表明, 场地放大效应是非线性的: 当  $PBA_H$  低于 0.4g 时, 软土地表地震动被放大; 超过该阈值后, 土的非线性导致地表地震动减弱<sup>[76]</sup>。在旧金山湾区中部沿岸的软土地, 地表  $PGA_H$  相对适中强度的出露基岩  $PGA_H$  (0.06g~0.12g) 被放大 2~3 倍, 余震记录则被放大 4~8 倍。

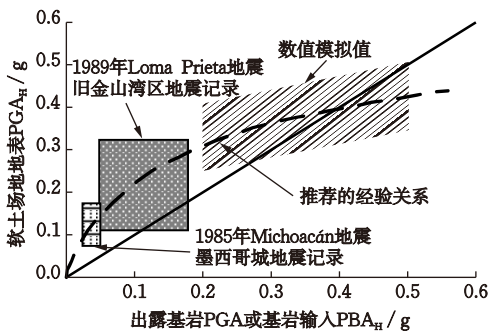


图 2 出露基岩和软土地表记录及计算的  $PGA_H$  比较<sup>[52]</sup>  
Fig.2 Correlation between the  $PGA_H$  values of outcropping rock and surface recorded and computed at soft site<sup>[52]</sup>

据 R. Dobry 等<sup>[76]</sup> 绘制的旧金山和奥克兰地区的地表水平向加速度反应谱 (Horizontal spectral acceleration,  $SA_H$ ) 平均曲线 (图 3), 尽管出露基岩的  $PGA_H$  约为 0.08g 或 0.1g, 但软土地表  $SA_H$  在短周期 (0.2~0.3 s) 段放大了 2~3 倍, 而在中长周期 (0.5~2 s) 段平均放大 3~6 倍。地表  $SA_H$  在中长周期段的大幅放大是由于场地基本周期 ( $T_g \approx 1.4$  s) 与  $T_p$  相近所致。图 3 中, 在周期  $T=1.4$  s 处的地表

$SA_H$  相对基岩放大 3.5 倍。H. B. Seed<sup>[52]</sup> 从局部场地效应角度解释了这一现象。

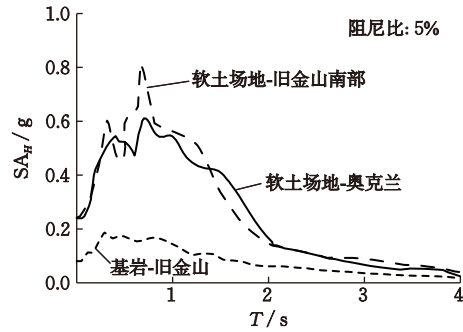


图 3 1989 年 Loma Prieta 地震期间旧金山软土和岩石记录的水平向地表谱加速度平均曲线<sup>[76]</sup>

Fig.3 Average spectral accelerations (horizontal component) recorded at soft soil sites and rock sites in San Francisco during the 1989 Loma Prieta earthquake<sup>[76]</sup>

## 1.2 墨西哥城盆地场地效应

20 世纪发生在中美洲海沟最重要的五次俯冲地震为: 1911 年  $M_w$  7.6 地震, 其破裂区约为 1985 年 Michoacán  $M_w$  8.1 地震的 60%, 1957 年  $M_w$  7.8 地震, 1979 年  $M_w$  7.4 地震, 其破裂区主要位于 1985 年  $M_w$  7.6 余震的破裂区; 1981 年  $M_w$  7.3 地震<sup>[77-78]</sup>。图 4 展示了 1950~1986 年期间  $M_w$  7 及以上的中美洲海沟地震余震区域<sup>[77]</sup>。其中, 大★、较小★和小☆分别表示 1985 年  $M_w$  8.1 地震及其  $M_w$  7.6 和  $M_w$  6.9 余震震中, ▲为震后 1 个月内的余震震中, m1 和 m2 指震后 1、2 个月内余震区域; 虚线区域为 1932 年  $M_w$  8.1 地震的余震区域; ○代表断层上滑动带位置。这些

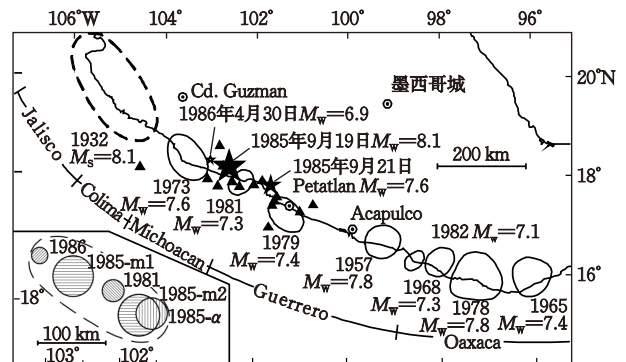


图 4 中墨西哥地区的地图: 1950~1986 年期间中美洲海沟  $M_w$  7 及以上地震余震区域 (用椭圆表示)<sup>[77]</sup>

Fig.4 Map of central Mexico showing the aftershock areas (ellipses) of the Middle America Trench earthquakes from 1950 to 1986 with  $M_w \geq 7$ <sup>[77]</sup>

地震造成距俯冲带约 300 km 的墨西哥城不同程度的破坏。相比之下,1985 年地震所造成的破坏最为严重。尽管 1957 年和 1979 年的两次地震可以被视为一种警示,因为墨西哥城的一些建筑物出现了明显的坍塌,但缺乏可靠的地震历史数据导致人们低估了地震的危险性,从而无法预见到 1985 年地震的影响。墨西哥城盆地是一个封闭的水系流域,在 NNE-SSW 向超过 100 km,横向平均宽度约 30 km<sup>[79]</sup>。墨西哥城坐落于前 Texcoco 湖的边缘,其地质特征独具特色<sup>[78]</sup>。

由于气候变化和火山活动的影响,墨西哥城盆地由火山岩和湖相沉积物构成,其古湖区由 Zumpango 湖、Xaltocan 湖、Texcoco 湖、Xochimilco 湖和 Chalco 湖等古湖泊盆地构成<sup>[78-79]</sup>。Texcoco 湖向北延伸约 35 km,被横跨城市南部的山脊与 Xochimilco-Chalco 湖分隔。如今,两个湖床基本上都沉积满了黏土,Xochimilco-Chalco 湖的黏土比 Texcoco 的黏土稍硬、强度稍高<sup>[14]</sup>。墨西哥城独特的地质环境有利于地震波传播经过前 Texcoco 湖区时的放大并改变地震波特性<sup>[25, 80-81]</sup>。由于墨西哥城盆地特有的地质条件,其地震风险与场地效应有着密切的关联。R. J. Marsal 和 M. Mazari<sup>[82]</sup>将墨西哥城划分为图 5 所示的三个区域:丘陵区(岩石和硬土场地)、过渡区和古湖区(盆地中心区域)。图中的红点表示地震台站,而黄色三角形表示记录了 1985 年地震记录的地震台站。墨西哥城市中心、机场南部、Texcoco 湖和 Xochimilco-Chalco 湖的古湖泊区是沉积土最深厚的四个区域<sup>[79]</sup>。

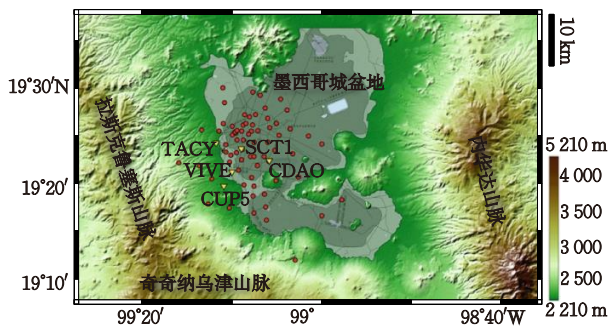


图 5 墨西哥盆地地形图(山谷、古湖区、过渡区分别用深灰色阴影、浅灰色表和绿色表示)<sup>[78]</sup>

Fig.5 Topography of Mexico City and its basin (The lake bed zone (dark gray), transition zone (light gray), and hill zone (green) are shown within the basin)<sup>[78]</sup>

墨西哥城古湖区主要富含蒙脱石,但也含有有机物质和火山灰的湖相黏土,并夹有粉土和粉砂夹

层。图 6 展示了墨西哥城 EW 向地层剖面<sup>[83]</sup>。沉积土厚度从过渡区 0~15 m 到古湖区 20~100 多 m。黏土含水量高达 200%~600%,塑性指数  $I_p=200\sim300$ ,压缩指数  $C_c\approx 2.6$ ,不排水抗剪强度  $S_u\approx 50$  kPa,黏土层  $V_s\approx 30\sim 90$  m/s,其下层硬土  $V_s\approx 500$  m/s 或更高,浅层 30 m 土的  $V_{s30}$  介于 60~70 m/s<sup>[14, 24, 80]</sup>。因此,软硬土界面处  $V_s$  变化显著。在循环剪应变幅值 ( $\gamma_a$ ) 高达 0.1% 时,高  $I_p$  值黏土仍显示出几乎线性的剪应力-应变关系,其  $G/G_0$  未出现显著下降 ( $\approx 0.90$ ); 同样,在  $\gamma_a$  达到约 0.3% 之前,其  $\lambda$  维持在 2%~3%,未出现显著增加<sup>[10, 14, 80, 84-88]</sup>。因此,墨西哥城湖相黏土的地震反应几乎是线弹性的,这导致了地震波放大效应的极大提升。

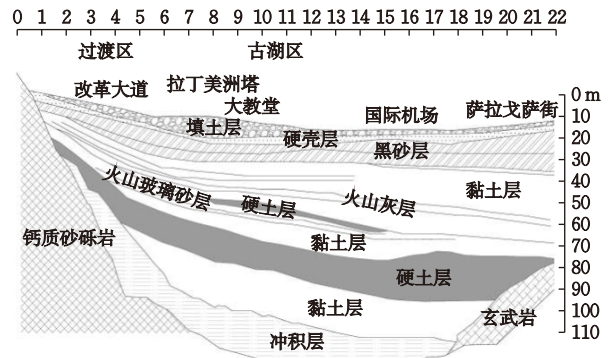


图 6 墨西哥城东西向地层剖面<sup>[83]</sup>

Fig.6 East-West stratigraphic cross-section of Mexico City<sup>[83]</sup>

由于地震波的传播路径及墨西哥盆地的速度结构控制了 1985 年远源大地震长周期地震动的破坏性特征<sup>[89]</sup>,2004 年版《墨西哥城抗震设计规范》据此将墨西哥城划分为六个不同的场地地震效应分区<sup>[10]</sup>:岩石和硬土区 I ( $T_g < 0.5$  s);过渡区 II ( $T_g = 0.5\sim 1.0$  s);古湖泊区 III a ( $T_g = 1.0\sim 1.5$  s), III b ( $T_g = 1.5\sim 2.5$  s), III c ( $T_g = 2.5\sim 3.5$  s) 和 III d ( $T_g = 3.5\sim 5.0$  s)。图 7 展示了 2017 版《墨西哥城抗震设计规范》中的场地地震效应分区图<sup>[88, 90]</sup>。II 区沉积物由砂、砂质粉土夹湖相黏土组成,覆盖层厚度小于 20 m,  $V_s$  低于 100 m/s。III 区沉积物为高压缩性湖相黏土,其间夹有不同粉土或黏土含量的砂。

1985 年 9 月 19 日和 21 日,墨西哥 Michoacán 沿岸海域相继发生  $M_w 8.1$  主震及  $M_w 7.6$  余震。此次地震首次在全球范围内凸显了远源长周期地震动的显著影响:周期 2~4 s 的地震波在墨西哥城古湖盆沉积层中被显著放大并持时延长,同时伴随非线性场地效应<sup>[91]</sup>,导致该城不同区域建筑损毁程度差异

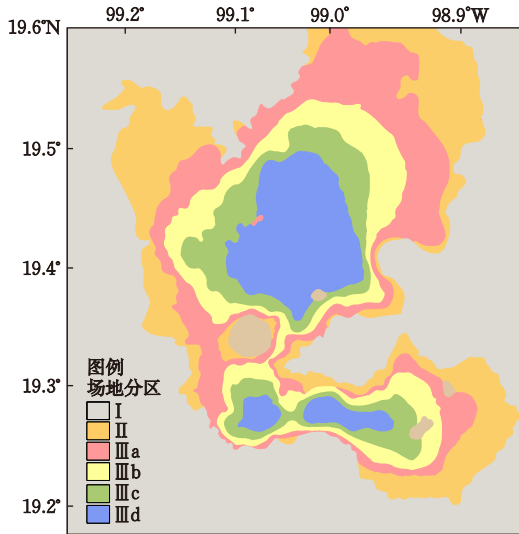


图7 墨西哥城场地地震效应分区图(作者重绘)<sup>[88, 90]</sup>

Fig.7 Seismic microzonation maps of Mexico City for local site effect (Revised)<sup>[88, 90]</sup>

巨大:西北部遭受灾难性破坏,而西南部震害相对

较轻(图8)。这一差异主要归因于盆地内不同区域的场地放大效应。古湖区强震记录显示持时极长(约5 min)且长周期振荡突出<sup>[92]</sup>,反映了盆地地形对地震波放大与持时延长的主导作用。2017年9月19日(1985年地震32周年纪念日)的Puebla  $M_w$ 7.1地震再次印证了这一模式,但破坏最严重的建筑从1985年地震中6~20层的建筑变为5~8层的建筑,体现了土层条件、地震动特性与结构特性共同作用的结果。

研究证实,墨西哥城古湖区记录到的大幅值、长持时地震动源于震源、传播路径与盆地场地效应的共同贡献<sup>[15, 78, 85]</sup>,其中俯冲带大地震通过地震波传播的路径效应能在远距离大型深厚沉积盆地中激发长周期面波<sup>[93]</sup>。该案例引发长达四十年的持续研究<sup>[10, 14, 78, 80-81, 92, 94]</sup>,成为远场大震引发城市场地效应最引人注目的实例。

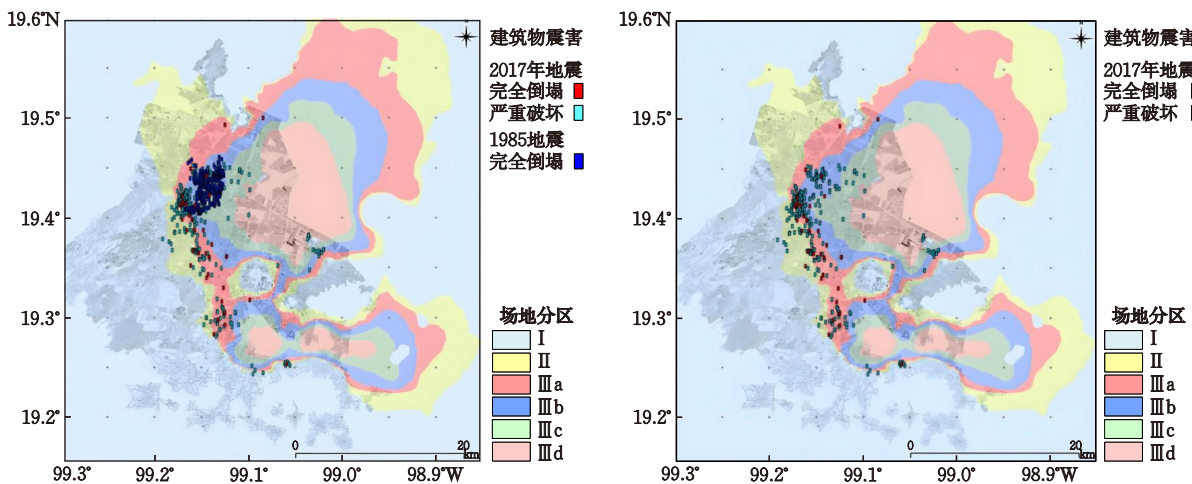


图8 1985年和2017年地震期间墨西哥城严重破坏或倒塌的建筑物<sup>[10]</sup>

Fig. 8 Collapsed or severe damage buildings in Mexico City during the 1985 and the 2017 Puebla earthquakes<sup>[10]</sup>

### 1.2.1 1985年墨西哥 Michoacán 地震的场地效应

1985年  $M_w$ 8.1地震是墨西哥有史以来规模最大、破坏性最强的地震之一。此次地震影响深远,凸显了现代城市在面对远场大地震时的脆弱性,并首次揭示了远源长周期地震动的巨大威胁<sup>[91]</sup>。关于此次地震距离墨西哥城的震中距、人员伤亡及经济损失,不同文献存在较大差异。J. G. Anderson等<sup>[92]</sup>报道,距震中约350 km的墨西哥城,有300至3300座建筑物被摧毁或严重损坏,导致约8千人死亡或失踪、3万人受伤、5万人无家可归,经济损失达40亿美元。J. L. Beck和J. F. Hall<sup>[91]</sup>估计死亡人数可

能高达2万,约30万人失去住所,800至1000座建筑已拆除或待拆除,其中超过300栋按现代抗震规范设计的高层建筑倒塌或严重受损,6至15层建筑中约20%遭受重创,总损失约50亿美元。M. R. Degg<sup>[95]</sup>指出,尽管墨西哥城距震中约370 km,  $M_s$ 8.1主震及  $M_s$ 7.6余震仍导致至少1万人死亡、5万人受伤、25万户家庭无家可归,经济损失约40亿美元,其中保险损失达2.75亿美元<sup>①</sup>,成为保险史上最严重的灾难之一。M. R. Degg还引述慕尼黑再保险公司(1986)的数据称,墨西哥城共有7400座建筑受损,其中770座完全损毁,1665座严重受损。

①数据转引自慕尼黑再保险公司,1986

W. W. Hays<sup>[96]</sup>研究表明,尽管震中距 $R_{epi}$ 约400 km,出露基岩记录的 $PGA_H$ 仅约0.03g,但由古湖床场地放大效应,地表地震动被放大5倍以上,达到0.18g, $T_p$ 约为2 s。场地放大、土-结构共振及土壤液化效应共同导致古湖床及邻近区域5 728栋建筑倒塌,引发约350处火灾,造成约1万至4万人死亡、2.5万人受伤、25万人无家可归,经济损失不低于50亿美元。据R. R. Castro等<sup>[97]</sup>引用的官方数据,地震导致1万人死亡,损失超40亿美元。A. Arciniega-Ceballos等<sup>[78]</sup>指出,距震中约400 km的墨西哥城MMI达IX度,超过6 000座建筑被毁或严重受损,约1万至3.5万人失踪或死亡,数万人受伤或无家可归,经济损失超过墨西哥当年GDP的2%。

S. Nikolaou等<sup>[24]</sup>强调,尽管震中远离城市中心约400 km,地震波、沉积土与建筑物的双重共振仍导致超过3.9万人死亡、近1万栋建筑倒塌。D. Asimaki等<sup>[98]</sup>称震中位于墨西哥城西南350 km处,地震造成1万人死亡,经济损失数十亿美元。这些不确定性反映了当时远场大震巨灾评估面临的科学挑战与社会困境。

图9展示了该地震中9个台站记录的加速度时程。这些地震动图清晰地描绘了古湖区地震动相对丘陵区的显著放大和持续时间延长,以及墨西哥城地震动场的空间变化特征;古湖区部分台站还观察到了场地反应的非线性现象<sup>[79,99]</sup>。

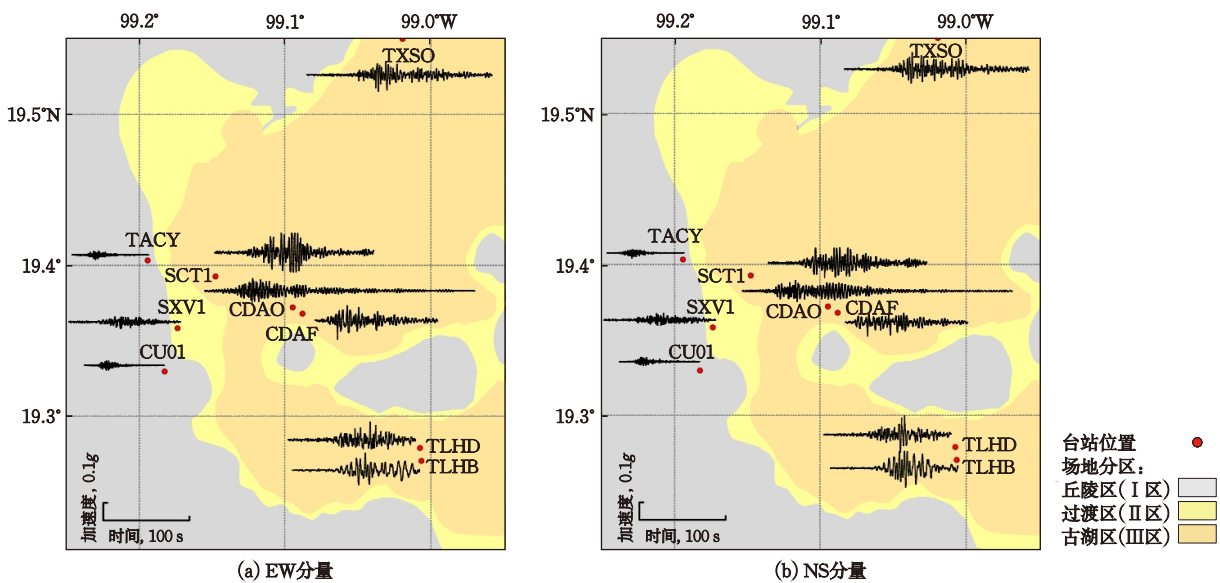


图9 1985年地震期间墨西哥城9个强震台站记录的加速度时程示意图(数据:RAII-UNAM)

Fig.9 Map showing the recorded seismograms at 9 seismic stations in Mexico City during 1985 earthquake (source: RAII-UNAM)

图10展示了1985年地震期间RAII-UNAM强震台网11个有效台站记录的三分量地表PGA(圆括号中数字分别代表EW、NS和UD分量的PGA,cm/s<sup>2</sup>),以及相对基岩台站TACY的地表PGA放大倍数。因当时墨西哥城强震台站数量有限,可能有更大的地表PGA未被记录。文献中墨西哥城及其周边的强震台站记录(因台网扩展与更新,有的台站名称曾更名,有的台站曾在原址邻近重建,故有的台站在不同文献中的名称不一)包括:

丘陵区(I区)4个硬土台站: Tacubaya处1个台站TACY(或T);墨西哥国立自治大学城(Ciudad Universitaria, Universidad Nacional Autonoma de Mexico)<sup>[100]</sup>邻近的3个玄武岩台站: CU(或

CU01, CU05)、CUMV(或CUP5, CUP)和UNAM(或CUIP)(文献中提及的CUMV于1985年10月、CUIP于1986年10月停用)<sup>[10, 15, 78, 80-81, 85, 92]</sup>。

过渡区(II区)Viveros处1个软土台站:不同文献中记为V、SXVI、VIV或VIVE<sup>[15, 78, 85, 92]</sup>。

古湖区(III区)7个台站:城市中心台站SCT(后更名为SCT1, SCT2)位于严重破坏区南缘的黏土场地(III b区),坚硬土埋深约37 m;相距约0.5 km的台站CAF(或CDAF、CDA)和CAO(或CDAO)位于中央市场区(III c区),CAF处黏土深约45 m, CAO处约56 m;相距约3 km的台站TLHD(或TLD)和TLHB(或TLB)位于前Xochimilco-Chalco湖区(III b区),TLHD处黏土深约65 m, TLHB处达

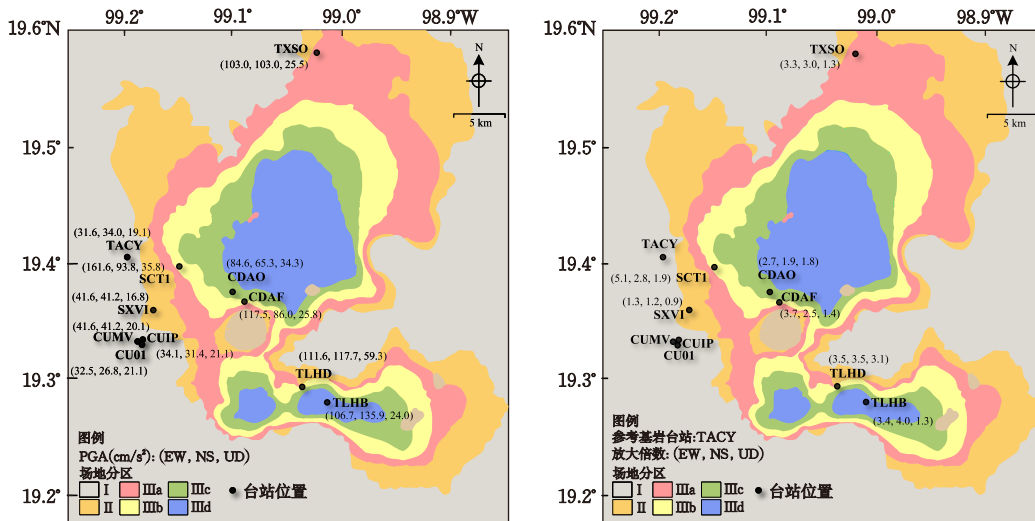


图10 1985年地震期间墨西哥城地表峰值加速度(左)及相对基岩台站 TACY的放大倍数(右)(数据:RAII-UNAM)  
 Fig.10 Locations of 11 seismic stations, recorded surface PGAs (left) and their amplifications relative to the reference rock station TACY (right) in Mexico City during the 1985 earthquake (source: RAII-UNAM)

105 m;台站 TXC(或 TXSO)和 TXL(或 TXLC)分别位于城北和城东的前 Texcoco 湖区(Ⅲ a区),场地信息不详。1985年地震期间,局部场地效应造成了广泛破坏。考虑到墨西哥城距震中很远(>450 km),通常预期地震波会显著衰减而不造成严重破坏,因此该城的破坏程度出乎意料。震后调查显示,建筑损毁程度及分布区域存在显著差异,大多数倒塌发生在最软的古湖床沉积物区(Ⅲ b/Ⅲ c区,  $T_p$ 约 2 s)(图8(左))。这表明场地效应在确定墨西哥城内建筑的受损区域方面必定发挥了重要作用。

从图10可知,过渡区地表  $PGA_H$ 仅放大 1.2~1.3倍,而古湖区5个台站EW分量地表  $PGA_H$ 放大 2.7~5.1倍,NS分量地表  $PGA_H$ 则放大 1.9~4.0倍,其中,SCT场地放大最强烈,CDAO场地放大最弱。因此,古湖区场地放大效应极为强烈,且地表地震动的强度随墨西哥城空间位置的变化极为显著。

S. K. Singh等<sup>[85]</sup>的研究表明,相对丘陵区 CUIP记录的傅里叶幅值谱,过渡区 SXVI记录NS和EW分量的2 Hz谐波放大了4倍,而古湖区记录的0.2~0.7 Hz分量放大了8~50倍。图11展示了1985年地震期间墨西哥城9个有效台站记录的地表  $SA_H$ 曲线,并与1976年版(1985年有效)墨西哥城设计反应谱<sup>[101]</sup>进行了比较。图12显示了古湖区地表记录  $SA_H$ 相对丘陵区的放大倍数。可以看出:

丘陵区大学城和 Tacubaya处地震动(视为出露基岩地震动)特征相似,地表  $PGA_H$ 小于 0.04g,地表  $SA_H$ 曲线呈宽频带特征,峰值  $SA_H$ 约 0.11g~0.13g,

明显低于设计反应谱平台值  $DSA_{FP}$ (0.16g)。

过渡区地震动强度低、频带宽,地表  $PGA_H$ 小于 0.045g,地表  $SA_H$ 曲线呈双峰特征,卓越频带对应的周期 0.4~1.0 s,峰值  $SA_H$ 稍超过 0.15g,也明显低于  $DSA_{FP}$ (0.20g)。

古湖区软黏土层对地震动放大显著。该区域6个台站的地表  $PGA_H$ 均明显超过  $DSA_{FP}$ (0.24g)。位于城市中心区的 SCT台站记录显示,其EW分量地表  $PGA_H$ 约为 0.17g,  $SA_H$ 呈单峰型,  $T_p \approx 2$  s。EW分量峰值  $SA_H$ 约为 1.0g(约为  $DSA_{FP}$ 的 4.2倍),NS分量峰值  $SA_H$ 约为 0.60g(约为  $DSA_{FP}$ 的 2.5倍)。与丘陵区参考台站 TACY的记录相比,SCT台站在周期  $T \approx 2$  s处EW分量  $SA_H$ 放大超过 20倍,NS分量放大超过 17倍;与CU台站记录相比,EW分量  $SA_H$ 放大超过 10倍,NS分量放大超过 7倍。该结果清晰揭示了 2 s周期分量在土层中传播时发生强烈共振现象,使得 SCT记录(该建筑上部楼层在地震中倒塌)成为表征湖床场地地震动放大与双重共振的标志性案例。

古湖区中央市场区的地震动强度相对较低、频带较宽,与城市中心区的地震动特性特征明显不同。CDAF台站EW分量地表  $PGA_H$ 约为 0.095g,峰值  $SA_H$ 约 0.45g( $DSA_{FP}$ 的 1.9倍),  $T_p \approx 3$  s;CDAO台站EW分量  $PGA_H$ 约为 0.08g,峰值  $SA_H$ 约 0.45g,  $T_p$ 约为 3.5 s。相对于丘陵区CU和TACY记录,CDAO台站在 3~5 s周期范围的放大效应最为显著,其峰值放大倍数与SCT记录相当。但由于输入

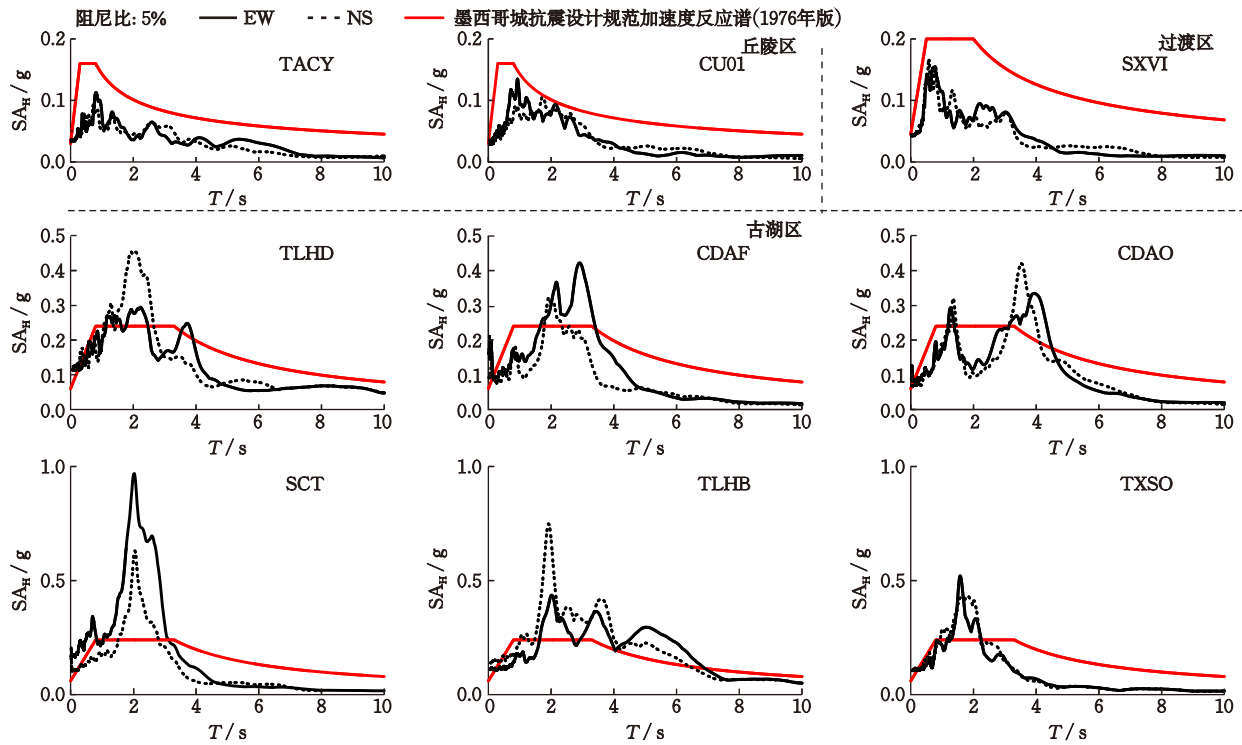


图 11 1985 年地震期间墨西哥城强震记录的水平向谱加速度与 1976 年版抗震设计反应谱的比较 (数据:RAII-UNAM)  
 Fig.11 Recorded spectral accelerations recorded during the 1985 earthquake vs the seismic design spectra in the 1976 Mexico's code (source: RAII-UNAM)

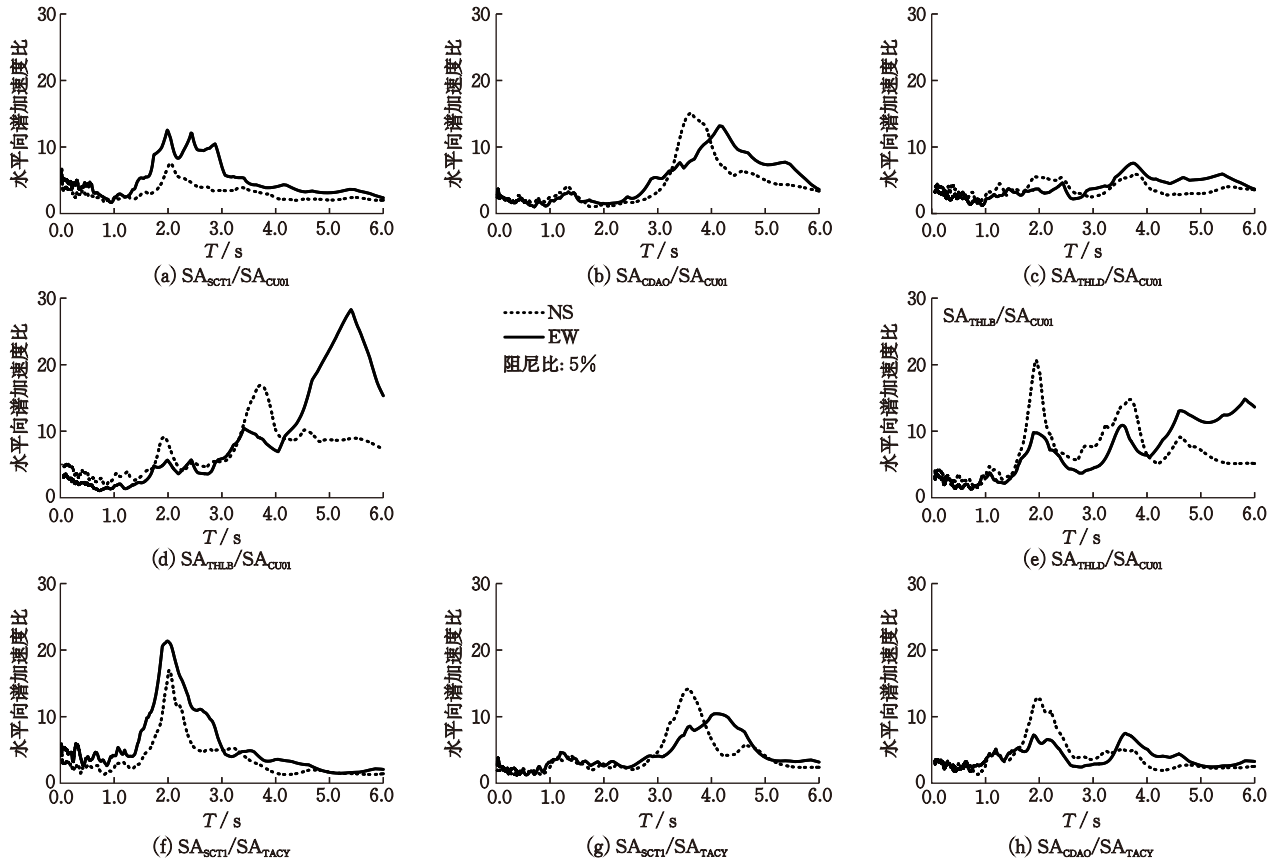


图 12 1985 年地震期间 SCT、CAO、TLHD 和 TLHB 记录的谱加速度相对 CU 或 TACY 记录的放大比 (数据:RAII-UNAM)  
 Fig.12 Spectral acceleration amplification ratios recorded at strong-motion stations SCT, CAO, TLHD, and TLHB relative to the reference rock station CU (or TACY) during the 1985 earthquake (source: RAII-UNAM)

(丘陵区)地震动在该周期段能量较弱(与2 s谐波分量很丰富形成对比), $SA_H$ 值仅为0.30g~0.45g。

古湖区前 Xochimilco-Chalco 湖区台站 TLHB 和 TLHD 显示出明显的场地效应。TLHB 台站 NS 分量地表  $PGA_H$  约 0.14g, 峰值  $SA_H$  约 0.75g ( $DSA_{FP}$  的 3 倍),  $T_p \approx 1.8$  s; TLHD 台站 NS 分量地表  $PGA_H$  约 0.12g, 峰值  $SA_H$  约 0.45g ( $DSA_{FP}$  的 1.9 倍),  $T_p$  约 1.3 s。两台站 EW 分量  $SA_H$  曲线呈现双峰宽频特征, 峰值分别为 0.43g 与 0.30g,  $T_p \approx 2$  s。TLHD 记录 EW 与 NS 两分量相对于丘陵区地震动的场地放大相似, 主/次峰值周期介于 2~3.5 s 较宽范围; 而 TLHB 记录两分量的场地放大差异显著, 其不甚明显的卓越频带对应周期约 3~5 s。该差异可能与 TLHB 台站处于山丘间谷地有关, 导致 EW 向(SH 波为主)与 NS 向(SV 波为主)波的传播形式不同, 反映了 2D 波传播现象对地震动的影响<sup>[102]</sup>。

在 1985 年地震中, 城市周边和低矮建筑的损坏几乎为零; 建筑物的严重破坏集中于古湖区西北部城市中心区(Ⅲb 和 Ⅲc 区: 台站 SCT 所在区域),  $T_g$  介于 2.0 s 与 3.0 s (图 7)。破坏最严重区域黏土层厚 20~50 m, 五层以下及 30 层以上建筑损害较轻, 而 5~20 层建筑大多倒塌或严重损坏<sup>[10, 24, 96, 103]</sup>。由于墨西哥城的建筑结构刚度较低、地基土压缩性高, 填充墙在地震初期开裂后刚度降低, 结构进入塑性后周期延长。估计破坏率最高建筑的“有效周期”介于 1.5~2.5 s<sup>[24, 99]</sup>。总体而言, 古湖区沉积物放大了周期 2~4 s 的地震动分量, 并延长了地震动持时(图 9)。严重破坏区的  $T_g$ 、 $T_p$  与建筑结构基本自振周期( $T_s$ )接近, 表明该区域的严重破坏是由远源地震动、湖床沉积物与  $T_s = 2\sim 3.5$  s 的建筑物双重共振效应所致。距中央市场区台站 CDAF 不足几公里范围内没有 7 层以上建筑物, 且周期低于 1.5 s 的  $SA_H$  并未超过抗震规范设计反应谱, 这合理解释了该区域在 1985 年地震中未出现显著破坏的原因。因此, 地表  $PGA_H$  水平并非造成墨西哥城的严重破坏及其空间分布差异显著的最主要原因。

### 1.2.2 2017 年墨西哥 Puebla 地震的场地效应

2017 年, 墨西哥发生 Puebla  $M_w$  7.1 地震(板内正断层), 震中位于 Puebla 以南 55 km、墨西哥城以东南 120 km 处<sup>[98, 104]</sup>。这次地震为验证或修正 1985 年地震后获取的经验性结论提供了新的数据。

此次地震导致墨西哥城 228 人死亡, 77 座建筑

物部分或完全倒塌, 约 8 000 栋建筑物遭受不同程度的损坏<sup>[105]</sup>。根据 Y. Alberto 等<sup>[83]</sup>引用的官方数据, 该城共有 2 273 座房屋整体损毁, 3 492 栋部分损坏。与 1985 年地震类似, 大部分倒塌和严重破坏的建筑位于城市西部和西南部一个狭长环形区域(约 7 km×20 km), 相应的  $T_g$  介于 0.8~1.5 s, 遍布从丘陵区到古湖区的三个场地效应分区: Ⅱ区、Ⅲa 区和 Ⅲb 区(图 8(右))。依据 CICM<sup>[106]</sup>数据, 该市有 38 栋建筑完全倒塌, 数百栋遭受了严重的非结构性和结构性损坏。在这些倒塌建筑中, 位于过渡区 Ⅱ区( $T_g$  约 1 s)西部和西南部的 9 栋, 位于古湖区 Ⅲa 区和 Ⅲb 区( $T_g$  约 2 s)的各为 15 栋和 12 栋。场地效应对盆地内建筑的震害分布起到关键作用: 损毁建筑主要发生在 5~8 层高的柔性建筑。尽管 Ⅱ、Ⅲa 和 Ⅲb 区集中了 85% 的严重损坏建筑和 95% 的倒塌建筑, 但这些建筑中约 90% 建于 1985 年前、57% 具有楼层软弱层、43% 位于街区转角处、10% 表现出与邻近建筑碰撞现象, 许多建筑具有不规则性特征, 其抗震设防的  $SA_H$  值比 1985 年后的抗震规范设计反应谱的  $SA_H$  值低 40%, 也有许多老旧建筑在 1985 年地震后未做充分检测与加固, 导致许多建筑的延性不足<sup>[10, 25, 98, 107]</sup>。因此, 场地效应与建筑物损伤的因果关系受建筑物震前服役状态的不可控因素影响而存在偏差。多栋建筑的严重破坏反映了共振效应: 地震动能量集中在周期 0.15~1.0 s 的分量, 并与 Ⅲa 区的场地基本周期( $T_g = 1.0\sim 1.5$  s)比较接近, 这对  $T_s$  约为 0.8~1.6 s 的 5 至 8 层建筑造成了显著影响<sup>[10]</sup>。图 8(左)展示了墨西哥城中心区在 1985 年和 2017 年两次地震中倒塌建筑的对比情况。

自 1985 年 Michoacán 地震后, 墨西哥城强震台网经历了大规模扩展及更新。2017 年 Puebla 地震期间, 墨西哥地震台网 RAI-UNAM 和 CIRES. A. C. 中的大量台站获得了这次地震的强震记录。Y. Alberto 等<sup>[83]</sup>提到(台站名称未知)丘陵区 NS 和 EW 分量的  $PGA_H$  分别为 0.076g 和 0.081g (高于 1985 地震记录  $PGA_H$  的 2 倍), 过渡区 NS 和 EW 分量的  $PGA_H$  分别为 0.072g 和 0.085g (约为 1985 地震记录  $PGA_H$  的 1.6~1.9 倍)。这比 1985 地震 SCT 记录的  $PGA_H$  高约 30%。F. A. Galvis 等<sup>[107]</sup>则提到位于古湖区南部的 Culhuacan 软土台站记录的  $PGA_H \approx 0.23$ g。这比 1985 地震 SCT 记录  $PGA_H$  高约 30%。图 13 展示了墨西哥城 39 个台站记录 EW 和 NS 分

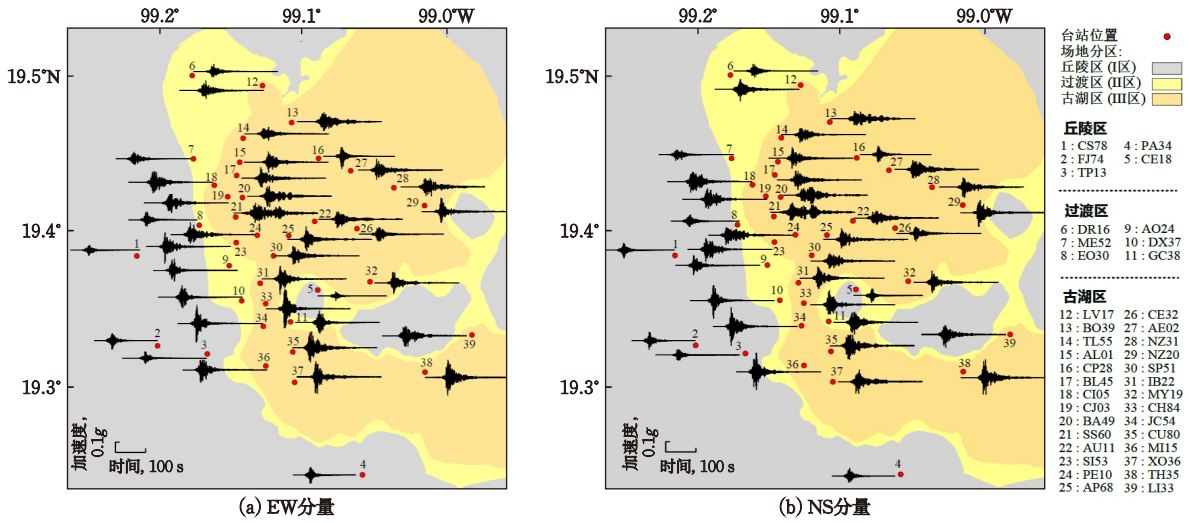


图 13 2017年地震时墨西哥城39个台站记录的EW和NS分量加速度时程(来源:CIRES. A. C.)

Fig.13 Seismograms (EW and NS components) recorded at 39 strong-motion stations in Mexico City during the 2017 earthquake (source: CIRES. A. C.)

量加速度时程。可以发现:加速度时程的幅值和持时强烈依赖于场地条件;靠近山边可能因盆地边缘效应而增大地震动幅值。P. Heresi等<sup>[108]</sup>指出,在墨西哥城盆地边缘产生的瑞利面波引起的盆地边缘效应,可以解释离盆地边缘垂直距离最近的地震台

站记录的地表PGA<sub>H</sub>放大最为显著的现象。

图 14 展示了 2017 年地震期间布设在墨西哥城的 33 个强震台站的地理位置及记录的地表 PGA (圆括号中数字分别代表 EW、NS 和 UD 分量的 PGA, cm/s<sup>2</sup>)。图 15 展示了该地震时墨西哥城 32

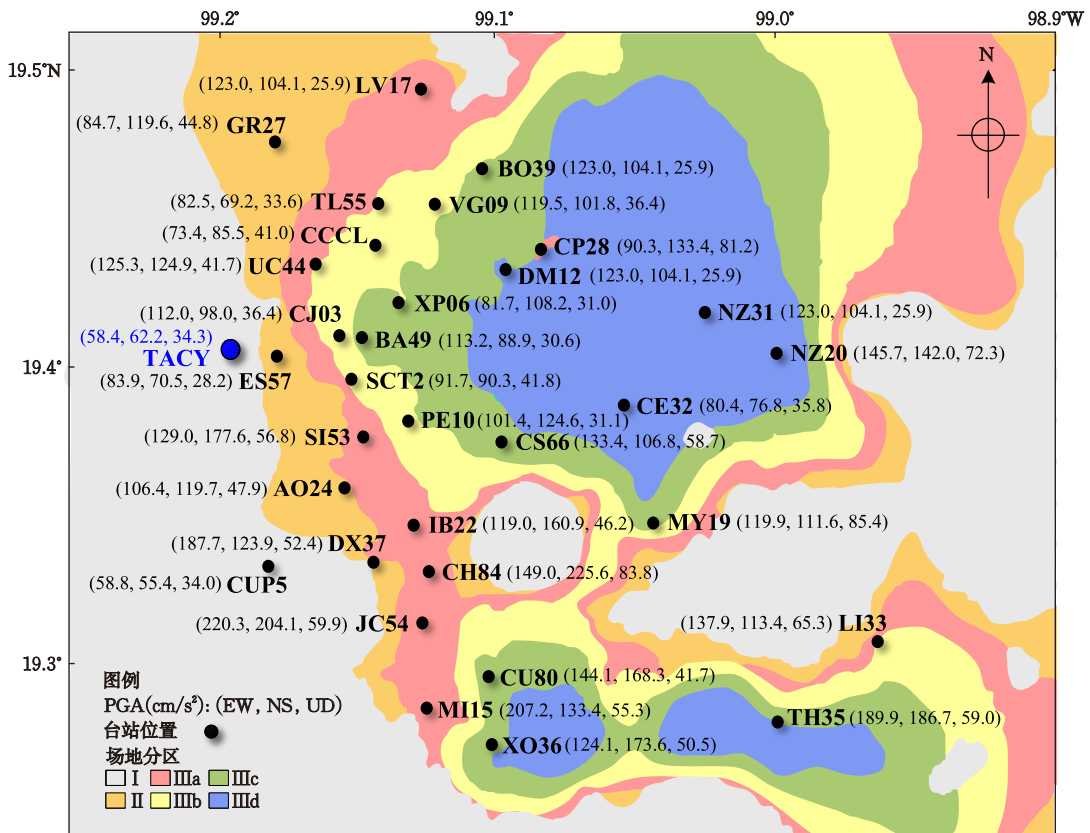


图 14 2017年地震期间墨西哥城33个地震台站的位置及记录的PGA(来源:RAII-UNAM和CIRES. A. C.)

Fig.14 Locations of 33 seismic stations and recorded PGAs in Mexico City during the 2017 earthquake ( sources: RAI-UNAM and CIRES. A. C.)

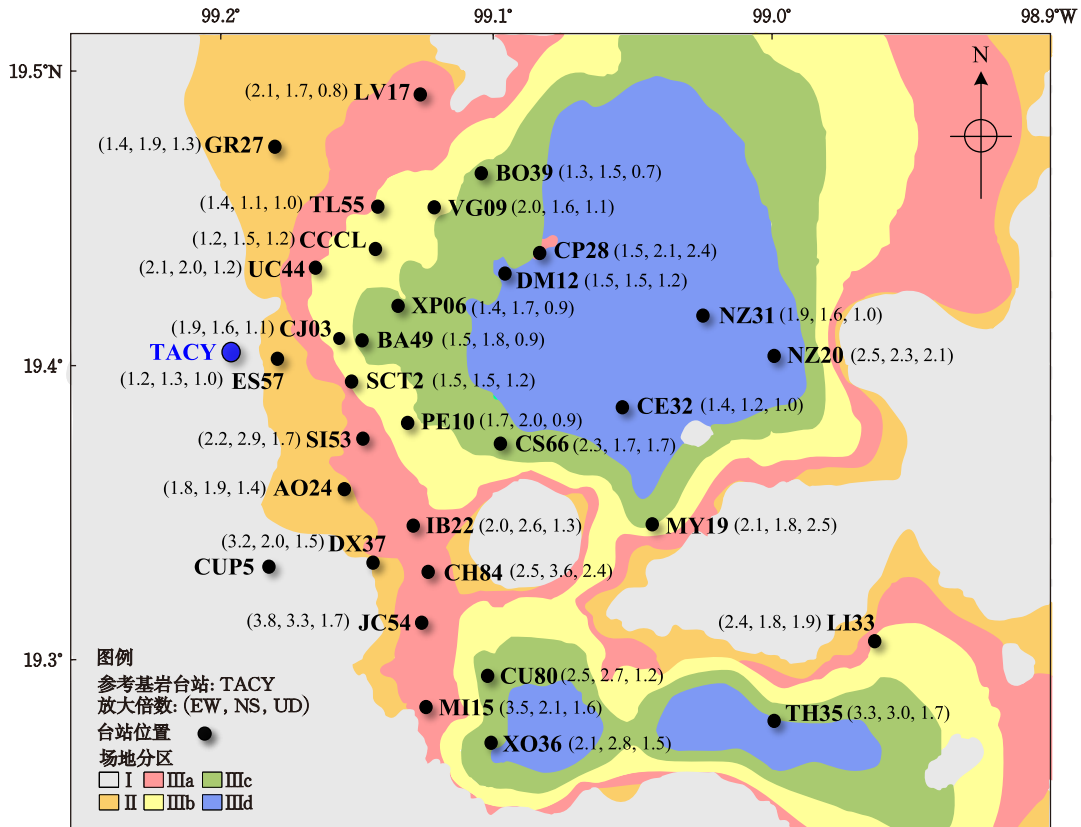


图15 2017年地震期间墨西哥城32个台站记录的PGA相对台站TACY的放大比(来源:RAII-UNAM和CIRES. A. C.)  
 Fig.15 Amplification ratios of PGAs recorded at 32 seismic stations (relative to reference station TACY) in Mexico City during the 2017 earthquake (sources: RAII-UNAM and CIRES. A. C.)

个台站记录的地表PGA相对基岩台站TACY的放大倍数。图16展示了该地震时不同区域台阵地表记录的 $SA_H$ 曲线。基于这些记录可得出以下结论:(1)2017年地震丘陵区地震动的 $PGA_H$ 几乎高达1985年地震的2倍;(2)不同场地效应分区的地表 $PGA_H$ 、 $SA_H$ 曲线及地震动持时的差异显著;(3)古湖区各台站记录的峰值 $SA_H$ 所对应的卓越周期 $T_p$ 值取决于台站下方土层条件及输入地震动的频率成分;(4)靠近山丘的区域因盆地效应表现出更高的地表 $SA_H$ 值。此外,震级与震源距的耦合效应导致0.7~2.0 s周期区间的地表 $SA_H$ 明显增大,进而使得结构基本周期( $T_s$ )处在该区间内的建筑承受更为强烈的地震作用。

尽管2017年地震的震级比1985年地震小1级,但由于其震中距 $R_{epi}$ 不及1985年地震的一半,在古湖区自台站SI53往南沿台站IB22→DX37→CH84→JC54→CU80→MI15→XO36至TH35的范围内,所记录的地表 $PGA_H$ 相对丘陵区的放大极为显著,高达2.6~3.8倍,且均高于1985年地震在台站SCT所记录的 $PGA_H$ 。尤其是CH84记录NS分量的 $PGA_H$

高达0.230g,JC54记录EW分量的 $PGA_H$ 高达0.225g,相对丘陵区台站TACY记录相应分量的 $PGA_H$ 分别放大约3.6倍和3.8倍,是1985年地震时台站SCT记录 $PGA_H$ 的约1.4倍。即使位于古湖区中部、距丘陵区较远的台站TH35和NZ20,其记录的 $PGA_H$ 也分别高达0.194g和0.149g,相对丘陵区仍放大了2.5~3.3倍。然而,在2017年地震中,自古湖区的PE10往北沿台站PE10→SCT2→BA49→CJ04→UC44→CCCL→TL55至LV17一带,记录的 $PGA_H$ 却呈现出截然不同的放大特征,仅比丘陵区放大1.4~2.1倍,显著低于1985年地震中台站SCT记录到的 $PGA_H$ 。S. K. Singh等<sup>[109]</sup>曾指出,板内地震可能产生比震级相近的俯冲带地震更高的 $PGA_H$ 。通过比较1985年Michoacán俯冲带地震和2017年Puebla板内地震的强震记录,这一观点得到证实:两类地震在墨西哥盆地上所引发的场地反应存在明显差异。这一结果支持了M. Campillo等<sup>[15]</sup>的推测:由于黏土沉积层的 $V_s$ 极低,材料特性的横向变化可能导致很近距离内地震动特性的显著变异。

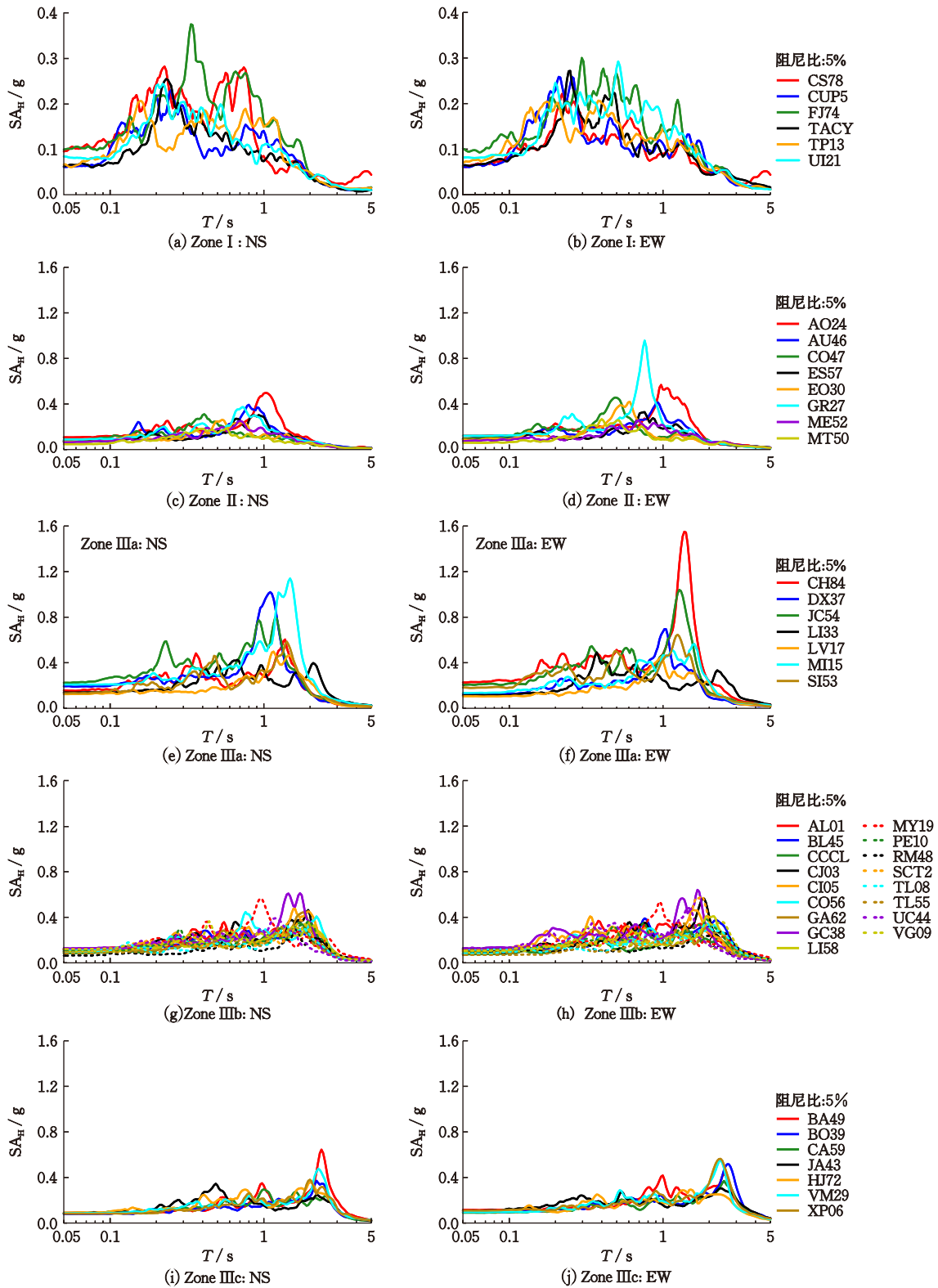


图 16 2017 年地震时墨西哥城地震 45 个台站记录水平向谱加速度 (作者重绘)<sup>[10]</sup> (来源:RAII-UNAM 和 CIRES. A. C.)  
 Fig.16 Comparison of recorded spectral accelerations (EW and NS components) at 45 stations in Mexico City during the 2017 earthquake (Revised)<sup>[10]</sup>. (sources: RAII-UNAM and CIRES. A. C)

尽管丘陵区台站地震记录在 0.5~1 Hz 频段的能量极低,但 III b 区该频段地震动成分被强烈放大,传播过该区域后地震动放大和持时递减。III d 区台

站 NZ20 的地震记录显示出异常的放大效应,与 III b 区台站 SCT2、CJ03 和 III c 区台站 BA49 记录的场地放大相似,这种异常应是 3D 波动效应所致。尽管

山丘区地震动的长周期( $T > 2$  s)能量极少,但这些成分在盆地沉积层内部被剧烈放大(振幅和持时):过渡区台站 ES57(位于台站 CJ03 西南侧的很近位置)的地震记录显示最小的放大(可能因该区域沉积土浅),而整个古湖区(Ⅲ a、Ⅲ b、Ⅲ c 和 Ⅲ d 区)台站地震记录均呈现定性上类似的放大效应,即使相距仅 1 km 的台站 CJ03 和 BA49 的地震记录也存在显著的差异性。从图 16 可以看出,每个场地地震效应分区所记录到的  $SA_H$  较大的周期范围总体上都在预期的  $T_g$  范围内,符合各分区的土层厚度和岩土工程基本条件对场地效应的影响特征。

2017 年地震期间记录的墨西哥城地震动以 0.50~1.0 Hz 的相对高频成分为主,这些成分在某些软土地可能因盆地边缘效应而被强烈放大,多层建筑特别容易倒塌(图 8)。强震台站记录的频谱分析表明:古湖区沉积土对 1~2 Hz ( $T=0.5\sim 1$  s)的地震动分量具有明显的放大效应。这一观测似乎与最严重损伤建筑位于过渡区且具有较短的共振周期(估计值 0.5~1.5 s)的证据是一致的。尽管山丘区强震记录富含高频成分,但长周期分量仍是古湖区强震记录的控制分量。另一观测结果是放大效应远非线性:Ⅲ c 区台站 BA49 记录中被放大的地震长周期成分( $T > 1$  s)在其相邻 1 km 处的 Ⅲ b 区台站 CJ03 记录中的地震动分量却显著衰减。也即,原本预计那些结构高度较高、共振周期超过 2 s 的建筑物也应该受到影响。这是因为其共振模式很可能与较深海床沉积物的共振特性有关,从而导致了共振效应的放大:2017 年地震引发了土层与 5~8 层建筑物基本自振模态的双重共振。

M. Çelebi 等<sup>[90]</sup>采用谱比法识别出:(1) 2017 年地震期间古湖区台站 SCT2 记录的  $T_p$  约为 2 s,与 1985 年地震期间台站 SCT 记录的  $T_p$  是一致的;(2)

丘陵区台站 CUP5 在 0~2 Hz 频带内无明显的卓越周期;(3)过渡区台站(COVM、CTVM 和 ES57)记录的  $T_p \approx 1.0\sim 1.43$  s;(4)对于古湖区:Ⅲ a 区台站(JC54、CH84、SI53 和 LEAC)记录的  $T_p \approx 1.18\sim 1.43$  s;Ⅲ b 区 6 个台站(含 CCCL 和 SCT2)记录的  $T_p \approx 1.78\sim 2.86$  s;Ⅲ c 区 1 个台站记录的  $T_p \approx 2.22$  s;Ⅲ d 区 3 个记录的  $T_p \approx 3.03\sim 4.17$  s。可以发现,对于 2017 年地震的墨西哥城台站记录,谱比法计算的 Ⅲ 区记录的  $T_p$  值,与 2017 版《墨西哥城抗震规范》中的场地效应分区(图 7)Ⅲ 区的  $T_g$  值相当一致,Ⅱ 区记录的  $T_p$  值稍大于该规范中场地效应分区 Ⅱ 区的  $T_g$  值。其差异可能源于从谱比曲线中峰值频率的选取误差,以及基于参考台站的 H/H(土/岩,水平向/水平向)谱比法与基于同一台站的 HVSR 法<sup>[110]</sup>之间的物理差异所致。

### 1.2.3 1985 年地震和 2017 年地震的场地效应比较

为了对比 1985 年地震和 2017 年地震的能量衰减在墨西哥城盆地反应中的显著差异,图 17 比较了这两次地震期间丘陵区台站 CUP5 和 TACY 记录以及古湖区 Ⅲ b 区台站 SCT(SCT2)记录的傅里叶幅值(Fourier amplitude, FA)谱。在 1985 年地震后,这三个台站记录被广泛用于佐证场地效应。这一比较是通过应用平滑参数为 40 的 Konno-Omachi 滤波器实现的。通过比较两次地震期间在丘陵区 and 古湖区台站的强震记录频率成分时,俯冲和板内震源机制经过区域地壳衰减滤波后,在墨西哥城所引发的地震动特征和场地放大效应的差异是显而易见的。可以看出,与 1985 年地震记录到的 FA 谱相比,2017 年地震的丘陵区地震动含有更丰富的高频成分,频率高于 0.5 Hz 的地震动分量的 FA 谱放大 5 倍以上,从而对短周期结构造成比 1985 年地震更严重的影响;而对低于 0.5 Hz 的地震动分量,则

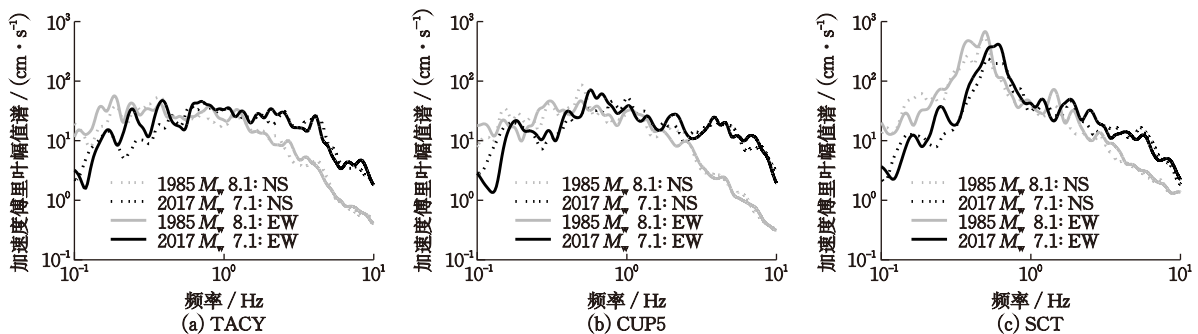
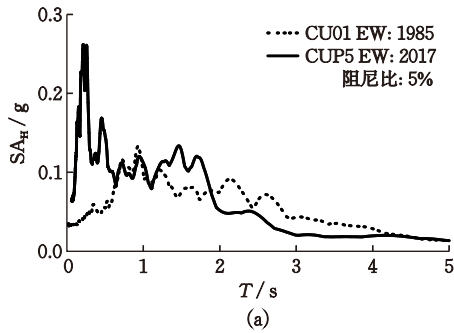


图 17 1985 和 2017 年地震时墨西哥城台站 TACY, CUP5 和 SCT 记录的 FA 谱(作者重绘)<sup>[111]</sup>(来源:RAII-UNAM)

Fig.17 Comparison of recorded Fourier amplitude spectra at the stations TACY, CUP5, and SCT in Mexico City during the 1985 and the 2017 earthquakes (Revised)<sup>[111]</sup>(source: RAII-UNAM)

正好与此相反,1985年地震的CUP5记录的FA谱要比2017年地震的FA谱高出2~3倍,某些频段甚至高出一个数量级。

图18比较了1985年和2017年两次地震的丘陵区台站CU和古湖区Ⅲb区台站SCT(SCT2)记录的 $SA_H$ 曲线<sup>[25]</sup>。可以发现,尽管两次地震的CU记录 $PGA_H$ 相近,然而,2017年地震CU记录 $SA_H$ 曲线的 $T_p=0.2$  s,而1985年地震CU记录 $SA_H$ 曲线在周期 $T=0.7\sim 3.0$  s段出现多个峰值,呈宽频带特征,



卓越周期不明晰。2017年地震SCT记录的 $SA_H$ 曲线同样呈现出一个强烈的共振峰值,但 $T_p$ 约为1.6~1.8 s,略小于1985年地震SCT记录的 $T_p$ 值(约2 s)。此外,尽管2017年地震CU记录的 $PGA_H(0.058g)$ 大于1985年地震相应的 $PGA_H(约0.03g)$ ,但2017年地震SCT记录的峰值 $SA_H(约0.6g)$ 小于1985年地震记录的峰值 $SA_H(约1.0g)$ ,在周期大于 $T_p$ 的区间内,2017年地震记录的 $SA_H$ 曲线显著低于1985年地震记录的 $SA_H$ 曲线。

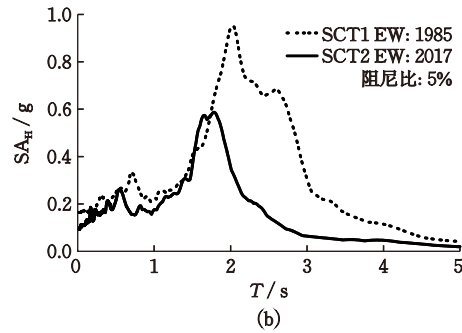


图18 1985和2017年地震时墨西哥城CU和SCT记录EW分量的谱加速度(作者重绘)<sup>[25,80]</sup>(来源:RAII-UNAM)

Fig.18 Recorded spectral accelerations (EW component) at stations CU and SCT in the 1985 and the 2017 earthquakes (Revised)<sup>[25,80]</sup> (source: RAII-UNAM)

图19对比了1985年与2017年两次地震期间古湖区地震动(SCT记录)相对于丘陵区出露基岩地震动(TACY记录)的放大效应。从该谱加速度比曲线可知,1985年与2017年地震对应的共振周期分别为1.85 s和2 s。共振周期的降低可能是由于经过32年固结作用后土层变得更为坚硬所致<sup>[80]</sup>。尽管这两次地震记录的谱加速度比曲线整体形态较为相似,但在周期 $T=0\sim 5$  s内2017年地震中SCT记录相对TACY记录的谱加速度比小于1985年地震。这一结果与震害现象相一致:2017年地震同样

造成了严重破坏,重灾区位于沉积层较薄、更靠近过渡区的地带;但总体破坏程度小于1985年地震。其原因除2017年地震记录的 $SA_H$ 较小之外,还包括1985年地震后《墨西哥城抗震规范》中的 $SA_H$ 值已有所提高,许多老旧建筑进行了加固。

1985年地震期间,由于受损的6到15层高的建筑物与卓越周期 $T_p=2\sim 4$  s的地震动发生共振,许多这类建筑最终倒塌或严重受损<sup>[91]</sup>。图20以示意图的形式展示了1985年地震和2017年地震的双重共振效应。对于1985年地震,基岩地震动的 $T_p$ 约

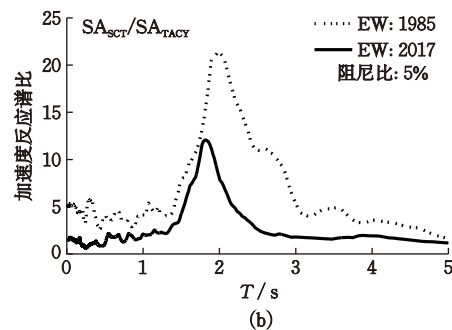
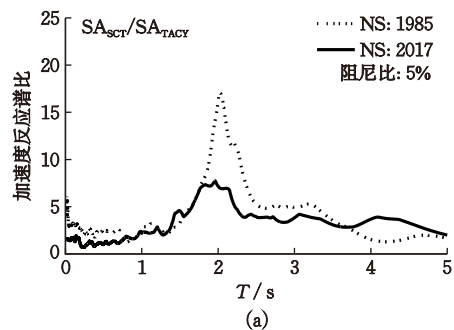


图19 1985和2017年地震时台站SCT记录相对台站TACY记录的水平向谱加速度的放大比(作者重绘)<sup>[25,80]</sup>(来源:RAII-UNAM)

Fig.19 Comparison of horizontal spectral acceleration amplifications at station SCT (relative to reference station TACY) between the 1985 and the 2017 earthquakes (Revised)<sup>[25,80]</sup> (source: RAII-UNAM)

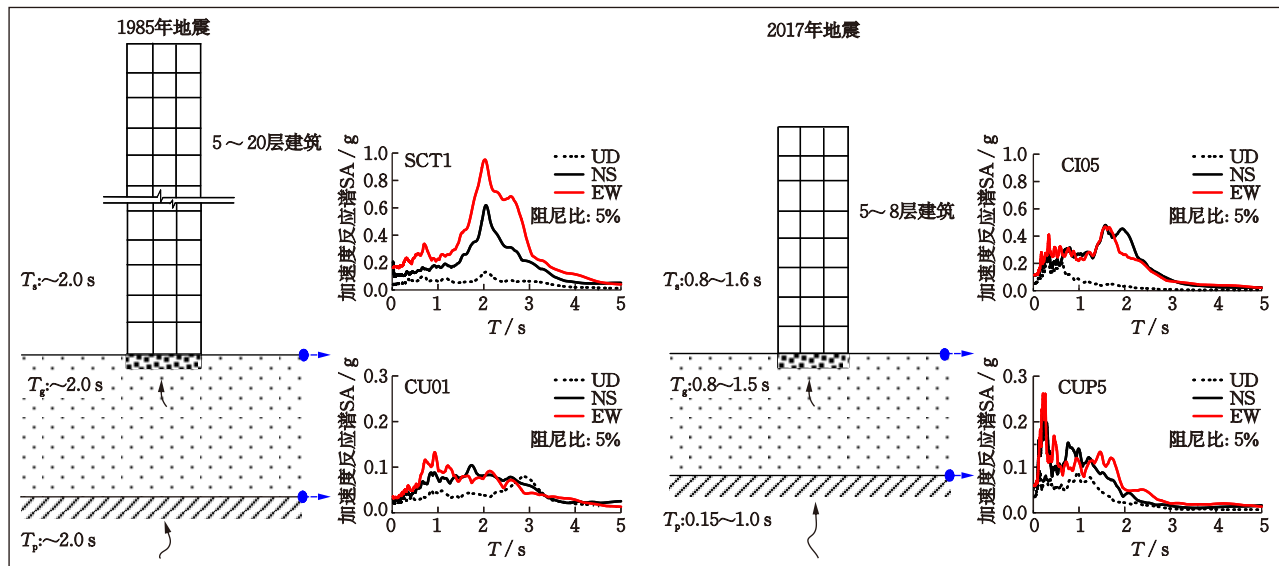


图20 双重共振效应示意图(作者重绘)<sup>[10]</sup>

Fig.20 Schematic plot of potential double resonance effect (Revised)<sup>[10]</sup>

2.0 s,与古湖区Ⅲb区的  $T_g \approx 2.0$  s高度吻合,也与5至20层高的  $T_s \approx 2.0$  s一致。 $T_p$ 、 $T_g$ 与  $T_s$ 之间的三重匹配,显著放大了建筑物所遭受的地震作用,从而导致该次地震中这类建筑的严重破坏甚至倒塌。而对于2017年地震,对应基岩地震卓越频带的  $T_p$  介于0.15~1.0 s,与古湖区Ⅲa区的  $T_g$  ( $\approx 0.8 \sim 1.5$  s)及中低层建筑物(5~8层)的  $T_s$  ( $\approx 0.8 \sim 1.6$  s)更为接近,故主要对这一高度范围的建筑物造成影响。对建筑物的地震作用很大程度上取决于  $T_g$  和  $T_s$  的大小。因此,在这两次地震中,大多数建筑物的倒塌或不同程度的破坏与地震期间的场地效应及建筑结构的自身震动特性密切相关。

### 1.3 汶川大地震的远场场地效应特征

#### 1.3.1 渭河盆地中西部场地效应

2008年汶川  $M_s 8.0$  地震期间,西安和宝鸡地区均表现出显著的高烈度异常现象。尽管两地距离震中约550~650 km,但其受影响程度明显高于周边相同  $R_{epi}$  的区域。西安为Ⅵ度高烈度异常区,部分高层建筑(如28~29层、高90.05~94.85 m的建筑)因水平位移过大而发生非结构构件的严重破坏<sup>[112]</sup>。宝鸡则为Ⅶ度高烈度异常区,其中陈仓区震害最为严重,砖混结构、土木结构、框架结构及框架-砌体混合结构房屋普遍受损严重,部分砖混和土木结构甚至倒塌<sup>[113]</sup>。两地高烈度异常区的形成,与渭河盆地的地震构造和沉积地质特征密切相关。

西安凹陷地处渭河盆地中南部,为典型的不对

称箕状断陷盆地和沉积中心。巨厚沉积层对地震波具有显著放大作用,是导致西安高烈度异常的主要原因。其沉积序列自下而上为:古近系以河湖相砂质泥岩、泥岩夹砂岩及砾岩为主,厚度较薄;新近系沉积厚度巨大,主要为河湖相泥岩、粉砂质泥岩,夹多层砂岩与砂砾岩;第四系厚度一般超过500 m,最厚处可达1 000 m以上,下更新统以湖相黏土、粉质黏土为主,中更新统至全新统以河流相-冲洪积相为主,岩性包括风积黄土与冲、洪、湖积形成的砂、砾石及粉质黏土互层,构成复杂的黄土-古土壤序列及河漫滩沉积体系,相变快、沉积类型多样。

宝鸡位于渭河盆地西端。渭河切穿抬升的黄土塬与基岩山脊,形成宝鸡峡。该区域在汶川地震中表现为高烈度异常区。其沉积序列主要包括:新近系中新统为河湖相砂质泥岩、砂岩夹砾岩,上新统以河流-湖相泥岩、粉砂岩及砂砾岩为主;第四系极为发育,下更新统为湖相黏土与粉砂质黏土,中-上更新统以深层风成黄土与河流相砂砾石土互层为特征,全新统为现代河漫滩相砂砾石及一级阶地沉积。该区沉积相以河流相和山前洪积相主导,深厚黄土覆盖于早期洪积扇和河流阶地之上,形成广阔的黄土台原地貌。

图21展示了渭河盆地中西部(西安凹陷、宝鸡峡谷及其过渡带)11个强震台站的位置、震中距及在汶川地震中记录的地表PGA。其中括号内数字依次为EW、NS和UD分量的PGA( $\text{cm/s}^2$ ),及  $R_{epi}$ (km)。汤峪(眉县)和长安台站位于秦岭基岩上,

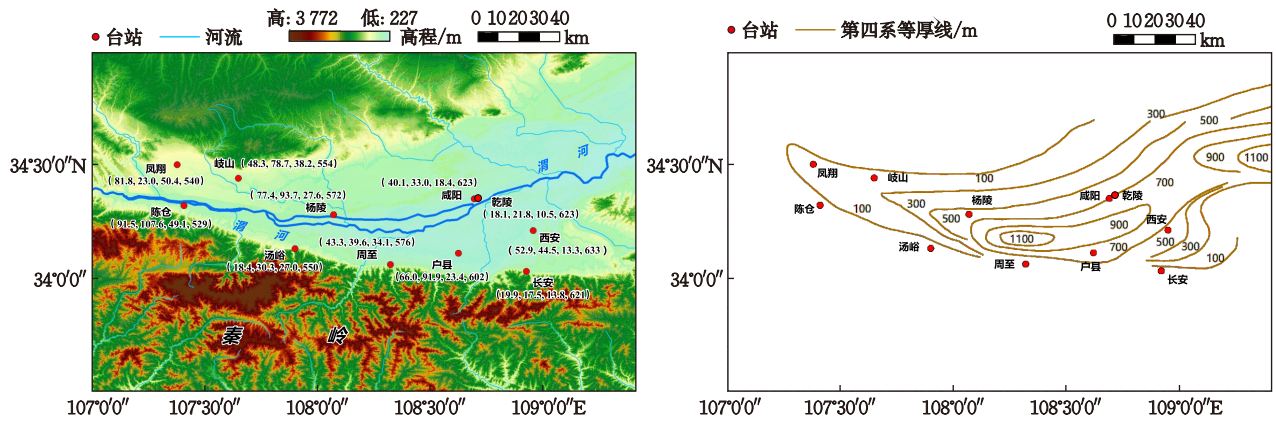


图 21 渭河盆地中西部地形和第四系沉积层等厚线,强震台站的位置与震中距,及 2008 年汶川地震中记录的地表 PGA (数据: Flatfile, <http://www.gmm-cn.com/>)

Fig.21 Map of the Central-Western Weihe Basin showing topography (top), quaternary overburden thickness (bottom), locations and epicentral distances of strong-motion stations, and the recorded PGAs during the 2008 Wenchuan earthquake (source: Flatfile, <http://www.gmm-cn.com/>)

乾陵台站位于渭河盆地北缘梁山石灰岩山地,其余 8 个为土层台站,分别位于渭河阶地(陈仓、咸阳、西安)、黄土台塬(凤翔、杨陵)、渭河平原(户县)、山前洪积扇(岐山)以及山前丘陵地带(周至)。汤峪台站位于西安凹陷(东经约 108.5°以东)与宝鸡峡谷(东经约 107.8°以西)之间的构造过渡带。长安台站坐落于秦岭山地基岩上。岐山台站也处于西安凹陷与宝鸡峡谷之间的过渡构造单元。位于西安凹陷及过渡带的西安、长安、咸阳、乾陵、户县和杨陵台站的  $R_{epi}$  约 600~630 km;周至台站稍近,约 575 km(咸阳与乾陵台站相距仅 640 m)。位于宝鸡峡及过渡带的凤翔、陈仓和岐山台站的  $R_{epi}$  约 520~560 km。位于凹陷与峡谷过渡带的汤峪台站的  $R_{epi}$  约 550 km。

汤峪、长安和乾陵台站地表记录的 EW 向  $PGA_H$  较为接近(分别为 0.018 7g、0.017 8g 和 0.018 4g),而汤峪台站 NS 向  $PGA_H$  为 0.031g,显著高于长安(0.020g)和乾陵台站(0.022g)。依据王海云<sup>[18]</sup>的研究,汤峪台站的基岩记录更适合作参考基岩地震动,故本研究以其为参考进行对比。相对于汤峪台站,西安、咸阳、户县、周至和杨陵台站地表的 EW 向  $PGA_H$  分别放大 2.88、2.18、3.59、2.35 和 4.21 倍,NS 向则放大 1.47、1.09、3.03、1.31 和 3.09 倍,其中,户县和杨陵台站的放大效应最为显著。凤翔、陈仓和岐山台站地表的 EW 向  $PGA_H$  分别放大 4.45、4.97 和 2.63 倍,NS 向放大 1.66、3.55 和 2.59 倍,以陈仓台站放大效应最强。

在西安凹陷及过渡带,除咸阳台站地表 NS 向

$PGA_H$  与参考基岩记录基本一致外,其余土层台站地表的 EW 向与 NS 向  $PGA_H$  均显著放大,且 EW 向放大倍数(2.2~4.2 倍)高于 NS 向。宝鸡峡及过渡带土层台站的  $PGA_H$  同样显著放大,EW 向尤为突出(2.6~5.0 倍)。此外,除凤翔和乾陵台站外,其余土层台站记录的持时均较汤峪台站的明显延长。总体而言,宝鸡峡地表 EW 向  $PGA_H$  的放大高于西安凹陷地表,这与两地地震烈度分布一致。

图 22 则显示了这 11 个强震台站在汶川地震中记录到的地震动时程。所有 11 个台站均成功获取了汶川地震的高质量加速度记录。鉴于上述台站的  $R_{epi}$  差异较小,汤峪、长安、乾陵基岩台站与西安、咸阳、户县、周至、杨陵土层台站( $V_{s30}$  依次为 280.8、374.1、257.7、278.3 和 407.8 m/s),以及汤峪基岩台站与凤翔、陈仓、岐山土层台站( $V_{s30}$  依次为 306.1、361.1、360.1 m/s)所记录的地震动特性的差异,可忽略地震波的传播路径效应,主要归因于局部场地条件的影响。可以发现,相对于参考基岩汤峪台站记录,土层台站记录的地震动持时显著延长,其幅度甚至可达 3 倍以上。

图 23 展示了汶川地震期间渭河盆地中西部 8 个土层台站地表记录相对于汤峪基岩台站 EW 分量的水平向加速度反应谱( $SA_H$ )放大比。可以看出,由于周至台站位于秦岭边缘且薄覆盖层,其记录的  $SA_H$  放大最小,宽周期范围内( $T \approx 0.25 \sim 6.6$  s)的  $SA_H$  放大介于 2~5 倍,在周期  $T \approx 1.4$  s 处峰值  $SA_H$  的放大约为 4.7 倍。陈仓台站记录的  $SA_H$  在  $T \approx 1$  s 附近放大高达 10~15 倍,在 0.2~4.9 s 周期范围内

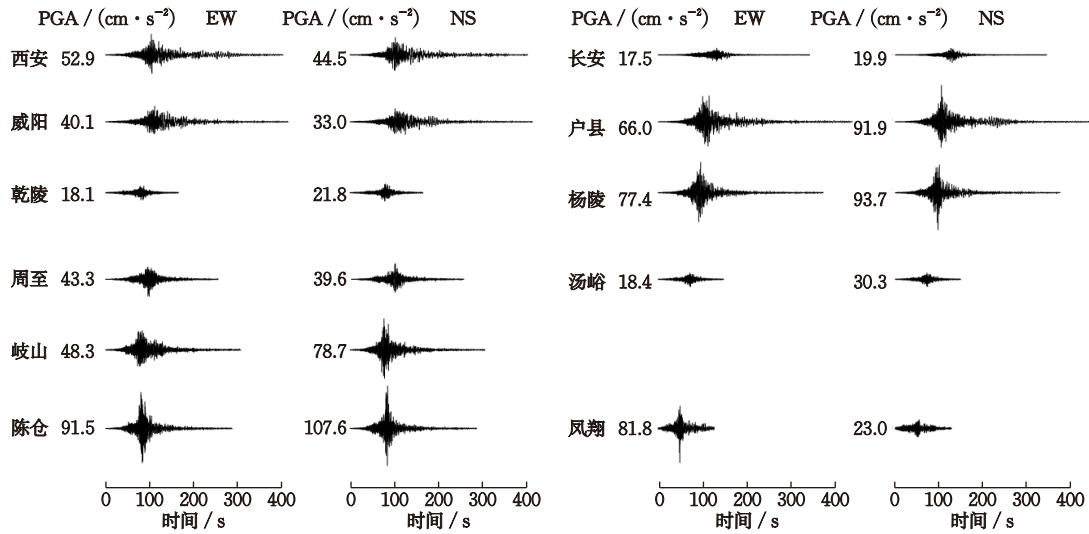


图22 渭河盆地中西部强震台站在2008年汶川地震中记录到的地震动时程(数据: Flatfile, <http://www.gmm-cn.com/>)  
 Fig.22 Seismograms recorded by strong motion stations in the Central-Western Weihe Basin during the 2008 Wenchuan earthquake (source: Flatfile, <http://www.gmm-cn.com/>)

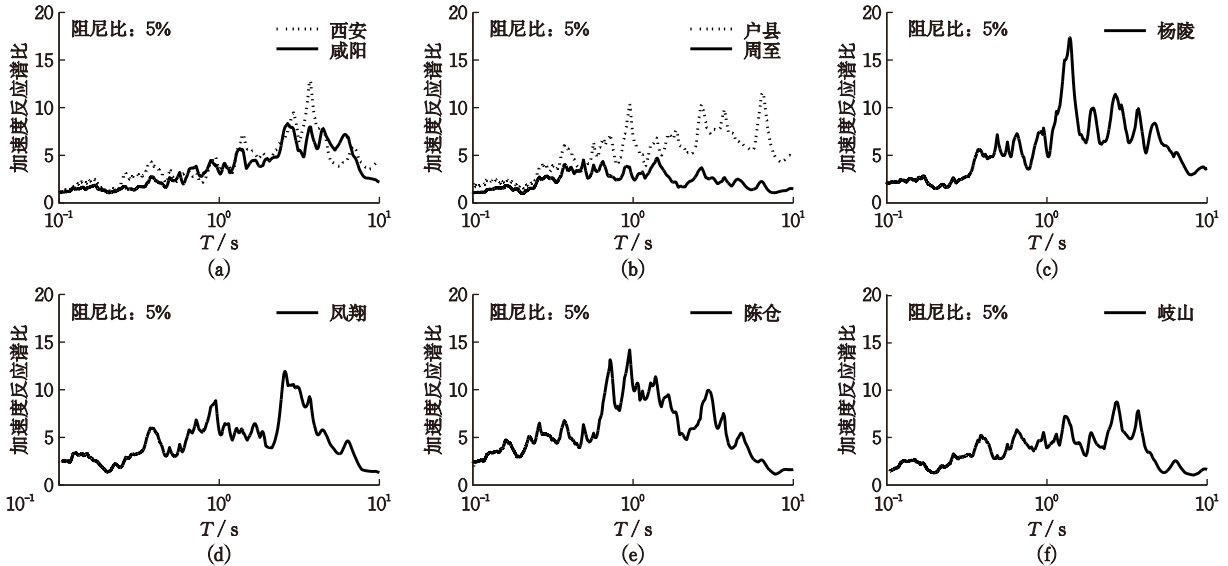


图23 汶川地震中土层台站记录EW分量谱加速度相对于汤峪基岩台站的放大比(数据: Flatfile, <http://www.gmm-cn.com/>)  
 Fig.23 Spectral acceleration amplifications (EW component) at the soil-site stations (relative to reference rock station Tangyu) during the 2008 Wenchuan earthquake (source: Flatfile, <http://www.gmm-cn.com/>)

$SA_H$ 均显著放大,幅度达5倍以上。西安、咸阳、户县、杨陵、凤翔和岐山台站对中、低频段(中、长周期)地震动具有显著放大作用, $SA_H$ 放大倍数介于5~14倍。具体而言,西安与咸阳台站的放大特性较为相似,在 $T \approx 1.3 \sim 7.0$  s范围内 $SA_H$ 放大均超过5倍,西安台站在 $T \approx 3.7$  s处 $SA$ 放大达12.8倍,咸阳台站在 $T \approx 2.7 \sim 5.9$  s范围内出现4个 $SA_H$ 峰值,放大倍数均高于7倍;户县台站在 $T \approx 0.55 \sim 7.6$  s范围内 $SA_H$ 放大超过5倍, $T \approx 6.4$  s处峰值 $SA$ 放大超过11.5倍;杨陵台站在 $T \approx 0.36 \sim$

$6.8$  s范围内 $SA_H$ 放大超过5倍, $T \approx 1.4$  s处峰值 $SA_H$ 放大高达17倍;凤翔台站在 $T \approx 0.63 \sim 4.7$  s范围内 $SA_H$ 放大超过5倍, $T \approx 2.6$  s处峰值 $SA_H$ 放大大约12倍;岐山台站在 $T \approx 0.38 \sim 4.0$  s范围内 $SA_H$ 放大呈现多峰特征,各峰值 $SA_H$ 的放大均超过5倍, $T \approx 2.7$  s处峰值 $SA_H$ 放大大约8.7倍。值得注意的是,上述6个台站在放大低频地震动的同时,高频分量也有相当程度的放大,尽管幅度相对较低。这种宽频带放大效应可能导致高层与低层建筑均面临震害风险。

在宝鸡峡及过渡区的凤翔、陈仓和岐山台站中,陈仓台站地表EW向 $PGA_H$ 最大,达0.11g,且在 $T \approx 0.67 \sim 1.4$  s周期范围内地表 $SA_H$ 放大超过10倍,卓越周期约1 s。该台站所在的陈仓区是宝鸡峡及渭河盆地内震害最严重的区域。相比之下,位于其以北约10 km、土层更厚但不在宝鸡高烈度异常区内的凤翔台站,其地表EW向 $PGA_H$ 为0.083g,峰值 $SA_H$ 放大约14倍,卓越周期约1.0 s。这一对比表明,陈仓台站的地震动放大不仅源于土层效应,还受到盆地边缘效应的显著影响。

综上,西安凹陷巨厚沉积土对长周期地震波的剧烈放大导致西安高烈度异常(Ⅵ度);而自宝鸡至眉县沿盆地边缘的高烈度异常区(Ⅶ度),则是宝鸡峡引起的盆地边缘效应及盆地场地对长周期地震波的放大效应共同作用所致,也反映了渭河盆地沉积土结构对地震动放大效应的重要影响。

### 1.3.2 舟曲-文县段白龙江流域场地效应

舟曲-文县段白龙江流域第四系类型多样:北部高海拔台地及山麓地带见风成黄土;沿河岸发育河流阶地沉积;河谷两岸及沟口广泛分布巨厚滑坡、泥石流等堆积体。

图24展示了该流域四个强震台站的位置、震中距及地表PGA。其中括号内数字分别为地表记录

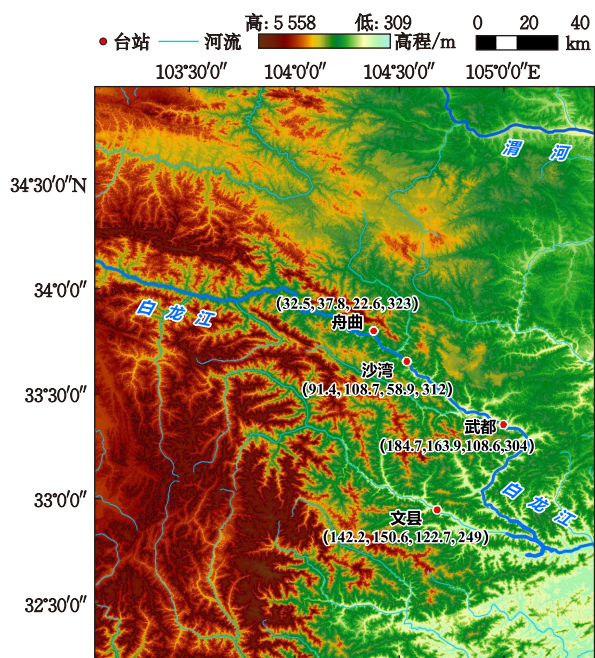


图24 舟曲-文县段白龙江流域地形图,强震台站的位置与震中距,以及在2008年汶川地震中记录到的 $PGA_H$

Fig.24 Map of the Zhouqu-Wenxian segment of the Bailongjiang River basin showing topography, locations and epicentral distances of strong-motion stations, and the recorded PGAs during the 2008 Wenchuan Earthquake

NS、EW和UD分量的 $PGA$ ( $cm/s^2$ ),及 $R_{epi}$ (km)。其中舟曲与文县台站位于基岩,沙湾和武都台站位于土层。2008年汶川地震中,文县台站( $R_{epi} = 246$  km)记录的EW、NS和UD向PGA分别为0.145g、0.154g和0.125g;舟曲台站( $R_{epi} = 323$  km)记录值依次为0.033 1g、0.038 5g和0.023 0g,明显低于文县台站,体现了基岩地震动随距离衰减的规律。此外,文县、舟曲和沙湾台站的NS向PGA均高于EW向,而武都台站则相反。以舟曲基岩台站记录为参考,沙湾台站EW、NS和UD向PGA放大倍数分别为2.81、2.88和2.61,武都台站则依次高达5.68、4.34和4.81,表明其场地放大效应更强,且EW向尤为显著。

图25显示了上述台站在汶川地震中记录的地表EW向与NS向加速度时程。沙湾和武都台站的 $V_{s30}$ 分别为387.5和220.8 m/s。舟曲、沙湾和武都三台站的 $R_{epi}$ 分别为323、312和300 km,相对于震源可视为近似同一点位,故可忽略传播路径差异,其地震动差异主要归因于场地条件。与舟曲基岩记录相比,沙湾和武都台站的地震动持时均明显延长,其中,武都台站强震段持时延长更突出,进一步反映了场地条件的影响。

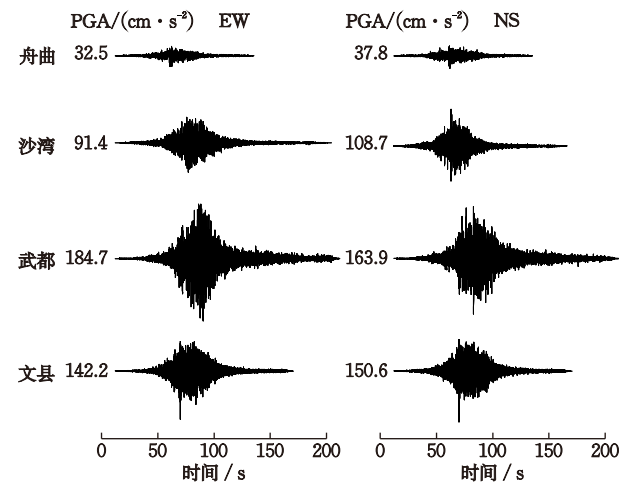


图25 白龙江流域4个强震台站2008年在汶川地震中记录的地震动图(数据:Flatfile, <http://www.gmm-cn.com/>)

Fig.25 Seismograms recorded by four seismic stations in the Bailongjiang River basin during the 2008 Wenchuan earthquake (source: Flatfile, <http://www.gmm-cn.com/>)

为进一步分析沙湾与武都台站场地放大效应的差异,图26展示了汶川地震时两者相对舟曲基岩台站的EW和NS向地表 $SA_H$ 之比(阻尼比5%)。结

果显示,沙湾台站记录的短周期( $T < 0.2$  s)分量放大效应显著:EW分量在 $T=0.146$  s处 $SA_H$ 放大6.81倍,NS分量在 $T=0.075$  s处放大达8.18倍。而武都台站记录则在较宽周期范围( $T < 1.2$  s)内均表现显著放大,EW和NS分量的 $SA_H$ 放大均超过5倍,其中EW分量在 $T \approx 0.9$  s处放大高达13.9倍,NS分量在 $T=0.27$  s和 $0.71$  s处分别放大9.5倍和8.0倍。该差异主要源于武都台站位于软厚沉积土层(Ⅲ类场地)之上。

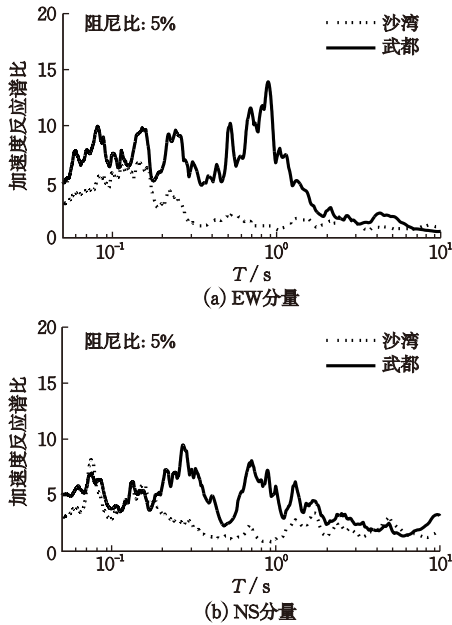


图 26 沙湾和武都土层台站在 2008 年汶川地震中记录的水平向加速度反应谱相对于舟曲基岩台站的放大比

Fig.26 Horizontal spectral acceleration amplifications at the Shawan and Wudu soil-site stations (relative to reference rock station Zhouqu) during the 2008 Wenchuan earthquake

任叶飞<sup>[114]</sup>采用 5% 阻尼比的 H/V 速度反应谱比法(水平分量取 EW 与 NS 分量的几何平均)识别出武都台站记录的主、次峰值周期分别为 0.7 s 和 0.2 s。因此,0.7 s 可视为水平向地震动的卓越周期  $T_p$ 。卢育霞等<sup>[115]</sup>指出,该台站地表记录 EW 与 NS 分量的傅里叶幅值谱主峰频率均为 1.2 Hz( $T_p \approx 0.83$  s),次峰为 2.2 Hz( $T_p \approx 0.45$  s);H/V 谱比法所得 EW 与 NS 向场地基本频率  $f_g$  约为 1.2 Hz( $T_g \approx 0.83$  s),而单点地脉动 H/V 谱比法所得  $f_g$  分别为 2.3 Hz( $T_g \approx 0.43$  s)和 2.5 Hz( $T_g \approx 0.40$  s)。综合表明,不同方法识别的地震动显著放大频段基本一致,印证了武都台站场地反应特征的确切性。

②数据源自日本社会事务局,1926

#### 1.4 东京湾区及毗邻地区场地效应

1923 年的日本关东  $M_w 7.9$  ( $M_s 8.1$ ) 地震彻底毁了东京和横滨<sup>[17]</sup>,震中( $35.274^\circ N, 139.344^\circ E$ )位于相模湾海槽俯冲带。该地震导致强烈地面运动,给关东地区造成了巨大灾难,导致超 10 万人死亡(USGS 官方网站记载超过 14 万人),20 万间房屋烧毁,10 万间房屋倒塌,保守估计财产损失 40~60 亿美元<sup>[116-118]</sup>。多数人员死亡和财产损失可归因于震后引发的大规模火灾<sup>[117]</sup>。据 C. Strand<sup>[60]</sup>报道,447 128 座建筑物被烧毁;在约 14.2 万名遇难者中,约有 10 万人被认为是死于火灾或吸入烟雾,包括 22 名消防员丧生<sup>②</sup>。

图 27 展示了 USGS 发布的该地震 ShakeMap 格式 MMI 分布。此次地震中 JMA 烈度的 VI 度(对应 MMI 的 IX-X 度)区约 8 000 km<sup>2</sup>,其范围与 2011 年东日本  $M_w 9.0$  地震 VI 度区的面积相当,约为 1995 年神户  $M_w 6.9$  地震 VI 度区的 25 倍。I. Towhata<sup>[17]</sup>指出:1923 年的震害经验在现代意义上揭示了软土地地对地震动的放大效应。

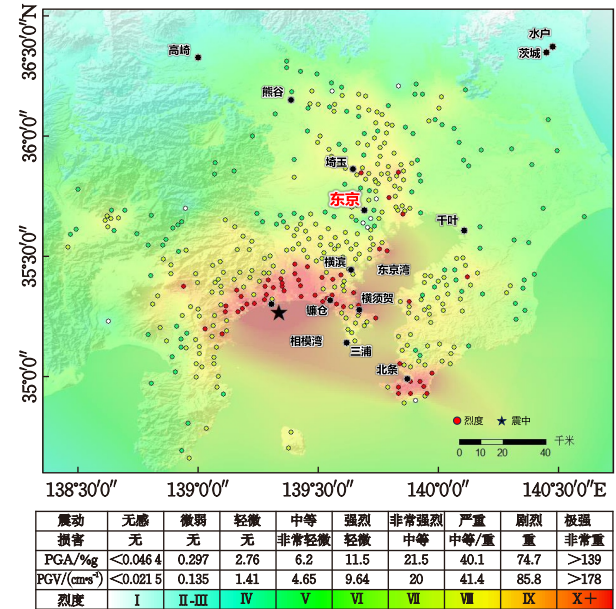


图 27 ShakeMap 格式的 1923 年关东地震 MMI 分布图(引自 USGS 官网)

Fig.27 ShakeMap showing modified Mercalli intensity during the 1923 Kanto earthquake (source: USGS)

图 28 显示了估算的东京湾区和相模湾区地表  $PGA_H$  分布<sup>[118]</sup>。地震导致的破坏分布与近地表全新世沉积土的相关性表明,软土地基上城镇破坏严

重,土层放大效应对地震动具有显著影响。东京山地的 $PGA_H$ 、 $PGV_H$ 和地表水平向峰值位移(Horizontal peak ground displacement,  $PGD_H$ )分别约为0.33g、50 cm/s和50 cm,卓越周期 $T_p$ 约为2 s。在神奈川县东部横滨市、西部小田原市和南部镰仓市、千叶县南端北条附近,地表 $PGA_H$ 可能大于0.5g,地震烈度可能达JMA烈度Ⅵ度。在1944年日本南海 $M_w\sim 8.0$ 地震期间,在震中距超400 km的东京市中心记录到了相当强烈( $PGD_H > 10$  cm)且持时很长(超10 min)的长周期( $T > 10\sim 12$  s)地震动<sup>[119]</sup>。关东地区以其深达4 km的沉积盆地而闻名。3D盆地结构增强了地震动的复杂性以及短、长周期的强烈场地反应放大效应<sup>[117]</sup>。

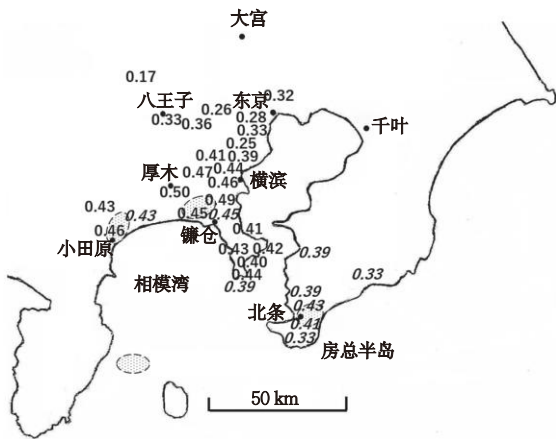


图28 估算的1923年关东地震地表 $PGA_H$ 分布<sup>[118]</sup>  
Fig.28 ShakeMap showing distribution of estimated surface  $PGA_H$  during the 1923 Kanto earthquake<sup>[118]</sup>

2011年东日本 $M_w 9.1$ 地震是自1923年关东地震以来灾害最为严重的俯冲型地震。地震期间,几乎整个日本都观测到了强烈地面震动。这次地震对日本东北至关东地区太平洋沿岸造成了严重的破坏,房屋受损的范围南至东京及东京以南约50 km的町田。东京湾区大范围填海造陆地区出现了严重的土壤液化现象<sup>[21,120-122]</sup>。截至2024年3月日本官方公布的数据,这次地震造成19 775人死亡(包括地震、海啸和核事故这三重悲剧)、2 550人失踪、约6 242人受伤;共有122 050栋房屋完全被毁、283 988栋房屋严重破坏、750 064栋房屋部分损毁。截至2011年6月,日本官方公布的经济损失约为16~25万亿日元(约1 450~2 150亿美元);而世界银行则估计,此次灾害的经济损失可能高达2 350亿美元,使其成为世界历史上代价最惨重的自然灾

害。此外,海啸引发了福岛第一核电站的核事故。为保护核电站周边地区居民,政府设立了疏散区,导致约11万人撤离家园。截至2023年3月日本官方公布的数据,震后因长期避难生活造成的健康恶化、自杀等“震灾关联死亡”达3 950人。

这次巨震在约500 km×200 km的断层面上发生的复杂震源破裂过程,导致东日本地区及关东地区(包括东京湾区)都观测到了1~2g的强烈地震动加速度<sup>[21,122]</sup>。KiK-net与K-NET强震台网的密集记录清晰地展现了日本北部极广区域前所未见的异常强烈地面震动现象。图29展示了该地震引起的高烈度区MMI分布。图中的矩形代表断层平面,星号表示震中位置。宫城县栗原市的地震烈度达JMA烈度7度。JMA烈度超过6度的记录广泛出现在宫城、福岛、茨城、栃木、群馬、埼玉和千叶等县。烈度分布并非简单自东海岸衰减,而是沿海岸线变化剧烈。这意味着震源破裂过程在空间上并非均匀的。

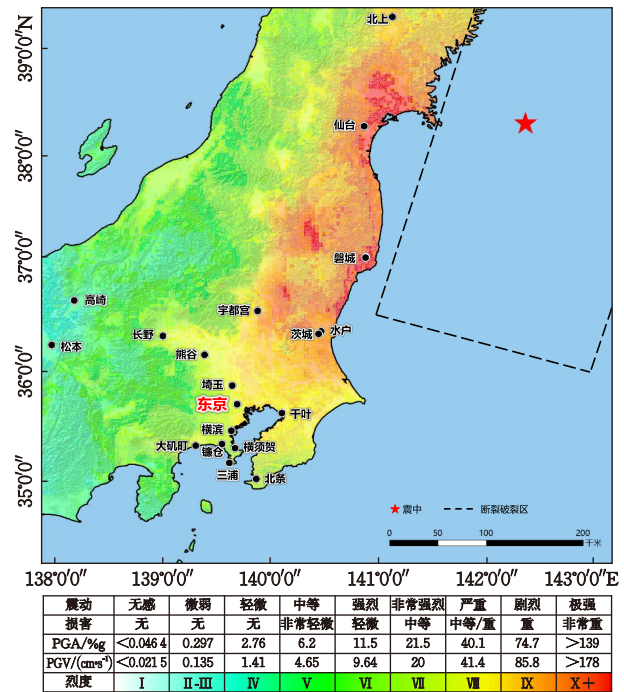


图29 ShakeMap格式的2011年东日本 $M_w 9.1$ 地震MMI分布图(引自USGS官网)  
Fig.29 ShakeMap showing modified Mercalli intensity during the 2011 Tohoku  $M_w 9.1$  earthquake (source: USGS)

地表 $PGA$ 沿东海岸海岸线变化剧烈,类似于烈度分布。图30展示这次地震期间61个台站记录的关东平原地表 $PGA$ 分布。图中圆括号内的数据为

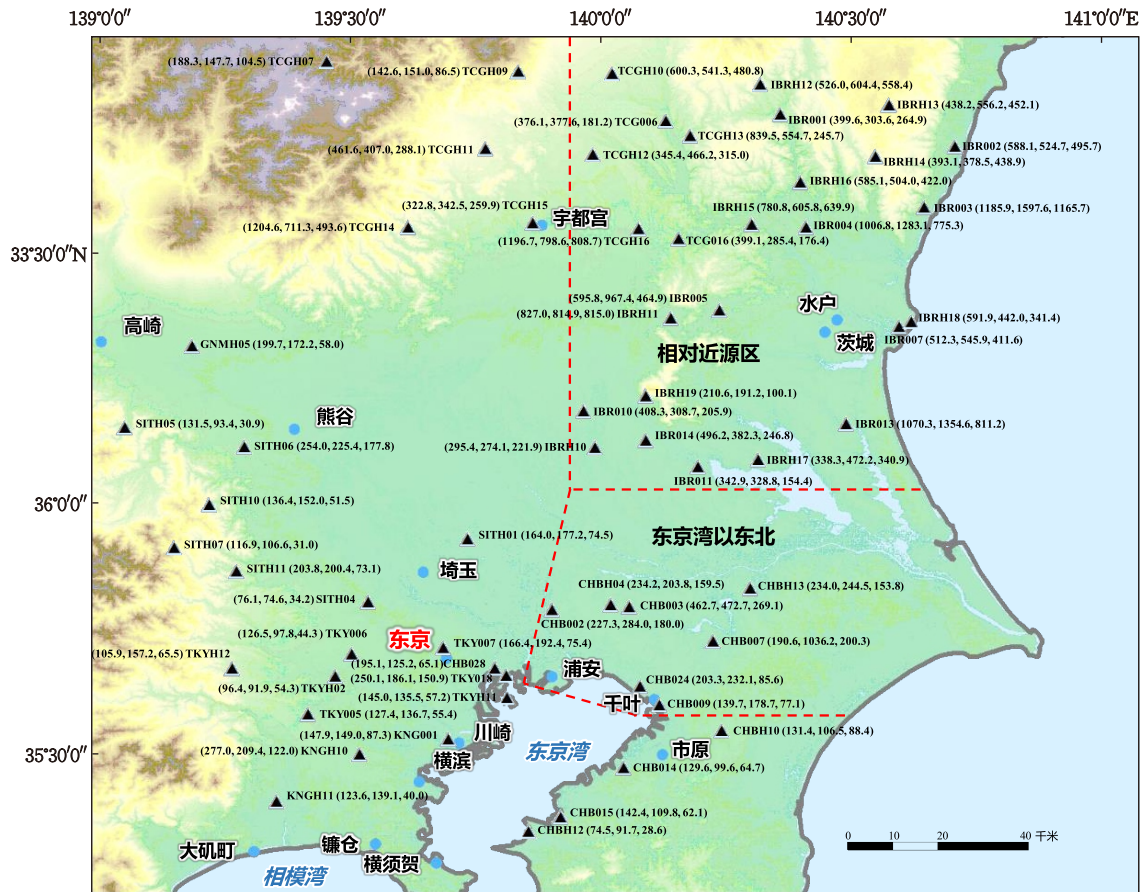


图30 2011年东日本地震期间关东平原61个强震台站的位置及记录的地表PGA(数据:KiK-net与K-NET)

Fig.30 Seismic station locations and surface PGAs recored at 61 seismic stations in the Kanto region during the 2011 Tohoku earthquake (sources: KiK-net and K-NET)

EW, NS和UD方向地表PGA( $\text{cm/s}^2$ )。具体而言,东京湾以西平原的地表 $\text{PGA}_H$ (EW向和NS向两者之大者)介于我国地震烈度表Ⅶ-Ⅷ度对应的水平:临近东京湾西北角的CHB028和TKY018台站,彼此相距仅2.86 km,地表 $\text{PGA}_H$ 差异明显,前者为0.199g,而后者为0.255g;横滨以西KNGH台站的地表 $\text{PGA}_H$ 高达0.282g,埼玉以西SITH11台站的地表 $\text{PGA}_H$ 亦达0.208g,而SITH04和TKYH02台站,其地表 $\text{PGA}_H$ 分别仅为0.078g和0.098g。东京湾以东北平原的地表 $\text{PGA}_H$ 介于我国地震烈度表ⅤⅢ-Ⅸ度对应的水平:位于东京湾东北角、相距5.39 km的台站CHB024和CHB009记录到的地表 $\text{PGA}_H$ 差异较大,前者达0.237g,后者仅为0.182g(该区域强震记录中的最小值),而CHB007台站的地表 $\text{PGA}_H$ 极为异常,竟高达1.015g;相距3.45 km的CHBH04和CHB03台站地表 $\text{PGA}_H$ 差异甚大,前者为0.239g,后者高达0.482g。东京湾以东平原的地表 $\text{PGA}_H$ 则介于0.094g~0.145g,相当于我国地震烈度表Ⅶ度对

应的水平。

相对近震源(断层距小于100 km)的茨城和栃木县,8个台站地表 $\text{PGA}_H$ 超过0.75g,达到我国地震烈度表的Ⅹ度(MMI的Ⅸ度):IBR003(1.629g)、IBR013(1.381g)、IBR004(1.308g)、TCG014(1.228g)、IBR005(0.986g)、TCGH13(0.856g)、IBRH11(0.843g)和IBRH15(0.796g);14个台站的地表 $\text{PGA}_H$ 介于0.38g~0.75g,达到我国烈度表的Ⅸ度(对应MMI的Ⅷ度):TCGH10(0.612g)、IBRH18(0.603g)、IBR002(0.599g)、IBRH16(0.596g)、IBRH13(0.567g)、IBR007(0.556g)、IBR014(0.508g)、IBRH17(0.481g)、TCGH12(0.475g)、IBRH14(0.447g)、IBR010(0.416g)、TCG016(0.407g)、IBR001(0.407g)和TCG006(0.385g)。

相应地,图31展示了图30中61个台站记录的三分量地表PGA相对于井底(基岩)PBA的放大倍数。其中,括号内数据分别对应EW、NS和UD分

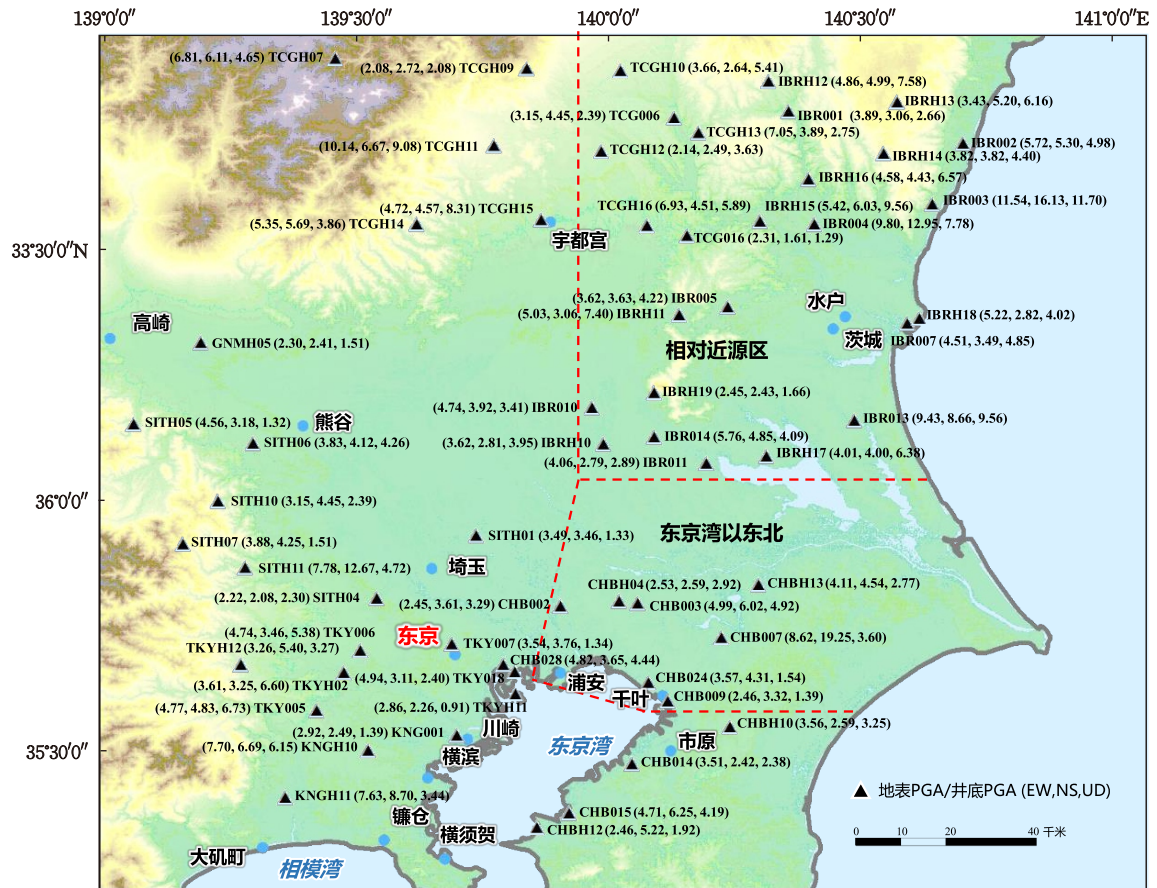


图 31 关东地区 61 个台站在 2011 年东日本地震期间记录的地表 PGA 相对井底 (基岩) 的放大 (来源: KiK-net 和 K-NET)  
 Fig.31 Peak acceleration ratios of surface-to-downhole bedrock motions recorded at 61 seismic stations in the Kanto region during the 2011 Tohoku earthquake (sources: KiK-net and K-NET)

量; K-NET 台站的地表  $PGA_H$  放大倍数是基于邻近 KiK-net 台站的井底记录计算的, IBR01-IBR04 台站的地表  $PGA_H$  放大倍数均是参考 IBRH14 台站的井底记录得出的。东京湾以西平原 14 个台站的 EW 和 NS 向地表  $PGA_H$  分别放大 2.22~7.78 倍和 2.08~12.67 倍, 东京湾以东北平原 7 个台站的 EW 和 NS 向地表  $PGA_H$  放大倍数分别介于 2.46~8.62 和 2.59~19.25, 而东京湾以东平原 4 个台站的 EW 和 NS 向地表  $PGA_H$  放大分别介于 1.9~4.3 倍和 2.1~4.6 倍。相对地, 东京湾以东北场地放大效应更为显著。

2011 年东日本地震的一个显著特征是地震动持时极长 (5 min 以上), 这主要源于断层浅层大滑动区域在初始破裂后的 60 s 至 100 s 内持续扩展, 并辐射出富含极低频成分 ( $<0.02$  Hz) 的地震波<sup>[123]</sup>。这种持时很长、低频丰富的地震动引发了广泛的土壤液化破坏, 在东京湾沿岸尤为显著<sup>[120-121]</sup>。强震观测显示, 茨城-栃木地区记录到的地表  $PGA_H$  高达  $1g \sim$

$2g$ , 远超日本常用的地震动衰减经验方程对  $M_w 9$  地震的预测值<sup>[122]</sup>。宫城地区  $0.50g \sim 1.0g$  的地表  $PGA_H$  则源自两次大滑移产生的高频多重断层破裂。约在主震破裂 130 s 后, 茨城地区发生第三次破裂。基于茨城台站记录到的强地震动 (如 IBR003) 向北与向南传播时表现出的低视波速及走时曲线弯曲特征, 可推断该次破裂的震中位于福岛与茨城交界的陆地。因此, 在茨城地区记录到的高  $PGA_H$  是宫城近海强地震动与福岛-茨城边界浅源地震共同叠加的结果。需指出的是, IBRH11-IBRH18 台站场地厚度为 2~20 m,  $V_s$  介于 120~270 m/s, 在相对近源强地震动作用下很可能发生了强非线性场地反应。

长周期地震动中的低频分量易诱发长周期结构的共振反应。尽管长周期地震动的相关研究已有约半个世纪的历史, 但直至 2003 年日本十胜近海  $M_w 8.3$  地震致使距震中超过 250 km 的北海道苫小牧市大型储油罐因剧烈晃动引起的严重损坏及火

灾(因储油罐中的流体晃动周期与  $T_p=7\sim 8$  s 的震动卓越周期相近),公众才首次广泛认识到该现象的存在<sup>[124]</sup>。已有研究指出,关东盆地(神奈川、东京、埼玉、群马、栃木、茨城和千叶)下方覆盖有超过 3 500 m 厚的低波速 ( $V_s < 2$  km/s) 沉积层,会显著放大长周期 ( $T=6\sim 10$  s) 地震动并引发共振现象<sup>[119, 121, 125-127]</sup>。例如,2004 年新潟中越  $M_w 6.8$  地震导致东京市中心约 70 层(高约 350 m,基本自振周期  $T_s \approx 7$  s) 的超高层建筑发生显著共振<sup>[127]</sup>;2004 年纪伊半岛东南近海  $M_w 7.4$  地震引发了千叶县沿海大型储油罐晃动损伤现象<sup>[119, 126, 128]</sup>。K. Koketsu 和 M. Kikuchi<sup>[125]</sup> 和 Y. Tanaka 等<sup>[129]</sup> 研究发现,关东盆地的长周期地震动主要源自盆地边缘的瑞雷波折射效应,且该面波在坚硬基岩之上极厚沉积土 ( $>3\sim 4$  km) 的传播过程中会发生持续放大;地表水平向速度反应谱(Horizontal spectral velocity,  $SV_H$ ) 的峰值所对应的  $T_p$  在空间分布上呈现出明显的规律:盆地内部的  $T_p$  约为 7 s,向边缘逐渐缩短至  $T_p$  约为 3 s。2011 年东日本大地震中,该长周期地震动引起的超高层建筑共振现象再次显现,造成了东京等地的超高层建筑发生持续摇晃<sup>[120, 130]</sup>。

#### 1.4.1 东京湾区:远源长周期地震动的场地放大

图 32~34 分别展示了 2011 年东日本大地震期

间,东京湾区 12 个台站记录的地表 EW 和 NS 向加速度时程、 $SA_H$  曲线及相对于井底(基岩)的  $SA_H$  放大倍数。其中,K-NET 台站的地表  $SA_H$  放大倍数是基于邻近 KiK-net 台站的井底记录计算的。可以发现,东京湾区的地表地震动持时很长,普遍达 5 min 以上。不同台站场地地表  $PGA_H$  及地震动频谱特性差异显著。总体而言,东京湾区平原场地放大效应极为显著,但东京湾区以西、以东北和以东平原场地放大效应存在显著差异,即场地条件显著影响地震波放大效应。

在东京湾以西平原,相距仅 2.86 km 的台站 TKY018 和 CHB028(临近东京湾西北角)记录到地表记录  $SA_H$  曲线频谱特性的显著差异。CHB028 地表记录的  $SA_H$  曲线呈现单峰 ( $T_p \approx 0.20$  s) 特征;而 TKY018 地表记录的  $SA_H$  曲线则呈现宽频带特征:其 EW 分量无明显的峰值,NS 分量呈现单峰,对应的  $T_p \approx 0.50$  s。两个台站记录的峰值  $SA_H$  均高达约 1.0g。此外,台站 TKY007 和 KNGH10 记录的地表  $SA_H$  曲线亦呈单峰特征,其 EW 和 NS 分量的峰值对应的  $T_p$  分别介于 0.20~0.30 s 和 0.40~0.60 s,其中 KNGH10 地表记录的 EW 分量峰值  $SA_H$  超过 1.4g。台站 TKYH11 和 KNG001 则记录到具有宽频带特征的地表  $SA_H$  曲线。作为比较,图 33 同时给出了

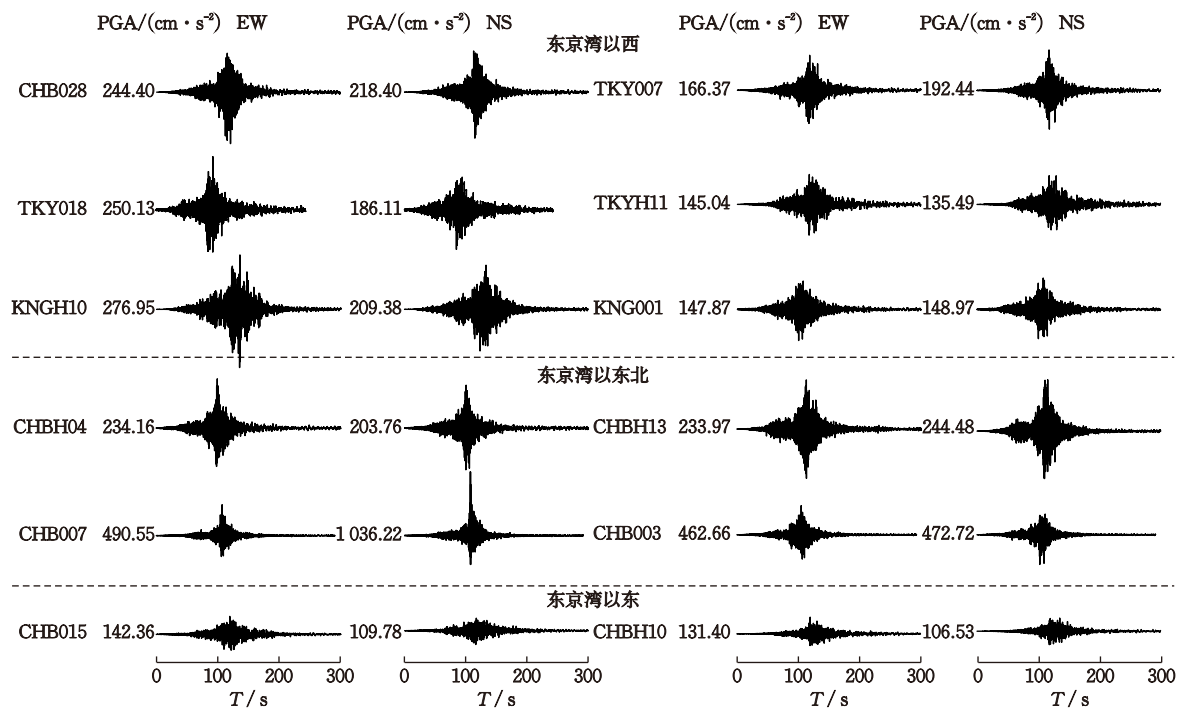


图 32 东京湾区 12 个强震台站在 2011 年东日本大地震中记录的水平分量地表加速度时程(来源:KiK-net 和 K-NET)

Fig.32 Seismograms (EW and NS components) recorded at the surface by 12 strong-motion stations in the Tokyo Bay area during the 2011 Tohoku earthquake (sources: KiK-net and K-NET)

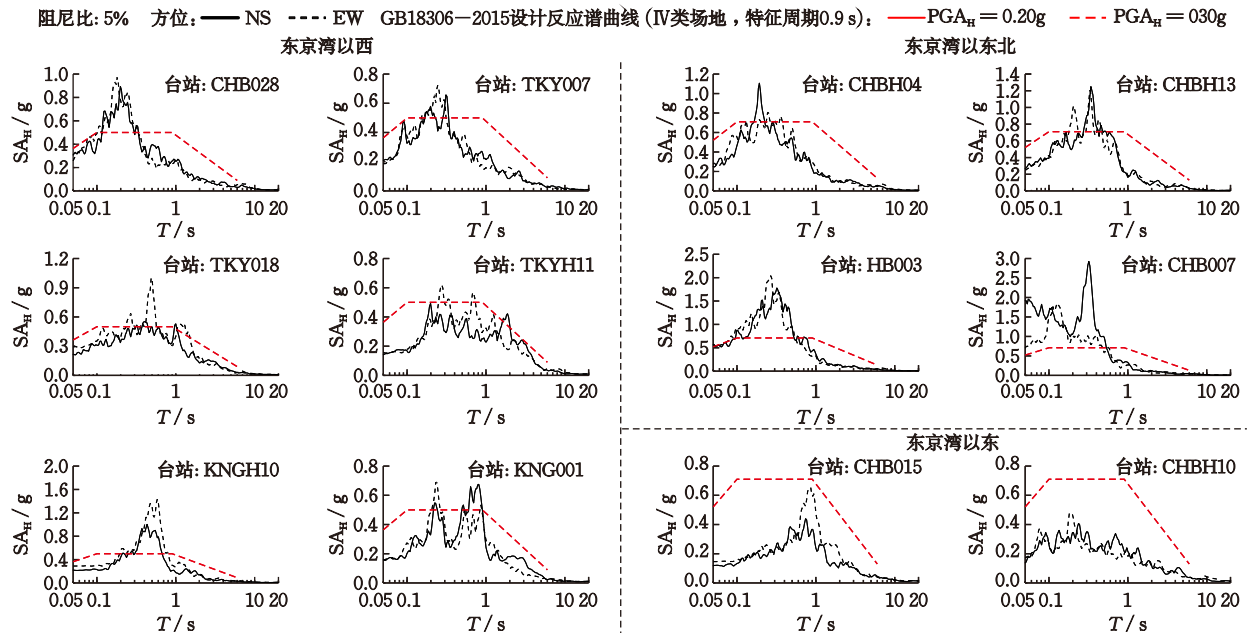


图 33 东京湾区 12 个强震台站在 2011 年东日本地震中记录的水平分量地表加速度反应谱 (来源: KiK-net 和 K-NET)  
 Fig.33 Acceleration response spectra (EW and NS components) at the surface recorded by the 12 strong-motion stations in the Tokyo Bay area during the 2011 Tohoku earthquake (sources: KiK-net and K-NET)

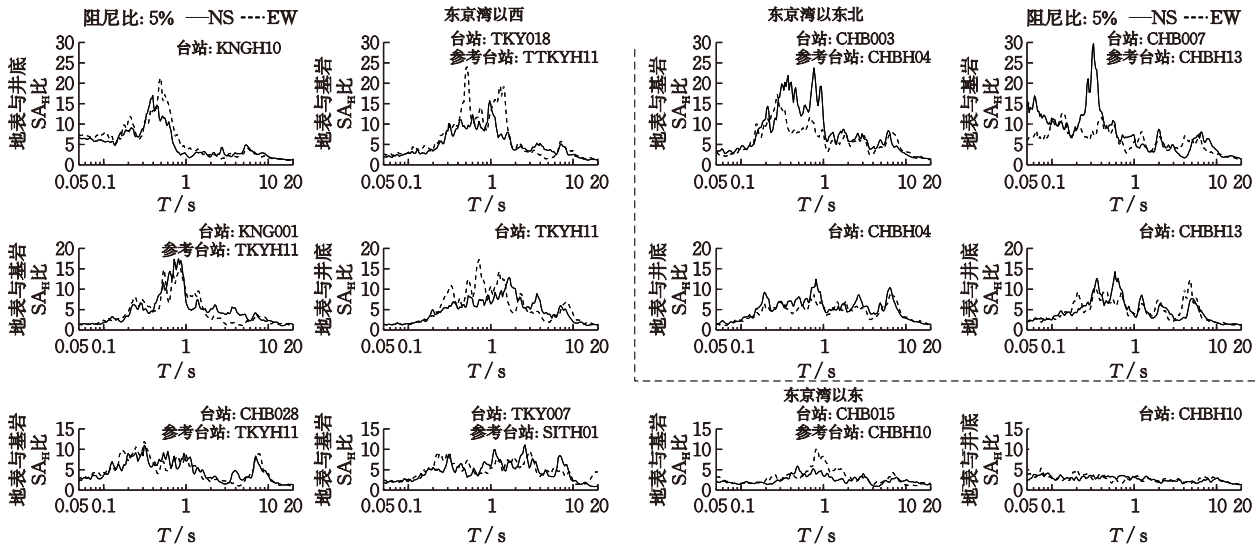


图 34 东京湾区 12 个强震台站在 2011 年东日本地震中记录的地表与井底 (基岩) 谱加速度比 (来源: KiK-net 和 K-NET)  
 Fig.34 Spectral acceleration ratios of surface-to-downhole bedrock motions for the EW and NS components recorded at the 12 strong-motion stations in the Tokyo Bay area during the 2011 Tohoku earthquake (sources: KiK-net and K-NET)

《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)中 IV 类场地的  $SA_H$  曲线 (特征周期  $T_g=0.90$  s,  $PGA_H$  分区 0.20g 档)。该区域地表  $PGA_H$  介于 GB18306—2015 中  $PGA_H$  分区值 0.10g~0.20g 档, 但峰值  $SA_H$  反应强烈, 均显著超过 GB18306—2015 中 IV 类场地  $SA_H$  曲线平台值  $DSA_{FP}$  (0.50g), 其中, KNGH10 场地的地表  $SA_H$  峰值达到  $DSA_{FP}$  的近 3 倍, CHB028 和 TKY018 场地亦达  $DSA_{FP}$  的 2 倍。该平原中长期

地震动放大效应极为显著, 地表与井底 (基岩) 的  $SA_H$  比最大可达 10~25 倍, 其地表  $SA_H$  峰值甚至超过 GB18306—2015 中 IV 类场地 0.20g 档的罕遇地震水平。

东京湾区大多数地震记录的地表峰值  $SA_H$  对应的周期小于 1.0 s。这意味着地震期间小于 1.0 s 的高频辐射显著, 并导致了大的地表  $PGA_H$ ; 也观测到几个超过 1.0 s 的峰值周期, 尽管地表  $PGA_H$  不太

大。在东京湾以东北平原,台站 CHBH04、CH-BH13、CHB003 和 CHB007 记录的地表  $SA_H$  曲线均呈现为单峰特征,峰值对应的  $T_p$  依次约为 0.20、0.35、0.30 和 0.30 s,且峰值  $SA_H$  均超过 1.0g,其中 CHB003 和 CHB007 分别高达约 2.0g 和 3.0g。该区域的地表  $PGA_H$  大多对应 GB18306—2015 中分区值的 0.30g 档;但台站间差异显著:个别台站的地表记录对应于 0.10g 档或 0.40g 档,而台站 CHB007 记录的地表  $PGA_H$  竟超过 1.0g。CHB003 与 CHB007 场地的地表  $SA_H$  峰值分别略超 2.0g 和接近 3.0g,远高于 GB18306—2015 中 IV 类场地 ( $T_g=0.90$  s,  $PGA_H$  分区 0.30g 档)的  $DSA_{FP}$  (0.712g);CHBH04 与 CHBH13 场地的地表  $SA_H$  峰值分别约为 1.1g 和 1.2g,亦超过该  $DSA_{FP}$ 。该区域同样表现出极强的中长期地震动放大效应,地表与井底(基岩)的  $SA_H$  比可达 10~30 倍,周期 0.2~10 s 的地震动成分普遍放大 5 倍以上。

东京湾以东平原不同台站记录的地表  $PGA_H$  差异显著,多数台站记录的地表  $PGA_H$  对应 GB18306—2015  $PGA_H$  分区值的 0.10g 档。例如,CHBH10 地表记录的 EW 分量  $PGA_H$  为 0.134g,其地表  $SA_H$  峰值略高于 IV 类场地 ( $T_g=0.90$  s,  $PGA_H$  分区 0.15g 档)  $DSA_{FP}$  (0.412g);个别台站如 CHB015(地表  $PGA_H$  为 0.145g,EW 分量)的地表  $SA_H$  峰值达到该

$DSA_{FP}$  的 1.5 倍。值得注意的是,该平原南端区域台站记录的地表  $PGA_H$  较低,多对应  $PGA_H$  分区值的 0.05g 档。与东京湾以西及以东北平原相比,东京湾以东平原的场地放大效应明显较弱:除个别台站部分谐波放大可达 10 倍外,地表与井底(基岩)的  $SA_H$  比普遍低于 5 倍。

H. Takewaki 等<sup>[120]</sup> 与 T. Furumura 等<sup>[122]</sup> 针对 2011 年东日本地震在关东盆地激发的地表长周期地震动及其对高层建筑共振效应开展了研究。图 35 展示了该地震期间 K-NET 东京新宿台站 TKY007 地表记录的 EW 与 NS 分量速度时程及其  $SV_H$  曲线。该台站 EW 和 NS 分量的地表  $PGA_H$  分别为 0.170g 和 0.196g,相对于邻近台站 SITH01 井底基岩记录的场地放大倍数分别为 3.54 和 3.75;相应的地表  $PGV_H$  分别为 17.55 cm/s 和 24.36 cm/s,地震动持续时间超过 5 min。该 EW 分量的地表  $SV_H$  曲线在  $T_p=2.05$  s 处达到 53.1 cm/s,而 NS 分量则在  $T_p=2.65$  s 处高达 59.3 cm/s。TKY007 场地记录表明,地表地震动包含显著的水平向长周期谐波成分,中长周期段 ( $T>1.0$  s) 地表  $SV_H$  普遍高于 35.0 cm/s,且包含了周期长达 10 s 的宽频带长周期谐波成分。这意味着该台站记录地震动可能会引起超高层建筑的强烈晃动甚至破坏。

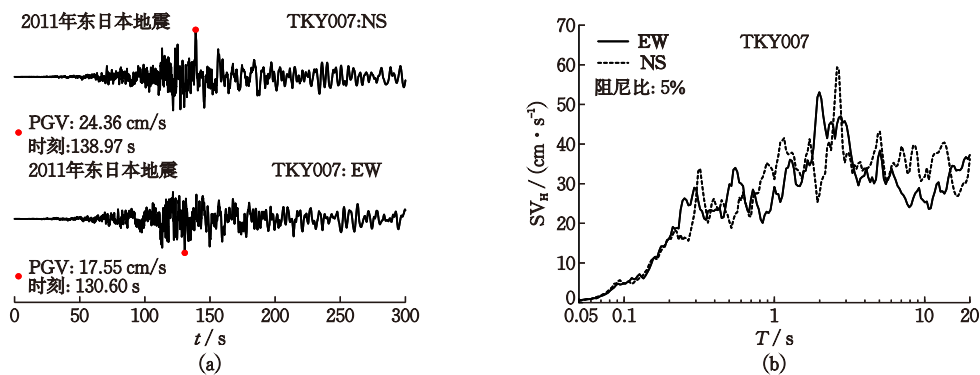


图 35 2011 东日本地震期间东京台站 TKY007 记录的水平向地表速度时程及其速度反应谱(数据:K-NET)<sup>[120]</sup>

Fig.35 Surface velocity waveforms and velocity response spectra (EW and NS components) recorded at the station TKY007 in Tokyo city during the 2011 Tohoku earthquake (source: K-NET)<sup>[120]</sup>

图 36 对比了 2011 年东日本地震时东京湾以西三个台站(KNGH10、KNGH11 与 KNG001)记录的地表速度时程及其  $SV_H$  曲线(EW 和 NS 分量  $PGV_H$  较大者)。这三个场地地表  $PGV_H$  均达到我国地震烈度表 VIII 度对应的水平。KNGH10 场地 EW 分量地表  $PGA_H$  为 0.282g,相对井底的场地放大倍数为 5.90,相应的地表  $PGV_H$  为 27.98 cm/s。地表  $SV_H$  曲

线呈单峰型,峰值  $SV_H=132.48$  cm/s,对应的  $T_p=0.60$  s。KNGH11 场地 NS 分量地表  $PGA_H$  为 0.142g,相对井底的场地放大倍数为 2.72,相应的地表  $PGV_H$  为 23.16 cm/s。地表  $SV_H$  曲线呈双峰特征,主峰  $T_p=0.86$  s、峰值  $SV_H=73.90$  cm/s,次峰  $T_p=1.62$  s、峰值  $SV_H=62.10$  cm/s。KNG001 场地 NS 分量地表  $PGA_H$  为 0.152g,相对台站 TKYH11 井

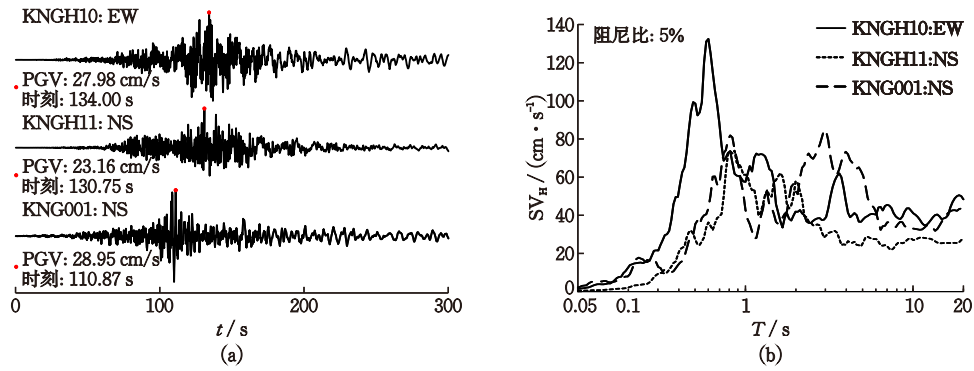


图 36 2011 东日本地震期间东京湾以西台站 KNGH10、KNGH11 和 KNG001 记录的水平向地表速度时程及其速度反应谱 (数据:KiK-net 与 K-NET)

Fig.36 Surface velocity waveforms and velocity response spectra (EW and NS components) recorded at the stations KNGH010, KNGH011, and KNG00 in the west Tokyo Bay during the 2011 Tohoku earthquake (sources: KiK-net and K-NET)

底记录的场地放大 3.15 倍,相应的地表 PGV<sub>H</sub> 约为 28.95 cm/s。地表 SV<sub>H</sub> 曲线呈双峰型,主、次峰 T<sub>p</sub> 分别约为 2.94 s 和 0.81 s,峰值 SV<sub>H</sub> 分别为 84.55 和 81.89 cm/s,也即,该场地地表地震动包含极为显著的周期约 1 s 和 3 s 的长周期谐波分量。因此,东京湾以西场地记录的地表地震动均包含相当强的水平向中-长周期(T>0.5 s)谐波成分。

图 37 对比了东京湾以西的东京台站 TKY007 和以东的千叶台站 CHBH10 在 2011 年东日本 M<sub>w</sub>9.1 地震与 2004 年新潟中越 M<sub>w</sub>6.8 地震期间记录的水平向地表速度时程及其 SV<sub>H</sub> 曲线。相对这两个台站,东日本地震位于东北侧,震中距分别约为 390 km(TKY007)和 365 km(CHBH10);新潟地震位于西北侧,震中距分别约为 190 km(TKY007)和 230 km(CHBH10)。东日本地震期间,TKY007 和

CHBH10 地表记录 NS 分量的峰值 SV<sub>H</sub> 分别达到 59.4 cm/s(卓越周期 T<sub>p</sub>=2.61 s)和 76.6 cm/s(T<sub>p</sub>=4.34 s),两个场地的地表 SV<sub>H</sub> 曲线分别在周期 T>0.3 s 和 T>0.7 s 部分持续高于 30 cm/s。而在新潟中越地震期间,两个台站均表现出明显的长周期地震动放大现象:TKY007 场地 EW 分量的峰值 SV<sub>H</sub> 为 23.7 cm/s(T<sub>p</sub>=6.22 s),CHBH10 场地 NS 分量的峰值 SV<sub>H</sub> 为 19.0 cm/s(T<sub>p</sub>=6.80 s),地表 SV<sub>H</sub> 放大集中于周期 6~8 s 范围。这与 Y. Tanaka 等<sup>[129]</sup>关于关东盆地中心 T<sub>p</sub>≈7 s 的结论一致。相比之下,在较短周期(T<4 s)范围,地表 SV<sub>H</sub> 显著降低,说明该地震对低-中层建筑(低于层数约 30 层、高度约 150 m 以下)的影响相对较小。此外,同一台站 TKY007 或 CHBH10 在 2004 年新潟中越地震中记录的地表 SV<sub>H</sub> 明显低于其在 2011 年东日本地震中的记录;而

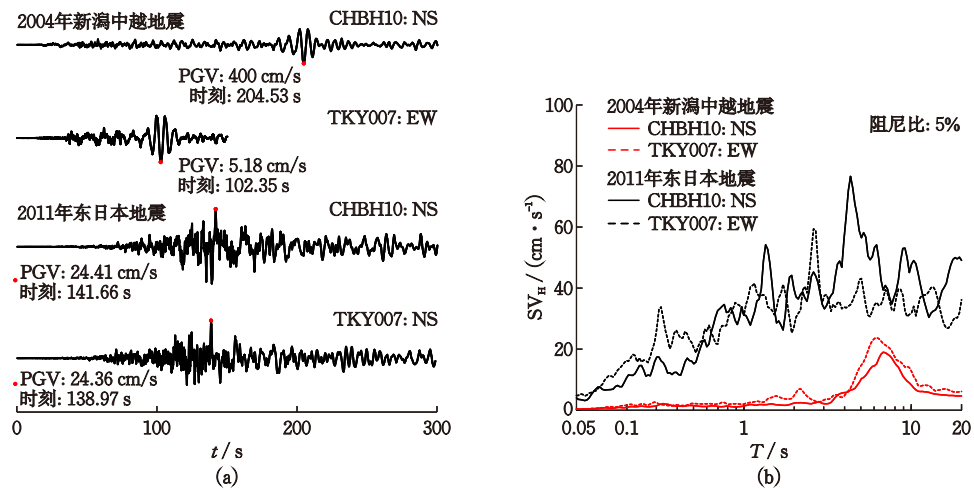


图 37 2011 年东日本和 2004 新潟中越地震期间东京湾以西台站 TKY007 和以东台站 CHBH10 记录的水平向地表速度时程及其速度反应谱的比较 (数据:KiK-net 与 K-NET)

Fig.37 Recorded horizontal surface velocity time histories and spectral velocities during the 2011 Tohoku and 2004 Niigata Chuetsu earthquakes: station TKY007 (west Tokyo Bay) vs. station CHBH10 (east Tokyo Bay) (sources: KiK-net and K-NET)

在 2011 年东日本地震期间东京湾以西台站 TKY007 和以东台站 CHBH10 记录的地表  $SV_H$  的大小及频谱特征也存在显著差异。

为对比 2011 年东日本  $M_w$ 9.0 级地震期间东京盆地中心(东京湾东北角附近)的长周期地震动强度,图 38 展示了四次地震期间在东京湾以东竖井台站 CHBH10 地表记录的速度时程及其  $SV_H$  曲线。这四次地震分别为:2011 年东日本  $M_w$ 9.1 地震、2004 年新潟中越  $M_w$ 6.8 地震、2004 年纪伊半岛东南近海  $M_w$ 7.4 地震(台站西南约 390 km)以及 1944 年日本东南海  $M_w$ 8.0 地震(台站西南约 435 km)。在 2011 年东日本地震期间,该场地地表  $PGV_H$  为 24.41 cm/s,地表  $SV_H$  曲线峰值达 50.33 cm/s(对应的  $T_p=1.69$  s),且在很宽周期范围内( $T=0.5\sim 30$  s)引发相当强烈的反应( $SV_H$  持续超过 30 cm/s)。这表明地震波在东京湾以东平原极厚沉积层发生显著放大,在东京盆地中心区形成了强烈且持久的长周期运动。该  $SV_H$  值分别约为 2004 年新潟中越地震(地表  $PGV_H$  为 4.00 cm/s,地表  $SV_H$  峰值为 24.08 cm/s,  $T_p=9.81$  s)和 2004 年东南近海  $M_w$ 7.4 级地震(地表  $PGV_H$  为 5.18 cm/s,地表  $SV_H$  峰值为 10.90 cm/s,  $T_p=7.34$  s)的 1.2 倍和 3 倍,且后两次地震显著的地表  $SV_H$  反应仅集中于  $T=9\sim 12$  s 的窄周期段。相比

之下,1944 年东南海地震期间,东京盆地中心观测到了显著发育的长周期( $T>10.0$  s)地震动,地表峰值  $SV_H$  高达 200.71 cm/s( $T_p=12.83$  s),且在中-长周期范围内( $T=0.3\sim 30.0$  s)引发了相当强烈的反应( $SV_H$  持续超过 30 cm/s;地表  $PGV_H$  为 22.12 cm/s)<sup>[131]</sup>。由此可见,2011 年东日本地震对不同周期特性的低层至高层建筑均会产生显著影响;1944 年东南海地震则可能会对长周期结构产生尤为严重的影响;而 2004 年的两次地震对建筑物的影响范围较为有限,其显著的共振反应主要集中在周期 6~8 s 的高层建筑和大型储油罐上。值得注意的是,尽管 2011 年东日本地震与 1944 年东南海地震至千叶县的距离相近,但 2011 年在 CHBH10 记录的地表长周期(10.0~20 s)地震动的  $SV_H$  仅为 1944 年在东京湾以东(千叶)东金(Togane)观测到的地表长周期地震动水平的 1/4 至 1/2。综上,2011 年东日本  $M_w$ 9.1 地震引发的地震动影响范围和强度均极为显著。然而,东京湾以东平原长周期地震动的发展并不突出,其地表  $SV_H$  水平总体上与  $M_w$ 7-8 地震引起的地表  $SV_H$  水平是可比的。这表明,地表长周期地震动的水平不仅受震级控制,还受到震源破裂过程、地震波从震源到东京盆地的传播路径效应以及在关东盆地 3D 非均质地层结构中的传播路径效应的共同影响。

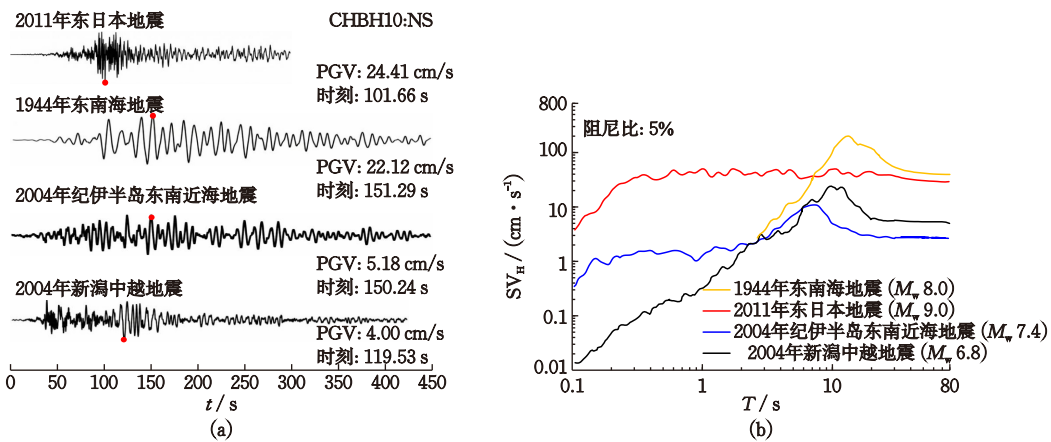


图 38 东京湾以东台站 CHBH10 在 2011 年东日本地震、2004 年新潟中越和东南近海地震及 1944 年东南海地震期间记录到的地表速度时程和速度反应谱的对比<sup>[122]</sup>

Fig.38 Comparison of horizontal velocity response spectra for surface strong motions recorded at the station CHBH10 (east of Tokyo Bay) during the 2011 Tohoku, the 2004 mid-Niigata, the 2004 SE-off-Kii-Peninsula, and the 1944 Tonankai earthquakes<sup>[122]</sup>

#### 1.4.2 茨城-栃木地区:相对近源地震动的场地放大

图 39~41 分别展示了 2011 年东日本地震期间, KiK-net 和 K-NET 台网在茨城-栃木地区 16 个台站记录的地表 EW 和 NS 向加速度时程、 $SA_H$  曲线及相对于井底(基岩)的  $SA_H$  放大倍数。其中, K-NET 台

站的地表  $SA_H$  放大倍数也是基于邻近 KiK-net 台站的井底记录计算的。可以发现,该地区地表地震动持时极长,达 5 min 以上,不同台站的地表  $PGA_H$  及频谱特性差异显著。K-NET 台站 TCG014、IBR003 和 IBR013 的地表  $PGA_H$  高达 1.2g 以上,该地区高地

表  $PGA_H$  记录具有相似的卓越周期较短的特征。总体而言,该地区场地放大效应极为显著,但不同台站的场地放大效应存在显著差异;且大多数台站记录的卓越周期  $T_p$  小于 0.5 s。需注意的是,栃木县小

川台站 TCG006 记录 NS 分量  $T_p$  达 1.31 s,其峰值  $SA_H$  高达 1.49g。该场地在周期 0.40~5.0 s 范围内,地表  $SA_H$  放大约 5~16 倍,其中周期约 1.3 s 的谐波分量放大略超 16 倍。邻近东京湾以东北的台站

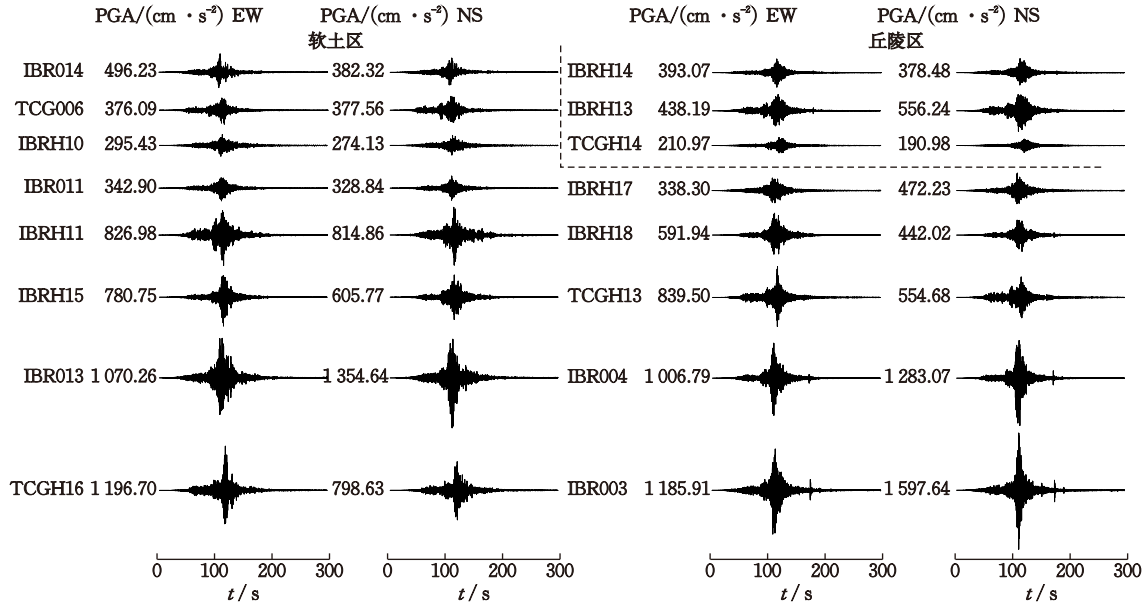


图 39 茨城-栃木地区 16 个强震台站在 2011 年东日本地震中记录的水平分量地表加速度时程 (来源:KiK-net 和 K-NET)  
Fig.39 Surface seismograms (EW and NS components) recorded at the 16 strong-motion stations in the Ibaraki-Tochigi region during the 2011 Tohoku earthquake (sources: KiK-net and K-NET)

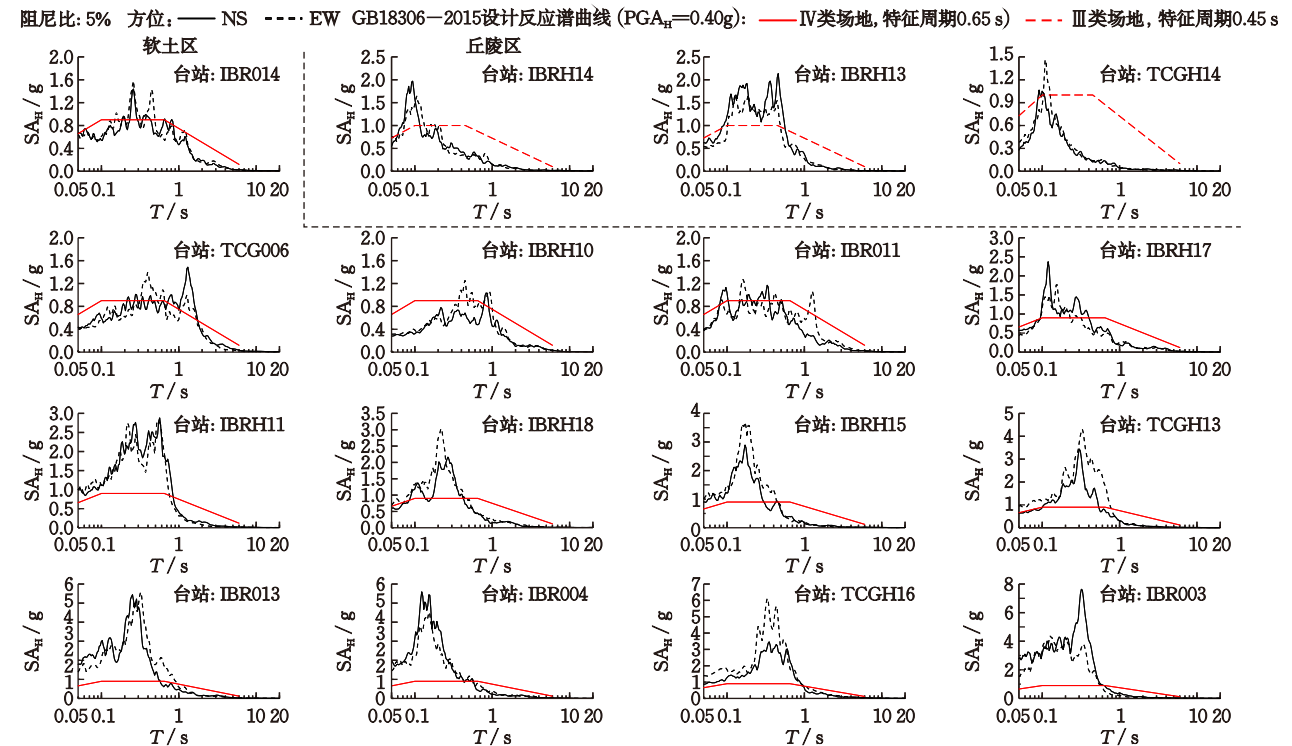


图 40 茨城-栃木地区 16 个强震台站在 2011 年东日本地震中记录的水平分量地表加速度反应谱 (来源:KiK-net 和 K-NET)  
Fig.40 Surface acceleration response spectra (EW and NS components) at the 16 strong-motion stations in the Ibaraki-Tochigi region during the 2011 Tohoku earthquake (sources: KiK-net and K-NET)

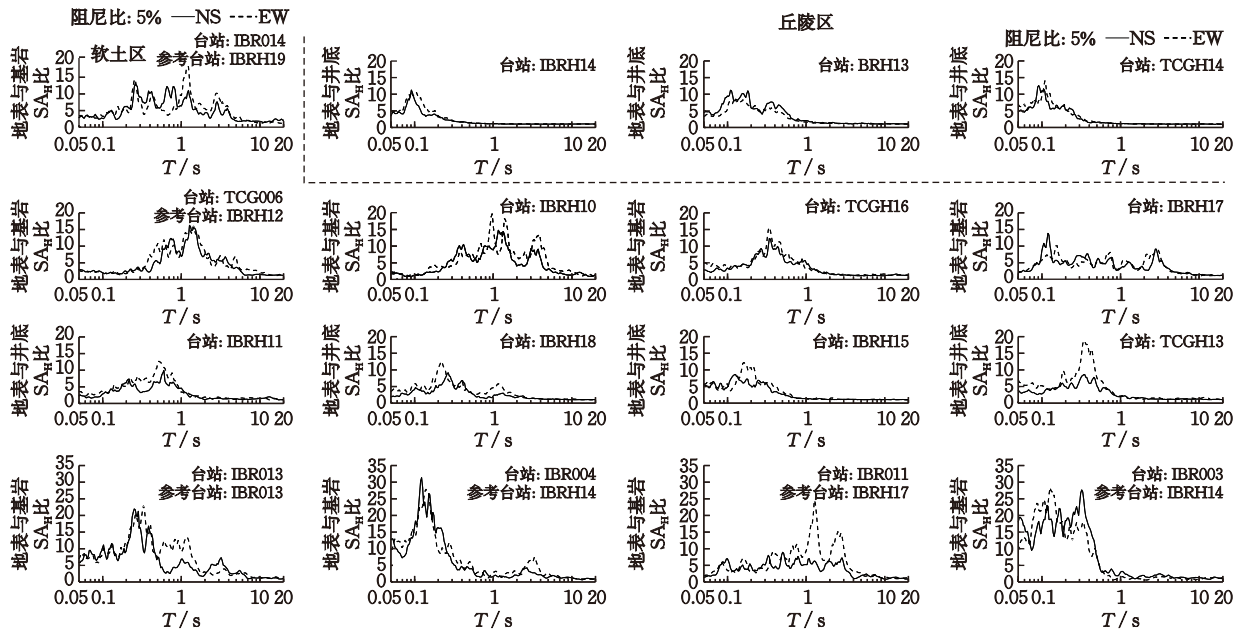


图41 2011东日本地震时茨城-栃木地区16个台站的水平向地表与井底(基岩)的谱加速度比(来源:KiK-net和K-NET)  
 Fig.41 Spectral acceleration ratios of surface-to-downhole bedrock motions (EW and NS components) recorded at the 61 KiK-net and K-NET stations in the Ibaraki-Tochigi region during the 2011 Tohoku earthquake (sources: KiK-net and K-NET)

IBRH10、IBRH17、IBR011、IBR014地表记录显示, 中-长周期( $T > 1.0$  s)地震动放大显著, IBRH10和IBR014场地分别对周期约1.2和1.3 s的谐波分量放大近20倍, 而IBR011场地对该周期段谐波放大近25倍。IBRH17场地则对周期0.2~3.0 s的宽频带地震动产生5~10倍的放大, 并对高频分量(周期约0.12 s)放大近10倍。

作为比较,图40中给出了GB18306—2015中Ⅲ类场地( $T_g=0.45$  s)和Ⅳ类场地( $T_g=0.65$  s)的 $SA_H$ 曲线(PGA<sub>H</sub>分区值0.40g档)。该地区多数台站记录的地表PGA<sub>H</sub>对应GB18306—2015中分区值0.40g档。然而,有8个台站记录的地表PGA<sub>H</sub>超过了该档上限值0.75g,其值介于0.796g~1.629g。丘陵场地IBRH14和TCGH14地表记录的 $SA_H$ 曲线呈单峰特征,其 $T_p$ 约为0.09 s,对应的峰值 $SA_H$ 分别为1.97g和1.46g。该值远高于GB18306—2015中Ⅲ类场地的 $SA_H$ 曲线平台值 $DSA_{FP}$ (1.0g)。短周期地震波(0.07~0.2 s)在这两个场地的放大超过5倍,约0.1 s周期的谐波分量放大可达10~15倍。另一丘陵场地IBRH13地表记录的 $SA_H$ 曲线则为宽频双峰特征。在约0.1~0.6 s周期范围内, $SA_H$ 持续超过该 $DSA_{FP}$ ,场地放大5倍以上;峰值 $SA_H$ 高达2.13g,对应的 $T_p=0.18$  s,该周期附近的谐波分量放大超过10倍。

该地区软土地表的地表 $SA_H$ 曲线频谱特性表

现出显著差异。相较于GB18306—2015中Ⅳ类场地的 $DSA_{FP}$ (0.9g),台站IBR004和IBR013记录的地表 $SA_H$ 峰值高达该 $DSA_{FP}$ 的5.5倍以上,其对应的 $T_p$ 分别低于0.15 s和0.35 s,接近共振频率的谐波分量放大15~30倍。台站IBRH11和IBRH18地表记录的峰值 $SA_H$ 接近该 $DSA_{FP}$ 的3倍,共振频率附近的谐波分量放大约10倍。其中,IBRH11场地地表 $SA_H$ 曲线呈双峰特征,主、次峰对应的 $T_p$ 分别低于0.60 s和0.30 s;IBRH18场地的地表 $SA_H$ 曲线呈单峰特征,对应的 $T_p$ 介于0.20~0.30 s。台站IBR014和TCG006地表记录的峰值 $SA_H$ 约为该 $DSA_{FP}$ 的2倍,且两者的地表 $SA_H$ 曲线均呈宽频特征:IBR014场地地表 $SA_H$ 在 $T=0.15\sim0.80$  s范围内持续高于该 $DSA_{FP}$ ,中-长周期(0.20~4.0 s)地震动场地放大约为5~18倍;TCG006场地地表 $SA_H$ 则在 $T=0.20\sim1.6$  s范围内持续超过该 $DSA_{FP}$ ,中-长周期(0.50~2.0 s)谐波分量的放大约10~16倍。

图42展示了台站TCG014、IBR003和IBR013记录的地表水平向速度时程与 $SV_H$ 曲线,以进一步理解这些强地震动对震害的影响。这三个台站记录,地表PGV<sub>H</sub>介于48.6~63.2 cm/s、NS分量地表PGV<sub>H</sub>介于52.9~68.3 cm/s,其地表 $SV_H$ 曲线在较短周期范围内(0.28~0.42 s)存在明显的共振现象:三者EW分量的峰值 $SV_H$ 分别为344.4、213.4和286.3 cm/s,而NS分量的峰值 $SV_H$ 分别为192.5、

399.2 和 231.2 cm/s。但在中-长周期范围 (1.0~20.0 s) 中却发现了相对较低的地表  $SV_H$  反应 ( $< 100$  cm/s) (图 42)。这样很高地表  $PGV_H$  (达到我国地震烈度表 IX 度或 MMI 的 VIII 度对应的水平) 的高频地震波可能是由断层大规模滑动产生的, 反映了沿

断层发生的不规则震源破裂的传播。这种“很高的地表  $PGV_H$  和  $SV_H$ 、较短的  $T_p$ ”现象反映了相对近源地震动富含高频成分的特征。这种具有长持时、强震动的高频波效应可能会对具有较短自振周期的结构产生破坏性影响<sup>[122, 132]</sup>。

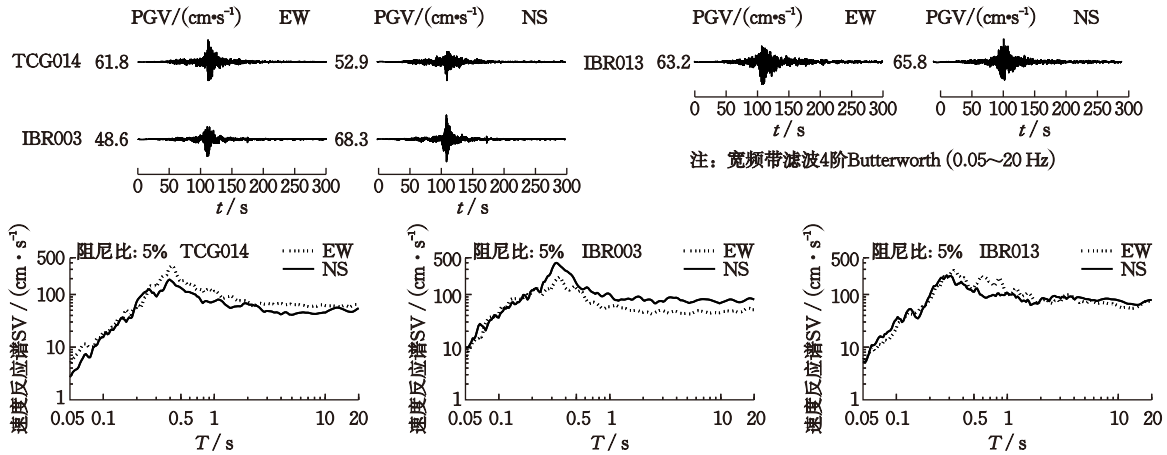


图 42 台站 TCG014、IBR003 和 IBR013 在 2011 年东日本地震中记录的水平向地表速度时程和谱速度 (数据来源: K-NET)  
 Fig.42 Surface velocity time-histories and velocity response spectra (EW and NS components) recorded at the station TCG014 in Tochigi prefecture and the stations IBR003 and IBR013 in Ibaraki prefecture during the 2011 Tohoku earthquake (sources: K-NET)

#### 1.4.3 场地液化效应对地表地震动特性的影响

2011 年东日本地震提供了多个珍贵的液化场地强震动记录, 对认识液化过程中地震动特性的变化具有重要价值。尽管场地液化对地震动的影响已被广泛认识, 但此前液化场地记录极为稀缺。在这次地震中, KiK-net 与 K-NET 台站在多个液化场地获取了高质量的强震记录。

图 43 对比了东京湾东北角相距约 4.0 km 的台站 CHB009 与 CHB024 记录。CHB009 场地地表  $PGA_H$  和  $PGV_H$  分别为 0.185g 和 40.68 cm/s, 覆盖层厚度 15 m ( $V_s < 500$  m/s), 虽地下存在饱和砂层但未出现液化的地表迹象<sup>[133]</sup>。其加速度时程未呈现明显变化 (幅值衰减和卓越周期延长), 强震动段 (幅值  $> 50$  cm/s<sup>2</sup>) 持续约 56 s; 地表  $SA_H$  曲线呈双峰特征, 主峰略高于 0.88g ( $T_p = 0.47$  s), 次峰约 0.80g ( $T_p = 0.18$  s); 地表  $SV_H$  谱形宽缓, 在  $T = 0.5 \sim 11$  s 范围内维持在 60 cm/s 左右, 周期 0.76 s 处达到峰值 82.3 cm/s。然而, CHB024 场地记录到明显的喷砂冒水及地裂等液化现象<sup>[133]</sup>, 至 20 m 深处  $V_s$  约 200 m/s,  $V_{s30} = 248.5$  m/s, 钻孔未揭示基岩深度。其地表  $PGA_H$  和  $PGV_H$  分别为 0.237g 和 30.48 cm/s。地表  $SA_H$  与  $SV_H$  曲线均呈宽频带特征, 在  $T = 0.2 \sim$

1.0 s 段  $SA_H$  出现几个相近的峰值, 最大峰值为 0.51g ( $T_p = 0.43$  s); 在  $T = 0.8 \sim 10$  s 范围内  $SV_H$  约为 60 cm/s, 峰值 98.9 cm/s ( $T_p = 3.74$  s)。需注意, 加速度时程在约 120~150 s 之间出现几个幅值类似的尖峰, 之后时程发生显著变化: 振幅突减、高频成分衰减 (对应周期延长) 并出现尖峰状特征。这些特征与液化触发后的典型地震动特征一致, 可归因于液化导致的场地软化与波传播特性改变。

图 44 对比了相对近源区西南角 IBRH11 和 IBR014 台站 (相距 13.75 km) 地表记录的加速度时程与  $SA_H$  曲线, 以及速度时程与  $SV_H$  曲线 (选用 EW 和 NS 分量中  $PGA$  较大者)。IBRH11 场地在 2011 年东日本地震中发生液化, 其 NS 分量  $PGA_H$  和  $PGV_H$  分别达 0.831g 和 61.91 cm/s。该场地 30 m 以浅为风化沉积土层, 以下为第三纪或更早期的基岩<sup>[134]</sup>。T. Satoh 等<sup>[135]</sup> 指出, 该处地表地震动强烈的原因源于 30 m 深处显著的波阻抗界面: 上覆沉积土层  $V_s$  低于 381 m/s, 而下伏硬岩  $V_s$  高达 2 371 m/s。地震动在约 115 s 达到  $PGA_H$  和  $PGV_H$ ,  $SA_H$  曲线呈双峰特征, 主、次峰  $SA_H$  分别高达 2.88g ( $T_p = 0.57$  s) 和 2.76g ( $T_p = 0.28$  s); 当  $T$  超过 0.7 s 后  $SA_H$  值急剧降低。  $SV_H$  曲线呈单峰特征, 峰值  $SV_H = 249.64$  cm/s

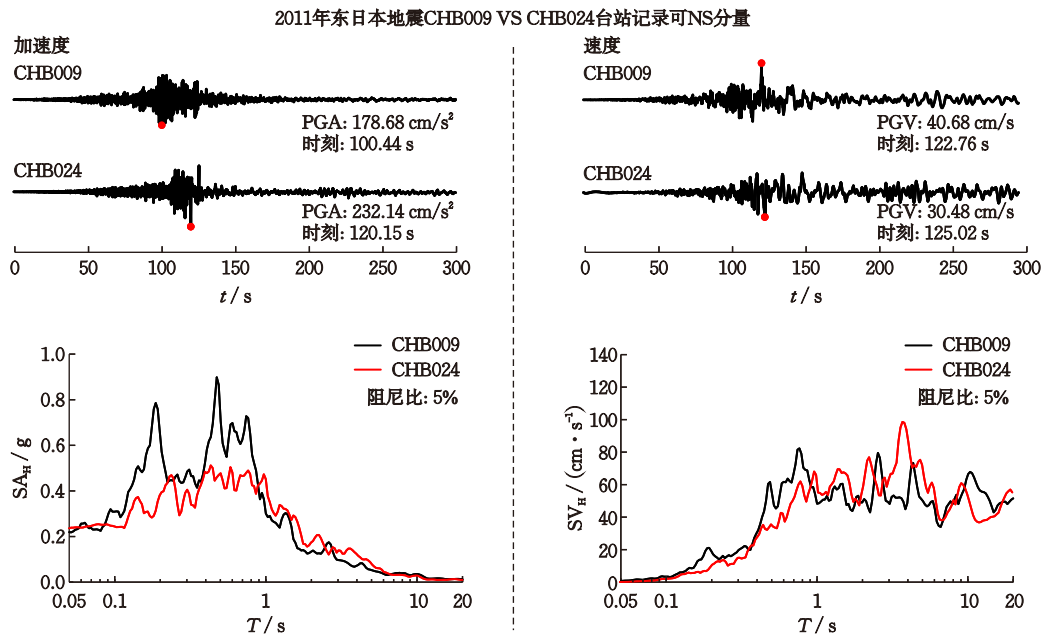


图 43 2011 年东日本地震时东京湾台站 CHB009 和 CHB024 记录的 NS 分量地表地震动特性的比较 (数据: K-NET)  
 Fig.43 Comparison of site surface seismograms, spectral accelerations and velocities (NS component) recorded at CHB009 and CHB024 stations in the Tokyo Bay during the 2011 Tohoku earthquake (source: K-NET)

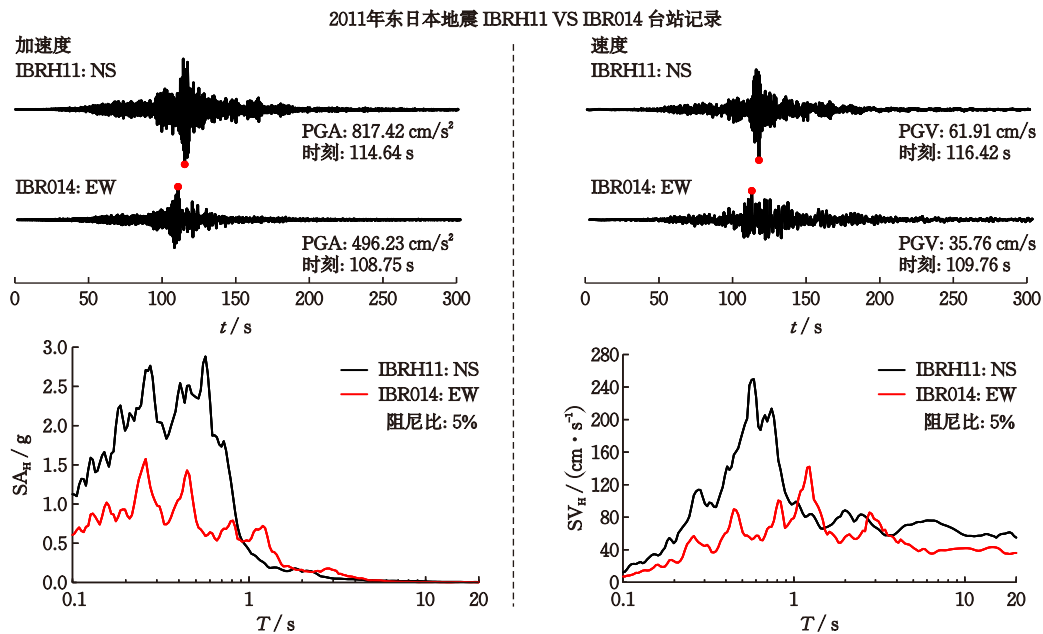


图 44 2011 年东日本地震时期 IBRH11 和 IBR014 台站的地表记录、谱加速度和谱速度的对比 (数据: KiK-net 和 K-NET)  
 Fig.44 Comparison of seismograms and the corresponding spectral accelerations and velocities recorded at stations IBRH11 and IBR014 in the relatively near-source region during the 2011 Tohoku earthquake (sources: KiK-net and K-NET)

( $T_p=0.58$  s), 且在周期 0.2~10 s 内  $SV_H$  持续超过 60 cm/s。这表明该地震动对中长周期结构具有极强烈的破坏作用。

IBR014 台站位于茨城霞浦湖西侧 (东京以北约 60 km)。在 2011 年地震期间, 该台站附近观测到土层液化地表迹象<sup>[136]</sup>。IBR014 记录 EW 分量强震动

( $\geq 0.05g$ ) 持时超过 2 min, 地表  $PGA_H$  和  $PGV_H$  分别略高于 0.50g 和 35.7 cm/s。接近 110 s 时 EW 分量记录中出现高频尖峰, 即  $PGA_H$  发生于此时此刻; 此后, 尽管地震动幅值仍保持较高水平, 但其频率迅速降低; 至约 120 s 时, 地震动幅值开始显著减小。其  $SA_H$  曲线也呈双峰形态, 主、次峰  $SA_H$  分别为

1.58g( $T_p=0.26$  s)和1.53g( $T_p=0.45$  s); $SV_H$ 曲线为单峰形态,峰值 $SV_H$ 高达142 cm/s( $T_p=1.23$  s)。IBRH11台站与IBR014台站相距约28 km,前者的地表 $PGA_H$ 和峰值 $SA_H$ 分别为后者的1.65倍和1.82倍,但IBR014记录在中长周期(约1.0~1.5 s)的地表 $SA_H$ 和 $SV_H$ 值反而显著高于IBRH11记录。应注意的是,IBRH11记录在长周期(4.0~20.0 s)范围内的 $SV_H$ 高达IBR014记录的1.5~2.0倍。

通过对台站地震记录的EW和NS分量分别进行Stockwell变换,并求取变换结果的范数,可将两个水平分量合并为单一时频谱<sup>[137]</sup>。该范数保留了

EW和NS分量的主要频率成分,既能减弱方向性偏振波影响,也能捕捉场地液化过程中高频成分的显著衰减特征。此外,范数运算增强了频谱峰值,有助于提升频谱变化特征的视觉辨识度,从而更便于识别场地液化引起的频谱成分改变<sup>[136]</sup>。该数值既是峰值谱振幅,也对应谐波频率。图45展示了2011年东日本地震期间CHB024、IBRH11和IBR014台站地表记录的水平分量归一化Stockwell时频谱。图中颜色从深蓝至深红的渐变表示归一化振幅从0到1.0,其中红色区域对应各时刻局部最强的优势频率成分。

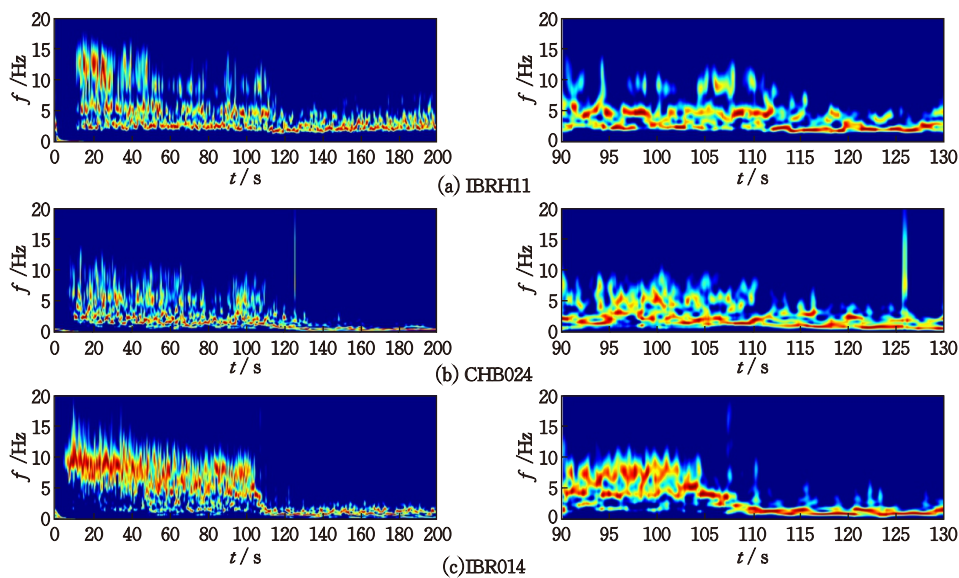


图45 台站IBRH11, CHB024和IBR014在2011年东日本地震期间记录的地表水平分量归一化Stockwell时频谱(数据:KiK-net和K-NET)

Fig.45 Comparison of normalized Stockwell transform amplitudes of surface horizontal seismograms recorded at stations IBRH11, CHB024, and IBR014 during the 2011 Tohoku earthquake (sources: KiK-net and K-NET)

Stockwell时频谱显示,记录初期震动较弱,频率与幅值关系随时间变化显著,不同时间段内地震动优势频率有所不同。随着震动持时增加,优势频率由高频向低频迁移,且幅值在不同频段随时间波动,反映了地震波传播过程中土层滤波、液化发展及波型叠加的综合效应。具体而言,IBRH11场地记录在约10~47 s、47~110 s及110 s之后的时段,优势频带分别约为2~16 Hz、2~11 Hz和2~6 Hz,据此可推测场地在约110 s左右发生液化。CHB024场地记录在约8~110 s、110~132 s及132 s之后的时段,优势频带从约2~12 Hz迅速收窄至1.5~4 Hz,再至约0.75 Hz为中值的极窄低频带,表明场地约在110 s开始液化,并在约130 s达到完全

液化状态。此外,该时频谱在约126 s处出现的细条状尖峰(瞬态高频高振幅),与加速度时程的次峰或速度时程的主峰相对应。IBR014场地记录显示,在约100~110 s之间频率成分发生快速阶梯式下降,从约12 Hz急降至约2 Hz。从90~130 s时段的放大图可见,Stockwell时频谱中的频率在约104 s从6 Hz下降至4 Hz,随后在约110 s降至1.5 Hz以下。值得注意的是,频率成分开始下降前,加速度幅值有短暂的显著增加。由于频率成分随加速度增加而迅速转变,且高频成分( $> 5$  Hz)在后续记录中未恢复,因此推测在100~110 s之间的某个时刻发生了场地液化,导致高频地震动无法传递至地表。由于脉冲形态呈尖峰状,其在归一化Stockwell时频谱

中表现为短时段内明显的高频、高幅值频带。可观察到时频谱在约 110、115 及 122 s 处出现的细条状高频、高振幅信号,即为剪胀脉冲的表现。

## 2 非线性场地反应的分析方法、验证与数值模拟

对场地效应的早期研究多采用 1D 模型,旨在通过识别地震动反应谱峰值,结合场地参数(土层厚度  $H$  和  $V_s$ )解释地震动放大效应。基于对最低阶频率的关注,场地卓越周期  $T_p=4H/V_s$  被广泛应用(计算的  $T_p$  实为场地基本周期  $T_g$  值;当场地土的非线性可忽略时,  $T_g$  与地震动强度相关的反应谱峰值周期  $T_p$  一致)<sup>[138-140]</sup>。  $T_g$  可用于解释实测地震动频谱峰值、地脉动观测及早期地震区划方法。随着傅里叶幅值谱数字化技术的发展,地震动频谱呈现多峰值的认识促进了成层场地模型的应用,使基于垂直入射 SH 波的 1D SRA 方法持续流行。

早期关于场地条件影响的认识源于人造结构震害现象与地层特性之间的关联,形成“地基条件越差,震害越严重”的经验认知,这一认知长期影响学术研究与抗震设计规范编制<sup>[139-144]</sup>。随着强震观测技术进步,场地条件与地震破坏间的复杂关系逐渐被揭示。在计算机与强震记录匮乏时期,场地影响主要通过建筑物震害、地震烈度空间变化及场地基本周期等间接推断。

地震动特性受震源、传播路径和局部场地效应三个物理过程控制。强地震动模拟是研究地震动空间分布及设定地震情景的主要手段。在远场(距断层破裂尺度一个数量级之外)情况下,基于弹性波理论的地震学方法能较好预测地震动。D. M. Boore<sup>[145]</sup> 基于随机震动理论,将地震动傅里叶幅值谱表示为震源项  $E(f)$ 、路径项  $P(R, f)$  和场地项  $S(f)$  的乘积( $R$  为震源距,  $f$  为频率),但该模型难以准确反映局部场地对特定频率的放大或抑制效应。

由于大震级近场记录稀缺,1D SRA 有助于弥补记录不足,并发现深厚复杂场地 NL 地震反应中可能呈现的不同现象<sup>[146-147]</sup>。R. W. Clough 和 A. K. Chopra<sup>[148]</sup> 首次将有限元(FE)法应用于土坝地震反应分析,推动了岩土地震工程的发展。I. M. Idriss 和 H. B. Seed<sup>[149-152]</sup> 在 1D SRA 方面做出了先驱性贡献。目前,1D SRA 已成为场地效应研究的标准方法。通常基于水平成层场地模型和垂直入射 S 波模

拟场地放大效应(传递函数或非线性反应)。但该方法无法捕捉复杂的地震波传播现象(如 2D/3D 效应、面波和盆地效应)。满足地层水平层状、横向均匀、仅模拟垂直入射 SH 波、土的阻尼与频率无关等假设的模型称为 SH1D 场地波动模型<sup>[153]</sup>。

NL SRA 主要包括两部分:波动方程(动力平衡方程)的求解(积分)方法与土的非线性本构模型。NL 地震波动问题的求解可采用 FE 法、隐式或显式有限差分(FD)法<sup>[154]</sup>,以及特征线法<sup>[155]</sup>。其中一种途径是将土的非线性本构模型嵌入到显式 FD 法中,并保留二阶项。根据分析中是否考虑超静孔压  $u_e$  的变化,NL SRA 方法可分为总应力法和有效应力法。总应力法能再现土的非线性与滞回特性,但未直接考虑  $u_e$  的影响。有效应力法能考虑饱和土在高应变下的压缩-剪切耦合效应。在总应力框架下,EQL SRA 通过等效线性的土动力特性参数近似模拟土的非线性,适用于中低应变水平;较高应变水平下,时域 NL SRA 更为适用。在有效应力法的框架内,预测地震引起的  $u_e$  主要有“弱耦合”法(耦合基于总应力的本构模型与  $u_e$  模型)和“完全耦合”法(采用基于塑性的本构模型同步模拟应力-应变与  $u_e$  反应)<sup>[156]</sup>。G. X. Chen 等<sup>[157]</sup> 回顾了  $u_e$  模型的研究进展,并提出了基于物理力学机制的峰值孔压增量统一模型。准确表征土的非线性行为是 SRA 的核心挑战。时域 NL SRA 可更真实地模拟 NL 场地反应,但其应用仍面临诸多挑战,主要体现在对土的非线性动力本构模型认知的不确定性及模型参数标定中存在的随机变异性。

当邻近的土层与基岩台站或竖井台站有记录时,可验证 1D SRA 的有效性。可将基岩记录作为输入,比较土层的计算与实测值。竖井台站记录能更直接验证 1D SRA 法,可区分场地条件与震源、路径等因素对地震动的影响。日本 KiK-net 台网记录已用于多种 1D SRA 软件的验证研究<sup>[153, 158-160]</sup>。

在 1D SRA 中,底部输入地震动应代表“露头基岩运动”还是“井下运动”存在疑惑。研究表明<sup>[161-164]</sup>:若输入为露头基岩记录,应使用弹性基底边界条件,上行波等于露头运动幅值的一半;若为井下记录,应使用刚性基底并直接使用井下记录,或反卷积分解入射上行波并在弹性基底输入上行波(图 46)。一般认为,地震基岩的  $V_s$  值应较高,如大于 700 m/s<sup>[165]</sup>、760 m/s<sup>[166]</sup> 或 2 000 m/s 以上<sup>[167]</sup>;若岩层的  $V_s$  大于 2 400 m/s,则可视为较理想

的地震基岩<sup>[168]</sup>。最近, M. Pilz等<sup>[169]</sup>提出并验证了一种广义反演技术将地表记录反演为无放大效应的均匀基岩( $V_s=3450\text{ m/s}$ )地震动时程的方法。

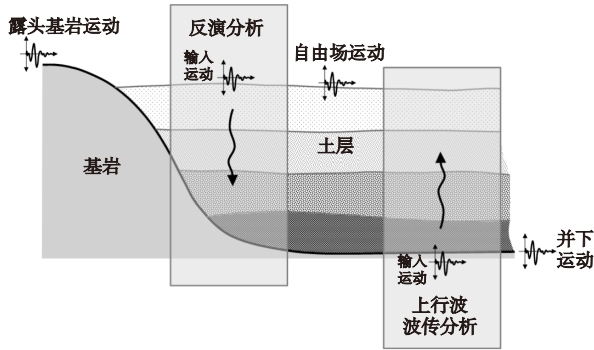


图46 输入地震动的定义

Fig.46 The definition of input seismic motion

近年来,不少学者致力于研究不同沉积环境(如平原、岛礁、峡谷/盆地、跨海峡/河谷场地)中地形地貌、地层与波速结构、沉积厚度及空间非均质性、土的非线性等因素对地震动放大效应的影响机制与特征<sup>[28-34, 98, 111, 170-181]</sup>。研究表明,沉积土的空间非均质性显著影响地震波场,土的非线性行为改变场地的地震动特性。远源特大地震引起的地震动对深厚沉积土上长周期结构的严重破坏而备受关注,地层波速结构和土的非线性是改变地表地震动特性的关键因素<sup>[147, 164, 182-185]</sup>。土的动力非线性本构关系是基于试验数据建立的。室内测试一致表明,随着 $\gamma_a$ 的增大, $G$ 会降低,而 $\lambda$ 会增大。 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 关系是表征土的非线性特性的最基本参数。

H. B. Seed和I. M. Idriss<sup>[41, 186]</sup>给出了典型试验的 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 曲线,且自此在SRA中被广为应用。

## 2.1 场地反应的1D分析方法及验证

### 2.1.1 频域EQL法

I. M. Idriss和H. B. Seed<sup>[149-150]</sup>最早提出了1D SRA的EQL方法。该方法假设非线性场地地震反应可以通过带阻尼的线弹性场地模型来模拟,根据土的平均应变水平调整其模量,以近似模拟地震动引起的土的软化效应。I. M. Idriss和H. B. Seed<sup>[151]</sup>使用1D EQL法研究了旧金山一个真实场地的地震反应。该研究奠定了非线性场地反应的主要理论特征:随着PBA<sub>H</sub>的增加,场地卓越频率及地震动放大系数降低。H. B. Seed和I. M. Idriss<sup>[41]</sup>构建了在1D SRA中使用EQL方法的方案,并建议,确定土的 $G$ 和 $\lambda$ 的等效剪应变( $\gamma_{\text{equ}}$ )取相应土层中最大剪应变( $\gamma_{\text{max}}$ )的2/3。定义折减系数 $R_\gamma=\gamma_{\text{equ}}/\gamma_{\text{max}}$ , I. M. Idriss和J. I. Sun<sup>[187]</sup>发现 $R_\gamma$ 约为0.4~0.75,并提出通过表达式 $R_\gamma=(M_w-1)/10$ ,将震级 $M_w$ 与 $\gamma_{\text{equ}}$ 关联起来。S. E. Dickenson<sup>[188]</sup>建议,对于面波震级 $M_s$ 6-7地震, $R_\gamma$ 取0.35~0.55,对于 $M_s$ 7-8地震, $R_\gamma$ 取0.55~0.70。P. B. Schnabel等<sup>[189]</sup>在《SHAKE用户手册》中建议 $R_\gamma$ 采用0.65。该经验值一直沿用至今。然而,这一建议值是基于 $M_w$ 7.5地震的不规则加速度波形转化为20次等幅谐波的经验折减系数。但就作者所知,该经验值尚未有试验结果的严格验证。EQL法的框架及每一层岩土介质 $l$ 所需的参数如图47所示。

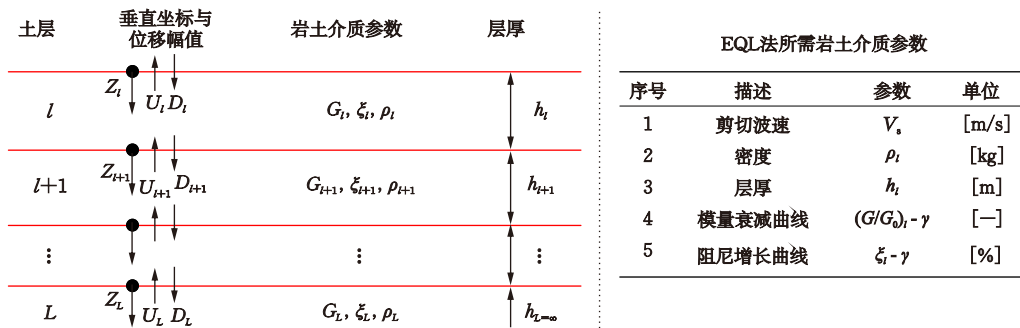


图47 1D SH波在土层中的传播及EQL场地反应分析所需的岩土参数

Fig.47 Layered soil system for 1D SH wave propagation and soil parameters for EQL site response analysis

注: $U_l$ 为上行SH波幅值; $D_l$ 为下行SH波幅值; $Z_l$ 为第 $l$ 层土局部坐标

SRA的实施通常需借助专业软件,其正确理解与使用是保证结果可靠的前提。频域SRA法基于层状连续介质中SH波波动方程的解析解,每层介

质 $l$ 由密度 $\rho_l$ 、剪切模量 $G_l$ 和滞回阻尼比 $\lambda$ 定义。该解析解是由J. M. Roesset与R. V. Whitman<sup>[190]</sup>、J. Lysmer等<sup>[191]</sup>和P. B. Schnabel等<sup>[42]</sup>提出,并在张

克绪和谢君斐<sup>[139-140]</sup>、陈国兴<sup>[26]</sup>的著作中也有详细阐述。该方法可在任意土层 $j$ 定义频率为 $\omega$ 的控制运动,土层反应的解析解表示为传递函数,描述任意 $i$ 层与 $j$ 层之间谐波位移幅值的关系。EQL法通过迭代更新各土层的应变相容剪切模量 $G$ 和阻尼比 $\lambda$ ,以近似模拟土的非线性行为,其本质是通过多次线性SRA迭代来逼近土的非线性特性。EQL法在SRA中被广泛用于模拟土层NL地震反应,优势在于计算效率高且所需输入参数少。此外,基于叠加原理的频域1D EQL波动理论(1D波传法)具备一个重要特点:可从基岩地震动中分离出入射波(上行波)和反射波(下行波)。当SH波向自由地面入射时,不论入射角与频率如何,自由地面运动幅值恒为入射波的2倍。因此,可将出露基岩地震动幅值除以2,作为1D波传法的基岩输入SH波。

P. B. Schnabel等<sup>[42]</sup>将EQL方法集成于软件SHAKE中,推动了该方法在SRA中的应用,使之成为1D EQL SRA领域首个广泛认可的专业工具。其后的修正版主要包括SHAKE91<sup>[187]</sup>, ProSHAKE<sup>[192]</sup>, SHAKE2000<sup>[189, 193]</sup>及SHAKE04<sup>[194]</sup>。这些修正版均沿用SHAKE的基本代码或遵循相同的基本原理,SHAKE系列软件长期成为频域1D EQL SRA的主要方法之一。此外,软件EERA<sup>[195]</sup>、DEEPSOIL<sup>[46, 196-197]</sup>和Strata<sup>[198]</sup>均是对经典软件SHAKE的继承与发展,保留了SHAKE的核心算法框架。SEISMOSOIL<sup>[199]</sup>也是基于频域EQL算法的1D SRA专业软件。这些软件均是目前广为应用的1D SRA专业软件。

地震波的低频放大主要由 $G$ 降低导致的土体软化控制,高频滤波则源于阻尼比 $\lambda$ 增大。也即, $G$ 控制低频分量地震动的场地放大, $\lambda$ 制约高频段放大效应。然而,EQL法在模拟宽频范围内土的循环特性时存在局限,对强非线性场地反应问题表现不足:(1)应变相容的 $G$ 和 $\lambda$ 通过最大剪应变折减(有效剪应变)确定。由于最大剪应变通常由低频成分主导,导致高频分量地震动被过度阻尼,从而低估场地反应。因为高频反应对应的实际剪应变幅值较小,其 $\lambda$ 值应更低, $G$ 的降低也应更小。(2)土的最大剪应力取决于 $G-\gamma_a$ 曲线和有效剪应变水平。该方法未对剪应力增长设置上限,可能高估土强度,进而在强地震动下高估峰值加速度。I. M. Idriss和H. B. Seed<sup>[151]</sup>的1D EQL SRA结果也表明,

基于弱震记录评估强震场地反应可能产生误导。

近三十年来,学者们开展了一系列1D SRA的验证研究<sup>[160, 162, 164, 200-207]</sup>,部分研究通过对比竖井台阵记录来评估模拟预测的准确性。有的研究者对频域EQL法的适用条件进行了量化:N. Yoshida和S. Iai<sup>[208]</sup>建议其适用的 $\gamma_a$ 阈值为0.5%;J. Kaklamanos等<sup>[158]</sup>基于日本100个Kik-net竖井台站的3720条记录(204条记录的地表 $PGA_H > 0.3g$ ),评估了EQL法的预测精度,建议当 $\gamma_a$ 超过0.1%~0.4%时应采用NL法;随后J. Kaklamanos等<sup>[159]</sup>通过对6个Kik-net场地的分析更新了 $\gamma_a$ 阈值至约0.05%;J. Kaklamanos和B. A. Bradley<sup>[203]</sup>再次推荐 $\gamma_a$ 阈值为0.1%~0.4%。值得注意的是,许多土在 $\gamma_a$ 约为1%时发生破坏<sup>[35, 209]</sup>,而其非线性行为则在 $\gamma_a$ 低至 $10^{-4}$ 量级时已显现<sup>[35, 157, 210-212]</sup>。

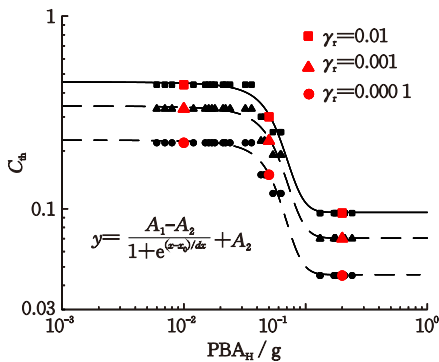
对于软土地或强震作用场地,EQL法的结果常与实测结果不符。M. Sugito等<sup>[213]</sup>和D. Assimaki等<sup>[214]</sup>拓展了EQL法,使其能考虑土的动力特性的频率相关性及压力相关性,研究表明在频域分析中表征土的非线性反应需假设土的阻尼随频率变化。D. Assimaki和J. Steidl<sup>[215]</sup>发展了一种混合优化反演方法,利用竖井台阵弱震记录反演低应变下土的动力特性,并通过主震记录反演强震下土的等效线性参数,从而近似评估强地震期间土的非线性效应。

强震观测和数值模拟表明,场地放大效应与地震动水平密切相关,尤其受土的非线性行为影响。由于土的非线性与滞回特性,场地效应的基本特征表现为场地基本周期 $T_g$ 延长及地震动高频放大的减弱<sup>[33-34, 40, 164]</sup>。为了克服EQL法在高应变下的过阻尼现象,研究者提出了材料参数与频率( $f$ )相关(Frequency-dependent, FD)的EQL法即FD-EQL法<sup>[160, 213-214, 216-219]</sup>。该类基于现象学的方法通过引入完整的剪应变频谱,合理选取各频率点对应的应变相容材料参数。其物理机制在于:土在低应变下具有较高的 $G$ 和较低的 $\lambda$ ,在高应变下 $G$ 显著降低、 $\lambda$ 明显增大。因此,尽管土被视为率无关材料,其力学特性的频率相关性仍可与地震剪应变幅值的频率关联性相结合。研究进一步揭示<sup>[217-218, 220]</sup>,高频激励主要引起幅值较小的局部剪应变循环,低频激励则主导幅值较大的主循环行为, $f > 10$  Hz的 $\gamma_a$ 可比低频成分的 $\gamma_a$ 低几个数量级。基于上述认识,不同研究者提出了频率相关等效剪应变的多种确定方

法<sup>[217-218, 221]</sup>。为避免原始不规则剪应变频率谱导致的数值不稳定, N. Yoshida等<sup>[217]</sup>与 D. Assimaki和 E. Kausel<sup>[218]</sup>分别提出了基于平滑化剪应变频谱的 FD-EQL算法, 两者差异在于平滑化处理的具体方式, 最终生成平滑的  $G/G_0-f$  和  $\lambda-f$  曲线。在场地反应数值模拟中, FD-EQL法与传统 EQL法均采用频域 1D波传法, 区别在于前者在不同频率采用不同的  $G$  和  $\lambda$  计算传递函数。然而需关注, 该方法在高频段可能会高估场地反应<sup>[220]</sup>。

袁晓铭及其合作者<sup>[222-224]</sup>指出, 传统 EQL法计算的深软场地地表  $PGA_H$  远低于地震记录值, 甚至低于输入的  $PBA_H$ 。为解决这一低估问题, 他们发展了一种新的 FD-EQL法及相应软件 SOIL-QUAKE, 采用基于试验数据的直接频率法确定应变相容的  $G$  和  $\lambda$  值, 虽缓解了深软场地地表  $PGA_H$  的低估, 但可能引起高频反应的异常放大<sup>[222]</sup>。需指出, 直接频率法本质上为经验方法, 难以推广至 2D 和 3D 波动问题。为此, 他们提出了全局优化等效

线性 (Holistic equivalent linear, EQL-H) 方法, 并研发了软件 SITERESPONSE<sup>[223-224]</sup>。该方法引入“整体等效剪应变” (Holistic equivalent shear strain, HESS) 概念, 其取值综合考虑了土的非线性特性、输入  $PBA_H$  水平及剪应变时程的波形特征。具体而言, 通过设定等效剪应变阈值  $\gamma_{eqth}$ , 将 HESS 定义为剪应变时程中超过该阈值的所有  $\gamma_a$  的平均值。当输入  $PBA_H$  低于 0.04g 或高于 0.1g 时,  $\gamma_{eqth}$  取为相应的固定值; 在 0.04g~0.1g,  $\gamma_{eqth}$  随  $PBA_H$  增大而递减。图 48 展示了  $\gamma_{eqth}$  与土的参考剪应变  $\gamma_r$  及  $PBA_H$  之间的经验关系, 其中  $\gamma_r$  为  $G/G_0-\gamma_a$  曲线中  $G/G_0=0.5$  所对应的  $\gamma_a$  值。EQL-H法与传统 EQL法的唯一区别在于  $\gamma_{eqth}$  的确定方式。由于基于全局优化策略确定  $\gamma_{eqth}$ , EQL-H法物理意义更明确, 结果更合理, 传统 EQL法可视为其在弱非线性条件下的特例。EQL-H法在保持传统 EQL法形式简单、计算高效优点的同时, 改进了较强非线性水平下场地反应的模拟精度。



	$A_1$	$A_2$	$x_0$	$A_3$
• $\gamma_r=0.0001$	0.230	0.045	0.054	0.013
▲ $\gamma_r=0.001$	0.347	0.070	0.055	0.014
■ $\gamma_r=0.01$	0.462	0.096	0.054	0.013

$$\gamma_{eqth} = C_{th} \gamma_{max}$$

$$C_{th} = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\frac{(PBA_H/g - x_0)}{A_3}}} + A_2$$

图 48 等效剪应变阈值系数  $C_{th}$  与  $PBA_H$  水平、土的参考剪应变  $\gamma_r$  的关系<sup>[223-224]</sup>

Fig.48 Relationship among equivalent shear strain threshold coefficient  $C_{th}$ ,  $PBA_H$ , and reference shear strain  $\gamma_r$  of soil<sup>[223-224]</sup>

### 2.1.2 时域 NL 总应力法

为准确考虑土的非线性对场地反应的影响, 时域 NL SRA 方法提供了更为精确的解决方案。该方法基于能够精确模拟高度非线性行为的本构模型, 在理论上更为严谨。基于叠加原理的 EQL 方法在理论上仅适用于线性系统, 而时域 NL 方法则通过直接求解非线性运动方程来捕捉土的真实动力反应。在时域 1D SRA 中, 水平成层土柱通常被理想化为多自由度集中质量 (Multi-degree-of freedom, MDOF) 体系 (即质量-弹簧-阻尼器模型), 亦可离散为采用单列土单元和适当边界条件的分布质量 FE 体系, 如图 49 所示。

自 SHAKE 软件问世以来, 相继研发出多个时

域 1D NL SRA 软件: CHARSOIL<sup>[155]</sup>、DEGRA-1 和 DESRA-2<sup>[45, 225, 276]</sup>、MASH<sup>[226]</sup>、SUMDES<sup>[227]</sup>、SPECTRA<sup>[228-230]</sup> 和 TESS<sup>[231-232]</sup> 等。此外, 多款通用的 FE 软件 ABAQUS<sup>[233-234]</sup>、LS-DYNA<sup>[235-237]</sup> 和 OpenSees<sup>[238-240]</sup>, 以及 FD 软件 FLAC<sup>[241-243]</sup> 等, 也具备进行 1D NLSRA 的能力。LS-DYNA 源自 J. O. Hallquist<sup>[244]</sup> 于劳伦斯利弗莫尔国家实验室研发的 FE 软件 DYNA3D。需特别指出, DEEPSOIL 和 SEISMOSOIL<sup>[199]</sup> 是兼具 EQL 与 NL 分析功能的专业软件。应特别指出, 软件 DESRA、TESS 和 DEEPSOIL 中的 SRA 也可采用有效应力法。

在场地建模的空间离散方法上, DEEPSOIL 等软件采用 MDOF 法, 而 LS-DYNA、OpenSees、

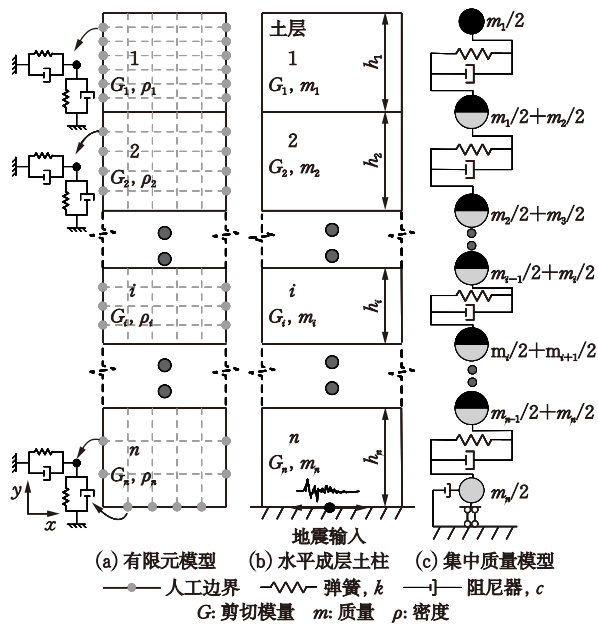


图 49 1D NL 场地反应分析的 MDOF 模型和 FE 模型<sup>[32]</sup>  
 Fig.49 Multi-degree-of-freedom lumped-mass and finite element models for nonlinear 1D site response analysis<sup>[32]</sup>

SUMDES 和 TESS 等软件则采用 FE 法。采用 FE 法求解 1D SRA 问题,本质上可视为在 2D 框架(单列单元)内处理 1D 场地模型。NL SRA 通过在时域内对 1D 模型动力平衡方程进行逐步积分求解来实现,通常采用 Newmark- $\beta$  法<sup>[245]</sup>、Wilson- $\theta$  法<sup>[246]</sup> 和 HHT (Hilber-Hughes-Taylor)- $\alpha$  法<sup>[247]</sup> 等隐式方法,以及显式中心差分(CD)法。例如,DEEPSOIL 采用隐式 Newmark- $\beta$  法,FLAC 和 TESS 采用显式 CD 法,ABAQUS 采用显式 CD 法或隐式 HHT- $\alpha$  法,而 LS-DYNA 采用显式 CD 法或隐式 Newmark- $\beta$  法。对于时域 SRA 法,通常在模型底部输入地震动。

地震波在土层中的传播过程受土的非线性应力-应变关系的影响显著。基于室内试验结果发展并应用于 NL SRA 的土的非线性本构模型,既有相对简单、描述土的循环应力-应变行为的非线性滞回模型<sup>[147, 248-256]</sup>,也有引入屈服面、硬化与流动法则的弹塑性本构模型,例如,SPECTRA 采用界面塑性本构模型<sup>[228]</sup>,OpenSees 采用多屈服面模型<sup>[257-259]</sup>、PM4Sand 或 PM4Silt 模型<sup>[260-262]</sup>。各类非线性本构模型在描述土对地震动作用的反应时,各有其一定的局限性与优势。室内试验已证实土的动力特性的应变相关性。这一特性具有可重复性,且在地震动水平较高( $\gamma_a > 0.1\%$ )时尤为重要。数值模拟基岩地震波经土层传播至地表的放大效应时,有效表征

土的非线性与滞回特性至关重要<sup>[30, 147, 164, 204]</sup>。然而,基于塑性理论的本构模型因参数较多,且缺乏普适的材料参数标定方法,在实际应用中仍面临诸多挑战<sup>[260-261, 263]</sup>。通常仅有实测的  $G/G_0-\gamma_a$  和  $\lambda-\gamma_a$  曲线可用于土的本构模型参数标定。因此,形式简单且能有效地描述不规则加载下土的非线性与滞回行为的本构模型,在 NL SRA 中是首选的<sup>[33-34, 147]</sup>。

在总应力法中,非线性滞回本构模通常由两部分组成:(1)描述初始加载应力-应变关系的骨架曲线;(2)控制卸载→加载→再卸载路径的一组滞回法则。已提出的各种骨架曲线模型均旨在更好地拟合  $G/G_0-\gamma_a$  和  $\lambda-\gamma_a$  曲线的试验数据。理想的骨架曲线需具备以下特征:零剪应变处剪切模量初始(最大)化;大剪应变时剪应力趋于有限值;在中间应变范围内可灵活调控非线性行为。因此,与 EQL 法相比,NL 法的主要局限性是模型比较复杂、所需输入参数较多,且模型参数标定依赖于土的动力特性试验数据,通用性不足。此外,NL 法不适合求解反卷积问题。目前,多国抗震设计规范<sup>[142, 144]</sup>要求对深软场地的地震效应进行专门的 NL 分析,以确定场地相关设计反应谱或地震动参数。

常用的骨架曲线表达式  $F_{sk}(\gamma)$  是基于 KZ (Kondner-Zelasko) 双曲线模型<sup>[249]</sup> 的修正双曲线 (MKZ) 模型<sup>[264]</sup>。 $F_{sk}(\gamma)$  可表示为(图 50):

$$\tau = F_{sk}(\gamma) = \frac{G_0 \gamma}{1 + \beta(\gamma/\gamma_r)^s} \quad (1)$$

式中, $\tau, \gamma$  分别为剪应力和剪应变; $\beta$  和  $s$  为无量纲指数; $\gamma_r$  为土的参考剪应变。参数  $\beta, s$  和  $\gamma_r$  可由室内试验给出的  $G/G_0-\gamma_a$  和  $\lambda-\gamma_a$  曲线进行标定。如  $B=s=1$ , 则  $F_{sk}(\gamma)$  退化为双曲线。DEEPSOIL、D-MOD 和 TESS 的骨架曲线均采用 MKZ 模型。

另一种常用的广义双曲骨架曲线为 Davidenkov 模型,其表达式  $F_{sk}(\gamma)$  为<sup>[252]</sup>:

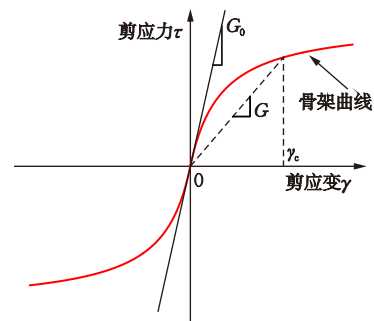


图 50 本构模型的骨架曲线  
 Fig.50 Backbone curve for constitutive model

$$\tau = F_{sk}(\gamma) = G_0 \gamma [1 - H(\gamma)] \quad (2)$$

$$H(\gamma) = \left\{ \frac{(\gamma/\gamma_r)^{2B}}{1 + (\gamma/\gamma_r)^{2B}} \right\}^A \quad (3)$$

式中,  $A$  和  $B$  为无量纲指数;  $\gamma_r$  为参考剪应变。  $A$ 、 $B$  和  $\gamma_r$  可由室内试验给出的  $G/G_0-\gamma_a$  和  $\lambda-\gamma_a$  曲线进行标定。如  $A=1, B=0.5$ , 则  $F_{sk}(\gamma)$  退化为双曲线。

Masing 法则<sup>[265]</sup> 及其扩展 Masing 法则<sup>[251, 253]</sup> 常与骨架曲线结合使用, 用以描述土的卸载-再加载及循环衰退行为(图 51)。Masing 法则(规则 1-2)与扩展 Masing 法则(规则 1-4)表述如下:

法则 1: 初始加载时, 应力-应变关系遵循骨架曲线(公式(1))。

法则 2: 任何循环的再加载曲线, 其初始段形态与正向初始骨架曲线放大两倍后的形状一致。对于与负向初始骨架曲线相关的卸载曲线, 这一规律同样适用。

法则 3: 如卸载或加载曲线超越历史最大应变点并与骨架曲线相交, 则后续应力-应变路径将沿骨架曲线前行直至下一次应力反转。

法则 4: 若当前卸载或加载曲线与既往循环中的卸载或加载曲线相交, 则应力-应变曲线将遵循该既往循环的曲线走势。

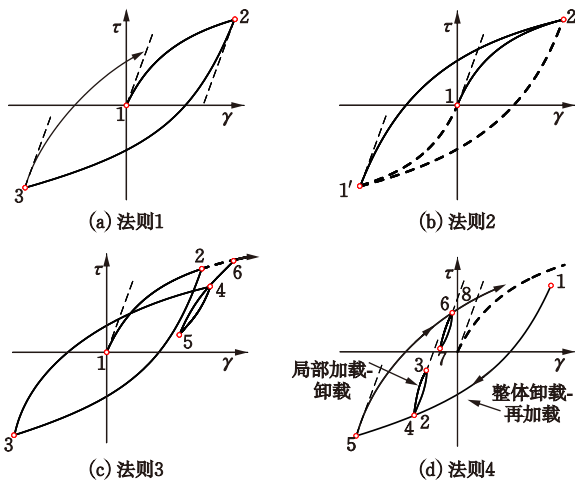


图 51 扩展 Masing 法则<sup>[253, 265]</sup>

Fig. 51 Extended Masing rules<sup>[253, 265]</sup>

基于经典或扩展 Masing 法则的滞回本构模型难以准确捕捉小应变( $\gamma_a < 10^{-3}\%$ )下的阻尼。因此, 大多数 NL SRA 软件会引入一定形式的小应变粘滞阻尼( $\lambda_{min}$ )。究其原因在于, 在极小应变条件下, 骨架曲线基本呈线性, 结合经典或扩展 Masing 法则

计算的粘滞阻尼接近于零。引入小应变粘滞阻尼项可避免该应变范围内 NL SRA 结果的失真<sup>[266]</sup>。粘滞阻尼<sup>[267]</sup>通常采用瑞利阻尼形式, 即假设阻尼矩阵与质量矩阵和/或刚度矩阵成正比。不同软件在粘滞阻尼的建模方式上存在差异, 主要体现在三方面(图 52): 阻尼模型(简化、完整或扩展形式的瑞利阻尼公式)的选择; 目标阻尼比( $\zeta_{tar}$ ); 匹配阻尼比的频率阶数(简化形式为一阶, 完整形式为二阶, 扩展形式为四阶)。

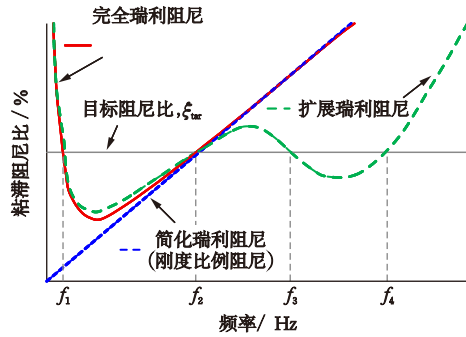


图 52 粘性阻尼模型及模型参数的示意图<sup>[200, 268]</sup>

Fig. 52 Schematic illustration of viscous damping models and model parameters<sup>[200, 268]</sup>

O. L. A. Kwok 等<sup>[161]</sup> 建议  $\zeta_{tar}$  取为  $\lambda_{min}$ 。目前大多数 NL SRA 软件采用完整瑞利阻尼公式, O. L. A. Kwok 等<sup>[161]</sup> 和 J. P. Stewart 等<sup>[163]</sup> 建议其第一模态频率取场地基本频率  $f_g$ , 第二模态频率取为  $5f_g$ 。例如: SUMDES 和 FLAC 采用简化瑞利阻尼; OpenSees 则同时支持简化与完整形式; TESS 则无需引入粘性阻尼。DEEPSOIL 支持所有三种形式, 允许定义上覆压力相关的  $\lambda_{min}$ <sup>[196]</sup>。DEEPSOIL 也提供了频率无关的粘滞阻尼选项<sup>[268]</sup>, 可有效消除高频过阻尼, 并避免瑞利阻尼中多个匹配频率的选取问题。

在软件 DEEPSOIL 中, 骨架曲线采用 MKZ 模型, 滞回法则采用 Masing 法则、扩展 Masing 法则或基于模量-阻尼折减因子 (Modulus reduction and damping factor, MRDF) 的 non-Masing 法则<sup>[268-269]</sup>, 定义参考剪应变  $\gamma_r$  与上覆压力相关<sup>[196]</sup>。该软件提供三种拟合方法(图 53)<sup>[46]</sup>: MR 法(仅用 Masing 法则拟合  $G/G_0-\gamma_a$  曲线)、MRD 法(用 Masing 法则同时拟合  $G/G_0-\gamma_a$  和  $\lambda-\gamma_a$  曲线)及 MRDF 法(利用 MRDF 同时拟合  $G/G_0-\gamma_a$  和  $\lambda-\gamma_a$  曲线)。为了克服 MKZ 模型剪应力无上限的局限性, DEEPSOIL 提供了广义二次/双曲线 (General quadratic/hyperbolic, GQ/H)

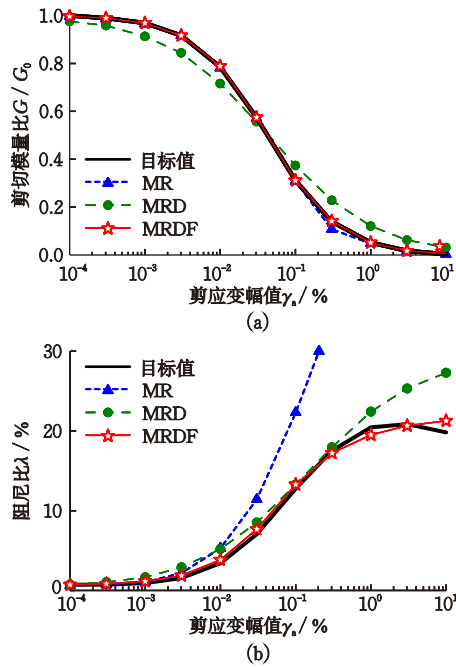


图 53 MR 法、MRD 法及 MRDF 法拟合的  $G/G_0-\gamma_a$  和  $\lambda-\gamma_a$  曲线的对比<sup>[268]</sup>

Fig.53 Comparison of the  $G/G_0-\gamma_a$  and  $\lambda-\gamma_a$  curves fitted by the MR method, the MRD method, and the MRDF method<sup>[268]</sup>

骨架曲线模型<sup>[270]</sup>。该模型限定土的剪切强度阈值,通过迭代校正使高应变下的剪应力符合目标强度<sup>[271]</sup>。需注意,MRDF 方法难以适用于其他函数形式的骨架曲线。经 MRDF 方法修正的扩展 Masing 公式与 O. A. Numanoglu 等<sup>[272]</sup>提出的适用于多类型骨架曲线的广义 MRDF 型 non-Masing 公式是一致的。

在 SEISMOSOIL 软件中<sup>[199]</sup>,骨架曲线采用混合双曲(Hybrid hyperbolic, HH)模型<sup>[273]</sup>。该模型旨在仅凭  $V_s$  剖面作为输入参数来捕获在弱震和强震作用下土的非线性反应。HH 模型是 MKZ 模型和 FKZ 模型(柔性双曲模型)的组合,包含 9 个参数用以灵活拟合  $G/G_0-\gamma_a$  和  $\lambda-\gamma_a$  曲线,并明确包含土的抗剪强度参数。对于引起  $\gamma_a$  超过 0.04% (大致对应  $PGA_H$  高于 0.05g) 的地震动,其表现优于 MKZ 模型。HH 模型结合 non-Masing 规则构建的滞回圈,能在宽应变范围内提供合理的结果。

众多学者致力于改进滞回法则以期在宽应变范围内匹配试验测试的  $G/G_0-\gamma_a$  和  $\lambda-\gamma_a$  曲线,但这些方法在复杂循环加载、特别是 2D/3D 应力状态下仍面临挑战,需保存大量中间状态变量以记忆先前不规则加载循环中每个应力-应变分支曲线的路径。为了更好地描述不规则加卸载下土的剪应力-应变

关系,解决 MR/MRD 法的过阻尼现象,避免 MRDF 法的复杂性,陈国兴及其合作者<sup>[34, 147, 274]</sup>提出了基于 Davidenkov 骨架曲线的广义 non-Masing 滞回本构模型(简称 Davidenkov-Chen-Zhao (DCZ) 模型)(图 54)。该模型通过对 Masing 准则与扩展 Masing 法则进行修正,简化了剪应力-应变滞回路径的识别方法,并将 Masing 准则的 2 倍法修改为  $n$  倍法。该广义 non-Masing 法则可表述如下:

法则 1:初始加载时,剪应力-应变骨架曲线可由式(2)表示。

法则 2:若发生应变反转,后续剪应力-应变路径将遵循公式(4)描述的曲线,从当前应变反转点延伸至前一个不规则循环中的历史应变极值点。

$$\tau - \tau_c = G_0 (\gamma - \gamma_c) \left[ 1 - H \left( \frac{|\gamma - \gamma_c|}{2n_c} \right) \right] \quad (4)$$

其中

$$H \left( \frac{|\gamma - \gamma_c|}{2n_c} \right) = \left\{ \frac{|\gamma - \gamma_c|^{2B}}{(2n_c \gamma_r)^{2B} + |\gamma - \gamma_c|^{2B}} \right\}^A \quad (5)$$

$$(2n_c \gamma_r)^{2B} = (\gamma_{ex} \pm \gamma_c)^{2B} \cdot \left( \frac{1-R}{R} \right) \quad (6)$$

$$R = \left( 1 - \frac{\tau_{ex} \pm \tau_c}{G_0 (\gamma_{ex} \pm \gamma_c)} \right)^{\frac{1}{A}} \quad (7)$$

式中,符号“ $\pm$ ”在正向路径时取“-”,负向路径时取“+”; $\tau_c$  和  $\gamma_c$  分别为加/卸载反转点的剪应力和剪应变; $\tau_{ex}$  和  $\gamma_{ex}$  分别为历史应变极值点的剪应力和剪应变。

法则 3:当卸载/再加载的剪应力-应变路径与骨架曲线重合时,该路径将沿骨架曲线发展,直至下

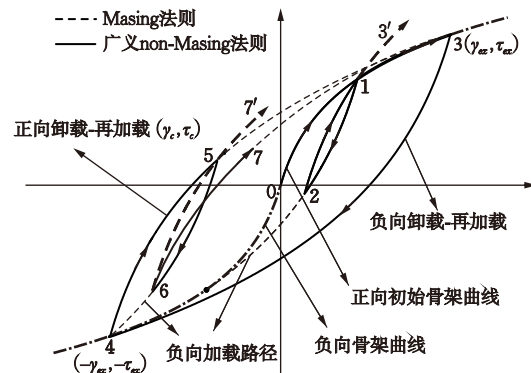


图 54 不规则加/卸载下的剪应力-应变关系示意图<sup>[147, 274]</sup>  
Fig.54 Shear stress-strain curves under irregular loading-unloading-reloading<sup>[147, 274]</sup>

一个剪应变反转点。

这组新的广义 non-Masing 法则形式简洁,以单一应变增量为零作为加-卸载的判据,具有简单且精确捕捉应变反转点的显著优势。其优势在于无需全程记忆复杂的应力-应变路径,仅需记录当前的应变反转点及应变历史上的极值点,就可定义后续不规则循环加载下的应力-应变路径走向,极大地减少了模型需要“记忆”的信息量,从而减少了状态变量的存储需求,提高了计算效率。此外,模型在每次不规则循环中会更新缩放因子  $n_c$ , 以实现宽应变范围内测试的  $G/G_0-\gamma_a$  和  $\lambda-\gamma_a$  曲线的同步匹配。在骨架曲线上应变反转则  $n_c=1.0$ ; 而在后续局部循环的不规则应力-应变路径中应变反转则  $n_c<1.0$ 。特别地,通过引入  $n_c<1.0$ , 可以有效模拟土的循环软化行为。根据上述 3 条规则,在不规则循环加卸载过程中,剪应力-剪应变路径表现为曲线  $0\rightarrow 1\rightarrow 2\rightarrow 3\rightarrow 4\rightarrow 5\rightarrow 6\rightarrow 7$ , 对传统“Masing 法则”中 2 倍法扩展形成的曲线段  $2\rightarrow 3'$  或  $6\rightarrow 7'$  的走向进行了修正,使其沿指向历史上应变极值点 3 的路径  $2\rightarrow 3$  或  $6\rightarrow 7\rightarrow 3$  发展。基于 ABAQUS 平台中的显式并行算法,陈国兴及其合作者<sup>[34, 147, 274]</sup>开发了 DCZ 模型的用户自定义材料子程序 (VUMAT), 该子程序采用 Fortran 语言编写。基于 ABAQUS 平台和 DCZ 模型子程序模块,提出了一种新的 1D NL SRA 总应力分析方法。

### 2.1.3 时域 NL 有效应力法

P. P. Martin 等<sup>[275]</sup>建立的剪切-压缩耦合的  $u_e$  模型为有效应力 NL SRA 奠定了基础。基于该  $u_e$  模型, M. K. W. Lee 和 W. D. L. Finn<sup>[45, 225]</sup> 及 W. D. L. Finn 等<sup>[250, 276-277]</sup> 开发了首个有效应力 1D NL SRA 软件 DESRA-1 及扩展的 DESRA-2 和 DESRA-2C。该软件采用基于双曲线骨架曲线和 Masing 法则的非线性滞回本构模型。此后, DESRA-2 中采用的  $u_e$  模型被 M. Vucetic 和 R. Dobry<sup>[266]</sup> 提出的  $u_e$  模型取代,相应改进版命名为 DESRAMOD; 随后,该  $u_e$  模型又经进一步修正,软件系列演进为 D-Mod<sup>[264]</sup> 和 D-Mod2000<sup>[278-279]</sup>。此外, DEEPSOIL<sup>[46, 280]</sup> 则采用了经 M. Vucetic 和 R. Dobry<sup>[266]</sup> 改进的  $u_e$  模型。在 DEEPSOIL V6.1 中,采用了 GQ/H 骨架曲线模型与 M. Vucetic 和 R. Dobry<sup>[266]</sup>  $u_e$  模型相耦合的方法,称该弱耦合有效应力法为 GQ/H+ $u_e$  模型<sup>[281]</sup>。此外, R. Siddharthan 与 W. D. L. Finn<sup>[282]</sup> 开发了 DES-

RA 的综合性升级版 TARA-2, 后经 W. D. L. Finn 等<sup>[283]</sup> 改进为 TARA-3。TARA-3 在发布前经历了为期三年的系统性验证。该验证工作受美国核管理委员会委托,依托剑桥大学开展的离心机试验完成<sup>[284]</sup>。

TESS 软件<sup>[232]</sup> 基于竖向传播的 SH 波假定,将波动传播方程与扩散方程作为非耦合问题进行求解。在采用有效应力的 SRA 法中,该软件能够模拟  $u_e$  的增长与消散过程。针对循环加载作用,软件采用特定的土动力本构模型;其骨架曲线采用 MKZ 模型描述,而加载-卸载-再加载行为则通过扩展 Masing 法则进行描述。

SUMDES 是由 X. S. Li 等<sup>[227]</sup> 开发的基于地震波竖向传播假定的 FE 分析软件。该软件采用基于界面亚塑性理论的本构模型<sup>[285]</sup>, 其特点是塑性应变增量的方向不仅依赖于当前应力状态,也受应力增量方向的影响。该软件能模拟 1D 和 3D 地震动作用下的 NL 场地反应,兼具总应力与有效应力分析法。该软件求解完全耦合的波的传播与扩散方程,其有效应力法能够预测 3D 地震波动及  $u_e$  的增长与消散过程。值得注意的是,该界面亚塑性本构模型也被集成至 FLAC 的 2D 版中<sup>[242]</sup>。

S. Iai 及其合作者<sup>[286-290]</sup> 对日本在工程实践中动力分析方法的发展进展做了系统阐述。基于这些研究, S. Iai 团队开发了有效应力 NL 分析的 FE 软件 FLIP。该软件采用应变空间多机制 (Strain space multiple mechanism) 模型,能够合理描述粒状土在循环加载下的力学行为,是一个支持 1D、2D 和 3D 有效应力 NL 分析的通用平台。如今, FLIP 已成为日本岩土地震工程实践中不可或缺的分析工具。基于该平台,对 2011 年东日本地震期间填海场地的地震动和  $u_e$  的增长开展了大量数值模拟研究。

Cyclic1D 是由 A. Elgamal 等<sup>[254-255]</sup> 开发的一个开源 1D FE 软件,专门用于有效应力 NL SRA。其研发旨在通过全耦合有效应力 NL SRA 研究场地液化问题,并使用了 Z. Yang<sup>[258]</sup> 提出的压力无关与压力相关本构模型。这些本构模型能有效描述  $u_e$  的增长与消散过程,以及循环液化过程中土的 NL 力学行为。在理论架构上,本构模型通过一个屈服面界定弹性行为的应力极限,借助硬化法则描述屈服面随塑性变形的发展,并利用流动法则将塑性应变增量与应力增量相关联。

基于 G. R. Martin 等<sup>[275]</sup>和 P. M. Byrne<sup>[291]</sup>建立的框架, G. X. Chen 等<sup>[210]</sup>提出了一个新的考虑剪切-体变耦合效应的增量  $u_e$  模型。该模型为不排水循环加载条件下残余  $u_e$  的增长机理提供了新的见解。其显著优势在于巧妙地规避了当前尚未解决的等效循环次数确定问题,即无需将不规则应力或应变时程转化为等幅形式。为实现该理论在 NL SRA 中的应用, G. X. Chen 等<sup>[147]</sup>耦合该增量  $u_e$  模型与 DCZ 本构模型,构建了用于表征饱和土有效应力-应变行为的新的本构模型。基于 ABAQUS/Explicit 平台,开发了采用 Fortran 语言编写的用户自定义材料子程序(VUMAT),从而实现了基于显式积分算法的 1D NL 场地反应弱耦合有效应力分析。

随着 ABAQUS、FLAC 和 OpenSees 等通用软件,以及 DEEPSOIL 等专业软件的兴起, SRA 正逐步向标准化方向演进。这些平台以标准化的形式使得复杂的有效应力 NL SRA 成为现实,同时为在实践中检验与比较各类本构模型提供了重要平台。

#### 2.1.4 EQL法和NL总应力法的比较与验证

土的动力本构模型的适用性一直是研究的焦点问题<sup>[147, 164, 203-204]</sup>。对比观测和预测的竖井台阵地地震反应,被视为验证 1D NL SRA 方法和土的动力本构模型最可靠的途径。近年来,利用竖井台阵强震记录验证 1D SRA 方法准确性的重要性被进一步强调<sup>[292-293]</sup>,多项研究致力于揭示 EQL 法与 NL 法在计算结果上的差异。

I. M. Idriss 和 H. B. Seed<sup>[151]</sup>以及 H. B. Seed 和 I. M. Idriss<sup>[41]</sup>首次将 1D EQL SRA 结果与几次历史地震(1957 年旧金山  $M_s$ 5.7 地震、1962 年墨西哥  $M_s$ 7.0 地震和 1964 年阿拉斯加  $M_w$ 9.2 地震)的实测记录进行比较,指出在输入  $PBA_H$  较低(如小于 0.07g)时,模拟结果能较好地反映实际场地反应,这推动了 1D EQL SRA 的初步应用。

I. V. Constantopoulos 等<sup>[294]</sup>较早地开展了 1D SRA 的 EQL 法和 NL 法的对比研究。研究表明: EQL 法低估地表  $PGD_H$ 、高估地表  $PGA_H$ ;两种方法计算的场地共振周期相当吻合,两者结果的差异随输入  $PBA_H$  的增加而增大。W. B. Joyner 与 A. T. F. Chen<sup>[154]</sup>对深厚土层的强震反应开展了另一项比

较研究。研究表明, EQL 方法低估地表  $PGA_H$ ;在较长周期( $T > 1.5$  s)段, EQL 与 NL 法给出的地表  $SA_H$  吻合良好,场地放大倍数可达 2 倍。然而,在周期 0.1~0.6 s 范围内, EQL 方法低估了地表  $SA_H$ ,未能准确反映 NL 反应中存在的短周期成分。

在 1989 年美国 Loma Prieta  $M_w$ 6.9 地震后,基于强震记录的验证研究日益增多<sup>[75, 188, 295]</sup>。I. M. Idriss<sup>[75]</sup>利用该次地震记录评估了软件 SHAKE 的预测准确性,发现当输入  $PBA_H$  水平较低时,该软件能合理预测地表  $PGA_H$ ,但对地表  $SA_H$  的预测精度有限。据此, I. M. Idriss 建议当输入  $PBA_H$  大于 0.2g 时,应同时进行 EQL 与 NL 分析。S. E. Dickenson<sup>[188]</sup>则分别采用 EQL 法软件 SHAKE04 和 NL 法软件 DESRA,对旧金山湾区的 10 个深软场地进行了类似研究。结果表明,仅对少数场地的模拟与实测数据吻合较好;此外,当单个场地有多个露头基岩记录可供选择时,模拟结果的准确性对输入基岩地震动的选择敏感。S. W. Chang<sup>[295]</sup>采用 1989 年 Loma Prieta 地震以及 1994 Northridge 地震期间在深厚硬黏土土地上的地震记录,对 SHAKE 和 D-MOD 软件开展了对比验证。上述系列研究表明,相应的软件能对场地反应做出合理的预测,但模拟结果对基岩输入地震动的选择较为敏感。同时,部分研究指出,通过合理调整土的动力特性参数,可以获得与地震记录更为一致的结果<sup>[296]</sup>。

H. B. Seed 等<sup>[52]</sup>以 1989 年 Loma Prieta 地震中 YBI 基岩台站记录 EW 分量( $PGA \approx 0.07g$ )作为基岩输入地震动,采用 EQL 法(SHAKE91)计算了距 YBI 约 2.5 km 处 TRI 台站软土地场的 1D 反应(图 55)。结果显示,计算的地表  $PGA_H$ (0.18g)与地震记录值(0.16g)吻合良好;地表  $SA_H$  曲线也合理地反映了实测谱的主要特征,即在  $T \approx 0.6$  s 处出现主峰,在  $T \approx 1.3$  s 处存在次峰。相对基岩输入地震动,地表  $SA_H$  在  $T \approx 1.3$  s 处放大 4~5 倍,而在  $T \approx 0.6$  s 处放大 2.5~3 倍。应注意,  $T \approx 0.6$  s 处的地表  $SA_H$  峰值主要源于基岩地震动中接近该周期的谐波能量激发了场地的二阶振型,而非场地基本周期( $T_g = 1.3$  s)。尽管 EQL 法对 TRI 台站的预测总体合理,但计算与记录的地表  $SA_H$  之间仍存在一定偏差,未能重现强震记录在  $T \approx 0.35$  s 处的峰值,这可能是 EQL 方法在高频段过度阻尼所致。

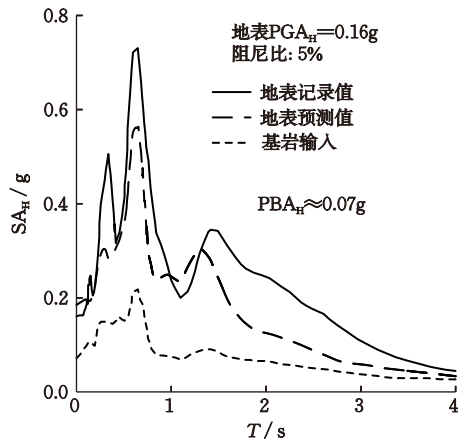


图 55 TRI 台站 Loma Prieta 地震记录与计算结果的谱加速度比较(输入 YBI 台站记录)<sup>[52]</sup>

Fig.55 Comparison between calculated and recorded acceleration response spectra for TRI station using YBI record during 1989 Loma Prieta earthquake<sup>[52]</sup>

此外, EQL 法计算的结果显著低估了长周期 ( $T > 1.5$  s) 的地表  $SA_H$ 。通常将其归因于填土中  $u_e$  增长导致的土体软化效应。然而, 土的软化效应不能完全解释 EQL 法对长周期地表  $SA_H$  反应的一致低估。一种可能的假设是, 这些长周期地震波来源于面波, 这些面波可能因 YBI 的出露基岩向金银岛冲积层及填土下方倾斜而局部形成, 而 SH1D 模型无法有效模拟此类 2D 或 3D 波的传播效应。

台湾 LSST 场地布设有竖井台阵, 在 0、6、11、17 和 47 m 深处记录到了多次地震事件(包括 1986 年  $M_L 6.5$  地震), 所记录到的最大地表  $PGA_H$  达到  $258 \text{ cm/s}^2$ 。基于 LSST 场地中 DHB 台站在 1986 年  $M_L 6.5$  地震中的强震记录, R. I. Borja 等<sup>[229]</sup> 采用 EQL 法 (SHAKE) 和 NL 法 (SPECTRA) 对 DHB 场地进行了对比分析。研究表明, 该记录对应的场地反应已呈现非线性特征 ( $\gamma_s \approx 0.2\%$ )。NL 法预测的地表  $PGA_H$  虽较实测值偏低  $10\% \sim 20\%$ , 但验证了其在强震反应预测中的可行性; EQL 法的预测精度与之大致相当。类似地, H. C. Huang 等<sup>[297]</sup> 以 15 组弱震动记录(地表  $PGA_H < 100 \text{ cm/s}^2$ ) 的平均谱比作为参考基准, 发现强震动会导致场地卓越频率降低(最大降幅  $20\%$ ) 和放大效应减弱(最大降幅  $50\%$ )。他们以 DHB 台站 47 m 深处记录到的 1986 年  $M_L 6.5$  地震中的记录为基岩地震输入, 采用 NL 法 (DESRA-2) 进行模拟。结果表明, 虽然对地表  $PGA_H$  存在一定低估, 但预测的地表加速度时程在幅值与相位上与实际记录相当吻合。

J. P. Stewart 等<sup>[163]</sup> 报道了一项 1D NL SRA 软件的盲测对比研究。他们以加州 Turkey Flat 台阵场地为例(图 56), 利用 EQL 法软件 SHAKE04 以及多种 NL 法软件(包括 D-MOD\_2、DEEPSOIL、TESS、OpenSees 和 SUMDES) 进行盲测, 以井底 D3 记录作为基岩输入地震动, 预测地表 V1 和 V2 点的地震动, 并将结果与实测记录对比。采用在 2004 年 Parkfield  $M_w 6.0$  地震及其余震期间记录到的井底记录作为输入地震动, 其中实测最大地表  $PGA_H$  为  $0.292g$ 。研究发现, 多数软件能捕捉加速度时程的基本形态, 但在幅值上普遍存在低估现象。预测结果低估了较宽周期范围内的地表  $SA_H$ , 但高估了在  $T_g$  处的地表  $SA_H$ 。总体上, 没有一个软件的预测结果与实测记录高度吻合。研究者将这一差异归因于不准确的  $V_s$  剖面、NL 软件中过高的滞回阻尼, 以及实际存在的 3D 波动场与 1D SH 波传播假设之间的本质差异。

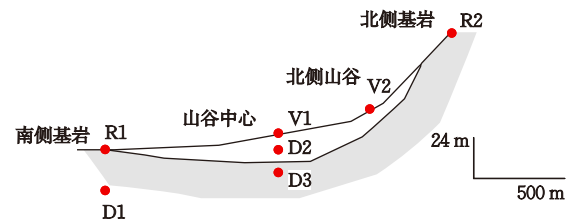


图 56 Turkey Flat 台阵场地剖面 and 地震仪位置<sup>[163]</sup>

Fig.56 Section and instrumentations of the Turkey Flat site<sup>[163]</sup>

此外, J. P. Stewart 等<sup>[163]</sup> 与 J. P. Stewart 和 A. O. L. Kwok<sup>[201]</sup> 采用这 6 个软件对比了三个场地的地震反应特性: 薄土坚硬场地 (Simi 峡谷 Knolls 学校)、中等厚软黏土地 (金银岛) 及深厚坚硬场地 (La Cienega)。该研究揭示了不同软件的 NL 法之间的差异情况, 部分软件对目标阻尼比  $\zeta_{tar}$  取值较为敏感, 并建议采用完整的瑞利阻尼公式。这项研究凸显了输入参数与模型假设的局限性对计算结果的关键影响。

日本 Kik-net 台网的大量地震记录为验证 1D SRA 软件分析结果的可靠性提供了宝贵的数据。基于该台网的强震数据, 多位学者开展了深入的对比研究。J. Kalkanos 等<sup>[158]</sup> 利用 KiK-net 台网 100 个竖井台站的 3 720 条记录(其中 204 条的地表  $PGA_H > 0.3g$ ) 进行分析。结果表明, 尽管 EQL 法 (SHAKE) 对单个记录的预测可能低估或高估地表  $PGA_H$ , 但总体而言, 平均低估约  $25\%$ 。此外, 在短周期 ( $T < 0.5$  s) 和高剪应变水平 ( $\gamma_s > 0.4\%$ ) 下, 其

计算的地表 $SA_H$ (5%阻尼比)与记录值存在显著偏差。后续J. Kaklamanos和B. A. Bradley<sup>[203]</sup>采用J. Zhang等<sup>[298]</sup>的 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 曲线,针对114个KiK-net竖井台阵的5 626条记录的进一步研究指出,当 $\gamma_a$ 低于约0.05%时,EQL法与NL法(DEEP-SOIL)的计算结果无显著差异;但当 $\gamma_a$ 超过此阈值时,NL法对场地反应的低估程度要轻于EQL法。G. Zalachoris和E. M. Rathje<sup>[160]</sup>基于11个竖井台站(9个KiK-net台站,La Cienega和Lotung台站)的650余条记录,比较了EQL法和FD-EQL法的预测结果。研究表明:当 $\gamma_a>0.1\%$ 且 $T<0.4$  s时,传统EQL法对场地放大效应的低估最高可达70~75%;而FD-EQL法则存在高估现象,最高可达75%。上述研究表明,1D SRA方法在短周期、大应变条件下的场地反应预测存在明显的局限性。

C. Bolisetti等<sup>[202]</sup>建立了4个深度均为100 m的典型核岛结构场地模型(涵盖硬岩至硬土条件),对比了1D EQL法(SHAKE软件)和1D NL法(DEEPSOIL和LS-DYNA)的模拟结果。研究发现:(1)方法局限性:EQL法难以有效反映高频地震反应,导致短周期段的地表 $SA_H$ (阻尼比5%)几乎为常数;而NL法也存在各自的问题,DEEPSOIL因其采用的土的本构模型滞回法则,偶现相邻土层间 $\gamma_a$ 的突变;LS-DYNA则偶尔会产生高频数值噪声。(2)共性规律:尽管DEEPSOIL和LS-DYNA采用的土的本构模型不同,但两者预测的地表 $PGA_H$ 较为接近。(3)阈值应变:当 $\gamma_a>0.1\%$ 时,EQL法的结果开始偏离NL法;当 $\gamma_a>1\%$ 时,二者差异显著。(4)场地类型影响:对于软岩场地( $T<0.5$  s)和硬土场地( $T<2$  s)的地表 $SA_H$ 预测,EQL与NL法的差异尤为明显。因此,当 $\gamma_a>0.1\%$ 时应优先采用NL法。如仍需使用EQL法,需谨慎对待其结果,并建议采用多种EQL法软件(如DEEPSOIL与SHAKE)交叉验证,以避免可能出现的非收敛问题。

B. Kim等<sup>[299]</sup>选取美国西、中、东部典型场地的基岩运动记录与剪切波速剖面,系统对比了EQL法与NL法给出的地表 $SA_H$ 及对应的傅里叶幅值谱( $FA_H$ )的差异。研究指出,剪应变指数 $I_\gamma$ (定义为基岩输入 $PGV_H$ 与 $V_{s30}$ 之比)是控制EQL法与NL法结果偏离程度的关键参数。当 $I_\gamma$ 较低时,两者结果基本一致;随着 $I_\gamma$ 增大,两者结果的偏离呈现明显的频段依赖性:在1~3 Hz频段, $I_\gamma\approx 0.1\%$ 时,两者计

算结果的比值开始偏离1;在更高频段( $\geq 5$  Hz),两者结果的偏离发生在更低的 $I_\gamma$ 值;而在低于1 Hz的频段,则需要更高的 $I_\gamma$ 值( $\approx 0.1\%$ )才出现显著差异。在场地基本频率 $f_g$ 附近,EQL法因采用时不变参数会高估共振反应,高于NL法的结果;而在高频段,EQL法则因过度阻尼而低估反应。这些差异在地表 $FA_H$ 的比较中比在 $SA_H$ 中更为明显。

袁晓铭及其合作者<sup>[220, 300-302]</sup>基于KiK-net台阵记录,对FD-EQL法(SOILQUAKE)、传统EQL法(SHAKE 2000)及NL法(DEEPSOIL)进行了对比研究。结果表明,在硬土地中,三者的结果较为一致;而在软土地中,特别是深软土地中,FD-EQL法的结果最接近实测记录,更能反映场地放大效应,传统EQL法与NL法则显著低估地表 $PGA_H$ 。此外,针对Eurocode 8<sup>[144]</sup>和NEHRP<sup>[142]</sup>分类中的D类和E类场地,他们进一步对比了EQL-H法(SIT-ERESPONSE)、传统EQL法(SHAKE2000)及NL法(DEEPSOIL)。研究发现,在D类和E类场地中,EQL-H法预测的地表 $PBA_H$ 与地震记录的吻合度显著优于传统EQL法和NL法;即使在C类场地,EQL-H法也表现出一定程度的改进。

I. Régnier等<sup>[303]</sup>基于KiK-net台网174个场地弱震和强震记录,通过比较地表与井下记录的 $FA$ 谱比,定义了非线性与线性场地反应之比的指标 $RSR_{NL/L}$ ,用以量化土的非线性效应。研究表明,低频段 $RSR_{NL/L}>1$ ,即强震的场地反应超过弱震;高频段 $RSR_{NL/L}<1$ ,即强震的场地反应低于弱震。场地特征频率 $f_{NL}$ ( $RSR_{NL/L}=1$ 对应的频率)与 $V_{s30}$ 及 $f_g$ 呈负相关。即使中强地震动(地表 $PGA_H\geq 0.1g$ )作用下,土的非线性已对场地反应产生显著影响,具体表现为低频放大( $RSR_{NL/L}>1$ )和高频衰减( $RSR_{NL/L}<1$ ),且 $f_{NL}$ 降低。

通过PRENOLIN国际基准项目研究,系统评估了不同软件及其相应土的本构模型对1D NL SRA的适用性<sup>[164, 204]</sup>。项目分为两阶段:第一阶段<sup>[204]</sup>针对理想土层剖面,发现软件间的差异主要源于"输入运动"的定义、材料参数、数值积分方式及数值阻尼处理的差异,且这种变异性随剪应变水平增大而增加;第二阶段<sup>[164]</sup>则将软件预测结果与已知场地的实际强震记录进行对比,共涉及19个团队、23个不同软件的模拟结果。依据E. M. Thompson等<sup>[153]</sup>与J. Régnier等<sup>[304]</sup>提出的SH1D场地标准,从KiK-net台网的688个台站中最终选定KSRH10台

站,以及PARI(港湾空港技术研究所)台网的仙台台站作为目标场地。这两个场地均有地表和井下的强、弱震动记录,以及完整的场地资料,包括土动力特性的现场和室内试验数据。针对KSRH10和仙台台站,分别选取了10组和9组输入地震动,以涵盖不同的震级、震中距、地表 $PGA_H$ 及频谱特性。结果表明,1D模拟可基本再现 $f_g$ ,但高阶模态及全频段反应仍难以准确捕捉,这凸显了1D SH波传播假设在复杂场地中的局限性。研究指出,当 $\gamma_a$ 超过约0.2%时,不应使用EQL方法。此外,该研究强调场地相关的土动力特性参数测试至关重要,室内试验测量的 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 曲线应与文献中的曲线进行比较,以论证其合理性。

G. J. Li等<sup>[305]</sup>利用美国加州和日本7个经严格筛选的竖井台站、覆盖较宽强度范围的41组地震动记录,基于软件LS-DYNA建立1D土柱模型,系统评估了1D SRA方法对预测场地放大效应的稳健性与适用性。该研究采用了GQ/H与MTH(修正的两阶段双曲线)两种骨架曲线模型<sup>[207, 292, 306]</sup>,并结合LS-DYNA中的MAT\_HYSTERETIC\_SOIL本构模型来表征土的非线性动力特性。该模型通过多屈服面框架描述土的非线性与滞回行为,其模量衰减与阻尼特性由用户定义的骨架曲线模型结合Masing准则确定。依据E. M. Thompson等<sup>[153]</sup>的场地分类方法对所选台站场地进行评估,发现仅Eureka场地符合理想的SH1D模型假设,这一结果为理解1D SRA的校准与适用范围提供了启示。为提高模拟精度,研究建议瑞利阻尼公式中的 $\lambda_{min}$ 宜取与地震动强度相关的值:对较强的地震动(地表 $PGA_H \geq 0.10g$ ),宜采用较低值(如2%);对较弱的地震动(地表 $PGA_H < 0.10g$ ),则宜采用较高值(如5%)。总体而言,NL模型能较好地再现台站记录的地震动。为量化1D SRA结果的不确定性(低估或高估),研究引入了周期指标 $T_{过渡}$ 。分析表明, $T_{过渡}$ 和 $T_g$ 之间存在显著相关性:当 $T_g < T_{过渡}$ 时,GQ/H与MTH模型趋于低估场地放大效应;当 $T_g > T_{过渡}$ 时,则出现轻微高估。这一趋势在强震动水平(地表 $PGA_H > 0.15g$ )下尤为明显。

陈国兴及其合作者<sup>[30, 307]</sup>系统研究了地震基岩埋深及土的动力本构模型对1D SRA结果的影响。针对某核电厂场地的3个巨厚沉积层钻孔剖面(深470 m,含火山岩夹层),他们选取5个不同 $V_s$ 界面作为地震基岩面,系统对比了EQL法(ProShake)与

NL法(基于DEEPSOIL的MKZ模型及基于ABAQUS的DCZ模型)模拟的场地反应<sup>[30]</sup>。研究表明:若以浅层硬岩夹层或深部土层作为地震基岩面,NL法在短周期段给出的地表 $SA_H$ 值高于EQL法,而两者在长周期段的结果基本一致;两种NL模型(MKZ模型与DCZ模型)所得的地表 $SA_H$ 曲线形态及加速度随深度变化的趋势较为一致。综合地表 $PGA_H$ 和累积绝对速度等指标,将 $V_s$ 约2 500 m/s的浅层硬岩夹层作为地震基岩面是合理的选择。

此外,他们以苏州城区某200 m深的钻孔剖面为例,基于DEEPSOIL软件对比了1D EQL法与NL法的模拟结果<sup>[307]</sup>。研究表明:随着输入 $PBA_H$ 增大,EQL法所得地表 $PGA_H$ 呈单调递增趋势,而NL法则表现为先快速增大后趋于基本稳定或缓慢降低;在短周期段,两种方法给出的地表 $SA_H$ (阻尼比5%)差异显著:EQL法对基岩地震动高频成分具有明显的滤波效应,而NL法对高频成分的影响则随输入 $PBA_H$ 增大呈先增强后减弱的非线性趋势。随着地震基岩面埋深增加,地表 $SA_H$ 值总体上略有增大,但在周期小于0.1 s段,NL法的地表 $SA_H$ 值反而略有降低。当输入 $PBA_H$ 超过0.10g时,地表地震动的持时不仅受基岩输入地震动特性的影响,NL法能更合理地反映输入 $PBA_H$ 的水平及上覆土层厚度对其综合的影响。

基于PRENOLIN国际基准项目研究中选定的KSRH10场地及其对应的 $V_s$ 剖面、 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 曲线,以及输入地震记录<sup>[164]</sup>,赵丁凤<sup>[274]</sup>在ABAQUS软件平台上建立土柱模型,并采用DCZ模型表征土的非线性特性,模拟了该场地的NL地震反应。图57展示了该模型预测与实测的地表加速度时程及其 $SA_H$ (5%阻尼比),以及PRENOLIN项目研究给出的地表 $SA_H$ 包络对比<sup>[164]</sup>。结果表明,DCZ模型对地表 $PGA_H$ 的预测与实测值吻合良好。具体而言,对于弱震(输入 $PBA_H=0.006g$ )作用的情况,地表 $PGA_H$ 的预测值(0.051g)与实测值(0.050g)的相对误差仅为2.6%,加速度时程波形基本一致,峰值时刻偏差为0.61 s;此时,近地表土的最大 $\gamma_a$ 约为 $1.25 \times 10^{-4}$ ,处于非线性弹性与弹塑性反应之间的临界状态。对于中强震(输入 $PBA_H=0.068g$ )作用的情况,地表 $PGA_H$ 的预测(0.321g)与实测(0.364g)值的相对误差为11.8%,加速度时程波形仍较为接近,峰值时刻仅差0.04 s;近地表土的最大 $\gamma_a$ 达 $1.23 \times 10^{-3}$ ,土表现出显著的非线性与滞回特性。地表 $SA_H$

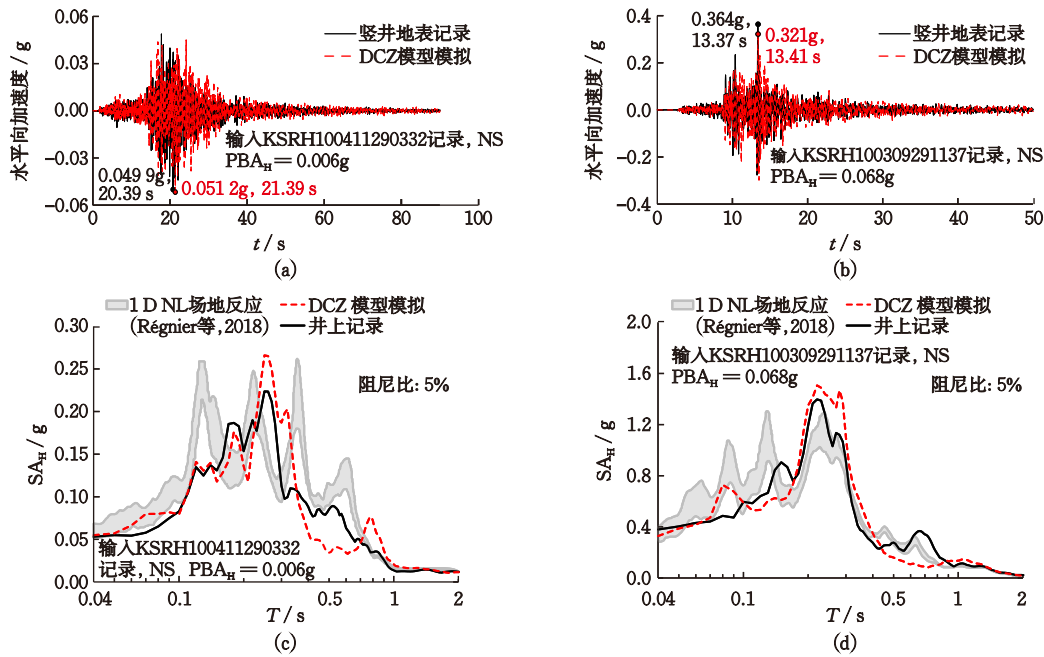


图57 PRENOLIN项目中KSRH10台站场地地震反应的模拟与记录的对比<sup>[274]</sup>

Fig.57 Comparison between the calculated and recorded surface responses of station KSRH10 site profile in PRENOLIN project<sup>[274]</sup>

曲线对比显示,该模型能较好地再现中短周期(0.17~0.45 s)的反应谱形状与卓越周期,但在短周期(<0.17 s)及中长周期(0.45~0.85 s)段存在一定低估。总体而言,DCZ模型在模拟弱震至中强震作用下地震动在土层中的传播、捕捉高频滤波效应及再现场地放大特性方面表现出良好的适用性与可靠性,并优于PRENOLIN国际基准项目中不同团队、软件的模拟结果。

Y. Miao等<sup>[308]</sup>基于美国Delaney Park竖井台阵记录的2018年Anchorage  $M_w$ 7.0地震数据,提出了一种从竖向台阵强震记录反演原位土动力参数( $V_s$ -剖面, $G/G_0$ - $\gamma_s$ 和 $\lambda$ - $\gamma_s$ 曲线)的方法。利用反演得到的参数,采用1D NL法(DEEPSOIL)模拟了地震波在土层中的传播,并将不同深度处的预测加速度时程与实测记录进行了对比。台阵在0、10.7、18.3、30.5、45.4和61 m深度处均有记录,预测的峰值加速度依次为0.209g、0.192g、0.134g、0.147g、0.214g和0.128g,强震记录值依次为0.257g、0.241g、0.125g、0.134g、0.228g和0.138g。结果显示,预测的加速度时程包络线与观测结果一致,相位吻合良好,较好地再现了场地非线性的空间分布特征。上部两个测点(0 m和10.7 m)的预测误差约为20%,而下部四个测点的预测误差均小于10%。上部误差可能源于近地表10 m范围内土层的实际非均质

性被模型简化为均质材料。各深度处预测与实测 $SA_H$ (阻尼比5%)的Pearson相关系数均在0.92以上,均方根误差介于0.14~0.22,有效验证了基于原位参数的1D NL SRA方法的可靠性。

美国加州Garner Valley竖井台阵在六个不同深度(0、6、15、22、50和150 m)布设了三分量强震仪,并记录到了地震代码10736069( $M_L$ 5.43,震源距32.53 km)的地震动。B. Ruan等<sup>[309]</sup>基于ABAQUS平台,采用DCZ模型描述土的非线性特性,利用文献中的 $G/G_0$ - $\gamma_s$ 和 $\lambda$ - $\gamma_s$ 曲线标定DCZ模型参数。研究以Garner Valley台阵150 m深处( $V_s > 2000$  m/s)的地震记录EW分量作为基岩输入地震动,采用时域1D NL法,模拟了地震波在该台阵场地中的传播。该场地在87 m深处 $V_s$ 已达1000 m/s以上,模拟得到的加速度时程峰值自地表至井底依次为1.06、0.95、0.52、0.44和0.38 m/s<sup>2</sup>,对应的实测记录则分别为1.04、1.01、0.62、0.56和0.50 m/s<sup>2</sup>。模拟结果表明:模拟与记录的加速度波形及其0~20 Hz频带内的 $SA_H$ (5%阻尼比)曲线基本一致。这说明,对于地表 $PGA_H$ 约0.1g的地震动水平,DCZ模型能够有效再现宽频带(0~20 Hz)范围内的NL场地反应特征。

综上,NL SRA仍面临显著挑战。1985年墨西哥 $M_w$ 8.1、1989年美国Loma Prieta  $M_w$ 6.9及2011年

东日本  $M_w 9.1$  等地震震害案例,均凸显了深厚软土地在强震作用下的强非线性行为。这些震害经验表明,若地震动设计反应谱未能合理体现深厚软土的NL场地效应,将给土木工程结构及设施带来潜在的安全风险。因此,进一步改进并校验NL SRA方法的可靠性至关重要。然而,目前可用于深度校验的、资料完备的竖向台阵案例仍然极为有限。典型案例仅包括LSST场地、Port Island场地,以及E. M. Thompson等<sup>[153]</sup>从KiK-net台网中识别的少数LG场地。现有研究表明,土的非线性效应可能导致长周期场地反应被严重低估;同时,随着剪应变水平的提高,不同NL SRA方法所得结果之间的离散性显著增大。

### 2.1.5 时域NL有效应力法的验证

2010~2011年新西兰 Canterbury 地震序列期间,基督城地震台网的强震记录为检验有效应力1D NL SRA法的可靠性提供了宝贵数据。C. S. Markham等<sup>[310]</sup>以台站CACS记录到的Woth1 FN分量作为输入,采用DEEPSOIL对比了EQL法、总应力NL法及有效应力NL法对CHHC和PPHS台站场地的计算结果。针对CBGS台站场地,比较了FLAC和DEEPSOIL的有效应力1D NL法的模拟结果。研究表明,在周期0.067~0.2 s段,DEEP-

SOIL总应力NL法给出的地表 $SA_H$ 略高于有效应力NL法,且两者均高于EQL法;当周期超过0.2 s时,三种方法的结果无明显差异。尽管总应力与有效应力NL法计算的地表 $SA_H$ 接近,但有效应力分析显示,CHHC场地在17~19 m深处的超静孔压比( $r_u$ )超过0.94,且在 $r_u$ 较高的深度处,有效应力NL法得到的 $\gamma_s$ 值明显高于其他两种方法;PPHS场地在4 m深处的峰值 $r_u$ 亦高达0.95。这表明,CHHC和PPHS场地均发生了液化。此外,FLAC计算的地表 $SA_H$ 与实测记录更为吻合,尤其在0.1~1 s周期段。两种软件计算结果的差异,可能源于FLAC所用PM4Sand本构模型与DEEPSOIL所用MKZ模型对土的应力-应变行为的表征方式不同,相对更先进的PM4Sand模型能更准确地捕捉液化土的非线性反应特征。

1995年阪神  $M_w 6.9$  地震期间,日本Port Island台阵场地发生的严重液化现象,为验证有效应力1D NL SRA法提供了另一典型案例。G. X. Chen等<sup>[147]</sup>以Port Island竖井台阵液化场地为研究对象,采用其提出的弱耦合有效应力NL SRA法,模拟了该场地的NL地震反应,并与-3 m、-16 m和-32 m深处记录的地震动时程及其 $SA_H$ 曲线进行了对比(图58)。由于缺乏详细的土动力特性参数,研究基

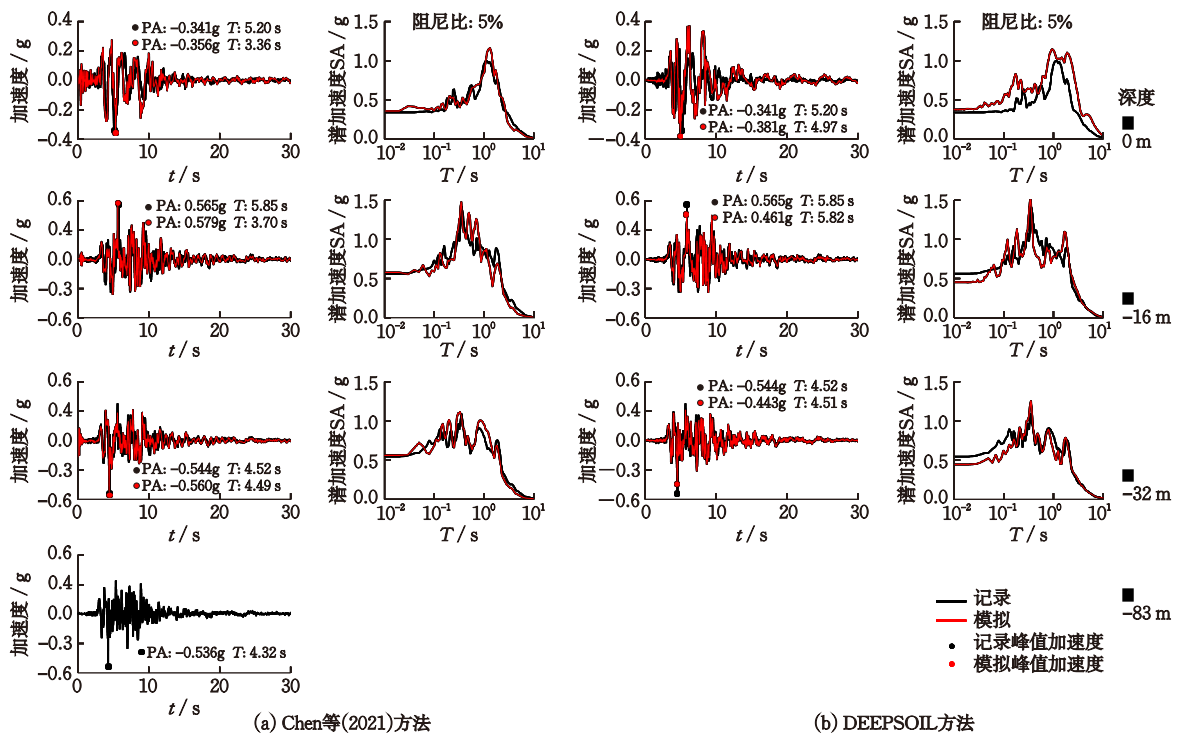


图58 模拟与记录的Port Island台站场地加速度时程和谱加速度的对比<sup>[147, 311]</sup>

Fig.58 Comparison of the simulated and recorded acceleration time-histories and the spectral accelerations at the Port Island seismic array site<sup>[147, 311]</sup>

于有限的现场实测资料,以-87 m深处记录的NS分量作为输入,进行1D NL场地反应模拟,通过试错优化标定了各类土的 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 关系,使得模拟结果与地震记录达到最佳吻合度。结果表明:在0 m、-16 m及-32 m处,该有效应力法模拟的加速度时程及其 $SA_H$ 曲线与实际的地震记录高度吻合:峰值加速度偏差不超过5%,峰值发生时刻的时差分别为0.16、0.15及0.03 s,且在周期0.1~1.1 s范围, $SA_H$ 峰值周期与记录值基本一致;但在周期大于1.1 s段,模拟的 $SA_H$ 值略低于地震记录值。相比之下,在0 m、-16 m与-32 m处,DEEPSOIL计算的峰值加速度偏差分别为11.7%、18.4%与20.9%。尽管在-16 m与-32 m处,DEEPSOIL的模拟结果与地震记录较为接近,但在0 m处(地表)吻合度较差。总体而言,DEEPSOIL在-16 m与-32 m处显著低估了短周期 $SA_H$ 值,而地表加速度时程及其 $SA_H$ 在周期0.1~10.0 s范围内整体偏大,表明其在模拟浅层液化土层的非线性反应方面存在明显的局限性。上述对比表明,该弱耦合有效应力NL SRA法在模拟多层液化场地的地震波放大和滤波效应方面优势显著,能更准确地捕获浅层液化土层的NL地震反应特征。

此外,W. L. Zakka等<sup>[314]</sup>基于M. B. Darendeli<sup>[312]</sup>和F. Y. Menq<sup>[313]</sup>提出的 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 曲线,采用1D EQL法(软件Strata)展开研究。他们将新西兰惠灵顿CentrePort附近VUWS SMS强震台站记录的三次地震(2016年 $M_w$ 7.8 Kaikōura地震、2013年 $M_w$ 6.6 Cook Strait地震和 $M_w$ 6.6 Lake Grassmere地震)的NS和EW分量反演至Greywecke基岩面,以此作为输入地震动。依据现场调查数据,他们建立了该港区深115 m的CPLB SMS场地的土柱模型,标定了软件FLAC中土的动力本构模型(PM4Sand、PM4Silt和UBCHyst)参数,并采用1D NL强耦合有效应力法计算了场地反应。模拟结果表明:除输入Kaikōura地震的EW分量外,地表 $PGA_H$ 的模拟值均低于地震记录值;输入Lake Grassmere地震记录时,计算的地表 $SA_H$ (阻尼比5%)略低于地震记录值,其NS分量的偏差尤为明显;而输入Kaikōura和Cook Strait地震记录时,计算与记录的地表 $SA_H$ 吻合较好。这些差异主要源于反演所得基岩地震动本身存在的不确定性。尽管如此,1D NL有效应力法的模拟结果在整体趋势上与CPLB场地观测到的液化现象相符。

综上,通过多处液化场地强震记录的模拟对比研究表明:现存的土动力本构模型在NL SRA中的适用性表现出显著的案例依赖性。无论是MKZ模型与PM4Sand模型在基督城CBGS场地模拟中的差异,还是不同有效应力法在Port Island竖井台阵浅层与深层模拟精度的差异,均表明现存的土动力本构模型在捕捉液化土层非线性滤波效应及 $u_c$ 增长过程中的应力-应变反应时,仍存在方法学上的不确定性,尚未形成普遍共识。尽管基于竖井台阵的有效应力NL SRA法的验证取得了进展,但受限于极深厚复杂场地中既有高质量的强震记录又有场地的动力特性参数试验数据的竖井台阵匮乏,目前尚缺乏此类场地条件下土的动力本构模型及相应有效应力NL SRA法的适用性验证研究。

## 2.2 场地反应的2D/3D分析方法及数值模拟

对地表与基岩面平坦、土层横向均匀的理想场地,1D SRA通常能较好地预测场地反应的主要特征<sup>[160, 315]</sup>。然而,除了受震源和传播路径影响的基岩地震动特性外,局部场地条件对场地反应也起着关键作用。强震观测和数值模拟表明:地表地形与基岩面的起伏、沉积土横向不连续性,会导致地震波传播过程中发生波的干涉、聚焦、反射和散射,使得2D/3D效应显著影响场地反应特性及其空间展布特征<sup>[33-34, 170, 178, 316-318]</sup>。例如,盆地边缘基岩面倾斜会加剧地震动放大,也即盆地边缘效应<sup>[319]</sup>。基于KiK-net台阵记录的研究表明,1D SRA的适用性有限;E. M. Thompson等<sup>[153]</sup>发现,在研究的100个竖井台站中,仅16个场地符合SH1D场地假设;M. Pilz和F. Cotton<sup>[320]</sup>也指出,在研究的354个竖井台站中,有45%的场地受2D/3D效应影响,且1D SRA普遍高估竖向地震动。

为了表征维度效应,F. J. Chávez-García与E. Faccioli<sup>[321]</sup>提出了“加剧因子”的概念,用以量化1D与2D、3D场地反应之间的差异。数值模拟成为解析这些复杂效应的关键手段。几位学者在2D、3D盆地非线性地震波动模拟方面开展了开创性研究<sup>[33, 322-323]</sup>。研究表明,土的非线性会抑制盆地效应引起的地震波放大<sup>[178, 322, 324]</sup>。然而,即使考虑了土的非线性效应,1D SRA仍低估了盆地场地反应的放大效应<sup>[33, 316, 325]</sup>。近年来,研究者采用理想化的小波(如Ricker小波、高斯小波)或实际地震记录作为输入地震动,模拟了浅盆地场地的2D NL场地反应

特征<sup>[178, 322, 326-328]</sup>。

尽管数值模拟能有效揭示地表几何特征、沉积土横向不均匀性及其波速结构对局部场地效应的耦合影响<sup>[33-34, 174-175]</sup>。但大尺度NL SRA仍面临严峻挑战。由于区域尺度场地的钻孔稀疏,基础数据缺乏,以及区域尺度3D NL SRA的计算量巨大,通常采用2D方法近似研究3D问题。尤其当截止频率较高(如25 Hz)时,由于土层波速接近地表时会急剧减小,需要快速减小网格尺寸,这成为区域尺度NL SRA的主要瓶颈。目前,大尺度(数km量级)复杂场地的2D NL SRA在工程实践中极为有限<sup>[31, 33, 179-181]</sup>。

### 2.2.1 频域和时域2D/3D EQL法

为应对实际工程的复杂需求,研究者将1D EQL SRA方法拓展至2D/3D领域,发展了一系列基于FE法的频域和时域求解技术,从而能够有效考虑地形和沉积土空间变异性对场地反应的影响,从而更真实地模拟场地反应。

在时域求解方面,I. M. Idriss等<sup>[329]</sup>首次将EQL法应用于2D FE求解,开发了软件QUAD-4,其后续升级版QUAD4M<sup>[330-331]</sup>采用Newmark平均常加速度法求解动力平衡方程。该软件基于完整瑞利阻尼公式构建阻尼矩阵,通过将第一频率 $f_1$ 设为场地基本频率 $f_g$ ,第二频率 $f_2 = \eta f_g$ ( $\eta$ 为大于输入地震卓越频率 $f_p$ 与 $f_g$ 之比的最小奇数),从而有效避免了由瑞利阻尼公式导致的过阻尼现象,使得SRA模型对输入地震动优势频带的反应更为合理。

在频域求解方面,J. Lysmer等<sup>[332]</sup>率先将1D SRA中采用的EQL方法拓展至2D FE求解,开发了软件LUSH。此后,该软件进一步发展出拟3D的FLUSH<sup>[333]</sup>及真3D的TLUSH<sup>[334]</sup>。这些软件均出自加州大学伯克利分校研究团队,在1970至1990年代是最主流的2D EQL SRA专业软件,几乎成为行业标准,并沿用至今。在此之后,2D EQL SRA法已取得了显著进展。

频域法的另一重要进展是J. Lysmer等<sup>[335]</sup>研发的3D土-结构动力相互作用(SS1)分析软件SASSI,后续版本为SASSI2000<sup>[336]</sup>和SASSI2010<sup>[337]</sup>。该软件也适用于自由场的3D SRA。SASSI在频域内采用基于FE法的复反应方法求解场地反应,通过复模量来引入材料阻尼,这导致了与频率无关的阻尼比。该软件通过H. B. Seed和I. M. Idriss<sup>[41]</sup>提出的EQL方法考虑土的非线性行为,并借助引入的阻抗

矩阵算法、插值技术及柔性体积法<sup>[338-339]</sup>,显著提升了计算效率与稳定性。该软件经过大量实际工程案例的验证,已成为美国核电行业的标准工具。

D. M. Ghiocel<sup>[340-341]</sup>基于VC++与Fortran90+语言研发的软件ACS SASSI,将原始SASSI的线性土柔性体积法扩展至非线性土,使其能够高效处理复杂几何形状的基础-结构系统的3D SSI分析,尤其适用于随空间变化的非相干地震动或多点地震激励的工程场景,同时也适用于3D EQL SRA。2007年,ACS SASSI通过了美国电力研究协会(EPRI)的独立评审与验证。目前,该软件已被全球多个国家的大型核能公司与机构采用。

### 2.2.2 时域2D/3D NL SRA方法及数值模拟

通用软件QUAKE/W<sup>[342-343]</sup>、OpenSees<sup>[240]</sup>、LS-DYNA<sup>[236-237]</sup>、ABAQUS<sup>[234]</sup>、Diana<sup>[344]</sup>、Lusas<sup>[345]</sup>和Flac3D<sup>[243]</sup>等均具有2D/3D NL SRA的功能。这些软件功能强大、颇为复杂且使用难度大,通常无法更改地震波动方程的求解方式,且其分析方法(如土的本构模型和人工边界条件)的改进需具丰富的专业经验,限制了研究者采用不同模型研究2D/3D场地效应的可能性;此外,构建非均匀复杂场地的3D模型过于复杂,导致3D场地反应研究仍极为有限。然而,对于盆地和高起伏地形场地,以及新近沉积的冲洪积土等3D非均质场地,3D效应对非线性场地效应的影响不可忽略。

1986年台湾东海岸先后发生了 $M_w 6.2$ 与 $M_w 7.0$ 地震,位于震中附近的LSST场地DHB竖井台站,记录到了地表与井下多个深度处的地震动以及3 m和16 m深处的 $u_c$ 数据,为验证近场地震动作用下的有效应力NL场地反应提供了宝贵的数据。X. S. Li等<sup>[346]</sup>基于该场地的土工试验数据,采用软件SUMDES中的强耦合有效应力NL SRA法,对两次地震作用下的场地反应进行了模拟。该软件专为分析水平成层场地在基岩地震动垂直入射条件下的场地反应而研发,能求解土柱在多维地震动作用下的反应。模拟的EW、NS和UD向加速度及 $u_c$ 时程,均与现场观测记录表现出合理的一致性,验证了该软件模拟液化场地反应的适用性。

随后,Z. L. Wang等<sup>[347]</sup>将SUMDES软件应用于1995年阪神地震期间Port Island竖井台阵液化场地。研究利用了K. Ishihara等<sup>[348]</sup>提供的原状与重塑Masado土(回填砂砾土)的室内试验数据,包括不排水单调试验获取的有效应力路径和稳态参

数(不排水强度和残余强度),用以标定 SUMDES 软件中的边界面亚塑性模型的参数。以-83 m 深处的地震记录作为输入地震动,模拟得到 0 m、-16 m 和-32 m 深处的水平与竖向地震反应与实测记录吻合良好。尤为重要的是,该模拟成功捕获到了液化引起的地面变形:计算得出约 0.4 m 的地表沉降量,与地震期间观测到的 0.2~0.5 m 沉降范围<sup>[349]</sup>相符。

陈国兴及其合作者<sup>[27, 33, 350]</sup>选取中国东部两个典型地貌单元,及苏州深厚软土地带与福州河口盆地,系统开展了 2D NL 地震反应特征的数值模拟研究,探讨了地形地貌与沉积土空间分布特征的几何构形与土的非线性耦合作用对场地反应的影响。

针对苏州平原深厚软土地带<sup>[27, 350]</sup>,他们基于大量原状土样的试验研究,分析了海侵作用与土层深度对土的  $G/G_0-\gamma_a$  和  $\lambda-\gamma_a$  关系的影响,提出了该地区典型土类的平均曲线。据此,采用基于分段函数修正的 Davidenkov 骨架曲线模型<sup>[351]</sup>描述土的非线性特性,依据试验结果标定模型参数。在 ABAQUS 平台建立的 20 km×100 m 的 2D FE 模型中,输入富含长周期成分的远场大震记录及人工波进行场地反应分析。研究表明,苏州平原场地对高频地震动 ( $T<0.3$  s) 具有显著滤波作用,而对中长周期地震动 ( $T=0.85\sim 1.65$  s) 则表现出明显放大效应,地表地震动参数远超现行抗震规范限值。此外,峰值加速度沿深度与水平方向的分布均呈现波动特征,在不同成因土层交界及横向不均匀性显著部位,地震波传播出现局部聚焦放大或过滤减弱现象。

针对福州河口盆地<sup>[33]</sup>,他们基于地球物理勘探与 124 个钻孔的实测  $V_s$  数据,选取 4 条呈井字形分布、尺度约 (20~25) km×130 m 的地层剖面,构建了盆地的 2D  $V_s$ -结构模型。土的动力本构模型及其参数标定方法与在苏州平原中采用的相同,但根据 141 组原状土样的动力特性试验结果,提出了适用于该盆地冲洪积土与海积土的  $G/G_0-\gamma_a$  和  $\lambda-\gamma_a$  平均曲线。输入地震动的选取,依据场地地震危险性分析结果合成 50 年超越概率 63%、10% 与 2% 水准的基岩地震动,各水准包含 6 条频谱特性不同的人工地震波,其  $PBA_H$  分别设定为 50、100 与 150 cm/s<sup>2</sup>。同时,另选用 1995 年阪神地震 KJMA 台站记录(震中距 18.27 km)作为对比分析的基岩输入地震动。2D 模型的数值模拟揭示了丰富的盆地效应:(1)盆地沉积土层对地震动放大作用显著,近地表尤为明

显,且峰值加速度放大系数随深度非单调递减,局部存在地震波聚焦现象;(2)盆地边缘呈现强烈边缘效应,基岩面起伏显著区域地表放大效应更为突出;(3)盆地场地对中长周期地震动放大显著,且在 0.5~2.0 Hz 频段对盆地放大与聚焦效应最为敏感;(4)地表地震动持时具有空间变异性,且随输入  $PBA_H$  增大而延长。研究明确指出,传统 1D SRA 严重低估了该类盆地的非线性放大效应。

R. Motamed 等<sup>[292]</sup>研究了 2D 地震动输入对 NL 场地反应的影响。该研究基于 2007 年日本新潟中越  $M_w 6.6$  近海地震期间 Kashiwazaki-Kariwa 核电站附近竖井台站的自由场记录,利用 LS-DYNA 模拟了与断层正交(FN)和平行(FP)方向的 2D 地震动输入下台站场地的 NL 反应。土的动力非线性行为采用 MTH 骨架曲线模型<sup>[306]</sup>结合 LS-DYNA 中的 MAT\_HYSTERETIC\_SOIL 材料模型进行表征:MTH 模型用于描述土体在循环荷载下的应力-应变关系,考虑了土的峰值强度及其完全发挥时对应的应变;MAT\_HYSTERETIC\_SOIL 模型用于引入应变率对土的刚度的修正机制。研究建立了由仅允许剪切变形的实体单元沿深度堆叠而成的土柱模型(图 59),以模拟多向振动下的自由场反应。以 99.4 m 深处的地震记录作为输入,并假定该深度以下为刚性基岩。所有土层在 0.3~9 Hz 范围内设置  $\lambda_{min}=2\%$ 。为消除高频数值噪声,对输出加速度时程施加截止频率 25 Hz 的低通 Butterworth 滤波<sup>[352]</sup>。研究表明,2D 地震动输入、应变率修正以及  $G/G_0-\gamma_a$  曲线形态均对 NL SRA 结果有显著影响。综合考虑 2D 输入与应变率效应后,模拟整体精度得到提升。两种因素的影响可总结如下:应变率效应会明显提高土柱的峰值加速度并降低剪  $\gamma_a$ ,但对  $SA_H$  的影响较小;2D 地震动输入效应则会显著降低预测的  $SA_H$  值,而对峰值加速度及  $\gamma_a$  的影响则相对较小。对比结果(图 60)显示,在 FP 方向上,基于 2D 输入预测的  $SA_H$  较 1D 结果更接近实测记录。1D 与 2D 地震动输入下场地反应的差异表明,地震波能量在不同方向间的转换会改变土的多向加载路径,进而耦合影响土的模量降低与  $u_c$  发展过程,显著影响 NL 场地反应。因此,在数值模型中考虑 2D 地震动输入不仅更符合实际物理过程,也有助于提高模拟结果与实测数据的一致性。

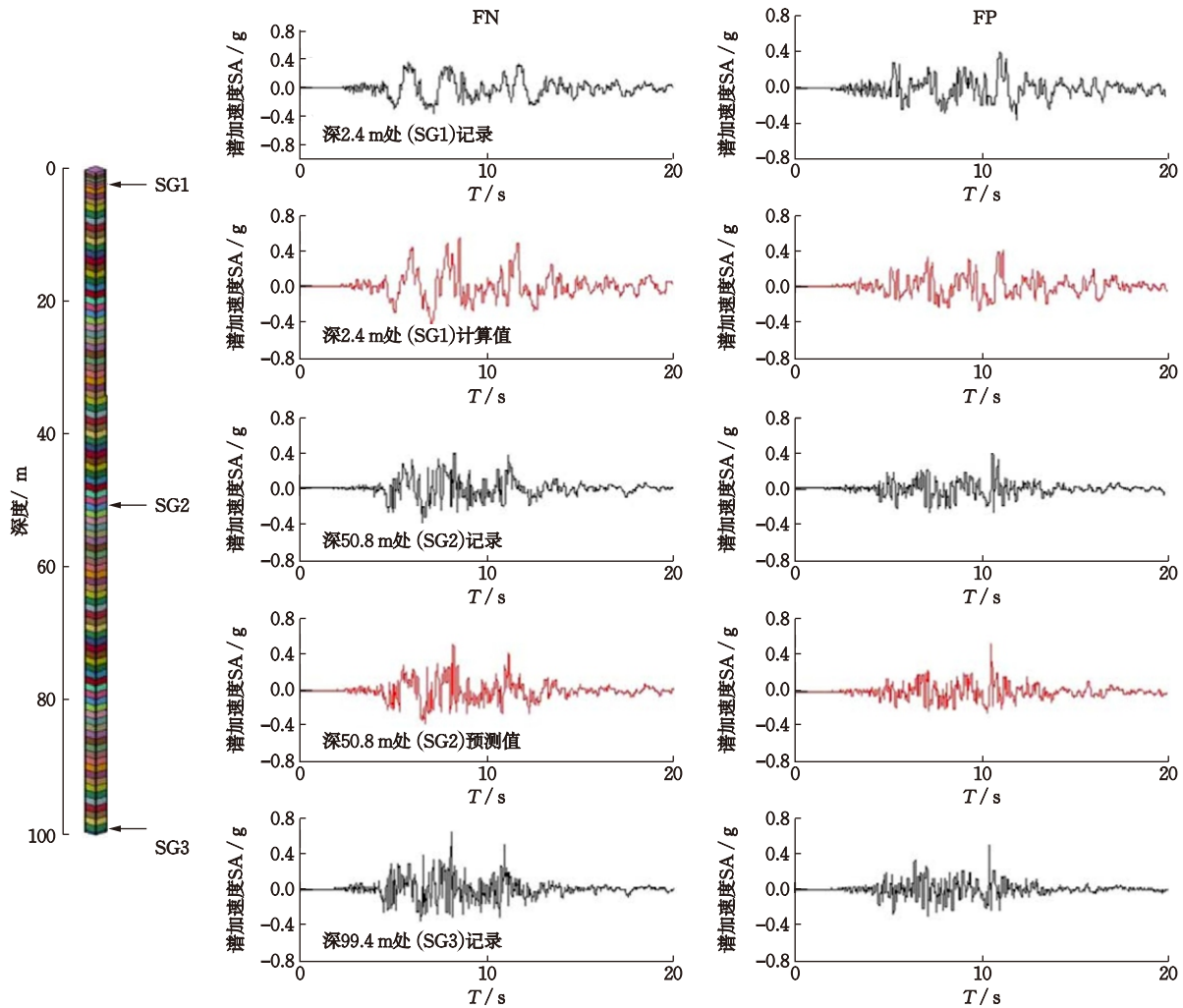


图 59 软件 LS-DYNA 生成的土柱模型 (左) 及记录和预测的地震动加速度时程 (右)<sup>[292]</sup>

Fig.59 Soil column developed in LS-DYNA (left) as well as both recorded and predicted acceleration time histories (right)<sup>[292]</sup>

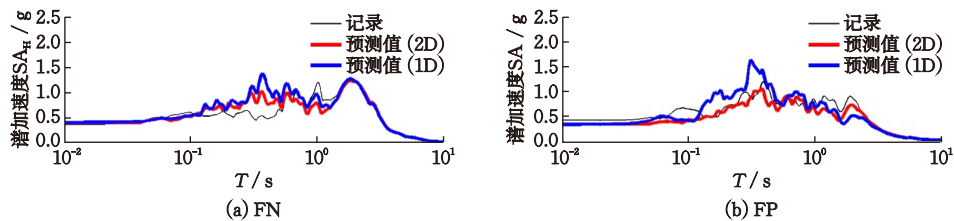


图 60 1D 和 2D 地震动输入下在 2.4 m 深度处预测与记录的加速度反应谱曲线的比较<sup>[292]</sup>

Fig.60 Comparison of FN and FP measured and predicted response spectra for both 2D and 1D input motions at 2.4 m depth<sup>[292]</sup>

陈国兴及其合作者<sup>[147, 274]</sup>提出了一种将 1D DCZ 模型拓展至 2D/3D 应力空间的新方法。其核心思想是,将描述 1D 剪应力-应变关系的广义非 Masing 滞回本构模型的形式不变,仅需将 1D 剪应变  $\gamma$  替换为广义剪应变  $\gamma_{gen}$  作为等效剪应变  $\gamma_{eq}$ 。此处,  $\gamma_{gen}$  是基于偏应变张量不变量定义的,能综合表征 2D/3D 复杂应力状态下的剪切变形。为实现这一拓展,他们发展了一种适用于 2D/3D 应力-应变

空间的  $\gamma_{eq}$  通用算法。该算法采用  $\gamma_{gen}$  的增量形式来定义  $\gamma_{eq}$ ,即每一时步的等效剪应变增量  $\Delta\gamma_{eq}$  等于该时步的  $\gamma_{gen}$  增量。在具体计算中,应变偏张量以当前剪应力-应变滞回圈上的应变反转点  $(\tau_c, \gamma_c)$  为起点,通过加/卸载判据实时更新  $\gamma_{eq}$ 。当  $\Delta\gamma_{eq}=0$  时,则应力-应变路径方向发生反转,随后的计算以新的应变反转点为起点。这一以  $\Delta\gamma_{eq}=0$  作为加卸载判据(即应变反转准则)的方法,兼具简单且精准的

特征。

基于上述  $\gamma_{eq}$  的通用算法,他们<sup>[147, 274]</sup>成功地将1D DCZ模型拓展至2D/3D应力条件,称为扩展DCZ模型,并在ABAQUS平台上开发了相应的用户自定义材料子程序(VUMAT)。据此,他们构建了一种适用于NL SRA的通用新方法。该方法兼具灵活性,既可用于2D和3D NL场地反应的弱耦合有效应力分析,也可用于相应的总应力分析。该扩展DCZ模型及VUMAT子程序的有效性,已得到一系列独立研究的验证<sup>[184-185, 308-309, 317, 353-358]</sup>。

1995年阪神地震中Port Island竖井台阵液化场地案例验证了该方法在复杂液化场地中的适用性。针对Port Island场地,G. X. Chen等<sup>[147]</sup>采用扩展DCZ模型及相应的弱耦合有效应力NL SRA法,以

-87 m深处井底记录作为基岩输入,通过2D土柱模型进行数值模拟。结果表明:模拟结果与台阵强震仪深度处记录到的水平及竖向加速度时程吻合良好(图61);成功重现了地震波传播过程中的关键现象:地震波从井底传至地表时PGA<sub>H</sub>有所减小,但竖向峰值加速度(Vertical peak ground acceleration, PGA<sub>V</sub>)显著放大,地表PGA<sub>V</sub>约为PGA<sub>H</sub>的1.6倍。此外,研究也表明,对完全饱和土,竖向振动对孔隙比( $r_v$ )增长的影响较小,这一结论与J. Yang等<sup>[182]</sup>的结果相吻合;位于-3.0 m和-16 m深处饱和土层的 $r_v$ 达到100%,呈现完全液化状态;而在-32 m深处饱和砂层的 $r_v$ 达到几近80%。这些结果与地震期间在现场观测到的宏观液化现象是一致的。

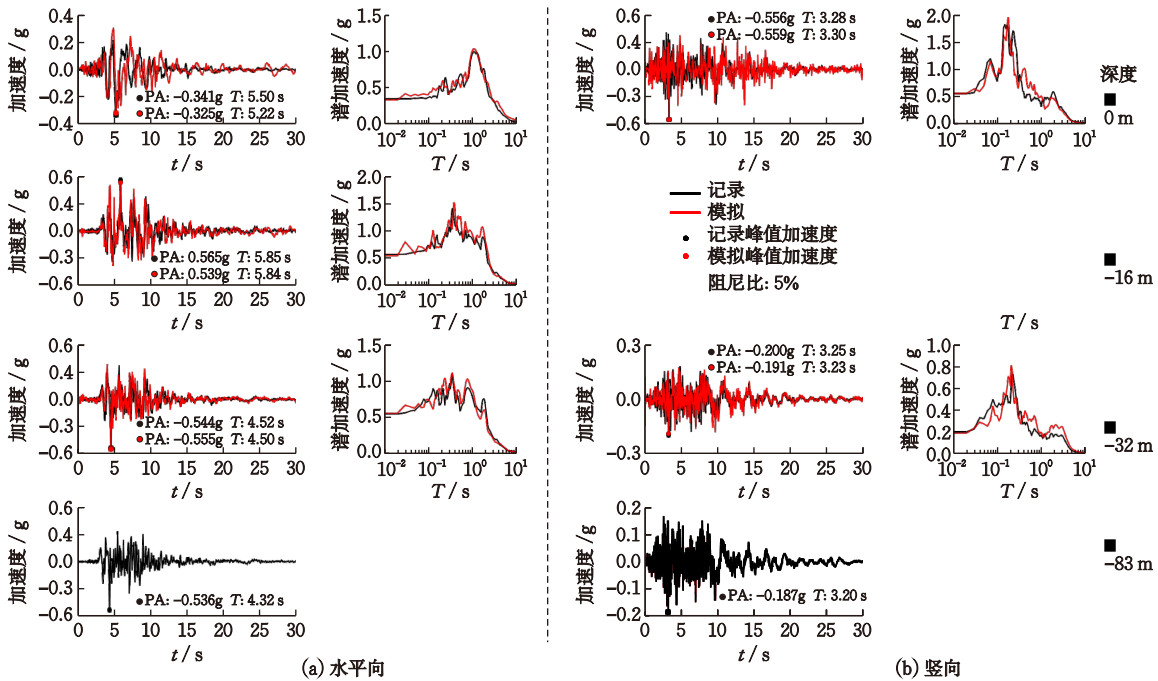


图61 模拟与记录的Port Island台阵液化场地加速度时程和谱加速度的对比

Fig.61 Comparisons of the simulated and recorded accelerograms and 5% damping spectral accelerations at the liquefied site, Port Island borehole array: (a) horizontal and (b) vertical<sup>[147]</sup>

该研究揭示了竖向地震动放大现象的物理机制:近地表土层的不完全饱和状态会显著放大P波,而对S波传播影响较小,从而导致竖向地震动的放大。这表明该方法能够有效描述深厚可液化土层在水平与竖向地震动共同作用下的剪切-压缩耦合反应。值得指出的是,模拟结果与实测记录之间仍存在一定偏差,这客观反映了理想化土柱模型的局限性及土动力特性参数标定中的不确定性。尽管如此,该方法的有效性已获得国际同行认可。美国

劳伦斯利弗莫尔国家实验室A. Pitarka教授在近期评述中指出,该方法提升了模拟2D与3D地震波在饱和及可液化土层中的传播能力<sup>[359]</sup>。

此外,B. Kato和G. Wang<sup>[328]</sup>针对香港屯门-元朗地区的浅盆地(尺度约14 km×16 km),基于岩土钻孔资料构建了盆地地层与 $V_s$ 结构(由于缺乏实测数据,假设P波 $V_p=2V_s$ )。他们首先通过1D EQL SRA(SHAKE软件)获取场地土层应变相容的 $G$ 与 $\lambda$ 值,以此表征土的非线性特性,进而采用谱

元法进行3D盆地场地反应的模拟。结果表明,谱加速度放大比(地表与基岩谱加速度之比)与土层厚度存在显著相关性;受盆地边缘产生的面波和3D几何构型的聚焦效应影响,盆地边缘和中心的场地放大效应更为突出。

综上所述,液化场地强震记录验证了有效应力NL SRA法的有效性;强耦合有效应力NL SRA法不仅能合理模拟液化场地的地震动和 $u_e$ 反应,也能有效预测液化所致的地面变形;无论是平原还是盆地,2D NL SRA揭示盆地/平原沉积土的几何效应与土的非线性耦合作用会显著改变地震动的幅值、频谱与持时,1D方法显著低估长周期地震动放大效应;对横向不均性显著的复杂场地,宜采用多维NL SRA方法;考虑2D地震动输入可提升NL SRA结果的准确性;基于扩展DCZ模型的NL SRA法,为复杂场地地震效应评价提供了有效工具。

### 2.3 考虑土动力特性参数不确定性的NL SRA方法

场地反应分析的不确定性可归因于输入地震动、分析方法、土的非线性特性及波速结构的不确定性。对于1D SRA,表征土的非线性动力行为的本构模型的选择不确定性属认知不确定性,而土的本构模型参数标定的不确定性属于偶然不确定性;场地波速结构的不确定性兼有认知不确定性(测试方法及其量测数据的解析)和偶然不确定性(测试数据的变异性)。场地反应对输入地震动的敏感性则主要表现为偶然不确定性。研究表明,非线性1D SRA能够提供场地反应的无偏估计<sup>[315]</sup>。

沉积土的空间不均匀性以及S和P波波速( $V_s, V_p$ )结构的空间变异性,使得2D/3D场地模型具有显著的随机特征。沉积土的空间变异性会导致 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 曲线的不确定性具有空间变异性。土动力特性参数( $V_s, V_p, G/G_0$ 和 $\lambda$ )的随机分布特征与土层深度密切相关,且 $G/G_0$ 和 $\lambda$ 的变异性与 $\gamma_a$ 有关<sup>[26, 360-364]</sup>。

目前研究主要集中在 $V_s$ 的原位测试及 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 关系室内试验的偶然不确定性<sup>[26, 360, 363, 365-366]</sup>。关于土动力特性参数的不确定性对场地反应的影响,现有研究主要采用1D NL SRA法<sup>[184-185, 367-371]</sup>。研究表明: $V_s$ -剖面的不确定性是导致场地反应不确定性的主要因素<sup>[368]</sup>。给定深度处 $V_s$ 的不确定性可视为正态分布<sup>[372-374]</sup>或对数正态分布<sup>[368, 375-377]</sup>,但尚

未形成共识。给定 $\gamma_a$ 处的 $G/G_0$ 和 $\lambda$ 的不确定性则视为正态分布<sup>[312, 365, 368]</sup>。值得注意的是,考虑土动力特性参数随机变异性计算的随机地表地震动参数均值(期望值),与采用土动力特性参数的最可能估计值计算的结果是一致的<sup>[369, 378]</sup>。地震动衰减关系研究与强震观测记录统计分析表明:地表地震动参数的不确定性(场地内变异性 and 单个台站标准差)服从对数正态分布<sup>[379-380]</sup>。

陈国兴等<sup>[381]</sup>指出,1D土柱 $V_s$ -剖面的不确定性对场地反应的影响比 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 曲线的不确定性更为显著。W. Li和D. Assimaki<sup>[382]</sup>发现,这种影响与输入 $PBA_H$ 的水平密切相关。E. M. Rathje等<sup>[368]</sup>和Q. Sun等<sup>[370]</sup>采用EQL法结合蒙特卡洛取样(Monte Carlo simulation, MCS)法,研究了1D土柱 $V_s$ -剖面以及 $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 曲线的不确定性对场地反应的影响,结果表明, $V_s$ -剖面的不确定性会降低地表 $SA_H$ 的均值,尤其在输入 $PBA_H$ 较高且 $V_s$ -剖面的不确定性较大时更为明显; $G/G_0$ 和 $\lambda$ 不确定性的影响类似,但程度稍小。通过对台湾LSST场地的NL SRA, Y. Guzel等<sup>[369]</sup>揭示:当输入 $PBA_H$ 较低时 $V_s$ 的空间变异性的影响更显著;反之, $G/G_0-\gamma_a$ 和 $\lambda-\gamma_a$ 曲线的空间变异性的影响更突出。

基于DCZ模型<sup>[34, 147]</sup>描述土的非线性动力特性, W. X. Liu等<sup>[184-185]</sup>采用MCS法和反应面(RS)法研究了1D土柱 $V_s$ -剖面的不确定性对地表 $PGA_H$ 的影响。研究表明,RS法能提供较为准确的地表 $PGA_H$ 预测。通过对NEHRP分类法中C、D和E类场地分别生成1000个 $V_s$ -剖面的随机样本(假设 $V_s$ 服从对数正态分布)进行了场地反应模拟。结果表明:地表 $PGA_H$ 也服从对数正态分布。值得注意的是,场地类别对 $PBA_H$ 的变异性影响显著:较软的E类场地 $PGA_H$ 变异系数明显大于较硬的C、D类场地。RS法和MCS法均通过对不确定性参数进行抽样并对场地反应进行确定性分析,再通过统计分析给出地表 $PGA_H$ 等场地反应的概率分布。与MCS法相比,RS法仅需抽取少量样本即可给出地表 $PGA_H$ 等场地反应的概率分布,计算效率更高。

MCS法是目前研究土的动力特性参数不确定性对场地反应影响的主要方法之一<sup>[185, 369, 383]</sup>。尽管MCS法在理论上较为简单,但需要抽取大样本才能达到可接受的精度,收敛速度较慢。为了克服这一局限性,R. Boushehri等<sup>[371]</sup>采用拉丁超立方体取样

法(Latin Hypercube Sampling, LHS)生成随机变量样本,研究了1D  $V_s$ -剖面以及 $G/G_0$ - $\gamma_a$ 和 $\lambda$ - $\gamma_a$ 曲线的不确定性传播对场地反应的影响。与完全随机取样的MCS法相比,LHS法能够实现数据统计的平滑化,仅需较少的样本即可获得精度良好的反应量统计参数。然而,不论是MCS法或LHS法,在处理涉及多个不确定性参数的大尺度(km量级)2D场地非线性地震反应的不确定性分析时,仍然面临较大的挑战。

近年有的学者将概率方法与随机场理论相结合,研究了土的非线性特性的空间变异性对场地反应的影响。例如,H. Q. Hu和Y. Huang<sup>[384]</sup>采用I. Ishibashi和X. Zhang<sup>[385]</sup>提出的 $G/G_0$ 和 $\lambda$ 曲线公式描述土的非线性特性, $G/G_0$ 的变异系数取为0.2,并采用随机场理论描述砂土非线性特性参数的变异性。基于概率密度演化法,他们从概率密度函数、累积分布函数和均值角度研究了20 m×20 m尺度场地的随机地震反应。针对180 m×20 m尺度场地,Y. H. Chang等<sup>[318]</sup>采用2D随机场理论模拟土的 $V_s$ 、 $G/G_0$ 和 $\lambda$ 的随机特征,开展了1D和2D场地线性和非线性场地反应分析。研究发现, $V_s$ -结构变异性的增大会使地表谱加速度放大比(地表与基岩的谱加速度之比)的均值减小、变异系数增大;而 $G/G_0$ 和 $\lambda$ 的变异性对地表谱加速度放大比均值的影响轻微。此外,随着输入PBA<sub>H</sub>的增大,场地地表反应的标准差增大。与2D SRA相比,1D SRA会低估地表谱加速度放大比的均值、高估其变异系数。

H. X. Wang等<sup>[386]</sup>采用P. Armstrong和C. Frederick<sup>[387]</sup>模型描述土的滞回非线性特性,并利用非高斯随机场描述土的非线性动力特性的不确定性。他们通过Hermite正交多项式混沌基函数在概率空间中对输入地震动和土的非线性特性参数进行离散,并采用随机FE法求解基岩地震动在10 m×1 m土柱中传播的时变概率反应。研究表明,场地随机地震反应的变异性显著,其标准差甚至大于均值。因此,研究土的动力特性参数不确定性在NL SRA中的传播,并量化场地反应的变异性具有重要意义。然而,将该方法拓展到大尺度的2D NL SRA仍面临挑战,主要体现在如何利用Hermite多项式混沌精确量化时变应力和刚度的概率分布。这通常需采用更高阶的Hermite正交多项式混沌基函数,但这会显著降低随机FE法的计算效率。

### 3 区域尺度极深厚软土复杂场地非线性地震效应预测的挑战性问题

#### 3.1 京津冀与长三角城市群面临的场地效应问题

城市地震韧性是城市安全体系的重要组成部分,主要体现在建筑和基础设施系统的地震安全性上。提升城市地震韧性是应对城市地震灾害脆弱性、实现可持续发展的根本路径。科学有效的抗震设防是实现城市地震安全的关键,而合理确定设防地震动参数,则是城市有效抗震设防的基础和依据。

京津冀城市群位于华北地区东北部、渤海湾西岸,为世界级城市群之一。该区域主体位于海河平原,属构造沉降背景下由河流冲积形成的巨型沉积盆地。黄河携带黄土高原泥沙经多次改道塑造了平原基本地貌;海河水系影响其西北部地形发育。约4 000年前,宁河一带为古黄河入海口,沉积大量泥沙,素有“黄河泥沙塑造的城市”之称。至西周时期,黄河古道经天津静海入海,逐步形成现今海河平原。第四纪海平面波动在东部滨海地区形成海陆交互相沉积。持续的构造沉降与沉积充填使海河平原第四纪松散沉积物厚度普遍达300~500 m,沉降中心超过1 000 m。其中,北京冲洪积平原主要由永定河、潮白河等水系冲洪积物堆积而成,第四纪沉积厚度数十米至数百米,局部达400~600 m。

长江三角洲的江浙沪地区是我国人口密集、经济活跃的世界级城市群。三角洲冲积平原由长江输送巨量泥沙,叠加第四纪海平面升降旋回,在持续沉降的构造盆地中堆积形成复杂海陆交互相沉积序列。第四纪地层厚度总体呈现“由西向东、由陆向海”渐厚的规律:西部苏锡常地区一般厚100~300 m;向东至上海地区,大多为厚达300~500 m的松散层覆盖,埋深自西南至北东呈阶梯状下降趋势;跨长江口至南通地区厚达240~350 m,一般厚约在300 m左右;向南至宁绍平原,绍兴北部厚80~120 m,南部及西部骤减至20~50 m,宁波地区一般厚约60~120 m。三角洲西南边缘的杭嘉湖地区沉积物主要来自长江泥沙向南扩散,与钱塘江等本地河流沉积物混合填充杭州湾及沿岸,第四纪地层一般厚170~200 m,局部300 m以上,自北东至西南渐薄,其范围大致为60~300 m。苏北东部盐城沿海地处长江下河平原东部,其沉积环境具有显著的过渡

性与复合性特征,属淮河-黄河复合三角洲平原,沉积土具多物源、多期次叠加特征。第四纪地层序列完整:下部为晚更新世陆相土;中部为全新世海相土;上部为黄河夺淮以来冲积-海积土,沉积层深厚,一般厚150~300 m,古河道区更厚,呈自西向海渐厚。

1679年三河-平谷 $M_s8.0$ 地震是京津冀地区有文献记载的一次灾难性大地震。图62展示了该地震的等震线图。据史料记载,极震区(三河、平谷与通县)人员死亡率高达40%,约6万人。这次地震灾区范围极大,震害极为严重。地震烈度Ⅺ度区涵盖三河与平谷县,Ⅹ度区包括大厂、通县、香河与蓟县;Ⅸ度区延伸至密云、顺义、朝阳、大兴、宝坻与廊坊。若以当前城市规模,Ⅸ度及以上区域人口超过1 000万。尽管未来三河-平谷发生8级地震是小概率事件,但其在未来发生的可能性不容忽视。当前,包括北京与天津两个国家中心城市在内的海河平原城市群,对抵御8级左右特大地震依然十分脆弱。若该地震重演,则为城市直下型巨震,可能引发极为严重的人员伤亡与社会灾难。

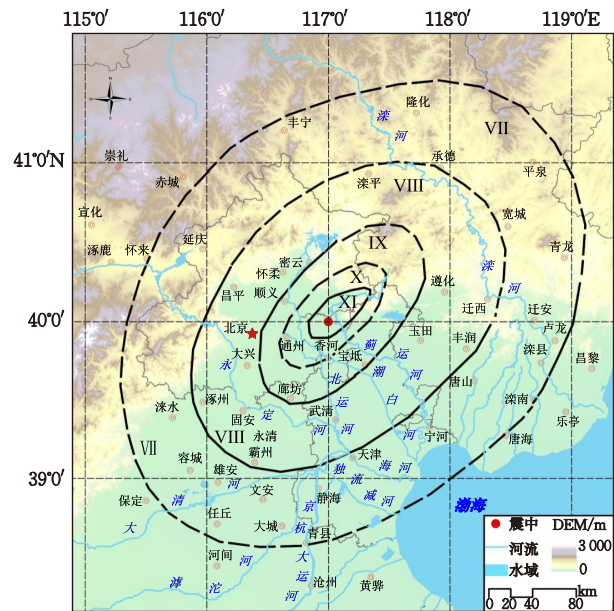


图62 1679年三河平谷 $M_s8.0$ 地震等震线图(作者重绘)<sup>[388]</sup>  
Fig.62 Isoseismal map of the 1679 Sanhe-Pinggu  $M_s8.0$  earthquake (Revised)<sup>[388]</sup>

1668年郟城 $M_s8\frac{1}{2}$ 地震是我国东部地区千年以来最强烈的地震事件。该地震极震区烈度高达Ⅺ度,破坏范围纵长逾1 000 km,波及东部10余省份,共410余县有震害记录,超过5 000  $km^2$ 区域内

的建筑物遭受损毁(图63)。据地方志记载,此次地震导致逾5万人死亡。尽管长江三角洲地区距震中达400~600 km,其影响仍非常显著且广泛。绍兴为高烈度Ⅺ度异常区,史料记载当时“屋瓦多落,压毙人畜”。当时的江宁(今南京)、扬州、苏州、松江(今上海)等府的地方志中均有此次地震的记载,描述包括“地大震”、“江河海水皆啸”和“屋宇摇动”等现象。虽然长江三角洲地区烈度仅为Ⅵ-Ⅶ区,仍造成了相当程度的破坏:南京城墙、官署、寺庙与民房多有损坏或倒塌,并有人员伤亡的记载;扬州、镇江、苏州等地普遍报告房屋倒塌、墙壁开裂,高耸建筑如塔、楼阁等受损;上海地区亦记载有民居倾颓、瓦片普遍掉落等现象。

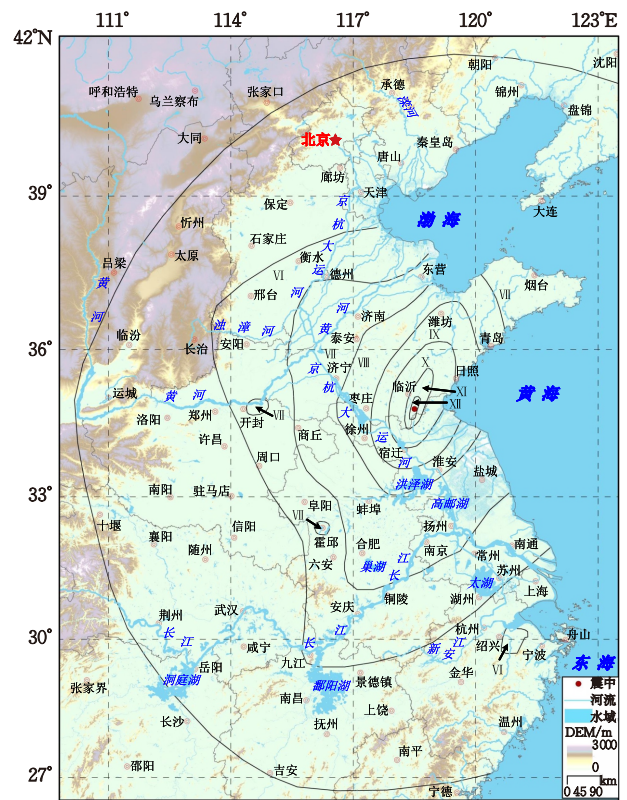


图63 1668年郟城 $M_s8\frac{1}{2}$ 地震等震线图(作者重绘)<sup>[388]</sup>  
Fig.63 Isoseismal map of the 1668 Tancheng  $M_s8\frac{1}{2}$  earthquake (Revised)<sup>[388]</sup>

特大地震在旧金山湾区、东京湾区和墨西哥城造成的严重震害,以及1668年郟城地震对长江三角洲地区的影响,为我们提供了重要的历史镜鉴:即使远离巨震震中数百公里,深厚沉积盆地/平原地区仍可能遭受强地震动的影响;深厚松软沉积层对远源低频地震波的极显著放大作用,会大幅加剧震

害。这一认识对今天高楼林立、经济高度集聚的京津冀与长三角城市群的大震巨灾防控至关重要。

历史地震记载显示,以北京为中心、约600 km×800 km内曾发生9次 $M_s7\frac{1}{2}$ 及以上的地震,其中包括3次 $M_s8.0$ 及以上巨震(图64)。这说明海河平原城市群存在遭遇 $M_s7.5$ 以上大地震乃至 $M_s8.0$ 以上巨震的风险。对应地,江浙沪闽及其邻近陆地与近海(含台湾海峡)区域曾发生6次 $M_s7.0$ 以上地震,其中包括1次 $M_s8\frac{1}{2}$ 地震;台湾岛及其东部近海则发生了41次 $M_s7.0$ 以上地震,其中含2次 $M_s8.0$ 地震(图65)。此外,研究表明,南黄海、台湾海峡分别具有发生 $M_s7.5$ 和 $M_s8.0$ 地震的地质构造条件。由此可见,长三角城市群同样存在 $M_s7.5$ 以上、甚至 $M_s8.0$ 以上巨震的威胁。

1668年郯城、1679年三河-平谷和1976年唐山大地震引起的大范围毁灭性破坏,深刻揭示了深厚松软场地条件对震害的重要影响。一旦再次发生此类极端地震,可能导致百万量级人员伤亡,数千万人需紧急安置;震害链式效应或致使京津冀、长三角及其周边数十个中等城市运行瘫痪,基本服务功能丧失,区域产业链与供应链崩溃,进而引发信息链、生态链及次生灾害链等多系统复合灾害。这种多维度损失通过级联放大效应可扩展十倍乃至百倍,导致大规模城市人口返贫,最终演变为需启动国家最高应对级别的特大区域性灾难。

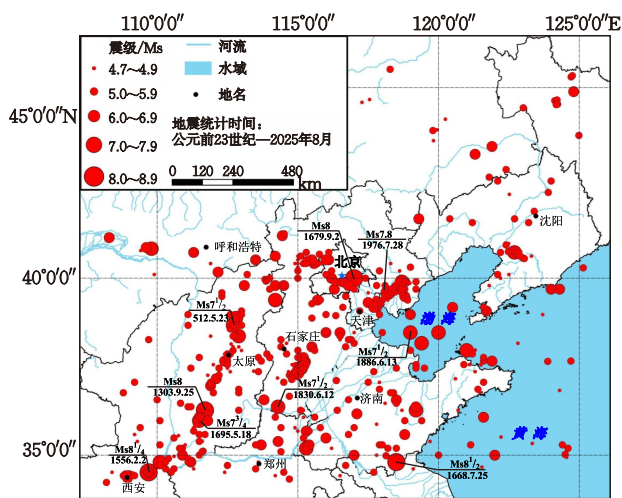


图64 以北京为中心、约600 km×800 km内历史地震分布  
Fig.64 Map showing historical earthquake distribution within an area of approximately 600 km × 800 km centered on Beijing

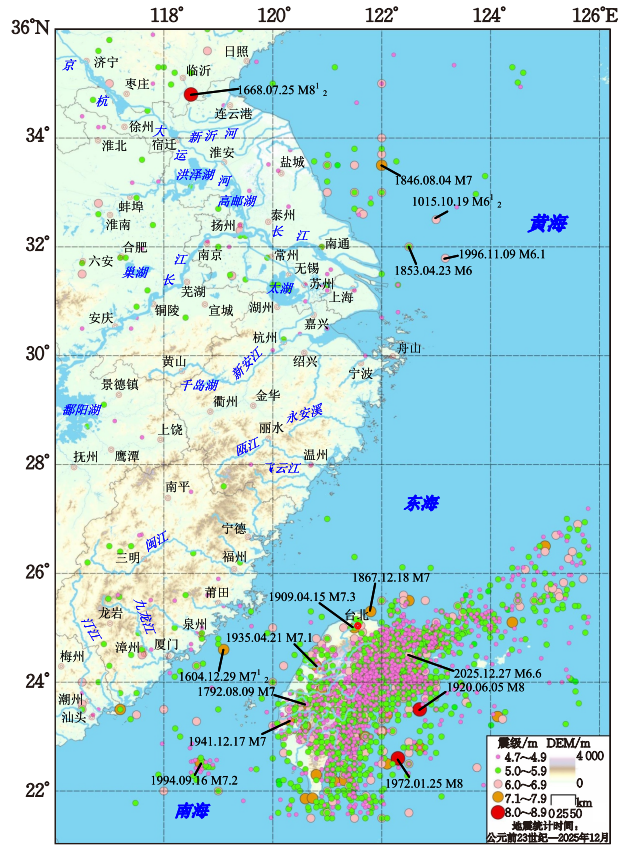


图65 江浙沪闽台及邻近地区的历史地震分布  
Fig.65 Distribution of historical earthquakes in Jiangsu, Zhejiang, Shanghai, Fujian, Taiwan and adjacent areas

### 3.2 极端地震下区域尺度深厚软土复杂场地非线性地震效应分析的挑战性问题

据日本官方预测,2030年前日本南海海槽发生8级以上地震的概率约为70%,极端地震震级可能达9.1级。最坏情景下,预计从关东到九州约32.3万人死亡、62.3万人重伤,震后首周需避难人数约950万,经济损失可达237万亿日元。因此,防范南海海槽9.1级巨震风险已成为日本近十年的基本国策。历史地震如1976年唐山 $M_s7.8$ 、2008年汶川 $M_s8.0$ 及2011年东日本 $M_w9.1$ 地震均属未被预期的特大地震。未来大地震的预测具有高度不确定性,必须正视极端地震对京津冀与长三角城市群可能造成的巨大灾难。目前我国尚缺乏类似日本那样系统性的极端地震情景研究。

极端地震通常是指震级7.5级以上、发生频率极低但破坏性极大的大震/巨震事件,包括城市直下型地震与远场地震。随着北京、上海等大都市工程结构向超大尺度、超深方向发展,防控极端地震引发的大都市灾害及其链式效应已成为关键的基

础课题。其中,区域尺度深厚软土复杂场地的输入地震动及其空间变化特征的确定尤为关键,须合理反映极端地震引起的强地震动破坏性作用特性。以海河平原和长江三角洲平原为例,研究极端地震下极深厚软土复杂场地的非线性地震效应,特别是长周期地震动放大效应,是一项极具挑战性的前沿课题。

区域尺度2D NL场地地震效应模拟属于能量开放系统的地震波动问题。然而,针对极深厚软土复杂场地的区域尺度2D NL地震效应准确模拟,仍是地震工程领域尚未有效解决的国际性难题。极端地震下此类场地的2D NL地震反应数值模拟主要面临以下三方面挑战。

### 3.2.1 极深厚软土强非线性行为特性的有效表征

现有研究表明,对覆盖层厚超过100 m的深厚松软场地,SRA宜采用时域NL法。地震波由基岩向上传播至地表时,土的非线性与滞回特性会显著影响宽频带地震波的传递。远源极端地震激发的地震波,经地壳介质传播至近地表基岩的地震动特性差异显著,从而导致上覆土层中产生的应变水平范围较大。目前,针对现有土的动力本构模型在深厚软土复杂场地NL SRA中的适用性,学术界尚未形成统一认识。尤其对于 $V_s < 500$  m/s、厚度超过100 m的极深厚松软覆盖层场地,现有土的动力本构模型适用性仍存疑问。迄今为止,尚未见到基于 $V_s < 500$  m/s、厚度超过100 m甚至更深的竖井台阵强震记录对土的动力本构模型适用性进行系统验证的相关文献。同时,也缺乏基于不同震级、震中距、地震动强度及场地条件的深井台阵强震记录反演分析,以验证土的动力本构模型在厚达200~300 m及以上沉积土地地(以 $V_s = 500$  m/s为地震基岩面)NL SRA中的适用性。这一现状使得极深厚软土复杂场地NL SRA结果的可信度存疑。

通常对各类工程结构有显著影响的地震动频率范围为0.03~30 Hz,而强地震动引起的近地表土层应变可能达到2%甚至更高。因此,基于覆盖层厚达200~300 m乃至更深的竖井台阵强震记录开展反演分析,构建能够合理表征超宽频带(0.025~40 Hz)、宽应变范围(至2%及以上)土的非线性动力特性的本构模型,已成为突破极深厚软土复杂场地NL SRA瓶颈的关键科学问题。推进该研究将显著提升此类场地NL SRA结果的可靠性,并为岩土地震工程领域的基础性难题提供关键理论支持

与技术途径。

### 3.2.2 区域尺度极深厚软土复杂场地及其参数空间变异性的有效表征

波速结构在场地震效应表征中具有关键作用。在区域尺度场地NL SRA中,由于岩土钻孔分布稀疏,且钻至基岩的深孔数量极为有限,直接获取完整的2D和3D地震波速模型难度较大。

为通过SRA量化局部场地效应,必须清晰掌握2D和3D空间中土层剖面及其空间展布的几何形态。完整的地层结构表征需包含实测钻孔以上的浅部地层及钻孔以下至地震基岩面的部分。针对极深厚软土复杂场地,通常缺乏深达地震基岩的钻孔数据。为此,可将钻孔以下未知的地层结构与区域内已有水文地质钻孔等控制性钻孔在相应深度处的已知信息进行定量关联与对比,进而合理推测下部地层结构,最终确定地震基岩面的空间分布。

地层层序是由成因相关且连续的地层构成的地层单元。基于钻孔资料,通过地质解释、识别与层序对比,遵循“由新至老、逐层递增”的原则,可建立区域地层层序表。采用“钻孔→地层面→实体”的建模思路,结合ArcGIS平台,可构建确定性的3D地层与波速结构模型。考虑到实测钻孔之间沉积土层的空间变异性,宜以钻孔揭示的地层信息及区域地层层序表为约束,基于条件随机场理论,建立地层结构、S-和P-波波速结构的3D条件随机场模型。进一步,以实测钻孔的 $V_s$ -和 $V_p$ -剖面为约束,基于非平稳条件随机场理论,构建3D随机地层与波速结构模型,并确保所生成的最可能随机模型与对应确定性模型相一致。

作为示例,图66展示了G. X. Chen等<sup>[389]</sup>基于苏州城区实测钻孔资料,结合ArcGIS Engine平台与Kriging插值法所构建的苏州城区3D地层模型。

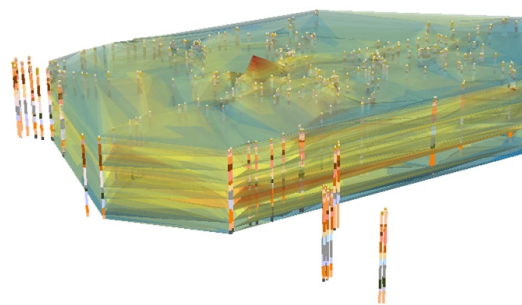


图66 苏州城区3D可视化地层模型<sup>[389]</sup>

Fig. 66 3D visualization of the resulting stratigraphic model in the urban of Suzhou<sup>[389]</sup>

土的动力特性参数具有显著的空间变异性和非平稳特征。土层波速结构及其非线性动力参数在空间上呈随机分布,且其统计特征随空间位置变化(非平稳)。如何综合考虑地层结构的空间变异性、土动力参数的非平稳不确定性及各参数间的相关性,是研究极端地震作用下区域尺度极深厚软土复杂场地2D/3D NL地震反应的关键难题之一。目前,该方面的研究尚属空白。

此外,现有研究未能同时考虑土层结构不确定性与土动力参数不确定性对区域尺度深厚软土复杂场地2D/3D NL SRA结果的影响。土动力参数不确定性的非平稳性对此类场地反应的影响,亦缺乏文献报道。解决上述问题,将为提升区域尺度2D/3D NL SRA结果的可靠性提供基础性技术支撑。

### 3.2.3 极深厚软土复杂场地非线性地震反应分析法

极深厚软土复杂场地或沉积凹陷会显著加剧场地效应。当特大地震的地震波传播至距震中200 km以远的极深厚软土场地地表时,地表地震动中低频成分较为丰富,峰值加速度可达 $0.10g\sim 0.50g$ 甚至更高。在特定的沉积结构和地形条件下,长周期地震动分量相对于基岩输入的放大倍数可能高达10~30倍。远场大震易引发长周期地震动、场地和上部结构的“双重共振”现象;而对于城市直下型大地震,其竖向地震动尤为强烈,此时极深厚软土复杂场地的空间变异性对水平与竖向地震动的耦合放大效应亦不容忽视。

这些现象表明,极深厚软土复杂场地的微地形、沉积环境及土的空间变异性对非线性地震波动过程具有控制作用,宏观上表现为地震波能量局部聚集效应、沉积凹陷放大效应以及长周期地震动共振效应。然而,目前对极深厚软土复杂场地非线性地震反应的物理机理与破坏特征的认知仍十分有限。受限于现有深井强震台阵数量稀少及极端地震的难以预见性,仅依靠有限的强震记录难以有效支撑城市大震巨灾风险的精准防控。因此,有必要深入研究区域尺度2D/3D NL SRA方法及场地效应的数值模拟,并结合深井台阵已获取的强震记录,系统阐释极端地震下极深厚软土复杂场地地震反应中出现的极端现象。具体而言,应揭示地层结构与土动力参数的不确定性对地震波非线性传播的影响机制,明确极端地震下极深厚软土复杂场地中强非线性地震波动的时空演化规律,特别是局部能量聚集效应、深软沉积凹陷放大效应及长周期分量放大效应的形成机理与表现特征。此外,还需进一步厘清极深厚软土复杂场地强地震动的破坏性作用特性,建立地震动非线性放大效应的定量表征方法。

通常,可不考虑土的动泊松比 $\nu_d$ 和密度 $\rho$ 的不确定性,对给定的基岩输入地震动,2D/3D NL场地反应 $y$ (如加速度、速度、位移、反应谱等)可视为土的4个动力特性参数( $V_s$ 、 $V_p$ 、 $G/G_0$ 和 $\lambda$ )的函数,而土动力特性参数( $V_s$ 、 $V_p$ 、 $G/G_0$ 和 $\lambda$ )均可视为具有非平稳特征的随机变量(图67)。

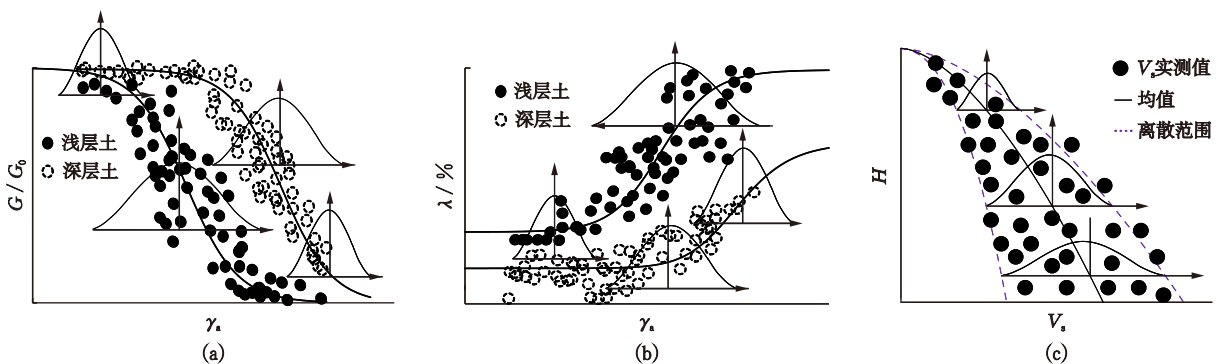


图67 土的动力特性参数变异性的非平稳性示意图

Fig.67 Schematic diagram illustrating the non-stationarity of variability in dynamic properties of soil

2D/3D 网格化地层结构的变异性可以通过土的动力特性参数值进行表征。因此,地层结构的空

间变异性和土动力特性参数的不确定性,本质上都可归结为土的参数  $V_s$ 、 $V_p$ 、 $G/G_0$  和  $\lambda$  的均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$  值在2D/3D 网格中的变异性。土的动力特性参数  $V_s$ 、 $V_p$ 、 $G/G_0$  和  $\lambda$  具有相关性,即:  $V_p$  与  $V_s$  正相关;  $V_s$  值较大时  $G/G_0$  值较大而  $\lambda$  值较小;  $V_s$  和  $G/G_0$  正相关,而  $V_s$  和  $\lambda$ 、 $G/G_0$  和  $\lambda$  负相关。因此,随机变

量  $V_s$ 、 $V_p$ 、 $G/G_0$  和  $\lambda$  中仅有 1 个独立随机变量。鉴于  $V_s$  是岩土勘探的基础性数据, 以  $V_s$  作为独立随机变量为宜。

## 4 总结与展望

铭记 1906 年旧金山地震以及过去一个多世纪中多起大城市震害的教训至关重要。这些地震往往毫无征兆地发生。必须认识到, 地震本身并不直接造成人员伤亡, 真正的致灾因素是建筑物与基础设施的破坏与倒塌。即便未来实现短期地震预报, 大量的既有建筑和基础设施仍面临较高地震风险, 其中部分结构在强震中很可能受损甚至倒塌。

回顾 1906 年旧金山地震与 1923 年关东地震, 以及过去一个多世纪中多次强地震中的次生火灾案例, 或许大地震引发的次生火灾是大城市所面临的极严重地震风险之一。这一历史经验警示我们, 必须重视大城市在极端地震后的次生火灾风险, 并在未来极端地震发生前实施有效的防范措施。

宏观震害调查与强震记录表明, 非线性场地效应会显著改变地震动的幅值、频谱与持时特性。土的沉积环境与局部场地条件对场地反应具有控制性影响。盆地效应往往在低频段表现出更显著的地震动放大作用, 而浅层地质与土质条件的差异则主要影响高频成分。深厚软土地层对远源大地震的基岩地震动具有极为显著的幅值放大和持时延长效应, 导致地表地震动低频成分丰富, 持时可达 3~5 min 甚至更长。历史地震中的非线性场地效应警示我们, 现代大尺度(超长、超高)建筑在遭遇远源大地震时可能极为脆弱。在远源大地震作用下, 深厚软土地表地震动的长周期加速度反应谱值可能远超现行抗震规范的设计谱值。

场地地震反应的数值模拟可采用 EQL 法或 NL 法。研究表明, 对于土层的剪应变水平较低(如弱震动( $PBA_H < 0.1g$ )、硬土)的情况, 两类方法的结果相近; 对于土层的剪应变水平较高( $\gamma_a > 0.1\%$ )的情况(如软土、可液化土或强震动), NL 法能更准确地捕获场地反应特征。当输入  $PBA_H > 0.2g$  或  $\gamma_a > 0.1\%$  时, 对于非液化场地, 在 SRA 中应谨慎使用 EQL 法, 宜采用多种 EQL 法(如软件 DEEPSOIL、SHAKE 和 SITERESPONSE 的最新版)和 NL 法进行数值模拟与交叉对比, 以佐证结果的合理性与可靠性; 对于液化场地, 在 SRA 中不应采用 EQL 法,

应采用多种 NL 法进行数值模拟与交叉对比, 以综合考虑土的非线性行为的认知不确定性。此外, EQL 法和 NL 法均可用于 1D、2D 和 3D 场地反应预测。

基于覆盖层浅于 100 m 的液化和非液化场地竖井台阵强震记录, 数值模拟验证了基于(扩展)DCZ 模型的 NL SRA 法(包括总应力法和弱耦合有效应力法)的适用性及可靠性。对弱震至中强震(输入  $PBA_H < 0.10g$ )作用的非液化场地, 该总应力 NL SRA 法模拟的地表地震动峰值加速度、波形及宽频带反应谱形状与竖井台阵记录基本一致, 其整体预测精度优于 PRENOLIN 国际基准项目研究中所用的众多软件中的非线性本构模型及相应的 SRA 法。对液化场地, 该弱耦合有效应力 NL SRA 法成功再现了单向(水平向)及双向(水平向+竖向)地震动作用下的多层液化土非线性反应, 并准确揭示了近地表非饱和土层的竖向地震动放大机制, 模拟精度显著优于 DEEPSOIL 软件的预测结果。总体而言, 基于(扩展)DCZ 模型的 NL SRA 法较好地再现了液化和非液化场地竖井台阵不同深度处的实测地震记录, 并为区域尺度场地的 2D/3D NL 地震反应预测提供了一种有吸引力的高效高精度算法。需要指出的是, 该 DCZ 模型在更深厚或复杂场地条件下的普适性仍有待进一步验证。

多次灾难性地震中深厚软土地场城市的惨痛经历提醒我们, 必须高度重视远源特大地震对这类大都市区的影响。其震害的严重性不仅源于地震动强度高, 更源于远源大地震激发的破坏性长周期地震动特性尚未被充分认识。目前, 对极深厚软土复杂场地非线性地震效应的理解仍存在明显不足, 亟需深入研究极端地震下该类场地的地震动放大效应, 以深化科学认知。因此, 迫切需要系统探究深厚冲积平原与大型沉积盆地内长周期地震动的成因与演化规律, 从而为减轻沿江/沿海大都市区未来可能遭受的远源大震灾害提供科学支撑。

针对极端地震作用下区域尺度极深厚软土复杂场地的非线性地震效应研究, 目前亟需突破以下三个基础性问题:

第一, 土的动力本构模型表征之困。现有的土的动力本构模型在极深厚软土覆盖层、超宽频带及高应变条件下的适用性缺乏验证, 导致场地非线性反应分析的物理基础薄弱。

第二, 数值模型构建之难。区域尺度极深厚地

层结构与参数具有显著的空间变异性与非平稳不确定性,如何融合稀疏钻孔数据与地质先验知识,构建既能反映确定性结构特征、又能充分表征随机性影响的2D/3D物理模型,是实现精确模拟的前提。

第三,数值分析方法之限。目前对极深厚软土复杂场地中地震波非线性传播、能量局部聚集与放大(尤其是长周期效应)的机理认识不清,缺乏能够高效、高精度模拟区域尺度极深厚软土复杂场地2D/3D非线性波动过程并量化参数不确定性影响的分析方法与工具。

这三个挑战性问题的相互关联、彼此制约。攻克这些难题,不仅对科学认识大型深厚沉积盆地与极深厚冲洪积平原的非线性地震反应规律至关重要,更是提升京津冀、长三角等世界级城市群应对极端地震风险、实现大震巨灾精准防控的迫切需求。

极端地震是京津冀与长三角城市群地震韧性建设面临的潜在大震巨灾风险源,若在城市抗震设防中考虑不足,可能导致灾难性后果。围绕上述问题,亟须构建能够有效表征极深厚软土非线性动力特性的本构模型,发展区域尺度极深厚复杂场地非线性地震效应的高效高精度模拟方法与技术。应结合区域尺度场地地震反应数值模拟与强震记录分析,揭示地层与土的动力特性参数不确定性对地震波传播的影响机制,阐明极端地震下极深厚软土复杂场地强非线性地震波动场的时空演变规律,特别是局部能量聚集效应与深软沉积凹陷放大效应的机理与特征,尤其是长周期地震动分量的放大机制。在此基础上,厘清该类场地强地震动的破坏性作用特性,建立强地震动非线性放大的半经验定量表征方法,并量化其空间分布特征。

## 参考文献:

- [1] 《一九二〇年海源大地震》编委会. 一九二〇年海源大地震[M]. 北京:地震出版社, 2020.
- [2] Oliveira C S. The main developments of Seismology and Earthquake Engineering since the early 1700s and the new challenges for a sustainable society[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2022, 20(10): 4697-4863.
- [3] Macmurdo J. Papers relating to the earthquake which occurred in India in 1819[J]. The Philosophical Magazine Journal, 1824, 63: 105-177.
- [4] Richter C F. Elementary seismology[M]. San Francisco: W.H. Freeman & Co., Inc., 1958.
- [5] Mallet R, Mallet J W. The earthquake catalogue of the British association, with the discussion, curves, and maps etc[M]. London: Taylor & Francis, 1858.
- [6] Reid H F. The mechanics of the earthquake[R]. In: Vol. II of Lawson A. C., Chairman. The California earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission: Carnegie Institution of Washington Publication 1910, 87, 192p. (reprinted in 1969).
- [7] 中国科学院工程力学研究所. 地震工程研究报告集[M]. 北京:科学出版社, 1965.
- [8] 胡聿贤, 孙平善, 章在墉. 场地条件对震害和地震动的影响[J]. 地震工程与工程振动, 1980, 1(1): 34-41. Hu Y X, Sun P S, Zhang Z Y. Effects of site conditions on earthquake damage and ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1980, 1(1): 34-41. (in Chinese)
- [9] 陈国兴. 中国建筑抗震设计规范的演变与展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(1): 102-113. Chen G X. The evolution and prospect of the code for seismic design of buildings in China [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(1): 102-113. (in Chinese)
- [10] Mayoral J M, Asimaki D, Tepalcapa S, et al. Site effects in Mexico City basin: Past and present [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 121: 369-382.
- [11] Wood H O. Distribution of apparent intensity in San Francisco, in the California earthquake of April 18, 1906 [R]. Washington D. C.: Carnegie Institute, 1908, 1: 220-245.
- [12] Gutenberg B. Effects of ground on earthquake motion [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1957, 47(3): 221-250.
- [13] Çelebi M. Topographical and geological amplifications determined from strong-motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77(4): 1147-1167.
- [14] H B, Romo M P, Sun J I, et al. The Mexico Earthquake of September 19, 1985-relationships between soil conditions and earthquake ground motions [J]. Earthquake Spectra, 1988, 4(4): 687-729.
- [15] Campillo M, Gariel J C, Aki K, et al. Destructive strong ground motion in Mexico City: Source, path, and site effects during great 1985 Michoacán earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America,

- 1989, 79(6): 1718-1735.
- [16] Hanks T C, Brady A G. The Loma Prieta earthquake, ground motion, and damage in Oakland, Treasure Island, and San Francisco [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1991, 81(5): 2019-2047.
- [17] Towhata I. History of geotechnical earthquake engineering in Japan[C]//*Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing: [s.n.], 2008.
- [18] 王海云. 渭河盆地中土层场地对地震动的放大作用[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(1): 137-150.  
Wang H Y. Amplification effects of soil sites on ground motion in the Weihe basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(1): 137-150. (in Chinese)
- [19] Cetin K O, Altun S, Askan A, et al. The site effects in Izmir Bay of October 30 2020, M7.0 Samos earthquake [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 152: 107051.
- [20] Song Q, Ren Y F, Zhou B F, et al. Deciphering the site effect as one of reasons causing severe building damages in Kahramanmaraş and Antakya in February 6 2023 earthquakes, Turkey [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2025, 84(8): 1-17.
- [21] Unjoh S, Kaneko M, Kataoka S, et al. Effect of earthquake ground motions on soil liquefaction [J]. *Soils and Foundations*, 2012, 52(5): 830-841.
- [22] 温瑞智. 我国强地震动记录特征综述[J]. *地震学报*, 2016, 38(4): 550-563.  
Wen R Z. A review on the characteristics of Chinese strong ground motion recordings [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2016, 38(4): 550-563. (in Chinese)
- [23] Bertero R D, Vaquero S, Mussat J M, et al. Seismic hazard in Buenos Aires, Argentina: A preliminary study on the effects of long-distance earthquakes on tall buildings [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2018, 47(11): 2333-2339.
- [24] Nikolaou S, Gazetas G, Garini E, et al. Geoseismic design challenges in Mexico City, Part 1: A 32-year déjà-vu[J]. *Structure Magazine*, 2018, 14: 10-13.
- [25] Diaz-Fanas G, Nikolaou S, Ktenidou O J, et al. Mexico City 1985 and 2017 Earthquakes: Soil Response and Code Lessons. In: *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges* [M]. [S.l.]: PressIOS, 2019: 1991-2000.
- [26] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [27] 陈国兴, 战吉艳, 刘建达, 等. 远场大地震作用下深软场地设计地震动参数研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(9): 1591-1599.  
Chen G X, Zhan J Y, Liu J D, et al. Parameter study on ground motion design of deep soft site under far-field large earthquake [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(9): 1591-1599. (in Chinese)
- [28] 陈国兴, 刘薛宁, 朱姣, 等. 深厚松软场地卓越周期与地面峰值加速度的空间变异特征: 以苏州为例[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(6): 996-1004.  
Chen G X, Liu X N, Zhu J, et al. Spatial variation of predominant periods of site and amplifications of peak ground accelerations for deep sediment layers: Case study of Suzhou City [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(6): 996-1004. (in Chinese)
- [29] 陈国兴, 朱翔, 赵丁凤, 等. 珊瑚岛礁场地非线性地震反应特征分析[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(3): 405-413.  
Chen G X, Zhu X, Zhao D F, et al. Nonlinear seismic response characteristics of a coral island site [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(3): 405-413. (in Chinese)
- [30] 陈国兴, 李磊, 丁杰发, 等. 巨厚沉积土夹火山岩场地非线性地震反应特性[J]. *岩土力学*, 2020, 41(9): 3056-3065, 3076.  
Chen G X, Li L, Ding J F, et al. Nonlinear seismic response characteristics of extremely deep deposit site with volcanic hard rock interlayers [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(9): 3056-3065, 3076. (in Chinese)
- [31] 陈国兴, 岳文泽, 阮滨, 等. 金塘海峡海床地震反应特征的二维非线性分析[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(11): 1967-1975.  
Chen G X, Yue W Z, Ruan B, et al. Two-dimensional nonlinear seismic response analysis for seabed site effect assessment in Jintang Strait [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(11): 1967-1975. (in Chinese)
- [32] 陈国兴, 夏高旭, 王彦臻, 等. 琼州海峡海床地震反应特性的一维非线性分析[J]. *工程力学*, 2022, 39(5): 75-85.  
Chen G X, Xia G X, Wang Y Z, et al. One-dimensional nonlinear seismic response analysis for seabed site effect assessment in the Qiongzhou strait [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(5): 75-85. (in Chinese)
- [33] 陈国兴, 靳丹丹, 朱江, 等. 非线性分析 on seismic site response of Fuzhou Basin, China [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(2A): 928-949.
- [34] 陈国兴, 阮滨, 赵克, 等. Nonlinear response characteristics of undersea shield tunnel subjected to

- strong earthquake motions [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2020, 24(3): 351-380.
- [35] Chen G X, Xiao X, Wu Q, et al. New paradigm for sand liquefaction under cyclic loadings [J]. *Engineering Geology*, 2025, 351: 108041.
- [36] Ishimoto M, Iida K. Determination of elastic constants of soils by means of vibration methods, Part 1: Young's modulus[J]. *Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 1936, 14: 632-657.
- [37] Ishimoto M, Iida K. Determination of elastic constants of soils by means of vibration methods, Part 2: Modulus of rigidity and Poisson's ratio[J]. *Bulletin of Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 1937, 15: 67-85.
- [38] Beresnev I A, Wen K L. Nonlinear soil response: A reality? [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(6): 1964-1978.
- [39] Zoback M L. The 1906 earthquake and a century of progress in understanding earthquakes and their hazards [J]. *GSA Today*, 2006, 16(4/5): 4-11.
- [40] Regnier J, Cadet H, Bonilla L F, et al. Assessing nonlinear behavior of soils in seismic site response: Statistical analysis on KiK-net strong-motion data [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2013, 103(3): 1750-1770.
- [41] Seed H B, Idriss I M. Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1969, 95(1): 99-137.
- [42] Schnabel P B, Lysmer J, Seed H B. SHAKE-A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites [R]. Report No. EERC 72-12, Berkeley, CA: University of California, 1972.
- [43] Sinha R. An improved notion for the computation of strain ratio in equivalent linear site response[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2025, 23(1): 53-82.
- [44] Andreotti G. Short-time frequency-domain method for truly nonlinear dynamic ground response analysis: The equivalent-nonlinear approach [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024, 176: 108266.
- [45] Lee M K W, Finn W D L. DESRA-1, Program for the dynamic effective stress response analysis of soil deposits including liquefaction evaluation[R]. Soil Mechanics Series No. 36, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1975.
- [46] Hashash Y M A. DEEPSOIL V7.1 user manual: Non-linear and equivalent linear seismic site response of one-dimensional soil columns[R]. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2024. <http://deepsoil.cee.illinois.edu/>.
- [47] Roblee C J, Silva W J, Toro G R, et al. Variability in site-specific seismic ground motion design predictions [J]. *ASCE Geotechnical Special Publication*, 1996, 58(2): 1113-1133.
- [48] Kramer S L. *Geotechnical earthquake engineering*[M]. Hoboken: Prentice-Hall Inc, 1996.
- [49] Stewart J P, Chiou S J, Bray J D, et al. Ground motion evaluation procedures for performance-based design [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(9-12): 765-772.
- [50] Housner G W. An historical view of earthquake engineering[J]. *Revista Ingeniería Sísmica*, 1984, 31: 1-16.
- [51] Boatwright J, Bundock H. Modified Mercalli intensity maps for the 1906 San Francisco earthquake plotted in ShakeMap format[R]. USGS Report, No. 2005-1135, 2005. <https://doi.org/10.3133/ofr20051135>.
- [52] Seed R B, Dickenson S E, Idriss I M. Principal geotechnical aspects of the 1989 Loma Prieta earthquake [J]. *Soils and Foundations*, 1991, 31(1): 1-26.
- [53] Goldman H B. Preliminary geologic map of the San Francisco Bay and the San Mateo map areas, California [R]. San Francisco Bay Conservation and Development Commission, 1967.
- [54] Borchardt R D. Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1970, 60(1): 29-61.
- [55] Borchardt R D, Gibbs J F, Lajoie K R. Prediction of maximum earthquake intensity in the San Francisco Bay region, California, for large earthquakes on the San Andreas and Hayward faults[R]. US Geological Survey, MF-709, 1975: 862-873.
- [56] Bonilla M G. The Marina District, San Francisco, California: Geology, history, and earthquake effects [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1991, 81(5): 1958-1979.
- [57] Borchardt R D, Glassmoyer G. On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, 82(2): 603-641.
- [58] Lomax A. A reanalysis of the hypocentral location and related observations for the Great 1906 California earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(3): 861-877.

- [59] Eiding J, De Castro L, Ma D. The 1906 earthquake impacts on the San Francisco and Santa Clara water systems—What we learned, and what we are doing about it [J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(S2): 113-134.
- [60] Strand C L. One hundred years of experience with gas system and fires following earthquakes[C]//8th National Conference on Earthquake Engineering. San Francisco, CA: Earthquake Engineering Research Institute, 2006.
- [61] Hansen G, Condon E. Denial of disaster[R]. San Francisco: Cameron and Company, 1989, 157.
- [62] Lawson A C. The California earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission[R]. Vol. I, [S.l.]: Carnegie Institution of Washington Publication 87, 1908, 451.
- [63] Humphrey R L. The effects of the earthquake and fire on various structures and structural materials[R]. U.S. Geological Survey Bulletin, 1907, 324: 14-129.
- [64] Thatcher W. Strain accumulation and release mechanism of the 1906 San Francisco earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(35): 4862-4872.
- [65] Thatcher W, Marshall G, Lisowski M. Resolution of fault slip along the 470-km-long rupture of the Great 1906 San Francisco earthquake and its implications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B3): 5353-5367.
- [66] Youd T L, Hoose S N. Liquefaction during 1906 San Francisco earthquake [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1976, 102(5): 425-439.
- [67] Youd T L, Hoose S N. Historic ground failures in northern California triggered by earthquakes [R]. US Government Printing Office, US Geological Survey Professional Paper 1993, Washington, DC: USGS, 1978.
- [68] Holzer T L, Blair J L, Noce T E, et al. Predicted liquefaction of East Bay fills during a repeat of the 1906 San Francisco earthquake [J]. *Earthquake Spectra*, 2006, 22(S2): 261-277.
- [69] Gilbert G K, Humphrey R L, Sewell J S, et al. The San Francisco earthquake and fire of April 18, 1906: and their effects on structures and structural materials [R]. US Government Printing Office, US Geological Survey Bulletin, 324, 1907.
- [70] Wald D J, Kanamori H, Helmberger D V, et al. Source study of the 1906 San Francisco earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1993, 83(4): 981-1019.
- [71] Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, et al. Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California [J]. *Earthquake Spectra*, 1999, 15(3): 557-564.
- [72] Darragh R B, Shakal A F. The site response of two rock and soil station pairs to strong and weak ground motion [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1991, 81(5): 1885-1899.
- [73] Bardet J P, Kapuskar M. Liquefaction sand boils in San Francisco during 1989 Loma Prieta earthquake[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 119 (3) : 543-562.
- [74] Boatwright J, Seekins L C, Fumal T E, et al. Ground motion amplification in the Marina District[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1991, 81(5): 1980-1997.
- [75] Idriss I M. Response of soft soil sites during earthquakes [C] //Proceedings of the H. Bolton Seed Memorial Symposium. Berkeley, California. Vancouver, B. C.: [s.n.], 1990, 2: 273-289.
- [76] Dobry R, Borcherdt R D, Crouse C B, et al. New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions [J]. *Earthquake Spectra*, 2000, 16(1): 41-67.
- [77] Astiz L, Kanamori H, Eissler H. Source characteristics of earthquakes in the Michoacan seismic gap in Mexico [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1987, 77(4): 1326-1346.
- [78] Arciniega-Ceballos A, Baena-Rivera M, Sánchez-Sesma F J. The 1985 (M8.1) Michoacán earthquake and its effects in Mexico City[M]//Living Under the Threat of Earthquakes: Short and Long-term Management of Earthquake Risks and Damage Prevention in Nepal. Cham: Springer International Publishing, 2017: 65-75.
- [79] Flores-Estrella H, Yussim S, Lomnitz C. Seismic response of the Mexico City Basin: A review of twenty years of research[J]. *Natural Hazards*, 2007, 40(2) : 357-372.
- [80] Garini E, Anastasopoulos I, Gazetas G. Soil, basin and soil-building-soil interaction effects on motions of Mexico City during seven earthquakes [J]. *Géotechnique*, 2020, 70(7): 581-607.
- [81] Garini E, Anastasopoulos I, Gazetas G, et al. Soil, basin and soil-building-soil interaction effects on motions of Mexico City during seven earthquakes [J]. *Géotechnique*, 2022, 72(6): 556-564.
- [82] Marsal R J, Mazari M. The subsoil of Mexico City [C]//1st Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: [s.n.], 1959.

- [83] Alberto Y, Kyokawa H, Otsubo M, et al. Reconnaissance of the 2017 Central Mexico Earthquake[J]. JSCE Journal of Disaster Factsheets, FS2018-E-0001, 2018.
- [84] Dobry R, Vucetic M. Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits[C]//Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils. Mexico: [s.n.], 1987, 2: 51-87.
- [85] Singh S K, Mena E, Castro R. Some aspects of source characteristics of the 19 September 1985 Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion data[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988, 78 (2) : 451-477.
- [86] Sun J I, Goleorkhi R, Seed H B. Dynamic and damping ratios for cohesive soils[R]. Report No. EERC 88-15. Berkeley, CA: University of California.
- [87] Mayoral J M, Castañon E, Alcantara L, et al. Seismic response characterization of high plasticity clays [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 84: 174-189.
- [88] Ochoa-Cornejo F, Pasten C, Hernandez F, et al. Geotechnical aspects of the 2017  $M_w$ 7.1 Puebla-Morelos earthquake [C] // III Chilean Congress of Seismology and Seismic Engineering. Valdivia, Chile: ACHISINA, 2019.
- [89] Shapiro N M, Olsen K B, Singh S K. On the duration of seismic motion incident onto the Valley of Mexico for subduction zone earthquakes [J]. Geophysical Journal International, 2002, 151(2): 501-510.
- [90] Çelebi M, Sahakian V J, Melgar D, et al. The 19 September 2017 M 7.1 Puebla-Morelos earthquake: Spectral ratios confirm Mexico City Zoning[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 108(6) : 3289-3299.
- [91] Beck J L, Hall J F. Factors contributing to the catastrophe in Mexico City during the earthquake of September 19, 1985 [J]. Geophysical Research Letters, 1986, 13 (6): 593-596.
- [92] Anderson J G, Bodin P, Brune J N, et al. Strong ground motion from the Michoacan, Mexico, earthquake [J]. Science, 1986, 233(4768): 1043-1049.
- [93] Koketsu K, Miyake H. A seismological overview of long-period ground motion[J]. Journal of Seismology, 2008, 12(2): 133-143.
- [94] Arroyo D, Singh S K, Ordaz M, et al. Strong ground motion during the 8 September 2021 ( $M_w$ 7.0) Acapulco earthquake: Rupture directivity and its effect on simulated motions in Mexico City from postulated  $m_w$  7.5-8.0 earthquakes [J]. Geofísica Internacional, 2025, 64(2): 1509-1520.
- [95] Degg M R. Some implications of the 1985 Mexican earthquake for hazard assessment[R]. In: McCall G J H, Laming D J C, Scott S C. (eds) Geohazards. AGID Report Series. Springer, Dordrecht, 1992.
- [96] Hays W W. Case histories of damaging earthquakes [C]//Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. [S.l.]: Missouri University of Science and Technology, 1998.
- [97] Castro R R, Pérez-Campos X, Zúñiga R, et al. A review on advances in seismology in Mexico after 30 years from the 1985 earthquake [J]. Journal of South American Earth Sciences, 2016, 70: 49-54.
- [98] Asimaki D, Villa J M, Ayoubi P, et al. Mexico City basin effects: Past, present, and future[C]//8th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Reston, American Society of Civil Engineers. VA: Geo-Congress, 2019: 422-435.
- [99] Seed H B, Sun J I. Implications of site effects in the Mexico City earthquake of Sept. 19, 1985 for earthquake-resistant design criteria in the San Francisco Bay Area of California [R]. Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 1989.
- [100] Montalvo-Arrieta J C, Reinoso-Angulo E, Sánchez-Sesma F J. Observations of strong ground motions flathill sites in Mexico City from recent earthquakes[J]. Geofísica Internacional, 2003, 42(2): 205-217.
- [101] Rosenblueth E. Seismic design requirements in a Mexican 1976 code[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1979, 7(1): 49-61.
- [102] Ayala G A, O'Rourke M J. Effects of the 1985 Michoacan earthquake on water systems and other buried lifelines in Mexico[R]. Report NCEER-89-0009, Buffalo, NY: National Center for Earthquake Engineering Research, 1989.
- [103] Stone W C, Yokel F Y, Celebi M, et al. Engineering aspects of the September 19, 1985 Mexico earthquake [M]. Washington, D.C.:National Bureau of Standards, NBS Building Science 165, 1987.
- [104] Roeslin S, Elwood K J, Juárez-García H, et al. The September 19 th, 2017 Puebla, Mexico Earthquake-Preliminary report [C]//Proceedings of the 2018 New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference. [S.l.]: [s.n.], 2018:13-15.
- [105] Roeslin S, Huarez-García H, Elwood K J, et al. The September 19th, 2017 Puebla, Mexico earthquake: Fi-

- nal report of the New Zealand reconnaissance team [J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2020, 53(3): 150-172.
- [106] CICM. Damage maps coordinated by the Colegio de Ingenieros Civiles de Mexico, 2017. <https://www.cicm.org.mx/>
- [107] Galvis F A, Miranda E, Heresi P, et al. Overview of collapsed buildings in Mexico City after the 19 September 2017 ( $M_w$ 7.1) earthquake [J]. Earthquake Spectra, 2020, 36(S2): 83-109.
- [108] Heresi P, Ruiz-García J, Payán-Serrano O, et al. Observations of Rayleigh waves in Mexico City Valley during the 19 September 2017 Puebla-Morelos, Mexico earthquake [J]. Earthquake Spectra, 2020, 36(S2): 62-82.
- [109] Singh S K, Reinoso E, Arroyo D, et al. Deadly intraslab Mexico earthquake of 19 September 2017 ( $M_w$  7.1): Ground motion and damage pattern in Mexico City [J]. Seismological Research Letters, 2018, 89(6): 2193-2203.
- [110] Nakamura Y. What is the Nakamura method? [J]. Seismological Research Letters, 2019: 90(4): 1437-1443.
- [111] Asimaki D, Mohammadi K, Ayoubi P, et al. Investigating the spatial variability of ground motions during the 2017  $M_w$ 7.1 Puebla-Mexico City earthquake via idealized simulations of basin effects [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 132: 106073.
- [112] 门进杰, 史庆轩, 陈曦虎. 汶川地震对远震区高层建筑造成的震害及设计建议 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2008, 40(5): 648-653.  
Men J J, Shi Q X, Chen X H. Seismic damage of high buildings caused in the remote areas from epicenter and aseismic design suggestion [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2008, 40(5): 648-653. (in Chinese)
- [113] 朱元祥, 李航飞, 孙东晓. “5·12”汶川地震后陕西宝鸡陈仓区建筑物震害调查与分析 [J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 116-120.  
Zhu Y X, Li H F, Sun D X. Damage investigation and analysis of buildings in Chencang County of Baoji City, Shaanxi Province after “5·12” Wenchuan earthquake [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 116-120. (in Chinese)
- [114] 任叶飞. 基于强震动记录的汶川地震场地效应研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014.  
Ren Y F. Study on site effect of Wenchuan earthquake based on strong earthquake records [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2014. (in Chinese)
- [115] 卢育霞, 马林伟, 卢芳琴, 等. 武都台的地震记录特征及场地条件分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(增1): 118-125.  
Lu Y X, Ma L W, Lu F Q, et al. Characteristics of strong ground motion and site condition on 62WUD seismic station [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(Sup1): 118-125. (in Chinese)
- [116] Jaggard T A. The Yokohama-Tokyo earthquake of September 1, 1923 [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1923, 13(4): 124-146.
- [117] Miyake H, Mori J J, Wald D J, et al. Introduction to the special section for the centennial of the Great 1923 Kanto, Japan, earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2023, 113(5): 1821-8215.
- [118] Midorikawa S. Strong ground motion of the 1923 Kanto, Japan earthquake [J]. Journal of Disaster Research, 2023, 18(6): 570-577.
- [119] Furumura T, Hayakawa T, Nakamura M, et al. Development of long-period ground motions from the Nankai Trough, Japan, earthquakes: Observations and computer simulation of the 1944 Tonankai ( $M_w$ 8.1) and the 2004 SE Off-Kii Peninsula ( $M_w$ 7.4) earthquakes [J]. Pure and Applied Geophysics, 2008, 165(3): 585-607.
- [120] Takewaki I, Murakami S, Fujita K, et al. The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake and response of high-rise buildings under long-period ground motions [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(11): 1511-1528.
- [121] Yasuda S, Harada K, Ishikawa K, et al. Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan earthquake [J]. Soils and Foundations, 2012, 52(5): 793-810.
- [122] Furumura T, Takemura S, Noguchi S, et al. Strong ground motions from the 2011 off-the Pacific-Coast-of-Tohoku, Japan ( $M_w=9.0$ ) earthquake obtained from a dense nationwide seismic network [J]. Landslides, 2011, 8(3): 333-338.
- [123] Suzuki W, Aoi S, Sekiguchi H, et al. Rupture process of the 2011 Tohoku-Oki mega-thrust earthquake ( $M$ 9.0) inverted from strong-motion data [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(7): L00G16.
- [124] Koketsu K, Hatayama K, Furumura T, et al. Damaging long-period ground motions from the 2003  $M_w$ 8.3 Tokachi-oki, Japan, earthquake [J]. Seismological Research Letters, 2005, 76(1): 67-73.

- [125]Koketsu K, Kikuchi M. Propagation of seismic ground motion in the Kanto Basin, Japan [J]. *Science*, 2000, 288(5469): 1237-1239.
- [126]Miyake H, Koketsu K. Long-period ground motions from a large offshore earthquake: The case of the 2004 off the Kii peninsula earthquake, Japan [J]. *Earth, Planets and Space*, 2005, 57(3): 203-207.
- [127]Furumura T, Hayakawa T. Anomalous propagation of long-period ground motions recorded in Tokyo during the 23 October 2004  $M_w$  6.6 Niigata-ken Chuetsu, Japan, earthquake [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, 97(3):863-880.
- [128]Hatayama K, Zama S. Slothing of liquid in oil storage tanks and long-period strong ground motions due to 2004  $M7$ -class earthquakes southeast off the Kii Peninsula[R]. *Rep Natl Res Inst Fire and Disast* 99: 52-58 2005. (in Japanese)
- [129]Tanaka Y, Miyake H, Koketsu K, et al. The DaiDai-Toku integrated model of the velocity structure beneath the Tokyo metropolitan area (2). (Abstract) [C]//Japan Geoscience Union Meet. [s.l.]: [s.n.], 2006. (in Japanese)
- [130]Takewaki I, Fujita K, Yoshitomi S. Uncertainties in long-period ground motion and its impact on building structural design: Case study of the 2011 Tohoku (Japan) earthquake[J]. *Engineering Structures*, 2013, 49: 119-134.
- [131]Furumura T, Nakamura M. Recovering of strong motion record of the 1944 Tonankai earthquake and long-period ground motion in Kanto region[J]. *Geophys Exploration*, 2006, 59: 337-351 (in Japanese).
- [132]Goto H, Hata Y, Kuwata Y, et al. Earthquake source and ground motion characteristics in eastern Japan during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake [J]. *Journal of JSCE*, 2013, 1(1): 329-342.
- [133]Cox B R, Boulanger R W, Tokimatsu K, et al. Liquefaction at strong motion stations and in Urayasu City during the 2011 Tohoku-Oki earthquake [J]. *Earthquake Spectra*, 2013, 29(S1): 55-80.
- [134]Davia M, Kingdomb L, Redaellic M. Site response at a location affected by soil softening and liquefaction during the 2011 Tohoku Earthquake [C]//Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation (5th GEDMAR). Taipei: [s.n.], 2017: 65-73.
- [135]Satoh T, Hayakawa T, Oshima M, et al. Site effects on large ground motions at KiK-net iwase station IBRH11 during the 2011 Tohoku earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 104(2): 653-668.
- [136]Greenfield M W. Effects of long-duration ground motions on liquefaction hazards[D]. Washington: University of Washington, 2017.
- [137]Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: The S transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(4): 998-1001.
- [138]Kanai K. *Engineering seismology*[M]. Tokyo, Japan: Tokyo of University Press, 1983
- [139]张克绪, 谢君斐. *土动力学*[M]. 北京:地震出版社, 1989.
- [140]张克绪, 谢君斐. *土动力学*[M]. 北京:地震出版社, 2024.
- [141]谢君斐. 我国建筑抗震规范中地基基础部分的发展 [M]//中国地震工程研究进展. 北京:地震出版社, 1992:21-26.
- [142]BSSE (Building Seismic Safety Council). NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures[S]. FEMA P-1050-1/2015 Edition, 2015.
- [143]ASCE. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures[S]. American Society of Civil Engineers. Reston, VA:ASCE, 2022.
- [144]CEN. Eurocode 8 - design of structures for earthquake resistance - part 1-1: General rules and seismic action [S]. European Standard (Ref. No. FprEN 1998-1-1), 2024.
- [145]Boore D M. Simulation of ground motion using the stochastic method [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2003, 160(3): 635-676.
- [146]Douglas J, Edwards B. Recent and future developments in earthquake ground motion estimation [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 160: 203-219.
- [147]Chen G X, Wang Y Z, Zhao D F, et al. A new effective stress method for nonlinear site response analyses [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2021, 50(6): 1595-1611.
- [148]Clough R W, Chopra A K. Earthquake stress analysis in earth dams [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1966, 92(2): 197-211.
- [149]Idriss I M, Seed H B. Response of horizontal soil layers during earthquakes[R]. Berkeley, CA: Soil Mechanics and Bituminous Materials Research Laboratory, University of California, 1967.
- [150]Idriss I M, Seed H B. Seismic response of horizontal soil layers [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 1968, 94(SM4): 1003-1031.

- [151] Idriss I M, Seed H B. An analysis of ground motions during the 1957 San Francisco earthquake [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(6): 2013-2032.
- [152] Idriss I M, Seed H B. Seismic response of soil deposits [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1970, 96(SM2): 631-638.
- [153] Thompson E M, Baise L G, Tanaka Y, et al. A taxonomy of site response complexity [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 41: 32-43.
- [154] Joyner W B, Chen A T F. Calculation of nonlinear ground response in earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(5): 1315-1336.
- [155] Streeter V L, Wylie E B, Richart F E Jr. Soil motion computations by characteristics method [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1974, 100(3): 247-263.
- [156] Tropeano G, Chiaradonna A, d'Onofrio A, et al. A numerical model for non-linear coupled analysis of the seismic response of liquefiable soils [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 105: 211-227.
- [157] Chen G X, Qin Y, Wu Q, et al. A unified model of cyclic shear-volume coupling and excess pore water pressure generation for sandy soils under various cyclic loading patterns [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2024, 150(9): 04024075.
- [158] Kaklamanos J, Bradley B A, Thompson E M, et al. Critical parameters affecting bias and variability in site-response analyses using KiK-net downhole array data [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(3): 1733-1749.
- [159] Kaklamanos J, Baise L G, Thompson E M, et al. Comparison of 1D linear, equivalent-linear, and nonlinear site response models at six KiK-net validation sites [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 69: 207-219.
- [160] Zalachoris G, Rathje E M. Evaluation of one-dimensional site response techniques using borehole arrays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(12): 04015053.
- [161] Kwok A O L, Stewart J P, Hashash Y M A, et al. Practical implementation of analysis routines for nonlinear seismic ground response analysis [C]. In: Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering, Vol. 11, 2006.
- [162] Kwok A O L, Stewart J P, Hashash Y M A. Nonlinear ground-response analysis of Turkey Flat shallow stiff-soil site to strong ground motion [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(1): 331-343.
- [163] Stewart J P, Kwok A O L, Hashash Y M A. Benchmarking of nonlinear geotechnical ground response analysis procedures [R]. Berkeley, CA: PEER Report 2008/04, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2008.
- [164] Régnier J, Bonilla L F, Bard P Y, et al. PRENOLIN: International benchmark on 1D nonlinear site-response analysis—Validation phase exercise [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 108(2): 876-900.
- [165] 朱姣, 陈国兴, 许汉刚. 地震基岩面的选取对深厚场地地表地震动参数的影响 [J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2079-2087.  
Zhu J, Chen G X, Xu H G. Effect of seismic bedrock interface depth on surface motion parameters of deep site [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 2079-2087. (in Chinese)
- [166] Bhardwaj A, Anbazhagan P. Effective depth of soil column for site response analysis of deep soil sites [J]. Indian Journal of Science and Technology, 2016, 9(44): 1-8.
- [167] Yasuda N, Cao Z Y. Characteristics of seismic motions at a concrete gravity dam site and suggestions for setting the engineering bedrock [J]. Earthquake Spectra, 2021, 37(4): 2596-2621.
- [168] 徐磊, 陈国兴. 地震基岩面选取对核岛场地地表地震反应影响 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(6): 113-121.  
Xu L, Chen G X. Effects of the soil depth of seismic bedrock interface on ground surface seismic response of nuclear island site [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(6): 113-121. (in Chinese)
- [169] Pilz M, Cotton F, Zhu C B, et al. Deriving site effect-free hard-rock time histories in Japan from the generalized inversion technique [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2023, 113(2): 732-744.
- [170] 巴振宁, 刘悦, 赵靖轩, 等. 2021年漾濞 6.4 级近断层宽频地震动模拟: 一种改进的 FK 方法 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45(4): 709-719.  
Ba Z N, Liu Y, Zhao J X, et al. Near-fault broadband ground-motion simulation of 2021 Yangbi M6.4 earthquake: An improved FK method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(4): 709-719. (in Chinese)

- [171]巴振宁, 赵靖轩, 桑巧稚, 等. 基于Davidenkov本构模型的三维沉积盆地非线性地震动谱元法模拟[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(7): 1387-1397.
- Ba Z N, Zhao J X, Sang Q Z, et al. Nonlinear ground motion simulation of three-dimensional sedimentary basin based on Davidenkov constitutive model and spectral element method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7): 1387-1397. (in Chinese)
- [172]高玉峰, 代登辉, 张宁. 翡翠河谷地震动地形效应解析分析[J]. 地震学报, 2022, 44(1): 40-49.
- Gao Y F, Dai D H, Zhang N. Analytical study on the topographic effect on ground motion of Feitsui canyon [J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44(1): 40-49. (in Chinese)
- [173]Narayan J P. Study of basin-edge effects on the ground motion characteristics using 2.5-D modelling [J]. Pure and Applied Geophysics, 2005, 162(2): 273-289.
- [174]Burjáněk J, Edwards B, Fäh D. Empirical evidence of local seismic effects at sites with pronounced topography: A systematic approach [J]. Geophysical Journal International, 2014, 197(1): 608-619.
- [175]Burjáněk J, Fäh D, Pischiutta M, et al. NERA-JRA1 working group. Site effects at sites with pronounced topography: overview & recommendations [R]. Luxembourg: Research report for EU project NERA, 2014: 64.
- [176]Shani-Kadmiel S, Tsessarsky M, Louie J N, et al. Geometrical focusing as a mechanism for significant amplification of ground motion in sedimentary basins: Analytical and numerical study [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2014, 12(2): 607-625.
- [177]Panzera F, Lombardo G, Imposa S, et al. Correlation between earthquake damage and seismic site effects: The study case of Lentini and Carlentini, Italy [J]. Engineering Geology, 2018, 240: 149-162.
- [178]Liu Z X, Qiao Y F, Cheng X L, et al. Nonlinear seismic response and amplification effect of 3D sedimentary basin based on bounding surface constitutive model [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 158: 107292.
- [179]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.
- Miao 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)
- [180]王彦臻, 范宏飞, 赵凯, 等. 深厚复杂海峡场地二维非线性地震反应特性[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(2): 345-356.
- Wang Y Z, Fan H F, Zhao K, et al. 2D nonlinear seismic response characteristics of a strait site with deep inhomogeneous soil deposits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(2): 345-356. (in Chinese)
- [181]王彦臻, 范宏飞, 陈国兴, 等. 海峡场地非线性地震反应特性的流-固弱耦合分析[J]. 地球物理学报, 2025, 68(4): 1352-1366.
- Wang Y Z, Fan H F, Chen G X, et al. Nonlinear seismic response characteristic analysis of a cross-strait seabed based on a fluid-solid weak coupling method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2025, 68(4): 1352-1366. (in Chinese)
- [182]Yang J, Sato T, Li X S. Nonlinear site effects on strong ground motion at a reclaimed island [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1): 26-39.
- [183]Huang D R, Sun P G, Jin F, et al. Topographic amplification of ground motions incorporating uncertainty in subsurface soils with extensive geological borehole data [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 141: 106441.
- [184]Liu W X, Juang C H, Chen Q S, et al. Dynamic site response analysis in the face of uncertainty: An approach based on response surface method [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2021, 45(12): 1854-1867.
- [185]Liu W X, Chen Q S, Juang C H, et al. Uncertainty propagation of soil property in dynamic site response under different site conditions [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2023, 47(9): 1521-1538.
- [186]Seed H B, Idriss I M. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses [R]. Berkeley, California: Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1970.
- [187]Idriss I M, Sun J I. SHAKE91: A computer program for conduction equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits[R]. Davis: Center for Geotechnical Modeling, University of California, 1991.
- [188]Dickenson S E. Dynamic response of soft and deep cohesive soils during the Loma Prieta earthquake of October, 17, 1989 [D]. Berkeley, CA: University of California, 1994.
- [189]Schnabel P B, Lysmer J, Seed H B. SHAKE: A com-

- puter program for earthquake response analysis of horizontally layered sites[R]. Berkeley, California: University of California, 1972.
- [190]Roesset J M, Whitman R V. Theoretical background for amplification studies[R]. Cambridge, Mass: Massachusetts Institute of Technology, 1969.
- [191]Lysmer J, Seed H B, Schnabel P B. Influence of base-rock characteristics on ground response[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1971, 61(5): 1213-1231.
- [192]ProShake. Ground response analysis program. User's manual[R]. Redmond, Washington: EduPro Civil Systems, Inc. 1998.
- [193]Ordonez G A. SHAKE2000: A computer program for the 1-D analysis of geotechnical earthquake engineering problems[R]. Lacey: Geomotions, LLC, USA, 2000.
- [194]Youngs R R. Software validation report for SHAKE04 [R]. Oakland, California: Geomatrix Consultant, 2004.
- [195]Bardet J P, Ichii K, Lin C H. EERA: A Computer program for equivalent-linear earthquake site response analysis of layered soil deposits [R]. Los Angeles: Department of Civil Engineering, University of Southern California, 2000.
- [196]Hashash Y M A, Park D. Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment [J]. Engineering Geology, 2001, 62(1-3): 185-206.
- [197]Hashash Y M A, Park D. Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in non-linear site response analysis [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22(7): 611-624.
- [198]Kottke A, Rathje E M. Technical manual for Strata [R]. Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering, University of California, 2008.
- [199]Asimaki D, Shi J, Li W. SeismoSoil User Manual, v.1.3[R]. Pasadena, CA, USA: California Institute of Technology; 2017.
- [200]Park D, Hashash Y M A. Estimation of non-linear seismic site effects for deep deposits of the Mississippi embayment[R]. Champaign, IL: University of Illinois, 2004.
- [201]Stewart J P, Kwok A O L. Nonlinear seismic ground response analysis: Code usage protocols and verification against vertical array data[C]//Proceedings of the Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV Congress. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2008: 1-24.
- [202]Bolisetti C, Whittaker A S, Mason H B, et al. Equivalent linear and nonlinear site response analysis for design and risk assessment of safety-related nuclear structures [J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 275: 107-121.
- [203]Kaklamanos J, Bradley B A. Challenges in predicting seismic site response with 1D analyses: Conclusions from 114 KiK-net vertical seismometer arrays [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 108(5A): 2816-2838.
- [204]Régnier J, Bonilla L F, Bard P Y, et al. International benchmark on numerical simulations for 1D, nonlinear site response (PRENOLIN): Verification phase based on canonical cases[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2016, 106(5): 2112-2135.
- [205]Meite R, Wotherspoon L, Kaklamanos J, et al. Sensitivity of 1-D ground motion predictions to analysis codes and material models using KiK-net vertical arrays [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 133: 106113.
- [206]Pretell R, Abrahamson N A, Ziotopoulou K. A borehole array data-based approach for conducting 1D site response analyses I: Damping and VS randomization [J]. Earthquake Spectra, 2023, 39(3): 1473-1501.
- [207]Pretell R, Abrahamson N A, Ziotopoulou K. A borehole array data-based approach for conducting 1D site response analyses II: Accounting for modeling errors [J]. Earthquake Spectra, 2023, 39(3): 1502-1533.
- [208]Yoshida N, Iai S. Nonlinear site response and its evaluation and prediction[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion. Yokosuka: [s.n.], 1998: 1-90.
- [209]Chen G X, Wu Q, Zhou Z L, et al. Undrained anisotropy and cyclic resistance of saturated silt subjected to various patterns of principal stress rotation [J]. Géotechnique, 2020, 70(4): 317-331.
- [210]Chen G X, Zhao D F, Chen W Y, et al. Excess pore-water pressure generation in cyclic undrained testing [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(7): 04019022.
- [211]Chen G X, Ma W J, Qin Y, et al. Liquefaction susceptibility of saturated coral sand subjected to various patterns of principal stress rotation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147(9): 04021093.
- [212]陈国兴, 吴琪, Juang C H. 砂土液化不变性理论[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(6): 1311-1370.

- Chen G X, Wu Q, Charng Hsein JUANG. Invariance theory of sand liquefaction under cyclic loadings [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2025, 45(6): 1311-1370. (in Chinese)
- [213] Sugito M, Goda H, Masuda T. Frequency dependent equivalent linearized technique for seismic response analysis of multi-layered ground [J]. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 1994, 493(3-2): 49-58. (in Japanese with English abstract)
- [214] Assimaki D, Kausel E, Whittle A. Model for dynamic shear modulus and damping for granular soils [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2000, 126(10): 859-869.
- [215] Assimaki D, Steidl J. Inverse analysis of weak and strong motion downhole array data from the  $M_w$ 7.0 Sanriku-Minami earthquake [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2007, 27(1): 73-92.
- [216] Sugito M. Frequency-dependent equivalent strain for earthquake response analysis of soft ground [C]//The first international conference on earthquake geotechnical engineering. Tokyo: [s.n.], 1995:655-660.
- [217] Yoshida N, Kobayashi S, Suetomi I, et al. Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(3): 205-222.
- [218] Assimaki D, Kausel E. An equivalent linear algorithm with frequency- and pressure-dependent moduli and damping for the seismic analysis of deep sites [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(9-12): 959-965.
- [219] Huang D R, Wang G, Wang C Y, et al. A modified frequency-dependent equivalent linear method for seismic site response analyses and model validation using KiK-net borehole arrays [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2020, 24(5): 827-844.
- [220] Kwak D Y, Jeong C G, Park D. Comparison of frequency dependent equivalent linear analysis methods [C]//Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, [s.n.], 2008: 12-7.
- [221] Furumoto Y M, Sugito M, Yashima A. Frequency-Dependent Equivalent Linearized Technique for FEM Response Analysis of Ground [C]//Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand: [s.n.], 2000.
- [222] 袁晓铭, 李瑞山, 孙锐. 新一代土层地震反应分析方法 [J]. *土木工程学报*, 2016, 49(10): 95-102, 122.  
Yuan X M, Li R S, Sun R. A new generation method for earthquake response analysis of soil layers [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(10): 95-102, 122. (in Chinese)
- [223] 孙锐, 袁晓铭. 全局等效线性化土层地震反应分析方法 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(4): 603-612.  
Sun R, Yuan X M. Holistic equivalent linearization approach for seismic response analysis of soil layers [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(4): 603-612. (in Chinese)
- [224] Sun R, Yuan X M. A holistic equivalent linear method for site response analysis [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 141: 106476.
- [225] Lee M K W, Finn W D L. DESRA-2: Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential [R]. Vancouver, BC, Canada: Department of Civil Engineering, the University of British Columbia, 1991.
- [226] Martin P P, Seed H B, MASH. A computer program for the non-linear analysis of vertically propagating shear waves in horizontally layered deposits [R]. Report No. EERC-78/23, Berkeley, CA: University of California, 1978.
- [227] Li X S, Wang Z L, Shen C K. SUMDES: A nonlinear procedure for response analysis of horizontally-layered sites subjected to multi-directional earthquake loading [R]. Davis: Department of Civil Engineering, University of California, 1992.
- [228] Borja R I, Wu W H. Vibration of foundations on incompressible soils with no elastic region [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1994, 120(9): 1570-1592.
- [229] Borja R I, Chao H Y, Montáns F J, et al. Nonlinear ground response at Lotung LSSST site [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(3): 187-197.
- [230] Borja R I, Lin C H, Sama K M, et al. Modelling nonlinear ground response of non-liquefiable soils [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2000, 29(1): 63-83.
- [231] Pyke R M. TESS: A computer program for nonlinear ground response analyses [R]. Lafayette, California: TAGA Engineering Systems and Software, 1992.
- [232] Pyke R M. TESS Users' Manual [R]. TAGA Engineering Software Services, Lafayette, California, 2000.
- [233] DS. Computer program ABAQUS-finite element analysis software [Z]. Dassault Systèmes, Providence, Rhode Island, 2005.
- [234] DS. Abaqus Unified Finite Element Analysis Software.

- Dassault Systèmes, 2021. <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus>.
- [235]Hallquist J O. LS-DYNA theoretical manual[R]. Livermore, CA, USA: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [236]LSTC. LS-DYNA Keyword User's Manual-Version R 7.0 [R]. Livermore, California: Livermore Software Technology Corporation, 2013.
- [237]Yosef T Y, Fang C, Faller R K, et al. A review of soil constitutive models for simulating dynamic soil-structure interaction processes under impact loading [J]. *Geotechnics*, 2025, 5(2): 40.
- [238]McKenna F, Fenves G L, Scott M H. Open system for earthquake engineering simulation [R]. 2000. <https://opensees.berkeley.edu/>.
- [239]IEEE. OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation. 2011. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5931487>.
- [240]Jan. Version 3.7.1 of the OpenSees binary [R]. 2025. <https://opensees.berkeley.edu>.
- [241]Itasca. FLAC, Fast Lagrangian analysis of continua (Version 3.3) [R]. [S.l.]: Itasca Consulting Group Inc., 1996.
- [242]Itasca. FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.40 User's Guide[R]. [S.l.]: Itasca Consulting Group Inc., 1998.
- [243]Itasca. Flac3D Program Guide[R]. 2021. <https://docs.itascasoftware.com/>
- [244]Hallquist J O. Preliminary user's manuals for DYNA3D and DYNAP (nonlinear dynamic analysis of solids in three dimensions) [R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1976.
- [245]Newmark N M. A method of computation for structural dynamics [J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 1959, 85(3): 67-94.
- [246]Wilson E L. A computer program for the dynamic stress analysis of underground structures[R]. CA: University of California at Berkeley, 1968.
- [247]Hilber H M, Hughes T J R, Taylor R L. Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1977, 5(3): 283-292.
- [248]Ramberg W, Osgood W R. Description of stress-strain curves by three parameters [R]. Technical Note 902, Washington, D.C.: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943.
- [249]Kondner R L, Zelasko J S. A hyperbolic stress-strain formulation of sands [C] //Proceedings of 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Sao Paulo, Brasil: [s. n.] , 1963: 289-324.
- [250]Finn W D L, Lee M K W, Martin G R. An effective stress model for liquefaction[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1977, 103 (6) : 517-533.
- [251]Pyke R M. Nonlinear soil models for irregular cyclic loadings [J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1979, 105(6): 715-726.
- [252]Martin P P, Seed H B. One-dimensional dynamic ground response analyses[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1982, 108(7): 935-952.
- [253]Vucetic M. Normalized behavior of clay under irregular cyclic loading [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, 27(1): 29-46.
- [254]Elgamal A W, Yang Z, Parra E, et al. CYCLIC 1D: An Internet-based finite element computer program for one dimensional site amplification analysis using an incremental plasticity coupled solid-fluid u-p formulation [R]. California: University of California at San Diego, 1998.
- [255]Lu J, Elgamal A W, Yang Z, Cyclic1D: A computer program for seismic ground response [R]. San Diego, La Jolla, California: University of California, 2006.
- [256]庄海洋, 陈国兴, 梁艳仙, 等. 土体动非线性黏弹性模型及其ABAQUS软件的实现[J]. *岩土力学*, 2007, 28 (3): 436-442.
- Zhuang H Y, Chen G X, Liang Y X, et al. A developed dynamic viscoelastic constitutive relations of soil and implemented by ABAQUS software [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(3): 436-442. (in Chinese)
- [257]Ragheb A M. Numerical analysis of seismically induced deformations in saturated granular soil strata [D]. Troy, NY: Rensselaer Polytechnic Institute, 1994.
- [258]Yang Z H. Numerical modeling of earthquake site response including dilation and liquefaction [D]. New York, NY: Columbia University, 2000.
- [259]Yang Z H, Elgamal A, Parra E. Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(12):1119-1127.
- [260]Boulanger R W, Ziotopoulou K. PM4Sand (Version 3.1): A sand plasticity model for earthquake engineering applications [R]. Report No. UCD/CGM-17/01. Davis, California: University of California, 2017.
- [261]Boulanger R W, Ziotopoulou K. PM4Silt (Version 1): A silt plasticity model for earthquake engineering Appli-

- cations [R]. Davis, California: University of California, 2018.
- [262]Chen L. Implementation, verification, validation, and application of two constitutive models for earthquake engineering applications[D]. U.S.A.: University of Washington, 2020.
- [263]Cubrinovski M, Ishihara K. State concept and modified elastoplasticity for sand modelling [J]. *Soils and Foundations*, 1998, 38(4): 213-225.
- [264]Matasovic N. Seismic response of composite horizontally-layered soil deposits[D]. Los Angeles, CA: University of California, 1992.
- [265]Masing G. Eigenspannungen und verfestigung beim messinging[C]//Proceedings of the 2nd International Congress on Applied Mechanics. Zurich, Switzerland: Orell Füssli, 1926: 332-335.
- [266]Vucetic M, Dobry R. Pore pressure buildup and liquefaction at level sandy sites during earthquakes [R]. New York: Rensselaer Polytechnic Institute, 1986.
- [267]Rayleigh J W S, Lindsay R B. The theory of sound (2nd edition, revised and enlarged) [M]. New York: Dover Publications, 1945. (Original work published 1894)
- [268]Phillips C, Hashash Y M A. Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(7): 1143-1158.
- [269]Phillips C, Hashash Y M A. A new simplified constitutive model to simultaneously match modulus reduction and damping soil curves for nonlinear site response [C]//Proceedings of the Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV Congress. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2008.
- [270]Groholski D R, Hashash Y M A, Kim B, et al. Simplified model for small-strain nonlinearity and strength in 1D seismic site response analysis [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2016, 142(9): 04016042.
- [271]Hashash Y M A, Dashti S, Romero M I, et al. Evaluation of 1-D seismic site response modeling of sand using centrifuge experiments [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, 78: 19-31.
- [272]Numanoglu O A, Musgrove M, Harmon J A, et al. Generalized non-Masing hysteresis model for cyclic loading [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2018, 144(1):06017015.
- [273]Shi J, Asimaki D. From stiffness to strength: Formulation and validation of a hybrid hyperbolic nonlinear soil model for site-response analyses [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2017, 107 (3) : 1336-1355.
- [274]赵丁凤.可液化地基地下结构三维非线性地震反应分析的有效应力法[D].南京:南京工业大学.  
Zhao D F. Simulation of a shaking table test for subway station structure in liquefiable foundation based on the effective stress method [D]. Nanjing: Nanjing Tech University. (in Chinese)
- [275]Martin G R, Finn W D L, Seed H B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1975, 101 (GT5) : 423-438.
- [276]Finn W D L, Lee M K W, Yoshida N. DESRA-2C: Dynamic effective stress response analysis of soil deposits with energy transmitting boundary including assessment of liquefaction potential [R]. Vancouver, BC: Facultad de Ciencias Aplicadas, the Universidad of British Columbia, 1991.
- [277]Finn W D L, Yoshida N, Lee M K W. DESRA-2C, Dynamic effective stress analysis of soil deposits with liquefaction beneath an impermeable layer with energy transmitting boundary [R]. Vancouver: University of British Columbia, 2000.
- [278]Matasovic N. D-MOD\_2—a computer program for seismic response analysis of horizontally layered soil deposits, earthfill dams, and solid waste landfills. User's Manual[R]. Lacey, WA: GeoMotions, LLC, 2006.
- [279]Matasovic N, Ordóñez G A. D-MOD2000: A computer program for seismic response analysis of horizontally layered soil deposits, earthfill dams, and solid waste landfills (User's Manual) [R]. Lacey, WA: GeoMotions, LLC, 2010.
- [280]Hashash Y M A, Musgrove M I, Harmon J A, et al. DEEPSOIL 6.0, User Manual[R]. [s.l.]: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2015: 1-116.
- [281]Mei X, Olson S M, Hashash Y M A. Evaluation of a simplified soil constitutive model considering implied strength and pore-water pressure generation for one-dimensional (1D) seismic site response [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2020, 57(7): 974-991.
- [282]Siddharthan R, Finn W D L. TARA-2: two dimensional nonlinear static and dynamic response analysis [R]. Vancouver: Soil Dynamics Group, University of British Columbia, 1982.
- [283]Finn W D L, Yogendrakumar M, Yoshida N, et al. TARA-3: a program for nonlinear static and dynamic effective stress analysis [R]. Vancouver: Soil Dynamics Group, University of British Columbia, 1986.

- [284] Finn W D L. Dynamic analysis in geotechnical earthquake engineering [C] //Earthquake Engineering and Soil Dynamics II -Recent advances in ground motion evaluation. [S.l.]: ASCE, 1988: 523-591.
- [285] Wang Z L. Bounding surface hypoplasticity model for granular soils and its applications[D]. Davis: University of California, 1990.
- [286] Iai S, Matsunaga Y, Kameoka T. Strain space plasticity model for cyclic mobility[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(2): 1-15.
- [287] Iai S. Seismic analysis and performance of retaining structures [J]. Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, 1998, 75(2): 1020-1044.
- [288] Iai S, Tobita T, Ozutsumi O, et al. Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(3): 360-392.
- [289] Iai S, Ueda K, Tobita T, et al. Finite strain formulation of a strain space multiple mechanism model for granular materials [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(9): 1189-1212.
- [290] Iai S, Ozutsumi O. Yield and cyclic behaviour of a strain space multiple mechanism model for granular materials [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2005, 29(4): 417-442.
- [291] Byrne P M. A Cyclic Shear-volume coupling and pore pressure model for sand[C]//Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and soil Dynamics. USA: St. Louis, Missouri, 1991: 47-55.
- [292] Motamed R, Stanton K, Almufti I, et al. Improved approach for modeling nonlinear site response of highly strained soils: Case study of the service hall array in Japan [J]. Earthquake Spectra, 2016, 32(2): 1055-1074.
- [293] Afshari K, Stewart J P. Insights from California vertical arrays on the effectiveness of ground response analysis with alternative damping models [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2019, 109(4): 1250-1264.
- [294] Constantopoulos I V, Roesset J M, Christian J T. A comparison of linear and exact nonlinear analyses of soil amplification[C]//Proceedings of the 5th World Conference in Earthquake Engineering. Rome: [s.n.], 1974.
- [295] Chang S W. Seismic response of deep stiff soil deposits [D]. CA: University of California, Berkeley, 1996.
- [296] Kwok O L A. Application of one-dimensional geotechnical modeling for site response predictions[D]. Las Angeles: University of California, 2007.
- [297] Huang H C, Shieh C S, Chiu H C. Linear and nonlinear behaviors of soft soil layers using Lotung downhole array in Taiwan[J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2001, 12(3): 503-524.
- [298] Zhang J F, Andrus R D, Juang C H. Normalized shear modulus and material damping ratio relationships [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(4): 453-464.
- [299] Kim B, Hashash Y M A, Stewart J P, et al. Relative differences between nonlinear and equivalent-linear 1-D site response analyses [J]. Earthquake Spectra, 2016, 32(3): 1845-1865.
- [300] 李兆焱, 袁晓铭, 王鸾, 等. 巨厚场地三种土震反应分析程序对比检验[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(4): 42-50.
- Li Z Y, Yuan X M, Wang L, et al. Verification of three methods for calculating earthquake response of soil layers in deep sites [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(4): 42-50. (in Chinese)
- [301] 王鸾, 袁近远, 汪云龙, 等. 基于软土地震实测记录的三种土震反应分析方法可靠性研究[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(5): 12-19.
- Wang L, Yuan J Y, Wang Y L, et al. Reliability comparison of three kinds of seismic response analysis methods for soil layers in soft soil site [J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(5): 12-19. (in Chinese)
- [302] 王鸾, 袁近远, 汪云龙, 等. 硬场地实测记录下几种土层地震反应分析程序可靠性对比[J]. 世界地震工程, 2018, 34(3): 161-168.
- Wang L, Yuan J Y, Wang Y L, et al. Verification of several programs for calculating earthquake response of soil layers in hard sites based on ground-motion records [J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(3): 161-168. (in Chinese)
- [303] Régnier J, Cadet H, Bard P Y. Empirical quantification of the impact of nonlinear soil behavior on site response [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2016, 106(4): 1710-1719.
- [304] Régnier J, Bonilla L F, Bertrand E, et al. Influence of the VS profiles beyond 30 m depth on linear site effects: Assessment from the KiK-net data [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(5): 2337-2348.
- [305] Li G J, Motamed R, Dickenson S. Evaluation of one-dimensional multi-directional site response analyses us-

- ing geotechnical downhole array data in California and Japan [J]. *Earthquake Spectra*, 2018, 34(1): 349-376.
- [306] Yee E, Stewart J P, Tokimatsu K. Elastic and large-strain nonlinear seismic site response from analysis of vertical array recordings [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, 139(10): 1789-1801.
- [307] 朱姣, 许汉刚, 陈国兴. 苏州第四纪深厚沉积层一维等效线性和非线性地震反应对比分析[J]. *岩土力学*, 2018, 39(4): 1479-1490, 1524.  
Zhu J, Xu H G, Chen G X. Comparison of 1D equivalent-linear and nonlinear seismic site responses for quaternary deep sediment layers in Suzhou region [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(4): 1479-1490, 1524. (in Chinese)
- [308] Miao Y, He H J, Liu H B, et al. Reproducing ground response using in-situ soil dynamic parameters [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2022, 51(10): 2449-2465.
- [309] Ruan B, Ji H W, Ye Y P, et al. A numerical separation method for incident wave of ground motion in time domain [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 163: 107550.
- [310] Markham C S, Bray J D, Macedo J, et al. Evaluating nonlinear effective stress site response analyses using records from the Canterbury earthquake sequence [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 82: 84-98.
- [311] 王彦臻, 赵丁凤, 陈国兴, 等. 一维场地地震反应非线性有效应力分析法及其验证[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(3): 502-510.  
Wang Y Z, Zhao D F, Chen G X, et al. A new nonlinear effective stress method for one-dimensional seismic site response analysis and its validation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(3): 502-510. (in Chinese)
- [312] Darendeli M B. Development of A New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves [D]. [S.l.]: The University of Texas at Austin, 2001.
- [313] Menq F Y. Dynamic properties of sandy and gravelly soils [D]. [S.l.]: The University of Texas at Austin, 2003.
- [314] Zakka W Z, Bray J D. Nonlinear effective stress site response analyses of liquefiable soils at the port of Wellington [C] // *Proceedings of Geo-Extreme 2025*. Long Beach, CA: ASCE, 2025.
- [315] Stewart J P, Afshari K. Epistemic uncertainty in site response as derived from one-dimensional ground response analyses [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021, 147(1): 04020146.
- [316] Ragozzino E. Nonlinear seismic response in the western L'Aquila basin (Italy): Numerical FEM simulations vs. ground motion records [J]. *Engineering Geology*, 2014, 174: 46-60.
- [317] Ruan B, Zhao K, Wang S Y, et al. Numerical modeling of seismic site effects in a shallow estuarine bay (Suai Bay, Shantou, China) [J]. *Engineering Geology*, 2019, 260: 105233.
- [318] Chang Y H, Tsai C C, Ge L, et al. Influence of horizontally variable soil properties on nonlinear seismic site response and ground motion coherency [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2022, 51(3): 704-722.
- [319] Şafak E. Local site effects and dynamic soil behavior [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(5): 453-458.
- [320] Pilz M, Cotton F. Does the one-dimensional assumption hold for site response analysis: A study of seismic site responses and implication for ground motion assessment using KiK-Net strong-motion data [J]. *Earthquake Spectra*, 2019, 35(2): 883-905.
- [321] Chávez-García F J, Faccioli E. Complex site effects and building codes: making the leap [J]. *Journal of Seismology*, 2000, 4(1): 23-40.
- [322] Xu J F, Bielak J, Ghattas O, et al. Three-dimensional nonlinear seismic ground motion modeling in basins [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2003, 137(1-4): 81-95.
- [323] Gélis C, Bonilla L F. Influence of a sedimentary basin infilling description on the 2-D P-SV wave propagation using linear and non-linear constitutive models [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 198(3): 1684-1700.
- [324] Roten D, Olsen K B, Day S M, et al. Expected seismic shaking in Los Angeles reduced by San Andreas fault zone plasticity [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(8): 2769-2777.
- [325] Oral E, Gélis C, Bonilla L F, et al. Spectral element modelling of seismic wave propagation in visco-elastoplastic media including excess-pore pressure development [J]. *Geophysical Journal International*, 2017, 211(3): 1494-1508.
- [326] Sun C G, Chung C K. Assessment of site effects of a shallow and wide basin using geotechnical information-based spatial characterization [J]. *Soil Dynamics and*

- Earthquake Engineering, 2008, 28(12): 1028-1044.
- [327] Madiati C, Facciorusso J, Gargini E. Numerical modeling of seismic site effects in a shallow alluvial basin of the northern Apennines (Italy) [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2017, 107(5): 2094-2105.
- [328] Kato B, Wang G. Regional seismic responses of shallow basins incorporating site-city interaction analyses on high-rise building clusters [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(1): 214-236.
- [329] Idriss I M, Lysmer J, Hwang R, et al. QUAD-4 - A computer program for evaluating the seismic response of soil structures by variable damping finite element procedures [R]. Report No. EERC 73-16, 1973, University of California, Berkeley, CA.
- [330] Hudson M, Idriss I M, Beikae M. QUAD4M - A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures incorporating a compliant base [R]. Davis, CA: University of California, 1992.
- [331] Hudson M, Idriss I M, Beikae M. User's manual for UAD4M: A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base [R]. CA: University of California Davis, 2003.
- [332] Lysmer J, Udaka T, Seed H B, et al. LUSH: A computer program for complex response analysis of soil-structure systems [R]. CA: University of California at Berkeley, 1974.
- [333] Lysmer J, Udaka T, Tsai C, et al. FLUSH-A computer program for approximate 3-D analysis of soil-structure interaction problems [R]. CA: University of California at Berkeley, 1975.
- [334] Kagawa T A, Mejia L H, Seed H B, et al. TLUSH: a computer program for the threedimensional dynamic analysis of earth dams [R]. CA: University of California at Berkeley, 1981.
- [335] Lysmer J, Tabatabaie M, Tajirian F, et al. SASSI-A system for analysis of soilstructure interaction [R]. CA: University of California at Berkeley, 1981.
- [336] Lysmer J, Ostadan F, Chin C. SASSI2000-A system for analysis of soil-structure interaction. Theoretical manual and users manual [R]. CA: University of California at Berkeley, 1999.
- [337] Ostadan F, Deng N. SASSI2010, Theoretical Manual: A system for analysis of soil-structure interaction [R]. CA: University of California at Berkeley, 2012.
- [338] Tajirian F F. Impedance matrices and interpolation techniques for 3-D interaction analysis by the flexible volume method [D]. CA: University of California at Berkeley, 1981.
- [339] Tabatabaie M. The flexible-volume method for dynamic soil-structure interaction analysis [D]. CA: University of California at Berkeley, 1982.
- [340] Ghiocel D M. ACS SASSII/PC: An advanced computational software for system analysis of soil-structure interaction on personal computers [R]. Cleveland, Ohio: ACS Report, 1997.
- [341] TechnologiesGP. ACS SASSI version 4.3.4 user manual [R]. G Ghiocel Predictive Technologies, Inc., Pittsford, New York 14534, 2025. <https://www.ghioceltech.com/>
- [342] Krahn J. Dynamic modelling with QUAKE/W: An engineering methodology [R]. Alberta, Canada: GEO-SLOPE/W International Ltd., 2004.
- [343] SEEQUENT. SIGMA/W Stress and deformation analysis software, 2021. <https://www.seequent.com/>
- [344] DIANA. Diana finite element analysis software, 2021. <https://dianafea.com/diana-software/>
- [345] LUSAS. Lusas infrastructure analysis and design software, 2021. <https://www.lusas.com/index.html>
- [346] Li X S, Shen C K, Wang Z L. Fully coupled inelastic site response analysis for 1986 lotung earthquake [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(7): 560-573.
- [347] Wang Z L, Chang C Y, Mok C. M. Evaluation of site response using downhole array data from a liquefied site [C] // Proceedings of 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. [S.l.]: [s.n.], 2001.
- [348] Ishihara K, Cubrinovski M, Nonaka T. Characterization of undrained behaviour of soils in the reclaimed area of Kobe [J]. Soils and Foundations, 1998, 38 (Special): 33-46.
- [349] Shibata T, Oka F, Ozawa Y. Characteristics of ground deformation due to liquefaction [J]. Soils and foundations, 1996, 36(Special): 65-79.
- [350] 战吉艳, 陈国兴, 刘建达, 等. 远场大地震作用下大尺度深软场地的非线性地震效应分析 [J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3229-3238.
- Zhan J Y, Chen G X, Liu J D, et al. Analysis of nonlinear seismic effects of large-scale deep soft site under far-field large earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3229-3238. (in Chinese)
- [351] 陈国兴, 庄海洋. 基于 Davidenkov 骨架曲线的土体动力本构关系及其参数研究 [J]. 岩土工程学报, 2005,

- 27(8): 860-864.
- Chen G X, Zhuang H Y. Developed nonlinear dynamic constitutive relations of soils based on Davidenkov skeleton curve [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 860-864. (in Chinese)
- [352] Hussin S F, Birasamy G, Hamid Z. Design of butterfly band-pass filter [J]. Politeknik & Kolej Komuniti Journal of Engineering and Technology, 2016, 1(1): 32-46.
- [353] Lv H, Chen S L. Analysis of nonlinear soil-structure interaction using partitioned method [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 162: 107470.
- [354] Lv H, Chen S L. Seismic response characteristics of nuclear island structure at generic soil and rock sites [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2023, 22(3): 667-688.
- [355] Wang Y C, Chen Q J, Zhao Z P, et al. Multi-location seismic isolation approach and design for underground structures employing the negative-stiffness amplification system [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 122: 104395.
- [356] Wang Y Z, Jiang Z J, Chen W Y, et al. Nonlinear seismic response characteristics of Jintang strait seabed site considering seawater-seabed coupling effects [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2026, 200: 109839.
- [357] Zhuang H Y, Zhao D F, Chen G X, et al. Three-dimensional numerical investigation on seismic response of subway station in liquefied soil by the loosely coupled effective stress model [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2023, 27(13): 3607-3631.
- [358] Wang Y C, Chen Q J, Zhao Z P, et al. A resilient column with angular friction damper for seismic performance upgrading of underground structures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 116: 104085.
- [359] Taslimi A, Petrone F, Pitarka A. Characteristics of vertical ground motions and their effect on the seismic response of bridges in the near-field: A state-of-the-art review [J]. Journal of Bridge Engineering, 2024, 29(6): 03124001.
- [360] 陈国兴, 刘雪珠, 朱定华, 等. 江苏长江以南地区新近沉积土动剪切试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(4): 745-750.
- Chen G X, Liu X Z, Zhu D H, et al. A study on dynamic shear of recently deposited soils for southern Jiangsu Province along Yangtze River [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(4): 745-750. (in Chinese)
- [361] 张岩, 陈国兴, 赵凯, 等. 考虑地层变异和趋势非线性的海床波速结构非平稳随机场模拟方法 [J]. 地球科学, 2024, 49(11): 4225-4237.
- Zhang Y, Chen G X, Zhao K, et al. Non-stationary random field simulation method of seabed site shear wave velocity structures considering stratigraphy variation and nonlinear trend [J]. Earth Science, 2024, 49(11): 4225-4237. (in Chinese)
- [362] 张岩, 陈国兴, 赵凯, 等. 海洋土动剪切模量比和阻尼比预测不确定性特性 [J]. 工程力学, 2023, 40(5): 161-171.
- Zhang Y, Chen G X, Zhao K, et al. Uncertainties of shear modulus reduction and damping ratio curves of marine soils [J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(5): 161-171. (in Chinese)
- [363] Liu W X, Chen Q S, Wang C F, et al. Spatially correlated multiscale Vs30 mapping and a case study of the Suzhou site [J]. Engineering Geology, 2017, 220: 110-122.
- [364] Zhang Y, Zhao K, Peng Y J, et al. Dynamic shear modulus and damping ratio characteristics of undisturbed marine soils in the Bohai Sea, China [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, 21(2): 297-312.
- [365] 李晓飞, 孙锐, 袁晓铭. 砂土动剪切模量比和阻尼比共振柱试验误差研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(11): 155-161, 168.
- Li X F, Sun R, Yuan X M. Resonant column test error analysis for dynamic shear modulus ratio and damping ratio of sand [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(11): 155-161, 168. (in Chinese)
- [366] Darvasi Y. Shear-wave velocity measurements and their uncertainties at six industrial sites [J]. Earthquake Spectra, 2021, 37(3): 2223-2246.
- [367] 孙锐, 袁晓铭, 刘晓键. 动剪切模量比与剪切波速对地震动影响及等量关系研究 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1267-1274.
- Sun R, Yuan X M, Liu X J. Effects of dynamic shear modulus ratio and velocity on surface ground motion and their equivalent relations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1267-1274. (in Chinese)
- [368] Rathje E M, Kottke A R, Trent W L. Influence of input motion and site property variabilities on seismic site response analysis [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(4): 607-619.

- [369]Guzel Y, Rouainia M, Elia G. Effect of soil variability on nonlinear site response predictions: Application to the Lotung site [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 121: 103444.
- [370]Sun Q Q, Guo X F, Dias D. Evaluation of the seismic site response in randomized velocity profiles using a statistical model with Monte Carlo simulations [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 120: 103442.
- [371]Boushehri R, Motamed R, Ellison K, et al. Estimating epistemic uncertainty in soil parameters for nonlinear site response analyses: Introducing the Latin Hypercube Sampling technique [J]. *Earthquake Spectra*, 2022, 38(4): 2422-2450.
- [372]Marosi K T, Hiltunen D R. Characterization of spectral analysis of surface waves shear wave velocity measurement uncertainty [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(10): 1034-1041.
- [373]Johari A, Javadi A A, Elmi M, et al. An analytical approach to reliability assessment of shear wave velocity relationship [J]. *Scientia Iranica*, 2013, 20(6): 1685-1694.
- [374]Rao V D, Choudhury D. Estimation of shear wave velocity and seismic site characterization for new nuclear power plant region, India [J]. *Natural Hazards Review*, 2020, 21(4): 06020004.
- [375]Toro G R. Probabilistic models of the site velocity profiles for generic and site-specific ground-motion amplification studies [R]. Upton, NY: Brookhaven National Laboratory, 1995.
- [376]Toro G R. Uncertainty in shear-wave velocity profiles [J]. *Journal of Seismology*, 2022, 26(4): 713-730.
- [377]Tran T T, Salman K, Han S R, et al. Probabilistic models for uncertainty quantification of soil properties on site response analysis [J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2020, 6(3): 04020030.
- [378]Hamidpour S, Soltani M. Probabilistic assessment of ground motions intensity considering soil properties uncertainty [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 90: 158-168.
- [379]Atik L A, Abrahamson N, Bommer J J, et al. The variability of ground-motion prediction models and its components [J]. *Seismological Research Letters*, 2010, 81(5): 794-801.
- [380]Baltay A S, Hanks T C, Abrahamson N A. Uncertainty, variability, and earthquake physics in ground-motion prediction equations [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2017, 107(4): 1754-1772.
- [381]陈国兴, 刘雪珠, 王炳辉. 土动力参数变异性对深软场地地表地震动参数的影响 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2007, 27(1): 1-10.  
Chen G X, Liu X Z, Wang B H. Effect of variability of soil dynamic parameters on ground motion parameters for deep soft sites [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2007, 27(1): 1-10. (in Chinese)
- [382]Li W, Assimaki D. Site- and motion-dependent parametric uncertainty of site-response analyses in earthquake simulations [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(3): 954-968.
- [383]Bazzurro P, Cornell C A. Ground-motion amplification in nonlinear soil sites with uncertain properties [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(6): 2090-2109.
- [384]Hu H Q, Huang Y. PDEM-based stochastic seismic response analysis of sites with spatially variable soil properties [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 125: 105736.
- [385]Ishibashi I, Zhang X J. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay [J]. *Soils and Foundations*, 1993, 33(1): 182-191.
- [386]Wang H X, Wang F B, Yang H, et al. Site response analysis: Uncertain motions propagating through uncertain elastoplastic soil [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2023, 415: 112706.
- [387]Armstrong P J, Frederick C O. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect [R]. Technical report RD/B/N/731, Berkeley, California: Berkeley Nuclear Laboratories, C.E.G.B, 1966.
- [388]国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录(公元前23世纪—1911年) [M]. 北京: 地震出版社, 1995.
- [389]Chen G X, Zhu J, Qiang M Y, et al. Three-dimensional site characterization with borehole data-A case study of Suzhou area [J]. *Engineering Geology*, 2018, 234: 65-82.

(本文编辑:赵霞)