

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.022

场地地震反应分析研究现状及展望*

于生生, 张熙胤, 陈兴冲, 王 义, 王万平

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 场地条件对结构震害的影响已成公认的事实, 如何定量的进行场地地震反应分析成为地震工程学中亟待解决的问题之一, 而在场地地震反应分析中确定地震动输入至关重要。针对场地条件和地震动输入对场地地震反应的具体影响、场地地震反应分析方法等方面的研究现状进行了系统总结。已有研究表明, 场地条件和地震动输入对场地地震反应分析结果有显著影响。但目前仍存在的问题有: 在冻土区进行场地地震反应分析时未充分考虑冻土层的影响效应; 缺乏合理的地震动模型来准确描述实际地震动; 尚未明确地震波入射角度对场地地震反应的影响规律; 目前广泛使用的等效线性化方法不能完全反应土体在地震动作用下的真实运动状态而使其计算结果不尽合理。结合以上问题对还需进一步研究的内容进行了展望, 为场地地震反应分析未来的研究工作提供参考。

关键词: 场地地震反应; 场地条件; 地震动输入; 等效线性化方法; 场地土非线性

中图分类号: TU42, P65 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0181-12

Present Research Situation and Prospect on Analysis of Site Seismic Response

YU Shengsheng, ZHANG Xiyin, CHEN Xingchong, WANG Yi, WANG Wanping

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The influence of site conditions on structural seismic damage has become a well-known fact. How to conduct quantitative analysis of site seismic response has become one of the urgent problems to be solved in seismic engineering. This paper gives a summary of the research status of the site conditions and the influence of ground motion input on the site seismic response and the analysis methods of the site seismic response. It is shown that site conditions and ground motion input have a significant impact on analytical results of site seismic response. However, there are still some problems: The effects of the frozen soil layer are not fully considered when the site seismic response analysis is carried out in the frozen soil areas; there is no reasonable ground motion model to describe the actual ground motion accurately; the influence law of incident angle of seismic wave on seismic response of site has not been clarified; the widely used equivalent linearization method cannot fully reflect the real motion state of soil mass under the action of ground motion, so its calculation results are not reasonable. Combined with the above problems, the further research contents are prospected, which provide reference

* 收稿日期:2019-11-13;修回日期:2020-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808273)、中国博士后科学基金面上项目(2018M643767)、兰州交通大学“天佑青年托举人才计划”基金(2019)资助

作者简介: 于生生(1996—),男,硕士研究生。主要从事寒区桥梁抗震方面的研究。E-mail:1656164005@qq.com

通讯作者: 张熙胤(1989—),男,副教授,博士。主要从事寒区工程抗震方面的研究。E-mail: zhangxiyin@mail.lzjtu.cn

for the future research of site seismic response analysis.

Keywords: site seismic response; site conditions; ground motion input; equivalent linearization method; site soil nonlinear

引言

地震是危及人民生命和财产的突发式自

然灾害,地震发生时产生的巨大能量使得地表产生变形、工程结构遭受破坏以及引发一系列次生灾害而给我们带来巨大损失,如图1所示。



(a) 昆仑山地震引起的地表破坏



(b) 汶川地震造成的结构破坏



(c) 地震引发的次生灾害

图1 地震引发的地表及结构破坏

Fig.1 Ground surface and structural damage caused by earthquakes

我国东临太平洋地震带,南接欧亚地震带,是一个多地震国家。历史上全国绝大部分地区都发生过较强的破坏性地震,有不少地区的地震活动非常激烈。统计数据表明,自1900年以来在中国及边邻地区发生8.0级及以上地震多达20次^[1]。近年来,我国发生的许多大地震造成了大量严重的工程破坏,例如8.0级汶川大地震、7.1级玉树地震和7.0级九寨沟地震造成了大面积的工程结构破坏^[2-4]。

结构破坏的主要原因之一是地面运动产生的惯性力作用到结构上,而地面运动是由于地震时震源释放的能量以地震波的形式通过土层传至地表造成了地面的颠簸和摇晃。当场地条件不同时,地震波到达地表的路径和时间不同,反映到地表的地震动必然存在差异,势必会造成结构震害程度和震害分布的差异性,这种差异性在多次地震中已经得到证实。因此在进行结构抗震研究之前,必须先进行场地土层地震反应分析,以探明场地条件和地震动输入对场地地震反应的具体影响,确定出合理的上部结构地震动输入参数。但是在土层地震反应分析计算中,地震动的输入、计算模型的选择和场地介质特征参数的确定均存在着很大的不确定性,使得场地地震反应分析结果有了很大的不确定性,给场地地震反应分析带来了极大的困难。这就要求地震学家们不断改进场地地震反应分析方法,来寻求一种具有结果可靠、原则合理、计算简单、工程

应用方便等特点的分析方法,以满足工程界发展的需要。

本文从场地条件和地震动输入对场地地震反应的影响、目前主要采用的地震反应分析方法等方面进行了全面归纳,分析总结出国内外场地地震反应分析研究现状及目前仍存在的问题,并对存在的问题提出了可能解决的办法,为场地地震反应分析的进一步研究提供参考。

1 场地条件对场地地震反应的影响

场地是地震波传播的介质,不同的场地对地震波的传播有着不同的影响,其影响主要表现为对场地地震波的放大或缩小,且场地条件直接影响着地震灾害程度的分布。早在1906年美国旧金山大地震和1923年日本关东大地震中,地震学家就发现不同场地上的建筑物的毁坏程度差异很大^[5-6]。在随后全球内发生的一系列大地震都证实了上述结果,场地条件对上部结构地震震害的影响已成公认的事实,因此在进行地震设计时应充分考虑场地条件的影响^[7]。

1.1 场地土层条件对场地地震反应的影响

(1) 土体类型的影响

土体条件不同,场地土的动力学参数也不一

致,不同类型土体对地震反应有不同的放大或缩小作用。尹力峰等^[8]对砂砾石场地和粉土场地两场地地震反应谱特征进行对比分析,发现这两类土体场地的强度和周期特征存在很大差异;吕西林等^[9]对沙土液化场地的地震响应进行了非线性分析,分析结果表明砂土有滤波和隔震的作用。另外,不同土体对场地和结构的震害程度也不同,通过分析通海大地震和唐山大地震的震害调查结果,发现在相同震级下相较于场地较软弱土层,硬岩处的地震动振幅更小、持续时间更短,引发的地面震害程度也较轻^[10]。

(2) 土层厚度的影响

在国内外抗震设计规范中,场地地震动参数是标定设计反应谱的重要依据,覆盖土层结构及厚度对场地地表地震动参数有着重要的影响^[11-13]。H.Dezfulian等^[14]研究发现,场地地震响应受覆盖土层的厚度和性质的影响显著。王国新等^[15]分析总结了表层土厚度的变化对不同场地地表峰值加速度的影响规律,分析发现不同场地类别条件下表层土厚度的变化对地表峰值加速度影响较大,其影响程度与覆盖层厚度有一定关系。后来也有学者通过构造不同填土高度计算剖面来分析填土高度对场地地表放大效应的影响,结果显示,在一定高度范围内随填土高度的增加场地地震放大系数呈递减趋势^[16]。这充分表明土层的厚度变化对地表地震动的影响十分显著。

(3) 软弱夹层的影响

即使是场地类别一致,但由于软弱夹层的存在及其位置的不同,地震作用及地震动参数都会有很大的差异性,J.F.Cassidy等^[17]研究发现在相对较窄的频率范围内,与固结土相比,软厚土层位置的峰值放大范围比较小,在较高的频率范围很少放大或没有放大,甚至在许多情况下有轻微的衰减。在场地类别划分时必须充分合理的考虑软弱土层的影响,为此我国学者对这一课题进行了深入研究,相关研究结果表明软弱夹层处于地面一定深度时确实能够起到隔震作用,且夹层越厚隔震效果越明显^[18-20]。但是,软弱夹层并非总是会减小场地的地震响应^[21],有研究表明场地深部夹层对高频地震动有减震作用,而浅部夹层对高频地震动有明显的放大作用^[22]。杨笑梅等^[23]研究发现软弱夹层虽然能够减弱输入的普通地震波加速度峰值,但是它会放大长周期地震动的长周期成分,与上部结构发生共

振而使得上部结构的地震反应加大。

(4) 冻土层的影响

冻土层的存在,对场地的地震反应将产生一定的影响,具体表现为场地地震加速度峰值、反应谱峰值以及地面放大系数的改变^[24-25]。冻土层的存在也会使地震波速发生变化,N.E.Zarubin等^[26]研究了地震波速度与冻土含冰量和温度之间的关系,发现土体从融化到冻结状态的转变过程伴随着弹性波速突变。A.M.Lebanc等^[27]在加拿大魁北克多年冻土区通过试验方法研究了体波波速以及高温冻土的动力学特性。我国学者通过对青藏铁路沿线多年冻土区场地进行地震反应分析,发现多年冻土区地震动加速度反应谱的短、中周期成分所占比例较大,随着地温的降低,冻土区地震动加速度反应谱幅值普遍减小^[28-29],且冻土层的存在使冻土场地放大效应有所减小^[30-31]。

1.2 局部地形地质条件对场地地震反应的影响

1985年墨西哥地震中,在震中距400公里以外的墨西哥城遭到了严重的破坏,震害程度远远大于震中区和墨西哥城周围地区,其原因正是该城坐落于一个很深、很软的沉积型盆地之上^[32];1995年埃吉翁地震中,靠近城镇高架区边缘的运动被放大47%,而在滨水低海拔区,该运动减弱57%~67%^[33]。由此可见,局部场地效应在与地震事件相关的损害分布和震级中的作用至关重要。

局部不规则地形对地震动影响十分显著,K.J.Zahradn等^[34]研究了一个简单山脉对SH地震波的影响,表明不规则地形会引起地震波强烈的空间变异性。刘中宪等^[35]以半空间峡谷与凸起地形对平面SV波的高频散射为例,讨论了峡谷及凸起周围地震波宽频散射基本特征,得出了峡谷、凸起地形的存在使得高频地震波能量发生局部聚焦效应,在峡谷角点或凸起顶部附近波的相干效应强烈,从而造成地震动局部放大的结论。D.M.Boore^[36]和刘晶波^[37]通过分析多个山梁场地地形对地面运动的影响,发现相邻不规则地形会使地面运动进一步放大。同样巴振宁等^[38]通过研究任意多个凸起地形对平面P波散射的影响,发现凸起地形间存在动力相互作用,多个凸起地形与单一凸起地形对应的位移幅值及放大谱均存在显著差异,且随着两侧凸起高度的增大、凸起间距的减小以及凸起个数的增多,凸起间动力相互作用会进一步加强,位移幅值

加大。然而,凸起地形不总是会加大场地的地震效应,也有学者研究发现凸起地形对其附近区域有抑制作用,且随坡高和坡角的加大,抑制作用呈增强趋势^[39-40]。为了揭示凹陷类地形的地震波动效应,地震工作者们对凹陷地形在平面SH波入射下其动力响应进行了研究,认为SH波入射角 γ 和输入波的半波长与半圆形曲率之比 η 是影响地表运动的两个主要因素^[41]。通过研究分析凹陷地形的几何形状和其沉积层排列次序对地震时地面运动影响,发现凹陷地形对入射波、场地的卓越频率和地表位移幅值曲线有明显改变^[42-43]。盆地在地震过程中容易产生面波,发生盆地边缘效应和聚集效应,在盆地中部处地震动幅值被明显放大,地震动持时加长,会加大对长周期结构的破坏^[44-46]。刘中宪等^[47]在近期研究中发现,复杂形状起伏盆地不同位置对盆地地表位移放大作用也有区别,地震波入射深盆地中心时地表点的放大效应较为明显,浅盆地的边缘地表点放大作用更加强烈。有学者将盆地简化成等腰梯形,建立了二维平面应变模型,研究了沉积盆地的场地地震反应,结果发现盆地的高度和宽度对其场地地震反应影响显著^[48],另外盆地坡角对盆地地表加速度峰值分布模式有重要影响,即盆地坡角较小时盆地边缘地震效应最大而中部相对较小,随着坡角的增大,地震反应最大位置逐渐由盆地边缘向盆地中部转移^[49]。研究河谷地形对土层地震反应的影响,对跨河谷结构的抗震设计和计算具有非常重要的意义。M.Rassem等^[50]利用三个工程模型对有限宽冲积河谷的场地地震反应进行了研究,得知冲积河谷场地对土壤放大和地表运动强度有显著影响。张宁等^[51]计算并对比了风化与未风化河谷的地表位移反应,发现在河谷两岸的地面运动受地形效应影响较大,而在风化土层范围内地面运动主要由土层的放大效应所决定。J.Bielak等^[52]提出在模拟场地地震时必须充分考虑河谷有限横向范围引起的场地效应。张郁山^[53-54]研究发现当波的入射频率较高时,由于谷地散射波间干涉作用会使地面运动出现能量聚集现象。另外河谷深宽比的增加以及高坡角都会使波在传播时的衍射、散射及反射等作用加大,且坡高对谷底和山顶地面峰值加速度有一定影响^[40]。

以上相关研究均表明,场地条件会显著改变地震动的特性,如地震动的加速度幅值、地震动的持续时间和地震动的频谱成分等,从而影响到场

地和结构的震害方式及震害程度。因此,在结构及地基抗震设计中应该充分地考虑工程场地条件的影响。

2 地震动输入对场地地震反应的影响

场地条件是影响地震反应的重要因素之一,而地震动输入的确定是工程结构抗震设计及结构可靠性估计的一个关键环节,输入的地震动不同,场地土的地震反应也不同。此外,数值分析方法是目前地震工作者进行场地地震反应分析采用的主要研究方法,但是在使用该方法研究时计算结果的精度和可靠度受到了地震动输入的直接影响。因此,研究地震动输入对场地地震反应的影响具有重要的理论意义和实际应用价值。

2.1 地震动特性的影响

地震动是由震源释放出来的地震波引起的地面运动,它是由不同频率、不同幅值在一个有限时间范围内的集合,所以通常以幅值、频率特性和持续时间三个参数来表达地震动特性。国内外许多学者针对地震动输入对地面运动影响这一课题进行了深入研究^[55-56],通过分析地震动持时对场地非线性地震响应的影响,发现相比短持时输入地震动的场地地表加速度和高频段的加速度反应谱,长持时的计算结果明显较大^[57]。同时研究了频率特性对场地设计地震动反应谱的影响,发现以高频成分为主的历史地震动和以低频为主的人工拟合波对反应谱的影响存在很大差异,以高频成分为主的历史地震动在短周期阶段具有集中放大的影响效果^[58]。另外,地震动强度不同,相同场地条件下的地震反应不同,得到的反应谱形状也不一致^[59-60]。

2.2 波速及入射角度的影响

为了更准确反映场地地形地貌对地震反应的影响,白建方等^[61]研究了基岩在采用不同行波输入下的场地地震反应特点,研究表明,不同的行波波速和对地表加速度、相对位移峰值和相位有不同程度影响。剪切波速不仅能够反映地基土的强度、变形特性,也是土层动力反应中的重要参数,合理准确地给出地震动参数在土层地震反应分析中有着极其重要的作用。兰景岩等^[62]进行了剪切波速对

设计反应谱的影响研究, 结果发现随着剪切波速的增大, 其特征周期呈减小趋势。曾金艳等^[63]研究了不同基岩剪切波速条件下场地地震反应结果, 研究表明随着基岩波速的增加, 地表水平峰值加速度和加速度反应谱值增大, 且增大的幅度随着输入的地震动强度的增大而减小。在对场地地震反应研究时, 大部分都建立在地震波垂直向上传播的基础上, 这样将地震波简单看作垂直向上入射的波体很难反映工程实际, 应当考虑地震波以一定角度倾斜入射^[64-65]。S.Takahiro等^[65]和X.Jin等^[66]根据地震记录分析得到了实际地震波入射角的变化范围和入射角平均值。E.Heymsfield^[67]研究了SH波倾斜入射时倾斜基岩对地表位移的影响, 发现地表位移幅值在SH波入射角为 60° 时达到最大。张建经等^[49]研究发现盆地地表加速度峰值比例系数最大值大致出现在入射角为 $5\sim 25^\circ$ 。

以上研究表明, 在工程实际中, 地震动输入对场地地震反应分析中的地表地震动峰值加速度和加速度反应谱等有着不可忽略的影响作用, 在抗震设计中也应该合理地考虑地震动输入条件的影响。

3 场地地震反应分析方法

工程场地是地震波传播的载体, 也是各类构筑物和建筑物的承载体, 在评估工程结构的安全性能时, 必须给出准确合理的工程场地地震动参数。这就要求地震学家和地震工作者们不断改进场地地震反应分析方法, 来寻求一种具有结果可靠、原则合理、计算简单、工程应用方便等特点的分析方法, 以满足工程界发展的需要。场地地震反应的分析方法归纳起来主要有确定性分析方法和不确定性分析方法两大类, 确定性分析方法是用时间的确定性函数来描述地震动以得到场地的地震反应, 不确定性分析方法是利用随机振动等相关理论, 通过进行土层的随机地震分析而得到的概率参数, 进而得到结构在概率意义上的反应值。

3.1 确定性分析方法

由于土的非线性特性, 强震作用下土层地震反应谱比曲线的峰值点向低频移动, 同时谱比曲线幅值有所下降^[68-70]。因此想要正确估计场地地震反应, 就必须合理模拟土层的非线性特性, 目前考虑土体非线性特性的主要方法是等效线性化法。等

效线性化方法由I.Idriss等^[71]首次提出, 该方法通过多次弹性迭代计算使土最终的弹性模量和阻尼比与其应力水平相匹配, 从而得到非线性分析的近似解。在国外, M.H.T.Rayhani等^[72]采用等效线性法和非线性法对考虑土层非线性特性的地基响应进行了分析, 并用FLAC中的完全非线性方法对地震波在土层中传播时的非线性土性进行了评价, 并与等效线性方法的响应进行了比较, 比较结果表明, 等效分析和非线性分析的运动响应谱相似, 在 $0.3\sim 1.5$ s的周期范围内出现峰值, 但在长周期内非线性分析的放大水平低于等效线性方法。J.A.Pries^[73]将Bouc-wen模型的随机等效线性化方法推广到Bouc-wen光滑滞回模型, 使其能更好地反映循环和随机动力荷载作用下土体的非线性应力应变特性。Turkey Flat试验场地位于美国加州Parkfield地区附近, 处于一个浅硬泥土冲积河谷中, A.O.L.Kwok等^[74]利用一维等效线性化方法模拟了该试验场地, 数值结果显示, 模拟结果和地震记录值非常接近。为了使计算结果更加合理, 不少学者对等效线性化方法进行了改进, 白建方等^[61]采用等效线性化模型描述了土体的非线性特性。陈国兴等^[75]提出了分时段等效线性有效应力法, 该方法能够有效降低等效线性模型产生的虚拟共振效应。王笃国等^[76]和蒋通等^[77]提出了一种考虑频率相关性的等效线性化方法, 使得计算结果更精确。张如林等^[78]建立了Rayleigh阻尼模型对等效线性化方法进行改进, 并编制了等效线性化方法的计算程序。

等效线性化方法由于其计算原理明确、迭代思路简单、各参数获取方便、计算量少、方法易于掌握, 且在中硬场地中强震过程中数值模拟结果较为精确等优点成为目前主要的场地地震分析方法^[79]。在中小震情况下, 此方法可以较真实反映实际情况, 但在大震情况下它不能真实反映土体非线性对地震反应的影响, 其计算结果与实际记录偏差很大, 迭代过程容易出现死循环、高频段成分结果误差较大等^[80-82]。从长远来看, 其本身存在的诸多缺点必将影响其今后的发展与应用。

3.2 不确定性分析方法

地震动是一个非常复杂的随机过程, 由此引起的场地土和地基土的反应也是一个随机过程, 采用随机过程理论分析方法才能更切合工程实际。G.W.Housner^[83]首次提出将地震时的地面运动作为

一个平稳随机脉冲过程来模拟,后来就有了许多学者采用随机理论来研究地震时地面运动问题。E. M. Rathje 等^[84]将采用 Brune 谱作为输入的随机振动场地响应与采用不同输入岩石运动组合的传统场地响应分析进行了比较,结果表明,随机振动场地响应分析可以提供一个响应谱,该响应谱类似于使用一组输入岩石运动进行的分析的中值响应谱,但是只有当用来描述随机振动的地震动参数与输入的岩石运动相一致时才能得到准确的比较结果。N. Deng 等^[85]提出了一种新的基于随机振动理论的场地地震反应分析方法,该方法不需要时间历程作为输入,设计响应谱可直接用于分析。到了 90 年代,我国学者才将随机过程理论应用于场地的地震反应分析中,曾心传等^[86]第一次提出土层的剪切模量随深度呈指数函数分布时场地土的随机地震反应分析方法,研究了非均匀土层对地震的动力响应问题。门玉明等^[87]将此方法用在剪切模量随深度呈线性变化时的场地地震反应分析中。黄义等^[88]利用随机振动理论研究了成层土层对地震的随机动力反应问题。之后随机振动分析方法日益受到重视,得到了地震研究者的广泛应用^[47, 89]。但是随机理论应用于土层地震反应分析时,需要对某些环节简化处理才能进行,比如将场地土简化为一维集中质量模型、采用等效线性化的办法处理土体非线性、假定土层的剪切模量随深度一定规律分布等简化手段^[90]。

4 结论及展望

4.1 结论

通过对场地地震反应国内外研究现状的综述,可以得到以下主要结论:

(1)不同土层条件对地震反应有不同的放大或缩小作用,总的来说,软土层对场地运动的放大作用一般比坚硬土层的大,但当软弱夹层处于地面一定深度时能够起到隔震作用,而且夹层越厚隔震效果越明显,另外冻土层的存在也会使场地放大效应有所减小。

(2)山梁、河谷及盆地等局部不规则地形对地震动影响十分显著,其原因是局部不规则地形的存在改变了地震波的传播路径,致使其在地表的汇聚或发散,从而形成地震增强区或减弱区。

(3)输入的地震动特性对场地地震反应分析中

的地震动反应谱有着显著的影响作用,其直接影响上部结构地震动输入参数的确定,在抗震设计中应合理考虑地震动特性输入的影响。

(4)在进行场地地震反应分析时地震波入射角对计算结果有很大影响,一般情况下垂直入射的波体不能反应工程实际,应考虑地震波以一定倾角入射。

(5)等效线性化方法以其自身诸多优点而被广泛采用,在土体较硬、地震动较小的情况下,计算结果比较精确,但是在强震作用下它不能真实的反应土体的非线性特性,其计算结果与实际偏差较大。

(6)不确定性分析方法利用随机振动相关理论来模拟地震时的地面运动使其更切合工程实际,但一般需要基于一些特定假设,这种方法目前还不太适用于真非线性和复杂场地情况。

4.2 展望

(1)已有大量文献研究了场地条件对地震反应的影响,但由于目前对冻土区场地地震动特性的认识仍不够明确,且缺乏相应的模型试验验证,在进行场地地震反应分析时未充分考虑冻土的影响效应,解决这一问题的关键是要找出合理的地震动强度指标来有效反映地震波中的冻土场地效应,并且将具有冻土场地效应的地震动用理论模型表达出来;

(2)目前广泛采用的人造地震波掺入了很多人造因素,造成了地震动输入的不确定性,但在已有的地震记录数量远不能满足工程实际需求的情况下,发展合理的地震动模型就更为必要;

(3)地震波的输入是最为关键的问题,其直接影响计算结果的精度和可靠度,大多数工程抗震设计中把入射地震波简化为垂直入射的体波是不合理的,因此有必要通过对地震波垂直入射和倾斜入射作用下的场地反应进行对比分析,探明地震波入射角对场地反应的影响规律;

(4)等效线性化方法在某些情况下不能完全反应土体在地震动作用下的真实运动状态,解决这一问题的关键是发展合理的土体动力本构模型来描述土体动力非线性特性。

参考文献:

- [1] 董治平,程建武.中国 8 级地震时空活动特点[J].国际地震动态,2018,(4):34-38.

- Dong Zh P, Cheng J W. Characteristics of space-time activity of magnitude 8 earthquakes in China [J]. Recent Developments in World Seismology, 2018, (4): 34-38. (in Chinese)
- [2] 王威,薛建阳,章红梅,等. 框架结构在汶川 5.12 大地震中的震害分析及抗震启示[J]. 世界地震工程, 2009, 25(4):131-135.
Wang W, Xue J Y, Zhang H M, et al. Seismic design and lessons learnt from the earthquake disaster of frame structures in 5.12 Wenchuan earthquake [J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(4): 131-135. (in Chinese)
- [3] 郑建军,廖永石,杜雷,等. 青海玉树地震民用建筑震害调查和分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(增 1): 1051-1054.
Zheng J J, Liao Y Sh, Du L, et al. Investigation and analysis of building damage in Yushu city caused by earthquake [J]. Building Structure, 2013, 43(Sup 1): 1051-1054. (in Chinese)
- [4] 袁小祥,王晓青,丁香,等. 基于无人机影像的九寨沟地震建筑物震害定量评估[J]. 中国地震, 2017, 33(4): 582-589.
Yuan X X, Wang X Q, Ding X, et al. Quantitative assessment of building damage in disaster area of the Jiuzhaigou earthquake based on UAV images [J]. Earthquake Research in China, 2017, 33(4): 582-589. (in Chinese)
- [5] Inkersley A. Effects of the earthquake and fire upon the city of San Francisco and its buildings [J]. Scientific American, 1906, 94(20): 418-420.
- [6] Sato T, Graves R W, Somerville P G. Three-dimensional finite-difference simulations of long-period strong motions in the Tokyo metropolitan area during the 1990 Odawara earthquake (MJ 5.1) and the great 1923 Kanto earthquake (MS 8.2) in Japan [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(3): 79-607.
- [7] Rodriguez-marek A, Bray J D. Seismic site response for near-fault forward directivity ground motions [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(12): 1611-1620.
- [8] 尹力峰,王坚,谭明,等. 不同场地条件下的土层地震反应对比分析[J]. 内陆地震, 2007, 21(4):297-303.
Yin L F, Wang J, Tan M, et al. Contrast analysis on earthquake response indifferent site condition [J]. Inland Earthquake, 2007, 21(4): 297-303. (in Chinese)
- [9] 吕西林,任红梅,李培振,等. 液化场地自由场体系的数值分析及振动台试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2):4046-4053.
Lyu X L, Ren H M, Li P Zh, et al. Numerical analysis of free field system in liquefiable site and validation of shaking table tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Sup 2): 4046-4053. (in Chinese)
- [10] 胡聿贤,孙平善,章在墉,等. 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):34-41.
Hu Y X, Sun P Sh, Zhang Z Y, et al. Effects of site conditions on earthquake damage and ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1980(1): 34-41. (in Chinese)
- [11] 薄景山,李秀领,刘红帅. 土层结构对地表加速度峰值的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3):35-40.
Bo J Sh, Li X L, Liu H Sh. Effects of soil layer construction on peak accelerations of ground motions [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(3): 35-40. (in Chinese)
- [12] 薄景山,李秀领,刘德东,等. 土层结构对反应谱特征周期的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5): 42-45.
Bo J Sh, Li X L, Liu D D, et al. Effects of soil layer construction on characteristic periods of response spectra [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(5): 42-45. (in Chinese)
- [13] 薄景山,李秀领,刘德东,等. 土层结构对反应谱平台值的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(4):29-33.
Bo J Sh, Li X L, Liu D D, et al. Effects of soil layer construction on platform value of response spectra [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(4): 29-33. (in Chinese)
- [14] Dezfulian H, Seed H B. Response of nonuniform soil deposits to travelling seismic waves [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1969, 97(SM1):27-46.
- [15] 王国新,黄坤朋. 表层土结构对地表地震动的影响研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(5):33-40.
Wang G X, Huang K P. Effects of surface soil on ground motion characters [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(5): 33-40. (in Chinese)
- [16] 来春景,朱彦鹏,王春青,等. 黄土高填方场地地震动参数特性分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(6): 1168-1173,1223.
Lai Ch J, Zhu Y P, Wang Ch Q, et al. Characteristics of ground motion parameters of loess- high filling site [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40

- (6): 1168-1173,1223. (in Chinese)
- [17] Cassidy J F, Rogers G C. Seismic site response in the greater Vancouver, British Columbia, area: spectral ratios from moderate earthquakes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(2): 195-209.
- [18] 廖红建,朱博鸿.黄土场地的地面地震反应分析[J].西安冶金建筑学院学报,1991,23(3):331-338.
Liao H J, Zhu B H. Seismic response analysis of the ground surface in loess site[J]. Journal of Xi'an Institute of Metallurgy and Construction Engineering, 1991, 23(3):331-338. (in Chinese)
- [19] 熊章强,陈少华,李修忠.工程场地土层地震反应模型实例分析[J].物探与化探,2004,28(2):173-176.
Xiong Zh Q, Chen Sh H, Li X Zh. The soil layer seismic reaction in the engineering site and the model sample analysis [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2004, 28(2): 173-176. (in Chinese)
- [20] 李美娟,夏雄.软土夹层厚度对场地地震反应特征影响研究[J].工程抗震与加固改造,2017,39(5):149-153.
Li M J, Xia X. Research on the effect of soft clay interlayer thickness on ground seismic response characteristics [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(5): 149-153. (in Chinese)
- [21] 李伟华,赵成刚.含软夹层的层状沉积河谷场地的地震动力响应分析[J].岩土力学,2009,30(1): 45-51,58.
Li W H, Zhao Ch G. Analysis of seismic dynamic response of layered alluvial valleys with soft interlayer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 45-51,58. (in Chinese)
- [22] 李恒,张静波,吴建超.软夹层和硬夹层对地表地震动特性的影响[J].地震工程学报,2014,36(3):441-445.
Li H, Zhang J B, Wu J Ch. Effects of soft and hard interlayers on ground motion characteristics [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 441-445. (in Chinese)
- [23] 杨笑梅,陈宇庭.考虑场地条件的高层建筑长周期地震反应特征分析[J].工程抗震与加固改造,2016,38(6): 18-23,31.
Yang X M, Chen Y T. Seismic response analysis of long period high-rise building under soft inter layer [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2016, 38(6): 18-23,31.(in Chinese)
- [24] 高峰,严松宏,陈兴冲.场地地震反应分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增2):2 789-2 793.
Gao F, Yan S H, Chen X Ch. Analyses on seismic responses of ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (Sup 2) : 2789-2793. (in Chinese)
- [25] 师黎静,陈盛扬,黎明.哈尔滨季节性冻土地特征参数研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(5):1053-1063.
Shi L J, Chen Sh Y, Li M. Research on the characteristic parameters of Harbin seasonal frozen soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(5): 1053-1063. (in Chinese)
- [26] Zarubin N E, Dzhurik V I. Seismic properties of frozen soils of the Baikal region [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1975, 12(3):141-144.
- [27] Leblanc A M, Fortier R, Allard M, et al. Seismic cone penetration test and seismic tomography in permafrost [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41 (5) : 796-813.
- [28] 吴志坚,孙军杰,王兰民,等.青藏铁路沿线冻土地地震动特征研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(12):2466-2472.
Wu Zh J, Sun J J, Wang L M, et al. Study on characteristics of ground motion at permafrost sites along Qinghai-Tibet railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (12) : 2466-2472. (in Chinese)
- [29] 吴志坚,王兰民,孙军杰,等.青藏高原典型多年冻土地地面脉动特征[J].岩石力学与工程学报,2008,27(11):2316-2323.
Wu Zh J, Wang L M, Sun J J, et al. Characteristics of microseism at typical permafrost sites in Qinghai-Tibet plateau [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (11): 2316-2323. (in Chinese)
- [30] 严松宏,陈兴冲,高峰.多年冻土区场地地震动随机特性研究[J].岩土工程学报,2005,27(9):1012-1015.
Yan S H, Chen X Ch, Gao F. Study on stochastic earthquake characteristics of ground in permafrost regions [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1012-1015. (in Chinese)
- [31] 陈拓,马巍,穆彦虎,等.青藏工程走廊冻土地地震动特征初步分析[J].防灾减灾工程学报,2019,39(2): 201-208.
Chen T, Ma W, Mu Y H, et al. Preliminary study on characteristics of ground motion at permafrost sites along Qinghai-Tibet engineering corridor[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(2): 201-208. (in Chinese)
- [32] Singh S K, Mena E, Castro R. Some aspect 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.
- [33] Athanasopoulos G A, Pelekis P C, Leonidou E A. Effects of surface topography on seismic ground response in the Egion (Greece) 15 June 1995 earthquake [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 1999, 18(2): 135-149.
- [34] Zahradn K J, Urban L. Effect of a simple mountain range on underground seismic motion [J]. *Geophysical Journal International*, 1984, 79(1): 167-183.
- [35] 刘中宪,孙帅杰,赵瑞斌,等.基于快速多极边界元法的局部场地对地震波高频散射二维模拟[J].*岩土工程学报*,2017,39(11):2017-2025.
Liu Zh X, Sun Sh J, Zhao R B, et al. Two-dimensional simulation of high-frequency scattering of seismic waves by local sites based on fast multi-pole boundary element method [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(11):2017-2025. (in Chinese)
- [36] Boore D M. A note on the effect of simple topography on seismic SH waves [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1972, 62(1): 275-284.
- [37] 刘晶波.局部不规则地形对地震地面运动的影响[J].*地震学报*,1996,18(2):239-245.
Liu J B. The effect of local irregular topography on seismic ground motion [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1996, 18(2): 239-245. (in Chinese)
- [38] 巴振宁,彭琳,梁建文,等.任意多个凸起地形对平面P波的散射[J].*工程力学*,2018,35(7):7-17,23.
Ba Zh N, Peng L, Liang J W, et al. Scatter and diffraction of arbitrary number of hills for incident plane p-waves [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(7):7-17, 23. (in Chinese)
- [39] 张季.弹性层状场地上凸起地形的出平面地震响应分析[D].天津:天津大学,2009.
Zhang J. Out-of-plane seismic response of a hill in layered half-space [D]. Tianjing: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [40] 盛志强,卢育霞,石玉成,等.河谷地形的地震反应分析[J].*地震工程学报*,2013,35(1):126-132,202.
Sheng Zh Q, Lu Y X, Shi Y Ch, et al. Seismic response analysis of valley topography [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(1): 126-132, 202. (in Chinese)
- [41] Wong H L, Trifunac M D. Scattering of plane SH waves by a semi-elliptical canyon [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 1(3): 267-281.
- [42] 杨彩红,梁建文,张郁山.多层沉积凹陷地形对平面SH波散射问题的解析解[J].*岩土力学*,2006,27(12): 2191-2196.
Yang C H, Liang J W, Zhang Y Sh. Analytical solution of scattering of plane SH waves around a canyon with multi-layered alluvia [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(12): 2191-2196. (in Chinese)
- [43] 杨彩红.圆弧状凹陷地形在平面SH波入射下的动力响应:高频解答[J].*震灾防御技术*,2009,4(2): 158-166.
Yang C H. Dynamic response of circular-arc-shaped canyon under the incidence of plane SH wave: high-frequency solution [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2009, 4(2): 158-166. (in Chinese)
- [44] Semblat J F, Kham A, Parara E, et al. Seismic wave amplification: Basin geometry vs soil layering [J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2005, 25(7): 529-538.
- [45] Nath S K, Thingbaijam K K S. Assessment of seismic site conditions: a case study from Guwahati City, Northeast India [J]. *Pure & Applied Geophysics*, 2011, 168(10): 1645-1668.
- [46] 袁晓铭,李雨润,孙锐.圆弧状沉积盆地与软土单覆盖层出平面地表运动对比[J].*地震工程与工程振动*,2002,22(4):16-21.
Yuan X M, Li Y R, Sun R. Comparison of out-of-plane surface ground motion between a circular-arc alluvial valley and a single overburden soft layer [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(4): 16-21. (in Chinese)
- [47] 刘中宪,张征,王少杰,等.基于快速多极子间接边界元法的城市区域沉积盆地三维地震响应宽频模拟[J].*岩土力学*,2019,40(10):4101-4110.
Liu Zh X, Zhang Zh, Wang Sh J, et al. 3D seismic response broadband-simulation of the alluvial basin in urban region based on the FMM-IBEM [J]. *Rock and Soil Mechanics*,2019,40(10):4101-4110. (in Chinese)
- [48] 王淮峰,楼梦麟,陈希,等.基于虚拟激励法的沉积盆地场地地震反应分析[J].*岩土工程学报*,2013,35(2): 337-347.
Wang H F, Lou M L, Chen X, et al. Pseudo-excitation method for seismic response analysis of sedimentary basin [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineer-*

- ing, 2013, 35(2): 337-347. (in Chinese)
- [49] 张建经, 朱传彬, 张明, 等. 地震波入射角对盆地地震反应影响的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增1): 2720-2727.
Zhang J J, Zhu Ch B, Zhang M, et al. Numerical analysis for effect of incident angle of seismic wave on seismic response of basin [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (Sup 1): 2720-2727. (in Chinese)
- [50] Rassem M, Ghobarah A, Heidebrecht A C. Engineering perspective for the seismic site response of alluvial valleys [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 26(4): 477-493.
- [51] 张宁, 高玉峰, 代登辉, 等. 风化半圆形河谷引起的土层与地形放大效应[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
Zhang N, Gao Y F, Dai D H, et al. Soil and topographic amplification effects by a weathered semi-circular canyon [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37 (1): 1-8. (in Chinese)
- [52] Bielak J, Xu J, Ghattas O. Earthquake ground motion and structural response in alluvial valleys [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(5): 413-423.
- [53] 张郁山. 圆弧状沉积谷地在平面SH波入射下的动力响应[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 1-6.
Zhang Y Sh. Dynamic response of arc-layered alluvial valley under incidence of plane SH waves [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 1-6. (in Chinese)
- [54] 张郁山. 圆弧状多层沉积谷地在平面SV波入射下的动力响应[J]. 地球物理学报, 2009, 52(6): 1547-1555.
Zhang Y Sh. Dynamic response of alluvial valley containing multiple circular-arc layers incident by plane SV waves [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (6): 1547-1555. (in Chinese)
- [55] 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 & Geoenvironmental Engineering, 2015, 136(4): 607-619.
- [56] 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.
- [57] 侯春林, 李小军, 潘蓉, 等. 地震动持时对核岛结构设计地基场地非线性地震响应影响分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(10): 9-12, 21.
Hou Ch L, Li X J, Pan R, et al. Influence analysis of ground motion duration on nonlinear seismic response of nuclear island design foundation [J]. Industrial Construction, 2016, 46(10): 9-12, 21. (in Chinese)
- [58] 孙译, 张建志, 戴骞鹏, 等. 不同频谱特性输入地震动对场地设计地震动反应谱的影响[J]. 地震工程学报, 2018, 40(增1): 70-75.
Sun Y, Zhang J Zh, Dai A P, et al. Influence of input ground motions with different spectral characteristics on the response spectra of design ground motion [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(Sup 1): 70-75. (in Chinese)
- [59] 朱东生, 虞庐松, 陈兴冲. 地震动强度对场地地震反应的影响[J]. 世界地震工程, 2005, 21(2): 115-119.
Zhu D Sh, Yu L S, Chen X Ch. Influence of earthquake ground motion intensity on site earthquake response [J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21 (2): 115-119. (in Chinese)
- [60] 兰景岩, 吕悦军, 刘红帅. 地震动强度及频谱特征对场地地震反应分析结果的影响[J]. 震灾防御技术, 2012, 7(1): 37-45.
Lan J Y, Lyu Y J, Liu H Sh. Influence of intensity and frequency of ground motion on site earthquake response [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2012, 7(1): 37-45. (in Chinese)
- [61] 白建方, 楼梦麟, 叶爱君. 苏通大桥南引桥场地土层地震反应的数值分析[J]. 震灾防御技术, 2007, 2(2): 176-186.
Bai J F, Lou M L, Ye A J. Numerical analysis on earthquake response of south ramp of Su-Tong Bridge [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2007, 2(2): 176-186. (in Chinese)
- [62] 兰景岩, 薄景山, 吕悦军. 剪切波速对设计反应谱的影响研究[J]. 震灾防御技术, 2007, 2(1): 19-24.
Lan J Y, Bo J Sh, Lyu Y J. Study on the effect of shear wave velocity on the design spectrum [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2007, 2(1): 19-24. (in Chinese)
- [63] 曾金艳, 李自红, 陈文. 基岩输入参数对场地地震反应的影响分析[J]. 西北地震学报, 2009, 31(2): 110-114.
Zeng J Y, Li Z H, Chen W. Analysis on influence of the input parameters of bedrock on site earthquake response [J]. Northwest Seismological Journal, 2009, 31(2): 110-114. (in Chinese)

- [64] 李山有,廖振鹏.地震体波斜入射情形下台阶地形引起的波型转换[J].地震工程与工程振动,2002,22(4):9-15.
Li Sh Y, Liao Zh P. Wave-type conversion caused by a step topography subjected to inclined seismic body wave [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4): 9-15. (in Chinese)
- [65] Takahiro S, Takeshi U, Ryoichi T, et al. Estimation of earthquake motion incident angle at rock site [C]// Proc. of 12th World Conference Earthquake Engineering, NZ National Society for Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand:[s.n.], 2000: 956.
- [66] Jin X, Liao Z P. Statistical research on S-wave incident angle [J]. Earthquake Research in China, 1994, 8(1): 121-131.
- [67] Heymsfield E. Two-dimensional scattering of SH waves in a soil layer underlain with a sloping bedrock [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19(7): 489-500.
- [68] Huang H C, Shieh C S, Chiu H C. Linear and nonlinear behaviors of soft soil layers using Lotung down-hole array in Taiwan [J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2001, 12(3): 503-524.
- [69] Joyner W B, Chen A T. Calculation of nonlinear ground response in earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(5): 1315-1336.
- [70] Bonilla L F, Steidl J H, Gariel J C, et al. Borehole response studies at the Garner Valley downhole array, southern California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2002, 92(8): 3165-3179.
- [71] Idriss I, Lysmer J, Hwang R, et al. QUAN-4, a computer program for evaluation the seismic response of soil structures by variable damping finite element procedures [R]. Berkeley: University of California, 1973.
- [72] Rayhani M H T, Naggar M H E, Tabatabaei S H. Nonlinear analysis of local site effects on seismic ground response in the bam earthquake [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2008, 26(1): 91-100.
- [73] Pires J A. Stochastic seismic response analysis of soft soil sites [J]. Nuclear Engineering & Design, 1993, 160(3): 363-377.
- [74] 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.
- [75] 陈国兴,谢君斐,韩炜,等.土体地震反应分析的简化有效应力法[J].地震工程与工程振动,1995,15(2):52-61.
Chen G X, Xie J F, Han W, et al. A simplified effective stress method of soil mass earthquake response analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(2): 52-61. (in Chinese)
- [76] 王笃国,赵成刚.厚软覆盖层场地地震反应分析方法研究[J].工程地质学报,2014,22(6):1128-1134.
Wang D G, Zhao Ch G. Seismic analysis of deep soft deposit site [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6): 1128-1134. (in Chinese)
- [77] 蒋通,邢海灵.水平土层地震反应分析考虑频率相关性的等效线性化方法[J].岩土工程学报,2007,29(2):218-224.
Jiang T, Xing H L. An equivalent linear method considering frequency-dependent soil properties for seismic response analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 218-224. (in Chinese)
- [78] 张如林,张志伟.土层场地地震反应时域分析中等效线性化方法研究[J].工业建筑,2018,48(1):109-113,156.
Zhang R L, Zhang Zh W. Equivalent linear method for seismic response analysis of soil site in time domain [J]. Industrial Construction, 2018, 48(1): 109-113, 156. (in Chinese)
- [79] 齐文浩,薄景山.土层地震反应等效线性化方法综述[J].世界地震工程,2007,23(4):221-226.
Qi W H, Bo J Sh. Summarization on equivalent linear method of seismic responses for soil layers [J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(4): 221-226. (in Chinese)
- [80] 李小军,彭青.不同类别场地地震动参数的计算分析[J].地震工程与工程振动,2001,21(1):29-36.
Li X J, Peng Q. Calculation and analysis of earthquake ground motion parameters for different site categories [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(1): 29-36. (in Chinese)
- [81] 杨伟林,陈国兴.软土地基深开挖对场地设计地震动的影响[J].地震工程与工程振动,2000,20(3):93-99.
Yang W L, Chen G X. Study of influence of deep level excavation on design on ground motion parameters in a weak foundation site [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(3): 93-99. (in Chinese)
- [82] 李小军,彭青,刘文忠.设计地震动参数确定中的场地影响考虑[J].世界地震工程,2001,17(4):34-41.

- Li X J, Peng Q, Liu W Zh. Consideration of site effects for determination of design earthquake ground motion parameters [J]. World in Formation on Earthquake Engineering, 2001, 17(4): 34-41. (in Chinese)
- [83] Housner G W. Characteristics of strong-motion earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1947, 37(1): 19-31.
- [84] Rathje E M, Ozbey M C. Site-specific validation of random vibration theory-based seismic site response analysis [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2015, 132(7): 911-922.
- [85] Deng N, Ostadan F. Random vibration theory based seismic site response analysis [C]// Proceeding of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing:[s.n.],2008.
- [86] 曾心传,秦小军. 土层对地震的随机反应分析[J]. 地震工程与工程振动,1998,18(3):28-40.
Zeng X Ch, Qin X J. Analysis of random response of soil layer to earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(3):28-40.(in Chinese)
- [87] 门玉明,黄义,刘增荣. 场地土的随机地震反应分析[J]. 工程地质学报,2001,9(1):68-73.
Men Y M, Huang Y, Liu Z R. The random seismic response analysis of soil in site[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(1): 68-73. (in Chinese)
- [88] 黄义,王春玲,曹彩芹. 成层地基一维土层对地震的随机反应分析[J]. 世界地震工程,2004,20(1):126-132.
Huang Y, Wang Ch L, Cao C Q. Random response analysis of stratified foundations to earthquakes [J]. World Earthquake Engineering, 2004, 20(1): 126-132. (in Chinese)
- [89] 尚守平,李定乾,杜运兴. 场地土随机地震反应分析及动力可靠度计算[J]. 工程抗震与加固改造,2007,29(1):26-29,32.
Shang Sh P, Li D Q, Du Y X. Response analysis and dynamic reliability calculation for random seismic of ground soil [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2007, 29(1): 26-29,32. (in Chinese)
- [90] 齐文浩,薄景山,张忠利. 土层地震反应分析的研究现状[J]. 世界地震工程,2010,26(增1):368-372.
Qi W H, Bo J Sh, Zhang Zh L. Research status on studies of soil layer seismic response analysis [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(Sup 1): 368-372. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)



“多灾作用下工程结构全寿命可靠性研究”专辑征稿函

我国具有自然灾害种类多、强度大、区域广、易灾区高度重叠等特点。传统设计方法在进行结构设计时仅考虑单一灾害作用,忽略了多次、多种灾害间的耦合效应,这势必对基础设施安全性、区域城市韧性等带来极大隐患。因此,开展多种灾害间联合概率分布研究及结构抗多种灾害联合作用下的全寿命风险评估和设计方法研究,对提升我国工程结构的整体防灾减灾能力具有重要意义。

《防灾减灾工程学报》现针对工程结构在多灾害作用下存在的研究问题和难点,拟于2022年择期出版“多灾作用下工程结构全寿命可靠性研究”专辑,欢迎从事相关科研工作的专家、学者踊跃投稿。

本次征文的主要范围如下:

- (1)多灾作用下结构的破坏与倒塌概率研究;
- (2)爆炸等联合效应的工程结构损伤评估;
- (3)全寿命工程结构抗多灾分析及设计理论;
- (4)特殊结构受灾后力学耦合机理与多荷载试验研究;
- (5)恶劣环境与灾害联合作用下混凝土结构耐久性研究。

专辑稿件征集截止日期2021年11月15日,投稿网址:<http://fzjzgcxb.ijournals.cn/>(投稿时请选择“多灾作用下结构可靠性”栏目),编辑部联系电话:025—84285560或84285517。

《防灾减灾工程学报》编辑部

2021年3月12日