

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.04.004

## 河谷地形地震放大效应研究进展与展望\*

高玉峰<sup>1,2</sup>, 代登辉<sup>1,2</sup>, 张 宁<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024;  
2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 地表局部地形对地震波的传播有重要影响,会造成地震波的散射与衍射,从而导致地震地面运动的放大或减小,该问题是地震学、地震工程学和土木工程学的交叉研究课题。河谷作为一种典型的局部不规则地形对震动分布影响很大,在河谷场地修建了许多大型水利、桥梁等基础设施工程,河谷地形地震放大效应对该地区工程设施的灾害影响不可忽视。总结了目前国内外关于河谷地形地震放大效应的研究成果,梳理了该领域的研究方法,对后续该领域的发展提出了展望,旨在为相关科研工作人员提供参考。

**关键词:** 河谷; 地震波; 地形效应; 波传播与散射; 地震动输入

**中图分类号:** TU443    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2021)04-0734-19

### Progress and Prospect of Topographic Amplification Effects of Seismic Wave in Canyon Sites

GAO Yufeng<sup>1,2</sup>, DAI Denghui<sup>1,2</sup>, ZHANG Ning<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Local irregular topographies have significant effects on seismic waves. Topographic features can cause scattering and diffraction of incoming seismic waves, resulting in amplifications and de-amplifications of earthquake ground motions. The problem is an interdisciplinary research topic of seismology, earthquake engineering and civil engineering. The canyon, a common topographic feature, can significantly modify the ground motions. A large number of infrastructures such as dams and bridges have been built in such sites. Thus, the effect of seismic amplification on the engineering facilities in the canyon sites cannot be ignored. The paper summarizes the research results on the topographic amplification effects of seismic wave in canyon sites, sums up the research methods in this field, and puts forward the prospect for the future development of this field, aiming to provide reference for relevant researchers.

**Keywords:** canyon; seismic wave; topographic effect; wave propagation and scattering; seismic input

\* 收稿日期:2020-11-29;修回日期:2020-12-08

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41630638)、国家自然科学基金面上项目(51479050)资助

作者简介:高玉峰(1966—),男,教授,博导,博士。主要从事土动力学与岩土地震工程方面的研究。

E-mail: yfgao66@163.com

## 引言

我国江河众多,尤其是西部地区,在河谷场地已建、在建和拟建许多大型的水坝、桥梁等重要基础设施工程。我国是一个多地震国家,西部地区又是我国的主要强地震区,这些大型工程中不少都受到地震的潜在威胁,防范化解河谷场地重大工程地震灾变风险是国家重大需求。

地表局部不规则地形会引起地震波的散射,散射波与入射波、反射波相互叠加,造成地震动的放大衰减现象,这种现象被称为地形效应,河谷作为一种局部不规则地形对震害分布影响很大。地形效应现象已被大量的实测地震记录和观察到的地震破坏情况所证实<sup>[1-5]</sup>。地形效应问题一直是地震学、地震工程和土木工程中的一类重要的波动问题。已有研究成果表明,相对凸起的位置如河谷肩部的震害较重,平坦地形和相对凹陷的位置如河谷底部震害较轻;土性偏软的黏土层上震害较重,坚实土层或出露岩石上的震害较轻。也就是说,河谷地形除了引起地震动的放大,还会造成局部场地范围内地震地面运动的空间变化,不同位置地震波的峰值和相位均有所不同。由此可见,河谷地形放大效应对于我国大型基础设施工程抗震计算的地震动输入的合理性具有直接影响,进而会严重影响这类工程抗震设计的可靠性。因此,河谷地形地震波放大效应的研究是保障工程抗震设计可靠性的基础科学问题。

早在20世纪60年代,人们就认识到岩土介质的材料性质对地震地面运动会有较大的影响<sup>[6-7]</sup>。但是,不规则地形对地震地面运动的影响一直未受关注。1968年,在美国内华达州的核试验场所进行的一次核爆试验显示地形可能是影响地面运动的重要因素。试验人员在美国内华达州的Tonopah及其周围部署了许多记录仪,分布在山顶和河谷表面。通过核爆试验记录到了很多有用的数据,结果显示在山顶测得的振幅都比在河谷测得的振幅大。虽然此次试验的目的不是研究地形对地表运动的影响,但是其结果产生的地形效应明显,在地形高点(山脉、丘陵等)的地面运动比在地形低点的更大<sup>[8]</sup>。

在1971年发生于加利福尼亚州旧金山附近的

6.6级地震中,美国南加州建立的强震台网得到了200余条地震数据,其中在Pacoima坝肩观测到了显著的地形放大现象,记录到的地震峰值加速度高达 $1.25g$ <sup>[1]</sup>。此次异常的地震记录直接使得河谷地形的地震放大效应进入人们的视野。

目前,无论是学术界还是工程界,都已经意识到河谷地形放大效应对河谷场地工程抗震设计的重要性。例如学术界已经意识到高土石坝的抗震设计不能简单采用一致地震动输入,采用考虑了局部场地效应的多点地震动输入更为合理;针对桥梁的抗震设计,工程界对地形效应的考虑规定得更加明确,《公路桥梁抗震设计细则》<sup>[9]</sup>指出:当桥址地形特征可能造成地震动参数显著不同时,地震安全性评价须考虑行波效应、部分相干效应和局部场地效应造成地震动的空间变化。

河谷地形放大效应研究可以分为工程学方法和地震学方法两类,工程学研究侧重地震动场非一致性的数学描述和经验统计,而地震学研究侧重地震波传播的物理机制,两者相得益彰且相互促进。从研究手段来看,一种是根据台阵观测到的实测地震动进行数据分析,一种是以波动理论为基础的理论方法。其中理论方法又根据解答的闭合性分为数值方法和解析方法。本文将从以上几个方法出发,对目前关于河谷地形效应的研究现状进行调查分析、总结归纳、对比探讨,旨在为河谷场地工程建设、相关领域的研究学者提供一定的参考。

## 1 实测地震动

自1971年美国地质调查局在Pacoima河谷大坝首次观测到谷顶比谷底地震动峰值加速度放大2倍以来,河谷场地地震放大效应的台阵监测研究引起了众多学者的兴趣<sup>[10-11]</sup>。

D.M.Boore<sup>[2]</sup>针对Pacoima坝肩的异常地震记录进行了详细地分析并通过建模进行解释,分析发现地形对地震运动的确有较显著的影响,但这种影响在低频时体现较弱,在高频时体现较为明显。这也符合人们的普遍认识,对于低频地震波,其波长较长,跨越障碍物的能力较强,因此地形对其影响较弱;但是对于波长较短的高频地震波,跨越障碍物的能力较弱,因此地形对其影响较强。L.L.Davis等<sup>[8]</sup>根据此次地震的余震记录进一步分析了地形效

应对空间地震动的影响规律。在1994年美国南加州 Northridge 发生的6.7级地震中,同样在 Pacoima 坝肩监测到了异常地震峰值加速度,达1.58g,相对于河谷谷底放大了3倍<sup>[12]</sup>,进一步证实了河谷地形放大效应的存在。

D.W.Griffiths 等<sup>[13]</sup>在 Appalachian 山体周围进行了一个现场试验,利用爆炸冲击波模拟地震,在地形凸起和凹陷位置布设了记录仪,通过137次试验得到了大量的地震运动数据,数据分析发现80%的山脊地震动相比于谷底具有地震放大效应,放大倍数在1.7~3.4。水平向的地形放大要比竖向的地形放大明显,同时发现实测地震结果一般大于理论分析结果。

1991年研究人员在距离中国台湾翡翠大坝300m的河谷上布置了6个强震仪,监测河谷断面宽1.5km、深350m。1992年9月发生的花莲 $M_L$ 5.5地震触发了台阵,监测到了翡翠河谷上6个强震仪位置处的地震动加速度时程。监测点SC1位于河谷左岸距谷底170m处,监测点SC4位于河谷右岸距谷底70m处,监测结果显示SC1的峰值加速度较SC4放大2.69倍,河谷地形效应引起的地震放大效应和空间非一致性较为显著<sup>[14-15]</sup>。

2008年5·12汶川地震造成了大量生命财产损失和工程结构破坏,周国良<sup>[16]</sup>通过对庙子坪大桥和百花大桥的震害调查发现,河谷地形因素对桥梁结构震害的影响不可忽视。北川县城位于连绵低山构成的峡谷内,张建毅等<sup>[17]</sup>通过北川县的震害调查并分析其原因发现,在地震作用下,峡谷两侧壁有明显的地震放大现象,并且随高程的增高地震放大系数越来越大,超出了规范规定值,进而造成了大面积的滑坡和崩塌。汉源县城是汶川地震中六度区内的八度异常区,李平等<sup>[18]</sup>基于科考资料及震害分布特征,通过计算分析发现该地区地震烈度异常受河谷地形的地震放大效应影响较大。汶川地震后,研究人员在青川县东山—狮子梁峡谷两侧不同高程处布置了一系列监测点,利用汶川地震余震得到了宝贵的河谷地震动实测数据,分析实测结果发现,河谷场地地形效应受河谷侧壁形状影响较大<sup>[19]</sup>。

基于已有地震记录的台站观测分析,是研究地形效应最直观、可靠的方法。但是针对地形效应的台阵数据相对匮乏,因此限制了人们对地形效应研

究的深入探讨。

## 2 研究方法

为了揭示河谷场地地形效应的机理,在台阵观测的基础上,人们开展了大量的关于河谷场地对地震波散射和衍射的理论研究,主要分为两类:数值模拟和解析研究。解析方法主要基于波函数展开法开展。数值模拟按其边界处理形式主要分为区域型方法和边界型方法。区域型方法的核心在于对无限区域的有限化截取,主要以有限差分法、有限元法为代表。边界型方法一般仅在模型的物理边界上进行计算,能够降低研究维度,主要以离散波数法、边界积分方程方法为代表。

### 2.1 有限差分法

有限差分的基本思路是将波动方程运用有限差分算子离散,从而用代数方程组代替微分方程,通过求解线性方程组获得问题的数值解答。这种方法占用内存少、计算速度快。

Z.Alterman 等<sup>[20]</sup>最早将有限差分法引入到波的传播问题中,研究了水平成层土中弹性波的传播及土层放大效应。因其计算概念清晰,一经引入便引起众多学者注意,并在地震波传播问题中得到快速推广。但是有限差分法在早期只能解决地表或界面水平或倾斜45°的情况。随后,D.M.Boore<sup>[21-22]</sup>将其进行了推广,可以用于研究不规则土层交界面的波动问题,这为后来将此方法应用于研究地震波地形效应问题奠定了基础<sup>[23]</sup>。

D.M.Boore<sup>[2]</sup>用有限差分方法模拟了美国旧金山 Pacoima 坝所在河谷截面的地震响应,解释分析了1971年 Pacoima 坝肩记录到的地震动放大现象。发现高频地震波放大是此异常地震记录的重要原因。A.Ilan 等<sup>[24]</sup>运用有限差分法研究了矩形峡谷在地震P波入射下的散射问题,研究发现散射波振幅与入射波波长和河谷宽度的比值有关,比值越小,散射波振幅越大。M.Fuyuki 等<sup>[25]</sup>运用有限差分法研究了瑞利波在凹陷地形周围的传播及散射规律,分析了凹陷地形对瑞利波引起的地面运动的影响。这些研究都是基于低阶有限差分方法,其结果受算法和差分阶数的影响较大,收敛性受到限制。为了克服这一问题,一些高阶有限差分方法相继出现,并用于研究河谷地形效应。M.A.Dablain<sup>[26]</sup>发展了

一种高阶有限差分算法,使其能够更好地模拟高频波动问题,并用此方法模拟了地震波在复杂河谷地形地质条件下的地震波传播规律,该算法使得有限差分法的计算精度和收敛性都得到了显著提高。

A.Pitarka等<sup>[27]</sup>将有限差分法拓展到三维地形效应的研究中,并以河谷为对象验证了方法的准确性。利用发展的三维有限差分法模拟了1995年阪神地震中某一真实地形的地震响应,理论上揭示了阪神地震中该场地监测到的低频地震放大现象。T.Ohminato等<sup>[28]</sup>利用三维有限差分法研究了二维半圆形河谷、三维半球形河谷、三维半圆形河谷在地震P、SV、SH波入射下的地震传播问题。结果发现,在三维半球形河谷底部发现较大的能量集中现象,理论上证实了河谷谷底仍可能产生较大的地震放大效应。

考虑到地表土体的黏弹性特性,K.Hayashi等<sup>[29]</sup>发展了非连续网格的有限差分法,研究了考虑地表不规则地形及土体黏弹性的P-SV波传播规律,并将其应用到任意不规则河谷形状的地震动模拟中。

基于2008年汶川地震中汉源县城震害调查,李平等<sup>[18,30]</sup>利用二维显式有限差分法和多次透射人工边界研究了汉源县城河谷地形引起的地震动空间差异性对震害的影响程度。随后,李平等<sup>[31]</sup>又模拟了梯形河谷的地形效应,并分析了河谷坡角和深宽比对地表地震动的影响规律,结果发现河谷几何参数对地表地震动的影响程度随着距河谷距离的增大而逐渐减弱。

为了研究瑞利波在不规则地形周围的传播规律,L.M.Wang等<sup>[32]</sup>和L.Ning等<sup>[33]</sup>在有限差分的基础上提出了一种波场分解方案,分析了瑞利波在遇到不规则河谷时的能量转换形式,瑞利波在遇到不规则地形时将产生P波和S波,结果发现在河谷迎波侧产生的S波能量比产生的P波能量大。

有限差分法研究地震波地形效应的难点主要在于如何构造复杂形状地表附近的数值网格,以及如何精确满足地表的零应力边界条件。传统的有限差分法的网格形状一般为矩形网格,地表不规则地形一般运用阶梯状的折线来逼近,这种方案会导致误差偏大,计算稳定性不高<sup>[34]</sup>。即使不断加密网格,其结果精度也不能得到本质提升,还大大增加了计算复杂度。为了克服传统方法的不足,E.Tessmer等<sup>[35]</sup>提出了基于坐标变换的有限差分法,将曲

线地表变换至水平地表上,通过传统的有限差分法即可精确满足地表零应力边界条件。

基于以上思路,W.Zhang等<sup>[36]</sup>发展了一种曲线网格方法来模拟不规则地表,并以此来研究地震波的地形效应问题。通过计算最经典的半圆形河谷周围地震波的传播规律,发现此类河谷对瑞利波有较强的阻隔性,最大的地震动放大位置位于入射波侧河谷肩部。随后,这种方法被推广到三维地形效应的研究中<sup>[37]</sup>。朱耿尚<sup>[38]</sup>应用此方法模拟了北京三河—平谷地震、芦山地震、中国台湾南投地震、汶川地震在实际场地的地震波传播过程及地面地震动。目前,该方法已经可以应用到考虑材料各向异性<sup>[39-40]</sup>和两相介质<sup>[41]</sup>的河谷地形地震放大效应的研究中。

## 2.2 有限元法

有限元法由于其灵活性可以模拟较复杂的河谷形状特征与材料特性,具有良好的工程适用性,因此在进行地形效应的研究中深受追捧。有限元法研究地震波地形效应问题的过程一般是将无限域波动问题通过人工截取成有限域和无限域的组合。有限域包含考虑的不规则地形条件和介质的非线性、非均质特性,无限域一般不作特别考虑,仅体现在截取产生的人工边界条件上。人工边界条件要能够满足外行波从有限域向无限域辐射的传播过程,同时在人工边界上不能产生附加的反射波。因而人工边界条件直接影响目标场地地震动的准确性。

人工边界的处理一直是有限元发展过程中备受关注的问题<sup>[42-44]</sup>。透射人工边界最早由廖振鹏等<sup>[45]</sup>提出,基本原理是人工边界处的位移通过多次透射公式由有限域内结点位移递推得出。经过逐步改进完善,目前已经发展成为较成熟的人工边界处理方法<sup>[46]</sup>。但是,此方法的高频稳定性仍是值得深入研究的问题。黏性人工边界条件物理意义上相当于在边界结点上施加阻尼器吸能以此模拟外形波的辐射,因其概念清楚,在有限元发展初期得到了广泛应用<sup>[47]</sup>,但是黏性边界条件的精度不高且存在低频失稳问题。A.J.Deeks等<sup>[48]</sup>、刘晶波等<sup>[49]</sup>通过克服黏性边界存在的问题,发展了一种二维黏弹性人工边界,物理概念相当于在人工边界结点各自由度上施加一个弹簧和阻尼原件,弹簧模拟无限域对有限域的影响,阻尼原件起到吸能作用。随着不

断改进,目前黏弹性边界已经发展到了三维情况<sup>[50-51]</sup>。为了研究近场波动问题的复杂波场特性,杜修力等<sup>[52]</sup>也发展了一种可靠的黏弹性人工边界,边界结点的反应与内部结点反应采用相同的积分格式,解决了人工边界的失稳问题。

基于上述人工边界技术,掀起了利用有限元方法进行河谷地形地震放大效应研究的热潮。基于人工透射边界,朱元清等<sup>[53]</sup>利用有限元计算了河谷地形的地震波传播规律,结果发现在地震SH波入射下,河谷地形效应随河谷坡面倾角的增大而增大,峡谷端部一般为地形放大区,峡谷底部为地形缩小区。刘晶波<sup>[54]</sup>研究了P、SV和瑞利波在不规则地形周围的传播规律。崔江余等<sup>[55]</sup>以小湾坝址河谷为例,分析了河谷地形地震动的空间分布规律,并给出了类似河谷地形地震动传递函数的经验公式。车伟等<sup>[56]</sup>结合透射人工边界运用显示有限元研究了典型河谷地形对地震波传播的影响规律,探究了地震波入射方向、入射角度、河谷几何参数等对地震动地形效应的影响规律。分析发现SV波垂直入射时,水平向地震动会产生较大的地形放大现象。利用显示有限元结合透射人工边界,周国良<sup>[16]</sup>研究了均匀黏弹性介质内河谷地形地震波的地形效应,分析了SH波、SV波入射下河谷地形地震动的空间分布规律。结果发现从河谷两肩到河谷底部的地震动PGA一般呈逐渐减小的趋势。并且在地震波斜入射下,地震动分布呈现显著的迎波侧和背波侧地震动差异,迎波侧地震动明显大于背波侧。研究成果为考虑河谷地形效应的大跨桥梁抗震计算提供了地震动输入。运用显示有限元和多次透射人工边界,刘必灯等<sup>[57]</sup>研究了SV波入射下V形峡谷地形对地震地面运动及地震动峰值的影响。结果显示河谷底部角点、两岸靠近河谷位置、两侧谷坡靠近两岸和谷底的位置都会产生地震位移放大现象。周国良等<sup>[58]</sup>研究了SV波入射下河谷地形地震动分布特征,结果发现入射角度是影响河谷地震动的重要因素,斜入射下的波动过程更加复杂。

盛志强等<sup>[59]</sup>基于黏弹性边界的有限元法重点研究了河谷坡角和坡高对河谷地震动响应的影响规律。研究表明:在高坡角的河谷内波衰减比较慢,波形相对较复杂。采用黏弹性边界和地震动输入等效结点力方法,基于ANSYS有限元软件,梁建文等<sup>[60]</sup>建立三维凹陷地形地震动模拟方法,计算得

到了半椭圆形和半球形凹陷河谷在平面SV波入射下的地震响应。此研究为大型复杂三维局部场地的地形效应奠定了基础。运用黏弹性人工边界和显示有限元,章小龙等<sup>[61]</sup>实现了SV波垂直入射时复杂三维地形地震反应的数值模拟。通过对同一场地的二维和三维模拟结果对比分析发现,三维结果与二维结果具有较明显的差异,三维模拟更能反映真实的地震响应。

虽然有限元法因其灵活性已经被工程界和学术界广泛应用,但也存在相应的不足,由于没有考虑无限域波动,因此不能严格满足无穷远处Sommerfeld辐射条件从而带来误差。低阶有限元法对高频波动的模拟效果不好,需要通过增加网格提高精度,但同时增加了计算复杂度。高阶有限元法会产生Runge现象从而产生虚假波问题。

### 2.3 边界型方法

边界型方法<sup>[62-65]</sup>能够降低研究维度,不需要区域截断,并且满足无穷远处的辐射条件,在研究河谷地震波地形效应方面也有独到的优势。

早在1970年,K.Aki等<sup>[66]</sup>提出了一种研究不规则界面介质中波场散射的研究方法,奠定了边界型方法研究地震波传播问题的基础。随后,M.Bouchon<sup>[67]</sup>应用Aki-Larner的方法(离散波数法)系统研究了地震SV、P、SH波在凸起山体 and 凹陷河谷地形周围的传播规律。P.Y.Bard<sup>[68]</sup>对此方法进行了改进,并可以用于考虑复杂的地质条件<sup>[69]</sup>。H.Takenaka等<sup>[70]</sup>基于离散波数法用三维波场研究了二维地形效应。离散波数法可以看作是最早研究地震波地形效应的边界方法,对不规则边界的处理相对成功,但是此方法也有一定的弊端,其收敛速度较慢。

边界积分方程方法(边界元)是目前应用最广泛、最活跃的研究地形效应的方法。H.L.Wong等<sup>[71]</sup>最早用边界积分方程研究了任意SH波入射角度下河谷地形地震波散射规律,并用此方法研究了Pacoima河谷两个理想断面上的河谷地震动,分析了河谷地形的地震动放大效应。随后H.L.Wong<sup>[72]</sup>将此方法应用到P、SV和瑞利波入射下河谷地形地震波散射问题中。边界积分方程方法一般需要运用格林函数,由于格林函数在边界处会产生奇异,从而无法直接进行数值计算。如何处理格林函数在边界上的奇异性是边界积分方程的研究重点。

目前主要有两种处理方式,一种是将计算边界设置在物理边界之外,然后通过边界积分方程来实现<sup>[71-78]</sup>。L.B.Sills<sup>[79]</sup>也提出了另一种方案,将离散点直接设置于物理边界上,通过Fredholm积分解决了数值计算奇异问题,并以此研究了二维任意形状地形对SH波的散射问题。这种处理方式也获得了众多跟踪研究<sup>[80-82]</sup>。

边界积分方程(边界元)根据基本未知量是否为边界待求量又分为直接边界积分方程(边界元)和间接边界积分方程(边界元)。间接边界积分方程(边界元)的基本未知量没有实际物理意义,待求位移和应力通过基本未知量的积分求得。直接边界积分方程(边界元)是把位移和应力作为基本未知量。F.J.Sánchez-Sesma等<sup>[73]</sup>运用间接边界积分方程方法研究了半圆形河谷、V形河谷在任意SH波入射角度下的地形效应问题。同样利用间接边界积分方程,F.J.Sánchez-Sesma等<sup>[80]</sup>研究了P、SV波入射下不同二维河谷引起的地形效应,发现高达4倍的地形放大。F.Luzón等<sup>[83]</sup>将间接边界元推广到了三维河谷地形效应的研究中。以上研究的介质均是弹性介质,但对于河谷场地而言,一般是饱和和多孔介质。通过引入Biot理论,梁建文团队<sup>[64,77-78,82,84-86]</sup>用间接边界元在饱和半空间河谷的地震波传播问题上进行了详细研究。最近,此方法又被推广到了研究三维饱和半空间河谷的地形效应问题中<sup>[87-90]</sup>。巴振宁等<sup>[91-92]</sup>根据沉积风化层的横观各向同性特性,研究了含沉积风化层的河谷地形对平面SH波的散射。为了研究高频地震波的地形散射问题,Zh.X.Liu等<sup>[93]</sup>又提出了一种快速多极边界元方法,并以此研究了三维凹陷河谷的地震响应。一些直接时域边界单元方法也用来研究局部地形对地震波的散射问题<sup>[94-97]</sup>。

无论直接边界积分方程(边界元)方法还是间接边界积分方程(边界元)方法,都要进行格林函数的推导和计算。对于一些复杂的问题,很难得到其格林函数,并且涉及格林函数的计算都比较耗时,尤其是半平面问题。除了离散波数法和边界积分方程方法(边界元)之外,还出现了其他的一些边界型方法。利用无场边界积分方程方法,J.T.Chen等<sup>[98-99]</sup>推导了多个半圆形河谷地震波散射问题的解答。R.England等<sup>[100]</sup>使用汉克尔函数的多极展开来解决SH波的散射问题,避免了奇异积分方程的引入。F.J.Sánchez-Sesma等<sup>[101]</sup>基于均质方程解提出

了一种适用于弹性波散射的边界方法,因为许多散射问题的解是这种方法的特例<sup>[102-104]</sup>,因此称之为广义边界法。广义边界法通常利用点离散和最小二乘法解决边界上的数值积分问题,作为替代,V.W.Lee等<sup>[105-106]</sup>利用加权残量法在初始边界上积分来研究任意形状的二维河谷的散射。此外,复变函数法也可以用来研究散射问题<sup>[107-109]</sup>。

## 2.4 解析方法

解析研究主要通过建立简化力学模型并利用波函数展开法对其进行求解,以分析地形效应机理及控制因素,可以揭示波散射问题的物理本质,还可以检验各种数值方法的精度。

对于地震SH波入射下的地形效应问题,由于其在传播过程中不存在波型转换,故已经获得了数量可观的严密满足边界条件的解析解。M.D.Trifunac<sup>[110]</sup>最早运用波函数展开法研究了半圆形凹陷河谷地形在地震SH波入射下的波函数级数解,开创了波函数展开法研究地震波地形效应的先河。并从理论角度分析了地震波波长、入射角度等因素对河谷地形放大效应的影响规律。随后,H.L.Wong等<sup>[111]</sup>将此方法扩展到了半椭圆形河谷的形状。由于解析解的精确性,这两个结果也常常被用来验证各种数值方法。运用波函数展开法,V.W.Lee<sup>[112]</sup>研究了SH波在三维半球形河谷周围的传播和散射问题。基于大圆弧假定和波函数展开法,H.Cao等<sup>[113]</sup>给出了圆弧形河谷周围地震波散射的近似解析结果。V.W.Lee<sup>[114]</sup>给出了抛物线形河谷在SH波入射下的散射解析解。X.M.Yuan等<sup>[115]</sup>研究了平面SH波在圆弧形河谷周围的传播问题。房营光<sup>[116]</sup>给出了相邻多个河谷之间对地震动的相互影响规律。梁建文等<sup>[117]</sup>研究了SH波入射下层状沉积河谷的地震响应。刘中宪<sup>[118]</sup>给出了含圆弧形楔形场地对平面SH波散射的解析解。D.H.Tsaur等<sup>[119]</sup>给出了SH波在削减半圆形河谷周围的散射解析结果。K.H.Chang等<sup>[120]</sup>研究了类楔形河谷周围SH波的传播与散射问题。M.S.Hsu等<sup>[121]</sup>给出了SH波在半椭圆形河谷周围散射的解析解。

值得注意的是,上述河谷形状一般假设为光滑曲线,这保证了能够顺利得到其在地震波入射下的解析解。但一般河流的上游河谷多属于下切很深的V形谷,河流中下游河谷逐渐演变成底部平缓的U形谷。这种河谷形状由于其地形复杂性及在动力

作用会出现应力奇异现象,其在地震波入射下的传播和散射问题一直未得到有效的解析解。为了克服这一难题,D.H.Tsaur等<sup>[122]</sup>应用区域分解策略和波函数展开法得到了SH波在较浅的V形河谷周围散射的级数解答,随后又研究了较深的V形河谷的情况<sup>[123]</sup>。这种方法虽然能够解决V形河谷的地震波地形效应问题,但是对不同深宽比的河谷,需要选择不同的解答。N.Zhang等<sup>[124]</sup>提出了一种对称V形河谷对地震SH波散射的统一解析解,也解决了V形河谷底部的应力奇异问题。随后,非对称V形河谷<sup>[125]</sup>、U形河谷<sup>[126]</sup>对地震SH波散射的解析结果也相继被给出,并在U形河谷谷底发现了明显的地震放大现象。N.Zhang等<sup>[127-129]</sup>给出了SH波在月牙形沉积河谷、径向非均质河谷场地、径向非均质成层河谷场地周围传播和散射的解析解。

目前关于P、SV波地形效应的解析解尚没有解决一个根本问题:半空间中P、SV波传播的耦合性导致地表的应力自由边界条件如何满足。V.W.Lee等<sup>[130]</sup>最早提出了一种大圆弧假设的方法,将水平地表假设成半径很大的圆弧,将开放空间波动问题转化成密闭空间而回避了水平地表应力条件的满足难题,据此提出了圆弧形河谷地形对SV波的散射解析解。大圆弧假设大大简化了研究难度,据此得到了一系列近似解析解,为揭示P、SV波地形效应起到了重要推动作用。H.Cao等<sup>[131]</sup>研究了P波入射下的圆弧形河谷地形效应。梁建文等<sup>[132]</sup>研究了浅圆形河谷地形周围高频瑞利波的散射。李伟华等<sup>[133]</sup>将大圆弧假设拓展到半空间饱和多孔介质波动理论,平面P波在饱和半空间中凹陷地形周围散射的解析解,巴振宁等<sup>[134]</sup>对P波在饱和河谷场地周围的散射规律进行了进一步分析。J.W.Liang等<sup>[135]</sup>研究了SV波在饱和半空间圆弧形河谷周围的传播与散射问题。钟慧等<sup>[136]</sup>利用柱函数渐进性质进一步拓展了大圆弧方法,获得了SV波入射下圆弧形凹陷地形的宽频解。然而,由于严格满足半无限水平地表应力自由条件的解析解的长期缺失,大圆弧假设带来的误差并不易控制。实际上,经过20多年的深入研究,大圆弧方法的主要提出者V.W.Lee等<sup>[137]</sup>:“在获得能够解决半无限地表应力自由边界条件的严格解之前,忽略这种边界条件甚至都比大圆弧假设更可靠”。最近,一些学者舍弃大圆弧假设,针对P、SV波传播问题重新做了研究,并得到了一些级数解答。姚虞等<sup>[138-139]</sup>基于Lamb解和波函数

展开提出了一种波函数组合法,得到了P、SV和瑞利波在半圆形峡谷周围传播和散射的级数解。

## 2.5 杂交方法

区域型方法的优势在于对场地复杂地形特征与材料特性的精细化模拟,但依赖于人工边界的使用;边界型方法可以严格满足无穷远处Sommerfeld辐射条件,但往往需要进行超大规模计算;解析方法可以精确满足辐射条件和边界条件,并能够揭示问题的物理本质。综合利用上述方法的优势,一些杂交型方法相继出现。

Ch.H.Zhang等<sup>[140]</sup>运用有限元-无限元的组合法研究了河谷地形地质条件对地震SH波作用下地面运动的影响规律。随后又运用到P、SV波入射下河谷地形地质条件对强震地面运动的影响研究中<sup>[141-143]</sup>。基于有限元-无限元组合的思想,M.H.Bazyar等<sup>[144]</sup>发展了一种比例边界有限元法,研究了任意不规则地表地形下,SH、SV、P和瑞利波传播和散射问题。

T.K.Mossessian等<sup>[145]</sup>联合有限元和间接边界元研究了任意三维地表不规则地形对平面P、SV、SH和瑞利波的散射问题。杜修力等<sup>[146]</sup>运用边界积分方程和级数解研究了SH波入射下不规则地形的地震放大效应。A.Ducellier等<sup>[147]</sup>运用有限元-四阶有限差分研究了二维河谷地形在SH、P和SV入射下的地形效应问题。刘中宪等<sup>[148]</sup>运用间接边界积分方程和有限元研究了成层河谷场地的地震波地形及场地效应问题。

M.Bouchon<sup>[149]</sup>结合离散波数法和边界积分方程研究了不规则地表形状在SH波入射下的地震放大效应。但是这种方法较难处理地表边界较为陡峭的河谷地形形状。随后,H.Kawase<sup>[150]</sup>对此方法进行了改进。这种方法经过发展又运用到三维河谷地形效应的研究中<sup>[151-152]</sup>。H.Zhou等<sup>[153]</sup>发展了一种新的边界积分方程-离散波数法提高了计算效率,并以此研究了二维不规则河谷地形在SH波入射下的放大效应。随后这种方法又被用来研究P、SV波入射时的河谷地形效应问题<sup>[154]</sup>。

A.H.Shah等<sup>[155]</sup>运用有限元-波函数展开法研究了SH波入射下半圆形、V形河谷的地形效应问题。结合有限元和波函数级数解,李彤等<sup>[156]</sup>研究了不规则地形在SV波入射下的动力反应。借鉴此思路,W.S.Shyu等<sup>[157]</sup>研究了相邻河谷对地震波地形效应

的相互影响规律。W.S.Shyu等<sup>[158]</sup>又结合有限元和Lamb解,研究了P波入射下圆弧形、椭圆形、V形和梯形河谷的地形效应。

### 3 近源效应

上述关于河谷地形地震放大效应的研究总结均是关于平面波的假设,即假设震源无限远,地形效应不受震源特性的影响。然而,最近关于场地效应是否受震源特性的影响这个问题开始有一些争论。也有一些学者指出了同时考虑近源效应、路径效应和场地效应的必要性<sup>[159-162]</sup>。K.B.Olsen<sup>[163]</sup>、P.Triantafyllidis等<sup>[164]</sup>和I.A.Parvez等<sup>[165]</sup>基于有限差分法或模态叠加与有限差分的杂交方法得出结论,认为场地效应不仅取决于局部土性特征和地表形态,还和震源特征有关。然而,L.Lozano等<sup>[166]</sup>应用谱比技术发现震源对场地效应的影响是可以忽略的。因此,基于数值和经验方法分别得到的关于震源在场地反应中角色的结论是完全相反的。

近源地形对远场辐射的影响引起了一些研究者的兴趣<sup>[167-168]</sup>,人们开始关注波源对场地效应的影响<sup>[164-166]</sup>。单就场地地形效应而言,研究近源效果的文献很少,只有S.J.Lee等<sup>[169]</sup>使用谱单元法研究了不同震源深度和破裂机制对大尺度地形效应的影响,A.J.Rodgers等<sup>[170]</sup>使用有限差分方法来模拟浅源爆破,重点研究源附近的模态转换和散射,同时指出动力反应受到源位置的影响。虽然有其它数值方法可以考虑地形引起的近源散射问题,如离散波数-边界积分方程方法<sup>[70]</sup>、时域边界单元法<sup>[96]</sup>、有限单元法<sup>[171]</sup>,但是这些数值方法都不能研究震源位置对地形效应的影响。

值得一提的是,在解析方法中,通过运用点源汉克尔函数模拟震源可以得到近源地震引起的地震波传播问题解答。H.Luo<sup>[172]</sup>给出了半圆形沉积谷在柱面SH波作用下反应的解析解。Y.F.Gao等<sup>[173]</sup>给出了近源SH波入射下对称V形河谷的地震响应解答。随后,部分填充半圆形沉积河谷<sup>[174]</sup>、径向非均质沉积河谷<sup>[175]</sup>和半圆形成层风化河谷<sup>[176]</sup>在近源SH波入射下的地震响应结果也相继被给出。

### 4 地形对地震动输入的影响

河谷场地重大工程地震动输入是重大工程地

震响应机制与灾变机理和抗震设计理论研究的基础,其合理性和可靠性直接决定抗震计算的准确性。目前,在大部分结构-基础系统的抗震分析中,普遍还是采用均匀一致地震动输入的方式,在计算边界节点处假设地震运动完全一致,即采用一致地震动输入方式模拟地震波输入。这种方法对建于平坦基岩上的小跨度结构相对合理。但对于大跨度桥梁、大坝等尺寸较大的结构来说,建基面上的地震动存在较大差别。根据地震台网的记录分析发现,由于地震波的行波效应、部分相干效应和局部的地形场地效应,地震动空间差异性明显,50 m范围内产生的差异就已经不可忽视。因此,采用非一致地震动输入进行河谷场地重大工程的抗震分析,能够更好地评估河谷场地重大工程的安全性。

目前,国内外的桥梁、隧道和水坝工程抗震规范已经逐步体现出对地震动输入的非一致性(空间变化)要求,然而关于地形效应的规定还不够明确和具体。以汶川地震中震害最为严重的桥梁工程为例,关于大跨度桥梁,《城市桥梁抗震设计规范》<sup>[177]</sup>指出:应根据专门的工程场地地震安全性评价确定地震作用。然而,由传统的地震安全性评价给出的重大工程场址地震动设计加速度峰值是半无限空间均质岩体的平坦自由地表的水平向分量值,它不涉及工程场址实际的地形和地质条件。《公路桥梁抗震设计细则》<sup>[9]</sup>对此有更详细的规定:当桥址地形特征可能造成地震动参数显著不同时,地震安全性评价须考虑行波效应、部分相干效应和局部场地效应造成地震动的空间变化。《水工建筑物抗震设计标准》<sup>[178]</sup>对甲类混凝土重力坝和拱坝工程的抗震计算动力分析进行了规定:近场地基的质量、岩性和各类地质构造,远域地基的辐射阻尼及沿坝基地震动输入的不均匀性影响。

非一致地震动输入最初仅考虑地震波的行波效应,即仅考虑不同位置处地震动的相位差。通过此种地震动输入方式,众多学者进行了河谷桥梁、大坝的动力反应分析<sup>[179-183]</sup>。研究结果均表明,考虑行波效应的结构地震响应结果与一致地震动输入结果有较大差别。但是,考虑行波效应的地震动输入方式仅考虑了地震波在时间上的差异,其输入地震波波形完全一致。

实际上,地震波由震源传播至场地是一个复杂的过程,单纯考虑地震波的行波效应不能真实反应场地地震动的空间分布规律。地震动受地震波传

播路径、地形地质条件影响较大,特别对于河谷场地,由于其地形地貌变化剧烈,使得河谷各点处地震动的差别不仅体现在时间差上,而且地震动的幅值及频谱特性也会有所改变。近年来,随着人们认识的逐渐深入,考虑地形效应的河谷场地工程结构抗震输入也越来越受关注,在河谷场地大跨桥梁工程<sup>[16,184-188]</sup>、大坝工程<sup>[189-194]</sup>的地震响应分析上进行了广泛的应用。

迄今为止,国内外还缺乏针对河谷场地重大工程地震动输入机制的系统研究成果。就目前的地震动输入方法来说,如果单纯考虑由震源传播至抗震计算输入面上的地震动特性,则忽略了场地内结构产生的外形散射波的影响,即忽略了场地和结构之间的能量交换;如果计算场地-结构动力系统的整体反应,则会大大增加计算复杂度,同时场地需要设置人工边界,但目前各种人工边界都有一定的缺陷。例如透射边界在时步积分时可能出现对高频波的振荡失稳问题。黏性边界和黏弹性边界不能完全吸收掉外行波,特别是黏性边界还存在低频失稳问题。

张建民院士课题组<sup>[193-195]</sup>提出了一种考虑河谷地形效应的大坝地震响应研究方法,该方法可以为目前河谷场地重大工程设施的抗震输入提供借鉴。由于场地内结构一般跟基岩模量相差两个量级,因此该思路认为场地内结构产生的地震散射波对基岩表面的地震动影响很小,因而假设空心河谷表面位移与实际地震位移一致。基于此假设,河谷场地重大工程结构的抗震输入问题变为河谷场地的地震波传播问题,即空河谷表面的地震动即为工程结构的地震动输入,然后通过此种输入方式即可计算河谷场地工程结构的地震响应。这一研究思路清晰,在场地分析基础上确定了地震动输入参数,建立了河谷场地重大工程设施多点输入动力分析相结合的动力分析框架流程。

总的来说,工程结构的设计地震动及其输入方式是进行抗震计算和安全性评价的前提。对于河谷场地较大尺寸的工程结构,探索一种可靠的考虑河谷场地地形地质条件和地震波行波效应的地震动输入方式是未来研究的重点和难点。

## 5 展 望

河谷地形地震波传播问题是土木工程、地震工

程和地震学领域的交叉研究课题,这些学科对该课题的研究始于二十世纪六七十年代。随着计算机水平的快速发展,各种研究方法陆续出现,各方法研究的目标也都在于如何更加高效、准确地模拟地震作用下复杂地形的真实地震响应,最终为河谷场地重大工程结构的抗震输入及设计提供理论指导。针对这一目标和目前的研究现状,笔者认为需要进一步加强如下方面的研究:

(1)多种耦合波入射下河谷地形效应的影响。地震发生时,所产生的能量以波的形式向外传播,根据弹性动力学的概念,大多数成果都将地震波分成了P、SV、SH和瑞利波的形式分别开展研究。但是,在实际的地震过程中,在目标场地可能同时受多种波型的共同传播影响。而且入射角度、入射频率和入射方向等因素对各种入射波的影响在定性或定量上都存在不同,不能用叠加原理来进行分析。因此,有必要考虑多种耦合波入射下河谷地形地震放大效应的研究。

(2)河谷介质非线性对河谷地震响应的影响。土体是典型的非线性介质,在强震作用下,土体表现出显著的非线性黏弹性甚至弹塑性特征。由于土体非线性特征的影响,在不同强度地震动作用下同一场地的地震放大效应也存在明显差异,需要在确定工程结构抗震设计地震动输入时予以考虑。

(3)河谷内水对河谷地形效应的影响。河谷内一般有水存在,地震作用下,虽然水不能传递剪切波的作用,但对压缩波会有影响。同时由于河谷表面水压的存在和地震作用下水体的波动,都会改变地震动响应。如何考虑含水河谷的地震动传播问题是今后需要考虑的问题。

(4)开展临近地形条件对河谷地震放大效应的影响。目前大多数研究仅考虑单一地形对地震波传播的影响。但河谷场地周围一般都是连绵起伏的高山峡谷,针对具体工程,需要考虑相邻不规则场地对河谷地形效应的影响。

(5)发展一种能够综合考虑基岩地震波传播、河谷地形效应、土结动力相互作用及结构动力响应的全域模拟方法,是准确进行河谷场地结构抗震计算的有效方案。目前的研究大多只考虑了其中一方面,对全域过程模拟考虑较少,在今后的研究中应该加以重视。

## 参考文献:

- [1] Trifunac M D, Hudson D E. Analysis of the Pacoima dam accelerogram—San Fernando, California, earthquake of 1971[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1971, 61(5): 1393-1411.
- [2] Boore D M. The effect of simple topography on seismic waves: implications for the accelerations recorded at Pacoima Dam, San Fernando Valley, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1973, 63(5): 1603-1609.
- [3] Spudich P, Hellweg M, Lee W H K. Directional topographic site response at Tarzana observed in aftershocks of the 1994 Northridge, California, earthquake: implications for mainshock motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, 86(1B): S193-S208.
- [4] Ashford S A, Sitar N. Topographic amplification in the 1994 Northridge earthquake analysis and observations [J]. Earthquake Engineering, 1997, 34(1): 210-214.
- [5] Hough S E, Altidor J R, Anglade D, et al. Localized damage caused by topographic amplification during the 2010 M 7.0 Haiti earthquake [J]. Nature Geoscience, 2010, 3(11): 778-782.
- [6] Murphy J R, Davis A H. Amplification of Rayleigh waves in a surface layer of variable thickness[R]. Alexandria, Va.: Environmental Research Corp, 1969.
- [7] Murphy J R, Davis A H, Weaver N L. Amplification of seismic body waves by low-velocity surface layers [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1971, 61(1): 109-145.
- [8] Davis L L, West L R. Observed effects of topography on ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1973, 63(1): 283-298.
- [9] 公路桥梁抗震设计细则:JTG/TB02-01—2008 [S]. 北京:人民交通出版社, 2008.
- [10] 刘洪兵, 朱晞. 地震中地形放大效应的观测和研究进展[J]. 世界地震工程, 1999, 15(3): 20-25.  
Liu H B, Zhu X. Advance on topographic amplification effects of seismic response[J]. World Earthquake Engineering, 1999, 15(3): 20-25. (in Chinese)
- [11] 李孝波, 薄景山, 李平, 等. 地震烈度异常研究的若干进展[J]. 地震学报, 2013, 35(3): 430-440.  
Li X B, Bo J Sh, Li P, et al. Some progress of study on abnormality of seismic intensity[J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(3): 430-440. (in Chinese)
- [12] Sepúlveda S A, Murphy W, Jibson R W, et al. Seismically induced rock slope failures resulting from topographic amplification of strong ground motions: The case of Pacoima Canyon, California [J]. Engineering Geology, 2005, 80(3/4): 336-348.
- [13] Griffiths D W, Bollinger G A. The effect of Appalachian Mountain topography on seismic waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1979, 69(4): 1081-1105.
- [14] Huang H C, Chiu H C. The effect of canyon topography on strong ground motion at Feitsui damsite: quantitative results[J]. Earthquake Engineering and Structural dynamics, 1995, 24(7): 977-990.
- [15] Huang H C, Chiu H C. Canyon topography effects on ground motion at Feitsui damsite [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1999, 18(2): 87-99.
- [16] 周国良. 河谷地形对多支撑大跨桥梁地震反应影响 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2010.  
Zhou G L. Canyon topography effects on seismic response of multi-support bridges [D]. Harbin: China Earthquake Administration, 2010. (in Chinese)
- [17] 张建毅, 薄景山, 王振宇, 等. 汶川地震局部地形对地震动的影响 [J]. 自然灾害学报, 2012, 21(3): 164-169.  
Zhang J Y, Bo J Sh, Wang Zh Y, et al. Influence of local topography on seismic ground motion in Wenchuan earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(3): 164-169. (in Chinese)
- [18] 李平, 刘红帅, 薄景山, 等. 汶川  $M_s8.0$  地震河谷地形对汉源县城高烈度异常的影响 [J]. 地球物理学报, 2016, 59(1): 174-184.  
Li P, Liu H Sh, Bo J Sh, et al. Effects of river valley topography on anomalously high intensity in the Hanyuan town during the Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(1): 174-184. (in Chinese)
- [19] 王福海, 王运生, 孙刚, 等. 地震荷载作用下斜坡响应研究: 以四川青川东山—狮子梁剖面为例 [J]. 现代地质, 2011, 25(1): 142-150.  
Wang F H, Wang Y Sh, Sun G, et al. Study on slope response under seismic loading: Taking the Dongshan-Shiziliang Profile in Qingchuan, Sichuan as an example [J]. Geoscience, 2011, 25(1): 142-150. (in Chinese)
- [20] Alterman Z, Karal F C. Propagation of elastic waves in layered media by finite difference methods [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(1): 367-398.
- [21] Boore D M. Finite difference solutions to the equations of elastic wave-propagation, with application to Love

- waves over dipping interfaces [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1970.
- [22] Boore D M. Love waves in nonuniform wave guides: finite difference calculations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, 75(8): 1512-1527.
- [23] 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.
- [24] Ilan A, Bond L J, Spivack M. Interaction of a compressional impulse with a slot normal to the surface of an elastic half space [J]. *Geophysical Journal International*, 1979, 57(2): 463-477.
- [25] Fuyuki M, Matsumoto Y. Finite difference analysis of Rayleigh wave scattering at a trench [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1980, 70(6): 2051-2069.
- [26] Dablain M A. The application of high-order differencing to the scalar wave equation [J]. *Geophysics*, 1986, 51(1): 54-66.
- [27] Pitarka A, Irikura K. Modeling 3D surface topography by finite-difference method: Kobe-JMA station site, Japan, case study [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(20): 2729-2732.
- [28] Ohminato T, Chouet B A. A free-surface boundary condition for including 3D topography in the finite-difference method [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, 87(2): 494-515.
- [29] Hayashi K, Burns D R, Toksöz M N. Discontinuous-grid finite-difference seismic modeling including surface topography [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2001, 91(6): 1750-1764.
- [30] 李平. 汶川特大地震汉源震害异常研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.  
Li P. The research of seismic damage anomalies in hanyuan during Wenchuan Great Earthquake [D]. Harbin: China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese)
- [31] 李平, 薄景山, 肖瑞杰, 等. 地震动河谷场地效应研究 [J]. *震灾防御技术*, 2018, 13(2): 331-341.  
Li P, Bo J Sh, Xiao R J, et al. The study of effect by the valley site on ground motion [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2018, 13(2): 331-341. (in Chinese)
- [32] Wang L M, Xu Y X, Xia J H, et al. Effect of near-surface topography on high-frequency Rayleigh-wave propagation [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2015, 116: 93-103.
- [33] Ning L, Dai T Y, Wang L M, et al. Numerical investigation of Rayleigh-wave propagation on canyon topography using finite-difference method [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 159: 350-361.
- [34] De la Puente J, Ferrer M, Hanzich M, et al. Mimetic seismic wave modeling including topography on deformed staggered grids [J]. *Geophysics*, 2014, 79(3): T125-T141.
- [35] Tessmer E, Kosloff D, Behle A. Elastic wave propagation simulation in the presence of surface topography [J]. *Geophysical Journal International*, 1992, 108(2): 621-632.
- [36] Zhang W, Chen X F. Traction image method for irregular free surface boundaries in finite difference seismic wave simulation [J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 167(1): 337-353.
- [37] Zhang W, Zhang Zh G, Chen X F. Three-dimensional elastic wave numerical modelling in the presence of surface topography by a collocated-grid finite-difference method on curvilinear grids [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 190(1): 358-378.
- [38] 朱耿尚. 有限差分方法在强地面运动模拟中的应用 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.  
Zhu G Sh. Strong ground motion simulation by finite difference method [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [39] 兰海强, 刘佳, 白志明. VTI介质起伏地表地震波场模拟 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54(8): 2072-2084.  
Lan H Q, Liu J, Bai Zh M. Wave-field simulation in VTI media with irregular free surface [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(8): 2072-2084. (in Chinese)
- [40] Sun Y Ch, Zhang W, Chen X F. Seismic-wave modeling in the presence of surface topography in 2D general anisotropic media by a curvilinear grid finite-difference method [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106(3): 1036-1054.
- [41] Sun Y Ch, Ren H X, Zheng X Zh, et al. 2-D poroelastic wave modelling with a topographic free surface by the curvilinear grid finite-difference method [J]. *Geophysical Journal International*, 2019, 218(3): 1961-1982.
- [42] Wolf J P. A comparison of time-domain transmitting boundaries [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1986, 14(4): 655-673.
- [43] Kausel E. Local transmitting boundaries [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1988, 114(6): 1011-1027.
- [44] 廖振鹏. 近场波动的数值模拟 [J]. *力学进展*, 1997, 27(2): 193-216.

- Liao Zh P. Numerical simulation of near-field wave motion[J]. *Advances in Mechanics*, 1997, 27(2): 193-216. (in Chinese)
- [45] 廖振鹏, 黄孔亮, 杨柏坡, 等. 暂态波透射边界[J]. *中国科学(A辑)*, 1984, 26(6): 556-564.
- Liao Zh P, Huang K L, Yang B P, et al. Multi transmitting formula for transient wave [J]. *Science China (Collect A)*, 1984, 26(6): 556-564. (in Chinese)
- [46] 廖振鹏. *工程波动理论导论*[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2002.
- Liao Zh P. *Introduce to wave motion theories in engineering*[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [47] Lysmer J, Kuhlemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1969, 95(4): 859-878.
- [48] Deeks A J, Randolph M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1994, 120(1): 25-42.
- [49] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. *土木工程学报*, 1998, 31(3): 55-64.
- Liu J B, Lyu Y D. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1998, 31(3): 55-64. (in Chinese)
- [50] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. *工程力学*, 2005, 22(6): 46-51.
- Liu J B, Wang Zh Y, Du X L, et al. Three-dimensional visco-elastic artificial boundaries in time domain for wave motion problems [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(6): 46-51. (in Chinese)
- [51] Liu J B, Li B. A unified viscous-spring artificial boundary for 3-D static and dynamic applications[J]. *Science in China Series E Engineering and Materials Science*, 2005, 48(5): 570-584.
- [52] 杜修力, 赵密, 王进廷. 近场波动模拟的人工应力边界条件[J]. *力学学报*, 2006, 38(1): 49-56.
- Du X L, Zhao M, Wang J T. A stress artificial boundary in fea for near-field wave problem[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied*, 2006, 38(1): 49-56. (in Chinese)
- [53] 朱元清, 胡天跃, 郭自强. 地震波在粘弹介质中的传播及地形效应[J]. *地震学报*, 1991, 13(4): 442-449.
- Zhu Y Q, Hu T Y, Guo Z Q. Propagation of seismic waves in a viscoelastic medium and the effect of topography[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1991, 13(4): 442-449. (in Chinese)
- [54] 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. Impact on earthquake ground motion by local irregular terrain[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1996, 18(2): 239-245. (in Chinese)
- [55] 崔江余, 杜修力. 河谷自由场地震动经验传递函数研究[J]. *水利学报*, 2001(10): 58-61.
- Cui J Y, Du X L. Study on empirical transfer function of gorge free field ground motion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001(10): 58-61. (in Chinese)
- [56] 车伟, 罗奇峰. 复杂地形条件下地震波的传播研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(9): 1333-1337.
- Che W, Luo Q F. Seismic wave propagation in complex topography [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(9): 1333-1337. (in Chinese)
- [57] 刘必灯, 周正华, 刘培玄, 等. SV波入射情况下V型河谷地形对地震动的影响分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2011, 31(2): 17-24.
- Liu B D, Zhou Zh H, Liu P X, et al. Influence of V-shaped canyon site on ground motions for incident SV waves[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2011, 31(2): 17-24. (in Chinese)
- [58] 周国良, 李小军, 侯春林, 等. SV波入射下河谷地形地震动分布特征分析[J]. *岩土力学*, 2012, 33(4): 1161-1166.
- Zhou G L, Li X J, Hou Ch L, et al. Characteristic analysis of ground motions of canyon topography under incident SV seismic waves[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(4): 1161-1166. (in Chinese)
- [59] 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.
- 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. (in Chinese)
- [60] 梁建文, 齐晓原, 巴振宁. 基于黏弹性边界的三维凹陷地形地震响应分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2014, 34(4): 21-28.
- Liang J W, Qi X Y, Ba Zh N. Seismic response analysis of 3D canyon based on the viscous-spring boundary [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2014, 34(4): 21-28. (in Chinese)
- [61] 章小龙, 李小军, 周正华, 等. 三维复杂山谷地形SV波垂直输入地震反应分析[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(7): 2779-2790.
- Zhang X L, Li X J, Zhou Zh H, et al. The seismic response analysis of three-dimensional canyon complex topography under incident SV seismic waves[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(7): 2779-2790. (in

- Chinese)
- [62] 杜修力, 熊建国. 波动问题的级数解边界元法[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(1): 39-49.  
Du X L, Xiong J G. Application of boundary element method to wave propagation by using series solution[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1988, 8(1): 39-49. (in Chinese)
- [63] 梁建文, 梅雄一, 巴振宁. 斜入射平面SH波在层状半空间中沉积谷地周围的三维散射[J]. 中国地震, 2012, 28(4): 370-380.  
Liang J W, Mei X Y, Ba Zh N. Three-dimensional scattering by an alluvial valley in a layered half-space for obliquely incident plane SH waves[J]. Earthquake Research in China, 2012, 28(4): 370-380. (in Chinese)
- [64] Liu Zh X, Liang J W, Huang Y H. The IBIEM solution to the scattering of plane SV waves around a canyon in saturated poroelastic half-space [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2015, 19(6): 956-977.
- [65] Ba Zh N, Yin X. Wave scattering of complex local site in a layered half-space by using a multidomain IBEM: incident plane SH waves[J]. Geophysical Journal International, 2016, 205(3): 1382-1405.
- [66] Aki K, Larner K L. Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves[J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75(5): 933-954.
- [67] Bouchon M. Effect of topography on surface motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1973, 63(2): 615-632.
- [68] Bard P Y. Diffracted waves and displacement field over two-dimensional elevated topographies[J]. Geophysical Journal International, 1982, 71(3): 731-760.
- [69] Geli L, Bard P Y, Jullien B. The effect of topography on earthquake ground motion: a review and new results [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1988, 78(1): 42-63.
- [70] Takenaka H, Kennett B L N, Fujiwara H. Effect of 2-D topography on the 3-D seismic wavefield using a 2.5-D discrete wavenumber-boundary integral equation method [J]. Geophysical Journal International, 1996, 124(3): 741-755.
- [71] Wong H L, Jennings P C. Effects of canyon topography on strong ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(5): 1239-1257.
- [72] Wong H L. Effect of surface topography on the diffraction of P, SV, and Rayleigh waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982, 72(4): 1167-1183.
- [73] Sánchez-Sesma F J, Rosenblueth E. Ground motion at canyons of arbitrary shape under incident SH waves[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1979, 7(5): 441-450.
- [74] Dravinski M. Scattering of plane harmonic SH wave by dipping layers or arbitrary shape[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1983, 73(5): 1303-1319.
- [75] Dravinski M, Mossessian T K. Scattering of plane harmonic P, SV and Rayleigh waves by dipping layers of arbitrary shape [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77(1): 212-235.
- [76] Ge Z X, Fu L Y, Wu R Sh. P-SV wave-field connection technique for regional wave propagation simulation [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(4): 1375-1386.
- [77] Liang J W, Liu Zh X. Diffraction of plane P waves by a canyon of arbitrary shape in poroelastic half-space (I): Formulation [J]. Earthquake Science, 2009, 22(3): 215-222.
- [78] Liang J W, Liu Zh X. Diffraction of plane P waves by a canyon of arbitrary shape in poroelastic half-space (II): Numerical results and discussion [J]. Earthquake Science, 2009, 22(3): 223-230.
- [79] Sills L B. Scattering of horizontally-polarized shear waves by surface irregularities[J]. Geophysical Journal International, 1978, 54(2): 319-348.
- [80] Sánchez-Sesma F J, Campillo M. Diffraction of P, SV and Rayleigh waves by topographic features: A boundary integral formulation [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1991, 81(6): 2234-2253.
- [81] Sánchez-Sesma F J, Campillo M. Topographic effects for incident P, SV and Rayleigh waves [J]. Tectonophysics, 1993, 218(1-3): 113-125.
- [82] Liang J W, You H B, Lee V W. Scattering of SV waves by a canyon in a fluid-saturated, poroelastic layered half-space, modeled using the indirect boundary element method [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(6/7): 611-625.
- [83] Luzón F, Sánchez-Sesma F J, Rodríguez-Zañiga J L, et al. Diffraction of P, S and Rayleigh waves by three-dimensional topographies [J]. Geophysical Journal International, 1997, 129(3): 571-578.
- [84] 刘中宪, 梁建文, 徐颖. Rayleigh波在饱和半空间中凹陷地形周围的散射[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 7-15.  
Liu Zh X, Liang J W, Xu Y. Scattering of Rayleigh waves by a canyon in saturated poroelastic half-space

- [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(4): 7-15. (in Chinese)
- [85] 尤红兵, 梁建文, 赵凤新. 饱和层状场地中任意凹陷地形对入射P波的散射[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 840-849.  
You H B, Liang J W, Zhao F X. Scattering of P waves by canyons of arbitrary shape in fluid-saturated poroelastic layered half-space[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 840-849. (in Chinese)
- [86] 尤红兵, 梁建文, 赵凤新. 饱和层状场地中任意凹陷地形对入射SV波的散射[J]. 地震学报, 2011, 33(6): 735-745.  
You H B, Liang J W, Zhao F X. SV wave scattering by a canyon of arbitrary shape in a saturated layered half-space[J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, 33(6): 735-745. (in Chinese)
- [87] 巴振宁, 梁建文, 梅雄一. 斜入射平面SH波在层状饱和半空间中沉积谷地周围的三维散射[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 476-486.  
Ba Zh N, Liang J W, Mei X Y. Three-dimensional scattering of obliquely incident plane SH waves in alluvial valley embedded in layered saturated half-space[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 476-486. (in Chinese)
- [88] Liu Zh X, Liu L, Liang J W, et al. An indirect boundary element method to model the 3-D scattering of elastic waves in a fluid-saturated poroelastic half-space[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2016, 66: 91-108.
- [89] Ba Zh N, An D H. Seismic response of a 3-D canyon in a multilayered TI half-space modelled by an indirect boundary integral equation method [J]. Geophysical Journal International, 2019, 217(3): 1949-1973.
- [90] Ba Zh N, Sang Q Zh, Lee V W. 2.5D scattering of obliquely incident seismic waves due to a canyon cut in a multi-layered TI saturated half-space[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 129: 105957.
- [91] 巴振宁, 张艳菊, 梁建文. 横观各向同性层状半空间中凹陷地形对平面SH波的散射[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(2): 9-21.  
Ba Zh N, Zhang Y J, Liang J W. Scattering of SH wave by a canyon in transversely isotropic layered half-space[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35(2): 9-21. (in Chinese)
- [92] Ba Zh N, Lee V W, Liang J W, et al. Scattering of plane qP-and qSV-waves by a canyon in a multi-layered transversely isotropic half-space[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 98: 120-140.
- [93] Liu Zh X, Wang D, Liang J W, et al. The fast multipole indirect BEM for solving high-frequency seismic wave scattering by three-dimensional superficial irregularities [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2018, 90: 86-99.
- [94] Hirai H. Analysis of transient response of SH wave scattering in a half space by the boundary element method [J]. Engineering Analysis, 1988, 5(4): 189-194.
- [95] Takemiya H, Fujiwara A. SH-wave scattering and propagation analyses at irregular sites by time domain BEM [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(5): 1443-1455.
- [96] Janod F, Coutant O. Seismic response of three-dimensional topographies using a time-domain boundary element method [J]. Geophysical Journal International, 2000, 142(2): 603-614.
- [97] Sohrabi-Bidar A, Kamalian M, Jafari M K. Seismic response of 3-D Gaussian-shaped valleys to vertically propagating incident waves[J]. Geophysical Journal International, 2010, 183(3): 1429-1442.
- [98] Chen J T, Chen P Y, Chen C T. Surface motion of multiple alluvial valleys for incident plane SH-waves by using a semi-analytical approach[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2008, 28(1): 58-72.
- [99] Chen J T, Lee J W, Wu C F, et al. SH-wave diffraction by a semi-circular hill revisited: a null-field boundary integral equation method using degenerate kernels [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(5/6): 729-736.
- [100] England R, Sabina F J, Herrera I. Scattering of SH waves by surface cavities of arbitrary shape using boundary methods[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1980, 21(2/3): 148-157.
- [101] Sánchez-Sesma F J, Herrera I, Avilés J. A boundary method for elastic wave diffraction: application to scattering of SH waves by surface irregularities[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982, 72(2): 473-490.
- [102] Moeen-Varizi N, Trifunac M D. Scattering and diffraction of plane P and SV waves by two-dimensional inhomogeneities: Part I[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1988, 7(4): 179-188.
- [103] Moeen-Varizi N, Trifunac M D. Scattering and diffraction of plane P and SV waves by two-dimensional inhomogeneities: Part II[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1988, 7(4): 189-200.
- [104] Eshraghi H, Dravinski M. Scattering of plane harmonic SH, SV, P and Rayleigh waves by non-axisymmetric

- three-dimensional canyons: A wave function expansion approach [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1989, 18(7): 983-998.
- [105] Lee V W, Wu X. Application of the weighted residual method to diffraction by 2-D canyons of arbitrary shape: I. Incident SH waves [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1994, 13(5): 355-364.
- [106] Lee V W, Wu X. Application of the weighted residual method to diffraction by 2-D canyons of arbitrary shape: II. Incident P, SV and Rayleigh waves [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1994, 13(5): 365-375.
- [107] Liu D K, Han F. Scattering of plane SH-wave by cylindrical canyon of arbitrary shape [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1991, 10(5): 249-255.
- [108] 刘殿魁, 许贻燕. 各向异性介质中SH波与多个半圆形凹陷地形的相互作用 [J]. *力学学报*, 1993, 25(1): 93-102.
- Liu D K, Xu Y Y. Interaction of multiple semi-cylindrical canyons by plane SH-waves in anisotropic media [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1993, 25(1): 93-102. (in Chinese)
- [109] Zhang Ch, Liu Q J, Deng P. Surface motion of a half-space with a semicylindrical canyon under P, SV, and Rayleigh waves [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2017, 107(2): 809-820.
- [110] Trifunac M D. Scattering of plane SH waves by a semi-cylindrical canyon [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1972, 1(3): 267-281.
- [111] Wong H L, Trifunac M D. Scattering of plane SH waves by a semi-elliptical canyon [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1974, 3(2): 157-169.
- [112] Lee V W. A note on the scattering of elastic plane waves by a hemispherical canyon [J]. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1982, 1(3): 122-129.
- [113] Cao H, Lee V W. Scattering of plane SH waves by circular cylindrical canyons with variable depth-to-width ratio [J]. *European Earthquake Engineering*, 1989, 3(2): 29-37.
- [114] Lee V W. Scattering of plane SH-waves by a semi-parabolic cylindrical canyon in an elastic half-space [J]. *Geophysical Journal International*, 1990, 100(1): 79-86.
- [115] Yuan X M, Liao Zh P. Scattering of plane SH waves by a cylindrical canyon of circular-arc cross-section [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1994, 13(6): 407-412.
- [116] 房营光. 二维地表相邻多个半圆弧沟谷对SH波的散射 [J]. *地震工程与工程振动*, 1995, 15(1): 85-91.
- Fang Y G. Scattering of plane SH-waves by multiple circular-arc valleys at the two-dimensional surface of the earth [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1995, 15(1): 85-91. (in Chinese)
- [117] 梁建文, 张郁山, 顾晓鲁, 等. 圆弧形层状凹陷地形对平面SH波的散射 [J]. *振动工程学报*, 2003, 16(2): 158-165.
- Liang J W, Zhang Y Sh, Gu X L, et al. Scattering of plane SH waves by a circular-arc layered canyon [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2003, 16(2): 158-165. (in Chinese)
- [118] 刘中宪. 含圆弧形凹陷或沉积的楔形场地对平面SH波的散射 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- Liu Zh X. Diffraction of plane SH waves by a wedge-shaped medium with a circular canyon or alluvial valley [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- [119] Tsaur D H, Chang K H. Scattering of SH waves by truncated semicircular canyon [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2009, 135(8): 862-870.
- [120] Chang K H, Tsaur D H, Wang J H. Scattering of SH waves by a circular sectorial canyon [J]. *Geophysical Journal International*, 2013, 195(1): 532-543.
- [121] Hsu M S, Tsaur D H. Scattering of SH waves by a truncated semi-elliptical canyon [J]. *Journal of Mechanics*, 2014, 30(2): 137-144.
- [122] Tsaur D H, Chang K H. An analytical approach for the scattering of SH waves by a symmetrical V-shaped canyon: shallow case [J]. *Geophysical Journal International*, 2008, 174(1): 255-264.
- [123] Tsaur D H, Chang K H, Hsu M S. An analytical approach for the scattering of SH waves by a symmetrical V-shaped canyon: deep case [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(3): 1501-1511.
- [124] Zhang N, Gao Y F, Li D Y, et al. Scattering of SH waves induced by a symmetrical V-shaped canyon: a unified analytical solution [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2012, 11(4): 445-460.
- [125] Zhang N, Gao Y F, Cai Y Q, et al. Scattering of SH waves induced by a non-symmetrical V-shaped canyon [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 191(1): 243-256.
- [126] Gao Y F, Zhang N, Li D Y, et al. Effects of topographic amplification induced by a U-shaped canyon on seismic waves [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2012, 102(4): 1748-1763.
- [127] Zhang N, Gao Y F, Dai D H. Ground motion at a semi-

- cylindrical valley partially filled with a crescent-shaped soil layer under incident plane SH waves[J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2017, 11(3): 1750007.
- [128] Zhang N, Zhang Y, Gao Y F, et al. An exact solution for SH-wave scattering by a radially multilayered inhomogeneous semicylindrical canyon [J]. *Geophysical Journal International*, 2019, 217(2): 1232-1260.
- [129] Zhang N, Gao Y F, Pak R Y S. Soil and topographic effects on ground motion of a surficially inhomogeneous semi-cylindrical canyon under oblique incident SH waves[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 95: 17-28.
- [130] Lee V W, Cao H. Diffraction of SV waves by circular canyons of various depths [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1989, 115(9): 2035-2056.
- [131] Cao H, Lee V W. Scattering and diffraction of plane P waves by circular cylindrical canyons with variable depth-to-width ratio[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1990, 9(3): 141-150.
- [132] 梁建文, 李方杰, 顾晓鲁. Rayleigh波在浅圆凹陷地形附近的散射: 高频解答[J]. *地震工程与工程振动*, 2005, 25(5): 24-29.  
Liang J W, Li F J, Gu X L. Scattering of Rayleigh waves by a shallow circular canyon: high-frequency solution[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2005, 25(5): 24-29. (in Chinese)
- [133] 李伟华, 赵成刚. 圆弧形凹陷饱和土场地对平面P波散射问题的解析解[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(4): 539-546.  
Li W H, Zhao Ch G. An analytical solution for the diffraction of plane P-waves by circular cylindrical canyons in a fluid-saturated porous media half space[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(4): 539-546. (in Chinese)
- [134] 巴振宇, 梁建文, Lee V W. 平面P波在饱和半空间中凹陷地形周围的散射规律[J]. *天津大学学报*, 2010, 43(6): 523-529.  
Ba Zh N, Liang J W, Lee V W. Diffraction of plane P waves by a shallow circular-arc canyon in a saturated poroelastic half-space [J]. *Journal of Tianjin University*, 2010, 43(6): 523-529. (in Chinese)
- [135] Liang J W, Ba Zh N, Lee V W. Diffraction of plane SV waves by a shallow circular-arc canyon in a saturated poroelastic half-space [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2006, 26(6/7): 582-610.
- [136] 钟慧, 张郁山. 圆弧状凹陷地形对平面SV波散射问题的宽频带解析解[J]. *中国地震*, 2010, 26(2): 142-155.  
Zhong H, Zhang Y Sh. Broad-frequency-band analytical solution to scattering of plane SV wave by arc-shaped canyon topography [J]. *Earthquake Research in China*, 2010, 26(2): 142-155. (in Chinese)
- [137] Lee V W, Liu W Y. Two-dimensional scattering and diffraction of P-and SV-waves around a semi-circular canyon in an elastic half-space: an analytic solution via a stress-free wave function [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 63: 110-119.
- [138] 姚虞, 刘天云, 张建民. 求解二维弹性半空间散射问题的波函数组合法[J]. *地震工程学报*, 2013, 35(1): 109-113.  
Yao Y, Liu T Y, Zhang J M. Combination method of wave functions to solve the problem of scattering in 2D elastic half space [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(1): 109-113. (in Chinese)
- [139] Yao Y, Liu T Y, Zhang J M. A new series solution method for two-dimensional elastic wave scattering along a canyon in half-space [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 89: 128-135.
- [140] Zhang Ch H, Zhao Ch B. Effects of canyon topography and geological conditions on strong ground motion [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1988, 16(1): 81-97.
- [141] Zhao Ch B, Valliappan S. Incident P and SV wave scattering effects under different canyon topographic and geological conditions [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1993, 17(2): 73-94.
- [142] Zhao Ch B, Valliappan S. Seismic wave scattering effects under different canyon topographic and geological conditions [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1993, 12(3): 129-143.
- [143] Zhao Ch B. Coupled method of finite and dynamic infinite elements for simulating wave propagation in elastic solids involving infinite domains [J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(6): 1678-1687.
- [144] Bazyar M H, Song Ch M. Analysis of transient wave scattering and its applications to site response analysis using the scaled boundary finite-element method [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 98: 191-205.
- [145] Mossessian T K, Dravinski M. A hybrid approach for scattering of elastic waves by three-dimensional irregularities of arbitrary shape [J]. *Journal of Physics of the Earth*, 1992, 40(1): 241-261.
- [146] 杜修力, 熊建国, 关慧敏. 平面SH波散射问题的边界积分方程分析法[J]. *地震学报*, 1993, 15(5):

- 331-338.
- Du X L, Xiong J G, Guan H M. The boundary integral equation method on the scattering of plane SH waves [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1993, 15(5): 331-338. (in Chinese)
- [147]Ducellier A, Aochi H. Interactions between topographic irregularities and seismic ground motion investigated using a hybrid FD-FE method [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2012, 10(3): 773-792.
- [148]刘中宪, 黄磊, 梁建文. 三维局部场地对地震波的散射 IBIEM-FEM 耦合模拟 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(2): 301-310.
- Liu Zh X, Huang L, Liang J W. FEM-IBIEM coupled method for simulating scattering of seismic waves by 3-D complex local site [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(2): 301-310. (in Chinese)
- [149]Bouchon M. A simple, complete numerical solution to the problem of diffraction of SH waves by an irregular surface [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1985, 77(1): 1-5.
- [150]Kawase H. Time-domain response of a semi-circular canyon for incident SV, P and Rayleigh waves calculated by the discrete wavenumber boundary element method [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1988, 78(4): 1415-1437.
- [151]Kim J, Papageorgiou A S. Discrete wave-number boundary-element method for 3-D scattering problems [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1993, 119(3): 603-624.
- [152]Durand S, Gaffet S, Virieux J. Seismic diffracted waves from topography using 3-D discrete wavenumber-boundary integral equation simulation [J]. *Geophysics*, 1999, 64(2): 572-578.
- [153]Zhou H, Chen X F. A new approach to simulate scattering of SH waves by an irregular topography [J]. *Geophysical Journal International*, 2006, 164(2): 449-459.
- [154]Zhou H, Chen X F. The localized boundary integral equation-discrete wavenumber method for simulating P-SV wave scattering by an irregular topography [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98(1): 265-279.
- [155]Shah A H, Wong K C, Datta S K. Diffraction of plane SH waves in a half-space [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1982, 10(4): 519-528.
- [156]李彤, 金春山, 林皋. 不规则地形波散射的混合方法研究 [J]. *大连理工大学学报*, 1993, 33(6): 717-723.
- Li T, Jin Ch Sh, Lin G. Study on hybrid method for scattering waves in irregular topography [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 1993, 33(6): 717-723. (in Chinese)
- [157]Shyu W S, Teng T J, Yeh C S. Surface motion of two canyons for incident SH waves by hybrid method [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 79: 533-539.
- [158]Shyu W S, Teng T J, Chou C S. Effect of geometry on in-plane responses of a symmetric canyon subjected by P waves [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 113: 215-229.
- [159]Sánchez-Sesma F J. Site effects on strong ground motion [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1987, 6(2): 124-132.
- [160]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.
- [161]Boore D M. Can site response be predicted? [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2004, 8(1): 1-41.
- [162]Zhang W, Shen Y, Chen X F. Numerical simulation of strong ground motion for the  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake of 12 May 2008 [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(12): 1673-1682.
- [163]Olsen K B. Site amplification in the Los Angeles basin from three-dimensional modeling of ground motion [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(6B): S77-S94.
- [164]Triantafyllidis P, Suhadolc P, Hatzidimitriou P M. Influence of source on 2-D site effects [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(6): 13-1-13-4.
- [165]Parvez I A, Vaccari F, Panza G F. Influence of source distance on site-effects in Delhi city [J]. *Current Science*, 2006: 827-835.
- [166]Lozano L, Herraiz M, Singh S K. Site effect study in central Mexico using H/V and SSR techniques: Independence of seismic site effects on source characteristics [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2009, 29(3): 504-516.
- [167]McLaughlin K L, Jih R S. Scattering from near-source topography: teleseismic observations and numerical simulations [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1988, 78(4): 1399-1414.
- [168]Imhof M G, Toksoz M N. Scattering from tunnels near sources and their effect on seismic signatures of explosions [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(1): 229-242.
- [169]Lee S J, Komatitsch D, Huang B S, et al. Effects of topography on seismic-wave propagation: An example

- from northern Taiwan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2009, 99(1): 314-325.
- [170]Rodgers A J, Petersson N A, Sjogreen B. Simulation of topographic effects on seismic waves from shallow explosions near the North Korean nuclear test site with emphasis on shear wave generation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2010, 115: B11309.
- [171]Ma S, Archuleta R J, Page M T. Effects of large-scale surface topography on ground motions, as demonstrated by a study of the san gabriel mountains, Los Angeles, California effects of large-scale surface topography on ground motions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(6): 2066-2079.
- [172]Luo H. Diffraction of SH-waves by surface or sub-surface topographies with application to soil-structure interaction on shallow foundations[D]. Los Angeles: University of Southern California, 2008.
- [173]Gao Y F, Zhang N. Scattering of cylindrical SH waves induced by a symmetrical V-shaped canyon: near-source topographic effects[J]. Geophysical Journal International, 2013, 193(2): 874-885.
- [174]Zhang N, Gao Y F, Yang J, et al. An analytical solution to the scattering of cylindrical SH waves by a partially filled semi-circular alluvial valley: near-source site effects[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 14(2): 189-201.
- [175]Zhang N, Gao Y F, Wu Y X, et al. A note on near-field site amplification effects of ground motion from a radially inhomogeneous valley [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 17 (4) : 707-718.
- [176]张宁, 高玉峰, 陈欣, 等. 风化半圆形河谷对柱面SH波的散射解析解[J]. 地震工程学报, 2017, 39(2): 348-355.
- Zhang N, Gao Y F, Chen X, et al. An analytical solution to the scattering of cylindrical sh waves by a weathered semi-circular canyon[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(2): 348-355. (in Chinese)
- [177]城市桥梁抗震设计规范:CJJ 166—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [178]水工建筑物抗震设计标准: GB51247—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [179]Dibaj M, Penzien J. Response of earth dams to traveling seismic waves[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1969, 95(2): 541-560.
- [180]沈珠江, 徐志英. 考虑行进波的土工建筑物地震反应分析[J]. 水利学报, 1983(11): 37-43.
- Shen Zh J, Xu Zh Y. Response analysis of earth structures under tracing seismic waves [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983(11): 37-43. (in Chinese)
- [181]楼梦麟, 林皋. 重力坝地震行波反应分析[J]. 水利学报, 1984(5): 26-32.
- Lou M L, Lin G. Dynamic response of gravity dams subjected to traveling seismic waves[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984(5): 26-32. (in Chinese)
- [182]刘浩吾, 何发祥. 拱坝行波输入的动力分析和抗震设计[J]. 水利学报, 1990 (9): 26-35.
- Liu H W, He F X. Travelling-wave-input dynamic analysis of arch dams and their aseismic design [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990 (9) : 26-35. (in Chinese)
- [183]何庆祥, 沈祖炎. 结构地震行波效应分析综述[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(1): 50-57.
- He Q X, Shen Z Y. Review of structural seismic analysis of travelling wave effects [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29 (1) : 50-57. (in Chinese)
- [184]刘洪兵, 范立础. 大跨桥梁考虑地形及多点激励的地震响应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 641-646.
- Liu H B, Fan L Ch. Seismic analysis of long span bridges considering topographic effects and multi-supported excitations [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2003, 31(6): 641-646. (in Chinese)
- [185]王蕾, 赵成刚, 王智峰. 考虑地形影响和多点激励的大跨高墩桥地震响应分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(1): 50-53.
- Wang L, Zhao Ch G, Wang Zh F. Seismic responses analysis of continuous rigid-framed bridge with hige piers considering topographic effects and multi-support excitations [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(1): 50-53. (in Chinese)
- [186]王蕾, 赵成刚, 屈铁军. SV波入射下地形条件对大跨刚构桥地震响应的影响[J]. 地震学报, 2008, 30(3): 307-314.
- Wang L, Zhao Ch G, Qu T J. Seismic response of long-span rigid-framed bridge to incident SV wave with topographic effect being considered [J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 30(3): 307-314. (in Chinese)
- [187]刘必灯. 考虑地形影响的多点输入下大跨桥梁地震反应及碰撞反应分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2008.
- Liu B D. Seismic responses and collision responses analysis of long-span bridges for multi-supported excitations and topographic effects [D]. Harbin: China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese)

- [188]周国良, 李小军, 李铁萍, 等. SV 波入射下峡谷地形对多支撑大跨桥梁地震反应影响分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1572-1578.  
Zhou G L, Li X J, Li T P, et al. Canyon topography effects on seismic responses of multi-support bridge under incident SV seismic waves[J]. Rock and Soil mechanics, 2012, 33(5): 1572-1578. (in Chinese)
- [189]Zhang Ch H, Pan J W, Wang J T. Influence of seismic input mechanisms and radiation damping on arch dam response[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, 29(9): 1282-1293.
- [190]程嵩. 土石坝地震动输入机制与变形规律研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.  
Cheng S. Research on seismic input mechanism and deformation law of embankment dams[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- [191]宋贞霞. 考虑河谷场地效应的拱坝-地基地震响应分析方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.  
Song Zh X. Research on seismic response analysis method of arch dam considering the effect of valley site[D]. Harbin: China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese)
- [192]杨正权, 刘小生, 汪小刚, 等. 土石坝地震动输入机制研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2013, 11(1): 27-33.  
Yang Zh Q, Liu X Sh, Wang X G, et al. An overview on research of ground motion inputting for earth-rock fill dam[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2013, 11(1): 27-33. (in Chinese)
- [193]姚虞, 刘天云, 张建民. 高面板坝地震动三维非一致输入的波函数组合法[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 324-328, 348.  
Yao Y, Liu T Y, Zhang J M. Wave function combination method used for three-dimensional non-uniform input of earthquake motion in high concrete-faced rockfill dam[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 324-328, 348. (in Chinese)
- [194]姚虞, 王睿, 刘天云, 等. 高面板坝地震动非一致输入响应规律[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2259-2266.  
Yao Y, Wang R, Liu T Y, et al. Seismic response of high concrete face rockfill dams subject to non-uniform input motion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2259-2266. (in Chinese)
- [195]王刚, 付鹏程, 张建民. 自由场地震输入下某堆石坝的动力响应[C]//第七届全国土动力学学术会议论文集. 北京: 清华大学出版社, 2006: 497-502.  
Wang G, Fu P Ch, Zhang J M. Seismic response of a CFRD subjected to free field motion input[C]// Proceedings of the 7th China Conference on Soil Dynamics. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 497-502. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)