坡形场地对海底地震动的影响

陈宝魁^{1,2},黄 怡¹,陈少林³,张 敏¹

(1.南昌大学建筑工程学院,江西南昌 330031; 2.中国地震局工程力学研究所,黑龙江哈尔滨 150080;3.南京航空航天大学民航学院土木与机场工程系,江苏南京 210016)

摘要:为了填补地形对海底地震动影响认识上的空白,本文通过数值模拟,分析了海底常见坡形场地的地震动特性。结合自编地震波动程序与有限元动力分析软件 ADINA,建立不同坡度海底场地模型,分析了地形、入射角度等 对海底场地响应的影响。通过比较不同坡度模型的场地响应与响应谱特征,确定地形对海底地震动的影响。结果 表明:P波入射时,坡形场地对海底地震动的场地放大效应与场地坡度有关,且场地放大效应随着场地坡度的增大 而增强,与陆上坡形场地地震响应规律区别较大。SV波入射时,坡形场地对海底场地地震响应无明显影响。

关键词:海底地震动;地形效应;坡形场地;入射角度;地震反应

中图分类号:P315.91;TU435 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-4523(2023)02-0410-09 DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.02.012

引 言

自美国圣费尔南多地震记录印的异常放大现象 得到关注之后,大量的实测地震动记录显示局部地 形对场地地震响应具有明显的影响,尤其是山丘、河 谷、峭壁等孤立的地形。为此,地震学和工程抗震领 域的学者展开了一系列理论研究。张宁等[2]利用波 函数展开方法和区域匹配技术提出了含峭壁V形 峡谷对SH波散射的解析解,并发现上部峭壁会增 强峡谷对地震动的地形放大效应。卓发成^[3]利用黏 弹性人工边界和显式动力有限元方法对SV波入射 时山谷地形的地震响应进行了分析。为探索浅切割 的高山峡谷复杂地形的地震动放大效应,李郑梁 等^[4]基于边界积分法获得了场地任意点的地震动, 发现地形效应的影响与入射波类型、频率、入射角 度,峡谷深度和场地几何形状密切相关。尹超等^[5] 讨论了坡形场地的地形效应,基于黏弹性人工边界 和自编程序建立了二维有限元模型,并探讨了不同 入射角和模型尺寸对坡体地形放大效应的影响 规律。

大多数地形效应的研究对象均集中在陆上局部 地形,鲜少涉及到海底场地。海底环境复杂,近岸海 床具有一定坡度。并且,海底地震动与陆上地震动 特性也存在显著差别。Boore等^[6]分析了部署在南 加州海岸的海床地震测量系统(SEMS)获得的地震 记录,并确定了近海地震动的几个特征。Diao等[7] 总结了近海地震动特性与陆地地震动特性的差异, 并指出海水层对地震动纵波具有削弱作用。为了研 究陆上地震动与海上地震动的区别,陈宝魁等[8-11]用 统计分析的方法研究了部分海底及陆地强震记录的 等延性强度折减系数谱、弹塑性响应谱、竖向/水平 加速度峰值比和竖直/水平地震响应谱比,并进行综 合数值分析以了解淤泥层和斜坡场地对近海地面运 动的影响。Zhang等^[12-13]对海陆地震动的时频域工 程特性进行了对比。陆地地震动与海底地震动的差 异主要来自海水层与软土沉积层的影响。朱镜清 等[14]提出了海底淤泥的流变性质对海洋工程的地震 作用环境的影响问题,但软土沉积物对海底地震动 特性的影响还未得到详细的研究。Crouse 等^[15]建 立了一个简单的模型,将地震动的垂直分量完全由 垂直传播的P波代替,成功地解释了有海水场地垂 直地震动比没有上覆水层场地垂直地震动小得多的 原因。Hatayama^[16]通过一些数值实验从理论上评 估了海水对地震地面运动的影响,并指出瑞利波会 受到海水的强烈影响。

地形因素对海底地震动的影响研究受限于海底 强震记录相对不足,目前主要基于解析和数值方法 研究海底地形的影响。为探索地形对地震动的影响 规律,Hao^[17]、Bi等^[18-19]开发了一种基于理论的分析 方法来模拟不规则地形和随机土壤性质场地上的地 震地面运动的空间变化。在这基础上,Li等^[20-21]进 一步建立了一个海底场地模型,通过流体动力学方

收稿日期: 2021-09-22; 修订日期: 2021-10-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52268076,51868048,51808099);中国地震局工程力学研究所基本科研业务费 专项资助项目(2018D18)。

程和一维波浪理论来模拟近海地面运动的传播。 Fan等^[22]在Crouse等^[15]的模型基础上提出了一种考 虑海水层和海底土壤饱和度因素的空间变化地震动 模拟理论。Liu等^[23]研究了上覆水饱和土中多点地 震激励的理论方法和数值模拟问题,考虑了水深和 入射角度对地震动的影响。解析方法虽然可以准确 模拟海底地震动在一维场地条件下的地震响应,但 难以模拟复杂海底场地的地震动传播特性。本文结 合自编波动分析程序与有限元动力分析软件建立二 维海底场地模型,分析与总结坡形场地对海底地震 动特性的影响规律。

1 数值模拟

1.1 场地模拟方法

本文基于 ADINA 有限元软件,建立二维多层 海底场地模型,用于探索坡形场地对海底场地地震 响应的影响规律。二维海底场地模型主要由海水 层、场地土层和各类边界组成,本文采用 ADINA 中 自带的本构材料、单元和边界来模拟海底场地,二维 海底场地模型中海水层和场地土层被定义为各向同 性(Isotropic)线弹性材料,在定义海水层和土层材 料时需输入材料的弹性模量、泊松比和密度。用二 维势流体单元(2-D Fluid)模拟海水层,用二维实体 单元(2-D Solid)模拟场地土层。土层与海水层之间 设置 FSI流固耦合边界,ADINA软件可自动处理海 水层和场地土层的流固耦合问题。为模拟海水层的 流体性质,需在海水层表面设置自由表面边界,在海 水层两侧设置流体无限域边界。

1.2 黏弹性人工边界与地震外源输入

黏弹性人工边界是当前解决从无限域中截取近 场有限区域并在其边界处施加虚拟边界条件来模拟 远场无限地基辐射阻尼效应的主要方法。主要作用 是为了使结构基础和地表产生的散射波在人工边界 上被吸收或穿过边界进入无限域,从而保证计算的 准确性和高效性。在有限元软件中实现黏弹性人工 边界的关键为在截断边界节点上并联弹簧-阻尼系 统,并选取适当的弹簧刚度和阻尼系数。在ADINA 软件中可利用软件自带的单自由度接地弹簧单元方 便地实现黏弹性人工边界的设置。黏弹性人工边界 弹簧-阻尼系统的弹簧刚度系数与黏性阻尼器的阻 尼系数计算公式为:

$$\begin{cases} K_{\rm N} = \alpha_{\rm N} \frac{G}{r} A, \ C_{\rm N} = \rho v_{\rm P} A \\ K_{\rm T} = \alpha_{\rm T} \frac{G}{r} A, \ C_{\rm T} = \rho v_{\rm S} A \end{cases}$$
(1)

式中 $K_N = K_T \beta M \beta \mu$ 簧的法向刚度系数与切向 刚度系数; $C_N = C_T \beta M \beta \beta t$ 化固定器的法向阻尼系 数与切向阻尼系数; $v_S = v_P \beta M \beta SV$ 波波速与 P 波 波速; ρ 为介质密度;r 为波源到人工边界的距离; a_N 与 $a_T \beta M \beta \lambda$ 之向与切向黏弹性人工边界的修正系 数,在二维问题中 a_N 的经验取值范围为 $0.8 \sim 1.2$, a_T 的经验取值范围为 $0.35 \sim 0.65$,本文取 $a_N = 1.0$, $a_N = 0.5$;A 为单元节点对应的有效面积,二维问题中为 边界单元长。

对于近场波动问题的有限元模拟,单元的网格 尺寸Δ*x*通常要求满足以下条件:

$$\Delta x \leqslant \frac{1}{n} \lambda_{\min} \tag{2}$$

式中 n为网格数量,n的取值范围一般为8~12; λ_{\min} 为最小波长, $\lambda_{\min} = \frac{v}{f}$,其中,f为最高频率,v为输 入地震波在介质中的波速。

黏弹性人工边界的地震输入法主要分为两种: 内源问题和外源(波源)问题。本文建立的二维海底 场地模型采用外源输入法,即在黏弹性人工边界节 点处输入地震动来计算相应的地震响应。人工边界 外受边界约束条件影响不能直接输入的入射波通过 外源输入法将位移或加速度时程转化为等效集中力 或等效应力加载在黏弹性人工边界上。

以黏弹性人工边界上的任一节点为例,对该节 点进行受力分析,该节点处施加的等效应力 τ(x,y,z)为:

$$\tau(x, y, z) = F(t) - f(t) \tag{3}$$

式中 F(t)为人工边界节点处输入的等效应力; f(t)为弹簧-黏性阻尼器元件内力之和,其运动方 程为:

$$f(t) = C_{\rm b}\dot{\omega}(x, y, t) + K_{\rm b}\omega(x, y, t)$$
(4)
将式(4)代人式(3)可得:

 $F(t) = \tau(x, y, t) + C_b \dot{\omega}(x, y, t) + K_b \omega(x, y, t)$ (5) 式中 $C_b = K_b \beta M \beta$ 滑簧-黏性阻尼器系统的黏性 系数与弹性刚度; $\dot{\omega}(x, y, t) = \omega(x, y, t) \beta$ 别为等效 荷载施加于人工边界节点上时产生的速度与位移。

为实现边界条件的准确模拟,该波动输入方法 需满足在人工边界处施加等效荷载所产生的位移和 应力与相应的原自由场的位移和应力相同的前提 条件:

$$\boldsymbol{\omega}(x, \boldsymbol{\nu}, t) = \boldsymbol{\omega}_0(x, \boldsymbol{\nu}, t) \tag{6}$$

$$\tau(x, y, t) = \tau_0(x, y, t) \tag{7}$$

将式(6)与(7)代入式(5),可得:

$$F(t) = \tau_0(x, y, t) + C_{\rm b}\dot{\omega}_0(x, y, t) + K_{\rm b}\omega_0(x, y, t)$$
(8)

式中 $\tau_0(x, y, t), \dot{\omega}_0(x, y, t)$ 和 $\omega_0(x, y, t)$ 可由波动

理论直接计算得到,而弹簧-黏性阻尼器系统的参数 也可由式(1)计算得到。

1.3 模型验证

为了验证建模方法的正确性,建立了单层海底 场地模型,将P波垂直入射时单层海底场地模型海 床中心位置B点的竖向传递函数与以往研究的模型 传递函数^[6,15,21]进行了比较。传递函数为海底场地 场地中点输出的地震动位移傅里叶谱与海底场地底 部中点输入的基岩地震动位移傅里叶谱之比。该模 型海水层深度为60m,单层土深度为40m,场地宽 度为1200m。材料参数均与以往研究的模型材料 参数保持了一致^[21]。由图1可得,本文提出模型的P 波竖向传递函数与以往研究中模型的竖向传递函数 基本一致,验证了本文建模方法的正确性。





1.4 坡形场地模型

为了研究场地坡度对海底地震动的影响规律, 建立坡度不同的多层海底场地模型和相应的水平场 地模型。为了准确分析坡度对场地响应的影响,不 同坡度模型计算点位置的水深与其下覆盖层完全相 同。考虑到近海位置海床的坡度一般较小,因此,海 底坡形场地的坡度考虑为5%,7.5%和10%,海底 坡形场地和水平场地的示意图如图2所示。为了控 制变量仅为场地坡度因素,不同坡度的坡型场地模 型与水平海底场地模型的计算点B处的水深、场地 覆盖层、地震输入脉冲均相同,且不同坡度海底场地 中B点的水深均为60m。参考渤海海域的相关资 料^[24-28],确定模型中场地各土层的密度、剪切模量、 波速等参数。海水层和场地土层的材料参数如表1 所示。以脉冲作为地震激励,分别输入垂直与10°入 射的P波,以及垂直与5°入射的SV波。图3和4分 别为P波和SV波的位移时程和位移傅里叶谱。根 据式(2),P波入射时模型网格尺寸选取5m×5m, SV波入射时模型网格尺寸为2.5 m×2.5 m。



图2 海底场地模型示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of offshore site models(Unit:m)

表1 模型各覆盖层物理参数

Tab. 1 Physical parameters of each covering layer of models

土层	p/	泊松比	$V_{ m P}/$	$V_{ m s}/$	E/	G/
类别	$(kg \cdot m^{-3})$	μ	$(m \boldsymbol{\cdot} s^{-1})$	$(m \boldsymbol{\cdot} s^{-1})$	MPa	MPa
海水层	1000	0.330	1500	-	2340	-
黏土覆盖层	2000	0.491	1700	220	289	97
砂土覆盖层	2100	0.479	1800	360	805	272
花岗岩	2250	0.451	2170	650	2758	951

2 分析结果

2.1 位移时程

为了探究坡形场地对海底地形地震响应的影 响,以垂直与斜入射的P波和SV波作为地震激励, 建立不同坡度坡形海底场地和水平海底场地模型。 以坡度为5%海底场地为例,在P波与SV波垂直入 射下,比较海床位置B点的位移时程,如图5所示。 图中P波入射时,坡形与水平场地的竖向位移时程 趋势相同,但坡形海底场地的峰值明显大于水平场 地;SV波入射时,坡形与水平海底场地B点的水平 向位移时程曲线基本重合。当坡形海底场地坡度为 7.5%和10%时,坡形海底场地和水平海底场地输 出的位移时程规律与5%坡形海底场地相同,P波、



Fig. 3 Displacement time history and Fourier response spectrum of P wave



Fig. 4 Displacement time history and Fourier response spectrum of SV wave

SV 波斜入射的场地输出结果与垂直入射时相似。 可见,P 波入射时坡形海底场地对场地地震响应有 明显的放大效应,而 SV 波入射时坡形海底场地对 场地地震响应无明显影响。

图 6 为 P 波、SV 波垂直入射时 5%, 7.5%, 10% 坡形海底场地B点的位移时程比较图。由图6(a)可 得,当P波垂直入射时三种坡度的坡形海底场地B 点的竖向位移时程曲线趋势相似,竖向位移峰值均 出现在0.2 s左右,竖向位移峰值(PGD)随着坡度的 增大而增大。表2列出了P波入射时不同坡度海底 场地B点的竖向位移峰值(PGD),P波垂直入射时 5% 坡形场地 B 点的竖向 PGD 为水平场地的 1.24 倍,7.5% 坡形场地为1.47倍,10% 坡形场地为1.74 倍。由表2可得P波10°斜入射时三种坡度的坡形 海底场地B点的竖向位移峰值(PGD)规律与P波垂 直入射时相同。图6(b)显示,当SV波垂直入射时, 不同坡度海底场地的水平向位移时程曲线出现相位 差且随着坡度的增大水平向位移时程曲线的峰值出 现时间越晚,但不同坡度海底场地B点的水平向位 移峰值大小无明显差别。SV 波5°斜入射时不同坡 度海底场地B点的位移时程曲线规律与垂直入射时 相同。



Fig. 5 Displacement time history of 5% slope site model and flat site model



图6 不同坡度坡形海底场地位移时程

Fig. 6 Displacement time history of different slope site models

表 2 斜坡与水平海底场地 B 点竖向 PGD Tab. 2 PGD at point B of slope and flat site models

坡度 -	竖向 PGD/cm			
	P波垂直入射	P波斜入射		
水平	0.157	0.153		
5%	0.194	0.195		
7.5%	0.231	0.234		
10%	0.271	0.272		

2.2 加速度时程

图 7 为 P 波、SV 波垂直入射时 5%,7.5% 和 10% 坡形海底场地 B 点的加速度时程比较图。从 图 7(a)中可得,随着坡形海底场地坡度的增大,海 底坡形场地 B 点的地震响应增强,且竖向加速度峰 值也随之增大,这一规律与竖向位移时程规律相同。 表 3 列出了 P 波入射时不同坡度海底场地 B 点的竖 向加速度峰值(PGA)。P 波垂直入射时 5% 坡形场 地 B 点的竖向 PGA 为水平场地的 0.95 倍,7.5% 坡 形场地为 1.43倍,10% 坡形场地为 1.77倍,5% 坡形 场地对竖向 PGA 的放大效果不明显。由表 3 可得 P 波斜入射时坡度因素影响下的坡形海底场地地震响 应规律与 P 波垂直入射时相似。如图 7(b)所示,当 SV 波垂直入射时,三种不同坡度海底场地 B 点的水 平向加速度时程曲线规律与P波垂直入射时有所区别,SV波垂直入射时的水平向加速度时程曲线出现相位差,且随着坡度的增大水平向加速度时程曲线 的峰值出现时间越晚,但不同坡度海底场地B点的 水平向加速度峰值无明显差别,SV波5°斜入射时的 曲线规律与SV波垂直入射时相似。由此可见,SV 波入射时,坡度因素对海底场地地震响应的影响不 明显。





表 3 斜坡与水平场地模型 B 点竖向 PGA Tab. 3 PGA at point B of slope and flat site models

坡度 -	竖向 PGA/gal			
	P波垂直入射	P波斜入射		
水平	426.42	423.41		
5%	406.27	407.04		
7.5%	605.10	562.00		
10%	774.45	794.71		

2.3 S/F谱比

为了直观体现坡度因素对海底场地地震响应的 影响大小,引入S/F谱比定量描述坡形场地的地形 放大效应。S/F谱比为坡形海底场地的位移傅里叶 谱与对应水平海底场地的位移傅里叶谱之比。图8 为P波、SV波垂直入射时不同坡度海底场地B点的 S/F谱比。P波垂直入射时,5%坡形海底场地的S/F 谱比曲线在1上下浮动,而当坡形场地坡度为7.5% 和10%时S/F谱比明显增大,且在横坐标为5Hz和 17Hz时出现峰值,10%坡形海底场地的S/F谱比 可达到7,说明坡形海底场地的地形放大效应较为 明显。SV波垂直入射时,不同坡度海底场地的S/F 谱比大致上为一条值为1的直线,可得SV垂直入射 时坡形海底场地的地形放大效应不明显。P波斜入 射和SV波斜入射的规律与垂直入射时相似。



Fig. 8 S/F spectral ratio of different slope site models

2.4 W/L谱比

海底场地地震动位移傅里叶谱与相应的陆地场 地地震动位移傅里叶谱之比,简写为W(Water)/L (Land)谱比,W/L谱比能直观地反映出海水层对海 底地震动的影响。图9比较了P波垂直入射时5%, 7.5%和10%坡形海底场地B点的竖向W/L谱比 (平滑曲线)。基于Crouse等^[15]计算水平场地下P 波与海水共振频率的计算方程可知,水深60m时,P 波在海水中的三阶衰减频率为20Hz,但受到坡型 场地影响,图9中W/L谱比在P波与水层的共振频 率内衰减并不明显,随着坡度的增大W/L谱比的峰 值略有增加。图10为SV波垂直入射时水平与坡形 场地的W/L谱比,由图可知,SV波入射时不同坡度 海底场地的W/L谱比均近似于值为1的水平线,说 明水层与坡度对SV波未产生影响。



图 9 P波垂直入射时不同坡度海底场地竖向 W/L 谱比





图 10 SV 波垂直入射时 5% 坡形海底场地水平向 W/L 谱比

2.5 传递函数

为了直观体现场地对地震动的放大效应,本文 采用传递函数比较坡度因素对海底场地地震动放大 效应的影响。图 11为P波垂直入射时5%,7.5%和 10%坡形海底场地B点的竖向传递函数(平滑曲 线)。由图 11可得,三种不同坡度坡形海底场地B 点的竖向传递函数整体上随着坡度的增大而增大, 尤其是传递函数峰值随坡度增大的趋势更为明显。 无论P波垂直入射时还是10°斜入射时,10%坡形海 底场地B点的竖向传递函数均能达到10左右。图 12为SV波垂直入射时5%坡形海底场地与对应水 平海底场地B点的水平向传递函数(平滑曲线),5% 坡形海底场地与对应水平海底场地B点的水平向传 递函数曲线大致上重合。当坡形海底场地坡度为 7.5%和10%时,水平向传递函数曲线规律相似,再 次印证了海水层对SV波水平向地震动影响很小的

Fig. 10 W/L spectral ratio of 5% slope site when SV wave is incident vertically

结论。



图11 P波垂直入射时不同坡度海底场地竖向传递函数

Fig. 11 The vertical transfer function of different slope sites when the P-wave is incident vertically



图 12 SV 波垂直入射时 5% 坡形海底场地水平向传递函数 Fig. 12 Horizontal transfer function of 5% slope site when SV-wave is incident vertically

3 结 论

为了分析地形对海底地震动的影响,分别建立 P波与SV波不同入射角度下,不同坡度坡型海底场 地与水平海底场地模型。并讨论地形、坡度、以及入 射角度等因素对海底地震动特性的影响,具体结论 如下:

(1)在P波入射时,海底坡形场地地震响应的位 移时程、加速度时程、传递函数和S/F谱比等参数与 水平场地相比均表现出明显的地形放大效应,其结 果与声波在海水中存在的"坡形放大效应"一致。P 波垂直入射时10%坡形海底场地的位移峰值可达 到水平海底场地的1.7倍,P波10°斜入射时可达到 1.8倍,放大效果明显。

(2)SV波入射时,无论是位移与加速度时程,还 是谱比与传递函数,坡形与水平海底场地的地震响 应基本一致。其S/F谱比及W/L谱比均在1左右, 说明坡度与海水层对SV波均无明显影响。

(3)P波入射时,随坡度的增大海底坡形场地的

放大效应随之增强,7.5%和10%坡形场地的放大效应远大于5%坡形场地。但坡度的变化对SV波的影响有限。另外,入射角度对P波与SV波的影响较小。

本文主要考虑海底常见的坡形场地对地震动的 影响,但真实海底场地远比理想化的数值模型复杂。 因此,不同地形、复杂海底场地对海底地震动影响以 及坡形海底场地影响的界限坡度还需要进一步 研究。

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] 张宁,潘家琐,代登辉,等.含峭壁V形峡谷对地震
 SH 波散射的解析解[J].地球物理学报,2021,64
 (3):896-906.

ZHANG Ning, PAN Jiasuo, DAI Denghui, et al. Analytical solution of seismic SH wave scattering by a V-shaped canyon with cliffs[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(3): 896-906.

- [3] 卓发成.山谷地形对入射SV波地震反应分析[J].地 震工程学报,2021,43(1):11-18.
 ZHUO Facheng. Seismic response analysis of valley topography to incident SV wave [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021,43(1):11-18.
- [4] 李郑梁,李建春,刘波,等.浅切割的高山峡谷复杂地形的地震动放大效应研究[J].工程地质学报,2021,29(1):137-150.

LI Zhengliang, LI Jianchun, LIU Bo, et al. Study on the magnification effect of ground motions in shallowcut alpine valleys and complex terrain[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(1):137-150.

 [5] 尹超,李伟华,赵成刚.SV波斜入射下坡体地形放大效应的研究[J].振动工程学报,2020,33(5): 971-984.

YIN Chao, LI Weihua, ZHAO Chenggang. Research on the amplification effect of SV wave oblique incident downslope topography [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(5): 971-984.

- [6] Boore D M, Smith C E. Analysis of earthquake recordings obtained from the Seafloor Earthquake Measurement System (SEMS) instruments deployed off the coast of southern California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(1): 260-274.
- [7] Diao Hongqi, Hu Jinjun, Xie Lili. Effect of seawater on incident plane P and SV waves at ocean bottom and engineering characteristics of offshore ground motion re-

cords off the coast of southern California, USA [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(2): 181-194.

- [8] Chen Baokui, Wang Dongsheng, Li Hongnan, et al. Characteristics of earthquake ground motion on the seafloor[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2015, 19 (6): 874-904.
- [9] 陈宝魁,王东升,李宏男,等.海底地震动特性及相关 谱研究[J].防灾减灾工程学报,2016,36(1):38-43.
 CHEN Baokui, WANG Dongsheng, LI Hongnan, et al. Research on the characteristics of submarine ground motions and related spectra[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 38-43.
- [10] Chen Baokui, Wang Dongsheng, Li Hongnan, et al. Vertical-to-horizontal response spectral ratio for offshore ground motions: analysis and simplified design equation[J].Journal of Central South University, 2017, 24(1):203-216.
- [11] Chen Baokui, Wang Dongsheng, Chen Shaolin, et al. Influence of site factors on offshore ground motions: observed results and numerical simulation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 145: 106729.
- [12] Zhang Qi, Zheng Xiangyuan. Offshore earthquake ground motions: distinct features and influence on the seismic design of marine structures [J]. Marine Structures, 2019, 65: 291-307.
- [13] Zhang Qi, Zheng Xiangyuan. Temporal and spectral characteristics of seismic ground motions: offshore versus onshore[J]. Marine Structures, 2020, 74: 102812.
- [14] 朱镜清,周建,朱达力.海底淤泥层对海洋工程地震 作用环境的影响问题[J].地震工程与工程振动,1999, 19(3):1-6.
 - ZHU Jingqing, ZHOU Jian, ZHU Dali. The influence of the submarine silt layer on the seismic environment of marine engineering[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1999,19(3): 1-6.
- [15] Crouse C B, Quilter J. Seismic hazard analysis and development of design spectra for Maul A platform [C].
 Proceedings of Pacific Conference on Earthquake Engineering, 1991, 3: 137-148.
- [16] Hatayama K. Theoretical evaluation of effects of sea on seismic ground motion [C]. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada. 2004: 3229.
- [17] Hao Hong. Input seismic motions for use in the structural response analysis[J]. WIT Transactions on the Built Environment, 1970, 3:87-100.

- [18] Bi Kaiming, Hao Hong. Influence of irregular topography and random soil properties on coherency loss of spatial seismic ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(9): 1045-1061.
- [19] Bi Kaiming, Hao Hong. Modelling and simulation of spatially varying earthquake ground motions at sites with varying conditions [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2012, 29: 92-104.
- [20] Li Chao, Hao Hong, Li Hongnan, et al. Theoretical modeling and numerical simulation of seismic motions at seafloor[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 77: 220-225.
- [21] Li Chao, Hao Hong, Li Hongnan, et al. Modeling and simulation of spatially correlated ground motions at multiple onshore and offshore sites [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2017, 21(3): 359-383.
- [22] Fan Shuli, Shi Yi, Liu Chunguang, et al. Simulation of spatially varying seafloor ground motions with random seawater layer and complex terrain [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 111: 110-118.
- [23] Liu Guohuan, Liu Yaqiang, Feng Xiao, et al. Simulation of spatially variable seismic underground motions in saturated double-phase media with overlying water excited by SV-wave and difference from P-wave incidence
 [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 123: 144-161.
- [24] 兰景岩,刘化涤,吕悦军,等.渤海海域典型场地土的 动剪切模量比和阻尼比的统计值[J].地震研究, 2012,35(2):260-267.
 LAN Jingyan, LIU Huadi, LÜ Yuejun, et al. Statistical values of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of typical soils in the Bohai Sea[J]. Journal of Seis-
- [25] 兰景岩, 吕悦军, 彭艳菊,等. 渤海海域典型场地土的 动力学特征[J]. 世界地震工程, 2011, 27(3): 23-31.
 LAN Jingyan, LÜ Yuejun, PENG Yanju, et al. Dynamic characteristics of soil in typical sites in the Bohai Sea[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(3): 23-31.

mological Research, 2012, 35(2): 260-267.

 [26] 吕悦军,唐荣余,刘育丰,等.渤海PL19-3油田设计地 震动参数研究[J].防灾减灾工程学报,2003,23(4): 26-32.

LÜ Yuejun, TANG Rongyu, LIU Yufeng, et al. Study on design ground motion parameters of Bohai PL19-3 oilfield [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003,23(4):26-32.

[27] 吕悦军,唐荣余,沙海军.渤海海底土类动剪切模量 比和阻尼比试验研究[J].防灾减灾工程学报,2003,23

(2): 35-42.

LÜ Yuejun, TANG Rongyu, SHA Haijun. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of submarine soils in the Bohai Sea[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(2): 35-42.

[28] 周杨锐, 董明明, 吴海京, 等. 渤海浅层沉积物剪切波

速与深度的相关性分析[J]. 工程勘察, 2011, 39(6): 90-93.

ZHOU Yangrui, DONG Mingming, WU Haijing, et al. Correlation analysis between shear wave velocity and depth of shallow sediments in the Bohai Sea[J]. Geo-technical Investigation & Surveying, 2011, 39 (6) : 90-93.

Influence of slope sites on offshore ground motion

CHEN Bao-kui^{1,2}, HUANG Yi¹, CHEN Shao-lin³, ZHANG Min¹

(1.School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China;2.Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;3.Department of Civil and Airport Engineering, College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to fill the gap in the understanding of offshore ground motion by topography, numerical simulation is used to analyze ground motion characteristics of common offshore slope sites. This paper combines the self-made seismic wave program and finite element dynamic analysis software ADINA to establish different slope site models, and analyzes the influence of topography and incident angle on the response of offshore site. This paper compares the site response and response spectrum characteristics of different slope site models to determine impact of terrain on ground motions. The results show that when P-wave is incident, site amplification effect of slope sites on the ground motion is related to site slope, and site amplification effect increases with site slope, which is quite different from seismic response law of onshore sites. When SV-wave is incident, slope sites has no obvious influence on seismic response of offshore site.

Key words: offshore ground motion; topographic effect; slope site; incidence angle; seismic response

作者简介:陈宝魁(1982—),男,博士,副教授。电话:15180166744;E-mail:baokui_2000@163.com。 通讯作者:陈少林(1974—),男,博士,教授。电话:13851650456;E-mail:iemcsl@nuaa.edu.cn。