

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220914004

海湾深厚海床场地二维非线性远场强地震反应特征*

缪涵¹, 王彦臻¹, 方怡^{1,2}, 陈国兴^{1,3}

(1. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏南京 210009; 2. 国家自然灾害防治研究院, 北京 100085; 3. 江苏省土木工程防震技术研究中心, 江苏南京 210009)

摘要:人们早已认识到远距离强地震可能引起覆盖层深厚的沿海或盆地城市发生严重的地震灾害。以某杭州湾跨海通道为背景, 建立跨海湾海床二维场地的精细化有限元模型, 依据区域地震活动性, 选取远场大地震井下记录作为海床基岩的输入地震动, 考虑地震动特性、海床微地形特征、沉积土的空间异质性和非线性滞回特性, 研究了远场强震引起的海床场地非线性地震效应特征。海床场地效应与海床微地形特征、沉积土的空间异质性和输入地震动特性密切相关。凹陷地表边缘、基岩隆起和凹陷部位及海床土软弱区域的场地放大效应显著, 呈现出低频聚焦现象, 且竖向地震反应更为明显。仅考虑水平向地震作用将显著低估海床非线性场地效应程度, 水平向和竖向地震同时作用引起的竖向地震效应不应忽视。

关键词: 深厚海床场地; 远场强地震; 二维非线性场地效应; 土的非线性; 海床地形地貌

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)04-0637-13

2D Nonlinear Site Response Characteristics of a Cross-bay Deep Seabed Subjected to Far-field Strong Earthquakes

MIAO Han¹, WANG Yanzhen¹, FANG Yi^{1,2}, CHEN Guoxing^{1,3}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China;

2. National Institute of Natural Hazards, Beijing 100085, China;

3. Civil Engineering and Earthquake Disaster Prevention Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China

Abstract: It has long been recognized that urban areas located in coastal regions or basins with deep and soft soil deposits subjected to long-distance strong earthquakes are prone to serious seismic disasters. Taking a sea-crossing project in Hangzhou Bay as the research issue, a 2D refined finite element simulated model of a large-scale seabed site was established. According to the regional seismicity, the far-field strong earthquake records were selected as input seabed bedrock motions. Considering the ground motion characteristics, the micro-topography of the seabed, the spatial heterogeneity and the nonlinear hysteresis characteristics of soils, and the seismic response characteristics of seabed sites were studied. The site effects are closely related to seabed topographical features, spatial heterogeneity of soils, and input seabed bedrock motion characteristics. The significant site amplification effect may focus on the edges of seabed surface depression areas, the convex and concave areas of the under-

* 收稿日期: 2022-09-14; 修回日期: 2023-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978334)资助

作者简介: 缪涵(1998—), 女, 硕士。主要从事岩土地震工程研究。E-mail: 202061225022@njtech.edu.cn

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

lying bedrock interface, and the seabed soft soil areas, exhibiting a low-frequency focusing effect on soil amplification. Compared with horizontal shaking, the site amplifications on vertical shaking in these areas are more significant. The nonlinear seabed site effect will be significantly underestimated when only the horizontal seabed bedrock motion is adopted. The simultaneous input of the horizontal and vertical seabed bedrock motions results in a substantial vertical site response, compared to the input of only the horizontal seabed bedrock motion.

Keywords: deep seabed site; far-field strong earthquake; 2D nonlinear site effect; soil nonlinearity; seabed topography

0 引言

“丝绸之路经济带”和“21世纪海上丝绸之路”（一带一路）倡议的提出,使得海洋经济在未来很长一段时间内将作为我国经济结构的重要组成部分。杭州湾位于杭州、上海、宁波等大城市的几何中心,处于我国“一带一路”倡议、沿海开放带、长江三角洲区域一体化及长江经济带等多重国家战略的交汇点。拟建的通苏嘉甬、沪甬、沪舟甬等跨海铁路,实现闭环的环杭州湾交通体系,对环杭州湾的经济发展具有极其深远的影响,对我国国民经济的发展也有着举足轻重的作用。

低频或长周期地震波的能量耗散缓慢,可以远距离传递能量。鉴于远距离强地震引起的地震动通常具有丰富的长周期分量,故对长周期结构具有大的破坏性。杭州湾位于低地震活动性地区,周边150 km范围内未曾发生过6级及以上地震,距离高地震活动性、多次发生大地震的南黄海带200 km以上、台湾海峡地震带600 km以上,距离1668年郟庐地震带的郟城8.5级地震约500 km,如图1所示。因此,远距离强地震对杭州湾跨海工程的影响不容忽视。例如:1985年墨西哥 M_s 8.1级大地震使远离震中350 km外的墨西哥城损失严重,由于古湖区深厚沉积物显著放大地震地面运动,导致大量高层建筑在此次地震中倒塌;1999年我国台湾集集 M_s 7.6级地震,导致远离震中的覆盖层深厚的台北盆地高层建筑发生严重破坏;2008年我国汶川 M_s 8.0级大地震导致远离震中600 km外,地处关中盆地的西安市高层建筑损坏严重。现有研究表明^[1-3]:海域地震动的长周期特性十分突出;由于远距离大地震引起的地震动长周期成分丰富,深软场地遭受远场强震作用时场地放大效应显著。

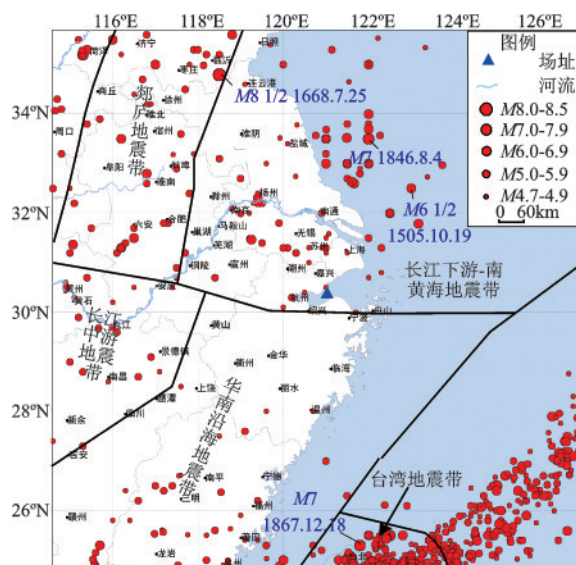


图1 工程场地地址位置及区域历史地震地质环境

Fig.1 The project site location and tectonic setting of regional historical seismicity

地形地貌对场地地震效应有重要影响。福州盆地非线性场地地震效应数值模拟表明^[4]:基岩起伏会导致场地地震反应的聚焦效应,基岩拗陷和隆起区域的场地放大效应尤为显著。浅层冲积盆地地震效应模拟发现^[5]:盆地边缘的场地放大效应最大,邻近盆地中心次之。B. Ruan等^[6]和G. Chen等^[7]模拟了汕头海湾海床场地非线性地震反应,发现基岩起伏对局部地震场地效应有显著影响,基岩隆起、基岩与软土过渡区域的场地放大效应显著增大。大量的研究表明^[6,8-9],1D模型的数值模拟难以反映复杂地形和沉积土空间异质性地对场地地震效应的影响,此时,应采用2D或3D模型进行场地效应的数值模拟。

本文依据某杭州湾跨海通道的场地勘探数据,建立了跨杭州湾海床剖面的2D模型;依据杭州湾的区域地震活动性,从日本Kik-net台网上选取远场

大地震井下基岩记录作为输入地震动,考虑海床地表地形、基岩起伏及沉积土空间异质性,探讨了远场强震作用下杭州湾海床非线性场地反应特征,期望为杭州湾海洋工程的抗震设计提供科学依据。

1 2D 场地模型建模

杭州湾水域宽约 20~95 km,最大水深约 40 m。某跨海通道地层剖面如图 2 所示。该海域水深约为 10 m,海床土层由上而下由亚黏土、亚砂土、淤泥质黏土、粉砂、细砂及中砂等构成,属滨海平原混合型地层,松散覆盖层较厚,底部基岩为熔结凝灰岩。基岩面有一定的起伏,坡度较缓,以微斜坡为主,基岩埋深总体为北深南浅,中间呈下凹趋势。北岸陆地坡缓,沿岸坡延伸至海床,在近岸区形成一处水

下阶地。海床中部与南部地势较为平坦,中部水深较大,近南岸处有浅水槽。钻孔 ZK1、ZK2、ZK3、ZK4、ZK5、ZK6 和 ZK7 的剪切波速 (V_s) 和纵波波速 (V_p) 剖面如图 3 所示。所有钻孔终孔处的土层 $V_s \geq 500$ m/s。该处可作为地震动输入的基岩面。

根据图 2 中的海床场地剖面,在 ABAQUS 软件平台,建立跨杭州湾海床 2D 精细化有限元模型。地震动输入的方法决定了场地反应模拟的精度。为了减小计算域的尺度及计算效率,只将感兴趣的海床区域映射到计算域,在其侧边、底部设置人工边界条件。该人工边界条件允许散射波通过边界无限传播而不反射^[4,7,8,10],从而将无限域的波动问题转化为近场波动问题。本文采用基于刘晶波等^[11]黏弹性人工边界单元的改进人工边界条件^[12]。

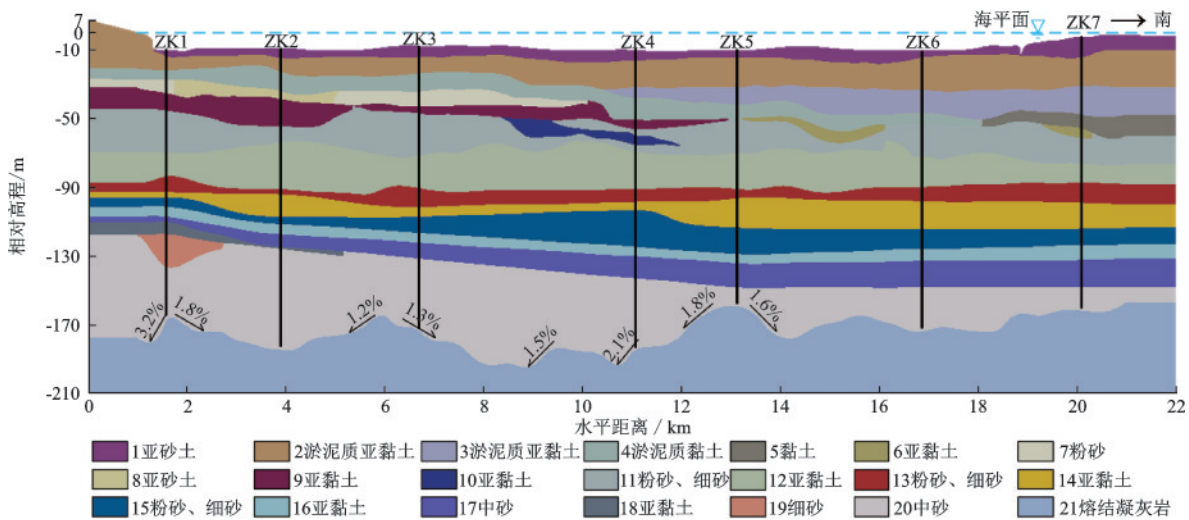


图 2 杭州湾跨海通道场址的地质剖面及钻孔位置示意

Fig.2 The seabed geotechnical cross-section and borehole locations crossing the Hangzhou Bay

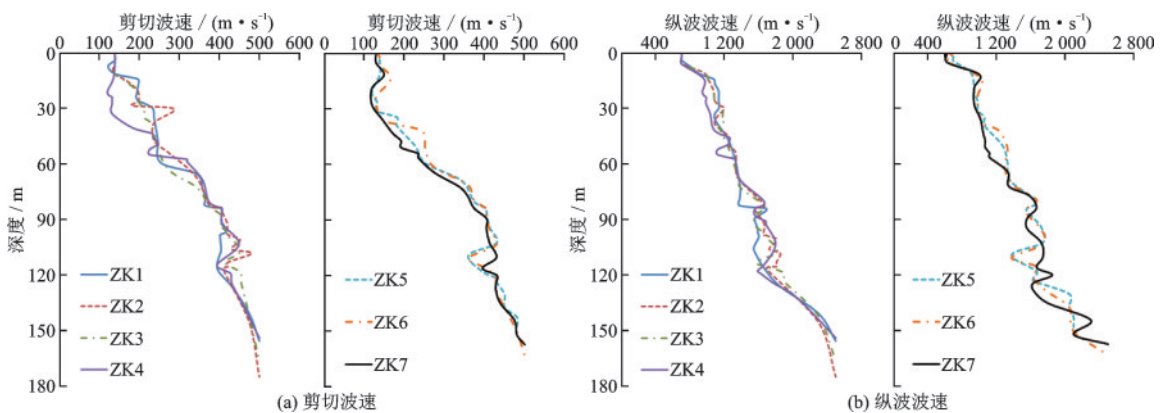


图 3 海床场地各钻孔剪切波速及纵波波速沿深度变化

Fig.3 Profiles of S- and P- wave velocities of the seabed site

计算模型的水平向尺寸 22 000 m、竖向尺寸 210 m,共 2 157 676 个单元。单元以四结点双线性插值平面应变缩减积分四边形单元为主,在不同土层交汇或地形起伏变化较大处,用三角形单元辅助过渡。单元尺寸满足 $l_{\max} \leq V_s/(8f_{\max})$,取截止频率 $f_{\max} = 25 \text{ Hz}$ 。地震动从模型底部输入,显式平行计算的最大时步为 $5 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。

2 输入地震动的选取

从图 1 可知,南黄海地震带地震活动相对活跃,属于远场地震,对杭州湾海床的地震影响较大。有

史记载以来,该地震带最大地震为 1846 年南黄海海域 7 级地震,距离某杭州湾跨海通道约 340 km;1505 年南黄海 6½ 级地震离该跨海通道约 350 km。由于缺乏杭州湾邻近基岩的远场大地震记录,为真实模拟南黄海地震带潜在震源对杭州湾海域场地地震反应的影响,考虑历史地震中几次 6½ 级以上地震的震级和震中距的类似性,在日本 Kik-net 台网选取了两次地震中各两条井下基岩记录作为该海床的基岩地震动,地震记录信息见表 1,相应的时程曲线和傅里叶频谱如图 4 所示。由图 4 可知,2021 年 7.3 级地震记录的长周期地震动分量较之 2021 年 6.9 级地震记录的更为丰富。

表 1 基岩地震动的原始信息

Table 1 Original information of bedrock earthquake motions

台站	地震或震源位置		地震年份	震中距/km	震级 M	地震动分量	基岩峰值加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	有效持时 D_{5-95}/s	卓越周期 T_p/s	卓越频率 f_p/Hz
	经度/ $^{\circ}\text{E}$	纬度/ $^{\circ}\text{N}$								
TCGH11	139.77	36.71	2021	205	7.3	NS	0.145	37.30	0.94	1.06
						UD	0.101	53.34	0.89	1.13
SITH07	139.15	35.91	2021	304	7.3	NS	0.073	32.96	1.03	0.97
						UD	0.053	53.99	0.31	3.27
IWTH07	141.57	40.27	2021	200	6.9	NS	0.068	36.37	0.70	1.43
						UD	0.048	42.04	0.40	2.52
IBRH17	140.31	36.09	2021	289	6.9	EW	0.035	38.59	0.94	1.06
						UD	0.027	53.66	0.46	2.17

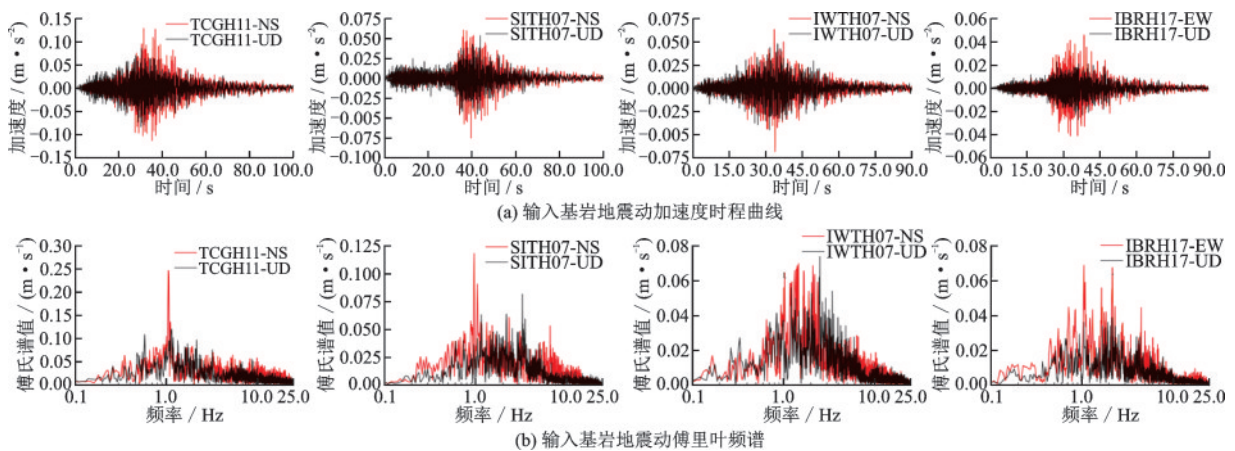


图 4 原始输入基岩地震动的时程曲线和傅里叶频谱

Fig.4 The time-history and Fourier spectra for input bedrock motions

3 海床土的动力本构模型及其参数

采用广义 non-Masing 非线性滞回本构模型描述土的非线性滞回特性^[10,13]。该模型的 Davidenkov

骨架曲线表达式为(图 5):

$$\tau = G \cdot \gamma = G_{\max} \cdot \gamma \cdot [1 - H(\gamma)] \quad (1)$$

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

式中, A 、 B 和 γ_c 为土性相关的参数,可通过拟合动剪切模量比 G/G_{\max} 与阻尼比 λ 的试验曲线给出。

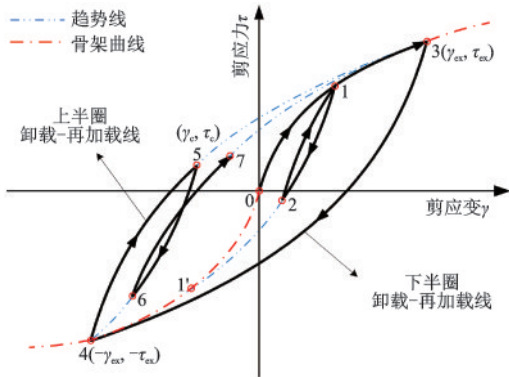


图5 广义 non-Masing 滞回模型的应力—应变曲线^[10,13]
Fig.5 Shear stress-strain curves of the generalized non-Masing hysteretic model^[10,13]

对取自杭州湾跨海通道的原状土土样进行共振柱试验,给出了各类土 G/G_{\max} 与 λ 的均值曲线,不同埋深土的相关 G/G_{\max} 与 λ 的曲线如图6所示。

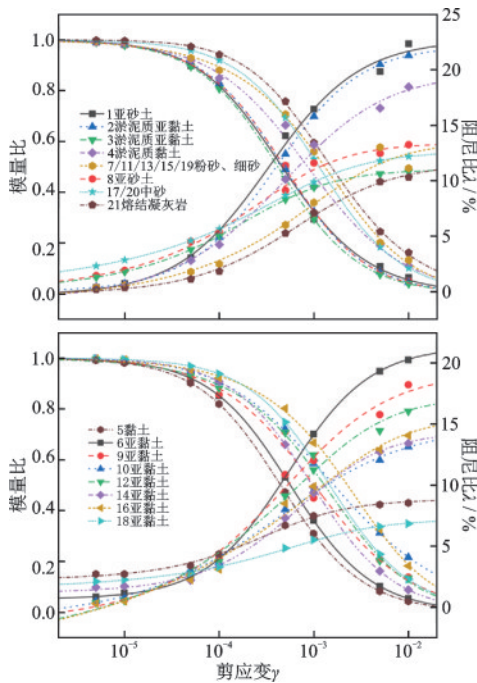


图6 各类海洋土的剪切模量比和阻尼比随剪应变的变化
Fig.6 Shear modulus reduction G/G_{\max} and damping ratio λ curves of various marine soils

4 数值模拟结果与分析

根据 Y. Nakamura^[14]提出的 HVSR

(Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio)法确定杭州湾海床场地基本频率 f_s 和基本周期 T_s ,如图7所示。该方法从基岩输入水平向和竖向弱震,分别计算水平向和竖向的海床地表与基岩地震动的傅里叶幅值比值 H_s/H_b 和 V_s/V_b ,从而计算 HVSR 值(H_s/H_b 与 V_s/V_b 的比值)。

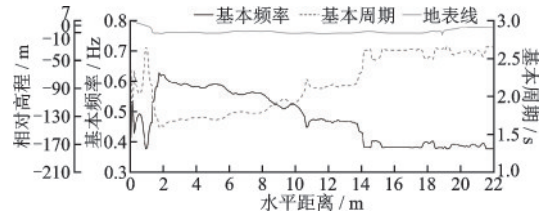


图7 海床场地的基本周期 T_s 和基本频率 f_s
Fig.7 Fundamental frequency and period along the longitudinal axis of the subsea site

从图7可知, T_s 介于1.59~2.65 s,相应的 f_s 介于0.38~0.63 Hz。近北岸1 km、中部至南岸的 T_s 均超过2 s,表明该区间的土层相对离北岸1~11 km段的土层较软,也即南段海床土较之北段的软。

为了研究竖向地震动对海床场地反应的影响,考虑了双向(水平向+竖向)输入地震动和仅水平向输入地震动。采用 ABAQUS/Explicit 并行计算显式算法进行场地反应数值模拟。

4.1 地震动传递函数

定义地表与基岩的加速度傅里叶幅值谱之比为地震动传递函数(Acceleration Transfer Function, ATF)。由图8~10可知,海床场地对于地震动水平向分量低于2 Hz的低频成分和高于10 Hz的高频成分分别有显著的放大和滤波作用,而对于地震动竖向分量低于1 Hz的低频成分和高于10 Hz的高频成分都有滤波作用。基岩地震动水平分量的卓越频率为0.97~1.42 Hz,竖向分量的卓越频率为1.13~3.27 Hz,场地 f_s 为0.38~0.63 Hz。同时输入水平向和竖向地震动时,水平向ATF(ATF_H)色谱图中峰值主要分布在0.25~0.85 Hz(主要受场地 f_s 影响)和1.3~1.6 Hz(主要受输入地震动 f_p 影响)两个频段内,竖向ATF(ATF_V)色谱图中峰值主要分布在1.22~1.76 Hz,局部地形在2.5~3.5 Hz频带也存在峰值。仅输入水平向地震时,ATF_H色谱图中峰值主要分布在0.23~0.85 Hz,这表明ATF的峰值频段受场地 f_s 和输入基岩地震动 f_p 共同影响。

结合海床地质剖面图(图2)可以发现,海床面

凹陷区域边缘的 ATF 的放大效果显著;在基岩凹陷或隆起区域, ATF 呈现出低频聚焦现象, ATF 值较基岩平缓区域的更大(色谱的颜色更深),这一现象在竖向地震反应中更加明显。通过对比输入 $M7.3$ 级情景地震的 TCGH11、SITH07 记录和 $M6.9$ 级情景地震的 IWTH07、IBRH17 记录计算的 ATF 色谱图,发现了 $M7.3$ 级情景地震作用引起的 ATF 的低频($0.2\sim 0.4$ Hz)成分增加,色谱颜色更深,非线性程

度更显著。对比输入同一次情景地震、不同震中距的 2 个台站记录计算的 ATF 色谱图, ATF 的色谱与震中距离相关性较低。这表明远场情景地震的震级对该海床场地进入非线性效应程度的影响较大,而震中距的影响较小。相较于水平向和竖向地震动同时作用,仅水平向地震动作用时计算的 ATF 要小。这表明:评价海床场地效应时,竖向地震动的影响不应忽视。

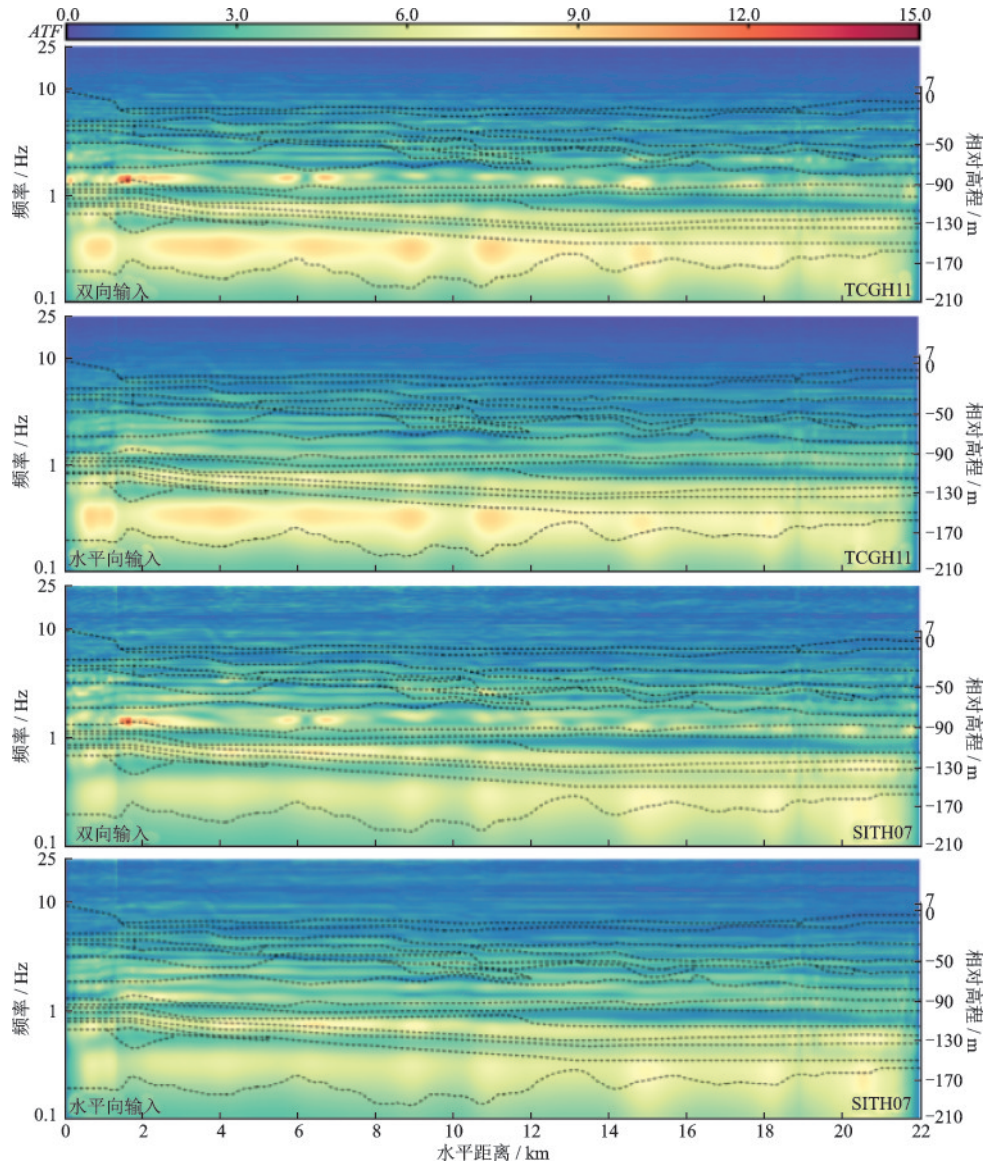


图 8 输入 $M7.3$ 级地震的双向和仅水平向地震动时海床剖面的水平向地表加速度传递函数

Fig.8 Variation of horizontal $ATFs$ at the seabed cross-section surface under bidirectional (horizontal + vertical) and only horizontal shakings for $M7.3$ earthquake scenario

注:黑色虚线为土层界面线

4.2 海床地表加速度反应

图 11(a)显示了海床地表峰值加速度放大系数

(amplification factor of peak ground acceleration, AF_{PGA})。 AF_{PGA} 定义为地表峰值加速度 (peak ground acceleration, PGA) 与基岩峰值加速度 (peak

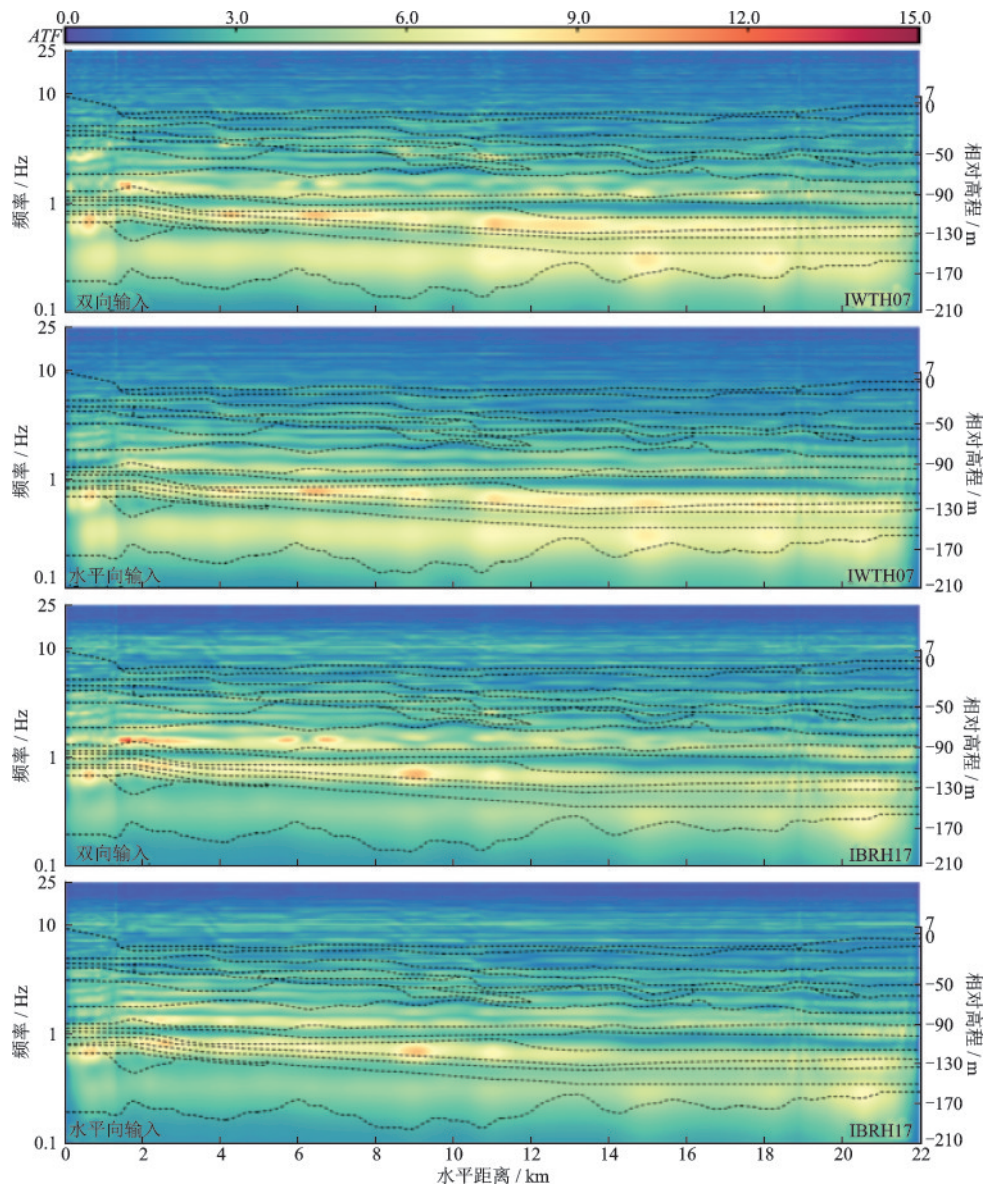


图9 输入M6.9级地震的双向和仅水平向地震动时海床剖面的水平向地表加速度传递函数

Fig.9 Variation of horizontal ATFs at the seabed cross-section surface under bidirectional (horizontal + vertical) and only horizontal shakings for M6.9 earthquake scenario

注:黑色虚线为土层界面线

bedrock acceleration, PBA)之比。双向输入M7.3级地震的TCGH11记录、SITH07记录分量时,水平向 AF_{PGA-H} 分别为1.3~2.8和1.5~2.9,竖向 AF_{PGA-V} 分别为3.1~6.7、3.5~9.4;仅输入水平向地震动时, AF_{PGA-H} 分别为1.0~2.3和1.5~2.4。双向输入M6.9级地震的IWTH07记录、IBRH17记录分量时, AF_{PGA-H} 分别为1.7~3.4和1.8~3.4, AF_{PGA-V} 分别为3.7~10.8和4.0~9.1;仅输入水平向地震动时, AF_{PGA-H} 分别为1.6~3.2和1.7~3.2。可以发现,由于震级越大、震中距越近,地震动强度越大,土体更易软化,土层滤波效应更显著,从而对同一次远场

地震作用,震中距较近时 AF_{PGA-H} 较小;而对震中距相近的不同远场地震作用,震级较大时 AF_{PGA-H} 较小。

AF_{PGA} 受基岩面起伏和地表地形共同影响,场地北侧基岩面起伏显著,南侧相对平缓,相应地,海床北侧的 AF_{PGA} 变化显著, AF_{PGA} 值较大,海床南侧的 AF_{PGA} 变化相对平缓, AF_{PGA} 值较小。图11(b)、(c)显示了仅输入水平分量、同时输入水平和竖向分量时(TCGH11记录)海床地表代表性观测点的加速度反应时程。对应基岩起伏处(C、D点)和海床地表凹陷地形边缘处(A点)的海床地表PGA值大

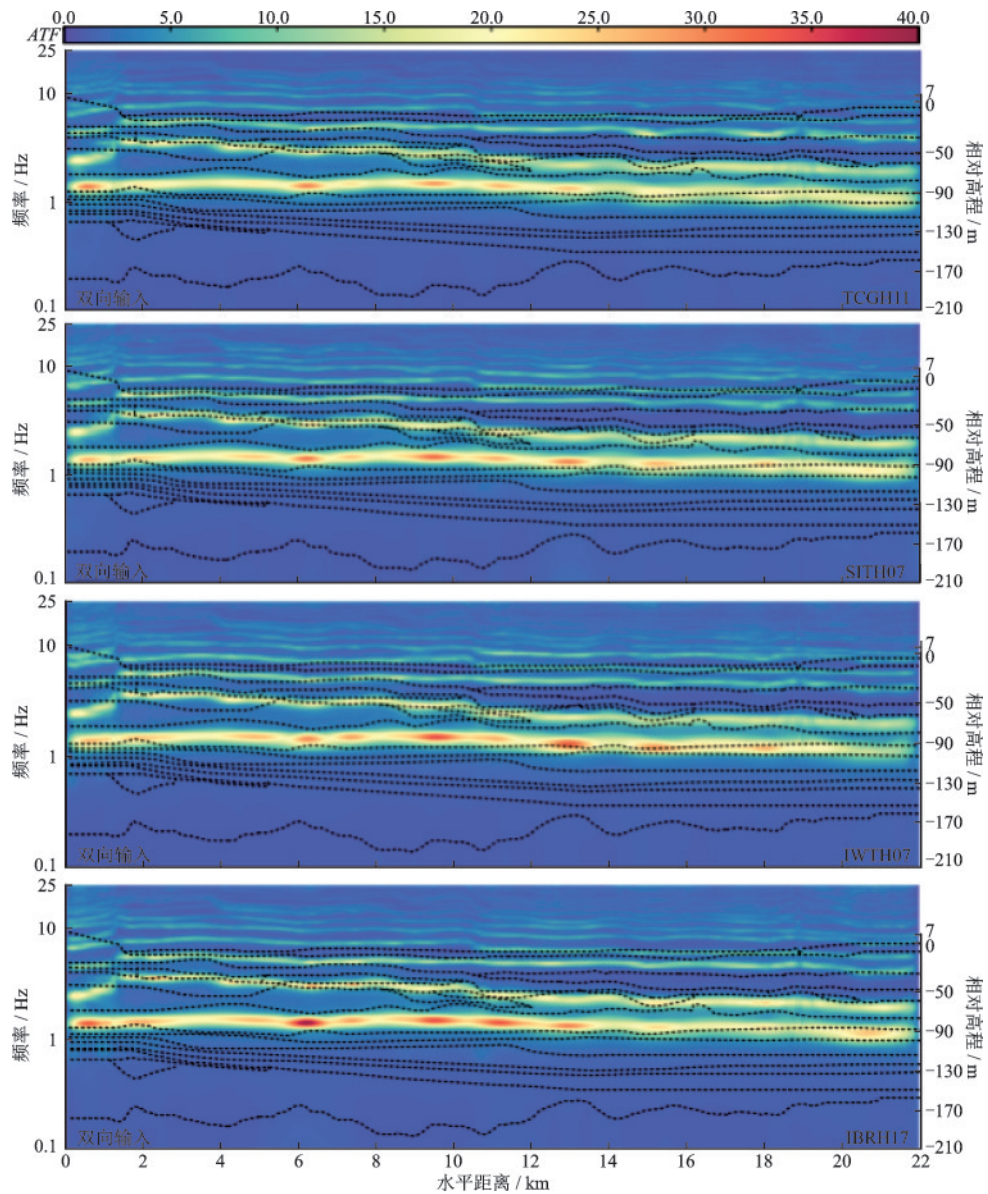


图 10 双向地震输入时海床剖面的竖向地表加速度传递函数

Fig.10 Variation of vertical ATFs at the seabed cross-section surface under bidirectional (horizontal + vertical) shaking scenarios
注:黑色虚线为土层界面线

于附近其他位置的 PGA 值, 竖向 PGA 的出现时间比之水平向 PGA 的早。总体而言, 与仅输入水平分量的计算结果相比, 双向(水平向+竖向)输入基岩地震动时, 海床地表水平向 PGA 及其放大系数更大, 沿土层横向的变化趋势更明显; 海床地表竖向 PGA 远大于水平向 PGA , 竖向地震动放大效应较之水平向更为显著。这可能是因为基岩起伏和沉积土的横向不均性, 土单元发生显著的剪切-压缩耦合变形, 加剧了地震动竖向分量的放大效应。

以输入 $M7.3$ 级地震 TCGH11 记录的工况为例, 图 12 显示了海床剖面峰值加速度放大系数 (amplification factor of peak acceleration, AF_{PA})。显

然, 沉积土的空间异质性对 AF_{PA} 沿海床深度和横向的分布特征有显著影响。远场强震的地震动从海床基岩传播到地表的过程中, AF_{PA} 整体呈放大趋势, 除了地表放大效应显著外, 由于南段海床 $30\sim 50$ m 深处的剪切波速较小, 土层相对较软, 该处的 AF_{PA} 放大效应较为明显, 表现出地震波传递在深度方向的局部聚焦效应。 AF_{PA} 沿海床剖面的分布特征亦受基岩面起伏的影响, 在基岩隆起或凹陷区域的 AF_{PA} 值较大, 且竖向地震反应尤为明显。这可能是由于基岩起伏导致地震波在传播过程中发生了多次反射和折射所致。与仅输入水平向地震动相比, 双向输入地震动时的 AF_{PA} 明显增大, 竖向 AF_{PA}

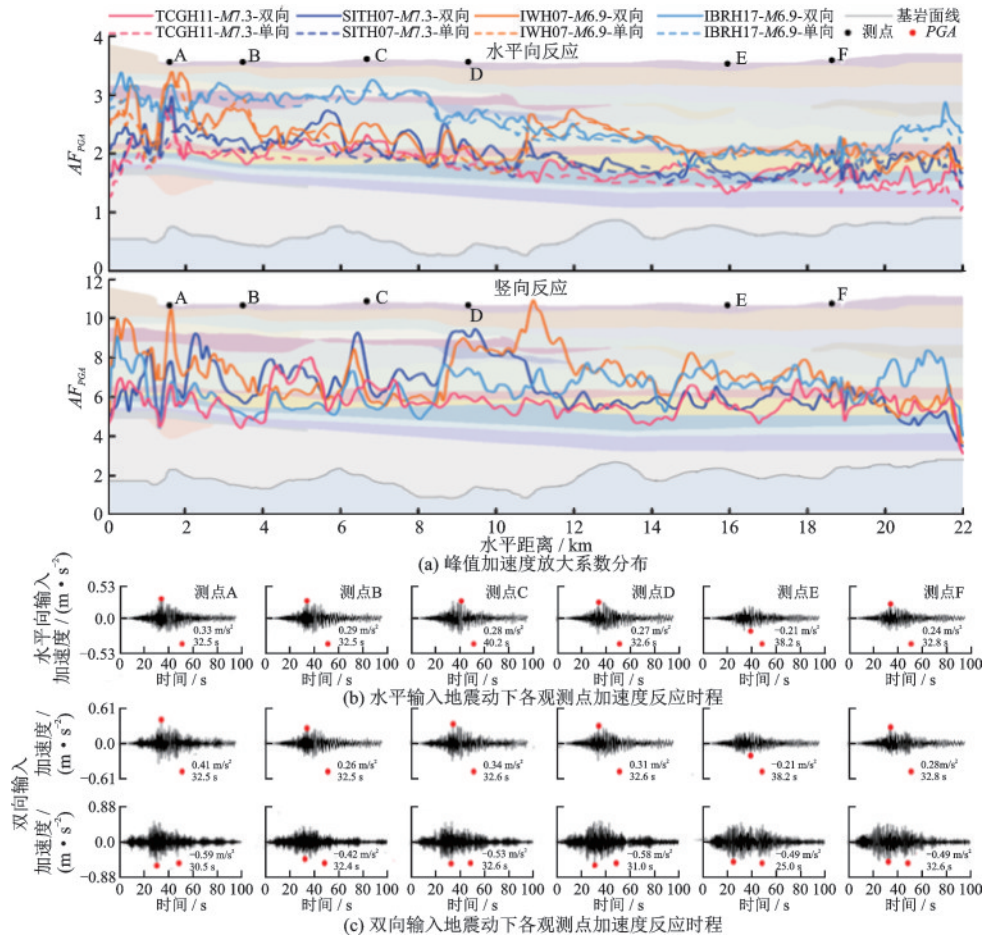


图 11 海床剖面地表峰值加速度放大系数及水平向、双向(水平向+竖向)地震动作用下海床面各观测点的加速度反应时程 (TCGH11 地震记录)

Fig.11 Variation of AF_{PGA} at the seabed cross-section surface and acceleration responses at the typical locations of seabed surface for only horizontal shaking and bidirectional (horizontal + vertical) shakings (seismogram: TCGH11)

明显大于水平向 AF_{PA} 。这表明海床场地的竖向地震动放大效应不容忽视。

4.3 地表地震动谱加速度 β 谱特性

以 TCGH11 记录和 IWTH07 记录为例,图 13~14 分别显示了海床地表的竖向和水平向地震动谱加速度 β 谱(阻尼比 5%)的色谱。由图 4 和表 1 可知, IWTH07 记录水平分量的卓越频带相比于 TCGH11 记录分布较为集中。因此,输入 IWTH07 记录对应的海床地表 β 谱的卓越周期段分布相比输入 TCGH11 记录的也较为集中。水平向 β 谱谱峰对应的卓越周期介于 0.48~1.1 s, 竖向 β 谱谱峰对应的卓越周期介于 0.25~0.5 s 和 0.61~0.95 s。

对比图 4 可知:海床地表 β 谱特性与输入地震动的频谱特性相关。由于南侧海床的场地 T_s 明显比北侧海床的长(图 7), 南侧的地表水平向 β 谱在周期 0.8~1.1 s 内的谱值明显大于北侧海床的地表水

平向 β 谱谱值。相比于水平向地震反应,基岩起伏显著区域(离北岸 2~12 km)的地表竖向 β 谱的卓越周期范围较基岩平缓区域稍宽,且地表竖向 β 谱的峰值较大。这表明基岩起伏地形对竖向 β 谱色谱的影响更大。此外,与仅输入水平向地震动相比,双向输入地震动时地表 β 谱的谱值更大,且海床对小于 0.1 s 的高频分量和大于 1 s 的长周期分量的竖向地震动的滤波效应比水平向地震动的滤波效应更为显著,并呈现更明显的双峰现象。

4.4 海床地表设计地震动参数

图 2 中海床 7 个代表性钻孔 ZK1-ZK7 近表面 30、130、140、129 m/s, T_s 分别为 1.72、1.72、1.79、2.12、2.14、2.61、2.58 s。依据文献[15]的场地分类方法,钻孔 ZK1-ZK7 剖面均为 IV 类场地。

图 15 比较了海床地表 β 谱和《中国地震动参数区划图》^[16] 中 IV 类场地的设计地震反应谱 β 谱的差

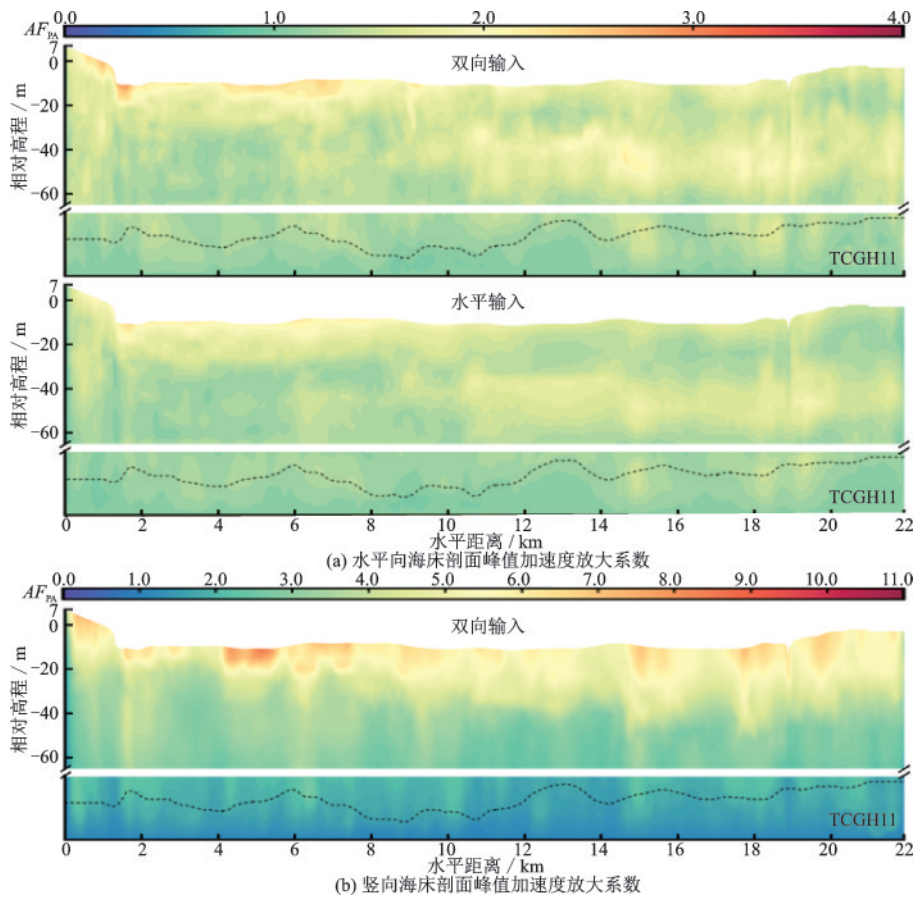


图 12 双向和仅水平地震输入时海床剖面峰值加速度放大系数

Fig.12 Variation of AFPAs at the seabed cross-section for bidirectional (horizontal + vertical) and only horizontal shakings: horizontal and vertical responses

注:黑色虚线为基岩线

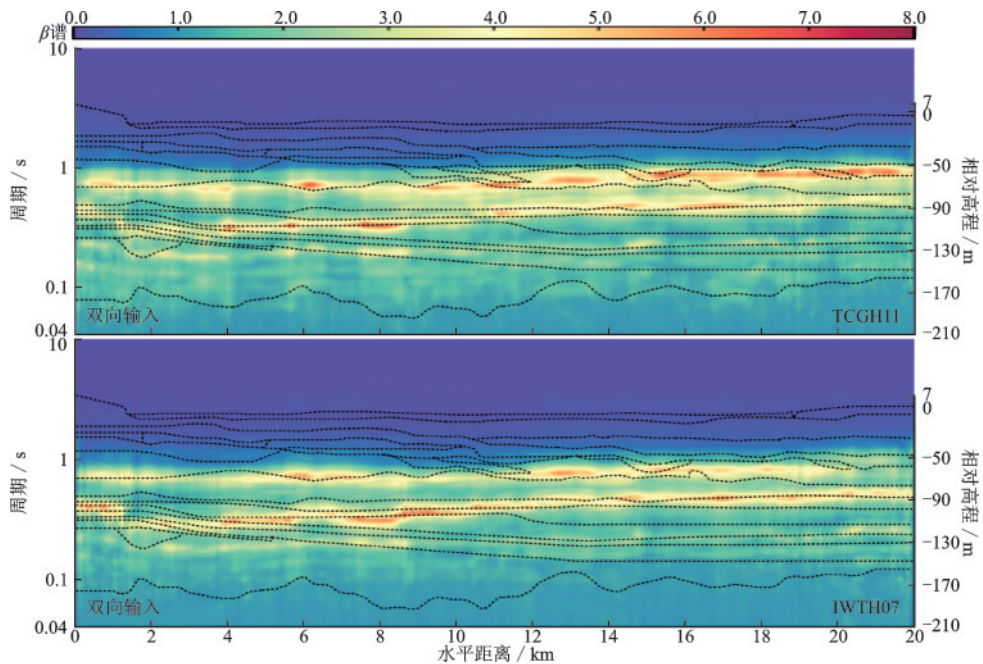


图 13 双向地震输入时海床地表竖向谱加速度 β 谱(5%阻尼比)

Fig.13 Seabed surface vertical spectral accelerations (β) at 5% damping for bidirectional (horizontal + vertical) shakings

注:黑色虚线为土层界面线

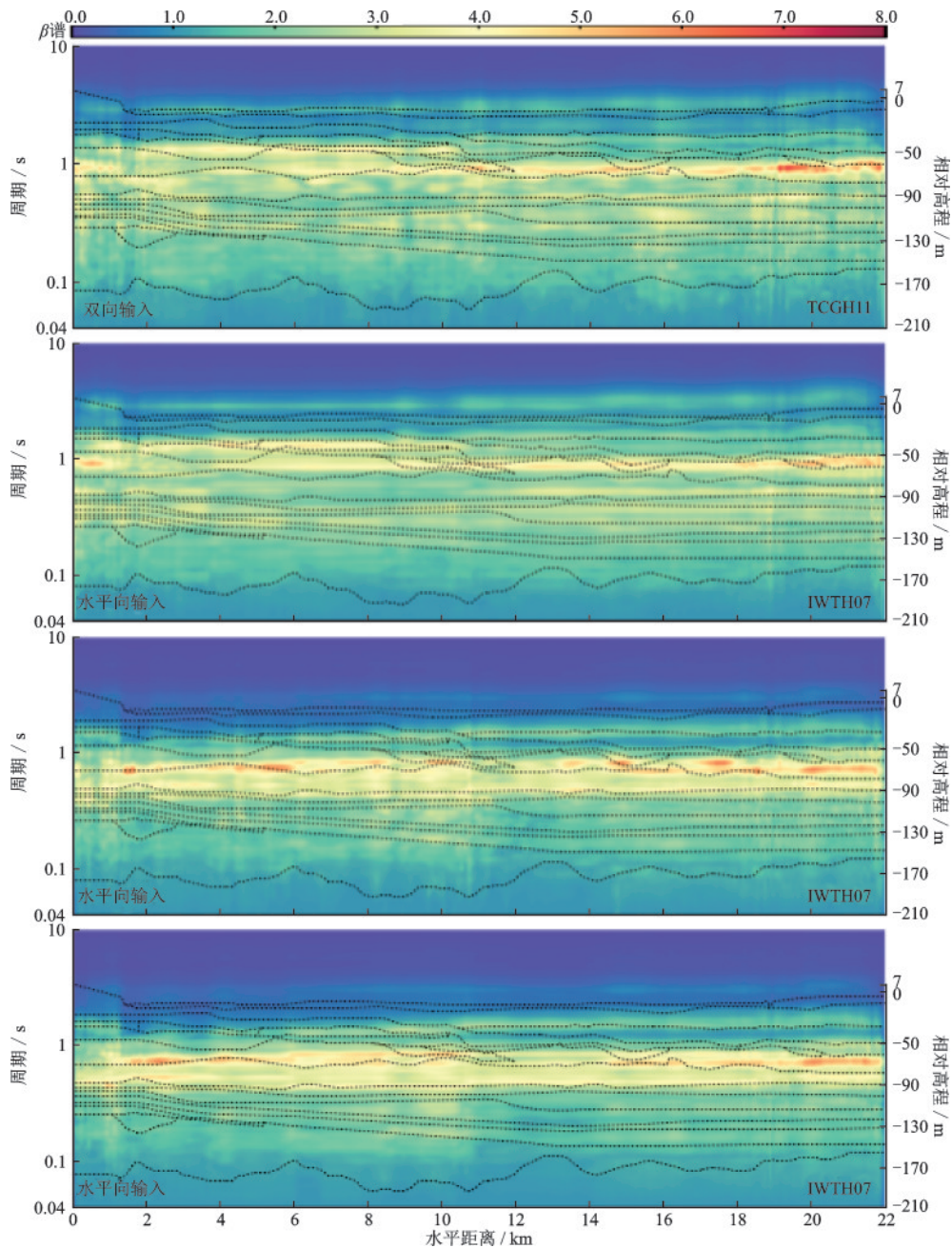


图 14 双向和仅水平向地震输入时海床地表水平向谱加速度 β 谱(5%阻尼比)

Fig.14 Seabed surface horizontal spectral accelerations (β) at 5% damping for bidirectional (horizontal + vertical) and only horizontal shakings

注:黑色虚线为土层界面线

异。鉴于仅输入水平向与双向输入地震动时的地表水平向 β 谱的范围差异很小,水平向 β 谱包括了这两种输入方式的全部计算结果。可以发现:该海床地表的水平向 β 谱谱值在周期 $T > 0.1$ s段大于区划图的水平向 β 谱谱值,且在周期 $0.3 \sim 5.2$ s范围内,该海床地表的水平向 β 谱谱值明显大于区划图的水平向 β 谱谱值。该海床地表的竖向 β 谱谱值在周期 $T > 0.1$ s段大于区划图的竖向 β 谱谱值,在周

期 $0.28 \sim 1.3$ s范围内,该海床地表的竖向 β 谱谱值明显大于区划图的竖向 β 谱谱值。这表明:海床场地对远场强地震引起的地震效应具有丰富的长周期地震动分量,对低频地震动的放大效应显著,由于跨海通道或海域工程结构自振周期较长,若按现行规范的设计反应谱 β 谱确定设计地震动参数,将偏于不安全。此外,海床场地竖向地震中的长周期地震动的放大效应显著,应予以重点关注。

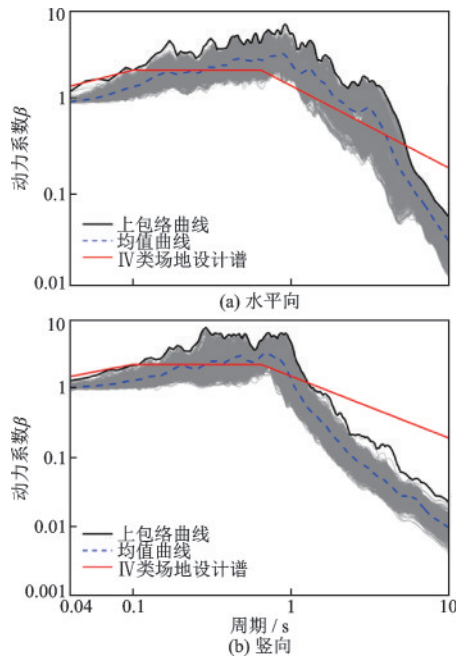


图15 海床地表谱加速度 β 谱(5%阻尼比)

Fig.15 Seabed surface spectral acceleration β spectra (5% damping) at the seabed surface

5 结 语

通过对跨杭州湾海床场地二维非线性地震效应的数值模拟,探讨了在远场强震作用下海湾深厚海床场地的二维非线性地震反应特征,主要结论如下:

(1)海床场地对低于2 Hz和10 Hz以上的远场水平向强地震动低频和高频分量分别有显著的放大和滤波效应,对低于1 Hz和高于10 Hz的远场竖向强地震动低频和高频分量均有显著的滤波效应。海床非线性场地效应受场地基本频率与输入地震动的卓越频带共同影响。

(2)海床场地效应受地表和基岩起伏及沉积土的异质性共同影响。海床地表凹陷区边缘、基岩隆起和凹陷部位、海床土相对软弱区域的场地放大效应更为显著,呈现出低频聚焦现象,且竖向地震反应中更明显。

(3)海床非线性场地效应程度与远场强震的震级、震中距有关。对同一次远场强震,震中距远的地震动作用时海床场地放大效应较小;震中距相近时,震级大的远场强震作用时海床场地放大效应较小。

(4)相比仅输入水平向基岩地震动,同时输入水平向和竖向地震动时的海床场地放大效应更为明显,且竖向地震反应受地形地貌的影响更为显著。

(5)与现行的《中国地震动参数区划图》^[16]的谱加速度 β 谱相比,远场强震引起的海床地表 β 谱在中-长周期段的谱值明显较大,海床地表竖向 β 谱尤为显著。

参考文献:

- [1] 战吉艳,陈国兴,刘建达,等. 远场大地震作用下大尺度深软场地的非线性地震效应分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3229-3238.
Zhan J Y, Chen G X, Liu J D, et al. Analysis of nonlinear seismic effects of large-scale deep soft site under far-field large earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3229-3238. (in Chinese)
- [2] Garini E, Anastasopoulos I, Gazetas G, et al. Soil, basin and soil-building-soil interaction effects on motions of Mexico City during seven earthquakes [J]. Géotechnique, 2022, 72(6): 556-564.
- [3] 谭景阳,胡进军,谢礼立. 海域地震动长周期特性及其强度指标研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(3): 1-9.
Tan J Y, Hu J J, Xie L L. Long-period characteristics of offshore ground motion and its intensity index [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(3): 1-9. (in Chinese)
- [4] Jin D D, Chen G X, Dong F F. Large-scale two-dimensional nonlinear FE analysis on PGA amplification effect with depth and focusing effect of Fuzhou Basin [J]. Journal of Central South University, 2014, 21 (7) : 2894-2903.
- [5] Madiati C, Facciorusso J, Gargini E. Numerical modeling of seismic site effects in a shallow alluvial basin of the northern apennines (Italy) [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2017, 107(5) : 2094-2105.
- [6] Ruan B, Zhao K, Wang S Y, et al. Numerical modeling of seismic site effects in a shallow estuarine bay (Suai Bay, Shantou, China) [J]. Engineering Geology, 2019, 260: 105233.
- [7] Chen G, Ruan B, Zhao K, et al. Nonlinear response characteristics of undersea shield tunnel subjected to strong earthquake motions [J]. Journal of Earthquake

- Engineering, 2020, 24(3): 351-380.
- [8] Chen G X, Jin D D, Zhu J, et al. Nonlinear analysis on seismic site response of Fuzhou Basin, China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105(2A): 928-949.
- [9] Maufroy E, Chaljub E, Hollender F, et al. Earthquake ground motion in the Mygdonian Basin, Greece: The E2VP verification and validation of 3D numerical simulation up to 4 Hz[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105(3): 1398-1418.
- [10] Chen G X, Wang Y Z, Zhao D F, et al. A new effective stress method for nonlinear site response analyses [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(6): 1595-1611.
- [11] 刘晶波,谷音,杜义欣.一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J].岩土工程学报,2006,28(9):1070-1075.
Liu J B, Gu Y, Du Y X. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2006, 28(9): 1070-1075. (in Chinese)
- [12] 章小龙,李小军,陈国兴,等.黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法[J].力学学报,2016,48(5):1126-1135.
Zhang X L, Li X J, Chen G X, et al. An improved method of the calculation of equivalent nodal forces in viscous-elastic artificial boundary[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(5): 1126-1135. (in Chinese)
- [13] 赵丁凤,阮滨,陈国兴,等.基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证[J].岩土工程学报,2017,39(5):888-895.
Zhao D F, Ruan B, Chen G X, et al. Validation of modified irregular loading-unloading rules based on Davidenkov skeleton curve and its equivalent shear strain algorithm implemented in ABAQUS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 888-895. (in Chinese)
- [14] Nakamura Y. What is the Nakamura method?[J]. Seismological Research Letters, 2019, 90(4): 1437-1443.
- [15] 陈国兴,丁杰发,方怡,等.场地类别分类方案研究[J].岩土力学,2020,41(11):3509-3522.
Chen G X, Ding J F, Fang Y, et al. Investigation of seismic site classification scheme[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3509-3522. (in Chinese)
- [16] 中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
(本文编辑:池营营)