

水平成层海床场地非线性地震反应的 流-固弱耦合分析

范宏飞^{1,2}, 王彦臻^{1,2}, 陈炜昀^{3,4}, 陈国兴^{1,2}, 赵 凯^{1,2}

(1.南京工业大学岩土工程研究所,江苏 南京 210009; 2.江苏省土木工程防震技术研究中心,江苏 南京 210009;
3.中山大学土木工程学院,广东 广州 510275; 4.南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),广东 珠海 519080)

摘要: 海床场地地震反应分析是建设海洋工程的重要先期工作。以琼州海峡海底拟建隧道沿线 4 个典型钻孔剖面为研究对象,基于一种流-固弱耦合分析法模拟海水-海床之间的相互作用,采用广义 non-Masing 本构模型(DCZ 模型)模拟软弱海床土的动力非线性特性,探讨海水、软弱海床沉积及基岩地震动特性对海床场地的地震反应的影响。主要结论为:海水对海床地震运动的抑制效果仅存在于海床浅层范围(<50 m),且对竖向地震反应的抑制效果优于水平向;海水对海床地表地震运动的抑制效果以及海床地震反应“高频抑制、低频放大”的频响现象与海水水深呈“正相关”;数值计算所得的水平向、竖向加速度 β 谱均值线在数个周期范围内高于陆域规范设计谱,表明海水、海床软弱沉积对海洋工程抗震产生的不利影响不可忽略。

关键词: 海床场地; 非线性地震反应; 流-固弱耦合模型; 琼州海峡; 土的非线性

中图分类号: TU433 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)04-0849-11

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.04.020

Fluid-solid weak coupling analysis of nonlinear seismic response at layered seabed sites

FAN Hongfei^{1,2}, WANG Yanzhen^{1,2}, CHEN Weiyun^{3,4}, CHEN Guoxing^{1,2}, ZHAO Kai^{1,2}

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

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

3.School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

4.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, China)

Abstract: The analysis of seismic response at seabed sites is a crucial initial step in marine engineering construction. In this study, a fluid-solid weak coupling model is employed to replicate the interaction between seawater and the seabed. Specifically, four representative borehole sections along the proposed tunnel at Qiongzhou strait are chosen to investigate the influence induced by seawater, soft sediments, and bedrock earthquake motion on the seismic responses of the seabed site. A generalized non-Masing constitutive model (DCZ model) is utilized to account for the dynamic nonlinearity of the seabed soft soil. The findings indicate that the suppression effect of seawater on seismic motion in the seabed is limited to depths shallower than 50 m. Furthermore, the suppression effect is more pronounced in the vertical direction compared to the horizontal direction. Additionally, there is a positive correlation between the suppression effect of seawater on seismic motion at the seabed surface and the frequency response phenomenon characterized by high frequency suppression and low frequency amplification in the seabed seismic response. This correlation is influenced by the depth of the seawater. The mean lines of the horizontal and vertical spectrum β obtained by numerical calculation are higher than the design spectrum in the land code in several period ranges, and the possibility of adverse effects induced by seawater and seabed soft sedimentation on the seismic resistance of marine structures should be considered.

Keywords: seabed site; nonlinear seismic response; fluid-solid weak coupling model; Qiongzhou Strait; soil nonlinearity

明确海床场地的地震反应特征,对指导海洋工程的抗震设计具有重大意义。已有的海域地震动的统计分析总结了海床与陆地场地地震反应的典型差

异特征^[1-3]:海床地表的竖向峰值加速度显著小于比邻陆地地表;海床地表的长周期反应大于比邻陆地地表,短周期反应小于比邻陆地地表。DIAO等^[4]、

收稿日期: 2023-06-27; **修订日期:** 2023-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978334);国家重点研发计划项目(2017YFC1500403)

LI等^[5]基于流体力学方程和一维波动理论,研究了海水对海床地震反应的影响机理,认为海水与海床的P波阻抗比较大时,海床地表的竖向地震运动的卓越频响与海水的P波共振频率相近;海水与海床的P波阻抗比较小时,海床地表的竖向地震运动在海水的P波共振频率附近被明显抑制,且海水与海床场地中的P波波动联系更紧密。由于海域地震动记录以及解析计算方法的局限性,既定场地的地震反应仍然难以确定。多年来,数值模拟方法在陆域场地地震反应分析中的有效性已得到了广泛验证,以陆域场地地震反应的分析方法为基础,进一步考虑海水的影响,是进行海床地震反应分析行之有效的方法。刘勇等^[6]忽略地震时海水与海床的相互作用,仅将Airy波产生的波浪力单向传递至海床地表,计算结果表明在微幅波和地震的共同作用下,海床的地震反应将增大。CHEN等^[7]基于势流理论及Biot固结理论,考虑海水-海床的相互作用及其间的流体交换,探讨了海水对简单海床地形的地震反应的影响,结果表明:倾斜海床地形对P波竖向分量有显著放大效应。CHEN等^[8]讨论了海水深度对脉冲波激励产生的海床场地动力反应特性的影响,发现竖向地震动放大效应的受抑制程度与海水深度呈“正相关”。陈炜昀等^[9]使用ABAQUS软件平台的声学模块计算地震时海水作用在海床地表的动水压力,结果表明:双向地震运动使海床地表产生更大的地震反应,海水的影响使得海床和隧道的低频响应增强。JENG等^[10]采用流体VARANS方程模拟海水,动态Biot方程模拟海床,考虑海水-海床的相互作用及其间的流体交换,提出的数值模型能同时精确模拟流体、固体的瞬态动力响应,有极大潜力应用于海床场地的地震反应分析。陈国兴等^[11]、王彦臻等^[12]忽略海水的影响分别开展了跨琼州海峡通道海床场地的一维、二维非线性地震反应分析,结果表明:当输入基岩地震运动的卓越频带与海床场地基本频率相近时,能引发更为强烈的“类共振”地震反应。

本文以琼州海峡跨海通道剖面的4个典型钻孔剖面为研究对象,采用流体N-S方程模拟海水,采用广义non-Masing本构模型描述海洋土的非线性动力特性,考虑地震引起的海水-海床的动力流-固耦合相互作用,建立考虑海水-海床的流-固弱耦合模型;根据场地地震地质概况,于KiK-Net选取代表性基岩地震运动记录,主要分析了海水对双向(水平向+竖向)地震作用下海床场地非线性地震反应特征影响及作用机理。

1 流-固弱耦合法

海水-海床的流-固耦合作用包含海水-海床的流-固相互作用和海水-海床的流场渗流力。本文仅考虑海水-海床的流-固相互作用,采用N-S方程求解流

体运动场,通过双向交错耦合积分算法实现流-固界面流场(Ω_F)、固体场(Ω_S)场变量的实时交换,是一种双向流-固弱耦合分析法,具体流程如图1所示,图中, p 为压强, v 为速度。

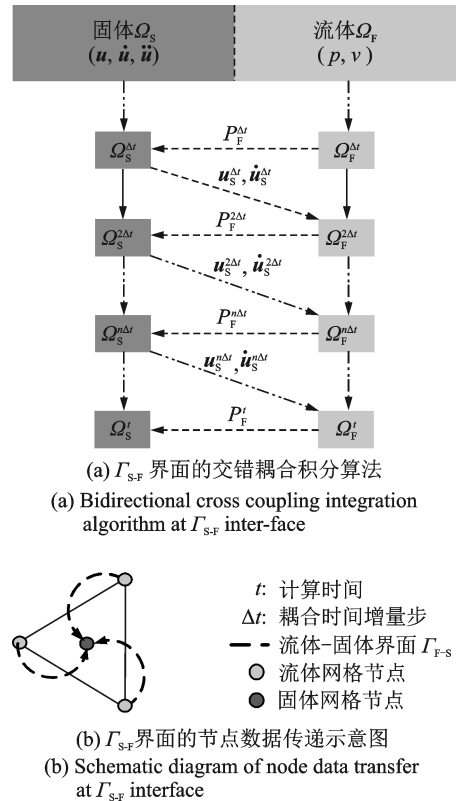


Fig. 1 Schematic diagram of bidirectional flow-solid coupling analysis method

计算初始化完成后,①开展流体动力分析,并将耦合时间增量步 Δt 时刻流-固交界面 Γ_{F-S} 上的动水压力 P_F 转化为固体场的外部载荷,并随即展开固体动力分析,求解 Δt 时刻流-固交界面 Γ_{F-S} 上的固体运动位移 u_s 、速度 \dot{u}_s ,完成 Δt 时刻的流-固弱耦合分析;② $2\Delta t$ 时刻,流-固交界面 Γ_{F-S} 上的固体场变量 u, \dot{u} 转化为流场的运动边界,开始 $2\Delta t$ 时刻的固体动力分析;之后重复①→②过程,并随着耦合增量步的步进,完成整个流-固弱耦合分析。

假设分析的海床场地为水平均质场地,与流-固弱耦合法相对应的水平成层海床场地的流-固弱耦合数值模型如图2所示。建立海水层、海床场地的水平均质模型,流-固耦合界面位于海底与海床地表的交界面上。因ABAQUS/CFD流体模型的3D属性,海床场地模型为仅包含一层3D固体单元的水平成层土柱模型,固体单元采用C3D8R单元,模型底部与两侧边界采用改进的等效黏弹性人工边界^[13],固体动力分析的计算增量步 Δt_s 设 5×10^{-5} s;流体模型为仅包含1层3D流体单元的层状水域,流体单元采用FC3D8单元,海水表面为自由流体界面,流体动力分析的初始计算增量步 Δt_f 设为0.01 s;耦合增

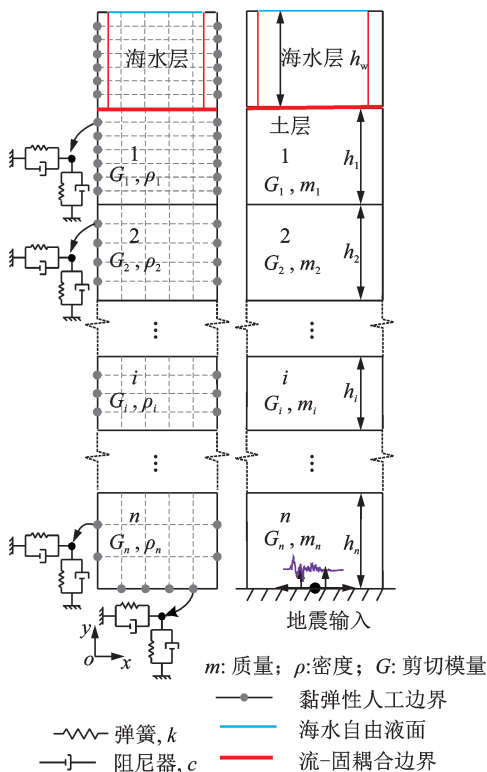


图 2 海水-海床土柱模型

量分析步 Δt 设为 0.01 s, 即每 0.01 s 流场与固体场进行一次数据交换。模型底部双向输入基岩地震动。

海水-海床的相互作用与重力场密切相关。海水-土柱模型通过模拟浮力驱动流场来形成重力场, 重力场的计算方式由下式描述:

$$G = F_{\text{Buoyancy}} \approx \rho^1 \beta (\theta - \theta^0) g \quad (1)$$

式中, G 为重力; F_{Buoyancy} 为浮力; ρ^1 为流场初始密度; β 为热膨胀系数; θ 为分析温度; θ^0 为参考温度; 令 $\rho^1 = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\beta(\theta - \theta^0) = 1.0$ 时, 海水压力等于海水重力 $\rho_w g h_w$, 其中, ρ_w 为海水密度, h_w 为水深。

另外, 在与海水-土柱模型作为对照的土柱模型中, 需计入海水产生的静水压力。

2 海床场地模型及参数

2.1 钻孔场地信息

本文选取琼州海峡拟建隧道沿线 4 个典型钻孔 ZK-04、ZK-08、ZK-11 和 ZK-13 剖面, 进行水平成层 seabed 场地的地震反应分析, 该方法是一种在工程抗震中的普遍简化方法。钻孔 ZK-04 和 ZK-13 分别位于近海岸处, ZK-08、ZK-11 位于海床中部, 钻孔剖面土层信息丰富, 上覆海水深度由浅及深分别为 25.6、55.6、81.6 和 84.8 m, 为海床的代表性钻孔^[12]。钻孔波速信息如图 3 所示。钻孔 ZK-04 孔

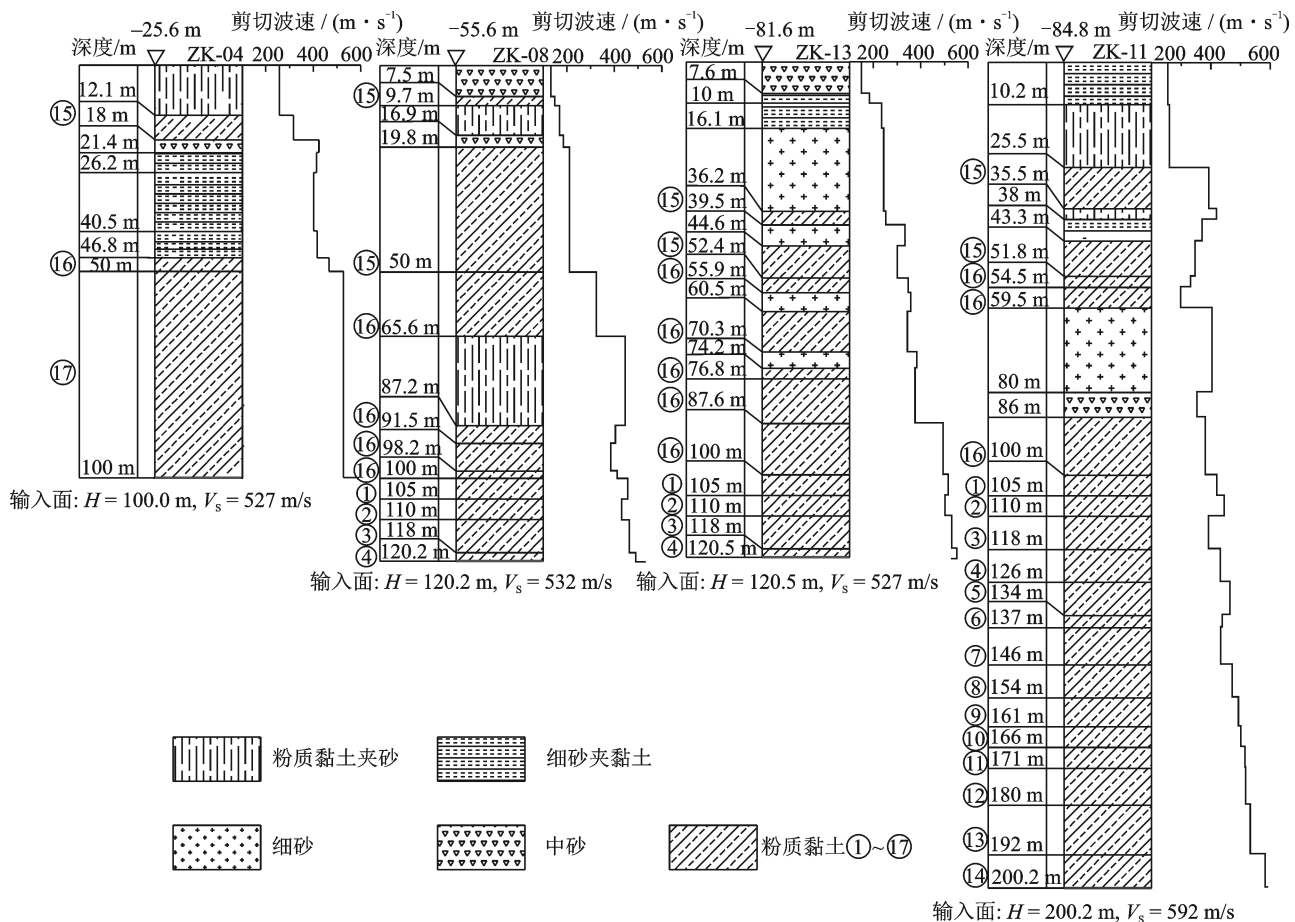


图 3 琼州海峡地层典型钻孔剪切波速和土层信息

Fig. 3 Shear-wave velocity profiles and the soil lithology with depth in the typical boreholes, Qiongzhou Strait

深100.0 m,顶面标高-25.60 m,上部为粉质黏土夹砂、粉质黏土、中砂,下部为厚的层状黏土;钻孔ZK-08孔深120.20 m,顶面标高-55.60 m,上部含有较厚粉质黏土层,下层为粉质黏土和粉砂互层;钻孔ZK-11孔深200.20 m,顶面标高-84.80 m,上部为粉砂互层、粉质黏土,中间为细砂和中砂,下部有厚的黏土层分布,是海床土层条件的控制性钻孔;钻孔ZK-13孔深120.50 m,顶面标高-81.60 m,钻孔剖面上部含有较厚细砂层,下部为厚层状粉质黏土。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[14]规定:剪切波速 $V_s \geq 500$ m/s且其下不存在更低波速的岩土界面可作为基岩。由图3可知:4个钻孔的终孔深度处 V_s 均符合规范要求,可作为地震动输入面。

2.2 土的非线性参数

采用文献[15-16]基于Davidenkov骨架曲线建立的广义non-Masing本构模型(DCZ模型)描述海床土体的非线性动力特性,DCZ模型描述的应力-应变关系如图4所示。

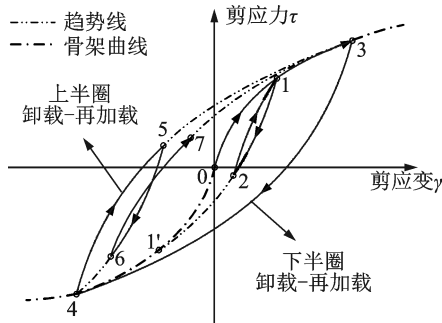


图4 DCZ模型描述的应力-应变示意图

Fig. 4 Schematic diagram of stress-strain described by DCZ model

Davidenkov骨架曲线表达式为:

$$\tau = G \times \gamma = G_{\max} \times \gamma \times [1 - H(\gamma)] \quad (2)$$

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

式中, τ 为剪应力; γ 为剪应变; G 为剪切模量; $G_{\max} = \rho V_s$ 为最大动剪切模量,其中, ρ 为密度, V_s 为现场勘测获取的场地剪切波速结果; A 、 B 、 γ_r 为土性相关的最佳拟合参数,由孙田等^[17-18]试验给出的琼州海峡各类土 G/G_{\max} - γ 和 λ - γ 均值曲线(如图5所示)确定。

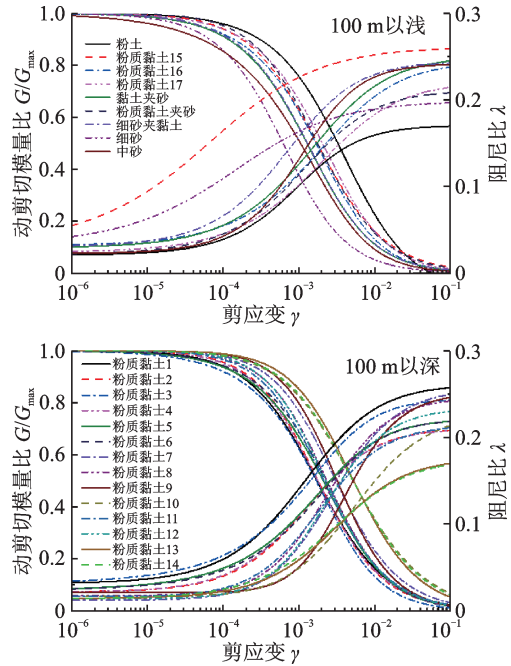


图5 琼州海峡海洋土的动剪切模量比与阻尼比曲线

Fig. 5 Variations of shear modulus ratio and damping ratio of soil at Qiongzhou Strait seabed

2.3 输入基岩地震动

琼州海峡及其邻近地区暂无历史地震记录数据,参考过往地震震级、震中距以及所选取钻孔深度等信息^[11],在日本强震观测网(KiK-Net)选取近场、中场、中远场以及远场4组地震记录作为基岩输入地震动,并以台站名称命名。地震动信息如表1所示。将EW/NS向中加速度峰值较大的地震运动信

表1 基岩地震动的原始记录信息

Tab. 1 Information of original earthquake recordings for bedrock input motions

| 台站 | 地震或震源位置 | | 地震时间/年 | 地震动分量 | 震级/M | 震中距/km | 峰值加速度/g | 有效持时 D_{5-95} /s | 卓越周期 T_p /s | 卓越频率 f_p /Hz | 钻孔深度/m |
|--------|---------|-------|--------|----------|------|--------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------|
| | 经度/°E | 纬度/°N | | | | | | | | | |
| EHHM04 | 133.07 | 33.90 | 2013 | EW UD | 6.4 | 41 | 0.145 0.048 | 18.64 31.99 | 0.48 0.28 | 2.09 3.61 | 200 |
| MYGH10 | 140.89 | 37.94 | 2022 | EW UD | 7.4 | 70 | 0.186 0.135 | 21.50 30.28 | 0.10 0.10 | 10.00 10.00 | 205 |
| FKSH10 | 140.09 | 37.16 | 2022 | NS UD | 7.4 | 148 | 0.042 0.034 | 37.15 41.10 | 0.20 0.18 | 5.00 5.55 | 200 |
| IBRH12 | 140.32 | 36.84 | 2011 | NS UD | 9.0 | 265 | 0.124 0.073 | 47.09 61.04 | 1.26 1.18 | 0.79 0.85 | 200 |

号作为水平向基岩地震运动激励,UD向地震运动信号分量作为竖向基岩地震运动激励,双向(水平

向+竖向)加载至钻孔剖面模型的基岩面。图6为基岩地震动的加速度时程和傅里叶谱。

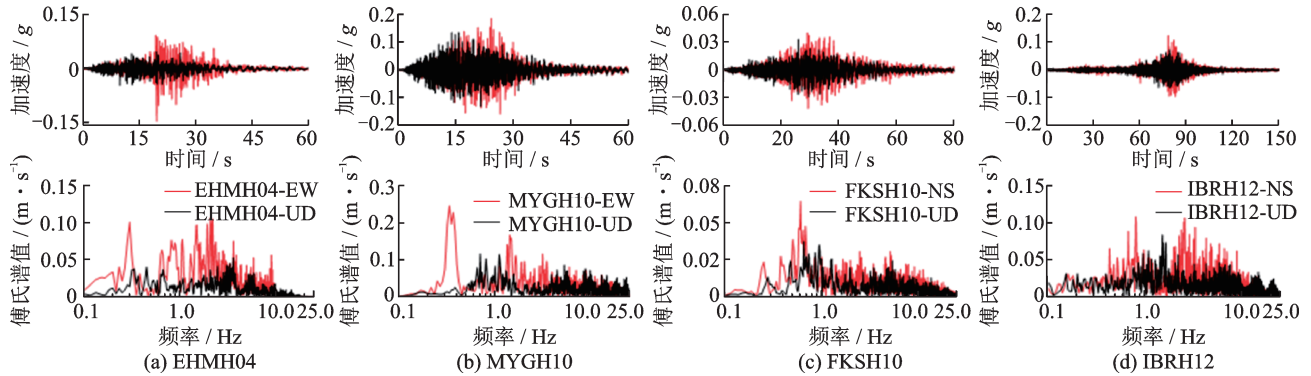


图6 基岩地震动信息

Fig. 6 Ground motion information of bedrock

3 数值计算结果与分析

3.1 海床场地基本周期及类别

采用HVSr (horizontal-to-vertical spectral ratio)方法^[19]确定海床场地的基本周期 T_s ,分别取土柱模型和海水-土柱模型在不同地震动激励下所计算的 T_s

均值。根据基于海床平均走时剪切波速 V_{s30} 、基本周期 T_s 和覆盖层厚度 H 三个指标的场地分类法^[20]确定不同钻孔剖面的场地类型。场地分类结果如表2所示。不考虑海水影响的土柱模型计算的 T_s 在0.97~1.56 s之间,考虑海水影响的海水-土柱模型计算的 T_s 在1.38~1.79 s之间,海水的影响导致海床场地的基本周期增大;另外,就本文分析结果而言,海水未对场地类别划分的结果产生影响。

表2 场地类别

Tab. 2 Site classification

| 钻孔编号 | $V_{s30}/(m \cdot s^{-1})$ | H/m | T_s/s | | 场地类别 | |
|-------|----------------------------|-------|---------|--------|---------|--------|
| | | | 不考虑海水影响 | 考虑海水影响 | 不考虑海水影响 | 考虑海水影响 |
| ZK-04 | 317.0 | 50.0 | 1.56 | 1.38 | III | III |
| ZK-08 | 168.7 | 110.0 | 1.44 | 1.70 | IV | IV |
| ZK-11 | 270.8 | 154.0 | 0.98 | 1.73 | IV | IV |
| ZK-13 | 204.5 | 87.6 | 0.97 | 1.79 | IV | IV |

3.2 海床地表加速度反应

图7为钻孔ZK-04、ZK-08、ZK-11和ZK-13在不同地震动记录EHMH04、MYGH10、FKSH10和IBRH12激励时海床地表观测点的加速度反应时程。

定义海水对地表地震动峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)的影响系数 $Q = (PGA_{土柱模型} - PGA_{海水-土柱模型})/PBA$,其中PBA为基岩输入地震动。钻孔ZK-04在不同地震动激励时的水平向 Q_H 分别为-0.07、0.11、0、0.08;竖向 Q_V 分别为0.21、0.81、1.18、1.64。钻孔ZK-08在不同地震动激励时的 Q_H 分别为0.34、0.05、-0.24、0.24; Q_V 分别为1.88、0.52、0.58、2.74。钻孔ZK-11在不同地震动激励时的 Q_H 分别为-0.07、0.16、0、0.16; Q_V 分别为

0.83、0.74、0.59、0.68。钻孔ZK-13在不同地震动激励时的 Q_H 分别为0、0.05、0、0.08; Q_V 分别为1.04、0.52、0.59、0.96。海水引起的土柱地表的峰值加速度相对差异(relative difference, RD)定义为: $RD_{PGA} = (PGA_{海水-土柱模型} - PGA_{土柱模型})/PGA_{土柱模型}$,表3给出4个典型钻孔在不同地震动激励时 RD_{PGA} 的计算结果。可以看出:在考虑海水时,水平向 RD_{PGA} 不超过18.52%,而对于竖向 RD_{PGA} ,减小幅度最大可达60.61%。综上可知,海水对海床地表的竖向运动存在抑制作用;海水对海床地表的竖向运动的影响强于水平向,海水对地表地震动峰值的影响的强弱与海床土层特性、海水深度以及地震运动特性等多种因素相关。

定义海床地表的地震动持时延长系数 $D_{5-95-PF} = D_{5-95-G}/D_{5-95-B}$,下标“G”代表地表,下标“B”代表基岩。

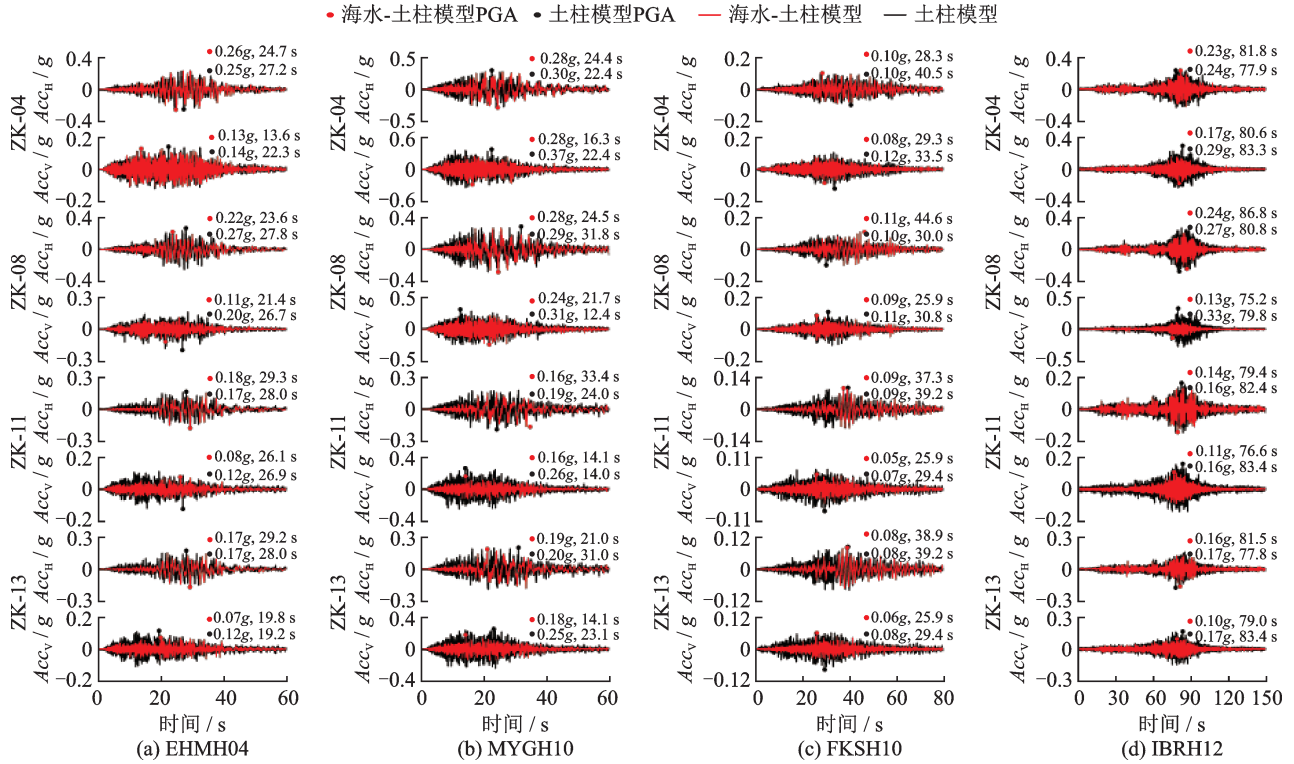


图7 不同钻孔地表观测点加速度反应时程

Fig. 7 Acceleration responses at the observation points at the surface of different boreholes

表3 不同地震动激励时4个典型钻孔的 RD_{PGA}

Tab. 3 RD_{PGA} of four typical boreholes under different seismic excitations

| 钻孔编号 | 地震动记录EHMH04 | | 地震动记录MYGH10 | | 地震动记录FKSH10 | | 地震动记录IBRH12 | |
|-------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| | 水平向/% | 竖向/% | 水平向/% | 竖向/% | 水平向/% | 竖向/% | 水平向/% | 竖向/% |
| ZK-04 | 4.00 | -7.14 | -6.67 | -24.32 | 0 | -33.33 | -4.17 | -41.38 |
| ZK-08 | -18.52 | -45.00 | -3.45 | -22.58 | 10.00 | -18.18 | -11.11 | -60.61 |
| ZK-11 | 5.88 | -33.33 | -15.79 | -38.46 | 0 | -28.57 | -12.50 | -31.25 |
| ZK-13 | 0 | -41.67 | -5.00 | -28.00 | 0 | -25.00 | -5.89 | -41.18 |

基岩地震波传播至地表的有效持时 D_{5-95} 的延长系数 $D_{5-95-PF}$ 如图8所示。不论水平向或竖向 $D_{5-95-PF}$ ，海水影响下的 $D_{5-95-PF}$ 数值均较小，意味着海水抑制了海床地表的有效持时延长；受海水影响，基岩地震运动MYGH10激励下的水平向 $D_{5-95-PF}$ 均值由1.66减小为1.43，竖向 $D_{5-95-PF}$ 均值由1.23减小为0.78；FKSH10激励下的水平向 $D_{5-95-PF}$ 均值由0.89减小为0.82，竖向 $D_{5-95-PF}$ 均值由1.17减小为1.05；可见，随着基岩地震运动强度增大，海床地表的地震动持时延长效应所受的抑制也将增加，且竖向地震动持时受

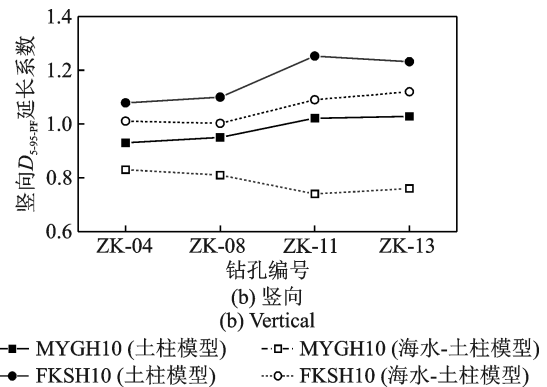


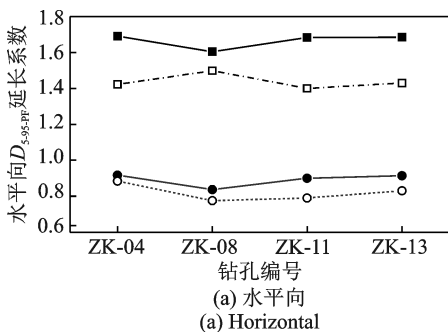
图8 海床表面地震动有效持时延长系数

Fig. 8 $D_{5-95-PF}$ at seabed surface

到抑制的程度高于水平向。

3.3 海床场地加速度传递函数

图9给出双向输入MYGH10记录时考虑海水与否的不同钻孔剖面的加速度传递函数(土层地震动与基岩地震动的平滑傅氏谱的比值(Fourier spectrum amplitude ratio, FSR))的色谱图。可以发现：



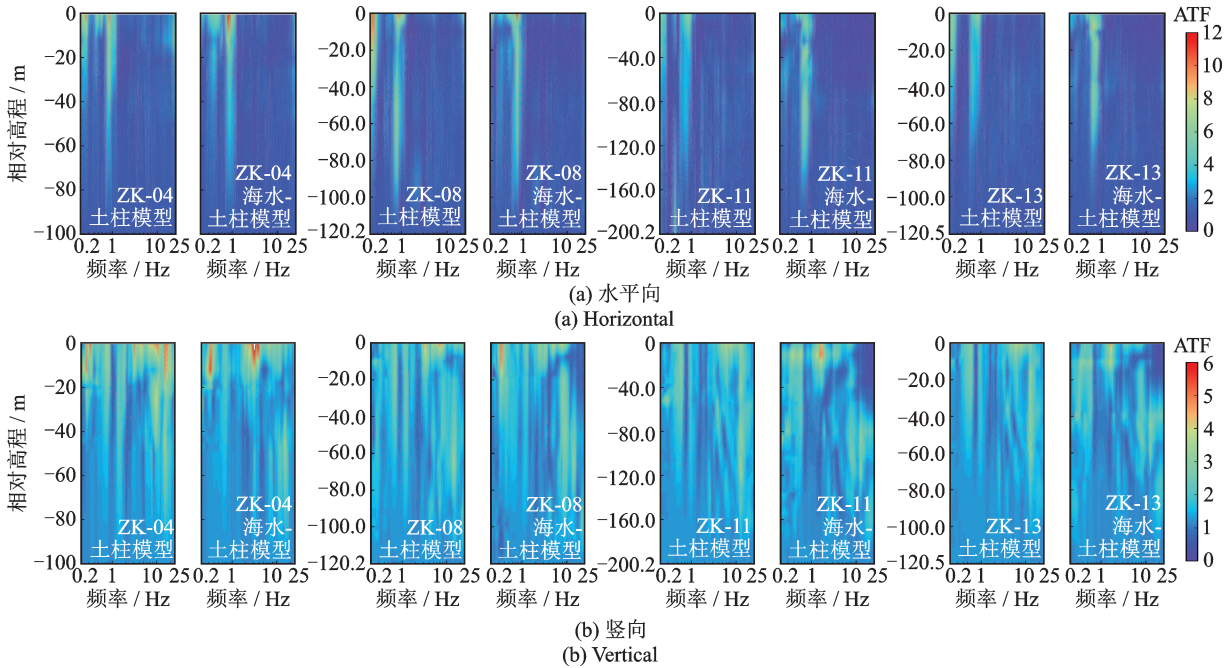


图9 考虑海水与否的场地剖面加速度传递函数的对比(双向输入:MYGH10记录)

Fig. 9 Comparisons of the Fourier spectrum amplitude ratios with and without seawater at the borehole profile (bidirectional input: MYGH10 record)

水平向、竖向FSR图形的色谱分布因钻孔场地剖面而异,土层结构异同是造成此差异的首要因素,不考虑海水影响时,四个典型钻孔在震动MYGH10激励下水平向地震反应在0.25和0.9 Hz类共振现象较为显著,竖向地震反应在全频率范围内多处出现类共振现象。考虑海水影响时,水平向地震动分量的类共振频率主要集中在0.7~1.1 Hz,竖向分量的类共振频率集中在1.5~3.0 Hz范围内。海水P波共振频率 f_n 由下式确定^[5]:

$$f_n = \frac{c}{4H} \cdot n; n=1, 3, 5, \dots \quad (4)$$

式中, n 为奇数; f_n 为对应的 n 阶频率; H 为水深; c 为

海水P波速,温度为20℃时, $c=1450$ m/s。

本文中各海床钻孔水深<110 m,对应的海水P波1阶共振频率>3.3 Hz,与海水影响下海床地表地震运动减小的频率范围相一致,可见海水抑制了高频成分的传播。而海床地表长周期成分的放大,则可归因于地震引起的海水动水压力。

以海床代表性钻孔ZK-11为例,探讨海水对土柱模型的地表地震运动的影响机理。对比仅水平向地震作用时考虑海水与否的海床场地地震反应(图10(a))发现,海水对土柱地表的加速度反应谱几乎无影响。进一步对比不考虑海水影响时,仅水平向地震作用和双向地震作用下的土柱地表的加速

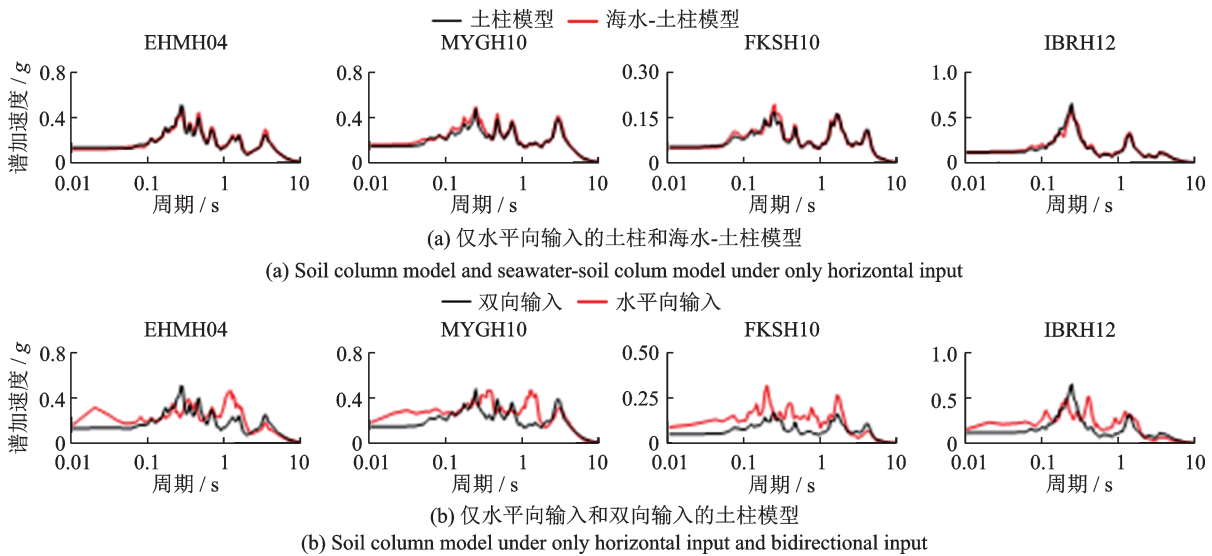


图10 土柱地表的水平向加速度反应谱对比(阻尼比:5%)

Fig. 10 Comparison of the horizontal spectrum acceleration (SA) at ground surface of the soil column (damping ratio: 5%)

度反应谱(图10(b)),二者表现出较大差异,双向地震作用引起的土柱地表的水平向加速度反应的频响更丰富,出现双向(水平向+竖向)耦合的地震反应现象。结合上述现象推测海水对水平成层海床场地的地震反应的影响机理,可认为:海水直接影响着海床场地的竖向地震反应,海水引起的水平成层海床场地的水平向地震反应之间的差异并不直接源于海水的影响,而是源于场地的双向耦合地震效应。

3.4 海床场地放大效应

基岩地震动MYGH10和FKSH10双向激励下,钻孔ZK-04、ZK-08、ZK-11、ZK-13的钻孔剖面峰值

加速度(peak acceleration, PA)沿深度的变化曲线如图11所示。可以看出:不论考虑海水与否,海床场地剖面的水平向峰值加速度 PA_H 差异不大;随着距海床地表的距离减小,海床剖面的竖向峰值加速度 PA_V 在海水的影响下逐渐减小,在海床地表处减小达到最大。因海水影响导致的竖向峰值加速度 PA_V 差异消失的深度大致为:钻孔ZK-04,差异在距海床地表42 m处消失;钻孔ZK-08,差异在距海床地表45 m处消失;钻孔ZK-11,差异在距海床地表43 m处消失;钻孔ZK-13,差异在距海床地表40 m处消失;可见海水对海床场地的影响仅存在于海床浅层(约 <50 m)。

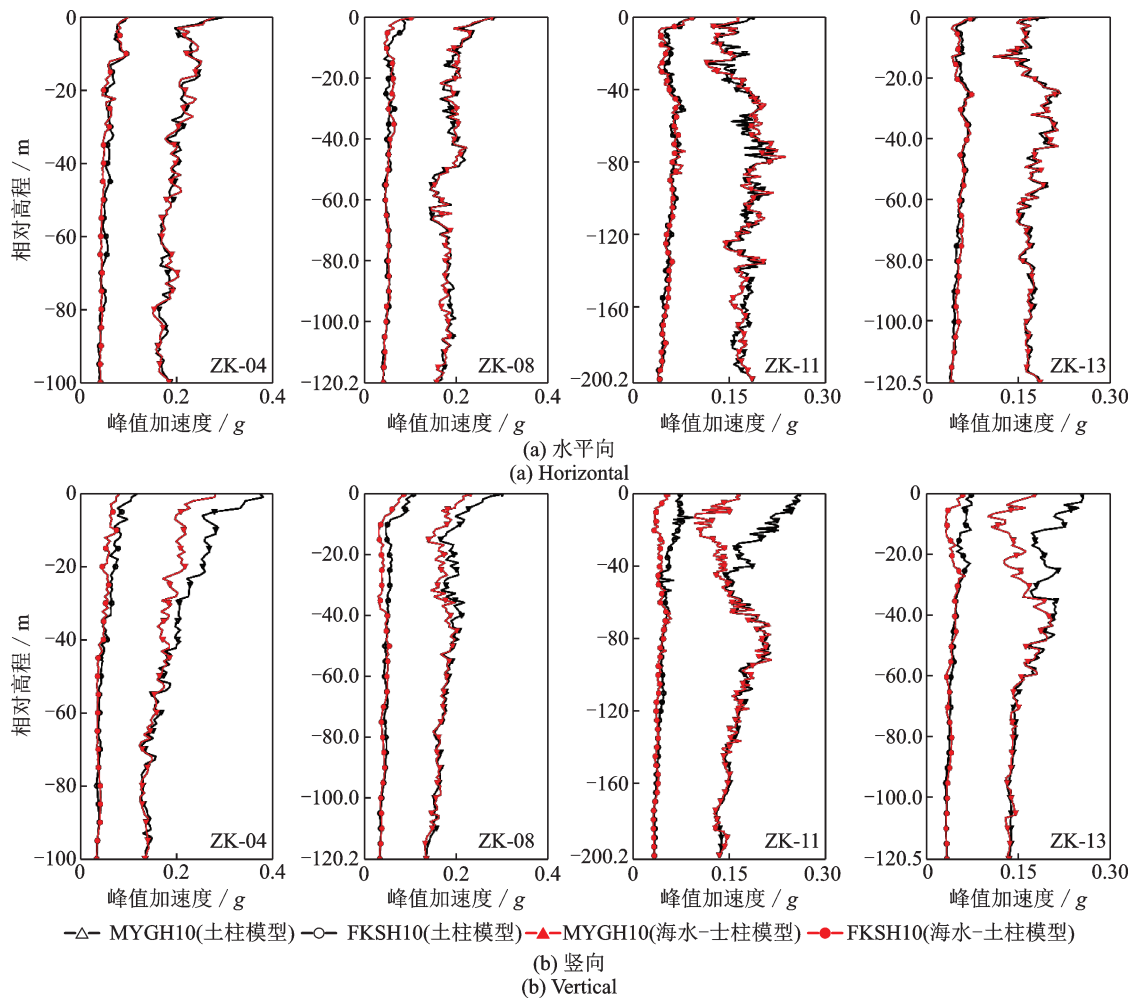


图11 不同基岩地震动激励时不同钻孔剖面峰值加速度随土层深度的变化

Fig. 11 Variation of peak accelerations with depth at different borehole profiles subjected to various bedrock motions

图12给出了考虑/不考虑海水的海床地表的规范化谱加速度 β 谱(5%阻尼比)及其均值曲线,同时给出《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)^[14]中Ⅲ类、Ⅳ类场地的罕遇地震设计反应谱 β 谱。可以看出:不论是否考虑海水,海床地表的水平向、竖向 β 谱均值线均存在某一周期范围大于规范设计 β 谱,意味着按照陆域规范进行海洋工程的抗震设计存在安全隐患。在海水的影响下,水平向、竖

向 β 谱均值曲线表现出较为明显的“高频滤波、低频放大”现象,其对应的卓越周期亦向长周期方向偏移;海水的影响导致陆域规范设计谱的不安全段向中、长周期段偏移。

3.5 水深的影响

以典型深孔ZK-11场地剖面为例,建立海水层深度分别为5、20、40、60和80 m的水平成层海床

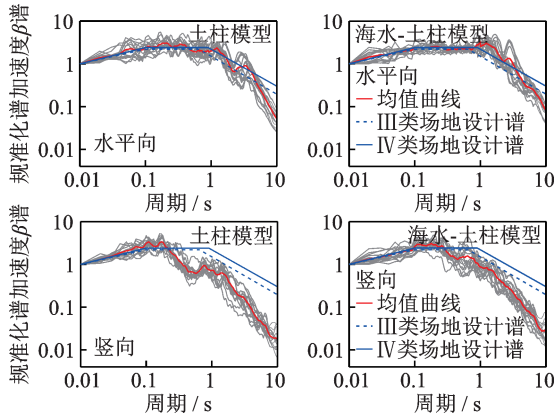


图 12 地表地震动规范化加速度 β 谱(5% 阻尼比)

Fig. 12 Normalized acceleration of surface seismic motion β spectrum (5% damping ratio)

场地剖面模型,进一步研究上覆海水层深度对海床场地地震反应的影响。图 13 给出不同海水深度下海水土柱模型与土柱模型计算所得海床地表峰值加

速度及影响系数 Q 的变化趋势图。可以看出:仅考虑海水的静水压力时,随着海水静水压力的增加,海床场地的初始应力场增大,土体的抗扰动能力增强,所以水平向、竖向 PGA 逐渐减小;地震引起的海水动水压力抑制了海床场地的水平向、竖向地震运动,且随海水层深度的增加,此抑制效果增强。海水对地表地震动峰值加速度的影响系数 Q 随海水层深度增加而增大,在地震动记录 MYGH10 和 FKSH10 激励下,水平向 Q_H 的均值分别为 0.12 和 0.29,竖向 Q_V 的均值分别为 0.39 和 0.41,海水对竖向地震运动的抑制程度大于水平向,且竖向地震运动随水深变化更剧烈。

图 14 给出不同海水深度下的海水-土柱模型计算的海床地表的规范化谱加速度 β 谱(5% 阻尼比)。可以看出:随着海水深度增加,不论输入 MYGH10 记录或 FKSH10 记录,海水对海床地表的水平向、竖

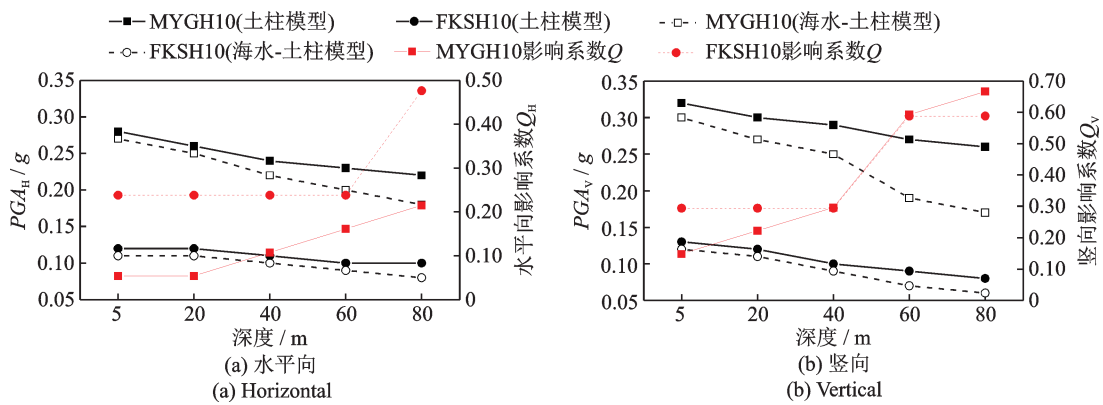


图 13 不同海水层模型计算的地表地震动峰值加速度及影响系数 Q

Fig. 13 PGA and influence coefficient Q calculated by models with different water depth

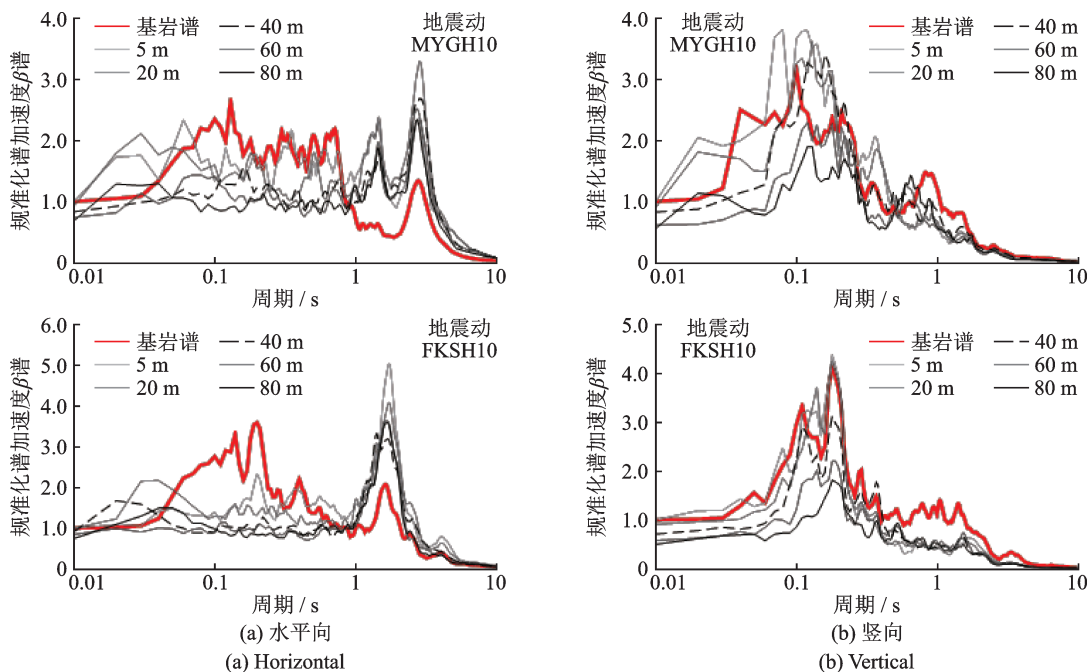


图 14 钻孔 ZK-11 地表观测点规范化谱加速度 β 谱

Fig. 14 Normalized β spectral acceleration of surface observation points in borehole ZK-11

向 β 谱的影响效果具有相似性,判断海水的影响与输入基岩地震运动特性的相关性较低;海床地表的水平向 β 谱表现为短周期反应逐渐减小、长周期反应逐渐放大,水平向卓越谱的卓越周期移动至 2.5 s 左右;竖向 β 谱表现为全周期范围内受抑制,其中短周期反应的受抑制程度较高,且竖向 β 谱的卓越周期向长周期方向逐渐移动。

4 结 论

通过对琼州海峡拟建海底隧道沿线 4 个典型钻孔剖面进行水平成层海床场地地震反应分析,考虑上覆海水动水压力,对比海水-土柱模型和土柱模型的计算结果,主要结论如下:

(1)海水抑制了海床地表的震动,海床地表的水平向、竖向峰值加速度和地震动有效持时均减小,且竖向地震运动的受抑制程度高于水平向。

(2)仅水平向地震作用与双向地震作用下的海床场地地震反应的差异表明:存在双向耦合地震效应,传统的一维场地分析方法可能错估场地的地震反应。海水直接影响水平成层海床场地的竖向地震反应,并借由双向耦合地震作用进一步影响水平成层海床场地的水平向地震反应。

(3)海水对海床地震反应的影响主要表现为对高频地震反应的抑制,这与海水的 P 波共振频率相关;而海床地表表现出的低频放大现象则归因于地震引起的海水动水压力。海床场地内的地震波动响应受到海水、海床软弱地层分布的共同影响。

(4)海水对海床场地的地震运动的影响主要为海床的浅层沉积土(<50 m),该范围内海床场地的竖向地震反应减小明显;海水的影响导致水平向、竖向加速度 β 谱均值线分别在相应的周期 0.75~1.5 s, 0.1~0.15 s 内大于陆地规范反应谱 β 谱的取值,应考虑海水对海洋工程抗震的不利影响。

(5)海水对海床地表地震运动的抑制效果、地震反应的“高频抑制、低频放大”的频响现象与海水水深呈“正相关”。

参考文献:

[1] CHEN B K, WANG D S, LI H N, et al. Characteristics of earthquake ground motion on the seafloor[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2015, 19(6): 874-904.

[2] HU J J, TAN J Y, ZHAO J X. New GMPEs for the Sagami Bay region in Japan for moderate magnitude events with emphasis on differences on site amplifica-

tions at the Seafloor and land seismic stations of K-NET[J]. The Bulletin of the Seismological Society of America, 2020, 110(5): 2577-2597.

- [3] TAN J Y, HU J J. Offshore ground motion characteristics on the horizontal PGA, spectral acceleration, frequency content and significant duration from the 2021 Mw 7.1 and 2022 Mw 7.4 offshore earthquakes near the Japan Trench area[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 164: 107646.
- [4] DIAO H Q, HU J T, XIE L L. Effect of seawater on incident plane P and SV waves at ocean bottom and engineering characteristics of offshore ground motion records off the coast of southern California, USA [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(2): 181-194.
- [5] LI C, HAO H, LI H N, et al. Theoretical modeling and numerical simulation of seismic motions at seafloor [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 77: 220-225.
- [6] 刘勇, 陈国兴, 孔梦云. 静、动水压力条件下海底隧道地震反应特性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 357-362.
- LIU Yong, CHEN Guoxing, KONG Mengyun. Seismic response of undersea tunnels to hydrodynamic and hydrostatic pressures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup2): 357-362.
- [7] CHEN B K, WANG D S, CHEN S L, et al. Influence of site factors on offshore ground motions: observed results and numerical simulation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 145: 106729.
- [8] CHEN B K, WANG B W, MA Z Q, et al. Influence of seawater depth on offshore ground motion characteristics and seismic responses of sea-crossing cable-stayed bridges[J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114853.
- [9] 陈炜昀, 吕振宇, 徐令宇, 等. 考虑海水-海床耦合效应的海底隧道地震响应研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(6): 1878-1886.
- CHEN Weiyun, LYU Zhenyu, XU Lingyu, et al. Seismic response of subsea tunnels considering seawater seabed coupling effect[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(6): 1878-1886.
- [10] JENG D S, YE J H, ZHANG J S, et al. An integrated model for the wave-induced seabed response around marine structures: model verifications and applications[J]. Coastal Engineering, 2013, 72: 1-19.
- [11] 陈国兴, 夏高旭, 王彦臻, 等. 琼州海峡海床地震反应特性的一维非线性分析[J]. 工程力学, 2022, 39(5): 75-85.
- CHEN Guoxing, XIA Gaoxu, WANG Yanzhen, et al. One-dimensional nonlinear seismic response analysis for seabed site effect assessment in the Qiongzhou Strait

- [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(5): 75-85.
- [12] 王彦臻,范宏飞,赵凯,等.深厚复杂海峡场地二维非线性地震反应特性[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(2): 345-356.
WANG Yanzhen, FAN Hongfei, ZHAO Kai, et al. 2D nonlinear seismic response characteristics of a strait site with deep inhomogeneous soil deposits[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(2): 345-356.
- [13] 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 Xiaolong, LI Xiaojun, CHEN Guoxing, 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.
- [14] 中国地震局.中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
China Earthquake Administration. Seismic ground motion parameters zonation map of China: GB 18306—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [15] 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.
- [16] 王彦臻,赵丁凤,陈国兴,等.一维场地地震反应非线性有效应力分析法及其验证[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(3): 502-510.
WANG Yanzhen, ZHAO Dingfeng, CHEN Guoxing, et al. A new nonlinear effective stress method for one-dimensional seismic site response analysis and its validation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(3): 502-510.
- [17] 孙田,陈国兴,周恩全,等.深层海床粉质黏土动剪切模量和阻尼比试验研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(增刊1): 9-14.
SUN Tian, CHEN Guoxing, ZHOU Enquan, et al. Experimental research on the dynamic shear modulus and the damping ratio of deep-seabed marine silty clay[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(Sup1): 9-14.
- [18] 孙田,陈国兴,周恩全,等.琼州海峡100 m以浅海洋土动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增刊2): 375-382.
SUN Tian, CHEN Guoxing, ZHOU Enquan, et al. Experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of marine soils in Qiongzhou Strait with depth less than 100 m[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Sup2): 375-382.
- [19] NAKAMURA Y. What is the Nakamura method[J]. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(4): 1437-1443.
- [20] 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 Guoxing, DING Jiefa, FANG Yi, et al. Investigation of seismic site classification scheme[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3509-3522.

第一作者:范宏飞(1999—),男,硕士研究生。

E-mail: fanhongfei99@163.com

通信作者:陈国兴(1963—),男,博士,教授。

E-mail: gxc6307@163.com