

DOI: 10.11779/CJGE202111002

金塘海峡海床地震反应特征的二维非线性分析

陈国兴^{1,2}, 岳文泽^{1,2}, 阮 滨³, 王彦臻^{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. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 确保强地震作用时海岸及近海工程的安全是一项重大的工程挑战。利用金塘海峡海底隧道地质勘探数据, 建立海床剖面二维精细化有限元模型, 依据场址区域地震动活动构造背景和历史地震记录, 选取两次强地震的井下基岩记录作为基岩输入地震动, 考虑海床土空间分布不均性和非线性特性, 采用并行算法模拟不同地震动水平下的深厚海床场地地震反应。该海床场地对地震动低于1 Hz的低频分量和10 Hz以上的高频分量分别有显著的放大和滤波作用; 随着基岩地震动水平增大, 海床地表加速度传递函数值逐渐减小, 其卓越频带向低频方向移动; 海床地表峰值加速度放大系数较之一般陆域场地的明显要小; 海床地表谱加速度β谱特性和累积绝对速度CAV主要受基岩地震动特性和海床局部场地条件的影响。相比于仅有水平向地震作用, 水平向和竖向基岩地震动的耦合作用对该海床场地的设计地震动参数有显著的不利影响。依据现行的抗震规范确定该海床场地的设计地震动参数可能偏于不安全。

关键词: 场地效应; 深厚海床; 场地反应特性; 二维非线性分析; 竖向地震动

中图分类号: TU433 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2021)11-1967-09

作者简介: 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。

Two-dimensional nonlinear seismic response analysis for seabed site effect assessment in Jintang Strait

CHEN Guo-xing^{1,2}, YUE Wen-ze^{1,2}, RUAN Bin³, WANG Yan-zhen^{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. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Ensuring the safety of coastal and offshore projects subjected to strong earthquakes is a major engineering challenge. A two-dimensional nonuniform gridding and fine finite element model for the seabed cross-section site in Jintang Strait is established using the geological and geotechnical exploration data. According to the regional tectonic setting and historical seismicity around the undersea tunnel site, the downhole array bedrock records during two strong earthquakes are selected as the input bedrock motions, the spatial inhomogeneous variation, nonlinear and hysteretic behaviors of the seabed soil are considered, and the site responses of the seabed deep deposits under various earthquake levels are simulated using the parallel method. The significant amplification and filtering effects of seismic propagation for the low-frequency components below 1 Hz and the high-frequency components higher than 10 Hz of the bedrock motions are observed in the site responses. With the increase of bedrock motion levels, the values of acceleration transfer function of the seabed site decrease, and the predominant frequencies of the seabed site response tend to be lower. The peak acceleration amplification factors of the seabed surface are obviously lower than those of the general land sites. The 5% damping spectral acceleration spectra and the cumulative absolute velocity at the seabed surface are significantly affected by the bedrock motion characteristics and seabed local site conditions. The coupled horizontal and vertical bedrock motions exhibit a substantial negative influence on the design ground motion parameters of the seabed site, compared to those in the cases of only the horizontal bedrock shaking. The determination of the design ground motion parameters of the seabed site based on the current seismic code may be unsafe.

Key words: site effect; seabed deep deposit; site response characteristic; two-dimensional nonlinear analysis; vertical motion

0 引言

近年来, 随着中国“海上丝绸之路”倡议和海洋强国战略的推进, 中国海岸及近海工程建设快速发展。

以上海、杭州、宁波为三大空间顶点的杭州湾区, 地

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1500403)
收稿日期: 2021-03-12

处中国沿海开放带、长江经济带、长江三角洲城市群与“一带一路”等多重国家战略的交汇点，是中国经济发展的重要增长极。金塘海峡位于杭州湾南部海域，是宁波、舟山通往上海港及对外经济贸易的海上交通要道。世界历史上，1923年8.2级关东大地震、2011年东日本9级大地震对东京湾区造成毁灭性的破坏；1906年7.8级旧金山大地震、1989年6.9级洛马普里塔地震对旧金山湾区造成严重破坏。中国海域地震频发，渤海、东海、南黄海、台湾海峡及南海海域历史上均多次发生过强烈地震。因此，以金塘海域为案例，开展杭州湾区海床场地地震效应研究，对防御和减轻环杭州湾海岸及近海工程的地震灾害具有重要的现实意义。

海床场地地震效应的研究，能够为海岸港口码头与防波堤、近海海底沉管隧道与油气管线等工程的抗震分析和设计提供科学的参考依据。目前，少量海床场地地震效应的研究主要集中于日本相模湾布设的海底地震观测台阵记录^[1-3]：海底水平向地震动明显大于相同震级的陆地地震动；海底竖向地震动谱加速度在短周期段小于陆地地震动，但在长周期大于陆地地震动；海底地震动的竖向/水平向(V/H)谱比在短周期段明显小于陆地地震动，海底不同台站间的V/H谱比也存在较大的差异。类似地，Zhang等^[4]对同一地震和相同震中距地震记录的对比表明：海底水平向峰值加速度(PGA)大于近岸陆上水平PGA；海底竖向/水平向峰值加速度比(V/H PGA)小于近岸陆上的V/H PGA；海底水平向、竖向谱加速度峰值的周期比近岸陆上的更长，且中长周期的海底谱加速度放大系数比近岸陆上的更大。由于海底地震动记录缺乏，且海域钻孔难度大且成本高，难以获取海洋土动力学测试参数，因此，目前数值模拟海床中地震波的传播及地震动特性的研究很少。

先前的解析和数值研究、强震记录数据分析均已经证明了深、浅盆地对场地效应的不利影响。研究人员对盆地效应的基本共识：①全盆地共振；②盆地边缘面波的产生及其叠加；③由于盆地的二维或三维几何形状导致入射波的聚焦。在低地震活动性地区，由于缺乏强震记录，数值模拟是评估场地地震效应的主要手段。由于地质构造和沉积环境复杂，近海海床场地通常为海相、海陆交互相沉积层，基岩面起伏明显，常有突起与凹陷，中部土层呈透镜体或带状分布，浅层沉积土软弱。这是海床场地地震效应数值分析中所面临的关键难题。对于复杂的海床场地地震效应分析，采用二维或三维数值模型是必要的。随着大规模并行计算的发展与普及，计算资源不再是大尺度场地地震

效应分析中难以克服的问题^[5-7]。

海床浅层软土的动力非线性动力特性对海床场地地震效应具有显著的影响。浅层软土较低的波阻抗特性在弱震作用下会引起显著的场地放大作用，而在强震作用下土的非线性动力行为会起主导作用，导致地震波出现明显的衰减^[8]。海湾滨海巨厚地层、河口盆地、海湾跨海剖面非线性地震效应特征的研究成果对研究金塘海峡海床非线性地震效应特征具有直接的借鉴意义^[6-7, 9-10]。

本文根据原位地质勘探数据，基于Abaqus软件平台，建立金塘海峡海床场地精细化二维有限元数值模型；根据场址的区域地震地质环境及历史地震数据，从KiK-Net强震台网选取代表性的井下台阵基岩记录作为输入基岩地震动，考虑海床土的非线性特性，探讨了金塘海峡海床二维非线性地震反应特征，期望为有关近海工程的抗震设计提供基础性的科学依据。

1 场地条件

金塘海峡宽度约5~10 km，最大水深约为50 m。在建的甬舟铁路金塘海底隧道全长16.2 km，最大埋深78 m，海域中段隧道长8.3 km，是国内设计长度最长、承受水压最大的水下盾构隧道。跨海甬舟铁路线位的地理位置如图1所示。

通过金塘海峡地球物理、地质和岩土工程勘探，获取了研究区的海床地层结构，如图2所示。金塘海峡海底沉积物表现出明显的海相沉积特征，岩性以粉土、粉砂、粉质黏土、中粗砂为主，深部基岩则为熔结凝灰岩。根据海底沉积物厚度及基岩面和海床面起伏特征可以将研究剖面粗略地划分为海峡西段（横坐标范围0~4000 m）和海峡东段（横坐标范围4000~7000 m）。其中，海峡西段的基岩面和海床面表面起伏明显，水深0~45 m。在基岩面以上海底沉积物自下而上总体上表现为粉质黏土、粉砂和粉土，海底沉积物厚度相对较小，为10~75 m。而海峡东段的基岩面和海床面则较为平坦，水深20~50 m。在基岩面以上海底沉积物自下而上总体上表现为含黏性土碎石、角砾土、粉质黏土、粉土和粉砂，海底沉积物厚度相对较大，为50~75 m。

参考Nakamura^[11]提出的HVSR(Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio)法确定场地的基本频率，其倒数为基本周期，如图2所示。具体方法：计算基岩输入水平向和竖向弱震时海床表面地震动的水平向与竖向傅里叶幅值谱比，绘制谱比-频率曲线，其峰值对应的频率即为场地基本频率。由图2可知，金塘海峡海床场地的基本频率为0.7~1.4 Hz。其中，由于海

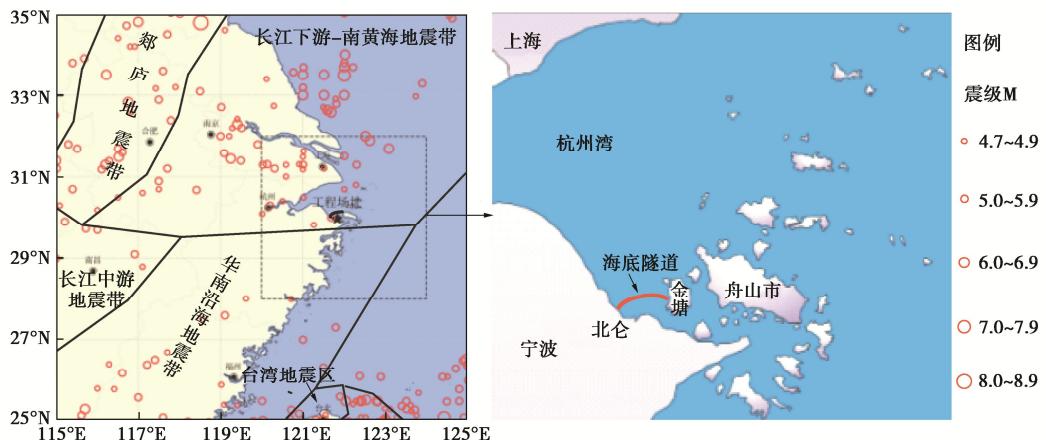


图 1 工程场地场址位置及区域地震地质环境

Fig. 1 Location of project site and tectonic setting of regional seismicity

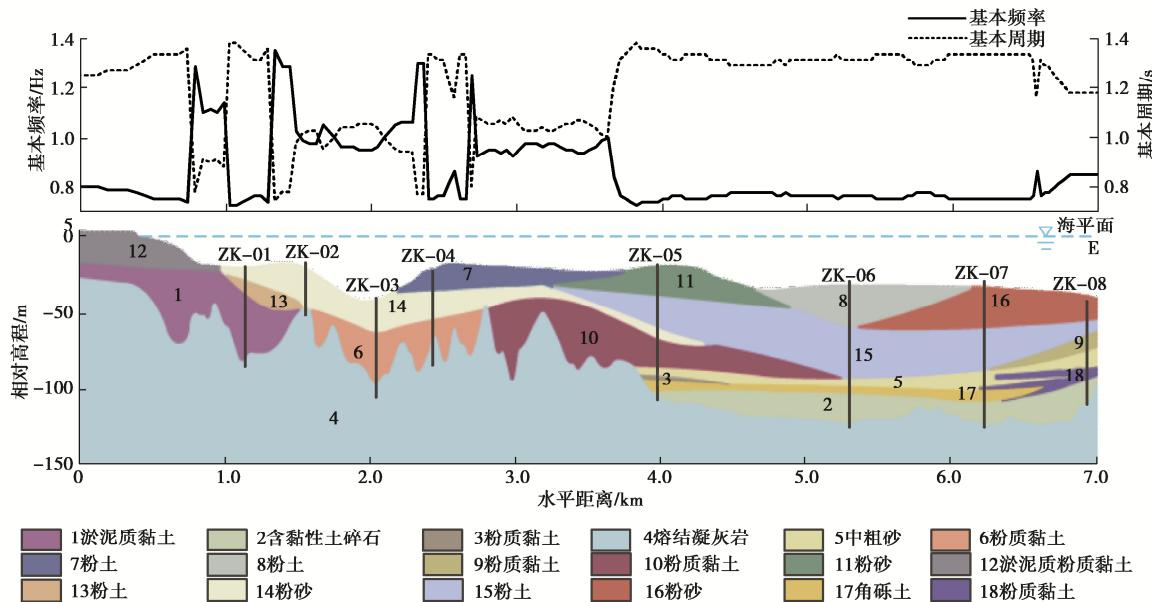


图 2 金塘海峡隧道所处场地的地质剖面图、基本频率和周期

Fig. 2 Geotechnical section, site fundamental frequencies and periods along longitudinal axis of subsea tunnel of Jintang Strait

峡西侧沉积物的厚度较薄且基岩面起伏明显, 该区域的场地基本频率波动在 1 Hz 左右, 表现出较明显的空间变异性。同时, 由于海峡东侧沉积物的厚度较高且基岩面平坦, 该区域的场地基本频率为 0.7~0.8 Hz。

2 地震环境与地震动输入

由图 1 可知, 研究区域内(工程场址外围 150 km)有史料记载以来发生 $M \geq 4.5$ 级地震 30 次, 其中 $5.0 \leq M < 6.0$ 级地震 14 次, $6.0 \leq M < 7.0$ 级地震 3 次, 最大地震为 1505 年南黄海 6.8 级地震, 近期的最大地震为 1996 年长江口以东海域 6.1 级地震。根据区域地震活动性, 区域存在发生 6~7 级地震的地震活动背景。此外, 近场区(场址及其外围 25 km)历史上也发生过多次地震, 最大地震为 1523 年宁波镇海海滨 5.5 级地

震, 震中烈度为 VII 度。1970 年以来华东地震台网记录到多次小地震, 最大为 1984 年宁波鄞州 2.8 级地震。注意到 1970 年以来在场址东北 50 km 以外的岱山海域发生过 4 次 4~5 级地震, 最大地震 4.5 级; 现今小震时有发生, 故近场区及附近地震比较活跃, 存在发生 5~6 级地震的地震活动背景。根据区域历史地震资料, 对金塘海峡海底隧道场址开展了地震安全性评价工作, 计算得到 50 年超越概率 63%, 10% 和 2% 的跨海铁路海底隧道沿线基岩水平向峰值加速度分别约为 0.027g, 0.083g 和 0.158g, g 为重力加速度。

由于缺乏当地的实际强震动记录, 依据海底隧道场址的区域和近场区历史地震资料, 从日本 KiK-Net 强震观测台网记录中选取了两次日本海域强震的基岩记录作为该海底隧道的基岩地震动。表 1 给出原始记录的峰值加速度 PGA 和卓越频率 f_p 。地震记录的时程

表 1 基岩输入地震动的原始地震记录信息

Table 1 Information of original earthquake recordings for bedrock motions

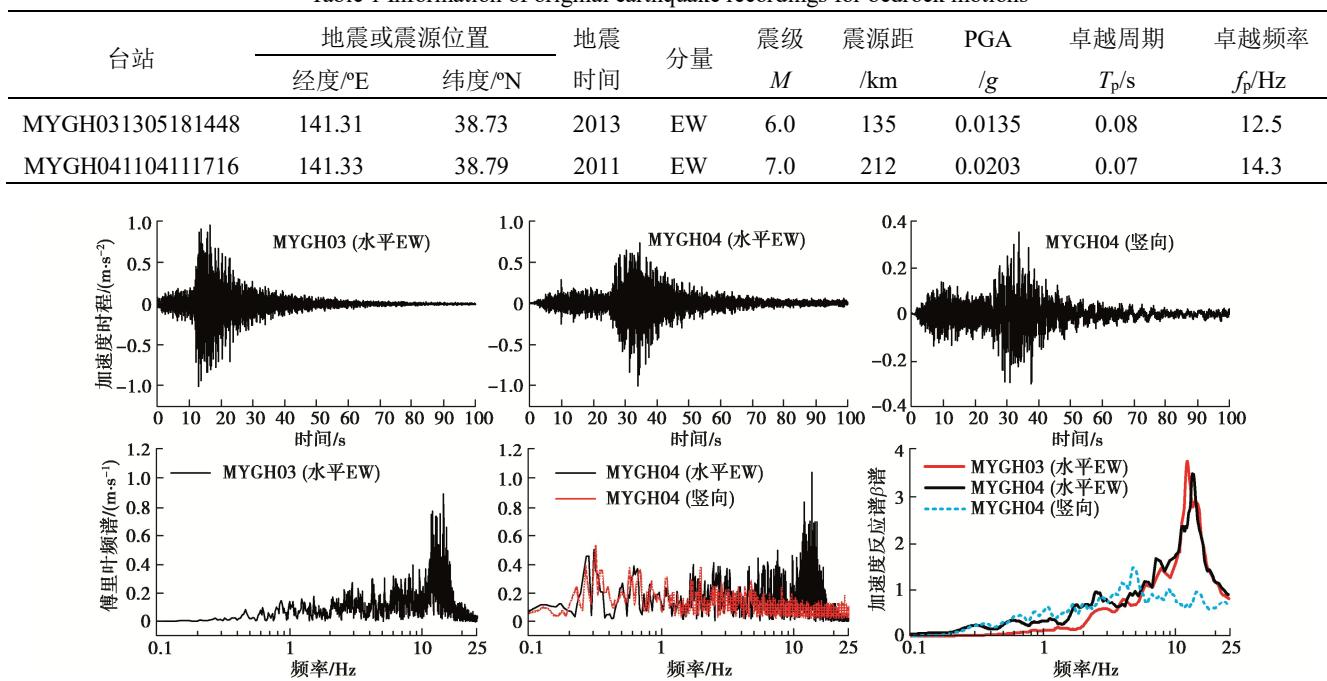
图 3 输入地震动的时程曲线、傅里叶频谱和谱加速度 β 谱(阻尼比 5%)

Fig. 3 Time-histories, Fourier spectra and 5% damping spectral accelerations in the form of β spectra for input bedrock motions 曲线(调幅为 0.1g)及对应的傅里叶频谱、谱加速度 β 谱如图 3 所示。日本海域 2013 年 6 级地震 MYGH031305181448(简记为 MYGH03)台站记录和 2011 年 7 级地震 MYGH041104111716(简记为 MYGH04)台站记录的震源距分别为 135, 212 km。参照该工程场址地震安全性评价结果,依次将输入水平地震动调幅为 0.03g(小震)、0.075g(中震)和 0.15g(大震),竖向地震动记录按水平向地震动记录等比例调幅,以考虑基岩地震动水平的影响。

3 二维有限元数值模型

根据图 2 中的地质剖面图,建立了金塘海峡大尺度二维精细化有限元数值模型。整个模型长度为 7000 m,深度约为 150 m,共 406080 个单元。单元以四边形单元为主,在不同材料交界面处辅助以三角形单元。单元格尺寸满足小于最小 1/8 波长的要求: $l_{\max} \leq V_s/(8f_{\max})$, f_{\max} 为考虑的最大频率,本文取为 25 Hz。模型的底部与两侧边界均采用刘晶波等^[12]提出、章小龙等^[13]改进的黏弹性人工边界,地表为自由边界。从模型底部输入地震动,最大时步为 5×10^{-5} s,以兼顾计算效率与准确性。

结合跨海铁路海底隧道现场岩土勘探,钻孔获取了金塘海峡海床 100 m 以浅的海洋原状土土样,对各钻孔不同埋深的各类原状海洋土进行系列室内共振柱

试验,各类土的剪切模量比与阻尼比曲线如图 4 所示^[14]。

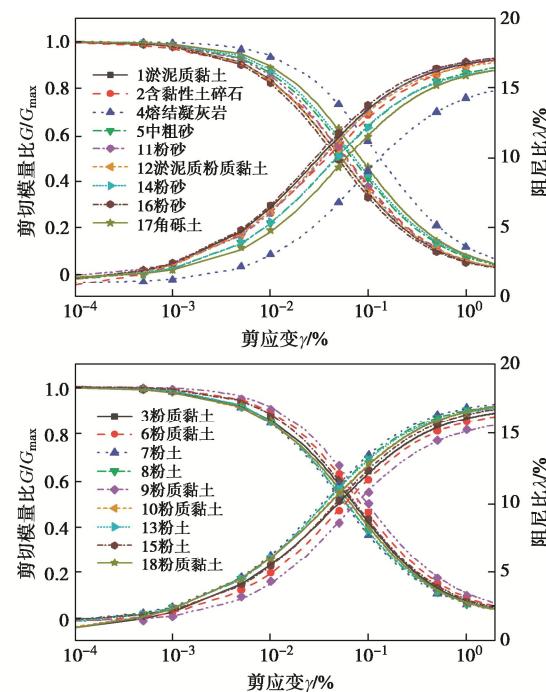


图 4 不同类型沉积土的剪切模量比和阻尼比随剪应变的变化曲线

Fig. 4 Curves of shear modulus ratio G/G_{\max} and damping ratio λ of various marine soils

采用基于 Davidenkov 骨架曲线、不规则加卸载准则构造的 non-Masing 本构模型(简称 DCZ 模型)描

述地震作用下土体应力 - 应变关系^[10, 15], 如图 5 所示。

以自定义子程序模块嵌入 Abaqus 软件。Davidenkov 骨架曲线表达式:

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

式中,

$$H(\gamma) = \left\{ \frac{(\gamma/\gamma_0)^{2B}}{1 + (\gamma/\gamma_0)^{2B}} \right\}^A \quad , \quad (2)$$

式中, G_{\max} 为最大剪切模量, $G_{\max} = \rho V_s^2$, ρ 为土体密度, V_s 为土体剪切波速, A , B 和 γ_0 为土的试验参数, 可通过图 4 所示的试验曲线的最佳拟合确定。

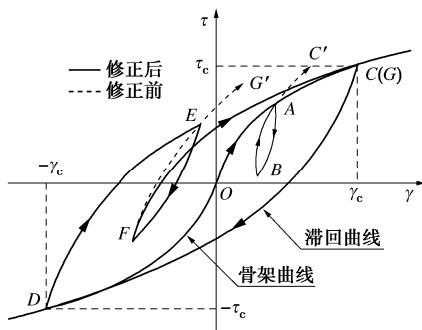


图 5 DCZ 模型的不规则加卸载应力 - 应变曲线

Fig. 5 Shear stress-strain curves of irregular loading-unloading-reloading for DCZ hysteretic model

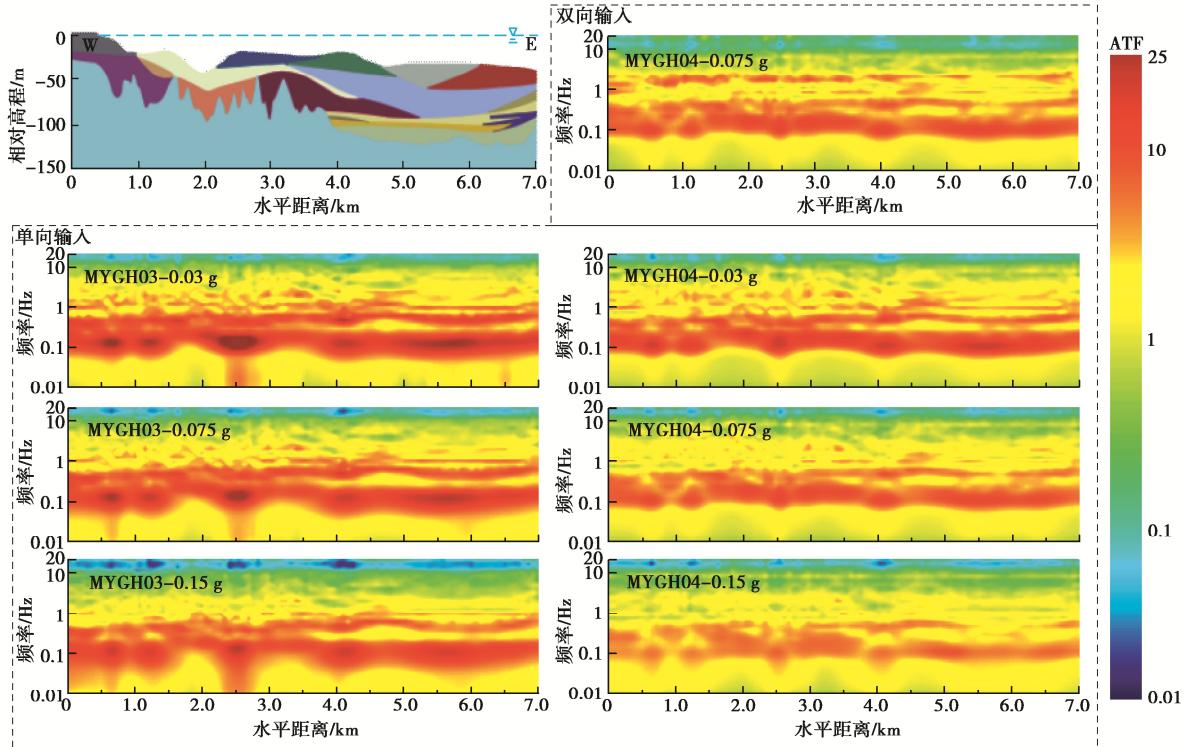


图 6 单向(水平向)和双向(水平向+竖向)基岩地震动激励时海床地表的水平向加速度传递函数 (ATF)

Fig. 6 Horizontal acceleration transfer functions (ATFs) for seabed surface subjected to unidirectional (horizontal) and bidirectional (horizontal and vertical) bedrock motions

4 结果与分析

基于并行计算显式算法^[5, 15], 不同工况的计算耗时 12~24 h。现从海床地表地震动加速度传递函数 (ATF) 与峰值加速度 (PGA) 放大系数的空间分布、海床地表谱加速度 β 谱特性和累积绝对速度 (CAV) 4 个方面分析金塘海峡场地的地震反应特征, 对比了单向 (水平向) 和双向 (水平向+竖向) 地震动作用下海床场地地震反应特征的差异, 并给出了钻孔剖面的地表谱加速度 β 谱的均值谱。

4.1 地震动传递函数

ATF 定义为地表与基岩的加速度傅里叶幅值谱的比值。由图 6 的 ATF 色谱可知, 海床场地对地震动低于 1 Hz 的低频分量和高于 10 Hz 高频分量分别有显著的放大和滤波作用。随着基岩地震动峰值加速度 (PBA) 的增加, ATF 的放大倍数减小, 且有向低频方向移动的趋势。究其原因: 由于海床场地的剪切波速较小, 导致海床土在地震作用下的剪应变水平较高, 表现出“高阻尼比”特性; 且 PBA 越大, 海洋土的非线性效应越显著。此外, PBA 相同时, MYGH04 记录激励时的 ATF 值要低于 MYGH03 记录激励时的 ATF

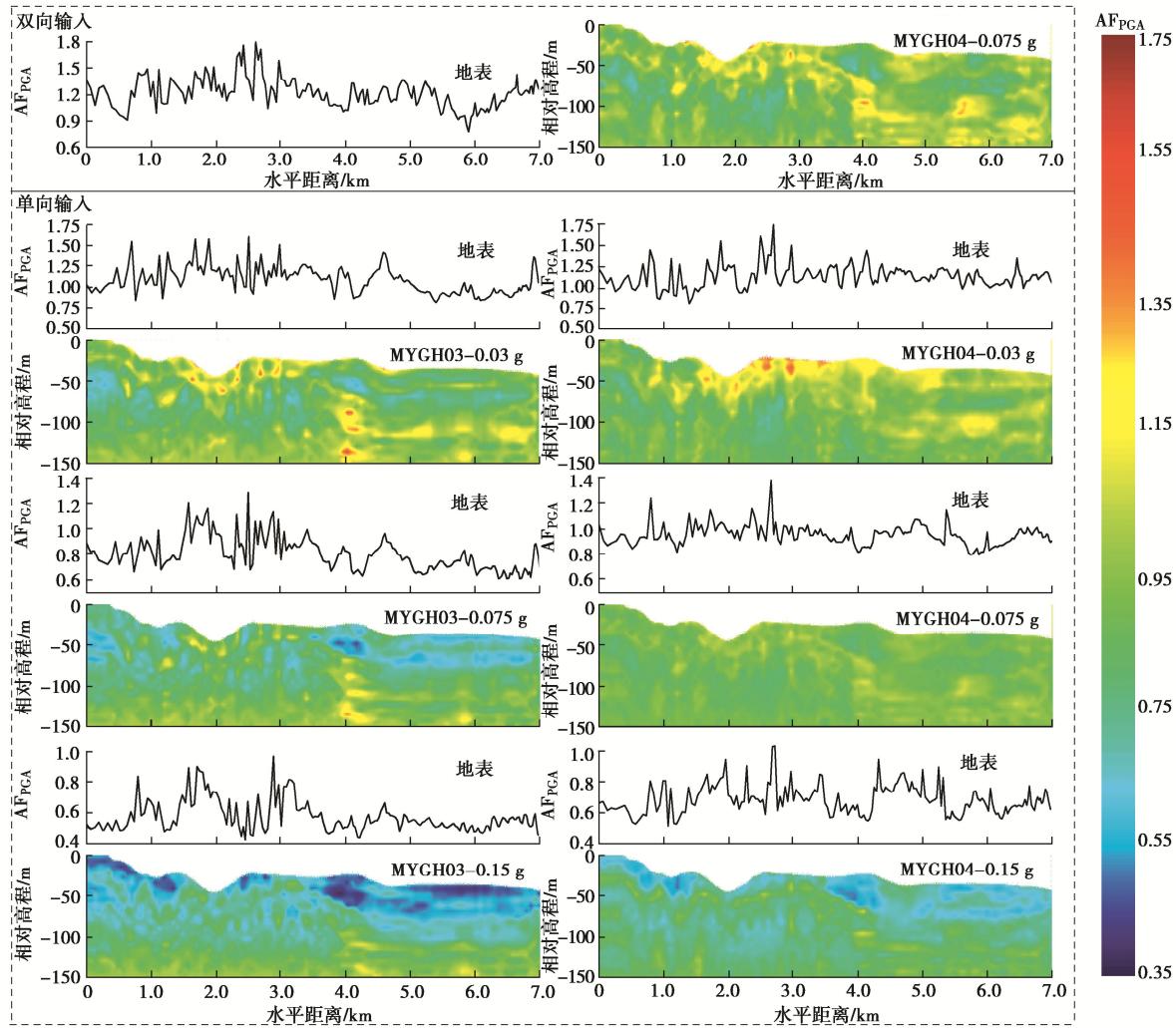


图 7 单向(水平向)和双向(水平向+竖向)基岩地震动激励时海床剖面的水平向峰值加速度放大系数的空间分布

Fig. 7 Spatial variation of amplification factors of horizontal peak ground acceleration (AF_{PGA}) of seabed cross-section site subjected to unidirectional (horizontal) and bidirectional (horizontal and vertical) bedrock motions

值。这表明该海床场地的非线性地震反应不仅取决于 PBA 的水平, 还取决于基岩地震动能量大小^[7]。与单向地震动作用相比, 双向地震动作用对应的 ATF 值更大。这表明: 仅考虑单向地震动作用会低估海床场地地震反应水平。

4.2 PGA 放大系数的空间分布

将海床场地地震反应的 PGA 与 PBA 之比定义为峰值加速度放大系数, 记为 AF_{PGA}。图 7 显示了海床剖面的 AF_{PGA} 色谱。对于水平向 PBA 为 0.03g, 0.075g, 0.15g 的工况, 海床表面的 AF_{PGA} 分别为 0.8~1.7, 0.6~1.3, 0.4~0.9。这一结果明显低于之前对陆地 AF_{PGA} 的认识。究其原因: 输入地震动的卓越频谱高于 10 Hz, 而该海床场地对地震动 10 Hz 以上的高频分量的滤波作用显著。此外, 基岩面起伏对海床的 AF_{PGA} 有显著影响。基岩面起伏在海峡西侧显著、东侧平缓, 相应地, 西侧海床表面的 AF_{PGA} 变化较为显著, 东侧海床表面的 AF_{PGA} 变化相对平缓。与 MYGH04 记录单向激励相比, 双向激励对应的 AF_{PGA} 更大, 约

为单向的 1.1 倍~1.5 倍。

4.3 海床表面地震动谱加速度 β 谱特性

图 8 给出了海床表面地震动谱加速度 β 谱(阻尼比 5%)的色谱。从图 8 可知, 与 MYGH03 记录相比, MYGH04 记录的低频分量更为丰富。因此, MYGH04 记录激励时海床表面的 β 谱谱值在中长周期 1~3 s 段明显高于 MYGH03 记录激励时的 β 谱谱值。同时, 由于受土体非线性动力学行为的影响, 随着 PBA 的增大, 海床表面的 β 谱谱值总体上呈现减小的趋势。此外, 总体而言, 同单向地震动作用相比, 双向地震动作用对应的 β 谱谱值更大。由表 1 可知, 输入地震动的卓越周期为 0.07~0.08 s, 而场地基本周期在 0.7~1.4 s。从图 8 可知, 谱加速度 β 谱谱值的卓越反应周期介于 0.1~1 s, 可以认为 β 谱的卓越反应周期同时受输入地震动卓越周期和场地基本周期的影响。 β 谱有两个卓越反应峰值, 其第二峰值接近于场地基本周期。因此, 可以认为, β 谱第一峰值主要受输入地震动特性控制, 而其第二峰值主要受场地基本周期控制。

同单向地震作用相比, 双向地震作用时海床地表的 β 谱第一峰值增大、第二峰值减小。从图 2 可知, 海床场地基本周期的变化在海峡东侧相当地平缓、而在西侧的变化幅度较大, 总体上, 东侧的海床地表 β 谱的谱值比西侧的更大。

4.4 地震动累积绝对速度

CAV 定义为加速度的绝对值对时间的积分:

$$\text{CAV} = \int_0^{t_{\max}} |a(t)| dt , \quad (3)$$

式中, $|a(t)|$ 为 t 时刻的加速度绝对值, t_{\max} 为加速度时程的持时。

CAV 是衡量地震动对结构损伤能力大小的一个重要指标^[16], 与场地地震灾害密切相关^[17-18]。图 9 显示了海床地表 CAV 分布。在水平向 PBA 为 0.03g, 0.075g, 0.15g 的工况下, MYGH03 记录激励时海床地表 CAV 值介于 2.5~5, 5~9, 9~13 m/s; MYGH04 记录激励时海床地表 CAV 值介于 4~7, 8~12, 13~19 m/s; MYGH04 记录双向激励时海床表面 CAV 值介于 4.5~8.5, 10~15.5, 14~23 m/s。这一结果表明: 随着 PBA 的增大, 海床地表地震动对结构的损伤能力随之增大, 但由于海床土的动力非线性特征, 海床地

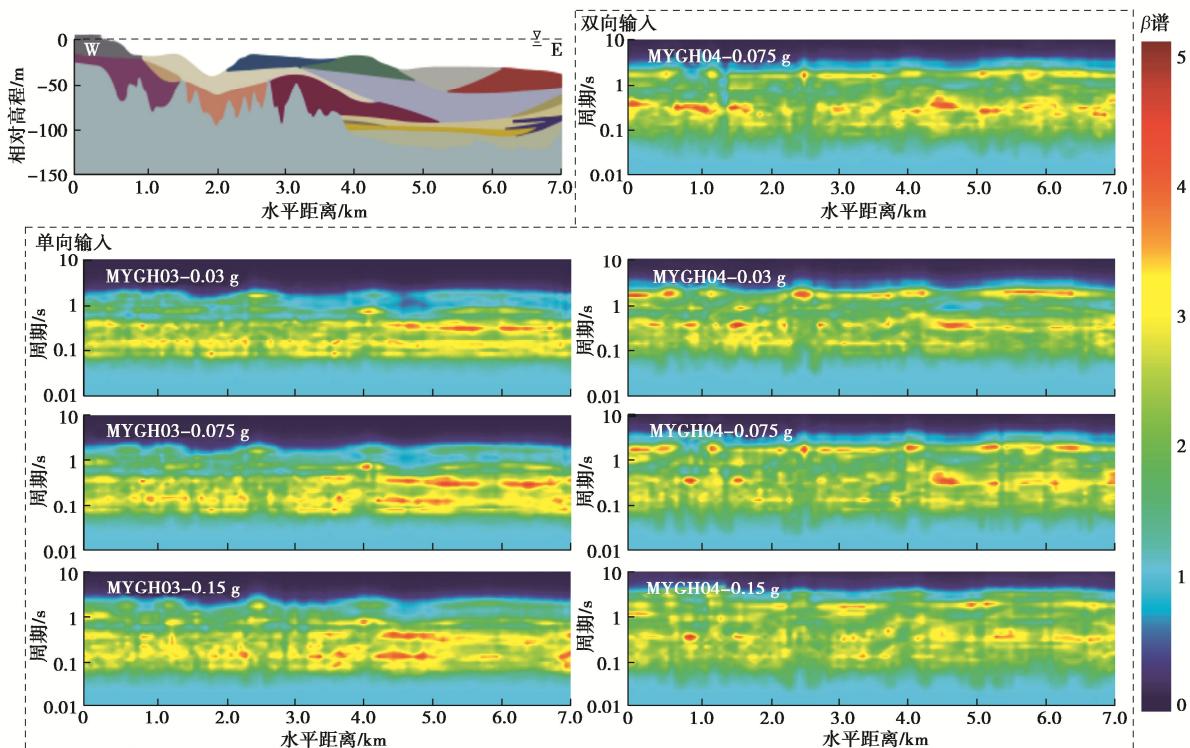


图 8 单向(水平向)和双向(水平向+竖向)基岩地震动激励时海床地表的水平向谱加速度 β 谱(阻尼比 5%)的空间分布

Fig. 8 Spatial variation of 5% damping horizontal spectral acceleration β spectra of seabed cross-section site subjected to unidirectional (horizontal) and bidirectional (horizontal and vertical) bedrock motions

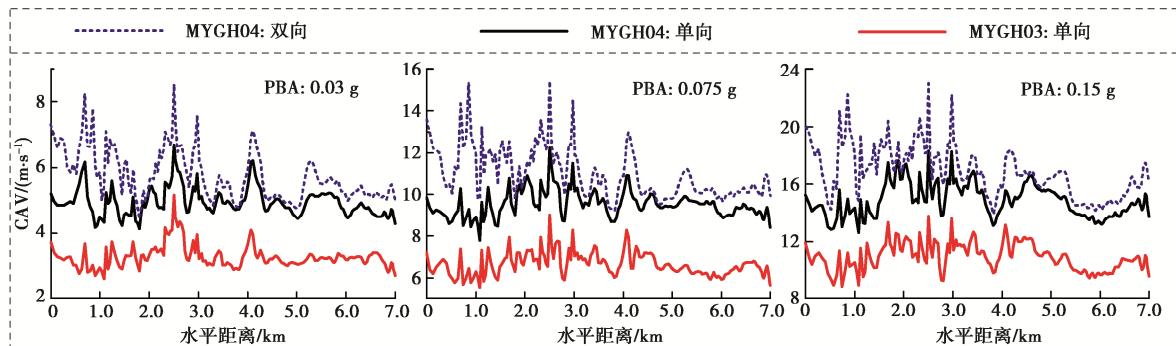


图 9 单向(水平向)和双向(水平向+竖向)基岩地震动激励时海床剖面地表的水平向累积绝对速度(CAV)的比较

Fig. 9 Comparison of cumulative absolute velocities (CAVs) of seabed cross-section site surface subjected to unidirectional (horizontal) and bidirectional (horizontal and vertical) bedrock motions

表 CAV 并非等比例增大。此外, 海床的基岩面起伏对海床表面 CAV 的影响显著, 基岩面起伏明显的海峡西侧海床表面 CAV 的变化幅度显著高于基岩面起伏平缓的海峡东侧表面 CAV 的变化幅度。MYGH04 记录双向激励的海床地表 CAV 约为单向激励时对应 CAV 的 1.1 倍~1.5 倍; 与中远场、中强震的 MYGH03 记录激励的海床地震反应相比, 远场强震 MYGH04 记录激励时海床地表的 CAV 值要大得多。

4.5 代表性钻孔剖面的地表谱加速度 β 谱

图 2 所示的代表性钻孔 ZK-01、ZK-02、ZK-03、ZK-04、ZK-05、ZK-06、ZK-07 和 ZK-08, 其剪切波速沿深度的变化如图 10 所示, 各钻孔剖面地表以下 30 m 深度内的走时平均剪切波速 V_{S30} 分别为 276, 500, 213, 296, 262, 258, 252, 238 m/s, 各钻孔剖面的基本频率 f_s 依次为 0.75, 1.0, 0.95, 0.75, 0.8, 0.8, 0.8, 0.9 Hz, 相应的基本周期 T_s 依次为 1.33, 1.0, 1.05, 1.33, 1.25, 1.25, 1.25, 1.11 s; 各钻孔剖面地表至 $V_s = 500$ m/s 的地震基岩面覆盖层深度 H 分别为 62, 27, 55, 39, 93, 94, 94, 45 m。鉴于目前对海域土的场地分类尚无规范可依, 据此, 采用文献 [19]建议的 V_{S30} , H 和 T_s 三指标场地分类法, 钻孔 ZK-01、ZK-02、ZK-03、ZK-04、ZK-05、ZK-06、ZK-07、ZK-08 剖面均为 IV 类场地。

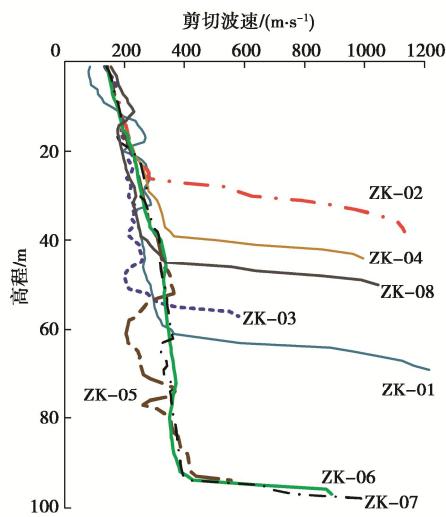


图 10 海床场地各钻孔剪切波速沿深度的变化

Fig. 10 Profiles of shear wave velocity of seabed site

图 11 给出了 MYGH04 记录双向激励时 (水平向 0.075g) 海床地表的谱加速度 β 谱及其均值谱、上包络线。作为对比, 将 GB18306—2015《中国地震动参数区划图》中 IV 类场地设计地震反应谱 β 谱绘制于图 11。可以发现: 在周期 $T > 0.15$ s 时, 海床场地相关反应谱 β 谱的均值曲线大于 GB18306—2015 规范 β 谱的取值。这意味着在 $T > 0.15$ 时, 如直接采用 GB18306

—2015 规范的 β 谱用于该海峡海床上工程结构的抗震设计将偏于不安全。

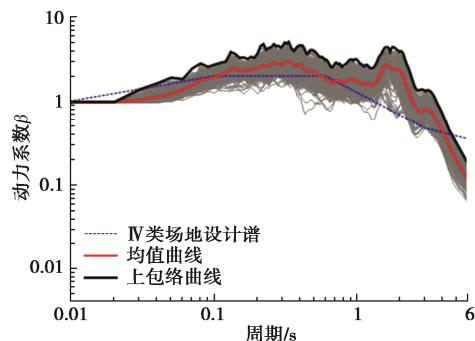


图 11 海床地表谱加速度 β 谱(5%阻尼比)

Fig. 11 Normalized ground motion acceleration response spectra β (5% damping) at seabed surface

5 结 论

本文数值模拟了金塘海峡海床场地的二维非线性地震反应特征, 得到 5 点结论。

(1) 金塘海峡海床场地对地震动 1 Hz 以内的低频分量有显著的放大作用, 对 10 Hz 以上的高频分量有显著的滤波作用。同时, 随着基岩地震动水平的增大, 海床场地的加速度传递函数的放大倍数逐渐减小, 且其卓越频带有向低频移动的趋势。

(2) 对于基岩地震动水平 0.03g, 0.075g, 0.15g 的工况, 海床地表峰值加速度放大系数分别为 0.8~1.7, 0.6~1.3, 0.4~0.9, 显著低于陆域一般场地的地表峰值加速度放大系数。

(3) 海床表面的地震动谱加速度 β 谱和 CAV 的大小受输入地震动特性和海床局部场地条件的影响。随着基岩地震动水平的增大, 海床表面的 β 谱谱值总体上呈现减小的趋势、CAV 呈现增大的趋势。基岩面起伏对海床表面的 β 谱谱值和 CAV 也存在一定的影响。

(4) 与双向地震动激励的计算结果相比, 仅考虑单向地震动激励将低估该海床场地的地震反应水平, 双向地震动激励的海床表面的地震动峰值加速度和 CAV 约为单向地震动激励的 1.1 倍~1.5 倍。

(5) 依据现行《中国地震动参数区划图》对该海床场地工程结构进行抗震设计会偏于不安全。

参 考 文 献:

- [1] DHAKAL Y P, AOI S, KUNUGI T, et al. Assessment of nonlinear site response at ocean bottom seismograph sites based on S-wave horizontal-to-vertical spectral ratios: a study at the Sagami Bay area K-NET sites in Japan[J]. Earth,

- [1] Planets and Space, 2017, **69**(1): 29.
- [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 amplifications at the seafloor and land seismic stations of K-NET[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2020, **110**(5): 2577 – 2597.
- [3] TAN J Y, HU J J. A prediction model for vertical-to-horizontal spectral ratios of ground motions on the seafloor for moderate magnitude events for the Sagami Bay region in Japan[J]. Journal of Seismology, 2021, **25**(1): 181 – 199.
- [4] ZHANG Q, ZHENG X Y. Offshore earthquake ground motions: Distinct features and influence on the seismic design of marine structures[J]. Marine Structures, 2019, **65**: 291 – 307.
- [5] 陈国兴, 陈 磊, 景立平, 等. 地铁地下结构抗震分析并行计算显式与隐式算法比较[J]. 铁道学报, 2011, **33**(11): 111 – 118. (CHEN Guo-xing, CHEN Lei, JING Li-ping, et al. Comparison of implicit and explicit finite element methods with parallel computing for seismic response analysis of metro underground structures[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, **33**(11): 111 – 118. (in Chinese))
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] TRIFUNAC M D. Nonlinear soil response as a natural passive isolation mechanism. Paper II. The 1933, Long Beach, California earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, **23**(7): 549 – 562.
- [9] 陈国兴, 李 磊, 丁杰发, 等. 巨厚沉积土夹火山岩场地非线性地震反应特性[J]. 岩土力学, 2020, **41**(9): 3056 – 3065, 3076. (CHEN Guo-xing, LI Lei, DING Jie-fa, et al. Nonlinear seismic response characteristics of extremely deep deposit site with volcanic hard rock interlayers[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(9): 3056 – 3065, 3076. (in Chinese))
- [10] CHEN G X, 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.
- [11] NAKAMURA. What is the Nakamura method?[J]. Seismological Research Letters, 2019, **90**(4): 1437 – 1443. DOI:10.1785/0220180376.
- [12] 刘晶波, 谷 音, 杜义欣. 一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(9): 1070 – 1075. (LIU Jing-bo, GU Yin, DU Yi-xin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(9): 1070 – 1075. (in Chinese))
- [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 Xiao-long, LI Xiao-jun, CHEN Guo-xing, 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))
- [14] 陈国兴, 杨文保, 岳文泽, 等. 金塘海峡海洋土动剪切模量与阻尼比特性研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, **40**(1): 1 – 8. (CHEN Guo-xing, YANG Wen-bao, YUE Wen-ze, et al. Experimental studies on the dynamic shear modulus and damping ratio characteristics of marine soils in the Jintang strait[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, **40**(1): 1 – 8. (in Chinese))
- [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] WANG J P, YUN X, KUO-CHEN H, et al. CAV site-effect assessment: a case study of Taipei Basin[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, **108**: 142 – 149.
- [17] BRAY J D, MACEDO J. 6th Ishihara lecture: Simplified procedure for estimating liquefaction-induced building settlement[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, **102**: 215 – 231.
- [18] MONTGOMERY J, BOULANGER R W. Effects of spatial variability on liquefaction-induced settlement and lateral spreading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, **143**(1): 4016086.
- [19] 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, 3582. (CHEN Guo-xing, DING Jie-fa, FANG Yi, et al. Investigation of seismic site classification scheme[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(11): 3509 – 3522, 3582. (in Chinese))