

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230809001

竖向和水平向地震动耦合作用下 海底沉管隧道失稳机理*

王秋哲^{1,2}, 荀 郑², 白笑笑², 赵 凯², 陈国兴²

(1. 江苏商贸职业学院建筑工程与管理学院, 江苏 南通 226000;

2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210000)

摘要: 在深厚软弱海床中修建跨海隧道并确保其地震安全是一项重大的工程挑战。竖向(P波)和水平向(SV波)地震动耦合作用导致海床土体产生复杂的流固耦合效应,即土体受到正应力差和剪应力的三维耦合剪切作用,瞬态超孔隙水压力呈振荡与累积两种增长模式且引起土体循环软化。基于扩展Masing法则构造了粘弹塑性应力应变滞回曲线,基于Biot动力固结方程以及对剪应力和正应力差耦合剪切引起的不可逆性体应变的数学描述,建立了饱和砂土有效应力本构模型;基于FLAC3D平台对该本构模型进行了二次开发,对室内单元试验数值模拟结果表明,建立的有效应力本构模型能够反映饱和砂土的孔压增长规律和液化过程。以渤海实际钻孔为场地条件,建立了沉管隧道-砂质海床相互作用模型,对竖向-水平向地震动耦合作用下沉管隧道的动力稳定性进行了数值模拟,揭示了双向地震动作用下沉管隧道-海床体系的动力相互作用机理及海床的渐进液化规律,明确了沉管隧道失稳的控制性因素为抗浮力的减小和上浮力的增大。上述研究成果可为海底沉管隧道的抗震设计提供参考依据。

关键词: 砂质海床; 沉管隧道; 有效应力方法; 地震反应; 土-结构相互作用

中图分类号: TU93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0584-09

Instability Mechanism of Immersed Tunnel under Coupled Vertical-horizontal Ground Motions

WANG Qiuzhe^{1,2}, XUN Zheng², BAI Xiaoxiao², ZHAO Kai^{2*}, CHEN Guoxing²

(1. School of Architectural Engineering and Management, Jiangsu Vocational College of Business, Nantong 226000, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210000, China)

Abstract: The construction of immersed tunnels across deep, soft seabeds and ensuring their seismic safety represents a major engineering challenge. The coupled action of vertical (P-wave) and horizontal (SV-wave) ground motions induces complex fluid-solid interaction in the seabed soil, where the soil is subjected to three-dimensional coupled shear effects of deviatoric stress and shear stress. This leads to transient excess pore water pressure exhibiting two growth patterns—oscillation and accumulation—which trigger cyclic softening of the soil. The viscoelastic-plastic stress-strain hysteresis curve was constructed based on the extended Masing rule. Based on the Biot dynamic consolidation equation and mathematical description of irreversible volumetric strain induced by the coupling of shear stress and

* 收稿日期:2023-08-09;修回日期:2023-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52378347, 52408540)、南通市自然科学基金项目(JC2023026)资助

作者简介:王秋哲(1994—),男,讲师,博士。主要从事海洋岩土工程防灾减灾工作。E-mail:wangqiuzhe@jsbc.edu.cn

通信作者:赵凯(1982—),男,教授,博士。主要从事岩土地震工程工作。E-mail:zhaokai@njtech.edu.cn

deviatoric stress, an effective stress constitutive model for saturated sand was established. A secondary development of this constitutive model was then implemented on the FLAC3D platform. Numerical simulation results of laboratory element tests demonstrated that the proposed effective stress constitutive model could reflect the pore pressure growth and liquefaction process of saturated sand. Using actual borehole data from the Bohai Sea as site conditions, an immersed tunnel-sandy seabed interaction model was established. Numerical simulations were conducted to investigate the dynamic stability of the immersed tunnel under coupled vertical-horizontal ground motions. The simulations revealed the dynamic interaction mechanisms of the tunnel-seabed system and the progressive liquefaction patterns of the seabed under bi-directional ground motions. It was determined that controlling factors for immersed tunnel instability were the reduction of anti-buoyancy and the increase in uplift force. The findings provide references for the seismic design of submarine immersed tunnels.

Keywords: sandy seabed; immersed tunnel; effective stress method; seismic response; soil-structure interaction

0 引言

我国是海洋大国,海洋是经济社会发展的重要依托和载体,隧道是跨越海洋的重要工程结构,具有重大的经济效益和社会价值。随着我国东部沿海重大发展战略的需要,海底隧道的防震减灾问题已成为地震工程领域的研究热点。我国海域地震活动频繁,海底隧道所处海域工程场地条件复杂,面临巨大的地震安全挑战。处于浅表层海床的沉管隧道与陆域隧道的围岩条件存在较大差异。目前海底沉管隧道的地震失效机理尚不明确,开展海底沉管隧道的地震稳定性研究具有重要的科学意义和工程应用价值。

以往震害调查表明,土-结构相互作用是影响地下结构地震响应控制性因素,受周围土层约束,周边场地对大断面海底沉管隧道的震害分布和破坏程度影响显著,在海底隧道抗震设计中起着至关重要的作用。受限于原型监测的困难,模型试验和数值模拟是海底隧道地震稳定性研究的主要方法。禹海涛和袁勇等^[1-4]基于多点振动台,对非一致地震激励下超长沉管隧道的响应规律进行了深入的研究。陆耀波等^[5]对非均匀场地中的沉管隧道进行了振动台试验,发现沉管隧道的地震响应受土体的动力特性的影响。K. Kyungtae等^[6]通过一系列的振动台试验,研究了回填材料性质和覆土厚度对浅埋隧道地震反应的影响。李文广^[7]对可液化地基中隧道开展了模型试验研究,对过河隧道工程在地震液化时的上浮变形机理开展了研究。由于海底沉管

隧道地震反应涉及多效应耦合作用问题,精细化数值模拟是基本研究手段,也是研究围岩-隧道动力相互作用与海底沉管隧道地震反应特征相关性的基本途径。目前主要的数值分析方法有梁-弹簧模型、质点弹簧模型等基于位移的简化方法以及整体动力时程法。整体动力时程法可以同时模拟隧道的横向与纵向地震反应,考虑复杂的土层分布和几何构型,可以采用适宜的本构模型描述土体和结构的非线性性能,并反映土-结构之间的动力相互作用。X. S. Cheng等^[8-9]将应力场和渗流场耦合,研究了海浪和地震共同作用下沉管隧道的动力响应。K. Zhao^[10-11]在Biot动力固结方程中引入体积应变增量模型,描述残余孔隙水压力的增长,揭示了沉管隧道-海床动力相互作用机理。赵凯等^[12]对苏埃海底隧道-竖井连接区段进行了精细化三维建模,对海底盾构隧道的端部效应进行了非线性分析,并提出了相应的抗震减震措施。徐笑然等^[13]考虑场地初始地应力水平和上覆水压力作用的影响,研究了水平及竖向地震动作用下沉管隧道的三维动力反应。于伦超等^[14]基于有限差分软件FLAC3D数值模拟软件和振动台试验,对处于不同液化土层分布范围和不同埋深的隧道地震上浮情况进行了研究。上述研究均围绕沉管隧道的地震响应展开,并未对沉管隧道周围海床液化导致的失稳破坏进行深入分析。

楼梦麟等^[15]指出海底沉管隧道建模过程中需重点关注:①模型范围大小的问题;②上覆海水动水作用的模拟;③时域分析中阻尼矩阵的合理建模及其影响;④地震输入方式的选择与影响等。考虑

土骨架与孔隙水相互作用的饱和两相介质动力有效应力方法及模拟复杂应力路径下海床土动力特性的本构模型是适宜于研究双向地震动耦合作用下海底沉管隧道地震稳定性机理的方法。本文以渤海海域某典型钻孔作为场地条件,考虑海床液化大变形引起的几何非线性建立了沉管隧道-可液化海床体系相互作用模型,揭示了竖向-水平向地震动耦合作用对海床渐进液化过程以及沉管隧道失稳上浮的影响机理,明确了沉管隧道失稳的控制因素。

1 砂质海床有效应力分析方法

1.1 控制方程及本构模型

饱和砂土有效应力方法建立在 $u-p$ 格式的 Biot 动力固结方程框架下^[16],其控制方程为:

$$G\nabla^2 u_i + \left(\frac{G}{1-2\nu}\right)\epsilon_{jj,j} = p_{,i} + p\ddot{u}_i \quad (1)$$

$$\frac{k}{\gamma_w}\nabla^2 p - \dot{p}n_s/K_f = \dot{\epsilon}_{jj} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{jj} = \dot{\epsilon}_{jj}^e + \dot{\epsilon}_{jj}^p \quad (3)$$

式中, G 为动剪切模量; ∇ 为拉普拉斯算子; u 为土单元位移矢量; ν 为泊松比; ϵ 为土单元应变张量; p 为超孔压; n_s 为孔隙率; k 为渗透系数; γ_w 为孔隙流体重度; K_f 为流体压缩系数; 上标“ \cdot ”为对时间求导。

采用等效循环应力比 ESR 归准化后的塑性体应变增长方程^[17-18]作为 Biot 动力固结方程中超孔隙水压力增长的源项:

$$\dot{\epsilon}_{jj}^p/\lambda = k_1 \exp(-k_2 \epsilon_{jj}^p/\lambda) \quad (4)$$

$$\lambda = ESR - ESR_1 \quad (5)$$

式中, k_1 、 k_2 为与土性相关的拟合参数; ESR_1 为体积门槛循环应力比。

采用按扩展 Masing 法则修正的 Davidenkov 骨架曲线描述海床土体的弹性非线性应力-应变关系,并采用 Mohr-Coulomb 屈服准则对骨架曲线进行修

正,描述土体的塑性大变形^[19-20],剪切模量衰减采用残余孔压比进行修正^[21],土骨架的循环应力-应变关系如图 1 所示。

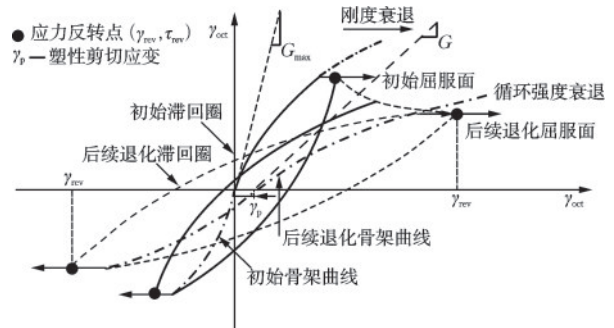


图 1 土骨架循环应力-应变曲线示意

Fig.1 Schematic diagram of cyclic stress-strain curves of soil skeleton

1.2 方法建立和验证

在 FLAC3D 计算平台中,采用 C++ 编程并编译为动态链接库文件,在动力计算过程中进行调用,实现了有效应力方法的二次开发。计算过程中,子程序根据主程序传入的应变增量 $d\epsilon_{ij}$ 、应变张量 ϵ_{ij} 和应力张量 σ_{ij} 计算体应变增量、孔隙水压力和应力增量并返回主程序。为防止数值计算失稳,设置了平均有效应力最小阈值 P_1 ,即土体液化后仍具有一定的残余剪切强度。

对应变加载南京细砂不排水循环三轴试验结果进行数值模拟,验证建立的有效应力方法的准确性。试样相对密度 $D_r=45\%$,饱和重度 $\gamma=19.2 \text{ kN/m}^3$,初始有效围压 $\sigma'_v=100 \text{ kPa}$,加载幅值 $\epsilon_a=0.15\%$,单元测试模型计算参数见表 1。计算得到和试验实测的超孔隙水压力时程和偏应力时程如图 2 所示,本文建立的方法较为准确地预测了饱和砂土超孔隙水压力的增长和偏应力的衰减,与试验得到的结果吻合度较高,试验过程中(如制样、饱和、加载过程等)的存在的不确定性造成了数值计算与试验结果之间的一定偏差^[22-23]。

表 1 单元测试模型计算参数

Table 1 Calculation parameters of soil element

初始剪切模量 G_{max}/MPa	泊松比 μ	A	B	γ_0	k_1	k_2	ESR_1	黏聚力 c	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	抗拉强度 T_{en}
50	0.3	1.02	0.35	4×10^{-4}	0.76	0.58	0.02	0	30	0

注: A 、 B 和 γ_0 为骨架曲线参数

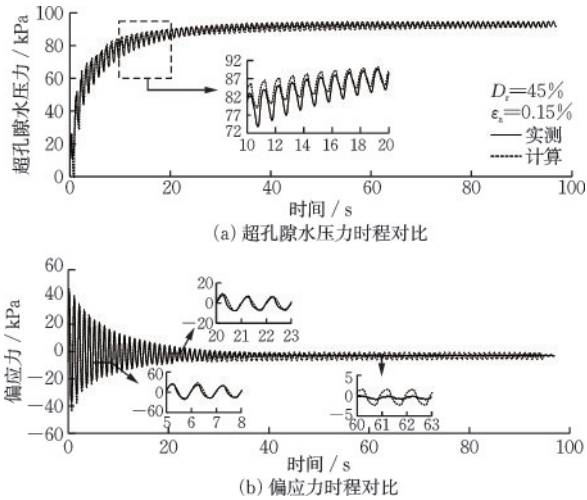


图2 应变加载循环三轴超孔压和偏应力预测值与实测值的对比

Fig.2 Comparison between predicted and measured values of excess pore pressure and deviatoric stress in strain-controlled cyclic triaxial tests

2 计算模型建立

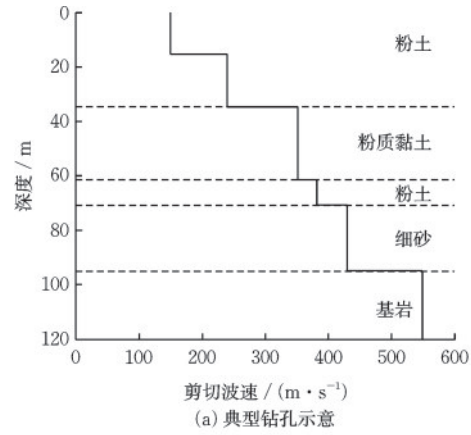
以渤海海域某实际钻孔为场地条件^[24-25], 钻孔波速分布及相对应模量阻尼如图3所示。建立沉管隧道横断面二维计算模型如图4所示, 模型宽度为400 m, 高度为100 m, 当模型宽度大于10倍的结构宽度时, 可忽略边界效应的影响。隧道为宽20 m的三跨结构。两个边跨宽为8 m, 中间跨宽为4 m, 隧道高度为8 m, 顶板、底板、立柱和侧墙厚度均为1 m, 隧道埋深为1 m。模型中海水的深度为10 m, 通过在海床表面施加等效静水压力来模拟海水的作用。

采用四节点等应变有效差分单元和均匀网格布局, 模型网格尺寸选取为地震波传播截止频率所对应最短波长的1/8~1/10^[26]。沉管隧道的计算参数见表2, 海床土体的计算参数见表3, 海床土体计算参数由已有试验结果外推得到, 并在计算过程中随深度进行修正。沉管隧道与海床土体之间的相互作用采用零厚度接触面单元模拟, 当接触面剪应力超过摩擦阻力时, 即发生相对滑动^[27]:

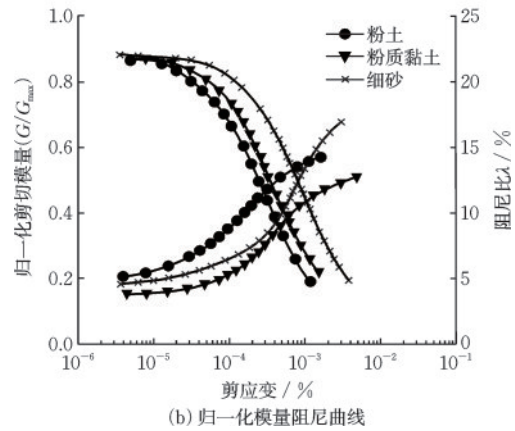
$$|\tau| \geq \sigma_n' \mu \quad (6)$$

式中, σ_n' 为接触面有效法向应力; μ 为沉管隧道与周围海床之间的摩擦系数, 文中取值为0.7。

动力计算过程中, 计算模型两侧采用黏性人工



(a) 典型钻孔示意



(b) 归一化模量阻尼曲线

图3 渤海典型钻孔示意及相对应归一化模量阻尼曲线

Fig.3 Schematic diagram of typical borehole in Bohai Sea and corresponding normalized modulus and damping curves

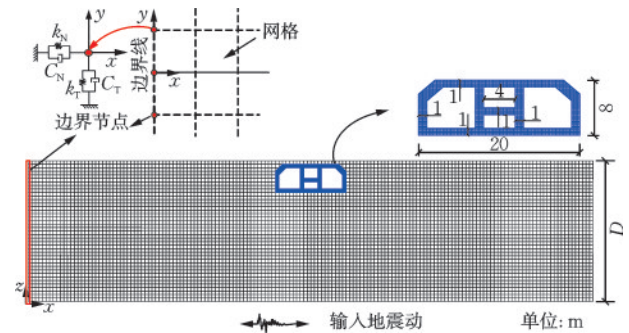


图4 模型网格示意

Fig.4 Schematic diagram of model mesh

表2 沉管隧道计算参数

Table 2 Calculation parameters of immersed tunnel

弹性模量 $E/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	泊松比 μ	密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	埋深 $h/$ m
3.5×10^7	0.18	2 500	1

边界, 模型顶部设置为自由排水边界, 模型临界阻尼比取为5%。模型采用 Lysmer 和 Kuhlemeyer^[28]

表3 海床计算参数

Table 3 Calculation parameters of seabed soil

土类	剪切模量 $G/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	泊松比 μ	Davidenkov 参数			孔压参数			Mohr-Coulomb 模型参数		
			A	B	$\gamma_0 \times 10^{-4}$	k_1	k_2	ESR_1	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度
粉土	7×10^4	0.3	1.03	0.5	1.8	0.43	0.93	0.02	0	30	0
粉质黏土	3×10^4	0.25	0.96	0.47	7.3	—	—	—	10	25	0
细砂	8×10^4	0.2	1.02	0.48	17.9	0.19	2.1	0.02	0	35	0

在1969年提出的黏性边界是基于在模型边界的法向和切向上使用的独立阻尼器,该方法的有效性已经在有限元和有限差分模型中得到了验证。沿法向和切向独立作用的阻尼器提供的法向和切向的黏性力可以按照下式进行计算:

$$\sigma_n = 2(\rho C_p)v_n \quad (7)$$

$$\sigma_s = 2(\rho C_s)v_s \quad (8)$$

式中, σ_n 和 σ_s 为边界上施加的法向与切向力; ρ 为介质密度; C_p 和 C_s 为介质中压缩波及剪切波传播的速度; v_n 和 v_s 为输入的法向与切向速度时程, 压缩波及剪切波的传播速度可以由下式进行计算:

$$C_p = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \quad (9)$$

$$C_s = \sqrt{G/\rho} \quad (10)$$

计算选取 Darfield 波作为基岩输入地震动, 并将原始记录中水平向峰值加速度调幅为 $0.2g$, 竖向地震动加速度进行等比例调幅, 调幅后的加速度时程如图 5 所示, 加速度由模型底部输入。

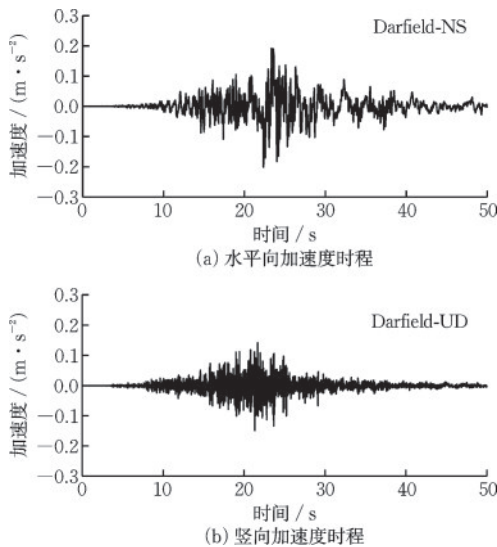


图5 输入地震动加速度时程

Fig.5 Input ground motion acceleration time history

3 结果分析

3.1 海床液化及变形特性

地震动的持续作用引起海床土体中平均有效应力的衰减和超孔隙水压力的累积, 并最终导致海床土体的液化, 沉管隧道侧墙处海床土单元和相对应深度远场海床土单元的超孔隙水压力时程如图 6 所示。竖向-水平向地震动的耦合作用加快了超孔隙水压力的累积, 同时引起超孔隙水压力在增长过程中的震荡。在竖向-水平向地震动的耦合作用下, 监测点 P2 土单元的超孔隙水压力在地震动作用下 17 s 达到最大值, 在仅有水平向地震动的作用下超孔隙水压力在 20 s 达到最大值。

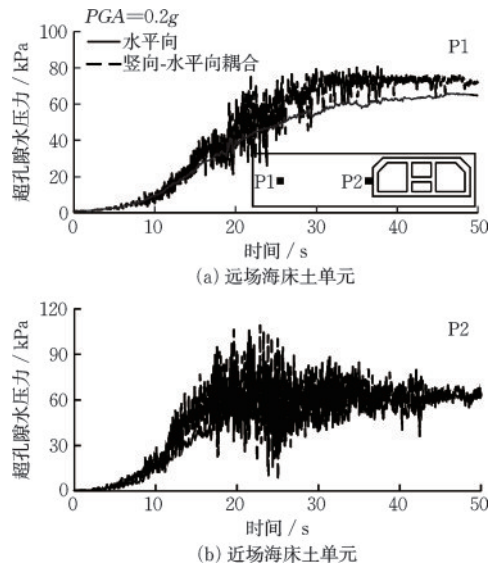


图6 不同位置海床土体超孔压时程

Fig.6 Time history of excess pore pressure in seabed soil at different locations

沉管隧道周围海床的最终超孔压比分布如图 7 所示。结合图 6 可知, 竖向-水平向地震动的耦合作用加快了海床的渐进液化速度并且加大了海床液化范围。

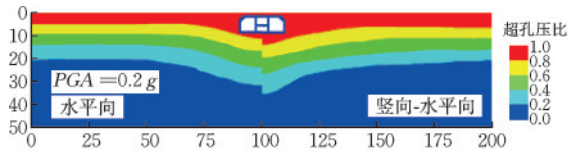


图7 砂质海床最终液化范围
Fig.7 Final liquefaction zone of sandy seabed

地震动的持续作用以及超孔隙水压力的上升引起的海床土体的强度衰退共同导致海床土体的大变形。沉管隧道结构侧墙处土单元P2的剪应力-剪应变滞回曲线如图8所示,竖向-水平向地震动的耦合作用加大了海床土体的剪应变水平,海床土体P2的最大剪应变水平达到1.6%,为仅有水平向地震动作用时的1.6倍。

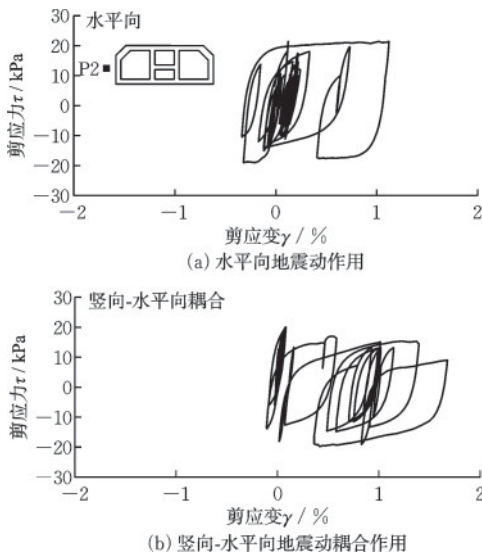


图8 沉管隧道侧墙海床应力-应变滞回曲线
Fig.8 Stress-strain hysteresis curves of seabed on side wall of immersed tunnel

沉管隧道周围海床表面的残余竖向位移分布如图9所示,以沉管隧道中轴线为中线,假定海床表面竖向位移以向上为正、向下为负。由图可知,地震动作用下沉管顶部土体产生向上的位移,沉管两侧土体产生不均匀沉降。竖向-水平向地震动的耦合作用加大了沉管隧道周围海床的残余位移,在仅有水平向地震动的作用下沉管隧道两侧海床的最大残余沉降为0.28 m,在竖向-水平向地震动的耦合作用下最大残余沉降达到0.42 m,为仅有水平向地震动作用下的1.5倍。竖向-水平向地震动作用下沉管隧道顶部海床产生了3.2 m的竖向残余位移,为仅有水平向地震动作用下的1.6倍。

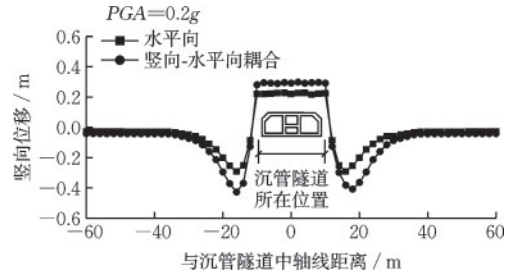


图9 沉管隧道周围海床表层土体竖向残余位移
Fig.9 Vertical residual displacement of surface seabed soil around immersed tunnel

3.2 沉管隧道-砂质海床相互作用

砂质海床沉管隧道所受的竖向力可分为上浮力和抗浮力两部分,抗浮力主要包括沉管自重、上覆土压力和沉管侧墙所受摩擦阻力,上浮力主要为静孔隙水压力和超静孔隙水压力。

沉管隧道侧墙受到的摩擦阻力作为沉管隧道抗浮力的重要组成,对维持沉管隧道的稳定起到重要作用。某一时刻沉管隧道侧墙受到的摩擦阻力可由下式计算:

$$R_{sf} = \mu \sum_i \sigma_{ix} A_i \cos \theta_i \quad (11)$$

式中, σ_{ix} 为沉管隧道侧墙单元所受到可液化海床土体的法向有效应力; A_i 为沉管隧道侧墙单元外表面面积; θ_i 为沉管隧道侧墙外表面与水平向外方向的夹角; μ 为摩擦因数。

沉管隧道侧墙不同位置处的摩擦阻力时程如图10所示,沉管隧道的侧摩阻力在地震动的作用下

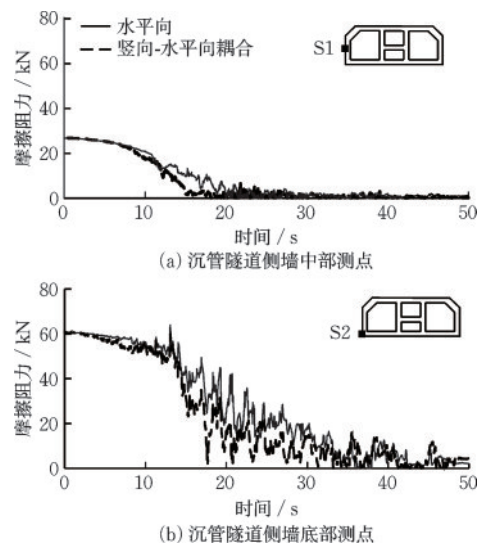


图10 沉管隧道侧墙摩擦阻力时程
Fig.10 Time history of friction resistance on side wall of immersed tunnel

逐渐衰减至0,侧摩擦阻力的衰减与超孔隙水压力的累积基本同步,竖向-水平向地震动的耦合作用加快了侧摩擦阻力衰减的速度。在竖向-水平向地震动的作用下沉管隧道结构侧墙中部测点S1和侧墙底部测点S2所受摩擦阻力分别在地震动作用17 s和30 s后衰减至0,比仅有水平向地震动作用分别快3 s和8 s。

地震动作用引起沉管隧道底部海床超孔隙水压力的上升导致沉管隧道所受浮力的增大,某一时刻沉管隧道底部受到的浮力可由下式计算:

$$F_d = \sum_i \rho_i A_i \cos \theta_i \quad (12)$$

式中, ρ_i 为与沉管隧道底板相接触的土单元的超孔隙水压力; A_i 为沉管隧道底板单元外表面面积; θ_i 为沉管隧道底板外表面与竖直向下方向的夹角。

沉管隧道底部所受的浮力时程如图11所示,沉管隧道底板所受的初始浮力为4 000 kN,竖向-水平向地震动的耦合作用加快了沉管隧道所受浮力的增长。沉管隧道底板处海床完全液化之后,浮力不再增长。

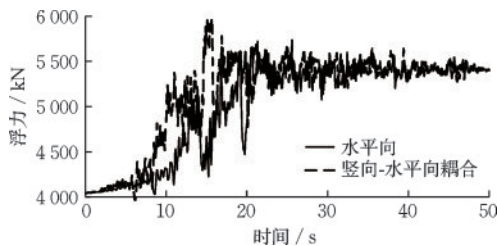


图11 沉管隧道底部浮力时程

Fig.11 Time history of buoyancy at the bottom of immersed tunnel

3.3 沉管隧道失稳上浮

地震动作用下沉管隧道上浮时程如图12所示,竖向-水平向地震动的耦合作用加快了沉管隧道的上浮速度,增加了最终残余上浮量。竖向-水平向地震动耦合作用下,沉管隧道的上浮发生在17 s,较仅

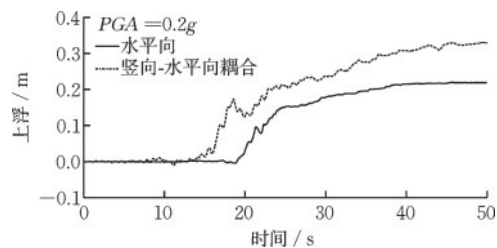


图12 沉管隧道上浮时程曲线

Fig.12 Time-history curves of immersed tunnel uplift

有水平向地震动作用快2.8 s。在仅有水平向地震动作用下沉管隧道的最终上浮量为0.2 m,双向地震动耦合作用下沉管隧道的最终上浮量达到0.32 m,为仅有水平向地震动作用时的1.6倍

结合图6、图7、图10和图11可知,地震动作用引起的超孔隙水压力上升和砂质海床的液化导致了沉管隧道受到的侧摩擦阻力的降低甚至完全丧失,并同时增大了沉管隧道底部受到的上浮力,沉管隧道的失稳破坏发生在其受到的抗浮力小于其受到的上浮力时。

4 结 论

基于“扩展 Masing”法则构造了土体粘弹塑性应力-应变滞回曲线,考虑了沉管隧道-可液化海床之间复杂的相互作用,对竖向-水平向地震动耦合作用下沉管隧道-砂质海床之间的动力相互作用进行了完全耦合的有效应力分析,研究了竖向-水平向地震动耦合作用对沉管隧道-海床体系动力相互作用的影响机理,分析了竖向地震动对沉管隧道失稳破坏的影响,主要结论如下:

(1) 对循环三轴试验的数值模拟结果表明,本研究采用的有效应力方法能够描述循环荷载作用下饱和砂土超孔隙水压力的发展规律和液化过程。

(2) 竖向-水平向的耦合作用加快了砂质海床中超孔隙水压力的累积速度,加大了沉管隧道周围海床的液化区域,并增大了沉管隧道周围海床的周围土体的变形。

(3) 砂质海床中超孔隙水压力的累积导致沉管隧道受到抗浮力的减小和上浮力的增大,最终引起沉管隧道的失稳上浮,竖向-水平向地震动的耦合作用加快了沉管隧道上浮的速度并加大了沉管隧道的最终残余浮量。

参考文献:

- [1] 袁勇,禹海涛,燕晓,等.超长沉管隧道多点振动台试验模拟与分析[J].中国公路学报,2016,29(12):157-165.
Yuan Y, Yu H T, Yan X, et al. Multi-point shaking table test simulation and analysis of a super-long immersed tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(12): 157-165. (in Chinese)
- [2] 禹海涛,袁勇,顾玉亮,等.非一致激励下长距离输水

- 隧道地震响应分析[J]. 水利学报, 2013, 44(6): 718-725.
- Yu H T, Yuan Y, Gu Y L, et al. Effect of non-uniform excitation on seismic response of long-distance water-conveyance tunnel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(6): 718-725. (in Chinese)
- [3] Yuan Y, Yu H T, Li C, et al. Multi-point shaking table test for long tunnels subjected to non-uniform seismic loadings-Part I: Theory and validation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 108(5): 177-186.
- [4] Yu H T, Yuan Y, Xu G P, et al. Multi-point shaking table test for long tunnels subjected to non-uniform seismic loadings-part II: Application to the HZM immersed tunnel[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2018, 108(5): 187-195.
- [5] 陆耀波, 崔杰, 欧阳志勇, 等. 沉管隧道穿越纵向非均匀场地振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(2): 123-132.
- Lu Y B, Cui J, Ouyang Z Y, et al. Study of shaking table model test of immersed tunnel through horizontal non-uniform site[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(2): 123-132. (in Chinese)
- [6] Kyungtae K, Hesham M N E, Ahmed E A. Large-scale shake table testing of shallow tunnel-ground system [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 166(3): 1-19.
- [7] 李文广. 可液化地基中隧道上浮的模型试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(2): 488-494.
- LI W G. Model experimental study of tunnel uplift in liquefiable foundations [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(2): 488-494. (in Chinese)
- [8] Cheng X S, Xu W W, Yue C Q, et al. Seismic response of fluid-structure interaction of undersea tunnel during bidirectional earthquake [J]. Ocean Engineering, 2014, 75(1): 64-70.
- [9] Cheng X S, Li G L, Chen J, et al. Seismic response of a submarine tunnel under the action of a sea wave [J]. Marine Structures, 2018, 60(7): 122-135.
- [10] Zhao K, Zhu S D, Bai X X, et al. Seismic response of immersed tunnel in liquefiable seabed considering ocean environmental loads [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2021, 115(10): 104066.
- [11] 赵凯, 王秋哲, 王彦臻, 等. 可液化地基地下结构地震反应特征简化有效应力分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(21): 39-46.
- Zhao K, Wang Q Z, Wang Y Z, et al. Effects of soil-underground structure interaction on seismic response of liquefiable site around underground structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(21): 39-46. (in Chinese)
- [12] 赵凯, 卢艺静, 王彦臻, 等. 海底盾构隧道结构端部效应及抗减震措施研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(16): 33-42.
- Zhao K, Lu Y J, Wang Y Z, et al. Investigations on the spatial end effect of a subsea shield tunnel and the aseismic measures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(16): 33-42. (in Chinese)
- [13] 徐笑然, 赵旭, 杜修力. 港珠澳跨海工程沉管隧道三维地震反应分析[J]. 震灾防御技术, 2016, 11(1): 44-54.
- Xu X R, Zhao X, Du X L. Three-dimensional Seismic Response Analysis of Immersed Tunnel Project in Hong Kong-Zhuhai-Macau [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2016, 11(1): 44-54. (in Chinese)
- [14] 于伦超, 钟小春, 张露露. 局部液化地层范围及埋深对隧道地震上浮的影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 57-62, 77.
- Yu L C, Zhong X C, Zhang L L. Study on the influence of the local liquefaction formation range and burial depth on the seismic floating displacement of tunnel [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2020, 37(4): 57-62, 77. (in Chinese)
- [15] 楼梦麟, 董云, 张如林. 沉管隧道地震反应分析局部精细化建模中的几个问题[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1705-1712.
- Lou M L, Dong Y, Zhang R L. several problems in refined local modeling for seismic response analysis of immersed tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1705-1712. (in Chinese)
- [16] Biot M A. General solutions of the equations of elasticity and consolidation for a porous material [J]. Journal of Applied Mechanics, 1956, 23(1): 91-96.
- [17] Huang B, Chen X Y, Zhao Y. A new index for evaluating liquefaction resistance of soil under combined cyclic shear stresses [J]. Engineering Geology, 2015, 199: 125-139.
- [18] 赵凯, 吴琪, 熊浩, 等. 双向耦合循环剪切条件下饱和砂土体应变发展规律试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1260-1269.

- Zhao K, Wu Q, Xiong H, et al. Experimental investigations on volumetric strain behavior of saturated sands under bi-directional cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1260-1269. (in Chinese)
- [19] Wang Q Z, Bian J, Huang W T, et al. Seabed liquefaction around pipeline with backfilling trench subjected to strong earthquake motions[J]. Sustainability, 2022, 14(19): 12825.
- [20] Zhao K, Wang Q Z, Chen S, et al. Dynamic response of pipelines in liquefiable seabed under nature loadings: Waves and currents[J]. Ocean Engineering, 2021, 230(6): 109051.
- [21] Hardin B, Drnevich V. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves [J]. Geotechnical Special Publication, 1972, 98(7): 667-692.
- [22] Sze H Y, Yang J. Failure modes of sand in undrained cyclic loading: impact of sample preparation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(1): 152-169.
- [23] 孙锐, 陈红娟, 袁晓铭. 土的非线性动剪切模量比和阻尼比不确定性分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1228-1235.
- Sun R, Chen H J, Yuan X M. Uncertainty of non-linear dynamic shear modular ratio and damping ratio of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1228-1235. (in Chinese)
- [24] Zhang Y, Zhao K, Peng Y J, et al. Dynamic shear modulus and damping ratio characteristics of undisturbed marine soils in the bohai sea, China[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2022, 21(2): 297-312.
- [25] 张岩, 陈国兴, 赵凯, 等. 海洋土动剪切模量比和阻尼比预测不确定性特性[J]. 工程力学, 2023, 40(5): 161-171.
- Zhang Y, Chen G X, Zhao K, et al. Uncertainties of shear modulus reduction and damping ration curves of marine soils [J]. Engineering Mechanics 2023, 40(5): 161-171. (in Chinese)
- [26] 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.
- [27] Luan M T, Qu P, Jeng D S. Dynamic response of a porous seabed-pipeline interaction under wave loading: Soil-pipeline contact effects and inertial effects[J]. Computers and Geotechnics, 2008, 35: 173-186.
- [28] Lysmer J, Kuhlemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1968, 95(40): 859-878.

(本文编辑: 苏泽云)