

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.04.012

纳米流体阻尼器对高桩码头抗震性能的影响

王远欣¹, 苏雷¹, 孙岳霆², 凌贤长^{1,3}

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266000; 2. 伯明翰大学工程学院, 西米德兰兹郡 伯明翰 B15 2TT;
3. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为了研究纳米流体材料在降低高桩码头的动力响应、减轻码头震害领域的应用潜力, 基于开源有限元计算平台 OpenSees, 建立了加入阻尼器的高桩码头二维有限元模型, 对比分析了传统黏滞阻尼器和纳米流体阻尼器对高桩码头抗震性能的影响, 评估了纳米流体材料对高桩码头的减震效果。结果表明: 纳米流体阻尼器比黏滞阻尼器具有更好的限制桩顶侧向变形的能力; 相比于黏滞阻尼器, 纳米流体阻尼器可以更好地降低陆侧桩的桩顶曲率; 加入纳米流体阻尼器的码头桩顶耗能小于加入黏滞阻尼器的码头桩顶耗能。

关键词: 纳米流体材料; 黏滞阻尼器; 高桩码头; 地震响应

中图分类号: U656.1⁺13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2024)04-0085-10

Influence of nanofluidic dampers on seismic performance of pile-supported wharf

WANG Yuanxin¹, SU Lei¹, SUN Yueting², LING Xianzhang^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266000, China;
2. School of Engineering, University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, United Kingdom;
3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to explore the potential applications of nanofluidic materials in attenuating the dynamic response of pile-supported wharves and reducing their damages, this work built a two-dimensional finite element model of a pile-supported wharf with dampers using the open-source finite element platform OpenSees. The study compared the effects of conventional viscous dampers and nanofluidic dampers on the seismic performance of the pile-supported wharf. Results show that nanofluidic dampers have a better ability to limit the lateral deformation on the top of the piles than viscous dampers and are more effective than viscous dampers in reducing the curvature on the top of the land-side piles. The energy dissipation of pile top with nanofluidic dampers is lower than that of pile top with viscous dampers.

Key words: nanofluidic material; viscous damper; pile-supported wharf; seismic response

目前我国沿海共有 150 余座港口, 港口新的格局初步形成^[1]。我国位于太平洋沿岸, 亚欧板块与太平洋板块、印度洋板块的交界处, 存在诸多断裂带和地震带, 地震灾害频发, 而高桩码头极易受到地震作用的影响发生破坏, 如 1976 年唐山地震中天津港高桩码头结构的破坏^[2]。如何最大限度地减轻地震中高桩码头的结构性破坏, 是一个重要的研究课题。

地震作用下, 面板水平方向上的位移较大时, 刚接的桩顶往往不能像铰接一样协调面板的水平位移。桩顶节点承受的弯矩会增大, 直至桩顶发生破坏。为避免地震作用下桩顶的破坏, Kilborn 等^[3]结合桥梁中桩与面板的连接形式, 开发了一种隔震支座, 将其置于桩帽处, 以减轻桩帽与面板连接处的破坏。鲍臻等^[4]结合 1976 年唐山地震中高桩码头叉桩节点的破坏, 将叉桩节点改为阻尼节点, 可以有效减小地震作用力。基于这个思路, 国内外的专家学者展开了对减隔震装置的研究。邹建文等^[5]提出了一种新的直桩与面板节点

基金项目: 国家自然科学基金项目(42211530078, 42072310); 英国皇家学会项目(IEC\NSFC\211069)

作者简介: 王远欣(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事高桩码头抗震研究。E-mail: w2091293883@163.com

通信作者: 苏雷(1986—), 男, 教授, 博士, 主要从事土动力学及岩土地震工程研究。E-mail: sulei@qut.edu.cn

引用本文: 王远欣, 苏雷, 孙岳霆, 等. 纳米流体阻尼器对高桩码头抗震性能的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 85-94.

WANG Yuanxin, SU Lei, SUN Yueting, et al. Influence of nanofluidic dampers on seismic performance of pile-supported wharf[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(4): 85-94.

连接方式,即采用钢板加橡胶垫的方式,在动荷载作用下,这种节点连接方式表现为黏弹塑性,其优点是钢板限制橡胶在竖向压力下产生的横向变形,橡胶垫满足协调水平位移需要的弹塑性,具有竖向压缩变形小,承受荷载高的优点,同时允许面板有较大的水平位移,满足高桩码头中直桩抗震的需要。李悦等^[6]针对现有高桩码头结构形式,提出了设置橡胶支座的抗震减震措施,发现设置橡胶支座后的桩基抗震能力明显提高,减震效果显著;加入减隔震装置后,高桩码头能有效地吸收地震带来的能量,确保结构在强震中的安全。Lee等^[7]在高桩码头桩与上部结构中增设高阻尼橡胶和黏弹性阻尼器作为减震装置,发现增设减震装置可以有效提高高桩码头的抗震性能,减轻码头的动力反应。赵颖^[8]将常规设计的桩帽分成上桩帽和下桩帽两部分,并在上下桩帽之间安置组合减震件,形成阻尼减震接头。陈杰^[9]根据黏滞流体阻尼器的特点,提出用黏滞流体阻尼器将码头和接岸结构连接起来,发现设置黏滞流体阻尼器能够有效地提高高桩码头的抗震性能。Soderberg等^[10]的研究表明,在桩-面板连接处设置纤维增强弹性支承垫将显著提高码头的抗震性能。Mousavi等^[11]在高桩码头上部结构与接岸结构之间增设金属屈服阻尼器,发现增设的阻尼器能消耗大部分地震输入能量,减轻桩基破坏。

可见加入阻尼器可以改善高桩码头的抗震性能。然而,现有的传统吸能材料对于外界机械能的吸收主要依靠材料自身的塑性变形及断裂,能量吸收密度较低,且存在吸收能量后无法恢复形变或重复使用的缺点,不适用于循环荷载。与传统吸能材料相比,一种新型高效的吸能材料——纳米流体材料不仅能量吸收密度高且吸收能量后变形可恢复,即可重复使用。纳米流体材料利用水分子在外界压强下突破阻力入侵到疏水的纳米孔道中的过程吸收外界机械能。Sun等^[12-13]的研究发现,纳米流体材料在动态加载下能达到50 J/g的能量吸收密度,高于传统吸能材料,且由于被压入纳米孔道的液体分子在卸载后能够自行流出,因此能够反复使用,循环往复加载下具有稳定性能,适用于地震所致的结构减震领域,有望为高桩码头等重要基础设施提供性能优异的吸能减震防护。基于此,本文针对近岸典型高桩码头结构,建立高桩码头数值模型,并引入新型的纳米流体材料,通过在高桩码头数值模型中设置纳米流体阻尼器,研究设置纳米流体阻尼器对高桩码头抗震性能的影响。

1 高桩码头有限元模型

1.1 数值模型

高桩码头-土层体系的布置如图1所示,纵向总长317.2 m,上部结构由6排预应力钢筋混凝土桩支撑的钢筋混凝土面板组成,桩排间距除了桩排F和E间距为3.7 m,其余桩排间距为6.7 m。选取单位厚度(1 m)作为计算区域(图1),建立码头-土层体系二维有限元模型,所选计算区域各桩桩长均为42 m。二维数值模型中,共有1837个节点,1716个单元,其中土单元1186个,非线性梁柱单元124个,刚性连接单元186个,零长度单元186个,边界剪切梁单元34个。

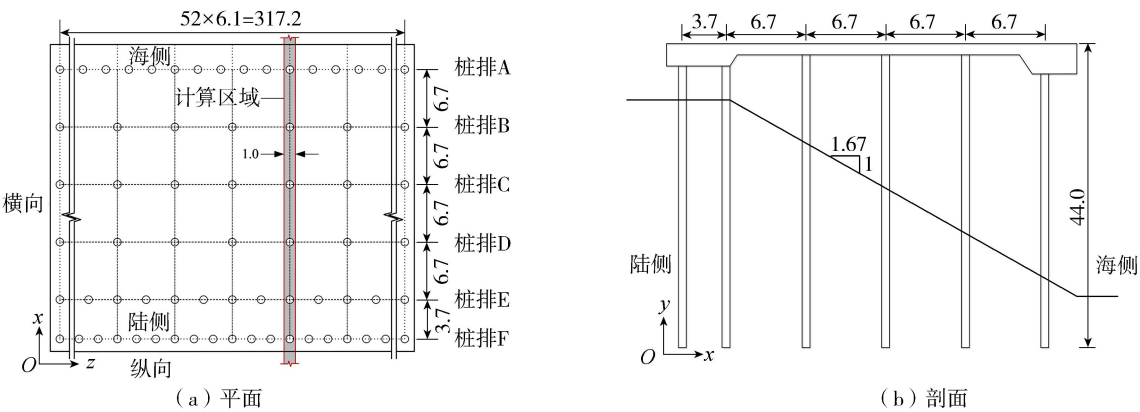


图1 码头-土层相互作用体系(单位:m)

Fig.1 Wharf-ground interaction system (unit: m)

将有限元模型中的土层理想化为4层(记作Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ),再细分为9个子层及1个坡面碎石层。土层Ⅰ的自重及上部荷载简化为竖向节点力。土层剖面具体情况见图2和表1。

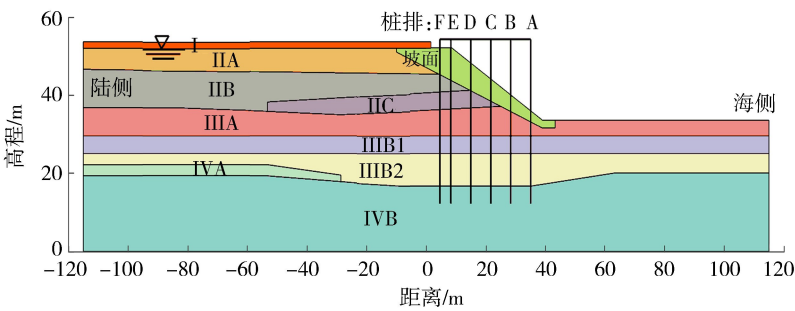


图 2 土层剖面
Fig. 2 Soil layer profile

表 1 土层材料参数

Table 1 Material parameters of soil layers

土层	编号	密度/(t/m ³)	内摩擦角/(°)	剪切模量/MPa	体积模量/MPa	黏聚力/kPa
松砂	II A	1.92	32	100	469	0
密砂	II B	2.00	36	151	703	0
中密砂	II C	2.00	34	127	591	0
中硬黏土	III A	1.76		26	122	80
硬黏土	III B1	1.84		43	200	108
硬黏土	III B2	1.84		84	391	135
密砂	IV A	2.00	36	186	868	0
非常密实砂	IV B	2.08	38	279	1 300	0
碎石	坡面	2.24	45	141	1 363	20

有限元模型中,砂土采用与围压有关的多屈服面塑性本构模型(PDMY)模拟,黏土采用与围压无关的多屈服面塑性本构模型(PIMY)模拟^[14]。模型中的自由水体采用在节点上施加节点静水压力和相应节点力的方法模拟,忽略地震下的水体惯性力。预应力钢筋混凝土桩采用基于位移的纤维截面梁柱单元模拟,钢筋混凝土面板采用弹性梁柱单元模拟^[14]。为了建模方便,数值模型中的桩体参数并未进行相应的调整。

1.1.1 预应力钢筋混凝土桩的数值模拟

预应力钢筋混凝土桩截面为正八边形,其内切圆直径为 610 mm,其中保护层混凝土厚度为 75 mm,桩横截面及配筋见图 3,为简化建模,将截面离散成圆形的纤维截面。纤维截面中,预应力钢筋采用 Steel02 模拟,参数如下:屈服强度为 1 490 MPa,预应力为 1 062 MPa,弹性模量为 204 GPa,应变硬化比为 0.0。约束与非约束混凝土采用 Concrete01 模拟^[15],材料参数见表 2。约束和非约束混凝土及钢筋在循环荷载(图 4)下的应力-应变响应见图 5(a)~(c)(图中 f'_c 为混凝土的抗压强度; ε_c 为抗压强度对应的应变; f_{cu} 为混凝土的压碎强度; ε_{cu} 为压碎强度对应的应变; σ_{ini} 为钢筋的预应力; f_y 为钢筋的屈服强度; E 为钢筋弹性模量)。通过定义截面中钢筋、约束和非约束混凝土的材料性能,得到不同轴向荷载下桩截面的弯矩-曲率响应,见图 5(d)(图中 F_{Axial} 即为桩截面所受的轴向荷载)。

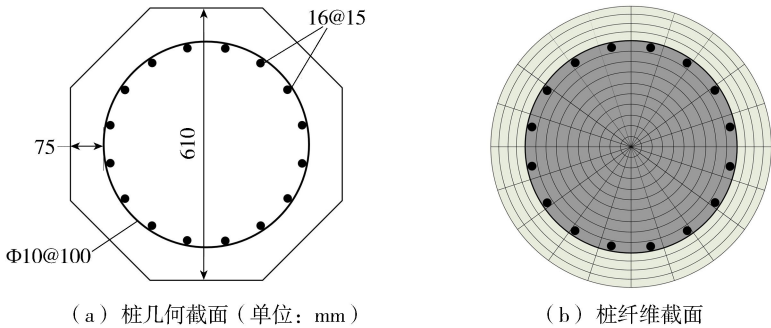


图 3 桩几何与纤维截面
Fig. 3 Pile geometry and fiber section

1.1.2 桩-土相互作用

为了更好地模拟桩-土相互作用,在桩-土刚性连接单元^[16]基础上增加零长度单元模拟桩-土界面摩擦滑

表 2 混凝土材料参数

Table 2 Material parameters of concrete

材 料	抗压强度/ MPa	抗压强度 对应的应变	压碎强度/ MPa	压碎强度 对应的应变
约束混凝土	74.9	0.005	63.0	0.018
非约束混凝土	49.0	0.002	0.0	0.004

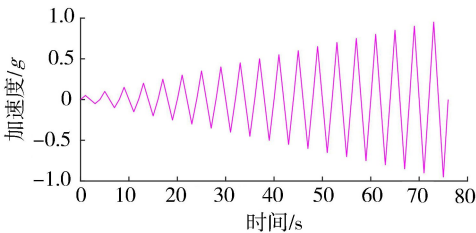


图 4 循环荷载
Fig. 4 Cyclic load

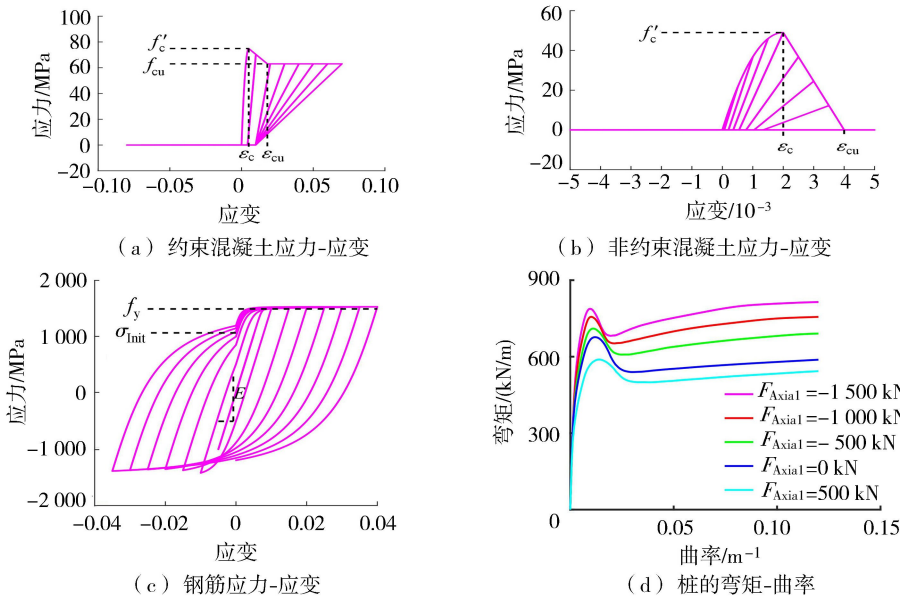


图 5 预应力钢筋混凝土桩的模拟

Fig.5 Modeling of prestressed reinforced concrete pile

动机理,如图 6 所示,其中土节点自由度为水平位移、竖向位移以及孔隙水压力,其余节点自由度为水平位移、竖向位移和转角,该模拟方法能够很好地考虑桩-土界面的动力特性。通过定义剪切屈服力,可以模拟桩-土界面滑移。

1.1.3 高桩码头模型可靠性分析

本文采用的高桩码头数值模拟主要包括土层的模拟、桩基非线性模拟、自由场边界的模拟、桩-土相互作用的模拟、地震动的输入及分析步的设定等,均已通过桩-土-结构体系振动台试验得到验证^[17-18]。这种模拟方法已经很好地应用于高桩码头的数值模拟中^[14,19],因此本文数值模型具有良好的可靠性。

1.1.4 阻尼器的设置

在第 1.1 节中高桩码头-土层体系选取了码头纵向长度为 1 m 的区域作为建模区域,在桩排 A ~ F 中各取了一根桩(桩的编号为所在桩排编号)建立了一个简化的二维有限元模型。为了对比分析,在已经建立的高桩码头二维有限元模型中分别加入纳米流体阻尼器和传统黏滞阻尼器,布置方案如图 7 所示。在高桩码头二维有限元模型的桩排 F 和 E 顶部布置相应的阻尼器,阻尼器另一端锚固在地面上且保持与桩的夹角为 45°。

1.2 地震动输入

为使模型在地震作用下呈现明显的变形特性和非线性特性,模型

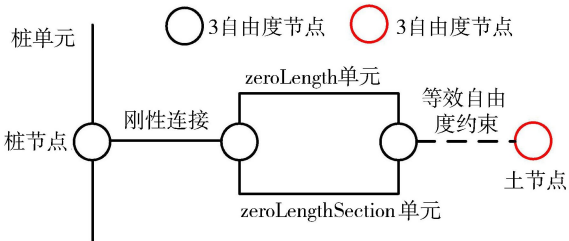


图 6 二维桩-土界面模拟

Fig.6 Modeling of 2D soil-pile interface

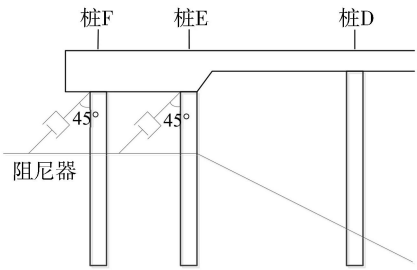


图 7 阻尼器的布置方案

Fig.7 Arrangement of dampers

基底地震动采用相对较高的峰值加速度。选取 1979 年 Imperial Valley 地震中 Brawley 台站记录的地震动,为考虑土层传播对地震动的影响,将记录的加速度幅值缩小一半作为输入地震动。采用 OpenSees 中均匀基底激励 Uniform Excitation,即基底各点的加速度相同。输入的地震加速度时程曲线如图 8 所示,将处理后的地震动沿模型基底 x 方向输入。动力矩阵方程采用 Newmark 类型的积分法^[20-21],积分参数 $\gamma = 0.6$ 和 $\beta = 0.3025$ 。计算中每一时步均采用修正的 Newton-Raphson 法求解一组瞬态方程,通过不断更新刚度算子加快收敛,使其达到预定的收敛精度。在数值模拟分析中,结构阻尼模型采用瑞利(Rayleigh)阻尼,阻尼系数矩阵 $C = \alpha' M + \beta_0 K$,其中, α' 为质量比例系数, M 为质量矩阵, β_0 为刚度比例系数, K 为刚度矩阵,考虑体系的阻尼效应^[22]。

1.3 数值模拟步骤

采用线性和非线性方法对数值模型进行计算,步骤如下:①在初始状态下,对土层施加自重进行弹性状态下自重应力计算;②维持土体初始应力状态,使土体初始位移为零,确保获得土层的非零应力和孔隙水压力;③分别加入梁柱单元、刚性连接单元和零长度单元,并完成码头结构与土层的连接,执行码头-土层相互作用计算;④将土层性质由弹性改为塑性,执行码头-土层相互作用计算;⑤在模型基底输入地震动,完成码头-土层体系地震响应计算。

2 纳米流体材料的数值模型

纳米多孔材料在力学、材料、物理、化学、生物学等方面有着广泛的应用价值。2001 年 Eroshenko 等^[23]研究了高压下水侵入沸石多孔材料过程中所伴随的能量吸收现象;国内外相关研究表明纳米流体材料在机械能耗散、吸收及存储方面有巨大的应用潜力^[13,24]。基于界面力学的能量转化通常通过两种物质的接触、挤压和摩擦来实现,除了常作为材料薄弱环节的固-固界面,固-液界面也是实现能量转换的途径^[24],但应用中需要将界面最大化以得到最高效率,纳米多孔材料超高的比表面积(1 000 ~ 10 000 m²/g)为此提供了机会。研究发现纳米流体材料能量吸收密度可以达 50 ~ 100 J/g^[12,25],远高于泡沫(0.1 ~ 3.0 J/g)及形状记忆合金(0.3 ~ 2.0 J/g)等传统材料。

2.1 吸能耗散机理

纳米流体材料通常包括疏水的纳米多孔材料(如金属有机骨架材料、沸石、多孔硅材料)和液体(水或水溶液)。纳米多孔材料一般为具有纳米孔的颗粒,其孔径可低至 1 nm 以下或达几百纳米。液体在常温常压下不会自发渗入疏水的纳米孔,但当外荷载大于某个临界压强值(P_{in} ,也称为临界入侵压强),液体将被压入纳米孔,随之机械能被转化为纳米孔内的固-液界面能;卸载后,一定条件下纳米孔内的液体会自发地流出,储存的界面能将被释放,纳米流体材料随即恢复到初始状态,可用于下一次加载,因此纳米流体材料可重复使用,而其渗入渗出过程也耗散了一部分能量。图 9 为纳米流体材料典型的压强-体积变化(或应力-应变)曲线(图中 τ 为 $\partial P / \partial V$,即阶段 II 曲线的斜率),在弹性压缩阶段 I 之后为液体入侵阶段 II,直至所有孔道被填充完毕,进入第二个弹性压缩阶段。对于卸载阶段,实线所示为液体分子滞留于孔道内的情况,而虚线所示为液体分子自发渗出孔道的情况,后者将使得该纳米流体系统具有可恢复形变的特征。纳米流体材料的吸能性能表现取决于很多材料参数,如纳米孔径、孔道拓扑几何结构、液相性质(如离子)、环境温度、流速等^[24,26],因此从性能调控的角度而言具有灵活可控的能量吸收特性。

2.2 动态压缩响应

以往的研究主要集中在准静态加载条件,即纳米流体材料在应变率为 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的缓慢压缩过程。

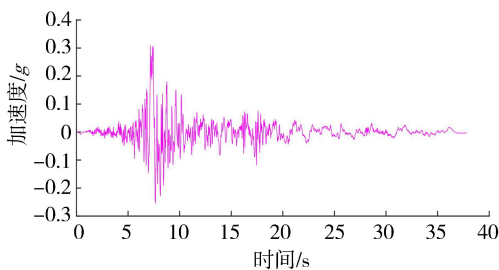


图 8 基底输入的地震加速度时程曲线
Fig. 8 Time series of input acceleration on the model base

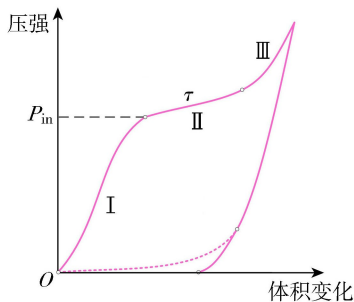


图 9 纳米流体材料典型的压强-体积变化关系
Fig. 9 Typical pressure-volume relationship of nanofluidic materials

这在实际生活中应用场景较少,因为吸收机械能的减震和缓冲材料需要在较高的应变率下工作。为了探究纳米流体材料在动荷载甚至冲击荷载下的吸能性能,学者们已经开始研究加载速率的影响。另外,为了使纳米流体材料成为可循环加载的减震器,进入孔道的水分子应在卸载之后自行离开孔道。Sun 等^[12]采用高速冲击试验对一种沸石咪唑酯骨架(ZIF-8)进行了动态水入侵试验,发现纳米流体材料在高应变率下拥有比准静态条件下更高的能量吸收效率。为了验证纳米流体材料可重复使用的特性,还进行了 ZIF-8 连续 5 次高速冲击的响应试验,结果表明纳米流体材料在多次冲击循环下表现出一致的性能,应力-应变曲线没有明显衰减,证明了 ZIF-8 在循环荷载下的性能表现十分稳定。

本文依据 Sun 等^[12]得到的 ZIF-8 动态水入侵的试验数据,使用开源有限元数值计算平台 OpenSees 中单轴材料 KikuchiAikenHDR 进行数据拟合,最终确定的材料参数:材料厚度 $H_r=1.0\text{ m}$,材料面积 $A_r=0.9\text{ m}^2$,材料类型 T_p 为 X0.6,等效剪切模量 $C_g=1.0$,等效黏滞阻尼比 $C_h=1.0$,拟合结果如图 10 所示,得到了类似液体入侵过程的平台段。由于纳米流体吸能的物理机制目前还无法在宏观数值模拟中体现,本文仅是对特定参数下试验所得的应力应变曲线进行拟合,再现材料的宏观响应以探索其工程应用。

3 结果与分析

为了便于对比分析,本文同时给出未设置阻尼器、设置传统阻尼器和纳米流体阻尼器 3 种工况下的码头地震响应,根据面板位移、桩的变形、桩顶的弯矩和曲率、桩顶单元的耗能大小综合判断阻尼器的减震性能。

3.1 传统黏滞阻尼器参数确定

为了获取一个适宜的传统阻尼器参数加入已经建立的高桩码头模型,建立一个简单的单层门式框架模型,几何尺寸如图 11 所示(图中 α 为速度指数; C_D 为阻尼系数),门式框架的单元 1 和单元 2 采用与高桩码头的模型桩相同的截面尺寸、材料参数和截面纤维;单元 3 的各项参数则与码头模型中的面板相同。

传统的黏滞阻尼器由 α 和 C_D 两个基本参数定义,改变模型中 α 、 C_D ,得到同一地震动下(图 8)门式框架的响应和黏滞阻尼器的滞回曲线,滞回曲线所围成的面积即为阻尼器吸收的全部能量。为了找到适用于地震场景下的黏滞阻尼器参数,司盼等^[27]分析了黏滞阻尼器对液化场地群桩-土-结构体系的减震效果,甄选出适用于地震作用下的黏滞阻尼器 C_D 和 α 范围。以此为基础,本文在对黏滞阻尼器进行参数分析时采用了共计 42 个工况,依据各工况滞回曲线面积(表 3),选择耗能较高的阻尼器参数,将高桩码头模型中的黏滞阻尼器参数设置为 $\alpha=0.70$, $C_D=2\,000\text{ kN}\cdot(\text{s/m})^{0.7}$ 。

表 3 不同工况下黏滞阻尼器滞回曲线面积

Table 3 Area of hysteretic curves for viscous dampers under different conditions						
滞回曲线面积(黏滞阻尼器耗能)/(kN·m)						
α	$C_D=500\text{ kN}\cdot(\text{s/m})^{0.7}$	$C_D=1\,000\text{ kN}\cdot(\text{s/m})^{0.7}$	$C_D=2\,000\text{ kN}\cdot(\text{s/m})^{0.7}$	$C_D=3\,000\text{ kN}\cdot(\text{s/m})^{0.7}$	$C_D=4\,000\text{ kN}\cdot(\text{s/m})^{0.7}$	$C_D=5\,000\text{ kN}\cdot(\text{s/m})^{0.7}$
0.3	485.4	574.2	484.7	400.2	319.4	238.2
0.4	449.2	586.8	504.9	444.3	384.2	369.9
0.5	415.0	571.1	546.5	477.6	429.9	383.9
0.6	378.3	539.3	584.7	517.0	467.0	429.4
0.7	344.5	499.9	603.4	562.0	506.7	467.6
0.8	313.6	464.3	596.5	593.5	554.4	508.9
0.9	283.7	431.1	572.7	576.6	587.3	556.7

3.2 框架结构减震分析

在将两种类型阻尼器加入高桩码头模型之前,进一步分析两种阻尼器减轻结构震害的原理。在图 11 所

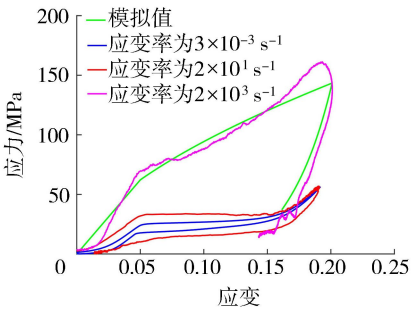


图 10 纳米流体材料动态压缩响应
Fig. 10 Dynamic compression response of nanofluidic materials

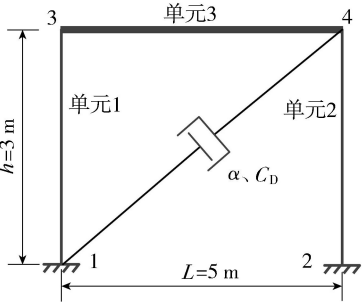


图 11 单层门式框架模型
Fig. 11 Model of single-layer portal frame

示的单层门式框架中,分别设置上述的两种阻尼器,在门式框架 4 节点上施加往复并逐渐增大水平位移。由图 12 可知,加入黏滞阻尼器后框架结构的刚度有轻微提高,随着荷载的增大,滞回曲线呈现一定的非线性行为,滞回圈面积变化不明显。加入纳米流体阻尼器的框架明显提高了框架结构的刚度,随着荷载的增大,滞回曲线呈现出明显的非线性特征,滞回圈面积明显增大,说明框架结构的耗能性能与承载力得到显著提升。

3.3 面板水平位移

假定面板完全刚性,在地震动作用下,可以忽略面板本身产生的变形,因此码头数值模型中各桩桩顶水平位移与面板位移基本相同。图 13 给出了地震作用(图 8)下桩 A 和 F 桩顶的水平位移时程曲线。由图 13 可知,不加入阻尼器的情况下,桩顶的水平位移幅值超过 40 cm。设置黏滞阻尼器后,位移幅值以及随后的波动范围都要低于未设阻尼器的码头模型。加入纳米流体阻尼器后,高桩码头模型的桩顶水平位显著降低。这与纳米流体阻尼器可以明显提高结构的刚度有关。

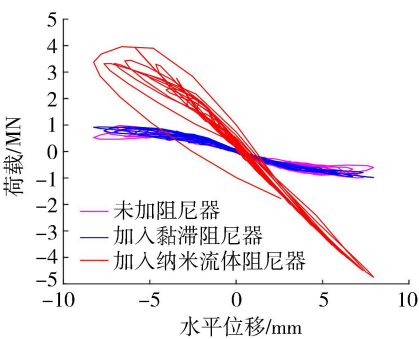


图 12 框架结构的滞回曲线

Fig. 12 Hysteresis curves of frame structure

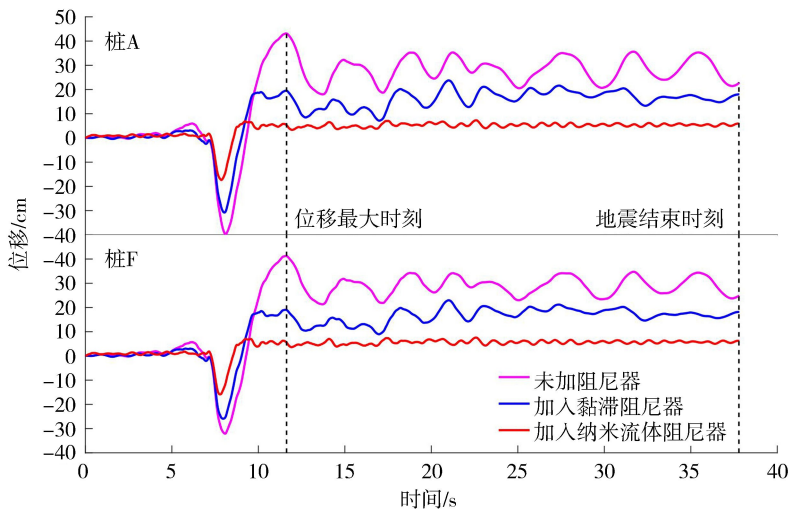


图 13 桩 A 和 F 的桩顶水平位移时程曲线

Fig. 13 Horizontal displacement time histories of pile A and pile F

为了进一步分析加入阻尼器对减轻高桩码头地震响应的效果,选取地震作用中面板位移最大的时刻和地震结束时刻,得到两个典型时刻下桩的位移响应剖面,如图 14 所示。在面板位移最大时刻和地震结束时刻,各桩桩顶的位移基本相同。桩顶以下的桩段横向位移有较大区别,海侧桩自由长度较长,沿桩埋深方向上的水平位移变化较平缓;陆侧桩自由长度较短,沿桩埋深方向上的位移变化较剧烈。在埋深较深的位置,两个时刻下 3 种码头模型中桩基的水平位移相差不大,这是由于桩周的土层限制了桩的横向位移。在地表附近及地表以上,加入纳米流体阻尼器的码头模型桩基水平位移明显小于加入黏滞阻尼器的码头桩基水平位移,未加入阻尼

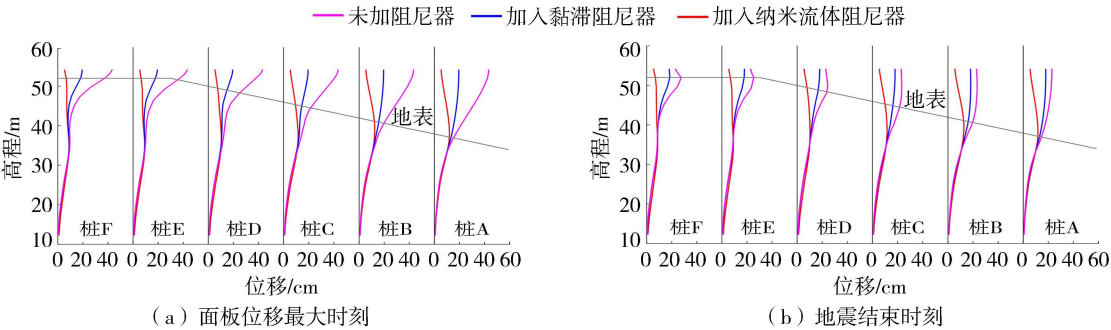


图 14 桩基水平位移沿埋深的响应

Fig. 14 Horizontal displacement response of piles along the depth

器的码头桩基水平位移最大。这表明加入纳米流体阻尼器后,明显提高了码头结构的侧向刚度,限制码头结构的水平位移。纳米流体阻尼器在不同加载速度下本身具有一定的刚度,因此相比于黏滞阻尼器具有更好的限制桩顶侧向变形的能力。又由于面板刚度足够,保证在地震作用下桩顶具有相同的位移。所以,在陆侧增加的纳米流体阻尼器明显约束了桩顶的侧向变形,这将导致在地震作用下桩的侧向最大位移主要发生在地表附近。

3.4 桩的曲率和弯矩

由图 15 可知,自由长度较长的桩曲率较小,自由长度较短的桩曲率较大,其中桩身曲率的峰值出现在桩顶或地表处。与未加入阻尼器相比,加入阻尼器后,明显减轻了桩顶处的曲率。由图 16 可知,与未加入阻尼器的高桩码头模型响应结果相比,加入纳米流体阻尼器后,码头结构各桩桩顶的曲率峰值降低了 50% ~ 68%;而加入黏滞阻尼器,码头结构各桩桩顶的曲率峰值降低 23% ~ 48%。

由图 17 可知,加入黏滞阻尼器后,桩E和F的桩顶弯矩时程与未加入阻尼器的桩顶弯矩时程相比改变

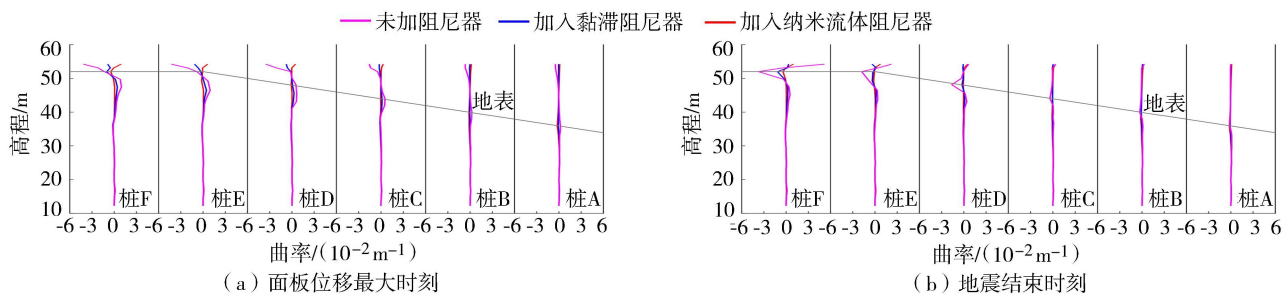


图 15 桩基曲率响应剖面
Fig. 15 Curvature response profile of piles

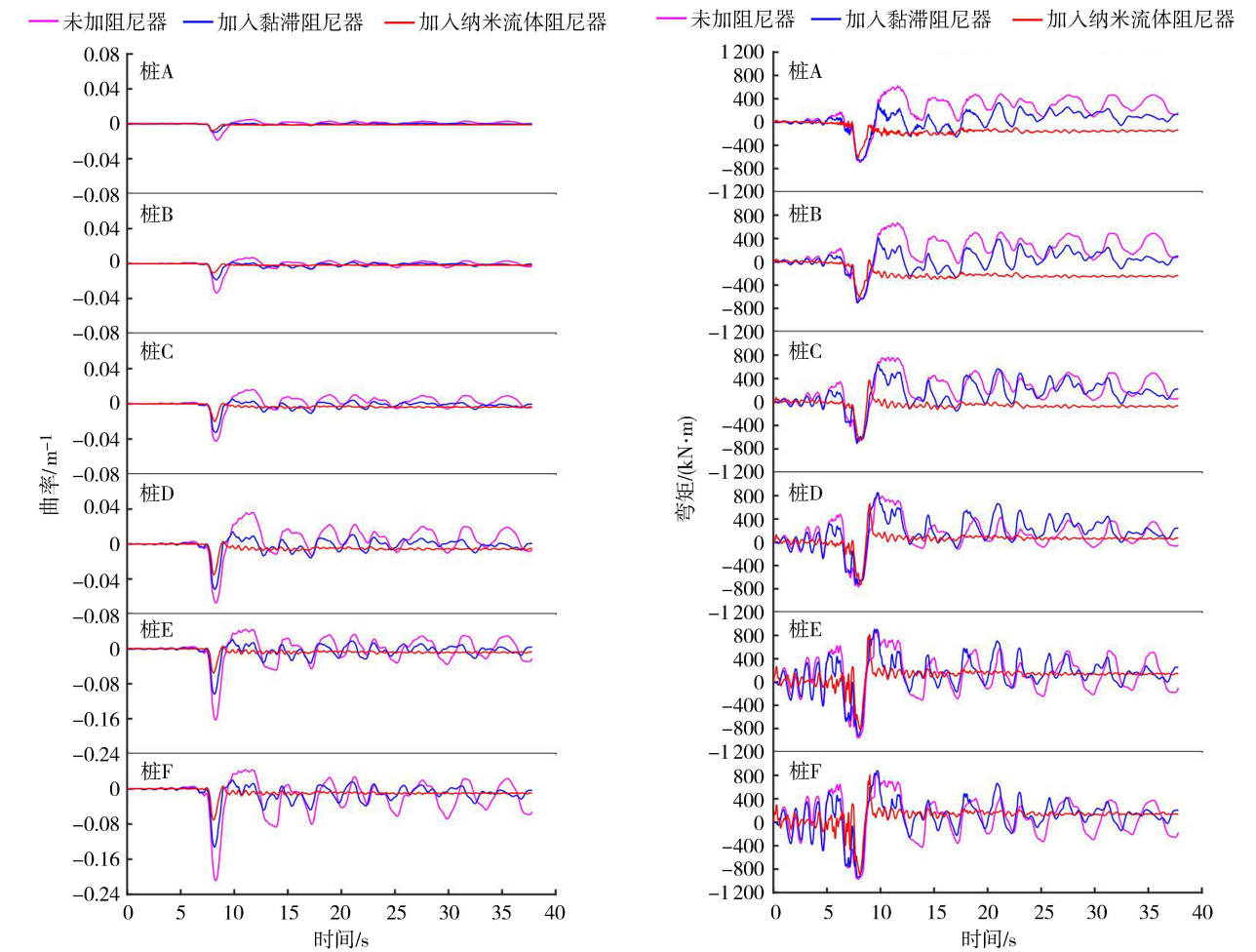


图 16 桩顶曲率时程
图 17 桩顶弯矩时程
Fig. 16 Time histories of curvature at the top of piles
Fig. 17 Time histories of bending moment at the top of piles

不明显。这可能是由于黏滞阻尼器不能很好地控制桩顶位移,使得土层对陆侧桩的约束作用在桩顶产生了较大的弯矩。在海侧桩 A 和 B,加入黏滞阻尼器的模型产生的弯矩略小于未加阻尼器的模型。加入纳米流体阻尼器后,桩 E 和 F 的弯矩时程在达到峰值后,其响应显著降低,弯矩峰值处附近,减小不明显。因为此时桩顶已经产生了较大的位移,纳米流体材料进入了非线性阶段,水分子充满纳米孔后,纳米流体阻尼器能产生的变形已经很小了,若继续增大荷载,其阻尼器的反力也会随之增大。

3.5 桩顶单元耗能

将阻尼器加入高桩码头的主要目的是吸收地震中产生的能量,降低码头桩基部分的耗能,从而减轻码头震害。地震中,桩与面板的连接处是最主要破坏部位。图 18 是桩顶在地震作用下弯矩-曲率响应,所包围的面积可以反映结构所吸收的能量,不设置阻尼器的情况下,这些能量通常通过结构的弹塑性变形或局部损伤(如开裂、塑性铰转动等)耗散。由图 18 可知,在地震作用下,高桩码头陆侧桩桩顶吸收的能量远大于海侧桩桩顶吸收的能量,这是由于陆侧桩自由长度较短,地表以下的桩段由于土层的约束无法产生大变形来吸收能量。加入阻尼器的高桩码头模型各桩桩顶单元的耗能均小于未加阻尼器的码头模型,而加入纳米流体阻尼器的码头桩顶耗能又小于加入黏滞阻尼器的码头桩顶耗能。因为黏滞阻尼器本身不具有刚度,是通过变形滞后的特性来吸收能量,这就意味着码头结构依然会产生较大的变形。而纳米流体阻尼器可以在码头地震反应较小的阶段发挥刚性支撑作用,减小结构的水平位移。

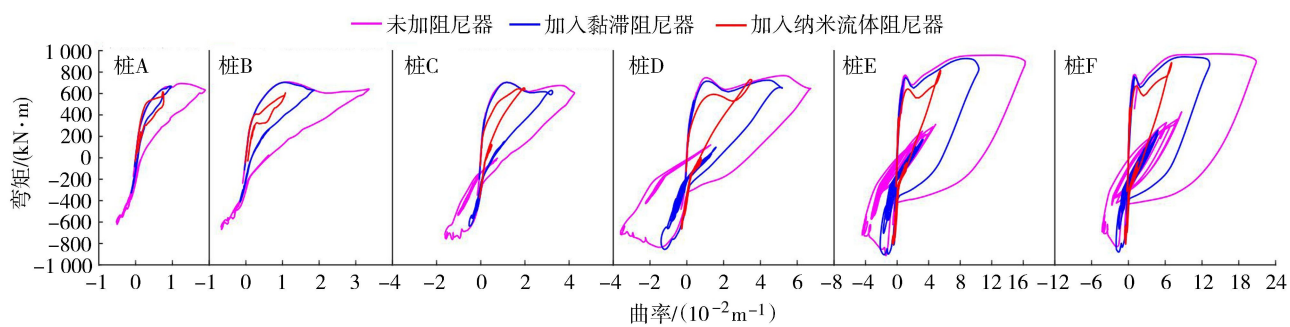


图 18 桩顶弯矩-曲率响应

Fig. 18 Moment-curvature response at the top of piles

4 结 论

- a. 纳米流体阻尼器在不同加载速度下本身具有一定的刚度,因此比黏滞阻尼器具有更好的限制桩顶侧向变形的能力,加入纳米流体阻尼器可以明显约束桩顶的侧向变形。
- b. 在地震作用下,高桩码头陆侧桩桩顶吸收的能量远大于海侧桩桩顶吸收的能量。相比于黏滞阻尼器,纳米流体阻尼器可以更好地降低陆侧桩的桩顶曲率,从而减轻码头桩顶的震害。
- c. 纳米流体阻尼器因为材料本身具有一定刚度以及吸能密度高的特点,在降低码头桩基水平位移、弯矩、曲率以及桩身耗能方面的性能优于黏滞阻尼器。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 全国沿海港口布局规划[EB/OL]. (2006-09-12). https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202006/t20200630_3320031.html.

[2] 孟昭华. 唐山地震中天津地区高桩码头的震害[J]. 土木工程学报,1982,15(4):88-91. (MENG Zhaohua. Tangshan earthquake,1976,damaged the pile-elevated docks in Tianjin region[J]. China Civil Engineering Journal,1982,15(4):88-91. (in Chinese))

[3] KILBORN J,FIRAT Y,HARN R,et al. Seismic retrofit of a historic pier using lead-rubber bearings[C]//Proceedings of Ports'13:13th Triennial International Conference. Seattle:ASCE,2013.

[4] 鲍臻,李成泉. 高桩码头摩擦减震的研究[J]. 地震工程动态,1982(3):20-23. (BAO Zhen,LI Chengquan. Research on friction damping of pile-supported wharf[J]. Earthquake Resistant Engineering,1982(3):20-23. (in Chinese))

[5] 邹建文,徐莹. 采用粘弹性连接改善高桩码头抗震性能分析[J]. 国外建材科技,2007,28(2):122-123. (ZOU Jianwen,XU Ying. Analysis in improving earthquake resistance ability of high pile wharf by viscoelasticity connection[J]. Science and

- Technology of Overseas Building Materials,2007,28(2):122-123. (in Chinese))
- [6] 李悦,宋波.高桩码头震害分析及减震措施[J].水道港口,2006,27(2):101-104. (LI Yue, SONG Bo. Earthquake-damage analysis and damping measures of high-piled piers[J]. Journal of Waterway and Harbor,2006,27(2):101-104. (in Chinese))
- [7] LEE H H, CHUNG P Y, LIAO S R, et al. Seismic and vibration mitigation on the harbor wharf structural system [C]// Proceedings of the Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering. Ottawa: Canadian Association for Earthquake Engineering,2007.
- [8] 赵颖.桩基码头减震接头技术试验研究[J].水运科学研究,1995(2):145-152. (ZHAO Ying. Experimental study technique of absorbing adaptor for pile supported wharf[J]. Research on Waterborne Transportation,1995(2):145-152. (in Chinese))
- [9] 陈杰.设置黏滞流体阻尼器高桩码头抗震性能及有限元分析[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [10] SODERBERG E, LIND D, LONI S. Innovative wharf details: elastomeric bearing pile-deck connection and finned monopile [C]// Proceedings of Ports'13:13th Triennial International. Seattle: ASCE,2013.
- [11] MOUSAVI S A, BARGI K. Enhancing seismic capacity of pile-supported wharves using yielding dampers [J]. Journal of Structures,2013,2013:329130.
- [12] SUN Yueting, ROGGE S M J, LAMAIRE A, et al. High-rate nanofluidic energy absorption in porous zeolitic frameworks [J]. Nature Materials,2021,20(7):1015-1023.
- [13] TAN Jinchong, SUN Yueting, JIANG Hebin, et al. Mechanical behaviour of metal-organic framework materials [M]. London: The Royal Society of Chemistry,2023.
- [14] SU Lei, LU Jinchang, ELGAMAL A, et al. Seismic performance of a pile-supported wharf: three-dimensional finite element simulation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2017,95:167-179.
- [15] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. OpenSees command language manual [M]. Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center,2001.
- [16] ELGAMAL A, YAN Linjun, YANG Zhaohui, et al. Three-dimensional seismic response of Humboldt Bay bridge-foundation-ground system [J]. Journal of Structural Engineering,2008,134(7):1165-1176.
- [17] SU Lei, WAN Huaping, LI Yong, et al. Soil-pile-quay wall system with liquefaction-induced lateral spreading: experimental investigation, numerical simulation, and global sensitivity analysis [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2018,144(11):04018087.
- [18] SU Lei, WAN Huaping, ABTAHI S, et al. Dynamic response of soil-pile-structure system subjected to lateral spreading: shaking table test and parallel finite element simulation [J]. Canadian Geotechnical Journal,2020,57(4):497-517.
- [19] SU Lei, WAN Huaping, DONG You, et al. Seismic fragility assessment of large-scale pile-supported wharf structures considering soil-pile interaction [J]. Engineering Structures,2019,186:270-281.
- [20] PARRA E. Numerical modeling of liquefaction and lateral ground deformation including cyclic mobility and dilation response in soil systems [D]. Troy: Rensselaer Polytechnic Institute,1996.
- [21] 钱向东,李晨,沈人杰.广义阻尼模型及其在混凝土重力坝地震响应分析中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):98-104. (QIAN Xiangdong, LI Chen, SHEN Renjie. A generalized damping model and its application in seismic response analysis of concrete gravity dam [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):98-104. (in Chinese))
- [22] 钱向东,李震东,李晨.混凝土重力坝非黏滞阻尼地震响应分析[J].河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):342-348. (QIAN Xiangdong, LI Zhendong, LI Chen. Non-viscous damped seismic response analysis of concrete gravity dam [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4):342-348. (in Chinese))
- [23] EROSHENKO V, REGIS R C, SOULARD M, et al. Energetics: a new field of applications for hydrophobic zeolites [J]. Journal of the American Chemical Society,2001,123(33):8129-8130.
- [24] CHEN Xi, XU Baoxing, LIU Ling. Nanoscale fluid mechanics and energy conversion [J]. Applied Mechanics Reviews,2014,66(5):050803.
- [25] FRAUX G, COUDERT F X, BOUTIN A, et al. Forced intrusion of water and aqueous solutions in microporous materials: from fundamental thermodynamics to energy storage devices [J]. Chemical Society Reviews,2017,46(23):7421-7437.
- [26] 曹国鑫.纳米流控能量吸收耗散系统[J].力学进展,2017,47:201707. (CAO Guoxin. Nanofluidic energy absorption system: a review [J]. Advances in Mechanics,2017,47:201707. (in Chinese))
- [27] 司盼,唐亮,张征,等.液化场地装设黏滞阻尼器的桩基-结构体系抗震性能分析[J].地震工程与工程振动,2022,42(5):150-157. (SI Pan, TANG Liang, ZHANG Zheng, et al. Seismic performance analysis of pile foundation-structure system with viscous dampers in liquefiable soil [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2022,42(5):150-157. (in Chinese))