

整体箱板式高桩码头地震响应数值模拟分析

庄宁^{1,2}, 许明宇^{1,2}, 陈聪^{1,2}, 杨文涛^{1,2}

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利工程实验教学中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对整体箱板式高桩码头的地震响应, 利用 ABAQUS 软件创建有限元与无限元耦合的弹塑性损伤模型。通过非线性有限元分析, 研究了码头在 Elcentro 波、Kobe 波和 Northridge 波作用下结构的力学特性与抗震性能, 分析了面板、桩基的动力响应及损伤特性。研究表明, 码头结构的地震响应随着地震强度的增大而增大, 地震波频谱特性对结构地震响应的影响较大; 上部结构纵向预应力筋的设置能很好地保护桩顶节点, 减少桩顶位移; 桩基在泥面处及土层界面处是结构响应较为强烈的部位; 阻尼耗散了大部分地震输入的能量, 通过损伤耗能可以确定结构发生脆性破坏的时间节点。

关键词: 整体箱板式高桩码头; ABAQUS; 有限元分析; 地震响应

中图分类号: U656.1; TU352

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2020)11-0001-06

doi: 10.7640/zggwjs202011001

Numerical simulation analysis of seismic response of integral box-slab high-pile wharf

ZHUANG Ning^{1,2}, XU Ming-yu^{1,2}, CHEN Cong^{1,2}, YANG Wen-tao^{1,2}

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. The Experimental Teaching Center of Water Conservancy Projects of Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Aiming at the seismic response of integral box-slab high-pile wharf, the elastoplastic damage model coupled with finite element and infinite element was created by ABAQUS software. Through the nonlinear finite element analysis, we studied the mechanical properties and aiti-seismic performance of the wharf structure under Elcentro wave, Kobe wave and Northridge wave, and analyzed the dynamic response and damage characteristics of the panel and pile foundation. The results show that seismic response of the wharf structure increases with the increase of seismic intensity, and seismic wave spectrum characteristics have great impact on the seismic response of the structure. The arrangement of the longitudinal prestressed rebar of the superstructure can well protect the pile-head and reduce the displacement. The mud surface and the soil layer interface are the areas where the structural response is relatively strong; damping dissipates most of the seismic input energy, and the time node of brittle fracture failure can be determined by damage energy dissipation.

Key words: integral box-slab high-pile wharf; ABAQUS; finite element analysis; seismic response

0 引言

高桩码头是我国应用最广的码头结构形式之

一, 地震作用下高桩码头的破坏形式主要有两种^[1]: 一是桩基在土分界处桩身曲率过大, 桩基发生破坏; 二是土体液化, 使码头整体失稳从而导致破坏。传统带斜桩式高桩码头较弱的抗震性能限制了码头自身的发展, 新型高桩码头结构的抗震问题成为防灾减灾研究中的一重要课题^[2]。整体箱板式高桩码头上部结构由数块预制箱板拼

收稿日期: 2020-05-22 修回日期: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679080、51379013); 江苏省水利科技资助项目(2017030); 江苏高校“青蓝工程”资助项目(2017)

作者简介: 庄宁(1977—), 男, 江苏镇江人, 副教授, 博士, 主要研究港口与近海工程结构维修加固新材料与新技术。

E-mail: 757492450@qq.com

接而成,通过纵向预应力筋穿过箱板预留孔洞将箱板结合成一个整体,且不需设置斜桩,该新型全直桩码头结构可以承受较大的水平荷载,同时在地震作用下较之斜桩码头更不易被破坏,抗震性能大大增强。

邴晓等^[3]首次提出新型整体箱板式高桩码头的结构形式,从施工、工程量和经济指标等方面论证了这种新型码头设计优于传统的梁板式高桩码头。王文仲等^[4]验证了经验系数法、等代框架法、虚拟交叉梁法应用在整体箱板式高桩码头中的可行性,并与有限元数值计算结果对比。张舰^[5]利用 ABAQUS 准确模拟了整体箱板式高桩码头桩基内力和门机荷载的动态加载,验证了数值模拟在新型码头中的可行性。

目前针对地震影响下的整体箱板式高桩码头结构的研究很少,本文采用数值模拟的研究方法,利用有限元软件 ABAQUS 建立基于实际工程条件下的弹塑性损伤数值模型,采用无限元模拟实际的边界条件,考虑材料非线性和桩土相互作用,分析结构在不同地震波强度作用下的动力响应,进一步深化整体箱板式高桩码头结构抗震性能的研究。

1 计算模型建立

本文模型数据参考某港区 5 万吨级整体箱板式高桩码头结构设计^[6],选用 ABAQUS 中提供的混凝土塑性损伤模型,土体材料选用摩尔库伦本构模型^[7-8],将土体简化为 2 层,分别为淤泥质粉质黏土和砂质板岩。混凝土等级为 C50,地震设防烈度为 8 度。塑性系统松弛时间黏性系数取为 1×10^{-5} ,混凝土双轴受压与单轴受压极限强度比值取 1.16。此外, $P-Q$ 平面剪胀角取 38° ,塑性势能方程的流动势偏移量取 0.1,拉伸子午线和压缩子午线上第二应力不变量比值取 $2/3$ 。上部结构中双层纵向预应力筋在箱板横断面上下各布置 62 根,并对每根钢筋施加 1.3×10^9 Pa 的预应力。码头断面图和码头平面图如图 1、图 2 所示(每榀排架的桩基编号从海侧向陆侧依次为 1~4 号,如 2-3 表示第 2 榀排架的 3 号桩基),码头尺寸为码头宽度 35 m,排架间距 7.28 m,箱板厚度 1.65 m,1、2 号桩截面(单根桩) $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,3、4 号桩截面(两根桩) $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$,桩长 57.95 m。土层物理力学性能指标见表 1。

本文借鉴以往研究者^[9]的研究方法,利用过去

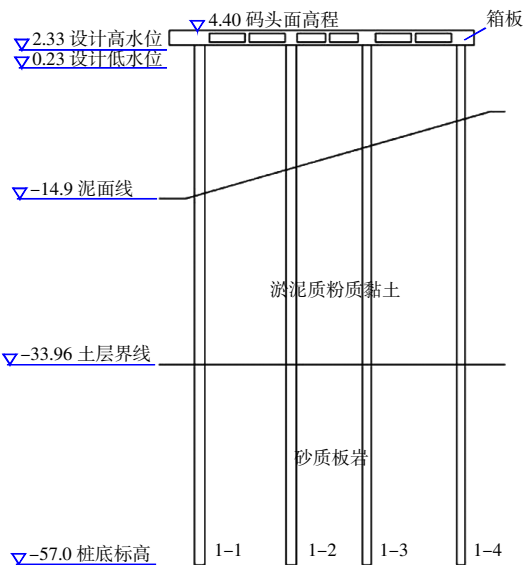


图 1 码头断面图(m)

Fig. 1 Cross-sectional view of wharf (m)

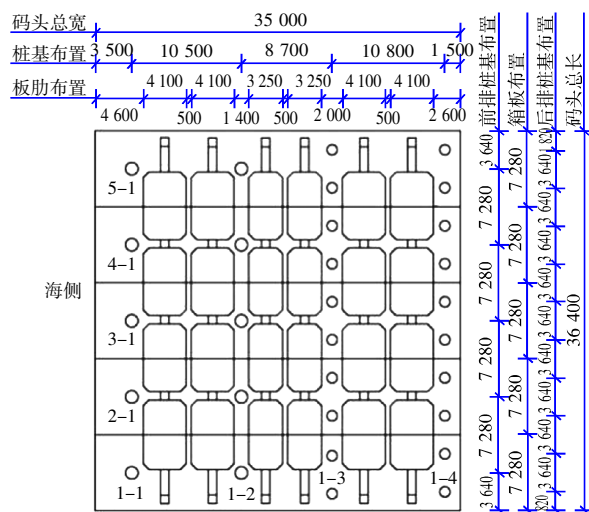


图 2 码头平面图(mm)

Fig. 2 Plan view of wharf (mm)

表 1 土层物理力学性能指标

Table 1 Physico-mechanical properties of soil layer

土层	弹性模量/ Pa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^\circ$)	黏聚力/ kPa
淤泥质粉质黏土	1×10^7	0.38	1 920	10	15
砂质板岩	1.07×10^{10}	0.23	2 550	45	49

的典型地震波记录进行地震分析,分别选择频谱特征不同的 Elcentro 波、Northridge 波和 Kobe 波作为输入地震波,纵向施加,持续时间为 15 s。根据抗震设防烈度的要求^[10],将地震波加速度峰值调整为 $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.4g$,对应的抗震设防烈度

为7度、8度、9度地震。

模型中码头结构与土体均采用 ABAQUS 中的三维实体 C3D8R 单元^[1], 预应力钢筋采用 B31 线单元, 无限元部分采用 CIN3D8 单元。对于阻尼计算, 采用黏性阻尼模型^[12-13]中的瑞利阻尼进行计算。除了土体上表面(Y 向正方向)为自由面外, 其余 5 个方向的表面作为不反射地震波的无穷远表面, 在考虑地应力平衡的条件下^[14], 最终生成有限元与无限元耦合的整体箱板式高桩码头结构模型。

2 面板动力响应分析

2.1 面板位移响应

分别调整加速度峰值为 0.1g、0.2g、0.4g 的 Elcentro 波和 0.2g 的 Northridge 波、Kobe 波作为输入地震波, 面板水平位移时程曲线分别如图 3 和图 4 所示(位移正向为向海侧方向)。

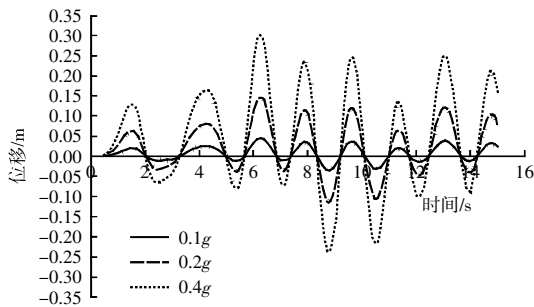


图 3 不同强度 Elcentro 波作用下码头面板水平位移时程曲线

Fig. 3 Time-history curve of horizontal displacement of panel under Elcentro waves with different strength

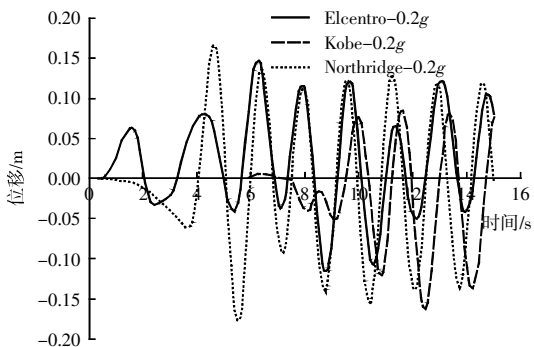


图 4 不同地震波作用下码头面板水平位移时程曲线

Fig. 4 Time-history curve of horizontal displacement of panel under different seismic waves

由图 3 可知, 面板水平位移与加速度趋势基本匹配, 结构受到向海侧加速度时位移幅值更大, 结构响应更加明显。随着地震波强度的增大, 面板的水平位移响应也逐渐增大, 残余位移就越明

显。在 0.4g(9 级)地震强度下, 码头面存在明显的向海侧偏移的情况, 位移达到最大, 结构响应强烈, 结构发生不可恢复的塑性破坏。

由图 4 可以看到, 对比 Elcentro 波和 Kobe 波, Elcentro 波作用下面板最大正向位移更大, 面板向海侧偏移更大, 而 Kobe 波作用下面板最大负向位移更大, 面板向陆侧偏移更大。在 Northridge 波作用下面板水平位移变化幅值最大, 表明面板在该地震波下响应最为剧烈。

2.2 面板加速度响应

不同强度的地震波作用下面板水平加速度时程曲线分别如图 5~图 6 所示。

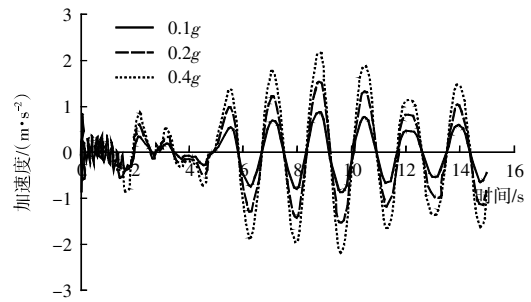


图 5 不同强度 Elcentro 波作用下码头面板水平加速度时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of horizontal acceleration of panel under Elcentro waves with different strength

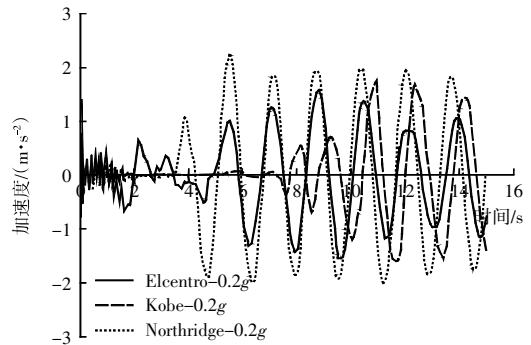


图 6 不同地震波作用下码头面板水平加速度时程曲线

Fig. 6 Time-history curve of horizontal acceleration of panel under different seismic waves

由图 5 可知, 面板水平加速度在不同地震波强度下的时程曲线表现出相似的变化规律, 随着地震波强度的增大, 水平加速度峰值也随之增大。不同强度下加速度峰值都有所衰减, 且地震波强度越大, 衰减幅度就越大, 这是因为地震波从岩石传播到面板过程中会发生能量的消耗, 面板混凝土采用的损伤模型引入了损伤参数, 结构在强震下会发生损伤劣化, 刚度降低。

由图 6 可知, 3 种地震波的水平加速度时程

曲线与各自对应的输入地震波加速度时程曲线相似,但三者在线形规律以及峰值变化上存在较大差异。Elcentro波和Kobe波的峰值加速度与其对应的输入地震波相比都有所衰减,而Northridge波却有所增强,加速度峰值呈增长趋势,这是因为Northridge波振动能量集中在0.1~0.8 Hz及2.0~2.6 Hz,并且结构本身的自振频率(0.196~0.355 Hz)恰好在这之间,使结构发生共振,响应更为剧烈。

3 桩基动力响应分析

选取结构第一榀排架的桩基作为研究对象,其编号从海侧向陆侧依次为1-1~1-4。

3.1 桩身位移响应

不同强度的地震波作用下1-1桩身各点的水平位移峰值曲线如图7所示。

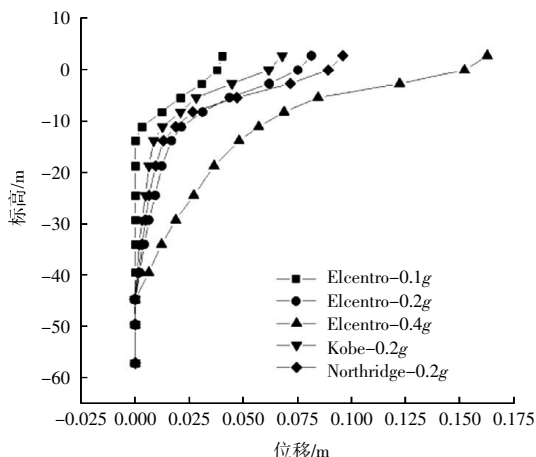


图7 不同强度地震波作用下1-1桩沿桩身的相对位移峰值

Fig. 7 Peak value of relative displacement of pile 1-1 under seismic waves with different strength

桩身各点相对桩底的水平位移峰值从桩底到桩顶逐渐增大,并在桩顶处达到峰值,这表明桩顶处易发生破坏,需在设计时加强桩顶与箱板的连接强度。同时,由于上部结构预应力筋的存在,明显减缓了桩顶部位的位移增加趋势,有效减少了桩顶位移,并且其强度与位移峰值保持较好的线性增长,说明桩顶未发生较大破坏。另一方面,当地震波强度增大时,由于桩基离开泥面后土体的嵌固作用消失,桩基缺少土体约束,桩身相对位移从泥面到桩顶处的斜率发生了较大变化,桩基向海侧位移明显增大。

在泥面以下,本应与结构响应最强烈的Northridge波作用下的桩身位移峰值略小于Elcentro波的作用,而当观察点离开土体后,由于桩基与

Northridge波的共振响应逐渐增强,桩身位移峰值快速增长。这表明频谱特性与结构自振频率接近的地震波对桩基位移的影响较大。

3.2 桩身弯矩及剪力响应

1-1~1-4号桩身在不同地震波强度下的弯矩及剪力响应峰值如表2所示。

表2 不同强度Elcentro波作用下桩顶弯矩及剪力响应峰值

Table 2 Peak value of moment and shear response of pile-head under Elcentro waves with different strength

桩基	桩顶弯矩峰值/(MN·m)			桩顶剪力峰值/kN		
	0.1g	0.2g	0.4g	0.1g	0.2g	0.4g
1-1	1.43	2.87	5.76	1.63	3.25	6.71
1-2	1.47	2.96	5.93	1.73	3.42	6.86
1-3	0.98	1.96	3.92	1.21	2.47	5.01
1-4	0.98	1.95	3.90	1.25	2.49	5.13

在同一地震烈度下,单独对比表中1-1、1-2及1-3、1-4两组桩基可知,随着桩基入土长度的增大,桩顶弯矩和剪力峰值逐渐增大;而对比桩基1-2和1-3,桩顶弯矩和剪力随着入土深度的增大反而有所降低,这是因为在同一个排架下3、4号桩基数量较1、2号桩基增加了1倍,每根桩仅承担一半的载荷,故单根桩的桩顶弯矩和剪力反而较1、2号桩有所降低。由于桩身在不同强度Elcentro波作用下弯矩响应峰值曲线类似,以强度为0.2g的Elcentro波为参考,如图8所示,除桩顶外,桩身还出现了两处弯矩峰值,分别在土层交界面以及泥面附近,这表明桩身易在土层改变处和泥面处产生较大弯矩,在抗震设计中需要重点关注。

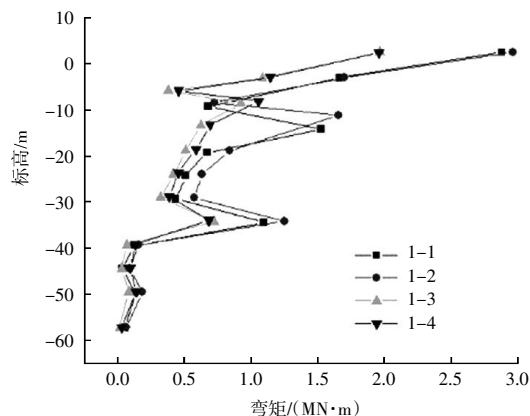
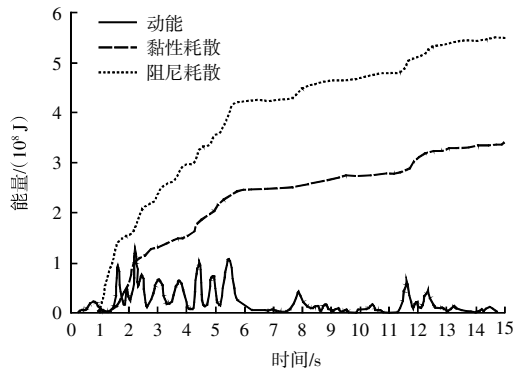


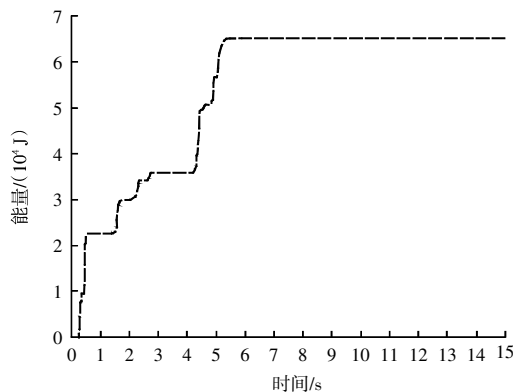
图8 0.2g的Elcentro波作用下桩身弯矩响应峰值
Fig. 8 Peak of moment response of pile under 0.2g Elcentro wave

4 系统能量耗散规律

结构在地震产生能量的输入与输出中存在不同的能量转化与耗散,主要包括结构动能,阻尼耗散,黏性耗散以及损伤耗能等。以加速度峰值为0.2g的Elcentro波为参考,各能量变化时程曲线如图9所示。



(a) 结构动能、阻尼耗散和黏性耗散时程



(b) 损伤耗能时程

图9 能量时程曲线

Fig. 9 Energy time-history curves

由图9(a)可知,系统能量耗散主要是阻尼耗散和黏性耗散,且能量耗散随着地震输入能量的增加而增加,结构动能在地震波施加前期波动较为频繁,后期趋于稳定;由图9(b)可知,损伤耗能随着时间的递增,在0.00~1.00 s、1.50~2.00 s和4.50~6.00 s期间发生了损伤耗能的骤然跳跃,表明结构此时发生了较大的裂缝破坏,瞬间释放了大量能量,属于脆性断裂耗能。这之间的耗能曲线呈阶梯状逐级上升,能量耗散为黏性耗散。

5 结语

本文采用ABAQUS软件对整体箱板式高桩码头进行地震响应分析,考虑了桩土相互作用、材料的非线性特征等,分析了结构面板、桩基在不

同强度地震波作用下的加速度、位移、弯矩响应及系统能量耗散规律,判明了结构的薄弱环节,主要结论如下:

1) 地震波频谱特性对结构的地震响应有很大影响, Northridge波的频谱与结构本身自振频率接近,结构产生共振,相比于其他两种地震波响应更加剧烈。

2) 地震波作用下桩基在土层交界面和泥面附近产生弯矩突变,并且位移在桩顶处达到最大,表明这些部位容易发生破坏,在设计中应重点考虑其抗震性能,加强结构连接强度。

3) 结构所布置的纵向预应力筋作用明显,能有效分担桩顶应力,使泥面以上桩身应力减小并在桩顶处趋于一致。另外,桩基数量对桩顶的弯矩和剪力也有较大影响,桩基数量增加,使每根桩承受的载荷减少,弯矩和剪力也随之减少。

4) 阻尼耗散了大部分地震输入的能量,且随着输入能量的增加而增加。通过损伤耗能可以确定结构发生脆性断裂破坏的时间节点。

参考文献:

- [1] 陶桂兰,王定. 水平地震作用下高桩码头结构响应谱分析[J]. 中国港湾建设, 2012, 32(1): 9-11, 47.
TAO Gui-lan, WANG Ding. Response spectrum analysis of piled structure of wharf under action of horizontal earthquake effect[J]. China Harbour Engineering, 2012, 32(1): 9-11, 47.
- [2] 付东王,李洪焯,郭兴文,等. 高桩码头结构地震响应分析[J]. 水运工程, 2011(3): 71-75.
FU Dong-wang, LI Hong-xuan, GUO Xing-wen, et al. Seismic response analysis of high-pile wharf[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(3): 71-75.
- [3] 邴晓,邱大洪,仝成才,等. 一种创新的码头结构新形式——整体箱板式高桩码头结构设计与施工技术[J]. 水利水电工程学报, 2009(4): 143-150.
BING Xiao, QIU Da-hong, TONG Cheng-cai, et al. An innovative scheme of new type wharf structure(The design and construction technique of a piled wharf with monolithic box-slab superstructure)[J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(4): 143-150.
- [4] 王文仲,何良德,杨洋,等. 箱板式高桩码头简化计算方法比较[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2013, 12(2): 216-220.
WANG Wen-zhong, HE Liang-de, YANG Yang, et al. Comparison of simplified calculation method of the box-slab high-pile wharf[J]. Journal of Jiangnan University: Natural Sciences Edition, 2013, 12(2): 216-220.
- [5] 张舰. ABAQUS在整体箱板式高桩码头三维数值模拟中的应用[J]. 水运工程, 2018(10): 77-81, 100.
ZHANG Jian. Application of ABAQUS in three-dimensional numerical simulation of piled wharf with monolithic box-slab

- superstructure[J]. Port & Waterway Engineering, 2018(10): 77–81, 100.
- [6] 王堃. 整体箱板式新型高桩码头的结构设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- WANG Kun. Structure design of the new integral box-slab high-pile wharf[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [7] 董林伟. 数值模拟中常用岩土本构模型及其参数研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
- DONG Lin-wei. Study on constitutive models and parameters of rock and soil commonly used in numerical simulation[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2011.
- [8] CORP D S S. ABAQUS user's manual version 6.14[M]. Providence, RI, USA: Dassault Systemes, 2015.
- [9] 李强, 姜萌, 王文彬. 高桩码头地震响应非线性有限元分析[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(4): 259–263.
- LI Qiang, JIANG Meng, WANG Wen-bin. Nonlinear finite element analysis of seismic response of high piled wharf[J]. China Water Transport (the second half of the month), 2015, 15(4): 259–263.
- [10] JTS 146—2012, 水运工程抗震设计规范[S].
- JTS 146—2012, Code for seismic design of water transport engineering[S].
- [11] BETTESS P. More on infinite elements[J]. International Journal for Numerical Methods, 1980, 15(11): 1 613–1 626.
- [12] CHOPRA A.K., 谢礼立. 结构动力学理论及其在地震工程中的应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- CHOPRA A.K., XIE Li-li. Structural dynamics theory and its application in earthquake engineering[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [13] 刘子涵. 桩基-重力式靠船墩的抗震特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2016.
- LIU Zi-han. Research on seismic characteristics and performance of pile-gravity breasting dolphin[D]. Nanjing: Hohai University, 2016.
- [14] 代汝林, 李忠芳, 王姣. 基于 ABAQUS 的初始地应力平衡方法研究[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 2012, 29(9): 76–81.
- DAI Ru-lin, LI Zhong-fang, WANG Jiao. Research on initial geo-stress balance method based on ABAQUS[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2012, 29(9): 76–81.

小贴士

如何编写文章题名

题名编写要点:

题名是一篇文章的总题目, 是能反映文章特定内容的恰当、简明的词语的逻辑组合。题名应能准确无误地表达文章的中心内容和重要论点, 使读者能从题名中了解到该文所要研究的核心内容和主要观点。当确有必要补充说明题名的特定内容时, 可使用副题名作进一步的具体说明。

题名编写注意事项:

- 1) 应高度概括文章中的重要内容, 避免使用含义笼统及一般化的词语。
- 2) 使用适当的词语进行恰如其分地表述, 避免使用不得体的华丽辞藻, 或过高过低的程度用语。
- 3) 用词要简洁明朗, 避免使用繁琐冗长的形容词和不必要的虚词。
- 4) 用语用词要规范严谨, 不得使用非公知公用、同行不熟悉的外来语、缩写词、符号、代号和商品名称, 不出现数学式和化学式。
- 5) 题名中尽可能不用或少用点号。
- 6) 中文题名一般不宜超过 20 个汉字, 英文题名应与中文题名含义一致, 一般以不超过 10 个实词为宜。

示例:

《大体积混凝土施工技术》。此题名明显过于泛指和笼统, 从文章内容可知, 该文实际上是讨论大体积混凝土施工过程中产生裂缝的原因和控制裂缝的措施及方法, 因此, 应将题名改为《大体积混凝土裂缝控制施工工艺》。