

基于强度折减法的框架式海堤稳定性分析

郑安兴^{1,2}, 毛 前¹

(1. 浙江水利水电学院水利与环境工程学院, 浙江 杭州 310018;
2. 浙江水利水电学院浙江省农村水利水电资源配置与调控关键技术重点实验室 浙江 杭州 310018)

摘要:以温州框架式海堤为研究对象,采用有限元强度折减法,分析密排桩排数和背水坡土方填筑高度对框架式海堤变形、稳定性的影响。结果表明:与双排密排桩情况下相比,单排密排桩情况下桩顶附近的水平位移减小,框架式海堤整体稳定安全系数有较大幅度减小;随着背水坡土方填筑高度增加,密排桩桩身水平位移不断增大,增大幅度最大位置发生在桩顶,框架式海堤整体稳定安全系数急剧降低。

关键词:框架式;海堤;变形;稳定性;土方填筑;强度折减法

中图分类号:TV33 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)02-0070-05

Stability analysis of frame seawall based on strength reduction method//ZHENG Anxing^{1,2}, MAO Qian¹ (1. School of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 2. Key Laboratory for Technology in Rural Water Management of Zhejiang Province, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Taking the frame seawall in Wenzhou as an example, the finite element strength reduction method was used to analyze the influence of dense-row piles and filling height of the downstream slope on the deformation and stability of the seawall. The results show that compared to double-row pile cases, the horizontal displacement of the piles near the top of piles in single-row pile cases decreases, the overall stability safety factor of frame seawall decreases substantially. With the increase filling height at the downstream slope, the horizontal displacement of the dense-row piles increases continuously with the maximum increase rate at the top of piles, and the overall stability safety factor of the frame seawall decreases sharply.

Key words: frame type; seawall; deformation; stability; earth fill; strength reduction method

浙江省已建海堤结构形式分为钢筋混凝土桩基框架结构、土石结构与钢筋混凝土防洪墙结构三类形式^[1]。框架式海堤能够进行规模化、现代化施工,可以缩短施工工期,当地土石用料少,占地少。框架式海堤主要由钢筋混凝土结构及桩基础构成,目前浙江沿海地区框架式海堤多见于温州市瓯江沿岸^[2]。温州地区已建成桩基框架式海堤 12 条,长 47.1 km,占温州地区一线海堤总长的 11.23%。框架式海堤是温州地区抵挡浪、台、潮侵袭的安全屏障,是人民生命财产安全、社会经济发展的生命线和保障线。因此开展框架式海堤的稳定性分析具有重大意义。

目前国内外学者提出各种海堤稳定性分析方法,积累了丰富的研究成果。例如王元战等^[3]利用

有限元强度折减法,分析了沉入式大圆筒防波堤结构的稳定性。王飞朋等^[4]通过物理模型试验,对混凝土铰链排护坡式海堤进行了稳定性研究。刘江娇等^[5]考虑海堤土体在高水位波浪作用时发生液化的情况,用 Geo-slope 软件计算土质海堤整体滑动稳定性的安全系数。朱斌等^[6]采用 GeoStudio 软件分别基于总应力及有效应力分析法,分析了围垦海堤工程施工期及竣工后稳定运行期海堤的整体稳定性随时间变化规律。沈自力等^[7]利用刚度等效原则,将薄壁筒桩海堤结构简化为二维问题,研究了不同土体弹性模量对结构内力和位移的影响。Indraratna 等^[8]通过试验研究海堤纵向沉降分布、坡脚隆起趋势及堤坝剪切破坏的发展规律。Rajesh 等^[9]采用修正拟动力法和极限平衡法研究了地震

作用下海堤的稳定性,提出了抗滑安全系数和倾覆破坏模式的表达式。这些研究大多关注传统海堤稳定性,而框架式海堤应用时间不长,堤后填土作用下,海堤框架结构与桩基础的变形研究匮乏,工程上一般借鉴港口工程中高桩码头及桩基桥台工程的相关成果。

本文以框架式海堤为研究对象,运用 ABAQUS 有限元强度折减法,分析密排桩排数和背水坡土方填筑高度对框架式海堤变形、稳定性的影响,以供同类工程参考。

1 有限元强度折减法基本原理

有限元强度折减法的基本原理是对土体的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 同时除以一个强度折减系数 F_t ,得到一组新的黏聚力 c_t 和内摩擦角 φ_t ,具体公式如下:

$$c_t = c / F_t \tag{1}$$

$$\varphi_t = \arctan(\tan\varphi / F_t) \tag{2}$$

对土体进行有限元分析,不断增加强度折减系数,直到临界破坏,此时得到的强度折减系数为安全系数^[10-11]。本文采用摩尔库伦准则作为土体的屈服准则,将有限元计算不收敛性作为岸坡失稳判据^[11]。

2 计算模型与参数

2.1 计算模型

堤塘堤线总长 5 793 m,堤顶高程 6.70 m,针对深水区段堤塘堤线相对现状岸线外移距离较大的特点,采用框架式堤塘结构。该结构海堤沿断面方向分承台段、框架段及 L 形挡墙段 3 部分。承台段宽 5 m,基础为 $\varnothing$ 800 管桩,承台顶高程为 6.70 m。框架段为高桩梁板结构,基础为预应力方桩,桩基为摩擦端承桩。L 形挡墙段沿岸边布置,基础为二排 $\varnothing$ 800 钻孔灌注桩,构成密排灌注桩墙。钻孔灌注桩为摩擦端承桩,底部持力层为砂卵石层;密排灌注桩长为 35.76 m。模型横断面方向宽 116.2 m,土层从细沙夹淤泥到卵石总厚度 75.3 m。建立桩基-土体-海堤结构整体有限元模型,桩-土接触采用摩尔-库伦摩擦罚函数形式,框架式海堤整体有限元计算模型见图 1。

整体模型有限元网格划分如图 2 所示,模型中所有实体单元均采用平面应变四节点单元,有限元模型共有 8 732 个单元,9 012 个节点。模型的左、右边界均施加法向约束,底部边界给予固定约束,顶面为自由边界。

2.2 本构模型与材料参数

L 形挡土墙、桩体、框架结构为 C30 混凝土浇筑,视为各向同性弹性体,混凝土材料参数如下:密度 $\rho =$

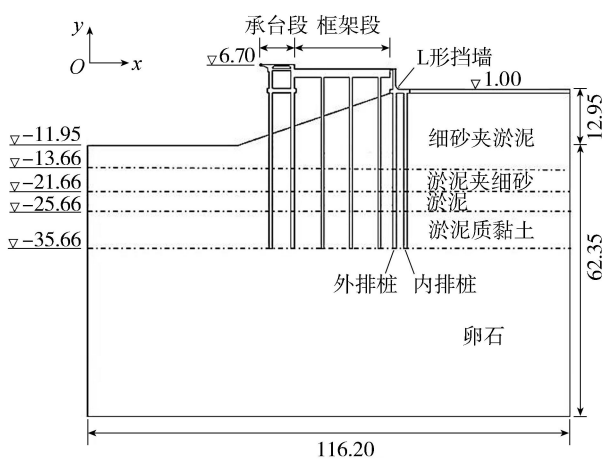


图 1 框架式海堤整体有限元计算模型(单位:m)

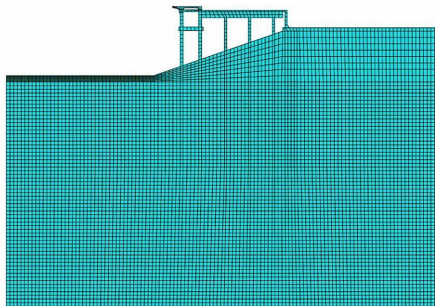


图 2 框架式海堤整体有限元网格划分

2 500 kg/m³,弹性模量 $E=30$ GPa,泊松比 $\nu=0.2$ 。

地基土采用塑性摩尔库伦本构模型。根据土工试验测得各层土的物理力学性质指标如表 1 所示。

表 1 土层物理力学指标

土的类型	土层底 高程/m	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/MPa	内摩擦角/ (°)	泊松 比	黏聚力/ kPa
细砂夹淤泥	-13.66	1 660	16.0	16.9	0.35	5.0
淤泥夹细砂	-21.66	1 670	13.5	15.4	0.35	9.4
淤泥	-25.66	1 600	11.0	14.7	0.35	7.3
淤泥质黏土	-35.66	1 680	13.5	14.3	0.35	10.5
卵石	-71.42	2 200	150.0	36.0	0.35	0

2.3 施工工况

共考虑了 4 个施工工况,工况 1:岸坡土体初始地应力平衡;工况 2:灌注桩开挖施工(考虑岸坡开挖卸载);工况 3:框架结构施工(考虑岸坡自重及框架结构自重荷载);工况 4:背水坡土方填筑(考虑填筑土体自重荷载)。

3 数值计算结果与分析

为分析密排桩排数对框架式海堤变形、稳定性的影响,根据实际施工顺序,数值计算考虑工况 1、工况 2 和工况 3。为分析背水坡土方填筑对框架式海堤稳定性的影响,数值计算考虑工况 1、工况 2、工况 3 和工况 4。

图 3 为双排密排桩情况下桩身位置的水平位移曲线,可以看出,外排桩与内排桩的水平位移曲线基

本相似,最大水平位移发生在桩顶,随着桩身深度增加,桩身水平位移不断减小。

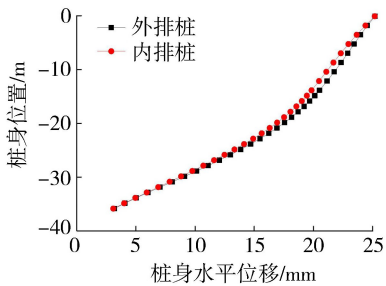


图3 双排密排桩桩身水平位移曲线

图4 为外排桩桩身位置的水平位移曲线,可以看出,单排密排桩与双排密排桩情况的桩身水平位移曲线基本相似,最大水平位移发生在桩顶,随着桩身深度增加,桩身水平位移不断减小。与双排情况下相比,单排密排桩情况下桩顶附近的水平位移减小。

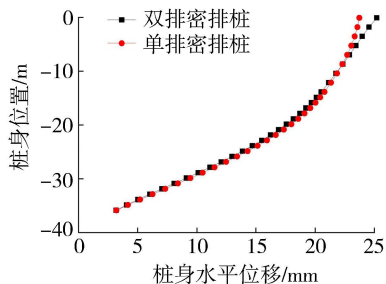


图4 外排桩桩身水平位移曲线

图5 为框架式海堤竖直位移云图,计算得到的堤身位移观测点(堤顶最左端)竖直位移为7 mm,而相位移观测点处实际监测的竖直位移范围为0~12 mm,计算结果与监测结果相符合。

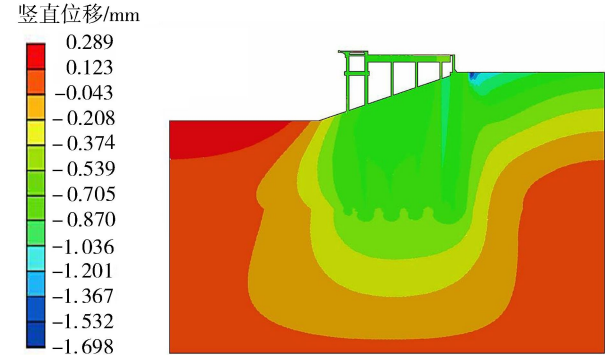


图5 框架式海堤竖直位移云图

框架式海塘整体稳定性采用有限元强度折减法进行计算,其中强度折减系数的初始值设为0.5,终止值设为3。由于土体强度折减后的摩擦角并不是一个线性变化量,这里采用分段线性模拟的方法,取场变量增量步为0.25。

双排密排桩情况下岸坡土体强度折减分析步为0.7124时计算终止,迭代计算无法收敛,此时土体已完全失稳,安全系数为2.281。图6 为计算得到

的框架式海塘滑动面位置,框架式海塘及岸坡呈圆弧整体滑动,滑动面经过岸坡坡脚、桩身底部及挡土墙后方等区域。

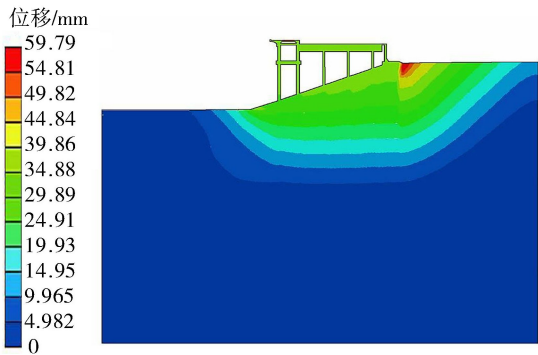


图6 框架式海堤失稳时滑动面位置

单排密排桩情况下岸坡土体强度折减分析步为0.3806时计算终止,迭代计算无法收敛,此时土体已完全失稳,安全系数为1.452,与双排情况下相比,单排密排桩情况下框架式海塘整体稳定安全系数有较大幅度减小。

为探讨背水坡土方填筑高度对框架式海堤稳定性的影响,考虑双排密排桩情况下,取背水坡土方填筑高度 $h=1.6\text{ m}$ 、 3.2 m 、 4.7 m 和 5.7 m ,计算得到不同背水坡土方填筑高度下框架式海堤水平位移云图如图7所示。从图7可以看出,随着背水坡土方填筑高度增加,框架式海堤及其所在区域浅部土体侧向变形增大。

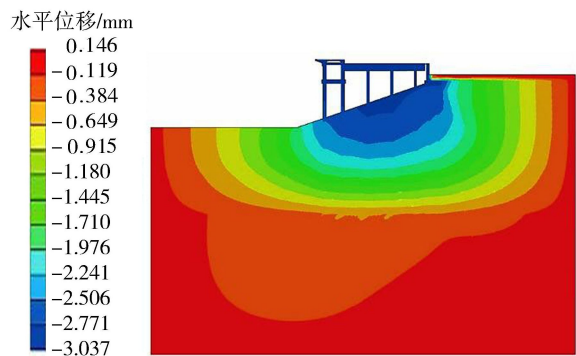
图8 为不同土方填筑高度情况下外排桩与内排桩桩身水平位移曲线。由图8可知,不同土方填筑高度情况下的外排桩与内排桩水平位移曲线很相似,最大水平位移都发生在桩顶,随着桩身深度增加,桩身水平位移不断减小。随着背水坡土方填筑高度增加,密排桩桩身水平位移不断增大,增大幅度最大位置发生在桩顶。

图9 为背水坡土方填筑与框架式海堤整体稳定安全系数的关系曲线。从图9可以看出,背水坡土方填筑对海堤整体稳定性有较大影响,随着背水坡土方填筑高度增加,框架式海堤整体稳定安全系数急剧降低,当背水坡土方填筑高度为 5.7 m 时,框架式海堤出现整体失稳。建议对背水坡实填区进行加固后,采用分级加高的方法,避免对框架结构以及海堤整体稳定产生较大影响。

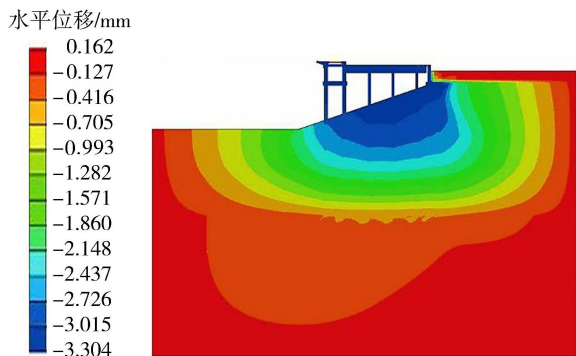
4 结 论

a. 与双排密排桩情况下相比,单排密排桩情况下桩顶附近的水平位移减小,且框架式海塘整体稳定安全系数有较大幅度减小。

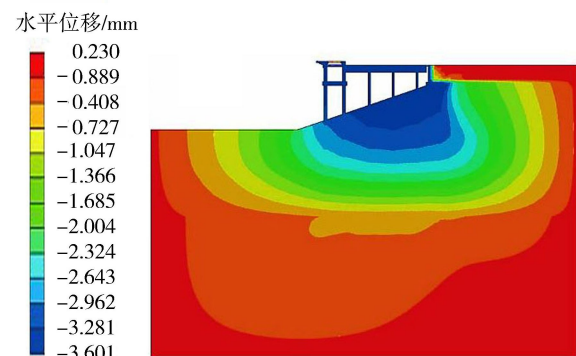
b. 随着背水坡土方填筑高度增加,框架式海堤



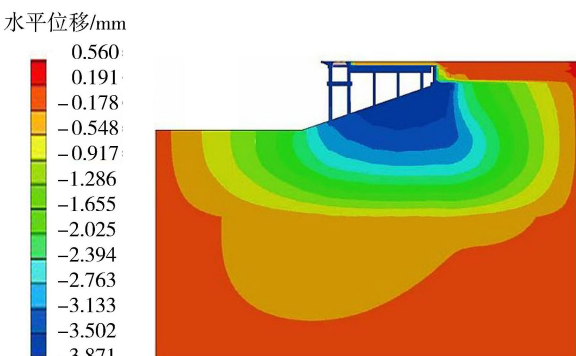
(a) $h = 1.6 \text{ m}$



(b) $h = 3.2 \text{ m}$



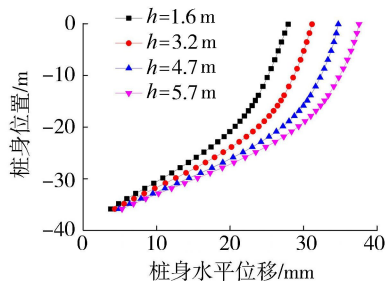
(c) $h = 4.7 \text{ m}$



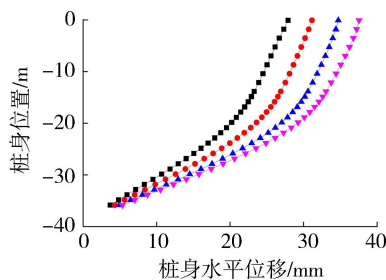
(d) $h = 5.7 \text{ m}$

图7 不同土方填筑高度情况下框架式海堤水平位移云图及其所在区域浅部土体侧向变形增大,密排桩桩身水平位移不断增大,水平位移增大幅度最大位置发生在桩顶,框架式海堤整体稳定安全系数急剧降低。

c. 背水坡土方填筑对密排桩桩身水平位移及海塘整体稳定性影响很大,而沿线的下卧层又为淤泥层,建议对背水坡实填区进行加固后,采用分级加高的方法,避免对框架结构以及海堤整体稳定产生



(a) 外排桩



(b) 内排桩

图8 不同土方填筑高度情况下桩身水平位移曲线

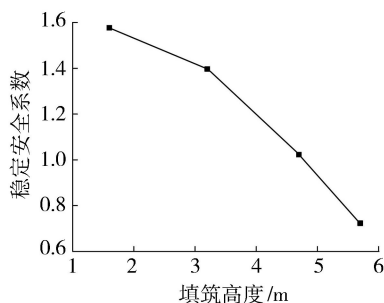


图9 背水坡土方填筑对海堤整体稳定性的影响

较大影响。

致谢:本研究得到“温州市鹿城区瓯江沿岸框架式海塘结构性状研究”项目支持,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 胡晓明,詹敏杰. 填土作用下桩基框架结构堤防原位观测和数值模拟[J]. 土工基础,2017,31(5):623-627. (HU Xiaoming, ZHAN Minjie. Field observation and numerical simulation of the embankment with pile supported frame structures under backfill loads[J]. Soil Engineering and Foundation,2017,31(5): 623-627. (in Chinese))
- [2] 郑国兵,黄朝煊,袁文喜,等. 深厚淤泥中双排钢板桩结构安全稳定性研究[J]. 水利水电科技进展,2020,40(4):71-76. (ZHENG Guobing, HUANG Chaoxuan, YUAN Wenxi, et al. Research of safety and stability of double-row steel sheet pile structure in deep silt[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(4):71-76. (in Chinese))
- [3] 王元战,蔡雅慧. 沉入式大圆筒防波堤稳定性分析的有限元强度折减法[J]. 交通科学与工程,2012,28(3):47-53. (WANG Yuanzhan, CAI Yahui. Stability analysis of the embedded large cylinder breakwater by strength

- reduction FEM [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2012, 28(3): 47-53. (in Chinese))
 - [4] 王飞朋, 邵宇阳, 吕博, 等. 混凝土铰链排护坡式海堤排体稳定性试验研究[J]. 水运工程, 2017(3): 58-64. (WANG Feipeng, SHAO Yuyang, LYU Bo, et al. Experimental study on stability of the mattress of seawall with hinged concrete slab mattress revetment [J]. Port & Waterway Engineering, 2017(3): 58-64. (in Chinese))
 - [5] 刘江娇, 郑建国, 王奎峰, 等. 强浪作用下土体液化的土质海堤稳定性分析[J]. 水运工程, 2016(7): 128-133. (LIU Jiangjiao, ZHENG Jianguo, WANG Kuifeng, et al. Stability of soil seawall suffering soil liquefaction under action of strong wave [J]. Port & Waterway Engineering, 2016(7): 128-133. (in Chinese))
 - [6] 朱斌, 冯凌云, 柴能斌, 等. 软土地基上海堤变形与失稳的离心模型试验与数值分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(11): 3317-3323. (ZHU Bin, FENG Lingyun, CHAI Nengbin, et al. Centrifugal model test and numerical analysis of deformation and stability of seawall on soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(11): 3317-3323. (in Chinese))
 - [7] 沈自力, 刘卫未. 地基土弹性模量对薄壁筒桩海堤结构的影响分析[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 77-80. (SHEN Zili, LIU Weiwei. Effect of elastic modulus of foundation soil on seawalls with thin-walled tubular piles [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(2): 77-80. (in Chinese))
 - [8] INDRARATNA B, BALASUBRAMANIAM A S, BALACHANDRAN S. Performance of test embankment constructed to failure on soft marine clay [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(1): 12-33.
 - [9] RAJESH B G, CHOUDHURY D. Stability of seawalls using modified pseudo-dynamic method under earthquake conditions [J]. Applied Ocean Research, 2017, 65(4): 154-165.
 - [10] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381-3388. (ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381-3388. (in Chinese))
 - [11] 周桂云. 基于强度折减的边坡稳定安全系数有限元迭代解法[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3): 58-61. (ZHOU Guiyun. Finite element iteration method for safety factor of slope stability based on strength reduction method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(3): 58-61. (in Chinese))
 - [12] 赵尚毅, 郑颖人, 时卫民, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 343-346. (ZHAO Shangyi, ZHENG Yingren, SHI Weimin, et al. Analysis on safety factor of slope by strength reduction FEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(3): 343-346. (in Chinese))
(收稿日期: 2020-03-24 编辑: 雷燕)
- +++++
- (上接第 41 页)
- [12] 张超然, 牛志攀. 向家坝水电站泄洪消能关键技术研究与实践[J]. 水利水电技术, 2014, 45(11): 1-9. (ZHANG Chaoran, NIU Zhipan. Key technology research on flood discharge and energy dissipation of Xiangjiaba Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(11): 1-9. (in Chinese))
 - [13] WANG Xin, HU Ya'an, LUO Shaoze, et al. Prototype observation and influencing factors of environmental vibration induced by flood discharge [J]. Water Science and Engineering, 2017, 10(1): 78-85.
 - [14] 李淑君, 练继建, 欧阳秋平. 高坝泄流诱发坝区及场地振动的振源分析研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(9): 47-51. (LI Shujun, LIAN Jijian, OUYANG Qiuping. Study on source of high dam discharge-induced vibration in dam region and site [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(9): 47-51. (in Chinese))
 - [15] 张龔, 练继建, 刘昉, 等. 基于模型试验的高坝泄洪诱发场地振动影响因素研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(16): 30-37. (ZHANG Yan, LIAN Jijian, LIU Fang, et al. Influencing factors of the ground vibration induced by flood discharge of high dams based on model experiments [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(16): 30-37. (in Chinese))
 - [16] 张龔, 练继建, 李松辉, 等. 高坝泄洪诱发场地振动传播问题的有限元-无限元耦合分析[J]. 振动与冲击, 2018, 37(15): 14-26. (ZHANG Yan, LIAN Jijian, LI Songhui, et al. Analysis of ground vibration propagation problems induced by high dam flood discharge using finite-infinite element coupled method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15): 14-26. (in Chinese))
 - [17] DEEKS A J, RANDOLPH M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(1): 25-42.
 - [18] 尹刚, 赵兰浩, 李同春. 考虑成层地基的黏弹性人工边界模型[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(3): 87-94. (YIN Gang, ZHAO Lanhao, LI Tongchun. Viscoelastic artificial boundary model considering layered foundation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(3): 87-94. (in Chinese))
 - [19] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准: GB 10070—88[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
(收稿日期: 2020-04-13 编辑: 雷燕)