



# 衡重式板桩结构在码头中的应用

扈世龙

(广西交科集团有限公司, 广西 南宁 530007)

**摘要:** 分别建立无锚式、单锚式和衡重式板桩码头有限元概化模型, 并以某10万吨级板桩码头为原型, 进行数值分析。结果表明: 衡重式板桩的最大水平位移值分别为无锚式板桩的1/13和单锚式板桩的1/2; 无锚式板桩入土段土压力分布突变明显, 单锚式板桩入土面以上墙后土压力分布突变明显, 衡重式板桩墙后和墙前土压力分布均较平顺; 无锚式和单锚式板桩弯矩、剪力分布均出现多次反转, 尤以无锚式板桩最明显, 衡重式板桩除在衡重台位置出现弯矩突变外, 其他位置弯矩、剪力分布均较平顺; 工程案例中衡重式板桩桩身水平位移和弯矩属于正常范围, 同时衡重式结构不需设置锚碇系统、后排灌注桩等组合结构, 具有场地适应性强、施工简单和建设成本低等诸多优势, 在板桩码头中具有较强的应用价值。

**关键词:** 水工结构; 衡重式板桩; 数值模拟; 有限元; 板桩码头

中图分类号: U 656.1+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0110-06

## Application of counterweight sheet-pile structure in wharf

HU Shi-long

(Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning 530007, China)

**Abstract:** The generalized finite element models of anchorless, single-anchored, and counterweight sheet-pile wharves are built separately, and a 100,000-ton sheet-pile wharf is used as a prototype for numerical analysis. The results indicate that the maximum horizontal displacement of the counterweight sheet pile is 1/13 of the anchorless sheet pile and 1/2 of the single-anchored sheet pile. The soil pressure distribution of the anchorless sheet pile sees a sudden change in the soil entry section, and that of the single-anchored sheet pile encounters the same behind the wall above the soil surface, while that of the counterweight sheet pile is relatively smooth behind the wall and in front of the wall. For anchorless and single-anchored sheet piles, the distributions of bending moment and shear force are reversed many times, especially for the anchorless sheet pile, while in the case of the counterweight sheet pile, except for the sudden change in bending moment at the counterweight table, the distributions of bending moment and shear force in other positions are relatively smooth. In the case analysis of the project, the horizontal displacement and bending moment of the counterweight sheet pile are within the normal range. Moreover, the counterweight structure does not require the setup of the combined structure such as the anchor system and the rear cast-in-place pile, featuring many advantages such as strong site adaptability, simple construction, and low construction costs. It has strong application value in sheet-pile wharves.

**Keywords:** hydraulic structure; counterweight sheet pile; numerical simulation; finite element; sheet-pile wharf

板桩码头结构简单、工程造价低, 是码头常规的三大结构形式之一。但由于受板桩断面难以满足大型码头急剧增大弯矩的限制, 与其他两大

常规码头结构形式相比, 板桩码头一般只能用于中小型码头的建设。随着码头逐渐向深水化、大型化方向发展, 码头相关建设人员从未停止对大

收稿日期: 2022-02-13

作者简介: 扈世龙(1989—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程结构检测、评估、加固、设计与咨询。

型化板桩码头建设的探索, 如刘永秀等<sup>[1-4]</sup>推出了新型的遮帘式、半遮帘式板桩码头结构, 并对此类码头的工作机制、计算理论和方法等进行探讨, 成功将板桩码头的应用提高到 10 万吨级, 此类码头主要通过板桩墙后方设置遮帘桩或半遮帘桩的方式减少土压力对前方板桩墙的作用, 从而使板桩断面深水化、大吨级得以实现; 蔡正银等<sup>[5-6]</sup>、王琰等<sup>[7]</sup>通过对卸荷式板桩码头的工作机制、力学性能、变形特性等进行研究, 成功将板桩码头的应用进一步提高到 20 万吨级, 此类码头在传统的板桩码头基础上, 通过在前方板桩墙后方设置桩基卸荷承台的方式减少土压力对前方板桩墙的影响, 从而达到对前方板桩墙的卸荷作用; 胡荣华<sup>[8]</sup>、刘国楠等<sup>[9-10]</sup>、张明等<sup>[11]</sup>在工程实践中提出一种带有衡重台的板桩墙结构——衡重式板桩, 并通过理论分析、模型试验和数值分析等手段对此类结构的工作机制、受力变形特性和理论计算方法等进行系统研究, 成功将此类结构应用于高陡边坡的治理, 此类结构通过在常规板桩后方设置刚性连接承重台的方式, 达到减少墙后土压力、削弱墙身弯矩和整体改善结构受力的目的, 与传统的板桩挡墙结构相比具有建设成本较低、施工简单、对周边环境影响小等特点, 具有较强的推广价值。

本文通过建立无锚式、单锚式和衡重式板桩码头有限元概化模型, 对比分析 3 种结构板桩桩身的变形特性、土压力分布和内力分布特点, 并通过衡重式板桩码头工程案例分析, 探究衡重式板桩结构在码头中的应用价值。

## 1 有限元模型概况

通过有限元软件 ANSYS 进行数值计算, 分别建立无锚式板桩、单锚式板桩和衡重式板桩 3 种码头的二维概化模型, 假定除板桩结构外 3 种模型的其他各项计算参数均一致。

模型板桩墙体厚度 1.0 m, 板桩深 13.0 m, 入土深度 5.0 m, 墙后回填层简化为厚 8.0 m 的细

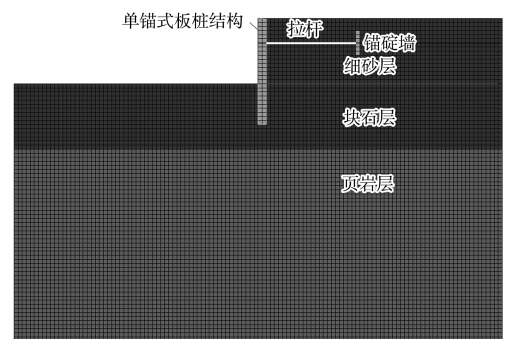
砂层, 回填层下部简化为厚 8.0 m 的块石层, 块石层下部简化为厚 24.0 m 的页岩层。单锚式板桩模型拉杆直径 60 mm、长度 12.0 m, 水平位置距码头顶面 3.0 m; 锚碇墙高度 3.0 m、厚度 0.5 m, 墙顶距码头顶面 1.5 m。衡重式板桩模型衡重台(卸荷板)悬臂长度 3.0 m、厚度 1.0 m, 距码头顶面 3.0 m。模型计算范围 60 m×40 m(长×宽), 左右侧边界的  $y$  向位移自由,  $x$  向位移约束, 下部边界  $x$  和  $y$  向位移全约束, 码头顶面均布荷载 20 kPa。模型平面采用 plane82 单元, 结构与土体面面接触对采用 target169 和 conta172 单元, 拉杆采用 link1 单元。墙后回填土层采用 D-P 屈服准则, 黏聚力为 0 kPa, 摩擦角为 30°, 膨胀角为 15°, 模型其他材料参数见表 1, 建立的 3 种概化模型见图 1。

表 1 材料参数

| 材料      | 弹性模量/GPa | 泊松比   | 密度/(t·m <sup>-3</sup> ) |
|---------|----------|-------|-------------------------|
| 钢筋混凝土结构 | 30       | 0.167 | 2.5                     |
| 回填细砂    | 0.015    | 0.300 | 1.8                     |
| 块石      | 0.180    | 0.250 | 2.0                     |
| 页岩      | 22       | 0.173 | 2.5                     |



a) 无锚式板桩



b) 单锚式板桩

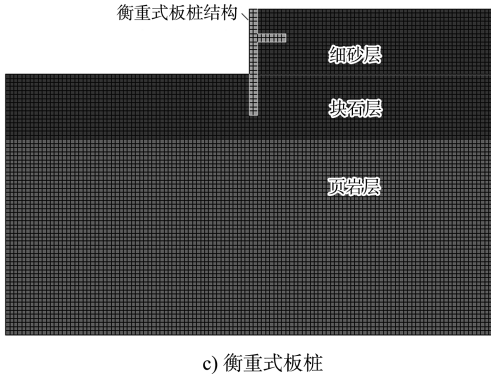


图1 3种板桩码头概化模型

## 2 数值计算结果分析

### 2.1 变形特性对比分析

无锚式、单锚式和衡重式板桩码头结构变形见图2。可以看出，板桩码头结构变形以水平位移为主，故本文主要分析水平位移：1) 无锚式和单锚式板桩水平位移沿桩身自下往上整体近似线性增大，桩身水平位移最大值分别为 39.0 和 9.9 mm，前者约为后者的 4 倍；2) 衡重式板桩桩身水平位移自下往上整体相差不大，其中最大水平位移出现在衡重台及以下区域，最大值为 5.3 mm。

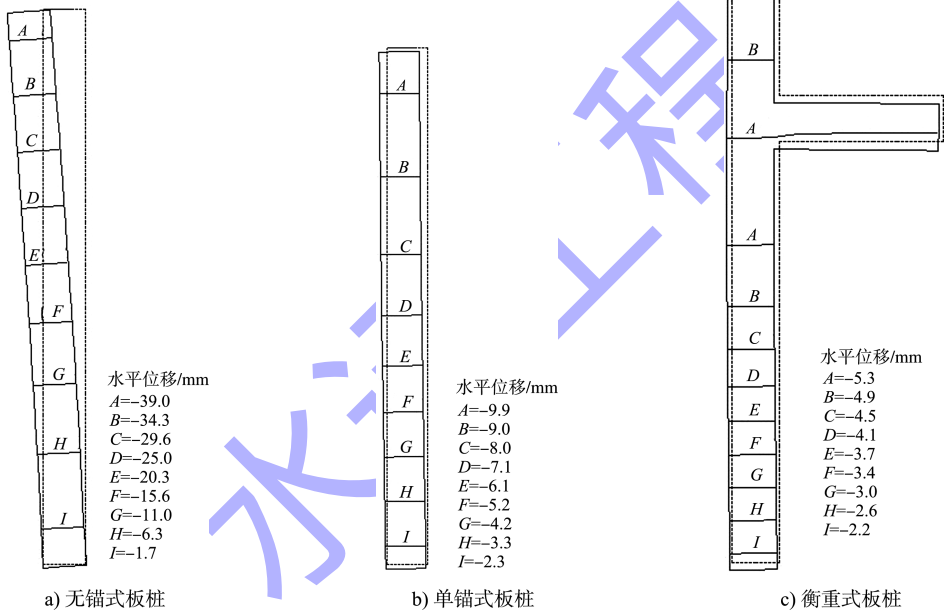


图2 3种板桩码头结构变形

从3种结构形式整体的变形特性对比可以看出，无锚式、单锚式板桩的变形特点和衡重式板桩存在区别，前两者的最大水平位移值出现在板桩顶端，且单锚式板桩由于锚碇系统的抗力作用桩身水平位移明显小于无锚式板桩，衡重式板桩由于衡重台的影响最大水平位移值出现在桩身衡重台附近，且最大值分别为无锚式结构的1/13和单锚式结构的1/2，说明相同条件下衡重式板桩结构水平位移更小，适应变形的能力更强。

### 2.2 土压力分布对比分析

无锚式、单锚式和衡重式板桩墙前、墙后土压力分布对比见图3。

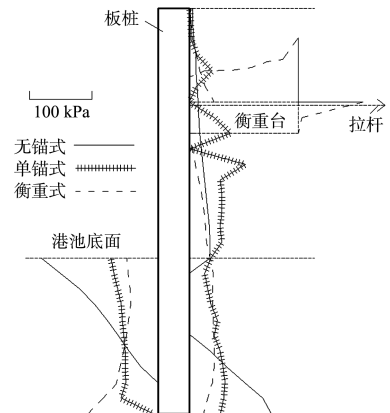


图3 3种板桩墙前、墙后土压力分布对比

可以看出：1) 无锚式板桩在入土面以上的墙后土压力近似线性分布，呈现出明显的主动土压力分布特点；入土面以下的墙后土压力分布从上

往下出现突变, 先出现土压力分布零区, 后土压力增长较快, 从上往下呈近似正三角形分布; 与之对应, 墙前土压力从上往下呈近似倒三角形分布, 最后在墙底段出现土压力分布零区, 与整体的变形相协调, 入土段板桩墙后下端和墙前上端呈现出明显的被动土压力分布特点。

2) 单锚式板桩入土面以上受锚碇系统抗力作用的影响, 墙后土压力分布出现多处突变; 入土段墙前和墙后土压力分布均较平顺, 与整体变形相协调, 入土段板墙墙后下端和墙前上端呈现出轻微的被动土压力分布特点。

3) 衡重式板桩墙后土压力分布以衡重台为分界, 上墙墙后土压力近似线性分布, 分布值大于无锚式板桩, 下墙墙后由于衡重台(卸荷板)的卸

荷作用, 墙后土压力同样呈现出从零开始的近似线性分布特点, 并一直延伸至入土面以下; 入土段墙前和墙后土压力分布均较平顺, 与整体的变形相协调, 入土段板桩墙后上端和墙前下端呈现出轻微的被动土压力分布特点。

从 3 种结构形式土压力分布特点对比可以看出, 无锚式板桩入土段桩身土压力分布突变较明显, 单锚式板桩入土面以上墙后土压力分布突变较明显, 而衡重式板桩墙后和墙前土压力整体分布均较平顺。衡重台(卸荷板)此种墙后土压力分布形成机制详见文献[12], 本文不再赘述。

### 2.3 内力分布对比分析

无锚式、单锚式和衡重式板桩桩身弯矩、剪力分布对比见图 4。

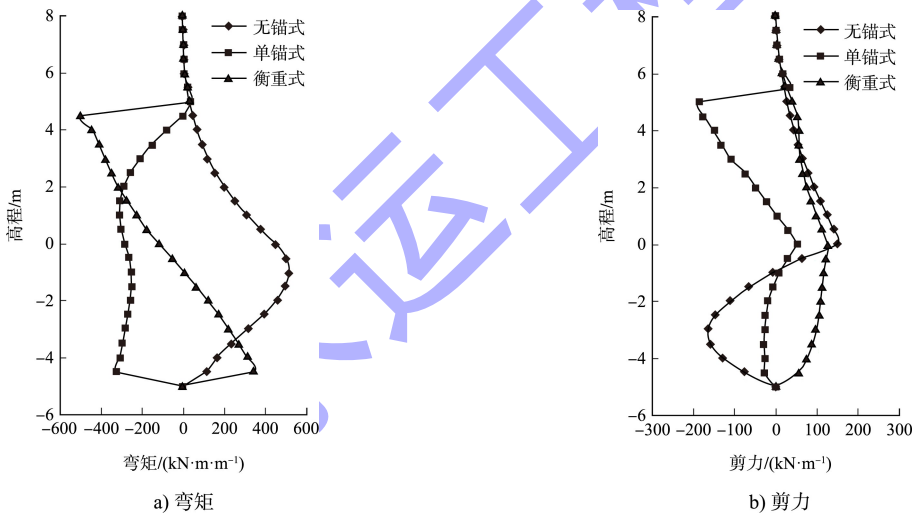


图 4 3 种板桩桩身弯矩、剪力分布对比

可以看出: 1) 无锚式板桩在入土面以下 1 m 左右桩身弯矩达到峰值, 出现反弯点, 最大弯矩值为 519.9 kN·m/m, 桩身整体后侧受拉; 桩身剪力从上往下出现 2 次转点, 第 1 次转点发生在入土面, 剪力峰值为 149.7 kN/m; 第 2 次转点发生在入土面以下 3 m 左右的位置, 剪力峰值为 163.4 kN/m。

2) 单锚式板桩桩身弯矩从上往下出现 3 次转点, 第 1 次发生在拉杆位置, 第 2 次发生在入土面以上 1.5 m 左右, 第 3 次发生在入土面以下 1 m 左右, 最大弯矩出现在桩底为 329.3 kN·m/m, 拉杆以上桩身后侧受拉, 拉杆以下桩身前侧受拉; 桩身剪力在拉杆位置出现突变, 又在入土面出现

反转, 最大剪力出现在拉杆位置为 184.3 kN/m。

3) 衡重式板桩在衡重台位置发生桩身弯矩突变, 衡重台以上、以下桩身弯矩均分布较平顺, 未见明显转点, 最大弯矩发生在衡重台处为 493.8 kN·m/m, 衡重台以上、入土面以下 1 m 左右以下桩身后侧受拉, 衡重台以下至入土面以下 1 m 左右桩身前侧受拉; 剪力沿桩身从上往下整体分布较平顺, 仅在入土面处出现轻微反转, 最大剪力出现在入土面为 127.9 kN/m。

从 3 种结构形式桩身弯矩、剪力分布特点对比可以看出, 无锚式和单锚式板桩桩身弯矩、剪力分布均出现多次反转, 尤以无锚式板桩最明

显，而衡重式板桩桩身除在衡重台位置出现弯矩突变外，其他位置桩身弯矩、剪力分布均较平顺，其中最大弯矩值分别为无锚式和单锚式的95%和150%，而最大剪力值分别为两者的78%和69%。衡重式板桩在衡重台(卸荷板)位置由于刚性连接衡重台的存在会集中形成较大的弯矩突变，应引起足够重视。文献[9]和[10]通过在衡重台下方设置刚性支撑杆的形式解决，取得较理想的效果。

### 3 工程案例析

本文以某港区10万吨级深水泊位分离卸荷式板桩码头为原型<sup>[13]</sup>，码头前墙结构尺寸、港区土层等各项参数不变，采用衡重式板桩结构替代分离卸荷式板桩结构建立有限元数值模型进行分析。原型码头前墙采用地下连续墙，前墙厚1.05 m，墙底高程为-30.0 m，码头顶面高程为4.0 m，码头前沿泥面高程-15.5 m；码头前沿21.5 m范围内30 kPa均布荷载，码头后方堆场范围内80 kPa均布荷载；港区土层各项参数及数值模型采用的各项材料参数见文献[13]，本文计算模型除衡重台(卸荷板)悬臂长度因结构自身特点采用4.5 m外，其他各项模型参数与文献[13]相同。衡重式与文献[13]中分离卸荷式板桩在码头顶面无均载和有均载两种工况下桩身水平位移和弯矩分布对比见图5。

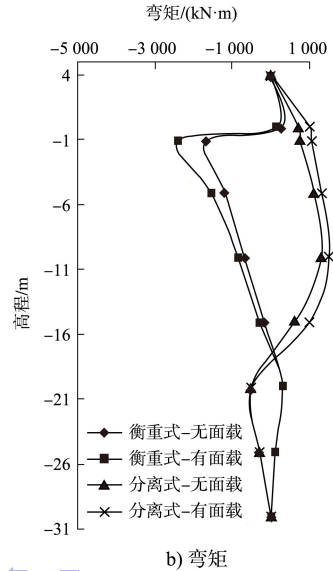
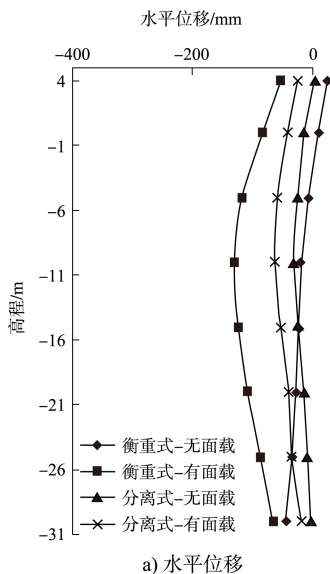


图5 衡重式和分离卸荷式板桩桩身水平位移和弯矩分布对比

可以看出，分离卸荷式板桩无面载和有面载两种工况水平位移最大值分别为30和61 mm，后者与前者相比增幅约为103%，而衡重式板桩无面载和有面载两种工况水平位移最大值分别为43和128 mm，后者与前者相比增幅约为198%，说明同等条件下衡重式与分离卸荷式相比板桩桩身水平位移有较明显的增大，但衡重式板桩最大水平位移值为板桩墙高度的0.37%，仍小于通常认为的最大水平位移应小于板桩墙高度的0.5%，表明此时板桩墙的水平位移值属于正常范围；分离卸荷式板桩无面载和有面载两种工况最大弯矩值分别为1 300和1 500 kN·m/m，主要表现为桩在陆侧受拉，而衡重式板桩由于衡重台(卸荷板)存在的弯矩突变，无面载和有面载两种工况最大弯矩值分别为1 723和2 414 kN·m/m，主要表现为桩在海侧受拉，与分离卸荷式板桩相比最大弯矩值均有明显增大。

### 4 结论

- 1) 无锚式和单锚式板桩水平位移沿桩身自下往上整体近似线性增大，衡重式板桩水平位移峰值出现在衡重台附近，最大水平位移值衡重式板桩分别为无锚式板桩的1/13和单锚式板桩的1/2。
- 2) 无锚式板桩入土段桩身土压力分布突变较

明显, 单锚式板桩入土面以上墙后土压力分布突变较明显, 而衡重式板桩墙后和墙前土压力整体分布均较平顺。

3) 无锚式和单锚式板桩桩身弯矩、剪力分布均出现多次的反转, 尤以无锚式板桩最明显, 而衡重式板桩桩身除在衡重台位置出现弯矩突变外, 其他位置桩身弯矩、剪力分布均较平顺。

4) 与同等条件下的分离卸荷式板桩相比, 衡重式板桩虽然桩身水平位移和弯矩均较大, 但是仍属于正常范围, 同时衡重式板桩结构不需设置锚碇系统和后排灌注桩等组合结构, 具有场地适应性强、施工简单和建设成本低等诸多优势, 在板桩码头深水化、大型化的建设中具有较强的应用价值。实际应用过程中还可对衡重式板桩结构进行优化或设置必要的组合结构, 减少墙后的土压力作用, 改善板桩桩身受力, 进一步提高衡重式板桩结构在码头中的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 刘永绣, 吴荔丹, 李元音. 一种新型码头结构型式: 半遮帘式深水板桩码头结构的推出[J]. 港工技术, 2005(S1): 16-19.
- [2] 刘永绣. 板桩码头向深水化发展的方案构思和实践: 遮帘式板桩码头新结构的开发[J]. 港工技术, 2005(S1):

12-15.

- [3] 刘永绣, 吴荔丹. 遮帘式板桩码头计算理论和方法[J]. 港工技术, 2005(S1): 33-36.
- [4] 刘永绣, 吴荔丹, 徐光明, 等. 遮帘式板桩码头工作机理[J]. 水利水运工程学报, 2006(2): 8-12.
- [5] 蔡正银, 侯伟, 周健, 等. 20 万吨级卸荷式板桩码头数值分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 218-224.
- [6] 蔡正银, 侯伟, 关云飞, 等. 分离卸荷式板桩码头的工作机理[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2133-2139.
- [7] 王琰, 谭慧明, 焦志斌. 分离卸荷式板桩码头中桩基-卸荷承台结构的卸荷机理研究[J]. 水道港口, 2017, 38(1): 72-79.
- [8] 胡荣华. 衡重式桩板挡墙受力特性及破坏机理的研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2011.
- [9] 刘国楠, 胡荣华, 潘效鸿, 等. 衡重式桩板挡墙受力特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 103-110.
- [10] 刘国楠, 胡荣华, 潘效鸿, 等. 衡重式桩板挡墙上墙土压力模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 94-99.
- [11] 张明, 胡荣华, 刘国楠, 等. 基于离心试验的衡重式桩板挡墙受力特性研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(10): 145-152.
- [12] 扈世龙, 张建球. 重力式码头卸荷板工作机理有限元分析[J]. 水运工程, 2020(10): 76-81, 86.
- [13] 龚丽飞. 分离式卸荷板地下连续墙板桩码头结构和土相互作用的研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007.

(本文编辑 王璁)

(上接第 103 页)

#### 参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] 张炜煌. 超深基槽重力式码头结构选型与设计关键技术[J]. 水运工程, 2014(4): 52-56.
- [3] 郭林林, 别社安, 寇军, 等. 重力式码头抛石基床压缩特性和变形参数试验研究[J]. 水利学报, 2019, 50(4): 524-533.
- [4] JIANG N, GAO T, ZHOU C B, et al. Effect of excavation blasting vibration on adjacent buried gas pipeline in a metro tunnel[J]. Tunnelling and underground space technology, 2018, 81: 590-601.

- [5] JIANG N, ZHOU C B, LU S W, et al. Propagation and prediction of blasting vibration on slope in an open pit during underground mining[J]. Tunnelling and underground space technology, 2017, 70: 409-421.
- [6] 李俊如, 李海波, 高建光, 等. 抛石基床爆夯振动效应监测与分析[J]. 岩土力学, 2005(9): 1417-1420, 1426.
- [7] 杨莉, 汪玉, 杜志鹏, 等. 沉底装药水下爆炸冲击波传播规律[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 100-104.
- [8] 中交第四航务工程局有限公司. 深水厚抛石基床大分层重锤夯实关键技术研究[R]. 广州: 中交第四航务工程局有限公司, 2016.
- [9] 秦川, 别社安. 重力式码头抛石基床应力分析[J]. 水运工程, 2014(3): 88-93.

(本文编辑 王璁)