



高频破碎锤清礁范围适用性分析

邹永胜¹, 李启佳¹, 王锐¹, 汪江军¹, 冯国星², 闵文军³

(1. 长江重庆航道工程局, 重庆 400010; 2. 广西平陆运河建设有限公司, 广西南宁 530200;
3. 天津天科工程管理有限公司, 天津 300456)

摘要: 在航道工程清礁施工中, 如清礁区域内附近存在临近建筑物, 则需要考虑施工对临近建筑物的影响。在西部陆海新通道(平陆)运河航道工程建设中, 为避免清礁时对既有临近建筑物产生不利影响, 工程利用高频破碎锤的循环冲击作用对礁石进行破碎, 更加高效、环保。针对高频破碎锤在清礁敏感区域的适用性问题, 基于3DEC建立高频破碎锤清礁数值模拟计算模型, 开展高频振动冲击下岩体内的动力响应规律研究, 提出施工过程中使用HB3600破碎锤清礁时的适用范围。结果表明, HB3600破碎锤适用于抗压强度30 MPa以内的岩石, 超过此范围后破岩效率下降; 破碎锤冲击作用下, 岩体内部产生的应力随着与锤尖距离的增大而逐渐减小, 其中竖向应力在0.95 m范围内影响较大, 横向应力在半径0.5 m范围内影响较大。

关键词: 高频破碎锤; 清礁敏感区; HB3600破碎锤; 3DEC; 适用范围

中图分类号: U615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0205-04

Applicability analysis of high-frequency hammer for reef cleaning range

ZOU Yongsheng¹, LI Qijia¹, WANG Rui¹, WANG Jiangjun¹, FENG Guoxing², MIN Wenjun³

(1. Changjiang Chongqing Waterway Engineering Bureau, Chongqing 400010, China;

2. Guangxi Pinglu Canal Construction Co., Ltd., Nanning 530200, China;

3. Tianjin Tianke Engineering Management Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: In the reef clearing construction of the channel project, the impact of the construction on the adjacent buildings needs to be considered if there are adjacent buildings near the reef clearing area. To avoid the adverse impact on existing nearby buildings in the Western Land-Sea New Corridor, Pinglu Canal, channel project, the project uses the cyclic impact of a high-frequency breaker to break the rocks, which is more efficient and environmentally friendly. Aiming at the applicability of the high-frequency hammer for reef clearing in sensitive areas, a numerical simulation calculation model of the high-frequency hammer for reef clearing is established based on 3DEC, the dynamic response rules of the rock mass under high-frequency vibration impact are studied, and the range of application of the HB3600 hammer for the reef clearing construction is proposed. The results show that the HB3600 hammer is suitable for rocks with a compressive strength within 30 MPa and the rock-breaking efficiency decreases beyond this range. The stress generated inside the rock mass under the impact of the breaker gradually decreases as the distance from the hammer tip increases, the vertical stress has a greater impact within the range of 0.95 m and the lateral stress has a greater impact within the radius of 0.5 m.

Keywords: high-frequency hammer; sensitive areas of reef cleaning; HB3600 hammer; 3DEC; range of application

西部陆海新通道(平陆)运河航道工程起点位于西江干流西津库区南宁横州市平塘江口, 终点位于北部湾钦州港海域, 全长约135 km, 是一条

通江达海的水上运输通道。工程主要建设内容为疏浚、炸礁、护岸、陆上土石方等工程。在开挖航道断面时, 要求尽量减小对施工河段附近居民

收稿日期: 2024-03-22

作者简介: 邹永胜(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事航道整治工程及水利水电工程的施工管理。

用房、养殖鱼塘、管线、市政公园、跨河桥梁等的不利影响。

航道工程清礁方法主要分为机械清礁法和化学爆破法。常用的重锤凿岩、高频破碎锤、铣挖、液压致裂和水射流等为机械清礁法；水下裸露爆破和毫秒爆破为化学爆破法。重锤凿岩法在水深浅、岩石强度高时效率较低；高频破碎锤法具有施工效率高、对生态环境影响较小的优势^[1]，适用于页岩、砂岩和风化岩等；铣挖法施工效率高，适用于开挖泥岩、页岩、黏土岩等松软岩层；水下液压致裂法主要适用于存在临空面的礁石清除^[2]；高速水射流法对施工要求较高，不适用于清除河流中的礁石^[3]；水下钻孔爆破常用于水深较深时，施工效率最高，但对周围生态环境有一定影响^[4]。

清礁区域附近存在敏感性建筑物时，要求采用高效、环保且噪声小的高频破碎锤施工技术，但目前高频破碎锤作用下岩体内的应力响应及传递规律仍不清晰，无法明确判断清礁施工对既有临近建筑物的影响范围，亟需开展研究，为工程施工提供参考。

1 典型岩石强度清礁范围适用性分析

西部陆海新通道(平陆)运河河段多为砂岩，施工水深较浅。工程中配备的破碎锤型号为HB3600，钎杆直径170 mm，可以破碎60 MPa的岩石，其性能参数为工作压力160~180 bar(16~18 MPa)、打击频率280~560次/min(4.7~9.3 Hz)。

高频破碎锤是将液压能转换为机械能，在破碎锤钎杆产生高频冲击荷载的一种设备。破碎锤的冲击荷载会在岩体内部产生应力波，由钎杆击打岩石的中心点向各向传播^[5]。在岩体计算力学中，离散单元法能更准确地描述节理岩体的几何特征^[6]，便于处理岩体破坏问题，因此研究中的数值模拟采用一款基于离散单元法作为基本理论的计算分析程序3DEC^[7]，可对连续岩体力学行为进行普遍分析，同时在处理非连续介质上具有优势，特别适合处理离散岩体介质在静态和动态荷

载下的力学响应问题。

1.1 模型建立

用3DEC建立高频破碎锤清礁数值模拟计算模型，岩石尺寸为4.00 m×1.65 m，对其进行网格划分。为提高计算精度，对破碎锤附近的网格局部加密，网格尺寸为0.02 m，满足摩尔-库仑破坏准则。为了研究高频振动冲击下岩石内应力的响应和传递规律，在岩石模型内布置应力监测点，见图1。其中，竖向布置点位8个，间距0.2 m，坐标分别为(0,-0.5)、(0,-0.7)、(0,-0.9)、(0,-1.1)、(0,-1.2)、(0,-1.5)、(0,-1.7)、(0,-1.9)，主要监测8个点位z、y方向的应力变化规律；横向布置15个监测点，间距为0.25 m，坐标分别为(-1.75,-0.5)、(-1.50,-0.5)、(-1.25,-0.5)……(0,-0.5)、……(1.25,-0.5)、(1.50,-0.5)、(1.75,-0.5)，主要监测15个点位y方向的应力变化规律。

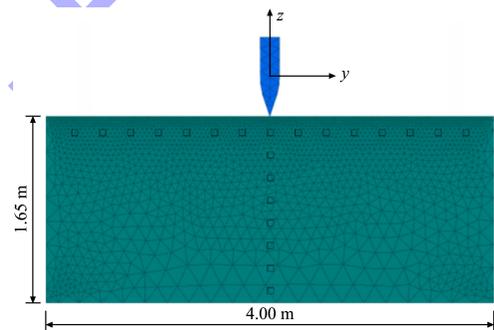


图1 破碎锤清礁模型及应力监测点位布置

Fig.1 Reef cleaning model of crushing hammer and location of stress monitoring points

1.2 模型参数选取

试验模拟岩体为砂岩，采用弹性、各向同性模型，岩石材料参数通过实地取样测得。以某一岩石为例：岩石密度 $2\ 530\ \text{kg/m}^3$ ，内摩擦角 46.12° ，黏聚力 $5.21\ \text{MPa}$ ，弹性模量 $4.083\ \text{GPa}$ ，泊松比 0.11 ，剪切模量 $1.84\ \text{GPa}$ ，体积模量 $1.74\ \text{GPa}$ 。模型裂隙本构采用库仑-摩尔破坏下的区域接触弹/塑性模型，其破坏标准由黏聚力、张力和摩擦残余值确定，破坏过程中黏聚力一直存在，张力逐渐减小至残余值(默认为0)^[8]。裂隙节理的法向刚度和剪切刚度用周围“最大刚度”相邻区域等

效值的 10 倍进行计算^[9]:

$$k_n = k_s = 10 \max \left[\frac{(K+4G/3)}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (1)$$

式中: k_n 为法向刚度, GPa /m; k_s 为剪切刚度, GPa /m; G 为剪切模量, GPa; K 为体积模量, GPa; Δz_{\min} 为接触面法向方向上相邻区域的最小尺寸, m。

1.3 边界条件设置和模型自重力平衡

模型四周采用位移边界, 即设置模型四周边界的速度为 0; 模型底部固定; 模型顶部为自由面。通过对模型本身施加重力, 使其达到自重力平衡, 从而模拟模型岩体未扰动之前的状态, 减少模拟试验的误差^[10]。

1.4 结果分析

设置岩石抗压强度为 15 MPa。随着工作压力和打击频率的增大, 破碎深度及破碎宽度均会增加, 因此施工中选用的最优参数为工作压力 180 bar (18 MPa), 打击频率 560 次/min (9.3 Hz)。自重力平衡后破碎锤开始对岩石进行冲击, 计算时间设置为 1 s。

根据仿真模拟结果得到监测点 (0, -0.5) 的 z 向应力时程曲线, 如图 2 所示, 在高频破碎锤的循环冲击下, 随着钎杆凿入深度的增加, 监测点处的 z 向应力呈逐渐增大的趋势。当迭代步达到 158.642 1 万步时, 应力达到峰值 5.46 MPa。

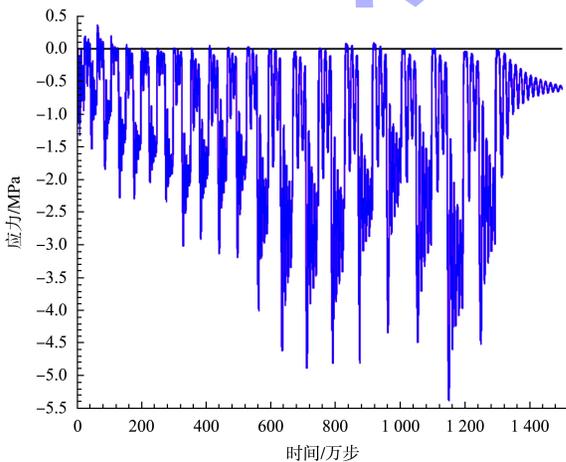


图 2 监测点 (0, -0.5) z 向应力时程曲线
Fig. 2 Time travel curve of z -direction stress at monitoring point (0, -0.5)

图 3 为高频破碎锤循环冲击下竖向布置监测点的 z 向峰值应力和 y 向峰值应力随监测点深度的变化关系曲线。由图可知, 在破碎锤冲击作用下, 随着监测点深度的增加, 岩体内应力呈减小的趋势, 且在监测点 (0, -1.3) 后逐渐趋于稳定, 该监测点位于岩石表面以下 0.95 m 处, 即表明高频破碎锤作用下, 岩体内产生的应力在深度 0.95 m 范围内较大, 当深度超过 0.95 m 后, 冲击作用对岩体的应力响应并不明显。

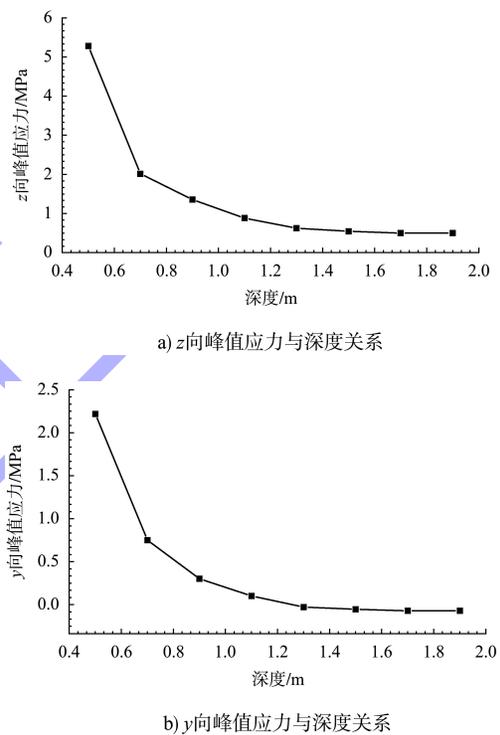


图 3 监测点峰值应力与深度关系

Fig. 3 Relationship between peak stress and depth of monitoring points

图 4 为横向布置监测点 y 向应力与水平位置的关系曲线。在坐标 O 点处, 峰值应力达到最大, 且两侧应力变化规律呈对称趋势。当监测点坐标变化时, 峰值应力的变化趋势为: 对于 O 点左侧监测点, 随着坐标增加即距离锤尖越近, 峰值应力增大且增长速率越来越大; 对于 O 点右侧监测点, 随着坐标增加即距离锤尖越远, 峰值应力减小且减小的速率越来越小最后趋于稳定。这说明在距离锤尖越近的点, 破碎锤作用产生的应力响应越强, 特别在距锤尖 0.5 m 范围以内。

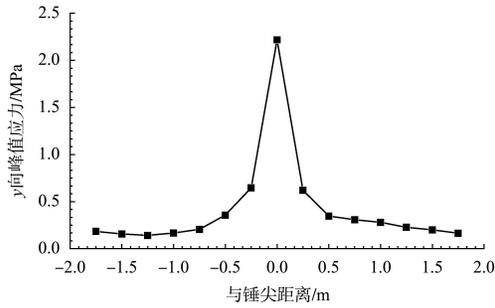


图4 横向监测点 y 向应力与水平位置关系

Fig. 4 Relationship between y-direction peak stress and horizontal position of transverse monitoring points

对比 z 向应力和 y 向应力的传播范围可以发现, z 向应力在深度 0.95 m 范围内产生的响应较大, 而 y 向应力在水平 0.5 m 范围内产生的响应较大。这是由于在钎杆侵入岩体的过程中, 钎杆的竖向荷载作用于岩体上, 竖向应力在岩体中产生并传播, 当锤尖侵入岩体后, 挤压两侧岩体从

而产生水平应力。因此, 高频破碎锤清礁过程中主要产生的是竖向应力, 其比水平应力的响应范围更远。在实际工程中, 高频破碎锤清礁施工效率可达到 0.86 m³/h。

2 其他岩石强度清礁范围适用性分析

2.1 模型建立

为探究其他不同岩石强度下的破碎锤清礁范围, 在破碎锤的工作压力 (18 MPa) 和冲击频率 (9.3 Hz) 不变的情况下, 岩石的抗压强度分别设置为 20、25、30、35、40 MPa。参照典型岩石强度建立模型, 自重力平衡后破碎锤开始对岩进行冲击, 计算时间设置为 1 s。

2.2 模型参数选取

不同强度岩石的参数设置见表 1。

表 1 砂岩的强度参数

Tab. 1 Strength parameters of sandstone

弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	基于 M-C 的单轴抗压强度/MPa
3.85	0.24	2 465	20	45.01	4.95	1.33	23.89
4.81	0.23	2 480	25	45.70	5.85	1.67	28.73
5.78	0.22	2 495	30	46.40	6.75	2.00	33.74
6.74	0.21	2 510	35	47.10	7.65	2.33	38.92
7.70	0.20	2 525	40	47.80	8.55	2.67	44.29

2.3 结果分析

根据仿真模拟结果可得到岩石破碎参数随岩石强度的变化情况, 见图 5。由图可知, 岩石破碎的深度和宽度随强度的增加而减小, 且这种减小趋势逐渐加剧。这是由于随着岩石强度的增加, 岩体抵抗变形和破坏的能力也增强, 导致破碎锤钎杆更难凿入岩体, 从而使得破碎的深度和宽度减小。岩石强度在 20、25、30 MPa 时, 破碎的深度和宽度变化不大。随着岩石强度增加到 35 MPa 时, 破碎锤破岩效率陡然降低。因此, HB3600 破碎锤在抗压强度为 0~30 MPa 的岩石中破岩效率最高。

下, 岩石强度在 15 MPa 时产生的竖向应力和横向应力最大, 且与 20、25、30 MPa 相差不大。

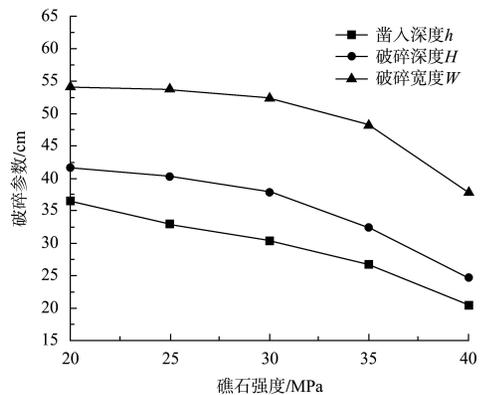


图 5 岩石破碎参数随强度变化曲线

Fig. 5 Curves of rock breaking parameters changing with strength

综上所述, 在工作压力和打击频率一定的情况