

高硬度礁石水下凿岩施工参数研究及施工效果分析

陆磊

中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510220

摘要 : 为掌握高硬度礁石水下钻孔凿除施工特点, 文章研究凿岩棒下落高度于其下落速度、冲击力及冲击压强的规律, 结合国内外学者对岩体破坏理论的研究结果以确认水下高硬度礁石钻孔凿岩施工的可行性, 并同通过典型施工的形式加以论证分析。结合广州港桂山锚地 (18GSA) 扩建工程钻孔凿岩施工现场, 对钻孔凿岩工艺进行了应用, 分析了不同凿岩施工参数的破岩效果, 结果表明钻孔可有效的减小施工难度, 并且钻孔越密集凿除效果越好。

关键词 : 水下凿岩; 施工参数; 施工效果

中图分类号 : P633.1

文献标志码 : A

文章编号 : 2023030173

Research on Construction Parameters and Construction Effect Analysis of High Hardness Reef Underwater Rock Drilling

Lu Lei

China Communications Guangzhou Navigation Bureau Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510220

Abstract : In order to understand the characteristics of underwater drilling and removal of high hardness reefs, this article studies the law of the falling height of the rock drill rod in relation to its falling speed, impact force, and impact pressure. Combined with the research results of domestic and foreign scholars on rock mass failure theory, the feasibility of underwater drilling and removal of high hardness reefs is confirmed, and it is also demonstrated and analyzed through typical construction forms. Based on the drilling and rock drilling construction site of the Guangzhou Port Guishan Anchorage (18GSA) expansion project, the drilling and rock drilling technology was applied, and the rock breaking effect of different drilling construction parameters was analyzed. The results showed that drilling can effectively reduce construction difficulty, and the denser the drilling, the better the chiseling effect.

Key words : underwater rock drilling; construction parameters; construction effect

一、引言

水下凿岩是利用凿岩棒自由落体的方式, 对水下岩石施以轴向压力和冲击荷载, 当岩石在荷载作用下礁石内部最大应力超过其起裂应力时, 岩石内部产生裂纹, 并在凿岩棒不断的作用下岩石内部的裂纹不断扩展, 最终达到岩石破碎的目的。该施工技术具有对周围环境影响较小, 安全便捷, 组织灵活的特点, 在爆破工艺受限的水下礁石清除工程中得到广泛利用。深圳一中山跨江通道工程 [1] 利用凿岩施工工艺成清除了 55MPa 的中风花岗岩, 安哥拉 SONILS 石油服务基地项目 [2] 采用凿岩锤和海上打桩船钻孔的处理方案成功清除 87MPa 的岩层。厦门嵩屿港区二期工程除礁工程 [3] 采用钻孔-布钢锭-凿岩-抓斗相结合的施工方法, 成功清除了 70MPa 的礁石。

广州港桂山锚地 (18GSA) 扩建工程位于万山群岛重要渔业海域限制类红线区, 工程需对扩建范围内的四尺岩礁石进行清除, 目标礁石属于微风花岗岩, 其饱和单轴抗压强度平均值为 96.0MPa, 最大抗压强度 193MPa。清礁石区域面积 2472 平方米, 总清礁工程量 0.91 万立方米, 礁石分布集中、埋藏深度浅、强度高、岩层厚且岩面起伏高差大等的的特点。目前对强度大于 70MPa 的岩石多采用爆破除礁工艺, 对于生态环保要求较高的工程项目仍需要采用机械破岩的施工工艺。

本人通过分析凿岩棒水下运动的规律, 结合目前国内为对岩体

破坏理论的研究结果, 分析广州港桂山锚地 (18GSA) 扩建工程岩石处理不同施工参数破岩特点, 为后续水下礁石清除提供参考。

二、水下凿岩冲击力分析

假设凿岩棒在目标礁石上方 H (小于水深) 处开始自由下落, 当下落距离为 x 时, 作用于凿岩棒上的力有自重 mg , 浮力 $\rho_{\text{水}}gV$, 水阻力 $F_{\text{阻}}$, 其中 m 是凿岩棒质量, V 是凿岩棒体积, g 为重力加速度, $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度。考虑运动的相对性, 将 $F_{\text{阻}}$ 看成运动水体对静止夯锤的绕流阻力。凿岩棒在力作用下作加速、或匀速运动, 则重锤运动方程如下:

$$mg - \rho_{\text{水}}gV - F_{\text{阻}} = ma \quad (1)$$

$F_{\text{阻}}$ 为运动水体对静止重锤的绕流阻力, 通常可用下式表示:

$$F_{\text{阻}} = C_f \omega \rho_{\text{水}} v^2 / 2 \quad (2)$$

式中, C_f 为绕流阻力系数绕流阻力系数与锤形、流速、流体雷诺数等因素有关, 为简化问题, 假设绕流阻力系数为常数, 根据深中通道实测标定斧形凿岩棒扰流系数为 2.0; v 为重锤水中运动速度; ω 为凿岩棒下落时迎水面面积。根据位移 x 、速度 v 、加速度 a 的物理意义, 可进一步整理为:

$$v \frac{dv}{dx} = g \left(1 - \frac{\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{锤}}} \right) - \frac{C_f \omega \rho_{\text{水}}}{2m} v^2 \quad (3)$$

当凿岩棒规格确定后可令常数项 $g\left(1 - \frac{\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{锤}}}\right) = j$; $\frac{C_f \omega \rho_{\text{水}}}{2m} = k$

令初始条件 $x=0$, $v = \frac{dx}{dt} = 0$ 可解得速度位移关系为:

$$v = \frac{\exp\left(-kx - \frac{\ln\left(-\frac{1}{j}\right)}{2}\right) \sqrt{k \left[j \exp\left(2kx + \ln\left(-\frac{1}{j}\right)\right) + 1 \right]}}{k} \quad (4)$$

叶四桥 [3] 在研究落石冲击力时基于冲量定理, 建立了最大冲击力计算公式:

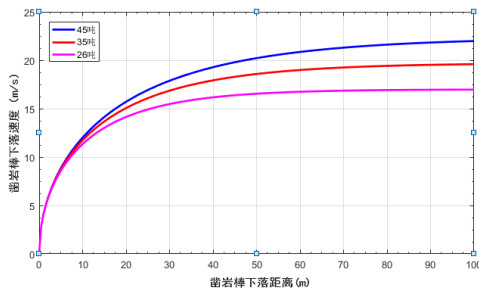
$$F_{\max} = k \left(\frac{mv_{bn}(1+e_n)}{\Delta t} + mg \cos \alpha \right) \quad (5)$$

$$\Delta t = \frac{1}{100} \left(0.097mg + 2.21h + \frac{0.09}{v_{bn}^2} + 1.2 \right) \quad (6)$$

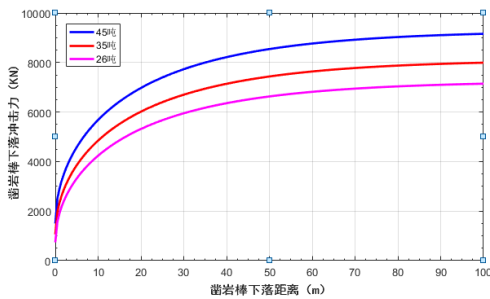
以上公式中 e_n 为覆盖土层的法向恢复速度, 在凿岩施工中首先需对覆盖层进行清理, e_n 为 0, v_{bn} 为冲击过程中的法相冲击速度, α 为冲击面与水平面的夹角, 根据凿岩施工的特点此角度为 0, h 为覆盖土层厚度取 0。其余符号物理意义同上, mg 单位为 kN, k 为最大冲击力放大系数于凿岩棒等效直径有关。

故凿岩棒在凿击过程中对接触面的平均压强为: $p = \frac{F_{\max}}{S}$

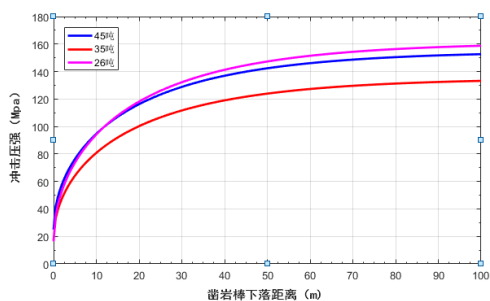
分别计算 26 吨、35 吨、45 吨三个凿岩棒下落高度与下落速度、岩石所受冲击力及冲击压强的关系。



> 图 1 凿岩棒下落距离与下落速度关系



> 图 2 凿岩棒下落距离与冲击力关系



> 图 3 凿岩棒下落距离与冲击压强关系

根据计算结果, 随着凿岩棒下落高度的增加, 下落速度、岩石所受冲击力及冲击压强均会有一个近似线性增加的阶段, 此阶段凿岩棒所受水流阻力较小。随着下落深度的增加, 水流阻力随着凿岩棒速度增大对凿岩棒的作用愈加明显, 最总会达到一个平衡状态, 加速度为零, 其下落速度、能对岩石产生的冲击力及冲击压强也将达到最大值。在水深不大于 60m 的水域施工, 在保证凿岩精度的情况下, 提高凿岩棒下落高度能明显提高凿岩效果。

而凿岩棒自身质量直接影响着其下落速度, 对岩石产生的冲击力及冲击压强。而随着下落高度的增加, 水流阻力对会凿岩棒下落加速度的不断削弱, 可以看出接触面积对冲击压强的影响要明显大于凿岩棒质量的影响。虽然减小接触面积能够有效的提高破岩效果, 但岩石作用力影响范围也相对变小, 需同时增加凿击次数, 施工中应更具岩石硬度及施工范围综合考虑。

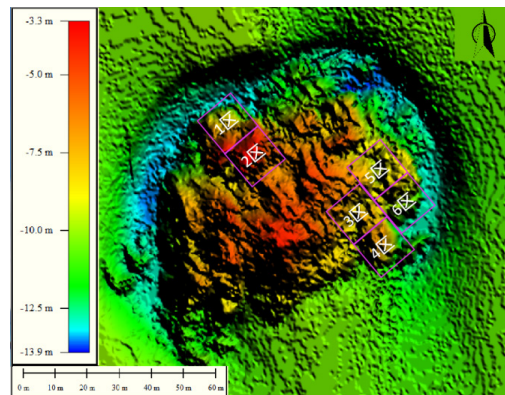
三、岩体破坏研究理论分析

岩体的破坏是一个复杂的过程, 对于在岩体破坏特点国内外学者有着大量研究, 许多成果均表明脆性岩石的峰前应力 - 应变曲线一般可以被分为 4 个阶段: I 阶段为岩石内原生裂纹的压缩闭合阶段; II 阶段是线弹性变形阶段; III 阶段是裂纹稳定扩展阶段; IV 阶段是裂纹非稳定扩展阶段 [4]。与岩石的峰值强度相比, 轴压应力一般在峰值应力的 40% ~ 59% 时岩石内部的裂纹就已开始扩展, 在峰值应力的 77%~82% 岩石内部的裂纹开始连接、贯通、汇合最终形成宏观的剪切或劈裂断裂面而破坏 [5]。

针对岩石脆性破坏的特点, 本工程在凿岩清礁工序前, 先在岩体上进行钻孔以降低礁石的整体性, 同时也从另一个角度减少了凿岩施工时凿岩棒与岩石的接触面积, 增大了凿岩棒的冲击压强。而在多次冲击荷载作用下花岗岩内部的裂纹损伤不断累计, 其岩体强度也会随之减小, 最终达到破岩目的。

四、典型施工验证

根据上述分析, 开展典型施工试验验证, 工程采用钻孔加凿岩棒施工工艺。首先利用钻孔设备在礁石上进行钻孔施工, 以降低岩石的强度及侧向围压降低后续凿岩难度, 钻孔后再利用凿岩棒凿碎岩石, 采用抓斗船进行清礁施工。



> 图 4 试验区域划分

根据礁石区域钻探资料及地形特点，确定了6个试验区域。各区域强度、岩层厚、水深条件不同，具有一定的代表性

首先采用钻孔船对试验区域进行钻孔，钻孔直径120mm，从礁石区的边缘向中间逐步施工，一次性钻孔至-11.8m，钻孔孔距分0.5×0.43m和0.65×0.6m进行施工效果对照。钻孔完成后，采用机械破岩完成凿岩工序。采用26t及45t两种不同重量的斧头形凿岩棒，根据礁石钻孔情况及表面发育特性排布2×2m锤布

点，每个凿岩点凿击6次，充分利用凿岩锤的工作特性，实现对岩石的快速全面破坏。

典型施工凿岩完毕后利用水下摄像机查看记录水下凿岩效果，并安排多波束进行测量；同时将抓斗船的凿岩锤换成抓斗，待水下施工结果观测记录完毕后根据反馈结果对已凿岩区域进行清渣打捞，将打捞岩渣转放至泥驳进行礁石破碎情况记录，最后运输至岩渣弃卸。

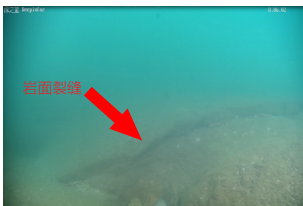
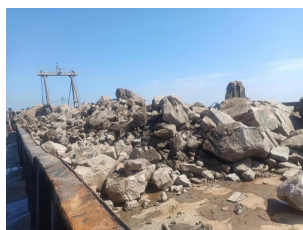
五、凿岩效果分析

表1 典型施工试验结果

试验区域	凿岩棒	钻孔孔距	平均水深	水下摄影效果	多波束测量清礁厚度
1	26t	0.5×0.43m	6m	存在明显碎块岩石脱落	1.4m
2	45t	0.5×0.43m	4m	岩石无可见损坏	/
3	45t	0.5×0.43m	7m	存在明显岩块脱落，脱落块石体积较大	2m
4	26t	0.5×0.43m	8m	岩石表面出现裂缝，未破碎	/
5	45t	0.65×0.6m	9m	存在明显碎块岩石脱落，岩石破碎程度较高	0.8m
6	26t	0.65×0.6m	9m	存在明显碎块岩石脱落	0.6m



>图5 打捞块石



>图6 水下摄影情况

(1) 根据施工结果试验1区、3区、5区、6区存在明显岩石脱落，且岩石破碎面多位于钻孔截面位置，其主要是钻孔周围的应力集中现象，在凿岩棒的冲击作用下会产生较多裂纹，在岩石内部大部分裂纹还没及时产生扩展情况下，礁石就已经沿承载能力低且裂纹密度大的截面扩展、贯通而破坏，此贯通面通常沿钻孔直径所在的截面。

(2) 凿击的目标岩石在四周岩体的侧向约束下其抗压强度会得到提升，同时会抑制岩石内部损伤的积累，加大岩石破坏难度。表现为试验4区礁石表面已出现明显裂缝但周边岩体约束下岩石仍保持着较好的整体性。

(3) 对于水深浅、强度高、岩层厚的地区(2区)凿岩效果不佳，可待周边岩石清除出临空面后，充分利用涨潮时的水位增加凿岩棒下落高度，以达到破岩的目的。

(4) 根据打捞的岩渣情况0.5×0.43m和0.65×0.6m的钻孔

区域均能达到凿岩破礁的效果。0.5×0.43m打捞岩渣普遍表现为脱落岩石块体大，除沿经钻孔直径出现的断裂面外，岩石体表面裂纹较少。0.65×0.6m区域岩石破碎程度较高，打捞岩渣中大尺寸岩石较少，岩石破碎均出分层小块脱落的特点，同时多波束测量显示0.5×0.43m清礁厚度要大于0.65×0.6m区域。

(5) 在相同水深条件下45t的凿岩棒破岩效果要优于26t凿岩棒，施工中两个凿岩棒均出现不同程度的磨损，且26t的磨损情况要明显严重，可考虑备用多个凿岩棒循环使用，以保障连续施工。

六、结论

(1) 在水下凿岩施工中，下落速度、岩石所受冲击力及冲击压强首先线性增加，但随着下落深度的增加，水阻力越来越大，相应的增幅越来越小，最终达到一个固定值。且接触面积对凿岩棒冲击压强的影响要比凿岩棒质量显著。

(2) 在超高硬度礁石凿除施工中，密集钻孔可有效的减小施工难度，并且钻孔越密集凿除效果越好。

(3) 在大体积礁石凿除时，中部岩石受四周岩体的约束下凿除难度会提升，可优先选择具有临空面的礁石部分进行施工。

参考文献:

[1]王权、蒋文杰. 基于多因素试验的凿岩参数影响规律研究[J]. 水运工程, 2022(7):252-258.
 [2]王艳锋、刘建卫. 机械凿岩在疏浚工程中的应用[J]. 水运工程, 2019(6):207-211.
 [3]叶四桥. 隧道洞口段落石灾害研究与防治[D]. 西南交通大学博士论文. 2008.
 [4]朱泽奇、盛谦、冷先伦、张占荣. 三峡花岗岩起裂机制研究[J]. 岩石力学与工程学报 2007(12):2570-2575.
 [5]周辉、孟凡震、张传庆、杨凡杰、卢景景. 硬岩应力-应变门槛值特点及产生机制, [J]. 岩石力学与工程学报 2015(8):1513-1521.