



重型绞吸式挖泥船挖掘中风化岩影响因素分析

刘璟, 刁海岛, 张陈浩, 魏志平

(中交天津港航勘察设计院有限公司, 天津 300461)

摘要: 针对目前国内外疏浚岩石理论及岩石疏挖工艺研究较少的现状, 以重型绞吸式挖泥船在中风化岩石条件下的挖掘施工数据为基础, 提出了疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$, 并对中风化岩石性质与施工参数的相互影响因素进行分析。结果表明, 绞刀切片厚度、绞刀转速、绞刀功率等施工参数与岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 的相关性较好, 并拟合得出相应的经验公式, 对挖岩工艺的改进具有指导意义。

关键词: 重型绞吸式挖泥船; 中风化岩石; 影响因素分析; 经验公式

中图分类号: U 616⁺. 21

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0182-05

Analysis of influential factors for heavy-duty cutter suction dredger working in moderately weathered rock

LIU Jing, DIAO Hai-dao, ZHANG Chen-hao, WEI Zhi-ping

(CCCC Tianjin Port & Waterway Prospection & Design Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: According to the present situation which is lack of the rock dredging theory and the construction technology, this paper presents the new revised rock mass basic quality indicator for the dredging engineering ($[BQ]_{TH}$) and also analyzes the influential factors for the heavy-duty cutter suction dredger working in the moderately weathered rock, on the basis of the data recorded in the dredging construction in the medium weathered rock. The results show that the reamer slice thickness, the reamer shaft speed, and reamer power with revised rock mass basic quality indicator ($[BQ]_{TH}$) have good correlations. Relevant empirical formulas are summarized to guide future process of the construction technology.

Key words: heavy-duty self-propelled cutter suction dredger; moderately weathered rock; analysis of influential factors; empirical formula

随着我国港口吞吐量的日益猛增, 现有港口的规模已不能适应经济社会发展的需要。为满足大型、超大型船舶的进出港及停泊、作业的需求, 国家加大了对现有港口的改、扩建建设。加大挖深, 则往往导致遇到岩石层, 而有些新建港口由于空间位置的需要, 必须建设在岩层海岸带或珊瑚礁地区。

基于原有疏浚泥土理论所设计的挖泥船并不适用于疏浚强度很大的岩石, 目前, 国内虽然已有利用大型绞吸船进行挖岩的实例, 但对疏浚岩

石理论及疏挖工艺的研究极少, 国外目前也没有公布其研究成果。挖岩工艺缺乏系统研究, 迫切需要对绞吸船疏挖岩石的理论及工艺进行研究。

本文以“天鲸号”挖岩的施工数据为基础, 分析了重型绞吸船“天鲸号”在典型中风化岩石条件下的施工影响因素, 对“天鲸号”的中风化岩石疏挖工艺进行初步研究。

1 岩石可挖性分析

绞吸船疏挖岩石时, 首先将岩体破碎成岩块,

收稿日期: 2013-07-18

作者简介: 刘璟 (1971—), 男, 高级工程师, 从事港口航道工程设计研究工作。

后再将其经过提升、输送到指定位置。影响绞吸船疏挖岩石的因素, 主要取决于岩石的自然特性、工程特性及疏浚机械对岩石工程特性的适应性等。

岩石可挖性反映了岩石破碎的难易程度。岩石可挖性是个多变量的函数, 它不仅受控于岩石的性质, 而且与外界技术条件和工艺参数有密切的关系。

本文在《工程岩体分级标准》^[1]对岩体基本质量分级的基础上, 结合疏浚工程的特点, 考虑地下水状态、初始应力状态、工程轴线或走向线的方位与主要软弱结构面产状的组合关系等必要的修正因素, 建立了疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 。

1.1 基本质量指标修正值[BQ]

基本质量指标修正值[BQ]是岩体所固有的、影响工程岩体强度和稳定性的最基本属性, 岩体基本质量由岩石坚硬程度和岩体完整程度所决定。受岩体赋存状态、地下水状态、结构面产状和初始应力状态的影响。

岩体基本质量指标修正值 ($[BQ]$), 可按下式计算:

$$[BQ] = BQ - 100 (K_1 + K_2 + K_3) \quad (1)$$

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v \quad (2)$$

式中: $[BQ]$ 为岩体基本质量指标修正值; BQ 为岩体基本质量指标; R_c 为岩石单轴饱和抗压强度 (MPa); K_v 为岩体完整性指数; K_1 为地下水影响修正系数; K_2 为主要软弱结构面产状影响修正系数; K_3 为初始应力状态影响修正系数。

表1 岩体质量分级

基本质量级别	岩体基本质量的定性特征	岩体基本质量指标[BQ]
I	坚硬岩, 岩体完整	> 550
II	坚硬岩, 岩体较完整; 较坚硬岩, 岩体完整	550 ~ 451
III	坚硬岩, 岩体较破碎; 较坚硬岩或软硬岩互层, 岩体较完整; 较软岩, 岩体完整	450 ~ 351
IV	坚硬岩, 岩体破碎; 较坚硬岩, 岩体较破碎-破碎; 较软岩或软硬岩互层, 且以软岩为主, 岩体较完整-较破碎; 软岩, 岩体完整-较完整	350 ~ 251
V	较软岩, 岩体破碎; 软岩, 岩体较破碎-破碎; 全部极软岩及全部极破碎岩	≤ 250

1.2 疏浚岩体基本质量指标修正值[BQ]_{TH}

依据疏浚工程^[2]的特点, 疏浚的岩石处于海底, 在海水下浸泡了很长时间, 疏浚岩石微观裂隙复杂, 疏浚岩石的深度一般较浅, 不会超过 30 m, 对计算的岩体基本质量指标[BQ], 进行海水状态、结构面产状和初始应力状态修正, 结合疏浚岩石特性引入了疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$, 具体计算如下:

$$[BQ]_{TH} = BQ - 100 (K_1 + K_2 + K_3) \quad (3)$$

$$BQ = 90 + 3R_c + 250K_v \quad (4)$$

式中: $[BQ]_{TH}$ 为疏浚岩体基本质量指标修正值; BQ 为岩体基本质量指标; R_c 为岩石单轴饱和抗压强度 (MPa); K_v 为岩体完整性指数; 由于勘察外业采集数据较困难, 一般根据勘察中采集的

RQD 指标和体积节理裂隙条数进行估算。 K_1 为地下水影响修正系数, 综合指标取值 0.8; K_2 为主要软弱结构面产状影响修正系数, 综合指标取值 0.2; K_3 为初始应力状态影响修正系数, 由于疏浚深度较浅, 岩石不考虑初始应力, 综合取值为 0.5。

1.3 工程机械的适应性

挖岩比功是指挖岩机具破碎单位体积岩石所需要的能量, 既是物理量又是效率指标。通过这一指标可以把各种挖岩方法和挖岩效果联系起来进行比较, 但需注意每种挖岩方法的挖岩比功不是一个常量。

压头压入岩石时使岩石发生弹性变形所作的功:

$$W_e = \frac{P\xi}{2} \quad (5)$$

式中： P 为岩石破碎时的载荷； ξ 为与 P 相应的弹性变形。

由材料力学可知：

$$\xi = \frac{P(1-\mu^2)}{2aE} \quad (6)$$

式中： μ 为泊松比； a 为压头半径； E 为岩石弹性模量。

进一步处理：

$$W_s = \frac{P^2(1-\mu^2)\pi a C_p}{4(\pi a^2)^2 E} = \frac{H_y^2(1-\mu^2)\pi a C_p}{4E} \quad (7)$$

式中： H_y 为压入硬度。

单位体积破碎功为：

$$W_v = \frac{A_t}{V} = \frac{P^2(1-\mu^2)C_p}{4aEV} \quad (8)$$

2 中风化岩石施工影响因素分析

2.1 中风化岩石特性

岩石风化程度是风化作用对岩体的破坏程度，它包括岩体的解体和变化程度及风化深度。确定岩石风化程度主要依据的是矿物颜色变化、矿物成分变化、岩石破碎程度和岩石强度变化等 4 个方面。根据风化程度的不同，特征岩石一般划分成残积土、全风化、强风化、中等风化、微风化和未风化等 6 级，各级别的特性及指标情况见表 2。

中风化岩石其结构部分破坏，沿节理面有次生矿物，风化裂隙发育，岩体被切割成岩块。用镐难挖，岩芯钻方可钻进，波速比 $v_p/v_s = 0.6 \sim 0.8$ ，风化系数 $K_f = 0.4 \sim 0.8$ 。

表 2 岩石风化程度分级

风化程度	野外特征	风化程度参数指标	
		波速 v_p/v_s	风化系数 K_f
未风化	岩质新鲜, 偶见风化痕迹	0.9 ~ 1.0	0.9 ~ 1.0
微风化	结构基本未变, 仅节理面有渲染或略有变色, 有少量风化裂隙	0.8 ~ 0.9	0.8 ~ 0.9
中等风化	结构部分破坏, 沿节理面有次生矿物, 风化裂隙发育, 岩体被切割成岩块。用镐难挖, 岩芯钻方可钻进	0.6 ~ 0.8	0.4 ~ 0.8
强风化	结构大部分破坏, 矿物成分显著变化, 风化裂隙很发育, 岩体破碎, 用镐可挖, 干钻不宜钻进	0.4 ~ 0.6	< 0.4
全风化	结构基本破坏, 但尚可辨认, 有残余结构强度, 可用镐挖, 干钻可钻进	0.2 ~ 0.4	
残积土	组织结构全部破坏, 已风化成土状, 锹镐易挖掘, 干钻易钻进, 具可塑性	< 0.2	

注：波速比 K_v 为风化岩石与新鲜岩石压缩波速度之比；风化系数 K_f 为风化岩石与新鲜岩石饱和单轴抗压强度之比。

2.2 施工参数影响因素分析

1) 绞刀切片厚度的影响。

绞刀刀片是通过旋转运动和横向移动的合成运动来实施切削作业的，为了使岩土体切削下来，绞刀必须转动并切入土层。绞刀的切片厚度主要与绞刀的尺度、绞刀转速、横移速度和岩土性质有关。岩石越坚硬，单轴饱和抗压强度越大，岩体越完整，裂隙发育不强烈，在绞刀尺寸、绞刀钻速和横移速度相同时，绞刀的切片厚度应越小。

2) 绞刀功率的影响。

绞刀功率直接影响施工效率的高低，岩石性质将决定绞刀实际运行所需功率，选择适宜的绞刀功率可以达到最佳的挖掘和吸排效果。

3) 绞刀齿磨损的影响。

绞吸船在挖掘岩石时，绞刀头高速旋转，岩

石摩擦绞刀齿，造成绞刀齿磨损，随着切削刃口形状改变，间隙角值也向不利方面发展，使消耗能量加大，绞刀转速较大，才能克服加大的摩擦力。从岩石的特性方面研究与绞刀磨损关系，有利于延长绞刀齿寿命，减少绞刀齿的更换次数，提高生产效率。

3 典型中风化岩石施工案例分析

为研究绞吸挖泥船在中风化岩石的施工工艺，选择了“天鲸号”在防城港工程施工时所采取的有关施工参数并进行分析，对“天鲸号”在中风化岩石的施工影响因素做进一步研究。

3.1 概况

防城港 20 万吨级进港航道工程，是在原有防城港 15 万吨级进港航道的基础上加深并向东单侧

拓宽 35 m。航道的设计底高程由原来的 -16 m 加深至 -17.9 m; 设计底宽由 160 m 拓宽至 195 m, 航道全长约 17.3 km, 中风化岩饱和单轴抗压强度 26 ~ 60.7 MPa。

3.2 影响因素分析

1) 与绞刀切片厚度的关系。

图 1 为绞刀切片厚度与 $[BQ]_{TH}$ 的拟合关系, 经过拟合绞刀切片厚度和岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 之间的指数关系, 得到经验关系式如下:

$$D = 12.512e^{-0.003b}, R^2 = 0.754 \quad (9)$$

式中: D 为“天鲸号”绞刀刀片切割岩体切片厚度 (cm); b 为疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ (同下); R^2 为回归系数, 是相关系数的平方 (同下)。

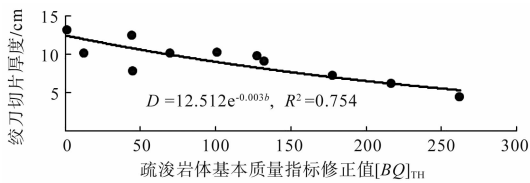


图 1 绞刀切片厚度与 $[BQ]_{TH}$ 拟合关系

此拟合曲线回归系数较大, 说明绞刀切片厚度与岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 的相互影响程度高, 函数关系密切。

2) 与绞刀转速的关系。

图 2 为经过拟合绞刀转速和岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 之间的线性关系, 所得经验公式为:

$$N = 0.0291b + 17.936, R^2 = 0.9084 \quad (10)$$

式中: N 为“天鲸号”防城港粉砂岩施工的绞刀转速 (转/min)。

此拟合曲线回归系数较大, 说明绞刀转速与岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 的相互影响程度高, 函数关系密切。

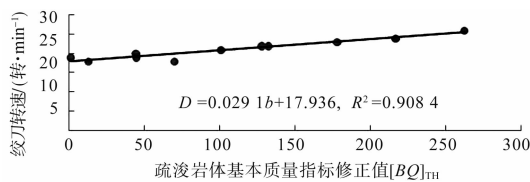


图 2 绞刀转速与 $[BQ]_{TH}$ 拟合关系

3) 与横移速度的关系。

图 3 为经过拟合绞刀横移速度和岩体基本质

量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 之间的指数关系, 得其经验关系式如下:

$$S = 13.59e^{-0.002b}, R^2 = 0.4583 \quad (11)$$

式中: S 为“天鲸号”防城港粉砂岩施工的绞刀横移速度 (m/min)。

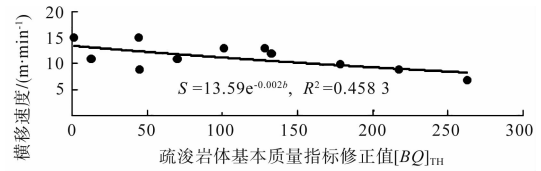


图 3 横移速度与 $[BQ]_{TH}$ 拟合关系

此拟合曲线回归系数相对较小, 反映绞刀横移速度和岩石的单轴饱和抗压强度间关系杂乱, 函数关系式不明显, 施工中影响因素较多。

4) 与绞刀功率的关系。

经过拟合, 绞刀最大功率和岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 之间为二次多项关系式 (图 4), 其经验关系式为:

$$P = 0.0061b^2 + 4.0792b + 1964.2, R^2 = 0.8215 \quad (12)$$

式中: P 为“天鲸号”防城港粉砂岩施工的绞刀最大功率 (kW)。

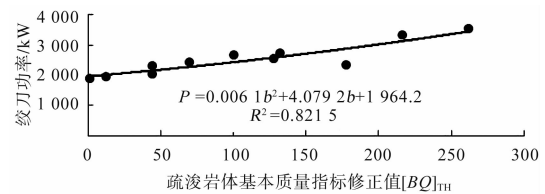


图 4 绞刀功率与 $[BQ]_{TH}$ 拟合关系

5) 与绞刀齿磨损关系分析。

经过拟合, 绞刀齿磨损和岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 之间为线性关系 (图 5), 相关性最大, 其经验关系式如下:

$$M = 0.0228b + 3.4365, R^2 = 0.3249 \quad (13)$$

式中: M 为“天鲸号”防城港粉砂岩施工的绞刀齿磨损速度 (个/h)。

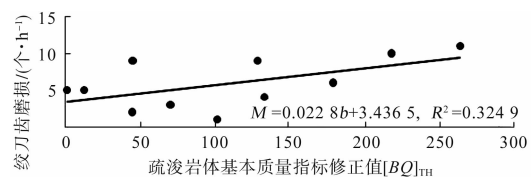


图 5 绞刀齿磨损与 $[BQ]_{TH}$ 拟合关系

此拟合曲线回归系数相对较小,反映绞刀齿磨损和岩体基本质量指标修正值[BQ]_{TH}间关系杂乱,函数关系式不明显,表明施工中该影响因素较复杂。

4 结论

1) 本文针对疏浚岩体的整体特性,创新性地提出了疏浚岩体基本质量指标修正值[BQ]_{TH}。

2) 以重型绞吸式挖泥船典型施工数据为基础,分析得到了区域疏浚中风化岩基本质量指标修正值[BQ]_{TH}与各施工影响因素之间的经验公式。

3) 研究还得出,绞刀横移速度和绞刀齿磨损速度与岩体基本质量指标修正值[BQ]_{TH}的相关性

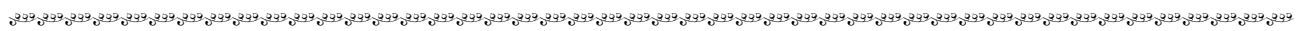
不明显,表明施工中的影响因素较为复杂。绞刀切片厚度、绞刀转速、绞刀功率等施工参数与岩体基本质量指标修正值[BQ]_{TH}的相关性较好。

4) 在今后的岩石疏浚工程中,可对本文所提出的理论和经验公式做进一步验证,对改进重型绞吸式挖泥船挖岩工艺和降低施工成本具有指导意义。

参考文献:

[1] GB 50218—1994 工程岩体分级标准[S].
 [2] JTJ/T 320—1996 疏浚岩土分类标准[S].

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 177 页)

[3] 龚镛,余文天.新吹填淤泥的工程性质变化特性研究[J].工程勘察,2008(6):23-25.
 [4] 张明,杨永生.吹填淤泥土的固结特征研究[J].工程勘察,2011(9):19-24.
 [5] 刘莹,王清,肖树芳.不同地区吹填土基本性质对比研究[J].岩土工程技术,2003(4):197-200.
 [6] 宋志刚,唐益群.吹填土固结速度影响因素的分析[J].路基工程,2010(3):18-20.
 [7] 刘莹,肖树芳,王清.吹填土室内模拟实验研究[J].岩土力学,2004,25(4):518-521.
 [8] Kuo C Y, Fost J D, A Chameau J L. Image analysis determination of stereology based fabric tensors [J]. Geotechnique, 1988, 48(4): 515-525.
 [9] 杨爱武,杜东菊,卢力强.天津吹填软土沉积特性及其微观结构研究[J].水文地质工程地质,2010,37(5):83-87.
 [10] 苑晓青,王清.分级真空预压法加固吹填土过程中孔隙分布特征[J].吉林大学学报:地球科学版,2012,42(1):169-175.
 [11] 张玲玲.天津滨海新区吹填土沉降固结前期的微结构与力学机制研究[D].长春:吉林大学,2013.
 [12] 朱颖波,王中,陈明杰.多种地基处理方法在曹妃甸煤码头续建工程的应用[J].水运工程,2012(8):172-176.
 [13] 王芳,郭进京.吹填土地基处理方法的讨论[J].岩土工

程界,2009,12(6):15-17.
 [14] 张明,杨永生.基于成长模型的吹填土软基沉降预测方法研究[J].水运工程,2012(4):162-179.
 [15] 王文军,刘用海,朱向荣.宁波海相软土工程特性研究[J].工程勘察,2008(10):19-24.
 [16] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle size distribution: Analysis and limitations [J]. Soil Science of America Journal, 1992(56):362-369.
 [17] 宋晶,王清.高黏性高盐量吹填土固结过程中孔隙分维特征研究[J].吉林大学学报:地球科学版,2010,40(2):361-367.
 [18] Vallejo L E. Fractal analysis of the fabric changes in consolidating clay [J]. Engineering Geology, 1996, 43: 281-290.
 [19] 孔令荣,黄宏伟.不同固结压力下软黏土孔隙分布试验研究[J].地下空间与工程学报,2007,3(2):1036-1040.
 [20] 刘莹,王清.吹填土沉积后微观结构特征定量化研究[J].水文地质工程地质,2006(3):124-128.

(本文编辑 郭雪珍)