



广西防城港岩石性能对疏浚生产率影响分析

张更生, 程 瑾, 马永刚

(中交天津航道局有限公司 疏浚工程技术实验室, 天津 300456)

摘要: 以防城港20万t航道疏浚工程为例, 从重型绞吸船“天鲸号”开挖岩石难易程度的角度, 分析了影响疏浚生产率的关键因素; 并对疏浚区域的泥质粉砂岩单轴饱和抗压强度、岩石质量等反映岩体特性的指标进行统计分析, 利用经验公式估算岩体的完整性指数。针对疏浚岩石工程特性, 创新性地引进了反映岩体整体特性指标——疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$, 基于最小二乘法建立了 $[BQ]_{TH}$ 疏浚生产率的经验公式, 并利用拟合的经验公式和BP (Back-Propagation Network) 神经网络对疏浚生产率进行了预测, 得到了良好的效果。

关键词: 疏浚工程; 岩石特性; 生产率; 统计分析; 预测

中图分类号: U 616.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0057-05

Impact of dredging productivity according to rock properties in Fangcheng port, Guangxi

ZHANG Geng-sheng, CHENG Jin, MA Yong-gang

(Dredging Engineering Laboratory, CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: Taking the 200 000 DWT waterway dredging project of Fangcheng port for example, we analyze key factors influencing the dredging productivity in view of difficult degrees of rock excavation on severe cutter suction dredger ‘Tianjing’, carry out a statistical analysis on the rock property indices including saturated uniaxial compressive strength, RQD, etc., and estimate the rock mass integrity index by the empirical formula. According to the rock properties of dredging engineering, we present the basic quality index of modified value reflecting the overall characteristics of dredged rock mass $[BQ]_{TH}$. Based on the least square method, we establish the empirical formula on $[BQ]_{TH}$ and dredging productivity, forecast the dredging productivity, and obtain a good result using the empirical formula and back-propagation network.

Key words: dredging engineering; rock property; productivity; statistical analysis; prediction

随着我国沿海港口不断发展, 急需对沿海城市港口航道进行增深增宽疏浚, 加大货物吞吐量。而我国东南部沿海城市地质状况复杂, 广泛分布着强度及风化程度不同的岩石, 尤其是强度大的岩石给沿海城市港口航道的增深带来了很大的困难。为了疏挖海底不同强度和完整性的岩石, 达到港口航道设计高程, 在疏浚工程中, 环境气候、土质、船舶自身性能、工程技术等条件

均对疏浚施工效率产生很大的影响。假设其它影响因素不变, 单纯的土质条件变化对疏浚效率影响到底有多大? 二者的内在规律如何? 笔者一直试图通过某种定量分析方式找到各种土质条件与疏浚效率之间的函数关系, 通过实际生产参数可靠性验证, 实现利用土质资料估算工艺参数, 制定准确的施工方案, 降低疏浚施工风险, 给类似的疏浚工程以借鉴。

收稿日期: 2013-05-27

作者简介: 张更生(1980—), 男, 硕士, 工程师, 注册岩土工程师, 从事岩土工程勘察设计和疏浚土质研究工作。

1 防城港20万t航道地质概况

防城港20万t进港航道K9+690—K11+500段全航道和K13+000—K14+988段西半侧航道为疏浚区域，疏挖岩石主要为泥质粉砂岩，棕红色，岩芯较完整，未见挤压变质迹象，石英脉较发育，岩面起伏不平。依据风化程度深浅划分为3个风化岩带：

1) 全风化岩：棕红色或灰黄色夹灰白色，稍湿，呈密实粉土状或坚硬粉质黏土柱状，原岩结构可辨，遇水易软化崩解，局部夹碎石。

2) 强风化岩：棕红色、灰黄色夹灰白色及

灰-灰黑色，稍湿，岩芯呈柱状，原岩结构清晰，岩质软，干钻难，可捏碎或折断，浸水易软化，局部夹碎块状中风化岩块，志留系岩石中石英脉发育，岩芯夹有石英碎石。

3) 中风化岩：棕红色、灰-灰黑色、灰黄-灰绿色，岩质较硬。棕红色，岩芯一般较完整，呈短柱状；灰黄-灰绿色岩芯呈碎块状，节理、裂隙较发育。

防城港疏浚区域见图1，岩石特性指标分析统计见表1。

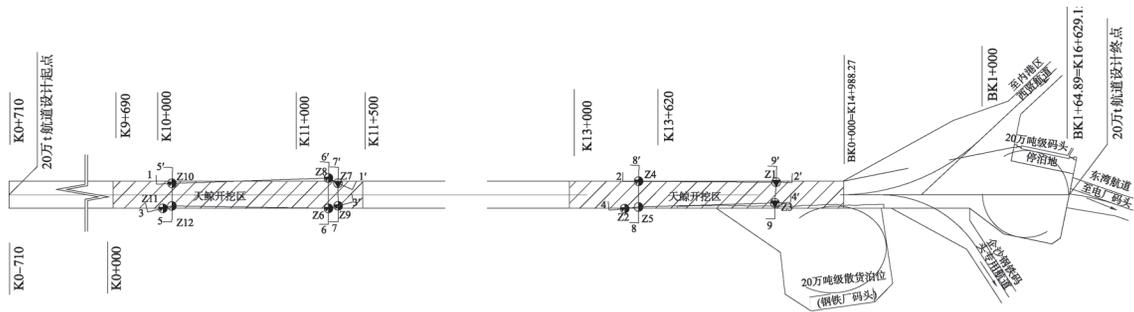


图1 疏浚区域平面图

表1 岩石特性指标

里程	代表性钻孔	饱和单轴抗压强度/MPa	中风化RQD指标	风化程度	软化系数
K9+690—K10+500	Z10,Z11,Z12	0.2 ~ 35.6	78 ~ 93	强中风化岩	0.45 ~ 0.80
K10+500—K11+500	Z6,Z7,Z8,Z9	0.6 ~ 44.1	60 ~ 95	强中风化岩	0.54 ~ 0.83
K13+000—K14+988	Z1,Z2,Z3,Z4,Z5	0.3 ~ 26.0		强风化岩	0.43 ~ 0.62

从表1可以看出，航道疏浚区域K9+690—K14+988的岩石抗压强度和软化系数呈现逐渐减小趋势，强风化岩的RQD指标小于25，岩石质量极差，属于软化岩石。疏浚区域K9+690—K11+500的中风化岩石为较软—较硬岩石，RQD指标在60~95，岩石质量为较差至好，岩石经过海水浸泡后，强度下降约30%左右。

2 岩体疏浚开挖影响因素及理论

2.1 岩体开挖影响因素

岩石的坚硬程度、风化程度、破坏形式和岩体的完整程度、结构类型等因素对疏浚机械效率与能耗影响程度不同。仅考虑疏浚岩石性能变化对重型绞吸船施工效率的影响，得出影响疏浚生产率的关键因素为抗压强度和岩体的完整性，同

时引入了由岩石坚硬程度和岩体完整程度所决定的疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 。在确定反映岩体开挖难易程度 $[BQ]_{TH}$ 时，同时考虑了岩体赋存状态，地下水状态、结构面产状和初始应力状态的影响，使 $[BQ]_{TH}$ 指标对挖掘性能响应更接近实际情况。

2.2 岩体开挖理论

2.2.1 岩体完整性指数的估算

对地质钻探测试点部位实测的岩石质量指标RQD与岩体完整性指数 K_v 所做相关分析，得到RQD与 K_v 的关系^[1]：

$$K_v = 0.177e^{0.0165RQD} \quad r=0.81 \quad (1)$$

依据上述相关关系式，通过岩石质量指标RQD估算出岩体完整性指数，见表2。

表2 岩体完整性指数估算

岩体结构类型及级别	节理间距 (岩块块度) /m	$J_v / (\text{条} \cdot \text{m}^{-3})$	岩体完整性指数 K_v	岩石质量指标 R_{QD}
完整性 (大块体) 岩体 (I)	≥ 1.0	< 3	> 0.75	> 90
较完整 (块体) 岩体 (II)	1.0 ~ 0.4	3 ~ 10	0.75 ~ 0.55	69 ~ ≤ 90
较破碎 (碎块状) 岩体 (III)	$\leq 0.4 \sim 0.2$	10 ~ 20	0.55 ~ 0.35	42 ~ ≤ 69
破碎性 (碎石状) 岩体 (IV)	≤ 0.2	20 ~ 35	0.35 ~ 0.15	0 ~ ≤ 42
极破碎 岩体 (V)		> 35	< 0.15	0

2.2.2 岩体基本质量分级理论

GB 50218—1994《工程岩体分级标准》^[2]中核心量值岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$, 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, 同时受岩体赋存状态、地下水状态、结构面产状和初始应力状态的影响。疏浚的岩石处于海底, 且疏浚岩石微观裂隙复杂、充水饱和、无初始应力, 并依据疏浚工程特点, 引入了疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$, 具体计算如下:

$$[BQ]_{TH} = BQ - 100 (K_1 + K_2 + K_3) \quad (2)$$

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

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; K_1 为地下水影响修正系数, 依据未修正 BQ 指标多在300以下, 且疏浚的岩石在水下, 假设裂隙贯通, 岩石渗水饱和状态, 查《工程岩体分级标准》^[2]表, 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, 岩体不考虑初始应力, 综合取值为0.5。

3 岩体性能和疏浚生产率相关性分析

依据“天鲸号”施工过程中工艺参数变化情况, 统计分析了广西防城港2011-03—2011-07疏浚20万t航道11个时间段里, 不同特性岩石和船舶工艺参数间的变化关系(表3)。

表3 岩石和船舶工艺参数对应关系

日期	岩石类型	岩石饱和单轴抗压强度/MPa	完整性指数	岩体完整程度	岩体基本质量指标 BQ	疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$	生产率/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
2011-03-30	中风化泥质粉砂岩	35.6	0.68	较完整	366.8	216.8	288
2011-04-22	强风化泥质粉砂岩	21.6	0.51	较破碎	282.3	132.3	367
2011-05-18	中风化泥质粉砂岩	44.1	0.76	完整	412.3	262.3	190
2011-05-19	强风化泥质粉砂岩	15.3	0.46	较破碎	250.9	100.9	418
2011-05-20	强风化泥质粉砂岩	8.1	0.32	破碎	194.3	44.3	630
2011-05-22	强风化泥质粉砂岩	10.8	0.39	较破碎	219.9	69.9	486
2011-06-22	强风化泥质粉砂岩	26.0	0.64	较完整	328.0	178.0	349
2011-06-04	强风化泥质粉砂岩	9.9	0.30	破碎	194.7	44.7	509
2011-06-12	强风化泥质粉砂岩	5.9	0.22	破碎	162.7	12.7	621
2011-06-18	强风化泥质粉砂岩	19.3	0.52	较破碎	277.9	127.9	380
2011-06-13	强风化泥质粉砂岩	5.4	0.18	破碎	151.2	1.2	635

单轴饱和抗压强度试验是确定岩石强度最重要的试验, 岩石抗压强度和岩体完整性共同决

定岩石的挖掘难易程度, 统计重型绞吸船“天鲸号”在防城港特有工况下的生产率, 建立经验公

式，预测绞刀产量和生产率。根据表3数据拟合的 $[BQ]_{TH}$ 和疏浚生产率曲线见图2。

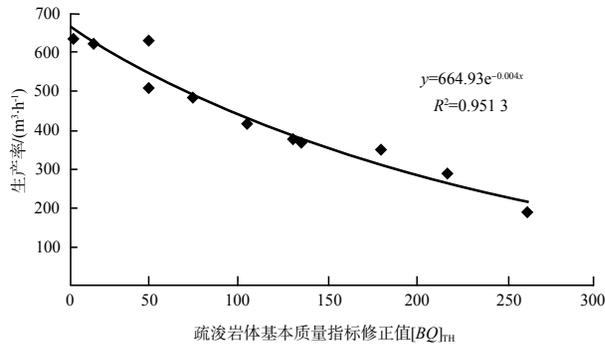


图2 $[BQ]_{TH}$ 和疏浚生产率关系曲线

疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 和生产率的经验为指数关系：

$$\begin{cases} y = 664.93e^{-0.004x} \\ R^2 = 0.9513 \end{cases} \quad (4)$$

式中： y 为天鲸号开挖不同性质岩石的生产率 (m^3/h)； x 为疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ ； R^2 为回归系数，是相关系数的平方，表示所得到的结果的可信程度，值越大则可信度越高。

4 疏浚生产率预测

基于BP (Back-Propagation Network) 神经网络和拟合的公式，在防城港工况条件下，对重型绞吸船“天鲸号”疏浚生产率进行预测。将样本分为训练集和测试集，疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 作为输入，疏浚生产率作为期望输出，11组数据作为训练集，4组数据作为测试集。训练样本关系见图3。

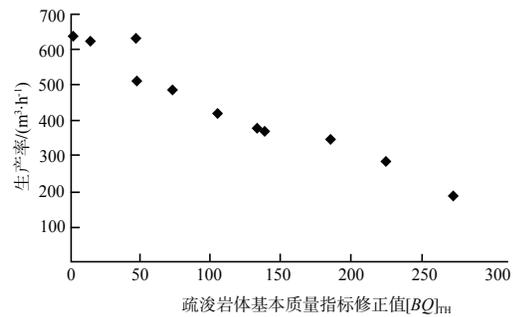


图3 训练样本散点

根据处理后的数据范围，神经网络模型建立选取正切S型传递函数tansig和线性purelin作为激活函数，BP网络的训练函数为有动量的梯度下降法，训练函数traingdm。设定网络的最大学习迭代次数为10 000次。设定网络的学习精度为0.01。

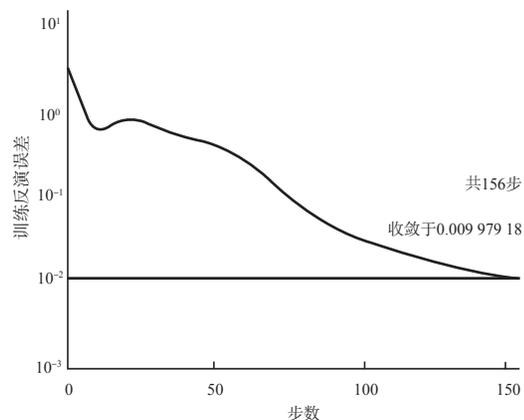


图4 训练收敛曲线

如图4所示，BP网络模型在训练学习过程中，学习迭代到156次时，就达到了学习精度要求。表4为训练的BP神经网络和一元经验公式对疏浚生产率的预测效果。

表4 疏浚生产率预测对比

日期	参照钻孔	岩石类型	疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$	生产率 / ($m^3 \cdot h^{-1}$)			相对预测误差 (差值/实际值) / %	
				一元公式计算	BP神经网络预测	实际	经验公式	BP网络
2011-03-19	Z10	中风化泥质粉砂岩	206.3	291.3	276.5	293	-0.57	-5.63
2011-04-03	Z12	中风化泥质粉砂岩	158.0	353.4	340.0	309	14.38	10.03
2011-05-08	Z9	中风化泥质粉砂岩	151.4	362.9	350.5	327	10.97	7.19
2011-05-28	Z5	强风化泥质粉砂岩	1.7	660.3	633.2	606	8.96	4.49

从表4对生产率预测值和实际值可以看出, 经验公式和BP神经网络的生产率预测值普遍比实际生产率大, 预测值随着疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 的增加, 预测值愈小, 相对差值无规律可循。当 $[BQ]_{TH}$ 为158时, 预测值相对误差最大, 经验公式相对差值百分数为14.38%, BP神经网络相对差值百分数为10.03%。

拟合的一元方程和BP神经网络预测的生产率相比较, BP神经网络预测值更接近实际生产率(图5)。

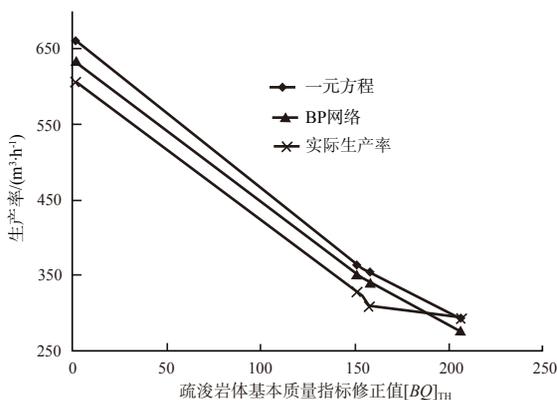


图5 生产率预测比较

5 结语

1) 仅考虑疏浚岩石条件变化对船舶施工效率的影响, 分析影响疏浚生产率的关键因素为抗压强度和岩体的完整性。创新性地引进了疏浚岩体

基本质量修正值 $[BQ]_{TH}$, 并考虑了疏浚岩体在海床下的结构面产状、初始应力状态和饱和程度, 反映岩体开挖难易程度, 建立了 $[BQ]_{TH}$ 和疏浚岩石生产率之间的经验公式。

2) 基于BP神经网络和拟合的经验公式, 在防城港工况条件下, 对重型绞吸船“天鲸号”疏浚生产率进行预测, 随着疏浚岩体基本质量指标修正值 $[BQ]_{TH}$ 增加, 预测值愈小, 相对差值无规律可循。当 $[BQ]_{TH}$ 为158时, 预测值相对误差最大, 经验公式相对差值百分数为14.38%, BP神经网络相对差值百分数为10.03%, 预测值的可靠性得到进一步的验证。

3) 拟合经验公式和预测模型可靠性得到验证后, 专业人员只需根据以往经验、船舶性能参数, 在设定的运距、水深、风浪等条件下分析船舶在标准土质条件下的施工效率, 结合疏浚岩体基本质量修正值 $[BQ]_{TH}$, 可以快速估算拟建工程项目的船舶施工效率, 具有较高的实际应用价值。

参考文献:

[1] 胡卸文, 钟沛林, 任志刚. 岩体块度指数及其工程意义[J]. 水利学报, 2002(3): 80-83.
 [2] GB 50218—1994 工程岩体分级标准[S].

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

三航院中标温州港状元岙港区二期工程勘察设计项目

近日, 三航院中标浙江温州港状元岙港区二期工程勘察设计项目, 合同金额4 242万元, 设计周期约8个月。

该工程年设计吞吐量为130万个标准箱, 水域部分建设5万吨级集装箱专用泊位3个, 码头岸线总长969 m, 码头总尺寸969 m × 50 m, 引桥3座。港区陆域面积0.817 km², 包括堆场、道路、生产生活辅助区、卡口及查验场地等。

该港区的建设, 将进一步提高温州港集装箱运输专业化和集约化的发展水平, 推进港区功能布局调整优化, 并完善长江三角洲地区集装箱港口布局。

摘编自《中国交通建设网站》