

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.S2.041

基于 TBM 掘进参数的岩石强度估算方法探讨

马池帅^{1,2}, 陈卫忠^{1,3}, 田洪铭¹, 杨建平¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;
2. 中国科学院大学, 北京, 100049; 3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要: 隧道盾构掘进机(TBM)掘进时难以及时地、有效地评估掌子面岩石强度, 导致现场施工过程中很难客观地判别岩爆、卡机等施工风险。在前人研究成果和工程实践的基础上, 提出一种基于 TBM 掘进参数的现场岩石强度快速估算方法, 对掌子面岩石强度进行实时评价。通过 TBM 规格、掘进参数与岩石强度的力学分析, 建立了现场岩石强度快速估算公式。基于对国内外多条隧道 TBM 数据的统计拟合分析, 确定了估算公式中系数常量与 TBM 参数(开挖直径、刀具尺寸)的相关性, 以多个典型 TBM 工程实例进一步验证了所提经验公式的普适性与可靠性。研究结果可为 TBM 工程岩石强度的快速现场估算提供新的切实可行的思路。

关键词: 隧道掘进机(TBM); 掘进参数; 岩石强度; 实时; 现场估算

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 增 2 - 0295 - 09

Discussion on rock strength estimating method based on TBM parameters

MA Chi-shuai^{1,2}, CHEN Wei-zhong^{1,3}, TIAN Hong-ming¹, YANG Jian-ping¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: It is difficult to estimate the detailed rock strength of excavating face timely and effectively when tunnel boring machine(TBM) advances, which results in it difficult to predict the risk of rockburst and TBM jamming. Based on previous research results and engineering practices, a method for estimating rock strength using TBM parameters is proposed for real-time in-situ estimation of rock strength. The equation of real-time estimation is established by the mechanical analysis between TBM specifications, excavation parameters and the rock strength. Then the relationships between the constants in the equations and the TBM specifications such as excavation(tunnel) diameter, cutter diameter are determined in this study on the basis of data collected at several tunnels. Typical TBM case studies for application further verified the wide suitability and reliability of the novel equations. The proposed method appears to be promising and feasible for real-time in-situ estimation of rock strength.

Keywords: tunnel boring machine(TBM); boring parameters; rock strength; real-time; in-situ estimation

1 引 言

与钻爆法等传统工艺相比, 全断面岩石隧道掘进机(TBM)因施工质量高、高效环保、围岩扰动小等^[1]优点, 已广泛应用于国内外地下工程建设中, 逐渐成为隧道施工的首选。岩石单轴抗压强度作为表征岩体质量特性的重要参数, 已应用于岩体分级(RMR、Q 分级)、岩爆强度应力比判别和支护参

数优化等方面^[2-4]。在现场对岩石特性的勘查描述和快速准确地确定岩石强度尤为重要, 然而 TBM 掘进时有其特殊性, 刀盘切割整个掌子面, 护盾或管片使工作人员与掌子面及洞壁围岩完全隔绝^[5], 施工过程中无法直接对其作全面监察, 很难快速地、准确地对围岩质量特性进行现场试验、评估, 传统的“取芯室内力学实验”、“锤击回弹法”或“点荷载试验法”等方法在此条件下已不适用。如何根据 TBM

收稿日期: 2017-03-23

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(No. 2015CB057906)

This work was supported by the National Program on Key Basic Research Project(973 Program)(2015CB057906).

第一作者简介: 马池帅, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事地下工程岩爆预测及控制技术方面的工作。E-mail: machishuai014@126.com

通讯作者: 陈卫忠, 男, 1968 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面的教学与研究工作。E-mail: wzchen@whrsm.ac.cn

掘进参数变化趋势,科学合理地建立一种现场岩石强度快速估算方法,对于 TBM 施工中的岩石力学特性的研究和解决 TBM 施工技术难题具有重要意义,也是工程承包方最为关注的重要课题。

TBM 掘进参数与岩石强度间具有很强相关性,20 世纪 70~80 年代 Roxborough 等^[6]、Snowdon 等^[7]提出岩石强度与推力成线性比例关系。Nelson 等^[8]提出了贯入度指数(field penetration index, FPI)概念,基于室内试验和理论分析,发现岩石强度与贯入度指数 FPI 成比例关系。近年来, Fukui 等^[9-11]基于室内试验结果提出 TBM 掌子面处的岩石强度可以通过滚刀推力、扭矩、滚刀数量、滚刀直径和贯入深度计算,并选择多条 TBM 隧道实例验证了所提公式的准确性。Hamidi 等^[12]分析现场实测数据发现 FPI 与岩石强度 UCS 呈线性比例, $R^2 = 0.7$ 。Ebrahim 等^[13]基于工程实际发现岩石强度与 $\ln(FPI)$ 成比例关系, $R^2 = 0.75$ 。Hassanpour 等^[14-16]以伊朗多条引水隧洞的工程实例,提出岩石强度 UCS 与 FPI 或 $\ln(FPI)$ 的线性拟合关系式。

对于 TBM 参数间相关性,国内外学者和工程人员已做了一些探讨和研究。Roxborough 等^[6]、Sanio 等^[17]通过理论分析和室内试验,证明了滚动力与法向推力的比值与贯入度成幂函数关系,法向推力与贯入度成幂函数关系。Howarth 等^[18]也通过室内试验得出法向推力与贯入度成线性比例关系。宋克志等^[19]研究了泥岩、砂岩交互地层条件下现场掘进试验和岩石点荷载强度试验,发现岩石强度与贯入度、刀盘推力与贯入度均成幂函数关系。龚秋明等^[20-21]分别研究了新加坡花岗岩地层、锦屏 II 级水电站工程现场掘进试验和室内线性切割试验,发现法向推力与贯入度成线性或幂函数比例关系。

从上述 TBM 掘进参数和岩体强度估算理论可以发现,岩体质量等级越高,岩石强度越大,相应贯入度越小,推力、扭矩越大,基于 TBM 掘进参数估算围岩强度基本可行的。然而在这方面的研究仍有明显的不足:(1)前期研究大部分是基于室内试验定性或半定量描述,没有给出工程通用的量化公式。(2)考虑因素较为单一,仅通过某一特定 TBM 工程、某一掘进参数与岩石强度的简单拟合,对岩石强度的描述较为粗略,工程实践中可操作性和普适性都有待提高。

岩石强度与滚刀推力、扭矩、贯入度、开挖直径、滚刀数量、滚刀直径等 TBM 参数密切相关,本研究在前人研究成果和工程实践的基础上,提出一种基于 TBM 规格和掘进参数的岩石强度快速估

算方法,通过对国内外多条隧道 TBM 数据的统计拟合分析,确定岩石强度估算公式中的系数常量与 TBM 参数的相关性,以多个典型 TBM 工程掘进实例分析验证了所提经验公式的适用性与可靠性。本研究为 TBM 工程岩石强度的快速估算提供了一种新的切实可行的思路,使工程人员能相对准确地迅速地估计现场岩石强度,继而通过对围岩质量指标、支护设计、岩爆等地质灾害进行相应判别。

2 基于 TBM 掘进参数的现场岩石强度估算方法

2.1 现场岩石强度估算公式提出

基于先前法向推力 F_N 与贯入度 P 、岩石强度 UCS 的相关性研究,法向推力与贯入度成幂函数关系,与岩石强度成线性比例关系,故法向推力 F_N 可表示为

$$F_N = A_1 \sqrt{PUCS} \quad (1)$$

式中: A_1 为常量系数。

TBM 总推力 F 、总扭矩 T_R 为

$$F = nF_N F_L \quad (2)$$

$$T_R = nF_R \frac{D}{4} F_L \quad (3)$$

式中: F_R 为 TBM 滚动力; D 为 TBM 主机直径; F_L 为刀具与围岩摩擦造成的损失系数,一般取 1.2; n 为滚刀数量。

同时, Roxborough 等^[6]、Sanio 等^[17]基于理论分析和室内试验,已验证滚动力与轴向力比值与 P 成幂函数关系:

$$\frac{F_R}{F_N} = a_1 \sqrt{P} \quad (4)$$

联立式(1)~(4)可得 TBM 总推力 F 、总扭矩 T_R 与岩石强度的关系公式:

$$F = C_1 n \sqrt{PUCS} \quad (5)$$

$$T_R = C_2 n D P U C S \quad (6)$$

式中:

$$C_2 = 0.25 a_1 C_1 \quad (7)$$

岩石强度 UCS 可通过与扭矩的关系式(6)计算:

$$UCS = T_R / C_2 n D P \quad (8)$$

式中: C_1 、 C_2 与刀盘直径、刀头直径密切相关。

2.2 TBM 掘进参数数据统计及系数确定

TBM 掘进推力、扭矩、贯入度、滚刀直径、数目、开挖直径等参数以及岩石强度间有很强的相关性,本文通过分析 18 条国内外 TBM 隧洞工程的实

测数据分析，拟合分析系数 C_1 、 C_2 、 a_1 与 TBM 参数间相关性，建立了一种基于 TBM 掘进参数的岩石强度快速估算方法。TBM 隧道规格参数（开挖直径、刀具直径、刀具数量）、掘进参数（推力、扭矩、贯入度）以及施工期间的平均岩石强度统计见表 1。

(1) 系数常量 C_1

由公式 (5) 计算系数常量 C_1 值，绘制 C_1 与刀具直径 d 的散点图，并对散点图进行趋势拟合，如图 1 所示。拟合关系式为

$$C_1 = 0.14d - 0.04, (R^2 = 0.7068) \quad (9)$$

两者存在很好的相关性，随刀具直径 d 的轻微改变，常数 C_1 有明显变化，说明刀具直径 d 是估算岩石单

轴抗压强度的一个关键参数。

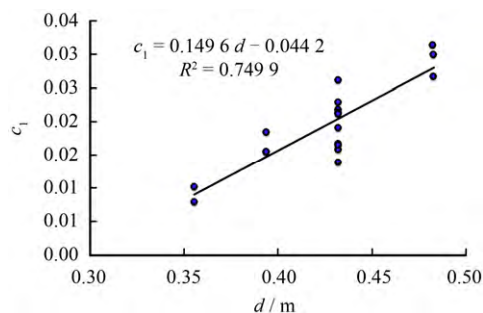


图 1 常数 C_1 与刀具直径相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of constant C_1 and tool diameter

表 1 TBM 规格和掘进数据汇总

Table 1 Summary of specifications and excavation data of TBM

| 参数 | 隧道各文献 | | | | | | | | | |
|------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|----------------------|--------|
| | Nikengoya ^[9] | Maiko ^[9-10] | Doushi ^[10] | Ogouchi ^[10] | Hiraya ^[10] | CHAIWan ^[10] | Tsukui ^[10] | Takisato ^[10] | Tolo ^[10] | |
| 开挖直径 D/m | 2.75 | 5 | 3 | 3.6 | 2.6 | 4.8 | 5.4 | 8.3 | 3.56 | |
| 刀具直径 d/m | 0.394 0 | 0.394 0 | 0.355 6 | 0.355 6 | 0.394 0 | 0.482 6 | 0.432 0 | 0.432 0 | 0.432 0 | |
| 刀具数目 n | 20 | 37 | 27 | 34 | 19 | 32 | 37 | 52 | 25 | |
| TBM 规格参数 | 刀盘间距 s/mm | 68.8 | 67.6 | 55.6 | 52.9 | 68.4 | 75 | 73 | 79.8 | 71.2 |
| | 转速 $RPM/(rev/min)$ | 9.5 | 7.5 | 7.6 | 10.0 | 4.0~12.0 | 11.5 | 6.3 | 2.6/5.3 | 11.3 |
| | 最大应用推力/MN | 4.4 | 8.31 | 8 | 4.3 | 4.12 | 10 | 9.12 | 12.4 | 7.15 |
| 掘进参数 | 单个刀具最大推力/kN | 220 | 225 | 296 | 126 | 217 | 313 | 246 | 238 | 286 |
| | 最大应用扭矩/(kN·m) | 300 | 1 058 | 637 | 430 | 289 | 1 982 | 1 363 | 3 920 | 540 |
| | 岩石强度均值/MPa | 53.4 | 140 | 67 | 76.6 | 76.8 | 122.7 | 84.7 | 60 | 120 |
| | 平均贯入度/(mm/rev) | 7.7 | 3.2 | 8.2 | 3.1 | 6.8 | 4.3 | 5.9 | 10.7 | 4.4 |
| | 平均推力/MN | 1.45 | 4.55 | 1.67 | 1.14 | 2.22 | 8.07 | 5.26 | 6.17 | 4.25 |
| | 平均扭矩/(kN·m) | 210 | 470 | 310 | 120 | 210 | 900 | 590 | 770 | 300 |
| 拟合参数 | C_1 | 0.015 | 0.016 | 0.010 | 0.008 | 0.018 | 0.031 | 0.022 | 0.019 | 0.021 |
| | C_2 | 0.009 | 0.006 | 0.007 | 0.004 | 0.008 | 0.011 | 0.006 | 0.003 | 0.006 |
| | a_1 | 2.401 | 1.461 | 2.733 | 2.101 | 1.765 | 1.417 | 1.082 | 0.581 | 1.196 |
| 参数 | Shinyuyama ^[11] | KWCT ^[14] | GWCT ^[15] | MSTT ^[15] | ZWCT ^[16] | Maen ^[22] | Pievel ^[22] | Varzo ^[23] | 锦屏 ^[24] | |
| 开挖直径 D/m | 3.8 | 4.65 | 4.53 | 10.07 | 6.73 | 4.2 | 4.05 | 3.84 | 12.43 | |
| 刀具直径 d/m | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.432 | 0.483 | |
| 刀具数目 n | 27 | 31 | 32 | 68 | 42 | 36 | 27 | 27 | 80 | |
| TBM 规格参数 | 刀盘间距 s/mm | 70.4 | 90.0 | 90.0 | 90.0 | 90.0 | 66.0 | 75.0 | 86.5 | |
| | 转速 $RPM/(rev/min)$ | 4~10 | 0~11 | 0~12 | 5.07 | 0~11 | 5.5~11 | 11.3 | 4.5~8.9 | 4.98 |
| | 最大应用推力/MN | 8.000 | 16.913 | 18.000 | 27.101 | 28.134 | 7.920 | 4.620 | 8.827 | 24.260 |
| 掘进参数 | 单个刀具最大推力/kN | 296 | 546 | 563 | 399 | 670 | 220 | 171 | 327 | 267 |
| | 最大应用扭矩/(kN·m) | 725 | 1 723 | 1 950 | 6 433 | 4 450 | 2 050 | 1 890 | 1 890 | 16 519 |
| | 岩石强度均值/MPa | 57.4 | 100 | 135 | 165 | 75 | 130 | 156 | 135 | 105.01 |
| | 平均贯入度/(rev/min) | 6.9 | 11 | 5 | 4 | 7 | 4.2 | 3 | 5.5 | 10.46 |
| | 平均推力/MN | 2.04 | 4.51 | 8 | 15 | 4.41 | 5 | 3.2 | 6.2 | 16.929 |
| | 平均扭矩/(kN·m) | 250 | 890 | 900 | 1 200 | 850 | 850 | 541 | 558 | 2 492 |
| 拟合参数 | C_1 | 0.016 | 0.014 | 0.026 | 0.021 | 0.017 | 0.016 | 0.014 | 0.023 | 0.020 |
| | C_2 | 0.006 | 0.006 | 0.009 | 0.003 | 0.006 | 0.010 | 0.011 | 0.007 | 0.002 |
| | a_1 | 1.553 | 1.619 | 1.405 | 0.502 | 1.369 | 2.498 | 3.049 | 1.264 | 0.463 |

(2) 系数常量 C_2

基于上述 TBM 数据的统计分析, 由式 (6) 计算得 C_2 值, 再利用式 (7) 确定 a_1 值, $a_1 D$ 的散点趋势拟合如图 2 所示, 拟合关系式为

$$a_1 = 7.54 / D - 0.18 \quad R^2 = 0.8117 \quad (10)$$

可得 $a_1 = 0.8117$ 。 a_1 与开挖直径 D 成反比关系, 随隧道开挖直径 D 的增大, a_1 值呈幂函数形式减小。

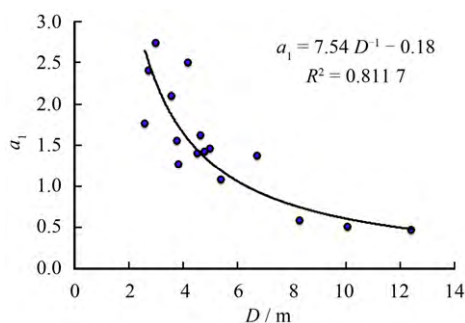


图2 系数常量 a_1 与开挖直径相关性分析

Fig.2 Correlation analysis of coefficient constant a_1 and tunnel diameter

联立式 (7) (10) (11) 可得 C_2 与 D 、 d 的拟合关系式:

$$C_2 = (0.14d - 0.04)(1.88 / D - 0.05) \quad (11)$$

(3) 刀具数目 n

硬岩 TBM 刀具数目 n 与开挖直径 D 有很强的相关性, 但是其量化方法鲜见报道。本研究统计分析了国内外近 20 条 TBM 隧道的数据, 得到如图 3 所示的散点图趋势, 拟合关系式为

$$n = 5.96D + 5.15, \quad (R^2 = 0.9653) \quad (12)$$

$n = 0.9653$, 对于给定的开挖直径 D 即可估算选用 TBM 的刀具数目 n 。

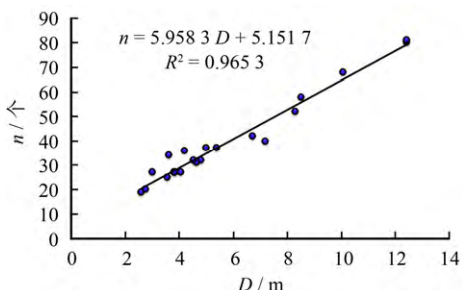


图3 刀具数量与开挖直径相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of cutter number and diameter

基于上述相关性拟合分析, 联立式(8)~(13)可得岩石单轴抗压强度与贯入度、刀盘直径、刀头直径以及扭矩之间的关系:

$$UCS = \frac{T_R}{(1.88 - 0.05D)(0.14d - 0.04)nP} \quad (13)$$

式中: $n = 5.96D + 5.15$ 。

综上, 给定 TBM 工程即可在可研阶段基于 TBM 规格参数确定系数常量 C_1 、 a_1 、 C_2 , 得到掌子面岩石强度的估算公式。在施工阶段, 随着地质、岩性的不断变化, TBM 掘进参数相应变化, 从而快速获得不同 TBM 掘进参数下的掌子面岩石强度, 为进一步的岩体质量分级、可掘性研究、岩爆或卡机风险的判别及相应的支护决策提供了依据。

3 工程实例验证

(1) 实例 1

Maiko 铁路隧道采用直径为 5 m、刀具尺寸为 394 mm 的 TBM 开挖一段 600 m 长节段。岩性主要为 Rokko 花岗岩, 强度范围为 47~250 MPa, 均值为 140 MPa。

从图 4 可以看出, 扭矩基本维持在 500 kN·m, 贯入度范围为 1.6~5.3 mm, 变化较大。基于式(13)估算岩石强度, 260 m 处现场试验结果为 80.9 MPa, 贯入度为 5.3 mm/rev, 两式计算值分别为 100.3 MPa 和 81.9 MPa; 500 m 处现场试验结果为 244.7 MPa, 贯入度为 1.6 mm, 两式计算值分别为 246.7 MPa 和 253.7 MPa。误差分析如图 5 所示。扭矩的误差范围为 0.3%~36.94%, 均值为 15.31%, 尽管已判别筛选数据, 有些桩号地段两套公式估算数据误差还是较大, 但整体趋势与现场吻合度较好。

(2) 实例 2

Hiraya 隧道由于构造节理较发育, 选用直径为 2.6 m、刀具尺寸为 394 mm 的护盾 TBM。开挖断面主要为中生代 Tenryu 花岗岩, 最低岩石强度为 10 MPa, 最大可达 230 MPa。从图 6 可以看出, 其岩石强度呈现区域性分布, 在 2 500~2 700 m 和 2 800~2 850 m 里程强度变化范围较小, 呈现缓慢增大趋势, 基本维持在均值 35 MPa 附近, 2 700 m 出现陡增; 2 700~2 800 m 里程范围其强度整体较高, 均值即达 150 MPa, 最大可达 230 MPa。相应的扭矩参数趋势与强度变化趋势类似, 贯入度变化正好相反, 充分说明岩体质量等级越高, 岩石强度越大, 相应贯入度越小, 推力、扭矩越大。同样, 利用式 (13) 估算岩石强度, 并与实际岩石强度比较分析, 如图 6 所示。估算结果整体趋势与现场回弹仪计算岩石强度基本一致。采用数理统计判断准则取舍异常数据, 误差分析 (见图 7) 发现, 基于扭矩的误差范围为 0.7%~36.9%, 均值 16.6%, 尽管局部区域有些数据误差较大, 但整体趋势与现场

吻合度较好，估算结果可满足工程实践需要。

(3) 实例 3

日本 Shinyuyama 隧道开挖直径为 3.8 m，TBM 刀具直径为 432 mm。围岩主要是第三纪黑色、棕色安山岩和凝灰角砾岩。

图 8 为桩号 1 100 ~ 1 250 m 范围的 TBM 掘进

参数变化趋势与基于现场试验获得的岩石强度值。扭矩在桩号 1 150 m 和 1 225 m 时较高，总体保持在 144 ~ 507 kN·m。贯入度在 1 100 m 附近达到 10 mm/rev，基本维持在 4 ~ 8 mm/rev 之间。黑色安山岩具有很高的单轴抗压强度约为 200 MPa，棕色安山岩强度较低，约为 50 MPa，凝灰角砾岩与安山岩

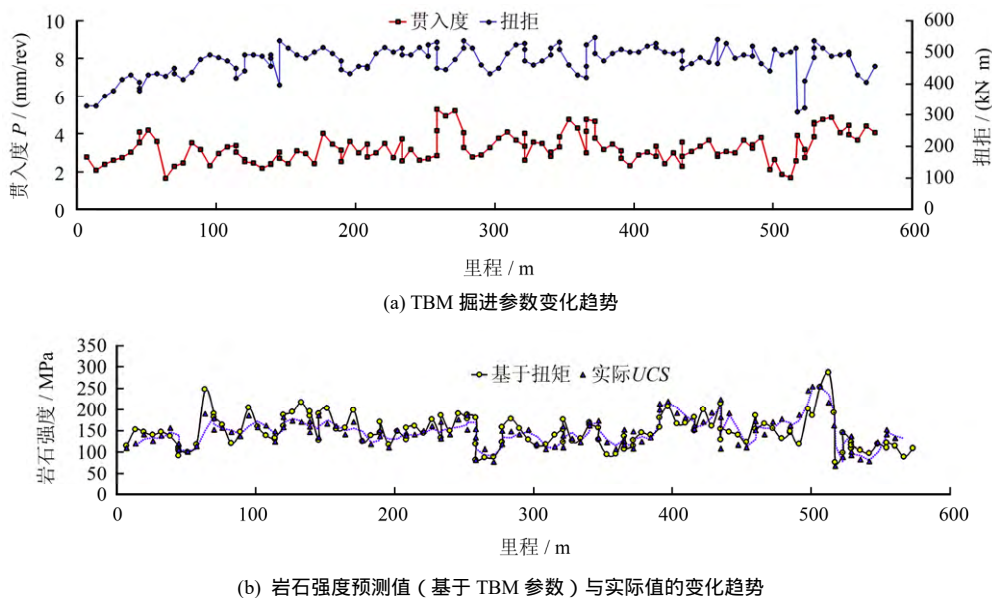


图 4 Maiko 隧道 TBM 掘进参数和岩石强度变化趋势^[10] (125 组数据)

Fig.4 Changes trend of TBM tunneling parameters and rock strength of Maiko tunnel^[10](125 sets of data)

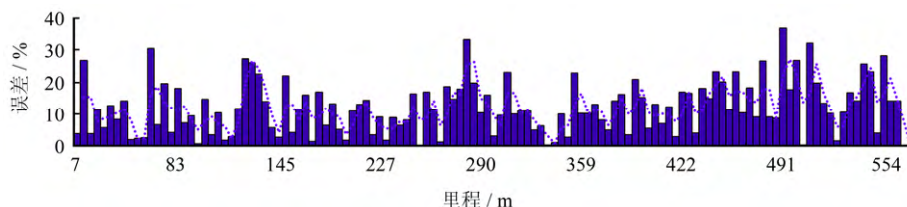


图 5 Maiko 隧道误差分析图

Fig.5 Error analysis graphics of Maiko tunnel

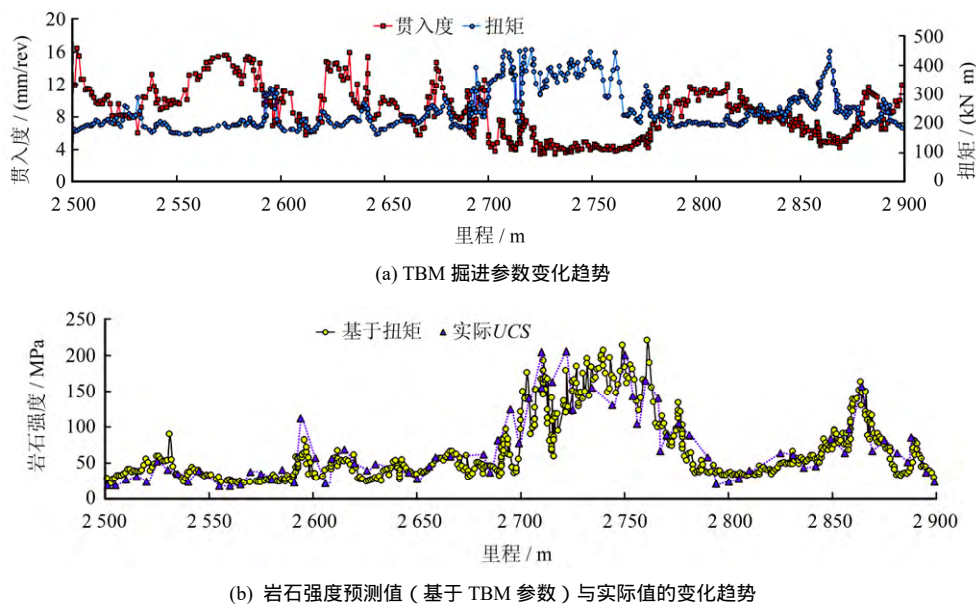


图 6 Hiraya 隧道 TBM 掘进参数和岩石强度变化趋势^[10] (575 组数据)

Fig.6 Changes trend of TBM tunneling parameters and rock strength of Hiraya tunnel^[10](575 sets of data)

强度类似。

采用本文岩石强度估算公式，并代入相应的TBM掘进参数计算，与现场试验获得的岩石强度值进行对比可得岩石强度变化趋势(见图8)，通过TBM掘进参数估算的岩石强度与现场回弹仪试验结果整体趋势吻合度较好，只是个别区域出现或大

或小现象。

采用数理统计中格拉布斯判断准则取舍异常数据后，对估算的岩石强度进行误差分析，如图9所示。实际与估算强度(基于推力、扭矩)相比，基于扭矩的估算误差范围为0.03%~37.22%，均值18.71%，误差满足工程实践许可范围。

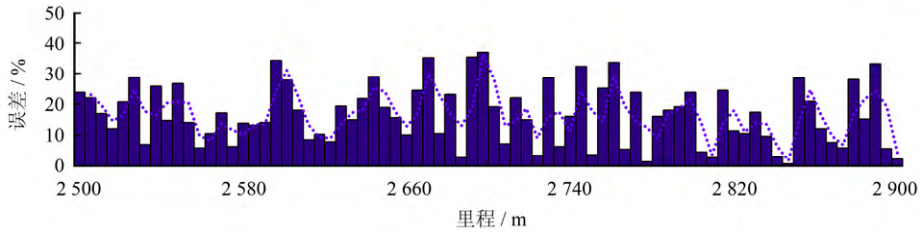
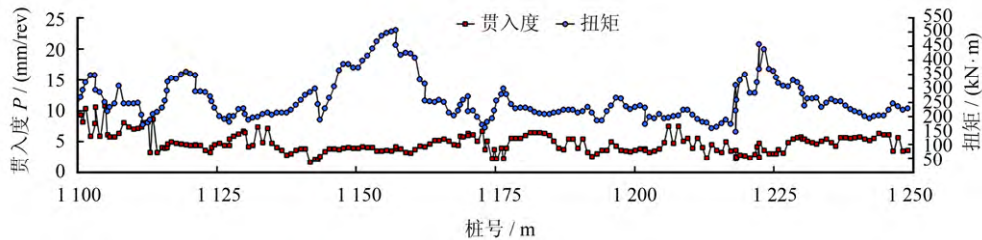
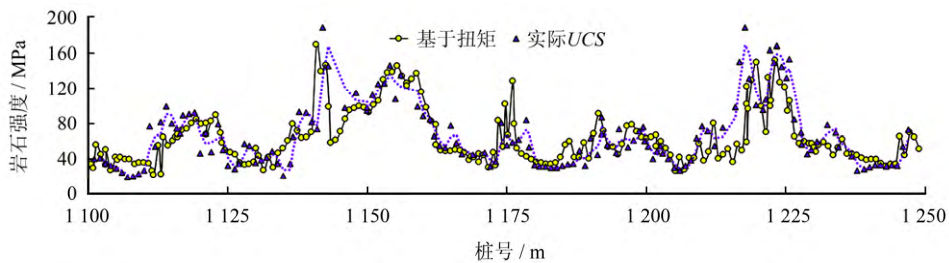


图7 Hiraya 隧道误差分析图
Fig.7 Error analysis graphics of Hiraya tunnel



(a) TBM 掘进参数变化趋势



(b) 岩石强度预测值(基于TBM参数)与实际值的变化趋势

图8 Shinyuyama 隧道 TBM 掘进参数和岩石强度变化趋势^[11] (203 组数据)

Fig.8 Changes trend of TBM tunneling parameters and rock strength of Shinyuyama tunnel^[11](203 sets of data)

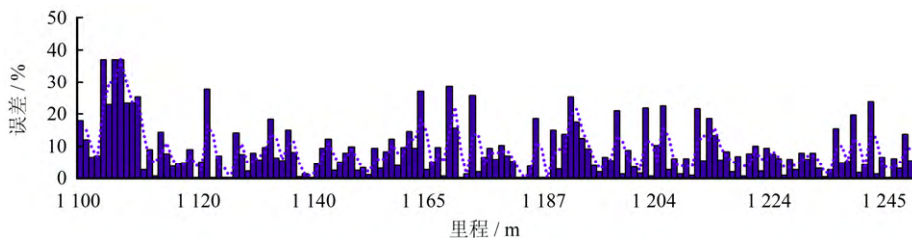


图9 Shinyuyama 隧道误差分析图
Fig.9 Error analysis graphics of Shinyuyama tunnel

(4) 实例 4

依托的巴基斯坦 Neelum-Jhelum (N~J) 水电 TBM 引水隧洞选用直径为 8.53 m、刀具尺寸为 432 mm 的开敞式 TBM。地形地质条件较为复杂，穿过

一些连续发育紧闭短小褶皱构造(向斜、背斜)，地层岩性界线及产状发生较大变化，主要为第三系 Murree 地层组青灰色砂岩、紫红色粉砂岩夹泥质岩，青灰色砂岩强度为 125~220 MPa，紫红色粉砂

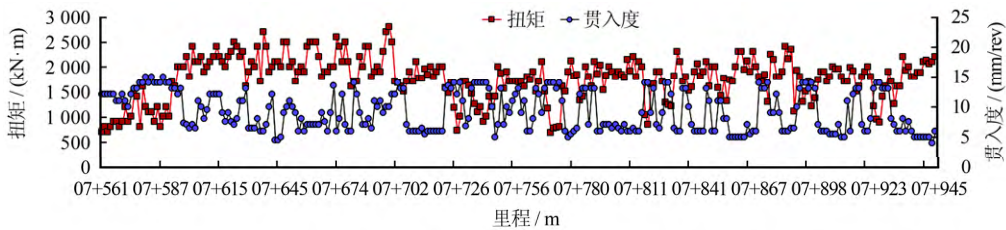
岩强度为 72 ~ 184 MPa，泥岩强度为 10 ~ 60 MPa。

TBM 隧道施工过程中掘进参数变化趋势和现场实际岩石强度值如图 10 所示。所有参数呈现出典型的波动起伏分布。07+945 ~ 07+930 m 范围为强度较高的青灰色砂岩，为 138 ~ 220 MPa 相应的扭矩值也较大，为 1 600 ~ 2 200 kN·m，贯入度则较小，为 4 ~ 8 mm/rev；07+930 ~ 07+920 m 为紫红色粉砂岩并夹杂泥质岩，反映在 TBM 掘进参数上即扭矩值相对较小(884 ~ 1 400 kN·m)，贯入度较大(13 ~ 14 mm/rev)，相应估算的岩石强度达到较小值 30 ~ 75 MPa。误差统计分析如图 11 所示。

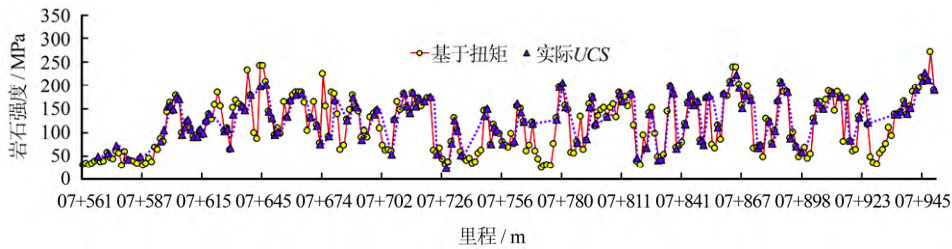
基于扭矩的误差范围为 0.8 % ~ 37.63 %，均值 6.1 %。现场岩石强度离散性较大，局部地段估算强度有一定误差，但整体趋势与现场吻合度较好，统计的 07+945 ~ 07+561 m 桩号段内，采用估算公式清晰地反映出现场岩石强度的软硬交替现象（地址素描图清晰显示该区域硬质砂岩与软质粉砂岩夹泥

岩相间分布），这说明基于 TBM 掘进参数估算的岩石强度与现场的地质勘察、强度试验相吻合。

几个典型工程实例统计验证发现，基于 TBM 掘进参数的岩石强度值与实际值有一定误差，整体平均误差为 6.10 % ~ 18.71 %，局部区域误差较大，接近 40 %。分析原因有两点：当开挖区域围岩较为完整，结构面相对不发育时，围岩质量主要由完整岩石强度等参数控制，TBM 掘进参数与岩石强度之间具有较高的相关性，此时由 TBM 掘进参数得到的估算值准确性较高。而当围岩较为破碎，结构面较发育时，岩体质量主要由岩体结构和不连续面状态决定，此类地层中 TBM 掘进参数往往不稳定，受人为因素影响较大，基于 TBM 掘进参数求解的岩石强度值误差相对较大。在实际工程实践中，通过“锤击回弹法”或“点荷载试验法”获得岩石强度也会有一定离散性，两者对比分析时有时也会出现较大误差，故评判岩石强度误差时更看重整体均



(a) TBM 掘进参数变化趋势



(b) 岩石强度预测值（基于 TBM 参数）与实际值的变化趋势

图 10 Neelum-Jhelum 隧道 TBM 掘进参数和岩石强度变化趋势（285 组数据）

Fig.10 Changes trend of TBM tunneling parameters and rock strength of Neelum-Jhelum tunnel(285 sets of data)

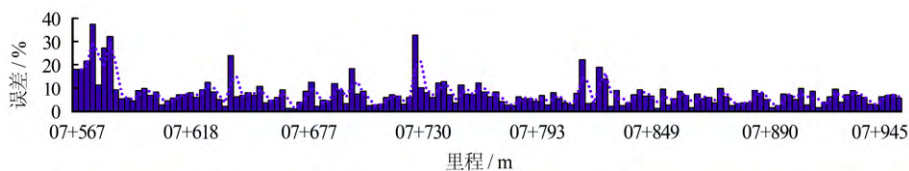


图 11 Neelum-Jhelum 隧道误差分析图

Fig.11 Error analysis graphics of Neelum-Jhelum tunnel

值误差而非最大误差。

4 结 论

(1) 岩石强度与 TBM 掘进机的滚刀推力、扭

矩、贯入度、开挖直径、滚刀数量、滚刀直径等参数密切相关。本研究基于 TBM 掘进参数，提出了一种现场掘进过程中岩石强度快速估算方法，有助于解决 TBM 施工过程中掌子面岩石强度难以及时、

有效评估的技术难题。

(2) TBM 参数(开挖直径、刀具尺寸等)对岩石强度估算公式中的系数常量有较大影响,基于回归分析确定了两者的拟合关系式,得到岩石单轴抗压强度与贯入度、刀盘直径、刀头直径以及扭矩之间的关系为式(13)。

(3) 基于扭矩估算的岩石强度与现场吻合度较好,整体平均误差在 6.1%~18.71%,验证了所提经验公式的普适性与可靠性。

本研究为 TBM 工程岩石强度的快速估算提供了一种新的切实可行的思路,可使工程人员能相对准确迅速地对现场岩石强度进行估计。为更好地将本文的研究成果应用于工程实践,下一步将开发一个软件系统,将 TBM 掘进机的掘进参数信息传输到系统,再结合本文提出的岩爆和挤压大变形的判据,实时评判掌子面的安全状态,及时调整掘进参数,避免岩爆、卡机及塌方等地质灾害发生的次数。

参 考 文 献

- [1] 马洪素, 龚秋明, 王驹, 等. 围压对 TBM 滚刀破岩影响规律的线性切割试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(2): 346 - 355.
MA Hong-su, GONG Qiu-ming, WANG Ju, et al. Linear cutting tests on effect of confining stress on rock fragmentation by TBM cutter[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering**, 2016, 35(2): 346 - 355.
- [2] 付志亮, 王亮. 煤层顶底板岩石点荷载强度与拉压强度对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 88 - 96.
FU Zhi-liang, WANG Liang. Comparative experimental research on point load strength, uniaxial compressive strength and tensile strength for rocks in roof and floor of coal seam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering**, 2013, 32(1): 88 - 96.
- [3] 林宗元. 岩土工程试验监测手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 34 - 40.
LIN Zong-yuan. Geotechnical testing and monitoring manual[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005: 34-40.
- [4] BRUNO G, VESSIA G, BOBBO L. Statistical method for assessing the uniaxial compressive strength of carbonate rock by Schmidt hammer tests performed on core samples[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2012, 46(1): 199 - 206.
- [5] 孙金山, 卢文波, 苏利军, 等. 基于 TBM 掘进参数和渣料特征的岩体质量指标辨识[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1847 - 1854.
SUN Jing-shan, LU Wen-bo, SU Li-jun, et al. Rock mass rating identification based on TBM performance parameters and muck characteristics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(12): 1847 - 1854.
- [6] ROXBOROUGH F F, PHILLIPS H R. Rock excavation by disc cutter[C]//**International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Oxford: Pergamon Press: [s. n.], 1975.
- [7] SNOWDON R A, RYLEY M D, Temporal J. A study of disc cutting in selected British rocks[C]//**International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**. Oxford: Pergamon Press: [s. n.], 1982.
- [8] NELSON P, O'ROURKE TD, KULHAWY F H. Factors affecting TBM penetration rates in sedimentary rocks[C]//**The 24th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)**. Texas: [s. l.]: [s.n.], 1983.
- [9] FUKUI K, OKUBO S. Rock-properties estimation by TBM cutting force[C]//**9th ISRM Congress**. Sandton: [s.n.], 1999.
- [10] FUKUI K, OKUBO S. TBM cutting forces with particular reference to cutter and tunnel diameters[C]//**10th International Congress on Rock Mechanics**. Sandton: [s. n.], 2003.
- [11] FUKUI K, OKUBO S. Some attempts for estimating rock strength and rockmass classification from cutting force and investigation of optimum operation of tunnel boring machines[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2006, 39(1): 25 - 44.
- [12] HAMIDI J K, SHAHRIAR K, REZAI B, et al.

- Performance prediction of hard rock TBM using rockmass rating(RMR) system[J]. **Tunnelling & Underground Space Technology**, 2010, 25(4): 333 - 345.
- [13] FARROKH E, ROSTAMI J, LAUGHTON C. Study of various models for estimation of penetration rate of hard rock TBMs[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2012, 30: 110 - 123.
- [14] HASSANPOUR J, ROSTAMI J, KHAMEHCHIYAN M, et al. TBM performance analysis in pyroclastic rocks: A case history of Karaj water conveyance tunnel[J]. **Rock Mechanics & Rock Engineering**, 2010, 43(4): 427 - 445.
- [15] HASSANPOUR J, ROSTAMI J, ZHAO J. A new hard rock TBM performance prediction model for project planning[J]. **Tunnelling & Underground Space Technology**, 2011, 26(5): 595 - 603.
- [16] HASSANPOUR J, VANANI A A G, ROSTAMI J, et al. Evaluation of common TBM performance prediction models based on field data from the second lot of Zagros water conveyance tunnel(ZWCT2)[J]. **Tunnelling & Underground Space Technology**, 2016, 52: 147 - 156.
- [17] SANIO H P. Prediction of the performance of disc cutters in anisotropic rock[C]//International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon: [s. n.], 1985, 153 - 161.
- [18] HOWARTH F F. Some fundamental aspects of the use of disc cutters in hard-rock excavation[J]. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, 1982, 82(11): 309 - 315.
- [19] 宋克志, 孙谋. 复杂岩石地层盾构掘进效能影响因素分析[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(10): 2092 - 2096.
- SONG K Z, SUN M. Analysis of influencing factors of shield tunneling performance in complex rock strata[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(10): 2092 - 2096.
- [20] GONG Q M, ZHAO J. Influence of rock brittleness on TBM penetration rate in Singapore granite[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2007, 22(3): 317 - 324.
- [21] 龚秋明, 余祺锐, 侯哲生, 等. 高地应力作用下大理岩岩体的 TBM 掘进试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(12): 2522 - 2532.
- GONG Qiu-ming, SHE Qi-yue, HOU Ze-sheng, et al. Experimental study of TBM penetration in marble rock mass under high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(12): 2522 - 2532.
- [22] SAPIGNI M, BERTI M, BETHAZ E, et al. TBM performance estimation using rock mass classifications[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2002, 39(6): 771 - 788.
- [23] RIBACCHI R, FAZIO A L. Influence of rock mass parameters on the performance of a TBM in a gneissic formation(Varzo Tunnel)[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2005, 38(2): 105 - 127.
- [24] YIN L J, GONG Q M, ZHAO J. Study on rock mass boreability by TBM penetration test under different in situ stress conditions[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2014, 43: 413 - 425.