

比能法在渤海海峡隧道TBM施工中的应用分析

高攀, 邹 翀

(中国中铁隧道集团有限公司技术中心, 河南洛阳 471009)

[摘要] 拟建的渤海海峡隧道采用隧道掘进机(TBM)施工极具挑战性, 其中关键之一就是TBM的掘进速率预测问题。本文将渤海海峡隧道和澳大利亚 Clem Jones 隧道进行工程类比, 并介绍了比能法在 Clem Jones 隧道中的应用情况。在 Clem Jones 隧道施工过程中, 相关研究人员运用比能法对TBM的可掘性进行了分析及预测, 从后期的掘进情况来看比能法的预测结果与实际施工吻合得较好。本文在 Clem Jones 隧道和渤海海峡隧道对比分析的基础上, 认为运用比能法预测TBM的可掘性同样适用于渤海海峡隧道的TBM施工。

[关键词] TBM; 比能; 凿岩速率指数; 掘进速率

[中图分类号] U455 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)12-0073-07

1 前言

隧道掘进机(TBM)以其诸多特性成为硬岩掘进中的首选设备。结合地质条件和岩土条件选取合适的TBM对于隧道施工来说至关重要。高效的掘进设备可以极大程度地缩短工期, 并降低造价。各国已有众多研究者和TBM制造商提出了TBM性能预测方法和可掘性指标, 并已应用于实际工程中。部分方法基于理论或试验波形, 其他则基于经验公式^[1]。如今, 借助先进的TBM技术及监测设备, 在掘进过程中可以得到连续的记录及测量结果。这些信息可以很好地修正模型所假设的岩土条件。

澳大利亚 Clem Jones 隧道对采用TBM施工进行全程跟踪, 并采用比能法对TBM的掘进效率、设备性能进行了研究。本文根据由探孔钻机和TBM上安装的其他监测设备提供的数据, 以比能为参数, 评估了地质条件对硬岩TBM可掘性的影响。

2 比能法理论简介

评估TBM性能通常采用基于试验室测试结果及切削力的理论或试验模型方法以及基于TBM的

现场性能及部分岩层特性经验公式法, 而比能法可归于理论或试验模型类别中^[2]。比能是开挖单位体积岩石所需的能量值, 由Teale根据石油工业中的钻探参数提出^[3]。McFeat-Smith等采用相似的方法研究了确定条件下的破岩比能^[4]。Snowdon等在一篇对盘形滚刀作用于英国岩层的综合性论文中, 研究了法向轧制力与钻入力的关系。本文引用了由Teale提出的比能概念, 即

$$SE = \frac{(FgP) + (2\pi gNgT)}{AgP} \quad (1)$$

式(1)中, SE 为比能, MJ/m^3 ; F 为推力, N ; A 为隧道断面面积, m^2 ; N 为转速, r/min ; T 为扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; P 为贯入速率, m/min 。

式(1)的第一部分表示推力, 在本文所引用的 Clem Jones 隧道实例中, 等于作用于隧道横断面的压力。第二部分是扭矩(转动能量), 即作用于转动中的TBM上的转动力, 由线性力和相应的半径相乘而得。使刀盘转动所需的扭矩由岩石特性及TBM的设计参数决定。在本文所引用的 Clem Jones 隧道实例中, TBM提供的最大扭矩取决于转动电机的参数。

[收稿日期] 2013-10-08

[作者简介] 高攀(1982—), 男, 河南周口市人, 工程师, 主要从事地下工程科研与施工技术工作; E-mail: 94474888@qq.com

3 Clem Jones 隧道与渤海海峡隧道工程类比

3.1 Clem Jones 隧道与渤海海峡隧道工程概况

3.1.1 Clem Jones 隧道

Clem Jones 隧道是目前澳大利亚最大的基础设施工程之一,这条双洞隧道大部分由两台直径 12.4 m 的双护盾硬岩 TBM 开挖。工程全长 6.8 km,其中 4.8 km 为双圆隧道,其余 2 km 为地面道路、匝道及互通式立交。这项投资 3 亿美元的工程自 2006 年 9 月开始施工,于 2010 年 3 月完工。两台直径 12.4 m 的双护盾 TBM 开挖了双圆隧道 75% 的部分,由城市自北向南横穿布里斯班河。剩余的地面工程,包括上下坡道、大跨度交叉洞口、通风隧道、连接通道

及变电站则采用传统方法开挖而成。

3.1.2 拟建的渤海海峡隧道

拟修建的渤海海峡隧道位于山东蓬莱市东港至旅顺老铁山之间,全长约 125 km。隧道拟采用双洞单线+服务隧道方案,隧道按 250 km/h 标准进行设计和建设。根据我国高速铁路隧道断面大小,内净空面积 66 m² 可以满足客车 200~250 km/h 的行车速度要求,在参考英法海底隧道及我国的狮子洋隧道的断面大小基础上,初步拟定其横断面如图 1 所示。为了减小建设风险,采用深埋方案,考虑到第四系沉积有 30 m 左右,因此隧道最小埋深初步定为海底以下 80 m 左右,最大纵坡定为 1.8%。

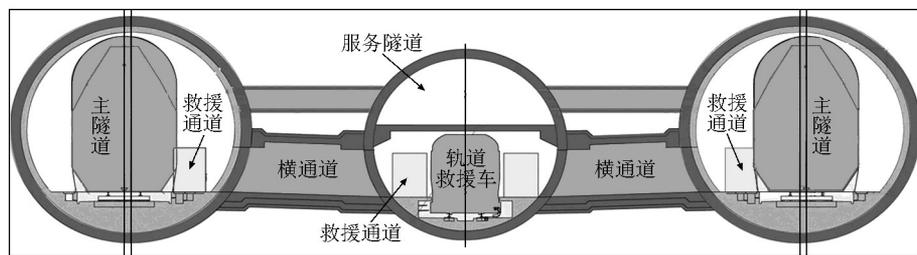


图 1 渤海海峡隧道横断面

Fig.1 Cross section of Bohai Strait tunnel

从以上情况来看,Clem Jones 隧道的施工难度主要集中在开挖断面大,使用了当时世界上直径最大的 TBM,对 TBM 的整体要求高。而渤海海峡隧道虽然开挖断面小于 Clem Jones 隧道,但考虑到隧道总长在 125 km 左右,分段开挖长度为 50 km 左右的施工条件,渤海海峡隧道的综合施工难度和风险等级要远高于 Clem Jones 隧道。

3.2 Clem Jones 隧道与渤海海峡隧道的地质条件

3.2.1 Clem Jones 隧道

Clem Jones 隧道横穿的是布里斯班河床最下层布里斯班凝灰岩(TUFF)层及 Neranleigh Fernvale (NF)地层中的非均质理化变质岩。TUFF 一般节理欠发育,含有 3 个正交不连续区域。由于选址的特殊性,独立 TUFF 层节理处的低于水平面不连续区域成为主导的非连续区域。隧道附近的岩体为典型的轻度风化和未风化岩体。在低洼地带,TUFF 风化程度更加明显,节理更加密集。TUFF 的抗压强度为 40~130 MPa。风蚀度测量值为 1~5.6,均值为 2.2。

NF 岩体主要为包含纹理石英和石英砂屑岩的千枚岩。岩体主要经历了两次地质变形,形成了结构区域间的窄剪切带及局部断裂带。NF 岩体的抗压强度取决于荷载的方向,即页理的角度,但大多为 50~120 MPa。由于石英纹理的存在,其风蚀度测量值为 3.8~5.2,明显高于 TUFF 体。

3.2.2 拟建的渤海海峡隧道

目前尚无针对渤海海峡隧道工程的地质勘测资料,仅有地球物理探测、石油勘探、沿线各岛屿的地质资料。从这些资料推断渤海海峡隧道掘进地层以花岗岩、玄武岩、石英岩等强度较高的硬岩为主。

因此,两条隧道所穿越的地层都是性质较为单一的硬岩,但都穿越了多条断层破碎带。从埋深情况推断,渤海海峡隧道所穿越的围岩其强度应大于 Clem Jones 隧道,并且围岩的风蚀度应小于 Clem Jones 隧道。渤海海峡隧道的地质不确定性明显要大于 Clem Jones 隧道,同时考虑到海上地质勘探的难度较大,因此渤海海峡隧道更有必要运用技术手

段进行TBM可掘性预测分析。

4 Clem Jones 隧道 TBM 主要参数

工程使用的两台护盾式 TBM(S-375 和 S-376)

由德国制造商海瑞克公司为该工程专门制造。其直径为 12.34 m, 刀盘驱动功率为 4 200 kW。刀盘配有 74×19" 的盘形滚刀。TBM S-375 参数见表 1。

表 1 TBM S-375 参数
Table 1 Parameters of TBM S-375

编号	直径 / mm	类型	刀盘功率 / kW	刀盘转速 / (r·min ⁻¹)	总推力 / kN	额定扭矩 / (kN·m)	TBM 总重 / t	TBM 总长 / m	最小曲线半径 / m
S-375	12 340	护盾式 TBM	4 200	4.5	79 388	18 473	3 700	261	550

5 比能法在 Clem Jones 隧道可掘性预测中的应用

5.1 隧道开挖过程中收集的数据

TBM 在掘进过程中采集到以下几种类型的信息,用于评估 TBM 工作中的地质条件:

- 1) 通过盾体上的孔向掌子面前方进行冲击钻探;
- 2) 掘进过程中对隧道侧壁的观测,以及维修停工期间从掘进机刀盘部位对开挖面的观测;
- 3) 对 TBM 传送带上运出的开挖渣土的目测、评估;
- 4) 对 TBM 头部地下水流入率的评估;
- 5) 对 TBM 通过后开挖的隧道横通道的地质绘图;
- 6) 建立永久衬砌前对在开挖断面采取的岩芯样本的单轴抗压强度试验。

具体的过程如下。

1) 钻探孔。探孔主要用于探测 TBM 前方 24 m 的水流及其他异常现象。采用数据记录器记录钻进过程中的钻入压力及掘进速率等详细信息。分析采集的数据,可推断出软弱带是否存在及其位置,并及时在计划中进行修正。

2) 对隧道内部暴露岩体的观测。在 TBM 施工过程中,仅能在双护盾模式下对隔板区露出的岩体进行观测,暴露的岩体约位于刀盘后方 6 m 处。在隧道掌子面,仅能在 TBM 停机维修时对掌子面暴露的岩体进行观测。在观测中,对岩体种类、风化程度、破碎程度及岩体质量进行记录。

3) 岩碴观测。在 TBM 掘进过程中,对皮带输送机输送的开挖下来的岩碴进行观测,并对碴块的大小、形状进行观测评估。另外,对碴块的整体级配进行观测。如果可行的话,对岩碴的含土量进行观测。

4) 地下涌水评估。由于主要观测点位于 TBM 下部,且流入的水包括地下水及施工废水两部分,故 TBM 头部地下水渗流/涌入情况难以评估。尽管如此,仍可以通过对总涌水速率进行评估,得到大致的地下水涌入情况。

5) 横通道掌子面地质素描。横通道每一开挖循环后,进行掌子面地质素描,以得到岩石种类、风化程度、强度及不连续性等信息。利用混凝土取芯钻机,对横通道每一开挖循环钻取岩芯,并进行单轴抗压强度(UCS)试验,以得到完整岩石的强度及变形模量等信息。

6) TBM 掘进参数。每一台 TBM 都装配有数据记录器,每隔 10 s 自动记录超过 350 个相关机械参数,并存入两个主数据库。这里主要记录了掘进速率、贯入速率、推力(总值/接触值)、转速、扭矩、开挖时间等关键数据对 TBM 性能进行研究。南侧隧道的基本掘进速率-推力、扭矩曲线见图 2。

5.2 开挖比能分析

刀盘需要的功率是岩石性质和 TBM 特性的函数,与隧道直径、盘形滚刀数量、刀盘直径和贯入速率等有关。由于节理、页理岩层需要更大的功率和更大的刀盘扭矩,有时对节理和页理岩层的掘进功率大于对完整岩层的掘进功率。

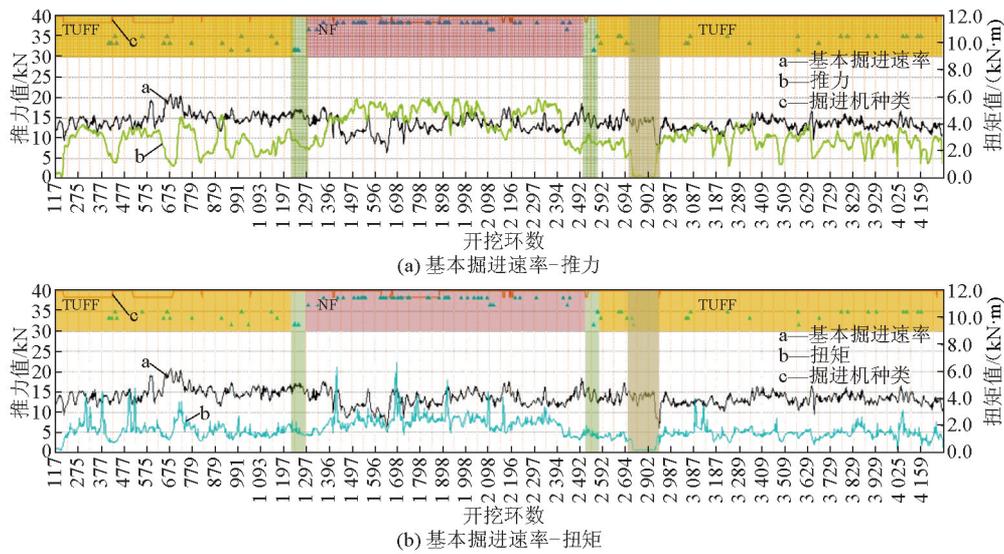


图2 南侧隧道的基本掘进速率-推力、扭矩曲线

Fig.2 Penetration rate vs thrust and torque, southbound tunnel profile

注: ▲表示岩体类别

对于本文中的分析,开挖比能由 Teale 提出的式(1)确定,但由于第一部分的值小于第二部分的值,故将式(1)简化为

$$ESE = \frac{2\pi gNgT}{AgP} \quad (2)$$

式(2)中, ESE 为开挖比能, MJ/m^3 ; A 为隧道断面面积, m^2 ; N 为转速, r/min ; T 为扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; P 为贯入速率, m/min 。

5.2.1 最大应变能理论

根据 Beltrami 和 Haigh 的阐释,最大应变能理论假定失效发生在由应力引起的实测单位体积应变能与 UCS 试验中屈服点单位体积应变能相等的时刻^[5]。根据能量守恒定律,由表面位移引起的表面力使得岩石应变能增加,并积蓄在应力集中现象增强的区域。由于应变能与屈服或失效点相关,这类应变能被称为弹性失效应变能^[6]。

弹性失效应变能由 UCS 试验确定,如图3所示,弹性失效应变能为应力-应变曲线下下降之前的曲线与应变轴围成的面积,表示吸收的能量。采用理想线性-弹塑性模型模拟岩体,弹性失效应变能可以表示为

$$ESE_t = \frac{\sigma_t^2}{2gE} \quad (3)$$

式(3)中, ESE_t 为弹性失效应变能, MJ/m^3 ; σ_t 为岩石失效抗压强度, N/m^2 ; E 为变形模量, N/m^2 。

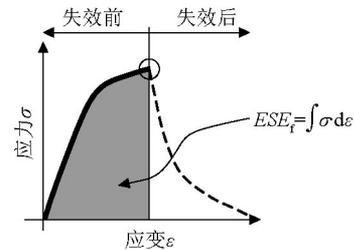


图3 由 UCS 试验决定的弹性失效应变能

Fig.3 Elastic strain energy at failure determined by a UCS test

5.2.2 开挖比能与弹性失效应变能之间的相关效应

最大应变能理论假设开挖比能与弹性失效应变能之间存在直接相关性。本文中,二者的相关性表示为^[7]

$$ESE = k_{ESE} g \frac{ESE_t}{(DRI/100)} \quad (4)$$

式(4)中, ESE 为开挖比能, MJ/m^3 ; ESE_t 为弹性失效应变能, MJ/m^3 ; DRI 为凿岩速率指数; k_{ESE} 为有关 TBM 系统和地质条件的常数。

如式(4)所示,凿岩速率指数和弹性失效应变能共同表示岩石的可钻性或可切削性。凿岩速率指数最早由 Johannessen 在挪威理工大学模型中提出^[8],并在 Lislerud^[9]和 Filip Dahl 等^[10]的研究中得到发展。凿岩速率指数主要取决于以下两个试验。

1) 脆性试验(瑞典脆性试验)。此试验用冲击设备对岩石的脆性进行测试,定义脆性值(S20)为

20次冲击后通过筛子的粒级百分比。

2)筛粒J值试验。此试验使用微型钻头测试岩石表层的硬度。定义筛粒J值(SJ)为钻头200次运行后1/10 mm处的穿透量。

如式(4)所示,为结合弹性失效应变能和开挖比能,引入了新的常数 k_{ESE} ,该常数与TBM系统和地质条件有关^[7]。理想状况下, k_{ESE} 需要根据大量不同地质条件下的场地数据和不同的隧道直径进行修正。因此,可以考虑在各参数间根据试验室数据

及实际TBM比能建立一个直接相关常数。建立此常数的主要目的是提供计算隧道开挖比能的直接公式。

5.2.3 比能法分析预测结果

TBM S-376的比能计算图线、TBM模式及隧道开挖面观测情况见图4。比能图线在NF区出现了值得注意的上升,这可能是由于存在的石英岩提高了岩体的冲蚀度,较页岩效应更为显著。TUFF层则更易于开挖,需要的比能也更低。

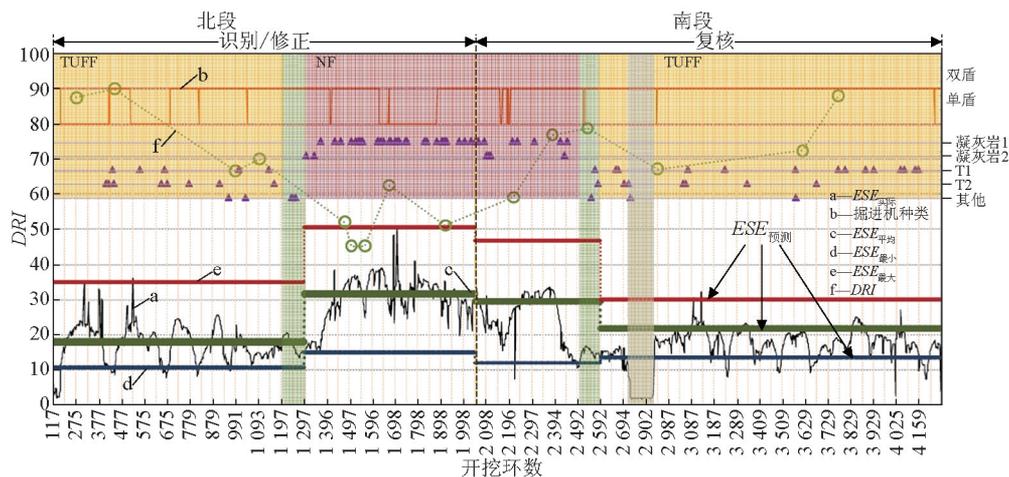


图4 弹性失效应变能相对应的ESE及ESE预测

Fig.4 ESE and ESE predicted from elastic strain energy at failure

注:T1和T2分别表示两种TUFF

在图4中根据已有资料给出了凿岩速率指数。凿岩速率指数体现了岩石的抗挤压能力(脆性)和抗穿入能力(表层硬度)。凿岩速率指数与比能密切相关。岩体越难贯入(凿岩速率指数低),比能越大。TBM S-376对TUFF层和NF岩层的平均值分别为18 MJ/m³和28 MJ/m³。NF岩层较TUFF层所需的开挖比能增加了约50%。

基于对Clem Jones隧道岩石样本进行的UCS试验^[11],得出了TUFF岩与NF岩的弹性失效应变能(见表2)。由TBM数据计算得到的比能也列于表2中,并与试验室数值进行了对比。 k_{ESE} 值由在隧道中段117 m至2 050 m里程间(北段)的数据推出,并用2 050 m至4 255 m里程段的数值对现有模型进行了复核。在Clem Jones隧道的应用中 k_{ESE} 值由北段数据确定,同时用以计算南段ESE的预测值ESE_{预测}。从图4和表2可以看出,TBM实际掘进所得的结果与预测值是比较相近的。这说明在岩层

多为硬岩且岩石力学性质较为一致的情况下,采用比能法对ESE的预测是较为可靠的。

6 比能法在渤海海峡隧道应用前景分析

从工程实际应用情况来看,比能法在Clem Jones隧道开挖预测中获得与实际开挖较为一致的预测效果,说明该方法对TBM施工较为适用。从地层适应性来说,渤海海峡隧道所处地层也多为强度较高、风化程度低的硬岩,对于该类工程可以认为岩石性质较为单一。从比能法在以往石油钻井工程和本文所介绍的Clem Jones隧道的应用情况来看,在地层较为单一时比能法具有较好可靠性。

7 结语

本文介绍了利用比能法评价地质条件对硬岩地区TBM法隧道施工的影响。研究结果表明,这种评价方法能够起到良好的效果。Clem Jones隧道的

表2 $ESE_t, DRI, ESE_{平均}, k_{ESE}$ 及 $ESE_{预测}$ 汇总
 Table 2 Summary of $ESE_t, DRI, ESE_{average}, k_{ESE}$ and $ESE_{predicted}$

位置	地质区	ESE_t /(MJ·m ⁻³)	DRI	$ESE_{平均}$ /(MJ·m ⁻³)	k_{ESE} 北段	k_{ESE} 初值	$ESE_{预测}$ /(MJ·m ⁻³)
北段	TUFF-最小	0.12	—	—	—	—	10.77
	TUFF-最大	0.39	—	—	—	—	35
	TUFF-平均	0.2	78	17.96	70	70	17.95
北段	NF岩-最小	0.045	—	—	—	—	15
	NF岩-最大	0.152	—	—	—	—	50.67
	NF岩-平均	0.095	48	31.1	160	160	31.67
南段	TUFF-最小	0.051	—	—	—	—	12
	TUFF-最大	0.199	—	—	—	—	46.82
	TUFF-平均	0.125	68	24.67	—	160	29.41
南段	NF岩-最小	0.15	—	—	—	—	13.64
	NF岩-最大	0.33	—	—	—	—	30
	NF岩-平均	0.24	77	17.53	—	70	21.82

比能计算公式可以包络实际及预测比能的最大值、最小值及平均值,且实测值与预测值吻合较好。虽然使用的数据仅来源于一个工程实例,但分析表明,通过对某一既定路线隧道比能需求的评估,可以推断TBM的作业性能。因此,建议在拟建渤海海峡隧道的TBM施工中运用该方法,可根据TBM的相关数据及相应地质状况对文中的公式进行修正与研究。

参考文献

[1] 李刚,于天彪,费学婷,等.一种基于CSM模型的TBM刀盘比能预测方法[J].东北大学学报:自然科学版,2012,12:1766-1769.
 [2] 景宁,樊洪海,翟应虎,等.基于比能理论的钻头工作状态监测方法[J].断块油气田,2011,18(4):538-540.
 [3] Teale R. The concept of specific energy in rock drilling [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965, 2(1): 57-73.
 [4] McFeat-Smith I, Fowell R J. Correlation of rock properties and

the cutting performance of tunnelling machines [C]//Conference on Rock Engineering, 1977.
 [5] 胡铸华.对Beltrami-Haigh最大总应变能理论的改进及其应用[J].工程力学,1990,7(2):136-139.
 [6] 梁昌玉,李 晓,王声星,等.岩石单轴压缩应力-应变特征的率相关性及其能量机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(9):1830-1838.
 [7] Ardie Purwodihardjo, Les McQueen, Stephen Barrett. Effects of ground conditions on hard rock TBM performance CLEM7 tunnel, Brisbane, Case History [C]//World Tunnel Congress, 2011.
 [8] Johannessen. Hard rock tunnel boring [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2000.
 [9] Lislerud A. Hard rock tunnel boring: Prognosis and costs [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1988, 3(1): 9-17.
 [10] Filip Dahl, Amund Bruland, Pål Drevland Jakobsen, et al. Classifications of properties influencing the drillability of rocks, based on the NTNU/SINTEF test method [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28(3): 150-158.
 [11] Dixon N, Jones D R V, Fowmes G J. Interface shear strength variability and its use in reliability-based landfill stability analysis [J]. Institution of Civil Engineers, 2006, 13(1): 1-15.

The analysis of specific energy applied in Bohai Strait tunnel during TBM construction

Gao Pan, Zou Chong

(Technology Center of China Railway Tunnel Group Co. Ltd., Luoyang, Henan 471009, China)

[Abstract] The proposed Bohai Strait tunnel is a challenging project, and penetration rate of tunnel boring machine (TBM) is one of the keys. This paper made a contrast between the Clem Jones tunnel in Australia and the Bohai Strait tunnel, and introduced the specific energy used in the Clem Jones tunnel. During the construction of the Clem Jones tunnel, researchers made the analysis and forecasted about the TBM's penetration rate using the specific energy, which was identical to the practical construction very well. This paper concluded that the specific energy can be used in the Bohai Strait tunnel as well as the Clem Jones tunnel, which was based on the comparative analysis of the Clem Jones tunnel and Bohai Strait tunnel.

[Key words] TBM; specific energy; drilling rate index; penetration rate