深埋高地应力 TBM 隧道挤压大变形及其控制技术研究

陈卫忠[1, 2]，肖正龙[1]，田洪铭[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. 山东大学 岩土与结构工程研究中心，山东 济南 250061)

摘要：深部岩体构造复杂、地应力高，对于挤压性地层开挖后容易产生挤压大变形，大量实践经验表明，若不及时合理处置应对将造成巨大的经济损失。关注 TBM 隧道，介绍围岩挤压大变形的机制、关于挤压性地层的提前预报方法和监测辨识指标，讨论预测围岩收敛变形的方法并详细介绍人工智能和非确定性分析方法，最后总结归纳常用的应对挤压性地层的处置手段。各种关于 TBM 隧道挤压大变形的辨识公式、预测方法以及处置手段都是依托相应的工程案例而建立，盲目的套用并不一定能起到预期的效果，建议具体工程问题应具体分析，综合比选，各取所长。

关键词：隧道工程；高地应力；挤压大变形；TBM 隧道

中图分类号：U 45 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－6915(2015)11－2215－12

RESEARCH ON SQUEEZING LARGE DISPLACEMENT AND ITS DISPOSING METHOD OF WEAK ROCK TUNNEL UNDER HIGH IN-SITU STRESS

CHEN Weizhong[1, 2]，XIAO Zhenglong[1]，TIAN Hongming[1]

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

Abstract：Without timely and reasonable treatments，the large convergence displacement due to high geostress and complex tectonic stress of ground squeezing will result in economic losses. TBM tunnels were the focus of the study. The mechanism of large displacement due to ground squeezing was described. The prediction and recognition methods were presented. The prediction methods of convergence displacement of tunnel including AI method and uncertainty analysis method were discussed in detail. Finally the common disposal methods for grounds under different squeezing levels were summarized. The formulas for recognition，the prediction methods and the disposal technologies of large squeezing displacement of TBM tunnels were developed for corresponding projects，so blindly using these methods yielded no effect. We suggested the choosing of these methods with caution.

Key words：tunnelling engineering；high geostress；squeezing large displacement；TBM tunnel

---

收稿日期：2015－07－19；**修回日期：**2015－07－28

基金项目：国家重点基础研究发展计划(973)项目(2015CB057906)；国家自然科学基金杰出青年基金项目(51225902)；国家自然科学基金资助项目(51379007)

作者简介：陈卫忠(1968－)，男，博士，1990 年毕业于山东矿业学院采矿工程专业，现任研究员、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。通讯作者：肖正龙(1988－)，男，现为博士研究生。E-mail：xsteamer@qq.com

DOI：10.13722/j.cnki.jrme.2015.1000

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　引　言

随着国家重大工程建设重心向地形地质极端复杂的西部山区转移，预计未来 10 a，西部地区将要建设 40 余座装机超百万千瓦的特大型水电站；与此同时，西部地区的跨流域调水工程也在相继上马，国内规划、在建或已建成的水工隧洞总长度将超过 1 200 km。引汉济渭工程秦岭引水隧洞全长 81.78 km，穿越秦岭主脊段长度达到 39 km，最大埋深 2 000 多米。北疆、卡拉麦里等调水工程，最大埋深超过 2 000 多米。新疆土库铁路二线中天山隧道全长 22.45 km，最大埋深 1 728 m。

我国于 20 世纪 90 年代起，先后在引大入秦、万家寨引黄工程、昆明掌坞河引水供水工程、新疆恰甫其海引水工程大板隧洞以及秦岭隧道等工程中采用了 TBM 施工技术。TBM 掘进深埋长大隧道具有显著的优势，但随着埋深的加大、破碎的断层、裂隙、软弱的夹层带、挤压性的围岩、高地应力等不良地质条件会大大增多，出现不稳定的围岩洞段也快速增加。TBM 对不良地层的适应性远不如钻爆法，其对围岩稳定状态十分敏感，围岩的岩性、应力状态及变形特征、支护方式对 TBM 的开挖都产生很大影响，甚至还是决定 TBM 成败的关键。

目前，我国尚无完整的 TBM 隧道开挖的国家标准或行业规范，现行的围岩稳定性分析方法及隧洞支护设计方法不能满足当前 TBM 快速发展的需要。TBM 施工中经常出现掘进效率低、软岩大变形、突水涌泥、塌方冒顶及岩爆等地质灾害。据对国内外 TBM 施工事故案例分析发现，岩体大变形所诱发塌方及卡机事故占 37%，这些地质灾害不但造成长时间停机停工。如台湾坪林公路隧道、山西省万家寨引黄工程南干线 7#隧洞联接段、昆明掌坞河引水供水工程上公山隧洞、引红济石调水工程秦岭隧洞、引大济湟总干渠引水隧洞和山西万家寨引黄工程隧洞、新疆恰甫其海大板隧洞、意大利 Nuovo Canale Val Viola 隧洞、希腊 Evinos-Mornos 隧洞、瑞士 Gotthard Base 隧道 Faido 段西线、土耳其 Uluabat 及 Gerede 隧洞、美国南加州箭头隧洞、伊朗 Ghomroud 输水隧洞、委内瑞拉 Yacambú-Quibor 隧道、埃塞俄比亚 Gil-gel Gibe II 隧洞、南非莱索托高地水利工程输水隧洞北段隧洞等因卡机停工，处理工程灾害和事故不仅延误工期，更会造成巨大的经济损失[1-6]。造成 TBM 隧洞卡机灾害的根本原因在于深埋高地应力软岩挤压大变形诱发卡机灾害的机制和变形临界控制标准研究不够深入，缺乏科学、可靠的高地应力不良地质 TBM 隧洞围岩变形适应性评价与安全控制理论。

本文搜索了国内外专家学者的研究成果，并进行了总结和归纳，试图通过对比寻找合理适用的分析、计算方法用于预测高地应力下 TBM 隧道的挤压大变形，及相应的围岩变形控制技术。

2　挤压大变形机制

挤压指的是开挖过程中与时间相关的大变形现象，与岩石材料的弹黏塑性行为及流变时效特性有关[7]。挤压与隧道围岩的过应力(overstressing)有关，常发生在低强度、有大变形能力的软弱岩体中，通常伴随着大埋深和高地应力[8-9]。比较典型的易发生大变形的岩石类型：变质片麻岩、片岩、千枚岩、页岩、黏土、泥岩和凝灰岩。这些岩石之所以产生挤压大变形由其矿物成分决定，主要包括：云母、绿泥石、蛇纹岩、黏土等矿物[9]。

隧道工程开挖是导致挤压大变形的工程因素。以往将隧道开挖简化为平面应变问题，忽略了隧道开挖的空间效应，并不能反应围岩的真实响应，其计算结果相较轴对称模型更小[10]。TBM 隧道开挖过程中，由于掌子面的支撑作用，围岩的应力路径较为复杂，隧道开挖面上点应力路径如图 1 所示(侧压力系数为 0.8，竖向地应力 30 MPa，p 为静水压力，Mises 应力 q 从 5 MPa 显著增加至 30 MPa)。

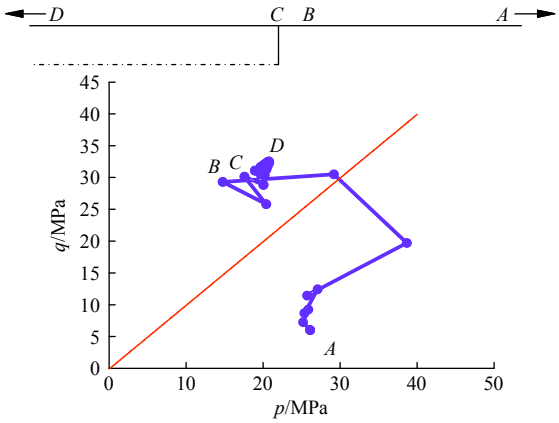


图 1　隧道开挖过程中开挖面上点的应力路径

Fig.1　Stress path of tunnel front during tunneling

通常认为围岩的挤压大变形由两部分组成：开挖卸荷造成的瞬时变形，主要包括岩体的弹塑性变形以及岩石破碎导致的体积扩容；应力重分布使得

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

岩石偏应力增大，增加了岩石的流变潜力以及时效破坏的可能[11]，最终导致围岩的持续性变形。另外也有学者认为，在软弱围岩中存在较复杂的结构面，高应力条件下开挖扰动会造成结构面发生一系列的时效力学响应，即结构性流变[12]。对于低渗透性的饱和软岩还与开挖造成的瞬态固结相关。许多工程经验也证实了高孔隙水压能加剧挤压大变形现象的发生[13]。

3　挤压大变形地层的辨识

围岩挤压特性的辨识包括 2 个概念：第一为尚未获得收敛结果阶段的预测；第二为根据围岩收敛变形的判别。

3.1　挤压大变形特性预测

对于未开挖岩层或者已经开挖但尚无监测资料的情况，通常根据以往的工程经验，依据岩层的埋深 H、岩石重度 γ、岩石/岩体抗压强度 σ_c / σ_{cm}，分级指标等参数等进行划分，黄 兴等[11-12]给出了较为全面的总结。

Nakano、Aydan(1979)建议采用岩石坚固系数 C_f 来预测围岩的挤压特性[12]：

$$C_f = \sigma_c / (\gamma H) \tag{1}$$

当 C_f ＜4 时，存在明显挤压，C_f ＜2 时则存在重度挤压。

J. L. Jethwa 和 B. Singh[14]则根据岩体抗压强度 σ_{cm} 给出了类似的预测方法：

$$N_c = \sigma_{cm} / (\gamma H) \tag{2}$$

当 N_c＜0.4 时为高度挤压，当 N_c = 0.4～0.8 时为中度挤压，当 N_c = 0.8～2.0 时为轻度挤压，当 N_c＞2 时无挤压。

B. Singh 等[15]根据 39 条隧道的建设经验给出了经验公式，根据隧道的埋深初步判断挤压的可能，即

$$H_{cr} = 350Q^{1/3} \tag{3}$$

式中：Q 为岩体质量。当隧道深度大于 H_{cr} 时可能存在挤压。

R. K. Goel 等[16]根据 72 个断面的监测资料给出经验公式：同样以埋深作为考量指标，兼顾考虑了隧道的尺寸以及围压条件，认为当满足下式时存在挤压的可能：

$$HB^{0.1} > 270N^{0.33} \tag{4}$$

式中：B 为隧道直径或者宽度，N 为当 SRF = 1 时 N. Barton 等[17]中的 Q 值，$N = (RQDJ_rJ_w)/(J_nJ_a)$。

深埋隧道与浅埋隧道的本质差别之一是地应力的水平大不相同，也应该作为围岩的特性之一。

张祉道[18]根据围岩的岩体强度 σ_{cm} 以及地应力条件 σ_{0i} (i = 1，2，3)对挤压潜力进行评价，并区分了双车道公路隧道和单线铁路隧道。该方法根据岩体抗压强度计算出临界地应力 σ_{0i}，与实测地应力进行比较确定大变形等级。例如双车道公路隧道的大变形等级划分如图 2[18]所示，σ_{0i} (i = 1，2，3)的计算方法如下：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{01} &= 4.67\sigma_{cm} + 2.52\\ \sigma_{02} &= 5.74\sigma_{cm} + 4.48\\ \sigma_{03} &= 7.73\sigma_{cm} + 5.20\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

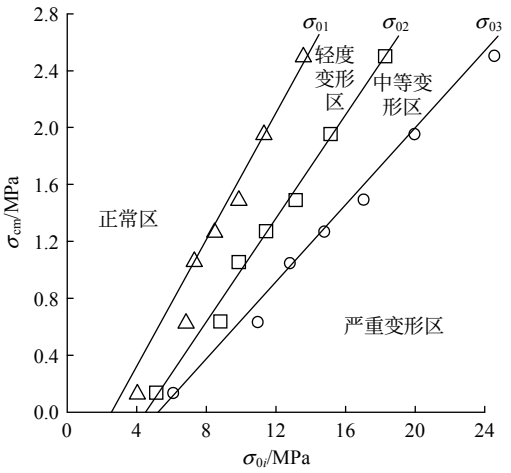


图 2　双车道公路隧道大变形等级划分[18]

Fig.2　Large deformation grade for double-lane highway tunnel[18]

3.2　挤压大变形特性识别

对于存在挤压的围岩，会造成开挖面的持续快速收敛变形。即使隧道断面的开挖工作顺利完成，持续的收敛变形也会造成危害，特别是对于 TBM 隧道，刀头正常工作尾部护盾被卡也将导致掘进工作的被迫停止。开挖完成后通过对开挖面的持续监测可以判断围岩的挤压程度。

E. Hoek[19]根据隧道变形对地层的挤压程度进行了划分。划分依据为未支护隧洞的标准应变 ε(收敛 δ 位移与隧道半径 r 的百分比)，如图 3 所示(图中 σ_0 为地应力)。O. Aydan[20]提出用临界应变的方法判断是否存在挤压，并给出挤压指数(SI)划分挤压的程度(见表 1)：

$$SI = \frac{u_a / r}{\varepsilon_{cr}} \tag{6}$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

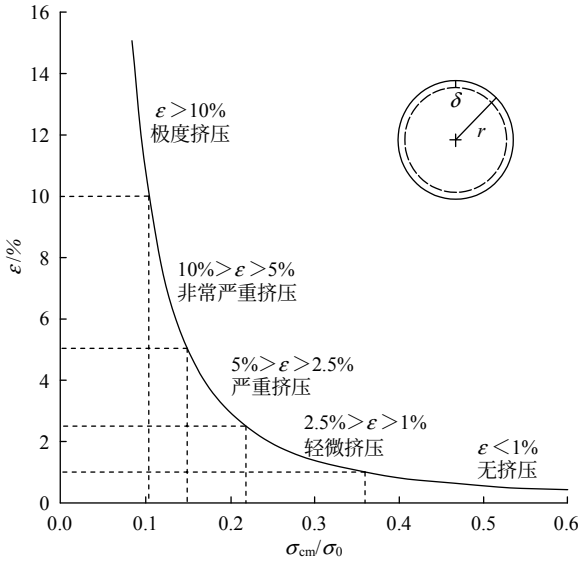


图 3　E. Hoek[19]提出的隧道工程挤压大变形预测

Fig.3　Squeezing prediction of tunnel by E. Hoek[19]

表 1　挤压指数对应的挤压程度

Table 1　Squeezing index and correspond squeezing level

类别	挤压程度	*SI*
1	无挤压(NS)	$SI<1.0$
2	轻微挤压(LS)	$1.0<SI\leq 2.0$
3	一般程度挤压(FS)	$2.0<SI\leq 3.0$
4	严重挤压(HS)	$3.0<SI\leq 5.0$
5	非常严重挤压(VHS)	$5.0<SI$

$$\varepsilon_{cr}=31.1\frac{\sigma_{ci}^{1.6}}{E_{ci}\gamma^{0.6}Q^{0.2}}(\%) \tag{7}$$

式中：u_a 为径向收敛位移，E_{ci} 为完整岩石的变形模量，σ_{ci} 为完整岩石单轴抗压强度，γ为岩石重度。

N. Barton[21]也曾给出类似的表达式：

$$\varepsilon_{cr}=5.84\frac{\sigma_{ci}^{0.88}}{E^{0.63}Q^{0.12}} \tag{8}$$

定性的判别岩层的挤压特性是为了在施工阶段做好应对准备。对于已经准确判定的挤压性地层，更进一步的工作是预测围岩的挤压特性对开挖面的不利影响，包括收敛大变形的量值以及挤压力等。若直接根据对岩层开挖后的监测情况给出围岩收敛变形或者挤压力的定量预测值，也可以据此对岩层的挤压潜能进行分级评定，而无需再做定性判别。

4　隧道工程挤压大变形预测

围岩挤压大变形的预测对隧道施工、设计以及运营都有着重大影响。甘肃乌鞘岭铁路隧道断层带，边墙收敛 160 cm，底鼓 100 cm，拱顶下沉量达到 240 cm，严重影响铁路建设[11]。提前预测挤压性隧道的收敛变形或者挤压应力并给出相应的支护方案或者衬砌设计方案能有效的避免事故的发生以及不必要的经济损失。

预测隧道挤压变形的方法可以分为 2 类，一类是经验公式法，另一类是理论计算方法。根据计算所采用理论的不同，理论计算方法可以分为有限单元法、人工智能法和概率统计法。虽然经验公式方法同样需要对工程经验进行详细的统计，但分析的目的是为了使经验公式得到更好的相关性。

4.1　经验方法

挤压对地下工程的负面影响是显著的。出乎意料的过大围岩变形会造成经济的损失，特别是 TBM 开挖隧道，有可能造成卡机灾害，轻则影响工程进度，重则 TBM 拆机甚至报废，造成严重的经济损失。提前预测地层挤压特性，提早预防控制灾害的发生能有效的保障经济效益。

F. Ebrahim 和 R. Jamal[22]统计了 TBM 施工隧道不同断面渣料的破碎程度，并与该断面隧道边墙的径向收敛变形建立联系，认为渣料中粒径大于 10 cm 以及小于 2 cm 的石块的含量越高时，该断面的收敛变形越大，而粒径为 2～10 cm 的石块含量越高时，则该断面的收敛变形越小(见图 4(a))。相应的，渣料中石块的最大直径也与收敛变形存在一定关系(见图 4(b))。

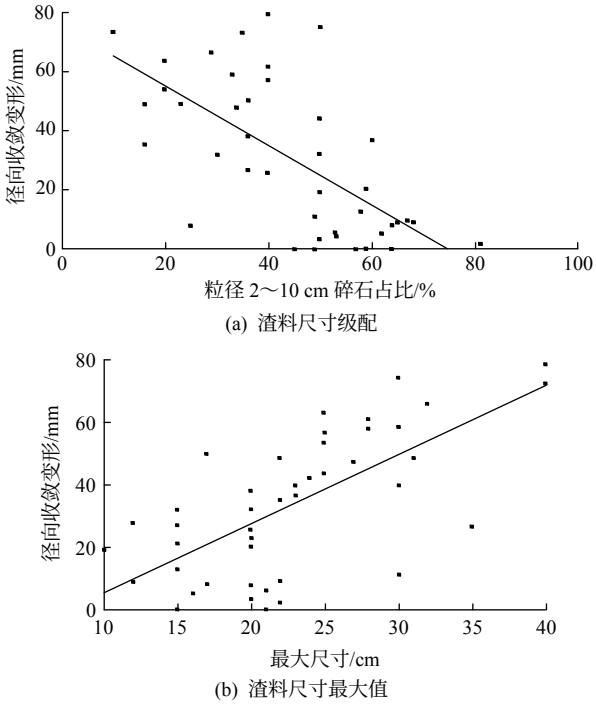


图 4　岩石碎片尺寸与围岩收敛变形的关系[22]

Fig.4　Relationship between size of rock fragments and convergence deformation[22]

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

建立 TBM 的操作参数与围岩的收敛变形之间的联系，得到 TBM 操作指数 I_{TBM} 与收敛变形的关系[22]如图 5 所示。I_{TBM} 可表示为

$$I_{\mathrm{TBM}}=\frac{T_{\mathrm{q}}^{2}}{T_{\mathrm{h}}ROP} \tag{9}$$

式中：T_{q} 为刀盘扭矩(kN · m)，T_{h} 为 TBM 推力(kN)，ROP 为测得的掘进速率(m/h)。

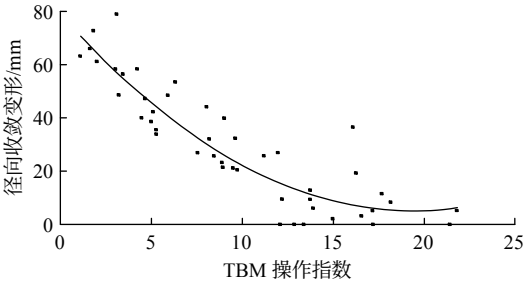


图 5　TBM 操作指数预测收敛变形[22]

Fig.5　Predicted convergence deformation by TBM operation index[22]

围岩分级(RMR 或者 Q 系统)情况常常伴随着隧道的开挖记录在册，是一项重要的反应围岩力学特性的参数。R. D. Dwivedi 等[23]研究了 14 条隧道、矿井、硐室的共 63 个横断面的监测数据，分别建立了如下考虑节理因素以及考虑岩体质量指标影响的经验公式：

$$\frac{u_{\mathrm{a}}}{r}=\frac{5\times10^{-10}\sigma_{\mathrm{v}}J_{\mathrm{f}}^{3}}{K+0.5}+0.005\ 2 \tag{10}$$

$$\frac{u_{\mathrm{a}}}{r}=\frac{0.019\ 1\sigma_{\mathrm{v}}Q^{-2}}{K+1}+0.002\ 5 \tag{11}$$

式中：Q 为岩体质量指数，K 为支护刚度，σ_{v} 为竖向低应力。式(10)，(11)不考虑开挖方式、掘进速率和支护设置时间等因素的影响。根据式(10)，(11)，引入围岩条件后即可得到其收敛变形的预测值。

M. S. Dehkordi 等[24]提出运用峰后残余应变能(W_{post})与峰前应变能(W_{pre})之比(ψ)预测围岩的挤压应力的方法。根据伊朗 Emamzade Hashem 隧道的工程检测结果(见图 6)，拟合出经验公式：

$$H_{\mathrm{p}}=5.559\ 3\psi^{0.247\ 9} \tag{12}$$

式中：H_{p} 为土柱高度，用以等代表示围岩的挤压应力。

对于存在各向异性挤压的隧道，V. THE Manh 等[25]根据隧道收敛变形的监测结果，采用椭圆方程对其断面轮廓进行拟合得到两主轴长度，然后

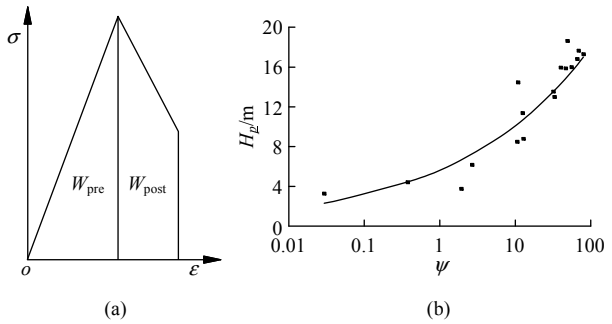


图 6　应变能与土柱高度间关系[24]

Fig.6　Relationship between strain energy ratio and rock load height[24]

依据收敛法则分别预测两轴的最终变形量，预测结果为适应和优化隧道施工以及支护设计起到了较好的作用。

4.2　解析解法

对于 TBM 隧道，卡机的根本原因来自于装机推力不足以克服围岩挤压造成的摩擦阻力[26-27]，研究挤压的最终目的还是为了了解围岩对设备的压力。收敛约束法被广泛应用于深部工程的支护设计，该方法能直观的表现围岩收敛变形与围岩压力之间的关系。对于有护盾的 TBM，当隧道围岩收敛变形过大时，围岩与护盾相互接触、挤压产生摩擦阻力，若压力达到一定程度，TBM 推力尚不足以克服护盾的最大静摩擦力，卡机发生。TBM 的护盾在该过程中与隧道的衬砌起到类似的作用，同样可以采用收敛约束法估计护盾受到的挤压力，并依此判断 TBM 的卡机状态。

隧道开挖的时间特性体现在两方面：一是围岩参数随时间推移的弱化，二是围岩应力因掌子面随时间而前移的重分布。将隧道径向变形随轴向分布的曲线 LDP 与岩层响应曲线 GRC，支护特性曲线 SCC 曲线叠加，可以方便的得到相应的围岩压力。图 7 为采用 Hoek-Brown 强度准则时的 GRC 曲线[28]。

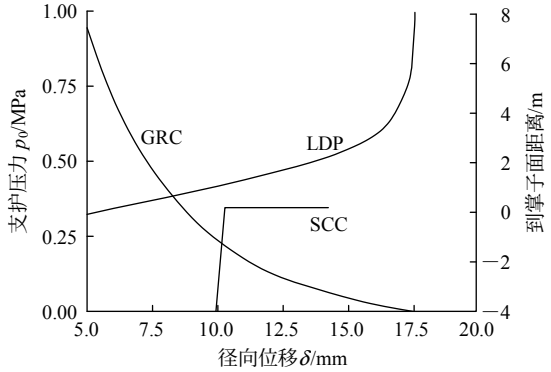


图 7　收敛约束法预测围岩压力[28]

Fig.7　Predicted rock pressure by convergence constraint method[28]

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4.3 数值模拟

深部隧道开挖是一个复杂的问题，解析解只能由简化后的模型求得。随着计算机仿真技术的发展，包含复杂材料、大尺度计算域的模拟都成为可能。

F. I. Shalabi[29]分别采用如下指数模型与双曲模型对美国犹他州斯蒂尔沃特隧道的围岩挤压变形和衬砌的支护压力进行了分析：

$$\dot{\varepsilon} = A\sigma^n t^m \tag{13}$$

$$\varepsilon = \frac{2}{E_u / S_u}\frac{D}{1 - R_f D} \tag{14}$$

式中：$\dot{\varepsilon}$ 为应变率；σ为偏应力；t 为时间；A，m，n 为材料参数；E_u 为初始不排水切线模量；S_u 为不排水剪切强度；D 为剪切应力级别；R_f为失效偏应力与极限偏应力之比。

即相比之下，式(14)中包含土剪切强度及剪切模量的影响，并且能很好地描述土在不同剪切应力级别下的应力 – 应变行为。

图 8[29]所示的 2 种计算模型都体现出围岩收敛变形随时间的增加，且其增长率不断减小。虽然双曲模型能较好地体现简单应力状态下的应力 – 应变关系，但其计算结果与实际认知并不一致。

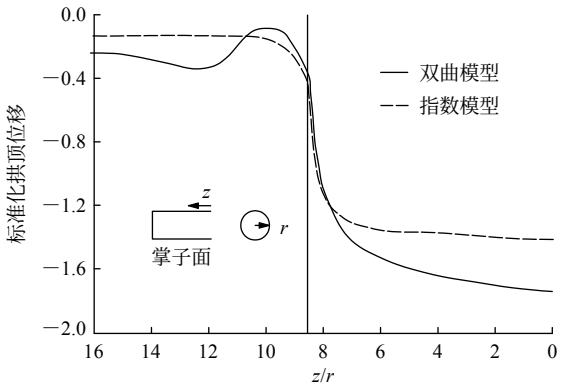


图 8　2 种模型的计算结果[29]

Fig.8　Predicted results of two constitute models[29]

该分析采用的是非线性黏弹性模型，没有考虑岩石的塑性流动。

D. Sterpi 和 G. Gioda[30]将挤压地层下岩石的长期力学特性分为 3 个阶段：黏弹性(主要)、黏塑性(次要)及损伤蠕变。采用西原体模型分析隧道围岩的长期力学特性，同时考虑由累计黏塑性应变驱动的损伤因子。

D. Debernardi 和 G. Barla[31]开发了一种可以同时考虑岩石材料弹塑性以及时效特性的本构模型——SHELVIP，特别适用于模拟重度挤压条件下围岩开挖过程中岩石的力学行为。将之运用于模拟页岩的三轴蠕变试验以及煤矿石的应力松弛试验，得到了较好的结果。

F. L. Pellet 等[32-33]采用三维数字仿真技术模拟了隧道开挖，将围岩视作损伤黏塑性材料，得到了开挖导致的围岩损伤区的分布情况，以及时间效应引起的围岩损伤、收敛变形的发展规律。

M. Ramoni 和 G. Anagnostou[34]假设隧道开挖为垂直于隧道轴线方向上的平面应变问题，采用轴对称模型分析了各种扩挖条件下、不同支护方式下以及断层的存在条件下，TBM 护盾与围岩、支护与围岩的相互作用。

K. Zhao 等[35-36]考虑刀盘、护盾以及撑靴等 TBM 组件与围岩的接触作用，回填与衬砌的分步设置，以及撑靴对围岩的挤压作用，以期完全模拟 TBM 的施工过程，从而得到 TBM 隧道围岩的变形规律。

4.4 人工智能预测

R. Jimenez 和 D. Recio[37]介绍了一种基于统计的经验方法，线性分类器，预测隧道围岩的挤压状态。

该文从现有的文献资料中收集了喜马拉雅山脉大量的工程信息，过滤(剔除重复、引用、不完全)挑选出其中的 62 条作为训练数据。采用每一个隧道断面的 2 个参数，埋深 H(或者 lg$H$)与围岩质量指数 Q(或者 lg$Q$)分别代表“需求”与“能力”，组合成一个输入向量 $\boldsymbol{x}$(为了使用线性分类函数的表达式为一般形式，实际向量 $\boldsymbol{x} = [1, H, \lg Q]^T$，增加了一个分量“1”)，将该断面的挤压状态(挤压或者非挤压，分别由 1 和 0 表示)作为输入向量的分类标签 y。

建立概率公式：

$$p(y \mid x) = \mu(x)^y [1 - \mu(x)]^{1-y} \tag{15}$$

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + e^{-\boldsymbol{\theta}^T x}} \tag{16}$$

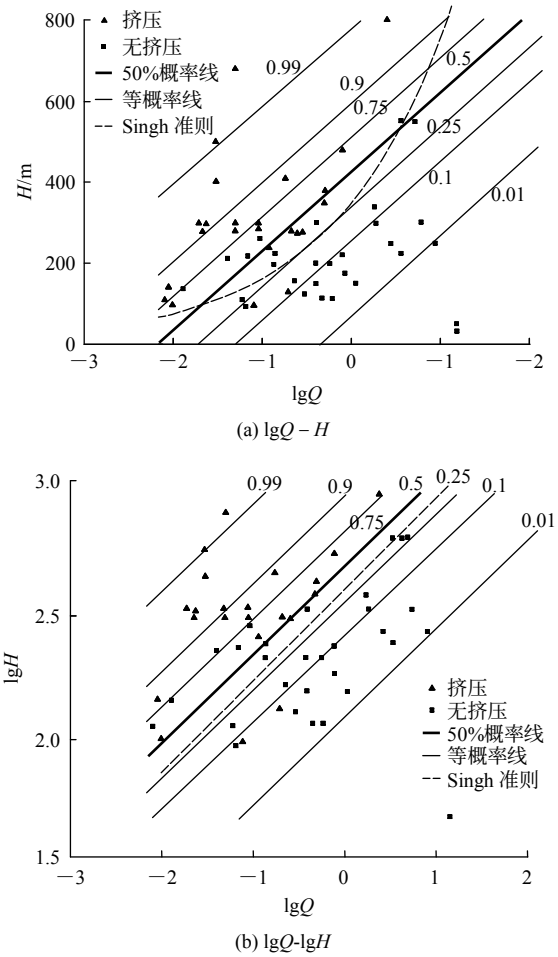
式中：$\mu(x)$为值域为[0，1]的函数表示事件 x，y 同时发生的概率，其待定参数向量$\boldsymbol{\theta}$通过极大似然估计法确定。

得到参数向量$\boldsymbol{\theta}$后，根据指定的不同概率水平 μ，可以得到一系列互相平行的分类函数。根据该分类函数可以进行预测隧道的挤压状态，即

$$\theta_1 + \theta_2 H + \theta_3 \lg Q = \ln\frac{\mu}{1 - \mu} \tag{17}$$

图 9 为采用 2 种形式的输入向量得到的不同概率下的分类函数[37]。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) lg$Q$ – H

(b) lg$Q$-lg$H$

图 9　2 种输入向量的计算结果对比[37]

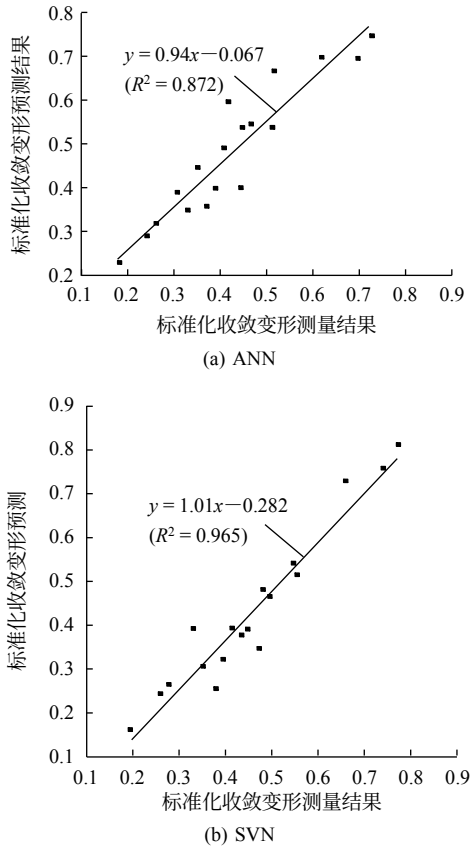
Fig.9　Result comparison of the two different input parameter vectors[37]

该方法预测围岩挤压存在较强的局限性，仅能预测训练数据所圈定范围内的情况。例如，H_{max}，H_{min} 分别为用于训练的数据中埋深的最大值和最小值，要求预测的埋深必须在[H_{min}，H_{max}]范围，对于 Q 也一样。

用极大似然估计法以概率的形式确定分类函数并不是唯一的方法，二维空间的样本分类也只是分类器的基本运用。线性分类器是最简单的分类器形式，但却包含 SVM(support vector machine)的形成思路和核心概念。M. Satar 等[38-39]将 TBM 隧道的收敛变形问题看做多维函数估值问题，分别采用 SVM 以及 ANN(artificial neural networks)预测隧道的收敛变形并对比了 2 种方法的适用性。

用于训练的数据来自于伊朗 Ghomroud 引水隧道。将同一隧道断面的埋深、地质强度指标(GSI)、岩石质量指标(RQD)、岩体单轴抗压强度(σ_{cm})、岩体单轴抗拉强度(σ_{tm})、黏聚力、内摩擦角、弹性模量、单轴抗压强度(UCS)组成输入向量，输出值为围岩径向收敛变形量。

SVM 模型经交叉验证后其测量值与预测值之间的相关性系数达到 0.965，较 ANN 模型的 0.872 稍高，表明 SVM 模型在预测隧道开挖收敛变形适应性更强。图 10 为 2 种预测方法的标准化预测结果与标准化实际测量结果之间的对比[38]。



(a) ANN

(b) SVN

图 10　ANN 与 SVM 预测结果对比[38]

Fig.10　Prediction comparison of ANN and SVM[38]

4.5　蒙特卡罗法

岩石因其材料特殊性，在较短的里程内可能会呈现出复杂的变化，而工程建设中的地质勘察不可能将围岩的每一部分都查明清楚，即对于已经探明定性的围岩其力学参数可能存在一定的变异性。综合考虑各种变异的可能对围岩力学行为的影响是有必要的。

尼泊尔境内喜马拉雅山脉隧道建设期间，围岩挤压问题是隧道稳定性的主要不良影响。K. K. Panthi 和 B. Nilsen[40]采用@Risk 风险管理软件，基于概率方法进行不确定性分析，考虑围岩参数可能存在的变异特性，分析隧道不同收敛变形值的概率分布情况。

用于风险分析的功能函数为预测隧道径向应变的经验公式有 2 个，E. Hoek 和 P. Marinos[41]提出的

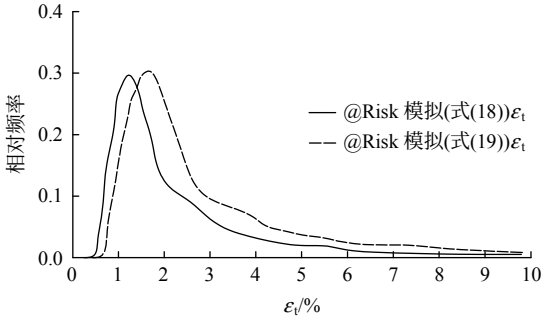
?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

公式及 K. K. Panthi[42]提出的公式，即

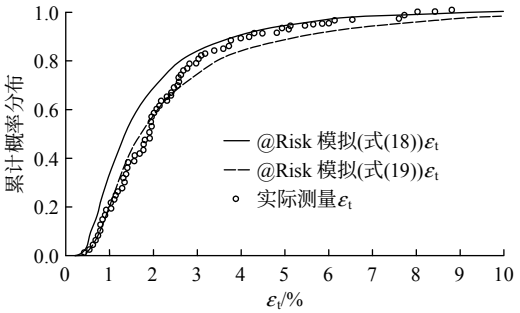
$$\varepsilon_t = \left(0.2 - 0.25\frac{P_i}{\sigma_v}\right)\left(\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_v}\right)^{2.4\frac{P_i}{\sigma_v}-2} \tag{18}$$

$$\varepsilon_t = 0.2\left(\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_v}\right)^{-2} \tag{19}$$

考虑存在变异性的参数有岩体强度(σ_{cm})、自重压力(σ_v)、围岩支护压力(P_i)，并假设皆服从正态分布。指定可能发生变异的参数并给出其不同变异值的概率分布之后，采用蒙特卡罗方法模拟待预测地层在不同变异情况下的径向收敛变形，最后统计变形的分布情况即可得到不同变形值的相对频率分布，频率越高代表待预测断面产生该变形值的可能性越大。图 11 为 2 种功能函数获得的收敛变形(ε_t)的预测结果及实测结果[40]，在频率累计图中，实测曲线基本被 2 条预测曲线包夹。



(a) 相对频率曲线



(b) 累计概率分布曲线

图 11　蒙特卡罗法预测结果[40]

Fig.11　Predicted results with the uncertainty analysis method[40]

5　深埋 TBM 隧道挤压大变形预测

前述围岩挤压大变形的辨识及预测等方法根据所参考的工程案例研究而成，是否适用于其他工程项目，尚需要实践的检验。现根据上述的部分方法对某引水隧洞的挤压特性进行分析。

5.1　挤压潜力预测

巴基斯坦 N-J 水电站引水隧洞，直径 B = 8.5 m，某断面埋深约为 990 m，为泥质含量较高的粉砂岩。室内单轴压缩实验测得其强度为σ_c = 58 MPa，经综合分析后考虑围岩参数 c = 1.6 MPa，φ = 38 °，其岩体单轴抗压强度测算为σ_{cm} = 5.3 MPa，E = 8.3 GPa。工程围岩采用 RMC 分级方法，Q4，Q5 类软弱围岩转化成 Q 系统 $Q \le 1$，取 SRF 系数为 10，则可得相应的 N = 10。

根据上述参数推算重度(表 2 中 3，4 项表示定性预测存在挤压可能的极限埋深)挤压条件下的极限指标(见表 2)，即当施工记录的参数达到极限指标时即表示当前围岩存在严重挤压，需要及时处理。需要指出的是，不同的方法给出的挤压程度判定也许都是“严重”，但其意义肯定是存在差异的。另外部分判别方法仅是对挤压特性进行定性的判别，如表 2 中第 3，4 项，当深度超过极限深度时表示存在挤压的可能性。

表 2　挤压地层预报

Table 2　Forecasting of squeezing ground

编号	公式	极限指标	其他参数
1	$C_f = \sigma_c/\gamma H$	H_{cr} = 1 074 m	C_f = 2
2	$N_c = \sigma_{cm}/\gamma H$	H_{cr} = 1 161 m	N_c = 0.17
3	$H_{cr} = 350Q^{1/3}$	H_{cr} = 350 m	Q = 1
4	$HB^{0.1} > 270N^{0.33}$	H_{cr} = 469 m	N = 10
5	σ_{oi}	H_{cr} = 1 586 m	σ_{o3} = 43 MPa
6	$\varepsilon_{cr} = 31.1\frac{\sigma_{ci}^{1.6}}{E_{ci}\gamma^{0.6}Q^{0.2}}$	u_a = 273 mm	SI = 5
7	$\varepsilon_{cr} = 5.84\frac{\sigma_c^{0.88}}{E^{0.63}Q^{0.12}}$	u_a = 141 mm	SI = 5

基于岩石(表 2 中第 1 项)或岩体(表 2 中第 2 项)强度指标计算的极限深度较为接近，而根据地应力(表 2 中第 5 项)判定的极限深度则较大。现场实际情况则是，该断面收敛变形较大，TBM 通过收缩护盾约 4 cm 后顺利穿越。结果表明表 2 中第 1，2 项判别方法存在一定的适用性，而表 2 中第 5 项的判别与实际情况存在一定差异，分析原因，可能是由于该项需要给定围岩的地应力指标，计算时采用的是估计值。

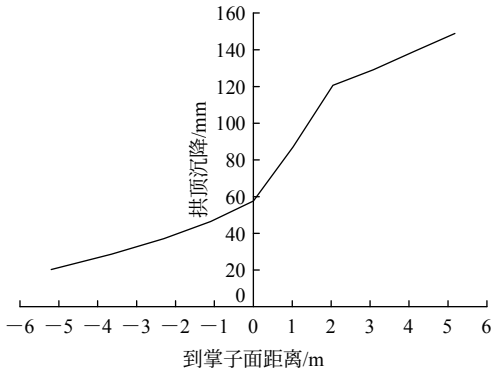
高埋 TBM 深隧道因为其构造运动复杂、及时快速的岩石物性探测难度高，预估收敛变形时需要十分慎重。单次检验，预测准确的方法并不代表就可以套公式进行运用，预测不准的方法也不代表毫无价值，更可行的办法是首先分析各种方法针对当前工程的适用权重，再综合考虑各种方法的预估值，

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

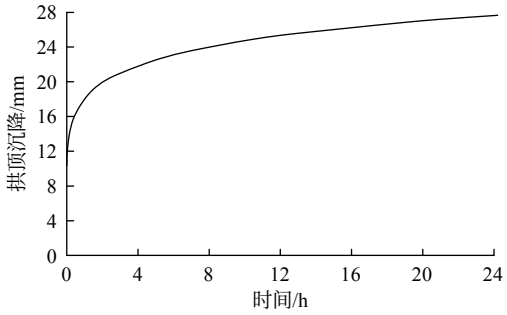
从而得到全面的预测结果。

5.2　挤压大变形预测

采用有限元法对隧道开挖进行模拟，将围岩考虑为弹塑性材料，对于 Q5 类围岩，当隧道埋深为 2 000 m 时，随着 TBM 开挖的进行，围岩变形结果如图所示 12(a)所示。当考虑围岩的流变特性时，其收敛变形将随着时间的推移进一步增加，如图 12(b)所示。结合表 2 第 6，7 项，该断面存在严重挤压，需要采取扩挖或者进行超前加固等措施。



(a) 随着掌子面推进围岩的收敛变形



(b) 围岩流变变形随时间变化规律

图 12　围岩收敛变形预测

Fig.12　Prediction of convergence deformation of ground

6　挤压大变形控制技术

应对挤压性地层，应主动提高围岩力学性能，促使深部岩体共同受力抵抗围岩变形以改善围岩受荷条件。

针对不同功能的隧道在不同大变形等级条件下，张祉道[18]给出了相应的整治措施，对于初衬的主要措施包括增加喷射混凝土厚度、增加锚杆长度、喷射混凝土添加钢纤维、设置可缩式钢架；对于二衬可以增加衬砌厚度、提高混凝土标号、添加钢纤维、增设钢筋；还可以通过修改开挖面形状、增加预留变形等方法，具体见表 3。

乌鞘岭岭脊段千枚岩地层低应力高[43]，地质构造复杂，断层带穿插，收敛变形严重，经现场足尺试验后确定支护方案，除常规挂网锚喷以外，还设置了超前小导管和 H175 钢拱架，特别地方还增设了横向钢管支撑，保证了施工的顺利进行以及隧道结构的安全稳定。科学研究、工程实践最后得出“短开挖、快封闭、强支护、快速成环、二衬适时紧跟”的原则[44]。采用短台阶法开挖，控制台阶长度在 4～5 m 范围内并及时进行支护能有效控制收敛变形。开挖先行导洞虽不能降低隧道总的收敛变形量，但是由于导洞的分担使得初衬受到的围岩压力有所降低，若能及时施做二衬则能有效地改善隧道的变形。对于不能及时封闭成环的支护，应对拱墙范围内围岩采用小导管进行径向注浆加固[45]。

挤压性地层围岩收敛变形大，持续时间长，刚性支护虽然能短时控制围岩的变形量，但随着时间的增长，围岩压力的聚集会对刚性支护造成破坏，采用可伸缩钢拱架则既能控制围岩的稳定又能保证钢架的正常工作[46]。然而，对于挤压特别严重存在快速收敛的围岩，柔性支护无法起到控制变形的作用，特别是对于公、铁路隧道，如果侵入了二衬界面，后续的二次开挖和支护将导致建设成本的上升，例如土耳其某隧道由于二次施工导致开挖支护的费用上升 15%～20%。若选用刚性支护，并充分考虑围岩的时效力学特性，将达到较好的整体经济效益[47]。

表 3　不同挤压程度下的整治手段[18]

Table 3　Disposal methods for ground under squeezing condition of different levels[18]

大变形等级	改善硐室形状	初期支护								预留变形量/cm		设置临时仰拱	二次注模衬砌				
		喷层厚度/cm		喷层留纵缝	喷射混凝土中掺钢纤维	可缩式钢架	锚杆长度/m		预应力长锚索				衬砌厚度/cm		提高模注混凝土强度等级	采用钢筋混凝土	掺钢纤维
		双车道公路隧道	单线铁路隧道				双车道公路隧道	单线铁路隧道		双车道公路隧道	单线铁路隧道		双车道公路隧道	单线铁路隧道			
轻度	–	20～25	15～20	–	采用	采用	6	4	–	25	15	–	50	45	C30	–	–
中等	采用	25～35	20～30	采用	采用	采用	10	6	–	40	30	采用	50	45	C30	采用	–
严重	采用	35～45	30～40	采用	采用	采用	＞14	＞6	采用	60	45	采用	＞50	＞45	C40	采用	采用

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对于采用 TBM 进行开挖的隧道，受围岩挤压的影响比较敏感，若不及时应对而导致 TBM 卡机将严重影响工程进度。Y. Shang 等[47]给出了各种不利地质条件下应对手段，包括降低 TBM 掘进速率，保持匀速不间断施工，刀头贴紧掌子面等。

对于存在轻微挤压的 TBM 隧道，N. Bilgin 和 M. Algan 等[48]将地层的挤压特性与 TBM 的操作参数相结合给出了定量的挤压指数 S_i，旨在帮助工程师判断 TBM 的受挤压程度，以便准确采取措施，如在 TBM 护盾外注射膨润剂等，其表达式为

$$S_i = \frac{\Delta F}{dt} \tag{20}$$

式中：ΔF 为 TBM 受挤压时与地层存在挤压时刀盘推力的差值(如图 13 中 $F_B - F_A$)；d，t 分别为挤压开始到 TBM 卡机之间的距离($L_{A_2} - L_{A_1}$)和时间($t_{A_2} - t_{A_1}$)。

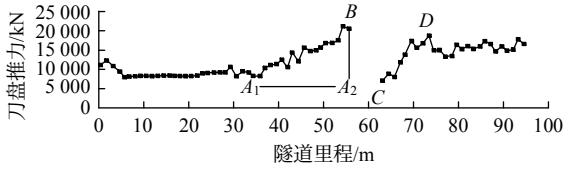


图 13　TBM 刀盘推力沿隧道里程的变化[48]

Fig.13　Variation of TBM thrust along the tunnel mileage[48]

对于收敛变形严重，挤压 TBM 甚至阻塞 TBM 的情况，需要采取更为积极的措施。昆明上公山饮水隧道，TBM 在长达 100 m 断层带中数次发生卡机事故，最后采用人工扩挖旁洞、设置钢拱架支撑以及开挖超前导洞等处置措施，达到一定有益效果[49]。

7　结　论

本文介绍了高地应力挤压性围岩的辨识、预测和整治的方法。通常预测围岩挤压的方法包括经验公式法、解析法、数值模拟方法、人工智能预测以及蒙特卡罗法等。其中经验方法单纯的根据现场测量结果建立不同指标量之间的数学关系，物理意义不够明晰。解析方法则将开挖进行了简化，物理意义明确，却与实际工程出入较大。数值模拟可以将围岩的逐步开挖、各部分间的接触关系等考虑清楚，但计算所用的本构模型都存在一定得片面性，不能完整的反应软弱岩石在高地应力下开挖的力学行为。人工智能方法与经验方法有一定得相似性，都是建立指定的输入与输出参数间的数学关系，但是区别在于机器学习方法不需要人为的指定两者之间的关系模式(指数、对数或者线性)。可以想象，岩体强度参数、隧道埋深、岩石力学指标等参数与挤压之间存在着某种联系，而这种潜在的联系又难以由简单函数所表达，人工智能方法不需要特别的指定既可以得到输入与输出间高度非线性的映射关系，这一点使其更便于工程运用。但是，与经验方法一样，用于预测的模型不能超出训练样本所圈定的范围。蒙特卡罗法的显著特点是考虑参数的变异特性，这是实际工程中真真切切存在的而其他方法却又不加以考虑的方面，但是指定参数的分布规律则是一件较为困难的事情，限制了该方法的运用。

各种预测方法，由于参考的工程案例不同，其适用性也存在较大的差异，并没有哪一种预测方法可以完美地运用于各种工程，如：针对硬岩开发的本构模型就不能贴切的反应软岩隧道的时效力学响应，由喜马拉雅山脉的工程数据训练过的神经网络用于分析阿尔卑斯山脉的隧道时可能由于两者构造运动差异较大而变得不那么适用，由大量泥质粉砂岩所统计出来的岩石变异特性并不能强加到盐岩上等。

对于存在不同程度挤压潜力的地层，具体采用何种预测、控制方法或者优先采用何种方法需要综合考虑地质条件、围岩条件以及工程因素慎重地选择。希望本文的研究工作对有需要的岩土人士能起到一定的参考作用。

参考文献(References)：

[1] RAMONI M，ANAGNOSTOU G. TBM tunnelling in squeezing ground—basic considerations and decision aids[C]// Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings. San Francisco，California：[s. n.]，2011：219－233.

[2] RAMONI M，ANAGNOSTOU G. On the feasibility of TBM drives in squeezing ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2006，21(3)：262.

[3] MA H S，WANG J，YIN L J. TBM tunneling in squeezing ground：Problems and solutions[C]// Veterinary Clinical Pathology：A Case-Based Approach. [S. l.]：[s. n.]，2015：339.

[4] SHATERPOUR-MAMAGHANI A，TUMAC D，AVUNDUK E. Double shield TBM performance analysis in difficult ground conditions：a case study in the Gerede water tunnel, Turkey[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment，2015，74(1)：1－12.

[5] AKSOY C O，OGUL K，TOPAL I，et al. Numerical modeling of non-deformable support in swelling and squeezing rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2012，52(1)：61－70.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[6] SHANG Y，XUE J，WANG S，et al. A case history of tunnel boring machine jamming in an inter-layer shear zone at the Yellow River Diversion Project in China[J]. Engineering geology，2004，71(3)：199 – 211.

[7] ISRM. Commission on squeezing rocks in tunnels tunneling in difficult ground[C]// BARLA G ed. Proceedings of Workshop the 8th ISRM. Tokyo：[s. n.]，1995：1 – 90.

[8] BARLA G. Tunneling under squeezing rock conditions[M]. Berlin：Logos Verlag Berlin，2001：91.

[9] KOVFIRI K，STAUS J. Basic considerations on tunnelling in squeezing ground[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，1996，29(4)：203 – 210.

[10] LINARD C，GEORGIOS A. The effect of the stress path on squeezing behavior in tunneling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2009，42(1)：289 – 318.

[11] 黄　兴. 深部软弱地层 TBM 掘进围岩挤压大变形与卡机致灾机制[博士学位论文][D]. 武汉：中国科学院武汉岩土力学研究所，2014.(HUANG Xing. Mechanism of large squeezing deformation and shield jamming in deep soft ground tunnelling by TBM[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan：Institute of Rock and Soil Mechanics，Chinese Academy of Sciences，2014.(in Chinese))

[12] 赵旭峰. 挤压性围岩隧道施工时空效应及其大变形控制研究[博士学位论文][D]. 上海：同济大学，2007.(ZHAO Xufeng. The temporal and spatial effect in construction and control of large deformation of tunnels in squeezing ground[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai：Tongji University，2007.(in Chinese))

[13] RAMONI M，ANAGNOSTOU G. The effect of consolidation on TBM shield loading in water-bearing squeezing ground[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2011，44(1)：63 – 83.

[14] JETHWA J L，SINGH B. Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions—a new approach[C]// Design and Performance of Underground Excavations，ISRM Symposium. Cambridge：[s. n.]，1984：231 – 238.

[15] SINGH B，JETHWA J L，DUBE A R. Correlation between observed support pressure and rock mass quality[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，1992，7(1)：59 – 74.

[16] GOEL R K，JETHWA J L，PAITHANKAR A G. Indian experiences with Q and RMR system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，1995，10 (1)：97 – 109.

[17] BARTON N，LIEN R，LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support[J]. Rock Mechanics，1974，6(4)：189 – 236.

[18] 张祉道. 关于挤压性围岩隧道大变形的探讨和研究[J]. 现代隧道技术，2003，40(2)：5 – 12.(ZHANG Zhidao. Discussion and study on large deformation of tunnel in squeezing ground[J]. Modern Tunneling Technology，2003，40(2)：5 – 12.(in Chinese))

[19] HOEK E. Big tunnels in bad rock[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2001，127(9)：726 – 740.

[20] AYDAN O，AKAGI T，KAWAMOTO T. The squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，1993，26(2)：137 – 163.

[21] BARTON N. Some new *Q*-value correlations to assist in site characterization and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2002，39(2)：185 – 216.

[22] EBRAHIM F，JAMAL R. Correlation of tunnel convergence with TBM operational parameters and chip size in the Ghomroud tunnel，Iran[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2008，23(6)：700 – 710.

[23] DWIVEDI R D，SINGH M，VILADKAR M N，et al. Prediction of tunnel deformation in squeezing grounds[J]. Engineering Geology，2013，161(18)：55 – 64.

[24] DEHKORDI M S，SHAHRIAR K，MOAREFVAND P，et al. Application of the strain energy to estimate the rock load in squeezing ground condition of Eamzade Hashem tunnel in Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences，2013，6(4)：1 241 – 1 248.

[25] THE MANH V，JEAN S，DIDIER S，et al. Anisotropic closure in squeezing rocks：the example of saint-martin-la-porte access gallery[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2013，46(2)：231 – 246.

[26] LIU Q S，HUANG X，SHI K，et al. Jamming mechanism of full face tunnel boring machine in over thousand-meter depths[J]. Journal of China Coal Society，2013，38(1)：78 – 84.

[27] 刘泉声，黄　兴，时　凯，等. 深部挤压性地层 TBM 掘进卡机孕育致灾机制[J]. 煤炭学报，2014，39(增 1)：75 – 82.(LIU Quansheng，HUANG Xing，SHI Kai，et al. The mechanism of TBM shield jamming disaster tunnelling through deep squeezing ground[J]. Journal of China Coal Society，2014，39(Supp.1)：75 – 82.(in Chinese))

[28] CARRANZA-TORRES C，FAIRHURST C. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2000，15(2)：187 – 213.

[29] SHALABI F I. FE analysis of time-dependent behavior of tunneling in squeezing ground using two different creep models[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2005，25(3)：271 – 279.

[30] STERPI D，GIODA G. Visco-plastic behaviour around advancing tunnels in squeezing rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2009，42(3)：319 – 339.

[31] DEBERNARDI D，BARLA G. New viscoplastic model for design analysis of tunnels in squeezing conditions[J]. Rock Mechanics and

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Rock Engineering，2009，42(2)：259 – 288.

[32] PELLET F L，ROOSEFID M，DELERUYELLE F. On the 3D numerical modelling of the time-dependent development of the damage zone around underground galleries during and after excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2009，24(6)：665 – 674.

[33] PELLET F，HAJDU A，DELERUYELLE F，et al. A viscoplastic model including anisotropic damage for the time dependent behaviour of rock[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics，2005，29(9)：941 – 970.

[34] RAMONI M，ANAGNOSTOU G. The interaction between shield, ground and tunnel support in TBM tunnelling through squeezing ground[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2011，44(1)：37 – 61.

[35] ZHAO K，JANUTOLO M，BARLA G. A completely 3D model for the simulation of mechanized tunnel excavation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2012，45(4)：475 – 497.

[36] ZHAO K，JANUTOLO M，BARLA G，et al. 3D simulation of TBM excavation in brittle rock associated with fault zones：The Brenner Exploratory Tunnel case[J]. Engineering Geology，2014，181(1)：93 – 111.

[37] JIMENEZ R，RECIO D. A linear classifier for probabilistic prediction of squeezing conditions in Himalayan tunnels[J]. Engineering Geology，2011，121(1)：101 – 109.

[38] SATAR M，SEYED R T，MASOUD M. Application of artificial intelligence algorithms in predicting tunnel convergence to avoid TBM jamming phenomenon[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2012，55(1)：33 – 44.

[39] SATAR M，SEYED R T. Prediction of tunnel convergence using Artificial Neural Networks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2012，28(2)：218 – 228.

[40] PANTHI K K，NILSEN B. Uncertainty analysis of tunnel squeezing for two tunnel cases from Nepal Himalaya[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2007，44(1)：67 – 76.

[41] HOEK E, MARINOS P. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses[J]. Tunnels and Tunnelling International，2000，32 (11)：45 – 51.

[42] PANTHI K K. Analysis of engineering geological uncertainties related to tunnelling in Himalayan rock mass conditions[Ph. D. Thesis][D]. Norway：Norwegian University of Science and Technology，2006.

[43] 张继奎，方俊波. 高地应力千枚岩大变形隧道支护参数试验研究[J]. 铁道工程学报，2006 (5)：66 – 70.(ZHANG Jikui，FANG Junbo. Experiment research on support parameters of large strain phyllite tunnel under high stress[J]. Journal of Railway Engineering Society，2006，(5)：66 – 70.(in Chinese))

[44] 李国良，朱永全. 乌鞘岭隧道高地应力软弱围岩大变形控制技术[J]. 铁道工程学报，2008，(3)：54 – 59.(LI Guoliang，ZHU Yongquan. Control technology for large deformation of highland stressed weak rock in Wushaoling tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society，2008，(3)：54 – 59.(in Chinese))

[45] 许再良，孙元春. 雁门关铁路隧道挤压变形问题分析[J]. 岩石力学与工程学报，2014，33(增 2)：3 834 – 3 839.(XU Zailiang，SUN Yuanchun. Tunneling in squeezing ground conditions：with a case study of Yanmenguan railway tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2014，33(Supp.2)：3 834 – 3 839.(in Chinese))

[46] 刘志强，宋 冶，胡元芳. 隧道挤压型变形与支护特性研究[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(增 1)：413 – 418.(LIU Zhiqiang, SONG Ye，HU Yuanfang. Study of squeezing deformation and support characteristics of tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics，2013，34(Supp.1)：413 – 418.(in Chinese))

[47] SHANG Y，XUE J，WANG S，et al. A case history of tunnel boring machine jamming in an inter-layer shear zone at the Yellow River Diversion Project in China[J]. Engineering Geology，2004，71(3)：199 – 211.

[48] BILGIN N，ALGAN M. The performance of a TBM in a squeezing ground at Uluabat，Turkey[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2012，32(1)：58 – 65.

[49] 尚彦军，史永跃，曾庆利，等. 昆明上公山隧道复杂地质条件下 TBM 卡机及护盾变形问题分析和对策[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(21)：3 858 – 3 863.(SHANG Yanjun，SHI Yongyue，ZENG Qingli，et al. TBM jamming and deformation in complicated geological conditions and engineering measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21)：3 858 – 3 863.(in Chinese))

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net