文章编号:1005-0930(2025)02-0526-011 中图分类号:U458 文献标识码:A doi:10.16058/j.issn.1005-0930.2025.02.019

# 基于 MARS 的隧道工作面安全系数预测公式 构建研究

## 满建宏1, 黄宏伟1, 王飞阳2, 陈佳耀3

(1.同济大学土木工程学院地下建筑与工程系,上海 200092;2.东华大学环境科学与工程学院土木工程系,上海 201620;3.北京交通大学 隧道及地下工程教育部工程研究中心,北京 100044)

摘要:为解决山岭隧道工作面稳定性评估难题,提出一种快速高效的评估模型.收集文献中包括 GSI、 $\sigma_c$ 和 $m_i$ 等关键参数在内的818组数据,得到 $\sigma_c$ 与 $m_i$ 以及GSI与 $\sigma_c$ 的相关系数;结合拉丁超 立方抽样和解析解构建V级围岩隧道工作面稳定性数据库;通过MARS(Multivariate Adaptive Regression Splines)算法建立隧道工作面安全系数的预测公式,将其评估结果与施工现场相验证.对 比分析表明:相比于岩体自身参数( $\sigma_c$ 、 $m_i$ 和GSI),隧道的几何参数更能影响工作面的稳定性;该 模型对各因素之间的复杂隐式关系具有良好的可解释性,可实现快速、准确、可靠的计算.因此,该 评估模型更便于施工现场的应用,可为岩石隧道工作面稳定性的快速评估提供参考. 关键词:工作面稳定性;相关系数;解析解;MARS算法;拉丁超立方抽样;快速评估

随着我国交通建设水平的不断提高及国家交通强国战略的全面实施,越来越多的山岭隧道正在兴建,特别是在我国西南等多山地区.然而,由于西南地区地势多山、地质条件复杂等因素,为山岭隧道的钻爆法施工带来了许多潜在的安全风险和挑战<sup>[1]</sup>.在隧道爆破结束、清理出渣阶段,隧道工作面的稳定性尤其重要,一旦发生坍塌,将对施工人员的人身安全造成重大威胁,同时也会导致成本超支、工期延误等问题.因此,在施工阶段准确判断工作面的稳定性状况至关重要.

目前,国内外对于隧道稳定性<sup>[2-3]</sup>的研究已有很多,主要采用极限分析法<sup>[4-9]</sup>、极限平衡法<sup>[10-11]</sup>、数值模 拟<sup>[12-14]</sup>及试验方法<sup>[15-16]</sup>等.数值模拟与试验方法方面:吕玺琳等<sup>[17]</sup>采用有限元数值模拟的方法研究了地下 水位变化对工作面稳定性的影响,结果表明渗流力与水位高低呈近似线性关系,且地下水会加剧工作面的不 稳定性.Zhang 等<sup>[18]</sup>采用离散元数值模拟(DEM)方法对粉质细砂深、浅埋隧道的工作面稳定性进行了分析, 并考虑了水压和浮力的影响.张红军等<sup>[19]</sup>采用离散元软件 FLAC 3D 对上覆富水砂层隧道工作面的变形进行 了分析研究,得到了临界隔水层的厚度.Di 等<sup>[20]</sup>采用模型试验的方法研究了不同相对密度下工作面失稳土 体的扰动范围.虽然数值模拟可以模拟各种复杂的地质环境,模型试验可以在机理上对工作面的破坏现象进 行解释,但是其二者都要耗费大量的时间成本.因此,具有计算效率高、结果准确等优点的解析解方法被广泛 应用.王立新等<sup>[21]</sup>引入椭球体放矿理论,改进了传统的棱柱体筒仓破坏模型,对砂卵石地层的工作面稳定性 进行了分析.傅鹤林等<sup>[22-23]</sup>采用拟静、动力法对地震效应下的工作面的稳定性分析研究表明,地震加速度显 著影响工作面的稳定性.曹成勇等<sup>[24]</sup>建立了考虑水渗流作用下工作面稳定性分析模型,并分析了隧道几何 尺寸、土体强度参数(*c*和*φ*)及水的深度对工作面稳定性的影响.杨小礼等<sup>[4]</sup>采用非线性 Hoek-Brown 准则分 析了不同饱和度下破碎软岩隧道工作面的稳定性,并给出了岩体强度参数减弱程度快慢的临界饱和度(*S*,= 0.4).Li 等<sup>[25]</sup>开发了一种水平分层离散化的方法,将极限分析理论扩展到非均匀土体中,并讨论了软弱夹层 的位置和厚度对工作面稳定性的影响.Hou 等<sup>[26]</sup>基于离散化的破坏机制,将数值模拟求解的孔隙压力插值

收稿日期:2023-07-15;修订日期:2023-11-17

**基金项目**:国家自然科学基金项目(52279107);云南省黄宏伟专家工作站(202205AF150015);云南交投科技创新计划项目(YCIC-YF-2022-15);中国国家留学基金委项目(202206260203)

作者简介:满建宏(1993—),博士研究生.E-mail:1911383@tongji.edu.cn

通信作者:黄宏伟(1966—),博士,教授.E-mail:huanghw@tongji.edu.cn

到每个离散点上,对渗透率各向异性及锚杆布置对工作面安全系数的影响进行了分析.Man 等<sup>[27-29]</sup>采用分块 技术、虚拟岩体及镜像法,分别对分层地层、软弱夹层及岩体渗透系数对工作面稳定性的影响进行了综合分 析.综上所述,极限分析方法已被应用到各种复杂的地质情况,得到了众多学者的认可.但是,极限分析方法 通常需要借助遗传算法等优化算法来求解最小值或最大值,这导致无法得到一个明确的极值显式表达式.这 也意味着每一次的求解都要在 MATLAB 等软件上进行优化计算,对于施工现场来说仍是不便的.

目前,众多学者采用非线性回归的方法<sup>[30-32]</sup>对极限分析方法的优化结果建立显式表达式,然而要确定 最佳的表达式形式,需进行多次的试错分析<sup>[33]</sup>,这个过程既复杂又繁琐,且需要提前输入各个因素与结果的 函数关系.此外,上述学者建立的稳定性数据库,仅仅是参数在一定范围内任意变化的数据库,对围岩等级与 岩体参数之间的对应关系及岩体参数之间的相关性均无考虑.因此,目前对于既考虑围岩等级,又考虑岩体 参数间相关性的数据库构建,仍鲜有研究.近年来,采用机器学习方法<sup>[34-35]</sup>解决土木工程问题是当前研究的 热点,特别是处理庞大、复杂、高维度数据集时,机器学习表现出了出色的性能.其中,MARS 算法<sup>[36]</sup>具有自动 构建可解释性高的显式表达式的能力,可识别和删除与目标变量不相关的特征.这些优势使其成为众多学者 在数据分析和建模领域中的首选工具.Zhang 等<sup>[37-38]</sup>结合有限元分析和 MARS 算法建立了开挖基坑水平支 撑墙的挠度表达式,考虑了基坑的几何形状、墙体刚度、土体参数及支柱间距等因素.Lai 等<sup>[39]</sup>基于有限元分 析的人工数据集,结合 MARS 算法建立了地下水存在时基坑开挖安全系数的预测方程.Zhang 等<sup>[40]</sup>采用 MARS 算法对隧道周边开挖基坑造成隧道最大水平位移的显式表达式进行了研究.

综上所述,目前 MARS 算法多用在基坑领域,在隧道领域方面的应用尚少,因此本文尝试采用 MARS 算法对隧道工作面稳定性的评估进行显式表达式的构建.首先,根据统计数据得到岩体参数间的相关系数,结合拉丁超立方抽样和 Man 等<sup>[28]</sup>开发的工作面稳定性分析模型建立了数据库;之后,采用 MARS 算法建立工作面稳定性判定的显式表达式,其不但直观简洁,而且便于在便携式设备上进行计算,对施工现场有一定的指导作用.

## 1 Hoek-Brown 准则和解析模型简介

Hoek-Brown(H-B)破环准则自提出以来<sup>[41]</sup>受到了国内外学者的广泛关注和认可,但最初的H-B破环准则仅适用于完整的、没有节理的坚硬岩石.为了扩展应用范围,Hoek和Brown<sup>[42]</sup>对其进行了改进,使其可以反映岩石软硬、节理数量和开挖扰动等影响,并且对于低应力且质量较差的岩体也适用.改进后的H-B准则如下

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^n \tag{1}$$

其中: $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 分别为最大、最小主应力; $\sigma_a$ 为完整岩石的单轴抗压强度; $m_b$ 、s和n为反应岩体特征的无量 纲参数,其计算方法如下

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14d}\right)$$
 (2a)

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3d}\right) \tag{2b}$$

$$n = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[ \exp\left(-\frac{GSI}{15}\right) - \exp\left(-\frac{20}{3}\right) \right]$$
(2c)

其中:m<sub>i</sub>为反应岩体软硬程度的参数,可以通过三轴试验或者查表获得;GSI为地质强度指标,反映岩体结构和节理条件,取值为0~100;d为节理岩体扰动系数,反映爆破和应力松弛对岩体的扰动程度,取值为0~1, 当岩体未受到扰动时取值为0,完全扰动时取值为1;s反映岩体的完整程度;n为表征节理的岩体参数.

由于采用极限分析上限法进行计算,而 H-B 准则中不包括强度参数黏聚力 c 和内摩擦角  $\varphi$ ,因此需要将 H-B 准则参数与 c 和  $\varphi$  进行等效转换.根据 Hoek 等<sup>[43]</sup>的研究,转换公式如下

$$c = \frac{\sigma_c [(1+2n)s + (1-n)m_b \sigma_{3n}](s+m_b \sigma_{3n})^{n-1}}{(1+n)(2+n)\sqrt{1 + \frac{[6m_b n(s+m_b \sigma_{3n})^{n-1}]}{((1+n)(2+n))}}}$$
(3a)

No.2

$$\varphi = \arcsin\left[\frac{6m_b n(s+m_b\sigma_{3n})^{n-1}}{2(1+n)(2+n) + 6m_b n(s+m_b\sigma_{3n})^{n-1}}\right]$$
(3b)

其中,各参数的计算方法参考 Hoek 等<sup>[43]</sup>的研究.



结合极限分析上限法和 H-B 准则, Man 等<sup>[28]</sup>建立的工作 面稳定性分析模型如图 1 所示.其中,隧道埋深为 H,隧道直径 为 D<sub>d</sub>,隧道穿越地层分为两层,厚度分别为 h<sub>1</sub> 和 h<sub>2</sub>.总体而 言, Man 等<sup>[28]</sup>采用双对数螺旋线的形式,并将破坏体分为 5 部 分进行积分求解,可以得到总的重力功率和破坏边界内能消 散功率分别如下

$$W_{G} = \iint_{S} \vec{v} \cdot \vec{\gamma}_{i} \sin\theta dS = W_{BFC} + W_{AFCD} + W_{AGD} + W_{ECD} \quad (4)$$

$$P_D = \int_l c_i v \cos\varphi_i dl = P_{AE} + P_{ED} + P_{DC} + P_{CB}$$
(5)

其中: $\vec{v}$ 和v分别为坍塌微元体和破坏边界的滑动速度; $\theta$ 为各微元体相对于竖直方向的角度;dS和dl分别为各微元体的面积及破坏边界的微元体长度; $c_i$ 和 $\varphi_i$ 分别为坍塌体的黏聚力和内摩擦角; $\gamma_i$ 为各岩层的容重; $W_c$ 为各部分求得的重力功率; $P_p$ 为各破坏边界的内能消散功率. $W_c$ 和 $P_p$ 各部分的表达式详见附录 A.

采用安全系数来对工作面的稳定性进行判定,将式(4)和式(5)带入式(6)即可得到相应的安全系数

$$F_s = \frac{P_D}{W_G} \tag{6}$$

若不考虑安全储备,当*F<sub>s</sub>*<0时,工作面发生坍塌;*F<sub>s</sub>*=0时,工作面处于极限平衡状态;*F<sub>s</sub>*>0时,工作面 处于稳定状态.*F<sub>s</sub>*通过 MATLAB 编写遗传算法程序进行优化求解.每部分公式的具体求解过程可参考 Man 等<sup>[28]</sup>的研究.

### 2 数据库构建方法

### 2.1 岩体参数的相关性

为了得到岩体参数的相关性,并使其更加的符合实际工程,统计了文献中通过实验测得的单轴抗压强度  $\sigma_c(MPa)$ 、抗拉强度  $\sigma_t(MPa)$ ,内摩擦角  $\varphi$  和 *CSI* 值,以及已有数据库中的  $m_i(至少通过 5 组三轴测试获得 的 <math>\sigma_1$  和  $\sigma_3$ ,根据 Hoek 等<sup>[44]</sup>建议的方法计算  $m_i$ ),总共 818 组数据<sup>[45-52]</sup>.其中包括泥岩、粉砂岩、砂泥岩、泥 灰岩、凝灰岩、片麻岩、花岗闪长岩等几十种岩石,应可覆盖隧道施工中遇到的各类岩体.

此外,由于三轴实验既耗时又昂贵,而单轴抗压强度、抗拉强度及内摩擦角是比较容易测得的,所以很多 研究人员试图不通过 $\sigma_1$ 和 $\sigma_3$ 来计算 $m_i$ 主要包括"R指数"法<sup>[53]</sup>、内摩擦角计算<sup>[54]</sup>及基于单轴抗压强度的  $\sigma_e$ 法, "R指数"法主要通过单轴抗压强度 $\sigma_e$ 和抗拉强度 $\sigma_i$ 来计算 $m_i$ ,表达式如下

$$m_i \approx R = \frac{\sigma_c}{|\sigma_i|} \tag{7}$$

Mehrishal 等<sup>[54]</sup>根据库伦失效准则推导出内摩擦角与 m<sub>i</sub> 的关系式

$$m_i = 2 \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \tag{8}$$

Balazs 等[55]和 Shen 等[56]采用单轴抗压强度建立了一种简单的估算 m<sub>i</sub> 的方程

$$m_i = A \sigma_{ci}^{B+1} \tag{9}$$

其中:参数 A 和 B 是拟合参数,且对于不同种类的岩石, A 和 B 的取值不同.比如:石灰岩 A=22, B=-1.15;砂 岩 A=50, B =-1.26;花岗岩 A=100, B =-1.20<sup>[56]</sup>等.若使用方程(9)来估算参数 m<sub>i</sub>,则需对每类岩石进行拟

Vol.33

合,从而确定每类岩石的参数 A 和 B,这导致了方程(9)不具有普遍性.因此,采用上述"R 指数"法和内摩擦 角计算两种方法分别对  $m_i$  值进行估算,并与已有数据库中的  $m_i$ (至少 5 组  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  计算得到)进行对比,如 图 2 所示.图中1:1的实线表示三轴实验数据计算得到的  $m_i$  与"R 指数"法的结果完全相等,而图中的上下虚 线表示对  $m_i$  值的高估或者低估,Karakul 等<sup>[46]</sup>采用  $m_i$ =±10 来表示  $m_i$  值估算的高低界限.理论上,该值越 小,估算的  $m_i$  值越多地在这个范围内,则表明估算得越准确,因此将采用较小的  $m_i$ =±3 来表示对  $m_i$  值的高 估或者低估.图 2 中圆形计算点表示既有抗拉强度  $\sigma_i$  和单轴抗压强度  $\sigma_e$ ,也有内摩擦角  $\varphi$  的情况,总共有 93 组;而图 2(b)中三角点为数据库中无抗拉强度  $\sigma_i$  的情况,只能根据内摩擦角  $\varphi$  计算获得  $m_i$ ,总共有 44 组.从图 2 可以看出,采用内摩擦角  $\varphi$ 来估算的  $m_i$  值与三轴实验数据计算的值更为接近,其中计算点有 65% 的数据落在  $m_i$ =±3 之间,补充点有 64%落在  $m_i$ =±3 之间;而"R 指数"法计算的结果仅有 41%的数据点在  $m_i$ =±3 之间.因此,采用内摩擦角的方法对缺失的  $m_i$  值进行计算.



Fig.2 Comparison of  $m_i$  values calculated from 3-axial tests with R-index method and internal friction Angle method, respectively

通过内摩擦角  $\varphi$  方法计算的  $m_i$ ,并结合统计的数据,可以得到单轴抗压强度  $\sigma_e$  和  $m_i$  的皮尔逊相关系数,相关性散点图如图 3(a)所示.地质强度指标 *GSI* 与单轴抗压强度  $\sigma_e$  的相关关系可通过 Ching 等<sup>[45]</sup>建立的 ROCKMass/9/5879 数据库中的 724 组 *CSI*(或者 *RMR*<sub>89</sub>) – $\sigma_e$  的数据得到,对于缺失的 *CSI* 值采用公式 *CSI* = *RMR*<sub>89</sub> –5<sup>[44]</sup>进行补充,相关性散点图和皮尔逊系数如图 3(b)所示.如图 3 所示, $\sigma_e$ - $m_i$  和 *CSI*– $\sigma_e$  的相关系数分别为 $\rho_{\sigma_e,m_i}$ =0.285,  $\rho_{\sigma_e,GSI}$ =0.446,其显著性检验均存在  $P \leq 0.05$ ,相关性显著.值得注意的是,针对某一具



Fig.3 Correlation of rock mass parameters

体工程,当施工现场有足够多的岩体参数数据时,应根据现场的数据重新来计算  $\sigma_e - m_i$  和 *GSI*- $\sigma_e$  的相关系数;若现场较难提供或提供较少的岩体参数,则可以根据统计结果来进行粗略地计算.

表 1 围岩等级与 GSI 的关系						
Table 1 Relationship between rock mass rating and GSI						
围岩等级	Ι	Π	Ш	IV	V	
RMR	81~100	61~80	41~60	21~40	21 <	
GSI	76~95	56~75	36~55	16~35	16 <	

表 2	围岩等级与 m	ı, 的关系

Table 2	Relationship	between	rock mass	rating and	1 <i>m</i> <sub>i</sub>
围岩等级	Ι	II	Ш	IV	V
内摩擦角 φ/(°	) >60	50~60	39~50	27~39	27 <
$m_i$	>30	21~30	13~20	8~12	8 <

### 2.2 参数范围与抽样方法

根据以往工程经验,对于V级围岩,更有可能发生坍塌等事故,因此,计算参数将根据 V级围岩的参数进行选取.基于 Bieniawski 等<sup>[57]</sup>提出的地质力学 RMR 分级方法,结合  $GSI = RMR_{89} - 5^{[44]}$ ,可以得到 GSI 与围岩等级 对应的关系(表 1).

《工程岩体分级标准》<sup>[58]</sup>中指出,围岩 等级与岩体的内摩擦角之间存在对应关系, 结合公式(8),并考虑±3的差异,可将围岩等 级与*m*;建立起对应关系,如表2所示.此外,

根据《工程岩体分级标准》中对岩石坚硬程度的划分,粗略地将V级围岩的单轴抗压强度  $\sigma_c$  取值为 0~5MPa.

拉丁超立方抽样<sup>[59]</sup>作为一种简单且广泛的抽样技术,其不但结合了随机抽样和分层抽样的优点,而且 与单独使用随机抽样或分层抽样相比,较少的样本点就可以覆盖整个样本空间,并提供了更加有效和系统化 的样本抽样,因此采用拉丁超立方均匀抽样的方法,结合相关系数  $\rho_{\sigma_c,m_i}$ 和  $\rho_{\sigma_c,GSI}$ ,在参数范围内进行样本点 的生成,再结合隧道的几何参数(埋深和隧道直径)进行数据库的构建.

## 3 MARS 模型与效果评价

Friedman 等<sup>[36]</sup>将 MARS 算法作为一种统计学方法引入,用于拟合输入与输出之间的关系.与其他拟合 或回归方法相比,MARS 算法不但可以处理连续和分类输入变量,捕捉数据中的非线性关系、交互作用和非 单调关系;而且不需要预先输入与输出变量之间的潜在函数关系,就能给出函数的显式表达式,该表达式具 有很好的解释性,这是大多数机器学习方法所不具备的.

MARS 模型是通过样条基函数来构建函数表达式,样条基函数分为分段线性函数和分段三次函数,为了简单,仅采用分段线性函数.输入和输出变量之间的关系可表示为

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{m=1}^{M} \beta_m \lambda_m(x) = \beta_0 + \sum_{m=1}^{M} \beta_m \prod_{k=1}^{K_m} \left[ s_{km}(x_v(k,m) - t_{km}) \right]$$
(10)

其中: $\beta_0$ 为常数; $\beta_m$ 为第 m 个样条基函数的系数,可通过最小二乘法获得; $\lambda_m(x)$ 是第 m 个样条基函数;KM 是节点的数量(节点可以连接基函数); $s_{km}$ 取值为1或-1,从而保证基函数的非负性; $t_{km}$ 为第 km 个节点的取值.

MARS 在计算过程中包括向前阶段和向后阶段,向前阶段添加一系列的基函数对,直到达到预期的函数 数量,但是这有可能导致过度拟合及增加函数的复杂性.因此将进行向后阶段,采用 Generalized Cross-Validation(GCV)技术不断地去除不太重要的基函数来获得最佳的模型.

$$GCV = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\left(1 - \frac{C(M)}{N^2}\right)}$$
(11)

其中:N为数据库中数据的数量; $y_i$ 为目标值; $\hat{y}_i$ 为预测值;C(M)为模型的惩罚函数,表达式如下

$$C(M) = trace(\boldsymbol{B}(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}) + 1 + dM$$
(12)

式中:*M* 是基函数的数量; *B* 是 *M*×*N* 的矩阵; trace( $B(B^TB)^{-1}B^T$ )+1 是有效系数的数量; *d* 为模型的惩罚 系数.

数据库的构建,首先,需要确认各参数的取值范 围,如表3所示.考虑相关系数 $\rho_{\sigma_c,m_i}$ 和 $\rho_{\sigma_c,GSI}$ ,采用拉 丁超立方采样的方法在参数 GSI, $m_i$ 和 $\sigma_c$ 的范围区 间上生成5组相关计算点;随后,隧道埋深以20m 间隔在取值范围内变化,结合隧道直径的取值,总共 可以生成390组计算点(表4),并构建数据库,数据 库中的安全系数 $F_s$ 由解析解公式(6)进行求解.

表 3 输入参数					
		Table 3 Input varia	bles		
	参数	物理含义	值或范围		
1	<i>H</i> ∕m	隧道埋深	10~510		
2	$D_d/\mathrm{m}$	隧道直径	10.0, 12.5, 15.0		
3	GSI	地质强度指标	1~16		
4	$m_i$	Hoek-Brown 常数	1~8		
5	$\sigma_c/\mathrm{MPa}$	单轴抗压强度	1~5		

Table 4         Artificial database generated by analytic solutions							
计算点	组	埋深 H/m	$D_d$ /m	GSI	$m_i$	$\sigma_c$ /MPa	F <sub>S</sub>
	1	10	10.0	6.48	1.16	1.30	0.08
	÷	:	÷	÷	÷	÷	÷
计管占组 1	26	510	10.0	6.48	1.16	1.30	0.81
订异 <b>只</b> 钮 I	27	10	12.5	6.48	1.16	1.30	0.07
	:	:	:	:	:	÷	:
	78	510	15.0	6.48	1.16	1.30	0.55
-	79	10	10.0	15.56	6.28	4.99	0.82
	÷	:	÷	÷	÷	÷	:
山笛上加っ	104	510	10.0	15.56	6.28	4.99	6.18
月昇黒组 2	105	10	12.5	15.56	6.28	4.99	0.66
	÷	:	:	:	:	÷	:
	156	510	15.0	15.56	6.28	4.99	4.08
	157	10	10.0	7.20	5.10	2.66	0.29
	:	:	:	:	:	÷	:
计体上机力	182	510	10.0	7.20	5.10	2.66	2.78
订异点组 3	183	10	12.5	7.20	5.10	2.66	0.23
	÷	:	:	:	:	÷	:
	234	510	15.0	7.20	5.10	2.66	1.85
	235	10	10.0	1.91	3.17	3.65	0.15
	÷	:	:	:	:	÷	:
	260	510	10.0	1.91	3.17	3.65	1.63
订异只组4	261	10	12.5	1.91	3.17	3.65	0.12
	:	:	:	:	÷	÷	÷
	312	510	15.0	1.91	3.17	3.65	1.08
	313	10	10.0	12.80	7.63	1.80	0.46
	÷	:	:	:	:	÷	÷
山谷上伊を	338	510	10.0	12.80	7.63	1.80	3.89
11 异 品 组 3	339	10	12.5	12.80	7.63	1.80	0.37
	÷	:	:	:	:	:	÷
	390	510	15.0	12.80	7.63	1.80	2.56

表4 由解析解生成的人工数据库

将数据库中的 390 个数据点,随机选择 70%的数据点作为训练集,剩余的 30%作为测试集.采用二阶相 互作用的 MARS 模型来构建安全系数 F<sub>s</sub> 的显式表达式,其中包括了 24 个样条基函数,表达式如下

 $F_{s} = 1.1939 + 0.228 \times BF1 - 0.147 \times BF2 + 0.0005 \times BF3 - 0.0007 \times BF4 - 0.193 \times BF5 - 0.0007 \times BF4 - 0.193 \times BF5 - 0.0007 \times BF4 - 0.0007 \times BF4 - 0.0007 \times BF4 - 0.0007 \times BF5 - 0.0007 \times BF4 - 0.0007 \times BF4 - 0.0007 \times BF5 - 0.0007 \times BF4 - 0.0007 \times BF5 - 0.0007$ 

 $0.387 \times BF6 - 0.011 \times BF7 + 0.003 \times BF8 - 0.01 \times BF9 + 0.0009 \times BF10 - 0.0007 \times BF11 - 0.000$ 

0.0005 × BF12 + 0.003 × BF13 + 0.002 × BF14 + 0.034 × BF15 - 0.062 × BF16 - 0.343 ×

 $BF17 + 0.332 \times BF18 - 0.022 \times BF19 + 0.0003 \times BF20 - 0.0007 \times BF21 - 0.001 \times BF22 + 0.0003 \times BF20 - 0.0007 \times BF21 - 0.001 \times BF22 + 0.0003 \times BF20 - 0.0007 \times BF21 - 0.001 \times BF22 + 0.0003 \times BF20 - 0.0007 \times BF21 - 0.001 \times BF22 + 0.0003 \times BF20 - 0.0007 \times BF21 - 0.001 \times BF22 + 0.0003 \times BF20 - 0.0007 \times BF2$ 

 $0.001 \times BF23 + 0.012 \times BF24$ 

样条基函数的相应表达式如表 5 所示.从表 5 可以看出,基函数之间发生了交互作用,24 个基函数中有 16 个是交互项,因此,所构建的 F<sub>s</sub>显式表达式不仅仅是简单的相加,其可以考虑各参数之间的相互影响及 非线性等复杂关系.值得注意的是:选用的是线性的样条基函数,这是因为数据的非线性程度不高.对于非线

(13)

表5 MARS 模型中样条基函数的表达式

### 性程度较高的情况,应用非线性(三次函数)的样条基函数来构建表达式.

Table 5 The expression of spline basis functions in MARS model					
基函数表达式	基函数表达式	基函数表达式			
BF1 = max(0, GSI - 6.483)	$BF9 = \max(0, 90 - H)$	BF17 = $\max(0, D_d - 12.5)$			
$BF2 = \max(0, 6.483 - GSI)$	$BF10 = BF8 \times max(0, D_d - 12.5)$	$BF18 = max(0, 12.5D_d)$			
$BF3 = BF1 \times max(0, H-250)$	BF11 = BF8×max( $0, m_i$ -5.0975)	$BF19 = BF18 \times max(0, 12.802 - GSI)$			
$BF4 = BF1 \times max(0, 250 - H)$	$BF12 = BF8 \times max(0, 5.0975 - m_i)$	$BF20 = BF18 \times max(0, H-230)$			
BF5 = max(0, $\sigma_c$ - 3.6473)	$BF13 = BF9 \times max(0, m_i - 6.2843)$	$BF21 = BF18 \times max(0,230-H)$			
BF6=max(0,3.6473- $\sigma_c$ )	$BF14 = BF9 \times max(0, 6.2843 - m_i)$	$BF22 = BF17 \times max(0, H-330)$			
BF7=BF1×max(0, $D_d$ -12.5)	$BF15 = BF6 \times max(0, D_d - 12.5)$	$BF23 = BF17 \times max(0, 330 - H)$			
BF8 = max $(0, H-90)$	$BF16 = BF6 \times max(0, 12.5 - D_d)$	$BF24 = BF17 \times max(0, 7.2022 - GSI)$			

图 4 显示了采用公式(13)对训练集和测试集中数据点进行预测的结果与性能,包括确定系数 R<sup>2</sup>、均方 根误差 RMSE、平均误差 MAE;其中, R<sup>2</sup> 越接近于 1, RMSE 和 MAE 越小,说明模型的预测性能越好.从图中可 以看到,无论是训练集还是测试集,大多数预测的数据点均落在目标值的±10%范围内,只有较少的点落在误 差线外,这有可能是在构建模型时的舍入误差造成的.因此,通过 MARS 算法所构建的 F<sub>s</sub> 显式表达式具有良 好的预测性能.





Fig.4 Comparison between analytical solution and  $F_s$  predicted by MARS



Fig.5 Relative importance index of each variable

图 5 显示了各变量的相对重要性指数的影响,其表示 每个变量对结果的敏感性程度.对于 MARS 模型,根据去除 相应变量后计算各模型的 GCV 来评估相对重要性.结果表 明,隧道的几何参数(直径、埋深)相比于岩体自身参数 ( $\sigma_e, m_i$ 和 GSI)更能影响工作面的稳定性.其中,隧道埋深 对安全系数  $F_s$  有着重要的影响,其次是隧道的直径,对于 岩体本身的参数,地质强度指标 GSI 的影响最大.

为了进一步验证所开发的 MARS 模型在计算安全系数 F<sub>s</sub>方面的准确性,采用解析解的方法,考虑参数间的相关 关系,生成了上述构建的数据库之外的 73 组数据点,并与 建立的 F<sub>s</sub>计算式的结果进行对比.如图 6 所示,大多预测 值都在 MARS 模型预测结果的±10%误差内,R<sup>2</sup>=0.9703 说 明该模型取得了良好的预测效果. 此外,为验证构建公式的可实用性,采用重庆某隧道的数据来进行分析.该隧道全长为4031m,沿线地形 起伏大,地形地貌复杂,岩层倾角大于45°,岩土种类多,存在人工填土、红黏土、石膏岩和煤层等特殊性岩

土,岩层以碳酸盐岩为主,泥质岩和砂岩为次,工程建设可 能诱发洞顶、侧壁围岩局部滑塌掉块等灾害.选取里程 K76 +339 断面进行验证分析,由详勘报告可知,该处岩体单轴 抗压强度  $\sigma_e$  = 4.9MPa, Hoek-Brown 常数  $m_i$  = 6.2,地质强度 指标 *GSI* = 15.5,围岩等级属于 V级,隧道直径为 13m,埋深 为 19.67m(计算时取为 20m).将分别采用构建的预测公式 和已有的解析解模型<sup>[28]</sup>进行对比计算:预测公式计算的工 作面安全系数为 0.8380,已有解析解模型计算得到的工作 面安全系数为 0.8594,二者的误差为 2.5%,在可接受范围 内.由计算结果可知,在全断面施工情况下,该处的工作面 安全系数较低,因此现场采用了 3 台阶法进行施工,从而保 证了工作面的稳定,避免了坍塌等灾害.由此可见,构建的 预测公式对现场的施工具有一定的指导作用.



在计算效率方面,采用构建的安全系数F。预测公式对

73 组数据点计算(图 6),仅需 0.04s 即可给出全部结果,然而采用 Man 等<sup>[28]</sup>建立的优化程序进行计算,仅一种工况就需要 40~50s.因此,基于 MARS 算法开发的安全系数 *F*<sub>s</sub> 预测公式在隧道工作面安全系数预测方面 具有一定的准确性和可靠性,并且具有极高的计算效率.在现场施工中,可以以此作为隧道工作面安全状态 的判断工具.

## 4 结论

采用 MARS 算法来构建岩石隧道工作面安全系数的预测公式,根据文献中已有解析解生成的数据和施工现场数据进行验证,得到以下结论:

(1) MARS 可捕捉输入与输出变量之间复杂的非线性关系及变量间的交互作用,且易直接给出相应的显式计算公式,避免了需提前对输入与输出之间的潜在函数关系进行假设和多次试错分析的繁琐;

(2)建立的隧道工作面安全系数预测公式具有良好的准确性和可靠性.该公式计算简单、效率高,便于在 便携式设备(智能手机或应用程序)上实现,更加易于在施工现场的应用,对隧道的智能化施工可提供一定 的借鉴作用,对于轻量级隧道智能施工-评估设备的发展提供了有益的参考;

(3)计算结果表明,在计算框架下,隧道几何尺寸(隧道直径、埋深)对隧道工作面稳定性的影响要大于 岩体参数的影响.其中,隧道埋深是至关重要的;在岩体参数中,地质强度指标 GSI 对稳定性的影响最大.若考 虑岩体参数变异性等方面的影响,该结论需重新验证;

(4)通过搜集文献中 818 组各类岩石数据,得到了 $\sigma_e 与 m_i \ CSI 与 \sigma_e$ 的相关系数分别为 $\rho_{\sigma_e,m_i} = 0.285$ 和  $\rho_{\sigma_e,GSI} = 0.446. 在现场数据缺失的情况下,只需测得岩石的单轴抗压强度 \sigma_e,即可通过预测公式计算隧道工作$ 面的安全系数,大大增加了预测公式的可实用性;

(5) 虽然采用 MARS 算法对隧道工作面稳定性的快速判断做了一定的尝试,但是 MARS 算法在处理高 维数据时可能会受到维度灾难的影响;当模型复杂度较高时,其计算复杂度也会增加.因此,当输入变量过多 时,需要将 MARS 算法与其他方法相结合,从而更高效、合理地构建预测公式.

#### 参 考 文 献

 <sup>[1]</sup> 李术才,石少帅,李利平,等.山岭隧道塌方风险评价的属性识别模型与应用[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(1):147-158
 Li Shucai, Shi Shaoshuai, Li Liping, et al. Attribute recognition model and its application of mountain tunnel collapse risk assessment[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(1):147-158

 <sup>[2]</sup> 王述红,董福瑞,朱宝强,等.山岭隧道围岩参数智能反演及稳定性分析[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(5):1171-1185
 Wang Shuhong, Dong Furui, Zhu Baoqiang, et al. Parameters intelligent inversion and stability analysis of surrounding rock of mountain tunnel[J].
 Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(5):1171-1185

[3] 黄震,李仕杰,赵奎,等.隧道完整型岩盘渗透破坏失稳机制流固耦合模型试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2019,27(6): 1345-1356

Huang Zhen, Li Shijie, Zhao Kui, et al. Liquid-solid coupling model test to investigate seepage failure mechanism of intact confining rocks of tunnels[J].Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(6):1345-1356

[4] 杨子汉,杨小礼,张佳华,等.不同饱和度下破碎软岩隧道掌子面破坏范围上限分析[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(6): 2267-2273

Yang Zihan, Yang Xiaoli, Zhang Jiahua, et al. Upper bound analysis of collapsing area of tunnel face in broken soft rocks under different saturations [J].Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(6):2267-2273

- [5] 黄戡,安永林,岳健,等.渗透力对新奥法隧道掌子面稳定性的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(5):1221-1228 Huang Kan, An Yonglin, Yue Jian, et al. Influence of seepage force on tunnel face stability by new Austria tunneling method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2019,50(5):1221-1228
- [6] 杨小礼,王作伟.非线性破坏准则下浅埋隧道围岩压力的极限分析[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(1):299-302
   Yang Xiaoli, Wang Zuowei. Limit analysis of earth pressure on shallow tunnel using nonlinear failure criterion [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2010,41(1):299-302
- [7] 李得建,赵炼恒,杨峰,等.非线性破坏准则下浅埋隧道掌子面三维被动稳定性能耗分析改进方法[J].岩石力学与工程学报,2016,35 (4):743-752

Li Dejian, Zhao Lianheng, Yang Feng, et al. Three-dimensional stability analysis of passive failure on shallow tunnel face based on the nonlinear failure criterion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4):743-752

- [8] 张箭,杨峰,刘志,等.浅覆盾构隧道开挖面挤出刚性锥体破坏模式极限分析[J].岩土工程学报,2014,36(7):1344-1349 Zhang Jian,Yang Feng,Liu Zhi,et al.Three-dimensional limit analysis of blow-out failure modes of shallow shield tunnels[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(7):1344-1349
- [9] Zhang Z L, Yang X L. Unified solution of safety factors for three-dimensional compound slopes considering local and global instability [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 155;105227
- [10] Huang M,Zhan J W.Face stability assessment for underwater tunneling across a fault zone [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019,33(3):04019034
- [11] Zhang Xiao, Wang Mingnian, Li Jiawang, et al. Safety factor analysis of a tunnel face with an unsupported span in cohesive-frictional soils [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 117:103221
- [12] Ukritchon Boonchai, Yingchaloenkitkhajorn Kongkit, Keawsawasvong Suraparb. Three-dimensional undrained tunnel face stability in clay with a linearly increasing shear strength with depth[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 88:146-151
- [13] Long Ying Ying, Tan Yong. Soil arching due to leaking of tunnel buried in water-rich sand [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020,95:103158
- [14] Zhang Z L, Li W, Hou C T, et al.Required strength of geosynthetic-reinforced soil structures subjected to varying water levels using numeric-based kinematic analysis [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2023, 51(1):1-15
- [15] Weng Xiaolin, Sun Yufeng, Yan Binhua, et al. Centrifuge testing and numerical modeling of tunnel face stability considering longitudinal slope angle and steady state seepage in soft clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 101(2):103406
- [16] Chen Renpeng, Yin Xinsheng, Tang Lvjun, et al. Centrifugal model tests on face failure of earth pressure balance shield induced by steady state seepage in saturated sandy silt ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 81;315-325
- [17] 吕玺琳,李冯缔,黄茂松,等.渗流条件下三维盾构隧道开挖面极限支护压力[J].岩土工程学报,2013,35(S1):108-112 Lü Xilin,Li Fengdi,Huang Maosong, et al.3D limit support pressure solution for shield tunnel face subjected to seepage[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(S1):108-112
- [18] Zhang Zhihua, Xu Wensheng, Nie Wenting, et al. DEM and theoretical analyses of the face stability of shallow shield cross-river tunnels in silty fine sand[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 130:103905
- [19] 张红军,张太平,王奎峰,等.上覆富水砂层地铁隧道掌子面变形特征数值试验研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(6):1454-1462 Zhang Hongjun, Zhang Taiping, Wang Kuifeng, et al. Numerical experimental study on deformation characteristics of metro tunnel excavation surface with overlying water-rich sand layer[J].Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2023,43(6):1454-1462
- [20] Di Qiguang, Li Pengfei, Zhang Mingju, et al. Influence of relative density on deformation and failure characteristics induced by tunnel face instability in sandy cobble strata[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 141:106641
- [21] 王立新,胡瑞青,任 超,等.砂卵石地层盾构隧道掌子面稳定性理论分析[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(9):1362-1371 Wang Lixin, Hu Ruiqing, Ren Chao, et al.Study on face stability of shield tunnel in sandy cobble stratum[J].Journal of Tongji University(Natural Science),2023,51(9):1362-1371
- [22] 鹿存金,傅鹤林,李 鲒,等.基于拟动力法的地震作用下隧道掌子面动态稳定性上限分析[J].现代隧道技术,2022,59(S1):251-257
   Lu Cunjin,Fu Helin,Li Jie, et al. Upper bound analysis of dynamic stability of tunnel face under earthquake based on pesudo dynamic method[J].
   Moden Tunnelling Technology,2022,59(S1):251-257
- [23] 汪 泓,傅鹤林,王成洋,等.基于拟静力法的地震作用下隧道掌子面动态稳定性上限分析[J].矿业研究与开发,2023,43(2):95-101
   Wang Hong, Fu Helin, Wang Chengyang, et al. Upper limit analysis on dynamic stability of tunnel face under earthquake based on quasi-static method[J].Mining Research and Development,2023,43(2):95-101
- [24] 曹成勇,施成华,雷明锋,等.浅埋透水地层泥水盾构开挖面极限支护压力研究[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(9):3133-3139 Cao Chengyong, Shi Chenghua, Lei Mingfeng, et al. Limit support pressure for excavation face of shallow slurry shield-driven tunnel in water permeable strata[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2016,47(9):3133-3139
- [25] Li T Z, Yang X L.New approach for face stability assessment of tunnels driven in nonuniform soils [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 121:103412
- [26] Hou Chuantan, Zhong Junhao, Yang Xiaoli. Three-dimensional stability assessments of a non-circular tunnel face reinforced by bolts under seepage flow conditions [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 131:104831

- [27] Man Jianhong, Huang Hongwei, Ai Zhiyong, et al. Stability of complex rock tunnel face under seepage flow conditions using a novel equivalent analytical model[J]. International Journal of Rock Me chanics and Mining Sciences, 2023, 170:105427
- [28] Man Jianhong, Zhou Mingliang, Zhang Dongming, et al. Face stability analysis of circular tunnels in layered rock masses using the upper bound theorem [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(6):1836-1871
- [29] Man Jianhong, Huang Hongwei, Ai Zhiyong, et al. Analytical model for tunnel face stability in longitudinally inclined layered rock masses with weak interlayer [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 143:104608
- [30] Keawsawasvong Suraparb, Ukritchon Boonchai. Design equation for stability of shallow unlined circular tunnels in Hoek-Brown rock masses [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(8):4167-4190
- [31] Wilson Daniel W, Abbo Andrew J, Sloan Scott W, et al. Undrained stability of a square tunnel where the shear strength increases linearly with depth [J]. Computers and Geotechnics, 2013, 49:314-325
- [32] Yamamoto Kentaro, Lyamin Andrei V, Wilson Daniel W, et al. Stability of a circular tunnel in cohesive-frictional soil subjected to surcharge loading [J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(4); 504-514
- [33] Kung Gordon T, Juang C Hsein, Hsiao Evan C, et al. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(6):731-747
- [34] Zhang Zilong, Pan Qiujing, Yang Zihan, et al. Physics-informed deep learning method for predicting tunnelling-induced ground deformations [J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(9):4957-4972
- [35] Pan Qiujing, Leung Yafai, Hsu Shuchien. Stochastic seismic slope stability assessment using polynomial chaos expansions combined with relevance vector machine [J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12(1):405-414
- [36] Friedman J H.Multivariate adaptive regression splines [J]. The Annals of Statistics, 1991, 19(1): 1-67
- [37] Zhang Wengang, Zhang Runhong, Wang Wei, et al. A Multivariate adaptive regression splines model for determining horizontal wall deflection envelope for braced excavations in clays[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 84:461-471
- [38] Zhang Wengang, Zhang Runhong, Goh Anthony T C. Multivariate adaptive regression splines approach to estimate lateral wall deflection profiles caused by braced excavations in clays[J].Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(2):1349-1363
- [39] Lai Fengwen, Chen Fuquan, Liu Songyu, et al. Undrained stability of pit-in-pit braced excavations under hydraulic uplift[J]. Underground Space, 2022,7(6):1139-1155
- [40] Zheng Gang, He Xiaopei, Zhou Haizuo, et al. Prediction of the tunnel displacement induced by laterally adjacent excavations using multivariate adaptive regression splines [J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(8):2227-2237
- [41] Hoek Evert, Brown Edwin T.Empirical strength criterion for rock masses [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, 106(9): 1013-1035
- [42] Hoek E, Brown E T.The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition[J].Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(3):445-463
- [43] Hoek E, Carranza Torres C, Corkum B.Hoek-Brown failure criterion-2002 Edition [C]. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference, 2002
- [44] Hoek E, Brown E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. Int J Rock Mech Min, 1997, 34(8): 1165-1186
- [45] Ching Jianye, Phoon Kok-Kwang, Ho Yuan-Hsun, et al. Quasi-site-specific prediction for deformation modulus of rock mass [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2021, 58(7): 936-951
- [46] Karakul Hasan, Ulusay Resat. A new internal friction angle-based approach for estimating Hoek-Brown constant mi and its comparison with those estimated from some current methods[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(8):1-25
- [47] Yaar Serdar. An experimental study to determine the hoek-brown constant (mi) for tuffs[J]. Yerbilimleri/Earth Sciences, 2021, 42(1):52-69
- [48] Betournay M C, Gorski B, Labrie D, et al. New considerations in the determination of hoek and brown material constants [C]. Proceedings of the 7th ISRM Congress, 1991
- [49] Hobbs D W.The strength and the stress-strain characteristics of coal in triaxial compression[J].The Journal of Geology, 1964, 72(2): 214-231
- [50] Schwartz Arnold E.Failure of rock in the triaxial shear test[C].Proceedings of the us Symposium on Rock Mechanics, 1964
- [51] He Mingming, Zhang Zhiqiang, Zheng Jun, et al. A new perspective on the constant mi of the hoek-brown failure criterion and a new model for determining the residual strength of rock [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2020, 53:3953-3967
- [52] Wang Haoteng, He Mingming, Zhang Zhiqiang, et al. Determination of the constant mi in the Hoek-Brown criterion of rock based on drilling parameters [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(4):747-759
- [53] Cai M.Practical estimates of tensile strength and Hoek-Brown strength parameter mi of brittle rocks[J].Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010,43(2):167-184
- [54] Mehrishal S, Sharifzadeh Mostafa, Shahryar K. Estimating of hoek-brown mi using internal friction angle [C]. Proceedings of the 24th International Mining Congress of Turkey, IMCET, 2015
- [55] VáSáRhelyi BaláZs, KováCs LáSzló, TöRöK ÁKos. Analysing the modified Hoek-Brown failure criteria using Hungarian granitic rocks [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2016, 2(2):131-136
- [56] Shen Jiayi, Karakus Murat.Simplified method for estimating the Hoek-Brown constant for intact rocks[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140(6):04014025
- [57] Bieniawski Z.The rock mass rating (RMR) system (geomechanics classification) in engineering practice [M].Rock Classification Systems for Engineering Purposes.ASTM International.1988
- [58] 工程岩体分级标准:GB50218-94[S].北京:中国计划出版社,1995
- Standard of engineering classification of rock masses:GB50218-94[S].Beijing:China Planning Press,1995
- [59] Helton J C, Davis F J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 81(1):23-69

## Study on the Construction of Tunnel Face Safety Factor Prediction Formula Based on MARS

MAN Jianhong<sup>1</sup>, HUANG Hongwei<sup>1</sup>, WANG Feiyang<sup>2</sup>, CHEN Jiavao<sup>3</sup>

(1.Department of Underground Architecture and Engineering, Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China; 2.Department of Civil Engineering, College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 3. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

#### Abstract

To address the challenge of assessing the stability of rock tunnel face, a fast and efficient assessment model was proposed. A comprehensive dataset comprising 818 set of data encompassing crucial parameters like  $GSI, \sigma_e$  and  $m_i$ were meticulously collected from the literature. The correlation coefficients between  $\sigma_c$  and  $m_i$  as well as GSI and  $\sigma_c$ . were subsequently determined. The Latin hypercube sampling and analytical solutions were combined to construct a robust stability database specifically tailored for Grade V rock tunnel faces. Utilizing the Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) algorithm, a predictive formula for the safety factor of rock tunnel face was developed, and rigorously validated using on-site construction data. Comparative analysis indicates that the geometric parameters of the tunnel exert a pronounced impact on the stability than rock properties. The model exhibits good interpretability of the intricate relationships of the tunnel face safety factor to various factors, enabling rapid, accurate, and reliable computation. Consequently, the assessment model stands as a convenient on-site tool, offering expeditious evaluations of the rock tunnel face stability.

Keywords: tunnel face stability; correlation coefficient; analytical solution; MARS algorithm; latin hypercube sampling; expeditious evaluation

附录 A

$$W_{BFC} = \left(\int_{\theta_2}^{\theta_4} vG\sin\theta d\theta\right)_{[OBC-\Delta OBF-\Delta OFC]} = \omega\gamma_2(r_b^3f_5 - r_b^3f_6 - r_c^3f_7)$$
(A1)  
$$W_{4FCD} = W_{4FCI} + W_{4CD}$$
(A2)

$$f_{AFCD} = W_{AFCI} + W_{ICD} \tag{A2}$$

$$W_{AFCI} = \left(\int_{\theta_1}^{\theta_1} vG\sin\theta d\theta\right)_{[\Delta OBF]} + \left(\int_{\theta_1}^{\theta_3} vG\sin\theta d\theta\right)_{[\Delta OFC]} - \left(\int_{\theta_1}^{\theta_2} vG\sin\theta d\theta\right)_{[\Delta OAB]} - \left(\int_{\theta_2}^{\theta_3} vG\sin\theta d\theta\right)_{[\Delta OAI]} = \omega\gamma_1(r_o^3f_{10} - r_o^3f_{11} - r_b^3f_{12})$$
(A3)

$$W_{ICD} = \left(\int_{\theta_3}^{\theta_4} vG\sin\theta d\theta\right)_{[ODC-\Delta OID]} = \omega\gamma_1(r_{\omega}^3f_8 - r_{d}^3f_9)$$
(A4)

$$W_{AGD} = P_{AGD} = \left( \int_{\theta_2}^{\theta_4} vG\sin\theta d\theta \right)_{[\Delta OAD - OAG]} = \omega \gamma_0 r_a^3 (f_3 - f_4)$$
(A5)

$$W_{ECD} = \left( \int_{\theta_4}^{\theta_5} vG\sin\theta d\theta \right)_{[OED - \Delta OEG]} = \omega \gamma_0 (r_d^3 f_1 - r_a^3 f_2)$$
(A6)

$$P_{AE} = \omega c_0 r_a^2 \frac{1}{2 \tan \varphi_0} \{ \exp\{2[(\theta_5 - \theta_2) \tan \varphi_0]\} - 1 \}$$
(A7)

$$P_{ED} = \omega c_0 r_d^2 \frac{1}{2 \tan \varphi_0} \{ -\exp\{2[(\theta_4 - \theta_5) \tan \varphi_0]\} + 1\}$$
(A8)

$$P_{DC} = \omega c_1 r_c^2 \frac{1}{2 \tan \varphi_1} \{ -\exp[2(\theta_3 - \theta_4) \tan \varphi_1] + 1 \}$$
(A9)

$$P_{CB} = \omega c_2 r_b^2 \frac{1}{2 \tan \varphi_2} \{ -\exp[2(\theta_1 - \theta_3) \tan \varphi_2] + 1 \}$$
(A10)

其中:f1~f1,表达式的推导和求解参考 Man 等<sup>[28]</sup>的研究.