

# 软岩隧道支护让压体系优化及安全状态易损性评价

周彪<sup>1,2</sup>, 李锐钰<sup>1,2</sup>, 谢雄耀<sup>1,2</sup>, 徐金峰<sup>1,2</sup>, 刘龙坤<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 软岩隧道围岩参数变异性大, 支护体系与围岩相互作用不确定性强, 易发生大变形等安全问题, 为此国内外开展了隧道让压支护优化等工作以应对上述风险, 但对其安全状态评价仍面临诸多难题。设计了一种新型柔-刚型让压接头, 并基于可靠度分析方法, 从易损性出发, 综合拱顶沉降及初衬强度破坏准则, 提出了基于概率的隧道开挖安全状态易损性评价方法。其通过利用概率有限元分析围岩-支护相互作用, 拟合形成极限状态功能函数响应面, 经由随机抽样获得隧道开挖失效概率与可靠度指标; 以此为基础, 建立拱顶沉降与结构应力响应之间的拟合关系, 提出了基于拱顶沉降的结构极限状态条件概率计算方法, 并根据概率分布区间划定易损区进行支护安全性评价。基于上述理论方法, 结合工程实际, 开展了新型让压支护与传统刚性支护的易损性对比分析, 验证了让压支护体系在大变形承载可靠性方面的优势。

**关键词:** 软岩; 支护; 让压; 概率; 易损评价

中图分类号: TU43

文献标志码: A

## Optimization of Yield-Control Support System and Vulnerability Evaluation of Soft Rock Tunnel

ZHOU Biao<sup>1,2</sup>, LI Ruiyu<sup>1,2</sup>, XIE Xiongyao<sup>1,2</sup>, XU Jinfeng<sup>1,2</sup>, LIU Longkun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** During the soft rock tunnel excavation, large deformation is easy to occur because the parameters of surrounding soft rock are highly variable, the stress of support system and its interaction with surrounding rock are highly uncertain. Therefore, the yield-control support system is studied both domestically and internationally to address these risks. However, there are still many difficulties in

evaluating its safety status. In this paper, a new type of flexible rigid yielding joint is designed, and a vulnerability evaluation method of tunnel excavation safety status based on probability is proposed, which combines of the reliability and vulnerability analysis method and vault settlement failure criteria. In detail, by analyzing the interaction between surrounding rock and support with probabilistic finite element method, the support response of limit state function is fitted, and the failure probability and reliability index of tunnel excavation are obtained by random sampling, based on which, the fitting relationship between vault settlement and structural stress response is established, the calculation method of exceedance probability of structural limit state conditions based on vault settlement is proposed, and the vulnerable area is delimited according to the probability distribution for support safety evaluation. The reliability of the new support system is verified based on the comparison between the traditional support system and the rigid support system.

**Keywords:** soft rock; support; yield-control support; probability; vulnerability evaluation

软岩在我国分布广泛, 从其自身特性上看, 根据国际岩石力学学会定义, 单轴抗压强度在 0.5~25.0 MPa 的岩石可视为软质岩。何满潮院士等<sup>[1]</sup>从工程岩体出发, 提出因受到力的作用会产生明显塑性变形的岩体可视为工程软岩体。赵勇<sup>[2]</sup>分析了软弱围岩的地质特征、变形特征和强度特征, 将软弱围岩分为三个等级。目前大量的试验研究表明, 软岩在遇水软化等条件下变形特征、强度特征、破坏及失稳机理等均表现出极大的不确定性<sup>[3-5]</sup>, 文明等<sup>[6]</sup>对隧道围岩力学参数、荷载参数、支护构件参数的变异系数和概率分布类型进行统计分析, 给出了合理化

收稿日期: 2022-08-24

基金项目: 国家重点研发计划资助(2019YFC0605103); 国家自然科学基金重点项目资助(52038008); 云南省交通运输厅科技项目(云交科教便[2021]7号)

第一作者: 周彪, 教授, 工学博士, 主要研究方向为地下空间防灾与安全评估。E-mail: zhoubiao@tongji.edu.cn

通信作者: 谢雄耀, 教授, 工学博士, 主要研究方向为地下空间教学与科研。E-mail: xiexiongyao@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

的建议。

围岩特性的不确定性又将导致“支护-围岩”相互作用呈现非线性、动态性及模糊性,在膨胀岩作用、高地应力及局部水压及气压力等综合作用下,开挖过程中围岩及支护变形与破坏表现出明显的时空效应特性,易发生大变形等工程行为<sup>[7]</sup>。需对围岩进行适时的外部动态干预,如采用让压支护等方式,以给围岩提供适当的支护力为前提,允许支护-围岩产生适当协同变形以释放部分围岩变形能,直至达到平衡。根据围岩变形发展规律及支护围护相互作用机制,孙钧院士等<sup>[8]</sup>提出一种大尺度让压锚杆;Barla等<sup>[9]</sup>根据制作材料的不同,提出了多孔材料及钢管构件为核心的将高压缩性让压元件;何满潮等<sup>[10]</sup>研发了具有负泊松比效应的高预紧力恒阻大变形锚索;雷升祥等<sup>[11]</sup>通过设置隧道环向让压装置,实现了支护结构先刚后柔再刚的特性。仇文革等<sup>[12]</sup>针对软岩隧道初期支护因受力过大而发生破坏的问题,研制了限制支护阻力阻尼器;李术才等<sup>[13]</sup>基于先让后抗再刚的支护理念,提出钢格栅混凝土钢管核心筒新型支护体系。汪波等<sup>[14]</sup>提出先及时刚性支护再让压支护的让压支护理念,设计了包含让压锚杆+可缩性钢拱架+带变形槽的让压支护体系。

让压支护体系为解决软岩大变形隧道提供了经济、安全的手段,但也为支护优化设计评价和可靠度分析带来了新的挑战。传统上,支护安全及围岩稳定性评价主要基于围岩及支护变形而展开的,并以此进行稳定性或可靠性评价。张顶立等<sup>[6,15-16]</sup>从分析隧道围岩变形演化特征出发,对围岩变形过程进行预测和安全性评估,形成“围岩变形控制为目标,支护刚度设计为核心和强度校核作保障”的理论体系与设计方法,并开展了可靠度评价方面的研究。朱永全、刘志春及李国良等<sup>[7,17]</sup>,李磊、谭忠盛等<sup>[18]</sup>综合考虑围岩的相对变形、强度应力比、原始地应力等参数,给出挤压性围岩隧道大变形分级标准及控制方法。

由此可见,让压支护体系是在围岩与支护的相互作用过程中,通过支护延性及围岩应力的释放,逐步达到平衡状态,针对不同的围岩性质,支护体系形式各异。红层软岩复杂的围岩特性导致隧道“支护-围岩”相互作用表现出极强不确定性,传统依据变形量计算的安全评估方法难以预测支护安全状态,并比较支护体系的优劣。因此,如何评价让压支护体系的安全性及合理性,已成为支护设计优化的瓶颈。为此,本文将基于可靠度理论,采用易损性分

析方法,提出基于拱顶沉降的让压支护体系极限状态条件概率计算方法,并根据概率的变化进行安全性评价和支护体系设计优化。

## 1 工程背景及让压支护设计

本文以云南某红层软岩隧道为研究背景,其上覆薄层粉质黏土,硬塑状态,稍湿,透水性较好,下覆强至中风化泥岩夹泥质砂岩,裂隙很发育,岩体呈碎裂状,局部呈镶嵌碎裂结构,均属于典型的红层软岩,遇水易软化产生大变形。因此根据让压支护先柔后刚的原理,设计了一种工字钢+新型让压接头的支护体系。

如图1所示,让压接头由套筒、套杆和弹簧三部分组成,套杆与套筒之间留有5 cm变形空间,中间采用弹簧构件实现构件5 cm变形区间内的轴向高压缩性,达到5 cm轴向变形之后套管与套筒之间会挤压在一起,恢复轴向高抗压刚度状态。让压接头通过高强螺栓与钢拱架相连,设计放置于“高轴力,低弯矩”的截面处(如拱肩),为围岩提供变形空间,并根据实际需求调整让压变形空间,从而使围岩应力得到进一步释放,起到降低支护压力的效果,优化结构受力与工程成本。

如图2所示,根据加载试验,构件在弹性变形范围内曲线呈明显的两阶段,一阶段刚度较小,由弹簧承担轴力荷载,故一阶段斜率即为弹簧刚度;当弹簧压缩至49.1 mm(接近设计值50 mm)时,套杆与套筒相互压紧,此时由套杆、套筒、弹簧三者共同承受轴向荷载,故二阶段刚度增大,发挥先柔后刚的作用。

## 2 基于条件概率的支护易损性评价法

针对让压支护体系安全状态难以评估等难题,本节基于围岩支护协同变形共同承载的理论,分析围岩支护体系极限状态并建立对应的功能函数;结合可靠度评价理论,通过蒙特卡罗抽样法,进行有限元随机抽样模拟,计算不同抽样点的结构响应,确定支护体系极限状态及对应的功能函数值,通过响应面法拟合功能函数响应面;继而针对响应面进行大量随机抽样,获得失效概率与可靠度指标,并通过拟合拱顶沉降与结构应力响应值,计算给定条件概率;最后,基于概率值对隧道支护结构进行可靠度分析和安全评定。

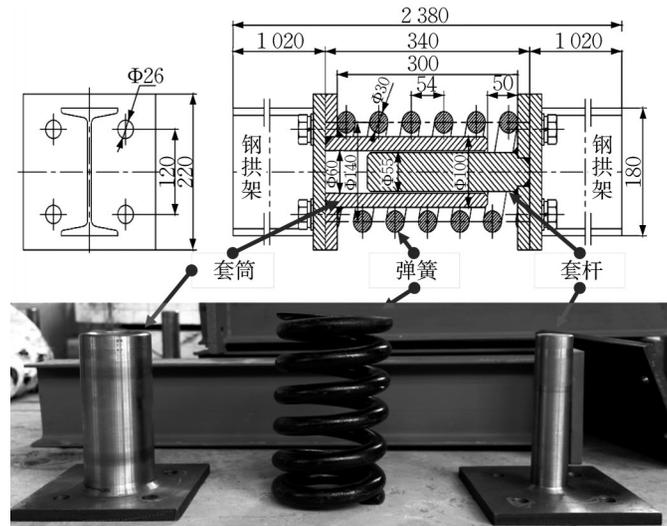


图1 新型让压接头(单位:mm)

Fig. 1 New yield-control support joint (unit: mm)

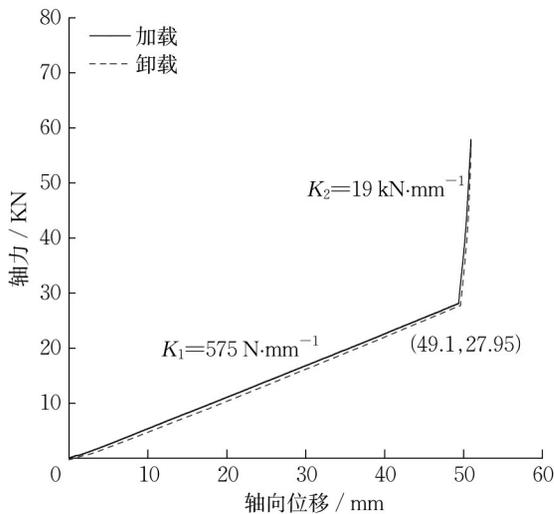


图2 让压接头轴压试验轴力位移曲线

Fig. 2 Axial force and displacement of yield-control support joint

### 2.1 条件概率计算方法

从概率的角度定量表达隧道围岩支护结构承载能力及安全性能,拟借鉴地震工程中易损性分析方法进行隧道开挖安全性分析。

在抗震分析中,为研究不同等级强度地震作用下结构损伤状态,可通过分析地震动强度指标与结构在某一损伤极限状态下失效概率之间的联系,获得地震易损性曲线,并作为确定结构潜在地震风险的重要工具<sup>[19]</sup>。该方法关键在于建立地震动强度参数和结构响应之间的关系,表达超越不同破坏状态的条件概率。其最常使用的估计方法是“云图法”<sup>[20]</sup>,其中Cornell等<sup>[21]</sup>最先假设地震作用下工程需求参数(engineering demand parameter,  $R_{EDP}$ )与地

震强度指标(intensity measure,  $I_M$ )之间服从对数线性关系,并建立普通最小二乘回归模型<sup>[22]</sup>:

$$\ln(R_{EDP}) = \alpha_1 \ln(I_M) + \alpha_2 + e, \quad e \sim n(0, \beta_D^2) \quad (1)$$

式中: $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 为回归系数;基于最小二乘回归的假设,残差 $e$ 符合均值为0,方差为 $\beta_D^2$ 的正态分布; $\beta_D$ 为构件需求的对数标准差。由此得到地震响应条件概率表达式:

$$P[D \geq d | I_M] = 1 - \Phi\left[\frac{\ln d - \ln(S_D)}{\beta_D}\right] \quad (2)$$

式中: $D$ 为构件需求,即地震响应; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数; $S_D$ 为EDP的均值。

类比地震易损性分析中的“云图法”,本文基于支护结构的强度准则(应力准则),提出了基于隧道拱顶沉降的初支极限状态条件概率计算方法。在隧道开挖过程中,随着超前支护施作、隧道开挖、初期支护施作、二次衬砌施作等施工步的开展,围岩由原始平衡状态逐步过渡到围岩-支护相互作用,如两者最终无法达到平衡状态,出现变形持续发展或坍塌等极限状态,这一状态判定在隧道分析中通常可基于隧道结构准则、周边环境准则及复合准则等三大类<sup>[6]</sup>。因此,如假设结构应力响应 $\sigma$ 与其破坏状态界限值 $f$ 均为随机变量且均服从正态分布且相互独立,结构可靠度指标 $\beta$ 可表示为

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_f - \mu_\sigma}{\sqrt{\sigma_f^2 + \sigma_\sigma^2}} \quad (3)$$

式中: $\mu_\sigma$ 和 $\mu_f$ 分别表示应力响应 $\sigma$ 和破坏状态界限值 $f$ 的均值; $\sigma_\sigma$ 和 $\sigma_f$ 分别表示应力响应 $\sigma$ 和破坏状态界限值 $f$ 的方差。以位移响应 $v$ 极限状态与结构应力响

应 $\sigma$ 为例,假定两者间存在线性相关,则应力响应可表示为

$$\sigma = \alpha_1 + \alpha_2\nu + e, e \sim n(0, d_e^2) \quad (4)$$

其中: $\alpha_1, \alpha_2$ 为拟合系数;残差 $e$ 符合均值为0,方差为 $d_e^2$ 的正态分布,当拱顶沉降 $\nu$ 处于 $\nu_0$ 时有:

$$\mu_{\sigma|\nu_0} = \alpha_1 + \alpha_2\nu_0; \sigma_{\sigma|\nu_0}^2 = d_e^2 \quad (5)$$

结构失效概率为

$$P_{f|\nu_0} = P(\sigma > f | \nu_0) = P(\sigma | \nu_0 > f) \quad (6)$$

结合式(3),结构失效概率可表示为

$$P_{f|\nu_0} = P(\sigma | \nu_0 > f) = \frac{\mu_f - \mu_{\sigma|\nu_0}}{\sqrt{\sigma_{\sigma|\nu_0}^2 + \sigma_f^2}} \quad (7)$$

将式(5)代入式(6)中,可靠度指标可表示为

$$\beta_{\nu_0} = \frac{\mu_f - (\alpha_1 + \alpha_2\nu_0)}{\sqrt{\sigma_f^2 + d_e^2}} \quad (8)$$

对应的结构极限状态条件概率可表示为

$$P_{f|\nu_0} = 1 - \Phi(\beta_{\nu_0}) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_f - (\alpha_1 + \alpha_2\nu_0)}{\sqrt{\sigma_f^2 + d_e^2}}\right) \quad (9)$$

### 2.2 易损性评价方法与流程

基于2.1中的条件概率分析方法,结合围岩支护概率有限元模拟、拉丁超立方<sup>[23]</sup>及克里金(kriging)<sup>[24]</sup>抽样等方法,基于拱顶沉降的隧道开挖易损性分析及可靠度评定具体流程如图3所示

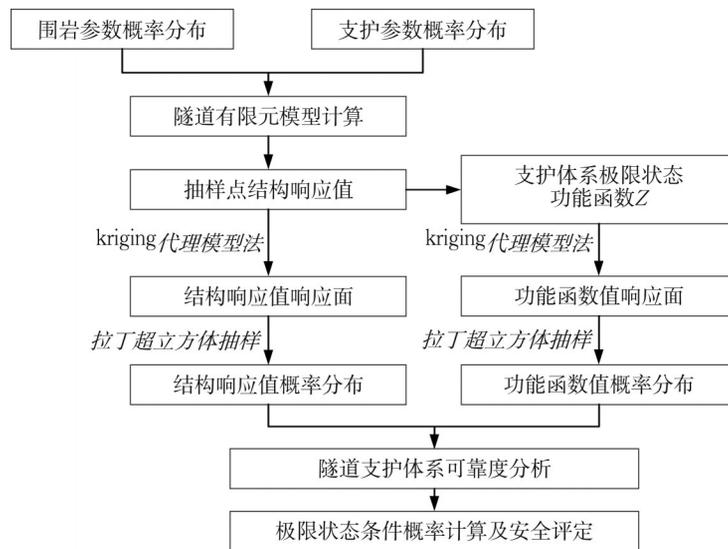


图3 易损性及可靠度评价流程图

Fig. 3 Flowchart of vulnerability and reliability evaluation

具体步骤为:

#### (1) 围岩及支护参数分布确定

根据理论研究,结合现场勘探数据、室内试验,确定围岩参数及其概率分布;并根据支护设计指标与材料性质确定支护参数概率分布。

#### (2) 支护响应随机有限元模拟及可靠度分析

建立围岩支护有限元模型,并结合参数的分布进行拉丁超立方体随机抽样,计算抽样点结构响应与功能函数值。根据抽样点数据,采用克里金代理模拟法进行应力等响应面拟合,采用应力准则判断支护结构极限状态,针对混凝土衬砌受拉破坏、受压破坏以及锚杆受拉破坏三种极限状态,根据功能函数如式(10)–(12)获得功能函数。

$$Z_1 = f_{ht} - \sigma_{ct} \quad (10)$$

式中: $\sigma_{ct}$ 为混凝土衬砌拉应力; $f_{ht}$ 为混凝土抗拉强度值。

$$Z_2 = f_{hc} - |\sigma_{cc}| \quad (11)$$

式中: $\sigma_{cc}$ 为混凝土衬砌压应力(负值取绝对值); $f_{hc}$ 为混凝土抗压强度值。

$$Z_3 = f_{gt} - \sigma_{mt} \quad (12)$$

式中: $\sigma_{mt}$ 为锚杆拉应力; $f_{gt}$ 为钢材抗拉强度值。

结合结构响应值响应面与功能函数值响应面,基于可靠度定义,根据式(6)–(7)进行失效概率与可靠度指标计算。

#### (3) 结构极限状态条件概率计算

根据式(9),通过对拱顶沉降与结构内力响应进行线性拟合,将支护结构的极限应力转化为对应的支护结构的允许变形,提出基于拱顶沉降的结构极限状态条件概率。

#### (4) 基于条件概率的支护易损性评定

根据条件概率计算结果,将支护出现破坏前的概率区间定义为易损区间,并根据易损区的发展规

律及变化特征比较支护体系优劣。

### 3 支护响应有限元模拟及可靠度分析

根据2.2中的所述步骤,本节通过蒙特卡罗抽样法针对围岩支护参数进行随机抽样开展数值模拟,确定支护体系极限状态及对应的功能函数并计算抽样点功能函数值,拟合功形成能函数响应面,最终基于随机抽样获得支护体系失效概率与可靠度指标。

#### 3.1 模拟参数选取

通过现场采样进行不同含水率三轴试验结果,并根据文明等<sup>[6]</sup>对参数概率分布建议,有限元模拟所采用的支护及围岩概率参数选取如表1及表2所示。

表1 支护参数概率分布

Tab. 1 Probability distribution of line support parameters

	分布类型	均值	标准差	变异系数
初衬混凝土弹性模量/GPa	正态分布	31.00	3.10	0.100
混凝土抗拉极限强度/MPa	正态分布	2.71	0.44	0.160
混凝土抗压极限强度/MPa	正态分布	23.07	3.70	0.160
锚杆强度/MPa	正态分布	353.80	12.00	0.034
初衬混凝土厚度/cm	正态分布	27.00	2.70	0.100
初衬混凝土重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	正态分布	25.00	1.75	0.070

表2 围岩参数概率分布

Tab. 2 Probability distribution of surrounding rock parameters

	分布类型	均值	标准差	变异系数
围岩重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	正态分布	26.00	2.60	0.100
围岩弹性模量/GPa	正态分布	1.60	0.46	0.290
围岩内摩擦角/(°)	正态分布	36.00	6.00	0.167
围岩黏聚力/MPa	正态分布	2.00	0.28	0.140

此外,围岩及混凝土泊松比随含水率的变化较小且分布难以确定,故此处视为常数,分别取为0.4及0.2。

#### 3.2 让压接头模拟

为开展让压接头的随机有限元模拟,需解决接头处切向相对有限滑移的约束关系,以实现“抵抗压、高抗弯剪”的力学性能。本文在对构件进行准确地几何建模的基础上,采用变刚度弹簧单元模拟构件间切向连接关系,如图4所示,同时为套筒和套杆构件施加“法向无分离”约束,令套筒和套杆在弯剪作用下协同变形,使让压处不致在弯剪作用下发生大变形与破坏。

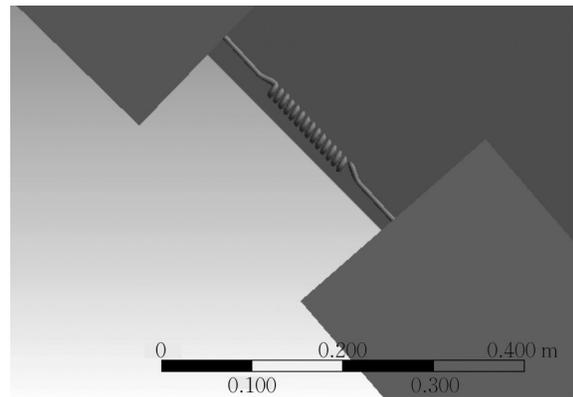


图4 让压接头数值模型图

Fig. 4 Numerical model of yield-control support joint

#### 3.3 隧道开挖过程模拟

基于表1及表2所述数据,采用拉丁超立方体抽样法,共得到150组抽样参数值,以此为基础,按照实际施工顺序,模拟上下台阶分布开挖过程,下台阶开挖完成后模型图如图5所示。其中,围岩采用平面单元模拟并选用MC塑性屈服准则,锚杆采用杆单元模拟,钢拱架及初衬采用Line2单元进行模拟。

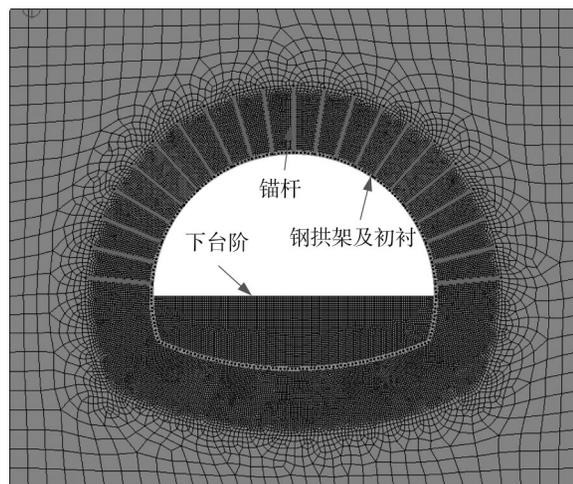


图5 隧道开挖有限元模型图

Fig. 5 Finite element model of tunnel excavation

整个计算模型采用地层结构法,出于对数值模型的简化需求,隧道围岩体系的受力变形为平面应变问题,选取50 m埋深截面,根据圣维南原理,为消除边界效应影响,取边界距离为开挖的3倍,水平方向边界距离隧道中心50 m,施加法向约束;下边界距离隧道中心50 m,施加法向约束;并考虑隧道纵向1米范围内的隧道围岩结构作为数值模拟对象。

#### 3.4 响应面分析

采用表1及表2所述参数及图5所示模型开展

随机概率计算,基于kriging代理模型法进行响应面拟合,得到衬砌混凝土抗拉功能函数响应面如图6所示。从图中可以发现,随着围岩支护参数的不同

取值,功能函数值发生明显的变化,存在混凝土衬砌受拉破坏 $Z_1$ 及锚杆受拉破坏 $Z_3$ 功能函数值小于0,即支护衬砌存在发生受拉破坏的危险。

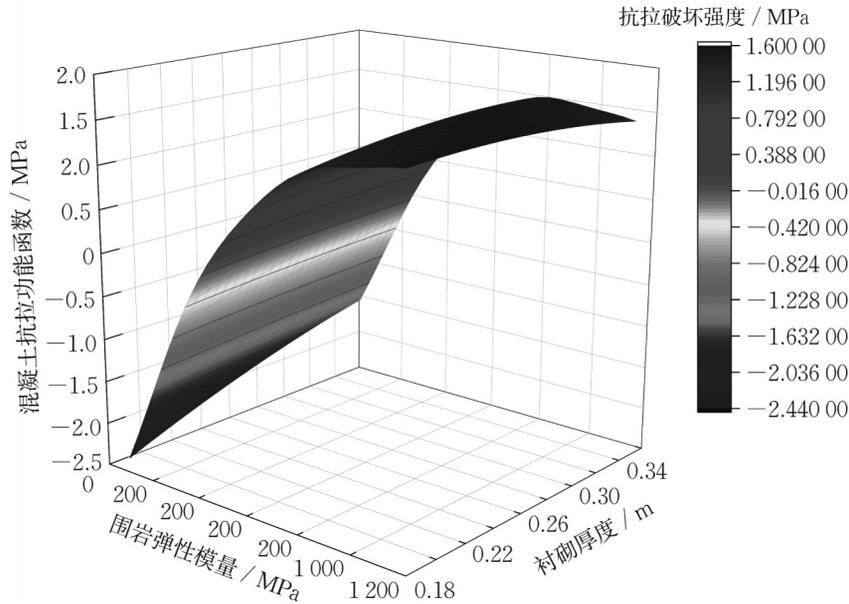


图6 让压支护初衬混凝土抗拉功能函数

Fig. 6 Functional function of concrete tensile capacity of initial lining with support

基于图6功能函数响应面,经10 000次拉丁超立方体抽样得到混凝土抗拉功能函数概率分布如图7所示。

根据抽样结果进行统计分析,混凝土抗拉功能函数均值和方差分别为1.06 MPa和0.7 MPa。

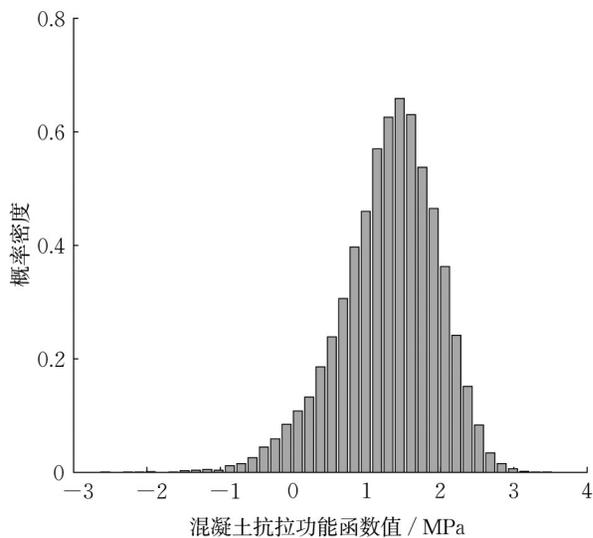


图7 混凝土抗拉强度功能函数抽样概率密度分布

Fig. 7 Sampling probability density distribution of initial lining concrete tensile capacity function

#### 4 让压及刚性支护易损性对比分析

为了进一步验证第2节所述易损性评价方法,比较让压支护与传统支护在安全可靠性的差异。本节基于第2节所述流程及方法,在第3节概率密度计算基础上,比较两者在条件概率及其发展规律的不同,给出两者在安全控制方面的优劣。

##### 4.1 让压支护极限状态条件概率分析

根据3.3节所述方法开展有限元模拟,计算采用让压支护条件下的隧道拱顶沉降值,并针对混凝土抗拉极限状态进行条件概率分析计算。

###### (1) 混凝土抗拉极限状态拟合关系确定

如图7所示,基于计算结果抽样可知衬砌拉应力 $\sigma_{t1}$ 服从正态分布,结合前序混凝土抗拉强度 $f_t$ 符合正态分布的假设,根据式(3),隧道开挖初衬可靠度指标为

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_{f_t} - \mu_{\sigma_{t1}}}{\sqrt{\sigma_{f_t}^2 + \sigma_{\sigma_{t1}}^2}} \quad (13)$$

对拱顶沉降值 $v$ 与衬砌最大拉应力值 $\sigma_{t1}$ 进行线性回归分析,并对残差进行正态分布拟合,结果如图8、图9所示。

图8中拟合直线的截距为0.465 64,斜率为31.448 03,皮尔逊系数为0.933 81,决定性系数为

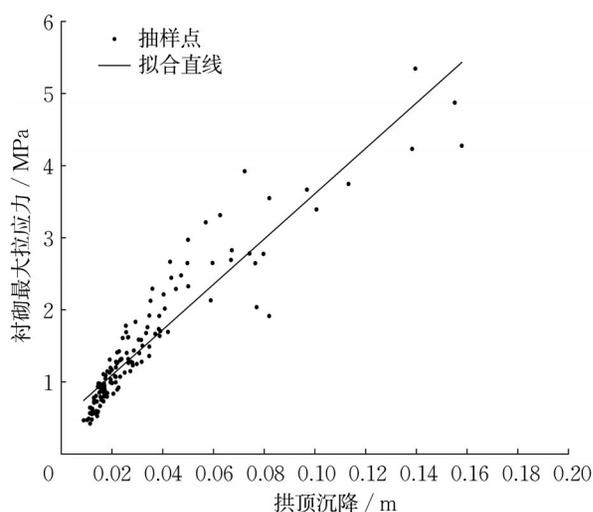


图8 让压支护衬砌最大拉应力拱顶沉降线性拟合关系图  
Fig. 8 Linear fitting relationship between maximum tensile stress of yield-control support initial lining and vault settlement

0.872。

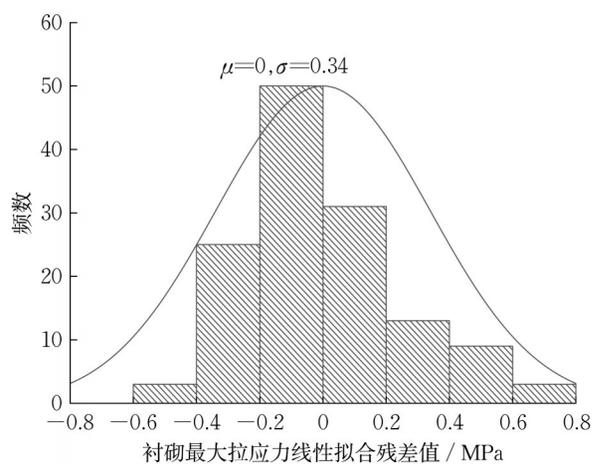


图9 衬砌最大拉应力拟合残差分布图  
Fig. 9 Probability distribution of fitting residual of maximum tensile stress of yield-control support initial lining

#### (2) 条件概率计算

根据图8、图9拟合结果可知,让压支护初衬最大应力与拱顶沉降可表达为线性关系,且残差符合正态分布,故得到式(14):

$$\sigma_{t1} = 0.46 + 31\nu + e_1, \quad e_1 \sim n(0, 0.115) \quad (14)$$

由此计算得到条件概率表达式为

$$P_{f|\nu} = 1 - \Phi(\beta_\nu) = 1 - \Phi\left(\frac{2.25 - 31\nu}{0.56}\right) \quad (15)$$

#### 4.2 刚性支护极限状态条件概率分析

为对比同等物理力学参数条件下支护体系的易

损特征,在不考虑让压接头条件下,刚性支护数值模拟仍采用表1及表2所述围岩及支护参数,并针对混凝土抗拉极限状态进行条件概率的分析计算。

其中,拱顶沉降值 $\nu$ 与衬砌最大拉应力值 $\sigma_{t1}$ 的线性拟合特征及残差分布如图10、图11所示。

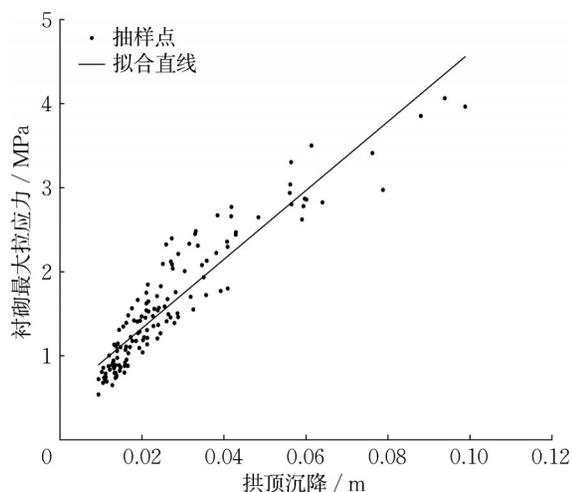


图10 刚性支护初衬最大拉应力与拱顶沉降线性拟合关系  
Fig. 10 Linear fitting relationship between maximum tensile stress of rigid support initial lining and vault settlement

图10中拟合直线的截距为0.507 73,斜率为40.985 89,皮尔逊系数为0.930 63,决定性系数为0.866 07。

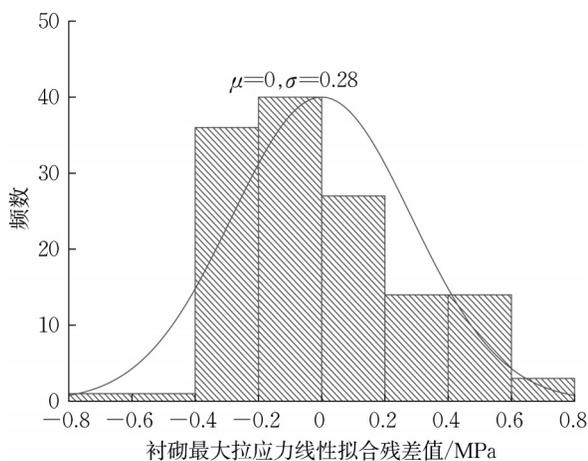


图11 刚性支护初衬最大拉应力拟合残差分布图  
Fig. 11 Probability distribution of fitting residual of maximum tensile stress of rigid support initial lining

基于图10、图11拟合结果,并根据式(4), $\sigma_{t1}$ 与 $f_t$ 间关系可表达为式(16):

$$\sigma_{t1} = 0.5 + 41\nu + e_1, \quad e_1 \sim n(0, 0.078) \quad (16)$$

根据式(5)—(6)中得隧道开挖失效概率为

$$\beta_{\nu_0} = \frac{\mu_f - (\alpha_1 + \alpha_2 \nu_0)}{\sqrt{\sigma_f^2 + d_e^2}} = \frac{2.21 - 41\nu}{0.52} \quad (17)$$

并可计算基于拱顶沉降量的极限状态条件概率为

$$P_{f|\nu} = 1 - \Phi(\beta_{\nu}) = 1 - \Phi\left(\frac{2.21 - 41\nu}{0.52}\right) \quad (18)$$

#### 4.3 易损性对比分析

根据式(12)及式(15)绘制让压支护及刚性支护的条件概率曲线如图12所示。

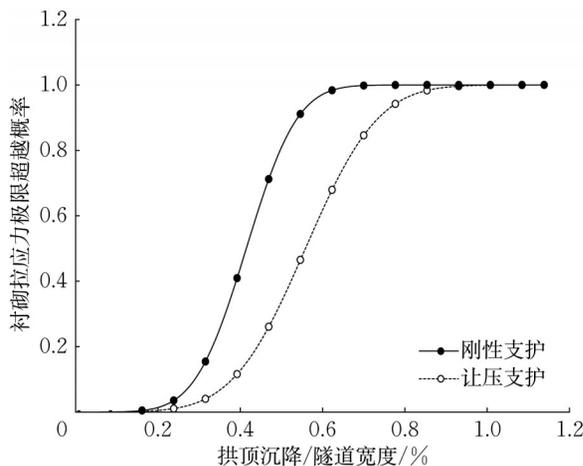


图12 让压支护衬砌极限状态条件概率曲线

Fig. 12 Probability of bearing capacity limit state of rigid support initial lining

如图12所示,相比刚性支护,让压支护对拱顶沉降的冗余度更大,在同等沉降条件下,让压支护的极限状态概率更低。同时,让压支护的易损区范围更大,刚性支护随着拱顶位移发展很快进入破坏区,而让压支护进入破坏区的相对沉降临界值从0.7%延后至0.9%,对围岩的适应性更强,可靠度更高。

通过以上对比发现,可通过对比支护的易损区范围评价让压支护的优劣,通过变形释能,易损区的扩大有助于支护变形条件下的可靠度。

## 5 结论

本文从易损性出发,采用条件概率分析隧道开挖安全状态随拱顶沉降发展的可靠度变化规律,并比较了刚性支护与让压支护在抗变形可靠度方面的差异,得到如下结论:

(1)根据易损性概率的大小,将支护破坏之前的条件概率分布区间视为易损区间,对应让压支护在

让出过程中承载能力;

(2)相较于刚性支护,让压支护在同等变形条件下失效概率更小,对围岩的适应性更强,抗变形可靠度更高,与围岩协调变形性更强;

(3)可通过易损区间范围评价支护承担围岩变形释能的能力,易损区范围越大表明让压支护变形承载能力越强。

本文提出的条件概率方法为评估软岩大变形等安全问题提供了新思路,但仍需在响应概率分布,响应与沉降间的关系等问题上做更为深入的研究。

#### 作者贡献声明:

周彪:提出理论概念与方法,构建实施方案并完成论文撰写。

李锟铄:理论推导及数值模拟。

谢雄耀:项目负责人。

徐金峰:让压支护设计。

刘龙坤:数值模拟及论文撰写。

#### 参考文献:

- [1] 何满潮. 中国煤矿软岩工程地质力学研究进展[J]. 煤, 2000(1): 6.  
HE Manchao. The research development of soft rock engineering geological mechanism in China coal mine [J]. Coal, 2000(1): 6.
- [2] 赵勇. 隧道软弱围岩变形机制与控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
ZHAO Yong. Study on deformation mechanism and control technology of weak rock surrounding tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [3] 陈从新, 卢海峰, 袁从华, 等. 红层软岩变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 261.  
CHEN Congxin, LU Haifeng, YUAN Conghua, et al. Experimental research on deformation properties of red-bed soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 261.
- [4] 贾彤. 泥岩的宏微观力学性质研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2019.  
JIA Tong. Study on macroscopic and microscopic mechanical behaviors of mudstone [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2019.
- [5] 郭富利, 张顶立, 苏洁, 等. 地下水和围压对软岩力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(11): 2324.  
GUO Fuli, ZHANG Dingli, SU Jie, et al. Experimental study on the influence of groundwater and confining pressure on the mechanical properties of soft rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(11): 2324.
- [6] 文明, 张顶立, 季学伟, 等. 隧道工程可靠性基本要素统计分析与建议[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(6): 34.

- WEN Ming, ZHANG Dingli, JI Xuewei, *et al.* Statistical analysis and suggestions on basic elements of tunnel engineering reliability [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2019, 43(6):34.
- [7] 刘志春,朱永全,李文江,等. 挤压性围岩隧道大变形机理及分级标准研究[J]. *岩土工程学报*, 2008(5):690.  
LIU Zhichun, ZHU Yongquan, LI Wenjiang, *et al.* Research on large deformation mechanism and classification standard of tunnel in squeezing surrounding rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008(5):690.
- [8] 孙钧,钦亚洲,李宁. 软岩隧道挤压型大变形非线性流变属性及其锚固整治技术研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2019, 39(3): 337.  
SUN Jun, QIN Yazhou, LI Ning. Research on nonlinear rheological properties of soft rock tunnel with large deformation and anchorage treatment technology [J]. *Tunnel Construction*, 2019, 39(3): 337.
- [9] BARLA G, BONINI M, SEMERARO M. Analysis of the behaviour of a yield-control support system in squeezing rock [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(1): 146.
- [10] 何满潮,李晨,宫伟力,等. NPR锚杆/索支护原理及大变形控制技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(8): 1513.  
HE Manchao, LI Chen, GONG Weili. NPR bolt/cable support principle and large deformation control technology [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(8): 1513.
- [11] 雷升祥,赵伟. 软岩隧道大变形环向让压支护机制研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 1039.  
LEI Shengxiang, ZHAO Wei. Study on the supporting mechanism of large deformation circumferential pressure allowing for soft rock tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 1039.
- [12] 仇文革,王刚,龚伦,等. 一种适应隧道大变形的限阻耗能型支护结构研发与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(8): 1785.  
QIU Wenge, WANG Gang, GONG Lun, *et al.* Development and application of a resistance-limiting energy-dissipating support structure suitable for large tunnel deformation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(8): 1785.
- [13] 李术才,徐飞,李利平,等. 隧道工程大变形研究现状、问题与对策及新型支护体系应用介绍[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(7): 1366.  
LI Shucai, XU Fei, LI Liping, *et al.* Introduction to the current situation, problems and countermeasures of large deformation research in tunnel engineering and the application of new support system [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(7): 1366.
- [14] 汪波,王杰,吴德兴,等. 让压支护体系在软岩大变形公路隧道中的应用研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2016, 13(10): 1985.  
WANG Bo, WANG Jie, WU Dexinxing, *et al.* Research on application of pressure-concession support system in soft rock large deformation highway tunnel [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2016, 13(10): 1985.
- [15] 张顶立. 隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J]. *力学学报*, 2017, 49(1):3.  
ZHANG Dingli. Fundamental problems and research progress of tunnels and underground engineering [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(1):3.
- [16] 张顶立,方黄城,陈立平,等. 隧道支护结构体系的刚度设计理论[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(4):649.  
ZHANG Dingli, FANG Huangchen, CHEN Liping, *et al.* The stiffness design theory of the tunnel supporting structure system [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(4):649.
- [17] 李国良,刘志春,朱永全. 兰渝铁路高地应力软岩隧道挤压大变形规律及分级标准研究[J]. *现代隧道技术*, 2015, 52(1):62.  
LI Guoliang, LIU Zhichun, ZHU Yongquan. Study on the law of large extrusion deformation and classification standard of high geostress soft rock tunnel on lanyu railway [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2015, 52(1):62.
- [18] 李磊,谭忠盛. 挤压性破碎软岩隧道大变形特征及机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S1):3593.  
LI Lei, TAN Zhongsheng. Research on characteristics and mechanism of large deformation of tunnels in crushed soft rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S1):3593.
- [19] HUH J, TRAN Q, HALDAR A, *et al.* Seismic vulnerability assessment of a shallow two-story underground RC box structure[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(7): 735.
- [20] ARGYROUDIS S A, PITILAKIS K D. Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 35: 1.
- [21] CORNELL C A, JALAYER F, HAMBURGER R O, *et al.* Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(4): 526.
- [22] 黄忠凯,张冬梅. 地下结构地震易损性研究进展[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 49.  
HUANG Zhongkai, ZHANG Dongmei. Recent advance in seismic fragility research of underground structures [J]. *Journal of Tongji university(Natural Science)*, 2021, 49(1): 49.
- [23] MCKAY M D, BECKMAN R J, CONOVER W J. A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code [J]. *Technometrics*, 1979, 2(21): 239.
- [24] 毛凤山,陈昌富,朱世民. 代理模型方法及其在岩土工程中的应用综述[J]. *地基处理*, 2020, 31(4): 295.  
MAO Fengshan, CHEN Changfu, ZHU Shimin. Proxy model method and its application in geotechnical engineering [J]. *Journal of Ground Improvement*, 2020, 31(4): 295.