

基于变权模糊综合评判理论的桩基下岩溶顶板稳定性评价

胡雪雯, 李云安, 范志高

Stability evaluation of karst roof of pile foundation based on variable weight fuzzy comprehensive theory

HU Xuewen, LI Yun'an, and FAN Zhigao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307035>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于区间非概率可靠性方法的岩溶区桩基下溶洞顶板稳定性评价

Stability evaluation of karst cave roof under pile in karst areas based on the interval non-probabilistic reliability method

秦溯, 李云安, 孙琳 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 81-88

基于尖点突变理论的软岩弃渣路堤局部稳定性分析

An analysis of local stability of soft rock cinder embankment based on the cusp catastrophe theory

鞠兴华, 杨晓华, 张莎莎 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 112-118

基于岩体结构特征和未确知测度评价模型的岩质开挖边坡稳定性研究

A study of the stability of rock excavated slope based on rockmass structure and unascertained measure evaluation models

穆成林, 裴向军, 裴钻, 张引, 习朝辉 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 150-158

基于岩体损伤的大型高陡危岩稳定性评价方法

Stability assessment methods for huge high-steep unstable rock mass based on damage theory

贺凯, 高杨, 殷跃平, 李滨 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 82-89

大牛地气田区地下水水质模糊综合评价

Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality of the Daniudi gas field area

梁乃森, 钱程, 穆文平, 段扬, 朱阁, 张日升, 武雄 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 52-59

基于桩体抗剪强度的复合地基路堤稳定性分析方法

Stability analysis method for the composite foundation embankment based on pile shear strength

钟昌茂, 邱恩喜, 魏永幸, 王智猛, 刘菀茹, 万旭升, 李康乐 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 100-107



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307035

胡雪雯, 李云安, 范志高. 基于变权模糊综合评判理论的桩基下岩溶顶板稳定性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 149-159.

HU Xuewen, LI Yun'an, FAN Zhigao. Stability evaluation of karst roof of pile foundation based on variable weight fuzzy comprehensive theory[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 149-159.

基于变权模糊综合评判理论的桩基下岩溶顶板 稳定性评价

胡雪雯¹, 李云安¹, 范志高²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430070;

2. 中铁十六局集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 常权层次分析法在评价桩基下岩溶顶板稳定性中存在准确性较低的问题。基于变权理论对评价指标的结构模型进行改进, 构建一种有效的判定稳定性的数学评价方法。以岩溶发育区深圳市轨道交通三号线停车场为研究区, 利用故障树分析理论得到影响桩基下岩溶顶板稳定性的主要因素, 通过解析结构模型理论确定稳定性评价指标的结构模型, 依据模糊数学提出的层次分析法、变权理论的综合评价方法等手段对稳定性进行评价, 并与常权下的稳定性评价结果对比。结果表明: (1) 基于故障树分析理论得到的稳定性评价因素, 可以系统评估稳定性, 确定可能发生的事件路径, 识别高风险区域, 克服评价因素不全面的问题; (2) 引入的变权模糊综合评价方法从“惩罚”变权的机制确定了需要变权的评价因素, 通过放大评价因素的影响达到准确评价现场实际情况的目的; (3) 变权模型下研究区稳定性等级为“不稳定”, 相较于与常权模型下“较不稳定”的评价, 变权模糊综合评价模型计算结果更符合现场勘查结果。研究表明基于变权理论的桩基下岩溶顶板稳定性评价方法能反映研究区整体稳定性水平, 对类似岩溶工程的前期稳定性判别具有重要的参考意义。

关键词: 岩溶顶板; 稳定性; 故障分析理论; 变权理论; 模糊综合评价

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0149-11

Stability evaluation of karst roof of pile foundation based on variable weight fuzzy comprehensive theory

HU Xuewen¹, LI Yun'an¹, FAN Zhigao²

(1. Engineering College, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430070, China;

2. China Railway 16th Bureau Group Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: Regarding the lower accuracy of the Analytic Hierarchy Process (AHP) in assessing the stability of karst cave roof under pile foundations, an improved structural model of evaluation indicators based on variable weight theory was developed to establish an effective mathematical assessment method for stability determination. Focusing on the parking lot of Shenzhen Rail Transit Line 3 within a karst development area, the main factors influencing the stability of the karst cave roof under pile foundations were identified utilizing Fault Tree Analysis

收稿日期: 2023-07-24; 修订日期: 2024-01-10

投稿网址: www.swdzgcdz.com

第一作者: 胡雪雯(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶桩基础工程和岩溶深基坑工程。E-mail: 2628074506@qq.com

通讯作者: 李云安(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为水-土耦合与环境岩土工程、水-岩耦合与环境地质工程、地下建筑工程和地震地质工程。E-mail: liyunan@cug.edu.cn

theory. The structural model of stability assessment indicators was delineated through theoretical analysis. Subsequently, based on Fuzzy Mathematics, a comprehensive evaluation method of stability integrated the AHP and the assessment method under variable weights was conducted to contrast the outcomes with stability assessment results under constant weights. Results indicate: (1) Factors obtained from Fault Tree Analysis theory can be used to evaluate stability systematically, identify potential event pathways, and mitigate incomplete evaluation factors. (2) The comprehensive evaluation method introduced variable weight fuzzy, employing a “penalty” mechanism for weight variation to determine the need for weight variation in assessment factors, achieves accurate on-site assessments through amplifying their influences. (3) The stability grade within the study area under the variable weight model was “unstable”, contrasting the evaluation of “relatively unstable” under the constant weight model, demonstrating that the variable weight fuzzy comprehensive evaluation model aligns more closely with on-site survey results. This study underscores that the variable weight theory-based assessment method for karst cave roof stability under pile foundations reflects the overall stability level within the research area, offering crucial insights for preliminary stability assessment in similar karst engineering endeavors.

Keywords: karst roof; stability; failure analysis theory; variable weight theory; fuzzy comprehensive evaluation

我国工程建设高速发展, 桩基工程在岩溶区应用广泛^[1-2]。由于岩溶地质的异质性和溶洞的复杂发展, 基岩表面呈现不规则的溶槽和溶沟。岩溶地下水涌入基坑和桩孔, 导致场地及周围地面沉降, 引发岩溶地区桩基工程的多重技术问题, 存在建筑物安全性的风险因素。传统的依赖少量钻孔岩芯的抗压强度评估可能导致工程失误^[3-4]。实际上, 地基的强度和稳定性受多种因素影响^[5-7], 包括不同类型的临空面、溶洞、溶隙、溶蚀带, 以及基坑开挖可能引发的突水涌泥、地面沉降等环境效应^[8-9]。因此, 在考虑岩溶地区桩基的持力层和承载力以及稳定性问题时, 必须全面考虑各种因素的影响。

岩溶顶板稳定性研究经历了定性、半定量、定量 3 个阶段。定性方法使用工程地质学经验划定指标^[8], 但存在主观性。半定量方法引入顶板安全厚度计算, 如顶板厚跨比法^[10]、近似结构力学法^[11]、散体理论分析法^[12]等, 在考虑岩溶地区特殊结构和地下水条件时存在局限性。定量方法包括稳定系数法、普氏压力拱理论分析法和有限元数值法。稳定系数法^[13]依赖实测数据和经验公式, 但受地质条件和水文变化限制。普氏压力拱理论分析法^[14]考虑地下水支撑, 但简化了地质结构和水文条件。有限元数值法^[15]能详细建模岩溶顶板, 但需要准确参数和大量计算资源。

针对上述难点, 近年来已逐步形成模糊多属性决策方法对该问题进行研究^[16]。然而, 现有的评价方法存在主观性较强、评价指标选取缺乏依据的问题, 同

时在权重选取上常采用常权理论。但是, 一方面工程中随着时间尺度的增长, 部分指标值会出现极值和突变^[17], 常权理论易忽略随着时间推移对评价因素造成的影响; 另一方面, 岩溶区的地质问题是一个逐渐演化的过程, 涉及物理和化学侵蚀、地下空间的扩展、水位上升、水力压力的增加等多个阶段。在演变过程中, 地下空间的扩大和水的流动速度的增加通常标志着从量变到质变的转折点, 可能会引发严重的地质问题^[18]。

为解决常权模糊综合评价方法主观性、灵活性及评价结果精度方面的限制, 以深圳市地铁三号线为研究区, 引入故障分析理论和变权理论, 采用变权模糊综合评价方法进行桩基下岩溶顶板稳定性评价。通过故障树分析选择主要评价因素, 并基于变权理论建立岩溶顶板稳定性模糊综合评价系统。通过对比、验证和分析变权模糊综合评价模型与常权模糊综合评价模型计算结果, 得到准确的研究区岩溶顶板稳定性评价结果。这种变权理论模型可以规避常权理论模型中指标值出现极值和突变的问题, 为类似工程提供了有经验的评价方法。

1 变权模糊综合评价模型

1.1 模型建立

模糊数学中定义了有关论域的概念^[19], 定义论域 U 为将要参与评价的对象集合。基于上述定义将桩基下岩溶顶板稳定程度的评判纳入有限论域 U 的范畴,

并将影响稳定程度的 n 个因素视为 U 中的元素进行细致研究, 表示为:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n\} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

此外, 定义桩基下岩溶顶板稳定性评语集 (V), 即所有可能出现的结果有 m 个, 表示为:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_m\} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

最后, 进行单因素模糊评价得到 $r_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}\}$ 。确定好各因素的模糊评价集后, 构造全因素综合评价矩阵 R , 表示为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: r_{nm} ——第 n 个指标对第 m 个评价等级的隶属度。

1.1.1 桩基下岩溶顶板失稳因素确定

桩基下岩溶顶板稳定性系统庞大且环境复杂, 存在多种导致岩溶顶板失稳的因素。为确定桩基下岩溶顶板失稳发生的可能路径和可能性, 引入故障树分析法^[20]。

故障树分析法以图形方式表示系统故障的逻辑关系, 包括顶层事件、过程事件和底层事件。顶层事件是系统发生突发事件的原因, 选择顶层事件需满足明确定义、可进一步分解、可度量的原则。顶层事件逐渐向下演绎分解展开, 使用图形符号建立逻辑连接匹配对应过程事件。通过对过程事件的归纳与分析, 并依次向下进行模块探索, 直到不能或者不需要继续往下深究故障事件为止, 此时的事件即定义为底层事件。通过分析事件的逻辑关系, 并正确应用逻辑符号 (表 1), 可以形成相应的故障树^[21]。

表 1 常见故障树名称
Table 1 Common fault tree names

符号	名称	定义
	逻辑与门	所有输入事件发生输出事件才发生
	底事件	不能再进行展开的事件
	逻辑或门	有一个输入事件发生输出事件就发生
	结果事件	顶层事件: 位于故障树顶端 中间事件: 除顶层事件外的其他可展开事件

为了达到稳定桩基下岩溶顶板的目的, 需要溶洞顶板提供稳定承载力, 溶洞几何特征和充填特征满足稳定性条件, 同时保证基桩能够有效地传递荷载到溶洞顶板和地下岩层^[22]。

通过研究桩基下岩溶顶板的力学环境与顶板失

稳的诊断机制, 结合深圳轨道交通三号线四期工程相关勘察试验资料和故障树分析的结果, 依据模糊数学的相关理论建立桩基下岩溶顶板稳定性二级评判模型, 模型树如图 1 所示。得到了包括顶板岩层厚度 (u_{11})、裂隙发育及充填情况 (u_{12})、岩石风化程度 (u_{13})、岩石单轴饱和抗压强度 (u_{14})、岩石层状构造 (u_{15})、岩芯完整情况 (u_{16})、溶洞宽度 (u_{21})、溶洞高度 (u_{22})、溶洞充填情况 (u_{23})、桩长 (u_{31})、基桩设计荷载 (u_{32}) 11 个评价指标, 从而构成了桩基下岩溶顶板稳定性系统的影响要素。其中, 指标 u_{11} 、 u_{14} 、 u_{16} 、 u_{21} 、 u_{22} 、 u_{31} 、 u_{32} 具有连续取值范围, 可以采用实数或者取值范围较大的整数等连续数据来表示, 称为连续性指标。指标 u_{12} 、 u_{13} 、 u_{15} 、 u_{23} 具有有限个取值, 表示为某种属性、类别、等级或状态的离散值, 称为离散型指标。

1.1.2 桩基下岩溶顶板稳定性评价等级划分

在桩基下岩溶顶板稳定性的模糊综合评价方法中, 评级标准与其他定量评价方法有所不同, 允许在评语等级中包括模糊语言或术语, 以更灵活的方式表达不确定性和模糊性^[23]。

工程领域各大学科系统质量要求评价体系中关于评价等级的划分, 通常分为 4 级。如矿井通风健康系统^[24]为很健康、较健康、不健康、病态 4 级; 黄土边坡稳定性^[25]分为稳定、较稳定、较不稳定、不稳定 4 级; 大桥安全评估^[26]包括完好、良好、合格、不合格的 4 级评语集。

综合上述各工程领域等级划分理论, 结合相关规范^[4,27-28]拟定 4 级评语集, 即: 稳定、较稳定、较不稳定、不稳定, 对桩基下岩溶顶板的稳定性进行评价。各等级的定义如下。

稳定: 岩溶顶板无明显裂隙、变形和岩块松动, 正常提供承载力。

较稳定: 岩溶顶板有少量裂隙, 但能较好封闭, 轻微变形和岩块松动, 在防治措施下可正常提供承载力。

较不稳定: 岩溶顶板有较多裂隙, 封闭能力有限, 有大的变形和岩块松动, 通过及时防治和不定时评价可提供承载功能。

不稳定: 岩溶顶板有大量宽大裂隙, 无法有效封闭, 明显变形和岩块松动, 可能导致严重损失, 无法提供承载力, 需立即解危处理。

1.2 计算模型

二级模糊综合评判的计算模型如式 (4)。

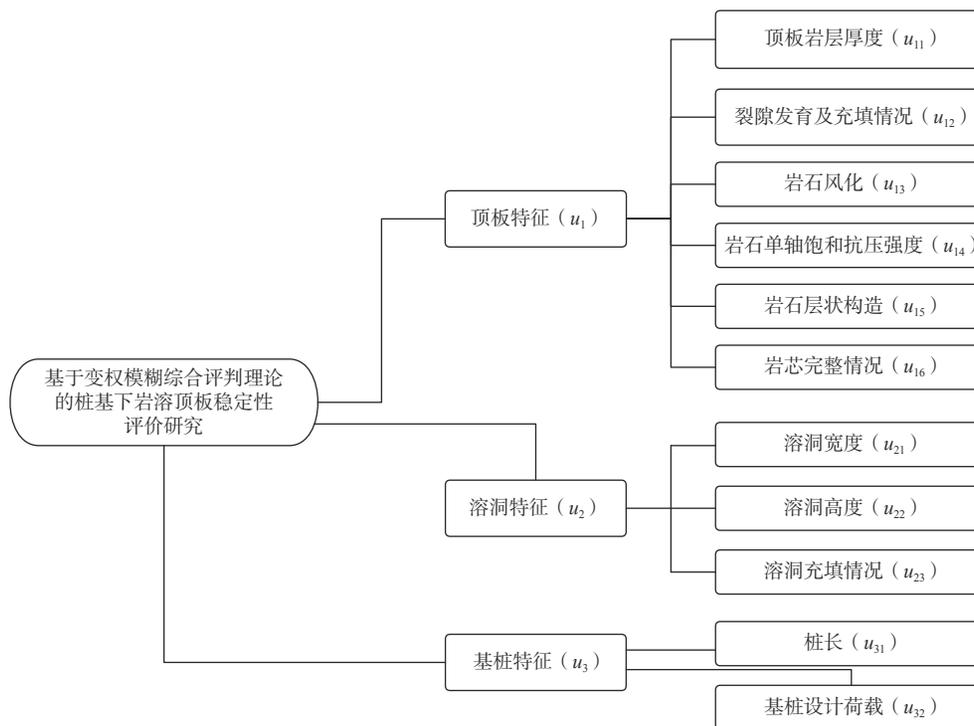


图 1 评价体系模型树

Fig. 1 Evaluation system model tree

$$A = H \circ B = H \circ \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = H \circ \begin{bmatrix} H_1 \circ R_1 \\ H_2 \circ R_2 \\ H_3 \circ R_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： H ——二级综合评判的权重模糊集；

$H_i(i = 1, 2, 3)$ ——一级综合评判的权重模糊集；

$R_i(i = 1, 2, 3)$ ——一级综合评判中评语集与因素集模糊关系，即一级评判矩阵；

$B_i(i = 1, 2, 3)$ ——既是一级评判的结果集，又是二级评判的因素集。

在该计算模型中需要确定模糊关系 R ，权集 H 及合成运算“ \circ ”三要素。

1.2.1 模糊关系的确定

模糊关系 (R) 的关键在于确定各单因素的隶属度值^[29]。隶属度用于将评价指标的具体数值转化为模糊语言项，以在模糊逻辑运算和综合计算中使用^[30]。

针对连续性评价指标，参考相关书籍和标准^[4,31-32]，建立分级标准 (表 2)。其中，岩芯完整程度可通过 RQD 值^[33] 表示，其范围一般在 0~100 之间，高值表明岩石坚固，低值则表示岩石力学性质相对较差。为确保因素集独立于单位族制，对顶板岩层厚度、溶洞高度、溶洞宽度以及桩长进行无量纲化处理，即以其与桩径的比值建立相应的分级标准和隶属函数。基于表 2 的数据，采用三角模糊数^[34] 对连续性评价指标进

行模糊关系描述，其隶属度函数曲线详见图 2。

表 2 连续性指标分级标准

Table 2 Criteria for the classification of continuity indicators

评价指标名称	稳定性状态			
	稳定	较稳定	较不稳定	不稳定
顶板岩层厚度与桩径比值	≥ 4.5	$3.0 \sim < 4.5$	$1.5 \sim < 3.5$	< 1.5
岩石单轴饱和和抗压强度/MPa	≥ 100	$70 \sim < 100$	$40 \sim < 70$	< 40
岩芯完整情况/%	≥ 90	$70 \sim < 90$	$50 \sim < 70$	< 50
溶洞宽度与桩径比值	< 1	$1 \sim < 2$	$2 \sim < 4$	≥ 4
溶洞高度与桩径比值	< 1	$1 \sim < 2$	$2 \sim < 4$	≥ 4
桩长与桩径比值	≥ 40	$25 \sim < 40$	$10 \sim < 25$	< 10
基桩设计荷载/kN	$< 3\ 000$	$3\ 000 \sim < 8\ 000$	$8\ 000 \sim < 12\ 000$	$\geq 12\ 000$

对于离散型的指标，其分级标准如表 3^[11]。

基于表 3，采用专家打分法^[8] 确定其隶属度，具体方法为：邀请专家对各离散性指标下的不同指标值进行稳定性隶属度打分，利用 F 统计量法^[35] 评估各专家分数的差异性，确保评价结果的可靠性，最后整理隶属度结果 (表 4)。

1.2.2 权值确定

岩溶顶板稳定性的度量经常选用权重模糊集的代表方法。然而，在实际岩溶区域评价中，地质环境的恶化可能导致影响岩溶顶板稳定性的指标值发生

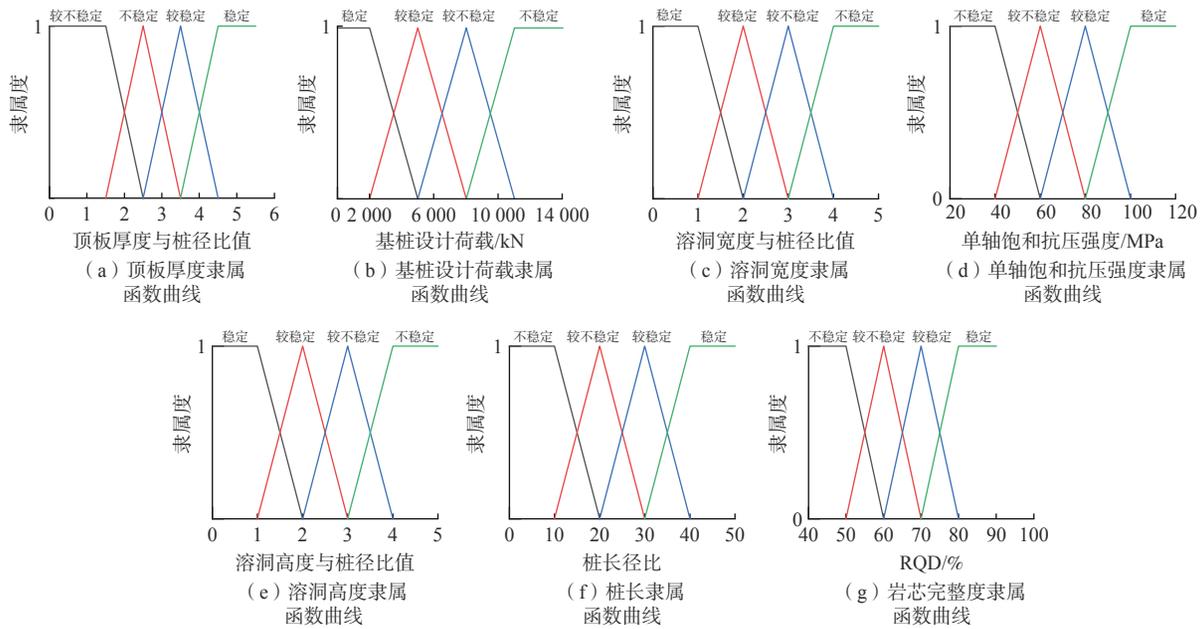


图 2 连续性指标的隶属函数曲线

Fig. 2 Membership function curves of the continuity indicators

表 3 离散性指标分级标准

Table 3 Criteria for the classification of discrete indicators

影响因素	稳定	欠稳定
岩石层状构造	厚层块状、强度高的岩石	泥质岩、白云质灰岩、薄层状有互层且岩性软化
裂隙发育情况	无断裂、裂隙不发育或胶结好	有断层通过; 裂隙发育, 岩体被两组以上裂隙切割, 裂隙张开, 岩体呈平砌状
岩石风化程度	基本无风化现象或微风化	中等至强风化
顶板情况	顶板岩层厚度与洞径比值大, 顶板呈板状或拱状, 可见钙质沉积	顶板岩层厚度与洞径比值小, 有悬挂岩体, 被裂隙切割且未胶结
溶洞内充填情况	密实沉积物填满且无水冲蚀的可能	未充填或半充填, 水流冲蚀充填物, 洞中见有近期塌落物

表 4 离散性指标因素隶属度取值

Table 4 Values of the membership degree of discrete index factors

离散型 指标因素	指标值	稳定	较稳定	较不稳定	不稳定
裂隙发育及 充填情况	裂隙不发育或发育 但胶结良好	0.50	0.30	0.15	0.05
	裂隙发育但多数胶结充填	0.40	0.40	0.15	0.05
	裂隙发育且少数充填	0.20	0.30	0.40	0.10
	裂隙极发育且无充填	0.05	0.15	0.35	0.45
岩石风化 程度	微风化	0.50	0.30	0.15	0.05
	弱风化	0.10	0.30	0.40	0.20
	强风化	0.05	0.15	0.30	0.50
岩石层状 构造	巨厚	0.40	0.30	0.20	0.10
	厚层	0.20	0.40	0.30	0.10
	薄层	0.10	0.20	0.25	0.45
溶洞充填 情况	全充填	0.40	0.30	0.20	0.10
	半充填	0.15	0.20	0.35	0.30
	无充填	0.05	0.20	0.35	0.40

并给出变权的一般性公式:

$$W(X) = \frac{W_j^0 S_j(X)}{\sum_{j=1}^m W_j^0 S_j(X)} = \left(\frac{W_1^0 S_1(X)}{\sum_{j=1}^m W_j^0 S_j(X)}, \frac{W_2^0 S_2(X)}{\sum_{j=1}^m W_j^0 S_j(X)}, \dots, \frac{W_m^0 S_m(X)}{\sum_{j=1}^m W_j^0 S_j(X)} \right) \quad (5)$$

$$S_{j(x)} = \begin{cases} 2 - \log_b \mu(x_j) & \mu(x_j) > b_j \\ 1 & \mu(x_j) \leq b_j \end{cases} \quad (6)$$

式中: $W(X)$ —— m 维局部变权向量;

$W^0 = (W_1^0, W_2^0, \dots, W_m^0)$ ——任一常权向量;

$S(X)$ —— m 维状态影响向量;

$\mu(x_j)$ ——评价指标 x_j 隶属于“不稳定”评价等级的隶属度;

b_j ——评价指标 $x_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 的调整限值, 即隶属于最低评价等级(不稳定)时的隶属

突变和质变。继续使用常权函数评估其重要性已不再合适, 因此需要引入变权的概念^[25]。

李洪兴等^[17]对变权思想进行了细致全面的阐述,

度阈值。

1.2.3 合成运算的确定

合成运算(“ \circ ”)通常有 4 种可以用于模糊评判运算: $M(<, >)$ 、 $M(<, \oplus)$ 、 $M(<, \otimes)$ 。其中, $M(<, >)$ 常被用于主因素决定模式, “ $<$ ”表示在多个数中取小值, “ $>$ ”则相反, 该算子表示只有最大值和最小值起作用, 不考虑中间值的作用带来的计算影响, 仅适合于单项最优选择。 $M(<, \oplus)$ 、 $M(<, \otimes)$ 与 $M(<, >)$ 类似, 皆忽略次要因素的作用; 模糊综合评价选择 $M(<, \oplus)$ 进行评判运算^[36], 对所有指标都兼顾, 适用于整体评判模型, 称为乘积算子, 记为“ \circ ”。

2 工程实例

深圳市城市轨道交通三号线四期工程坪地停车场工

程区呈长方形, 长 1 100 m, 宽 220 m, 总用地 280 000 m², 实际红线用地 103 000 m²。停车场地基处理总面积 28 100m², 采用单层混凝土框架结构, 桩基础, 桩径 1 000 mm。停车场设计竖向承载力特征值约 10 200 kN。

根据工程实地勘察成果, 工点广泛揭露大理岩, 发育溶(土)洞。在本次勘察见可溶岩(大理岩)钻孔 245 个, 钻探及物探综合揭露到溶洞的钻孔有 177 个, 见洞率约 72.2%。本次共揭露溶洞 535 个, 累计洞高 1 293.1 m, 岩溶发育等级为强烈发育。

2.1 确定模糊矩阵

根据深圳地铁三号线坪地停车场桩基下岩溶顶板稳定性评价指标的实际评价价值, 代入各自对应的隶属度函数中进行计算, 根据结果按式(3)构造出模糊关系矩阵 R , 具体内容见表 5。

表 5 桩基下岩溶顶板稳定性评价模糊关系矩阵

Table 5 Fuzzy relationship matrix for the stability evaluation of karst roof of pile foundation

评价指标	实际评价价值	模糊关系矩阵				相对权重
		稳定	较稳定	较不稳定	不稳定	
顶板岩层厚度	43.2 m	1.00	0	0	0	0.318
裂隙发育情况	节理、裂隙只在大理岩中发育且胶结良好	0.50	0.30	0.15	0.05	0.103 1
岩石风化	中等风化	0.10	0.30	0.40	0.20	0.095 9
岩石单轴饱和抗压强度	34.40 MPa	0	0	0.25	0.75	0.389 6
岩石层状构造	中厚层岩石: 0.3 m±0.05 m	0.20	0.40	0.30	0.10	0.043 9
岩芯完整情况	87.65%	0.20	0.40	0.20	0.20	0.049 4
溶洞宽度	3.45 m	0	0	0.30	0.70	0.683 3
溶洞高度	3.07 m	0	0.17	0.83	0	0.199 8
溶洞充填情况	溶洞充填少量粉质黏土	0.15	0.20	0.35	0.30	0.116 8
桩长	23.2 m	0	0	0.25	0.75	0.250 0
基桩设计荷载	8 007 kN	0	0.10	0.90	0	0.750 0

2.2 确定指标权重

2.2.1 层次分析法确定常权权重

根据层次分析法的原理^[12], 对桩基下岩溶顶板稳定性评价指标做出以下层次划分:

目标层: 桩基下岩溶顶板稳定性评价(A)。

准则层: 顶板特征(B₁)、溶洞特征(B₂)、基桩特征(B₃)。

方案层: 顶板岩层厚度(C₁)、裂隙发育及充填情况(C₂)、岩石风化程度(C₃)、岩石单轴饱和抗压强度(C₄)、岩石层状构造(C₅)、岩芯完整情况(C₆)、溶洞高度(C₇)、溶洞宽度(C₈)、溶洞充填情况(C₉)、桩长(C₁₀)、基桩设计荷载(C₁₁)。

按 Saaty^[37] 提出的标度(1~9)及其倒数标度层次分析法确定常权方法下的各因素权重值, 具体计算结果见表 6—9。

对上述层次分析法计算结果和对应的一致性检验结果汇总于表 10。

2.2.2 变权理论确定变权权重

(1) 确定状态影响向量

按式(6), 确定状态影响向量(S_j)针对评价指标的评价价值较差时进行“惩罚”变权处理, 即当某个评价指标属于“不稳定”等级的隶属度大于 b_j 时进行变权处理。“惩罚”变权处理的目的是降低异常值对结果的

表 6 A-B 判断矩阵

Table 6 A-B judgment matrix

评价指标	判断矩阵				常权权重
	A	B ₁	B ₂	B ₃	
顶板特征	B ₁	1	1	2	0.4
溶洞特征	B ₂	1	1	2	0.4
基桩特征	B ₃	0.5	0.5	1	0.2

表 7 B_1 - C 判断矩阵
Table 7 B_1 - C judgment matrix

评价指标	判断矩阵							常权权重
	B_1	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	
顶板岩层厚度	C_1	1	4	6	0.5	4	7	0.318 0
裂隙发育及充填情况	C_2	0.25	1	1	0.25	3	3	0.103 1
岩石风化	C_3	0.166 7	1	1	0.2	3	3	0.095 9
岩石单轴饱和抗压强度	C_4	2	4	5	1	6	6	0.389 6
岩石层状构	C_5	0.25	0.333 3	0.333 3	0.166 7	1	0.5	0.043 9
岩芯完整程度	C_6	0.142 9	0.333 3	0.333 3	0.166 7	2	1	0.049 4

表 8 B_2 - C 判断矩阵
Table 8 B_2 - C judgment matrix

评价指标	判断矩阵				常权权重
	B_2	C_7	C_8	C_9	
溶洞宽度	C_7	1	4	5	0.683 3
溶洞高度	C_8	0.25	1	2	0.199 8
溶洞充填情况	C_9	0.2	0.5	1	0.116 8

表 9 B_3 - C 判断矩阵
Table 9 B_3 - C judgment matrix

评价指标	判断矩阵			常权权重
	B_3	C_{10}	C_{11}	
桩长	C_{10}	1	0.333 3	0.25
桩基设计荷载	C_{11}	3	1	0.75

影响,通过对异常值进行减权处理,减少对结果的贡献,从而提高数据分析的准确性和稳定性^[24]。为确定合适的 b_j 值,基于调权水平、离散度、调节度等概念对

表 11 不同隶属度阈值及其调权水平表

Table 11 Different affiliation thresholds and their level of weighting

b_j 值	0	0.2	0.2	0.4	0.6	0.8	1
调权水平	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21	0.24	0.27
稳定性评价结果	稳定	较稳定	较稳定	较不稳定	不稳定	不稳定	不稳定

根据表 5 可知,岩石单轴饱和抗压强度、溶洞宽度、桩长等 3 项属“不稳定”评价等级的隶属度分别为 0.75, 0.70, 0.75, 大于规定的隶属度阈值 0.6, 需进行变权处理。

(2) 确定变权权重

根据式(5)(6),得到了岩溶桩基顶板稳定性综合评价模型的变权权重(表 12)。

(3) 二级模糊综合评价

变权下的一级评价:基于变权理论的一级模糊综合评价矩阵见表 13。

变权下的二级评价:根据一级评价指标综合运算的结果,构建二级模糊评价矩阵 B :

表 10 层次分析法结果

Table 10 Analytic hierarchy results

排序层	H	λ_{max}	C.I	C.R
$A-B$	[0.4, 0.4, 0.2]	3	0	0
B_1-C	[0.318, 0.103 1, 0.095 9, 0.389 6, 0.043 9, 0.049 4]	6.557 4	0.071 82	0.057
B_2-C	[0.683 3, 0.199 8, 0.116 8]	3	0.008 2	0.015 769
B_3-C	[0.25, 0.75]	2	0	0

S_j 进行确定^[38-39],设置 7 个模拟方案,得出不同方案的调权水平及相应的桩基下岩溶顶板稳定性评价模拟结果(表 11)。随着 b_j 值变大,低于阈值的指标受到的“惩罚”越重,但 b_j 趋近于 1 会造成式(6)无实际意义; b_j 值越小,受到的“惩罚”越轻,甚至当 b_j 值接近于 0,评价结果与实际情况完全相反,出现“惩罚不足”。因此,经过分析,调权水平为 0.21, b_j 值为 0.6 时,变权评价效果良好,客观地反映了桩基下岩溶顶板稳定性状况。设定为 $b_j = 0.6 (j = 1, 2, \dots, m)$ 。

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.381 5, 0.078 4, 0.175 4, 0.361 0 \\ 0.015 3, 0.048 6, 0.387 5, 0.530 5 \\ 0.00, 0.692 5, 0.700 2, 0.230 7 \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据二级评价指标的变权权重值,可得桩基下岩溶顶板稳定性二级模糊综合评价矩阵。

$$A = H \circ B = [0.4, 0.4, 0.2] \circ$$

$$\begin{bmatrix} 0.381 5, 0.078 4, 0.175 4, 0.361 0 \\ 0.015 3, 0.048 6, 0.387 5, 0.530 5 \\ 0, 0.692 5, 0.700 2, 0.230 7 \end{bmatrix} = [0.158 7, 0.189 3, 0.365 2, 0.402 7] \quad (8)$$

根据最大隶属度原则,变权理论下深圳地铁三号线停车场桩基下岩溶顶板稳定性评价为“不稳定”。

表 12 桩基下岩溶顶板稳定性评价指标变权权重

Table 12 Variable weighting of pile foundation karst top stability evaluation index

评价指标	模糊关系矩阵				相对权重	变权权重
	稳定	较稳定	较不稳定	不稳定		
顶板岩层厚度	1.00	0	0	0	0.318 0	0.318 0
裂隙发育及充填情况	0.50	0.30	0.15	0.05	0.103 1	0.082 2
岩石风化	0.10	0.30	0.40	0.20	0.095 9	0.089 2
岩石单轴饱和抗压强度	0	0	0.25	0.75	0.389 6	0.443 2
岩石层状构	0.20	0.40	0.30	0.10	0.043 9	0.031 1
岩芯完整情况	0.20	0.40	0.20	0.20	0.049 4	0.036 3
溶洞宽度	0	0	0.30	0.70	0.683 3	0.714 0
溶洞高度	0	0.17	0.83	0	0.199 8	0.165 7
溶洞充填情况	0.15	0.20	0.35	0.30	0.116 8	0.102 3
桩长	0	0	0.25	0.75	0.250 0	0.307 6
桩基设计荷载	0	0.10	0.90	0	0.750 0	0.692 5

表 13 基于变权理论的一级模糊综合评判矩阵

Table 13 One-level fuzzy comprehensive judgment matrix based on variable weight theory

一级评价指标	模糊综合评判矩阵			
	稳定	较稳定	较不稳定	不稳定
顶板特征	0.381 5	0.078 4	0.175 4	0.361 0
溶洞特征	0.015 3	0.048 6	0.387 5	0.530 5
桩基特征	0	0.069 25	0.700 2	0.230 7

(4) 常权结果对比分析

为更直观和清晰的验证模糊变权理论在桩基下岩溶顶板的稳定性评价中的可行性与合理性, 将引入常权值的模糊综合评价法进行对比, 并于工程场地的真实情况进行对比分析。

引入常权权重的模糊综合计算结果如下:

① 常权下的一级评价矩阵见表 14。

表 14 基于常权理论的一级模糊综合评判矩阵

Table 14 One-level fuzzy comprehensive judgment matrix based on constant power theory

一级评价指标	模糊综合评判矩阵			
	稳定	较稳定	较不稳定	不稳定
顶板特征 u_1	0.397 8	0.097 0	0.174 3	0.326 2
溶洞特征 u_2	0.017 5	0.057 3	0.411 7	0.513 4
桩基特征 u_3	0	0.075 0	0.737 5	0.187 5

② 常权下的二级评价:

$$B' = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.397 8, 0.097 0, 0.174 3, 0.326 2 \\ 0.017 5, 0.057 3, 0.411 7, 0.513 4 \\ 0, 0.075 0, 0.737 5, 0.187 5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由表 12 取得二级评价指标的常权权重值, 通过计算可得桩基下岩溶顶板稳定性二级模糊综合评价矩阵。

$$A' = H \circ B = [0.4, 0.4, 0.2] \circ$$

$$\begin{bmatrix} 0.397 8, 0.097 0, 0.174 3, 0.326 2 \\ 0.017 5, 0.057 3, 0.411 7, 0.513 4 \\ 0.00, 0.075, 0.737 5, 0.187 5 \end{bmatrix} = [0.166 1, 0.076 7, 0.381 9, 0.373 3] \quad (10)$$

根据最大隶属度原则, 常权理论下深圳某坪地停车场桩基下岩溶顶板稳定性评价为“较不稳定”。

将不同权值所确定的稳定性等级隶属度进行对比, 如图 3 所示。

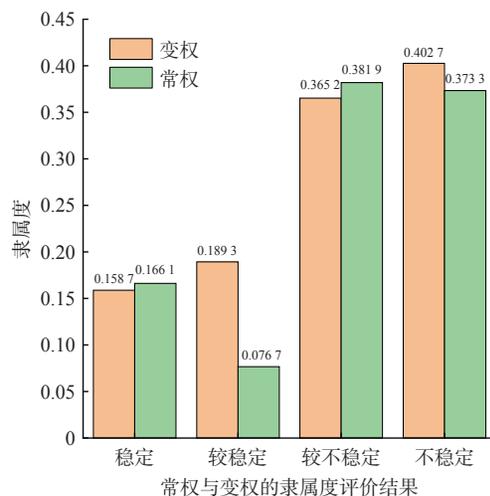


图 3 Results of the affiliation evaluation of constant and variable weights

常权权重和变权权重所算出的评价结果并不完全相同, 变权方法中的“较不稳定”评价等级隶属度为 0.366 2, 比常权方法降低了 4%; “不稳定”评价等级隶属度为 0.402 7, 比常权方法增长了 7.3%。表明变权方法通过放大不稳定指标的影响, 能直接导致评价结果

的改变,同时证明常权方法中会出现不稳定评价指标中和和其他稳定指标的情况。出现这种情况的原因如下:①权重分配差异:变权模糊综合评判中,不同的指标因子在评价系统中的各个阶段被赋予不同的权重,以反映它们在评价对象中的相对重要性。而常权模糊综合评判中,所有的指标因子在系统运作过程中权重不变,即假设它们在评价对象中的重要性是相同的。即会出现常权稳定性模糊综合评价中会出现“不稳定”指标中和“稳定”指标的情况^[20],从而引起评价结果的不同。②评价方法理论不同,变权综合评价方法不仅考虑各个指标因子的相对重要性(即权重),还考虑了各个指标因子在不同状态下对评价目标的影响程度。因此,在变权综合评价中,权重不仅反映指标因子的重要性,还体现了指标因子状态对于评价结果的影响程度。这两方面的作用同时体现在可变的权重之中^[27],造成其与常权综合评判方法结果存在差异。

根据场地工程详勘报告,拟建场地上部地基土层包括第四系全新统人工填土层、第四系全新统冲洪积层和第四系残积层,其工程性状差异大,承载能力不一。浅部地基土体为不均匀地基,稳定性差。下伏基岩为石炭系石磴子组大理岩,大理岩岩溶发育强烈,整体稳定性及均匀性较差。可以表明,采用变权理论下的“不稳定”评价与实际情况完全吻合,突显模型构建的合理性和可行性,同时规避了传统单一评价方法的局限。相关结论应引起工程设计人员的高度关注,以预防和治理顶板失稳事故的发生。

3 结论

(1)采用故障树分析模型,逐级筛选出对桩基下岩溶顶板稳定性起关键作用的因素作为评价指标,能系统地评估潜在失效因素,全面理解稳定性问题,从而弥补评价体系的不全面性,提高评价的准确性和可靠性。

(2)以深圳市地铁三号线岩溶发育区停车场桩基工程为例,分别采用变权理论模糊综合评价方法与常权理论模糊综合评价方法对桩基下岩溶顶板稳定性进行评价,结果表明,变权模型下评价结果为“不稳定”,常权模型下评价结果为“较不稳定”。变权评价模型相对于常权评价模型,“不稳定”评价等级隶属度上升了7.3%,与实际情况完全吻合,反映出变权模型相对于常权模型具有更高准确性。

(3)引入的变权模型方法通过“惩罚”变权的手段,可以避免常权计算中由于权重恒定不变出现的评价指标值出现极值和突变最终导致评价结果不准确的问题。

(4)为进一步提高评价结果的合理性、实用性和经济性,未来的研究将考虑地下水、群桩效应、施工影响等相关因素对桩基下岩溶顶板稳定性的影响。

参考文献 (References) :

- [1] 刘之葵,梁金城,朱寿增,等.岩溶区含溶洞岩石地基稳定性分析[J].岩土工程学报,2003,25(5):629-633. [LIU Zhikui, LIANG Jincheng, ZHU Shouzheng, et al. Stability analysis of rock foundation with cave in Karst Area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 629 - 633. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李超鹏.隧道岩溶塌陷的超前地质预报研究及防治对策[D].湘潭:湖南科技大学,2016. [LI Chaopeng. A study on advanced geological forecast techniques for tunnel Karst collapse and corresponding solutions[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 蒋德松.岩溶区路基稳定性分析及处治方法研究[D].长沙:湖南大学,2019. [JIANG Desong. Study on stability analysis and treatment method of subgrade in Karst areas[D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 龚晓南.桩基工程手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2016. [GONG Xiaonan. Handbook of pile foundation engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)]
- [5] 姜巽,曹聪,刘智,等.歌乐山地区隧道工程诱发的岩溶塌陷发育规律与形成条件[J].水文地质工程地质,2023,50(5):181-191. [JIANG Xun, CAO Cong, LIU Zhi, et al. Development and formation conditions of Karst collapse induced by tunnel engineering in the Gele Mountain Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 181 - 191. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 黄波林,殷跃平,李滨,等.三峡工程库区岩溶岸坡岩体劣化及其灾变效应[J].水文地质工程地质,2020,47(4):51-61. [HUANG Bolin, YIN Yueping, LI Bin, et al. Rock mass deterioration and its catastrophic effect of Karst bank slope in the Three Gorges Project Reservoir Area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 51 - 61. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 周长松,邹胜章,朱丹尼,等.广昆铁路复线秀宁隧道大皮坡一中村段岩溶塌陷成因[J].水文地质工程地质,2019,46(3):146-152. [ZHOU Changsong, ZOU Shengzhang, ZHU Danni, et al. An analysis of the cause of Karst collapses near the Dapipo-Zhongcun section of the Xiuning tunnel of the Guangzhou-Kunming railway[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3):

- 146 – 152. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 何清雨. 南宁地铁某区间岩溶发育机制及溶洞处理成套技术 [D]. 南京: 南京大学, 2019. [HE Qingyu. Karst development mechanism and complete technology of Karst cave treatment in a section of Nanning subway[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 蒋毅, 王罡, 任晓光, 等. 深圳某基坑工程岩溶地基处理案例分析 [J]. 工业建筑, 2022, 52(7): 204 – 207. [JIANG Yi, WANG Gang, REN Xiaoguang, et al. Case study of Karst foundation treatment for a foundation pit project in Shenzhen[J]. Industrial Construction, 2022, 52(7): 204 – 207. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 甘峻松. 岩溶地基及其处理 [J]. 勘察科学技术, 1986(5): 35 – 40. [GAN Junsong. Karst foundation and its treatment[J]. Site Investigation Science and Technology, 1986(5): 35 – 40. (in Chinese)]
- [11] 赵明华, 袁腾方, 黎莉, 等. 岩溶区桩端持力岩层安全厚度计算研究 [J]. 公路, 2003, 48(1): 124 – 128. [ZHAO Minghua, YUAN Tengfang, LI Li, et al. Computation study on safety thickness of bearing rock strata at ends of piles in Karst region[J]. Highway, 2003, 48(1): 124 – 128. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 蒋继昭. 南(宁)柳(州)高速公路洛维大桥桩基岩溶问题 [J]. 广西交通科技, 1998, 23(3): 22 – 23. [JIANG Jizhao. Karst problem of pile foundation of Luowei Bridge on Nanning-Liuzhou Expressway[J]. Guangxi Communication Science and Technology, 1998, 23(3): 22 – 23. (in Chinese)]
- [13] 黄伯瑜. 岩溶地基的稳定性评价与工程处理 [J]. 勘察科学技术, 1988(3): 1 – 6. [HUANG Boyu. Stability evaluation and engineering treatment of Karst foundation[J]. Site Investigation Science and Technology, 1988(3): 1 – 6. (in Chinese)]
- [14] 彭柏兴. 利用卸荷拱理论对地基中防空洞进行评价和处理 [J]. 勘察科学技术, 1999(6): 25 – 27. [PENG Baixing. Applying the unloading arch theory to assess and treat the air - raid shelter in foundation soil[J]. Site Investigation Science and Technology, 1999(6): 25 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张建同, 陈顺军, 刘素梅, 等. 隐伏岩溶条件下的上部结构-基础-地基共同作用数值模拟分析 [J]. 中国岩溶, 2018, 37(5): 792 – 798. [ZHANG Jiantong, CHEN Shunjun, LIU Sumei, et al. Numerical simulation analysis of interaction of superstructure-foundation-pile foundation under hidden Karst condition[J]. Carsologica Sinica, 2018, 37(5): 792 – 798. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 曹文贵, 程晔, 袁腾芳, 等. 潭邵高速公路路基岩溶顶板稳定性二级模糊综合评判 [J]. 公路, 2003, 48(1): 13 – 16. [CAO Wengui, CHENG Ye, YUAN Tengfang, et al. Secondary fuzzy comprehensive evaluation on stability of subgrade Karst top slab for Tan-Shao expressway[J]. Highway, 2003, 48(1): 13 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架 (I)——因素空间的公理化定义与描述架 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 1996, 32(4): 151 – 157. [LI Hongxing. Theory of factor space and mathematical framework of knowledge representation (I): Axiomatic definition and description frame of factor space[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 1996, 32(4): 151 – 157. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 陈宏峰, 张发旺, 何愿, 等. 地质与地貌条件对岩溶系统的控制与指示 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(5): 42 – 47. [CHEN Hongfeng, ZHANG Fawang, HE Yuan, et al. Geological and geomorphologic settings acting as the controlling factors and indicators for Karst systems[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(5): 42 – 47. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 曹禄来, 徐林荣, 陈舒阳, 等. 基于模糊神经网络的泥石流危险性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 143 – 147. [CAO Lulai, XU Linrong, CHEN Shuyang, et al. Assessment of debris flow hazard based on Fuzzy Neural Network[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 143 – 147. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 张帆, 黄世泽, 郭其一, 等. 基于故障树分析法的道岔故障诊断与可靠性评估方法 [J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(10): 52 – 56. [ZHANG Fan, HUANG Shize, GUO Qiyi, et al. Research on turnout fault diagnosis and reliability assessment technology based on fault tree analysis[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(10): 52 – 56. (in Chinese with English abstract)]
- [21] AHMAD KHAN A, YU Rongrong, GU Ning, et al. Exploring critical risk factors in volumetric modular construction: Fault tree analysis with stakeholders' perspectives on probability and impact[J]. Journal of Architectural Engineering, 2023, 29(4).
- [22] 秦溯, 李云安, 孙琳. 基于区间非概率可靠性方法的岩溶区桩基下溶洞顶板稳定性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(5): 81 – 88. [QIN Su, LI Yun'an, SUN Lin. Stability evaluation of Karst cave roof under pile in Karst areas based on the interval non-probabilistic reliability method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(5): 81 – 88. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 张晓波, 刘凯, 蒋鹏, 等. 基于约束条件的深圳市南山区地下空间开发地质适宜性评价 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 213 – 224. [ZHANG Xiaobo, LIU

- Kai, JIANG Peng, et al. Geological suitability evaluation of underground space development in the Nanshan District of Shenzhen based on constraint conditions[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(4): 213 – 224. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 陈泽彭. 基于模糊变权理论的矿井通风系统健康评价研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022. [CHEN Zepeng. Research on health evaluation of mine ventilation system based on fuzzy variable weight theory[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 何建东, 张亚, 梁谊. 变权模糊模型在黄土高边坡稳定性评价中的应用 [J]. *西北水电*, 2020(3): 41 – 45. [HE Jiandong, ZHANG Ya, LIANG Yi. Application of variable weight fuzzy model in stability evaluation of loess high slope[J]. *Northwest Hydropower*, 2020(3): 41 – 45. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 吴俐滢, 杨涛远, 翁顺, 等. 基于综合层次分析法的赣江特大桥安全评估 [J]. *土木工程与管理学报*, 2022, 39(2): 133 – 140. [WU Liying, YANG Taoyuan, WENG Shun, et al. Safety assessment of Ganjiang bridge of Chang Gan railway based on comprehensive analytic hierarchy process[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2022, 39(2): 133 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 中华人民共和国建设部. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. [Ministry of Construction of the People’s Republic of China. Technical code for building pile foundations: JGJ 94—2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese)]
- [28] 中华人民共和国建设部、国家质量监督检验检疫总局. 建筑地基基础工程施工质量验收规范: GB 50202—2002[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China. Code for acceptance of construction quality of building foundation: GB 50202—2002[S]. Beijing: China Planning Press, 2004. (in Chinese)]
- [29] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. *模糊系统与数学*, 2000, 14(2): 80 – 88. [ZHANG Jijun. Fuzzy analytical hierarchy process[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2000, 14(2): 80 – 88. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 梁乃森, 钱程, 穆文平, 等. 大牛地气田区地下水水质模糊综合评价 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(3): 52 – 59. [LIANG Naisen, QIAN Cheng, MU Wenping, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality of the Daniudi gas field area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(3): 52 – 59. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 袁道先. 中国岩溶学 [M]. 北京: 地质出版社, 1994. [YUAN Daoxian. Karst science in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese)]
- [32] 中国科学院地质研究所岩溶研究组. 中国岩溶研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1979. [Karst Research Group, Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. Karst research in China[M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)]
- [33] PALMSTROM A. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD) [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20(4): 362 – 377.
- [34] 赵明华, 程晔, 曹文贵. 桥梁基桩桩端溶洞顶板稳定性的模糊分析研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(8): 1376 – 1383. [ZHAO Minghua, CHENG Ye, CAO Wengui. Fuzzy method for the stability analysis of cave roof under pile tip in Karst Region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(8): 1376 – 1383. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 马赞甫, 刘妍珺. 回归分析中最小样本容量的确定 [J]. *统计与决策*, 2017(5): 20 – 22. [MA Zanfu, LIU Yanjun. The determination of the minimum sample size in the regression analysis[J]. *Statistics & Decision*, 2017(5): 20 – 22. (in Chinese with English abstract)]
- [36] DUBOIS D J, PRADE H M. Fuzzy sets and systems: theory and applications[M]. New York: Academic Press, 1980.
- [37] SAATY T L. The analytic hierarchy process: planning, setting priorities, resource allocation[M]. New York: McGraw-Hill International Book Co., 1980.
- [38] 张晶晶, 马传明, 匡恒, 等. 郑州市地下空间开发地质环境适宜性变权评价 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(2): 118 – 125. [ZHANG Jingjing, MA Chuanming, KUANG Heng, et al. Geo-environmental suitability assessment with variable weight for underground space exploitation in Zhengzhou[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2): 118 – 125. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 李德清, 李洪兴. 变权决策中变权效果分析与状态变权向量的确定 [J]. *控制与决策*, 2004, 19(11): 1241 – 1245. [LI Deqing, LI Hongxing. Analysis of variable weights effect and selection of appropriate state variable weights vector in decision making[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(11): 1241 – 1245. (in Chinese with English abstract)]