

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221465

基于多因子遴选和灰色聚类矢量投影法的 隧洞塌方风险评价方法及应用

张建明^{a,b}, 侍克斌^{a,b}, 善鸿泽^a, 石仁义^a, 符涛^a, 卢志鹏^a

(新疆农业大学 a. 水利与土木工程学院; b. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 由于隧洞塌方风险评价涉及众多模糊因素且评价方法复杂,因而造就了评价体系构成灰色体系、评价方法适用性不高、难以准确评估隧洞塌方风险等级的问题。基于此,运用灰色系统基本思想及矢量投影原理,提出了一套基于灰色矢量投影法的隧洞塌方风险评价模型,在综合分析复杂地层条件下隧洞塌方的影响因素基础上,采取顾及到决策者观点差异程度的群层次分析法(GAHP)对预选评价指标体系进行降维遴选,继而根据综合决策权重系数遴选出能够充分反映塌方机理迥异、具有代表性和区分度高的13个优选评价指标,在此基础上建立隧洞塌方风险优选评价指标体系;此外,引入灰色群组聚类(GGC)和反熵权法(AEW)分别确定主、客观单层次排序权重;利用改进博弈论组合赋权(ICWGT)获得最佳综合权重分配系数,确定指标总层次排序权重;最后根据此模型对隧洞塌方风险进行评估验证。研究结果表明,隧洞塌方风险评价等级与实际开挖情况吻合度较高,验证了该模型的可靠性及准确性。

关键词: 隧洞塌方; 风险评价; 灰关联投影; 指标遴选; 灰色群组聚类; 改进博弈论组合赋权

中图分类号: TV554; U458.3; X947

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)05-0121-05

1 引言

隧道塌方为隧道工程中极为常见的地质灾害,尤其深埋超特长输水隧洞地质条件极其复杂,发生塌方事故的概率极大,因此精准评估隧洞塌方风险是亟待解决的重要问题。近年来对隧洞风险评估模型进行了大量研究,如有功效系数法、贝叶斯网络与故障树分析相结合、突变理论模型、属性识别模型,风险矩阵法、可拓综合评价模型、人工神经网络、可拓云模型等,但这些方法均有局限性,在隧洞塌方风险等级评估中,由于塌方风险等级与评价指标呈现出高度的非线性、评价等级界限存在随机性、评价因子不完全及专家赋权主观性强等特点,使塌方风险评价存在极大的模糊性和不确定性,因此造就了塌方风险评价构成灰色系统,但目前已有的评估方法并未将此灰色系统考虑在内。鉴此,本文提出了一套基于灰色系统理论及矢量投影原理相结合的灰色矢量投影模型,可统一描述在模糊复杂环境下的系统决策,实

现多因素向标准量化的精确投影转化,可有效解决目前隧洞塌方评估中存在的不足,为隧洞塌方风险评价提供了新思路。

2 基于多因子遴选和灰色聚类矢量投影法的隧洞塌方风险评价方法

2.1 构建评价指标体系

2.1.1 预选指标体系

隧洞塌方通常包含工程地质及自然因素、不良地质及水文地质因素、设计因素、地质预报及爆破、施工因素和人员管理6个一级指标和15个二级指标,见图1。

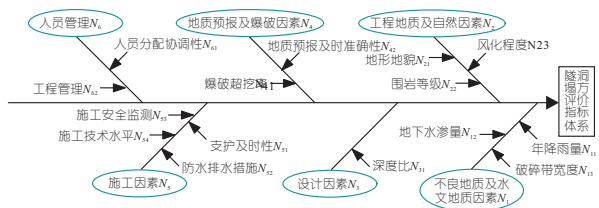


图1 隧洞塌方预选指标体系鱼骨图

Fig. 1 Fishbone diagram of tunnel collapse pre-selection index system

收稿日期: 2022-07-13, 修回日期: 2022-08-10

基金项目: “新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室”2022年研究项目(ZDSYS-YJS-2022-08)

作者简介: 张建明(1999-),男,硕士研究生,研究方向为超隧洞施工规划理论与技术, E-mail: zjmchnxj@163.com

通讯作者: 侍克斌(1957-),男,博士、教授、博导,研究方向为水利工程, E-mail: xndsg@sina.com

由于细微且全方位地分析影响隧洞塌方的因素难度较大,同时还需考虑指标数据获取的难易性问题。指标体系数量过多,还易造成状态空间维数增加、分析数据繁琐、计算量庞杂及部分指标不易量化等问题,因此需对预选指标体系进行降维选择,建立隧洞塌方优选指标体系。

2.1.2 基于 GAHP 指标优选

设有 m 个评价指标,利用 Saaty 标度基准作为各指标之间的对比标准,并由 AHP 得各判断矩阵的权重向量 $O = (o_1, o_2, \dots, o_m)$,第 b, q 两位决策者之间相似度 d_{bq} 采用欧氏距离表征。

假定利用 d_u 表示第 u 个决策者同剩余所有决策者间的相似度,则 d_u 及第 u 个决策者的综合决策权重系数 ϑ_u 可表示为:

$$\vartheta_u = \begin{cases} 1/K & d_u = 0 \\ \left(d_u \sum_{k=1}^K \frac{1}{d_u}\right)^{-1} & d_u \neq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $d_u = \sum_{k=1}^K d_{uk}$

式中, K 为决策者数量; d_u 为第 u 个决策者同其他决策者的相似度; d_{uk} 为第 u 个决策者同第 k 个决策者间的相似度。

由式(1)可看出, d_u 与 ϑ_u 呈负相关,且 d_u 越大,则表征该决策者同其他决策者间的意见差异越大,反之差异则越小。

指标综合权重向量 O^* 可表示为:

$$O^* = (o_1^*, o_2^*, \dots, o_m^*) = \sum_{u=1}^K \vartheta_u O^u \quad (2)$$

式中, ϑ_u 为第 u 个决策者的综合决策权重系数; O^u 为第 u 个决策者的权重向量。

2.1.3 确定优选指标

以 Saaty 标度作为基准,邀请 5 位决策者对预选指标进行两两比较并构建判断矩阵。继而基于 GAHP 指标优选,求解各决策者判断矩阵的权重向量、综合决策权重系数,最终得到一级指标综合权重向量 $O^* = (0.392\ 2, 0.235\ 6, 0.077\ 3, 0.155\ 0, 0.095\ 9, 0.043\ 9)$ 。选取权重较大的工程地质及自然因素、不良地质及水文地质因素、设计因素、地质预报及爆破、施工因素 5 个一级指标作为最终优选指标。

2.1.4 风险等级划分及建立优选指标体系

为使隧洞塌方风险评价结果更加精确,将隧洞塌方风险评价划分为五个标准,见表 1。由于评价指标等级划分存在一定的模糊性,因此采用纵坐标为隶属度的云图来表征定量指标等级区间划分的关系,隶属度越接近 1 时,隶属于相应评价

等级的倾向越高,态势越明显,否则越低,见图 2,定性指标各等级下的状态描述及赋值见表 2。

表 1 各评价等级下的施工状态
Tab. 1 Onstruction status at each evaluation level

风险等级	施工状态
I	风险极低,正常施工,无需采取相关处理措施。
II	风险低,可不采取处理措施,但需加强日常检测。
III	风险在可接受范围内,对潜在隐患需采取适当措施进行处理。
IV	风险超出预期,需引起重视,并采取一定的处理措施。
V	风险极高,需不惜成本的采取相关必要措施将风险降至理想等级。

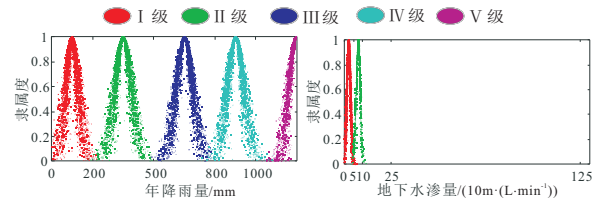


图 2 优选定量指标等级划分云图

Fig. 2 Preferably quantitative index grading cloud ma

表 2 优选定性指标各等级划分表

Tab. 2 Preferably the qualitative index classification table

指标	指标编号	等级				
		I	II	III	IV	V
地形地貌	N_{21}	无影响	影响小	影响一般	影响大	影响极大
围岩等级	N_{22}	I	II	III	IV	V
风化程度	N_{23}	新鲜	弱风化	中度风化	强风化	完全风化
防水排水措施	N_{52}	防水排水措施设计完全合理,完全满足日常防水排水	防水排水措施设计合理,水排水较通畅	防水排水措施设计一般,水排水功能一般	防水排水措施设计较不合理,防水排水功能弱	防水排水措施设计不合理,无防水排水功能
施工技术水平	N_{54}	极好	好	一般	差	极差
定性指标各等级赋值		>0.8	0.8~0.6	0.6~0.4	0.2~0.4	<0.2

2.2 构建基于灰色矢量投影法的隧洞塌方风险评价模型

2.2.1 灰关联投影模型

灰色矢量投影法是一种将灰色系统理论与矢量投影原理相结合的多目标系统决策方法,可在模糊复杂的系统决策中发挥效果可观的作用^[1],

主要计算步骤如下。

步骤 1 设 m 个评价指标与 $n+1$ 个样本(包括理想样本 C_0)构成样本矩阵 C ,若隧洞塌方风险等级由低到高依次可分为(1 级, 2 级, ..., z 级),则评价标准矩阵 $G=(G_{it})_{m \times z}$ 。同时设 1 级风险对应元素为 1,则 z 级为 0。根据样本与理想级别之间的关联度 r_{ij} ,可构建样本灰关联度判断矩阵 $F=(r_{ij})_{m \times (n+1)}=(F_{ij})_{m \times (n+1)}$,同理可构建评价标准灰关联度判断矩阵。

步骤 2 若将各样本视为各自的独立向量,则称样本 C_j 与理想样本 C_0 间的夹角 θ_j 为灰关联投影角,假设各指标权重为 σ_i ,建立加权向量 $Q=(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m)^T$,则待评样本在理想样本上的投影角 θ_j 满足下式:

$$C_{\cos\theta_j} = r_j = \frac{(C_j, C_0)}{|C_j| |C_0|} = \frac{\sum_{i=1}^m \sigma_i F_{ij} \sigma_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (\sigma_i F_{ij})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2}} \quad (3)$$

式中, F_{ij} 为第 j 个样本中第 i 个指标的灰关联度。

步骤 3 可将样本 C_j 的模记为 d_j ,则评价样本 C_j 的灰关联投影值 Y_{B_j} 为:

$$Y_{B_j} = \sum_{j=1}^m F_{ij} \left(\sigma_i \sqrt{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2} \right) \quad (4)$$

令 $\tilde{\sigma}=(\tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_2, \dots, \tilde{\sigma}_m)^T$ 为灰关联投影权值向量,最终可得到样本灰关联投影值向量 Y_B 及评价标准灰关联投影值向量 D_B 。将样本矩阵与评价标准矩阵通过相同的计算法则向同一评价标准进行投影,故可使各级风险标准所对应的投影值 $D_{B_t} (t=1, 2, \dots, z)$ 作为隧洞塌方风险评价划分的标准。即当 $Y_{B_j} = D_{B_1} = Y_{B_0}$ 时评价样本风险等级为 1 级; $D_{B_t} \leq Y_{B_j} < D_{B_{t-1}}$ 时,评价样本风险等级为 t 级; $Y_{B_j} = D_{B_z}$ 时,评价样本风险等级劣于 z 级,根据此法则可确定各评价样本所隶属的风险等级。

2.2.2 确定权重值

(1)GGC 主观赋权。假设在给定的评价准则下,邀请 n 个专家评估 m 个评价指标,可得到判断矩阵 $A=(a_{ij})_{m \times m}$,进一步对判断矩阵 A 进行归一化处理,可获得评价指标的排序向量 $L^k=(l_1^k, l_2^k, \dots, l_m^k)^T$ 。根据各决策者的个人排序向量,通过汇总可得排序矩阵 R 。决策者 i, j 的排序向量 L^i, L^j 采用灰关联度 e_{ij} 进行衡量,故 L^i, L^j 的灰关联度 e_{ij} 可表示为:

$$e_{ij} = \frac{1 + |s_i| + |s_j|}{1 + |s_i| + |s_j| + |s_i - s_j|} \quad (5)$$

$$\text{其中 } |s_i| = \left| \sum_{u=2}^{m-1} l_u^i + \frac{1}{2} l_m^i \right|$$

$$|s_i - s_j| = \left| \sum_{u=2}^{m-1} (l_u^i - l_u^j) + \frac{1}{2} (l_m^i - l_m^j) \right|$$

式中, s_i, s_j 分别为计算第 i, j 决策者间的 e_{ij} 中间参数; l_u^i, l_u^j 分别为第 i, j 个决策者对第 u 个指标的评分权重; l_m^i, l_m^j 分别为第 i, j 个决策者对第 m 个指标的评分权重。

根据决策者群灰关联矩阵 E ,取定阈值 $\delta \in [0, 1]$,选取的阈值 δ 离 1 越近,则决策者群组的划分越细致。当 $e_{ij} \geq \delta (i \neq j)$,则可判定 L^i, L^j 拥有类似判别性质,即认为决策者 i, j 可聚为一类。若 k 位决策者被划分为 P 类,某一类中包含 χ_p 位决策者,则决策者 k 所在类 P 的类间权重为 ϵ_p 。最后,依据决策者群组中决策者 k 的排序向量所蕴含的信息熵 $H(k)$ 及所在类的类内权重 ϕ_{pk} ,可获得决策者权重 ϕ_k 及评价指标权重 $\bar{\omega}_i$:

$$\begin{cases} \phi_k = \epsilon_p \phi_{pk} \\ \bar{\omega}_i = \sum_{k=1}^K l_i^k \phi_k \end{cases} \quad (6)$$

式中, ϵ_p 为决策者所在类 p 的类间权重; ϕ_{pk} 为决策者 k 的所在类 p 的类内权重; l_i^k 为第 k 个决策者对第 i 个指标的评分权重。

(2)AEW 客观赋权。熵权法赋权时易出现指标无序程度(表征所蕴含的信息量)敏感性过强的问题,从而导致出现极端权重的情况^[2],对此,可采用改进的反熵权法(AEW)进行客观赋权。

(3)ICWGT 组合赋权。传统博弈论组合赋权过分依赖线性组合系数,且线性组合系数可能出现负数,因此需改进博弈论组合赋权模型。为确保线性组合系数不出现负数,依据矩阵微分性质可优化对策模型:

$$f = \min_{a_1, a_2, \dots, a_g} \sum_{i=1}^g \left| \left(\sum_{i=1}^g a_i \omega_i \omega_i^T \right) - \omega_i \omega_i^T \right| \quad (7)$$

式中, a_i 为线性组合系数; ω_l, ω_i 分别为第 l, i 种赋权方法得到的权重; ω_l^T 为第 l 个赋权方法得到权重向量的转置权重向量。

改进博弈论组合赋权模型综合权重系数 a_i^* 计算公式为:

$$a_i^* = \sum_{i=1}^L \omega_i \omega_i^T / \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^L \omega_l \omega_l^T \quad (8)$$

3 应用

3.1 工程概况

为验证基于多因子遴选和灰色聚类矢量投影

法的隧洞塌方评价方法的合理性及可行性,以国内五个采用钻爆法施工的隧道进行塌方评价,各隧道评价指标的参数取自文献[3],具体数值见表 3。

表 3 工程数据

Tab. 3 Engineering data

隧道 样本	N_{11} /mm	N_{12} /(10m·(L·min ⁻¹))	N_{13}/m	N_{21}	N_{22}	N_{23}	N_{31}	$N_{41}/\%$	$N_{42}/\%$	N_{51}/min	N_{52}	N_{53}	N_{54}
1	1 200	8	22.5	0.6	0.2	0.8	24.5	7	92	100	0.6	4	0.5
2	1 600	15	32	0.4	0.2	0.4	22.0	9	66	120	0.4	4	0.3
3	1 500	55	40	0.2	0.2	0.4	25.6	9	70	100	0.2	4	0.3
4	1 500	130	7	0.2	0.6	0.8	36.0	6	60	150	0.8	2	0.3
5	1 200	150	15	0.2	0.4	0.4	35.0	7	75	150	1.0	0	0.1

根据专家对评价指标的偏好信息,对水文地质及不良地质、工程地质及自然地质、设计因素、爆破及超前地质预报、施工因素 5 个一级指标进行评价,得灰关联矩阵为:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0.9965 & 0.9496 & 0.9516 & 0.9489 \\ & 1 & 0.9528 & 0.9548 & 0.9457 \\ & & 1 & 0.9978 & 0.9036 \\ & & & 1 & 0.9054 \\ & & & & 1 \end{bmatrix}$$

选取阈值 $\delta = 0.99$,故可将决策者 1、2、3、4 聚为一类,决策者 5 聚为一类,即表示为 $\{(1,2,3,4), (5)\}$ 。进一步得出类间权重 $\epsilon_1 = 0.94, \epsilon_2 = 0.06$ 。继而得类内权重 $\psi_{11} = 0.1874, \psi_{12} = 0.2264, \psi_{13} = 0.2969, \psi_{14} = 0.2893, \psi_{21} = 1$ 。故得出一级指标主观权重 $\bar{\omega}_1 = 0.4418, \bar{\omega}_2 = 0.2394, \bar{\omega}_3 = 0.1526, \bar{\omega}_4 = 0.0984, \bar{\omega}_5 = 0.0678$ 。二级指标计算方法同一级指标一致,最终计算得各指标综合主观权重 $\bar{\omega}_i = (0.1528, 0.1271, 0.1619, 0.0330, 0.1086, 0.0979, 0.1526, 0.0354, 0.0630, 0.0343, 0.0070, 0.0143, 0.0122)$ 。

(2)客观权重。基于 AEW 客观赋权,得出各指标的反熵值 $h_i^1 = (0.2271, 0.4193, 0.2955, 0.2982, 0.2982, 0.2583, 0.2346, 0.2302, 0.2296, 0.2324, 0.2862, 0.3104, 0.2736)$,最终可得客观权重 $\lambda_i = (0.0632, 0.1167, 0.0822,$

3.2 评价指标综合权重计算

(1)主观权重。基于 GGC 主观赋权,邀请 5 名决策者构成决策者群,以 Saaty 标度为基准,并

$0.0830, 0.0830, 0.0719, 0.0653, 0.0640, 0.0639, 0.0647, 0.0796, 0.0864, 0.0761)$ 。

(3)综合权重。基于 ICWGT 组合赋权,得出主观、客观权重最佳综合分配系数分别为 $0.5548, 0.4452$,则综合权重 η_i 可表示为 $\eta_i = 0.5548\bar{\omega}_i + 0.4452\lambda_i$,因此各指标的综合权重见图 3。

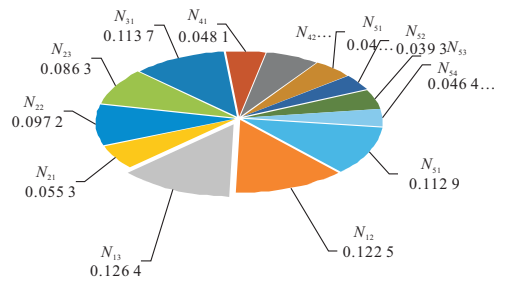


图 3 各指标综合权重占比

Fig. 3 The proportion of the comprehensive weight of each indicator

3.3 ICWGT-灰色投影法的隧洞塌方风险评价

将表 3 中的数据基于灰关联投影模型进行计算,可得到各样本在理想样本上的评价标准灰关联投影值 D_B 及灰关联投影值 Y_B, D_B 与评级等级之间的关系见图 4,各样本的灰关联投影角、 Y_B 值及所属等级见图 5。

最后根据图 4、5,将评价标准灰关联投影值对隧洞塌方风险进行等级投影,易得灰色矢量投影模型下各样本的评价等级 = (IV、V、V、IV、V)。



图 4 评价等级分布图

Fig. 4 Schematic map of the evaluation level distribution area

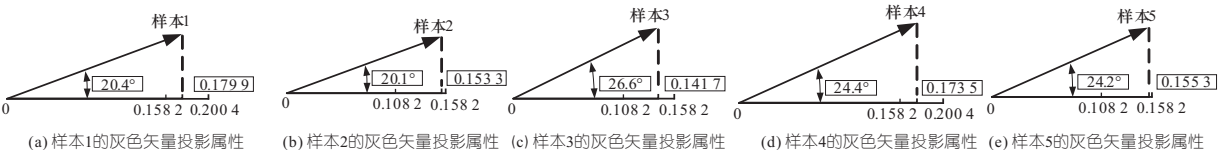


图 5 各样本的灰关联投影属性

Fig. 5 Gray associated projection properties for each sample

3.4 实际等级及不同方法比对

各评价样本从现场实际施工状况来看,样本 1、4 在施工时发生局部过度坍塌;样本 2、3、5 发生全断面塌方。因此,根据现场施工状态及文献 [3] 对该五组钻爆法施工隧洞的统计评价,五组隧洞的塌方实际等级=(IV、V、V、IV、V),由此可知本文评价结果与实际等级均相符。并将本文评价模型与物元可拓模型、理想点法(欧氏距离)进行比对见表 4。

表 4 不同评价方法评价结果比对

Tab. 4 Accuracy comparison between different evaluation methods

样本	灰色矢量 投影值	本文 模型	实际 等级	理想点法 (曼哈顿距离)	物元可 拓模型
1	0.179 9	IV	IV	IV	II
2	0.153 3	V	V	V	V
3	0.141 7	V	V	V	V
4	0.173 5	IV	IV	IV	V
5	0.155 3	V	V	IV	V

结合表 4 及实际开挖情况综合分析,本文模型、理想点法(曼哈顿距离)及物元可拓模型的评判准确率分别为 100%、80%、60%,从结果上可判定本文模型的准确率较理想。从最终的评价结果来看,理想点法与物元可拓模型总体评价与实际情况存在偏差。究其原因在于理想点法无法考虑到评价中的模糊性与指标间的不确定性。而物元可拓模型在定性与定量视角分析客观事物所存在的矛盾性问题时具有显著效果,对于多因素之间的关联特性问题无法有效表达。此外,物元可拓模型分析时将特征值视为不动值,事物的随机性亦被忽略。灰色矢量投影模型充分考虑到了隧

洞塌方风险评价中的“灰色特性”,原理易懂,计算更加简便,通用性及准确性更高。

4 结论

a. 根据 GAHP 法建立了一套优选评价指标体系,在此基础上,提出了一套 GGC、AEW 及 ICWGT 相结合的灰色聚类矢量投影模型,并将该模型应用于隧洞塌方风险评估中。

b. 实例应用结果表明,隧洞塌方风险评价等级与实际开挖情况吻合度较高,该模型不仅考虑了隧洞塌方风险评估的模糊性和不确定性,且可综合反映因素指标在空间中的影响,有效避免了隧洞塌方风险评估的单方向偏差,解决了隧洞坍塌评估中存在“灰色系统”的问题,在多因素模糊复杂的系统决策中发挥较好作用,且精度均高于理想点法及物元可拓模型。

参考文献:

- [1] 何杜博,黄栋,石文成. 基于群组 DEMATEL 与灰关联投影的供应商质量绩效评价[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(4): 980-990.
- [2] 向思阳,蔡泽祥,刘平,等. 基于 AHP-反熵权法的配电网低碳运行模糊综合评价[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 69-76.
- [3] CHEN WU, ZHANG GUOHUA, JIAO YUYONG, et al. Unascertained measure-set pair analysis model of collapse risk evaluation in mountain tunnels and its engineering application [J]. KSCE journal of civil engineering, 2021, 25(2): 451-467.

Risk Assessment of Tunnel Collapse Based on Multi-factor Selection and Grey Clustering Vector Projection Method

ZHANG Jian-ming^{a,b}, SHI Ke-bin^{a,b}, SHAN Hong-ze^a, SHI Ren-yi^a, FU Tao^a, LU Zhi-peng^a

(a. College of Hydraulic and Civil Engineering; b. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The risk assessment of collapse of tunnel involves many fuzzy factors and the evaluation method is complex, which makes the evaluation system constitute a gray system and the applicability of the evaluation method is not high. It is difficult to accurately assess the risk level of tunnel landslides. Using the basic idea of gray system and vector projection principle, a set of tunnel collapse risk evaluation model based on gray vector projection method is proposed. Based on the comprehensive analysis of the influencing factors of tunnel collapse under complex stratigraphic conditions, the group analytic hierarchy process (GAHP), which takes into account the degree of difference in the views of decision makers, is used to reduce the dimensionality of the pre-selected evaluation index system. Then, according to the comprehensive decision weight coefficient, 13 preferred evaluation indicators that can fully reflect the different, representative and highly differentiated evaluation indicators of the collapse mechanism are selected to establish a tunnel collapse risk optimal evaluation index system. In addition, grey group clustering (GGC) and anti-entropy weight (AEW) are introduced to determine subjective and objective single-level sorting weights, respectively. The improved combination weighting method of game theory (ICWGT) is used to obtain the optimal comprehensive weight distribution coefficient to determine the total ranking weight of the indicator. Finally, according to this model, the risk of collapse of five groups of tunnels was evaluated by the model. The results show that the risk assessment level of tunnel collapse is highly consistent with the actual excavation. The reliability and accuracy of the model are verified.

Key words: tunnel collapse; risk assessment; grey relational projection; metric selection; grey group clustering; improved game theory combination weighting method