

文章编号: 1004-2954(2017)08-0134-06

缓倾岩层隧道施工风险评估研究

沈红云¹, 杜建华², 黄 歆³

(1. 河北交通职业技术学院, 石家庄 050035; 2. 石家庄铁路职业技术学院, 石家庄 050041;

3. 西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 基于熵法、模糊综合评价法, 并结合离散元数值模拟方法, 对缓倾岩层隧道的施工风险评价与对策进行研究。通过回顾相关文献, 建立针对缓倾岩层隧道的施工风险评价指标体系, 将熵法和模糊综合评价法运用到风险评价中, 结合离散元数值模拟软件 3DEC 判断围岩及支护系统的稳定性, 为风险评估提供依据。根据风险评估结果提出相应的风险规避对策。实践表明, 针对缓倾岩层隧道建立的指标体系和评估方法, 结合定量数值模型分析, 有效提高评估施工风险的可靠程度与支护设计的针对性及有效性, 以期减少安全事故。

关键词: 缓倾岩层隧道; 风险指标体系; 风险评价; 定量评价; 数值模拟

中图分类号: U451 文献标识码: A DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.2017.08.028

Study on Risk Analysis of Tunneling in Slight Inclined Stratum Rock

SHEN Hong-yun¹, DU Jian-hua², HUANG Guang³

(1. Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050035, China; 2. Shijiazhuang Institute

of Railway Technology, Shijiazhuang 050041, China; 3. School of Civil Engineering,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on entropy weight method and comprehensive evaluation method and in combination with discrete element method, this paper conducts the study on risk analysis and strategy-making for tunnels in slight inclined stratum. According to literature review, a risk evaluation index system for tunnels in slight inclined stratum is developed. In the analysis, entropy weight method and comprehensive evaluation method are used together. Based on the results, discrete element numerical simulation software 3DEC is employed to study the stability of rock mass and support system. According to risk evaluation results, corresponding risk prevention measures are proposed. The practices show that the newly established index system and the evaluation method together with the numerical simulation analysis could efficiently assess the risk of construction and the pertinence and effectiveness of the support system, thus to reduce safety accidents.

Key words: Slight inclined stratum tunnel; Risk index system; Risk evaluation; Quantitative evaluation; Numerical simulation

岩层面接近水平状态, 岩层倾角小, 此种岩层被称作缓倾岩层。沉积岩层原始产状通常水平或近于水平, 沉积成岩后在仅整体升降而未倾伏和褶曲

的原始水平产状的地层。本文研究对象为缓倾岩层隧道。

在地表范围及接近地表范围内的岩体工程诸如边坡、埋深不大的洞室工程, 工程所赋存岩体中初始地应力一般不高, 围岩的破坏模式主要由岩体的自身特性决定。按照围岩的破坏模式划分, 地下工程中围岩的失稳模式主要分为两种, 一种是由应力引起的失稳, 当初始地应力大于岩体自身强度时, 产生由应力导致的

收稿日期: 2016-11-16; 修回日期: 2016-12-01

基金项目: 教育部重点实验室课题(2011KF4); 铁道部科技研究开发计划项目(2010G016-H), 国家自然科学基金青年科学基金项目(51208437)

作者简介: 沈红云(1979—), 女, 讲师, 硕士研究生, 2002年毕业于石家庄铁道学院, 主要从事工程风险管理研究工作, E-mail: 695207593@qq.com。

破坏;另一种则是由块体几何形式决定的结构面控制型破坏,此种破坏类型多发生在初始地应力水平相对低的地下工程中(如隧道)。

围岩岩层倾角接近水平的情况大量存在,例如包西铁路中大量的缓倾岩层隧道,包(头)北(海)线黄陵至延安段高速公路新窑沟隧道,四川广安至巴中高速公路的东兴场隧道等^[1-6]。以往有关缓倾岩层隧道围岩稳定性的研究通常基于连续介质的力学理论,相关设计规范^[7-8]中亦对其按照传统塌落拱理论进行计算设计,导致在缓倾岩层隧道施工中,仍易出现围岩坍塌的风险。如何对缓倾岩层隧道施工的风险进行评估、量化,成为亟待解决的问题。

目前,风险评价法中可定量分析风险的有层次分析法(A analytical Hierarchy Process)、网络层次分析法(A analytical Network Process)、熵法(Entropy Method)、模糊综合评判法(Fuzzy Comprehensive Evaluation)等。其中,熵度法可为评价事物,将事物的影响因素的定性描述转化为定量评价;模糊综合评价法能够较好地考虑研究对象的不确定性并定量地评价研究对象。本文通过分析研究缓倾岩层隧道施工风险,在总结已有关于缓倾岩层隧道研究成果的基础上,充分考虑到在缓倾岩层隧道施工各影响因素的特征,将熵度法与模糊综合评价法共同运用到本文中,作为缓倾岩层隧道施工风险的评价方法。

在对隧道施工风险评价中,对于指标的评定通常存在主观的现象,为了避免由于主观随意导致的评价偏差,本文基于熵法计算各指标权重,利用极大熵原理对数据所属评语区间的随机性进行分析处理,相对于层次分析法而言计算得出的权重相对客观,将此方法用于评价隧道施工中的风险十分必要。利用类似方法对工程问题评价并非首次,李辉^[9]曾利用主观权重赋值法与模糊综合评价法相结合的方法分析评价地铁隧道近接施工的风险并验证其可以用于隧道施工风险评价。本文将客观权重赋值方法熵法替代主观权重赋值法,与文献[9]评价方法类似对于缓倾岩层隧道施工风险评价同样有一定适用性。

首先,利用熵法求得各影响因素的权重,再利用模糊综合评价法计算得出缓倾岩层隧道施工的风险,最后利用离散元数值模拟软件进行模拟分析相应隧道的稳定性,根据计算结果提出相应的风险对策达到风险控制管理的目标。结合渝利铁路某缓倾岩层隧道,说明了缓倾岩层隧道风险评价的实施过程,确保施工安全进行。

1 缓倾岩层隧道施工风险评价指标体系

在缓倾岩层隧道施工中,影响因素较多,且各因素

存在一定的模糊性。通过对现有隧道施工状况的调查和现有资料的研究,影响缓倾岩层隧道施工风险的主要因素有安全层面、技术层面、经济层面和地质环境层面。主要影响因素可分为地质、设计、施工、信息化施工 4 个方面,在此 4 个影响因素下又细分为 16 个底层因素。

本文所构建缓倾岩层隧道施工风险指标体系为递阶层次结构。上层是评估总目标,亦称为目标层;中层位于上层与底层之间,它包含了评价准则;底层位于层次结构的最底部,较独立。缓倾岩层隧道的风险评价结构如表 1 所示。

表 1 安全风险评价指标体系

一级指标	二级指标	评价依据
地质情况 T_1	岩体完整性 T_{11}	重要性、围岩分级等
	岩体坚硬情况 T_{12}	重要性、围岩分级等
	节理结构面情况 T_{13}	重要性、围岩分级等
	地下水情况 T_{14}	重要性、工程地质情况等
设计情况 T_2	地应力与岩体剪切强度比 T_{21}	隧道埋深、水平应力情况等
	设计与施工匹配程度 T_{22}	支护类型、围岩情况等
	开挖设计合理程度 T_{23}	开挖设计参数等
	支护设计合理程度 T_{24}	支护类型及设计参数等
施工情况 T_3	施工与设计符合程度 T_{31}	施工完成情况与设计图纸等
	开挖控制爆破效果 T_{32}	超欠挖情况等
	施工组织的合理程度 T_{33}	施工组织设计等
	喷射混凝土质量 T_{34}	混凝土试块试验等
	施工工艺 T_{35}	施工方法、管控措施等
信息化施工 T_4	水平收敛 T_{41}	水平收敛值与变形趋势等
	拱顶沉降 T_{42}	拱顶沉降值与变形趋势等
	监测信息反馈施工 T_{43}	监测是否能够及时反馈并指导施工等

2 风险评估基本理论

熵法(EM)根据对信息熵的计算得到相对客观的指标权重,再利用模糊综合评判法(FCE)根据专家打分,基于模糊线性变换原理和最大隶属度原则对事物做出合理的评价。熵法与模糊综合评价法在隧道工程中已有广泛运用并被证实可行^[10-13]。

2.1 熵法理论

熵法理论由 Jaynes^[14]在 20 世纪提出,并被后人用于各个工程领域。

熵法理论提出针对 m 个指标、 n 个评价的问题(以下简称 (m, n) 评价问题),建立评语隶属关系矩阵 $m \times n$,如下所示

$$X' = \begin{bmatrix} x'_{11} & x'_{12} & \cdots & x'_{1j} & \cdots & x'_{1n} \\ x'_{21} & x'_{22} & \cdots & x'_{2j} & \cdots & x'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_{i1} & x'_{i2} & \cdots & x'_{ij} & \cdots & x'_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_{m1} & x'_{m2} & \cdots & x'_{mj} & \cdots & x'_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对 X' 做标准化处理

$$X_{\text{std}} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2j} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i1} & x_{i2} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mj} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n; x_{ij}$ 为第 j 个专家对第 i 个指标的评语值, 其计算式为

$$x_{ij} = \frac{x'_{ij} - \min_j(x'_{ij})}{\max_j(x'_{ij}) - \min_j(x'_{ij})} \quad (3)$$

式中 $x_{ij} \in [0, 1]$, 当 $\max_j(x'_{ij}) - \min_j(x'_{ij}) = 0$ 时, 取 $x_{ij} = 0$ 。

针对 (m, n) 评价, 通过熵度量相关概念可得到第 i 个评价指标的熵为

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (4)$$

式中 f_{ij} 、 k 为计算参数, 且令当 $f_{ij} = 0$ 时 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。其计算式

$$f_{ij} = x_{ij} / \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (5)$$

$$k = 1 / \ln n \quad (6)$$

基于熵度量, 可得到在 (m, n) 评价问题中, 第 i 个指标的熵权为

$$\omega_i = (1 - H_i) / (m - \sum_{j=1}^n H_j) \quad (7)$$

指标熵权应满足 $0 \leq \omega_i \leq 1$ 和 $\sum_{i=1}^m \omega_i = 1$ 的要求。

2.2 FCE 模糊综合评判理论

模糊综合评判法用于评价多因素事件的决策中^[15]。利用此方法能够将定性描述转化为定量评价, 被广泛用于隧道工程中。

针对具体的项目特点, 结合工程实际, 筛选出评估目标的影响指标与评语, 评语集可用向量 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 表示。影响指标集可表示为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 。向量 U 与 V 组成模糊关系矩阵 $R(r_{ij})$ 。利用模糊数学的基本原理即可得出所求的目标事件的向量元素集^[16]。

将矩阵相乘, 得到目标层向量集

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_n) = K \cdot R \quad (8)$$

式中 K 表示评价指标 U_k 的权向量, $K = \{K_1, K_2, \dots, K_k, \dots, K_n\}$; R 表示模糊关系矩阵。

目标层归一化处理如下。

$$B = \left\{ \frac{b_1}{\sum_{t=1}^n b_t}, \frac{b_2}{\sum_{t=1}^n b_t}, \dots, \frac{b_n}{\sum_{t=1}^n b_t} \right\} \quad (9)$$

根据最大隶属度原则, B 中指标 $\max_{1 \leq i \leq n} \{b_i / \sum_{t=1}^n b_t\}$ 即对目标影响最大的指标。以某缓倾岩层隧道工程为依托, 阐述了针对缓倾岩层隧道施工风险进行评估的具体方法和分析过程。

3 案例分析

3.1 工程概况

区段内隧道地质构造复杂、围岩破碎。隧道为双线隧道, 隧道每延米开挖量为 $123.29 \sim 135.08 \text{ m}^3$ 。

隧道施工过程中严格监控量测, V 级围岩区段采用台阶分步开挖法、CD 法、CRD 法或大拱脚台阶法, IV 级围岩、III 级围岩采用台阶法。III 级围岩地段, 对地质条件较好地段, 采用全断面法施工, 以便加快施工进度。隧道断面如图 1 所示。

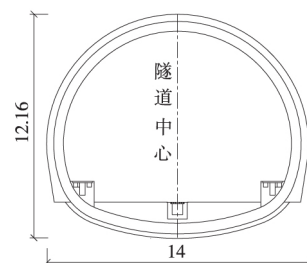


图 1 研究隧道断面(单位: m)

本文研究隧道由于围岩中节理裂隙发育, 在多组结构面切割下, 完整岩体被切割为块状, 在开挖后形成几何不稳定的体系, 易出现掉块的现象, 如图 2 所示。

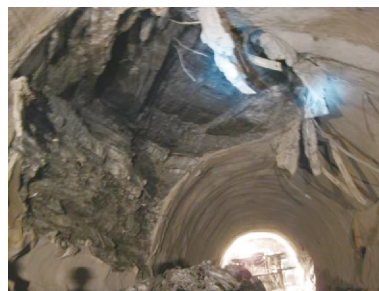


图 2 施工现场拱部塌落情况

3.2 熵法(EM) 计算权重

针对缓倾岩层隧道的指标体系作为指标因素集, 利用评语集将需要评价因素的定性描述转化为定量描述, 根据每个因素对评估目标的总影响程度, 将评语集设定为{强, 较强, 中, 弱} = {4, 3, 2, 1}。

对评语集投票的专家共有 30 位,其中 10 位来自于施工企业,10 位来自于设计单位,10 位来自于国内高校的专家,结果如 X 矩阵所示,每一行的每个数字代表该指标在 4 个评语集中所获的投票数。

再根据式(1)~式(9)得到最终各个指标的权重。

将 X 标准化后得到 X' 如式(11)所示。

计算 f_{ij} 如式(12)所示。

最终获得各个评价因素的熵权为 $w = [0.11, 0.08, 0.14, 0.08, 0.11, 0.01, 0.16, 0.01, 0.09, 0.05, 0.01, 0.004, 0.01, 0.05, 0.02]^T$

$$X = \begin{bmatrix} 12 & 17 & 1 & 0 \\ 10 & 18 & 2 & 0 \\ 14 & 16 & 0 & 0 \\ 5 & 5 & 20 & 0 \\ 17 & 12 & 1 & 0 \\ 8 & 8 & 14 & 0 \\ 12 & 10 & 5 & 3 \\ 5 & 15 & 4 & 6 \\ 9 & 12 & 2 & 7 \\ 3 & 13 & 4 & 10 \\ 2 & 15 & 7 & 6 \\ 8 & 8 & 14 & 0 \\ 10 & 8 & 12 & 0 \\ 1 & 12 & 10 & 7 \\ 1 & 4 & 15 & 10 \\ 7 & 8 & 12 & 3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$X' = \begin{bmatrix} 0.71 & 1 & 0.06 & 0 \\ 0.56 & 1 & 0.11 & 0 \\ 0.88 & 1 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.25 & 1 & 0 \\ 1 & 0.71 & 0.06 & 0 \\ 0.57 & 0.79 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0.22 & 0 \\ 0.1 & 1 & 0 & 0.18 \\ 0.7 & 1 & 0 & 0.5 \\ 0 & 1 & 0.1 & 0.7 \\ 0 & 1 & 0.39 & 0.31 \\ 0.57 & 0.57 & 1 & 0 \\ 0.83 & 0.67 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0.82 & 0.55 \\ 0 & 0.33 & 1 & 0.67 \\ 0.44 & 0.56 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$f_{ij} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.57 & 0.03 & 0 \\ 0.33 & 0.6 & 0.07 & 0 \\ 0.47 & 0.53 & 0 & 0 \\ 0.17 & 0.17 & 0.67 & 0 \\ 0.57 & 0.4 & 0.03 & 0 \\ 0.27 & 0.27 & 0.47 & 0 \\ 0.5 & 0.39 & 0.11 & 0 \\ 0.07 & 0.79 & 0 & 0.14 \\ 0.32 & 0.46 & 0 & 0.23 \\ 0 & 0.56 & 0.06 & 0.39 \\ 0 & 0.59 & 0.23 & 0.18 \\ 0.27 & 0.27 & 0.47 & 0 \\ 0.33 & 0.27 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0.42 & 0.35 & 0.23 \\ 0 & 0.17 & 0.5 & 0.33 \\ 0.22 & 0.28 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.3 模糊综合评价法(FCE)计算风险

模糊综合评价法由专家对评语集进行打分来确定隶属度,将定性评价转换为定量评判。评语集设置为{高,较高,一般,小} = {1, 0.75, 0.5, 0.25}。对于本文邀请 30 名来自于施工、设计单位的相关技术人员,对底层因素投票得到隶属向量,由隶属向量架构模糊综合评价矩阵 R' ,再由隶属向量求得隶属度。

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 11 & 17 \\ 3 & 18 & 9 & 0 \\ 5 & 25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 30 \\ 1 & 1 & 15 & 13 \\ 8 & 18 & 4 & 0 \\ 2 & 5 & 20 & 3 \\ 15 & 15 & 0 & 0 \\ 5 & 12 & 12 & 1 \\ 0 & 2 & 24 & 4 \\ 2 & 5 & 17 & 6 \\ 2 & 8 & 20 & 0 \\ 1 & 1 & 12 & 16 \\ 1 & 1 & 5 & 23 \\ 0 & 2 & 15 & 13 \\ 2 & 8 & 12 & 8 \end{bmatrix}^T$$

将权重与模糊综合评价矩阵相乘计算得到缓倾岩层隧道施工风险的隶属向量为 $P = \{0.133, 0.238, 0.150, 0.062\}^T$ 。将隶属向量 R 与评语集 $V = \{1, 0.75, 0.5, 0.25\}$ 相乘获得缓倾岩层隧道施工风险的评分 $S = 0.584 \in [0.5, 0.75]$ 。由评语集可知,本案例所分析的缓倾岩层隧道风险较高,应采取有效对策应对风险。

标准化后即为因素权重与模糊综合评价矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.067 & 0.367 & 0.567 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0 \\ 0.167 & 0.833 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.033 & 0.033 & 0.5 & 0.433 \\ 0.267 & 0.6 & 0.133 & 0 \\ 0.067 & 0.167 & 0.667 & 0.1 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.167 & 0.4 & 0.4 & 0.033 \\ 0 & 0.067 & 0.8 & 0.133 \\ 0.067 & 0.167 & 0.567 & 0.2 \\ 0.067 & 0.267 & 0.667 & 0 \\ 0.033 & 0.033 & 0.4 & 0.533 \\ 0.033 & 0.033 & 0.167 & 0.767 \\ 0 & 0.067 & 0.5 & 0.433 \\ 0.067 & 0.267 & 0.4 & 0.267 \end{bmatrix} T$$

根据同样的方法计算得到各个一级指标的风险如表 2 所示。

表 2 各一级指标风险

一级指标	一级指标下各二级指标权重	风险评分	评价
地质情况 T1	(0.25 0.21 0.35 0.20)	0.56	较高
设计情况 T2	(0.32 0.04 0.15 0.48)	0.54	较高
施工情况 T3	(0.08 0.51 0.30 0.08 0.03)	0.52	较高
信息化施工 T4	(0.12 0.62 0.26)	0.43	一般

由表 2 可知,地质情况、设计情况与施工情况的风险评价均为较高,信息化施工的风险评价为一般,与总体风险为较高较符合。

3.4 数值模拟分析

在上文所述风险评估中,各指标中对风险贡献最大的为“设计”,尤其现有规范设计理论仍旧参照塌落拱理论进行计算,并未对节理发育的水平层状围岩隧道进行特殊的规定,因此根据数值模拟结果提出相应对策以期降低风险。

离散元数值模型的基本假定:(1)各单元为理想

的刚体;(2)块体间接触为角-角接触、边-边接触;(3)块体间满足无张拉。

计算采用离散元软件 3DEC,围岩与隧道衬砌采用实体单元模拟,围岩单元服从 Mohr-Coulomb 屈服准则的弹塑性本构模型,隧道初支及二次衬砌采用弹性模型。锚杆利用 Cable 单元模拟,模型左、右、下边界取 5 倍隧道宽度,模型尺寸为 154 m×204 m×30 m(宽×高×厚),左、右、底部边界为法向约束,上边界设置为自由,围岩、隧道支护结构、锚杆力学计算参数如表 3~表 5 所示。数值模拟模型如图 3 所示。

表 3 围岩物理力学参数

V 级围岩	容重 / (kN/m³)	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 / (°)	黏聚力 /kPa
砂岩夹页岩	20	0.1	0.25	35°	900

表 4 混凝土材料物理力学参数

混凝土	重度 / (kN/m³)	弹性模量/GPa	泊松比
初期支护 C25	22	20.0	0.2
二次衬砌 C30	25	28.0	0.2

表 5 锚杆力学参数

弹性模量 /MPa	灰浆剪切刚度 / (N/m²)	黏结力 / (N/m)	面积 /m²	极限抗拉荷载/kN
2.1×10^5	8.745×10^3	6.91×10^5	3.8×10^{-4}	127.3

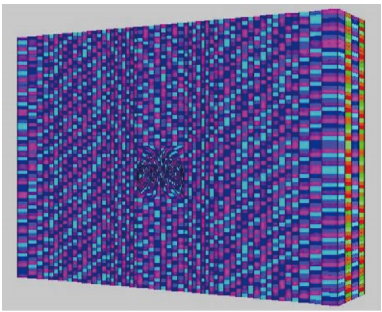
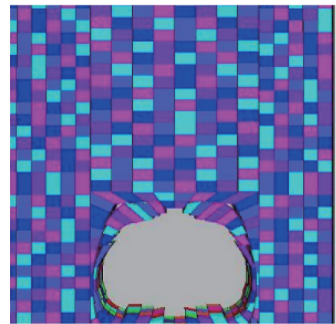
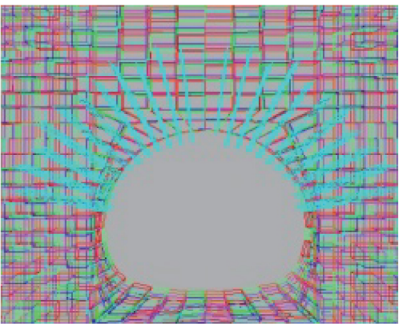


图 3 数值模拟模型

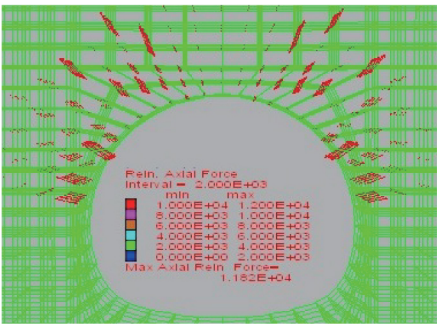
计算结果如图 4 所示。图 4(a)表示未施加锚杆时计算结果,图 4(b)表示施加锚杆计算结果,图 4(c)为锚杆受力图。



(a) 未施加锚杆时计算结果



(b) 施加锚杆时计算结果



(c) 锚杆受力图(单位: N)

图 4 计算结果

由图4(a)可知,开挖毛洞在未支护时,由于节理裂隙与结构面的切割作用,拱顶将有块体掉落,仰拱处隆起,计算结果与现场情况图3相符。由图4(b)与图4(c)可知,在施加拱部锚杆后,围岩稳定且锚杆最大受力为12 kN,受力较小。锚杆发挥悬吊作用,将几何不稳定块体固定,隧道衬砌结构成环能够保持围岩稳定。数值模拟结果表明:在节理较发育时,针对缓倾岩层隧道需要施作锚杆保持围岩的几何稳定性。

根据离散元数值模拟结果可知,水平岩层隧道施工中易产生的拱顶塌落现象主要源于围岩结构面、节理切割,依据C.D. Martin可将此类失稳定为岩体结构控制性失稳(structurally-controlled damage)^[18]。同时,根据数值模拟结果可知,仅仅利用轻型支护就可以有效稳定围岩。利用离散元数值软件3DEC,可有效分析缓倾岩层中修建隧道时围岩的稳定性,为评估“地质情况”“设计情况”等指标时提供依据。

3.5 施工风险对策

基于风险计算与数值模拟,根据底层因素权重值的大小可知,主要影响缓倾岩层隧道施工的6个因素依次为支护设计合理程度、节理结构面情况、岩体完整性、地应力与岩体剪切强度比、开挖控制爆破效果、施工组织的合理程度。经过分析可知,缓倾岩层隧道施工的主要风险为:由于目前设计未考虑缓倾岩层倾角较缓,由于节理结构面的切割作用导致几何失稳,现阶段设计并未针对此种情况进行特殊设计,导致隧道拱部围岩坍塌造成施工风险。基于隧道施工要点^[17],为了有效降低施工风险,提出了以下4项措施控制风险。

(1) 优化支护结构,基于钢筋网喷混凝土支护,安装锚杆,组成刚度不高的柔性支护。利用锚杆加固围岩,减少结构面对围岩的分割,利用钢筋网与分散的锚杆组成新的支护结构。新的柔性支护结构可以将几何失稳的围岩组织起来,围岩自承能力得以发挥,围岩自稳能力变强,防止围岩坍塌的风险,支护参数如表6所示。

表6 优化支护参数

喷射混凝土 厚度/cm	φ6 mm 钢筋网 网格间距/cm	锚杆	
		长度/m	间距/m
20	25×25	4	1.5×1.2(环×纵)

(2) 在拱部施作环向锚杆防止拱部围岩塌落,并施作超前锚杆。超前锚杆与环向锚杆形成支护体系,充分利用锚杆的悬吊、组合梁和对围岩的加固作用,防止拱部围岩塌落。

(3) 尽量避免人工找顶造成关键块体的塌落,进而导致更大规模的围岩坍塌。

(4) 考虑隧道工程的复杂性,应依据现场掌子面

地质预报及掌子面素描,根据其结果反馈设计,研究分析节理结构面对稳定性的影响,及时调整设计,提出一套适合在应力水平较低区段的支护体系。

(5) 做好控制爆破,有效地保护围岩,最大发挥围岩自身承载力。

(6) 缓倾岩层隧道施工中,发生坍塌通常十分突然,为保证施工安全,当出现围岩拱顶坍塌时,应及时上报业务主管单位,坍塌时人员应及时撤离,避免发生人员损失。坍塌后,应根据地质素描情况,查找原因,寻找问题并提出对策,采取补救措施后方可继续开挖。具体应急措施如下:

① 施工时应准备额外物资及设备以备抢险所需;

② 对施工人员做好抢险培训,可事先进行抢险演练;

③ 增加地质素描频率并反馈分析,当分析结果产生风险较大时,应及时停工;

④ 成立现场指挥部,进行24 h不间断施工管理。

4 结论

缓倾岩层隧道施工风险影响因素众多,且不确定性较强,同时还具有模糊性的特点。通过熵法和模糊综合评价法结合离散元数值模拟计算,分析了渝利铁路某缓倾岩层隧道施工风险,并得出以下结论。

(1) 基于对缓倾岩层隧道相关的工程实例调查研究,提出了针对缓倾岩层隧道施工风险的指标体系。

(2) 结合熵法与模糊综合评价法,熵法可以确定指标体系中各因素的权重,并通过模糊综合评价法建立隶属矩阵,得到隶属向量,将隶属向量与评语集相乘获得风险评分,将定性评价的指标量化,获得科学、可靠的风险定量评分,风险计算得出在4项指标中,设计对缓倾岩层隧道风险的影响最大,施工其次,地质条件排第三。根据数值模拟计算得出施加锚杆可以有效支护拱部围岩,防止在现场施工中出现的拱部坍塌现象。根据风险评价结合数值模拟的方法指导施工,可避免风险发生。

(3) 通过实例计算,利用熵法与模糊综合评价法对缓倾岩层隧道施工风险进行评价,评估得出本缓倾岩层隧道施工风险较高,根据离散元数值模拟计算提出锚杆支护的方法可有效降低设计所造成的风险,除此之外,提出针对缓倾岩层隧道应尽量减少“找顶”,保护围岩几何稳定性,仔细分析围岩产状,做好控制爆破,有效地保护围岩,确保施工安全。

参考文献:

- [1] 刘鹏,吉锋,温书亿.隧道水平岩层变形破坏机制的模拟研究[J].现代隧道技术,2015,52(3):82-87.

文章编号: 1004-2954(2017)08-0140-07

地铁高架车站形式类比及其适应性研究

沈 欣

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

摘 要: 地铁高架车站作为地面建筑, 周边环境复杂, 限制因素多, 其对城市的影响也比地下车站大。为解决地铁高架车站在设计过程中, 车站不同形式对用地、道路、客流、景观等多种因素的适应性问题, 通过对地铁高架车站周边地块及道路对车站形式的影响入手, 再深入到不同功能需求下车站本身的站型及内部公共区布置形式, 利用分析法得出各类型高架车站的特点, 总结出不同类型车站对不同外部条件及功能的适应性, 得出适应常见条件因素的优选方案。旨在为地铁高架车站设计工作中快速准确地形成方案提供参考。

关键词: 地铁高架车站; 类型特点; 适应性; 优选方案

中图分类号: U231.4 文献标识码: A DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.2017.08.029

Analysis of Analogy and Adaptability of Elevated Subway Station

SHEN Xin

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: The elevated subway station as the ground building has more impact on the city than the underground station due to its complex surroundings and more limitations. The purpose of this paper is to define the adaptabilities of different forms of station to the land, road, passenger flow, landscape and so on. This research, starting from the impact on the type of the station by the surrounding land and roads of the elevated subway station to station type and internal layout of public areas of different functions, analyzes the characteristics of each type of elevated station, and sums up the adaptabilities of different

types of stations to different external conditions and functions so as to determine the optimal solution. The purpose of this paper is to provide some reference for the design of the elevated

收稿日期: 2017-03-01; 修回日期: 2017-03-14

作者简介: 沈欣(1984—), 男, 建筑师, 2011年毕业于西安建筑科技大学建筑学院建筑设计专业, 建筑学硕士, 主要从事地铁车站和轨道交通配套建筑的设计与研究, E-mail: 116543851@qq.com。

- [2] 李清龙. 缓倾岩层隧道塌方机理及治理措施研究——以叙大铁路正峰寺隧道为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [3] 冯文凯, 石豫川, 王兴平, 等. 高速公路隧道水平层状围岩支护优化[J]. 中国公路学报, 2009(2): 65-70.
- [4] 汶文钊. 横山隧道水平岩层稳定性分析及施工措施[J]. 铁道标准设计, 2009(S1): 133-135.
- [5] 刘鹏, 张俊, 韩永昌, 等. 东兴场隧道水平岩层变形破坏机制的物理模拟研究[J]. 西南科技大学学报, 2009, 24(2): 32-36.
- [6] 李丹, 夏彬伟, 陈浩, 等. 缓倾岩层各向异性岩体隧道稳定性的物理模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 1933-1938.
- [7] 铁道第二勘察设计院. TB10003—2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
- [8] 重庆交通科研设计院. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [9] 李辉, 郝余朝, 李俊松. ANP_FE 技术在地铁隧道近接施工风险评估中的应用[J]. 铁道标准设计, 2012(12): 84-87, 91.
- [10] 王亚琼, 周绍文, 孙铁军, 等. 基于模糊贴近度的公路隧道结构健康

康评价[J]. 公路交通科技, 2014, 31(12): 78-83.

- [11] 周绍文. 基于可变模糊集理论的公路隧道衬砌结构健康状况评价方法[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [12] 周正兵, 孙璐, 李易峰, 等. 基于 AHP 和模糊熵的高速公路隧道重要度评价[J]. 交通运输工程与信息学报, 2012(4): 36-43.
- [13] 付立家, 李海鹰, 谢世平. 高速公路隧道运营安全性综合评价方法研究[J]. 公路隧道, 2015(1): 6-9.
- [14] Jaynes E T. Information Theory and Statistical Mechanics [J]. Physical Review, 1957, 106(4): 620-630.
- [15] 肖盛燮. 模糊数学在土木与水利工程中的应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 1980.
- [16] Saaty T L. How to make a decision: The analytic hierarchy process [J]. European Journal of Operational Research, 1990, 48(1): 9-26.
- [17] 关宝树. 隧道工程施工要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [18] Martin C D, Kaiser P K, McCreath D R. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(1): 136-151.