

基于灰色关联的隧道衬砌裂缝致灾通道分析

刘德军^{1,2}, 黄宏伟^{1,2}, 薛亚东^{1,2}

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

摘要: 统计分析了 109 条含有衬砌裂缝的隧道, 获得了衬砌裂缝分布的特征规律和可能导致衬砌裂缝的底事件及其统计概率, 建立了衬砌裂缝故障树模型. 运用灰色关联分析法, 确定了造成衬砌裂缝的主要致灾通道. 为了获得可靠的底事件概率, 提出了将统计概率与专家调查所得概率相结合的方法. 结果表明: 偏压、背后空洞、渗漏水、松弛地压和不均匀沉降等为衬砌裂缝的主要致灾通道.

关键词: 衬砌裂缝; 致灾通道; 故障树; 灰色关联分析; 统计分析; 专家调查

中图分类号: O319.56

文献标志码: A

Disaster-inducing Channels Based on Grey Relational Analysis for Lining Cracks

LIU Dejun^{1,2}, HUANG Hongwei^{1,2}, XUE Yadong^{1,2}

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

Abstract: 109 tunnels with lining cracks were summarized, and characteristic distribution laws of lining cracks and statistical probabilities of factors causing lining cracks were attained; the fault tree model of lining cracks was established based on identification of risk sources; furthermore, the main disease-inducing channels were obtained by grey relational analysis. In the analysis process, in order to get reliable probabilities of bottom events, the method to combine statistical probability and investigation probability by experts was proposed. The research results show that the asymmetric load, voids behind lining, water leakage, loosely pressure and uneven settlement are main disaster-inducing channels for lining cracks.

Key words: lining cracks; disaster-inducing channels; fault tree; grey relational analysis; statistical analysis; expert investigation

进入 20 世纪 90 年代后,我国建设的隧道结构主流形式是以锚喷支护作为初期支护,以模筑混凝土作为二次永久衬砌的复合衬砌结构^[1].但是,随着建设规模和运营时间的增加,运营期隧道衬砌结构的病害也逐渐暴露出来.铁路隧道方面,1995 年对 4 855 座铁路隧道衬砌病害调查发现,衬砌出现裂缝和净空不足侵限的隧道有 2 546 座,占 52.4%,其中严重开裂的达 677 座,占 13.9%^[2].公路隧道方面,截止到 2007 年底,出现病害的有 4 673 座,总里程约 2 560 km,主要病害为渗漏水和衬砌裂缝^[3].另外,2012 年,对浙江省的 19 座公路隧道调查结果表明,19 座隧道含有 1 328 条裂缝,平均每百米衬砌含有将近 7 条裂缝^[4].以上的统计数据均表明,裂缝是隧道衬砌最为主要的病害之一.

为正确把握隧道衬砌的开裂机理,有效开展衬砌裂缝的预防及修复工作,衬砌裂缝致灾通道是研究的关键.由于衬砌裂缝的致灾通道存在着不确定性和多样性,因此为了更好地掌握它的发展态势,有必要确定影响其发展的主要致灾通道.然而,目前关于衬砌裂缝产生原因的研究基本上都集中在针对某一或某几个具体因素而展开的分析^[5-13],缺乏对引起衬砌裂缝原因的整体把握和系统分析,对“衬砌裂缝的致灾通道有哪些?主要致灾通道是什么?”这些关键问题尚未有学者给出过明确的答复.为此,本文首先通过文献查阅,统计了境内外 109 条含有裂缝的隧道实例,分析了衬砌裂缝各种特征分布规律和可能造成衬砌裂缝的底层因素及其统计概率.在此基础上,进一步分析衬砌裂缝的各种风险源,建立了衬砌裂缝的故障树模型.在统计分析的基础上,进一步采用专家调查法,用以获得可靠的底事件概率,最后运用灰色关联分析法得到了可能造成隧道衬砌裂缝的各种致灾通道的关联度排序.

收稿日期: 2012-11-14

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB013800); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1029)

第一作者: 刘德军(1985—),男,博士生,主要研究方向为隧道病害监测及修复. E-mail: dejun.liu11@gmail.com

通讯作者: 黄宏伟(1966—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要从事岩土及地下工程的风险管理理论与应用.

E-mail: huanghw@tongji.edu.cn

1 衬砌裂缝统计分析

1.1 衬砌裂缝的分布规律

隧道衬砌裂缝的分类主要有产生机理、裂口特征、与隧道轴向关系和直接产生原因四种方法。按照产生机理主要可以分为张拉裂缝、剪切裂缝和压溃裂缝等;按照直接产生原因可以分为结构性裂缝和非结构性裂缝;按照与隧道轴向关系可以分为纵向裂缝、环向裂缝和斜向裂缝。文献[14]给出了结构性裂缝和非结构性裂缝的明确分类标准,具体表述为:在第一类荷载(包括静荷载、动荷载和其他荷载)作用下产生的裂缝为结构性裂缝,而由温度、收缩和膨胀、不均匀沉降等因素引起的裂缝称为非结构性裂缝。值得注意的是,非结构性裂缝起因是结构首先要变形,当变形得不到满足时引起应力,应力进一步发展引起裂缝。

为了获得可能造成隧道衬砌裂缝的各种因素,统计分析文献,共得到了境内外 109 条含有衬砌裂缝的隧道,其中公路隧道 86 条,铁路隧道 18 条,人行隧道 5 条。案例主要来源于文献[5, 10, 15-18]。在统计的 109 条隧道中,影响衬砌裂缝的主要因素包括:设计过程(隧道断面形式、衬砌厚度等);施工过程(混凝土收缩、衬砌背后空洞、衬砌厚度不均、施工缝处理不当、拆模时间过早、模板下沉、填土不足等);运营过程(渗漏水、偏压、松弛地压、滑坡、高地应力、膨胀性土压、围岩崩塌、冻害、盐害、地震、火灾、车辆振动等)。

图 1 为依据直接产生原因归类的裂缝分布图。从图可知,隧道中的结构性裂缝所占比例明显高于非结构性裂缝,这与“工业及民用混凝土结构中以非结构性裂缝为主^[14]”的结论存在着一定出入。分析其

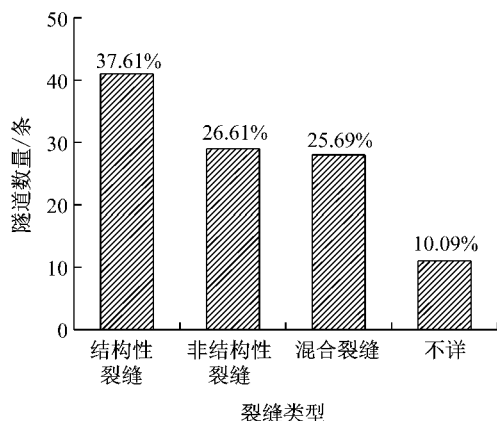


图 1 依据直接产生原因归类的裂缝分布图

Fig.1 Classification according to the direct reasons

原因,这可能归结于以下两点:第一,隧道所处的复杂地质环境;第二,通常认为结构性裂缝对结构安全影响较大,文献多以讨论结构性裂缝为主。因此,这一结论需要进一步加以验证。

图 2 为依据与隧道轴向关系归类的裂缝分布图。从图中可知,隧道衬砌裂缝以纵向裂缝和复合裂缝(同时存在着两种类型以上的裂缝)为主,比例最小的为环向裂缝,仅占统计类型的 9.18%。另外,从产生机理上来看,隧道中的裂缝主要以张拉裂缝为主,其次为复合裂缝和剪切裂缝(见图 3)。但是需要注意的是,在这 109 条隧道中,有一半以上的裂缝产生机理是不明确的。

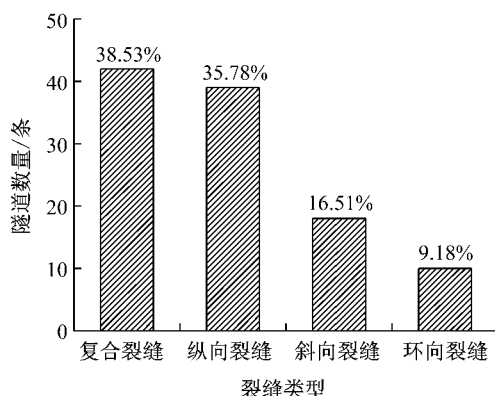


图 2 依据与隧道轴向关系归类的裂缝分布图

Fig.2 Classification according to the relationship between the crack and tunnel axis

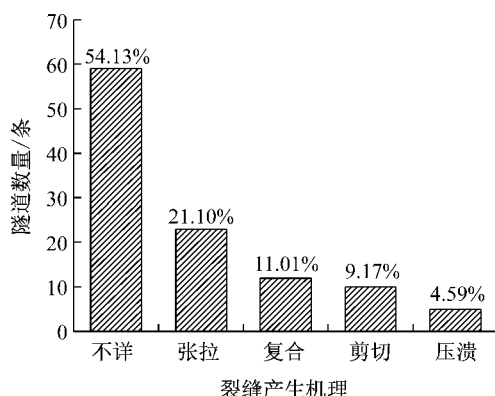


图 3 依据产生机理归类的裂缝分布图

Fig.3 Classification according to generation mechanism

1.2 造成衬砌裂缝因素的统计概率

假设 A 为造成隧道衬砌裂缝的其中因素之一,在所统计的 109 条隧道中,导致衬砌裂缝的因素中明确地包含因素 A 的隧道数量为 N,则 A 因素的统计概率 P_t 为 $N/109$ 。如在所统计的 109 条隧道中,造成衬砌裂缝因素中明确地包含“偏压”的隧道数量

为 17 条,因此“偏压”的统计概率为 0.155 96. 按此得到造成衬砌裂缝各因素的统计概率见表 1.

2 裂缝故障树建立

故障树分析法是一种判明基本故障、确定故障原因和发生概率的简单可靠而又行之有效的诊断方

法. 本文在统计分析工作的基础上,对可能造成隧道衬砌裂缝病害的各种风险源进行进一步分析与归类,建立裂缝的故障树模型. 由于按照产生机理、裂口特征和与隧道轴向关系三类均难以与各种风险源建立清晰而独立的关系,因此本文以“裂缝的直接产生原因”为分类方法,建立隧道衬砌裂缝的故障树模型,见图 4.

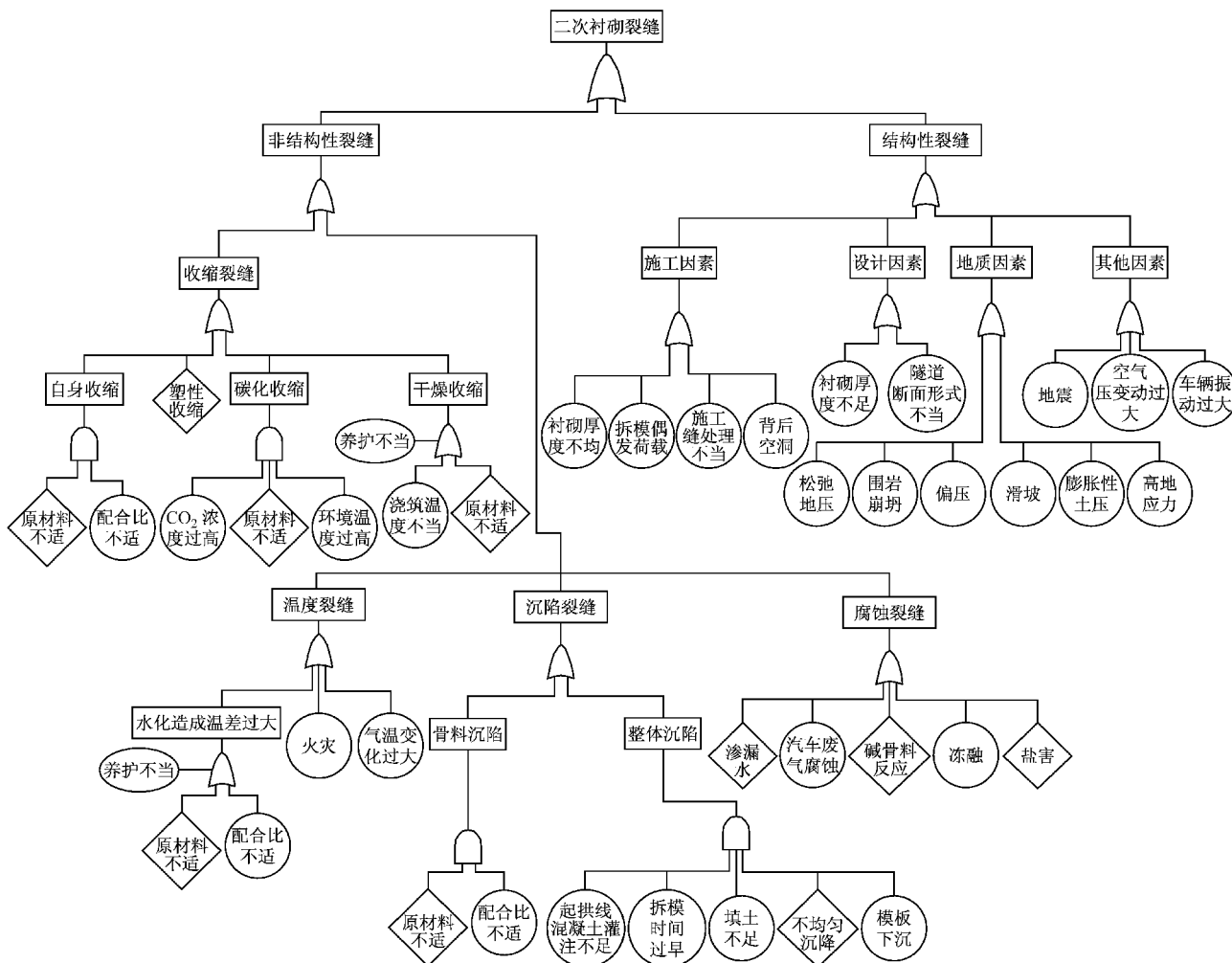


图 4 衬砌裂缝故障树模型

Fig.4 Fault tree model of lining cracks

在衬砌裂缝的故障树分析中,最小割集代表导致衬砌裂缝发生一种致灾通道. 采用布尔代数法计算,可以求得衬砌裂缝故障的最小割级如下: $\{X_1, X_2\}, \{X_3\}, \{X_1, X_4, X_5\}, \{X_6, X_7\}, \{X_1, X_7\}, \{X_2, X_7\}, \{X_8\}, \{X_9\}, \{X_{10}\}, \{X_{11}\}, \{X_{12}\}, \{X_{13}\}, \{X_{14}\}, \{X_{15}\}, \{X_{16}\}, \{X_{17}\}, \{X_{18}\}, \{X_{19}\}, \{X_{20}\}, \{X_{21}\}, \{X_{22}\}, \{X_{23}\}, \{X_{24}\}, \{X_{25}\}, \{X_{26}\}, \{X_{27}\}, \{X_{28}\}, \{X_{29}\}, \{X_{30}\}, \{X_{31}\}, \{X_{32}\}, \{X_{33}\}, \{X_{34}\}$. 代号的具体说明见表 1. 依照上述顺序,最小割集依次排序为 $C_1 \sim C_{33}$.

导致顶事件发生的最小割集有 33 个,表示共有 33 种致灾通道可以造成衬砌裂缝病害.

3 裂缝主要致灾通道分析

3.1 致灾通道灰色关联分析原理

灰色关联分析法是一种按照待分析系统的各特征参量序列构成的发展趋势接近程度来度量待分析系统与参照系统之间相似性的一种指标,待分析系统与参照系统越贴近,则关联度越大^[19]. 假设有两个

数列 $\{x_i(t)\}$ 和 $\{x_j(t)\}$, 则在同一时刻它们间的关联度定义为^[20]

$$r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \epsilon_{ij}(t) \quad (1)$$

$$\epsilon_{ij}(t) = \frac{\min |x_i(t) - x_j(t)| + 0.5 \max |x_i(t) - x_j(t)|}{|x_i(t) - x_j(t)| + 0.5 \max |x_i(t) - x_j(t)|} \quad (2)$$

式中: r_{ij} 为数列之间的关联度, $\epsilon_{ij}(t)$ 为关联系数。

表 1 符号说明及相关概率

Tab.1 Symbol description and related calculation

底事件	基本底事件	P_t	$P_{\text{底}}$
X_1	原材料不适	0.082 57	0.150 70
X_2	配合比不适	—	0.024 51
X_3	塑性收缩	0.045 87	0.086 73
X_4	CO ₂ 浓度过高	—	0.094 92
X_5	环境温度过高	0.027 52	0.100 35
X_6	浇筑温度不当	—	0.091 29
X_7	养护不当	—	0.004 33
X_8	气温变化过大	—	0.046 39
X_9	起拱线混凝土浇筑不足	—	0.014 50
X_{10}	拆模时间过早	0.009 17	0.024 53
X_{11}	不均匀沉降	0.091 74	0.096 62
X_{12}	模板下沉	—	0.016 32
X_{13}	渗漏水	0.119 27	0.114 01
X_{14}	汽车废气腐蚀	—	0.000 04
X_{15}	碱骨料反应	0.018 35	0.034 55
X_{16}	冻融	0.027 52	0.040 95
X_{17}	盐害	0.018 35	0.030 92
X_{18}	衬砌厚度不均	0.064 22	0.071 99
X_{19}	拆模偶发荷载	0.009 17	0.015 46
X_{20}	施工缝处理不当	0.064 22	0.069 27
X_{21}	填土不足	—	0.023 57
X_{22}	背后空洞	0.110 09	0.116 67
X_{23}	衬砌厚度不足	0.018 35	0.029 11
X_{24}	隧道断面形式不当	0.018 35	0.025 49
X_{25}	松弛地压	0.091 74	0.105 69
X_{26}	围岩崩坍	0.045 87	0.041 06
X_{27}	偏压	0.155 96	0.146 86
X_{28}	滑坡	0.073 39	0.092 89
X_{29}	膨胀性土压	0.073 39	0.067 51
X_{30}	高地应力	0.027 52	0.040 95
X_{31}	地震	—	0.000 37
X_{32}	空气压变动过大	—	0.004 60
X_{33}	车辆振动过大	0.009 17	0.000 09
X_{34}	火灾	0.009 17	0.006 04

注: $P_{\text{底}}$ 为底事件概率。

假设造成隧道衬砌裂缝的致灾通道有 m 种, 共有 n 个底事件, 第 i 个致灾通道 C_i 共有 j 个底事件。令致灾通道 C_i 中 j 个底事件的值等于“1”, 其余 $(n-j)$ 个事件的值等于“0”, 则衬砌裂缝的致灾通道就构成了一个典型致灾通道特征矩阵

$$X_c = \begin{bmatrix} X_{C_1}(1) & X_{C_1}(2) & \cdots & X_{C_1}(n) \\ X_{C_2}(1) & X_{C_2}(2) & \cdots & X_{C_2}(n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{C_m}(1) & X_{C_m}(2) & \cdots & X_{C_m}(n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

对衬砌裂缝的底事件进行重要度分析, 可以得到以各底事件重要度组成的待检向量

$$\omega_T = \{\omega_T(1), \omega_T(2), \cdots, \omega_T(n)\} \quad (4)$$

将致灾通道特征矩阵与待检向量之间进行关联度计算可得到各致灾通道的关联度序列。

3.2 底事件概率的获取

由于统计样本有限, 因此为了提高所获取的底事件概率的可靠性, 本文采用统计概率与专家调查所得概率相结合的方法来获取底事件的最终概率。计算过程中, 设定统计概率和专家调查所得到的概率的权重值一致, 则底事件的最终概率 $P_{\text{底}}$ 按照下式进行计算:

$$P_{\text{底}} = 0.5P_t + 0.5P_d \quad (5)$$

式中: P_d 为采用专家调查所得底事件概率。

工程评估中, 专家调查法是最常用的获取未知统计数据的方法。由于专家调查中难以给出底事件的具体发生概率, 因此本文采用级差概率进行专家调查。级差概率是由美国 Graham 和 Kinney 提出的作业危险性评价法, 是一种简单易行的半定量评价法, 具有调查方便的特点^[21]。发生危险事件的级差概率分值见文献^[22-23]。依据文献^[21], 本文共选取四类专家进行专家调查, 专家的具体计算系数和计算权重见表 2。

专家的计算权重按照式(6)进行计算。

$$w_r = \frac{v_r}{\sum_{r=1}^4 (m_r v_r)} \quad (6)$$

式中: v_r 为专家类别对应的计算系数, m_r 为专家类别所对应的人数。

本文共发出了 55 份问卷, 收回 18 份有效问卷。有效问卷的具体专家构成见表 2。

表 2 专家计算权重

Tab.2 Calculation weight of experts

专家类别	计算系数	人数	w
一类	1.0	3	0.064 1
二类	0.9	8	0.057 7
三类	0.8	5	0.051 3
四类	0.7	2	0.044 9

专家调查所得到的底事件概率按照式(7)(加权平均法)进行计算。

$$P_d = \frac{\sum_{r=1}^4 \sum_{i=1}^n \omega_i P_{di}}{\sum_{r=1}^4 m_r} \quad (7)$$

式中: P_{di} 为专家所给出的底事件级差概率。

经计算, 得到各底事件的概率, 见表 1。

3.3 顶事件概率的计算

(1) 当各个最小割集中彼此无重复的底事件, 顶事件的发生概率为^[23]

$$P_{\text{顶}}(T) = \bigcup_{l=1}^m \prod_{X_i \in C_l} P_{\text{底}i} = 1 - \prod_{l=1}^m (1 - P_{\text{底}i}) \quad (8)$$

式中: l 为最小割集序数, i 为底事件序数, $P_{\text{底}i}$ 为第 i 个底事件的概率, m 为系统中最小割集数, C_l 为第 l 个最小割集。

(2) 当最小割集中有重复事件时, 采用不交算法进行计算。所谓不交算法^[24], 即是把故障树结构函数的最小割集表达式化为不交化表达式, 然后再进行顶事件的概率计算。具体过程如下: 设 C_1, C_2, \dots, C_R 为全部最小割集, 令 $K_j = \prod_{X_i \in C_m} X_i$, 则有

$$\begin{cases} K_1 + K_2 + \dots + K_r = K_1 + \overline{K_1}(K_2 + \overline{K_2}(K_3 + \overline{K_3}(K_4 + \dots + \overline{K_{r-2}}(\overline{K_{r-1}} + \overline{K_{r-1}}K_r) \dots))) = \\ K_1 + \overline{K_1}K_2 + \overline{K_1}\overline{K_2}K_3 + \dots + \overline{K_1}\overline{K_2}\dots\overline{K_{r-1}}K_r \\ \overline{K_i} = (\overline{X_1}X_2\dots\overline{X_i}) = X_1 + \overline{X_2}X_1 + \overline{X_3}X_1X_2 + \\ \dots + X_1X_2\dots\overline{X_{i-1}}X_i \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\overline{K_i}$ 为 K_i 的补集。

将衬砌裂缝中无重复事件和有重复事件的最小割集概率分别按照式(8)和式(9)进行计算, 然后相加可以得到顶事件衬砌裂缝的概率。

3.4 关联度计算

(1) 底事件重要度计算

重要度分析常用方法主要有结构重要度、概率重要度、相对概率重要度和相关割集重要度四种^[24]。其中, 当故障树中存在多个单一事件的最小割集时, 采用结构重要度和概率重要度分析底事件重要度时, 会得到能独立构成最小割集的所有底事件重要度相等的结论, 因而得不到实用的重要度排序。而由于计算方法的原因, 相对重要度和相关割集重要度的计算结果大致相同, 可采用两者之一来计算重要度。本文采用相关割集重要度进行底事件重要度分析, 具体计算表达式如下^[24]:

$$\omega_T(i) = \frac{P\left(\bigcap_{j=1}^{N_i} C_j^{(i)}, X_i = 1\right)}{P_{\text{顶}}} \quad (10)$$

式中: $C_j^{(i)}$ 是包含底事件 X_i 的最小割集, N_i 是系统包含底事件 X_i 最小割集的数目, $P_{\text{顶}}$ 为顶事件概率。

(2) 关联度计算

按照致灾通道灰色关联分析原理进行关联度计算, 得到各致灾通道的关联度及大小排序, 见表 3。

表 3 关联度计算结果

Tab. 3 Calculation results of correlation degree			
最小割集	关联度	最小割集	关联度
$C_{26} = \{X_{27}\}$	0.707 835	$C_{22} = \{X_{23}\}$	0.678 463
$C_{21} = \{X_{22}\}$	0.697 710	$C_{23} = \{X_{24}\}$	0.677 481
$C_{12} = \{X_{13}\}$	0.697 026	$C_9 = \{X_{10}\}$	0.677 212
$C_{24} = \{X_{25}\}$	0.695 015	$C_{20} = \{X_{21}\}$	0.676 939
$C_{10} = \{X_{11}\}$	0.692 991	$C_4 = \{X_6, X_7\}$	0.674 825
$C_{27} = \{X_{28}\}$	0.692 194	$C_{11} = \{X_{12}\}$	0.674 750
$C_2 = \{X_3\}$	0.690 913	$C_{18} = \{X_{19}\}$	0.674 475
$C_{17} = \{X_{18}\}$	0.687 938	$C_8 = \{X_9\}$	0.674 160
$C_{19} = \{X_{20}\}$	0.687 393	$C_{33} = \{X_{34}\}$	0.671 130
$C_{28} = \{X_{29}\}$	0.687 040	$C_6 = \{X_2, X_7\}$	0.670 762
$C_7 = \{X_8\}$	0.682 621	$C_{31} = \{X_{32}\}$	0.670 563
$C_{25} = \{X_{26}\}$	0.681 414	$C_{30} = \{X_{31}\}$	0.668 781
$C_{29} = \{X_{30}\}$	0.681 388	$C_{32} = \{X_{33}\}$	0.668 659
$C_{15} = \{X_{16}\}$	0.681 388	$C_{13} = \{X_{14}\}$	0.668 635
$C_5 = \{X_1, X_7\}$	0.679 859	$C_1 = \{X_1, X_2\}$	0.665 844
$C_{14} = \{X_{15}\}$	0.679 854	$C_3 = \{X_1, X_4, X_5\}$	0.643 625
$C_{16} = \{X_{17}\}$	0.678 936		

由关联度计算结果可以得到, 造成隧道衬砌裂缝的前十种致灾通道依次为 $C_{26}, C_{21}, C_{12}, C_{24}, C_{10}, C_{27}, C_2, C_{17}, C_{19}$ 和 C_{28} , 即{偏压}、{背后空洞}、{渗漏水}、{松弛地压}、{不均匀沉降}、{滑坡}、{塑性收缩}、{衬砌厚度不均}、{施工缝处理不当}和{膨胀性土压}。

4 结论

(1) 统计分析境内外 109 条隧道衬砌裂缝的结果表明: 从裂缝产生机理角度上看, 隧道衬砌裂缝中张拉裂缝所占百分比较大, 其次为复合裂缝和剪切裂缝。

(2) 采用灰色关联分析法得到了隧道衬砌裂缝各种致灾通道的关联度排序, 分析结果表明造成隧道衬砌裂缝的前五项关键致灾通道为: {偏压}、{背后空洞}、{渗漏水}、{松弛地压}和{不均匀沉降}。这为有的放矢地进行隧道衬砌开裂分析明确了方向, 也为有效地控制裂缝的产生提供了理论依据。

需要指出的是, 本文是从全局出发, 因此本文得到的主要致灾通道对于具体的工程而言不一定吻合。如果针对具体的工程, 需要在实际工程背景的基础上进行专家调查, 以期获得更为真实的主要致灾通道。

参考文献:

- [1] 余健,何川,汪波,等.衬砌背后空洞对隧道结构承载力影响的模型试验研究[J].公路交通科技,2008,25(1):104.
SHE Jian, HE Chuan, WANG Bo, et al. Study on effect of cavities behind linings on bearing capacity of tunnel structure by model test [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(1): 104.
- [2] 关宝树.隧道工程维修管理要点集[M].北京:人民交通出版社,2004.
GUAN Baoshu. Points set of maintenance and management in tunnel project[M]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [3] 王华牢,刘学增,李宁,等.纵向裂缝隧道衬砌结构的安全评价与加固研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(z1):2651.
WANG Hualao, LIU Xuezheng, LI Ning, et al. Safety evaluation of tunnel lining with longitudinal cracks and reinforcement design[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (supplement): 2651.
- [4] 王平让.隧道衬砌裂缝机器视觉检测方法 & 结构安全评估研究[D].上海:同济大学,2012.
WANG Pingrang. Study on machine vision inspection method for cracks and structural safety assessment in tunnel lining [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [5] WANG Taitian. Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes[J]. Engineering Geology, 2010, (115): 80.
- [6] Mashimo H, Isago N, Kitani T. Numerical approach for design of tunnel concrete lining considering effect of fiber reinforcements [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2004, 19(4): 454.
- [7] Lee J S, Choi I Y, Lee H U, et al. Damage identification of a tunnel liner based on deformation data [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2005, 20(1): 73.
- [8] Anders A. Investigation of shrinkage cracking in shotcrete on tunnel drains [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010, 25(5): 607.
- [9] 蒲春平,夏才初,李永盛,等.隧道的温度应力及由其引起的裂缝开展规律的研究[J].中国公路学报,2000,13(2):76.
PU Chunping, XIA Caichu, LI Yongsheng, et al. Study of thermo-stress of highway tunnel and the law of line-fissure development caused by the thermo-stress[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(2): 76.
- [10] 刘庭金,朱合华,夏才初,等.云南省连拱隧道衬砌开裂和渗漏水调查结果及分析[J].中国公路学报,2004,17(2):64.
LIU Tingjin, ZHU Hehua, XIA Caichu, et al. Analysis of site investigation of cracking and leakage on arcade tunnel lining of Yunnan province[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(2): 64.
- [11] 叶飞,何川,夏永旭.隧道衬砌裂缝的跟踪监测与分析研究[J].土木工程学报,2010,43(7):97.
YE Fei, HE Chuan, XIA Yongxu. Post-construction monitoring and analysis for highway tunnel lining cracks[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(7): 97.
- [12] 王建秀,朱合华,唐益群,等.双连拱隧道裂缝成因及防治措施[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):195.
WANG Jianxiu, ZHU Hehua, TANG Yiqun, et al. Cracking twin-arc highway tunnels and its prevention measures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (2): 195.
- [13] 翁壁石,李小坤,龙广成,等.硫酸盐环境下铁路隧道结构衬砌混凝土病害调查及分析[J].铁道科学与工程学报,2010,17(13):91.
WANG Bishi, LI Xiaokun, LONG Guangcheng, et al. Investigation on deterioration of lining concrete of railway tunnel suffering sulfate ambient [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 17(13): 91.
- [14] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
WANG Tiemeng. Control of cracking in engineering structure [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995.
- [15] 王战兵.隧道病害处治研究[D].长安:长安大学,2004.
WANG Zhanbing. The study of tunnels disease treatment[D]. Chang'an: Chang'an University, 2004.
- [16] 荣耀.海底隧道衬砌裂缝控制关键技术研究[D].上海:同济大学,2007.
RONG Yao. The research on the key technology of the crack controlling of reinforced concrete lining of undersea tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [17] 苏生.公路隧道二次衬砌开裂机理与开裂性试验研究[D].杭州:浙江大学,2007.
SU Sheng. Experimental study on the crack principle and anti-crack performance of secondary linings of highway tunnel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [18] 豆海涛.基于温度梯度的岩石隧道衬砌渗漏水检测及风险评估研究[D].上海:同济大学,2011.
DOU Haitao. The study on water leakage detection based on temperature gradient and risk evaluation for rock tunnel lining [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [19] 田建艳,张鹏飞,刘思峰.基于灰色关联分析的神经网络轧制力预报模型的研究[J].应用力学学报,2009,26(1):164.
TIAN Jianyan, ZHANG Pengfei, LIU Sifeng. Neural network prediction model of rolling force based on grey incidence analysis[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2009, 26 (1): 164.
- [20] 苏欣平,杨成禹,吴学深,等.基于灰色关联理论的故障树分析及程序实现[J].中国工程机械学报,2010,8(4):461.
SU Xinping, YANG Chengyu, WU Xueshen, et al. Fault tree analysis and programming based on grey correlation theory[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2010, 8(4): 461.
- [21] 陈龙.城市软土盾构隧道施工期风险分析与评估研究[D].上海:同济大学,2004.
CHENG Long. Analysis and evaluation research on risk in shield tunnel construction on municipal soft soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [22] 维齐利 W E.故障树手册[M].北京:原子能出版社,1987.
WEIQILI W E. Handbook of fault tree[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1987.
- [23] 张小平,王杰,胡明亮.事故树分析在排桩基坑工程安全评价中的应用研究[J].岩土工程学报,2011,33(6):960.
ZHANG Xiaoping, WANG Jie, HU Mingliang. Application of FTA in safety assessment of row piles of excavation engineering[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(6): 960.
- [24] 中华人民共和国行业标准编写组. GJB/Z 768A—98 故障树分析指南[S].北京:中国建筑工业出版社,1998.
The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Guide to fault tree analysis[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998.