

脚手架中人为错误发生规律的数学模型及其在人因可靠度分析中的应用

朱豫争

(中电建路桥集团有限公司, 北京 100032)

摘要:人为错误是脚手架坍塌的主要因素。分析此类人为错误的特点,将其分为结构性错误和参数性错误两类,给出基于现场调查数据的初始人为错误发生率的计算方法和错误大小的概率模型,提出改进的证据融合方法,给出错误保有率的区间模型及其计算公式,建立扣件式脚手架中人为错误的数学模型。基于上述数学模型,给出人因可靠度的区间分析方法,为研究脚手架的安全性提供理论基础。

关键词:人为错误;脚手架;建模方法;证据理论;可靠性分析

中图分类号:TU74 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)01-0231-05

脚手架结构坍塌事件时有发生,事故原因分析表明,人为错误是此类事故的主要原因。人为错误指偏离有关规范、规程与规定要求的偏差,人为错误发生规律是研究人为错误的基础,依据人为错误的检查和改错流程,人为错误发生规律包括初始错误发生率、初始错误大小和改错后错误保有率等。

文献[1]的调研结果表明,绝大部分脚手架中人为错误的初始发生率为 5%~15%,本文称之为具有相对较高概率的人为错误。当初始错误发生率大于 15%时,可以较为容易取得足够的样本值,从而直接得到统计规律;当错误发生率小于 5%时,较难获得样本,无法直接给出统计规律。对于初始发生概率为 5%~15%的人为错误,可以采集到一些样本,但数量不足;依然难以通过现场调查直接得到足够的错误保有率的样本数据。

本文将针对脚手架中具有相对较高发生概率的人为错误的上述特点,充分利用现场采样数据,研究初始人为错误的调查方法和数据处理方法,基于包容性更强的 D-S 证据理论,研究改错效果的调查方法和数据处理方法,给出人为错误发生规律的数学模型。基于该模型,给出人因可靠性的区间分析法,并应用于脚手架的人因可靠性分析中。

1 调查方法

1.1 错误类型

脚手架结构中的人为错误分为两类,一类为偏

离理论分析模型的偏差错误,本文简称结构性错误;一类为偏离有关规范、规程与规定要求(容许误差)的参数方面的偏差,本文简称参数性错误。人为错误也可分为保守型和冒进型错误,保守型错误增加建设成本,使得结构可靠性增加,冒进型错误降低建设成本,使得结构可靠性降低。受利益驱动,绝大部分施工错误均为冒进型错误。因此本文以冒进型错误为研究对象。

根据脚手架坍塌事故原因和对施工现场的初步调查,可以识别施工中各种人为错误。

1.2 初始人为错误发生概率和程度的调查方法

当完成人为错误的识别之后,在搭建完毕但还没有改错的时段内,以与各种错误对应的参数和构件为调查对象,无论出错与否均进行样本采集。

1.3 基于 D-S 证据理论的错误保有率的调查方法

D-S 证据理论由 Dempster^[1] 首先提出,后经 Shafer^[2] 改进,主要用于融合多个不确定性信息(称之为证据)。证据理论用一个概率的区间而不是单一概率值去描述不确定性,容许含糊不清的证据存在,对于未知事件的处理更接近于人的自然思维习惯,给了专家更大的灵活性。因此本文的问卷调查方法基于 D-S 证据理论。

1.3.1 人为错误的改错次数

假设所有人为错误均能在检查中发现,绝大多数情况下最多只进行两次检查和改错。

收稿日期:2021-09-08

作者简介:朱豫争(1983—),男,安徽合肥人,中电建路桥集团有限公司,工程师,研究方向为道路、桥梁、隧道工程施工技术。

1.3.2 调查问卷

采取文献[4]的调查问卷。认为第二次检查后仍有错误未得到改正,因此对于每种人为错误,设有初次检查时能否及时改错、是否进行第二次检查和第二次检查后人为错误是否得到改正等 3 个判据。为了简化,忽略错误种类的下标,分别记为 A_1 、 A_2 和 A_3 。

根据 D-S 证据理论的要求,对判断 A_1 , 识别框架定义 Θ_1 为{ 初次检查时能及时改错 (θ_{11}), 初次检查时不能及时改错 (θ_{12})}, 焦元为 θ_{11} 、 θ_{12} 和 $\theta_{11} \cup \theta_{12}$, 分别记为 A_{11} 、 A_{12} 和 A_{13} ; 对判断 A_2 , 识别框架 Θ_2 定义为{ 进行第二次检查 (θ_{21}), 不进行第二次检查 (θ_{22})}, 焦元为 θ_{21} 、 θ_{22} 和 $\theta_{21} \cup \theta_{22}$, 分别记为 A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23} ; 对判断 A_3 , 识别框架 Θ_3 定义为{ 第二次检查后人为错误没有得到改整 (θ_{31}), 第二次检查后人为错误得到改整 (θ_{32})}, 焦元为 θ_{31} 、 θ_{32} 和 $\theta_{31} \cup \theta_{32}$, 分别记为 A_{31} 、 A_{32} 和 A_{33} 。其中 A_{i3} 为表示判据 A_i 不确定、含糊不清。人为错误的改错流程如图 1 所示。

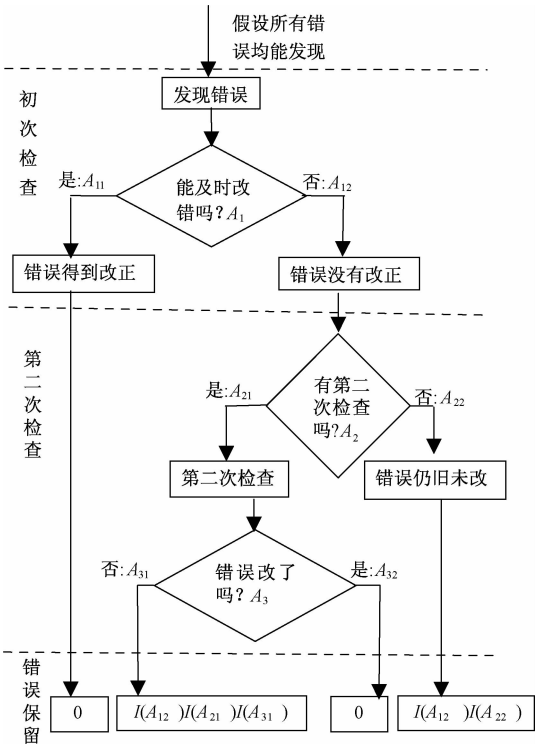


图 1 人为错误的改错流程

基于改错流程,在调查问卷中为每种人为错误的焦元 A_{ij} ($i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3$) 设计了问题,具体如下。

A_1 : 初次检查发现错误后,改正的可能性是____%,不改正的可能性是____%,不确定的可能性是____%。

A_2 : 如果初次检查发现的错误没有改正,则执行第二次检查的可能性是____%,不执行第二次检查的可能性是____%,不确定的可能性是____%。

A_3 : 第二检查结束后,初次检查发现的错误还没有改正的可能性是____%,得到改正的可能性是____%,不确定的可能性是____%。

为了使得专家的意见具有广泛的代表性,要求至少要有 50 名以上具有 10 年以上工作经验的专家。第 k 名专家的调查结果记为 $m_k(A_{ij})$, 是焦元 A_{ij} 的一个基本信任度。

2 人为错误发生规律的数学模型

2.1 初始错误的统计规律

2.1.1 结构性错误的初始发生率

初始发生率为

$$\text{初始发生率} = \frac{\text{错误的数量}}{\text{总检查次数}} \tag{1}$$

2.1.2 参数性错误的初始发生率和错误大小的概率模性

基于所有采集到的样本,得某参数的概率密度函数,如图 2 所示,图中阴影部分表示参数超出规范所规定容许误差,其面积为错误发生率。从图中可以看出无论是从左边超出还是从右边超出容许误差,阴影部分均可用双参数指数分布近似表示,具体如下:

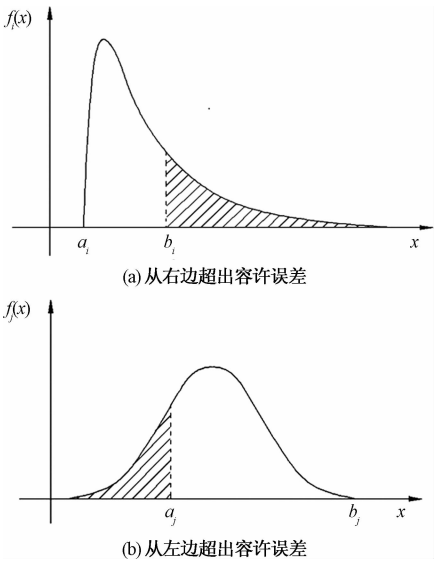


图 2 结构参数的概率密度图

对于参数 X_i , 当初始错误 E_i 为右边超出容许误差上界 b_i 的错误时, E_i 发生概率 $P(E_i)$ 为

$$P(E_i) = \int_{b_i}^{+\infty} f_i(x) dx \tag{2}$$

E_i 的概率密度函数为

$$f_{E_i}(x) = \lambda_i e^{-\lambda_i(x-b_i)}, x \geq b_i \quad (3)$$

其均值 μ'_i 和标准差 σ'_i 为

$$\mu'_i = b_i + 1/\lambda_i \quad (4)$$

$$\sigma'_i = \lambda_i \quad (5)$$

由式(4)可以求出式(3)中参数 λ_i 为

$$\lambda_i = [\mu'_i - b_i]^{-1} = \left[\frac{1}{P(E_i)} \int_{b_i}^{+\infty} x f_i(x) dx - b_i \right]^{-1} \quad (6)$$

对于参数 X_j , 当初始错误 E_j 为左边超出容许误差下限 a_j 的错误时, E_j 发生概率 $P(E_j)$ 为

$$P(E_j) = \int_0^{a_j} f_j(x) dx \quad (7)$$

概率密度函数为

$$f_{E_j}(x) = \lambda_j e^{-\lambda_j(a_j-x)}, x \leq a_j \quad (8)$$

其均值 μ'_j 和标准差 σ'_j 为

$$\mu'_j = a_j - 1/\lambda_j \quad (9)$$

$$\sigma'_j = \lambda_j \quad (10)$$

由式(9)可以求出式(8)中参数 λ_j 为

$$\lambda_j = \left[a_j - \frac{1}{P(E_j)} \int_0^{a_j} x f_j(x) dx \right]^{-1} \quad (11)$$

2.2 错误改正效果的区间模型

假设收到 n 名专家的调查结果(证据), 则数据空间为 n 维, 所有证据合成后可得到 Θ_i 内所有焦元的信任分配度。

作者发现当调查专家数量大于 5 人时, 用 D-S 理论合成后的信任分配度将会出现极化现象, 表现为当调查结果中大部分专家给某个问题较高的基本信任度时, 该问题的信任分配度将大幅度提高, 而对于某个基本信任度普遍较低的问题, 其合成后的信任度分配度将大幅度降低; 专家数量越多, 该种现象越明显。

分析原因后发现, 用不同数量的专家调查数据进行合成时, 将得到不同维数空间中的信任分配度, 这些数据结果不具备可比性。为此, 对于 Θ_i , 本文将合成后的数据统一换到一维空间中, 用如下新证据合成公式来计算信任分配度, 即

$$m(A_{il}) = \frac{1}{K_i} \sqrt[n]{\sum_{A_{ij} \subset \Theta_i} \prod_{1 \leq k \leq n} m_k(A_{ij})} \quad (12)$$

式中: $m(A_{il})$ 为合成后 Θ_i 内第 l 个焦元的信任分配度, $1 \leq l \leq 3$; $m_k(A_{ij})$ 为第 k 个专家给出的焦元 A_{ij} 的基本信任度; K_i 为系数,

$$K_i = \sum_{j=1}^3 \sqrt[n]{\sum_{A_{ij} \subset \Theta_i} \prod_{1 \leq k \leq n} m_k(A_{ij})}。$$

根据图 1, 错误保有率的区间变量为

$$I(\bar{D}/O) = I(A_{12})I(A_{22}) + I(A_{12})I(A_{21})I(A_{31}) \quad (13)$$

式中: $I(\bar{D}/O)$ 为错误保有率的区间变量; $I(A_{12})$ 为初次检查时不能及时改错可能性的区间变量; $I(A_{22})$ 为不进行第二次检查可能性的区间变量; $I(A_{21})$ 为进行第二次检查的可能性的区间变量; $I(A_{31})$ 为第二次检查后人为错误没有改整的可能性的区间变量。

根据证据理论, 上述区间变量的区间分别为

$$I(A_{12}) = [m(A_{12}), m(A_{12}) + m(A_{13})] \quad (14)$$

$$I(A_{22}) = [m(A_{22}), m(A_{22}) + m(A_{23})] \quad (15)$$

$$I(A_{21}) = [m(A_{21}), m(A_{21}) + m(A_{23})] \quad (16)$$

$$I(A_{31}) = [m(A_{31}), m(A_{31}) + m(A_{33})] \quad (17)$$

根据区间运算法则^[6], 得 $I(\bar{D}/O)$ 的区间下界和上界为

$$d(\bar{D}/O) = m(A_{12})[m(A_{22}) + m(A_{21})m(A_{31})] \quad (18)$$

$$u(\bar{D}/O) = [m(A_{12}) + m(A_{13})]\{[m(A_{22}) + m(A_{23}) + m(A_{21}) + m(A_{23})][m(A_{31}) + m(A_{33})]\} \quad (19)$$

3 人因可靠度的区间估计

Ellingwood^[6]曾假设 r 个人为错误相互独立, 基于人为错误的概率模型, 给出了人因可靠度的概率计算公式。本文在此基础上, 基于初始人为错误的概率模型和改错效果的区间模型, 给出人因可靠度的区间估计公式:

$$I[P(EF)] = \sum_{i=1}^r P(F/\bar{D}_i O_i) I(\bar{D}_i/O_i) P(O_i) \quad (20)$$

式中: F 表示结构或构件的失效事件; E 表示错误发生的事件; O_i 为第 i 个过失发生的事件; $\bar{D}_i$ 为第 i 个过失经检查和改错程序后仍未得到改正的事件。

$I[P(EF)]$ 的区间下界 $d[P(EF)]$ 和上界 $u[P(EF)]$ 分别为

$$d[P(EF)] = \sum_{i=1}^r P(F/\bar{D}_i O_i) d(\bar{D}_i/O_i) P(O_i) \quad (21)$$

$$u[P(EF)] = \sum_{i=1}^r P(F/\bar{D}_i O_i) P(O_i) u(\bar{D}_i/O_i) \quad (22)$$

4 应用

扣件式脚手架中人为错误的发生频率较高且对可靠性影响较大的人为错误有:

结构性人为错误 E_1 = 没有设置竖向剪刀撑;

几何参数错误 E_2 = 立杆壁厚不满足规范要求。

无人为错误随机变量的统计特征见表 1, 实际调查得到的立杆壁厚的统计特征和没有搭设竖向

剪刀撑的发生率见表 2。从统计结果看,立杆壁厚不足,为左边超出容许误差 2.5 mm 的错误,根据式(2)得初始错误的发生率为 11.9%,根据式(8)和式(11)得错误程度的概率密度函数为

$$f(x) = 7.27e^{-7.27(2.5-x)} \tag{23}$$

表 1 无人为错误随机变量的统计特征

随机变量	均值	变异系数	分布类型
恒载/(kN/m²)	9.25	0.110	正态分布
活载/(kN/m²)	1.0	0.4	极值 I 型
振捣荷载/(kN/m²)	2.0	0.4	极值 I 型
施工设备重量/kN	7.5	0.05	正态分布
计算模式不确定性	1.03	0.07	正态分布
节点刚度/(kN/rad)	77.4	0.20	正态分布
钢材弹性模量/EK	1.08	0.08	正态分布
立杆超出顶层水平杆长度/m	0.7	0.05	正态分布
初始弯曲率/‰	1	0.15	正态分布
搭设偏差/‰	2	0.15	指数分布
钢管壁厚/mm	3.25	0.08	正态分布

表 2 实际调查结果

调查对象	均值/mm	标准差/mm	分布类型	容许误差/mm	错误发生率
竖向剪刀撑搭设与否					0.15
壁厚	2.83	0.28	正态分布	+0.5,-1.0	0.119

采用文献[7]所提方法计算图 3 所示的扣件式模板支架的极限承载力,用 Monte Carlo 法通过 2 000 次有限元计算,得出 E₁和 E₂发生条件下的极限承载力的统计特征,见表 3。为了比较,采用同样的方法,得出了无错情况下极限承载力的统计特征,见表 3。采用 Monte Carlo 法,通过 2×10⁷次计算,得出失效概率,见表 3。

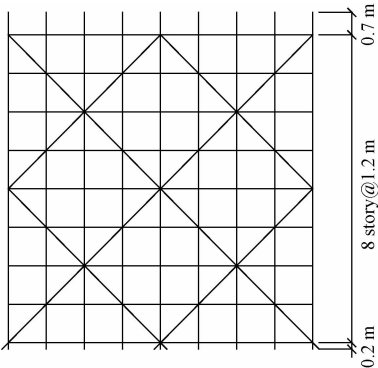


图 3 立面图

87 位专家回答了调查问卷,调查结果的区间见表 4。由式(12),得到调查数据的合成结果,见表 5。

表 3 极限承载力和失效概率

错误	极限承载力的统计特征			
	均值/kN	变异系数	分布类型	失效概率
E ₁	36.43	0.13	正态分布	1.46×10 ⁻²
E ₂	33.14	0.12	对数正态	3.02×10 ⁻²
无错	44.16	0.13	对数正态	2.55×10 ⁻⁴

表 4 87 位专家的调查数据的区间

错误	判据	A _{i1}	A _{i2}	A _{i3}
E ₁	A ₁	[0.3,0.80]	[0.10,0.60]	[0.10,0.2]
	A ₂	[0.10,0.50]	[0.30,0.80]	[0.10,0.45]
	A ₃	[0.05,0.40]	[0.50,0.80]	[0.10,0.30]
E ₂	A ₁	[0.05,0.25]	[0.60,0.83]	[0.10,0.35]
	A ₂	[0.10,0.50]	[0.30,0.80]	[0.10,0.45]
	A ₃	[0.70,0.90]	[0.02,0.10]	[0.05,0.20]

表 5 调查数据的合成结果

错误	判据	A _{i1}	A _{i2}	A _{i3}
E ₁	A ₁	0.52	0.36	0.12
	A ₂	0.33	0.52	0.15
	A ₃	0.28	0.61	0.11
E ₂	A ₁	0.22	0.68	0.10
	A ₂	0.33	0.52	0.15
	A ₃	0.79	0.13	0.08

将上述结果,代入式(18)和式(19)得
 $I(\overline{D}_1/O_1)=[0.22,0.41],I(\overline{D}_2/O_2)=[0.53,0.85]$ 。

代入式(21)和式(22)得

$I[P(EF)] = [2.382 \times 10^{-3}, 3.948 \times 10^{-3}]$ 。

与无人为错误的结构失效概率相比,经过改错后的两种人为错误使得失效概率增加了近 10 倍,严重降低了结构的安全性。

5 结论

对于脚手架中常见的人为错误,提出了初始错误发生率和错误程度的建模方法;对 D-S 证据理论进行了改进,使得专家调查的数据可以在统一的一维数据空间进行比较和分析,给出了错误保有率区间的计算方法;基于上述数学模型,给出了人因可靠度的区间分析方法。

将本文提出的方法用于扣件式脚手架的人因可靠性分析中,计算结果表明,本方法可以在初始错误样本有限、专家的调查结果一致性较差的情况,给出人因可靠度的区间;计算结果还表明,仅仅两种人为错误已使得失效概率增加了一个数量级,严重降低了结构的安全性。因此,人为错误是应该倍加关注的危险要素。

参考文献

[1] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced

by a multivalued mapping[R]. The Annals of Mathematical Statistics,1967;325-339.

[2] SHAFER G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton;Princeton University Press,1976;223-238.

[3] 谢楠. 高大模板支撑体系的安全控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[4] 谢楠,李靖,李建爽,等. 基于证据理论的施工中人为过失改错效果的评估方法[J]. 工程力学,2014,31(S1):245-248.

[5] 王德人,张连生,邓乃扬. 非线性方程的区间算法[M]. 上海:上海科技出版社,1987.

[6] ELLINGWOOD B. Design and construction error effects on structural reliability[J]. Journal of Structural Engineering,1987,113(2):409-422.

[7] 谢楠,付小辉,王立峰,等. 扣件式高大模板支架的概率极限状态设计法研究[J]. 工程力学,2016,33(10):68-75.

The Mathematical Model of Human Error Occurrence in Scaffolding and Its Application in Human Reliability Analysis

ZHU Yuzheng

(Powerchina Roadbridge Group Co.,Ltd.,Beijing 100032,China)

Abstract: Human error is the main factor in the collapse of scaffolding. The characteristics of such human errors and divides them into structural errors and parametric errors was analyzed. The calculation method and calculation method of initial human error incidence based on field survey data are given. Probabilistic model of error size, an improved evidence fusion method is proposed, an interval model of error retention rate and its calculation formula are given, and a mathematical model of human error in fastener-type scaffolding is established. Based on the above mathematical model, an interval analysis method of human factor reliability is given, which provides a theoretical basis for studying the safety of scaffolding.

Keywords: human error;scaffolding;modeling method;evidence theory;reliability analysis