

# 基于模糊数学的寒区高速铁路路基 稳定性评价及应用分析

刘 华<sup>1</sup>, 牛富俊<sup>2,3</sup>, 牛永红<sup>2</sup>, 许 健<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 中交第一公路勘察设计院多年冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 陕西 西安 710068)

**摘要:** 新建哈尔滨至大连客运专线是我国寒区第一条建设运营的高速铁路, 其社会经济意义十分突出. 为实现对寒区高速铁路路基稳定性问题的多因素量化评价, 应用模糊数学理论提出了寒区高速铁路路基稳定性模糊综合评判方法. 基于可代表性和易操作性的原则从路基土体填料、工程条件、水力环境、热力条件以及地质地貌单元确立了5个一级因素指标和16个二级因素指标, 采用层次分析法分配各因素指标的权重, 并应用模糊统计法和专家评分法对各个因素指标按稳定性等级进行量化分级并赋值, 最后基于安全可靠度原理并考虑各个影响因素之间的关系, 提出了综合评价方法. 应用该方法评价的哈大高铁无砟轨道路基长春西试验段路基稳定性可靠度为0.889 7, 评价体系按照加权平均法最终得分为72.902分, 显示出路基处在较稳定的状态, 取得了与工程实际相一致的评判结果. 由此表明: 采用模糊综合评判的方法评价寒区高速铁路路基的稳定性具有合理性和可操作性, 为寒区高速铁路路基设计和运营管理提供理论支持.

**关键词:** 季节性冻土; 哈大客运专线; 路基稳定性; 安全可靠度; 层次分析法; 模糊综合评价

**中图分类号:** U412.36<sup>+</sup>; U492

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)03-0367-09

在冻土地区, 冻结土体的物理力学性质随温度的波动极易发生较大的变化, 尤其是冻土路基横向和纵向的热状态差异, 将会引起地温、冻结层厚度等土体冻结特征在空间时间上发生不易判定的变化, 这将直接影响到路基等土工建(构)筑物的稳定性, 因此冻土问题是寒区工程需要面对的一大难题<sup>[1]</sup>.

新建哈尔滨至大连客运专线是我国寒区第一条设计、建造和运营的高速铁路, 其社会、经济意义十分突出. 线路穿越东北地区中部山前平原, 降雨丰富, 地下水位较浅, 沿线土体大多具有冻胀敏感性, 其线路的防水防冻胀要求等级较高. 同时该条线路全线地处中深季节冻土区, 沿线冻深在0.88~2.05 m之间, 路基全长约为231 km, 其稳定性要求等级较高, 路基的稳定与否严重制约着高速列车的行车舒适度和安全性, 因此对冻土路基在冻融作用下的热稳定性分析是保证寒区高速铁路正常、安全运营的关键之一, 所以对寒区高铁无砟轨道路基热稳定性的评价就成为铁路运营中的一项重要工作.

自层次分析法及模糊数学理论提出并在评价领域应用<sup>[2-7]</sup>以来, 其迅速在道路交通运营等管理综合评价中得到广泛的应用<sup>[8-14]</sup>, 并且有学者在此基础上提出了安全可靠度的概念<sup>[15]</sup>. 该方法简单、便捷、高效, 可系统的对比众多影响因素之间的关系, 并基于此可建立整体评价模型. 综合考虑到影响寒区高铁无砟轨道冻土路基热稳定性的众多因素, 本文利用层次分析法并结合模糊数学的基本理论和原则, 同时将系统可靠度的概念和计算方法引入到寒区高铁无砟轨道路基热稳定性评价分析中. 首先, 利用层次分析法原理结合实际工况, 并充分考虑寒区高铁无砟轨道路基热稳定性影响因素并基于此建立热稳定性评价模型, 最终给出适应与实际工况的相应判断矩阵; 其次, 通过对各选定的影响因素进行专家评价, 并通过计算分析得到各因素对评价集中各评价等级的隶属度, 进而得出其可靠度的结果, 并进一步求出整个评价体系的安全可靠度结论, 在评价体系安全可靠度满足要求的情况下, 进而对整个评价体系进行二级模糊综合评价.

## 1 寒区高速铁路冻土路基稳定性评价体系

随着经济技术的发展, 各国铁路部门规划、建设和运营的关注重点转向了高速、重载铁路的发展. 当前哈大客运专线是运营速度最快的寒区高速铁路, 且并无可靠的实体工程经验可以对照, 因此在参考分析了多年冻土区和季节性冻土区其它较低等级的公路、铁路等线性工程的建设经验, 考虑到影响寒区高速铁路

收稿日期: 2013-09-02

修改稿日期: 2014-04-13

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金项目(51208409); 冻土工程国家重点实验室自主立项课题(SKLFSE-ZY-15); 西安建筑科技大学校人才科技基金项目(RC1363)

**作者简介:** 刘华(1983-), 男, 博士, 讲师, 主要从事寒区岩土工程方面的研究. E-mail: qyxuan911@163.com

基稳定性的众多因素, 本文通过路基土体填料及热力条件等方面对这些因素进行了综合择优选择和分类. 应用层次分析法原理进行分析并建立模型, 最终建立了以路基土体填料、工程条件、水力环境、热力条件及地质地貌单元 5 个方面为准则层因素的寒区高铁无砟轨道路基热稳定性评价指标体系, 同时选取对其影响较大的 16 个因素作为因素层因子 (见图 1).

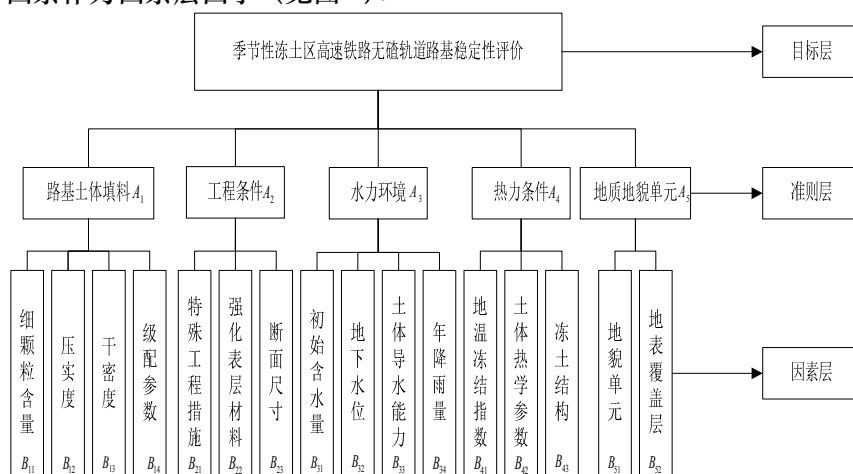


图1寒区高速铁路无砟轨道冻土路基热稳定性评价指标体系

Fig. 1 The thermal stability evaluation system of roadbed with no-ballasted track for high-speed railway in cold regions

## 2 系统可靠度

寒区高铁无砟轨道路基热稳定性整体评价指标体系中各影响因素众多, 关系复杂, 并相互影响, 是一个具有典型非线性特征的复杂系统. 本文建立的整体评价体系由图 1 所示, 由目标层向下按照顶层设计的原则由两级子系统构成. 其中: 一级子系统以准则层中所有因素为基本元素, 其有 5 个因素构成, 分别为路基土体填料、工程条件、水力环境、热力条件和地质地貌单元; 二级子系统则分别由隶属于准则层 5 个因素的 16 个独立因子构成, 以因素层中不同的影响因子为基本元素, 其分组依据按照属性和影响相近的原则. 因此, 本文建立的综合评价体系是由 1 个一级子系统和 5 个二级子系统构成. 其中各级子系统的可靠度计算原则和方法略有差别:

### (1) 一级子系统可靠度

一级子系统中 5 个基本元素之间被默认为以串联关系存在. 即其中任何一个元素失效, 则整个子系统失效, 即为这 5 个因素中一旦有一个不能实现其使用功能或者其使用功能被严重影响, 那么整个寒区高铁冻土路基热稳定性即可视为失效. 将基本元素  $i$  的有效概率记为  $P(\Omega_i)$ , 依据概率论计算原理, 一级子系统的可靠度表示为:

$$\phi_s = P\left(\bigcap_{i=1}^5 \Omega_i\right) \quad (1)$$

若各个基本元素之间相互独立时, 则其可靠度可表述为:

$$\phi_s = P\left(\bigcap_{i=1}^5 \Omega_i\right) = \prod_{i=1}^5 P(\Omega_i) \quad (2)$$

### (2) 二级子系统可靠度

二级子系统中各基本元素之间被默认为以并联关系存在, 即所有元素失效, 则整个子系统失效, 换言之, 隶属于某一准则层的各因子, 一旦某一因子失效不能达到预定要求, 并不直接否决其稳定性结论, 需要与隶属于同一准则层其它因子共同作用, 只有在全部因素层因子俱不满足使用功能的情况下, 才使得该准则层失效, 进而使得整个路基稳定性失效. 依据概率论计算原理, 将第  $i$  个二级子系统中基本元素  $j$  的失效概率记为  $P(\overline{\Phi}_j)$ . 其中,  $J$  为第  $i$  个二级子系统中包含的元素个数, 本文中  $J$  依次分别为 4, 3, 4, 3, 2. 当其中的基本元素相互独立时, 二级子系统  $i$  的失效概率可表述为:

$$P(\overline{\Phi}_i) = \prod_{j=1}^J P(\overline{\Phi}_j) \quad (3)$$

则相应的第  $i$  个二级子系统可靠度为:

$$\phi_s = 1 - P(\overline{\Phi_j}) = 1 - \prod_{j=1}^J P(\overline{\Phi_j}) \quad (4)$$

### (3) 综合评价体系可靠度

由该综合评价体系和上述计算原则可以得出,寒区高铁无砟轨道路基热稳定性系统可靠度的计算方法和原则,其中:一级子系统可靠度即为整个路基热稳定性评价体系的可靠度,而第  $i$  个二级子系统的可靠度为相应的一级子系统中第  $i$  个基本元素的可靠度,联合式(1)至式(4)综合求解即可得出整个路基热稳定性评价体系的可靠度。

## 3 层次分析模型

引入层次分析法原理分析问题的思路,首先需要把待解决的问题(或评价目标)按照不同的需求层次化.根据问题的性质或事先设定的最终目标,将问题分解为不同级别的组成因素,并依据事先设定好的顶层目标,按照因素间的相互影响关系以及隶属关系将众多因子按不同级别的层次聚集、分类、组合,形成一个多层次的的分析结构模型或体系.并最终把系统分析结果归结为最底层(各影响因子)相对于最高层(评价结果)的相对重要性权值的分配、确定或相对优劣次序的排序问题之上.在排序或权重分配计算中,每一层次的因素相对上一层某一归类因素的单排序问题又可以简化为以系列成对因素的两两对比判断比较.这样形成的判断矩阵,即可应用矩阵计算方法,通过计算判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量,来计算出某一层对于上一层某一元素的相对重要性权值.继而用上一层因素本身的权值加权综合,即可计算出某层因素相对于上一层的相对重要性权值,即层次总排序的权值重新分配.这样,依次由上而下即可计算出最底层因素相对于最高层的相对重要性权值或相对优劣次序的排序值.本文中层次分析的计算方法和原则如下:

### (1) 判断矩阵

利用层次分析法建立的寒区高铁无砟轨道路基热稳定性评价体系可分为目标层、准则层和因素层等三层(见图1).假设  $A_k$  表示准则层中第  $k$  个元素(本例中  $k$  最大可取5),则  $B_{k1}, \dots, B_{kn}$  表示隶属于准则层元素  $A_k$  的所有因素层元素.从准则层元素  $A_k$  的角度分析,考虑通过两两比较判断来判定元素  $B_{k1}, \dots, B_{kn}$  对元素  $A_k$  的重要性.将  $B_{k1}, \dots, B_{kn}$  两两之间的重要性对比根据的标度具体量化,利用  $B_{ij}$  表示元素  $B_i$  相对于  $B_j$  的重要性.因此,针对准则层因素  $A_k$  的判断矩阵可表示为:

$$B_k = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \cdots & B_{1n} \\ \vdots & B_{22} & \cdots & B_{2n} \\ \vdots & \vdots & B_{ii} & \vdots \\ B_{n1} & B_{n2} & \cdots & B_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{式中 } B_{ij} \text{ 的取值为: } B_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 1/B_{ji} & i \neq j \end{cases} \quad (6)$$

### (2) 元素权重向量

在上述过程中我们通过分析建立起了判断矩阵,并使得判断过程和结论数学化、定量化,简化了问题的复杂分析过程,使得复杂问题定量分析成为可能.此外,这种数学化的定量方法还有助于使决策者检查并保持判断思维的一致性.所谓判断思维的一致性是指评判人在两两对比判断指标重要性时,各判断结论之间协调一致,不致出现方向相反的结果.在应用层次分析法分析解决问题时,保持判断思维的一致性对判断结论来说是非常重要的.因此,为了保证得到的结论合理性和正确性,必须对评判者构造的判断矩阵进行一致性检验.而且这种检验通常是随着排序步骤进行的.

针对准则层元素  $A_k$ ,通过判断矩阵  $B_k$  可求出其因素层元素  $B_{k1}, \dots, B_{kn}$  的权重向量.判断矩阵  $B_k$  及其最大特征值  $\lambda_{\max}$  和特征向量  $\omega$  存在如下关系:

$$B_k \omega = \lambda_{\max} \omega \quad (7)$$

$$\omega_i = \left( \prod_{j=1}^n B_{ij} \right)^{1/n} / \sum_{k=1}^n \left( \prod_{j=1}^n B_{kj} \right)^{1/n} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

依据上述计算结果将特征向量  $\omega$  通过矩阵计算按行规范后作为元素  $B_{k1}, \dots, B_{kn}$  的权重向量. 可将因素层中隶属于准则层元素  $A_k$  的元素的权重向量记为  $\omega_i$ , 而将准则层中所有元素的权重向量集记为  $\omega$ .

### (3) 一致性检验

判断矩阵是通过系统各因素重要性程度进行两两比较判断确定而构建的, 而一致性检验的目的就是为了验证判断矩阵是否合理. 依据计算原则将判断矩阵的一致性指标可记为:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

其中  $RI$  为 T.L.saaty 提出的平均随机一致性指标. 具体取值见表 1.

当  $CR = (CI/RI) < 0.10$  时, 可以认为判断矩阵满足一致性要求, 即判断矩阵合理, 权重赋值不会出现矛盾; 否则, 判断矩阵不合理, 需要进行调整判断矩阵, 即重新调整两两判别重要性程度的权重指标.

表 1 平均随机一致性指标

Tab1. The random consistency index

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$RI$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

## 4 多级模糊综合评价模型

模糊综合评价方法是引入模糊数学的原理和概念, 以模糊数学理论为基础, 应用模糊关系合成的原理和计算方法, 将一些边界不清、不易定量的因素人为或者有选择的定量化, 从多个因素对被评价事物隶属等级状况的结果分类进行综合性评价的一种方法.

整体设立评判对象的全体, 根据所处的条件和工况, 给每个对象人为赋予一个非负实数, 即所谓的评判指标, 再据此排序择优. 模糊综合评判作为模糊数学的一种具体应用方法, 它按照顺序分为两步: 第一步先按每个因素单独评判; 第二步再利用前述结果对所有因素进行综合评判. 其优点在于: 数学模型较为简单, 对多因素、多层次的复杂问题评判效果比较好, 结论比较可靠, 是别的评判方法和计算模型难以代替的方法. 该方法的特点是评判是两两逐对进行, 对被评判对象有惟一的评价值, 而不受被评价对象所处对象集合的影响. 其具体评价过程及步骤如下:

### (1) 确定评价因素集、评价集

记  $U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_n\}$  为描述待评价对象的  $n$  种因素 (即为评价指标); 而  $V = \{V_1, V_2, V_3, \dots, V_m\}$  为描述每一因素所处的状态的  $m$  种评价等级.

### (2) 构造评判矩阵和确定权重

首先对因素集中的单因素  $u_i (i=1, 2, \dots, n)$  作单因素评判, 从因素  $u_i$  看该事物对抉择等级  $v_j (j=1, 2, \dots, m)$  的隶属度为  $r_{ij}$ , 这样就得出第  $i$  个因素  $u_i$  的单因素评判集:

$$r_i = \{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, \dots, r_{im}\} \quad (10)$$

这样  $n$  个因素的评价集就构造出一个总的评价矩阵  $R$ . 即从每一个待评价对象确定了从  $U$  到  $V$  的模糊关系  $R$ , 它是一个矩阵:

$$R = (r_{ij})_{n \times m} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (11)$$

其中  $r_{ij}$  表示第  $i$  个因素  $u_i$  在第  $j$  个评语  $v_j$  上的频率分布, 一般将其归一化使之满足  $\sum_{j=1}^m r_{ij} = 1$ . 这样, 模糊关系矩阵本身就变成没有量纲的, 不需作专门处理.

而各评价因子的影响程度不同, 所以需要确定不同因子的权重. 在本例操作中根据前述所讲的 AHP 方法来确定各个指标的权重.

### (3) 单级模糊综合评价

通过建立的单因素评价矩阵  $r_i$  和权重矩阵  $B$ , 就可以得出某一单元的模糊综合评价结果:

$$A = RB = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\} = [r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, \dots, r_{im}] \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1m} \\ \vdots & b_{22} & \cdots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & b_{ii} & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中  $a_i$  表示某单元隶属于第  $i$  评价等级的程度, 根据最大隶属度原则或者加权平均法就可以确定综合评价等级结果。

### (4) 多级模糊综合评价

对于较为复杂的多层次系统来说, 具有复杂的非线性特征, 影响因素众多, 而且各因素之间还存在着不同的层次关系. 采用单层次模糊综合评价就难以得出可靠的综合评价结果. 这就需要将各评价因素按某种属性或者特征进行分类组合, 先对每一类进行综合评价, 然后再对各类的评价结果进行类之间的高层次综合评价. 具体步骤如下:

若一个系统按某种属性划分为  $k$  个子系统. 对于每一个子系统来说, 先按照单层次模糊综合评价模型进行评价, 评价结果为  $k$  个  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\}$ .

然后将  $k$  个评价结果  $A_1, A_2, \dots, A_m$  组成一个新的评价决策矩阵:

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{km} \end{bmatrix} \quad (13)$$

如果  $k$  个评价子系统的权重集为  $\tilde{B}$ , 则可以得到综合评价结果:  $\tilde{A} = \tilde{R} \cdot \tilde{B}$ . 若一个系统可以划分为更多层次的模糊综合评价模型, 按照上述方法可以层层递进进行评价, 最终得到综合评价结果。

完成二级或者多级模糊综合评价后, 可以记  $M$  作为评价结果. 若进一步对评价结果  $M$  进行处理, 会使最终评价结果更加清楚了, 目前常用的方法有最大隶属度法和加权平均法。

最大隶属度法是取与模糊评价结果  $M$  中最大值  $m_i$  相对应的评价集中评价结果  $e_i$ , 将其作为最终的评价体系的评价结果. 利用该方法对评价结果  $M$  处理后, 最终评价结果  $e_i$  体现了最大可能性, 但仍然不够全面. 加权平均法是将模糊评价结果  $M$  量化的评价集进行加权求和, 根据加权值在量化评价集中的位置得出评价结果, 该方法较全面的考虑了所有影响因素, 更确切的给出最终评价结果. 本文中采用了加权平均方法来确定最终评价结果。

## 5 算例

结合图 1, 将评价体系准则层中各元素  $A_k$  的集合可记为  $Y = \{A_1, A_2, \dots, A_5\}$ , 其中  $k = \{1, 2, \dots, 5\}$ . 因素层中隶属于准则层元素  $A_k$  的各元素的集合记为  $Y_k = \{B_{k1}, B_{k2}, \dots, B_{kn}\}$ , 因此集合  $Y$  和  $Y_k$  构成了评价体系的两层影响因素集。

针对评价对象的特殊性, 根据评价体系可能做出的评价结果组成的集合作为初步的评价集. 因此初步设定依据寒区高铁无砟轨道路基热稳定性所建立的评价体系的评价集为  $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$ ,  $e_1, e_2, e_3, e_4, e_5$  分别表示寒区高铁无砟轨道路基热稳定性的不稳定、较不稳定、稳定性一般、较稳定和稳定五级状态, 进一步对评价集量化, 将其赋值表示为  $E = \{20, 40, 60, 80, 100\}$ 。

将因素层中隶属于准则层元素  $A_i$  的第  $j$  个影响因素而导致评价结果为设定评价集中第  $k$  个评价结果的可能性概率记为  $l_{ijk}$ ,  $l_{ijk} \in [0, 1]$ , 而且必然  $\sum_{k=1}^m l_{ijk} = 1$ , 其中  $m$  为评价集因素的个数, 本文中  $m$  为 5. 这里将  $l_{ijk}$  ( $k = \{1, 2, \dots, 5\}$ ) 与量化评价集  $E = \{20, 40, 60, 80, 100\}$  加权求和后的百分比结果记为该影响因素的安全可靠度. 同时利用该评价体系可靠度的计算方法, 进行整个寒区高铁无砟轨道路基热稳定性评价体系的可靠

度计算, 得到最终的评价结果。

本节以哈大高铁无砟轨道路基长春西试验段为例进行冻土路基稳定性评价分析。根据从事寒区工程研究的多位学者和工程师们的讨论, 利用本文所建立的冻土路基热稳定性评价系统进行综合评判。分析评价对象, 其标准层的判断因子矩阵可见表 2; 标准层元素  $A_k$  下的因素层的判断矩阵分别为表 3~表 7:

表 2. 准则层评价指标判断矩阵及权重  
Tab 2. Matrix for comparing or judging of evaluation in Criterion layer

指 标	路基土体填料	工程条件特征	水力环境	热力条件	地质地貌单元	权 重
路基土体填料	1	2	3	3	5	0.400 0
工程条件特征	0.5	1	2	3	4	0.267 3
水力环境	0.333 3	0.5	1	2	3	0.162 6
热力条件	0.333 3	0.333 3	0.5	1	2	0.104 8
地质地貌单元	0.25	0.25	0.333 3	0.5	1	0.065 3

$$\lambda = 5.149 1; CI = 0.037 28; RI = 1.12; CR = 0.033 28 < 0.1$$

表 3. 路基土体填料评价指标判断矩阵及权重  
Tab3. Matrix for comparing or judging of evaluation by roadbed fillings

指标	细颗粒含量	压实度	干密度	级配参数	权重
细颗粒含量	1	2	3	4	0.470 8
压实度	0.5	1	3	2	0.279 9
干密度	0.333 3	0.333 3	1	1	0.122 8
级配参数	0.25	0.5	1	1	0.126 5

$$\lambda = 4.045 8; CI = 0.015 3; RI = 0.90; CR = 0.017 < 0.1$$

表 4. 工程条件特征评价指标判断矩阵及权重  
Tab4. Matrix for comparing or judging of evaluation by engineering conditions

指标	特殊工程措施	强化表层材料	断面尺寸	权重
特殊工程措施	1	3	5	0.637 0
强化表层材料	0.333 3	1	3	0.258 3
断面尺寸	0.2	0.333 3	1	0.104 7

$$\lambda = 3.038 5; CI = 0.012 8; RI = 0.58; CR = 0.022 1 < 0.1$$

表 5. 水力环境评价指标判断矩阵及权重  
Tab5. Matrix for comparing or judging of evaluation by hydraulic environment

指标	初始含水量	地下水位	土体导水能力	年降雨量	权重
初始含水量	1	2	3	2	0.417 8
地下水位	0.5	1	2	3	0.295 4
土体导水能力	0.333 3	0.5	1	1	0.143 4
年降雨量	0.5	0.333 3	1	1	0.143 4

$$\lambda = 4.103 1; CI = 0.034 4; RI = 0.90; CR = 0.038 2 < 0.1$$

表 6. 热力条件评价指标判断矩阵及权重  
Tab6. Matrix for comparing or judging of evaluation by heat environment

指标	地温冻结指数	土体热学参数	冻土结构	权重
地温冻结指数	1	2	4	0.558 4
土体热学参数	0.5	1	3	0.319 6
冻土结构	0.25	0.333 3	1	0.122 0

$$\lambda = 3.018 3; CI = 0.0091 5; RI = 0.58; CR = 0.015 8 < 0.1$$

表 7. 地质地貌单元评价指标判断矩阵及权重  
Tab7. Matrix for comparing or judging of evaluation by geological and geomorphologic unit

指标	地貌单元	地表覆盖层	权重
地貌单元	1	1	0.5
地表覆盖层	1	1	0.5

在表 1 中, 对于 1、2 阶判断矩阵, 基于数学上的计算原则,  $RI$  只是形式上的, 因此表中  $n=1、2$  时,  $RI$  理论上定义为 0, 这是由于 1、2 阶判断矩阵总是具有完全一致性。

经过多位专家学者和工程师们对评价对象所处地区的热力环境以及工程因素等有关冻土路基冻结特征的讨论和评判, 对评价系统中因素层的 16 个主要影响因素进行系统评估, 得出因素层中隶属于标准层元素  $A_k$  的各因素对评价集中各评价结果的隶属度分别为(见表 8):

表 8. 评价决策矩阵 (隶属度表述)  
Tab8. Matrix of evaluation or decision (membership representation)

子系统	评价集	不稳定	较不稳定	一般	较稳定	稳定
路基土体填料 $L_1$	$l_{11}$	0	0	0.4	0.4	0.2
	$l_{21}$	0	0.2	0.5	0.2	0.1
	$l_{31}$	0	0	0.2	0.6	0.2
	$l_{41}$	0	0.1	0.7	0.2	0.1
工程条件特征 $L_2$	$l_{21}$	0	0	0.1	0.8	0.1
	$l_{22}$	0	0	0.2	0.2	0.6
	$l_{23}$	0	0	0	0.1	0.9
水力环境 $L_3$	$l_{31}$	0	0.1	0.2	0.7	0
	$l_{32}$	0.1	0.6	0.3	0	0
	$l_{33}$	0	0	0.5	0.3	0.2
	$l_{34}$	0.1	0.2	0.5	0.2	0
热力条件 $L_4$	$l_{41}$	0	0.3	0.4	0.3	0
	$l_{42}$	0	0.4	0.4	0.2	0
	$l_{43}$	0	0	0.2	0.6	0.2
地质地貌单元 $L_5$	$l_{51}$	0	0	0.6	0.2	0.2
	$l_{52}$	0	0	0.1	0.8	0.1

由表 3~表 8 可以得到各子集的权重, 分别为:

$$\omega = [0.400\ 0, 0.267\ 3, 0.162\ 6, 0.104\ 8, 0.065\ 3], \quad \omega_1 = [0.470\ 8, 0.279\ 9, 0.122\ 8, 0.126\ 5]$$

$$\omega_2 = [0.637\ 0, 0.258\ 3, 0.104\ 7], \quad \omega_3 = [0.417\ 8, 0.295\ 4, 0.143\ 4, 0.143\ 4]$$

$$\omega_4 = [0.558\ 4, 0.319\ 6, 0.122\ 0], \quad \omega_5 = [0.5, 0.5]$$

接着应用模糊理论进行综合评价: 通过矩阵乘法  $A = \omega L$ , 可以得到各子集的综合评价结果:

$$A_1 = \omega_1 L_1 = [0.470\ 8, 0.279\ 9, 0.122\ 8, 0.126\ 5] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix} = [0, 0.068\ 6, 0.441\ 4, 0.343\ 3, 0.159\ 4]$$

$$A_2 = \omega_2 L_2 = [0.637\ 0, 0.258\ 3, 0.104\ 7] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.2 & 0.6 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \end{bmatrix} = [0, 0, 0.115\ 4, 0.571\ 7, 0.312\ 9]$$

$$A_3 = \omega_3 \cdot L_3 = [0.417\ 8, 0.295\ 4, 0.143\ 4, 0.143\ 4] \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.2 & 0.7 & 0 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.3 & 0.2 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0 \end{bmatrix} = [0.043\ 9, 0.247\ 7, 0.315\ 6, 0.028\ 7]$$

$$A_4 = \omega_4 L_4 = [0.558\ 4, 0.231\ 96, 0.122\ 0] \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.6 & 0.2 \end{bmatrix} = [0, 0.295\ 4, 0.375\ 6, 0.024\ 4]$$

$$A_5 = \omega_5 L_5 = [0.5, 0.5] \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.6 & 0.2 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.8 & 0.1 \end{bmatrix} = [0 & 0 & 0.350\ 0 & 0.500\ 0 & 0.150\ 0]$$

由上述计算结果可得准则层的模糊评价矩阵为:

$$L = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.0686 & 0.4414 & 0.3433 & 0.1594 \\ 0 & 0 & 0.1154 & 0.5717 & 0.3129 \\ 0.0439 & 0.2477 & 0.3156 & 0.3642 & 0.0287 \\ 0 & 0.2954 & 0.3756 & 0.3046 & 0.0244 \\ 0 & 0 & 0.3500 & 0.5000 & 0.1500 \end{bmatrix}$$

则季节性冻土区高速铁路无砟轨道路基热稳定性评价结果为:

$$M = \omega L = [0.4000, 0.2673, 0.1626, 0.1048, 0.0653] \begin{bmatrix} 0 & 0.0686 & 0.4414 & 0.3433 & 0.1594 \\ 0 & 0 & 0.1154 & 0.5717 & 0.3129 \\ 0.0439 & 0.2477 & 0.3156 & 0.3642 & 0.0287 \\ 0 & 0.2954 & 0.3756 & 0.3046 & 0.0244 \\ 0 & 0 & 0.3500 & 0.5000 & 0.1500 \end{bmatrix}$$

$$= [0.0071, 0.0987, 0.3209, 0.4139, 0.1644]$$

其系统综合得分为

$$G = ME^T = [0.0071, 0.0987, 0.3209, 0.4139, 0.1644][20, 40, 60, 80, 100]^T = 72.902$$

结合式(1)~(4)所述的逻辑原理计算可靠度:  $P = l \cdot E^T / 100$ , 计算结果见表9。

## 6 结论

(1)通过考虑影响寒区高铁路基热稳定性的各个主要因素及其它们之间的相互关系,综合应用层次分析法以及基于可靠度的多级模糊综合评价方法建立了定量化评价模型,并对寒区高铁无砟轨道路基热稳定性进行评价。通过建立了各层次的判断矩阵和各因素的评价集,并基于安全可靠度的原理计算出各因素以及整个系统的可靠度。

(2)应用该方法评价的哈大高铁无砟轨道路基长春西试验段路基稳定性可靠度为

0.8897,评价体系按照加权平均法计算最终得分为72.902分,显示出路基处在较稳定的状态。并通过与现场实测资料进行对比,显示采用该评价模型的结果与野外观测结果基本相符,表明此模型可运用于寒区高铁无砟轨道路基的热稳定性评价。

(3)该模型的应用关键在于准确建立寒区高铁无砟轨道路基热稳定性评价体系、进一步确定准则层和因素层的判断矩阵因子分布、按照顶层设计原则明确各因素的评价集,同时需要更系统、深入的分析,以便更加高效、便捷的进行寒区高铁路基热稳定性的评价以及推广到其它线性工程基础热稳定性评价中。

## 参考文献 References

- [1] 吴紫汪,程国栋,朱林楠.冻土路基工程[M].兰州:兰州大学出版社,1988:48-60.  
WU Ziwan, CHENG Guodong. Roadbed engineering in permafrost region[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1988:48-60.
- [2] 刘新宪,朱道立.选择与判断:AHP(层次分析法)决策[M].上海:上海科学普及出版社,1990:1-5.  
LIU Xinxian, ZHU Daoli. Choice and judgment: decision by AHP (Analytic Hierarchy Process)[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 1990:1-5.
- [3] 彭祖赠,孙韞玉.模糊数学及其应用[M].武汉:武汉大学出版社,2002:12-20.  
PENG Zuzeng, SUN Wenyu. Fuzzy mathematics and its applications[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002:12-20.
- [4] 汪培庄.模糊集合及其应用[M].上海:上海科学出版社,1983:62-80.  
WANG Peizhuang. Fuzzy sets and its applications[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983:62-80.
- [5] 李柏年.模糊数学及其应用[M].合肥:合肥工业大学出版社,2007:4-13.

表9.分级系统可靠度得分对比

Tab9.The safety reliability in different layer

一级子系统	$P_1$				$P_2$		
二级子系统	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{23}$
可靠度	0.76	0.64	0.80	0.72	0.80	0.88	0.98
一级子系统	$P_3$				$P_4$		
二级子系统	$P_{31}$	$P_{32}$	$P_{33}$	$P_{34}$	$P_{41}$	$P_{42}$	$P_{43}$
可靠度	0.72	0.44	0.74	0.56	0.60	0.56	0.80
一级子系统	$P_5$		整体系统				$\phi$
二级子系统	$P_{51}$	$P_{52}$					
可靠度	0.72	0.8	可靠度				0.8897



- LI Bonian. Fuzzy mathematics and its application[M]. Hefei: Hefei University of Technology Publishing House, 2007:4-13.
- [6] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005:15-58.
- LI Hongji. Fuzzy math and practical algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2005:15-58.
- [7] 韩科明, 李凤明. 采煤沉陷区稳定性模糊综合评判[J]. 煤炭学报, 2009, 34(12):1617-1619.
- HAN Keming, LI Fengming. Fuzzy comprehensive evaluation on stability of mining subsidence area[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(12):1617-1619.
- [8] 许宏科, 王维敏, 王世伟. 高速公路隧道运营管理模糊综合评价[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2005, 37(3):381-385.
- XU Hongke, WANG Weimin, WANG Shiwei. Fuzzy evaluation on the operation management of highway tunnel. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2005, 37(3):381-385.
- [9] 刘运通. 道路交通安全宏观模糊评价模型[J]. 中国公路学报, 1995(1):169-175.
- LIU Yuntong. A fuzzy-based model for macroscopic evaluation of road traffic safety[J]. China Journal of Highway and Transport, 1995(1):169-175.
- [10] 管冰蕾, 胡静涛. 基于AHP的模糊综合评价方法在交通保障方案优选中的应用[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2005(4):91-94.
- GUAN Binglei, HU Jingtao. Application of AHP based fuzzy comprehensive evaluation in scheme selection of traffic guarantee[J]. Journal of Henan University: Natural Science, 2005(4):91-94.
- [11] 马立峰, 刘建坤, 牛富俊. 基于可靠度的多年冻土区路基稳定性评价及应用分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(4):522-527.
- MA Lifeng, LIU Jiankun, NIU Fujun. Reliability based AHP - FUZZY synthetic evaluation system for stability of roadbeds in permafrost regions[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(4):522-527.
- [12] 马立峰. 动荷载条件下多年冻土区斜坡路基稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010:118-131.
- MA Lifeng. Dynamic response and stability analysis of the embankment on slopes in permafrost regions [D]. Beijing :Beijing Jiaotong University, 2010:118-131.
- [13] 毛卫南, 田泽野, 刘建坤. 冻土区输油管道服役性能可靠度评价[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(S1):1526-1530.
- Mao Weinan, Tian Zeyue, Liu Jiankun. Evaluation of the reliability of oil pipeline serving performance in permafrost region [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S1):1526-1530.
- [14] 黄达. 多年冻土区输油管道稳定性评价方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011:49-64.
- HUANG Da. Study on evaluation methods for the stability of pipeline in permafrost regions [D]. Beijing :Beijing Jiaotong University, 2011:49-64.
- [15] 钱勇生, 周波, 广晓平. 基于可靠度的公路交通安全工程评估与应用分析[J]. 建筑管理现代化, 2007(2):5-8.
- QIAN Yongsheng, ZHOU Bo, GUANG Xiaoping. AHP-fuzzy synthetic evaluation on traffic safety of highway on the basis of reliability[J]. Construction Management Modernization, 2007(2):5-8.

## Comprehensive evaluation on stability of roadbed of high-speed railway in seasonal frozen regions based on fuzzy mathematic

LIU Hua<sup>1</sup>, NIU Fujun<sup>2,3</sup>, NIU Yonghong<sup>2</sup>, XU Jian<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an, 710055; 2 State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, China; 3. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Permafrost Region Ministry of Transport, CCCC First Highway Consultants CO. LTD, Xi'an, 710068)

**Abstract:** Harbin to Dalian Passenger Dedicated Line (HDPDL) is the first high-speed railway for construction and operation in cold regions in China, which have prominent social and economic significance. To realize the multi-factors quantitative evaluation on the roadbed stability in high-speed railway in seasonal frozen regions, a fuzzy comprehensive evaluation method is proposed on the basis of the theory of fuzzy mathematics. Based on the principle of operability and representativeness, five primary factors and sixteen secondary factors are established, containing the roadbed fillings, the engineering conditions, the hydraulic environment, the heat environment and the geological and geomorphologic unit. The analytic hierarchy process (AHP) is used to distribute rational weight for every factor, a comprehensive evaluation system is constructed where factors are quantitatively graded according to five stability grades by using fuzzy statistical method and experts grading method, to analyze the conformation of membership function of every factor. And the fuzzy synthetic evaluation method is advanced based on the safety reliability. By applying the method the stability reliability of Changchun West test roadbed was 0.889 7, and according to the weighted average method evaluation the whole system, the final score was 72.902 points, which showed the roadbed was in a stable state. Comparing the test project in Changchun site, a satisfying evaluation result consistent with engineering reality is achieved. Fuzzy comprehensive evaluation method proves to be rational and operable for evaluating the roadbed stability in high-speed railway in cold regions, which therefore provides theoretical support for design methods and operation.

**Key words:** seasonal frozen ground; Harbin to Dalian passenger dedicated line (HDPDL); roadbed stability of high-speed railway; safety reliability; analytic hierarchy process; fuzzy synthetic evaluation

(本文编辑 吴海西)