

于晖, 张岭梅, 路勋. 基于组合权重灰色关联法的多年冻土路基稳定性评价[J]. 灾害学, 2018, 33(S1): 1-7. [YU Hui, ZHANG Lingmei and LU Xun. Stability Evaluation of Permafrost Embankment based on Gray Relational Analysis with Combined Weights [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(S1): 1-7. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.Z1.001.]

基于组合权重灰色关联法的多年冻土路基稳定性评价*

于 晖, 张岭梅, 路 勋

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室, 陕西 西安 710075)

摘 要:通过对多年冻土路基变形影响因素的分析, 将路基下原天然上限温度、冻土含冰量、路基高度、天然上限深度及高含冰层距离原天然上限深度五个因素作为影响冻土区路基(变形)稳定性的主要因素, 采用了基于组合权重的灰色关联度决策方法, 建立了多年冻土区路基稳定性评价体系。通过分析评价结果与沉降的对应关系, 表明所建立的评价系统能够较为真实地反映路基的稳定状态。研究表明建立的评价体系可以较好地评价监测断面路基稳定性所处的状态, 为诊断多年冻土区路基健康状态和多年冻土区路基维护决策提供了有效的支持方法。

关键词:多年冻土; 路基; 稳定性评价; 组合权重; 灰色关联法

中图分类号: X43; U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)S1-0001-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.Z1.001

多年冻土是一种对外界环境极为敏感的特殊土体, 强烈依赖其赋存环境。气候变化、工程活动等因素均可能显著地改变多年冻土环境, 诱发多年冻土地温、上限等发生变化, 导致其工程性质发生变化, 这使得多年冻土成为寒区工程面对的一大难题^[1-2]。随着经济的需求, 国内外在多年冻土地地区建设了一系列的道路工程, 针对多年冻土地地区路基病害开展了大量的研究和实践, 多年冻土地地区筑路技术取得了长足的进步^[3-4]。然而多年冻土工程性质变化非常复杂, 在全球变暖和工程扰动的背景下, 多年冻土区道路工程依然出现了较多的工程问题, 威胁道路的安全运营。因此, 多年冻土路基稳定性评价则成为了冻土路基设计和养护的关键, 研究适合多年冻土区冻土路基评价方法则显得十分重要。在面对多年冻土地地区工程风险, 多年冻土地地区道路工程建立了大量以冻土地温、变形监测为主的长期监测场地^[5-6], 如何利用监测数据有效评价多年冻土路基稳定性则显得尤为重要。基于此, 本文采用了基于组合权重的灰色关联度方法, 构建了多年冻土路基稳定性模型, 以对道路运营期的养护决策和

长期安全运营提供科学依据。

1 评价方法

1.1 灰色关联度方法^[7]

灰色关联度方法是一种多元统计分析的方法, 它基于指标因子序列的微观或者宏观几何相似或相界程度, 来分析和确定指标间的影响程度或指标对综合评价的贡献程度。灰色关联是指指标之间的不确定性关系, 如果两指标发展的态势基本一致, 那么它们之间的关联度较大, 反之关联度较小。

(1) 建立指标矩阵

设有 m 个评价指标 x_1, x_2, \dots, x_m , 同时有 n 个评价对象, 即可以确定比较数列的矩阵为:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n1} & x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix}。$$

(2) 指标数据的量纲归一化处理

进行灰色关联度评价时, 直接使用不同量纲的值是毫无意义的, 需要进行量纲归一化处理,

* 收稿日期: 2018-03-01 修回日期: 2018-07-11

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAG05B01, 2014BAG05B03); 交通运输部建设科技项目(2013 318 490 010); 交通运输部应用基础研究项目(2014 319 090)

第一作者简介: 于晖(1979-), 男, 甘肃兰州人, 博士, 高级工程师, 主要从事寒区冻土及岩土工程研究。

E-mail: yuhui-fhcc@qq.com

以实现实际值到评价指标值的转换。一般评价指标一般可以分为4种类型,即极大型、极小型、定指标型、区间型。通过针对不同类型的指标采用不同的归一化方法,将评价指标值归一化为隶属于 $[0, 1]$ 区间的数值。计算方法如下:

极大型指标:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_j}{\max x_j - \min x_j} \quad (1)$$

极小型指标:

$$X_{ij} = \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \quad (2)$$

定指标型指标:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & x_{ij} = x_j^* ; \\ 1 - \frac{|x_{ij} - x_j^*|}{\max |x_j - x_j^*|}, & x_{ij} \neq x_j^* . \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_j^* 为第 j 个指标的最佳取值。

区间型指标:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{x_{j\min} - x_{ij}}{\max(x_{j\min} - \min x_j, \max x_j - x_{j\max})}, & x_{ij} < x_{j\min}; \\ 1, & x_{ij} \in [x_{j\min}, x_{j\max}]; \\ 1 - \frac{x_{ij} - x_{j\max}}{\max(x_{j\min} - \min x_j, \max x_j - x_{j\max})}, & x_{ij} > x_{j\max}. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $[x_{j\min}, x_{j\max}]$ 为第 j 个指标的最佳取值区间。

(3) 灰色关联系数的确定

以待评价方案指标向量与最优方案指标向量的关联度作为方案优劣的准则,设最优方案各指标构成的向量为 $x_0 = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0m}]$, 则各评价方案与最优方案的评价指标的灰色关联系数为:

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \rho \Delta_{\max}} \quad (5)$$

式中: $\Delta_{ij} = |X_{ij} - X_{0j}|$; $\Delta_{\min} = \min_i \min_j |X_{ij} - X_{0j}|$; $\Delta_{\max} = \max_i \max_j |X_{ij} - X_{0j}|$; ρ 为分辨系数, $\rho \in (0, 1)$, ρ 越大,分辨能力越大,即提高关联系数间的差异,但是对评价结果并不产生影响,所以本文中取 $\rho = 0.5$ 。

(4) 评价结果决策

通过计算得到的关联系数,可以得到各评价方案与最优方案的加权关联度 R_i , 关联度越大,表明方案越优。其计算方法为:

$$R_i = \sum_{j=1}^m W_j \cdot \xi_{ij} \quad (6)$$

式中: W_j 为各指标的权重。

1.2 权重确定

权重是评价方案中各指标相对重要程度的衡量值,合理的权重对综合评价结果有着重要的影

响,因此在评价过程中需要力求获得最为合理的权重。权重赋值常采用主观赋权和客观赋权两种方式。主观赋权通常凭专家对指标重要性做出权重的判断,会受到人为因素的干扰,可能忽略各指标的内在信息,引起夸大或降低某些指标的作用。而客观赋权虽然避免了人为因素带来的偏差,但却忽略了指标本身的重要程度,也可能造成评价结果偏离实际。因此,本文将主观权重和客观权重相结合,确定评价指标的组合权重,使得评价结果更合理。

(1) 主观权重的确定

主观权重采用层次分析方法确定,它通过分析评价对象所包含的因素及其相互关系,将评价对象分解为目标、准则、方案等递阶多层次结构,按照一定的准则对每一层因素进行比较,分别确定层次中各因素对上一层相应准则的相对重要程度,根据形成的判断矩阵来计算最大的特征值和特征向量,得到各因素的权重^[8-9]。其分析步骤如下:

(1) 通过对评价指标的分析,建立多年冻土路基稳定性综合评价的目标,准则和方案递阶多层次指标结构。

(2) 根据建立的递阶多层次结构,按照每一层次中各因素相对上一层各准则的重要程度构成判断矩阵,这里,重要程度的判断值采用1~9及其倒数的标度方法。标度值意义为:所有目标 A_i 相对目标 A_j ($i, j = 1, 2, \dots, m$) 相对的重要程度的判断数 a_{ij} , 1表示 A_i 与 A_j 同等重要, 3表示 A_i 较 A_j 稍微重要, 5表示 A_i 较 A_j 明显重要, 7表示 A_i 较 A_j 非常重要, 9表示表示 A_i 较 A_j 极端重要。而2, 4, 6, 8表示介于相邻判断的中值。通过两两比对,可以得到判断矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times m}$ 。对于任何判断矩阵都应该满足:

$$\begin{cases} a_{ii} = 1, \\ a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, \end{cases} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

(3) 求解判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} 及对应的特征向量,将该特征向量归一化后得到的向量即为该层各因素相对上一层某个准则的重要性值,即权重。

(4) 对判断矩阵的一致性进行检验。衡量判断矩阵质量的标准是矩阵中的判断是否具有一致性,如果判断矩阵存在关系:

$$a_{ij} = \frac{a_{ik}}{a_{jk}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

则称它具有完全一致性。但是因客观事物的复杂性以及对问题认识的局限,可能会产生片面性,要求每一个判断矩阵都具有完全的一致性是不可能的,所以一般要求不一致性的程度在允许范围

表 1 平稳随机一致性指标

| 阶数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| RI | 0 | 0 | 0.58 | 0.9 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 | 1.52 | 1.54 |

内即可。计算一致性指标 CI 和平均随机一致性比例 CR :

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

$$CR = \frac{CI}{RI}. \quad (10)$$

式中: RI 为随机一致性指标, 其取值参照表 1 确定。

CI 越大表明判断矩阵的一致性越差, $CI = 0$ 时表示判断矩阵具有完全一致性。当 $CR < 0.1$ 时即认为判断矩阵具有满意的一致性。否则需要重新评估, 调整判断矩阵, 直至得到满意的一致性为止。

(2) 客观权重

客观权重则采用熵权法来确定。熵权法根据评价指标构成的判断矩阵来计算评价指标的熵, 并利用指标值的熵来确定权重^[10]。熵的大小和被评价对象有直接关系, 它代表该指标在该问题中提供了有用信息量的多少, 仅通过指标矩阵中各指标的实际值来确定, 可消除各评价指标权重的主观性。

设有 m 个评价指标, n 个实测待评价对象的区域系统内, 第 j 个评价指标的熵定义为:

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, j = 1, 2, \dots, m. \quad (11)$$

式中: $f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$, $k = \frac{1}{\ln n}$, $0 \leq \omega_j \leq 1$, $\sum_{i=1}^m \omega_j = 1$,

并且假设 $f_{ij} = 0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$, 同时选择 k , 使得 $0 \leq H_i \leq 1$ 。这样, 第 j 个指标的熵权为:

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{m - \sum_{i=1}^m H_j}. \quad (12)$$

(3) 组合权重的确定

设 $\omega' = [\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_m]$ 为主观权重向量, $\omega'' = [\omega''_1, \omega''_2, \dots, \omega''_m]$ 为客观权重向量, 满足 $0 \leq \omega'_i, \omega''_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^m \omega'_i = \sum_{i=1}^m \omega''_i = 1$, ($i = 1, 2, \dots, m$), 则各评价指标的组合权重为:

$$\omega_i = \alpha \omega'_i + \beta \omega''_i \quad (13)$$

式中: α 和 β 分别表示主观和客观权重的相对重要程度, 满足 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]$, 且 $\alpha + \beta = 1$ 。

最终可以确定评价指标的权重向量为 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]$, ($i = 1, 2, \dots, m$)。

2 多年冻土路基稳定性评价

2.1 影响多年冻土路基稳定性的指标

多年冻土区路基稳定性是冻土变化对路基稳定性所带来的影响, 尽管多年冻土地区路基也遭受到寒冻破坏而引发稳定性问题, 但多年冻土融沉压缩问题所引发的稳定性问题占据了绝大部分, 主要表现为路基的沉降。因此, 在针对多年冻土地区路基稳定性的评价主要针对融沉问题进行研究。

影响路基下多年冻土热力稳定性的因素众多, 受制于目前的监测数据以及理论研究, 在冻土路基稳定性评价中无法完全考虑所有的影响因素。当前针对多年冻土地区公路稳定性的监测普遍进行地温监测和变形监测, 因此考虑综合利用地温和变形监测数据结合路基形式以及地质资料, 最大程度地反映这些客观因素的综合结果, 将影响路基稳定性的主要因素归结 5 个方面。

(1) 原天然上限处的年平均温度 (T_h)

温度是冻土的稳定性重要的影响因素, 多年冻土温度的改变诱发了冻土力学特征的变化进而反馈于路基变形。原天然上限处的温度反映了众多外界因素(气温变化、工程影响等)对多年冻土本身的温度特性的影响, 包含了大量的信息。同时, 它也反映了多年冻土本身所固有的地温条件, 所以在冻土温度的考虑中选取原天然上限处的年平均温度。

图 1 给出了各评价断面年平均地温和原天然上限处的年平均温度。可以看出, 原天然上限的年平均温度一方面与年平均地温保持着良好的对应关系, 同时也体现出了路基形式对多年冻土温度状况的影响。

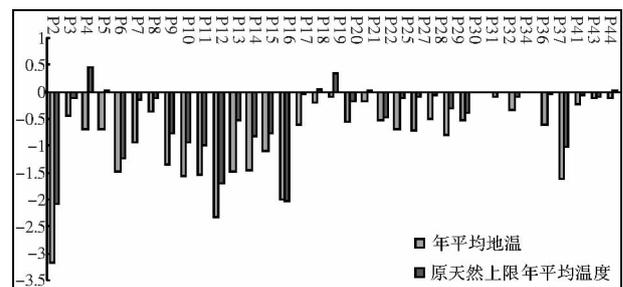


图 1 多年冻土原天然上限年平均温度与冻土年平均地温的对比

(2) 含冰量(i)

含冰量是多年冻土稳定性重要的指标,随着多年冻土含冰量的增加,其融化后产生的融沉压缩变形量增大,对路基的稳定性会产生重大的影响^[11]。另外,多年冻土存在流变特性,冻土中的含冰量对其压缩性起主导作用,在多年冻土温度相同的情况下,高含冰量冻土对路基变形产生的消极影响要远大于低含冰量冻土^[12-14]。本文中含冰量的确定主要依据钻探中获取的地质资料进行分析后获得。综合考虑原天然上限下一定深度范围高含冰量差异带来的影响,对于研究深度内含冰量在深度上的加权平均值状态来表征含冰量的影响。

(3) 路基高度(H)

研究表明,多年冻土地区过高的路基高度会造成多年冻土路基的沉降和病害发生^[14-15],一方面是因为过高的路基高度造成了路基的吸热增强,诱发多年冻土融沉,另一方面,高路基也会造成多年冻土层承受了较大的附加应力,引起了多年冻土的压缩变形,尤其对于高温高含冰量多年冻土,该影响较为显著。因此,路基高度也为多年冻土路基稳定性重要的影响指标。需要指出的是,路基下原天然上限处的温度已经反映了由于路基高度所引起地温变化,所以在评价体系中,路基高度所代表的是多年冻土层受到的附加应力状态。

(4) 原天然上限深度(h)

多年冻土上限极易受到外界环境的影响^[16-17]。因此,对于原天然上限深度影响,主要考虑当多年冻土上限深度较小时,多年冻土极易受到外界环境变化影响;而上限深度较深时外界环境的变化对多年冻土的影响将减小。

(5) 高含冰层相对原天然上限埋藏深度(Δh)

路基下多年冻土含冰量的纵向分布并非均匀的,而对路基稳定性产生重要影响的则是高含冰量(富冰冻土、饱冰冻土和含土冰层)冻土层,该层的埋藏深度越深则受到外界热扰动影响相应较小,同时受到路基的附加应力也相应减小。因为原天然上限深度指标反映了冻土埋藏深度影响,所以这里高含冰量的埋藏深度选择为高含冰量土层相对路基下原多年冻土上限的距离。

2.2 多年冻土路基稳定性评价矩阵的建立

本文采用布设于青藏铁路沿线的监测场地构建评价矩阵,对于各评价指标的确定方法如下。

(1) 多年冻土路基监测研究表明,路基下多年

冻土受影响的范围主要集中在地表下 10 m 以内的范围中,无论从冻土的温度状况还是从冻土受力状况上来看,在 10 m 范围内的冻土对路基的稳定性产生较多的影响,而在 10 m 以下范围内的多年冻土状态受到外界环境的影响很小,因此,在评价中对于上限深度低于 10 m 的深埋多年冻土地区将作为季节冻土类型来对待。

(2) 原天然上限处的年平均温度、原天然上限深度、路基高度均按照实测值选取。

(3) 含冰量的确定主要依据钻探中获取的地质资料,但是由于含冰量在纵向上的空间变异性,使得我们需要综合考虑原天然上限下高含冰量带来的影响,含冰量是根据钻孔资料取 10 m 深度含冰量在深度上的加权平均值。含冰量取值与实际测试值不同,分别为少冰和多冰冻土认为影响最小取 10%,富冰和饱冰冻土互层时依据比例分别冻土取 25% 和 30%,对于饱冰冻土和含土冰层认为具有相同的危害,均取 40% 为最大。

(4) 高含冰土层距离原天然上限埋深的确定中,对于少冰冻土和多冰冻土,并不存在高含冰冻土层,所以在评价计算中认为其埋藏深度为评价深度范围之外,取值为 10 m,即代表不存在高含冰层的影响,其他高含冰层距离远天然上限的埋深值按照实测值选取。依据上面的思路,最终确定了 35 个监测断面完整冻融周期进行评价,各评价指标数据如表 2 所示。

2.3 评价指标权重计算

(1) 主观权重的计算

图 2 给出评价模型需的层次结构模型,图中可以看出实际上这里目标层只有一个准则层,各指标相对准则层获得的权重即为我们所需要的权重。综合以往的研究经验,通过分析各指标对路基稳定性影响相对重要程度构造判断矩阵,结果列入表 3。

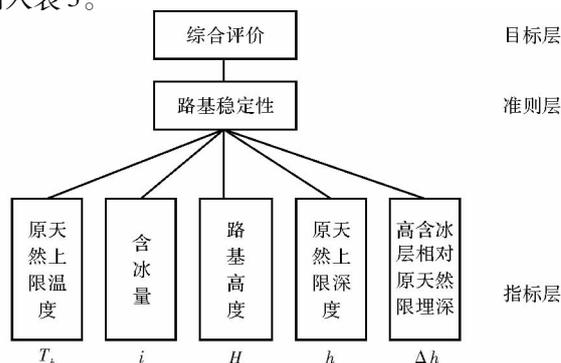


图2 评价层次结构模型

表2 参与评价断面指标数据

| 监测断面 | $T_h/^\circ\text{C}$ | $l/\%$ | H/m | h/m | $\Delta h/\text{m}$ |
|------|----------------------|--------|--------------|--------------|---------------------|
| P2 | -2.08 | 10.0 | 1.0 | 1.9 | 10.0 |
| P3 | -0.13 | 10.0 | 6.4 | 2.5 | 10.0 |
| P4 | 0.43 | 25.0 | 5.5 | 1.0 | 0.9 |
| P5 | 0.01 | 10.0 | 4.0 | 3.0 | 10.0 |
| P6 | -1.25 | 25.0 | 3.3 | 2.9 | 0.2 |
| P7 | -0.16 | 25.0 | 3.4 | 3.2 | 1.1 |
| P8 | -0.12 | 10.0 | 2.8 | 5.0 | 10.0 |
| P9 | -0.77 | 25.0 | 3.2 | 1.8 | 0.0 |
| P10 | -0.94 | 25.0 | 2.8 | 1.8 | 0.0 |
| P11 | -1.00 | 30.0 | 3.0 | 1.8 | 0.0 |
| P12 | -1.69 | 40.0 | 4.0 | 0.9 | 1.0 |
| P13 | -0.52 | 30.0 | 8.0 | 2.3 | 0.0 |
| P14 | -0.84 | 25.0 | 6.0 | 2.3 | 10.0 |
| P15 | -0.78 | 25.0 | 3.0 | 2.3 | 0.0 |
| P16 | -2.02 | 40.0 | 5.7 | 1.7 | 0.0 |
| P17 | -0.05 | 40.0 | 0.9 | 4.0 | 0.0 |
| P18 | 0.03 | 25.0 | 4.2 | 3.3 | 0.2 |
| P19 | 0.33 | 10.0 | 2.4 | 6.2 | 10.0 |
| P20 | -0.19 | 25.0 | 3.6 | 3.1 | 0.0 |
| P21 | 0.02 | 10.0 | 3.6 | 3.1 | 10.0 |
| P22 | -0.47 | 25.0 | 3.6 | 5.2 | 0.0 |
| P25 | -0.12 | 30.0 | 3.4 | 2.4 | 0.0 |
| P27 | -0.11 | 40.0 | 3.6 | 2.9 | 0.3 |
| P28 | -0.09 | 25.0 | 3.7 | 2.9 | 0.0 |
| P29 | -0.30 | 25.0 | 3.6 | 3.4 | 0.0 |
| P30 | -0.39 | 25.0 | 5.7 | 2.7 | 0.0 |
| P31 | -0.01 | 30.0 | 4.0 | 8.0 | 0.0 |
| P32 | 0.00 | 10.0 | 3.5 | 4.8 | 10.0 |
| P33 | -0.09 | 30.0 | 2.9 | 3.4 | 0.0 |
| P34 | -0.02 | 30.0 | 3.0 | 3.8 | 0.0 |
| P36 | -0.03 | 25.0 | 4.4 | 2.8 | 2.8 |
| P37 | -1.03 | 30.0 | 0.0 | 2.4 | 0.0 |
| P41 | -0.08 | 25.0 | 6.8 | 5.0 | 0.0 |
| P43 | -0.11 | 25.0 | 7.0 | 3.5 | 0.0 |
| P44 | 0.02 | 40.0 | 3.5 | 2.4 | 0.0 |

表3 路基稳定性判断矩阵

| C | T_h | i | H | h | Δh |
|------------|-------|-----|-----|-----|------------|
| T_h | 1 | 1/3 | 7 | 5 | 3 |
| i | 3 | 1 | 7 | 5 | 3 |
| H | 1/7 | 1/7 | 1 | 1/5 | 1/7 |
| h | 1/5 | 1/5 | 5 | 1 | 1/3 |
| Δh | 1/3 | 1/3 | 7 | 3 | 1 |

通过计算得到评价指标权重, 结果见表4。

表4 评价指标主观权重

| | T_h | i | H | h | Δh |
|-----------|--------|--------|--------|--------|------------|
| ω' | 0.4426 | 0.2839 | 0.0322 | 0.0811 | 0.1603 |

计算后 $CI = 0.109$, $CR = 0.0973 \leq 0.1$, 判断矩阵通过一致性检验。

确定主观向量矩阵为: $\omega' = (0.4426, 0.2839, 0.0322, 0.0811, 0.1603)$ 。

(2) 客观权重

直接使用不同量纲的数值进行分析是不具可比性的, 所以在求解熵权值之前, 首先应该进行量纲的归一化处理, 以实现实际值到指标评价值的转换。为了计算编程简便, 采用下式极差法将数据归一化在 $[0.1, 0.9]$ 区间内:

$$X_{ij} = 0.1 + (0.9 - 0.1) \frac{\max x_j - x_{ij}}{\max x_j - \min x_j} \quad (14)$$

利用式(11)和式(12), 通过计算最终得到各评价指标的客观权重, 结果见表5。

表5 评价指标客观权重

| | T_h | i | H | h | Δh |
|------------|-------|-------|-------|-------|------------|
| ω'' | 0.207 | 0.203 | 0.207 | 0.205 | 0.179 |

确定评价指标客观权重向量为: $\omega'' = (0.2041, 0.1986, 0.2039, 0.2015, 0.1919)$ 。

(3) 组合权重的确定

这里认为主观权重合客观权重同等重要, 选取 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$, 通过式(13)进行计算, 最终确定评价指标的权重向量为: $\omega = 0.3274, 0.2425, 0.1185, 0.1426, 0.1688$ 。

2.4 评价断面加权关联度计算

依据前面的分析, 原天然上限年平均温度、含冰量、路基高度为极小型指标, 即数值越小越有利于路基的稳定性, 通过式(2)进行归一化处理; 原天然上限深度、高含冰层距上限埋藏深度为极大型指标, 即数值越大越有利于路基的稳定性, 通过式(1)进行归一化处理。

为了使得动态的评价结果具有可比性, 必须确立两个参考数列矩阵, 即代表假定最稳定断面和假定最不稳定断面。在评价体系中参考数列矩阵的温度数据是动态变化参量, 所以需要选择一个合理的参考值, 且在选择中要力求接近实际状态, 这样才能使评价结果更具有实际意义, 否则会因为参考值的选择而导致最终评价结果发生变化。而其他的指标值现阶段并未发生明显变化, 可以认为是静态参量。

这样, 在假定最稳定断面选择中, 除原天然上限年平均温度指标外, 含冰量与路基高度指标的选择在指标评价矩阵中为最小值, 天然上限深度与高含冰层距离上限深度选择在指标评价矩阵中为最大值, 认为该评价断面具有最稳定的状态; 在假定最不稳定断面选择中, 除原天然上限年平均温度指标外, 含冰量与路基高度指标选择在指

标评价矩阵中为最大值,原天然上限深度与高含冰层距离上限深度选择在指标评价矩阵中为最小值,认为该评价断面稳定型最差,最终确定假定最稳定断面参考数列矩阵为 $P_b = [-3.00, 10, 0, 8.0, 10]$, 假定最不稳定断面参考数列矩阵为 $P_w = [1.00, 40, 8.0, 0.9, 0]$ 。

由于分辨系数 ρ 对评价结果的趋势并不产生影响,这里选取 $\rho = 0.5$, 通过建立的评价指标矩阵利用式(5)计算关联系数矩阵,再通过式(6)得到各评价断面对最稳定状态路基断面的加权关联度,即得到关联度向量 R_i , 其意义为评价断面相对最稳定断面的稳定程度,这样使得每一评价断面具有了统一的参考。

通过计算,各监测断面加权关联度结果如表 6 所示。

表 6 评价断面加权关联度

| 监测断面 | 关联度 | 监测断面 | 关联度 | 监测断面 | 关联度 | 监测断面 | 关联度 |
|-------|--------|------|--------|------|--------|-------|--------|
| P_b | 1.0000 | P11 | 0.4437 | P21 | 0.6652 | P34 | 0.4250 |
| P2 | 0.7834 | P12 | 0.4452 | P22 | 0.4645 | P36 | 0.4367 |
| P3 | 0.6482 | P13 | 0.4006 | P25 | 0.4140 | P37 | 0.4993 |
| P4 | 0.3999 | P14 | 0.5501 | P27 | 0.3931 | P41 | 0.4319 |
| P5 | 0.6616 | P15 | 0.4551 | P28 | 0.4311 | P43 | 0.4175 |
| P6 | 0.4762 | P16 | 0.4563 | P29 | 0.4415 | P44 | 0.3858 |
| P7 | 0.4248 | P17 | 0.4335 | P30 | 0.4256 | P_w | 0.0000 |
| P8 | 0.6937 | P18 | 0.4278 | P31 | 0.4935 | | |
| P9 | 0.4502 | P19 | 0.7042 | P32 | 0.6818 | | |
| P10 | 0.4605 | P20 | 0.4362 | P33 | 0.4246 | | |

实际上加权关联度反映了各监测断面相对假定的最稳定断面相对稳定程度,我们也可以认为这是路基稳定性的评价得分,即假定最稳定断面的得分为 1,那么其他断面的得分为相应关联度的值。

2.5 多年冻土区路基稳定性评价结果验证

评价体系建立的目的是了解多年冻土区道路路基稳定性状况,为保障道路安全运营提供决策支持,所以必须保证其评价结果的准确性。路基稳定性直观反映为路基的变形过程,而我们所建立的评价体系的出发点是基于路基沉降变形的考虑,所以通过与变形数据的对比可以清晰地判断评价结果是否合理。

图 3 给出了关联度和沉降的对应关系,表 7 给出了一个完整冻融周期中评价断面的排序以及对应的总沉降量。可以看出,评价断面的得分和路基沉降有良好的对应关系,很好地反映了评价结果的合理性。所以我们认为评价体系是合理的,能够表现出路基稳定状态。

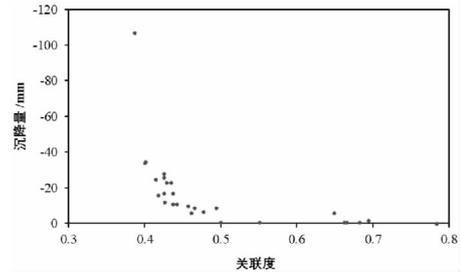


图 3 关联度与沉降量对应关系

表 7 评价结果总排序及对应沉降

| 排序 | 监测断面 | 关联度 | 沉降量/mm | 排序 | 监测断面 | 关联度 | 沉降量/mm |
|----|-------|--------|--------|----|-------|--------|--------|
| | P_b | 1.0000 | - - - | 19 | P29 | 0.4415 | - 11 |
| 1 | P2 | 0.7834 | 0 | 20 | P36 | 0.4367 | - 11 |
| 2 | P19 | 0.7042 | - - - | 21 | P20 | 0.4362 | - 17 |
| 3 | P8 | 0.6937 | - 2 | 22 | P17 | 0.4335 | - 23 |
| 4 | P32 | 0.6818 | - 1 | 23 | P41 | 0.4319 | - - - |
| 5 | P21 | 0.6652 | - 1 | 24 | P28 | 0.4311 | - - - |
| 6 | P5 | 0.6616 | - 1 | 25 | P18 | 0.4278 | - 23 |
| 7 | P3 | 0.6482 | - 6 | 26 | P30 | 0.4256 | - 12 |
| 8 | P14 | 0.5501 | - 1 | 27 | P34 | 0.4250 | - 26 |
| 9 | P37 | 0.4993 | - 1 | 28 | P7 | 0.4248 | - 17 |
| 10 | P31 | 0.4935 | - 9 | 29 | P33 | 0.4246 | - 28 |
| 11 | P6 | 0.4762 | - 7 | 30 | P43 | 0.4175 | - 16 |
| 12 | P22 | 0.4645 | - 9 | 31 | P25 | 0.4140 | - 25 |
| 13 | P10 | 0.4605 | - 6 | 32 | P13 | 0.4006 | - 35 |
| 14 | P16 | 0.4563 | - 10 | 33 | P4 | 0.3999 | - 34 |
| 15 | P15 | 0.4551 | - - - | 34 | P27 | 0.3931 | - - - |
| 16 | P9 | 0.4502 | - - - | 35 | P44 | 0.3858 | - 107 |
| 17 | P12 | 0.4452 | - - - | | P_w | 0 | - - - |
| 18 | P11 | 0.4437 | - - - | | | | |

将评价结果分析后发现有如下的分布规律:

排序在 1~18 所对应的监测断面其年总沉降量基本均控制在 10 mm 之内,表现出很好的稳定状态。

排序在 19~31 的监测断面其当年沉降量基本为 10~30 mm,稳定状态一般。

排序在 32~35 的监测断面当年的沉降量基均大于 30 mm,稳定状态较差。

这样排序的结果给了我们很好的启示,即如果通过统一的参考断面(假定最稳定断面)所获得的断面评价得分能够判断出断面的稳定状态,那么我们可以将路基的稳定状态对应到上述的分类中,这样就为我们认清多年冻土地地区道路路基稳定状态提供了可以直接判别的依据,同时这样的排序结果也为道路健康状态诊断和维护提供了决策方案。

3 结论

(1)通过分析多年冻土路基变形影响因素,将

路基下原天然上限温度、冻土含冰量、路基高度、天然上限深度及高含冰层距离上限深度五个因素作为影响冻土区冻土路基稳定性的主要因素, 建立了冻土路基稳定性评价指标矩阵, 采用了基于组合权重的灰色关联度决策方法, 建立了多年冻土区路基稳定性评价体系。

(2) 通过分析评价结果与沉降的对应关系, 表明所建立的评价系统能够真实的反映路基的稳定性状态, 通过建立的评价体系可以良好的评价监测断面路基稳定性所处的状态, 为诊断多年冻土区路基健康状态, 为多年冻土区道路运营维护提供了有效的决策支持手段。

(3) 该评价系统作为决策支持手段也可以应用到冻土区多年冻土工程地质评价、冻土区建筑物选址、道路选线的工作中, 为决策提供了有效的方式。

参考文献:

- [1] 马巍, 程国栋, 吴青柏. 解决青藏铁路建设中冻土工程问题的思路与思考[J]. 科技导报, 2005, 23(1): 23-28.
- [2] 程国栋, 马巍. 青藏铁路建设中冻土工程问题[J]. 自然杂志, 2006, 28(6): 315-320.
- [3] 汪双杰, 王佐, 袁堃, 等. 青藏公路多年冻土地区公路工程地质研究回顾与展望[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 1-8.
- [4] WU Q B, LIU R Z, ZHANG J M, et al. A review of recent frozen soil engineering in permafrost regions along Qinghai-Tibet highway, China[J]. Permafrost & Periglacial Processes, 2010, 13(3): 199-205.
- [5] WU Q B, CHENG G D, MA W. Impact of permafrost change on Qinghai-Tibetan railroad[J]. Science in China, 2004, 47(S1): 122-130.
- [6] 于晖, 吴青柏, 刘永智. 青藏铁路多年冻土区工程长期监测系统[J]. 冰川冻土, 2008, 30(3): 475-481.
- [7] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [8] Saaty T L. Decision making for leaders: the analytical hierarchy process for decisions in a complex world[J]. The Analytical Hierarchy Process Series, 1996, 2: 71-74.
- [9] Saaty T L. How to make a decision: the analytic hierarchy process[J]. European Journal of Operational Research, 1990, 48(1): 9-26.
- [10] Mon D L, CHENG C H & LIN J C. Evaluating weapon system using fuzzy analytic hierarchy process based on entropy weight[J]. Fuzzy Sets & Systems, 1994, 62(2): 127-134.
- [11] 程国栋. 青藏高原多年冻土区路基工程地质研究[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 134-141.
- [12] 张建明, 刘端, 齐吉琳. 青藏铁路冻土路基沉降变形预测[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3): 12-17.
- [13] 郑波, 张建明, 马小杰等. 高温-高含冰量冻土压缩变形特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 35(S1): 3063-3069.
- [14] 马巍, 刘端, 吴青柏. 青藏铁路冻土路基变形监测与分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 571-579.
- [15] ZHANG M, ZHANG J & LAI Y. Numerical analysis for critical height of railway embankment in permafrost regions of Qinghai-Tibetan plateau[J]. Cold Regions Science & Technology, 2005, 41(2): 111-120.
- [16] 吴青柏, 朱元林, 刘永智. 人类工程活动下多年冻土热融蚀敏感性评价模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(6): 731-735.
- [17] 吴青柏, 朱元林, 刘永智. 人类工程活动下冻土环境变化评价模型[J]. 中国科学: 地球科学, 2002, 32(2): 141-148.

Stability Evaluation of Permafrost Embankment based on Gray Relational Analysis with Combined Weights

YU Hui, ZHANG Lingmei and LU Xun

(State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions, CCCC First Highway Consultants Co., LTD, Xi'an 710075, China)

Abstract: Through the analysis of the factors affecting the deformation of permafrost subgrade, the main factors affecting the stability of the subgrade (deformation) in the frozen soil area are taken as the main factors affecting the stability of the subgrade (deformation) in the frozen soil area, which are five factors, the original natural upper limit temperature, the frozen soil ice content, the subgrade height, the natural upper limit depth and the high ice layer distance as the main factors of the stability of the subgrade (deformation) in the frozen soil area. The evaluation system of subgrade stability in permafrost regions is established by color correlation degree decision method. By analyzing the corresponding relationship between the evaluation results and the settlement, it shows that the evaluation system can truly reflect the stability of the roadbed. The results show that the established evaluation system can better evaluate the status of the stability of the subgrade of the monitoring section, and provide an effective support method for the diagnosis of subgrade health status in permafrost region and the maintenance decision of Subgrade in permafrost region.

Key words: permafrost; subgrade; stability evaluation; combination weight; grey correlation method