

公路软基沉降处治方案多层次灰关联模糊评价

王修山¹, 凡涛涛²

(1. 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018; 2. 长安大学公路学院, 西安 710064)

摘要:公路软基不均匀沉降处治方案选择过程中受到多种因素影响,具有不确定性、模糊性等,针对该问题,采用现代综合评价方法,构建多层次灰关联综合评价模型,以关联度为评价指标,对刚性桩、FMS置换和加铺调平三种处治方案进行分析。研究表明,刚性桩处治软基沉降问题最佳,FMS置换方案次之。该多层次灰关联综合评价模型适用于解决公路软基不均匀沉降处治方案选择问题。

关键词:公路工程;软土地基;沉降;处治方案;模糊评价

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2018)09-0637-05

0 引言

公路软土地基不均匀沉降问题是制约公路建设、运营及后期维修的首要问题。当前工程界处治公路软土地基沉降问题主要从地下处理和地上处理两部分进行方案选择^[1-2],其中:地下处理方案主要指对地基进行加固,如真空预压粒料桩、刚性桩及碎石桩等;地上处理方案主要指对路堤进行加固,如气泡混合轻质土(Foamed mixture lightweight soil, FMS)置换、堆载预压等。不同方案的选择受到多种因素的影响,使得软土地基处治方案选择具有不确定性、随机性及模糊性等特点^[3-5]。在实际处治方案选择过程中,如何在众多的方案中选取最佳处治方案,是工程技术人员需要考虑的关键问题。

现代综合评价方法是以管理科学为基础,多学科交叉运用,使用多指标对问题进行综合评价比较的一系列有效方法的总称,具有评价指标多样性、评价结果整体性的特点,包括层析分析法、模糊综合评判、数据包络分析法、人工神经网络评价法和灰色综合评价法等。现代综合评价方法主要应用于经济与管理领域,在公路工程领域较少且方法单一^[6-7]。在公路领域方面,李月光等^[8]采用灰色关联分析方法对高速公路软土地基沉降影响因素敏感性进行分

析,确定了软基沉降的敏感因素;张留俊、尹利华等^[9-11]构建了过滤式模糊推理模型进行公路软土地基处理方案决策,该模型引入了专家评判法和模糊综合评价法中的加权平均型算子,实例验证结果表明,该模型适用于解决公路软基处理方案决策问题,同时提高决策的科学性和可靠性。本文将层次分析方法与灰色综合评价法结合,建立多层次灰关联综合评价模型,将待分析事件进行目标、准则、方案多层次划分后再进行科学分析与讨论。以浙江省沪杭甬高速公路某段软基沉降处治工程为依托,运用所建立的多层次灰关联综合评价模型,对公路软基沉降处治方案选择问题进行分析,得到适用于工程的最佳软基处治方案。

1 多层次灰关联评价模型

多层次灰关联评价模型主要由多层次评价模型和灰色综合评价模型两部分构成。

1.1 多层次评价模型

1.1.1 构建多层次结构模型

根据问题的因果关系将相关因素分解成目标层A、准则层B和方案层C三层次,当某层次包括的因素较多时,可将该层次进一步划分为若干子层次,如图1所示。

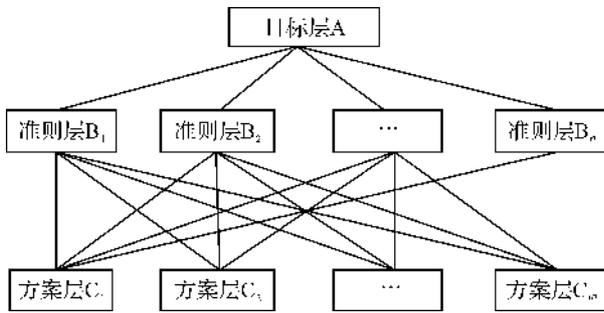


图1 多层次结构分析模型

1.1.2 构建判断矩阵

假设准则层B中有 n 个因素，方案层C有 m 个因素，则可分别得到准则层B对于目标层A的正反判断矩阵 $N=(N_{ij})_{n \times n}(i, j=1, 2, \dots, n)$ ，方案层C对于准则层B的正反判断矩阵 $M=(M_{ij})_{m \times m}(i, j=1, 2, \dots, m)$ 。其中 N_{ij} 表示相对于目标层A，准则层B中各因素 $B_k(k=1, 2, \dots, n)$ 两两重要度值， M_{ij} 表示相对于准则层B中的因素 B_k ，方案层C中各因素两两重要度值，其值一般采用1~9的整数或其倒数的标度方法，见表1—表2。

表1 判断矩阵N

因素	B_1	B_2	...	B_n
B_1	N_{11}	N_{12}	...	N_{1n}
B_2	N_{21}	N_{22}	...	N_{2n}
...
B_n	N_{n1}	N_{n2}	...	N_{nm}

表2 判断矩阵M

因素	C_1	C_2	...	C_m
C_1	M_{11}	M_{12}	...	M_{1m}
C_2	M_{21}	M_{22}	...	M_{2m}
...
C_m	M_{m1}	M_{m2}	...	M_{mm}

1.1.3 层次单排序及一致性检验

根据所建立的判断矩阵，求出最大特征根对应的特征向量，将特征向量归一化得到各指标的重要程度排序值。对于所建立的判断矩阵，采用层次分析法计算法则，利用判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} 按式(1)—(2)求出随机一致性比率CR对其一致性进行检验。当 $CR < 0.1$ 时，表示所建判断矩阵具有满意一致性，当 $CR \geq 0.1$ 时，表示所建判断矩阵不具有有一致性，应重新建立，直到符合要求为止^[12]。

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

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式中： CI 为判断矩阵的一致性指标； λ_{\max} 为判断矩阵

的最大特征根； q 为判断矩阵的阶数； RI 为同阶平均随机一致性指标，当 q 为3~9时所对应的 RI 值分别为0.58、0.90、1.12、1.24、1.32、1.41、1.45。

1.2 灰色综合评价模型

1.2.1 典型因素评价特征矩阵与待检模式向量建立

根据前述，每个方案层 C_m 可以由 n 个特征参数构建一个向量 $X_t(\omega) = [x_t(1), x_t(2), \dots, x_t(\omega)]$ ， $t=1, 2, \dots, m$ ； $\omega=1, 2, \dots, n$ 。则可得到典型因素评价特征矩阵 X ：

$$X = \begin{bmatrix} x_1(1) & x_1(2) & \dots & x_1(n) \\ x_2(1) & x_2(2) & \dots & x_2(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_m(1) & x_m(2) & \dots & x_m(n) \end{bmatrix}$$

根据计算出的准则层B各因素相对于目标层A的重要程度排序值，得出灰色综合评价模型中的待检模式向量 U ：

$$U = [u_1, u_2, \dots, u_n]$$

1.2.2 关联系数

以待检模式向量 U 为母序列，以向量 $X_t(\omega)$ 为子序列进行关联系数计算。

a) 对向量 U 的数据进行初始化处理，通常可采用初值化、均值化和归一化等方法。

b) 进行序列求差，分别按式(3)—(5)计算出 $\Delta_t(\omega)$ ， Δ_{\max} ， Δ_{\min} ；

$$\Delta_t(\omega) = |u_{\omega} - x_t(\omega)| \quad (3)$$

$$\Delta_{\max} = \max_t \max_{\omega} |u_{\omega} - x_t(\omega)| \quad (4)$$

$$\Delta_{\min} = \min_t \min_{\omega} |u_{\omega} - x_t(\omega)| \quad (5)$$

式中： $t=1, 2, \dots, m$ ； $\omega=1, 2, \dots, n$ 。

c) 按式(6)分别计算两个序列的灰关联系数 $\xi_t(\omega)$ ；

$$\xi_t(\omega) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_t(\omega) + \rho \Delta_{\max}} \quad (6)$$

式中： ρ 为分辨系数，用来提高关联系数之间的差异显著性，取值范围为0~1。

1.3 评价指标计算与分析

所建立模型结果以关联度值大小为评价指标，待检模式向量与典型因素评价特征矩阵中的子序列之间的关联度 r_t 按式(7)计算；

$$r_t = \frac{1}{n} \sum_{\omega=1}^n \xi_t(\omega) \quad (7)$$

式中： r_t 为关联度值。

根据计算出的关联度值大小对方案层C中的因素进行排序，关联度值越大表示该方案越好。

2 公路软基沉降处治方案多层次灰关联评价

2.1 多层次分析结构模型建立

沪杭甬高速公路沽渚至宁波段 K125+0~K125+768 软土路段,其工程地质特征:上部分布湖沼积亚粘土,层厚 0.0~1.0 m,其下分布海积软土,层厚 10.0~15.0 m,下部为冲湖积亚粘土,下卧冲海积亚砂土、粉细砂层,下伏基岩,岩性为凝灰岩。由于软土地基问题多年来存在不均匀沉降问题,历年来主要采用加铺调平方案进行处治,本文根据实际路段软土地基工程状况和软基处治情况调查等资料,建立公路软基处治方案选择的多层次分析模型,如图 2 所示。目标层 A 为“公路软基沉降处治最佳方案”,准则层 B 取六个因素作为评价控制指标,方案层 C 取刚性桩、FMS 置换和加铺调平(对照方案)三种方案进行比较。

2.2 判断矩阵计算及排序

根据所建立的公路软基沉降处治方案多层次结构分析模型编制专家调查表,对项目总工、专业技术人员、科研单位负责人等进行独立问卷调查,被调查

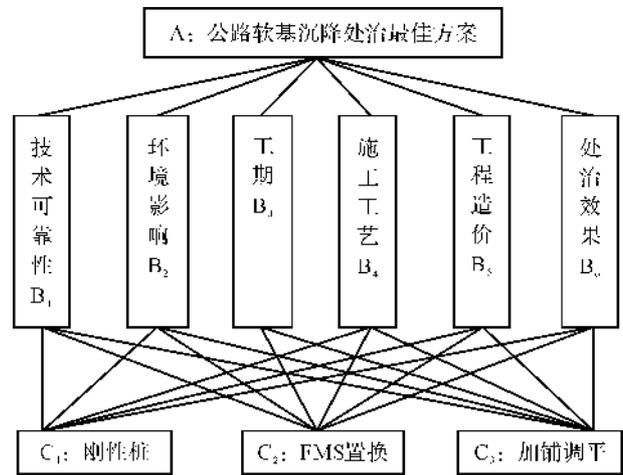


图 2 公路软基沉降处治方案多层次结构分析模型

人数不少于 8 位,然后由被调查人员根据自身专业知识和丰富的经验,采用 Satty 所提 1~9 的整数及其倒数的标度方法^[13],分别对准则层和方案层中各因素的相对权重赋值,最后对专家调查结果进行统计。

根据前述分析计算步骤,得到准则层 B 对目标层 A 的权重系数,见表 3。方案层 C 对准则层 B 各因素的层次排序结果见表 4~表 9。

表 3 准则层 B 影响因素判断矩阵及对目标层 A 的权重系数

影响因素	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	排序值
B ₁	1	8	2	5	5	3	0.400
B ₂	1/8	1	1/7	1/2	1/3	1/5	0.041
B ₃	1/2	7	1	5	3	1/2	0.212
B ₄	1/5	2	1/5	1	1/3	1/3	0.053
B ₅	1/5	3	1/3	3	1	1/2	0.092
B ₆	1/3	5	2	3	2	1	0.202

注:λ_{max}=6.383,CI=0.0766,RI=1.24,CR=0.0618<0.10。

表 4 B₁ 的层次排序

因素	C ₁	C ₂	C ₃	排序值
C ₁	1	3	4	0.614
C ₂	1/3	1	3	0.268
C ₃	1/4	1/3	1	0.117

注:λ_{max}=3.074,CI=0.037,RI=0.58,CR=0.0638<0.10。

表 5 B₂ 的层次排序

因素	C ₁	C ₂	C ₃	排序值
C ₁	1	1/3	1/5	0.105
C ₂	3	1	1/3	0.258
C ₃	5	3	1	0.637

注:λ_{max}=3.039,CI=0.0195,RI=0.58,CR=0.0336<0.10。

表 6 B₃ 的层次排序

因素	C ₁	C ₂	C ₃	排序值
C ₁	1	1/2	1/5	0.113
C ₂	2	1	1/5	0.179
C ₃	5	5	1	0.709

注:λ_{max}=3.054,CI=0.027,RI=0.58,CR=0.0466<0.10。

表 7 B₄ 的层次排序

因素	C ₁	C ₂	C ₃	排序值
C ₁	1	1/3	1/5	0.109
C ₂	3	1	1/2	0.309
C ₃	5	2	1	0.582

注:λ_{max}=3.004,CI=0.002,RI=0.58,CR=0.003<0.10。

表8 B₅的层次排序

因素	C ₁	C ₂	C ₃	排序值
C ₁	1	1/3	1/5	0.105
C ₂	3	1	1/3	0.258
C ₃	5	3	1	0.637

注: $\lambda_{\max}=3.039, CI=0.0195, RI=0.58, CR=0.0336 < 0.10$ 。

表9 B₆的层次排序

因素	C ₁	C ₂	C ₃	排序值
C ₁	1	1/3	1/5	0.637
C ₂	3	1	3	0.258
C ₃	5	1/3	1	0.105

注: $\lambda_{\max}=3.039, CI=0.0195, RI=0.58, CR=0.0336 < 0.10$ 。

由表3—表9可知,所建立各判断矩阵均符合一致性要求。由此得到方案层C对准则层B中不同因素的重要程度排序值汇总结果,见表10。

表10 方案层C对准则层B中不同因素的权重系数

综合评价	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆
刚性桩 C ₁	0.614	0.105	0.113	0.109	0.105	0.637
FMS置换 C ₂	0.268	0.258	0.179	0.309	0.258	0.258
加铺调平 C ₃	0.117	0.637	0.709	0.582	0.637	0.105

表11 数列值处理结果

数列值	数列绝对差值					数列绝对差最大值	数列绝对差最小值
	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_{\max}	Δ_{\min}		
Δ_1	0.386	0.002	0.417	0.024	0.125	0.132	0.386
Δ_2	0.732	0.155	0.351	0.176	0.028	0.247	0.732
Δ_3	0.883	0.534	0.179	0.449	0.407	0.400	0.883
Δ_{\max}	—	—	—	—	—	—	0.883
Δ_{\min}	—	—	—	—	—	—	0

取分辨系数 $\rho=0.5$,根据式(6)计算关联系数,结果见表12。

表12 关联系数

系数	$w=1$	$w=2$	$w=3$	$w=4$	$w=5$	$w=6$
$t=1$	0.534	0.995	0.514	0.948	0.779	0.770
$t=2$	0.376	0.740	0.557	0.715	0.940	0.641
$t=3$	0.333	0.453	0.712	0.496	0.520	0.525

2.5 关联度计算与评价

根据式(7)计算得到三种方案所对应的关联度,结果见表13。

表13 关联度

方案	刚性桩	FMS置换	加铺调平
关联度 r	0.757	0.662	0.507

从表13可知,三种软基不均匀沉降处治方案的关联度值大小排序为0.757(刚性桩)、0.662(FMS置换)、0.507(加铺调平),表明采用刚性桩处治公路软基沉降问题最佳,FMS置换方案次之,加铺调平

2.3 不同因素评价特征矩阵和待检模式向量

影响软土地基处治最佳方案选择的因素有6个,即 $n=6$;待评价处治方案有3个,即 $m=3$ 。由此可得到不同因素评价特征矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.614 & 0.105 & 0.113 & 0.109 & 0.105 & 0.637 \\ 0.268 & 0.258 & 0.179 & 0.309 & 0.258 & 0.258 \\ 0.117 & 0.637 & 0.709 & 0.582 & 0.637 & 0.105 \end{bmatrix}$$

同理,可以得到不同影响因素重要度值构成的待检模式向量 U :

$$U = [0.400 \quad 0.041 \quad 0.212 \quad 0.053 \quad 0.092 \quad 0.202]$$

对向量 U 的数据值采用初值化处理,得:

$$U = [1.000 \quad 0.103 \quad 0.530 \quad 0.133 \quad 0.230 \quad 0.505]$$

2.4 关联系数计算

根据式(3)–(5)对数列值进行处理,结果见表11。

方案最差,这与其他学者方法的研究结论一致^[14-16],刚性桩已在公路软基处治工程中得到应用,处治沉降效果明显。

3 结论

本文将层次分析法与灰色综合评价法有机结合,建立多层次灰关联评价模型,并将其应用于公路软基沉降处治方案选择中,结果表明:对于所比较的刚性桩、FMS置换和加铺调平三种方案,刚性桩处治公路软土地基沉降问题效果最佳,FMS置换方案次之,加铺调平方案处治效果最差。因此,沪杭甬高速公路沽渚至宁波段 K125+0~K125+768 软土路段沉降问题应首选刚性桩处治方案,以 FMS 置换方案作为备选方案。

本文建立的多层次灰关联评价模型能够为实际工程中公路软基沉降处治方案的选择提供参考,对比以往研究方法,提高了决策的科学性、准确性与合理性。

参考文献:

- [1] 郑刚,龚晓南,谢永利,等.地基处理技术发展综述[J].土木工程学报,2012,45(2):127-146.
- [2] 高彦斌,张松波,郭永发.软土地基的变形速率及稳定性控制[J].中国公路学报,2017,30(2):11-17.
- [3] 刘汉龙,赵明华.地基处理研究进展[J].土木工程学报,2016,49(1):96-115.
- [4] 王安辉,丁选明,章定文.在役高速公路软基不均匀沉降病害注浆处治技术[J].东南大学学报(自然科学版),2017,47(2):397-403.
- [5] 曹杰,郑建国,刘智,等.真空预压法处理软土地基的工程应用[J].岩土工程学报,2017(S2):124-127.
- [6] 李玉敏,姚玉玲.基于公路工程施工水平的定额测定对象选择方法[J].公路交通科技,2017,34(9):45-51.
- [7] 王可意,徐东强.公路安全防护措施可靠性评价研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(1):196-200.
- [8] 李月光,聂敏.高速公路软土地基沉降影响因素敏感性灰色关联分析[J].系统工程理论与实践,2010,30(5):956-960.
- [9] 张留俊,黄晓明,尹利华.公路软基处理方案多层次模糊评判方法研究[J].公路交通科技,2007,24(3):35-38.
- [10] 尹利华.公路软土地基处理关键技术智能信息化研究[D].西安:长安大学,2011.
- [11] 尹利华,张留俊,王晓谋.公路软土地基处理方案模糊决策[J].中外公路,2010,30(2):46-50.
- [12] 杜栋,庞庆华,吴炎.现代综合评价方法与案例[M].北京:清华大学出版社,2015:14-64.
- [13] Satty T L. Fundamentals of the analytic hierarchy process [M]// Schmoldt D L, Kangas J, Mendoza G, et al. The Analytic Hierarchy Process in Natural Resource and Environmental Decision Making. Dordrecht: Springer,2001:15-35.
- [14] 康洪,彭振斌.软土地基处理方案多层次综合模糊评判[J].湖南师范大学(自然科学学报),2009(3):120-124.
- [15] 郑刚,刘力,韩杰.刚性桩加固软弱地基上路堤稳定性问题(I):存在问题及单桩条件下的分析[J].岩土工程学报,2010,32(11):1648-1657.
- [16] 薛元,崔维秀,封志军,等.滇池地区铁路软土地基加固处理技术[J].铁道工程学报,2015(8):35-40.

Multi-layer gray correlation fuzzy evaluation for soft foundation settlement treatment scheme of highway

WANG Xiushan¹, FAN Taotao²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The selection for uneven soft foundation settlement treatment scheme of highway is influenced by multiple factors, so it has uncertainty and fuzziness. For this problem, the modern comprehensive evaluation method was applied to construct the multi-layer gray correlation comprehensive evaluation model. The correlation value was used as the evaluation index to analyze three kinds of treatment schemes, including the rigid pile, the foam mixture lightweight soil (FMS) replacement and pavement overlay. The results show: firstly, for three kinds of treatment schemes, the treatment effect of rigid pile is best, followed by the FMS replacement. Secondly, the model is feasible to solve the problem of selecting uneven soft foundation settlement treatment scheme of highway.

Key words: highway engineering; soft foundation; settlement; treatment scheme; fuzzy evaluation

(责任编辑:康 锋)