

基于熵权—密切值法的软土地基处理方案优选

胡庆国, 刘斌, 何忠明

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 综合考虑软土地基处理方案的特点及影响因素, 从技术可行性、经济合理性、环境影响三方面识别并筛选出 8 个二级指标构建软土地基处理方案评价指标体系, 采用熵权法确定评价指标权值, 运用密切值法进行多目标决策, 评价软土地基处理方案的优劣; 以汕头市鮑东路 CK0+270—470 段为例, 对静压预应力管桩、长螺旋钻孔灌注桩、钉形水泥土双向搅拌桩 3 种软土地基处理方案进行优选。结果表明, 处治效果、造价及工期的熵权值较高, 对软土地基处理方案选取的影响较大; 长螺旋钻孔灌注桩的密切值最小, 综合评价最优; 该评价模型可客观反映软土地基处理方案的优劣, 且计算简单, 能为软土地基处理方案选取提供决策依据。

关键词: 公路; 软土地基; 处理方案; 优选模型; 熵权; 密切值法

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)02-0052-04

地基的质量对道路性能和寿命有直接影响。软土的失稳性强, 力学性质差, 天然含水量高, 抗剪强度低, 孔隙比大, 常导致路基发生不均匀沉降, 甚至出现失稳和坍塌, 软土地基处理方案直接关系到工程项目的安全和造价。影响软土地基处理方案的因素很多, 在目前处理方案优选模型主要建立数学模型的基础上, 如王广月、李元军等通过层次分析法确定软土地基处理方案, 胡德斌运用模糊数学理论将不能定量的信息转化成定量的信息来对公路软土地基处理进行评估, 张士勋等在考虑指标的模糊性和不确定性的基础上建立软基处理方案多层次评价模型, 付旭等运用灰色—模糊分析法建立软土地基处理方案决策模型。总体来看, 软土地基处理方案的优选主要运用层次分析法、模糊数学评价法和灰色理论评价法等, 其中层次分析法的评价结果具有一定的主观性, 指标权重的不确定性也会使方案评价结果失真; 模糊数学评价法和灰色理论评价法对指标权重矢量的确定主观性较强且计算复杂。密切值法是多目标决策的一种方法, 其计算简便且精度高, 已在医疗、水利、农业等领域得到应用且效果较好。该文考虑软土地基处理的正向指标和负向指标, 采用熵权法确定指标权重, 利用密切值法对软土地基处理方案进行优选, 为软土地基处理方案选择提供借鉴。

1 数学建模

熵是信息论中对系统不确定性的度量。指标的熵越小, 则表达的信息量越大, 综合评估中作用越

大, 权重值越高。熵权值在评价研究中并不等同于实际意义上的指标重要性, 而是在给定评价指标值的条件下, 各指标在竞争意义上的相对强度系数。密切值法是系统工程中多目标决策的一种方法, 主要用于对样本进行优劣排序。

1.1 软土地基处理方案评价指标体系

理清软土地基处理方案选择时涉及的影响因素之间的从属关系是科学构建软土地基处理方案评价体系及准确计算其权重值的前提。软土地基处理方案优选的影响因素有:

(1) 技术可行性。技术可行性是保证工程安全和可靠的前提, 包括软土地基处理方案与工程现场水文地质条件的匹配性、施工条件的适宜性及处治效果等。

(2) 经济合理性。经济合理性是方案评价中最实际的一个问题。项目工期和造价是影响工程项目经济最重要的两个因素。

(3) 环境影响。为减轻工程施工对周围环境的不良影响, 在选择软土地基处理方案时需全面考虑机械施工产生的噪音对周围居民的影响、机械振动和地基变化对周围建筑的影响及施工材料对地下水的污染等。

1.2 建立软土地基处理方案指标的归一化矩阵并同向化

由软土地基处理方案优选的 m 种方案和 n 个指标单元建立初始矩阵 $X = \{x_{ij}\}_{m \times n}$ 。将其同向化为 $Y = \{y_{ij}\}_{m \times n}$, 公式如下:

$$y = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} & (x_{ij} \text{ 为正向指标}) \\ \frac{-x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} & (x_{ij} \text{ 为负向指标}) \end{cases} ; j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

1.3 构建虚拟的最优单元和最劣单元

令

$$\begin{cases} y_j^+ = \max_{1 \leq i \leq m} \{y_{ij}\} \\ y_j^- = \min_{1 \leq i \leq m} \{y_{ij}\} \end{cases}, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

则最优单元为:

$$A^+ = \{y_1^+, y_2^+, y_3^+, \dots, y_j^+\} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

最劣单元为:

$$A^- = \{y_1^-, y_2^-, y_3^-, \dots, y_j^-\} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

1.4 确定指标的熵权

1.4.1 标准化处理原始矩阵

在计算权重前先对原始矩阵进行标准化处理,解决各项不同质指标值的同质化问题。由于正向指标(数值越高越好)和负向指标(数值越低越好)表示的意义不同,标准化处理方法也不同。对于正向指标,原始矩阵标准化处理方法如下:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (3)$$

负向指标原始矩阵标准化处理方法如下:

$$z_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (4)$$

1.4.2 计算指标变异程度

令 $P = \{p_{ij}\}_{m \times n}$, 则第 j 项指标下第 i 种施工方案占该指标的比重为:

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

各项指标的熵值为:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}), k = \frac{1}{\ln(n)} \quad (6)$$

信息熵冗余度为:

$$d_j = 1 - e_j$$

评价指标的熵值越小,该指标的变异程度越大,所能传递的信息量越多,赋权越大。采用商值可避

免平均赋权法及主观赋权法的缺陷。

1.4.3 计算指标变异程度

指标权重按下式计算:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (7)$$

基于熵权法的各指标的权重为:

$$w = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_j\} \quad (j = 1, 2, \dots, m)$$

1.5 计算熵权密切值

运用欧氏距离计算各方案与最优单元的距离 d_i^+ 和与最劣单元的距离 d_i^- , 公式如下:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (y_{ij} - y_j^+)^2} \quad (8)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j (y_{ij} - y_j^-)^2} \quad (9)$$

各评价对象的密切值 c_i 按下式计算:

$$c_i = \frac{d_i^+}{d^+} - \frac{d_i^-}{d^-} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

式中: $d^+ = \min_{1 \leq i \leq m} \{d_i^+\}$; $d^- = \max_{1 \leq i \leq m} \{d_i^-\}$ 。

通过熵权-密切值法可将软土地基处理方案评价的多个指标转变成能从整体上衡量软土地基处理方案的单指标 c_i (熵权密切值), c_i 反映该分析单元与最优单元的远近, c_i 越小, 表明该分析单元离最优单元越近, 离最劣单元越远, 方案评价结果越好; $c_i = 0$ 时, 评价结果最好。

2 实例分析

2.1 工程概括

采用上述方法对汕头市鮀东路 CK0+270—470 段软土地基处理方案进行优选。该工程位于广东省汕头市金平区, 按城市主干路设计, 全长 6.35 km, 红线宽度 42 m。

从地貌特征分析, 该段属于滨海三角洲平原区, 绝对标高 2~4 m, 相对高度 1~2 m, 地势较平坦, 基岩埋深大, 多分布民房、工厂、耕地、鱼塘等。水系发育主要为榕江, 河流总体呈北西—南东走向, 流向出海口。航道区水运交通发达, 为出入榕江水系的黄金水道, 水深 3~13.5 m, 水域宽约 3.5 km, 海底标高为 -3~-7 m。

诚德善堂位于 CK0+320—420 右侧红线外 3~4 m, 该段路基为软土地基。诚德善堂为当地多个居委会居民进行聚集性活动的场所, 整栋建筑物高

4层,长约123 m,宽约90 m,采用块石条形基础,且处于软基上。

2.2 工程地质

该项目中软土路段土类含水量为41.5%~71%,孔隙比为1.137~1.986,内摩擦角 2.6° ~ 9.5° ,压缩模量2.26~3.37 MPa。在勘探深度内的土层根据其地质成因、沉积韵律及工程物理力学性质等,自上而下划分为5个层次(见表1)。

表1 地基勘探数据

层号	土层名称	层顶埋深/m	层底埋深/m	层厚/m
1	杂填土			0.5~1.7
2	黏土	0.0~2.9	0.6~4.6	0.4~2.7
3	淤泥	0.6~13.2	21.0~39.0	13.3~38.5
4	粉质黏土	21.0~34.9	25.4~38.2	0.8~8.2
5	粗、砾砂	23.2~39.0	33.1~46.2	0.5~13.1

表2 软土地基处理方案评价定性指标的评分标准

评分	水文地质	施工条件	处治效果	噪音	对空气和水质的影响	对周围建筑的影响
0~0.2	不可靠	不适应	不好	很大	严重影响	严重影响
0.2~0.4	不太可靠	不太适应	不太好	较大	明显影响	明显影响
0.4~0.6	中等可靠	中等适应	中等	中等	轻微影响	轻微影响
0.6~0.8	可靠	适应	好	较小	基本无影响	基本无影响
0.8~1	很可靠	非常适应	很好	小	无影响	无影响

评分,剔除关键信息缺失及答卷不规范等问卷后,共收回有效问卷67份,有效率为93.06%。运用SPSS软件对问卷情况进行信度检验,结果显示:克隆巴赫系数为0.875,检验合格,数据信度满足要求。对有效问卷的数据进行分析,确定各指标的评分值。3种软土地基处理方案评价指标的分值见表3。

表3 3种软土地基处理方案评价指标的分值

指标	各方案的评分值		
	静压预应力管桩	长螺旋钻孔灌注桩	钉形水泥土双向搅拌桩
水文地质	0.84	0.81	0.65
施工条件	0.75	0.73	0.67
处治效果	0.93	0.77	0.65
造价/万元	1 633	1 157	1 435
工期/d	171	188	154
噪音	0.92	0.91	0.85
对空气和水质的影响	0.86	0.85	0.83
对周围建筑的影响	0.88	0.84	0.89

根据表3,指标特征向量矩阵 $X_{3 \times 8}$ 为:

2.3 软土地基处理方案比选

由于该项目软土较深,对于软土地基的深层处理,在满足规范要求的稳定性和工后沉降的前提下应考虑造价、工期、对周围环境的影响等多种因素。结合工程所在地的土质条件、各施工方案适用条件,参考该地区同类工程,选取静压预应力管桩、长螺旋钻孔灌注桩、钉形水泥土双向搅拌桩进行方案比选。

分析软土地基方案选取的影响因素,确定水文地质、施工条件、处治效果、造价、工期、噪音、对空气和水质的影响、对周围建筑的影响8个软土地基处理方案评价指标,其中除造价和工期外都属于定性指标,通过专家评分进行定量,评分标准见表2。

向72位软土地基处理方面专家和施工现场管理人员(28位来自施工单位;23位来自设计监理单位;21位来自科研院所及高校)发放问卷,采用表2所示评分标准对各软土地基处理方案评价指标进行

$$X_{3 \times 8} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.84 & 0.75 & 0.93 & 1\ 633 & 171 & 0.92 & 0.86 & 0.88 \\ 0.81 & 0.73 & 0.77 & 1\ 157 & 188 & 0.91 & 0.85 & 0.84 \\ 0.65 & 0.67 & 0.65 & 1\ 435 & 154 & 0.85 & 0.83 & 0.89 \end{bmatrix}$$

2.3.1 原始矩阵的归一化和同向化

利用式(1)将原始特征向量矩阵 $X_{3 \times 8}$ 归一化和同向化为 $Y_{3 \times 8}$:

$$Y_{3 \times 8} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.63 & 0.60 & 0.68 & -0.66 & -0.58 & 0.59 & 0.59 & 0.58 \\ 0.60 & 0.59 & 0.56 & -0.47 & -0.63 & 0.59 & 0.58 & 0.56 \\ 0.49 & 0.54 & 0.47 & -0.58 & -0.52 & 0.55 & 0.57 & 0.59 \end{bmatrix}$$

2.3.2 构建虚拟的最优指标单元和最劣指标单元

利用式(2)得到最优单元、最劣单元分别为:

$$A^+ = [0.63 \ 0.60 \ 0.68 \ -0.47 \ -0.52 \ 0.59 \ 0.59 \ 0.59]$$

$$A^- = [0.49 \ 0.54 \ 0.47 \ -0.66 \ -0.63 \ 0.55 \ 0.57 \ 0.56]$$

2.3.3 确定指标的熵权

根据式(3)~(7)计算得到权值 w_j (见表4)。

表4 软土地基处理方案各指标的熵权

指标	熵权 w	指标	熵权 w
水文地质	0.116 4	工期	0.131 5
施工条件	0.118 3	噪音	0.116 2
处治效果	0.138 8	对空气和水质的影响	0.121 1
造价	0.140 3	对周围建筑的影响	0.117 1

2.3.4 计算熵权密切值

按式(8)~(10)计算,得到3种软土地基处理方案的密切值 $c=[0.216\ 0\ 0.053\ 7\ 1.129\ 4]$ 。

2.3.5 综合评定结果

根据上述计算结果,处治效果、造价及工期的赋权较高,对软土地基处理方案选取的影响较大;长螺旋钻孔灌注桩的密切值最小,说明该方法优于钉形水泥土双向搅拌桩和静压预应力管桩。而实际工程中软土地基处理方案为长螺旋钻孔灌注桩,且施工后单桩竖向抗压承载力与复合地基承载力都符合要求,证明该处理方法有效、该评价模型科学合理。

3 结语

将密切值法引入软土地基处理方案优选中,建立基于熵权-密切值法的软土地基处理方案优选模型,该模型原理简单、概念清晰、易于实现,同时解决了一般模型需确定隶属函数等主观性参数的问题,使评价结果更精准。工程应用表明,模型评价结果与工程实际使用方案相吻合,施工后单桩竖向抗压承载力与复合地基承载力都符合设计要求,验证了模型的正确性及实用性。该模型能在考虑技术性、经济合理性、环境影响的情况下有效地对软土地基施工方案进行优选,对软土地基施工方案选择具有参考价值。

参考文献:

- [1] 亢长江.道路桥梁施工中的软土地基处理技术[J].建材与装饰,2019(18):256-257.
- [2] 韩涛.公路施工中软土地基处理技术分析及应用[D].邯郸:河北工程大学,2017.

- [3] 张超.高速公路湖相软土地基处理效果与评价技术研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2017.
- [4] 王广月,牛之庚,王萌,等.地基处理方案评价的灰色关联逼近理想解法[J].数学的实践与认识,2011,41(9):115-120.
- [5] 李元军.层次分析法在公路软基处理方法选择中的应用[J].山西交通科技,2015(6):4-7.
- [6] 胡德斌.公路软基处理决策问题智能化技术分析[J].河南建材,2016(3):261-262.
- [7] 张士励,张亦飞,袁航新,等.考虑指标不确定性的软基处理方案优选模型[J].铁道工程学报,2010,27(3):19-23.
- [8] 付旭,刘益良,刘晓立.基于层次分析法的软基处理方案灰色-模糊多属性群决策模型研究[J].北华航天工业学院学报,2017,27(4):1-4.
- [9] 张瑞华,孙渤星,何思长,等.密切值法视角对四川省医疗机构发展概况的综合分析[J].中国卫生统计,2017,34(1):147-149.
- [10] 孙佳佳,帅红,李荣荣,等.基于SD模型的湘江长沙综合枢纽库区水环境承载力优化研究[J].科技和产业,2020,20(3):39-45.
- [11] 赵芳芳.面板数据综合评价中权重确定方法研究[D].长沙:湖南大学,2017.
- [12] 魏炜.基于密切值法的道路选线方案评价研究[J].西部交通科技,2020(1):56-58.
- [13] 张星星.公路软土地基处理及沉降分析[D].邯郸:河北工程大学,2019.
- [14] 张贤奎.汕头市软土的分布及工程地质特征[J].西部探矿工程,2001(增刊1):137-139.
- [15] 李石坚.CFG桩在公路软土路基设计中的应用[J].工程与建设,2019,33(2):268-270.
- [16] 程严毅.道路桥梁施工中软土地基处理技术应用实践[J].河南科技,2020(8):94-96.
- [17] 杨晓月.软土路基处理技术在公路工程施工中的应用研究[J].工程建设与设计,2019(4):201-202.

收稿日期:2020-08-24

(上接第51页)

- [12] 周志刚.交通荷载下沥青类路面疲劳损伤开裂研究[D].长沙:中南大学,2003.
- [13] 周玉民.水泥混凝土路面沥青加铺层反射裂缝机理与

设计方法研究[D].上海:同济大学,2007.

- [14] 赵冰,贺剑辉,关宏信,等.不同碎石化效果下沥青加铺结构断裂力学分析[J].交通科学与工程,2015,31(1):14-20.

收稿日期:2020-06-15