

文章编号:1671-8879(2006)02-0014-04

黄土地基承载力的模糊评判方法

石 刚^{1,2}, 支喜兰², 刘怡林³, 张建新⁴

(1. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 交通部公路研究所, 北京 100088; 4. 长安大学 基建处, 陕西 西安 710064)

摘 要:针对黄土地基承载力影响因素复杂的特点,基于模糊综合评判原理提出了黄土地基承载力模糊综合评判的确定方法。通过对黄土地区大量实测资料进行统计分析,构造了隶属函数形式,建立了承载力评价模型,权重采用了主观和客观因素相结合的综合权重原则。工程实例验证表明,用该方法确定的承载力更客观、全面,精度明显提高。

关键词:道路工程;黄土;地基;承载力;模糊评判;隶属函数;权重

中图分类号:U416.169 **文献标识码:**A

Fuzzy Evaluation of Loess Foundation Bearing Capacity

SHI Gang^{1,2}, ZHI Xi-lan², LIU Yi-lin³, ZHANG Jian-lin⁴

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. Research Institute of Highway, Ministry of Communications, Beijing 100088, China; 4. Department of Construction Management, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Considering the complex features of influencing factors on the foundation bearing capacity of subgrade in loess region, this paper proposes fuzzy synthesis evaluation method on the foundation bearing capacity in loess region based on fuzzy synthesis evaluation theory. With the results of actual plate loading tests in loess region, the membership function is built, and the model is developed for the evaluation of bearing capacity. Its synthetic right weight includes both subjective and objective right weight. The application results show that this method is more objective, comprehensive with high accuracy. 6 tabs, 1 fig, 6 refs.

Key words: road engineering; loess; foundation; bearing capacity; fuzzy evaluation; membership function; right weight

0 引 言

近年来,黄土地区高速公路由于地基承载力不足导致路基路面的病害,已引起了公路工程界的普遍关注。公路行业关于地基承载力的评价过去主要

借鉴建筑、铁路行业的经验,《湿陷性黄土地区建筑规范》(GBJ25-78、90)给出的承载力表(简称规范表),虽然在 2004 年新规范中被取消,但该表在工程界仍有广泛影响。现有建筑、铁路行业关于黄土地基承载力评价方法主要用于点工程,对于公路路基

这种线工程不完全适用。本文针对黄土地区公路工程的特点,以 226 份黄土地区实测载荷板试验及其相应的土工试验资料为基础,考虑多因素对承载力的影响,提出应用模糊数学理论确定承载力的方法,并且用计算机应用程序中可视化窗口形式实现其操作的简便性和实用性^[1-3]。

1 模糊综合评判的数学模型

1.1 基本原理

设因素集 $U = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)$, 评价集 $V = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_n)$ 。由全体单因素评价组成的模糊子集 $R_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 构成总的评判矩阵 R 为

$$R = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{Bmatrix}$$

R 就是一个 $U \rightarrow V$ 的模糊关系矩阵。

根据各个因素在总的因素集中所起的作用不完全相同,选用不同权重组成的集合为 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, 那么综合评判的结果 B 是 V 上的模糊子集。 B 的表达式见式(1)。

$$B = AR = (b_1, b_2, \dots, b_m) \tag{1}$$

如果要做出一个选择,须根据模糊变换和最大隶属原则,选取最大的 b_j 对应的 v_j 作为评判结果,再根据模糊运算带来的信息,在做出评判的基础上,进一步确定承载力的大小^[4]。

1.2 建立模型

晚更新世 Q_3 黄土在中国黄土地区分布相对比较稳定,公路地基主要为 Q_3 黄土,本文主要针对 Q_3 黄土展开讨论。在大量黄土地区实测载荷试验结果分析基础上,按承载力的大小将黄土地区分为强地基、次强地基、中等地基、较弱地基和弱地基 5 个级别,地基的强度级别与承载力的划分标准见表 1。这就构成了评价集 V , $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$ 。

选择评价因素组成因素集的原则:①评价因素对黄土承载力影响较大,而且便于测试;②评价因素构成的模型既有可靠的评判效果,又使用方便。

表 1 承载力分级标准

承载力级别	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V
	强地基 v_1	次强地基 v_2	中等地基 v_3	较弱地基 v_4	弱地基 v_5
承载力大小/kPa	>250	133~250	175~233	160~175	<160

通过对比分析,确定了选取物理力学指标(含水量、容重、空隙比、液限、压缩系数)、地貌类型作为评价因素,组成的因素集 U 为

$$U = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6) \tag{2}$$

式中: u_1 为含水量; u_2 为容重; u_3 为孔隙比; u_4 为液限; u_5 为压缩系数; u_6 为地貌类型。

2 隶属函数的建立

在求模糊关系矩阵 R 时,必须建立各评价因素对黄土地基承载力级别的隶属函数。而隶属函数的建立首先应统计分析承载力和各影响因素的分布情况,然后根据分布情况确定隶属函数的形式。

2.1 影响因素的统计分析

根据收集的大量黄土地区实测承载板试验数据及其对应的土工试验资料,对黄土的各种因素进行统计分析,统计结果表明,绝大多数指标不拒绝接受正态分布。中国《港口工程结构可靠度设计统一标准》指出,地基土的物理指标比较符合正态分布,力学指标比较符合极值 I 型分布,但大部分也能通过正态分布。国外有关资料也指出,黄土地基土体的物理力学参数的概率分布均可以通过正态分布检验。本次统计分析结果与国内外相关行业的统计结果基本一致。因此,对中国黄土地区的地基承载力分析,可将地基土中各指标的分布情况用正态分布表示。

2.2 隶属函数的确定

通过运用统计方法对影响承载力的各因素进行相关分析,分析各评价因素对承载力的作用程度,表 1 中的评价集 V 的承载力分级相对应,把各因素分成 5 个不同层次。表 2 给出对应于承载力分级的各因素的分级标准值。

隶属函数的值域区间为 $[0, 1]$, 反映了元素对模糊集合的隶属程度,隶属程度愈大,其值愈接近于 1, 当元素完全属于集合时,则隶属函数的值为 1。

表 2 评价因子分级标准值

指标	级别				
	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V
含水量 $w/\%$	<9.5	9.5~13.5	13.5~18.0	18.0~22.5	>22.5
容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	>21.0	19.6~21.0	18.0~19.6	16.5~18.0	<16.5
孔隙比 e	<0.90	0.90~0.96	0.96~1.00	1.00~1.03	>1.03
液限 $w_L/\%$	>32	29~32	26~29	24~26	<24
压缩系数 $a/(\text{m}^2 \cdot \text{kN}^{-1})$	<0.16	0.16~0.38	0.38~0.55	0.55~1.10	>1.10

黄土的承载力总体上有随影响承载力分级变化而变化的趋向,同时这些实测的因素(如 w 、 γ 、 e 、 a 、 w_L)具有一定的离散性,其分布近似服从正态分布。根据隶属函数的统计求法,评价因素对黄土承载力级别的隶属函数取正态。

$$\mu(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-m}{c}\right)^2\right]$$

(3)

当 $x = m$ 时, $\mu(x) = 1$, 既隶属度最大, 所以 m 就是物理量的平均值。

由分级所得到的承载力级别, 当物理量范围的边界处于两种级别之间, 对两种级别的隶属度相同, 令其近似等于 0.5, 有

$$\exp\left[-\left(\frac{x_{\text{上}} - x_{\text{下}}}{2c}\right)^2\right] = 0.5$$

(4)

式中: $x_{\text{上}}$ 、 $x_{\text{下}}$ 分别为该级别物理量的上、下边界值。

黄土地区不同地貌类型对应的承载力有差别, 已有研究表明^[5-6], 阶地越高, 承载力越大。为分析地貌类型对承载力的影响程度, 把黄土地区地貌类型划分为塬区、高阶地、二级阶地、一级阶地、河漫滩, 其对承载力的影响分级见表 3。

表 3 地貌类型对应的承载力评价值

地貌类型	塬区	高阶地	二级阶地	一级阶地	河漫滩
评价值	80	70	60	50	40

这样, 各评价因素对各承载力级别的隶属函数就可根据上述参数全部建立, 隶属函数的图形见图 1。

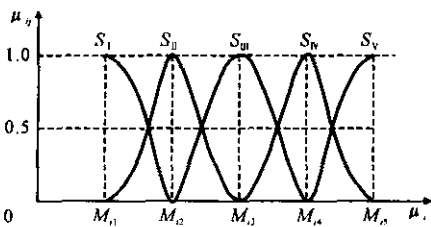


图 1 隶属函数的图形

当评定因素值 x_i 等于某承载力级别物理量的平均值 m_{ij} 时, 隶属函数的值 $u_{ij} = 1$, 即隶属度最大, 说明就单因素评价, 应完全隶属于该承载力范围; 当 x_i 远离 m_{ij} 时, u_{ij} 就愈小; 直至 x_i 等于相邻承载力级别物理量的平均值时, $u_{ij} \approx 0$, 隶属度最小, 说明此时就单因素评价, 应完全不属于该承载力级别。此外, 当 x_i 处于两种承载力级别物理量范围的边界值时, 对两种级别的隶属度相同, 且两者都近似等于 0.5, 在这种情况下就单因素评价而言, 要做出某种选择是最困难的, 也就是最模糊的。

3 权重的确定

(1) 根据各因子取值的大小而确立的权重, 称为数值权重。根据分级情况和隶属函数来确定该权重, 其计算式为

$$\alpha_i = \frac{5x_i / \sum_{j=1}^5 m_{ij}}{\sum_{i=1}^n \left[5x_i / \sum_{j=1}^5 m_{ij} \right]}$$

(5)

式中: α_i 为第 i 个因子的数值权重; x_i 为第 i 个因子的取值; m_{ij} 为分级标准值。

(2) 根据各因子本身的特性及其对承载力贡献的大小而确立的权重, 称为特性权重。特性权重的选取多采用专家打分的方法人为给定。通过咨询经验丰富的多位专家, 并经过问卷打分、综合评定, 确定各指标对应的特性权重的取值见表 4。再对各因素权重归一化后, 得特性权重向量 $\beta = (0.286, 0.229, 0.143, 0.171, 0.114, 0.057)$ 。

根据以上两种做法分别得到的权重 α 和 β , 求这两个模糊集的代数积, 再通过归一化得到需要的综合的权重 $A = (a_i) (i = 1 \sim 6)$, a_i 的计算式为

$$a_i = \frac{\alpha_i \beta_i}{\sum_{i=1}^n (\alpha_i \beta_i)}$$

(6)

式中: a_i 为第 i 个因子的综合权重; α_i 、 β_i 分别为第 i 个因子的数值权重和特性权重。

表 4 各因素对应的特性权重 β 取值

权重	物性指标					
	含水量 β_1	孔隙比 β_2	容重 β_3	液限 β_4	压缩系数 β_5	地貌类型 β_6
β_i	1.0	0.8	0.5	0.6	0.4	0.2

4 模糊综合评判

模糊综合评判是通过 A 和 R 的复合运算求得评价矩阵 B 来实现, 见式(7), 进行运算时, 算子的表达式见式(8), 其中 B 是 V 的一个模糊子集。

$$B = AR$$

(7)

$$b_i = \sum_{j=1}^n a_j r_{ji}$$

(8)

模糊综合评判的结果是评价集 V 上的一个模糊子集 B , B 的表达式见式(9), 其中 b_i 为第 i 个评价等级 v_i 对 B 的隶属度。

$$B = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5)$$

(9)

在确定承载力时, 充分利用 B 的全部信息, 同

时突出占优势等级的作用,以各隶属度 b_i 的幂为权,取加权平均的方法求承载力,算法见式(10),其中 b_i 是等级为 v_i 时的参数值。

$$f_{ak} = \frac{\sum_{i=1}^5 b_i^k n_i}{\sum_{i=1}^n b_i^k} \tag{10}$$

通过大量的对比分析,确定了 k 值取 2 比较合理。根据影响承载力各因素统计分析确定了隶属函数采用正态形式,决定了 n_i 的值取每个分级区间的平均值,取值结果见表 5。

表 5 n_i 的取值

承载力级别	S _I	S _{II}	S _{III}	S _{IV}	S _V
n_i	258.5	241.5	204.0	167.5	152.5

5 应用实例

将整个过程编制成黄土地基承载力模糊评判软件,计算过程应用计算程序中可视化窗口的形式实现,只要输入工程地点土体的基本参数,就可以方便快捷地计算出地基的承载力值。在黄土分布典型地区选取了部分地点的实测数据,将本方法确定的承载力值、查规范表确定的承载力值,分别与实测承载力进行对比,结果见表 6。

由表 6 数据可知,采用模糊数学评判系统确定的黄土地基承载力与现场载荷试验实测结果比较接近,相对误差小于 10%,完全能满足公路工程建设精度的要求。由此说明,采用模糊数学评判方法与查表法确定地基承载力相比,精度明显提高。

表 6 承载力对比

选择地点		阎良	介休	西安	兰州
指	含水量 $w/\%$	18.0	22.1	18.7	12.6
	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	13.8	15.1	17.0	15.1
	孔隙比 e	1.220	1.199	0.902	1.033
	液限 $w_L/\%$	29.0	30.7	29.1	30.0
	压缩系数 $a/(\text{m}^2 \cdot \text{kN}^{-1})$	0.73	0.23	0.32	0.22
标	地形地貌 F	二级阶地	一级阶地	二级阶地	一级阶地
	实测值 f_{ak}/kPa	163	175	196	212
	模糊评判 f_{ak}/kPa	173	167	186	210
	相对误差 $\%$	6.1	4.6	4.6	0.9
	查表值 f_{ak}/kPa	176	157	234	259
	相对误差 $\%$	8.3	10.2	19.3	22.2

6 结 语

本文主要讨论了 Q_3 黄土,针对黄土地区地基承载力受到多种因素影响,而且有些因素具有不明确性和模糊性的特点,以大量黄土地区实测载荷板试验结果为依据,提出了应用模糊综合评判原理确定黄土地基承载力的方法。通过实际工程验证,用该方法确定的承载力相对误差小于 10%,与规范查表法相比,更客观、全面,精度更高,表明该方法具有较好的可靠性,可为黄土地区公路工程设计及地基处理提供参考依据。

参考文献:

References:

[1] 应益荣,李 桃. 模糊控制系统的设计方法及应用[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003,23(1):95-96.
YING Yi-rong, LI Tao. Selection Method for Fuzzy Control System and Its Application[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2003, 23(1):95-96.

[2] 毕玉峰,王选仓,孙立军. 公路工程中多种资源均衡优化的遗传算法设计[J]. 中国公路学报,2004,17(1):86-89.
BI Yu-feng, WANG Xuan-cang, SUN Li-jun. GA's Design of Multi-Resources Equilibrium Optimization in Highway Engineering[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004,17(1):86-89.

[3] 尚 鑫,徐 岳. 基于灰色理论的斜拉桥拉索安全性评价[J]. 长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):52-55.
SHANG Xin, XU Yue. Safety-Based Cables' Condition Evaluation of Cable Stayed Bridge with Grey Theory[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004,24(1):52-55.

[4] 谢季坚. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2001.
XIE Ji-jian. Fuzzy Mathematics and Its Application [M]. Wuhan: Press of Huazhong University of Science and Technology, 2001.

[5] 关文章. 湿陷性黄土工程性能新篇[M]. 西安:西安交通大学出版社,1990.
GUANG Wen-zhang. Engineering Capability in Collapse Loess Region[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1990.

[6] 景宏君,张 斌. 黄土路基强度规律[J]. 交通运输工程学报,2004,4(2):14-18.
JING Hong-jun, ZHANG Bin. Loess Subgrade Strength Law[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004,4(2):14-18.