

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.02.17

黄土湿陷系数影响因素的相关性分析

朱凤基¹, 南静静¹, 魏颖琪², 白 兰²

(1. 长安大学地质工程与测绘学院地质工程系, 陕西 西安 710054;

2. 西安长庆科技工程有限责任公司, 陕西 西安 710018)

摘要: 湿陷性是黄土重要的工程性质, 而湿陷系数则是评价黄土湿陷等级的重要指标, 本文从工程地质角度出发分析了各土性指标对湿陷系数的影响, 利用数理统计方法建立其内在关系。由于黄土湿陷是众多影响因子共同作用下造成的, 且各因素之间并非是完全独立, 基于全面选取指标的考虑, 采用因子分析理论对孔隙比、干密度、初始含水率、饱和度、塑限、液限、塑性指数、压缩模量八个常见指标进行分析, 消除共线性对拟合的影响。将八个指标分为四大类, 并从每一大类中选取一个与湿陷系数相关程度最大的因子进行线性回归分析, 建立黄土湿陷系数与各影响因子的回归方程。最后, 利用甘肃庆阳地区一探井实测数据验证该模型的精确度, 结果显示湿陷系数预测结果与实测结果较为接近, 对快速、准确预测黄土湿陷系数和评价黄土地区场地湿陷等级具有一定的工程实践和参考价值。

关键词: 黄土湿陷; 湿陷系数; 因子分析法; 相关性

中图分类号: TU444

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)02-0128-06

Mathematical statistical analysis on factors affecting collapsible coefficient of loess

ZHU Fengji¹, NAN Jingjing¹, WEI Yingqi², BAI Lan²

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Department of Geology Engineering Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Xi'an Changqing Technology Engineering Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: Collapsibility is an important engineering property of loess, and collapse coefficient is an important index for evaluating the collapsibility of loess. In this paper, mathematical statistics method is used to establish their internal relationship various factors influencing the collapse coefficient of loess. The collapsibility of loess is influenced by many factors, and these factors are not completely independent. Therefore, based on the overall selection of indexes, factor analysis theory is applied to analyze porosity ratio, dry density, initial moisture content, saturation, plastic limit, liquid limit, plasticity index and compression modulus to eliminate the influence of collinearity on fitting. These eight indexes are divided into four classes, and one factor that has the greatest correlation with the coefficient of collapsibility is selected to participate in the linear regression analysis from each class, and the linear regression equation of the loess collapse coefficient and the influencing factors is established. Finally, the accuracy of the model is verified by the test data from a well in this region. It turns out that the predicted results of collapse coefficient are close to the test data, which has a certain practical and reference value for predicting the loess collapsible coefficient and evaluating the loess collapsibility quickly and accurately.

Keywords: loess collapsibility; collapse coefficient; factor analysis method; correlation

收稿日期: 2018-06-29; 修订日期: 2018-08-13

基金项目: 国家基础科学(973)发展计划项目: 黄土灾害成灾机理及灾害链演化规律(2014CB744702); 中国地调局项目(NO. 121201001000150122)

第一作者: 朱凤基(1994-), 男, 陕西省西安市人, 硕士研究生, 主要从事黄土湿陷性研究。E-mail: 415798947@qq.com

0 引言

黄土广泛分布在我国西北地区。湿陷性是黄土重要的工程性质,黄土大多为非饱和欠压密土,具有大孔隙和垂直节理,在天然湿度下具有较高强度和较低的压缩系数。关于黄土湿陷的机理众说纷纭,如胶体不足说、水膜嵌入假说、毛管假说、微结构不平衡吸力成因论等^[1],但无论哪一种假说都不能充分解释其机理,可见其复杂性。总的来说黄土在一定压力作用下浸水湿润后,其结构迅速破坏,土颗粒填充到架空孔隙的空腔中,从而产生湿陷变形^[2]。随着我国经济以及城镇化的飞速发展,对于在黄土场地上的基建项目已愈来愈多,稍有不慎将导致如建筑物上部结构破坏、公路路基沉陷等工程事故,所以湿陷性的评价是工程地质勘察不可或缺的一步。为确定湿陷系数,一般要在工程场地取样进行单线法或双线法湿陷实验,需要消耗大量的人力和时间。如何利用现在已有的数据资料分析总结,在可允许的误差范围内预测出湿陷系数、湿陷起始压力等湿陷参数,简化工程工作量,成为了国内众多学者的研究方向。如王家鼎^[3]、李瑞娥等^[4]利用模糊信息优化处理方法研究湿陷数据资料的结构和信息内容,通过找出这些数据之间所遵循的某种规律,建立信息矩阵,分析各个影响因子与湿陷系数的模糊关系,取得了一定的成果。高凌霄等^[5]、李萍等^[6]运用数理统计法将几个指标与湿陷系数建立多元非线性回归方程,随后徐志军等^[7]、邵生俊等^[8]利用因子分析原理,分析影响因子之间的相关性,消除了共线性的影响,并将指标归类后来线性拟合计算湿陷系数、湿陷起始压力等湿陷参数,其预测结果与实测数据误差较小,符合工程需要。

综上所述,前人研究中大多数只考虑某个指标或个别几个指标进行数理统计分析,且只注重对于数学方法的应用。而湿陷性是多种因素共同作用影响下造成的,故在选取指标时应全面考虑湿陷性的影响因子,并应从湿陷机理的角度出发去解释所选取指标的合理性。因此,本文基于选取多个黄土湿陷性影响因子,利用因子分析理论分析各个指标间的相关性,从湿陷机理的角度对各影响因子进行研究分析,筛选相对独立并且与湿陷系数相关程度较大的影响因子进行线性回归分析,保证选用指标的全面性以及合理性。最后将预测模型的结果与实际结果进行对比分析,验证预测模型的准确性。

1 黄土湿陷指标的相关性分析与选取

土工试验中测试或计算所得的土性指标都具有明确的物理意义,这些土性指标包含物理、水理以及力学等多方面因素,反映了黄土的物质成分、结构特征和当前的赋存状态等属性,对黄土的湿陷性有着不同程度的影响。基于此,通过前人总结经验^[9-10]与工程土工试验中常测参数的对比,现选用孔隙比 e , 干密度 ρ_d , 初始含水率 W , 饱和度 S_r , 液限 W_L , 塑限 W_p , 塑性指数 I_p , 压缩模量 E_s 8 个重要指标进行相关分析,这些指标能够较为综合全面的反映出影响黄土湿陷性的多方面因素,因此,具有一定的合理性和代表性。本文分析数据来源于甘肃省庆阳市西峰区某湿陷性黄土 (Q_3) 场地的室内试验实测数据。

1.1 相关性分析

因子分析法是处理多元统计分析中多变量的常用方法,主要通过研究多种变量之间的内在关系,寻求已知数据的基本结构,用少数几个变量代替基本数据结构。利用这种方法可以有效克服变量的共线性。本文根据因子分析原理,将原始数据标准化后,计算各物性指标的相关性,并得到相应的相关系数矩阵见表 1。之后利用各个影响因子的相关系数矩阵进行聚类分析,将相关性较好的因子聚为一类。本文选用的贴合度 α 为 0.8 (α 为因子间相近程度的比例系数,取值在 0~1 之间),当相关系数小于 α 则标记为 0,大于 α 则标记为 1,得到的关系矩阵为表 2。由表 2 可以看出:孔隙比与干密度相关性较强,含水率与饱和度相关性较强,塑限、液限、塑性指数相关性较强,而压缩模量与其他指标相关性都较弱。

1.2 定性分析与指标选取

由上述聚类分析可将各土性指标根据相关性强弱归为四类:孔隙比与干密度归为一类,含水率与饱和度归为一类,塑限、液限、塑性指数归为一类,压缩模量归为一类。下面将从工程地质学的角度定性分析各个指标与湿陷系数之间的关系,并用散点图加以验证,得出各个指标与湿陷系数的相关程度,选取每一类中相关性最大的指标进行建模,保证选取指标的全面性以及合理性。

1.2.1 孔隙比和干密度对湿陷系数的影响

黄土大孔隙性是湿陷的根本原因,前人的研究表明,黄土中的孔隙按构造形态分类主要有以下 4 种:大孔隙、架空孔隙、粒间孔隙及粒内孔隙,不同类型的孔隙在湿陷中的作用不尽相同,其中中孔隙(即架空孔隙)是导致黄土湿陷最主要的因素^[11]。当黄土在上覆

土压力或者在上覆土压力与附加压力的共同作用下产生湿陷后,其结构迅速破坏,架空孔隙崩溃,大、中孔隙被土颗粒填充并形成众多微小孔隙,孔隙数量减小。孔隙比与干密度在一定程度上可以体现出架空孔隙的多少。孔隙比越小,土质越紧密,发生湿陷的可能性就越小;干密度越大,土颗粒排列越紧密,架空孔隙就越

少,发生湿陷的可能性也就越小。孔隙比与湿陷系数呈正相关关系(图1),即孔隙比越大,湿陷系数就越高;干密度与湿陷系数呈负相关关系,即干密度越大,湿陷系数越小。相比于干密度,孔隙比与湿陷系数的相关程度更高($R^2=0.8797$),且高度相关,故选用孔隙比进行线性回归建模分析。

表 1 各指标间的相关系数

Table 1 Correlation coefficient of physical parameters

	孔隙比 e	塑限 W_p	塑性指数 I_p	饱和度 S_r	压缩模量 E_s	液限 W_L	初始含水率 W	干密度 ρ_d
孔隙比 e	1	-0.570	-0.663	-0.743	-0.563	-0.677	-0.494	-0.997
塑限 W_p	0.570	1	0.896	0.738	0.509	0.882	0.704	0.572
塑性指数 I_p	-0.663	0.896	1	0.707	0.688	0.953	0.733	0.672
饱和度 S_r	-0.743	0.738	0.707	1	0.618	0.744	0.877	0.733
压缩模量 E_s	-0.563	0.509	0.688	0.618	1	0.669	0.499	0.576
液限 W_L	0.677	0.882	0.953	0.744	0.699	1	0.780	0.684
含水率 W	-0.494	0.704	0.733	0.877	0.499	0.780	1	0.476
干密度 ρ_d	-0.977	0.572	0.672	0.733	0.576	0.684	0.476	1

表 2 各指标之间相关系数的聚类分析

Table 2 Clustering analysis of correlation coefficient of different parameters

	孔隙比 e	塑限 W_p	塑性指数 I_p	饱和度 S_r	压缩模量 E_s	液限 W_L	初始含水率 W	干密度 ρ_d
孔隙比 e	1	0	0	0	0	0	0	1
塑限 W_p	0	1	1	0	0	1	0	0
塑性指数 I_p	0	1	1	0	0	1	0	0
饱和度 S_r	0	0	0	1	0	0	1	0
压缩模量 E_s	0	0	0	0	1	0	0	0
液限 W_L	0	1	1	0	0	1	0	0
含水率 W	0	0	0	1	0	0	1	0
干密度 ρ_d	1	0	0	0	0	0	0	1

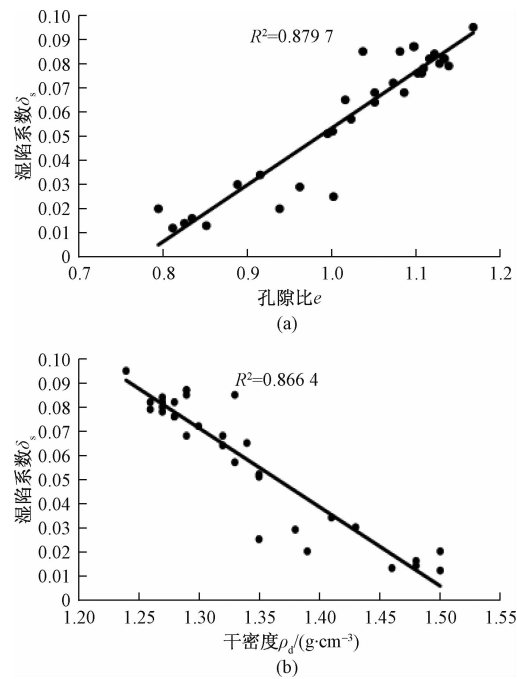


图 1 孔隙比、干密度与湿陷系数相关性
Fig.1 Correlation between porosity ratio, dry density and collapse coefficient

1.2.2 初始含水率和饱和度对湿陷系数的影响

在众多黄土湿陷机理假说中,水都是导致黄土产生湿陷的主要外因。当土中水量较小时,毛细管弯液面就越深,基质吸力就越大,颗粒间的摩擦系数就越高,从而增加土颗粒发生错动的难度,导致土的抗剪强度增加;土中水越少,颗粒间的胶结物质距离就越近,从而颗粒间的连接强度就越大^[12]。另一方面,随着含水率的增加,有效应力会因为孔隙水压力的增大而减小,从而初始含水率较高的土与初始含水率较低的土相比其土质较软,在试验初始加压阶段其变形也就相对较大,故导致浸水后可压缩的孔隙相对减少,而由前面的推论可知,孔隙越少则湿陷变形量就越小,故可推论初始含水率与湿陷系数应呈现负相关关系。根据饱和度定义,相同体积下,饱和度越大则反映土中开放孔隙越少,提供湿陷变形的空间就越小。所以,推论饱和度与湿陷系数亦应呈负相关关系。随着含水率和饱和度的增大,湿陷系数均逐渐减小(图2(a)),由最开始的强湿陷性黄土到弱湿陷性黄土甚至变为非湿陷性黄土,这与之前的定性推论相符合。通过对比可知,饱和度与湿陷

系数的相关程度更高($R^2=0.8574$),且高度相关,故选用饱和度进行线性回归建模分析(图2(b))。

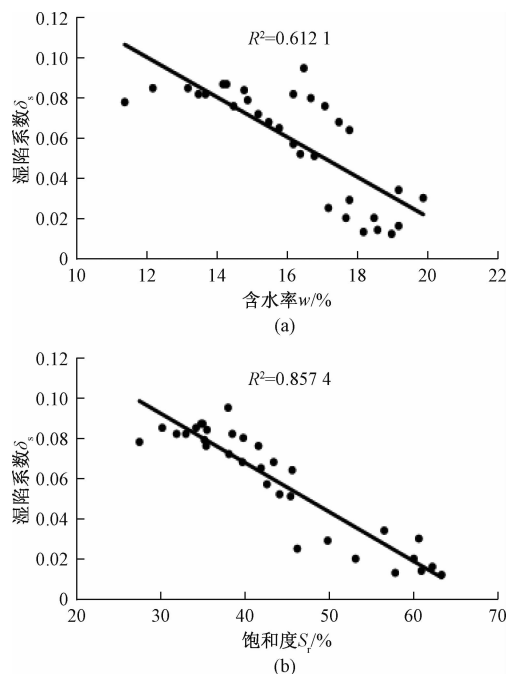


图2 含水率、饱和度与湿陷系数相关性

Fig. 2 Correlation between moisture content, saturation and collapse coefficient

1.2.3 塑限、液限与塑性指数对湿陷系数的影响

土颗粒的黏粒含量、矿物成分等因素对湿陷性的影响很大,主要体现在土颗粒吸附水的能力上。当土中含水量较少时,水被紧紧吸附在土颗粒的表面上,成为强结合水,此时粒间连接强度较高。当含水量增大后,土颗粒的水膜逐渐变厚,其表面不仅有强结合水而且还有弱结合水,此时土呈可塑状态,接下来随着含水量越来越大,逐渐将有自由水的出现,颗粒间的连接强度逐渐减小。而塑限和液限就是理论上定量结合水膜厚度的指标,塑限表示土从半固态转变到可塑状态时的含水量,液限表示土从可塑状态到液性状态时的含水量,塑限和液限越大则表示土颗粒吸附水的能力越强,湿陷性就越小。而由以往的研究可知,土的黏粒含量越多,湿陷性就越小,而塑性指数可以大体上表示土中黏粒含量的多少。塑性指数越大,黏粒含量就越多,土的湿陷性就越小。湿陷系数随着液限、塑限、塑性指数的增大而减小,这与前面推论相符(图3)。通过对比,液限相比塑限和塑性指数其与湿陷系数的相关程度更高($R^2=0.627$),中度相关,故选用液限进行线性回归建模分析。

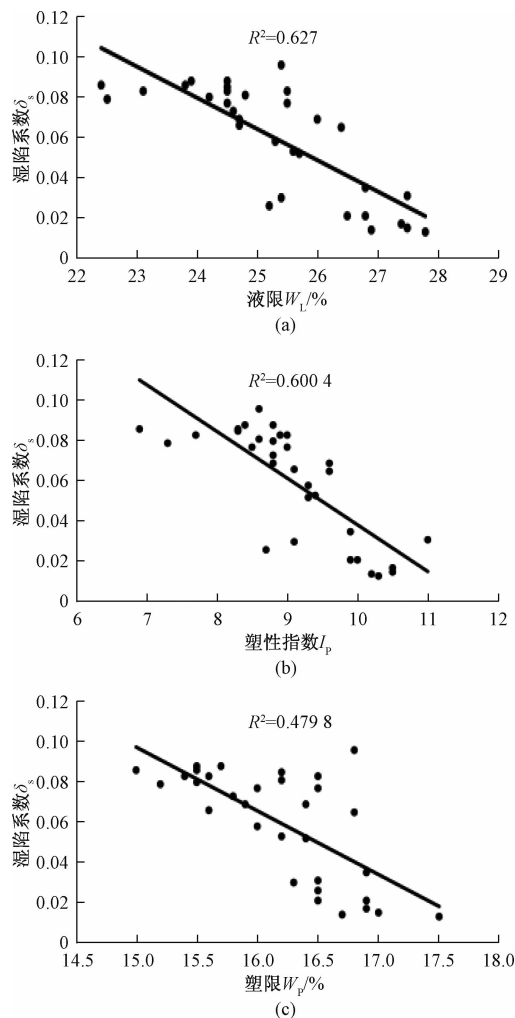


图3 液限、塑性指数、塑限与湿陷系数相关性

Fig. 3 Correlation between liquid limit, plasticity index, plastic limit and collapse coefficient

1.2.4 侧限压缩模量对湿陷系数的影响

侧限压缩模量指在完全侧限的条件下竖向应力增量与应变增量的比值,是反应土体抵抗变形的能力和压缩性的指标。影响模量大小的因素主要为:土颗粒的排列密实度、土体的结构强度。若压缩模量较大,一方面可能是土颗粒排列较密实,可供土体变形的空间有限,故当土浸水后其湿陷变形量就较少,表现出压缩模量与湿陷系数呈负相关关系;另一方面,若土体结构强度较大,其初始压缩变形量则较小,当土浸水后,其结构迅速被破坏,湿陷变形量就较大,则表现出压缩模量与湿陷系数呈正相关关系^[13]。总的来说,湿陷系数与压缩模量的关系需从实际出发。由于本文选取的数据是不同深度下黄土的压缩模量值(图4),而随着深度的增大,土体结构强度对压缩模量的影响就越小,所以湿陷系数与压缩模量呈负相关关系,即随着压缩模

量的增大,湿陷系数逐渐减小。压缩模量与湿陷系数相关系数为 0.686 ($R^2 = 0.4709$)。

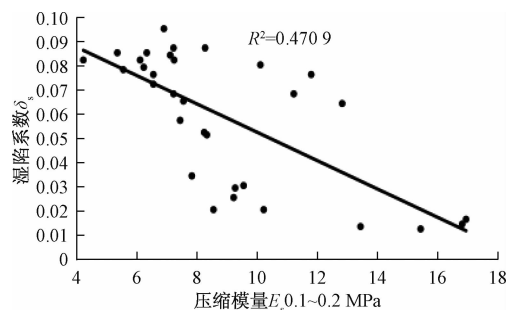


图4 压缩模量与湿陷系数相关性

Fig. 4 Correlation between the compression modulus and collapse coefficient

2 湿陷系数回归分析

通过上述对各个影响因素的分析,确定选取孔隙比、饱和度、液限、压缩模量作为反映黄土湿陷性的影

响因子来参与黄土湿陷系数的多元线性回归分析。并将指标中饱和度与液限做比值,压缩模量与一个标准大气压做比值,从而使影响因子转化为无量纲的量。

基于上述因子分析结果,以研究区的试验数据为样本,利用 SPSS 软件将数据进行线性拟合,得出湿陷系数与各影响因子间的回归方程为:

$$\delta_s = +0.049 + 0.059e - 0.0246 \frac{S_r}{W_L} - 0.000159 \frac{E_s}{P_a}$$

为了验证回归方程的准确性及实用性,笔者选择该区一勘探点的实测数据进行检验,并列出了其计算误差,误差的算法为预测模型计算得出的湿陷系数预测值减去湿陷系数实测值再除以湿陷系数的实测值,其原始数据和检验结果见表3,湿陷系数预测值与实测值的对比曲线见图5。由此可以看出,总体上该定量模型分析较为合理,预测结果与实测结果的误差绝对值主要分布在 0%~6%,且都不大于 15%,符合工程需要。

表3 湿陷系数预测结果与误差分析

Table 3 Predicted results and error analysis of collapse coefficient

取样深度/m	e	S_r/W_L	E_s/P_a	湿陷系数预测值	湿陷系数实测值	误差/%
1	1.177	1.74	65.61	0.073	0.072	2
2	1.109	1.83	75.82	0.071	0.069	3
3	1.142	1.71	65.60	0.071	0.075	-5
4	1.121	1.47	67.29	0.073	0.077	-5
5	1.098	1.58	72.33	0.074	0.074	0
6	1.108	1.56	64.51	0.076	0.078	-2
7	1.087	1.54	60.61	0.076	0.076	0
8	1.090	1.57	78.94	0.074	0.075	-1
9	1.074	1.31	81.25	0.063	0.072	-11
10	1.051	1.31	87.31	0.060	0.061	-2
11	1.054	1.24	112.31	0.052	0.048	8
12	1.040	1.10	145.52	0.042	0.038	10
13	1.030	0.77	132.34	0.024	0.021	11
14	0.865	0.72	141.78	0.020	0.019	3
15	0.782	0.75	138.81	0.023	0.020	14
16	0.785	0.73	137.62	0.020	0.021	-6

3 结论

(1) 通过对影响湿陷性的指标进行因子分析和聚类分析,得出各个因子之间有很强的相关性。根据分析结果将相关性较大的指标归类。其中,孔隙比与干密度归为一类,饱和度与含水率归为一类,塑限、液限和塑性指数归为一类,压缩模量归为一类。

(2) 通过对各大类影响因素的研究分析,孔隙比与干密度,初始含水率和饱和度这两大类为影响黄土湿陷系数的主要因素,从四大类中分别选取孔隙比、饱

和度、液限、压缩模量这四个与湿陷系数相关程度较高的指标参与线性回归分析。

(3) 基于上述各因子分析结果,确定选取孔隙比、饱和度与液限之比及压缩模量与一标准大气压之比作为最终的无量纲影响因子,利用多元线性回归分析建立各影响因子与湿陷系数的关系。通过对试验数据的拟合分析,发现其湿陷系数预测结果与实测结果变化趋势相同,误差较小,符合工程需要。该方法能够全面考虑到各物性指标,并且很好的消除了各物性指标间的信息重叠性,因此可用来快速、准确的预测黄土湿陷

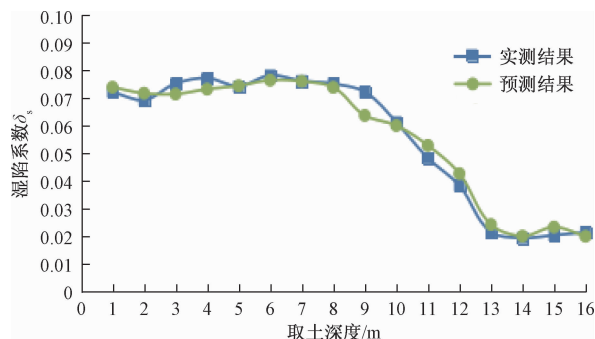


图5 湿陷系数预测结果与实测结果对比

Fig. 5 Comparison of predicted collapse coefficient and its measured value

系数和评价黄土湿陷性,对当地的工程建设具有一定的实践和参考价值。但由于黄土湿陷性具有区域性特点,各个地区的土性指标与湿陷系数的相关程度也不尽相同,故在其它地区进行应用时,可依据文本所述的方法合理选取已有的土性指标数据。

参考文献:

- [1] 汤连生. 黄土湿陷性的微结构不平衡吸力成因论[J]. 工程地质学报, 2003, 11(1): 30-35.
TANG Liansheng. Synthetic effect of microstructure and uneven suction on loess subsidence[J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(1): 30-35.
- [2] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1-10.
GAO Guorui. A structure theory for collapsing of deformation of loess soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 1-10.
- [3] 王家鼎. 地理学研究中的模糊信息优化处理方法[J]. 地理与地理信息科学, 1999(1): 75-80.
WANG Jiading. The fuzzy information optimization processing method in the study of geography[J]. Geography and Territorial Research, 1999(1): 75-80.
- [4] 李瑞娥, 谢永利. 模糊理论在黄土湿陷性预测中的应用[J]. 路基工程, 2008(5): 22-23.
LI Ruie, XIE Yongli. Application of fuzzy theory in the prediction of loess collapsibility[J]. Subgrade Engineering, 2008(5): 22-23.
- [5] 高凌霞, 赵天雁. 黄土湿陷系数与物性指标间的定量关系[J]. 大连民族大学学报, 2004, 6(5): 63-65.
GAO Lingxia, ZHAO Tianyan. The quantitative relation between loess collapsibility and its physical index[J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2004, 6(5): 63-65.
- [6] 李萍, 李同录. 黄土物理性质与湿陷性的关系及其工程意义[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 506-512.
- LI Ping, LI Tonglu. Relation between loess collapsibility and physical properties and its engineering significance[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 506-512.
- [7] 徐志军, 郑俊杰, 张军, 等. 聚类分析和因子分析在黄土湿陷性评价中的应用[J]. 岩土力学, 2010(增刊2): 407-411.
XU Zhijun, ZHENG Junjie, ZHANG Jun, et al. Application of cluster analysis and factor analysis to evaluation of loess collapsibility[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010(S2): 407-411.
- [8] 邵生俊, 杨春鸣, 马秀婷, 等. 黄土的独立物性指标及其与湿陷性参数的相关性分析[J]. 岩土力学, 2013(增刊2): 27-34.
SHAO Shengjun, YANG Chunming, MA Xiuting, et al. Correlation analysis of collapsible parameters and independent physical indices of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013(S2): 27-34.
- [9] 钱鸿缙, 王继唐, 罗宇生. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.
QIAN Hongjin, WANG Jitang, LUO Yusheng. Collapsible loess foundation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1985.
- [10] 刘祖典. 影响黄土湿陷系数因素的分析[J]. 工程勘察, 1994(5): 6-11.
LIU Zudian. Analysis of factors of collapsibility coefficients of loess[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1994(5): 6-11.
- [11] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学, 1987, 17(12): 1309-1318.
LEI Xiangyi. Size of loess pores in relation to collapsibility[J]. Scientia Sinica, 1987, 17(12): 1309-1318.
- [12] 高国端. 我国黄土湿陷性质的形成研究[J]. 南京建筑工程学院学报, 1994(2): 1-8.
GAO Guoduan. The formation of collapsibility of loess soils in China[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1994(2): 1-8.
- [13] 马闫, 王家鼎, 彭淑君, 等. 黄土湿陷性与土性指标的关系及其预测模型[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 120-128.
MA Yan, WANG Jiading, PENG Shujun, et al. Relationships between physical-mechanical parameters and collapsibility of loess soil and its prediction model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1): 120-128.