

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.01.019

黄土湿陷性与土体物性指标的相关性研究

郭倩怡¹, 王友林¹, 谢婉丽², 石卫¹

(1. 陕西省水工环地质调查中心, 陕西 西安 710068; 2. 西北大学
地质学系/大陆动力学重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要:为充分应用现有的试验资料, 构建出一套快速准确的预测评价黄土湿陷性的新方法。笔者基于咸阳黄土塬区多年积累的岩土勘查数据资料, 采用因子分析理论同偏最小二乘法及回归分析法相结合的研究方法, 深入挖掘试验数据, 应用黄土湿陷机理理论基础分析土体物性指标与黄土湿陷系数相关性及其主要影响指标, 分别构建了基于PLS方法及LogisticCum函数的黄土湿陷系数预测模型。结果表明, 采用LogisticCum函数所构建的黄土湿陷系数与饱和度、孔隙比的三维曲面方程在预测黄土湿陷性方面是可靠的, 模拟结果更加接近实际, 可以满足工程应用的需要。

关键词:黄土湿陷; 物理力学指标; 因子分析; 偏最小二乘法; 预测模型

中图分类号: P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6248(2021)01-0212-10

Study on Correlation between Loess Collapsibility and Soil Physical Property Index

GUO Qianyi¹, WANG Youlin¹, XIE Wanli², SHI Wei¹

(1. Shaanxi Hydrological Engineering Geology and Environmental Geological Survey Center, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: The authors aimed to use the existed laboratory test data to establish a set of rapid and accurate new method for predicting and evaluating the loess collapsibility. On the basis of the results from laboratory test conducted in Xianyang Loess Plateau, the factor analysis theory, the partial least squares method and the regression analysis method was used. This paper analyzed the correlation between soil physical property index and loess collapsibility coefficient with loess collapsibility mechanism, thus constructing a prediction model of loess collapsibility based on PLS method and LogisticCum function.

Keywords: loess collapsibility; physical and mechanical index; factor analysis; partial least squares method; prediction model

在区域协调发展战略的引领下, 为加快推进“关中城市群”的融合互动发展, 势必将有大量线

路工程、工业建设、民用建筑、地下工程等重要工程穿越或兴建于黄土台塬及黄土高地。而这些区

收稿日期: 2019-12-26; 修回日期: 2020-08-26

基金项目: 陕西省公益性地质调查专项“咸阳城市地质调查”(20160302), 陕西省公益性地质调查专项“关中平原城市群地下空间可持续利用研究”(20180303)

作者简介: 郭倩怡(1993-), 女, 硕士研究生, 助理工程师, 从事地质工程研究。E-mail: 653599474@qq.com

域往往广泛分布有大厚度湿陷性黄土,在降雨、外荷载等因素作用下极易形成不均匀沉降,造成工程结构严重破坏,是中西部城市建设发展过程中所面临的极为重要的工程地质问题,也是黄土地区岩土工程勘察评价的重要工作(林鸿州等,2015)。

黄土工程特性受土体基本物理力学指标影响密切(李萍等,2007;Derbyshire E,1994;Derbyshire E et al.,1996;Dudley J H.,1970;Clemence S P,1981),随着越来越多工程兴建于黄土地区,目前,已积累了大量的基础试验资料,能否应用现有的资料,采用科学的分析总结方法,探索出一种快速准确的预测评价黄土湿陷性的新方法,从而减轻试验工作量,简化评价工序,加快建设发展脚步,已成为广大学者关注的热点问题之一。

近年来,一些学者采取了诸如“数理统计法”(井彦林等,2010;刘颖莹等,2018)、“模糊数学法”(刘悦等,2000)等先进数学方法对湿陷系数及一个或某几个黄土物性指标的相关关系进行探讨研究,以期建立黄土湿陷性评价预测模型。其中,邵生俊等通过因子分析法及多元线性回归分析法得到了黄土湿陷性评价指标与含水比和孔隙比之间的关系(邵生俊等,2013);徐志军采用聚类分析和因子分析理论引入黄土湿陷等级评价中,并提出分析预测模型(徐志军等,2010);马闫采用偏相关分析法获取湿陷系数与各土性指标的相关程度排序,进一步引入 RBF 神经网络,建立湿陷系数预测模型(马闫等,2016);王家鼎、谢婉丽等基于模糊信息优化处理方法,采用模糊数学方法以一个或多个物性指标与湿陷系数的模糊关系,得到模糊近似推理结果(王家鼎,1999;谢婉丽等,2005)。

由于土体物理力学性质具有明显的地域性规律,受各区域地质条件及岩土特征影响明显。因此,针对关中平原城市群,笔者以“咸阳城市地质调查”项目为依托,基于咸阳黄土塬区多年积累的岩土勘察工程资料,将因子分析理论同偏最小二乘法及回归分析法相结合,深入挖掘试验数据,应用黄土湿陷机理理论基础,分析土体物性指标与黄土湿陷系数相关性,进一步明确主要影响指标,研究黄土湿陷系数预测模型的实用化表达,以加深对黄土湿陷机理理论的认识和研究,从而更为简便经济地开展黄土湿陷性评价工作。

1 黄土湿陷系数与土体物性指标综述

黄土湿陷性是在如压力荷载、含水率等外部条件以及粒状架空微结构等内部条件共同作用下形成的(谢婉丽等,2015),其主要影响因素有:压力、含水率、孔隙性、深度、黄土成因、黄土成壤作用等,这些影响因素可通过常规土工试验所测定的土性指标反映,包括:含水率、饱和度、孔隙比、孔隙度、天然密度、干密度、塑限、液限、塑性指数、液性指数、压缩系数、压缩模量。因而这些具有明确物理意义的土性指标同黄土湿陷系数均存在不同程度的相关性。根据湿陷系数,黄土的湿陷等级可划分为 4 类(表 1),为确定湿陷系数预测模型以便于分析黄土湿陷等级。笔者采用咸阳黄土塬中部某地开展的原位大型浸水试验及其配套的室内试验数据,由定量、定性两方面分析湿陷系数与各类土性指标及深度的相关性,借助土力学及工程地质理论,对两者关系进行分析讨论,以加深对黄土湿陷性机理的认识。

表 1 黄土湿陷等级分类表

Tab. 1 Classification of loess collapsibility classification

湿陷系数	湿陷等级
$\delta_s < 0.015$	非湿陷性
$0.015 < \delta_s \leq 0.03$	轻微湿陷性
$0.03 < \delta_s \leq 0.07$	中等湿陷性
$\delta_s > 0.07$	强烈湿陷性

1.1 黄土物性指标因子相关性定量分析

笔者借助 Partial 偏相关分析算法这种定量化评价方法,对上述 12 种黄土物性指标及深度指标与黄土湿陷系数之间的相关程度进行评价。由于影响黄土湿陷的各指标因素并非相互独立,而是存在一定的联系,因此笔者依据计算所得的相关程度绝对值大小,筛选相关程度高或典型的几个变量研究其与湿陷系数的依赖关系。

Partial 偏相关分析是在对原始变量进行标准化后,通过控制一个或多个附加变量的效应,研究某一个要素对另一个要素的影响或相关程度。假设存在变量 $x_1、x_2、x_3$,一阶偏相关系数(1)是在排除其余一个变量影响后得到的。

$$r_{ij.h} = \frac{r_{ij} - r_{ih}r_{jh}}{\sqrt{(1 - r_{ih}^2)(1 - r_{jh}^2)}} \tag{1}$$

式中: i,j,h 分别代表任一变量 x_1,x_2,x_3 的脚标; $r_{ij,h}$ 表示控制变量 x_h 、变量 x_i,x_j 之间的一阶偏相关系数; r_{ij},r_{ih},r_{jh} 表示各变量间的简单相关系数,其计算公式如式(2)所示。

$$p=\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{(x_i-\bar{x})2}\sqrt{(y_i-\bar{y})2}}\tag{2}$$

式中: p 为变量间的简单相关系数; x_i,y_i 分别表示 2 变量数值; $\bar{x},\bar{y}$ 分别表示 2 变量平均值。

假设有 4 个变量 x_1,x_2,x_3,x_4 ,二阶相关系数为排除 2 个变量影响作用后所得,如式(3)所示。

$$r_{ij,hm}=\frac{r_{ij,h}-r_{im,h}r_{jm,h}}{\sqrt{(1-r_{im,h}^2)(1-r_{jm,h}^2)}}\tag{3}$$

式中: i,j,h,m 分别取变量 1、2、3、4 的排列组合,分别代表各变量间的一阶偏相关系数。

由上述分析可知,假设有 $k(k>2)$ 个变量 $x_1,x_2,x_3\cdots x_k$,则任意 2 个变量 x_i,x_j 的 g 阶($g\leq k-2$)阶偏相关系数公式如下式(4)。

$$r_{ij,l_1l_2\cdots l_g}=\frac{r_{ij,l_1l_2\cdots l_{g-1}}-r_{il_g,l_1l_2\cdots l_{g-1}}r_{jl_g,l_1l_2\cdots l_{g-1}}}{\sqrt{(1-r_{il_g,l_1l_2\cdots l_{g-1}}^2)(1-r_{jl_g,l_1l_2\cdots l_{g-1}}^2)}}\tag{4}$$

式中: $r_{ij,l_1l_2\cdots l_g}$ 为 g 阶偏相关系数; $r_{ij,l_1l_2\cdots l_{g-1}}$ 为 $g-1$ 阶偏相关系数。显然, g 阶偏相关系数是由 $g-1$ 阶偏相关系数所得。

偏相关分析所得各指标相关程度如表 2 所示。

表 2 各物性指标间的相关系数表
Tab.2 Correlation coefficient between various physical indicators

物性指标	取样深度	天然含水率	天然密度	干密度	孔隙比	饱和度	液限	塑限	塑性指数	液性指数	压缩系数	压缩模量	湿陷系数
取样深度	1.000	0.606	0.782	0.744	-0.692	0.796	0.329	0.331	0.409	0.540	-0.222	0.194	-0.600
天然含水率	0.606	1.000	0.646	0.350	-0.374	0.861	0.246	0.295	0.282	0.968	-0.008	-0.117	-0.482
天然密度	0.782	0.646	1.000	0.953	-0.885	0.935	0.399	0.385	0.478	0.573	-0.420	0.400	-0.875
干密度	-0.744	0.650	0.953	1.000	-0.944	0.915	0.298	0.244	0.433	0.554	-0.431	-0.387	-0.865
孔隙比	-0.692	-0.374	-0.885	-0.944	1.000	-0.773	-0.355	-0.316	-0.435	-0.308	0.530	-0.554	0.901
饱和度	0.796	0.861	0.935	0.615	-0.773	1.000	0.388	0.393	0.459	0.795	-0.246	0.169	-0.829
液限	0.329	0.246	0.399	0.298	-0.355	0.388	1.000	0.922	0.925	0.028	-0.075	0.006	-0.224
塑限	0.331	0.295	0.385	0.244	-0.316	0.393	0.922	1.000	0.929	0.063	-0.061	0.019	-0.250
塑性指数	0.409	0.282	0.478	0.333	-0.435	0.459	0.925	0.929	1.000	0.070	-0.119	0.058	-0.223
液性指数	0.540	0.968	0.573	0.454	-0.308	0.795	0.028	0.063	0.070	1.000	0.012	-0.123	-0.428
压缩系数	-0.222	-0.008	-0.420	-0.431	0.530	-0.246	-0.075	-0.061	-0.119	0.012	1.000	-0.669	0.342
压缩模量	0.194	-0.117	0.400	0.387	-0.554	0.169	0.006	0.019	0.058	-0.123	-0.669	1.000	-0.459
湿陷系数	-0.600	-0.482	-0.875	-0.865	0.901	-0.829	-0.224	-0.250	-0.223	-0.428	0.342	-0.459	1.000

根据相关程度分级:相关性 <0.4 为弱相关, $0.4\sim0.7$ 为中等相关, >0.7 为强相关。由表 2 可知,与湿陷系数具有显著强相关性的物性指标为:孔隙比、天然密度、干密度、饱和度、取样深度、天然含水率、液性指数。压缩模量同湿陷系数具有中等相关性,而液塑限、塑性指数、压缩系数与湿陷系数的相关性为弱相关。相关性方面,只有孔隙比及压缩系数与湿陷系数具有正相关性,其与物性指标均表现出负相关性。

各物性指标之间存在着一定的重叠性和相互影响性。中等相关性指标中,取样深度与 4 个强相关

指标均具有较好的相关性;天然含水率与强相关指标中的饱和度、天然密度具有较好的相关性,其中其与饱和度相关性高达 0.861;液性指数同饱和度具有显著强相关性,压缩模量则同孔隙比具有较好的相关性。而湿陷系数强相关指标中,孔隙比相关程度最大,且天然密度、干密度均与孔隙比具有强相关性,天然密度与饱和度也具有强相关性。

1.2 黄土湿陷性与主要影响因子的关系

笔者将在因子分析理论的基础上,着重选择与湿陷系数具有显著中等相关性以上的指标,绘制各指标同湿陷系数关系散点图,由土力学及工程地质

学角度切入,深入分析各指标对黄土湿陷性的影响,进一步明确影响黄土湿陷性的主要因素,为建立湿陷系数预测模型选取合理因子以反映多重因子影响效应。

1.2.1 孔隙比

据以往研究可知,黄土架空孔隙的大量赋存是黄土湿陷性的内因之一,孔隙比是衡量孔隙体积率的重要指标,间接反映了黄土的微结构特征。图 1 为黄土湿陷系数与孔隙比之间的关系曲线。黄土的湿陷性实质是黄土内部孔隙结构在浸水作用下的压缩变形,影响黄土湿陷性的内部孔隙主要为:大孔隙、架空孔隙、粒间孔隙。其中架空孔隙对于其湿陷性影响最大,为黄土湿陷提供了充分的变形空间。黄土的湿陷过程是大、中孔隙随着骨架颗粒的滑移而坍塌,或被软化后的胶结物及矿物质重新填充,从而致使孔隙总量总体减小。架空孔隙数量占比随孔隙总量的增大而增多,因而孔隙的数量与黄土湿陷性直接相关,这与图 1 中所反映的关系一致,黄土湿陷性随孔隙具有高程度的正相关性。由图 1 可以看出,试验黄土孔隙比数据分布于 0.62~1.30,其中非湿陷性黄土及微湿陷性黄土其孔隙比集中在 0.62~0.95,当孔隙比大于 0.95 时,黄土湿陷性主要为中等及严重湿陷性。

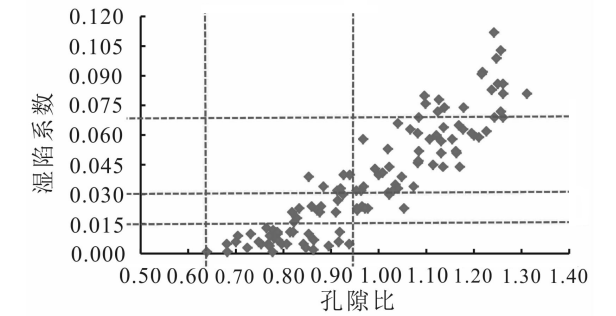


图 1 试验黄土湿陷系数与孔隙比关系图
Fig. 1 Relationship between collapsibility coefficient and void ratio of experimental loess

1.2.2 初始含水率、初始饱和度

黄土是一种具有“水敏性”的特殊土体,这是由于黄土特殊的孔隙结构以及其内部“亲水性”矿物成分及可溶盐所致,一旦浸水,亲水性矿物遇水融合移动造成骨架损伤,起到胶结作用的可溶盐在水中呈离子状态,使颗粒间的胶结、粒间强度降低,原先大孔隙被填充,土骨架瓦解失稳。因此土体内部初始

含水率一定程度决定了土体内部初始结构形态。初始含水率越低,与黄土湿陷直接相关的架空孔隙数量更多,土体内部孔隙结构更稳定,可溶盐及亲水性矿物未大量移动流失,土体“水敏性”相对更强,在单位荷载作用,一旦浸水,黄土湿陷变形明显。若初始含水率较高,土体在未浸水时,孔隙数量由于塑性状态下土骨架自身失稳,大孔隙的填充,大量减少了可供湿陷的架空孔隙数量(葛瑞华等,2015)。因而可知,黄土初始含水率应于湿陷系数呈负增长关系。如图 2 所示,试验黄土湿陷系数与黄土初始含水率关系同上述分析一致,两者虽具有一定的离散性,但仍然呈现明显的负相关性。

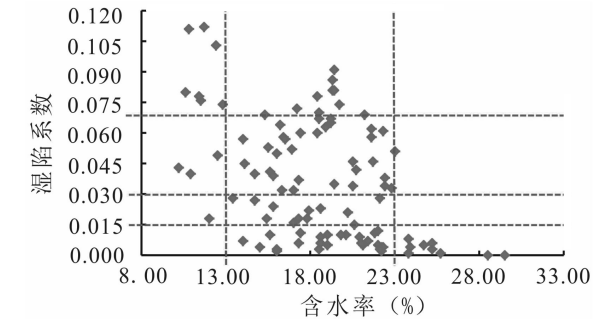


图 2 试验黄土湿陷系数与初始含水率关系图
Fig. 2 Relationship between experimental loess collapsibility coefficient and initial water content

土体初始饱和度是土体中水的体积与孔隙体积之比,同含水率正相关,同孔隙负相关。根据上述论述可知,黄土的湿陷系数同含水率及孔隙比分别呈负相关及正相关公式,因此可推论黄土湿陷系数同黄土初始饱和度呈现负相关关系。图 3 黄土湿陷系数与初始饱和度关系图反映两者关系同推论一致,呈现明显负相关关系,且该相关性高于初始含水率。

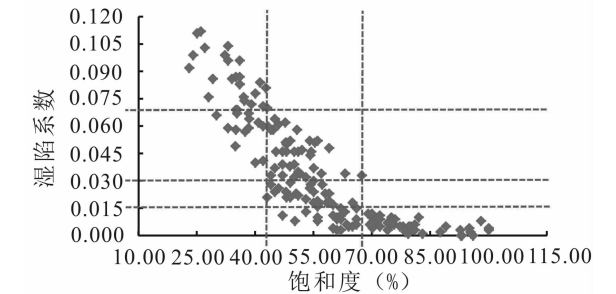


图 3 试验黄土湿陷系数与初始饱和度关系图
Fig. 3 Relationship between experimental loess collapsibility coefficient and initial saturation

由图 2 及图 3 可知,黄土湿陷系数随着初始含水率及饱和度的增加而减小,当含水率及饱和度增大至一定数值时,黄土湿陷系数小于 0.015,属于非湿陷性黄土,因而该数值可称为湿陷终止含水率(饱和度)。咸阳黄土塬湿陷终止含水率为 23%,终止饱和度为 68%,说明当黄土的天然含水率及饱和度分别高于 23%、68%,黄土就不会产生湿陷。当黄土初始含水率小于 13%,初始饱和度小于 43%时,此时黄土的湿陷性以强湿陷为主,因此该界点为黄土强湿陷起始含水率(饱和度)。

1.2.3 天然密度、干密度

黄土是典型的三相体,密度则是反映三相物质中单位体积的质量,分为干密度及天然密度。干密度表示土体三相物质中只有固相和气相时,单位体积土体颗粒骨架的质量;天然密度是指在天然状态下土体单位体积的质量,此时土体三相物质固、气、液相均存在,土体天然密度包含 2 方面,既包含单位体积土体固体颗粒含量,也包含单位体积水质量。由上述分析可知,黄土密度在一定程度上表示了土体的欠压密状态,其中干密度越小,单位体积土体颗粒含量越小,土骨架紧密程度越小,从而在遭受浸水、外荷载扰动作用下,土骨架排列和联结特征变化越大,因此湿陷性越强;而天然密度在一定程度上还反映出含水率对于湿陷性的影响,在含水率及土体颗粒排列紧密程度的双重影响作用下,天然密度越小,其内部所包含的单位体积水含量越小或土体颗粒骨架紧密程度越小,湿陷性越强。

由图 4、图 5 可知,黄土湿陷系数与其天然密度、干密度均呈现明显的负相关性,与上述分析一致。并且当天然密度及干密度分别大于 1.85 g/cm³、1.52 g/cm³,在浸水及扰动作用下,黄土表现为非湿陷性,该数值为湿陷终止天然密度(干密度);当天然密度及干密度分别小于 1.50 g/cm³、1.30 g/cm³时,黄土湿陷等级主要为中等及严重湿陷为主,同时是严重湿陷即强湿陷的起始点。

1.2.4 液性指数、压缩模量

液性指数是反映土体稠度的指标,可用于判断土体的软硬状态,综合表示土体自身的粒度及湿度。因此土体的稠度一定程度可反映出土体抵抗外力作用下自身破坏变形的能力,这种能力由土颗粒骨架排列特征及颗粒间的连结作用所决定。表 3 表示土体液性指数与土体塑性形态的关系,当液性指数越

小,土体变得越来越软,塑性形态愈明显,此时土体天然含水率逐渐增大,颗粒间的结合水膜增厚,连结力减弱,土体骨架结构稳定性较低,在自身上荷载作用下则发生较大的压缩变形,从而使土体可发生湿陷变形的孔隙空间减小,湿陷系数减小。由此分析可知,随着液性指数的增大,土体湿陷系数逐渐减小。

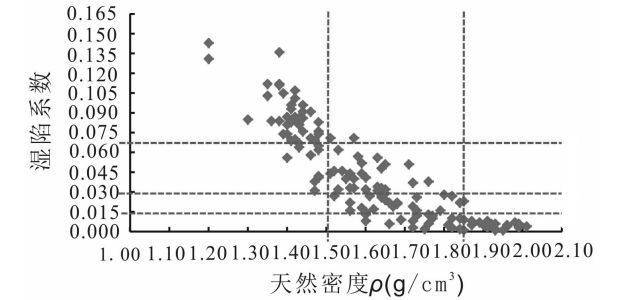


图 4 试验黄土湿陷系数与天然密度关系图
Fig. 4 Relationship between experimental loess collapsibility coefficient and natural density

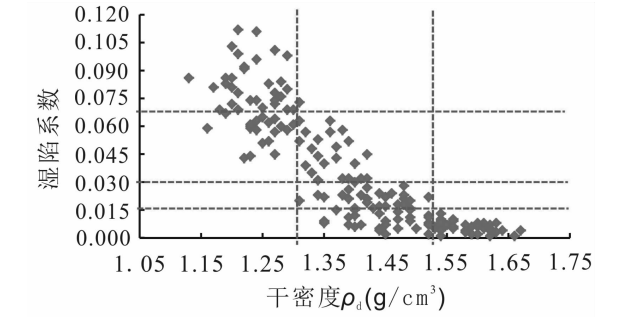


图 5 试验黄土湿陷系数与干密度关系图
Fig. 5 Relationship between experimental loess collapsibility coefficient and dry density

表 3 土体液性指数与土体塑性形态关系表
Tab. 3 Relationship between soil liquidity index and soil plastic morphology

液性指数 Ip	<0	0~0.25	0.25~0.75	0.75~1	>1
土体形态	坚硬	硬塑	可塑	软塑	流塑

图 6 表示湿陷系数与液性指数之间的关系,同上述分析反应一致,两者呈现较为明显的负相关关系。由图 6 可知,当土体处于坚硬状态,土体湿陷系数以中等及严重湿陷为主,其中当液性指数小于 -0.40 时,黄土的非湿陷性终止;当液性指数小于 0.20 时,即土体处于硬塑状态时,土体开始发生严重湿陷,液性指数为 0.20 时,为强湿陷起始液性指

数。当土体液性指数大于 0.65 时,即土体塑性状态处于可塑至软塑的临界过渡状态时,土体的湿陷性终止,该液性指数为湿陷终止液性指数。

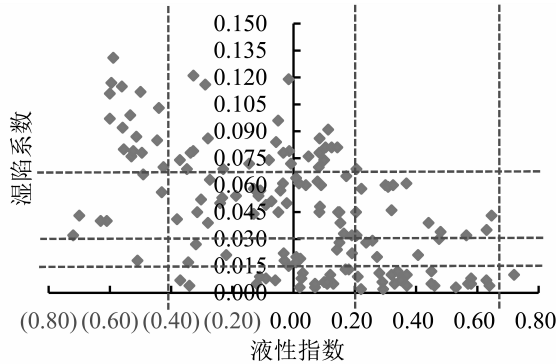


图 6 试验黄土湿陷系数与液性指数关系图
Fig. 6 Relationship between experimental loess collapsibility coefficient and liquidity index

压缩模量表示在有侧限的条件下,土体竖向应力与竖向应变之比,代表了土体的压缩性能,压缩模量数值越大,土体压缩变形越小,一方面可反映土体抵抗竖向变形破坏的能力越强,微观结构仍处于稳定的状态,土体结构强度较大;另外也有可能表示土体密实,内部可供压缩的孔隙数量较小,限制了土颗粒在竖向荷载作用下的变形调整空间。而当土体浸水时,较大的结构强度对于水的软化作用抵抗能力更强,并且土体密实,可发生湿陷变形的孔隙空间较小。因此,由图 7 可知,压缩模量与湿陷系数呈负相关关系。当压缩模量增大至 22 kPa,黄土的湿陷性终止,该压缩模量可称为终止湿陷压缩模量;当压缩模量逐渐减小至 12 kPa 时,黄土开始产生严重湿陷,该压缩模量可称为强湿陷起始压缩模量。

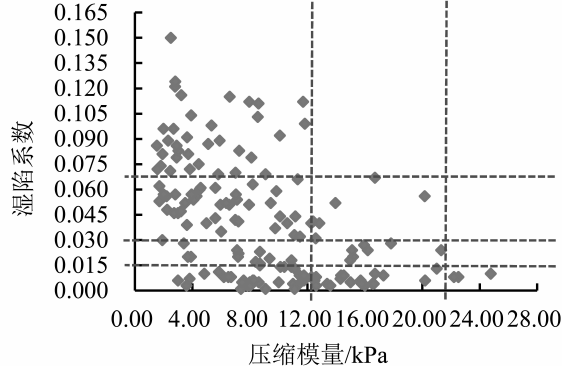


图 7 试验黄土湿陷系数与压缩模量关系图
Fig. 7 Relationship between experimental loess collapsibility coefficient and compressive modulus

1.2.4 取样深度

由于黄土存在自身重度,黄土的上覆荷载随深度的增加而增大,其结构特性也由上部支架大孔隙微结构在自身荷载作用下逐渐转变为下部的镶嵌微孔隙结构,对湿陷性影响最大的架空孔隙逐渐发育为不易湿陷的微孔隙,因此试验黄土湿陷系数与取样深度关系如图 8 所示,呈现明显的负相关性。并且由图 8 可知,研究区黄土湿陷终止深度约为 30 m,强湿陷起始深度约为 11 m,即在咸阳黄土塬区湿陷性黄土分布深度在 30 m 以内,严重湿陷性黄土其埋深主要在 11 m 以内。

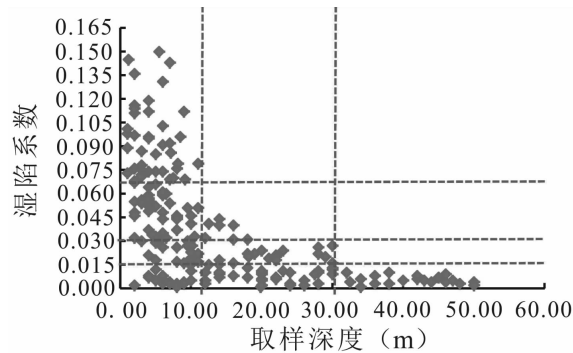


图 8 试验黄土湿陷系数与取样深度关系图
Fig. 8 Relationship between experimental loess collapsibility coefficient and sampling depth

2 构建黄土湿陷系数预测模型

由上述分析可知,黄土的湿陷性主要受黄土孔隙结构特性及浸水程度两方面影响。笔者对于上述这些具有多重共线性的相关因子分别采取偏最小二乘法构建 PLS 模型,以及基于因子相关程度选取主要影响因子采用回归分析法构建三维曲面模型,对比分析构建黄土湿陷系数预测模型的实用化表达。

2.1 建黄土湿陷系数 PLS 数学模型

笔者选取与黄土湿陷系数具有强相关性的因子:天然密度(x_1)、干密度(x_2)、孔隙比(x_3)、饱和度(x_4)作为建模参数变量,利用 SPSS 软件通过提取各相关因子标准化后的主成分,以消除这 4 个因子之间的共线性。表 4 为这 4 个变量的总方差表,由表 4 可知,可提取 2 个主成分 u_1 、 u_2 ,其累计方差贡献率达到 99.588%,即表示 u_1 、 u_2 对于这 4 个变量的解释程度接近 100%,信息提取效果很好。表 5

为主成分因子得分系数表,基于该表可获取因子得分函数如下。

$$u_1 = 0.270x_1^* + 0.263x_2^* - 0.262x_3^* + 0.246x_4^* \tag{5}$$

$$u_2 = 0.241x_1^* - 0.754x_2^* - 0.843x_3^* + 1.440x_4^* \tag{6}$$

式中: x_1^* 、 x_2^* 、 x_3^* 、 x_4^* 为变量的标准化值。

同时可获取因变量湿陷系数(y)标准值(y^*)与主成分 u_1 、 u_2 的回归方程为如下。

$$y = 0.032 - 0.076 u_1 - 0.005 u_2 \tag{7}$$

表 4 总方差解释表
Tab. 4 Explanation of total variance

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差百分比(%)	累积(%)	总计	方差百分比(%)	累积(%)
1	3.690	92.252	92.252	3.690	92.252	92.252
2	0.293	7.335	99.588	0.293	7.335	99.588
3	0.014	0.360	99.948			
4	0.002	0.052	100.000			

表 5 成分得分系数矩阵表
Tab. 5 Component score coefficient matrix

项目	成分	
	1	2
天然密度	0.270	0.241
干密度	0.263	-0.754
孔隙比	-0.262	0.841
饱和度	0.246	1.440

将式(5)、式(6)代入式(7),并对变量标准值进行还原,可获取基于天然密度(x_1)、干密度(x_2)、孔隙比(x_3)、饱和度(x_4)对黄土湿陷系数(y)的 PLS 数学预测模型式(8)。

$$y=0.141-0.035x_1-0.047x_2+0.035x_3-0.0003x_4 \tag{8}$$

2.2 构建黄土湿陷系数三维曲面方程模型

由上述各土性指标之间的相关程度分析可知,孔隙比及饱和度这 2 个不仅与黄土湿陷系数具有强相关性,并且与其他几类因子均存在中等以上相关性的因子,因此选择孔隙比及饱和度作为黄土湿陷系数回归分析建模参数,选取 LogisticCum 方程(式 9)构建三者的三维曲面模型如图 9 所示,其拟合优

度 $R^2=0.909$,拟合程度较好。

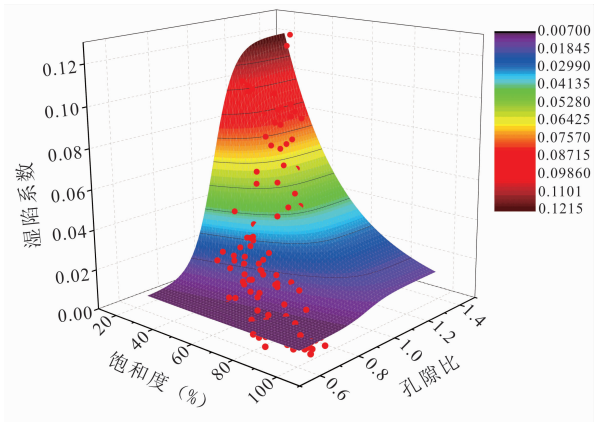


图 9 湿陷系数与饱和度、孔隙比三维拟合曲面图

Fig. 9 Three-dimensional fitting surface diagram of experimental loess collapsibility coefficient and saturation and void ratio

回归拟合所得 LogisticCum 方程函数关系式如下。

$$z = z_0 + B * \left[\frac{1}{1 + exp \left(- \left(\frac{x - C}{D} \right) \right)} \right] * \left[\frac{1}{1 + exp \left(- \left(\frac{y - E}{F} \right) \right)} \right] \tag{9}$$

式中: z 、 x 、 y 分别为湿陷系数、饱和度、孔隙比; z_0 为当 x 、 y 均为 0 时,曲面拟合起始点; B 、 C 、 D 、 E 、 F 为曲面拟合参数,该系列参数数值与区域土体颗粒参数、沉积应力应变历史均有关。由于本次研究只探讨咸阳地区黄土塬黄土湿陷性,未涉及其他区域,曲面拟合参数与区域沉积应力历史可在后续研究中深入探讨。各拟合参数拟合数值如表 6 所示。

表 6 曲面方程拟合参数取值表
Tab. 6 Values of surface equation fitting parameters

拟合参数	数据取值
z_0	0.007
B	3.207
C	-64.712
D	-27.216
E	0.972
F	0.060

由图 9 试验黄土湿陷系数与饱和度及孔隙比三

维拟合曲面图可知,拟合后的图形整体呈三角形曲面形态,孔隙比与湿陷系数具有正相关性,随着孔隙比的增大,湿陷系数逐渐增大,当孔隙比增长至一定数值时,湿陷系数趋于稳定,而这种增长速率随着饱和度的增大而逐渐减小;与此同时,饱和度与湿陷系数呈负相关性,这种相关性随着孔隙比的增大而愈发明显。当饱和度减小至 25%附近时,孔隙比增长至 1.1~1.3 时,黄土湿陷系数增长至最大值,根据数据拟合结果,咸阳区域黄土湿陷系数最大值约为 1.20。当土体孔隙比及饱和度数值点落于图形紫色区域内时,土体为非湿陷性,尤其是当孔隙比在 0.6~0.8 时,饱和度为 90%~80%,此时土体为非湿陷性土体,与相对应的孔隙比、饱和度数值无关;当孔隙比及饱和度数值分别为 0.85~1.15、70%~50%时,黄土湿陷性为中等湿陷性;当孔隙比及饱和度数值分别增长至 1.15、50%以上时,此时黄土湿陷性为严重湿陷性。

2.3 模型预测能力检验

笔者采用残差分析方法,通过分析残差特征,由外部检验,检查数据是否满足模型假设,确定模型的预测能力,残差特征可由平均残差(AE)、平均绝对残差(AAE)、均方根误差(RMSE)来表示,相关参数定义如下。

$$AE = \sum_{k=0}^n \frac{(y_i - y_i')}{n}$$
 (10)

$$AAE = \sum_{k=0}^n \frac{|y_i - y_i'|}{n}$$
 (11)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{k=0}^n \frac{(y_i - y_i')^2}{n}}$$
 (12)

选取咸阳地区乾礼黄土源地貌单元区域内黄土土工试验数据共 41 组(表 7)作为模型检验样本,分别计算实际值与 2 种预测模型所得预测值的残差特征参数如表 8 所示。

由表 8 可知,2 种模型检验数据所得残差特征参数均接近于 0,表明 2 种模型整体拟合效果均较好,但是由表 7 各组数据实际值与预测值的相对误差结果显示,PLS 数学模型对于各组数据预测结果相对误差较大,而三维曲面方程模型基本可以在一个很小的量级上达到高精度的预测,预测值与实际值吻合程度较高,其误差在工程建设上处于可接受范围。由此可证明,相较于基于 PLS 方法所得的数学模型,采用 LogisticCum 函数所构建的黄土湿陷系数与饱和度、孔隙比的三维曲面方程在预测黄土湿陷性方面是可靠的,其计算模拟结果更加接近实际,更为实用,可以满足工程应用的需要。同时,此模型只采用了 2 种常规物理力学参数:孔隙比及饱和度来判定黄土湿陷性,减少了试验工作量,达到降低成本的要求,可以更为简便经济地开展黄土湿陷性评价工作,具有一定的应用价值和实用性。

表 7 预测模型验证数据表
Tab. 7 Predictive model validation data

序号	湿陷系数	孔隙比 e_0	饱和度 S_r (%)	天然密度 ρ (g/cm ³)	干密度 ρ_d (g/cm ³)	PLS 数学 模型预测值	相对误差 (%)	三维曲面方 程模型预测值	相对误差 (%)
1	0.021	0.90	31	1.58	1.43	0.040	-88.57	0.029	-0.86
2	0.018	0.87	34	1.61	1.45	0.035	-97.15	0.019	-0.12
3	0.026	0.94	30	1.54	1.39	0.045	-71.64	0.044	-1.87
4	0.010	0.82	42	1.68	1.49	0.027	-173.62	0.012	-0.22
5	0.013	0.85	44	1.67	1.47	0.029	-123.61	0.014	-0.11
6	0.005	0.81	47	1.71	1.50	0.024	-376.49	0.010	-0.64
7	0.052	1.18	38	1.45	1.24	0.061	-16.78	0.077	-2.10
8	0.041	1.16	30	1.41	1.25	0.063	-54.30	0.099	-4.99
9	0.009	0.81	43	1.69	1.50	0.026	-186.26	0.011	-0.22
10	0.049	1.07	43	1.53	1.31	0.049	-0.74	0.058	-0.79
11	0.033	1.11	42	1.51	1.29	0.052	-59.01	0.063	-2.74

续表 7

序号	湿陷系数	孔隙比 e_0	饱和度 S_r (%)	天然密度 ρ (g/cm ³)	干密度 ρ_d (g/cm ³)	PLS 数学 模型预测值	相对误差 (%)	三维曲面方 程模型预测值	相对误差 (%)
12	0.060	1.29	51	1.47	1.18	0.063	−4.81	0.052	0.62
13	0.041	1.07	52	1.58	1.31	0.045	−9.54	0.043	−0.21
14	0.028	1.14	64	1.61	1.27	0.045	−59.50	0.034	−0.48
15	0.028	1.06	63	1.64	1.32	0.039	−38.75	0.031	−0.26
16	0.023	1.06	54	1.60	1.32	0.043	−85.55	0.039	−1.55
17	0.031	0.97	64	1.69	1.38	0.031	0.64	0.021	1.05
18	0.010	0.84	57	1.74	1.48	0.022	−118.27	0.011	−0.06
19	0.021	0.95	49	1.63	1.39	0.036	−71.37	0.026	−0.52
20	0.069	1.13	44	1.51	1.28	0.053	22.81	0.061	0.65
21	0.066	1.18	45	1.49	1.25	0.057	14.08	0.061	0.40
22	0.078	1.22	45	1.47	1.22	0.060	22.82	0.062	1.30
23	0.048	1.07	55	1.60	1.32	0.043	10.91	0.039	0.81
24	0.014	0.81	53	1.74	1.50	0.021	−50.88	0.010	0.521
25	0.005	0.88	53	1.69	1.44	0.028	−459.60	0.014	−1.04
26	0.008	0.83	51	1.71	1.48	0.024	−204.87	0.011	−0.35
27	0.006	0.84	68	1.78	1.47	0.018	−198.68	0.010	−0.43
28	0.012	0.88	56	1.71	1.45	0.026	−117.82	0.014	−0.21
29	0.087	1.22	48	1.49	1.22	0.059	32.42	0.057	2.49
30	0.055	0.94	48	1.63	1.40	0.036	35.26	0.025	3.14
31	0.088	1.22	38	1.43	1.22	0.064	27.48	0.078	0.81
32	0.007	0.86	59	1.73	1.46	0.023	−232.27	0.011	−0.51
33	0.003	1.02	74	1.72	1.34	0.031	−920.57	0.021	−1.73
34	0.008	0.97	69	1.72	1.38	0.028	−253.63	0.018	−1.08
35	0.030	0.96	54	1.65	1.39	0.034	−14.82	0.026	0.43
36	0.096	1.29	32	1.37	1.19	0.071	25.73	0.096	0.01
37	0.057	1.16	34	1.44	1.26	0.060	−5.96	0.086	−2.54
38	0.115	1.22	32	1.40	1.22	0.066	42.21	0.095	1.65
39	0.090	1.16	33	1.43	1.25	0.062	31.45	0.090	0.03
40	0.052	0.95	38	1.58	1.39	0.041	20.90	0.037	1.62
41	0.012	0.91	52	1.67	1.42	0.031	−157.64	0.018	−0.64

表 8 两种模型预测值分析表
Tab.8 Analysis of predicted values of two models

残差特征参数	PLS 数学模型	三维曲面方程模型
平均残差(AE)	−0.005	−0.003
平均绝对残差(AAE)	0.016	0.011
均方根误差(RMSE)	0.018	0.016

3 结论

(1)笔者采用偏相关分析法计算得出了咸阳黄土塬黄土各常规土性指标与黄土湿陷系数的相关程度,其中与湿陷系数具有显著强相关性的物性指标为:孔隙比、天然密度、干密度、饱和度、取样深度、天然含水率、液性指数;压缩模量同湿陷系数具有中等相关性;同时,各土性指标之间并非相互独立,而是具有明显的共线性。

(2)由土力学及黄土湿陷机理角度切入,深入分析同黄土湿陷系数具有中等相关性以上的土性指标对黄土湿陷性的影响作用,其中除孔隙比与湿陷系数正相关,其余各指标均呈现不同程度的负相关性,进一步确定了各土性指标强湿陷起始数值及终止湿陷数值大小。

(3)应用数据挖掘技术,分别采用偏最小二乘法和多元回归分析法,构建了基于PLS的黄土湿陷性预测数学模型及基于LogisticCum函数的黄土湿陷系数三维曲面方程模型,经过外部检验确定了三维曲面方程模型在预测黄土湿陷性方面精度较高,同时预测模型所含指标因子较少,可以更为简便经济的开展黄土湿陷性评价工作,可降低工作量及工程成本,具有一定的应用价值。

参考文献(References):

林鸿州,李广信,于玉贞,等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学,2007,28(9):1931-1936.

LIN H Z, LI G X, YU Y Z, et al. Influence of matric suction on shear strength behavior of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(9):1931-1936.

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,(04):506-512.

LI Ping, LI Tonglu. Relationship between physical properties of loess and collapsibility and its engineering significance. [J]. Journal of Engineering Geology,2007,(04):506-512.

井彦林,作彦卿. 基于最小二乘支持向量机的黄土湿陷性预测挖掘[J]. 岩土力学,2010,31(06):1865-1870.

JING Yanlin, WU Yanqing. Prediction of loess collapsibility by using data mining based on least squares support vector machines [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (06):1865-1870.

刘颖莹,谢婉丽,朱桦,等. 陕西泾阳地区黄土固结湿陷试验及预测模型研究[J]. 西北地质,2018,51(02):227-233.

LIU Yingying, XIE Wanli, ZHU Hua, et al. Study on Loess Consolidation collaps Test and Prediction Model in Jingyang District, Shaanxi Province[J]. Northwestern Geology,2018,51(02):227-233.

刘悦,王家鼎. 黄土湿陷性评价中的模糊信息优化处理方法[J]. 西北大学学报(自然科学版),2000,30(1):63-65.

LIU Yue, WANG Jiading. The method of fuzzy information processing of optimization in the evaluation of loess collapsibility[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2000, 30(1): 63-65.

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,2013,34(S2):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,2013,34(S2):27-34.

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,2010,31(S2):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,, 2010,31(S2):407-411.

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,1999,15(1):75-80.

WANG Jiading. Fuzzy information optimization processing method in geography research[J]. Geography and Geographic Information Science, 1999,15(1):75-80.

谢婉丽,王家鼎,张新军,等. 模糊信息优化方法在黄土湿陷性评价中的应用[J]. 西北大学学报:自然科学版,2005,35(1):95-99.

XIE Wanli, WANG Jiading, ZHANG Xinjun, et al. Application of Fuzzy Information Optimization Method in Evaluation of Loess Collapsibility[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2005, 35 (1): 95-99.

谢婉丽,王延寿,马中豪,等. 黄土湿陷机理研究现状及发展趋势[J]. 现代地质,2015,29(02):397-407.

XIE Wanli, WANG Yanshou, MA Zonghao, et al. Research Status and Development Trend of Loess Collapsing Mechanism [J]. Modern Geology, 2015, 29 (02): 397-407.

葛瑞华,谢婉丽,冯立. 泾阳南塬 Q3 黄土吸湿特性试验研究[J]. 西北地质,2015,48(04):218-225.

GE Ruihua, XIE Wanli, FENG Li. Experimental study on moisture absorption characteristics of Q3 loess in Jingyang[J]. Northwestern Geology,2015,48(04):218-225.

Derbyshire E. Failure mechanism in loess and the effects of moisture content changes on remoulded strength [J]. Quaternary International, 1994, 24: 5-15.

Derbyshire E, Meng X, WANG J. Collapsible loess on the loess plateau of China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1996, 33(4): 157-162.