

任文博,胡少磊,刘云龙,等.黄土湿陷系数与其物性指标的定量关系分析[J].地震工程学报,2023,45(2):311-318,DOI:10.20000/j.1000-0844.20201102006
REN Wenbo, HU Shaolei, LIU Yunlong, et al. Quantitative relationship between the collapsibility coefficients and physical indexes of loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(2): 311-318, DOI: 10.20000/j.1000-0844.20201102006

黄土湿陷系数与其物性指标的定量关系分析

任文博¹, 胡少磊², 刘云龙¹, 李佳佳², 李 磊³

(1. 郑州大学, 河南 郑州 450001; 2. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450004;

3. 三门峡市国道三一零南移项目建设管理有限公司, 河南 三门峡 472000)

摘要: 湿陷性是黄土特殊且重要的工程性质。以黄土微观角度探讨湿陷性与物性指标之间的关系, 再依据《中原城市群环境地质调查》统计得到的洛阳地区湿陷性黄土土性参数, 运用 MATLAB 定量分析黄土湿陷性与其物性指标的相关性, 得到如下结果: (1) 在众多与湿陷性相关的物性参数中, 洛阳地区黄土湿陷系数与孔隙比、干密度、塑性指数等物性指标关系密切, 且相关性程度依次为孔隙比、干密度和塑性指数; (2) 运用 MATLAB 分析湿陷系数与物性指标的定量关系, 得到了该地区湿陷系数与物性指标之间函数关系的拟合公式; (3) 通过实测值与预测值的比较, 结合黄土的湿陷机理, 论证拟合公式的合理性。研究方法对其他地区黄土湿陷系数的预测也具有启发意义。

关键词: 黄土湿陷变形; 物性指标; MATLAB 数值分析; 湿陷机理

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2023)02-0311-08

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20201102006

Quantitative relationship between the collapsibility coefficients and physical indexes of loess

REN Wenbo¹, HU Shaolei², LIU Yunlong¹, LI Jiajia², LI Lei³

(1. Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;

2. China Construction Seventh Engineering Division Co., Ltd., Zhengzhou 450004, Henan, China;

3. Sanmenxia National Highway 310 South Project Construction Management Co., Ltd., Sanmenxia 472000, Henan, China)

Abstract: Collapsibility is an important engineering property of loess. In this study, the relationship between collapsibility and physical property indicators is first discussed in the context of the loess microstructure, and then the soil parameters of the collapsible loess in the Luoyang area are obtained on the basis of the *Environmental Geological Survey of Central Plains City Group*. Finally, the correlation between the collapsibility and physical property indicators of loess is quantitatively analyzed using MATLAB. The results are as follows: (1) Among the physical property parameters related to collapsibility, the loess collapsibility coefficient in the Luoyang area is closely related to the void ratio, dry density, and plasticity index; the degree is in the order of void ratio, dry density, and plasticity index; (2) MATLAB is used to analyze the quantitative re-

收稿日期: 2020-11-02

第一作者简介: 任文博(1990—), 男, 河南郑州人, 博士研究生。研究方向: 非饱和土和特殊土中结构抗震。

E-mail: hupo900623@163.com。

通信作者: 刘云龙(1988—), 男, 河南开封人, 博士, 讲师。研究方向: 非饱和黄土增湿变形研究。E-mail: liyunlongzhu@hotmail.com。

relationship between loess collapsibility coefficients and physical property indexes, and the fitting formula of the functional relationship between them in the study area is obtained; (3) Combined with the collapsible mechanism of loess, the rationality of the fitting formula is demonstrated by comparing the measured value with the predicted value. The research method used in this paper also has an enlightening significance for the prediction of the loess collapsibility coefficient in other areas.

Keywords: collapsible deformation of loess; physical index; MATLAB numerical analysis; collapsible mechanism

0 引言

湿陷性黄土是在干旱、半干旱气候条件下形成的一种具有特殊性质的土,其土质均匀、结构疏松、孔隙发达。在未受水浸湿时,一般强度较高,压缩性较小。当在一定压力下受水浸湿,土体结构会迅速破坏,容易导致在建及已有的建筑发生地基下沉、裂缝、倾斜或结构破坏等工程状况,对人民生命财产安全造成极大威胁。

我国黄土主要分布在甘肃、宁夏、陕西、山西、河南等区域。黄土的结构也有着区域性的变化规律,呈现出自西北的粒状架空接触式结构到东南的凝块镶嵌胶结式结构^[1]。由于其内部结构的不同,各个区域黄土的湿陷性程度也强弱不一。为了更好地服务地区建设发展,准确和高效地预测不同区域黄土的湿陷程度显得尤为重要。

湿陷系数是黄土湿陷性程度的重要判断依据。目前,测定湿陷性的方法主要有:室内压缩试验、现场静载荷试验和现场试坑浸水试验^[2]。然而,采用试验测得的湿陷系数,即使在误差允许范围内也很难做到精准测定,且需要的仪器设备多,测定效率低^[3]。因此,一些学者通过建立湿陷系数与湿陷性黄土物性指标之间的关系,力求一种简便、可靠的湿陷性程度判断方法^[2],主要研究成果汇总如表1所列^[4-12]。

通过上表可知:湿陷系数与物性指标关系分析已取得一定进展,但仍存在以下问题需要进一步研究:(1)由于与湿陷系数有关的物性指标较多,无法确定计算时所需物性指标的个数和密切程度。(2)在选择物性参数时,大多通过数理分析确定与物性指标的关系,缺乏理论支撑。(3)通过试验得到的数据往往是数量大,范围广且发散,因此需要一种高效、简便的数据处理方法,可以快速分析、处理物性参数和湿陷系数之间的关系。

本文首先分析湿陷性黄土在荷载和浸水作用下微观结构的变化,以加深对湿陷性黄土的理论认

识。然后运用 MATLAB 定量分析湿陷系数与物性指标之间的关系,并由此得到与湿陷系数有关的拟合公式。最后通过湿陷理论分析和工程实测值验证,确定了河南洛阳地区预测湿陷系数的最优拟合公式。

1 湿陷系数与湿陷微观机理

1.1 湿陷系数

湿陷性是黄土在自重或者上部荷载作用下受水浸湿后而发生的沉陷现象。在一定的压力下,土样浸水前和浸水后的差值与土样原始高度的比值,称为黄土湿陷系数^[2],用 δ_s 表示。即:

$$\delta_s = \frac{h_p - h'_p}{h_0} \quad (1)$$

式中: h_p 为加压至一定压力时,下沉稳定后的高度(mm); h'_p 为浸水饱和条件下,附加下沉后的高度(mm); h_0 为试样原始高度(mm)。

1.2 黄土湿陷现象的微观分析

研究认为黄土的微观结构体系是由颗粒骨架、骨架之间的各种排列方式及各种胶结连接方式共同组成。图1说明黄土颗粒骨架在荷载和浸水作用下发生的微结构变化。

如图1所示:湿陷是多因素导致的物理、化学耦合变化过程。一些学者一直致力于从黄土本身结构特性出发,探讨湿陷发生前至湿陷发生过程中的微结构变化,进展较为缓慢^[8]。研究发现,在外力作用下,湿陷发生后的颗粒骨架之间会发生新的配位与排列,与之相应的也表现在物性指标的变化上^[13-17]。通过测定湿陷过程中黄土的干密度、孔隙比、塑性指数等物性指标,阐述湿陷过程中黄土结构发生的变化,降低了分析难度,且这些物性指标具有稳定、易于测定、误差小的特点。因此本文探索湿陷性发生后,基于湿陷系数与物性指标之间的变化,通过分析物性指标对湿陷系数影响,进而对湿陷系数作出预测。

表 1 湿陷系数主要研究成果表

Table 1 Main research results of collapsibility coefficient

来源	年份	区域	研究成果	相关预测方法及验证
叶为民等 ^[4]	2006	法国北部	分析探讨几种湿陷性判别准则的适用性;研究初始含水变化对湿陷系数的影响。	$\delta = K(n - 40)(30 - \omega_{\text{Nat}})$ 式中: n 为天然孔隙率; ω_{Nat} 为天然含水率; K 为黄土类型。 经验证该准则明显高估了黄土湿陷性,并通过用 H.J.Gidds 准则对本次试验黄土的湿陷性作了合理的评判。
李萍等 ^[5]	2007	正宁 西峰 镇原 庆阳	用鲁棒回归法分析建立了湿陷系数与含水量、孔隙比、黏粒含量的分析模型。	$\delta_s = 0.029\ 5 - 0.002\ 7\omega + 0.015\ 4\exp(1.7e) - 0.028\ 6\exp\left[-\frac{(c-18.0)^2}{100}\right]$ 式中: ω 为含水量; e 为孔隙比; c 为黏粒含量。结果显示湿陷系数与物理指标之间相关性良好。
邢玉东 ^[6]	2008	辽西地区	采用 BP 神经网络法,利用物性指标进行湿陷性黄土的判断。	将天然含水率、天然密度、干密度、孔隙比、塑性指数这五个指标作为输入层的节点,将湿陷系数作为单一输出节点。通过计算对比实测数据,误差小于 10%。
王有林 ^[7]	2009	郑西客运 专线沿线	利用数据挖掘技术得到自重湿陷系数与比重、干密度、孔隙比、塑性指数、天然含水量等因素的相关性,以及综合作用下的黄土湿陷性情况。	$\delta_{zs} = 77.13 + 56.62e - 5.10\rho_d - 4.84\omega - 8.17I_p - 93.80e\rho_d - 2.35e\omega - 4.89eI_p + 0.81\rho_d\omega + 0.99\rho_dI_p + 0.51\omega I_p + 4.51e\rho_d\omega + 8.67e\rho_dI_p + 4.51e\rho_dI_p + 0.20e\omega I_p - 0.11\rho_d\omega I_p - 0.42e\rho_d\omega I_p$ 式中: δ_{zs} 为自重湿陷系数; e 为孔隙比; ρ_d 为干密度; ω 为含水量; I_p 为塑性指数。计算相关系数为 0.886。利用八个试验点进行实测值与计算值比较,结果基本一致。
王梅 ^[8]	2010	山西 陕西 甘肃	研究黄土微观结构,确立孔隙面积比与湿陷性的关系,并给出了确定系数。还得出随含水量、饱和度的增加,黄土的湿陷系数降低;随孔隙比、孔隙率的增加,黄土的湿陷系数提高的结论。	$\delta_{s1} = 0.395\ 6\ln(n_{va}) + 0.291\ 8;$ $\delta_{s2} = 0.327\ 4\ln(n_{va}) + 0.276\ 2;$ $\delta_{s3} = 0.067\ 4\ln(n_{va}) + 0.087\ 9$ 式中: δ_{s1} 、 δ_{s2} 、 δ_{s3} 分别为山西运城、陕西西安、甘肃兰州土样; n_{va} 为土样孔隙面积比。 R^2 在 0.7~0.9 之间。土样垂直面的孔隙面积比与湿陷系数的相关性更好,水平面相关系数较差。
邵生俊等 ^[9]	2013	西安地铁 4 号线和 宝鸡—兰州 高速铁路	运用因子分析法和多元线性回归分析的方法分别得到了两个场地黄土的自重湿陷系数、湿陷起始压力以及压缩模量与含水比和孔隙比之间的相关关系。	$\delta_{zs} = -0.021\ 9\frac{\omega}{\omega_L} + 0.060\ 6e - 0.020\ 1;$ $\delta_{zs} = -0.032\ 5\frac{\omega}{\omega_L} + 0.033\ 2e + 0.002\ 0$ 式中: δ_{zs} 分别为宝鸡兰州、西安地铁 4 号线的自重湿陷系数; ω 为含水率; ω_L 为液限; e 为孔隙比。 计算值与实测值对比发现,虽然存在一定的差别,但二者的变化趋势能基本保持一致。
杜晓启 ^[10]	2018	兰州新区	利用最小二乘法进行多元线性分析,得到自重湿陷系数与含水比、孔隙比的相关关系。	$\delta_{zs} = -0.010\ 2u + 0.212\ 6e - 0.149\ 9$ 式中: u 为黄土的含水比,即含水量与液限的比值; e 为孔隙比。 实测值与预测值最大偏差为 0.003,实测值与预测值结果相近。
李论基等 ^[11]	2018	河西走廊	依据影响因子变异性分析和多元线性回归理论,得到黄土湿陷系数与黄土物性指标之间的相关性方程。	$\delta_s = -1.646 + 0.742\rho_d + 0.724e - 0.003\ 89I_p$ 相关系数 $R = 0.68$,并依托工程不同位置的湿陷性数据进行编号验证,结果表明:河西走廊的黄土湿陷性与干密度、孔隙比、塑性指数密切相关,与含水比的相关性较差。
宋建等 ^[12]	2018	兰州新区	用传统回归分析法给出兰州新区黄土湿陷系数与黄土物性指标之间的经验方程。	$\delta_s = 0.659\ 4 - 0.079\ 2\frac{\omega}{S_r} + 0.04e - 0.405\ 2\rho$ 式中: ω 为天然含水率; S_r 为饱和度; e 为孔隙比; ρ 为天然密度。 指标间的相关规律与宏观规律基本一致。相关系数 $R = 0.792$ 。

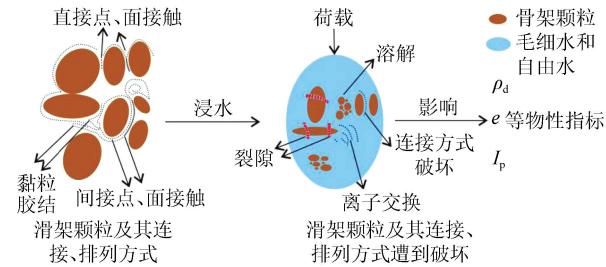


图 1 湿陷性黄土微结构变化图

Fig.1 Microstructural changes of collapsible loess

2 MATLAB 数据分析

在探讨湿陷系数和物性指标关系时,单纯运用传统分析方法处理样本,容易造成模型多样性,计算结果离散性、随机性大^[18-19]。于是,本文通过改进传统回归分析的方法,并结合黄土湿陷理论,使其能够解决物性指标难以确定的问题。改进的回归分析方法主要通过计算相关系数判断与湿陷系数最接近的

物性指标,再进行湿陷系数与物性指标之间的线性与非线性拟合和分析,最终确定单个物性指标至多个物性指标与湿陷系数的最优拟合公式。

本方法依据相关系数的大小进行显著性判断,其中相关系数 R 如下式所示:

$$R(x,y)=\frac{n\sum_{i=1}^nx_iy_i-\sum_{i=1}^nx_i\sum_{i=1}^ny_i}{\sqrt{\left[n\sum_{i=1}^nx_i^2-\left(\sum_{i=1}^nx_i\right)^2\right]\left[n\sum_{i=1}^ny_i^2-\left(\sum_{i=1}^ny_i\right)^2\right]}} \quad (2)$$

规定当相关系数 $R \leq 0.6$,认为“不显著”,即拟合程度不高;当 $0.6 < R \leq 0.8$,认为“显著”,即拟合程度中等;当 $R > 0.8$ 时,认为“高度显著”,即高度拟合^[18]。具体操作流程如图 2。

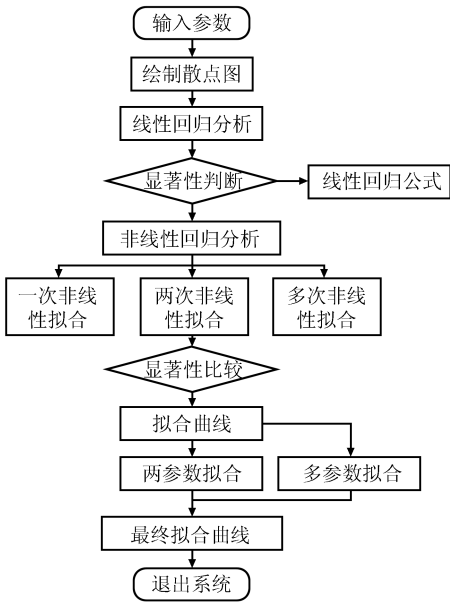


图 2 MATLAB 数值分析流程图

Fig.2 MATLAB flow chart for numerical analysis

3 湿陷系数与其物性指标的分析

3.1 湿陷系数与物性指标的数据选取

洛阳地区的湿陷性黄土主要通过风积、冲积、洪积和坡积等方式堆积而成^[16]。本文依据中国地质科学研究院承接的《中原城市群环境地质调查》项目,统计得到洛阳地区湿陷性黄土的相关土性参数^[16]。

通过 MATLAB 计算得到该地区湿陷系数和各物性指标之间的相关性,如图 3 所示。各物性指标间的相关性系数,如表 2 所列。通过分析发现该地区湿陷系数与物性指标的相关性排序依次为孔隙比、干密度、塑性指数、液限、塑限、初始含水率、深度、液性指数、弹性模量和压缩模量,本文选取孔隙比、干密度和塑性指数进行黄土湿陷系数预测。

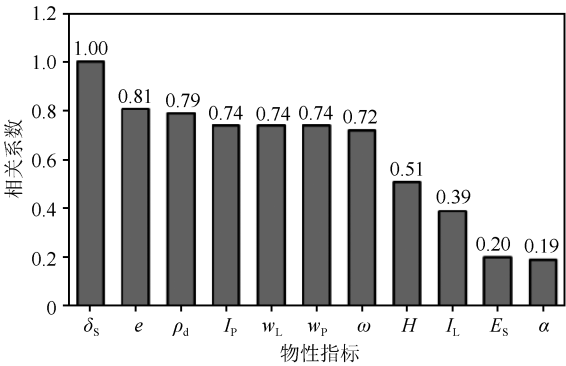


图 3 湿陷系数与众多物性指标相关性关系图

Fig.3 Correlation diagram of collapsibility coefficient and many physical indexes

本文研究选取的相关数据源于王志良等的研究^[16],共计 36 组数据,如表 3 所列,其中前 26 组用来数据拟合,后 10 组用来验证所提出的预测模型。

表 2 湿陷系数与各指标间的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between the collapsibility coefficient and each index

物性指标	δ_s	H	w	ρ_d	e	w_L	w_p	I_p	I_L	α	E_s
δ_s	1.000	0.513	0.716	0.794	0.809	0.736	0.735	0.736	0.388	0.190	0.198
H	0.513	1.000	0.467	0.561	0.563	0.341	0.344	0.338	0.304	0.524	0.458
w	0.716	0.467	1.000	0.518	0.525	0.609	0.611	0.608	0.814	0.140	0.120
ρ_d	0.794	0.561	0.518	1.000	0.998	0.774	0.774	0.775	0.233	0.513	0.555
e	0.809	0.563	0.525	0.998	1.000	0.732	0.732	0.732	0.281	0.521	0.564
w_L	0.736	0.341	0.609	0.774	0.732	1.000	1.000	1.000	0.278	0.342	0.381
w_p	0.735	0.344	0.611	0.774	0.732	1.000	1.000	1.000	0.295	0.354	0.394
I_p	0.736	0.338	0.608	0.775	0.732	1.000	1.000	1.000	0.261	0.329	0.368
I_L	0.388	0.304	0.814	0.233	0.281	0.278	0.295	0.261	1.000	0.053	0.062
α	0.190	0.524	0.140	0.513	0.521	0.342	0.354	0.329	0.053	1.000	1.000
E_s	0.198	0.458	0.120	0.555	0.564	0.381	0.394	0.368	0.062	1.000	1.000

注: δ_s 为湿陷性系数; H 为深度,m; w 为天然含水量,%; ρ_d 为干密度,g/cm³; e 为孔隙比; w_L 为液限,%; w_p 为塑限,%; I_p 为塑性指数; I_L 为液性指数; α 为压缩系数; E_s 为压缩模量,kPa。

表 3 训练集与预测集样本数据

Table 3 Sample data of training set and prediction set

序号	孔隙比 e	干密度 ρ_d $/(g \cdot cm^{-3})$	塑性指数 $I_P/\%$	湿陷系数 δ_s	序号	孔隙比 e	干密度 ρ_d $/(g \cdot cm^{-3})$	塑性指数 $I_P/\%$	湿陷系数 δ_s
1	0.982	1.36	8.6	0.043	19	0.999	1.35	8.9	0.042
2	0.696	1.60	12.0	0.005	20	0.888	1.44	10.9	0.030
3	0.759	1.55	12.8	0.017	21	0.909	1.40	9.7	0.028
4	0.993	1.36	9.1	0.035	22	0.906	1.42	10.4	0.025
5	0.77	1.54	12.9	0.014	23	0.997	1.35	8.8	0.036
6	1.097	1.29	9.3	0.051	24	0.963	1.38	10.2	0.041
7	0.893	1.43	8.7	0.043	25	0.964	1.38	10.8	0.022
8	0.705	1.59	11.3	0.014	26	0.991	1.36	10.8	0.036
9	0.912	1.42	10.1	0.012	27	0.99	1.36	9.0	0.042
10	0.665	1.63	11.4	0.015	28	0.976	1.32	10.1	0.031
11	0.846	1.47	12.2	0.019	29	0.95	1.39	11.0	0.029
12	0.815	1.49	10.2	0.013	30	0.772	1.54	12.8	0.019
13	0.704	1.60	13.0	0.006	31	0.722	1.58	12.0	0.023
14	0.805	1.50	11.1	0.024	32	0.992	1.36	8.0	0.044
15	0.789	1.51	11.7	0.01	33	0.999	1.35	8.4	0.038
16	0.986	1.36	11.6	0.027	34	0.841	1.47	11.5	0.025
17	1.010	1.35	8.7	0.045	35	0.982	1.37	10.3	0.028
18	0.673	1.62	13.5	0.006	36	0.991	1.36	10.4	0.030

3.2 孔隙比对湿陷系数的影响

由于黄土处于非饱和欠压密状态,因而具有较大的孔隙比,孔隙比的大小直接反映了黄土的密实程度^[8]。定量分析孔隙比对湿陷系数的影响,有助于全面认识黄土的湿陷理论。依据流程图运算得到湿陷系数和孔隙比两者之间不同类型的回归模型和相关系数,如表 4 所列。

表 4 湿陷系数与三个物性指标的相关系数
Table 4 Correlation coefficient of collapsibility coefficient and three physical indexes

回归类型	孔隙比 e	干密度 ρ_d $/(g \cdot cm^{-3})$	塑性指数 $I_P/\%$
一元线性拟合	0.809	0.794	0.736
倒幂函数拟合	0.834	0.857	0.812
幂函数拟合	0.861	0.860	0.800
指数拟合	0.852	0.862	0.807
倒指数拟合	0.861	0.855	0.789
对数拟合	0.847	0.853	0.815
一元二次拟合	0.866	0.866	0.817

通过分析表 4 可知,孔隙比与湿陷系数更偏向于非线性拟合,特别是一元二次函数拟合,孔隙比与湿陷系数的相关系数 $R=0.866$,拟合模型图如图 5 所示。由图可知孔隙比与湿陷系数呈正相关,符合客观现象。孔隙比作为表征湿陷系数的最重要物性指标,其与湿陷系数的最佳拟合曲线函数如式(3)所示:

$$\delta_s=0.125\ 7e^2-0.120\ 8e+0.033\ 1\tag{3}$$

3.3 密度对湿陷系数的影响

通过 MATLAB 数值分析可以发现干密度与湿陷系数也符合非线性回归趋势(图 4)。随着干密度

的增加,湿陷性逐渐减小,即干密度与湿陷系数表现为负相关,如图 5 所示。

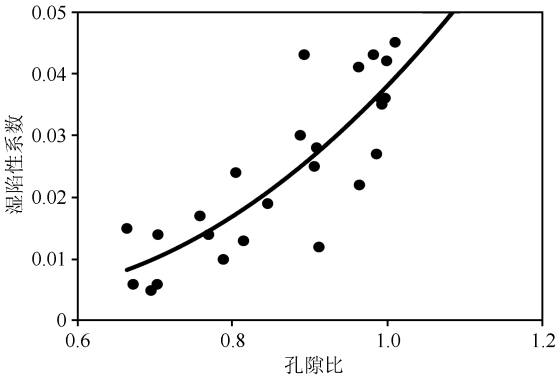


图 4 湿陷系数与孔隙比拟合曲线图
Fig.4 Fitting curve of collapsibility coefficient and void ratio

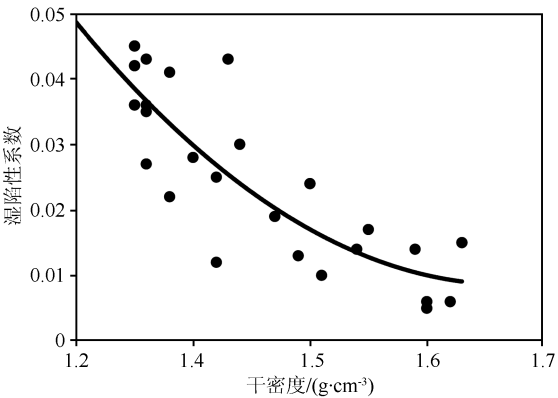


图 5 湿陷系数与干密度的拟合曲线图
Fig.5 Fitting curve diagram of collapsibility coefficient and dry density

通过流程图运算得图 5 相关系数 $R=0.866$, 所示曲线认为“高度显著”, 拟合效果最佳。由此得湿陷系数与干密度的非线性拟合曲线函数如式(4)所示:

$$\delta_s=0.292\ 7\rho_d^2-0.977\ 5\rho_d+0.824\ 6$$

(4)

3.4 塑性指数对湿陷系数的影响

骨架颗粒间通过胶结物连接在一起, 胶结物体现了土的黏结性。塑性指数的变化规律和黏结性变化规律相似, 黏结性越大, 塑性指数越大, 黏粒含量就越多, 土的湿陷性就越小^[20]。

如图 6 为塑性指数与湿陷系数拟合曲线图。通过运算得到最大相关系数为 $R=0.817$, 此时拟合效果最佳。湿陷系数与塑性指数的非线性拟合曲线方程如式(5)所示:

$$\delta_s=0.000\ 8I_p^2-0.024\ 6I_p+0.196\ 6$$

(5)

3.5 多个物性指标共同作用对湿陷系数的影响

湿陷性黄土在浸水和外力作用下, 架空孔隙崩塌, 黄土湿陷。架空孔隙的存在是湿陷产生的最主要原因。塌陷后细小的骨架颗粒会填充到其中, 形成新的微孔隙, 再经过水的入渗, 非饱和黄土土颗粒

间的吸力逐渐减小, 土颗粒之间的黏性降低, 颗粒间更容易发生错动从而持续湿陷^[8]。通过分析可知, 黄土微结构的变化并不易定量分析, 但通过孔隙比、干密度、塑性指数等物性参数则可以反映。因此, 进行湿陷系数与两参数、三参数的拟合, 求得相应拟合公式。运用得到的拟合公式计算预测值, 并与实测值进行对比分析。公式结果如表 5 所列, 公式验证如表 6 和图 7 所示。

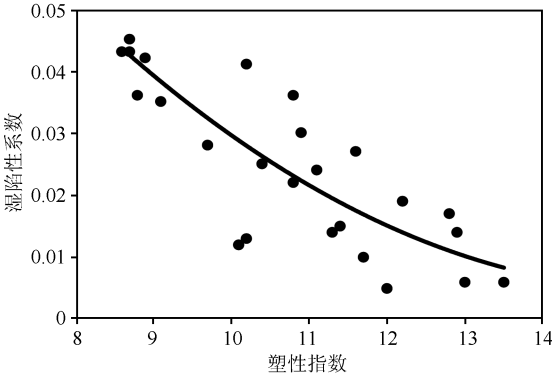


图 6 塑性指数与湿陷系数拟合曲线图
Fig.6 Fitting curve diagram of plasticity index and collapsibility coefficient

表 5 湿陷系数与物性指标的函数表达式

Table 5 Functional expressions of collapsibility coefficient and physical index			
序号	所选参数	相关性最大的函数表达式	相关系数
1	e	$\delta_s=0.125\ 7e^2-0.120\ 8e+0.033\ 1$	0.866
2	ρ_d	$\delta_s=0.292\ 7\rho_d^2-0.977\ 5\rho_d+0.824\ 6$	0.866
3	I_p	$\delta_s=0.000\ 8I_p^2-0.024\ 6I_p+0.196\ 6$	0.817
4	e,ρ_d	$\delta_s=0.129\ 3\rho_d+0.200\ 1e-0.337\ 1$	0.860 2
5	ρ_d,I_p	$\delta_s=-0.075\ 7\rho_d-0.003\ 5I_p+0.173\ 0$	0.880 8
6	e,I_p	$\delta_s=0.063\ 8e-0.003\ 4I_p+0.006\ 5$	0.889 4
7	ρ_d,e,I_p	$\delta_s=0.261\ 4\rho_d+0.270\ 1e-0.004\ 1I_p-0.546\ 5$	0.901 7

表 6 实测值与拟合方程求得预测值统计表

Table 6 Statistics of measured values and predicted values obtained by seven fitting equations								
预测集	实测值	预测值						
		公式 1	公式 2	公式 3	公式 4	公式 5	公式 6	公式 7
1	0.042	0.037	0.037	0.040	0.037	0.039	0.039	0.040
2	0.031	0.035	0.044	0.030	0.029	0.038	0.034	0.021
3	0.029	0.032	0.031	0.023	0.033	0.029	0.030	0.028
4	0.019	0.015	0.013	0.013	0.016	0.012	0.012	0.012
5	0.023	0.011	0.011	0.017	0.012	0.011	0.012	0.012
6	0.044	0.037	0.037	0.051	0.037	0.042	0.043	0.044
7	0.038	0.038	0.038	0.046	0.037	0.041	0.042	0.042
8	0.025	0.020	0.020	0.020	0.021	0.021	0.021	0.018
9	0.028	0.036	0.035	0.028	0.037	0.033	0.034	0.035
10	0.03	0.037	0.037	0.027	0.037	0.034	0.034	0.034

由表 5 可知:(1)洛阳地区黄土湿陷系数与单个物性指标相关性强弱依次为孔隙比、干密度和塑性指数。(2)单个至多个物性指标的拟合方程相关性

不断增强,最后相关系数高达 0.901 7。
由表 6 和图 7 可知:(1)在一定条件下,通过单个物性指标的拟合计算就可得到湿陷系数。但单个

物性指标得到的预测值与实测值相比变化幅度大,说明用单个物性指标预测湿陷系数并不稳定。(2)采用多个物性参数预测湿陷系数,特别是用三个相关性最强的孔隙比、干密度和塑性指数预测得到的值与实测值相比最为接近。(3)由于影响湿陷系数的因素,用几个特定的物性指标预测湿陷系数的准确性仍有待提高。

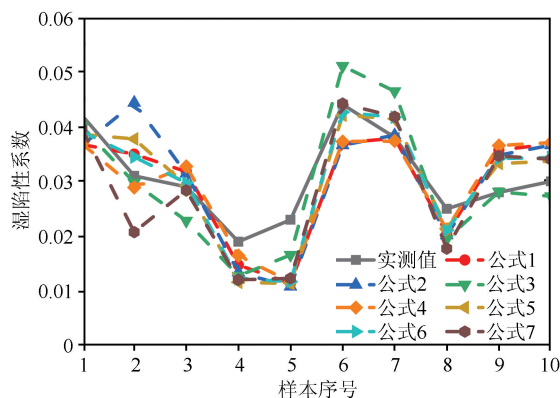


图 7 实测值与 7 公式预测值对比图

Fig.7 Comparison between measured values and predicted values of seven equations

4 结论

黄土湿陷系数是黄土地区工程设计与施工的必要参数,对黄土地区的工程安全有显著影响。本文运用 MATLAB 对传统的回归分析法进行改进,并结合黄土湿陷微观机理,选取特定物性指标开展黄土湿陷系数定量分析,结论如下:

(1) 洛阳地区黄土湿陷系数与物性指标关系的密切程度依次为孔隙比、干密度、塑性指数、液限、塑限、初始含水率、深度、液性指数、弹性模量和压缩模量。

(2) 利用改进的回归分析法得到洛阳地区黄土湿陷系数与物性指标间的 7 个拟合公式。通过预测值与实测值进行对比分析,发现该方法得到的 7 个公式整体预测精度较高,且多参数公式优于单参数公式。

参考文献(References)

- [1] 王沫涵.陕北一关中段黄土湿陷性区域变化规律的研究[D].西安:长安大学,2007.
WANG Mohan.Study on the regional variation law of loess collapsibility in the middle part of northern Shaanxi—Guanzhong [D].Xian:Chang'an University,2007.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.湿陷性黄土地区建筑标准:GB 50025—2018[S].北京:中国建筑

工业出版社,2019.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China,State Administration of Market Supervision and Administration.Code for building construction in collapsible loess regions:GB 50025—2018 [S].Beijing:China Architecture &. Building Press,2019.

- [3] 黄雪峰,陈正汉,哈双,等.大厚度自重湿陷性黄土场地湿陷变形特征的大型现场浸水试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(3):382-389.
HUANG Xuefeng,CHEN Zhenghan,HA Shuang,et al.Large area field immersion tests on characteristics of deformation of self weight collapse loess under overburden pressure[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(3):382-389.
- [4] 叶为民,崔玉军,黄雨,等.黄土的湿陷性及其评价准则[J].岩石力学与工程学报,2006,25(3):550-556.
YE Weimin,CUI Yujun,HUANG Yu,et al.Collapsibility of loess and its discrimination criteria[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(3):550-556.
- [5] 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.
- [6] 邢玉东.辽宁西部湿陷性黄土特性与处治技术研究[D].沈阳:东北大学,2008.
XING Yudong.Research on engineering characteristics of collapsible loess and subgrade treatment technique in west area of Liaoning[D].Shenyang:Northeastern University,2008.
- [7] 王有林.黄土湿陷及其评价方法[D].兰州:兰州大学,2009.
WANG Youlin.The loess collapsibility and its evaluation method[D].Lanzhou:Lanzhou University,2009.
- [8] 王梅.中国湿陷性黄土的结构研究[D].太原:太原理工大学,2010.
WANG Mei.Study on structure of collapsible loess in China [D].Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2010.
- [9] 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(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,2013,34(Suppl02):27-34.
- [10] 杜晓启.挤密桩处理大厚度自重湿陷性黄土地区综合管廊地基及其工后浸水试验研究[D].兰州:兰州理工大学,2018.
DU Xiaochi.Research on utility tunnel foundation treated by compaction piles and post-work immersion test in the self-weight collapsible loess area with large thickness [D].Lanzhou:Lanzhou University of Technology,2018.
- [11] 李论基,赵天宇,李锦.河西走廊黄土湿陷性与物理力学特性[J].工程勘察,2018,46(3):22-28.
LI Lunji,ZHAO Tianyu,LI Jin.Collapsibility and physical and mechanical characteristics of loess in Gansu Corridor[J].

Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(3): 22-28.

[12] 宋建, 李论基. 兰州新区黄土湿陷性与其物性指标的相关性规律探讨[J]. 甘肃科技, 2018, 34(16): 104-106, 83.

SONG Jian, LI Lunji. The discuss on the correlation between collapsibility and physical properties of loess in Lanzhou New Area[J]. Gansu Science and Technology, 2018, 34(16): 104-106, 83.

[13] 高国瑞. 兰州黄土显微结构和湿陷机理的探讨[J]. 兰州大学学报, 1979, 15(2): 123-134.

GAO Guorui. Study of the microstructures and the collapse mechanism in loess soil from Lanzhou[J]. Journal of Lanzhou University, 1979, 15(2): 123-134.

[14] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学出版社, 1980(12): 1203-1208, 1237-1240.

GAO Guorui. Classification and collapsibility of loess micro-structure[J]. China Science Press, 1980(12): 1203-1208, 1237-1240.

[15] 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 deformation of loess soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 1-10.

[16] 王志良. 河南郑州—洛阳地区黄土湿陷机理研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2013.

WANG Zhiliang. The study on collapsible mechanism of loess between Zhengzhou with Luoyang of Henan region[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2013.

[17] 方祥位, 申春妮, 李春海, 等. 陕西蒲城黄土微观结构特征及定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1917-1925.

FANG Xiangwei, SHEN Chunni, LI Chunhai, et al. Quantitative analysis of microstructure characteristics of Pucheng loess in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1917-1925.

[18] 王岩, 隋思涟. 试验设计与 MATLAB 数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

WANG Yan, SUI Silian. Experimental design and MATLAB data analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.

[19] 赵彦晖. 数理统计[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

ZHAO Yanhui. Mathematical statistics [M]. Beijing: Science Press, 2013.

[20] 朱凤基, 南静静, 魏颖琪, 等. 黄土湿陷系数影响因素的相关性分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 128-133.

ZHU Fengji, NAN Jingjing, WEI Yingqi, et al. Mathematical statistical analysis on factors affecting collapsible coefficient of loess [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(2): 128-133.