

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2020.01.015

汾渭盆地西北缘巨厚黄土湿陷特性现场试验研究

刘小平^{1,2}, 李 宁¹, 王玉涛², 曹晓毅²

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 方便、快速、准确地获取黄土湿陷性参数对我国西部地区重大工程建设中解决湿陷性问题具有重要的意义。以汾渭盆地西北缘具有代表性的彬州新民塬区巨厚层黄土为研究对象,在对5 987组原状试样进行压缩试验的基础上,系统研究黄土物理指标随深度的变化规律及单一指标与湿陷系数相关性。根据湿陷系数与各单物理指标相关性系数的高低,结合指标的类别,选取密度、孔隙率和饱和度3个指标作为黄土湿陷的多物理指标模型的因子,采用线性回归法建立了湿陷系数与3个相对独立物理指标的多元线性预测模型。验证结果表明,所建立模型预测精度较高,可以满足该区域黄土湿陷系数预测及工程应用要求,可为该地区快速准确地评价黄土湿陷特性提供了依据。

关键词: 巨厚层黄土; 湿陷性参数; 物理指标; 相关性分析

中图分类号: TU444

文献标志码: B

文章编号: 1006-4710(2020)01-0107-08

Study on the characteristics of super-thick loess collapsibility in the northwestern margin of the Fenwei Basin

LIU Xiaoping^{1,2}, LI Ning¹, WANG Yutao², CAO Xiaoyi²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China)

Abstract: It is of great significance to obtain the collapsibility parameters of loess conveniently, quickly and accurately for solving the collapsibility problems in the construction of major projects in Western China. The representative loess in Xinminyuan Area of Binzhou in the northwest of Fenwei Basin is taken as the research object; based on the compression test of 5 987 groups of undisturbed samples, the variation law of loess physical index with depth and the correlation between single index and collapsibility coefficient are studied systematically. According to the correlation coefficient of collapsibility coefficient and each single physical index, combined with the category of index, three indexes-density, porosity and saturation are selected as the factors of the multi physical index model of loess collapsibility. The multiple linear prediction model of collapsibility coefficient and three relatively independent physical indexes is established by using the linear regression method. The results show that the prediction accuracy by the model is high, which can meet the prediction of loess collapsibility coefficient in this area and the requirements of engineering application, providing a basis for the rapid and accurate evaluation on loess collapsibility in this area.

Key words: super-thick layer loess; collapsibility parameter; physical indices; correlation analysis

黄土是在第四纪地质年代由于风力搬运黄色粉土颗粒,并在干旱、半干旱气候环境条件下沉积形成的一种特殊土^[1-2],在我国分布较为广泛^[3]。湿陷性

是黄土覆盖区工程建设中不可避免的重大灾害问题。构建黄土湿陷系数与物理指标之间的相关关系,是快速获得黄土湿陷系数、评价黄土湿陷性的有

收稿日期: 2019-11-08; 网络出版日期: 2020-04-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20200424.0831.002.html>

基金项目: 中煤科工集团西安研究院科技创新基金资助项目(2013XAYCX025)

第一作者: 刘小平,男,博士生,副研究员,研究方向为矿山地质灾害防治。E-mail: liuxiaoping@cetgexian.com

通信作者: 李宁,男,博士,教授,博导,研究方向为岩体静、动力学及岩土工程。E-mail: ningli@xaut.edu.cn

效手段。众多学者^[1,4-7]先后对此开展了相关性研究,分别建立了单物理指标和多物理指标的经验公式。

汾渭盆地西北边缘黄土塬区,具有黄土厚度大、湿陷性强的特点。黄土湿陷问题严重制约着该区机场、高铁、煤化工等基础设施建设,对工程地基处理方式选择和工程投资影响巨大。由于黄土湿陷的形成环境复杂,影响因素多,且具有明显的地域性,以往的研究成果不能直接用于该区湿陷性快速评价,需要开展试验工作。黄土湿陷性试验工作量往往很大,费工费时,由于试验条件和测试技术的限制,测试结果变化幅度较大,精度有限^[1]。因此,通过对该地区黄土开展大量的室内测试工作,研究湿陷性主要影响因素,建立常规物理指标与湿陷系数的相关关系,对快速预测评价该地区黄土湿陷性、解决重大工程建设中的黄土湿陷性问题具有重要的理论意义与实践价值。

1 研究区概况

1.1 试验点

研究区选择在汾渭盆地西北边缘新民塬区,黄土梁塬地貌。该区土层最大厚度 237 m,最大湿陷性黄土厚度 38 m,为我国典型的巨厚层湿陷性黄土地层。地层结构如下。

1) 全新统(Q₄)耕植土,分布在地表,一般厚度 0.6~0.9 m。

2) 上更新统(Q₃)黄土,厚度 7~15 m,底部为古土壤与下部 Q₂ 分界。

3) 中更新统(Q₂)黄土,浅棕黄色,中间夹 10 多层古土壤,厚度 146~164 m。其下为第三系红黏土。

研究区地下水位埋深 39~42 m,水位高程 1 158~1 164 m。

1.2 试验方案

为研究黄土湿陷特性,对研究区 326 个勘探点进行取样,20 m 深度内采用人工探井取样,20 m 深度以下采用薄壁取土器,快速静力连续压入法采集原状样品。为保持土样的原始结构不受扰动,采集的样品严格按照规范(程)密封。采用压缩实验法研究黄土湿陷性,测试湿陷性指标。本次研究共对 5 987 组试验数据进行了统计分析,统计过程中剔除 3 倍标准差异常值。

2 研究区黄土湿陷物理指标变化规律

2.1 基本物理指标分布规律

将黄土试样物理指标在同一深度的多个数据取平均值,绘制出该指标沿深度方向的分布规律(见图 1)。采用回归算法,建立各物理指标与深度的回归方程(见表 1)。

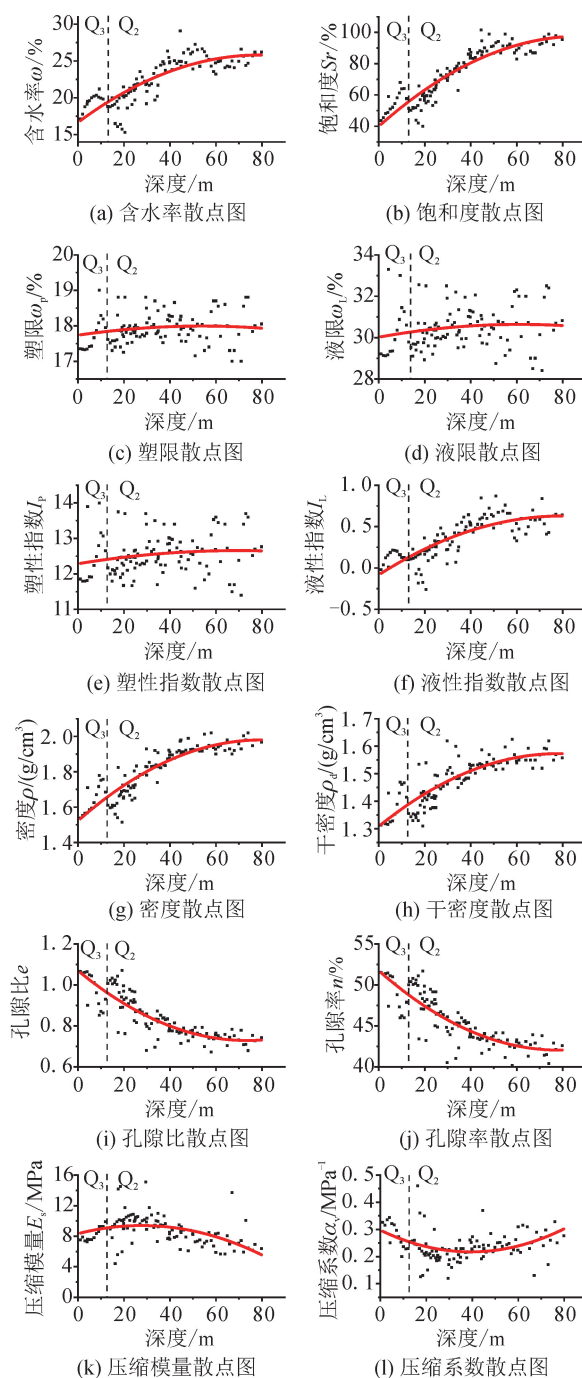


图 1 物理指标与深度关系散点图

Fig. 1 Scattered plot of the relationship between physical indices and depth

表 1 物理指标与深度的回归方程
Tab.1 Regression equations of physical index and depth

物理指标	回归方程	相关系数 R^2
含水率 $w/\%$	$w = 16.657 + 0.232h - 1.47 \times 10^{-3}h^2$	0.684
饱和度 $Sr/\%$	$Sr = 39.955 + 1.313h - 7.48 \times 10^{-3}h^2$	0.828
塑限 $w_p/\%$	$w_p = 17.74 + 9.58 \times 10^{-3}h - 8.89 \times 10^{-5}h^2$	0.003
液限 $w_L/\%$	$w_L = 30.022 + 0.021h - 1.651 \times 10^{-4}h^2$	0.008
塑性指数 I_p	$I_p = 12.287 + 0.011h - 7.62 \times 10^{-5}h^2$	0.012
液性指数 I_L	$I_L = -0.083 + 0.018h - 1.119 \times 10^{-4}h^2$	0.623
天然密度 $\rho/(g/cm^3)$	$\rho = 1.522 + 0.011h - 7.217 \times 10^{-5}h^2$	0.804
干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$	$\rho_d = 1.309 + 0.007h - 4.368 \times 10^{-4}h^2$	0.711
孔隙比 e	$e = 1.070 - 9.28 \times 10^{-3}h + 6.309 \times 10^{-5}h^2$	0.724
孔隙率 $n/\%$	$n = 51.745 - 0.249h + 1.59 \times 10^{-3}h^2$	0.714
压缩模量 E_s/MPa	$E_s = 8.330 + 0.077h - 1.40 \times 10^{-3}h^2$	0.199
压缩系数 α_v/MPa^{-1}	$\alpha_v = 0.297 - 4.05 \times 10^{-3}h + 5.15 \times 10^{-5}h^2$	0.148

注:表中 h 为土样深度,单位 m。

结果表明,研究区黄土物理指标具有以下特点。

1) 含水率为 15%~28%,饱和度 >40%,当深度超过 40 m 后,土体基本达到完全饱和。随深度增加,这两个指标也随之升高,相关性较好,相关系数为 0.6~0.8。

2) 塑限为 17~19,液限为 29~34,塑性指数为 12~14,液性指数 ≤ 0.8 。塑限、液限及塑性指数,0~10 m 有一定程度增大,10~18 m 有所降低,指标离散性较大,随深度变化规律性较差,相关系数小于 0.05。液限指数整体随深度增加而增大,相关性较强,相关系数为 0.6。

3) 天然密度为 1.45~1.98 g/cm³,干密度为 1.30~1.65 g/cm³,它们随深度的增加,均存在增大的趋势,与深度相关性较好,相关系数为 0.7~0.8。

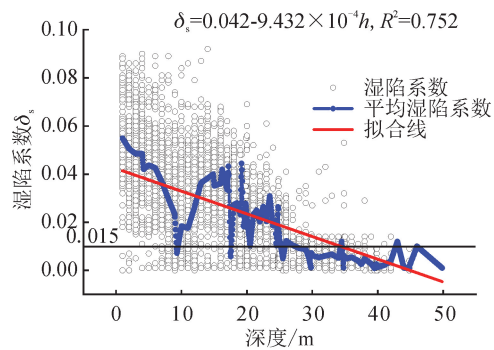
4) 孔隙比为 0.7~1.05,孔隙率为 42%~52%。二者均随深度的增加而减小,变化规律基本一致,与深度相关性较好,相关系数约 0.7。

5) 压缩模量为 6~12 MPa。在 30 m 以内,压缩模量随深度增加而增大;当深度超过 30 m,其值随深度增加而减小。压缩系数为 0.15~0.35,中等压缩,其变化趋势与压缩模量正好相反。压缩模量、压缩系数两个指标与深度相关性较差,相关系数小于 0.2。

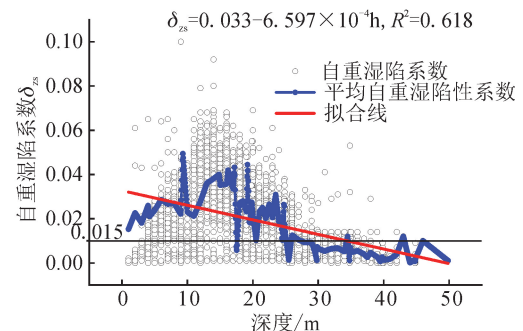
2.2 湿陷性分布规律

将不同深度的湿陷性试验结果绘制成图 2 和图 3。图 2 表明,湿陷系数、自重湿陷系数与深度存在线性降低的关系。由图 3 可知,研究区湿陷性土层大多集中在 26 m 以内,局部最大湿陷深度达到 38.2 m。其中,0~9 m 深度场地黄土湿陷程度基本为中等,局部零星为湿陷强烈和湿陷轻微(见图 3(a))。9~

12 m 深度受古土壤的影响,湿陷系数有较大幅度降低,大部分场地不具有湿陷性,仅在场子西北角和东南角具有轻微~中等湿陷(见图 3(b))。12~20 m 深度场地大部分为湿陷性中等,场地中部局部湿陷性轻微(见图 3(c))。20~26m 深度场地大部分表现为湿陷性轻微,零星为湿陷性中等(见图 3(d))。深度大于 26 m 主要为轻微湿陷。



(a) 湿陷系数散点图



(b) 自重湿陷系数散点图

图 2 湿陷系数(含自重湿陷系数)与深度关系散点图
Fig.2 Scatter plot of relationship between collapsibility coefficient(including coefficient of self weight collapsibility) and depth

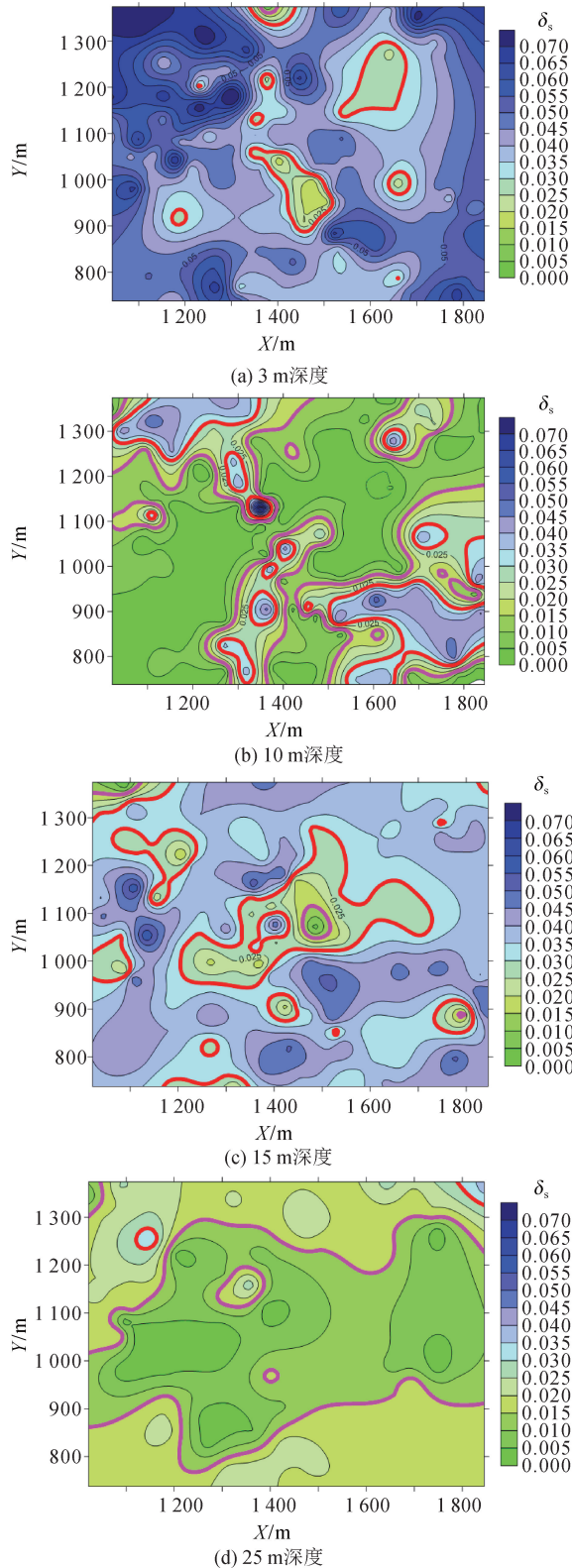


图3 不同深度湿陷系数平面分布图
Fig. 3 Plane distribution of collapsibility coefficient in different depths

根据实验结果,计算了场地自重湿陷量、湿陷量,依据文献^[8]判断研究场地为自重湿陷性场地,绘制了场地湿陷性等级分布图。图4~5表明,场地自重湿陷量介于111.0~1 148.4 mm,计算湿陷量介

于346.3~1 524.7 mm。场地湿陷等级为Ⅱ级中等~Ⅳ级很严重,326个勘探点中,湿陷等级为Ⅳ级(很严重)勘探点239个,占总数的73.3%;Ⅲ级(严重)湿陷勘探点78个,占总数的24%;Ⅱ级(中等)湿陷勘探点9个,占总数的2.7%。图6表明,场地黄土湿陷Ⅳ级(很严重)面积占67.7%,Ⅲ级(严重)湿陷面积占31.0%,Ⅱ级(中等)湿陷面积占1.3%。

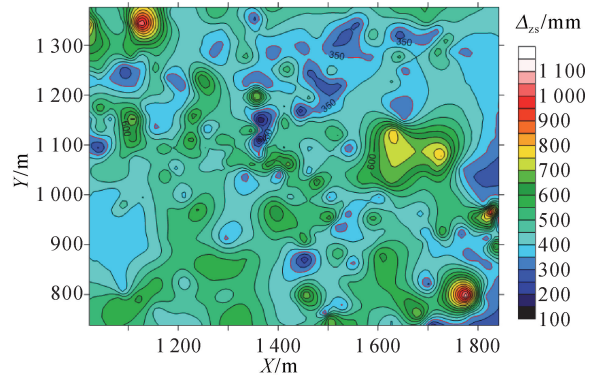


图4 自重湿陷量计算等值线图
Fig. 4 Isoline chart for calculation of self weight collapsibility

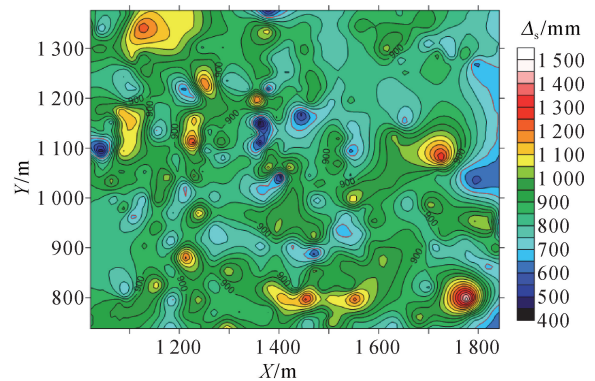


图5 湿陷量计算等值线图
Fig. 5 Isoline chart for calculation of collapsibility

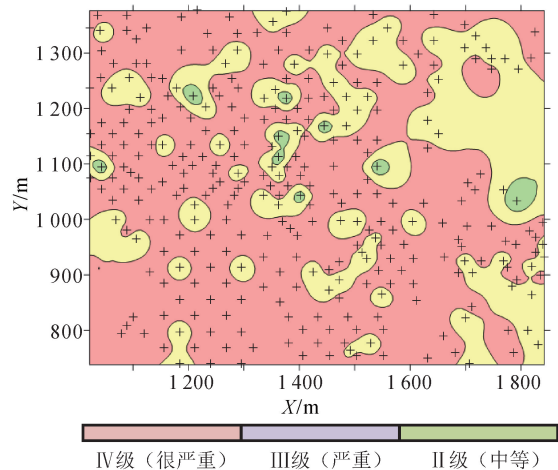


图6 研究场地湿陷性等级分布图
Fig. 6 Distribution map for collapsibility grade of research site

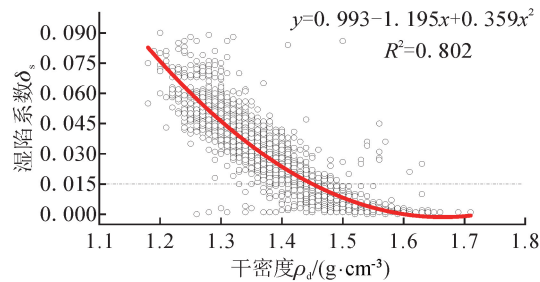
3 湿陷系数与单一物理指标相关分析

3.1 湿陷系数与密度类指标的关系

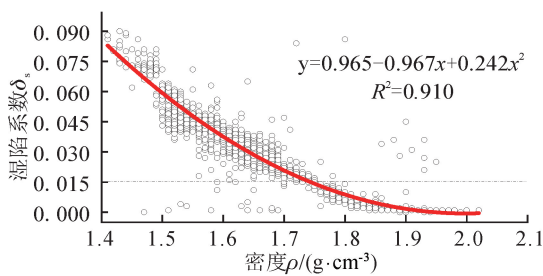
土体中固体颗粒、水和气三相体系之间的不同比例形成了不同密度。天然密度和干密度是土体重要的物理力学指标参数。其中,天然密度包含了土体颗粒密实程度与含水率两方面因素的影响;而干密度消除了土体中水的影响,变为了土颗粒与气的两相体系,其数值大小直接的反映了土体的密实程度。

美国以干密度作为黄土湿陷性的评价指标,当干密度小于 1.28 g/cm^3 时易发生大量湿陷,当干密度大于 1.44 g/cm^3 时湿陷性轻微^[6]。

图 7 表明,随着天然密度、干密度的增加,湿陷系数存在逐步减小的趋势。湿陷系数与密度类指标之间存在良好的相关性,回归分析相关系数大于 0.7。湿陷性在干密度为 1.45 g/cm^3 和天然密度为 1.74 g/cm^3 位置存在明显的界线,当数值小于界线值时具有明显的湿陷性,大于界线值时基本无湿陷性。



(a) 湿陷系数与干密度关系散点图



(b) 湿陷系数与密度关系散点图

图 7 湿陷系数与干密度、天然密度关系散点图

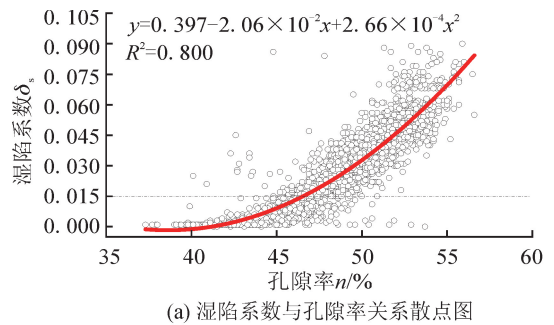
Fig. 7 Scatter plot of relationship between collapsibility coefficient and dry density and natural density

3.2 湿陷系数与孔隙类指标的关系

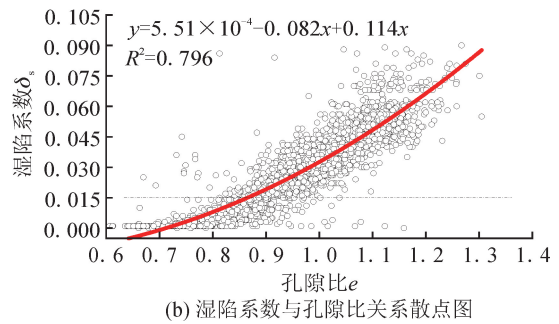
孔隙比和孔隙率是反映黄土密实程度的重要物理性质指标,其数值越大,表明黄土颗粒间隙越大,土质就越松散,越容易被压缩。在较小应力下,结构

越易被破坏,而导致湿陷发生。黄土是由颗粒组成的骨架结构,随着含水率的增大,土颗粒骨架结构的破坏失稳,是造成黄土湿陷的根本原因。

由图 8 可以看出,研究区黄土发生湿陷的孔隙率集中在 $46.6\% \sim 55\%$,孔隙比集中在 $0.87 \sim 1.25$ 之间。湿陷性在孔隙率为 46.6% 和孔隙比为 0.87 位置存在明显的分界。随着孔隙比和孔隙率的增大,湿陷系数存在大幅增大的趋势,与两指标之间的变化规律基本一致,回归分析相关系数大于 0.7,相关性强。



(a) 湿陷系数与孔隙率关系散点图



(b) 湿陷系数与孔隙比关系散点图

图 8 湿陷系数与孔隙率、孔隙比关系散点图

Fig. 8 Scatter plot of the relationship between collapsibility coefficient and porosity and void ratio

3.3 湿陷系数与含水率类指标的关系

土体三相体系中气体所占的孔隙多少是湿陷性强弱的关键。含水率与饱和度是表征土体中含有多少水的指标,其数值越大表示土体三相体系中气体的体积越小,黄土湿陷性试验中在未浸水前的压缩阶段被压缩的孔隙就越多,导致可供湿陷的孔隙数量就会越少^[5]。

由图 9 可知,随着含水率和饱和度的增大,黄土湿陷系数逐渐减小,湿陷强度逐步由中等湿陷降低为非湿陷。湿陷性在饱和度 62% 和含水率 26.4% 位置存在明显的分界,当数值小于界线值时,具有明显的湿陷性,大于界线值时基本无湿陷性。回归分析结果表明,湿陷系数与饱和度相关性较好,湿陷系数与含水率相关性较差。

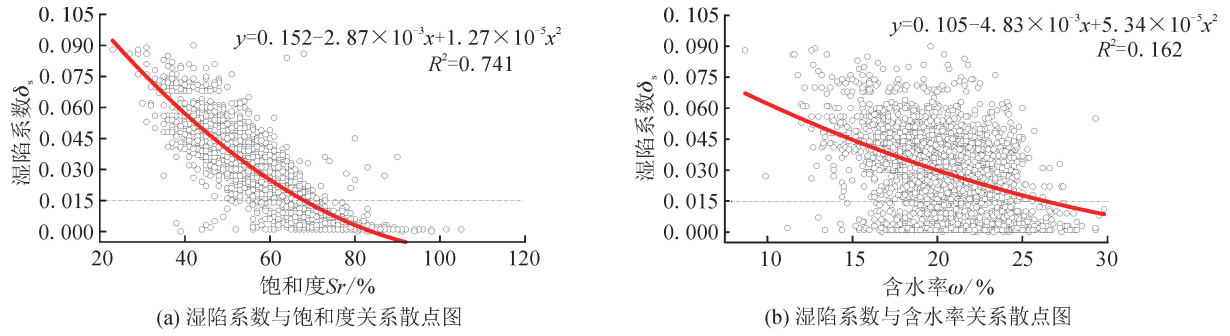


图9 湿陷系数与饱和度、含水率关系散点图

Fig. 9 Scatter plot of relationship between collapsibility coefficient and saturation and water content

3.4 湿陷系数与液塑限类指标的关系

黄土中骨架颗粒或粒团主要依靠粘粒胶结连接,连接遇水强度减弱,骨架结构迅速发生破坏,细颗粒逐步将大的架空孔隙填充,从而导致湿陷的产生^[9]。粘粒胶结强度的高低与细颗粒含量的多少决定着发生湿陷的程度及可能性。液塑限类指标在一定程度上综合反映了土中粘粒或亲水矿物含量高低、矿物成分及黏粒遇水的敏感性。

由图10可知,黄土湿陷系数与液塑限类指标之

间存在着较好的负相关关系。当塑限介于17.2~18.2,液限介于29~31.5,塑性指数介于11.5~13,液性指数介于0~0.35之间时,黄土具有明显的湿陷性。而当塑限大于17.2,液限大于31.5,塑性指数大于13,液性指数大于0.35时,湿陷性通常很微弱甚至没有。

总体上,由于液塑限类指标包含了亲水矿物成分及含量的影响,使得黄土湿陷性系数与液塑限类指标关系较其他指标要弱。

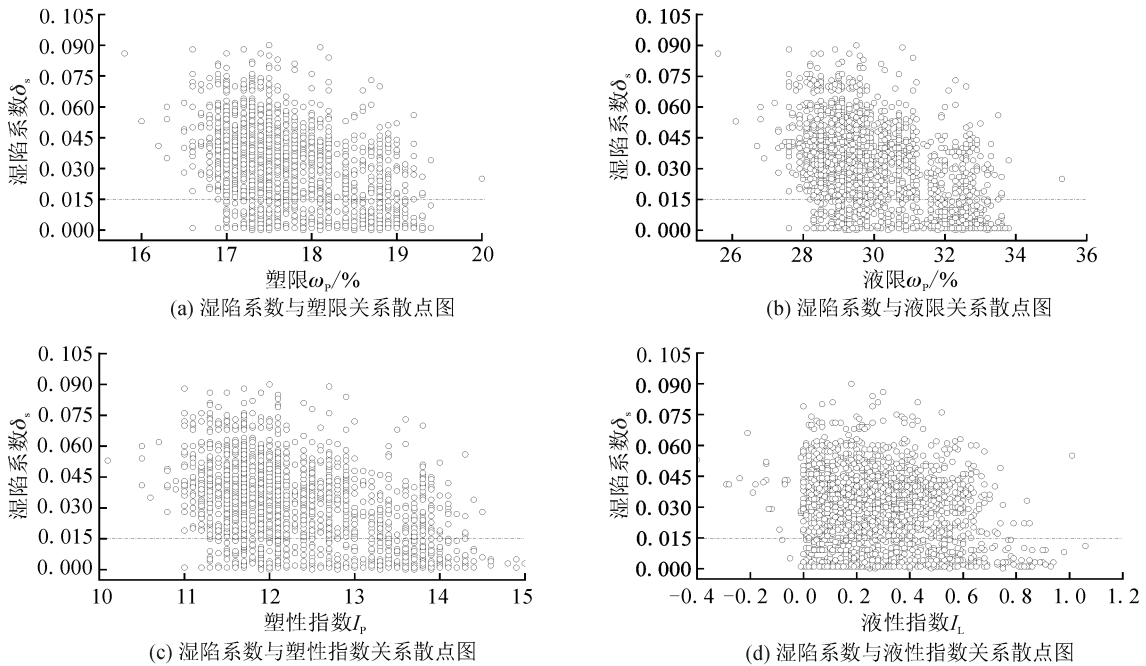


图10 湿陷系数与黄土塑限、液限、塑性指数、液性指数关系散点图

Fig. 10 Scatter plot of relationship between collapsibility coefficient and plastic limit, liquid limit, plastic index and liquid index of loess

3.5 湿陷系数与压缩性指标的关系

压缩模量与压缩系数都是表征土体受压变形性质的指标^[10],其值的大小,反应了土体压缩变形和

发生湿陷的难易程度。由图11可以看出,湿陷系数与压缩系数、压缩模量之间离散性较大,回归分析结果表明相关系数小于0.3,相关性差。

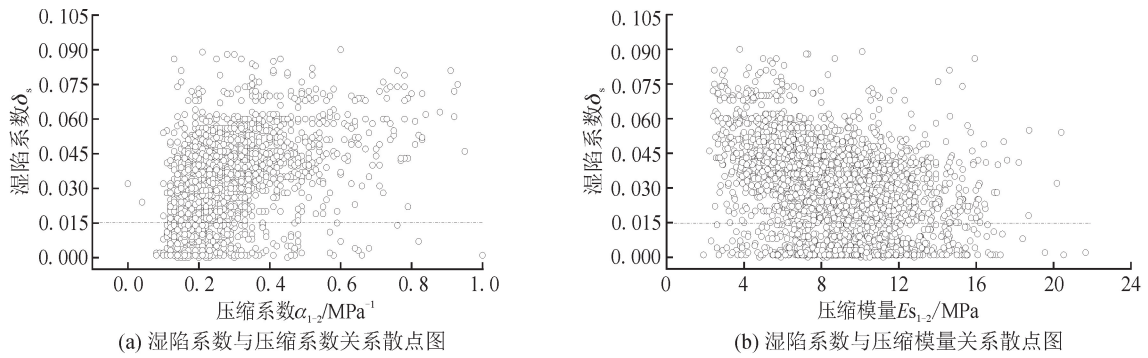


图 11 湿陷系数与压缩系数、压缩模量关系散点图

Fig. 11 Scatter plot of the relationship between collapsibility coefficient and compression coefficient and modulus

4 湿陷系数多物理指标计算模型

4.1 模型建立

黄土湿陷性是各物理指标的总体反映,并由各指标共同决定,且每个指标对其影响程度不同。各单一因素物理指标与湿陷系数相关性分析时,均会受到其他因素产生的影响。

根据单因素指标相关性分析,湿陷系数与液塑限类和压缩性指标相关性较差,而与密度类指标、孔隙类指标、饱和度相关性较好。按照相关性系数阈值为 0.7,同类指标中选取较高指标的原则,确定了密度、孔隙率和饱和度三个指标作为多物理计算模

型的因子。

以试验场地部分实测试验数据作为样本,多元回归分析建立了湿陷系数与主要影响物理指标之间的线性表达式:

$$\delta_s = 2.1214 - 0.906\rho - 0.0163n + 0.0037Sr \quad (1)$$

4.2 检验与对比分析

利用另外 600 个实测样本对回归方程进行对比实测值与计算值检验,由对比结果图 12 可知,各样本点的计算值分布比实测值更为集中,波动范围更小,两者之间虽然存在一定的偏差,但二者的变化规律基本保持一致。

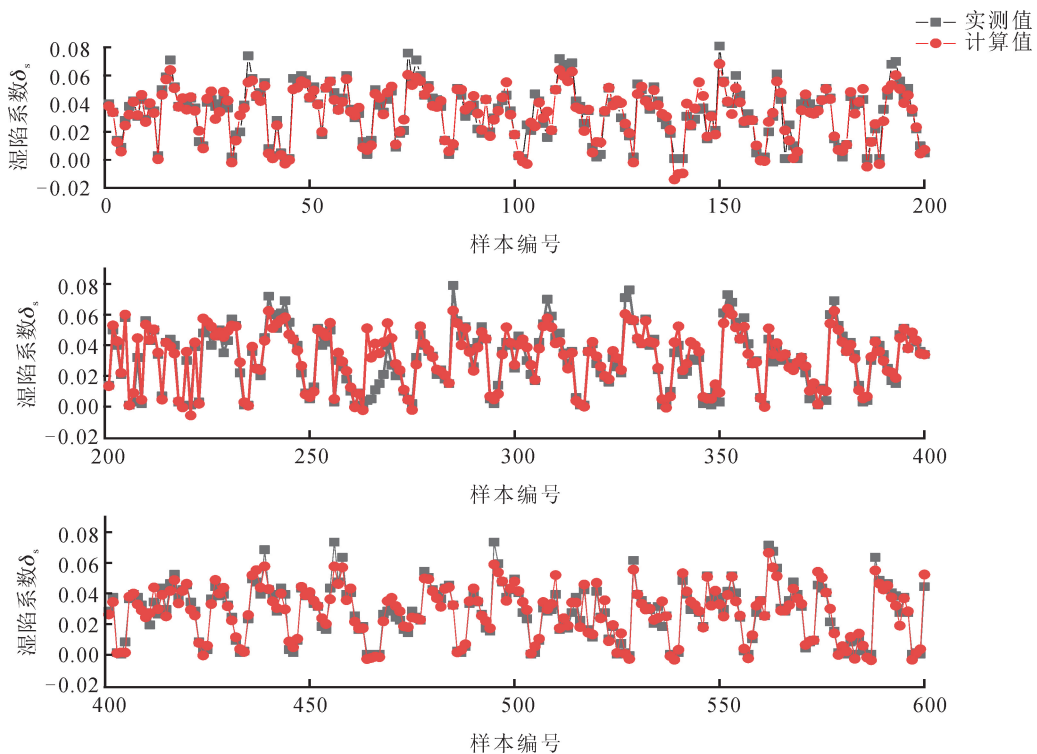


图 12 湿陷系数实测值与计算值的偏差

Fig. 12 Deviation between measured and calculated values of collapsibility coefficient

为验证所建立模型的有效性,现场重新随机布置了 15 个勘探点,采取了试验样品进行室内压缩试验,实测物理指标及湿陷系数。对实验的 15 个勘探点实测湿陷性系数(δ_s)与本计算模型公式(1)、文献[6](郑西高铁)、文献[7](岐山、兴平)进行了对比分析(见表 2)。根据实测的黄土物理指标数据,利用式(1)预测的湿陷系数与实测值的最大误差

14.3%,与文献[6]最大误差达到 94.4%,与文献[7]最大误差达到 92.6%。对比结果表明,本文所建立计算模型精度较高,可以满足该区域黄土湿陷系数预测及工程应用要求。同时也说明,受黄土沉积环境及地质构造等因素影响,黄土特性具有很强的地域性差异,不同地区的黄土湿陷系数与物理指标之间关系也有很大不同。

表 2 与以往文献对比分析表
Tab. 2 Comparison and analysis with previous literature

样本编号	含水率 $w/\%$	饱和度 $S_r/\%$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	孔隙率 $n/\%$	塑性指数 I_p	湿陷系数实测值 δ_s	湿陷系数计算值			相对误差/ $\%$		
									本文	文献[6]	文献[7]	本文	文献[6]	文献[7]
1-1	17.5	43	1.51	1.29	1.109	52.4	11.3	0.062	0.058 3	0.079 4	0.054 0	5.9	28.1	12.8
1-2	19.8	49	1.55	1.29	1.095	52.4	11.6	0.048	0.044 3	0.081 9	0.057 8	7.8	70.6	20.5
1-3	15.3	39	1.52	1.32	1.056	51.3	12.1	0.056	0.052 4	0.102 2	0.053 8	6.4	82.4	3.9
1-4	16.4	44	1.57	1.35	1.009	50.2	11.7	0.044	0.043 5	0.079 4	0.051 9	1.1	80.4	18.1
1-5	23.0	53	1.53	1.24	1.179	54.2	12.1	0.055	0.047 2	0.087 6	0.059 4	14.3	59.2	8.0
1-6	17.5	49	1.61	1.37	0.978	49.4	11.5	0.038	0.038 8	0.064 8	0.050 6	2.2	70.5	33.2
1-7	20.1	50	1.55	1.29	1.100	52.4	11.7	0.046	0.048 0	0.076 9	0.056 5	4.3	67.2	22.8
1-8	12.6	33	1.51	1.34	1.021	50.6	11.7	0.050	0.050 7	0.091 7	0.053 6	1.3	83.4	7.1
1-9	20.2	51	1.57	1.31	1.075	51.7	12.5	0.044	0.045 0	0.071 0	0.053 5	2.2	61.3	21.6
1-10	20.4	49	1.54	1.28	1.127	53.0	12.5	0.041	0.043 6	0.064 1	0.054 0	6.2	56.3	31.8
1-11	16.5	37	1.43	1.23	1.208	54.6	11.8	0.082	0.072 5	0.089 2	0.056 4	11.5	8.7	31.2
1-12	17.5	43	1.51	1.29	1.109	52.4	11.3	0.062	0.058 3	0.079 4	0.054 0	5.9	28.1	12.8
1-13	22.0	61	1.67	1.37	0.980	49.4	11.9	0.026	0.028 1	0.044 7	0.050 1	8.1	72.0	92.6
1-14	21.6	51	1.53	1.26	1.154	53.5	11.7	0.047	0.051 8	0.065 3	0.056 4	10.2	38.9	20.1
1-15	18.4	51	1.63	1.38	0.968	49.1	11.9	0.031	0.033 4	0.060 3	0.048 5	7.6	94.4	56.3

5 结 论

1) 对研究区黄土进行物理性质指标测试与结果分析可知,黄土的饱和度、液性指数、天然密度、干密度、孔隙比、孔隙率和湿陷系数 7 个指标与深度具有良好的相关性,含水率、塑限、液限、塑性指数、液性指数、压缩模量与压缩系数 7 个指标随深度变化的规律性不强,相关性较差。

2) 黄土在干密度为 1.45 g/cm^3 、天然密度为 1.74 g/cm^3 、饱和度为 62%、孔隙率为 46.6% 和孔隙比为 0.87 位置存在明显的湿陷界限。当土层干密度、天然密度和饱和度大于界限,孔隙率和孔隙比小于界限时,黄土基本无湿陷性表现,反之则湿陷性显著。

3) 根据湿陷系数与各单物理指标相关性系数的高低,结合指标的类别,选取密度、孔隙率和饱和度三个指标作为黄土湿陷的多物理指标模型的因

子,回归分析得到了湿陷系数与三个物理指标多元线性方程,并用试验数据验证了模型的准确性。

参考文献:

[1] 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(S2): 27-34.

[2] 仲光伟. 兰州地铁大断面黄土隧道浅埋暗挖法施工力学特性研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2016.
ZHONG Guangwei. Study on mechanical characteristics of shallow-buried underground excavation method for large section loess tunnel of Lanzhou Metro [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.

(下转第 121 页)

- ring-shear test of loess shear resistance strength in Jingyang [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31 (1): 113-119.
- [9] 李先瑞,李晓媛,王圣麟. 改性黄土垂直方向毛细水上升作用研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(28):191-195,204.
LI Xianrui, LI Xiaoyuan, WANG Shenglin. Capillary water migration effects of modified loess in vertical direction [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15 (28): 191-195,204.
- [10] 薛塞光. 宁夏寒冷地区骨干渠道砌护技术研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(1):96-98.
XUE Saiguang. Research of the main canal lining technology in the frigid districts of Ningxia [J]. Yellow River, 2012, 34(1): 96-98.
- [11] 张国军,陆立国. 影响衬砌渠道冻胀破坏严重的关键因素[J]. 中国农村水利水电, 2012, (9):105-108.
ZHANG Guojun, LU Ligu. Important factors that influence lining channel frost heaving damage [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012, (9): 105-108.
- [12] 潘鹏,李剑,郝佳兴,等. 宁夏饱和黄土的冻胀融沉特性[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(18):230-233.
PAN Peng, LI Jian, HAO Jiaying, et al. Frost heaving and thawing settlement characteristics of saturated loess in Ningxia [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16 (18): 230-233.
- [13] 王天亮,卜建清,王扬,等. 多次冻融条件下土体的融沉性质研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 625-632.
WANG Tianliang, BU Jianqing, WANG Yang, et al. Thaw subsidence properties of soils under repeated freeze-thaw cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (4): 625-632.
- [14] 崔自治,郝佳兴,潘鹏,等. 非充分补水条件下冬灌区压实黄土的冻融变形特性[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2018, 39(3):234-238.
CUI Zizhi, HAO Jiaying, PAN Peng, et al. Compacts loess' deformation characteristic of frost and thaw in winter irrigated area under non-sufficient water supplying condition [J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2018, 39 (3): 234-238.
- (责任编辑 周 蓓)

(上接第 114 页)

- [3] 刘春龙,张志强,刘奉银,等. 巴基斯坦某黄土场地湿陷特性试验[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(2):177-182.
LIU Chunlong, ZHANG Zhiqiang, LIU Fengyin, et al. Research on collapsibility of a loess site in Pakistan[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(2): 177-182.
- [4] 井彦林,仵彦卿,杨丽娜,等. 组合最小二乘支持向量机与粒子群优化算法研究黄土湿陷性[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(1):15-19.
JING Yanlin, WU Yanqing, YANG Lina, et al. A study of loess collapsibility by combining least squares support vector machines with particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(1): 15-19.
- [5] 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.
- [6] 武小鹏,赵永虎,徐安花,等. 黄土湿陷性与其物理力学指标的关系及评价方法[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6):75-80.
WU Xiaopeng, ZHAO Yonghu, XU Anhua, et al. Relationship between collapsibility and physical-mechanical indexes of loess and evaluation methods[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35 (6): 75-80.
- [7] 王吉庆,雷胜友,李肖伦,等. 湿陷系数与物理性质参数的相关性[J]. 地质与勘探, 2013, 41(3):42-45,50.
WANG Jiqing, LEI Shengyou, LI Xiaolun, et al. Correlation of wet collapsibility coefficient and physical property parameters of loess [J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(3): 42-45,50.
- [8] 中华人民共和国建设部. 湿陷性黄土地区建筑规范: B50025-2004[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2004.
- [9] 张长飞. 固原地区马兰黄土湿陷性评价[J]. 福建建筑, 2018, 240(6):97-101.
ZHANG Changfei. The collapsibility evaluation of the Malan loess around the Guyuan area[J]. Fujian Architecture & Construction, 2018, 240(6): 97-101.
- [10] 王庆. 挖掘技术在土的工程分类和黄土力学性质研究中的应用[D]. 西安:西安理工大学, 2014.
WANG Qing. Data mining technology in the application of the engineering classification of soil and loess mechanics properties[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2014.
- (责任编辑 王绪迪)