

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201911046

基于主成分分析法的 Q_2 黄土湿陷特性研究

王玉涛¹, 刘小平^{1,2}, 曹晓毅¹

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

摘要: Q_2 黄土由于埋藏深, 结构相对致密, 其湿陷性问题常常被忽视。湿陷系数作为评价黄土湿陷程度的定量指标, 其影响因素众多, 包括土的含水率、干密度、孔隙比等。由于各因素之间存在一定的相关性, 所建立的湿陷系数与物理指标之间相关关系往往准确度较低。为降低黄土湿陷指标多重相关性对数据回归分析结果的影响, 提高预测精度, 以彬州渭化乙二醇项目场地 Q_2 黄土为研究对象, 在统计分析场地地层物性指标及湿陷系数与物理单一指标之间相关性的基础上, 筛选了7个与湿陷系数相关性较好的指标。采用主成分分析法, 通过多元线性回归分析, 建立了以累积方差贡献率为基础的 Q_2 黄土湿陷系数计算模型。模型计算值与实测值对比结果表明, 该方法有效降低了湿陷系数影响因子之间的多重相关性和相互影响问题, 证实了所建立的 Q_2 黄土湿陷系数与独立影响因子之间相关关系的合理性和准确性。

关键词: 主成分分析; Q_2 黄土; 湿陷性; 物理指标; 相关性分析

中图分类号: TU411.2; TU444

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)04-0141-08

A study of the collapsibility of Q_2 loess based on principal component analysis

WANG Yutao¹, LIU Xiaoping^{1,2}, CAO Xiaoyi¹

- (1. Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an, Shaanxi 710077, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Due to deep burial and the relatively dense structure of Q_2 loess, its collapsibility is often overlooked. As a quantitative index to evaluate the degree of loess collapsibility, collapsibility coefficient is influenced by many factors, including soil moisture content, dry density, void ratio and other physical properties. Because there is a certain correlation among the factors, the correlation between the established collapsibility coefficient and the physical index is often of low accuracy. In order to effectively reduce the influence of multiple correlation of loess collapsible index on the data regression analysis results and to improve the prediction accuracy, the Q_2 loess of the Weihua glycol project site in Binzhous is taken as the research object. Based on the statistical analysis of the correlation between the physical property index of the site stratum and the single index of collapsible coefficient and physical property, seven indexes with better correlation with collapsible coefficient are selected. By using principal component analysis and multiple linear regression analysis, the calculation model of Q_2 loess collapsibility coefficient based on cumulative variance contribution rate is established. The comparison between the calculated value of the model and the measured value shows that the method is effective in reducing the multiple correlation and mutual influence between the

收稿日期: 2019-11-21; 修订日期: 2019-12-12

基金项目: 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目资助(2016XAYMS31)

第一作者: 王玉涛(1982-), 男, 副研究员, 硕士, 从事岩土工程与地质灾害防治研究工作。E-mail: wyt192001@163.com

influence factors of the collapsibility coefficient, and confirms the rationality and accuracy of the correlation between the established Q_2 loess collapsibility coefficient and the independent influence factors.

Keywords: principal component analysis; Q_2 loess; collapsibility; physical indices; correlation analysis

黄土是在干旱、半干旱气候环境条件下由风力搬运黄色粉土颗粒沉积形成的一种特殊土^[1]。 Q_2 黄土位于马兰黄土下部,具有埋藏深及厚度大的特点,是构成黄土梁塬的主体^[2],在我国华北、西北和黄河中游等地区广泛分布。以往对黄土的研究主要集中在 Q_3 、 Q_4 地层中,传统认为 Q_2 黄土较之上部的 Q_3 、 Q_4 黄土质地相对密实,一般无湿陷性^[3]。随着经济的发展,工程规模及技术等级的不断提高,越来越多的基础工程涉及到 Q_2 黄土变形计算和地基处理问题^[4]。河南灵宝、陕西蒲城、甘肃西峰等地区的 Q_2 黄土地基工程中,逐步发现 Q_2 黄土仍存在一定的湿陷问题,但其湿陷敏感性、规律及特性与 Q_3 、 Q_4 黄土有明显区别^[5-6]。湿陷性作为黄土最重要的工程特性,不仅直接关系到工程安危和工程造价的高低,如果处理不当往往给工程建设带来严重危害,甚至导致工程事故。 Q_2 黄土湿陷问题已成为工程建设所面临的最主要工程地质问题之一^[7],严重制约着黄土地区水利、电力、高铁、机场、煤化工等基础设施建设。

方祥位等^[2-3]、申春妮等^[5]以陕西蒲城 Q_2 黄土为研究对象,研究了 Q_2 黄土的物质组成、湿陷性影响因素及其在三维高压作用下湿陷变形特征。高燕燕等^[8]研究了延安新区马兰、离石黄土不同压实情况下的饱和渗透特性。谢星等^[9-10]开展了西安地区不同湿度原状 Q_2 黄土的单轴蠕变试验和三轴蠕变试验,揭示了 Q_2 黄土的非线性流变特性,建立了考虑瞬时损伤的统计损伤流变模型。张森安等^[11]以兰州地区离石黄土为对象,探讨了湿陷性、承载力等工程性质。李永伟等^[12]研究了山西太原盆地和晋西北吕梁地区的 Q_2 黄土在高压作用下黄土湿陷特性。上述研究主要从 Q_2 黄土的物质组成、微观结构、渗透特性、结构损伤、流变特性、湿陷因素及高应力状态下湿陷变形等方面开展了相关研究,但是缺乏 Q_2 黄土湿陷性与多物理指标相关性方面的研究。武小鹏等^[13]、马闫等^[14]、李萍等^[15]虽然开展了黄土湿陷特性与物理指标的相关性研究,但其研究对象主要为 Q_3 、 Q_4 黄土,且这些研究大多数只考虑了某个指标或某几个指标,且未考虑指标之间的多重相关性对湿陷性评价的影响。

陕西彬县长武地区黄土最大沉积厚度达 240 m,地层层序齐全,其中 Q_2 黄土厚 145 ~ 164 m,且湿陷性

显著。由于生成年代、成因、环境以及生成后历史变迁的不同, Q_2 黄土湿陷性具有明显的地域特性^[16],以往研究成果不能直接用于该区湿陷性快速评价。黄土湿陷试验工作量往往很大,且测试结果变化幅度较大,精度有限。为降低黄土湿陷指标多重相关性对数据回归分析结果的影响,本文以彬州渭化乙二醇项目场地 Q_2 黄土为研究对象,采用主成分分析法进行了多指标相关性分析,建立了 Q_2 黄土湿陷系数与物理指标的相关关系^[13],对减少试验工作量、快速准确地进行湿陷性计算与评价,具有重要的实践意义。

1 土样与试验方法

试验土样取自陕西彬州市新民镇渭化乙二醇项目场地,取样钻孔分布见图 1,20 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^[17]。

研究区场地属黄土梁塬地貌,钻探揭露土层深度为 80 m,地下水位埋深 39.00 ~ 42.80 m,地层综合性质描述见表 1。对研究场地 363 个勘探钻孔(含探井)所取的 1 143 个土样进行了湿陷性试验。按照《土工试验方法标准(2008 版)》(GB/T 50123—1999)规定,试验采用单向压缩单线法和双线法两种方法进行。取样深度小于 11.5 m 时,试验压力取 200 kPa;取样深度超过 11.5 m 时,试验压力取 300 kPa。 Q_2 湿陷性黄土物理力学试验数据统计结果见表 2。

根据试验结果可知,上更新统(Q_3)中的 L1 黄土层湿陷性程度中等—强烈,S1 古土壤湿陷性轻微。中更新统(Q_2)L2、L3 黄土层湿陷性程度主要为中等,S2、S3、S4 古土壤及 L4、L5 黄土层湿陷性轻微。L5 以下地层基本无湿陷性。

2 Q_2 黄土湿陷性主成分分析

2.1 主成分分析方法

主成分分析法(principal component analysis,PCA)是多元统计分析处理多变量问题时常用的方法,利用降维的思想,将众多相互关联要素的信息压缩表达为若干具代表性的综合变量^[18],剔除了变量冗余属性和彼此的相关性,有效提高了模型的预测精度。

主成分分析的计算步骤如下:

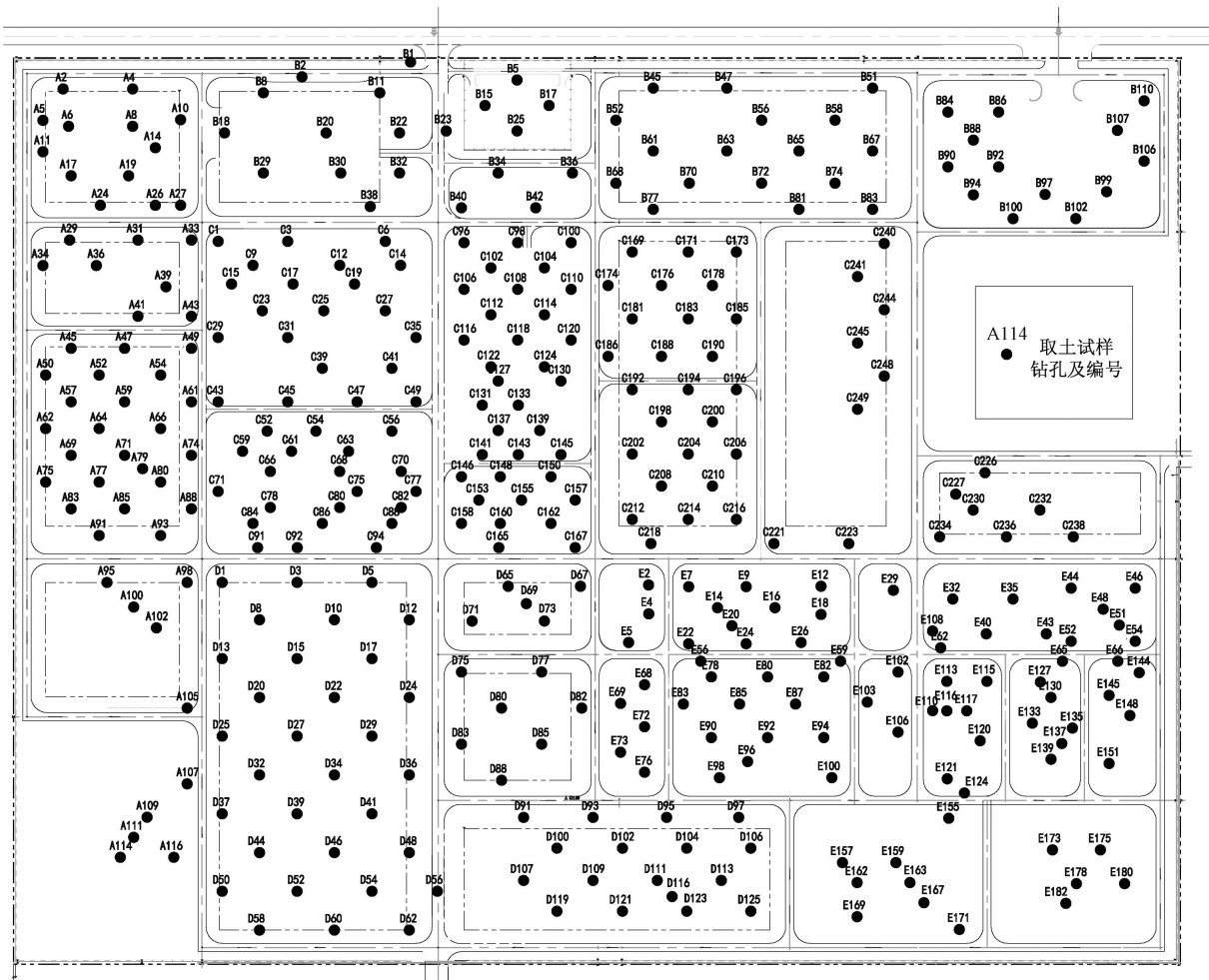


图1 取样钻孔平面分布图

Fig. 1 Plane distribution of the sampling boreholes

(1) 为消除量纲的影响,将原始试验数据矩阵

$\mathbf{x} = (x_{ij})_{n \times m}$, 进行数据标准化, 即:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sqrt{\text{var}(x_j)}} \quad (1)$$

式中: n ——试验样本数量;

m ——单个样本变量个数; $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$;

$\bar{x}_j$ ——变量 j 的平均值;

$\sqrt{\text{var}(x_j)}$ ——变量 j 的标准差。

(2) 变量之间相关性系数可按下式计算, 由此得到相关系数矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{m \times m}$:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n z_{ki} z_{kj}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n z_{ki}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n z_{kj}^2}} \quad (2)$$

式中: z_{ki}, z_{kj} ——标准化矩阵第 k 行、第 i 列与第 j 列

数据;

r_{ij} ——变量 i 与变量 j 之间的相关系数, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m$ 。

(3) 计算相关矩阵的特征值及特征向量, 根据累计贡献率, 确定主成分个数。计算主成分得分, 得到主成分表达式函数 F 。

2.2 Q_2 黄土湿陷影响因素分析

(1) 物性指标与湿陷系数相关性分析

由表 3 可知, Q_2 黄土湿陷系数与取土深度、含水率、饱和度、天然密度、干密度、孔隙比、孔隙率 7 个物性指标的相关系数绝对值大于 0.5, 说明之间存在良好线性相关性。而与其余 4 个指标相关性较差。

(2) 深度对湿陷系数的影响

由图 2 可知, 研究区 Q_2 黄土湿陷性主要集中在 8 ~ 26 m, 湿陷程度为轻微—中等。随着试验土样深度的增大, 土体原始自重应力的增加, 湿陷系数存在逐渐减小的趋势。

表 1 研究区场地土层综合描述
Table 1 Comprehensive histogram of the research area

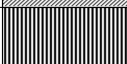
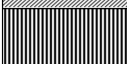
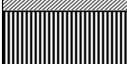
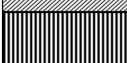
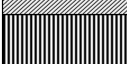
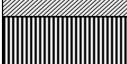
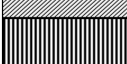
地层编号	年代地层	岩性地层	柱状图	代号	地层名称	分层厚度/m	层底深度/m	描述
①	Q ₄	马兰黄土		L0	耕植土	0.60 ~ 0.90	0.60 ~ 0.90	褐黄色,分布于地表,以粉土为主,植物根系发育。
②	Q ₃			L1	黄土	4.70 ~ 11.20	5.40 ~ 12.60	褐黄、浅灰黄色,可塑。虫孔、针状孔隙特别发育,可见蜗牛壳、零星钙质结核和白色钙质条纹。
③				S1	古土壤	1.90 ~ 4.10	7.60 ~ 15.70	褐红色,稍湿,硬塑—可塑状态。孔隙比较发育,含大量白色钙质条纹和钙质结核,偶见蜗牛壳,具有团粒结构。
④	Q ₂	离石黄土		L2	黄土	3.50 ~ 8.40	14.60 ~ 21.80	浅黄、黄褐色,稍湿,可塑。孔隙发育,可见白色钙质条纹、零星钙质结核和蜗牛碎片。
⑤				S2	古土壤	0.40 ~ 3.20	15.80 ~ 23.0	褐红色,稍湿,硬塑—可塑状态。孔隙发育,可见大量钙质结核,偶见蜗牛壳,具团粒结构。
⑥				L3	黄土	0.20 ~ 7.50	16.30 ~ 24.70	黄褐色,稍湿,可塑。孔隙发育,可见白色钙质条纹、零星钙质结核和蜗牛碎片。
⑦				S3	古土壤	0.40 ~ 2.70	17.50 ~ 26.60	褐红色,稍湿,硬塑—可塑状态。孔隙比较发育,可见钙质结核,偶见蜗牛壳,具团粒结构。
⑧				L4	黄土	1.80 ~ 5.60	20.8 ~ 30.50	黄褐色,稍湿,可塑。孔隙发育,可见白色钙质条纹、零星钙质结核和蜗牛碎片。
⑨				S4	古土壤	0.90 ~ 3.40	22.40 ~ 32.60	褐红色,稍湿,硬塑—可塑状态。孔隙比较发育,偶见蜗牛壳,可见钙质结核,具团粒结构。
⑩				L5	黄土	1.40 ~ 8.00	24.20 ~ 39.60	浅黄、黄褐色,稍湿,可塑状态。孔隙比较发育,可见白色钙质条纹、钙质结核,偶见蜗牛碎片。
⑪				S5	古土壤	0.70 ~ 5.10	28.20 ~ 41.70	褐红、棕红色,稍湿,硬塑—可塑状态。孔隙比较发育,可见较多钙质结核,偶见蜗牛壳,具团粒结构。
⑫				L6	黄土	2.00 ~ 8.20	30.20 ~ 43.0	浅黄、黄褐色,稍湿,可塑状态。孔隙比较发育,可见铁锰质斑点、零星钙质结核和蜗牛碎片匀。
⑬				S6	古土壤	1.90 ~ 5.60	35.80 ~ 43.90	褐红、棕褐色,很湿—饱和,可塑状态。孔隙比较发育,可见较多钙质结核,偶见蜗牛壳,具团粒结构。
⑭				L7	黄土	1.00 ~ 17.00	43.20 ~ 58.60	浅黄、黄褐色,饱和,可塑状态。孔隙比较发育,可见铁锰质斑点、零星钙质结核和蜗牛碎片。
⑮				S7	古土壤	1.20 ~ 2.70	55.40 ~ 61.0	褐红、棕褐色,很湿—饱和,可塑状态。孔隙比较发育,可见较多钙质结核,偶见蜗牛壳,具团粒结构。
⑯				L8	黄土	10.40 ~ 11.20	71.20 ~ 71.50	浅黄、黄褐色,饱和,可塑状态。孔隙比较发育,可见铁锰质斑点、零星钙质结核和蜗牛碎片。
⑰				S8	古土壤	1.80 ~ 2.50	73.20 ~ 74.00	褐红、棕褐色,很湿—饱和,可塑状态。孔隙比较发育,可见较多钙质结核,偶见蜗牛壳,具团粒结构。
⑱				L9	黄土	6.7	80	浅黄、黄褐色,饱和,可塑状态。孔隙比较发育,可见铁锰质斑点、零星钙质结核和蜗牛碎片。

表 2 Q₂ 湿陷性黄土物理力学性质指标统计表
Table 2 Statistics of physical and mechanical properties of the Q₂ collapsible loess

统计项目	取样深度 h/m	含水率 w/%	饱和度 Sr/%	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙 比 e	孔隙率 n/%	液限 W _L /%	塑限 W _P /%	压缩模量 Es/MPa	压缩系数 a/MPa ⁻¹	湿陷系数 δ_s
最小值	9.00	9.90	29.70	1.45	1.21	0.663	39.90	26.10	16.00	2.30	0.00	0.004
最大值	46.00	29.80	82.90	1.95	1.63	1.241	55.40	35.30	20.00	20.40	0.83	0.071
平均值	18.70	20.20	56.80	1.65	1.38	0.976	49.30	29.90	17.70	9.46	0.24	0.029
标准差	6.495	2.635	9.683	0.089	0.064	0.090	2.326	1.267	0.561	3.101	0.109	0.014
变异系数	0.347	0.130	0.170	0.054	0.046	0.092	0.047	0.042	0.032	0.328	0.454	0.482
样本数	1 143	1 143	1 143	1 143	1 143	1 143	1 143	1 143	1 143	1 143	1 143	1 143

(3)孔隙比、孔隙率对湿陷系数的影响

由孔隙比和孔隙率的定义可知,2 个指标不仅体现了土体中孔隙体积的多少,而且综合反映了黄土固体颗粒的疏密程度。黄土是由颗粒组成的骨架与孔隙组成的,2 个指标数值越大,表明黄土颗粒之间孔隙越大,土质就越松散,在较小应力下,骨架结构也越容易被破坏产生压缩,从而导致湿陷发生。研究表明,黄土湿陷性与孔隙总体积、孔隙大小及形态密切相关^[19]。

大、中孔隙是黄土湿陷产生的主要原因,其数量越多湿陷性越强。黄土湿陷过程是黄土架空结构破坏,导致大孔隙被挤压成小孔隙的过程^[20]。由图 3 可以看出, Q₂ 黄土的孔隙率主要为 44% ~ 54%,孔隙比为 0.80 ~ 1.15。湿陷系数与孔隙率、孔隙率存在良好线性增大的趋势。当孔隙率大于 46.6%、孔隙比大于 0.874 时,土体表现出较为明显湿陷性;相反,则基本无湿陷性。孔隙率 46.6% 和孔隙比为 0.874 位置 Q₂ 黄土湿陷性表现出明显的分界性。

表 3 黄土湿陷系数与物性指标的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between the loess collapsibility coefficient and physical property indexes

序号	物性指标	相关系数	序号	物性指标	相关系数
1	取土深度 h	-0.657	7	孔隙率 n	0.860
2	含水率 w	-0.511	8	液限 W_L	-0.335
3	饱和度 S_r	-0.865	9	塑限 W_p	-0.333
4	密度 ρ	-0.953	10	压缩模量 E_s	-0.242
5	干密度 ρ_d	-0.859	11	压缩系数 a	0.300
6	孔隙比 e	0.865			

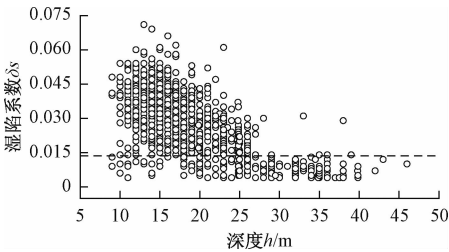


图 2 取土深度与湿陷系数关系散点图

Fig.2 Scatter plot of the relationship between the soil depth and collapsibility coefficient

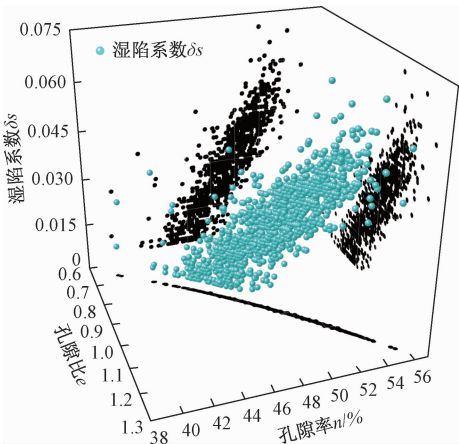


图 3 湿陷系数与孔隙比、孔隙率双因素三维关系散点图

Fig.3 Two-factor 3D relationship scatter plot of the collapsibility coefficient, void ratio and porosity

(4) 含水率、饱和度对湿陷系数的影响

以往研究成果表明,土体三相体系中气体所占的体积的多少是黄土湿陷程度强弱的关键,造成黄土湿陷的根本原因是由于土颗粒骨架结构的破坏失稳。在土体中总孔隙体积一定的情况下,含水率与饱和度越大,表示土体三相体系中气体的体积越小,导致可供湿陷的孔隙体积就会越少^[14]。由图 4 可知, Q₂ 黄土的含水率主要集中在 12% ~ 28%,饱和度集中在 32% ~ 82%。湿陷系数随含水率和饱和度增大呈较好线性递减关系。当含水率小于 25.3%、饱和度小于 67.6% 时,土体表现出较为明显湿陷性;相反,则基本无湿陷性。含水率和饱和度分别在 25.3% 和 67.6% 位置 Q₂ 黄土湿陷性表现出明显的分界性。

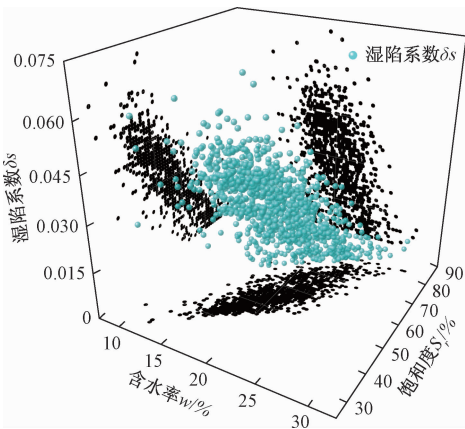


图 4 湿陷系数与含水率、饱和度双因素三维关系散点图

Fig.4 Two-factor 3D relationship scatter plot of the collapsibility coefficient, water content and saturation

(5) 天然密度、干密度对湿陷系数的影响

土颗粒密度一般较恒定,多为 2.70 ~ 2.73 g/cm³。天然密度和干密度作为土体重要的物理指标,其数值越大,表明土体中孔隙所占体积就越小,土颗粒越密实程度,湿陷性越弱。美国就以干密度作为黄土湿陷性的评价指标^[21]。由图 5 可以看出, Q₂ 黄土的天然密度为 1.45 ~ 1.85 g/cm³,干密度为 1.25 ~ 1.55 g/cm³。湿陷系数存在随着天然密度和干密度增加呈较好线性减小的关系。当天然密度小于 1.746 g/cm³、干密度小于 1.448 g/cm³ 时, Q₂ 黄土存在明显湿陷性;相反,则基本无湿陷性。

(6) 液塑限对湿陷系数的影响

土体的液塑限综合反映了土中矿物成分、亲水矿物黏粒含量高低及遇水的敏感性。土中黏粒对土颗粒骨架起到胶结连接作用。在水作用下,可溶盐发生溶解,其厚度和体积减小,黏粒胶结强度降低,骨架颗粒沿黏粒接触点发生滑移,此时黏粒起“润滑”作用^[22],

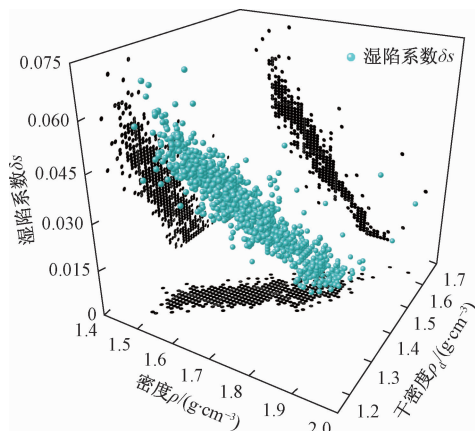


图5 湿陷系数与密度、干密度双因素三维关系散点图

Fig.5 Two-factor 3D relationship scatter plot of the collapsibility coefficient, density and dry density

导致了骨架结构的破坏和湿陷的发生。由图6可知,研究区Q₂黄土的湿陷系数与液塑限分布较为离散,相关性较差。

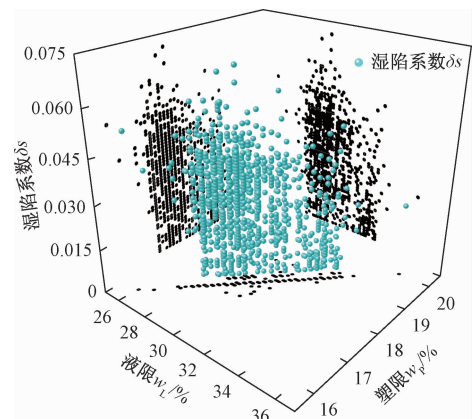


图6 湿陷系数与塑限、液限双因素三维关系散点图

Fig.6 Two-factor 3D relationship scatter plot of the collapsibility coefficient, plastic limit and liquid limit

(7) 压缩系数、压缩模量对湿陷系数的影响

压缩系数和压缩模量都是表征土体受压变形性质的指标,其值的大小反映了土体发生压缩变形难易程度。由图7可以看出,湿陷系数与压缩系数、压缩模量双因素三维分布较为离散,相关性较差。

2.3 主成分分析计算结果

(1) 根据相关性分析结果,选择与湿陷系数相关性较好的7个物性指标,对其中800组试验样本进行了主成分分析,得到相关系数矩阵(表4)。

(2) 由方差累计贡献率计算结果见表5,前2个主成分特征值的累积贡献率达到93.47%,已超过85%,可以反映原始数据的主要信息。选用前2个主成分作

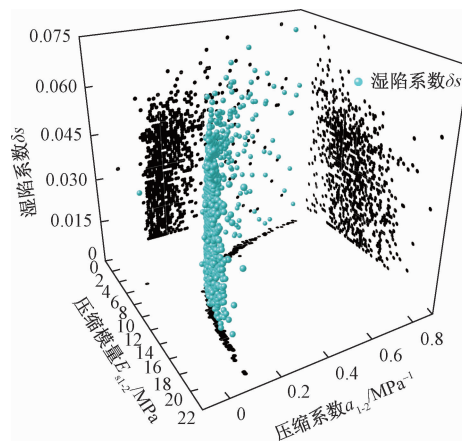


图7 湿陷系数与压缩系数、压缩模量三维关系散点图

Fig.7 Two-factor 3D relationship scatter plot of the collapsibility coefficient, compression coefficient and compression modulus

为新变量,作为模型的输入变量。

表4 各物性指标之间的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between physical indexes

物性指标	含水率 w	饱和度 S_r	密度 ρ	干密度 ρ_d	孔隙比 e	孔隙率 n	深度 h
含水率 W	1.000	0.834	0.517	0.122	-0.126	-0.121	0.532
饱和度 S_r	0.834	1.000	0.900	0.644	-0.646	-0.644	0.689
密度 ρ	0.517	0.900	1.000	0.912	-0.912	-0.911	0.639
干密度 ρ_d	0.122	0.644	0.912	1.000	-0.997	-0.999	0.481
孔隙比 e	-0.126	-0.646	-0.912	-0.997	1.000	0.998	-0.484
孔隙率 n	-0.121	-0.644	-0.911	-0.999	0.998	1.000	-0.482
深度 h	0.532	0.689	0.639	0.481	-0.484	-0.482	1.000

(3) 主成分因子系数得分见表6,得分函数为:

$$F_1 = 0.097x_1 + 0.175x_2 + 0.197x_3 + 0.183x_4 - 0.183x_5 - 0.183x_6 + 0.140x_7 \quad (3)$$

$$F_2 = 0.56x_1 + 0.29x_2 + 0.008x_3 - 0.259x_4 + 0.257x_5 + 0.26x_6 + 0.252x_7 \quad (4)$$

对主成分新变量 F_1 、 F_2 进行线性回归分析,得到的回归方程为:

$$y = -0.0416 - 0.0085F_1 + 0.0027F_2 \quad (5)$$

表5 方差累计贡献率计算结果

Table 5 Accumulated variance contribution rates of factors

成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	5.034	71.920	71.920
2	1.508	21.550	93.470
3	0.449	6.400	99.883
4	0.004	0.062	99.944
5	0.003	0.037	99.981
6	0.001	0.014	99.994
7	0	0.006	100.000

表 6 主成分系数得分

Table 6 Score of principal component coefficient

物性指标		成分 F_1	成分 F_2
x_1	含水率 w	0.097	0.560
x_2	饱和度 S_r	0.175	0.290
x_3	密度 ρ	0.197	0.008
x_4	干密度 ρ_d	0.183	-0.259
x_5	孔隙比 e	-0.183	0.257
x_6	孔隙率 n	-0.183	0.260
x_7	深度 h	0.140	0.252

将主成分还原为原始变量后,则回归方程为:

$$y = -0.0416 + (0.688x_1 - 0.705x_2 - 1.653x_3 - 2.255x_4 + 2.249x_5 + 2.258x_6 - 0.51x_7) \times 10^{-3} \quad (6)$$

为分析回归方程的效果,利用另外 100 个现场实测样本数据进行了检验,由对比结果(图 8)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。

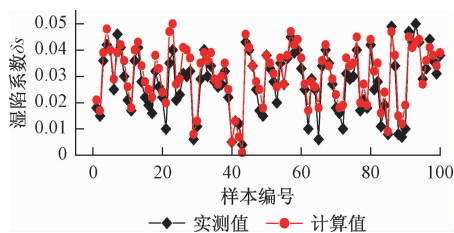


图 8 湿陷系数实测值与计算值的对比

Fig.8 Comparison of measured and calculated values of the collapsibility coefficient

3 结论

(1)相关性分析可知, Q_2 黄土湿陷系数与含水率、饱和度、天然密度、干密度、孔隙比、孔隙率及取土深度 7 个单一物性指标具有较好的线性相关性。湿陷性在孔隙率为 46.6%、孔隙比为 0.874、含水率为 25.3%、饱和度为 67.6%、天然密度为 1.746 g/cm^3 和干密度为 1.448 g/cm^3 位置存在明显的界限。

(2)利用主成分分析法建立了 Q_2 黄土湿陷系数计算模型。效果检验证明,计算模型有效消除了物性指标因子之间的共线性问题,更加符合工程实际,实现了 Q_2 黄土湿陷系数的快速获得,为准确评价湿陷性提供了依据。

参考文献 (References):

[1] 王丽琴,邵生俊,王帅,等. 原状黄土的压缩曲线

特性[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1076 - 1084. [WANG L Q, SHAO S J, WANG S, et al. Compression curve characteristic of undisturbed loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3): 1076 - 1084. (in Chinese)]

[2] 方祥位,欧益希,申春妮,等. Q_2 黄土湿陷性影响因素研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 49 - 54. [FANG X W, OU Y X, SHEN C N, et al. Influence factors analysis on collapsibility of Q_2 loess [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(1): 49 - 54. (in Chinese)]

[3] 方祥位,申春妮,李春海等. 陕西蒲城 Q_2 黄土湿陷变形特性研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 115 - 120. [FANG X W, SHEN C N, LI C H, et al. Collapsible deformation properties of Q_2 loess in Pucheng of Shaanxi Province [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup 2): 115 - 120. (in Chinese)]

[4] 申春妮,方祥位,陈正汉. Q_2 黄土的非饱和直剪试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 724 - 728. [SHEN C N, FANG X W, CHEN Z H. The unsaturated direct shear tests of Q_2 loess [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(4): 724 - 728. (in Chinese)]

[5] 方祥位,成培江,申春妮等. 陕西蒲城 Q_2 黄土物质组成试验研究[J]. 后勤工程学院学报, 2012, 28(1): 1 - 6. [FANG X W, CHENG P J, SHEN C N, et al. The matter composition tests of Q_2 loess in Pucheng, Shaanxi Province [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2012, 28(1): 1 - 6. (in Chinese)]

[6] 顾宝和. 我国特殊岩土研究[J]. 水文地质工程地质, 1997, 24(2): 43 - 45. [GU B H. Researches on special rocks and soils in China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1997, 24(2): 43 - 45. (in Chinese)]

[7] 吴兴辉. 黄土的水敏性与结构性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006. [WU X H. The water sensitivity and structural properties of loess [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese)]

[8] 高燕燕,钱会,徐盼盼,等. 延安新区马兰、离石黄土饱和和渗透特性的试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(增刊 1): 134 - 138. [GAO Y Y, QIAN H, XU P P, et al. Experimental study of permeability of Malan and Lishi loess in Yan' An new area [J].

- Journal of Engineering Geology, 2017, 25 (Sup 1): 134 - 138. (in Chinese)]
- [9] 谢星, 王东红, 赵法锁. Q_2 黄土流变特性及其统计损伤流变模型[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 63 - 68. [XIE X, WANG D H, ZHAO F S. Study on rheological properties and statistical damage rheological model for Q_2 loess [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37 (3): 63 - 68. (in Chinese)]
- [10] 谢星, 王东红, 赵法锁. 单轴压缩下结构性 Q_2 黄土的损伤本构模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 47 - 50. [XIE X, WANG D H, ZHAO F S. Study on damage constitutive model of structural Q_2 loess under uniaxial compression [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3): 47 - 50. (in Chinese)]
- [11] 张森安, 张秦琦, 李晓龙等. 兰州地区离石黄土 (Q_2) 工程性质研究[J]. 山西建筑, 2014, 40 (26): 53 - 55. [ZHANG S A, ZHANG Q Q, LI X L, et al. Study on engineering properties of the Lishi loess (Q_2) in Lanzhou [J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(26): 53 - 55. (in Chinese)]
- [12] 李永伟, 张培恒, 李贞孝. 山西离石黄土湿陷性[J]. 工程地质学报, 2014, 22(增刊1): 395 - 399. [LI Y W, ZHANG P H, LI Z X. The collapsibility of Lishi loess, Shanxi Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22 (Sup 1): 395 - 399. (in Chinese)]
- [13] 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 X P, ZHAO Y H, XU A H, 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. (in Chinese)]
- [14] 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 Y, WANG J D, PENG S J, 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. (in Chinese)]
- [15] 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 P, LI T L. Relation between loess collapsibility and physical properties and its engineering significance [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 506 - 512. (in Chinese)]
- [16] 王梅. 中国湿陷性黄土的结构性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010. [WANG M. Study on structure of collapsible loess in China [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010. (in Chinese)]
- [17] 单红仙, 陈勇, 刘正银, 等. 现代黄河三角洲粉质类土承载力确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (增刊2): 4089 - 4096. [SHAN H X, CHEN Y, LIU Z Y, et al. Determination of slity soil bearing capacity on modern Yellow river delta in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Sup 2): 4089 - 4096. (in Chinese)]
- [18] 井彦林. 基于数据挖掘技术的黄土湿陷性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006. [JING Y L. Study on loess collapsibility based on data mining [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese)]
- [19] 陈开圣, 彭小平. 关中地区黄土的湿陷特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 37 - 40. [CHEN K S, PENG X P. Study on loess's s collapsibility in the Guanzhong area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32 (1): 37 - 40. (in Chinese)]
- [20] 谷天峰, 王家鼎, 郭乐等. 基于支持向量机的 Q_3 黄土孔隙微观结构研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 102 - 106. [GU T F, WANG J D, GUO L, et al. Research on mesoscopic pore of loess based on image processing of SVM [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(6): 102 - 106. (in Chinese)]
- [21] 王吉庆, 雷胜友, 李肖伦等. 黄土湿陷系数与物理性质参数的相关性[J]. 煤田地质与勘探, 2013, 41(3): 42 - 45. [WANG J Q, LEI S Y, LI X L, et al. Correlation of wet collapsibility coefficient and physical property parameters of loess [J]. Coal Geology & Exploration, 2013, 41(3): 42 - 45. (in Chinese)]
- [22] 李兰, 王兰民. 含粘粒量黄土抗震陷性能的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(3): 63 - 66. [LI L, WANG L M. Experimental study of the subsidence characteristics of clayey loess [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(3): 63 - 66. (in Chinese)]