

延安新区黄土湿陷性与其物性指标的相关性分析

唐辉¹, 张瑞松¹, 高建中²

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司/陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 陕西 西安 710043;

2. 延安新区管理委员会, 陕西 延安 716000)

摘要: 湿陷系数是评价黄土湿陷性的重要指标, 根据黄土物理力学指标可快速预测和评价其湿陷系数, 故有必要对黄土湿陷性与其物性指标之间的关系进行研究。针对延安新区湿陷性马兰黄土, 采用数理统计及理论分析, 系统研究了马兰黄土湿陷系数与含水量、干重度、孔隙比、饱和度之间的关系。研究表明: 对于延安新区马兰黄土, 湿陷系数与含水量、干重度、饱和度呈负相关, 与孔隙比呈正相关; 湿陷性的界限含水量为 17%, 界限干重度为 $14.5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, 起始孔隙比为 0.9, 界限饱和度为 50%; 相对比而言, 对湿陷系数影响最大的因子为饱和度, 孔隙比、干重度次之, 含水量与湿陷系数相关性较低。最后通过多元线性回归分析, 提出了用多个物理指标评价及预测黄土湿陷性的经验公式, 并验证了该公式的准确性和合理性, 在工程实践中具有一定的参考价值。

关键词: 湿陷性评价; 延安新区; 马兰黄土; 相关性分析; 回归分析

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)01-0019-06

Correlation analysis between collapsibility and physical properties of loess in Yan'an New District

TANG Hui¹, ZHANG Rui-song¹, GAO Jian-zhong²

(1. China Jikan Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd./

Shaanxi Key Laboratory for the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an 710043, Shaanxi, China;

2. Yan'an New District Management Committee, Yan'an 716000, Shaanxi, China)

Abstract: The collapsibility coefficient is an important index to evaluate the collapsibility of loess. According to the physical and mechanical indexes, the collapsibility coefficient of loess can be quickly predicted and evaluated. Therefore, it is necessary to study the relationship between the collapsibility of loess and its physical properties. Using mathematical statistics and theoretical analysis, the relationship between the collapsibility coefficient and water content, dry weight, void ratio and saturation of Malan Loess in Yan'an New District is systematically studied. The results show that for Malan Loess in Yan'an New District, the collapsibility coefficient is negatively correlated with the water content, dry weight and saturation, but positively correlated with void ratio. The limit moisture content of collapsibility of Malan Loess is 17%, the limit dry weight is $14.5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, the initial void ratio is 0.9, and the limit saturation is 50%. In comparison, the factor that has the greatest influence on the collapsibility coefficient is the saturation, followed by pore ratio and dry weight, and the correlation between the water content and the collapsibility coefficient is lower. Finally, an empirical formula for evaluating and predicting the loess collapsibility with multiple physical indexes is proposed through multiple linear regression analysis. The accuracy and rationality of the empirical formula are verified, and it has important reference value in engineering practice.

Key words: collapsibility evaluation; Yan'an New District; Malan Loess; correlation analysis; regression analysis

0 引言

延安新区是目前世界上在湿陷性黄土地区“平

山、填沟、造地、建城”规模最大的岩土工程^[1], 共形成建设用地和生态综合治理用地 21.333 km^2 。场地形成后, 延安新区湿陷性黄土主要是指分布在

挖填交界区原始地形表层的马兰黄土,大部分具自重湿陷性,湿陷性土层厚度一般约为10~20 m,最大厚度约30 m。对湿陷性黄土进行合理分析评价,是岩土工程勘察单位的重要任务之一^[2-3]。

目前常用的直接测定黄土湿陷性的试验方法主要有室内浸水压缩试验和现场试坑浸水试验两种,由于现场试坑浸水试验周期长、费用高、效率低,工程实践中多采用室内试验方法进行黄土湿陷性评价^[4]。根据《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)的强制性条文规定,测定湿陷性用的不扰动土样应为I级土样,且必须保持其天然的结构、密度和湿度。延安新区马兰黄土具有孔隙发育、粉粒含量高、含水量低的特点,现场在钻孔内采用黄土薄壁取土器“压入法”或“击入法”取样均不易取得结构完整性较好的I级土样,人工探井可保证现场取样的质量,但取样深度浅、效率低,且在土样运输过程中由于振动等因素易发生结构破坏^[5]。最终经常出现由于取样间距不符合规范要求或土样湿陷系数与现场实际判断不一致等状况,难以合理地进行湿陷性评价,成为岩土工程勘察一大难题。近年来许多学者研究了关中地区、兰州、新疆等地黄土湿陷系数与基本物理力学指标之间的关系,并基于此进行黄土湿陷性的评价和地基处理方案的研究^[6-8],在工程实践中可起到一定的指导作用。

延安新区是经造地工程形成的场地,与自然沉积的场地不同,可借鉴的研究成果很少。鉴于此,本文以延安新区5个建筑场地的马兰黄土为研究对象,基于大量室内土工试验资料,采用统计方法研究了湿陷系数与物理力学指标之间的相关性,并通过回归分析建立了延安新区马兰黄土湿陷系数与多个物理力学指标的经验关系模型,最后与实测数据进行了对比验证,对延安新区马兰黄土的湿陷性评价和预测具有一定的参考作用。

1 延安新区马兰黄土物理力学性质

延安新区 Q_3 马兰黄土天然条件下呈褐黄色、疏松、颗粒较均匀、大孔隙显著、垂直节理发育、以黏性土为主、局部粉粒含量较大、硬塑-坚硬状态、一般具轻微-中等湿陷性。本次收集了5个建筑场地245件不扰动土样室内土工试验结果,土样用DPP-100型汽车钻机螺纹钻头回转钻进,并采用黄土薄壁取土器静压取得,主要指标统计结果如表1。

从表2和图1可以看出,根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)规定,延安新区 Q_3 马兰黄土微观上属细粒土,其颗粒组成总体特征为 >0.05 mm和 <0.005 mm的颗粒含量较少,表明粉粒含量占比很高,粉粒中又以粗粉粒(0.01~0.05 mm)为主。

表1 天然状态下马兰黄土主要物理力学性质指标(样本数:245)

Table 1 Main physical and mechanical properties of Malan Loess in natural state (sample number: 245)

统计项	含水量 $w/\%$	干重度 $\gamma_d/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 e	液性指数 I_L	压缩系数 $a_{1-2}/(\text{MPa}^{-1})$	塑性指数 I_p	湿陷系数 δ_s
最大值	18.50	16.30	73.20	1.16	0.20	0.23	17.00	0.056
最小值	6.60	12.52	17.84	0.66	-0.98	0.14	8.20	0.000
平均值	13.37	13.54	37.12	1.00	-0.21	0.18	12.93	0.027
标准差	2.82	0.81	12.00	0.11	0.21	0.31	1.45	0.010
变异系数	0.21	0.06	0.32	0.11	-1.00	1.72	0.11	0.370

表2 天然状态下马兰黄土颗粒组成统计表(样本数:155)

Table 2 Statistical table of particle composition of Malan Loess in natural state (sample number: 155)

值别/mm	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
<1.000	100	100	100	—	—
<0.500	100	87	100	2.0	0.02
<0.250	100	80	98	4.3	0.04
<0.075	100	72	96	7.6	0.08
<0.050	91	46	70	10.9	0.16
<0.010	29	8	18	4.8	0.27
<0.005	17	5	11	2.8	0.26

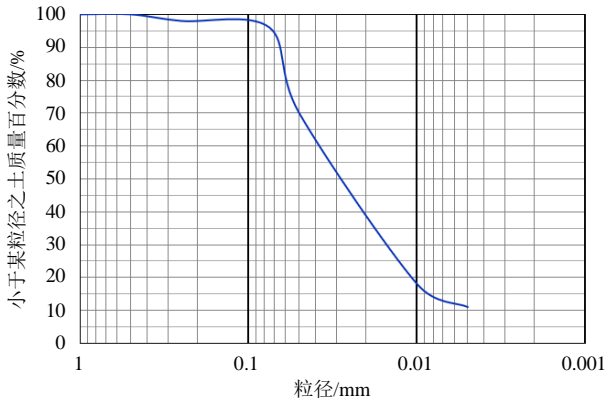


图 1 马兰黄土颗粒粒径级配曲线

Fig. 1 Particle size grading curve of Malan Loess

2 湿陷系数与单物理指标的相关性分析

综合前人在黄土地区研究成果^[9-10]和延安新区马兰黄土特点,选择马兰黄土的含水量、干重度、孔隙比、饱和度 4 个物理参数来研究其与湿陷系数的关系。

2.1 湿陷系数与含水量的关系

从图 2 可以看出,马兰黄土湿陷系数与含水量之间呈现出负相关关系,即随着含水量的增加,其湿陷系数逐渐减小,当含水量 $w > 17\%$ 时,湿陷系数一般小于 0.015,即不具有湿陷性。从组成物质和结构上分析,马兰黄土中有大量易溶盐和黏土矿物的存在,使黄土结构对含水量的变化非常敏感。

一般当含水量较低时,天然黄土颗粒间的连接强度较大,自身结构稳定性较好,但随着含水量的逐渐增大,颗粒间的连接强度迅速降低,结构破坏,进而发生湿陷变形;但当含水量增大到一定程度之后,水土之间发生一系列物理化学作用,黄土结构的水敏性随之降低,湿陷性也降低。根据线性拟合的结果,相关系数 R^2 较小,表明二者相关性并不明显。

2.2 湿陷系数与干重度的关系

干重度或干密度是勘察技术人员现场判断黄土密实度的重要指标,也是湿陷性黄土的重要评价依据。从图 3 可以看出,随着干重度的增加,黄土的湿陷系数直线减小,根据线性拟合的结果,相关系数 R^2 为 0.742,黄土湿陷性与干重度之间基本呈负相关关系。当干重度 $r_d < 14.5$ 时,黄土的湿陷性表现较为突出;当干重度 $r_d > 14.5$ 时,湿陷系数一般小于 0.015,黄土基本不表现出湿陷性。因此,对于延安新区马兰黄土,干重度为 $14.5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 可作为黄土是否存在湿陷性的界限干重度。

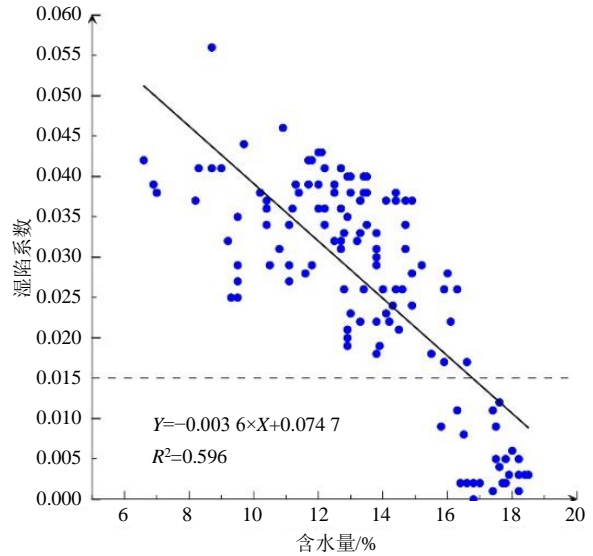


图 2 湿陷系数与含水量的线性关系

Fig. 2 Linear relationship between the collapsibility coefficient and the water content

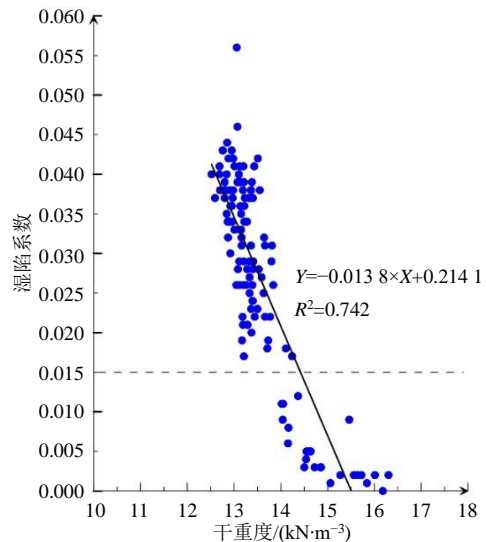


图 3 湿陷系数与干重度的线性关系

Fig. 3 Linear relationship between the collapsibility coefficient and the dry weight

2.3 湿陷系数与孔隙比的关系

孔隙比是黄土内孔隙分布特征的直接反映,孔隙比的大小一定程度上决定了湿陷系数。从图 4 可以看出,随着黄土孔隙比的增大,黄土的湿陷系数也随之增大,根据线性拟合的结果,相关系数 R^2 为 0.753,黄土的湿陷性与其孔隙比之间呈正相关变化关系。当孔隙比 $e < 0.9$ 时,湿陷系数一般小于 0.015;当孔隙比 $0.9 < e < 1.05$ 时,湿陷系数一般介于 0.015~0.030 之间,属轻微湿陷性;当孔隙比 $e > 1.05$ 时,湿陷系数均大于 0.030,属中等湿陷性。因此,对于延安新区马兰黄土,孔隙比 0.9 可作为黄土出现湿陷性的起始孔隙比 e_0 。

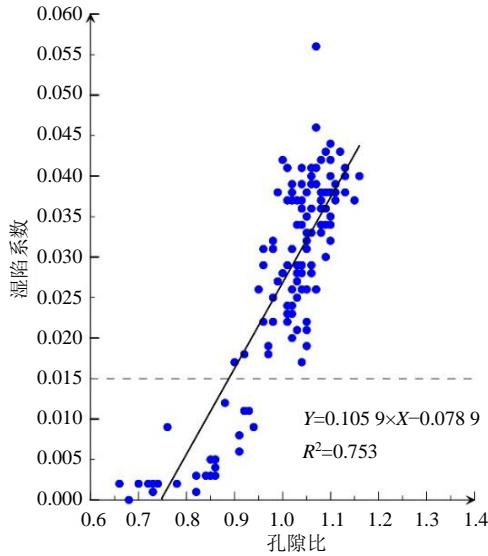


图4 湿陷系数与孔隙比的线性关系

Fig. 4 Linear relationship between the collapsibility coefficient and the void ratio

2.4 湿陷系数与饱和度的关系

饱和度是土体三相指标中的“间接指标”，主要用来描述土中水充满孔隙的程度。但对于不同的土样，即使含水量相同，饱和度也存在差异。从图5可以看出，随着饱和度的增加，黄土的湿陷系数直线减小，根据线性拟合的结果，相关系数 R^2 为0.803，黄土湿陷性与饱和度之间基本呈负相关关系。当饱和度 $S_r < 50\%$ 时，湿陷性表现显著；当饱和度 $S_r > 50\%$ 时，一般不具有湿陷性。因此，对于延安新区马兰黄土，饱和度 50% 可作为黄土湿陷性的界限饱和度。

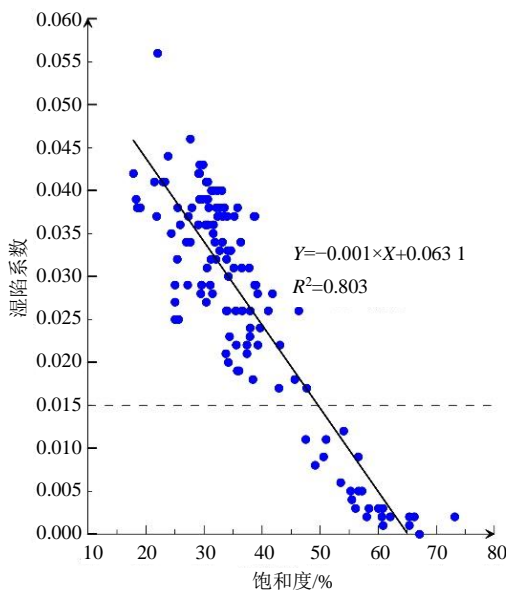


图5 湿陷系数与饱和度的线性关系

Fig. 5 Linear relationship between the collapsibility coefficient and the saturation

3 湿陷系数与多个物理指标的综合关系

根据图1~4中湿陷系数与单物理指标的相关性分析可知，与延安新区马兰黄土湿陷系数最密切的因素为饱和度 S_r ，但相关系数 R^2 为0.803，相关系数并不高，表明湿陷系数并不是由某一个因子单独决定的，可能受多种因子共同影响。

3.1 相关性分析

为分析各单物理指标之间的相关性及进行因子分析的必要性，对单物理指标构造相关系数矩阵如表3。从相关系数计算结果可以看出，干重度和孔隙比具有很强相关性，饱和度和含水量、孔隙比具有较强的相关性，含水量和干重度、孔隙比相关性较弱，符合一般工程经验。

表3 各物性指标之间的相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix between physical properties

项目	含水量 w	饱和度 S_r	干重度 r_d	孔隙比 e
含水量 w	1.000	0.916	0.585	-0.575
饱和度 S_r	—	1.000	0.856	-0.844
干重度 r_d	—	—	1.000	-0.997
孔隙比 e	—	—	—	1.000

3.2 主成分分析

主成分分析是一种对数据进行简化分析的技术，其分析结果中因子负荷可反映各变量与公因子之间关系的密切程度，绝对值越大说明该变量对公因子影响程度越大，相互关系越紧密；公因子的方差比可反映各变量信息分别被提取的充分程度，方差比越大则表明提取相应自变量的信息就越充分。应用主成分分析可以进一步了解黄土各单物理指标（变量）对湿陷系数（公因子）的影响程度。本次利用 SPSS 软件对 245 个样本进行主成分分析，通过分析-降维-因子分析-抽取（选择主成分方法）可以计算出各物理指标的因子负荷和公因子方差，如表4。

表4 主成分分析各物理指标的因子负荷和公因子方差

Table 4 Factor load and common factor variance of physical properties by principal component analysis

物理指标	成分矩阵因子负荷	公因子方差
含水量 w	0.827	0.684
饱和度 S_r	0.980	0.960
干重度 r_d	0.934	0.872
孔隙比 e	-0.939	0.883

表 4 表明, 因子负荷从高到低的顺序为: 饱和度 $S_r >$ 孔隙比 $e >$ 干重度 $r_d >$ 含水量 w , 即与马兰黄土湿陷系数关系密切程度依次为饱和度、孔隙比、干重度、含水量。

3.3 回归分析

为建立延安新区马兰黄土湿陷系数与多个物理指标的经验关系模型, 以湿陷系数为因变量, 以与因变量密切相关但彼此相对独立的饱和度、干重度为自变量, 利用 SPSS 软件进行了自动线性回归分析, 得出经验式 (1):

$$\delta_s = -0.00064S_r - 0.00565r_d + 0.1276 \quad (1)$$

为了消除指标之间的量纲影响, 可对原始数据进行归一化处理, 各指标处于同一数量级, 适合进行综合对比评价, 数据可按如下式进行线性转换:

$$x_i' = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: x_i' 是样本归一化后数据, 其数值范围在 0~1 之间; x_{\max} 是样本数据的最大值; x_{\min} 是样本数据的最小值。

分别对湿陷系数、干重度数据进行归一化处理得到 δ_s' 、 r_d' , 经验式 (1) 可转换为式 (3):

$$\delta_s' = -0.0115S_r' - 0.3813r_d' + 1.0137 \quad (3)$$

根据表 5, 式 (3) 线性回归相关系数为 0.914, 相关性很强, 表明拟合效果很好, 回归方程是合理的。

表 5 线性回归统计表

Table 5 Statistics of linear regression

回归统计	
Multiple R	0.914
R Square	0.836
Adjusted R Square	0.833
标准误差	0.095
样本数量	245

3.4 验证分析

为进一步验证回归方程的适用性, 本次随机在延安新区其它 2 个建筑场地选择 60 件马兰黄土土样试验结果, 将饱和度、孔隙比、干重度、含水量代入式 (3) 计算湿陷系数, 并将计算值与实测值进行对比, 如图 6。另随机选择一个探井中所取得的 11 件土样进行竖向验证, 如图 7。

图 6 表明进行模型检验的 60 个样本的湿陷系数计算值与实测值基本吻合, 虽然存在一定的偏差, 但整体变化趋势是一致的, 经计算最大绝对误差为 0.008 2, 平均相对误差为 12.9%, 并不影响湿陷性的判断。

图 7 表明竖向上 11 个样本的湿陷系数计算值与实测值变化趋势基本一致, 经计算最大绝对误差为 0.006, 平均相对误差为 11%。

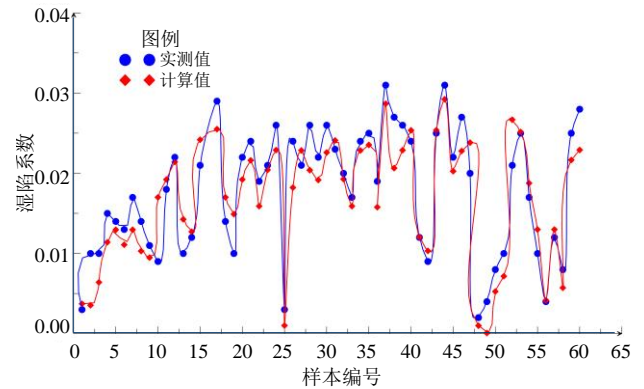


图 6 各样本湿陷系数实测值与计算值对比

Fig. 6 Comparison between the measured and the calculated collapsibility coefficient of samples

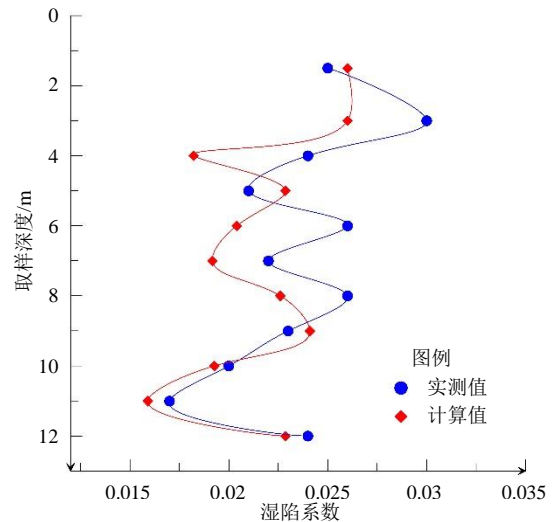


图 7 探井土样湿陷系数实测值与计算值对比

Fig. 7 Comparison between the measured and the calculated collapsibility coefficient of soil samples along the depth of exploration well

通过验证分析, 虽然湿陷系数计算值与实测值存在一定误差且大小不一, 但相对误差在工程应用中处在可接受范围内, 可认为工程实践中采用式 (3) 综合评价延安新区马兰黄土湿陷性的方法具有一定的借鉴价值。

3.5 对比分析

为便于更好地了解延安新区马兰黄土与其他地区黄土的差异, 分别采用文献^[4] (关中地区)、文献^[7] (河西走廊) 中建立的湿陷系数与多物理指标的经验方程对延安新区马兰黄土进行了计算, 湿陷系数相对误差介于 45%~300%, 误差较大。反映到物理指标上主要区别在于延安新区马兰黄土主要以粉质黏土为主, 而关中地区、河西走廊湿陷性黄

土塑性指数平均值一般小于10,以粉质黄土为主。

3.6 适用条件和范围

考虑到本次进行数据分析的样本数据特征,式

(3)主要适用于延安新区具轻微-中等湿陷性的 Q_3 马兰黄土,应用到其它地区还有待验证。

4 结 论

(1)通过相关性分析可知,对于延安新区马兰黄土湿陷系数与含水量、干重度、饱和度呈负相关,与孔隙比呈正相关;湿陷界限含水量可按17%考虑,湿陷界限干重度可按 $14.5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 考虑,湿陷起始孔隙比可按0.9考虑,湿陷界限饱和度可按50%考虑。

(2)通过主成分分析,相对比而言,对延安新区马兰黄土湿陷系数影响最大的因子为饱和度,孔隙比、干重度次之,含水量与湿陷系数相关性较低。

(3)建立了湿陷系数与多个物理指标的多元线性回归方程,计算值与实测值变化趋势基本一致,相对误差可接受,可快速评价延安新区黄土湿陷性,在工程实践中具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 延安新区黄土丘陵沟壑区区域工程造地实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Engineering Practice of Land Reclamation in Loess Hilly Gully Areas of Yan'an New District[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019.
- [2] 高建中. 延安新区工程勘察技术导则[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
GAO Jian-zhong. Technical Guidelines for Engineering Investigation in Yan'an New District[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019.
- [3] 高建中. 延安新区建筑工程设计技术导则[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
GAO Jian-zhong. Technical Guidelines for Architectural Engineering Design in Yan'an New District[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019.
- [4] 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): 75-79.
WU Xiao-peng, ZHAO Yong-hu, XU An-hua, 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): 75-79.

- [5] 王维理, 高光亮, 赵佩. 取样方式对湿陷性土性质的影响探讨[J]. 岩土工程技术, 2018, 32(6): 277-281.
WANG Wei-li, GAO Guang-liang, ZHAO Pei. Discussion on the effect of sampling mode on the properties of collapsible soil[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2018, 32(6): 277-281.
- [6] 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): 27-30.
SHAO Sheng-jun, YANG Chun-ming, MA Xiu-ting, et al. Correlation analysis of collapsible parameters and independent physical indices of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 27-30.
- [7] 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 Lun-ji, ZHAO Tian-yu, LI Jin. Collapsibility and physical and mechanical characteristics of loess in Gansu Corridor[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(3): 22-28.
- [8] 裴存建, 陈岩斌, 惠建奇. 新疆湿陷性土的特性和湿陷性地基土的处理[J]. 西部探矿工程, 2002(5): 47-48.
PEI Cun-jian, CHEN Yan-bin, HUI Jian-qi. Characteristics of collapsible soil and treatment of collapsible foundation soil in Xinjiang[J]. West-China Exploration Engineering, 2002(5): 47-48.
- [9] 陈伟, 赵天宇. 不同地貌黄土的物理力学特性和湿陷性评价[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(6): 193-198.
CHEN Wei, ZHAO Tian-yu. Study on physical and mechanical properties and evaluation of collapsible loess of different landforms[J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(6): 193-198.
- [10] 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, 2018, 31(2): 407-411.
XU Zhi-jun, ZHENG Jun-jie, ZHANG Jun, et al. Application of cluster analysis and factor analysis to evaluation of loess collapsibility[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 31(2): 407-411.