

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2021.04.004

# 压实 $Q_3$ 黄土的高压压缩与浸水变形特性研究

王建安, 徐传召, 朱俊鹏, 雷方超

(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)

**摘要:** 为揭示压实  $Q_3$  黄土的高压压缩与浸水附加压缩变形特性, 对陕北某黄土高填方工程的压实  $Q_3$  黄土进行了不同压实系数、垂直压力和含水率下的高压固结和湿陷试验, 采用多元线性回归分析方法, 建立压实  $Q_3$  黄土的浸水附加压缩变形与压实系数、垂直压力和含水率三个物理指标的经验关系式, 并通过  $F$  检验和残差分析评价了经验关系式的预测效果。结果表明, 提高压实黄土的干密度可显著减少压缩变形, 压缩模量受土体含水率的影响显著; 当压实系数  $\geq 0.90$  (采用重型击实试验控制) 时, 压实黄土浸水后产生的附加压缩变形基本可以消除; 经验关系式可用于预测依托工程压实  $Q_3$  黄土的浸水附加压缩变形。研究成果可为黄土高填方工程中土方压实标准的制订提供参考。

**关键词:** 黄土高填方; 压实黄土; 高压压缩试验; 浸水附加压缩变形

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)04-0023-07

## High Pressure Compression and Soaking Deformation Characteristics of Compacted $Q_3$ Loess

WANG Jianan, XU Chuanshao, ZHU Junpeng, LEI Fangchao

(China JK Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China)

**Abstract:** In order to reveal the high pressure compression and additional compression deformation characteristics of compacted  $Q_3$  loess, the high pressure consolidation and collapse tests under different compaction coefficients, water content and vertical pressure of a high-fill loess project in Northern Shaanxi were carried out, and multiple linear regression analysis method was adopted. The empirical relationship between the additional compression deformation of compacted  $Q_3$  loess and three physical indexes of compaction coefficient, water content and vertical pressure was established, and the prediction effect of the empirical relationship was evaluated by  $F$ -test and residual analysis. The results show that increasing the dry density of compacted loess can significantly reduce the compression deformation, and the compression modulus is significantly affected by soil moisture content. When the compaction coefficient is greater than or equal to 0.90 (controlled by heavy compaction test), the additional compression deformation of the compacted loess after soaking can be eliminated. The empirical relation can be used to predict the additional compression deformation under water soaking of compacted  $Q_3$  loess. The research results can provide references for the formulation of earthwork compaction standard in loess deep filled engineering.

**Keywords:** loess deep filled ground; compacted loess; high pressure compression test; additional compression deformation under soaking

我国西北黄土丘陵沟壑区, 地形起伏、沟谷深切、平地较少, 土地资源十分紧张<sup>[1]</sup>。为了开展基

收稿日期: 2021-02-27

修稿日期: 2021-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41790442)

作者简介: 王建安(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程施工方面的工作。E-mail: 14185385@qq.com

通讯作者: 徐传召(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程设计方面的工作。E-mail: 545039451@qq.com

基础设施建设、拓展城镇发展空间,近年来多个城市开展了填沟造地工程,形成了许多大厚度的黄土高填方工程<sup>[2]</sup>,如陕西延安新区最大填方厚度 112 m<sup>[3]</sup>。在黄土地区的挖填造地工程中,填筑材料一般就地取材,主要为湿陷性黄土,其明显特征是浸水后可能产生较大的附加压缩变形,这也是黄土填方地基不同于其他一般土质填方地基的不同之处<sup>[4]</sup>。若压实度控制不足,容易出现地面沉陷、裂缝及过大工后沉降等工程问题<sup>[5]</sup>,若压实度控制过高,则会显著增加施工成本,因此,掌握压实黄土的高压压缩与浸水附加压缩变形特性是压实标准制订的基础性工作。

黄土的湿陷变形特性与其基本性质指标之间的关系问题,一直是黄土力学与工程研究的热点,我国学者进行了大量有益的研究工作,如郭倩怡等<sup>[6]</sup>研究了黄土湿陷性与土体物性指标的相关性;刘小平等<sup>[7]</sup>根据湿陷系数与单物理指标相关系数的高低,采用线性回归法建立湿陷系数与密度、孔隙率和饱和度三物理指标的多元线性预测模型;朱凤基等<sup>[8]</sup>采用因子分析理论,建立湿陷系数与众多影响因子的回归方程;王玉涛等<sup>[9]</sup>采用主成分分析法,通过多元线性回归分析,建立 Q<sub>2</sub> 黄土湿陷系数的计算模型;褚峰等<sup>[10]</sup>通过侧限压缩试验系统研究了原状黄土在湿压条件下的结构屈服特性及结构损伤演化过程;方祥位等<sup>[11]</sup>通过单向压缩湿陷试验,分析了 Q<sub>2</sub> 黄土与物质组成、物性指标及微观结构定量参数之间的关系;扈胜霞等<sup>[12]</sup>分析了吸力对重塑黄土固结特性的影响;孔洋等<sup>[13]</sup>分析了黄土的垂直压应力与垂直压应变的关系。综上所述,现有文献主要集中在天然黄土的固结压缩和湿陷变形特性研究上,一般所施加压力区段较窄和压力范围较小,而关于大厚度填方场地中压实黄土在大压力条件下的固结压缩与浸水附加压缩变形特性的研究工作仍较少。

本文从陕北某黄土高填方场地填方区内取 Q<sub>3</sub> 黄土填料,进行了压实 Q<sub>3</sub> 黄土的一维高压固结和湿陷试验,分析了压实系数、含水率和垂直压力三个物理指标对压实 Q<sub>3</sub> 黄土的压缩变形和浸水附加压缩变形的影响规律,通过多元线性回归分析,建立了浸水附加压缩变形系数与三物理指标间的经验关系式,并对该经验关系式进行了 F 检验和残差分析,评估经验关系式的预测效果。研究成果可为黄土高填方工程中土方压实标准的制订提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验土样的基本性质

试验土样为 Q<sub>3</sub> 黄土,呈黄褐色,属粉质黏土,原状黄土的湿密度  $\rho = 1.58 \text{ g/cm}^3$ ,含水率  $w = 10.2\%$ ,比重  $G_s = 2.7$ ,湿陷系数  $\delta_s = 0.031$ ,塑限  $w_p = 16.1$ ,液限  $w_L = 28.1$ ,易溶盐含量 0.082%,有机质含量 0.23%。颗粒分析结果如表 1 所示,采用重型击实试验测得土料的最大干密度为  $\rho_{dmax} = 1.86 \text{ g/cm}^3$ ,最优含水率为  $w_{op} = 12.03\%$ 。

表 1 各级颗粒含量

颗粒组成/mm	0.25 ~ 0.075	0.075 ~ 0.05	0.05 ~ 0.01	0.01 ~ 0.005	<0.005
百分比含量/%	2.2	32.5	52.3	7.7	5.3

### 1.2 试验设计与方法

黄土高填方工程的填料一般是从黄土梁峁处开挖后直接填筑,天然含水率变化较大。为了解含水率的变化区间,本次随土方填筑施工随机采集了 390 组料源黄土土样进行含水率测试,含水率统计结果如图 1 所示。由图 1 可知,料源黄土的含水率分布区间较广,其中 7.5% ~ 18.5% 含水率区间内的样本数量约占样本总数的 89.7%。

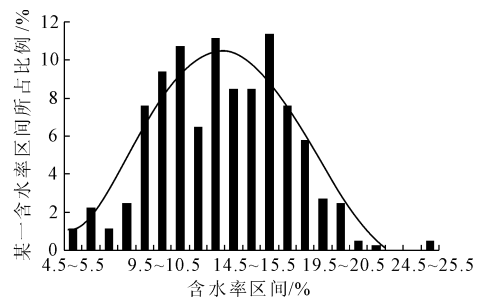


图 1 黄土填料的含水率统计结果

本次试验设计为完全正交试验,含水率和干密度两种控制因素,其中含水率为 6 个水平:8.04%、9.96%、12.03%、13.94%、15.97%、18.10%,干密度为 5 个水平:1.56 g/cm<sup>3</sup>、1.62 g/cm<sup>3</sup>、1.67 g/cm<sup>3</sup>、1.73 g/cm<sup>3</sup>、1.79 g/cm<sup>3</sup>,对应压实系数为 0.84、0.87、0.90、0.93、0.96。为保证试验用土物理性质的均匀性,将土料风干、碾碎、过筛(2 mm)。试样采用击样法制备,试样直径为 79.8 mm,高为 20 mm。试验仪器采用 WG 型单杠三联高压固结仪。

本次采用双线法<sup>[14]</sup>土进行浸水压缩试验,每组试验进行 3 个试样的平行试验。试验加压级别依次

为 50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、600 kPa、800 kPa、1 000 kPa、1 200 kPa、1 400 kPa、1 600 kPa。在双线法的试验中,试样 1 在天然湿度下加压至 50 kPa 变形稳定后浸水;试样 2 在天然湿度下分级加压至 1 600 kPa 变形稳定后再浸水。在试验过程中,每级压力的稳定标准均为连续两次,每小时的变形量不大于 0.01 mm。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 压实 $Q_3$ 黄土的高压压缩变形特性

不同含水率时,压缩模量与压实系数的关系曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出,压缩模量随压实系数的增大而增大,压缩模量增大的规律又因为含水率不同而变化:当含水率较低时(对应的含水率  $w = 8.04\%、9.96\%、12.03\%、13.94\%$ ),随压实系数的增大,压缩模量增量呈先减小后增大的趋势;当含水率接近或大于塑限时(对应的含水率  $w = 15.97\%、18.1\%$ ),随压实系数增大,对不同含水率

压实黄土压缩性的影响是不同的,尤其是当压实系数较大时差别更大。因此,提高压实黄土的干密度可减少压缩变形,压缩模量受土体含水率的影响显著。当含水率相同时,随着压实系数的增大,压缩曲线斜率逐渐增大,即相同压力增量下,压实系数越大,压缩模量增量越大。从图 2 还可以看出,对试验使用的不同含水率和压实系数的土样,在不同垂直压力时的压缩模量差别较大,试验所用的 42 组土样压缩模量随垂直压力的增加而增大,但这种变化的规律受含水率和压实系数的影响差别较大。当压实系数相同时,含水率越小,随加压等级的增大,压缩模量的增加越大,即压力对干密度越小、含水率越大的土样影响最小。在不同压力条件下,压实黄土的压缩模量  $E_s$  差别很大。在低压条件下的压缩模量  $E_s$  较低,但随着压力增大,其压缩模量  $E_s$  逐渐增大,且当压力达到一定量值后,压缩模量  $E_s$  随压力的增幅变缓,即压实  $Q_3$  黄土的变形参数具非线性特征。

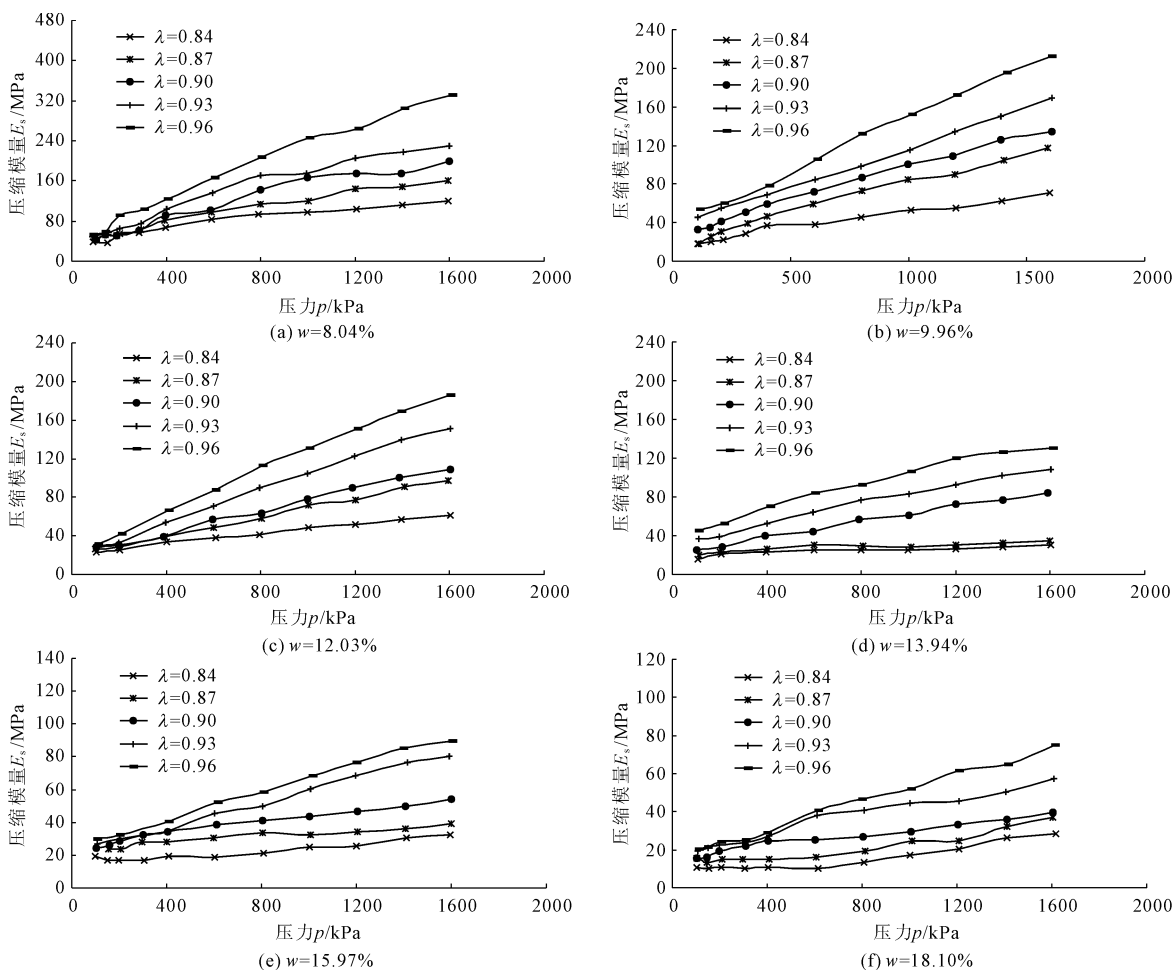


图 2 压缩模量与垂直压力的关系曲线

## 2.2 压实 $Q_3$ 黄土的浸水附加压缩变形特性

通常所说的“黄土湿陷”是针对包含有结构性概念的原状黄土而言的。压实黄土是将原状黄土破碎、铺填、碾压而成,具有不同于原状黄土的结构特征,其变形机理发生了变化,在力与水的联合作用下,其变形已经与通常所说的“湿陷”含义不同,但考虑到二者表现形式相近,本文对压实黄土因浸水而产生的浸水附加压缩变形评价仍借用天然黄土湿陷系数的计算方法来描述,为便于与天然黄土的湿陷系数进行区分,这里称之为“浸水附加压缩变形系数”,计算公式如式(1)所示。

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

式中: $h_0$ 为试样初始高度,mm; $h_p$ 为各级压力下试样变形稳定后的高度,mm; $h_p'$ 为各级压力下试样浸水

变形稳定后的高度,mm。

(1) 压实系数对浸水附加压缩变形的影响。压实  $Q_3$  黄土的浸水附加压缩变形系数与压实系数的关系曲线如图 3 所示。根据《湿陷性黄土地区建筑规范》<sup>[15]</sup>(GB 50025—2018),当湿陷系数  $\delta_s < 0.015$  时,认为黄土不具有湿陷性。由图 3 可知,随压实系数的增大,浸水后附加压缩变形逐渐减小,在低压力下,浸水后附加压缩变形降低的速度较快,当试样含水率为 8.04%、9.96%、12.03%、13.94%、15.97%、18.10% 时,压实系数分别大于 0.89、0.86、0.85、0.82、0.82、0.85,在各级试验压力下,浸水后附加压缩变形系数  $\delta_s < 0.015$ 。因此,借用天然黄土湿陷性的判定临界指标,当压实系数  $\geq 0.90$  (采用重型击实试验控制) 时,压实  $Q_3$  黄土因浸水而产生的附加压缩变形(相当于湿陷变形)基本可以消除。

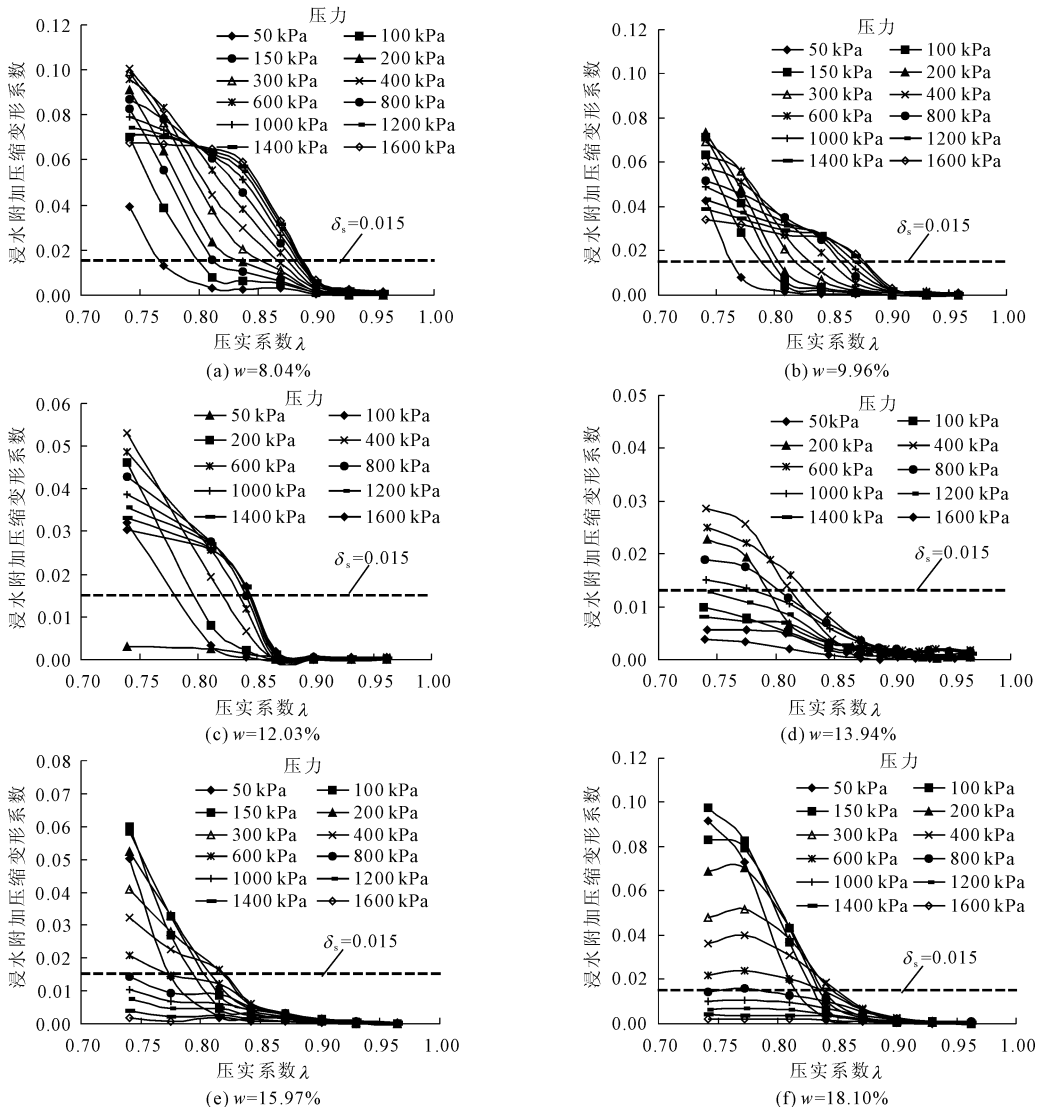


图 3 浸水附加压缩变形系数与压实系数关系曲线

(2) 垂直压力对浸水附加压缩变形的影响。不同压实系数时,压实  $Q_3$  黄土浸水附加压缩变形系数与垂直压力的关系曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出,当压实系数不变,浸水附加压缩变形系数随垂直压力的增加呈现先陡增后缓降的变化特征,即浸水附加压缩变形系数随垂直压力的增加而快速增大至峰值,而后浸水附加压缩变形系数随压力增加而缓慢降低,但在较大压力范围内仍具有浸水附加压缩变形。此外,还可以看出,一些压实系数较高的试样,尽管所施加的压力已达 1 600 kPa,也没有出现峰值点,一维状态、低压力下,不具有浸水附加压缩变形的压实黄土在高压下仍可能发生变形,压实黄土的浸水附加压缩变形起始压力及浸水附加压缩变形系数的峰值点压力值均随压实系数的增大而增

大,且压实系数越小,浸水附加压缩变形系数的起始压力及峰值点压力值越小。

(3) 含水率对浸水附加压缩变形的影响。不同初始含水率时,压实  $Q_3$  黄土的浸水附加压缩变形系数与压实系数的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知,随着初始压实系数的增大,压实  $Q_3$  黄土的浸水附加压缩变形系数先陡降后缓降,此外,含水率越低曲线越陡,表明随初始含水率增大,浸水附加压缩变形系数对含水率变化的敏感性降低。不同加压荷载时,压实  $Q_3$  黄土的浸水附加压缩变形系数与含水率关系曲线如图 6 所示。当压实系数相同,含水率增大时,峰值浸水附加压缩变形系数及其对应的压力值呈现减小的趋势。

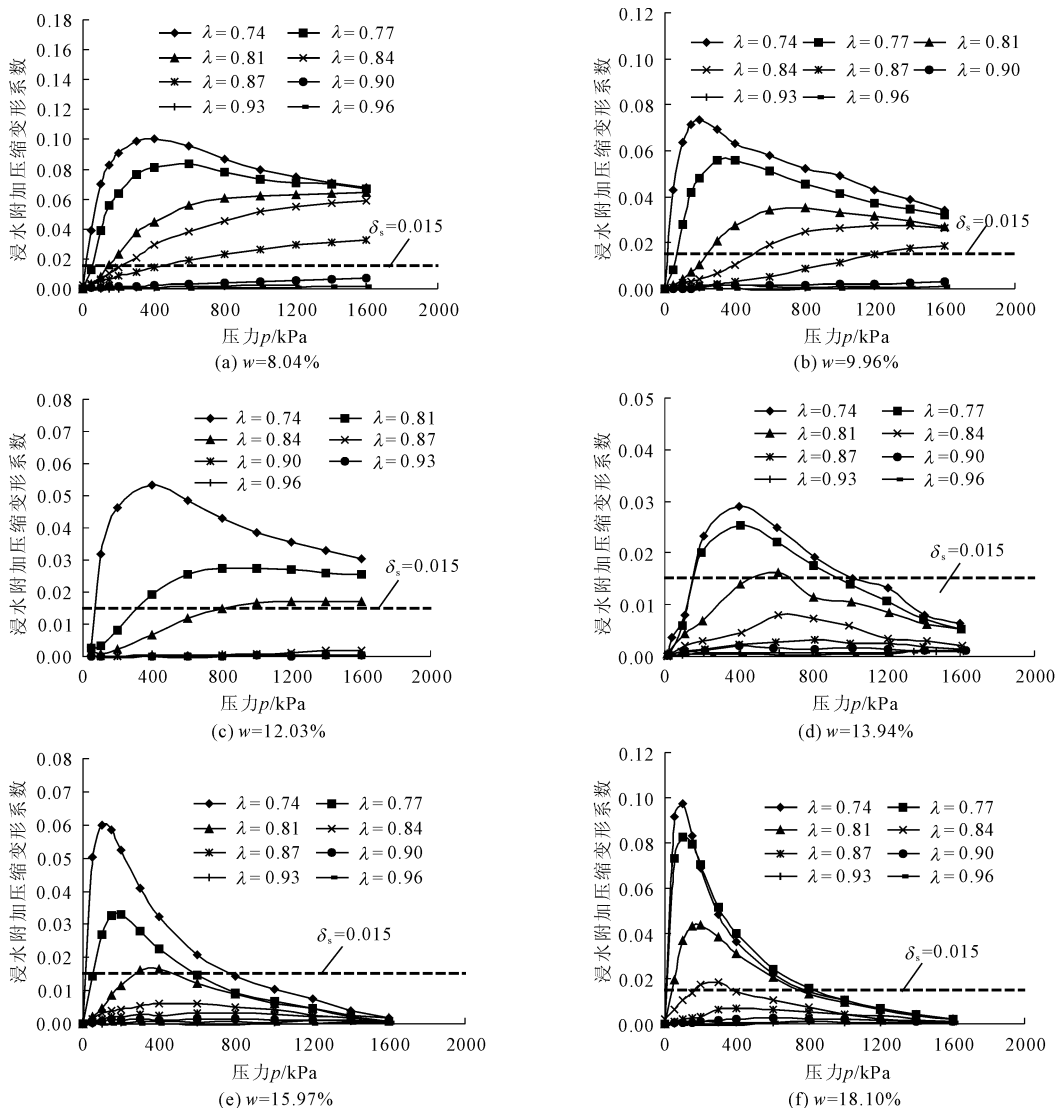


图 4 浸水附加压缩变形系数与垂直压力关系曲线

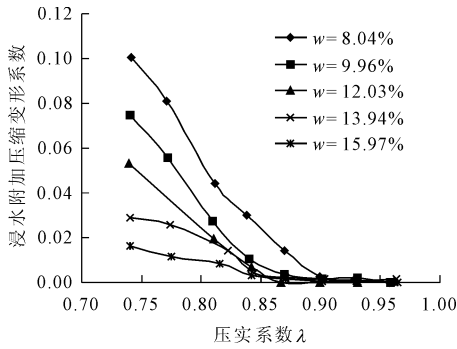


图5 浸水附加压缩变形系数与压实系数的关系曲线(400 kPa)

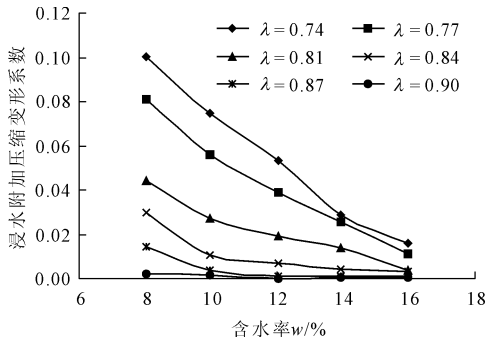


图6 浸水附加压缩变形系数与含水率的关系曲线(400 kPa)

### 2.3 压实 $Q_3$ 黄土浸水附加压缩变形系数的回归分析

本次采用含水率、压实系数以及垂直压力三个物理指标与压实  $Q_3$  黄土的浸水附加压缩变形系数进行多元回归分析,具体试验数据见表2。利用 Origin 软件进行多元一次线性回归分析,建立压实  $Q_3$  黄土浸水附加压缩变形系数与三个物理量之间的经验关系式如下:

$$\delta_s = 0.19968 - 0.00281\omega - 0.1956\lambda + 0.00251\ln p \quad (2)$$

该经验关系式的统计检验主要包括两个方面,一方面是检验回归方程对样本数据的拟合程度,通过可决系数  $R^2$  可反映;另一方面是检验回归方程的显著性,包括对回归方程的线性关系的检验和对回归系数显著性的检验。

(1) 可决系数  $R^2$  的计算。在计算可决系数之前先计算:总离差平方和  $TSS = \sum(\delta_i - \bar{\delta})^2 = 0.176$ , 回归平方和  $ESS = \sum(\hat{\delta}_i - \bar{\delta})^2 = 0.106$ , 残差平方和  $RSS = \sum(\delta_i - \hat{\delta}_i)^2 = 0.070$ 。由  $R^2 = ESS/TSS$  得到可决系数  $R^2 = 0.603$ , 复相关系数  $R = 0.777$ 。

其中  $0 \leq R^2 \leq 1$ , 该统计量越接近 1, 模型的拟合度越高, 同时查复相关系数表, 在显著水平  $\alpha = 0.05$  的条件下,  $R_{0.05}(k, n - k - 1) = R_{0.05}(3, 386) = 0.160$  (其中  $n$  为样本容量,  $k$  为变量的个数, 在本文

中  $n = 390, k = 3$ ), 而  $R = 0.777 > R_{0.05}(3, 386) = 0.160$ , 说明了回归模型与实际情况拟合较好, 即相关性好。

(2) 方程显著性  $F$  检验。根据实测数据和预测值, 计算  $F$  统计量, 计算公式如下:

$$F = \frac{ESS/k}{RSS/(n - k - 1)} = 195.401 \quad (3)$$

$F$  统计量服从自由度为  $(k, n - k - 1)$  的  $F$  分布, 查表得:  $F_{0.05}(3, 386) = 2.680$ 。  $F > F_{0.05}(3, 386)$ , 即回归方程的线性关系显著成立。

(3) 回归系数的显著性检验。根据实测数据和预测值, 构造计算统计量:

$$t_i = \frac{\hat{\beta}_i}{s} \quad (i = 0, 2, 3, 4) \quad (4)$$

式中:  $\hat{\beta}_i$  为相应的回归系数,  $s$  为  $\hat{\beta}_i$  的标准差。计算得:  $t_0 = 21.143, t_1 = -12.080, t_2 = -20.589, t_3 = 4.142$ 。该统计量服从自由度为  $(n - k - 1)$  的  $F$  分布, 查表得:  $t_{0.05}(386) = 1.658$ 。  $|t_i| > t_{0.05}(386)$ , 即变量对解释变量的影响是显著的。由此可以看出该回归方程较为合理, 符合工程需要。

为了检验该回归方程是否适合用来预测依托工程中压实  $Q_3$  黄土的浸水附加压缩变形系数, 对回归方程进行残差分析, 计算结果见图7。

残差:

$$e = \delta_i - \hat{\delta}_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

标准化残差:

$$ZRE_i = \frac{e_i}{\hat{\sigma}} \quad (6)$$

式中:  $\hat{\sigma}$  为回归标准差。

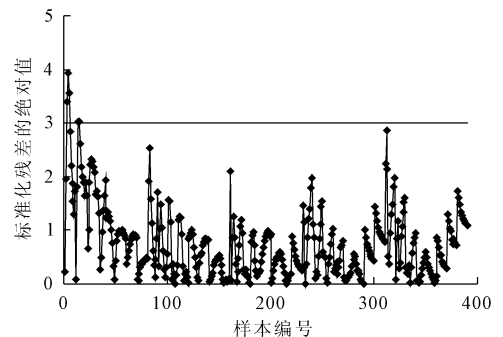


图7 标准化残差的绝对值曲线

残差计算中的标准化残差绝对值  $|ZRE_i| < 3$ , 表明无异常值。在图7中, 可以看到绝大多数的数据计算结果符合预期, 表明该经验关系式用于依托工程压实  $Q_3$  黄土的浸水附加压缩变形预测效果较好, 可快速地预测实际工程中不同含水率、不同压实系数时, 压实  $Q_3$  黄土的浸水附加压缩变形系数。

表2 压实 Q<sub>3</sub> 黄土的浸水附加压缩变形系数试验结果

试验 编号	含水率 w/%	压实 系数 λ	干密度 ρ <sub>d</sub> /(g·cm <sup>-3</sup> )	不同压力(kPa)浸水附加压缩变形系数 δ <sub>s</sub>									
				50	100	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600
T1	8.1	0.74	1.38	0.039	0.070	0.091	0.100	0.096	0.087	0.079	0.075	0.071	0.068
		0.77	1.43	0.013	0.039	0.064	0.082	0.083	0.078	0.073	0.071	0.070	0.067
		0.81	1.51	0.003	0.008	0.023	0.047	0.060	0.065	0.067	0.067	0.066	0.065
		0.84	1.56	0.000	0.001	0.004	0.010	0.025	0.036	0.043	0.049	0.053	0.057
		0.87	1.62	0.000	0.000	0.002	0.005	0.007	0.010	0.014	0.020	0.026	0.031
		0.90	1.67	0.000	0.000	0.001	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008
		0.93	1.73	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002
		0.96	1.79	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
T2	10.0	0.74	1.38	0.043	0.064	0.074	0.063	0.058	0.052	0.049	0.043	0.039	0.034
		0.77	1.43	0.008	0.028	0.048	0.056	0.051	0.046	0.042	0.037	0.035	0.032
		0.81	1.51	0.002	0.004	0.011	0.027	0.034	0.035	0.033	0.031	0.029	0.027
		0.84	1.56	0.001	0.002	0.004	0.010	0.019	0.025	0.027	0.028	0.027	0.026
		0.87	1.62	0.000	0.001	0.002	0.003	0.005	0.009	0.012	0.015	0.018	0.019
		0.90	1.67	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003
		0.93	1.73	0.000	0.000	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
		0.96	1.79	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001
T3	12.0	0.74	1.38	0.003	0.032	0.046	0.053	0.049	0.043	0.039	0.036	0.033	0.030
		0.81	1.51	0.003	0.003	0.008	0.019	0.026	0.028	0.027	0.027	0.026	0.026
		0.84	1.56	0.001	0.001	0.002	0.007	0.012	0.015	0.017	0.017	0.017	0.017
		0.87	1.62	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.002
		0.90	1.67	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001
		0.93	1.73	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		0.96	1.79	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		T4	14.6	0.74	1.38	0.004	0.010	0.023	0.029	0.025	0.019	0.015	0.013
0.77	1.43			0.003	0.008	0.020	0.026	0.022	0.018	0.014	0.011	0.007	0.006
0.81	1.51			0.002	0.005	0.007	0.014	0.016	0.012	0.011	0.008	0.006	0.005
0.84	1.56			0.001	0.002	0.003	0.004	0.008	0.007	0.006	0.003	0.003	0.002
0.87	1.62			0.000	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001
0.90	1.67			0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
0.93	1.73			0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
0.96	1.79			0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
T5	16.0	0.74	1.38	0.050	0.060	0.052	0.032	0.021	0.014	0.010	0.008	0.004	0.002
		0.77	1.43	0.015	0.027	0.033	0.023	0.015	0.009	0.007	0.004	0.002	0.001
		0.81	1.51	0.002	0.005	0.012	0.016	0.012	0.009	0.006	0.004	0.003	0.002
		0.84	1.56	0.001	0.003	0.004	0.006	0.006	0.005	0.004	0.003	0.002	0.001
		0.87	1.62	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001
		0.90	1.67	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
		0.93	1.73	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001
		0.96	1.79	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

### 3 结论

(1) 压实 Q<sub>3</sub> 黄土的浸水附加压缩变形系数随垂直压力的增加而快速增大至峰值,而后浸水附加压缩变形系数随垂直压力增加而缓慢降低,但在较大压力范围内仍具有浸水附加压缩变形。

(2) 压实 Q<sub>3</sub> 黄土的浸水附加压缩变形系数随着初始含水率的增大而减小,对低含水率较敏感,下降速率快;随着垂直压力的增大,浸水附加压缩变形系数先是增大而后减小,但高压条件下,仍可能发生浸水附加压缩变形。

(3) 当最大干密度采用重型击实试验标准确

定,压实系数  $\lambda \geq 0.90$  时,压实 Q<sub>3</sub> 黄土浸水后产生的附加压缩变形系数均小于 0.015。

(4) 建立的压实 Q<sub>3</sub> 黄土浸水附加压缩变形系数与压实系数、含水率和垂直压力的经验关系式,经 *F* 检验和残差分析效果较好,可用于依托工程中压实 Q<sub>3</sub> 黄土的浸水附加压缩变形预测。

#### 参考文献:

- [1] 蒲川豪,许强,蒋亚楠,等.延安新区地面沉降分布及影响因素的时序 InSAR 监测分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(11):1728-1738.

(下转第 52 页)

- 方桩水平承载特性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(4):136-140.
- [10] Yang X, Zeng X W, Wang X F. Lateral - moment loading capacity and bearing behavior of suction bucket foundations for offshore wind turbines in sand[J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2018, 18(11): 152-167.
- [11] Achmus M, Akdag C T, Thieken K. Load-bearing behavior of suction bucket foundations in sand[J]. Applied Ocean Research, 2013, 43(5):157-165.
- [12] Liu M M, Lian J J, Yang M. Experimental and numerical studies on lateral bearing capacity of bucket foundation in saturated sand[J]. Ocean Engineering, 2017, 144(1):14-20.
- [13] 李大勇,冯凌云,张雨坤,等. 饱和细砂中裙式吸力基础水平单调加载模型试验——承载力及变形分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(11):2030-2037.
- [14] 栾茂田,范庆来,杨庆. 非均质软土地基上吸力式沉箱抗拔承载力数值分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 29(7):1054-1059.

(上接第 29 页)

- [2] 梁小龙,王建业,白泽朝,等. 基于 PS-InSAR 技术的黄土大厚度挖方区回弹变形规律分析[J]. 测绘通报, 2020(3):163-166.
- [3] 乔俊义,郝明月,孔洋. 延安地区压实  $Q_2$ 、 $Q_3$  黄土变形特性分析[J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(4): 143-149.
- [4] 马闫,王家鼎,彭淑君,等. 黄土贴坡高填方变形破坏机制研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3):518-528.
- [5] 郝嘉琪. 高填方黄土填筑体固结变形规律试验研究[D]. 西安:西安科技大学, 2020.
- [6] 郭倩怡,王友林,谢婉丽,等. 黄土湿陷性与土体物性指标的相关性研究[J]. 西北地质, 2021, 54(1):212-221.
- [7] 刘小平,李 宁,王玉涛,等. 汾渭盆地西北缘巨厚黄土湿陷特性现场试验研究[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(1):107-114, 121.
- [8] 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.
- [9] 王玉涛,刘小平,曹晓毅. 基于主成分分析法的  $Q_2$  黄土湿陷特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4):141-148.
- [10] 褚峰,张宏刚,邵生俊. 结构性黄土湿压屈服损伤特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(5):1375-1383.
- [11] 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):59-54.
- [12] 扈胜霞,张栋,杨瑞,等. 非饱和重塑黄土固结特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(4): 55-58.
- [13] 孔洋,阮怀宁,黄雪峰. 延安地区压实马兰黄土高压固结变形特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(5):1731-1736.
- [14] 邢义川,金松丽,赵卫全,等. 基于离心模型试验的黄土湿陷试验新方法研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3):389-398.
- [15] 湿陷性黄土地区建筑标准:GB 50025—2018[S]. 北京:中华建筑工业出版社, 2018.