

## 中更新世黄土的湿陷特性及其湿陷预测模型

付昱凯, 李广林, 李同录, 张子然, 刘 贺

### Collapsible properties of $Q_2$ loess and its collapsible prediction model

FU Yukai, LI Guanglin, LI Tonglu, ZHANG Ziran, and LIU He

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307022>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 深厚黄土地基浸水湿陷变形及竖向土压力作用分析

Analysis of collapsible deformation and vertical soil pressure action of thick loess foundation

屈宏录, 刘德仁, 孙英萍, 闫炳舟, 徐硕昌, 张严 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 157-164

#### 基于主成分分析法的 $Q_2$ 黄土湿陷特性研究

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

王玉涛, 刘小平, 曹晓毅 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 141-148

#### 黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势

Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level

范文, 魏亚妮, 于渤, 邓龙胜, 于宁宇 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 144-156

#### 不同压实度下黄土填方边坡失稳的模型试验研究

A model test study of the instability of loess fill slope under different compactness

陈林万, 裴向军, 张晓超, 张硕, 钟玉健, 罗欣 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 137-147

#### 临夏盆地巴谢河流域晚更新世以来滑坡发育历史重建

Reconstruction of the landslide history since late Pleistocene of the Baxie River Catchment in Linxia Basin

侯圣山, 李昂, 陈亮, 王立朝, 刘艺璇, 朱玉晶, 王惠生 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 26-33

#### 二维条件下颗粒柱体崩塌入水堆积过程

A study of the process of particle column collapsing into water under 2D condition

冯万里, 黄波林, 张全, 王健, 郑嘉豪 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 90-96



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202307022

付昱凯, 李广林, 李同录, 等. 中更新世黄土的湿陷特性及其湿陷预测模型 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(1): 159-166.  
FU Yukai, LI Guanglin, LI Tonglu, et al. Collapsible properties of  $Q_2$  loess and its collapsible prediction model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(1): 159-166.

## 中更新世黄土的湿陷特性及其湿陷预测模型

付昱凯<sup>1,2</sup>, 李广林<sup>1,2</sup>, 李同录<sup>1,2</sup>, 张子然<sup>1,2</sup>, 刘 贺<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 黄土高原水循环与地质环境教育部野外科学观测研究站, 甘肃 正宁 745399)

**摘要:** 间歇性的地表灌溉或工程运营引起的长期地表渗漏, 会导致深层中更新世( $Q_2$ )黄土的增湿变形, 进而影响构建筑物安全。为了预测  $Q_2$  黄土的湿陷变形特性, 对陕西泾阳原状  $Q_2$  黄土进行了多个含水率下的高压固结试验, 得到不同含水率及压力下的湿陷系数, 并基于试验结果, 在  $\delta_s$ -lgp 半对数坐标系中, 利用线性及 Lorentz 型函数构建  $Q_2$  黄土湿陷系数的压力相关模型, 然后基于模型参数与含水率相关性, 建立湿陷系数与压力和含水率的二元函数三维模型。试验结果表明: 随着荷载的增大, 黄土的湿陷系数在  $\delta_s$ -lgp 半对数坐标系中均呈现出线性缓增-骤增-峰值-减小的变化趋势, 且各含水率下缓增-骤增阶段的分界压力不随含水率的变化而改变, 均为饱和状态压缩曲线的结构屈服压力; 各含水率下峰值湿陷系数和对应的压力均随含水率的增大逐渐减小。建立的湿陷系数模型能较好地描述  $Q_2$  黄土高压范围内各含水率下湿陷系数随压力的变化, 可用来预测  $Q_2$  黄土在不同含水率和荷载下的湿陷系数, 对深厚层  $Q_2$  黄土的浸水、增湿湿陷评价具有实际意义。

**关键词:** 中更新世黄土; 湿陷变形; 湿陷系数; 压力; 含水率; 湿陷模型

中图分类号: P642.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)01-0159-08

## Collapsible properties of $Q_2$ loess and its collapsible prediction model

FU Yukai<sup>1,2</sup>, LI Guanglin<sup>1,2</sup>, LI Tonglu<sup>1,2</sup>, ZHANG Ziran<sup>1,2</sup>, LIU He<sup>1,2</sup>

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;  
2. Water Cycle and Geological Environment Observation and Research Station for the Chinese Loess Plateau, Ministry of Education, Zhengning, Gansu 745399, China)

**Abstract:** Long-term surface leakage caused by intermittent surface irrigation or project operation can lead to the humidification and settlement deformation of deep  $Q_2$  loess, compromising the safety of the structures. To predict the collapsible deformation properties of  $Q_2$  loess, a series of high pressure consolidation tests were performed under different water contents on  $Q_2$  loess from Jingyang of Shaanxi Province. The collapsible coefficients under different water contents were measured by using double-line method tests, and the collapsibility of  $Q_2$  loess of different water contents and pressures within high pressure range were investigated. Based on these experimental results, a pressure-dependent collapsibility coefficient model in the  $\delta_s$ -p semi-logarithmic coordinates was

收稿日期: 2023-07-15; 修订日期: 2023-10-05

投稿网址: [www.swdzcgdz.com](http://www.swdzcgdz.com)

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JM-167); 国家自然科学基金项目(42474051)

第一作者: 付昱凯(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土力学与地质灾害研究。E-mail: [fw@chd.edu.cn](mailto:fw@chd.edu.cn)

通讯作者: 李同录(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事黄土工程地质、地质灾害防治研究。E-mail: [dcdgx08@chd.edu.cn](mailto:dcdgx08@chd.edu.cn)

proposed by using linear and Lorentz-type joint functions. Furthermore, a 3D collapsible surface model related to the pressure and water content was proposed based on the correlation analysis between model parameters and water content. The test results indicates that all collapsible coefficients in the  $\delta_s$ - $p$  semi-logarithmic coordinates present the trend of linear slow increase-sudden increase-peak-decrease with the increasing pressure. The boundary pressure between the slow increase stage and sudden increase stage remains unaffected by changes in water content and corresponds to the structural yield pressure of the saturated compression curve. Additionally, the peak collapsible coefficient and its corresponding pressure decreases with the increase of water content. The proposed model can accurately describe the variation of collapsibility coefficient of  $Q_2$  loess with different water contents throughout the high pressure consolidation, which is of practical significance to evaluate the collapsibility of deep and thick  $Q_2$  loess under water immersion and humidification.

**Keywords:**  $Q_2$  loess; collapsible deformation; collapsible coefficient; pressure; water content; collapsible model

黄土遇水产生湿陷变形,会对其上部道路及附属构筑物产生较大危害。在工程荷载较小,对地基影响不深的情况下,一般认为黄土湿陷变形主要发生在  $Q_3$  黄土中,对  $Q_3$  黄土的湿陷及力学特性已有大量的研究,从物理、力学特性及微观结构等方面取得了有意义的成果。刘祖典<sup>[1]</sup>根据大量试验数据,分析陇西、陕西关中及太原地区黄土的湿陷性和其干容重、湿陷起始含水率及颗粒级配不均匀系数之间的关系。李萍等<sup>[2]</sup>和唐辉等<sup>[3]</sup>分别针对陇东和延安地区的  $Q_3$  黄土,系统地研究含水率、孔隙比和干重度等物理指标与湿陷性的关系。骆亚生等<sup>[4]</sup>在西安、兰州和太原地区  $Q_3$  湿陷性试验的基础上,探讨含水率、干密度、压力对黄土湿陷性的影响规律,并从结构性的角度解释不同地区间黄土湿陷特性的差异。张苏民等<sup>[5]</sup>提出用考虑应力路径的增湿变形曲面表示黄土增湿变形发展过程的方法。雷胜友等<sup>[6]</sup>和陈正汉等<sup>[7]</sup>利用 CT 扫描技术对增湿及载荷作用下  $Q_3$  黄土的微观结构演化进行了研究,并建议了一种确定土的结构屈服应力的新方法。范文等<sup>[8]</sup>从黄土的胶结物组成、性质及胶结方式、微结构特征和颗粒间作用力等 3 个方面归纳总结黄土湿陷微观机理,并认为黏土胶结的水化膨胀是引起颗粒间强度降低、发生湿陷的主要原因之一。

在  $Q_3$  黄土湿陷模型预测方面,侯晓坤等<sup>[9]</sup>针对甘肃黑方台  $Q_3$  黄土的自重湿陷性,基于不同含水率的侧限压缩和土水特征曲线的试验结果,建立了考虑基质吸力的非饱和湿陷变形计算模型;朱凤基等<sup>[10]</sup>针对甘肃庆阳  $Q_3$  黄土,基于因子分析理论,建立了湿陷系数与孔隙比、饱和度与液限之比及压缩模量与标准大气压之比的多元回归方程。随着工程建设的发展,黄

土地区公路、铁路及大型构筑物修建过程的深挖高填工程越来越多,建筑物高度、基底压力、基础埋深都在增大,使得  $Q_2$  黄土更多暴露在地表水分入渗及工程建设的荷载的影响范围之内。刘厚健等<sup>[11]</sup>基于  $Q_2$  黄土地区已建成运营的大型工程实例指出,  $Q_2$  黄土确实存在湿陷的危害性。王玉涛等<sup>[12]</sup>针对陕西彬州  $Q_2$  黄土,采用主成分分析法,分析含水率、饱和度、干密度等 7 个指标对  $Q_2$  黄土湿陷性的影响,并建立湿陷系数回归方程。

与  $Q_3$  黄土相比,饱和  $Q_2$  黄土的湿陷变形往往在较大的压力下表现出来。如方祥位等<sup>[13]</sup>等对陕西蒲城  $Q_2$  黄土试验表明,规范给定的试验压力下不湿陷的  $Q_2$  黄土,在高压下可能发生湿陷,工程中对  $Q_2$  黄土的湿陷性评价,宜采用实际压力或更大压力。黄土的湿陷系数及湿陷量的大小与所承受的压力有关。陈宝等<sup>[14]</sup>从结构强度的方面认为湿陷系数与压力不是简单的单调递增函数关系,存在湿陷增强区间和湿陷减弱区间。胡瑞林等<sup>[15]</sup>、刘保健<sup>[16]</sup>研究表明黄土的湿陷系数随压力的变化存在一个峰值。李同录等<sup>[17]</sup>对甘肃正宁黄土做双线法高压湿陷性试验表明,  $Q_2$  黄土湿陷系数峰值对应的压力明显高于  $Q_3$  黄土。

实际工程中,在地表长期的间歇性灌溉<sup>[18]</sup>及工程运营中长期的地表渗漏<sup>[19]</sup>作用下,表层补给的水分中一部分会以非饱和渗透的形式逐步迁移至深层  $Q_2$  黄土中,并在渗透性较差的基岩或厚度较大的古土壤层上积累,引起深层  $Q_2$  黄土增湿,并在较大的应力作用下,产生湿陷变形,影响构筑物安全。目前评价黄土湿陷性最常用的指标是湿陷系数,根据《湿陷性黄土地区建筑标准》(GB 50025—2018)<sup>[20]</sup>,湿陷系数可根据建筑基底压力及上覆饱和黄土自重应力,将土样从天



然含水率浸湿到饱和状态测定,该方法不能反映黄土实际工程加载过程和含水率从天然到饱和状态的过渡,无法描述黄土的非饱和湿陷变形过程。李同录等<sup>[17]</sup>针对 Q<sub>2</sub> 黄土提出湿陷系数试验压力的修正方案,使湿陷系数和湿陷沉降与实际压力下的值较为接近。

由上述文献分析可以看出,目前对于 Q<sub>2</sub> 黄土湿陷特性的研究主要集中在完全浸水的饱和状态下的湿陷及随加载压力变化的趋势上,对于天然状态下的非饱和 Q<sub>2</sub> 黄土,在较大的压力下,由于含水率变化引起的非饱和湿陷变形特性及预测计算模型研究不是很多,工程勘察设计中高压范围非饱和-饱和状态含水率渐变工况下的 Q<sub>2</sub> 黄土湿陷性评价缺乏相关参考。因此,为研究 Q<sub>2</sub> 黄土在非饱和-饱和及低压-高压全过程的湿陷变形特性,采取陕西泾阳 Q<sub>2</sub> 原状黄土试样,做多个含水率下的高压固结试验,获得不同含水率下的 *e*-lg*p* 曲线,并计算绘制湿陷系数曲线。基于试验结果,建立湿陷系数与压力和含水率的二元相关三维湿陷曲面模型。

1 不同含水率的高压固结试验

1.1 试验土样

黄土地层呈现黄土(L)-古土壤(S)交替成层沉积的特征,黄土层和古土壤层的增湿变形明显不同,自重作用下 Q<sub>2</sub> 的黄土层(L)产生弱湿陷变形,古土壤层(S)则不会湿陷甚至膨胀变形。在较大荷载作用下, Q<sub>2</sub> 地层的湿陷变形主要由黄土层(L)产生,其中 Q<sub>2</sub> 中部的第 5 层黄土(L5)是离石黄土上部厚度较大的一层黄土,其土质均匀、钙质结核含量少,具有湿陷黄土的典型特征,因此选取 L5 黄土作为研究对象。

试验所用土样取自陕西省泾阳县舒唐王村黄土塬边的高边坡,边坡黄土地层及取样层位如图 1 所示。边坡出露黄土地层层序连续、完整,易于确定层位和年代。土样取自第 5 层黄土(L5),位于 Q<sub>2</sub> 的中部。取样时,在 L5 黄土顶部的平台上,开挖一 5.0 m 深的探井,井底位于 L5 黄土中部,在井底沿井壁周围切取边长不小于 20.0 cm 的块样,再用高 2.0 cm,直径 6.18 cm 的环刀切取试样,并环刀样用保鲜膜包裹放入装有锯末的塑料样盒运回实验室。试样的基本物理指标如表 1 所示,其粒径累计分布曲线如图 2 所示。

1.2 试验方案

为了研究含水率和竖向压力对黄土湿陷变形特性的影响,控制 9%、12%、15%、18%、21%、25% 及 30%

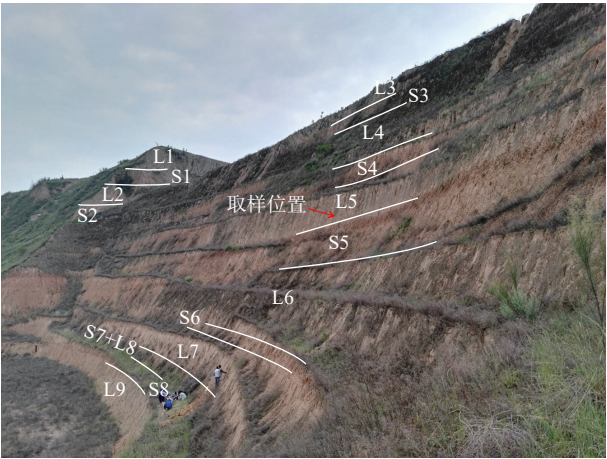


图 1 取样黄土剖面 and 取样层位  
Fig. 1 Loess profile and sampling layer

表 1 泾阳 Q<sub>2</sub> 黄土基本物理指标

Table 1 Basic physical parameters of Q <sub>2</sub> loess in Jingyang						
土样	孔隙比	干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	颗粒比重	天然含水率/%	液限/%	塑限/%
黄土	0.727	1.57	2.71	17.3	28.8	18.5

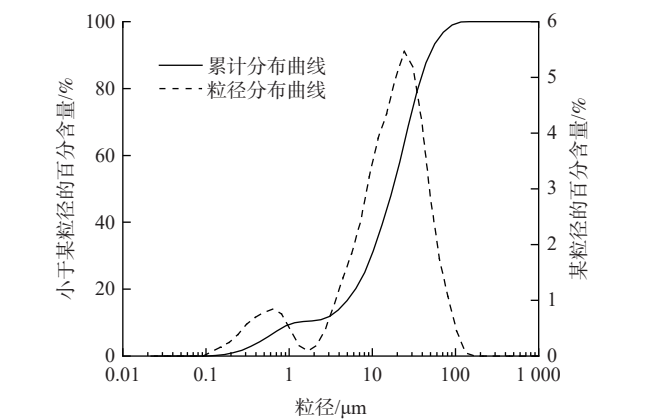


图 2 土样的粒径分布曲线  
Fig. 2 Particle size distribution of the sample

(饱和)7 种含水率,其中大于天然含水率的试样采用均匀增湿到目标含水率,小于天然含水率的试样采用微热风干到目标含水率,所有试样在到达目标含水率后,养护 48 h 使其内部含水率达到均匀状态。每个含水率的试样压力分 15 级,自 12.5 kPa 逐级增加到 4 000 kPa。

2 试验结果与分析

2.1 不同含水率黄土的压缩特性

不同含水率高压固结试验结果如图 3 所示,在同一级压力下, Q<sub>2</sub> 黄土在饱和状态下压缩量最大,压缩性随着含水率的增大而增大,在 9% 含水率的较干状态下,表现出较大的刚度,加载等级到达 4 000 kPa 时,

其压缩量仅为饱和状态下的压缩量的 1/5。各含水率的压缩曲线均可分为初始压缩和结构屈服后压缩两个阶段。根据图 3 中  $e-\lg p$  曲线上拐点所对应的压力得到各含水率下  $Q_2$  黄土的结构屈服压力  $p_k$ , 根据邵生俊等<sup>[21]</sup>的方法确定的具体数值如图 4 及表 2 所示, 可以看出结构屈服压力随着含水率的增大而减小。

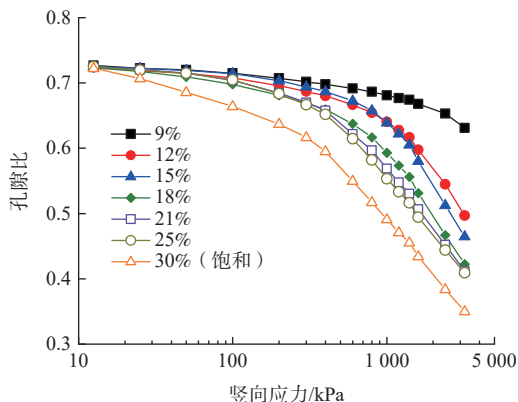


图 3 不同含水率试样的一维固结压缩曲线

Fig. 3 Oedometer test curves with different water contents of the samples

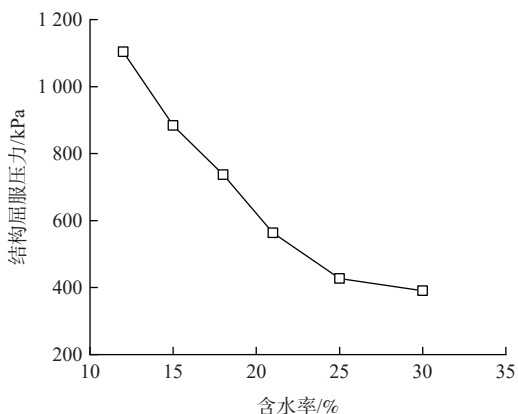


图 4 结构屈服压力随含水率变化曲线

Fig. 4 Structural yield pressure with respect to water content

表 2 不同含水率下的结构屈服压力

Table 2 Structural yield pressure of different water content

含水率/%	12	15	18	21	25	30(饱和)
结构屈服压力/kPa	1 104.0	883.6	737.3	563.1	426.7	390.9

## 2.2 不同含水率黄土的湿陷性

根据双线法试验结果, 按照式(1)计算得到各含水率下的湿陷系数。

$$\delta_{p,w} = \frac{h_{p,w} - h_{p,s}}{h_0} \quad (1)$$

式中:  $\delta_{p,w}$ ——含水率为  $w$  的黄土样在压力等级  $p$  作用

下的湿陷系数;

$h_{p,w}$ ——含水率为  $w$  的黄土样在压力等级  $p$  作用下变形稳定后的试样高度/mm;

$h_{p,s}$ ——饱和的黄土样(30% 含水率)在压力等级  $p$  作用下变形稳定后的试样高度/mm;

$h_0$ ——试样初始高度, 取值为 20 mm。

将试样在各含水率下的湿陷系数( $\delta_s$ )随压力的变化过程整理到在  $\delta_s-\lg p$  坐标系中如图 5 所示。可以看出, 各级荷载下的湿陷系数随含水率的减小而增大。含水率一定, 湿陷系数随着荷载的增大先增大, 到达峰值后再减小的趋势(其中 9% 含水率的试样未达到下降段荷载等级), 各湿陷系数曲线可分为线性缓增-骤增-下降等 3 个阶段, 并且各含水率下缓增-骤增阶段的分界点压力( $p_s$ )基本一样, 如图 5 中虚线所示, 即等于饱和状态下(30% 含水率)的结构屈服压力。这是由于双线法计算各含水率下的湿陷系数是以饱和状态的压缩变形为基准的, 各含水率下的湿陷系数曲线形态很大程度上决定于饱和状态的压缩曲线特征, 结构屈服压力前后, 饱和状态的压缩曲线斜率急剧增大(图 5), 因此各含水率的湿陷系数曲线均在饱和和结构屈服压力处出现骤增拐点。还可以看出, 各含水率下湿陷系数曲线的骤增段与下降段大致对称, 导致同一个湿陷系数会对应两个大小不同的压力  $p$ , 与关文章<sup>[22]</sup>提出的“共轭湿陷性”现象一致。

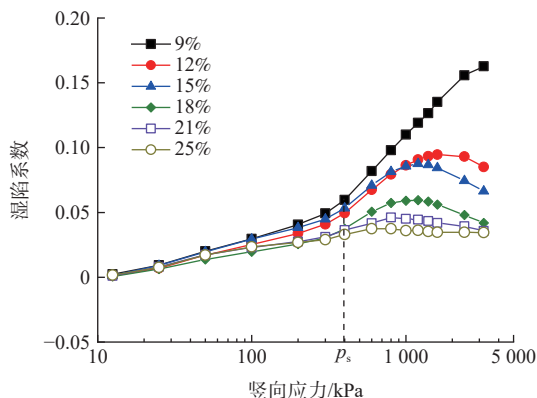


图 5 不同含水率黄土湿陷系数随压力变化曲线

Fig. 5 Collapsible coefficients of different water content with varied pressure

## 3 非饱和黄土湿陷系数的预测模型

### 3.1 压力与湿陷系数的关系

为了将各含水率下的湿陷系数随压力变化趋势用统一的函数式表达, 可将饱和和状态的结构屈服压力作为界限压力, 将湿陷系数曲线分成缓增段和共轭湿

陷段两部分。通过对各含水率下湿陷系数  $\delta_{p,w}-\lg p$  曲线的形态观察可知, 在缓增段, 湿陷系数在半对数坐标内近似为直线, 在共轭湿陷段, 湿陷系数可近似用 Lorentz 型函数描述。由此, 构建了式(2)湿陷系数与压力关系模型, 模型简图如图 6 所示。

$$\delta_{p,w} = \begin{cases} \frac{\delta_{ps}}{\ln\left(\frac{p_s}{p_0}\right)} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right), & p < p_s \\ \frac{\delta_{\max}}{a \ln^2\left(\frac{p}{p_f}\right) + 1}, & p \geq p_s \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $p_s$ ——缓增段和共轭段的分界压力/kPa;  
 $\delta_{ps}$ ——饱和状态下与  $p_s$  对应的湿陷系数;  
 $p_0$ ——固结试验第一级加载压力/kPa;  
 $\delta_{\max}$ ——峰值湿陷系数;  
 $p_f$ ——峰值湿陷系数对应的竖向压力/kPa;  
 $a$ ——模型形状参数。

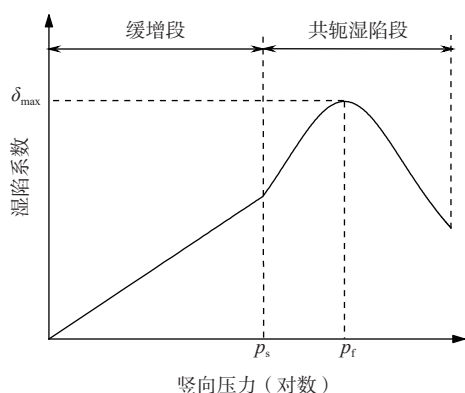


图 6 压力相关湿陷系数模型

Fig. 6 Pressure-dependent collapsible coefficient model

其中,  $p_s$  与含水率无关, 其取值为饱和状态的结构屈服压力, 由表 2 可知  $p_s=390.9$  kPa;  $p_0$  取 12.5 kPa; 模型形状参数  $a$  影响共轭段湿陷系数随压力的变化速率, 湿陷系数随压力的变化速率随  $a$  的增大而增大。

各含水率下湿陷系数的模型计算结果如图 7 所示, 模型参数见表 3。可以看出式(2)能较好地描述各含水率下的黄土湿陷系数与竖向压力的相关性, 但模型参数  $\delta_{\max}$ 、 $p_f$  和  $a$  的取值受含水率影响。需要指出的是: 式(2)中第 1 式的  $\delta_{ps}$  是由各含水率曲线共轭段起点压力  $p_s$  下湿陷系数确定的, 可先拟合出共轭段曲线方程, 再由  $p_s$  及共轭段曲线方程式计算确定  $\delta_{ps}$ , 进而确定式(2)中第 1 式, 因此模型参数不含  $\delta_{ps}$ 。

### 3.2 模型参数与含水率的相关性

由上述分析可知, 各含水率( $w$ )下压力相关湿陷

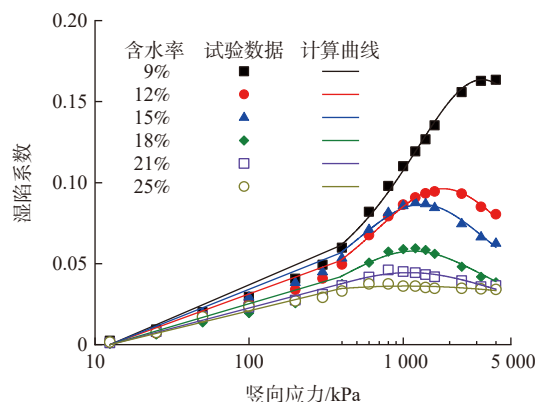


图 7 不同含水率黄土湿陷系数及模型计算曲线

Fig. 7 Fitting curves of collapsible coefficients with respect to pressure for the samples with different water content

表 3 不同含水率下模型拟合参数

Table 3 Model parameters with different water content

含水率/%	拟合参数			
	$a$	$\delta_{\max}$	$p_f/\text{kPa}$	$R^2$
9	0.373 7	0.163 5	3 259.9	0.994
12	0.360 3	0.096 2	1 817.2	0.988
15	0.358 5	0.086 6	1 321.1	0.985
18	0.316 5	0.057 7	1 166.1	0.961
21	0.173 9	0.044 5	1 094.3	0.985
25	0.047 9	0.036 2	1 050.2	0.978

系数模型式(2)参数中湿陷系数曲线缓增段和共轭段的分界压力( $p_s$ )与含水率无关, 但模型形状参数( $a$ )、峰值湿陷系数( $\delta_{\max}$ )和对应的竖向压力( $p_f$ )均随含水率减小而增大, 如表 3 所示。为了描述湿陷系数从非饱和状态到饱和状态各含水率变化的完整过程, 需要建立模型参数  $a$ 、 $\delta_{\max}$  和  $p_f$  与含水率间的关系式。由式(1)可知, 饱和状态作为湿陷系数计算的参考状态, 不存在湿陷变形, 各压力下湿陷系数取值为 0, 因此取  $a=0$ ,  $\delta_{\max}=0$ ,  $p_f=p_s=390.9$  kPa 作为模型参数在饱和状态的参考限值, 分别采用如下函数描述模型参数随含水率的变化规律。

$$a = a_1 \exp\left[-\left(\frac{w}{a_2}\right)^{a_3}\right] \quad (3)$$

$$\delta_{\max} = b_1 \left( \ln \frac{w_s - b_3}{w - b_3} \right)^{b_2} \quad (4)$$

$$p_f = p_s + c_1 \left( \frac{w_s - w}{w - c_3} \right)^{c_2} \quad (5)$$

式中:  $w$ ——湿陷状态当前含水率/%;

$w_s$ ——饱和状态的含水率/%;

$a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ ——与参数  $a$  相关的拟合参数;



$b_1, b_2, b_3$ ——与  $\delta_{\max}$  有关的拟合参数;

$c_1, c_2, c_3$ ——与  $p_f$  有关的拟合参数。

其中,  $w_s$  根据表 2 取为 30%,  $p_s$  可由一维固结试验曲线直接得到, 这里取为 390.9 kPa。

模型参数与含水率的拟合结果如图 8, 可以看出式(3)~(5)能较好地描述含水率与模型各参数的关系, 计算结果可体现含水率从非饱和到饱和状态的连续过渡。

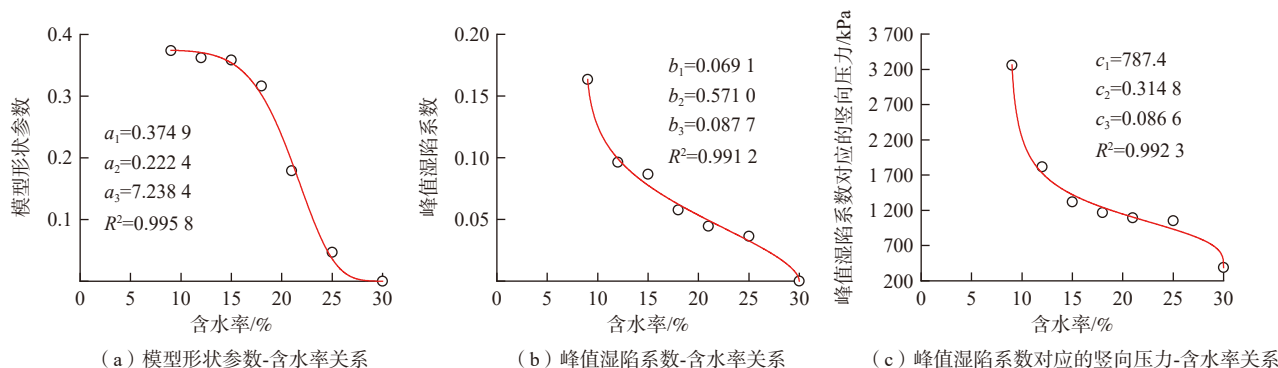


图 8 模型参数与含水率关系曲线

Fig. 8 Model parameters with respect to water content

### 3.3 湿陷系数随压力及含水率的三维模型

为了完整地描述黄土的湿陷系数的随压力及含水率的变化, 将式(3)~(5)代入式(2), 得到湿陷系数的预测公式(6)。

$$\delta_{p,w} = \begin{cases} \frac{\delta_{ps}}{\ln\left(\frac{p_s}{p_0}\right)} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) & , p < p_s \\ \frac{b_1 \exp\left(\frac{w}{a_2}\right)^{a_3} \left(\ln \frac{w_s - b_3}{w - b_3}\right)^{b_2}}{a_1 \ln^2 \left[ \frac{p}{p_s + c_1 \left( \frac{w_s - w}{w - c_3} \right)^{c_2}} \right] + 1} & , p \geq p_s \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $w$ ——含水率/%。

图 9 为式(6)计算得到的  $Q_2$  黄土的湿陷系数-竖向压力-含水率的空间曲面, 模型参数见 3.2 节, 图中的点为试验数据。可以看出, 试验值基本位于模型曲面上。该三维曲面可以很好地描述黄土的湿陷变形的特点, 可以较准确地预测不同含水率和不同压力下  $Q_2$  黄土的湿陷系数。

## 4 结论

对  $Q_2$  黄土进行了不同含水率下的高压固结试验, 基于试验数据分析了  $Q_2$  黄土的湿陷特性, 构建了湿陷系数的预测模型, 主要结论如下。

(1) 在  $\delta_s$ -lgp 坐标系中, 各含水率下的黄土试样的湿陷系数随着荷载的增加, 均呈现出线性缓增-骤增-

下降的趋势, 缓增段与骤增段的分界压力均为饱和状态下的结构屈服压力。

(2) 在  $\delta_s$ -lgp 坐标系中, 各含水率下湿陷系数与压力曲线的缓增段和共轭湿陷段可分别用线性函数和 Lorentz 型函数进行描述, 据此构建了压力相关湿陷系数模型。

(3) 基于湿陷系数模型参数与含水率的关系函数, 构建湿陷系数与压力和含水率的二元函数三维模型, 能较好地描述  $Q_2$  黄土各含水率下湿陷系数随压力的变化, 可用来预测计算  $Q_2$  黄土在不同含水率和荷载下的湿陷系数。

文中的模型及参数是基于泾阳  $Q_2$  黄土湿陷试验得到的, 后期还需进行其他地区黄土的湿陷性试验,

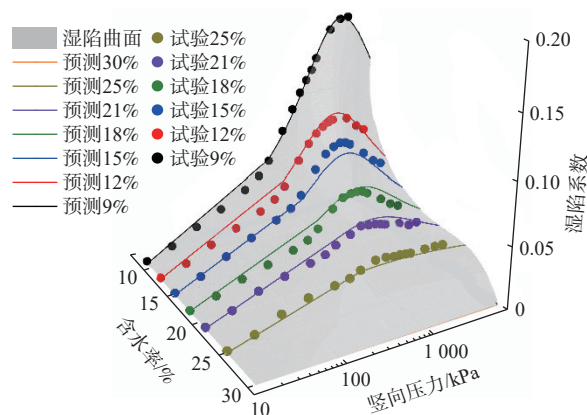


图 9  $Q_2$  黄土湿陷系数与压力及含水率的关系

Fig. 9 Collapsible coefficient with respect to pressure and water content of the  $Q_2$  loess

以便对模型进行验证并推广应用。

### 参考文献 (References):

- [1] 刘祖典. 影响黄土湿陷系数因素的分析 [J]. 工程勘察, 1994, 22(5): 6 - 11. [LIU Zudian. Analysis of factors affecting collapsibility coefficient of loess[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1994, 22(5): 6 - 11. (in Chinese)]
- [2] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 唐辉, 张瑞松, 高建中. 延安新区黄土湿陷性与其物性指标的相关性分析 [J]. 地基处理, 2023, 5(1): 19 - 24. [TANG Hui, ZHANG Ruisong, GAO Jianzhong. Correlation analysis between collapsibility and physical properties of loess in Yan'an New District[J]. Journal of Ground Improvement, 2023, 5(1): 19 - 24. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 骆亚生, 谢定义, 邢义川. 原状黄土的地区湿陷特性及其潜在湿陷率 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 90 - 95. [LUO Yasheng, XIE Dingyi, XING Yichuan. Regional collapse characteristics of intact loess and its rate of potential collapse[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2002, 30(5): 90 - 95. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张苏民, 郑建国. 湿陷性黄土( $Q_3$ )的增湿变形特征 [J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 21 - 31. [ZHANG Sumin, ZHENG Jianguo. The deformation characteristics of collapsible loess during moistening process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 21 - 31. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 雷胜友, 唐文栋. 黄土在受力和湿陷过程中微结构变化的 CT 扫描分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4166 - 4169. [LEI Shengyou, TANG Wendong. Analysis of microstructure change for loess in the process of loading and collapse with CT scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4166 - 4169. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 陈正汉, 方祥位, 朱元青, 等. 膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 1 - 11. [CHEN Zhenghan, FANG Xiangwei, ZHU Yuanqing, et al. Research on meso-structures and their evolution laws of expansive soil and loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 1 - 11. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 范文, 魏亚妮, 于渤, 等. 黄土湿陷微观机理研究现状及发展趋势 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 144 - 156. [FAN Wen, WEI Yani, YU Bo, et al. Research progress and prospect of loess collapsible mechanism in micro-level[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 144 - 156. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 侯晓坤, 翟张辉, 晁建红, 等. 黄土非饱和湿陷变形的计算模型 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 94 - 100. [HOU Xiaokun, ZHAI Zhanghui, CHAO Jianhong, et al. A model for predicting the unsaturated collapse deformation of loess[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 94 - 100. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘厚健, 周天红. 从多个工程实践看  $Q_2$  黄土的湿陷性 [C]//中国工程建设标准化协会湿陷性黄土委员会全国黄土学术会议论文集, 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 66 - 72. [LIU Houjian, ZHOU Tianhong. The collapsibility of  $Q_2$  loess can be seen from a number of engineering practices [C]//Proceedings of the national loess academic conference of the collapsible loess committee of the china engineering construction standardization association, Beijing: China Architecture & Building Press, 2001: 66 - 72. (in Chinese)]
- [12] 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. [WANG Yutao, LIU Xiaoping, CAO Xiaoyi. A study of the collapsibility of  $Q_2$  loess based on principal component analysis[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 141 - 148. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 方祥位, 申春妮, 汪龙, 等.  $Q_2$  黄土浸水前后微观结构变化研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1319 - 1324. [FANG Xiangwei, SHEN Chunni, WANG Long, et al. Research on microstructure of  $Q_2$  loess before and after



- wetting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(5): 1319 – 1324. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 陈宝, 喻达, 胡鑫, 等. 三门峡黄土湿陷特性及其与结构强度的关系 [J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(11): 149 – 153. [ CHEN Bao, YU Da, HU Xin, et al. Collapsibility of Sanmenxia loess and its relation with structural strength[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(11): 149 – 153. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 胡瑞林, 官国琳, 李向全, 等. 黄土湿陷性的微结构效应 [J]. *工程地质学报*, 1999, 7(2): 161. [ HU Ruilin, GUAN Guolin, LI Xiangquan, et al. Microstructure effect of loess collapsibility[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1999, 7(2): 161. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] 刘保健, 支喜兰, 谢永利, 等. 公路工程中黄土湿陷性问题分析 [J]. *中国公路学报*, 2005, 18(4): 27 – 31. [ LIU Baojian, ZHI Xilan, XIE Yongli, et al. Analysis of problems on loess hydrocompaction in highway engineering[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2005, 18(4): 27 – 31. (in Chinese with English abstract) ]
- [17] 李同录, 冯文清, 刘志伟, 等.  $Q_2$  黄土湿陷系数试验压力取值的讨论 [J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(6): 59 – 68. [ LI Tonglu, FENG Wenqing, LIU Zhiwei, et al. A discussion of the test pressure of collapsible coefficient for  $Q_2$  loess[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(6): 59 – 68. (in Chinese with English abstract) ]
- [18] HOU Xiaokun, VANAPALLI S K, LI Tonglu. Wetting-induced collapse behavior associated with infiltration: A case study[J]. *Engineering Geology*, 2019, 258: 105146.
- [19] 李同录, 习羽, 侯晓坤. 水致黄土深层滑坡灾变机理 [J]. *工程地质学报*, 2018, 26(5): 1113 – 1120. [ LI Tonglu, XI Yu, HOU Xiaokun. Mechanism of surface water infiltration induced deep loess landslide[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(5): 1113 – 1120. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 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 for Market Regulation. Standard for building construction in collapsible loess regions: GB 50025—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese) ]
- [21] 邵生俊, 王丽琴, 邵帅, 等. 黄土的结构屈服及湿陷变形的分析 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(8): 1357 – 1365. [ SHAO Shengjun, WANG Liqin, SHAO Shuai, et al. Structural yield and collapse deformation of loess[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(8): 1357 – 1365. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 关文章. 析黄土湿陷性曲线评其工程意义 [J]. *勘察科学技术*, 1997(2): 20 – 24. [ GUAN Wenzhang. Analyzing the curves of collapsing loess and assessing its engineering significance[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 1997(2): 20 – 24. (in Chinese with English abstract) ]

编辑: 王支农