米文静,张爱军,梁志超.不同增湿程度下伊犁黄土湿陷变形规律研究[J].地震工程学报,2026,48(5):1083-1094.DOI:10.20000/j.1000-0844.20241206001
MI Wenjing,ZHANG Aijun,LIANG Zhichao.Collapsible deformation of the Ili loess under varying degrees of Humidification[J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(5):1083-1094.DOI:10.20000/j.1000-0844.20241206001

不同增湿程度下伊犁黄土湿陷变形规律研究

米文静[1],张爱军[2,3],梁志超[1,2]
(1.商洛学院 城乡规划与建筑工程学院,陕西 商洛 726000;
2.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;
3.西京学院 土木工程学院,陕西 西安 710000)

摘要:湿陷变形是黄土地区建筑物失稳破坏的主要诱因。开展不同增湿条件下黄土湿陷变形特性研究,对工程实践具有重要指导意义。以新疆伊犁地区黄土为研究载体,通过室内压缩试验,探究含水率、干密度、埋深等因素对土体湿陷变形特性的影响规律;依托增湿湿陷试验,分析不同增湿水平下黄土的增湿变形演化特征,揭示增湿过程中增湿湿陷量与饱和湿陷量的占比关系。结果表明:(1)伊犁黄土湿陷系数与干密度呈线性负相关,与含水率则表现为非线性变化特征。(2)基于增湿水平建立的黄土增湿变形系数计算公式,可较好拟合湿陷系数变化曲线,能够客观反映湿陷系数随上覆压力增大而递减的变化规律。(3)增湿水平与增湿湿陷量占饱和湿陷量比值的关系近似服从幂函数分布,可较好表征土体增湿变形随含水率变化的演化规律。

关键词:伊犁黄土;增湿水平;增湿变形;湿陷变形
中图分类号:TU411 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1083-12
DOI:10.20000/j.1000-0844.20241206001

Collapsible deformation of the Ili loess under varying degrees of Humidification

MI Wenjing[1], ZHANG Aijun[2,3], LIANG Zhichao[1,2]
(*1.School of Urban and Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo 726000, Shaanxi, China;*
2.College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;
3.School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an 710000, Shaanxi, China)

Abstract: Collapsibility is a major cause of structural damage in loess regions. Investigating the collapsible deformation of loess under varying degrees of humidification can offer more effective guidance for engineering practice. In this study, Ili loess from Xinjiang was selected as the research subject, and indoor compression tests along with other methods were used to analyze the effects of water content, dry density, and depth on the collapsible deformation characteristics of Ili loess. Humidification col-

收稿日期:2024-12-06
基金项目:2021年商洛学院校级博士基金(21SKY123);国家自然科学基金资助项目(51978572)
第一作者简介:米文静(1985-),女,博士,副教授,主要从事特殊土研究。E-mail:miwenjing@nwsuaf.edu.cn。
通信作者:张爱军(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事特殊土研究。E-mail:zaj@nwsuaf.edu.cn。

lapse tests were also conducted to examine the humidification deformation behavior of loess at different humidification levels, as well as the relationship between the humidification collapse amount and saturated collapse during the humidification process. The results indicate the following: (1) The collapsibility coefficient of Ili loess is linearly and inversely proportional to dry density and varies nonlinearly with water content. (2) An expression for the humidification deformation coefficient calculated from the humidification level fits the collapsibility coefficient curve well, and the curve reflects the actual decrease in the collapsibility coefficient with increasing overburden pressure. (3) The relationship curve between the humidification level and the ratio of humidification collapse to saturated collapse approximately follows a power function, which effectively captures the variation of humidification deformation of the soil with water content. These findings provide a reference for loess engineering construction and research in Ili and other regions.

Keywords: Ili loess; humidification level; humidification deformation; collapsible deformation

0 引言

我国黄土分布范围广阔,约占全球黄土总面积的4.9%,主要集中于西北及黄河中游地带。其中,新疆黄土分布面积占全国黄土总面积的13.19%[1]。黄土是兼具水敏性与湿陷性的特殊性土体。其水敏性特征表现为:在天然低含水率状态下,土体强度高、压缩性小;随增湿程度不断提高,土体强度显著衰减,变形大幅增大。黄土湿陷变形还具有突变性、非连续性与不可逆性,呈现发展速率快、变形量大、沉降不均匀的显著特点。在黄土地区实际工程中,地基沿深度方向增湿程度差异引发的不均匀湿陷变形,是造成建(构)筑物损坏的主要诱因[2]。因此,探究不同埋深条件下增湿程度对黄土湿陷变形特性的影响,揭示黄土逐级增湿过程中湿陷变形的演化规律,对完善黄土力学基础理论、指导区域工程建设均具有重要理论价值与工程实际意义。

增湿诱发黄土湿陷是内外因素共同作用的结果。外因主要为水分入渗与外部压力作用,内因则源于黄土自身的物质组分与微观结构特征。目前,已有诸多学者围绕饱和度、上覆压力、含水率、易溶盐含量及土体结构性等因素对黄土增湿变形的影响规律开展了系统探究。刘保健等[3]、张茂花等[4-5]针对湿陷性黄土增湿与减湿全过程的湿陷变形特性展开研究,归纳得出黄土湿陷变形随饱和度及竖向压力的演化规律;李旭东等[6]分析了不同压实度和含水率条件下增湿变形系数随荷载的变化特征,指出压实度与含水率是控制黄土增湿变形特性的主导因素。国外学者Lawton等[7]、Basma等[8]、Muñoz-Castelblanco等[9]依托侧限压缩试验,探究了初始含水率、应力水平、初始干密度等因子对湿陷性黄土湿陷变形的作用机制;刘金禹等[10]揭示了黄土湿陷变形随孔隙气压力与孔隙水压力的变化规律;邵生俊等[11]、周茗如等[12]重点分析了黄土增湿变形过程中结构性的演化特征;梁志超等[13]利用非饱和固结仪试验,阐明了基质吸力对黄土压缩及湿陷特性的影响机制。然而,含水率与饱和度仅为表征土体湿度的状态指标:含水率只能反映土体瞬时含水状态,无法刻画动态增湿过程,也不能兼顾土体变形效应;饱和度同样属于状态参量,难以描述逐级增湿的演变过程。二者均无法全面表征土体实际增湿程度及其对应的变形响应。在现行黄土规范中,湿陷变形定义为土体增湿至完全饱和条件下的变形特征,但工程实际中地基增湿既存在饱和浸湿工况,也普遍存在非饱和部分浸湿工况。仅采用饱和湿陷指标进行工程评价,难以真实反映地基土体的实际增湿变形性状,易造成设计偏保守、工程量增加及经济浪费。因此,引入能够综合表征黄土增湿程度与变形响应的过程变量,系统开展黄土增湿变形规律研究,可直观描述在土体增湿过程中,增湿程度与变形发展的对应关系,研究成果更贴合工程实际,具备更好的理论应用与工程指导价值。

新疆伊犁黄土属于典型风积黄土,土层沿深度分布整体均匀,具有天然密度小、孔隙比大、天然含水率低、易溶盐含量高、湿陷性强烈等显著工程特性[14-19]。伊犁黄土天然含水率偏低,可在增湿湿陷试验中拓宽含水率取值区间,能够完整反映土体由低含水到高含水逐级增湿全过程的湿陷变形演化规律;同时该区域黄土湿陷性强烈,增湿变形量大、

不同增湿状态下变形差异明显；加之土体质地均匀，试验成果稳定性与可重复性较好，具备开展增湿变形特性研究的良好天然条件。现有黄土增湿变形相关研究多集中于陕西、甘肃、山西及中原等地，针对新疆伊犁黄土的系统性研究相对匮乏，亦缺乏适配本地工程的专项设计规范与技术指导依据[20-27]。因此，开展伊犁黄土增湿变形规律研究具有重要理论价值与工程现实意义。

本文以新疆伊犁地区原状黄土为研究对象，开展侧限条件下常规湿陷试验与分级增湿湿陷试验，探究含水率、干密度、埋深等因素对黄土饱和湿陷变形的影响规律，分析不同增湿水平下土体的增湿变形特征，明确增湿过程中增湿湿陷量与饱和湿陷量的占比变化关系。研究成果可为新疆地区黄土力学特性研究及工程建设规范完善提供参考与技术支撑。

1　试验基本情况

1.1　试验土样

试验土样采自新疆伊犁昭苏县特克斯河Ⅳ级阶地。按照《原状土取样技术标准(JGJ 89—1992)》[28]中规定的Ⅰ级原状土样要求进行，人工开挖探井截面尺寸0.9 m(长)×0.9 m(宽)，实际开挖最大深度34 m，取土深度为地面以下1.5～30 m。原状试样削为20 cm(长)×20 cm(宽)×20 cm(高)的块状，每米取3块试样，并将取出的试样进行密封和蜡封之后运回试验室，现场取样如图1(a)所示。

室内试验按照《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》[29]进行。由室内试验和现场观测可知：沿探井深度黄土层厚度较大，无其他夹层，土质从上到下质地均匀，呈棕黄色，含水率低、密度小，有大孔隙，试验土样如图1(b)所示。所取黄土土样的砂粒、粉粒、黏粒和胶粒含量分别分布在0.5%～13.8%、63.7%～84.5%、19.2%～34.5% 和 7.0%～13.5% 之间，属低液限黏土(Low Plasticity Clay，简称CL)。液限和塑限均值分别为29.4% 和18.6%。将30 m深度范围内的土样按含水率与干密度变化特征划分为6个土层，分别统计各层平均干密度与平均含水率。经对比发现，2.5～3.0 m、8.5～9.0 m、11.5～12.0 m、14.5～15.0 m、19.5～20.0 m、29.5～30.0 m处土样的干密度、含水率与对应土层均值基本接近。因此，选取以上6个不同深度的原状黄土作为典型代表层开展试验研究，各代表层原状土样的基本物理性质指标列于表1。



(a)　(b)

图1　试验土样现场取样图

Fig. 1　Field sampling of test soil

表1　试验土样的基本物理性质指标

Table 1　Basic physical properties of test soil

土样编号	取样深度 h/m	初始含水率 w/%	干密度 ρ_d/(g/cm³)	相对质量密度 G_s	孔隙比 e	饱和度 S_r/%	土的分类
1-3	2.5～3.0	7.0	1.24	2.73	1.194	16.0	CL
1-9	8.5～9.0	8.6	1.23	2.72	1.211	19.3	CL
1-12	11.5～12.0	9.4	1.28	2.72	1.125	22.7	CL
1-15	14.5～15.0	6.4	1.43	2.72	0.902	19.3	CL
1-20	19.5～20.0	6.7	1.38	2.72	0.971	18.8	CL
1-30	29.5～30.0	9.8	1.38	2.72	0.971	27.5	CL

1.2　试样的制备

本次试验均采用原状黄土试样。试验前，使用切土刀将块状原状土修整为略大于环刀尺寸的土柱，将环刀垂直下压，随压随削，待土样完全贯穿环刀后，削除两端多余土体并整平，最终制备得到尺寸为直径79.8 mm、高度20 mm的标准环刀试样。在原状土增湿试验中，实现无变形条件下的精准增湿，是保障试验数据真实可靠的核心与技术难点。本文基于原状黄土在上覆压力低于湿陷起始压力时不产生增湿变形的力学特性，采用水膜转移法进行试样增湿处理。将制备好的环刀试样放置于精度0.01 g的电子天平上，通过滴管以少量多次的方式向试样表面均匀滴加预设水量，随后将试样置于干燥缸内密封静置24 h，使水分在土体内部充分扩

散、分布均匀，完成分级增湿。该方法对土体原生结构扰动极小，可最大程度保留黄土原状结构性，且增湿过程中土体无附加变形，试验可靠性高。

本次试验增湿加水量以 7 g 为初始用量，加水量梯度设置为 7 g。以 2.5～3.0 m 深度土样为例，其干密度为 1.24 g/cm³，每递增 7 g 加水量，试样含水率对应提升 5.6%。试样增湿所需加水量均依据式(1)计算：

$$m_w = \frac{m_n}{1 + 0.01w_n} \times 0.01\left(w_j - w_n\right) \tag{1}$$

式中：m_w为制备试样增加的水量(g)；m_n为试验前环刀内土样的质量(g)；w_n为试样的初始含水率(%)；w_j为试样要求的增湿含水率(%)。

为减少误差，同一组试验的密度差值控制在 0.02 g/cm³范围内。试验仪器为三联固结仪。具体试样准备和试验过程如图 2 所示。

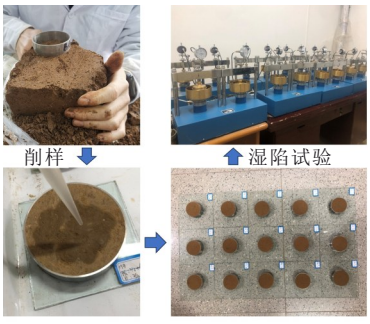


图 2 试样制备及试验过程

Fig. 2 Specimen preparation and test procedure

1.3 试验方案

对不同深度原状土样开展密度与含水率基础物理试验。

单线法试验原理与天然地基受力、湿陷演化过程更为贴合，因此本文采用单线法开展不同深度土层的饱和湿陷变形试验，试验加荷等级依次设置为 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa、400 kPa。

相较于单线法，双线法操作简便，故增湿变形试验采用双线法开展。该方法需选取同一深度的两组相同原状试样进行对照试验：一组试样在天然含水率条件下分级加载；另一组试样施加第一级压力后浸水饱和，再继续分级加载，最终对比计算各级压力对应的湿陷量。

本次共设置 5 组增湿湿陷试验，试验土样取自 2.5～3.0 m、8.5～9.0 m、11.5～12.0 m、14.5～15.0 m、19.5～20.0 m、29.5～30.0 m 等 6 个典型土层，试验增湿加水量梯度为 7 g，加荷等级设定为 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa。

1.4 增湿水平的描述

本文引用金松丽[30]提出的增湿水平概念，增湿水平的表达式为：

$$S_w = \frac{w_i - w_0}{w_s - w_0} \tag{2}$$

式中：S_w为试样的增湿水平；w_0为试样天然状态下的含水率(%)；w_s为试样饱和时的含水率(%)；w_i为增湿至第 i 级时的含水率(%)。

现行黄土规范以饱和湿陷变形作为湿陷评价指标，仅考虑土体增湿至完全饱和的变形工况，但实际工程中地基土体浸湿状态复杂，既存在饱和浸湿，也普遍存在非饱和局部浸湿情况。同时，传统含水率仅能表征土体瞬时含水状态，无法刻画动态增湿过程，难以全面反映不同增湿程度下黄土的变形响应。为此，本文引入增湿水平作为评价变量，该指标可综合表征黄土增湿程度与对应变形特征，直观反映土体逐级增湿的动态过程，工程适用性更强。增湿水平定义为土体实际含水率变化量与最大含水率变化量的比值，取值范围为 0～1，分别对应土体天然初始状态与完全饱和状态。

在压力 p 的作用下，增湿变形系数表达式可表示为：

$$\delta_m^p = \frac{h_{w_0}^p - h_{w_i}^p}{h_{w_0}^p} \tag{3}$$

式中：δ_m^p为增湿变形系数；$h_{w_0}^p$为天然含水率试样在压力 p 作用下变形稳定后的高度(mm)；$h_{w_i}^p$为增湿至第 i 级含水率的试样在压力 p 作用下变形稳定后的高度(mm)。

侧限条件时饱和含水率的计算式为：

$$w_s = \left(\frac{\rho_w}{\rho_{dp}} - \frac{1}{G_s}\right) - \frac{\delta_m^p \cdot \rho_w}{\rho_{dp}} \tag{4}$$

式中：w_s为侧限条件时的饱和含水率；G_s为试样的比重；ρ_{dp}为试样在压力 p 作用下变形稳定后的干密度(g/cm³)；ρ_w为水的密度(g/cm³)。

将式(4)代入式(2)即可得出增湿至第 i 级时，试样的增湿水平表达式：

$$S_w = \frac{w_i - w_0}{\dfrac{\rho_w}{\rho_{dp}} - \dfrac{1}{G_s} - \dfrac{\delta_m^p \cdot \rho_w}{\rho_{dp}} - w_0} \tag{5}$$

2　试验结果分析

2.1　饱和湿陷变形变化规律分析

黄土的成因条件、堆积历史、物理力学性质及竖向分布特征存在差异，使其湿陷变形具有显著的空间非均匀性。饱和湿陷变形是黄土在压应力作用下充分浸水后，土体结构快速失稳破坏而产生的突发性、大幅度附加沉降变形。其中，含水率与干密度是影响并灵敏反映黄土湿陷特性的核心物理指标。伊犁黄土干密度随深度的变化规律如图 3 所示。由图可知，研究范围内黄土干密度介于 1.19～1.43 g/cm³，整体呈现浅层偏小、深层偏大的分布特征。14～16 m 土层干密度达到峰值 1.43 g/cm³，随深度继续增大，干密度整体呈递减趋势且数据离散性较强。究其原因，伊犁黄土干密度主要受土体自身密实度控制，同时受易溶盐含量、矿物组分、前期固结压力等多重因素共同影响，导致干密度随深度的变化规律不显著。

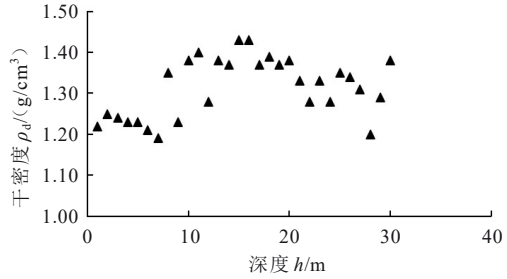


图 3　深度与干密度关系

Fig. 3　Relationship between depth and dry density

伊犁黄土含水率随深度的分布规律如图 4 所示。在 21 m 深度范围内，土体含水率整体稳定在 8% 左右，平均含水率为 8.36%；当深度超过 22 m 后，含水率显著提升，平均含水率可达 13%。该分布特征与场地水文及气象条件密切相关：伊犁地区降雨量较少，浅层土体受蒸发作用强烈，含水率偏低；中层土体受蒸发作用减弱，水分变化主要受降雨条件控制；深层土体含水率则主要受地下水位及上层水分下渗补给影响。

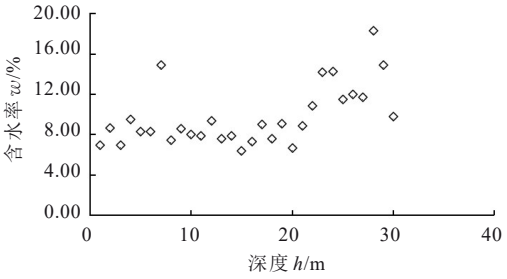


图 4　深度与含水率关系

Fig. 4　Relationship between depth and water content

土体干密度可表征单位体积土体内固体颗粒的密实程度，反映土体气、液两相状态下的密实特性。干密度越小，土体结构越松散，湿陷特性越显著。伊犁黄土湿陷系数与干密度的对应关系如图 5 所示。

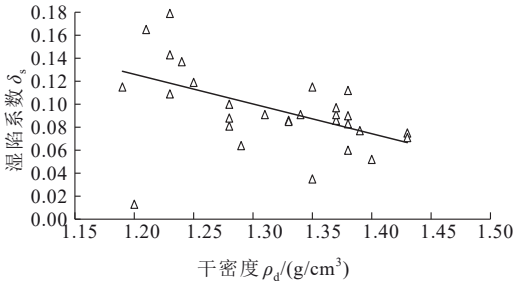


图 5　湿陷系数与干密度关系

Fig. 5　Relationship between collapsibility coefficient and dry density

由图 5 可知，伊犁黄土干密度整体偏小且分布较为均匀，取值范围为 1.19～1.43 g/cm³，平均值为 1.31 g/cm³。由于伊犁黄土沉积环境气候干燥，且土体上覆自重应力较小，未超过对应含水率条件下的湿陷起始压力，因此土体整体密实度偏低。同时，伊犁黄土湿陷系数与干密度呈线性负相关规律，数据虽存在小幅离散但整体变化趋势显著：干密度越小，土体结构越松散，湿陷性越强；随干密度增大，土体密实度提升，湿陷性逐渐减弱。数据离散主要原因为原状黄土的结构性差异，原状土体颗粒胶结状态、内部结构及应力状态各不相同，致使相同干密度条件下土样湿陷系数存在波动，而重塑土可消除原生结构差异，有效降低数据离散程度。

伊犁黄土湿陷系数与含水率的变化关系如图 6 所示。由图可知，试验土样含水率整体集中在 10% 以内，仅少量深度土体含水率偏高，分布于 10.9%～18.3% 区间。含水率与湿陷系数呈现显著非线性变化特征：含水率低于 10% 时，黄土湿陷系数整体偏大，湿陷特性突出；含水率超过 10% 后，湿陷系数基本稳定在 0.02 左右小幅波动。这一规律与土体含水率的竖向分布特征密切相关，伊犁黄土含水率随埋深增加整体呈递增趋势，21 m 以上浅层土体含水率较低，湿陷性强烈；21 m 以下深层土体含水率更高，土体湿陷性随之减弱。

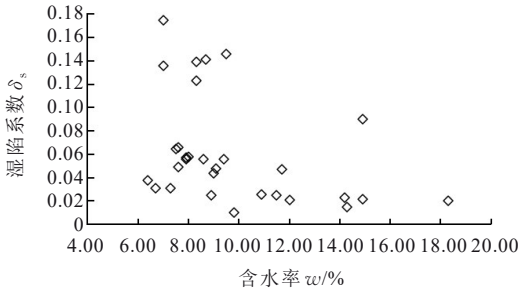


图 6 湿陷系数与含水率关系

Fig. 6 Relation between collapsibility coefficient and water content

2.2 增湿水平与增湿变形系数关系

现行《湿陷性黄土地区建筑标准(GB 50025—2018)》[31]将湿陷变形定义为土体浸水饱和后产生的附加沉降变形,仅考虑完全饱和工况。但实际工程中,地基土体增湿包含饱和与非饱和多种状态,仅依据饱和湿陷指标开展评价,无法真实反映地基实际增湿变形特征,易造成设计偏保守、工程量增加与工程经济浪费。因此,引入增湿水平指标系统研究黄土增湿变形规律,对湿陷性黄土地区工程建设具有重要指导意义。本文对 6 种不同深度的代表性原状黄土开展分级增湿试验,在各级竖向压力作用下以 7 g 为梯度逐级增湿,得到不同工况下增湿水平与增湿变形系数的变化关系,结果如图 7 所示。由图可知,不同竖向压力下,伊犁黄土增湿变形随增湿水平的演化规律存在显著的深度效应。低压条件下(p<100 kPa),各深度土体的增湿变形系数随增湿水平整体呈“S”型波动变化,无明显单调增长趋势;当压力增大至 200 kPa 及以上时,埋深 12.0 m 以内土体的增湿变形系数随增湿水平显著递增。随埋深进一步增大,增湿变形系数的增长幅度逐渐减弱,表明土体水敏性随深度增加逐步降低。其原因在于伊犁黄土干密度随深度整体增大,土体结构性与结构强度更强,低压作用下原生结构可有效抑制增湿变形的发展。

在相同增湿水平条件下,土体增湿变形系数随竖向压力增大整体升高,但压力引起的变形增量随埋深增加逐渐减小。埋深小于 12.0 m 的浅层黄土,在固定压力下增湿变形系数随增湿水平整体呈先增大后小幅回落的变化特征;埋深大于 12.0 m 的深层黄土,曲线变化趋于平缓,说明增湿水平对深层土体增湿变形的调控作用显著弱化。

图 7 中的增湿变形系数与增湿水平呈幂函数关系,对图 7 中的数据点进行拟合,可得出以下函数:

$$\delta_{\mathrm{m}}^{p}=\alpha(p)\cdot S_{\mathrm{w}}^{\beta(p)} \tag{6}$$

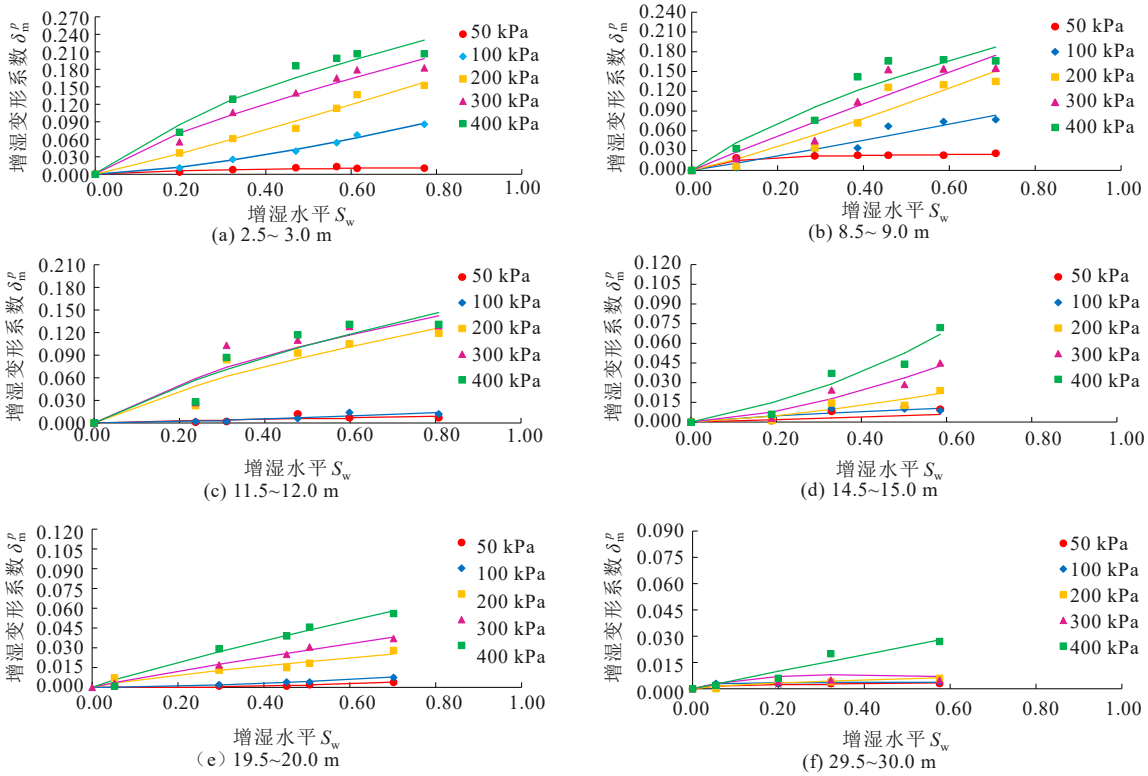


图 7 增湿水平与增湿变形系数关系

Fig. 7 Relationship between humidification level and humidification deformation coefficient

式中：$\alpha(p)$与$\beta(p)$均为竖向压力p的拟合参数。以上 6 种不同深度，各级竖向压力作用下增湿水平与增湿变形系数拟合曲线参数列于表 2。由表中拟合参数可知，29.5～30.0 m 深度土层的拟合精度相对偏低。究其原因，深层黄土在增湿过程中，变形量随增湿水平的变化幅度极小，幂函数模型难以精准表征其变化规律，致使拟合误差增大。由此表明，该公式对常规埋深黄土的增湿变形系数与增湿水平变化规律具有良好的适用性，但针对大厚度黄土场地的深层土体，仍需进一步修正优化，以提升模型适配度。当黄土增湿至饱和状态时，增湿变形系数值与饱和时的湿陷系数相等，此时，增湿水平S_w=1，将其代入式(6)得：

$$\delta_{m}^{p}=\alpha(p) \tag{7}$$

式中：参数$\alpha(p)$的物理意义为饱和时的湿陷系数与竖向压力的相关关系。

根据表 2 中的参数值，将 6 处不同深度土样饱和状态时的湿陷情况与竖向压力的关系绘于图 8 所示。

表 2　增湿水平与增湿变形系数拟合曲线参数表

Table 2　Fitting curve parameters of humidification level and humidification deformation coefficient

取样深度 h/m	竖向荷载/kPa	拟合参数 $\alpha(p)$	拟合参数 $\beta(p)$	相关系数
2.5～3.0	50	0.013 9	0.519 9	0.847 2
	100	0.127 7	1.458 5	0.792 5
	200	0.209 8	1.101 2	0.772 1
	300	0.241 3	0.757 0	0.754 3
	400	0.273 8	0.664 5	0.750 8
8.5～9.0	50	0.026 1	0.140 1	0.816 1
	100	0.121 0	1.065 1	0.700 5
	200	0.223 2	1.138 7	0.705 7
	300	0.243 3	0.959 4	0.792 2
	400	0.239 4	0.713 0	0.708 5
11.5～12.0	50	0.010 7	0.801 3	0.784 5
	100	0.018 5	1.332 7	0.777 3
	200	0.147 8	0.742 9	0.787 8
	300	0.163 9	0.660 7	0.693 4
	400	0.171 6	0.734 3	0.688 3
14.5～15.0	50	0.010 4	1.087 0	0.870 1
	100	0.015 5	0.730 0	0.845 5
	200	0.046 9	1.423 8	0.895 6
	300	0.097 3	1.535 8	0.903 6
	400	0.154 9	1.556 0	0.905 0
19.5～20.0	50	0.008 9	2.274 8	0.861 7
	100	0.014 2	1.680 5	0.843 6
	200	0.033 4	0.786 1	0.887 2
	300	0.052 5	0.902 2	0.804 6
	400	0.079 5	0.887 2	0.802 7
29.5～30.0	50	0.004 0	0.327 1	0.729 2
	100	0.004 3	0.136 7	0.732 4
	200	0.008 8	0.607 2	0.754 8
	300	0.016 5	0.334 5	0.729 6
	400	0.048 5	0.997 8	0.700 2

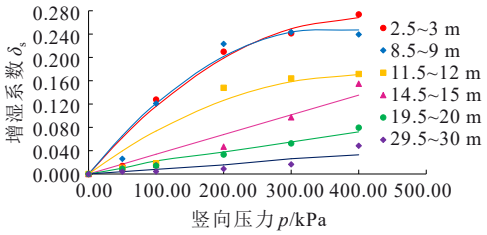


图 8　不同深度竖向压力与湿陷系数关系

Fig. 8　Relationship between vertical pressure and collapsibility coefficient at different depths

由图 8 可知，黄土湿陷系数整体随竖向压力增大呈递增趋势。埋深小于 12.0 m 的浅层黄土，湿陷系数随压力增大表现为先快速增长、后缓慢增长的变化特征。表明浅层土体结构稳定性较差，低压条件下极易发生结构破损，湿陷响应灵敏、湿陷系数增长显著；随着竖向压力持续增大，土体原有结构完全破坏，颗粒重新排列形成稳定密实结构，可有效平衡外部荷载，湿陷系数的增长速率显著放缓并逐渐趋于稳定。埋深大于 12.0 m 的深层黄土，整体湿陷系数显著更低，且随压力变化的波动幅度较小。说明深层土体质地更为密实，自身抗变形能力更强，结构性稳定性更好，受竖向荷载作用下的湿陷响应微弱。

2.3　湿陷系数与压力关系

魏汝龙[32]最早提出，土样的侧限压缩曲线中上覆压力p和沉降压缩应变ε之间符合以下关系：

$$\varepsilon=\frac{p}{a+bp} \tag{8}$$

式中：a和b均为上覆压力与沉降压缩应变关系的拟合参数。刘保健等[3]依据以上关系提出了湿陷系数的实用计算方法，认为湿陷变形与压力的关系也符合式(8)的规律，由此，湿陷变形的割线模量E与p的关系为：

$$E=\frac{p}{\varepsilon}=a+bp \tag{9}$$

式(9)关系为直线关系，由试验数据可求出参

数 a 和 b，从而可以根据上覆压力 p 值求出应变值 ε，进而得出湿陷系数值。

刘金禹等[10]提出采用以下函数来拟合湿陷变形曲线：

$$\varepsilon=\frac{a}{1+\mathrm{e}^{-\frac{p-p_0}{b}}} \tag{10}$$

式中：p_0 为湿陷起始压力(kPa)。

上述拟合函数均为增函数，即土体应变 ε 随上覆压力 p 的增大持续增长。其中，式(10)为“S”型函数，更适用于拟合前期变形小、后期变形显著增长的工况；式(8)与式(9)均为双曲线函数，仅能表征变形持续增长的变化特征。但实际黄土湿陷系数与上覆压力并非单调递增关系，存在明显峰值特征：当上覆压力增至临界值时，湿陷系数达到最大值，后续随压力继续增大呈递减趋势。由此可知，现有函数模型无法精准刻画湿陷系数随压力的真实演化规律。为了更好地反映湿陷系数随上覆压力增加而减小的关系，需尝试寻找新的函数表达。

考察式(10)函数特性如下：

$$\delta=\frac{p}{a+bp}-cp \tag{11}$$

式中：δ 为湿陷系数；p 为上覆压力(kPa)；a、b 和 c 均为湿陷系数与压力关系的参数，其中 a、b 和 c 均大于 0。

对式(11)求导得出：

$$\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}p}=\frac{a}{\left(a+bp\right)^2}-c \tag{12}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2\delta}{\mathrm{d}p^2}=\frac{2ab}{\left(a+bp\right)^4}<0 \tag{13}$$

由于式(13)小于 0，因此式(11)是一个上凸函数，存在极大值。求其极大值点的坐标，则有：

$$\frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}p}=\frac{a}{\left(a+bp\right)^2}-c=0 \tag{14}$$

得到极大值点的坐标如下：

$$\begin{cases}p_{\mathrm{m}}=\dfrac{1}{b}\left(\sqrt{\dfrac{a}{c}}-a\right)\\ \delta_{\max}=\dfrac{1}{b}\left(\sqrt{ac}-1\right)^2\end{cases} \tag{15}$$

同时，可以看出，当 $p\to\infty$ 时，$\lim\limits_{p\to\infty}\dfrac{\delta}{p}=-c$；而 $\lim\limits_{p\to\infty}(\delta+cp)=\dfrac{1}{b}$。因此，该函数的后半段存在一条斜渐近线，其方程为 $\delta=\dfrac{1}{b}-cp$。

由此可知，式(10)的函数式存在以下特性：(1)该函数曲线呈现先增后减的变化特征，曲线中段存在极大值点，极值可通过式(14)求解，能够较好拟合湿陷系数先上升、后下降的变化规律。(2)该函数曲线后半段存在渐近线，渐进线的斜率为 $-c$，截距为 $1/b$。函数曲线基本形状与渐近线如图 9 所示。

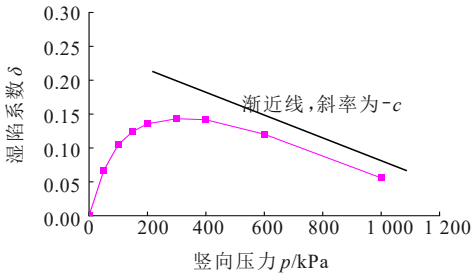


图 9 函数曲线基本形状与渐近线图

Fig. 9 Basic shape and asymptote of the function curve

该函数的以上特性使其能够较好模拟湿陷系数随压力变化的关系。拟合方法如下：

(1) 选择拟合函数如下：

$$\delta=\frac{p-p_0}{a+b\left(p-p_0\right)}-c\left(p-p_0\right) \tag{16}$$

式中：p_0 为湿陷起始压力(kPa)，从湿陷起始压力开始拟合。

(2) 求取参数 c 值。利用 $-c$ 是 δ-$(p-p_0)$ 关系曲线后半段的渐近线的斜率这一特性，将试验得到的最大值以后的数据点的斜率求出，以变化趋势求出该斜率的趋近值作为 c 值的初始值。

(3) 变换式(16)为：$\left(p-p_0\right)/\left[\delta+c(p-p_0)\right]=a+b(p-p_0)\Rightarrow y=a+bx$，可知 y 与 x 之间是一条直线。将试验数据整理成为 $\dfrac{p-p_0}{\delta+c(p-p_0)}$ 与 $p-p_0$ 关系点，可用拟合法即求出 a 和 b 两个参数值。

(4) 将参数 a、b、c 代入函数得到拟合曲线，与试验数据点进行对比。在确定湿陷系数极大值的前提下，依据式(15)核验 3 个参数的匹配关系，对参数 c 进行修正，参数 a、b 随之同步迭代调整。最终以拟合曲线与试验数据吻合度最优为标准，确定各组参数的最终取值。采用上述方法对不同厚度黄土层的湿陷系数与压力关系进行拟合，得到的参数如表 3 所列，拟合曲线如图 9 所示。试验数据点的拟

合结果表明，该方法可以较好地拟合湿陷系数曲线。相较于现有拟合方法，本文方法的优势在于可精准模拟曲线后半段的下降段变化规律，且仅新增1个参数，同时该参数易于获取。

表3　竖向压力与湿陷系数拟合合曲线参数

Table 3　Fitting curve parameters of vertical pressure and collapsibility coefficient

取样深度 h /m	拟合参数 a	拟合参数 b	拟合参数 c	相关系数
2.5～3.0	70.810 0	0.008 7	0.012 8	0.944 6
8.5～9.0	45.100 0	0.004 2	0.020 8	0.957 6
11.5～12.0	112.700 0	0.014 0	0.008 0	0.833 0
14.5～15.0	$-0.262\,4\times10^{7}$	$3.562\,0\times10^{4}$	−0.000 3	0.881 5
19.5～20.0	$-0.341\,2\times10^{5}$	$0.546\,1\times10^{3}$	−0.000 2	0.918 8
29.5～30.0	$-0.135\,9\times10^{7}$	$0.503\,9\times10^{4}$	−0.000 1	0.838 5

2.4　增湿湿陷量占饱和湿陷量的比值关系

相较于单一饱和湿陷指标，增湿变形与湿陷变形的比值可更真实、全面地反映土体实际湿陷响应规律。增湿湿陷试验结果表明，土样变形随增湿水平提升持续增大。其中，增湿变形系数可定义为：土体在恒定压力下沉降稳定后，由初始含水率逐级增湿至特定含水率所产生的附加沉降差值，能够精准表征不同增湿程度下黄土的变形增量特征。

由于饱和湿陷量与增湿路径无关，土样增湿至某一增湿含水率 w_i 时的增湿变形系数表达式为：

$$\delta = \delta_{s_0} - \delta_{s_i} \tag{17}$$

式中：δ_{s_0} 为初始含水率 w_0 下的湿陷系数；δ_{s_i} 为某一增湿含水率 w_i 下的湿陷系数。

对不同深度伊犁原状黄土以7 g为加水量梯度，由初始含水率逐级增湿至饱和状态，且各组增湿湿陷量与饱和湿陷量均扣除天然含水率条件下的土体压缩变形量。不同增湿水平与增湿湿陷量占饱和湿陷量比值的变化关系如图10所示。通过对比分析不同深度伊犁黄土的增湿水平与增湿湿陷量占饱和湿陷量比值的变化曲线，发现二者整体近似服从幂函数关系，拟合表达式如下：

$$\eta = aS_{\mathrm{w}}^{\mathrm{b}} \tag{18}$$

式中：S_{w} 为增湿水平；η 为增湿湿陷量占饱和湿陷量比值（%），a、b 均为表征增湿水平与增湿湿陷量占饱和湿陷量比值变化规律的参数。。

依据《湿陷性黄土地区建筑标准（GB 50025—2018）》[31]，规范湿陷量计算方法以土层完全饱和为前提，通过累加各层土体饱和湿陷量得到总湿陷量。但在实际工程场景中，降雨等外界入渗增湿作用难以使土体达到饱和状态，土体实际湿陷变形量与真实增湿程度密切相关，需依据土体实际增湿状态确定，该工况下的实际湿陷量可定义为可能增湿湿陷量。基于式（18），可依托土体饱和湿陷量与表征增湿程度的增湿水平，精准计算土体非饱和增湿状态下的实际湿陷量，即“可能增湿湿陷量”。

6种不同深度，增湿水平与增湿湿陷量占饱和湿陷量比值的关系拟合曲线参数列于表4，拟合曲线如图10所示。

表4　增湿水平与增湿湿陷量占饱和湿陷量比值的关系参数表

Table 4　Parameters for the relationship between humidification level and the ratio of humidification-induced collapsibility to saturated collapsibility

土样埋深 /m	拟合参数 a	拟合参数 b	相关系数
2.5～3.0	102.567 3	0.897 9	0.829 5
8.5～9.0	111.819 5	0.848 4	0.709 1
11.5～12.0	104.712 3	0.676 9	0.660 0
14.5～15.0	106.756 7	1.848 1	0.837 6
19.5～20.0	97.508 4	1.479 6	0.737 3
29.5～30.0	98.166 9	0.700 0	0.717 7

式（18）中的参数 η 可定量表征土体在不同增湿程度下的湿陷发育水平。结合图10可知：湿陷性显著的浅层土体在低含水率条件下即可产生较大增湿变形，且随增湿水平提升，增湿变形占饱和湿陷量的增长速率逐渐放缓；深层土体整体湿陷性弱于浅层土体，其变形响应主要集中在高含水率增湿阶段，具体分析如下：

（1）不同埋深条件下，黄土增湿湿陷量与饱和湿陷量的比值均随增湿水平提升持续增大，表明伊犁黄土湿陷变形具有渐进累积的发育特征，土体湿陷变形随增湿程度提高持续发展，最终在饱和含水率条件下达到峰值。

（2）埋深12 m范围内的浅层土体，当增湿水平处于0～0.2的低增湿区间时，增湿湿陷量占比曲线斜率较大，对应湿陷量占饱和总湿陷量的25%～35%，表明该深度黄土在低增湿状态下即具备极强的湿陷敏感性。这一特征由伊犁黄土浅层土体干密度低、初始含水率小、可溶盐含量高、颗粒胶结作用弱的固有结构特性决定。

（3）埋深大于12 m的土体，增湿湿陷量占比

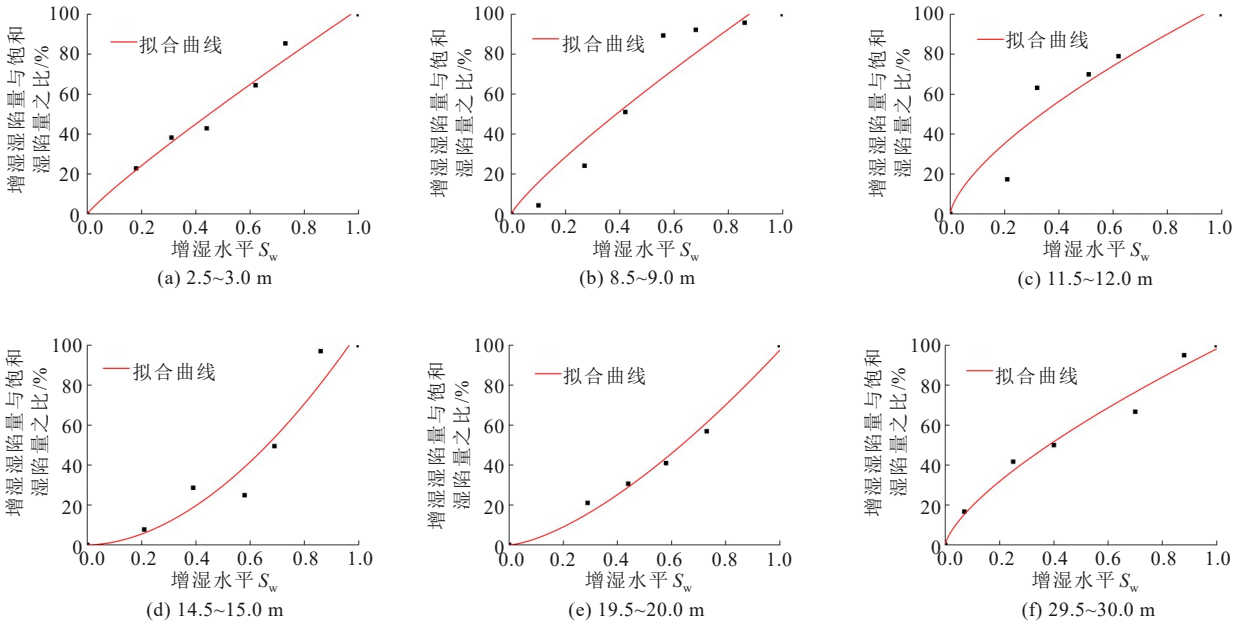


图 10 不同深度下伊犁黄土增湿湿陷量与饱和湿陷量比值随增湿水平变化的关系曲线

Fig. 10 Relationship curves of the ratio of humidification-induced collapsibility to saturated collapsibility of Ili loess with humidification level at different depths

与增湿水平整体呈幂函数增长规律；当埋深超过14.5 m后，曲线增长速率进一步放缓。整体规律表明，伊犁黄土的增湿变形主要集中于浅层、低含水率工况，核心原因是浅层黄土结构松散、干密度偏小，天然湿陷性更为显著。

综上，增湿湿陷量与饱和湿陷量的比值随增湿水平的演化规律，清晰揭示了黄土增湿变形随含水率动态变化的内在机制，可有效反映不同埋深、不同增湿程度下土体的湿陷响应特征，能够为湿陷性黄土场地的实际工程设计与施工提供理论参考。

3 结论

本文以伊犁黄土为研究对象，通过研究黄土的湿陷变形和不同增湿水平下的增湿变形特性，及增湿湿陷量与饱和湿陷量的比值与增湿水平的关系，得到以下主要结论：

（1）伊犁黄土的湿陷系数与干密度之间呈线性反比关系。同时，伊犁黄土的湿陷系数与含水率呈非线性关系变化，湿陷系数的变化范围为0.01～0.18，属于湿陷性黄土。

（2）以增湿水平为变量，研究了增湿水平与增湿变形的规律，提出了由增湿水平计算黄土增湿变形系数的表达式。通过分析黄土的湿陷系数曲线，提出了可以较好地拟合湿陷系数曲线的方法，该方法能够对曲线后半段下降做出模拟，反映湿陷系数随上覆压力增加而减小的实际。

（3）伊犁黄土在小于12.0 m深度范围内，对小压力湿陷敏感性强，而深度大于12.0 m时，对高压力湿陷敏感性强。

（4）给出了增湿到某级含水率时土体的增湿变形的计算方法，即“可能增湿湿陷量”确定方法。并提出了伊犁黄土场地的增湿湿陷量占饱和湿陷量的比值与增湿水平的关系曲线表达式，该关系曲线可以用来表征土体的增湿变形随含水率变化的规律。

参考文献(References)

[1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安：陕西科学技术出版社，1997：1-15.
LIU Zudian. Loess mechanics and engineering[M]. Xi’an: Shaanxi Science & Technology Press, 1997: 1-15.

[2] 张林，陈存礼，张登飞，等. 饱和重塑黄土在部分排水条件下的力学特性研究[J]. 水力发电学报，2019，38(12)：112-120.
ZHANG Lin, CHEN Cunli, ZHANG Dengfei, et al. Mechanical properties of saturated remolded loess under partial drainage conditions[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(12): 112-120.

[3] 刘保健，谢定义，郭增玉. 黄土地基增湿变形的实用算法[J]. 岩土力学，2004，25(2)：270-274.
LIU Baojian, XIE Dingyi, GUO Zengyu. A practical method for moistening deformation of loess foundation[J]. Rock and

Soil Mechanics, 2004, 25(2): 270-274.

[4] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 增(减)湿时黄土的湿陷系数曲线特征[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1363-1368.
ZHANG Maohua, XIE Yongli, LIU Baojian. Characteristics of collapsibility coefficient curves of loess during moistening and demoistening process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1363-1368.

[5] 张茂花, 谢永利, 刘保健. 基于割线模量法的黄土增湿变形本构关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 609-617.
ZHANG Maohua, XIE Yongli, LIU Baojian. Study on constitutive relation of loess moistening deformation based on secant-modulus method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 609-617.

[6] 李旭东, 黄雪峰. 延安新区压实 Q_2 黄土增湿变形特性研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2017, 34(1): 48-52.
LI Xudong, HUANG Xuefeng. Study of the moistening deformation characteristics of compacted Q_2 loess in Yan'an new district[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2017, 34(1): 48-52.

[7] LAWTON E C, FRAGASZY R J, HETHERINGTON M D. Review of wetting-induced collapse in compacted soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(9): 1376-1394.

[8] BASMA A A, TUNCER E R. Evaluation and control of collapsible soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(10): 1491-1504.

[9] MUÑOZ-CASTELBLANCO J, DELAGE P, PEREIRA J M, et al. Some aspects of the compression and collapse behaviour of an unsaturated natural loess[J]. Géotechnique Letters, 2011, 1(2): 17-22.

[10] 刘金禹, 邢义川, 张爱军. 黄土增湿湿陷的非线性本构方程研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 210-214, 221.
LIU Jinyu, XING Yichuan, ZHANG Aijun. Study of nonlinear constitutional equation for humidifying collapse loess[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2011, 39(1): 210-214, 221.

[11] 邵生俊, 周飞飞, 宋春霞. 考虑黄土结构性变化的地基增湿压缩变形分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(6): 94-99.
SHAO Shengjun, ZHOU Feifei, SONG Chunxia. Analysis of moistening and compression deformation of loess considering soil structure variations[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 94-99.

[12] 周茗如, 王晋伟, 王腾, 等. 黄土塬非饱和黄土增湿变形特性及结构性研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(1): 99-104.
ZHOU Mingru, WANG Jinwei, WANG Teng, et al. Study on moistening deformation characteristic and structure of unsaturated loess in loess tableland[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(1): 99-104.

[13] 梁志超, 胡再强, 郭婧, 等. 非饱和石灰黄土土水特征与压缩湿陷特性研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(3): 66-75.
LIANG Zhichao, HU Zaiqiang, GUO Jing, et al. Study on soil-water characteristics and compressive collapsibility of unsaturated lime loess[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(3): 66-75.

[14] 梁志超, 张爱军, 任文渊, 等. 不同含水率高易溶盐含量的伊犁黄土流变特性[J]. 农业工程学报, 2023, 39(5): 90-99.
LIANG Zhichao, ZHANG Aijun, REN Wenyuan, et al. Rheological properties of the high soluble salt content Ili loess with different water contents[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(5): 90-99.

[15] LIANG Z C, ZHANG A J, REN W Y, et al. Investigating the curing time effect on water retention property and microstructure of lime-treated Ili loess[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(7): 241-253.

[16] NIU L S, REN W Y, ZHANG A J, et al. Experimental study on the influence of soluble salt content on unsaturated mechanical characteristics of undisturbed Ili loess[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(9): 6689-6704.

[17] 米文静, 张爱军, 郭敏霞. 伊犁黄土湿陷变形特性研究[J]. 江西农业学报, 2019, 31(12): 49-53.
MI Wenjing, ZHANG Aijun, GUO Minxia. Study on collapsible deformation characteristics of Yili loess[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2019, 31(12): 49-53.

[18] 张爱军, 邢义川, 胡新丽, 等. 伊犁黄土强烈自重湿陷性的影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊2): 117-122.
ZHANG Aijun, XING Yichuan, HU Xinli, et al. Influence factors of strong self-weight collapsibility of Ili loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Suppl02): 117-122.

[19] 牛丽思, 张爱军, 赵佳敏, 等. 易溶盐含量对伊犁原状黄土力学特性的影响规律[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1705-1714.
NIU Lisi, ZHANG Aijun, ZHAO Jiamin, et al. Influences of soluble salt content on mechanical properties of Ili undisturbed loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1705-1714.

[20] 毛伟, 王一惠, 如黑艳·木合买尔, 等. 基于地质分区的伊犁河谷黄土滑坡滑移特征研究[J]. 新疆地质, 2024, 42(3): 444-450.
MAO Wei, WANG Yihui, Ruheiyan·Muhemaier, et al. Study on characteristics of loess landslide and slip in Yili River valley based on geological zoning[J]. Xinjiang Geology, 2024, 42(3): 444-450.

[21] 陈志敏, 孙勇, 郝彦玉, 等. 公路地质纵剖面黄土湿陷系数预测及分布规律研究[J]. 地震工程学报, 2024, 46(6): 1269-1278, 1290.
CHEN Zhimin, SUN Yong, HAO Yanyu, et al. Prediction and distribution law of the collapsibility coefficient of loess in a geological longitudinal section of highway[J]. China Earth-

quake Engineering Journal, 2024, 46(6): 1269-1278, 1290.

[22] 贾竣予, 张紫昭, 张天栋, 等. 冻融循环条件下伊犁河谷典型黄土滑坡力学强度变化及微观作用机理研究[J]. 新疆地质, 2024, 42(1): 111-116.
JIA Junyu, ZHANG Zizhao, ZHANG Tiandong, et al. Study on the mechanical strength variation and microscopic mechanism of loess in the Ili River valley under freeze-thaw cycling conditions[J]. Xinjiang Geology, 2024, 42(1): 111-116.

[23] 刘伟, 连佳胜, 赵吉祥. 木质素抑制黄土湿陷性试验研究[J]. 地震工程学报, 2024, 46(3): 557-565.
LIU Wei, LIAN Jiasheng, ZHAO Jixiang. Collapsibility test on the loess inhibited by lignin[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(3): 557-565.

[24] 任文博, 胡少磊, 刘云龙, 等. 黄土湿陷系数与其物性指标的定量关系分析[J]. 地震工程学报, 2023, 45(2): 311-318.
REN Wenbo, HU Shaolei, LIU Yunlong, et al. Quantitative relationship between the collapsibility coefficients and physical indexes of loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(2): 311-318.

[25] 马建全, 邱勇强, 赵晓杰, 等. 盐分及含水率对甘肃黑方台黄土强度的影响研究[J]. 地震工程学报, 2023, 45(4): 819-825, 886.
MA Jianquan, QIU Yongqiang, ZHAO Xiaojie, et al. Effects of salinity and moisture content on the strength of loess in Heifangtai, Gansu Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, 45(4): 819-825, 886.

[26] 王沈力, 李晓龙, 刘辰麟, 等. 木钙对兰州黄土水理性质的影响[J]. 地震工程学报, 2024, 46(3): 637-643, 671.
WANG Shenli, LI Xiaolong, LIU Chenlin, et al. Influence of calcium lignosulfonate on the hydrological properties of Lanzhou loess[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(3): 637-643, 671.

[27] 吴旭阳, 任明洋, 黄俊杰, 等. 兰州重塑黄土抗拉强度冻融特性与衰减模型研究: 基于轴向压裂法[J]. 地震工程学报, 2022, 44(5): 1041-1049, 1058.
WU Xuyang, REN Mingyang, HUANG Junjie, et al. Freeze-thaw characteristic and attenuation model of tensile strength of Lanzhou remolded loess based on the axial splitting method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(5): 1041-1049, 1058.

[28] 中华人民共和国建设部. 原状土取样技术标准: JGJ 89—1992[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Technical Standard for sampling of undisturbed soils: JGJ 89—1992[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993.

[29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
The Ministry of Housing and Urban - Rural Development of the People's Republic of China. Geotechnical test method standard: GB/T 50123-2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.

[30] 金松丽. 基于"可能湿陷变形"的黄土渠道地基湿陷性评价方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017: 8-19.
JIN Songli. Research on assessment method for loess canal foundation collapse based on possible collapse concept[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017: 8-19.

[31] 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.

[32] 魏汝龙. 库仑土压力理论在粘性土中的应用(英)[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 80-84.
WEI Rulong. Application of Coulomb's theory to cohesive soill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(3): 80-84.

(本文编辑: 任 栋)