

许书雅,王平,王会娟,等.考虑土体性质的黄土震陷灾害区域性特征[J].地震工程学报,2020,42(5):1194-1201.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1194
XU Shuya, WANG Ping, WANG Huijuan, et al. Regional Characteristics of the Earthquake Subsidence Disaster in Loess Area Based on Soil Properties[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(5): 1194-1201. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1194

考虑土体性质的黄土震陷灾害区域性特征

许书雅¹, 王平², 王会娟², 于一帆²

(1. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450000;
2. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:本研究在通渭、兰州、西吉、宝鸡、西安等多个西北典型黄土震陷灾害场地获取原状土样,通过对密度、含水率、孔隙比、塑液限等物理指标的测试,分析其与土体震陷性的关系;通过动弹性模量和阻尼比、动强度、震陷等室内动力特性试验,并结合大量前人研究资料,分析土体性质对岩土震陷灾害的区域性影响。结果表明:1)震陷系数与单一土体物性参数呈正相关或负相关关系,六盘山以西和以东的黄土震陷特性反映了明显的地区变化规律,在相同地震荷载作用下震害东轻西重;2)随着时间的推移,人类的活动增加,改变了土的含水率,导致土体上覆压力增大,在上覆压力的作用下,土体的初始孔隙数量有所减少,其固结程度越来越好,宏观表现为土体的易损性即震陷性减小。

关键词:黄土震陷灾害;土体性质;土体易损性;区域特征

中图分类号: TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2020)05-1194-08
DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.05.1194

Regional Characteristics of the Earthquake Subsidence Disaster in Loess Area Based on Soil Properties

XU Shuya¹, WANG Ping², WANG Huijuan², YU Yifan²

(1. Geophysical Exploration Center, CEA, Zhengzhou 450000, Henan, China;
2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Gansu Province & CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Based on physical indexes such as density, moisture content, pore ratio, and plastic limit, the relationship between each physical index and soil vulnerability was analyzed. Undisturbed soil samples in Tongwei, Lanzhou, Baoji, Xiji, Xi'an, and other typical loess disaster sites were used as the research object. Through an indoor dynamic characteristics test and based on the findings of numerous previous studies, the regional effects of soil properties on geotechnical subsidence disasters were quantitatively analyzed. The results showed the following: (1) A positive or negative correlation exists between the seismic subsidence coefficient and individual soil physical property. The seismic subsidence characteristics in the west and east of the Liupan Mountain present a regional law; the disaster distribution is characterized as light in the south and heavy in

收稿日期: 2020-07-10

基金项目: 基本科研业务费专项(2020IESLZ07); 甘肃省重点研发计划(18YF1FA101); 地震联合基金(U1939209)资助

第一作者简介: 许书雅(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事黄土地震工程方面的研究。E-mail: xushuya16@mails.ucas.ac.cn。

通信作者: 王平(1977-), 男, 副研究员, 主要从事土动力学与地震工程方面的研究。E-mail: lanzhouwang_p@126.com。

the east under the same seismic load. (2) Over time, the increase in the number of human activities changes the soil moisture, increasing the overburden pressure of soil. Under the action of the overburden pressure of soil, the number of initial soil pores decreases, and the consolidation degree increasingly improves. Macroscopically, this result shows that the soil vulnerability is reduced, and thus, the seismic subsidence is reduced.

Keywords: seismic subsidence disaster of loess; soil properties; soil vulnerability; regional characteristics

0 引言

黄土相较于一般软土,具有较高的黏粒含量和独特的大孔隙、弱胶结的架空孔隙结构,其导致的强动力易损性是造成黄土高原区震陷灾害的主要原因,表现为场地在地震作用下突然的附加沉降。加之黄土高原位于地震高烈度区,部分地区中强震频发,且地震前后伴随的突发强降雨以及长期的人类活动与气候变化对黄土的极大影响,更加重了震陷灾害并使之具有了典型的区域性分布特征。

早在十九世纪六十年代,HB Seed^[1], IMI driss^[2]等学者就发现土体在振动作用下产生的竖向沉降现象并进行了研究,通过土的动强度试验归纳出影响附加沉降产生的部分主要因素:固结应力,动应力以及动应力循环次数,但这时,“震陷”的概念还没有被明确提出;随后,K.L.Lee 等^[3]通过三轴试验系统模拟了循环荷载下试样产生永久变形的过程并据此建立了沉陷量估算的经验公式;在此基础上,部分学者对不同类型土体进行了大量室内试验^[4-5],进而改良或建立相应的沉陷量预测公式并应用于规范编制和实际工程中。二十一世纪初至今,在震陷机理分析、震陷性判定,震陷量值估算以及震陷性地基处理等方面国内外学者从不同角度进行了进一步的探索研究。然而,目前绝大多数震陷研究来自砂土液化和黏土软化,对于黄土,尤其是西北地区低含水率、架空结构的特殊黄土,它的震陷特性和现象虽与一般土体有共性,但其独特性也是显而易见的。特殊的气候条件和沉积来源导致该区黄土覆盖层厚度、颗粒组分、含水率等差异大,在实际工程中按同一标准进行广泛的震陷处理显然是不切实际的。因此,对黄土震陷尤其是西北地区典型高震陷性黄土的研究上国内学者承担了大量的工作。其中研究人员从现场调研^[6-7]、室内静、动力学试验分析^[8-9]、微结构观察与统计^[10]等手段对西北黄土震陷性及其影响因素从其物质成分、组织结构、物理力学性质和动力特性等进行具体分析并综合归纳,在手段上,多以室内试验为主。考虑到黄土在我国分布广泛,沉

积情况千差万别,不同地区的黄土性状具有很大区别,导致其易损性也有明显差异性。雷祥义^[11]、李晓猛等^[12]以陕北、陇东黄土为研究对象,定量揭示了该区黄土中不同大小孔隙的分布特征,并从区域角度说明了黄土渗透性与其毛管压力曲线类型的关系,刘雷^[13]分析了含水率对黄土整体稳定性的影响,获得了太原黄土的邓肯-张模型参数及其随含水率变化的规律。王谦等^[14]研究了甘南地区次生黄土的动模量和阻尼比发展特征,并与风成黄土试验结果进行比对,说明黄土动力特性的差异性受沉积环境的影响较为显著。以上对特定区域黄土的某一特性进行具体分析,可以看到其地区之间的差异不仅存在,且具有明显的地域特征。因此,我们借鉴上述思想,从区域的角度对震陷这一典型地震灾害进行归纳分析不失为一个可供当地工程应用参考和借鉴的方法。

本研究选取的地点位于西北黄土覆盖区六盘山两侧即陇西和陇东、关中地区城市如兰州、宝鸡、西安等地的典型黄土场地,取样地点具有明显地域特征,且区内抗震设防烈度Ⅷ度,存在较高的地震危险性。基于室内试验对其基本物理性质参数及动力参数进行数据收集与结果梳理,并结合大量前人研究资料,分析了土体性质对震陷灾害的影响,同时分析了其区域性影响特征。研究成果有助于该区黄土场地震陷灾害初判,并对城镇化建设中是否需要进行抗震陷地基加固措施提供区域性参考依据。

1 试样、仪器和试验条件

试验中所用的土样根据区域位置进行分类编号,1~5号分别代表甘肃兰州、宁夏西吉、甘肃通渭、陕西宝鸡和陕西西安的典型地震岩土灾害场地,取样地点分布如图1所示。

上述5处取得的土样均为在各场地中未经扰动的区域开挖探井取备,取样深度均为5 m。试样均为原状Q3黄土,呈黄色或黄褐色,有肉眼可见的大孔隙。试样削制为圆柱形,50 mm×100 mm(直径

×高度)。

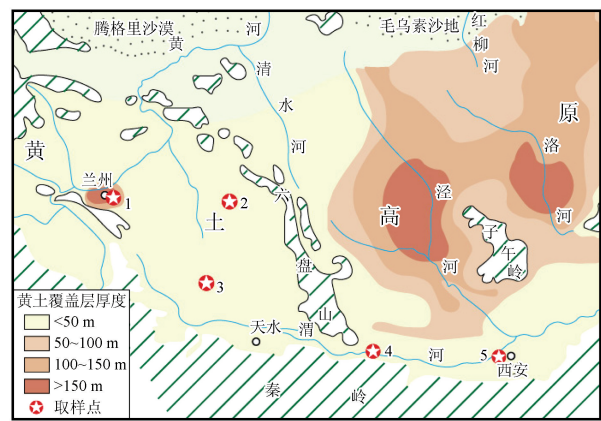


图 1 取样点分布简图

Fig.1 Sampling point distribution diagram

土的物理性试验参照《土工试验规程》(SL237-03201999)(1999)^[15] 进行操作,部分试样的基本物性参数见表 1。塑、液限采用塑、液限联合测定法测定;微结构测试采用中国地震局黄土地震工程重点实验室的 KYKY2800B 电子显微镜,仪器最高放大倍数 10 000 倍;土的动力学特性试验包括动强度和震陷试验,采用中国地震局黄土地震工程重点实验室的 WF-12440 型动三轴-扭剪试验系统,其应变测量范围误差不超过 0.001%,试验在固结不排水条件下进行,固结时轴向应力为 200 kPa,固结比 K_c 为 1.69。

2 土体性质的区域性变化对震陷的影响分析

黄土震陷在室内试验中普遍被认可为残余应

表 1 土体物性参数表

Table 1 Physical property parameters of soil

区域	土类	密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙比	含水率 /%	土粒组成/%		
					砂粒	粉粒	黏粒
兰州	粉质黄土	1.16	1.08	9.95	13.0	76.5	10.5
通渭	粉质黄土	1.19	1.27	18.6	6.5	68.0	25.5
西吉	粉质黄土	1.21	1.14	9.40	18.0	70.9	11.1
宝鸡	黄土状亚黏土	1.58	0.93	23.60	13.5	57.0	29.5
西安	黄土状亚黏土	1.44	0.90	16.97	7.0	62.0	31.0

变,在给定振次 N 的循环荷载作用下的动三轴试验中被取为动应力作用前后试样的高度差与动应力作用前试样高度之比^[16]。

$$\epsilon_p(N) = \frac{H - H'(N)}{H} \tag{1}$$

式中: $\epsilon_p(N)$ 表示动应力往返作用 N 次产生的残余应变; H 和 $H'(N)$ 分别是动应力作用前和作用 N 次后试样的高度。现将黄土的残余应变的主要影响因素分为两类,即黄土的物理力学指标和黄土的动力学参数,它们的影响规律分别如下。

2.1 土体含水率与区域震陷性的关系

黄土以粉粒为主,质地疏松,具有较强的水敏性^[17]。而在地震前后,通常伴有连续强降雨,导致土体含水率大增从而影响灾害的严重程度。

以宁夏西吉相同地点与深度的土样为例,通过制备 3 种含水率条件下的重塑黄土,在 200 kPa 轴向固结条件下进行动三轴试验,其残余变形量与施加的循环荷载间的结果对比如图 2 所示。当其他物理性质比较接近时,相同应力作用下随着含水率增加,土体的压缩性大,强度相对降低,其产生的残余应变急剧增长,当含水率达到 30% 以上时,施加动应力不超过 50 kPa 其场地已达到了严重震陷的程度(一般认为应变达到 2%~3% 时土样产生脆性破

坏^[17])。

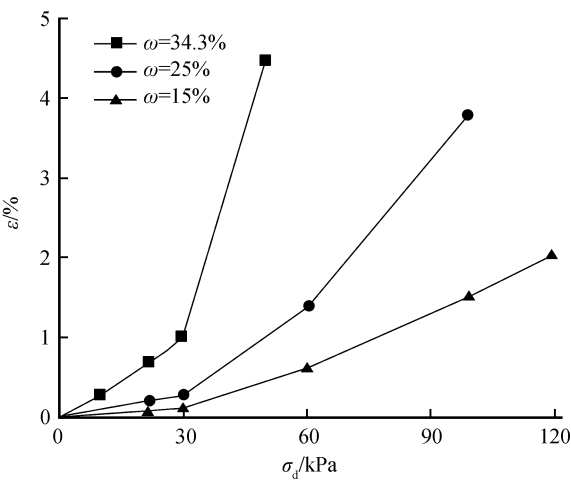


图 2 含水率对残余应变的影响

Fig.2 The effect of water content on residual strain

由于动强度的概念中应力应变指标与震陷试验中动应力、残余应变指标存在一一对应的关系,因此通过实验得到部分区域试样加载振次 $N=10$ 时的动强度指标 c_d 、 φ_d ,并绘制其与含水率之间的关系如图 3 所示。随着含水率自西北向东南的增长,黄土的动黏聚力也呈逐渐增加的趋势。关中的代表地区西安黄土的含水率较高,远高于其他三地的黄土

中水分的含量,其动黏聚力也最大,达到 46 kPa,而兰州、西吉等地动黏聚力很低,在这些土体粉粒含量大又自身含水率较低的地区,干燥时土体可承担一定荷载而变形不大,但越是干燥的地区需格外警惕浸水的发生,一旦降雨,土体含水量在短期内即可发

生较大增长,与未降雨或土体本身含水量较高的区域相比,相同荷载下震陷灾害现象会更加严重,甚至会面临震陷和湿陷的双重风险。内摩擦角这一参数在西吉、兰州等含水率差异很大的地方却基本不变,说明其受含水量变化的影响不大。

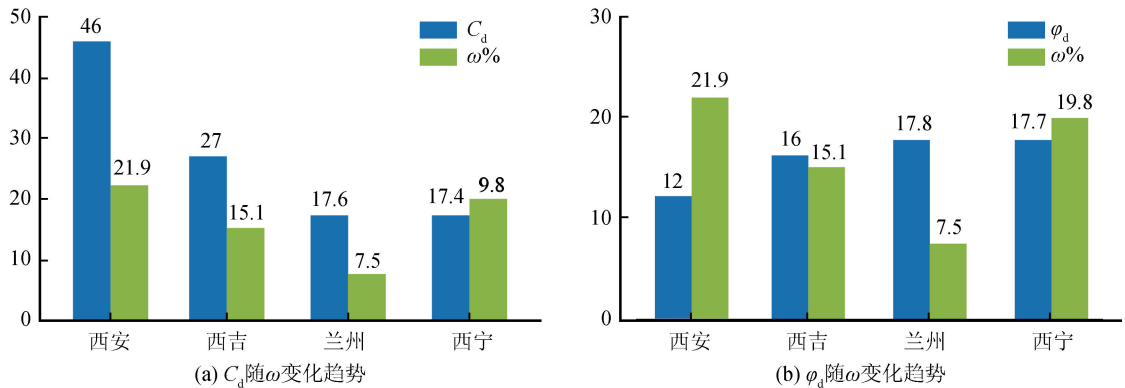


图 3 不同地区土体强度参数与含水率的关系

Fig.3 The relationship between loess strength parameters and moisture content in different region

2.2 土体结构特征与区域震陷性的关系

黄土的结构很大程度上受其孔隙的影响。其中土的孔隙比是反映土的疏密程度的指标,其与震陷量也有较为密切的正相关关系。选取含水率相同,干密度也接近的兰州、西吉两个陇西地区典型场地 5 m 深度的黄土制样,对震陷试验结果进行比较,即可验证,孔隙比稍大的西吉地区土样震陷性更强,相同动应力作用下残余应变更大,这说明孔隙比控制着残余变形的大小,孔隙比大的黄土在外力和内力作用下更易破坏,其易损性更大,如图 4 所示。

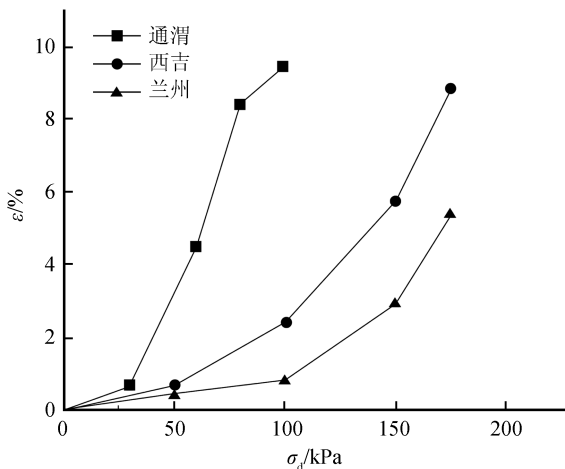


图 4 土体残余应变曲线

Fig.4 Residual strain curve of soil

综合前人^[16,18-19]对孔隙比参数的区域性统计结果可知,黄土高原地区的孔隙比呈自西北到东南逐

渐减小的趋势,并具有明显的地域分布规律,即陇西地区的黄土孔隙比均大于 1,而六盘山以东地区其数值基本上小于 1,本研究所选取区域的土样孔隙比参数亦完全符合这一规律。

这一现象可从微结构研究的角度给出进一步解释:西安、宝鸡等关中地区大部分为集粒状接触,形成絮状胶结或凝块粒状镶嵌胶结结构,使得粒间孔隙体积小、数量少,如图 5(a)、(b)所示;而西吉、兰州等陇西黄土颗粒之间基本上呈点状接触,很少胶结,多个颗粒间形成大体积的脆弱架空孔隙结构,如图 5(c)、(d)所示。

2.3 土体塑性特征与区域震陷性的关系

包括震陷在内的土体变形性质均与塑性指数密切相关。塑性指数越大,土能够维持可塑状态时的含水量范围大,即土中黏粒或亲水矿物含量高,土的抗震陷能力强。因此,塑性指数也直观反映了黏性土及其三项组成的基本特性,进而反映震陷特性。根据《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)^[20],塑性指数 $I_p \leq 10$ 且粒径大于 0.075 的颗粒质量不超过总质量 50% 的土为粉土,塑性指数 $10 < I_p \leq 17$ 为粉质黏土,塑性指数 $I_p > 17$ 称为黏土。结合土体的物性参数(表 1),在各个黄土场地取备的试样粉粒含量均较高,超过 50%,兰州和西吉的试样平均粉粒含量甚至超过了 70%,属粉土性质,而西安、宝鸡、通渭黏粒含量相对较高,具有部分黏土性质。

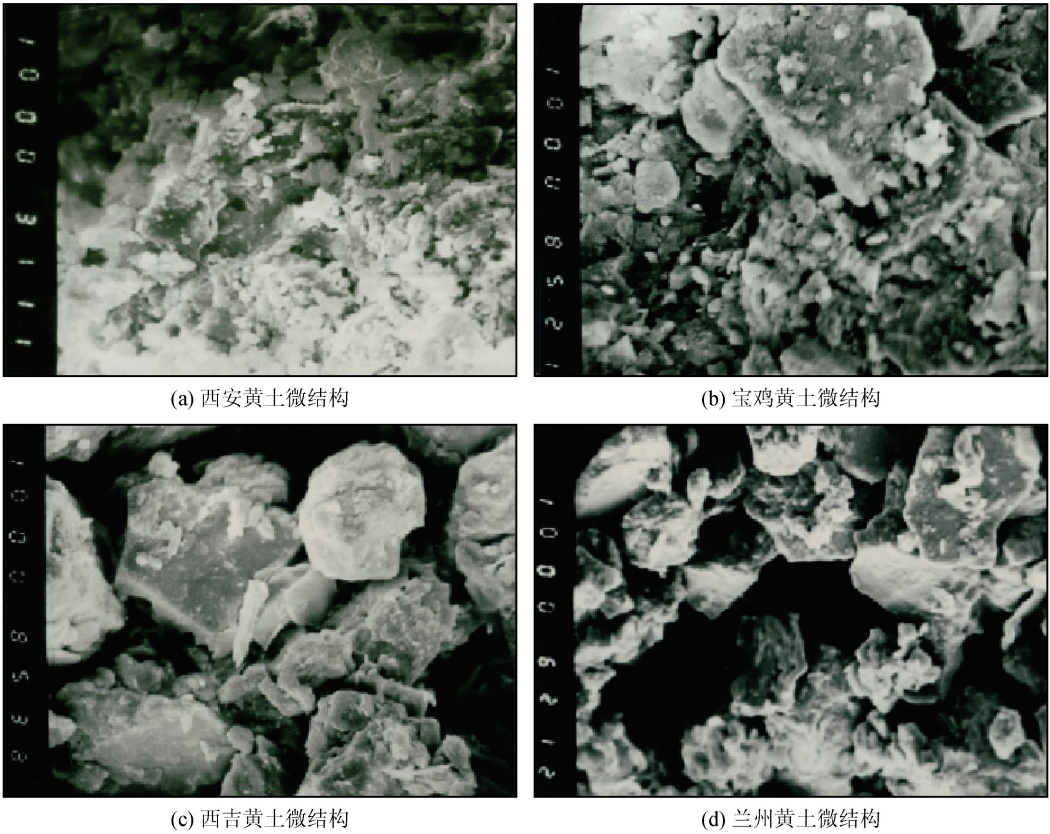


图 5 不同地区原状黄土电镜扫描图像(放大倍数 1 000)

Fig.5 SEM images of loess in different regions (magnification of 1 000)

通过试验得到四个地区土样塑性指数的均值以及黄土的强度参数与塑性指数之间的关系,如图 6 所示。结果表明,试样的塑性指数同样具有自东南向西北逐渐减小的趋势,且以六盘山为界,减幅幅度剧增。西安原状黄土的塑性指数高达 16.1,在动强度试验中其动黏聚力高达 46 kPa,远高于其他三地。需要特别说明的是,西宁黄土由于含砂量较高,影响了其颗粒组成时的塑性指数。四地的内摩擦角

宏观表现为相反的趋势,如图 6(b)所示,幅值减小率不具有相似性。以上说明黄土的塑性指数通过影响其动黏聚力而影响土体的震陷特性。相较于一般黏性土,黄土的吸水性、胀缩性等均减弱,兰州、西吉和西宁塑性指数普遍偏低,颗粒间咬合力弱,在地震甚至与降雨的共同作用下土颗粒内部发生位移甚至瞬间“崩溃”的可能性随塑性指数的降低而大大增加。

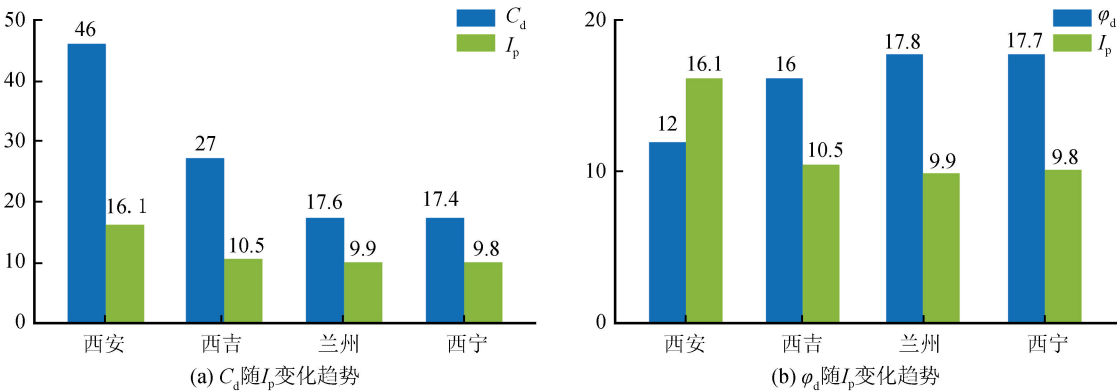


图 6 不同地区土体强度参数与塑性指数的关系

Fig.6 The relationship between loess strength parameters and plasticity index in different region

2.4 动弹性模量、阻尼比与震陷的关系

黄土的动弹性模量、阻尼比是表征土动力特性的重要参数,其大小反映一定土层深度动应力作用下的应力-应变关系,是判别土体地震易损性的重要指标。该指标受到土体物理力学性质包括密度、含水率、孔隙比等参数和结构特性的影响,而上述参数又随黄土分布区域的不同而改变从而表现出明显的区域分布规律。一般来说,动弹性模量越大、阻尼比越小的土易损性较小^[21]。表 2 列出了由西往东各地区试样的初始动弹性模量和阻尼比参数。结果表明,关中典型地区宝鸡、西安的初始动弹性模量值在 100 MPa 及以上,远大于陇西地区,从西北往东南,黄土动弹性模量逐渐增大,以六盘山为界分界明显。阻尼比幅值的变化不如弹性模量显著,但也呈现随着应变的增大逐渐变大的趋势,宏观表象为震陷易

损性大。

表 2 不同地区黄土的动力特性参数

Table 2 Parameters of dynamic characteristics of loess in different regions

试样地区	初始动弹性模量 E_0 /MPa	阻尼比 D (范围)
兰州	84.38	0.110~0.184
通渭	53.61	0.098~0.131
西吉	78.20	0.089~0.136
宝鸡	154.85	0.071~0.150
西安	99.94	0.083~0.144

2.5 时间、人类活动与黄土震陷易损性的关系

考虑到人类活动的区域性影响,收集甘宁地区土地利用数据,并利用 ARCGIS 平台数据分析和可视化处理,以土地利用类型反映其上进行的人类活动程度,结果如图 7 所示(限于图幅面积,以固原市西吉县庞湾村附近为例)。

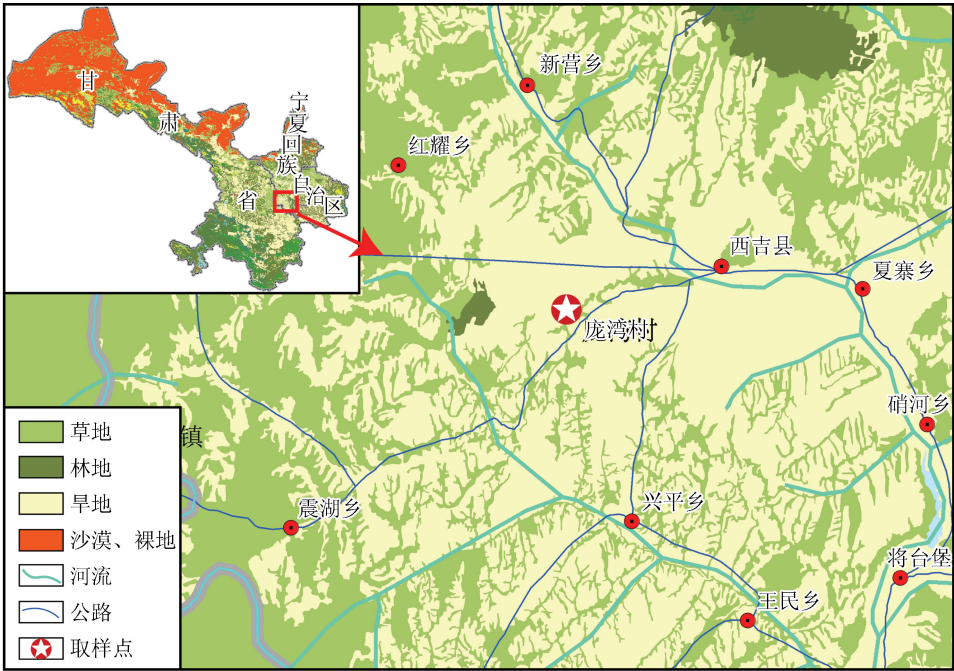


图 7 甘宁地区用地类型统计(以庞湾村为例)
Fig.7 Statistics of land use types in Gansu and Ningxia (taking Pangwan village as an example)

在此,以人类活动影响程度为指标,对土地利用类型进行简单归纳。绿色系为低、中、高覆盖草地和林地,表示人类活动影响较小区域;以橙色表示裸土、沙漠等无人类活动区域;黄色为旱地,是农村居民用地、城镇用地、工交建设用地等的总和,表示人类生活与工程活动较多区域,在黄色区域,与震陷相关的土体物性参数随着各类人类活动以及时间的改变已然发生了不同程度的变化,因此在这些地区进行重大工程建设场地评价时,在前人研究资料基础

上,十分有必要开展进一步的土地震陷性评价。
为了研究人类活动对于黄土震陷易损性的影响,根据土地利用类型统计结果,选取黄色区域内宁夏西吉庞湾村为研究区,于 1999 及 2010 年分别在相同地点选取土样进行黄土震陷试验,其结果如图 8 所示,西吉县庞家湾黄土总体具有较强的震陷性,随着时间的推移,人类的活动增加,改变了土的物理性质,导致土体上覆压力增大,在上覆压力的作用下,土体的初始孔隙数量有所减少,其固结程度越来越

越好,宏观表现为土体的易损性减小,即震陷性减小(图8)。可见,由于工程与居民建筑、地下水抽取等人类活动以及随季节的温度、降水、地下水位线的变化等从不同方面影响着土地地震易损性的变化。

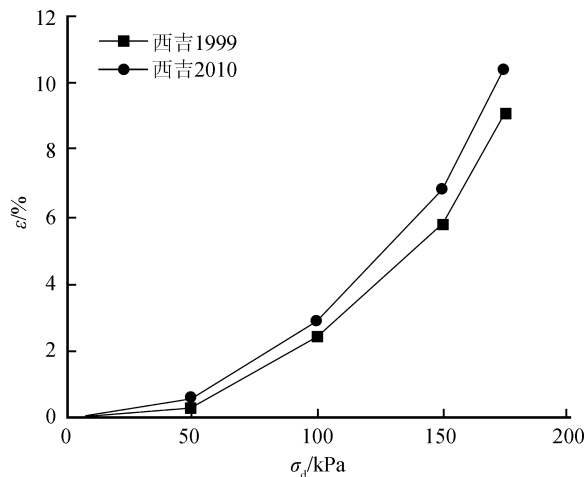


图8 西吉庞湾村震陷曲线

Fig.8 Seismic subsidence curve in Pangwan village, Xiji

3 结论

(1) 动残余应变与含水量呈正相关性,动强度与含水率呈负相关性,但含水率对动摩擦角的影响较小;震陷系数随黄土的孔隙比同样呈正相关关系;土体的易损性与塑性指数、动弹性模量呈负相关性,与阻尼比呈正相关性;

(2) 动三轴抗剪强度试验结果显示出明显的区域性差异,六盘山以西和以东的黄土震陷特性反映了明显的地区变化规律,在相同地震荷载作用下震害西重东轻;

(3) 土体的物性参数会随环境因素的改变而发生改变,尤其人类活动对土体含水率、上覆土层压力会产生巨大影响,使土体的初始孔隙数量有所减少,固结程度越来越好,震陷性减小。

参考文献(References)

- [1] BOLTON SEED H. Earthquake-Resistant Design of Earth Dams[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1967, 4(1): 1-27.
- [2] IDRISSE I M, H B SEED. Seismic Response of Soil Deposits[J]. Journal of the soil mechanics & foundation division, 1970, 96(2): 631-638.
- [3] LEE L K. Seismic Permanent Deformation in Earth Dams[J]. Mechanics and Structures Department School of Engineering and Applied Science University of California Los Angeles, 1974.
- [4] 邵帅, 邵生俊, 陈攀, 等. 黄土的动扭剪震陷特性试验研究[J].

岩土工程学报, 2020, 42(6): 1167-1173.

- SHAO Shuai, SHAO Shengjun, CHEN Pan, et al. Experimental Study on Seismic Subsidence Characteristics of Structural Loess under Cyclic Torsional Shear [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1167-1173.v
- [5] 田兆阳, 李平, 郑志华, 等. 软土动力特性动三轴试验研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(1): 95-99, 118.
- TIAN Zhaoyang, LI Ping, ZHENG Zhihua, et al. Dynamic Tri-axial Tests on Dynamic Characteristics of Soft Soil [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1): 95-99, 118.
- [6] ZHANG Z Z, ZHANG D L, LIU H M. Comprehensive Study on Seismic Subsidence of Loess under Earthquake [J]. North-western Seismological Journal, 2005, 27(1): 36-41.
- [7] WANG L M, SUN J J, WANG Q, et al. Physical Mechanism and Prevention of Loess Slope Failure Induced by the Coupling Effect of Earthquake and Rainfall [C]. 16th World Conference on Earthquake, Beijing: [s.n.], 2017.
- [8] 赵宽耀, 许强, 张先林, 等. 黑方台浅层黄土渗透特性对比试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 459-466.
- ZHAO Kuanyao, XU Qiang, ZHANG Xianlin, et al. Infiltration Characteristics of Topsoil at Heifangtai in Gansu Province [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(2): 459-466.
- [9] 许书雅, 王平, 王峻, 等. 强震作用下不同处理方式黄土地基抗震陷性能评价[J]. 地震工程学报, 2018(02): 71-78.
- XU SY, WANG P, WANG J, et al. 2018. Evaluation of Seismic Subsidence of Loess Foundation with Different Ground Treatments under Strong Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1198-1205.
- [10] 李瑞宽, 吴志坚, 梁庆国, 等. 考虑微结构特征的黄土动力特性影响因素研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 905-914.
- LI Ruikuan, WU Zhijian, LIANG Qingguo, et al. Influence Factors of Dynamic Characteristics of Loess Considering the Microstructure Properties [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(4): 905-914.
- [11] 李晓猛, 李萍, 马路, 等. 非饱和黄土基质吸力与结构屈服压力的关系研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(增刊1): 189-193.
- LI Xiaomeng, LI Ping, MA Lu, et al. Research on the Relation between unsaturated Loess Matrix Suction and Yielding Stress of Structures [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(Suppl1): 189-193.
- [12] 刘雷. 太原黄土含水率对邓肯-张模型参数影响研究[J]. 路基工程, 2010(2): 169-171.
- LIU Lei. Study on Influence of Water Content in Taiyuan Loess on Duncan-Chang Model Parameters [J]. Subgrade Engineering, 2010(2): 169-171.
- [13] 雷祥义. 陕北陇东黄土孔隙分布特征[J]. 科学通报, 2003(3): 48-51.
- LEI Xiangyi. Pore Distribution Characteristics of Loess in Eastern Part of Shaanxi and Northern Part of Gansu [J]. Chinese science bulletin, 2003(3): 48-51.

- [14] 王谦,李娜,王平,等.甘南地区黄土的动模量与阻尼比特性研究[J].岩土工程学报,2017,39(增刊1):192-197.
WANG Qian,LI Na,WANG Ping,et al.Behaviors of Dynamic Modulus and Damping Ratio of Loess in Gannan Region of Gansu Province[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(Suppl1):192-197.
- [15] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国水利行业标准:土工试验规程 SL 237-1999 SL 237-1999[S].北京:中国水利水电出版社,1999.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China,Water Resources Standard (Irrigation) of the People's Republic of China:Specification of soil test SL 237-1999[S].Beijing:China Water Power Press,1999.
- [16] 王兰民.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003.
WANG Lanmin.Loess Dynamics [M].Beijing:China Seismological Press,2003.
- [17] 翟礼生.中国湿陷性黄土区域建筑工程地质概要[M].北京:科学出版社,1983.
ZHAI Lisheng.Outline of Engineering Geology for Construction in Loess areas of China[M].Beijing:Science Press,1983.
- [18] 刘东生.黄土与环境[M].北京:地质出版社,1985.
LIU Dongsheng.Loess and Environment[M].Beijing:Geological Press,1985.
- [19] 李同录,张辉,李萍,等.不同沉积环境下马兰黄土孔隙分布与土水特征的模式分析[J].水文地质工程地质,2020,47(3):107-114.
LI Tonglu,ZHANG Hui,LI Ping,et al.Mode Analysis of Pore Distribution and Soil-water Characteristic Curve of Malan Loess under Different Depositional Environments[J].Hydrogeology and Engineering Geology,2020,47(3):107-114.
- [20] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家标准:岩土工程勘察规范:GB 50021-2001[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.
Ministry of Construction of the People's Republic of China.National Standard (Mandatory) of the People's Republic of China:Code for investigation of geotechnical engineering:GB 50021-2001[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2004.
- [21] 王兰民,张振中.随机地震荷载作用下黄土动本构关系的试验研究[J].西北地震学报,1992(4):61-68.
WANG Lanmin,ZHANG Zhenzhong,WANG Jun,et al.Lab Study of Dynamic Constitutive Relationship of Loess under Random Seismic Loading [J].Northwestern Seismological Journal,1992(4):61-68.