

含水量对黄土震陷性定量影响研究

徐舜华^{1,2}, 王兰民², 孙军杰^{1,2}, 吴志坚²

(1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:含水量是影响黄土震陷性非常重要的参数。本文以洮河三级阶地上典型的 Q_3 黄土为研究对象,对其震陷性特征进行了全面、系统的研究。通过在20 m深探井中依次取得4 m、8 m、12 m、16 m、20 m处黄土原状试样进行室内试验,得到以下结果:(1)天然黄土存在震陷性随深度增加而逐渐减弱的规律;(2)通过增湿、减湿获得5%、10%、15%和20%四种不同含水量黄土试样,同一深度黄土随着含水量增加其震陷性增长的规律明显;(3)通过实验数据分析得到了含水量对黄土震陷性定量影响规律,并根据其规律给出了不同动应力作用下的黄土震陷临界含水量。

关键词:洮河;黄土震陷性;定量;增湿;减湿;临界含水量

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2010)01-0030-06

Study on the Influence of Water Content to Subsidence Characters of Loess

XU Shun-hua^{1,2}, WANG Lan-min², SUN Jun-jie^{1,2}, WU Zhi-jian²

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Water content of loess is a very important parameter for seismic subsidence. The subsidence characters of the typical Q_3 loess, located on third terrace of Tao River are systemically investigated. The samples taken at depth of 4 m, 8 m, 12 m, 16 m, 20 m in a 20 m depth pit are researched in laboratory. The results show some primary achievements: (1) the seismic subsidence capacity of natural loess gradually weakens with depth increasing; (2) there is a obvious law that the seismic subsidence capacity of loess increases with the growth of water content in same depth from experimenting 4 samples with 5%, 10%, 15% and 20% water content, which were acquired by humidification and dehumidification of the samples; (3) Through analyzing the experiment data, the quantitative law of water content influence on the seismic subsidence capacity of loess is found, and based on the law, the critical water contents of loess seismic subsidence are given under different dynamic stress.

Key words: Tao river; Seismic subsidence capacity of loess; Quantitate; Humidification; Dehumidification; Critical water content

0 引言

中国黄土主要分布在多地震的中西部地区,其中湿陷性黄土约占总面积的60%。由于黄土特殊的结构特性,特别是六盘山以西的黄土呈现粒状架

空大孔结构,胶结物较少,土质疏松,强度较低,在地震时容易产生破裂、滑移和沉陷等,这已被历史地震和当代地震的震害所证实^[1]。黄土地震灾害主要有

收稿日期:2009-07-27

基金项目:国家自然科学基金(50379049);中国地震局地震预测研究所基本业务费项目(2009A18);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2010003

作者简介:徐舜华(1974-),男(汉族),黑龙江拜泉人,助理研究员,主要从事岩土地震工程方面的研究。

黄土地震滑坡、震陷和液化等。其中震陷是黄土地区普遍存在的严重地基震害^[1]。

黄土震陷概念是 20 世纪 80 年代初由兰州地震研究所张振中等人提出的^[2-3]。从土动力学角度来讲,黄土震陷是指黄土在动荷载作用下产生的残余应变值;在随机地震荷载或等幅循环荷载下的动三轴震陷试验中则被取为动应力作用前后试样的高度之比:

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

式中, $\epsilon_p(N)$ 表示动应力往返作用 N 次所产生的残余应变; H 和 $H'(N)$ 分别表示动应力作用前和作用 N 次后的试样高度。从灾害学角度来讲,黄土震陷是指非饱和、低湿度的黄土在地震荷载作用下,土体产生的附加沉陷,它与黄土的残余变形密切相关。本文中在不同动应力作用下的震陷系数就是通过振动试验得出的残余应变值。从黄土地震灾害的考察、土动力学试验及黄土微结构的研究结果来分析,黄土震陷的机理可以描述为:黄土的架空孔隙结构在地震作用下发生的崩溃性破坏。

经过几十年的探索研究,目前黄土震陷研究已经获得了大量的科研成果。其中有关物性指标的研究主要有:李启鹞研究了孔隙比对残余应变的影响^①;余雄飞等研究了含水量对残余应变的影响规律^[5];张振中等研究了动应力、振次、孔隙比、含水量等黄土震陷的影响因素,提出了孔隙比、震陷起始压力等黄土震陷的判别标志^[3];王兰民等研究了含水量、孔隙比、固结应力、振次、动应力、荷载类型、卓越周期和有效持时以及峰值等黄土震陷影响因素^[1]。

在诸多影响因素当中,含水量对黄土震陷影响非常显著,对黄土的震陷性起着决定性的作用。研究表明,西安黄土震陷量随含水量的增加而增大,当含水量小于 15% 时,震陷曲线呈直线型^[5];兰州黄土发生震陷的含水量范围在缩限含水量和塑限含水量之间^[3,7],黄土含水量小于缩限时,比较坚硬,几乎不发生震陷或是震陷极小;黄土含水量大于缩限时,则随着动应力的增加产生较明显的震陷量。

在以往含水量对黄土震陷性影响的研究中,虽然已经取得了一些研究成果,但这些研究成果是基于不同场地条件、甚至不同成因的黄土试样数据情况下获得的,其影响规律仍然需要进一步的研究探讨。本文采取在同一块黄土场地进行取样,以消除不同黄土场地黄土的差异性,并对所取得试样进行增湿、减湿处理,研究含水量对黄土震陷性的影响规

律。

1 试样与试验方法

1.1 试样及场地

2006 年 6 月,自然科学基金项目《黄土地基震陷性处理技术研究》选取甘肃省临洮县太石镇李家湾坪南缘的黄土地地做为爆破地点,进行爆破模拟地震动诱发黄土震陷实验。为配合该项目的研究工作,于爆破前采取了该场地的不同深度的原状黄土试样。李家湾位于兰州以南约 40 km 的洮河三级阶地上,取样场地属典型 Q_3 黄土土层。通过挖掘 20 m 深度的探井,采集了 4 m、8 m、12 m、16 m、20 m 共 5 个不同黄土层位的原状黄土试样(即取样过程中最大可能减少干扰,保持土样初始状态和方向),表 1 为该场地黄土的基本物理参数,探井剖面见图 1。

土层埋深 /m	层厚 /m	图例	岩性描述	取样位置 /m	备注
1.0	1.0		耕作层		每层取样 25 个
			典型马兰黄土,灰黄色,土质均匀,大孔发育,结核较少,上部可见少量植物根系。	4.0	
			冲洪积层,浅黄褐色,致密,较硬,呈似层状,沿层面可裂开。15 m 开始出现较多硬质结核,砾石直径最大 2~3 mm,较多钙质薄膜;18 m 开始土的颜色变化明显,呈黄褐色或黄红相间,冲洪积特征明显,结核减少;19 m 更加致密,出现条带状盐类物质;20 m 致密,出现条带状盐类物质;20 m 砂质含量见多。	8.0	
				12.0	
				16.0	
15.0	14.0				
20.0	5.0			20.0	

图 1 李家湾 Q_3 黄土地层剖面

Fig. 1 The profile of Q_3 loess at Lijiawan.

1.2 试验方法

试验在中国地震局兰州地震研究所黄土地震工

① 李启鹞,程显尧,蔡东艳.地震荷载下黄土的动力特性.西安:西安冶金建筑学院,1984.

程开放实验室进行,使用的仪器是电磁式振动三轴仪。选取土体整体均匀分布、较少杂质的土样。首先把初始土样加工为直径 50 mm,高 100 mm 的圆柱,然后对土样施加等效地震作用的正弦循环荷载。在同一固结压力下,对同一组(同一层位)的 5~7 个试样在同一地震动时程不同幅值下进行震陷试验,得到轴向应力(峰值 σ_d)和应变时程(残余应变 ϵ_p)的对应黄土震陷曲线。本文根据《湿陷性黄土地区建筑规范》的湿陷性标准,认为震陷系数大于 0.015 的黄土具有震陷性。

表 1 李家湾黄土物理参数

土样深度/m	含水量/%	密度/ [g·cm ⁻³]	干密度/ [g·cm ⁻³]	孔隙比	剪切波速/ [m·s ⁻¹]
4	11.59	1.47	1.32	1.045	256
8	15.28	1.48	1.29	1.101	269
12	14.80	1.49	1.29	1.109	294
16	10.97	1.48	1.33	1.026	363
20	8.41	1.54	1.42	0.911	402

2 天然黄土的震陷性特征

对天然含水量条件下的黄土试样在动三轴仪上施加正弦循环荷载,就取得了不同层位黄土的震陷曲线(图 2),曲线利用指数函数进行拟合:

$$\epsilon_p = a \times e^{b\sigma_d} \quad (2)$$

式中 ϵ_p 为残余应变; σ_d 为动应力; a 、 b 为震陷曲线参数。

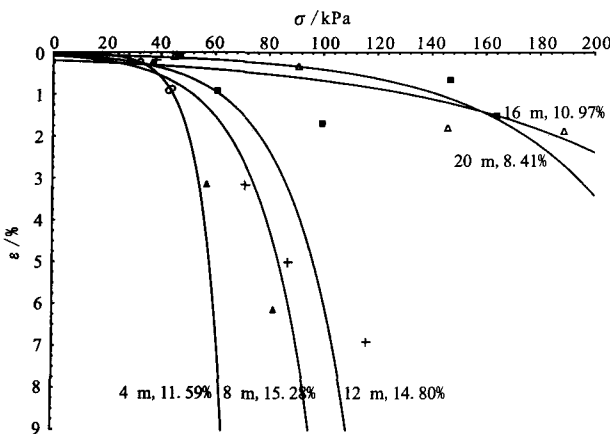


图 2 李家湾不同深度天然黄土震陷曲线

Fig. 2 Seismic subsidence curves of Lijiawan natural loess in different depths.

从图中可以看出,黄土震陷性随深度变化存在一个随着深度的增加、黄土震陷性在逐渐减弱的规律。4 m、8 m、12 m 的浅层黄土震陷曲线在动应力超过一定数值(约为 40 kPa)时下降速度突然加快,

开始出现较大的残余应变;而在 16 m 和 20 m 层位上的深部黄土震陷曲线弧度较小,已接近走平,其震陷特性随动应力增加变化不大。尤其值得说明的是,在 4 m 和 16 m 层位的黄土含水量较为接近,但是震陷性质却大相径庭,显示出了不同深度黄土震陷性的差异性。

通过研究分析震陷曲线可以知道,李家湾黄土在 12 m 至 16 m 之间存在一个震陷性临界层位,很可能处于 15 m 处马兰黄土结束的位置。结果同时表明黄土地层随着深度的增加其固结程度也在加强,下部地层经长时间的上覆地层压力作用,颗粒之间接触更加紧密,孔隙量也在变少,胶结得到加强,所以在地震力作用下其易损性将会变小。所以在一定地震力作用下,大于某一深度的黄土其震陷性将会减小到一般工程场地条件的要求。需要特别提示的是,通过 4 m 与 16 m 深度黄土震陷曲线的对比可知,即使浅层黄土含水量较低,但因其欠紧密的特点,震陷依然会很强;而较深层黄土在含水量很低时震陷会很弱,这一点在黄土场地震陷性条件判定时一定要加以注意。

3 含水量对黄土震陷性的影响

对李家湾场地 5 个深度的原状黄土试样做增湿、减湿处理,每一深度获得 5%、10%、15% 和 20% 四种不同含水量的黄土试样。通过动三轴试验得到了不同含水量条件下震陷曲线(图 3)。

从图 3 可以看出,含水量对黄土震陷性的影响规律总体上是一致的,即随着含水量的增加黄土的震陷性在显著增加;在 10% 和 15% 含水量之间震陷曲线跨度较其它含水量为大,显示出这期间是一个震陷快速增长区间;随着土层深度的增加黄土震陷在逐渐减弱,在 12 m 以下更深处 5% 和 10% 含水量的黄土震陷性已基本消失。

含水量对黄土震陷性的影响程度在不同深度的黄土试样中表现的不尽相同:在 12 m、16 m 和 20 m 的深部黄土中 5% 与 10% 的震陷曲线相互纠缠不清,相距很近,表现出在此层位其震陷的一致性;而在浅层黄土中却显示出了相互的独立性。这表明含水量在 10% 以下时对深部黄土震陷性的影响有限,这一点在处理一定深度黄土地基震陷性时有一定的借鉴意义。

在黄土震陷曲线的基础上,可以得到不同动应力作用下含水量与残余应变对应关系曲线(图 4),以及一定动应力下发生震陷的含水量临界值(表 2),

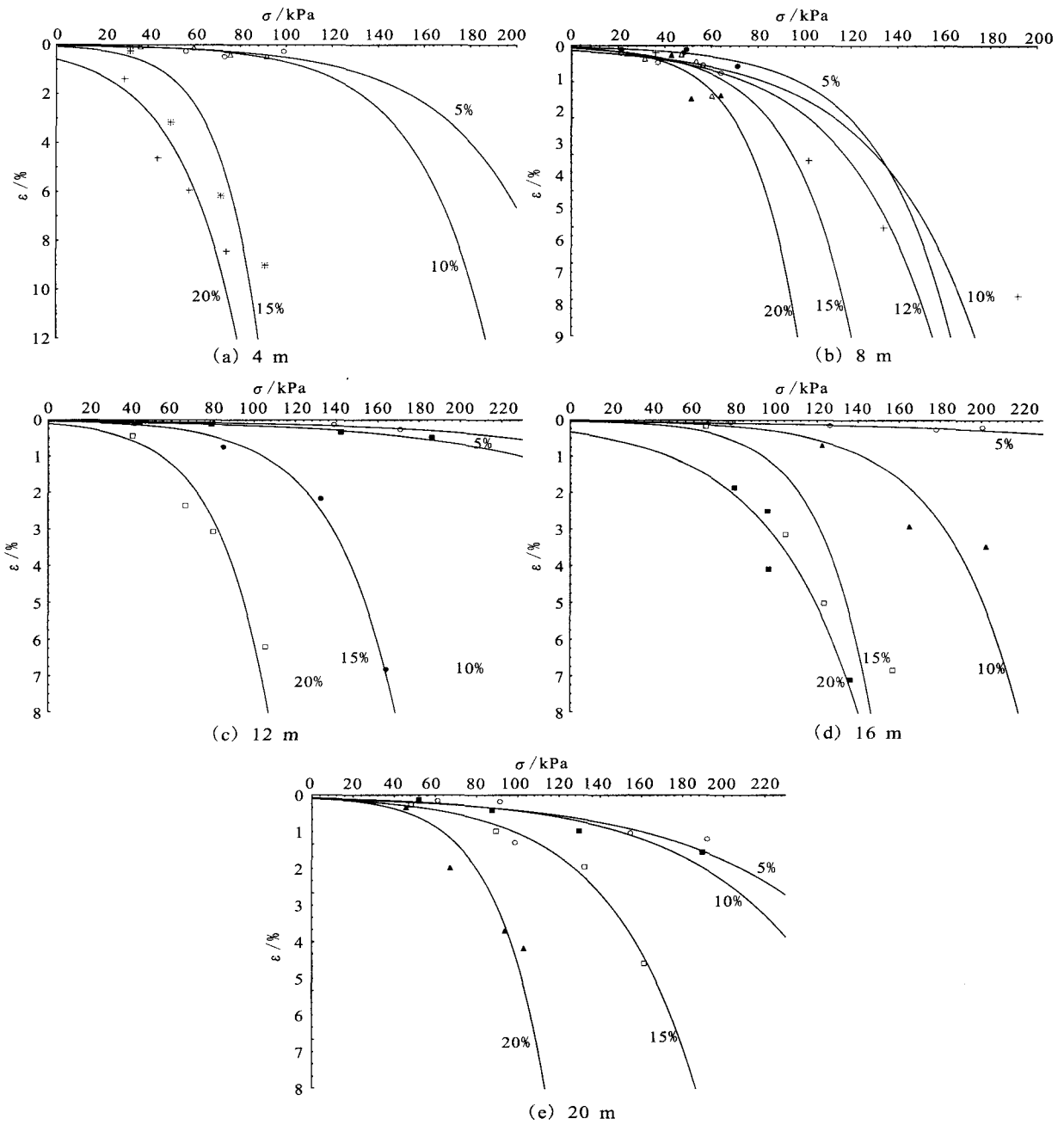


图 3 同一深度不同含水量的黄土震陷曲线

Fig. 3 Seismic subsidence curves of loess in same depth with different water contents.

图中曲线均用指数函数拟合式(2)。

不同动应力下黄土震陷临界含水量曲线见图 5。能够看出 4 m 处黄土随着动应力增加,在 50~80 kPa 区段震陷临界含水量急剧减小,说明浅层黄土对水的敏感性较强;而 8~20 m 处黄土没有急剧变化的区段,说明深层黄土对水的敏感程度有所减弱;注意到 12 m 与 16 m 之间的震陷临界含水量跨度较大,仍然说明了期间有一个临界层位的存在。

4 结论

水对黄土震陷的影响是显著的。当水进入黄土时会溶解一部分黄土中的易溶盐,其中包括颗粒、胶结物等;即使易溶盐很少不会影响黄土的力学性质,水也会以各种形式削弱黄土的结构强度,从而增加黄土震陷发生的可能性。

通过对李家湾黄土含水量对震陷性影响的分析,可以得出以下结论:

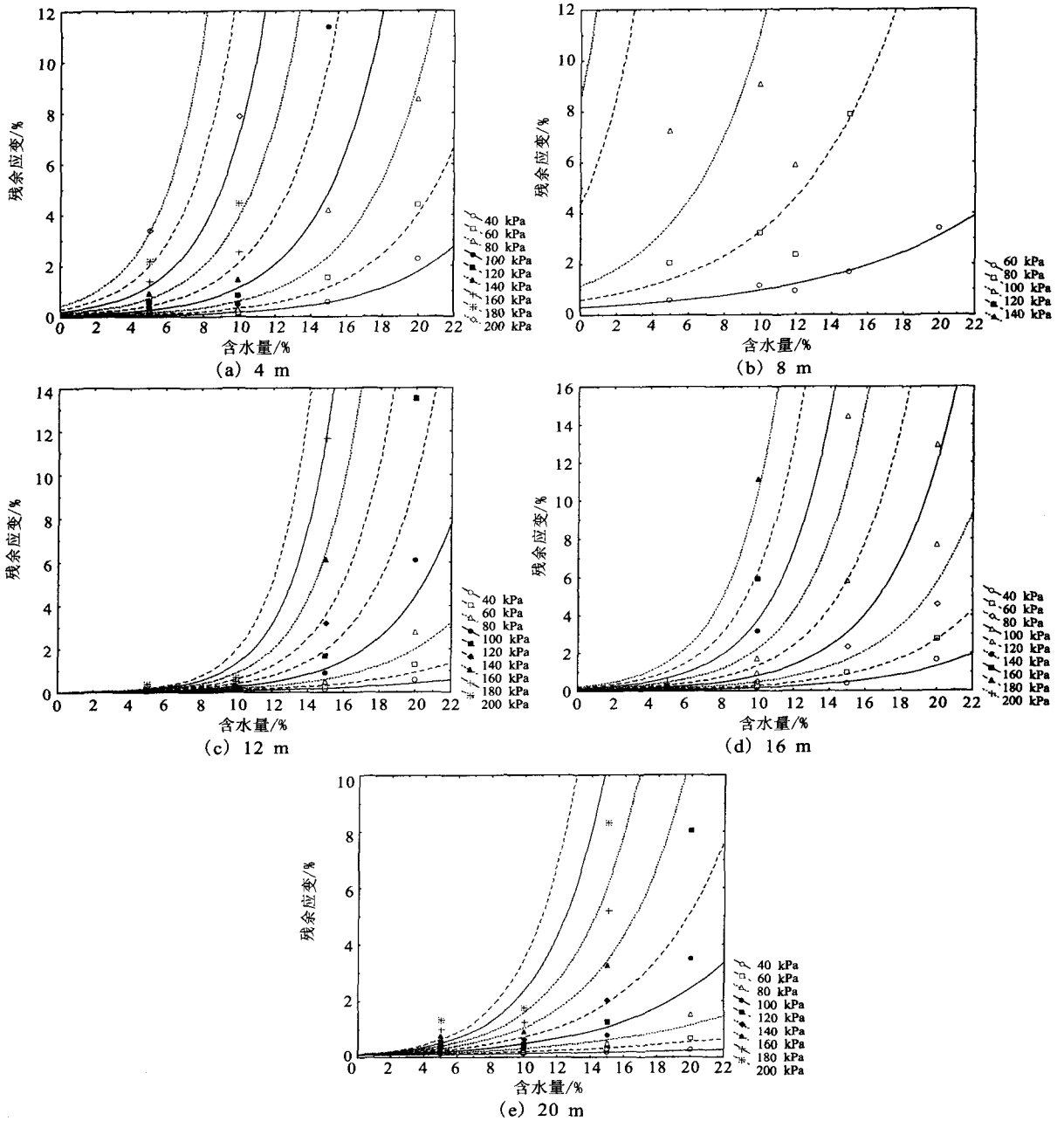


图 4 不同深度黄土在不同动应力作用下含水量对震陷影响

Fig. 4 The influence of water content on seismic subsidence of loess in different depths under certain dynamic stresses.

(1) 相比以前的含水量影响的试验研究, 本文的震陷系数与含水量的统计关系更为可信, 因为实验试样均来自于同一块黄土地场。

(2) 针对不同地区黄土, 建立不同动应力下残余应变与含水量的定量关系, 即可从开始产生显著震陷性的临界含水量来判断其震陷性大小。

(3) 根据李家湾黄土含水量对震陷影响的系统研究, 各个层位黄土对含水量的敏感程度是不同的,

土层越浅影响越大; 反之影响较小。并随着土层深度的加深所需要的震陷临界含水量越大。

(4) 较大动应力时, 临洮李家湾黄土不同深度临界含水量却不同: 4 m (80 kPa) 是 5.45%, 8 m (180 kPa) 是 4.25%, 12 m (200 kPa) 是 4.95%, 16 m (200 kPa) 是 9.44%, 20 m (200 kPa) 是 7.52%。说明震陷特征明显的浅层黄土当动应力达到一定值时, 只需其黄土大于或接近缩限时震陷即可发生; 而

表 2 不同动应力下李家湾黄土震陷临界含水量

动应力 /kPa	4 m 深度		8 m 深度		12 m 深度		16 m 深度		20 m 深度	
	临界含水量 /%	拟合函数 ϵ	临界含水量 /%	拟合函数 ϵ	临界含水量 /%	拟合函数 ϵ	临界含水量 /%	拟合函数 ϵ	临界含水量 /%	拟合函数 ϵ
40			19.34	$0.018e^{0.23w}$	20.74	$0.022e^{0.2w}$	28.18	$0.017e^{0.16w}$	52.72	$0.087e^{0.05w}$
60	13.78	$0.302e^{0.12w}$	16.06	$0.027e^{0.25w}$	17.37	$0.029e^{0.23w}$	22.53	$0.017e^{0.2w}$	31.35	$0.09e^{0.09w}$
80	5.45	$0.589e^{0.17w}$	13.3	$0.04e^{0.27w}$	14.63	$0.039e^{0.25w}$	18.78	$0.017e^{0.24w}$	22.12	$0.093e^{0.13w}$
100			10.96	$0.06e^{0.29w}$	12.34	$0.052e^{0.27w}$	16.11	$0.017e^{0.28w}$	17.00	$0.097e^{0.16w}$
120			8.93	$0.09e^{0.32w}$	10.77	$0.07e^{0.28w}$	14.11	$0.017e^{0.32w}$	13.73	$0.1e^{0.2w}$
140			7.17	$0.134e^{0.34w}$	8.75	$0.093e^{0.32w}$	12.55	$0.017e^{0.36w}$	11.46	$0.104e^{0.23w}$
160			5.62	$0.2e^{0.36w}$	7.31	$0.125e^{0.34w}$	11.31	$0.016e^{0.4w}$	9.80	$0.108e^{0.27w}$
180			4.25	$0.3e^{0.38w}$	6.06	$0.166e^{0.36w}$	10.29	$0.016e^{0.44w}$	8.52	$0.112e^{0.3w}$
200					4.95	$0.222e^{0.39w}$	9.44	$0.016e^{0.48w}$	7.52	$0.117e^{0.34w}$

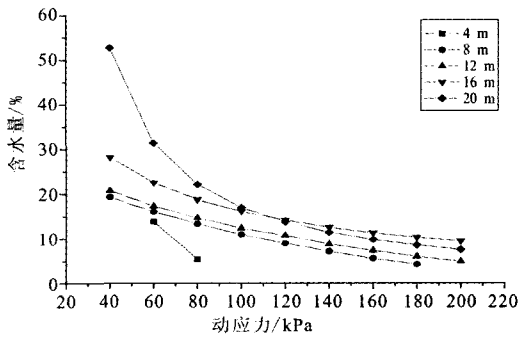


图 5 不同动应力下黄土震陷临界含水量曲线
Fig. 5 The critical water content curves of loess seismic subsidence under different dynamic stresses.

深层黄土由于其固结较强,孔隙减少,胶结加强,临界含水量会较高。含水量在 10% 以下时对深部黄土震陷性的影响有限,这一点在处理一定深度黄土地基震陷性时有一定的借鉴意义。

致谢:感谢中国地震局黄土地震工程开放实验室的王峻高级工程师和李兰高级工程师,他们负责完成了本研究的室内实验工作;感谢中国地震局兰州地震研究所的陆斌博士、安张辉助研和胡永钧助研,他们在本研究的现场取样时给予了我们很多帮助。

[参考文献]

[1] 王兰民,主编.黄土动力学[M].北京:地震出版社,2003:198,208.
[2] 张振中,段汝文.黄土震陷研究与预测[J].西北地震学报,

1987,9(增刊):14-18.
[3] 张振中.黄土地震灾害预测[M].北京:地震出版社,1999:68-70.
[4] 王兰民,张振中.地震时黄土震陷量的估算方法[J].自然灾害学报,1993,2(3):85-94.
[5] 余雄飞,谢定义.原状黄土的增湿结构弱化特性对动荷载下变形特性的影响[A]//全国土工建筑物及地基抗震学术讨论会论文汇编[C].北京:中国水利学会岩土力学专业委员会,1986:225-228.
[6] 何光,朱鸿博.黄土震陷研究[J].岩土工程学报,1990,12(6):99-103.
[7] 湿陷性黄土地区建筑规范(GB50025-2004)[S].北京:中国建筑工业出版社,2004.
[8] 王兰民,袁中夏,石玉成,等.黄土地震灾害区划指标与方法研究[J].自然灾害学报,1999,8(3):87-92.
[9] 徐舜华,王兰民,袁中夏.黄土震陷初判指标的界定研究[J].西北地震学报,2006,28(2):140-143.
[10] 张冬丽,王兰民,王玉华.有限元方法在黄土地基震陷预测中的应用[J].西北地震学报,2002,24(3):207-214.
[11] 徐舜华,秋仁东,王平.黄土震陷下限深度研究[J].西北地震学报,2007,29(3):240-244.
[12] 陈希哲.土力学地基基础(第三版)[M].北京:清华大学出版社,2003.
[13] 谢定义.试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J].岩土工程学报,2001,23(1):3-13.
[14] 孙崇绍.西北黄土地区河谷城市地震动参数小区划研究——以兰州为例[J].西北地震学报,2007,29(1):3-11.
[15] 廖胜修,程菊红.黄土场地震动液化实例[J].西北地震学报,2007,29(1):54-57.