

DOI: 10.11779/CJGE201511019

爆破场地黄土震陷空间分布特征研究

徐舜华^{1, 2}, 孙军杰^{1, 2}, 王兰民^{1, 2}

(1. 中国地震局甘肃省黄土地震工程重点实验室, 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: 黄土震陷是广大黄土地区在进行工程建设时避免不了的一种主要地震灾害。许多年来, 黄土震陷研究是以室内试验为主要手段, 天然地震黄土震陷现象的例证与现场试验的研究较为罕见。在典型震陷性黄土地场通过爆破方法模拟实际地震动的现场试验能够直观地了解黄土震陷发生的真实过程和分布特征和影响因素。试验结果表明, 较强的地震动可以诱发黄土震陷的发生; 场地内黄土震陷的最大量值可达33 mm, 最小值约为13 mm; 通过分析场地内黄土震陷分布特征和地震动强度分布特征可知, 地震动强度与频谱H/V值是影响黄土震陷的决定性因素, 地形也对震陷分布具有一定的影响; 因为离爆破点较近, 场地下部土层沉降贡献率大于上部土层。

关键词: 黄土; 震陷; 爆破; 空间分布特征; 地震动强度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)11-2073-06

作者简介: 徐舜华(1974-), 男, 副研究员, 主要从事岩土地震工程方面的科研工作。E-mail: xshunh@163.com。

Distribution characteristics of seismic subsidence of in-test field by explosion

XU Shun-hua^{1, 2}, SUN Jun-jie^{1, 2}, WANG Lan-min^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA & Gansu Province, Lanzhou 730000, China; 2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The seismic subsidence of loess is a main kind of earthquake disaster in a large loess region, and it cannot be avoided during project construction. It has been investigated for many years mainly by indoor experiment, while it is rare that it is found during actual earthquakes or investigated by field tests. The seismic subsidence of loess can be really seen by blast instead of actual ground motion in typical loess field. So distribution characteristics can be found and factors of the seismic subsidence of loess can be analyzed. The experimental results show that the strong ground motion can cause seismic subsidence of loess. The maximum of loess subsidence is 33 mm and the minimum is 13 mm in test field. It is discovered that the settlement distribution coincides well with the strength of ground motion and spectral characteristics (value of H/V) in the loess field and is partly controlled by terrain. The seismic subsidence of upper loess layers is less than that of the lower ones in the field tests due to the closer distance between the lower layers and explosion shots.

Key words: loess; seismic subsidence; explosion; distribution characteristic; strength of ground motion

0 引言

黄土是一种具有多孔隙和弱胶结的特殊土类^[1-2]。中国的广大黄土地区大部分处于强震多发区^[3]。现场震害调查和室内试验研究结果表明^[4-8], 中强地震作用下, 黄土容易产生震陷和液化等灾害。黄土在强地震时发生震陷的成果更多的是来自室内试验研究。在1995年的永登地震后的野外现场调查过程中发现过黄土震陷的相关例证^[9], 然而在此后的研究中在黄土区再未发现相关震害现象发生。2008年, 在一次典型震陷黄土地场上的人工爆破试验表明^[10], 人工爆破可以诱发黄土震陷的发生, 可以推测在天然地震条件下黄土震陷现象是客观存在的。

本文利用在爆破测试现场观测到的黄土地震陷数据, 深入分析了在人工地震条件下黄土震陷的发生、发展和分布规律以及相关的影响因素。这不仅是对实际地震中黄土震陷能否发生的例证, 而且能够深入了解实际地震发生时黄土震陷的场地分布特征及影响要素、黄土地震陷发展规律以及黄土震陷的场地土体分层沉降特征。这对于天然地震条件下黄土震陷的研究具有重大的工程意义和实用价值。

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本业务费项目(2013IESLZ06);
国家自然科学基金项目(51209186); 冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201104); 甘肃省自然科学基金项目(145RJZA165)
收稿日期: 2014-08-20

1 试验场地

1.1 场地情况与地层

试验场地坐落于洮河III级阶地之上，地势较为平坦，在选择试验场地时，本着黄土层厚度适中，含水率在塑限上下，土体具有室内试验判定的足够的震陷性、场地使用赔偿费用适当、周边环境适宜爆破工作开展和交通便利等原则，黄土地震陷与桩基负摩阻力现场观测试验最终选定在位于甘肃省临洮县太石镇李家湾村北李家湾坪南缘的典型Q3黄土地场上爆破实施（爆破场地见图1）。



图1 爆破前试验场地全貌

Fig. 1 Experiment of site before explosion

该试验场地土层的柱状剖面如图2所示，场地土层0~1.0 m为植耕土；1.0~15.0 m为典型震陷性风成黄土，土质疏松，孔隙较发育，孔隙比大于1，含水率为10%~16%，局部黏粒含量较高，呈现不均匀特征；15.0~28.0 m为非震陷性次生（水成）黄土，土体黏粒含量增高，含水率低于9%，该层土体水平层理明显，自上而下愈渐发育；28.0 m以下为卵砾石层，厚度较大，崖边露头可见其覆盖于第三纪红层之上。

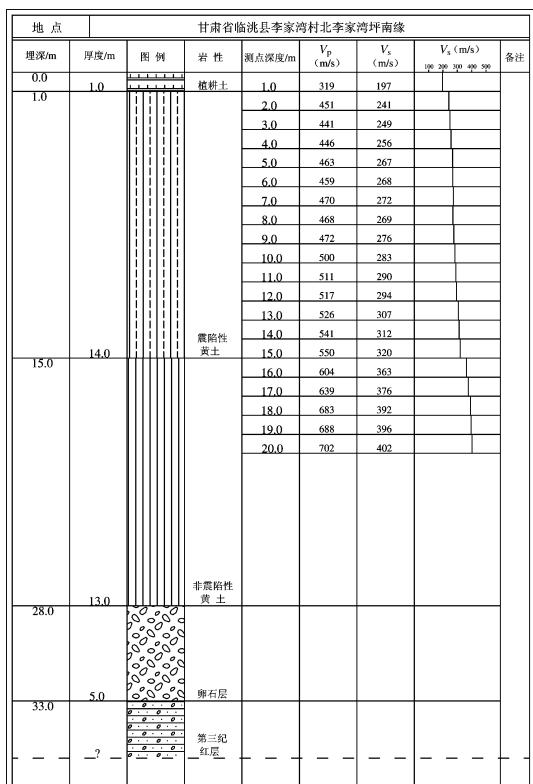


图2 试验场地土层柱状剖面图

Fig. 2 A column of soil strata of test field

不同深度土层黄土物理参数见表1。

表1 不同深度黄土物理参数

Table 1 Physical parameters of loess in test field

深度 /m	含水率 /%	密度 /(g·cm ⁻³)	干密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙比
4	11.59	1.47	1.32	1.045
8	15.28	1.48	1.29	1.101
12	14.80	1.49	1.29	1.109
16	10.97	1.48	1.33	1.026
20	8.41	1.54	1.42	0.911

1.2 爆破设计与时程

如图3所示，在场地上在以30 m为直径的圆周上每3.14 m为间隔均匀分布了30个爆破点，每个爆破点深度23 m，位于震陷性黄土层之下。考虑到爆炸对土层冲击的持续性与均衡性，设计间隔700 ms成对爆炸，共计15组爆破。

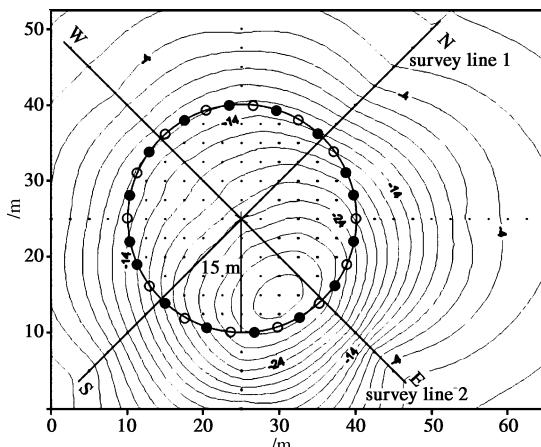


图3 场地土体沉降区域分布测线

Fig. 3 Isoline map for seismic subsidence of loess in test field induced by explosions

这样获得了超过10 s的地震动时程如图4所示（双箭头竖线标注了未爆炮源的可能位置），基本反映了试验中微差爆破的实际作用效果（UD为垂直分量；SN，EW分别为水平南北、东西分量）。容易看出爆破引发地震动的三分量强度与持时特征，即PGA普遍较大，持时较短。

2 试验场地黄土地震陷分布特征

2.1 震陷分布特征

试验期间土体沉降监测结果显示，场地试坑内部及其周边区域在爆破完结后并未出现明显的地表裂缝，不过观测期内场地的全部震陷观测点都表现出了致的下沉趋势，这一趋势随着场地震陷量的不断累积而逐渐减弱。图3显示了现场监测期间试验场地内黄土地震陷分布的等值线图。从图3中可见，试验场地

内的土体沉降的分区特征极为明显, 大致表现出中间高、外围低的基本特征。监测期间试验场地的整体沉降具有近东西向的轴对称特征。能够说明, 地貌因素在影响和制约爆破模拟地震动强度、场地土体沉降量值等的分布与发展特征时具有至关重要的作用。

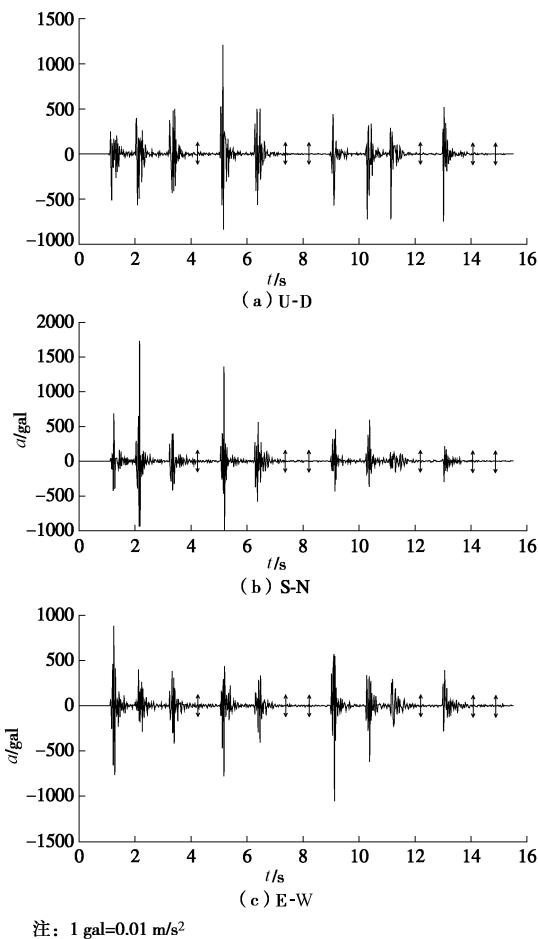


图 4 场地中心位置记录到的地面强震动加速度时程

Fig. 4 Time histories of ground motion in field center

沉降监测期间, 试坑内黄土震陷的最大量值可达 33 mm, 最小值约为 13 mm; 试坑外的土体震陷量, 最大值约 26 mm, 最小值为 0 mm。试验场地内外震陷量最大的观测点均位于相应区域的南侧, 震陷量最小的两个点则皆在北侧。

通过分析试验场地区域内不同测线土体沉降量的分布及其变化, 能够定量描述黄土震陷的区域分布特征。利用图 3 中所示位置的测线, 可绘制出如图 5 示例的场地土体沉降的区域分布形态。图 5 统计的各条测线黄土震陷分布变化结果显示, 试验场地黄土震陷的重心偏离场地中心位置 5.0~11.0 m, 这一偏移依测线不同而存在差异。其中, WN→ES 测线给出的偏移量最大, 约为 11.0 m; WS→EN 测线的偏移量最小, 约为 5.0 m。

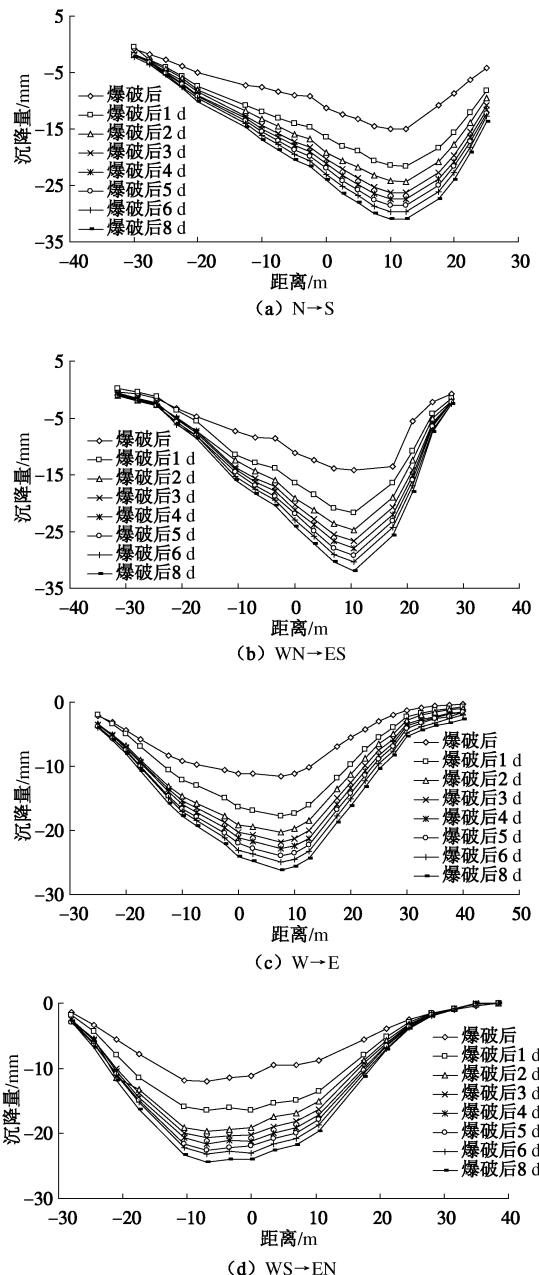


图 5 场地不同测线土体沉降分布

Fig. 5 Distribution of seismic subsidence along survey lines

2.2 震陷分布影响因素

一般而言, 典型的震陷性黄土是一种欠压密、具结构性强度的土体。黄土震陷的实质, 是欠固结土体自身特有的结构性强度遭受地震力破坏而在自重或外荷加载下产生的再固结现象。由此不难推断, 影响黄土震陷量值特征的主要因素, 定当是土体物性参数和外部输入动荷载。对于特定的黄土场地, 土体结构性强度及其场地分布特征应可作为已知要素。在此既定状态下, 地震动强度必然是影响黄土场地震陷性的决定性因素。同时, 既定场地的地形地貌条件不可能随时产生变动, 因此地震动强度的分布特征也将主导黄土震陷的场地分布形态。

场地地面运动强度与频谱特性是描述爆破地震动特征的两个主要参量。对于前者而言，地面强震动三分量的矢量和，在一定程度上表征了观测点所在位置地震动能量的强弱；与此同时，地震动频谱 H/V 值则能反映地震动中水平分量与垂直分量之间能量的相对关系。因此，叠加绘制强地面运动三分量矢量和及频谱 H/V 均值与爆破后、爆破后 8 d 两个重要时段的土体震陷量值等数据，能够分析阐释爆破模拟地震动强度与频谱分量影响场地震陷的定量关系。依照该思路的对比如图 6 中所示。

由图 6 可见，试验场地内黄土震陷量值最大的区域与较高的地震动强度及其频谱 H/V 量值具有较好的对应关系，进一步地，图 6 中红色虚线标注的地震动强度与频谱 H/V 二者量值较大的合域椭圆范围，则基本涵盖了试验场地内黄土震陷量值分布最大的观测区域，而场地沉降分布形态的重心正位于该区域的中心位置。

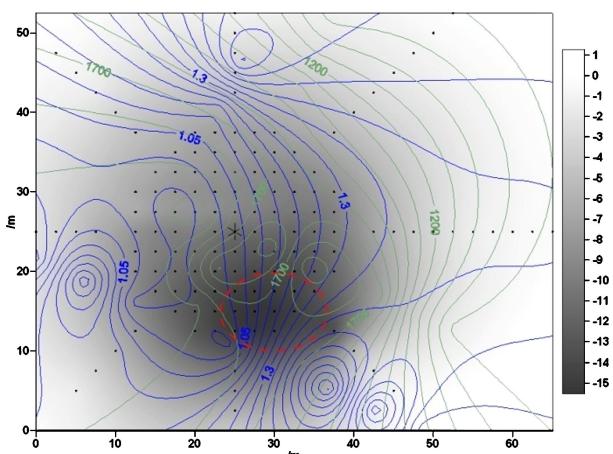


图 6 爆破地震动与场地震陷的关系

Fig. 6 Relationship between ground motion by explosions and seismic subsidence of loess

除过地震动强度及频谱特征对场地黄土震陷有决定性影响之外，同时应当认识到，场地黄土震陷量及其分布特征也与地形地貌条件有重要关联。不同时段场地黄土震陷分布重心与对称轴的偏移能够看出，试验场地土体沉降不仅受地震动特征制约，同时地形地貌条件也对这种变化施加了控制作用。图 7 分析了试验场地地形地貌条件对黄土震陷的场地分布形态的影响与控制作用。

如图 7 中所示，试验场地中#27 与#30 测点（各距场地中心 38.5 m 与 40.0 m）的最终沉降量分别为 0, 2.68 mm，若以这两个测点为参考作圆，其远端圆周与场地南侧陡崖边界交成扇形 OAB，弧形 AB 可简单视为能够表征扇形区域内场地土体产生震陷的极限位置。由于场地南侧陡崖起始界限位于此沉降极限范围

之内，该自由边界对土体沉降的约束要比场地其它部位弱，这将导致黄土震陷的场地分布形态向南东方向偏移。理论而言，最终的沉降偏移位置应当位于扇形 OAB 区域内。图 7 中也给出了爆破后与爆破后 8 d 场地沉降重心附近的震陷等值线，两组等值线的示意对称轴自爆破后的 L0 位置转至爆破后 8 d 的 L8 位置。考虑震源引爆过程花费的时间极短，可近似认为爆破后给出的场地土体震陷分布形态主要以地震动强度、频谱 H/V 值的分布特征为主导，而与地形地貌条件无关，由此可得出结论场地震陷分布重心区域则未必一定位于扇形 OAB 之内。图 7 显示的场地沉降等值线结果证实了这一点。随着爆破后观测时间的延续，场地地形地貌条件应逐渐影响场地震陷的分布形态，可以预见其重心区域必然向扇形 OAB 内部移动。同样地，图 7 给出的两组等值线的对称轴向扇形 OAB 腹地的偏移很好地验证了这一理论推测。

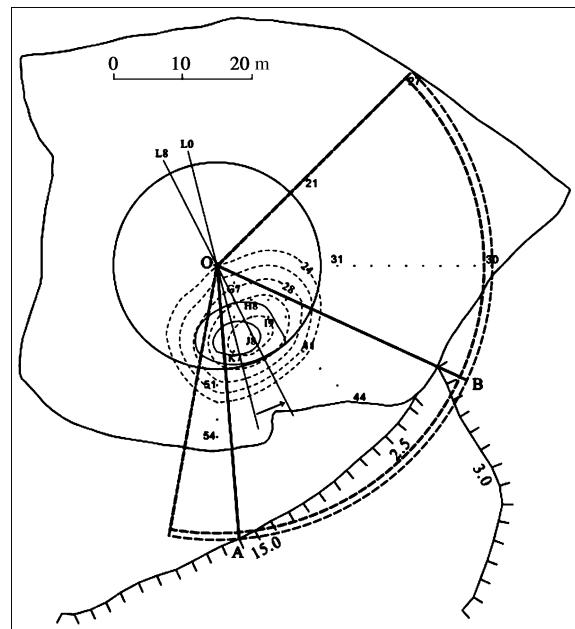


图 7 地形地貌与黄土震陷的场地分布

Fig. 7 Influence of terrain on seismic subsidence of loess

综上分析可知，不同地形地貌条件下的黄土地带，其内土体沉降时，所受边界约束也有差别，此种差异能够产生与地貌条件相联系的场地沉降分布特征。这一点足够充分说明，为什么先前的震害考察中，观察到的黄土震陷现象会发生在山梁部位。

2.3 土体分层沉降特征

试验中，在观测场地黄土震陷分布与发展的同时，也利用埋设的机械式分层沉降观测装置对场地不同深度土体的震陷量进行了监测。

图 8 给出了场地不同深度土层震陷的时域发展特征。

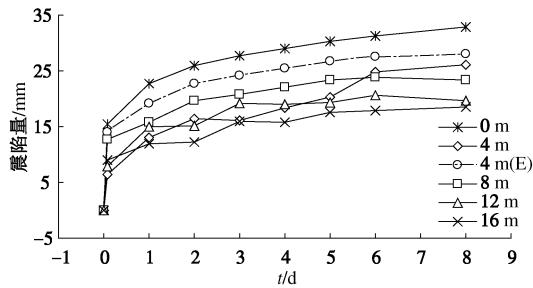


图 8 场地不同深度土层震陷发展特征

Fig. 8 Seismic subsidences of loess at different depths

由于 4.0 m 埋深黄土层的震陷观测数据表现极不稳定(笔者认为该层黄土沉降观测数据存在问题,可能与其布设时机械装置底板有过多土的堆积和试验期间观测装置受到人为扰动有关),在图 8 中,补充了 4.0 m 埋深土层的理论修正的沉降数据(按照埋深 8.0~16.0 m 土层之间沉降变化关系,取埋深分别为 0m 与 8.0 m 黄土层沉降数据的均值,时域发展曲线标记为 4 m (E)),0 m 埋深土层(地表)的沉降分析选用了试验场地内震陷最大观测点的数据。

由图 8 不难看出,不同埋深的土体其观测震陷量随深度渐浅而依序增高。从理论上来讲,地表震陷量代表了其下所有土层自身沉降的总和,不同埋深土层的自身沉降量则表征该土层对总震陷量的贡献情况(相邻土层沉降量的差值即为二者之中上部土层的自身沉降量)。

图 9 中的统计结果显示,试验场地内上部土层(埋深 0~16.0 m)对总沉降的贡献比下部土层(埋深 16.0~20.0 m)小。从平均贡献率来看,上部土层贡献和值约为 45%,而下部土层则约为 55%。室内动三轴震陷试验结果表明,试验场地内埋深 1.0~15.0 m 典型震陷性黄土层的平均震陷系数可达 7%,15.0~20.0 m 非震陷性水成黄土层的震陷系数小于 0.5%。若以典型震陷性黄土底部埋深为界,根据试验数据可算得,上部黄土的理论震陷量约为 105 cm,下部黄土的理论震陷量小于 25 mm。现场试验中,埋深 16.0~20.0 m 黄土层的最终沉降约为 18 mm,而 0~16.0 m 黄土层的终期沉降约为 15 mm。

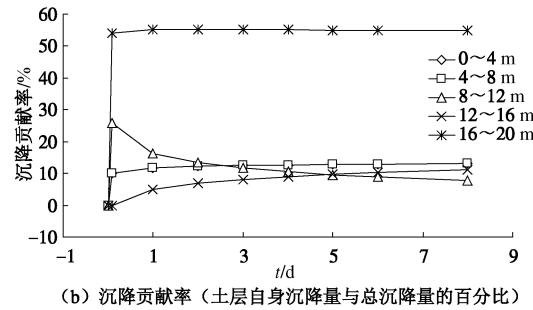
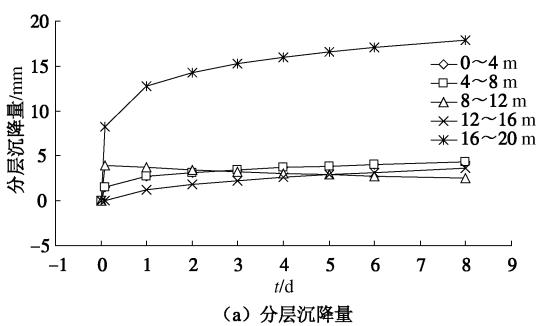


图 9 场地不同埋深土体分层沉降贡献

Fig. 9 Settlements of different layers

上述数据说明,试验场地上层黄土的潜在震陷性并未被完全引发,如果该土层再次经历足够强度的地震动时,还将可能发生震陷。前文中爆破地震动强度及其频谱特征的相关分析结果已证实,试验中的爆破地震动,其有效能量强度远低于实际地震引发的强地震动,此差别可能是造成黄土震陷现场观测数据与室内试验数据出入较大的主要原因,而现场试验中观测到的震陷性极小的下部土层能够产生比震陷性极大的上部土层还要大的震陷量的现象,应与下部土层距离炮源更近以及上部土层起始压力不够有关(两者土层均未达到理论震陷量的饱和程度)。

3 结论与讨论

(1) 尽管现场爆破黄土震陷量较小,试验结果表明,黄土震陷不仅能通过室内试验进行测试研究,而且能够被实际地震所诱发。因此,由实际地震引发的黄土震陷灾害考虑进工程抗震规范是完全合理和科学的。

(2) 地震动强度和 H/V 频谱值是影响爆破试验场地黄土震陷分布的决定性因素。另外,地形地貌也有一定的影响。

(3) 爆破能量中绝大部分在使周围土体压缩过程中耗散,仅有一小部分会在炮源附近转化为强地震动。与真实地震相比,爆炸表现为冲击型能量,在显示较大瞬时 PGA 的同时,其后续能量不足,将导致爆破引发的地震动仅能维持较短的时间,即具有持时较短的显著特征。它们对黄土震陷的定量影响主要体现在能量大小与持时方面。这可能为爆破试验现场黄土震陷量较小的原因。

(4) 震陷性黄土的震陷性远大于非震陷性黄土。场地上部黄土震陷贡献率低于下部黄土贡献率,原因可能下部黄土更接近爆破点以及上部土层起始压力不够有关。

(5) 鉴于黄土震陷性的数据主要来自实验室,虽然也有极少自然黄土震陷现场的案例,从试验角度来

讲, 室内黄土震陷形变更为充分, 而自然场地则更具不均匀性, 一直以来实验室震陷形变数据较实际自然场地震陷值大, 将来如何将实验室震陷形变数据转换为更为接近实际场地震陷表现, 对作为实际抗震设计中的一个实用指标具有更重要的意义。

参考文献:

- [1] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980, 23(12): 1203 - 1208. (GAO Guo-rui. Microstructure and collapsibility of loess in China[J]. Science in China, 1980, 23(12): 1203 - 1208. (in Chinese))
- [2] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑), 1987, 17(12): 1309 - 1316. (LEI Xiang-yi. Poretype and collapsibility of loess in China[J]. Science in China(Series B), 1987, 17(12): 1309 - 1316. (in Chinese))
- [3] 王兰民, 石玉成, 刘旭, 等. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003. (WANG Lan-min, SHI Yu-cheng, LIU Xu, et al. Loess dynamics[M]. Beijing: Earthquake Press, 2003. (in Chinese))
- [4] 张振中, 段汝文. 黄土震陷研究与震害[J]. 西北地震学报, 1987, 9(增刊): 63 - 69. (ZHANG Zhen-zhong, DUAN Ru-wen. Study on seismic subsidence and seismic hazards of loess[J]. Northwestern Seismological Journal, 1987, 9(S0): 63 - 69. (in Chinese))
- [5] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 35 - 41. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHANG Zhen-zhong. A constitutive laws considering soil structure properties[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 35 - 41. (in Chinese))
- [6] 王兰民, 刘红玫, 李兰, 等. 饱和黄土液化机制与特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 89 - 94. (WANG Lan-min, LIU Hong-mei, LI Lan, et al. Laboratory study on mechanism and behaviors of saturated loess liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(1): 89 - 94. (in Chinese))
- [7] 王兰民, 邓津, 黄媛. 黄土震陷性的微观结构量化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3025 - 3031. (WANG Lan-min, DENG Jin, HUANG Yuan. Quantitative analysis of microstructure of loess seismic subsidence[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3025 - 3031. (in Chinese))
- [8] 王峻, 石玉成, 王杰民, 等. 不同地震荷载作用下黄土震陷特性的对比分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 102 - 103. (WANG Jun, SHI Yu-cheng, WANG Jie-min, et al. Comparative analysis of characters of loess subsidence under different seismic load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 102 - 103. (in Chinese))
- [9] 张冬丽, 王兰民. 1995年永登地震山体变形计算机模拟与机理分析[J]. 西北地震学报, 2003, 25(1): 77 - 81. (ZHANG Dong-li, WANG Lan-min. Computer-added analogue and mechanics analysis on deformation of hill ground induced by Yongdeng earthquake in 1995[J]. Northwestern Seismological Journal, 2003, 25(1): 77 - 81. (in Chinese))
- [10] 王兰民, 孙军杰, 徐舜华, 等. 爆破模拟地震条件下黄土场地震陷研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 913 - 921. (WANG Lan-min, SUN Jun-jie, XU Shun-hua, et al. Characteristics of seismic subsidence of loess site induced by blasting ground motion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 913 - 921. (in Chinese))