

# 黄土地区城市的震陷灾害

张振中 王兰民

(国家地震局兰州研究所)

## 摘 要

本文根据黄土场地具有震陷性的研究结果提出了目前还未被人们引起注意的特殊灾害,即在地震作用下黄土场地上的城市将产生严重的地基失效事件。由于震陷的突然发生和它普遍带有不均匀性,将导致一般工业与民用建筑在振动和地基残余变形的共同影响下加重震害。常见的震害现象是建筑物开裂、倾斜和倒塌。本文以兰州为例,说明了黄土引起的震害将是一种不可低估的严重灾害,应引起工程界和城市建设部门的重视,研究黄土震陷对建筑物的影响,采取相应的防御措施,以减轻或避免震陷灾害带来的损失。

## 前 言

我国西北黄土高原是多地震地区,根据地震学家的预测,我国西北自 1985 年以来已进入一个地震活跃期,面临着发生多次强震的严峻形势,这将给那里的居民和工、农业生产及工程建设带来巨大的灾难,如西安、兰州、西宁等大、中城市都位于黄土场地上,这些城市都已经或正在完成减轻和防御地震灾害的综合对策。但是这些在黄土场地上的城市,黄土地基将因黄土震陷而导致大片建筑物的震害还没有引起足够的注意。

本文作者根据黄土动力学特性的实验研究和黄土地区震害考察资料,提出了黄土震陷性的判别与预测方法。认为上更新世马兰黄土和全新世的黄土状土是具有大孔结构的弱粘结土,因而具有特殊的工程性质。在地震作用下,因大孔结构崩溃破坏而产生急剧的残余变形——震陷。经估算,有些地区的震陷量相当惊人,将远远超过建筑物地基允许沉降量、沉降差或倾斜度。由于这种沉降是在地震振动过程中突然发生,对建筑物破坏作用尤为明显,将使其严重破坏或倒塌。据资料<sup>(1)</sup>介绍,1974—1975 年调查,陕、甘、宁、青、晋、豫六省区有 1505 幢房屋因黄土湿陷而严重破坏,其过程可以延续数月或数年,人们易于觉察并及时采取防御措施,不致于造成房屋内的财产损失和人员伤亡。但震陷引起的破坏过程仅数秒或数十秒时间,震害及其经济损失要比前者大得多,所以黄土场地的震害预测,尤其是黄土震陷性对建筑物震害影响的研究有十分重要的意义。

## 一、黄土的震陷性及其震害

城市的地面破坏形成的灾害是多种多样,如地下矿井的采空或岩溶引起的地面塌陷、地下水过量开采引起的地面沉降、由于构造运动或地下水位上升引起的地裂缝、砂土或轻亚粘土受震液化引起的震陷,黄土场地因地下水位上升引起的湿陷等等。而对于黄土在地震作用下的震陷研究很少,因而对黄土震陷造成的震害还未引起人们的重视。近十年来作者对此问题进行了

大量的现场考察和室内的黄土动力特性试验,研究结果表明,黄土存在震陷性,它与建筑工程的震害有着密切的关系<sup>(2)</sup>。

### 1. 黄土震陷性在室内试验研究结果中的反映

在最初进行黄土动力特性的动三轴仪实验中发现,当对试样所加的动应力达到一定数值时,在一定振次内突然崩溃性破碎的现象,同时在应力—应变关系曲线上表现为达到一定动应力后应变急剧增长直至破坏的规律,从而认为黄土在地震载荷作用下具有附加沉陷的特性,并且这种沉陷不同于其它粘性土的振密变形特性,在应力—应变关系中存在阈值,我们把这种残余变形称为黄土的震陷。

根据土动力学的实验资料我们又对应进行了黄土显微结构的电镜扫描分析,其结果表明凡是震陷性强的黄土都具有明显的架孔空隙结构。它导致了力学性质上特殊性,在震陷实验中显示出很低的临界动应力,又因粒间胶结很弱,结构强度很低,一旦受力,大孔隙结构产生崩溃性破坏,粉粒填入大孔隙而呈现急剧增大的残余变形,这也就是震陷的形成机制。与此相反,凡是架空孔隙结构不明显的凝块镶嵌胶结结构,不具震陷性。

在黄土的物理性质指标中也可以找出对应的相关性,其震陷的含水量界限为10—15%,低于缩限含水量的试样将无明显的残余应变<sup>(3)</sup>,研究还表明震陷与湿陷在形成条件上有极端相似的特点。综上所述,可以凭借这些指标作为震陷的判别标志。

### 2. 黄土震陷引起的宏观震害现象

在对黄土地区震害考察后认为,有很多震害现象是属于黄土的残余变形,历次发生在黄土地区的大震史料记载和保留至今的震害现象极为普遍,1920年海原8.5级地震时,8度以上高烈度区的黄土丘陵地带形成的区域性地震滑坡事件,其面积可达4000Km<sup>2</sup>以上,这些地震滑坡多在缓斜坡地段,具有崩塌性和没有地下水作用却具流滑形态的特征,在8—9度区甘肃省会宁县当地居民想寻找修筑一个贮水窖的地点都很困难。遗憾的是当时没有留下任何足以证明地面沉陷的地物标志,震陷量无法估计。1556年陕西华县8.0级地震区华县—渭南一带的震陷现象极为罕见,前者三门巷沉陷4—10米,后者城内沉陷最深达7米,鼓楼下沉约1米<sup>(4)</sup>。虽在有些黄土层下有粉细砂层液化引起的沉陷,但黄土的震陷不容忽视。苏联《地震小区划》<sup>(5)</sup>一书中阐述。在地震作用下的黄土因残余变形形成的震陷现象也很普遍,其中有干燥黄土状土8度地震时可发生1米下陷的记载,这样大的震陷如发生在建筑物密集的城市,不考虑地震动对结构和斜坡失稳的影响,只考虑地基失效一项,将导致形成城市严重灾害。凡此种种,说明黄土具有突出的震陷性。

## 二、黄土场地上的震陷量

上面阐述了黄土具有震陷性及其判别的标志,但考虑对工程是否影响时,还必须进行震陷量的预测。近年来对此提出过一些预测方法,为震陷研究成果应用于解决工程问题开拓了途径<sup>(6)</sup>。

### 1. 震陷量的预测方法

为适应于工程应用,我们建议采用相似于黄土湿陷性评价的分层总和法的地震工程地质方法,即根据室内动三轴仪震陷试验取得应力—应变( $\sigma_d - \epsilon_p$ )关系曲线,然后在纵坐标上找出与一定动应力相对应的残余应变即为相对变形系数,称之为震陷系数。当计算地基中某一土层一定动力条件下震陷量时,将相应的震陷系数乘以该土层的厚度得该层的震陷量求和即得剖

面上的总和震陷量。将计算公式表示如下:

$$S = \sum \varepsilon_{pni} \cdot h \quad (1)$$

式中:  $S$ —总震陷量,以厘米计;

$\varepsilon_{pni}$ —震陷系数(%);

$N$ —相应于地震持时的振次,  $i$  表示第  $i$  层;

$h_i$ —第  $i$  层的厚度(厘米)。

必须说明的是上述变形是轴向动应力作用下得到的压缩变形参数,而工程上主要考虑的是地震水平剪应力对地基的作用。为此,需根据工程场地给定的地震力(烈度或加速度)作一转换,并根据不同深度乘以相应的折减系数,以求出在给定地震力作用下的震陷系数,再进行震陷量的计算。

除根据试验结果获得震陷系数外,还利用已经取得的震陷试验结果与黄土物理性质指标、显微结构特征之间的规律关系,运用非线性曲线拟合回归分析方法,推导出估算黄土在一定振次范围内,动荷载作用下的震陷系数经验公式并编成计算机程序,进行震陷量的计算。现将震陷系数的经验公式表示如下:

$$\varepsilon_{p10} = c(\sigma_d - \sigma_{d0})^b \quad (2)$$

式中:

$\sigma_d$ —黄土试样所受动应力(kPa);

$\sigma_{d0}$ —临界动应力(kPa);

$\varepsilon_{p10}$ —在动应力  $\sigma_d$  下,振动 10 次所产生的残余应变(%);

$c, b$ —与土的物性参数有关的震陷参数,由试验确定;

$$c = -1.263 + 3.064 \times |\ln(\sigma_{d0})|^{1/6} \quad (\text{相关系数为 } -0.886) \quad (2.1)$$

$$b = \begin{cases} 1.308 - 0.606 \cdot I_L & W < W_p \quad (\text{相关系数为 } -0.909) \\ 2.084 - 1.073 \cdot I_L & W \geq W_p \quad (\text{相关系数为 } -0.938) \end{cases} \quad (2.2)$$

因此,当已知黄土的含水量( $W$ )、孔隙比( $e$ )、液性指数( $I_L$ )和  $\sigma_{d0}$  时,就可以进行给定地震影响下的震陷量计算<sup>(6)</sup>。

## 2. 黄土场地上的震陷量

我们在西安至西宁的城市地震小区划研究中,对上更新世( $Q_3$ )的马兰黄土和全新世( $Q_4$ )的黄土状土都采集了黄土样品进行了震陷试验,现摘要将震陷系数经验公式估算的地震加速度(或烈度)与黄土震陷量的关系曲线(图 1)及其烈度 7—9 度条件下震陷量预测结果列于表 1:

表 1

黄土震陷量估算值

| 地 点        | 场地编号    | 计算深度<br>(米) | 各烈度下最大震陷量(cm) |      |       |
|------------|---------|-------------|---------------|------|-------|
|            |         |             | 7°            | 8°   | 9°    |
| 兰州市彭家坪     | L—9     | 20          | 1.1           | 8.9  | 57.0  |
|            | L—9 湿化  | 20          | 7.5           | 34.5 | 134.5 |
| 兰州市兰山公园    | L—14    | 19          | 0.1           | 4.0  | 45.0  |
|            | L—14 湿化 | 19          | 5.9           | 30.8 | 133.0 |
| 兰州兰炼炼制所    | L—12    | 5           | 0.0           | 3.5  | 14.5  |
|            | L—12    | 10          | 4.9           | 20.8 | 45.8  |
|            | L—12    | 20          | 25.0          | 50.0 | 130.0 |
| 西宁市沈那古墓    | ST—10   | 20          | 12.0          | 52.0 | 298.0 |
| 西安市昆仑机械厂   | X—8     | 20          | 1.2           | 10.6 | 84.0  |
| 西安市 87 号信箱 | X—20    | 20          | 13.5          | 25.0 | 55.0  |
| 西安市新城阀门厂   | X—21    | 20          | 14.0          | 3.0  | 60.0  |

对表 1 作如下说明:

(1)震陷性黄土的震陷量在相同土层厚度下,随地震烈度的增高而加大,在烈度 7 时,震陷都不明显;当烈度达 9 度时,普遍产生严重震陷,其震陷量平均在 90 厘米左右。

(2)兰州市 L—9、L—14 两组试样为高阶地上典型的  $Q_3$  风成黄土,孔隙比大于 1,粒状架空结构特征,应具有强震陷性,但由于高阶地上的表层黄土的天然湿度普遍低,试样含水量在 7% 左右,接近于缩限含水量,属干型黄土,所以在 8 度地震影响下无明显的震陷,当把试样湿化为 17% 含水量时,震陷明显。这说明今后城市向高阶地发展,因上下水工程处理不当或人类活动的影响改变湿度时,增加了因地震而地基失效的危险。

(3)兰州市 L—12 试样取自一级阶地,因黄土层厚度较薄总震陷量不大,考虑到二级阶地黄土状土厚度较大,而且有三级自重湿陷性黄土分布区,所以把计算深度延伸至 20 米,这作为一、二阶地震陷量的平均值。一、二级阶地是兰州城市的主要部分,在 8 度地震影响下将产生 20—50 厘米的震陷量也是比较严重的震害因素。

(4)西宁黄土试样的震陷量预测结果偏大,但这是在高阶地上的资料,而西宁城市也主要座落于黄土状土层不厚的低阶地上,震陷系数不高,地震基本烈度为 7 度,所以从总体来说震陷灾害的影响不大。

(5)西安市的震陷预测结果表明,场地上黄土的震陷性比陇西盆地的兰州,西宁等城市要弱些。这反映了黄土区域性变化的特征,虽然含水量较高,但因黄土颗粒有一定程度的胶结,震陷性有一定减弱。

### 三、以兰州市为例评价震陷对震害的影响

黄土震陷的研究还处于探索阶段,但根据研究的结果看,震陷灾害的严重性是明显的。

根据兰州市黄土厚度分布图,西固区和城关区(含东岗镇)都位于一、二阶地上,黄土状土厚度 2—20 米,大部分地区厚度在 5 米以上,一般为 5—10 米。我们就以这两个区作为评价对象。由于在地震动载荷作用下,地基土层应力分布不均匀性和土质不均匀性的综合影响下必然

产生不均匀下沉,在下沉量、沉降差和倾斜度等方面超过工程允许范围,因而导致建筑物的严重破坏或倒塌。现将各类建筑物的地基允许变形值列于表 2<sup>(7)</sup>。

表 2 房屋和构筑物的地基容许变形值

| 变 形 特 征                  | 地 基 土 类 别   |        |
|--------------------------|-------------|--------|
|                          | 中、低压<br>缩性土 | 高压缩性土  |
| 砖体承重结构基础的局部倾斜            | 0.002       | 0.003  |
| 工业与民用建筑相邻柱基的沉降差          |             |        |
| (1)框架结构                  | 0.002L      | 0.003L |
| (2)砖石墙填充的边排柱             | 0.0007L     | 0.001L |
| (3)当基础不均匀沉降时不产生附加应力的结构   | 0.005L      | 0.005L |
| 单层排架结构(柱距为 6m)柱基的沉降量(mm) | (120)       | 200    |
| 桥式吊车轨面的倾斜(按不调整轨道考虑)      |             |        |
| 纵向                       | 0.004       |        |
| 横向                       | 0.003       |        |
| 多层和高层建筑基础的倾斜             |             |        |
| $H_g \leq 24$            | 0.004       |        |
| $24 < H_g \leq 60$       | 0.003       |        |
| $60 < H_g \leq 100$      | 0.002       |        |
| $H > 100$                | 0.0015      |        |
| 高耸结构基础的倾斜                |             |        |
| $H \leq 20$              | 0.008       |        |
| $20 < H_g \leq 50$       | 0.006       |        |
| $50 < H_g \leq 100$      | 0.005       |        |
| $100 < H_g \leq 150$     | 0.004       |        |
| $150 < H_g \leq 200$     | 0.003       |        |
| $200 < H_g \leq 250$     | 0.002       |        |
| 高耸结构基础的沉降量(mm)           |             |        |
| $H_g \leq 100$           |             | 400    |
| $100 < H_g \leq 200$     | (200)       | 300    |
| $200 < H_g \leq 250$     |             | 200    |

【注】(1)有括号者仅适用于中压缩性土；

(2)L 为相邻柱基的中心距离(mm)； $H_g$  为自室外地面起算的建筑物高度(m)；

(3)倾斜指基础倾斜方向两端点的沉降差与其距离的比值；

(4)局部倾斜指砌体承重结构沿纵向 6~10m 内基础两点的沉降差与其距离的比值。

由表 2 可知,建筑物的沉降差、倾斜度的允许值很小,一般允许沉降差仅 1—2 厘米。又根据湿陷性黄土地区建筑物规范规定,地基处理层下的湿陷性黄土的剩余沉降不得大于 20 厘米,都说明了上述这样大的震陷量即使是上部结构已经采取抗震措施也无济于事,建筑物将因地基失效而导致严重破坏或倾倒。

在 8 度地震影响下,这两个区振动破坏的震害预测结果(除高层建筑外)为:建筑物和居民财产损失合计为十几亿元。如果将地基失效震害加重的因素叠加考虑,经济损失将增至数十亿

元,人员伤亡数量也成倍增加。这是相当惊人的数字,黄土地区城市场地的震陷灾害不容忽视。

## 结 语

1. 本文指出了黄土具有震陷性,并指出了震害预测方法,可为城市黄土场地震害预测给出定量的结果,以便采取防御措施和减灾措施。

2. 黄土震陷性的研究尚处于探索阶段,试用震陷预测方法的结果表明,这类地基失效引起的震陷损失是惊人的,不容忽视。

3. 今后尚需进一步探索黄土震陷预测方法以及震陷对建筑物震害的影响。

## 参 考 文 献

(1)郭希哲等(1990):我国地质灾害评估和防治对策建议,地质灾害与防治,第一卷第一期。

(2)Zhang Zhenzhong & Duan Ruwen (1986): Discussion Seismic Subsidence of Loess in the Northwest China During Earthquakes, in "Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology Problems Seismic Areas" Vol. 2, pp 65—76 (Bari, Italy).

(3)巫志辉、方彦(1990):原状黄土在增湿时的震陷特性,第三届全国土动力学学术会议论文集,同济大学出版社。

(4)李永善等(1982):华县大地震与古地震遗迹探讨,史前地震与第四纪地质文集,陕西科学出版社。

(5)C. B. 麦德维杰夫主编,黄秀铭译(1990):《地震小区划》,地震出版社。

(6)张振中、段汝文、王兰民(1990):黄土震陷性的判断与预测,第三届全国土动力学学术会议论文集,同济大学出版社。

(7)建筑地基基础设计规范,GBJ 7—89, 1989,中国建筑出版社。

### SEISMIC SUBSIDENCE DISASTER ON SITE OF

### CITIES IN LOESS AREA

ZHANG ZHENZHONG WANG LANMIN

(Lanzhou Seismological Institute, SSB)

Based on the research of loess being of the property of seismic subsidence, this paper pointed out a type of particular disaster that people has not pay attention to yet, which is that serious accidents of ground losing efficacy will happen in cities on loess sites under the effect of earthquakes. Because of seismic subsidence occurring suddenly and distributing inhomogenously generally, the seismic damage of common industrial civil buildings become more serious under the effect of shaking and residual deformation of ground together. Usual phenomena of the seismic damage are cracking, slopping and Collapsing of buildings. To take Lanzhou as an example, the disaster induced by loess seismic subsidence are proved to be serious disaster which can not be underestimated. The engineering field and the department of city construction should think highly of it, studying the effect of loess seismic subsidence on buildings, taking appropriate prevention measures and lessening or avoiding the loss caused by the disaster of seismic subsidence.