

# 甘肃永登 5.8 级地震黄土 震害特征及机理分析

齐吉琳

(西安理工大学岩土工程研究所, 西安 710048)

赵国武

(山东东方路桥总公司, 临沂 276005)

张振中 王兰民

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

**摘要** 对 1995 年甘肃永登 5.8 级地震极震区黄土覆盖处的震害现象进行了分类, 大致将其分为出现震陷性断坎和发生小规模滑坡两种. 利用电子显微镜和图象处理系统对震区的黄土试样孔隙结构性进行了定量分析. 应用常规土工试验取得了该地区黄土的物性指标和湿陷、震陷性质资料. 通过对上述室内试验资料的分析认为该地区的黄土孔隙大, 在遇水条件下易发生震害. 结合野外考察的总体认识和室内资料并注意到震区在临震时曾有过短时间暴雨的现象, 将此次地震的震害原因归结为雨水在坡面下渗, 在坡脚处上浸和对坡脚的冲蚀等, 并对两种不同震害现象发生的机理作了分析.

**关键词** 甘肃 震害分布 黄土 孔隙结构特征 震陷

## 1 永登 5.8 级地震的黄土震害特征

1995 年 7 月 22 日, 甘肃省永登县发生了一次  $M_S 5.8$  地震. 震中位于该县七山乡疙瘩沟到马家山城一带. 震中区及整个受灾地区广泛分布着晚更新世的马兰黄土.

在 VII 度区和 VIII 度区内, 许多黄土山丘被震酥. 地裂缝广泛存在, 有的裂缝宽达 15 cm. 初步考察发现伴随的下陷量达 30~40 cm, 这在一般地震的 VII 度和 VIII 度区内是较为罕见的. 有的黄土梁顶面上发生了阶梯状下错, 靠近坡顶处具有碎裂现象, 坡脚处则破坏较轻, 顺坡面的错距大致相同. 目前看来只是由于地震力的作用黄土梁出现错动, 坡脚处尚未滑动, 也就是说整个斜坡尚未滑动, 因此这不是滑坡现象. 而且重力亦不是造成这种现象的主导因素. 另外, 有的地方在坡度很缓乃至平地上出现局部下陷. 所有这些现象中都没有一个明显的滑面或整体滑动的趋势, 因此不是一般的土坡稳定性问题. 我们认为这些现象属于黄土的震陷.

震陷性是黄土的一个重要的动力特性, 即在动荷载作用下, 黄土大孔隙结构崩溃性破坏所

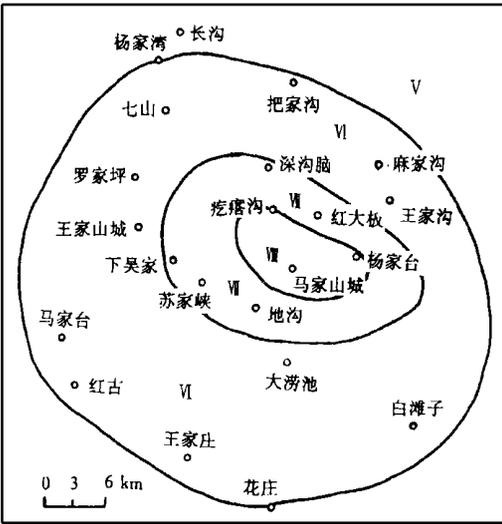


图 1 永登 5.8 级地震烈度分布<sup>[2]</sup>  
 Fig. 1 Intensity distribution of the Yongdeng  $M_s$  5.8 earthquake 1995 in Gansu province.

表现出的急剧残余变形, 宏观表现为场地大面积的碎裂或下沉. 研究表明, 非饱和的晚更新世马兰黄土 ( $Q_3$ ) 和全新世的黄土 ( $Q_4$ ) 均具有不同程度的震陷性. 根据我们以往的研究结果, 可将黄土的震陷机制描述如下: 具有架空孔隙结构的黄土, 因其粒间胶结很弱, 结构强度低, 受一定的动应力作用后, 大孔隙结构产生崩溃性破坏, 粉粒充填大孔隙而呈急剧增长的残余变形. 黄土的含水量和孔隙比是影响震陷量的两个重要因素<sup>[2]</sup>. 对非饱和黄土的进一步研究表明, 水的影响主要是导致土中吸力的损失而不是胶结的弱化.

这次地震所造成的震害的第二个重要特征是较大面积区域发生规模较小的滑坡, 有许多地段可以认为是剥皮现象. 我们曾在震后数日及震后一年两次赴现场调查滑坡的特征, 发现此次地震滑坡在广大的 VII 度和 VIII 度区分布极

广, 坡脚处往往有冲沟发育. 尤其是坡脚位于冲沟拐弯处时更易发生较大规模的滑坡. 此外, 我们在工作区域内抽样测量了个别滑坡体的坡度、宽度等特征. 同时引用了朗煜华等人的一些调查资料<sup>[1]</sup>进行了分析.

由图 2 可见, 滑坡主要分布在 VII 度和 VIII 度区. VII 度及其以下地区基本无滑坡发生. 滑坡主要沿断层及河流台地分布, 分布范围为  $293 \text{ km}^2$ .

图 3 为滑坡所在地之坡度分布特征. 由图 3 可见, 滑坡主要发生在坡角为  $30^\circ \sim 39^\circ$  的地区. 缓坡安全系数较高, 不易滑塌. 而陡坡又往往是由岩石构成, 仅在表面覆盖了一薄层黄土, 不能产生滑坡.

由表 1 可见, 滑坡的宽度大都在 40 m 以下, 厚度大都在 3 m 以下, 而体积在  $100 \sim 500 \text{ m}^3$  者占 30%, 小于  $2000 \text{ m}^3$  者占 90%.

## 2 地震区域黄土试样的室内分析

我们在 VII 度和 VIII 度区的 4 个点取了土样, 在室内做了黄土结构性的定量电镜分析和土动力试验.

在做电镜分析时我们取永登柴沟 4 m 深处和兰州市九州台 7 m 深处的原状土样作了对比研究. 为了消除以点代面造成的随机性, 我们在一个取土点的一定深度上从 5 个不同方位各取一土样做成试

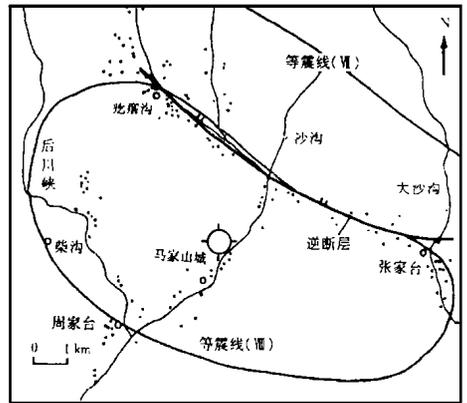


图 2 永登地震滑坡分布图  
 Fig. 2 Landslide distribution caused by the Yongdeng earthquake.

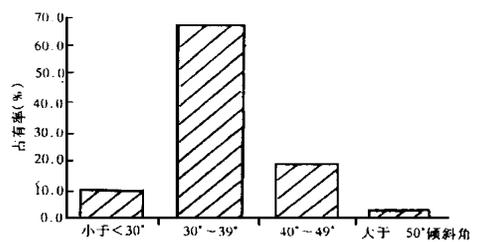


图 3 滑坡所在地的坡度分布特征  
 Fig. 3 Topography slope distribution characteristics of location of landslides.

样. 对于每个电镜试样先在较低倍数(200倍)下转动以观察样品的整体微观结构特征, 避开奇异点, 在有代表性的视野附近连续拍摄5张照片. 这样每一个取土点我们用25张照片来说明. 利用WD-2电镜联机图象分析处理系统将这些图象在电镜观察的同时输入计算机中, 经过一系列处理, 最后测得所需孔隙参数. 我们仅对孔隙面积进行了分析, 做出了孔径分布曲线, 见图4<sup>[3]</sup>.

表1 地震滑坡的规模及特征

	范围	滑坡数	所占比例(%)		范围	滑坡数	所占比例(%)
长 (m)	1~10	37	23.7	厚 (m)	小于1.0	26	16.7
	11~20	66	42.3		1.0~1.9	93	59.6
	21~30	35	22.4		2.0~2.9	29	18.6
	31~40	11	7.1		3.0以上	8	5.1
	大于40	7	4.5				
宽 (m)	1~10	35	22.4	体积 (m <sup>3</sup> )	小于100	31	19.9
	11~20	48	30.8		100~499	46	29.5
	21~30	27	17.3		500~999	30	19.2
	31~40	34	21.8		1000~1999	18	11.5
	大于40	12	7.7		1500~1999	13	8.3
				大于2000	18	11.5	

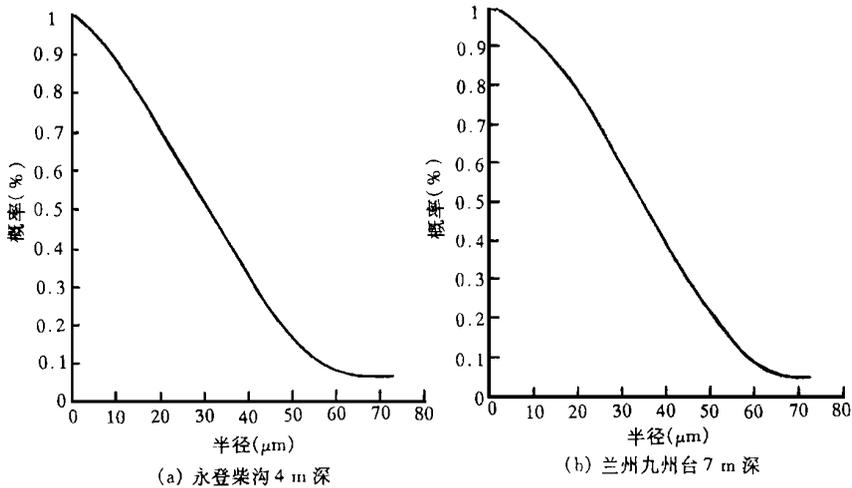


图4 永登、兰州两地黄土孔隙分布曲线

Fig.4 Pore distribution in loess in Lanzhou and Yongdeng areas.

图4曲线中一点代表大于某一等效半径的孔隙的面积之和占孔隙面积总和的百分比. 从图4可见, 两地黄土的孔隙分布曲线形态相似, 但也存在一定的差异. 相似之处表现在曲线都是两端平缓中间陡直, 与土的颗粒分布曲线相似. 差异表现在永登黄土孔隙分布曲线显示从0到10 $\mu\text{m}$ 的孔隙约占10%, 而兰州的曲线显示的相应数值约为5%. 从总体特征来看, 永登曲线下下降较快, 如永登 $P_{30}=50\%$ , 而兰州 $P_{30}=60\%$ . 尽管如此, 两地的半径超过60 $\mu\text{m}$ 的孔隙占的百分比相差不大, 而永登黄土中还略大一些. 我们对两地黄土做了一般物性分析, 结果见表2.

从表2中可以看出, 二者的容重、密度等都相差不大. 永登黄土是中粉质粘土, 而兰州九州

台黄土是轻粉质粘土. 我们在永登取的 4 个土样中有两处是轻粉质粘土, 两处是中粉质粘土, 相差也不大. 我们认为造成孔隙分布曲线的差异的原因是地震的影响. 一定的地震力使永登黄土中一定半径范围内的孔隙被破坏, 由大、中孔隙变为小孔隙, 使该范围内的孔隙占的百分比减小. 我们所说的减小是统计意义上的减小, 而不是说中、大孔隙全部被破坏. 尽管如此, 永登黄土的孔隙比仍比兰州九州台大, 说明永登黄土的孔隙较九州台黄土更为发育.

表 2 永登、兰州两地黄土物性分析对比

土样	取样深度 (m)	密度 $\gamma$ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	干密度 $\gamma_d$ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	孔隙比 $e$	比重 $G$	含水量 $w$ (%)	液限 $w_L$ (%)	塑限 $w_p$ (%)	湿陷系数 $\delta_s$ (%) (200kPa)
永登 1	4	12.35	11.86	1.231	2.70	4.53	27.2	18.3	
永登 2	4	12.45	11.96	1.213	2.70	4.31	25.5	17.3	
永登 3	4	12.64	12.05	1.195	2.70	5.21	28.1	19.8	17.51
九州台 1	7	13.23	12.54	1.109	2.70	5.80	25.7	16.3	12.24

我们对在永登取的 4 组土样(其中有一组由于成样困难, 数量太少, 未做力学分析)进行了震陷试验. 在实验中为了模拟一般建筑物地基土的应力状态, 采用  $\sigma_{1c} = 200 \text{ kPa}$ ,  $\sigma_{3c} = 118 \text{ kPa}$  的压力进行固结. 固结完成后在轴向施加动荷载, 测定残余变形. 在同一固结压力下每组用 4 ~ 5 个土样, 分别施加不同幅值的动应力, 得到  $\sigma_d - \epsilon_p$  曲线, 我们称为震陷曲线. 所测得的数据离散性很大, 不能拟合出很理想的曲线, 但实验数据却可以说明问题. 所有天然试样在  $\sigma_d = 100 \text{ kPa}$  时, 动残余应变都在  $0.78\% \sim 2.75\%$  之间. 对永登 1 试样进行了湿化, 当含水量从  $4.53\%$  增至  $12\%$  时, 对应于  $\sigma_d = 100 \text{ kPa}$  的震陷系数从  $1\%$  增至  $4.15\%$ .

由此可见, 该处的黄土无一例外都具有强震陷性, 在加水湿化后尤甚. 我们对永登黄土试样做过湿陷试验, 对应于  $50 \text{ kPa}$ ,  $100 \text{ kPa}$  和  $200 \text{ kPa}$  的湿陷系数分别为  $13.98\%$ ,  $16.43\%$  和  $17.55\%$ . 自重湿陷系数为  $17.60\%$ . 可以看出该处黄土为 IV 级自重湿陷黄土. 同时证明了强湿陷性黄土必然具有强震陷性的规律.

### 3 震害机理分析

针对永登地震极震区的震害特征, 我们进行了调查分析. 据调查, 在地震前夕当地出现短时间的暴雨. 我们认为暴雨可能是造成震害的主导因素, 而地震力是触发因素.

通过对湿陷试验及湿化试样震陷试验资料的分析, 我们认为该地区黄土在干性状态下强度较大, 而一旦浸水则极易在外力作用下发生下陷现象. 在震前暴雨淋湿了土坡表层, 由于降雨时间短, 水分下渗深度有限, 因此只造成表面土体湿化, 结构强度降低, 在地震力作用下发生较大应变. 如果坡脚处有机会受暴雨汇集水的冲蚀浸泡, 则冲蚀作用会使坡体下缘抗滑力降低. 浸泡作用又会使坡脚之上很大范围内含水量增大. 这两方面因素促使滑坡产生. 但由于在坡体上雨水顺坡而下, 大量水分很快流下坡体, 致使浸湿深度仅限于表层体积不大的土体, 因此这次地震造成的滑坡规模总体来说都较小. 而如果坡脚处有积水存在, 由于毛细作用使较大体积范围内含水量增大, 则滑坡体规模就大一些.

坡顶碎裂而未造成滑坡的现象多出现在坡脚无机会浸水的高处, 而高处有对地震力的放大作用. 之所以未产生整体滑动, 是因为仅有表层土体湿化, 强度降低, 而下部土体仍为干性, 其强度仍较大, 支撑住了上部碎裂土体产生的附加压力.

两种震害现象都可归结为浸水土体中吸力损失, 强度降低所致, 如图 5 所示.

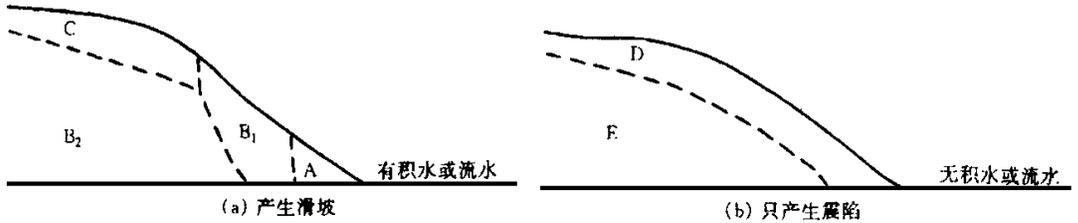


图5 震害机理示意图

Fig. 5 Sketch of mechanism of earthquake disaster.

图5(a)中A区受冲蚀作用, B<sub>1</sub>区在毛细作用下含水量增大. 当C区中吸力损失产生碎裂时, 有附加应力加在B<sub>1</sub>与B<sub>2</sub>区上. 由于A区受冲蚀, B<sub>1</sub>区含水量增大, 吸力损失, 强度较小, 支撑作用减小, 于是会产生滑坡. 图5(b)中D区含水量增大, 吸力损失, 在地震力作用下易产生碎裂, 原来的强度丧失, 在E区上作用一种附加应力, 但E区的强度足以抵抗这种附加应力, 于是不会产生滑塌.

## 4 结语

我们对永登地震区震害现象进行了野外调查和室内分析研究. 对电镜图象进行定量分析发现, 极震区黄土的中、大孔隙在一定程度上遭到破坏. 物性分析证明, 震后黄土的孔隙比仍较大, 因此可以断定极震区的黄土存在产生震陷的内在原因. 而震陷试验和湿陷试验进一步证实了浸水后该区域的黄土会产生极不稳定的现象. 结合野外对调查现象的认识, 我们将此次极震区的震害现象归结为雨水的下渗, 坡脚处的冲蚀和浸泡使坡土体含水量增大, 吸力损失, 强度减小所致, 而地震力只是外部触发因素.

## 参考文献

- 朗煜华, 等. 兰州市永登 5.8 级地震滑坡及其特征. 甘肃科学, 1996, 8(增刊): 67~72.
- 张振中, 齐吉琳. 论企业在黄土土地上震陷灾害预测的必要性. 见: 企业减灾对策研究. 兰州: 兰州大学出版社, 1996. 107~110.
- 齐吉琳. 黄土结构孔隙性定量分析的孔隙分布曲线. 西北地震学报, 1997, 19(增刊): 83~87.

## ANALYSIS ON CHARACTERISTICS AND MECHANISM OF THE SEISMIC DAMAGE IN LOESS IN YONGDENG $M_s$ 5.8 EARTHQUAKE REGION, GANSU PROVINCE

QI Jilin

(*Xi'an University of Technology, Xi'an 710048*)

ZHAO Guowu

(*Dongfang Road and Bridge General Company of Shandong Province, Linyi 276005*)

ZHANG Zhenzhong WANG Lanmin

(*Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000*)

### Abstract

In this paper, the seismic damage phenomena in the loess in Yongdeng  $M_s$ 5.8 earthquake region, Gansu province are collected and analyzed. The damages are divided into two types, one is crisp crash by the quake on the top of the hill, the other is small-scale landslide. For the loess samples from the intensity areas of VII, VIII degrees, the quantitative analysis on the SEM pictures and the common geo-engineering experiments are carried out. The results show that the loess from this region is full of big pores and is prone to seismic damage when the damp ratio becomes higher. Combining the general knowledge of the field investigation with the indoors experiments data and noticing that just before the earthquake there was a storm, we impute the loess damage to water penetrating on the slope surface and eroding in the slope foot. According to the above analysis, the mechanisms of the two kinds of seismic damage are proposed.

**Key words** Gansu, Earthquake disaster distribution, Loess, Pore structure characteristics, Seis-subsidence