

黄土震陷研究与震害预测

张振中 段汝文

(国家地震局兰州地震研究所)

一、概述

黄土不但有特殊的工程地质性质——湿陷性,而且在地震作用下具有特殊的地震工程地质性质——震陷性。由于震陷性的存在,西北黄土地区遭大震袭击时均产生了山崩、滑坡、地裂缝及沉陷等严重震害。1970年西吉地震震中烈度仅7度强,仍然产生了相当发育的滑坡等震害。国内外在黄土层中形成类似震害的实例很多,但对黄土动力特性,尤其是震陷的土动力学研究较少,尚处于探索阶段。

1556年华县8级大震,位于极震区的渭南县城,地裂缝遍地,鼓楼地面下沉达1米多;〔1〕1718年通渭7.5级地震,滑坡面积约有665KM²,几乎占据了整个极震区,历史资料有“平地裂陷”的记载,相当于现今所指的地面不均匀沉陷引起的裂缝;〔2〕1920年海原8.5级大震,滑坡严重而密集区的面积达4000KM²地裂缝也很发育,可能掩盖了典型的地面沉陷现象,未能引起人们的注意,苏联把上述震害统称为地面的残余变形,并在黄土状土层中观察到8度地震时有1米的沉陷〔3〕;美国、日本等国家的黄土或弱结土层中也有类似的震害,美国土力学家Seed曾对海原地震时发生于黄土塬上的滑坡事件作过不是因为“液化”就是“气化”的推断〔4〕,黄土层中震害很多情况下是因结构破坏引起土层体积变化所致。

我们通过对马兰黄土(Q₃)和新近堆积黄土(Q₄)的动三轴仪试验、扫描电镜的黄土显微结构观察结合宏观震害和黄土湿陷性研究结果对黄土震陷问题作了初步探讨。震陷的土动力学性质与孔隙比等物理性质指标、显微结构特性等有明显的规律联系,与湿陷的形成条件极为相似,这些初步认识,可以作为震陷的判别标志,从而为黄土场地震害预测提供了新的途径,并将有助于地震小区划、烈度区划图的编制。

二、震陷的土动力学特征

震陷是指动荷载作用下,土体产生的附加沉陷,它与土的残余变形密切相关,宏观表现为建筑物地基受地震影响产生的附加不均匀沉陷引起的建筑物不同程度的破坏或斜坡失稳现象。

我们用兰州、西吉、宝鸡、西安等地黄土试样,在动三轴仪上作了相当数量动变形(残余成变)试验,得出应力—应变关系的一些规律。

1. 残余应变随动应力增大而增大,不同试样的临界动应力*不同(图1),我们将临界动应力作为评价土层是否产生残余应变的标志,若土层受大于临界动应力的地震力时,预示

* 临界动应力是指动应力~动应变关系曲线上,由线性转为非线性乃至破坏时的动应力。

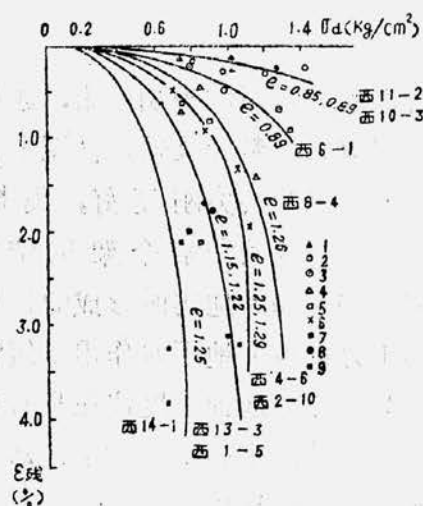


图1 $\sigma_d - \varepsilon_{残}$ 关系图

1. 西11-2 2. 西10-3 3. 西6-1 4. 西8-4
5. 西4-6 6. 西2-10 7. 西1-5 8. 西13-3
9. 西14-1 震次=10

形态,

3. 一定动应力水平下残余应变随孔隙比 e 的增大而增大, 图1所示, 当孔隙比 e 小于0.85时, 临界动应力大于 1 kg/cm^2 , 说明这样的土层在中强地震影响下, 将不可能产生震陷, 图2是按不同动应力水平绘制的 $\varepsilon_{残} \sim e$ 关系曲线, $e=0.8$ 时, $\varepsilon_{残}=0$, 考虑土的不均匀性

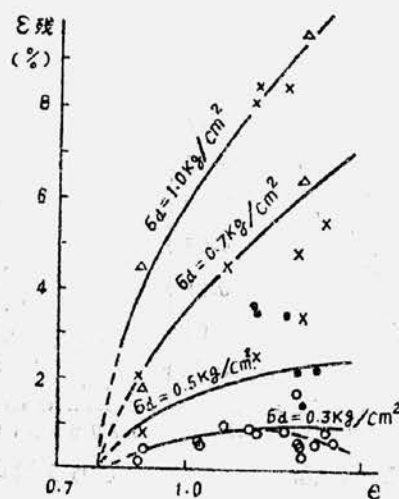


图2 $\varepsilon_{残} \sim e$ 关系图

4. 残余应变随含水量增高而增大, 临界动应力降低, 西安地区黄土的含水量小于15.4%时, 将不可能产生残余应变, [6]对宝鸡一组土样作原状与饱和两种试验, 残余应变有很大变化(表2)。

表2 原状与饱和试验时 σ_d 、 $\varepsilon_{残}$ 变化

试样编号	原 状	饱 和	注
BG7-1	σ_d	>2.0	0.25 kg/cm^2
	$\varepsilon_{残}$	4×10^{-4}	1.7×10^{-2} 当 $\sigma_d = 0.8$ 时

残余应变有很大增长而产生震陷。六盘山以西陇西地区临界动应力很低: 兰州黄土为 $0.2 \sim 0.5 \text{ kg/cm}^2$ [5]; 静宁黄土为 0.2 kg/cm^2 。六盘山以东关中地区: 西安黄土为 $0.3 \sim >1.0 \text{ kg/cm}^2$; 宝鸡黄土为 $0.3 \sim 0.7 \text{ kg/cm}^2$ 。显然陇西黄土较关中黄土更易于震陷。

黄土在临界动应力之前的应变很小, $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 之间, 当应变在2—3%时, 多数土体已经破坏, 这反映了黄土力学性质上的结构性, 宏观的脆性或崩溃性破坏。

2. 残余应变随振次增加而增大, 试验中给定的振次是模拟不同地震震级地震动的持续时间。从振次10~20次的试验曲线来分析, $\varepsilon_{残}$ 有所增加, 但未能改变曲线的基本

表1 陇西地区 Q_2 黄土 e 值

地 点	e
兰 州	1.132
静 宁	1.377
西 吉	1.248
靖 远	1.220
定 西	1.280

结果说明,饱和黄土比原状黄土的 $\varepsilon_{残}$ 大的多,更易于引起震陷。

5. 显微结构特征对残余应变具控制作用

黄土显微结构类型很多,而架空孔隙是使黄土具有特殊动力性质的控制因素,粒状架空接触结构的黄土颗粒以点接触的形式连接,这些颗粒又以围成大于粒径几倍,甚至上百倍直径孔隙的方式排列,这时黄土的强度主要由加固凝聚力构成,颗粒传力刚度好,集粒显刚性,当土体受不大的外力时,颗粒接触点处应力易于集中而导致移动和整个架空结构的破坏,显示崩溃性,它在宏观震害现象中有充分的反映,如1920年海原地震时形成的滑坡就有反映上述特征的特点:1)地震滑坡具有崩塌性质,不具重力滑坡(地下水作用)缓慢移动的特征,破裂壁全部裸露,滑坡体大部或全部冲出谷地;2)原始地面坡度往往只有10~20度;3)滑坡体呈粉碎性破坏,纵观滑坡全貌或航照判读,虽然几乎是干燥黄土,却呈现流滑形态,反映黄土结构破坏的崩溃性所引起的“液化”或“气化”现象。

在 $\sigma_d \sim \varepsilon_{残}$ 曲线上表现残余应变一过临界动应力点即急剧增长,典型架空结构的黄土临界动应力很低,仅0.2~0.3kg/cm²,架空结构的存在与否直接影响 $\sigma_d \sim \varepsilon_{残}$ 曲线的形态,图1所示,西8—4、西14—1等试样以架空孔隙为主,显示明显的残余应变,临界动应力在0.3~0.60kg/cm²,西6—1、西11—2等架空特性不明显的试样,其曲线平缓,临界动应力大于1.0kg/cm²时才略有残余应变的趋势,因此,显微结构架空特性存在与否是判别震陷可能性的标志。

三、震陷判别标志应用于震害预测的可能性

上述研究给出了一些判别标志。这里则把这些标志与宏观震害的实际进行比较分析,讨论应用于震害预测的可能性。

1. 震陷与湿陷形成条件的相似性

前人对湿陷性的显微结构研究结果表明,湿陷性存在与否,也是以架空特性为其控制因素^[7],造成两者在形成条件的极其相似性。列举主要几点:

1) 孔隙比 e

据陇西、关中地区黄土 e 值与湿陷系数 σ_s 关系图(图3)表明 e 小于0.7~0.9时不发生湿陷,它与 $\varepsilon_{残} \sim e$ 变化关系相对应, e 小于0.75~0.85时不具震陷性。

2) 湿陷的起始压力 $P_{1.1}$

黄土湿陷的起始压力是反映土体结构改变产生沉陷时的强度指标,它的含义与震陷的临界动应力相当,表3说明,同一地区类型相近的黄土临界动应力数值与湿陷起始压力值相近或相等。

3) 湿陷性强弱

具架空特性的黄土一般都有明显的残余应变,临界动应力低(0.2~0.5kg/cm²),宏观条件下易产生震陷,试验结果证明易于震陷的黄土必定是自重湿陷系数 $\sigma_{s.1}$ 高的Ⅰ、Ⅱ级自重湿陷性黄土。

尽管对黄土湿陷机理众说纷云,也很复杂,但最终表现为结构的破坏,所以两者的差别

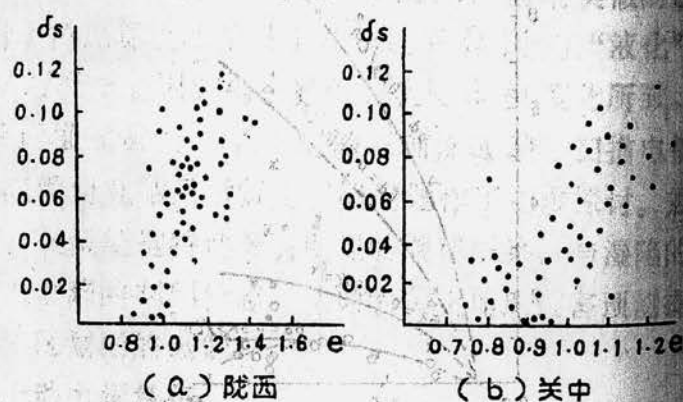


图3 湿陷系数与孔隙比关系散点图^[8]

表3 σ_d 与 P_{sh} (湿陷起始压力) 比较

地 点	δ_{zs}	σ_d (kg/cm ²)	P_{sh} (kg/cm ²)	注
兰 州	0.04~0.08	0.30~0.50	0.30~0.50*	*[7]
静 宁	0.049	0.20	0.36	
西 吉	0.035~0.072	—	0.35~0.47	
西 安	0.057~0.059	0.50	0.25~0.44	

在于促成它们的作用因素不同,在进一步深入研究的基础上,湿陷性的指标可作为震陷判别的参考标志。

2. 宏观震害实例的检验

上述各项判别资料中,六盘山以西和以东的黄土震陷的特性反映了明显的地区变化规律,这同黄土工程地质性质具自西北向东南逐渐变化规律相一致,也以六盘山为界东西两侧有明显的差别,在相同地震影响下震害东轻西重。

以1920年海原地震震害分布为例,滑坡严重而密集区在9~10度烈度区的静宁、西吉等县,而在极震区的海原至打拉池一带却无严重密集区分布(图4)[9],原因是前者为强烈自重湿陷性黄土分布地段,后者为非自重湿陷性黄土状土分布地段(图5)[10],相应的如显微结构、孔隙比、临界动应力等服从于上述规律变化。

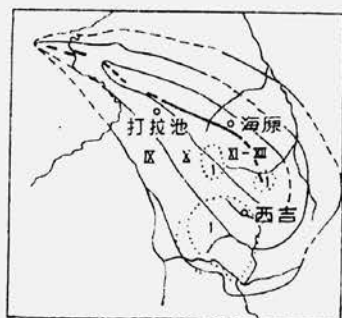


图4 1920年海原地震震害分布

1. 为滑坡严重而密集区



图5 黄土工程地质分区略图

1. 自重湿陷性黄土区 2. 非自重湿陷性黄土状土区

此外,我们在西安市地震小区划时,利用震陷的判别标志作了震害预测的尝试,西安地区的黄土多属六盘山以东的黄土状亚粘土是架空结构不显著的凝块粒状、镶嵌、絮状胶结的过渡类型,而西安东部韩森寨一带分布有具明显架空结构的Ⅲ级自重湿陷性黄土,孔隙比大,临界动应力低,并将其折算成剪应力同该处的地震反应计算得到的地震剪应力相比较,经综合分析,划定了可能的震陷地区。

综上所述,震陷研究应用于震害预测的可能性是存在的。

结 束 语

1. 对震陷问题的研究是初步的。通过类比法在判别标志方面作了一些探讨。这里没有讨

论震陷的理论分析问题。

2. 在进行具体工程场地评价时, 必须对地基土层剖面上的应力分布和总的震陷量进行计算, 为此要研究震陷量的计算方法和程序, 在所需的黄土层剖面上输入地震动参数和进行地震反应计算。

3. 陇西地区的黄土如此易于形成震害, 联系它的工程地质指标、动力参数和地震反应分析结果^[11]应按现行的工业与民用建筑抗震设计规范的规定定为Ⅲ类土较为适宜, 这一点可供未来西北黄土地区烈度区划图编制时参考。

4. 西北黄土工程地质研究较深资料也很丰富, 有些成果已经编入规范, 并有中国湿陷性黄土工程地质分区图, 所以在进一步研究震陷和湿陷关系的基础上可充分利用上述关于黄土湿陷的资料和图件大大有助于黄土地区宏观震害预测图的编制, 同时也将为第三代烈度区划图增添新的内容。

参考文献(略)



图1 黄土高原地区震害分布图

1. 黄土高原地区震害分布图; 2. 黄土高原地区震害分布图

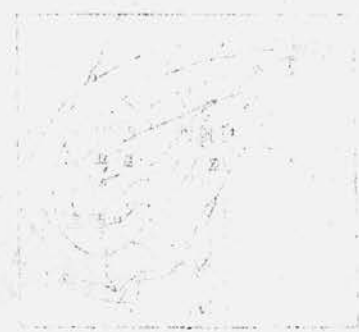


图2 黄土高原地区震害分布图

1. 黄土高原地区震害分布图; 2. 黄土高原地区震害分布图