

汶川地震后甘肃临夏北塬黄土场地大面积沉陷研究^①

王 谦^{1,2,3}, 袁中夏^{1,2,3}, 王兰民^{1,2,3}, 侯景瑞^{1,2,3}, 张国信^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要:北塬是位于甘肃省临夏县东北部的黄土塬, 塬上分布为典型的马兰黄土。2008 年汶川地震以后该地区陆续发生了较大规模的黄土湿陷灾害, 并造成相当的经济损失。通过对北塬湿陷性黄土的野外调查和室内试验, 研究了黄土湿陷的原因和机理。结果表明, 该地区黄土产生大面积沉陷的主要原因是汶川地震中产生的深大裂缝与底部黄土垂直节理贯通形成渗水通道, 水在底部不透水层聚集, 土体由下至上产生湿陷, 从而导致地基沉降。结合经济可行性和当地实际, 针对类似原因引起的黄土湿陷问题提出了防治措施。

关键词:黄土; 湿陷灾害; 成灾机理; 防治措施; 甘肃临夏

中图分类号: P642.13⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2012)02-0180-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2012.02.0180

Study on Large-scale Subsidence of Loess Site after Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake in Beiyuan, Linxia County, Gansu Province

WANG Qian^{1,2,3}, YUAN Zhong-xia^{1,2,3}, WANG Lan-min^{1,2,3}, HOU Jing-rui^{1,2,3}, ZHANG Guo-xin^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, Gansu Earthquake Administration, CEA, Lanzhou 730000, China;

3. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Beiyuan is a loess tableland in northeast of Linxia county, Gansu province, where the soil deposit is typical Malan loess(Q_3). After 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake, cases of serious subsidence of loess ground were found within several months and caused substantial loss in economic. In this paper, the causes and mechanism of these large-scale subsidence of loess are analyzed through field investigation and laboratory test. It is believed that water seepage through channels which formed by connection of surface cracks developed during Wenchuan earthquake with vertical fissures in loess is the main cause. In the water seepage, water accumulates on the impermeable layer at the bottom of loess layer, and the loess partially collapsed from the bottom to the surface. To prevent such hazard, some treatment methods considering the economic condition and local suitability are proposed.

Key words: Loess; Subsidence hazard; Disaster mechanism; Prevention and treatment measure; Linxia county of Gansu province

① 收稿日期: 2011-01-21

基金项目: 甘肃省地震局地震科技发展基金(2011S01, 2012S01); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务经费项目; 国家自然科学基金(50978239); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2012014

作者简介: 王 谦(1975-), 男, 甘肃临夏人, 硕士, 研究实习员, 主要从事工程地震与黄土动力学理论与试验研究工作。

通信作者: 王兰民(1960-), 男(汉族), 陕西蒲城人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事黄土动力学及岩土地震工程方面的研究工作。

0 引言

黄土是一种多孔隙、弱胶结的第四纪沉积物,在中国的分布面积约 64 万 km²,其中 60% 以上地区为湿陷性黄土^[1-2]。黄土的湿陷性是指黄土在一定压力作用下,受水浸湿后结构迅速破坏而产生显著附加沉陷性能。黄土产生湿陷的物理本质在目前尚未取得一致的结论。以往的观点认为黄土中颗粒间的胶结物质(一般认为是可溶盐类)在水的作用下溶解从而导致黄土颗粒间连接减弱,在土体自身重力或上覆荷载作用下产生湿陷;而袁中夏等通过研究认为黄土产生湿陷的机理是黄土中由于吸力丧失而导致的架空结构的破坏,从而使土体产生进一步固结的过程^[3]。但黄土发生湿陷终归是黄土结构强度降低所致,而大孔、多孔是黄土产生湿陷的重要条件^[4]。黄土的湿陷往往会引起地基的不均匀沉降,从而导致工业及民用建筑、道路、渠道、耕地以及其

他公共场地的破坏,对人民的生命财产安全造成极大的危害。

甘肃省临夏县的北塬地区自 1958 年北塬渠修建以来,随着灌溉每年都会发生黄土湿陷灾害,但发生灾害的频度与数量均较低,造成的损失也较小。然而,2008 年汶川地震以后由于地震导致黄土深大裂缝贯通及渠道渗漏等原因^[5],黄土湿陷灾害在多个场地大面积发生,对民房、耕地、道路和渠道产生了重大的危害,造成了较大的损失。本文通过野外调查结合室内实验,研究这种大面积沉陷的原因和机理,以及防治措施。

1 野外调查

北塬地区位于甘肃省临夏县东北部,塬区面积 299.9 km²,黄河、大夏河及银川沟环绕四周,塬面与河谷高差达 100~300 m,为典型的黄土台塬。北

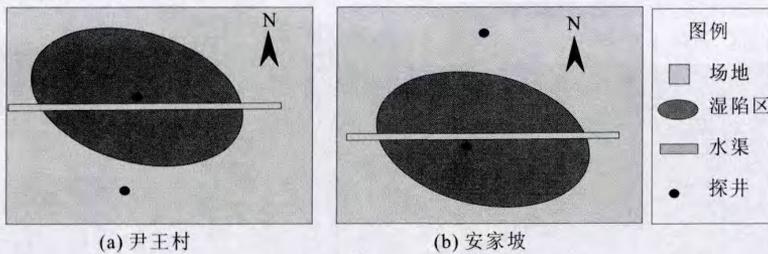


图 1 临夏北塬湿陷性黄土地及取样点示意图

Fig. 1 Sketch map of the subsidence of loess site and sampling location at Beiyuan tableland in Linxia.



图 2 北塬地区主要大面积沉陷点分布

Fig. 2 Distribution of the main large-scale subsidence points on Beiyuan tableland.

塬地区地层主要为黄土层、砂砾层和红层。表层为马兰黄土,厚度约为 30~70 m 左右;其下是厚度为 7~8 m 的砂砾层,最下面是第三纪红层,厚度约 50~100 m。据康建成^[6]等研究,该地区黄土的形成时间距今约 15 万年,其沉积速率较快,固结程度不高,因此在动荷载和水的作用下易发生震陷、湿陷等灾害。

作者等对北塬地区黄土湿陷灾害较严重的土桥、桥寺、先锋和安家坡四乡镇进行了调查,调查中发现黄土湿陷灾害造成了这些乡镇耕地产生不同规模的沉陷,其中位于土桥镇尹王村和安家坡乡安家坡村的两个碟式沉陷的场地面积超过 0.1 km²,最大沉降量分别达 1.8 m 和 1.5 m,其周围由于湿陷产生的拉张裂缝最宽处可达 15~20 cm。图 1 为上述两处场地的示意图,场地沿水渠大致呈对称分布,湿陷区颜色越深表示沉降量越大,湿陷区周边虚线为拉张裂缝。

除此之外,黄土湿陷灾害对道路、民房和公共基

基础设施造成了较严重的破坏。临夏至三塬公路桥寺乡江川段受湿陷影响导致路面难以硬化的路段长达600 m;土桥镇通往重台塬的村镇公路阳洼大坝段出现湿陷坑,长轴近3.8 m,短轴2.7 m左右,深度超过2.5 m,地基的不均匀沉降还造成公路路面开裂长度达15.8 m。四乡镇多所民居出现不同程度

的破坏,轻者地面、墙体开裂,重者房屋成为危房无法居住。北塬渠各支干毛渠均造成不同程度的破坏,严重者渠道错位,渠水渗漏,使湿陷灾害更加严重。

北塬地区大面积沉陷场地分布如图2所示,其造成的灾害情况如图3所示。



图3 临夏北塬地区典型黄土沉陷灾害

Fig.3 Some typical subsidence hazards in loess area of Beiyuan.

2 室内试验

2.1 物性指标测试

通过对北塬地区不同场地黄土湿陷情况的对比,以及对湿陷场地与邻近未湿陷场地进行对比,选取了土桥镇尹王村、安家坡乡安家坡村的湿陷与未湿陷场地(图1),分别在2.5 m、5 m深处取样,进行物性指标测试,结果如表1所示。

根据表1可知,北塬黄土的密度在1.40~1.59之间,含水率在12.5%~19.55%之间,且随着深度的增加而增加;由北塬黄土的粒度分布可知,该黄土的粘粒含量为16.5%~20.2%,砂粒含量小于8%,粉粒含量在72.3%~75.3%之间,属于典型的马兰黄土。

2.2 渗透性试验

表1 北塬黄土的主要物性指标

试样编号	取样深度/m	密度 /[g·cm ⁻³]	含水率/%	比重	颗粒组成/%		
					粘粒	粉粒	砂粒
安干2.5	2.5	1.42	13.60	2.70	20.2	72.3	7.5
安干5	5.0	1.40	13.82	2.70	16.6	74.9	8.5
安湿2.5	2.5	1.55	15.50	2.69	18.5	74.1	7.4
安湿5	5.0	1.59	19.55	2.70	20.0	72.9	7.1
尹王湿2.5	2.5	1.47	15.75	2.70	16.9	75.3	7.8
尹王湿5	5.0	1.51	18.34	2.71	19.1	72.9	8.0
尹王干2.5	2.5	1.44	12.50	2.70	20.2	72.3	7.5
尹王干5	5.0	1.41	12.80	2.70	18.5	74.0	7.5

对北塬地区两个取样场地湿陷与未湿陷探井中土样的渗透系数进行测定,结果如表2所示。由表2可知,湿陷后试样的渗透系数较湿陷前明显减少,大约降低55%~70%,这说明黄土湿陷后由于部分孔隙塌陷而变得密实,从而使流体在土体中通过的

速率减小;此外,湿陷后不同方向的渗透系数差别减小,土体的各向异性丧失,成为匀质性土层,因此,湿陷也使得土的结构性一定程度上遭受破坏。

表 2 北塬不同场地黄土试样的渗透系数

探井	垂直渗透系数/[$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$]	水平渗透系数/[$\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$]
尹王湿	4.63×10^{-5}	4.47×10^{-5}
安湿	4.90×10^{-5}	5.00×10^{-5}
尹王干	1.11×10^{-4}	1.81×10^{-4}
安干	1.46×10^{-4}	8.08×10^{-5}

2.3 自重湿陷性试验

采用室内压缩试验测定不同场地湿陷与未湿陷探井中不同深度黄土试样的自重湿陷系数,结果如表 3 所示。由表 3 可知:安家坡未湿陷场地黄土较为疏松,土体含水量较大,土层自重湿陷系数高,均值为 0.046;尹王村未湿陷场地黄土的自重湿陷系数均值为 0.037 左右,土层自重湿陷系数相对较低。

表 3 北塬黄土的自重湿陷系数

探井	取样深度/m	自重湿陷系数
尹王湿	5.0	0.023
尹王干	5.0	0.038
安干	5.0	0.044
安湿	5.0	0.017

3 场地湿陷性评价和影响因素

3.1 场地湿陷性评价

在上述不同的场地进行现场试坑浸水试验,计算场地黄土的总湿陷量,并根据自重湿陷性试验结果计算不同场地黄土的自重湿陷量,依照文献[8]判定不同黄土的湿陷性等级,如表 4 所示。

表 4 北塬不同场地的湿陷等级

场地	总湿陷量/cm	自重湿陷量/cm	湿陷等级
尹王未湿陷	42.6	28.5	中等
尹王湿陷	26.3	17.3	轻微
安家坡未湿陷	61.5	33.0	严重
安家坡湿陷	31.7	12.8	中等

根据表 4 评价北塬黄土的湿陷性,可得以下几点认识:

(1) 北塬未湿陷黄土场地的湿陷性较强,场地的湿陷等级为中等或严重湿陷,因此在水的作用下易发生大面积沉陷灾害;

(2) 北塬湿陷场地由于发生了沉陷,场地土趋于密实,因此湿陷等级有所降低,但仍为轻微或中等湿陷;

(3) 北塬湿陷场地黄土湿陷后自重湿陷量仍大于规范规定的临界值 7 cm,因此取样场地的黄土均未发生完全湿陷,湿陷后场地的黄土仍具有较强的

湿陷性,其原因主要是由于场地供水和降水量较少,土层浸水量尚未达到一定值使土结构发生完全改变,因而黄土湿陷并不充分,所以即便是已经发生黄土湿陷的场地上沉陷仍在继续,今后还有发生较强湿陷可能。

3.2 初始孔隙比的影响

根据表 1 中北塬黄土的密度、含水率和比重计算不同土样的初始孔隙比,并对同一场地相同取样深度土样的初始孔隙比进行对比,结果如表 5 所示。

表 5 北塬黄土的初始孔隙比

取样场地	取样深度/m	初始孔隙比	
		未湿陷	湿陷
安家坡	2.5	1.16	1.01
	5.0	1.20	1.03
尹王	2.5	1.11	1.13
	5.0	1.16	1.12

根据表 5 可知:(1)北塬未湿陷黄土的初始孔隙比在 1.16 以上,土体极为疏松,具有很强的湿陷破坏势;(2)总体上湿陷后试样的初始孔隙比较未湿陷试样明显减小,湿陷前后安家坡场地的黄土的初始孔隙比差值要比尹王场地大,说明安家坡场地的黄土要比尹王场地的黄土疏松,发生湿陷后产生的沉降量更大;(3)湿陷后的黄土孔隙率仍大于 50%,按照以往的经验判定其仍具有较强的湿陷性^[7]。

3.3 含水率的影响

对北塬地区不同场地湿陷与未湿陷探井中不同深度土样的含水率测试结果,对比湿陷和未湿陷试样的含水量,结果如图 4 所示。

由图 4 可得以下结论:(1)地表由于受取样前降雨的影响,含水量较高,而到深度 2 m 左右时,含水量有所降低,然后含水量又有所增加。整个含水量随深度的分布呈“C”形,局部对深度增加呈“S”形。(2)两个场地上,同一深度时湿陷处探井黄土的含水量均大于未发生湿陷处探井黄土的含水量。而且干湿探井含水量的差别随深度的增加有增加的趋势,其差别在安家坡和尹王村最大分别为 6%,4%,由此可知该地区黄土湿陷是从底部向上发展的。

3.4 渗透性的影响

根据表 2 中北塬黄土的渗透性测试结果,北塬未湿陷黄土的渗透系数为 4.47×10^{-5} cm/s 到 1.81×10^{-4} cm/s 之间,而以往的研究结果表明,红层的渗透系数一般在 10^{-7} cm/s 左右,因此位于黄土以下的红层可近似认为是一不透水层。地表的水自黄土的垂直节理向下渗透,到黄土层底部由于红层的渗透性较差,水在黄土层底部聚集,湿陷探井中不同

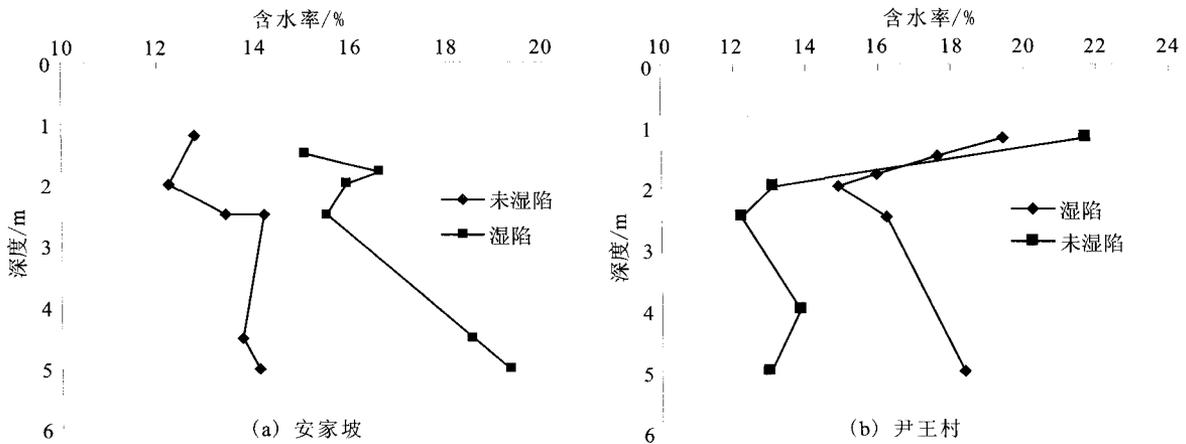


图 4 安家坡与尹王探井试样的深度—含水量分布

Fig. 4 Distribution of water contents with depth change at Anjiapo and Yinwang site.

深度土样含水率的变化趋势证实了这一推断的正确性。水的聚集使覆盖层底部黄土由于颗粒间起胶结作用的可溶盐溶解,大孔隙减少,致使底部黄土湿陷。随着积水不断渗透扩散,发生湿陷的范围越来越大,最终引起地表沉降。

4 成灾机理

由于北塬黄土湿陷灾害的宏观表象为中心低、周边渐高的碟形湿陷坑,可得出该地区黄土的湿陷是由底部向上发展的,因而黄土层中必然存在可以使水流通的竖向裂缝。现场测得尹王村湿陷场地和安家坡湿陷场地中心的沉降量分别为 1.8 m 和 1.5 m,根据文献[8],可估算两场地黄土的湿陷深度,其结果分别为 40 m 和 30 m,也就是说这些竖向裂缝的深度也达 30~40 m。作者认为这个深度只有地震作用产生的裂缝和黄土中垂直节理贯通才有可能到达。根据中国地震局公布的汶川地震烈度分布图,2008 年汶川地震中临夏北部地区的地震烈度为 V 度。王兰民等研究认为,黄土塬由于高差等原因对地震动具有放大效应,一般可放大 1~2 度^[9]。所以汶川地震中北塬地区的地震烈度应为 VI~VII 度,这足以导致黄土层中深大竖向裂缝的贯通和北塬渠道的破坏。

综上所述,北塬黄土产生湿陷灾害的机理是:北塬地区平均高度比周边高出 100~300 m,其上覆土层厚达 30~70 m,在地震作用下容易产生地震动放大效应,使得该地区震动更为强烈。特别是厚土层对震动幅值具有放大作用,使得表层的位移较大,产生很多裂缝。其中有些裂缝与下部的节理贯通,就形成了可以渗水的通道。当这个通道的位置在具有

积水条件的沟渠旁边时,积水就会沿通道较快的流到节理底部并聚集,形成初始湿陷点。由于底部不透水层的存在,加上非饱和吸力的作用,使得水的渗透主要向上和向四周扩散。由于中间距离最短,此处湿陷较快,湿陷量也较大。随着积水不断渗透扩散,发生湿陷的范围越来越大,最终引起地表沉降。

5 地基处理措施

湿陷性黄土地基处理,一般在其竖向或横向采用夯实挤密的办法,使处理范围内土的孔隙比减小,干密度增加,压缩性降低,承载力提高,从而降低黄土的湿陷性^[2]。文献[8]规定:自重湿陷性黄土场地,欲消除建筑物地基的全部湿陷量,应处理基础地面以下全部湿陷性黄土层。然而,根据黄土湿陷深度的估算结果,临夏北塬地区湿陷性黄土层厚度一般在 30 m 以上,对地面以下全部湿陷性黄土层所需的成本很高。因此考虑消除建筑物地基的部分湿陷量,另外采用适当的方法避免或减少地基受水的浸湿,从而减轻湿陷灾害。

文献[8]规定的湿陷性黄土地基处理方法主要有垫层法、夯实法、土挤密桩法、单液硅化法和桩基法。通过对各种地基处理方法处理效果和成本的对比,以及对该地区以往地基处理经验的了解,认为垫层法和夯实法比较适用于北塬地区湿陷性黄土地基处理。

作者等在北塬地区考察时了解到,位于尹王村取样点附近的土桥镇环镇东路在修建时用灰土垫层并进行了夯实处理,并对道路两边的排水沟进行了水泥硬化。该公路自 2007 年建成以来,尽管周围农田发生了显著地湿陷沉降,道路并未产生破坏。

此外,防止水的渗漏是防治北塬地区黄土湿陷灾害的最重要手段。具体措施有:(1)使用混凝土块等材料硬化灌溉渠道,并定期进行检查修复,减少渠水的渗漏;(2)合理的进行居民点的给排水规划,对于雨水采用集流措施,以防造成黄土湿陷灾害。

6 结论

(1) 北塬黄土为典型的马兰黄土,其粉粒含量大于70%,含水量较高,孔隙比较大,具有严重的自重湿陷性,并且湿陷后的黄土仍具有较强的湿陷性;

(2) 北塬黄土场地产生大面积沉陷的主要原因是黄土遇水后产生湿陷引起的黄土场地沉降;

(3) 北塬黄土产生湿陷灾害的机理是地震作用产生的裂缝与土体下部的竖向节理贯通形成了渗水通道,从而在土层底部形成初始湿陷点,底部不透水层的存在最终使得聚集的水向上及向周围扩散,使得上部及周围土体产生湿陷,最终引起地面沉降;

(4) 防止水的渗漏是防治北塬地区黄土湿陷性的重要手段,渠道硬化和定期检修、合理的进行居民

点给排水规划以及雨水集流都是防治湿陷灾害的有效措施。

[参考文献]

- [1] 石兆吉,王兰民. 土壤动力特性—液化势及危害性评价[M]. 北京:地震出版社,1999.
- [2] 罗宇生. 湿陷性黄土地基处理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [3] Z X Yuan, L M Wang. Collapsibility and Seismic Settlement of Loess[J]. *Engineering Geology*, 2009,105(1):119-123.
- [4] 关文章. 湿陷性黄土工程性能新篇[M]. 西安:西安交通大学出版社,1992.
- [5] 王峻,王强,王杰民. 震后黄土动力学特性试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(4):63-67.
- [6] 康建成,李吉均. 甘肃临夏黄土剖面:15万年环境演变的良好记录[J]. *地质论评*, 1993,39(2):165-175.
- [7] 孙建中. 黄土学[M]. 香港:香港考古学会出版社,2005.
- [8] GB50025—2004. 湿陷性黄土地区建筑技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [9] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京:地震出版社,2003.