

黄土湿陷典型案例及相关问题

孙萍萍, 张茂省, 朱立峰, 薛 强, 胡 炜

SUN Ping-ping, ZHANG Mao-sheng, ZHU Li-feng, XUE Qiang, HU Wei

国土资源部黄土地质灾害重点实验室/中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054

Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MLR/Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:黄土湿陷除引发路基变形、房屋开裂等工程建设问题外,还会造成地表塌陷、地下潜蚀,以及由此诱发的黄土斜坡失稳等灾害。通过对甘肃永靖县黑方台灌区典型黄土湿陷案例的分析发现,应用现行规范推荐方法对黄土湿陷量进行评价,其计算值与实际观测值间具有较大差距,计算值不足实际值的 50%。由此,对现行黄土湿陷性评价中的湿陷性黄土定义、湿陷量计算等有关问题进行讨论,认为湿陷性黄土为典型的非饱和土,含水量和结构组成是影响黄土湿陷的重要因素。从非饱和土力学角度出发,应用综合反映黄土含水量和结构的参数,即吸应力,开展黄土湿陷性研究,才能真正地实现由“为什么湿陷”到“怎么湿陷”的转变,进而建立黄土湿陷的本构关系,更好地服务于工程实践。

关键词:黄土;湿陷;灌溉;地下水

中图分类号:P642.13¹;P642.22

文献标志码:A

文章编号:1672-2552(2013)06-0847-05

Sun P P, Zhang M S, Zhu L F, Xue Q, Hu W. Typical case study of loess collapse and discussion on related problems. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(6):847-851

Abstract: Collapsibility is the unique feature of loess. Problems induced by collapse of loess include deformation of foundation, sub-surface erosion, and slope failure. A case study of loess collapse at Heifangtai of Yongjing County in Gansu Province was analyzed in this paper. There exists a notable difference between the calculated result with the recommended equation in the national standard and the real collapse value. The calculated value of collapse is less than 50% of the motivated data. The definition of collapsible loess, the calculation method and the related issues on the assessment of loess collapse were discussed, and the results show that collapsible loess is typical unsaturated loess, and water content and structure are key factors affecting collapsibility of loess. Only by adopting the theory of mechanics of unsaturated soil and employing the parameter representing both the water content and the structure can the research on loess collapse realize the change from "why collapse" to "how collapse" so as to achieve the purpose of better serving engineering construction.

Key words: loess; collapsibility of loess; irrigation; groundwater

黄土是地球上分布广泛、性质特殊的一种沉积物^[1]。中国黄土分布之广、厚度之大、时代延续之长冠盖全球,其覆盖面积达 $64 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占中国国土总面积的 6.6%, 其中湿陷性黄土的分布约占黄土总面积的四分之三^[2]。天然状态下,黄土强度较高,压缩性小。但黄土遇水浸湿后将会发生显著下沉,其强度也随之迅速降低,由此引发灾害造成巨大损失

的实例屡见不鲜。据调查,1974—1975 年间,陕、甘、宁、青、晋、豫六省区有 1505 栋建筑物和大量地下管道因黄土湿陷而破坏^[3]。在县(市)地质灾害调查及 1:5 万地质灾害详细调查的基础上,对中国西北地区的黄土湿陷灾害进行不完全统计,其中由于黄土湿陷所形成的大面积地面塌陷有 400 余处。

黄土的湿陷性是国内外学者开展黄土工程性质

收稿日期:2013-03-26;修订日期:2013-05-25

资助项目:中国地质调查局项目(编号:1212011014024)、国家科技支撑计划课题(编号:2012BAK10B02)

作者简介:孙萍萍(1983-),女,硕士,从事黄土地质灾害调查与研究。E-mail: sunpingping203@gmail.com

研究长期关注的问题,讨论了半个世纪,取得了一批很有价值的研究成果。从黄土为什么产生湿陷的角度出发,提出了可溶盐假说^[4]、胶体不足说、毛管假说^[5]、欠压密说、结构说^[6-10]和黄土力学说等^[11-13]。为解决工程建设中的黄土湿陷问题,中国在1966年至2004年间先后颁布了4部湿陷性黄土地区建筑规范,至现行的《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB 50025—2004)^[14],使得对黄土湿陷类型、黄土湿陷性判别标准、湿陷性黄土地基处理方法等方面的研究不断得以完善,较好地指导了湿陷性黄土分布区的工程建设。

然而,早期研究成果多在饱和黄土湿陷理论的传统框架内开展,是对黄土“浸水沉陷”现象的刻画。黄土是典型的非饱和土,常见到的湿陷往往发生在沿土层深度达到不同含水量的情况^[15],从饱和角度开展黄土湿陷性的研究只是黄土湿陷的一种特例。Barden等^[16]首先提出了非饱和压实土常吸力下的湿陷试验。汤连生^[17]认为微结构的不平衡吸力导致黄土湿陷,提出非饱和黄土湿陷是微结构与广义吸力综合效应的产物。袁中夏等^[18]提出非饱和黄土基质吸力降低是黄土湿陷的主要原因。许领等^[19-20]提出了黄土广义湿陷的概念,从非饱和土力学角度探讨了黄土湿陷的机制。从非饱和角度出发开展的黄土湿陷性研究,其理论认识与研究成果更加接近于客观实际,然而受现有仪器对复杂应力状态下黄土湿陷性研究的限制,相关试验和理论研究还有待进一步开展。这也导致在现行理论和方法的指导下对黄土湿陷性评价,其理论值与实际值间的差距较大。以位于甘肃永靖县的黑方台为例,历经40余年的灌溉,厚约45m的黄土实际湿陷值超过5.96m,而计算值仅为2.8m。

随着西部大开发战略的实施与推进,湿陷性黄土分布区的建设活动不断增加,以现行理论和方法为指导,在工程建设中会面临若干新问题,借助先进的仪器与理论揭示黄土湿陷的本质,才能更好地服务和指导工程实践。本文通过对甘肃黑方台黄土湿陷典型案例的分析,对现行黄土湿陷性评价中的相关问题进行讨论,以期引起相关学者的重视。

1 灌溉区黄土湿陷典型案例

1.1 灌区黄土湿陷灾害特征

位于甘肃省兰州市西北70km的黑方台地区,

常年沿袭大水漫灌,除导致滑坡灾害频繁发生外,还引发了大面积的黄土湿陷^[21-22]。区内黄土湿陷由灌溉水入渗和地下水位上升共同引起^[23],由地下水位上升引起的黄土湿陷范围广,由灌溉水入渗引起的非饱和湿陷也不容忽视。据调查,由灌溉水入渗造成黄土湿陷形成的裂缝、落水洞随处可见,导致大量农田耕地废弃,仅十余平方千米的台面累计损失耕地超过200hm²,水利设施严重破坏,距离灌区近的房屋整体沉陷明显,台面上原来整齐排列的村户,由于黄土的不均匀湿陷被裂得七歪八斜。此外,黄土湿陷造成地基变形、房屋开裂,区内新塬、朱王、陈家、方台4个移民村因黄土湿陷造成房屋开裂损毁,村民每隔几年就需要对房屋进行翻新或者复迁新建,平均每家复迁翻修房屋达2次,多者高达5~6次。相关研究表明,区内黄土虽然经历了长达40余年的灌溉,但其湿陷性尚未完全消除^[23],灌溉水沿裂缝和黄土垂直节理快速补给地下水,会再次引起新的湿陷。因此,有必要通过改变灌溉模式、控制灌溉量等方式,对灌区黄土湿陷加以控制,减少或避免由黄土湿陷造成的损失。

1.2 灌区黄土湿陷量

区内原修建于地下的四处水窖变为水塔的现象,引起了笔者开展黄土湿陷研究的兴趣。四处水窖均为1968年修建,修建过程中,为消除水窖处黄土地基的湿陷性,对其进行了大开挖换土,采用浆砌块石独立基础,在很大程度上避免了由于后期灌溉引起的水窖处的沉陷。与之相比较,水窖周围黄土则随着灌溉时间的增长不断产生沉陷,最终使得位于地下的水窖“长”出地表(图1)。其中一号水窖位于台塬东北的陈家村,深9m,水窖刚建成时,其进水口与地面相平,历经40余年的灌溉,至2012年水窖已成了高出地表3.5m的“水塔”(图2),台塬其它3处水窖也都存在类似的情况。水窖变水塔的事实真实记录了灌溉历史内黄土湿陷的结果。

此外,以研究区内1977年和1997年2期1:10000地形图为数据源,计算不同时期台塬地表的高程变化(图3)。可以看出,整个台面均存在不同程度的沉降。其中较大的沉降主要分布于台塬西侧和北侧,最大沉陷值为5.96m,其次为台塬中部的灌溉区,一号水窖附近的地面高差值约为3m。研究区内常年灌溉引起黄土湿陷量之大超出了以往工程实践的经验。

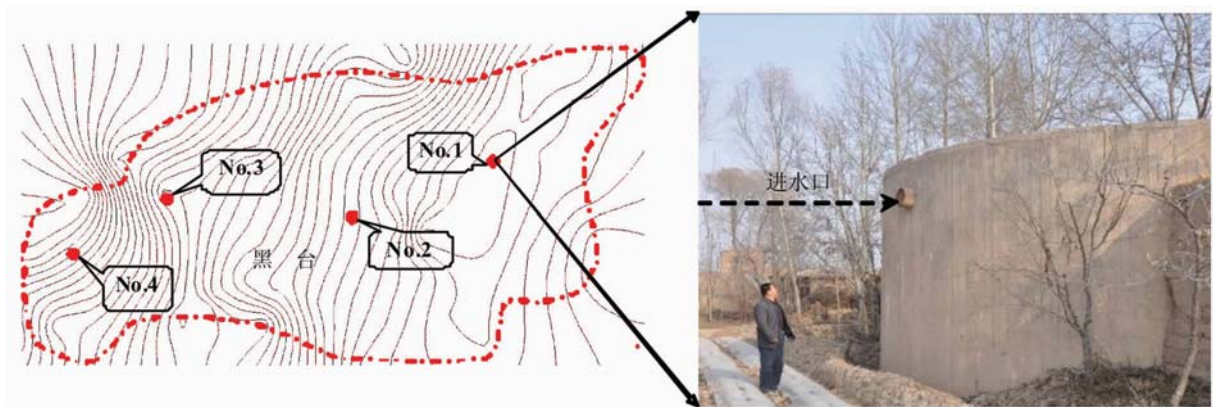


图 1 作为湿陷监测标志的水窖位置
Fig. 1 Location of the water tower

2 黄土湿陷性评价讨论

2.1 黄土湿陷量的理论计算

研究区以农田为主,村庄的建筑物均为 1~2 层民用建筑,无其它附加荷载,台面沉陷主要来自黄土自重湿陷。在区内选取典型灌区和未灌区分别开挖 15m 探井,每隔 1m 采集原状黄土样进行室内测试(表 1)。由表 1 可知,灌区黄土的自重湿陷系数明显小于非灌区,且灌区与非灌区黄土在地表 15m 深度范围内均具有较大的自重湿陷性,特别是灌区黄土,虽然经历了长达 40 余年的灌溉,湿陷性仍未完全消除。据调查资料,灌区黄土厚约 45m,其中 25m 埋深以下为饱和黄土,其湿陷性可忽略,非灌

区黄土厚约 50m。据《湿陷性黄土地区建筑规范》(GB50025-2004),采用分层总和法分别计算黑方台灌区与非灌区黄土层自重湿陷量。对于陇西地区,土质的修正系数为 1.50。以最不利工况考虑,假定灌溉前 50m 厚的黄土层均具有湿陷性,计算得出灌区黄土自重湿陷量为 1.68m,非灌区黄土的自重湿陷量为 4.48m,即经历 44 年的灌溉后,灌区黄土已产生的湿陷为 2.8m。该计算值与区内黄土的真实湿陷值间相差近 50%。

按照规范^[14]推荐公式计算得到的黄土湿陷量是在饱和黄土湿陷理论的框架内展开的,没有考虑到长期灌溉条件下黄土不同埋深范围内含水量的变化、黄土内部胶结成分的溶解、黄土微观结构的变化、黄土内部应力的重分布等对黄土湿陷性的影响。同时,室内测试多是基于侧限压缩的试验,而完全侧限的压缩湿陷试验无法反映自然条件下不同侧限的

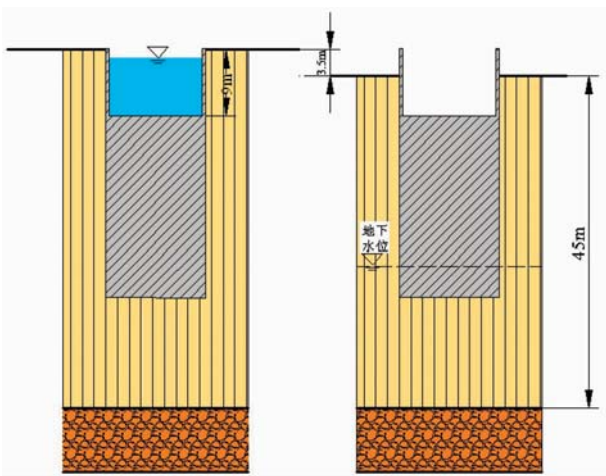


图 2 水窖变“水塔”示意图
Fig. 2 Schematic diagram showing the conversion of subsurface cistern into water tower

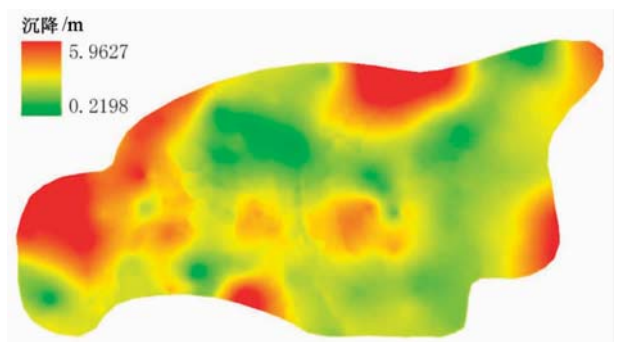


图 3 1977—1997 年间地表高程对比
Fig. 3 Comparison of topographic maps between 1977 and 1997

表1 灌区与非灌区黄土自重湿陷系数统计
Table 1 Coefficient statistics of collapsibility for
loess before and after irrigation at different depths

埋深/m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	>15
灌区 $\delta z/10^{-2}$	2.34	2.40	3.34	5.1	4.75	4.83	4.52	4.74	4.73	4.57	4.66	4.72	4.77	5.01	4.68
未灌区 $\delta z/10^{-2}$	7.63	9.73	7.3	7.5	9.67	9.63	10.5	10.5	8.69	10.5	8.65	5.36	6.93	5.03	5.04

实际湿陷变形^[15]。多种原因导致应用现行规范推荐公式计算得到的黄土湿陷理论计算值与实际值间尚存在较大差异。

2.2 大厚度黄土分布区湿陷性黄土的定义

对于湿陷性黄土的定义,现行规范规定在一定压力下测定的湿陷系数大于0.015的黄土为湿陷性黄土,否则为非湿陷性黄土^[4],这对一般黄土分布区是适用的。然而,对于大厚度黄土分布区,即便是湿陷系数小于0.015的黄土,由于大厚度黄土的逐层累加效应所引起的黄土湿陷量也不容忽视。若在工程施工过程中遇有此类问题,对黄土的湿陷性不予考虑,必将对工程后期稳定性产生较大影响。

2.3 从吸应力角度讨论黄土的湿陷性

黄土是典型的非饱和土,袁中夏等^[14]认为黄土结构强度中吸力的贡献不容忽视,不同的黄土绝对吸力还与其结构因素相关,指出黄土湿陷的主要作用机制是浸水后吸力变化而引起的黄土强度降低、亚稳态破坏引起的强度变形。朱元清等^[24]认为黄土在一定压力下受水浸湿,吸力减小,是黄土产生显著湿陷变形的原因。可见,从非饱和角度出发,黄土含水量及其内部结构组成是影响黄土湿陷的重要因素,应用综合反映黄土含水量和结构的参数开展黄土湿陷性研究能够更好地揭示黄土湿陷的本质。Lu等^[25]提出的非饱和土吸应力理论恰好解决了这一问题。他提出的吸应力理论抛开已有研究中将黄土结构与含水量隔离甚至对立的观点,将其作为一个统一体,认为黄土湿陷实际上是在黄土内部含水量和结构变化的条件下表现出来的吸应力与外加应力的平衡过程。以此为理论支撑,借助先进的仪器设备开展试验,建立黄土湿陷的本构关系,有望从“怎么湿陷”的角度实现黄土湿陷研究的突破。

3 结论

(1)黑方台灌区灌溉引起的黄土湿陷量超出了以往的经验黄土地区建筑规范计算值。历经44年的灌溉,台塬最大湿陷量超过5.9m,理论计算值仅为实际湿陷量的50%,说明在传统饱和黄土湿陷理论的框架内展开的黄土湿陷性评价已不能满足现今工程建设的需求。

(2)对于大厚度黄土分布区,由非饱和黄土和湿陷系数小于0.015的黄土产生的湿陷量不可忽视。

(3)黄土是典型的非饱和土,含水量及其内部结构组成是影响黄土湿陷的重要因素,黄土的非饱和湿陷实际上是内部吸应力与外加应力的平衡过程。

(4)借助先进的仪器开展复杂应力状态下黄土湿陷性研究仍将是未来黄土湿陷性研究的趋势,同时关于黄土湿陷的时间效应,即黄土湿陷的敏感性问题尚有待深入研究。

参考文献

- [1]孙建中. 黄土学(上篇)[M]. 香港:香港考古学会, 2005.
- [2]罗宇生. 湿陷性黄土地基评价[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4):87-91.
- [3]郭希哲, 楚占昌, 柳源. 我国地质灾害评估和防治对策建议[J]. 地质灾害与防治, 1990, 1(1):3-7.
- [4]Muxart T, Billard A, Andrieu A. Changes in water chemistry and loess porosity with leaching: Implications for collapsibility in the loess of North China [J]. Genesis and Properties of Collapsible Soils, 1995, 468: 313-332.
- [5]Dudley J H. Review of collapsing soil[J]. J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE. 1970, 96(SM3):935-939.
- [6]张宗祜. 我国黄土显微结构的研究[J]. 地质学报, 1964, 44(3):357-364.
- [7]张宗祜. 黄土湿陷变形过程中微结构变化特征及湿陷性评价[C]//国际交流地质学术会论文集(6). 北京:地质出版社, 1985:67-78.
- [8]雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑), 1987,12:

- 1309-1316.
- [9]高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980, 12:1203-1208.
- [10]Locat J. On the development of microstructure in collapsible soil[J]. *Genesis and Properties of Collapsible Soils*, 1995, 468:93-128.
- [11]刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西科技出版社, 1997.
- [12]陈正汉, 刘祖典. 黄土的湿陷变形机理[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(2):1-12.
- [13]Fredlund D G. The collapse mechanism of a soil subject to one-dimensional loading and wetting. E. Derbyshire et al (ed.), *Genesis and Properties of Collapsible Soils*, 1995, 486:173-206.
- [14]湿陷性黄土地区建筑规范(GB50025-2004)[J]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [15]谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. 地下空间, 1999, 19(4):273-285.
- [16]Barden L, Mador A O, Sides G R. Volume change characteristics of unsaturated clay[J]. *J. Soil Mech. Found Div.*, 1969, 95(SM1):33-52.
- [17]汤连生. 黄土湿陷性的微结构不平衡吸力成因论[J]. 工程地质学报, 2003, 11(1):30-35.
- [18]袁中夏, 王兰民, 王峻. 考虑非饱和土与结构特性的黄土湿陷性讨论[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1):12-17.
- [19]许领, 戴福初. 黄土湿陷机理研究现状及有关问题探讨[J]. 地质力学学报, 2009, 15(1):88-94.
- [20]许领, 戴福初, 金艳丽. 从非饱和土力学角度探讨黄土湿陷机制[J]. 水文地质工程地质, 2009, 4:62-65.
- [21]王家鼎, 张倬元. 典型高速黄土滑坡群的系统工程地质研究[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1999.
- [22]李保雄, 王得楷, 张世武. 永靖黑方台灌区黄土沉陷灾害、土体工程地质性质变异初步研究[J]. 甘肃科学学报, 1991, 3(2):57-66.
- [23]张茂省. 引水灌区黄土地质灾害成因机制与防控技术——以黄河三峡库区黑方台移民灌区为例[J]. 地质通报, 2013.
- [24]朱元清, 陈正汉. 研究黄土湿陷性的新方法[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4):524-528.
- [25]Lu N, Godt J W, Wu D T. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil[J]. *Water Resour. Res.*, 2010, 46, W05515, doi:10.1029/2009WR008646.