

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.01.009

# 地下水扰动作用下地基土体渗透破坏试验研究

陈国庆<sup>1</sup>, 李天斌<sup>1</sup>, 贺宇航<sup>1</sup>, 周治刚<sup>2</sup>, 韦 璐<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059;

2. 江苏省水利工程科技咨询有限公司, 南京 210003)

**摘 要:**为分析近年来中国西南地区频繁发生的“天坑”形成原因,从渗流破坏理论出发,通过自主设计循环变水压渗透试验装置模拟地下水扰动过程,研究了地下水扰动作用下地基土体的变形破坏机制。首先通过现场和室内试验获得土样的基本物理化学性质,排除由碳酸盐溶洞导致地表塌陷的可能性。在此基础上,为模拟地下水循环扰动对土体的渗透破坏作用,采用饱和土渗流理论,设计了 1 种变压型常水头渗透试验装置,通过自动循环地改变水头大小模拟地下水扰动对土体的破坏机制,分析实验前后土样级配组成、水头变化和土样变形破坏特性,试验表明土样在地下水扰动作用下细颗粒明显减少,土体级配结构发生改变,土体承载力降低并最终导致土体塌陷。变压型常水头渗透破坏试验研究表明,该方法较好地阐明了该地区“天坑”形成机制。

**关键词:**土力学;天坑;渗透破坏;地下水扰动

**中图分类号:** TU46      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2013)01-0052-05

## Seepage Failure Test of Foundation Soil Under Ground Water Perturbation

Chen Guoqing<sup>1</sup>, Li Tianbin<sup>1</sup>, He Yuhang<sup>1</sup>, Zhou Zhigang<sup>2</sup>, Wei Lu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, P. R. China;

2. Jiangsu Province Water Resources Engineering Consultant Co., Ltd, Nanjing 210003, P. R. China)

**Abstract:** In order to find out the reason of many “tiankeng” in southwest of china in recent years, based on seepage damage theory, the theory of saturated soil seepage and changed water head equipment were used to simulate the change process of water head in geologic norm, considering the influence of vacuum erosion as well. At first, physical property and chemical composition of soil samples were got by in-situ test and laboratory test before destroy test, and the result shows that the surface subsidence is not caused by carbonate karst cave. Then changed water head equipment was designed to simulate the change process of water head automatically. The gradation, water head and sample deformation characteristic of soil before the destroy experiment were compared with those after the destroy experiment. It is show that soil sample chemical property changes little, but little soil particles reduce significantly. With the change of gradation and structure of soil, the bearing capacity decreases and eventually it leads to the soil mass collapse. The changed water head test clarifies the reason and mechanism of “tiankeng” phenomenon reasonably.

**Key words:** soil mechanics; Tiankeng; seepage failure; ground water perturbation

收稿日期: 2012-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(41002110、41230635); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室课题(SKLG2009Z002)

作者简介: 陈国庆(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程研究, (E-mail) chgq1982@126.com.

近年来,在中国西南各地不断出现“天坑”地质灾害现象,严重影响了人们正常的生产生活,以及道路交通安全秩序。因此,“天坑”地表塌陷问题的形成原因备受关注<sup>[1]</sup>。地表塌陷类型主要分为 2 种:构造性塌陷<sup>[2-3]</sup>、外界动力作用<sup>[4-5]</sup>和土体工程性塌陷<sup>[6-8]</sup>。构造性塌陷主要为下覆碳酸盐岩层遭地下水侵蚀后形成隐伏洞穴,进而导致上覆土体缺乏有效承载力使地表塌陷。土体工程性塌陷主要从土力学角度出发,强调土体本身结构特性和地下水位变动导致的地表塌陷。

在众多地表塌陷原因中,地下水扰动是影响地基土体稳定性的重要因素<sup>[9-15]</sup>。如万志清<sup>[11]</sup>认为超静孔隙水压力或真空吸力使土的结构产生破坏。隋旺华<sup>[12]</sup>在突砂模型试验中发现,一旦抽冒或形成水砂突涌后,含水层内孔隙水压力表现为剧烈下降并形成瞬时负压。谢忠球<sup>[13]</sup>研究了人工抽水引起的岩溶地面塌陷机理,认为剥落力大于土体抗拉强度是土洞的扩展条件。覃羨安<sup>[14]</sup>认为大气降水渗入土层后产生超静孔隙水压力和动水压力,使得土洞形成和扩大。

上述研究较好地解释了地下水对土体塌陷的影响,但关于地下水扰动对土体变形破坏的物理模型试验仍较少。为更好地研究地下水扰动对地基土体的变形破坏机制,对四川大邑新场与崇州怀远 2 处“天坑”进行了现场调研和取样,在自主设计的渗透试验装置上进行了地下水扰动渗透破坏试验,试验表明,在地下水循环扰动作用下土体产生结构变化与级配改变,从而引起地基土体的塌陷,试验揭示了该地区“天坑”灾害的形成原因。

## 1 土样物理化学性质

### 1.1 土样物理性质

土样取自大邑新场(1 号土样)和崇州怀远(2 号土样)“天坑”处,现场和室内试验获得的土样物理性质见表 1 和表 2。从表 1 中可以得出,2 组土样的平均比重分别为 2.60、2.61,液限分别为 48.3%、47.2%,塑限分别为 28.2%、22.8%,塑性指标分别为 20.1、24.4;表 2 为土样粒径成分,2 组土样均以粉粒为主,含量分别为 65.4%、58.2%,均为低塑性无机黏性土,两组土样的物理性质相近。

表 1 试验土样物理性质指标

土样编号	比重 $G_s$	风干含水率/%	液限 $\omega_p$ / %	塑限 $\omega_L$ / %	塑性指标 $I_p$
1	2.60	2.96	48.30	28.20	20.10
2	2.61	3.01	47.20	22.80	24.40

表 2 试验土样粒径成分 (%)

土样编号	砂粒 (2~0.075 mm)	粉粒 (0.075~0.005 mm)	黏粒 (<0.005 mm)
1	8.15	65.40	12.96
2	3.66	58.20	18.48

土样的级配曲线如图 1 所示,由图 1 可以看出,两地土样的颗粒级配曲线线型非常相近,细颗粒比重较大,粒径小于 0.01 的细颗粒含量达到 40% 左右。

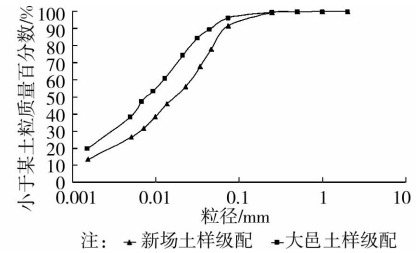


图 1 土样级配曲线

根据以上分析可以得出:两处“天坑”土样的物理性质相近,颗粒组成也相类似,表明“天坑”形成与土体本身的工程物理性质有较大联系。

### 1.2 土样化学性质

通过矿物 X 射线粉晶衍射分析获得土样化学性质,见表 3 和表 4。

表 3 试验土样粘土矿物物质组成 (%)

土样	黏性土矿物总量	黏性土矿物含量		
		蒙脱石	伊利石	绿泥石
1 号	28.2	—	8.8	19.4
2 号	30.9	3.7	8.4	18.8

表 4 试验土样非粘土矿物物质组成 (%)

土样	石英	长石	方解石	闪石
1 号	56.8	12.7	—	2.3
2 号	45	18.2	1.6	4.3

从表 3 和表 4 中可以看到 2 种土样的黏土矿物均为绿泥石,其含量分别占 19.4% 和 18.8%,其次含有少量伊利石;非黏土矿物主要含有石英,含量分别为 56.8% 和 45.0%,其次含有少量长石及闪石。土样化学组成中碳酸盐含量较少,故,排除由碳酸盐溶洞导致上覆土体缺乏承载力而形成地表塌陷的可能性。

## 2 地下水扰动渗透实验

### 2.1 试验设计

为揭示地下水扰动形成地基塌陷的原因,自行

设计了变压型常水头渗透试验装置。装置由 2 部分组成:土体渗透装置(如图 2)和自动抽压装置(如图 3)。土体渗透装置主要由渗透筒、溢水孔、出水孔、止水夹、两个水头管、金属隔板、以及加压管道组成。渗透筒材料选用有机玻璃,其透明特性可直观地观察试验现象。渗透筒半径  $r=15\text{ cm}$ ,高  $h=25\text{ cm}$ ,渗透筒下层铺筑  $10\text{ cm}$  厚的卵砾石层,上层土样高度为  $10\text{ cm}$ ,土样与卵砾石层间加金属隔板作为滤层。

自动抽压装置主要由抽压水槽、金属框架、两个水箱、微型抽水泵、出水管、进水管以及电子压力开关组成。下部水箱通过微型抽水泵将水抽入上部水箱,上部水箱通过电子压力开关感应水压力的变化,控制水的回流。

由于土样采集时受到了较大扰动,其整体结构遭到了一定程度的破坏,装入渗透筒时会产生较多空隙,为恢复土样结构的完整性,试验前对土样进行了固结排水压实。

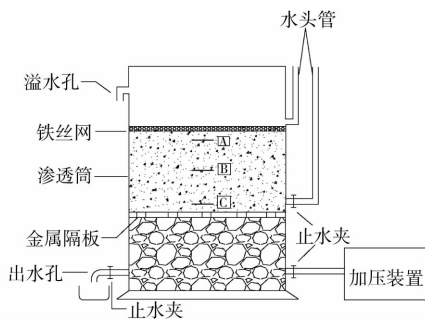


图 2 渗透装置及土样布置

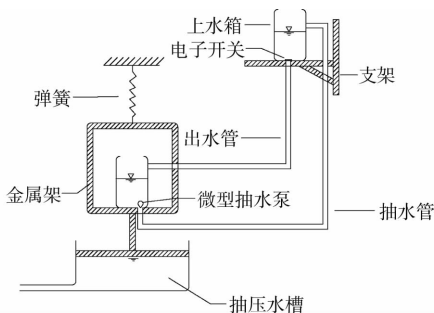


图 3 自动抽压装置

## 2.2 试验步骤

试验持续时间为  $30\text{ d}$ ,分 3 阶段进行,每阶段  $10\text{ d}$ ,分别采用不同的抽压周期,前  $10\text{ d}$  和最后  $10\text{ d}$  周期为  $1\text{ min/次}$ ,中间  $10\text{ d}$  周期为  $0.5\text{ min/次}$ 。抽压试验步骤为:

1) 活塞对抽压水槽进行挤压,使砾石层内充满水,但不漫过金属隔板;

2) 匀速加水至金属架内的水箱,使框架下沉对活塞加压,使渗透装置里砾石层中的水进入上覆土

样并对其进行挤压;

3) 打开微型抽水泵,调整其单位时间抽水量(用于调整抽压周期),将水从金属架内水箱抽至上水箱,活塞向上提拉,对抽压水槽和砾石层中的水形成负压,土体内水位下降;

4) 随着上水箱水量不断增大,电子压力开关自动打开,上水箱中的水又通过出水管回流至金属架内的水箱;

5) 重复步骤 2),实现水压力的正负循环,模拟地下水循环扰动对上覆土层的影响。

试验结束后,取出试验土样,按上中下均匀分为 A、B、C 3 层(如图 2 所示),在各层土体中取土样进行颗粒级配试验,对 3 层土样的颗粒级配曲线进行对比分析。

## 3 试验结果分析

### 3.1 土体孔隙水压力分析

为分析孔隙水压力与地下水扰动之间的关系,在地下水扰动抽压实验过程中,对土体孔隙水压力进行了分析(如图 4)。

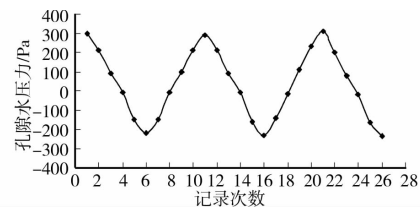


图 4 水头变化规律

图 4 中,每隔  $5\text{ s}$  时间记录水头高度,两水头管差值代表的水压力  $P$  为纵坐标:

$$P = P_c - P_z \quad (1)$$

式中:  $P_c$  为水头管代表的实时水压力;  $P_z$  为土体未扰动前水头管代表的自重压力。

当地下水位下降较剧烈时,土体还将产生较大的超静孔隙水压力,超静孔隙水压力并呈上升趋势<sup>[11]</sup>。从图 4 可以看出,随着地下水位的快速下降,  $P$  值呈正负周期变化,地下水水面与上覆盖层之间会产生负压,对上覆盖层土颗粒产生较大吸力。

图 5 为水头差变化与试验时间的对应关系,由图 5 可得,随着地下水扰动次数增加,两水头管之间的水头差逐渐变小,表明土体在地下水循环扰动作用下,超静孔隙水压力和负压吸蚀作用引起土体结构产生变化,土体中微小裂隙不断扩展贯通,造成土体产生渗透变形破坏。

图 6 为抽压周期与水头变化关系,在不同的抽压周期  $T$  作用下,水头差变化幅度各不相同,当抽

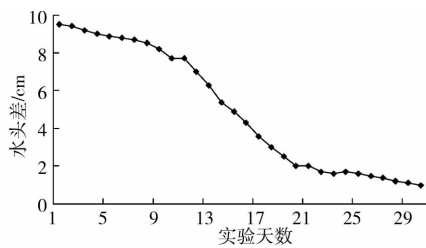


图 5 水头差与试验进行天数的关系

压周期大,即地下水位波动频率较慢时,水头差下降幅度较为缓慢;当抽压周期小时,即地下水位波动频率较快时,水头差下降幅度较快。因此地下水波动频率对土体变形破坏有较大影响。

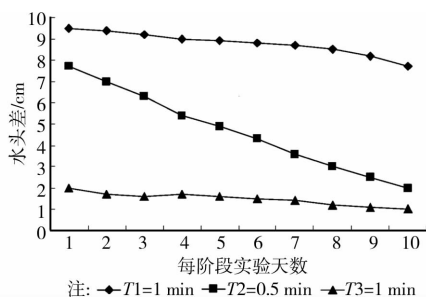


图 6 水头差变化快慢与抽压周期大小的关系

### 3.2 土样级配分析

试验结束后,对不同高度土层的颗粒进行了级配分析,采集的土样位置见图 2 中的 A、B、C 3 点,级配曲线分析如图 7 所示。

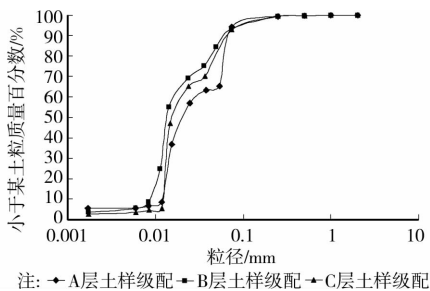


图 7 土层高度与级配变化关系

从图 7 可以发现,土层位置越低,土体中的细颗粒(粒径 0.001~0.01)的含量越少。表明在地下水循环对土体的扰动过程中,孔隙水压力和负压带走了土体中大量的细颗粒,土体中微小裂隙不断扩展贯通,最终导致了土体的结构整体性遭到破坏。

图 8 为 C 点土样试验前后的级配曲线对比,从图 8 可以分析,土样在受扰动之后的级配曲线细颗粒部分下移,地下水扰动使土的细颗粒产生迁移,土体中细颗粒含量明显减少,图中曲线陡增表明细颗粒缺失,使土体微小裂隙不断扩大,并最终导致土体

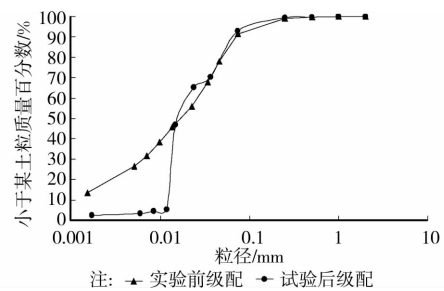


图 8 试验前后 C 点土样级配对比

的结构性贯通破坏。试验进一步证明了土体颗粒的级配变化与地下水扰动密切相关。

## 4 “天坑”灾害防治建议

“天坑”成为近年来多发地质灾害,不仅给当地人民财产造成严重损失,更引起当地社会恐慌,因此需要对“天坑”灾害进行预防和治理。以下是“天坑”灾害的一些具体防治措施建议:

1) 避免地下水的过度开采。城镇和企业集中开发的地下水水源地,尽可能远离城区和重点工程设施。实时进行地下水监测,控制地下水开采强度,防止地下水水位的突然下降和反复升降造成地表塌陷。

2) 城市地表塌陷灾害,需进行钻孔灌浆、旋喷加固、回填混凝土、增设土工膜等方式进行治理。将水泥、碎料和速凝剂等灌注材料通过钻孔进行注浆,强化土层或洞穴充填物,并加固建筑物地基。对重要建筑物需将坑底与基岩面的通道堵塞,采用回填混凝土进行加固处理。

3) 远离建筑物的地表塌陷灾害,采用清除填堵法、强夯法等方式进行治理。清除松土,填入块石、碎石形成反滤层,以防止地下水扰动将细颗粒土带走,上覆回填粘土并利用强夯法夯实回填地基。

4) 加强地表水的疏、排、围、改治理。在治理塌陷地基阶段,不能忽视对地表水的治理,应在预防措施基础上进一步完善。如设置完善的场地排水系统,进行地表河流的疏导或改道,填补河床漏水点或落水洞,调整抽水井孔布局和井距等处理措施。

## 5 结论

1) 当地下水位快速下降时,土体颗粒会受到超静孔隙水压力和负压作用,细小土颗粒被逐渐带走,进一步造成土块体的剥落,使得土体中微小裂隙逐渐扩展。

2) 当地下水位波动频率越快,水头差下降程度越快。表明地下水波动频率对土体变形破坏有较大的影响。

3) 试验初步揭示了近年来发生的地基“天坑”的形成机制,地下水扰动作用是地表塌陷的重要原因。地下水扰动导致土体级配结构发生变化,土体的整体结构遭到破坏。

#### 参考文献:

- [1] 冯跃封. 广西、四川等西南地区地面塌陷成因分析[J]. 城市地质, 2011, 3(1): 37-39.  
Feng Y F. Analysis of the subsidence in southwest china including guangxi and sichuan provinces [J]. Urban Geology, 2011, 3(1): 37-39.
- [2] 袁杰, 高宗军, 马海会. 论岩溶地下水位对岩溶塌陷形成的控制作用——以山东枣庄市岩溶地面塌陷区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(4): 95-98.  
Yuan J, Gao Z J, Ma H H. Discuss on controlling and forming mechanism of Zaozhuang karst collapse [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(4): 95-98.
- [3] 樊永生, 李爱军, 汤江红. 武昌倒口湖地区 F 地块岩溶特征、地面塌陷机理分析及治理措施[J]. 资源环境与工程, 2010, 24(4): 394-397.  
Fan Y S, Li A J, Tang J H. Development characteristics of karst and analysis of collapse mechanism on the ground on F block in daokou lake area in Wuchang [J]. Resources Environment and Engineering, 2010, 24(4): 394-397.
- [4] Vologina E G, Kalugin I A, Osukhovskaya Y N, et al. Sedimentation in Proval Bay (Lake Baikal) after earthquake-induced subsidence of part of the Selenga River delta [J]. Russian Geology and Geophysics, 2010, 51 (12): 1275-1284.
- [5] 姚鑫, 文冬光, 戴福初, 等. “5.12”汶川地震震后龙门山前地表塌陷成因探讨[J]. 工程地质学报, 2008, 16(5): 578-583.  
Yao X, Wen D G, Dai F C, Wang X L, Xiong T Y. Discussions on possible causes of the ground collapse in front of Longmen mountain after the “5.12” Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(5): 578-583.
- [6] Claudiu V S, Shingo T, Kazuhiko Y. On the fatigue fracture at adsorption/desorption of water in/from liquid-repellent nanoporous silica [J]. Acta Mechanica, 2010, 214 (1): 195-203.
- [7] 周健, 姚志雄, 张刚. 管涌发生发展过程的细观试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(5): 842-848.  
Zhou J, Yao Z X, Zhang G. Meso-laboratory study on initiation and evolution of piping [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(5): 842-848.
- [8] Bromley C J, Steve C, Manville V R, et al. Recent ground subsidence at Crown Road, Tauhara and its probable causes [J]. Geothermics, 2009, 38(1): 181-191.
- [9] 杨勇, 李国敏, 窦艳兵, 等. 抽取地下水引起地面沉降的研究现状与进展[J]. 工程勘察, 2010, 12 (11): 32-37.  
Yang Y, Li G M, Dou Y B, et al. Present situation and advance problems on the land subsidence caused by groundwater pumping [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 12 (11): 32-37.
- [10] Ouyang Z H, Cai M F, Li C H, et al. Seepage effects of groundwater and its make-up water on triggering ground subsidence [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 2006, 13 (1): 11-15.
- [11] 万志清, 秦四清, 李志刚, 等. 土洞形成的机理及起始条件[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1377-1382.  
Wan Z Q, Qin S Q, Li Z G, et al. Formation mechanism and initial condition of soil cavity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1377-1382.
- [12] 隋旺华, 董青红. 近松散层开采孔隙水压力变化及其对水砂突涌的前兆意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9): 1908-1916.  
Sui W H, Dong Q H. Variation of pore water pressure and its precursor significance for quicksand disasters due to mining near unconsolidated formations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (9): 1908-1916.
- [13] 谢忠球, 万志清, 钱海涛. 人工抽水引起土洞扩展条件的分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(4): 768-772.  
Xie Z Q, Wan Z Q, Qian H T. Analysis of expansion condition of soil cavity induced by pumping [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(4): 768-772.
- [14] 覃羨安, 王昆, 宋平, 等. 昆明新机场土洞形成机理及发育规律研究[J]. 岩土工程界, 2008, 12(3): 31-33.  
Qin X N, Wang K, Song P, et al. The research of Formation mechanism and Development regularity of the Soil caves of the airport of Kunming [J]. Geotechnical Engineering World, 2008, 12(3): 31-33.
- [15] Aksoy C O. Chemical injection application at tunnel service shaft to prevent ground settlement induced by groundwater drainage: A case study [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(3): 376-383.