

## 城区地表塌陷土洞发育破坏特征

苏永华<sup>†</sup>, 廖君橙, 黄腾  
(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为了研究城区塌陷土洞的发育致塌机制,通过建立三维模型试验研究土洞的发育破坏过程,分析了试验过程中地表变形数据以及土洞的最终破坏形状,同时通过土压力量测试分析土洞发展过程中覆土应力的变化.以此试验为基础建立了计算土洞极限半径的有限元模型,通过正交试验分析了弹性模量、泊松比、黏聚力、内摩擦角对极限半径的影响.结果表明:对于发育的土层空洞,破坏区内土压力显著降低;土洞发生破坏时,洞顶沉降速率发生突变;土洞内部破坏的高度与土洞直径间的规律与普氏理论提出的几何规律吻合良好;对于埋深不同的土洞,其破坏形式主要分为坛形和直筒形塌陷.

**关键词:**土洞破坏;室内模型;有限元计算;土压力;沉降  
**中图分类号:**U416.1 **文献标志码:**A

## Study on Development and Failure Characteristics of Soil Caves in Urban Surface Subsidence

SU Yonghua<sup>†</sup>, LIAO Juncheng, HUANG Teng  
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to study the development and collapse mechanism of the collapsed soil cave in the urban area, the development and failure process of the soil cave were studied through the establishment of a three-dimensional model test. The surface deformation data during the test and the final failure shape of the soil cave were analyzed. Changes in the stress of the covering soil during the development of the cave was also analyzed through the measurement tests of earth pressure. Based on this experiment, a finite element model for calculating the limit radius of the soil cave was established, and the influence of elastic modulus, Poisson's ratio, cohesion and internal friction angle on the limit radius was analyzed through orthogonal experiments. The results show that: for the developed soil cavity, the earth pressure in the failure area is significantly reduced; when the soil cave is damaged, the settlement velocity of the cave top changes suddenly; the law between the height of the damage inside the soil cave and the diameter of the soil cave is consistent with that proposed by Platts theory. The geometric rules are in good agreement; for soil caves with different burial depths, the damage modes are mainly divided into altar-shaped and straight-tube-shaped collapses.

**Key words:** soil cave failure; indoor model; finite element calculation; earth pressure; settlement

\* 收稿日期:2020-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878266), National Natural Science Foundation of China(51878266); 湖南创新型省份建设专项经费资助项目(2019GK1011), Special Funds for the Construction of an Innovative Province in Hunan(2019GK1011)

作者简介:苏永华(1965—),男,湖南涟源人,湖南大学教授,博士

<sup>†</sup> 通信联系人, E-mail: yong\_su1965@126.com

城区地表塌陷是指在城市开发过程中,建设项目对地层不断造成扰动,致使土层中形成内部空洞并逐步发展,直至地层土体达到承载能力极限状态并最终发生浅层地表失稳的现象<sup>[1]</sup>. 该类土洞发育隐蔽,事故后维护速度快,相关事故现场实测数据提取难度大,因此对于地表塌陷事故的可靠测量数据较少. 根据相关统计,北京市2012年发生道路塌陷事故300余次;深圳市2017年报道的该类事故高达238次,我国其他各大城市,城区地表塌陷事故多有报道. 其塌陷形式、塌陷规模与产生的损失各不相同.

相关理论研究表明,当地层土洞发育时,土洞上方发生应力重新分布<sup>[2-3]</sup>,最终土洞发生破坏的形式为上覆土剪切破坏<sup>[4]</sup>. 同时,文献[4]指出,当土洞产生于黏性土中并发生塌陷时,塌陷形式为沿着空洞外围的竖向筒状塌陷,并利用极限平衡法构建了圆柱形土洞覆土安全系数计算方法. 对于黄土路基下伏土洞,研究将黄土内土洞发育简化为土洞顶面的抬升过程<sup>[5]</sup>,基于普氏理论探讨了覆土临界厚度.

该类事故的试验研究可归纳为以下两大类:假设土洞为理想球体,基于三维模型的试验<sup>[6-7]</sup>;设置土洞为二维平面模型,探究其发展破坏机理<sup>[8-9]</sup>;将土洞假设为三维竖直筒形,研究覆土在该条件下的极限覆土厚度<sup>[10]</sup>.

相关理论与试验研究结果表明,工程中发生的地表塌陷事故为三维土洞通过逐步塌落发展引发的事故,二维试验对于其发展过程的研究价值有限;三维模型试验使用黏土为填料<sup>[11]</sup>,假设土洞为标准球形且均匀发育. 对于城区地表塌陷,事故地层为较为松散的填土地层,对于类似土洞发育过程,在工程实际中,影响因素较多,实际工程中难以预测.

鉴于以上的土洞发育致塌特点,基于目前的研究现状,模型试验研究计划采用以下路线:选取砂土混合物为试验材料,通过改变填土高度研究不同埋深下土洞的破坏特征,综合考虑土洞在外力影响下的发展,试验中逐渐扩大土洞的半径,并通过监测地面沉降量分析其发育过程中的覆土变形特征.

### 1 试验步骤

#### 1.1 试验模型箱设计

试验模型箱为长宽高均为1.2 m的土箱,使用螺栓连接角钢为其外框架,为方便沉降观测,模型箱体侧面均采用钢化玻璃材料. 在模型箱底部设置直径为18 cm的圆形开孔,作为模拟土洞的初始直径,在

底部布置两道型钢梁控制模型箱底部变形.

#### 1.2 测量点位布置

针对土洞内部坍塌发育过程中地面沉降情况以及土洞扩展引发的地面塌陷形式. 试验沉降监测点与土压力测点布置如图1和图2所示. 试验过程中,随着土洞半径扩展,洞顶覆土发生沉降,最终产生突塌,以覆土沉降为观测对象,采用摄影测量技术,在洞顶对称设置间隔为10 cm的标记物进行地表沉降观测,测点标记为C1~C5,该测试系统通过不同发育状态下测点的位置确定该状态下模型箱内表土的相对沉降量.

试验土压力测量系统包括5个量程为30 kPa的CS-TYL050土压力盒,以土洞垂直中心线为轴心,在同一水平面上对称布置于土洞上方,编号为P1~P5,直径28.0 mm,厚度6.5 mm. 为保证土压力盒不对土体应力分布产生影响,参考已有研究中同样大小土压力传感器的设置方法<sup>[12]</sup>,将土压力传感器间距设置为150 mm.

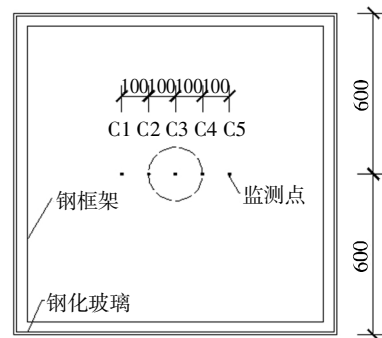


图1 沉降观测点布置

Fig.1 Settlement observation points

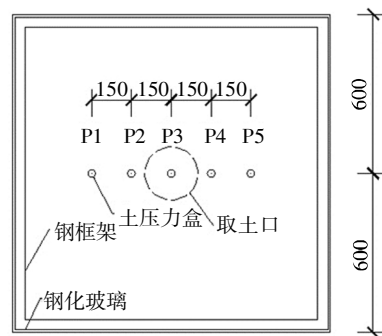


图2 土压力观测点布置

Fig.2 Arrangement of pressure measuring points

#### 1.3 填土选择与基本物理性质测定

目前对土洞坍塌的试验研究主要采用的材料有以下两种:其一,以干砂作为填料,该方案试验效果显著,体现了松散介质中土体的沉降破坏过程,但是其忽略了实际工程中的黏聚力参数;其二,以黏土为

试验材料,考虑了实际工程材料的黏聚力,但是其试验现象不够明显.为了兼顾工程实际中土体的材料参数特性,试验填料采用与路面路基材料成分相近的工程砂土混合材料作为模型填料,使用 Geotest 室内大型剪切仪测试材料,结果如图 3 所示.

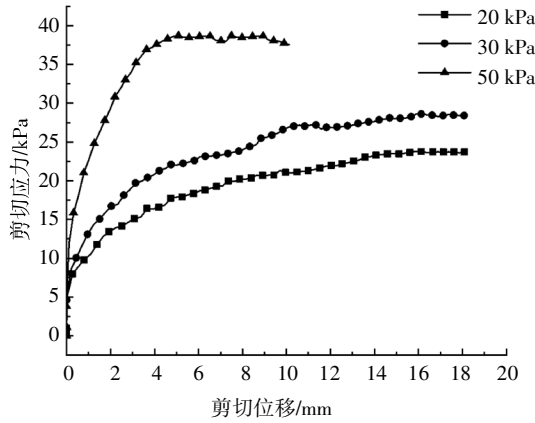


图 3 填土材料剪切试验曲线  
Fig.3 Shear test curve of fill material

试验分别在 20 kPa、30 kPa 和 50 kPa 的侧压力下进行剪切,直至剪应力无法增加.取曲线水平段平均值为该压力下材料抗剪强度.直线拟合其黏聚力为 10 kPa,摩擦角为 25°.

土样级配曲线如图 4 所示,其不均匀系数  $C_u = 6.05$ ,曲率系数  $C_c = 1.05$ ,试验材料为良好级配砂质填土.

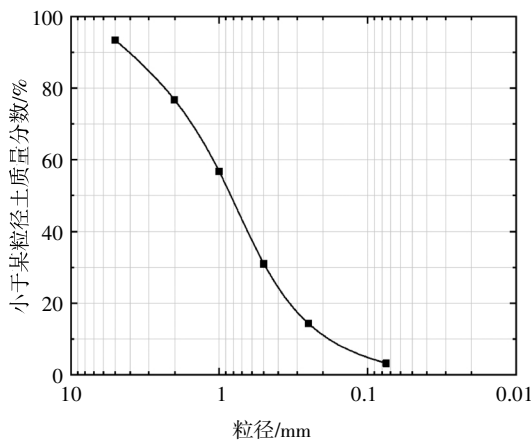


图 4 试验土级配曲线  
Fig.4 Gradation curve of soil

### 1.4 不同埋深土洞发育模拟

针对试验砂土进行 3 组对比试验,每组试验中均以试验箱底部 9 cm 半径圆形开口作为初始土洞直径,通过逐步扩大土洞半径模拟土洞发育过程,设定每次将半径扩大 1 cm,测试其稳定后的土压力与

表面沉降.试验安排见表 1.

表 1 试验安排  
Tab.1 List of tests

试验编号	填土高度/mm	土压力盒埋深/mm
N1	400	—
N2	500	—
N3	600	200

试验在红砖砌筑的下部悬空的操作台上进行,具体操作为:1)将模型箱在操作台上水平放置;2)封闭试验箱下部开口;3)分层填土,试验材料模型采用分层压实的方法,每 10 cm 压实一次;4)击实后静压 24 h 进行模型土填筑;5)布置试验测点标记物;6)打开试验箱下部开口,形成初始塌落面;7)使用每一步对应长度刀具分步扩大土洞半径,待土洞发育稳定后测量塌落尺寸并使用摄影测量技术监测沉降点位的位移直至土洞发生贯穿塌孔.

模型土填筑过程中要保证试验土的均匀性,具体操作如图 5 所示.为了保证试验土体的均匀,在试验箱中埋设取土盒,对试验土体进行取样,试验结束后取出埋设的取样盒并且测量试验取样参数,由此测量试验用土的密度参数  $\gamma$  与含水率  $w$ ,试验土体物理学参数见表 2.

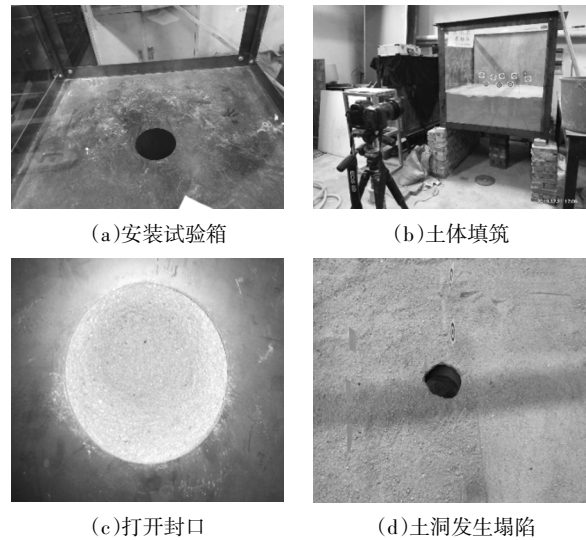


图 5 土体填筑与土洞发育

Fig.5 Soil filling and soil cave development

表 2 材料物理学参数

Tab.2 Physical and mechanical parameters of materials

参数	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$w/\%$
测试值	14.5	10	25	9.2

## 2 不同埋深土洞发育破坏

### 2.1 土洞发育致塌过程

对于土洞发育的研究表明,当土体内部产生悬空时,上覆土层逐步发生坍塌,其坍塌产生类似拱形的界面<sup>[13-14]</sup>,试验过程显示,在该类坍塌过程中,最终坍塌面为椭球面.因此,将空洞坍塌形状参数简化为开孔半径  $R$  与其对应的坍塌高度  $h$  来描述.

试验过程中每一步发育土洞底部的半径  $R$  不断扩大,同时对应的土洞高度  $h$  也逐渐增大,最终地面塌陷,产生半径为  $r$  的塌陷窗口.针对以上三组不同填土高度试验,土洞发生骤发塌陷时的土洞尺寸各不相同:埋深为 400 mm 时覆土塌穿时土洞的开口半径为 140 mm;埋深为 500 mm 时,覆土塌穿时土洞开口半径为 190 mm;埋深为 600 mm 时,土洞的塌孔半径为 160 mm,其塌陷高度随土洞开口半径的变化见表 3.

表 3 土洞发育过程

Tab.3 Excavation results of soil caves cm						
步骤	N1		N2		N3	
	$R$	$h$	$R$	$h$	$R$	$h$
1	9	18	9	20	9	21
2	10	20	10	22	10	22
3	11	23.5	11	25	11	25.5
4	12	26	12	27	12	27
5	13	28	13	29.5	13	30
6	14	40	14	30	14	31.6
7	—	—	15	31	15	33
8	—	—	16	32	16	60
9	—	—	17	33	—	—
10	—	—	18	35	—	—
11	—	—	19	50	—	—

对于不同填土高度的模型,试验结果表明在相同填土材料的条件下,土洞处于极限状态时,对于埋深较浅土洞,其直径随埋深增加而增加,而埋深较深的土洞由于上覆荷载的增加,其直径有所减小.为了分析土洞发育过程中半径  $R$  与塌落高度  $h$  的关系,塌落高度与开孔直径之比即为土洞发育过程中的无量纲化高跨比  $n$ ,高跨比随半径  $R$  变化如图6所示.

对于覆土下存在土洞的情况,普氏理论针对岩溶土洞的发育过程将土洞直径与覆土塌落后自然平衡拱高间建立的关系为:

$$h_{\max} = \frac{D}{2f_k} \tag{1}$$

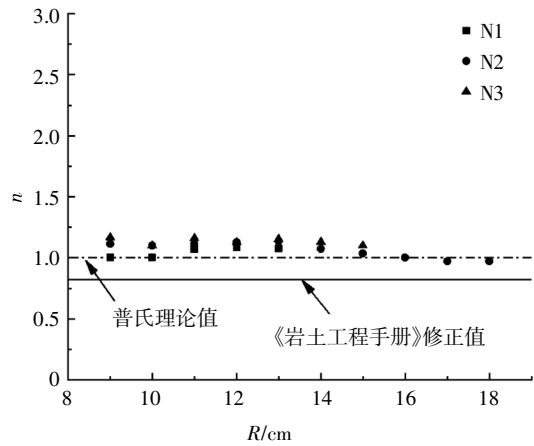


图 6 试验土洞塌落高跨比

Fig.6 Height-span ratio of each cavern

式中: $f_k$  为坚固系数,《岩土工程手册》建议在松散土中取该值为 0.5.实际工程应用中将式(1)乘以经验系数 0.828 进行计算,即:

$$h_{\max} = 0.828 \frac{D}{2f_k} \tag{2}$$

将试验结果与理论计算值相对照,已有理论研究主要针对埋藏较深岩溶或隧道上方,其覆土强度指标相比于浅层的松散土体更高,引发的塌陷范围相比试验结果更小.对于浅层空洞而言,采用普氏理论的计算结果更符合实际工程情况.

### 2.2 土洞塌陷类型分析

对以上三组试验进一步分析其塌陷模式,不同埋深情况下,土洞的极限直径  $D$ 、地面塌陷直径  $d$  及其比值  $k$  如表 4 所示.

表 4 最终塌陷尺寸

Tab.4 Collapse size

组别	$D/cm$	$d/cm$	$k$
N1	28	12.5	0.45
N2	38	31	0.82
N3	36	32	0.89

试验结果表明,相同材料条件下,当不同埋深的土洞发生破坏时,其覆土塌陷模式可以分为坛形塌陷与直筒形塌陷.

### 2.3 覆土沉降模式

采用摄影测量的方法记录 N1 和 N2 每一次土洞发育完成后洞顶的沉降量  $S$  与其半径方向坐标  $X$ ,绘制为如图 7、图 8 所示沉降分布图.同时,将 C3 号沉降监测点的沉降与相应直径  $R$  进行对比分析,如图 9 所示.

对比以上两组试验的沉降测量结果,该结果表

明位于塌陷区域的土体沉降随着土洞破坏的加剧,上覆土的沉降槽由近似圆弧形逐渐发生变化,土洞到达极限平衡状态时其沉降可近似看作抛物线型.分析其沉降过程,发现在土洞发生坍塌事故前,地面由于土洞发育引发的沉降速度逐渐减小,在土洞覆土发生完全坍塌时,其沉降量发生突变从而引发地面塌陷,该现象符合实际工程<sup>[7]</sup>中城市路面下土洞发育时地面沉降发展规律.

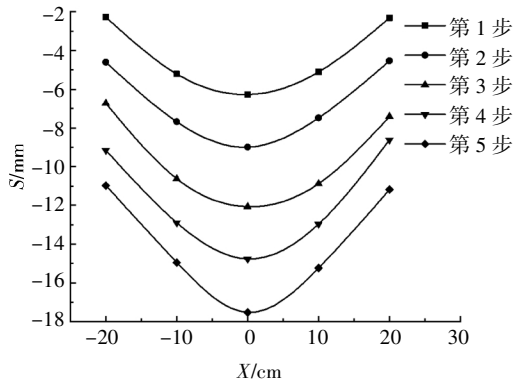


图 7 埋深 400 mm 土洞地表沉降分布

Fig.7 Surface subsidence of 400 mm buried soil cave

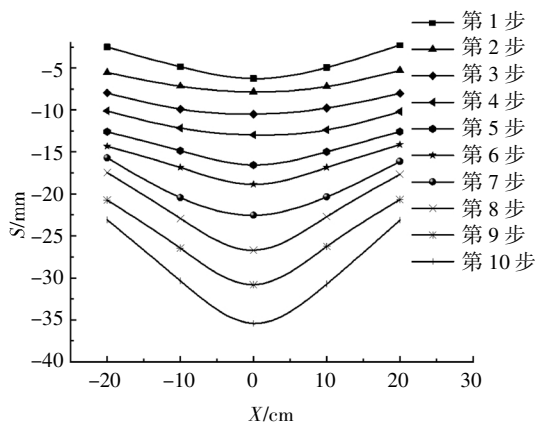


图 8 埋深 500 mm 土洞地表沉降分布

Fig.8 Surface subsidence of 500 mm buried soil cave

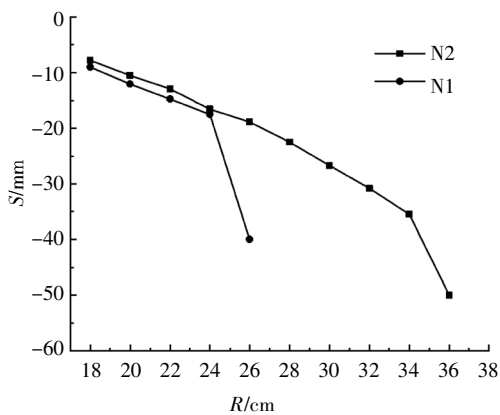


图 9 C3 点位沉降量对比

Fig.9 Comparison of settlement at point C3

## 2.4 土压力分布

当土洞在发育扩展的过程中,使用土压力传感器记录土压力随土洞开口直径变化过程.试验设计综合考虑土压力盒的灵敏度以及设置土压力盒对试验结果的扰动情况,仅对于 600 mm 埋深的土洞模型,在埋深 100 mm 的位置布置一排土压力盒,土压力盒平面位置如图 2 所示,将土压力盒从左至右编号为 1~5 号.土洞中心测点为 3 号测点,发育过程中记录各土压力盒的测试值  $P$ ,在竖直方向上土洞各步发育后土压力测量值如图 10 所示.根据不同点位的测试结果,土洞发育过程中,洞顶土压力明显小于洞周的土压力.为排除土压力监测过程中的无关因素,对称位置上各测点的数据取平均,测量值与发育步骤间关系如图 11 所示.

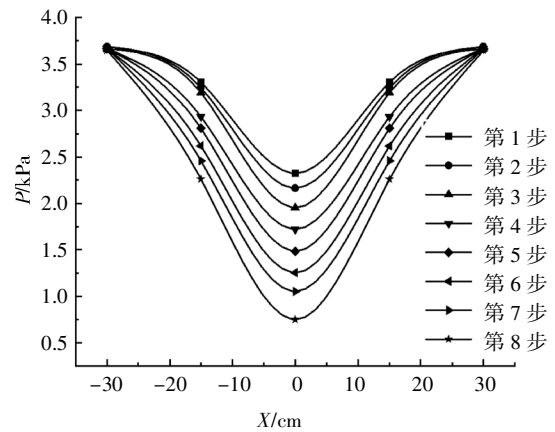


图 10 土压力测试结果

Fig.10 Earth pressure test results

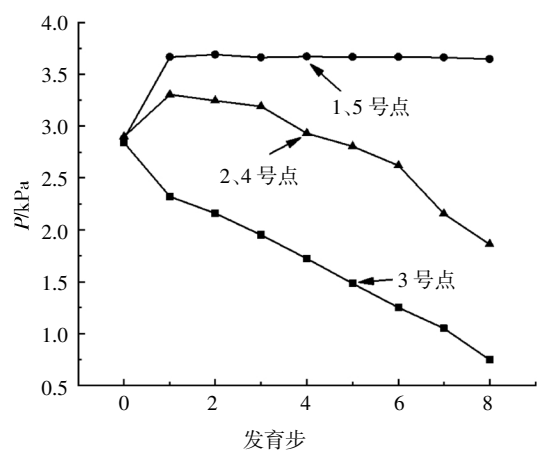


图 11 各点位土压力变化图

Fig.11 Change of earth pressure at each point

土压力测试试验结果表明,当填土下方产生土洞时,土洞轴心处土压力变化最为明显,随着半径逐渐扩大,土压力值显著减小.其次当土洞发育至直径

为 32 cm 时,2、4 号土压力盒位置在水平方向位于该范围内,其土压力降低速度加快. 试验 1、5 号土压力盒在整个发育过程中位于土洞水平投影范围之外,第 1 步发育完成后其竖向土压力上升 26%, 并且在之后的试验过程中变化较小.

### 3 数值模型计算分析

#### 3.1 数值模型建立方法

对于试验所取得的实测数据,选取 N1 组试验结果,建立相对应的数值模型,其模型相关参数如表 2 所示. 考虑三维模型的对称性,取 1/4 模型进行有限元计算,取摩尔库仑模型为计算本构模型. 建立模型如图 12 所示. 该模型共计 17 846 个三维计算单元,其内部侧面设置为对称边界条件,外部侧面则限制水平方向位移,模型下部采用固定边界. 将表 3 中 N1 组别的坍塌数据代入有限元模型中,对照试验过程改变模型,对比有限元计算模型沉降计算结果与试验实测沉降数据.

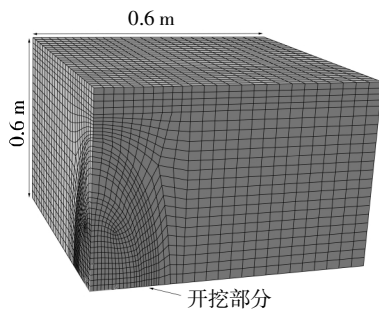


图 12 数值计算模型图

Fig.12 Numerical calculation model diagram

以土洞为中心,取室内模型试验 C3、C4 点沉降测量值与数值模型试验对应点沉降值进行对比,数值模拟结果与实际测量结果对比如图 13 所示. 结果表明,对于试验用砂土材料,数值模拟方法对于椭球形土洞正中心处其模拟效果较好,C3 点位试验与模拟结果误差不超过 3%,C4 点的误差为 7%. 根据模型试验与试验结果对比,在土洞发生破坏前各步计算中,数值模拟较好地反映了土洞发育过程中塌陷土体的变形特征,在工程中具有一定参考价值.

根据计算模型进一步选取长沙一处路面塌陷事故为例,其现场塌坑深度 3 m,地表产生近似圆形塌孔,塌孔直径为 2.8 m. 由临近地质资料推断塌陷事故土洞在地表填土层中,物理力学参数见表 5.

按照上述方法建立有限元计算模型,地层为杂填土层,经验取值认为对于砂质土完整系数取 0.5,

砂质黏土为 0.6,粉质黏土以及砾石层则取为 0.8. 因填土层粒径分布复杂,考虑其类似砾石土,取其完整系数为 0.8,以确定其发育模式. 考虑塌陷土体对土洞的填埋,取土洞的近似埋深为 3.5 m.

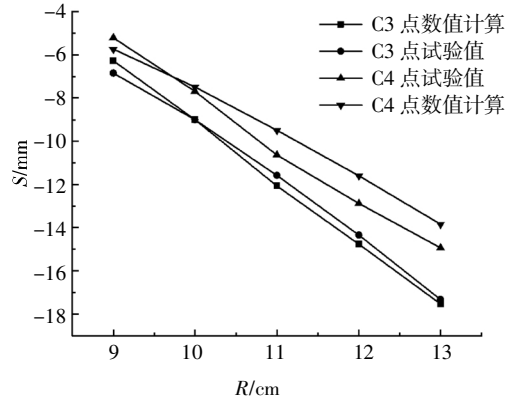


图 13 埋深 400 mm 试验沉降对比

Fig.13 Settlement comparison of 400 mm buried depth test

表 5 现场地层参数

Tab.5 Field parameters

$\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	$c/kPa$	$\varphi/(^{\circ})$	$E/MPa$	$\mu$
18.5	10	23	3	0.2

当土洞在水平方向半径逐渐发育时,取塑性区贯通至地表面时土洞发生塌陷,最终塌陷时塑性区分布如图 14 所示. 由其地面塑性区分布,可以预测其地面塌陷形式为土洞顶部发生塌穿,周边地面产生环状塑性区,该环状塑性区产生拉裂破坏. 数值模拟结果与实际工程均显示地面发生塌穿的范围为圆形,数值计算塌陷半径为 1.5 m,实际事故发生的塌穿范围半径约为 1.4 m,模拟结果较好地反映了工程中的事故现场.

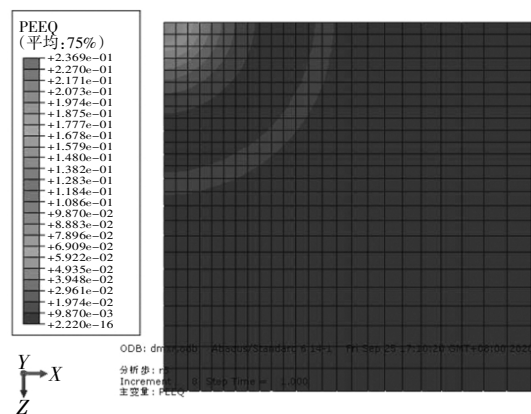


图 14 模型塑性区分布

Fig.14 Distribution of plastic zone in model

3.2 数值模拟参数分析

以上针对三维试验模型测试结果与实际工程实例建立了相关的数值计算模型,结果表明了本文数值模拟计算模型的可靠性.在实际工程中,探讨土体材料参数对塌陷事故的影响具有重要的工程意义.因此,以地表填土的弹性模量  $E$ 、泊松比  $\mu$ 、黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  作为变量进行分析,填土物理参数的经验取值范围见表 6.

正交试验设计是探讨材料参数对土洞坍塌半径影响的一种有效分析方法<sup>[15]</sup>,该方法针对填土参数的经验取值,将填土参数在取值范围内进行变量水平划分,以此作为变量的编码依据,将因素水平划分为上星号臂  $\gamma$ 、上水平、零水平、下水平、下星号臂  $-\gamma$  五个等级,其具体划分如表 7 所示.

表 6 素填土参数经验值

Tab.6 Empirical value of materials

参数	$E/\text{MPa}$	$\mu$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$
范围	1~10	0.2~0.4	5~10	18~30

表 7 因素编码水平表

Tab.7 Factor coding level

变量水平	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
	$E/\text{MPa}$	$\mu$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$
上星号臂	10	0.4	10	30
上水平	8.956	0.374	9.348	28.434
零水平	6.000	0.300	7.500	24.000
下水平	3.044	0.226	5.652	19.566
下星号臂	2	0.2	5	18
变化间距	2.956	0.074	1.848	4.434

为了分析各因素对土洞最终塌陷时半径的影响,采用二次正交组合试验进行分析.选用正交表  $L8(2^7)$  为二因素设计依据,其星号试验次数为 8 次,零水平试验次数为 1,总试验次数为 17 次.试验所得的回归方程包含七项,其中  $Z_1 \sim Z_4$  为因素  $X_1 \sim X_4$  的一次项,交互项为  $Z_1Z_2, Z_1Z_3, Z_2Z_3$ ,平方项为  $Z_1', Z_2', Z_3', Z_4'$ ,则拟合公式为:

$$y = a + \sum_{j=1}^4 b_j Z_j + b_{12} Z_1 Z_2 + b_{13} Z_1 Z_3 + b_{23} Z_2 Z_3 + \sum_{j=1}^4 b_{jj} Z_j' \quad (3)$$

将上述变量水平依据二次正交计算模型输入有限元计算软件,利用湘江路路面塌陷事故建立的模型进行有限元模拟,分别得到不同条件下土洞发育的极限半径  $R$  的值,计算结果见表 8.

将试验结果进行回归计算,忽略参数中影响极

小的项,得到土洞极限半径关于以上表 6 中的 4 个参数的回归方程如式(4),将上述回归变量代回可得到极限半径相对于各参数值的回归方程如式(5).

$$y = -0.122Z_1 - 0.131Z_2 + 0.228Z_3 + 0.209Z_1Z_2 + 0.169Z_1Z_3 + 0.174Z_2Z_3 - 0.23Z_1' - 0.211Z_2' - 0.211Z_3' - 0.222Z_4' + 2.252 \quad (4)$$

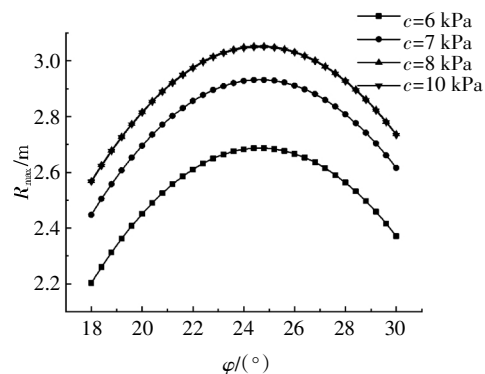
$$y = -5.726 - 0.241X_1 + 6.109X_2 + 0.483X_3 + 0.542X_4 + 0.957X_1X_2 + 0.031X_1X_3 + 1.274X_2X_3 - 0.027X_1^2 - 38.632X_2^2 - 0.062X_3^2 - 0.011X_4^2 \quad (5)$$

表 8 正交试验安排

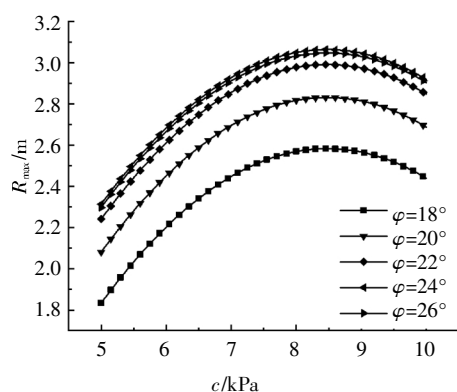
Tab.8 Orthogonal test arrangement

试验号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$y$
1	8.956	0.374	9.348	28.434	2.48
2	8.956	0.374	5.562	19.566	1.1
3	8.956	0.226	9.348	19.566	2.06
4	8.956	0.226	5.562	28.434	1.46
5	3.044	0.374	9.348	19.566	2.02
6	3.044	0.374	5.562	28.434	1.4
7	3.044	0.226	9.348	28.434	2.52
8	3.044	0.226	5.562	19.566	2.51
9	6	0.3	7.5	24	2.53
10	10	0.3	7.5	24	2.48
11	2	0.3	7.5	24	2.53
12	6	0.4	7.5	24	2.55
13	6	0.2	7.5	24	2.53
14	6	0.3	10	24	2.56
15	6	0.3	5	24	2.52
16	6	0.3	7.5	30	2.53
17	6	0.3	7.5	18	2.51

针对计算结果,当  $E=6 \text{ MPa}, \mu=0.3$  时,黏聚力与内摩擦角与土洞极限半径  $R_{\text{max}}$  绘制为图 15. 图 15 分别显示了土洞的极限半径受内摩擦角和黏聚力的影响,当内摩擦角增大时,在表 6 的取值范围内,土洞的半径呈现先增大后减小的关系,在  $\varphi = 24^\circ$  时其半径取得极大值;当填土黏聚力增大时,土洞极限半径



(a)内摩擦角对极限半径的影响



(b)黏聚力对极限半径的影响

图 15 填土强度参数对土洞极限半径的影响

Fig.15 Influence of filling strength parameters on the limit radius of soil cave

在  $c = 8.5$  kPa 处取得极大值. 该拟合结果显示在一定范围内增加填土材料参数有助于增强土洞的稳定, 从而使塌陷时土洞的半径更大, 但若继续提高填土的强度, 其土体的塌陷半径反而有所降低. 由此, 在道路建设中应当针对材料进行多次试验以选取合适强度的填土材料以防止该类事故的发生.

## 4 结论

本文通过室内模型试验, 重点研究了土洞发育致塌过程中土洞形状、地表沉降量与其对应土压力变化数据, 分析试验结果得出以下结论:

1) 对于同一填土材料, 当土洞的水平向直径发展时, 其竖向高度与水平向直径的比值符合普氏理论提出的几何规律.

2) 对于松散填土中埋深不同的土洞, 其塌陷形式主要分为坛形与筒式塌陷两类.

3) 土洞产生引发地面沉降的监测数据结果表明, 在土洞坍塌之前沉降发育较缓慢, 塌陷为突发式失稳.

4) 土洞发育过程中, 上覆土发生明显的应力转移现象, 土洞外侧竖向土压力发生明显升高, 其内侧竖直土压力明显降低.

5) 利用有限单元法结合试验结果建立了模拟土洞发育的模型, 以此为基础通过正交回归试验分析了各参数项对塌陷半径的影响.

## 参考文献

[1] 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. (In Chinese)

[2] KARL T. Theoretical soil mechanics [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1943: 66—76.

[3] 赵明华, 吴家继, 何玮茜, 等. 基于土拱效应的桩承式路堤承载变形计算研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 135—141.  
ZHAO M H, WU J J, HE W X, *et al.* Researches on bearing mechanism and deformation of pile-supported embankments based on soil arch effect [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(3): 135—141. (In Chinese)

[4] 李涛, 张子真, 宗露丹. 地下空洞引起土质地层地陷的形成机制与预测研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(7): 1995—2002.  
LI T, ZHANG Z Z, ZONG L D. Study of formation mechanism and prediction of sinkholes in soil stratum induced by subterranean cavity [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (7): 1995—2002. (In Chinese)

[5] 朱才辉, 李宁. 黄土高填方地基中暗穴扩展对机场道面变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 198—206.  
ZHU C H, LI N. Analysis of airstrip deformation due to expansion of hidden cavities in loess filled high embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (1): 198—206. (In Chinese)

[6] SAGASETA C. Analysis of undraind soil deformation due to ground loss [J]. Géotechnique, 1987, 37(3): 301—320.

[7] 周乾. 基于尖点突变理论的城区孕育型土洞地陷判据研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019: 38—48.  
ZHOU Q. Study on the criterion of ground subsidence of pregnant soil cave in urban area based on cusp catastrophe theory [D]. Changsha: Hunan University, 2019: 38—48. (In Chinese)

[8] FEHDI C, BAALI F, BOUBAYA D, *et al.* Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging in the Cheria Basin (north-east of Algeria) [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2011, 4 (1/2): 181—187.

[9] 陈其志, 郭生根, 徐长节, 等. 砂土中松动土压力及松动区位移破坏形式的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(1): 108—117.  
CHEN Q Z, GUO S G, XU C J, *et al.* Trapdoor model tests on loosening earth pressure and failure mode of loosening zone in sand [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(1): 108—117. (In Chinese)

[10] XIAO X X, XU M, DING Q Z, *et al.* Experimental study investigating deformation behavior in land overlying a Karst cave caused by groundwater level changes [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(3): 1—11.

[11] 苏永华, 周乾, 蹇宜霖. 孕育型土洞地陷判据研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(5): 39—47.  
SU Y H, ZHOU Q, JIAN Y L. Study on the criterion of land subsidence for gestation type soil cave [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(5): 39—47. (In Chinese)

[12] 梁波, 陈弘杨, 聂影, 等. 不同扶壁间距的仓扶式支挡结构土压力分布[J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 24—31.  
LIANG B, CHEN H Y, NIE Y, *et al.* Distribution of earth pressure of warehouse-counterfort retaining wall with different counterfort spacing [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(4): 24—31. (In Chinese)

[13] YANG X L, HUANG F. Three-dimensional failure mechanism of a rectangular cavity in a Hoek-Brown rock medium [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 61: 189—195.

[14] 王滨, 贺可强. 岩溶塌陷临界土洞的极限平衡高度公式[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 458—462.  
WANG B, HE K Q. Study on limit equilibrium height expression of critical soil cave of Karst collapse [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 458—462. (In Chinese)

[15] 苏永华, 孙旺, 方砚兵. 基于正交试验的隧道开挖面位移释放分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(11): 156—163.  
SU Y H, SUN W, FANG Y B. Analysis on displacement release of tunnel face based on orthogonal tests [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(11): 156—163. (In Chinese)