

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.02.13

不同活动速率下隐伏地裂缝的模型试验研究

于文才¹, 杨亚磊¹, 卢全中^{1,2}, 韩文卿¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 目前国内外已查明的地裂缝大都是在地表能直接看到的地裂缝, 然而埋藏在地表之下不易被人类所察觉的隐伏地裂缝发育数量更为众多, 并且隐伏地裂缝因活动速率的不同可能招致不同程度的地质灾害, 进而不同程度地影响人类的工程建设活动。为了研究活动速率不一样的隐伏地裂缝之间有什么发育特征上的不同, 进行一组物理模型对比试验。结果显示当隐伏地裂缝以不同速率活动时, 其所形成的反倾裂缝和直立裂缝的形态特征、地表土体位错量以及土体对深部沉降的吸收作用均有明显的不同。并且当隐伏地裂缝慢速活动的一个活动周期内, 其地表土体位错量随深部底板的活动过程会出现典型的三次“稳定”阶段。

关键词: 地裂缝; 破裂扩展; 活动速率; 物理模型试验

中图分类号: P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)02-0098-08

Comparative study on physical model test of concealed ground fissure rupture propagation under different activity rates

YU Wencai¹, YANG Yalei¹, LU Quanzhong^{1,2}, HAN Wenqing¹

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education of China, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: At present, most of the identified ground fissures at home and abroad are those that can be seen directly on the surface. However, the number of hidden ground fissures buried under the surface which are not easily detected by human beings is more numerous, and the hidden ground fissures may cause different degrees of geological disasters due to different rates of activity, thus affecting human engineering construction activities in varying degrees. In order to study the development characteristics of buried ground fissures with different activity rates, a set of physical model contrast experiments were carried out. The results show that when the buried ground fissures move at different rates, the morphological characteristics of the anti-dip fissures and vertical fissures, the displacement of the surface soil and the absorption of the deep subsidence of the soil are obviously different. In addition, when the buried ground fissures move slowly during a period of activity, the displacement of the surface soil will appear three typical “stable” stages with the movement of the deep floor.

Keywords: ground fissure; rupture propagation; activity rate; physical model test

收稿日期: 2018-12-24; 修订日期: 2019-01-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877250;41272284); 中国地质调查局地质调查项目(12120113004900;DD20160264)

第一作者: 于文才(1990-), 男, 河南淮阳人, 硕士在读, 主要从事地质工程研究工作。E-mail:2016126089@chd.edu.cn

通讯作者: 卢全中(1971-), 男, 湖北鄂州人, 博士研究生, 硕士研究生导师, 主要从事地质工程与岩土工程教学与研究工作。E-mail:lqz_19711@163.com

0 引言

地裂缝是人类社会发展中遇到的一个突出的自然灾害问题,也是地球科学中一个新的科学问题^[1]。按照成因一般可以将地裂缝分为构造地裂缝、非构造地裂缝和混合成因地裂缝三类^[2]。国内外学者从事地裂缝的研究工作至今已逾 90 年,自 1927 年 9 月 Picacho 盆地暴雨过后出现地裂缝地质灾害并被报道以来,世界上众多学者便开始对地裂缝灾害进行研究^[3]。地裂缝在全球范围内广泛分布,美国、墨西哥、印度、欧洲、非洲、澳大利亚及中国等的学者都已相继发表了对本地区地裂缝的研究状况^[4-10]。近年来,随着人类过量的城市用水、农业用水,或是遇到持续干旱的天气导致地下水位急剧下降,此时若遇上强降水等的诱发作用,大量的地裂缝就会在地表形成^[11]。事实上大量的地裂缝是由土体内部的开裂延伸到地表的结果,有时候这些土体开裂会被人类的工程建筑物阻断,当这些内部孕育着地裂缝的土体遇到强降水或者地震活动的作用就有可能出露地表裂缝^[12]。有学者认为,这些新出露的地裂缝可以分为 2 类:一是由土体内部的裂缝发育到土体表层形成,二是已经出露的地裂缝在外力作用下闭合,一段时间后在新的成缝因素作用下重新开启所产生,在还没有出露地表时这两者都可以归为隐伏地裂缝^[13]。

目前国内外已查明的地裂缝大都是在地表能直接观察到的地裂缝,然而埋藏在地表之下不易被人类所察觉的隐伏地裂缝的数量和规模都更为庞大。因此,利用各种钻探技术、物探手段对隐伏地裂缝进行测量,归纳隐伏地裂缝的实际空间展布状态;开展室内试验,模拟其发育过程;综合前两者的数据,对隐伏地裂缝的发育条件归纳出隐伏地裂缝活动的本构模型等,十分有利于对地裂缝场地进行合理有效的利用^[14-15]。对于地裂缝地模型试验研究方面,早期国外具有代表性的有 BRAY^[16]等,国内具有代表性的有刘学增等^[17]。为了协助解决西安市城市建设过程中遭遇的地裂缝灾害问题,长安大学相关专业的优秀教师和研究生团体关于解决西安地裂缝在工程建设方面的问题上设计了许多有创新性的模型试验和研究课题^[18-19],这些研究成果对跨地裂缝的地铁隧道建设、桥梁建设等具有积极的帮助。值得一提的是,这些研究课题涉及到的内容大多是探究地裂缝活动强度对工程建筑破坏能力的大小,或者是不同地质环境下地裂缝活动的成因分析,对于活动速率差异导致隐伏地裂缝产生不同发育特征等几乎没有

涉及。

对于隐伏地裂缝来说,由于地应力不均匀变化形成的隐伏地裂缝发育出露至地表往往要经历数年;强降水过后的隐伏地裂缝出露至地表仅需几天;由地震作用诱发的隐伏地裂缝破裂扩展至地表仅仅发生在几分钟甚至几秒之间^[11]。显然隐伏地裂缝因活动速率的不同可能招致不同程度的地质灾害,进而不同程度地影响人类的工程建设活动。因此,探究不同发育速率对隐伏地裂缝破裂扩展至地表过程中裂缝周围土体的影响,对于指导隐伏地裂缝场地的综合开发利用有着重要的意义,这正是这次试验的研究目的所在。试验方案包含慢速活动、快速活动两组物理模型试验,分别模拟不同地应力条件下隐伏地裂缝破裂扩展过程,通过对比隐伏裂缝破裂扩展的剖面特征、地表土体水平位移和沉降上的差异大小,从而把握活动速率对隐伏地裂缝发育过程的影响。

1 物理模型试验概况

1.1 试验仪器设备

本次物理模型试验在长安大学地质灾害大型物理模拟试验中心的一个模型箱(图 1、图 2)内完成。



图 1 模型箱实物图

Fig. 1 The physical diagram of the model box

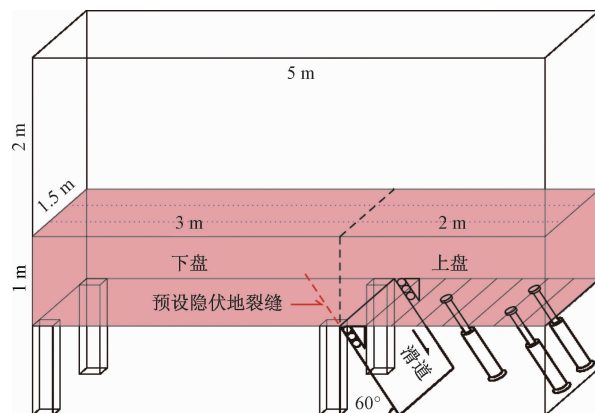


图 2 模型箱结构图

Fig. 2 The structure diagram of the model box

模型箱整体由钢化玻璃、钢板、高刚度支撑梁构成,可分为箱体部分和动力控制部分。箱体部分是上述材料搭接成的一个 5.0 m(长)×1.5 m(宽)×3.0 m(高)长方体,箱体底板由左右两块尺寸分别为 3.0 m(长)×1.5 m(宽)、2.0 m(长)×1.5 m(宽)的厚钢板构成,两底板拼接处设置隐伏地裂缝,其中右侧底板可沿滑道平行滑动(除此之外,箱体其他部位均固定不动)。动力部分由连接在右底板下表面的三个高精度千斤顶和速率控制元件(图 3a)组成,速率控制元件可以通过同步调控三个千斤顶升降速率来控制右底板的活动量,从而可以在试验过程中模拟出不同活动速率的隐伏地裂缝。

本次试验要获取的数据包括土体中地裂缝的形态特征、地表土体的水平位移量和垂直沉降量。其中前一项数据的采集使用高清数码摄像机(图 3b)定点拍摄并辅以记号笔在钢化玻璃表面标注;后两项数据采用高精度位移计(图 3c)和 DH3816 静态应变采集系统(图 3d)进行采集。

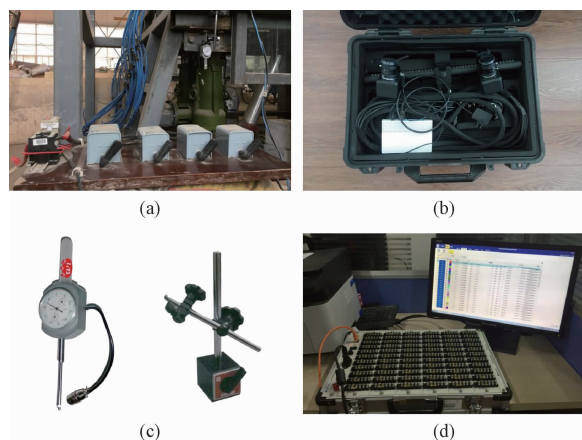


图 3 试验所用仪器

Fig. 3 Instruments used in experiments

(a) 速率控制元件;(b) 高清数码摄像机;
(c) 高精度位移计;(d) DH3816 静态应变采集系统。

1.2 试验方案

试验前先进行土料处理、测量元件标定、数据采集设备调试,然后进行模型箱内的铺土。铺土前模型箱右底板处于与左底板平齐的位置,按照每次填土 15 cm 并将其夯实至 10 cm 的方法,把土料填铺至预设深度 1 m,每次铺土后在土层表面靠近模型箱玻璃板处撒薄层石膏粉作为分层标志。铺土开始时在模型箱左、右底板拼接处沿预设隐伏地裂缝方向上放置一块与模型箱底板等宽的木板(木板厚 1 cm),木板在裂缝方向上长 30 cm,待铺土即将没过木板时将其抽出,从

而在土体内造出一个中空的裂缝,达到模拟预设隐伏地裂缝的效果。试验用模型箱内的土体来模拟隐伏地裂缝场地,以模型箱左、右底板拼接处在地表的投影为界,把试验土体分为上盘、下盘。

铺土完成后进行地表位移计安装,位移计布设方案如图 4 所示:沿模型箱长轴方向布置 1、2 两条相互平行的测线,两条测线与模型箱边界的距离均为 50 cm,其中 1 号测线测量表层土体的垂直沉降量,2 号测量表层土体的水平位移量,位移计从模型箱左边界起 105 cm 位置处开始布设,每条测线上共布设 10 个位移计,相邻两个位移计间距 30 cm,最终铺设结果如图 5 所示。

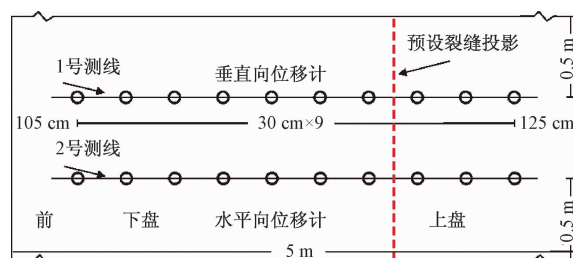


图 4 地表位移计布设平面图

Fig. 4 The design of extensometers at the surface of soil



图 5 地表位移计布设图

Fig. 5 The diagram of extensometers at the surface of soil

模型试验以预设隐伏地裂缝活动(通过控制右底板活动实现)速率为单一变量,共设计 2 种试验工况(表 1)。其中工况 1 模拟隐伏地裂缝在地应力长期缓慢影响下的破裂扩展特征,工况 2 模拟隐伏地裂缝在发生地震时地应力突然改变情况下的破裂扩展特征。

在按照要求铺设好土体后,启动地表位移采集器,打开摄像机等监控试验过程的设备,依据预设工况控制千斤顶进行右底板的的活动。达到预设沉降深度后试验并不是立即终止,而是持续一段时间采集数据,这是考虑了土体内部颗粒间变形的滞后效应。试验过程透过玻璃板拍摄土体中隐伏地裂缝的破裂扩展情况,并用记号笔在玻璃板表面对土体出现破裂的位置和时间进行标记。试验结束后,对相机拍摄成果进行技术处理以更直观地体现土体中地裂缝破裂地形态特征,依

据应变采集系统的数据绘制出地表土体的水平位移量和垂直沉降量曲线图。

1.3 试验材料

本次试验材料选取西安地区的黄土,为了更好地

反映试验土体的常规物理力学特征,试验结束后在模型箱内取土样进行土的常规试验,测定它们的重度 γ 、含水率 w 、以及固结快剪试验的内摩擦角 Φ 、黏聚力 C 等基本物理力学参数,结果见表 2。

表 1 物理模型试验工况表

Table 1 The table about the conditions of the physical model tests					
工况	土层厚度/m	土体类型	隐伏地裂缝倾向/(°)	右底板沉降速率	右底板设计沉降总量/cm
1	1	重塑黄土	60	0.4 cm/h	4
2	1	重塑黄土	60	4 cm/s	4

表 2 土体物理力学参数

Table 2 The table about the physical and mechanical parameters of the test material				
试验条件	上/下盘重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	上/下盘含水率 $w/\%$	上/下盘黏聚力 C/kPa	上/下盘摩擦角 $\Phi/^\circ$
工况 1	16.01/16.04	23.2/23.6	41.4/39.9	15.6/15.7
工况 2	16.19/16.27	23.3/24.1	38.7/37.9	15.4/16.1

2 试验结果及分析

2.1 隐伏地裂缝破裂扩展的横剖面 and 地表的宏观特征

工况 1 隐伏地裂缝破裂扩展最终的横剖面特征如图 6 所示,图中数字代表该位置最初产生裂缝时右底板活动的次数(每次活动右底板的垂直沉降量为 2 mm,对应时间间隔 0.5 h)。图像显示,在下盘土体中形成一条由地表向下发育的近似直立的裂缝,该裂缝宽度随深度的增加而减小,地表处宽约 30 mm,向下尖灭于预设隐伏地裂缝上端部,本文称之为“直立裂缝”。该直立裂缝开始产生于右底板沉降量达约 14 mm 时,裂缝主体部分发育在预设隐伏地裂缝以左约 18 cm 范围内的土体中。摄像机记录显示该直立裂缝一经产生的同时有约 25 cm 的可见发育深度,之后的一段时间随着右底板的不断活动,该裂缝的宽度逐渐增加,但发育深度保持稳定,直到右底板垂直沉降约 20 mm 时,其向下的发育突然加速,裂缝宽度也相应增加,随着试验的继续进行直到终止,这条直立裂缝尖灭于预设隐伏地裂缝的上端部附近,最终发育深度约 80 cm。在上盘土体中形成一条由预设隐伏地裂缝下端部向上发育的倾斜裂缝,其倾向与预设隐伏地裂缝的倾向相反,本文称之为“反倾裂缝”。按照本课题组试验研究成果,可将反倾裂缝的破裂扩展过程分为 4 个阶段:反倾裂缝产生阶段、反倾裂缝快速发育阶段、反倾裂缝塌陷阶段、反倾裂缝闭合稳定阶段。事实上反倾裂缝在预设隐伏地裂缝布设过程中就已经产生;摄像机拍摄显示,在右底板沉降约 0 ~ 14 mm 的过程中,反倾裂缝快速向右上扩展至一定规模;之后随着

右底板继续活动,反倾裂缝长度和宽度上变化甚微,当右底板沉降量达到约 34 mm 时,靠近预设隐伏地裂缝位置处的反倾裂缝突然发生塌陷,同时在预设隐伏地裂缝的右侧伴随产生数条长 10 ~ 40 cm、宽 2 ~ 8 mm 的小裂缝;试验结束后的一段时间内由于右底板活动的停止,反倾裂缝趋向闭合稳定。宏观上看,该反倾裂缝主倾向角约为 40°,最终发育宽度在水平方向上约为 180 cm。

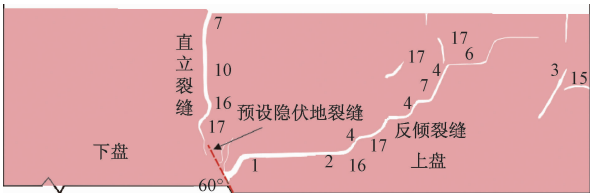


图 6 工况 1 横剖面素描图

Fig. 6 The profile sketch under condition 1

工况 1 地表的整体破裂状况如图 7 所示。在该工况下,隐伏地裂缝活动最终在土体内引起了数条明显的地表裂缝:土体下盘产生一条贯穿的纵向裂缝 a,土体上盘产生了规模次之的地表裂缝 b、c,这三条规模较大的地表裂缝的走向与预设隐伏地裂缝的走向几乎一致。其中 a 地裂缝对应于横剖面上的直立裂缝,开始产生于右底板沉降量约 14 mm 的时段,它的张开宽度随着右底板活动量的增加而变宽,并稳定在 25 ~ 35 mm 范围内。b、c 地裂缝形成在反倾裂缝陷落的过程中,此时右底板活动量约为 34 mm,该地表裂缝出现后其宽度约 8 mm,几乎不随隐伏地裂缝的活动而变化。试验后对 a、b、c 三条裂缝进行开挖,发现 a 裂缝整体发育较深,近乎垂直并向下尖灭于预设隐伏地裂缝的上端部附近;开挖结果表明裂缝 b、c 没有和反倾

裂缝连通在一起,其向下发育较浅,据此推测这两条地裂缝与隐伏反倾裂缝的发育拓展无关,因为为隐伏地裂缝陷落时表层土体应力释放产生的裂缝。宏观上看,土体的破裂主要分布在上盘,其破裂形态具有一定的对称性。

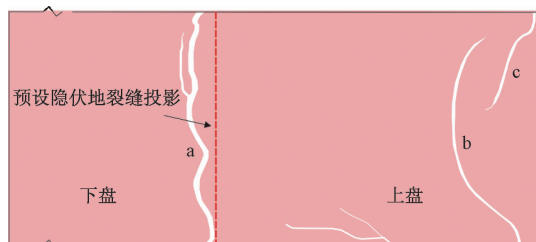


图7 工况1地表素描图

Fig. 7 The surface sketch under condition 1

工况2 隐伏地裂缝破裂扩展最终的横剖面特征如图8所示。图像显示该工况下土体内部并未出现明显的直立裂缝。反倾裂缝瞬间产生并贯通至土体表层附近,裂缝较宽位置处宽约10~25 mm。另外在上盘土体坍塌过程中,反倾裂缝附近土体受扰动生成了少量小型裂缝,其宽约5~10 mm,长约25~35 mm。宏观上看,该反倾裂缝主倾角约为75°,最终发育宽度在水平方向上约45 cm。

工况2 土体地表的整体破裂状况如图9所示。在该工况下,隐伏地裂缝活动最终在土体内引起了总体走向几乎和预设隐伏裂缝走向一致并且规模较大的一条地裂缝和一些规模较小的地裂缝,其中主裂缝宽约5~8 mm,次级裂缝宽约2~4 mm。由于试验过程持

续时间极短,这些裂缝几乎是瞬间同时产生的。试验完成后,静置一段时间,地表破裂无明显变化。试验后对土体分析结果表明,直立裂缝的发育程度微弱,仅在地表上可被观察到,而在横剖面上几乎不可见。反倾裂缝在横剖面中发育形态比较明显,而在地表中也有小部分出露,这说明反倾裂缝近乎扩展至地表。宏观上看,地表土体破裂形态对称性较差,土体破裂区域比较集中。



图8 工况2横剖面素描图

Fig. 8 The profile sketch under condition 2

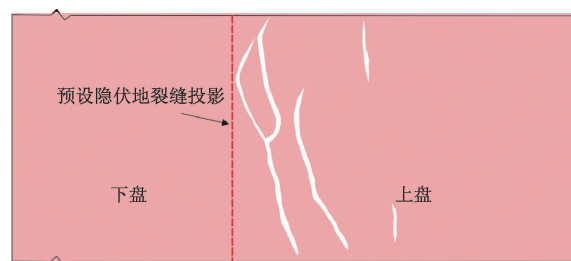


图9 工况2地表素描图

Fig. 9 The surface sketch under condition 2

表3对工况1、工况2各横剖面特征数据进行了对比。

表3 两种工况下的特征数据对比表

Table 3 The comparison table of the characteristic data under the two conditions

工况	直立裂缝 发育深度/m	反倾裂缝		地表裂缝的分布宽度		
		水平延伸宽度/m	倾角/(°)	上盘/m	下盘/m	总宽度/m
1	0.80	1.80	40	2.00	0.20	2.20
2	0.15	0.50	75	0.90	0.00	0.90

2.2 隐伏地裂缝破裂扩展地表位移特征

工况1 地表垂直沉降量及水平位移量随时间变化如图10、图11(其中图像的横轴代表位移计安装位置距模型箱左边界的横向水平距离,纵轴代表位移计的读数,下同)所示,0~10 h为右底板按4 mm/h速率活动的过程,11~16 h为试验后对土体应变的滞后采集过程。

图10显示该工况下,土体垂直沉降量在时间上出现了三次“平稳”阶段,即0~0.5 h、3.5~5.5 h、6.5~16 h,在这三段时间内土体垂直沉降量几乎无明显变

化,三次“平稳”阶段间隔了两段垂直沉降量快速增大阶段,其中以5.5~6.5 h增大量最为明显。图像显示在空间位置上,表层土体垂直沉降量在模型箱0~2.55 m位置变化微弱,最大沉降量仅为0.8 mm,约为右底板总活动量的2%,为试验土层总厚度的0.08%;在模型箱2.55~3.15 m之间,垂直沉降量随着位移计位置的向右逐渐增加,其中前文提到的直立裂缝就位于该区间内;剩余3.15~4.05 m,沉降量近乎一致,最终沉降量约为14 mm,约为底板活动量的35%,为试验土层总厚度的1.4%。

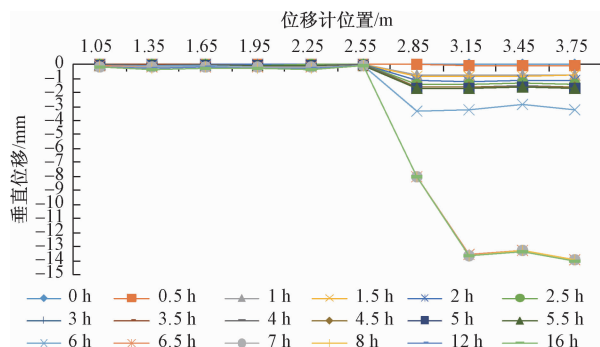


图 10 工况 1 地表垂直沉降量曲线

Fig. 10 The diagram of vertical settlement under condition 1

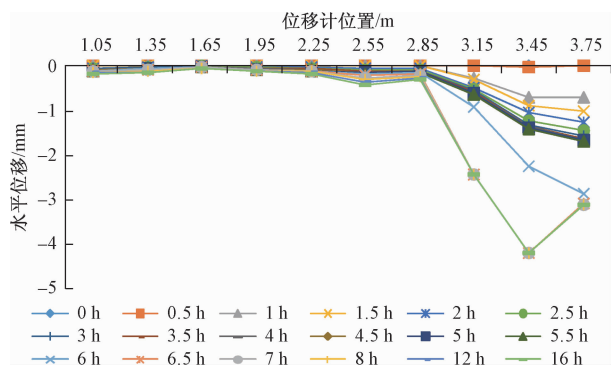


图 11 工况 1 地表水平位移量曲线

Fig. 11 The diagram of horizontal displacement under condition 1

图 11 显示该工况下,土体水平位移量也出现了在同一时间段上与垂直沉降量类似的三次“平稳”阶段,在这三段“平稳”时间内,水平位移量几乎也是没有明显变化,三次“平稳”阶段所间隔的两段水平位移量增大阶段中的增大量近似相等。图像显示在空间位置上,表层土体水平位移量在模型箱 0 ~ 2.25 m 位置处几乎无变化,最大位移量仅为 0.26 mm,约为同期垂直沉降量的 1/3,为右底板水平位移量的 1%;在模型箱 2.25 ~ 3.75 m,水平位移量向右逐渐增大,局部略有波动;由于边界效应的影响,预计在 3.75 m 之后的上盘范围内,土体位移会急剧衰退至零。采集设备检测到整个土层面上的位移最大量约为 4.3 mm,约为同期最大垂直沉降量的 1/4 ~ 1/3,为右底板水平位移量的 18%。这表明当隐伏地裂缝以较慢的速率活动时,其所引起的地表位错主要以垂直沉降为主,隐伏地裂缝作用下的水平张引位移量比出露于地表的裂缝水平张引量更加微弱。

事实上综合本次试验和本课题组 2 m 厚土层的模型试验和本次试验结果,在隐伏地裂缝以慢速率活动时,表层土体在垂直和水平变形上会先后产生 3 回稳

定过程(图 12),这 3 回稳定过程与隐伏地裂缝的发育阶段有一定的联系。第 1 回稳定过程对应于图中的 0 ~ a 沉降过程,因为整个土层对预设隐伏地裂缝活动所引起的位移具有吸收作用,导致地表位错量极小;裂缝活动的 a ~ b 沉降过程,反倾裂缝还未扩展至地表,表层土体受到反倾裂缝下侧土体的拉动作用向下位移,随着预设隐伏地裂缝的继续活动以及土体对位移吸收的不断饱和,地表位错量迅速累积;裂缝活动到 b ~ c 阶段时,反倾裂缝已扩展至地表,此时上盘地表土体与反倾裂缝下侧土体近乎分离,地表土体在自身强度作用下形成了“土拱”,不再受下侧土体的拉动作用,也没有立即发生塌陷,在该过程中隐伏地裂缝仍在继续活动,但表层土体并不能形成明显错动,这是第 2 回稳定过程;在 c ~ d 沉降过程,隐伏地裂缝塌陷迅速产生,此过程地表变形在隐伏地裂缝反倾发育过程中的坍落作用下变化又快又多; d ~ e 沉降过程即反倾隐伏裂缝发育陷落后地表变形接近为零,裂缝在重力作用下缓慢闭合的阶段,即第 3 回稳定过程。

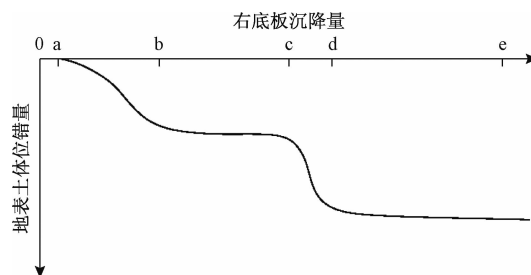


图 12 隐伏地裂缝扩展中的三个稳定过程示意图

Fig. 12 The schematic diagram of three stable stages in the development of concealed ground fissures

工况 2 地表水平位移量及垂直沉降量随时间变化如图 13 ~ 14 所示,试验设定右底板的快速沉降发生在第 1 分 30 秒,接下来是采集土体的滞后变形过程,直到数据稳定。

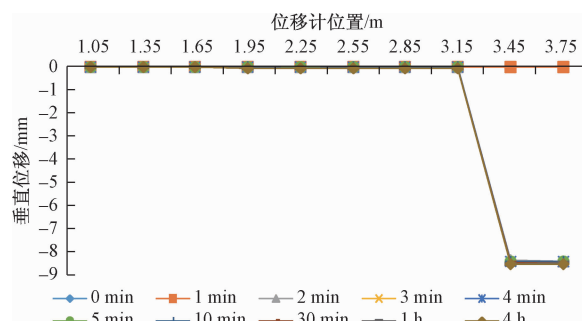


图 13 工况 2 地表垂直沉降量曲线

Fig. 13 The diagram of vertical settlement under condition 2

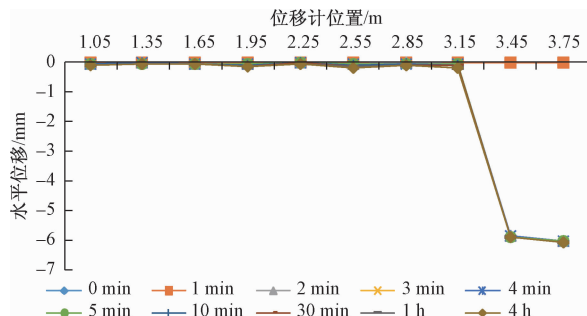


图 14 工况 2 地表水平位移量曲线

Fig. 14 The diagram of horizontal displacement under condition 2

图 13 表明该工况下表层土体垂直沉降量在模型箱 0~3.15 m 位置无明显变化,在预设隐伏地裂缝右侧出现最大垂直沉降量为 8.57 mm,约为右底板垂直活动量的 21%,为试验土层总厚度的 0.86%。图 14 显示该工况下表层土体水平位移量在模型箱 0~3.15 m 位置虽有小幅波动,但总体变化不大,在预设隐伏地裂缝右侧附近出现最大水平位移量为 6.04 mm,约为同期地表垂直沉降量的 2/3,为右底板水平位移量的 26%。这表明当隐伏地裂缝快速活动时,地表处的垂直沉降量和水平位移量相差不大,并且具有相似的变化规律,但地表处的垂直沉降量明显小于慢速活动下的垂直沉降量。

3 结论与讨论

根据实验结果,进行两种工况下隐伏地裂缝活动的对比分析,可以得出以下结论:

(1) 隐伏地裂缝活动时一般会形成两种类型地地裂缝:由地表向下发育的直立裂缝和由土体内部向地表发育的反倾裂缝。

(2) 当隐伏地裂缝慢速活动时,其引起的反倾裂缝在横剖面上的倾角较小;其引起的直立裂缝发育较深,并且整个试验土体更显破碎。而当隐伏地裂缝快速活动时,其引起的反倾裂缝在横剖面上的倾角较大;其引起的直立裂缝发育较浅,并且整个试验土体稍显破碎。

(3) 当隐伏地裂缝慢速活动时,隐伏地裂缝的地表投影附近土体垂直沉降量较大,水平位移量相对较小。当隐伏地裂缝快速活动时,隐伏地裂缝的地表投影附近土体的垂直沉降量和水平位移量相差不大,但整体都小于慢速活动时的垂直沉降量和水平位移量。

(4) 如果把一次实验中隐伏地裂缝的活动视为一个活动周期,那么在隐伏地裂缝慢速活动的一个周期

内,其上盘土体位错的变化可能会出现典型的三次“平稳”阶段。

(5) 相比于慢速活动,隐伏地裂缝快速活动时,土体对右底板沉降量的吸收作用更为明显。

当然,这次实验主要探讨的是不同活动速率隐伏地裂缝的动态发育过程,没有涉及土体中应力应变的分析,事实上隐伏地裂缝发育过程中其与应力应变的关系规律也是本课题组的一个方向。至于能否通过实验的结论很好地预测地裂缝场地的地质灾害效应,还需要进行大量的研究工作。

参考文献:

- [1] 彭建兵,张勤,黄强兵,等. 西安地裂缝灾害[M]. 北京: 科学出版社,2012.
PENG Jianbing, ZHANG Qin, HUANG Qiangbing, et al. Xi'an ground fissures hazards [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] 贾三满,刘明坤,田芳,等. 北京地区地裂缝分类及防治措施[J]. 城市地质,2011,6(2): 4-7.
JIA Sanman, LIU Mingkun, TIAN Fang, et al. The classification of ground fissures and their prevention measures in Beijing area [J]. Urban Geology, 2011, 6(2): 4-7.
- [3] LEONARD R J. An earth fissure in Southern Arizona [J]. Journal of Geology, 1929, 37(8): 765-774.
- [4] RUDOLPH D L, CHERRY J A, FARVOLDEN R N. Groundwater flow and solute transport in fractured lacustrine clay near Mexico City [J]. Water Resources Research, 1991, 27(9): 2187-2201.
- [5] LEE C F, ZHANG J M, ZHANG Y X. Evolution and origin of the ground fissures in Xian, China [J]. Engineering Geology, 1996, 43(1): 45-55.
- [6] NGECE W M, NYAMBOK I O. Ground subsidence and its socioeconomic implications on the population: a case study of the Nakuru area in Central Rift Valley, Kenya [J]. Environmental Geology, 2000, 39(6): 567-574.
- [7] ALLIS R G. Review of subsidence at Wairakei field, New Zealand [J]. Geothermics, 2000, 29: 455-478.
- [8] SAPIGNI M, BARBERA G L, GHIROTTI M. Engineering geological characterization and comparison of predicted and measured deformations of a cavern in the Italian Alps [J]. Eng Geo, 2003, 69: 47-62.
- [9] HOLZER T L, GALLOWAY D L. Impacts of land subsidence caused by withdrawal of underground fluids

- in the United States [J]. Reviews in Engineering Geology, 2005, 16(8): 87-99.
- [10] 彭建兵, 范文, 李喜安, 等. 汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 433-440.
- PENG Jianbing, FAN Wen, LI Xi'an, et al. Some key questions in the formation of ground fissures in the Fen—Wei Basin [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 433-440.
- [11] 卢全中, 彭建兵, 范文, 等. 陕西三原双槐树地裂缝的发育特征[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 458-462.
- LU Quan zhong, PENG Jianbing, FAN Wen, et al. Development features of ground fissure in Shuanghuaishu village, Sanyuan county, Shaanxi province [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 458-462.
- [12] 陈立伟. 地裂缝扩展机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- CHEN Liwei. Study on the propagation mechanism of ground fissure [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [13] 卢全中, 赵富坤, 彭建兵, 等. 隐伏地裂缝破裂扩展研究综述[J]. 工程地质学报, 2009, 30(4): 903-908.
- LU Quanzhong, ZHAO Fukun, PENG Jianbing, et al. Overview on rupture propagation studies of buried ground fissures [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 30(4): 903-908.
- [14] 李力. 倾角 60° 隐伏地裂缝破裂扩展模型试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- LI Li. Physical simulative on buried ground fissures by 60° inclination [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [15] 罗文超. 正断型隐伏地裂缝破裂扩展的倾角效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- LUOWenchao. The effects of fracture dip on propagation of buried ground fissures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [16] BRAY J D, SEED R B, SEED H B. Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(3): 562-580.
- [17] 刘学增, 滨田政则. 活断层破坏在土体中传播的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 425-427.
- LIU Xuezheng, MASANORI HAMADA. Experiments on rupture propagation of active faults on soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(3): 425-427.
- [18] 黄强兵, 彭建兵, 门玉明, 等. 地裂缝对地铁明挖整体式衬砌隧道影响机制的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2324-2331.
- HUANG Qiangbing, PENG Jianbing, MEN Yuming, et al. Model test study on effect of ground fissure on open-cut metro tunnel with integral lining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2324-2331.
- [19] 石玉玲, 门玉明, 彭建兵, 等. 地裂缝对不同结构形式桥梁桥面的破坏试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2917-2922.
- SHI Yuling, MEN Yuming, PENG Jianbing, et al. Damage test study of different types structures of bridge decks by ground fissure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 2917-2922.