

彭建兵, 陈立伟, 黄强兵等. 地裂缝破裂扩展的大型物理模拟试验研究. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1826~1834

Peng J B, Chen L W, Huang Q B, et al. Large-scale physical simulative experiment on ground-fissure expansion mechanism. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(6): 1826~1834

地裂缝破裂扩展的大型物理模拟试验研究

彭建兵^{1,2}, 陈立伟³, 黄强兵¹, 门玉明¹, 范文¹,
闫金凯¹, 李珂¹, 姬永尚¹, 石玉玲¹

1 长安大学地质工程与测绘工程学院, 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, 西安 710054

3 中国核电工程有限公司, 北京 100840

摘 要 通过大型物理模拟试验, 研究了具有正断层性质的隐伏地裂缝破裂扩展时, 下伏断层位错引起上覆土体中的应力场和位移场等的变化规律, 以及隐伏地裂缝向上破裂扩展模式和平、剖面结构特征, 并对裂缝的破裂过程进行了分析; 将模拟试验结果与西安地裂缝的破裂扩展模式及建筑物的破坏模式进行对比分析发现, 模拟试验结果与西安地裂缝剖面结构不一致, 但与地裂缝带上建筑物的破裂形式相一致, 这证明了西安地裂缝的形成年代较为久远, 是一种早就存在的接近地表的构造破裂面, 过量开采地下水则使其重新开启而形成地表裂缝. 大型物理模拟试验取得的重要成果对于揭示西安地裂缝的成因机理具有重要的指导意义.

关键词 地裂缝, 扩展机理, 破裂模式, 物理模拟试验

文章编号 0001-5733(2008)06-1826-09

中图分类号 P512

收稿日期 2007-04-11, 2008-09-08 收修定稿

Large-scale physical simulative experiment on ground-fissure expansion mechanism

PENG Jian-Bing^{1,2}, CHEN Li-Wei³, HUANG Qiang-Bing¹, MEN Yu-Ming¹, FAN Wen¹,
YAN Jin-Kai¹, LI Ke¹, JI Yong-Shang¹, SHI Yu-Ling¹

1 School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China

3 China Nuclear Power Engineering Corporation, Ltd., Beijing 100840, China

Abstract For a buried ground-fissure of normal fault type propagating and expanding upwards, the variation of stress and displacement field in overlying strata caused by the dislocation of underlying fault, the fracturing mode, and the planar and sectional characters were studied through large-scale physical experiment, also the breaking process of ground fissure was analyzed. Compared with the fracturing mode of Xi'an ground fissure and destruction pattern of buildings, it can be found that, the experiment result was consistent with the destruction pattern of buildings, but not with the profile structure of Xi'an ground fissure. This shows that Xi'an ground fissure has come into being long time ago, and it's a kind of tectonic fracture adjacent to earth's surface. The groundwater pumping is the very reason of Xi'an ground fissure's renewed activity and causes it to be exposed on the earth surface. The results from the large-scale physical simulative experiment will guide us to reveal the genesis secret of Xi'an ground fissure.

Keywords Ground-fissure, Expansion mechanism, Fracturing mode, Physical simulative experiment

1 引言

我国华北地区尤其是汾渭盆地,地裂缝十分发育^[1],给当地城乡建设带来了巨大的经济损失,也给人们的正常生产和生活造成了不利影响,已成为一种独特的地质灾害^[2,3].其中,西安地裂缝是世界上最著名的城市地质灾害,自 20 世纪 50 年代以来,在西安城区发现的地裂缝已达 13 条之多(图 1)^[4],延伸长度超过 100 km,覆盖面积约 150 km²;这些地裂缝穿越工厂、民房,横切地下洞室、路基,造成建筑破坏、机器停转、道路变形、管道破裂,给城市建设带来了一系列灾害^[1~5].

西安地裂缝是一种区域性的地质灾害现象,在平面上具有明显的方向性、成带性、似等间距性、位

错同步性和多级性及剖面上的结构组合形式多样性(图 2)^[1]等展布规律,并具有以下基本特征:①大多是由主地裂缝和分支裂缝组成的,上盘发育大规模的次级裂缝.②主地裂缝总体走向北东,近似平行于临潼—长安断裂;倾向南东,与临潼—长安断裂倾向相反,倾角约 80°.③地裂缝在走向上具断续延伸特征,每条地裂缝的延伸长度可达数公里至数十公里.④地裂缝都发育在特定的构造地貌部位,即梁岗地貌的南侧陡坡上(梁间洼地的北侧边缘).⑤地裂缝的活动方式是蠕动,主要表现为主地裂缝的南侧(上盘)相对下降,北侧(下盘)相对上升;次级地裂缝则表现为北侧(上盘)下降,南侧(下盘)相对上升.⑥地裂缝的垂直位移具有单向累积的特征,断距随深度的增大而增大.

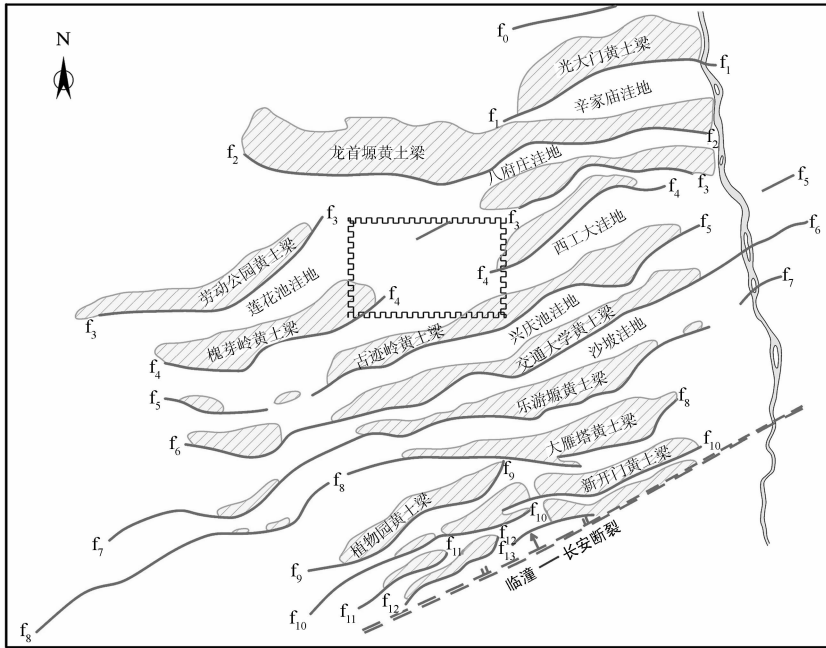


图 1 西安地裂缝与地貌构造关系图

Fig. 1 Xi'an ground-fissure and its relationship with tectonic and morphological map

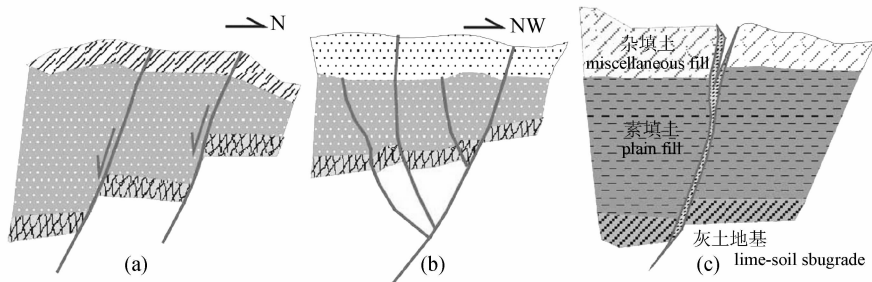


图 2 西安地裂缝带剖面组合形式图

(a) 阶梯状; (b) “y”型; (c) 追踪式.

Fig. 2 Combination section patterns of Xi'an ground fissure

(a) step-shaped; (b) “y”-shaped; (c) tracing style.

关于西安地裂缝成因机理方面的研究已有 20 多年的历程,主要有三种观点:①由于过量抽取地下水导致地面大面积沉降引起^[6],在差异沉降陡变带上,由于两侧变形差大于岩土体的极限应变而产生了地表破裂.②构造成因观点如断块掀斜成因^[4]和构造重力扩展成因^[7]等.③以隐伏断裂构造的发育为基础,过量开采地下水为诱因的成因观点^[1,4,8],即认为西安地裂缝是构造作用和抽取地下水共同作用的结果.近年来越来越多的学者趋向于第三种观点,认为地裂缝是土层中的剪切破裂带在近地表处的扩展延伸,但其超常活动却是由于过量抽取地下水,使弱透水层(粘土层)压缩而改变土层中的应力状态所引起的^[9].

然而至今西安地裂缝成因机理研究方面还存在一些关键问题未得到解决,如西安地裂缝之下是否普遍发育活断层?下伏断层的活动是怎样产生和加剧地表地裂缝的形成与活动的?西安地裂缝或许是一种早就存在于近地表土体中的构造破裂面,过量开采地下水只是引起这些构造破裂面重新开启而出露至地表.这些问题一直是地质学界和工程界普遍关注且迄今未能解决的难点问题.

为此,我们开展了地裂缝破裂扩展的大型物理模拟试验,以研究隐伏地裂缝位错活动时引起上覆土体中的应力场、位移场等的变化规律,及地裂缝向上破裂扩展模式和平、剖面结构特征,包括土体中的应力变化、高应变区位置与破裂带的关系等.这对于研究地裂缝的成因、不同深度土体中的地下结构防裂和地表建筑物的防灾等均具有重要的理论与工程意义.

2 物理模拟试验方法

2.1 试验装置与原理

试验在长安大学大型试验沉降台上完成.试验平台的有效面积 320 m^2 ($20 \text{ m} \times 16 \text{ m}$),最大沉降量 30 cm .平台各点的沉降通过 138 组特制自锁千斤顶实现,托板系统则由 230 块正三角板构成.

为模拟具有正断层性质的隐伏地裂缝两侧土体活动时引起上覆土体的破裂扩展机制,本次试验模型一端跨试验平台,另一端跨原始地面,人为控制试验平台的整体下降(图 3),以考察模型沿裂缝的破裂扩展情况以及土层顶面的破裂状况.

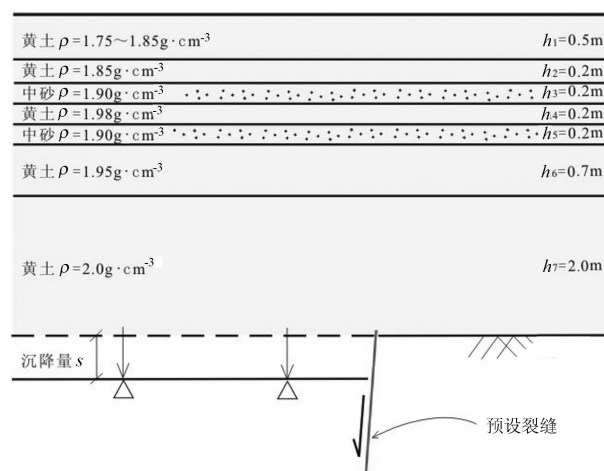


图 3 地层剖面及试验原理图示

Fig. 3 Stratum section and experimental principle schematic drawing

2.2 模型设置与测试元件布置

2.2.1 模型设置

试验模型为填筑夯实的黄土,断面呈梯形:底部长 18.0 m 、顶部长 10.0 m 、高为 4.0 m ,东西两端坡度为 45° ,模型总宽 16 m ,南北两侧用钢架进行水平约束.

模型分两种工况,各宽 8.0 m ,北半部为工况一,含有砂层,地层剖面情况见图 3;南半部为工况二,无砂层,地层剖面情况如表 1 所示.

表 1 模型地层剖面(工况二)

Table 1 Stratum section of model(case 2)

层数	层厚(m)	层底深度(m)	土类	密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1	0.8	0.8		1.80~1.85
2	1.0	1.8	黄土	1.90
3	1.6	3.4		1.98
4	0.6	4.0		2.00

2.2.2 测试元件布置

土体内部的应力变化和沉降变形通过埋设压力盒和沉降杯等设施实时监测.

两种工况均设沉降变形和应力变化监测剖面各一,剖面位置位于各工况中心线附近.每一剖面设四条测线,各测试元件水平间距 1.0 m ,跨预设裂缝两侧分层埋设.其中工况一的沉降杯和压力盒的埋设位置及编号见图 4 所示,图中水平坐标零点为预设裂缝位置;工况二的埋设方法同工况一,只是编号不同.模型中共埋设 54 只沉降杯和 48 只水平埋设的压力盒.模型土体表面的沉降变形直接采用水准仪进行观测.

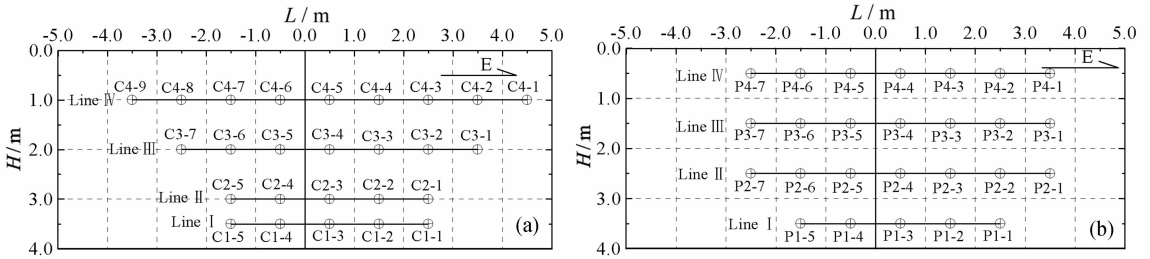


图 4 沉降杯(a)和压力盒(b)的埋设位置与编号

Fig. 4 Burying position and number of subsidence cups (a) and pressure cells(b)

2.3 模拟试验步骤

模型填筑过程中尽可能控制土层容重和变形模量与实际原状地层相近,分层碾压保证土体压实均一.每填筑 50 cm 后整平,在两种工况的中心部位均匀铺设一薄层白灰,以备试验完毕进行剖面开挖观察.模型填筑完成后,对各需测量的数据进行初始读数;之后启动试验平台的动力系统,每天缓慢下降 1 cm,下降过程一般在 3 h 左右完成,稳定 10~12 h 后,对压力盒、沉降杯、表层沉降观测点等进行观测并记录数据.本次试验沉降台共下降了 24 cm.

3 试验结果及分析

3.1 平面破裂状况

模型土体表部的整体破裂概况如图 5 所示.

在试验平台沉降过程中,模型土体表面最早出现的裂缝为上升盘土体中的 F1 裂缝.初始沉降量仅为 1 cm 时,模型表面即产生一条贯通整个模型的细小裂缝,且与设置裂缝相平行.随着沉降量的增大,裂缝逐渐变宽(图 6a).由图可知在底部位错量由 1 cm 增大到 6 cm 时,F1 裂缝迅速变宽,由 2.5~4.5 mm 增大为 15.0~17.0 mm.之后虽继续增大沉降量,但其张开度变化较小或基本不变,直到底部位错量达到 22 cm 时,其张开度仅增大为 16.5~20 mm.模型沉降量为 5~6 cm 时,下降盘土体表面才出现 F2 裂缝,其张开度变化趋势如图 6b.由图可知 F2 裂缝出现之后,其张开度基本随位错量的增大直线上升;当底部位错量达到 22 cm 时,其张开度为 41.0~46.0 mm.

从表面观察来看,F1和F2裂缝均属张裂缝,裂

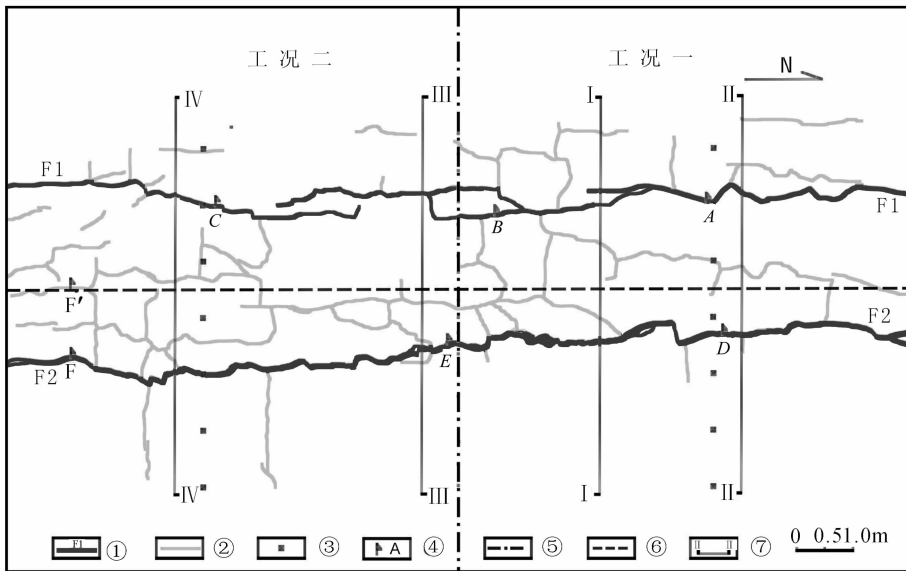


图 5 表部裂缝素描图

①主裂缝及编号 ②次裂缝 ③沉降观测点 ④裂缝张开度监测点 ⑤分界线 ⑥底部预留裂缝 ⑦开挖断面

Fig. 5 Sketch of ground-fissures on model surface

①Main fissure and its symbol ②Sub-fissure ③Settlement observation point ④Observation point of fissure width
⑤Boundary of the two cases ⑥Pre-fissure under bottom ⑦Excavation section

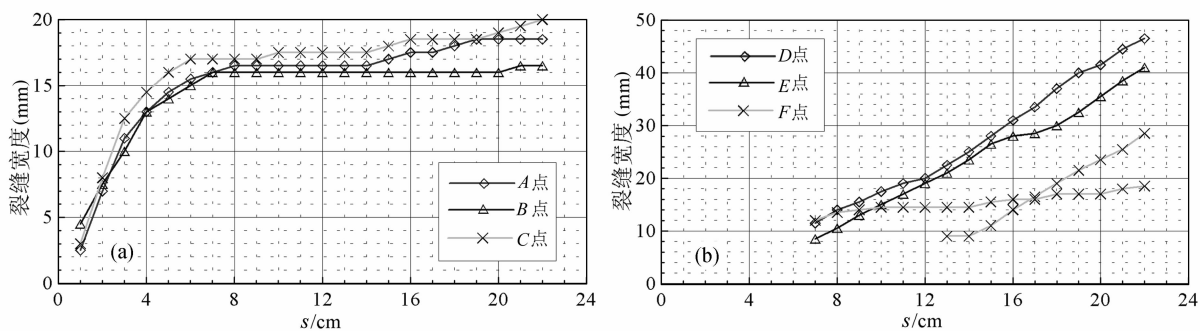


图6 裂缝 F1 (a) 和 F2(b) 张开度随位错量的变化关系曲线

Fig. 6 Width of fissure F1(a) and F2(b) relating to dislocation

缝两侧垂直位错不明显。

3.2 剖面破裂格局

为了对土体内部的破裂格局进行观察和分析,我们从模型的中间位置进行了开挖,同时得到了两种工况下不同位置处的四个剖面,其编号及位置见图 5。

3.2.1 工况一

从剖面一和剖面二(图 7)看,裂缝 F1 由上至下直立发展,最深处达 2.2 m 左右;缝宽随深度的增加逐渐减小,地表处最宽为 18 mm 左右,向下宽度迅速减小为 1~3 mm,最后消失。但裂缝在砂层中始终呈闭合状态,原因在于砂粒能够调整自身的分布状态,当有缝隙出现时,砂粒则会自动及时填充。

F2 裂缝存在明显的破碎带,破裂面倾向上升盘;裂缝倾角由模型底部向地表逐渐变缓,在模型底部为 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$,中上部 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 。F2 裂缝的破碎带在剖面上呈一倒立的扫帚状,模型底部破碎带宽度一般在 50~80 cm;浅部土体破碎较轻,但破碎带变

宽,一般在 1.0 m 以上。带内土体拉张、挤压和剪切变形严重;模型底部(埋深大于 3.0 m)裂缝两侧土体位错明显,但裂缝闭合,土体破碎呈糜棱状,表明此处裂缝两侧土体发生相对运动时受挤压和剪切作用明显;模型中部(埋深 1.5~3.0 m)裂缝张开明显,一般缝宽 1~2 cm,最宽处达 4~6 cm,且裂面平整,未见擦痕,表明裂缝属拉剪断裂,且裂缝形成后,下降盘土体与上升盘土体呈逐渐脱离趋势;模型浅表部(埋深小于 1.5 m)裂缝张开不明显,但由于上升盘的相对俯冲作用,存在明显变形破碎带,带内土体主要受剪切和挤压作用。

F2 裂缝在模型底部的垂直位错明显,从切断预设的白灰层来看,底部的位错量最大(图 7)。本次试验平台最大下沉量为 24 cm,开挖断面后,经量测,从底层算起,第一层白灰(埋深 3.5 m)的垂直位错量为 23 cm,第二层(埋深 3.0 m)18 cm,第三层(埋深 2.5 m)20 cm,第四层(埋深 2.0 m)20 cm,第五层(埋深 1.5 m)18.5 cm,向上位错量逐渐变小,至

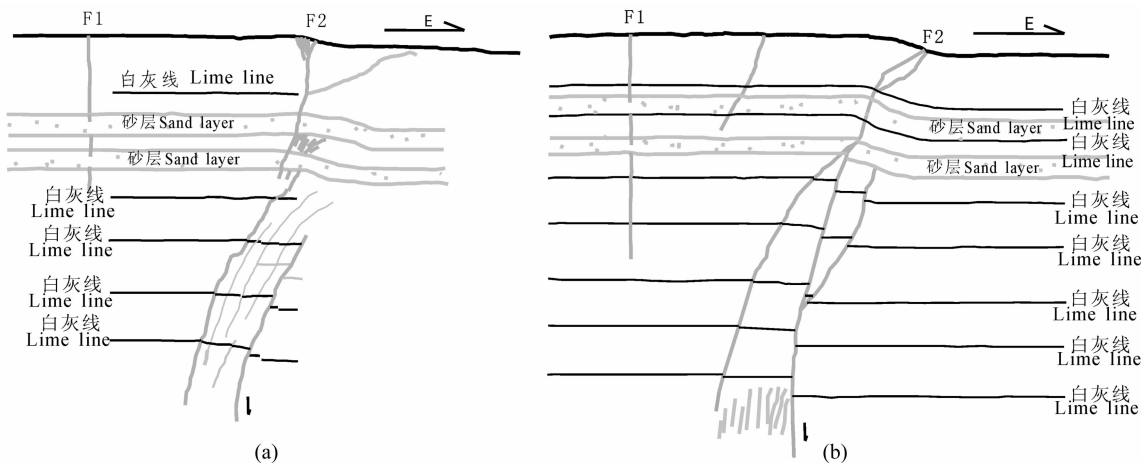


图7 工况一开挖剖面一(a)和剖面二(b)素描图

Fig. 7 Section 1(a) and section 2(b) sketches of case 1

地表表现为缓坡状.由于破碎带的存在,垂直位错在各层间表现为台阶状,砂层及砂层以上地层位错不明显.

不同深度处地层的沉降变形及应力随底部位错量变化情况分别见图 8 和图 9.

3.2.2 工况二

工况二与工况一的剖面破裂格局相似.裂缝 F1 从上至下直立发展,最大开裂深度达 2.8 m 左右.

F2 裂缝存在明显的破碎带,在剖面上呈一倒立的扫帚状,破裂面倾向上升盘.裂缝倾角在模型底部约 70°~80°,中上部 50°~60°,由深部向地表逐渐变缓.破碎带宽度在模型深部一般为 40~70 cm,浅部土体破碎较轻,但破碎带变宽,一般在 1.0 m 以上.

F2 裂缝在模型底部的垂直位错明显,开挖断面后,经量测,从底层算起,第一层白灰(埋深 3.5 m)

的垂直位错量为 22 cm,第二层(埋深 3.0 m)20 cm,第三层(埋深 2.5 m)17.5 cm,第四层(埋深 2.0 m)22.5 cm,第五层(埋深 1.5m)22 cm,第六层(埋深 0.8 m)16 cm,第七层(埋深 0.4 m)6 cm,由于存在破碎带,垂直位错在各层间表现为台阶状(图 10).

不同深度处地层的沉降变形及应力随底部位错量变化情况分别见图 11 和图 12.

图 8 和图 11 显示,两种工况不同深度地层的沉降变形曲线与剖面开挖的地层变化基本相吻合:地裂缝下降盘土体由于随基底的向下错动而发生明显沉降变形,上升盘土体则沉降变形不明显;模型底部裂缝两侧位错量较大(图 8a 和图 11a),当试验台沉降量为 22 cm 时,裂缝两侧土体产生的位错量达 20~22 cm;模型表部的沉降变形则以缓变为主(图 8b 和图 11b),但地层形变带变宽,与实际观察相一致.

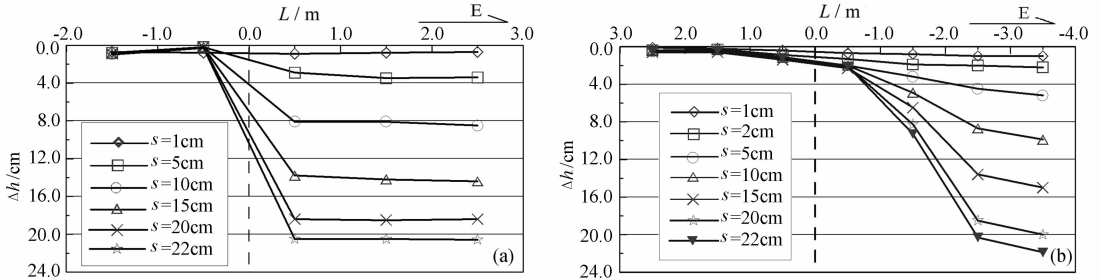


图 8 第一工况不同深度地层沉降变形变化曲线 (a)埋深 3.0 m(Line II)地层沉降变形曲线;(b)地表沉降变形曲线.

Fig. 8 Different depth soil-layer settlement curves of case 1

(a) 3.0 m depth soil-layer(Line II) settlement curves; (b)Settlement curves of model surface.

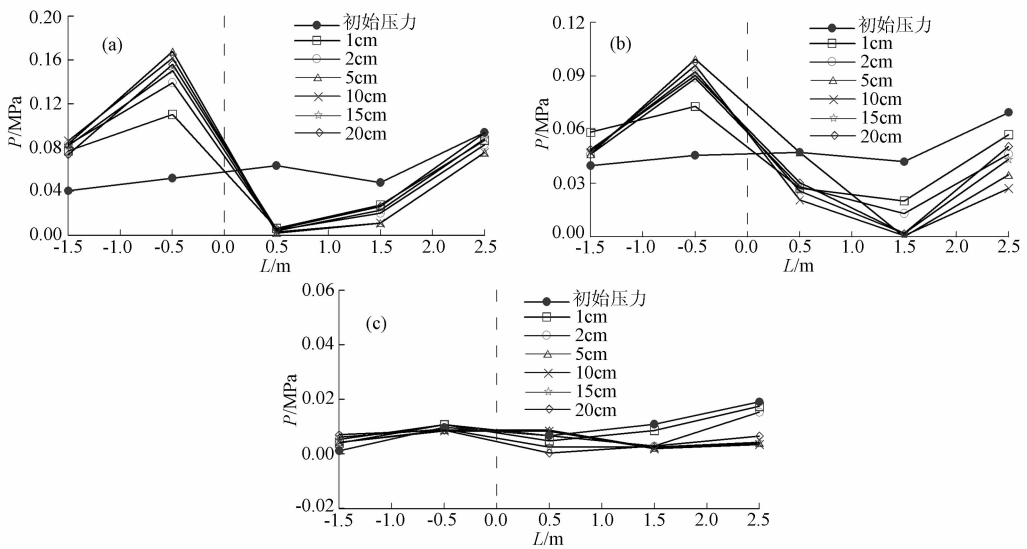


图 9 第一工况不同深度地层应力变化曲线

(a)埋深 3.5 m(Line I)的竖向压力;(b)埋深 2.5 m(Line II)的竖向压力;(c)埋深 0.5 m(Line IV)的竖向压力.

Fig. 9 Different depth soil-layer stress curves of case 1

(a)Vertical stress of 3.5m depth soil-layer (b)Vertical stress of 2.5m depth soil-layer (c)Vertical stress of 0.5m depth soil-layer.

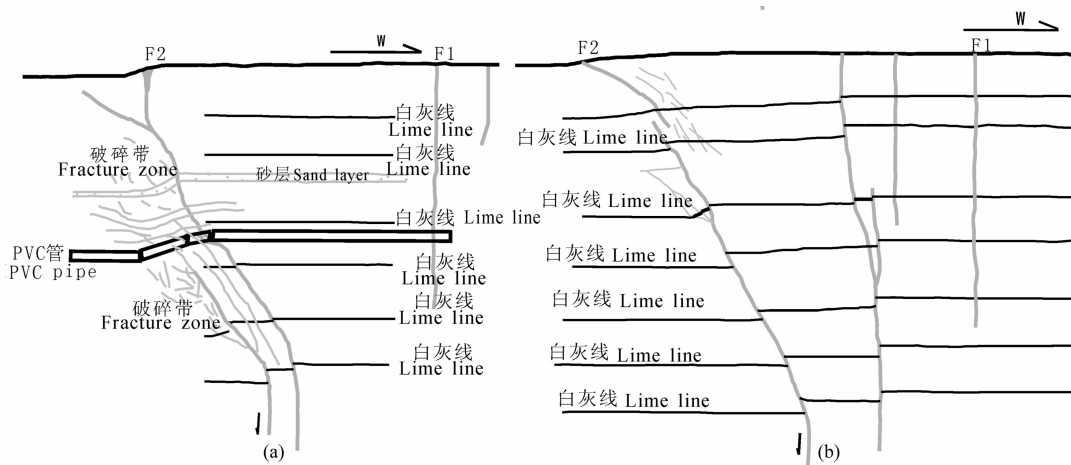


图 10 工况二开挖剖面三(a)和剖面四(b)素描图
Fig. 10 Section 3(a) and section 4(b) sketches of case 2

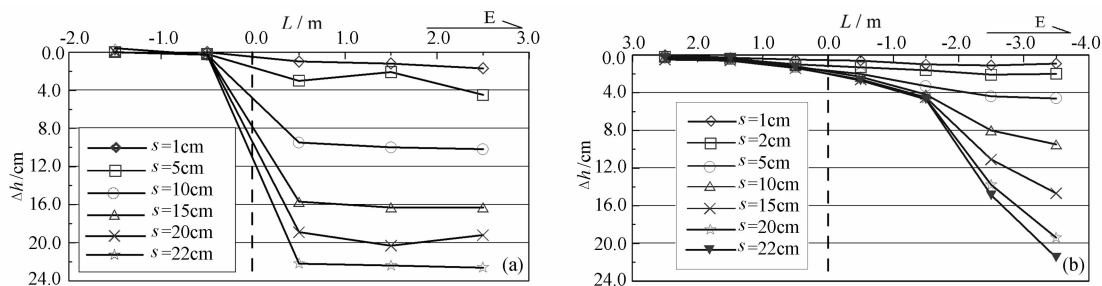


图 11 第二工况不同深度地层沉降变形曲线
(a)埋深 3.0 m(Line VI)处沉降曲线 (b)地表沉降变形曲线
Fig. 11 Different depth soil-layer settlement curves of case 2
(a) 3.0 m depth soil-layer(Line VI) settlement curves (b) Settlement curves of model surface

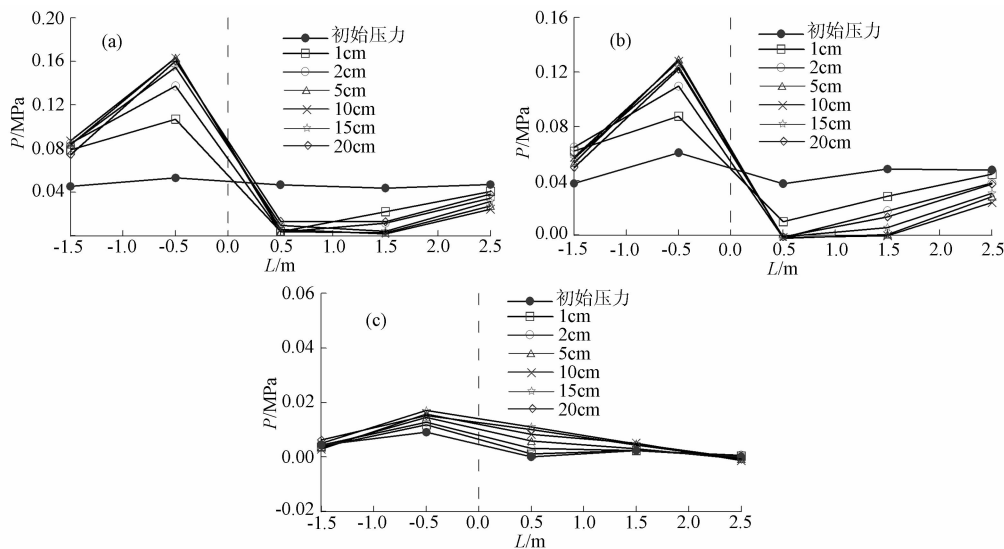


图 12 第二工况不同深度地层应力随底部位错量变化曲线
(a)埋深 3.5 m(Line V)的竖向压力; (b)埋深 2.5 m(Line VI)的竖向压力; (c)埋深 0.5m(Line VIII)的竖向压力。
Fig. 12 Different depth soil-layer stress curves of case 2
(a) Vertical stress of 3.5 m depth soil-layer; (b) Vertical stress of 2.5 m depth soil-layer;
(c) Vertical stress of 0.5 m depth soil-layer.

由此说明地裂缝的影响带宽度随深度变浅和沉降量的增大而增大. 工程上既要避免将建筑物直接建于地裂缝之上, 又要避开地裂缝两侧的地层形变带, 这个不适宜进行建筑的范围即称为地裂缝的影响带. 根据两种工况地表沉降曲线及地表破裂情况, 可归纳出近地表处的强烈变形带宽度为上升盘 1.5 m, 下降盘 3.5 m; 而整个影响带(包括强烈变形带和弱变形带)宽度可能超越了模型长度, 即 10 m 以上.

从水平压力盒在模型试验过程中的测试结果(图 9、图 12)看, 上下盘土体应力场受地裂缝带影响较大, 并由裂缝带中心向两侧逐渐减弱直至消失. 试验前, 各层压力盒的初始读数基本处于同一应力水平, 这说明了压力盒埋设正确, 读数误差不至于影响测试结果. 当试验平台开始向下沉降时, 底部两层位于下降盘的压力盒读数迅速减小, 随着试验平台的继续下降, 最终靠近裂缝的竖向压力值趋近于零, 而远离裂缝的竖向压力也有不同程度减小, 离裂缝越远则数据变化越小; 同时, 位于上升盘的压力盒读数随着试验平台的下降却在不断增大, 越靠近裂缝竖向压力值增长越大, 远离裂缝则读数增长相对较小. 由此说明, 在试验平台的下降过程中, 下降盘在靠近裂缝处土体逐渐出现脱空, 使得竖向应力值减小, 原因在于这部分土体将应力转化到了上升盘土体之上, 进而又造成了位于上升盘的压力盒读数升高.

3.3 破裂过程分析

经试验观察分析, 隐伏地裂缝的破裂扩展大致经历了初始破裂、裂缝发展和裂缝扩展至地表等三个阶段.

(1) 初始破裂阶段: 对应于沉降量仅为 0~1 cm 时, F1 裂缝即出现于上升盘土体顶部, 距沉降边缘 1.5~1.8 m, 垂直向下发展; F2 裂缝则发育于原有隐伏裂缝端部, 由下而上发展, 但破裂面倾向上升盘, 倾角 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$.

(2) 裂缝发展阶段: 对应于沉降量为 2~4 cm 时. 随着下降盘土体沉陷, F1 裂缝宽度不断增大, 同时垂直向模型深部发展; 此间 F2 裂缝随基底沉降量增大逐渐向上破裂扩展, 但并未至地表, 同时裂缝倾角逐渐变缓.

(3) 裂缝扩展至地表阶段: 对应于沉降量为 5~6 cm 时. 从模型开挖剖面来看, F1 裂缝开裂深度有限, 到一定深度则不再发展, 约为模型高度的 $2/3$; F2 裂缝在基底沉降量为 5~6 cm 时即开裂至地表, 可见其破裂速度相当迅速, 从开挖剖面看, F2 裂缝破裂至近地表时出现分叉现象, 使其剖面形态呈一

“Y”字型.

隐伏地裂缝破裂扩展的过程中, 土体②受到土体③的拖拽(图 13), 使模型上升盘土体顶部呈受拉状态而产生了 F1 裂缝; 当基底沉降量达到 5~6 cm 后, F2 裂缝从基底破裂扩展至地表, 土体③与土体②逐渐相脱离, 此时 F1 裂缝的宽度和深度也基本增至极大值; 而当基底沉降量再继续增大时, F1 裂缝的宽度和深度不会发生大的变化, 但 F2 裂缝却会随之变宽. 这与 F1 裂缝和 F2 裂缝张开度随位错量的变化趋势(图 6)相一致.

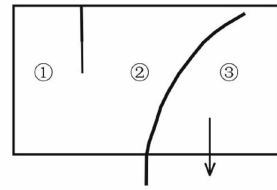


图 13 模拟结果简图

Fig. 13 Schematic diagram of experiment result

4 讨论

4.1 大型物理模拟试验获得的结果

1) 具有正断层性质的隐伏地裂缝活动时, 地表共出现两条主裂缝, 走向平行于隐伏断层带, 以水平拉裂为主, 无明显垂直位错和扭动现象.

2) 模型剖面开挖显示, F1 裂缝破裂方向垂直向下, 裂缝两侧无破碎带, 破裂深度约为模型高度的 $2/3$. F2 裂缝由隐伏地裂缝端部向上破裂扩展, 但破裂面倾向上升盘, 倾角由地层深部向地表逐渐变缓, 裂缝存在明显的破碎带, 带内土体拉张、剪切和挤压变形严重, 在剖面上呈一倒立扫帚状.

3) 地裂缝的影响带宽度随深度变浅和沉降量的增大而增大. 近地表处的强烈变形带宽度可达 5 m, 而整个影响带(包括强烈变形带和弱变形带)宽度达到了 10 m 以上.

4) 上下盘土体应力场受地裂缝带影响较大, 并由裂缝带中心向两侧逐渐减弱直至消失.

5) 隐伏地裂缝破裂扩展经历了三个阶段, 即初始破裂阶段、裂缝发展阶段和裂缝扩展至地表阶段.

4.2 由结果揭示的问题

由大型物理模拟试验结果可发现, 具有正断层性质的隐伏地裂缝在向上扩展破裂时, 并不像人们所推测的新生裂缝沿着老裂缝方向扩展, 而是出现倾向上升盘的新生破裂(图 13), 这揭示出:

1)该模型试验实际上反映了地面不均匀沉降引起的表土层破裂规律,即上盘下降、下盘不动,破裂面倾向上升盘(下盘),这与西安地区地裂缝带上的建筑物的破裂形式基本一致(图 14),裂缝的产生位置、破裂过程也基本相似。

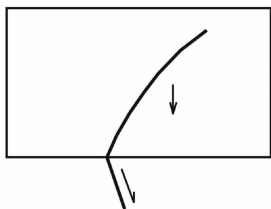


图 14 西安地裂缝建筑物破坏模式

Fig. 14 Destruction pattern of buildings on Xi'an ground-fissure

2)西安地裂缝带的下盘为黄土梁,为上升盘;上盘为沉降漏斗区即洼地,为下降盘,但其间的地裂缝均同步倾向南,即倾向下降盘,而且在剖面上从未发现裂面倾向发生转变的现象,与物理模拟结果恰好相反。

3)对于这种模拟试验结果与西安地裂缝剖面结构不一致,但与地裂缝带上建筑物破裂形式相一致的现象的唯一合理解释是,西安地裂缝是一种一直通达近地表处的老破裂面,只是其表部被一层很薄的松散层所掩盖,过量抽水引起地面沉降导致裂缝上盘土层下滑松裂,使裂缝出露地表而成为明显的地裂缝。同时,降雨入渗和集中注水的渗透与潜蚀作用也可使地裂缝显露出来。

由此可见,大型物理模拟试验结果证明,西安地裂缝的形成年代较为久远,是一种早就存在的、近地表的构造破裂面,抽水引起地面沉降或降雨入渗使其显露出来,并破坏工程建(构)筑物。如果没有急剧的构造应力变化或抽水等因素的影响,西安地裂缝将长久隐伏于地下并处于非常缓慢的蠕动状态,也不会给西安市人民带来危害。因此西安地裂缝本身是一种早就存在于地表土体中的构造破裂面,过量开采地下水只是使其重新开启而出露至地表。

致 谢 长安大学谢永利教授、杨晓华教授对我们的模型试验给予的大力支持。

参考文献(References)

- [1] 彭建兵,张 骏,苏生瑞等著. 渭河盆地活动断裂与地质灾害. 西安:西北大学出版社,1992
Peng J B, Zhang J, Su S R, et al, eds. Active Faults and Geological Hazards in Weihe Basin (in Chinese). Xi'an: Northwest University Press, 1992
- [2] 王景明,王春梅,刘 科. 地裂缝及其灾害研究的新进展. 地球科学进展,2001,16(3):303~313
Wang J M, Wang C M, Liu K. Progress in ground fissures and its hazard research. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2001,16(3):303~313
- [3] 王景明,等著. 地裂缝及其灾害的理论与应用. 西安:陕西科学技术出版社,2000
Wang J M, et al, eds. Theory of Ground Fissures Hazards and Its Application (in Chinese). Xi'an: Science and Technology Press of Shaanxi, 2000
- [4] 张家明. 西安地裂缝研究. 西安:西北大学出版社,1990
Zhang J M. Research on Ground Fracturing in the Region of Xi'an (in Chinese). Xi'an: Northwest University Press, 1990
- [5] 唐大荣,雷 炜,彭 成. Mini-Sosie 浅层高分辨反射波技术在西安市地裂缝研究中的应用. 地球物理学报,1988,31(6):100~104
Tang D R, Lei W, Peng C. Mini-sosie shallow reflection technique with high resolution and its application for investigation the ground fissures in Xi'an city. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1988, 31(6): 100~104
- [6] 易学发. 西安市地面不均匀沉降及地裂缝成因的讨论. 地震,1984,(6):50~54
Yi X F. Study on land subsidence and cause of ground-fissures in Xi'an. *Earthquake* (in Chinese), 1984, (6): 50~54
- [7] 赵其华,王兰生. 构造重力扩展机制的地质力学模拟研究. 工程地质学报,1995,(3):21~27
Zhao Q F, Wang L S. Study on geomechanical simulation of tectonic gravity spreading mechanism. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 1995, (3):21~27
- [8] Lee C F, Zhang J M, Zhang Y X. Evolution and origin of the ground fissures in Xian, China. *Engineering Geology*, 1996, (43): 45~55
- [9] Peng J B, Sun P, Li X An. Ground fissure: the major geological and environmental problem in the development of Xi'an city, China. *Environmental Science and Technology*. American Science Press, 2006. 469~474

(本文编辑 汪海英)