

正断层破坏在砂土中传播规律试验模拟*

刘学增^① 王煦霖^② 林亮伦^③

(^①同济大学土木信息技术教育部工程研究中心 上海 200092)

(^②同济大学地下建筑与工程系 上海 200092)

(^③重庆市建筑科学研究院 重庆 400015)

摘要 断层错动不仅可以引起地震灾害,而且带来的地层永久性变形,对结构物特别是线性构造物,如地下管线,隧道等,造成很大影响,因此,研究断层破坏在上覆土层中传播规律是十分必要的。本文依据正断层砂箱模型试验,对断层在砂土中传播模式,断层在地表的露头位置,断层垂直位移与土体厚度关系等内容进行了分析,并认为:(1)砂土中正断层破裂面不唯一,出现分叉;(2)传至地表所需的断层垂直位移与倾角无关;(3)正断层传播形成三角剪切带,其宽度随断层倾角减小而增大。

关键词 断层 传播 模型试验 破坏

中图分类号:P642 **文献标识码**:A

MODELING TEST OF NORMAL FAULT RUPTURE PROPAGATION IN SANDY SOIL

LIU Xuezheng^① WANG Xulin^② LIN Lianglun^③

(^①Civil Engineering Information Technology Research Center of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092)

(^②Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

(^③Chongqing Construction Science Research Institute, Chongqing 400015)

Abstract Fault movement cannot only cause earthquake, but also bring about permanent deformation in strata. They have great damage to structures, especially linear structures like underground pipelines and tunnels unavoidably. The Kobe earthquake in Japan in 1995 and the Taiwan Chi-Chi earthquake in 1999, the WenChuan earthquake in China in 2008 have all caused to large losses of lives and properties. Active faults are widely distributed in China. Therefore, study on earthquake fault rupture propagation in overlying strata is essential. Many scholars at home and abroad have paid attentions to this subject. Modeling test, centrifuge test and numerical method are used to research the problem. Generally the damages induced by surface rupture are considered as a result of discontinuous deformations of overlying soil resulting in vertical or lateral offset at the surface of soil. However, due to the reason of the complexity of geological and stratigraphic conditions, the limitation of research and field monitoring methods, the question still does not have a clear answer.

On the base of sand box, the paper aims to reveal the patterns of fault rupture propagation and location of surface rupture in sandy soil under 1-g modeling test of normal fault. It also studies the relationship between vertical

* 收稿日期: 2012-05-21; 收到修改稿日期: 2012-07-17.

第一作者简介: 刘学增, 主要从事隧道的安全评价、风险评估以及加固设计理论的研究. Email: xuezhengL@263.net

displacement and height of overlying strata. that the following results are found. The failure surfaces of normal fault begin to propagate directly up to the surface regardless to dip angle. Then the following failure surfaces appear. The required vertical displacement when a complete failure surface forms is independent with the dip angle. In the modeling test, the value of D/H comes out to be 4.4%. As many failure planes exist when fault rupture propagates, an apparent triangle shear zone stays between them. At the surface, the width of the triangle shear zone reaches a maximum S . The value of S becomes greater as the dip angle decreases.

Key words Fault, Propagation, Modeling test, Rupture

1 引言

断层错动不仅可以引起地震灾害,而且带来的地层永久性变形会因断层两侧的差异运动对地上及地下工程造成很大影响,特别是线性构造物,如地下管线,隧道等,1995年日本的神户地震、1999年的台湾集集地震以及2008年我国的汶川大地震都带来了巨大的生命财产损失^[1]。我国广泛分布活断层,进行基础设施建设的同时,必须开展断层在土体中传播规律的研究工作,弄清基岩断层错动在上覆土体中传播模式,断层的地表露头位置等,具有重要意义^[2]。

国内外很多学者利用模型试验、离心机试验及数值计算^[3,4]等方法进行了研究,Roth等^[5,6]利用松散砂、密实砂进行了逆断层在土体中传播的离心机试验和数值模拟,认为断层位移速率和土体性质是破坏传播模式的重要影响因素,而边界效应影响不大。Lee^[7]进行了砂性土重力场模型试验和数值计算,分析了断层地表露头位置和影响因素。Bray^[3,4]使用土体非线性模型模拟了逆断层在黏土中的传播,认为恰当模拟条件下,数值模拟可以得到量化的结果。郭恩栋等人^[8]进行了正断层和走滑断层位移作用下土层模型地震模拟振动台断裂位移反应实验,正断层试验的结论有:(1)竖向断层作用下,土层处于平面应力状态;(2)地震地表裂缝处下方并非基岩断裂位置;(3)试验现象与离心机试验相似,可以有效替代离心机试验。杨杰等^[9]针对南京砂,模拟在 45° 和 60° 倾角下逆断层错动时裂缝在土体中的发展模式、断层在地表的露头位置、以及断层错动的位移量与土层厚度之间的关系。由于地质和地层条件的复杂性,研究手段的局限性,现场探测技术的制约,目前的研究还未能有清楚的认识。本文针对正断层,进行了砂箱重力场模型试验。

2 试验装置和试验工况

试验用断层模拟装置(图1)的模型箱底板分为两部分,下盘部分固定,上盘可随千斤顶升降运动,通过控制千斤顶,实现上盘的滑动。断层倾角通过在上盘底部与加载系统之间设置活动轴承以及辅助系统来实现,角度从 $30^\circ \sim 90^\circ$ 之间可自由调节。试验中,土体表面布置沉降观测点,以监测地表位移变化,在模型箱一侧用数码相机拍照,记录断层传播过程^[10~12]。

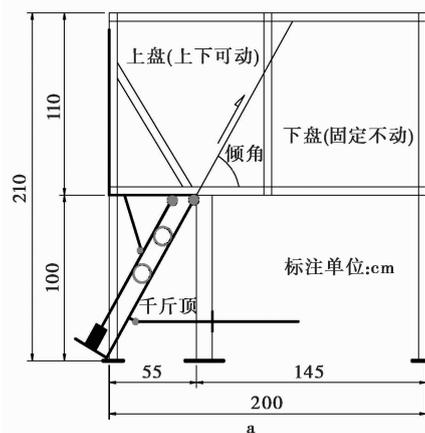


图1 试验装置

Fig. 1 Test equipments

地层模型材料选用干燥黄砂,剪切模量 $G = 0.5 \text{ GPa}$, 密度 $1.28 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$, 内摩擦角 $\varphi = 28^\circ$, 黏聚力 c

=0, 加载速率控制在 $1\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

试验分倾角 75° 、 60° 、 45° 3 个工况, 断层的最大垂直位移可达 100mm 。

3 试验结果及分析

3.1 正断层 75° 倾角

75° 断层试验 (图 2) 有两个破裂面。从水平向的条纹变化可以看出土体的变形, 在裂缝的两侧, 土体发生较大错动, 裂缝之间部分为倒置的三角形剪切带。需要指出的是, 图中 1 号缝左侧, 靠近模型箱侧壁处, 水平条纹不平整并非断裂传播裂缝, 而是由于模型箱玻璃壁面后有斜撑 (图 1a), 距玻璃很近, 试验中, 在用石灰画水平条纹时, 难以整平所致。

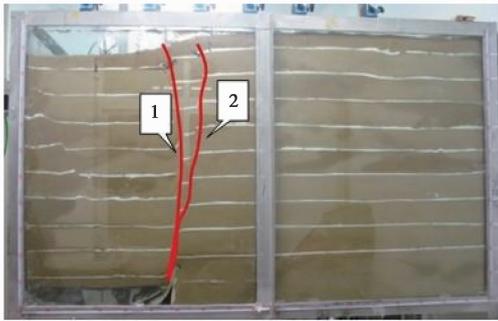


图 2 75° 正断层试验裂缝

Fig. 2 Cracks of normal fault with dip angle = 75°

断层的传播过程为: 当上盘下沉 10mm 时, 在土体中产生破坏起始角约为 90° 的 1 号破裂面, 传播高度 20cm , 当上盘下沉达到 40mm 时, 1 号破裂面传播高度 90cm , 在地表露头。2 号破裂面在上盘下沉 30mm 时出现, 下沉 80mm 出露地表 (图 3)。剪切带的几何特征如图 4 所示, 1 号破裂面 (图 4 中 AB) 倾角为 89° , 2 号破裂面 (图 4 中 AC) 倾角为 80° , AE 为 AB 和 AC 的角平分线, 倾角 84° , 剪切带扩散角 $\angle BAC$ 为 9° , 剪切带最大宽度为 17cm 。

3.2 正断层 60° 倾角

60° 断层试验 (图 5) 出现破裂面较多, 除 3 号之外的破裂面均在地表露头, 三角形剪切带比 75° 倾角更宽。如图 6 为断层的传播过程, 当上盘下沉 10mm 时, 1 号破裂面传播高度 30cm , 上盘下沉 100mm , 1 号破裂面出露地表。4 号破裂面在上盘下沉 20mm 时产生, 下沉 40mm 时最先到达地表, 并分出 5 号破裂面, 两者在地表露头位置重合。

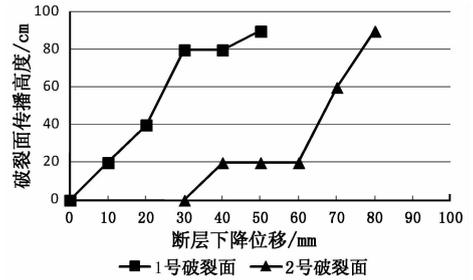


图 3 75° 正断层破裂传播过程

Fig. 3 Process of rupture propagation for normal fault with dip angle = 75°

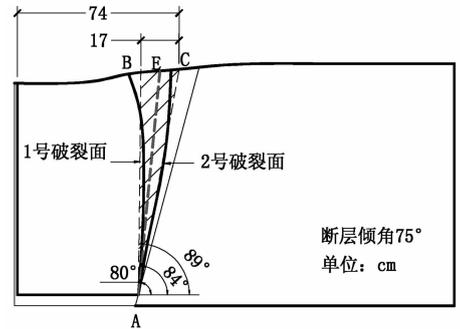


图 4 75° 正断层剪切带几何特征

Fig. 4 Geometric features of shear zone for normal fault with dip angle = 75°

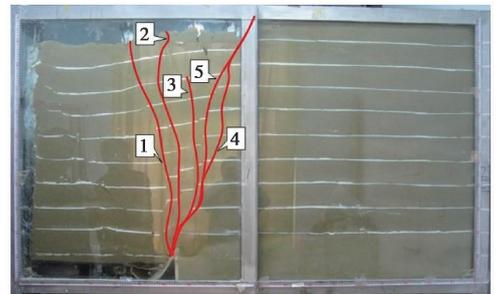


图 5 60° 正断层试验裂缝

Fig. 5 Cracks of normal fault with dip angle = 60°

剪切带的几何特征如图 7 所示, 1 号破裂面 (图 7 中 AB) 倾角为 92° , 4 号破裂面 (图 7 中 AC) 倾角为 64° , AE 为 AB 和 AC 的角平分线, 倾角 77° , 剪切带扩散角 $\angle BAC$ 为 25° , 剪切带最大宽度为 53cm 。

3.3 正断层 45° 倾角

45° 断层试验 (图 8) 共 6 个破裂面, 只有 5 号面未在地表露头, 三角形剪切带比 75° 和 60° 更宽。图 9 为断层的传播过程, 当上盘下沉 10mm 时, 1 号破

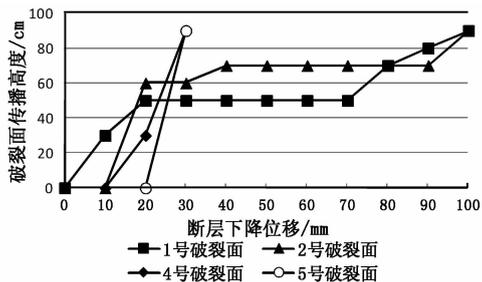


图6 60°正断层破裂传播过程

Fig. 6 Process of rupture propagation for normal fault with dip angle=60°

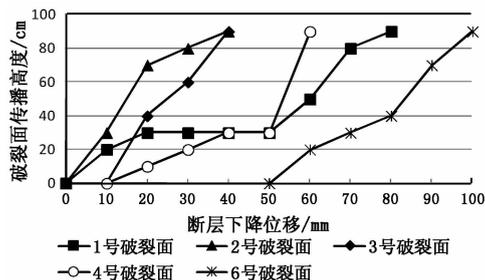


图9 45°正断层破裂传播过程

Fig. 9 Process of rupture propagation for normal fault with dip angle=45°

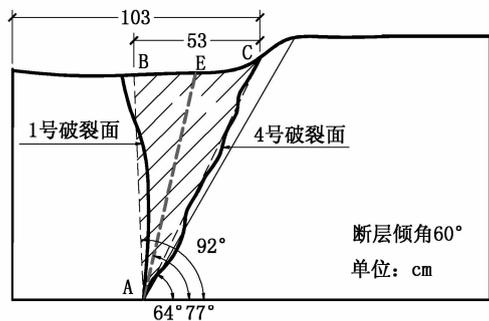


图7 60°正断层剪切带几何特征

Fig. 7 Geometric features of shear zone for normal fault with dip angle=60°

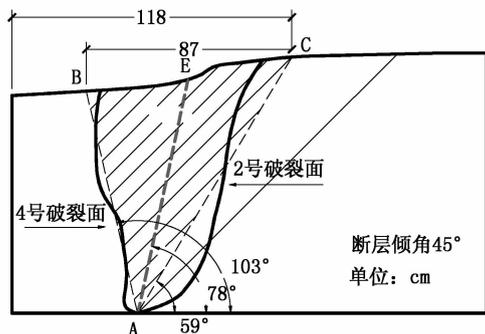


图10 45°正断层剪切带几何特征

Fig. 10 Geometric features of shear zone for normal fault with dip angle=45°

裂面传播高度 20cm, 上盘下沉 80mm, 在地表露头。2号破裂面在上盘下沉 10mm 时出现, 此时的传播高度 30cm, 上盘下沉 40mm, 首先在地表露头。断层下沉 10mm 出现 4号破裂面, 下沉 60mm, 出露地表。

剪切带的几何特征如图 10 所示, 4号破裂面(图 10 中 AB)倾角为 103°, 2号破裂面(图 10 中 AC)倾角为 59°, AE 为 AB 和 AC 的角平分线, 倾角 78°, 剪切带扩散角 $\angle BAC$ 为 44°, 剪切带最大宽度为 81cm。

3.4 正断层传播模式

正断层试验, 上盘下沉, 土体产生裂缝, 破坏起始角近似为一直角, 随后破坏滑动面向上延伸, 在不同位置分叉, 破裂面不唯一, 破裂面之间部分为倒置的三角形剪切带。当破裂面传播到地表时, 地表断层线呈弧形, 由于砂体与模型箱侧壁的摩擦, 两侧水平传播距离小于中间。

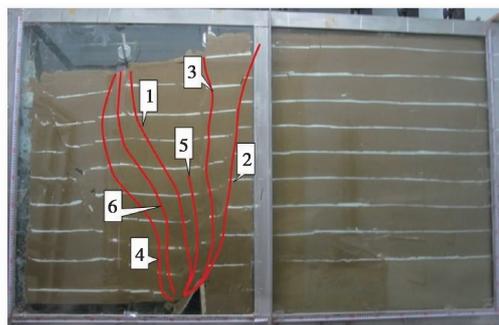


图8 45°正断层试验裂缝

Fig. 8 Cracks of normal fault with dip angle=45°

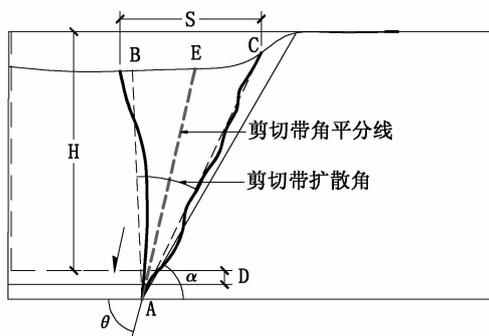


图11 正断层传播模式

Fig. 11 Model of rupture pattern for normal fault

图 11 为正断层传播的模式图, θ 为断层的倾角, α 为断层破坏起始角, D 为上盘的垂直位移量, 试验中, 断层垂直位移 D 占上覆土层厚度 H 一定比例时, 破裂面在地表露头, 不同倾角结果见表 1, D 值均为 40mm, $D/H=4.4\%$, 断层传至地表所需垂直位移与断层倾角无关。

表 1 正断层 D/H Table 1 Value of D/H for normal fault

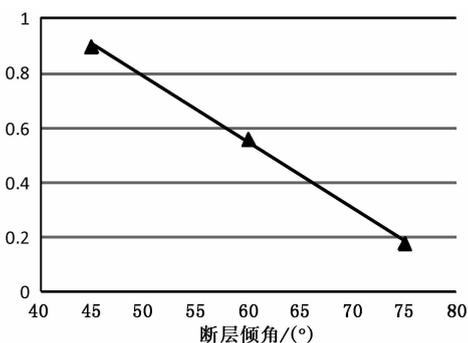
	75°	60°	45°
D	40mm	40mm	40mm
$D/H(H=90\text{cm})$	4.4%	4.4%	4.4%

表 2 为正断层三角剪切带地表宽度 S (最大宽度) 与上覆土层厚度 H 的关系, 断层倾角减小, 三角剪切带范围变大, 其变化趋势见图 12; 剪切带角平分线作为该区域的中心位置, 倾斜角度大约为 80°, 受断层倾角影响较小。三角剪切带向上传播的扩散角 $\angle BAC$ 近似与断层倾角互余, 剪切带扩散角略比断层倾角的余角小 (表 3)。

表 2 三角剪切带特征

Table 2 Geometric features of triangle shear zone

	75°	60°	45°
S	16cm	50cm	81cm
$S/H(H=90\text{cm})$	0.18H	0.56H	0.9H
剪切带角平分线倾角	84°	77°	78°

图 12 S/H 与倾角关系Fig. 12 S/H versus dip angle for normal fault表 3 扩散角 $\angle BAC$ 与断层倾角关系Table 3 $\angle BAC$ versus dip angle

倾角	75°	60°	45°
扩散角	9°	25°	44°
倾角+扩散角	84°	85°	89°

4 结 论

通过干燥黄砂试验, 对正断层在上覆地层中传播模式进行了模拟, 得出以下结论:

(1) 正断层破坏起始角近似为直角, 传播过程中破裂面分叉, 破坏滑动面之间形成三角剪切带。

(2) 断层传至地表所需 D/H 与断层倾角无关, 试验所得值为 4.4%。断层倾角减小, 剪切带宽度增大, 而其角平分线倾角受断层倾角影响较小, 约为 80°。剪切带扩散角与断层倾角大致成互余关系。

参 考 文 献

- [1] 刘学增, 朱合华. 断层在土体中的传播模式及对地下管线的影响[J]. 力学与实践, 2004, **26**(5): 7~13.
Liu Xuezheng, Zhu Hehua. Earthquake fault rupture propagation in soil and its effect on pipeline. Mechanics and Engineering, 2004, **26**(5): 7~13.
- [2] 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, Hamada M. Experiments on rupture propagation of active faults in soil. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(3): 425~427.
- [3] Bray JD, Seed RB, Seed HB. Earthquake fault rupture propagation through soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **120**(3): 543~561.
- [4] Bray JD, Seed RB, Seed HB. Analysis of earthquake fault rupture propagation through cohesive soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **120**(3): 562~580.
- [5] WH Roth, RF Scott, I Austin. Centrifuge modeling of fault propagation through alluvial soils [J]. Geophysical research letters, 1981, **8**(6): 561~564.
- [6] WH Roth, G Kalsi, D Papastamatiou. Numerical modeling of fault propagation in soils [A]. Proceeding of the Fourth International Conference on Numerical Method in Geomechanics [C]. Edmonton, Canada, 1982, **2**: 487~494.
- [7] Lee Jea Woo, Hamada. An experimental study on earthquake fault rupture propagation through a sandy soil deposit [J]. Structural Engineering/Earthquake Engineering, 2005, **22**(1): 1~13.
- [8] 郭恩栋, 冯启民, 薄景山, 等. 覆盖土层场地地震断裂实验 [J]. 地震工程与工程振动, 2001, **21**(3): 145~149.
Guo Endong, Feng Qimin, Bo Jingshan. Seismic test of soil site rupture under fault displacements. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, **21**(3): 145~149.
- [9] 杨杰, 陈新民, 沈建. 断层错动在砂土中传播规律的模型试验研究 [J]. 防灾科技学院学报, 2011, **13**(2): 18~23.
Yang Jie, Chen Xinmin, Shen Jian. Model test research of the fault slip spreading rule in the soil. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2011, **13**(2): 18~23.

- [10] 马小君. 逆断层黏滑错动对山岭隧道影响的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.
Ma Xiaojun. Experimental Study on the Effect of Stick-Slip Dislocation of Thrust Fault to Mountain Tunnel. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [11] 林亮伦. 正断层黏滑错动对山岭隧道影响的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
Lin Lianglun. Experimental Study on the Effect of Stick-Slip Dislocation of Normal Fault to Mountain Tunnel. Shanghai: Tongji

University, 2012.

- [12] 刘学增, 林亮伦. 75°倾角逆断层黏滑错动对公路隧道影响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2523 ~ 2530.
Liu Xuezheng, Lin lianglun. Research on model experiment of effect of thrust fault with 75° dip angle stick-slip dislocation on highway tunnel. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2523 ~ 2530.

新书推荐

长江三峡库区地质灾害成因与评价研究

刘传正 刘艳辉 温铭生 李铁锋 连建发 秦胜伍 著

内 容 提 要

本书比较系统地反映了长江三峡库区地质灾害成因与评价研究3个空间尺度进展。一是大尺度范围,即整个三峡库区涉及的19个县(区)行政管辖范围内的地质灾害调查评价,重点是区域地质灾害评价预警的“发育度”、潜势度、“危险度”和“危害度”递进分析方法与应用。二是中尺度范围,即长江三峡江段复杂斜坡(滑坡)的成因研究,提出了古川江与古峡江在瞿塘峡段东西贯通形成统一的长江所伴随的溯源侵蚀、“水锯”下切和地下暗河或岩溶洞穴垮塌等3种异常地质作用,是长江三峡江段复杂斜坡(滑坡)形成的主因。这种复杂斜坡是一种“基岩”、古垮塌体、古崩滑体、现代崩滑体和第四纪沉积体等几种或全部的“复合堆积体”。三是小尺度范围,即三峡库区巴东县新城区所在的扇形大斜坡的地质特征、成因和开发利用问题。论证提出了巴东斜坡是一个“复杂斜坡系统”,是在单斜山背景下持续经受长江快速侵蚀下切导致侧向卸荷与滑移作用的产物,即“重力成因论”,并以巴东斜坡区为例初步建立了区域工程地质环境质量评价-地质环境功能区划-工程容量评价-地质灾害防治风险

管理的四阶段关联的研究体系。

本书可供从事工程地质、环境地质、灾害地质等方面科研人员、工程技术人员和政府官员阅读,也可供高等院校师生参考。

