

龚放,黄今,白志勇.互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征研究[J].地震工程学报,2019,41(1):162-168.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.162

GONG Fang, HUANG Jin, BAI Zhiyong. Dislocation Characteristics of Seismic Surface Rupture of Normal Faults in Interbedded Cemented Soil [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 162-168. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.162

互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征研究

龚 放¹, 黄 今², 白 志 勇²

(1. 成都师范学院, 四川 成都 611130; 2. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010;
3. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611130)

摘要:为了解决采用 Trimble GX 3D 地面激光三维扫描仪分析互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征时,未有效模拟地表垂直和水平位移的基本特征,获取的地表破裂位错特征结果不准确的问题。提出新的互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征研究方法,先构建地震地表弹性位错模型,分析互层胶结土正断层的地表三维断裂特征,得到地表在受到走滑、逆冲和张开错动导致的地表错位变化情况;再通过正断层地震地表破裂离心机试验,获得互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征。试验结果说明,所提方法可有效分析互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征,且破裂点在土体模型中部和中下部的裂缝深度分别为 22.4 m 和 33.4 m,裂缝上的破裂点处于土体模型的中下部时,裂缝的深度越深。

关键词:互层胶土; 正断层; 地震地表; 破裂位错; 特征研究; 弹性位错

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2019)01-0162-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.162

Dislocation Characteristics of Seismic Surface Rupture of Normal Faults in Interbedded Cemented Soil

GONG Fang¹, HUANG Jin², BAI Zhiyong³

(1. Chengdu Normal University, Chengdu 611130, Sichuan, China;

2. School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

3. College of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

Abstract: The basic characteristics of vertical and horizontal displacements of the ground surface cannot be effectively simulated, and the obtained results of dislocation characteristics of ground rupture are inaccurate, when using a Trimble GX 3D ground laser three-dimensional scanner to analyze the dislocation characteristics of normal faults in interbedded cemented soil. To address this issue, this paper proposes a new method to study the dislocation characteristics of seismic surface fractures of normal faults in interbedded cemented soil. First, the elastic dislocation model of the earthquake surface was constructed, and the three-dimensional fault characteristics of

收稿日期:2018-07-28

基金项目:四川省自然科学基金(17ZB0005);四川省外专局项目(S201759)

第一作者简介:龚 放(1983—),女,彝族,四川西昌人,讲师,硕士,研究方向:工程地质及地质灾害。

E-mail:woaiwojia1617@sina.com。

the normal fault in interbedded cemented soil were analyzed to obtain the surface dislocations. Surface rupture dislocation characteristics of normal faults in interbedded cemented soil were then studied through the centrifuge test. The experimental results showed that the proposed method can effectively analyze the dislocation characteristics of the seismic surface fractures of normal faults in interbedded cemented soil. The fracture depth of the fracture point in the middle and lower parts of the soil model were 22.4 m and 33.4 m, respectively. The fracture was deeper with the fracture point in the lower part of the soil model.

Keywords: interbedded cemented soil; normal fault; earthquake surface; fracture dislocation; characteristic research; elastic dislocation

0 引言

进行互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征研究, 需要分析正断层地震地表破裂位错的相关情况。根据以往大量地震灾后的地质调查结果可知, 互层胶结土中正断层受到外力的作用会导致其上覆土体产生位错变化即变形^[1], 该位错变化会损坏地表及地表建筑。由于互层胶结土环境下可清晰的观察正断层土体在地震影响下产生的剪力和张力破裂位错变化, 因此研究互层胶结土中正断层地震地表破裂时的位错特征十分必要, 可以为抗震研究提供可靠地分析依据。采用实地测量的方法获取地震发生后地表破裂位置处的水平和垂直位错量, 获取的数据结果存在较大的误差^[2]; 通过 Trimble GX 3D 地面激光三维扫描仪分析互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征时, 通过卫星遥感获取地震发生区的影像, 同时采取野外探索和探槽的方式观测断裂处的活动特征, 该方法仅可分阶段的对破裂位置处的活动情况进行分析, 耗费大量的时间, 且未有效模拟地表垂直和水平位移的基本特征, 获得的地表破裂位错特征结果不准确^[3]。

本文提出互层胶结土中正断层地震地表位错特征研究新方法, 不仅分析了互层胶结土正断层地表在受到走滑、逆冲和张开错动导致的地表错位变化情况, 还通过正断层地震地表破裂离心机试验, 研究互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征, 实现地震地表破裂处的位错特征的全面、有效分析。

2 互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征模拟分析

2.1 弹性位错模型

分析互层胶结土中断层地震地表断裂原理时, 可借鉴 Steketee 在地质研究中应用的位错理论思想。位错理论是通过 Green 函数计算出地表位移,

根据计算结果建立模型, 通过模型分析地震地表断裂的原理。而晶体学中研究的位错与 Steketee 所构建的弹性位错模型不同, 晶体学中研究的位错为离散型位错^[4], 而研究 Steketee 构建模型处理的位错属于连续位错, 为有效区分二者, Steketee 将其构建的模型称作弹性位错模型^[5]。弹性位错模型研究的是连续介质非连续平面上周围介质位移场布局和附近介质位移场的关系^[6]。图 1 描述了互层胶结土中正断层发生地震时地表破裂位错变化, 图中的 χ 表示正断层的断裂下盘, 将地震地表破裂带的延伸方向视作 X 轴, 与地面垂直且朝向地表的直线为 Z 轴, 且图中的 S、D 和 M 分别表示地表破裂下底面

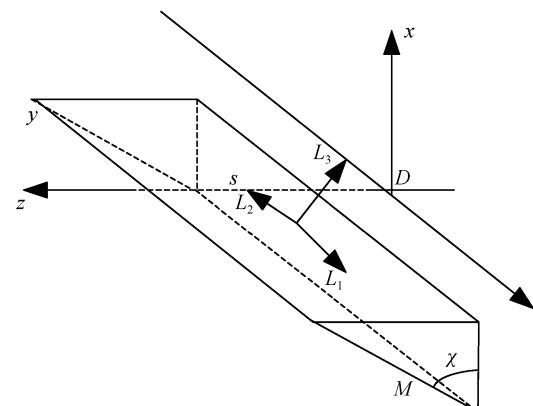


图 1 弹性位错模型图

Fig.1 Elastic dislocation model

深度、走向大小以及倾向大小; L_1 、 L_2 和 L_3 分别代表正断层上盘相对下盘的走滑、逆冲和张开位移^[7]; 互层胶结土中正断层走滑、逆冲和张开错动引起的地表位错在垂直和水平方向处的位移变化分别用公式(1)、(2)和(3)描述:

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{\text{水平}}^1 = -\frac{L_1}{2\pi} \left[\frac{\zeta p}{T(T+\epsilon)} + \tan^{-1} \frac{\zeta \epsilon}{pT} + F_1 \sin \chi \right] \\ l_{\text{垂直}}^1 = -\frac{L_1}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}p}{T(T+\epsilon)} + \frac{p \sin \chi}{T+\epsilon} + F_4 \sin \chi \right] \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{cases} l_{\text{水平}}^{\text{I}} = -\frac{L_2}{2\pi} \left[\frac{p}{T} - F_3 \sin\chi \cos\chi \right] \\ l_{\text{垂直}}^{\text{I}} = -\frac{L_2}{2\pi} \left[\frac{\tilde{d}p}{T(T+\epsilon)} + \sin\chi \tan^{-1} \frac{\zeta\epsilon}{pT} - F_5 \sin\chi \cos\chi \right] \\ l_{\text{水平}}^{\text{II}} = -\frac{L_3}{2\pi} \left[\frac{p^2}{T(T+\epsilon)} - F_3 \sin^2\chi \right] \\ l_{\text{垂直}}^{\text{II}} = -\frac{L_3}{2\pi} \left[\frac{\tilde{y}p}{T(T+\zeta)} + \cos\chi \left(\frac{\zeta p}{T(T+\epsilon)} - \tan^{-1} \frac{\zeta\epsilon}{pT} \right) - F_5 \sin^2\chi \right] \end{cases} \quad (2)$$

其中: p 表示下盘位移断裂变化量; T 表示总体位移变化量; F 表示地表破裂错位量,破裂面上质点在三维空间坐标为 ζ 和 ϵ 。

上述三个公式中出现的 \parallel 为地表整个破裂面的积分结果,以符号 $f(\zeta, \epsilon) \parallel$ 为例,其含义如公式

(4) 所示:

$$f(\zeta, \epsilon) \parallel = f(x, q) - f(x, q - M) - f(x - D, q) + f(x - D, q - M) \quad (4)$$

公式(1)、(2) 和(3) 中的地表破裂错位量 F_1 、 F_3 、 F_4 和 F_5 的表述如公式(5) 所示:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{\mu}{\varphi + \mu} \left[\frac{-1}{\cos\chi} \frac{\zeta}{T + \tilde{d}} \right] - \frac{\sin\chi}{\cos\chi} F_5 \\ F_3 = \frac{\mu}{\varphi + \mu} \left[\frac{1}{\cos\chi} \frac{T + \tilde{d}}{\tilde{d}} - \ln(T + \epsilon) \right] + \frac{\sin\chi}{\cos\chi} F_4 \\ F_4 = \frac{\mu}{\varphi + \mu} \frac{1}{\cos\chi} [\ln(T + \tilde{d}) - \sin\chi \ln(T + \epsilon)] \\ F_5 = \frac{\mu}{\varphi + \mu} \frac{2}{\cos\chi} \tan^{-1} \frac{\epsilon(X + p \cos\chi) + X(T + X) \sin\chi}{\zeta(T + X) \cos\chi} \end{cases} \quad (5)$$

其中: d 表示地表发生断裂下底面的深度。

假设 $\cos\chi = 0$, 此时的 F_1 、 F_3 、 F_4 和 F_5 的取值如公式(6) 所示:

$$\begin{cases} F_1 = -\frac{\kappa}{2(\varphi + \kappa)} \frac{\zeta T}{(T + \tilde{d})^2} \\ F_3 = \frac{\kappa}{2(\varphi + \kappa)} \left[\frac{\epsilon}{T + \tilde{d}} + \frac{\tilde{y}p}{(T + \tilde{d})^2} - \ln(T + \epsilon) \right] \\ F_4 = -\frac{\kappa}{\varphi + \kappa} \frac{p}{T + \tilde{d}} \\ F_5 = -\frac{\kappa}{\varphi + \kappa} \frac{\zeta \sin\chi}{T + \tilde{d}} \end{cases} \quad (6)$$

公式(6) 中各参数表示如下: $q = y \cos\chi + d \sin\chi$; $p = y \sin\chi - d \cos\chi$; $\tilde{y} = \epsilon \cos\chi + p \sin\chi$; $\tilde{d} = \epsilon \sin\chi - p \cos\chi$; $T^2 = \zeta^2 + \epsilon^2 + p^2 = \zeta^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{d}^2$; $X^2 = \zeta^2 + p^2$

上述公式中的 φ 、 u 和 κ 均为拉梅常数; 地表发生变形点在三维空间坐标系的坐标为 x 和 y ; 从图 1 可以看出 $d = S$, 可采用公式(7) 表示地表破裂三维运动的地表垂直和水平方向的位错:

$$\begin{cases} l_{\text{水平}} = l_{\text{水平}}^{\text{I}} + l_{\text{水平}}^{\text{II}} + l_{\text{水平}}^{\text{III}} \\ l_{\text{垂直}} = l_{\text{垂直}}^{\text{I}} + l_{\text{垂直}}^{\text{II}} + l_{\text{垂直}}^{\text{III}} \end{cases} \quad (1)$$

上述过程采用弹性位错模型获取互层胶结土中正断层发生地震时地表破裂位错变化情况^[8], 再通过离心机试验分析互层非胶结土和互层胶结土土壤胶结特性和破裂点位置对位错特征的影响^[9], 全面研究互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征。

2.2 正断层地震地表破裂位错扩展特征研究

2.2.1 离心机试验

研究互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征时, 分别采用互层非胶结土和互层胶结土为研究对象, 分析土壤胶结特性对正断层地震地表破裂位错特征的影响^[10], 试验一 8Hm、8H1 的破裂点分别处于胶结土的中间和中下方; 试验二 L8Hm 和 L8H1 同样比较破裂点位置对位错特征的影响, 两次试验具体安排如表 1 所列。

表 1 试验安排
Table 1 Test arrangement

试验	试验名称	土壤材料	土层厚度 G/m	j/m	裂缝上破裂点 D _T
一	8Hm	互层非胶结	55.7	0.54	1/2H
	8H1				2/3H
二	L8Hm	互层胶结	49.9	0.54	1/2H
	L8H1				2/3H

试验在重力加速度为 100 g 的加速场进行, 试验模拟互层胶结土厚度 G 和地震地表破裂位错垂直分

量 j 如表 1 所示, 且假设地震地表破裂位错垂直分量值均为 0.54 m, 试验模拟互层胶结土正断层地震地表破裂处基岩断层倾角 α 和裂缝倾角 β 均为 60 度。

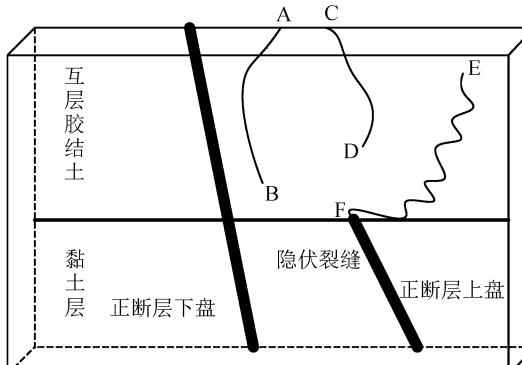
2.2.2 土体模型制备

试验采用模型箱安装的玻璃主要观测互层胶结土的变形和正断层地震地表破裂位错扩展, 模型箱中设置互层胶结土的正断层地震地表破裂位错模拟装置^[11], 该位错模拟装置包括正断层上下盘和随动边界侧墙, 其中随动边界侧墙被固定于正断层上盘, 二者同时运行, 可缓释模型箱大小受限产生的边界问题^[12]; 千斤顶作用在正断层上盘, 促使正断层上盘在与水平方向成 60 度的方向处做正断层位错模拟; 而正断层的下盘始终维持在静止状态。

互层胶结土体模型制作前, 需将正断层上盘下方的千斤顶移动到最大位移处, 保持正断层下盘顶部与上盘在相同位置, 然后应用压实操作制作正断层下盘侧方向的土体模型^[13], 同时放置滤纸于正断层地震地表裂纹(预制裂缝)处, 有效模拟出裂纹发生位置。互层胶结土体模型的压实干密度大约为 1.5 g/cm³, 制作完成后的互层胶结土体模型应放置在无气水中 2 周左右, 削弱放置时间较短对胶结过程造成的影响, 保持土体模型长期处于饱和状态。

2.2.3 试验仪器安置和试验步骤

在制作完互层胶结土体模型后, 即可将模型箱



(a) 试验 L8Hm 互层胶结土的裂缝

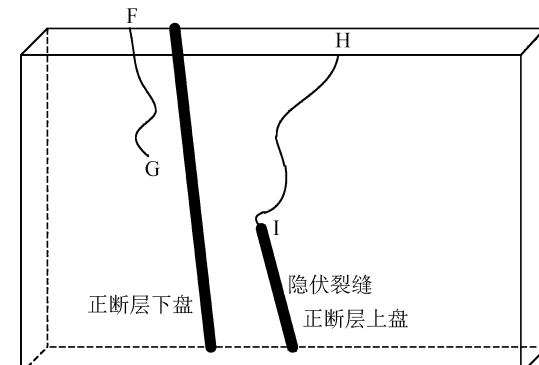
运送到离心机试验平台上, 将其与位移传感器有效连接, 试验主要过程是将位移传感器分别安置在互层胶结土体模型的表面和随动边界侧墙上^[14], 通过位移传感器测得地震地表土体沉降量和基岩断层位错量的垂直变化量。在模型箱的前方一定距离处放置高速相机, 有效记录地震地表破裂的位错变化情况。

连接完位移传感器和千斤顶后, 即可以开始离心机试验。离心机的加速度需在 15 分钟内增加到 100g (g 为重力加速度), 在此加速期间土体模型出现固结沉降。将位移传感器的初始数据记录有效记录, 试验开始模拟互层胶结土正断层受到地震后的位错特征变化^[15], 试验开始模拟前后均仔细记录模型土体的变化, 采用土工图像分析技术分析互层胶结土正断层地震地表破裂位错。在所有位移传感器获取准确的试验数据后, 完成离心机试验同时记录后期土体模型数据。

3 试验分析

3.1 裂缝位错扩展观测

互层胶结土正断层发生地震后, 地表破裂位置观察到明显的裂缝位错深度变化, 图 2 中(a)和(b)分别为试验 L8Hm 和试验 L8H1 的胶结土裂缝位错结果。



(b) 试验 L8H1 互层胶结土的裂缝

图 2 胶结土裂缝结果

Fig.2 Results of cracks in cemented soil

图 2(a)中共有三条裂缝, AB 裂缝位于正断层上盘一侧的地表, 经观察可知, 该条裂缝出现在地表并持续地朝向深层的土体扩展, 终止扩展于黏土层; EF 裂缝处于正断层上盘部分, 该裂缝起源于隐伏裂缝的断点处, 裂缝逐渐向地表扩展直至黏土层; CD 裂缝在 AB 裂缝和 EF 裂缝之间, 从地表向下扩展穿过较厚的互层胶结土体。

试验结果中出现裂缝向上地表扩展和向下扩展两种扩展模式, 说明互层胶结土中的黏土层对地表裂缝位错扩展起到显著影响。

图 2(b)中观察到两条裂缝, FG 裂缝由地表产生逐渐扩展到土体模型的中间; 裂缝 HI 是从隐伏裂缝扩展到地表处, 对比(a)(b)两图可以看出, 当裂缝上的破裂点处于土体模型的中下部时, 裂缝位错

扩展角度较大,产生该结果的原因在于胶结土深层受到的围压的抑制作用更强,裂缝垂直位错扩展到黏土层,然后慢慢朝着正断层上盘弯曲。

3.2 地表破裂裂缝位错分析

试验根据离心机试验结果比较互层胶结土和互层非胶结土正断层受到地震后地表破裂位错变形特征,图3为表1试验8Hm采用本文方法分析得到的地震地表破裂裂缝位错结果,分析该图可以看出,裂缝的深度和宽度分别为5.6 m和0.2 m,该地表破裂裂缝穿过地表,裂缝处于正断层与地表交接处,产生该结果是因为地表层的土壤处于不饱和状态,互层非胶结土体自身不具有较强的黏聚力,当发生地震地表产生不均匀沉降时,不均匀沉降会造成土体发生水平拉伸,促使地表产生裂缝位错,图4、图5和图6分别为表1中不同试验的地表破裂裂缝位错结果。

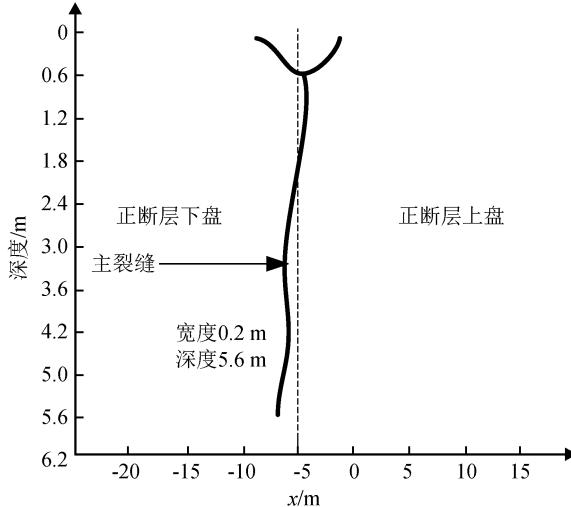


图3 试验8Hm的地表破裂裂缝位错结果

Fig.3 Surface fracture dislocation results of test 8Hm

图4为试验8H1为采用本文方法研究得到的地表破裂位错裂缝结果,分析图可知产生的位错主裂缝出现在正断层和地表的交接处,且裂缝的深度和宽度分别为6.6 m和0.2 m,裂缝穿过地表土体进入到砂土层中。可在主裂缝左侧正断层,清晰的观察到一条宽度较小的裂缝。比较图3和图4试验的8Hm和8H1的正断层地震地表破裂位错结果可知,互层非胶结土中,正断层地震地表破裂点发生位置对位错裂缝的影响较低,主裂缝的深度和宽度相差较小。

图5为试验L8Hm采用本文方法研究得到的互层胶结土地表破裂位错裂缝结果,经本文方法分析可知该试验同样在正断层和地表的交界处出现一

条主裂缝,且破裂点在土体模型中部的裂缝深度和宽度分别为22.4 m和0.3 m。在互层胶结土中的裂缝结果与非胶结土中的裂缝不同是因为胶结土受到地震作用力的破坏机制,促使地表附近的土体发生水平受力,使发生在地表的裂缝位错深入到更深的土体中。

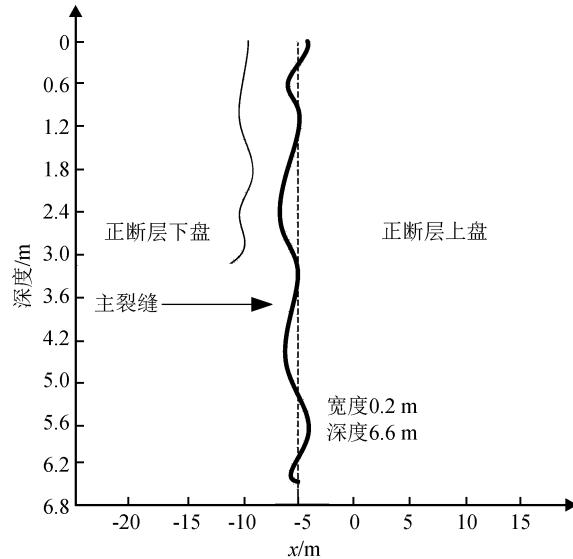


图4 试验8H1的地表破裂裂缝位错结果

Fig.4 The surface fracture dislocation results of test 8H1

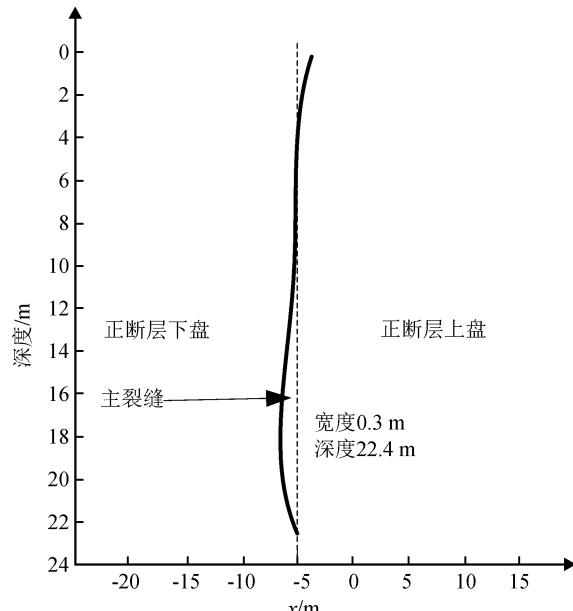


图5 试验L8Hm的地表破裂裂缝位错结果

Fig.5 The surface fracture dislocation results of test L8Hm

图6为试验L8H1采用本文方法研究得到的地表破裂位错裂缝结果,观察图6可以看出地表破裂

位错深度穿过地表顶部较厚的胶结土,且主体裂缝的附近还有一条次级裂缝,该次级裂缝不是主体裂缝的延伸,而是胶结土体受地震产生的次生裂缝,且破裂点在土体模型中下部的裂缝深度和宽度分别为 33.4 m 和 0.1 m。且将图 5 与图 6 实施对比可以得出,互层胶结土中正断层地震地表破裂点的发生位置对裂缝位错深度和厚度的影响较明显,裂缝上的破裂点处于土体模型的中下部时,裂缝的深度越深。

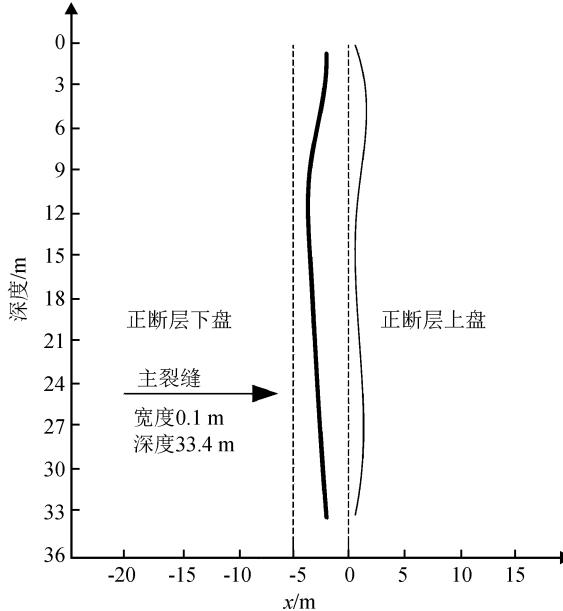


图 6 试验 L8H1 的地表破裂裂缝位错结果

Fig.6 The surface fracture dislocation results of test L8H1

4 结论

文章提出新的互层胶结土中正断层地震地表破裂位错特征研究方法,构建地震地表弹性位错模型,研究互层胶结土正断层的地表三维断裂特征,该模型研究地表在受到走滑、逆冲和张开错动导致的地表错位变化情况;并通过模拟正断层破裂位错扩展离心机试验,全面研究互层胶结土中正断层地震地表破裂的位错特征,该试验得出:互层胶结土中的黏土层对地表裂缝位错扩展起到显著影响,当破裂点出现于土体模型的中下部时,裂缝位错扩展角度较大,位错扩展效果更加明显;互层非胶结土中,正断层地震地表破裂点发生位置对位错裂缝的影响较低,主裂缝的深度和宽度相差较小;互层胶结土中正断层地震地表破裂点的发生位置对裂缝位错深度的影响较明显,且裂缝上的破裂点处于土体模型的中下部时,裂缝的深度越深。

参考文献(References)

- [1] 杨志华, 兰恒星, 张永双, 等. 强震区震后地质灾害长期活动性研究综述[J]. 地质力学学报, 2017, 23(5): 743-753.
YANG Zhihua, LAN Hengxing, ZHANG Yongshuang, et al. Research Review on Long-Term Activity of Post-earthquake Geohazard in Strong Seismic-Disturbed Regions[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(5): 743-753.
- [2] 陈永新, 迟明杰, 李小军. 地表岩土层对地震动特性的影响分析[J]. 地震工程学报, 2015, 37(3): 743-747.
CHEN Yongxin, CHI Mingjie, LI Xiaojun. Effect of Overlaying Rock and Soil Layers on Ground Motion Characteristics[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 743-747.
- [3] 张永双. 汶川地震区崩滑堆积体强度现场直剪试验研究[J]. 地质力学学报, 2017, 23(1): 105-114.
ZHANG Yongshuang. In-Situ Direct Shearing Test on Landslide Accumulation Body Intensity of Wenchuan Earthquake Region[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(1): 105-114.
- [4] 张昱, 李春燕, 吴建华, 等. 印尼 8.6 级地震甘肃地区流体观测试资料同震响应分析[J]. 地震工程学报, 2016, 38(5): 830-837.
ZHANG Yu, LI Chunyan, WU Jianhua, et al. Co-seismic Response in Fluid Observation Data from Gansu during the Indonesia M8.6 Earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(5): 830-837.
- [5] 钱向东, 景洋. 地震作用下重力坝非线性振型响应的耦合性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 211-218.
QIAN Xiangdong, JING Yang. Modal Coupling Analysis of Nonlinear Seismic Response of Gravity Dams[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(3): 211-218.
- [6] 薛成凤, 刘来君, 武芳文. 大跨度混凝土梁斜拉桥横向地震作用易损性分析[J]. 地震研究, 2017, 40(1): 65-69.
XUN Chengfun, LIU Laijun, WU Fangwen. Fragility Analysis of Long-span Concrete Cable-stayed Bridge under Lateral Seismic Loads[J]. Journal of Seismological Research, 2017, 40(1): 65-69.
- [7] 吴赵, 袁道阳, 王爱国, 等. 西秦岭北缘断裂带武山—天水段全新世活动的新证据[J]. 地震工程学报, 2016, 38(2): 249-259.
WU Zhao, YUAN Daoyang, WANG Aiguo, et al. New Evidence for Holocene Tectonic Activities of the Wushan—Tianshui Segment in the Northern Margin Fault of the West Qinling[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(2): 249-259.
- [8] 郑山锁, 马德龙, 刘洪珠. 汶川地区震后钢筋混凝土框架结构的地震易损性研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(1): 131-137.
ZHENG Shansuo, MA Delong, LIU Hongzhu. Seismic Vulnerability of Post-earthquake Reinforced Concrete Frame Structures in the Wenchuan Area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(1): 131-137.
- [9] 李浩, 杨为民, 黄晓, 等. 天水市麦积区税湾地震黄土滑坡特征及其形成机制[J]. 地质力学学报, 2016, 22(1): 12-24.
LI Hao, YANG WeiMin, HUANG Xiao, et al. Characteristics

- and Deformation Mechanism of Shuiwan Seismic Loess Landslide in Maiji, Tianshui[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(1):12-24.
- [10] 岳乌云高娃.地震后重建过程中的建筑最低成本分析[J].地震工程学报,2017,39(6):1150-1155.
YUE Wuyungaowa.Lowest-cost Analysis of Buildings During Post-earthquake Reconstruction[J]. China Earthquake Engineering Journal,2017,39(6):1150-1155.
- [11] 周汉国,郭建春,李静,等.深层碳酸盐岩储层溶洞围岩应力分布研究[J].地质力学学报,2018,24(1):546-554.
ZHOU Hanguo, GUO Jianhun, LI Jin, et al. Stress Distribution of Surrounding Rock of Karst Cave in Deep Carbonate Reservoir[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(1): 546-554.
- [12] 杨玉宝,潘毅,徐振山,等.现浇型生态混凝土护岸抗水力冲刷性能试验研究[J].水利水电技术,2017,48(11):122-127.
YANG Baoyu, PAN Yi, XU Zhenshan, et al. Experimental Study on Hydraulic Erosion Resistance of Cast-in-place Eco-concrete Revetment [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(11): 122-127.
- [13] 夏峰,郭宝震,余大新.厚层淤泥质粉质黏土的动力特性参数对地表地震动参数的影响[J].地震工程学报,2016,38(3):391-397.
XIA Feng, GUO Baoxian, YU Daxin. Influence of Dynamic Characteristic Parameters of Thick Mucky Silty Clay on Surface Ground Motion Parameters[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(3): 391-397.
- [14] 郭增建,郭安宁,赵乘程.四种方法对四川九寨沟7级地震的初步回顾预测[J].地震工程学报,2017,39(1):43-45.
GUO Zengjian, GUO Anning, ZHAO Chengcheng. Reviewing Prediction for Jiuzhaigou, Sichuan M_S 7.0 Earthquake Using Four Methods [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(1): 43-45.
- [15] 刘潇,张学,赵俭斌,等.单、双向振动条件下饱和粉砂变形特性对比试验研究[J].地震工程学报,2015,37(3):748-753.
LIU Xiao, ZHANG Xue, ZHAO Jianbin, et al. Study on Deformation Characteristics of Saturated Silty Sand in Uni-and Bidirectional Cyclic Triaxial Tests[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3): 748-753.