

文章编号: 1009-3087(2010)05-0058-10

非连续逆断层引起地表破裂和桥梁破坏的模型试验

黄凯珠, 张乾兵, 张健恒

(香港理工大学 土木与结构工程系, 香港)

摘要:通过地质力学模型试验研究了共线型和阶梯型两种非连续逆断层的运动引起上覆松散沉积层的破裂特征、沉积层与断层基岩之间的相互关系,并以汶川地震中受损的高原大桥为背景,通过改变桥梁与以上两种断层之间的布置关系研究了断层运动引起桥梁破坏的原因。引进数字散斑相关方法和高速摄像系统进行观测和记录试验过程。试验结果表明,非连续逆断层的破坏过程可分为 4 个不同的阶段,依次为弹性变形阶段、贯通阶段、滑动阶段和破坏阶段;结合观测系统解释说明了上述变化过程;分析了断层倾角和运动速度对断层基岩破坏形态和地表破裂带的影响;统计了地表破裂带宽度、断层基岩和沉积层抬升高度的关系,对比结果发现:共线型断层在破坏前聚集的能量较大、其地表破裂带宽度和抬升高度均大于阶梯型断层的;沉积层的抬升高度小于基岩的抬升高度;当桥梁模型垂直断层走向布置时均发生破坏,而平行断层走向布置时并没有破坏。

关键词:非连续逆断层;地质力学模型试验;数字散斑相关方法;高速摄像系统;破裂特征

中图分类号: TU435

文献标识码: A

Geomechanical Model Testing of Surface Rupture and Bridge Damage Produced by Discontinuous Reverse Faults

WONG Robina H C, ZHANG Qian-bing, CHEUNG Kin Hang Thomas

(Dept. of Civil and Structural Eng., The Hong Kong Polytechnic Univ., Hong Kong)

Abstract: Coplanar and stepped buried reverse faults were carried out to study the relationship between faults movement and surface rupture appearing in soil layer using geomechanical model test. Furthermore, the Gaoyuan Bridge damaged during Wenchuan Earthquake was taken as an example to study the effect of fault propagation on bridge foundation by changing the arrangement of the bridge to these two types of faults. Digital speckle correlation method and high speed camera were used to observe and analyze the process of the fault movement. We have studied the effect of fault dip angles and loading rates. The research results indicated that the failure process of discontinuous reverse faults can be divided into four stages: elastic stage, fault coalescence stage, sliding stage and failure stage. The width of surface rupture zone, the uplifts of bedrock and sediment layer were statistics, which indicated the width of surface rupture zone and the uplift of the coplanar type were greater than the stepped one. The larger the fault dip angle, the wider the surface rupture zone was resulted. The uplift of bedrock was greater than the uplift of soil layer. The bridge perpendicular to the fault was damaged and no damage to the parallel one.

Key words: discontinuous reverse faults; geomechanical model test; digital speckle correlation method; high speed camera; rupture characteristic

地震地表破裂是地下深部断层破裂扩展至地表

收稿日期: 2010-03-28

基金项目: 香港理工大学-四川大学合作项目“汶川地震中桥梁结构破坏现象的地质与力学原因分析和重建建议”(56/85G7)和香港理工大学科研基金(G-U665)

作者简介: 黄凯珠(1960-),女,副教授,研究方向:岩土工程与地质力学模型试验. E-mail: cerwong@inet.polyu.edu.hk

后的反映,所以地表破裂的运动特征与深部断层运动具有相关性^[1]。汶川地震在中央断裂的映秀-北川断裂和前山断裂的灌县-江油断裂上伴生有地表破裂,分别长 240 km 和 72 km,此外,在上述两条地表破裂带的西部还存在 1 条 NW 向带有逆冲垂直分量、左旋走滑性质的小鱼洞地表破裂带,长约 6 km,最大垂直位移达 6.5 m,引起的强地表形变带宽

度大多小于 $40 \text{ m}^{[2-4]}$ 。文献[5]根据中央断裂上两个地表破裂点的几何学和运动学特征,认为汶川地震在龙门山中央断裂上的破裂方式以逆冲为主,兼有右旋走滑。文献[6]通过研究安县肖家桥附近基岩的地表破裂形态,揭示出地震断层作用形式以右旋斜冲运动为主。文献[7]针对几个地点的古地震遗迹分析了汶川地震的地表破裂断层上大地震原地重复的现象。但地震基岩在地表破裂露头非常少见以及地表破裂形态的不确定性,为进一步研究地表破裂带与断层基岩之间的关系以及地震构造的特征带来了一定的困难。隐伏活断层引起松散沉积层中破裂的研究是一项非常复杂的断裂力学扩展问题,主要受断层埋深、断层倾角和运动速度等因素的影响。因此,关于深部隐伏发震断层与地震地表变形和破裂的关系是一项需深入研究的课题^[8]。地质力学模型试验和数值模拟方法是研究隐伏断层在沉积层中的破裂扩展特征的重要方法^[9-14],但以上研究主要是针对单一断层引起的沉积层破裂特征。汶川地震地表破裂带的分布显示了逆断层在结构上的复杂性,如在小鱼洞和虹口等地的地表破裂带均表现出非连续形态,且出露处倾角多大于 60° 。因此,有必要开展多条非连续断层破坏特征以及引起地表破裂方面的研究。

此外,汶川地震和余震触发了多处地质灾害,据交通运输部统计,因地震受损的高速公路 19 条,国道、省道干线公路 159 条,农村公路 7 605 条,道路累计长度 53 288 km;受损的桥梁 5 560 座,隧道 110 座,直接经济损失 653.06×10^8 元^[15]。地震引起桥梁破坏的研究多集中于桥梁本身结构为基础,但也应着重考虑地基的破坏特征对桥梁的影响作用^[16]。文献[17]在灾后考察中观察到桥梁与断层的不同布置导致了桥梁的多种破坏形态。因此,研究桥梁的布置与断层的关系也是值得深入探讨。但多数受损桥梁缺乏前期设计资料,文献[18]分析了高原大桥桥梁结构的破坏,见图 1,并提供了较详细的设计和地质资料。作者将以高原大桥的设计资料做参考,探讨桥梁布置与断层运动的关系。

采用地质力学模型试验方法,设计了共线型和阶梯型两种非连续逆断层,并通过改变桥梁与断层基岩之间方位的布置关系来研究断层破坏特征、引起松散沉积层的破裂形式、断层基岩与沉积层之间的相互关系以及导致桥梁破坏的规律。考虑到地震发生的瞬时性,引进了数字散斑相关方法和高速摄像系统观测和记录试验变化现象。研究结果能为进



图 1 高原大桥破坏情况(镜向 NNE)

一步认识地震破坏过程、地表破裂模式和桥梁抗震设计等工作提供一定的理论支持。

1 地质力学模型试验

1.1 基岩和断层面相似材料

在文献[19]配置的相似材料基础上,并结合高原大桥的砂、页岩基岩,选择石膏粉、砂子($90 \sim 150 \mu\text{m}$ 和 $150 \sim 300 \mu\text{m}$ 粒径的砂各占 40% 和 60%)、硫酸钡和冰水为原材料,按质量比 2:4:1:1.5 进行混合,在振动台上振捣密实后制作,并将标准试验样本放置在恒温 60°C 的烘箱内一周时间进行养护。所有力学材料参数都根据 ASTM 标准试验方法测试,其结果见表 1。断层相似材料选用厚度为 0.35 mm 的铁片模拟,由直剪试验测试得其摩擦系数为 0.72,满足砂岩中节理充填物摩擦角的范围($25^\circ \sim 35^\circ$)^[20]。根据 Buckingham π 定理进行无量纲对比分析^[21],确定材料的独立 π 因子为 6 个^[19],分别为 $\gamma L/\sigma_t$ 、 $K_{1c}/(E\sqrt{L})$ 、 σ_c/σ_t 、 E/σ_c 、 ν 和 μ 。当几何相似比 $L = \frac{25}{0.1} = 250$,应力相似比 $\zeta = \frac{\sigma}{\sigma'} = \frac{\sigma_c}{\sigma_c'} = \frac{\sigma_t}{\sigma_t'} = 33$ 时,6 个无量纲参数中有 5 个满足砂岩的参数,因此该材料基本符合砂岩类相似材料的要求。

1.2 沉积层模拟材料

高原大桥的桩基础是在砂卵石层和砂、页岩中,深度均为 5 m ,由于缺少桥址区沉积层材料的参数,以四川省红层第四系砂卵石层的参数为依据(砂卵石层以椭圆和圆状为主,其中粒径为 $60 \sim 250 \text{ mm}$ 的卵石占 20% 左右)^[25]。按照材料密度相等条件下,粒径大小要符合试验几何相似比,因此上述砂卵石的粒径对应模拟材料的粒径大小为 $0.24 \sim 1 \text{ mm}$ 。以此粒径大小作为选材的标准,最终选择干沙和土的混合物作为模拟材料。其密度为 1.37 g/cm^3 ,内摩擦角为 40.3° ,不均匀系数 $C_u \geq 5$ 和曲率系数 C_c

= 1 - 3 ,模拟材料的级配良好。此外 ,粒径为 0.24 mm 到 1 mm 范围的颗粒所占的质量比例为 20.24% (见图 2 中 a、b 两点之间的范围) ,因此 ,该模拟材料满足砂卵石层的要求。

表 1 相似材料与原岩材料的参数对比表

Tab.1 The comparison of prototype rock and modeling material

材料参数和 π 因子	抗压强度 σ_c / MPa	抗拉强度 σ_t / MPa	断裂韧度 $K_{IC} / \text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$	弹性模量 E / GPa	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	长度 L / m	$\gamma L / \sigma_t$	$K_{IC} / (E \sqrt{L})$	σ_c / σ_t	E / σ_c	柏松比 ν	断层面摩擦系数 μ
砂岩	20 ~ 170	4 ~ 25	0.22 ~ 2.66	3 ~ 35	23	25	0.023 ~ 0.14	$1.47 \times 10^{-5} \sim 1.77 \times 10^{-4}$	4 ~ 35.7	17.65 ~ 17.50	0.02 ~ 0.35	0.53 ~ 1.01
相似材料	5.218	0.627	0.114	4.59	18.96	0.1	0.003	7.86×10^{-5}	8.32	879.65	0.33	0.72

注:表中 K_{IC} 的值见文献[22] ,其他参考值见文献[23]

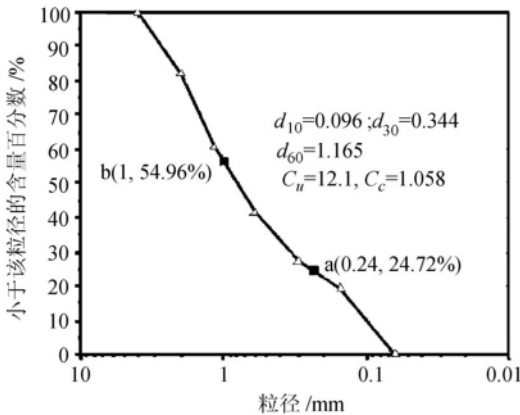


图 2 沉积层模拟材料颗粒级配曲线

Fig.2 Grain size distribution curve of sedimentary material

1.3 断层基岩的设计

断层设计和加载方式如图 3 所示 ,基岩样本尺寸为 400 mm × 400 mm × 25 mm (长 × 宽 × 厚) ,断层参数见表 2 ,断层名称的表示方法和裂纹扩展研究的一致 ,分为共线型和阶梯型两种断层。

文献 [26] 公布的汶川地震震源深度为 15.5 km ,倾角为 32°。但受模型试验尺寸的限制 ,模拟范围只能选择近地表一定深度处。另由于汶川地震中靠近地表的破裂角多大于 60° ,因此断层倾角设计为 60° ± 4°。基岩的相似材料按照 1.1 节的配比 ,并进行振动台捣筑 ,断层是采用辅助工具按照设计角度插入铁片。并插入 8 mm 直径的铁棒作为预留桥墩钻孔 ,在样本凝固之前将其拔出。

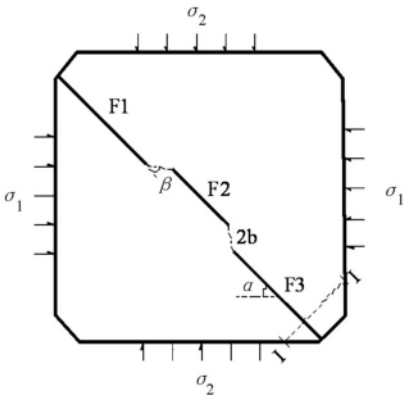
表 2 断层几何参数表

Tab.2 Geometries of faults tested in modeling material

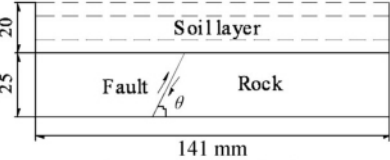
类型	岩桥角 $\beta / (^\circ)$	断层角 $\alpha / (^\circ)$	倾角 $\theta / (^\circ)$	间距	长度 / mm	
				2b/mm	F1: F3	F2
共线型	0	45	60 ± 4	30	178	110
阶梯型	35	45	60 ± 4	37	178	110

1.4 桥梁尺寸设计和布置方式

高原大桥桥长 115 m ,桥面净宽 8 m ,全桥共 4 跨 ,上部结构为预应力空心板梁 ,支座采用板式橡胶



(a) 三条断层几何示意图



(b) I-I 剖面图 (高速摄像系统监测面)

图 3 断层设计示意图

Fig.3 The designschematic diagram of faults

支座 ,下部结构为钢筋混凝土双柱式圆形桥墩 ,重力式桥台。试验中以地震中破坏最为严重的 2# 和 3# 主梁作为对象 ,按照试验几何相似比制作模型桥梁 ,主要组成部分的几何参数对比见表 3。为不影响散斑相机拍摄土层表面的破坏现象 ,桥面材料选择为透明的 PMMA 材料 ,其他部分的材料和基岩相似材料一致。在桥柱和桩基础内部放入 1 根 0.6 mm 直径的铜丝模拟配筋。

表 3 高原大桥与模型的几何参数对比表

Tab.3 The geometry comparisons of Gaoyuan Bridge and the model bridge

名称	高原大桥 / m			模型桥梁 / mm		
	长度	直径 / 宽度	厚度	长度	直径 / 宽度	厚度
桥面	25	7.5	1.4	100	30	5.6
墩帽	8.5	1.5	1.5	34	6	6
双柱	10	1.5		40	6	
联系梁	7.5	2.5	2.5	30	10	10
桥墩	6.3	1.5		25	6	

桥梁与两种断层之间有3种布置关系:垂直、横跨和平行于断层,与阶梯型断层的布置见图4。

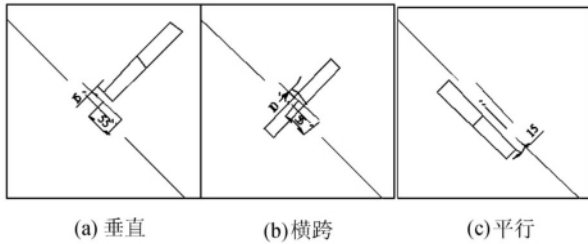


图4 桥梁与阶梯型断层布置方式(单位: mm)

Fig.4 The layout of the model bridge and stepped faults

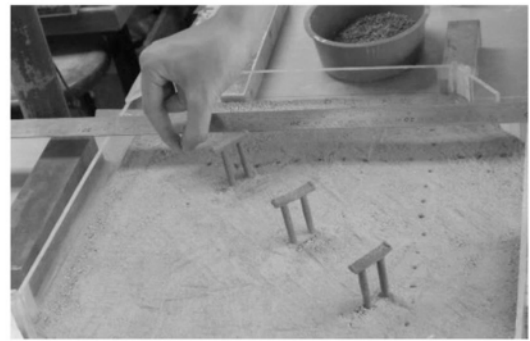
1.5 加载方式设计

龙门山断裂带两侧百米深度钻孔水压致裂地应力测量结果表明:该地区构造应力场与龙门山断裂带逆冲性质一致,最大主压应力和中间主压应力水平,垂直应力最小,在汶川附近三叠纪砂岩中测得400 m孔深中的水平最小主应力为10 MPa^[27]。本次试验以现场测量结果为依据,根据应力相似比 ζ 得到稳压时的水平侧应力大小为0.3 MPa。双轴液压加载系统以0.015 kN/s的加载速率同步施加轴向和侧向荷载,当侧向应力到达0.3 MPa时维持侧压不变,而继续以相同的加载速率施加轴向荷载直至破坏。

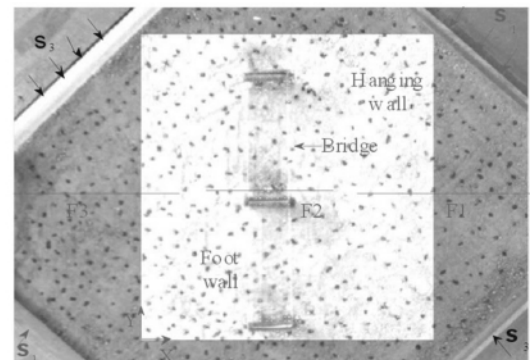
1.6 观测系统

数字散斑相关方法用于量测地表破裂带的演化规律,基本测量过程如下:在沉积层表面放置与土体颜色和颗粒相差较大的红色砂粒作为散斑点,白光照明保证拍摄过程不受光强变化的影响,将高分辨率数码相机垂直布置在模型顶部,调整使观测区域合适、图像清晰,见图5(a)、(b)。采用Geo-DSCM Ver1.90软件对这些有序的图片进行相关性分析^[28],标定拍摄系统的物面分辨率为0.220 mm/pixel。

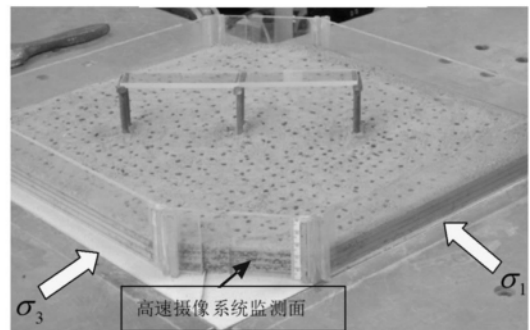
高速摄像系统采用Prosilica公司生产的GE680/680C型号,其分辨率为640×480 pixel、传感器类型为1/3"CCD Kodak KAI-0340D、最大帧频为205 fps。为捕捉断层基岩微小变化引起土层的变化情况和地震破坏瞬间土层的破坏规律,将高速摄像系统沿断层走向方向布置,监测面见图3(b)、图5(c),并在监测面上分层布置红色砂子和标尺作为观测基准,聚焦摄像范围如图5(d)所示,以200/s的速度进行观测和记录。同时,为了保证上下盘的土层能随断层基岩变化而不受边框的约束,专门研制了图5(c)所示的可分开移动式塑料框架。



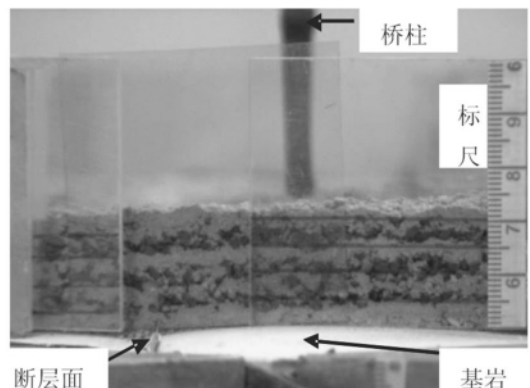
(a) 布置散斑点



(b) DSCM 分析范围



(c) 模型安装完成



(d) 高速摄像系统监测面

图5 试验安装过程和观测系统布置

Fig.5 Experimental setup and the layout of measurement system

此外,在模型试验的顶部安置一台数码摄像机,用于观测和记录试验的全场变化过程。

1.7 试验步骤

- 1) 将基岩样本放置在双轴加载系统上,安装桥梁模型的桥墩、连接梁、双柱和墩帽;
- 2) 放置可分开移动式塑料框架,按 5 mm 每层等质量装填松散沉积层;
- 3) 在沉积层表面布置散斑点并轻压;
- 4) 分别在 4 个加载面上安置 LVDT 位移传感器,按照设计加载方式加压,采用 Data Logger 软件实时记录和动态显示荷载-位移变化曲线。

2 试验结果与讨论

2.1 非连续断层破坏特征

双轴加载条件下非连续逆断层的破坏过程与前面已开展的连续断层的模型试验存在明显的不同点^[9-14],因为一般的试验方法主要采用沿断层面匀速加载的方式,因此没有突然抬升发生破坏的过程。而本试验中采用的双轴加载方式更符合实际应力状态,断层基岩在加载过程中积累能量,导致最终的突然失稳破坏。

共线型和阶梯型非连续断层的轴向应力-应变曲线见图 6,破坏过程存在以下几个明显的特征:

I 阶段:应力与应变成正比,a 点为弹性极限点,基岩处于弹性变形阶段;

II 阶段:应力由 σ_a 突然减小为 σ_b ,具体分析见后,称为断层贯通阶段;

III 阶段:上盘基岩沿贯通面逐渐滑动,c 点为沉积层表面破裂起始点,该阶段为断层滑动阶段;

IV 阶段:断层基岩上盘突然抬升并发生破坏,d 点为断层破坏临界点,称为断层破坏阶段。

数字散斑相关方法和高速摄像系统能实时捕捉和记录沉积层在水平方向和断层基岩在垂直方向的变化量,以共线型($\theta = 59^\circ$)试验(桥梁横跨断层)为例对图 6(a)中关键点(a、b、c、d 和 e)的物理意义进行解释说明,观测结果见图 7,图 7(a)和(b)均含有 4 个小图,其中小图 a、b、c、d、e 与图 6 应力-应变曲线上的 5 个特征点相对应。

1) 图 6(a)中应力从 a 点突跳到 b 点:高速摄像系统观测到沉积层突然出现跳动现象,但并不明显;但数字散斑结果显示跳动区域为断层在沉积层中的投影范围,表明断层在 a 点的应力条件下贯通,但位移变化量仅为 0.45 mm。分析其原因,主要是岩桥距离较短的原因。今后的试验中应考虑增大岩桥距

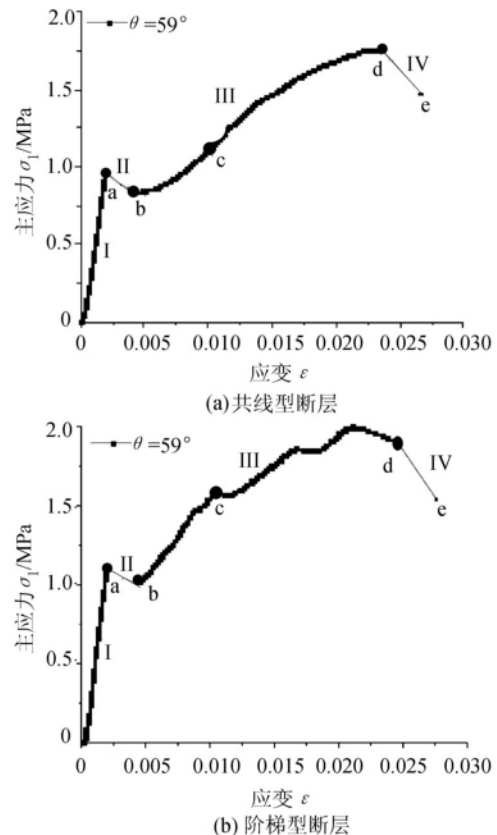


图 6 轴向应力-应变关系曲线

Fig. 6 Axial stress and strain curve

离和断层长度,该阶段现象的变化是否能更明显,能否将该现象作为非连续逆断层破坏的前兆还有待进一步的研究。

2) 断层贯通后再继续加压,断层进入滑动阶段,当应力达到 c 点时:基岩上盘抬升高度为 5 mm,沉积层表面出现破裂,其变形带宽度为 3 mm,桥柱微微倾斜。

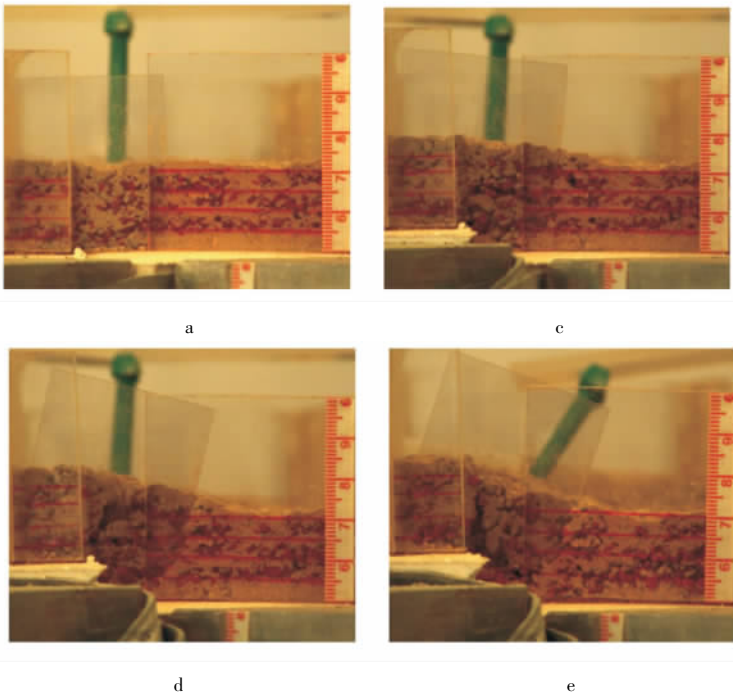
3) 当应力达到 d 点时:基岩上盘抬升高度为 9 mm,上盘土层抬升后变形带最大宽度为 2.4 mm,下盘最大宽度增至 7 mm。

4) 当应力大于 d 点时(d-e):基岩上盘突然抬升了 5 mm,应变能释放。断层发生破坏瞬时,由于沉积层瞬时变形太大,导致图像失去相关性,数字散板方法无法计算,经实际量测后沉积层地表破裂带宽度为 32 mm。

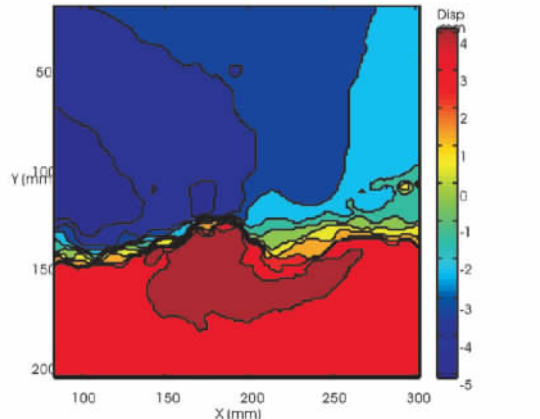
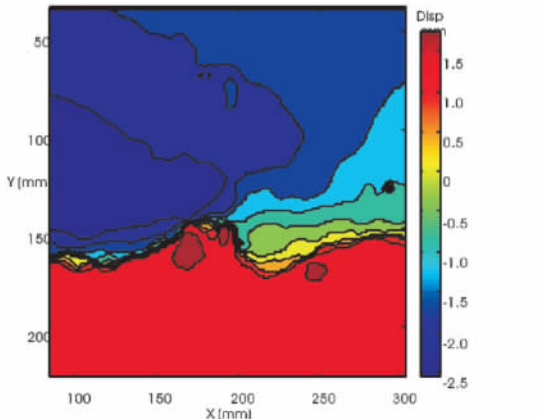
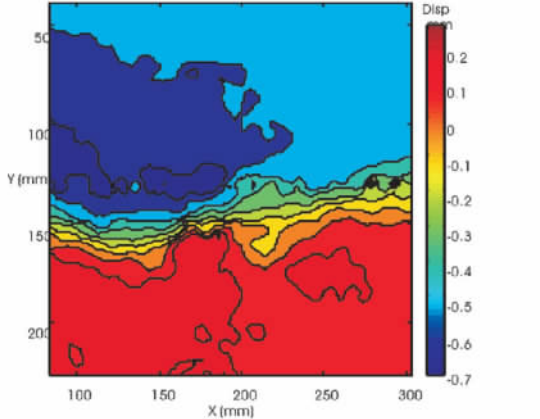
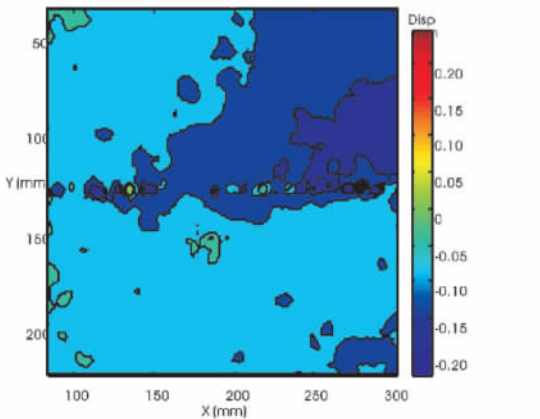
2.2 断层倾角与加载速度的影响

1) 断层倾角不同时应力-应变曲线如图 8 所示。

①断层倾角越大,弹性极限 σ_a 和峰值应力 σ_d 也越大,破坏前聚集的能量越大,破坏现象也越剧烈,引起地表破裂带的宽度也越宽,见图 9,地表破裂带最大宽度为 11 m。



(a) 高速摄像系统观测结果



(b) DSCM 位移场(x 方向位移场, 即平行断层方向)

图 7 共线型断层($\theta = 59^\circ$) 试验量测结果

Fig. 7 The results of coplanar fault with dip angles 59°

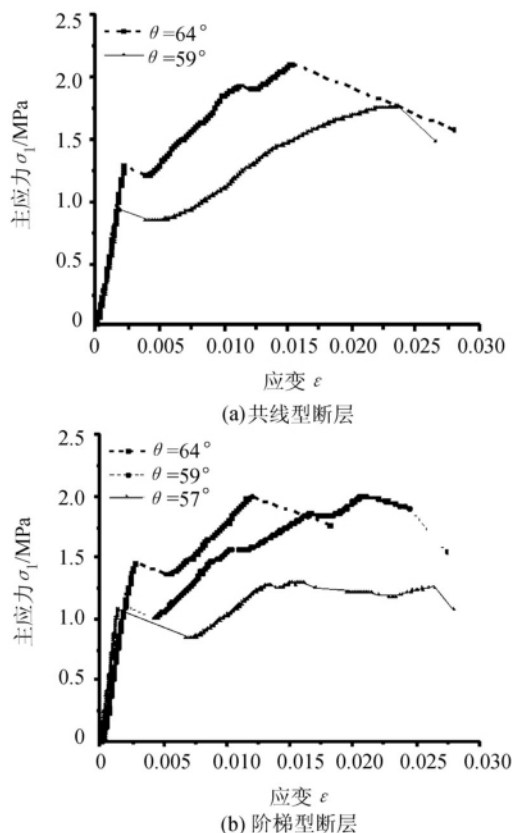


图 8 角度不同的轴向应力 - 应变关系曲线

Fig. 8 Axial stress and strain curve of models with different dip angles

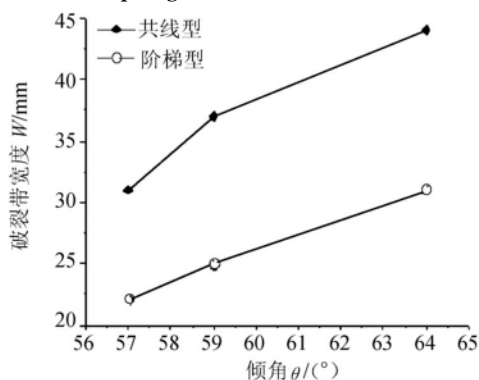


图 9 地表破裂带宽度

Fig. 9 The width of surface rupture zone

②断层倾角越大,断层基岩和沉积层的抬升高度均越大,而沉积层的抬升高度小于基岩抬升高度,如图 10 所示,由于松散沉积层吸收了部分断层基岩的能量。根据试验几何相似比可知,实际基岩断层的最大抬升高度为 7 m,沉积层的最大抬升高度为 5.75 m,结果与汶川地震引起地表破裂的抬升高度也基本相符^[2]。

2) 为研究不同加载速率对断层的破坏现象,将倾角为 57°的共线型断层的加载速率提高为 0.035 kN/s,结果如图 11 所示。对比发现,加载速率越大,

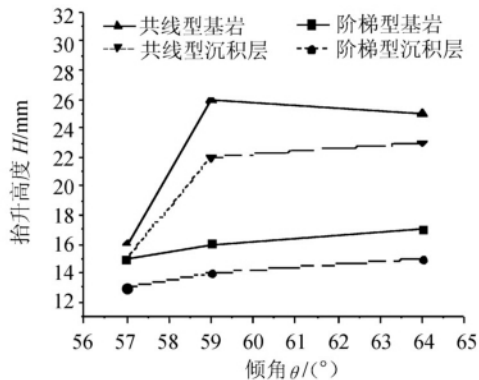


图 10 断层基岩和沉积层抬升高度

Fig. 10 The uplift of rock and sediment layer
应变值由 ε_a 增加到 ε_b 的变化量也越大,其破坏过程较剧烈。

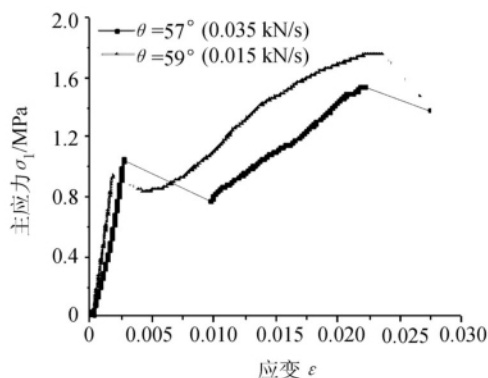


图 11 角度和速度均不同时共线型断层的应力 - 应变曲线

Fig. 11 Axial stress and strain curve of models with different dip angles and loading rates

以上的模拟结果与地震中出现的现象相似,由于模型试验的数量有限,并没有很完全的认识,在今后的试验和研究中应考虑改变沉积层厚度、断层倾角和加载速率的影响。

2.3 非连续断层破坏特征比较

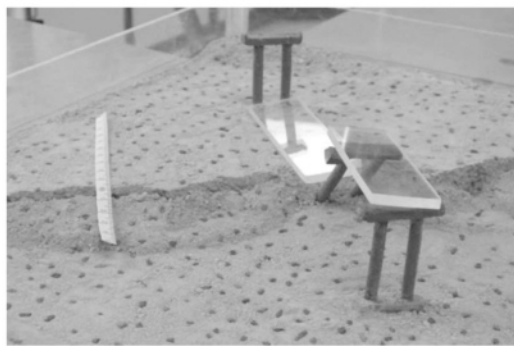
由图 8 可知,共线型断层贯通所需要应力 σ_d 要小于阶梯型断层的,这是由于共线型断层的岩桥距离(30 mm)小于阶梯型断层的(37 mm)(见表 2),岩桥距离的影响有待日后更进一步的研究;然而共线型断层的峰值应力 σ_d 却大于阶梯型断层的,在最终破坏前集聚的能量更大,试验现象也表明共线型断层易于贯通。

共线型断层地表破裂带的宽度和抬升高度均大于比阶梯型断层的,如图 10 ~ 11 所示。

2.4 桥梁破坏特征

共线型逆断层引起桥梁破坏特征见图 12,靠近断层的桥墩在断层破坏后被剪断。试验中桥梁破坏形态如图 13 所示,在断层贯通阶段,所有桥梁均未出现任何反应;在断层滑动阶段,a、b、c、d 4 个模型

中靠近断层的桥柱向滑动方向倾斜,e、f仅随着断层抬升而抬升;在断层破坏阶段,a、b、c、d 4个模型中靠近断层方向的主梁发生落梁现象,靠近断层的桥墩均被断层抬升后剪断,而e和f的桥墩仅随断层升高。虽然在桥梁模型方面做了较多准备工作,但由于桥梁模型相似比例的难度,以上结果也只能简单的解释地震引起桥梁破坏的特征。



(a) 落梁现象



(b) 桥墩倾斜

图12 桥梁破坏形态(共线型断层 $\theta = 59^\circ$)

Fig. 12 The failure mode of model bridge (coplanar faults with dip angle 59°)

3 结论

共线型和阶梯型非连续逆断层错动引起上覆松散沉积层和桥梁破坏过程的模拟结果表明:

1) 非连续逆断层的破坏过程可分为4个不同的阶段,依次为弹性变形阶段、贯通阶段、滑移阶段和破坏阶段;并结合数字散斑相关方法和高速摄像系统解释说明了上述变化过程。

2) 断层倾角越大,断层破坏前聚集的能量就越大,破坏现象也越剧烈。

3) 沉积层的抬升高度小于基岩的抬升高度。

4) 共线型断层地表破裂带的宽度和抬升高度均大于阶梯型断层的。

5) 当桥梁垂直断层布置的情况下桥梁均破坏,

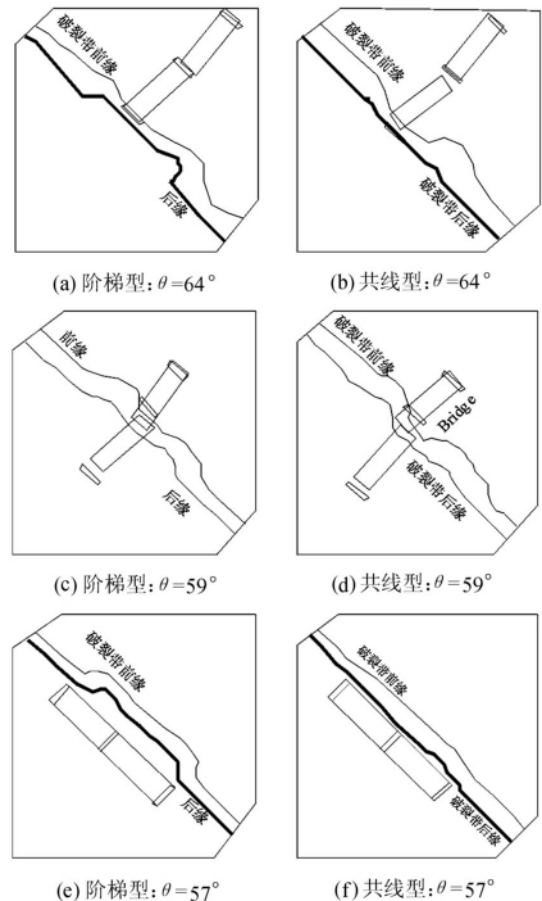


图13 沉积层和桥梁最终破坏形态

Fig. 13 The failure of model bridges and sediment layer

而平行于断层布置的情况下没有破坏。建议在桥梁选址前尽量详细地调查场址区的地质构造,尽量避免在断层带处建筑,或尽量避免桥梁方位与断层走向垂直布置。

参考文献:

- [1] Zhang Peizhen, Deng Qidong, Xu Xiwei, et al. Blind thrust, folding earthquake, and the 1906 Manas Earthquake, Xinjiang [J]. Seismology and Geology, 1994, 16 (3): 193 - 204. [张培震, 邓起东, 徐锡伟, 等. 盲断裂、褶皱地震与新疆1906年玛纳斯地震[J]. 地震地质, 1994, 16(3): 193 - 204.]
- [2] Xu Xiwei, Wen Xueze, Yu Guihua, et al. Coseismic reverse and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China [J]. Geology, 2009, 37(6): 515 - 518.

- [3] Li Yong, Huang Runqiu, Densmore A L. Basic features and research progresses of Wenchuan Ms 8.0 Earthquake [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(3): 7–25. [李勇, 黄润秋, Densmore A L. 汶川 8.0 级地震的基本特征及其研究进展 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(3): 7–25.]
- [4] Zhou Qing, Xu Xiwei, Yu Guihua, et al. Investigation on widths of surface rupture zones of the MS 8.0 Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, China [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3): 778–788. [周庆, 徐锡伟, 于贵华, 等. 汶川 8.0 级地震地表破裂带宽度调查 [J]. 地震地质, 2008, 30(3): 778–788.]
- [5] Wei Zhanyu, He Honglin, Dong Shaopeng, et al. Rupture analysis of the Wenchuan Earthquake at two observation stations by geometry and kinematics [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(4): 630–643. [魏占玉, 何宏林, 董绍鹏, 等. 2008. 从两个地表破裂点的几何学与运动学特征分析汶川地震的破裂方式 [J]. 地震地质, 30(4): 630–643.]
- [6] Li Xiguan, Yu Guihua, Xu Xiwei. Surface ruptures in bedrock of the MS8.0 Wenchuan Earthquake [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(4): 989–995. [李细光, 于贵华, 徐锡伟. 汶川 MS8.0 地震基岩中的地表破裂 [J]. 地震地质, 2008, 30(4): 989–995.]
- [7] Ran Yongkang, Chen Lichun, Chen Guihua, et al. Primary analysis of in-situ recurrence of large earthquake along seismogenic fault of the MS 8.0 Wenchuan Earthquake [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(4): 630–643. [冉勇康, 陈立春, 陈桂华, 等. 汶川 MS8.0 地震发震断裂大地震原地重复现象初析 [J]. 地震地质, 2008, 30(4): 630–643.]
- [8] Han Zhujun, Ran Yongkang, Xu Xiwei. Primary study on possible width and displacement of future surface rupture zone produced by active fault [J]. Seismology and Geology, 2002, 24(4): 484–494. [韩竹军, 冉勇康, 徐锡伟. 隐伏断层未来地表破裂带宽度与位错量初步研究 [J]. 地震地质, 2002, 24(4): 484–494.]
- [9] Lade P V, Cole D A, Cummings D. Multiple failure surfaces over dip-slip faults [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110: 616–627.
- [10] Bray J D, Seed R B, Cluff L S, et al. Earthquake fault rupture propagation through soil [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(3): 543–561.
- [11] Lin M L, Chung C F, Jeng F S. Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip [J]. Engineering Geology, 2006, 88(1–2): 70–89.
- [12] Guo Endong, Feng Qimin, Bo Jingshan, et al. Seismic test of soil site rupture under fault displacements [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(3): 145–149. [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.]
- [13] Zhao Lei, Li Xiaojun, Lei Da. Problems of rupturing process of overlaying soil due to fault dislocation of bedrock [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(1): 20–25. [赵雷, 李小军, 霍达. 断层错动引发基岩上覆土层破裂问题 [J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(1): 20–25.]
- [14] Dai Shuhong, Ma Shengli, Pan Yishan, et al. Experimental study on rupture of buried reverse fault and its seismogeological significance [J]. Seismology and Geology, 2008, 30(4): 945–956. [代树红, 马胜利, 潘一山, 等. 隐伏逆断层破裂扩展特征的实验研究及其地震地质意义 [J]. 地震地质, 2008, 30(4): 945–956.]
- [15] Li Jianmin, Feng Jian, Jin Dayong, et al. Elementary analysis of typical destroying condition and reason of bridges in

- “5·12” Wenchuan Earthquake area [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control 2008(8): 26–27. [李建民,冯际安,金大勇,等. “5·12”汶川地震灾区桥梁典型损毁情况与原因浅析[J]. 城市道桥与防洪 2008(8): 26–27.]
- [16] Yao Lingkan, Chen Qiang. New research subjects on earthquake resistant techniques of line engineering extracted from “5·12” Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(3): 43–50. [姚令侃,陈强. “5·12”汶川地震对线路工程抗震技术提出的新课题[J]. 四川大学学报: 工程科学版 2009 41(3): 43–50.]
- [17] Huang Yong. The performance of girder bridges in Wenchuan Earthquake and a new method for seismic protection [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(5): 20–26. [黄勇. 汶川地震中梁式桥的震害和预防震害的新方法[J]. 地震工程与工程振动, 2008 28(5): 20–26.]
- [18] Xie Heping, Tai Jiajia, Deng Jianhui, et al. Analysis of damage mechanism of Gaoyuan Bridge in Hongkou [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(3): 51–55. [谢和平,台佳佳,邓建辉,等. 虹口高原大桥的破坏机制分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版 2009 41(3): 51–55.]
- [19] Wong R H C, Chau K T. Crack coalescence in a rock-like material containing two cracks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(2): 147–164.
- [20] Barton N R. A review of the shear strength of filled discontinuities in rock [M]. Norwegian Geotech Inst Publ, 1974.
- [21] Obert L, Duval W I. Rock mechanics and the design of structures in rock [M]. New York: Wiley, 1967: 650.
- [22] Atkinson B K. Fracture mechanics of rock [M]. New York: Elsevier, 1987: 155.
- [23] Farmer I W. Engineering behaviour of rocks [M]. 2nd Ed. London: Chapman & Hall, 1983: 208.
- [24] Goodman R E. Introduction to rock mechanics [M]. 2nd Ed. New York: John Wiley & Sons, 1989: 576.
- [25] Yang Guanghui, Zhao Yunhong, Deng Taiping. Primary study on the geological suitability of using ground source heat pump technology in red ground, Sichuan [R]. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation. [阳光辉,赵云红,邓太平. 四川省红层区运用地源热泵技术的地质适宜性初探[R]. 四川省地质工程勘察院,成都,2008.]
- [26] Wang Weimin, Zhao Lianfeng, Li Juan, et al. Rupture process of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(5): 1403–1410. [王卫民,赵连锋,李娟,等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程 [J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1403–1410.]
- [27] An Meiqi, Ding Lifeng, Wang Haizhong, et al. Research of property and activity of Longmen Mountain fault [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(2): 115–119. [安美其,丁立丰,王海忠,等. 龙门山断裂带的性质和活动性研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(2): 115–119.]
- [28] Ma Shaopeng. Development and application of digital speckle correlation method of failure of failure measurement of rock materials [D]. Baijing: Tsinghua University, 2003. [马少鹏. 数字散斑相关方法在岩石破坏测量中的发展与应用 [D]. 北京: 清华大学 2003.]

(编辑 黄小川)