

黄兴、胡宏玖、王华林等,2015,沂沭断裂带构造区光弹实验与地震危险区判定研究,中国地震,31(3),529~543。

# 沂沭断裂带构造区光弹实验 与地震危险区判定研究

黄兴<sup>1)</sup> 胡宏玖<sup>2)</sup> 王华林<sup>3)</sup> 黄大卫<sup>2)</sup> 王纪强<sup>3)</sup>  
陈平<sup>3)</sup> 胡超<sup>3)</sup> 刘军<sup>3)</sup> 刘红欣<sup>1)</sup>

1) 上海大学理学院力学系,上海市上大路 99 号 200444

2) 上海市应用数学与力学研究所,上海 200072

3) 山东省地震工程研究院,济南 250021

**摘要** 在对沂沭断裂带的地质构造环境、断裂带分布特征进行详细分析的基础上,采用聚碳酸酯材料制成沂沭断裂带构造区域的地质模型,分别运用集中、2 点和均布等加载方式,使用光弹实验方法模拟特定构造框架下应力、应变场的变化特征。通过对光弹实验数据的分析,在对比不同加载方式下应力积累区域和地震危险区的基础上判定沂沭断裂带构造区中的地震危险区域。

**关键词:** 光弹模拟 应力应变场 沂沭断裂带 地震危险区

[文章编号] 1001-4683(2015)03-0529-15 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

沂沭断裂带属于郯庐断裂带,是地震多发断裂带(晁洪太等,1994;方仲景等,1976;李家灵等,1994;林伟凡等,1987;王华林,1995a、1995b;魏光兴等,1993)。对地震多发断裂带的危险区域判定能够有效预防由地震造成的巨大损失。由于地震的发生与地质断裂带的关系十分紧密,因而研究构造地质断裂带的实验手段是必要的,而通过光弹实验的方法能很好地模拟特定区域的地震断裂带分布(陈树珍等,1983;许忠淮等,1979;颜玉定等,2006;殷秀兰等,2007;张兴等,1996)。殷秀兰等(2007)、张兴等(1996)通过光弹实验找到渤中坳陷的地应力区域,陈树珍等(1983)应用光弹实验模拟郯庐断裂构造应力场,这些研究都取得了较好的效果。本文借助光弹实验模拟沂沭断裂带构造区域的地质环境,试图通过对刻有断裂带的光弹模型的应力、应变场的研究,找到沂沭断裂带构造区中的应力、应变累积区域和地震危险区域。

[收稿日期] 2014-05-14; [修订日期] 2014-09-29

[项目类别] 国家科技计划专题项目“郯庐地震断裂带中段地震活动规律及地震危险区判定研究”(2012BAK19B04-01) 资助

[作者简介] 黄兴,男,1971 年生,主要从事实验力学研究。E-mail: hxing01@staff.shu.edu.cn

胡宏玖,通讯作者,男,研究员。E-mail: huhongjiu@shu.edu.cn

## 1 沂沭断裂带地质构造环境

### 1.1 沂沭断裂带地质构造概况

沂沭断裂带是郯庐断裂带中出露清楚、发育最好的一段(陈国星等,1988)。在卫星与航空影像上清晰醒目,实地考察显而易见。因其错断了岩层、岩脉、第四系沉积物、夷平面、阶地、洪积扇、冲沟水系等,所以多处可见白垩系地层逆冲到上更新统或全新统之上。断层的上盘形成断褶隆起的低山、丘陵,呈长条状控制在断层的一侧;断层的下盘一侧为缓倾斜的平原、断层崖,高数米,成为现代地貌的分界线。沂沭断裂带是我国东部一条著名的深大断裂带,断裂带由几条平行的主干断裂及分支断裂构成。断裂带的构造活动十分复杂并且具有明显的分带性和分段性,现代断裂活动和地震活动十分强烈,沂沭断裂带北段发生过公元前 70 年安丘 7 级地震(王华林,1990),中南段发生过 1668 年郯城 8½ 级地震和 6280(±120) BP 至公元前 70 年间的大地震(7~8 级)。

沂沭断裂带新构造活动具有继承性活动的特点,延续了两堑夹一垒(图 1)的构造格局,形成了沂沭断裂谷活动区。受长期构造活动及岩性的控制,沿沂沭断裂带为宽约 40km 的狭长的地貌单元,是本区的主导构造,新构造活动比较强烈,仍继承了前期的构造格局特点,在东、西地堑中分别发育了近 SN 向的沭河和沂河,见有一、二级阶地发育。其东、西两侧块体新构造活动亦有明显的差异,山东陆地范围内西强东弱。郯庐断裂带东地堑内的安丘-莒县断裂是全新世活动断裂,在其中部发现了 1668 年郯城地震断层。沿安丘-莒县断裂形成了马陵山、岭泉、晓店和窑湾等一系列隆起和凹陷,地质调查表明,这些隆起和凹陷形成于晚更新世以来(林伟凡等,1987)。



图 1 沂沭断裂带横剖面结构(据国家地震局地震研究所(1987))

沂沭断裂带是整个郯庐断裂带上出露最好、规模最大、新活动最强烈的地区。沂沭带的主要构造特征如下:

(1)重力图显示为一条宽缓的、走向多扭曲畸变的梯度带;人工地震和大地电磁测深结果表明,断裂切割深度已达莫霍面。

(2)构成鲁东、鲁西 2 大地块的构造结合带,其两侧的基底类型、盖层类型和地球物理特征等均不同。

(3)断裂带第四纪活动强烈,全新世以来断裂以右旋走滑运动为主,沿断裂带多处发现古地震和全新世活动证据。如在莒县-郯城段上,除 1668 年郯城 8½ 级地震外,全新世以来还有 3 次古地震事件,这 3 次古地震事件发震时间间隔约为 3500a。全新世以来断裂的水平、垂直位移速率分别为 2、0.5mm/a。

(4)沂沭断裂带与 NW 走向断裂(燕山-渤海、苍尼、蒙山、益都等断裂)的交汇处,正是重

力梯度带扭曲畸变部位,也是形变特征发生转换和强震发生的部位(王华林等,1988)。

(5)据历史记载,沂沭断裂发生过公元前 70 年安丘 7 级地震、1668 年郯城 8½ 级地震和 6280(±120)BP 至公元前 70 年间大地震(7~8 级),具有地震活动频度低、强度大的特点。

(6)流动重力、地磁、形变资料表明,沂沭断裂带近期活动较弱,具有蠕动特点。极微震、小震的应力降和  $Q$  值的研究表明,沂沭断裂带中、南段应力集中不明显,北段小震稀少并形成活动空区。

## 1.2 沂沭断裂带断裂构造活动特征

研究区地处华北地震区,区内 NE 向沂沭断裂带是区域的主体构造,构造活动强烈,构成了强震活动构造带。NNE 向沂沭断裂带构成了区域的主体构造,鲁西断块区内发育 NW 向、NE 向和 NNE 向等断裂,鲁东断块区内发育一系列 NNE-NE 向断裂,这些断裂相互交汇(图 2),构成了沂沭断裂带的基本断裂构造格架。这些断裂的切割深度和活动强度存在明显差异(陈国星等,1988;王华林,1995b;孙洁等,1988;张碧秀等,1988),控制着沂沭断裂带及其两侧的地震活动。沂沭断裂带主要断裂的特征见表 1。

## 1.3 沂沭断裂带地震活动特征

沂沭断裂带历史地震、现代地震活动具有频度低、强度大的特点。空间分布具有继承性、集群、空段和条带等特征。其中,继承性表现在小震分布与沂沭断裂带的中强地震分布区非常一致,构成了 NNE 向、NW 向的地震条带,地震集群分布主要表现为郯城 8½ 级地震震中周围中小地震的密集分布。

沂沭断裂带  $M_s \geq 4.7$  地震震中分布图(图 3)显示,公元前 70~2013 年 6 月,区域范围内共记录到破坏性地震 26 次,其中 4.7~4.9 级 7 次、5.0~5.9 级 15 次、6.0~6.9 级 2 次、7.0~7.9 级 1 次、8.0~8.9 级 1 次。分析认为,研究区内中、强地震活动的空间分布是不均匀的,主要表现为集群、条带的分布特征;地震活动受 NNE 向沂沭断裂和几条 NW 向活动断裂的控制,表现为条带分布。8.0~8.9 级地震即 1668 年山东郯城 8.5 级地震,震中位于安丘-莒县断裂南段;7.0~7.9 级地震即公元前 70 年山东安丘 7 级地震,震中位于安丘-莒县断裂的北段;2 次 6.0~6.9 级地震,1 次为 1672 年山东莒县 6 级地震,震中位于安丘-莒县断裂的中段,另 1 次为 1829 年山东临朐 6¼ 级地震,震中位于双山-李家庄断裂和益都断裂的交汇处;15 次 5.0~5.9 级地震,主要分布在 NE 向郯庐断裂带和几条 NW 向活动断裂带附近;7 次 4.7~4.9 级地震,主要分布在 NE 向断层附近。分析认为,区域 6 级以上地震都位于晚更新世断裂附近,主要表现为集群分布,其中,3 次位于全新世活动断层安丘-莒县断裂附近,1 次位于双山-李家庄断裂和益都断裂的交汇处。沂沭断裂带  $M_s \geq 4.7$  地震在沂沭断裂带东、西两侧表现为西强、东弱之特点。

沂沭断裂带现代地震中  $M_s \geq 4.7$  地震震中分布图(图 3)和现代地震统计资料显示,1970~2013 年 6 月,区域范围内有地震台网观测到的  $2.0 \leq M_L \leq 5.9$  地震 998 次,其中 2.0~2.9 级 878 次、3.0~3.9 级 106 次、4.0~4.6 级 13 次、5.0~5.9 级 1 次。分析认为,这些地震受断裂控制明显,主要沿新构造活动强烈的断裂带密集分布,并在 NE 向活动断裂附近丛集分布;海域地震主要沿着串场河断裂和响水河断裂附近丛集分布,沂沭断裂带西侧地震受几条 NW 向晚更新世以来断层控制明显,沿 NW 向断层周围丛集分布;3 级以上地震都分布在这些晚更新世以来断层附近,受 NW 向断裂控制。

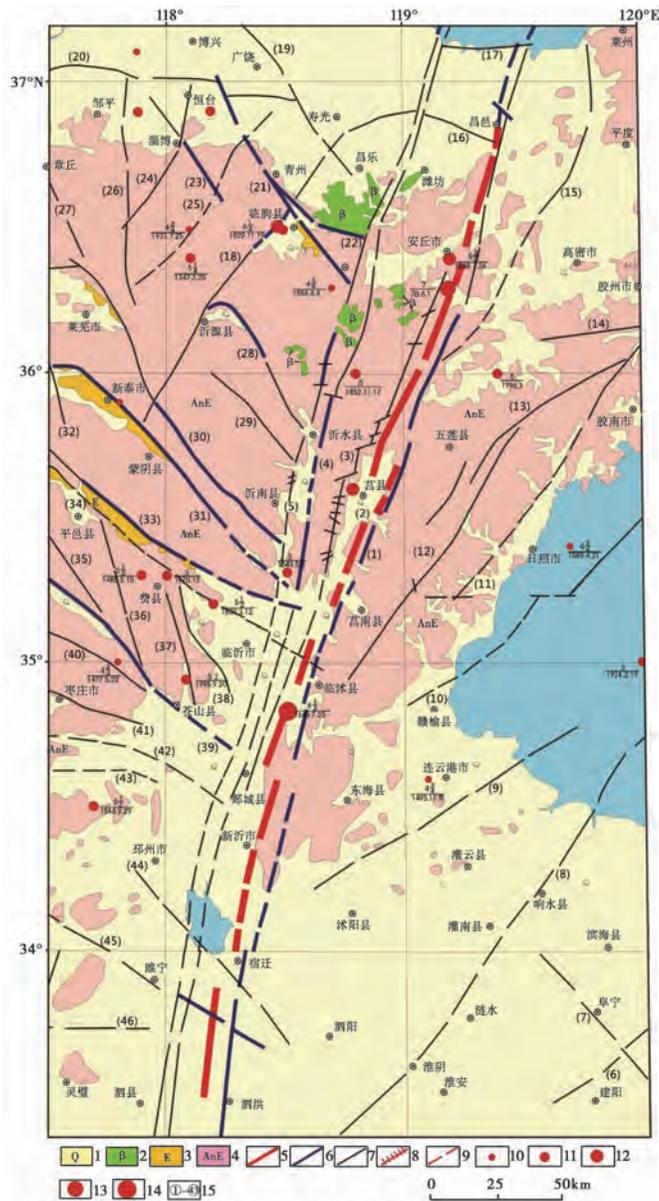


图2 沂沭断裂带区域地震构造

1. 第四系; 2. 新生代玄武岩; 3. 下第三系; 4. 前第三系; 5. 全新世活断层; 6. 晚更新世活断层; 7. 早、中更新世活动断层和前第四纪断裂; 8. 1668年郟城地震发震断层; 9. 隐伏断层; 10. 地震  $M=4.0\sim 4.9$ ; 11. 地震  $M=5.0\sim 5.9$ ; 12. 地震  $M=6.0\sim 6.9$ ; 13. 地震  $M=7.0\sim 7.9$ ; 14. 地震  $M=8.0\sim 8.9$ ; 15. 断层编号: (1) 昌邑-大店断裂; (2) 安丘-莒县断裂; (3) 白芬子-浮来山断裂; (4) 沂水-汤头断裂; (5) 郟部-葛沟断裂; (6) 洪泽-沟墩断裂; (7) 串场河断裂; (8) 响水河断裂; (9) 郟店-桑墟断裂; (10) 千里岩断裂; (11) 日照-胶南断裂; (12) 相邸-高阁庄断裂; (13) 山相家-郝戈庄断裂; (14) 百尺河断裂; (15) 景芝断裂; (16) 固堤断裂; (17) 淮北断裂; (18) 上五井断裂; (19) 昌乐-广饶断裂; (20) 广饶-齐河断裂; (21) 双山-李家庄断裂; (22) 益都断裂; (23) 张店-仁河断裂; (24) 王母山断裂; (25) 淄河断裂; (26) 禹王山断裂; (27) 文祖断裂; (28) 沂源-沂水断裂; (29) 马牧池-铜冶店断裂; (30) 铜冶店-孙祖断裂; (31) 新泰-蒙阴断裂; (32) 羊流店断裂; (33) 蒙山前断裂; (34) 汶泗断裂; (35) 独角-梁丘断裂; (36) 铜石-甘霖断裂; (37) 苍山断裂; (38) 万家庄断裂; (39) 苍尼断裂; (40) 鬼山断裂; (41) 陶枣断裂; (42) 韩台断裂; (43) 台儿庄断裂; (44) 无锡-宿迁断裂; (45) 废黄河断裂; (46) 宿县断裂

表 1 沂沭断裂带主要断裂特征一览表

编号	断裂名称	断裂基本特征				最新活动		
		长度/km	走向/(°)	倾向	倾角/(°)	运动性质	最新活动时代	地震活动
1	昌邑-大店断裂	>360	10~25	NW	70~80	正右走滑	Q <sub>3</sub>	
2	安丘-莒县断裂	360	10~25	NW/SE	25~80	右走滑/倾滑	Q <sub>4</sub>	公元前 70 年 7 级地震, 1668 年 8½ 级地震
3	白芬子-浮来山断裂	240	10~25	NW/SE	25~80	正断层	Q <sub>前</sub>	
4	沂水-汤头断裂	360	10~25	NW	70~80	正右走滑	Q <sub>3</sub>	
5	郯部-葛沟断裂	360	NNE	SE	70~80	正右走滑	Q <sub>3</sub>	
6	洪泽-沟墩断裂	120	NE	SE/NW	70~80	右旋走滑	Q <sub>1-2</sub>	
7	串场河断裂	60	NW	SW	70~80	正断	Q <sub>1-2</sub>	
8	响水河断裂	205	NE	SE	>60		Q <sub>2</sub>	
9	邵店-桑墟断裂	120	NE	SE/NW	60~80	右旋走滑	Q <sub>1-2</sub>	
10	千里岩断裂	360	NE	SE/NW	80±	右旋走滑	Q <sub>3</sub>	
11	日照-胶南断裂	50	NE	SE	65~75	右旋正	Q <sub>2</sub>	
12	相邸-高阁庄断裂	110	35~40	NW	80		Q <sub>前</sub>	
13	山相家-郝戈庄断裂	80	65	NW	>65		Q <sub>2</sub>	
14	百尺河断裂	70	85	S	70~74		Q <sub>1-2</sub>	
15	景芝断裂	60	NE	NW	60~80	正断	Q <sub>1</sub>	
16	固堤断裂	35	NW	NE	40~70	正断	Q <sub>1-2</sub>	
17	淮北断裂	55	EW	N		正断	Q <sub>1-2</sub>	
18	上五井断裂	150	40~50	SE	70~80	正断兼右走滑	Q <sub>3</sub>	1829 年 6¼ 级地震
19	昌乐-广饶断裂	75	NW	SW	70	正断	Q <sub>1-2</sub>	
20	广饶-齐河断裂	170	65~80	NNW	60	正断	Q <sub>1-2</sub>	
21	双山-李家庄断裂	90	320~340	NW/SE	70~80	倾滑、左走滑	Q <sub>3</sub>	1829 年 6¼ 级地震
22	益都断裂	50	320~340	NE/SW	70~80	倾滑左走滑	Q <sub>3</sub>	
23	张店-仁河断裂	60	320~340	SW	50~60	正断	Q <sub>3</sub>	5 级地震
24	王母山断裂	65	20	NW	65~85	正断	Q <sub>1-2</sub>	
25	淄河断裂	80	18	108	78	正断	Q <sub>2</sub>	5 级地震
26	禹王山断裂	70	5	95	40	正断	Q <sub>2</sub>	
27	文祖断裂	130	NNW	W	65~75	正断	Q <sub>2</sub>	
28	沂源-沂水断裂	60	310~320	SW	60~80	正断左走滑	Q <sub>3</sub>	
29	马牧池-铜冶店断裂	45	NW	SW	60~80	正断	Q <sub>前</sub>	
30	铜冶店-孙祖断裂	120	290~325	SW	60~80	正断左走滑	Q <sub>3</sub>	
31	新泰-蒙阴断裂	110	315~320	SW	60~80	正断左走滑	Q <sub>3末</sub>	1831 年 4¾ 级地震
32	羊流店断裂	70	350	60~80	SE	正断	Q <sub>2</sub>	

续表 1

编号	断裂名称	断裂基本特征					最新活动	
		长度/km	走向/(°)	倾向	倾角/(°)	运动性质	最新活动时代	地震活动
33	蒙山山前断裂	120	270~320	SW	45~85	正断左走滑	Q <sub>3末</sub>	1485年 5½级地震
34	汶泗断裂	300	300~320	SW	75	正断	Q <sub>1</sub>	
35	独角-梁丘断裂	66	340	SW	70~80	正断	Q <sub>前</sub>	
36	铜石-甘霖断裂	60	345	NE	60~85	正断	Q <sub>2</sub>	
37	苍山断裂	45	SN	W	60~80	正断	Q <sub>1-2</sub>	
38	万家庄断裂	45	330~350	SW	60~80	正断	Q <sub>2</sub>	
39	苍尼断裂	170	NW	SW	70~83	左旋正断	Q <sub>3</sub>	5.2级地震
40	鳧山断裂	120	NWW	S	70~80	正断	Q <sub>3</sub>	462年 6½级地震
41	陶枣断裂	70	EW	S	70~75	正断	Q <sub>前</sub>	
42	韩台断裂	80	EW	S	70~80	正断	Q <sub>2</sub>	
43	台儿庄断裂	40	EW	S	70~80	正断	Q <sub>2</sub>	
44	无锡-宿迁断裂	100	NW	SW	70~80	正断	Q <sub>1-2</sub>	M <sub>s</sub> 6.0地震
45	废黄河断裂	120	NW	SW	70~83	左旋正断	Q <sub>3</sub>	
46	宿县断裂	30	EW	N	60~80	正断	Q <sub>1-2</sub>	

#### 1.4 沂沭断裂带断裂与强震活动的关系

根据前人区域断裂和地震活动特征的研究结果,将区域断裂与强震活动的关系归纳如下:

(1)断裂的成带、分段和衰减等特征(王华林等 1995)决定了强震活动的成带、分段和衰减特征。NW 向益都断裂带活动强度由 SE 向 NW 衰减,决定了地震震级由 7.0 级向 6.0、5.5 和 5.0 级过渡。沂沭断裂带强、弱交替的分段活动,决定了 6、7 级地震和 5 级地震的分段差异活动。沂沭断裂带东、西分带,决定了沂沭断裂带东、西地堑地震活动的差异性。

(2)壳幔结构的横向不均匀性,如上地幔隆起、重力、航磁、电性、形变梯度、扭曲带以及高速体与低速体互层,是深大断裂强烈活动作用的结果,它们构成了 7 级以上强震活动的深部构造条件。可见活动的深大断裂与 7 级地震活动之间存在内在的成因上的联系。如郯城 8.5 级地震区均为上地幔隆起区,存在明显的速度结构和电性结构的不均匀性(张碧秀等, 1988)。公元前 70 年安丘 7 级地震发生在 NNE 向重力、航磁和形变梯度向 NW 扭曲畸变带上。6280(±120)BP 至公元前 70 年间大地震(7~8 级)区具有与郯城 8.5 级地震区相似的壳幔结构的横向不均匀性。

(3)第四纪晚期,尤其是全新世活动的交汇断裂构成了沂沭断裂带 6 级以上地震发震构造。研究表明,本区所有 7 级以上地震的发震构造均为 NNE 断裂与 NWW 断裂以及 NE 断裂与 NW 断裂交汇构造,大部分的 6 级、5 级以上地震的发震构造亦以不同方向断层的相互交汇为特征。简单的单一方向的断层往往第四纪晚期以来活动较弱,对本区的 6 级以上地震无控制作用。



(4) NNE、NE、NW 和 NWW 向断层为区域范围内的主要活动断层,它决定了本区所有 6 级以上地震的发生。其中,有些是共轭交汇发震断层,如公元前 70 年间的安丘 7 级地震和郯城 8.5 级地震。有些是深大断裂为控震断裂,而与之交汇的次级断层为发震断层,如公元前 70 年安丘 7 级地震。

## 2 光弹实验

光弹性实验方法是将全息照相和光弹性法相结合而发展起来的一种实验应力分析方法。利用光弹性法可以研究几何形状和载荷条件都比较复杂的工程构件的应力分布状态,特别是应力集中的区域问题(黄庆华等,1989)。由于光弹性实验的全场性和直观性,所以可将其应用于构造模拟地质模型的应力场,并能够解决许多实际问题。

### 2.1 实验原理

依据光的波动理论可知,由光源发出的光经过偏振片 P 成为平面偏振光,平面偏振光在应力作用下透过由光敏性材料制成的模型后产生双折射,使光沿着 2 个主应力方向分解为 2 个折射路径不同的平面偏振光,其传播速度不同而产生光程差  $\delta$ ,当检偏镜 A 的振动轴与起偏镜 P 的振动轴正交时,光通过 A 后就变成了与 A 镜振动轴平行的平面振动波,并产生光干涉现象(图 4)。

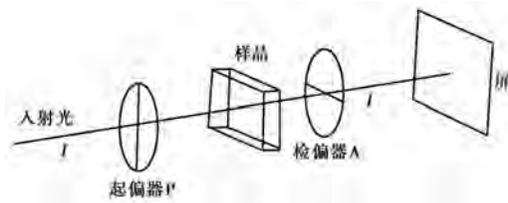


图 4 光弹实验原理

根据二维应力光学定律

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{nf}{t} \quad (1)$$

式中,  $f$  为材料的条纹常数 ( $\text{kg}/(\text{cm} \cdot \text{条})$ );  $t$  为试件厚度;  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  为第 1、2 主应力;  $n$  为等色条纹的级数。当试验试样制成以后,  $t$  和  $f$  为可被测得的常数,而最大剪应力  $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$  与等色条纹级数  $n$  成正比。因此,光弹实验的等色线条纹图案能够直接地反映最大剪应力或差应力的分布。

### 2.2 实验仪器与模型制作

本研究采用 409-II 型光弹仪。由于聚碳酸酯(PC)具有良好的双折射性质且易加工,所以使用新型的 PC 工程塑料作为基体。按照地质坳陷裂纹的

纹路对 PC 薄板进行机械加工雕刻,制作环氧树脂的渤海强震构造区地质坳陷裂纹的纹路地质模型。该模型尺寸及其与实际地质体的比例见表 2。

表 2 渤海强震构造区地质坳陷裂纹的纹路地质模型

试件厚度 /mm	裂纹深度 /mm	裂纹宽度 /mm	试件 相似性	比例
5	2	1	313.09km×282.80km~ 118.0mm×106.5mm	1:2.65×10 <sup>6</sup>

### 2.3 光弹实验结果分析

依据相似性原理,选取沂沭断裂带构造区域为目标实验区域。由山东省地震工程研究院的构造活动调查(王华林等,1988、1995;王华林,1995a、1995b)研究以及现今的实地研究数据可知,沂沭断裂带构造区域主要受挤压作用,而挤压作用的实际情况不清楚。因此,实验中采用3种加载方式:①EW向均布加载;②东向单点加载,西向均布加载;③东向2点加载,西向均布加载。

为了体现挤压强度对沂沭断裂带构造区域的影响,实验中对模型施加不同的压力。其中,EW向均布加载压力分别选取5、7、9、11、13、15kg;东向单点加载,西向均布加载的压力分别选取5、7kg;东向2点加载,西向均布加载的压力分别选取5、7kg。

通过对实验数据的处理获得沂沭断裂带构造区域的等色条纹分布图像。将此等色条纹分布图像与原地质研究区域进行叠加。对叠加后的图像进行分析,找到应力累积区域与地质断裂带之间的关系,如图5~7所示。图5~7中的数字区域1、2、3(数字3为红色)分别表示光弹模型上的等色条纹级数数值,其中等色条纹级数为3的区域即是剪应力最大的区域,即地震危险区域。

图5给出了模型分别承受9、13、15kg载荷时应力累积区域与地质断裂带的分布图。随着载荷的增加,可以看到应力累积区域逐步发育的过程。由图5(a)可知,在9kgEW向均布加载的条件下,出现了小型3级等色条纹区域。3级等色条纹区域主要集中在昌邑-大店断裂与安丘-莒县断裂的南段附近(郯城县北部的两堑夹一垒区域相对于断裂带呈中心对称分布)以及新泰-蒙阴断裂、蒙山山前断裂、苍尼断裂的东南部断裂尖端。当EW向均布加载载荷增加至13kg(图5(b))时,在更多的区域出现了3级等色条纹区域。值得注意的是,南部断裂带的3级等色条纹区域减少,而北部区域出现3级等色条纹区域,并且相对于断裂带具有明显的局部对称性。出现3级等色条纹的区域有:昌邑-大店断裂南段的东侧和安丘-莒县断裂南段的西侧;沂水-汤头断裂中段的东南侧、西南侧、东北侧与西北侧;沂水-汤头断裂北部尖端的东侧与西侧;沂源-沂水断裂的东南部尖端区域;双山-李家庄断裂与益都断裂相夹区域;安丘-莒县断裂北段的东侧与西侧。当EW向均布加载载荷增至15kg(图5(c))时,研究区的南、中、北部区域都出现了大量的3级等色条纹区域,其中昌邑-大店断裂的全段东侧与安丘-莒县断裂全段西侧的3级等色条纹区域几乎成对出现。由于西侧裂纹的复杂性增加了该区域应力分布的复杂性,此处3级等色条纹区域相对分散。而在安丘-莒县断裂全段西侧的3级等色条纹区域分布大致相对于沂水-汤头断裂呈东西对称。受沂源-沂水断裂的影响,沂源-沂水断裂东南端的3级等色条纹区域面积非常大。与加载载荷为13kg相比,加载载荷15kg的3级等色条纹区域发展迅速。

由于渤海强震构造区域受挤压作用的实际情况不清楚,所以为了更好地反映地震发生时可能存在的实际情况,本文采取了另外2种典型的加载方式进行比较。图6为不同载荷下东向单点加载(单点加载区域为 $35^{\circ}\sim 35.7^{\circ}\text{N}$ )以及西向均布加载的光弹等色条纹图,其中由于单点加载的特性使得在加载点附近等色条纹级数有所增加。由图6(a)可知,在5kg的东向单点加载、西向均布加载载荷作用下,3级等色条纹区域主要出现在昌邑-大店断裂中段东侧,而在沂源-沂水断裂东南末端与苍尼断裂东南末端也出现了3级等色条纹区域。由图6(b)可知,当东向单点加载、西向均布加载载荷增至7kg时,3级等色条纹区域出现了由









### 3 结论

(1) 沂沭断裂带对 EW 向的应力起到了有效的阻隔作用,但是东部边界在不同的加载方式及载荷下,沂沭断裂带出现呈东西对称的高应力区域。而在沂沭断裂带西部即双山-李家庄、张店-仁河和沂源-沂水等断裂附近也出现了不同大小的高应力孕育区域。

(2) 将光弹实验结果与地震活动分布进行对比后发现,在全新世和晚更新世活动断裂尤其是不同方向断裂的交汇处,往往是 6 级,尤其是 7~8 级地震发生的地点,而这些区域也是光弹实验应力、应变集中的区域。

(3) 将分析结果中的地震危险区在断裂带分布图上标出,并用不同颜色区别于不同加载条件下得到的地震危险区。其中,沂水县北部与南部、沂南县南部、安丘市东南部与西南部和东海县西部都处于 2 种甚至 3 种加载条件下的地震危险区。

本研究结果为沂沭断裂带的地震危险区判定提供了实验依据,对沂沭断裂带的地震预测研究和震情跟踪等工作具有实际意义。

### 参考文献

- 晁洪太、李家灵、崔昭文等,1994,郯庐断裂带中段全新世活断层的几何结构与分段,见:国家地震局地质研究所,活动断裂研究(3),180~190,北京:地震出版社。
- 陈国星、高维明,1988,沂沭断裂带现代活动特征及其与强震构造的关系,中国地震,4(3),130~135。
- 陈树珍、梅家福、赵晔英,1983,郯庐断裂中中段应力场的全息光弹模拟实验,地震学报,5(1),108~115。
- 方仲景、计凤桔、向宏发等,1976,郯庐带中段第四纪断裂活动特征与地震地质条件述评,地质科学,(4),354~365。
- 国家地震局地质研究所,1987,郯庐断裂带,北京:地震出版社。
- 黄庆华、李永贤、王砚庆,1989,青藏高原地区应力场的光弹性模拟分析及地震危险区的探讨,地质力学研究所所刊,12,145~157。
- 李家灵、晁洪太、崔昭文等,1994,1668 年郯城 8.5 级地震断层及其破裂机制,地震地质,16(3),230~237。
- 林伟凡、高维明,1987,沂沭断裂带大震复发周期,中国地震,3(3),34~39。
- 孙洁、徐常芳、王钊,1988,鲁南地区大地电磁测深结果,中国地震,4(3),30~37。
- 王华林,1990,公元前 70 年诸城-昌乐地震发震构造的初步研究,地震学刊,(3),100~103。
- 王华林,1995a,1668 年郯城 8.5 级地震断裂的全新世滑动速率、古地震和强震复发周期,西北地震学报,17(4):1~12。
- 王华林,1995b,山东青州地震研究与地震区划,北京:地震出版社。
- 王华林、贾占岭、苏孟如,1988,鲁南地区活断层近期动态观测与分析,中国地震,4(3),136~142。
- 王华林、王健、张玲,1995,山东断裂活动的时空非均匀性研究,见:王华林,山东青州地震研究与地震区划,21~26,北京:地震出版社。
- 魏光兴、刁守中、周翠英,1993,郯庐带地震活动性研究,北京:地震出版社。
- 许忠淮、刘玉芬、张郢珍,1979,京、津、唐、张地区地震应力场的方向特征,地震学报,1(2),121~132。
- 颜玉定、李亚林、刘特培,2006,广东省及邻区活动断裂的实验研究,华南地震,26(4),14~25。
- 殷秀兰、马寅生、张西娟,2007,渤中拗陷中部地区构造应力场光弹模拟实验研究,中国地质,34(6),1123~1129。
- 张碧秀、汤永安,1988,沂沭断裂带地壳结构特征,中国地震,4(3),16~22。
- 张兴、马寅生,1996,黄骅拗陷构造应力场演化光弹模拟实验,石油勘探与开发,23(1),21~24。

## Photoelastic experimental simulation on Yishu fault zone and earthquake risk zone judgment

*Huang Xing*<sup>1)</sup> *Hu Hongjiu*<sup>2)</sup> *Wang Hualin*<sup>3)</sup> *Huang Dawei*<sup>2)</sup> *Wang Jiqiang*<sup>3)</sup>  
*Chen Ping*<sup>3)</sup> *Hu Chao*<sup>3)</sup> *Liu Jun*<sup>3)</sup> *Liu Hongxin*<sup>1)</sup>

1) Department of Mechanics, College of Sciences, Shanghai University, Shanghai 200444, China

2) Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China

3) Shandong Institute of Earthquake Engineering, Jinan Shandong 250021, China

**Abstract** Based on the detailed analysis on geological environment and fault zone distribution in the Yishu fault zone, the Yishu fault zone geological model is made of polycarbonate material. To simulate the specific structural framework of stress and strain fields, we used uniformed, concentrated and two-point loadings in photoelastic experiments. The seismic risk area in the Yishu fault zone is judged through photoelastic experimental data analysis and processing, which is based on the comparison of stress accumulation area and seismic hazard points in different loading ways.

**Key words:** Photoelastic simulation Stress and strain field Yishu fault zone  
Earthquake risk zone