

文章编号:1000-582X(2011)06-069-06

## 薄层胶体受剪应力-应变关系的测试方法

全学友<sup>1a,1b</sup>,王仁燕<sup>1a</sup>,刘连杰<sup>1a</sup>,马松<sup>2</sup>,黄音<sup>1a,1b</sup>,严勇<sup>3</sup>

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;  
2. 重庆市设计院, 重庆 400015; 3. 中国中铁八局集团第一工程有限公司, 重庆 400050)

**摘要:**文中采用组合圆盘粘结试件,对胶层端部引入圆弧面构造并对钢质基体进行倒角处理,能够在胶层中形成均匀系数高达0.97以上的剪应力分布,并将粘结面上的正拉应力控制在很低的水平。利用INSTRON单轴伺服试验机高精度的内置位移测试系统,将系统变形从总变形中予以剔除,从而获得胶层竖向变形,并最终换算成胶层的剪切变形和剪应变。采用样品胶体进行的组合圆盘剪切试验表明,粘结件以胶层剪切破坏为特征,随后胶体与金属基体脱层,因此组合圆盘试验方法能够反映材料受剪性能,强度测试值可作为材料强度条件使用,受剪应力-应变本构关系可在粘结构件承载力计算分析中应用。组合圆盘试验方法较为简单,适合在具有位移控制功能的伺服试验机系统的实验室采用。

**关键词:**组合圆盘粘结试件;薄层胶体;受剪应力-应变关系;位移控制伺服系统

**中图分类号:**TU365

**文献标志码:**A

## Method for measuring shear stress-strain relationship of thin adhesive layer

QUAN Xue-you<sup>1a,1b</sup>, WANG Ren-yan<sup>1a</sup>, LIU Lian-jie<sup>1a</sup>, MA Song<sup>2</sup>, HUANG Yin<sup>1a,1b</sup>, YAN Yong<sup>3</sup>

(1a. College of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;  
2. Chongqing Architectural Design Institute, Chongqing 400015, P. R. China;  
3. No. 1 Engineering Ltd of China Railway Eight Civil Group, Chongqing 400050, P. R. China)

**Abstract:** This paper uses the combined bonding disc specimen, with a round end surfaces at both ends of the longitudinal adhesive joint and chamfered steel substrates hither, forms a shear stress distribution of uniform coefficient more than 0.97 and controls the normal tension stress along the bonding surfaces to a very low level. By means of the built-in high accuracy displacement measuring system of uniaxial INSTRON servo equipment, it eliminates the measuring system deformation from the measured total deformation, and then obtains the shear deformation of the joint, and eventually converts into the shear strain of the adhesive joint. The results of experiments using adhesive samples show that the bonding disc specimens are characterized by shear failure of the adhesive joint layers, so it can be thought that the method of combined bonding disc specimens can reveal the right shear properties of adhesives. The measured shear strength can be used as material strength criterion and the measured shear stress-strain relationship can be used in the load capacity analysis of bonded structural members. Because of the simplicity, the combined bonding disc specimen test method is suitable to be adopted in laboratories

**收稿日期:**2010-12-14

**基金项目:**重庆市自然科学基金资助项目(CSTC,2008BB6181);重庆市建设科技计划项目(城科字2009第(68)号);重庆市交委科技计划项目(200917)

**作者简介:**全学友(1963-),男,重庆大学副教授,主要从事结构工程加固与改造研究,(E-mail)quanxueyou@163.com。

having displacement-controlled servo systems.

**Key words:** combined bonding disc specimen; thin layer of adhesive; shear stress-strain relationship; displacement-controlled servo system.

薄层胶体是加固用钢板或加固用碳纤维片材与基层结构之间的传力媒介。在构件层次上,通常假定加固材料(钢板或碳纤维片材)与被加固构件之间能够协同工作,直至达到由材料强度确定的构件极限承载能力<sup>[1]</sup>。但实际上在裂缝两侧以及加固材料端部区域,容易产生剥离破坏,造成破坏荷载可能远低于前述极限承载能力<sup>[2-5]</sup>。

为了确保加固效果,避免或推迟胶层剥离破坏,必须研究加固构件中薄层胶体的应力状态。卢亦焱<sup>[6]</sup>、杨勇新<sup>[7]</sup>进行了碳纤维布粘贴在钢板上的拉剪试验,并分别推导了有效粘结长度和粘结应力计算方法;A. Benachour<sup>[8]</sup>等对采用预应力 FRP 加固钢梁的粘结应力进行了理论推导,Joan<sup>[9]</sup>等则推导了钢筋混凝土梁裂缝间的粘结应力计算方法。前述研究工作均在胶层为弹性材料的假定下完成的。

胶层主要承担剪力作用,但直接对胶层受剪应力-应变关系进行的试验研究却很少。单层薄层金属片搭接接头试验方法<sup>[10-11]</sup>采用拉剪受力的方式对薄层胶体进行剪切试验,由于接头区剪应力分布不均匀,且存在很高的正拉应力,破坏通常由正拉应力引起,因此强度测试值只能作为材料质量的表征,并不代表胶层真实抗剪强度<sup>[12]</sup>,并且该方法不能测试胶层的剪切变形。ASTM 标准试验方法<sup>[13]</sup>采用厚层金属搭接接头进行胶层的剪切性能试验,并认为粘结区域剪应力分布较为均匀,测试结果可作为胶体与金属基体之间的粘结剪切强度使用;该方法利用专门的位移测试系统可以获得胶体受剪应力-应变关系。J. Y. Cognard<sup>[14]</sup>与 P. Davies<sup>[15]</sup>利用改进的 Arcan 圆盘试验装置对胶层粘结剪切强度和剪拉、剪压复合强度进行测试,并通过精细的有限元分析证明胶层中的剪应力分布较均匀;利用专用的数码相机系统对胶层的变形图像进行处理,可以获得胶体在纯剪及复合应力状态下的应力-应变关系。

文中提出的薄层胶体组合圆盘试验方法,采用完全相同的试件形式,既可进行纯剪试验,也可进行剪压复合试验;可以在胶层及粘结面上形成均匀系数高达 0.97 的剪应力分布状态,并将粘结面上的拉应力降低到明显低于受拉破坏的水平;薄层胶体变形十分

难以测量,利用 INSTRON 伺服试验机的高精度内置位移测试系统,通过消除测试系统变形,方便地实现了胶层变形的测量,获得胶层在纯剪或剪压复合受力状态下的受剪应力-应变关系。

## 1 组合圆盘粘结件胶层应力分布

参考 ASTM 标准试验方法<sup>[13]</sup>关于厚层金属搭接接头粘结件在胶层中能形成较为均匀的剪应力分布的观点,笔者设计了图 1 所示的组合圆盘粘结件。组合圆盘粘结件试验方法不仅可以测试胶层在纯剪状态的强度,还可以测试胶层的剪压复合强度。组合钢质圆盘采用线切割技术加工,在直径线上形成胶缝。胶缝宽度按 1.3 mm 设计,胶缝长度 30 mm。为了方便控制胶缝长度,在胶缝两端专门设置了圆孔构造。制作试件时在圆孔内安装表面有油脂涂层的塑料棍或蜡纸卷,胶体固化后抽出塑料棍或纸卷,可在胶层端面形成圆弧面并准确控制胶层长度。

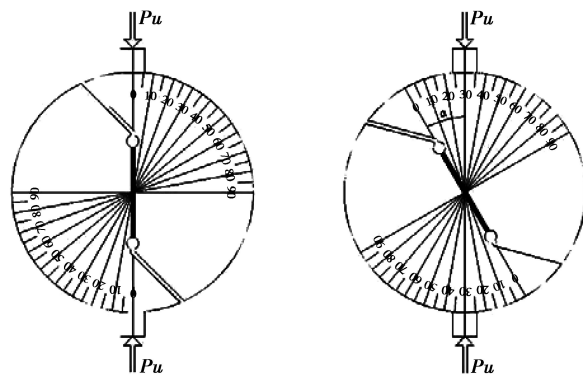


图 1 胶层受剪性能测试的组合圆盘

试验时将垫条宽度中心刻度线与组合圆盘上的角度刻度线对齐,可保证压力线通过组合圆盘中心(即胶层长度中心)。如果定义  $\alpha$  为压力线与胶层长度中心线之间的夹角,则当  $\alpha=0$  时可对胶层进行纯剪强度试验;当  $0<\alpha<90^\circ$  时可对胶层进行剪压复合强度试验。假定组合圆盘粘结试件的破坏压力测试值为  $P_u$ ,则粘结面上的平均正压应力  $\sigma_n$  和与之对应的粘结剪切强度  $\tau_u$  如式(1)所示

$$\sigma_n = P_u \sin\alpha / A, \quad (1)$$

$$\tau_u = P_u \cos\alpha / A, \quad (2)$$

式中,  $A$  为粘结面积。

为了验证组合圆盘粘结构件胶层剪应力分布的均匀性,采用 ANSYS 有限元通用程序按弹性平面问题对组合圆盘进行了精细有限元分析。此处所谓精细有限元,指胶层单元尺度很小。参考文献[15]的建议,胶层单元厚度方向的最小尺寸为 0.001 mm,胶层长度方向尺寸不超过单元厚度尺寸的 10 倍。材料性能参数取值为:钢质圆盘弹性模量  $2.0 \times 10^5$  MPa,泊松比 0.2;胶体弹性模量 2 500 MPa,泊松比 0.2。不论纯剪受力状态还是剪压复合受力状态,外加荷载均按在粘结面上形成的平均剪应力为 14.0 MPa 计算。

计算分析表明,不论是纯剪受力状态还是剪压复合受力状态,胶层剪应力基本呈对称分布,且相当均匀,分布特征如图 2 所示。为了描述胶层剪应力分布的均匀性,引入剪应力均匀系数  $k_e$ ,其定义为沿胶层全长,低于平均剪应力的实际剪应力分布面积与平均剪应力分布面积之比;同时引入剪应力集中系数  $k_s$ ,其定义为峰值剪应力与平均剪应力之比,即

$$k_e = \frac{S_{\text{shadow}}}{S_{\text{ABCD}}}, \quad (3)$$

$$k_s = \frac{S_{\text{max}}}{S_e}. \quad (4)$$

取定胶层端面圆孔直径为 4.0 mm 和 2.5 mm 进行计算,不论胶层中心平面还是粘结面,剪应力均匀系数均能达到 0.97 以上,剪应力集中系数均能达到 1.20 以下,可见组合圆盘粘结构件胶层平均剪应力能够代表胶层实际剪应力分布。

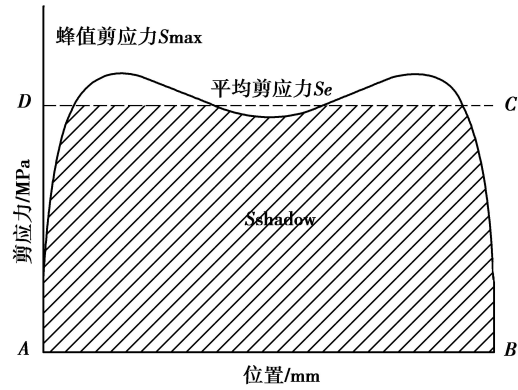


图 2 胶层剪应力分布特征参考图

纯剪受力状态下,胶层厚度中面存在对称分布的正应力,且拉应力和压应力的绝对值均很小;粘结面上的正应力呈反对称分布,最大应力发生在端部。当端面圆孔直径为 4.0 mm 时,最大正拉应力为 40.80 MPa;当端面圆孔直径为 2.5 mm 时,最大正拉应力为 22.90 MPa。笔者尝试在胶层端部的钢质基体上按图 3 所示的方式进行倒角处理,发现可以进一步降低粘结面上的正拉应力,例如当胶层端部圆弧面直径为 2.5 mm 且按图 3 方式倒角处理时,粘结面上的最大正拉应力降低至 17.02 MPa。剪压复合受力状态下,胶层或粘结面上的正拉应力进一步降低。表 1 为不同胶层端面边界条件下胶层厚度中面和粘结面上的应力分布特征。

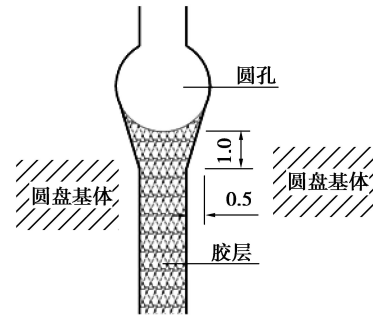


图 3 胶层端部圆盘基体倒角大样

表 1 不同端部边界条件下胶层应力分布特性

胶层端部条件	端面圆孔直径				
	4.0 mm(纯剪)	2.5 mm(纯剪)	2.5 mm+倒角(纯剪)	2.5 mm+倒角+30°(剪压)	
剪应力均匀系数 $k_e$	厚度中面	0.98	0.98	0.98	0.97
	结合面	0.98	0.98	0.97	0.97
剪应力集中系数 $k_s$	厚度中面	1.09	1.11	1.07	1.07
	结合面	1.19	1.07	1.15	1.16
最大拉应力/MPa	厚度中面	0.61	0.80	0.67	-7.20
	结合面	40.80	22.90	17.02	11.64
最大压应力/MPa	厚度中面	-0.42	-0.44	-0.43	-9.71
	结合面	-27.24	-21.69	-16.13	-20.11

通过对表 1 计算数据的分析,用于测试胶体受剪应力-应变本构关系的组合圆盘试件,最终选定胶层端面圆孔直径采用 2.5 mm,并按图 3 的方式进行倒角处理。此时,胶层剪应力分布的均匀系数达到 0.97 以上,粘结面上的正拉应力可以控制在很低的水平,不致引起粘结面的受拉破坏,剪切强度试验值能真实反映胶体与金属基体之间的粘结性能或胶体材料的剪切受力性能。

## 2 INSTRON 系统变形的识别方法

对薄层胶体直接进行剪切变形测试是很困难的。胶层很薄,产生的剪切变形很小,位移测试仪表的精度要求很高。此外,由于粘结试件尺度很小,安装位移测试仪表很困难,试件破坏时附着在试件上的测试仪表很容易损坏。

国内几乎未见有直接对胶层剪切变形进行测试的研究报道。ASTM 标准试验方法采用的专用测试装置<sup>[13]</sup>和 J. Y. Cognard<sup>[14]</sup>与 P. Davies<sup>[15]</sup>等采用数码摄像系统的测试方法在国内一般结构与材料实验室中难以实现,因此需要寻求一种简便实用的变形测试方法。

重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室拥有位移测试精度达 1/2 000 mm 的 INSTRON 单轴伺服试验机,测试精度能满足要求。组合圆盘粘结件在 INSTRON 单轴试验机上的安装方法如图 4 所示。利用 INSTRON 试验机内置荷载和位移测试系统,可以直接记录荷载-位移变形曲线,图 5 为采用“四川承华”碳纤维粘胶进行的组合圆盘纯剪试验、偏转 20°剪压及偏转 40°剪压复合试验时的荷载位移全曲线,各组合圆盘所用胶体一次调制,完全相同。



图 4 组合圆盘试验情景照片

图 6 为试件破坏后典型的胶层裂缝照片。图中清晰显示胶层发生了剪切破坏,因此可以认为,文中采用的组合圆盘试验方法能够用于测试薄层胶体的受剪应力-应变本构关系。

由图 5 可见,各条曲线在初始段均存在强化现

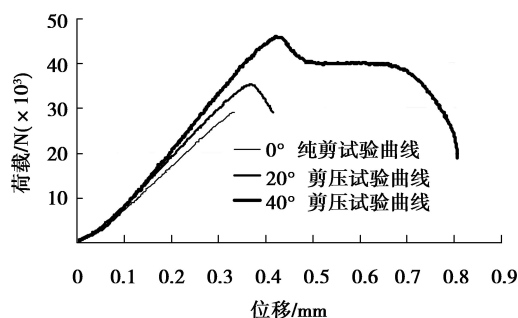


图 5 组合圆盘实测荷载-位移全曲线

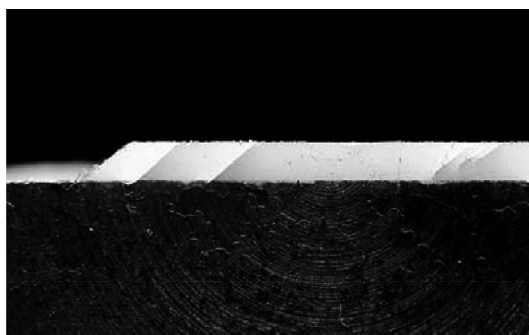


图 6 胶层受剪破坏裂缝放大图

象,这显然不是材料自身的特性。事实上,由于 INSTRON 单轴伺服试验机内置位移测试系统测读的变形值为上、下加载头之间的变形值,该变形值除包含胶层本身的变形外,还包含圆盘自身变形、垫条变形及垫条与圆盘及垫条与承压杆之间的接触变形、承压杆压缩变形以及承压杆与抱紧装置之间的滑移变形等,如图 7 所示。除了胶层本身的变形以外,前述所有与组合圆盘测试方法有关的其余变形统称为该方法的系统变形。胶层沿竖直方向(即压力作用线)的变形  $s_v$  为 INSTRON 伺服试验机内置位移系统测读的总变形  $s_g$  与系统变形  $s_s$  之差,即

$$s_v = s_g - s_s \quad (5)$$

为了简单地测量出系统变形  $s_s$ ,制作一个材质、厚度和直径与组合圆盘完全相同的完整圆盘,并采用与组合圆盘粘结件完全相同的试验状态安装在承压杆端面上进行受压试验。对完整圆盘按位移控制方法逐级施加压力,系统自动记录各级位移下的压力。重复进行 3 次试验,可得到如图 8 所示的 1 组荷载-系统变形曲线

由图 8 可见,各次试验实测的荷载-系统变形曲线( $p-s_s$  曲线)几乎是完全重合的,表明系统变形本身复现性很好,容易进行识别并予以剔除。由图 8 还可以看出,压力较低时荷载-系统变形曲线存在与图 5 相似的强化现象,因此可以认定存在于图 5 和图 8 中的初始强化现象来源于各接触面的逐步压紧以及承压杆滑移量逐步趋于稳定所致。

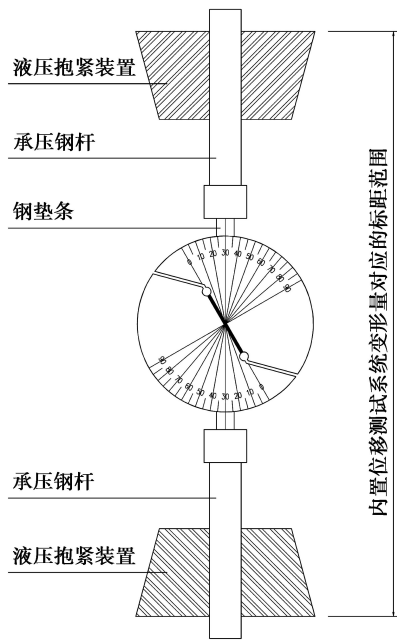


图 7 总变形的标距范围示意

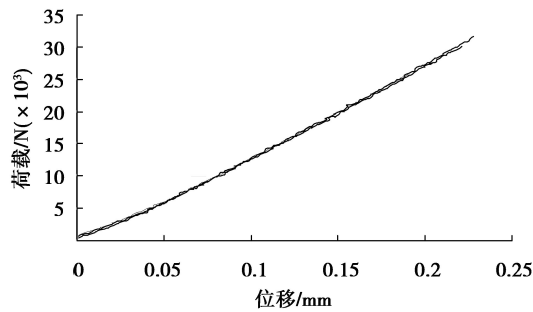


图 8 实测的荷载-系统变形曲线

除了初始段具有非线性以外,荷载-系统变形曲线呈线性关系变化。为了便于描述荷载-系统变形之间的关系,比较荷载-总变形曲线的初始非线性段后,确定一个统一的荷载水准  $P_0$ ,并将  $P_0$  以下的非线性段舍弃不用。

按此方法对试验的荷载-系统变形进行线性回归,并取  $P_0=5\ 000\ \text{N}$ ,可得直线方程  $P=140\ 818\ s_s - 1\ 221$ ,荷载  $P$  单位为  $\text{N}$ ,系统变形  $s_s$  单位为  $\text{mm}$ 。该回归直线中存在自由项,应予以取消,并得到荷载-系统变形关系如(6)式所示

$$P = 140\ 818s_s \quad (6)$$

### 3 胶层沿荷载线的变形量 $s_v$ 的计算

观察图 5 中组合圆盘各条荷载-总变形曲线发现,  $P_0 \sim 75\%$  极限荷载之间曲线呈线性关系,因此舍弃  $P_0=5\ 000\ \text{N}$  以下的数据不用,并对  $P_0 \sim 75\%$  极限荷载之间的区段进行线性回归,可得各条荷载-总变形关系曲线中的直线段方程如式(7)~(9)所示

$$P = 97\ 507S_g - 2\ 497.7 \quad (0^\circ \text{ 纯剪试验}), \quad (7)$$

$$P = 109\ 164S_g - 2\ 653.4 \quad (20^\circ \text{ 剪压试验}), \quad (8)$$

$$P = 126\ 814S_g - 4\ 812.5 \quad (40^\circ \text{ 剪压试验}). \quad (9)$$

对荷载-总位移曲线中荷载  $P_0$  以后的所有试验数据,总位移均应分别减去直线回归方程(7)~(9)中荷载零点( $P=0$ )对应的位移  $s_{s0}$ ,即对曲线进行平移以消除前述接触变形和滑移变形的影响,从而得到修正后的荷载-总位移曲线,如图 9 所示。

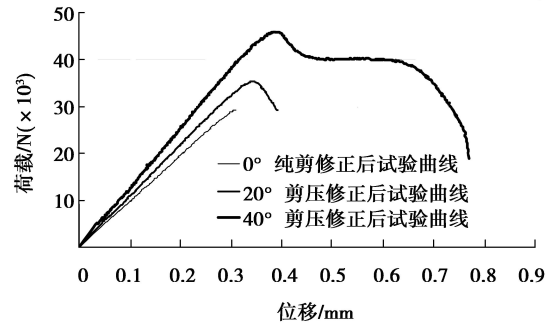


图 9 修正后组合圆盘荷载-总位移曲线

对各条修正后的荷载-总位移曲线,在总位移中减去由式(6)计算的由相应荷载产生的系统位移后,即得胶层沿荷载线的荷载-变形曲线,如图 10 所示。

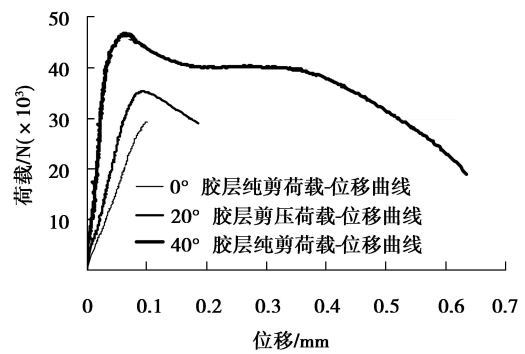


图 10 胶层荷载-位移( $P-s_v$ )曲线

### 4 胶层受剪应力-应变本构关系曲线

如图 11 所示,对纯剪试验,剔除系统变形后的胶层竖向变形  $s_v$  即为胶层的剪切变形  $s$ ;对偏转  $\alpha$  角度的剪压复合试验,胶层剪切变形  $s$  应按式(10)计算

$$s = s_v \cos\alpha, \quad (10)$$

式中,  $s_v$  为剔除系统变形后的胶层竖向变形。

胶层剪应变按式(11)计算

$$\gamma = s/d, \quad (11)$$

式中,  $d$  为胶层实测厚度。胶层厚度这样进行测量,

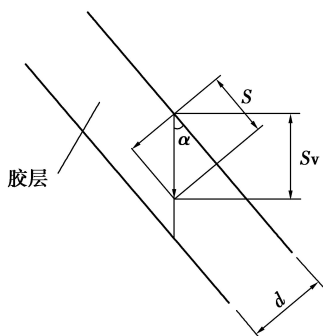


图 11 胶层剪切变形计算图示

涂胶前将成对的 2 个半圆沿直径对接密合,测量垂直于接缝方向的圆盘最大宽度,胶体固化后再次测量垂直于接缝的圆盘最大宽度,2 次测量值之差,即为胶层厚度。测量胶层厚度时的精度应控制在 0.01 mm 以内。

图 12 为 0° 纯剪、偏转 20° 剪压、偏转 40° 剪压试验的受剪应力-应变全曲线。这些曲线表明,增大粘结面上的正压应力,可以提高胶体抗剪刚度和抗剪强度,同时提高胶层受剪变形能力。

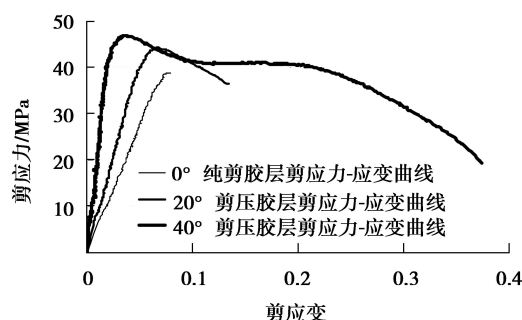


图 12 实测胶层受剪应力-应变曲线

## 5 结 语

薄层胶体受剪应力-应变本构关系在粘结层应力分析中具有重要价值。采用的组合圆盘粘结件试验方法,能够在薄层胶体中形成很均匀的剪应力分布,同时消除粘结面上的高正拉应力,使粘结件的破坏不受结合面上的正拉应力控制,获得的胶层抗剪强度能够真实反映胶体的材料性能。在不需外置附加位移传感器的前提下,利用 INSTRON 内置高精度的位移测试系统,直接测试组合圆盘试验系统的总竖向变形和测试系统竖向变形,并由此获得胶层的竖向变形,最终获得受剪应力-应变全曲线。该方法简单实用,能够在具有伺服试验系统的实验室推广应用。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. GB 50367-2006 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [2] YAO J, TENG J G. Plate end debonding in FRP-plated RC beams-I: experiments[J]. Engineering Structures, 2007, 29(10): 2457-2471.
- [3] TENG J G, YAO J. Plate end debonding in FRP-plated RC beams-II: strength model [J]. Engineering Structures, 2007, 29(10): 2457-2471.
- [4] TENG J G, YUAN H, CHEN J F. FRP-to-concrete interfaces between two adjacent cracks: theoretical model for debonding failure[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(18/19): 5750-5778.
- [5] LEUNG C K Y. FRP debonding from a concrete substrate: some recent findings against conventional belief[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(8): 742-748.
- [6] 卢亦焱, 张号军, 刘素丽. 碳纤维布与钢板黏结剪切性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 60-67. LU YI-YAN, ZHANG HAO-JUN, LIU SU-LI. A study on the adhesive shear performance of steel plates bonded by carbon fiber reinforced polymer[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 60-67.
- [7] 杨勇新, 岳清瑞, 彭福明. 碳纤维布加固钢结构的黏结性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10): 1-5. YANG YONG-XIN, YUE QING-RUI, PENG FU-MING. Study on the bond behaviour of CFRP sheets to steel[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10): 1-5.
- [8] BENACHOUR A, BENYOUCEF S, TOUNSI A, et al. Interfacial stress analysis of steel beams reinforced with bonded prestressed FRP plate [J]. Engineering Structures, 2008, 30(11): 3305-3315.
- [9] CASAS J R, PASCUAL J. Debonding of FRP in bending: simplified model and experimental validation[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(10): 1940-1949.
- [10] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 7124-2008 胶粘剂拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料)[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [11] ASTM D 1002-05 Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal) [S]. Berlin: ASTM International, 2005.
- [12] ASTM D 4896-01 (2008)el. Standard guide for use of adhesive-bonded single lap-shear specimen test results [S]. [S. l.]: ASTM International.
- [13] ASTM D 5656-04el. Test method for thick-adherend metal lap-shear joints for determination of the stress-strain behavior of adhesives in shear by tension loading [S]. [S. l.]: ASTM International.
- [14] COGNARD J Y, DAVIES P, GINESTE B, et al. Development of an improved adhesive test method for composite assembly design[J]. Composites Science and Technology, 2005, 65(3/4): 359-368.
- [15] DAVIES P, SOSHIER L, COGNARD J Y, et al. Influence of adhesive bond line thickness on joint strength[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29: 724-736.