第3卷 第1期 复合材料学报 Vol. 3 No. 1
1986年3月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA March 1986

GRP(CSM)三点弯曲梁松弛实验

張双寅
(中国科学院力学研究所)

R. Kitching*
(Dept. Mech. Engn. UMIST, UK)

摘 要

本文对短玻璃纤维毡增强聚酯玻璃钢的三点弯曲梁試件的松馳行为进行了实驗研究。并通过有限元分析与实驗結果的比較，建立了一个初步的“变剪切模量$G_{13}(t)$”模型。

一、引 言

在英国，化工部门大量采用短玻璃纤维毡增强聚酯玻璃钢（*Chopped Strand Mat Glass Fibre Reinforced Polyester GRP*）制造压力容器与管道系统。在进行管道弯曲试验时，观察到明显的蠕变松馳现象。比如，使弯曲挠度保持不变，管壁上的弯曲应变随时间逐渐减小，并且管壁内外表面上的应变值松馳速率大不相同[1][2]。为了从材料性能角度分析解释这一现象，进行了相同材料在相同环境下的三点弯曲梁的松馳实驗研究。试驗表明，三点弯曲松馳行为与管道弯曲松馳现象相似。

为探讨这类材料的松馳机理，建立松馳模型，进行了有限元计算。根据计算结果与试驗数据建立了一个依赖时间的“变剪切模量$G_{13}(t)$”模型。

本文1985年6月23日收到。

*Dr. R. Kitching是英国曼徹斯特大学理工学院（UMIST）机械工程系应用力学室代理主任。

二、实 驗 研 究

1. 材料与試件

试验材料为E玻璃纤维毡增强聚酯层板，板材是英国化学工业公司（ICI）特种化学组提供的，树脂的牌号为$Atac$382，其断裂应变为3.6～4.2%。板材是用手鋪工艺制造，与制管道的工艺相似。板材靠台面的一面树脂较多，光滑，而另一面则粗糙不平。

17个试件从同一块板材上用电锯切割而成。试件尺寸列于表1。试件上下表面贴上标距为2mm的应变片。应变片的位置离开试件中心线约5mm（图1）。

表1 試件尺寸与試驗条件

試件号碼	厚度 h mm	宽度 b mm	最大載荷 W_{max} kg	最大挠度 f_{max} mm	松馳时間 t hrs	备注
1	8.90	20.50				預备試驗
2	7.64	25.55	81.25	5.45	27	
3	9.30	21.35				預备試驗
4	8.00	23.65	64.89	4.44	24	
5	8.10	22.80				預备試驗
6	8.13	22.84				預备試驗
7	9.00	22.98	29.10	1.26	46	
8	8.60	22.25	45.50	2.60	96.5	
9	8.05	22.91	62.50	4.45	72	
10	9.17	23.03	66.10	2.77	44	
11	8.95	22.68	56.40	2.81	71	
12	7.98	22.74	56.90	3.66	97	更换电池
13	9.12	23.68	55.20	3.26	49.5	
14	8.10	23.15	81.25	5.18	71.5	
15	8.28	22.97	27.32	1.59	72	
16	8.20	22.55	29.70	1.56	72	
17	9.21	21.84	26.70	1.28	43	

2. 試驗装置与測試仪器

试验装置示意图如图2所示，主要加载机构是一个螺杆系统。跨距为126mm，在加载刀口与螺杆之间串联一个应变式传感器，用三台应变仪分别测量弯曲应变与载荷。测量载荷的应变仪为$Peekel\ Strain\ Indicator$，$Type\ CA66$。测量弯曲应变的应变仪为$Vishay\ Strain\ Gauge\ Indicator\ P-3500$和$Peekel\ Strain\ Indicator$，$Type$ 581，DNH。预备试验表明，使用一台多通道应变仪不能满足要求，因为在改变通道时选择开关的接触电

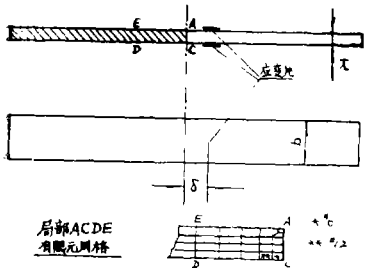
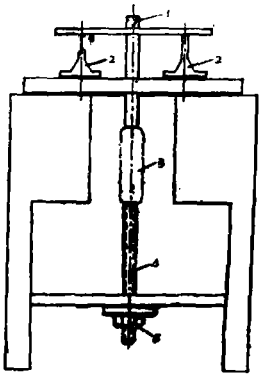


图 1　試件



1. 上刀口；
2. 試件；
3. 下砧块；
4. 載荷传感器；
5. 螺杆；
6. 螺母

图 2　試驗装置示意图

阻有变化，影响测量精度。此外，对各台应变仪的稳定性进行了检查，将精密电阻联入应变仪，经过 1～2 天监测，应变仪零点漂移在24小时内不大于10×10^{-6}应变值。

3. 实驗步驟

除少数预备试验外，多数试验步驟如下：

a) 把试件架在支撑刀口上，升高加载刀口，使之不接触试件，将三个应变仪调零。

b) 安放加载刀口，对准试件中点，装上千分表，这时螺杆与载荷传感器系统的重量 5.5*kg* 以静载荷加于试件。记录千分表与弯曲应变初读数，并校核载荷传感器的初（零）读数。

c) 对试件逐级加载，每级加载千分表指针转 1～2 圈。因加载过程中材料就有松驰进行，故加载过程尽可能快些，直到最大弯曲应变值。

d) 保持弯曲挠度不变，测量松驰过程中载荷与应变随时间的变化。在第一小时内，每隔 5 分钟或10分钟记录一次读数，一小时之后，记读数的时间间隔愈来愈长。总的松驰时间为 2～4 天。

e) 终止松驰实验，分级卸载，方法与加载过程相似。在完全卸载后使试件恢复。在恢复过程中记录应变值的变化。最后记录残余应变，结束整个试验。

4. 实驗結果与討論

试件按初始应变大小分成三组（表 2）每组 4 个试件，其中两个试件光面*S*受压粗糙面*R*受拉，另外二个试件相反。图3给出了试件#11的挠度、载荷与应变随时间的变化曲线。图上的时间坐标在不同试验阶段采用不同的标尺。

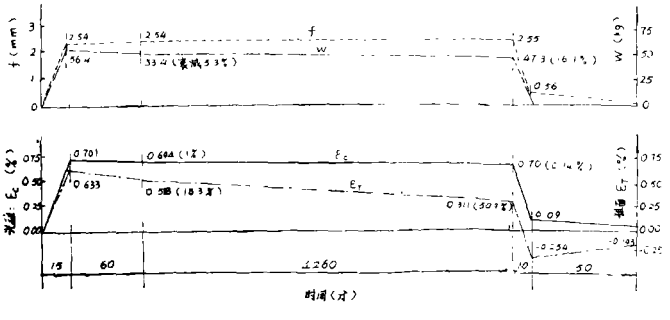


图 3　試件#11挠度、載荷与应变变化曲线

表 2　試件分組

試件分組	試件号碼	最大弯曲应变 ε $m/m\times10^{-6}$	粗糙面受拉	粗糙面受压
1	15	3000～4000	√	
	16		√	
	7			√
	17			√
2	10	6000～7000	√	
	11		√	
	8			√
	13			√
3	4	10000～13000	√	
	14		√	
	2			√
	9			√

a）由表3可知弯曲应变不对称于试件的几何中面。除 7 号试件外，其余试件的光滑面应变都大于粗糙面的应变值，不论受拉还是受压。所有试件加载过程的载荷～挠度曲线基本上是线性的。松驰试验后，卸载过程中的载荷～挠度曲线也是线性的，加载线与卸载线基本平行（图 4 ）。由图 5 ，在应变值小于6000×10^{-6}时载荷～应变曲线是线性的，大于6000×10^{-6}时出现非线性。

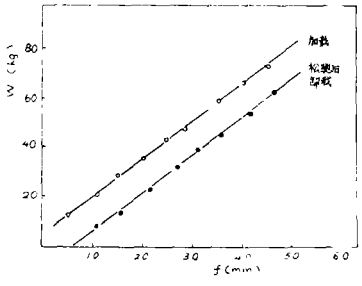


图 4　試件#2載荷～挠度曲綫

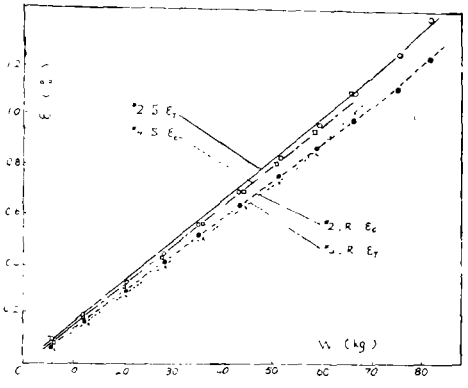


图 5　試件#2与#4載荷～应变曲綫

b）表 4 与表 5 表示了松驰实验结果。表中在给定时间内的松驰量为：

$$q=\frac{\varepsilon_I-\varepsilon_t}{\varepsilon_I}\times100\% \qquad (1)$$

表 3　最大初始弯曲应变

試件号碼	最大拉伸应变 ε_T $m/m\times10^{-6}$		最大压縮应变 ε_C $m/m\times10^{-6}$		拉伸与压縮間之偏差 %	
	粗面	光面	粗面	光面	光面受拉	粗面受拉
15	3202			3767		15.0
16	3655			4005		8.7
7		3380	3391		-0.3	
17		3773	3242		21.84	
10	6360			7269		12.5
11	6334			7010		9.6
8		6640	6618		0.33	
13		6603	6302		4.55	
4	10153			10774		5.8
14	10345			13229		21.8
2		13644	12128		11.0	
9		12500	10459		16.3	

而单位时间内的松驰率为：

$$\varphi=\varphi/t \qquad (2)$$

其中ε_I与ε_t分别为初始应变与松驰应变。关于载荷的松驰实验值，也有相似的公式。

粗糙面的应变松驰率较大而光滑面则很小。不论受拉还是受压。当粗糙面受拉时比受压时应变松驰率大得多。这与管道松驰试验相似。对比图 6 可以看出，初始弯曲应变的大小对松驰曲线有一定的影响。由表 4 看出，初始载荷的大小对载荷松驰率的影响不大。在整个松驰过程中，挠度 f 稍有增加，因为加载系统有一定弹性，并且载荷变化与温度改变等因素都会引起挠度改变。此外，环境温度对应变松驰率影响较明显。白天工作时间室温较高，松驰率大于晚上与周末时的松驰结果。尽管如此，因所有试验都是在上班时间开始并结束的，特别是短时松驰都是在白天上班时间进行的，故可比性很强。环境湿度对松驰无大影响。

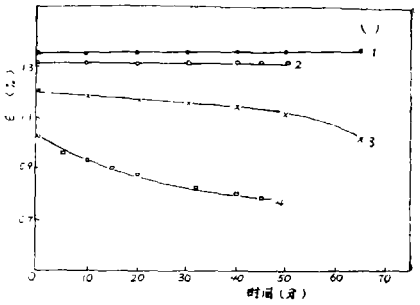


图 6　試件#2与#14应变松馳曲綫

1.#2光面ε_T（衰减0.5%）；

2.#14光面ε_C（0.3%）；

3.#2粗面ε_C（12%）；

4.#14粗面ε_T（24.8%）。

c）在卸载过程中，松驰衰减量大的粗糙面的应变值变号。当载荷卸为零时试件两面

表 4　載荷松馳衰減試驗值

試件号碼	最大載荷 W_{max} kg	載荷松馳 短时 时間 min	短时 松馳量 %	短时 松馳率 %/小时	长时 时間 hrs	长时 松馳量 %	长时 松馳率 %/小时
15	27.32	85	6.7	4.7	72	13.3	0.18
16	29.70	60	3.0	3.0	72	14.5	0.20
7	29.10	60	6.2	6.2	46	20.6	0.44
17	26.70	60	5.6	5.6	43	9.0	0.21
10	66.10	60	5.9	5.9	44	13.8	0.31
11	56.40	60	5.3	5.3	71	16.1	0.23
8	45.50	85	7.9	5.5	96	17.4	0.18
13	55.20	60	6.5	6.5	49.5	17.6	0.36
4	64.89	60	5.6	5.6			
14	81.25	45	7.4	9.8	71.5	14.5	0.20
9	62.50	60	5.4	5.4	72	15.5	0.22
2	81.25	70	7.4	6.3	27	15.0	0.56
平均值				5.8	平均值		0.28

表5　应变松馳衰減試驗值

試件号碼	最大初始应变 $m/m \times 10^{-6}$ 拉伸应变		压縮应变		应变松馳衰減 短时 时間 min	短时 每小时百分衰減 拉伸	短时 每小时百分衰減 压縮	长时 时間 hrs	长时 每小时百分衰減 拉伸	长时 每小时百分衰減 压縮
15	粗	3202	光	-3767	85	25.2	0.56	72	0.80	0.04
16	粗	3655	光	-4005	60	30.0	1.9	72	0.92	0.07
7	光	3380	粗	-3391	60	3.25	2.9	46	0.15	0.43
17	光	3773	粗	-3242	60	2.65	8.6	43	0.15	0.38
10	粗	6363	光	-7269	60	23.0	0.39	44	1.22	0.01
11	粗	6334	光	-7010	60	18.3	1.0	71	0.72	0.002
8	光	6640	粗	-6618	85	1.20	3.2	96.5	0.07	0.44
13	光	6603	粗	-6302	60	0.53	5.0	49.5	0.03	0.76

续表 5

4	粗	10153	光	-10774	60	11.1	0.28			
14	粗	10345	光	-13229	45	33.1	0.4	71.5	0.69	-0.002
9	光	12500	粗	-10459	60	0.88	4.5	72	0.04	0.77
2	光	13644	粗	-12128	70	0.43	10.0	27	0.02	1.61
平均值						7.85			0.42	

应变值同号。在恢复阶段，两面应变值同时缓慢减小（图 3 ）。

三、有限元分析与松弛模型

采用二维八节点四边形等参元计算了试件中的应变分布。根据对称性只计算 $\frac{1}{2}$ 图 1 中阴影部分。图1中AC为对称面。支持条件是：在B点的垂直位移为零，水平位移自由；加载条件是令试件中点A有给定挠度$f_A=5mm$。

用两种材料模型，即各向同性与正交异性模型进行计算。同时比较了两个不同横向剪切模量G_{13}对应变值的影响（表 6 ），材料常数来自实验结果[3][4]。将 6 号与 12号单元的应变计算值列于表 6 。12号单元中点与梁中心线之距为$\delta=5mm$。由表中数据可知：

表 6　有限元計算結果

材料模型	弹性常数	单元号	横向剪切模量G_{13} GPa	拉伸应变 应变值 $m/m\times10^{-6}$	拉伸应变 偏差 %	剪切应变 应变值 $m/m\times10^{-6}$	剪切应变 偏差 %
各向同性	$E=7.0GPa$	6	2.61	11060	8.0	210	-2119
			0.261	10180		4660	
	$\mu=0.34$	12	2.61	10700	10.2	540	-1024
			0.261	9610		6070	
正交異性	$E_{11}=E_{22}=9.81GPa$	6	1.43	10850	18.8	627	-1678
			0.143	8810		11150	
	$E_{33}=5.203GPa$	12	1.43	10460	21.0	1410	-890
	$\mu_{13}=0.34$		0.143	8280		13960	

a. 单元 6 的正应变大于单元12的正应变，而剪应变相反；单元12的正应变计算值因G_{13}的减小引起的偏差量却大于单元 6 的结果，剪应变却相反。

b. 当横向剪切模量$G_{13}(t)$减小为初始值$G_{13}(0)$的$\frac{1}{10}$时，正应变改变量为21%（正

交异性模型）。

复合材料蠕变松弛行为十分复杂（請参考文献[5]），三点弯曲松弛更是如此。欲建立理想的松弛模型是不可能的。这里提出如下松弛模型：

$$G_{13}(t)=G_{13}(0)e^{-\alpha t} \tag{3}$$

其中$G_{13}(0)$与$G_{13}(t)$分别为初始与松弛剪切模量，α为待定常数。

从表5的验实数据可知，60分钟内短时松弛衰减量为7.85%；又由表6中正交异性模型的有限元结果得知，当$G_{13}(t)=\frac{1}{10}G_{13}(0)$时，正应变衰减21%，这等于试验中160.5分钟内应变平均松弛量。于是由式（3）得到：

$$0.1=e^{-\alpha\cdot 160.5} \tag{4}$$

$$\alpha=0.0143/min \tag{5}$$

这个结果可用载荷的松弛试验数据验证。三点弯曲梁的挠度f可由下式计算：

$$f=\frac{a^3w(t)}{6EI}+\frac{aw(t)}{2AG_{13}(t)} \tag{6}$$

其中a为跨距之半，A与I为梁截面面积与弯曲惯性矩，$w(t)$为弯曲载荷。杨氏模量E主要由纤维控制，其松弛率与$G_{13}(t)$的松弛率相比可以忽略。试验中保持挠度f不变，$\frac{df}{dt}=0$。由此得出：

$$\frac{1}{G_{13}(t)}\frac{dG_{13}(t)}{dt}=\frac{1}{w(t)}\frac{dw(t)}{dt}\left(1+\frac{Aa^2}{3I}\frac{G_{13}(t)}{E}\right) \tag{7}$$

将式(3)代入上式，经过积分，我们得到：

$$w(t)=w(0)\frac{(1+C)e^{-\alpha t}}{1+Ce^{-\alpha t}} \tag{8}$$

其中$C=\frac{Aa^2}{3I}\frac{G_{13}(0)}{E}$。利用试件尺寸（平均值）计算$C$，并令$t=60min$。由式（8）得到$w(t)|_{t=60min}=0.958w(0)$，即60分钟载荷衰减量为4.2%，与表4中试验值符合较好。

四、結　束　語

1. 本文对$CSM-GRP$三点弯曲梁进行了松弛试验，从材料性能角度研究了管道试验观察到的松弛现象。手鋪工艺造成材料弯曲与蠕变松弛行为不对称于板材中面。粗糙面应变松弛大于光滑面，尤其当糙粗面受拉时比它受压应变松弛更快。

2. 有限元分析提示了解释松弛行为的一种可能的物理机制。当$G_{13}(t)$（主要由基体控制）松弛时弯曲正应变衰减。结合实验数据导出一个初步松弛模型——依赖时间t的“可变剪切模量”模型。这个模型又用载荷松弛实验结果作了验证。

致谢　在实验工作中，$UMIST$应用力学室实验室负责人$P.Tennant$在测试仪器方面给予了热情帮助，在此特致谢意。

参 考 文 献

[1] P.Myler, "Report on the Constant Deflection Test", Applied Mechanices Division, (UMIST) Report to Polymer Engineering Directorafe, July, 1984.

[2] P.Myler, "Extended Time Tests——In-Plane Bending", Applied Mechanics Division, (UMIST), Report to Polymer Engineering Directorate, March, 1984.

[3] D.C.Barton and P.D.Soden, "Short Term In-Plane Stiffness and Strength Properties of CSM Reinforced Polvester Laminates", Composites, 13, 1, 1982, pp.66—78.

[4] R.Kitching, A.L.Tan and T.M.N.Abu Mansour, "The Influence of Through Thickness Properties on Glass Reinforced Plastic Laminated Structures", Composite Structures, 1, 2, 1984, pp.105-151.

[5] H.F.Brinson and D.A.Dillard, "The Prediction of Long Term Viscoelastic Properties of Fiber Reinforced Plastics", Progress in Science and Engineering of Composites. Proc. ICCM-IV, Ed. T.Hayashi, 1982, pp.795-802.

读者·作者·编者

《复合材料学报》自创刊以来，得到了全国各有关单位和个人的大力支持和帮助，在此学报编委会向这些单位和个人表示衷心的谢意。由于学报创刊时间较短，学报的组稿、印刷、出版、发行工作还存在有不少问题，学报编辑部恳切希望读者就学报各项工作提出批评、建议和意见，本刊编辑部将虚心听取读者意见，努力改进1986年的学报工作。本刊1985年各期由于各种原因拖期，给读者带来许多不便，在此编辑部向读者致歉。1986年争取改进本刊的发行工作。1986年学报仍由本刊编辑部发行，新老订户可向本刊编辑部函索订单续订、补订。本刊1984年创刊号、1985年各期尚有少量存刊，来函可办理补订手续。

通讯：北京航空学院内复合材料学报编辑部

电话：277.251—541

地址：北京市学院路37号北京航空学院教学区2号楼113号

agree well with what is in Ref.[3] where the optimality criteria is used.

THE SIMPLE CALCULATION METHOD FOR ROOM-TEMPERATURE SHAPE OF UNSYMMETRIC CROSS-PLY LAMINATES

Chen Liemin

Chinese Academy of Space Technology, P.O.Box 5106, Beijng, China

(Received Aug. 1985)

Abstract

The analysis for room-temperture shape of unsymmetric laminates after high-temperture curing is significant for design and manufacturing of composite materials. Hyer first calculated this room-temperture shape by using minimum potential energy theorem and large deflection theory of thin plate, but his calculation method is too compplex to be used in engineering.

In this paper simple calculation method for room-temperature shape of unsymmetric cross-ply laminates is prsesnted. By using the generalized variational principle and large deflection theory of thin plate, the fomulae for calculating the room-temperature shape are derived. Tts results are extremly consistent with the previous results by Hyer. Because the method in this psper is very clear and simple, it is convenient in engineering application.

EXPERIMENTAL STUDY ON RELAXATION BEHAVIOUR OF THREE-POINT BENDING BEAM OF GRP

Zhang Shuangyin

Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, China

(Received June 1985)

Abstract

Creep and relaxation phenomena were observed in the bending tests of pipe line system made of chopped strand mat glass fibre reinforced polyester(CSM-GRP). In order to characterize the relaxation behaviour of this kind of material, the experimental study on relaxation behaviour of three point-bending beam was carried out. The test scheme is that a beam specimen was loaded through a screw system to give a fixed deflection. Then the deflection was kept censtant and the load and bending strains were measured continually. Twelve specimens were

tested. The results showed a marked unsymmetry of the relaxatien rate of the bending strains on the two surfaces of the beam specimen. The relaxation rate of the strain of the rough surface (which corresponds the ousside surface of the pipes) was much larger than that of the smooth surface, which coincides the observation in the pipes. the consistency of the test results of the load relaxation is better than that of bending strains.

To search the relaxation mechanism, a FEM analysis was carried out. The calculated results suggested a preliminary relax ationmodel, i.e,"time-dependent shear modulus $G_{13}(t)$" model.

$$G_{13}(t)=G_{13}(0)e^{-\alpha t}$$

By using the results of FEM analysis and the experimental results of the bending strains, the value of the constant α was determined. This model was verified rough the test data of the load relaxation.

THE MECHANICAL PROBLEMS OF COMPOSITE STRUCTURES IN THE DESIGN, MANUFACTURE AND APPLICATION

Wang Zhenming

Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, China

(Received June 1985)

Abstract

In this paper, a series of mechanical problems of structures for composite materials related to the design, manufacture and application are discussed. It is expected to cause the more attention of engineers and researchers, so as to promote a greater progress in the works of design, research and manufacture of composite structures in China.