

文章编号:1673-2049(2010)01-0073-05

芳纶纤维布松弛性能试验

张建伟^{1,2}, 张瑞云¹, 杜修力²

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京工业大学 城市与工程安全减灾省部
共建教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:为了研究预应力芳纶纤维布因应力松弛引起的预应力损失,进行了 28 个试件的应力松弛性能试验。结果表明:预应力芳纶纤维布的应力松弛损失随着张拉控制应力的提高而增大;松弛损失率与时间对数线性相关;持荷初期应力松弛发展较快,200 h 后趋于稳定;浸胶的芳纶纤维布应力松弛损失相对于不浸胶的芳纶纤维布较小;10 ℃~30 ℃条件下,温度变化对预应力芳纶纤维布的应力松弛影响不明显。

关键词:芳纶纤维布;环氧树脂胶;应力松弛;张拉控制应力

中图分类号:TU375 **文献标志码:**A

Experiment of Relaxation Performance of AFRP Sheets

ZHANG Jian-wei^{1,2}, ZHANG Rui-yun¹, DU Xiu-li²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: For researching the loss of prestress caused by the stress relaxation of prestressed aramid fiber reinforced polymer (AFRP) sheets, an experiment about stress relaxation performances of aramid fiber sheets with 28 specimens was carried out. The results show that the higher the tension control stress is, the greater the stress relaxation loss becomes; the relaxation rate linearly depends on the time logarithm; stress relaxation is fast at the beginning and tends to be stable after 200 h; the stress relaxation loss of dipping AFRP sheets is lower than the sheets without dipping; stress relaxation of prestressed AFRP sheets caused by the temperature variations is not obvious under 10 ℃~30 ℃ conditions.

Key words: AFRP sheet; epoxy adhesive; stress relaxation; tension control stress

0 引言

纤维增强复合材料(FRP)因具有轻质、高强、耐腐蚀的特性,使其在土木工程领域得到了较广泛的应用。外贴 FRP 片材的加固方法由于耐腐蚀、施工方便快捷、不占用使用空间等优点而成为一种新型的加固技术。使用预应力纤维片材加固混凝土受弯

构件,可提高被加固构件的开裂荷载和屈服荷载,改善其在使用阶段的性能,取得了较好的加固效果^[1-5]。为了推广应用,预应力纤维片材加固过程中的预应力损失尚需进一步研究,尤其是其应力松弛损失。中国一些学者已对不同 FRP 材料的应力松弛进行了初步试验研究,如孟履祥等^[6]进行了中国产碳纤维筋的应力松弛损失试验;李世宏^[7]进行了

收稿日期:2009-10-12

基金项目:北京市教育委员会科技项目(KM20081005010);北京市优秀人才培养项目(20081D0501500182)

作者简介:张建伟(1971-),男,河北丰润人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:zhangjw@bjut.edu.cn。

碳纤维布的应力松弛试验;邓宗才等^[8]进行了少量芳纶纤维(AFRP)布试件的应力松弛试验。这些试验的样本数量较少,还不能满足工程应用的需要^[9-10]。另外,预应力纤维布加固混凝土结构的施工方法一般为张拉后立即浸环氧树脂胶,然后对树脂胶进行养护,使之硬化,其材料特性与不浸胶的纤维布有所不同,因此应模拟实际加固施工工艺对预应力纤维布的松弛性能进行研究。笔者在已有的预应力 AFRP 布加固混凝土结构技术研究的基础上,进行了较系统的预应力 AFRP 布松弛性能的研究,测试试件包括 2 种:不浸胶的 AFRP 布和张拉后浸环氧树脂胶的 AFRP 布。

1 试验概况

试验用的 AFRP 布为深圳市海川实业股份有限公司提供的 AFS-40 型凯美拉芳纶纤维布,其名义极限抗拉强度 f_u 为 2 060 MPa,弹性模量为 1.18×10^5 MPa,名义厚度为 0.193 mm。试件制作所用 AFRP 布的尺寸均为 350 mm×70 mm,AFRP 布的两端使用环氧树脂胶粘贴在笔者开发的平板式锚具上,粘贴长度为 100 mm,AFRP 布试件的中间净距为 150 mm。试件制作时,首先将固定端锚具安装在预制的混凝土台座上,然后将 AFRP 布粘贴在固定端锚具和张拉端锚具上,常温养护 7 d 后进行张拉,张拉控制应力 σ_{con} 通过拧紧张拉端锚具螺母的方式施加,张拉控制应力的大小通过螺母前的力传感器控制并进行张拉完毕后的监测。该测试方法避免了因锚具弹性变形、垫片孔隙压缩等因素引起的预应力损失。

共设计了 6 组 28 个 AFRP 布应力松弛试件:不浸胶的 AFRP 布[图 1(a)],共 18 个;张拉完毕后立即浸环氧树脂胶的 AFRP 布[图 1(b)],共 10 个。试验变化参数见表 1。

试验中使用静态电阻应变仪读取力传感器的数据信号,读取时间为张拉完毕后的 1、2、4、8、15、30 min 和 1、2、4、6、12、24、48、72、100、200、300 h。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

不同预应力水平的试件在各阶段的应力松弛损失实测结果见表 2,其中,应力松弛率 $\gamma = (\Delta\sigma / \sigma_{con}) \times 100\%$, $\Delta\sigma$ 为应力变化量。图 2 为预应力设计值为 60%、50%、40%、30%、20% 极限抗拉强度试件的应力松弛损失随时间变化的关系曲线,其中, σ 为

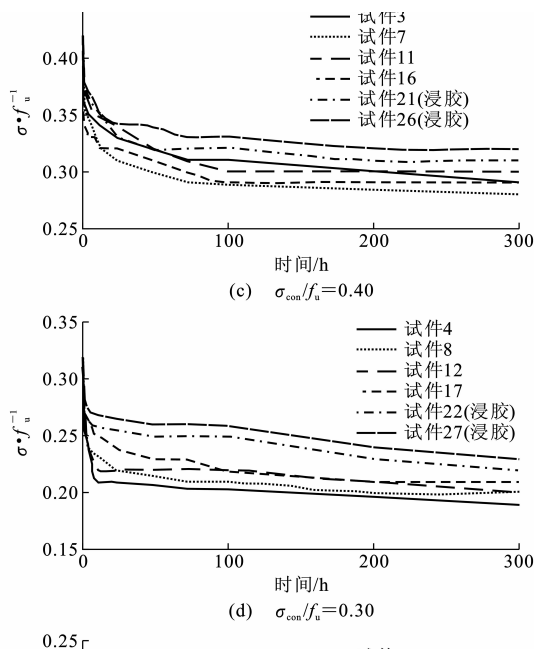


图 1 试验装置

Fig. 1 Test Set-up

应力。

由表 2 及图 2 可知: AFRP 布试件在加载初期应力松弛发展较快,持荷 1 h 后应力松弛发展趋缓,持荷 100 h 后应力松弛发展较慢,持荷 200 h 后基本稳定;应力松弛损失随初始预应力水平的提高而增大;浸胶 AFRP 布的应力松弛损失小于不浸胶 AFRP 布的应力松弛损失;10℃~30℃条件下,温度变化对应力松弛的影响不明显。

相同预应力设计值的不浸胶试件松弛率均值与时间对数的关系曲线见图 3(a),相同预应力设计值的浸胶试件松弛率均值与时间对数的关系曲线见图 3(b)。由图 3 可知,各试件的应力松弛率与时间对数近似呈线性关系,可对其进行线性拟合,即

$$\gamma = \alpha + \beta \lg(t/h) \quad (1)$$

式中: t 为时间; α 、 β 为系数。

根据各试件测试数据平均值进行数理统计回归求出系数 α 、 β 及相关系数 R_1 ,试验数据线性拟合系数见表 3。

2.2 松弛规律

应力施加 1 h 的试件应力损失包括锚具的变形、滑移,为了研究 AFRP 布的应力松弛规律,以 1 h 为初始值进行分析计算。图 4(a) 为相同预应力设计值的不浸胶试件应力比均值与时间对数的关系曲线,图 4(b) 为相同预应力设计值的浸胶试件应力比均值与时间对数的关系曲线。由图 4 可知, AFRP 布的应力比均值与时间对数呈线性关系,可

表 1 试验参数
Tab.1 Parameters of Test

分组编号	T/℃	试件编号	$\sigma_{\text{con}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{con}} \cdot f_u^{-1}$	分组编号	T/℃	试件编号	$\sigma_{\text{con}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{con}} \cdot f_u^{-1}$
1	10	1	1 195	0.58	2	10	5	1 195	0.58
		2	1 030	0.50			6	1 030	0.50
		3	845	0.41			7	824	0.40
		4	618	0.30			8	618	0.30
3	25	9	1 195	0.58	4	25	14	1 277	0.62
		10	1 030	0.50			15	1 030	0.50
		11	865	0.42			16	803	0.39
		12	659	0.32			17	639	0.31
		13	412	0.20			18	412	0.20
5(浸胶)	30	19	1 236	0.60	6(浸胶)	30	24	1 236	0.60
		20	1 071	0.52			25	1 030	0.50
		21	845	0.41			26	824	0.40
		22	618	0.30			27	639	0.31
		23	453	0.22			28	433	0.21

注:T 为环境温度。

表 2 不同预应力水平的试件应力松弛损失实测结果
Tab.2 Measured Results of Stress Relaxation Losses of Specimens Under Different Prestress Levels

设计预应力/ MPa	试件编号	$\sigma_{\text{con}} \cdot f_u^{-1}$	不同持荷时间(h)下的应力比						应力松弛损失/MPa		应力松弛率/%	
			1	24	48	100	200	300	损失值	均值	损失值	均值
1 236	1	0.580	0.500	0.470	0.470	0.460	0.450	0.420	329.6	334.8	27.6	27.5
	5	0.580	0.520	0.450	0.440	0.430	0.430	0.420	329.6		27.6	
	9	0.580	0.520	0.470	0.460	0.440	0.420	0.420	329.6		27.6	
	14	0.620	0.560	0.500	0.490	0.470	0.460	0.450	350.2		27.4	
	19(浸胶)	0.600	0.560	0.515	0.485	0.470	0.460	0.460	288.4	278.1	23.3	22.5
	24(浸胶)	0.600	0.570	0.530	0.500	0.470	0.470	0.470	267.8		21.7	
1 030	2	0.500	0.460	0.390	0.385	0.370	0.360	0.355	298.7	291.0	29.0	28.3
	6	0.500	0.450	0.390	0.380	0.360	0.360	0.360	288.4		28.0	
	10	0.500	0.440	0.400	0.390	0.370	0.360	0.360	288.4		28.0	
	15	0.500	0.430	0.409	0.400	0.376	0.360	0.360	288.4		28.0	
	20(浸胶)	0.520	0.470	0.420	0.410	0.390	0.380	0.380	288.4	278.1	26.9	26.5
	25(浸胶)	0.500	0.470	0.420	0.410	0.390	0.380	0.370	267.8		26.0	
824	3	0.410	0.360	0.330	0.320	0.310	0.300	0.290	247.2	236.9	29.3	28.4
	7	0.400	0.358	0.310	0.300	0.288	0.284	0.280	247.2		30.0	
	11	0.420	0.370	0.340	0.320	0.300	0.300	0.300	247.2		28.6	
	16	0.390	0.340	0.320	0.310	0.290	0.290	0.290	206.0		25.6	
	21(浸胶)	0.410	0.370	0.330	0.320	0.320	0.310	0.310	206.0	185.4	24.4	22.2
	26(浸胶)	0.400	0.385	0.343	0.340	0.330	0.320	0.320	164.8		20.0	
618	4	0.300	0.250	0.209	0.207	0.203	0.197	0.190	226.6	221.5	36.7	34.9
	8	0.300	0.250	0.220	0.215	0.210	0.200	0.200	206.0		33.3	
	12	0.320	0.260	0.220	0.220	0.220	0.210	0.200	247.2		37.5	
	17	0.310	0.273	0.239	0.230	0.220	0.210	0.210	206.0		32.3	
	22(浸胶)	0.300	0.268	0.256	0.250	0.249	0.230	0.220	164.8	164.8	26.7	26.2
	27(浸胶)	0.310	0.288	0.266	0.260	0.259	0.240	0.230	164.8		25.8	
412	13	0.200	0.170	0.158	0.155	0.143	0.135	0.125	144.2	154.5	35.0	37.5
	18	0.200	0.170	0.155	0.145	0.140	0.125	0.120	164.8		40.0	
	23(浸胶)	0.222	0.201	0.164	0.156	0.155	0.150	0.150	148.3	125.7	32.3	27.8
	28(浸胶)	0.212	0.181	0.174	0.166	0.165	0.160	0.162	103.0		23.3	

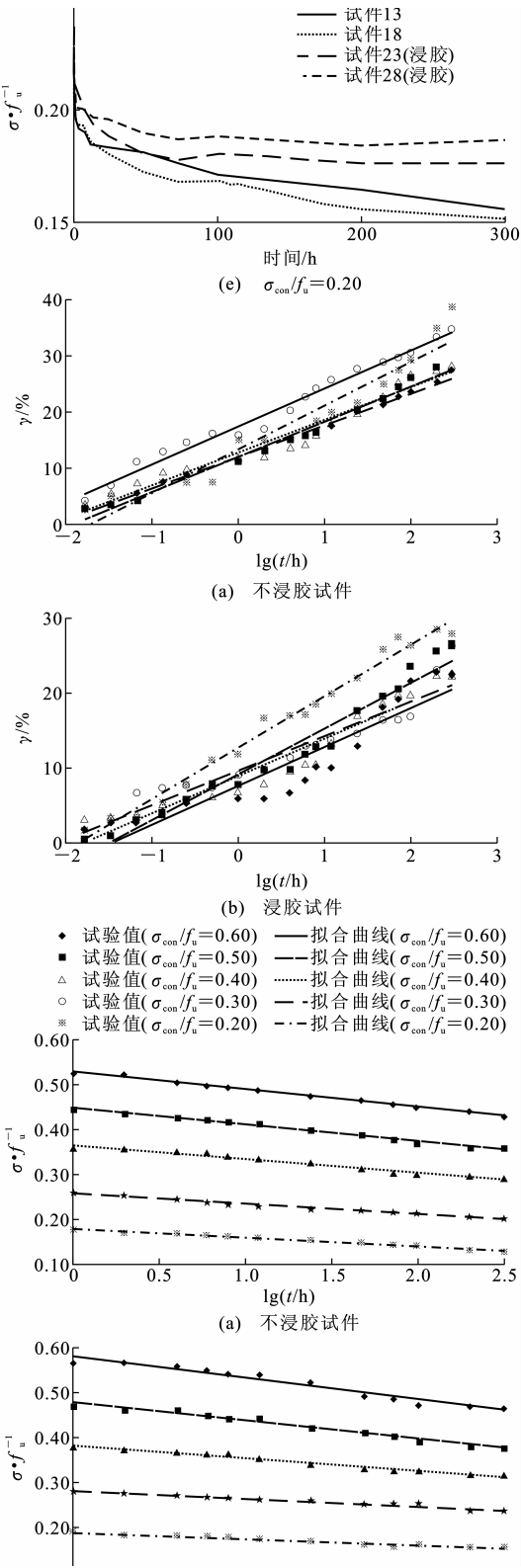


图 2 试件的应力变化

Fig. 2 Stress Variations of Specimens

对其进行线性拟合,即

$$\frac{\sigma}{f_u} = a + b \lg(t/h) \quad (2)$$

式中: a 、 b 为系数。

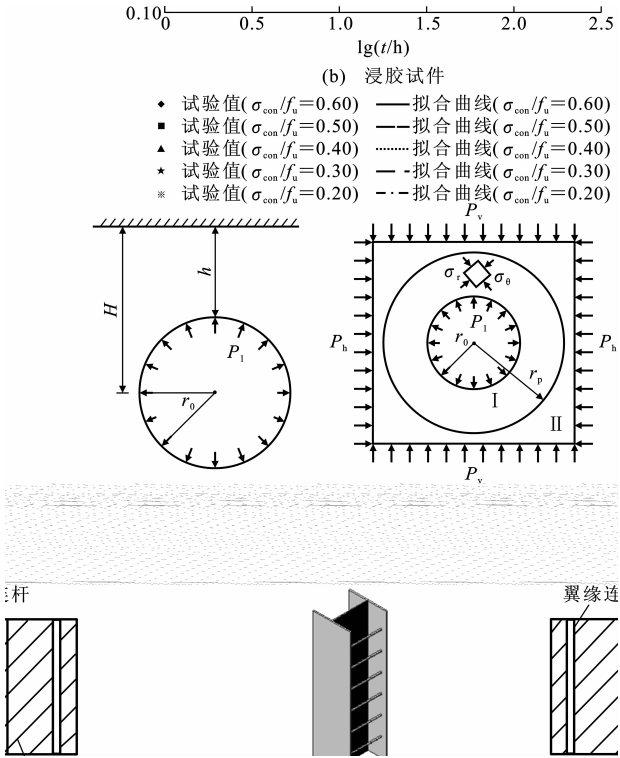


图 3 试件应力松弛率均值与时间对数的关系

Fig. 3 Relations Between Stress Relaxation Ratio Means of Specimens and Time Logarithms

表 3 应力松弛率拟合系数

Tab. 3 Fitting Coefficients of Stress Relaxation Ratios

设计预 应力/MPa	不浸胶试件			浸胶试件		
	α	β	R_1	α	β	R_1
1 236	12.040	5.649 7	0.988 9	7.585 3	5.188 8	0.878 3
1 030	12.005	6.296 6	0.984 2	9.047 5	6.152 3	0.958 3
824	12.724	5.759 4	0.951 3	8.829 5	4.947 7	0.926 7
618	17.522	6.805 5	0.984 3	9.636 0	4.618 7	0.914 3
412	13.431	7.786 2	0.939 7	12.648 0	6.848 5	0.984 8

根据各试件测试数据均值进行数理统计回归求出系数 a 、 b 及相关系数 R_2 , 线性拟合系数及应力预测结果见表 4。由表 4 可知, 5 年后不浸胶和浸胶 AFRP 布的应力松弛率均达到 50 年后其相应应力松弛率的 83% 以上, 故可认为二者的应力松弛在 5 年后基本稳定。

3 结 语

(1) 预应力 AFRP 布的应力松弛呈现前期发展快、后期发展较慢的规律, 200 h 后基本稳定。

(2) 浸胶 AFRP 布的应力松弛损失小于不浸胶 AFRP 布的应力松弛损失。

(3) 预应力 AFRP 布的应力松弛损失值随预应力水平的提高而增大。

表 4 应力松弛拟合系数及应力预测结果

Tab. 4 Forecast Results of Stress and Fitting Coefficients of Stress Relaxation

AFRP 布类型	设计预应力/MPa	a	b	R_2	1 年后应力比	5 年后应力比	50 年后应力比	5 年与 50 年应力松弛率比/%
不浸胶	1 236	0.527 2	-0.038 8	0.993 6	0.374	0.347	0.308	86.6
	1 030	0.448 2	-0.037 1	0.990 0	0.302	0.276	0.240	86.2
	824	0.365 5	-0.031 4	0.971 5	0.242	0.220	0.188	84.9
	618	0.257 2	-0.023 3	0.979 8	0.165	0.149	0.126	86.8
	412	0.178 4	-0.019 3	0.918 6	0.102	0.089	0.070	85.4
浸胶	1 236	0.581 4	-0.049 2	0.950 5	0.387	0.353	0.304	83.4
	1 030	0.478 7	-0.041 3	0.970 6	0.316	0.287	0.246	85.0
	824	0.381 7	-0.028 6	0.973 2	0.269	0.249	0.221	83.9
	618	0.282 0	-0.018 3	0.875 1	0.210	0.197	0.179	84.4
	412	0.188 8	-0.014 7	0.954 4	0.131	0.121	0.106	84.0

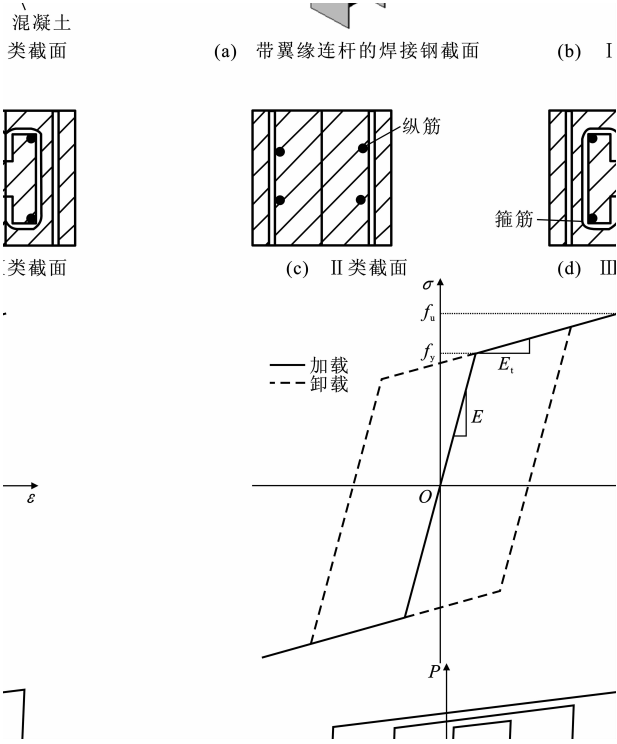


图 4 试件应力比均值与时间对数的关系

Fig. 4 Relations Between Stress Ratio Means of Specimens and Time Logarithms

(4)10℃~30℃条件下,温度对 AFRP 布的应力松弛影响不明显。

参考文献:

References:

[1] 尚守平,彭 晖,童 桦,等. 预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2003,24(5):24-30.
SHANG Shou-ping, PENG Hui, TONG Hua, et al. Study of Strengthening Reinforced Concrete Beam Using Prestressed Carbon Fiber Sheet[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5): 24-30.

[2] 飞 渭,江世永,彭飞飞,等. 预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003,29(2):56-60.
FEI Wei, JIANG Shi-yong, PENG Fei-fei, et al. Experimental Study on Flexural Strength of RC Beams Strengthened with Prestressed CFRP Sheets [J]. Building Science Research of Sichuan, 2003, 29(2): 56-60.
[3] 张建伟,杜修力,邓宗才,等. 预应力芳纶纤维布加固混凝土梁的受弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(5):101-109.
ZHANG Jian-wei, DU Xiu-li, DENG Zong-cai, et al. Study on Flexural Performance of RC Beams Strengthened with Prestressed AFRP Sheets [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(5): 101-109.
[4] 杜修力,张建伟,邓宗才. 预应力 FRP 加固混凝土结构技术研究与应用[J]. 工程力学, 2007, 24(增2): 62-74.
DU Xiu-li, ZHANG Jian-wei, DENG Zong-cai. Technology and Application of Strengthening RC Structure with Prestressed FRP [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(S2): 62-74.
[5] 张建伟,杜修力,邓宗才,等. 预应力芳纶纤维布加固混凝土梁的疲劳试验[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(1):70-77.
ZHANG Jian-wei, DU Xiu-li, DENG Zong-cai, et al. Experimental Study on Fatigue Performance of RC Beams Strengthened with Prestressed AFRP Sheets [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(1): 70-77.
[6] 孟履祥,徐福泉,关建光,等. 碳纤维筋(CFRP 筋) 松弛损失试验研究[J]. 施工技术, 2005, 34(7): 40-41.
MENG Lu-xiang, XU Fu-quan, GUAN Jian-guang, et al. Experiment Study on Relaxation Losses of CFRP Tendons[J]. Construction Technology, 2005, 34(7): 40-41.

- [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- [4] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2005.
CHEN Shao-fan. Principles of Steel Structure Design [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2005.
- [5] 饶芝英, 童根树. 钢结构稳定性的新诠释[J]. 建筑结构, 2002, 32(5): 12-14.
RAO Zhi-ying, TONG Gen-shu. New Concept of Stability of Steel Structure[J]. Building Structure, 2002, 32(5): 12-14.
- [6] 闫月梅. 多高层钢结构框架的整体稳定分析[J]. 西安科技学院学报, 2003, 23(4): 382-385.
YAN Yue-mei. Overall Stability Analysis of High-rise Steel Frames[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2003, 23(4): 382-385.
- [7] 刘学武, 郭彦林. 考虑几何非线性钢结构施工力学分析方法[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(2): 161-169.
LIU Xue-wu, GUO Yan-lin. Construction Mechanics Analytical Procedures for Steel Structures in View of the Geometric Nonlinearity[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(2): 161-169.
- [8] 申红侠, 陈绍蕃. 钢梁支承加劲肋的计算长度[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2006, 38(5): 660-663.
SHEN Hong-xia, CHEN Shao-fan. Effective Length of Bearing Stiffener of Steel Girders[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2006, 38(5): 660-663.
- [9] 郭彦林, 刘学武. 大跨度钢结构屋盖拆撑过程数值模拟的千斤顶-间隙单元法[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(1): 1-7.
GUO Yan-lin, LIU Xue-wu. Jack-gap Element Model for Numerical Simulation of Removing Temporary Supports of Large-span Steel Structural Roof [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(1): 1-7.
- [10] 陈 冀. 钢结构稳定理论与设计[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2006.
CHEN Ji. Theory and Design of Stability of Steel Structures[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2006.
- (上接第 77 页)
- [7] 李世宏. 碳纤维布应力松弛试验研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(4): 72-75.
LI Shi-hong. Experimental Study on Relaxation of CFS[J]. Building Structure, 2009, 39(4): 72-75.
- [8] 邓宗才, 李建辉, 张建军, 等. 芳纶纤维布应力松弛试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(6): 110-112.
DENG Zong-cai, LI Jian-hui, ZHANG Jian-jun, et al. Experimental Study on Stress Relaxation of Aramid Fiber Sheets[J]. Building Structure, 2008, 38(6): 110-112.
- [9] 程云虹, 吕念春. 纤维增强混凝土的动态断裂模型[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(4): 462-468.
CHENG Yun-hong, LU Nian-chun. Dynamic Crack Model of Fibre Concrete[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(4): 462-468.
- [10] 张兴虎, 李 源, 张保印. 碳素纤维布加固铁路桥梁疲劳试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(4): 520-523, 528.
ZHANG Xing-hu, LI Yuan, ZHANG Bao-yin. Fatigue Study on the Railway Beam Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Plastic Sheet [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(4): 520-523, 528.