

文章编号: 1673-2049(2014)03-0058-06

GFRP-花旗松胶合木夹芯桥面板受弯性能 试验与结构设计

方海, 韩娟, 刘伟庆, 祝露

(南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 采用花旗松胶合木作为芯材, 玻璃纤维增强复合材料(GFRP)作为面层制备夹芯结构桥面板, 在对花旗松胶合木芯材和 GFRP 开展基本力学性能试验研究的基础上, 开展了 GFRP-花旗松胶合木夹芯梁的受弯性能试验, 得出了其荷载-跨中挠度曲线与 GFRP 荷载-跨中应变曲线, 并对抗弯刚度测试值与理论计算值进行了对比; 针对某 GFRP-花旗松胶合木桥面板, 提出了完整的结构设计流程, 给出了桥面板的合理设计参数。研究结果表明: GFRP-花旗松胶合木桥面板应用于钢梁-复合材料桥面板组合桥梁结构较为可行。

关键词: GFRP; 胶合木; 夹芯结构; 桥面板; 抗弯刚度

中图分类号: TU399

文献标志码: A

Experiment on Bending Capacity and Structural Design of GFRP-pseudotsuga Taxifolia Glulam Bridge Deck

FANG Hai, HAN Juan, LIU Wei-qing, ZHU Lu

(School of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract: The bridge panel of sandwich structure was manufactured by using pseudotsuga taxifolia glulam as core materials and glass fiber reinforced polymer (GFRP) as surface course. The bending experiment of GFRP-pseudotsuga taxifolia glulam beam was carried out based on basic mechanical property of pseudotsuga taxifolia glulam core materials and GFRP. From the bending experiment, the load-midspan deflection curve and GFRP load-midspan strain curve were got, and the test value was compared with theoretical value of bending stiffness. It brought up a whole structured design process of a sandwich structure bridge deck, and gave the design parameter of bridge deck. The study results show that using GFRP-pseudotsuga taxifolia glulam bridge deck into girder-composite bridge panel is feasible.

Key words: GFRP; glulam; sandwich structure; bridge deck; beading stiffness

0 引言

欧美自 1985 年开始了纤维增强复合材料(FRP)桥面板在结构工程中的应用研究, 并付诸于实际工程^[1], 如 1996 年 FRP 桥面板体系较早应用

在美国堪萨斯州沙漠附近的无名沟壑上架起的一座公路桥, 此后, FRP 桥面板在美国近百座中短跨桥梁中得到应用^[2]。

FRP 桥面板的基本结构主要有 2 种形式, 即夹芯板结构和拉挤型材粘合结构^[3]。拉挤型材桥面板

收稿日期: 2014-05-11

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51238003); 江苏省自然科学基金项目(55130005)

作者简介: 方海(1981-), 男, 江苏仪征人, 副教授, 工学博士, E-mail: fanghainjut@163.com。

可以连续生产,生产效率高,原材料浪费少,整体性和截面形状一致性好,其型材长度不受限制,是目前各国主要采用的桥面板结构形式,但是拉挤工艺制造的构件截面形式固定,不能根据桥梁跨度大小灵活设计调整^[4]。FRP 夹芯板由高强度、高模量的面层与轻质芯材复合而成,面层承受弯曲正应力,芯材提高了结构惯性矩,并提供剪切强度。尽管这种结构存在成本高以及结构的固定和连接性能差等缺点,但是能够根据荷载条件进行灵活设计制造。采用蜂窝夹层法的桥面板有 Hardcore 和 KSCI 等系统,夹芯桥面板一般采用真空导入成型工艺或手糊法制造^[5]。国外较早应用 FRP 夹芯桥面板的桥梁是美国加利福尼亚州的 No Name Creek 桥^[6],现场施工安装只用了 8 h。Stone 等^[7]对密苏里州街区桥上的 KSCI 系统进行加载测试,他们也采用 Hardcore 桥面板的 Bennetts Creek 桥^[8]进行了现场加载测试,结果均符合 AASHTO 标准。2001 年美国缅因大学参考 AASHTO LRFD 设计方法在缅因州设计建造了 SKIDMORE 桥^[9],该桥采用东部铁杉胶合木作为芯材,GFRP 为面层。

胶合木作为一种结构用材有较多优点:①胶合工艺使原木材中的缺陷均匀分布,并能够有选择性地剔除原木中存在的节子、孔洞等天然缺陷,胶合后材料具有容许应力高、变异系数小等特点;②胶合木不受天然木材尺寸的限制,能够被制成满足建筑和结构要求的各种尺寸构件,能够直接加工成曲线、异型构件,可满足多种需要,尤其能满足大截面、大跨度构件的需要;③胶合木在加工过程中,其板材得到了充分干燥,能够保证构件尺寸和形状的稳定,减少了裂缝和变形对构件功能的影响;④可用次生和三生树林以及人造林的小树,制成大型胶合木构件,可以扩大结构用材的树种。

本文中笔者提出采用性能稳定的花旗松胶合木作为芯材,GFRP 作为面层的夹芯结构桥面板,应用于中小跨度桥梁中,具有轻质、易安装、防除冰盐腐蚀等优点,应用前景广阔。

1 GFRP-花旗松胶合木夹层板的结构构造与制备

1.1 结构构造

GFRP-花旗松胶合木夹层板由 GFRP 面板和花旗松胶合木芯材组合而成,中间为花旗松胶合木芯材,上下为 GFRP 面板,如图 1 所示。

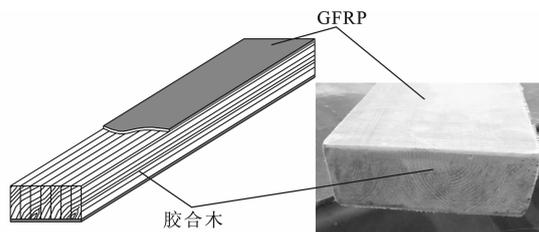


图 1 GFRP-花旗松胶合木夹层板结构

Fig. 1 Structure of GFRP-pseudotsuga Taxifolia Glulam Sandwich Plate

1.2 制备过程

1.2.1 原材料

玻璃纤维采用常州天马集团有限公司生产的双轴向玻璃纤维布,铺层设计为 0° 或 90° ,纤维纵横向比例为 1:1。基体材料采用常州华科树脂有限公司生产的间苯级不饱和聚酯树脂,粘度为 $0.1 \sim 0.15 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,较适合于真空导入成型工艺。

1.2.2 制备工艺

花旗松胶合木芯材采用宽度为 35 mm 的花旗松木板侧面胶合,经制材、窑干、木材分级、指接、抛光、涂胶、加压胶合、整形加工、检验等主要加工工艺制成。将花旗松胶合木芯材表面铺设 GFRP 布,进行真空导入操作即可完成 GFRP-花旗松胶合木夹层板构件的制备。

1.3 组分材料基本力学性能

1.3.1 花旗松胶合木芯材基本力学性能

基于木材正交各向异性的特征,根据中国《木材顺纹抗拉强度试验方法》(GB 1938—2009)^[10]和 ASTM D143-94^[11]进行了木材拉伸试验;根据《木材顺纹抗压强度试验方法》(GB 1935—2009)^[12]、《木材顺纹抗压弹性模量测定方法》(GB/T 15777—1995)^[13]、《木材横纹抗压试验方法》(GB 1939—2009)^[14]、《木材横纹抗压弹性模量测定方法》(GB 1943—2009)^[15]测试了木材的抗压性能;根据《木材顺纹抗剪强度试验方法》(GB 1937—2009)^[16]进行了木材剪切性能试验,材性测试结果见表 1。

1.3.2 GFRP 面层材性试验

GFRP 面层由 GFRP 布与不饱和聚酯树脂固化而成。试件按照《玻璃纤维增强塑料拉伸性能试验方法》(GB/T 1447—2005)制作,试验装置如图 2 所示,试件两端采用铝板对夹持端进行增强,使试件不至于在夹持处发生破坏。

试验采用德国进口 Zwick/Roell 电子拉伸试验机,按照 DIN EN ISO 527-4 试验标准,试验速度为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,连续加载,并用 3816 应变箱测试应

表1 胶合木芯材基本力学性能测试结果

Tab. 1 Test Results of Basic Mechanical Behavior of Glulam

材料	弹性模量/MPa		剪切模量/MPa		剪切强度/MPa		压缩强度/MPa		拉伸强度/MPa
	顺纹	横纹	顺纹	横纹	顺纹	横纹	顺纹	横纹	顺纹
花旗松	12 236	780	910	1 180	10.85	8.14	56.70	7.47	102.12

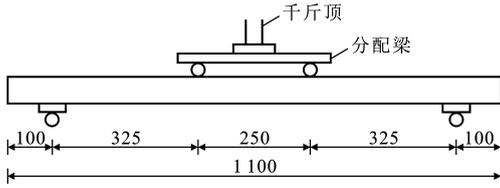


图2 试验装置示意(单位:mm)

Fig. 2 Schematic of Test Device (Unit:mm)

变情况。GFRP 面层拉伸性能测试结果见表 2。

利用试件上的应变片纵向与横向数值,测出 GFRP 面板的面内泊松比为 0.15。根据《纤维增强塑料纵横剪切试验方法》(GB/T 3355—2005)进行腹板纵横向剪切试验,根据标准规定,对于正交纤维增强平板纵横向剪切试验,取纤维方向与试验机主拉伸方向成 45° 角,所以此种试验方法被称作 45° 偏

表2 GFRP 面层拉伸性能测试结果

Tab. 2 Tensile Performance Test Results of GFRP Skin

序号	厚度/mm	宽度/mm	拉伸强度/MPa		面板面内弹性模量 E_t /GPa		极限应变	
			试验值	平均值	试验值	平均值	试验值	平均值
1	3.16	24.90	305.2	322.9	19.99	20.952	0.042	0.043
2	3.06	24.08	290.9		20.28		0.041	
3	3.10	26.04	337.7		20.45		0.043	
4	3.18	25.22	351.3		20.74		0.052	
5	3.26	25.02	329.4		23.30		0.036	

轴拉伸试验方法。断裂处的断面成 45° 角,GFRP 面层剪切性能测试结果如表 3 所示。

表3 GFRP 面层剪切性能测试结果

Tab. 3 Shear Performance Test Results of GFRP Skin

序号	厚度/mm	宽度/mm	剪切模量/GPa		变异系数/%
			试验值	平均值	
1	2.48	24.16	3.81	3.62	30.3
2	2.54	25.00	3.58		
3	2.58	24.32	3.48		
4	2.44	24.18	3.22		
5	2.46	24.58	4.01		

2 GFRP-花旗松胶合木夹层梁受弯性能试验与结果分析

2.1 试验方案

GFRP 面层厚度为 3 mm,试件长度为 1 100 mm,宽度为 150 mm;花旗松胶合木芯材厚度分别取 48 mm(试件 J48-F3)和 54 mm(试件 J54-F3)。

试验在反力架上进行,采用 200 kN 量程的千斤顶进行逐级加载,每级荷载为 1 kN,并通过力传感器量测千斤顶施加的荷载。通过分配梁在夹层梁上形成 2 个加载点,加载点之间距离为 250 mm,在加载点处铺设细条橡胶垫以防止局部破坏,支座间距为 900 mm。在梁跨中设置位移传感器测试挠

度,利用梁跨中上下侧 GFRP 层的 2 个应变片测试面层应力,试验装置如图 2 所示。

2.2 受弯破坏模式

试件 J48-F3 与试件 J54-F3 为 GFRP-花旗松胶合木夹层板,胶合木芯材厚度有所不同,两者的破坏现象虽然相近,但是也有所区别:

(1)对于试件 J48-F3,加载初期无变化,当加载至 21 kN 时出现轻微响声,加载至 26 kN 时出现连续噼啪响声,夹层板的挠度迅速增大,加载至 31 kN 时发生破坏,破坏现象为上面层压皱断裂错层,芯材有裂纹,破坏现象如图 3(a)所示。

(2)对于试件 J54-F3,由于该试件的芯材厚度有所增加,故加载至 38 kN 时试件才出现轻微响声,当加载至 42 kN 时出现连续轻微响声,荷载增至 49 kN 时发生巨大响声,芯材下部木材拉坏,试件随即破坏,破坏现象如图 3(b)所示。

2.3 试验结果分析

以试件 J54-F3 测试结果为例进行分析,其荷载-跨中挠度曲线与 GFRP 荷载-跨中应变曲线分别如图 4、5 所示。

从图 4 可知,在外荷载为 10 kN 的情况下,跨中挠度仅为 4.37 mm,整体刚度较大。由图 5 可知,荷载-跨中应变关系在整个加载过程中基本呈线性关系。夹芯板的上面板与下面板 GFRP 的应变基

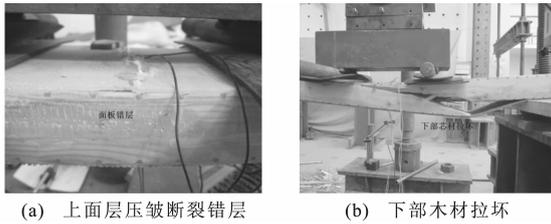


图 3 GFRP-花旗松胶合木夹层板破坏模式
Fig. 3 Failure Modes of GFRP-pseudotsuga Taxifolia Glulam Sandwich Plate

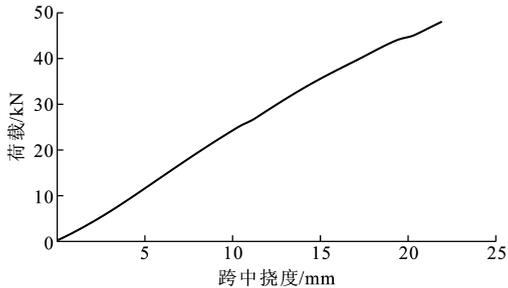


图 4 试件 J54-F3 的荷载-跨中挠度曲线

Fig. 4 Load-midspan Deflection Curve of Specimen J54-F3

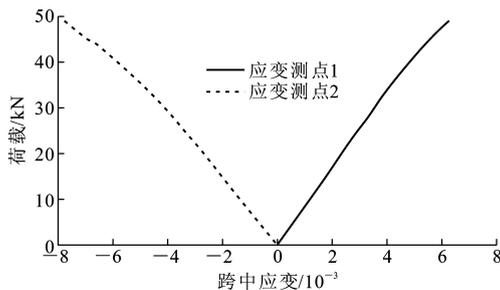


图 5 试件 J54-F3 的 GFRP 荷载-跨中应变曲线
Fig. 5 GFRP Load-midspan Strain Curves of Specimen J54-F3

本相等,上面板的应变略大。

Allen^[17]于 1969 年提出,当面板厚度远小于芯材厚度,上下面板厚度相等且芯材的弹性模量大于泡沫、蜂窝等芯材时,木质芯材,包括轻木、泡桐木、胶合木等,夹层板的抗弯刚度 D 可近似用下式表示

$$D = E_f \frac{bt d^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \quad (1)$$

式中: E_c 为芯材的顺纹弹性模量; t 为单面板的厚度; c 为芯材的厚度; d 为芯材的厚度与单面板厚度之和; b 为夹层板的宽度。

将表 1,2 中芯材与面层的基本力学性能测试值以及试件尺寸代入式(1),即可以计算得到 GFRP-花旗松胶合木夹层板试件 J54-F3 的抗弯刚度为 $39 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$,而试件 J54-F3 的抗弯刚度试验值为 $34 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$,两者相差 12.8%。

分析误差产生的原因是:受弯试件仅上下层面为 GFRP,而四周未被 GFRP 包裹,试件暴露于空气中时间过长,其胶合木芯材存在吸湿现象,从而导致弹性模量下降,继而抗弯刚度试验值略小于计算值。该试件在应用于桥面板工程时,胶合木芯材上下及四周均被 GFRP 包裹,不存在吸湿等现象;同时在进行结构设计时,GFRP 和胶合木芯材的基本力学性能均采用设计值,从而保证结构的安全度。

3 复合材料桥面板结构设计

上述通过试验和理论方法对比了 GFRP-花旗松胶合木夹层板的弯曲刚度求解公式和破坏模式。将该夹层板应用于某公路单车道车行桥,如图 6 所示。该桥由 3 根钢主梁支承横向桥面板结构体系,主梁中心线之间的距离为 1.8 m,设计荷载为公路 I 级。桥面板最大挠度限制为 $L/500$, L 为桥长。

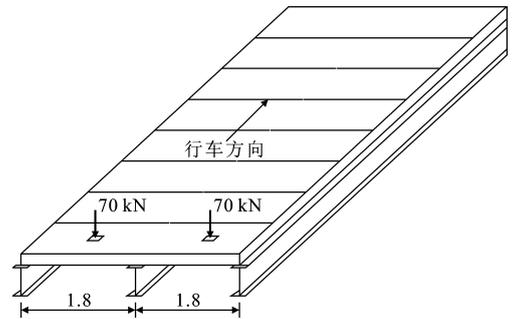


图 6 某公路桥设计示意(单位:m)

Fig. 6 Design Schematic of Vehicular Bridge (Unit: m)

3.1 结构尺寸与设计荷载

3.1.1 材料属性

在设计胶合木构件时,一般将其视为整体截面构件而不考虑胶缝的影响。国外对这种胶合木构件已经形成标准化设计与生产,并在试验的基础上确定其强度设计值。中国目前由于缺乏系统的试验工作和足够的试验数据,同时又不能简单引用国外规范,因此在《木结构设计规范》(GB 50005—2003)中,胶合木构件的强度设计值和弹性模量取值仍与截面相同的实木构件相同,然后根据相应的调整系数进行调整。

花旗松胶合木清材小构件的强度标准值为

$$f_k = u_f - 1.645\sigma_f \quad (2)$$

式中: f_k 为材料强度的标准值; u_f 为材料强度的平均值; σ_f 为材料强度的标准差。

首先将花旗松胶合木试验结果平均值转化为标准值,即可得出花旗松清材的力学性能,如表 4 所示。在胶合木构件中,由于木材的很多天然缺陷被

人工剔除或均匀分布于构件中,因此其对材料强度的影响相对于实木材料要低很多。结合本课题组的制造现状,建议系数 K_{Q1} 值对于拉、压、弯分别取为 0.73, 0.88, 0.83。综合以上分析,计算得出花旗松胶合木的强度设计值(表 4), GFRP 的抗拉强度设计值为 144 MPa, 其弹性模量设计值为 20.95 GPa。

表 4 花旗松强度设计值

Tab. 4 Design Strength Values of Pseudotsuga Taxifolia

材料	E_x /GPa	f_t /MPa	f_c /MPa	f_v /MPa
花旗松	12.236	17.00	13.57	2.80

注: E_x 为花旗松顺纹弹性模量; f_t , f_c , f_v 分别为材料在顺纹方向的抗拉强度、抗压强度和抗剪强度设计值。

3.1.2 内力计算

(1) 恒载引起的内力

桥面板横向支承于钢梁时多采用连续梁形式,中间支点对跨中正弯矩有卸载的作用,使内力状态比较均匀合理。因此首先计算桥面板的自重,将其作为均布荷载 q 作用于桥面板连续梁分析模型中,计算简图即为恒载引起的弯矩图和剪力图(图 7)。

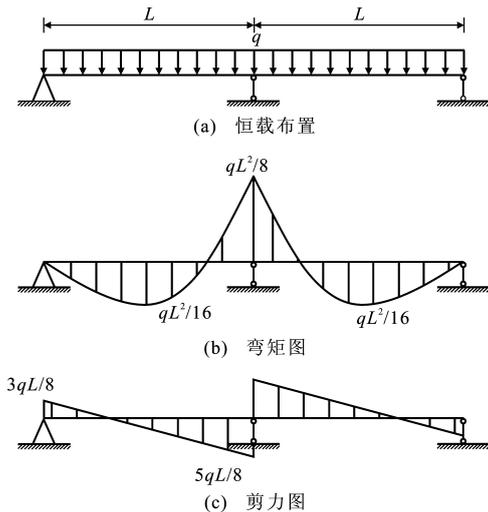


图 7 恒载计算简图

Fig. 7 Calculation Diagrams of Dead Load

(2) 活载引起的内力

计算车轮荷载 P 并考虑冲击作用,进行荷载组合得到桥面板活载设计值。由于本设计方案的主梁中心线之间的距离为 1.8 m,故按计算简图确定活载引起的最不利弯矩图和剪力图(图 8)。

若主梁中心线之间的距离大于 3 m,则可能同时有 2 个车轮作用于桥面板的一跨中,因此荷载布置和内力分布并非如图 8 所示,桥面板需要按最不利工况进行设计。

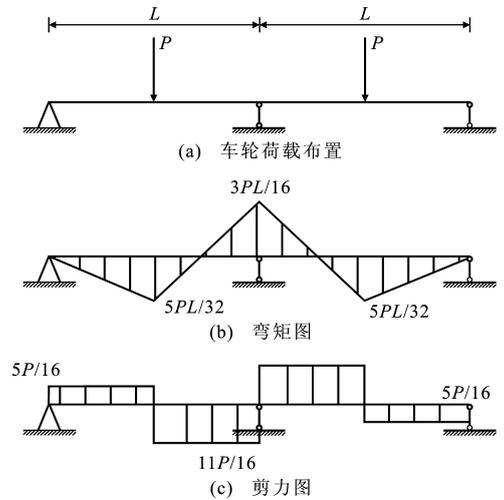


图 8 活载计算简图

Fig. 8 Calculation Diagrams of Live Load

3.1.3 强度验算

取最不利截面的弯矩和剪力,利用换算截面法验证 GFRP 面层和胶合木的正应力和剪应力是否大于材料强度,即要求保证

$$\gamma_0 S \leq R \quad (3)$$

式中: γ_0 为桥梁结构的重要性系数; S 为荷载效应组合的设计值; R 为结构构件抗力的设计值。

3.1.4 挠度验算

由于复合材料桥面板自重较小,故使用考虑剪切效应的铁木辛柯公式求解活载引起的挠度。双跨连续梁由于中间支座的支承,挠度大为降低,桥面板跨中挠度 Δ 的计算公式为^[18]

$$\Delta = \Delta_b + \Delta_s = \frac{7ps^3}{1536EI} + \frac{73ps}{512GA} \quad (4)$$

式中: Δ_b 为弯曲引起的挠度; Δ_s 为剪切引起的挠度; p 为车辆单轮荷载; s 为桥面板有效跨度; EI 为桥面板等效弯曲刚度; GA 为桥面板等效剪切刚度。

3.2 结果分析

桥面板初始设计值:桥面板长度为 3.6 m,宽度为 0.5 m,总厚度为 170 mm;采用 160 mm 的花旗松胶合木芯材以及上下各 5 mm 的 GFRP 面层,由式(4)计算得到桥面板跨中挠度为 1.85 mm。

按 AASHTO LRFD 的规定,木结构桥梁的挠度限值为 2.5 mm,另一种在纯胶合木桥面板设计中广泛使用的挠度限值为有效跨度的 1/500,本文中提出采用下式对挠度限值 $\Delta_{LL,lim}$ 进行验算

$$\Delta_{LL,lim} = \min\left\{\frac{s}{500}, 2.5 \text{ mm}\right\} \quad (5)$$

计算可得到桥面板跨中挠度小于 2.5 mm,满足挠度要求。将计算得出的弯曲正应力、剪应力与

组分材料的强度设计值进行对比,均满足设计要求,故本桥面板的初始设计参数满足设计要求。

4 结 语

(1)介绍了GFRP-花旗松胶合木夹层板的材料组成与制备工艺,并根据相关规范得出了GFRP面层和胶合木芯材的基本力学性能测试值。

(2)开展了GFRP-花旗松胶合木夹层板的弯曲性能试验,观测了其破坏现象,其抗弯刚度测试值与理论值相差为12.8%。

(3)针对某小型GFRP-花旗松胶合木桥面板工程案例,提出了完整的结构与验算流程,给出了桥面板的合理设计参数。

参考文献:

References:

- [1] LUKE S, CANNING L, COLLINS S, et al. Advanced Composite Bridge Decking System—Project ASSET [J]. *Structural Engineering International*, 2002, 12(2):76-79.
- [2] ZUREIEK A. Fiber Reinforced Polymeric Bridge Decks[C]//FHWA. *The National Seminar on Advanced Composite Material Bridges: Advancing FRP Bridge and Structure into the 21st Century*. Washington DC: FHWA, 1997:1-10.
- [3] BAKIS C E, BANK L C, BROWN V L, et al. Fiber-reinforced Polymer Composites for Construction—State-of-the-art Review[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(2):73-87.
- [4] 万水, 胡红, 周荣星. FRP桥面板结构特点与实例[J]. *南京理工大学学报:自然科学版*, 2005, 29(1):17-21.
WAN Shui, HU Hong, ZHOU Rong-xing. *Structural Characteristics of FRP Bridge Decks and Its Application Instance in Bridge Engineering* [J]. *Journal of Nanjing University of Technology: Natural Science Edition*, 2005, 29(1):17-21.
- [5] 付翰香, 薛元德, 李文晓. 拉挤成型FRP桥面板的研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2003(6):45-48.
FU Han-xiang, XUE Yuan-de, LI Wen-xiao. *Research of Pultruded FRP Bridge Deck* [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composite*, 2003(6):45-48.
- [6] 叶列平, 冯鹏. FRP在工程结构中的应用与发展[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(3):24-36.
YE Lie-ping, FENG Peng. *Applications and Development of Fiber-reinforced Polymer in Engineering Structures* [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(3):24-36.
- [7] STONE D, NANNI A, MYERS J J. Field and Laboratory Performance of FRP Bridge Panels [C]//FIGUEIRAS E J, JUVANDERS L, FARIA R. *Proceedings of International Conference Composites in Construction*. London: Balkema A A, 2001:701-706.
- [8] ZHOU A X. *Stiffness and Strength of Fiber Reinforced Polymer Composite Bridge Deck* [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [9] LOPEZ-ANIDO R, GARDNER D J, HENSLEY J L. Adhesive Bonding of Eastern Hemlock Glulam Panels with E-glass/Vinyl Waster Reinforcement[J]. *Forest Products Journal*, 2000, 50(11/12):43-47.
- [10] GB 1938—2009, 木材顺纹抗拉强度试验方法[S]. GB 1938—2009, Method of Testing in Tensile Strength Parallel to Grain of Wood[S].
- [11] ASTM D143-94, Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber[S].
- [12] GB 1935—2009, 木材顺纹抗压强度试验方法[S]. GB 1935—2009, Method of Testing in Compressive Strength Parallel to Grain of Wood[S].
- [13] GB/T 15777—1995, 木材顺纹抗压弹性模量测定方法[S]. GB/T 15777—1995, Method for Determination of the Modulus of Elasticity in Compressive Parallel to Grain of Wood[S].
- [14] GB 1939—2009, 木材横纹抗压试验方法[S]. GB 1939—2009, Method of Testing in Compression Perpendicular to Grain of Wood[S].
- [15] GB 1943—2009, 木材横纹抗压弹性模量测定方法[S]. GB 1943—2009, Method for Determination of the Modulus of Elasticity in Compression Perpendicular to Grain of Wood[S].
- [16] GB 1937—2009, 木材顺纹抗剪强度试验方法[S]. GB 1937—2009, Method of Testing in Shearing Strength Parallel to Grain of Wood[S].
- [17] ALLEN H G. *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels* [M]. London: Pergamon Press, 1969.
- [18] DAVALOS J F, CHEN A, QIAO P Z. *FRP Deck and Steel Girder Bridge Systems* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013.