

新型玻璃纤维增强复合材料

——轻木夹心桥面板概念、设计及试验验证

李春生¹, 周兴党¹, 高雁波¹, 颜美² 编译

(1.云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041; 2.云南省城乡规划设计研究院)

摘要:描述了位于瑞士贝克斯(Bex)的阿旺松(Avançon)桥梁的概念、设计和试验验证。通过采用轻质玻璃纤维增强复合材料(GFRP)夹心桥面板与钢主梁进行胶黏结的方式,因施工造成的交通中断时间比传统混凝土现浇方式缩短了近40 d(节省约80%的时间),且实现了双车道的扩展。通过半整体式的设计方案,可实现沥青层从桥台至桥面板的连续铺装,从而避免了伸缩缝的使用及简化了维护工作。带有轻木夹心的桥面板在结构性能上满足所有设计准则的要求,包括使用和承载能力极限状态和疲劳性能,然而桥面板尺寸很大程度上取决于选取和采用的设计准则。对于阿旺松桥,德国和英国准则提供了最保守的材料系数,而荷兰准则最不保守;欧洲准则介于两者之间。计算刚度时的材料系数选取会影响桥面板的组成和材料用量。

关键词:桥面板;组合桥梁;夹心桥面板;夹心结构;纤维增强塑料;纤维增强复合材料

玻璃纤维增强复合材料(Glass Fiber-Reinforced Polymer, GFRP)在桥面板中具有良好的应用前景。玻璃复材桥面板有耐腐蚀及轻质等优点,且可快速安装和替换现有的重混凝土桥面板从而实现桥面加宽或升级。玻璃复材桥面板有两种基本形式:①由拉挤型材胶结组成的正交异性桥面板;②夹心桥面板。与前者相比,夹心桥面板具有优越的几何协调性,能适应较大跨度或斜交的桥面结构。夹心桥面板通常由上下表层和中间的蜂窝或泡沫夹心组成。使用泡沫夹心时,一般需要设置额外的玻璃复材腹板来提高夹心层的抗剪承载力。然而,不管是蜂窝还是泡沫夹心,腹板对上表层提供的支撑刚度都不均匀,从而容易造成高频轮载下上表层与夹心层间的剥离。

为同时达到足够的抗剪承载力和均匀的上表层支撑,Keller设计了一种使用轻型混凝土夹心的玻璃复

材—混凝土组合桥面板。另外一种能满足抗剪要求的可选夹心材料则是轻木;其中,木材纤维方向与上表层主向相垂直。

基于轻木优越的力学性能,该文提出一种玻璃复材—轻木夹心桥面板结构,并应用于一座位于瑞士贝克斯横跨阿旺松河流的桥梁。该文介绍这种新型桥面板的概念、设计和试验验证。

1 阿旺松桥的设计和施工

1.1 背景和桥梁尺寸

建于1900年横跨瑞士贝克斯阿旺松河流的一座混凝土老桥因严重的腐蚀问题亟需更新替换。替换后,11.45 m跨桥梁的桥宽由原来的5.3 m增加到7.5 m,从而实现单车道至双车道的扩展。根据瑞士SIA

[5] 彭波,尹光凯,李海宁,等.骨架密实型水泥稳定碎石级配设计与分形评价[J].中外公路,2016(3).

[6] 李立伟,李国峰,蒋应军.基于VTM水泥稳定碎石疲劳强度特性[J].公路工程,2012(4).

[7] 张洪伟,高志伟,常明丰,等.橡胶颗粒沥青混合料矿料级配的分形评价[J].武汉理工大学学报,2011(1).

[8] 王立久,刘慧.基于分形理论嵌挤结构级配设计的研究[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2009(5).

[9] 张飞,于江,李林萍,等.嵌挤密实型沥青混合料级配分形评价[J].中外公路,2013(6).

[10] 李淑明,许志鸿.水泥稳定碎石基层的最低疲劳强度和抗压强度[J].建筑材料学报,2007(2).

261 标准,新桥的车辆荷载需从 280 kN 增加到 400 kN。由于该桥位于山区且是通向贝克斯后山谷的唯一途径,因施工造成的交通阻断须最小化;因此,原有 6 m 高、且未被腐蚀的石头承台需要保留。但由于承台承载能力的限制,新桥中因车道扩展造成的车载增加需通过使用轻型上部结构来弥补。另外,设计中还需考虑几何约束因素,如 65° 的桥面斜交角和 8% 的纵坡。为简化后期维护,设计中采用了不带伸缩缝的半整体式方案,即沥青铺装层从承台连续至桥面。

1.2 桥梁结构概念和细节

通过不同结构、材料和施工方案的对比研究表明:轻质夹心桥面板与两根纵向钢主梁进行黏结是最佳方案。

桥面板的主跨方向是桥梁横向;但在桥梁纵向,桥面板也相当于钢主梁的上弦。桥面板的主要尺寸如下:钢主梁间的跨度为 3.9 m,悬挑 1.8 m,桥面板厚 285 mm,重量 160 kg/m² (只有类似混凝土桥面板的 1/4)。

两根高 650 mm、宽 400 mm 的工字型钢主梁两端嵌入桥梁承台内。氯丁橡胶带横梁为桥面板的横向边缘提供了非黏结支撑;边缘的转角和平面内位移符合连续桥面铺装施工的标准要求。这种半整体式的结构构造见图 1。横梁安装完成后再现浇过渡板,从而避免给铺装层造成刚度不连续的支撑。

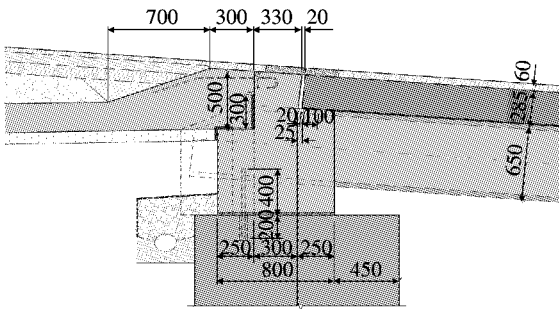


图 1 桥台构造(单位:mm)

施工现场,60 mm 厚的沥青层在 120 ℃ 的中等温度下进行铺装,即小于树脂的玻璃化转变温度(T_g)。桥面板表面在工厂加工时已添加了一层黏结保护层,因此不需要额外的保护措施。防护栏锚固于夹心板内。与传统混凝土桥面板相比,玻璃复材桥面板边缘构造简洁,因此几乎不需要后期维护。

1.3 制造和施工

85 m² 的桥面板由 3 块相似尺寸的板拼装组成;这些板在工厂由真空浸渍工艺加工而成。3 块梯形板

之间的连接接头与承台边缘平行。新的上部结构在原桥址的边上现场组装,程序如下:先安装两根镀锌钢主梁,浇筑混凝土横梁,然后安装 3 块板并与钢主梁黏结,最后在 3 块板间的接头处注入环氧胶进行连接。旧桥拆除及桥台准备工作完成后,新的上部结构由起重机整体吊装到位。

因施工造成的交通中断持续共 10 d。其中,旧桥拆除耗时 2 d,新桥安装耗时 3 h。剩下时间用于过渡板的浇筑及两边道路的重建和加宽。与现浇混凝土桥相比,交通中断时间缩短了近 40 d(节省约 80% 的时间)。

2 玻璃复材夹心桥面板构造

2.1 概念、使用材料和加工工艺

夹心板由上下两层 22 mm 厚的玻璃复材表层和 241 mm 厚的轻木心组成。玻璃纤维呈正交异性布置:沿桥梁纵向和横向的纤维(0°)约分别占 25% 和 75%,因此,两个方向的平均纤维体积含量为 55%。基体选用了耐化学性、耐久性、易于塑化且价格相对较低的乙烯基树脂。玻璃复材表层在组成板的连接处采用斜接连接。

轻木夹心的纤维方向与表层垂直,能提供足够的抗凹陷和抗剪强度。为减小这种自然木材的材料变异性,采用了由薄层木板通过胶黏而成的单板层积结构(LVL)。轻木心平均密度为 250 kg/m³,即只有钢筋混凝土的 1/10。玻璃复材表层和 LVL 轻木心的材料属性如表 1、2 所示。

表 1 玻璃复材层材料属性($x=0^\circ, y=90^\circ$)

材料属性	符号	单位	数值	
			5%分位	平均值
拉压弹模	$E_{t,x} = E_{c,x}$	MPa	—	42 000
	$E_{t,y} = E_{c,y}$	MPa	—	14 000 ^a 1 200 ^b
抗拉强度	$f_{t,x}$	MPa	777	885
	$f_{t,y}$	MPa	23	26 ^a 42 ^b
抗压强度	$f_{c,x}$	MPa	450	619
	$f_{c,y}$	MPa	100	117
热膨胀系数	α_x	1/K	—	$7 \times 10^{-6} *$
	α_y	1/K	—	$20 \times 10^{-6} *$
密度	ρ	kg/m ³	—	1 875 *

注:a 为弹性极限;b 为塑性极限;* 为加工厂提供。

表 2 LVL 轻木心材料属性

材料属性	符号	单位	数值
抗压弹模	$E_{t,x} = E_{c,x}$	MPa	200
	$E_{t,y} = E_{c,y}$	MPa	200
	$E_{c,z}$	MPa	4 320
剪切模量	$G_{xz} = G_{yz}$	MPa	290
抗拉强度	$f_{t,x} = f_{t,y}$	MPa	0.7
抗压强度	$f_{c,x} = f_{c,y}$	MPa	0.7
	$f_{c,z}$	MPa	18.9
抗剪强度	$f_{s,xy} = f_{s,yz}$	MPa	2.3
热膨胀系数	$\alpha_x = \alpha_y$	1/K	20×10^{-6}
密度	ρ	kg/m ³	250

表 3 阿旺松桥设计采用的材料系数

构件和荷载	系数		参考标准
	ULS	SLS	
表层+车载	2.64	1.50	BÜV
表层+恒载	2.88	1.50	
表层接头+车载	3.30	—	
表层接头+恒载	3.60	—	BÜV & Eurocomp
表层+疲劳	3.96	—	
轻木	1.50	1.60	

局部分析采用了实体单元,得到了不同方向的桥面板轴力设计值 $E_{N,d}$ 、弯矩设计值 $E_{M,d}$ 和剪力设计值 $E_{V,d}$ 。承载能力极限状态验算考虑了其组合效应。假设玻璃复材表层主要承担弯矩和轴力,而轻木心承担剪力,表层和夹心层的验算分别使用式(2)、(3):

$$\frac{E_{N_x,d}}{R_{N_x,d}} + \frac{|E_{M_y,d}|}{R_{M_y,d}} \leq 1.0, \quad \frac{E_{N_y,d}}{R_{N_y,d}} + \frac{|E_{M_x,d}|}{R_{M_x,d}} \leq 1.0 \quad (2)$$

$$\frac{E_{V_{xz},d}}{R_{V_{xz},d}} + \frac{E_{V_{yz},d}}{R_{V_{yz},d}} \leq 1.0 \quad (3)$$

式中: R 为抗力; x 、 y 、 z 分别为平面内相互垂直的两个方向和平面外方向。

玻璃复材表层的弯矩和轴力抗力值由第一层达到最大应力准则出现破坏时的应力分布所决定。由于层合板横向强度验算更为关键,轻木在垂直于纤维方向的轴向应力小于其强度。另外,夹心抗剪承载力的计算则基于轻木的抗剪强度和沿厚度方向剪应力均匀分布的假设。

纵向桥面板和主梁的胶黏连接设计,在板与板胶黏连接相垂直的方向,假设接头的承载能力与相关的足尺梁试验结果一致。桥梁纵、横向的挠度以及桥面板边缘挠度通过有限元模型计算得到。横向挠度在 SLS 状态下达到极限值,即跨长的 1/500。

3 试验研究

3.1 概述

为了验证桥面板的组成板之间横向胶结接头设计的合理性,对两个足尺梁进行了疲劳和准静载试验,并加载至破坏。两根梁的 Z 字形胶结接头均位于跨中。B1 梁中,Z 字形胶结接头的竖向部分与上下底板呈 70° 夹角,而 B2 梁中呈 90°,见图 2。

2.2 结构设计

设计主要参考了与欧洲 Eurocode 标准理念一致的瑞士 SIA 标准。正常使用和承载能力极限状态设计(SLS 和 ULS)采用部分安全系数法,即分别考虑荷载和材料安全系数。对于荷载部分,荷载组合和对应安全系数基于瑞士标准 SIA 260 和 SIA 261 确定。轻木的材料安全系数选取基于 SIA 265。由于瑞士和欧洲标准均没有针对玻璃复材的相关规定,其安全系数的选取参考了与欧洲标准理念一致的德国 BÜV 和欧洲 Eurocomp 标准。

在承载能力极限状态(ULS)下,BÜV 标准中设计抗力 R_d 计算如下:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3} \quad (1)$$

式中: R_k 为抗力的特征值(5%分位数); γ_m 为材料系数(层和板取 1.2,连接接头取 1.5);系数 A 考虑了 3 种参数: A_1 为荷载持续时间(短期和长期); A_2 为环境腐蚀; A_3 为温度。

在正常使用能力极限状态(SLS)下,层和板应变、挠度设计需考虑蠕变和系数 A (但 $\gamma_m = 1.0$)。参考 BÜV,刚度设计采用弹模和剪切模量的平均值,而非特征值。弹性应变最大容许设计值为 0.20%(BÜV),短期和长期效应下桥面板最大容许挠度分别为跨度的 1/500 和 1/700(SIA 260)。两种极限状态设计时采用的材料系数(已包括系数 A),如表 3 所示。由于 BÜV 标准没有对层合板的疲劳特性作相关规定,选取了 Eurocomp 标准中的附加抗力系数 $\gamma_{m,fat} = 1.5$ 。

使用 Ansys 有限元程序对整桥进行三维模拟分析。桥面板的整体验算采用了层合壳单元,而胶结处

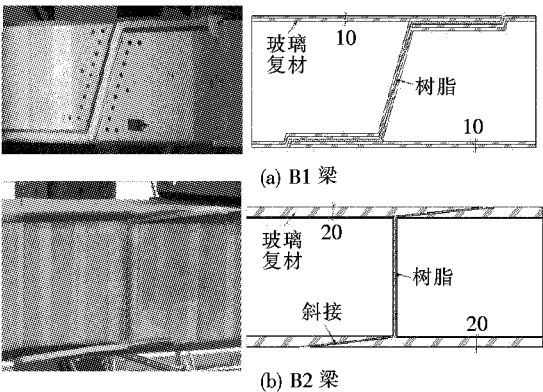


图 2 两种连接方式(单位:mm)

B1 梁的设计与最终桥面板设计相差较大,而 B2 梁则是基于 B1 的改进设计,与最终的桥面板设计基本一致。两根梁的夹心部分都是由块状轻木拼装而成,而最终设计中 LVL 构造的选取则是基于后续的详细材性试验。另外,将护栏固定于桥面板的设计也通过足尺试验进行了验证。试验中,水平力施加在距离桥面板 0.7 m 高的杆端;破坏发生在固定处而桥面板仍保持完好。

3.2 小尺寸试验

玻璃复材层合板在 0°和 90°方向的抗拉压性能通过 10 个标准试件测试得到,见表 1。轻木的材料性能则通过 50 多个夹心梁试件的四点弯曲试验得到;梁的跨度分别为 500、800 和 1 000 mm。轻木心和玻璃复材层合板之间的黏结强度则基于 19 个 50 mm×50 mm×37 mm 的夹心结构试件沿厚度方向的拉伸试验得到。大部分试件的破坏发生在轻木心部分,而小部分则出现了玻璃复材表层的纤维剥离。最终得到的沿厚度方向抗拉强度为 7.9 MPa。

对 4 根 845 mm 跨度夹心梁(构造与上述梁相同)进行了四点弯曲疲劳试验;对于夹心部分,其中两根梁采用横切面的块状构造,而另外两根则采用 LVL 构造。对这些梁进行了 1 000 万次疲劳加载;疲劳荷载幅对应 SIA 265 规定的轻木疲劳极限强度值(0.7 MPa,即 30%的抗剪强度)。所有梁均未出现早期破坏或刚度和强度折减。

4 分析及讨论

4.1 材料系数

阿旺松桥梁的设计参考了德国 BÜV 标准。SLS 和 ULS 状态设计对应的材料系数见表 3。此节对采

用此标准的合理性及其对桥梁设计的影响进行了讨论。其他可参考的标准有欧洲 Eurocomp,英国 BD 90/05 和荷兰 CUR 96+。

在所有参考标准中,材料系数(也称抗力系数)可进一步划分成几个子系数或计入附加因素或转换系数,见表 4 和式(1)(BÜV 标准);第一列列举了影响材料性能的各种子系数,包括:参数来源(来自材料手册或试验)、纤维和基体类型(特别是后者的固化程度)、加工工艺(手糊或全自动化成型,如拉挤)、荷载持续(包括荷载和时间相关的抗力和刚度)、疲劳及环境影响(如温度和湿度)。另外,有些文件也规定了接头设计时所需考虑的系数。

表 4 计算材料系数时考虑的因素

因素	BÜV	Eurocomp	BD 90/05	CUR 96+
材性来源	no	$\gamma_{m,1}$	no	$\gamma_{m,1}$
纤维类型	no	no	G/C/A—FRP	no
基体类型	A_3	$\gamma_{m,2}$ (固化)	no	考虑 T_g
	A_1, A_2 (固化)	$\gamma_{m,3}$ (HDT)		
加工	γ_m, A_1	$\gamma_{m,2}$	yes	$\gamma_{m,2}$
荷载	A_1	$\gamma_{m,3}$	yes	γ_{ck} (蠕变)
温度	A_3, A_2	$\gamma_{m,3}$	yes	γ_{ct}
湿度	A_2 (+UV)	—	yes	γ_{cv}
疲劳	—	$\gamma_{m,4}$	γ_{fatm}	γ_{cf}

注:HDT 为加热变形温度;UV 为紫外线;G 为玻璃纤维;C 为碳纤维;A 为芳纶纤维。

ULS 状态下,抗力可通过 Eurocomp 和 CUR 96+提出的式(4)、(5)计算;其中,子系数和转换系数参见表 4,且常需同时考虑多个系数。SLS 状态下(如弹性模量)也需考虑子系数;其中,第一个系数通常等于 $1.0[\gamma_m(BÜV) = \gamma_m(CUR 96+) = 1.0]$,但在 Eurocomp 中, $\gamma_m(SLS) = \gamma_m(ULS) > 1.3$ 。

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m \cdot \gamma_{m,1} \cdot \gamma_{m,2} \cdot \gamma_{m,3} \cdot \gamma_{m,4}} \quad (4)$$

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m \cdot \gamma_c \cdot \gamma_{m,1} \cdot \gamma_{m,2} \cdot \gamma_{ct} \cdot \gamma_{cv} \cdot \gamma_{ck} \cdot \gamma_{cf}} \quad (5)$$

为比较不同的系数选取对桥梁设计可能产生的影响,阿旺松桥桥面板玻璃复材表层在 ULS 和 SLS 状态下参考不同标准所选取的材料系数如表 5 所示。宏观对比看,参考不同标准所得结果差距显著,例如 SLS 状态下永久荷载系数取值从 1.50(BÜV 和 CUR 96

表 5 阿旺松桥梁设计可采用的不同材料系数对比

构件,荷载	ULS				SLS			
	BÜV (选用)	Eurocomp	BD 90/05	CUR 96+	BÜV (选用)	Eurocomp	BD 90/05	CUR 96+
表层,车载	2.64	1.50	2.21	1.70	1.50	1.38	1.56	1.10
表层,永久荷载	2.88	3.45	3.90	2.30	1.50	3.45	1.95	1.50
表层接头,车载	3.30	2.50	—	—	—	—	—	—
表层接头,永久荷载	3.60	3.75	—	—	—	—	—	—
表层,疲劳	—	2.25	2.21	—	—	—	—	—

十)增加到 3.45(Eurocomp)。但对于最常见的关键设计,系数的变化则相对较小,例如桥面板在车载作用下的挠度验算(阿旺松桥也是关键设计之一),系数只从 1.10(CUR 96+)增加到 1.56(BD 90/05)。因此,按 BÜV 标准采用的 1.50 处于较高的安全区域。

阿旺松桥的第二个关键在于车载下层合板在垂直于 0°桥面板边缘的 90°铺层方向的横向强度设计。对应系数为 2.64,即远高于 Eurocomp 的 1.50 和 CUR 96+ 的 1.70。另外,轻木心的疲劳设计比玻璃复材层合板更为关键。因此,参考不同标准选取的材料系数组合,其安全性从低到高分别为 CUR 96+,Euro-comp,BÜV 和 BD 90/05;其中,最后两种情况的安全级别相近。若参考 CUR 96+ 标准,阿旺松桥的表层板厚度可减小,从而大幅降低材料费用。但如果在弹性模量和剪切模量均采用平均值而非特征值的情况下,SLS 设计仍选取 1.10 的材料系数则太过激进。考虑到这是第一个应用这种新型桥面板的案例,最终采用了更为保守的 BÜV 标准。

4.2 连接构造的改进设计

B1 梁连接接头的安全系数只有 3.0,低于表 3 中的规定值 3.30,但 B2 梁的安全系数(9.5)则远高于这个规定值。前者低值主要归因于:① B1 梁接头构造会导致明显偏心,产生较大的沿厚度方向的拉(剥离)应力,从而导致底部搭接部分易出现较早的初始破坏;② B2 梁的接头连接采用树脂注入法,可提高接头的整体质量。另外,B2 的接头构造不需要轻木心的机械加工。

B2 梁破坏时,接头部分的弯矩为 $190 \times 1.43/0.6 = 453 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$,对应的表层轴向力为 $453/0.265 = 1\,710 \text{ kN/m}$ 。基于表 1 中的平均强度及考虑平面应变分布和弹性变形,计算得到表层的强度为 3 150 kN/m。因此,接头的抗弯承载力为整体梁结构抗弯

承载力的 54%。类似地,接头的抗剪承载力为轻木心的 43%(190/445 kN)。

5 结 论

描述了位于瑞士贝克斯的阿旺松桥的概念、设计和试验验证,得出以下结论:

(1) 采用玻璃复材夹心桥面板与钢梁黏结的施工方式将交通阻隔时间减少了近 40 d,节省了约 80%的时间,并实现双车道的扩展,从而证明了所提出桥梁方案的优势。

(2) 半整体式设计可省去伸缩缝设置,实现沥青层从桥台到桥面的连续铺装,从而简化和减少了后期维护。

(3) 玻璃复材表层和 LVL 轻木心组成的夹心组合桥面板可节省加工成本,并同时满足正常使用和承载力极限状态及疲劳性能要求。

(4) 同样使用胶黏结的情况下,斜接接头性能优于搭接;前者减少了偏心且可通过树脂注入工艺提高接头质量。

(5) 桥面板设计尺寸很大程度上取决于参考的设计标准。针对于阿旺松桥的案例,德国 BÜV 和英国 BD 90/05 标准分别提供了最保守的抗力或材料系数,而荷兰 CUR 96+ 标准则最不保守,另外,欧洲 Euro-comp 标准则介于两者之间。对于刚度设计,材料系数选取会影响桥面板的构造和材料用量。

——编译自:Keller T., Rothe J., De Castro J. Osei—Antwi M. GFRP—Balsa Sandwich Bridge Deck: Concept, Design, and Experimental Validation [J].J.Compos Constr., 2014,18(2).