

对接接头对现代木结构桥梁 SLT 桥面板性能的影响

傅梅珍¹, 刘永健¹, 姚晓荣², 李娜¹, 张志伟¹

1. 长安大学公路学院, 西安 710064
2. 吉林交通职业技术学院, 长春 130012

摘要 针对现代木结构桥梁应力叠合木(SLT)桥面板性能受其对接接头的影响问题,探讨了Ritter、Crews的设计方法以及加拿大、美国、欧洲的有关规范,并通过工程实例进行了计算分析。结果表明,对接接头会降低SLT桥面板的强度及刚度,为了保证结构安全,需要合理设计对接接头的频率与间距,而各种设计方法及规范中,Ritter设计方法相对安全,目前SLT桥面板的应用在中国尚处于初期研究阶段,适合采用安全系数较高的Ritter设计方法;在恒载和活载作用下,SLT桥面板的挠度安全储备较应力安全储备大,采用Ritter设计方法时弯曲应力计算值为设计值的69.2%,而挠度计算值为容许值的90.7%,因此在SLT桥面板的应用设计中要着重考虑满足刚度要求。

关键词 木结构桥梁;应力叠合木桥面板;对接接头

中图分类号 TU997

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.15.013

Influences of butt joint on the behavior of stressed laminated timber deck of modern timber bridge

FU Meizhen¹, LIU Yongjian¹, YAO Xiaorong², LI Na¹, ZHANG Zhiwei¹

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. Jilin Communication Polytechnic, Changchun 130012, China

Abstract For the problem that the behavior of the stress laminated timber (SLT) deck of modern timber bridge is influenced by butt joint, the design methods of Ritter and Crews and the specifications of Canada, Europe and America are discussed, and the calculations contrasted through a practical engineering project. The results show that butt joint may reduce the strength and stiffness of the SLT deck, and that reasonable butt joint frequency and spacing should be considered in order to ensure the safety of the structure. The Ritter's design method is relatively safe among the various kinds of design methods and can meet the specifications. Therefore, it is recommended because the application of SLT deck in China is still in its early stage at present. The SLT deck has a larger emergency capacity of stiffness than that of strength under dead load and live load, the calculated value of bending stress is 69.2% of the design value, and the calculated value of deflection is 90.7% of the permissible value using the Ritter's design method, so the stiffness requirement should have a priority in the design consideration.

Keywords timber bridge; stress laminated timber deck; butt joint

收稿日期:2015-02-09;修回日期:2015-05-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51178051,51378068);交通运输部建设科技项目(2013318812410);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2009JM7011)

作者简介:傅梅珍,博士研究生,研究方向为钢桥与钢木组合结构桥梁,电子信箱:382463681@qq.com;刘永健(通信作者),教授,研究方向为钢桥与组合结构桥梁,电子信箱:steel163@163.com

引用格式:傅梅珍,刘永健,姚晓荣,等.对接接头对现代木结构桥梁SLT桥面板性能的影响[J].科技导报,2015,33(15):82-86.

1976年,加拿大安大略省首次提出了现代木结构桥的应力叠合木(stress laminated timber, SLT)桥面板,其最初是用于加固重复载荷作用下性能较差的木桥纵向钉合桥面板^[1]。SLT桥面板是一种通过张拉预应力高强钢筋在叠合层板内部施加侧向压应力而形成的整体式桥面结构^[2]。随着胶合技术的发展和预应力概念的清晰化,SLT桥面板使用性能不断提高,并被广泛应用于北美、欧洲、澳大利亚、日本等很多国家的中小跨径木桥以及人行景观木桥等新建桥梁的建设中^[3-5],如图1所示。



(a) 美国 SLT 木桥 (b) 挪威 SLT 木桥

图1 SLT在木结构桥梁中的应用

Fig. 1 Application of stress laminated timber in bridge

20世纪70年代以来,国外许多学者在对接接头对SLT桥面板受力性能影响方面进行研究并提出了各自的设计方法,其相关规范也趋于完善。目前中国对现代木结构桥SLT桥面板的研究才刚刚展开,其设计方法尚属空白。本文在总结国外前期研究成果的基础上,以实际工程为例,研究采用不同设计方法时对接接头对SLT桥面板强度及刚度的影响。

1 前期研究

现代木结构桥梁的SLT桥面板主要由叠合层板、预应力高强钢筋及对接接头等组成^[6],如图2所示。

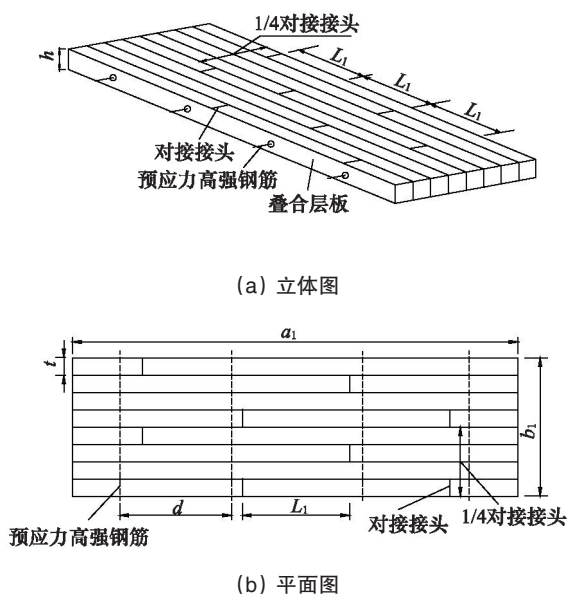


图2 SLT桥面板

Fig. 2 Stress laminated timber deck

受树木天然生长尺寸限制,当桥面长度大于叠合层板长度时,需要对叠合层板进行接长,该接长连接构造即为对接接头^[7,8]。在使用对接接头的情况下,桥面板的纵向连续性被破坏,整体刚度被折减,导致其承载力降低^[9]。刚度折减的程度与对接接头频率有关,对接接头频率为对接接头间距 L_1 范围内,至多允许使用1个对接接头的叠合板数量的倒数。图2中,1/4对接接头表示对接接头频率为1/4; h 为SLT桥面板厚度; a_1 为SLT桥面板长度; b_1 为SLT桥面板宽度; d 为预应力高强钢筋间距; t 为叠合层板厚度。

1983年,加拿大Taylor进行了应力叠合木结构桥梁的专题研究,指出无对接接头桥面板弹性模量为各叠合层板的弹性模量均值^[10]。1990年,美国Ritter引入对接接头系数来描述其对SLT桥面板的影响,并规定了其布置间距^[11],但该系数的取值仅与对接接头布置频率有关,且缺乏实验验证。1993年,美国Julio等分别对不同对接接头频率、不同预应力水平下的40块SLT桥面板的抗弯刚度进行理论及实验研究,利用载荷-位移曲线及虚拟梁理论计算有效抗弯刚度 D_{eff} ,然后依据式(1)计算出刚度折减系数 φ ,并与Ritter建议的对接接头系数进行拟合,证明Ritter建议的系数是安全的^[12]。

$$D_{eff} = \varphi D \quad (1)$$

式中, D 为无对接接头SLT桥面板的抗弯刚度; φ 为刚度折减系数。

2002年,澳大利亚Crews对对接接头也做了相关工作,并针对对接接头的设置、对接接头影响系数、叠合层板间滑移等进行了较为系统的研究。Crews依据叠合层板材料的硬度来区分对接接头影响系数,认为选用硬木时SLT桥面板的对接接头影响系数相对偏小,并提出了相关计算公式,同时指出对接接头不仅影响SLT桥面板的有效抗弯刚度,且影响载荷有效分布宽度^[13]。

2010年,瑞典查尔姆斯理工大学Carlsson分别对3种对接接头频率、3种预应力水平(300、600、900 kPa)下的SLT桥面板进行静、动载试验,依据欧洲试验标准EN 408(timber structures- structural timber and glued laminated timber- determination of some physical and mechanical properties, 2010)确定加载方式,与通过式(2)所得的SLT桥面板纵向弹性模量 E 进行对比,其对比曲线如图3所示^[14]。

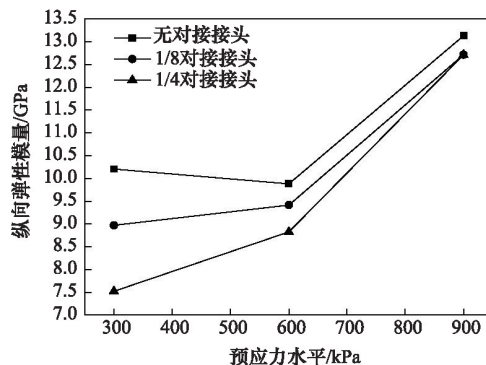


图3 纵向弹性模量对比

Fig. 3 Contrast of the longitudinal elastic moduli

试验结果表明,对接接头频率愈高,对桥面板刚度的削减愈明显;预应力水平愈高,纵向弹性模量的变化愈迅速。该试验尚存在如下不足,试验未考虑湿度影响且预应力测量误差导致的试验误差较大。

$$E = [l_1 l_2^2 (F_2 - F_1)] / [16I(\omega_2 - \omega_1)] \quad (2)$$

式中, $F_2 - F_1$ 为载荷增量; l_1 为加载点距支座的距离; l_2 为测试点距加载点的距离; I 为构件截面惯性矩; $\omega_2 - \omega_1$ 为挠度增量。

2 设计方法

对接接头布置是SLT桥面板设计时需要着重考虑的问题。Ritter、Crews等学者均对SLT桥面板对接接头布置进行了研究,并提出各自的设计方法,分别简称为Ritter设计方法和Crews设计方法。美国、加拿大和欧洲等颁发的木结构规范对SLT桥面板对接接头设计方法也有其特殊规定。

2.1 Ritter设计方法

Ritter设计方法认为当SLT桥面板使用对接接头时,对接接头频率不得大于1/4,且对接接头间距应不小于600 mm。计算时,Ritter将SLT桥面板简化成宽度等于有效分布宽度的梁,将桥面板模拟为纵向条带,载荷分布与桥面板扭转刚度系数 α 、纵横刚度比 θ 有关,其计算公式为

$$\alpha = 2G_w / \sqrt{EG_b E_s} \quad (3)$$

$$\theta = hEC_b^{0.25} / 2a_1 E_s \quad (4)$$

式中, C_b 为对接接头影响系数(依据表1取值); G_w 、 G_b 分别为木材横向、纵向剪切模量; E_s 、 E 分别为木材横向、纵向弹性模量。

表1 对接接头系数
Table 1 Butt joint factors

布置频率	C_b
1/4 对接接头	0.8
1/5 对接接头	0.85
1/6 对接接头	0.88
1/7 对接接头	0.90
1/8 对接接头	0.93
1/9 对接接头	0.93
1/10 对接接头	0.94
无对接接头	1.00

2.2 Crews设计方法

基于预应力水平为1000 kPa的基本假定,Crews将载荷有效分布宽度计为 D_w ,它取决于SLT桥面板的横截面面积 A 以及在极限承载能力状态下该截面最大挠度 ω_{max} ,即

$$D_w = A / \omega_{max} \quad (5)$$

当预应力水平低于1000 kPa时,需要对 D_w 按5%~10%进行折减。

与Ritter观点类似,Crews设计方法同样将SLT桥面板简化成宽度等于有效分布宽度 D_w 的梁,由行车道有效分布宽度 D_{wi} 、对接接头系数 C_b 和对接接头调整系数 η 来确定,即

$$D_w = D_{wi} [(C_b / \eta - 1)^2 + 1] \quad (6)$$

其中, η 依据硬木或软木分别取0.75或0.85。

叠合层板间剪力依赖预应力作用产生的板间摩擦力传递,Crews将相邻对接接头间应力完全重分布所需的长度定义为 Δ ,其计算式为

$$\Delta = t \sigma_{max} / 2\tau_{max} \quad (7)$$

式中, σ_{max} 为SLT桥面板最大弯曲应力; τ_{max} 为SLT桥面板最大剪应力。 Δ 值取决于摩擦力及木材表面情况。当对接接头间距 L_1 小于 Δ 时,桥面板刚度应进行折减,当 L_1 大于或等于 Δ 时则不需折减。且SLT桥面板对接接头间距最大值与木材材质有关,硬木不得小于1000 mm,软木不得小于900 mm。

为了衡量对接接头对SLT桥面板刚度的影响,引入对接接头影响系数 C_b 来度量其折减程度。对接接头影响系数 C_b 和SLT桥面板有效惯性矩 I_e 的计算公式为

$$C_b = (N - \lambda) / N \quad (8)$$

$$\lambda = \Delta / L_1 \quad (9)$$

$$I_e = C_b N I_i \quad (10)$$

式中, N 为叠合层板数量; λ 为应力分布长度系数; I_i 为叠合层板惯性矩。

2.3 加拿大规范设计方法

加拿大《公路桥梁设计规范》(CSA.CAN/CSA-S6-06. Canadian highway bridge design code, 2006, 下文简称加拿大规范)引入影响系数 C_b 对SLT木桥面板SLT桥面板刚度进行修正,依据式(11)计算,对接接头频率为 $1/N_b$,则影响系数 C_b 的计算公式为

$$C_b = (N_b - 1) / N_b \quad (11)$$

式中, N_b 为对接接头间距 L_1 范围内至多允许使用1个对接接头的叠合层板数量。

叠合层板长度方向1000 mm范围内,对接接头应错开布置,且对接接头频率不得大于1/3。正常使用情况下,纵向SLT桥面板有效分布宽度取定值1750 mm。

2.4 欧洲规范设计方法

欧洲《木结构设计规范5》(Eurocode 5: EN 1995, design of timber structures-part 2: bridges, 2004, 简称欧洲规范)基于正交异性板理论将SLT桥面板简化为梁格模型。规定对接接头频率为1/4,且对接接头间距 L_1 取2倍预应力高强钢筋间距 d 、30倍叠合层板厚度 t 和1200 mm三者中的最小值,即

$$L_1 = \min(2d, 30t, 1200 \text{ mm}) \quad (12)$$

2.5 美国规范设计方法

美国《公路桥梁设计规范》(AASHTO, load and resistance factor design bridge design specifications, 2010, 简称美国规范)规定,当SLT桥面板中有对接接头时,在1200 mm长度范围内,任意相邻4块叠合层板至多允许使用1个对接接头,即对接接头频率不得大于1/4。

2.6 综合分析

Ritter、Crews的设计方法以及加拿大、欧洲、美国的有关规范对SLT桥面板对接接头布置的规定的差异主要体现在以下几个方面:

1) 对接接头频率。加拿大规范设计方法规定对接接头频率不得大于1/3, Ritter设计方法和欧洲、美国的规范设计方法均规定不得大于1/4, Crews设计方法则无明确规定。其中,加拿大规范设计方法规定的对接接头频率较大。

2) 对接接头间距。Ritter设计方法规定对接接头间距不得小于600 mm, Crews则考虑硬木及软木的不同进行取值, 美国规范设计方法规定对接接头间距不得小于1200 mm, 欧洲规范设计方法给出了设置规则, 加拿大规范设计方法则无明确规定。其中, Ritter设计方法规定的对接接头间距较小。

3) 对接接头影响系数。美国、欧洲的规范设计方法中没有明确对接接头影响系数的计算方法, Ritter、Crews的设计方法和加拿大规范设计方法均给出了建议值, 其中Ritter设计方法和加拿大规范设计方法仅考虑对接接头频率的影响因素, Crews设计方法则考虑了对接接头间距和应力重分布宽度的影响因素。总的来说, 目前各种设计方法考虑的对接接头影响系数的影响因素相对比较单一, 建议后期研究时增加其考虑因素。

3 算例比较

3.1 工程特点及数据

以某四级县乡公路木结构桥梁为例进行计算比较。该桥梁采用纵向SLT桥面板结构形式, 桥梁计算跨径 $L=11.23$ m, 桥宽8 m, 双车道, 设计载荷为公路-II级, 载荷作用下的容许挠度为 $L/360$ (即31.2 mm)。双车道SLT桥面板木结构桥梁的载荷有效分布宽度如图4所示。

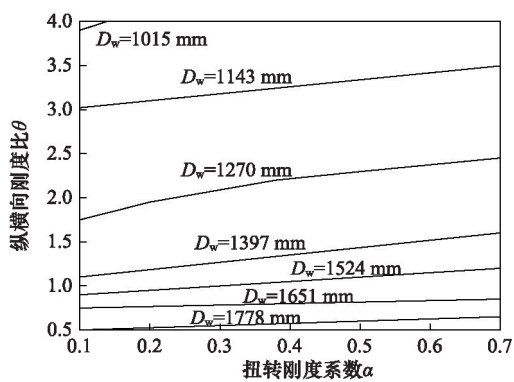


图4 双车道SLT桥面板载荷有效分布宽度
Fig. 4 Load effective distribution width of a two-lane SLT deck

SLT桥面板厚度 $h=500$ mm, 采用质量一级的花旗松, 其抗弯强度 $F_b=10.335$ MPa, 纵向弹性模量值 $E=12402$ MPa。依据式(13)、式(14)计算修正抗弯强度 F'_b 及修正弹性模量

E' , 即

$$F'_b = C_b F_b C_{m1} = 1.50 \times 10.335 \times 0.86 = 13.33 \text{ MPa} \quad (13)$$

$$E' = E C_{m2} = 12402 \times 0.97 = 12029.94 \text{ MPa} \quad (14)$$

式中, C_b 为SLT桥面板的材料强度提高系数, 取1.50; C_{m1} 为材料抗弯强度含水率调整系数, 取0.86; C_{m2} 为材料弹性模量含水率调整系数, 取0.97。

SLT桥面板对接接头间距为1220 mm, 对接接头频率为1/4。

3.2 考虑对接接头影响系数的对比计算

以无对接接头情况为参考, 依据Ritter、Crews、加拿大规范设计方法分别计算对接接头影响系数和SLT桥面板在恒载和活载作用下的最大弯曲应力及挠度。

对于无对接接头的SLT桥面板, 其对接接头影响系数为 $C_b=1$, 由式(3)、式(4)可得 $\alpha=0.59, \theta=0.98$, 依据图4取载荷有效分布宽度 $D_w=1600$ mm。

依据式(15)、式(16)计算SLT桥面板的截面特性——截面静矩 S 和截面惯性矩 I , 即

$$S = D_w C_b h^2 / 6 \quad (15)$$

$$I = (D_w C_b h^3) / 12 \quad (16)$$

代入数据求得 $S=6.67 \times 10^7 \text{ mm}^3, I=16.67 \times 10^9 \text{ mm}^4$ 。

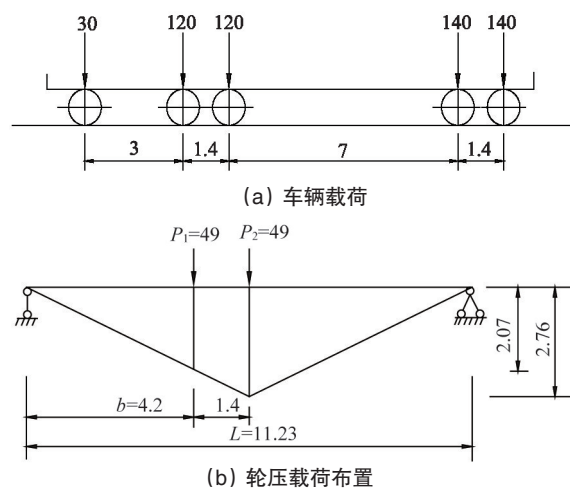
考虑铺装、栏杆自重, 单位桥面板宽度内桥梁恒载集度 $g_1=5.34$ kN/m, 则在载荷有效分布宽度内的载荷集度 g' 为

$$g' = D_w g_1 = 1.6 \times 5.34 = 8.54 \text{ kN/m} \quad (17)$$

由恒载产生的弯矩 M_1 为

$$M_1 = g' L^2 / 8 = 8.54 \times 11.23^2 / 8 = 134 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (18)$$

参照《公路桥涵设计通用规范》^[15], 公路-II级车辆载荷轴重及布置如图5(a)所示, 且四级公路可乘以0.7的折减系数, 所以重轴单轮载荷 $P_1=49$ kN。按照结构力学影响线最不利布载原则布置车轮载荷, 其中一个重轴布置在跨中, 另一个重轴布置在距跨中1.4 m处, 如图5(b)所示。



尺寸单位为m; 载荷单位为kN;
 P_1, P_2 为轮压载荷; b 为轮压载荷与支座间的距离

图5 车辆载荷及轮压载荷布置

Fig. 5 Vehicle load and layout of wheel load

桥梁活载下的最大弯矩 M_2 为

$$M_2 = 49 \times (2.07 + 2.76) = 236.67 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (19)$$

恒载和活载作用下,SLT桥面板最大弯曲应力 f_b 和最大挠度 ω_{\max} 计算公式分别为

$$f_b = \frac{(1.2M_1 + 1.4M_2)}{S} \quad (20)$$

$$\omega_{\max} = \frac{5g'L^4}{384E'I} + \frac{P_2L^3}{48E'I} + \frac{P_1b(3L^2 - 4b^2)}{48E'I} \quad (21)$$

代入数据求得 $f_b = 7.38 \text{ MPa}$ ($< 13.33 \text{ MPa}$), $\omega_{\max} = 22.61 \text{ mm}$ ($< 31.2 \text{ mm}$),所以无对接接头时SLT桥面板强度和刚度均满足设计要求。

当对接接头频率为1/4时,分别采用Ritter、Crews的设计

方法以及加拿大规范的设计方法对该SLT桥面板进行计算,计算结果见表2。

由上述计算表明,SLT桥面板强度和刚度满足设计要求,结构安全可靠。对接接头会降低SLT桥面板的强度和刚度,为了保证结构安全,设计时要合理设置对接接头频率和间距。Ritter设计方法相对偏安全,鉴于SLT桥面板应用在我国尚处于研究、推广阶段,推荐采用该设计方法。在恒载和活载作用下,SLT桥面板挠度(刚度)安全储备较应力(强度)安全储备大,以Ritter设计方法为例,弯曲应力计算值为设计值的69.2%,但是计算挠度为容许挠度的90.7%,所以SLT桥面板设计时应首要考虑满足刚度要求。

表2 不同设计方法的计算结果对比

Table 2 Calculation results with different design methods

对接接头	设计方法	C_b	D_n/mm	S/mm^3	I/mm^4	f_b/MPa	ω_{\max}/mm
无对接接头	—	1	1600	6.67×10^7	16.67×10^9	7.38	22.61
	Ritter的设计方法	0.80	1600	5.33×10^7	13.33×10^9	9.23	28.30
1/4对接接头	Crews的设计方法	0.75	1830	5.72×10^7	14.30×10^9	8.61	26.36
	加拿大规范	0.75	1750	5.47×10^7	13.67×10^9	8.90	27.57

4 结论

1) 加拿大规范设计方法规定对接接头频率不得大于1/3,较其他方法大。Ritter设计方法规定对接接头间距不得小于600 mm,较其他方法小。

2) 对接接头会降低SLT桥面板的强度和刚度,在实际推广应用,推荐采用安全系数较高的Ritter的设计方法。

3) SLT桥面板挠度安全储备较应力安全储备大,设计时应首要考虑满足刚度要求。

参考文献(References)

[1] Taylor R J, Keenan F J. Wood highway bridge[M]. Ottawa: Canadian Wood Council, 1992.

[2] 刘永健,刘士林.现代木结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2012.
Liu Yongjian, Liu Shilin. Modern timber bridges[M]. Beijing: China Communication Press, 2012.

[3] Crews K. An overview of the development of stress laminated cellular timber bridges decks for short to medium span applications in Australia[C]//Proceedings of the International Conference on High Performance Materials in Bridges. Hawaii: United Engineering Foundation, 2003: 162-172.

[4] Aasheim E. Nordic timber bridge program continues[C]//4th Pacific Timber Engineering Conference. New Zealand: Forest Research Bulletin, 1999: 349-351.

[5] Usuki S, Hasebe K, Harigane S, et al. Stress laminated timber deck bridges in Japan[C]//Proceedings of 3rd Pacific Timber Engineering Conference. Australia: Gold Coast, 1994: 156-161.

[6] 刘永健,傅梅珍,刘士林,等.现代木结构桥梁及其结构形式[J].建筑科学与工程学报,2013,30(1): 83-91.
Liu Yongjian, Fu Meizhen, Liu Shilin, et al. Modern timber bridges and structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,

2013, 30(1): 83-91.

[7] Davalos J F, Kish D A, Wolcott M P. Bending stiffness of stress-laminated timber decks with butt joints[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(5): 1670-1676.

[8] Wacker J P. Field performance of stress-laminated highway bridges constructed with glued laminated timber[C]//Proceedings 2004 Structures Congress: Building on the Past, Securing the Future. Washington D C: American Society of Civil Engineers, 2004: 1-7.

[9] 姚晓荣.应力叠合木桥面板及其对接接头折减系数研究[D].西安:长安大学,2012.
Yao Xiaorong. Research on stress laminated timber deck and butt joint reduction factor[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.

[10] Taylor R J, Keith J, Ritter M A, et al. Past present and future of stress laminated timber bridges[C]//Proceedings of 3rd Pacific Timber Engineering Conference. Australia: Gold Coast, 1994: 113-122.

[11] Ritter M A. Timber bridges: Design, construction, inspection, and maintenance[M]. Washington D C: University Press of the Pacific, 2005.

[12] Davalos J F, Sonti S S, Moody R C, et al. System stiffness for stress-laminated timber decks[C]//Proceeding of the International Wood Engineering Conference. New Jersey, USA: Omni Press, 1996: 213-220.

[13] Crews K. Behavior and critical limit states of stress-laminated timber cellular bridge decks[D]. Sydney: University of Technology, 2002.

[14] Carlsson A. Influence of butt joints on stress laminated timber bridge decks theoretical and experimental study[D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 2010.

[15] JTG D60-2004.公路桥涵设计通用规范[S].北京:人民交通出版社,2004.
JTG D60-2004. General code for design of highway bridge and culverts[S]. Beijing: China Communication Press, 2004.

(责任编辑 韩星明)