

文章编号:1673-2049(2011)03-0014-09

FRP 人行天桥的结构性能与设计指标研究

冯 鹏,金飞飞,叶列平

(清华大学 土木工程系,北京 100084)

摘要:以 1 座 FRP 斜拉人行天桥为工程背景,研究了 FRP 人行天桥的结构设计方法和设计指标。分析了采用工业化生产的大截面 FRP 拉挤型材斜拉桥的受力性能,发现 FRP 人行天桥具有较高的承载力安全储备,变形和振动舒适度是结构设计中的主要控制参数;总结了各国规范中对人行天桥变形的要求,结合有限元计算和现场实测结果,建议 FRP 人行天桥的变形限值为跨度的 1/500;总结了各国规范中对人行天桥振动舒适度的要求,分析了频率限值、加速度限值及引起加速度的激励荷载,结合有限元计算和现场实测结果,建议以加速度作为设计控制指标,并给出了用于计算加速度的简化激振模型和计算方法;总结了已有文献中各种桥梁阻尼比的实测结果,建议对单一构件 FRP 桥的阻尼比取 0.008,对多构件 FRP 桥的阻尼比取 0.02。基于建议的设计指标分析了 FRP 连续梁桥和 FRP 斜拉桥的极限跨度,对实际的 FRP 人行天桥进行了有限元分析和现场实测,由于无法满足设计要求,提出了加铺混凝土层的改善方法,通过该方法,使此 FRP 人行天桥的性能达到了正常使用要求;基于以上研究,提出了 FRP 人行天桥结构的设计方法和指标要求,通过实际的 FRP 人行天桥的工程实践,证明其是实用、合理的。结果表明:加铺混凝土面层是一种改善 FRP 人行天桥结构特性的有效方法。

关键词:FRP 人行天桥;舒适度;加速度;蹲伏激励荷载;最大挠度;结构性能

中图分类号:U443.31

文献标志码:A

Research on Structural Performance and Design Indices of FRP Footbridges

FENG Peng, JIN Fei-fei, YE Lie-ping

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A tentative FRP cable-stayed footbridge was investigated, in which the design method and design indices of FRP footbridges were studied. Firstly, the analysis of mechanical properties of the FRP footbridge made of large section industrialization pultruded profiles was carried out. It was found that FRP footbridge had the high loading capacity, while the deformation and the vibration comfort were the main controlling parameters for structural design. Furthermore, based on summarizing the deformation limits of the footbridge in domestic and international codes and considering the finite element analysis and the field measurement results, the deflection limit of 1/500 span length for FRP footbridge was proposed. The indices for the pedestrian vibration comfort requirements were also summarized, and the frequency limit, acceleration limit and excitation load were analyzed. Considering the finite element analysis and the field measurement results, it was concluded that the acceleration should be the controlling indicator, and simplified

收稿日期:2011-06-15

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ03B07);科技部国际合作计划项目(2010DFR50400)

作者简介:冯 鹏(1977-),男,陕西耀县人,副教授,工学博士,E-mail:fengpeng@tsinghua.edu.cn.

excitation load model and calculation method for acceleration were proposed. After reviewing the variety of damping ratio of real bridge in literature, the damping ratio of FRP footbridge was suggested to take as 0.008 for single component and 0.02 for multi-component structures. Based on the proposed design indices above, the limit span of continuous beam FRP footbridge and cable-stayed FRP footbridge were analyzed. For the cable-stayed FRP footbridge, the results of finite element analysis and field measurement showed that it could not meet the designing requirements. Hence, the improvement of overlaying a concrete layer was proposed. After it, the behaviors of the FRP footbridge met the requirements. All these works made out the design approach and the design indices for FRP footbridges, which were proved to be practical and reasonable through the actual FRP footbridge. Results show that overlaying a concrete layer is an effective method for improving the structural performance of FRP footbridge.

Key words: FRP footbridge; comfort; acceleration; crouching excitation load; maximum deflection; structural performance

0 引言

桥梁是决定交通通行能力和通行效率的关键枢纽,其架设速度、长期可靠性、抗超载和抗疲劳的能力是近年来随着经济发展对桥梁结构提出的更高的要求。采用新结构材料是提高桥梁性能的一个重要的途径,从历史上看,每一次新材料应用于结构中都会带来革命性的变化。纤维增强复合材料(FRP)是近年来在土木工程结构中得到成功应用的一种高性能结构材料,具有轻质、高强、耐腐蚀、施工成型方便等优点,现已成为混凝土、钢材等传统结构材料的重要补充^[1],合理地将 FRP 应用于各类结构中已成为工程结构应用发展的重要方向。FRP 桥梁与传统结构材料的桥梁相比,具有以下优势:自重轻、架设速度快、抗腐蚀能力强、抗超载、抗疲劳、抗震性能好;外表美观,色泽持久;具有透波、无磁、绝缘等功能特性。

在国际上,FRP 桥梁从 20 世纪末开始兴起^[2-3]。美国已在 27 个州建成了 82 座用 FRP 作为上部结构的桥梁,并正在研究用于应急的可快速搭建的 FRP 桥梁。欧盟联合开发了多种 FRP 桥梁体系,建成了 10 座 FRP 人行天桥和 7 座 FRP 公路桥梁。俄罗斯依靠其在航空航天技术上对复合材料结构的研究积累,研发了 FRP 桥,2004 年建成了第 1 座高性能 FRP 试验桥,2008 年又开发了模块化快速架设 FRP 桥梁。其他国家如澳大利亚、日本和韩国等也开展了相关研究,并有 FRP 桥梁相继建成。

中国于 1982 年在北京密云建造了世界上第 1 座 FRP 公路桥,1986 年在重庆建成了采用手糊箱梁的 FRP 人行天桥^[4],2006 年在江苏建成 1 座采

用碳纤维索的斜拉桥^[5],并相继研究了 FRP 桥面板^[6-8]、FRP-混凝土组合桥面板^[9-10]、FRP 桥索^[11]、FRP 大跨空间结构^[12]等构件和结构。

早期的 FRP 桥梁主要采用低压接触工艺(手糊)成型,质量的稳定性和可靠性较差,纤维含量较低,力学性能离散性大。近年来,随着拉挤、缠绕、树脂传递模塑(RTM)等工业化成型工艺的进步以及纤维和树脂材料的发展,可获得具有较稳定力学性能和使用性能的大尺寸、高性能 FRP 构件。这种高性能 FRP 桥梁结构和构件具有工业化、标准化的特点,能满足大用量的工程建设需求。2008 年笔者参与建成了 1 座全部采用 FRP 拉挤型材的试验性斜拉人行天桥,该桥为中国首座采用工业化 FRP 拉挤型材为主梁和桥索的桥梁。

FRP 的材料强度较高,合理设计的 FRP 桥的承载力较高,通常不是主要设计控制参数,而挠度和满足通行舒适度的动力特性成为主要的控制参数。各国已有较多针对人行天桥的振动舒适度的系统研究^[13-14],但针对 FRP 轻质桥梁舒适度设计指标的研究还较少。本文中以 FRP 拉挤型材斜拉试验人行天桥为背景,对轻质 FRP 人行天桥的结构性能与关键设计指标进行了研究。

1 工程概况

FRP 拉挤型材斜拉桥的结构如图 1 所示,桥面宽 4.0 m,主跨长 24 m,桥下净空 5.5 m,全长 39 m。主梁采用 0.5 m 高的大断面玻璃纤维增强复合材料(GFRP)拉挤型材平行拼接而成,如图 2 所示;斜拉索为直径 32 mm 的 GFRP 拉挤杆;斜向桥塔为钢结构,底部刚接;边立柱为 GFRP 管混凝土柱,直径 600 mm;设计人群荷载 5 kPa。

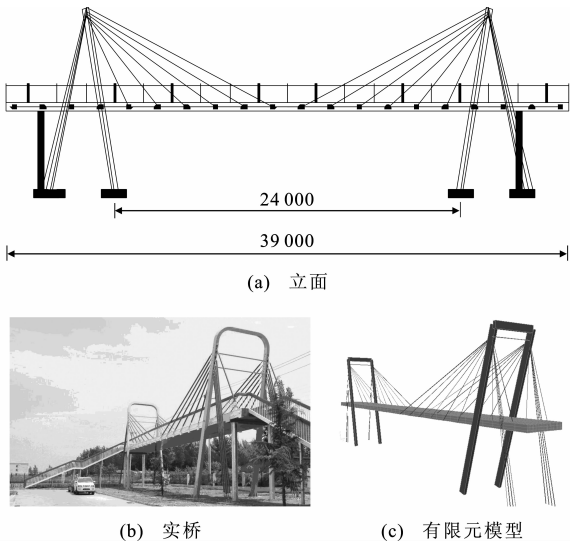


图 1 FRP 人行天桥及有限元模型 (单位: mm)
Fig. 1 FRP Footbridge and Finite Element Model (Unit: mm)

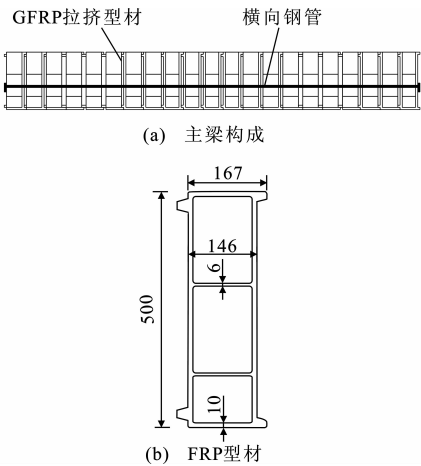


图 2 FRP 主梁截面 (单位: mm)

Fig. 2 Cross Section of FRP Main Girder (Unit: mm)

GFRP 拉挤型材为正交各向异性,纵向弹性模量为 45 GPa,极限抗拉强度为 500 MPa,横向弹性模量为 9 GPa,密度为 $2\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

将此 FRP 桥按照实际尺寸在 SAP2000 中建模 (图 1),按照最大荷载组合计算,可得结构中最大纵向应力均在 60 MPa 以下,远小于 GFRP 的纵向强度,FRP 人行天桥的承载力安全储备较高。

在设计试算中发现,FRP 人行天桥的承载力通常不是控制设计的参数,而挠度变形和振动舒适性指标会成为主要控制参数。因此,针对 FRP 人行天桥这一新材料结构的特性,本文中对其挠度变形和振动舒适性指标的设计要求与控制方法进行深入探讨。

2 最大跨中挠度

2.1 规范要求

对人行天桥最大挠度进行要求主要是为保证桥

梁的正常使用以及避免给行人造成心理上的影响。调查各国人行天桥的设计规范,对正常使用过程中产生的挠度都有一定的限值,但各国规范要求并不相同,具体如下:

(1)中国规范^[15]规定:由人群荷载计算的最大竖向挠度对梁板式结构不大于 $L/600$ (L 为计算跨径),对桁架、拱桥不大于 $L/800$ 。

(2)俄罗斯规范^[16]规定:行人荷载下最大挠度要小于 $L/400$ 。

(3)美国规范^[17]规定:对钢筋混凝土桥、铝合金桥和钢桥要求在行人荷载下最大挠度为 $L/500$,对于木结构人行天桥为 $L/425$,对于 FRP 人行天桥^[18]为 $L/500$,推荐采用 $L/400$ 。

(4)加拿大规范^[19]规定:活荷载下的最大挠度限值与桥梁 1 阶竖向频率相关,静荷载下的挠度按照行人多和行人少两类给出了绝对值,频率为 3 Hz 时两者挠度限值分别约为 7 mm 和 19 mm。

(5)欧洲规范^[20]规定:最大挠度不大于 $L/600$ 。

这些要求主要是针对传统材料桥梁,并不完全适用于 FRP 人行天桥。综合来看,对人行天桥的挠度限值有较大的变化范围 ($L/800\sim L/400$),最多相差 1 倍,中国规范基本取值偏于保守。从实际应用来看,FRP 比传统结构材料的自重要轻,且承载力储备较高,不存在锈蚀等问题,因此挠度限值可比传统材料桥梁适当放宽。本文中建议可参照美国规范对 FRP 人行天桥的要求取最大挠度限值为 $L/500$,但同时推荐适当放宽至 $L/400$ 。本文中的分析将分别按照 $L/600$ 、 $L/500$ 、 $L/400$ 予以考虑。

2.2 实测与计算

本文中采用跨中施加人群荷载对 FRP 试验桥进行了实际挠度的测试:跨中位置沿宽度站 2 排,共 24 人 (平均质量为 65 kg),实测最大挠度为 4.6 mm,采用有限元模型计算此结果为 4.3 mm,说明有限元模型能够较好地模拟结构的实际变形。

采用有限元模型计算 FRP 试验桥中间跨满载时最大挠度为 78.2 mm,不能满足 $L/600$ 的挠度限值要求。在实际建造中,通常可通过预设反拱,反拱变形可抵消恒荷载下的挠度,这样活荷载下挠度满足规范要求,且变形并不影响实际使用,也没有给行人造成不安全的心理影响。

3 振动特性指标

3.1 规范要求

对人行天桥振动特性的要求主要是为了保证通

行时的舒适性,同时防止出现共振而造成较大的变形。人行天桥动力特性与行人舒适度有密切关系,一般要求人行天桥结构的振动频率要避开行人步频,避免共振,因此,中国规范都以1阶竖向自振频率作为主要控制指标。但实际上,振动的加速度才是行人能够直接感受到的力学特征,是影响行人舒适度的直接指标,因此各国规范直接采用加速度作为控制指标,具体如下:

(1)中国规范规定:人行天桥要避免1阶竖向自振频率低于3 Hz。

(2)俄罗斯规范规定:人行天桥前2阶自振周期(对简支梁桥通常为第1阶自振周期)不应落在如下范围内:即竖直方向自振周期在0.45~0.60 s内,水平方向在0.9~1.2 s内。

(3)美国规范规定:人行天桥要避免1阶竖向频率低于3 Hz。

(4)加拿大规范规定:人行天桥要避免竖向自振频率低于4 Hz。

(5)欧洲规范规定:当人行天桥不满足1阶竖向自振频率低于5 Hz或横向、扭转振动频率低于2.5 Hz时,应该进行桥面振动响应的校验,桥面可接受的最大竖向加速度为 $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;横向为 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,在拥挤的情况下最大允许值为 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

(6)瑞士规范规定:人行天桥1阶频率要避免在1.6~2.4 Hz范围,2阶频率避免在3.5~4.5 Hz范围^[21]。

(7)日本规范规定:人行天桥要避免1阶竖向自振频率在1.5~2.3 Hz范围^[22]。

(8)英国规范^[23]规定:人行天桥要避免竖向自振频率低于5 Hz,当横向自振频率低于1.5 Hz时,需要进行详细的动力特性分析。

可以看到,各国规范对人行天桥振动特性的要求不尽相同,在方向上包括竖向和横向,在限值上有最小限值也有区间限值,在指标上包括频率和加速度,在频率上包括1阶频率和2阶频率,针对传统人行天桥的规定目前尚不统一。

人行天桥中,人群是最主要的振动源。一般人行天桥的1阶振型通常为竖向,而横向和扭转通常为更高阶频率。由结构动力学基本原理,可以得到人行天桥基本振动方程

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{C} 为阻尼矩阵; \mathbf{K} 为刚度矩阵; $\mathbf{F}(t)$ 为外激励荷载矩阵; $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ 为结构加速度; $\dot{\mathbf{u}}(t)$ 为结构速度; $\mathbf{u}(t)$ 为结构位移; t 为时间。

可见,人行天桥在步行荷载下的动力响应由人行天桥的外激励、质量、阻尼、结构刚度等因素共同控制,仅从控制自振频率对人行天桥提出要求,这无法保证设计的合理性。FRP人行天桥质量较小,能够提供的刚度相对较小,因此针对FRP人行天桥应具有更为合理的振动特性指标以用于设计。

3.2 加速度与激励荷载

舒适度本身是一个比较复杂的概念,对于行人而言,控制其舒适度的因素包括许多方面,如行走时感受到的噪声、悬索及栏杆的晃动、拥挤程度、振动问题等,上述因素都能对行人在天桥上行走时的舒适度产生不同程度的影响,本文中主要讨论结构振动对舒适度的影响。

在振动舒适度的研究初期,对行人舒适度受哪些指标控制存在不同的见解,如Wheeler^[24]认为行人舒适度是由振动速度控制的,并认为最大振动速度为 $24 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时便无法接受。但近年来,随着在人机工程学领域的研究,各国研究者普遍认为行人对振动的不舒适感主要受加速度控制,采用的加速度 $a(t)$ 的评价指标主要包括最大加速度 a_{\max} 和均方根加速度 a_{rms} 。均方根加速度 a_{rms} 定义为

$$a_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (2)$$

式中: T 为振动时间。也有研究将 $a(t)$ 考虑了频率的加权^[25]。

结构的加速度与受到激励直接相关,人行天桥可能遭受的外激励包括风荷载、地震荷载、行人荷载等各种常规建筑所需考虑的荷载形式,其中行人荷载是引起振动舒适度问题的根源。当采用加速度来评判桥梁的振动特性时,必须先确定输入的激励荷载,激励荷载不同加速度也不同。

行人激励荷载的产生是由行人行走时的周期性步伐引起的。由于行人行走时会有屈膝、抬腿、落脚等连续性动作,其重心的上下起伏会对桥面产生周期性的竖向激励。又由于行人行走时其支撑点在两脚之间不断变换,这种连续性动作又产生了对人行天桥的周期性的横向激励。对于行人激励荷载各国较多的研究,国外学者在20世纪60年代就开始对单人的竖向步行荷载进行研究。研究发现,步行激励的频率平均值为2.0 Hz^[26],还有一些研究分析了行人单足荷载时程曲线^[27-29](图3)、行人跳跃激励荷载^[30]和蹲伏激励荷载。但是,由于行人激励荷载非常复杂,影响因素较多,很难用较为简单的形式表达,目前还没有较为合理且统一的输入激励荷载

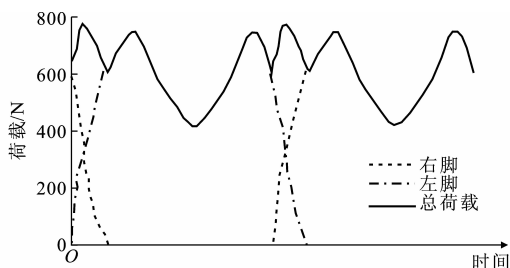


图3 Andriacchi 实测单个行人步行荷载时程

Fig. 3 Time Histories of Loads of One Human Step Measured by Andriacchi

模型。

英国规范规定的行人荷载函数 $F(t)$ 为

$$F(t) = \begin{cases} 180 \sin(2\pi f t) & f < 4 \text{ Hz} \\ [1 - 0.3(f - 4)] \times 180 \sin(2\pi f t) & 4 \text{ Hz} \leq f < 5 \text{ Hz} \end{cases} \quad (3)$$

式中: f 为桥梁的 1 阶竖向自振频率。

该荷载以 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度沿桥纵向移动, 当 $f > 5 \text{ Hz}$ 时, 桥梁结构的振动使用性要求可以得到满足无需验算。瑞士规范将行人荷载假定为一个固定的脉冲正弦荷载, 荷载形式为

$$F(t) = k_1 k_2 \sin(2\pi f_s t) \quad (4)$$

式中: k_1 为桥跨调整参数, $k_1 = \sqrt{0.1BL}$, B 为桥面宽度; k_2 为基本荷载, $k_2 = 150 \text{ N}$; f_s 为步频。

这 2 个荷载模型存在以下不足: ①未考虑行人激励荷载中的固定值, 与实际不符; ②移动荷载的计算较为复杂, 实际应用不方便。因此, 本文中建议采用简化形式的激励, 并考虑结构的振动特性, 建立标准的激励荷载模型。

本文中建议了一个蹲伏激励荷载, 模拟单个成年人有意做上下蹲伏以激励人行天桥, 其表达式为

$$F(t) = G[1 + \sin(2\pi f_n t)] \quad (5)$$

式中: G 为单个成年人重力荷载, 标准取为 650 N ; f_n 为上下蹲伏周期, 可取人行天桥 1 阶竖向自振频率 f_0 , 最大取为 5 Hz , 荷载施加到 1 阶模态的变形峰值点。

蹲伏激励荷载可使结构与人行天桥达到共振, 有阻尼时结构的动力反应很快达到稳定状态, 可得到稳定的 a_{\max} 。可用此峰值加速度作为桥梁动力舒适度的评价指标, 这样就能方便地对人行天桥结构的振动舒适度进行评价。此荷载模式综合考虑了结构的振动特性和人的激励特点, 进行了标准化, 并以最不利于结构的形式施加荷载, 是一种工程实用方法。

3.3 实测与计算

FRP 人行天桥建成后, 采用手持式频率测试仪

对此桥进行了动力特性实测, 测得此桥的 1 阶竖向自振频率为 3.13 Hz , 与计算得到的竖向自振频率 3.17 Hz 非常接近, 相对误差仅为 1.44% 。计算与实测结果均满足中国规范对振动舒适度的要求, 但在桥上通行的实际感受却并非如此。行人步行通过时会感觉到轻微的振动; 行人的上下蹲伏激励, 能将此桥激起较大的振幅; 单人站在桥的跨中进行每秒 3 次左右的上下蹲伏运动, 桥梁整体便晃动很明显, 桥索振动显著, 桥上其他人能明显感受到加速度; 在行人跑步通行时, 桥上其他行人能够明显感到振动。

按照本文中建议的蹲伏激励荷载计算试验桥动力时程, 得到结构的最大竖向加速度达到 $0.65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 意味着单个成年人在桥梁上进行蹲伏运动, 可使桥梁出现较大的竖向加速度。

3.4 FRP 桥梁的阻尼

阻尼是影响结构振动的另一个关键参数, 由于 FRP 材料的自重轻, 阻尼对于减小振动显得至关重要。Chandra 等^[31]研究了 FRP 材料的阻尼产生的原因, 认为其机理与传统材料不同之处是, FRP 材料的阻尼主要来自于基体以及基体和纤维之间的界面, 且当发生基体破坏、分层时阻尼又将增大。

通过对实际桥梁结构的阻尼比测量发现, FRP 桥梁的阻尼比要小于传统材料的桥梁。Aluri 等^[32]对使用 FRP 桥面板的桥梁进行实际荷载测试, 获得了一座采用 FRP 桥板钢桁架桥的阻尼比为 0.005 , 另一座采用 FRP 桥板钢梁桥的阻尼比为 0.0197 。Bai 等^[33]对瑞士的 2 跨 12 m 长的 FRP 桁架人行天桥动力特性采用 2 种不同的方法进行了测试, 得到结构竖向振动的阻尼比分别为 0.0594 (粘结连接) 和 0.0584 (螺栓连接)。

为此, 本文中对 1 座全 FRP 箱梁桥 (上海张江工业园区内) 进行了动力特性测试, 实测阻尼比为 0.0086 ; 还对 1 个简支 3.6 m 跨度的 FRP 桥面板的阻尼比进行了实测, 阻尼比为 0.007 , 增加附加荷载 (等效路面铺装) 后为 0.0081 。可以看到, FRP 结构阻尼比的结果相差很大, 与 FRP 应用的部位和结构形式都有关系。单一 FRP 构件构成的结构, 如简支梁、桥板等, 阻尼比较小 ($0.005 \sim 0.0086$), 而包含多个 FRP 构件组成的 FRP 结构阻尼比较大 ($0.0197 \sim 0.0594$)。设计中如阻尼比取值较大, 则结构动力特性的计算偏于保守, 而过小的阻尼比也不符合实际。根据以上结果, 本文中建议在 FRP 桥的设计计算中, 对单一 FRP 构件组成的 FRP 桥

阻尼比取为 0.008,对包含多个 FRP 构件组成的 FRP 结构阻尼比取为 0.02。

4 基于设计控制指标的极限跨度分析

在实际工程应用中,GFRP 拉挤型材的断面大小也是控制结构性能的一个重要参数。受加工生产能力的限制,FRP 拉挤型材的尺寸一般不会太大,500 mm 基本已经达到了目前常规生产能力的极限。基于生产条件,考虑设计控制指标,本文中可通过计算确定图 2 中目前工艺条件下 FRP 拉挤梁对于人行天桥可实现的最大跨度,从而能为工程设计的可行性提供参考。

4.1 连续梁桥

FRP 连续梁桥的梁截面如图 2 所示,两端支座可受拉。采用 SAP2000 建模,如图 4 所示,计算 1 阶竖向自振频率和最大挠度,并变化主跨长度进行参数分析,得到其与 1 阶竖向自振频率和满跨活荷载引起的挠度间的关系,结果如图 5、6 所示。



图 4 FRP 连续梁桥计算模型

Fig. 4 Calculation Model of FRP Continuous Beam Bridge

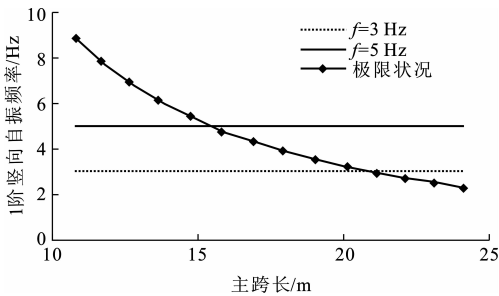


图 5 连续梁桥频率-主跨长曲线

Fig. 5 Frequency-span Length Curves of Continuous Beam Bridge

计算可得:仅考虑挠度要求,挠度小于 $L/600$,主跨度能达到 20.5 m;挠度要求小于 $L/500$,主跨度能达到 22.0 m;挠度要求小于 $L/400$,主跨度能达到 23.7 m。如果考虑频率的要求,频率要求大于 5 Hz,主跨度能达到 21.1 m;频率要求大于 3 Hz,主跨度能达到 28.0 m。因此,如果按中国现行规范要求,采用图 2 中的 FRP 梁目前可以实现的最大跨度的连续梁桥主跨为 20.5 m,而按照美国规范针对 FRP 人行天桥的要求,可达到 22.0 m。这 2 种情况

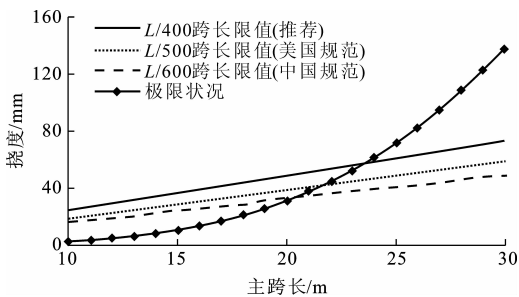


图 6 连续梁桥挠度-主跨长曲线

Fig. 6 Deflection-span Length Curves of Continuous Beam Bridge

下,挠度都是控制跨度的主要设计指标。

4.2 斜拉桥

采用同样的方法计算 FRP 斜拉人行天桥,除主跨外与实际试验桥相同,采用 SAP2000 建模,计算 1 阶竖向自振频率和最大挠度。变化主跨长度进行参数分析,得到 1 阶竖向自振频率和满跨活荷载引起挠度间的关系,结果如图 7、8 所示。

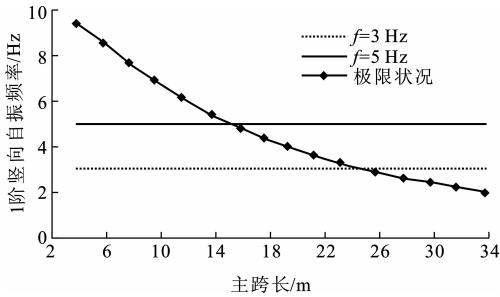


图 7 斜拉桥频率-主跨长曲线

Fig. 7 Frequency-span Length Curves of Cable-stayed Bridge

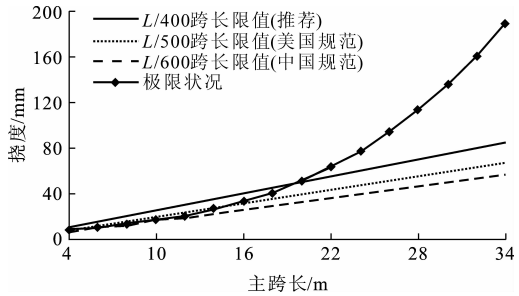


图 8 斜拉桥挠度-主跨长曲线

Fig. 8 Deflection-span Length Curves of Cable-stayed Bridge

计算可得:仅考虑挠度要求,挠度小于 $L/600$,主跨度能达到 12.0 m;挠度要求小于 $L/500$,主跨度能达到 15.1 m;挠度要求小于 $L/400$,主跨度能达到 19.2 m。如果考虑频率的要求,频率要求大于 5 Hz,主跨度能达到 25.2 m;频率要求大于 3 Hz,主跨度能达到 28.0 m。因此,如果按中国现行规范

要求,采用图 2 中的 FRP 梁目前可以实现的最大跨度的斜拉桥主跨为 12.5 m,而按照美国规范针对 FRP 人行天桥的要求,可达到 15.1 m,同样,挠度都是控制指标。

通过以上算例可知,挠度通常是控制 FRP 人行天桥的主要参数。挠度控制过严,将造成结构中应力水平过低,从而造成较大的浪费。因此,在不影响正常使用的前提下,可适当放宽 FRP 人行天桥的变形要求,根据相关规范的要求,本文中建议取 $L/500$,当承载力和振动能满足要求时可取 $L/400$ 。

5 FRP 试验桥的性能改善

如前所述,FRP 试验桥实测竖向自振频率为 3.13 Hz,能满足规范要求,但实际上仍有较为明显的振动感。桥梁在活荷载下的变形值较大,不能满足规范要求。因此,本文中提出采用在试验桥桥面加铺混凝土面层来改善结构的受力性能。

桥面加铺混凝土面层略增大结构自重,显著增大结构刚度,并能采用传统的桥面铺装,因此是一种较为方便实用的性能改善措施。根据分析,在 FRP 箱梁顶面打孔,插入直径 8 mm 的短钢筋,再铺设双向钢筋网片,浇筑 60 mm 混凝土即可。在以后的实际工程中,可采用 FRP 筋替代钢筋。

本文中对铺设混凝土后的桥梁进行了结构计算和动力特性实测。计算中在 FRP 的上表面增设 1 层混凝土,两者结合共同受力。增加混凝土铺层后,最大挠度为 55.1 mm,约为 $L/435$,能达到俄罗斯人行天桥规范和美国规范推荐的要求,因此加铺混凝土面层是改善 FRP 桥有效的技术手段。中国 1983 年建成的世界第 1 座 FRP 车行桥在建成初期,挠度也偏大,增加了混凝土面层后也使其挠度得到了控制,达到了很好的效果。

加铺混凝土面层后该桥的计算自振频率降至 2.72 Hz,实测结果为 2.80 Hz,由原来的满足规范要求变为不满足规范要求,这是由于结构自重增大造成的,但实际使用的感受是相反的:行人步行通过时会感觉不到振动;行人的上下蹲伏激振能将该桥激振为有感振动,但并不明显;在行人跑步通行时,桥上其他行人能感到轻微振动。结构频率从满足规范要求变为不满足规范要求,而实际感受却从不舒适变为舒适,证明了采用频率作为控制 FRP 人行天桥的振动舒适度指标并不合理。

本文中采用建议的蹲伏激励荷载计算了改造前和改造后试验桥的动力时程。改造前计算得到 1 阶

竖向自振频率 $f_0 = 3.13$ Hz,在跨中施加以下蹲伏激励荷载

$$F(t) = 650[1 + \sin(\frac{2\pi}{0.32}t)] \quad (6)$$

可得到稳定状态时,跨中的最大加速度为 $0.65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。改造后该桥自振频率降至 2.72 Hz,则 $f_0 = 2.50$ Hz,按以下蹲伏激励荷载计算

$$F(t) = 650[1 + \sin(\frac{2\pi}{0.40}t)] \quad (7)$$

得到稳定时跨中的最大加速度为 $0.29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。2 次输入的蹲伏激励荷载时程如图 9 所示,跨中的加速度时程如图 10 所示。FRP 试验桥为多个 FRP 构件组成的结构,阻尼比应取为 0.02,而混凝土结构的阻尼比应取为 0.05。在计算时,为集中反映结构变化的影响而非混凝土材料与 FRP 阻尼比差别的影响,改造前与改造后的结构阻尼比均取为 0.05。若阻尼比小于 0.05,减振效果更为显著,见图 11。

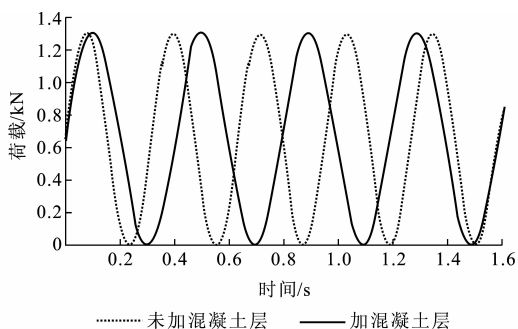


图 9 蹲伏激励荷载时程

Fig. 9 Time Histories of Crouching Excitation Loads

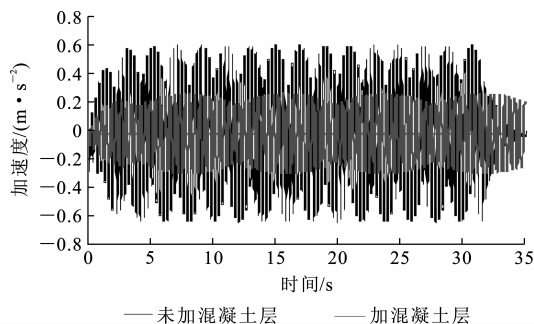


图 10 阻尼比为 0.05 时的跨中加速度时程

Fig. 10 Acceleration Time Histories of Mid-span when Damping Ratio is 0.05

对比可见,加铺混凝土面层后,蹲伏激励荷载下峰值加速度显著降低,此结果与实际感受一致。因此,对于 FRP 轻质桥梁,频率不能作为控制通行舒适度的单一评价指标,应以加速度为主要控制指标。本文中建议的蹲伏激励荷载计算方法能够反映 FRP 人行天桥振动舒适度指标。

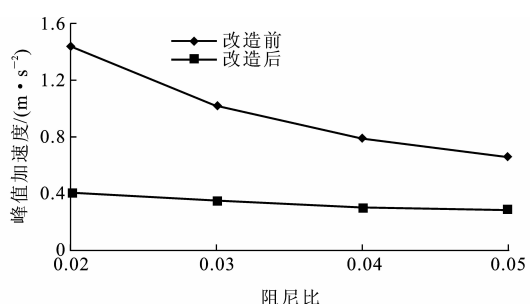


图 11 不同阻尼比时的减振效果

Fig. 11 Vibration Reduction Effects in Different Damping Ratios

6 结 语

(1) 挠度是控制 FRP 人行天桥的主要设计指标,通过对比各国规范,对 FRP 人行天桥建议活荷载下的挠度取为 $L/500$,当承载力和振动均能满足时可取为 $L/400$ 。

(2) FRP 人行天桥振动舒适度的动力特性包括频率与加速度 2 个指标,通过实桥的测试分析发现,加速度是相对重要的指标,而频率仅作为参考。

(3) 针对人行天桥的振动加速度的计算,本文中建议采用简化蹲伏激振荷载作用下的加速度进行评判和衡量,实桥计算证明,此方法可行,并与实际相吻合。

(4) 研究了 1 座采用工业化 FRP 拉挤型材的试验性人行天桥,其初始承载力和频率指标能够满足要求,但挠度不能满足要求,实际感觉振动较明显;而采用加铺混凝土面层方法,提高了结构刚度,减小了挠度,虽然降低了结构振动的频率,但显著降低了振动的峰值加速度,证明加铺混凝土面层是一种改善 FRP 人行天桥结构特性的有效方法。

参考文献:

References:

[1] 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.

[2] ACMA. Global FRP Use in Bridge Applications[R]. New York:ACMA,2004.

[3] 冯 鹏,叶列平,金飞飞,等. FRP 桥梁结构的受力性能与设计方法[J]. 工业建筑,2009,39(增):23-30.
FENG Peng, YE Lie-ping, JIN Fei-fei, et al. Mechanical Behaviors and Design Methods of FRP Bridge

Structures[J]. Industrial Construction, 2009, 39(S): 23-30.

[4] 汤国栋. 玻璃钢斜拉桥研究与实践[J]. 重庆交通学院学报,1987,16(3):1-12.
TANG Guo-dong. The Analytical and Experimental Work of GRP Cable-stayed Pedestrian Bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 1987, 16(3):1-12.

[5] 吕志涛,梅葵花. 国内首座 CFRP 索斜拉桥的研究[J]. 土木工程学报,2007,40(1):54-59.
LU Zhi-tao, MEI Kui-hua. First Application of CFRP Cables for a Cable-stayed Bridge in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(1):54-59.

[6] 冯 鹏. 新型 FRP 空心桥面板的设计开发与受力性能研究[D]. 北京:清华大学,2004.
FENG Peng. Development and Study on an Innovative FRP Bridge Deck[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.

[7] 冯 鹏,叶列平. 外部纤维缠绕增强 FRP 桥面板受力性能试验研究[J]. 土木工程学报,2009,42(9):61-67.
FENG Peng, YE Lie-ping. Experimental Study on Exterior Filament-wound Strengthening Fiber-reinforced Polymer Bridge Decks[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9):61-67.

[8] 朱坤宁,万 水,刘玉擎. FRP 桥面板静载试验研究及分析[J]. 工程力学,2009,26(增 2):618-622.
ZHU Kun-ning, WAN Shui, LIU Yu-qing. Analysis and Experimental Study on Statically Loaded FRP Bridge Deck[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S2):618-622.

[9] 李天虹. FRP-混凝土组合梁受力性能和设计方法研究[D]. 北京:清华大学,2007.
LI Tian-hong. Study on Mechanical Performance and Design Method of FRP-concrete Hybrid Beams [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.

[10] 王言磊. FRP-混凝土组合梁/桥面结构试验、分析与设计方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
WANG Yan-lei. Experimental Investigation, Analysis and Design Methods for FRP-concrete Composite Beam/Bridge Superstructure Systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.

[11] 谢 旭,朱越峰. CFRP 拉索设计对大跨度斜拉桥力学特性的影响[J]. 工程力学,2007,24(11):113-120.
XIE Xu, ZHU Yue-feng. Study on Behavior of Long-span CFRP Cable-stayed Bridges [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(11):113-120.

[12] FENG P, YE L P, TENG J G. Large-span Woven Web

- Structure Made of Fiber-reinforced Polymer [J]. Journal of Composites for Construction, 2007, 11(2): 110-119.
- [13] ZIVANOVIC S, PAVIC A, REYNOLDS P. Vibration Serviceability of Footbridges Under Human-induced Excitation; a Literature Review [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 279(1/2): 1-74.
- [14] 陈政清, 华旭刚. 人行天桥的振动与动力设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- CHEN Zheng-qing, HUA Xu-gang. Vibration and Dynamics Design of Footbridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [15] CJJ 69—95, 城市人行天桥与人行地道技术规范 [S]. CJJ 69—95, Technical Specifications of Urban Pedestrian Overcrossing and Underpass [S].
- [16] SNIP 2. 05. 03-84, Construction Regulation. Bridges and Pipes [S].
- [17] AASHTO-2004, LRED Bridge Design Specifications [S].
- [18] AASHTO-2008, Guide Specifications for Design of FRP Pedestrian Bridges [S].
- [19] CAN/CSA-S6-00, Canadian Highway Bridge Design Code [S].
- [20] BS EN 1990:2002, Eurocode; Basis of Structural Design [S].
- [21] ZHOU A, BAI Y, KELLER T. Dynamic Characteristics of Bridge Superstructures with FRP Composite Structural Elements [C] // HAMELIN P. Proceedings of the Third International Conference on Composites in Constructions. Lyon: ICCI, 2005: 971-978.
- [22] FUJINO Y, PACHECO B M, NAKAMURA S, et al. Synchronization of Human Walking Observed During Lateral Vibration of a Congested Pedestrian Bridge [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1993, 22(9): 741-758.
- [23] BS 5400-2: 1978, Steel, Concrete and Composite Bridges—Part 2: Specification for Loads [S].
- [24] WHEELER J E. Prediction and Control of Pedestrian-induced Vibration in Footbridge [J]. Journal of Structural Division, 1982, 108(9): 2045-2065.
- [25] 何 勇, 金伟良, 宋志刚. 多跨人行天桥振动均方根加速度响应谱法 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(1): 48-53.
- HE Yong, JIN Wei-liang, SONG Zhi-gang. RMS Acceleration Response Spectrum Method of Multi-span Footbridge Under Pedestrian Excitation [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(1): 48-53.
- [26] KERR S C, BISHOP N W M. Human Induced Loading on Flexible Staircases [J]. Engineering Structures, 2001, 23(1): 37-45.
- [27] ELLINGWOOD B, TALLIN A. Structural Serviceability: Floor Vibrations [J]. Journal of Structural Engineering, 1984, 110(2): 401-418.
- [28] BACHMANN H. Vibration Upgrading of Gymnasia, Dance Halls and Footbridges [J]. Structural Engineering International, 1992, 2(2): 118-124.
- [29] ANDRIACCHI T P, OGLE J A, GALANTE J O. Walking Speed as a Basis for Normal and Abnormal Gait Measurements [J]. Journal of Biomechanics, 1977, 10(4): 261-268.
- [30] CAETANO E, CUNHA A, HOORPAH W, et al. Footbridge Vibration Design [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [31] CHANDRA R, SINGH S P, GUPTA K. Damping Studies in Fiber-reinforced Composites; a Review [J]. Composite Structures, 1999, 46(1): 41-51.
- [32] ALURI S, JINKA C, GANGARAO H V S. Dynamic Response of Three Fiber Reinforced Polymer Composite Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10(6): 722-730.
- [33] BAI Y, KELLER T. Modal Parameter Identification for a GFRP Pedestrian Bridge [J]. Composite Structures, 2008, 82(1): 90-100.