

FRP 人行天桥结构设计与分析*

冯鹏¹ 李天虹¹ 李威¹ 叶列平¹ 邵忠民²

(1 清华大学土木工程系 结构工程与振动教育部重点实验室 北京 100084 ;

2 北京市市政专业设计院 北京 100037)

摘要：用 FRP 建造桥梁结构具有施工速度快、重量轻、耐腐蚀性好、易于维护等优点，从上世纪 70 年代开始，已经有百余座 FRP 桥梁在世界各地相继建成。本文以北京郊区某商业区的实际道路条件为背景，对一座长 46.45m 的人行天桥进行了结构方案设计，分别对连续梁桥和吊桥两种形式采用 FRP 结构进行了设计，并用有限元软件分别对两种结构方案的设计结果进行了分析和对比，对结构变形和自振频率的控制方法进行了研究，为 FRP 桥梁结构的设计提供了参考。

关键词：人行天桥 新型桥面体系 频率 吊桥 腐蚀 快速施工

STRUCTURAL DESIGN AND ANALYSIS OF AN FRP PEDESTRIAN BRIDGE

FENG Peng¹ LI Tianhong¹ LI Wei¹ YE Lieping¹ SHAO Zhongmin²

(1 Department of Civil Engineering, Key Lab of Structural Engineering and Vibration, Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084

2 Beijing Municipal Engineering Special Design Corp., Beijing, 100037)

Abstract : It has the advantages of rapid installation, light weight, corrosion resistance and convenient maintain to construct bridge with FRP. From 1970's, more than 100 FRP bridges have be built in the world. A 46.45m long pedestrian bridge is designed based on the highway conditions of a commercial district at the suburb of Beijing. A continuous beam bridge scheme and a suspension bridge scheme which are FRP structures are separately designed. Their results are analyzed comparatively by finite element software. The approach to control the deformation and the natural frequency is investigated, which can provide reference for the design of FRP bridges.

Keywords pedestrian bridge; innovated bridge deck; frequency; suspension bridge; corrosion; rapid construction

1 引言

从上世纪 70 年代开始，FRP 就开始在桥梁工程中尝试应用^[1]。英国、美国和以色列最先应用这种新型材料作为建筑结构和桥梁结构中的主要构件^[2]。70 年代后期，我国也开始对 GFRP 桥梁进行研究。当时大多采用的是 FRP。1982 年，北京密云建成了跨径 20.7 米、宽 9.2 米的 GFRP 筒支蜂窝箱梁公路桥，为世界上第一座 FRP 车行桥，证明了 FRP 作为承重构件的可行性^[3]。1986 年，重庆建成一座 FRP 斜拉人行桥^[4]，如图 1 所示，推动了 FRP 用于大跨度桥梁的应用。近年来，随着 FRP 在结构工程中被逐渐接受，FRP 在桥梁结构中的应用迅速发展，世界各地有各种结构形式的 FRP 桥梁相继建成，目前已经超过 100 座^[5]，例如：1992 年在英国苏格兰建成的 Aberfeldy 人行桥为全 FRP 斜拉桥；2001 年在西班牙建成

* 国家自然科学基金重点项目 (编号 50238030) 资助

第一作者：冯鹏 男 1977 年 10 月出生 讲师。

的 Lleida 桥为拱桥^[6]；2001 年在英国建成的 Havgavor 桥为悬索桥^[7]；美国的 Clear Crack 桥为 FRP 型材梁桥；2004 年西班牙建成的 Asturias 桥为 FRP 箱梁混凝土组合梁桥，如图 3 所示。在这些应用中 FRP 桥施工速度快、重量轻、耐腐蚀性好、易于维护等优点得到了很好地体现。因此，在北京某跨路的人行天桥中拟采用 FRP 结构，进行工程的试点。

虽然 FRP 材料强度较高，设计中强度容易满足，而 FRP 的弹性模量相对较小，尤其是 GFRP，在跨度较大的人行桥中主要为桥梁跨中变形控制。此外，人行天桥需要满足行人舒适度的要求，主要为对竖向振动频率的控制。本文根据设计要求，对箱梁方案和吊桥方案进行结构设计，通过有限元分析对结构变形和自振频率进行分析计算，并依此对结构方案进行优化。



图 1 重庆 FRP 斜拉桥



图 2 苏格兰 Aberfeldy 桥



图 3 西班牙 Asturias 桥

2 设计条件

此工程为过街人行天桥，位于北京市某郊区中心地带，周围为现代化商业中心。跨越双向六车道和中央绿化带，以及两侧非机动车道，如图 2 所示。全桥总长 46.45m，根据使用要求，中央不能设柱，在机动车道与非机动车道隔离带处可以设柱，因此此桥共 3 跨，中跨较大，为 28m，两边跨为 8.2m 和 8.25m。由于此桥位于商业集中地区，甲方要求此桥具有较好的外观，能起到一定的景观效果，形成当地的标志性景观。同时希望经济、可靠，在施工阶段对主路的交通影响小。

结构设计条件根据《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ69-95)中规定确定，取人群荷载按 5kN/m^2 ；结构的变形控制为人群荷载作用下的跨中最大竖向挠度不超过 $L/600$ (L 为计算跨径)；同时为保证通行的舒适性，要求上部结构竖向自振频率不小于 3Hz。

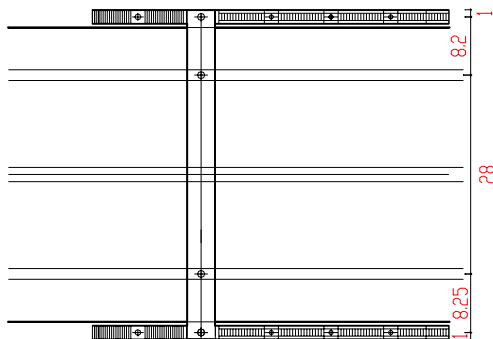


图 4 人行桥平面



图 5 连续梁桥方案效果图

3 方案 1：连续梁桥

在概念设计阶段，提出了两个设计方案，分别采用 FRP 进行结构设计。

3.1 设计方案

方案 1 为连续梁桥，桥墩采用混凝土材料，桥面体系采用 GFRP。下部为主梁，表面为光滑曲线；上部为金属质感围护和装饰结构，从一侧开放通过渡到另一侧虚实结合；墩柱采用 V 字型，体现现代感。建成的效果图如图 5 所示，桥梁风格独具匠心，桥面装饰旨在营造动感的时空隧道。

主梁采用 GFRP-混凝土组合箱形梁，横纵截面如图 6 所示。桥面宽 4m，中间 3 个腹板高 900mm，外侧两腹板高 300mm。箱形截面采用 12mm 厚拉挤 GFRP 板拼装，通过拉挤角件粘接。上翼缘和腹板采用一层拉挤板，下翼缘由两层拉挤板粘贴。箱梁下表面粘贴 1 层 0.167mm 厚 CFRP。沿跨度方向每 4m 间距设置横向加劲肋防止 GFRP 板局部失稳，横向加劲肋采用和腹板相同材料。为了增加截面刚度，在 GFRP 箱形梁上铺设 80mm 厚 C30 轻骨料混凝土。混凝土和箱形梁之间的剪力通过图 6 中所示的剪力连接件传递，剪力连接件采用拉挤工型 GFRP。混凝土层中按构造配 $\phi 8-300$ 钢筋。由图 6 可以看到，为获得足够的刚度，桥面体系截面高度较大。

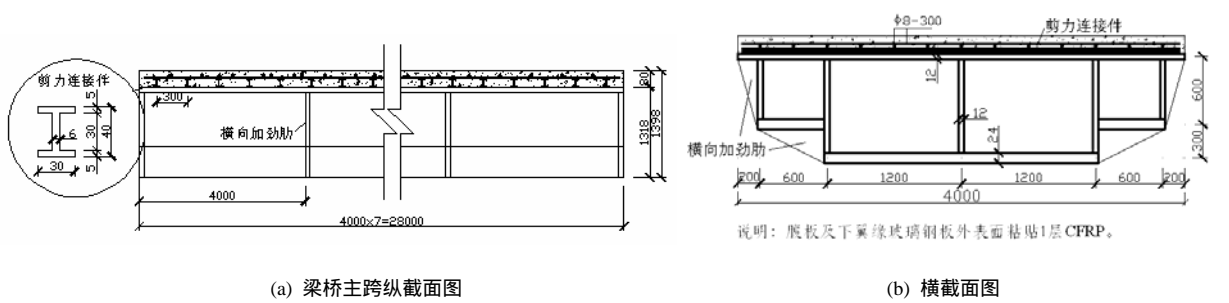


图 6 梁桥方案桥面体系

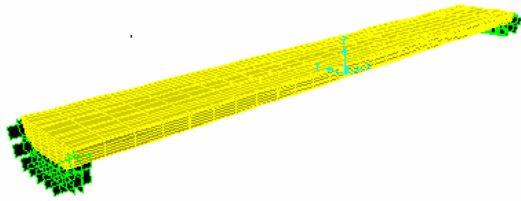


图 7 主梁结构模型三维图

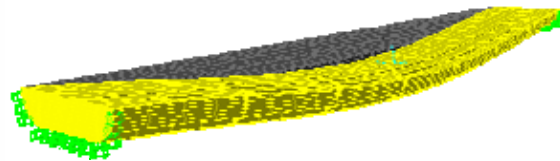


图 8 主梁一阶竖向振型

表 1 FRP 材性参数表

	纵向弹模 (GPa)	横向弹模 (GPa)	剪切模量 (GPa)
上下翼缘 GFRP	30	17	4
腹板及肋 GFRP	17	17	8
CFRP 布	210	-	-

表 2 连续梁桥计算最大应力值(MPa)

x 方向最大拉应力	x 方向最大压应力	y 方向最大拉应力	y 方向最大压应力	xy 面内最大剪应力
67.7	57.6	30.5	26.6	36.2

3.2 施工方案

考虑对主路的影响较小，采用先简支后连续的方法进行施工。主跨和两个边跨在工厂预制完成，现

场吊装拼接；主跨梁重量很轻施工非常方便；最后在箱梁顶面上浇筑混凝土，无需底模，形成连续梁。

3.3 结构分析

主跨的大梁跨度 28m，两端固支，有限元计算模型如图 7 所示，桥面体系所采用的 GFRP 和 CFRP 的材料属性见表 1。

由于采用拉挤平板，两个方向上的材料属性不同，在有限元软件中采用各向异性材料进行分析。根据计算结果，在承载力极限状态荷载组合下，箱形梁各项最大应力值见表 2 所示。可以看到，最大应力值远远低于 GFRP 材料的承载能力，所以，结构强度不是设计的控制因素。而由于 GFRP 材料刚度较小，位移限值主要的控制因素，因此采用了轻质混凝土叠合层，一方面增大结构刚度，同时也方便了桥面的铺装。根据计算结果，在人群荷载作用下跨中最大竖向挠度为 36.4mm，约为计算跨径的 1/769，能够满足要求。同时为了避免振动，减少行人的不安全感，需要控制人行天桥上部结构的竖向自振频率，主要通过控制主梁的刚度实现。计算得到此结构一阶竖向自振频率为 4.25Hz，满足舒适度要求，相应振型如图 8 所示。

4 方案 2：吊桥

4.1 设计方案

方案 2 为双塔吊桥，效果图如图 9，采用 3 根吊索悬挂 5 个刚性吊环，两侧各有 4 根边索；拱形桥塔，向两外侧倾斜；桥梁从拱形塔和 5 个吊环中间穿过。采用吊桥，使跨度减小，箱形主梁的高度减小，使桥面显得很轻盈。另外值得一提的是，此桥型不但外形优美，而且悬挂桥面的五个吊环分别采用红黄绿蓝黑奥运五环色，与 2008 年北京奥运主题相呼应，具有很好的文化意义。

桥塔采用直径 500mm FRP 管混凝土拱形斜桥塔，中间两根拉索采用直径 70mm 预应力不锈钢束，两个边索采用直径 90mm 预应力不锈钢束，桥面由 5 个钢圆环悬挂，圆环截面外直径 200mm，壁厚 6mm。桥面宽 4m，梁高 400mm，采用 GFRP 拉挤板，厚度均为 12mm，板底外表面粘贴 1 层 CFRP。构件横截面如图 10 所示。



图 9 吊桥方案效果图

4.2 施工方案

考虑对主路的影响，吊桥采用先立拱形桥塔再整体吊装中梁的方案，施工顺序如图 11 所示。

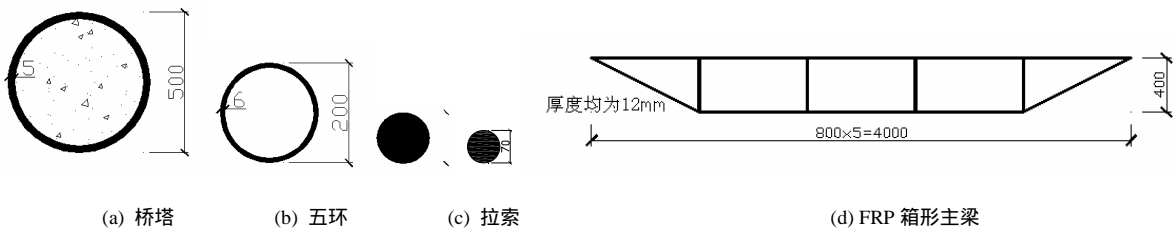


图 10 吊桥方案构件横截面图

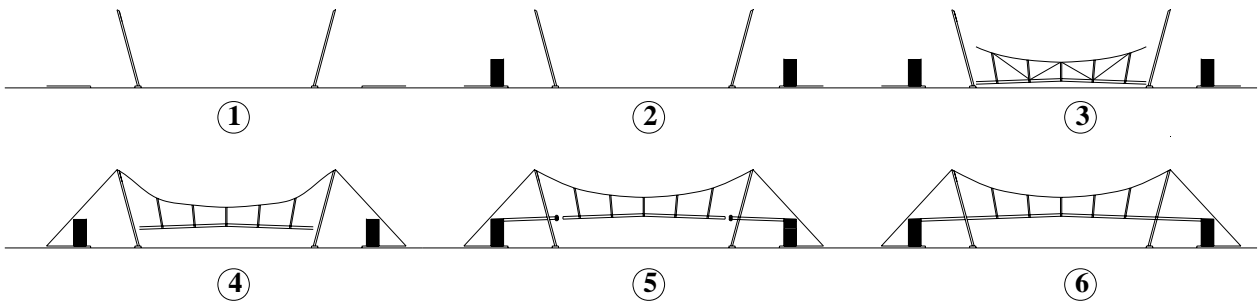


图 11 吊桥施工步骤

4.3 结构分析

根据桥梁的设计方案建立有限元模型，考虑几何非线性进行分析。根据计算结果调整索形和索力，得到如图 12 所示方案，中间 3 根钢索总的预应力为 92kN，两边索施加预应力 180kN。主梁仍采用拉挤板拼装，拱形塔采用 GFRP 纤维缠绕管内填混凝土制成，索为不锈钢索。

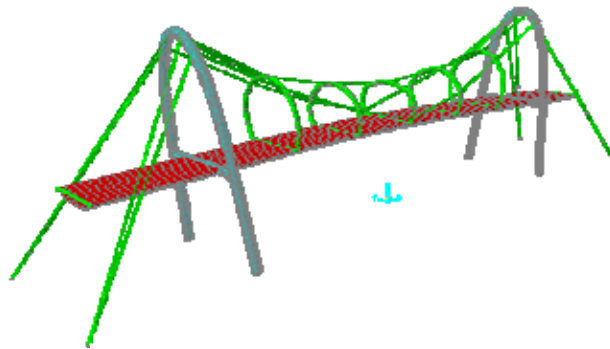


图 12 吊桥模型三维图

表 3 吊桥计算最大应力值(MPa)

x 方向最大拉应力	x 方向最大压应力	y 方向最大拉应力	y 方向最大压应力	xy 面内最大剪应力
30.8	22.8	31.5	12	7.5

根据有限元模型计算结果，在承载力极限状态荷载组合下，箱形梁各向最大应力值见表 3 所示。可以看出，最大应力值比梁桥方案低，远远低于 GFRP 材料的强度，所以与梁桥一样，结构强度不是设计的控制因素，而是变形。图 13 即为吊桥在人群荷载作用下的变形最大竖向位移，可以看到最大变形不是

发生在桥中部的圆环处，而是发生在其两侧的圆环处：人群荷载下最大位移值为 40.5mm，满足设计要求。在结构自振频率的计算中，低阶的振型都是由拉索的振动产生，如图 14(a)所示，而最先出现竖向振型的频率为 3.45Hz，振型如图 14(b)，满足通行舒适度的要求。

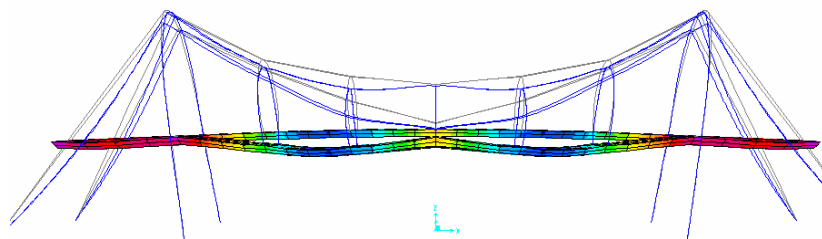
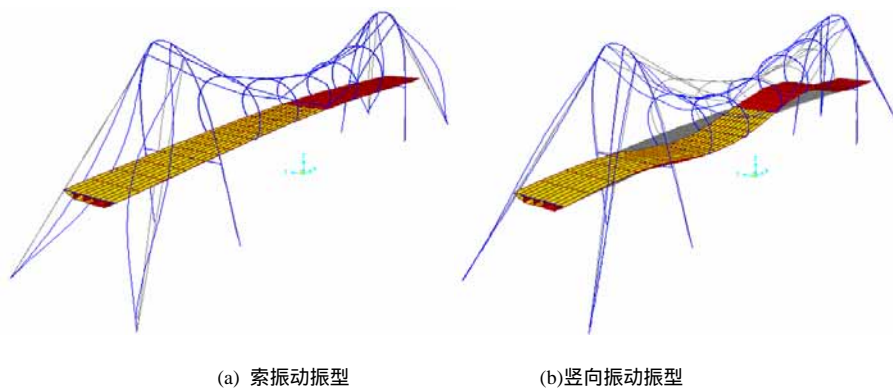


图 13 人群荷载下结构的竖向变形图



(a) 索振动振型 (b) 竖向振动振型

图 14 吊桥结构典型振型图

5 方案对比

最终两个方案均能满足设计要求，将方案的材料用量列在表 4 中，对比可以发现，组合连续梁桥方案经济性比吊桥方案略好，但从建筑效果上看，吊桥方案较有优势。这两个方案都反映出了 FRP 轻质桥梁的施工方便、重量轻的优势；建成后其耐腐蚀的优势也将得到体现。

表 4 两个方案主要材料用量

吊桥（不包括边墩和坡道）			连续梁桥（不包括墩柱和坡道）		
构件	材料	用量	构件	材料	用量
桥面结构	主结构 GFRP	10.4t	主梁	主结构 GFRP	15.2t
	节点 GFRP	1t		节点加强 GFRP	0.6t
	CFRP	75.6kg		剪力连接件 GFRP	0.3t
钢索	不锈钢	6.4t		CFRP	208.8kg
五环	钢	3t	混凝土层	轻骨料混凝土	15m ³
桥塔	GFRP	1.2t		钢筋	0.64t
	混凝土	14.2m ³			

5 结语

虽然用 FRP 材料建造桥梁已经有 30 多年的历史,但是 FRP 在桥梁结构中仍是一个新型材料。国内外的研究和实践对于其优点已有一定了解,但我国在结构设计方面还缺少相关经验。

通过本文的设计实践可以看到,FRP 强度较高,但价格低廉的 GFRP 的弹性模量较小,在实际的桥面体系的设计计算中,控制因素往往是位移或者自振频率而不是承载力。在梁桥中,为了控制桥面体系的位移,不得不增大截面的面积来增大桥面的几何刚度,这不但不经济,增加坡道的费用,而且使结构显得笨重而庞大,影响美观;而在其表面铺上混凝土层形成 FRP-混凝土组合梁桥则能大大改善,是一个很好的应用形式。

吊桥的结构形式使主梁的跨度减小,而使结构截面大大降低,不但节省了材料,而且结构显得非常轻巧。可以看到,FRP 材料具有其自身的特点,与钢材和混凝土有很大的不同,如果沿用传统的钢结构或者混凝土结构的结构形式势必不能很好的利用 FRP 材料,从而会造成 FRP 材料性能不佳的错误观念。因此,寻求符合 FRP 材料的特点的合理的结构形式,将是 FRP 结构应用的关键问题。

参考文献

- 1 叶列平,冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展. 土木工程学报. 2006, 39(3):24-36
- 2 沃丁柱,李顺林,王兴业,等,编. 复合材料大全. 北京:化学工业出版社,2000
- 3 蔡国宏. 先进复合材料在桥梁中的应用现状和发展前景. 高新技术专题报道:中国交通. 2000 (网上文献)
- 4 汤国栋,汤羽,冯广占. 中国 GRP / COM 桥梁的研究与实践. 成都科技大学学报, 1995, (6):69-80
- 5 冯鹏. 新型 FRP 空心桥面板的设计开发与受力性能研究. 清华大学博士学位论文. 北京, 2004
- 6 Sobrino J A, Pulido M D G. A new glass-fibre-reinforced arch bridge in Spain. In: Proc. IABSE Symposium. Melbourne, Australia: IABSE, 2002 (CD-ROM)
- 7 Firth I, Cooper D. Glass fibre reinforced plastic bridges - three UK examples. In: Proc. IABSE Symposium. Melbourne, Australia: IABSE, 2002 (CD-ROM)