



Research  
Bridge Engineering—Review

## 纤维增强复合材料应用于荷兰桥梁设计：面临创新性、可持续性和耐久性的建筑挑战

Joris Smits

Department of Architectural Engineering and Technology, Faculty of Architecture and the Built Environment, Delft University of Technology, Delft 2628 BL, the Netherlands

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 18 May 2016

Revised 22 September 2016

Accepted 17 October 2016

Available online 24 November 2016

#### 关键词

建筑

结构设计

桥梁设计

纤维增强复合材料 (FRP)

生物复合材料

柔性成型系统

单壳体结构

### 摘要

本文综述了纤维增强复合材料 (FRP) 在荷兰桥梁的建筑性与结构性设计方面的应用, 讨论了这种相对较新的材料给建筑师和工程师带来的挑战和机遇。本文涵盖了纤维增强复合材料的最新结构处理方案, 以及对于纤维增强复合材料在建筑方面应用的讨论, 这些应用来源于笔者与其他科研人员在建筑上的实践。

© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

尽管建筑行业的发展往往比其他行业诸如汽车或航空航天工业更为保守, 但在荷兰, 创新性材料和新技术不断应用于桥梁建设。纤维增强复合材料 (FRP) 是桥梁设计中非常有发展前途的新材料之一。纤维增强复合材料是由纤维增强聚合物基体所组成的复合材料。这些纤维包括玻璃纤维、碳纤维、陶瓷纤维、芳纶纤维、纸纤维、木纤维以及植物纤维。而聚合物通常为环氧树脂、乙烯基酯或聚酯热固性塑料。纤维和聚合物基体表现出不同的物理和化学性质, 两者相结合可以形成一种坚固和刚性的复合材料。

自从1995年第一座纤维增强复合材料人行桥于哈灵根 (Harlingen) 建成以来, 荷兰对于这一新材料在桥梁设计领域的应用体现出愈加浓厚的兴趣, 从而使纤维增强复合材料的桥梁数量显著增加。本文所讨论的桥梁的例子表明纤维增强复合材料可用于桥梁主要的承重结构, 如模块化的边缘部件和桥面系统。虽然在荷兰的纤维增强复合材料桥梁设计的初始研究中, 纤维增强复合材料主要应用于直接承重板, 但本文将指出这种材料也能提升桥梁外观的美观度。

荷兰的公路、铁路和水路较为密集。因此, 这个国家拥有较多数量的交通桥和人行桥也不足为奇了, 而大部分的桥梁是在第二次世界大战之后建造的[1]。自第

E-mail address: [j.e.p.smits@tudelft.nl](mailto:j.e.p.smits@tudelft.nl)

2095-8099/© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: Engineering 2016, 2(4): 518–527

引用本文: Joris Smits. Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands: Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable, and Durable Bridges. *Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ENG.2016.04.004>

二次世界大战以来,荷兰的交通强度已经增长了10倍,而设计规范和法规也越来越严格,尤其是在材料损耗、力学和疲劳方面。因此第二次世界大战以后大量的桥梁由于技术上的原因遭淘汰。由于经济的衰退,政府已经被迫缩减开支,并且置换桥梁花费成本较高,因此桥梁维护方面几乎没有预算成本[2]。

建设新的桥梁时,无论是从工程参数的合理性还是文化和美学方面考虑,都会出现诸如混凝土和钢材等传统材料是否仍适用的问题。因而,一些新的材料开始应用于桥梁设计领域,纤维增强复合材料则是其中一种。

虽然在过去的20年里,荷兰已经建造了大量使用纤维增强复合材料的桥梁,但显而易见,只有少数桥梁的设计考虑了美学上的问题。这些设计大多非常简单,拥有庞大的桥梁结构,但这反而不能体现出使用一种新型材料的情况。这些桥梁仅可看做水面上的平板;只有少数桥梁考虑到了美学因素,而新材料只被用于模仿传统材料的作用,如木材(作为护墙或桥面)或钢材。这种情况类似于第一座铁桥设计,该设计直接以钢铁取代传统的木材进行连接。

为了解释纤维增强复合材料在桥梁设计中所产生的影响,首先要确定如何使用纤维增强复合材料来改变桥梁的外观,以及纤维增强复合材料的何种形状和构造能够在桥梁设计中被充分应用。本文的目的是开创一种能够使设计师、建筑师和工程师进一步进行纤维增强复合材料桥梁设计的方法,不仅因务实的工程选择而使用这种新材料,而且还处理因为使用而带来的挑战。

为了了解这种材料能够做什么,首先需要知道它是什么。因此,第二部分探讨了工程师如何得到新型纤维增强复合材料,包括不同类型和生产方法。第二部分讨论并评估这些方法的美学价值。而在第三部分通过评估笔者的工作和其他科研开创者的工作,提出了在美学改善方面所面临的不同机遇和挑战。

## 2. FRP 工程解决方案

回顾纤维增强复合材料的发展历程,工程师先于建筑师尝试这种新材料。在建筑师使用这种材料前,航空航天、海运和汽车工业领域最先使用这些材料。早在1940年,亨利·福特(Henry Ford)以大麻纤维和树脂制造了一个开创性的复合汽车,其宣传标语为“十倍强钢”(图1和图2)。塑料材料也开始吸引其他行业的注意,包括产品设计、建筑学以及建筑工程。建筑学的实践发



图1. 亨利·福特(Henry Ford)展示以大麻纤维和树脂制造的汽车的强度(Ford, 1940)。

现了新材料生产成型技术的潜能,如未来系统建筑师项目(Future Systems Architects),并且基于此类实践开发了未来纤维增强复合材料房屋及结构。然而,对于桥梁设计而言,早期的纤维增强复合材料设计未能考虑材料的美学价值。

受桥梁维护和耐久性问题的驱动,桥梁工程师在寻求传统建筑材料的替代品时发现,纤维增强复合材料常常具有相对良好的性能(表1)。它们突出的优点之一是密度低而导致质量较小。笔者实践中的比较案例研究表明,在具有相同性能的情况下,纤维增强复合材料复合桥梁的平均重量约是钢桥的一半;并且混凝土桥梁的重量是具有相同性能纤维增强复合材料桥梁的五倍。重量方面的好处是可以减少在运输、吊装、装配、支撑结构和基础设施方面的能源消耗和成本。考虑到原材料有限及其碳排放方面的因素,纤维增强复合材料的桥梁往往是一个理性的选择。这类材料不仅在耐用性方面有显著优势,而且表现出高耐腐蚀性,因此,其维护成本低。

### 2.1. 手工叠层的应用: 哈灵根的人行桥

1995年12月,荷兰基础设施与环境部(Rijkswaterstaat)在荷兰建成一座完全由纤维增强复合材料构成的人行桥(图3)。两年后,该桥正式在哈灵根的海港开放并投入使用。其重量仅是传统钢铁材质桥梁重量的一半,造价是传统桥梁的两倍,另外,由于其U型梁理念与高承重女儿墙相结合的设计特点,该桥的跨高比( $L/D$ )仅是传统桥梁的一半。手工叠层,或称手工涂层复合工艺,是一种应用广泛的制作复合材料零件的传统技术。该技术通过反复堆涂树脂与纤维涂层形成增强体,并最终制得复合材料零件。这是一项简单但劳



图2. 航空航天、海运、汽车和体育行业等工程领域中纤维增强复合材料的使用情况。

表1 与钢和铝材料相比的FRP材料的性能<sup>a</sup>

Properties	Density, $\rho$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	Young's modulus in x-direction, $E_x$ ( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ )	Young's modulus in y-direction, $E_y$ ( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ )	Tensile/compression strength in x-direction, $f_{x,k}$ ( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ )	Tensile/compression strength in y-direction, $f_{y,k}$ ( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ )
GFRP UD, $V_f$ 50%	1.875	36.569	10.924	740.00	n/a
GFRP 625, $V_f$ 50%, anisotropic lay-up (0/90/45/-45) (62.5%/12.5%/12.5%/12.5%)	1.850	27.600	15.200	331.00	182
CFRP UD, $V_f$ 50%	1.450	120.000	60.000	1.56	n/a
Steel S355	7.850	210.000	210.000	355.00	355
Aluminum 6063	2.720	69.600	69.600	110.00	110

GFRP UD stands for unidirectional glass fiber-reinforced polymer; CFRP UD stands for unidirectional carbon fiber-reinforced polymer.

<sup>a</sup> Both GFRP and CFRP have superior strength in a unidirectional fiber orientation. However, an anisotropic fiber lay-up is more realistic in bridge applications. Arguably, the relatively lower Young's modulus in FRP demonstrates that deflection is key in FRP design.



图3. 荷兰哈灵根市的人行桥 (Poly, 1997年摄)。

动密集型的手工作业，即使零件质量与操作技工的技术水平直接相关，且保障了基于该材料的后续设计的

灵活性，但由于人工作业的限制，加工的成品无法满足高纤维体积比要求。



## 2.2. 拉挤型材的装配

另一个在许多桥梁中得到应用的解决方法是纤维增强复合材料拉挤型材的使用。拉挤成型是一种连续自动化的生产工艺，可用于生产大量相同的零件。该工艺保证了相同质量条件下相对较低的生产成本。截面形状复杂、纤维含量高、高要求的产品生产目标均可通过该自动化生产过程实现。将待加工的零件在车间进行树脂浸浴，而后迅速将其通过加热的模具。模具沿加强件的延伸方向将其切削成型，整根型材的树脂完全固化后，它将被切割成特定长度的零件待用。

由于纤维增强复合材料采用具有恒定截面的宽范围实心和中空相结合的结构，故可被应用于桥梁、桥面、光栅系统及栏杆处。该材料的优异机械性能往往在轴向得以体现。为了使材料具有一定程度的双向性，可以将机织物或纤维垫送入模具以集成在层压复合板中，但尽管如此，其横向性能仍具有一定的局限性[3]。

在细节方面，由拉挤型材零件组建的纤维增强复合材料桥梁与钢桥十分相似。直型型材与拉挤板材相得益彰，被组装成桁架、拱门、塔架或U型梁(图4)。拉挤型材应用的关键是衔接组装技术的实现。因为纤维材料的压合在型材延展方向上往往是单向的，所以在衔接处极易断裂，在现有工艺中，人们常用螺栓和加固板来将其固定。

## 2.3. 桥面

桥面通常是人行桥和交通桥最不耐用的部分。初期施工不当、合理维护保养的欠缺、不理想的环境条件等是桥面使用寿命降低的最主要原因。在荷兰，除去漆涂费用，桥面的维修与更换费用占每年桥梁维护成本的75%~90%[4]。除了用以替代腐朽磨损的钢铁或混凝土桥面，复合材料还可被应用于加宽现有桥结构，并且不会明显增加桥墩和桥台的静负荷(图5)。

## 2.4. 承重均匀的桥面

如前文所述，过去10年中，荷兰见证了纤维增强复合材料在步行及非机动车桥梁领域的应用与推广。与此同时，人们使用另一种高效的技术建造了大量的复合材料桥梁。该类桥梁由空心FRP板材铺就，桥面上安装有钢质栏杆。该生产流程包含了一系列被平行放置且包裹在机织物中的非承重核心部件，加强件在核心部件的水平面方向上穿过腹板和相邻的核心部件面层持续延伸。随后内核与加强件被固定在可变形模板上(图6)，并由柔性袋密封。然后通过真空技术将树脂吸入复材压层板中。该真空装置包含一个位于模具输出端的真空泵。真空泵从位于模具输入端的储存器中抽取树脂。经过上述先进设备的加工，加强件成品的腹板和翼缘厚度可达几

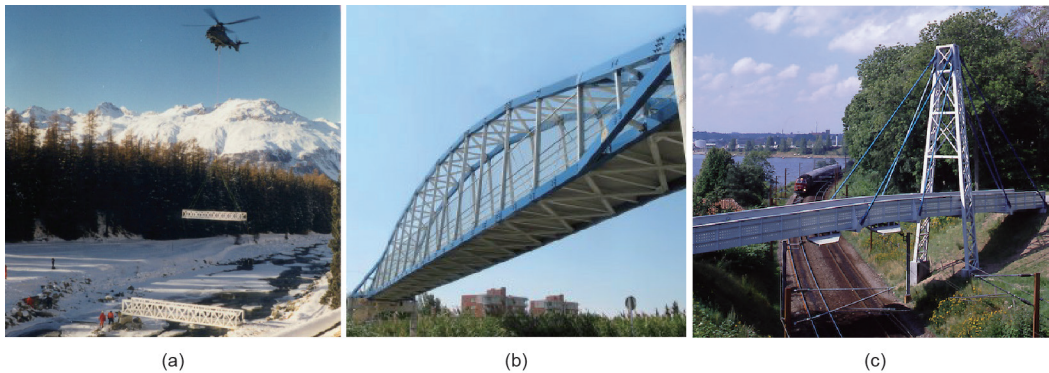


图4. 采用拉挤型材并进行材料替换的桥梁结构(Fiberline, 2013年摄)。(a)瑞士, 蓬特雷西纳; (b)西班牙, 莱里达; (c)丹麦, 科灵。

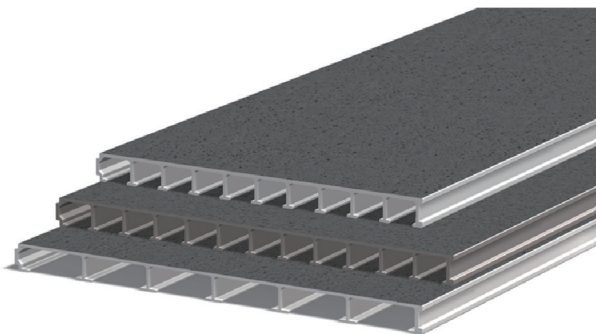


图5. 由拉挤工艺制得的桥面板(美国运输研究委员会, 2006)。

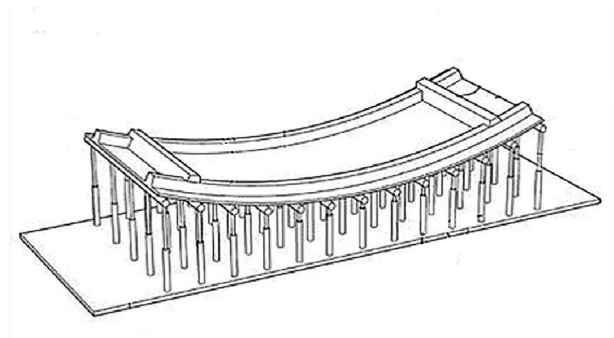


图6. 一个拥有长宽可调整拱形面板的模具系统。

十厘米，其纤维含量亦可达70%。尽管轻质的核心部件在最终产品中并没有起到结构方面的作用，但在产品生产过程中它所发挥的模具作用无可替代，在加强件成品加工完成后，它仍被密封其中[5]。然而，通常情况下这种由泡沫材料制得的核心部件强度极大，足以抵抗在树脂抽入过程中由真空造成的压力。

尽管这类桥梁建筑风格极简，并且受到女儿墙设计的限制，但其较低的跨高比以及女儿墙与承重结构的分离设计，使得该类桥梁与用上述方法制造的桥梁相比具有更加精巧的外观(图7)。

### 3. 建筑师面临的挑战

上一部分回顾了在过去20年中，工程师们开发、应用纤维增强复合材料的历程。然而，本文开篇所提出的问题仍旧未得到回答：建筑师们在应用纤维增强复合材料设计桥梁时，将采用哪些建筑手段？又将面临哪些挑战？为了回答这个问题，本节将回顾一系列纤维增强复合材料在桥梁设计中的应用案例，其中涉及的实践经历与学术研究项目，均是笔者在过去10年中亲身经历的。

#### 3.1. 模块化的桥面边缘部件

边缘部件在很大程度上决定了桥梁的外观，因为从相邻的田地或河边，而不是从桥梁上方的角度看，所感知和欣赏到的是其立面的结构设计。最佳情况下在桥梁上驾驶能有一个很好的视角，但从这个角度可以看到的仅仅是桥梁本身的沥青、护栏和女儿墙。因此，将纤维增强复合材料用于生产边缘部件将显著地扩展设计潜力。因为纤维增强复合材料提供了比其他常规材料(如钢)更大的自由度，所以可以在具有高度抛光表面的材料上实现曲面和光滑边界。

除了可设计性，纤维增强复合材料边缘部件解决了耐久性差的问题。在使用纤维增强复合材料之前，边缘部件或由具有锥形端部的实体混凝土制成，或被制成中空钢梁。虽然后者为管道和电缆提供了一个宽阔的、可检查的空间，但一直存在耐久性差的问题。钢梁由于水分冷凝而倾向于从内部腐蚀，而真菌和苔藓则在混凝土部件的表面上生长。

纤维增强复合材料边缘部件的细节设计和装配也是具有优势的。纤维增强复合材料的边缘部件结合末端边缘使用向内定向的翼缘进行制造。这不仅在边缘处形成了精细而平滑的端部，而且在装配期间公差也较小。桥梁面板被放置在二级结构上之后，从一个角度观察连接情况，可以看出相同的材料与混凝土相互融合而不是留下间隙。

通常，厚度为60 mm、半径为10 mm的翼缘就足以掩盖较小的缺陷。在设计者忽略指定这些翼缘的情况下，结果可能是不理想的，如图8和图9(a)所示的瓦德波尔德跨线桥的面板。这些面板之间的垂直间隙是可见的，实际上不可能调节所有面板之间的间距，来实现等宽。然而，由于肉眼只能在近距离观察中发现面板阵列中一些面板和扭结之间的宽间隙，所以高架桥在一定距离处具有连续的线性外观。

荷兰赞斯塔德的朱莉安娜女王桥的细长侧边体现出将纤维增强复合材料应用于桥面板边缘部件设计的优点，如图9(b)所示。该桥梁高度抛光和光滑的边缘面板具有一个弯曲的、锥形的横截面，由连接到混凝土桥面的900 mm悬臂所组成。桥梁的女儿墙以允许拆卸用于检查和维护(如电缆更换)的方式集成在模块化部件中。桥梁面板之间的接缝十分精细，其内部翼缘的厚度为60 mm，这不仅弥补了装配公差，也避免了部件之间可见的暗间隙。在荷兰，其他纤维增强复合材料边缘部件



图7. 旨在建造一体化桥梁结构的工程专利技术(Peeters, 2011年摄)。



的工程应用包括阿尔克马尔的纳尔逊·曼德拉桥(2016年2月建成)、里森威尔登(Rijssen Wierden)的野生动物横道和行人隧道[图9(c)、(d)], 及史基浦机场附近的高速公路N201高架桥, 如图10所示。

高速公路N201高架桥的设计证明, 纤维增强复合材料边缘部件的可行性不仅仅体现在形状、颜色和质地方面。在这个项目中, 引入了通过在复合材料板上部安装灯具来使建筑物在夜间闪耀的理念。为了实现期望的

效果, 将半透明纤维增强复合材料与蜂窝芯一起使用, 这实现了光在一定厚度内和在桥梁面板表面上透射, 并且让桥梁面板达到足够的刚度。在桥梁的边缘面板上部安装红色的亮灯, 当接近高速公路时, 最终会呈现出线性发光效果。

### 3.2. 单壳体结构

随着由纤维增强复合材料制成的整个承重结构的建



图8. (a)安装和(b)瓦德波尔德跨线桥中边缘部件的最终装配。



图9. 荷兰部分具有纤维增强复合材料边缘部件的项目。(a)哈勒姆的瓦德波尔德跨线桥; (b)赞斯塔德的朱莉安娜女王桥上的边缘部件; (c, d)里森威尔登的野生动物横道和行人隧道(荷兰Royal Haskoning DHV集团, 2007, 2013, 2013)。

立，纤维增强复合材料在建筑中的应用不限于模块化桥梁的部件。受到单壳体桥面的启发，这种结构试验了由纤维增强复合材料提供的设计潜力。单壳体是具有承载外壳的结构，与甲壳类动物相当(图11)。这种结构的横截面外部区域能够有效地聚合材料，从而有利于实现长柱状。从维护和美学的角度来看，桥梁的下侧平滑封闭，富有优势。污垢不会积聚在突出的翼缘上，从而避免了鸟巢建在该结构下。

生产具有双曲率的单壳体桥梁是一个具有挑战性的过程(图12和图13)。为了获得一个平滑且易于维护的表面，需要使用模具。由于形状特殊需要独特的模具，因此模具制造成本高昂。通过采用简单的平模可以有效地减少模具成本。生产方法对于最终结果也是至关重要

的。一种方法是使用单模真空注射，通过该模具将桥倒置生产，那么真空箔和纤维的纹理就会暴露在桥梁下面——类似于内部具有凹凸表面的老式独木舟。使用双模具或研磨和抛光处理后可以克服这个弊端。另一种方法是手工叠层，其中层压材料围绕特殊设计的心墙表面构建，将其包封在最终结构中。尽管该手动过程有更多的设计空间，但是由于其纤维体积比低，需要更多的树脂和厚壳结构，因此不是最佳的材料使用方法。在手工层压的情况下，仅通过大量的研磨、涂装和抛光就可以获得光滑的表面。

### 3.3. 折纸结构和壳体结构

承重纤维增强复合材料也可以被设计成壳体结构或



图10. 高速公路N201高架桥面板上安装的红色亮灯。



图11. 龙虾螯——一个自然界中单壳体结构的例子。



图12. 哈尔德韦克的蜻蜓人行桥(荷兰Royal Haskoning DHV集团, 2014)。



三维折叠形状,使其在结构上受益于这些结构具有的内在刚度。对于折叠相对平坦的部件,如纤维增强复合材料夹芯板,被折叠成三维形状后可以显著增加结构刚度。U型梁结构可以由不同的最简折叠结构组成,但更为复杂的折叠设计灵感则有可能源自折纸结构(图14和图15)。但是折叠结构也具有明显缺陷,其自身带有褶皱以及材料内部应力不能通过轴向力单一作用。褶皱意味着需要额外的材料,在拐角处具有倒圆的棱边最佳,弯曲度的概念由此被引入。

与折叠式策略正好相反,壳体结构在对材料的利用上更充分。在这些情况下,由于结构刚度源于三维曲率,桥面本身可以相当薄(图16和图17)。笔者与英国

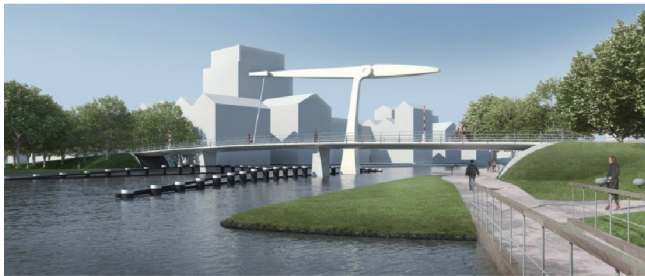
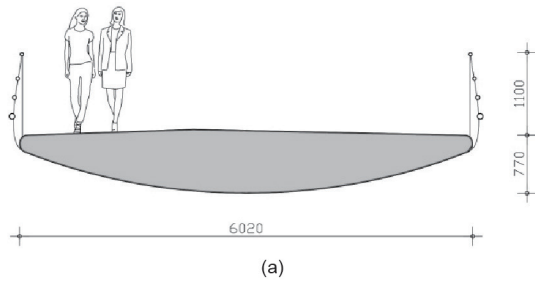


图13. 卡特韦克的便于行人和自行车跨越莱茵河的单壳体纤维增强复合材料吊桥(荷兰Royal Haskoning DHV集团, 2014)。(a)桥梁面板横截面(单位: mm); (b)艺术家印象。



图14. 自然界中的折纸结构例子——树叶。

FiberCore公司合作设计的模块化的纤维增强复合材料人行桥(图18),就是一个很好的壳体结构例子。桥面横截面曲线上凸,形成部分桥面护栏。随着弯曲度向中间增加,桥面的高度也在增加。

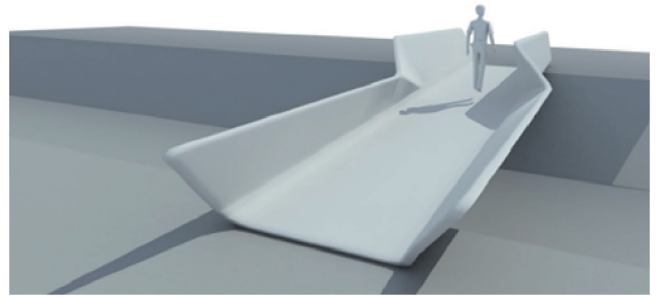


图15. 折纸结构桥梁(荷兰代尔夫特理工大学)。



图16. 轻韧的对虾壳结构。



图17. 品客薯片和油炸马铃薯片的优化刚度。

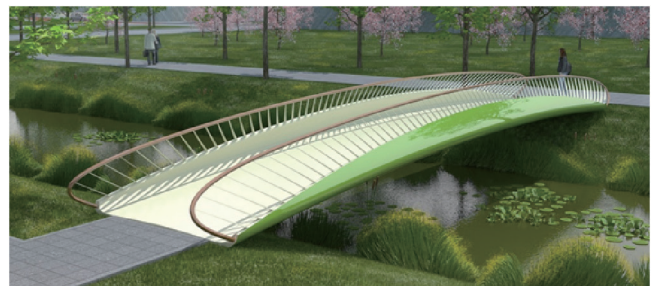


图18. 代尔夫特设计的行人和自行车组合桥(荷兰Royal Haskoning DHV集团, 英国FiberCore公司, 2008)。



### 3.4. 智能模板

在实现纤维增强复合材料的复杂三维几何图形过程中，最重要的决定因素之一是模板费用。对大规模生产来说，相同部件的批量化生产可以实现，桥面边缘部件的处理也已在3.1节讨论过，规模生产费用在可承受范围内。然而，当每个部件都不同，要求其三维结构变化时，采用单一特定的模具解决方法就会很昂贵。一些研究人员正在研究智能灵活型模板和尝试新的成型系统，以便有效解决几何改建问题。研究出的混凝土结构(图19)[6,7]的铸塑软模具和弧形玻璃窗格(图20)[8]可调型模板，可以很好地调整和应用到纤维增强复合材料中，最终可以让建筑师有更多的设计可能性且形式自由。

### 3.5. 生物复合材料

目前在实践中，建筑师和客户对可持续性的关注愈发强烈。虽然最近荷兰方面的相关研究证明，与用钢材、混凝土等传统建筑材料建造人行桥相比，纤维增强复合材料天桥在控制碳排放方面要表现得更好，但该材料的主要成分仍然来自不可再生资源。在结构应用中的纤维增强复合材料，通常是由石油基树脂玻璃和碳材料等人

造纤维组成。

近年来在环保意识的推动下，基于可再生的原材料已经进入合成工业，在各种产品中得到应用。天然纤维已成功取代人造纤维，并且各种新类型的基于天然物质的树脂已被引入市场，旨在减少对环境的影响和生产纤维的能耗。虽然生物复合材料已经被其他一些行业接受，如汽车工业，但也仅限于外观制造方面。至于在承重结构的应用方面，如人行桥，生物基聚合物和天然纤维的应用仍处在实验阶段。在荷兰的埃曼市，据说生物复合材料的桥面跨度长达5 m。但实际情况是该桥面除了使用天然亚麻纤维，还加入了玻璃纤维。

对于选用生物复合材料的桥梁设计师来说，在考虑设计要素之前，考察生物复合材料的组成、研究它们组成成分的不同是有好处的。以下各节会讨论笔者正在和即将参与的实验项目，该项目研究了埃因霍芬市的生物复合材料人行桥的建造情况。

#### 3.5.1. 纤维

“天然纤维”这个术语，指的是存在于大自然中并且存在于植物(纤维素纤维)或动物(蛋白质纤维)体内的纤维，但在复合材料中仅使用植物纤维作为增强材料[9]。纤维素纤维可从植物的多个器官中获取，如种子(棉花、木棉、马利筋)、茎(亚麻、黄麻、大麻、苧麻、洋麻、苧麻、竹)、叶(剑麻、马尼拉草、蕉麻)和果实(椰子)；也会存在其他草类纤维。由于原材料的不同，这些纤维长度不一。长纤维可从较长植物茎部的外皮中提取，如亚麻和黄麻，由于这两种植物纤维的机械性能比其他纤维高，通常优先选择它们作为增强材料。与人造纤维一样，天然植物纤维也可以用来加工生产不同类型的工业纺织品，如机织织物、非卷曲织物、短切毡和抓绒布料。

除了个别类型的长纤维，大多数天然植物纤维与其对应的人工合成纤维相比机械性能更差。然而，天然植物纤维的突出优点之一是其低密度性，这使得制成的部件比玻璃纤维复合材料轻得多。由于天然纤维的比重较低，其比强度和比刚度因此增加。对生物复合材料来说，这些是很关键的性质，对于有弯曲刚度设计要求的部件尤为必要，因为天然纤维的刚度高于强度。除此以外，植物的机械性能受到生长环境(温度、湿度、土壤和大气成分，以及收割和种植方式)的极大影响，导致即使同种类型的纤维，性质上也出现数值偏差。

天然纤维的另一特点是耐久性差。多项研究[10,11]表明，亲水性导致的过度吸湿，是纤维素纤维机械性能

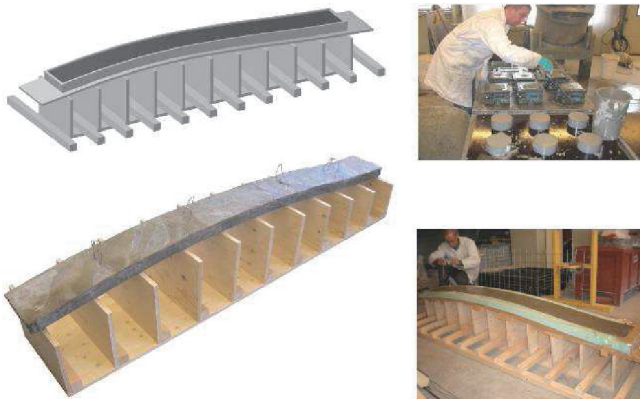


图19. 单一弧形部件的测试设置。

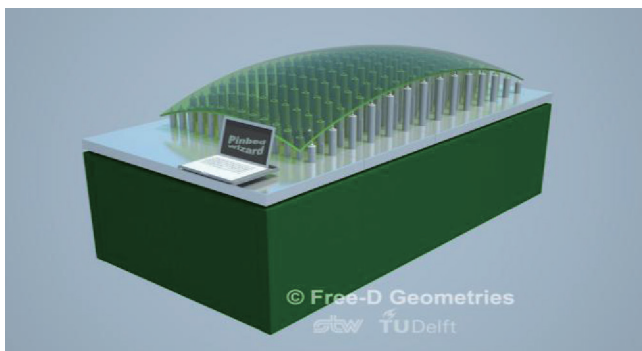


图20. 200台计算机同时执行模板调型。

加速下降的主要原因。天然纤维与疏水树脂之间较差的兼容性也是耐久性差的另一个原因，兼容性差可引起材料过早老化[12]，导致材料降解、强度损失。天然纤维还易受紫外线(UV)辐射的影响。紫外线的化学降解导致复合材料分子结构改变，促进表面脆化、开裂、变色，以及拉伸强度和冲击强度的降低。但是，人们已经进行了许多研究，开发改善天然纤维耐久度的处理方法。这些方法是利用物理或化学手段，通过改变纤维表面、形态和组成，达到减少水分吸收、改善纤维基质黏附状况的目的[13]。

### 3.5.2. 树脂

生物树脂的研发，旨在通过提高可再生原料的百分比，进一步改善生物复合材料对环境的影响。生物树脂又称生物基聚合物或有机塑料，是利用可再生原料如淀粉、纤维素或农业废弃物生产出的合成聚合物。由于化学组成不同，根据其生物可降解性和耐久性，生物树脂分为不同种类。

与天然纤维类似，可降解塑料也会主动从环境中吸收水分；此外，可降解塑料比石油基树脂更脆。因此，可降解塑料是短期使用产品的优选材料，如包装和快速消费品。高耐久性生物树脂是可降解聚合物的下一代产品。这种塑料以植物油为基础，最大限度地提高可再生原料含量，同时实现持久的功能。通过在生产过程中加入填料和添加剂，可抑制自然降解、降低脆度。正是由于其持久的性能，高耐久性生物树脂在长期使用产品上得到应用。

### 3.5.3. 埃因霍温的实验性生物复合材料人行桥

笔者目前致力于一项关于生物复合材料在某座承重人行桥中应用情况的研究(图21)。该桥梁由亚麻纤维、生物树脂、聚乳酸(PLA)泡沫以及天然软木建造而

成。该项目的团队成员包括埃因霍温理工大学、代尔夫特理工大学、NPSP私人责任有限公司(the company NPSP BV)及专业生物经济中心(the Center of Expertise Biobased Economy)。研究结果应用于埃因霍温市2016年10月投入使用的一座全承重生物复合人行桥。关于此问题的更多信息将在一篇科技论文中发表，该论文同时展示了我们对于生物复合桥梁的研究结果。

## 4. 结论

在过去的20年中，纤维增强复合材料在桥梁工程中的使用量得到极大的提升。从简单的桥面部件到拉挤部件，纤维增强复合材料的应用广泛，甚至已经能只使用这种材料制成全承重结构。由于结构和经济上的优势，如重量降低、维护成本降低，纤维增强复合材料吸引了许多工程师，他们已经开发出能与传统结构竞争的纤维增强复合材料建筑方案。近来，在建筑领域，纤维增强复合材料作为建筑材料在桥梁建造方面得以应用，因此产生了许多应用该材料的项目，其中，纤维增强复合材料既能起到建筑作用，又能达到美学目的。建筑师和工程师们还以简单形式或以半透明并结合光线的形式，使用纤维增强复合材料，将其作为桥面周围的覆盖材料。他们还展示了更加大胆的应用，包括承重壳体、折叠结构和非标准弯曲单壳体结构。另外，这种创新材料显然尚未展示出其全部实力，还需要我们进一步研究。特别是，我们应该深入关注，如何通过利用可再生原料(天然纤维、生物树脂等)替代传统材料，来改善环境影响，降低纤维复合增强材料的物化能量。最后，我们需要将纤维增强复合材料作为一种成熟的材料引入教育系统，以便未来的建筑师们能够学习到如何巧妙利用其独特的材料属性及制备方法。



图21. 亚麻纤维、生物树脂、聚乳酸泡沫以及天然软木被用于建造这座位于埃因霍温市的生物复合人行桥。(a)埃因霍温市生物复合人行桥通行仪式(笔者版权所有，2016年10月27日摄)；(b)可提取亚麻纤维的亚麻植物。



## References

- [1] Van Blankenstein E. *Bruggen in Nederland (1940–1950). Vernieling en herstel (destruction and revival)*. Zutphen: Walburg Pers; 2009. Dutch.
- [2] Smits JEP. Bridge design 2.0: recent developments in the field of integrated, sustainable and durable bridges. In: *Structural design. ICSA 2013: Proceedings of the 2nd International Conference: Structures and Architecture*; 2013 July 26; Guimaraes, Portugal; 2013. p. 1–10.
- [3] Majumdar PK, Liu Z, Lesko JJ, Cousins TE. Performance evaluation of FRP composite deck considering for local deformation effects. *J Compos Constr* 2009;13(4):332–8.
- [4] Karbhari VM. Materials considerations in FRP rehabilitation of concrete structures. *J Mater Civ Eng* 2001;13(2):90–7.
- [5] Veltkamp M, Peeters J. Hybrid bridge structure composed of fibre reinforced polymers and steel. *Struct Eng Intl* 2014;24(3):425–7.
- [6] Schipper HR, Janssen B. Curving concrete—a method for manufacturing double curved precast concrete panels using a flexible mould. In: *Design and construction. IABSE-IASS 2011: Proceedings of the Joint Symposium of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) and the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*; 2011 Sep 20–23; London, UK. London: Hemming Group Ltd.; 2011. p. 8.
- [7] Grünewald S, Janssen B, Schipper HR, Vollers KJ, Walraven JC. Deliberate deformation of concrete after casting. In: *Structural engineering. ICFF 2012: Proceedings of the 2nd International Conference on Flexible Formwork*; 2012 Jun 27–28; Bath, UK. Bath: University of Bath; 2012. p. 132–9.
- [8] Rietbergen D, Vollers KJ, inventors. A method and apparatus for forming a double-curved panel from a flat panel. European patent EP 20080741664. 2008 Apr 24.
- [9] Nguong CW, Lee SNB, Sujan DA. A review on natural fibre reinforced polymer composites. *World Acad Sci, Eng Tech* 2013;73:1123–30.
- [10] Zini E, Scandola M. Green composites: an overview. *Polym Composite* 2011;32(12):1905–15.
- [11] Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, Sain M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Prog Polym Sci* 2012;37(11):1552–96.
- [12] Alix S, Philippe E, Bessadok A, Lebrun L, Morvan C, Marais S. Effect of chemical treatments on water sorption and mechanical properties of flax fibres. *Bioresource Technol* 2009;100(20):4742–9.
- [13] Maheswari CU, Reddy KO, Muzenda E, Shukla M. Effect of surface treatment on performance of tamarind fiber-epoxy composites. In: *ICICEMS 2012: Proceedings of International Conference on Innovations in Chemical Engineering and Medical Sciences*; 2012 Dec 26–27; Dubai, UAE; 2012. p. 16–9.