

DOI:10.15951/j.tmgcxb.2018.12.001

新材料组合结构

滕锦光^{1,2}

(1. 香港理工大学, 中国香港; 2. 南方科技大学, 广东深圳 518055)

摘要: 新型结构材料的开发及应用是土木工程技术发展的一个主要驱动力。新型结构材料往往部分性能非常突出, 而其他性能却相对较弱。因此, 在土木工程中应用某种新型结构材料时, 往往需要将其与其他传统或新型结构材料进行优化组合, 以期获得高性能的结构。与传统钢-混凝土组合结构相比, 基于新材料应用的组合结构 (即新材料组合结构) 的材料选择更加多样化, 结构性能更加突出, 为结构工程提供了巨大的创新和发展空间。文中介绍了作者课题组提出的 5 种新材料组合构件形式, 并回顾部分相关研究工作, 希望能为新材料组合结构的发展起到抛砖引玉的作用。

关键词: 新材料; 新型结构; 组合结构; 复合材料; 混凝土; 钢; 木材

中图分类号: TU398 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2018)12-0001-11

New-material hybrid structures

Teng Jinguang^{1,2}

(1. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 2. Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The development and application of new structural materials are a major driving force for technological advances in civil engineering. A new structural material is often very strong in some of its properties, but relatively weak in its other properties. Therefore, in the exploitation of a new structural material in civil engineering, it is often necessary to combine it in an optimal manner with other structural materials, including both traditional and new materials, to deliver excellent structural performance. Compared with traditional steel-concrete composite structures, composite structures enabled by new materials (referred to as new-material hybrid structures) are capable of delivering superior structural performance as a result of greater freedom in material choices. Therefore, new-material hybrid structures offer many possibilities for innovations and advances in structural engineering. This paper introduces five innovative forms of new-material hybrid structures developed by the author's research group and reviews briefly some of the research work conducted on them so far, with a view to illustrating the advantages of new-material hybrid structures to stimulate further development in the area.

Keywords: new materials; innovative structures; hybrid structures; fiber-reinforced polymer (FRP) composites; concrete; steel; timber

E-mail: jin-guang.teng@polyu.edu.hk

引 言

新材料的开发及应用是土木工程技术发展的一个主要驱动力。钢材和混凝土都出现在第二次工业革命时期, 历经一百多年的发展, 已成为建造土

木工程结构的主要材料。采用普通钢材和混凝土建造的结构, 在很大程度上满足了人类社会经济发展的需求, 但也带来了一些重要挑战。其中一个主要挑战就是结构的短寿问题, 而导致结构性能退化的最重要原因是钢材的锈蚀, 尤其是钢筋混凝土结构中的钢筋锈蚀。据统计, 我国每年因钢材锈蚀导致的经济损失超过国民生产总值的 3%^[1]。

土木工程材料的研发在不断朝着更轻、更强、更耐久、更可持续的方向发展。首先, 钢材和混凝

作者简介: 滕锦光, 博士, 讲席教授
收稿日期: 2018-07-16

土的强度在过去几十年中得到了很大的提高。就钢材而言,屈服应力在 1000MPa 左右的超高强钢材已经在钢结构中得到关注^[2-3]。就混凝土而言,超高性能混凝土的强度可以超过 250MPa^[4-5]。其他新型的结构材料包括:①纤维增强树脂基复合材料(简称为复合材料或复材)^[6-7];②超高韧性水泥基材料^[8-10];③织物增强混凝土^[11-13];④记忆合金^[14-15]等。这其中,复合材料在其他工业领域,如航空业、造船业,已经得到广泛应用,但是对于土木工程而言,仍属于一种新材料。过去 20 多年,复合材料在土木工程结构加固中得到了广泛的应用^[16-17],同时也在新建结构中得到越来越多的关注和应用^[18-20]。

土木工程结构对其性能的要求是多方面的,其中主要包括强度、刚度、延性和耐久性。采用普通的钢材与混凝土,结构工程师们发展出了钢结构、钢筋混凝土结构和钢-混凝土组合结构这 3 种主要结构形式和众多的构件截面形式,在很大程度上满足了上述 4 方面的要求。这其中,钢-混凝土组合结构是指在构件层面将钢型材和混凝土进行优化组合的结构,其目的是让钢材与混凝土发挥各自的优点,规避各自的缺点,最大限度地优化构件及结构性能。与钢材、混凝土类似,各种新型结构材料也并非完美无缺,它们通常具有以下共性:其某些性能非常突出,而其他性能却相对较弱。例如:超高强钢材的强度远高于普通钢材,但其弹性模量基本不变,因此屈曲破坏会在更加多的情况下限制对其材料强度的充分利用;复合材料的抗拉性能远好于其抗压性能,宜在结构中作为抗拉材料使用。因此,组合应用新型结构材料是土木工程发展的一个重要方向。

以上的讨论表明,在土木工程中应用某种新型结构材料时,与其他传统或新型结构材料进行优化组合,是获得高性能工程结构的重要途径,甚至可以说是最重要的途径。这类组合结构(称为新材料组合结构)和传统的钢-混凝土组合结构有两个重要区别:①材料的选择更加多样化,因此可能产生的组合构件形式大为增加,为结构工程的创新提供了巨大的空间;②新型结构材料主要为某方面优势突出的高性能材料,组合应用获得的构件性能,相对于传统的组合构件可以有极大的提升。基于这一基本思想,作者的课题组近年来在该领域展开了大量的研究。本文主要讨论本课题组提出的五种构件形式,并回顾了部分相关的研究进展(主要为本课题组的工作),希望能为新材料组合结构的发展起到抛砖引玉的作用。

1 复合材料及其约束混凝土构件

1.1 复合材料及其复材约束混凝土

复合材料(复材)是指由纤维增强体(如玻璃纤维、碳纤维、玄武岩纤维、芳纶等)与树脂基体复合而成的材料,其构件的制作工艺包括手糊、拉挤、缠绕、模压等。根据增强材料的不同,常见的复材分为玻璃纤维增强复合材料(GFRP 或玻纤复材)、碳纤维增强复合材料(CFRP 或碳纤复材)、玄武岩纤维增强复合材料(BFRP 或玄武岩复材)以及芳纶增强复合材料(AFRP 或芳纶复材)。用于土木工程新建结构中的复材产品主要包括复材筋、复材管及复材型材等。与传统结构材料相比,复材具有轻质高强(密度约为钢材的 1/4,而强度可达普通碳素结构钢的 10 倍以上)(见图 1)、良好的抗腐蚀性能、可设计性强等优点。

最常见的复材-混凝土组合构件为复材管混凝土柱^[21-23](图 2)。在此类构件中,若不配置纵向钢筋,复材管需要同时在环向和纵向具有足够的刚度和强度;此时,复材管在轴向受拉区的破坏是一种脆性破坏模式,应通过设计加以避免^[23]。比较理想的做法,是让复材管的纤维缠绕方向接近环向,主要为内部混凝土提供环向约束,同时配置纵向钢筋,以保证构件的延性。本文只讨论复材管纤维缠绕方向接近环向的情况。由于复材管的约束作用,混凝土强度及极限应变相对于素混凝土有大幅度的提高(图 3)^[24],从而提高了混凝土柱的承载力及延性。作者课题组前期已对复材约束混凝土进行了大量深入的研究,提出了能对复材约束混凝土性能进行准确预测的理论模型^[24-26],成果已被世界多国(包括中国、美国、英国、澳大利亚)的相关设计指南/规范采用^[27-31]。

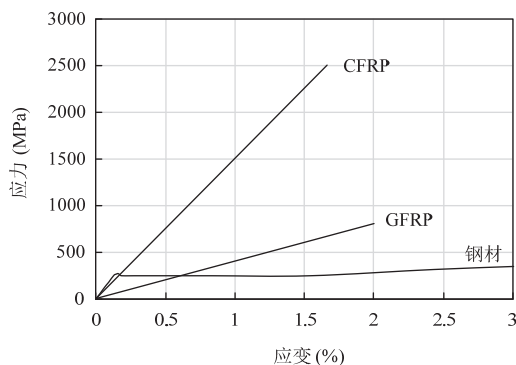


图 1 复材和钢材的典型应力应变曲线

Fig.1 Typical stress-strain curves of FRPs and mild steel

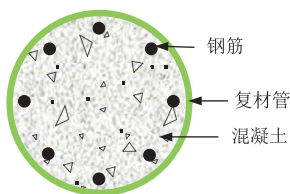


图 2 复材管约束钢筋混凝土柱

Fig.2 FRP tube-confined reinforced concrete (RC) column

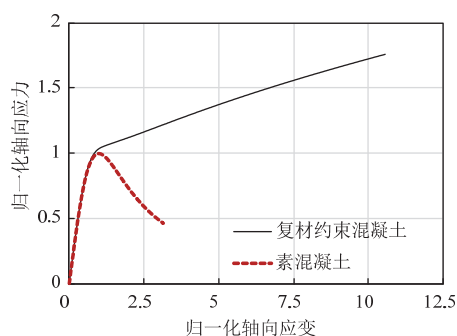
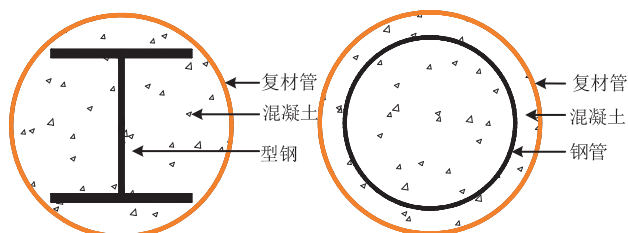


图 3 复材约束混凝土轴向应力-应变曲线

Fig.3 Typical axial stress-strain curve of FRP-confined concrete

1.2 复材管约束型钢混凝土构件

为了延缓钢材发生屈曲及充分发挥钢材（尤其是高强、超高强钢材）的材料强度，可将型钢置于混凝土中，形成型钢混凝土柱^[32]。然而对高强、超高强钢材而言，这种组合形式并不理想，因为混凝土在轴压应变超过 0.2%、未达 0.3% 时即会被压碎，而此时钢材并未达到屈服（例如屈服强度为 960MPa 的钢材的屈服应变大约为 0.48%）却容易发生屈曲破坏。为此，可以采用复材管对型钢混凝土柱进行约束，形成复材管约束型钢混凝土柱（图 4（a））^[33-34]。由于复材管的约束，混凝土的应变能力大大提高（可轻易超过 1%），使得高强及超高强型钢能在屈曲之前达到屈服并发生塑性变形，从而大幅度提高了型钢混凝土柱的强度和延性。此外，外部的复材管还可为内部的钢材提供附加的耐腐蚀保护，



(a) 复材管约束型钢混凝土柱 (b) 双管约束混凝土柱

图 4 复材管约束钢-混凝土组合柱

Fig.4 FRP tube-confined steel-concrete column

同时也可作为施工的永久性模板，简化了施工过程。

1.3 双管约束混凝土构件

基于上述思路，本文作者提出了一种新型的双管约束混凝土柱（图 4（b））^[35]。该双管柱由内钢管、外复材管以及填充的混凝土组成。和普通的复材管约束型钢混凝土柱比较，该组合柱的内钢管既可满足纵向受力的要求，又可以为混凝土提供附加的约束，从而最大程度地发挥了钢材的力学性能。试验表明，由于充分的组合作用，该组合柱的承载力远远大于空钢管和复材约束混凝土柱两者单独承载力之和（图 5）^[35-36]。

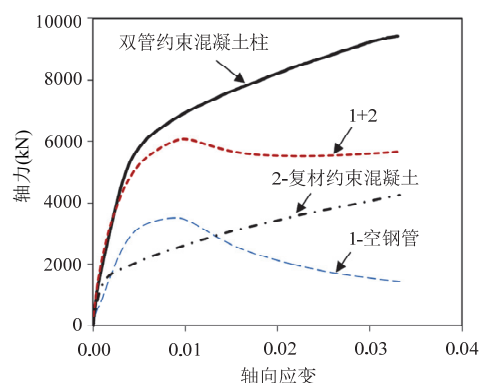


图 5 双管约束混凝土柱轴力-应变曲线

Fig.5 Axial load-strain curve of a double-tube concrete column

2 复材-混凝土-钢双壁空心构件

复材-混凝土-钢双壁空心构件是本文作者发明的一种具有优越耐腐蚀性能和延性的新型组合构件^[19,37-39]。该新型组合构件由复材外管、钢内管及两者之间填充的混凝土组成（见图 6）。上述的双管约束混凝土构件，可视为复材-混凝土-钢双壁空心构件的一种变异，可由对内钢管填充混凝土获得。复材外管的纤维缠绕方向应接近环向，为混凝土提供约束并为构件提供部分抗剪承载力；复材外管和混凝土层可保护钢内管不接触腐蚀环境，使构件具有优越的耐久性；钢内管可起到纵筋的作用，为该组合构件提供抗弯能力；混凝土在钢内管和复材外

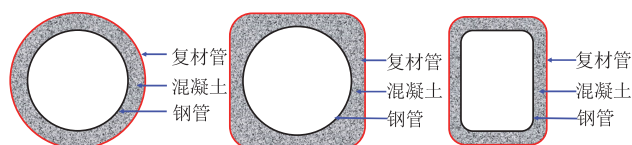


图 6 复材-混凝土-钢双壁空心构件截面形式

Fig.6 Cross-sections of FRP-concrete-steel double-skin tubular members

管的约束下,表现出很好的延性;通过采用较大的空心率,可有效减少混凝土用量并降低结构自重;复材外管和钢内管可作为施工模板,从而大大简化施工过程。

2.1 复材-混凝土-钢双壁空心柱

复材-混凝土-钢双壁空心构件特别适合在恶劣腐蚀环境下作为受压构件使用,如桥墩、输电塔或风力发电塔等。近年来,包括作者课题组在内的国内外学者已对该组合柱在各种受力状态下的力学性能进行了较为系统的试验研究和理论分析,包括单调轴压(例如^[39-44])、循环轴压(例如^[43,45-46])、偏心受压(例如^[47-48])以及水平往复荷载及振动台试验(例如^[43,49-53])。研究表明,该组合柱在不同的荷载作用下都具有良好的承载力及优越的延性。同时,拟静力试验结果表明该组合柱具有极佳的耗能及抗震能力(图7)^[51],特别适合于高烈度地震区。

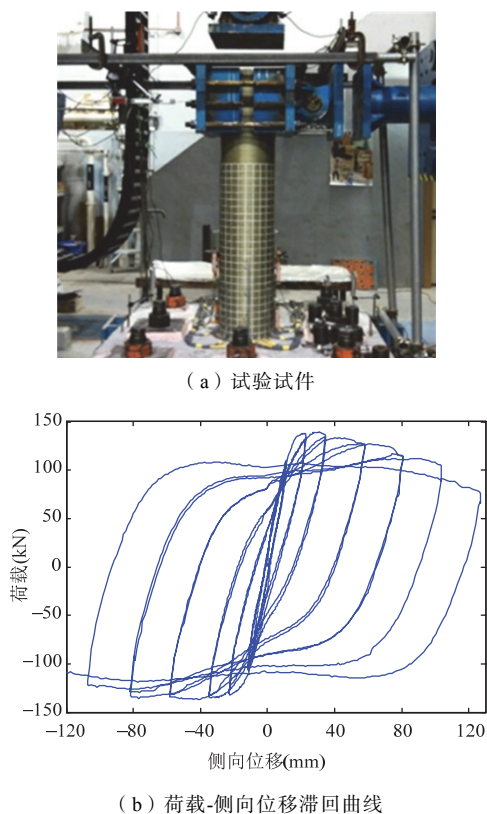


图7 双壁空心柱的抗震性能试验及荷载-侧向位移滞回曲线

Fig.7 Seismic performance of hybrid double-skin tubular columns: test set-up and hysteresis loops

2.2 复材-混凝土-钢双壁空心梁

将复材-混凝土-钢双壁空心构件作为梁使用时,宜将钢内管的中心位置向构件受拉区移动,以提高梁的抗弯承载力和抗弯刚度^[38]。在钢内管和混

凝土的界面应焊接剪力钉,以增强三种材料的组合作用^[54-55]。作者课题组和其他学者对不同截面形式的双壁空心梁进行了一系列抗弯试验和理论分析(例如^[38,54-56])。试验结果表明,双壁空心梁的荷载-跨中挠度曲线具有极好的延性(图8)^[55]。

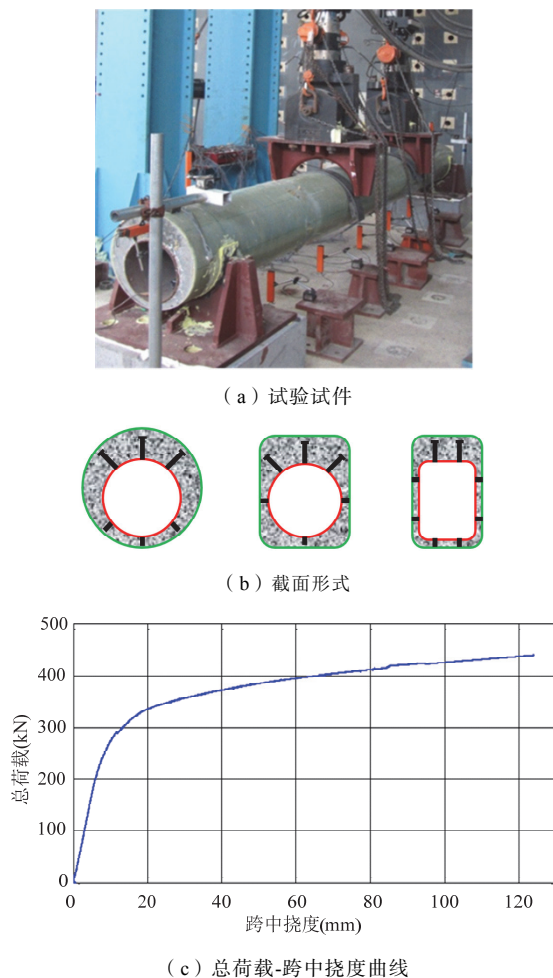


图8 双壁空心梁截面及其抗弯试验

Fig.8 Hybrid double-skin tubular beams: cross-sections and a flexural test

2.3 基于复材-混凝土-钢双壁空心构件的拱桥体系

钢管混凝土拱桥已经成为一种常见的结构形式^[57],但其直接暴露于外部环境中的钢管容易生锈,造成较高的防腐及维护成本。另外,由于拱结构的承载力往往由稳定设计控制,靠近截面中心区域的混凝土所起的作用较为有限,导致材料利用率偏低。复材-混凝土-钢双壁空心拱(简称为双壁空心拱)能够很好地避免以上两个问题,不仅具有耐腐蚀、轻质高强等特点,而且能够显著提高施工效率。作者课题组通过与澳大利亚昆士兰大学 Fernando 博士课题组的合作,证实了该类组合拱良好的受力性能^[58],并开展了如图9所示的双壁空心

拱桥的研发工作,预计该结构形式将于不久的将来首先应用于澳大利亚的一座拱桥中^[59]。通过对该桥梁体系进行模块化设计与施工,可有效缩短建造周期,减少材料用量,进而大幅降低建造成本^[59]。描述该新型桥梁结构体系的论文最近获得了由葡萄牙 BERD- Bridge Engineering Research & Design 公司和波尔图大学工学院联合主办的第一届世界桥梁工程创新奖的唯一获奖论文(Winner of the First World Innovation Prize in Bridge Engineering, 即第一届 WIBE 奖)^[60]。

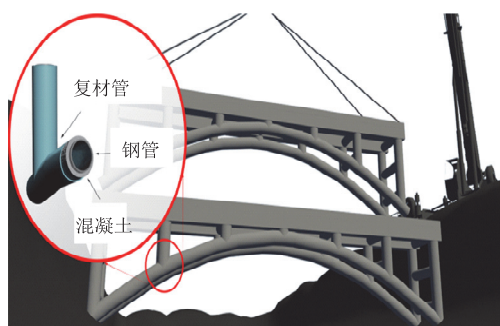


图 9 采用双壁空心构件的新型拱桥体系

Fig.9 Novel arch bridge system based on FRP-concrete-steel double-skin tubular members

2.4 复材-混凝土-钢双壁空心构件的设计方法

基于作者课题组的工作,已经为复材-混凝土-钢双壁空心柱建立了系统的设计计算方法。该设计方法已经被国家标准《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB 50608—2010)采用^[23,27]。规范中对该组合柱的各项参数取值给出了具体建议,并对其轴心受压、偏心受压、抗剪承载力给出了计算公式。同时,对该组合柱中复材管与混凝土界面、混凝土与钢管界面的抗滑措施、混凝土浇筑过程与质量控制等给出了明确建议。

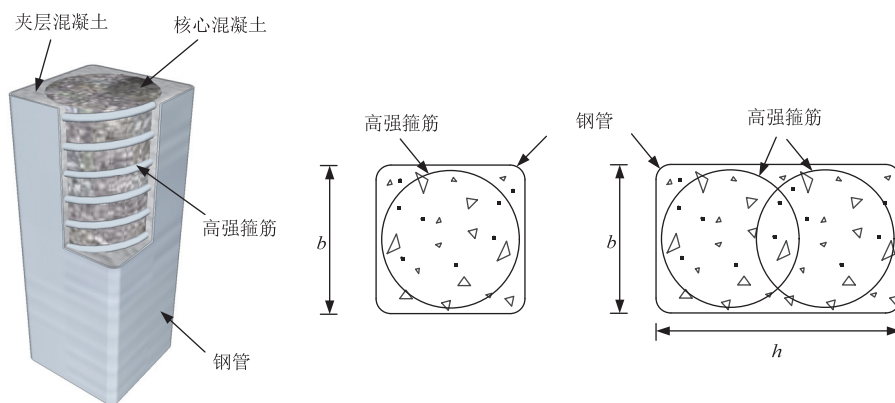


图 10 高强箍筋钢管柱

Fig.10 Concrete-filled steel tubular columns with internal high-strength steel spiral confinement

3 内置高强箍筋钢管混凝土柱

根据截面形式的不同,钢管混凝土柱可分为圆形柱、矩形柱和异形柱。矩形柱由于形状简单、便于节点连接等优点,在实际工程中已经得到大量应用^[61]。然而研究表明,矩形钢管对内置混凝土的约束作用远弱于圆形钢管,尤其当采用高强钢管或高强混凝土时,矩形钢管混凝土柱的延性会大幅下降,严重限制了矩形钢管混凝土柱在抗震结构中的应用^[61-62]。为了解决上述不足,研究者们提出了各种措施,例如:在钢管内部焊接加劲肋、在相邻钢板间焊接对拉钢筋等^[63-64],但是这类方法对提升钢管混凝土柱的延性作用有限,且费工费时。另一种方法是通过内置圆形普通强度钢管或者普通强度箍筋对内部混凝土进行约束^[63,65]。但是,由于普通强度钢管或普通强度箍筋的约束能力和弹性应变能力较低,约束效果并不理想。此外,有些学者提出用圆形复材管对内部混凝土进行约束,取得了不错的效果^[66-67]。

基于以上背景,本文作者提出了内置高强螺旋箍筋的矩形钢管混凝土柱(图 10)^[68]。高强箍筋(屈服强度一般大于 1000MPa)受拉屈服前有较大的弹性应变,类似于复材,而价格低于复材,螺旋箍筋也比复材管更有利于节点的连接处理。在该类组合柱中,高强螺旋箍筋可以对内置混凝土提供强有力的约束,从而提高核心混凝土的强度和延性,减小混凝土的侧向变形,延缓钢管局部屈曲的发生;高强螺旋箍筋约束混凝土具有类似于复材约束混凝土的双线性硬化应力应变关系,可以抵消矩形钢管局部屈曲后的软化行为,从而可明显提升柱子延性。

本文作者课题组对该组合柱进行了一系列的试验研究,证实了该组合柱具有的优越延性(图 11)^[68]。同时,为了更好地理解该组合柱中的约束作用,对高强箍筋约束混凝土进行了专门的研究(图 12)。从图中可以看出,在**高强箍筋屈服前,高强箍筋约束混凝土的应力应变曲线与具有相同约束刚度的复材约束混凝土应力应变曲线接近。随着箍筋的屈服,高强箍筋约束混凝土的应力应变曲线与主动约束混凝土的情况接近,出现缓慢上升段和下降段,呈现出较大的延性,而复材约束混凝土在复材达到断裂应变后呈现脆性破坏模式。

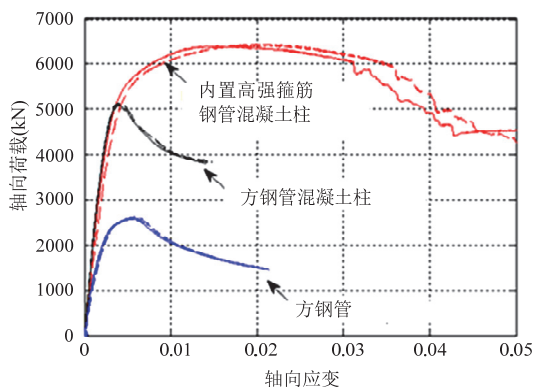


图 11 内置高强箍筋钢管混凝土柱轴向荷载-应变曲线

Fig.11 Axial load-strain curves of square steel tubular columns filled with high-strength-steel-confined

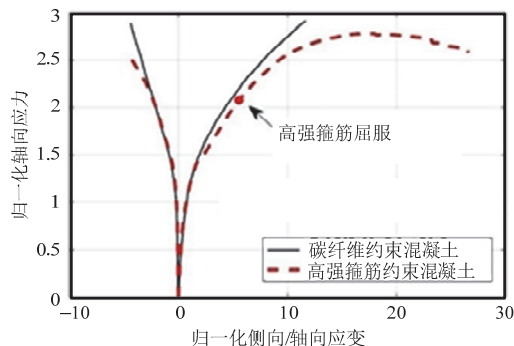


图 12 高强箍筋约束混凝土的应力-应变曲线

Fig.12 Stress-strain curves of high-strength steel-confined concrete

4 复材-木材组合薄壁结构

在主要建筑材料中,木材是唯一的可再生天然材料。木结构建筑具有低碳环保、保温节能、建造方便等优点,但木材也有湿胀干缩、易腐蚀、材性不均匀等弱点。另外,为了能够有效利用小直径的树木,可对原木进行旋切或者刨切制成单板,再将单板经热压胶合成板材或者型材(如工字型材、圆

管等),用于承重结构^[69]。如此制成的板材或者型材,在沿着木材纹理的方向(顺纹方向)具有很好的力学性能,但是在垂直纹理的方向(横纹方向)力学性能较差,因此该类构件容易在垂直纹理的方向发生破坏。为此,本课题组与澳大利亚昆士兰大学 Fernando 课题组合作提出了复材-木材组合薄壁结构(hybrid FRP-timber thin-walled structures,简称 HFT 薄壁结构)^[70-72]。如图 13(a)和图 13(b)所示,HFT 薄壁结构是由木板层和复材层组合形成的薄壁结构,可采用模压成型。其中木板层的木纹平行于构件的纵轴线;复材的纤维方向垂直于顺纹方向,以增强木材横向受力性能,可简化 HFT 的成型工艺。

为适应不同的应用需求,HFT 薄壁结构的性能可通过复材的有效布置及截面的合理设计予以提升,例如将 HFT 薄壁构件的截面设计成槽形(图 13(a))、矩形管及圆形管等截面形式(图 13(b))。特别地,对于图 13(b)中的空心截面,外部的复材层除了用于连接两个 HFT 薄壁“半截面”外,还提供了附加约束作用以增强构件的整体性^[71]。

为了验证 HFT 结构技术的有效性,在昆士兰大学采用模压成型工艺制作了 HFT 组合墙板(图 13(c)),并对其进行了轴压试验。结果显示:HFT 墙板与纯木墙板相比,极限承载力提高了 91%,纵向刚度、极限变形能力均有显著提高(见图 14),而成本仅增加了 40%^[71]。HFT 组合薄壁结构作为一种轻质、环保、高性能、易制作的新型结构形式,可适用于土木工程中的梁、柱、楼板、桥面板、墙等构件。这种结构不仅具有良好的力学性能,也能够有效利用多缺陷、低品质、小尺寸木料,符合我国绿色、环保、可持续发展战略,凸显出较高的社会、经济效益。

5 基于海水海砂混凝土与复材的海洋工程结构

海洋是最严酷的自然腐蚀环境之一。普通钢材在海洋环境中极易腐蚀,而不锈钢不仅价格昂贵,在海洋环境中依然面临着较大的锈蚀风险^[73-74]。复材因其轻质、高强、抗疲劳、耐腐蚀等优点,是海洋环境下代替普通钢材建造安全、耐久结构的理想材料。现有研究表明,复材在海洋环境中具有优异的耐腐蚀性能^[75-76],能够在 100 年后仍保持约 75% 的拉伸强度^[75]。

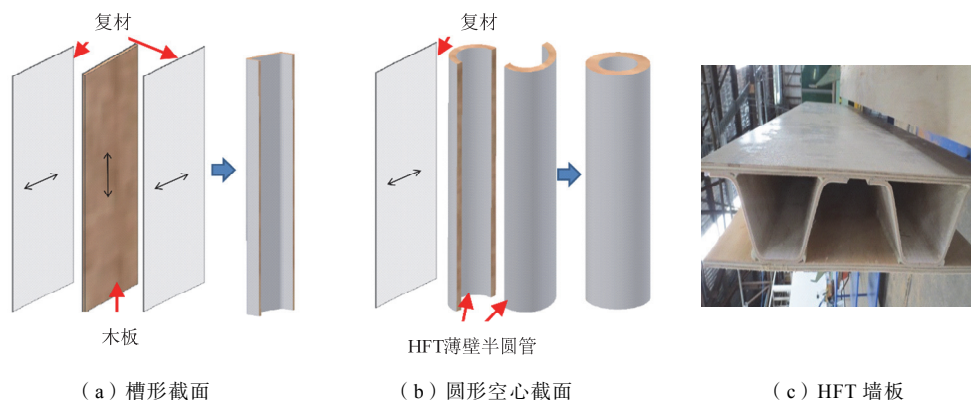
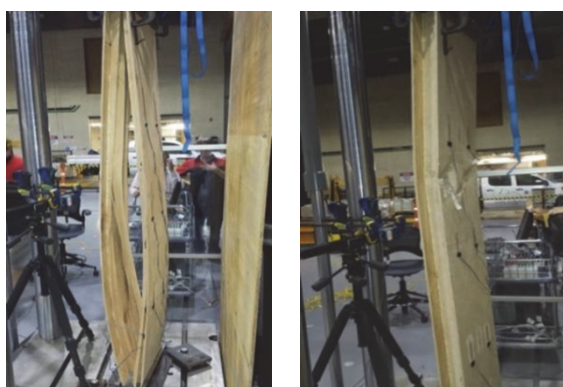
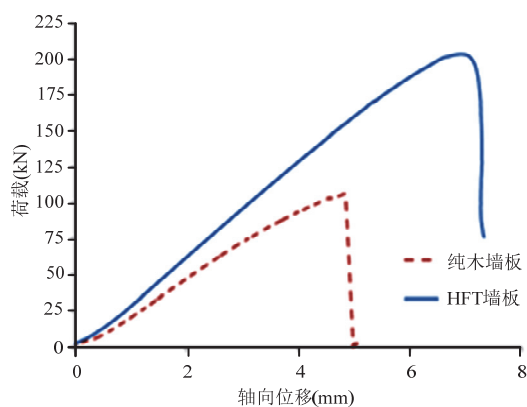


图 13 压模成型 HFT 薄壁构件 (双箭头线表示复材纤维与木纹方向)

Fig.13 Compression-moulded HFT thin-walled members (arrow heads indicate the FRP fibre and the timber grain directions)



(a) 纯木墙板的破坏模式 (b) HFT 墙板的破坏模式



(c) 荷载-轴向位移曲线

图 14 主要试验结果

Fig.14 Experimental behaviour of wall panels

在传统海洋工程钢筋混凝土结构中, 由于钢材的存在, 所使用的混凝土不能含有海水和未经处理的海砂。然而, 由于多年来无节制的开采, 目前天然河砂开采难度大、采购成本高、资源持续减少, 且河砂的过度开采严重损害了河流生态, 导致了严重的水环境问题。鉴于此, 我国水利部从 2002 年起对长江中下游地区的河砂开采进行了严格的控制^[77]。

复材由于其优异的耐腐蚀性能, 可代替钢材作为增强材料直接应用于海水、海砂混凝土 (seawater sea-sand concrete, 简称 SSC) 中而不会出现腐蚀问题。基于此思想, 作者于 2011 年提出了复材增强海水海砂混凝土 (FRP-SSC) 新型海洋工程结构的构想^[78]。通过复材产品 (包括复材筋、复材管、复材型材等) 与混凝土的优化组合, 可以形成多种具有优越性能的 FRP-SSC 新型组合构件和节点形式 (如图 15 所示)。

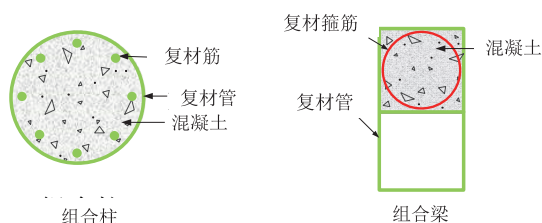


图 15 FRP-SSC 组合构件

Fig.15 FRP-SSC hybrid members

在 FRP-SSC 组合构件中, 复材筋不可避免地要承受压力。复材筋受压时, 内部的纤维会发生微屈曲, 使复材的抗压强度远低于抗拉强度; 此外, 复材筋受压时的脆性破坏, 会给结构带来不利影响^[79]。为此, 作者提出了一种延性组合筋 (见图 16)^[80]。该延性组合筋由内部的复材筋、外部复材管 (或复材螺旋箍筋) 及两者之间填充的超高性能混凝土 (UHPC) 组成 (图 16)。试验结果表明, 该延性组合筋中复材筋的抗压强度和其抗拉强度类似; 组合筋的受压应力应变曲线具有明显的二次刚度段, 且可通过设计改变其二次刚度 (见图 17)。组合筋的抗拉能力主要由中心的复材筋提供。

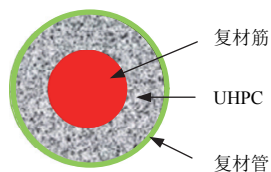
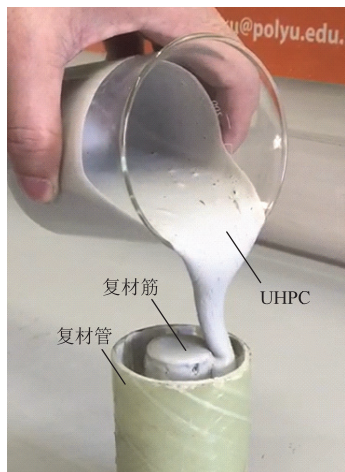
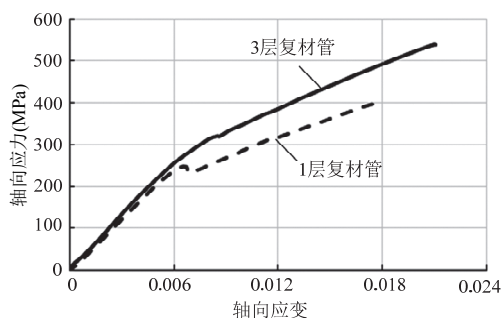


图 16 延性组合筋截面形式

Fig.16 Cross-section of ductile hybrid rebar



(a) 制作过程



(b) 受压应力-应变曲线

图 17 延性组合筋

Fig.17 Ductile hybrid rebar

6 结论

本文指出了新材料组合结构的重要性和优势，并通过介绍作者课题组提出的几种组合构件形式，说明了通过两种或多种材料的组合，能够使各材料的优势得到发挥、缺点得到补偿，是优化构件性能的有效途径。为了使新材料组合结构能够尽快、更好地为我国的社会经济发展服务，需要在以下方面进行系统的科学研究和技术研发：

(1) 新型材料的基本力学性能及其面向土木工程应用的性能提升技术。

(2) 基于新材料组合应用的新型构件和结构的形式优化、力学性能、设计理论。

(3) 新材料组合结构的长期性能、全寿命设计、经济性及可持续性的评估。

(4) 材料、测试、设计、施工标准的建立及其应用示范。

(5) 新材料和前沿技术的结合：如 3D 打印、智能传感、大数据、人工智能、机器人等。

新材料组合结构不仅是一片科研沃土，也是一块技术高地，更是我国从土木工程大国走向土木工程强国的必经之路。

致谢：在本文的准备过程中，得到了作者课题组多位成员及合作者（林观、张冰、侯炜、王吉吉、汪子豪、余涛、Dilum Fernando、向宇、蒋程、郑博通、张译文）的帮助，在此对他们表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 中国科学报, 邢桂芳, 沈春雷. 侯保荣: 对海洋腐蚀说不[EB/OL]. 北京: 中国科学报, 2014. http://www.cas.cn/xw/zjsd/201410/t20141013_4222476.shtml
- [2] Bjorhovde R. Performance and design issues for high strength steel in structures [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2010, 13(3): 403-411
- [3] Ma J L, Chan T M, Young B. Experimental investigation of cold-formed high strength steel tubular beams [J]. *Engineering Structures*, 2016, 126: 200-209
- [4] Yardimci M Y, Aydın S, Karabulut A Ş. Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(3): 1223-1231
- [5] Wille K, Naaman A E, El-Tawil S, et al. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing [J]. *Materials and Structures*, 2012, 45(3): 309-324
- [6] Hahn H T, Tsai S W. *Introduction to composite materials* [M]. USA: CRC Press, 1980
- [7] Mallick P K. *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design* [M]. USA: CRC Press, 2007
- [8] Li V C, Leung C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 1992, 118(11): 2246-2264
- [9] Li V C, Tetsushi K. Engineered cementitious composites for structural applications [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 1998, 10(2): 66-69
- [10] 徐世烺, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(6): 13-13 (Xu, Shilang, Li Hedong. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(6): 13-13 (in Chinese))
- [11] Brameshuber W. Textile reinforced concrete [R]. *State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC*, 2006
- [12] Brückner A, Ortlepp R, Curbach M. Textile reinforced

- concrete for strengthening in bending and shear [J]. *Materials and Structures*, 2006, 39(8): 741-748
- [13] Hegger J, Voss S. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete [J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(7): 2050-2056
- [14] Janke L, Czaderski C, Motavalli M, et al. Applications of shape memory alloys in civil engineering structures—overview, limits and new ideas [J]. *Materials and Structures*, 2005, 38(5): 578-592
- [15] Cladera A, Weber B, Leinenbach C, et al. Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: an overview [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 63: 281-293
- [16] Teng J G, Chen J F, Smith S T, et al. FRP strengthened RC structures [M]. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2002
- [17] Hollaway L C, Teng J G. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites [M]. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2008
- [18] Bank L C. Composites for construction: structural design with FRP materials [M]. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2006
- [19] Teng J G, Yu T, Wong Y L, et al. Hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: concept and behavior [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(4): 846-854
- [20] Nanni A, de Luca A, Zadeh H J. Reinforced concrete with FRP bars: mechanics and design [M]. USA: CRC Press, 2014
- [21] Mirmiran A, Shahawy M. A new concrete-filled hollow FRP composite column [J]. *Composites Part B: Engineering*, 1996, 27(3/4): 263-268
- [22] Fam A Z, Rizkalla S H. Confinement model for axially loaded concrete confined by circular fiber-reinforced polymer tubes [J]. *ACI Structural Journal*, 2001, 98(4): 451-461
- [23] Yu T, Teng J G. Design of concrete-filled FRP tubular columns: provisions in the Chinese technical code for infrastructure application of FRP composites [J]. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2011, 15(3): 451-461
- [24] Lam L, Teng J G. Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2003, 17(6/7): 471-489
- [25] Jiang T, Teng J G. Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(11): 2968-2986
- [26] Teng J G, Jiang T, Lam L, et al. Refinement of a design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2009, 13(4): 269-278
- [27] GB 50608—2010 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010 (GB 50608 — 2010 Technical code for infrastructure application of FRP composites [S]. Beijing: China Planning Press, 2010 (in Chinese))
- [28] ACI 440-08 Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures [S]. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute, 2017
- [29] Concrete Society. Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials [R]. 3rd edition. Crowthorne, Berkshire, UK, 2012
- [30] AS HB 305—2008 Design handbook for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs [S]. Standards Australia, 2008
- [31] AS 5100.8—2017 Bridge design, Part 8: rehabilitation and strengthening of existing bridges [S]. Standards Australia, 2017
- [32] El-Tawil S, Deierlein G G. Strength and ductility of concrete encased composite columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1999, 125(9): 1009-1019
- [33] Karimi K, Tait M J, El-Dakhakhni W W. Testing and modeling of a novel FRP-encased steel-concrete composite column [J]. *Composite Structures*, 2011, 93(5): 1463-1473
- [34] Yu T, Lin G, Zhang S S. Compressive behavior of FRP-confined concrete-encased steel columns [J]. *Composite Structures*, 2016, 154: 493-506
- [35] Teng J G, Wang Z H, Yu T, et al. Double-tube concrete columns with a high-strength internal steel tube: concept and behaviour under axial compression [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(10): 1369433217746838
- [36] 汪子豪. GFRP-混凝土-高强钢实心双管柱的试验研究与分析模型 [D]. 浙江: 浙江大学, 2017 (Wang Zihao. Experimental study and analytical modeling of double-tube concrete column with an FRP external tube and a high-strength steel internal tube (DTCC) [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2017 (in Chinese))
- [37] Teng J G, Yu T, Wong Y L. Behaviour of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns [C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. Adelaide, Australia, 2004: 811-818
- [38] Yu T, Wong Y L, Teng J G, et al. Flexural behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular members [J]. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2006, 10(5): 443-452
- [39] Yu T. Behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns [D]. Hong Kong, China: The Hong Kong Polytechnic University, 2007
- [40] 钱稼茹, 刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管短柱轴心抗压试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(2): 104-113 (Qian Jiaru, Liu Mingxue. Experimental investigation of FRP-concrete-steel double-skin tubular stubs under axial compressive loading [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(2): 104-113 (in Chinese))
- [41] Yu T, Teng J G, Wong Y L. Stress-strain behavior of concrete in hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2010, 136(4): 379-389
- [42] Ozbakkaloglu T, Fanggi B L. Axial compressive behavior of FRP-concrete-steel double-skin tubular columns made of normal-and high-strength concrete [J].

- Journal of Composites for Construction, ASCE, 2013, 18(1): 46-47
- [43] Zhang B. Hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns under static and cyclic loading [D]. Hong Kong, China: The Hong Kong Polytechnic University, 2014
- [44] Zhang B, Teng J G, Yu T. Compressive behavior of double-skin tubular columns with high-strength concrete and a filament-wound FRP tube [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2017, 21(5): 04017029
- [45] Yu T, Zhang B, Cao Y, et al. Behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns subjected to cyclic axial compression [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 61: 196-203
- [46] Ozbakkaloglu T, Fanggi B A L. FRP-HSC-steel composite columns: behavior under monotonic and cyclic axial compression [J]. Materials and Structures, 2015, 48(4): 1075-1093
- [47] Yu T, Wong Y, Teng J. Behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns subjected to eccentric compression [J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 13(5): 961-974
- [48] Xie P. Behavior of large-scale hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns subjected to concentric and eccentric compression [D]. Hong Kong, China: The Hong Kong Polytechnic University, 2018
- [49] 钱稼茹, 刘明学. FRP-混凝土-钢双壁空心管柱抗震性能试验[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 29-36 (Qian, Jiaru, Liu Mingxue. Tests of seismic behavior of FRP-concrete-steel double-skin tubular columns [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(3): 29-36 (in Chinese))
- [50] Han L H, Tao Z, Liao F Y, et al. Tests on cyclic performance of FRP-concrete-steel double-skin tubular columns [J]. Thin-Walled Structures, 2010, 48(6): 430-439
- [51] Zhang B, Teng J G, Yu T. Experimental behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular columns under combined axial compression and cyclic lateral loading [J]. Engineering Structures, 2015, 99: 214-231
- [52] Moustafa A, El-Gawady M A. Shaking table testing of segmental hollow-core FRP-concrete-steel bridge columns [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2018, 23(5): 04018020
- [53] Abdelkarim O I, El-Gawady M A, Ghenni A, et al. Seismic performance of innovative hollow-core FRP-concrete-steel bridge columns [J]. Journal of Bridge Engineering, ASCE, 2016, 22(2): 04016120
- [54] Zhao J L, Teng J G, Yu T, et al. Behavior of large-scale hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular beams with shear connectors [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2016, 20(5): 04016015
- [55] Zhao J L. Behavior and modelling of large-scale hybrid frp-concrete-steel double-skin tubular beams with shear connectors [D]. Hong Kong, China: The Hong Kong Polytechnic University, 2017
- [56] Idris Y, Ozbakkaloglu T. Flexural behavior of FRP-HSC-steel composite beams [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 80: 207-216
- [57] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007 (Chen Baochun. Concrete filled steel tubular arch bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2007 (in Chinese))
- [58] Jiang S, Fernando D, Teng J G, et al. Experimental behaviour of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular arches [C]//Proceedings of the 8th International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering. Hong Kong, China, 2016
- [59] de Waal L, Jiang S, Hislop-Lynch S R, et al. Novel bridge system for durable, low-cost and rapid construction [C]// Wibe Prize Paper, 2018
- [60] BERD. Wibe prize award decision [EB/OL]. BERD, 2018. https://paginas.fe.up.pt/~wibe/wp-content/uploads/WIBE-Prize-Award-Decision_final_May.pdf
- [61] Han L H, Li W, Bjorhovde R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures: members [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 100: 211-228
- [62] Thai H T, Uy B, Khan M, et al. Numerical modelling of concrete-filled steel box columns incorporating high strength materials [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 102: 256-265
- [63] Ding F X, Fang C, Bai Y, et al. Mechanical performance of stirrup-confined concrete-filled steel tubular stub columns under axial loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 98: 146-157
- [64] Huang C S, Yeh Y K, Liu G Y, et al. Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2002, 128(9): 1222-1230
- [65] Qian J R, Li N B, Ji X D, et al. Experimental study on the seismic behavior of high strength concrete filled double-tube columns [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 13(1): 47-57
- [66] Li G C, Zhang C Y, Yu H P. Advance in high-strength concrete filled square steel tubular structure with inner CFRP circular tube [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(S): 57-68 (in Chinese)
- [67] Feng P, Cheng S, Bai Y, et al. Mechanical behavior of concrete-filled square steel tube with FRP-confined concrete core subjected to axial compression [J]. Composite Structures, 2015, 123: 312-324
- [68] Teng J G, Zhang J, Wang J J, et al. Concrete-filled steel tubular columns with internal confinement by high strength steel spirals[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Steel and Aluminium Structures. Hong Kong, China: The University of Hong Kong, 2016
- [69] Gilbert B P, Hancock S B, Bailleres H, et al. Thin-walled timber structures: an investigation [J]. Construction and Building Materials, 2014, 73: 311-319
- [70] Fernando D, Gattas J, Teng J G, et al. Hybrid thin-walled members made of FRP and timber [C]//Proceedings of the 12th International Symposium on Fibre Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures & 5th Asia-Pacific Conference on Fibre

- Reinforced Polymers in Structures Joint Conference. Nanjing, China, 2015:157
- [71] Fernando D, Teng J G, Gattas J, et al. Hybrid fibre-reinforced polymer-timber thin-walled structural members [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(9): 1409-1417
- [72] Gattas J M, O'Dwyer M L, Heitzmann M T, et al. Folded hybrid FRP-timber sections: concept, geometric design and experimental behaviour [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 122: 182-192
- [73] Sedriks A J. *Corrosion of stainless steel* [M]. 2nd edition. New York: Wiley-Interscience, 1996
- [74] 吴剑. 不锈钢的腐蚀破坏与防蚀技术(四): 应力腐蚀破裂 [J]. *腐蚀与防护*, 1997, 18(4): 38-40
- [75] Benmokrane B, Ali A H, Mohamed H. Microstructural characterization and durability of GFRP reinforcing bars exposed to concrete environment and saline solution [C]//*Proceedings of the International Workshop on Seawater Sea-Sand Concrete (SSC) Structures Reinforced with FRP Composites*. Hong Kong, China: The Hong Kong Polytechnic University, 2016
- [76] Nishizaki I, Sasaki I, Sakuraba H. Long-term exposure performance of FRP composites in marine environments [C]//*Proceedings of the International Workshop on Seawater Sea-Sand Concrete (SSC) Structures Reinforced with FRP Composites*. Hong Kong, China: The Hong Kong Polytechnic University, 2016
- [77] 中华人民共和国水利部. 长江中下游干流河道采砂规划报告[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2002
- [78] 滕锦光, 余涛, 戴建国, 等. FRP 在新建结构中应用的现状及机遇[C]//第 7 届全国建设工程 FRP 应用学术交流会论文集. 杭州, 2011: 58
- [79] Deitz D H, Harik I E, Gesund H. Physical properties of glass fiber reinforced polymer rebars in compression [J]. *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 2003, 7(4): 363-366
- [80] Teng J G, Zhang B, Zhang S S, et al. Steel-free hybrid reinforcing bars for concrete structures [C]//*Proceedings of the 6th Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS 2017)*. Singapore, 2017

滕锦光 (1964—), 男, 博士, 讲席教授。主要从事新材料结构及新型结构、复合材料结构、薄壁结构、钢结构等方面的研究。