

FRP 复合材料及其在土木工程中的应用研究

王全凤 杨勇新 岳清瑞

(华侨大学土木工程学院, 福建 泉州 362021; 国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心, 北京 100088)

摘要 FRP 复合材料(Fiber Reinforced Plastic, FRP)及其在现代土木工程中应用,这是土木工程领域的前沿课题之一.对于这一领域的研究工作,目前国内刚刚起步.文中在综合有关资料的基础上,综述了国内外对 FRP 复合材料及其在现代土木工程中应用的研究.介绍 FRP 复合材料在现代土木工程中应用的关键技术,并展望 FRP 应用前景.

关键词 FRP 复合材料, 土木工程, 工程应用

中图分类号 TU 599

文献标识码 A

1 FRP 复合材料

1.1 FRP 复合材料特性

复合材料(Composite Material)是指两种以上的材料组合在一起形成的非均匀材料.事实上,自然界中绝大多数物体都可视为复合材料.在土木工程界,最典型的复合材料是混凝土.在现代工业界,复合材料是指人工制造合成的二相或多相材料,通常一相为加强材料(Reinforce),另一相为基质(Matrix).常用的加强材料有玻璃(Glass)、铜(Carbon)、石墨(Graphite)或碳化硅(Polymer).常用的基质材料有各类聚合物(Polymer),如高分子聚合物、低分子聚合物、热固性聚合物和金属、陶瓷等.加强材料通常采用纤维(Fiber)或颗粒(Particle)两种形式.在工业界最常采用的复合材料是加强纤维复合材料(Fiber Reinforced Plastic, FRP).复合材料的发展历史很短,最早的复合材料产生于 1939 年,是玻璃纤维复合材料(Glass/Epoxy Fiber Reinforced Plastic, GFRP).从 1959 年开始,工业界开始生产和应用复合材料.

1.2 FRP 复合材料在土木工程中应用的优势

复合材料产生和发展的基本思想是充分发挥加强材料和基质的不同材料特性,并将其有机组合,使复合材料具有传统材料所不具备的物理化学及力学特性.这种思想类似于钢筋混凝土的特性,利用钢筋承担大部分受拉应力,利用混凝土承担大部分受压应力.所不同的是,在复合材料中,绝大部分应力均由具有较高强度的纤维承担,而基质主要起传递剪力和包裹纤维的作用.正是复合材料可以有机组合不同性质的材料,因此复合材料具有传统材料(如钢材)无法比拟的优点.复合材料最重要的优点是具有非常高的强度对重量比(Strength to Weight Ratio)及刚度对重量比(Stiffness to Weight Ratio),因此复合材料广泛应用在航空、航天等要求轻质高强结构的领域.此外,复合材料还具有抗疲劳、抗腐蚀、电磁屏蔽及使用寿命长等优点.

2 FRP 复合材料在土木工程中应用的技术现状及趋势

FRP 在土木工程中的应用比其它产业滞后,主要有两个原因.第一个原因是建筑物造价不能过高;另一个原因是缺少工程经验.工程师面对的许多实践性问题就是关于这种 FRP 加强结构的预期或先见效果的设计.对混凝土结构和钢结构有一系列规程和标准及丰富的设计理论和工作经验,然而对于

收稿日期 2004-04-09

作者简介 王全凤(1945-),男,教授,博士,主要从事土木工程的研究. E-mail: qfwang@hqu.edu.cn

基金项目 国家“十五”863 计划基金资助项目(2001AA336010)

FRP 加强结构设计的标准和研究还相当匮乏.但从 90 年代早期,尤其从 1996 年开始,在土木工程中的一些特殊领域,FRP 的使用已经有了巨大发展.在最近 10 年中,有许多文献报道了 FRP 在土木工程中的应用.第二届复合材料在桥梁和结构进展的国际会议上,有来自 20 个国家的 247 位作者提交 119 篇文章涉及到 FRP 复合材料的应用,这表明了 FRP 复合材料的应用正在引起广泛注意.

2.1 国外技术发展现状

由于 FRP 复合材料特性奠定了 FRP 在土木工程领域应用的巨大技术优势.美国材料咨询委员会(NMAB)1987 年的年度报告中指出,有 253 000 座混凝土桥存在不同程度的损伤,且以每年 35 000 座的速度在增加.1991 年用于修复由于耐久性不足而损坏的桥梁,耗资 910 亿美元^[1].英国为解决海洋环境下钢筋混凝土构筑物的腐蚀与防护问题,每年就花费将近 20 万英镑.英国英格兰岛中部环形线的快车道有 11 座混凝土高架桥,建于 1972 年,建造费用为 2 800 万英镑.建成两年后就发现有因钢筋锈蚀使混凝土发生顺筋裂缝的现象,在 1974~1989 年的 15 年期间,修补费用已高达 4 500 万英镑,为造价的 1.6 倍,估计以后 15 年还要耗费 1.2 亿英镑,累计接近造价的 6 倍^[2].日本引以为豪的新干线使用不到 10 年,就出现大面积混凝土开裂、剥蚀现象.我国混凝土工程的耐久性问题也十分突出,据统计我国既有的公路桥梁中危桥约占 35.4%,北京市的多座高架桥都存在程度不同的耐久性损伤.从最早期的 FRP 材料应用开始,国外 FRP 材料在土木工程中的研究和应用的历史已有近 30 年.20 世纪 60 年代,美国即生产出早期的 GFRP 筋用于混凝土结构.80 年代,日本、美国和欧洲发达国家的有关高等学校、科研机构 and 材料生产厂家在 FRP 材料用于工程结构加固方面投入了许多研究力量,在土木工程领域进行大量的研究和广泛应用,取得了一批富有成效的成果.特别是 90 年代,由于在欧美一些国家,特别是美国,有大量的结构接近设计寿命或承载能力不足,如何有效快速进行结构补强或置换成为学术研究的热点.1995 年日本阪神地震,采用 GFRP 对混凝土结构进行抗震加固,由于 GFRP 现场加固技术具有高强高效、施工便捷、耐久性好等优点,为抗震救灾和震后恢复重建工作赢得了时间.

在 FRP 筋混凝土方面,FRP 筋最主要的优势是不锈蚀和高强度.FR 筋可以替代普通钢筋,解决普通钢筋容易锈蚀的问题.另外,它们很轻,没有磁性,而且拥有非常好的抗疲劳性.据美国西弗吉尼亚(West Virginia)大学研究 GFRP 筋的报告,高强度 FRP 筋混凝土梁比使用传统钢筋的梁显示出极大的抗弯强度.美国在 1986 年建成了第一座配置 FRP 筋的预应力混凝土桥梁.1983 年荷兰研制出芳纶纤维(AFRP)预应力筋,与普通钢筋混凝土构件相比,采用这种 AFRP 预应力筋不需要混凝土保护层,从而可以减小构件截面尺寸.1994 年加拿大建成了第一座采取 GFRP 预应力绞线的公路大桥.1996 年在美国西弗吉尼亚建造了第一座使用 FRP 筋的大桥.目前,采用 FRP 筋混凝土结构实例不多,技术也不完全成熟.其 FRP 筋材料均为单一品种的 AFRP、碳纤维(CFRP)或 GFRP,没有应用混凝土改性的 FRP 筋.其应用领域,也大多局部于桥梁或有较高防腐要求的结构.

在研究与应用的规范与标准化方面,各国也给予了相当的重视.1999 年日本土木学会成立 FRP 加固委员会,并完成了使用 FRP 片材的混凝土维修、加固技术草案.1991 年美国混凝土协会成立了 ACI440 委员会,负责开展 FRP 加固混凝土与砌体结构的研究;ACI423 委员会负责开展 FRP 的研究,目前已推出了有关设计指南(草案).1993 年 ACI 在加拿大主办了第一届国际 FRP 专题会议,此后每两年举办一次.欧洲《高性能 FRP 加固混凝土结构设计指南》项目于 1997 年 12 月开始启动,目前已完成.我国在 FRP 加固的规范制定方面还是比较落后,到目前为止我国仅仅制定了一本关于碳纤维加固混凝土结构的规程《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》^[3].近年来,国外某些发达国家不仅已将 CFRP 材料成功地应用于各种新建及已建的建筑与土木工程领域,而且其它 FRP 材料(GFRP 和 AFRP)也已得到成功地应用.许多发达国家都十分重视和积极推广 FRP 在土木工程中的研究和应用.据统计仅 CFRP 每年应用数量即达 600~700 t,在土木建筑方面的应用产品已达数十种,并已标准化、规范化.

2.2 国外技术发展趋势

国外在进行 FRP 在现代土木工程中应用技术的研究中,明显的有以下发展趋势.(1)在对单一品种高性能 FRP 复合材料研究与应用的基础上,更加重视与强调由不同种类高性能 FRP 复合材料混杂与复合后的改性问题.目的在于克服材料本身弱点,使之更适用于现代土木工程的特点,并满足实际需要.(2)为更好利用高性能 CFRP 与 AFRP 高强的特点,更强调采取预应力的方法给予充分利用.(3)为抢占

海洋工程的制高点,国外,特别是日本投入了大量资金进行该方面的应用材料与应用技术的研发,以期在今后的海洋工程建设中占据技术统治地位。(4) 土木工程中应用的高性能 FRP 复合材料的品种已越来越多元化。随着经济的发展、材料性能的提高,以及成本的下降,越来越多的 FRP 复合材料被应用于土木工程的各个方面。如从最初的 GFRP 发展到 CFRP 和 AFRP,再发展到 PBO 纤维、超高强聚乙烯纤维和玄武岩纤维等。

2.3 国内技术现状及特点

我国在土木工程中对 FRP 材料应用技术的研究与开发,基本是从 20 世纪 90 年代中期开始的。1997 年开始引进 CFRP 片材加固混凝土结构技术,并开始进行相关研究。由于其巨大的技术优势,在很短的时间内就形成研究及其工程应用的热点。目前已有冶金工业部建筑研究总院(国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心)、清华大学、东南大学、华侨大学等数家单位开展了 FRP 应用与材料技术的研究。迄今已完成几十项研究项目,发表研究论文 100 多篇。其在 FRP 加固技术和设计计算理论等方面,已取得一批创新性的研究成果^[4]。同时,已完成 FRP(主要是 CFRP 片材)加固工程数百项。中国土木工程学会于 2000 年 6 月成立了“纤维增强塑料(FRP)及工程应用专业委员会”,并同时在北京召开我国首届纤维增强塑料(FRP)混凝土结构学术交流会,使得该项研究更有组织性与系统性,提高了研究效率。随着 CFRP 片材加固混凝土结构技术在我国研究和应用的迅速开展,中国工程建设标准化协会标准《碳纤维布加固修复混凝土结构技术规程》已经发布实施。其它两个材料产品标准和国家级《高性能复合材料应用规范》,也在编制当中。高性能 FRP 复合材料加固修复技术的研究和应用已在我国逐渐展开,且正在以高速度发展。

我国土木工程应用高性能 FRP 复合材料的进展很快,但起步较晚。CFRP 片材的应用才刚刚进行,且仅用于结构加固修复技术方面。在高性能 FRP 复合材料材料方面,CFRP 片材基本还依赖进口。其它纤维的 FRP 研究和应用,也还落后于国外发达国家水平。GFRP 国内有较成熟的生产技术,但用于土木工程的研究和应用尚较少,未形成规模也不配套。这在某种程度上也制约其发展。而 AFRP 的材料生产、研究和应用均很少,没有自己的主导产品。FRP 筋/索和 FRP 预应力混凝土的研究工作刚刚起步,相关的技术(如锚具、张拉设备等)研究国内目前还很少。至于其它 FRP 应用领域的研究,如 FRP 组合结构、FRP 筋、索、型材的应用和研究方面基本是空白。这种情况严重制约了该领域材料及技术的发展,远远满足不了国民经济发展的需要。

3 FRP 在土木工程中应用的几个特殊领域^[5]

目前,FRP 在土木工程中应用有以下几个特殊领域。

3.1 FRP 在复杂环境下部结构(Infrastructure)中的应用

在最近几年,由于环境影响,水边码头地下基础显示出结构性能劣化与抗力衰减的缺陷得到了广泛的关注。由于这种情况的产生原因是复杂的、大量的,土木工程师们越来越意识到 FRP 复合材料作为一种解决复杂环境下部结构中存在问题可行材料的优势。例如,增加 FRP 材料的层数以加强一个现有结构,或者用 GFRP 加强筋替换一些钢筋,这些新材料的使用将会比原始结构的结构性能有极大地改进。

3.2 FRP 加强筋

FRP 加强筋可以替代普通钢筋,解决容易锈蚀的问题。另外,它们很轻,没有磁性,而且拥有非常好的抗疲劳性。

3.3 FRP-混凝土组合结构

受钢-混凝土组合结构应用成功的启发,当考虑经济因素时,一个混凝土和 FRP 组合的新概念变成了一个有潜力的可行解决方案。当前这个领域的研究聚焦在用 FRP 外包混凝土上,类似钢管混凝土。Seible 研究了这种结构体系^[6],使用 GFRP 的外壳填充混凝土替换桥的主梁,支撑由 FRP 制作的桥面板。这种 FRP-混凝土组合梁、组合柱,很好利用了 FRP 和混凝土的最好性能。FRP-混凝土组合结构强度高、重量轻和刚度高、价格低的特点将改变影响 FRP 在推广应用中建造成造的因素。

3.4 全 FRP 复合材料大型结构

FRP 复合材料的多功能性、可制造性,提供给工程师们很多机会在一些功能要求抗腐蚀或磁电屏蔽的特殊建筑结构中,去开发应用这种独特的 FRP 复合材料。比如用于电磁试验操作的建筑结构,或者是感光电路金属板房间。第一个全 GFRP 建筑是美国苹果计算机公司的电磁干涉实验室,另一个工程例子是 IBM 计算机公司电路板车间的 5 层上部结构。

3.5 FRP 桥面板的优势

桥梁结构性能劣化与抗力衰减的一个根源是侵蚀。在传统设计中,冬季使用防冻剂会恶化结构中钢筋。FRP 是解决这个问题的可行方法,因为 FRP 有非常好的抗腐蚀性性能。由于大多数结构性能劣化与抗力衰减的桥梁都处于重要的交通路线中,所以迅速地替换那些桥梁,避免交通的长期中断是极其重要的。使用 FRP 桥面板替代那些结构性能劣化与抗力衰减的桥面板是个很省时的办法,因为这些桥面板可以在工厂中生产,现场安装过程只需要很短的时间。在多地震地区,因为 FRP 复合材料重量轻,在地震过程中会减小惯性力的作用,使用 FRP 桥面板将会减少地震的损害。由于 FRP 桥面板与传统桥面板相比有太多的优势,在近几年里,人们致力于开发研究这种由 FRP 制成的高性能、轻质和造价经济的桥面板系统。

4 FRP 在土木工程中应用的关键技术

4.1 关键的材料技术

4.1.1 高性能 FRP 复合材料改性技术研究 FRP 复合材料与土木工程常用建筑钢材相比具有高强、轻质、耐久、耐疲劳、易施工与可设计等诸多优点,不同的 FRP 复合材料与传统建筑钢材相比有不同的特点,但也有一定的弱点,如与钢材相比,其韧性差,破断延伸率较低(钢材破断延伸率约为 15.0%~26.0%,而 CFRP 为 1.5%,AFRP 为 1.5%~2.0%,GFRP 为 2.5%~3.0%的破断延伸率),破坏时没有屈服台阶。土木结构对材料韧性的基本要求是 2.5%~3.0%。所以,CFRP 和 AFRP 的强度高,但韧性差。GFRP 可以满足韧性要求,但模量和强度低,这就使得其在土木工程中的应用效果大大降低。因此,如何通过对各有特点的不同纤维材料的复合改性,使其具有高性能(高强、高模、高耐久性及良好的韧性等)同时又具有低成本、良好的环境亲和性,是影响现有高性能 FRP 复合材料在现代土木工程中应用的关键材料技术问题。该问题一旦获得解决,将会给现代土木工程材料技术带来革命性的变革,也会为复合材料领域带来一个巨大的潜在市场与更大的发展机遇。

4.1.2 高性能 FRP 复合材料关键配套材料和设备研究开发 由于土木工程用 FRP 复合材料形式是多种多样的,其应用环境、应用方法也多种多样。因此,仅仅解决 FRP 复合材料改性技术,并生产出适合于土木工程应用特点的材料还不够,还必须解决其配套的关键材料与设备技术问题。主要包括以下两方面内容:(a)特种粘贴树脂基体结构设计及材料合成技术;(b)高性能 FRP 复合材料筋/索锚具及预应力张拉设备研制。

4.2 关键的设计技术^[5]

4.2.1 新的工程力学分支——复合材料力学 由于材料的非匀质性(Anisotropic),由复合材料制成的板、壳及薄壁杆件的力学性能不同于传统材料制成的结构构件。因此基于匀质材料(Isotropic)的经典弹塑性力学及板壳理论,不适用于分析复合材料结构构件。最典型的例子是复合材料可能出现弯拉耦合(Bending-Stretching Coupling)、弯翘耦合(Bending-Twisting Coupling)及拉剪耦合(Stretching-Shear Coupling)。例如,板在平面应力作用下会产生平面外弯曲及翘曲。正是这些不同的力学性能给学术界提出挑战,并产生新的工程力学分支——复合材料力学。从 70 年代开始,在美国国家宇航局(NASA)的资助下,越来越多的工程力学界学者转向复合材料力学研究,至今已经出现许多激动人心的学术成果。

4.2.2 设计参数的选择 尽管复合材料具有如此多的优点,但在工业界中的应用还仅限于航天、航空、汽车及造船领域,在土木工程中还鲜有应用。限制复合材料广泛应用的原因除了采用复合材料的结构造价昂贵外,另一个原因是设计的复杂性,和传统材料结构相比,复合材料结构设计参数非常多。例如,设计一块承重板,采用传统的匀质材料,设计参数主要有拟选用材料的类型及板的厚度;而采用复合材料叠合板结构(Laminated Plate),需要确定的设计参数有加强筋的材料类型、基质的材料类型、板的厚度、薄层板的数量,各薄层板中纤维方向等。这些设计参数必须仔细选择,不同的设计参数组合可以导致结

构力学性能的极大差别。

4.2.3 快速有效的优化设计 由于复合材料结构造价昂贵,在设计过程中必须考虑优化,以降低结构自重,减少材料用量。而如前所述,复合材料结构设计变量多,优化搜寻次数多,特别是当几何尺寸变量变化时,有限元模型(几何形状,网格划分)必须重新建立,使优化设计成为非常冗长复杂的过程。因此如何快速有效地进行优化设计成为学术研究的重要课题,华侨大学在这方面作了一些有益的前期工作^[7~10]。一个直接可行的方法就是在详细设计前,进行初步设计,并且采用简化方法进行分析,以避免复杂的有限元计算。从而,得到较接近优化设计的初步设计方案,减少详细设计中的优化搜寻次数,因而大大减轻详细设计的工作量和难度。

4.2.4 FRP 复合材料加固补强设计方法 采用 FRP 复合材料对已有结构进行加固补强,应充分考虑其材料的差异、工艺的差异,以及环境的影响。

4.3 关键的应用技术

4.3.1 结构加固补强的关键技术 与传统加固形式形成鲜明对比的是近年来在国际兴起的 FRP 加固现有结构技术,其简便的施工工艺及优良的加固效果得到土木工程界的普遍赞同^[11, 12]。FRP 复合材料,尤其是高性能 CFRP 与 AFRP 复合材料目前在现代土木工程中应用最广泛的是在基础设施的结构加固补强方面。尽管该项工作已取得很多成果,并得到广泛应用,但仍有很多课题尚待解决,制约着其发展与更广泛应用。主要包括两个方面,一是界面受力性能研究;二是预应力加固补强技术研究。

4.3.2 在新结构中应用的关键技术 高性能 FRP 复合材料在现代土木工程中应用的一个最广阔领域,即是应用于新建结构中的应用技术。由于其材料特点,可以为现代土木工程建设带来革命性的变化。采用 FRP 材料代替原有混凝土结构的钢材,会使原有的设计理论与设计方法发生较大改变。而针对 FRP 混凝土及 FRP-混凝土组合结构的新设计理论与设计方法的建立,即成为 FRP 应用的技术关键。FRP 材料在土木工程中应用,其连接锚固性能与构造要求一直是其应用的关键。

4.3.3 特殊条件下应用的技术 (1) 海洋环境下 FRP 材料应用技术研究。任何海洋资源的开发都离不开对海洋基础设施的建设,而在所有海洋基础设施的建设中,结构防腐问题一直是一个最突出的问题。目前在建的海洋钢筋混凝土结构,采用最厚的混凝土保护层(一般为 150 mm 左右,相当于陆地混凝土结构保护层的 5 倍以上)及防腐措施,其对内部钢筋防氯盐腐蚀也仅有 15 年左右,这与永久或半永久性的海洋结构耐久要求相距甚远。采用 FRP 混凝土或 FRP-混凝土组合结构就可以从根本上解决海洋工程中的钢筋(钢材)腐蚀问题,其重大意义不言而喻。(2) 高寒环境下免维护应用技术研究。高寒环境下,基础设施建设与维护费用昂贵,建设周期过长。因此,对于再建或拟建的各种基础设施项目(主要是公路与铁路等交通项目),提高其建设质量,减少维护费用是一个重大的技术问题。用 FRP 筋代替钢筋,做成免维护复合材料混凝土结构,从而达到提高基础设施耐久性与延长寿命的目的。(3) 地质灾害防治中永久锚固支护技术研究。对山体与边坡滑移治理最有效的办法就是采用预应力锚固支护技术。到目前为止,预应力锚固支护均采用预应力钢绞线锚杆。这对于临时支护或半永久支护尚可以应用,但对于永久支护项目因钢筋锈蚀等问题对长期使用带来相当大的隐患。如现在的长江三峡库区 2003 年开始蓄水后,一部分山体与边坡将埋于水底,不可能再对其使用状况进行检测与再加固。几十年或百年以后,一旦由于预应力钢绞线锈蚀而使山体或边坡锚固支护失效发生滑移,结果将是灾难性的。

4.3.4 高性能 FRP 复合材料检测评价的技术 材料的试验检测、评价技术是一切材料工程应用的基础。目前,世界范围内还没有建立一套大家公认的土木工程用高性能 FRP 复合材料试验检测与评价技术体系,而我国在该方面的成果则更少。

5 FRP 应用展望

随着经济高速发展和技术飞速进步,世界各国对土木工程的要求越来越高。在有些条件下,传统建筑材料很难满足这种发展要求。FRP 复合材料,具有轻质、高强、耐腐蚀、抗疲劳、耐久性好、多功能、适用面广、可设计和易加工等多种优点。在重要的土木工程中,如超大跨、超高层、地下结构、海洋工程、高耐久性的应用,以及特殊环境工程、永久性工程、结构加固修复、大型工程结构的在役监测等的应用,都具备着巨大的优越性。它可以满足现代土木工程,对新型建筑材料提出更新、更高的要求。FRP 复合材料作为

一种新型的有发展潜力的建筑材料与技术,并不是要取代传统的建筑材料-钢材与混凝土,而是做为传统建材的一个重要补充. FRP 复合材料在土木工程中的应用技术与材料研究开发,在当今世界上已成为复合材料界与土木工程界共同研究开发的一个热点. 该技术研究开发成功后,将会极大地推动现代土木工程的技术进步. 它还将为现代复合材料产业开辟出巨大的应用市场,因而具有非常广阔的发展应用前景.

参 考 文 献

- 1 Dunker K F, Rabbat B G. Why American bridges are crumbling[J]. Scientific American, 1993, (3): 31 ~ 37
- 2 罗福午. 建筑结构缺陷事故的分析及防止[M]. 北京:清华大学出版社, 1996. 4 ~ 12
- 3 中国工程建设标准化协会编. CECS 146 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工程出版社, 2003. 1 ~ 33
- 4 岳清瑞. 我国碳纤维增强塑料(CFRP)加固修复技术研究应用现状与展望[J]. 工业建筑, 2000, 30(10): 23 ~ 26
- 5 何毅鸿. 纤维加强的井字肋核芯复合材料夹层板受弯简化分析方法[D]:[学位论文]. 泉州:华侨大学土木工程系, 2000. 6 ~ 8
- 6 Seible F. Advanced composites materials for bridges in the 21st century [A]. In: Elbadry M M, eds. Advanced Composite Materials Bridges and Structures [C]. New York: Elsevier, 1996. 17 ~ 40
- 7 Wang Quanfeng. Lateral buckling of thin-walled open members with shear lag using optimization techniques[J]. Int. J. of Solid and Structures, 1997, 34(11): 1 343 ~ 1 352
- 8 李育凯, 王全凤. 不需要计算机的建筑结构优化概念设计[J]. 工业建筑, 2001, 31(10): 21 ~ 23
- 9 郑 浩, 王全凤. 基于 Hopfield 神经网络的结构优化分析[J]. 四川建筑科学研究, 2002, 28(2): 52 ~ 55
- 10 徐玉野, 王全凤. 遗传算法在工程结构优化中的应用研究[J]. 基建优化, 2002, 23(6): 50 ~ 52
- 11 岳清瑞. 纤维增强塑料(FRP)在土木工程结构中的应用技术的进展[A]. 见:岳清瑞主编. 第二届全国土木工程用纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流会议论文集[C]. 北京:清华大学出版社, 2002. 18 ~ 22
- 12 冯 鹏, 叶列平. FRP 结构和 FRP 组合结构在结构工程中的应用与发展[A]. 见:岳清瑞主编. 第二届全国土木工程用纤维增强复合材料(FRP)应用技术学术交流会议论文集[C]. 北京:清华大学出版社, 2002. 51 ~ 63

FRP Composite Material and Its Application to Civil Engineering

Wang Quanfeng Yang Yongxin Yue Qingrui

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China;

National Diagnosis and Rehabilitation of Industrial Engineering Research Center, 100088, Beijing, China)

Abstract FRP (fiber reinforced plastic) composite material and its application to civil engineering is one of topics in forward position. The study of this topic starts just now in our country. Based on the summary of releveant studies at home and abroad, the authors present key technology concerning FRP composite material and its application to modern civil engineering; and look forward to the prospect of FRP application.

Keywords FRP composite materials, civil engineering, application