

HPFL 加固 RC 结构研究综述

汤繁华, 蒋隆敏, 曹 晖, 欧蔓丽

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 分析、整理了相关学者对 HPFL 加固 RC 结构性能试验研究成果, 综合论述了 HPFL 这种薄层加固材料中高性能复合砂浆材料性能, 被加固构件抗弯性能、抗剪性能、抗压性能、抗震性能、抗疲劳性能及抗高温性能等, 并提出了今后应重点研究的问题。

关键词: 高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层; 加固 RC 构件; 综述

中图分类号: TU746.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)01-0020-06

Summary on Research of HPFL Strengthening RC Structure

Tang Fanhua, Jiang Longmin, Cao Hui, Ou Manli

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Analyzes and summarizes the research of some scholars on the issues of the strengthening effect of HPFL to RC structure. Reviews the behaviors of high-performance composite mortar in lamina reinforced materials of HPFL, including the behaviors of the reinforced constructional element in anti-bending, anti-shearing, compression resistance, seismic behavior, fatigue resistance and high temperature resistance. And proposes important issues needed to be researched in future.

Keywords: high performance ferrocement laminate (HPFL); strengthening RC structure; review

0 引言

结构加固是通过有效措施, 使受损结构或老化结构恢复原有功能, 或者提高已有结构的承载力、延性、刚度等。随着混凝土结构加固技术的快速兴起和发展, 采用新型无机材料加固混凝土结构已成为可能。高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层 (high performance ferrocement laminate, 简称 HPFL) 加固材料正是为了顺应这种发展趋势而产生的, 它是对传统普通钢丝网水泥 (ferrocement) 进行改良所获得的研究成果, 它是以前高性能水泥复合砂浆为基相, 以钢筋网为增强相, 再辅

以黏结性能优良的界面黏结剂 (必要时辅以剪切销

钉) 的一种加固方法^[1-3]。在过去的十多年里, 用于钢筋混凝土 (reinforce concrete, 简称 RC) 结构加固的方法主要包括加大截面法、外包钢加固法、预应力加固法、粘钢加固法、外粘纤维增强塑料加固法等。以上加固方法大多有各自的适用范围, HPFL 加固 RC 结构的方法以其加固效果显著、施工质量容易保证、造价低廉、防火和耐高温、耐久和抗老化、与原构件混凝土相容性和协调性好、不明显增大构件截面、环保性能好等优良特征而得到了广泛推广和运用, 并已创造了可观的经济效益和社会效益。

收稿日期: 2010-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51058001), 湖南省自然科学基金资助项目 (10JJ3080), 湖南省教育厅科研基金资助重点项目 (10A024), 湖南省科技厅基金资助项目 (2009GK3007)

作者简介: 汤繁华 (1973-), 女, 湖北武汉人, 湖南工业大学讲师, 湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为新型材料及其在结构加固中的应用, E-mail: tangfh@163.com

关于 HPFL 加固 RC 结构在常温下的性能已取得了较系统的研究成果, 包括高性能复合砂浆材料性能、被加固构件抗弯性能、抗剪性能、抗压性能、抗震性能、抗疲劳性能及抗高温性能等。

1 高性能复合砂浆材料性能研究

蒋隆敏、尚守平等人首先对一种用聚合物纤维增强的复合砂浆进行了抗压性能、抗拉性能试验研究, 同时对一种连接试件(在黏结面上涂刷一种由水泥基复合的双组份无机界面剂。试验所用界面剂由 A、B 两组分构成, 简称 AB 组分界面剂, A 组分为树脂系列减水剂为水剂, B 组分为水泥基复合的含 18% 的硅灰、粉煤灰等超细掺合料组成的无机界面剂)进行了弯曲抗拉试验及剪切试验研究, 试验结果表明: 这种经过聚丙烯纤维增强的复合砂浆的抗压强度和抗拉强度比同等条件的普通水泥砂浆的抗压强度和抗拉强度有明显提高; 其良好的变形性能和韧性满足加固层随构件适时变形和防止构件脆性破坏的需要, 也能满足吸能性的要求; 良好的阻裂性和密实性改善了加固层的耐久性^[4]。

曾令宏、尚守平、蒋隆敏等人的进一步研究表明: 高性能复合砂浆的抗压和抗拉强度分别为同条件普通水泥砂浆的 2.59 倍和 1.35 倍, 而涂有界面剂的试件界面黏结强度要高; 高性能复合砂浆开裂应变比普通砂浆的要大, 其主要原因是砂浆中的聚丙烯纤维不仅能抑制砂浆因失水、温差、自干燥等作用引起的原生裂缝的引发, 还能在受力过程中抑制裂缝的发生与扩展; 高性能复合砂浆由于其弹性模量较低, 其断裂伸长率大于砂浆的断裂伸长率, 有利于提高砂浆的延性, 改善砂浆的变形性能^[5]。

颜军、尚守平、聂旭对高温后的高性能复合砂浆抗压强度及耐火性能进行了试验研究, 结果表明: 高性能复合砂浆与同条件的普通水泥砂浆高温后抗压强度变化规律相似, 都随着温度的升高显著下降, 但是高性能复合砂浆的残余强度较高; 高性能复合砂浆中参入的聚丙烯纤维能对减小抗压强度损失有利, 能缓解爆裂现象, 与普通水泥砂浆相比, 加固层厚度可以提高被加固构件的耐火极限^[6]。

2 HPFL 加固 RC 受弯构件的性能研究

2.1 抗弯承载力

提高结构构件的承载能力是加固的主要目的之一, HPFL 加固 RC 结构构件相当于对其进行体外配筋, 构件的承载能力能受到积极的影响。

卜良桃、叶秦等人通过对 14 根采用 HPFL 加固的足尺钢筋混凝土梁和 6 根对比梁进行的受弯性能试验研究发现: 被加固梁正截面的承载力能得到较大幅度提高, 提高幅度最大为 77.4%, 最小也有 31.2%; 一次受力水平对加固梁的极限承载力影响不大; 相同的加固方法对原配筋率不同的试件的极限承载力的提高幅度近似, 在使用上限范围内, 承载力随加固层纵向钢筋的配筋率增大而增大^[7]。

卜良桃、胡尚瑜等人设计了 7 根 HPFL 加固足尺梁受弯试验, 结果发现: HPFL 加固能有效地提高少筋梁和适筋梁受弯承载力和截面刚度, 但对少筋梁的加固效果更为显著; 不同混凝土强度等级的加固梁的屈服荷载提高幅度基本相同, 极限荷载提高幅度随混凝土强度等级的提高而提高^[8]。

曾令宏、尚守平等人通过 10 根采用 HPFL 做 3 面 U 形(在梁的受拉面和侧面进行加固)加固的混凝土梁和 2 根没有加固的对比梁的试验研究发现: 一次受力加固试件屈服荷载提高程度为 67%~110%, 极限荷载提高程度为 26%~102%; 二次受力加固试件屈服荷载提高程度为 51%~78%, 极限荷载提高程度为 48%~77%; 在平截面假定的基础上推导的极限承载力公式的计算值与试验值吻合较好^[9]。

卜良桃、王月红等人以 8 根 HPFL 加固 RC 梁的试验研究结果为参考, 通过非线性有限元分析及其与试验梁的比较, 得出加固梁的极限承载能力提高幅度随加固梁沿纵向配筋率的增大而减小; 随配筋特征值的增大而减小, 但变化不显著; 随加固梁高宽比的增大而减小^[10]。

2.2 抗剪承载力

刘洸、尚守平等人通过提取试验数据对比分析得出: 1) 对于约束梁的抗剪加固, 一次受力时加固试件的极限承载能力提高幅度分别为 48.4%、24.0% 和 71.0%, 二次受力时加固试件的极限承载能力提高幅度分别为 42.0%、20.9% 和 63.6%, 相同条件下, 一次受力比二次受力极限承载能力提高幅度要大, 极限承载能力随着剪跨比的提高而提高; 2) 对于 1 点集中加载简支梁抗剪加固, 一次受力加固试件的极限承载能力提高幅度分别为 110.8%、108.5% 和 116.6%, 二次受力加固试件的极限承载能力提高幅度分别为 94.9%、95.6% 和 106.6%, 相同条件下一次受力比二次受力极限承载能力提高幅度要大; 3) 对于 2 点集中加载简支梁抗剪加固, 加固后试件的承载能力比未加固时有较明显的提高, 但是承载力提高的幅度不如前 2 种情况的大, 分析其原因, 认为是试件在剪切破坏以前产生了端部锚固破坏或弯曲破坏, 以至于试件没有达到抗剪承载力^[11]。

2.3 裂缝、刚度、延性

由图1可知:各加固梁破坏前的最大挠度均大于对比梁,即构件的延性较对比梁有一定提高。当原钢筋屈服后,对比梁A1的荷载-挠度曲线的斜率急剧减小至0,而各加固梁曲线的斜率均慢慢趋于0。B1、B3加固梁的二次受力阶段及B2加固梁的荷载-挠度曲线的斜率均大于对比梁,且加固梁二次受力阶段的曲线斜率随一次受力水平的增大而减小,说明加固后构件的刚度有一定提高,而且提高幅度随一次加载水平的增大而降低^[7]。

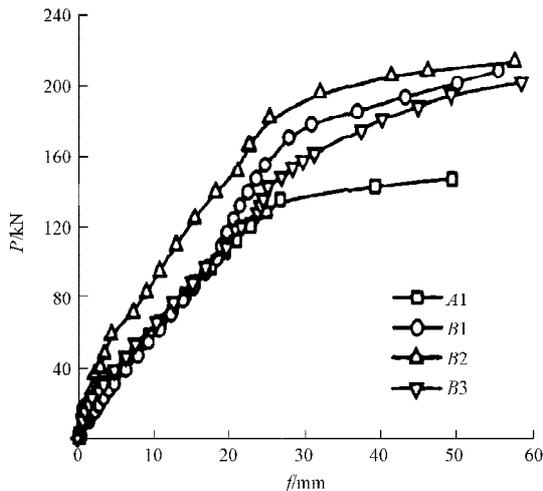


图1 一次受力水平不同加固梁的荷载-挠度曲线

Fig. 1 The load-deflection curves of strengthened beam at once different loading level

刘浏、尚守平等通过提取试验数据对比分析得出:1)对于约束梁抗剪加固,各试件破坏时斜裂缝条数明显增多,宽度、裂缝间距明显变小,说明抗剪加固对斜裂缝的发展起到了很好的抑制作用;2)对于1点集中加载抗剪加固简支梁,同一挠度水平下,加固梁的剪力值相对于对比梁都有一定程度的提高,加固措施提高了加固梁截面的剪切刚度,从试件裂缝发展看,进行抗剪加固后,各试件破坏时斜裂缝条数明显增多,宽度、裂缝间距明显减小,在相同斜裂缝宽度条件下,加固梁对应的剪力值大于未加固梁对应的剪力值,说明加固层限制了斜裂缝的发展;3)2点集中加载简支梁抗剪加固,一次受力试件的刚度从一开始加载就大于对比试件,而二次受力试件第一次加载过程中刚度与对比试件的刚度相当,加固后再加载,则刚度增大^[11]。

2.4 界面粘结与锚固

原混凝土与加固层之间的黏结性能直接关系到加固层与原构件能否共同受力和协同变形。结合AB组份界面剂的使用及原构件表面处理,高性能复合砂浆与原混凝土的粘结由3部分组成:化学黏结力、摩擦

力、机械咬合力。化学黏结力主要存在于加固层与混凝土表面发生相对滑移前,当黏结面发生相对粘结滑移后,化学黏结力大大降低,黏结力主要依靠摩擦阻力和机械咬合力来维持,摩擦阻力主要取决于加固层与混凝土连接面上的正应力和摩擦系数,机械咬合力主要取决于原混凝土表面的粗糙程度和表面状况。1)曾令宏、尚守平等人的研究表明:HPFL加固层与原混凝土层界面的黏结剪应力以及黏结法向应力,随黏结层的弹性模量和剪切模量的降低而减少,随黏结层厚度的增加而减少,随钢筋混凝土梁抗弯刚度的增加而减小,随加固层钢筋面积的减少而减小^[12];2)尚守平、高法启的研究表明:在加固梁端部植入一定数量的剪切销钉,能有效改善加固梁的破坏形态,避免发生端部“U”形加固层与梁整体剥离^[13];3)尚守平、龙凌霄、曾令宏的研究表明:销钉的使用能大幅提高界面黏结的抗剪能力及延性^[14]。建议销钉间的间距不小于销钉埋入深度的2倍,销钉在界面上分布越均匀越有利。使用销钉可使界面摩擦阻力和机械咬合力得到充分发挥,也利于延性的提高。

2.5 加固层配筋率的影响

文献[7-8, 10, 15]的实验研究得出:承载力随加固层中纵向钢筋的配筋率增大而增大;在二次受力阶段,加固梁的开裂荷载随配筋率的提高而提高;加固梁的极限承载能力提高幅度随配筋特征值的增大而减小,但变化不显著;随着钢筋网层数的增加,开裂荷载有相应提高的趋势。

2.6 二次受力加固特征

文献[8-9, 11, 15]对二次受力加固特征进行了试验研究:二次受力阶段各加固梁的屈服荷载和极限荷载的提高幅度有所不同,随着加固梁纵向配筋率的增大,屈服荷载提高幅度相对显著,而极限荷载提高幅度反而减少;不同混凝土强度等级的加固梁在二次受力时,梁的抗裂性能差别较大,强度低的加固梁抗裂性能改善效果比强度高的加固梁显著;相同条件下的二次受力试件极限承载力的提高幅度比一次受力小。

2.7 抗疲劳性能

尚守平、曾令宏等人对加固梁进行了疲劳性能试验。结果显示,与未加固梁相比,加固梁的疲劳性能有明显改善,疲劳寿命提高16%~104%,疲劳变形减小30%~60%;在疲劳荷载水平和幅度较高时,梁的疲劳破坏模式为钢筋疲劳断裂,混凝土压碎,而较低疲劳荷载作用下加固梁疲劳寿命大于200万次;在疲劳荷载作用下,加固梁的混凝土压应变和纵筋拉应变都有所降低,裂缝间距和宽度都比较小,裂缝开展情况与未加固梁的相比明显减小;试验也证实,加固施工只

要满足简单的操作规程就不会发生剥离破坏^[13,16]。

3 HPFL 加固 RC 压弯构件的性能研究

3.1 轴压性能研究

蒋隆敏、尚守平等人先后对9根直径为150 mm、高为450 mm小圆柱进行了单调加载的试验研究发现,加固柱的抗压承载力、峰值应变、延性、刚度都得到了明显改善,这些性能指标随横向网筋体积配筋率的增大而增大;被加固柱的裂缝分布形态由原柱的疏而宽变得密而细,极限破坏形态由原柱的脆性转为延性;横向网筋可对核心柱提供有效的约束作用;将原柱表面凿毛,涂刷高效界面剂,上下端部横向网筋加密,均为防止发生界面粘结破坏的有力措施^[17]。

3.2 一次和二次受力加固偏压柱性能研究

尚守平、蒋隆敏等人对9根近似足尺偏心受压柱的试验研究发现,被加固的偏压柱其承载力有了较大幅度的提高。在相同的加固条件下,小偏心受压柱加固后承载力提高幅度比大偏心柱的大;较低强度等级混凝土偏压柱的加固效果好于较高强度等级混凝土的偏压柱,尤其对于小偏压柱,这一现象似乎更加明显。加固层显著地改善了混凝土偏压柱的裂缝形态,对裂缝的发展有明显的抑制作用。被加固柱的延性也得到了明显改善,加固柱的变形能力和耗能能力有显著地增强。HPFL对偏压柱的加固作用机理表现为:受拉侧纵向网筋参与受拉,受压侧纵向网筋和砂浆参与受压,受压侧的横向网筋能有效的约束混凝土的横向膨胀变形,横向网筋特别是端部加密了的横向网筋还起到了锚固纵向网筋的作用。纤维增强复合砂浆的良好的黏结作用,高强特性、延展性和保护层作用成就了这种薄层加固材料的整体工作性能^[18]。

蒋隆敏、尚守平等人对4根近似足尺偏压柱进行了用HPFL作二次受力加固的试验研究,发现一次受力应力水平指标 β 越小,其承载力提高幅度越大。在 β 不太大(约小于0.7)的前提下,二次受力加固柱比一次受力加固柱的延性改善情况更明显。二次受力加固柱在原柱纵筋屈服后刚度也有一定程度的提高。二次受力加固柱比一次受力加固柱的开裂时间要晚。这种加固方法可使原柱已出现的裂缝被加固层砂浆中的活性成分所修补^[19]。

4 HPFL 加固 RC 构件的抗震性能研究

尚守平、蒋隆敏等人对HPFL加固4根RC足尺方柱在不变轴力和周期水平反复荷载作用下受力性能的试验研究,验证了提高其抗震性能的有效性(见图2

各根柱子的骨架曲线)^[20]。

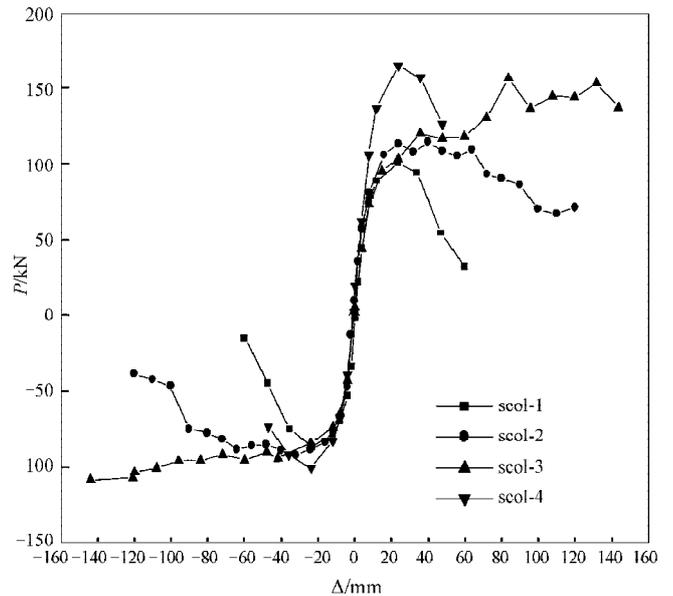


图2 骨架曲线

Fig. 2 The skeleton curves of lateral load-displacement

研究表明,只要对柱根部预计的塑性铰范围的钢筋网配筋率及配筋形式进行合理设计就能达到预期的抗震加固效果。将方形或矩形截面柱四角的保护层混凝土捣除后,将其用HPFL加固成圆形截面柱是一种加固效果非常显著的加固形式。轴压比是影响加固层利用效果的重要因素,高轴压比加固柱比较低轴压比加固柱的延性差,随着轴压比的增大,由于加固层对柱作用(包括横向约束作用和对轴向压应力的分担作用)增强,抗震承载力随之提高,各加载循环耗能能力增强,但位移延性随之降低;加固柱随轴压比的减小和加固层约束作用的增强其延性破坏特征越明显,即从开裂到试件完全破坏所经历的时间越长。

5 HPFL 加固 RC 构件抗高温性能研究

文献[21-22]对在高温下用HPFL加固RC梁进行了初步研究,其高温性能表现为:1)随着试验温度的升高,加固梁的极限承载力总体是呈下降趋势;到了800℃时,由于纵向钢筋受到高温影响,率先屈服使得构件破坏形态由受剪破坏变为受弯破坏;加固梁的跨中挠度随着温度的增加而增加,这是因为随着温度的增加,加固梁的弹性模量下降,从而挠度增加;在400~800℃温度下,用HPFL加固的RC梁均未发生加固层剥离破坏,故此加固技术具有良好的可靠性。2)剪切销钉的间距对HPFL加固梁的耐火性能有着重要影响,在I级粗糙度的情况下,所有加固梁界面均出现裂缝,无剪切销钉的加固梁均早于植入剪切销钉的加固梁破坏;剪切销钉的数量、间距对HPFL加固梁在高温下的

延性有显著影响,植入2倍钢丝网间距的加固梁破坏时的挠度远远大于未植入剪切销钉的加固梁;销钉间距为4倍钢丝网直径的加固梁比间距2倍钢丝网直径的加固梁在高温和外力共同作用时变异性更大。

尚守平等人对7根3面U型(在梁的受拉面和侧面进行加固)加固梁和1根未加固对比梁从加固界面原混凝土表面粗糙度、初始荷载2个方面进行了高温抗剪试验研究。结果表明,在初始荷载一定的条件下,加固界面为I级粗糙度的试件耐火时间较短,出现了加固层剥离退出工作的现象,II级粗糙度、III级粗糙度试件的耐火时间显著延长,且均为整体破坏,说明当加固界面为II级、III级粗糙度时能显著提高试件的耐高温性能。在界面粗糙度等级相同的条件下,随着初始荷载的增加,加固梁的耐火性能迅速下降^[23]。

6 有待研究的问题

从当前研究和应用的现状看,有许多理论和应用方面的问题急待解决,以下问题的研究会引起有关科研及工程技术人员的兴趣和关注。

1)对现有已研发的复合砂浆作进一步的改性,以提高其抗火性能。

2)研究HPFL加固层与原构件界面在火灾高温下及高温后粘结性能维持机理,研究被加固压弯构件在高温下的静力特性和高温后的静力性能及抗震性能的保持规律。

3)对用HPFL抗震加固的钢筋砼压弯构件作理论研究,包括其承载力、延性、刚度退化、强度衰减、耗能能力等的计算理论研究;考察荷载循环次数及剪跨比、轴压比及加固层性能等因素对滞回性能或骨架曲线的影响规律,建立恢复力模型,确定适用可靠的简化计算公式;开发这种被加固压弯构件低周反复加载全过程计算机模拟程序系统。

4)对剪力墙结构HPFL加固理论及方法的研究。

参考文献:

- [1] ACI Committee. A Guide for the Design, Construction and Repair of Ferrocement[J]. ACI Structural Journal, 1988, 85(3): 323-351.
- [2] Paramasivam P, Ong K C G, Lim C T E. Repair of Damaged RC Beams Using Ferrocement Laminates[C]//In Proc. Fourth International Conf. on Structural Failure, Durability and Retrofitting. Singapore: [s.n.], 1993: 613-620.
- [3] American Concrete Institute, State-of-the-Art Report on Ferrocement[R]. Detroit: ACI Committee 549, 1998: 24.
- [4] 蒋隆敏,尚守平,黄征宇.一种适用于钢丝(筋)网水泥

加固RC结构的纤维增强复合砂浆和界面剂[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5): 41-47.

Jiang Longmin, Shang Shouping, Huang Zhengyu. Fiber Reinforced Composite Mortar and Interfacial Adhesive for Strengthening of RC Structures with Ferrocement[J]. Civil Engineering Journal, 2005, 38(5): 41-47.

- [5] 曾令宏,尚守平,蒋隆敏,等.用于HPF加固RC结构的复合砂浆研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2007,30(9): 1187-1192.

Zeng Linghong, Shang Shouping, Jiang Longmin, et al. Study on Composite Mortar for Strengthening of RC Structures Using High-Performance Ferrocement[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2007, 30(9): 1187-1192.

- [6] 颜军,尚守平,聂旭.高性能复合砂浆高温后的抗压强度试验研究[J].铁道科学与工程学报,2006,3(4): 59-62.

Yan Jun, Shang Shouping, Nie Xun. Experimental Investigation of Compressive Strength of High Performance Composite Mortar after Elevated Temperature[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(4): 59-62.

- [7] 卜良桃,叶蓁,胡尚瑜,等.高性能复合砂浆钢筋网抗弯加固RC足尺梁试验研究[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2007,23(6): 895-899.

Bu Liangtao, Ye Zhen, Hu Shangyu, et al. Experimental Study on RC Beam Reinforced by Ferrocement Mortar and Reinforcing Steel Bar Mesh[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science, 2007, 23(6): 895-899.

- [8] 卜良桃,胡尚瑜,尚守平.HPF加固梁受弯性能影响参数试验[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(10): 181-183.

Bu Liangtao, Hu Shangyu, Shang Shouping. Experimental Study on Parameters Affecting Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with High-Performance Ferrocement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(10): 181-183.

- [9] 曾令宏,尚守平,戴睿.复合砂浆钢筋(丝)网加固RC梁受弯研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2007,34(5): 6-9.

Zeng Linghong, Shang Shouping, Dai Rui. Study on Strengthening Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with Ferrocement[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2007, 34(5): 6-9.

- [10] 卜良桃,王月红,尚守平.复合砂浆钢筋网加固抗弯RC梁的非线性分析[J].工程力学,2006,23(9): 125-130.

Bu Liangtao, Wang Yuehong, Shang Shouping. Nonlinear Fem Analysis of RC Beam Strengthened with Ferrocement Mortar[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9): 125-130.

- [11] 刘洸,尚守平.高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层(HPFL)加固混凝土结构斜截面承载力计算[J].施工技术,2008,37(4): 11-14.

Liu Wei, Shang Shouping. Calculation of Diagonal Section Resistance for Strengthening RC Structures Using High Performance Ferrocement Laminate(HPFL)[J]. Construction

- Technology, 2008, 37(4): 11-14.
- [12] 曾令宏, 尚守平, 周子范, 等. 复合砂浆钢筋网加固RC受弯构件粘结破坏研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(5): 22-27.
- Zeng Linghong, Shang Shouping, Zhou Zifan, et al. Study on Bonding of RC Beam Flexural Strengthened with High-Performance Ferrocement[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(5): 22-27.
- [13] 尚守平, 高法启. HPFL加固RC梁抗弯疲劳性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(3): 18-22.
- Shang Shouping, Gao Faqi. Experimental Study on Flexural Fatigue Behavior of RC Beams Strengthened with High Performance Ferrocement Laminate[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 5(3): 18-22.
- [14] 尚守平, 龙凌霄, 曾令宏. 销钉在钢筋网复合砂浆加固混凝土构件中的性能研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(3): 10-12.
- Shang Shouping, Long Lingxiao, Zeng Linghong. Study of the Pins in Reinforced Concrete Beam Strengthened with Ferrocement[J]. Building Structure, 2006, 36(3): 10-12.
- [15] 周方圆, 尚守平. 高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层(HPFL)加固混凝土构件正截面承载力计算[J]. 施工技术, 2008, 37(4): 7-10.
- Zhou Fangyuan, Shang Shouping. Calculation of Cross-Section Bending Capacity for Strengthening Concrete Beams with High Performance Ferrocement Laminate[J]. Construction Technology, 2008, 37(4): 7-10.
- [16] 曾令宏, 尚守平, 万剑平, 等. 复合砂浆钢筋网加固钢筋混凝土梁静力和疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 83-89.
- Zheng Linghong, Shang Shouping, Wan Jianping, et al. Static and Fatigue Experimental Study on Reinforced Concrete Beams Strengthened with High-Performance Ferrocement[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 83-89.
- [17] 蒋隆敏, 尚守平, 刘方成. 钢筋网高性能水泥复合砂浆加固圆柱的轴压性能研究[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(1): 41-47.
- Jiang Longmin, Shang Shouping, Liu Fangcheng. Research on Axially Compressed Behavior of RC Strengthening Round Columns Using High Performance Composite Cement Mortar Reinforced with Mesh Reinforcements[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(1): 41-47.
- [18] 尚守平, 蒋隆敏, 张毛心. 钢筋网水泥复合砂浆加固RC偏心受压柱的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 18-25.
- Shang Shouping, Jiang Longmin, Zhang Maoxin. Experimental Investigation into the Strengthening of Eccentric Compression RC Column Using Composite Mortar Laminate Reinforced with Mesh Reinforcement[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 18-25.
- [19] 蒋隆敏, 尚守平, 曹 晖. HPFL二次受力加固RC偏压柱试验研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2010, 33(6): 868-872.
- Jiang Longmin, Shang Shouping, Cao Hui. Experimental Investigation into the Strengthening of Eccentrically Compressed RC Column Using HPFL under Twice Loading [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2010, 33(6): 868-872.
- [20] 尚守平, 蒋隆敏, 张毛心. 钢筋网复合砂浆薄层加固钢筋混凝土方柱抗震性能的研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(4): 16-22.
- Shang Shouping, Jiang Longmin, Zhang Maoxin. Study on Seismic Behavior of RC Square Columns Strengthened Using High-Performance Composite Mortar Reinforced with Mesh Reinforcements[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(4): 16-22.
- [21] 尚守平, 罗 杰, 陈大川. HPFL加固RC梁在不同高温下的极限荷载试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(1): 1-4.
- Shang Shouping, Luo Jie, Chen Dachuan. Experimental Investigation of the Ultimate Load of RC Beam Reinforced with High-Performance Ferrocement Laminate under Different High Temperature[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2010, 37(1): 1-4.
- [22] 陈大川, 罗 杰, 尚守平. 高性能复合砂浆薄层加固RC梁的耐火极限试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(6): 101-104.
- Chen Dachuan, Luo Jie, Shang Shouping. Experimental Investigation on Duration of Fire Resistance of RC Beam Reinforced with High Performance Ferrocement Laminate[J]. Industrial Construction, 2009, 39(6): 101-104.
- [23] 尚守平, 罗 杰, 余德军. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固RC受剪梁的高温性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4): 13-18.
- Shang Shouping, Luo Jie, Yu Dejun. Experimental Study of High-Temperature Behavior of RC Shear Beam Retrofitted with High Performance Ferrocement Laminate[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4): 13-18.

(责任编辑: 李玉珍)