

使用形状记忆合金和纤维增强聚合物 对混凝土构件进行内外加固：综述

珍妮特·帕尔文, 阿扎德·拉德
隶属机构：美国土木与环境工程系

摘要：本文回顾了最近关于钢筋混凝土（RC）结构部件的研究，例如梁柱接头（BCJ）。这些构件采用无腐蚀形状记忆合金（SMA）、纤维增强聚合物（FRP）或这两种材料的组合进行内部或外部增强。粘合FRP板或近表面贴装（NSM）FRP钢筋用于外部加固案例。在RC结构中使用FRP和SMA材料可以提供巨大的潜在好处，包括RC结构的终身成本节约、耐用性、安全性和震后可维修性。尽管FRP材料以其耐腐蚀性、高强度重量比、易于应用和可施工性而闻名；作为增强材料的SMA材料允许结构在负载终止后恢复其原始形状，而不会产生任何永久性大残余变形。总之，所提出的文献综述提供了对使用这些材料进行改造或加固RC结构部件的正在进行的研究以及该领域未来研究的趋势的洞察。还讨论了成本和耐用性。

关键词：近表面贴装（NSM）；关节；纤维增强聚合物（FRP）；玻璃钢棒材；外部玻璃钢加固；形状记忆合金（SMA）；混凝土

Internal and External Reinforcement of Concrete Members by Use of Shape Memory Alloy and Fibre-Reinforced Polymers under Cyclic Loading: A Review

Janet Parvin, Azadeh Raad
Affiliation: Department of Civil and Environmental Engineering, USA

Abstract: This paper presents a review of recent studies on reinforced concrete (RC) structural components, such as beam-column joints (BCJs). These members are internally or externally reinforced with corrosion free shape memory alloy (SMA), fiber reinforced polymers (FRP), or a combination of the two materials. Bonded FRP sheets or near surface mounted (NSM) FRP bars are used in external strengthening cases. The use of FRP and SMA materials in RC structures can offer great potential benefits including lifetime cost saving, durability, safety, and post-earthquake serviceability for RC structures. Although FRP materials are well known for their corrosion resistance, high strength-to-weight ratios, ease of application, and constructability; SMA materials as reinforcement allow the structures to regain their original shape after the termination of the load without any permanent large residual deformation. In summary, the presented literature review provides an insight into the ongoing research on the use of these materials for retrofitting or strengthening of RC structural components and the trends for future research in this area. The cost and durability are also discussed.

Keywords: Near-surface-mounted (NSM); joints; fiber reinforced polymer (FRP); FRP bars; external FRP strengthening; shape memory alloy (SMA); concrete

引言：

钢筋混凝土结构劣化的原因之一是由于嵌入钢筋的腐蚀，随后在混凝土中形成裂缝，导致结构无法使用。几十年来，腐蚀问题一直是一个令人担忧的问题。同样，

地震造成的破坏是对结构安全构成威胁的另一个严重问题，特别是对于1970年代之前建造的结构，这些结构是为重力荷载而设计的，没有抗震措施。从那时起，对设计规范进行了修改，以防止新建结构在地震事件下倒塌。

然而,必须对非抗震设计的缺陷结构进行改造,以防止未来因为严重地震而造成破坏。多年来,建筑物的改造都是通过混凝土和钢护套等传统方法进行的,以提供额外的所需强度,直到使用创新材料。最近,世界各地的许多研究都针对 FRP 的使用,因为与传统方法相比,它们重量轻、耐腐蚀且易于安装。许多研究人员致力于使用 FRP 作为外部增强材料来进行限制、剪切和弯曲加固。然而,只有少数研究人员开始研究使用 FRP 作为关键部件 BCJ 的内部加固的概念,它们的失效可能导致结构完全倒塌。

另一方面,超弹性(SE)形状记忆合金(SMA)是一种能够承受较大的变形并在移除施加的力后恢复其原始形状和位置的材料。因此,使用 SMA 作为结构加固物即使在遭受地震袭击后也能减少对整体结构的损坏。SMA 以片材和条材的形式使用。然而,最近很少有研究人员将 SMA 用作塑性铰链区域的内部钢筋,这些区域的损坏会导致整个结构的失效。FRP 和 SMA 的这些优势为将它们一起用作混合材料或复合材料来加强 RC 构件的外部 and 内部的开始铺平了道路。对 BCJ 进行的一些研究认为这些混合或复合材料可以提高结构的整体性能。

FRP 和 SMA 材料提供了一种可行的增强解决方案,该解决方案具有非腐蚀性,而传统的钢筋在暴露于恶劣和碱性环境时会随着时间的推移而衰减。本文旨在深入了解 FRP、SMA 以及由 FRP 和 SMA 制成的新型复合材料增强的无腐蚀混凝土 BCJ 的性能。当接头在一个区域有 SMA 钢筋而在另一个区域有 FRP 钢筋时,称为混合,而当钢筋由 FRP 和 SMA 材料的混合物制成时,称为复合材料。

一、FRP 钢筋内部加固的梁柱接头

与更常见的外部 FRP 加固方法相比,对使用 FRP 钢筋进行内部加固的 BCJ 的研究是有限的。这些研究中的大多数已普遍使用玻璃纤维增强聚合物(GFRP)材料作为钢筋。Said 和 Nehdi 测试了两个全尺寸 BCJ,一个用 GFRP 网格加固,一个用钢筋和箍筋在循环载荷下加固。尽管在 GFRP 增强接头中实现了延性框架的 3% 最小漂移比要求,但与钢增强接头相比,由于 GFRP 材料的弹性行为,观察到较低的刚度和能量耗散。此外,梁端载荷与钢筋接头一样高。由于 GFRP 钢筋的低刚度,接头失效是由于脆性行为导致两个底部 GFRP 纵向钢筋断裂。

另一方面,Saravanan 和 Kumaran 对 18 个用 GFRP 箍筋和钢筋加固的 BCJ 进行了实验,随后进行了有限元分析研究。考虑的变量是钢筋类型(螺纹、砂涂层和开槽)、梁和柱的配筋率、混凝土强度和接头纵横比。此

外,研究了 GFRP 箍筋对节点抗剪强度的影响,并提出了预测节点抗剪强度的设计方程。他们的研究表明,与传统钢筋加固的 BCJ 相比,GFRP 砂涂层钢筋的承载能力提高了近 5%,但更重要的是变形能力提高了 30% 至 50%。此外,节点区域中箍筋的存在能够将破坏从节点核心移动到梁柱界面。

Mady 等人和 Hassaballa 等人在 2011 年进行了另外两个实验,在承受地震载荷时用 GFRP 钢筋和箍筋加固的全尺寸混凝土 BCJs 进行了研究,以探索 GFRP 加固对接头行为的影响。Mady 等人将纵向和横向钢筋材料类型(钢和 GFRP)以及梁纵向钢筋比率作为参数;而 Hassaballa 等人的研究变量是纵向和横向钢筋材料(钢和 GFRP)和梁的纵向钢筋细节(带有钩子、直的或直的延伸到梁短柱中)。两个实验都有一个参考样本(纵向和横向钢筋),一个用 GFRP 钢筋和钢箍筋加固的样本,其余的用 GFRP 钢筋和箍筋加固。Mady 等人揭示了 GFRP 纵向钢筋配筋率的增加将导致接头中更高的能量耗散。他们发现使用钢代替 GFRP 箍筋会导致耗散能量增加。在 Hassaballa 等人的研究中,尽管 GFRP 增强节点和控制节点均在剪切中失效,但通过远离柱面形成塑性铰链,观察到 GFRP 增强节点与延长短柱的破坏模式满足设计能力概念(弱梁-强列)。此外,在两个实验中,使用 GFRP 钢筋作为内部增强材料的 BCJ 安全地保持了 4% 的楼层漂移率,没有明显的损坏或残余应变。因此,BCJ 可以在移除高达该漂移比的地震载荷后保持其原始形状。此外,所有接头平均超出其各自的设计能力 9%。根据 Mady 等人和 Hassaballa 等人的调查,可以得出结论,与钢筋增强的 BCJ 相比,采用纵向和横向 GFRP 增强材料增强的 BCJ 通常提供更低的能量耗散。

同样,Hasaballa 和 El-Salakawy 在地震载荷下测试了六个全尺寸 GFRP 增强的外部 BCJ 原型。他们研究的参数是混凝土强度和接缝处的剪应力水平。在一些接头样本中观察到对角剪切裂纹。对于相同的剪应力水平,即使失效发生在不同的漂移比下,节点箍筋在失效时也会记录到相似的应变。此外,与具有较高混凝土强度的接头相比,具有较低混凝土强度的接头的能量耗散和延性较高。因此,具有较高能量耗散的关节在卸载后能够恢复其原始形状。

与最后一个参考文献类似,Ghomi 和 El-Salakawy 对六个在地震载荷下用 GFRP 钢筋和箍筋进行内部加固的全尺寸 BCJ 进行了实验。接头在柱子的所有四个侧面都有侧梁,而考虑的变量是钢筋材料(钢和 GFRP)、横梁的存在、接头剪应力水平和横梁纵向钢筋(头端和弯曲

钢筋)的端部锚固。他们的研究表明,在某些情况下,尽管 FRP-RC 结构具有预期的线性行为,但受侧梁限制的 GFRP-RC BCJ 提供了非线性行为和非脆性破坏。这也是由于某些接头中的高剪切应力水平,在相同的漂移比下,与具有较低剪切应力水平的接头相比,它们可以消耗更多的能量。

二、使用 SMA 钢混合钢筋内部加固的梁柱接头

尽管 SMA 材料具有能量耗散和自定心等优点,但对 SMA 棒在 BCJ 中的使用进行了有限的研究。此外,由于成本原因, SMA 钢筋特别用于 BCJ 关键区域的塑料铰链位置,而其他区域通常用传统钢筋加固。这种类型的钢筋布置称为混合 SMA 钢。研究人员注意到,使用 SMA 钢筋的加固结构在载荷减少后恢复其原始形状而没有任何残余位移的能力方面提供了显着的结果。Alam 等人基于之前已经完成的分析模型开发了有限元模型。通过将他们的结果与两个实验进行比较,验证了有限元模型的准确性。一个是用 SMA 钢筋和螺旋线加固的桥墩,另一个是 BCJ,在塑性铰区用 SMA 钢筋通过钢耦合器与其他区域的钢筋耦合。两个试样均经受循环载荷。SMA 增强 BCJ 和桥墩的实验研究表明,它们能够恢复大部分屈服后变形;因此,维修需求将是最小的。因此,Alam 等人能够识别 BCJ 弯矩-曲率关系的差异,以预测 SMA 加固接头在承受地震载荷时的塑性铰位置、裂缝宽度和粘结-滑动关系。数值结果表明,有限元分析能够以合理的精度预测力矩-旋转和载荷-位移曲线。

三、使用混合或复合 SMA-FRP 钢筋进行内部加固的梁柱接头

混凝土结构的 SMA-FRP 混合或复合钢筋提供了一个优势,可以有效地加强 BCJ 等结构中最关键的位置。Zafar 和 Andrawes 进行的实验研究主要是应用 SMA-FRP 复合材料作为一种创新材料来加强 RC 抗弯框架(MRF),以增强其在地震条件下的性能并减少其发生后的残余漂移。地震。他们观察到,由于较高的初始刚度,与用 SMA-GFRP 和 GFRP 加固的框架相比,用钢加固的框架经历了较低的层间漂移(ID)。与使用 SMA-GFRP 和 GFRP 钢筋加固的框架相比,带有钢筋的框架的残余内径分别增加了 84% 和 62%。在相同的峰值地面加速度(PGA)值下, SMA-FRP 加固的框架比 GFRP 框架能够耗散更多的能量,并且在不同的地震作用下可以抵抗 51% 的抗震需求(PGA)事件与用钢筋加固的框架相比。与 GFRP 和钢增强框架相比, SMA-FRP 增强框架也表现出几乎可以忽略不计的残余 ID 值。研究进一步表明,复合材料 SMA-FRP 筋材在 MRFs 塑性铰区的应用不仅显著提

高了延展性,而且与仅在相同位移处用 GFRP 加固的框架相比,残余位移和能量耗散也得到了改善。因此,框架在地震载荷条件下的整体性能得到了提高。

另一项研究是在循环载荷下在塑性铰区域使用 SE-SMA 钢筋,在无钢 BCJ 的其他区域使用 FRP。发现耦合的 SE SMA-FRP 钢筋对 BCJ 形成了力与位移的滞后曲线,类似于具有较低刚度和可比残余漂移的钢 RC 接头。由于 SMA 具有高度超弹性的特性,在 BCJ 的塑性铰链区域使用 SMA 可以显著减少漂移。然而,观察到的变形可能是由于 FRP 杆在车钩内的滑动造成的。尽管如此,在核心区域用 SMA 加固的 BCJ 能够承受超过极限的 89% 的承载能力。此外,在钢-RC BCJ 试样的情况下,塑性铰在柱面上形成。相反,通过在接头区域使用 SE-SMA,塑性铰区成功地从柱面转移了大约等于梁深度四分之一的距离。

四、用 NSM FRP 或 SMA 钢筋外部加固的梁柱接头

使用近表面安装(NSM)FRP 或 SMA 钢筋已成为提高 RC 梁或柱的抗弯能力的方法。NSM FRP 或 SMA 技术的过程始于在混凝土构件表面切割凹槽,无需任何表面处理。然后,使用环氧树脂填充将 SMA 或 FRP 条安装在凹槽中。与其他外部加固技术相比,这种方法耗时更少。

研究员已经对使用 FRP 或 SMA 钢筋的 NSM 技术对梁和柱进行外部加固进行了多项研究。然而,据作者所知, NSM 技术尚未完全扩展到 BCJ。Protá 等人的一项研究检查了地震载荷下的外部 RC BCJ。他们的加固技术包括将梁 NSM FRP 钢筋延伸到接头区域的后部,然后使用外部粘合的 FRP 层压板作为锚固。测试结果表明,破坏模式发生了变化,从节点核心中的剪切到梁中的弯曲。

最近,已经对 RC BCJs 的改进的 NSM CFRP 强化技术进行了实验研究。该技术基于在接合区域制作凹槽,用环氧树脂填充凹槽,并用 CFRP 片材将该区域外部粘合,而不是将 CFRP 嵌入凹槽中。检验了这种改进技术以及 FRP 板末端处的 FRP 风扇的有效性。结果发现,外部粘合 FRP 加强筋(EBROG)显著提高了它们的强度、刚度、延展性(与对照对应试样相比分别提高了 54%、84% 和 74%)、夹紧宽度比和能量耗散(用 CFRP 板和风扇加装后的能量消耗是对照板的两倍)。玻璃钢在凹槽外粘结和玻璃钢风扇的结合阻止了脱粘,延缓了脆性破坏。此外,塑料铰链从接头移到梁上。

五、用 FRP 板或带从外部加固的梁柱接头

近年来,FRP 材料被广泛用于 RC 结构的外部加固和改造。使用这些材料的目的是增加结构承载能力或修复损坏的结构以及使用其他材料(如砂浆)。为了解决新的规范要求、设计或施工过程中的错误或维持额外的活

荷载, 可能需要增加负载能力。在外加筋中, 微裂纹的扩展是影响粘结强度的一个重要因素。为此, 已经开发了多尺度分析模型来预测 FRP 外部强化的延迟剥离或粘合寿命。但是, 有一些新方法可以改善外部钢筋的粘合, 例如真空应用、螺柱剪切连接器和锚钉。在本节中, 我们特别阐明了一些使用 FRP 板或带来加强最关键的结构元素, 即 BCJ 的研究。

很少有关于 BCJ 的实验研究将钢锚用于 FRP 板。其中两项研究是在相同荷载条件下使用不同数量的 FRP 层和不同钢锚固配置对相同尺寸的 BCJ 进行的。Ghobarah 和 Said 对四个非抗震设计的 RC BCJ 进行了实验(接头核心中没有抗剪钢筋)。其中两个试样被认为是控制接头, 并受到准静态循环载荷。在这一阶段的实验之后, 两个试件仅在节点核心位置的柱上使用单向和双向 U 形和 X 形 GFRP 板进行修复, 另外两个未损坏的节点采用与损坏的。然后, 对四个试件再次进行准静态循环加载, 以确定修复的有效性。钢板和螺纹钢棒用作 GFRP 板的锚固。对照试件和加强试件的比较表明, GFRP 有助于提高接头的抗剪能力。此外, 延展性和能量耗散分别增加了大约 62% 和 72%。GFRP 加固成功地延缓了剪切破坏, 并且在某些情况下, 破坏模式从剪切破坏转移到梁中的弯曲铰链。此外, El-Amoury 和 Ghobarah 在相同的荷载条件下对相同尺寸的 BCJ 进行了另一项实验, 但 GFRP 层数和钢锚固配置不同。除了 GFRP 柱约束外, 在梁柱接头的底面添加了 L 形 GFRP 板, 随后采用了两种不同的锚固系统。第一个系统有点类似于 Ghobarah 和 Said 的研究, 在连接芯的柱子上使用带有螺纹钢棒的钢板, 只是在 BCJ 芯的底部添加了一个角钢。在第二个系统中, 使用两块 U 形钢板将延伸的 GFRP 板锚固在梁上, 以避免钢筋的粘结滑移和 GFRP 板的脱粘。在后面的实验之后, Ghobarah 和 Al-Emoury 有两组 BCJ 标本。在第一组中, 使用了相同的锚固系统, 但 GFRP 板材被 CFRP 取代。在第二组中, 结合了不同配置的锚固系统, 包括使用额外的钢筋和钢板。具体来说, 新的锚固系统和 GFRP 配置延迟了 GFRP 板的剥离, 以及梁顶部钢筋的滑动。此外, 杆的使用改善了锚固系统的条件, 可以完全实现抗拉强度。

最近的一项研究对地震缺陷型 RC BCJ 进行了类似的研究, 除了螺纹钢棒外, 还使用不同形状的钢板(U形、L形角钢和水平板)来锚固 CFRP 板(单轴、四轴)加强损坏或未损坏的关节。接头在循环荷载下进行了测试, 以研究 CFRP 配置(X形、U形和水平)、使用钢构件的锚固方法以及不同的内部钢筋配筋率的有效性。实验

结果表明, FRP 改造的构件恢复了强度, 并获得了比对照构件更高的延展性。还注意到在接头的所有角上使用 L 形角钢提供了限制, 导致高达 75% 的高水平位移能力。

六、与 FRP SMA 增强相关的耐用性和成本

评估钢筋混凝土构件耐久性的标准之一是调查其疲劳性能。在少数研究中进行了涉及 FRP 和 SMA 增强的疲劳试验。进行了一项实验研究, 以检查在重复加载下用 CFRP 板加固的腐蚀钢 RC 梁的弯曲行为。结果表明, 钢筋是 RC 梁疲劳能力的控制因素。因此, 修复梁或用 FRP 等创新材料代替钢材是增加腐蚀钢筋梁承载能力的方法。RC 腐蚀梁经修复和外部 CFRP 加固抗弯后, 其疲劳能力高于未腐蚀的对照梁。此外, Aidoo 等人发现, 疲劳能力的增加也受到 CFRP 板和混凝土之间的粘合质量的控制。在另一项研究中, 混凝土梁采用 CFRP 板和层压板进行加固, 并承受疲劳载荷。其中两个样品用环氧树脂粘合剂或机械紧固件连接到混凝土表面的预固化层压板进行加固。使用 CFRP 板和钉作为锚固物加固了另外两个样本。结果表明, 环氧树脂和机械紧固件在粘合 CFRP 层压板方面同样有效, 并且机械紧固件可以替代环氧树脂粘合剂。然而, 与机械紧固件相比, 带有锚钉的环氧树脂粘合 CFRP 板为梁提供了最高的极限强度, 并能承受大量的疲劳循环。

Yun 等人对用 NSM FRP 加固的 RC 梁进行了实验。他们透露, NSM 是在其他方法(外部粘合、纤维锚固粘合和混合粘合)中保持 FRP 和混凝土表面在疲劳载荷下的良好粘合的杰出方法。与 FRP 相比, SMA 的阶段在加强 RC 元件以维持疲劳载荷方面发挥着相当大的作用。如果 SMA 处于奥氏体状态(高温阶段), 则 SMA 棒材会发生相当大的变形, 而处于马氏体状态(冷却阶段)时, 去除载荷后没有残余变形。因此, 与钢相比, SMA 可以提供出色的抗疲劳能力和较大的能量耗散。

无腐蚀性和高强度能力的结合使 FRP 成为 RC 结构中作为内部和外部增强材料的出色材料。FRP 的耐久性与所使用的纤维类型(碳、玻璃、玄武岩等)和环氧树脂基体有关。此外, 碳纤维在恶劣环境下比玻璃纤维更耐用。虽然 FRP 材料的前期成本可能高于钢材, 但当使用 FRP 作为内部和外部增强材料时, 维护和损坏修复费用将在结构的整个生命周期内减少。

与 FRP 相比, SMA 的有限使用一直与其镍和钛(Ni-Ti)成分的高成本有关。然而, 使用不同的复合材料(如 Cu-Zn-Al 和 Cu-Al-Ni)对合金进行成型会导致成本比降低, 同时提供与传统 SMA 组合物相当的性能。根据形状和所需材料的数量, Cu-Zn-Al 的成本比为 1 到 10,

Cu-Al-Ni 的成本比为 2 到 20, 而使用 Ni-Ti 材料的成本比为 10 到 100。根据该分析, 当去除 Ti 并将 Ni 替换为另一种成分(例如 Zn)时, 可以观察到成本显著降低。

结论

本文讨论了用创新的智能和无腐蚀材料(如 FRP、SMA 以及混合和复合 SMA-FRP) 增强的混凝土 BCJ 的性能。根据本研究对 RC BCJ 进行的现有文献回顾, 按照 BCJ 的内部、外部加固以及耐久性和成本的影响的顺序得出以下结论。

- 与使用传统钢筋加固的对应物相比, 使用 FRP、SMA 和混合 FRP-SMA 纵向钢筋和箍筋加固的 BCJ 在提高整体承载能力方面表现更好。

- 在相同的漂移比下, 复合材料 SMA-FRP BCJs 钢筋比仅用 GFRP 增强的钢筋表现出更高的延展性和能量耗散。

- 在相同的 PGA 值下, GFRP 增强的 BCJ 与对应的复合材料 SMA-FRP 增强接头相比表现出更高的漂移率。然而, 与用钢和 GFRP 加强的接头相比, 用 SMA-FRP 钢筋加强的接头承受少量的残余位移。

- 混合 SMA-FRP 增强型 BCJ 在地震载荷下的性能得到增强, 特别是在塑性铰区区域。此外, 与用 GFRP 钢筋加固的接头相比, 在延展性、残余漂移和能量耗散方面观察到了相当大的改进。

- 尽管在某些情况下, GFRP 增强接头在反向循环载荷下表现出延展性, 但传统钢或混合 SMA-钢增强接头在地震载荷下的性能更佳, 特别是在承载能力和残余位移方面。

- 为保证塑性铰发生远离节点符合承载力设计规则(强柱弱梁概念), FRP 加固节点核心区域需要足够的锚固。而对于混合 SMA-FRP 增强接头, 在接头核心中放置 SMA 钢筋是必不可少的。

- FRP 和 SMA 材料由于其无腐蚀性和高强度, 可以为钢筋提供独特的替代品。在 FRP-SMA 或 SMA 加固的情况下, 也可以实现小的残余位移。这将导致更少的维修和维护以及更低的生命周期成本。

- 对于外部加固的 BCJ, 更多层 FRP 板可提供更高的接头承载能力。

- 使用钢板或角钢等钢构件作为 FRP 板的锚固, 防止 FRP 板剥离, 并提高连接能力(例如延展性、刚度和能量耗散)。

参考文献:

[1]Le-Trung, K.; Lee, K.; Shin, M.; Lee, J. Analytical assessment and modeling of RC beam-column connections

strengthened with CFRP composites. *Compos. Part B* 2011, 42, 1786 - 1798.

[2]Del Vecchio, C.; Ludovico, M.; Di Prota, A.; Manfredi, G. Analytical model and design approach for FRP strengthening of non-conforming RC corner beam-column joints. *Eng. Struct.* 2015, 87, 8 - 20.

[3]Antonopoulos, C.P.; Triantafillou, T.C. Experimental investigation of FRP-strengthened RC beam-column joints. *Compos. Constr.* 2003, 7, 39 - 49.

[4]Ghobarah, A.; El-Amoury, T. Seismic rehabilitation of deficient exterior concrete frame joints. *Compos. Constr.* 2005, 9, 408 - 416.

[5]Del Vecchio, C.; Di Ludovico, M.; Balsamo, A.; Prota, A.; Manfredi, G.; Dolce, M. Experimental investigation of exterior RC beam-column joints retrofitted with FRP systems. *Compos. Constr.* 2014, 18, 04014002.

[6]Di Ludovico, M.; Manfredi, G.; Mola, E.; Negro, P. Seismic behavior of a full-scale RC structure retrofitted using GFRP laminates. *Struct. Eng.* 2008, 134, 810 - 821.

[7]Realfonzo, R.; Napoli, A.; Pinilla, J.G.R. Cyclic behavior of RC beam-column joints strengthened with FRP systems. *Constr. Build. Mater.* 2014, 54, 282 - 297.

[8]Foraboschi, P. Shear strength computation of reinforced concrete beams strengthened with composite materials. *Compos. Mech. Comput. Appl.* 2012, 3, 227 - 252.

[9]Al-Hammoud, R.; Soudki, K.; Topper, T.-H. Fatigue flexural behavior of corroded reinforced concrete beams repaired with CFRP sheets. *Compos. Constr.* 2011, 15, 42 - 51.

[10]Aidoo, J.; Harries, K.-A.; Petrou, M.-F. Fatigue behavior of carbon fiber reinforced polymer strengthened reinforced concrete bridge girders. *Compos. Constr.* 2004, 8, 501 - 509.

[11]Ekenel, M.; Rizzo, A.; Myers, J.J.; Nanni, A. Flexural fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with FRP fabric and precured laminate systems. *Compos. Constr.* 2006, 10, 433 - 442.

[12]Yun, Y.; Wu, Y.-F.; Tang, W.-C. Performance of FRP bonding systems under fatigue loading. *Eng. Struct.* 2008, 30, 3129 - 3140.

[13]Dolce, M.; Cardone, D. Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 1. Martensite and austenite NiTi bars subjected to torsion. *Int. J. Mech. Sci.* 2001, 43, 2631 - 2656.