

弯曲纤维增强聚合物 (FRP) 钢筋 减少混凝土中的钢筋退化程度

毛里齐奥·加西亚, 萨诺萨克·瓜达尼尼, 凯普罗斯·伊姆贾伊, 雷耶斯·普纳库图斯
隶属机构: 泰国土木工程系

摘要: 混凝土中的钢筋容易腐蚀, 这个过程会导致结构损坏。纤维增强聚合物 (FRP) 增强材料代表了暴露于侵蚀性环境的结构的可行替代方案, 并且在需要卓越耐腐蚀性能的许多可能应用中。然而, 使用FRP钢筋作为混凝土的内部钢筋, 仅限于特定的结构元素, 尚未扩展到整个结构。其原因与市场上弯曲或成型增强FRP元件的有限可用性以及它们降低的结构性能有关。本文介绍了对弯曲FRP复合材料强度退化的最新综述, 并评估了现有FRP增强材料弯曲能力预测模型的性能。先前的研究表明, 在多轴应力组合下, FRP钢筋弯曲部分的机械性能显著降低。事实上, 弯曲FRP钢筋的抗拉强度可低至直条的最大抗拉强度的25%。在很多情况下, 发现目前对FRP加固混凝土结构的设计建议高估了FRP钢筋的抗弯能力。这篇评论文章讨论了基于Tsai-Hill失效准则的更准确和实用的预测模型, 并且探索了在土木工程应用中使用弯曲/成型FRP复合材料的潜在挑战和未来研究方向。

关键词: 弯曲的玻璃钢钢筋; 弯曲纤维增强聚合物 (FRP); 弯曲能力; 弯曲强度; 弯曲试验; 材料的强度和测试; 材料表征

Strength Degradation in Curved Fiber-reinforced Polymer (FRP) Bars Used as Concrete Reinforcement

Maurizio Garcia, Thanongsak Guadagnini, Kypros Imjai, Reyes Pnakoutus
Affiliation: Department of Civil Engineering, Thailand

Abstract: Steel reinforcements in concrete tend to corrode and this process can lead to structural damage. Fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcements represent a viable alternative for structures exposed to aggressive environments and have many possible applications where superior corrosion resistance properties are required. The use of FRP rebars as internal reinforcements for concrete, however, is limited to specific structural elements and does not yet extend to the whole structure. The reason for this relates to the limited availability of curved or shaped reinforcing FRP elements on the market, as well as their reduced structural performance. This article presents a state-of-the art review on the strength degradation of curved FRP composites, and also assesses the performance of existing predictive models for the bend capacity of FRP reinforcements. Previous research has shown that the mechanical performance of bent portions of FRP bars significantly reduces under a multiaxial combination of stresses. Indeed, the tensile strength of bent FRP bars can be as low as 25% of the maximum tensile strength developed in a straight counterpart. In a significant number of cases, the current design recommendations for concrete structures reinforced with FRP were found to overestimate the bend capacity of FRP bars. A more accurate and practical predictive model based on the Tsai-Hill failure criteria is also discussed. This review article also identifies potential challenges and future directions of research for exploring the use of curved/shaped FRP composites in civil engineering applications.

Keywords: Curved FRP bars; bent fiber-reinforced polymer (FRP); bend capacity; bend strength; bent test; strength and testing of materials; material characterization

引言:

自 1980 年代后期以来,纤维增强聚合物(FRP)增强材料已成为替代钢筋混凝土(RC)结构中传统钢筋的替代品。由于 FRP 增强材料不会腐蚀且非常耐用,因此可以延长结构的使用寿命并降低混凝土结构的维护/维修成本。迄今为止,用于混凝土的内部 FRP 增强材料主要限于特定的结构应用,例如桥面、路障、海洋结构以及隧道和地下基础设施。内部 FRP 增强材料的有限使用可能部分是由于缺乏复杂结构连接所需的市售弯曲或成形增强元件、对耐久性问题的担忧以及当 FRP 增强材料暴露于火时纤维/基体组合物的潜在降解。在当前的施工实践中,大多数弯曲/异形钢筋在场外预先弯曲并预先切割成正确的形状和长度。与 FRP 增强材料不同,钢筋具有弹塑性行为,因此可以通过冷弯轻松成型。现有的钢筋冷弯指南规定低碳钢的弯曲半径与直径比(r/d)为 2,这可以在钢中产生 20% 的最大应变值。然而,在冷弯 FRP 增强材料的情况下,存在与位于受压侧的纤维潜在屈曲相关的问题。

此外,商用 FRP 复合材料在混凝土结构中用作嵌入钢筋的典型极限应变值在 1% 到 2.5% 之间变化。因此,需要控制纤维中的诱导应变以避免增强材料过早失效。因此,FRP 钢筋的冷弯需要比目前为钢筋指定的更大的 r/d 比。

迄今为止,只有少数市售的 FRP 棒材以弯曲配置提供,并且它们都在制造过程中进行了预弯曲。弯曲通常是在材料部分固化时产生的。可用的典型弯曲形状包括热塑性 FRP 箍筋、J 型钩热塑性 FRP 条、预弯曲 GFRP 热固性复合材料和 U 形热固性 FRP 条。虽然市场上存在碳(CFRP)、玻璃(GFRP)、芳纶(AFRP)和玄武岩(BFRP)棒材,但 CFRP 和 GFRP 似乎更广泛地用于实际的 RC 应用和研究。这是可以理解的,因为 CFRP 比所有其他复合材料具有更好的性能,而 GFRP 比其他复合材料便宜得多。

虽然 FRP 材料在承受纯轴向拉力时最有效,但大多数 FRP RC 结构都承受多种应力。以前的研究报告说,FRP 增强材料的抗拉强度在拉伸和剪切应力的组合下会降低。这成为 RC 结构中弯曲 FRP 增强材料的一个问题,因为如现有文献中所报道的那样,在弯曲角处可能会发生过早失效。事实上,此类研究的结果表明,FRP 钢筋弯曲部分的抗拉强度可低至直部分最大抗拉强度的 25%。发生在 FRP 钢筋弯曲部分的强度退化可以使用经验方程来量化,例如日本土木工程学会(JSCE)最初提出的一个,目前在其他设计指南中采用。为了解决这种潜在的故障,一些设计指南限制了 RC 结构中弯曲 FRP 增强材料的设计应变值。然而,当前设计指南中包含的用于预测 FRP 钢筋弯曲部分强度退化的方程是根据经验得出的,并且主要是弯曲几何形状的函数。当使用不同类型

的复合材料时,这些方程给出的结果似乎不会产生一致的结果。因此,有必要根据现有和新的实验证据重新评估这些方程的准确性。

本文概述了现有和正在进行的关于 RC 结构中弯曲 FRP 钢筋强度的研究。按时间顺序介绍了调查弯曲 FRP 复合材料强度退化的大量实验工作。用于制造定制/复杂形状 FRP 复合材料的现代技术也被视为新兴挑战。

一、弯曲玻璃钢强度退化研究

Ozawa 等人的开创性研究通过测试混凝土梁来检验弯曲 FRP 钢筋的“弯曲能力”。混凝土梁采用抗弯和抗剪 FRP 钢筋加固。增强材料由连续的玻璃纤维和浸渍有树脂并通过细丝缠绕形成的碳纤维组成。共对 10 个梁试件进行两点弯曲试验;其中两个是静态载荷,另外八个是疲劳载荷。作者报告说,如果梁在剪切中失效,FRP 箍筋可能会在低于等效直杆极限强度的应力下在弯曲部分失效。小泽等人。得出的结论是,在钢筋弯曲部分产生的应力集中导致断裂——这种失效源于弯曲内部。Miyata 等人在随后的一项研究中也报告了类似的结论,该研究进行了一系列拉拔试验,研究了弯曲对嵌入混凝土块中的混合 FRP 钢筋的影响。对增强材料进行了直接拉伸试验,增强材料由直径为 10 毫米的混合 FRP 复合材料组成,该复合材料由连续玻璃和浸渍树脂的高强度碳纤维制成。研究的主要参数是弯曲 FRP 钢筋的抗拉强度随内部弯曲半径(r)的变化。测试中使用了五种不同的钢筋直径,弯曲半径设置为钢筋直径的三倍(即 $r/d = 3$)。作者报告说,大多数弯曲试样由于弯曲部分的 FRP 钢筋断裂而失效,并且纤维开始从弯曲的内侧部分断裂。他们还得出结论,失效载荷随着内部弯曲半径的增加而增加。尽管 Ozawa 等人和 Miyata 等人的研究对弯曲 FRP 钢筋的强度退化提供了一些见解,但试验只考虑了几个试验参数,因此他们的结论并不普遍。此外,这些测试没有考虑沿弯曲部分的粘合贡献和尾部锚固的影响。这些测试也排除了可能影响粘结应力的其他参数,例如 FRP 钢筋的混凝土强度和表面处理。

为了研究影响 FRP 箍筋混凝土梁抗剪能力的因素,Nagasaka 等人测试了 35 根 FRP 钢筋内部加固的半比例梁。研究的参数是 FRP 箍筋的类型和配筋率,以及混凝土强度。Nagasaka 等人还对四个面板试件进行了测试,以研究 FRP 箍筋与主筋的抗弯能力,以模拟主筋周围弯曲位置的粘结。FRP 条是芳纶、碳、玻璃以及玻璃和碳 FRP 的混合物。垂直腿在弯曲部分的开始处未粘合,弯曲半径是钢筋直径的两倍($r/d = 2$)。长坂等。据报道,用 FRP 箍筋加固的混凝土梁的极限抗剪承载力由弯曲部分箍筋的拉伸断裂或对角裂缝之间形成的混凝土支柱的压碎决定。他们还发现,弯曲 FRP 钢筋的抗拉强度仅为直钢筋的 25%–80%。Nagasaka 等人研究的主要贡献之一是发现

弯曲能力降低的程度取决于FRP复合材料的材料成分。

Ehsani等人通过36次直接拉拔试验研究了90度钩形GFRP钢筋在混凝土中的粘合行为。Ehsani等人研究的主要参数是弯曲FRP钢筋的强度能力与混凝土抗压强度($f'c$)之间的关系,其在28和56MPa之间变化。其他检查的参数包括弯曲半径与FRP钢筋直径比($r/d = 0, 3$)(直径、 $d = 9.5、19.0$ 和 28.6 毫米)、嵌入长度和超出钩的尾部长度(l_c)。在这些测试中,拉伸载荷通过夹持系统水平施加。Ehsani等人发现弯曲能力受弯曲半径和钢筋直径的影响很大。当使用 $r/d = 3$ 时,抗弯能力在极限抗拉强度的64%到70%之间,并且当使用更高的混凝土强度时,抗弯能力趋于增加。根据他们的结果,作者建议GFRP挂钩的最小弯曲半径为 $3d$,尾部长度为 $12d$,因为超过 $12d$ 的尾部长度对弯曲钢筋的强度没有有益影响。随着弯曲能力随着嵌入长度的增加而增加,Ehsani等人还建议90°标准GFRP钩的最小开发长度为 $16d$ 。本研究结果证实,混凝土强度、埋设长度和尾长是影响FRP钢筋弯曲部分的重要参数。不幸的是,Ehsani等人的研究没有考虑使用的复合材料类型或可能影响FRP钢筋弯曲能力的不同弯曲几何形状。

先前的研究还研究了FRP箍筋中弯曲的影响,但使用的几何形状与传统钢箍筋中使用的几何形状相似。在这些条件下,FRP箍筋的小角半径往往会限制混凝土梁的抗剪能力,通常在弯曲部分附近观察到过早的破坏。为了研究热塑性FRP在混凝土梁中作为抗剪增强材料的破坏行为,Carrier等人在拉挤成型过程中对由尼龙/碳和尼龙/芳纶FRP纤维制成的热塑性FRP箍筋进行了弯曲试验。热塑性FRP条带在实验室中通过加热弯曲以形成剪切连接的闭合形状,内部弯曲半径为12.7毫米。使用类似于ACI B.5方法的测试设置评估了热塑性FRP链接的弯曲能力。热塑性FRP钢筋的抗弯能力为直线部分的极限抗拉强度的25%,并且在箍筋的弯曲部分观察到所有测试样品的失效。

Ueda等人研究了部分嵌入混凝土块中的FRP箍筋的性能,旨在模拟穿过FRP箍筋的剪切裂缝。Ueda等人的研究中使用的6毫米直径FRP棒是编织的环氧树脂浸渍芳纶纤维。研究中的主要变量是嵌入长度和人工裂缝到弯头的距离。张力通过钢板和钢棒传递到轴承板上。试验装置采用ACI B.5方法,只是两个混凝土块之间的自由距离不是200mm,而是人工裂缝宽度。人造裂缝以0.5毫米的间隙开始,并随着拉力施加在FRP样品的弯曲部分上而开始张开。上田等人。还进行了有限元分析(FEA),以评估弯曲区域中发展的应力应变场的性质。他们的结果表明,弯曲能力在纤维方向的最终能力的40%和100%之间变化。FEA表明在弯曲的内部部分产生了高应变,这被认为是失效开始的位置。对于100

mm的埋置长度,破坏应力高于直杆的标称强度。Ueda等人进行的数值分析。可能是第一个关注FRP钢筋弯曲部分的应力应变场的研究。他们的结果也与之前的研究一致,即过早失效主要发生在弯道附近。

二、已确定的FRP增强材料抗弯能力的ACI测试方法

已经提出了不同的测试来计算弯曲钢筋的强度降低。例如,ACI 440.3R建议使用B.5方法(弯杆承载力)和B.12方法(拐角半径)。B.5方法通过测试(受拉)FRP C形箍筋的直线部分来测量FRP的极限承载力,该箍筋的弯曲端嵌入两个混凝土块中。测量弯曲FRP钢筋的弯曲能力,并将其与钢筋的极限抗拉强度进行比较,以获得弯曲效应引起的强度折减系数。B.12方法使用测试设备测量拐角半径对FRP钢筋抗拉强度的影响。该装置在U形FRP中施加张力,该张力反作用于安装在轭上的弯曲部分。

ISIS Canada和ACI 440.6M-08建议使用ACI B.5或B.12方法来确定弯曲FRP增强材料的弯曲能力。Ahmed等人通过使用B.5方法测试4个CFRP箍筋试样和使用B.12方法测试12个GFRP箍筋试样,比较了两种ACI方法。艾哈迈德等人。得出的结论是,B.5测试方法对FRP箍筋的抗弯能力产生了更真实的结果,因为测试布置更好地模拟了嵌入混凝土中的箍筋的实际机制。当外部应用FRP复合材料时,ACI B.12方法会产生更真实的结果。

根据本节的回顾,很明显ACI指南仅提供了两种标准测试配置来评估FRP增强材料的弯曲能力。在这两种方法中,ACI B.5方法对于检查用作抗剪增强材料的FRP复合材料的弯曲强度是最可行的。然而,实际上,简单的拉拔测试已在文献中广泛使用,因为该设置可以实际实现,并且可以在设置中轻松安装弯曲几何形状、嵌入长度和尾部长度等参数。相反,ACI B.5和B.12方法在测试设置中需要更多细节,并且必须仔细监测所施加载荷的偏心度。文献中几种测试方法进行的弯曲测试的结果被用于开发弯曲能力预测模型的过程,并将在下一节中详细描述。

三、预制玻璃钢复合材料及未来挑战

过去,用于制造复杂或定制FRP形状的方法非常昂贵,并且需要复杂的制造过程。如今,在计算机自动控制 and 3D打印的帮助下,目前建筑市场上已经出现了各种形状的玻璃钢增强材料。已开发出一种先进的纤维缠绕制造工艺,其中将浸渍树脂的纤维缠绕在专门设计的心轴上,以生产定制的闭合形状,例如剪切马镫。在这些预先弯曲的闭环箍筋中,材料围绕模具缠绕成一个大箍筋。固化过程完成后,取出模具,然后将大马镫切成适当宽度的小马镫(例如,预弯曲的开放/闭合马镫)。先进的长丝缠绕工艺可以在需要的地方生产出具有抗拉强度的定制FRP增强材料。Lee等人的实验研究证明,先进的长丝缠绕形成了适合制造封闭式FRP箍筋的宽而薄

的横截面的纤维。这种方法还允许快速准确地制造具有一致材料质量和均匀横截面的钢筋笼。这是因为缠绕系统允许弯曲的内半径比传统的开放式箍筋更紧，因为纤维不需要在树脂聚合之前弯曲直拉挤棒时需要相互滑动。

抗剪钢筋通常由拉挤钢筋在树脂聚合之前制成圆形、矩形和其他形式，例如螺旋形马镫。最近的一项研究报告称，使用纤维缠绕生产的预制 3D FRP 钢筋笼已成功用于混凝土构件。3D 增强玻璃钢保持架的制造过程包括湿法和干法缠绕工艺。在湿法缠绕工艺中，每层纤维都用双组分环氧树脂浸渍，用聚四氟乙烯工具挤压以去除多余的纤维，然后缠绕在模具上。在脱模之前，马镫在室温下固化 72 小时。在干法缠绕过程中，预浸丝束缠绕在模具上，然后装入真空袋中并在 120℃ 下固化 4 小时。从弯曲钢筋测试中获得的结果表明，使用缠绕 CFRP 代替传统的圆形 CFRP 箍筋在施工灵活性方面具有优势，而且成本更实惠，但它也有助于减轻弯曲拐角处的强度降低。

虽然目前存在用于生产用于工程应用的复杂 3D 成型 FRP 复合材料的先进技术，但这些工程产品在设计寿命期内用于混凝土结构的可行性和耐用性之间仍然存在差距。在充分利用成型 FRP 增强材料在土木工程应用中的全部功能之前，应进行结构方面的全面测试和耐久性测试。由于 FRP 钢筋制造的性质及其材料的各向异性特性，当 FRP 用作钢筋时，还应使用高级 FEA 来评估混凝土构件的结构行为。

结论

本文对弯曲 FRP 复合材料的强度退化进行了广泛的文献综述，并讨论了现有预测模型在计算 FRP 增强材料弯曲能力时的性能。文献综述表明，FRP 筋作为混凝土内部钢筋的使用仍仅限于特定的结构元素，尚未扩展到整个结构。其原因可能与市场上弯曲或成形加强元件的有限可用性及其有限的结构性能有关。以前的研究 hvv4 表明，复合钢筋弯曲部分的机械性能在多轴应力组合下显著降低，弯曲处的抗拉强度可低至直线部分产生的最大抗拉强度的 25%。弯曲试样的容量似乎不随 r/d 比（目前在 JSCE 的方程中定义）呈线性变化，而且似乎不仅仅是弯曲几何形状的函数。相反，粘合特性似乎在控制沿复合材料嵌入部分的应力发展和决定其最终行为方面很重要。

然而，值得注意的是，本分析中考虑的模型（包括基于宏观力学失效的模型）均未考虑混凝土强度、埋置长度和尾部长度的影响。这些参数被认为在确定嵌入混凝土中的弯曲钢筋的行为方面起着重要作用，并且可能是测试数据中观察到的大变化的原因。未来的研究应该集中在使用先进的有限元建模来捕捉单向 FRP 复合材料在微观层面的真实行为。这包括输入横向和纵向材料属性的完整定义。应对 FRP 复合材料进行双轴试验以获得

材料的破坏面。然而，弯曲 FRP 增强材料的耐久性应在设计寿命期内进行评估。已开发出一种先进的纤维缠绕制造工艺，将浸渍树脂的纤维缠绕在专门设计的心轴上，以产生定制的闭合形状，并成功地用作混凝土构件的 3D 钢筋笼。然而，在完全替代混凝土结构中的内部钢筋之前，应进一步研究长期耐久性。

参考文献：

- [1] Garcia, R.; Jemaa, Y.; Helal, Y.; Guadagnini, M.; Pilakoutas, K. Seismic strengthening of severely damaged beam-column RC joints using CFRP. *J. Compos. Constr.* 2014, 18, 1 - 10.
- [2] Garcia, R.; Hajirasouliha, I.; Pilakoutas, K. Seismic behaviour of deficient RC frames strengthened with CFRP composites. *Eng. Struct.* 2010, 32, 3075 - 3085.
- [3] Yang, X.; Wei, J.; Nanni, A.; Dharani, L.R. Shape Effect on the Performance of Carbon Fiber Reinforced Polymer Wraps. *J. Compos. Constr. ASCE* 2004, 8, 444 - 451.
- [4] Robert, M.; Benmokrane, B. Effect of aging on bond of GFRP bars embedded in concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2010, 32, 461 - 467.
- [5] Williams, B.; Kodur, V.; Green, M.; Bisby, L. Fire endurance of fiber-reinforced polymer strengthened concrete T-beams. *J. ACI Struct.* 2008, 105, 60 - 67.
- [6] Alsayed, S.H. Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Cem. Concr. Compos.* 1998, 20, 1 - 11.
- [7] Katz, A.; Berman, N. Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete. *Cem. Concr. Compos.* 2000, 22, 433 - 443.
- [8] Saafi, M. Effect of fire on FRP reinforced concrete members. *Compos. Struct* 2002, 58, 11 - 20.
- [9] Bisby, L.A. Fire Behavior of Fiber-Reinforced Polymer Reinforced or Confined Concrete. Ph.D. Thesis, Queen's University, Kingston, ON, Canada, 2003.
- [10] Adimi, R.; Rahman, H.; Benmokrane, B.; Kobayashi, K. Effect of temperature and loading frequency on the fatigue life of a CFRP bar in concrete. In Proceedings of the second international conference on composites in infrastructure (ICCI-98), Tucson, Arizona, 5 - 7 January 1998; pp. 203 - 210.
- [11] Hawileh, R.A.; Naser, M.Z. Thermal-stress analysis of RC beams reinforced with GFRP bars. *Compos. Part B Eng.* 2012, 43, 2135 - 2142.
- [12] Hawileh, R.; Naser, M.; Rasheed, H. Thermal-stress finite element analysis of CFRP strengthened concrete beam exposed to top surface fire. *Mech. Adv. Mater. Struct.* 2011, 18, 172 - 180.