

钢筋混凝土和预应力桥梁的修复材料与修复方法

穆罕默德·加法里，阿津·穆斯塔法

隶属：美国土木与环境工程系

摘要：美国全国的桥梁结构正在老化，需要维修，或者在某些情况下需要完全更换。与完全更换损坏或损坏的桥梁部件（如大梁）的更高成本相比，修复决定在桥梁所有者中很常见，因为其经济可行性。使用适当的维修方法，作为一种长期或短期的解决方案，可以带来其他方式无法实现的好处，例如节省大量时间和成本。此外，适当的维修方法可以帮助避免不利的环境影响、服务中断、附近基础设施负担过重以及当地反对建设。本文的主要目的是综合研究中所提出的钢筋混凝土桥梁的修复方法和材料，即最先进的以及最先进的已建立方法，并且讲述了一般维修过程中的不同步骤。这旨在使研究人员、工程师和决策者能够更方便地比较可用的修复方法，以根据经济和环境要求以及结构和施工条件为特定项目找到最佳修复方法。

关键词：桥梁大梁修复；玻璃钢材料；剪切裂缝；超高车辆碰撞；EB修复方法；NSM修复方法；锚固系统

Synthesis of Repair Materials and Methods for Reinforced Concrete and Prestressed Bridge Girders

Mohamed Ghaffary, Azin Moustafa

Affiliation: Department of Civil and Environmental Engineering, USA

Abstract: Bridge structures nationwide across the United States are aging and in need of repair or, in some cases, full replacement. Repair decisions are common among bridge owners because of the economic feasibility when compared to the higher cost of full replacement of damaged or deteriorated bridge components such as girders. Using a proper repair approach, as a long-term or just a short-term solution, can lead to benefits that could not be achieved otherwise such as considerable savings in both time and cost. Additionally, an appropriate repair approach can help avoid adverse environmental impacts, interruptions to service, overburdening of nearby infrastructure, and local opposition to construction. The main objective of this paper is to provide a synthesis of the repair methods and materials for reinforced concrete bridge girders proposed in research studies, i.e., state-of-the-art as well as state-of-the-practice established methods. Different steps in the general repair procedure are explained first. Next, a detailed description of three common bridge girder deficiencies, i.e., shear, flexural, and fire damage, is provided. For each damage type, the main causes and common solutions found in the literature are presented. The authors then provide specific recommendations to each repair procedure. This is intended to enable researchers, engineers, and decision makers to compare the available repair methods more conveniently to find the optimal repair approach for specific projects based on economic and environmental requirements as well as structural and construction conditions.

Keywords: Bridge girder repair; FRP-based materials; shear cracks; overheight vehicle collision; EB repair approach; NSM repair approach; anchorage system

引言：

美国的大部分交通基础设施已有 50 多年的历史。在桥梁结构中，该国 607, 000 多座桥梁中约有 30% 和 163, 000 座目前被归类为结构缺陷或功能过时。前者被描述为具有缺陷的桥梁，例如需要修复的腐蚀元件。然而，后者可以被称为与当前规范要求不一致的桥梁，例

如狭窄的路肩或车道宽度，或超大型车辆的净空不足。桥梁大梁损坏的常见来源是以下任何一种原因或它们的组合：（1）氯化物侵蚀、腐蚀和劣化；（2）疲劳损伤累积；（3）超高车辆撞击等意外损坏；（4）升级的装载要求和更严格的评估规范；（5）初始设计缺陷、施工缺陷和缺乏维护。

适用于大梁损坏的桥梁的可用选项是“离开并监控”、“修复”或“更换”大梁。Harries 等人将桥梁大梁的损坏强度分为轻微、中度和严重程度。更换桥梁可能会导致经济损失和车辆交通不便，并且与维修相比通常是更昂贵的选择。预应力工字梁的维修成本占上部结构更换成本的 35% 至 69%。此外，它还可能导致环境影响、服务中断、附近基础设施负担过重以及当地反对建设。研究表明，平均每英尺大梁更换大梁的成本约为 8000 美元，非常昂贵。因此，在某些项目中，由于桥梁所有者面临预算限制，改造是唯一的选择。但是，美国对缺陷桥梁的评估和加固估计超过 1400 亿美元，这仍然是一笔巨款。这些因素使得桥梁结构的修复和加固成为所有国家的重要课题，应该以有效和经济的方式进行。评估适当修复方法的一些重要因素是安全性、修复时间和经济性。否则，在没有经济有效的修复技术的情况下，桥梁应该被认为是存在缺陷的。由于缺乏维护和维修资金、结构部件的环境退化和/或车辆重量增加，全国九分之一的桥梁就是这种情况。为了在 2028 年之前消除美国的桥梁不足积压，每年需要投资 205 亿美元。在实践中，大多数修复方法可能会引起行业和交通部（DOT）决策者对其在有效加固缺陷桥梁方面的表现的担忧。这是因为对于大多数修复技术，缺乏现成的实验室结果。

本研究的主要目的是收集有关迄今为止已在实践中使用或仅通过研究项目提出的不同材料和桥梁大梁修复实施方法的信息。此处回顾和总结了 200 多项研究，重点关注钢筋混凝土（RC）桥梁大梁的修复，这些大梁占美国桥梁库存的 60% 以上。为此，对损坏的 RC 桥梁的一般修复程序所需的步骤进行了说明，无论损坏类型如何。

一般维修程序

典型维修程序的主要步骤可概括为八个步骤：（一）检查和监控；（二）首先作出选择修复材料的决定；（三）作出选择修复方式的第二次决定；（四）表面处理；（五）修复设计（六）修复材料的应用；（七）修复材料的预应力，如果适用的话；（八）锚固系统；（九）链拼接，如果需要的话。接下来将介绍每个步骤的最新技术和实践的总结。

一、检查和监控

这可以在定期或使用的基础上执行，或者根据损坏或极端负载的报告来确定损坏的严重程度、原因和预后。应确定结构的现有承载能力。应确定任何结构性缺陷及其原因。还应了解混凝土基材的状况。还应指定的其他参数包括：结构构件的现有尺寸；裂缝和剥落的位置、大小和原因；钢筋腐蚀的位置和程度；任何活性腐蚀的存在；现有钢筋的质量和位置；混凝土的现场抗压强度；以及混凝土的稳固性，尤其是加固材料将与混凝土粘合的所有区域的混凝土覆盖层。然后，就桥梁所需的行动

类型做出决定，可以是修理、拆除，还是不理睬并继续监控。在做出此决定时，主管当局将考虑与拆除或更换相比，维修的成本和耐用性。

二、选择修复材料

如果需要修复，那么下一步就是选择合适的修复材料。材料的可用性和耐用性、现场处理的便利性、成本效益、结构元件的类型和条件以及结构的针对性增强是做出此决定时应考虑的因素。RC 桥梁大梁修复常用的材料如下：

纤维增强复合材料：纤维增强复合材料是两种不同材料（即增强纤维和基体）的组合。基体和纤维的类型、纤维的取向以及基体与纤维含量的比例都会影响所得复合材料的性能。使用纤维增强复合材料加固混凝土构件，最初用于航空航天应用，始于 1980 年代中期，近年来，由于其优越的特性，特别是在桥梁修复应用中得到普及，例如：高强度-重量比，防腐性能，高抗拉强度，抗虫和真菌，低导热性，易于安装，应用灵活。纤维增强复合材料比钢轻约 85% 至 73%。这意味着易于处理并减少现场设备和劳动力需求。尽管与钢相比，它们的成本更高，但由于它们具有上面列出的优越特性，它们通常是长期维修项目的首选强化方法。而经过适当腐蚀处理的钢材可能是短期改造项目的更好选择。

三、选择修复方法

选择修复材料后，接下来的决定是选择合适的方法将材料应用于损坏的大梁。有几个因素会影响这个决定：修复技术是否在市场上可用，以及梁类型（箱形梁或工字梁），其中梁横截面的形状在选择修复技术时很重要修复技术。例如，对于矩形梁，最常见的修复方法是完全包裹构件，另一方面，由于存在翼缘，这对于 T 形梁是不切实际的。其他因素包括：主要修复极限状态，使用给定材料可以修复的损伤严重程度，疲劳性能，是否需要在未损伤能力之外进行强化，方法可以与绞线拼接相结合，移动速度，可施工性，是否需要专门的劳动力，是否需要专用工具，是否需要起重设备，桥梁下方的关闭量，典型维修时间，修复过程对环境的影响，以及耐久性。另一个需要考虑的因素是：正在修复的元件尺寸的变化，因为它影响元件的整体美观，并可能增加额外的劳动力成本和结构服务的中断。这是由所用强化材料的厚度控制的。最后但至关重要的两个考虑因素是：成本和美观。将修复材料应用于受损梁的方法有多种，总结如下：

外键合（EB）技术：这是加固钢筋混凝土梁最流行的方法。在该方法中，使用适当的粘合材料或机械紧固件将加强材料附接到梁的外表面。目前，美国有 24 个公路部门使用外部粘合 FRP 包裹物，其他几个州也正在采用它。与其他技术相比，这种方法的优点之一是无需移

除混凝土部件或钻入截面，因此易于应用并且暴露或损坏现有钢筋的风险较小。另一个好处是它可以保护修补混凝土和钢筋免受水和盐的侵入，从而防止腐蚀和变质。否则，仅通过混凝土补丁实施的修复在收缩和服务载荷的组合下容易出现裂缝。然而，加强元件的性能高度依赖于混凝土和加强材料之间的结合。这对于 FRP 强化元件尤其重要，因为在有效应变远低于 FRP 复合材料所能达到的极限应变时发生脱粘失效。因此，没有使用 FRP 的全部容量。此外，失败将以脆弱的方式。为了有效地使用 EB 技术，必须克服脱粘失效模式。这种方法还具有较低的耐火性和较高的车辆碰撞易损性。随着时间的推移，EB 技术中的饱和树脂会受到紫外线的不良影响。此外，它们的特性在暴露于高温时会降低。为了部分克服这个问题，可以使用保护层来限制紫外线照射并提供一些防火保护。EB 方法的上述问题已将注意力转移到其他方法，例如接下来解释的近表面安装方法。

近表面贴装 (NSM) 技术：这种方法最初是在 1940 年提出的。它是一种将 FRP 筋嵌入混凝土表面以提高 RC 结构性能的施工技术。虽然最初钢缆被用作加固过程的一部分，但后来由于钢的腐蚀，它们被 FRP 材料取代。FRP 材料通常以使用拉挤成型工艺制造的具有矩形横截面（条）或圆形横截面（棒）的棒材形式使用。钢筋可以喷砂或变形，但研究表明变形钢筋具有更好的粘合性能。此外，一些研究人员已经证明，条带可以导致更有效的修复，因为它们在 FRP 和粘合剂界面之间提供了增加的表面积，条带在拉伸断裂中失败并实现与混凝土的完全复合作用。这种方法两个主要优点是：(1) 与 EB 方法相比，可以实现更高的粘合强度，因为修复材料完全封闭在环氧树脂中，这意味着粘合的表面积更大，(2) 由于需要更少的材料使用对增强的键行为

嵌入式钢筋：即使使用 NSM 方法，仍然会发生过早脱粘，导致普通 FRP 修复材料的抗拉能力无法完全发挥作用。这更可能发生在具有 T 形或 I 形横截面的梁中。此外，研究表明，在 NSM 方法中，使用 NSM 钢筋的覆盖混凝土可能会发生分离，这会阻止修复方法充分发挥作用。因此，除非提供适当的锚固，否则使用 NSM 或 EB 方法可能无法充分利用修复材料的抗拉强度。这激发了另一种方法，即在梁内部很好地嵌入增强材料，即嵌入到混凝土芯中超出覆盖层或表面凹槽，以增加粘合。这是因为混凝土芯处理应力传递到加固材料，与混凝土覆盖层相比，它可以提供更好的约束，从而改善粘合行为。此外，在这种深度嵌入技术中，防火和防破坏比 NSM 方法更有效。

四、表面处理

表面处理，即复合材料表面的清洁和粗糙化是修复过程中的关键步骤，可以提高粘合强度。处理不当的表

面会导致脱粘或分层。喷砂、喷水、研磨、刷涂、气压、圆角、压力清洗混凝土表面、表面修补和尼龙剥离层技术通常用于此目的。未进行适当的表面处理可能会由于混凝土基材的分层而损坏修复材料。

五、维修设计

修复设计是确保所选修复材料以能够提供足够强度和耐用性的配置应用的重要步骤。可能需要不同的设计方法，具体取决于损坏的类型、损坏的程度、维修的预期耐久性、维修应用资源的可用性等。此外，可能会使用设计优化技术来实现最有效的结果。

六、修补材料的应用

表面处理后的下一步是修复材料的应用。根据所使用的修复方法，即 EB 技术、NSM 方法或嵌入式加固，修复材料应以不同的方式和配置应用。

EB 技术：使用 FRP 材料的 EB 修复技术通常以三种方式实施：(1) 湿铺层，(2) 预浸，或 (3) 预固化。在湿铺法中，树脂既可以浸透纤维，又可以将板材粘合到混凝土表面。干纤维片在现场用饱和树脂浸渍，并使用待固化的相同树脂粘合到混凝土基材上。通常，饱和和固化过程是在现场完成的，但它们也可能在制造商的工厂异地实施。这种方法具有玻璃钢片材的灵活性的优点。因此，它适用于相对光滑但具有陡峭或弯曲几何形状的表面。这里需要相对光滑的表面，以确保在混凝土和加固材料之间实现适当的粘合。湿铺层应用适用于柱包覆和 U 形包覆应用，但一般不推荐用于预应力混凝土梁的弯曲修复。在预浸渍或通常称为预浸方法中，纤维片在异地饱和并部分固化。在现场，它们使用树脂粘合到混凝土表面，通常需要额外加热才能完成固化。在预固化方法中，树脂仅用于将采购的（纤维和基质已经结合）层压板、条带或片材粘合到混凝土表面。纤维像预制混凝土构件一样在场外被饱和和固化。预固化的条带可从各种制造商处获得，具有不同的尺寸和多个等级。至于 CFRP 带材，高强度 (HS)、高模量 (HM) 和超高模量 (UHM) 等级已在市场上销售。在这种方法中，修复材料是刚性的，如果需要更灵活的应用，则不能弯曲。因此，应用仅限于直线或略微弯曲的表面。当结构表面光滑平整或使用湿铺法不实用时，使用此方法。

NSM 技术：首先，在混凝土表面制作凹槽，并将切口之间的混凝土凿掉。然后，清洁凹槽，并使用压缩空气去除灰尘。为了获得干净的最终外观，可以在凹槽的侧面贴上胶带。使用填充材料（环氧树脂、水泥浆等）将加强材料（棒材和薄条）固定在凹槽中。最后，使用抹子平整粘合剂表面，并在粘合剂固化之前去除胶带。

七、修复材料的预应力

为了提高修复效率，可以对 EB 和 NSM 方法的材料进行预应力处理。预应力在 1950 年代首次用于加固桥

梁。由于元件中产生的负力矩，它使构件能够承受更高的载荷并覆盖更长的跨度长度。它相对较快，并且可以在不影响流量的情况下完成。它还有助于提升构件在承载能力和适用性方面的性能，例如，受控挠度和裂纹萌生，这是其他方式无法实现的。预应力修复材料的一些优点是：充分利用材料的高强度，提高钢筋混凝土梁的使用寿命，限制旧裂缝的扩展，延缓新裂缝的形成，增强梁的刚度，更好地利用加固材料、混凝土中更小和更好分布的裂缝、钢筋的卸载（应力消除）导致更高的钢材屈服载荷，以及恢复服务水平位移或结构性能的潜力。预应力修复材料还对混凝土以及任何修补材料提供了限制效果，因为它使混凝土处于受压状态，进而导致开裂发生延迟和裂缝宽度减小。但是，应该注意的是，一般来说，不同水平的预应力会导致不同的失效模式。此外，尽管预应力修复材料具有所有优点，但端部锚固系统的设计需要进行准确且昂贵的分析，因为存在较大的剪力、较大的集中压缩力以及由偏心后张力引起的力矩。如果需要，锚固系统本身也应该后张。

八、锚固系统

对于高剥离或剪切应力的情况，可以使用锚固系统来延迟强化系统（例如 FRP 材料）的脱粘。适当的锚固系统可能允许使用不符合设计规范规定的加固计划，从而允许修复材料即使在发生脱粘后也能继续承载载荷，从而增加其贡献。它可以实现更大的强化或使用更广泛的可能配置和材料特性。到目前为止，已经引入了不同的锚固系统，具体取决于它们所使用的加固方法。一些示例包括：修复材料的附加水平条、通过粘合剂粘合的预切槽将修复材料嵌入梁翼缘、涉及螺栓和板的各种机械锚固系统以及扇形织物锚固。

基于纤维的锚具有重量轻且无腐蚀性的优点。此外，由于使用 FRP 基或织物基材料在大梁修复中很常见，因此使用兼容的锚固材料也是有利的。使用许多锚固系统的一个缺点是增加了安装成本和复杂性。

九、绞接（如果需要）

当预应力梁中一根或多根预应力钢绞线损坏时，可用钢绞线拼接进行修复。它是一种快速、高效、廉价的修复方法，用于重新连接损坏或断裂的预应力钢绞线，以恢复预应力。不能仅依靠绞线接头来完全恢复绞线或正在修复的元件的最终强度。这是因为它们仅限于发展它们所连接的股线的 85% 的标称强度（0.85 fpu）。为了提高它们的效率，拼接应该交错并且限制在一个大梁中拼接 15% 的钢绞线。应该注意的是，市售接头仅适用于最大 0.5 的股线直径。此外，绞线接头是内部应用，因此几乎可以与任何外部应用一起使用。NSM 方法可能是一个例外，因为钢绞线夹头和 NSM 槽之间可能会发生干扰。但是，它们可以与使用 FRP 或 FRCM 等修复材料的

外部粘合修复方法相结合。

结论

由于美国桥梁结构的老化以及由于相关的更高成本和更长的停机时间导致交通中断和不便，完全更换大梁并不有利，因此桥梁大梁修复是一个重要主题。本研究的目的是为研究人员、工程师和决策者提供全面的参考，以比较不同的 RC 桥梁大梁修复方法，并找到适合其特定修复问题的最佳方法，以提供最高的经济性、效率和安全性。

参考文献：

- [1]Al-Saadi, N.T.K.; Mohammed, A.; Al-Mahaidi, R. Assessment of residual strength of concrete girders rehabilitated using NSM CFRP with cementitious adhesive made with graphene oxide after exposure to fatigue loading. *Constr. Build. Mater.* 2017, 153, 402 - 422.
- [2]Oudah, F.; El-Hacha, R. Fatigue behavior of RC beams strengthened with prestressed NSM CFRP rods. *Compos. Struct.* 2012, 94, 1333 - 1342.
- [3]El-Hacha, R.; Gaafar, M. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using prestressed, near-surface mounted CFRP bars. *PCI J.* 2011, 56, 134 - 151.
- [4]Badawi, M.; Soudki, K. Fatigue behavior of RC beams strengthened with NSM CFRP rods. *J. Compos. Constr.* 2009, 13, 415 - 421. Nordin, H.; Täljsten, B. Concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP. *J. Compos. Constr.* 2006, 10, 60 - 68.
- [5]Babaeidarabad, S.; Loreto, G.; Nanni, A. Flexural strengthening of RC beams with an externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix. *J. Compos. Constr.* 2014, 18, 04014009.
- [6]Pino, V.; Akbari Hadad, H.; De Caso y Basalo, F.; Nanni, A.; Ali Ebead, U.; El Refai, A. Performance of FRCM-strengthened RC beams subject to fatigue. *J. Bridge Eng.* 2017, 22, 04017079.
- [7]Rahimi, H.; Hutchinson, A. Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates. *J. Compos. Constr.* 2001, 5, 44 - 56.
- [8]Papakonstantinou, C.G.; Petrou, M.F.; Harries, K.A. Fatigue behavior of RC beams strengthened with GFRP sheets. *J. Compos. Constr.* 2001, 5, 246 - 253.
- [9]Lamanna, A.J.; Bank, L.C.; Scott, D.W. Flexural strengthening of reinforced concrete beams using fasteners and fiber-reinforced polymer strips. *ACI Struct. J.* 2001, 98, 368 - 376.
- [10]Barnes, R.A.; Mays, G.C. Fatigue performance of concrete beams strengthened with CFRP plates. *J. Compos. Constr.* 1999, 3, 63 - 72.