

用纤维增强聚合物加固钢筋混凝土板以对抗冲切问题： 综述

拉尼亚·穆罕默德，马尼什·哈塔布，奥萨马·凯瓦拉玛尼

隶属机构：阿布扎比土木工程学院

摘要：钢筋混凝土平板或平板仍然是最受欢迎的地板系统之一，因为它能够被快速地施工，并且在与隔板相关的位置具有灵活性。然而，缺乏双向剪切强度的平板/平板楼板系统容易在板柱连接处发生脆性破坏，这种破坏可能会蔓延并导致结构系统的较大部分逐渐倒塌。双向剪切强度不足可能是由于设计/施工错误、材料强度不足或过载造成的。片材和/或带材形式的纤维增强聚合物（FRP）复合层压板用于结构缺陷的平板系统，以提高双向剪切能力、抗弯强度、刚度和延展性。玻璃FRP（GFRP）已成功地被使用，但碳FRP（CFRP）板/条/层压板更常用作其他昂贵和/或具有挑战性的方法（如柱扩大）的实用替代品。本文回顾了有关在柱/板交叉处利用FRP板/带和层压板以提高平板的冲切强度的方法和有效性的文献。

关键词：平板；双向剪切；碳纤维增强聚合物；玻璃纤维增强聚合物

Strengthening of RC Slabs with Fibre-reinforced Polymer Lamination to Against Punching Shear: A Review

Rania Mohamed, Manish Khattab, Osama Kewalramani

Affiliation: School of Civil Engineering, Abu Dhabi

Abstract: Reinforced concrete flat slabs or flat plates continue to be among the most popular floor systems due to speed of construction and inherent flexibility it offers in relation to locations of partitions. However, flat slab/plate floor systems that are deficient in two-way shear strength are susceptible to brittle failure at a slab-column junction that may propagate and lead to progressive collapse of a larger segment of the structural system. Deficiency in two-way shear strength may be due to design/construction errors, material under-strength, or overload. Fiber reinforced polymer (FRP) composite laminates in the form of sheets and/or strips are used in structurally deficient flat slab systems to enhance the two-way shear capacity, flexural strength, stiffness, and ductility. Glass FRP (GFRP) has been used successfully but carbon FRP (CFRP) sheets/strips/laminates are more commonly used as a practical alternative to other expensive and/or challenging methods such column enlargement. This article reviews the literature on the methodology and effectiveness of utilizing FRP sheets/strips and laminates at the column/slab intersection to enhance punching shear strength of flat slabs.

Keywords: Flat slab; two-way shear; carbon fiber reinforced polymers; glass fiber reinforced polymers

引言：

由于其建筑的灵活性和施工的速度，不受梁支撑的钢筋混凝土板（也称为平板）是建筑施工行业中最受欢迎的楼板系统。建造平板系统的速度快主要归功于节省了建造支撑梁模板所需的时间。它们还为设计师提供了在楼板上的任何位置放置重型和轻型隔板的灵活性，而无需遵守梁的位置。然而，平板很容易在板柱连接处发

生脆性双向剪切破坏（即冲切破坏），这是由剪切和不平衡力矩的传递引起的。尽管冲剪的力学原理尚未完全了解，但多年来已经开发了许多方法来防止这种类型的故障。

板柱连接冲孔失效的四个基本阶段被普遍认可。首先，弯曲和剪切裂缝形成在靠近加载区域面的板坏的受拉区。其次，靠近加载区域的板坏受拉钢筋屈服。第三，

弯曲和剪切裂缝延伸混凝土的受压区。最后,失效发生在钢筋的屈服超出荷载区域附近之前。冲压失败的一个可能原因是板坯中压缩区的破裂。破坏的表面形成一个由倾斜的临界裂纹图案包围的圆锥形,该裂纹图案与平行于到达受拉侧的钢筋的水平裂纹相遇。当板柱连接被加载时,初始响应是线弹性的,然后是降低连接刚度的开裂。板坯受压区的偏斜剖面可以看作是直线,而受拉区的偏斜剖面显示出轻微的不连续性,尤其是当剪切裂缝与钢筋相交时。Moe 测试了 43 块板并研究了 140 个基脚的结果以及文献中报道的 120 块板,并注意到在 60% 的极限荷载下普遍出现倾斜裂缝。这些倾斜的裂缝从弯曲裂缝开始,然后迅速延伸到中性轴附近,最后发展得相当缓慢,但只有很窄的受压区深度不受影响。在结构设计阶段,如果超过抗剪承载力,可以设计抗剪钢筋来提高承载力。一些研究表明,在双向板中使用抗剪钢筋可以使冲切强度加倍。使用具有高抗拉强度的外部应用材料在柱-板接合处加固平板并不是从纤维增强聚合物(FRP)板材开始的。

带有钢地脚螺栓的钢板能够成功地提高平板的双向抗剪强度。Ebead 和 Marzouk 使用直径 19 毫米的 ASTM A325 螺栓在受拉侧安装 6 毫米厚的美国材料试验协会(ASTM) A6 板,从而加强了板柱连接处。当施加的载荷为中心时,钢板的极限荷载增加了 45%,当试样同时承受中心载荷和力矩时,钢板的极限荷载增加了 122%。FRP 板材和层压板的重量轻、柔韧性和高抗拉强度使其成为钢板的可行替代品。外接碳纤维增强聚合物(CFRP)片材在其端部锚固到混凝土上被证明可以增加冲切强度,尤其是在相对于柱方向倾斜应用时。混凝土平板的抗弯能力也可以通过将 CFRP 板、条或层压板粘合到受拉侧来增加。

钢筋通常用于在钢筋混凝土构件的受拉侧承受弯曲拉应力。Rasha 等人的研究得出结论,平板中柱上方的抗弯拉伸钢筋有助于提高平板的冲孔能力。抗弯钢筋的屈服强度是决定受拉钢筋所需量的因素之一。尽管如此,Dilger 等人指出,没有确凿的证据表明屈服强度对冲切能力有任何影响。

Ebead 和 Marzouk 对中心加载的 $1.9\text{ m} \times 1.9\text{ m} \times 0.25\text{ m}$ 平板试件的实验研究发现,当柱上的抗弯配筋率增加时,冲切时的极限承载能力与参考无钢筋平板样品相比增加了 54% 为 1%。同样,当抗弯抗拉能力为 0.5% 时,冲切的极限荷载与未增强试样相比增加了 36.5%。当施加中心载荷的柱周围区域用钢板用螺栓加固时,

与未加固的试件相比,加固的平板试件的刚度增加了 105%。此外,Caldentey 等人的研究表明,与弯曲钢筋通过交叉点的类似平板相比,当弯曲钢筋不通过板柱交叉口时,冲切强度会降低。

McHarg 等人研究了弯曲顶部钢筋分布对冲切能力的影响。研究人员注意到,与均匀分布的钢筋相比,当顶部弯曲钢的一部分被绑在柱子上时,冲切能力增加了 14%。1956 年 Elstner 和 Hognestad 的文章中提出的研究表明平板的冲切强度与抗压强度的立方根成正比。In á cio 等人发现,与正常强度混凝土相比,使用高强度混凝土时的冲切能力增加 43%,与正常强度能力相比,破坏强度更高。

Alexander 和 Simmonds 的试验表明,与较小的覆盖层相比,增加内部板柱连接处顶部抗弯钢筋的混凝土覆盖层厚度会增加双向抗剪能力。然而,与遭受较大粘结变形的具有较小混凝土覆盖层的板相比,较大覆盖层使行为更不坚硬。

一、选定规范和标准中的冲切强度

在检查 FRP 片材和带材对混凝土双向剪切强度的影响之前,评估建筑规范和设计标准中描述的混凝土固有双向强度是有用的。国际规范和标准在估计冲切能力的模型中有所不同。以下讨论的混凝土冲切能力有两种模型,第一种是美国混凝土协会代码 ACI 318,第二种是欧洲代码 2(EC 2)。

ACI 318 要求完整的纵向钢筋,以在垂直承载构件丢失或损坏的情况下提供剩余容量。Weng 等人的一项研究表明,完整性加固在平板的后冲孔行为中起着重要作用,并建议提供至少 0.63% 的完整性加固率。与平板冲切破坏有关的一个典型问题是,它的脆性可能会导致结构系统的大部分部分逐渐倒塌。Mohamed 等人讨论了双向剪切对触发渐进倒塌的影响,以及建议的设计/细节措施,以增强结构系统的故障后行为。

二、实验样品、FRP 加强模式和方法

以下部分包括了实验方案的细节、各种 FRP 加固模式和方法以及一些重要的研究成果的讨论。Binici 和 Bayrak 使用 25 毫米宽的垂直 CFRP 条来加强平板试样(2133 毫米 \times 2133 毫米 \times 152 毫米)以抵抗冲切。通过在装载区域周围冲出直径为 18 毫米的垂直孔来加固平板。该方法的一个实际缺点是可能会在柱子周围切割张力和/或完整性钢,这可能会导致故障。两个试样在加载区域的每一侧延伸的一条线上有四个孔,一个试样在加载区域的每一侧有六个孔,一个试样从加载区域的每

一侧延伸有八个孔。孔开始的距离等于负载区域表面的有效深度 ($d/4$) 的 1, 并且中心到中心的间距为有效深度 ($d/2$) 的一半。作者清楚地观察到, 在包含垂直条的孔之间能够使用对角 CFRP 条。

在提高冲切强度方面, 以抗剪钢筋的形式垂直应用 CFRP 优于在受拉侧粘合 CFRP 条/层压板。Sissakis 和 Sheikh 报告称, 通过以与板缝合类似的方式将 CFRP 带垂直应用到垂直于加载柱的恒定间距处创建的孔中, 冲切能力提高了 80%。

Harajli 和 Soudki 证明, 在板的受拉面上提供增强 CFRP 带, 与不包含用于加强目的的 CFRP 带的对照平板试样相比, 其冲切强度提高了 17% 至 45%。这种加强方法增加双向剪切强度的机制是通过限制拉伸裂缝的增长或通过增加连接处的抗弯强度。因此, 对柱区受拉滑台板进行加固, 可将其弯曲破坏模式转变为弯剪破坏或纯双向剪切破坏。作者用 1% 到 2% 的张力钢筋测试了 670 平方毫米的试样。加载柱为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$, 与板坯一体浇筑。使用了四种 CFRP 带材宽度 (50、100、150 和 200 mm)。仅在受拉侧使用条带不会影响冲切开裂程度, 并且保持在距加载柱面 $2.0 \times h$ (h = 板总深度) 的距离处。

El-Salakawy 等人得出结论, 在边缘柱周围平板的受拉面上应用 CFRP 或玻璃 FRP (GFRP) 带可增加抗弯刚度并延迟弯曲裂缝的开放, 从而提高冲切抗剪能力。根据 FRP 板材的面积和配置, 与未强化试样相比, 边柱冲切强度的增加范围为 2% 至 23%。作者检查了加强平板系统中边缘柱的有效性。试样为 $1540\text{ mm} \times 1020\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 厚, 支撑边柱为 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 。板坯在每个方向上用平均 0.75% 的拉伸钢和在每个方向上平均 0.45% 的压缩钢加固。L 形条用于垂直于自由边缘, 而直条则应用于平行于每个方向的主钢筋的受拉侧。CFRP 加固时 FRP 带宽度为 50mm, GFRP 加固时 FRP 带宽度为 75mm。

Chen 和 Li 的一项研究证实, GFRP 加强板通过充当外部抗弯加强件来增加冲切抗剪能力。低等级混凝土 (16.9 MPa) 的冲切能力增加百分比高于正常强度混凝土 (34.4 MPa)。然而, GFRP 板材将失效模式从弯曲冲压失效转变为脆性冲压失效。这项研究包括 $1000\text{ mm} \times 1000\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 的试样, 其中心装有 150 毫米方柱短柱, 以模拟平板中的内部柱。单向抗弯受拉钢筋配筋率为 0.59%, 垂直方向为 1.31%。织物形式的 GFRP 层压板以一层 (1.31 毫米厚) 或两层 (1.93 毫米厚) 的形式

应用。使用一层 GFRP 层压板将极限荷载从 17% 增加到 45%, 而使用两层则增加了极限, 具体取决于混凝土等级和配筋率。对于相同的条件, 使用两层层压板总是会增加极限荷载。

虽然 GFRP 板产生的冲切破坏模式与本文回顾的已发表文献一致, 但研究人员用 GFRP 织物覆盖了荷载柱下方的区域, 这对于建筑结构来说并不典型, 除了支撑屋顶的柱子。对于这项研究, 作者得出结论, BS 8110 和 JSCE 提出的双向剪切预测公式与他们的实验研究产生了一致的结果, 而 ACI 318 被发现更为保守。

Sharaf 等人观察到, 使用外部粘合的 CFRP 条加固柱周围受拉区的平板, 与参考未加固平板相比, 刚度从 29% 提高到 60%, 具体取决于钢筋的数量。类似地, 柱周围的受拉侧加强将冲切强度从 6% 提高到 16%, 具体取决于加强条的面积和图案。一般来说, CFRP 条可以延缓弯曲裂纹的产生并控制它们的扩展。测试的板坯主要在冲切方面失败。研究人员还研究了 CFRP 条的正交应用、条的倾斜应用以及倾斜和正交条组合的效果。

Esfahani 比较了单调加载与循环加载时在平板受拉侧应用 CFRP 加固的有效性。据观察, 受拉侧板坯的 CFRP 强化提高了单调加载下的冲切强度, 但循环加载降低了 CFRP 条带抗冲剪的有效性。钢带在循环荷载下提高冲切强度的效果随着受拉钢筋的配筋率越高越显著。他测试了两组 $1000\text{ mm} \times 1000\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的板, 受拉钢筋配筋率分别为 0.84 和 1.59。

Farghaly 和 Ueda 指出, 根据 CFRP 带的面积, 将 0.167 mm 厚的 CFRP 带应用于加载柱周围平板的受拉侧, 与未加固平板相比, 冲切强度提高了 20-40%。脆性冲切破坏是 CFRP 强化平板的主要模式。他们研究了 $1600\text{ mm} \times 1600\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 的板坯试样, 荷载通过 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 施加。一组楼板用 50 毫米宽 (SF5) 的 CFRP 条加固, 而第二组楼板用 100 毫米宽 (SF10) CFRP 条加固。钢筋比率为 1.4%, 旨在产生冲切破坏模式。

Erdogan 观察到, 与垂直 CFRP 条在柱子周围以圆形排列的方式相比, 垂直 CFRP 条与柱子的四个侧面中的每一个垂直排列的垂直 CFRP 条具有更好的抗冲切性。在垂直配筋的情况下, 破坏面在加固区之外, 而圆形布置导致在加固区内破坏。此外, 当柱为方形时, CFRP 加固比当柱为矩形时更有效, 后者注意到冲切能力降低。研究者研究了布置在内柱周围的 CFRP 竖条 (称为销钉) 对冲切强度的影响。条带成对垂直应用, 垂直于每个柱尺寸并穿过板的深度。这些对以 $d/2$ 间隔 (其中 d 是受

拉钢的有效深度), 以确保拦截 45 度裂缝。垂直条旨在通过拦截倾斜的冲切裂纹来增强抗冲切能力。垂直 CFRP 条在混凝土浇注到垂直 14 毫米直径的圆柱形开口后安装。开口是通过在浇铸前嵌入 14 mm × 150 mm 聚氯乙烯(PVC)管而形成的, 而在浇铸后拆除管道。

Urban 和 Tarka 观察到, 在内部支撑柱周围使用 CFRP 带加固的平板的冲切能力提高了 11% 至 36%。冲切能力增加的百分比取决于 CFRP 条的面积以及是否使用锚栓来增强条与板的粘合。研究人员研究了 2300 毫米 × 2300 毫米 × 180 毫米的平板, 该平板装有 250 毫米方形柱, 模拟内部平板-柱相交。所有试样的抗拉钢筋比率为 0.5%。除了对照试样, 平板用 1.4 mm × 90 mm CFRP 条加固, 在加载柱周围施加不同的面积(就条带的数量而言)。除了粘合剂之外, 一些样品还提供了额外的 10 mm 直径锚固螺栓, 嵌入 100 mm 深的混凝土板中, 以增强 CFRP 条与混凝土的粘合。与未加固的对照样本相比, 使用 CFRP 条加固的样本以脆性爆炸方式失效。然而, 使用地脚螺栓将 CFRP 条固定在楼板上的试件比不使用地脚螺栓的相同试件更轻微地失效。作者认为, 这种“较软”的故障是由于逐渐从混凝土中拉出地脚螺栓。

当较小面积的 CFRP 条应用于受拉侧时, 使用地脚螺栓对施加载荷下裂缝宽度发展的影响可以忽略不计。然而, 当使用较大面积的 CFRP 条加固板时, 与对照试件和无锚固 CFRP 条的相同试件相比, 锚固螺栓减小了施加载荷下的裂缝宽度。CFRP 带增加了板的刚度, 因此, 用 CFRP 带加固的板的挠度远低于对照未强化的平板。此外, 对于相同的 CFRP 区域, 使用地脚螺栓可能会或可能不会减少板挠度, 具体取决于 CFRP 条的面积。对于较大的 CFRP 条带区域, 地脚螺栓更显著地减少了挠度, 特别是对于比控制板或没有地脚螺栓的 CFRP 板更大的施加载荷。因此, 地脚螺栓对 CFRP 加固板的挠度影响有限或没有影响。

Halabi 等人的研究得出结论, 当在柱区用 CFRP 条加固受拉侧时, CFRP 加固会增加单向跨接平板的极限破坏载荷。研究人员得出结论, 用 CFRP 板加固的平板柱连接处的偏心荷载会降低延展性和极限荷载。设计用于在同心荷载下支撑柱上方负弯矩区域弯曲破坏的平板, 当破坏荷载为偏心荷载时, 将转变为在较低施加载荷下发生的剪切破坏。当板坏用 CFRP 加固或保持未加固时, 破坏荷载随偏心距减小。

Soudki 等人的实验研究得出结论, 在平板内柱周围

的受拉侧应用 CFRP 条带, 与对照未加固板相比, 冲切强度提高了 29%。CFRP 加强板更硬, 因此与控制板相比, 挠度更小。在柱附近应用加强条增加了板的刚度, 同时应用从柱偏移的相同条增加了冲切能力。最有效的配置是偏离柱子更远的倾斜条带。这项研究是在 25.8 MPa 混凝土制成的 1220 mm × 1220 mm × 100 mm 平板试样上进行的。通过使用 100 mm 宽 × 1.2 mm 厚的条带加固选定的试件, 研究 CFRP 的效果, 该条带以各种配置施加在加载柱周围的受拉侧。

Hussein 和 El-Salakawy 得出结论, 将高强度平板(80 MPa)的抗弯拉力 GFRP 配筋率从 1% 提高到 1.5% (增加 50%), 冲切强度提高了 15%, 同时将配筋率提高到 2% (增加 100%) 使冲切强度增加 27%。纵向 GFRP 抗拉钢筋为 16 号(15.9 毫米), 抗拉强度为 1685 兆帕。

GFRP 抗剪钢筋抑制了裂缝的扩大并控制了其传播。开裂的控制导致正常强度(40 MPa)板的刚度提高和挠度降低。与没有抗剪钢筋的对照板相比, 13 号(直径 12.7 毫米) GFRP 剪力钉增加了 51% 的冲切抗剪强度。与对照板相比, 10 号(9.5 毫米)波纹 GFRP 抗剪钢筋增加了 34% 的冲切抗剪强度。

结论

本文回顾了过去二十年发表的关于在支撑柱区域使用纤维增强聚合物板/带加固平板/板以增强双向/冲剪能力的效果的文献。虽然 CFRP 和 GFRP 都用于加强, 但 CFRP 是主要材料, 因此在文献和本研究中得到了广泛的介绍。本文审查了选定国际规范和标准中用于预测冲切能力的模型, 以了解影响冲切强度的固有能力和因素, 同时, 介绍并讨论了各种研究人员的实验研究:

1. 一些建筑规范和标准, 如加拿大(CSA)和欧洲规范 2(EC2)承认抗弯钢筋有助于提高平板系统的双向抗剪能力。ACI 318 中的冲切抗剪能力模型不包含抗弯钢筋的影响。

2. 使用 CFRP 板/条加强支撑柱附近区域的两种最常用的技术包括:(1)在柱周围板的受拉侧粘合(胶合) CFRP 板/条,(2)安装 CFRP 以各种方式垂直模拟抗剪加固。使用垂直条的一种方法是将它们垂直插入, 使部分条延伸到板外以水平粘合以用于锚固目的。

3. 在平板支撑柱周围的受拉侧粘合 CFRP 板/条/层压板, 增加混凝土的冲切抗剪能力和极限荷载。容量提高的有效性和程度取决于各种因素, 例如带材相对于支撑柱的方向、端部锚固、带材/板材的面积等。

4. 当加强板/带在端部锚固时, 最好通过在支撑位

置将CFRP板/带粘合到试样的受拉侧来增加冲切抗剪能力。与没有CFRP加强的对照试样相比,当同心施加荷载时,垂直安装在带材末端的钢锚栓成功地增加了46%的冲切抗剪能力。当使用末端固定并垂直于主加强条的CFRP条进行端部锚固时,可以观察到冲切能力的类似改进。当荷载偏心时,CFRP粘合到受拉侧时,冲切能力的提高较低。

5. 垂直安装CFRP带,类似于在与柱面选定间距处垂直于板的抗剪钢筋,与将CFRP带/片材粘合到板的受拉侧相比,在提高冲切抗剪能力方面更有效。

参考文献:

- [1]Silva, M.A.L.; Madushanka, W.I.; Ariyasena, P.S.I.; Gamage, J.C.P.H. Punching Shear Capacity Enhancement of Flat Slabs Using End Anchored Externally Bonded CFRP Strips; Society of Structural Engineers: Colombo, Sri Lanka, 2018; Volume 28.
- [2]Malalanayake, M.L.V.P.; Gamage, J.C.P.H.; Silva, M.A.L. Experimental investigation on enhancing punching shear capacity of flat slabs using CFRP. In Proceedings of the 8th International Conference on Structural Engineering and Construction Management (ICSECM2017), Kandy, Sri Lanka, 7 - 9 December 2017.
- [3]Rasha, T.S.M.; Amr, B.; Hany, A. Effect of flexural and shear reinforcement on the punching behavior of reinforced concrete flat slabs. *Alex. Eng. J.* 2017, 56, 591 - 599.
- [4]Dilger, W.; Birkle, G.; Mitchell, D. Effect of flexural reinforcement on punching shear resistance. *Spec. Publ.*2005, 232, 57 - 74.
- [5]Caldentey, A.P.; Lavaselli, P.P.; Peiretti, H.C.; Fernández, F.A. Influence of stirrup detailing on punching shear strength of flat slabs. *Eng. Struct.* 2013, 49, 855 - 865.
- [6]McHarg, P.J.; Cook, W.D.; Mitchell, D.; Yoon, Y.S. Benefits of concentrated slab reinforcement and steel fibres on performance of slab - column connections. *ACI Struct. J.* 2000, 97, 225 - 234.
- [7]Elstner, R.C.; Hognestad, E. Shearing strength of reinforced concrete slabs. *Int. Assoc. Bridges Struct. Eng.*1956, 53, 29 - 58.
- [8]Inácio, M.; Ramos, A.; Lúcio, V.; Faria, D. Punching of High-Strength Concrete Flat Slabs-Experimental Investigation. In Proceedings of the Fib Symposium Tel Aviv 2013, Tel Aviv, Israel, 22 - 24 April 2013; Volume 293, p. 500.
- [9]Alexander, S.D.; Simmonds, S.H. Tests of column-flat plate connections. *ACI Struct. J.* 1992, 89, 495 - 502.
- [10]Hawkins, N.M.; Fallsen, H.B.; Hinojosa, R.C. Influence of Column Rectangularity on the Behavior of Flat Plate Structures. *Spec. Publ.* 1971, 30, 127 - 146.
- [11]ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary: ACI 318-14; American Concrete Institute: Detroit, MI, USA, 2011.
- [12]European Committee for Standardization. EN 1992-1-1Eurocode 2: Design of Concrete Structures—Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings; The European Union per Regulation 305/2011; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2004.