

# 钢筋混凝土框架节点抗震加固的研究进展

张 波

(陕西理工学院土木工程与建筑学院, 汉中 723001)

**摘要** 框架节点是框架结构中重要组成部分, 也是框架结构抗震的薄弱环节。本文简要阐述了混凝土框架节点加固的重要意义, 详细介绍了加大截面、粘钢、外包钢及粘贴 FRP 等方法加固框架节点抗震性能方面的研究进展, 期望为钢筋混凝土框架节点的实际加固改造提供应用参考。

**关键词:** 框架节点 加固技术 抗震性能

## 引言

历次震害表明, 钢筋混凝土框架结构梁柱节点部分是抗震的薄弱环节, 地震发生时框架节点易产生不同程度的破坏。其中最主要的破坏形式是: 节点核心区剪切破坏和核心区梁端纵筋粘结滑移破坏(张华东, 2013)。因此对节点进行抗震加固具有非常重要的现实意义。本文主要总结了加大截面、粘钢、外包钢和粘贴 FRP 等方法加固框架节点在抗震性能方面的研究进展。

## 1 加大截面加固法

加大截面加固法是采用增大混凝土构件的截面面积和配筋, 达到提高构件的承载能力和刚度、降低柱子长细比等目的的方法, 适用于钢筋混凝土受弯和受压构件的加固。节点的加大截面法主要有加大柱截面、加大梁截面、同时加大梁柱截面及八角形加大节点截面等形式。加大截面法虽然具有受力合理、效果显著、费用低、可避免在梁上钻孔等优点, 但其也具有使得建筑使用空间减少、湿作业量大、养护周期长、施工难度大等缺点。

金国芳等(2000)通过加大柱截面法加固十型框架平面节点的抗震性能试验研究, 其中加固试件 3 个, 未加固对比试件 1 个。结果表明, 加固后节点的极限荷载、刚度、耗能能力和延性均得到提高, 证实加大柱截面法加固框架节点是一种有效地抗震加固方法。

王玉镯等(2004a; 2004b)进行了增大截面法加固节点的低周反复荷载试验, 试件共有 3 个, 其中 1 个为未加固对比试件, 其余 2 个为不同加固形式的试件。试验结果表明, 增大节点截面法加固用于增强节点抗震能力是一种非常有效的加固方法, 箍筋间距、加固长度和加固厚度的不同对加固效果都有一定的影响。并针对一个实际加固工程提出了节点受剪承载力计算公式, 能满足工程设计的要求。

[收稿日期] 2015-06-15

[作者简介] 张波, 男, 生于 1976 年。博士研究生。主要从事工程结构抗震与加固研究。E-mail: zb97534@126.com

余琼等(2005)进行了3个加大柱截面法加固框架节点和1个未加固对比框架节点的低周反复荷载作用试验研究,其中1个对比试件为JHY,加固试件JH1和JH2新加核心区里不配箍筋,加固试件JH3新加核心区配 $2\phi 6$ 箍筋。试验结果表明加固试件各项力学性能指标均有提高,其中JH3初裂值提高程度和平均极限荷载提高程度最大,达到124%和39%,并提出原核心区开裂荷载和加固节点抗剪承载力的计算公式。余琼等(2003)还进行了柱加大截面和粘钢加固两组共8个试件的低周反复荷载试验,试验表明两种加固方法极限承载力提高程度相近,柱加大截面法加固节点核心区的初裂值和刚度相比粘钢法加固提高较多,粘钢法加固试件的延性及耗能能力相比柱加大截面法加固试件提高要多。

胡克旭等(2010a)采用水泥基高粘结、低收缩、自密实的新型加固用混凝土材料,通过层内泵送灌注技术,克服传统加大截面法的不足,实现混凝土框架节点快捷有效的加固,并通过ANSYS数值模拟验证了其有效性。此外,胡克旭等(2010b)通过5个试件的低周反复试验(其中1个为对比试件),模拟地震作用对框架节点的损坏,采用新型加固材料对框架节点进行加大截面法加固,结果表明节点的抗裂度、抗剪强度、刚度和变形能力可得到显著提高。并在试验基础上,提出了计算加固后节点抗剪承载力的公式,其综合考虑了加固部分对原节点抗剪强度的提高、加固部分参与工作程度和节点损伤影响三个系数。

加大截面加固法因其能提高节点承载能力、改善节点破坏形态、提高耗能性能而备受关注(Tsonos, 1999; 2002)。然而其增加构件截面使得建筑使用空间减少、施工工序复杂,同时增大了劳动强度。Karayannis等(2008)采用新材料加大截面法对10个I型混凝土预损节点进行了加固,并对加固后构件进行了抗震性能试验研究。这种新材料对混凝土节点周围柱体、梁端及节点核心区局部包裹加固,而不是整个柱体,极大节省空间。结果表明,这种新材料加大截面技术使得加固后的框架节点抗震性能明显提高,脆性破坏形态得到改善,极限承载力和耗能性能提高。

Shannag等(2005)进行了采用HPFRC结合传统增大截面法加固框架节点的抗震性能试验,共制作了10个1/3比例的节点试件,其中6个为加固试件。加固时采用HPFRC对柱体、节点核心区及梁端向外延伸100mm的范围内加固层厚度25mm的截面加大。结果表明,HPFRC加固后的框架节点脆性破坏形式改善,抗震性能提高。

加大截面法增大了节点核心区抗剪面积,新加混凝土对原节点核心区混凝土也起到了约束的作用,使得原核心区混凝土强度提高,新加混凝土参与斜压杆作用并使得斜压杆作用增强,从而提高了节点的抗剪强度和刚度,节点核心区的剪切变形减少。值得注意的是,对于外部新增加混凝土,轴向压力的施加对节点抗剪帮助很小甚至无帮助,采用加大截面法计算加固后节点的抗剪承载力时,轴向压力对新加混凝土部分抗剪承载力的有利作用建议不考虑。

## 2 粘钢加固法

粘钢加固法(或粘钢法)是指在混凝土构件表面用胶粘剂粘结钢板并用膨胀螺栓锚固来加固节点。与其他的加固方法比较,其具有施工快速,简洁轻巧,灵活多样,几乎不改变构件外形等优点。

马乐为等(1996; 1999; 2001)、刘瑛等(1997; 1999)进行了系列粘钢法加固框架中节点的低周反复加载试验,并对加固后节点的抗震性能进行计算机模拟,结果表明粘钢加固方法可靠可行,对提高节点的延性和耗能能力都具有良好的效果,并提出了粘钢加固节点的极

限承载力和位移的计算公式。

刘艳军等(2003)在梁柱节点受力桁架机构分析的基础上,针对不同粘钢加固方式,在现行规范节点水平抗剪承载力公式的基础上给出了粘钢加固节点水平抗剪承载力公式,并通过验证表明所得结果相对较安全。

樊述权等(2007)对6个足尺寸的框架中节点进行低周反复加载试验,其中2个为对比件,2个用粘钢加固,2个用碳纤维加固。试验结果表明,碳纤维布加固能有效改善中节点延性及抗震性能,粘钢加固能明显约束框架中节点区混凝土从而提高中节点抗剪承载力。

蔡建等(2001)对8个用TN胶粘钢加固和2个对比件的轴心受压钢筋混凝土梁柱节点进行了试验研究。试验分析表明,角钢贯通节点的节点加固形式加固效果最优,当有部分角钢被截断时,节点核心区混凝土受力不均匀,存在薄弱环节,此类节点的极限承载力比角钢不截断的节点形式低。

Yen等(2010)制作了13根钢板粘贴在梁侧面来加固核心区的钢筋混凝土十字型梁柱节点。通过低周反复加载试验研究表明,将钢板用环氧树脂粘贴后再用螺栓或钢箍锚固则可以显著地提高节点的强度、刚度和耗能能力。

在节点核心区通过粘钢进行加固,对核心区混凝土有较强的约束作用,对核心区混凝土初裂荷载有提高,节点核心区剪切变形得到减小。当混凝土开裂后,钢板和箍筋能共同抵抗主拉应力,使得箍筋屈服和裂缝产生发展得到有效延缓,达到提高抗剪承载力的目的。

### 3 外包钢加固法

外包钢加固法通常是指以型钢(角钢或槽钢等)外包钢筋混凝土构件的四角或两角,并通过横向缀板或缀条将外包型钢连成整体形成一个钢构架,与被包裹构件紧密相连,使得钢构架与原混凝土构件共同受力,从而构件的承载力和延性得到提高。此法优点在于施工简单,工期短,构件截面尺寸增加不多,对人民生活、生活影响相对较小;然而外露钢构件的防火防腐性能差是其最主要的缺点。

白宇飞等(1999)、刘畅等(1998)进行了4个外包钢+型节点的抗剪试验,并分析了外包钢加固节点的抗剪机理。分析表明,角钢销栓作用、核心区混凝土及节点核心区设置的水平箍筋是试件抗剪承载能力的三个主要组成部分,并给出了考虑各主要抗剪因素的外包钢加固框架节点抗剪承载力公式。

陆洲导等(2010)考虑正交梁的影响,设计制作了4个三维钢筋混凝土框架节点,先对框架节点进行预震损,然后裂缝修补后通过外包钢套法加固进行低周反复破坏试验,研究表明,外包钢套法可以显著提高节点刚度、延性等抗震性能,通过外包钢套加固后,预震损节点的承载力和抗震性能恢复并超过了预震损前节点的承载力和抗震性能。

徐福泉等(2007)进行了预应力包钢法加固梁柱+型节点在低周反复荷载作用下的试验研究,其中1个为对比试件,4个为加固试件,具体加固方法是在混凝土构件四周用型钢包裹,采用高强螺栓施加双向水平预应力。试验结果表明,体外预应力螺栓箍起到箍筋的作用,有效地提高了节点的受力性能,并根据试验结果提出了预应力包钢法加固节点受剪承载力实用计算方法。

余江滔等(2010)对8个梁柱板节点进行了预震损和反复荷载实验,其中1个为对比件,4个用BFRP加固,3个用外包钢套法加固。结果表明,BFRP加固和外包钢套加固都能够显

著提高节点的受力性能和延性, 包钢套加固能更显著地提高节点极限承载力和极限位移, 极限承载力和极限位移大约提高了 40% 和 70%。

采用外包钢加固法加固时, 刚性角钢使得节点具有较好的完整性和较大的刚度, 角钢在核心区出现剪切位移后发挥其销栓作用, 箍筋和角钢通过销栓作用阻止受拉裂缝上混凝土块的剪切滑移, 角钢积极参与抗剪, 承担部分水平剪力, 从而使得节点核心区的承载能力得到提高, 核心区裂缝的进一步开展得到延缓。另外, 钢材是一种吸收耗散地震能力较强的弹塑性材料, 因此, 外包钢法加固节点有着优良的抗震性能。此法适用于需要大幅度提高截面承载力和抗震能力的钢筋混凝土构件。

## 4 粘贴 FRP 加固法

粘贴 FRP (Fiber Reinforced Plastic) 加固法是指采用高性能胶粘剂将 FRP 材料粘贴在混凝土构件表面, 以提高构件承载能力的加固方法。此法具有占据使用空间少、施工简单方便、可操作性强等优点, FRP 材料轻质高强、可弯折粘贴、且抗疲劳、耐腐蚀性能好。缺点在于 FRP 材料耐火性能差, 受环境温度、湿度控制较严, 因此此法的应用范围受到了一定的限制。

余琼等 (2004) 通过对碳纤维加固受损框架节点与未受损框架节点的试验研究, 经过比较分析发现, 两者对节点的极限承载力、延性提高影响小, 受损使加固试件前期刚度比未受损试件降低, 减小了碳纤维加固对耗能能力的提高作用, 削弱碳纤维加固对强度退化及刚度退化的改善作用。商兴艳等 (2013) 针对内框架节点纤维增强材料难以穿越楼板或节点核心区的不足, 提出将 FRP 弯成 L 型外粘在框架梁、柱表面来增强震损钢筋混凝土框架节点的抗震性能, 并制做了 CFRP 和 BFRP 两组 10 个试件, 试验结果表明, 加固后震损试件的承载力得到恢复甚至提高, 节点延性得到明显改善。

余琼等 (2007) 进行了加大柱截面和碳纤维加固两组共 9 个试件的低周反复荷载试验, 通过试验表明, 两种加固方法也都能改变节点核心区的脆性破坏特征, 抗震性能得到提高, 而且加大柱截面法提高了核心区混凝土初裂值, 加大柱截面法对节点刚度和耗能能力的提高优于碳纤维加固。加大柱截面加固试件延性变化与核心区是否配有箍筋密切相关, 但碳纤维加固试件的延性有稳定提高。并在设计方法中指出计算抗剪承载力时, 碳纤维加固需适当考虑轴向力有利作用, 而加大柱截面法可不考虑。

彭亚萍等 (2006) 根据 4 个 I 型节点抗震试验研究, 提出了 FRP 加固节点的受剪承载力计算公式, 并对纤维品种、加固方式、纤维粘贴角度等主要因素对节点抗剪承载能力的影响机理进行了分析。基于拟静力加载试验结果, 彭亚萍等 (2010) 提出了适合于 FRP 加固混凝土梁柱节点的三折线恢复力模型及特征参数取值范围, 并给出了混杂 FRP 加固混凝土梁柱边节点的恢复力模型表达式, 与文中试验试件骨架曲线符合度较好。

欧阳利军等 (2009) 采用 BFRP 对 5 个不同损伤程度的框架节点加固, 并进行了低周反复试验。在节点试验结果研究和加固节点受力机理分析的基础上, 提出了构件修复后混凝土强度折减系数  $\gamma$  的概念, 并提出了修复后混凝土强度折减系数的计算公式, 根据规范建立了 BFRP 加固混凝土框架节点考虑构件初始损伤的抗剪承载力计算公式。

因粘贴 FRP 加固具有占据使用空间少、施工简便、操作性强、可曲面或转折粘贴等优点, 在国外研究较多。Le-Trung 等 (2010)、Lee 等 (2010) 采用 CFRP, El-Amoury 等 (2002)、Ghobarah 等 (2001) 采用 GFRP, Parvin 等 (2000)、Granata 等 (2001) 采用 AFRP, 加固框

架节点试件并进行了抗震性能试验研究,试验表明 FRP 加固可以改善节点抗震性能,提高节点的延性,改变节点核心区脆性破坏的形式。

FRP 法加固时,一般在梁底、柱端及节点核心区粘贴。加固节点承载力的提高主要来源于两方面:粘贴在梁、柱端可发挥抗弯作用,承担部分弯矩,纵筋应力得到降低,使得传入节点剪力减小,节点抗剪承载能力得到间接提高;节点核心区粘贴 FRP 起到箍筋约束的直接作用,使得核心区混凝土得到约束并且强度提高,其受力机理为斜压杆和剪摩机理叠加,节点的抗剪承载力提高。但由于外包 FRP 是柔性材料,节点开裂之前对节点核心区约束相对较弱,对核心区开裂荷载提高不明显。

通过对以上四种加固方法的探讨,其对节点脆性破坏的性质都有所改善,节点核心区的开裂荷载、极限强度、延性、刚度和耗能能力都有所提高。相比之下,加大柱截面法加固节点对开裂荷载提高程度最为显著,而 FRP 加固法对开裂荷载提高程度不明显;外包钢加固法和粘钢法对节点抗剪承载力提高程度较多,FRP 加固法对节点抗剪承载力提高程度比较少;外包钢法、粘钢法加固节点对延性提高最为显著,加大柱截面法加固节点对延性提高较小;加大柱截面法加固节点对刚度提高最多,合理的粘钢形式对刚度提高也较为显著;粘钢法、外包钢法及加大柱截面法加固节点对耗能能力的提高程度优于 FRP 加固法,但 FRP 材料可随意弯曲,施工方便且施工质量易保证,其他方法与其相比就显得比较逊色。

## 5 其它加固法

除此之外,国内外一些专家学者也提出了一些新的节点加固方法,并开展了一系列试验、理论研究。

曹忠民等(2006)进行了高强钢绞线网-聚合物砂浆加固框架节点的拟静力加载试验研究(其中 4 个为加固件,1 个为对比件)。研究表明,此种加固方法加固后节点的抗震性能明显改善,并提出了高强钢绞线网-聚合物砂浆加固钢筋混凝土框架节点受剪承载力的计算方法。之后其又对高强钢绞线网-聚合物砂浆加固带有直交梁和楼板的框架节点试件进行了拟静力加载试验(其中 2 个为加固件,1 个为对比件)。试验结果表明,节点的延性系数达到 4 以上,极限受剪承载力提高 22% 左右(曹忠民等,2007)。

王步等(2006)对 2 个混凝土框架节点进行了低周反复加载试验,其中 1 个为对比节点,1 个用碳纤维布-角钢组合加固。试验分析表明碳纤维布-角钢组合加固法结合了碳纤维布加固法和粘钢加固法二者的优点,能够有效改善节点的抗震性能,刚度、强度退化滞后,耗能效率提高,节点破坏模式得到改善,节点承载力提高了 54.5%。

黄群贤等(2013)利用钢丝绳易弯折、高强度、耐腐蚀等优良性能,利用预应力技术对环绕钢筋混凝土梁柱节点核心区的钢丝绳双向张拉施加预应力,达到对节点核心区横向约束,提高其抗剪强度和变形能力的目的。该技术可以绳穿越框架梁,因此具有适用于空间节点加固的特点。同时进行了闭合预应力钢丝绳加固节点的抗震性能试验研究(其中 7 个为加固件,2 个为对比件),加固试件破坏形态由节点剪切破坏转变为梁端弯曲破坏,通过试验表明加载后期加固试件滞回曲线的捏拢现象得到改善,加固试件承载能力、延性和耗能能力增强。最后提出了预应力钢丝绳加固节点的简化计算公式(黄群贤等,2015;崔俊,2013)。

陶立兴等(2013)采用加大截面法加固梁端,其新增钢筋通常采用植筋工艺。进行了 5 个试件在往复荷载作用下抗震性能试验研究,其中 1 个试件为对比试件,其他试件为增大截

面法加固构件, 加固试件中 1 个为新增钢筋贯穿节点区且无粘结, 3 个试件采用以不同锚固深度及锚固角度化学植筋。研究结果表明梁端采用植筋加固后, 节点延性较好, 梁端位移延性比均大于 4, 并通过研究比较得出锚入角度为  $15^\circ$ 、锚固长度为  $20d$  植筋时抗震性能最优。

## 6 结语

框架节点是框架结构的重要组成部分, 但由于是比较薄弱的部位, 其破坏会导致结构严重破坏。因此, 对此类抗剪不足、抗震性能较差的框架节点进行修复补强具有重要的社会意义和经济效益。本文详细综述了加大截面、粘钢、外包钢、粘贴 FRP 等方法加固框架节点抗震性能方面的研究进展, 以下几个方面将是今后关注的重点问题:

(1) 实际工程中的框架节点都是具有直交梁和楼板的空间节点, 然而上述试验大多是采用平面节点进行的, 与实际工程框架节点是不相符的, 而现有加固方法对此类空间节点的加固实施难度较大, 因此如何对此类空间节点进行有效加固还需进一步深入探讨。

(2) 加固材料的应力、应变滞后于原混凝土, 属于二次受力, 因此节点区加固部分和原混凝土部分两者各自承担的剪力如何分配的定量结论, 应做进一步的试验和理论研究。

(3) 上述多数加固方法在原构件增加持续新的荷载条件下, 加固材料才开始发挥其约束作用, 属被动加固。继续增大荷载直至破坏时, 加固材料仍有可能处于较低应力水平, 不能充分发挥加固材料的约束作用, 因此还应不断改进现有加固方法, 克服应力、应变滞后问题, 以便达到更好的加固效果。

## 参考文献

- 白宇飞, 刘畅, 1999. 外包钢框架节点抗剪强度分析. 哈尔滨建筑大学学报, **32** (3): 39—42.
- 蔡健, 徐进, 苏恒强, 2001. TN 胶粘钢加固钢筋混凝土梁柱节点的试验研究. 华南理工大学学报 (自然科学版), **29** (9): 90—94.
- 曹忠民, 李爱群, 王亚勇, 姚秋来, 2006. 高强钢绞线网-聚合物砂浆抗震加固框架梁柱节点的试验研究. 建筑结构学报, **27** (4): 10—15.
- 曹忠民, 李爱群, 王亚勇, 张蔚, 姚秋来, 2007. 钢绞线网片-聚合物砂浆加固空间框架节点试验. 东南大学学报 (自然科学版), **37** (2): 235—23.
- 崔俊, 2013. 预应力钢丝绳加固 RC 框架节点抗震性能试验研究. 华侨大学.
- 胡克旭, 刘春浩, 李响, 郭建明, 徐凯, 2010a. 新型材料加固钢筋混凝土框架结构性能初步研究. 工程抗震与加固改造, **31** (6): 37—41.
- 胡克旭, 张鹏, 刘春浩, 2010b. 新型材料加固钢筋混凝土框架节点的抗震试验研究. 土木工程学报, **43** (S1): 447—451.
- 黄群贤, 郭子雄, 姚秋来, 2013. 采用闭合预应力钢丝绳-聚合物砂浆加固 RC 框架节点技术研究. 福州大学学报 (自然科学版), **41** (4): 471—476.
- 黄群贤, 郭子雄, 崔俊, 刘阳, 2015. 预应力钢丝绳加固 RC 框架节点抗震性能试验研究. 土木工程学报, **48** (6): 1—8.
- 金国芳, 李视令, 李思明, 2000. 框架节点加固的抗震性能试验研究. 工程抗震, (1): 14—17.
- 刘畅, 白宇飞, 李海琦, 1998. 单调荷载作用下外包钢框架节点抗剪机理分析. 哈尔滨建筑大学学报, **31** (6): 23—29.

- 刘艳军, 肖贵泽, 2003. 混凝土框架节点粘钢加固及抗剪承载力计算. 武汉理工大学学报, **25** (3): 3—39.
- 刘瑛, 姜维山, 马乐为, 1997. 不同粘钢加固的钢筋混凝土框架节点破坏机理研究. 工业建筑, **27** (10): 15—19.
- 刘瑛, 马乐为, 1999. 粘钢加固节点的足尺模型试验分析. 工程抗震, (4): 26—29.
- 陆洲导, 刘长青, 张克纯, 王焕杰, 2010. 外包钢套法加固钢筋混凝土框架节点试验研究. 四川大学学报(工程科学报), **42** (3): 56—62.
- 马乐为, 姜维山, 刘瑛, 1999. 钢筋混凝土框架中节点粘钢加固低周反复试验的计算机模拟. 西安建筑科技大学学报, **31** (3): 273—276.
- 马乐为, 刘瑛, 周小真, 姜维山, 1996. 钢筋混凝土框架中节点粘钢加固抗震性能试验研究. 西安建筑科技大学学报, **28** (4): 414—418.
- 马乐为, 王春平, 2001. 钢筋混凝土框架中节点粘钢加固变形性能试验研究. 铁道学报, **23** (4): 113—115.
- 欧阳利军, 余江滔, 张克纯, 2009. 玄武岩纤维加固震损混凝土框架节点承载力计算分析. 工程抗震与加固改造, **31** (6): 33—36, 46.
- 彭述权, 樊玲, 2007. 粘钢与碳纤维布加固框架中节点对比试验研究. 同济大学学报, **29** (11): 108—111.
- 彭亚萍, 王铁成, 2010. FRP 增强混凝土框架节点恢复力模型. 江苏大学学报(自然科学版), **31** (1): 98—103.
- 彭亚萍, 王铁成, 刘增夕, 黄博升, 2006 等. FRP 抗震加固混凝土梁柱节点的受剪承载力分析. 地震工程与工程振动, **26** (1): 116—121.
- 商兴艳, 余江滔, 陆洲导, 张克纯, 2013. L 型纤维加固钢筋混凝土框架节点的抗震性能. 同济大学学报(自然科学版), **41** (11): 1644—1652.
- 陶立兴, 徐福泉, 2013. 梁端植筋加固后框架节点的抗震性能试验研究. 工程抗震与加固改造, (5): 42—49.
- 王步, 夏春红, 王溥, 刘伯权, 2006. 碳纤维布-角钢组合加固混凝土框架节点抗震性能试验研究. 施工技术, **35** (4): 74—78.
- 王玉镯, 田珊, 曹三鹏, 王时静, 庞林飞, 2004a. 钢筋混凝土框架节点的抗震加固. 山东建筑大学学报, **19** (1): 5—7, 31.
- 王玉镯, 2004b. 外包加固钢筋混凝土框架节点在反复荷载下的试验研究. 东南大学.
- 徐福泉, 刘敏, 关建光, 2007. 预应力包钢法加固框架梁柱节点的试验研究. 建筑科学, **23** (11): 29—34.
- 余江滔, 陆洲导, 张克纯, 2010. 震损钢筋混凝土框架节点修复后抗震性能试验研究. 建筑结构学报, **31** (12): 64—73.
- 余琼, 李思明, 2005. 柱加大截面法加固框架节点试验分析. 工业建筑, **35** (4): 43—47.
- 余琼, 李思明, 2003. 柱加大截面与粘钢法加固框架节点的比较分析. 同济大学学报: 自然科学版, **31** (10): 1157—1162.
- 余琼, 陆洲导, 2004. 受损对碳纤维加固框架节点的影响. 同济大学学报(自然科学版), **32** (2): 177—181.
- 余琼, 陆洲导, 2007. 柱加大截面加固与碳纤维加固框架节点的比较. 结构工程师, **23** (2): 90—96.
- 张华东, 2013. 钢筋混凝土框架节点八角形加固法研究. 武汉理工大学.
- El-Amoury T., Ghobarah A., 2002. Seismic rehabilitation of beam-column joint using GFRP sheets. Engineering Structures, (24): 1397—1407.
- Ghobarah A., Said A., 2001. Seismic rehabilitation of beam-column joints using FRP Laminates. Journal of Earthquake Engineering, **5** (1): 113—129.
- Granata P.J., Parvin A., 2001. An experimental study on Kevlar strengthening of beam-column connections.

- Composite Structures, (53): 163—171.
- Karayannis C.G., Chalioris C.E. and Sirkelis G.M., 2008. Local Retrofit of Exterior RC Beam-Column Joints Using Thin RC Jackets-An Experimental Study. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **37** (5): 727—746.
- Lee W.T., ChiouY.J. and Shih M.H., 2010. Reinforced concrete beam-column joint strengthened with carbon fiber reinforced polymer. *Composite Structures*, (92): 48—60.
- Le-Trung K., Lee K., Lee J., Lee D. H. and Woo S., 2010. Experimental study of RC beam-column joints strengthened using CFRP composites. *Composites: Part B*, (41): 76—85.
- Parvin A., GranataP., 2000. Investigation on the effects of fiber composites at concrete joints. *Composites: Part B*, (31): 499—509.
- Shannag M.J., Alhassan M.A., 2005. Seismic upgrade of interior beam-column subassemblages with high-performance fiber reinforced concrete jackets. *ACI Structural Journal*, **102** (1): 131—138.
- Tsonos A.G., 1999. Lateral load response of strengthened reinforced concrete beam-to-column joints. *ACI Structural Journal*, **96** (1): 46—56.
- Tsonos A.G., 2002. Seismic repair of exterior RC beam-to-column joints using two-sided and three-sided jackets. *Structural Engineering and Mechanics*, **13** (1): 17—34.
- Yen J.Y.R., Chien H.K., 2010. Steel Plates Rehabilitated RC beam-column Joints Subjected to Vertical Cyclic loads. *Construction and Building Materials*, **24** (3): 332—339.

## Review of Research Progress in Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Frame Nodes

Zhang Bo

(School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

**Abstract** The Framenode is an important part in frame structure, and it is the weak part in the aseismic design of frame structure. In this paper we present the application of strengthening frame nodes, and review the progress of the earthquake performace of the frame Nodes reinforced by enlarging section, bonding steel plate, wrapping steel plate, and bonding FRP. It is helpful to provide the reference for the frame Nodes reinforcement in situ in China.

**Key words:** Frame Nodes; Reinforcement technique; Earthquake performance