

文章编号: 1005—0523(2006)01—0001—05

抗震加固钢筋混凝土梁柱节点的研究进展

曹忠民^{1, 2}, 李爱群²

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 简要综述了国内外学者关于抗震加固钢筋混凝土梁柱节点的研究现状, 重点介绍 FRP、混凝土套和钢构套等节点加固方案的研究成果以及应注意的问题, 并进行了分析, 最后提出了目前所开展研究的不足和以后研究的展望。

关 键 词: 抗震; 加固; 梁柱节点; 钢筋混凝土

中图分类号: TU352

文献标识码: A

钢筋混凝土框架节点是框架结构中重要的组成部分, 起着传递、分配内力和保证结构整体性的作用。然而国内外大量的震例表明, 钢筋混凝土框架节点的破坏是比较明显的^[1]。当前的建筑抗震加固技术规程仅仅对框架梁和框架柱的抗震加固进行了规定, 而对于框架节点的抗震加固还没有明确规定^[2]。因此针对当前框架结构中抗震不足的实际情况, 提出一套可靠、有效的节点加固技术是非常必要的。

当前抗震加固梁柱节点方法主要有纤维片材加固、混凝土套加固法和钢构套加固等^[3]。为了进一步研究梁柱节点的抗震加固, 对以前所做相关文献的研究现状进行认真的综述是非常必要的。纤维片材加固法是用胶结材料把纤维片材黏结在节点周围; 钢构套加固法是在节点外包角钢、扁钢等制成的构架的加固方法; 混凝土套加固法是在节点外包一定厚度的钢筋混凝土的加固方法。在文献 3—4 的基础上, 本文简要介绍了近几年来国内外抗震加固梁柱节点的研究进展, 重点介绍节点各加固方案的特点和应注意的问题, 希望能够给相关的研究和工程人员提供有益的参考。

1 FRP 法抗震加固梁柱节点

纤维增强复合材料(FRP)具有高强、高弹模、低重量、耐腐蚀、易施工、适应性强以及与混凝土良好的协同工作等优越的性能, 是一种新型、高效的结构加固材料。然而国内外 FRP 加固结构的研究一般均限于构件加固研究, FRP 加固节点的研究还比较少。

国外学者 Gergely 等^[5]较早用碳纤维增强复合材料(CFRP)提高梁柱节点抗剪承载力的试验研究, 试件为 14 个 1/3 比例的混凝土梁柱 T 形节点, 其中 10 个采用 CFRP 加固, 试验参数包括混凝土表面的处理状况、CFRP 的不同布置和养护温度等, CFRP 的布置方式见图 1, 试验结果表明, 外贴 CFRP 加固节点可以有效地提高节点的抗剪承载力, 加固前混凝土表面的处理状况对加固节点的性能有明显影响, 而养护温度的升高不能明显提高抗剪承载力, 并且指出了合理锚固的重要性。

Ghobarah 等^[6]应用玻璃纤维(GFRP)采用不同的加固方式加固了 4 个钢筋混凝土边节点试件, 试验结果表明, 节点端部有合理锚固的加固试件基本上避免了节点剪切破坏, 延缓了钢筋滑移, 提高了承载能力和耗能能力, 而没有锚固措施的加固试件则没有明显改善。文献 7 进一步通过改进的锚固方式加固了两个边节点, 结果表明可以明显改善了节点的抗震性能, 加固节点的抗剪承载力提高, 耗能能力增强, 延性增大。

为了深入理解 FRP 抗震加固节点的性能, Antonopoulos 等^[7]进行了 18 个 2/3 比例的混凝土边节点试验, 试件设计为加固前后都发生节点剪切破坏以评价 FRP 对节点抗剪的贡献, 试验考虑了多个影响因素和多种方式加固, 证明了加固后节点的抗震性能明显提高, 分析了锚固方式、梁柱处纤维的用量比例、轴压比、包裹方式、正交梁等因素对 FRP 加固节点抗震性能的影响, 得出以下的结论: 锚固提高了加固效果; 如果加固前的损伤不修复, 则加固后耗能能力的提高

收稿日期: 2005—11—22

基金项目: 建设部研究开发项目(05—K4—18)

作者简介: 曹忠民(1972—), 男, 河南民权人, 华东交通大学讲师, 东南大学博士生。

不如抗剪承载力的提高;随节点内箍筋的减少,加固效果提高;正交梁将对加固效果起不利影响等. Prota 等^[8]进行了 CFRP 加固中间节点的试验研究,其创新之处是综合运用了内嵌式(near-surface-mounted)CFRP 筋和外贴 CFRP 片材进行节点加固,内嵌式 FRP 筋用在柱子上提高抗弯承载力,外贴在柱上的 CFRP 片材可用来改善柱的延性和提高受压混凝土的性能,CFRP 片材外贴在了节点核心区区和梁上以提高抗剪能力,进行了 11 个中间节点的试验,结果表明该加固方式虽然有一定的效果,但是破坏形态不能如愿控制,没有取得梁的延性破坏.

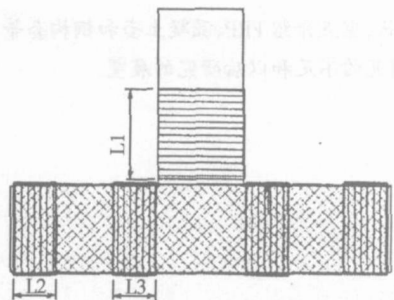


图 1 Gergely 等的 CFRP 布置方式^[5]

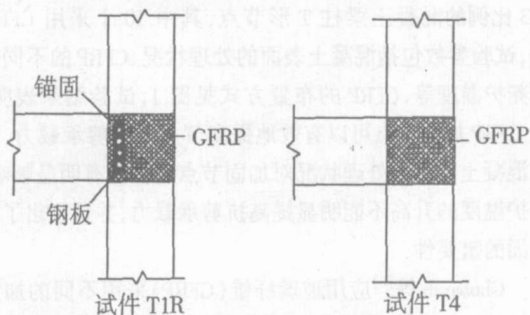


图 2 Ghobarah 等的 CFRP 的加固方式^[6]

我国同济大学的陆洲导教授等对碳纤维抗震加固梁柱节点进行了比较系统的研究^{[9]~[12]}.为了如实地体现碳纤维加固节点的效果和碳纤维加固后节点的抗震性能,试件采用了带板的十字节点.文献 9 介绍了低配箍的混凝土节点采用碳纤维加固的试验结果,节点梁端、柱端和核心区的配箍率均低于规范的最低要求,加固方式见图 3,其中三个试件采用核心区加固和梁端 U 型箍加固,一个试件采用核心区不加固而只梁端 U 型箍加固,试验结果表明,加固后的节点极限承载力和抗震性能都有大幅度的提高,各项性能指标都达到并超过了我国现行抗震规范的要求,而且核心区没有直接加固试件的屈服强度、极限强度和破坏形式也都得到了改善,这对于实际工程中存在正交梁的梁板柱节点的加固很有意义,文中指出施工质量对碳纤维加固的效果影响比较明显,相对而言轴压比的效果不太明显.文献 10 进行了碳纤维加固震损混凝土框架节点抗震性能的试验研究,首先对 4 个十字形混凝土梁板柱节点进行破损加载以模拟中小地震造成的损伤,然后实施灌缝修复和粘贴碳纤维布加固,试验结果表明,采用的加固修复方法非常有效,损伤历

史对加固试件的极限承载力影响很小,加固试件具有良好的耗能力和变形能力.文献 11 通过碳纤维加固受损框架节点与未受损框架节点的试验研究,对两者在承载力、刚度、位移等方面进行了比较和分析,发现未受损节点及受损节点碳纤维加固后节点的极限承载力提高幅度相近,受损对柱的极限位移影响比较小.文献 12 总结了碳纤维加固混凝土梁板柱节点的试验研究,发现加固后的节点极限承载力和抗震性能都有大幅度的提高,各项性能指标都达到并超过了我国现行抗震规范的要求.

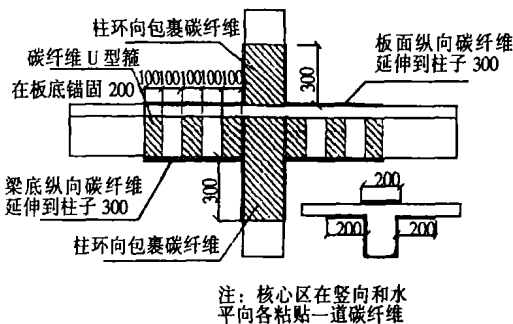


图 3 带板梁柱节点的 CFRP 加固方式^{[9]~[12]}

黄小奎等^[13]进行了 4 个梁柱节点(其中 2 个用碳纤维加固)的试验研究,加固方式见图 4,即柱的 4 个侧面宽 100mm 的碳纤维布粘贴,梁的侧面用 4 条宽 100mm 的碳纤维布粘贴在受拉区,梁的上下面满贴,同时伸到柱上的锚固长度都为 150mm,最后用宽 50mm 间距 100mm 的碳纤维布箍带包裹柱、梁上的碳纤维布.试验结果表明,加固节点的承载力并没有明显的提高,但随着节点变形的增大,碳纤维布对节点的约束将越来越大,因此提高了节点的极限位移和延性,对抗震有利.

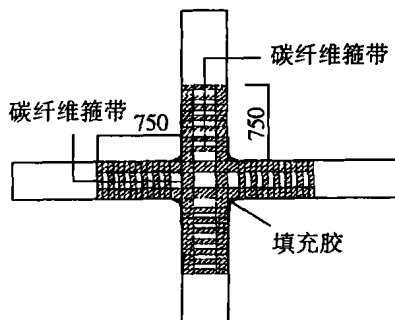


图 4 黄小奎等的 CFRP 加固方式^[13]

欧阳煜等^[14]介绍了粘贴玻璃纤维(GFRP)加固混凝土梁柱节点的试验研究,加固方式为对节点和梁、柱端采用 GFRP 包裹,GFRP 片材加固层数为 3 层,试验结果表明,节点试件的抗剪强度和延性比加固前有所增加,而增加的幅度与试件加固前的破坏形态有很大的关系,对于节点核心区剪切破坏模式加固效果较好,对于梁端塑性铰破坏模式加固效果较差,最后提出了一个值得注意的问题,即由于梁铰总是产生在梁柱交界面上,容易引起梁钢筋在节点内的锚固粘结破坏.

考虑到实际工程中带有正交梁的立体节点十分常见,吴波等^[15]对带有正交梁的立体节点采用碳纤维布进行了抗震加固的研究,钢筋混凝土节点试件按强柱强梁弱节点的原则设计,加固方式如图 5 所示,首先在节点核心区分条粘贴一层折线形碳纤维布(图中的①),并一直延伸到周围的梁各 150 mm 作为锚固,折线形碳纤维布沿柱高方向的总宽度,两个试件为 310 mm,一个试件为 180 mm,然后在各梁根紧靠节点核心区处各缠 3 层 50 mm 宽的碳纤维布梁箍(如图的②和③),研究参数包括折线形碳纤维布沿柱高的总宽度、节点核心区的碳纤维布上是否压钢板等.研究结果表明,该加固方法能有效提高节点的抗剪承载力,并在试验基础上提出了碳纤维布加固钢筋混凝土框架节点的抗剪承载力计算方法.

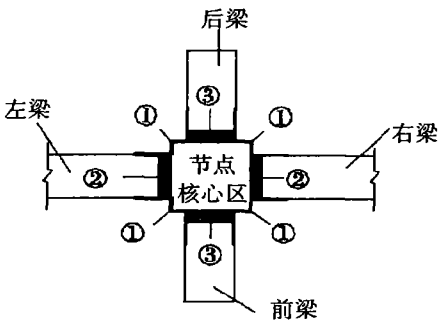


图 5 吴波等的带正交梁节点的加固方式^[15]

2 混凝土套加固法

国外文献 16 介绍了四个通过混凝土套加固带楼板的梁柱节点的试验研究,为了避免了在梁上钻洞来添加箍筋,用围绕节点的钢构架来代替核心区需要新加的箍筋,钢构架由用来约束节点侧向变形的角钢和连接角钢的钢板焊接而成,研究参数包括是只增大柱与梁柱都增大、加固前是否损伤以及柱周围新加的竖向钢筋是集中布置还是分散布置等,试验结果表明钢构架和角部的钢筋可以较好地约束节点,作者建议混凝土套加固节点的设计可以借用 ACI352—76 中有节点强度和粘结的条文.

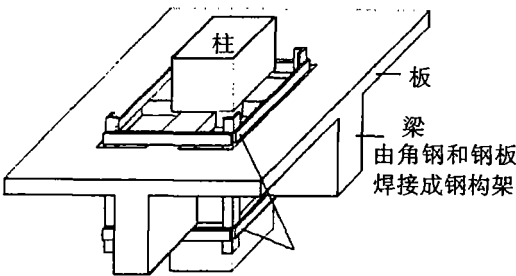


图 6 混凝土套加固梁板柱节点^[16]

文献 17 介绍了通过混凝土套加固 3 个中间节点的试验结果,其中加固前节点试件的核心区没有箍筋,为强梁弱

柱型,梁的纵筋也不满足锚固长度的要求,加固试件 R1 为先损伤后再用钢筋混凝土套法加固梁、柱和核心区,试件 R2 和 R3 加固前都没有损伤,试件 R2 核心区没有加箍筋,试件 R3 只沿柱梁加固而梁不加固.试验结果表明,加固后节点的延性和承载力都得到了明显的提高,试件 R1 的加固效果与 R2 非常接近,试件 R3 由于发生了梁的剪切破坏其加固效果差一些,文中指出如果节点核心区的水平剪应力低于 $0.07 f_c$,则核心区可以不加箍筋,然而核心区的箍筋有时也是必要的以防止柱纵筋发生屈曲,同时文中指出该加固技术的劳动强度是比较大的,并且由于添加核心区的箍筋需要在梁上钻洞从而使施工比较困难.

金国芳等^[18]进行了加大柱截面法加固钢筋混凝土框架节点的试验研究,采用沿柱高每边加厚 50mm,研究参数主要是轴压比和是否在核心区添加箍筋等,试验结果表明,柱加大截面法加固框架节点有效的,不仅能够提高节点的开裂荷载、刚度、屈服荷载和极限荷载,还能提高其耗能能力和延性,并且提出了一些加固建议.余琼等^[19]进行了柱加大截面法加固框架节点试验分析,得出原柱轴压比较大对新加混凝土参与抗剪不利,新加核心区配有箍筋比未配箍筋对原有核心区的约束强,加大柱截面法加固节点对于试件刚度、耗能能力提高较大,而延性提高较小,最后提出了原核心区开裂荷载和加固节点承载力的计算公式.

文献 20 采用高性能钢纤维混凝土 (HPFRC) 进行了梁柱节点抗震加固节点的研究,节点试件的配筋是按照非抗震节点设计,共制作了 10 个 1/3 比例的节点试件,其中 6 个试件用高性能钢纤维混凝土进行加固,加固方案为加固柱子和节点核心区,并向梁端延伸 100 mm,加固层的厚度为 25 mm,加固所用的钢纤维混凝土的抗拉强度和抗压强度分别是 9 MPa 和 75 MPa,试验结果表明,加固后试件的抗震性能得到了明显的提高,破坏形态可以从不加固时的脆性破坏转变为梁上出塑性铰的延性破坏,耗能能力和刚度退化得到了明显的改善.

3 钢构套加固法

国外学者 Ghobarah 等^[21]提出了用波纹状薄钢板套加固钢筋混凝土框架边节点,加固方法的形状见图 7,波纹钢板套加固节点的优点是,与平钢板套相比,波纹钢板套可以比较有效地侧向约束内部的混凝土,使节点的延性和强度显著提高,由于波纹钢板套的约束作用限制了纵向钢筋的屈曲和钢筋与混凝土之间的粘结破坏,使得节点原本的脆性破坏得以改善,节点延性得以提高,并且还提出了计算薄钢板套厚度和灌浆厚度等参数的设计方法.

我国西安建筑科技大学对粘钢加固梁柱节点进行过系列的研究,早期主要针对强柱弱梁、梁弱弯弱剪、梁纵筋锚固不足等 4 个节点进行了研究,试验结果表明粘钢加固节点对提高构件强度、改变框架破坏机制及增加变形能力具有良好的效果,并给出了粘钢加固节点的构造措施和加固方法^[22].

在前面研究的基础上,刘璞等^{[23],[24]}对节点核心区配筋不足、强梁弱柱、强柱弱梁、弱弯弱剪、梁纵筋锚固不足等 7 个粘钢加固中节点进行了研究,探讨了节点应力由梁传至柱的机理,提出了粘钢加固后节点的抗裂计算方法。

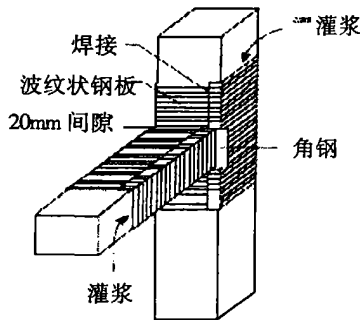


图 7 波纹钢板套加固节点^[21]

蔡健等^[25]对 TN 胶粘钢加固轴心受压钢筋混凝土梁柱节点进行了试验研究,共设计 10 个试件,加固形式包括角钢直通、对角角钢断开、角钢全断开以及一角钢断开等四种。结果表明这种加固方法是可行的,并推导出了计算加固节点极限承载力的公式。刘艳军等^[26]提出在粘钢加固节点时对不同的节点破坏应采取相应的加固形式,给出了粘钢加固节点水平抗剪承载力公式。

4 不同加固方法加固效果的比较

文献 28 进行了采用粘钢加固框架节点和碳纤维加固框架节点两种方法的比较,发现粘钢加固节点和碳纤维加固节点都可以提高节点的屈服强度、极限强度、延性、刚度及抗震性能,在该文的试验条件下粘钢加固对抗震性能的提高优于碳纤维的。文献 29 通过柱加大截面法及粘钢法加固框架节点的试验研究结果,对两者在承载力、刚度、延性及耗能能力等方面进行了比较,结果表明两者极限承载力提高程度相近,粘钢加固试件的延性及耗能能力提高优于柱加大截面法加固的试件,但刚度提高程度相对较小。文献 30 进一步总结了加大截面法、粘钢法及粘碳纤维法加固框架节点的试验结果,并对三种加固方法在承载力、刚度、延性及耗能能力等方面进行了比较与分析,结果表明,三种加固方法都基本可以改变节点核心区脆性破坏的性质,节点核心区的极限强度、延性、刚度及耗能能力都有所提高;加大柱截面法加固及粘钢加固提高原节点核心区的开裂荷载,而碳纤维加固节点核心区的开裂荷载无明显提高;加大柱截面法加固节点和粘钢加固节点承载能力提高相近,都比碳纤维加固节点的承载能力提高的多一些;粘钢加固试件延性提高最多,碳纤维加固延性较少;加大截面法及碳纤维法试件刚度的提高比粘钢法多些;粘钢加固试件耗能能力最好,碳纤维加固试件耗能能力比较小。

5 研究展望

震加固的研究,但是以下问题还需要进一步的深入研究:

1、由于实际工程中楼板的存在会对加固方式和加固效果将产生重大影响,因此研究的框架节点组合体应考虑楼板;

2、带有正交梁的立体节点的抗震加固;

3、对框架结构综合整体性的抗震加固;

4、节点加固后结构性能的评估。

参考文献:

- [1] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.
- [2] 中华人民共和国行业标准, 建筑抗震加固技术规程(JGJ 116—98)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [3] 彭亚萍, 刘增夕, 黄博升. FRP 约束混凝土梁柱节点的研究现状[C]. 第三届全国 FRP 学术交流会议论文集, 2004.
- [4] Engindeniz M, Kahn LF, Zureick AH. Repair and strengthening of reinforced concrete beam-column joints: State of the art. ACI Structural Journal. 2005, 102(2): 187—197.
- [5] Gergely Janos, Pantelides Chris P. Shear strengthening of RC T-joints using CFRP composites [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2000, v 4, n 2. p: 56—64.
- [6] Ghojarah A, Said A. Shear strengthening of beam-column joints [J]. Engineering Structures. 2002, 24(7): 881—888.
- [7] Antonopoulos CP, Triantafillou TC. Experimental investigation of FRP-strengthened RC beam-column joints [J]. Journal of Composites for Construction, ASCE, 2003, 7(1): 39—49.
- [8] Prota A, Nanni A, Manfredi G, Cosenza E. Selective upgrade of underdesigned reinforced beam-column joints using carbon fiber-reinforced concrete [J]. ACI Structural Journal. 2004, 101 (5): 699—707.
- [9] 陆洲导, 谢莉萍, 洪涛. 碳纤维加固低配箍混凝土梁柱节点的抗震试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, (3).
- [10] 陆洲导, 洪涛, 谢莉萍. 碳纤维加固震损混凝土框架节点抗震性能的初步研究[J]. 工业建筑, 2003(2).
- [11] 余琼, 陆洲导. 碳纤维加固受损框架节点与未受损框架节点的分析[J]. 工业建筑, 2003(5).
- [12] 陆洲导, 宋彦涛, 王李果. 碳纤维加固混凝土框架节点的抗震试验研究[J]. 结构工程师, 2004, (5).
- [13] 黄小奎, 崔凯成, 熊丹安. 碳纤维布加固梁柱节点试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, (2).
- [14] 欧阳煜, 黄奕辉, 钱在兹. 玻璃纤维片材加固混凝土梁柱节点的抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2003, (5): 54—58.
- [15] 吴波, 王维俊. 碳纤维布加固钢筋混凝土框架节点的抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005(4).
- [16] Alcocer, S. M., and Jirsa, J. O., "Strength of Reinforced

Concrete Frame Connections Rehabilitated by Jacketing,” *ACI Structural Journal*. 1993, Vol. 90(3), 249—261.

[17] Hakuto S., Park R., and Tanaka H.. Seismic Load Tests on Interior and Exterior Beam-Column Joints with Substandard Reinforcing Details [J]. *ACI Structural Journal*. 2000, Vol. 97 (1), January—February pp. 11—25.

[18] 金国芳, 李视令, 李思明. 框架节点加固的抗震性能试验研究[J]. *工程抗震*, 2000, (1).

[19] 余 琼, 李思明. 柱加大截面法加固框架节点试验分析[J]. *工业建筑*, 2005, (4).

[20] Shannag M. J., Alhassan M. A. Seismic upgrade of interior beam-column subassemblages with high-performance fiber-reinforced concrete jackets [J]. *ACI Structural Journal*. 2005, 102 (1)131—138.

[21] Ghobarah A., Aziz TS, Biddah A. Rehabilitation of Reinforced Concrete Beam-Column Connections Using Corrugated Steel Jacketing[J]. *ACI Structural Journal*. 1997, v 94 (3): 283—294.

[22] 马乐为, 刘 瑛, 周小真, 姜维山. 钢筋混凝土框架中节点粘钢加固抗震性能试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报*, 1996, (4).

[23] 刘 瑛, 马乐为. 粘钢加固节点的足尺模型试验分析[J]. *工程抗震*, 1999(3).

[24] 刘 瑛, 王玉良, 马乐为. 低强度混凝土节点粘钢加固的足尺模型试验[J]. *青岛大学学报(工程技术版)*, 2003(4).

[25] 蔡 健, 徐 进, 苏恒强. TN 胶粘钢加固钢筋混凝土梁柱节点的试验研究[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2001, (9).

[26] 刘艳军, 肖贵泽. 混凝土框架节点粘钢加固及抗剪承载力计算[J]. *武汉理工大学学报*, 2003, (3).

[27] 樊 玲. 粘钢加固梁柱中节点抗震性能试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学. 2003(5).

[28] 余 琼, 陆洲导. 粘钢加固框架节点与碳纤维加固框架节点方法探讨[J]. *工业建筑*, 2003, (12).

[29] 余 琼, 李思明. 柱加大截面与粘钢法加固框架节点的比较分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2003, (10).

[30] 余 琼. 框架节点加固方法探讨[J]. *结构工程师*, 2004, (1).

Advancement in Research of Seismic Strengthening
Reinforced Concrete Beam-column Joints

CAO Zhong-min, LI Ai-qun

(1.School of Civil Eng. and Arc., East China Jiaotong University, Nanchang 330013; 2.College of Civil Engineering of Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: This paper reviews recent research on seismic strengthening reinforced concrete beam-column joints in home and abroad paper presents results of experimental of strengthening techniques, including FRP, concrete jacketing and steel jacketing, points out shortages of recent studies and gives the research aspect of the research field.

Key words: seismic; strengthening; beam-column joints; reinforced concrete