

# 混凝土结构中梁柱节点核心区加固方法研究

潘立

中国建筑科学研究院有限公司建筑结构研究所, 北京

收稿日期: 2023年1月27日; 录用日期: 2023年2月17日; 发布日期: 2023年2月28日

## 摘要

建筑结构抗震设计中的“强节点弱杆件”理念虽早已成为业内共识,但多年来国内混凝土结构的检测鉴定、加固设计与施工却极少涉及梁柱节点核心区,由此可能使需加固结构的抗震构造与抗震性能存在缺陷或隐患。基于现行相关规范、规程要求,结合实际工程需求和分析研究,及作为现有混凝土梁柱节点核心区加固措施的补充,提出了适用性较好的高强材料置换节点核心区外周截面加固新方法,详述了其常用置换截面算法的推导过程及相应技术说明和实用建议,并在文后简述了某工程应用该方法加固梁柱节点核心区的成功案例,可供混凝土结构加固改造设计与施工参考。

## 关键词

混凝土梁柱节点核心区,轴压比,受剪承载力,增大截面加固梁柱节点,围套型钢加固梁柱节点,高强材料置换核心区外周截面加固节点,水泥基灌浆材料

# Research on the Strengthen Method for Core Region of Beam-Column Joints in Reinforced Concrete Structures

Li Pan

Institute of Building Structures, China Academy of Building Research, Beijing

Received: Jan. 27<sup>th</sup>, 2023; accepted: Feb. 17<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Although the idea of “joints are relatively stronger than members” in seismic design of building structures has been as the industry consensus for a long time, detection, identification, strengthening design and reconstruction of concrete structures rarely involve the core region of beam-column joints in domestic for many years, which may become the construction defect or hidden danger for

seismic performance of these structures to be reinforced. Based on several current requirements in relevant codes and specifications about the core region of concrete beam-column joints, according to corresponding research and analysis for engineering needs, the new strengthen method for the concrete core regions by replacing their peripheral part section with the selected high-strength material is firstly proposed as the complementary way with good applicability, then the derivation process about the replacement section algorithm is shown in detail. Furthermore, the relative technical explanations and practical suggestions followed by such a reinforcement engineering case are given at the back of the paper, which can be taken as useful references for some strengthening design and reconstruction of existing concrete structures.

## Keywords

Core Region of Concrete Beam-Column Joint, Axial Compression Ratio, Shear Capacity, Beam-Column Joint Reinforced by Increasing Section, Beam-Column Joint Reinforced by Steel Encased, Core Region of Beam-Column Joint Reinforced by Peripheral Part Section Replaced with High-Strength Material, Cementitious Grout

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

混凝土结构工程中，主梁与框架柱的节点核心区作为关键连接与主要承重部位通常处于复杂高应力状态，其构造特征、受力性能及组合内力直接关系整体结构的抗震性能，理应受得到结构设计、施工与检测鉴定的重点关注。

既有混凝土结构加固改造中，梁柱节点的轴压比、受剪承载力与实配箍筋需按现行相关规范、规程 [1] [2] [3] 要求进行验算复核，如明显不满足要求应采取相应补强或修复措施。但国内多年来，混凝土结构抗震加固改造工程却极少涉及梁柱节点核心区，虽然不排除其中部分节点经验算复核可维持原状，但发现较多节点核心区未曾验算复核，或其构造、性能不满足要求但却回避或未经加固处理。其主要原因如下：加固设计未能正确理解结构抗震关于“强节点弱杆件”的基本要求；现场难以检测鉴定这些部位的实际构造、混凝土强度与密实度；相对工程特定情况，缺少可靠有效、经济适用、简便易行的节点核心区加固比选方案；节点加固措施的预期效果难以验算复核确认；仅凭概念不合理利用节点核心区外周相连梁的约束作用。

结合实际工程需求，对部分现有混凝土梁柱节点核心区的加固方法进行了技术分析，补充提出了受力明确、适用性较好、简便易行的高强材料置换外周截面加固节点核心区新方法，详述了相应置换截面算法、技术说明与实用建议，文后介绍了某工程应用该方法加固梁柱节点核心区的成功案例，可供混凝土结构加固改造设计与施工参考。

## 2. 节点核心区

一般情况下，混凝土梁柱节点核心区的水平截面同相连柱的截面，核心区的高度同节点外周相连梁的截面高度，参见图 1。节点外周相连各梁的截面高度不同时，节点核心区高度可近似取各梁截面高度的平均值或较大值。对于不规则截面或异形构造的混凝土梁柱节点，其有效核心区范围可依据有限元仿真模型计算分析确定。



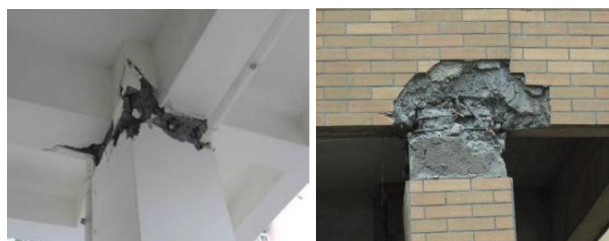
**Figure 1.** Common beam-column joints in reinforced concrete structures

**图 1.** 混凝土结构中常见梁柱节点

混凝土结构中，梁柱节点核心区可视同相连柱端的一部分。边柱与角柱部位的梁柱节点，其核心区亦为相连梁内受力纵筋的锚固区。设计荷载组合作用下，偏心梁柱节点的核心区应力状态随偏心程度不同而变化，宜基于有限元模型的计算分析云图确定。

混凝土结构施工中，相连梁、柱的混凝土强度相差 2 个等级以上时，节点核心区混凝土与相连梁板需分时浇筑，其强度等级同相连框架柱。节点部位的梁柱纵筋穿插交汇、多层叠加后与节点箍筋形成密织网笼，由此可能劣化节点核心区混凝土浇筑振捣条件，此处易出现难以检测确定的混凝土强度与密实度缺陷。

混凝土梁柱节点在内力组合作用下，核心区的应力及其分布虽存在不确定性，但结构抗震设计须通过构造措施与验算复核控制该部位不出现塑性变形或脆性破坏(见图 2)，以避免整体结构或其局部因此发生过大大变形甚至倒塌破坏。



**Figure 2.** Earthquake damage appearance of the core region in reinforced concrete beam-column joints

**图 2.** 混凝土梁柱节点核心区的地震损坏外观

### 3. 相关规范、规程要求与加固设计现状

《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010 [1]要求梁柱节点核心区的水平截面按第 11.6.3 条要求进行复核；节点抗震受剪承载力按第 11.6.4 条要求进行验算；未明确节点部位轴压比的上限值，为此设计现按第 11.4.16 条中柱的轴压比上限值控制节点轴压比。

《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010 [2]限梁柱节点核心区箍筋的最大间距和最小直径满足第 6.3.7 条要求，箍筋的特征值与体积配箍率满足第 6.3.10 条要求；未明确节点部位轴压比的上限值，设计目前取柱的相应控制值同上。

《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3-2010 [3]第 6.2.7 条要求，按一、二、三级抗震设计的框架节点核心区应进行验算，各抗震等级的框架节点的构造措施需进行复核；第 6.4.10 条明确了节点核心区水平箍筋要求；未明确节点部位轴压比的上限值，设计验算复核需满足柱的相应要求。

《混凝土结构加固设计规范》GB 50367-2013 [4]中虽无梁柱节点加固章节，但第 8.3.1 条中图示了外粘型钢加固混凝土梁柱节点核心区的构造；第 6.1.3 条要求置换局部强度偏低或有严重缺陷的承重构件受压区(含节点核心区)时，“非置换部分的原构件混凝土强度等级，按现场检测结果不应低于该混凝土结构建造时规定的强度等级”(注：此条要求缺少合理性)。

现行相关规范、规程关于混凝土梁柱节点核心区的设计要求中,未限定该部位混凝土强度不低于相连柱,未区别边柱、角柱与中柱不同部位情况,不考虑外周相连梁的数量、方向、高差的影响,不涉及如何确定异形梁柱节点核心区的有效范围,且均未明确限定节点核心区的轴压比的上限值(意为取其同框架柱)。

目前部分混凝土梁柱节点(含异形节点)核心区的加固设计,普遍直接套用国家建筑标准设计图集《混凝土结构加固构造》13G311-1 [5]中相关内容,即用环氧树脂或无机灌浆料高压注浆填补节点核心区的混凝土疏松部位,增大截面或粘贴钢板弥补“节点核心区配筋不足导致承载力不满足规范要求”缺陷(注:该图集中“配筋”指箍筋,“承载力”指受剪承载力。节点核心区的受压承载力,主要与其截面和混凝土强度有关)。国内多年来混凝土梁柱节点的加固设计,普遍回避或忽视依据相关规范、规程要求验算复核相应加固措施的预期效果。

#### 4. 节点核心区缺陷

待抗震加固的混凝土结构中,常见梁柱节点核心区的主要缺陷如下:

- 1) 混凝土实测强度明显低于相连柱或相应验算复核要求;
- 2) 局部混凝土存在疏松、蜂窝或空洞;
- 3) 经历地震作用、火灾高温或过度超载后,显现裂缝、表层剥落或局部破损;
- 4) 实配箍筋不满足构造复核要求。

梁柱节点核心区的混凝土强度和密实度缺陷及灾后裂损缺陷,相当于该部位混凝土缺损,导致节点核心区轴压比增大、受剪承载力降低,使其不满足原结构设计要求或抗震加固验算要求。梁柱节点核心区如实配箍筋不足,可能使该部位受剪或受扭承载力不满足复核要求,或先于相连梁端出现塑性变形,或延性较差,对整体结构的抗震性能有明显不利影响。

#### 5. 现有部分加固措施

目前既有混凝土结构加固时,为能提高梁柱节点核心区的受压、受剪及受扭承载力,或弥补该部位箍筋缺陷,或连带修补节点外观缺损,常见采用以下加固处理措施。

- 1) 增大截面:用强度等级  $\geq C40$  的细石混凝土外包增大节点核心区,见图 3,新增截面内配箍筋,



Figure 3. Strengthen the core region of concrete beam-column joints by enlarging the section

图 3. 增大截面加固混凝土梁柱节点核心区



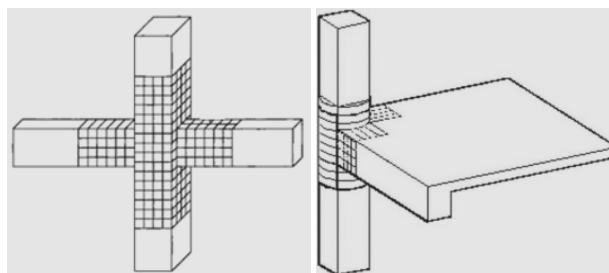
Figure 4. Strengthen the core region of concrete beam-column joints by steel encasement

图 4. 围套钢材加固混凝土梁柱节点核心区

新旧混凝土界面植筋。

2) 围套钢板/型钢：混凝土梁柱节点核心区外周栓锚 + 粘贴钢型材，各侧面钢材焊接连接，见图 4，加固后该部位表面覆盖防锈和防火涂层。

3) 包缠碳纤维片材：混凝土梁柱节点核心区外周包缠粘贴碳纤维片材，并相互叠压封闭其接缝，见图 5，加固后该部位表面覆盖防火涂层。



**Figure 5.** Reinforcing the core region of concrete beam-column joints by carbon fiber sheet wrapped

**图 5.** 包缠碳纤维片材加固混凝土梁柱节点核心区示意图

4) 调整结构体系：配合整体模型计算分析，在结构中适当位置增设剪力墙、柱间支撑(含耗能减震支撑)，见图 6，以分担或降低需加固梁柱节点核心区的荷载效应，即所谓节点“减效加固”。



**Figure 6.** Strengthen the core region of beam-column joints by adding shear wall or support between columns

**图 6.** 增设剪力墙、柱间支撑加固梁柱节点核心区

5) 组合应用加固措施。

根据工程的实际情况，如果确有必要，在结构中不同部位酌情选用上述不同措施加固混凝土梁柱节点核心区。

在结构正常使用阶段，节点外包加固材料的实际应力与加固施工卸荷方案有关，合理卸荷可减少其“应力滞后”或节点外包加固后的组合截面应力差现象。结构承载能力极限状态下，节点外包加固材料与相连基材仍能协调变形、共同工作，有利于加固材料充分发挥强度，此为加固节点核心区的理想状态。

## 6. 加固困难与对策

选用上述措施加固混凝土梁柱节点核心区时，常见困难如下：1) 节点核心区外露面较少时，难以检测确定该部位混凝土强度、密实度、箍筋构造；2) 难以验算复核选用加固措施的预期效果；3) 结构较大变形条件下，难以确保加固材料可靠连接锚固；4) 可能受限于建筑要求不改变加固部位既有外观；5) 加

固施工可能须避让相邻在用设备或管线；6) 基于验算分析确定加固施工卸荷方案。

针对上述节点核心区加固设计与施工困难，可酌情选用以下对策：1) 基于外观颜色比对，近似取梁柱节点核心区的混凝土实际强度同相连且同时浇筑的可测部位的实测值；2) 用小直径钻孔或芯样探查梁柱节点部位混凝土疏松缺陷；3) 剔凿节点核心区局部外露面的混凝土保护层，检查箍筋间距与直径；4) 依据节点核心区的缺陷类型及程度，考虑现场施工与验算复核的难易程度，综合比选多个可行节点加固方案；5) 基于有限元模型和最不利工况，对比计算分析节点核心区加固前后的组合应力；6) 节点核心区与外包混凝土之间界面合理植筋，用植栓与结构胶合理锚固围套钢材；7) 首选高强材料置换节点核心区外周截面的加固方案[6] [7]。

## 7. 置换外周截面加固节点核心区

高强材料置换外周截面加固混凝土梁柱节点核心区的技术目标如下：不改变加固部位既有外观，其组合截面的折算平均强度不低于原设计及验算复核要求，使原设计柱的纵筋和箍筋位于置换区域内，可按需增配箍筋，剔凿施工保留的混凝土内芯可确保加固施工安全。基于梁柱节点核心区的水平截面受力平衡条件，5种实用性较强的置换截面计算方法推导如下。

### 7.1. 矩形核心区保留圆形内芯

剔凿清除矩形截面节点核心区的外周混凝土，保留中间直径为  $d_{re}$  的圆形截面内芯。如计入圆芯的轴向承载力，偏于安全不考虑柱纵筋的承压作用，由平衡条件可得下式：

$$f_{c,h} \left[ b_s b_l - \left( \frac{d_{re}}{2} \right)^2 \pi \right] + f_{c,l} \left( \frac{d_{re}}{2} \right)^2 \pi = \gamma_c f_{c,d} b_s b_l \quad (7-1)$$

式中  $f_{c,h}$ 、 $f_{c,l}$ 、 $f_{c,d}$  分别为置换截面材料的设计抗压强度、圆芯混凝土实测抗压强度、节点核心区混凝土原设计抗压强度， $b_s$ 、 $b_l$  分别为节点核心区矩形截面的短边、长边尺寸。 $\gamma_c$  为加固超强系数，即核心区加固后的组合截面折算平均强度增大系数， $\gamma_c \geq 1.0$ ，可取  $\gamma_c = 1.05 \sim 1.10$ 。由式(7-1)可解出保留圆芯截面直径  $d_{re}$ ，

$$d_{re} = 2 \sqrt{\frac{b_s b_l (f_{c,h} - \gamma_c f_{c,d})}{\pi (f_{c,h} - f_{c,l})}} \quad (7-2)$$

限  $d_{re} < b_s$ ，式(7-2)中  $f_{c,h}$  应满足以下要求，

$$f_{c,h} < \frac{\gamma_c b_l f_{c,d} - 0.25 \pi b_s f_{c,l}}{b_l - 0.25 \pi b_s} = \frac{\gamma_c b_l f_{c,d} - 0.785 b_s f_{c,l}}{b_l - 0.785 b_s} \quad (7-3)$$

否则节点无需加固。如忽略保留圆芯承压作用，取  $f_{c,l} = 0$  代入式(7-2)，有

$$d_{re} = 2 \sqrt{\frac{b_s b_l \left( 1 - \frac{\gamma_c f_{c,d}}{f_{c,h}} \right)}{\pi}} \quad (7-4)$$

### 7.2. 矩形核心区保留矩形内芯

剔凿清除矩形截面节点核心区的外周混凝土，保留中间面积为  $\alpha_s b_s \alpha_l b_l$  的矩形截面内芯。如计入内芯的轴压承载力，偏于安全不考虑柱纵筋的承压作用，由平衡条件可得下式：

$$f_{c,h} b_s b_l (1 - \alpha_s \alpha_l) + f_{c,l} \alpha_s b_s \alpha_l b_l = \gamma_c f_{c,d} b_s b_l \quad (7-5)$$

系数  $\alpha_l$ 、 $\alpha_s$  分别为内芯截面长、短边与核心区截面长、短边的比值，且有  $\alpha_l < 1$ ， $\alpha_s < 1$ ，由式(7-5)可解

出:

$$\alpha_s \alpha_l = \frac{f_{c,h} - \gamma_c f_{c,d}}{f_{c,h} - f_{c,l}} \quad (7-6)$$

限  $f_{c,l} < f_{c,d}$ , 可满足  $\alpha_s \alpha_l < 1$ 。如忽略内芯承压作用, 取  $f_{c,l} = 0$  代入式(7-6)后有

$$\alpha_s \alpha_l = 1 - \frac{\gamma_c f_{c,d}}{f_{c,h}} \quad (7-7)$$

如取  $\alpha_s = \alpha_l = \alpha$ , 即内芯与核心区之长、短边比例相同, 且  $\alpha < 1$ , 由式(7-6)有

$$\alpha = \sqrt{\frac{f_{c,h} - \gamma_c f_{c,d}}{f_{c,h} - f_{c,l}}} \quad (7-8)$$

限  $f_{c,l} < f_{c,d}$ , 可满足  $\alpha < 1$ 。如忽略内芯承压作用, 取  $f_{c,l} = 0$  代入式(7-8)后有

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\gamma_c f_{c,d}}{f_{c,h}}} \quad (7-9)$$

对于正方形截面的节点核心区, 当剔凿施工后保留面积为  $\alpha^2 b^2$  的正方形截面内芯时, 在计入与不计入内芯承压作用两种情况中,  $\alpha$  仍可分别由(7-8)、(7-9)两式计算确定。

### 7.3. 方形核心区保留圆形内芯

剔凿清除正方形截面的节点核心区外周混凝土, 保留中间圆形截面内芯。如计入内芯的轴压承载力, 偏于安全不考虑柱纵筋的承压作用, 令式(7-2)中  $b_s = b_l = b$  后, 可解出内芯直径  $d_{re}$ ,

$$d_{re} = 2b \sqrt{\frac{f_{c,h} - \gamma_c f_{c,d}}{\pi(f_{c,h} - f_{c,l})}} \quad (7-10)$$

限  $d_{re} < b$ , 式(7-10)中  $f_{c,h}$  应满足式(7-11)要求,

$$f_{c,h} < \frac{\gamma_c f_{c,d} - 0.25\pi f_{c,l}}{1 - 0.25\pi} = 4.66\gamma_c f_{c,d} - 3.66f_{c,l} \quad (7-11)$$

否则节点无需加固。如忽略内芯承压作用, 令式(7-10)中  $f_{c,l} = 0$ , 有

$$d_{re} = 2b \sqrt{\left(1 - \frac{\gamma_c f_{c,d}}{f_{c,h}}\right) / \pi} \quad (7-12)$$

### 7.4. 圆形核心区保留圆形内芯

对于直径为  $d_o$  的圆形截面节点核心区, 剔凿清除截面外周混凝土, 保留直径为  $d_{re}$  的圆形截面内芯。如计入内芯的轴压承载力, 偏于安全不考虑柱纵筋的承压作用, 由平衡条件可得:

$$f_{c,h} \left[ \left(\frac{d_o}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_{re}}{2}\right)^2 \right] \pi + f_{c,l} \left(\frac{d_{re}}{2}\right)^2 \pi = \gamma_c f_{c,d} \left(\frac{d_o}{2}\right)^2 \pi \quad (7-13)$$

由式(7-13)可解出

$$d_{re} = d_o \sqrt{\frac{f_{c,h} - \gamma_c f_{c,d}}{f_{c,h} - f_{c,l}}} \quad (7-14)$$

限  $f_{c,l} < f_{c,d}$ , 可使  $d_{re} < d_o$ 。如忽略内芯承压作用, 令  $f_{c,l} = 0$ , 由式(7-14)有

$$d_{re} = d_o \sqrt{1 - \frac{\gamma_c f_{c,d}}{f_{c,h}}} \quad (7-15)$$

### 7.5. 圆形核心区保留方形内芯

对于直径为  $d_o$  的圆形截面节点核心区，剔凿施工中保留边长为  $b$  的正方形截面内芯。如计入内芯的轴压承载力，偏于安全不考虑柱纵筋的承压作用，由平衡条件可列出：

$$f_{c,h} \left[ \left( \frac{d_o}{2} \right)^2 \pi - b^2 \right] + f_{c,l} b^2 = \gamma_c f_{c,d} \left( \frac{d_o}{2} \right)^2 \pi \quad (7-16)$$

由式(7-16)可解出

$$b = \frac{d_o}{2} \sqrt{\frac{(f_{c,h} - \gamma_c f_{c,d}) \pi}{f_{c,h} - f_{c,l}}} \quad (7-17)$$

限  $\sqrt{2}b < d_o$ ， $f_{c,h}$  应满足下式要求，

$$f_{c,h} < \frac{\gamma_c f_{c,d} \pi - 2f_{c,l}}{\pi - 2} = 2.751 \gamma_c f_{c,d} - 1.751 f_{c,l} \quad (7-18)$$

否则节点无需加固。如忽略内芯承压作用，令  $f_{c,l} = 0$ ，由式(7-17)有

$$b = \frac{d_o}{2} \sqrt{\left( 1 - \frac{\gamma_c f_{c,d}}{f_{c,h}} \right) \pi} \quad (7-19)$$

限以上各式中  $f_{c,h} > f_{c,d} > f_{c,l}$ 。可见如计入保留内芯的承压作用， $f_{c,h} \rightarrow \gamma_c f_{c,d}$  时，有  $d_{re} \rightarrow 0$ 、 $\alpha_s \alpha_l \rightarrow 0$ 、 $\alpha \rightarrow 0$  或  $b \rightarrow 0$ ，即高强置换材料的设计强度越接近节点核心区混凝土设计强度，可保留内芯截面的计算直径或边长越小，或需剔凿置换截面越大，反之亦然。因此加固设计时酌情提高  $f_{c,h}$  值，可相应减少剔凿工作量。相同条件下，如忽略保留内芯的受压承载力，须置换更大截面才能使节点核心区组合截面的折算平均强度满足加固设计要求。

## 8. 相关说明与建议

既有混凝土结构中，梁柱节点核心区的加固验算需基于该部位检测鉴定结果，且完整涉及轴压比、水平截面、受剪承载力、箍筋特征值与体积配箍率。

为满足结构抗震设计“强节点弱杆件”要求，主梁与中柱节点的核心区混凝土强度不宜低于相连柱(注：可酌情考虑节点四周相连梁对节点核心区的横向约束作用)，主梁与边柱或角柱节点的核心区混凝土强度不应低于相连柱(注：不宜考虑节点外周相连梁对节点核心区的横向约束作用)。

外包配筋混凝土、钢板/型材、碳纤维片材加固混凝土梁柱节点核心区时，设计与施工需确保结构承载能力极限状态下加固材料与锚固基材之间可靠连接、协调变形、共同工作，其加固实效与此密切相关。

置换外周截面加固混凝土梁柱节点核心区时，限剔凿部位围绕核心区均匀对称，限水平剔凿最小深度  $\geq$  竖筋直径 + 2 倍竖筋的混凝土保护层厚度、且  $\geq 70$  mm；置换材料宜首选成型收缩较小、强度等级  $\geq$  C60，且便于浇筑施工的水泥基灌浆料[8]或补偿收缩混凝土[9]；加固施工期间宜兼用安全支撑基于计算合理卸荷，以尽量减小节点核心区加固后承压组合截面的应力差。

如选用高强材料置换外周截面加固节点核心区方案，为能确保加固施工安全，验算复核保留内芯受压承载力(第一道安全防线)时，宜忽略卸荷或安全支撑(第二道安全防线)的有利作用；保留内芯的混凝土实测强度  $<$  C20 相应值或存在明显疏松缺陷时，加固设计与施工不宜利用其截面受压承载力，此时节点



核心区外周截面宜改为分区分期剔凿置换。

置换外周截面加固梁柱节点核心区设计时，宜确保核心区混凝土组合截面的折算平均强度不低于相连柱，并说明或图示有利于相连梁的梁端受力、便于剔凿置换的施工缝位置与构造。

对比分析表明，选用围套钢材或缠绕碳纤维片材被动约束节点核心区、增加该部位受压承载力，或选用配筋混凝土外包增大节点截面、降低该部位轴压比，其加固效果均存在较大不确定性、且难以验算复核。而选用高强材料置换节点核心区外周截面，其预期加固效果更便于验算复核。

实际混凝土结构加固工程中，部分梁柱节点核心区与相连柱可能存在同类且程度相近的缺陷，此时宜分别基于检测鉴定和验算复核结果，首选高强材料同时等量剔凿置换两者外周截面进行加固处理，此方案可使相应加固设计与施工更为方便。

## 9. 置换截面加固节点核心区实例

某高层建筑位于广东省深圳市，为现浇混凝土框剪结构，于2020年3月在施期间实测发现，已建成首层部分边柱(截面1200 mm × 1200 mm)的梁柱节点核心区混凝土强度仅略大于C20相应值，明显低于原设计C55要求。为使这些梁柱节点核心区的加固处理不影响上部结构继续正常施工，且不改变加固部位设计外观，项目各方根据现场实际情况，经过比较多个可行加固方案，终选用C80水泥基灌浆料置换这些节点核心区外周低强截面进行加固处理，且利用节点内复合箍筋作为置换截面与保留内芯之间界面的拉结筋，并使节点核心区组合截面的混凝土折算平均抗压强度不低于C55相应值。为合理减少节点部位低强混凝土剔凿量，加固设计验算利用剔凿后保留的C20圆形截面内芯。为确保加固施工安全，加固验算不考虑所设安全支撑卸载及剔凿区柱纵筋承压的有利作用，并复核确认保留内芯的受压承载力设计值满足加固施工期间最不利荷载组合作用下的安全度要求。

该工程首层部分边柱节点核心区加固验算时，取原设计C55混凝土抗压强度设计值 $f_{c,d} = 25.3$  MPa [1]，保留C20内芯混凝土抗压强度设计值 $f_{c,l} = 9.6$  MPa [1]，重力荷载组合时各分项系数为1.0，不考虑水平荷载效应与非重力荷载效应。基于文中式(7-10)和式(7-12)分别验算，解出保留圆形截面内芯直径 $d_{re}$  (mm)的多种情况对比计算结果见下表，其中 $f_{c,h}$  (MPa)为水泥基灌浆置换材料的抗压强度设计值， $\gamma_c$ 为加固超强系数。

**Table 1.** Comparison check diameter  $d_{re}$  (mm) of low strength inner core retained

**表 1.** 剔凿保留低强内芯直径  $d_{re}$  (mm) 的对比验算值

$\gamma_c$	1.0		1.05		1.10	
$f_{c,d}$ /MPa	25.3		25.3		25.3	
$f_{c,l}$ /MPa	9.6		9.6		9.6	
$f_{c,h}$ /MPa	C75	C80	C75	C80	C75	C80
	33.8	35.9	33.8	35.9	33.8	35.9
式(7-10) $d_{re}$	802	860	740	807	673	750
式(7-12) $d_{re}$	679	736	626	690	569	642

由表1可见，考虑保留内芯受压承载力、按式(7-10)解出的 $d_{re}$ ，明显大于不考虑保留内芯受压承载力、按式(7-12)解出的 $d_{re}$ ，前者对应较小的剔凿量、较大的内芯受压承载力安全度。该工程首层部分边柱节点核心区加固设计取 $d_{re} = 800$  mm，剔凿截面最小宽度为200 mm、满足相应构造要求。加固设计解出C20混凝土内芯的受压承载力设计值为4825 kN，验算复核可满足节点核心区剔凿施工期间的承压安

全度要求，节点核心区完成剔凿施工的情况见图7。



**Figure 7.** Appearance of chiseling construction completed in the core region of some side column-beam joints on the first floor

**图7.** 首层部分边柱节点核心区完成剔凿施工的外观

该工程首层部分边柱的梁柱节点核心区选用本文方法加固后，综合效果经检验获得项目各方一致好评，且如期顺利通过验收。

## 10. 结束语

应用高强材料置换外周截面加固混凝土梁柱节点核心区，是近年提出并成功用于加固工程的新方法。基于现有相关加固措施并作为其补充方案，该新方法受力明确、适用性好、简便易行，且易于加固设计验算复核。为便于业内读者阅读理解，文中详述了节点核心区置换截面计算式推导过程和结果，文后介绍了相关加固工程实例，希望能有助于混凝土结构抗震加固设计与施工。

## 参考文献

- [1] 中国建筑科学研究院. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [2] 中国建筑科学研究院. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [3] 中国建筑科学研究院. JGJ3-2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [4] 四川省建筑科学研究院, 山西八建集团有限公司. GB 50367-2013 混凝土结构加固技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [5] 中国建筑标准设计研究院. 13G311-1 混凝土结构加固构造[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [6] 潘立. 高强灌浆料置换截面加固混凝土框架柱的研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(3): 88-91.
- [7] 潘立. 高强材料置换外周截面加固混凝土柱的试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(11): 1-7+19.
- [8] 中冶建筑研究总院有限公司, 鲲鹏建设集团有限公司. GB/T50448-2008 水泥基灌浆材料应用技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [9] 中国建筑材料科学研究总院, 长业建设集团有限公司. JGJ/T178-2009 补偿收缩混凝土应用技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.