

钢筋混凝土框架夹心节点设计方法

杨治洪^{1,2}, 李英民¹, 刘建伟¹, 韩军¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市南岸区建委, 重庆 400060)

摘要:为给出钢筋混凝土框架夹心节点的设计方法,依据试件破坏特征等试验结果提出了验算内容与设计准则,通过对夹心节点抗震性能影响因素的分析及其与传统节点的对比提出了设计参数限值,基于试验试件的承载力并结合非线性有限元模拟的结果提出了核心区承载力验算公式。结果表明:为达到所需的位移延性并满足承载力要求,需设置剪压比、轴压比、柱梁混凝土强度比、最小配箍量等参数限值约束夹心节点适用范围;通过核心区受压验算、受剪验算保障节点的承载力,必要时可采取适当的加强措施;此外需要采取合理的构造措施避免梁筋过度的粘结退化。

关键词:夹心节点;拟静力试验;有限元;设计方法

中图分类号:TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)03-0035-06

Design Method of Reinforced Concrete Sandwich Beam-column Joints

YANG Zhi-Hong^{1,2}, LI Ying-Min¹, LIU Jian-Wei¹, HAN Jun¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Nan'an Construction Committee, Chongqing, 400060, P. R. China)

Abstract: The experimental results of reinforced concrete sandwich beam-column joints were studied intensively and finite element method simulation of such joints were performed for the sake of design method. Basic design criterion and computation contents were provided according to failure mode of specimens and other experimental results. And the limits of parameters were proposed based on the analysis of seismic behavior influence factors and comparison of traditional joints and sandwich joints. Hence, formulas of load resistant capacity were acquired by the results of load resistant capacity of specimens and nonlinear finite element method simulation. It is found that three measures should be taken for sandwich joints in order to reach demanded ductility and load resistant capability. Firstly, several parameters should be limited, including shear-compression ratio, axial load ratio, ratio of beam concrete strength to column concrete strength, and minimal amount of transverse reinforcement of joint. Secondly, shear load resistant capacity and axial compressive load resistant capacity should be computed to ensure load resistant capability of joint, and essential strengthen measures could be applied if necessary. Thirdly, appropriate construction details should be taken to avoid reducing of beam bar anchorage capacity.

Key words: Sandwich Joints, Quasi-static test, Finite Element Method, Design Method

对于高层建筑中普遍存在的柱混凝土强度高于梁的情况,将节点核心区与梁一起浇筑形成的框架节点称之为夹心节点。与传统节点(核心区混凝土

强度与柱相同的节点)相比,此类节点具有施工方便、快捷的优势,近年来受到广泛关注并成为一项迫切的工程需求。

收稿日期:2009-12-22

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0765)

作者简介:杨治洪(1972-),男,高级工程师,博士生,主要从事结构工程、工程抗震研究,(E-mail)yzhwork@163.com。

国外自 20 世纪 60 年代开始对夹心节点展开研究^[1-2],致力于研究核心区混凝土强度降低对构件受压承载能力的影响^[3-6],提出的核心区混凝土抗压折算强度计算方法被美国 ACI、加拿大 CSA 等规范采纳^[7-8]。由于国外的试验没有对试件的抗震性能及节点核心区受剪承载能力进行研究,且研究对象绝大多数为板柱节点。20 世纪 90 年代开始,同济大学、北京建筑设计研究院等单位完成了包括空间端节点、空间角节点、平面十字形节点在内的 21 个夹心节点试件的拟静力试验^[9-12],一定程度上验证了采用框架夹心节点的可行性。但上述试件剪压比普遍偏小,且未明确夹心节点与传统节点抗震性能的差别。为此,重庆大学完成了 18 个近足尺中高剪压比夹心节点的拟静力试验^[13],包括 9 个平面中节点、2 个平面端节点、3 个空间节点及 4 个采取增设斜筋、加插短筋、设直交梁等加强措施的平面中节点;并选取其中 6 个平面节点、3 个空间节点与配筋、尺寸相近的传统节点进行了抗震性能对比分析^[14-15]。研究显示,虽然夹心节点的受力、变形、梁筋粘结锚固等性能相对传统节点更为不利,但多数节点的抗震性能可满足结构抗震设计的要求,或采取加强措施后可满足。

上述研究揭示了夹心节点的抗震性能及其与传统节点的差别,验证了夹心节点的可行性,但并未提出系统的夹心节点设计方法。因研究所限,《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3-2002)要求对于梁柱混凝土强度级差大于 5 MPa 的节点,按梁混凝土浇注时应作专门处理,但未明确处理方法。为此,以试验结果为依据,结合非线性有限元模拟,提出了夹心节点设计的参数限值、验算内容和验算公式。

1 夹心节点验算内容及设计准则

拟静力试验过程中剪切破坏是夹心节点核心区最主要的破坏模式,中高剪压比试件配箍不足可能加速核心区剪切破坏,使试件达不到所需延性,可见受剪承载力是影响夹心节点抗震性能的重要方面。为保障夹心节点核心区受剪承载力,夹心节点设计时应通过仔细的抗剪验算确定核心区箍筋数量。

拟静力试验过程虽未出现核心区受压破坏的情况,但试验发现夹心节点核心区受压承载力弱于传统节点,试验过程中个别试件柱端偏压破坏可能也与核心区混凝土强度降低有关,此外,轴压试验也表明夹心节点试件可能出现核心区轴压破坏,为此需对夹心节点核心区进行受压承载力验算,并采取保障柱端承载能力的措施。由于试验过程中并未出现

核心区偏压破坏的情况,偏压破坏的破裂面或验算截面并不明确,设计过程中主要进行轴压验算。

试验显示多数夹心节点达到 3.5 以上的位移延性,基本达到了框架节点设计要求的延性控制准则^[16],即在梁端或柱端受拉钢筋先行屈服的前提下,节点核心区能达到所需要的延性而不发生破坏。但试验研究显示夹心节点适用范围与传统节点不同,且受压、受剪承载力低于传统节点,抗震设计时仅进行简单替换不足以保障结构的安全性。为满足结构抗震要求,夹心节点设计时设置最高剪压比限值等参数约束节点适用范围;通过核心区受压验算、受剪验算保障其承载力,必要时可采取核心区加强措施;采取合理的构造措施避免梁筋过度的粘结退化。

2 夹心节点设计参数限值

2.1 剪压比限值

剪压比是影响试件破坏模式最主要因素,低剪压比试件因梁端破坏导致失效的情况较多,其抗震性能与传统节点差别不大;高剪压比试件失效通常因核心区剪切破坏造成,此种破坏模式的试件其抗震性能通常弱于传统节点。随着剪压比的增加,夹心节点试件核心区相对受剪承载力(最大作用剪力与计算承载力之比)降低,梁筋粘结锚固性能退化,位移延性减小。如图 1 所示,4 个夹心节点柱梁混凝土强度比均为 1.5,剪压比越高试件位移延性越低,剪压比最高的节点(0.35 左右)虽然配箍率明显高于其他试件,但其位移延性最低。可见,虽然通过增加节点箍筋一定程度上可以弥补夹心节点核心区受剪承载力的不足,但剪压比过高的情况下核心区受剪承载力明显降低,此时增加核心区配箍率作用十分有限。为保障核心区的抗剪性能,夹心节点设计时建议剪压比控制在 0.3 以下,剪压比依据核心区混凝土折算强度计算。

2.2 轴压比限值

轴压比提高有利于改善梁筋粘结性能,但对其他方面的性能如耗能性能、变形性能等有一定不利影响,由于夹心节点试件多为中高剪压比试件,试验过程中轴压比变化对其破坏模式及抗震性能的影响并非十分明显。核心区剪切破坏往往先于轴压破坏出现,在试验轴压比最高接近 0.8 的情况下,仍未出现核心区受压破坏的情况,夹心节点受压承载力弱于传统节点的现象虽然没有凸显,但这种现象事实上是存在的。研究显示柱梁混凝土强度比低于 1.5 时,夹心节点核心区受压承载力通常不低于柱

端^[17],拟静力试验时 2 个试件受压破坏部位出现在柱端就可能与此有关。

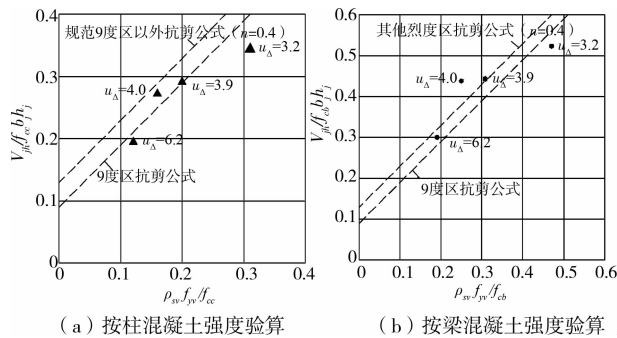


图 1 平面夹心节点剪压比、配箍率与位移延性

鉴于抗压能力的削弱及其可能存在的不利影响,夹心节点试件设置轴压比限值是必要的,框架结构采用夹心节点时,其轴压比限值可与传统节点相同,但轴压比验算时应采用核心区混凝土折算强度,此时柱梁混凝土强度比较高的夹心节点试件轴压比控制要求严于传统节点。

2.3 柱梁混凝土强度比限值

核心区按梁混凝土浇注导致节点刚度降低,变形增大,造成节点核心区及梁外端的承载力下降,并引发梁筋粘结锚固性能下降等问题。如图 2 所示,对于柱混凝土强度相近的框架节点试件,核心区混凝土强度越低,试件梁端承载力也越低。

国内完成的夹心节点试件柱梁混凝土强度比大都不高于 2.0,已涵盖柱、梁混凝土级配的常范围。核心区混凝土强度降低更多时梁端承载力下降严重且试件位移延性较差,限于目前柱梁混凝土强度比低于 2.0 的试件研究不多,建议夹心节点设计时柱梁混凝土强度比不高于 2.0。

2.4 核心区配箍量限值

核心区配箍量对核心区受剪承载力、位移延性等有一定影响,框架节点设计通过足够的核心区配箍达到所需的位移延性。由图 3 可知,即便在核心区配箍率较低的情况下,低剪压比夹心节点试件仍具有相对较高的受剪承载力,试件破坏部位通常出现在梁端,试验过程中仅有个别配箍率明显较低的试件出现核心区剪切破坏。可见,低剪压比夹心节点试件核心区受剪承载力相对较高,设计过程中满足现行规范最低配箍特征值和最小体积配箍率限值即可。由于夹心节点与传统节点具有相同的最低配箍量限值,低剪压比框架节点按梁混凝土浇注时,不会增加核心区箍筋用量。

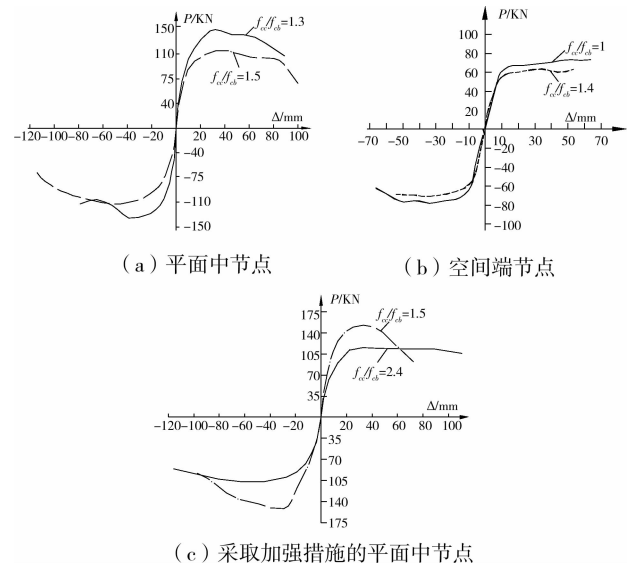


图 2 柱梁砼强度比不同时试件的骨架曲线

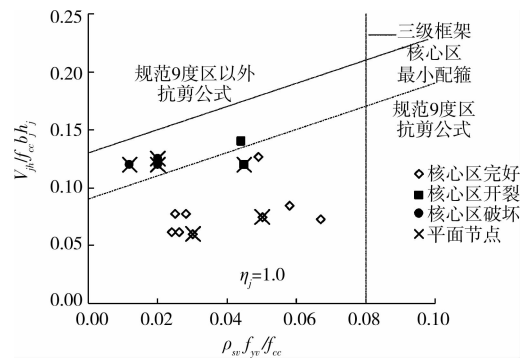


图 3 低剪压比夹心节点的破坏特征

2.5 梁筋粘结锚固长度限值

梁筋粘结锚固退化过快可能导致试件耗能能力降低,位移延性下降等。试验过程中同等受力状态下夹心节点梁筋滑移量明显大于传统节点,柱梁混凝土强度比为 1.5 时,大约相差 30%,如图 4 所示。建议梁筋贯穿节点段长度与梁筋直径的最小比值低于传统节点,控制在 1/30 以内,剪压比越高,越应从严控制。

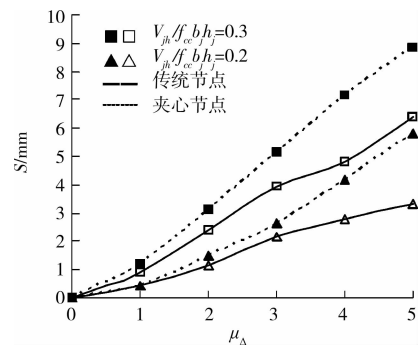


图 4 节点贯穿段梁筋滑移量平均值

3 夹心节点核心区承载力验算公式

试验研究明确了夹心节点核心区受压验算、受

剪验算的必要性,但由于试验数据多为定性分析结果,难以得到具体承载力验算公式。该文采用 ANSYS 软件建立了 2 类节点的有限元模型,对其受压承载力、受剪承载力进行模拟,定量分析了夹心节点核心区承载力影响因素,结合试验研究结果提出了承载力验算公式。

建立分离式模型(SOLID65+link8)模拟钢筋混凝土节点,认为钢筋和混凝土粘结良好,不考虑滑移。考虑到收敛精度及计算量等因素把梁、柱外端局部设置成弹性单元。混凝土本构关系采用规范提供的单轴抗压强度曲线,并采用多线性随动强化模型(MKIN)以反映混凝土的软化。失效面模型采用 William—Warnke 五参数强度模型,模型划分网格时尽量采用六面体单元。所有模型梁柱分为 2 种级配,1 种为梁 20.9 MPa/柱 31.7 MPa;另 1 种为梁 20.9 MPa/柱 45 MPa。受压模拟时,施加柱顶轴向压力直至计算发散;受剪模拟时,固定柱顶轴力,施加水平力直至计算发散。

3.1 核心区受压验算公式

研究表明,梁板及核心区箍筋约束效应的存在提高了夹心节点核心区受压承载力,核心区混凝土受压强度还与节点配箍量有关。

核心区配箍量对夹心节点承载力的影响低于传统节点,如图 5 所示,夹心节点配箍较多时核心区受压承载力提高不明显,因此可不考虑核心区配箍对夹心节点受压强度的影响。而梁板约束效应对夹心节点核心区受压承载力影响大于传统节点,柱梁混凝土强度比为 1.5 时,夹心节点由平面节点变为空间节点承载力提高了 28.5%,相应传统节点仅提高了 9.5%,夹心节点设计时应考虑不同类型试件梁板约束效应的差别,采用不同的核心区混凝土折算强度。依据现有研究,建议角节点核心区混凝土抗压强度不予提高,中节点最多提高 1.4 倍左右,端节点提高程度略高于两者平均值。

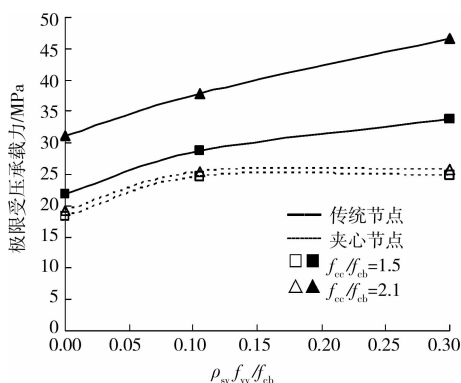


图 5 框架节点受压承载力模拟部分结果

柱梁混凝土强度比超过 1.5 时,柱混凝土强度增加不再能够明显提高核心区受压承载力。如图 5 所示,柱混凝土强度由 31.7 MPa 提高到 45 MPa 时,试件极限受压承载力仅提高 3% 左右。对于柱梁混凝土强度比较大的夹心节点,核心区受压承载力不应过多提高,夹心节点核心区混凝土抗压折算强度最高不超过柱混凝土抗压强度。

基于上述研究并参照相关规范,核心区混凝土折算抗压强度 f_{cc} 取值建议为:

中节点:

$$f_{cc} = \max(1.4f_{cs}, 1.05f_{cs} + 0.25f_{cc}) \leq f_{cc} \quad (1)$$

端节点:

$$f_{cc} = \max(1.25f_{cs}, 1.02f_{cs} + 0.20f_{cc}) \leq f_{cc} \quad (2)$$

角节点:

$$f_{cc} = f_{cs} \quad (3)$$

式中 f_{cs} 为梁混凝土抗压强度, f_{cc} 为柱混凝土抗压强度,满足 $f_{cc} \leq 2f_{cs}$ 。

夹心节点受压验算时,承载力构成要素与传统节点类似,仅核心区混凝土抗压强度不同,轴心受压验算公式为:

$$N \leq 0.9\varphi(f_{cc}A + f'_yA'_s) \quad (4)$$

式中 φ 指构件稳定系数, A 指核心区截面积, $f'_yA'_s$ 指纵筋受压承载力。

3.2 核心区受剪验算公式

夹心节点核心区受剪承载力与柱梁混凝土强度比、轴压比、核心区配箍量等有关。随着轴压比的增加,夹心节点、传统节点核心区受剪承载力均有明显提高,且提高的程度十分接近,如表 1 所示,可见轴压比变化对 2 类节点受剪承载力的影响相近,2 类节点验算时轴压比项可取相同数值。由图 6 可知,

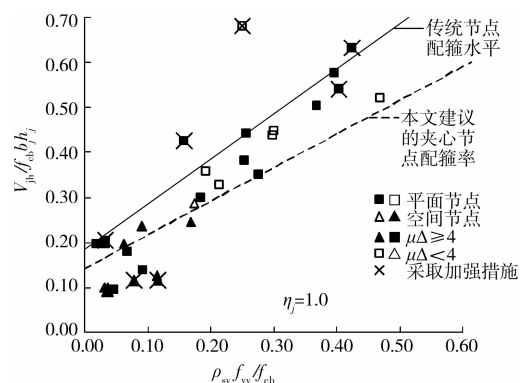


图 6 夹心节点试件的配箍水平与位移延性 μ_d

夹心节点若取用与传统节点相近的核心区配箍水平,不仅受剪承载力低于传统节点,部分节点位移延性较

差。即便将梁混凝土强度代人规范公式进行抗剪验算以增大核心区箍筋,夹心节点核心区受剪承载力也仅达到传统节点的80%左右,如表1所示。为保障夹心

节点的位移延性,依据2类节点受剪承载力的实际差别,夹心节点抗剪验算时,混凝土承载力项可采用梁混凝土强度,并将箍筋承载力折减75%。

表1 框架节点受剪承载力模拟结果

试件编号	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A4	B4
节点类型	夹心节点	传统节点	夹心节点	传统节点	夹心节点	传统节点	夹心节点	传统节点
试验轴压比	0.15		0.25		0.40		0.25	
节点箍筋	5Φ14	5Φ11	5Φ14	5Φ11	5Φ14	5Φ11	5Φ18	5Φ14
配箍特征值	0.20	0.12	0.20	0.12	0.20	0.12	0.33	0.20
柱梁混凝土强度比	31.7 MPa / 20.9 MPa = 1.5							
极限受剪承载力 / KN	493	629	557	712	603	740	575	758
极限受剪承载力之比	$V_{A5}/V_{B5} = 0.78$		$V_{A6}/V_{B6} = 0.78$		$V_{A7}/V_{B7} = 0.81$		$V_{A8}/V_{B8} = 0.76$	

注:轴压比、配箍特征值均按柱混凝土强度计算。

基于上述研究,夹心节点受剪验算公式中,核心区受剪承载力仍由混凝土承载力、箍筋承载力、轴压比作用3项构成,但其数值与传统节点有所差别。9度区以外节点抗剪验算公式可表示为:

$$V_j \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (1.1\eta_j f_{tb} b_j h_j + 0.05\eta_j N \frac{b_j}{b_c} + 0.75 f_{yv} A_{svj} \frac{h_{b0} - a'_s}{s}) \quad (5)$$

式中 η_j 指正交梁对节点的约束影响系数, f_{tb} 指梁混凝土抗拉强度设计值,其他参数取值与传统节点相同。由于低剪压比节点配箍由最小配箍量而非上式计算值控制,低剪压比夹心节点核心区配箍量没有增加。

(注:文中 f_{cc} 指柱混凝土抗压强度, f_{cb} 指梁混凝土抗压强度, f_{ce} 指核心区折算混凝土抗压强度; b_j 、 h_j 指核心区宽度、高度; f_{yv} 指节点箍筋强度; A_{sv} 指核心区有效验算宽度范围内同一截面验算方向箍筋各肢的全部截面面积。 $V_{jh}/f_{cb}b_jh_j$ 、 $V_{jh}/f_{ce}b_jh_j$ 分别表示按梁、柱混凝土强度计算的剪压比; $\rho_{sv}f_{yv}/f_{cb}$ 、 $\rho_{sv}f_{yv}/f_{ce}$ 分别表示按梁、柱混凝土强度计算的核心区配箍特征值,其中 $\rho_{sv} = A_{sv}/b_jh_j$ 。)

4 核心区加强措施设计及验算方法

增加核心区受力钢筋或提高核心区约束效应可以改善夹心节点的抗震性能,试验研究过程中采取的核心区加强措施主要包括增设交叉斜筋、加插竖向短筋、增设直交梁(近似考察梁端加腋等提高核心区约束效应的措施),如图7所示。

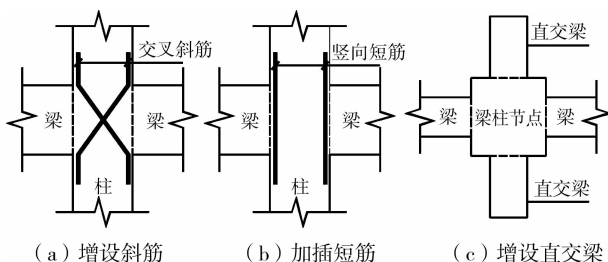


图7 核心区加强措施示意

试验过程中核心区交叉斜筋的存在增强了斜压杆机构的承载力,使得试件剪切变形减小,核心区受剪承载力提高;核心区竖向短筋承担了部分竖向荷载,限制了核心区裂缝的发展,改善了试件的抗震性能;增设直交梁的试件因直交梁缺乏水平箍筋约束而率先破坏,未能切实改善核心区约束效应。

总体而言,加强措施对于核心区承载力的提高是有效的,对于受力较为不利的夹心节点试件,为保障其抗震性能,必要时可采取适当的加强措施。加强措施的钢筋可依据受力情况参与核心区承载力验算,如新增交叉斜筋的竖向分量或新增竖向短筋可等代柱纵筋参与核心区受压验算;新增交叉斜筋水平分量的50%承担节点水平剪力;若核心区约束效应因梁端加腋、增设直交梁等措施得以改善,夹心节点设计时核心区混凝土可取用更高的核心区折算强度,具体计算方法尚待进一步研究。

5 结论

结合试验研究及有限元模拟的结果,系统提出了夹心节点设计方法,具体为:

1) 夹心节点设计过程中,为达到所需位移延性并满足承载力要求,需设置剪压比、轴压比、柱梁混凝土强度比、核心区配箍率等参数约束节点适用范围;通过核心区受压承载力、受剪承载力验算保障节点的承载力,必要时可采取加强措施;采取合理的构造措施避免梁筋过度的粘结退化。

2) 核心区混凝土折算受压强度应体现不同类型节点约束效应的差别及柱梁混凝土强度比的影响,角节点混凝土折算抗压强度不予提高,中节点最高提高1.4倍左右且不超过柱混凝土受压强度,端节点折算强度略高于角节点与中节点平均值。

3) 为保障夹心节点核心区承载力与实际相符,受压验算、受剪验算公式形式与传统节点相同,但受压验算公式取用核心区折算抗压强度,受剪验算公式取用梁混凝土抗压强度,受剪验算时将箍筋承载

力折减 75%。

参考文献:

- [1] BIANCHINI C A, WOODS E R, KESLER E C. Effect of floor concrete strength on column strength [J]. Journal of the American Concrete Institute, 1960, 31(11):1149-1169.
- [2] MCHARG J P, COOK D W, MITCHELL D, et al. Improved transmission of high-strength concrete column loads through normal strength concrete slabs[J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(1): 157-165.
- [3] LEE S C, MENDIS P. Behavior of high-strength concrete corner columns intersected by weaker slabs with different thicknesses[J]. ACI Structural Journal, 2004, 101(1):11-18.
- [4] SUBRAMANIAN N. Transmission of HSC column loads through NSC slabs[J]. Indian Concrete Journal, 2006, 80:44-49.
- [5] LEE J H, YOON Y S, COOK W D, et al. Benefits of using puddled HSC with fibers in slabs to transmit HSC column loads[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(12):1843-1847.
- [6] LEE J H, YANG J M, YOON Y S. Strategic Slab-column joint details for improved transmission of HSC column loads [J]. Magazine of Concrete Research, 2008, 60:85-91.
- [7] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Building Code Requirement for Reinforced Concrete and Commentary [S]. ACI 318M-05:2005.
- [8] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. Design of Concrete Structures [S]. CSA A23.3-04:2004.
- [9] ZHAO MING, SU XIAO-ZU, LU DAO-YUAN, et al. Seismic properties of rc frame sandwich type joint [C]//Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering. Canada, August 1-6, 2004.
- [10] 陆浩亮,李思明,金国芳. 梁柱不同混凝土强度的高层框架节点试验和有限元分析[J]. 力学季刊,2004,25(1):129-134.
LU HAO-LIANG, LI SI-MING, JIN GUO-FANG. Tests and finite element analysis of frame joints (beams and columns with different grade concrete) in tall building[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2004,25(1):129-134.
- [11] 余琼,李思明. 核心区柱混凝土强度不等时节点的性能研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(12):1583-1588.
YU QIONG, LI SI-MING. Research on frame's joint that concrete strength of core is inferior to that of column[J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2004,32(12):1583-1588.
- [12] 徐斌,程懋堃,张美励,等. 核心区混凝土强度低于柱的框架节点受力性能试验研究[J]. 建筑结构,2006,36(06):18-22.
XU BIN, CHENG MAO-KUN, ZHANG MEI-LI, et al. Experimental study on behavior of reinforced concrete beam-column joint with lower core concrete strength[J]. Building Structure, 2006,36(06):18-22.
- [13] 重庆大学土木工程学院. 框架节点核心区按梁混凝土施工措施研究[R]. 重庆大学,2007.
COLLEGE OF CIVIL ENGINEERING. Study of construction measures for reinforcement concrete frame joints with beam strength concrete [R]. Chongqing University, Chongqing:2007.
- [14] 刘建伟,李英民,杨治洪,等. 平面 RC 框架夹心节点与传统节点抗震性能对比试验[J]. 建筑结构,2009,39(4):10-13.
LIU JIAN-WEI, LI YING-MIN, YANG ZHI-HONG, et al. Comparison of behavior of traditional and sandwich plane rc beam-column joints based on cyclic load test[J]. Building Structure, 2009,39(4):10-13.
- [15] 刘建伟,李英民,杨治洪,等. 空间 RC 框架夹心节点与传统节点抗震性能对比试验[J]. 工业建筑,2009,39(4):10-13.
LIU JIAN-WEI, LI YING-MIN, YANG ZHI-HONG, et al. Comparison of behavior of traditional and sandwich space rc beam-column joints based on cyclic load test[J]. Industrial Construction, 2009,39(2):88-92.
- [16] 游渊,傅剑平,白绍良,等. 钢筋混凝土抗震框架梁柱节点的延性设计准则[J]. 重庆建筑大学学报,1996,18(4):12-20.
YOU YUAN, FU JIAN-PING, BAI SHAO-LIANG, et al. Principle of seismic ductility design of reinforcement concrete beam-column joints[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1996,18(4):12-20.
- [17] 段建中,刘立兵,方高倪,等. 不同强度混凝土梁柱节点承载性能研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2004,27(4):396-400.
DUAN JIAN-ZHONG, LIU LI-BING, FANG GAO-NI, et al. Experimental research on interior beam-column joints as the column and beam are constructed with different strength concrete[J]. Journal of Hefei University Of Technology: Natural Science Edition, 2004,27(4):396-400.

(编辑 胡玲)