

新型配筋小跨高比洞口连梁的性能及设计方法

傅剑平, 陈京洲, 皮天祥, 白绍良

(重庆大学 土木工程学院 重庆 400045)

摘要:洞口连梁是钢筋混凝土抗震联肢剪力墙中保证延性及耗能性能的关键部件,但小跨高比洞口连梁因其特殊剪切受力机理,使它在采取特殊配筋构造措施的前提下难以满足所需的延性要求。本文作者所在研究组通过对小跨高比洞口连梁的剪-弯受力机理的分析研究,提出了一种采用附加对角斜筋和菱形筋的新型配筋方案。经过共计20个接近足尺连梁试件低周反复加载试验验证,这种配筋方案的洞口连梁具有良好的延性及耗能性,且施工难度不大。本文在总结已完成试验结果的基础上,为此类新型配筋小跨高比连梁提出了一整套设计方法,供工程设计及修订国家标准参考。

关键词:抗震设计;钢筋混凝土;联肢墙;小跨高比洞口连梁;设计方法

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1006-7329(2008)02-0037-06

Experimental Study on, Small-Span-to-Depth-Ratio Coupling Beams with New Reinforcement mewt Scheme and Design Method

FU Jian-ping, CHENG Jing-zhou, Pi Tian-xiang, BAI Shao-liang

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Coupling beams combining two coupled walls are the primarily energy dissipating elements in the coupled walls and play a key role in improving ductility. It is proved by the test outcome at home and abroad that the shear failure happening early cannot be avoided and the ductility cannot be satisfied if the coupling beams are designed with the conventional method of frame beams. The advice on new reinforcement scheme of small-span-to-depth-ratio coupling beams, i. e. adding diagonal bars and rhombic inclined bars on the basis of traditional reinforcement, have been given. By the experiment of 20 specimens, well seismic resistance behavior and project applicability of new reinforcement scheme have been proved. Present integrated design advice of small-span-to-depth-ratio coupling beams with new reinforcement scheme, in order to provide consult for project designing and editing national standard.

Key words: seismic design; reinforced concrete; coupling beam; small-span-to-depth-ratio coupling beam; design method.

联肢剪力墙或联肢核心筒壁是钢筋混凝土高层建筑中抗侧向力体系的主要构件。其中连接各墙肢的洞口连梁不仅通过其跨高比影响联肢剪力墙的侧向刚度和墙肢的弯距-轴力比以及弯距-剪力比,而且是联肢剪力墙在强震作用下的第一线塑性耗能构件,它对联肢墙的抗震性能起着关键的控制作用。根据工程需要,常会在设计中采用小跨高比洞口连梁。国内外的试验研究结果表明,对这类连梁若再用常规框架梁的抗震设计方法进行设计,已无法避免其过早发生剪切

破坏,从而无法满足对它的延性要求。为此国内外近年来均在探讨联肢墙小跨高比连梁改善抗震性能,特别是改善抗震抗剪性能的有效设计方法。我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002)虽然提出了通过严格控制普通配筋小跨高比连梁的剪压比和增大其抗剪箍筋的做法,但这一方案仍因其剪压比控制条件过严和可能达到的位移延性偏小而有待改进。

为此本论文作者所在研究组自1999年开始提出了一种小跨高比连梁的新配筋方案,即在传统配筋基

* 收稿日期:2007-12-20

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(编号:59878056)

作者简介:傅剑平(1953-),男,辽宁本溪人,教授,博士,主要从事钢筋混凝土结构基本性能及抗震性能研究,(E-mail)tmxydw@cqu.edu.cn。

础上加设对角斜筋和上、下两组“L”形筋(菱形筋)的方案(图1),并已通过20个接近足尺试件的低周交变试验证明了这一方案的良好抗震性能和工程适用性。

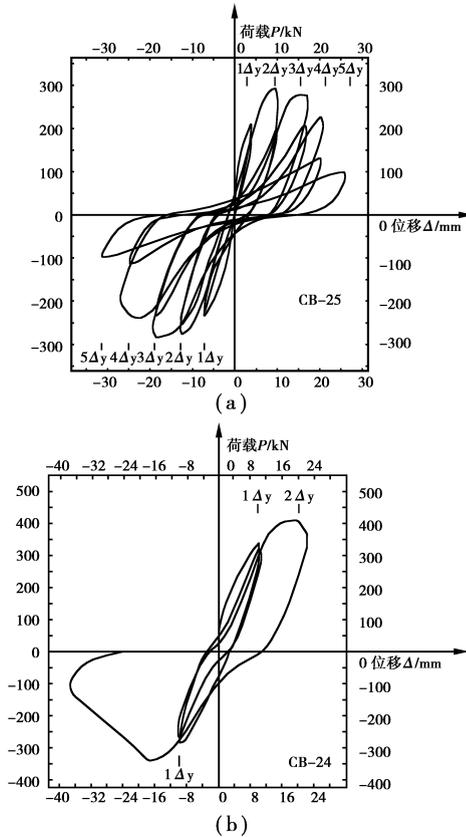


图2 试件CB-24及CB-25的P—Δ滞回曲线

1 小跨高比连梁的受力特点及新型配筋方案对其性能的提高

在水平荷载作用下剪力墙产生侧向挠曲时,连梁左右两端和与其相连的剪力墙肢之间分别作用有大小基本相等,方向相反的弯矩、剪力,反弯点在多数情况下会位于洞口连梁的跨中附近。

随着连梁跨高比的减小,连梁中的剪力-弯矩比(V/M)将相应增大。同时,连梁的受力特征也将由一般梁向深受弯构件甚至深梁过渡。从受力特征来看,因其具有反弯点在跨度中点附近的反对称弯矩图和全跨等剪力的剪力图,它的深梁特征又不同于一般简支或连续深梁。

在跨高比较大的细长连梁中,起主导作用的剪力传递机构是由混凝土斜压杆和竖向箍筋拉杆以及相互平行的上、下弦杆所组成的桁架机构。随跨高比的减小,受整个梁段弯、剪变形协调条件的控制,剪力中的相当一部分将更多的通过对角斜压杆传递,在这种情况下,斜裂缝坡度普遍增大,连梁幅面内的主拉应力从总趋势上看,也变为主要沿对角线方向作用。这时箍

筋的作用,即桁架机构的作用,将随跨高比的减小逐步减弱。

由于普通配筋方式的连梁已不能完全适应小跨高比连梁的这种受力趋势。所以,按照《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002)(以下简称《高规》)的普通配筋小跨高比连梁,尽管遵守了所规定的非常严格的剪压比上限($V_u/f_c b h_0 \leq 0.15$),并配置了明显多余一般框架梁的箍筋,连梁在反复荷载下的延性和耗能能力仍不理想。例如,本文作者所在研究组完成的普通配筋连梁试件CB-24,虽然仅刚刚进入小跨高比范围(跨高比为2.5),且剪压比($=0.136$)和配箍量均符合《高规》要求,位移延性也只是刚刚达到3.0,且耗能能力较弱(见图2(a))。若再稍稍增大剪压比(0.187),即使配箍量仍满足《高规》要求,位移延性只能勉强达到2.0(图2(b))。而已有非线性动力反应分析结果证实,按我国规范、规程设计的一级抗震等级的高层框架—剪力墙及框架—核心筒结构中联肢墙洞口连梁大震下的位移延性需求一般可能需要超过3.5~4.0^[4]。

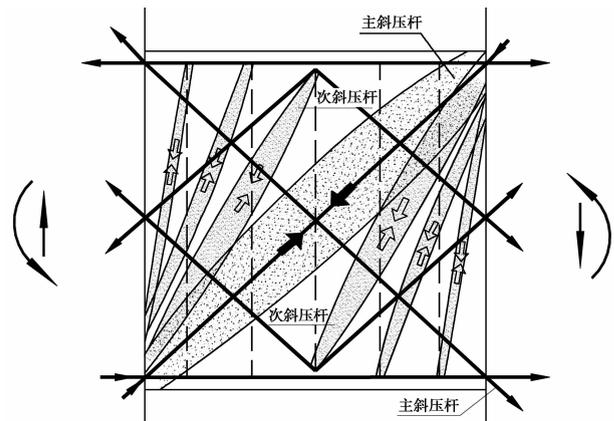


图3 小跨高比连梁受力特性

在认真分析联肢剪力墙洞口连梁进入小跨高比范围后在低周反复受力条件下的剪—弯综合受力特点后,本文作者所在研究组提出了图1所示的适用于工程中可能出现的整个小跨高比范围的新配筋方案。已完成的试验覆盖的跨高比为0.8~2.5,剪压比变化范围为0.165~0.310,通过试验还考察了交叉斜筋与“L”形筋的相对数量,以及构造配箍的多少对这类洞口连梁抗震性能的影响。已完成的绝大部分试件都达到了5.0以上的位移延性,即已达到新西兰学者提出的交叉暗柱配筋方案小跨高比洞口连梁的延性水准。这种方案已不存在交叉暗柱配筋方案连梁截面宽度不宜小于350 mm的限制条件,施工难度也比交叉暗柱配筋方案有明显改善。

根据试验结果,可将本文建议配筋方案小跨高比洞口连梁的受力特点依其重要程度归纳为:

1) 对角交叉斜筋与“L”形筋沿主拉应力方向较为均匀地分布在连梁高度上,能更好地抵抗连梁斜向主拉应力,限制斜向裂缝开展,其中的对角斜筋更能明显提高构件的剪切刚度,减小剪切变形;在主压应力作用方向,对角斜筋和“L”形筋还将协助混凝土承担主压应力。

2) 在较充分受力的连梁中,与主拉、压应力的作用趋势及配筋方式相适应,将形成如图 3 所示的单向剪一弯传力模型。从中可以看出,对角混凝土主斜压杆

在抗剪中发挥重要作用;同时,“L”形筋能与次斜压杆相适应,通过其弯折与次斜压杆形成局部拉一压杆传力机构;从而形成在整个连梁范围内的局部拉一压杆机构与主要的对角拉一压杆机构相结合的总体传力机构,使连梁各部位钢筋及混凝土受力较充分、较均匀,原则上消除了构件中的薄弱部位,从而充分发挥各部分材料的潜力,保证构件达到较高延性,并表现出相对更好的耗能性。

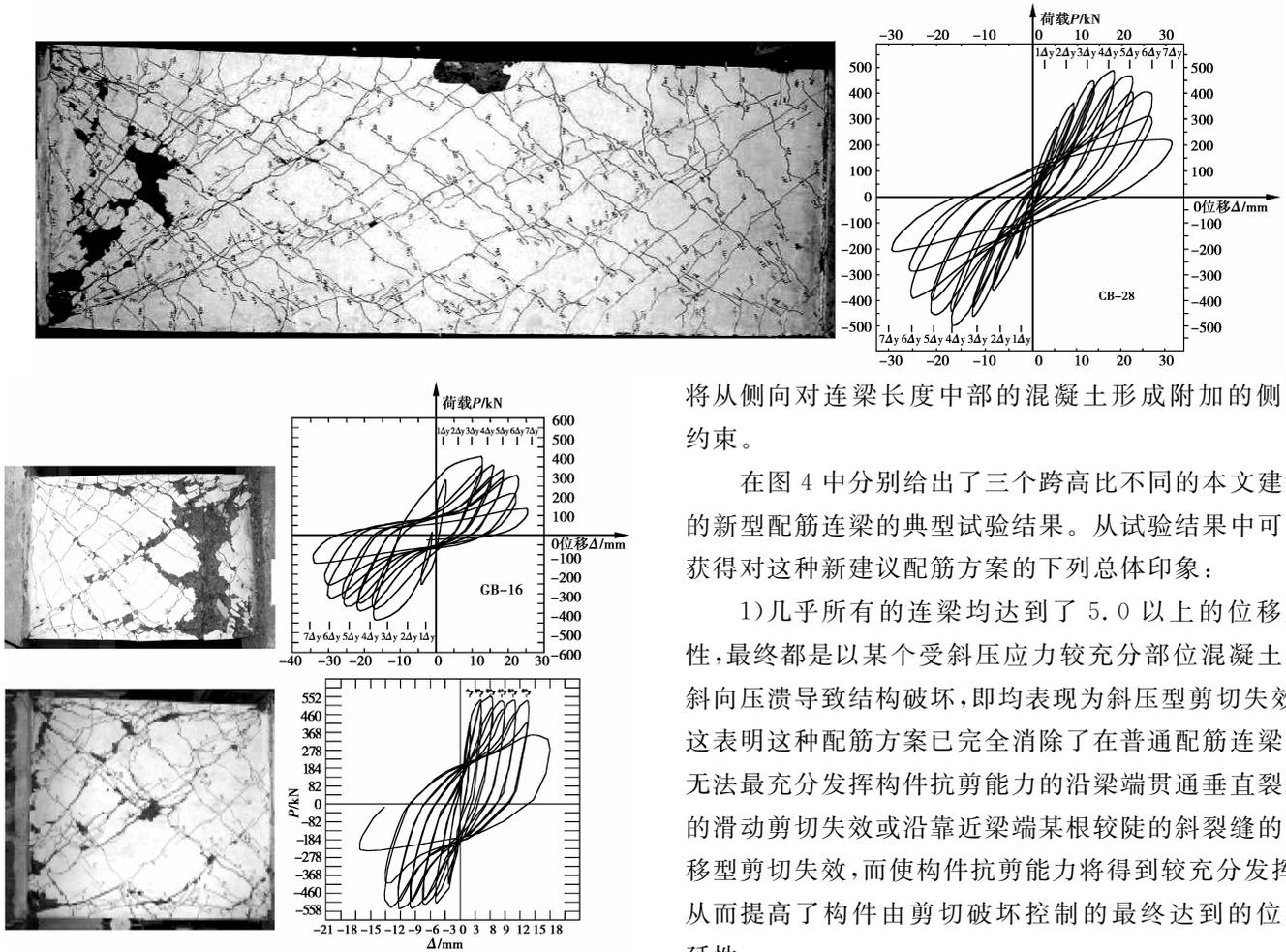


图 4 不同跨高比洞口连梁(CB-28,16,19)试验结果 (破坏后外观及 P-Δ 曲线)

3) 实测结果表明,对角拉、压斜筋原则上沿全长均匀受拉及受压;“L”形筋因其两肢段分别处在主拉、压应力方向,但又要与次斜压杆形成局部机构,故最终两肢段均受拉,但一个肢段(沿主拉应力方向)受拉充分,可达屈服;另一肢段拉应力偏小。连梁上、下的一般纵筋应变由在梁的一端充分受拉变到另一端较充分受压。在构件增大非弹性变形过程中,纵筋中的受拉范围逐步扩大,受压范围逐步缩小。

4) 为了保持对整个连梁范围内混凝土的约束,仍有必要配置最低数量的箍筋和构造纵筋。“L”形筋也

将从侧向对连梁长度中部的混凝土形成附加的侧向约束。

在图 4 中分别给出了三个跨高比不同的本文建议的新型配筋连梁的典型试验结果。从试验结果中可以获得对这种新建议配筋方案的下列总体印象:

1) 几乎所有的连梁均达到了 5.0 以上的位移延性,最终都是以某个受斜压应力较充分部位混凝土的斜向压溃导致结构破坏,即均表现为斜压型剪切失效。这表明这种配筋方案已完全消除了普通配筋连梁中无法最充分发挥构件抗剪能力的沿梁端贯通垂直裂缝的滑动剪切失效或沿靠近梁端某根较陡的斜裂缝的滑移型剪切失效,而使构件抗剪能力将得到较充分发挥,从而提高了构件由剪切破坏控制的最终达到的位移延性。

2) 试验结果表明,对角斜筋配置数量相对较多时,构件屈服后刚度和耗能能力会相对稍有改善,但延性相对略弱;而“L”形筋配置数量相对较多时,构件延性进一步改善,但屈服后刚度及耗能性略有减弱。

2 新型配筋小跨高比连梁设计方法

2.1 建立连梁设计方法的总体思路

为了协调洞口连梁抗剪强度及抗弯强度设计方法,本文一律以试验所得的各构件屈服后最大承载能力下的弯距及剪力作为建立抗剪能力设计公式和抗弯能力设计公式的基本依据。这样做一方面可以和其它各类构件建立这类设计方法时的基本思路相呼应,同

时也可以适应新配筋方案小跨高比连梁极限承载能力与纵向钢筋或对角斜筋首次屈服时的承载能力相比明显偏高的受力特点。

为了与建立其它构件传统设计方法时抗弯强度通常以试验结果的回归水准为依据,而抗剪强度则以试验结果的“偏下限水准”为依据的特点相呼应,在建立这类构件的抗剪计算公式时,考虑到试验数据的数量仍不足以确定有效的“偏下限水准”,因此以与试验结果相比取值偏低的思路来确定建议的抗剪公式。

2.2 关于新配筋方案洞口连梁的剪压比上限取值

由于普通配筋连梁的偏不利性能,目前中国《高规》(2002)对小跨高洞口连梁的做法是取用减小了的剪压比上限和比普通梁偏高的配箍。由于联肢墙随洞口连梁跨高比的减小,剪力逐步增大,剪压比也可能相应较高,目前《高规》的做法将给设计带来困难。

在已经完成的试验中,新配筋方案连梁在整个小跨高比范围内剪压比至少已经高达0.28~0.31,而此时连梁依然能够表现出不低于4.5的位移延性,这充分说明新配筋方案使这类小跨高比连梁甚至具有比一般受弯构件更高的抗剪能力上限。本文建议在留有一定裕量的前提下,将这类连梁的剪压比上限定为0.25,即取抗剪能力上限为:

$$V_b \leq 0.25 f_c b h_0 \quad (1)$$

这表明,采用这一新配筋方案后,在一、二级抗震等级的联肢墙中,就已经极有可能不再需要对连梁刚度进行折减,或对连梁作用剪力进行重新分配。这自然也是这类新配筋方案连梁与目前《高规》(2002)所采用的剪压比上限控制很低的普通配筋连梁相比所具有的另一项明显优势。

2.3 新型配筋小跨高比连梁的承载力计算

在连梁的抗弯公式中建议近似取受压区钢筋及混凝土压力的合力点位于连梁受压钢筋的形心高度,因此参加抗弯的包括纵向钢筋的拉力、对角受拉斜筋的拉力在水平方向的分力以及单侧菱形筋的拉力在水平方向的分力。以上三部分钢筋均按达到屈服取其抗拉强度,且都对受压钢筋形心确定其内力臂。

2.3.1 新型配筋小跨高比连梁的抗剪能力计算公式

试验实测结果表明新配筋方案连梁抗剪承载能力可以由下列分量组成:(1)受拉对角斜筋达到屈服时的拉力沿竖向的分量;(2)受压对角斜筋达到屈服时的压

力沿竖向的分量;(3)考虑到位于梁端截面高度中点附近的“L”形筋中,一个方向的钢筋受拉较为充分,而另一个方向的钢筋可能受拉但拉力颇小,因此在抗剪公式中建议只考虑一个方向的钢筋充分受拉,并以其竖向分量参与抗剪;(4)由于对角方向的混凝土受压所形成的斜压杆也将以其压力的竖向分力参与抗剪,而且,在抗剪能力中还可能包括占比不大的骨料咬合效应和纵筋的暗销作用,因此,抗剪公式中还应考虑混凝土项。除此之外,数量不多的箍筋和纵向构造钢筋也都可能以不同形式对抗剪作出贡献,但从偏安全的角度考虑,这些贡献不计入抗剪公式。

考虑小跨高比连梁的受力特点,于是连梁的抗剪承载力 V_{cs} 建议由混凝土、菱形筋以及对角斜筋的抗剪能力四部分组成,即:

$$V_{cs} = V_c + V_{sL} + V_{sD} \quad (2)$$

式中除对角斜筋(拉和压)、菱形筋之外的抗剪因素均笼统反映在混凝土项中。式中由混凝土承担的剪力取为: $V_c = k_c f_c b h_0$; 由图5可以看出,对角斜筋承担的剪力(考虑连梁中全部对角斜筋的抗剪作用)应取为: $V_{sD} = k_s 2 f_{yD} A_{sD} \sin \alpha$; 另外,如前文所述,相交在梁端截面高度中部的两个方向的菱形筋中只考虑一个方向的钢筋充分受力并参与抗剪,因此,从图5可以看出,由菱形筋承担的剪力应取: $V_{sL} = k_s f_{yL} A_{sL} \sin \beta$; 其中, k_c , k_s 分别为混凝土项与钢筋项参与抗剪的影响系数, α 和 β 分别为对角斜筋、菱形筋与连梁轴线之间夹角。

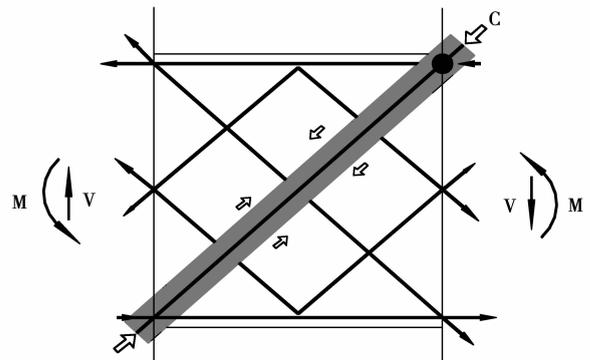


图5 连梁受力状态简图

另外,取连梁中单侧菱形筋与单向对角斜筋的拉力比为 ξ ($\xi = A_{sL} \cdot f_{yL} / A_{sD} \cdot f_{yD}$), 而菱形筋两支采用与对角斜筋平行的放置方式,故菱形筋和对角斜筋与连梁中轴线的夹角取为相等,即 $\alpha = \beta$, 并取 $f_y = f_{yZ} = f_{yD} = f_{yL}$ 。将各项代入(2)式并整理得:

$$V_{cs} = k_c \cdot f_c \cdot b \cdot h_0 + k_s \cdot f_y \cdot A_{sD} \cdot (2 + \xi) \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

按已有的有效试验数据的偏下限对此公式进行拟合(见图 6,图中 V_s 为对角斜筋及菱形筋总的抗剪分量),得: $k_c=0.10, k_s=0.93$;即:

$$V_{cs}=0.10f_c \cdot b \cdot h_0+0.93f_y \cdot A_{sD} \cdot (2+\xi) \cdot \sin\alpha \quad (4)$$

以上各式中: f_{yz} 为受拉纵筋的屈服强度; f_{yD} 为受拉对角斜筋的屈服强度; f_{yL} 为菱形斜筋的屈服强度; A_{sZ} 为受拉纵筋面积(单侧纵筋面积); A_{sD} 为受拉对角斜筋的面积(单侧对角斜筋面积); A_{sL} 为菱形斜筋的面积(单边菱形筋面积); h_0 为连梁截面的有效高度; h_L 为菱形斜筋的抗弯力臂; a'_s 为钢筋的保护层厚度; α 为对角斜筋的倾角; β 为菱形斜筋的倾角;其中, $\xi=A_{sL} \cdot f_{yL}/A_{sD} \cdot f_{yD}$;

从图 6 可以看出,本文建议的连梁抗剪能力计算公式(4)与试验结果的关系与到目前为止我国一般钢筋混凝土梁的抗剪公式取为偏下限的思路是一致的。

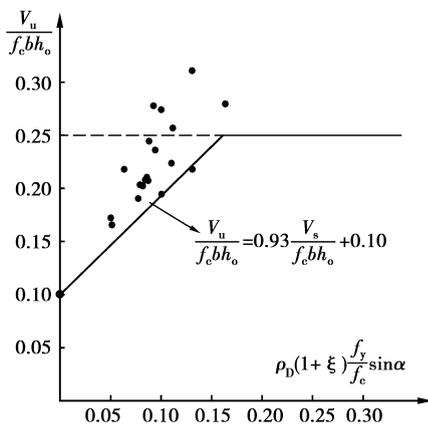


图 6 $V_u/f_c b h_0$ 与 $\rho_D(1+\xi)\sin\alpha f_y/f_c$ 关系图

在表 1 中给出了各试件按式(4)由实际配筋量及材料强度计算出的 V_{cs} 与实测峰值抗剪能力的比较。

还需要说明的是, ξ 在试验中的范围是 0.3~0.93。如前文所述对角斜筋对提高连梁抗剪刚度有较明显作用,而菱形筋则有利于进一步提高构件延性。在设计中,如将这两部分钢筋的数量比例控制在一个合理的范围内,则所设计出的连梁既具有较好的屈服后抗变形能力,又具有抗震所需的延性能力。根据对试验结果的分析,本文建议在这类连梁的设计中可取 $\xi=0.4\sim 0.7$ 。其中当对连梁的屈服抗变形能力有较高要求时, ξ 可取建议的下限值;若希望连梁的延性更好,但对其屈服后抗变形能力要求不很严格时, ξ 则可取建议的上限值。

2.3.2 新型配筋小跨高比连梁的抗弯能力计算公式

新型配筋连梁采用对称配筋方式,其梁端截面的

受力状态如图 5 所示。由于纵向构造筋进入屈服很晚,且对连梁的抗弯贡献较小,为简化计算拟在抗弯能力计算公式中忽略其影响。此外,建议以受压钢筋形心作为近似的截面受压区压力合力的作用点,于是,在继续只考虑单向菱形筋参与受弯的前提下,可将抗弯能力计算公式表示如下:

$$M_u = f_{yz} \cdot A_{sZ} \cdot (h_0 - a'_s) + f_{yD} \cdot A_{sD} \cdot \cos\alpha \cdot (h_0 - a'_s) + f_{yL} \cdot A_{sL} \cdot \cos\beta \cdot h_L \quad (5)$$

由于连梁中菱形筋与对角斜筋拉力的比例为 ξ , 并取 $\alpha=\beta$;另外,因菱形筋交点位于在左右梁端截面高度中点,故 $h_L=(h_0 - a'_s)/2$,其中 a'_s 为受压钢筋形心到受压边缘的距离;并取 $f_y=f_{yz}=f_{yD}=f_{yL}$,即可将式(5)整理如下:

$$M_u = f_y \cdot (h_0 - a'_s) \cdot [A_{sZ} + A_{sD} \cdot \cos\alpha(1 + \xi/2)] \quad (6)$$

在表 1 中给出了各试件由式(6)用实际配筋量及材料强度算得的 M_u 与其试验实测抗弯能力的比较,从中可以看出,式(6)大致体现了实测峰值抗弯能力的回归水准。

表 1 试件的极限承载能力

试件 编号	M_u^c /(kN·m ⁻¹)	M_u^t /(kN·m ⁻¹)	$\frac{M_u^t}{M_u^c}$	V_u^c /kN	V_u^t /kN	$\frac{V_u^t}{V_u^c}$
CB-5	105.1	127.0	1.21	365.0	329.4	1.11
CB-6	78.6	125.0	1.59	359.0	285.3	1.26
CB-7	148.6	168.0	1.13	482.0	382.4	1.26
CB-8	97.5	144.0	1.48	412.0	276.5	1.49
CB-9	108.3	208.0	1.92	594.0	441.9	1.34
CB-10	150.7	193.0	1.28	550.0	546.7	1.01
CB-11	110.2	153.0	1.39	438.0	371.7	1.18
CB-12	102.5	131.0	1.28	375.0	319.6	1.17
CB-13	110.7	128.0	1.16	366.0	327.4	1.12
CB-14	165.8	166.3	1.00	475.0	483.1	0.98
CB-15	118.7	147.0	1.24	420.0	368.5	1.14
CB-16	196.8	209.0	1.06	398.0	339.0	1.17
CB-19	172.2	193.7	1.12	553.5	487.7	1.13
CB-21	276.4	290.5	1.05	415.0	356.1	1.17
CB-22	321.0	321.7	1.00	459.6	340.5	1.35
CB-23	224.8	212.3	0.94	404.4	345.0	1.17
CB-26	113.4	128.6	1.13	367.4	332.6	1.10
CB-28	411.7	432.9	1.05	494.7	348.5	1.42

注:表中 M_u^c, V_u^c 为极限弯矩与极限剪力的计算值; M_u^t, V_u^t 为实测的峰值弯矩与峰值抗剪能力。

2.4 新型配筋方案小跨高比连梁的其它构造措施

新型配筋小跨高比连梁的设计除应满足上述剪压比上限以及抗剪能力和抗弯能力要求,并选择适当的菱形筋与对角斜筋的用量比 ξ 之外,根据试验结果还建议了以下需要满足的构造措施。

1) 对角斜筋分别在两个方向上穿过洞口连梁的两个对角,每个方向均按单排并对称布置,钢筋直径应偏大取用,但每个方向以配置两根或两根以上为宜。同时应对每排对角斜筋设置间距不小于连梁宽度的单肢拉筋,以约束对角斜筋并防止其过早压屈。但对于实际工程中可能出现的梁宽较大的洞口连梁,建议拉筋间距不大于300 mm。另外,建议对角斜筋的最小配筋量不小于 $2\phi 12$,且单侧对角斜筋按连梁截面计算出的配筋率不小于0.08%。对角斜筋从梁端伸入剪力墙肢后应按抗震受拉锚固。当工程中因分层浇注混凝土而需将伸入墙肢的对角斜筋向水平方向弯折时,可允许其向水平方向弯折,但锚固长度不变。

2) 每个方向菱形筋宜平行对角斜筋布置,且可为单根,但直径不宜小于10 mm。

3) 由于箍筋在限制构件裂缝宽度及对混凝土提供约束方面仍起到了一定作用,故建议箍筋的配置应满足《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)中一般钢筋混凝土梁的最小配箍率要求。

4) 由于纵向构造筋进入屈服较晚,且对连梁的抗弯贡献较小,故建议纵向构造钢筋满足《混凝土结构设计规范》(GB50010-2002)中一般梁纵向构造钢筋的构造要求。

3 结 语

1) 针对目前钢筋混凝土高层建筑结构抗震设计中需要解决联肢剪力墙小跨高比洞口连梁应具有足够延性能力(经分析初步认为其位移延性应不低于例如4.0),且应避免交叉暗柱配筋方案要求过大连梁宽度和钢筋施工过于困难的问题,本文作者所在研究组提出了一种配置附加对角斜筋和菱形筋的小跨高比洞口连梁新型配筋方案。经20个足尺试件的试验证实,这

类配筋方案的小跨高比洞口连梁在跨高比为0.8~2.5的范围内,直到剪压比为0.3时,仍具有普遍不低于5.0的位移延性能力。且施工无特殊困难,对连梁宽度也无过高要求。

2) 在对连梁受力机理进行分析归纳和对试验结果进行分析整理的基础上,本文提出了这类连梁的剪压比上限控制条件,以及抗剪能力和抗弯能力的计算公式,并给出了有关构造要求的初步建议,供工程应用及有关设计规范或规程的修订参考。

3) 使用这种配筋方案预计已经不再需要对连梁刚度进行折减,或对连梁作用剪力进行调整。

4) 目前我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002)规定的一般洞口连梁和需要用专门设计的小跨高比洞口连梁的分界线为跨高比等于2.5。但本文完成的试验结果表明,当洞口连梁的跨高比略大于2.5后,若立即改用抗震普通框梁梁的截面设计方法和构造措施,将仍可能不满足相应抗震等级对连梁的延性要求。因此本文提请有关国家设计规范和规程关注,2.5的跨高比界限是否可能过松。

参考文献:

- [1] T. Paulay and J. R. Binney. Diagonally Reinforced coupling beams of shear Walls[S]. ACI Special Publication 42, Detroit, 1974, 2:579-598.
- [2] I A TEGOS and G G PENELIS. Seismic resistance of short columns and coupling beams reinforced with inclined bars[J]. ACI Structural Journal, 1988, 85(1): 82-88.
- [3] 龚炳年,方鄂华.反复荷载下连肢剪力墙结构连梁的性能[J]. 建筑结构学报,1988,1:34-40.
GONG Bing-nian, FANG E-hua. Behavior of coupling beams combining two coupled walls under cyclic loading [J]. Journal of Building Structures, 1988, 1:34-40.
- [4] 陈小英. 基于非线性动力分析的框—剪结构抗震规定的验证[D]. 重庆:重庆大学土木工程学院,2005.
- [5] 徐瑞昌. 小跨高比洞口连梁有效配筋方式的试验研究[D]. 重庆:重庆大学土木工程学院,2004.

(编辑 王秀玲)