

高烈度区联肢墙抗震优化设计方法

杨 龙, 郑梓豪, 付静怡, 文 川

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要:近年来,由于大量超高层建筑的兴建,联肢剪力墙结构体系被广泛采用。其中混合联肢剪力墙由于结合了钢和混凝土材料的优点,抗震性能较传统的联肢剪力墙有了明显改善,已成为近年来的研究重点。对国内外混合联肢剪力墙的试验研究以及分析等进行了综述,详细回顾了过去几十年混合联肢墙(包括钢连梁联肢墙,可更换连梁联肢墙以及钢桁架连梁联肢墙)的发展,并对混合联肢剪力墙的进一步研究和设计做了展望。

关键词:钢连梁;可更换连梁;钢桁架连梁;联肢墙体系

中图分类号:TU398.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)S1-0078-05

Seismicoptimum design method of hybrid coupled walls in high seismic intensity zones

Yang Long, Zheng Zihao, Fu Jingyi, Wen Chuan

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

Abstract: Recently, the coupled wall systems are employed widely result from the development of high-rise buildings. Owing to the combination of the advantages of steel and concrete, the seismic performance of the hybrid coupled walls (HCWs) have been significantly improved compared to the traditional coupled walls, and, hence, the HCWs have been the research focus. Based on the extensive experimental and analytical research on HCW systems over the past several decades, the development of HCW (including the steel coupling beam, replaceable coupling beam and steel truss coupling beam) is reviewed and the prospect for further study and design on the HCWs is presented.

Key words: steel coupling beam; replaceable coupling beam; steel truss coupling beam; coupled wall system

随着中国经济的发展和城市化进程的加速,高层建筑得到了巨大发展,尤其近几年,中国超高层建筑数量和高度更是跻身世界前列。许多地区都位于抗震设防地区,因此,如何经济高效地提高建筑结构的抗震性能已成为中国乃至世界的一个问题。

剪力墙由于抗侧刚度大,能较好地控制结构顶部位移和层间侧移角,因而被广泛应用在高层建筑中^[1]。由于建筑方面需求和双重防线机制等优点,联肢剪力墙也越来越受到设计者的青睐。然而,传

统的钢筋混凝土联肢剪力墙,由于连梁的抗剪承载力要求过高,因此常使连梁高度过高形成深连梁,并不能有效保证结构具有足够的延性^[2]。而组合连梁联肢剪力墙即在连梁中加入型钢,会导致连梁构造复杂,施工困难,震后修复成本高等问题。为了克服上述连梁结构体系的问题,20世纪90年代,钢连梁联肢剪力墙的试验和分析研究就已开始进行。钢连梁比传统斜向配筋钢筋混凝土连梁具有更高的强度、刚度和耗能能力,且能更好的控制层间位移角,

非常适合高地震烈度区^[3]。经过合理设计的钢连梁-联肢组合剪力墙由于具有极好的延性和耗能能力等优点^[6-7],已在超高层建筑领域中得到了广泛应用。如国内在建的长沙国际金融中心就采用钢连梁-联肢组合剪力墙。

正是因为钢连梁这些特性,国内外都对钢连梁-联肢剪力墙进行了大量实验和分析研究。本文对国内外关于钢连梁-联肢剪力墙的研究进展进行了回顾和总结,介绍了已经取得的研究成果,同时提出了一些建议与展望,旨在为钢连梁-联肢剪力墙的进一步研究提供参考。

1 钢连梁

1.1 直插式连接节点

20世纪80年代初期, Marcakis 和 Mitchell^[4], Mattock 和 Gaafar^[5],提出了直插式钢连梁的荷载传递模型(图1),并以此来确定钢连梁的埋入长度。Shahrooz 等^[6]对3个1/2直插式钢连梁与混凝土剪力墙节点进行了往复加载试验,试验表明钢连梁展现了良好的滞回性能,且压应力作用下在梁端能形成理论塑性铰,但在拉应力作用时梁端会减小。

Harries 等在1993年^[7]和1997年^[8]各进行了两个足尺的混合联肢墙节点试验,用以研究连梁直插式连接的抗震性能,结果表明经过合理地设计,直插式连接的连梁可以实现良好的延性和耗能能力。

而 Park 和 Yun^[9-11]建立了5个从美国预应力混凝土协会规定的支架钢梁埋入模型中演变过来的模型,用以对钢连梁埋入长度进行分析,并对这种混合联肢墙进行了试验,结果表明与按弯曲屈服设计的钢连梁相比,按剪切屈服设计的钢连梁具有更好的耗能能力。

1.2 端板螺栓连接节点

2014年,重庆大学的伍云天等^[12]对5个采用端板螺栓连接的双肢组合剪力墙试件(图2)和1个直插式的小比例双肢钢筋混凝土剪力墙试件进行低周往复拟静力试验,通过对比这两种连梁与墙肢的连接方式,发现端板螺栓连接是合理有效的,且与直插式相比,连梁的荷载能通过墙肢中的型钢暗柱均匀传递到墙体,从而避免了在连接区域集中出现裂缝。并且发现以剪切变形为主的钢连梁比以弯曲变形为主的钢连梁具有更优异的抗震性能。另外,将端板螺栓连接和直插式连接进行直接对比^[13],进一步说明了与传统直插式连接方式相比,端板螺栓连接能

够具有相同甚至更好的抗震性能。

另外,伍云天等^[14]还进行了4个1/4缩尺钢连梁与钢-混凝土组合剪力墙连接试件在保持墙体恒定轴力的情况下钢梁的循环往复加载试验,表明端板螺栓连接能够保证连接区域的抗震性能,但按照现有设计方法设计的端板是偏于不安全的,因此需要对现有设计方法进行修正。上述研究表明端板螺栓连接与传统的直插式连接相比,施工难度低,可以提高施工效率,也较符合我国国情,因此有必要对其进行进一步的研究与应用。

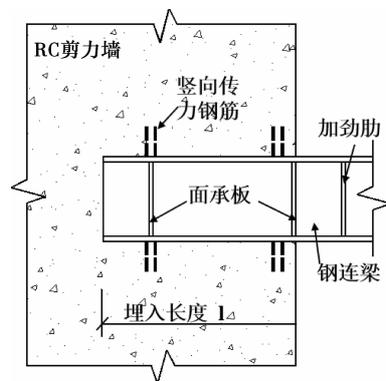


图1 直插式连接钢连梁示意图

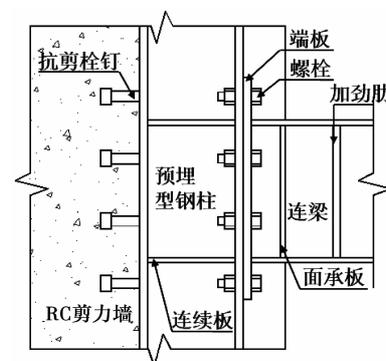


图2 端板螺栓连接钢连梁示意图

1.3 焊接型连接节点

西安建筑科技大学的苏明周教授提出了含型钢边缘构件的混合联肢墙,采用了在墙肢边缘设置型钢暗柱,并将其与钢连梁焊接的新型连接方式。为了研究该新型节点的破坏特征和抗震性能,该研发团队采用ANSYS程序分析表明,此类连接的混合联肢墙具有良好的延性及耗能能力,完全适应于高烈度地区^[15]。还对3个剪切屈服型连梁的混合联肢墙足尺节点进行了低周往复加载试验,发现该新型节点具有良好的抗震性能^[16]。文献^[17-18]分别对耦联比为30%和45%的含型钢边缘构件混凝土联肢墙结构进行了拟静力试验,试验表明剪切屈服的

钢连梁具有较好的延性和耗能能力,屈服后也继续能约束墙肢,且随着耦联比的增加,墙肢裂缝分布较为分散,连梁对结构整体的抗震性能贡献提高。

上述研究初步说明该结构体系中钢连梁与墙肢可形成可靠连接,且不同于传统的钢筋混凝土连梁,以剪切变形为主的钢连梁比以弯曲变形的钢连梁耗能能力更强,可以作为抗震设防的第一道防线,以满足“强墙弱梁”的抗震要求。

2 震后可更换钢连梁

连梁作为联肢剪力墙结构中重要的耗能构件,其重要性是不言而喻的。但是对传统的钢筋混凝土连梁、钢连梁和组合连梁都存在震后修复难度大,代价高等问题。鉴于连梁是地震作用下的重要耗能构件,且作为抗震第一道防线,保护墙肢在地震中免遭严重破坏。因此国内外近年来开始广泛研究可更换连梁。这一思想最早由 Fortney 等^[19]系统提出,即将钢连梁分成 3 段,对中间部分进行削弱(即形成“保险丝”),通过其剪切屈服耗能,能够避免墙和墙梁节点处的破坏,且“保险丝”损坏后也方便进行更换^[20]。

Chung 等^[21]在 2009 年提出了在钢连梁中部加入摩擦阻尼器,通过阻尼器来增强连梁的耗能能力,为了评估这种摩擦阻尼器的性能,用 SeismoStruct 进行了非线性时程分析,结果表明该种连梁的抗震性能优于刚性连梁。

滕军等^[22]在 2007 年提出了一种新型软钢耗能构件(图 3)以提高剪力墙结构的抗震性能,经过分析表明:通过合理设计,该构件能保证结构正常使用下的刚度需求,同时大震作用下耗能效果也较好。2010 年滕军等^[23]通过对 11 个连梁阻尼器的伪静力试验,得出合理设计连梁阻尼器的形状参数可以使连梁具有良好的延性变形能力。

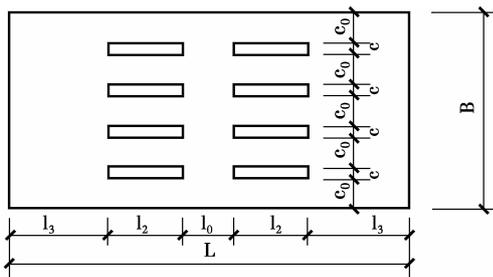


图 3 连梁阻尼器示意图

吕西林等^[24]提出了 3 种用于可更换连梁的耗能部件,分别为腹板开菱形孔的工字钢梁、双层腹板

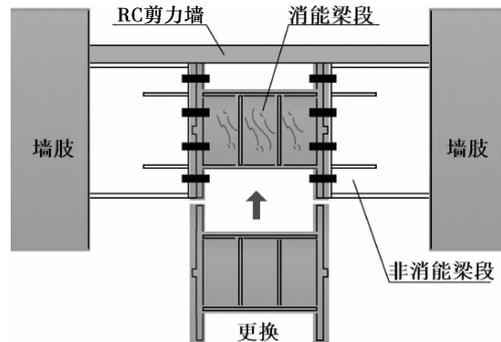


图 4 可更换钢连梁

内部灌铅的工字型钢梁和内部灌铅的平行钢管,并比较了 3 种部件的优劣。

纪晓东等^[25]基于损伤控制的思想,提出了由低损伤墙肢和可更换连梁组成的可快速恢复的联肢剪力墙,如图 4 所示。且为了研究可更换钢连梁的抗震性能和震后可更换能力,他们对分别采用 4 种不同的耗能梁段与非耗能梁段连接方式的 4 个试件进行了拟静力试验^[26]。试验表明经过合理设计连接节点后可实现强震后方便更换的目的。

为了研究不同剪跨比试件的抗震性能,2015 年武豪等^[27]利用 ABAQUS 对不同的可替换构造的钢连梁进行模拟,最终得出不同跨高比的钢连梁应采用合适的可替换构造,这样在实现快速修复的同时能更好地保证结构的抗震性能。

由于针对耗能连梁联肢剪力墙的弹塑性分析仍未有较合适的模拟方法,李冬晗等^[28]提出了一种基于 SAP2000 多线性塑性连接单元与非线性分层壳单元的数值模拟方法,通过算例分析与实体模型结构对比,表明该方法具有良好的实用性,但仍有待试验结构的验证。

3 钢桁架连梁

2003 年广西大学的邓志恒等提出了一种新型组合连梁控制结构体系^[29],为连梁结构设计提供了一条新的途径,是一种具有良好延性,便于设计和施工,震后便于修复的结构体系。2012 邓志恒等^[30]对 8 个钢组合桁架连梁试件的伪静力试验,发现钢桁架连梁具有较高的承载力和良好的延性,且设置了交叉腹杆的连梁总耗能明显大于无交叉腹杆桁架。2014 年为了对钢桁架连梁的整体抗震性能做进一步研究,该研究团队对一幢 12 层带钢桁架连梁的框架剪力墙结构 1:15 的比例模型进行了地震模拟振动台试验,试验表明该种结构体系具有良好的抗震

性能^[31]。

李贤等^[32]提出了两种可拆卸式消能减震钢桁架式连梁,如图5所示,分别为设置屈曲约束支撑的连梁和设置屈曲约束钢腹板的连梁。为了研究该可拆卸式钢桁架连梁的抗震性能,对2个1/2比例的钢桁架连梁试件进行了低周反复荷载试验,结果表明这两种连梁构造均具有较好的强度和延性,其破坏模式为塑性破坏,可用于高烈度地区的联肢剪力墙结构中。

另外,李贤等对3个设置屈曲约束钢腹板的可更换钢桁架连梁大比例试件进行了循环往复加载试验,结果表明这种连梁展现出优异的耗能能力,适用于中高烈度区^[33]。

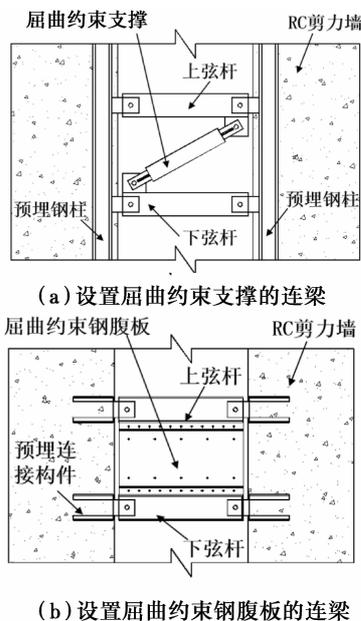


图5 建议的可拆卸式消能减震钢桁架连梁

4 结 论

1) 由于钢连梁联肢剪力墙结构能有效地发挥钢材和混凝土这两种材料的优势,具有良好的经济效益和抗震性能,这种结构体系在结构工程领域具有广阔的应用前景。

2) 钢连梁联肢剪力墙的研究已经较深入,且其结构概论明确和经济效益等优点也已为大众所知。但是,结构工程师能参照的有关钢连梁联肢剪力墙的设计规范还是相当欠缺的。因此,在接下来的研究过程中,应该尽量弥补规范方面的缺陷。

3) 新型钢连梁如可更换钢连梁和钢桁架连梁由于具有震后方便修复等重要优点,可进行更深入的研究,尽快完善其设计方法,才能在以后进行大规模

的推广应用。

参考文献:

- [1] Paulay T, Santhakumar A R. Ductile behavior of coupled shear walls [J]. Journal of the Structural Division 1976, 102(1): 93-108.
- [2] Fortney P J. Seismic performance evaluation of coupled core walls with concrete and steel coupling beams [J]. Steel and Composite Structures, 2007, 7(4): 279-301.
- [3] Harries K A, Shahrooz, B M. Hybrid coupled wall systems [J]. Concrete International, 2005, 27(5): 45-51.
- [4] Marcakis K, Mitchell D. Precast concrete connections with embedded steel members [J]. Journal Prestressed Concrete Institute 1980, 25(4):86-116.
- [5] Mattock A H, Gaafar G H. Strength of embedded steel sections as brackets [J]. ACI Journal Proceedings, 1982, 79(9):83-93.
- [6] Shahrooz B M, Remmetter M E, Qin F. Seismic design and performance of composite coupled walls [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119 (12): 3291-3309.
- [7] Harries K A, Mitchell D, Cook W D, et al. Seismic response of steel beams coupling concrete walls [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119 (12): 3611-3629.
- [8] Harries K A, Mitchell D, Redwood R G, et al. Seismic design of coupled walls-a case for mixed construction [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1997, 24 (3): 448-459.
- [9] Park W S, Yun H D. Seismic behavior of steel coupling beams linking reinforced concrete shear walls [J]. Engineering Structures, 2005, 27(7): 1024-1039.
- [10] Park W S, Yun H D. Seismic behaviour of coupling beams in a hybrid coupled shear walls [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61 (11): 1492-1524.
- [11] Park W S, Yun H D. Seismic behaviour and design of steel coupling beams in a hybrid coupled shear wall systems [J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236 (23): 2474-2484.
- [12] 伍云天,代崇民,肖岩,等. 联肢钢-混凝土组合剪力墙端板螺栓式钢连梁抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(12): 39-48.
- [13] 伍云天,代崇民,周忠亮,等. 剪切机制耗能端板螺栓连接组合联肢剪力墙钢连梁抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2014,35(4):255-261.

- [14] 伍云天,周忠亮,肖岩,等. 钢连梁与钢-混凝土组合剪力墙连接抗震性能研究[J]. 建筑结构学报,2014,36(9):7-17.
- [15] 郭峰. 含型钢边缘构件的混合连肢墙体系钢梁与剪力墙的连接性能[D]. 西安:西安建筑科技大学,2007.
- [16] 宋安良,苏明周,王丽. 剪切屈服型新型混合联肢墙足尺节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2015,48(7):71-81.
- [17] 石韵,苏明周,梅许江. 含型钢边缘构件混合连肢墙结构抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动,2013,33(3):133-139.
- [18] 石韵,苏明周,梅许江,等. 高耦连比新型混合连肢墙结构滞回性能拟静力试验研究[J]. 土木工程学报,2013,46(1):52-60.
- [19] Fortney P J, Shahrooz B M, Rassati G A. The next generation of coupling beams [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete V. Mpumalanga; ASCE, 2006: 619 -630.
- [20] Fortney P J, Shahrooz B M, Rassati G A. Large-scale testing of a replaceable “fuse” steel coupling beam [J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133 (12): 1801-1807.
- [21] Chung H S, Moon B W, Lee S K, et al. Seismic performance of friction dampers using flexure of RC shear wall system [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2009, 18(7): 807.
- [22] 滕军,马伯涛,周正根,等. 提高连肢墙抗震性能的连接耗能构件关键技术[J]. 工程抗震与加固改造,2007,29(5):1-6.
- [23] 滕军,马伯涛,李卫华,等. 联肢剪力墙连梁阻尼器伪静力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31 (12): 92-100.
- [24] 吕西林,陈云,蒋欢军. 新型可更换连梁研究进展 [J]. 地震工程与工程振动,2013,33(1):8-15.
- [25] 纪晓东,钱稼茹. 震后功能可快速恢复联肢剪力墙研究 [J]. 工程力学,2015,32(10):1-8.
- [26] 纪晓东,王彦栋,马琦峰,等. 可更换钢连梁抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(10):1-10.
- [27] 武豪,郭子雄,陈庆猛,等. 不同可替换构造钢连梁抗震性能研究[J]. 世界地震工程,2015,31(2):254-261.
- [28] 李冬晗,何政,欧进萍. 耗能连梁联肢剪力墙弹塑性数值模拟方法[J]. 建筑结构,2013,43(Sup):1161-1165.
- [29] 邓志恒,潘峰,陶晓光,等. 新型组合连梁控制结构体系 [J]. 世界地震工程,2003,19(3):6-11.
- [30] 邓志恒,林倩,胡强,等. 新型钢桁架连梁的抗震性能试验研究[J]. 振动与冲击,2012,31(1):76-81.
- [31] 胡强,邓志恒,庞振忠. 带钢桁架连梁的框架剪力墙结构振动台试验研究[J]. 世界地震工程,2014,30(2):173-178.
- [32] 李贤,吕恒林,余立永,等. 可拆卸式耗能减震钢桁架连梁抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(Sup 1):389-394.
- [33] Li X, Lyv H L, Zhang G C, et al. Seismic behavior of replaceable steel truss coupling beams with buckling restrained webs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 104: 167-176.

(编辑 郭 飞)