

高层建筑斜交网格筒结构抗震概念分析

滕 军¹, 郭伟亮¹, 容柏生², 李祚华³, 董志君¹

(1. 哈尔滨工业大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055;

2. 广州容柏生建筑工程设计事务所, 广州 510170; 3. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要:为了解高层建筑斜交网格筒-核心筒新型结构体系在地震作用下的抗震概念, 参照工程实例建立了典型的钢管混凝土斜交网格筒-钢筋混凝土核心筒结构, 采用弹塑性动力时程分析方法, 基于构件塑性能发展过程明确了体系构件的屈服顺序、探讨了墙肢厚度、斜柱截面、连梁高度等因素对体系构件屈服顺序的影响, 总结了内外筒抗震防线的分布特点, 分析了体系弹性和塑性阶段抗侧刚度的主要影响因素和关键构件以及体系塑性耗能的关键构件。结合“三水准”抗震设防目标和体系抗震防线分布特点以及构件屈服特点, 探讨了该类型结构的抗震概念。

关键词:斜交网格筒; 筒体; 抗震; 抗震防线; 塑性耗能;

中图分类号: TU352. 11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)04-0001-06

Seismic Concept Analysis of High-rise Diagrid Tube Structures

TENG Jun¹, GUO Wei-liang¹, RONG Bai-sheng², LI Zuo-hua³, DONG Zhi-jun¹

(1. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, P. R. China;

2. RBS Architectural Engineering Design Associates, Guangzhou 510170, P. R. China;

3. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, P. R. China)

Abstract: In order to study the seismic concept of high-rise diagrid tube-core tube structures, CFST diagrid tube-concrete core tube structures were designed based on typical project. The elastic-plastic time history analysis method is adopted and the components yield order is summarized based on their plastic developing processes. The influences of wall thickness, inclined column cross section and coupling beam height on the components yield order are studied and the distribution of seismic fortification lines between tubes are presented. The main factors exerting influence on structure lateral stiffness are analyzed and the key components of structure lateral stiffness and plastic energy dissipation are achieved. The seismic concept of this structure is discussed considering the three level earthquake fortification criterion and components yield characteristics at last.

Key words: diagrid tube; tube; earthquake resistance; seismic fortification line; plastic energy

21 世纪初, Norman Foster 将斜交网格筒结构成功应用于瑞士再保险大厦和纽约赫斯特大厦, 引起了世界各国建筑师和结构工程师的关注。该体系是由内核心筒、斜交网格外筒组成的新型结构体系, 其中斜交网格外筒由斜柱和环梁构成, 具有较大的抗侧刚度, 通过梁板与内部核心筒连接形成了筒中筒结构体系^[1-2], 外筒能够提供 60% 以上的抗侧刚

度, 结构体系抗侧刚度显著提高, 使其在高层、超高层建筑的建造中具有潜在的优势^[3]。

目前, 对该新型结构体系的研究多集中在弹性阶段的受力特点分析及影响因素探讨^[4-5]、外网筒简化计算方法理论研究^[6-7]、斜柱角度选取^[8]等方面。对体系大震下非线性性能的研究主要集中在交叉斜柱节点实验^[9-10]、体系抗震性能的总结^[11-12]以及结

收稿日期: 2011-01-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50938001); 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(90715009)

作者简介: 滕军(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事结构抗震抗风、高层复杂建筑结构研究, (E-mail) tengj@hit.edu.cn。

构设计方案比较和优化^[13-14]等方面,对其大震下抗震概念的把握尚不清晰。而在中国,高层斜交网格筒结构多建造在经济发达的城市,这些城市多处在抗震设防高烈度区域,体系的抗震性能是结构设计的中中之重。

与传统结构体系相比,斜交网格筒的结构形式,受力机理,传力路径等存在显著的差异。外筒将楼层竖向和水平荷载转化为斜柱的轴向拉压力向下层传递,传力直接且具有很强的空间协同工作性能,抗侧刚度甚至超过核心筒,体系的屈服机制明显不同于传统结构,抗震防线的分布也将发生较大变化。因此,了解该体系在地震作用下各类构件的屈服顺序,掌握体系内外筒抗震防线的分布,明确体系侧向刚度和塑性耗能的关键构件,建立体系的抗震概念,是确保这类新型结构体系的大震性态,对其进行合理抗震设计的前提。

该文对 10 个钢管混凝土斜交网格筒—钢筋混凝土核心筒结构进行了动力弹塑性时程分析,明确了地震作用下体系的屈服过程和内外筒抗震防线分布特点,分析了体系抗侧刚度、塑性耗能的关键构件,探讨了体系的抗震概念。

1 分析方法

参考典型实际工程广州西塔项目,结合斜交网格筒的受力特点以及研究目标,设计了结构形式规则的斜交网格筒-核心筒结构,其中外筒由钢管混凝土斜柱和钢环梁构成,内部为钢筋混凝土核心筒,内外筒间连系梁为钢梁,交叉斜柱及环梁与斜柱交点均为刚性连接,并采用刚性楼板假定。结构层高 4 m 共 48 层,总高度为 192 m,外筒为边长 36 m 的正方形,内筒为边长 18 m 的正方形。斜柱钢管及钢梁采用 Q345,核心筒按照规范方法采用 HRB400 进行配筋,外筒环梁采用工字钢 800×300×20×40,内外筒间连系梁采用工字钢 600×200×11×17,剪力墙厚度为 1~12 层 600 mm,随楼层的增高每隔 12 层减小厚度 100 mm,至顶层墙厚为 300 mm。连梁宽度与所在楼层的墙厚相同,连梁高度 1 200 mm。钢管混凝土斜柱的截面随高度的增加逐渐减小,壁厚均为 20 mm,具体参数如结构模型图 1 所示,编号为 D10W10C10,为便于阐述,定义一个交叉斜柱高度范围所包含的楼层(6 层)为一个斜交网格筒模块,则结构整体可视为 8 个斜交网格筒模块沿竖向组合而成。通过调整斜柱截面、墙肢厚度及连梁高度等影响内外筒抗侧刚度的主要参数,得到其余 9 个结构模型 D10W10C08、D10W10C12、D10W10C14、D10W08C10、D10W12C10、D10W14C10、D08W10C10、D12W10C10 和 D14W10C10。编号中字母依次代表斜柱截面、墙肢厚度、连梁高度,其后的数字表示参数相对尺寸,

如 D08 表示斜柱截面的直径及钢管厚度均为 D10 时的 0.8 倍。

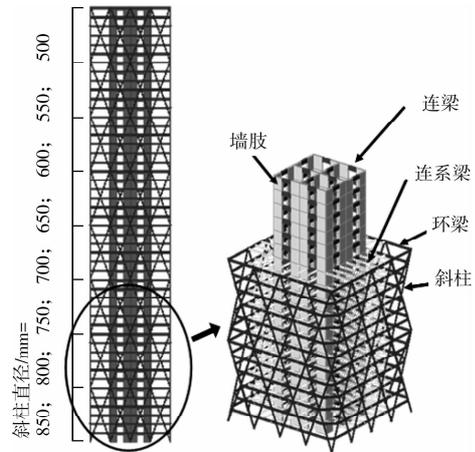


图 1 结构模型

采用 Perform3D 程序,以纤维截面模拟钢管混凝土斜柱及钢筋混凝土墙肢。钢材采用二折线理想弹塑性应力-应变曲线。钢管约束混凝土采用三折线应力-应变曲线^[15],并考虑其强度退化,不同截面参数对应的套箍系数 ξ 及其应力-应变曲线如图 2 所示。其中当 $\xi < 1$ 时,曲线具有下降段,当 $\xi > 1$ 时,曲线不出现下降段。钢筋混凝土剪力墙中的端部约束混凝土采用三折线有下降段的 Mander 约束混凝土应力-应变曲线模型^[16]。构件纤维截面及纤维段分布如图 3 所示,钢管混凝土柱截面外层为钢管纤维,内部为钢管约束混凝土纤维。将截面沿半径划分成若干层,每层再均分成若干段,图中截面共划分了 30 个纤维。截面的剪切特性通过定义可以考虑弹塑性剪切效应的剪切截面来模拟。墙肢截面沿墙长度方向划分纤维,其中端部为 Mander 约束混凝土,中部为非约束混凝土。采用弹塑性动力时程分析方法,选取的地震波如表 1 所示,在分析中将各条地震波调整为相同加速度峰值,且在不加说明的情况下,均采用 3 条地震波计算结果的平均值进行探讨。

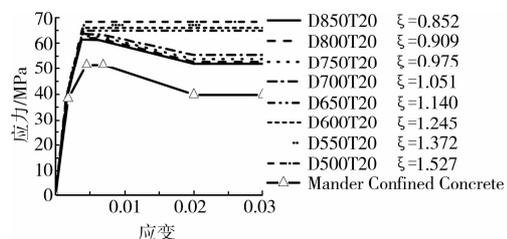


图 2 约束混凝土应力-应变模型

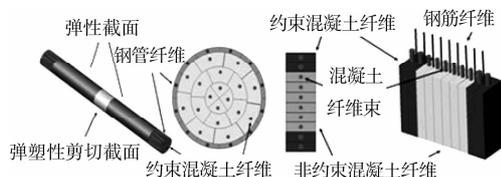


图 3 构件纤维截面示意图

表1 地震记录及其地震动参数

序号	地震	观测站	PGA /g	PGV/(cm·s ⁻¹)	PGD/cm
H1	Imperial Valley-06	El Centro Array #3	0.255 2	40.84	20.98
H2	Northridge-01	USC 90009N Hollywood	0.279 2	23.93	8.94
H3	Chalfant Valley-02	Bishop-LADWP South St	0.205 8	19.32	6.97

2 体系塑性发展过程

为研究斜交网格筒结构体系中各类构件的塑性发展过程和分布特点,逐渐增大地震作用峰值加速度至体系主要抗侧构件均出现一定塑性为止。由于塑性能可以有效地反映结构及构件的性能劣化及损伤累积过程,如图4所示为结构D10W10C10的塑性能发展时程曲线,其中纵坐标为体系各类构件塑性耗能占体系总塑性能的比例,分析初始阶段弹性体系中只有动能、弹性变形能和阻尼能,因此构件塑性能均为0,随着连梁、斜柱和墙肢等先后屈服,体系开始出现塑性能且不断累积,其余构件基本保持弹性。其中连梁最先屈服且塑性耗能持续增加,连梁为体系中塑性耗能最多的构件。斜柱是第2批屈服的构件,其塑性耗能增加速度较慢且增加到一定程度后基本保持稳定。墙肢最后因弯曲导致基底墙肢屈服,由于其塑性主要集中在基底墙肢的边缘处,塑性耗能较小。至分析结束时,在体系的总塑性能中连梁占78%,斜柱占21.7%,墙肢只占0.3%。

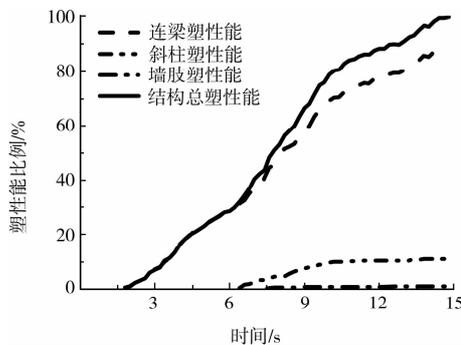
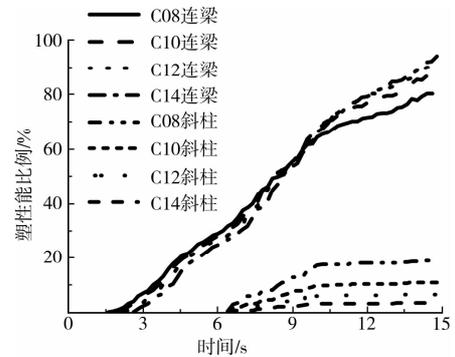


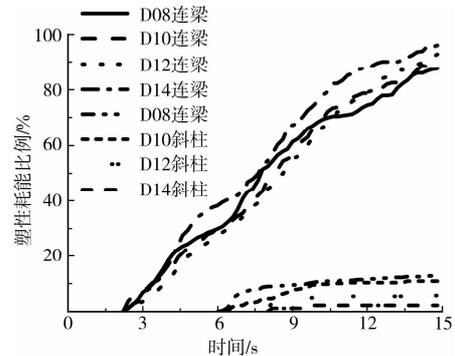
图4 塑性能发展过程

由于墙肢的塑性能相对体系总塑性耗能很小,因此仅对塑性耗能较大的连梁和斜柱进行塑性能参数分析,探讨连梁高度、斜柱截面和墙肢厚度等对塑性能发展过程的影响。对连梁高度的参数分析均以保证其屈服机制一致且不发生剪切破坏为前提。如图5(a)所示,增加连梁高度能推迟其屈服的时刻并增大其塑性耗能比例,但连梁仍是体系最先屈服的构件,斜柱屈服的时刻并不受影响,斜柱的塑性耗能比例随之降低。如图5(b)所示,增大斜柱截面能够推迟斜柱进入塑性的时刻并减小其塑性耗能比例,连梁屈服的时刻不受影响,连梁塑性耗能比例随之增大。如图5(c)所示,增大墙肢厚度不改变连梁和

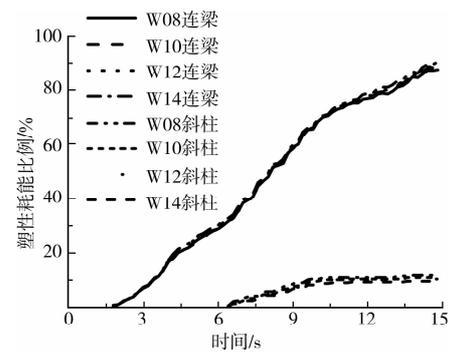
斜柱屈服的时刻,能够增大连梁的塑性耗能比例并减小斜柱的塑性耗能比例,但影响程度较小。可见在斜交网格筒结构体系中,构件的屈服顺序依次为连梁、斜柱、墙肢,改变相应参数水平并不影响其屈服顺序。这也说明体系内外筒抗震防线的分布与传统框架(框筒)-核心筒结构体系相比发生了明显的变化,外筒斜柱先于内筒墙肢屈服,斜交网格筒成为体系的第1道抗震防线,内部核心筒成为了体系的第2道抗震防线,而内筒中最先屈服的连梁仍可视作体系的1道附加抗震防线。



(a) 连梁高度影响



(b) 斜柱截面影响



(c) 墙肢厚度影响

图5 塑性能发展过程参数分析

3 体系抗震性能分析

3.1 抗侧刚度关键构件

如图 6 所示为墙肢厚度、连梁高度、斜柱截面对结构基本周期的影响,增大各参数都能够增大结构侧向刚度从而降低结构第 1 周期,各参数影响程度的排序为斜柱截面影响最大,墙肢厚度次之,连梁高度影响最小。如图 7 所示为保持地震作用不变,各参数对结构塑性层间位移角最大值的影响,增大各参数均可增大结构抗侧刚度而降低结构层间位移角最大值,其中斜柱截面影响最大,连梁高度影响次之,墙肢厚度影响最小。斜交网格筒内力系数随各参数的变化如图 8 所示,这里外筒内力系数为外筒基底内力与结构基底内力的比值。增加连梁高度和墙肢厚度使外筒内力系数减小,增大斜柱截面能够明显增大外筒内力系数。其中外筒剪力系数均大于 0.5,外筒弯矩系数均大于 0.82。可见在斜交网格筒结构中,外筒是体系主要的抗侧力构件,而斜柱是外筒弹性和塑性阶段侧向刚度的关键构件。

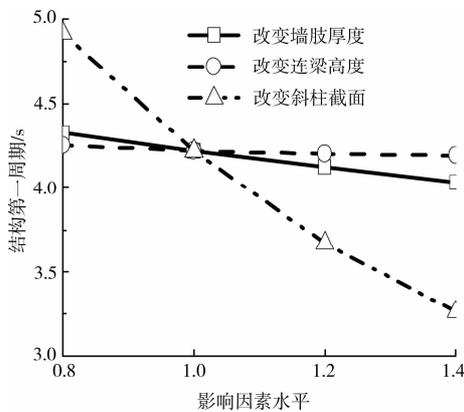


图 6 基本周期参数分析

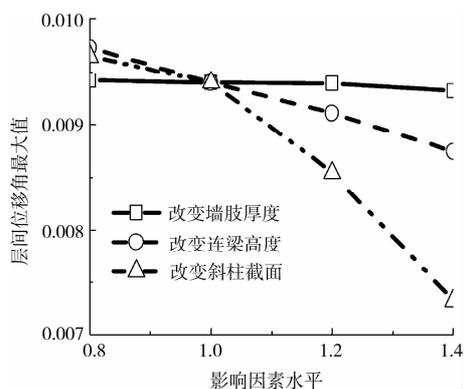


图 7 层间位移角参数分析

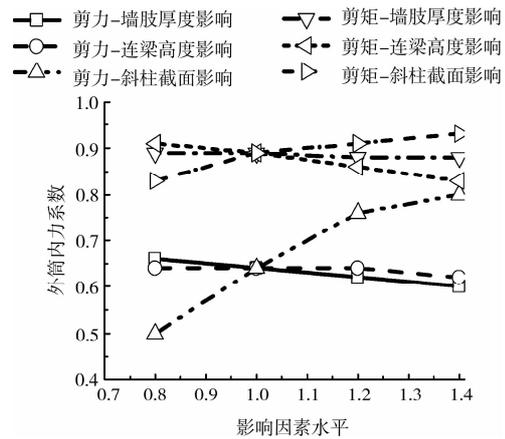


图 8 外筒剪力系数

3.2 塑性耗能关键构件

体系进入塑性后,衡量其抗震性能的不仅仅是其侧向刚度,还应包括其塑性耗能能力。如图 9 所示为 H1 波作用下连梁和斜柱典型的滞回耗能曲线,连梁为端部弯曲型屈服机制,滞回环较饱满,塑性耗能能力强。斜柱以轴向内力为主,屈服机制不利于构件耗能,但由于其轴向内力较大,因此屈服后也能够耗散一定的塑性能。如图 10(a-c)所示为斜柱塑性耗能在楼层间的分布曲线,斜柱塑性能分布相对集中在下部楼层,最大值发生在基底附近的第 1、2 模块内,随楼层的增高而迅速减小,上部个别楼层受高阶振型影响有所增大。改变墙肢厚度、连梁高度和斜柱截面对该塑性能分布规律的影响较小。如图 10(d-f)所示为连梁塑性耗能在楼层间的分布,可见连梁的塑性能分布范围较大且受高阶振型影响较明显,在靠近结构基底和顶部附近的模块内其塑性耗能最大,结构中部楼层略小,结构基底和顶部楼层内连梁塑性能最小。改变墙肢厚度、连梁高度和斜柱截面对连梁塑性耗能在楼层间的分布规律影响较小。斜柱和连梁塑性耗能占体系总塑性耗能的比列受各参数的影响如图 11 所示,增大连梁高度、斜柱截面和墙肢厚度均使连梁塑性耗能比例增加,斜柱塑性耗能比例减小,其中连梁高度影响程度最大,斜柱截面次之,墙肢厚度影响最小,且连梁塑性耗能比例在各参数水平下均在 80% 以上。可见连梁是斜交网格筒结构体系塑性耗能的关键构件。

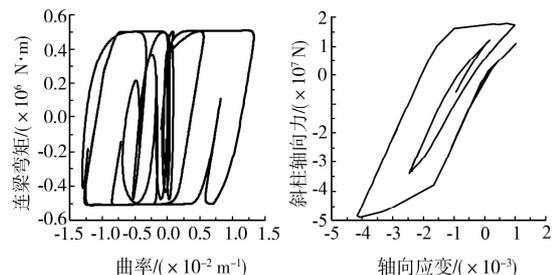


图 9 构件滞回耗能曲线

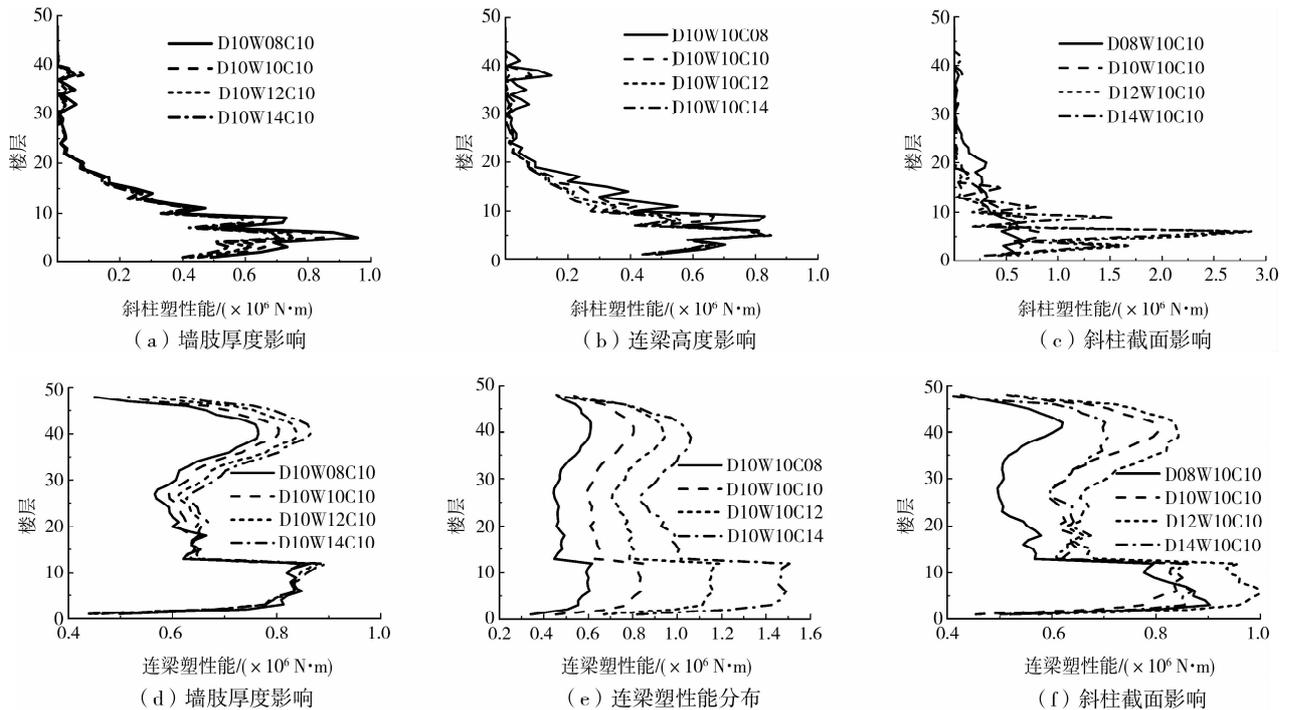


图10 构件塑性性能分布

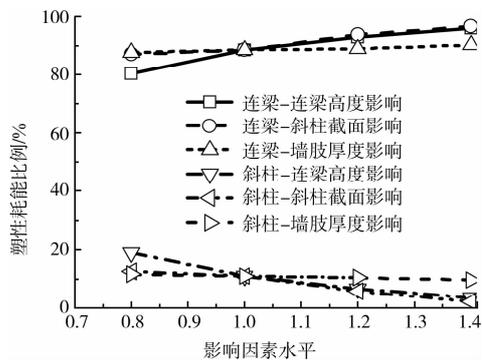


图11 构件塑性性能比例参数分析

3.3 抗震概念探讨

斜交网格筒结构体系的构件屈服顺序、内外筒抗震防线分布特点以及构件的抗震性能与传统的框架(框筒)-核心筒类型结构体系相比发生了较大的变化,因此对于该类型结构的抗震设计,应结合其自身特点建立与其相适应的结构抗震概念。目前中国抗震规范是以“小震不坏,中震可修,大震不倒”为抗震设防目标的,因此对于斜交网格筒结构体系,在小震作用下结构各类构件均应保持弹性从而实现“小震不坏”。在中震作用下,通常结构第1道抗震防线中的构件是允许一定程度屈服的,但是在斜交网格筒结构中,外筒成为结构的第1道抗震防线,而斜柱是其抗侧力和承重的关键构件,一旦发生较严重屈服则不易实现“可修”,因此宜控制斜柱在中震下轻

微损伤甚至保持不屈服。此时内筒墙肢作为第2道抗震防线的抗侧力和承重构件宜控制其屈服甚至保持弹性,而连梁是结构的附加抗震防线,更是结构关键的耗能构件,在兼顾其“可修”的前提下应允许其部分屈服以耗散地震能量。在大震作用下,通常结构的第1道和第2道抗震防线都是允许屈服的,但由于斜交网格筒是结构的主要抗侧力构件,承担了结构大部分的侧向荷载,斜柱作为其侧向刚度的关键构件,一旦大量屈服并发生承载力退化,将导致内外筒楼层荷载重分配,内筒承担的荷载将大幅上升,而墙肢作为结构最后一道抗震防线若发生较严重的屈服则难以确保结构“不倒”。因此,宜适当控制斜柱在大震下的屈服程度和数量,尽量控制斜柱不发生承载力退化,并且墙肢亦仅允许发生较轻的抗弯屈服为宜。此时连梁应允许充分发展塑性,进而降低结构刚度,减小地震作用并大量耗散地震能量。

4 结论

1)在斜交网格筒-核心筒结构中,构件在地震作用下的塑性发展顺序依次为连梁、斜柱、墙肢。斜交网格筒是体系的第1道抗震防线,核心筒是第2道抗震防线,连梁仍可视作体系1道附加的抗震防线。

2)斜交网格筒是体系的主要抗侧力构件,而斜柱是其弹性和塑性阶段刚度的关键构件;连梁是体系塑性耗能的关键构件。

3)斜柱塑性性能分布范围较集中,最大值发生在基底附件的第1、2斜交网格筒模块内,随楼层的增高而迅速减小。连梁塑性性能分布范围较大,且受高阶振型影响较明显,在靠近结构基底和顶部的斜交网格筒模块内其塑性耗能最大,中部楼层略小,基底和顶部楼层的连梁塑性耗能最小。

4)探讨了体系的抗震概念,小震时各类构件应保持弹性;中震下,斜柱宜尽量控制损伤,墙肢宜控制屈服,连梁宜允许部分屈服;大震下,斜柱和墙肢均宜控制屈服数量和屈服程度,特别是斜柱不宜发生承载力退化,而连梁应允许屈服。

参考文献:

- [1] 容柏生. 国内高层建筑设计结构的若干新进展[J]. 建筑结构, 2007, 37(9): 1-5.
RONG BAI-SHENG. Progress of high-rise building's structural design in China[J]. Building Structure, 2007, 37(9): 1-5.
- [2] GORDON W. Building on tradition[J]. Building Design & Construction, 2005, 46(4): 42-46.
- [3] MIR M A, MOON K S. Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects [J]. Architectural Science Review, 2007, 50(3): 205-223.
- [4] 张崇厚, 赵丰. 高层斜交网格筒结构体系抗侧性能相关影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(11): 41-46.
ZHANG CHONG-HOU, ZHAO FENG. Effects of related factors on lateral resistance of high-rise diagrid tubular structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(11): 41-46.
- [5] 郭伟亮, 滕军. 超高建筑斜交网格筒力学性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010, 42(2): 174-179.
GUO WEI-LIANG, TENG JUN. Mechanical property research on high-rise diagrid tube[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2010, 42(2): 174-179.
- [6] MOON K S, JEROME J. Diagrid structural systems for tall buildings characteristics and methodology for preliminary design [J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2007, 16: 205-230.
- [7] MOON K S. Stiffness based design methodology for steel braced tube structures: A sustainable approach[J]. Engineering Structures, 2010, 32: 3163-3170.
- [8] MOON K S. Optimal grid geometry of diagrid structures for tall buildings [J]. Architectural Science Review, 2008, 51(3): 239-251.
- [9] 韩小雷, 黄超, 方小丹, 等. 广州西塔巨型斜交网格空间相贯节点试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(1): 63-69.
HAN XIAO-LEI, HUANG CHAO, FANG XIAO-DAN, et al. Experimental study on spatial intersecting connections used in obliquely crossing mega lattice of Guangzhou West Tower [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(1): 63-69.
- [10] 方小丹, 韩小雷, 韦宏, 等. 广州西塔巨型斜交网格平面相贯节点试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(1): 56-62.
FANG XIAO-DAN, HAN XIAO-LEI, WEI HONG, et al. Experimental study on planar intersecting connections used in obliquely crossing mega lattice of the Guangzhou West Tower [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(1): 56-62.
- [11] 周健, 汪大绥. 高层斜交网格结构体系的性能研究[J]. 建筑结构, 2007, 37(5): 87-91.
ZHOU JIAN, WANG DA-SUI. Performance research on high-rise diagonal frame structure [J]. Building Structure, 2007, 37(5): 87-91.
- [12] 韩小雷, 唐剑秋, 黄艺燕, 等. 钢管混凝土巨型斜交网格筒体结构非线性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 77-84.
HAN XIAO-LEI, TANG JIAN-QIU, HUANG YI-YAN, et al. Nonlinear analysis of huge oblique crossing lattice structure with concrete filled steel tube [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 77-84.
- [13] 傅学怡, 吴兵, 陈贤川, 等. 卡塔尔某超高层建筑结构设计研究综述[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 1-9.
FU XUE-YI, WU BING, CHEN XIAN-CHUAN, et al. Summarization of research on the structural design of a super high-rise building in Qatar [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 1-9.
- [14] 张小冬, 刘界鹏. 大连中国石油大厦结构方案优化设计[J]. 建筑结构学报, 2009(S1): 27-33.
ZHANG XIAO-DONG, LIU JIE-PENG. Optimum design on Dalian China Petrol Tower [J]. Journal of Building Structures, 2009(S1): 27-33.
- [15] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论-研究与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [16] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress strain model for confined concrete [J]. Journal of Structure Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.