

文章编号:1000-582X(2004)10-0128-06

短肢墙预应力楼盖体系墙端弯矩增大系数的试验*

傅剑平,余向前,王飞

(重庆大学土木工程学院,重庆 400030)

摘要:通过对短肢剪力墙无粘结预应力楼盖结构体系2个顶层梁、墙肢、预应力现浇板组合体的试验研究,分析了结构体系中现浇板、受扭连梁等对短肢墙墙端弯矩增大系数的影响。利用电算分析对试验研究结果进行补充和完善,最后建议对该结构体系进行设计时,短肢墙墙端弯矩增大系数应比现行规范相应提高。

关键词:短肢剪力墙;墙端弯矩增大系数;受扭梁;肢厚比

中图分类号:TU375

文献标识码:A

随着我国经济和技术的快速发展,人民生活水平的不断提高,人们对高层住宅体系平面与空间的要求越来越高。现代住宅建筑要求大开间、平面及房间布置灵活、室内不露梁柱;在进行二次装修时,有可能将一些隔断墙体打掉,改变房间的布置。由剪力墙结构和异形柱框架结构衍生发展而来的短肢剪力墙结构能较好地满足这种建筑使用和结构性能上的需要。

这种结构体系在结构布置上,结合一般高层住宅的平面特点,利用中部的竖向交通区设置较多的剪力墙,形成一个较完整或基本完整的筒体;在外围部分,经过不断的实践与改进,最后以剪力墙为基础,并吸取异形柱框架结构的优点,形成一种能比较适应高层住宅建筑的短肢剪力墙结构体系。较之异形柱框架结构体系,该体系能够更好地满足目前人们对大空间住宅和相对灵活分隔空间的功能需求,且更能满足结构的抗侧力需要。

短肢剪力墙无粘结单向预应力现浇板结构可以形成更大的室内空间,平面和房间的分割都相对自由,不仅有效地减轻了结构自重,还能充分利用高强钢材的潜能,调整结构内力。由于这种结构是近年来发展起来的新型结构形式,其受力性能及设计方法还有待进一步研究和完善。根据目前收集到的文献,文献[1]对短肢剪力墙的尺寸和肢厚比的取值提出了建议,文献[2]通过建立有限元模型对短肢剪力墙的弹塑性性能进行了研究,文献[3]对短肢剪力墙结构层间极限

变形能力的计算进行讨论,文献[4]用SATWE对短肢剪力墙结构的整体性能进行了分析,其余文献[5-6]多通过工程实例对短肢剪力墙的设计方法进行了探讨。根据作者目前收集的资料,对短肢剪力墙无粘结单向预应力现浇楼盖结构体系在水平力作用(地震作用和风载)下受力性能的研究,国内外几乎没有展开。文章通过对反复水平荷载作用下的短肢剪力墙无粘结预应力楼盖大空间子结构体系的2个试件进行试验研究,并结合电算分析,对这种结构体系的墙端弯矩增大系数的取值问题进行了探讨。

1 试验概况

试件的全貌如图1所示,2个试件编号分别为YDB-1、YDB-2。短肢墙的肢厚比分别采用5:1和4:1,墙肢的具体截面尺寸及配筋如图2。与水平力方向平行的连梁(受弯梁)的尺寸和配筋如图3。现浇板厚100mm,配与水平力方向平行的单向无粘结预应力筋和双层双向普通钢筋。与水平力方向垂直的连梁(受扭梁)和其余构件的具体尺寸和配筋参见文献[1]。试件的加载及支撑体系如图4所示。首先在现浇板板面上利用砝码施加 1.8 kN/m^2 的竖向均布恒载,然后采用低周交变水平荷载对试件施加水平力。试验在重庆大学土木工程学院大型结构实验室进行。

* 收稿日期:2004-06-23

基金项目:重庆市科委基金资助项目(322123080)

作者简介:余向前(1976-),男,重庆南川人,重庆大学硕士研究生,主要从事混凝土结构研究。

水平荷载先按力控制加载至受弯梁屈服,然后按屈服位移控制逐级加载至试件失效。

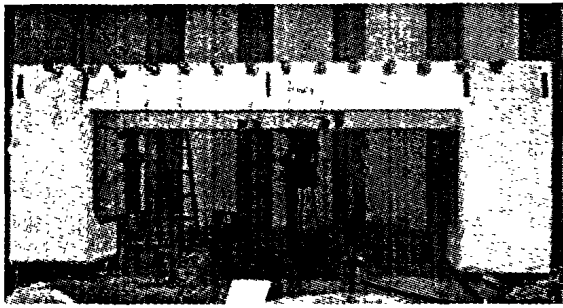


图 1 试件全貌图

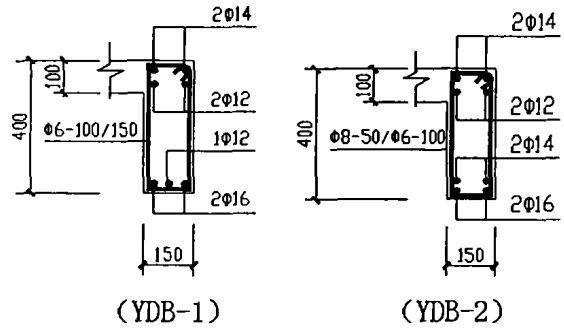


图 3 受弯梁截面配筋

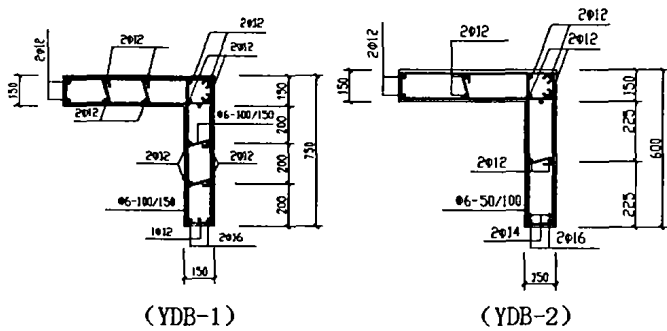


图 2 短肢墙截面配筋

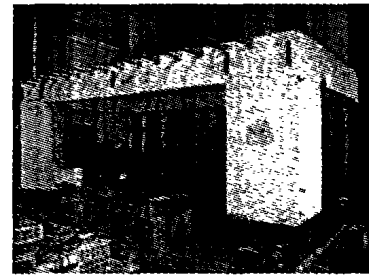


图 4 试验加载及支撑体系

2 主要试验结果分析

2 个试件的极限荷载和失效方式表 1。

表 1 试件的极限荷载和失效方式

试件	肢厚比	墙肢设计弯矩增大系数	推极限荷载/kN	拉极限荷载/kN	失效方式
试件一	5 : 1	1.65	228	114	两个试件均以受弯梁梁端出现塑性铰,并在此部位形成较宽的主裂缝而失效。
试件二	4 : 1	1.39	178	138	

根据试验现象及实测钢筋应变可知,在试验中墙端设计弯矩增大系数和各试件的尺寸及配筋条件下,结构体系在受到水平荷载作用时,都是受弯梁梁端纵筋首先达到屈服,形成塑性铰。在梁端逐渐形成较宽的主裂缝,最后此部位的承载力下降而导致试件失效。试件一失效时受扭梁和短肢墙纵筋都没有屈服,试件二失效时受扭梁部分纵筋则已经达到屈服,短肢墙也有部分纵筋达到或接近屈服,但还没有达到短肢墙极限承载力。总的来看,试验中的 2 个试件都形成了较为理想的梁铰机构,在加载后期,受弯梁在推力方向承载力下降明显,由于单向预应力筋的作用,预应力现浇板参与受力明显,结构的受力体系大致形成了现浇板—短肢墙受力体系。下面从 2 个方面来讨论结构中短肢墙墙端弯矩的增大系数取值。

2.1 现浇板的影响

根据文献[1]中对受弯梁的有效翼缘宽度的分析可以知道,试验研究的结构在受到水平荷载时,现浇板对受弯梁的受力性能是有明显帮助的,受弯梁的有效翼缘宽度可以取至短肢墙的肢端。尤其是试件受推时,受弯梁的梁端抗弯刚度有了显著的增强,使得受弯梁的梁端抗弯能力有所提高。所以在用能力设计法进行受弯梁—短肢墙的承载力级差设计时,应考虑现浇板对受弯梁的抗弯能力提高这一影响因素,以免使墙端弯矩增大系数取得过小,从而不能达到“强墙弱梁”的设计目的。下面将 2 个试件达到极限荷载时短肢墙墙端的弯矩及受弯梁梁端的弯矩与其理论设计值进行比较,以使我们能更清楚现浇板对受弯梁的抗弯能力及墙端弯矩增大系数的影响,如表 2 所示。

表 2 受弯梁端部弯矩的试验极限荷载值和理论设计值的比较

试件 编号	受力 方式	墙端弯矩 M_w	试验极限荷载值		理论设计值		比值 M_w/M_w^0
			受弯梁梁端弯矩 M_b	M_w/M_b	墙端弯矩 M_w^0	受弯梁梁端弯矩 M_b^0	
试件一	推	163.2	118.7	1.37	153.8	72.5	1.63
	拉	78.1	62.8	1.24	133.5	62.6	1.00
试件二	推	130.9	103.2	1.26	112.2	70.5	1.46
	拉	94.5	75.6	1.25	130.4	78.2	0.97

说明:表中各弯矩的单位为 kN·m

表2中试验极限荷载值指试件的最大推拉水平力下短肢墙墙端弯矩值和受弯梁梁端弯矩值。理论设计值是指按材料的实测强度取值对短肢墙墙端弯矩和受弯梁梁端弯矩进行计算。从表中可以看出,试件受推时,按试验极限荷载得到的受弯梁梁端弯矩比正常设计时的梁端弯矩大得多,试件一增大63%,试件二增大45%,其中现浇板对受弯梁梁端抗弯能力的提高是相当有效的。而试件一增大的幅度比试件二大了许多,这和试件二的短肢墙肢长减小导致受弯梁的有效翼缘宽度减小,从而试件二受弯梁的梁端抗弯刚度减小有关。另外,现浇板内板筋的间距增大,导致受弯梁翼缘内的受力钢筋减少也是一个影响因素。试件受拉时,因现浇板此时处于受弯梁的受压区,受弯梁翼缘内的受压板筋和预应力筋对受弯梁梁端的受弯极限承载力没有直接贡献,故试件受拉时按试验极限荷载得到的受弯梁梁端弯矩跟正常设计时的梁端弯矩相差不大。

由此可知,试验研究的结构体系在受到水平推荷载时,现浇板对受弯梁梁端的实际承载力的影响是很大的,在对这类结构进行“强墙弱梁”的能力级差设计时,特别是受弯梁梁端承受负弯矩时,必须考虑现浇板对受弯梁梁端承载力的增大作用,否则将导致短肢墙墙端的弯矩增大系数过小,不能形成理想的梁墙结构体系。而在受弯梁梁端承受正弯矩时,则可以不考虑现浇板对受弯梁梁端极限承载力的作用。

2.2 受扭梁的影响

各国规范在抗震设计中一般没有考虑受扭连梁的抗扭能力对墙端弯矩增大系数的影响,但实际上,受扭梁的抗扭能力对柱(墙)端弯矩增大系数是有一定影响的。试验研究的结构在受到水平荷载作用时,在结构体系的边节点处,由受弯梁梁端弯矩和受扭梁梁端扭矩共同平衡短肢墙墙端弯矩,如图5所示。

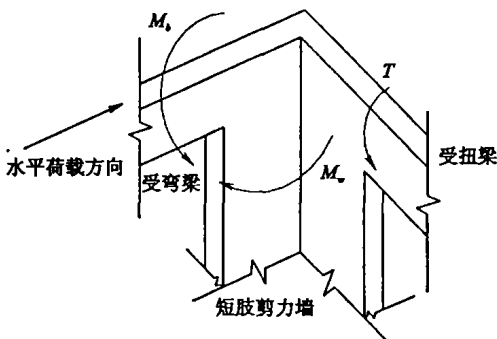


图5 边节点受力平衡示意图

从表2可以看出,试验达到极限荷载时,无论试件受推还是受拉,短肢墙墙端弯矩都比受弯梁梁端弯矩大一些,平均大25%左右。由此可见,在极限荷载时

按试验条件设计的试件,其受扭梁梁端承受的扭矩大约为受弯梁梁端弯矩的0.25倍,这个比例是比较大的,所以在考虑墙端弯矩的增大系数时,受扭梁梁端的扭矩作用是不能忽略的。

3 电算分析

3.1 电算分析的可行性验证

通过对2个无粘结预应力楼盖短肢剪力墙结构体系子结构模型的试验测试,对这种结构体系在水平荷载下影响短肢墙墙端弯矩增大系数的因素进行了探讨,得出了一些结论。由于试验模型数量不多,对该结构体系在水平荷载下的墙端弯矩增大系数的取值还没有形成比较系统的认识。下面通过大型通用有限元软件ANSYS进行电算分析,对前述问题的试验测试结果进行补充和完善。

采用ANSYS程序的弹塑性计算功能进行试件在水平荷载作用下受力性能的全过程分析。混凝土材料采用带有分离式钢筋的SOLID65单元。该单元考虑了混凝土开裂及压碎性能,混凝土本构模型采用多线性随动强化模型。破坏准则在三向受压时为William-Warnke5参数准则,即用配筋率及强化方向模拟钢筋网,分离式钢筋模型在应力应变矩阵中把混凝土与钢筋的贡献组合起来,即用混凝土和钢筋的应力应变矩阵按各自体积率叠加,然后求得单元的综合刚度矩阵。无约束混凝土的单轴受压应力-应变关系采用《混凝土结构设计规范》(GB50001—2001)中规定的单轴应力-应变关系公式,其中峰值点采用实测数据。钢筋采用分离式钢筋模型,选用LINK8三维单元作为钢筋单元,可承受单轴拉力-压力。此单元不仅考虑钢筋的应力应变中应力强化、塑性等特性,而且还可以考虑钢筋的预应力情况。钢筋的应力-应变关系采用经典的双线性强化模型。

因试验结构模型的具有明显的对称性,只取对称的试验试件的模型的一半进行计算分析。混凝土单元的划分模型见图6,计算模型中钢筋单元见图7。模型中边界条件完全按试件的实际约束条件来建立。对称面上在垂直于受力方向的面上没有位移。首先施加竖向荷载,并且考虑混凝土自重。再施加水平荷载,分多个荷载级别进行计算。

下面仅从单向水平荷载作用下试件模型的计算结果来探讨短肢墙墙端弯矩增大系数的取值。施加竖向荷载后,单向逐级增大水平荷载,可以得出与试验大致相吻合的结论。图8(a)、(b)分别是按试验中2个试件的尺寸和材料强度建立的电算分析模型的荷载-位

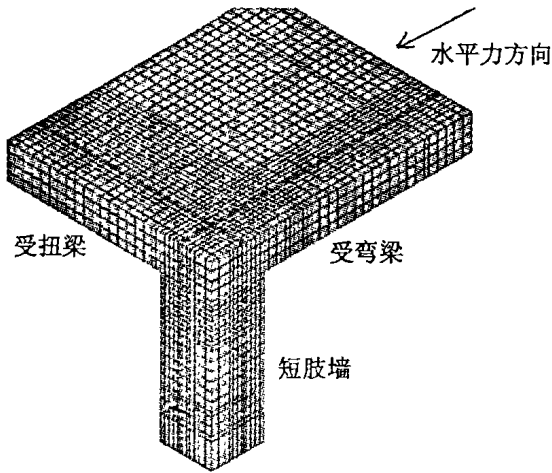


图 6 有限元计算模型中混凝土单元划分

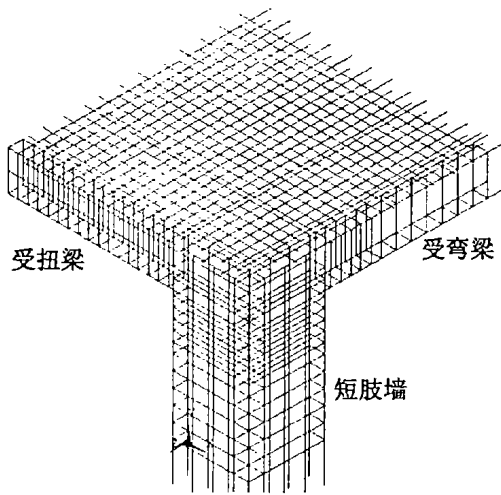
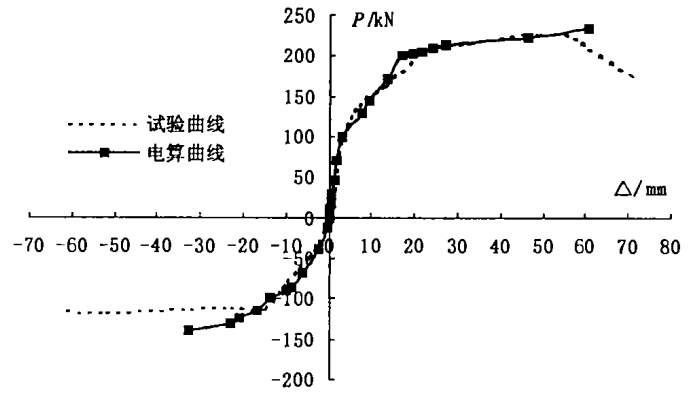
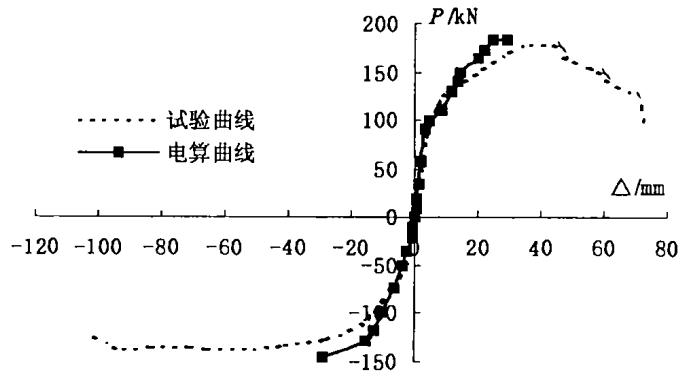


图 7 有限元计算模型中钢筋单元划分

移曲线与试验实测的 2 个试件左墙肢的荷载 - 位移骨架曲线对比图。因电算分析中加载始终采用力来控制,故只绘出曲线的上升段。从图中可以看出,由于电算分析中是单向加载而不是反复推拉加载,不存在累计损伤的问题,故电算分析中的极限荷载均比试验中的极限荷载略有所增加。但总的来看,两曲线在上升段还是比较吻合的,总体变化趋势大致相同。



(a) 试件一模型电算结果与试验结果荷载 - 位移曲线的比较



(b) 试件二模型电算结果与试验结果荷载 - 位移曲线的比较
图 8 2 个试件电算结果与试验结果荷载 - 位移曲线的比较

3.2 电算模型变参计算结果分析

通过上面的分析,对所用程序的可行性已经进行了验证。现仍采用试验中试件一和试件二的尺寸模型,其余构件的配筋不变,只是改变其受弯梁的配筋率(即相应改变了短肢墙墙端弯矩增大系数),分别进行电算分析,得到如下表 3 和图 9。

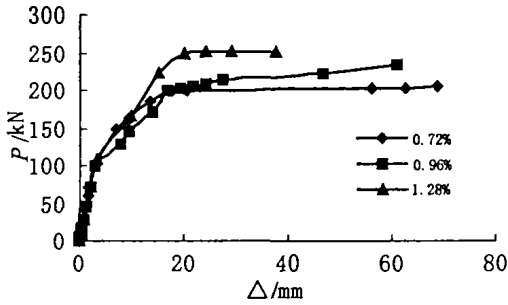
模型受推时受弯梁的配筋率分别采用 0.72%、0.96% 和 1.28%,模型受拉时受弯梁的配筋率分别采用 0.93%、1.28% 和 1.45%。分析以上各图及表 3,结合电算结果中的钢筋应力,可以得到如下的规律和结论:

表 3 电算模型中受弯梁采用不同配筋率时的极限荷载

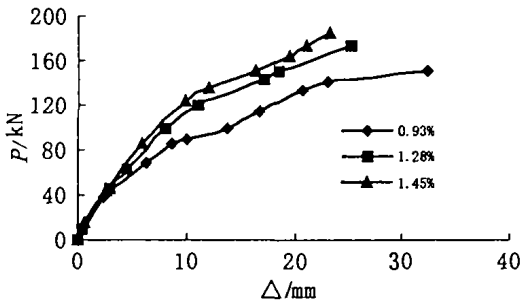
荷载方向	配筋率/%	极限荷载 /kN		$(P_1 - P_2)/P_2$
		肢厚比为 5 : 1 模型的 极限荷载 P_1 /kN	肢厚比为 4 : 1 模型的 极限荷载 P_2 /kN	
推荷载	0.72	207	174	0.19
	0.93	235	183	0.28
	1.28	252	201	0.25
拉荷载	0.93	150	129	0.16
	1.28	173	146	0.16
	1.45	185	168	0.10

1) 随着受弯梁配筋率的增大,各模型承受的极限荷载也随之提高,但达到极限荷载时的位移有所减小。

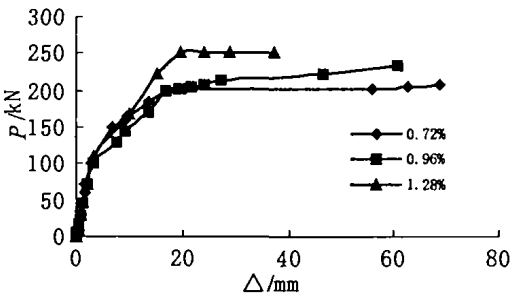
受弯梁配筋率相同的情况下,短肢墙肢厚比越大,模型能承受的极限荷载越大。在该实验模型的尺寸条件



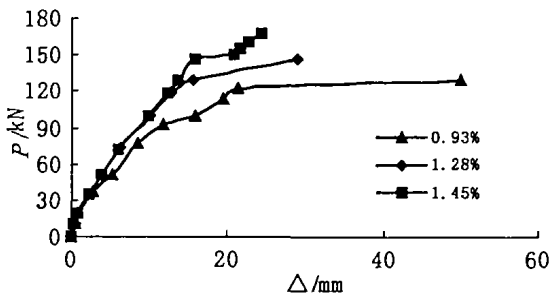
(a) 肢厚比为 5:1 的模型受推时荷载 - 位移曲线



(b) 肢厚比为 5:1 的模型受拉时荷载 - 位移曲线



(c) 肢厚比为 4:1 的模型受推时荷载 - 位移曲线



(d) 肢厚比为 4:1 的模型受拉时荷载 - 位移曲线

图9 电算模型中受弯梁采用不同配筋率时荷载 - 位移曲线

下,受推时肢厚比为 5:1 的模型比肢厚比为 4:1 的模型的极限承载力平均提高了 24%,受拉时其极限承载力则平均提高了 15%,可见肢厚比在提高极限承载力的效果方面是比较可观的。

2) 肢厚比为 5:1 的各模型在受到单向水平推力作用达到极限荷载时,从电算结果来看,配筋率为 0.72% 和 0.96% 的模型中短肢墙外层的受拉钢筋均没有达到屈服,而配筋率为 1.28% 的模型中短肢墙外层的受拉钢筋已接近屈服。受到单向水平拉力作用达

到极限荷载时,配筋率为 0.93% 的模型中短肢墙肢端的受拉钢筋远未屈服,配筋率为 1.28% 的模型中该受拉钢筋接近屈服,而配筋率为 1.45% 的模型中受拉钢筋已经达到屈服。可知短肢墙肢厚比为 5:1 时,在短肢墙配筋一定的情况下,为提高结构的极限承载力,同时为保证短肢墙的外墙肢纵筋不出现受拉屈服,受推时受弯梁上部采用 1.3% 左右的配筋率较为合适,此时短肢墙的墙端弯矩增大系数为 1.32;受拉时受弯梁下部的配筋率采用 1.5% 左右时较为合适,此时短肢墙的墙端弯矩增大系数为 1.27。笔者建议在短肢墙肢厚比为 5:1 时,将短肢墙的墙端弯矩增大系数控制在 1.25 ~ 1.35 之间较为合适。同时建议受弯梁的配筋率最好控制在 1.0% ~ 1.5%,属于经济配筋率的范围。

3) 肢厚比为 4:1 的各模型受推达到极限推荷载时,配筋率为 0.72% 的模型中短肢墙外层的受拉钢筋没有屈服,而配筋率为 0.96% 和 1.28% 的模型中短肢墙外层的受拉钢筋已达到屈服。受到单向水平拉力作用达到极限荷载时,配筋率为 0.93% 的模型中短肢墙肢端的受拉钢筋尚未屈服,配筋率为 1.28% 的模型中该受拉钢筋接近屈服,而配筋率为 1.45% 的模型中受拉钢筋已经达到屈服。可见在这种肢厚比下,为了提高极限承载力和保证短肢墙墙端不出现塑性铰,受推时最好采用比受弯梁的上部配筋率为 0.96% 时的墙端弯矩增大系数 1.23 大的屈服级差;受拉时受弯梁下部的配筋率采用 1.5% 左右时较为合适,此时短肢墙的墙端弯矩增大系数为 1.29。笔者建议在这种肢厚比的情况下,仍将短肢墙的墙端弯矩增大系数控制在 1.25 ~ 1.35 之间比较合适,受弯梁的配筋率最好控制在 1.0% ~ 1.5%,这样既能在一定程度上提高结构体系的承载力,又能保证结构中受弯梁的梁端首先屈服出现塑性铰,而短肢墙外层的受拉钢筋不致达到屈服。

4 结论

通过试验和有限元模型电算分析,对短肢剪力墙无粘结预应力楼盖结构体系的墙端弯矩增大系数的取值进行了初步探讨,主要得出了以下结论:

1) 结构体系中受弯梁承受端部负弯矩时,由于墙肢范围内的现浇板可以作为受弯梁的有效翼缘,现浇板对受弯梁梁端的抗弯刚度及梁端的极限抗弯承载力的影响是比较大的,在进行承载力级差设计时,必须考虑现浇板这种提高受弯梁梁端极限承载力的作用,否则就会降低墙端的弯矩增大系数,使短肢墙的受弯实际承载力与受弯梁的梁端承载力的级差比预期想要获

得的级差要低,这对推迟墙端塑性铰的出现和提高结构的抗震是不利的。在受弯梁端部正弯矩时,则可以不考虑现浇板的这种作用,这部分板仅可视为受弯梁的受压翼缘。

2) 无论结构体系受到水平推荷载还是受到水平拉荷载,体系中受扭梁受到的扭矩对节点处受力的平衡的影响是不能忽略的,用能力设计法对结构中顶层节点进行级差设计时,必须考虑受扭梁传递的扭矩对节点处短肢墙墙端总弯矩的影响。试验中受扭梁梁端扭矩所占受弯梁梁端弯矩的比例大约为 25% 左右。从试验结果数据来看,若按现行规范对墙端弯矩增大系数取值,对试验研究的短肢剪力墙和无粘结单向预应力板的大空间结构来看,不能保证“强墙弱梁”的实现。故用能力设计法对结构体系进行设计时,应相应提高墙端弯矩增大系数。

3) 结构体系的极限承载力随着受弯梁配筋率的增大而提高,但达到极限荷载时位移有所减小。在受弯梁配筋率相同的情况下,短肢墙的肢厚比越大,模型的极限承载力越高,且提高的程度比较可观。在试验研究的结构体系中,短肢墙肢厚比为 5:1 和 4:12 种情况下,为提高极限承载力,同时避免墙端出现塑性

铰,作者建议将受弯梁的配筋率最好控制在 1.0% ~ 1.5%,将短肢墙的墙端弯矩增大系数取为 1.25 ~ 1.35 比较合适。考虑到短肢墙预应力楼盖体系不宜用于高烈度地区,同时考虑到墙身轴力对墙端极限弯矩的有利作用,建议对二、三级抗震等级的柱端弯矩增大系数的取值比现行规范 GB50010-2002 相应提高。

参考文献:

- [1] 余向前. 短肢墙无粘结预应力楼盖结构体系抗震性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [2] 黄东升,程文褰,彭飞. 短肢剪力墙的弹塑性性能研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2003,33(2):164-167.
- [3] 丁永君,纪刚. 短肢剪力墙结构层间极限变形能力的计算[J]. 天津大学学报,2000,33(3):33-36.
- [4] 郭燕凤,苏海利,黄智勇. 应用 SATWE 进行短肢剪力墙结构的整体分析[J]. 安阳师范学院学报,2002,(5):15-17.
- [5] 张健康,陈勇. 对短肢剪力墙结构设计的体会[J]. 广东土木与建筑,2001,(8):14-16.
- [6] 吴春,叶敬. 高层建筑短肢剪力墙与异形柱结构受力分析与设计探讨[J]. 贵州工业大学学报,2002,31(3):83-85.

Experimental Researches of Flexural Strength Coefficient of Short Structure Wall with Unbonded Prestressed Floor System

FU Jian-ping, YU Xiang-qian, WANG Fei

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: By means of reversed cycle loading tests on the two specimens of short shear wall and unbonded prestressed floor system, the authors analyze the effect on the flexural strength coefficient between walls and beams of cast-in-placed slab and torsion beam. It complements the test results in terms of computer analysis. It brings forward some design method that the flexural strength ratio in this dimension structure system should be amplified than the criterion.

Key words: short structure wall; flexural strength coefficient; torsion beam; length depth ratio

(编辑 姚 飞)