利用斜支撑提高异型柱框架结构抗扭性能的研究

陆新征　江见鲸

(清华大学 土木工程系　北京　100084)

摘　要: 采用有限元程序 ANSYS 和 SAP ,对异型柱框架结构和异型柱加斜支撑结构进行了空间受力分析。单个结构单元的非线性分析说明,在异型柱框架中添加了人字形支撑后,结构的抗扭刚度和抗扭承载力有显著提高,延性也有所提高。通过对异型柱框架结构和矩形柱结构进行地震作用下的对比分析,说明异型柱框架的抗扭性能要远低于等惯性矩的矩形框架结构,而添加斜支撑对提高异型柱框架抗震性能有显著作用。并建议在刚心与质心不一致的异型柱框架结构中,应适当使用斜支撑结构以提高结构抗扭性能。

关键词: 异型柱　抗扭　空间受力

STUDIES ON IMPROVING THE TORSION RESISTANCE ABILITY OF SPECIAL SHAPE COLUMN FRAMES USING INCLINED SUPPORTS

Lu Xinzheng　Jiang Jianjing

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University　Beijing　100084)

Abstract: Spatial analysis on special shape column frames and special shape column frames with inclined supports is carried out here using finite element software, Ansys and SAP. The non-linear analysis of a simply spatial frame shows that the torsion stiffness and strength are improved obviously after inclined supports are added. The ductility of the frame is improved, too. Comparing to that of rectangle column frames, the torsion ability of special shape column frames is much lower under seismic load. However, the inclined supports can improve it effectively. Furthermore, advises are given that when the stiffness center and mass center are not coincident in a special shape column frame, inclined supports should be used to improve the torsion ability of the frame.

Keywords: Special shape column　Torsion　Spatial analysis

异型柱框架住宅结构采用柱肢宽与填充墙基本同厚的"T"、"L"和"+"形等异型截面柱,避免了传统框架住宅结构中因采用矩形柱造成的柱楞突出,容易满足建筑及使用功能,扩大了使用面积,近年来得到大量应用。但是,由于异型柱采用的截面形式,其截面抗扭惯性矩一般较等刚矩形截面要小,仅为后者的 1/2～1/4[1]。因此,当异型柱框架结构出现扭转作用时,将会对结构产生很不利的影响。但是由于近年来框架复合墙体结构大量出现,使得在框架中设置人字斜支撑变得较为容易,因此启发我们在异型柱框架的某些部位适当添加支撑结构,从而达到以较少材料提高结构刚度和安全性的目的。

1　单个结构单元的非线性有限元分析

由于现代计算机技术的高速发展和力学研究的不断深入,现代的有限元软件的功能日益强大,可以部分或全部代替模型实验。因此,在本文中,我们使用通用有限元分析程序 ANSYS 和 SAP 分别进行结构的非线性和线性分析。

先取单个结构单元如图 1 所示,上下楼板为刚性楼板,下楼板固定,上楼板施加扭矩。四角柱为 L 型柱。斜支撑配筋分别取为 4ϕ10,4ϕ14 和 4ϕ20,设混凝土为 C30,钢筋均为二级钢,屈服强度 f_y = 310 MPa。代入非线性有限元程序 ANSYS,混凝土单元使用 ANSYS 提供的混凝土 8 节点块体单元,混凝土的单轴受压应力 - 应变关系采用过镇海建议公式,并取轴心抗压强度(即峰值应力)为 f_c = 22 MPa,初始弹性模量 E_c = 30 GPa,泊松比为 0.2,上升段参数 α = 2.0,下降段参数

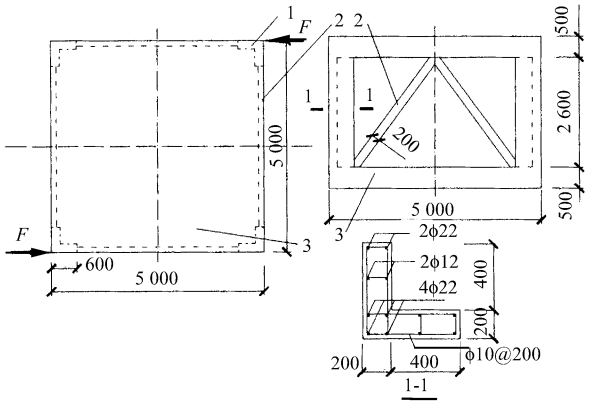

图 1　结构单元及其配筋情况

1 - L 型柱;2 - 人字支撑;3 - 刚性楼板

第一作者:陆新征　男　1978 年 12 月出生　博士研究生

收稿日期:2001 - 07 - 02

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

$\alpha = 0.8$,峰值应变 $\varepsilon_0 = 0.002$。钢筋单元采用 ANSYS 的 Link 8 空间一维链杆单元,其应力 - 应变关系取为二折线弹性强化模型,初始弹性模量 $E_s = 210$ GPa,屈服后弹性模量 $E_s' = 10$ GPa,计算得到该结构单元的荷载 - 位移曲线和钢筋单元应力随变形发展如图 2,图 3 所示。不同支撑情况对结构的极限强度、初始刚度、峰值割线刚度的影响如图 4 所示。

从计算结果的对比中可以看出,在添加了斜支撑后,框架的抗扭刚度,抗扭承载力有较大提高,破坏时的延性也有所提高。通过对比钢筋应力分布图可以看出,各项指标提高的关键原因在于添加斜支撑后,结构的传力方式发生了变化,从框架结构变为框架加桁架筒体结构,从而大大提高了结构的抗扭刚度和承载力。特别是当荷载到达极值点时,柱顶和柱脚出现了塑性铰,框架体系的承载力将迅速丧失,从而导致无支撑结构延性较差。而加了斜支撑的结构在此时则由框架加桁架结构变为桁架筒体结构,仍然具有较好的承载力,从而使结构破坏后仍具有较好的延性,这对于抗震是十分有利的。

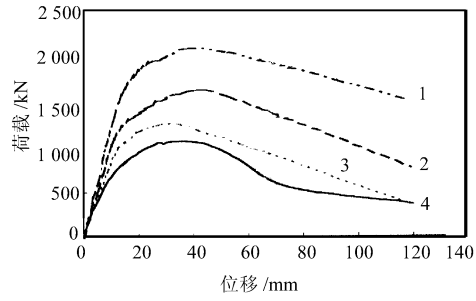

图 2　荷载 - 位移曲线

1 - 4φ20;2 - 4φ14;3 - 4φ10;4 - 无支撑

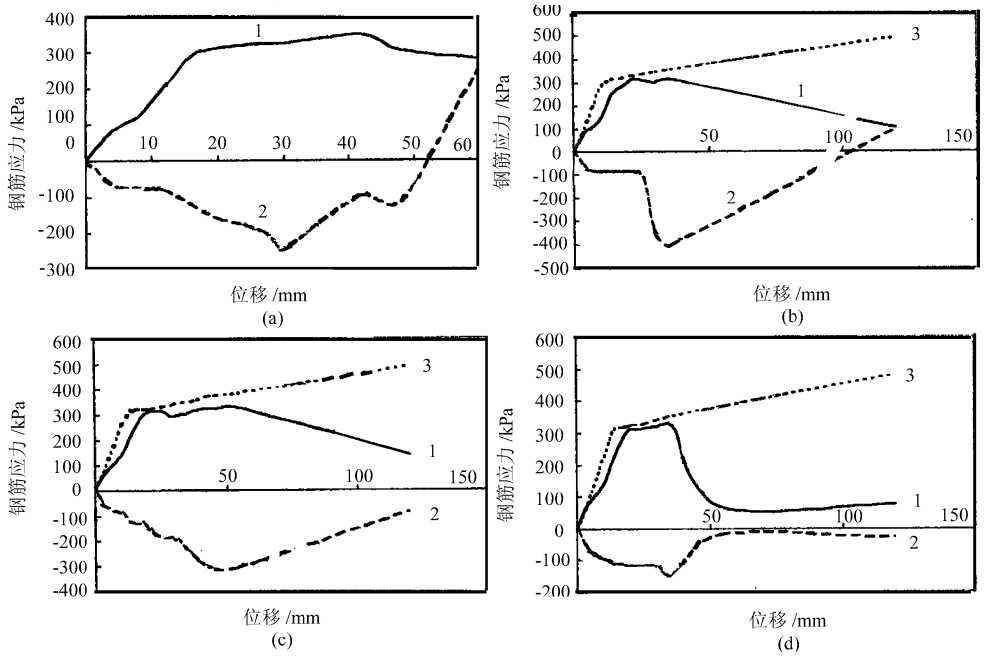

图 3　钢筋应力 - 位移关系

(a) - 无支撑;(b) - 斜支撑配筋 4φ10mm;(c) - 斜支撑配筋 4φ14mm;(d) - 斜支撑配筋 4φ20mm

1 - 异型柱受拉纵向钢筋应力;2 - 异型柱受压纵向钢筋应力;3 - 支撑内部钢筋应力

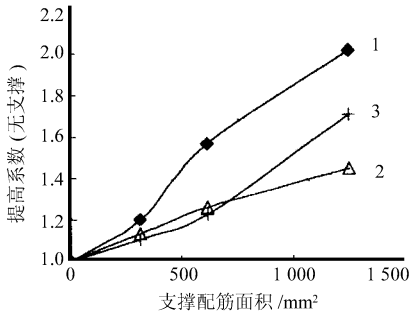

图 4　支撑的影响情况

1 - 最大荷载比;2 - 初始刚度;3 - 峰值割线刚度

此外,由钢筋的应力变化还可以看出,在 3 种支撑配筋情况下,支撑钢筋均先于异型柱受拉钢筋屈服,这种多道防线的设计,可以吸收更多的能量输入,提高结构在地震作用下的可靠度。

综合分析以上结果可以看出,在异型柱结构中适当增加支撑结构,所增加的材料用量仅约 10 %～15 %。但是可以使结构抗扭的承载力提高 50 %～100 %,而且具有多方面的综合效应。因此,在异型柱框架中适当使用支撑结构是一个具有较好的综合效益的方案。

2　斜支撑对结构整体的影响

某 10 层异型柱框架结构平面布置如图 5 所示,由于结构平面布置不对称,使结构的重心和刚心偏离,在地震作用下,其势必产生一个对结构非常不利的扭矩作用。因此,在图示位置对其添加人字形支撑以提高其抗扭能力。另外,为了便于比较,又取其等惯性矩矩形柱结构进行对比分析。计算得 4 种方案的自振周期如表 1 所示,其中第 1、2 阶振形为结构平动振形,第 3 振形为扭转振形。

由表 1 可以看出,在没有支撑的情况下,等惯性矩矩形

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

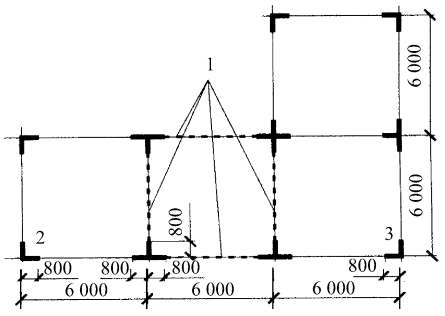

图 5　异型柱框架平面布置

1 - 拟添加支撑的位置;2 - 角点 1;3 - 角点 2

柱结构的平动周期与异型柱基本相同,但是转动周期双方差别较大。说明通常采用的等惯性矩设计方法虽然可以解决结构抗弯问题,但是结构的抗扭问题没有得到解决。

现对该结构沿 Y方向输入 EL Centro 地震波和唐山地震波,得到各结构方案顶点位移时程关系。以 EL Centro 地震波反应为例,如图 6 所示。可以清楚看出,尽管异型柱无支撑框架和等惯性矩矩形柱框架的顶点位移平均值差不多,但异型柱无支撑框架存在严重的扭转问题,而等惯性矩的矩形柱框架其扭转问题就要好得多。也就是说,当结构的刚心和重心不一致时,对异型柱结构的影响要比对矩形柱的影响大得多。

表 1　结构自振周期

自振周期	异型柱框架无支撑	异型柱支撑方案	等惯性矩矩形柱	等惯性矩矩形柱支撑方案
1 阶	0.986 3	0.706 4	1.026 8	0.564 0
2 阶	0.981 7	0.633 4	0.949 6	0.516 3
3 阶	0.770 1	0.517 1	0.646 8	0.378 2

然而,当增加了支撑结构后,结构在地震作用下的位移明显减小,且结构扭转情况得到明显好转,具体比较见表 2。

由以上比较可以看出,由于矩形柱框架结构自身具有较好的抗扭转性能,扭转相对而言不是主要矛盾,只要结构的抗水平位移满足要求,就没有必要添加支撑结构。但是,在异型框架中,当结构不对称时,扭转往往是主要矛盾,因此,添加支撑结构对异型柱体系有着更加重要的作用。适当添加斜支撑后,异型柱框架结构的抗扭性能可以达到矩形柱结构的水平。

表 2　地震反应

结构方案	EL Centro 地震波(A_{max} = 3.417 m/s^2)				唐山地震波(A_{max} = 2.00m/s^2)			
	顶点最大位移		顶点位移差		顶点最大位移		顶点位移差	
	数值/ mm	支撑效率*	数值/ mm	支撑效率	数值/ mm	支撑效率	数值/ mm	支撑效率
异型柱框架无支撑	34.5	—	27.9	—	4.30	—	2.15	—
异型柱支撑方案	12.2	0.354	3	0.108	0.89	0.206	0.30	0.140
等惯性矩矩形柱	17.7	—	2.7	—	2.97	—	0.22	—
等惯性矩矩形柱支撑方案	10.7	0.605	1.6	0.593	1.05	0.354	0.21	0.955

* 支撑效率 = (支撑方案结果)/(无支撑方案结果)。

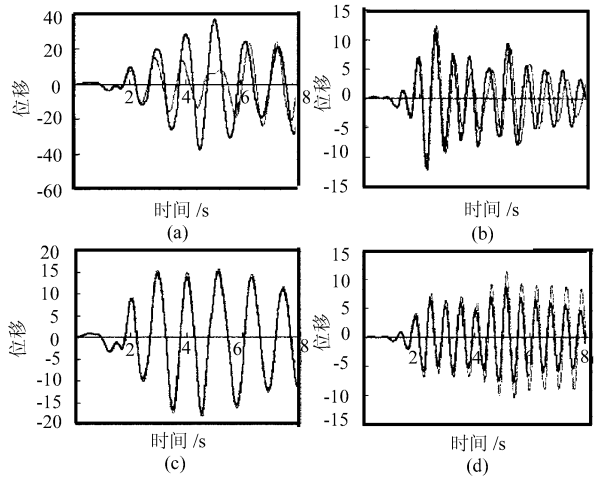

图 6　EL Centro 地震波下结构反应

(a) - 异型框架无支撑;(b) - 异型框架加支撑;

(c) - 矩形柱无支撑;(d) - 矩形柱加支撑

——角点 1;……角点 2

3　结　论

(1) 异型柱结构在空间受力上,存在抗扭转性能较差的问题。但是,通过添加人字型斜支撑结构,在增加材料用量不多的情况下,可以显著提高其在扭转作用下的刚度和承载力,对结构延性也有一定提高。

(2) 通过对一个 10 层框架结构在地震作用下的时程分析对比可以看出,当结构刚心与质心不重合,在地震作用下可能发生扭转时,异型框架结构的扭转要比等惯性矩的矩形柱严重,而用常用的等惯性矩法设计不能有效解决结构的扭转问题。

(3) 通过添加支撑结构,可以有效减小框架结构在地震作用下的反应。而对于异型柱结构,支撑对抗扭转性能的提高远较矩形柱结构显著。因此,斜支撑对提高异型框架的抗扭承载力有着更强的实际意义。

(4) 在异型框架结构设计中,如果结构在地震作用下可能有较严重的扭转作用,建议应在合适的位置适当布置斜支撑,形成支撑筒体,这样可有效提高异型框架的抗震能力。

(5) 本文的分析数据都是利用有限元程序计算得到的,其中有一些问题,如理想锚固,刚性楼板等都与实际有一定差距,还需要试验数据进行细致分析。

(下转第 67 页)

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd.　All rights reserved.

对于纵向排架,将所有联系梁的刚度增大 2 倍。同时在框架中添加支撑构件。所有荷载按照程序生成的数据取值。

(3) 对更改后的平面计算文件进行分析计算。计算结果中,钢柱及支撑体系的内力、最大应力、稳定性等结果直接采用,用以分析钢柱截面是否适当;对于框架梁和联系梁,只取内力计算的结果,然后利用自行开发的组合梁计算程序对组合梁截面强度、刚度进行验算。通过这种分析方法,可以基本保证整体计算中梁、柱相对刚度的准确性,从而保证内力计算的准确性。

(4) 次梁的计算采用手算内力,然后利用程序验算截面。节点、柱脚的设计参照 STS 的计算结果,同时,利用步骤(3)中的平面内力计算结果,进行手算校核。基础设计利用步骤(3)中的柱底内力计算结果。

2.3 构造措施

为保证结构体系的实际受力情况与计算模型相符合,需要有合适的构造措施来保证。在组合梁与工字形截面柱的刚接点处,钢梁部分与柱的连接采用通常做法,混凝土板中的负弯矩钢筋在组合梁的翼缘有效宽度范围内,遇到钢柱的部分,焊接在钢柱翼缘上,这样保证组合梁对负弯矩的抵抗能力。在铰接节点处,与组合梁的翼缘有效宽度范围内的板中钢筋同样处理,避免因梁端转角过大引起混凝土表面开裂。节点的构造如图 3 所示。

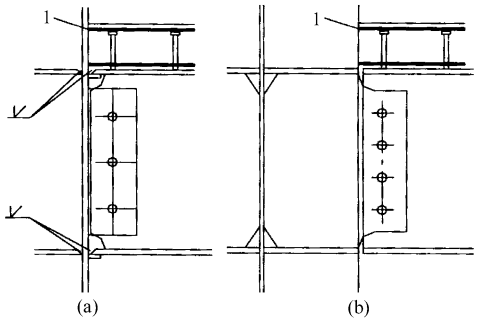

图 3 节点构造

(a) - 梁柱刚接节点;(b) - 梁柱铰接节点

1 - 焊接

在组合梁的翼缘有效宽度范围内,板内钢筋通过组合梁的计算确定,不同于其它位置楼板配筋。组合梁的翼缘有效宽度可以根据规范《钢 - 混凝土组合结构设计规程》确定,本工程中,为明确起见,每种梁均规定了翼缘有效宽度,如图 4 所示,其具体对应数值列于表 1。

2.4 主要经济技术指标

由于本工程用于档案资料贮存,所以设计中的一个特点是楼面荷载远大于普通民用结构,楼面的活荷载达到 12 kN/m^2,这也是本工程采用钢结构的原因之一。楼面梁采用钢 - 混凝土组合梁,可以降低截面高度,增大刚度,节省钢材用量。本工程中主要梁构件跨高比如表 2 所示。

表 1 翼缘有效宽度 mm

梁翼缘宽	b_0	b_1
400	750	
300	600	600
250	600	600
200	600	

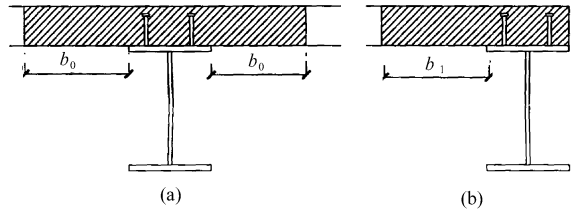

图 4 翼缘有效宽度

(a) - 中间梁;(b) - 边梁

表 2 主要梁构件跨高比

构件位置	构件类型	跨高比
档案存贮区	框架梁	11.5
	次梁	13.8
办公区	框架梁	15.6
	次梁	17.3

整个工程平均用钢量为 56 kg/m^2,其中右侧办公区用钢量仅为 27 kg/m^2,与普通民用钢结构相比,采用组合结构之后,用钢量明显节省。整个工程具有很好的经济技术效益。

3 结 语

(1) 对于荷载较大的特殊多层民用结构,采用钢结构以及钢 - 混凝土组合结构是一个很合理的选择。要根据实际情况选择一个合理的结构体系,使传力途径明确合理。

(2) 选择合理的计算方法,同时采取相应的构造措施保证计算模型与实际情况符合。

(3) 采用钢 - 混凝土组合楼盖可以降低截面高度,增加刚度,减少用钢量,具有很好的经济技术效益。

参考文献

1 聂建国,李勇. 钢 - 混凝土组合梁刚度的研究. 清华大学学报(自然科学版),1998,38(10):38～41

2 聂建国,沈聚敏,袁彦声. 钢 - 混凝土简支组合梁变形计算的一般公式. 工程力学,1994,11(1):21～27

3 聂建国,余志武. 钢 - 混凝土组合梁结构在我国的研究及应用. 土木工程学报,1999,32(2):3～8

(上接第 41 页)

参考文献

1 张晋,吕志涛,冯健. 异型柱结构中若干问题的研究. 结构工程师,2000,(增刊):312～316

2 刘威,李杰. 钢筋混凝土异型柱框 - 桁架低周反复实验研究. 结构工程师,2000,(增刊):349～353

3 王滋军. 中高层大开间钢筋混凝土异型柱框架结构住宅体系研究:[博士学位论文]. 南京:东南大学,2000

4 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 Ansys 上的实践. 西安:西北工业大学出版社,2000. 77～114

5 江见鲸. 钢筋混凝土结构非线性有限元分析. 西安:陕西科学技术出版社,1994. 5～13

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.