

带缝空心 R. C. 剪力墙结构模型动力特性研究

金怀印¹, 许淑芳², 周德源¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西西安 710055)

摘要:为了研究带缝空心钢筋混凝土结构房屋的动力特性,进行了1:3.0模型6层结构房屋的模态试验及拟动力试验,获得了结构的周期、振型、阻尼比、动力放大系数等动力特性参数。在试验研究的基础上,利用有限元分析软件 ANSYS 对结构模型进行了模态分析。研究表明,带缝空心钢筋混凝土剪力墙结构是一种介于框架结构和传统剪力墙结构之间的新型结构形式。试验结果与 ANSYS 模拟结果吻合较好,利用 ANSYS 软件进行仿真分析是测试结构动力特性的一种可靠方法。

关键词:空心钢筋混凝土剪力墙;模态分析;拟动力试验;动力特性

中图分类号:TU375.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7329(2008)01-0077-06

Study on the Dynamic Characteristics for Model of Silt Hollow Shear Wall Structure of Reinforced Concrete

JIN Huai-yin¹, XU Shu-fang², Zhou De-yuan¹

(School of Civil Engineering, Tong Ji University, Shanghai 200092; School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055)

Abstract: In order to study the dynamic characteristics of silt hollow shear wall building of reinforced concrete, the modal test and pseudo-dynamic test of 1/3.0 scale model of 6-storey building were made. Dynamic characteristic parameters such as periods, vibration modes, damping ratios, amplificatory coefficients of seismic action were obtained. On the basis of the experimental study, it uses finite element analysis software ANSYS to make modal analysis of the model structure. The results show that silt hollow shear wall building of reinforced concrete is a new type of structure which is between frame structure and traditional shear wall structure. The experimental results accord well with simulation results with ANSYS, which shows simulation with the software ANSYS is a reliable way to test structure's dynamic characteristics

Keywords: hollow shear wall of reinforced concrete; modal analysis; pseudo-dynamic test; dynamic characteristics

空心钢筋混凝土剪力墙具有节省材料、自重轻、延性大、耗能能力强、抗震性能好、节能等优点。为了进一步改善空心钢筋混凝土剪力墙结构的抗震性能,使其适应各种不同类型建筑的要求,本文提出了带缝空心钢筋混凝土剪力墙,并进行了相关试验研究。

1 模型设计与制作

建筑原型总高 18 m,共 6 层,层高 3.0 m,按 1/3.0 缩尺比制作模型,取 3.6 m×9.3 m 两个开间进行试验研究,模型总高 6.5 m(含基座),共 6 层,层高 1 m,模型墙厚 70 mm,墙中空心柱直径为 35 mm,用外径

为 35 mm、壁厚为 1.5 mm,两端封闭的外壁涂防水剂的纸管成型(纸管不取出),每层设有截面为 70 mm(宽)×100 mm(高)(加载层为 70 mm×120 mm)的圈梁,在墙板端部以及竖缝的两侧均设置了暗柱,暗柱尺寸详见文献[1]附图。结构的剪力墙墙板、暗柱、圈梁及楼板均采用现浇施工工艺。模型结构的平面布置图、立面图见图 1,部分墙体详图见图 2。

模型的混凝土强度等级为 C30,墙板水平和竖向分布钢筋采用 $\phi 3$ 镀锌铁丝,圈梁及构造柱箍筋为 $\phi 4$ 镀锌铁丝,其余为 $\phi 8$ 光圆钢筋,楼板配筋为 $\phi 6$ 光圆钢筋。

* 收稿日期:2007-09-15

基金项目:西宁市科技开发计划项目(2000-K-13);陕西省教育厅专项资金资助项目(01JK172)。

作者简介:金怀印(1977-),男,同济大学在读博士生,主要从事钢筋混凝土结构抗震性能研究,(E-mail) jb770828@yahoo.com.cn。

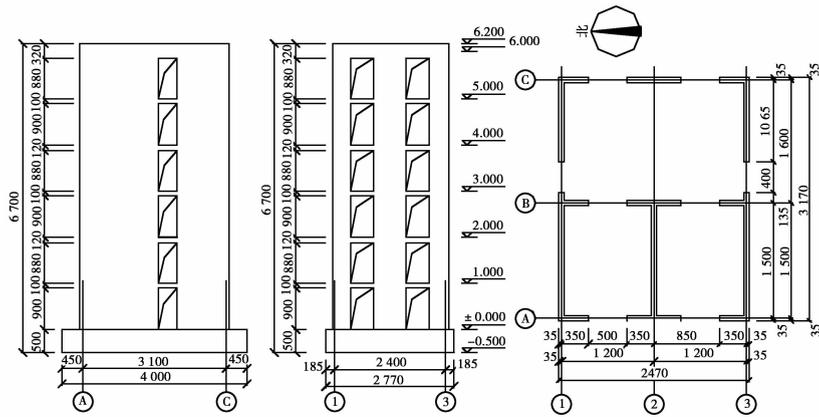


图1 模型结构的平、立面布置图

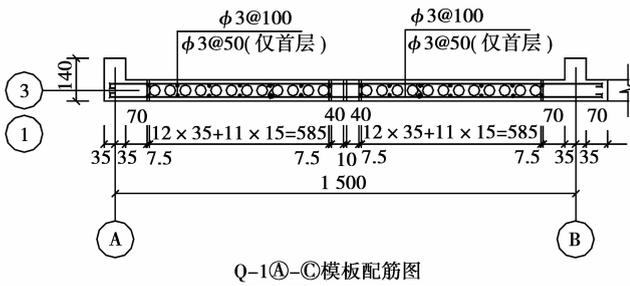


图2 模型结构的部分墙体详图

2 模态试验

模型固定在台座上,在模型结构的2、4层楼板的重心处各布置一个拾振器,在6层楼板南北两对称位置处各布置一拾振器。采用一带有橡皮的木制榔头,通过30 kN的荷重传感器敲击结构顶层对称位置处,其作用是产生一时间很短的脉冲信号。试验分两组进行,每组30次。第一组间隔10 s锤击一次,取一次样,第二组间隔五秒锤击一次,取一次样。结构发振后,其振动信号由拾振器拾起,经放大器放大,由PC机进行模态分析。

根据文献[2]的模态分析理论,对响应进行处理可得振型、频率、周期等动力参数。鉴于本结构模型层数较少,刚度较大,低阶振型起主要作用,因此,本文主要研究低阶振型及频率。模态分析所得结构第一振型如图3所示。可以看出配重前后结构一阶振型基本不变。

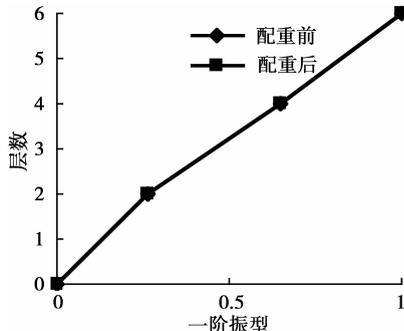


图3 试验前结构的第一振型

结构的一阶振型已不再是典型的弯曲型,而是倾向与弯剪型,4层以下有弯曲型趋势,四层以上有剪切型趋势。这与文献[3]所研究的十层空心钢筋混凝土剪力墙结构的振型是一致的,结构的振型呈现出以弯曲型为主的弯剪型特征,这与普通剪力墙结构的振型是不同的,由此可知,空心的存在使得结构的振型发生了明显的改变,结构具有了弯剪型的变形特征。

3 拟动力试验

3.1 加荷与测试方法^[4]

竖向荷载在试验前一次施加完毕。水平荷载通过钢筋混凝土反力墙借助三台电液伺服加载器分别在2、4、6层(加载层)施加。试验采用的地震波为EL-Centro波(N-S分量),输入峰值加速度分别为50 gal、100 gal、200 gal、400 gal、800 gal。拟动力试验中,首先根据地震加速度时程,将某一时刻的地震加速度以及由电液伺服加载器实测的该时刻结构的反力输入计算机中,用逐步积分法求解运动方程,计算出下一步结构的地震反应位移;由计算机控制电液伺服加载器将此计算反应位移施加到结构上,同时实测相应的结构反力。如此反复实现:计算位移——施加位移——实测结构恢复力——再计算位移的循环过程。

试验用顶点电液伺服加载器控制结构顶点的位移,其余各电液伺服加载器控制其加载力,并且其余两加载器的载荷与顶点加载器的载荷在整个试验过程中均保持固定的比例。各作动器加载的荷载比,本文采用基顶弯矩等效的原则求解,即保证各层所受地震作用相对于基础顶面的弯矩与折算成的各加载层所受荷载相对于基础顶面的弯矩相等,并以顶层为基准求出荷载比。

在墙板、连梁、暗柱及端柱上布置应变片,用以测试

结构变形特征、内力分布,采用 7V08 智能数据采集仪采集数据。在二、四层横向对称轴上分别布置一个位移计,测量结构的位移,6 层两端对称布置两个位移计,测量结构的顶点位移及判定结构整体是否发生扭转。

3.2 试验过程

3.2.1 结构破坏过程

峰值加速度 50 gal 时,结构没有开裂。峰值加速度 100 gal 时,2 层、3 层连梁根部出现垂直弯曲裂缝。峰值加速度 200 gal 时,顶部位移为 1.65 mm。南墙西侧 1 层楼板底部施工缝位置出现水平裂缝,长度约有 130 mm,裂缝宽度较小,南墙 1 层、6 层西侧和 4 层墙板的竖缝下部表层混凝土出现微裂缝,对结构的刚度、整体性、耗能等影响很小。2、3 层连梁裂缝继续发展。峰值加速度 400 gal 时,结构各构件的裂缝开展非常明显。各层连梁都已经出现裂缝,1 层墙体出现多条弯剪斜裂缝,结构 1、2 层的墙板的竖缝已基本贯通,竖缝处混凝土发生剥落,竖缝两侧墙体开始呈现出独立工作的趋势,此时竖缝对结构的整体性、刚度、耗能等均已发生了明显影响,该阶段结构 5 层、6 层东侧的竖缝也已出现微裂缝。峰值加速度为 800 gal 阶段,墙体、连梁不断产生新的裂缝,原有的裂缝亦加长加宽,各层竖缝均已基本贯通,竖缝两侧墙体均有明显的独立工作的趋势,竖缝作用已得到较为显著的发挥。拟静力试验阶段,结构进入破坏阶段,裂缝数量增加较多,并且各层连梁的端部、底层柱脚、竖缝及洞口根部的混凝土被压碎,形成塑性铰。1、2、3 层墙板竖缝两侧分别形成交叉弯剪斜裂缝。试验结束后的结构模型见图 4。



图 4 试验结束后的模型

3.2.2 与不带缝空心剪力墙结构破坏形态及受力特点对比分析

带缝空心钢筋混凝土剪力墙板是在空心剪力墙板中间按一定间距设置竖向缝,并在竖缝处放入胶合板作为隔板形成的。被竖缝分割而成的各空心剪力墙板的四周设置圈梁、暗柱,对墙板提供有效约束。该结构在弹性状态下刚度较大,初始开裂形态与不带缝空心钢筋混凝土剪力墙结构类似;但是结构进入弹塑性阶段后,竖缝开始工作,被竖缝分割而成若干小墙板独立工作的趋势逐渐加强。结构裂缝分布形态与不带缝空心剪力墙有了明显不同,呈现出裂缝多、分布域广、缝间墙裂缝开展均匀,说明各部分混凝土及其内配的钢筋受力均匀,能够发挥各部分的耗能和为结构提供阻尼的作用。并且竖缝截断了墙板上的弯剪斜裂缝,避免了在整个大墙肢上产生通长的弯剪斜裂缝,因而改变了墙肢的破坏形态;竖缝的根部易形成耗能能力较强的塑性铰,提高了结构的耗能能力^[5]。由于小墙板四周圈梁、暗柱的约束加强作用,致使结构在大震作用下变形较大但强度下降不多,因此本结构是一种抗震性能良好的结构形式。

由文献[6]得知:水平荷载作用下,竖缝两侧墙板存在反弯点,这与框架柱受力有类似之处,而不带缝空心钢筋混凝土剪力墙与普通钢筋混凝土剪力墙破坏形态和受力特点相似^[1]。这说明带缝空心钢筋混凝土剪力墙结构由于竖缝的存在使其成为介于框架结构和剪力墙结构之间的一种新型结构。因此,只要合理的设置竖缝,将各墙板的高宽比设置在较合适的范围内,即可使结构呈现出延性的弯剪破坏机制。

3.3 试验过程中结构动力特性

3.3.1 结构的振型

拟动力试验每一阶段结束后,进行单点加荷试验,测试结构的动力特性,即分别在模型结构的 6、4、2 层单点加荷,测得结构的柔度矩阵 $[f]$,进而求逆得结构的刚度矩阵 $[K]$ 。求解特征方程 $|[K]-\omega^2[M]|=0$,得结构的频率、周期。再由式: $([K]-\omega^2[M])\{\alpha\}=0$,可求得结构的振型。

得出的振型图见图 5,可知,带缝空心钢筋混凝土剪力墙结构在试验各个阶段,振型没有明显变化,即结构的振型不随破坏程度的增大而剧烈改变。

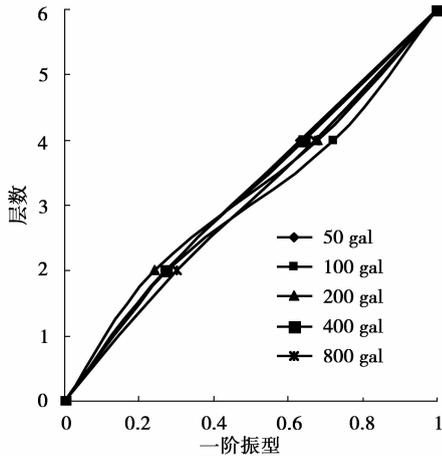


图 5 各工况下结构第一振型

3.3.2 结构的周期和频率

测试结构周期和频率的试验方法有三种：锤击法、单点加荷法(矩阵迭代法)、自由振动法。前期模态试验中采用锤击法测试结构频率和周期，拟动力试验阶段采用单点加荷法(矩阵迭代法)、自由振动法测试结构频率和周期。

自由振动法是在拟动力试验的每一试验阶段的后 200 步的自由振动段，截取 n 个峰值所需的时间，再除以 n 即为模型的自振周期(为保证数据准确， n 的取值可尽量大)。

据此测出结构模型及原型在各个阶段的自振频率及周期见图 6。

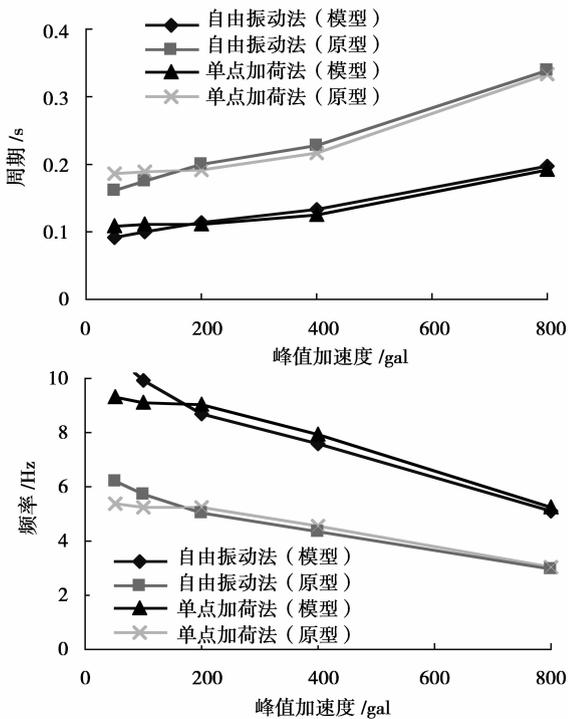


图 6 结构自振周期及频率

由图 6 可以看出,50 gal~200 gal 阶段的周期非常相近,这是由于在输入峰值加速度 200 gal 以前结构基本处于弹性状态,裂缝开展不充分,此时的周期即为结构在弹性阶段的基本周期。自由振动法和单点加荷法测试结果在大部分工况下很接近,仅在 50 gal 时差别较大,这说明这两种方法测得的结构动力特性结果是正确的。结构的周期和频率随着输入地震波加速度峰值的增大,周期增大,频率减小,尤其是 400 gal 以后,结构进入弹塑性状态,这种趋势更为明显。主要原因是随着输入地震波加速度的增大,结构裂缝开展充分,破坏严重,刚度降低,阻尼增大,从而周期增大。

3.3.3 结构的阻尼比 ζ

结构的阻尼特性用对数衰减率或临界阻尼比来表示,由于实测得到的自由振动记录图没有零线,所以计算阻尼特性时振幅采用了从峰值到峰值的取法,而且尽量采用相隔多个(m 个,本试验取 $m=200$)周期的振幅值进行计算,这样比较方便而且准确度高,计算得到的阻尼比见图 7。

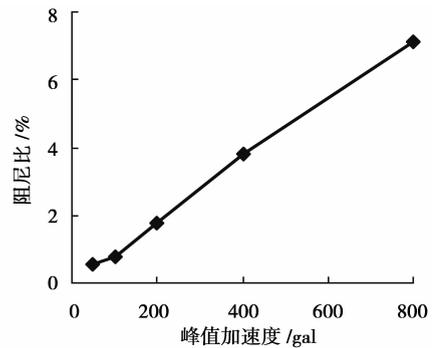


图 7 阻尼比

由图 7 可以看出:50 gal、100 gal 时结构的阻尼比较小,结构的耗能能力较差;200 gal 时连梁、墙板的一些施工缝及竖缝已经开裂,结构的耗能能力增大;因此阻尼比增大。400 gal 时结构的裂缝迅速开展,各层连梁都出现了裂缝,墙体的裂缝也已产生并迅速发展。结构的耗能能力增大较多,阻尼比增长较快,达到开始阶段的 7 倍;800 gal 时结构裂缝开展已经非常明显,连梁根部和女儿墙上的混凝土开始剥落,2、4、6 层连梁裂缝发展速度较快,6 层连梁上方女儿墙上的混凝土开始剥落。墙板上所有竖缝都已经开始工作,此时阻尼比增加到 7.12%;结构的耗能能力在后期增大很多。

3.3.4 结构动力放大系数 β

试验各阶段的动力放大系数 β 为反应加速度最大

值与输入加速度最大值的比值,即: $\beta = \frac{s_{a, \max}}{|\ddot{X}_{0,n}|_{\max}}$ 式中:

$s_{a, \max}$ 为反应加速度最大值; $|\ddot{X}_{0,n}|_{\max}$ 为输入最大加速度。

按照上式计算得到带缝空心钢筋混凝土剪力墙结构动力放大系数 β 随峰值加速度及自振周期的变化曲线见图 8 所示。

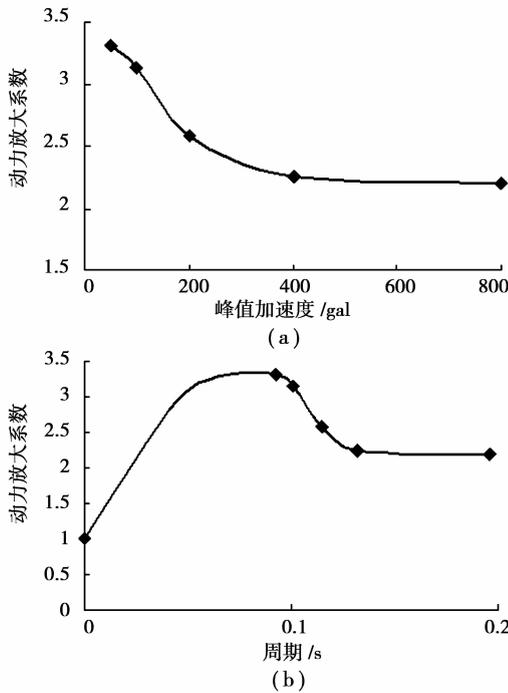


图 8 动力放大系数

由图 8(a)可以得知:输入峰值加速度为 50 gal、100 gal 时,结构刚度较大,退化不明显,动力系数较大,降低不明显。当输入峰值加速度为 200 gal、400 gal 时,刚度退化显著,动力放大系数迅速降低。在拟动力试验的后期,动力放大系数趋于稳定,降低幅度很小。

如果将处于不同损伤阶段的模型结构视为不同周期的带缝空心钢筋混凝土结构,并忽略阻尼比的不同,考虑周期和动力放大系数之间的关系,将得到此类结构的 β 反应谱曲线,此曲线实质上是一种加速度反应谱曲线。

由图 8(b)可知:(1)对于绝对刚性的结构物($T=0$)的绝对加速度最大反应等于地震动最大加速度,即 $\beta=1$ 。(2) β 反应谱曲线的峰值对应的周期值大约为 0.084 s,即在短周期部分反应较大,当周期稍长时就有随周期的增大而结构的反应逐渐衰减的趋势。这是因为随着输入加速度的增大,结构裂缝开展充分,刚度降低,周期增大,地震反应也随之降低。(3)当周期小于 β 反应谱曲线的峰值(0.084 s)时, β 反应谱曲线随 T 的增加急剧

上升;当 $T=0.084$ s 时, β 反应谱曲线达到峰值;当 $T>0.084$ s 时,曲线波形下降。这里的 0.084 s 即为此反应谱曲线的特征周期,也就是对应反应谱曲线峰值的结构自振周期,它与前面所测得的结构自振周期值(0.093 s)较为接近。这个周期值与输入地震波的卓越周期值相等或相近时,结构地震反应最大或较大,结构呈现类共振现象。因此,在抗震设计时,要使结构频率跨出地震波自频带,避免类共振现象的出现。

4 ANSYS 仿真分析

本文采用大型通用有限元软件 ANSYS 进行模态分析,剪力墙板采用整体式模型,直接利用 Solid65 提供的实参数建模。利用 ANSYS 进行模态分析,唯一有效荷载是零位移约束^{[7][8]},为了模拟实际情况把 y 坐标为零的节点(一层底的所有节点)的自由度全部约束。用定义材料密度和施加重力加速度的方式来模拟结构的自重和配重,模拟配重以前的结构时,直接定义钢筋混凝土材料的密度和重力加速度即可。模拟配重以后的结构时,需要同时考虑自重和配重。

综合前面所得动力特性测试结果和 ANSYS 模拟结果(见表 1),可知各种方法所测得的结构在相同情况下的周期、频率、振型较为接近。由此可见利用有限元软件 ANSYS 进行模态分析是测试结构动力特性的一种可靠的方法。

表 1 试验前结构的自振周期及频率

项目	测试方式	频率/Hz	周期/s	振型
配重前	锤击法	21.667	0.046 2	$\{x\}=[1 \quad 0.645 \quad 0.257]^T$
	ANSYS 模拟	20.474	0.048 8	$\{x\}=[1 \quad 0.658 \quad 0.269]^T$
配重后	锤击法	14.313	0.069 9	$\{x\}=[1 \quad 0.646 \quad 0.264]^T$
	ANSYS 模拟	13.330	0.075 0	$\{x\}=[1 \quad 0.639 \quad 0.285]^T$

注:表中数据为一阶周期、频率、振型

在此基础上利用 ANSYS 分别对与本试验模型同尺寸的不带缝空心钢筋混凝土剪力墙结构、普通钢筋混凝土剪力墙结构进行模态分析,分析结果见表 2 及图 9。

表 2 配重前各结构 ANSYS 模拟分析

项目	频率 /Hz	周期 /s	振型
带缝空心 RC 剪力墙结构	20.474	0.0488	$\{x\}=[1 \quad 0.658 \quad 0.269]^T$
空心 RC 剪力墙结构	21.024	0.0476	$\{x\}=[1 \quad 0.679 \quad 0.251]^T$
普通 RC 剪力墙结构	28.313	0.0353	$\{x\}=[1 \quad 0.577 \quad 0.251]^T$

可以看出当结构处于弹性阶段时,竖缝对结构的动力特性影响很小,带缝与不带缝空心钢筋混凝土剪力墙结构的动力特性非常接近。空心剪力墙结构与普通剪力墙结构的动力特性明显不同,普通剪力墙结构频率大,考虑到同尺寸的空心钢筋混凝土结构质量要小于普通钢筋混凝土结构,可知空心钢筋混凝土结构的刚度较普通钢筋混凝土结构小很多。空心剪力墙结构的一阶振型呈弯剪型,而普通剪力墙结构呈弯曲线型。可见剪力墙内部空心的存在使的结构振型发生了明显的改变,这与前面的模态试验结果一致。

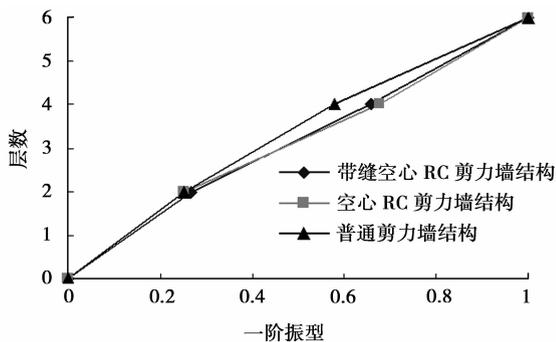


图9 各种结构第一振型

5 结 论

1)从模态试验结果可知,带缝空心钢筋混凝土结构是介于框架结构和剪力墙结构之间的一种新型结构,由于竖缝的存在使结构呈现出明显的弯剪型特征。

2)竖缝的作用在弹性阶段不明显,带缝空心钢筋混凝土剪力墙结构的动力特性与不带缝空心钢筋混凝土剪力墙结构的动力特性近似,具有较大刚度,在弹塑性阶段,竖缝作用发挥较充分,大大降低了结构的刚度、频率,增大了结构的周期、阻尼及耗能能力。

3)将试验结果与 ANSYS 模拟结果对比可知,ANSYS 模拟结果与试验结果符合较好,故可知 ANSYS 模拟是测试结构动力特性的一条可靠途径。

参考文献:

[1] 许淑芳,冯瑞玉,张兴虎,等. 十层钢筋混凝土空心剪力墙结构 1/2.8 比例模型房屋抗震试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:2006,38(1):63-68.

XU Shu-fang, FENG Rui-yu, ZHANG Xing-hu, et al.. Study on the aseismic test for 1/2.8 scale model of ten-story reinforced concrete hollow shear wall structure [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 2006, 38(1): 63-68.

[2] 郑治真,张少芬. 瞬态谱估计理论及其应用[M]. 北京:地震出版社,1993.

[3] 张锐,许淑芳. 空心剪力墙结构房屋动力特性试验研究[J]. 天津城市建设学院学报,2004,10(4):241-244.

ZHANG Rui, XU Shu-fang. Experimental study on vibration characteristics of hollow shear wall building [J]. Journal of Tianjin Institute of Urban Construction, 2004, 10(4): 241-244.

[4] 金怀印,许淑芳. 带缝空心钢筋混凝土剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 山东建筑工程学院学报,2006,21(2):107-11.

JIN Huai-yin, XU Shu-fang. Experimental study on the earthquake-resistant behavior of hollow shear wall buildings of reinforced concrete with seams[J]. Journal of Shandong University of Architecture and Engineering, 2006, 21(2): 107-11.

[5] 许淑芳,冯瑞玉,张兴虎,等. 带缝空心钢筋混凝土剪力墙的抗震性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报,2002,34(2):112-115.

XU Shu-fang, FENG Rui-yu, ZHANG Xing-hu, et al.. An experimental study on the aseismic behavior of slit hollow shear wall of reinforced concrete [J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology, 2002, 34(2): 112-115.

[6] 金怀印. 带缝空心 R. C. 剪力墙结构抗震性能试验研究及有限元分析[D]. 西安:西安建筑科技大学,2004.

[7] 尹强,陈世教,冀满忠. 基于 ANSYS 的塔式起重机结构模态分析[J]. 重庆建筑大学学报,2005,27(6):97-100.

YIN Qiang, CHEN Shi-jiao, JI Man-zhong. Model Analysis of Tower Crane Structure Based on ANSYS[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005, 27(6): 97-100.

[8] 高剑平. 砖混房屋整体式外套框架加层结构动力特性有限元分析[J]. 四川建筑科学研究,2007,33(3):89-91.

GAO Jian-ping. FE analysis of an incorporated masonry-in-frame system[J]. Sichuan Building Science, 2007, 33(3): 89-91.

(编辑 王秀玲)