

实验设计思路

(1) 结构缩尺建模（1 学时）

结构具体参数见图 2-2，在设计结构动力模型时，完全满足模型与原型的相似关系十分困难，该试验主要研究地震动下结构的性能，故设计时着重考虑抗侧力构件相似关系，使墙、柱、梁、板构件及其节点满足尺寸、配筋（按等强度进行代换）等相似关系，用设置配重的方法满足质量和活载相似关系。

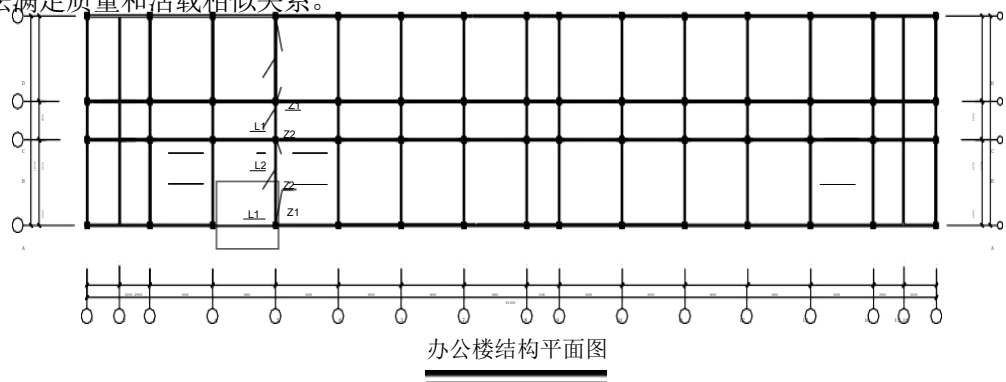


图 2-2 多自由度体系结构平面图

在设计模型各相似关系时，还相应考虑了施工条件、起吊能力和振动台性能参数等方面的因素，具体相似系数见表 2-1。

表 2-1 模型相似系数

序号	物理量	相似系数	物理量	相似系数
1	长度	1/25	应变	1
2	频率	11.19	质量	6.4×10^{-5}
3	密度	1	位移	1/25
4	弹性模量	1/5	加速度	5.0

模型主体采用微粒混凝土和镀锌铁丝制作，柱、梁、板、墙等构件尺寸及配筋由相似关系计算得出。柱中纵向钢筋与箍筋的连接采用锡焊。梁板中配点焊铁丝网或镀锌铁丝。微粒混凝土设计强度等级为 C5.0~C7.5，弹性模量为 6500~7200N/mm²，实测结构见表 2-2。

由于模型比较小，精度要求高，因此对施工有特殊要求。采用了有机玻璃板作为外模，以确保在浇筑微粒混凝土过程中及时发现问题，保证浇筑密实。内模采用泡沫塑料，

这种材料易于拆模，即使局部不能拆除，对模型的刚度和质量影响也很小。将内模制作成一定形状，形成构件所需空间，完成钢筋绑扎后进行浇筑，边浇边振捣密实，每搅拌一次浇筑一层，第二天进行上一层模板、钢筋施工，重复以上步骤，直至模型全部浇筑完成。施工过程中检查构件尺寸、整体垂直度等。完工后的模型总高度为 2.356m，底板厚为 0.300m，模型总重为 6.395t，其中模型重为 2.98t，底板重为 3.415t。

表 2-2 微粒混凝土强度及弹性模量

楼层	f _{cu}		E _c	
	实测	理论	实测	理论
1 层	11.3	12.0	9738	7200
2-4 层	8.71	10.0	7002	6900
5 层-屋顶	6.79	8.0	6593	6500

② 结构计算简图选择如图 2-3 所示。

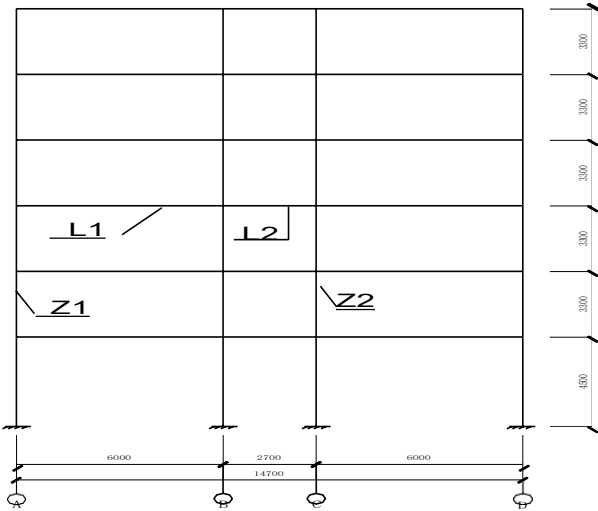


图 2-3 多自由度结构体系结构计算简图

③ 结构动力特性分析（1 课时）

采用子空间法进行计算求解，求出结构的前 r 阶振型。本工程得经过 MIDAS/GEN 的计算得到固有周期、固有频率、振型参与质量等的数值结果;X 方向振型参与达到总质量的 95.57%，Y 方向振型参与达到总质量的 94.83%，经过整理取前十阶列表可得到表 2-2。

表 2-2 结构的自阵周期、频率、运动形态

模态	周期（s）	频率（Hz）	运动形态
1	1.0149	0.9853	Y 方向平动
2	0.9768	1.0236	Z 方向转动
3	0.8826	1.133	X 方向平动
4	0.3053	3.2757	Y 方向平动
5	0.2936	3.406	Z 方向转动
6	0.2716	3.6824	X 方向平动

由表 2-2 可知道结构以水平振动为主。第一阶振型为 X 方向的平动，第二阶振型为 Y

方向平动，第三阶振型为绕 Z 轴的转动。以平动为主的第一自振周期为 $T_1=1.0149\text{s}$ ，以扭转为主的第一自振周期为 $T_2=0.9768\text{s}$ ，其比值 $T_2/T_1=0.96$ 满足《高层建筑混凝土结构技术规程》规定的 0.90（A 级高度）的严格限值，可见结构的平面刚度比较均匀。

前三阶模态图形：

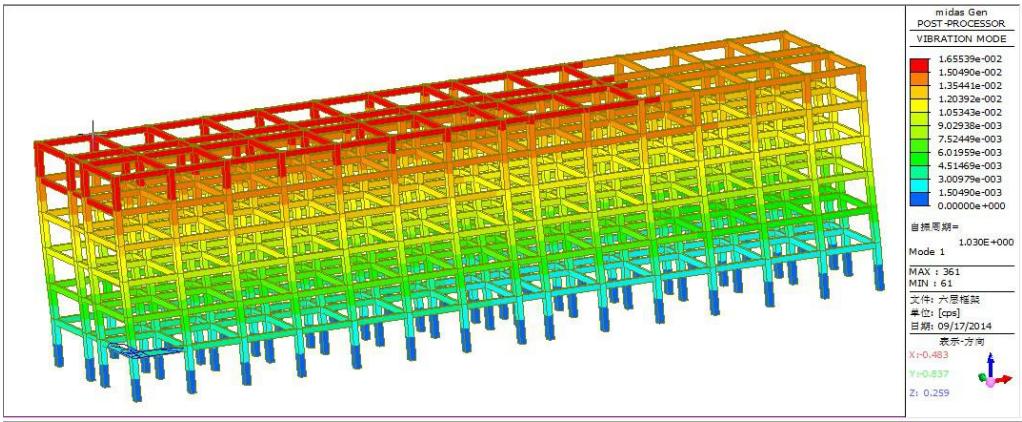


图 2-4 第一阵型图（Y 方向平动）

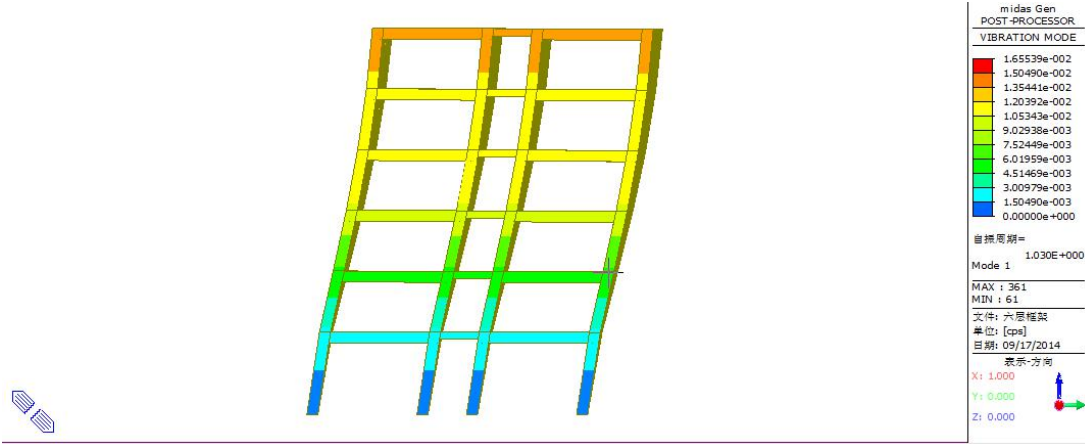


图 2-5 第一阵型图（Y 方向平动，侧面图）

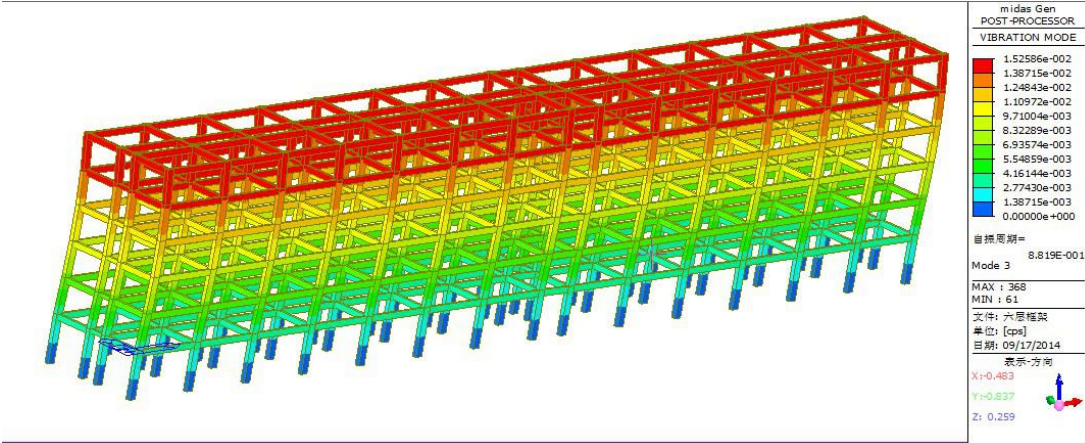


图 2-6 第二阵型图（X 方向平动）

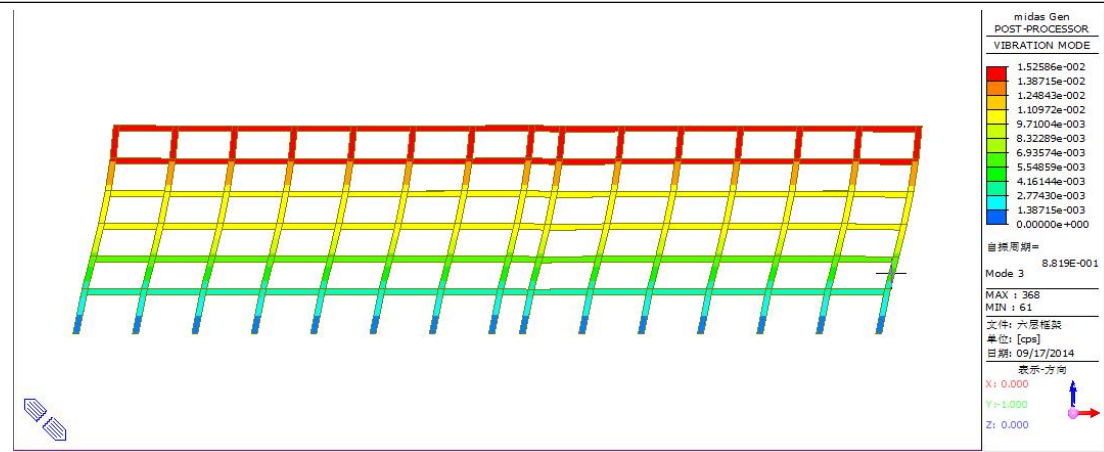


图 2-7 第二阵型图（X 方向平动，侧面图）

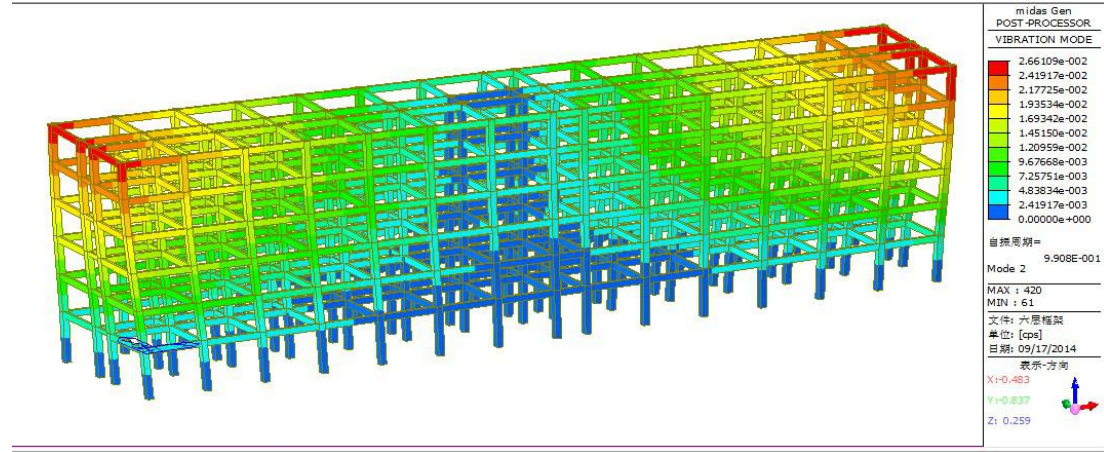


图 2-8 第二阵型图（Z 方向转动）

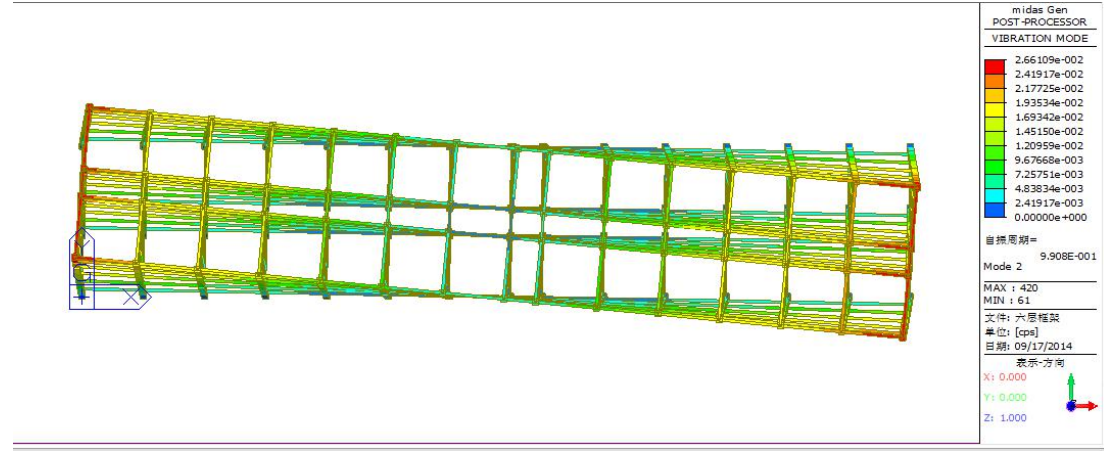


图 2-9 第二阵型图（Y 方向平动，平面图）

由计算结果看出，结构的第一周期为 $0.08N \sim 0.1N$ ，即 $0.48 \sim 0.6$ ，而计算结果为 $1.01s$ ，超出了这个经验公式的区间内，在误差范围内属合理的周期值。经计算，结构的前三阶振型如图2-4~图2-7所示。图中的各阶振型是从正视、侧视和俯视这三个角度观察的，以便一目了然。

由前三阶振型图可以看出，该结构的动力特征具有以下特点：

- 1). 第一振型以纵向平动为主
- 2). 第三振型表现为横向平动
- 3). 第二振型是扭转的振动，这主要是因为该结构纵横方向刚度不同引起的。由前三个振型图可以看出，两个水平方向的振型参与系数不在同一个数量级，即不存在明显的

扭转效应，可见本结构具有良好的抗扭刚度。

④ 结构动载试验方案设计（0.5 学时）

试验用地震波根据原型场地条件、原型结构的动力特性选用 EL-CENTRO 地震记录、PASADENA 地震记录和根据地震危险性分析得到的人工地震波作为模拟地震振动台试验的输入波。应变测点布置共选择 30 个，分别布置在各楼层柱和梁上，加速度测点共 20 个

⑤ 地震模拟振动台试验（0.5 学时）

①多自由度结构体系建模设计模块（1 学时）提供第 I 类地震波。用 GSRevit 进行单层框架结构建模，具体尺寸见图 2-2、图 2-3。

②强震记录分析模块（1 学时）提供第 II 类地震波。从 PEER（太平洋工程地震研究中心，http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database）下载的地面振动的时程信号通过频谱分析转化为频谱信号，也就是频谱曲线。

③反应谱分析模块（1 学时）提供第 III 类地震波。多自由度体系最大地震反应与体系自振周期的关系曲线称为反应谱，根据反应量的不同，可以分为位移反应谱、速度反应谱和加速度反应谱。由于结构所受的地震作用与质点运动的加速度直接相关，在工程抗震领域，常采用加速度反应谱计算结构的地震作用，如图 2-4。

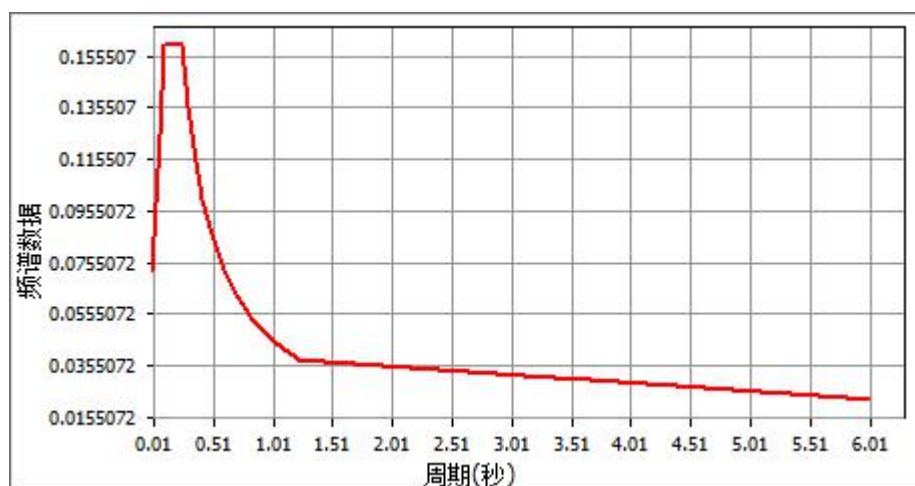


图 2-10 加速度反应谱

由结构的变形图可看出结构的水平侧移随楼层的变化比较均匀，也说明结构刚度均匀，结构的整体变形和位移如图 2-11。

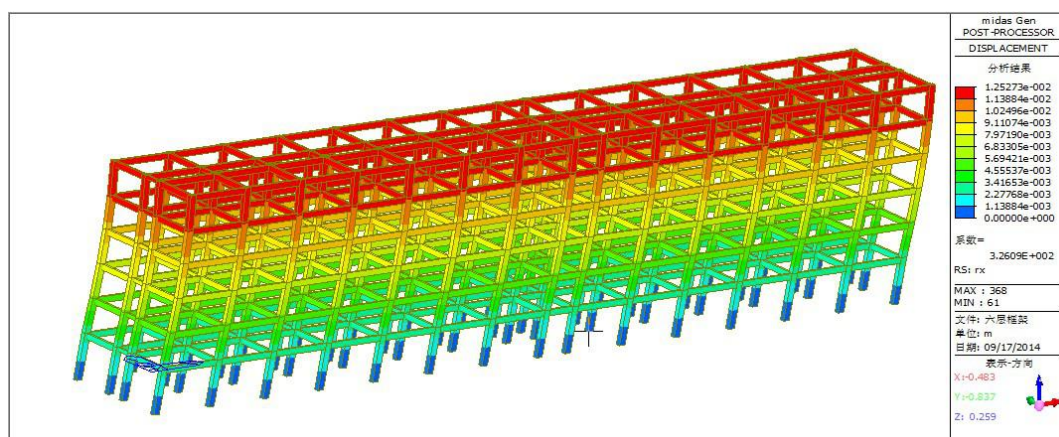


图 2-11 X 一反应谱作用下整体位移

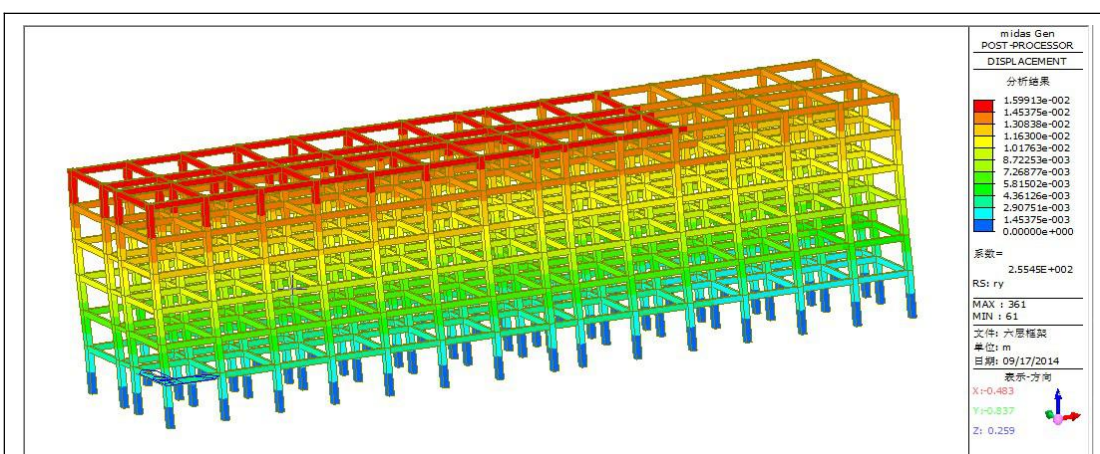


图 2-12 Y 一反应谱作用下整体位移

从图 2-13、图 2-14 中可以看出在 X 向反应谱作用下整个楼层的剪力最大值为 200.7kN，在 Y 向反应谱作用下整个楼层的剪力最大值为 167.9kN，发生的位置在楼层的最底层 1F。通过框架和抗震墙之间的协同工作分析，进行地震内力分配。

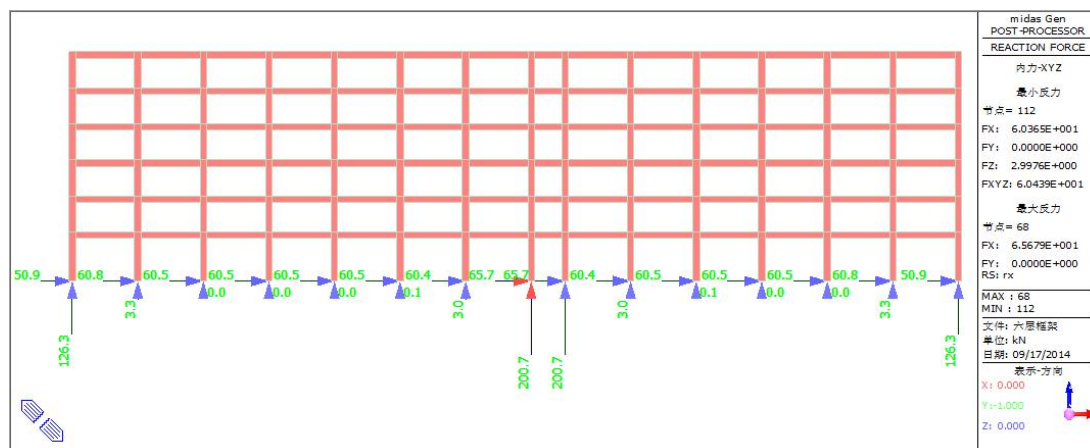


图2-13 X 向反应谱层一层剪力

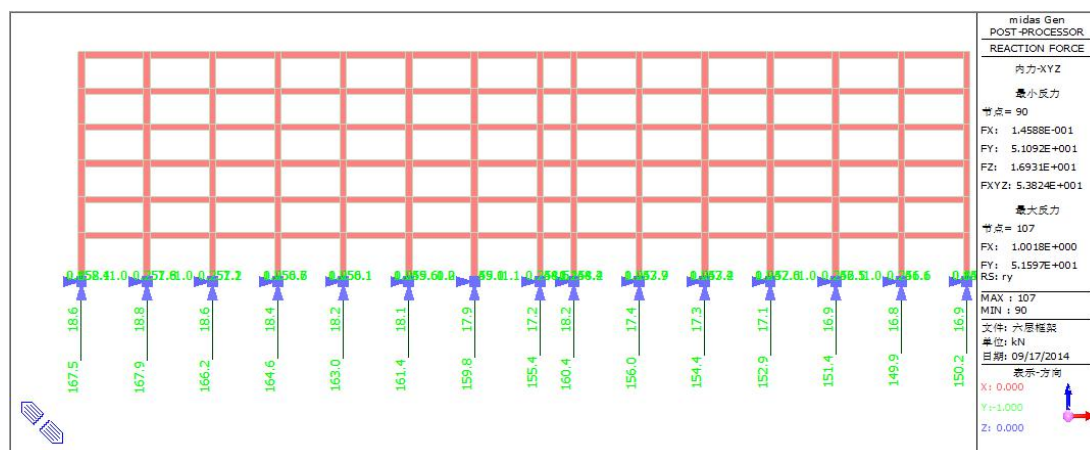


图2-14 Y 向反应谱层一层剪力

由于地震的随机性和影响地面运动因素的复杂性，即使同一地点不同时间发生地震，产生的地面运动强度和频率谱不会完全相同，地震反应谱也不同，所以为满足结构抗震设计要求，应根据大量强震地面运动加速度记录算出对应的每一条记录的反应谱曲线，按照影响反应谱曲线形状的因素进行分类，然后按照每种分类进行统计分析，求出最具代表性的平均曲线作为设计依据，这种曲线称为标准反应谱曲线。实验中标准反应谱曲线的拟合直接采用软件进行分析。

④地震模拟振动台实验操作模块（1 学时），帮助学生熟悉振动台结构和地震模拟振动台实验过程。将模块 1 得到的人工地震波、模块 2 得到的天然地震记录（取三组）、模块 3 拟合的规范反应谱的人工地震波作为振动台台面输入程序进行实验。

（6）结构检测报告编制（1 学时）

在上面 5 个模块的基础上，进行数据采集和数据处理，将理论和实验数据进行比对，编制结构检测报告。

知识点：共 5 个

- （1）缩尺建模
- （2）结构动力特性分析
- （3）结构动载试验方案设计
- （4）地震模拟振动台试验
- （5）结构检测报告编制