

土木工程防灾国家重点实验室

# 防灾抗震试验研究报告

同济大学土木工程学院

04 级防灾方向本科生

蔡云帆

学号：040989

2007 年 6 月 20 日

# 防灾抗震试验研究报告

姓名	蔡云帆	学号	040989
实习期限	4月~5月	指导教师	卢文胜

一个学期的参与试验，让我收获颇多，以下是对我参加过的试验的总结和对课程安排的建议。

## 一. 法门寺合十舍利塔结构模型模拟地震振动台试验研究

### 1、工程概况及研究目的

#### 1.1 项目名称：

法门寺合十舍利塔结构模型模拟地震振动台试验研究

#### 1.2 试验对象：

法门寺合十舍利塔结构模型

#### 1.3 试验目的：

根据“建筑抗震设计规范”（GB50011-2001）、“混凝土结构设计规范”（GB50010-2002）、“高层建筑钢结构技术规程”（JGJ99-98）等我国现行规范、规程的规定，该结构体型复杂，为竖向特别不规则结构。建筑正立面外倾内收，有大量的殿堂和夹层，质量分布不均匀；底层为大底盘、框支转换结构；二层以上为折线型双塔结构；双塔竖向构件大多为斜向布置，在多处形成拐点；54m 高度处通过桁架转换支撑唐塔；顶部天桥处为钢骨架混凝土桁架联结，联体结构受力性能复杂。因此，应在整体结构层面对结构的抗震性能进行深入的试验研究，以更充分地把握结构特点，反映结构的薄弱环节，为结构的合理设计提供依据。

#### 1.4 试验内容：

采用整体模型模拟地震振动台试验方法，研究法门寺合十舍利塔结构的抗震性能，特别是结构在竖向地震作用下的反应及结构的扭转反应等。

- (1) 结构动力特性：自振频率、振型和阻尼比等；
- (2) 结构在分别遭受不同设防水准地震作用下的位移、加速度反应和破坏情况，

- 以检验该结构是否满足不同水准的抗震要求；
- (3) 地震作用下的破坏部位、破坏模式及破坏机理；
  - (4) 整体结构的薄弱环节；
  - (5) 在综合结构计算分析和试验成果的基础上，提出改进结构抗震性能的相应措施。

## 2、模型设计

### 2.1 相似关系

表2.1 法门寺合十舍利塔整体模型相似关系

物理性能	物理参数	初始相似值	备注
几何性能	长度	1/35	控制尺寸
	线位移	1/35	
	角位移	1.0	
材料性能	应变	1.0	控制材料
	等效弹性模量	0.15	
	等效应力	0.15	
	质量密度	5.25	
	质量	1.22 E-4	
荷载性能	集中力	1.22 E-4	
	线荷载	4.29E-3	
	面荷载	0.15	
	弯矩	1.29E-2	
动力性能	阻尼	7.2 E-4	
	周期	0.17	
	频率	5.92	
	速度	0.17	
	加速度	1.0	控制试验
	重力加速度	1.0	
模型质量		约20t	含附加质量
模型高度		约3.8m	含底板

### 2.2 材料选择

整体结构模型中的钢筋混凝土部分，采用微粒混凝土、镀锌铁丝和铁丝网制作，钢骨混凝土梁、柱及桁架中的钢骨选用紫铜进行模拟。模型构件的设计原则按控制截面的承载能力相似和刚度相似的设计方法进行，即：对正截面承载能力的控制，

依据抗弯能力等效的原则；对斜截面承载能力的模拟，按照抗剪能力等效的原则。多次实践证明，按此原则设计的整体结构模型，在经历不同设防水准下的模拟地震动输入后，可以反映结构的破坏模式，体现结构的破坏特征，发现结构的薄弱环节，实现研究结构抗震性能的目的。

### 2.3 结构布置

模型结构平面及立面布置见附录。

### 2.4 施工方法

模型施工照片见附录。

### 2.4 安装及配重

采用表 2.1 所示相似关系，质量密度相似常数达 5.25，导致需放置的附加质量较大，因此选择密度较大的铅作为制作配重块、配重条的材料；塔楼封闭空间内的附加质量在模型施工至每层封顶前将铅板置于筒内，其余附加质量在模型上台就位后放置。工程多数结构构件竖向倾斜布置，其扭转地震反应可能较大，因此模拟质量按一定的偏心方式布置，且偏心布置应使整体结构扭转反应有增大的趋势。结合专家论证会意见，确定两塔楼附加质量沿 y 向反向各 5%偏心布置。

表 2.2 模型微粒混凝土材料抗压强度和弹性模量

层号	抗压强度 (MPa)	弹性模量 ( $\times 10^4$ MPa)
2	7.33	1.50
3	6.39	1.21
4	15.10	1.58
5	9.92	1.56
7	10.69	1.35
8	4.98	1.46
9	6.87	1.08
10	5.85	1.38
11	5.77	1.07
屋面	5.82	0.96
平均相似常数	0.119	0.359

表 2.3 模型质量分布

层号	标高 m	模型重量 kg	模型自重 kg	配重质量 kg
RF	3.509	433.59	66.31	367.27
11 夹	3.343	760.64	115.55	645.09
11	3.114	875.32	127.83	747.49
10	2.971	1060.51	156.17	904.34
9	2.686	1304.71	193.12	1111.59
8	2.400	1321.79	195.73	1126.06
7	2.114	1348.67	199.28	1149.39
6	1.829	1422.46	211.22	1211.24
5	1.543	2038.47	303.58	1734.89
4	1.257	1427.62	212.71	1214.91
3	0.971	1528.19	225.96	1302.23
2	0.686	2135.09	547.38	1587.71
	小计	15657.06	2554.85	13102.21

### 3、测点布置

#### 3.1 应变片

表 3.1 法门寺合十舍利塔结构模型地震振动台试验应变片布置

编号	布置楼层	方向	位置	导线号	通道号	备注
S27	11~11 夹	X	S 轴天桥桁架上表面中	78	78	
S26	11~11 夹	X	S 轴天桥桁架下表面中	52	44	
S25	11	Z	测点 A	77	77	
S24	7	45°	测点 A	76	76	应变花
S23	7	Z	测点 A	75	75	
S22	7	Y	测点 A	74	74	
S21	6~7	Y	手背水平紫铜骨架左	72	72	
S20	6~7	Y	手背水平紫铜骨架右	73	73	
S19	6~7	Z	手背竖向紫铜骨架 7 层下	71	71	
S18	6~7	Z	手背竖向紫铜骨架 6 层上	70	70	
S17	5	45°	测点 A	68	68	应变花
S16	5	Z	测点 A	69	69	
S15	5	Y	测点 A	67	67	
S14	4~5	X	N 轴唐塔桁架上表面 15 轴	53	45	
S13	4~5	X	N 轴唐塔桁架上表面 14 轴	51	51	
S12	4~5	X	N 轴唐塔桁架下表面 14 轴	50	50	
S11	4~5	X	N 轴唐塔桁架下表面 15 轴	49	49	
S10	4	45°	测点 A	新 78	47	应变花
S9	4	Z	测点 A	66	66	
S8	4	Y	测点 A	新 77	46	
S7	2	Z	Q 轴与 18 轴线交点斜柱	65	65	柱底
S6	2	Y	18 轴 EL01 上表面/Q 轴	64	64	
S5	2	Y	18 轴 EL01 下表面/Q 轴	63	63	
S4	2	Z	测点 A	62	62	
S3	1	Z	测点 A	61	61	
S2	1	Z	P 轴与 18 轴线交点框支柱	60	60	柱底
S1	1	Z	M 轴与 16 轴线交点框支柱	59	59	柱底

#### 3.2 位移计

表3.2 法门寺合十舍利塔结构模型地震振动台试验位移传感器布置

编号	布置楼层	方向	位置	导线号	通道号	备注
D15	屋面	Y	测点 C	86	86	
D14	屋面	X	测点 C	80	80	
D13	11	Z	测点 J	92	48	天桥板底
D12	11	Y	测点 C	87	87	
D11	11	X	测点 C	81	81	
D10	9	Z	测点 N	93	93	手心, S/14 轴
D9	7	Y	测点 C	88	88	11/T 轴
D8	7	X	测点 F	79	79	11/M 轴
D7	7	Z	测点 C	94	94	
D6	7	Y	测点 E	91	91	19/T 轴
D5	7	X	测点 C	82	82	11/T 轴
D4	4	Y	测点 C	89	89	
D3	4	X	测点 C	84	84	
D2	2	Y	测点 C	90	90	
D1	2	X	测点 C	85	85	

### 3.3 加速度计

表 3.3 法门寺合十舍利塔结构模型地震振动台试验加速度传感器布置

编号	布置楼层	方向	位置	导线号	通道号	备注
A36	屋面	Z	测点 C	37	37	
A35	屋面	Y	测点 C	36	43	
A34	屋面	X	测点 C	34	42	
A33	屋面	Z	测点 B	15	15	
A32	屋面	Y	测点 B	14	14	
A31	屋面	X	测点 B	13	13	
A30	11	Z	测点 C	33	41	
A29	11	Y	测点 C	32	32	
A28	11	X	测点 C	31	31	
A27	11	Z	测点 B	12	12	
A26	11	Y	测点 B	11	11	
A25	11	X	测点 B	10	10	
A24	7	Z	测点 C	30	30	
A23	7	Y	测点 C	29	29	
A22	7	X	测点 C	28	28	
A21	7	Z	测点 B	9	9	
A20	7	Y	测点 B	8	8	
A19	7	X	测点 B	7	7	
A18	5	Z	测点 C	27	27	
A17	5	Y	测点 C	26	26	
A16	5	X	测点 C	25	25	
A15	5	Z	测点 B	6	6	
A14	5	Y	测点 B	5	5	
A13	5	X	测点 B	4	4	
A12	4	Z	测点 C	24	24	
A11	4	Y	测点 C	23	23	
A10	4	X	测点 C	22	22	
A9	4	Z	测点 B	3	3	
A8	4	Y	测点 B	2	2	
A7	4	X	测点 B	1	1	
A6	2	Z	测点 C	21	21	
A5	2	Y	测点 C	20	20	
A4	2	X	测点 C	19	19	
A3	1	Z	测点 C	18	18	
A2	1	Y	测点 C	17	17	
A1	1	X	测点 C	16	16	

### 3.4 其它



表 3.4 法门寺合十舍利塔结构模型地震振动台试验加速度传感器布置

编号	布置楼层	方向	位置	导线号	通道号	备注
A36	屋面	Z	测点 C	37	37	
A35	屋面	Y	测点 C	36	43	
A34	屋面	X	测点 C	34	42	
A33	屋面	Z	测点 B	15	15	
A32	屋面	Y	测点 B	14	14	
A31	屋面	X	测点 B	13	13	
A30	11	Z	测点 C	33	41	
A29	11	Y	测点 C	32	32	
A28	11	X	测点 C	31	31	
A27	11	Z	测点 B	12	12	
A26	11	Y	测点 B	11	11	
A25	11	X	测点 B	10	10	
A24	7	Z	测点 C	30	30	
A23	7	Y	测点 C	29	29	
A22	7	X	测点 C	28	28	
A21	7	Z	测点 B	9	9	
A20	7	Y	测点 B	8	8	
A19	7	X	测点 B	7	7	
A18	5	Z	测点 C	27	27	
A17	5	Y	测点 C	26	26	
A16	5	X	测点 C	25	25	
A15	5	Z	测点 B	6	6	
A14	5	Y	测点 B	5	5	
A13	5	X	测点 B	4	4	
A12	4	Z	测点 C	24	24	
A11	4	Y	测点 C	23	23	
A10	4	X	测点 C	22	22	
A9	4	Z	测点 B	3	3	
A8	4	Y	测点 B	2	2	
A7	4	X	测点 B	1	1	
A6	2	Z	测点 C	21	21	
A5	2	Y	测点 C	20	20	
A4	2	X	测点 C	19	19	
A3	1	Z	测点 C	18	18	
A2	1	Y	测点 C	17	17	
A1	1	X	测点 C	16	16	

#### 4、试验过程

#### 4.1 加载步骤

表 4.1 法门寺合十舍利塔模型结构振动台试验工况表

试验 工况 序号	试验工 况编号	烈度	地震 激励	地震输入值(g)						备 注	
				主振 方向	X 向		Y 向		Z 向		
					设定	实际	设定	实际	设定		实际
1	W1	第一次白噪声			0.04		0.04		0.04		三向白噪声
2	F7EXY	7 度 多 遇	El Centro	X	0.06	0.059	0.05	0.051			双向水平地 震动
3	F7EYX			Y	0.05	0.061	0.06	0.060			
4	F7EZ			Z					0.04	0.082	竖向地震动
5	F7TXY		Taft	X	0.06	0.064	0.05	0.109			双向水平地 震动
6	F7TYX			Y	0.05	0.060	0.06	0.125			
7	F7TZ			Z					0.04	0.092	竖向地震动
8	F7GBX		GB	X	0.06	0.063					单向地震动
9	F7GBY			Y			0.06	0.101			
10	F7GBZ			Z					0.04	0.068	
11	W2		第二次白噪声			0.04		0.04		0.04	
12	B7EXY	7 度 基 本	El Centro	X	0.15	0.136	0.13	0.091			双向地震动
13	B7EYX			Y	0.13	0.115	0.15	0.121			
14	B7EZ			Z					0.15	0.197	竖向地震动
15	B7TXY		Taft	X	0.15	0.192	0.13	0.102			双向水平地 震动
16	B7TYX			Y	0.13	0.133	0.15	0.241			
17	B7TZ			Z					0.15	0.198	竖向地震动
18	B7GBX		GB	X	0.15	0.245					单向地震动
19	B7GBY			Y			0.15	0.123			
20	B7GBZ			Z					0.15	0.174	
21	W3		第三次白噪声			0.04		0.04		0.04	
22	R7EXYZ	7 度 罕 遇	El Centro	X	0.32	0.286	0.27	0.281	0.21	0.320	三向地震动
23	R7EYXZ			Y	0.27	0.279	0.32	0.297	0.21	0.121	
24	R7TXYZ		Taft	X	0.32	0.355	0.27	0.242	0.21	0.108	三向地震动
25	R7TYXZ			Y	0.27	0.226	0.32	0.298	0.21	0.119	
26	R7GBX		GB	X	0.32	0.374					单向地震动
27	R7GBY			Y			0.32	0.304			
28	R7GBZ			Z					0.32	0.448	
29	W4		第四次白噪声			0.04		0.04		0.04	

表 4.2 法门寺合十舍利塔模型结构振动台试验工况表(续)

试验 工况 序号	试验工 况编号	烈度	地震 激励	地震输入值(g)						备 注	
				主振 方向	X 向		Y 向		Z 向		
					设定	实际	设定	实际	设定		实际
40	R8SEXYZ	8 度 罕 遇	El Centro	X	0.52	0.485	0.44	0.504	0.34	0.467	三向地震动
41	R8SEYXZ			Y	0.44	0.537	0.52	0.628	0.34	0.432	
42	R8SEZ			Z					0.52	0.709	
43	R8STXYZ		Taft	X	0.52	0.596	0.44	0.536	0.34	0.900	三向地震动
44	R8STYXZ			Y	0.44	0.394	0.52	0.448	0.34	0.548	
45	R8STZ			Z					0.52	0.723	
46	R8SGBX		GB	X	0.52	0.752					单向地震动
47	R8SGBY			Y			0.52	0.540			
48	R8SGBZ	Z						0.52	0.740		
49	W6	第六次白噪声			0.04		0.04		0.04		三向白噪声
50	R9SEXYZ	9 度 罕 遇	El Centro	X	1.0	0.900	0.85	0.848	0.65	1.06	三向地震动
51	R9SEYXZ			Y	0.85	0.722	1.0	0.788	0.65	0.777	
52	R9SEZ			Z					1.0	1.560	
53	R9STXYZ		Taft	X	1.0	0.950	0.85	0.711	0.65	0.880	三向地震动
54	R9STYXZ			Y	0.85	0.853	1.0	0.914	0.65	0.854	
55	R9STZ			Z					1.0	1.200	
56	R9SGBX		GB	X	1.0	0.676					单向地震动
57	R9SGBY			Y			1.0	0.841			
58	R9SGBZ	Z						1.0	1.700		
59	W7	第七次白噪声			0.04		0.04		0.04		三向白噪声

#### 4.2 试验现象

由于结构整体刚度比较大，在 7 度多遇及 7 度基本地震试验工况下，反应并不明显，特别是输入 Z 向地震动时，肉眼观察的结构变形很小。随着地震输入值逐渐增大后，结构相对于底座的位移逐渐增大，肉眼直观明显。当最后加到 9 度罕遇时，结构变形已经很大，并且有混凝土碎屑掉落，质量块松动。

**裂缝出现的工况和部位：**

7 度基本地震时出现了第一条裂缝，但随后的几个工况下，结构未继续出现裂缝，经初步判断该条裂缝为粉刷层开裂引起而非结构裂缝。



图 1

图 1 为 37 工况后出现的贯穿四层手腕内侧折线的裂缝，因为处于结构体型转换层，上下结构不匀称，形成刚度薄弱区，在受水平和竖向地震荷载作用下易开裂。



图 2

图 2 裂缝位于四层唐塔桁架与主体结构交接处，出现在 46 工况后。



图 3

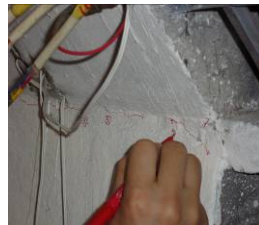


图 4



图 5

图 3、4、5 均出现在工况 51 后，其中图 3 位于结构南面四层转角处；图 4 位于第四层西面外墙体转折处；图 5 位于七层西面墙体内侧转折处。



图 7



图 8

九度罕遇时裂缝已经迅速从构件边缘延伸至内部，图 7、8 所示 52 工况后的裂缝开展情况。

整个振动台试验中，结构模型裂缝不多，且大部分出现于试验后期的 8 度、9 度罕遇地震情况下，可见结构刚度大，抗震性能好。再观裂缝的发展，很明显都集中于模型手心、手腕的拐点处，从裂缝走向来看，结构主要受水平和扭矩作用。

## 5、试验结果

### 5.1 地震动输出数据

表 5.1 模型结构自振频率、阻尼比与振型形态

序 号		一	二	三	四	五	六
第一次白噪声	频率 (Hz)	6.348	6.836	14.746	24.512	27.344	27.539
	阻尼比	0.0389	0.0409	0.0078	0.0079	0.0026	0.0023
	振型形态	Y向平动	X向平动	扭转	Y向平动	Z向平动	X向平动
第二次白噪声	频率 (Hz)	6.250	6.738	14.355	20.215	26.660	27.051
	阻尼比	0.0283	0.0367	0.0035	0.0161	0.0217	0.0132
	振型形态	Y向平动	X向平动	扭转	Y向平动	Z向平动	X向平动
第三次白噪声	频率 (Hz)	6.055	6.445	13.770	19.531	25.977	26.953
	阻尼比	0.0295	0.0282	0.0048	0.0026	0.0163	0.0082
	振型形态	Y向平动	X向平动	扭转	Y向平动	Z向平动	X向平动
第四次白噪声	频率 (Hz)	5.762	6.152	13.379	19.043	25.000	25.684
	阻尼比	0.0201	0.0232	0.0044	0.0041	0.0069	0.0032
	振型形态	Y向平动	X向平动	扭转	Y向平动	Z向平动	X向平动
第六次白噪声	频率 (Hz)	5.078	5.566	11.816	18.066	22.168	24.121
	阻尼比	0.0141	0.0285	0.0052	0.0239	0.0033	0.0051
	振型形态	Y向平动	X向平动	扭转	Y向平动	Z向平动	X向平动

表 5.2 七度多遇地震模型结构相对于底座的位移最大值 (mm)

位置		El Centro			Taft			GB		
		X 主向 (2)	Y 主向 (3)	Z 主向 (4)	X 主向 (5)	Y 主向 (6)	Z 主向 (7)	X 主向 (8)	Y 主向 (9)	Z 主向 (10)
屋面	X 向 C 测点	1.71	1.67	0.81	1.85	1.49	0.60	1.72	0.39	0.15
11层		1.71	1.66	0.56	1.76	1.32	0.31	1.71	0.21	0.26
7层		1.06	1.09	0.84	1.16	0.76	0.67	1.08	0.32	0.15
4层		0.61	0.61	0.47	0.64	0.39	0.34	0.58	0.11	0.39
2层		0.38	0.41	0.64	0.35	0.49	0.44	0.76	0.19	0.12
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
屋面	Y 向 C 测点	0.70	0.91	0.17	1.73	1.49	0.17	0.20	2.24	0.15
11层		0.66	0.83	0.27	1.47	1.32	0.28	0.26	2.06	0.26
7层		0.50	0.59	0.14	0.74	0.76	0.15	0.19	1.09	0.15
4层		0.28	0.36	0.44	0.37	0.39	0.47	0.54	0.66	0.39
2层		0.31	0.41	0.10	0.56	0.49	0.11	0.11	0.47	0.12
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11层	Z 向 J 测点	3.00	3.47	0.25	3.34	3.13	0.29	1.18	0.32	0.34
9层	Z 向 N 测点	2.14	2.60	0.26	2.50	2.29	0.28	1.16	0.34	0.32
7层	Z 向 C 测点	2.38	2.78	0.35	2.70	2.35	0.30	1.37	0.51	0.48
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 5.3 七度基本地震模型结构相对于底座的位移最大值 (mm)

位置		El Centro			Taft			GB		
		X 主向 (12)	Y 主向 (13)	Z 主向 (14)	X 主向 (15)	Y 主向 (16)	Z 主向 (17)	X 主向 (18)	Y 主向 (19)	Z 主向 (20)
屋面	X 向 C 测点	2.79	2.32	0.36	4.23	2.09	0.77	2.30	0.66	0.69
11层		2.74	2.38	0.25	3.89	2.07	0.45	2.29	0.59	0.42
7层		1.86	1.59	0.36	2.54	1.31	0.84	1.52	0.81	0.76
4层		0.90	0.75	0.26	1.25	0.73	0.52	1.17	0.59	0.53
2层		0.58	0.50	0.22	0.62	0.35	0.59	0.76	0.56	0.52
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
屋面	Y 向 C 测点	2.17	2.47	0.27	1.51	2.10	0.25	0.23	2.47	0.25
11层		1.99	2.27	0.35	1.23	1.83	0.30	0.41	2.21	0.38
7层		1.06	1.20	0.26	0.86	1.09	0.25	0.37	1.18	0.30
4层		0.49	0.56	0.45	0.52	0.53	0.40	0.81	0.67	0.48
2层		0.51	0.52	0.20	0.55	0.37	0.14	0.26	0.50	0.30
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11层	Z 向 J 测点	3.79	3.42	0.39	3.46	1.99	0.29	4.02	2.80	0.69
9层	Z 向 N 测点	2.95	2.56	0.35	2.62	0.56	0.29	4.35	3.05	0.60
7层	Z 向 C 测点	3.04	2.73	0.46	2.88	0.73	0.32	4.26	3.22	0.71
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 5.4 七度罕遇地震模型结构相对于底座的位移最大值 (mm)

位置		El Centro		Taft		GB		
		X 主向 (22)	Y 主向 (23)	X 主向 (24)	Y 主向 (25)	X 主向 (26)	Y 主向 (27)	Z 主向 (28)
屋面	X 向 C 测点	3.66	4.48	2.26	2.64	5.82	0.57	0.69
11 层		3.51	4.27	2.11	2.30	5.23	0.40	0.41
7 层		2.22	2.86	1.13	1.34	3.66	0.66	0.75
4 层		1.15	1.32	0.57	0.69	1.96	0.55	0.42
2 层		0.69	0.75	0.45	0.49	1.29	0.43	0.46
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
屋面	Y 向 C 测点	3.64	4.40	2.26	2.93	0.45	3.69	0.31
11 层		3.26	3.97	2.11	2.58	0.60	3.34	0.44
7 层		1.67	1.92	1.13	1.63	0.38	1.71	0.39
4 层		0.73	0.79	0.57	0.78	0.46	0.88	0.44
2 层		0.51	0.50	0.45	0.53	0.16	0.69	0.44
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11 层	Z 向 J 测点	0.75	4.46	2.01	4.45	2.84	2.11	0.92
9 层	Z 向 N 测点	0.53	3.38	0.42	3.18	3.01	2.19	0.94
7 层	Z 向 C 测点	0.93	3.23	0.95	3.26	3.23	2.49	1.04
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



表 5.5 七度罕遇地震模型结构相对于底座的位移最大值 (mm)

位置		El Centro		Taft		GB		
		X 主向 (22)	Y 主向 (23)	X 主向 (24)	Y 主向 (25)	X 主向 (26)	Y 主向 (27)	Z 主向 (28)
屋面	X 向 C 测点	3.66	4.48	2.26	2.64	5.82	0.57	0.69
11 层		3.51	4.27	2.11	2.30	5.23	0.40	0.41
7 层		2.22	2.86	1.13	1.34	3.66	0.66	0.75
4 层		1.15	1.32	0.57	0.69	1.96	0.55	0.42
2 层		0.69	0.75	0.45	0.49	1.29	0.43	0.46
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
屋面	Y 向 C 测点	3.64	4.40	2.26	2.93	0.45	3.69	0.31
11 层		3.26	3.97	2.11	2.58	0.60	3.34	0.44
7 层		1.67	1.92	1.13	1.63	0.38	1.71	0.39
4 层		0.73	0.79	0.57	0.78	0.46	0.88	0.44
2 层		0.51	0.50	0.45	0.53	0.16	0.69	0.44
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11 层	Z 向 J 测点	0.75	4.46	2.01	4.45	2.84	2.11	0.92
9 层	Z 向 N 测点	0.53	3.38	0.42	3.18	3.01	2.19	0.94
7 层	Z 向 C 测点	0.93	3.23	0.95	3.26	3.23	2.49	1.04
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 5.6 八度罕遇地震模型结构相对于底座的位移最大值 (mm)

位 置		El Centro			Taft			GB		
		X 主向 (40)	Y 主向 (41)	Z 主向 (42)	X 主向 (43)	Y 主向 (44)	Z 主向 (45)	X 主向 (46)	Y 主向 (47)	Z 主向 (48)
屋面	X 向 C 测点	5.25	7.48	0.44	6.77	4.47	0.85	9.33	1.23	0.89
11层		4.52	6.27	0.47	5.93	3.55	0.92	8.76	0.74	0.95
7层		2.85	4.36	0.58	4.70	2.39	0.90	6.77	0.90	0.94
4层		1.28	1.80	0.48	2.74	1.10	0.91	4.83	0.87	0.97
2层		0.82	1.13	0.36	2.12	0.67	0.80	4.06	0.71	0.82
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
屋面	Y 向 C 测点	7.91	11.12	0.42	6.66	5.78	0.36	0.61	7.27	0.52
11层		7.13	9.99	0.65	5.59	4.93	0.53	1.04	6.43	0.65
7层		3.09	4.48	0.47	2.90	2.44	0.32	0.97	3.21	0.46
4层		1.32	1.94	0.61	1.16	0.99	0.48	0.66	1.52	0.52
2层		0.80	0.88	0.54	0.61	0.55	0.30	0.26	0.92	0.63
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11层	Z 向 J 测点	0.83	1.21	0.57	1.02	0.74	0.61	1.46	3.65	0.97
9层	Z 向 N 测点	0.87	0.92	0.55	0.95	0.59	0.51	1.46	3.34	1.04
7层	Z 向 C 测点	2.10	2.38	0.65	2.11	1.27	0.58	2.51	4.04	0.89
底座		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 5.7 模型结构相对于底座的位移最大值 (mm)

位置	七度多遇			七度基本			七度罕遇			八度罕遇		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
屋面	1.85	2.24	-	4.23	2.47	-	5.82	4.40	-	9.33	11.12	-
11层	1.76	2.06	3.47	3.89	2.27	4.02	5.23	3.97	4.46	8.76	9.99	3.65
9层	-	-	2.60	-	-	4.35	-	-	4.35	-	-	3.34
7层	1.16	1.09	2.78	2.54	1.20	4.26	3.66	1.92	4.26	6.77	4.48	4.04
4层	0.64	0.66	-	1.25	0.81	-	1.96	0.88	-	4.83	1.94	-
2层	0.76	0.56	-	0.76	0.55	-	1.29	0.69	-	4.06	0.92	-
底座	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## 5.2 动力特性分析

在不同水准地震作用前后，均用白噪声对结构模型进行扫频试验。通过对各加速度测点的频谱特性、传递函数以及时程反应的分析，得到模型结构在不同水准地震前后的自振频率、阻尼比与振型形态，见表 5.1。

从表中可以看出：

该塔的各阶振动形态比较分明，简化模型的振型单纯，这是在塔使用当中有可能被激发出来的振动形式。

- ① 模型结构第一次白噪声扫描前三阶频率为：Y 方向平动 6.348Hz，X 方向平动 6.836 Hz，扭转 14.746 Hz；
- ② 模型结构的低阶振型形态主要为平动和整体扭转；

该结构振型比较简单，分为 X 方向平动，Y 方向平动和扭转三种基本振型。X，Y 方向平动振型对应的基频相差不大，说明结构 X，Y 方向刚度相当

随着试验时地震强度的不断增大，测得的结构频率和减小，说明结构在地震力

作用下不断生成裂缝，并且不断开展，导致结构刚度下降。

结构在 X, Y 方向的阻尼比在 0.02~0.05 范围内，比较理想，而结构对应扭转振型的阻尼比远小于 X, Y 方向平动的阻尼比，说明当地震频率接近扭转频率时，结构弹性反应较大，不能很快的耗散地震荷载产生的能量

**自振频率：**第一、二阶频率变化绝对值较小，第五、六阶则相对较大，同时，第四阶频率在第 1、2 阶段试验后变化相当大，说明该阶频率所对应的结构特征在这一时期发生了较大变化。将后三次扫频结果与前三次比较，排除第四阶频率的个别影响发现，后三次的频率变化相对值较大，说明在 7 度罕遇地震及之后强度的震动下，结构刚度发生了较大的改变，显然，此时结构裂缝比较发育。从试验现象观察中发现模型 X 向振幅较大，于是对于 X 向的振型二、六频率做横向比较发现，在相同数量级内 X 向振动频率较高。

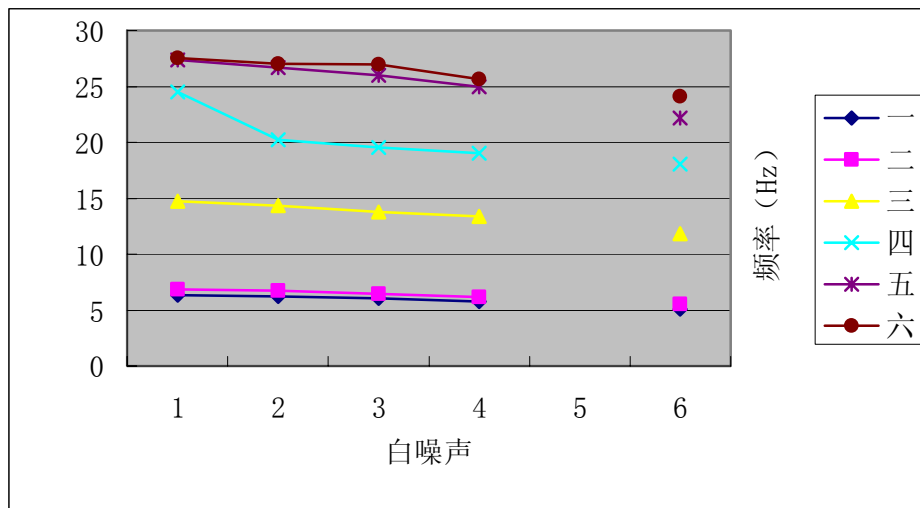


图 9 白噪声-频率

**阻尼比：**前四阶阻尼比总体成下降趋势，而后两阶则成上升趋势，则其对应的结构刚度在整体上是减弱了。在第 1、2 次扫频后有 3 阶阻尼比上升，结构刚度则有所下降，而此时并未观察到明显裂缝，则很可能结构内部或不易观察到的部位开始产生了裂缝。而在第 4、6 次扫频后有 4 阶阻尼比都上升，此时结构刚度也是下降严重，对应的，结构外表面被观察到很多裂缝发育。

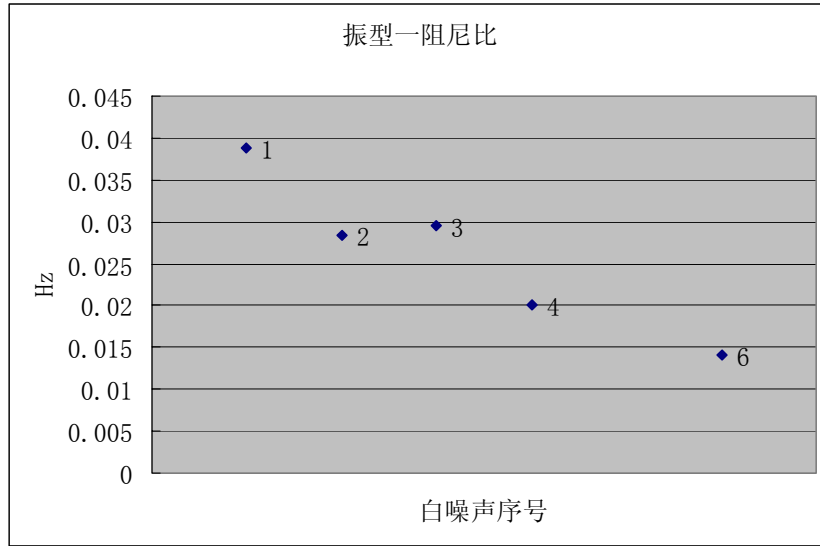


图 9

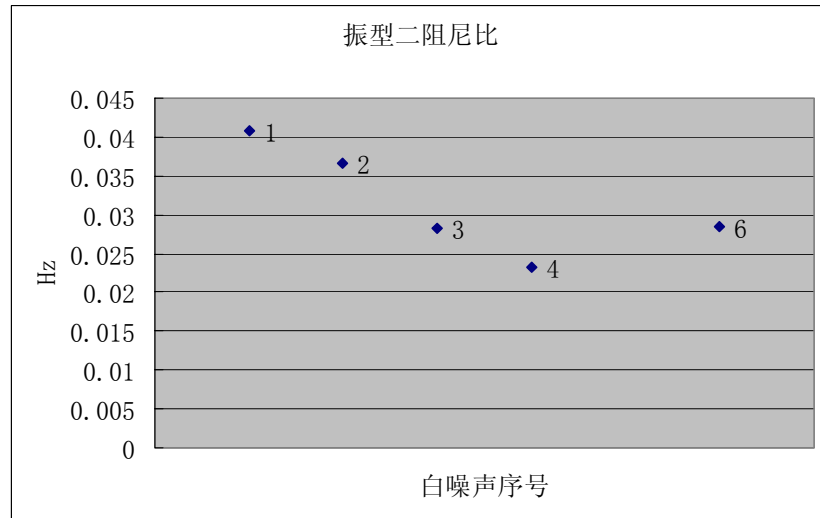


图 10

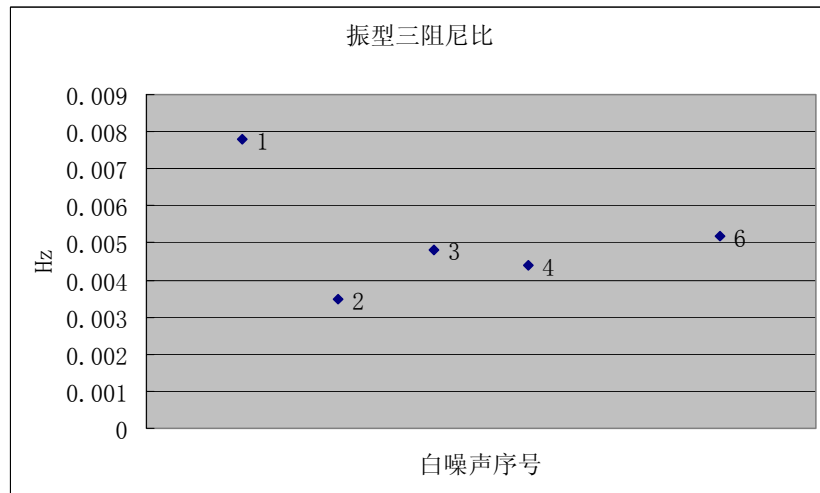


图 11

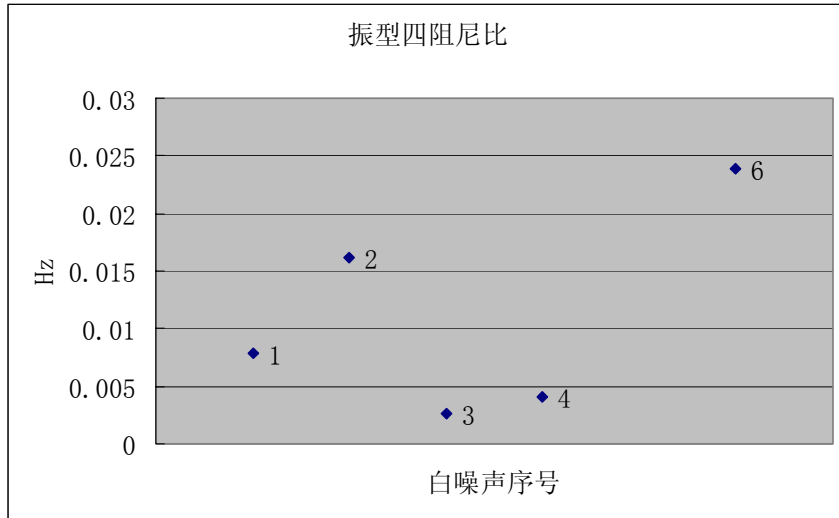


图 12

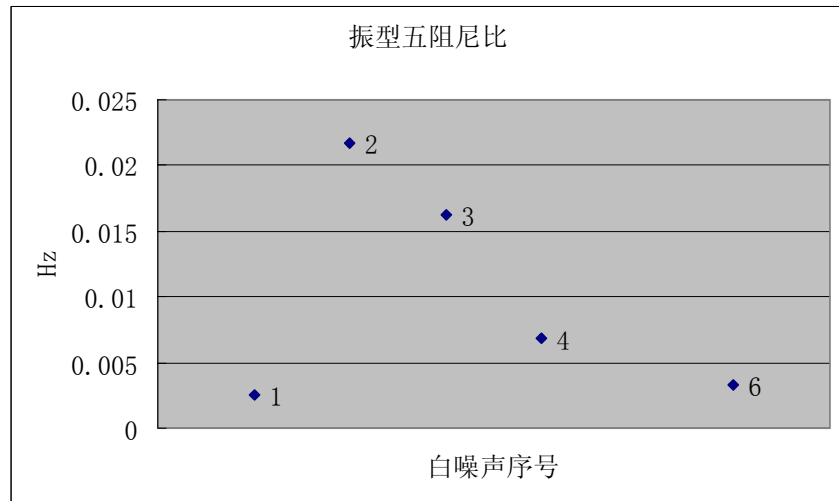


图 13

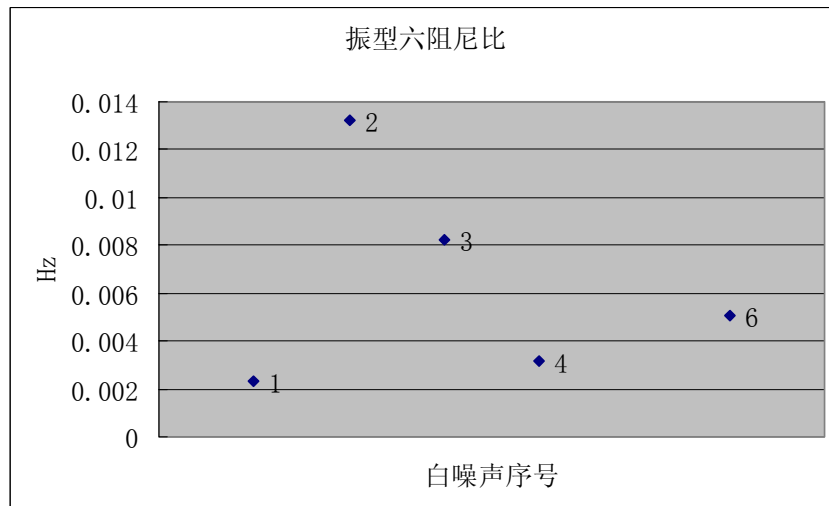


图 14

**振型：**本次试验最后关注的振型确定为：一阶 Y 向平动，二阶 X 向平动，三阶为扭转，四阶 Y 向平动，五阶 Z 向平动，六阶 X 向平动。

### 5.3 地震反应分析

X 向振幅较大，对于地震动反应明显。双塔中间连接及拐点处应力集中明显，开裂严重。第四次白噪声后刚度退化显著。但结构整体刚度大、抗震性能良好？，7 度多遇地震下基本无裂缝。

#### 四阶频率异常：

根据白噪声扫频数据作图后发现，试验模型第四阶频率，即 Y 向平动频率在第 1、2 次扫频后衰减明显，与其余数据所得出的平缓曲线相比较为异常。若排除数据处理的因素的话，此阶段试验模型应该发生了明显的结构变化，然而从试验过程中的观察上并无发现结构外观上有何异常。

#### 阻尼比变化不规则：

理想状态下，阻尼比随着刚度的减弱而有所增加。然而从所得到的阻尼比作图后发现，其变化相当异常，上升下降较无规律，从整体上看甚至有 3 阶频率相对应的阻尼比是下降的而且是较为明显的下降。由此对于模型刚度变化趋势的参考价值很难把握。

#### 疑问：

(1) 在表 5.3.1 至 5.3.4 中 N、J、C 三个测点的 Z 向位移最大值有共同特征：EL Centro、Taft 与 GB 波在各地震强度下输入时，以 X、Y 为主向地震波造成的最大位移比以 Z 轴为主向时还要大。如在同一地震强度，按直觉判断应该是以 Z 向为主向时造成的最大位移比比 X、Y 为主向时大。实验数据中的这一反常是什么原因造成的？

(2) 综合比较表 5.3.1 至 5.3.3 中 N、J、C 三个测点在 GB 波 X、Y 为主向时 Z 向最大位移会发现：当七度基本时这六个数据反常偏大，而且大于七度罕遇时的数据。再参考表 5.5.4，发现七度多遇、七度罕遇和八度罕遇时这六个数据基本符合地震强度越大最大位移越大的规律，只有在七度基本时反常。

(3) 表 6.3.2 中显示，1-2 层的层间位移角相对各层显得非常大，有时甚至超过 4-7

层的岑建位移角。而从结构体形来看，1-2 层应该是很刚度很大的部分。对此我们做两个假设，一是尽管 1-2 层柱子体形很大，但是空心的，相对 2-4 层的实心柱抗扭刚度小，于是扭转由 1-2 层承担；二是实验中由于测量计的原因，1-4 层数据反常可以归为误差。两个假设是否有道理，请老师指导。

## 6、思考

### 6.1 建筑结构地震模拟振动台试验在结构工程抗震试验和研究中的地位和作用？

答：建筑结构地震模拟振动台试验在结构工程抗震试验和研究中有着重要而的地位和作用。首先，在地震模拟振动台上进行动力试验，具有其他抗震动力和静力试验不同的特点，地震模拟振动台能再现各种形式的地震波，它为试验的多波输入分析提供了可能。

其次，它可以模拟若干次地震现象的出震、主震以及余震的全过程，因此就可以了解试验结构在相应各个阶段的力学性能，从而可给予人们直观了解和认识地震对结构产生的破坏现象。

再次，它可以按照人们的要求，借助于人工地震波的研究及输入，模拟在任何场地上的地面运动特性，便于进行结构的随机振动分析。

另外，对于一些特种结构，特别是与其他解质共同工作时，它的许多破坏过程还难于预测，振动台试验可以帮助人们获得感性认识，并提供建立力学模型的根据。

振动台试验主要作用有：

- 1) 研究结构的动力特性、破坏机理及震害原因；
- 2) 验证抗震计算理论和计算模型的正确性；研究动力相似理论，为模型试验提供依据；
- 3) 检验产品质量，提高抗震性能，为生产服务；为结构抗震静力试验，提供试验依据。

### 6.2 振动台试验能否真正考核原型结构的抗震性能？

答：振动台试验不能完全真正考核原型解忧的抗震性能，但可以为研究提供参考依据。



首先，由于试验需明确要研究的关于结构在振动荷载作用下的强度、刚度以及如何满足与正常使用条件有关的问题，确定对结构施加振动荷载的方法、形式和控制。在选择和设计台面的输入运动时，容易出现偏差或理论性错误，在模拟试验中有时很难避免。另外，设计实验时还需要考虑下列因素：试验结构的周期；结构所在的场地条件；考虑振动台台面的输出能力，考虑一次性加载和多次性加载的特点。然而地震具有历史性和多项复杂的特点，在实际试验中无法做到真正的模拟，所以各种理论假设终究还是属于假设。另外，试件的尺寸和构造，如配筋等，在按比例缩小的同时也会产生误差，故结构抗震的结果也会有一定的偏差。综上所述，振动台试验不能真正考核原型结构的抗震性能。

## 7、试验存在的问题

- 1) 考虑到试验得出的不同地震波主向下各方向结构相对于基座的位移是在各主向输入加速度最大值不同的情况下得出的，其结果不具有可比性。为了解决此问题，应该将所得的结果均一化，再进行比较。初步设想是将所得结果除以该主向加速度幅值，其可行性有待进一步讨论。
- 2) 振型个数的选择会对分析的精确度产生影响，比如上海电视塔设计精度要求较高，用了 56 个振型叠加，而本试验中振型较少，是否能满足精度要求？
- 3) 地震动的持续时间对于模型与原型的影响都是不可忽略的，在地震动过程中结构会有损伤积累效应。在试验中，我们按照一定的相似关系缩短了输入的地震波的持续时间，但是没有考虑到损伤积累的问题，从某种程度上说是偏于不安全的做法。
- 4) 在试验过程中也同样存在着损伤积累问题，我们按照震级不断增大的顺序逐级对模型进行地震反应试验，但在每次震动结束后模型不可避免的会出现一定的破坏，造成相似关系的改变，影响了下一次试验的准确性。为了解决次问题，考虑是不是能够在每次震动后，根据白噪声扫描出的结构自振频率，算出结构刚度，与原结构刚度形成新的刚度相似常数，再重新调整相似性关系，进行下一步试验。

## 8、参与实验的心得体会

### 8.1 我们学到了什么

这是开设防灾实验课以来，我们第一次亲自参与到实验项目中去。大家从刚开始查实验背景，去现场参与实验从震前准备，试震到震动台实验的全过程，到实验结束后一起分析数据，查阅相关资料提出问题，讨论模型的各项特性；又到就实验中出现的很多现象去向老师和学长们提问和请教……这所有的经历都让我们受益匪浅；和震动台的如此近距离接触更让我们难以忘记，无论何时提起来都兴奋不以~通过这次实验活动，我们学到了很多很多：

1、使我们在本科阶段就亲自参与了如此重大的实际项目。法门寺合十舍利塔试验方案已经进行了2年左右，经过了试验设计，模型制作等阶段，我们在本科阶段能在卢老师的帮助下，亲自参与到此试验的模拟试验阶段（即震动试验部分），感到十分的幸运，也十分珍惜这次接触真实结构模型，接触震动台的机会！

2、观看试验过程中，学长和老师及时的向我们解释试验工况和结构模型指标，耐心的解答我们关于试验过程的各种疑问，帮我们更好的理解试验。毕竟少了很多基础知识的积累，我们对于工况表中白噪声，EL centro, taft 等名词，和地震动输入时各向比例的要求不是很理解，老师细心周到的为我们安排了项目组的学长们，随时给我们解答各项疑问；也为我们介绍了很多试验和模型制作的背景知识。有了他们的指导和帮助，我们在看试验时就不会盲目，而是有针对性的观察模型的震动情况。

3、亲自观察模型震动后的开裂变形情况，使我们感性完整的认识本次试验，也有机会把实际结构模型和理论结合起来。试验中，老师还给我们机会第一时间近距离观察模型的裂缝，并建议我们通过观察和思考，结合所学知识，分析一下裂缝的成因。细致的观察裂缝发展，思考和讨论裂缝成因等过程不但为我们今后作试验观察研究奠定了很好的基础，也对我们将来分析实际工程有很大帮助。

4、试验报告的完成使我们对试验的数据处理有了更深刻的了解。大量数据的分析和选择，通过纵向横向的比较来发现规律和异常，是这次数据处理给我们最大的启示。第一次接触这么多实际的试验数据，我们大家通过比较和讨论，能够发现一

些问题和变化规律；结果的分析让我们对舍利塔的结构形式有了更好的了解，也体会了数据处理的烦琐和数据分析需要的耐心。

5、整个参与过程老师的关注和指导让我们非常感激。这次参与过程中，老师一直很关心我们这些本科生，希望我们能通过这次试验学到很多理论课外的东西。试验前，老师给我们每个人发了试验的整个研究方案和试验安排；试验中，老师不时来给我们解释问题；试验结束后，老师又给我们安排了和试验设计学长的交流讨论机会，不但可以帮我们了解试验的设计思路和模型制作配种情况和学长们对数据的处理方法，也给了我们提出问题的机会；并且，老师对我们发现的一些变化情况非常重视，和我们一起讨论，肯定了我们的工作！

## 8.2 我们对参与试验的一点建议

通过这次参与试验，我们也有一些提议，希望可以帮助以后的同学更好的感触试验：

1、在结果处理时，由于我们只有各项指标的最大值，而没有图形和所有数据，给我们分析数据有很多不便：比如不知取值的原因，自振频率的选择和阻尼比的计算依据等。希望下次试验可以提供给我们更详细的试验结果和图表，帮助我们更好的理解数据和统计观察数据。

2、现在的试验课的安排是先上理论，然后实践参与试验。可由于实际项目的不确定性，可能参与课时并没有项目可以参与，只能看一些构件制作的环节，不能像我们这次可以看到震动过程……其实可以机动的安排课时，有项目时安排大家参与，没有时上理论，这样理论和实践结合，可以帮助大家更好的理解试验理论，也让大家对试验课更有兴趣。

总之，参与试验可以让大家有兴趣主动学习试验理论，对实际工程项目有一定的了解，理论和实践结合也能让大家更好的理解试验设计原理……希望老师能给我们提供更多的参与机会，和学长，试验设计者的交流平台。

## 附录 模型结构平面、立面布置及施工照片

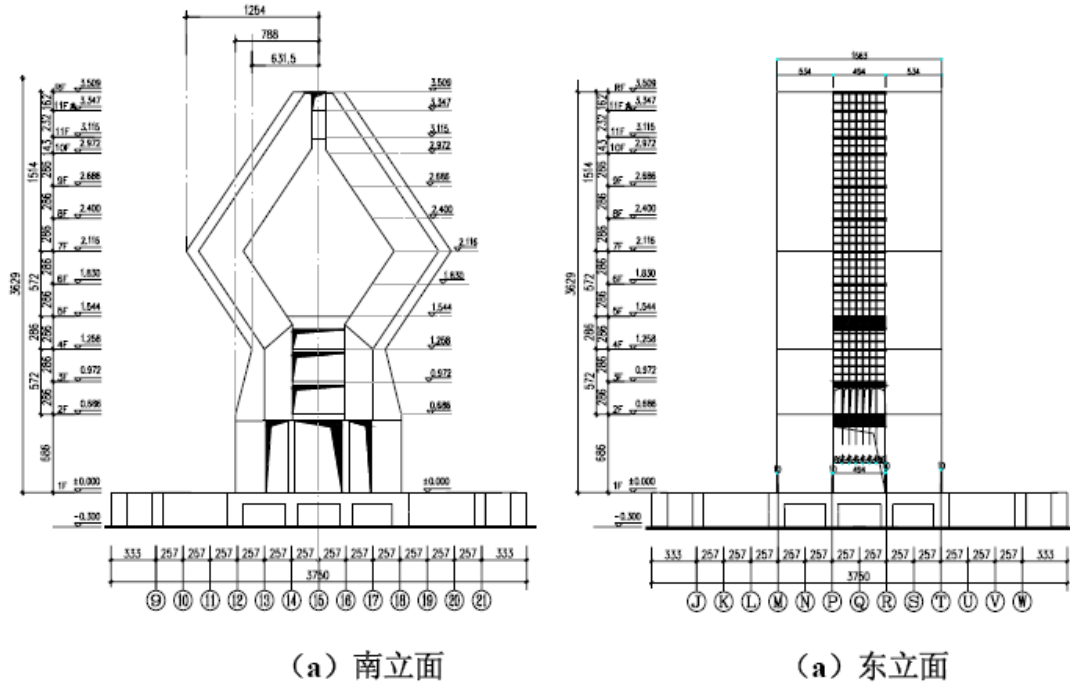


图 16 模型结构立面图

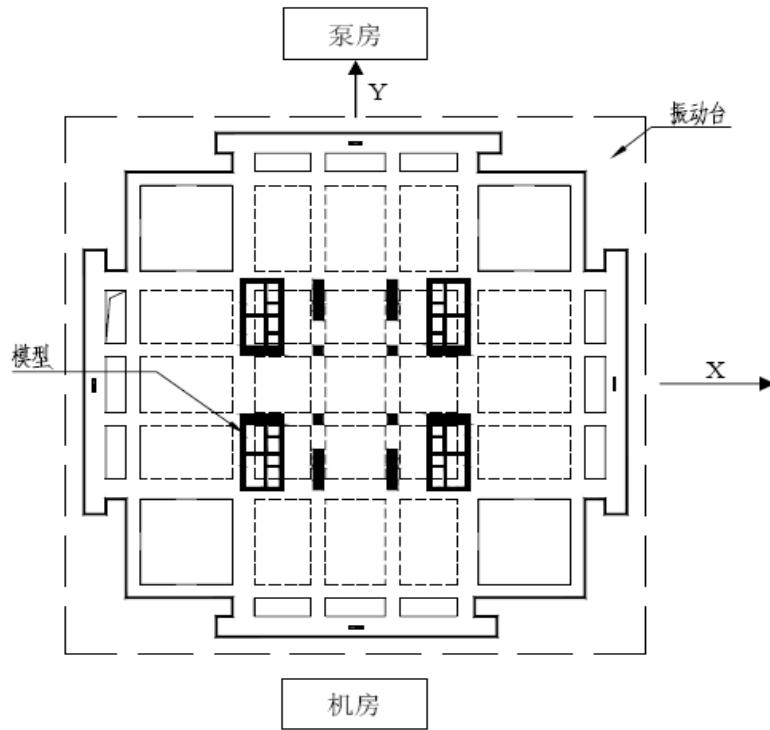


图 17 模型结构在振动台上的安装位置

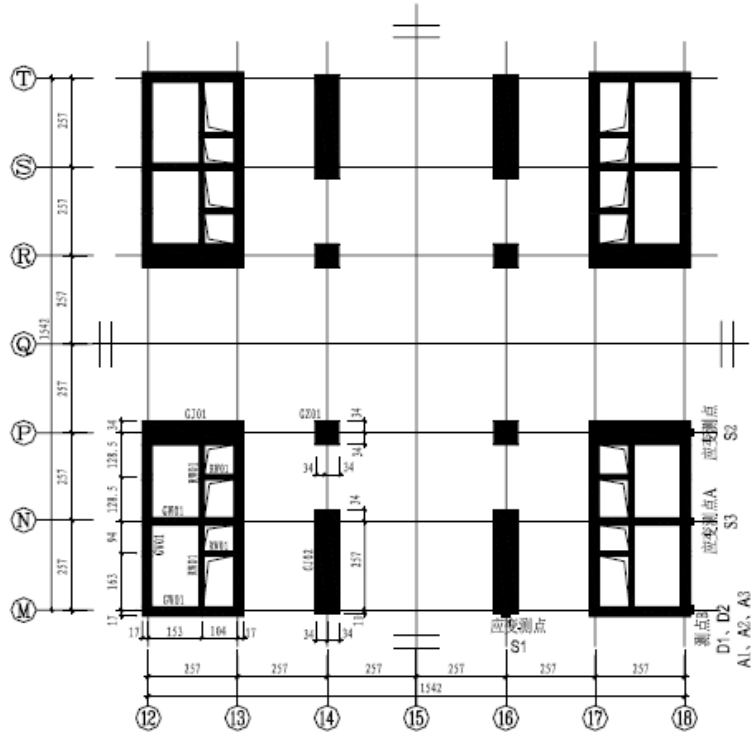


图 18 模型结构平面布及测点布置一（1层）

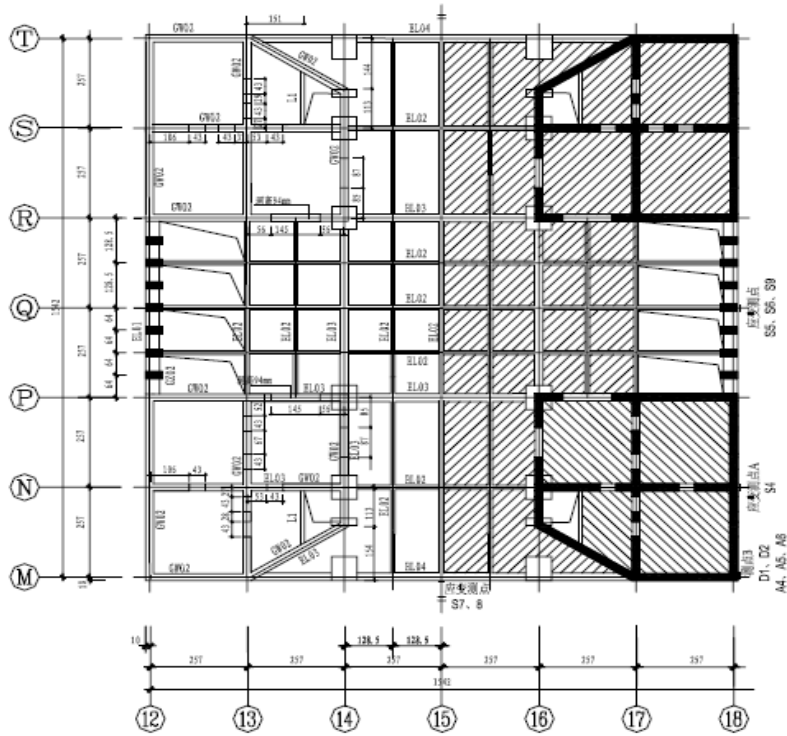


图 19 模型结构平面布置及测点布置二（2层）

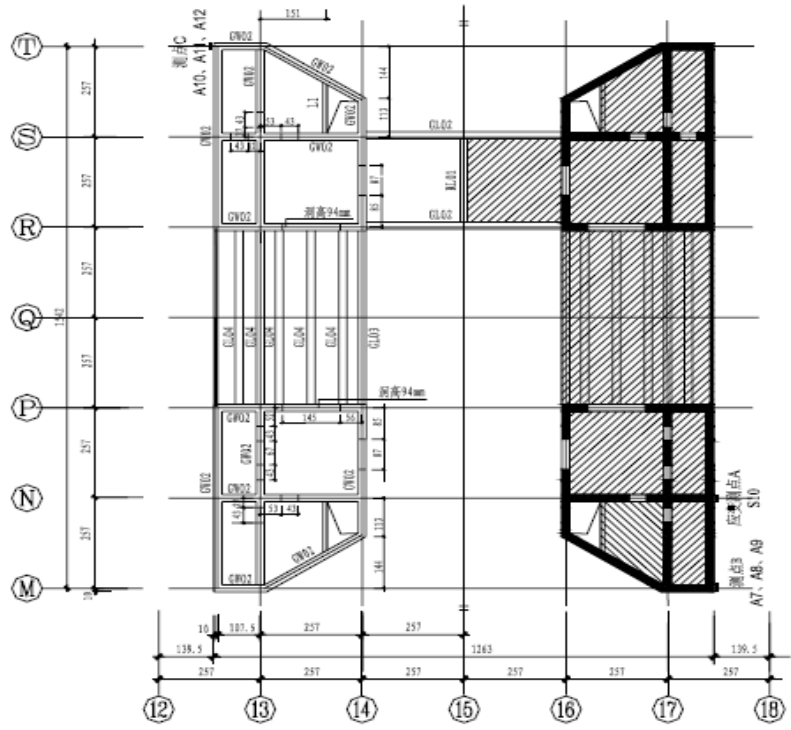


图 20 模型结构平面布置及测点布置三（4层）

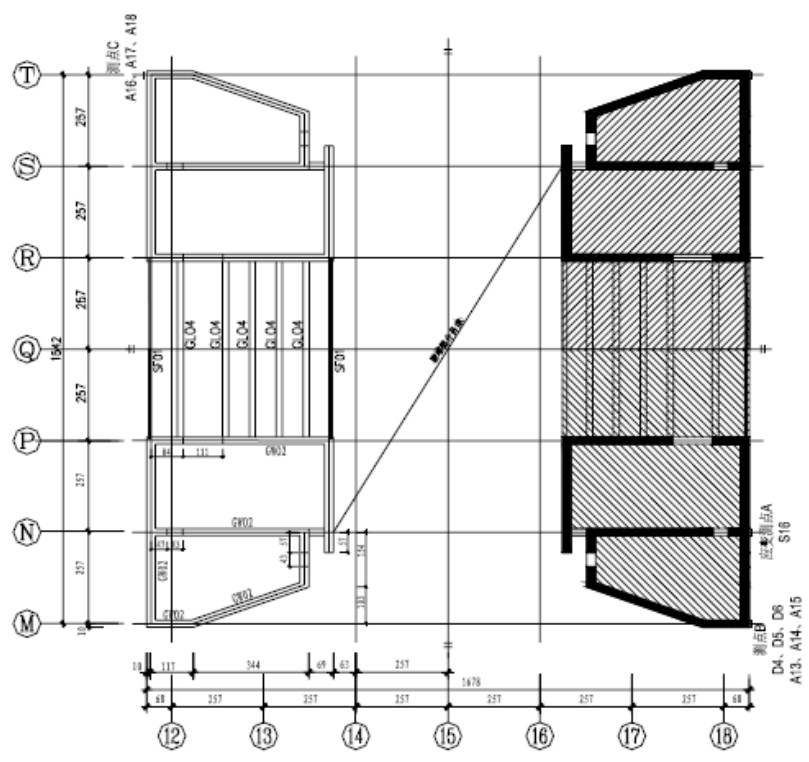


图 21 模型结构平面布置及测点布置四（5层）

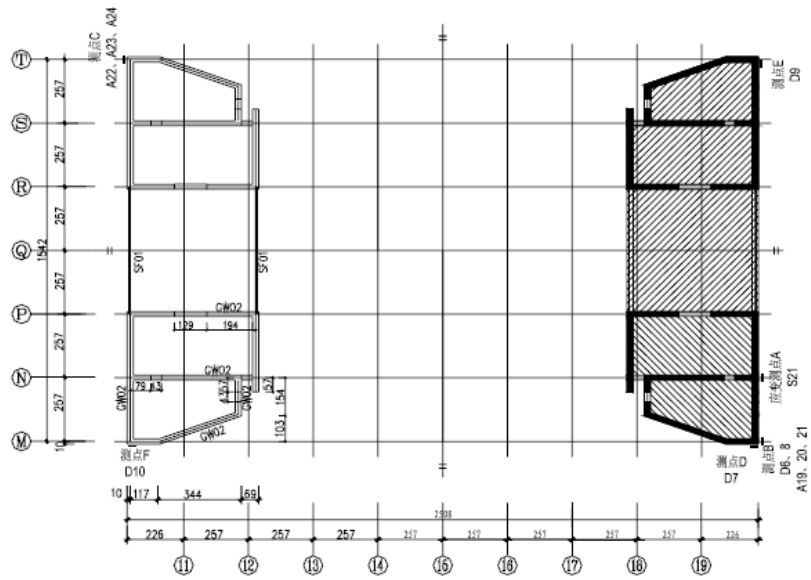


图 22 模型结构平面布置及测点布置五（7层）

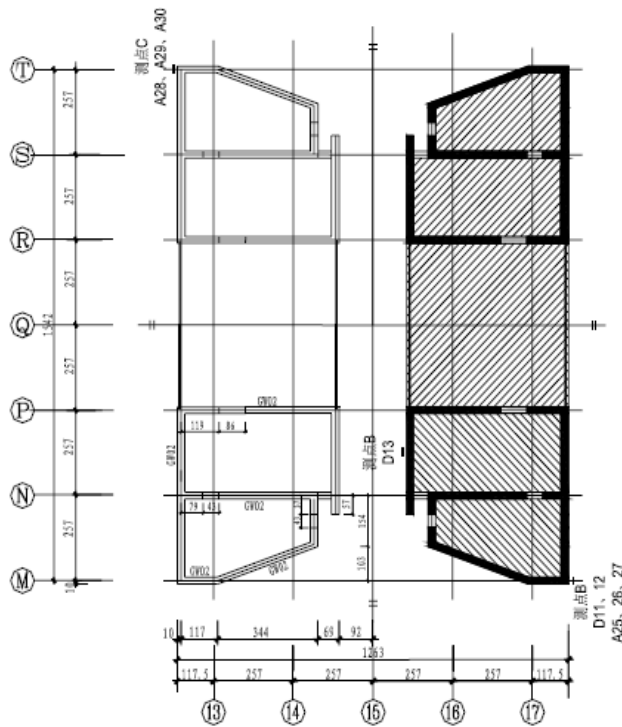


图 23 模型结构平面布置及测点布置六（10层）

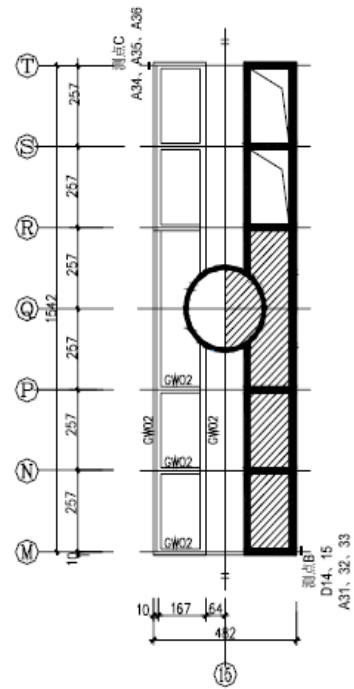


图 24 模型结构平面布置及测点布置七（R1F层）

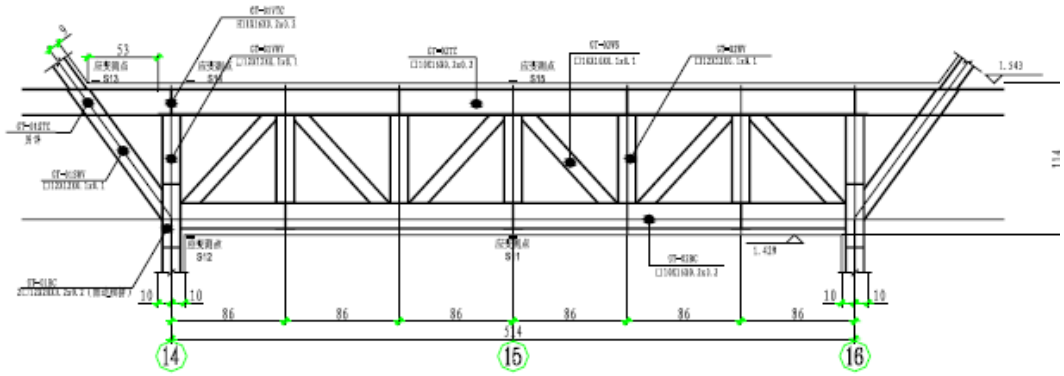


图 25 唐塔桁架详图及测点布置

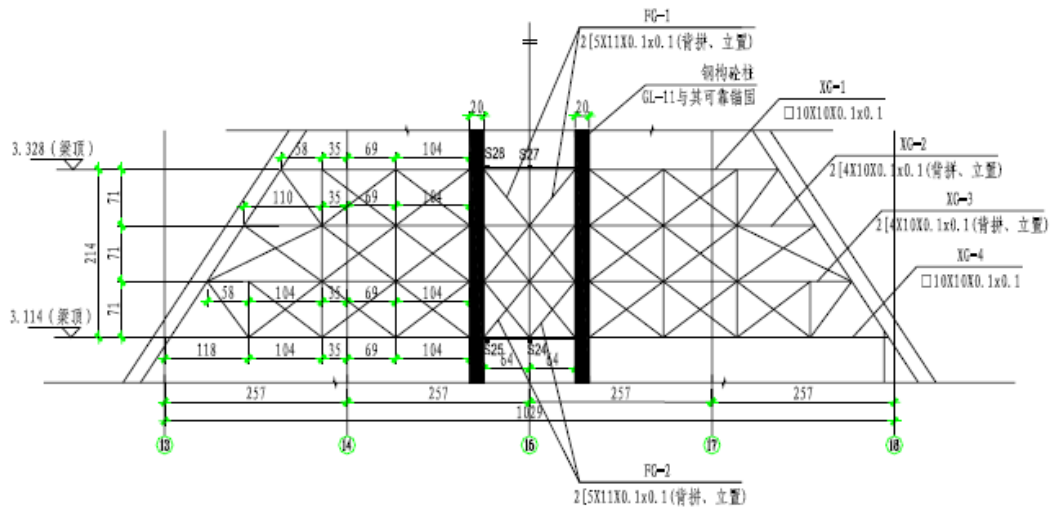


图 26 天桥桁架详图及测点布置

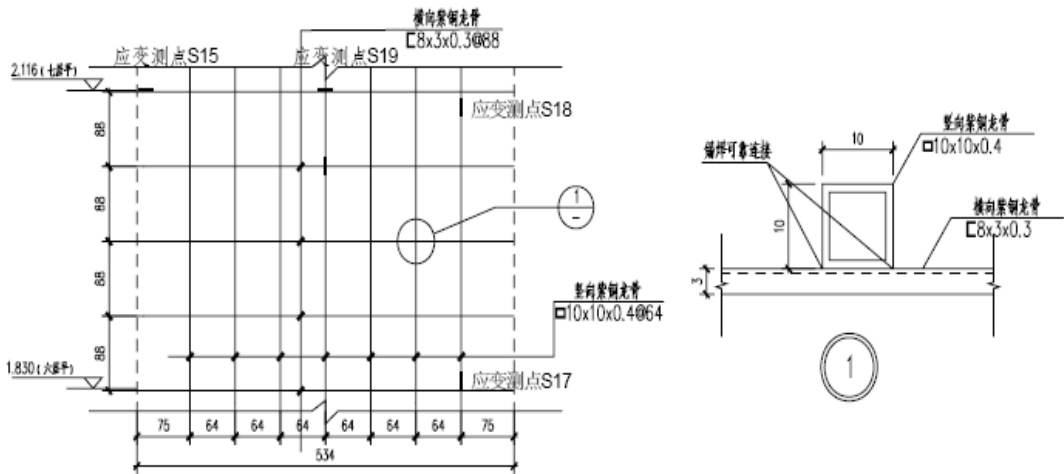


图 27 手背墙示意及测点布置



照片



照片 1 底座施工



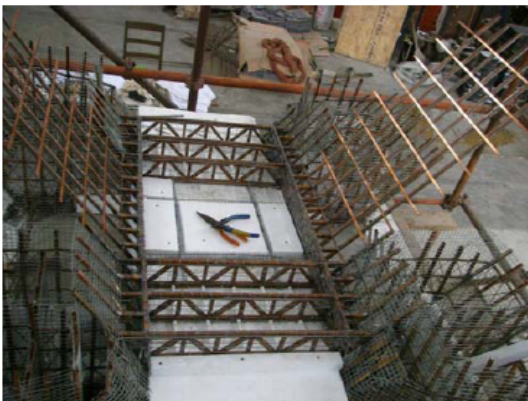
照片 2 一层施工



照片 3 二层施工



照片 4 三层施工



照片 5 四层及唐塔桁架施工



照片 6 七层局部加强施工



照片 7 八层平面施工



照片 8 八层施工



照片 9 九层施工



照片 10 十层以上施工



照片 11 正立面（施工至 10 层）



照片 12 侧立面（施工至 10 层）

## 二. 事必达EPCON G5植筋混凝土柱抗震性能试验方案

### 1、试验目的

EPCON G5化学植筋锚固剂是事必达公司最新最尖端科技产物，适用于钢筋、螺杆在混凝土、花岗岩中的锚固。为评定EPCON G5化学植筋锚固剂的抗震性能，事必达公司委托同济大学结构试验室通过对EPCON G5植筋混凝土柱抗震性能的检验评定其性能。

### 2、试验内容

本试验拟采用拟静力试验检验其抗震性能。

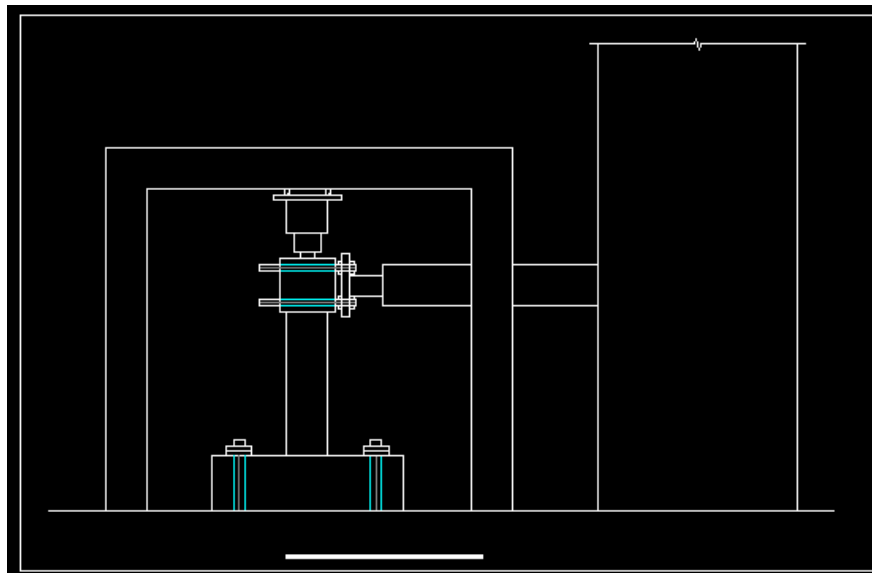
试验试件柱拟采用C30混凝土，主筋采用HRB335钢筋，箍筋采用HPB235钢筋，柱截面尺寸为300mmX300mm, 高1650mm。试件先浇筑台座，待混凝土浇筑养护2周后在台座上钻孔，用EPCON G5化学植筋锚固剂植入主筋，植筋的深度10d养护完毕后绑扎箍筋浇注柱混凝土。待混凝土养护到达强度后进行试验。试验拟对柱施加恒定不变轴压力（0.3倍轴压比），水平方向逐级施加往复荷载直到构件破坏。

### 3、试验方法

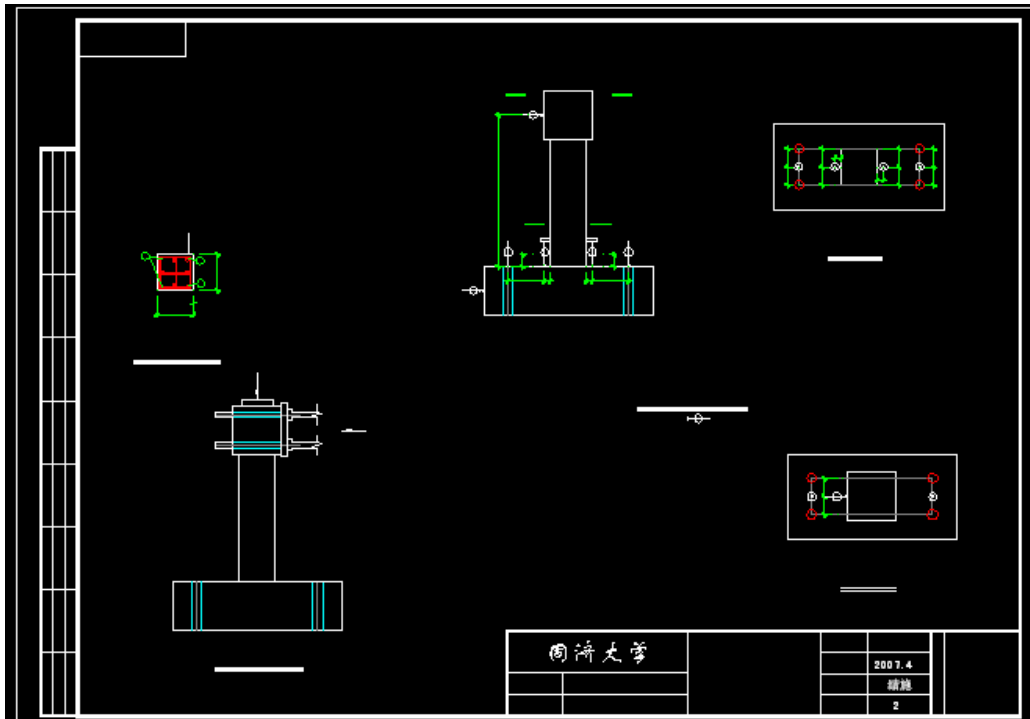
采用千斤顶、反力墙系统加载。竖向千斤顶在柱顶施加恒定的轴向压力，初步确定为400KN（柱轴压比约为0.3），千斤顶与柱顶可自由滑动。水平向千斤顶在柱顶部位对柱子施加水平推力，拟以10kN为一级逐级加载至0.8倍屈服荷载，然后以5kN为一级加载至屈服荷载。屈服后改为按位移控制，以3mm为一级加载，每级荷载循环3次，直到峰值荷载降为0.85P<sub>max</sub>，停止加载。

试验拟在3根角部钢筋植筋深度范围内布置9个应变片，在柱顶附近布置位移计和倾角仪测量柱的位移和倾角。

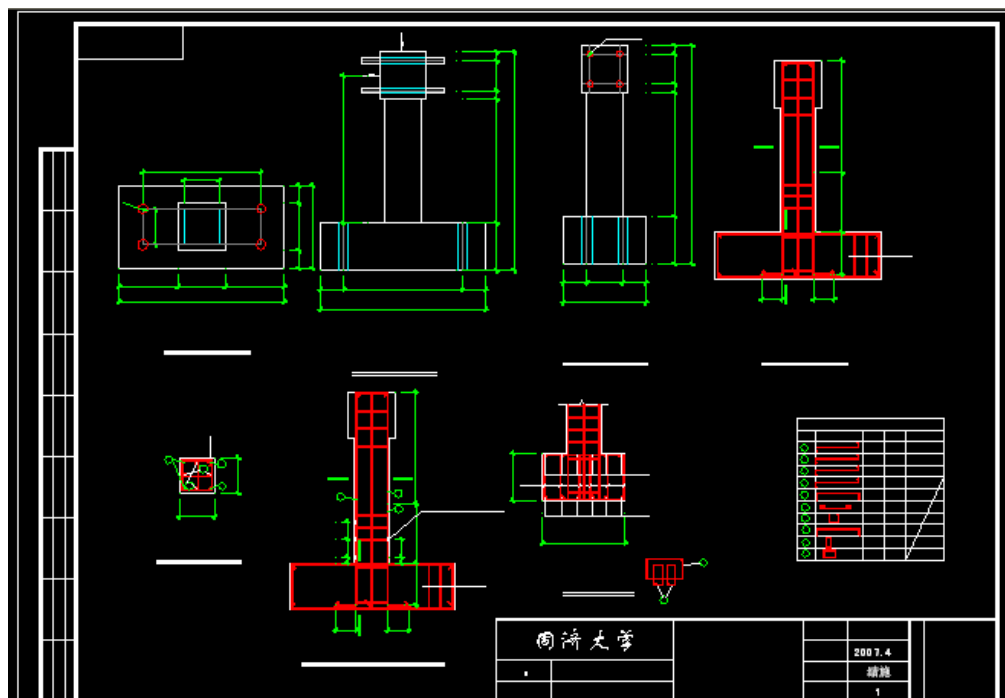
试验观测项目为植筋深度范围内钢筋应变、柱倾角、柱破坏形态、柱位移延性比、承载力等，通过试验结果与同样的非植筋柱的对比分析从而对EPCON G5化学植筋锚固剂的抗震性能做出综合评价。



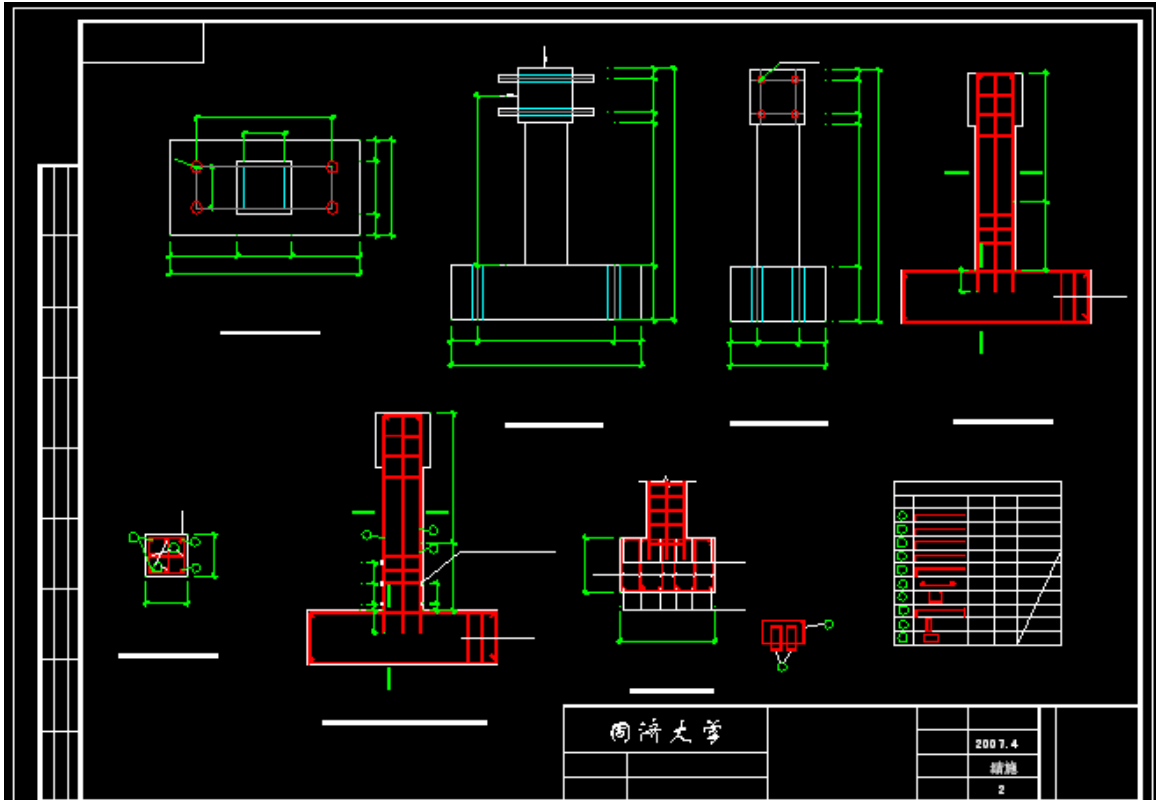
加载装置



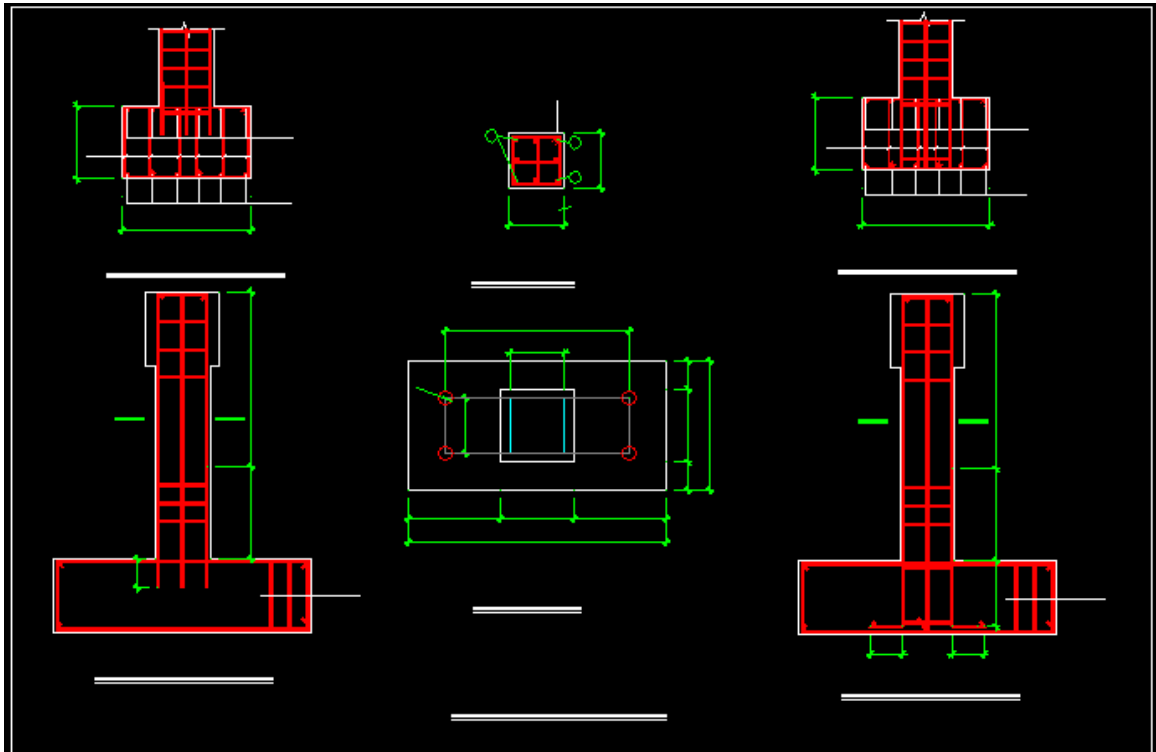
试件与台座和加载装置的连接方式



非植筋柱的配筋图



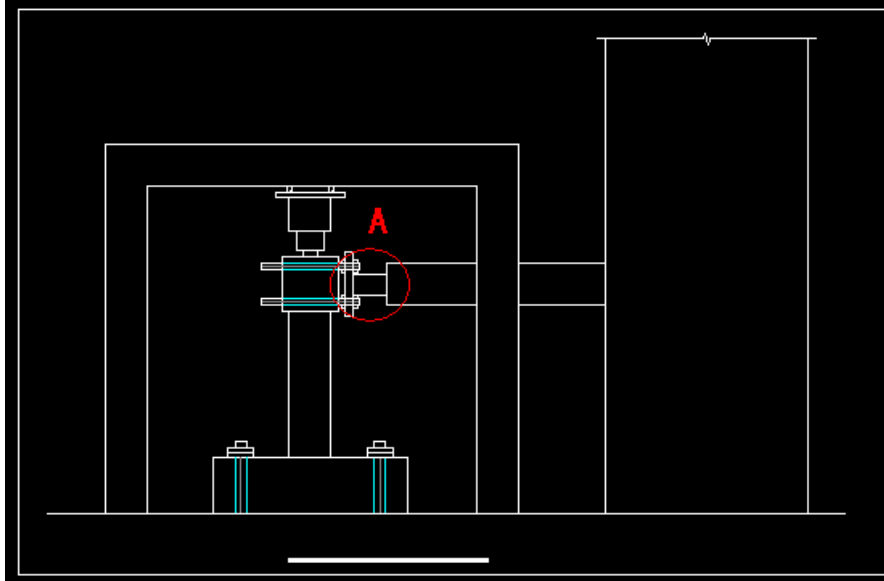
植筋柱的配筋图



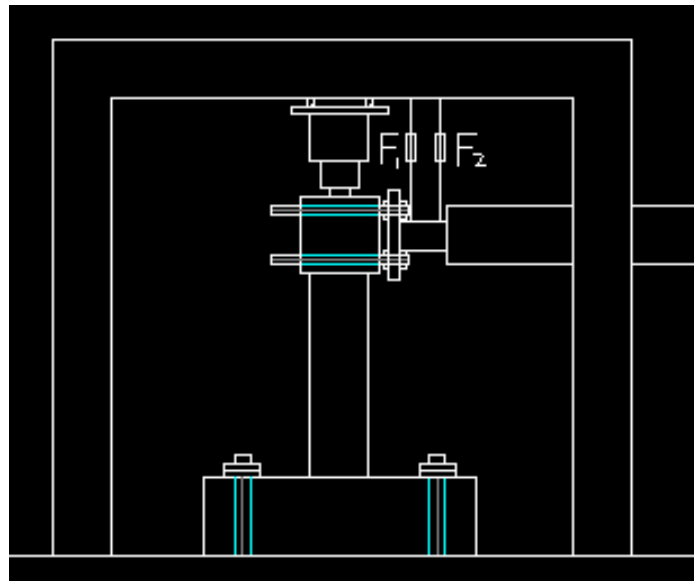
非植筋柱与植筋柱的比较

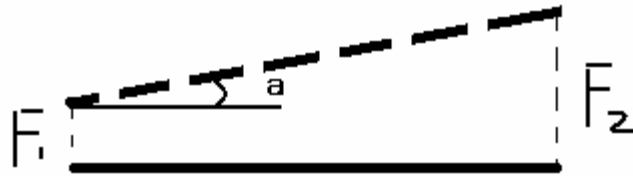
#### 4. 加载仪器分析

此试验装置中由于水平液压千斤顶的长度和台座地面上槽的相对位置关系，不得不在水平液压千斤顶上加接一段钢管，与试件顶部的加载点连接，如下图A处所示



但是加了这段钢管之后会带来一些问题，无论是采用位移控制加载还是力控制加载，都会产生误差，因为钢管是两端铰支，受压力后试件不仅有水平方向的位移还有转角，会带动钢管转动，这样一来相当于计划加的荷载被分配到水平和竖向了，实际输入的水平荷载会比计划的小，造成试验结果偏大。受拉力时，由于钢管能保持水平，不会产生相对偏转，所以试验结果比较准确，这就是为什么受拉和受压的屈服荷载不一样的原因。要解决这个问题，我觉得可以在钢管两端安装位移计，通过钢管偏转角的测量，对施加的水平荷载进行修正，这样基本能保证试验结果的准确性





$$\cos a = \frac{L}{|F_2 - F_1|}$$

故实际施加的水平力为： $H \cos a$

相应的竖向力增量为： $\Delta = H \sin a$

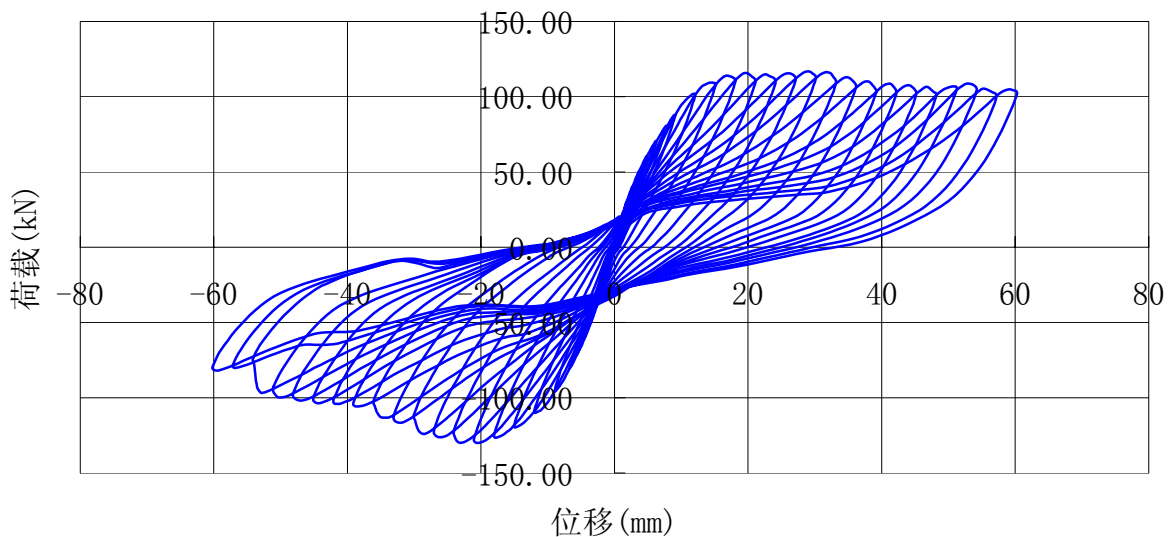
### 5. 试验现象分析

非植筋柱的破坏形式为支座破坏，可以看到支座处混凝土被破碎，而柱子只有少量裂缝，说明钢筋锚固不足，在受柱顶水平荷载时，受拉侧钢筋被拉出，致使支座混凝土破坏，结构延性较差，为脆性破坏。

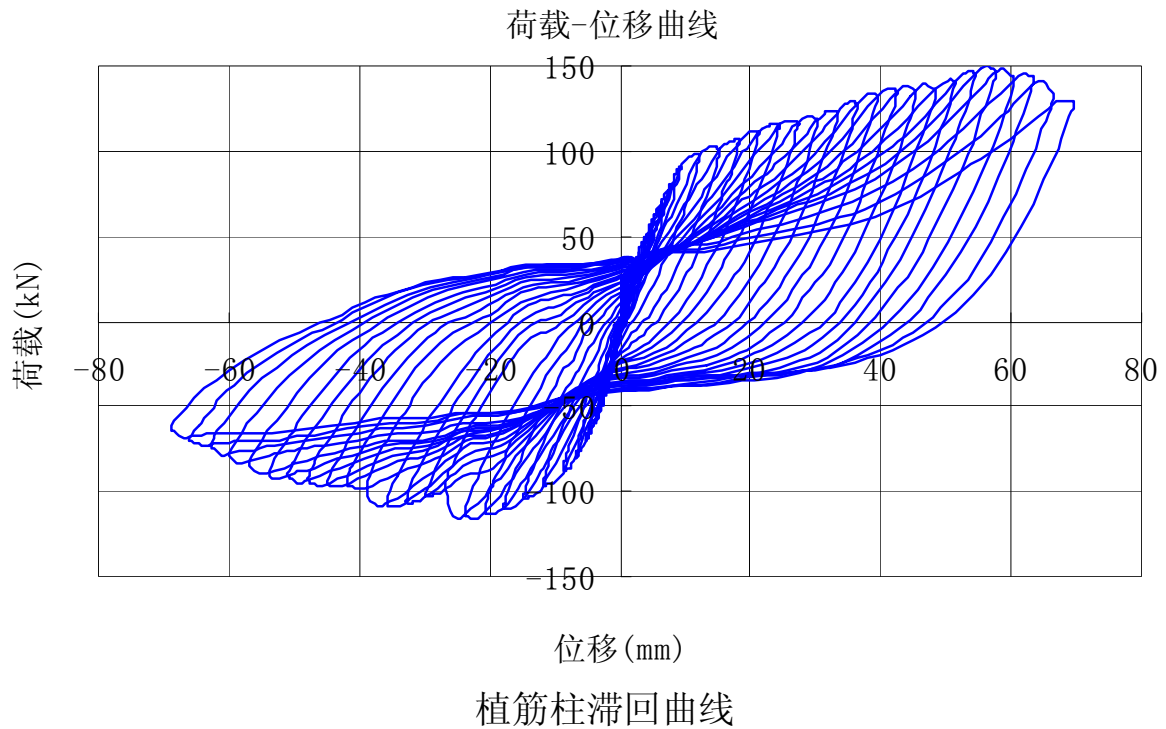
植筋柱的破坏形式为柱破坏，柱底两侧裂缝都充分发展，结构延性较好，承载力也较高。

### 6. 试验结果分析

荷载-位移曲线



非植筋柱滞回曲线



非植筋柱:

	屈服荷载	屈服位移	极限荷载	极限位移	位移延性比
F+	74.5	6.79	117	63.28	9.319588
F-	83.4	7.03	130	36.1	5.135135

植筋柱:

	屈服荷载	屈服位移	极限荷载	极限位移	位移延性比
F+	77.5	7.4	149.7	68.8	9.297297
F-	85.9	7.69	115.6	41.9	5.448635

通过分析可以发现，植筋柱滞回曲线较饱满，屈服位移，极限位移，屈服荷载，极限荷载都与锚固条件好的非植筋柱相当，说明EPCON G5化学植筋锚固剂效果明显，是值得信赖的。



### 三. 对试验课安排的建议

非常幸运在卢老师的指导下学习了《防灾试验》这门课，在本科阶段能够学习试验技术并参加国家重点实验室的项目是非常难得的机会。通过一个学期的学习，我掌握了防灾试验的基本原理，并对试验过程有了初步的了解，对我今后的工作学习都有莫大的帮助。

在课程过程中我也发现了一些不足的地方，比如对于我们参加的试验没有一个书面的材料和最后的试验结果，难以有直观的了解，只能是听一听印象不深，虽然后来都给我们发了试验资料，但是时间都比较不及时，如果早一点把资料（最好是书面的）发给我们可能会比较好一点。老师对于模型设计方面讲授的内容比较有限，个人觉得这方面的内容对于我们以后做试验起着非常关键的作用，比如我现在参加的一个创新项目“上部结构与基础的连接方式及其反应的试验研究”需要自己设计试验并研究结果，这第一步就要求我们根据相似关系设计模型，如果老师上课时候能多讲授些这方面的知识相信能给我们带来很大的帮助。还有感觉风洞试验的效果不好，一方面因为没有教材，不知道从哪里下手学习，另一方面授课时间比较段，试验环节也是缺少书面材料，难以记住并理解。

对试验课的安排我有一些建议：

虽然书上的理论知识学习过了，但是在实践中却会碰到很多问题，很多从书本上学不到的东西，所以我希望老师能在我们参加完某个具体试验以后，给我们详细讲述一下该试验碰到哪些问题，产生这些问题的原因是什么，数据处理的方法，用什么方法得出了什么样的结论，这些结论又有什么意义，相信这将使我们有很大提高，以后参加类似试验可以很快上手，否则还是局限于书本，不能真正意义上锻炼实践能力。

另外一个就是希望参加试验和课堂授课能穿插进行，先课堂授课再进行试验容易遗忘上课的内容，如果能穿插进行，及时的将讲过的内容让我们到实验室里面去有感性的认识，这样记忆深刻一些，比如这节课讲了传感器，下节课就带我们去实验室专门看各种传感器，这样个人觉得比较有针对性。

还有一点就是对风洞试验的建议，由于风的基本知识基本都没学过，所以老师上课的时候能不能先把如颤振，抖振等基本的知识大概讲解一下，方便我们进一步的学习，实践环节中的讲解也考虑到这个情况。

