

国家自然科学基金重点项目资助 (No. 50338040, 50025821)
同济大学土木工程防灾国家重点实验室振动台试验室研究报告
(A20030609-405)

12 层钢筋混凝土标准框架

振动台模型试验的完整数据

Benchmark Test of a 12-story Reinforced Concrete Frame Model on Shaking Table

报告编制: 吕西林 李培振 陈跃庆



同 济 大 学
土木工程防灾国家重点实验室振动台试验室
2004 年 1 月

目 录

1 试验概况	1
2 试验设计	1
2.1 试验装置	1
2.2 模型的相似设计	1
2.3 模型的设计与制作	1
2.4 材料性能指标	4
2.5 测点布置	4
2.6 加速度输入波	5
2.7 试验加载制度	9
3 试验现象	9
4 试验数据文件	12
4.1 AutoCAD 文件	12
4.2 输入地震波数据文件	12
4.3 测点记录数据文件	12
4.4 传递函数数据文件	12

12 层钢筋混凝土框架结构 振动台模型试验

1 试验概况

试验编号: S10H

模 型 比: 1/10

模型描述: 单跨 12 层钢筋混凝土框架结构

激励波形: El Centro 波、Kobe 波、上海人工波、上海基岩波

工 况 数: 62

试验日期: 2003.6.16

试验地点: 同济大学土木工程防灾国家重点实验室振动台试验室

2 试验设计

2.1 试验装置

地震模拟振动台主要性能参数:

台面尺寸	4.0m×4.0m
最大承载模型重	25t
振动方向	X、Y、Z 三向六自由度
台面最大加速度	X 向 1.2g; Y 向 0.8g; Z 向 0.7g
频率范围	0.1Hz~50Hz

2.2 模型的相似设计

表 1 中列出了模型各物理量的相似关系式和相似系数。

2.3 模型的设计与制作

模型比为 1/10, 梁、柱、板的尺寸由实际高层框架结构的尺寸按相似关系折算。原型和模型概况见表 2, 模型尺寸和配筋图见图 1。

模型材料采用微粒混凝土和镀锌铁丝。微粒混凝土是一种模型混凝土, 它以较大粒径的砂砾为粗骨料, 以较小粒径的砂砾为细骨料。微粒混凝土的施工方法、振捣方式、养护条件以及材料性能都与普通混凝土十分相似, 在动力特性上与原型混凝土有良好的相似关系, 而且通过调整配合比, 可满足降低弹性模量的要求。

考虑计入隔墙、楼面装修的重量和 50%活载, 在板上配质量块配重。在标准层上布置

每层 19.4 kg 配重，在屋面层上布置 19.7 kg 配重。

表 1 试验模型的动力相似关系

	物理量	关系式	1/10 模型	备 注
材 料 特 性	应变 ε	$S_\varepsilon = 1.0$	1	模型设计控制
	应力 σ	$S_\sigma = S_E$	1/3.870	
	弹模 E	S_E	1/3.870	
	泊松比 μ	$S_\mu = 1.0$	1	
	密度 ρ	S_ρ	1	模型设计控制
几 何 特 性	长度 l	S_l	1/10	模型设计控制
	面积 S	$S_S = S_l^2$	1/100	
	线位移 X	$S_X = S_l$	1/10	
	角位移 β	$S_\beta = 1.0$	1	
荷 载	集中力 P	$S_P = S_E S_l^2$	1/387	
	面荷载 q	$S_q = S_E$	1/3.870	
动 力 特 性	质量 m	$S_m = S_\rho S_l^3$	1/1000	动力荷载控制
	刚度 k	$S_k = S_E S_l$	1/38.7	
	时间 t	$S_t = (S_m / S_k)^{1/2}$	0.1967	
	频率 f	$S_f = 1 / S_t$	5.083	
	阻尼 c	$S_c = S_m / S_t$	0.00508	
	速度 v	$S_v = S_l / S_t$	0.508	
	加速度 a	$S_a = S_l / S_t^2$	2.584	动力荷载控制

表 2 原型和模型概况

项 目	原 型	1/10 模型
层 数	12	12
H/B	6	6
层高	3m	0.3m
总高	36m	3.6m
平面尺寸	6m×6m	0.6m×0.6m
梁截面	300mm×600mm	30mm×60mm
柱截面	500mm×600mm	50mm×60mm
楼板厚度	120mm	12mm
材 料	C30 砼	微粒砼

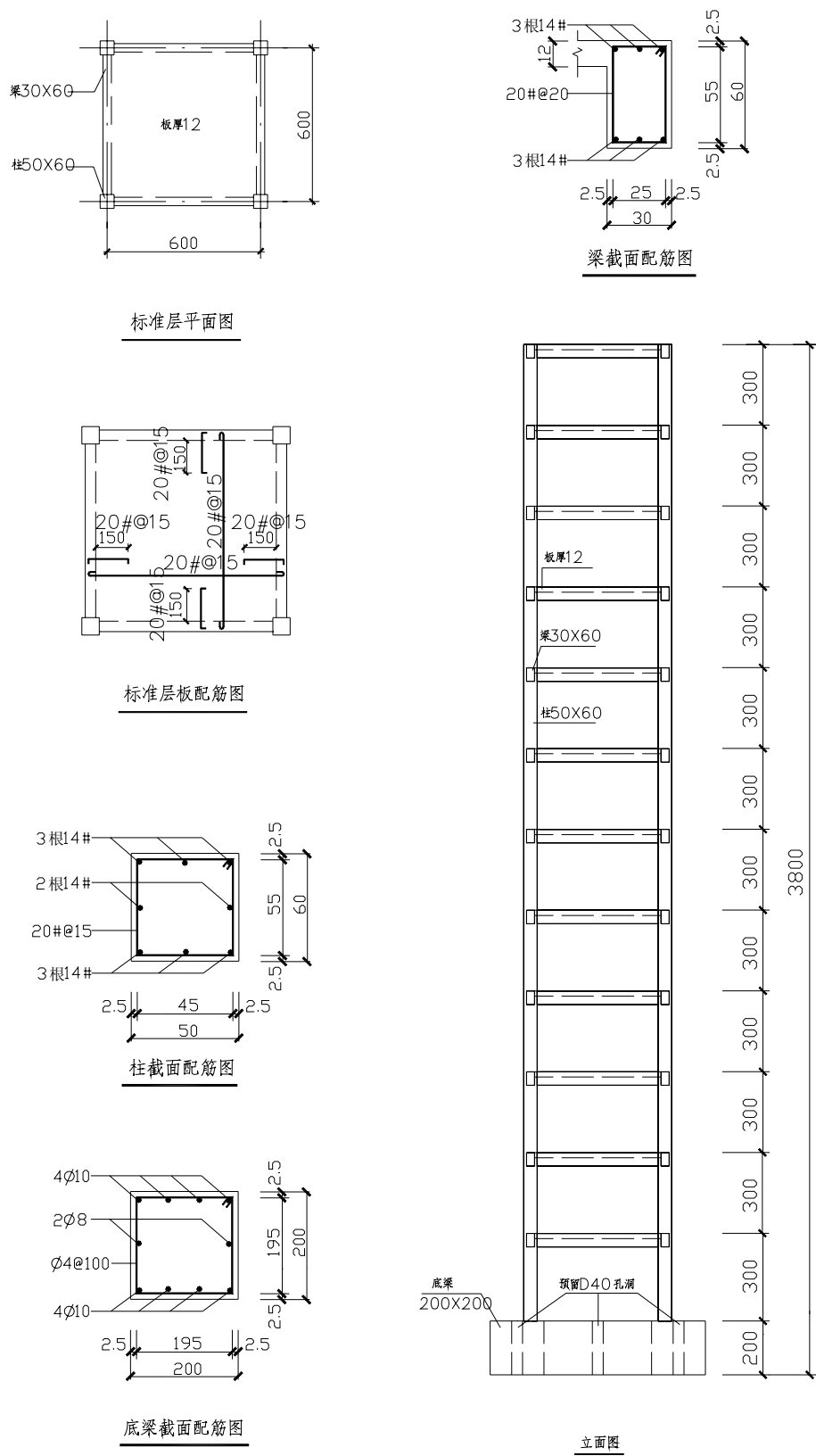


图 1 模型尺寸和配筋图

2.4 材料性能指标

在浇筑模型的同时预留了试样，混凝土材性试验结果见表 3，钢筋材性试验结果见表 4。

表 3 混凝土材性试验结果

类别	试样组号	浇筑日期	立方体强度(MPa)	弹性模量(MPa)	弹模均值(MPa)
微 粒 混 凝 土	0F	2003.3.26	9.216	10.167×10^3	7.751×10^3
	1F/2F	2003.3.30	7.969	8.490×10^3	
	3F/4F	2003.4.3	5.735	7.062×10^3	
	5F/6F	2003.4.5	7.402	7.649×10^3	
	7F/8F	2003.4.10	7.669	7.917×10^3	
	9F/10F	2003.4.14	7.202	7.322×10^3	
	11F/12F	2003.4.21	8.202	8.065×10^3	

注：（1）立方体抗压强度试件尺寸为 $70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm} \times 70.7\text{mm}$ ；
 （2）弹性模量试件尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 300\text{mm}$ ；
 （3）试样组号 0F 对应浇筑模型底座的微粒混凝土，不计入弹性模量平均值；
 （4）混凝土材性试验日期为 2003 年 6 月 2 日。

表 4 钢筋的材性试验结果

名 称	型 号	直 径 (mm)	面 积 (mm^2)	屈服强度 (MPa)	极限强度 (MPa)
铁 丝	20 #	0.90	0.63	327	397
	18 #	1.20	1.13	347	420
	14 #	2.11	3.50	391	560

2.5 测点布置

试验中采用加速度计、应变传感器量测模型结构的动力响应。加速度计的方向有 X、Y、Z 三个方向。

试验测点布置见图 2。测点传感器接线对应表见表 5。

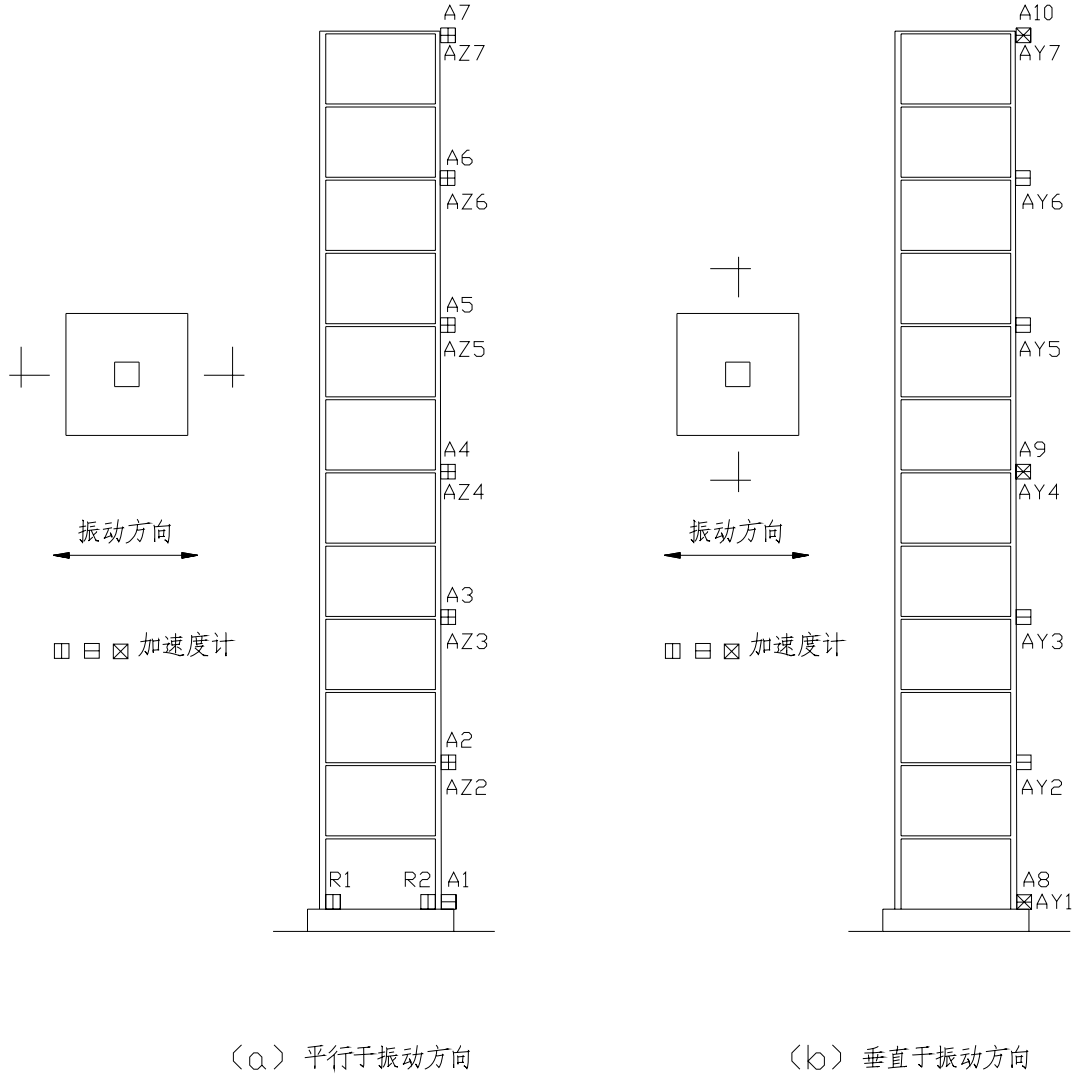


图 2 试验测点布置图

2.6 加速度输入波

试验选用地震波形有 El Centro 波、Kobe 波、上海人工波及上海基岩波，试验中的某些工况同时输入 X、Y 双向或 X、Y、Z 三向 El Centro 波或 Kobe 波。图 3～图 6 分别为 El Centro 波、Kobe 波、上海人工波和上海基岩波的加速度时程曲线及傅氏谱。

El Centro 波是 1940 年 5 月 18 日美国 IMPERIAL 山谷地震 (M7.1) 在 El Centro 台站记录的加速度时程，它是广泛应用于结构试验及地震反应分析的经典地震记录。其主要强震部分持续时间为 26 秒左右，记录全部波形长为 54 秒，原始记录离散加速度时间间隔为 0.02 秒，N-S 分量、E-W 分量和 U-D 分量加速度峰值分别为 341.7gal、210.1gal 和 206.3gal。

表 5 S10H 测点传感器接线对应表

序号	位 置	方向	测点号	通道号	备注
1	基础顶面	X	A1	8	
2	2F	X	A2	7	
3	4F	X	A3	6	
4	6F	X	A4	5	
5	8F	X	A5	4	
6	10F	X	A6	3	
7	12F	X	A7	1	
8	基础顶面平面外	X	A8	27	
9	6F 平面外	X	A9	26	
10	12F 平面外	X	A10	25	
11	基础顶面平面外	Y	AY1	15	
12	2F 平面外	Y	AY2	14	
13	4F 平面外	Y	AY3	13	
14	6F 平面外	Y	AY4	12	
15	8F 平面外	Y	AY5	11	
16	10F 平面外	Y	AY6	10	
17	12F 平面外	Y	AY7	9	
18	基础顶面	Z	R1	24	
19	基础顶面	Z	R2	23	
20	2F	Z	AZ2	22	
21	4F	Z	AZ3	21	
22	6F	Z	AZ4	19	
23	8F	Z	AZ5	18	
24	10F	Z	AZ6	17	
25	12F	Z	AZ7	16	
26	柱底应变		E11	49	西外
27	柱底应变		E12	50	西内
28	柱底应变		E13	52	东内
29	柱底应变		E14	53	东外
30	柱底应变		E15	54	北外
31	柱底应变		E16	55	北内
32	柱底应变		E17	56	南内
33	柱底应变		E18	58	南外

试验中选用 N-S 分量作为 X 向输入。其时程曲线和傅氏谱如图 3 所示(图中峰值缩比为 0.1g)。

Kobe 波是 1995 年 1 月 17 日日本阪神地震 (M7.2) 中, 神戸海洋气象台在震中附近的加速度时程记录。这次地震是典型的城市直下型地震, 记录所在的神戸海洋气象台的震中距为 0.4km。主要强震部分的持续时间为 7 秒左右, 记录全部波形长约 40 秒, 原始记录离散加速度时间间隔为 0.02 秒, N-S 分量、E-W 分量和 U-D 分量加速度峰值分别为 818.02gal、617.29gal 和 332.24gal。试验中选用 N-S 分量作为 X 向输入。其时程曲线和傅氏谱如图 4 所示 (图中峰值缩比为 0.1g)。

上海人工波 (Shw2) 的主要强震部分持续时间为 50 秒左右, 全部波形长为 78 秒, 加速度波形离散时间间隔为 0.02 秒。其时程曲线和傅氏谱如图 5 所示 (图中峰值缩比为 0.1g)。

上海基岩波 (Shj) 的主要强震部分持续时间为 30 秒左右, 全部波形长为 64 秒, 加速度波形离散时间间隔为 0.02 秒。其时程曲线和傅氏谱如图 6 所示 (图中峰值缩比为 0.1g)。

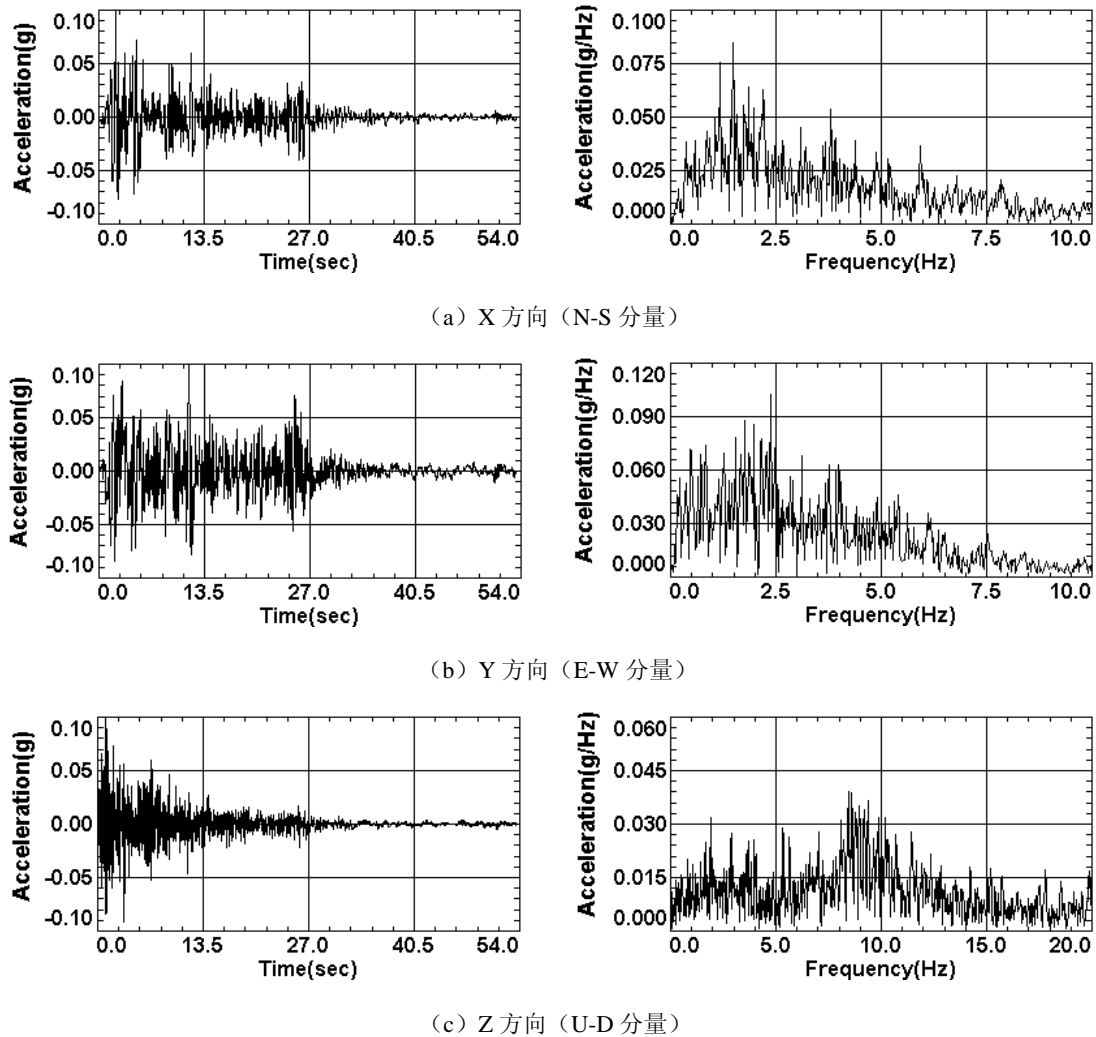
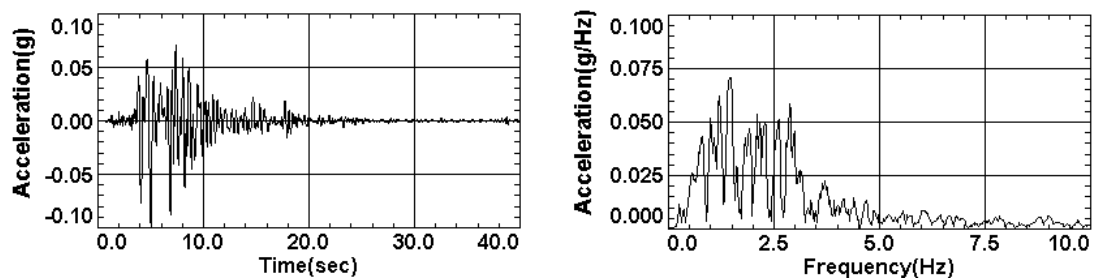
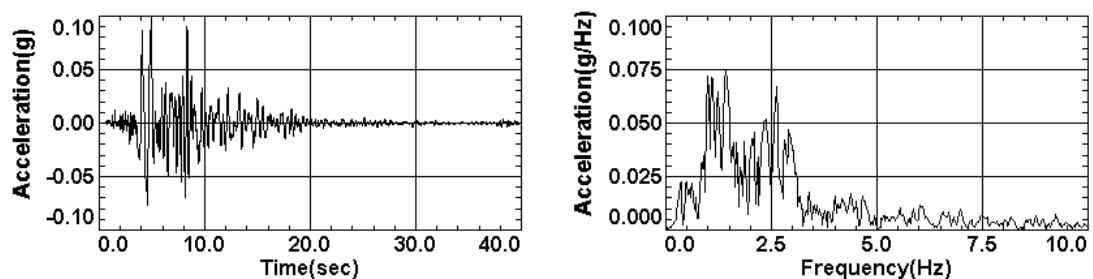


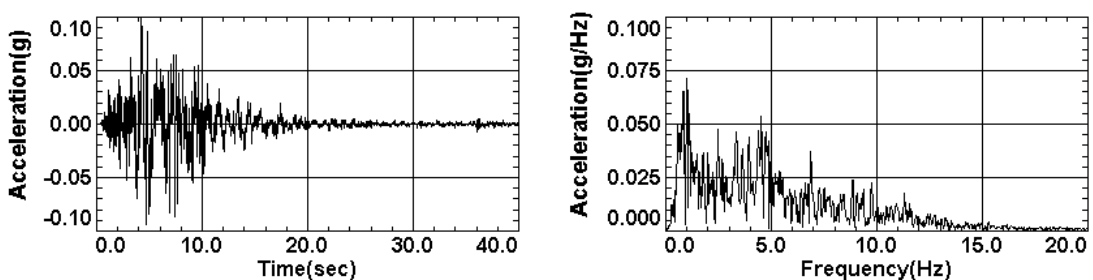
图 3 El Centro 波时程及其傅氏谱



(a) X 方向 (N-S 分量)



(b) Y 方向 (E-W 分量)



(c) Z 方向 (U-D 分量)

图 4 Kobe 波时程及其傅氏谱

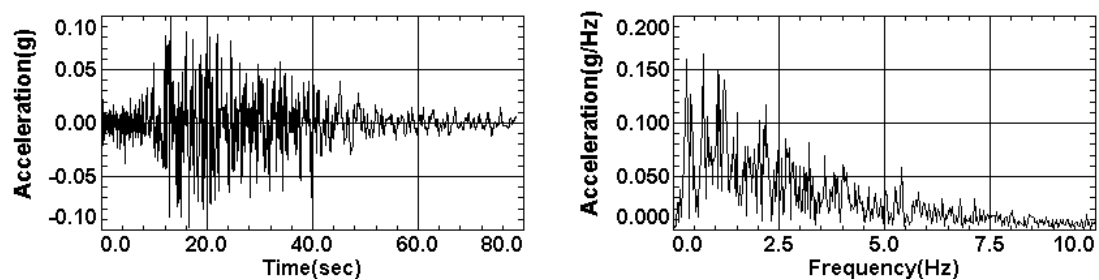


图 5 上海人工波 (Shw2) 时程及其傅氏谱

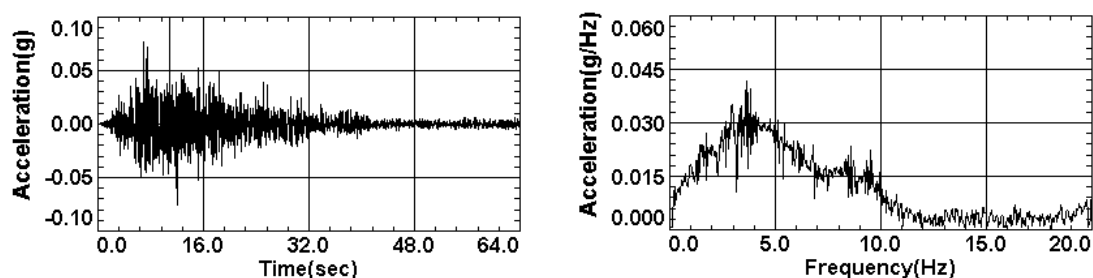


图 6 上海基岩波 (Shj) 时程及其傅氏谱

2.7 试验加载制度

试验中, 台面输入加速度峰值按小量级分级递增, 按相似关系调整加速度峰值和时间间隔。加载制度见表 6。每次改变加速度输入大小时都输入小振幅的白噪声激励, 观察模型系统动力特性的变化。

3 试验现象

试验时安装在振动台上的模型如图 5 所示。

试验中, 在前 7 个工况下 (相当于原型体系承受七度多遇地震), 在 S10H 结构上没有发现任何裂缝。在第 9 工况 SH2 后 (相当于原型体系承受七度地震), 在 4 层平行于 X 振动方向的框架梁的梁端首先出现细微的自上而下和自下而上发展的垂直裂缝, 缝宽小于 0.05mm。在第 16 工况后, 平行于 X 振动方向的 4~6 层框架梁的梁端均有垂直裂缝, 缝宽约 0.08mm, 各柱中未观察到裂缝; 平行于 Y 振动方向的框架梁柱中也未发现裂缝。在第 18 工况 SH3 后, 平行于 X 振动方向的 3~6 层框架梁的梁端垂直裂缝贯通, 最大缝宽在第 4 层处, 约 0.15mm。在第 21 工况双向 EY3 后, 平行于 Y 振动方向的框架中, 于第 4~6 层梁的梁端先出现垂直裂缝, 缝宽约 0.08mm。之后, 随着输入激励加大, 梁端裂缝增大, 开裂的梁的位置向上层、向下层发展。经 62 个工况后, 北侧和南侧的平行于 X 振动方向的框架上, 1~10 层的梁端或柱端均有裂缝, 其中 2~8 层梁端裂缝贯通, 3~6 层最严重, 拉出或压碎, 缝宽达 4mm, 形成塑性铰; 西侧和东侧的平行于 Y 振动方向的框架上, 1~9 层的梁端或柱端均有裂缝, 其中 3~6 层最严重, 梁柱节点裂通甚至拉出或压碎, 缝宽达 3mm, 形成塑性铰。在最上部 2~3 层基本没有裂缝。试验结束时, 模型已成为不稳定的机动结构。试验后 S10H 框架结构的裂缝图如图 6 所示。



图 7 S10H 试验

表 6 S10H 试验加载制度

序号	工况代号	原型			1/10 模型			备 注
		X 向	Y 向	Z 向	X 向	Y 向	Z 向	
1	1WN	—	—	—	0.07	0.07	0.07	
2、3、4、5	EL1、SH1、KB1、SJ1	0.035	—	—	0.090	—	—	七度多遇
6、7	EY1、KY1	0.035	0.030	—	0.090	0.077	—	七度多遇
7+	7+WN	—	—	—	0.07	0.07	0.07	
8、9、10、11	EL2、SH2、KB2、SJ2	0.1	—	—	0.258	—	—	七度
12、13	EY2、KY2	0.1	0.085	—	0.258	0.220	—	七度
14、15	EZ2、KZ2	0.1	0.085	0.05	0.258	0.220	0.129	七度
16	16WN	—	—	—	0.07	0.07	0.07	
17、18、19、20	EL3、SH3、KB3、SJ3	0.15	—	—	0.388	—	—	
21、22	EY3、KY3	0.15	0.128	—	0.388	0.329	—	
23、24	EZ3、KZ3	0.15	0.128	0.075	0.388	0.329	0.194	
25	25WN	—	—	—	0.07	0.07	0.07	
26、27、28、29	EL4、SH4、KB4、SJ4	0.2	—	—	0.517	—	—	八度
30、31	EY4、KY4	0.2	0.17	—	0.517	0.439	—	八度
32、33	EZ4、KZ4	0.2	0.17	0.1	0.517	0.439	0.258	八度
34	34WN	—	—	—	0.07	0.07	0.07	
35、36、37、38	EL5、SH5、KB5、SJ5	0.25	—	—	0.646	—	—	
39、40	EY5、KY5	0.25	0.213	—	0.646	0.549	—	
41、42	EZ5、KZ5	0.25	0.213	0.125	0.646	0.549	0.323	
43	43WN	—	—	—	0.07	0.07	0.07	
44、45、46、47	EL6、SH6、KB6、SJ6	0.3	—	—	0.775	—	—	
48、49	EY6、KY6	0.3	0.255	—	0.775	0.659	—	
50、51	EZ6、KZ6	0.3	0.255	0.15	0.775	0.659	0.388	
52	52WN	—	—	—	0.07	0.07	0.07	
53、54、55、56	EL7、SH7、KB7、SJ7	0.35	—	—	0.904	—	—	
57、58	EY7、KY7	0.35	0.298	—	0.904	0.769	—	
59、60	EZ7、KZ7	0.35	0.298	0.175	0.904	0.769	0.452	
61	61WN	—	—	—	0.07	0.07	0.07	

注：EL——El Centro 波（X 单向）； EY——El Centro 波（X、Y 双向）； EZ——El Centro 波（X、Y、Z 三向）；
KB——Kobe 波（X 单向）； KY——Kobe 波（X、Y 双向）； KZ——Kobe 波（X、Y、Z 三向）；
SH——上海人工波（X 单向）； SJ——上海基岩波（X 单向）； X：Y：Z=1：0.85：0.5

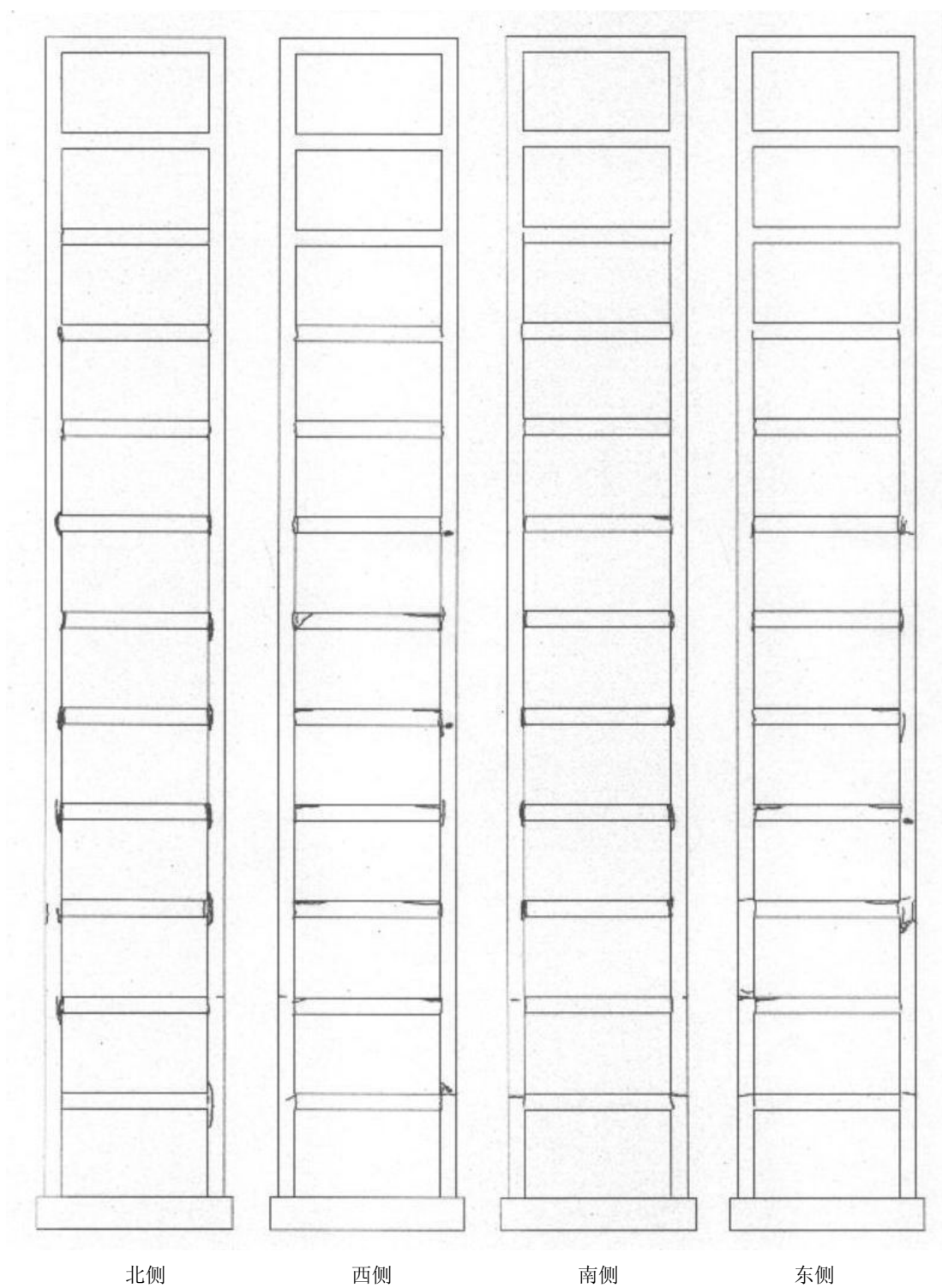


图 8 S10H 试验后框架结构裂缝图

4 试验数据文件

4.1 AutoCAD 文件

模型尺寸和配筋图: S10H_Modal.dwg

试验测点布置见图: S10H_Sensor.dwg

4.2 输入地震波数据文件

文件名: El Centro 波: elx.txt ely.txt elz.txt

Kobe 波: kbx.txt kby.txt kbz.txt

上海人工波: shw2.txt

上海基岩波: shjibo.txt

时间间隔: 0.00392 秒

说明: 输入地震波峰值缩比为 0.1g

4.3 测点记录数据文件

文件名格式: 示例:

AY2	e1	s1h.dat
		S10H试验编号
		工况代号, 见表6
测点号, 见图2		

时间间隔: 0.00392 秒

4.4 传递函数数据文件

文件名格式:

16	trf	8.txt
		通道号, 见表5
		传递函数
工况序号, 见表6		