

中华人民共和国行业标准

# 建筑抗震试验方法规程

Specifying of Testing Methods for  
Earthquake Resistant Building

**JGJ 101—96**

1997 北京

中华人民共和国行业标准

# 建筑抗震试验方法规程

Specifying of Testing Methods for  
Earthquake Resistant Building

**JGJ 101—96**

主编单位:中国建筑科学研究院

批准单位:中华人民共和国建设部

施行日期:1997年4月1日

1997 北 京

## 关于发布行业标准《建筑抗震试验 方法规程》的通知

建标[1996]614 号

各省、自治区、直辖市建委(建设厅)、计划单列市建委:

根据建设部(87)城科字第 276 号文的要求,由中国建筑科学研究院主编的《建筑抗震试验方法规程》业经审查,现批准为行业标准,编号 JGJ101—96,自 1997 年 4 月 1 日起施行。

本标准由建设部建筑工程标准技术归口单位中国建筑科学研究院负责归口管理,并负责具体解释等工作,由建设部标准定额研究所组织出版。

中华人民共和国建设部

1996 年 12 月 2 日

## 目 次

1	总则 .....	1
2	术语及符号 .....	2
2.1	术语 .....	2
2.2	符号 .....	3
3	试体的设计 .....	5
3.1	一般规定 .....	5
3.2	拟静力和拟动力试验试体的尺寸要求 .....	5
3.3	模拟地震振动台试验试体的设计要求 .....	6
4	试体的材料与制作要求 .....	7
4.1	砌体试体的材料与制作 .....	7
4.2	混凝土试体的材料与制作 .....	7
5	拟静力试验 .....	9
5.1	一般要求 .....	9
5.2	试验装置及加载设备 .....	9
5.3	量测仪表的选择 .....	12
5.4	加载方法 .....	13
5.5	试验数据处理 .....	13
6	拟动力试验 .....	16
6.1	一般要求 .....	16
6.2	试验系统及加载设备 .....	16
6.3	数据采集仪器仪表 .....	17
6.4	控制、数据处理计算机及其接口 .....	17
6.5	试验装置 .....	17
6.6	试验实施和控制方法 .....	21
6.7	试验数据处理 .....	21
7	模拟地震振动台动力试验 .....	24

7.1	一般要求 .....	24
7.2	试验设备 .....	24
7.3	试体安装 .....	24
7.4	测试仪器 .....	24
7.5	加载方法 .....	25
7.6	试验的观测和动态反应量测 .....	26
7.7	试验数据处理 .....	27
8	原型结构动力试验 .....	28
8.1	一般要求 .....	28
8.2	试验前的准备 .....	28
8.3	试验方法 .....	28
8.4	试验设备和测试仪器 .....	28
8.5	试验要求 .....	29
8.6	试验数据处理 .....	30
9	建筑抗震试验中的安全措施 .....	32
9.1	安全防护的一般要求 .....	32
9.2	拟静力、拟动力试验中的安全措施 .....	32
9.3	模拟地震振动台试验中的安全措施 .....	32
9.4	原型结构动力试验中的安全措施 .....	33
附录 A	模型试体设计的相似条件 .....	34
附录 B	拟动力试验数值计算方法 .....	38
附录 C	本规程用词说明 .....	41
附加说明	.....	42

## 1 总 则

- 1.01 为统一建筑抗震试验方法,确保抗震试验质量,制定本规程。
- 1.02 本规程适用于建筑物和构筑物的抗震试验。本规程不适用于有特殊要求的研究性试验。
- 1.03 建筑抗震试验所采用的仪器设备,应有出厂合格证,其性能应经专门的检测机构检测认定。
- 1.04 对抗震试验用试体进行设计及试验结果评定时,除应符合本规程要求外,尚应符合国家现行有关规范、标准的要求。

## 2 术语及符号

### 2.1 术 语

#### 2.1.1 试体 test sample

凡作为抗震试验的对象均称试体,是试验构件、结构的原型和模型的总称。

#### 2.1.2 原型结构 prototype structure

按施工图设计建成的直接投入使用的结构。

#### 2.1.3 足尺模型 prototype model

尺寸、材料、受力特性与原型结构相同的结构模型。

#### 2.1.4 弹性模型 elastic model

为研究在荷载作用下结构弹性性能,用匀质弹性材料制成与原型相似的结构模型。

#### 2.1.5 弹塑性模型 elastic-plastic model

为研究在荷载作用下结构各阶段工作性能包括直至破坏的全过程反应,用与实际结构相同的材料制成的与原型相似的结构模型。

#### 2.1.6 反力装置 reacting equipment

为实现对试体施加荷载的承载反力的装置。

#### 2.1.7 荷载控制 loading control

以荷载值的倍数为级差的加载控制。

#### 2.1.8 变形控制 deformation control

以变形值的倍数为级差的加载控制。

#### 2.1.9 拟静力试验 pseudo-static test

用一定的荷载控制或变形控制对试体进行低周反复加载,使试体从弹性阶段直至破坏的一种试验。

### 2.1.10 拟动力试验 pseudo-dynamic test

试体在静力试验台上实时模拟地震动力反应的试验。

### 2.1.11 模拟地震振动台试验 pseudo-earthquake shaking table test

通过振动台台面对试体输入地面运动,模拟地震对试体作用全过程的抗震试验。

### 2.1.12 初速度法 initial velocity method

对试体施加初速度使之振动而测定其动力性能的方法。

### 2.1.13 初位移法 initial displacement method

对试体施加初位移然后突然释放使之振动而测定其动力性能的方法。

## 2.2 符 号

### 2.2.1 拟静力与拟动力试验用符号

$K$ ——单质点试体的初始侧向刚度

$K_i$ ——第  $i$  次循环割线刚度

$X$ ——实测水平位移

$\pm F_i$ ——第  $i$  次正、反向峰点荷载值

$\pm X_i$ ——第  $i$  次正、反向峰点位移值

$F_j^i$ ——位移延性系数为  $j$  时,第  $i$  循环峰点荷载值

$X_j^i$ ——位移延性系数为  $j$  时,第  $i$  循环峰点位移值

$\mu$ ——试体的延性系数

$X_u$ ——试体的极限位移

$F_{j\max}^i$ ——位移延性系数为  $j$  时,第  $i$  次加载循环的最大峰点荷载值

$F_{j\max}$ ——位移延性系数为  $j$  时,第一次加载循环的最大峰点荷载值

$X_y$ ——试体的屈服位移

### 2.2.2 拟动力试验数值加载值计算符号

$[K]$ ——多质点试体的初始侧向刚度矩阵



- $M, M_i$ ——试体质量和第  $i$  个质点的质量  
 $[M]$ ——试体质量矩阵  
 $C$ ——试体阻尼比  
 $[C]$ ——试体的阻尼矩阵  
 $\dot{X}, \{\dot{X}\}$ ——试体的速度和速度向量  
 $\ddot{X}, \{\ddot{X}\}$ ——试体的加速度和加速度向量  
 $\ddot{Z}_0, \{\ddot{Z}_0\}$ ——地震地面运动加速度和加速度向量  
 $P, \{P\}$ ——试体的恢复力和恢复力向量  
 $P_i$ ——第  $i$  质点的恢复力  
 $\lambda_i, \lambda_j$ ——第  $i$  和第  $j$  振型的阻尼比  
 $w_i, w_j$ ——第  $i$  和第  $j$  振型的圆频率  
 $\Delta t$ ——积分时间间隔(地震加速度取值时间间隔)  
 $\tilde{m}, \tilde{C}, \tilde{P}$ ——等效质量,等效阻尼,等效试体恢复力  
 $\tilde{X}, \dot{\tilde{X}}, \ddot{\tilde{X}}$ ——等效位移,等效速度和等效加速度  
 $U_i$ ——第一振型曲线中第  $i$  个质点位移与最大位移的比值

### 2.2.3 试体设计使用符号

- $\rho_{1m}$ ——模拟人工质量施加于模型上的附加材料的质量密度  
 $\rho_{0m}$ ——模型材料中的质量密度  
 $\rho_{0p}$ ——原型结构具有结构效应的材料的质量密度  
 $L_m$ ——模型结构几何尺寸  
 $L_p$ ——原型结构几何尺寸

## 3 试体的设计

### 3.1 一般规定

- 3.1.1 采用模型或截取部分结构作试体时,试体应分别满足原型结构的几何、物理、力学、构造和边界的相应条件。
- 3.1.2 试体的尺寸应根据试验目的要求,和现有设备条件进行设计,并应满足本规程的有关规定。
- 3.1.3 试体设计时应进行试体的局部处理。试验时不得发生非试验目的的破坏。
- 3.1.4 当试体为截取的柱或墙时,其上部荷载重量应视为竖向外力。
- 3.1.5 当试体为构件时,同类构件不得少于 2 个;用于基本性质试验的构件数量,应通过各种因素用正交设计确定。
- 3.1.6 模型试体材料重力密度不足时可采用均匀附加荷载弥补,此时应按附加荷载在整个试体上的作用位置与分布情况确定。
- 3.1.7 拟静力和拟动力试验试体与原型结构的相似条件的设计应按本规程附录 A.1 进行。

### 3.2 拟静力和拟动力试验试体的尺寸要求

- 3.2.1 砌体结构的墙体试体与原型的比例不宜小于原型的 1/4。
- 3.2.2 混凝土结构墙体试体,高度和宽度尺寸与原型比例,不宜小于原型的 1/6。
- 3.2.3 框架节点试体,其尺寸与原型比例不宜小于原型的 1/4。
- 3.2.4 框架试体与原型比例可取原型结构的 1/8。

### 3.3 模拟地震振动台试验试体的设计要求

3.3.1 结构弹性模型与原型比例不宜小于原型结构的 $\frac{1}{100}$ 。结构

弹塑性模型与原型的比例不宜小于原型结构的 $\frac{1}{15}$ 。

3.3.2 试体设计时应满足试体安装、结构反应量测和传感器安装等对试体构造的要求。

3.3.3 对于多层整体结构模型试体,当以荷重块作为人工模拟质量时,可均匀布置在各层楼面和屋面上,荷重块应与模型固牢。

3.3.4 对于单榀框架或单片墙体等平面试体,应计入模拟用集中质量的重心高度对试体在平面外所产生的影响。

3.3.5 结构动力试体应按相似理论进行设计,其试验模型应符合本规程附录 A 的规定。

## 4 试体的材料与制作要求

### 4.1 砌体试体的材料与制作

- 4.1.1 抗震试验所用块材的强度等级应与原型结构相一致。
- 4.1.2 第一皮砖或砌块与底梁之间、最上层砖或砌块与顶梁之间的水平灰缝砂浆强度等级不应低于 M10,且应高于试体设计砂浆强度等级。
- 4.1.3 试体应根据模型的缩尺比例,可采用特制的缩尺砖或砌块。
- 4.1.4 试体材料力学性能试验方法应符合现行国家标准《砌体基本力学性质试验方法》的要求。
- 4.1.5 试体为配筋砌体时,尚应进行砌体中所配钢筋的基本力学性能试验。
- 4.1.6 砌体试体的制作、养护应符合国家标准《砌体工程施工及验收规范》的要求。

### 4.2 混凝土试体的材料与制作

- 4.2.1 试体采用混凝土时,应进行下列力学性能试验:
  - 4.2.1.1 制作混凝土立方体试件,测定试体混凝土抗压强度。
  - 4.2.1.2 当需要混凝土的应力应变关系时,应制作棱柱体试件进行测定,并绘制混凝土的应力—应变曲线。
  - 4.2.1.3 未取样试体混凝土的材料实际强度,可在全部试验完成后,从试体受力较小部位截取试件进行材料力学性能试验。
- 4.2.2 混凝土弹塑性模型其力学性能和骨料级配宜采用与原型结构有相似性的混凝土作为试体材料。
- 4.2.3 混凝土弹塑性模型其试体配筋的材料应符合相似性的要

求,可采用细筋。当采用盘圆筋需要调直时应计入力学性能的影响。模拟细纹筋时,光面钢筋宜作表面压痕处理。

4.2.4 试体采用的钢筋,应事先取样,并测定钢筋的弹性模量,绘制钢筋的应力—应变曲线。

4.2.5 试体制作时安装量测仪表的预埋件和预留孔洞位置应正确;在施工中应采取防止预埋的传感元件损坏的措施。

4.2.6 各类混凝土材性试件均应与试体同批同时制作,并应在同样条件下进行养护。

4.2.7 混凝土试体的制作、养护应符合现行国家标准《混凝土工程施工及验收规范》的要求。

## 5 拟静力试验

### 5.1 一般要求

5.1.1 本章适用于混凝土结构、钢结构、砌体结构、组合结构的构件及节点抗震基本性能试验。以及结构模型或原型在低周反复荷载作用下的抗震性能试验。

### 5.2 试验装置及加载设备

5.2.1 试验装置的设计应满足下列要求:

5.2.1.1 试验装置与试验加载设备应满足试体的设计受力条件和支承方式的要求。

5.2.1.2 试验台、反力墙、门架、反力架等,其传力装置应具有刚度、强度和整体稳定性。试验台的重量不应小于结构试体最大重量的 5 倍。试验台应能承受垂直和水平方向的力。试验台在其可能提供反力部位的刚度,应比试体大 10 倍。

5.2.1.3 墙体通过加载器施加竖向荷载时,应在门架与加载器之间设置滚动导轨(图 5.2.1)。其摩擦系数不应大于 0.01。

5.2.1.4 加载器的加载能力和行程应大于试体的最大受力和极限变形。

5.2.2 梁式构件可采用不设滚动导轨的试验装置(图 5.2.2)。

5.2.3 对顶部不容许转动的构件,所采用图 5.2.3 的试验装置,其四连杆结构与 L 型加载杆均应具有足够的刚度。对以弯剪受力为主的构件可采用本规程图 5.2.1 墙片试验装置。

5.2.4 对于梁柱节点的试验,当试体要求测  $P-\Delta$  效应时应采用图 5.2.4-2 的试验装置,当不要求测  $P-\Delta$  效应时应采用图 5.2.4-1 试验装置。

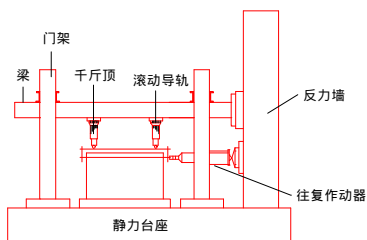


图 5.2.1 墙片试验装置

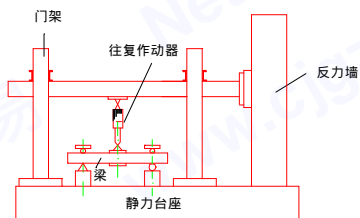


图 5.2.2 梁式构件试验装置

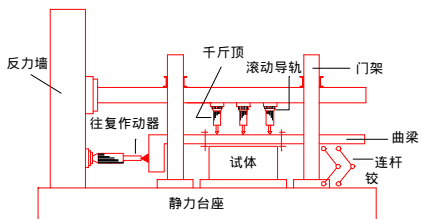


图 5.2.3 顶部无转动的抗剪试验装置

5.2.5 当进行多点侧向分配梁加载时,分配梁可采用悬吊支撑试验装置(图 5.2.5)。

5.2.6 柔性或易失稳试体的拟静力试验,应采取抗失稳的技术措施。

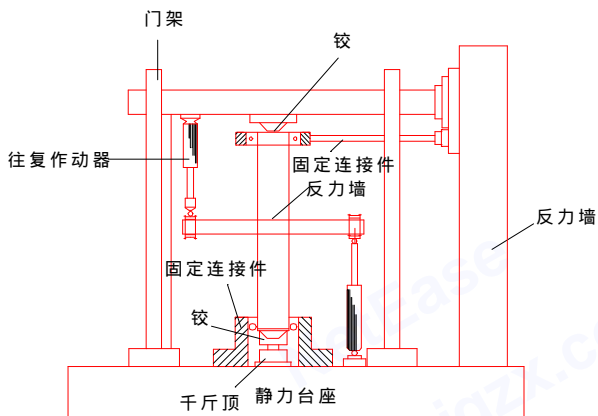


图 5.2.4-1 梁柱节点试验装置

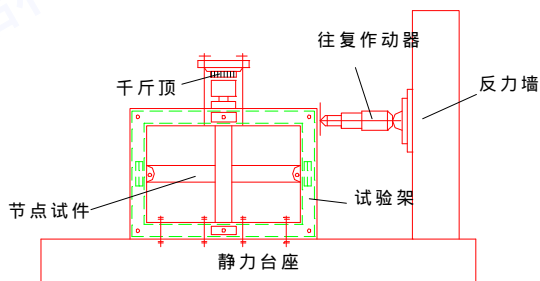


图 5.2.4-2 测  $P-A$  效应的节点试验装置



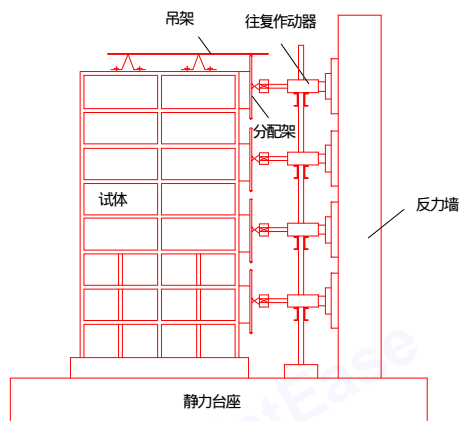


图 5.2.5 分配梁悬吊支撑加载试验装置

### 5.3 量测仪表的选择

5.3.1 应根据试验的目的选择测量仪表,仪表量程应满足试体极限破坏的最大量程,分辨率应满足最小荷载作用下的分辨能力。

5.3.2 位移计量的仪表最小分度值不宜大于所测总位移的 0.5%。示值允许误差为  $\pm 1.0\%F \cdot S$ 。

注: $F \cdot S$ ——表示满量程。

5.3.3 应变测量仪表的精度、误差和量程应满足下列要求:

5.3.3.1 各种应变式传感器最小分度值不宜大于  $10 \times 10^{-6}$ 。示值允许误差为  $\pm 1.0\%F \cdot S$ ;量程不宜小于最小分度值的 100 倍。

5.3.3.2 静态电阻应变仪(包括具有巡回检测自动化功能的数字式应变仪)的精度不应低于 B 级,最小分度值不宜大于  $10 \times 10^{-6}$ 。

注:电阻应变仪量测精度级别应符合国家行业标准《ZBY 109—82》的规定。

5.3.4 各种记录仪精度不得低于  $0.5\%F \cdot S$ 。

## 5.4 加载方法

5.4.1 正式试验前,应先进行预加反复荷载试验二次;混凝土结构试体预加载值不宜超过开裂荷载计算值的 30%;砌体结构试体不宜超过开裂荷载计算值的 20%。

5.4.2 正式试验时的加载方法应根据试体的特点和试验目的确定。宜先施加试体预计开裂荷载的 40%~60%,并重复 2~3 次,再逐步加至 100%。

5.4.3 试验过程中,应保持反复加载的连续性和均匀性,加载或卸载的速度宜一致。

5.4.4 当进行承载能力和破坏特征试验时,应加载至试体极限荷载下降段;对混凝土结构试体下降值应控制到最大荷载的 85%。

5.4.5 试体拟静力试验的加载程序应采用荷载—变形双控制的方法:

5.4.5.1 试体屈服前,应采用荷载控制并分级加载;接近开裂和屈服荷载前宜减小级差进行加载。

5.4.5.2 试体屈服后应采用变形控制。变形值应取屈服时试体的最大位移值,并以该位移值的倍数为级差进行控制加载。

5.4.5.3 施加反复荷载的次数应根据试验目的确定。屈服前每级荷载可反复一次,屈服以后宜反复三次。

5.4.6 平面框架节点的试体的加载,当以梁端塑性铰区或节点核心区为主要试验对象的试体,宜采用梁—柱加载;当以柱端塑性铰区或柱连接处为主要试验对象时,宜采用柱端加载,但应计入  $P-\Delta$  效应的影响。

5.4.7 对于多层结构试体的水平加载可按倒三角形分布。水平荷载宜通过各层楼板施加。

## 5.5 试验数据处理

5.5.1 混凝土构件试体的荷载及变形试验资料整理应按下列规定进行:

5.5.1.1 开裂荷载及变形应取试体受拉区出现第一条裂缝时相应的荷载和相应变形。

5.5.1.2 对钢筋屈服的试体,屈服荷载及变形应取受拉区主筋达到屈服应变时相应的荷载和相应变形。

5.5.1.3 试体的承受最大荷载和变形应取试体承受荷载最大时相应的荷载和相应变形。

5.5.1.4 破坏荷载及相应变形应取试体在最大荷载出现之后,随变形增加而荷载下降至最大荷载的 85% 时的相应荷载和相应变形。

5.5.2 混凝土试体的骨架曲线应取荷载变形曲线的各加载级第一循环的峰点所连成的包络线(图 5.5.2)。

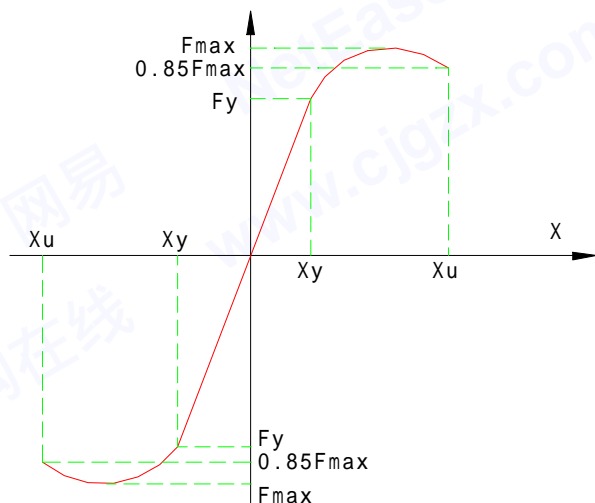


图 5.5.2 试体荷载变形曲线

5.5.3 试体的刚度可用割线刚度来表示,割线刚度  $K_i$  应按下式计算:

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (5.5.3)$$

式中  $F_i$ ——第  $i$  次峰点荷载值;  
 $X_i$ ——第  $i$  次峰点位移值。

5.5.4 试体的延性系数,应根据极限位移  $X_u$  和屈服位移  $X_y$  之比计算:

$$\mu = \frac{X_u}{X_y} \quad (5.5.4)$$

式中  $X_u$ ——试体的极限位移;  
 $X_y$ ——试体的屈服位移。

5.5.5 试体的承载力降低性能,应用同一级加载各次循环所得荷载降低系数  $\lambda_i$  进行比较,  $\lambda_i$  应按下式计算:

$$\lambda_i = \frac{F_j^i}{F_j^{i-1}} \quad (5.5.5)$$

式中  $F_j^i$ ——位移延性系数为  $j$  时,第  $i$  次循环峰点荷载值;  
 $F_j^{i-1}$ ——位移延性系数为  $j$  时,第  $i-1$  次循环峰点荷载值。

5.5.6 试体的能量耗散能力,应以荷载—变形滞回曲线所包围的面积来衡量,能量耗散系数  $E$  应按下式计算:

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \quad (5.5.6)$$

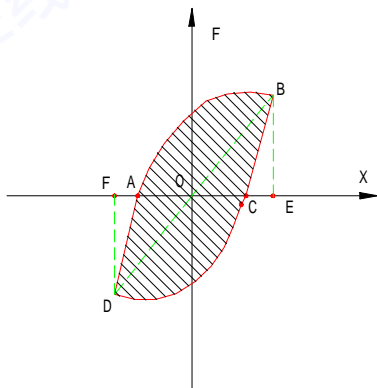


图 5.5.6 荷载—变形滞回曲线

## 6 拟动力试验

### 6.1 一般要求

- 6.1.1 本章适用于混凝土结构、钢结构、砌体结构、组合结构的模型在静力试验台上模拟实施地震动力反应的抗震性能试验。
- 6.1.2 对刚度较大的多质点模型可采用等效单质点拟动力试验方法。

### 6.2 试验系统及加载设备

- 6.2.1 拟动力试验系统应符合下列要求：
- 6.2.1.1 试验系统应由试体、试验台、反力墙、加载设备、计算机、数据采集仪器仪表组成。
- 6.2.1.2 加载设备宜采用闭环自动控制的机械或液压伺服系统装置的试验机。
- 6.2.1.3 与动力反应直接有关的控制参数仪表不宜采用非传感器式的机械直读仪表。
- 6.2.2 加载设备的性能应满足下列要求：
- 6.2.2.1 试验系统应能实现力和位移反馈的伺服控制。
- 6.2.2.2 系统动态响应的幅频特性不应低于  $2(\text{mm} \times \text{Hz})$ 。
- 6.2.2.3 力值系统允许误差为  $\pm 1.5\%F \cdot S$ ；分辨力应小于或等于  $0.1\%F \cdot S$ 。
- 6.2.2.4 位移系统允许误差为  $\pm 1\%F \cdot S$ ；分辨力应小于或等于  $0.1\%F \cdot S$ 。
- 6.2.2.5 加载设备在一段地震加速度时程曲线的试验周期内，其加载设备应稳定可靠、无故障地连续工作。

### 6.3 数据采集仪器仪表

- 6.3.1 测量仪表可按本规程第 5.3 节的规定选择。
- 6.3.2 试体各测量值,应采用自动化测量仪器进行数据采集记录,采集速度不宜低于每秒钟 1 个测点。

### 6.4 控制、数据处理计算机及其接口

- 6.4.1 拟动力试验采用的计算机(包括软件)应满足实时控制与数据采集、数据处理、图形输出等功能要求。
- 6.4.2 试体控制参量、结构量测参量应通过标准接口 A/D、D/A 接口,实现控制与数据采集。

### 6.5 试 验 装 置

- 6.5.1 试验装置的设计宜符合本规程 5.2 节的规定。
- 6.5.2 水平加载分配装置宜采用垂直方向滚动弹性支承(图 6.5.2)。
- 6.5.3 伺服作动器两端应有球铰法兰连接件,分别和反力墙、试体连接(图 6.5.3)。
- 6.5.4 结构试体垂直恒载加荷,宜采用短行程的伺服作动器并配装能使试体产生剪弯反力的装置。恒载精度应为 $\pm 1.5\%$ ,当装置(见图 6.5.4)采用一般液压加荷设备时,应有稳压技术措施,稳压允许误差为 $\pm 2.5\%$ 。
- 6.5.5 框架或杆件结构试体的水平集中荷载应通过拉杆传力装置作用在节点上,其总承载力应大于最大加载力的二倍。
- 6.5.6 作用在结构模型试体上的水平集中荷载应通过分配梁—拉杆装置均布在楼层板或梁上。拉杆装置总承载力应大于最大加载力的二倍。各拉杆拉力的不均匀差不应大于 5%。拉杆若需穿过结构模型试体结构开间或墙板时,其孔洞位置和孔径不宜影响试体受力状态。
- 6.5.7 分配梁应为简支铰接结构。集中荷载的分配级数不应大于

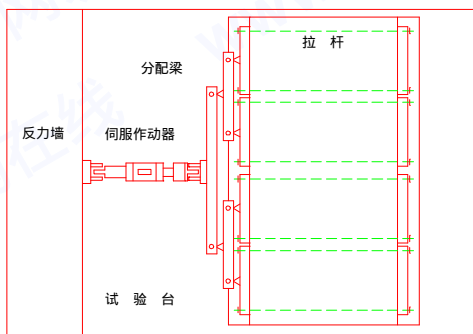
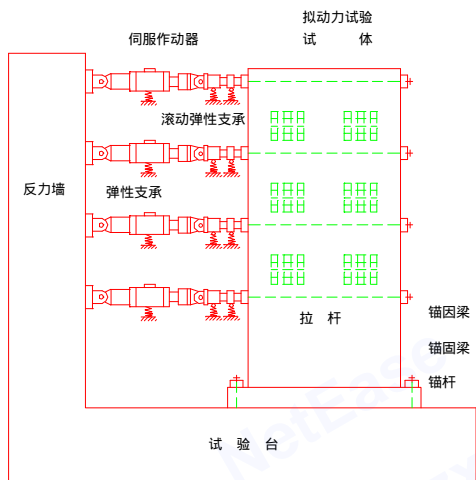


图 6.5.2 模型试体拟动力试验装置  
(a)立面图;(b)平面图

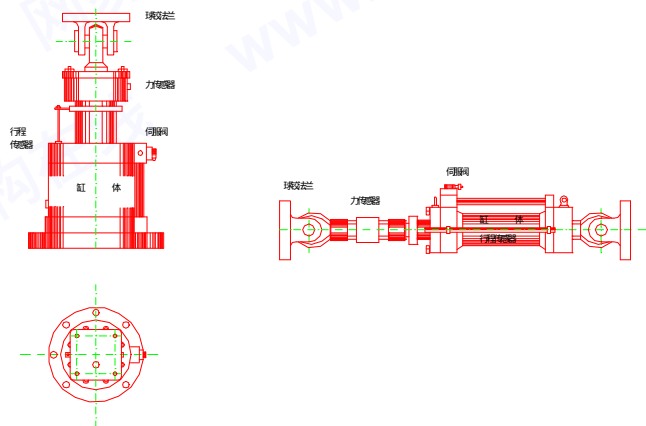


图 6.5.3 两种伺服作动器结构

(a)垂直加载伺服作动器;(b)水平加载伺服作动器



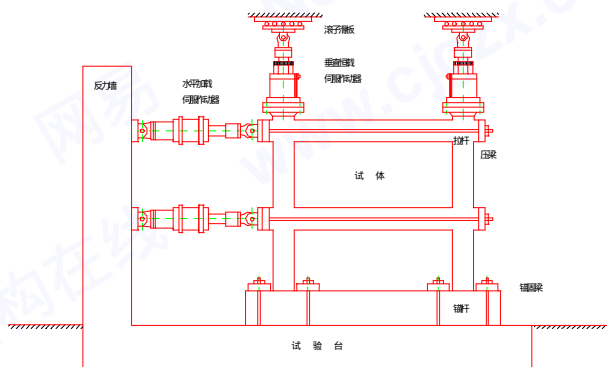


图 6.5.4 装有垂直恒载伺服作动器的框架结构试体拟动力试验装置

三级。与试体接触的卧式拉杆梁应具有刚度。

6.5.8 柔性或不稳定结构试体的拟动力试验,应符合本规程第 5.2.6 条的规定。

## 6.6 试验实施和控制方法

6.6.1 试验前应根据结构的拟建场地类型选择具有代表性的地震加速度时程曲线,并形成计算机的输入数据文件。

6.6.2 拟动力试验宜根据试验试体的不同工作状态的要求,可将地震加速度数据文件中的各加速度值按振动规律扩大或缩小。

6.6.3 试验前宜对模型先进行小变形静力加载试验,并确定试体的初始侧向刚度。

6.6.4 拟动力试验初始计算参数应包括:各质点的质量和高度、初始刚度、自振周期、阻尼比等。

6.6.5 试验的加载控制量应取试体各质点在地震作用下的反应位移。当试体刚度很大时,可采用荷载控制下逼近位移的间接加载控制方法,但最终控制量仍应是试体质点位移量。

6.6.6 量测试体各质点处的变形和结构恢复力,宜采取多次反复采集的算术平均值。

6.6.7 拟动力试验的基本步骤及每步加载值计算应符合本规程附录 B 的规定。

6.6.8 在拟动力试验中应对仪表布置、支架刚性、荷载最大输出量、限位等,采取消除试验系统误差的措施。

## 6.7 试验数据处理

6.7.1 对采用不同的地震加速度记录和最大地震加速度进行的每次试验,均应对试验数据进行图形处理,各图形应考虑计入结构模型进入弹塑性阶段后各次试验依次产生的残余变形影响,主要图形数据应包括下列内容:

6.7.1.1 基底总剪力—顶端水平位移曲线图;层间剪力—层间水平位移曲线图;试体各质点的水平位移时程曲线图和恢复力时程

曲线图;

6.7.1.2 最大加速度时的水平位移图、恢复力图、剪力图、弯矩图;抗震设计的时程分析曲线与试验时程曲线的对比图。

6.7.2 试体开裂时的基底总剪力、顶端位移和相应的最大地震加速度应按试体第一次出现裂缝(且该裂缝随地震加速度增大而开展)时的相应数值确定,并应记录此时的地震反应时间。

6.7.3 试体屈服、极限、破损状态的基底总剪力、顶端水平位移和最大地震加速度宜按以下方法确定:

6.7.3.1 应采用同一地震加速度记录按不同最大地震加速度进行的各次试验得到的基底总剪力—顶端水平位移曲线,取各曲线中最大反应循环内并已考虑各次试验依次使结构模型产生的残余变形影响后的各个反应值绘于同一坐标图中,做出基底总剪力—顶端水平位移包络线(图 6.7.3)。

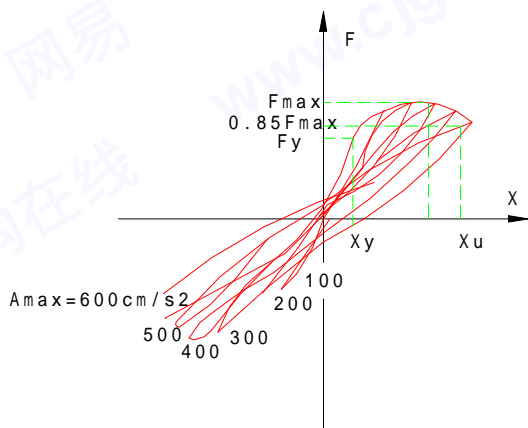


图 6.7.3 基底总剪力—顶端水平位移包络线

6.7.3.2 取包络线上出现明显拐弯点处(正、负方向上较小一侧)的数值为试体屈服基底总剪力、屈服顶端水平位移和屈服状态地震加速度。

6.7.3.3 取包络线上沿基底总剪力轴顶处(正、负方向上较小一

侧)的数值为试体极限基底总剪力和极限剪力状态的地震加速度。

**6.7.3.4** 取包络线上沿顶端水平位移轴、过极限基底总剪力点后、基底总剪力下降约 15%点处(正、负方向较小一侧)的数值,为试体破损基底总剪力及相应状态地震加速度。

网易 NetEase  
结构在线 www.cjgzx.com

## 7 模拟地震振动台动力试验

### 7.1 一般要求

7.1.1 本章适用于用模拟地震振动台对试体进行动力特性和动力反应的试验,判别和鉴定结构的抗震性能和抗震能力。

### 7.2 试验设备

7.2.1 当试验要求高精度模拟地震波输入时,宜选用能对地震波具有迭代功能的有数控装置的模拟地震振动台。

7.2.2 模拟地震振动台应根据试体的尺寸、质量以及试验要求并结合振动台的台面尺寸、频响特性和动力性能等参数选择使用。对于大缩比的试体模型应选用高频小位移的振动台,对足尺或小缩比的试体模型应选用低频大位移的振动台。

### 7.3 试体安装

7.3.1 在试体安装之前,应检查振动台各部分及控制系统,确认处于正常的工作状态。

7.3.2 试体与台面之间宜铺设找平垫层。

7.3.3 试体起吊、下降、安装时应防止受损。

7.3.4 试体就位后,应采用高强螺栓按底梁或底盘上的预留孔位置与台面螺栓孔连接。并宜采用特制的限位压板和支撑装置固定试体。在试验过程中应随时检查,防止螺栓松动。

### 7.4 测试仪器

7.4.1 测试仪器应根据试体的动力特性、动力反应、模拟地震振动台的性能以及所需的测试参数来选择。被选用的各种测试仪器

均应在试验前进行系统标定。

7.4.2 测试仪器的使用频率范围,其下限应低于试验用地震记录最低主要频率分量的 1/10,上限应大于最高有用频率分量值。

7.4.3 测试仪器动态范围应大于 60db。

7.4.4 测量讯号分辨率应小于最小有用振动幅值的 1/10。

7.4.5 试验数据的记录宜采用磁带记录器或计算机数据采集系统采集和记录。

7.4.6 量测用的传感器应具有良好的机械抗冲击性能,重量和体积要小,且便于安装和拆卸。

7.4.7 量测用的传感器的连接导线,应采用屏蔽电缆。量测仪器的输出阻抗和输出电平应与记录仪器或数据采集系统匹配。

## 7.5 加载方法

7.5.1 振动台试验加载时,台面输入的地面运动加速度时程曲线应按下列条件进行设计:

7.5.1.1 设计和选择台面输入加速度时程曲线时,应考虑试验结构的周期、拟建场地类别、地震烈度和震中距离的影响。

7.5.1.2 加速度时程曲线可直接选用强震记录的地震数据曲线,也可按结构拟建场地类别的反应谱特性拟合的人工地震波。选用人工合成地震波时,持续时间不宜小于 20s。

7.5.1.3 输入加速度时程曲线的加速度幅值和持续时间应按模型设计的比例所确定的相似常数进行修正。

7.5.2 模拟地震振动台模型试体的试验,宜在加载前采用正弦频率扫描法或白噪声激振法测定试体的动力特性:

7.5.2.1 正弦频率扫描法是采用单向等振幅加速度的变频连续正弦波,台面输入对试体进行正弦扫描。扫描速率可采用每分钟一个倍频程,加速度值为  $0.05\text{m/s}^2$ 。当振动台的噪声电平极低时,也可选用更小的加速度幅值。

7.5.2.2 白噪声激振法是采用单向白噪声对试体激振,白噪声的频段应能覆盖试体的自振频率,加速度值为  $0.5\sim 0.8\text{m/s}^2$ 。

7.5.3 模拟地震振动台试验,宜采用多次分级加载方法,加载可按下列步骤进行:

7.5.3.1 依据按试体模型理论计算的弹性和非弹性地震反应,估计逐次输入台面加速度幅值。

7.5.3.2 弹性阶段试验。输入某一幅值的地震地面运动加速度时程曲线,量测试体的动力反应、放大系数和弹性性能。

7.5.3.3 非弹性阶段试验。逐级加大台面输入加速度幅值,使试体逐步发展到中等程度的开裂,除了采集测试的数据外,尚应观测试体各部位的开裂或破坏情况。

7.5.3.4 破坏阶段试验。继续加大台面输入加速度幅值,或在某一最大的峰值下反复输入,使试体变为机动体系,直到试体整体破坏,检验结构的极限抗震能力。

## 7.6 试验的观测和动态反应量测

7.6.1 振动台试验时应按需要量测试体的加速度、速度、位移和应变等主要参数的动态反应。

7.6.2 对于框架、墙体等试体,加速度和位移测点宜优先布置在加速度和变形反应最大的部位。对于混凝土试体尚宜在试体受力和变形最大的部位布置测点量测钢筋和混凝土的应变和动态反应。

7.6.3 对于整体结构模型试体宜在模型屋盖和每层楼面高度位置布置加速度和位移传感器,量测模型的层间位移与加速度反应。对于钢筋混凝土模型试体或有构造柱的砌体结构模型试体,应量测钢筋和混凝土的应变反应。

7.6.4 在试体的底梁或底盘上,宜布置测试试体底部相对于台面的位移和加速度反应的测点。

7.6.5 当采用接触式位移计量测试体变形时,安装位移计的仪表架固定于台面或基坑外的地面上。仪表架本身必须有足够的刚度。

7.6.6 传感器与被测试体间应使用绝缘垫隔离,隔离垫谐振频率要远大于被测试体的频率。

7.6.7 传感器的连接导线应牢固固定在被测试体上,宜从物体运动较小的方向引出。

7.6.8 对于钢筋混凝土及砌体结构的试体在试验逐级加载的间隙中,应观测裂缝出现和扩展情况,量测裂缝宽度,将裂缝出现的次序和扩展情况按输入地震波过程在试体上描绘并作出记录。

7.6.9 试验的全过程宜以录像作动态记录。对于试体主要部位的开裂,失稳屈服及破坏情况,宜拍摄照片和作写实记录。

## 7.7 试验数据处理

7.7.1 试验数据采样频率应符合一般波谱信号数值处理的要求。

7.7.2 试验数据分析前,对数据必须进行下列处理:

7.7.2.1 根据传感器的标定值及应变计的灵敏系数等对试验数据进行修正。

7.7.2.2 根据试验情况和分析需要,采用滤波处理、零均值化、消除趋势项等减小量测误差的措施。

7.7.3 根据处理后的试验数据,应提取测试数据的最大值及其相对应的时间、时程反应曲线以及结构的自振频率、振型和阻尼比等数据。

7.7.4 当采用白噪声确定试体自振频率和阻尼比时,宜采用自功率谱或传递函数分析求得。试体的振型宜用互功率谱或传递函数分析确定。

7.7.5 需用加速度反应值计算位移值时,可用积分法计算,但应消除趋势项和进行滤波处理。



## 8 原型结构动力试验

### 8.1 一般要求

8.1.1 本章适用于利用外部动力直接作用于实际建筑结构的振动特性试验。

### 8.2 试验前的准备

8.2.1 应搜集原型结构所在场地的工程地质和地震地质、设计图纸、结构现状等资料。

8.2.2 应根据试验目的制定试验方案及必要的计算。

### 8.3 试验方法

8.3.1 测试结构的基本振型时,可优先选用环境振动法,在满足测试要求条件下也可选用初位移等其他方法。

8.3.2 测试结构平面内多个振型时,宜选用稳态正弦波激振法。

8.3.3 测试结构空间振型或扭转振型时,宜选用多振源相位控制同步的稳态正弦波激振法或初速度法。

8.3.4 要评估结构的抗震性能时,可选用随机激振法或人工爆破模拟地震法。

### 8.4 试验设备和测试仪器

8.4.1 当采用施加初速度的方法进行试验时,宜采用小火箭作激振源,其作用力大小应根据试验对象从弹性阶段动力特性要求选定,相应的作用时间宜为数毫秒至数十毫秒。

8.4.2 当采用稳态正弦激振的方法进行试验时,宜采用旋转惯性机械起振机,也可采用液压伺服激振器,使用频率范围宜在 0.5~

30Hz,频率分辨率应高于 0.01Hz。

8.4.3 可根据需要测试的动参数和振型阶数等具体情况,选择加速度仪、速度仪或位移仪,必要时可选择相应的配套仪表。

8.4.4 应根据需要测试的最低和最高阶频率选择测试仪器的频率范围。

8.4.5 测试仪器的最大可测范围应根据试体结构的类别,被测试体振动的强烈程度来选定。

8.4.6 测试仪器的分辨率应根据试体结构的最小振动幅值来选定。

8.4.7 传感器的横向灵敏度应小于 0.05。

8.4.8 进行瞬态过程测试时,测试仪器的可使用频率范围应比稳态测试时大一个数量级。

8.4.9 传感器应具备机械强度高,安装调节方便,体积重量小而便于携带,防水,防电磁干扰等性能。

8.4.10 记录仪器或数据采集分析系统、电平输入及频率范围,应与测试仪器的输出相匹配。

## 8.5 试验要求

8.5.1 原型结构脉动测试应满足下列要求:

8.5.1.1 应避免环境及系统干扰。

8.5.1.2 测试记录时间,在测量振型和频率时不应少于 5min,在测试阻尼时不应小于 30min。

8.5.1.3 当因测试仪器数量不足而作多次测试时,每次测试中应至少保留一个共同的参考点。

8.5.2 原型结构机械激振振动测试应满足下列要求:

8.5.2.1 应正确选择激振器的位置,合理选择激振力,防止对结构引起振型畸变。

8.5.2.2 当激振器安装在楼板上时,应避免楼板的竖向自振频率和刚度的影响,激振力应具有传递途径。

8.5.2.3 激振试验中宜采用扫频方式寻找共振频率。在共振频率

附近进行测试时,应保证半功率带宽内有不少于 5 个频率的测点。

8.5.3 施加初速度自由振动试验应满足下列要求:

8.5.3.1 火箭筒的数目应根据试验目的及试验方案决定。

8.5.3.2 火箭筒布置的位置宜在建筑物的顶部和结构主体部分的侧面。火箭筒的引爆宜用干电池引爆方式。

8.5.3.3 当采用多个火箭激振时,各个火箭筒应同时引爆。

8.5.4 施加初位移的自由振动测试应符合下列要求:

8.5.4.1 应根据试验目的布置拉线点。

8.5.4.2 拉线与结构的连结部分应具有能够整体传力到主体受力构件上。

8.5.4.3 每次测试时应记录拉力数值和与结构轴线间的夹角。量取波值时,不得取用突断衰减的最初两个波。

8.5.4.4 拉测时不应使结构出现裂缝。

## 8.6 试验数据处理

8.6.1 对原型结构试验的时域数据处理应满足下列要求:

8.6.1.1 对记录的试验数据应进行零点漂移、记录波形和记录长度的检验。

8.6.1.2 试验结构的自振频率可在记录曲线上比较规则的波形段内取有限个周期的平均值。

8.6.1.3 试体结构阻尼比可按自由衰减曲线求取,在稳态正弦激振时可根据实测后的共振曲线采用半功率点法求取。

8.6.1.4 试体结构各测点的幅值,应用记录信号幅值除以测试系统的增益,并按此求得振型。

8.6.2 对原型结构试验的频域数据处理应满足下列要求:

8.6.2.1 频域数据处理采样间隔应符合采样定理的要求。

8.6.2.2 对频域中的数据应采用滤波、零均值化方法进行处理。

8.6.2.3 试体结构的自振频率可采用自谱分析或付里叶谱分析方法求取。

8.6.2.4 试体结构的阻尼比宜采用自相关函数分析,曲线拟合法

或半功率点法确定。

**8.6.2.5** 试体结构的振型,宜采用自谱分析、互谱分析或传递函数分析方法确定。

**8.6.2.6** 对于复杂试体结构的试验数据,宜采用谱分析、相关分析、传递函数分析和相干分析等方法进行分析。

**8.6.3** 试验数据处理后应根据需要提供试体结构的自振频率、阻尼比和振型,以及动力反应最大幅值、时程曲线、频谱曲线等分析结果。

网易 NetEase  
结构在线 www.cjgzx.com

## 9 建筑抗震试验中的安全措施

### 9.1 安全防护的一般要求

- 9.1.1 任何试验方案,应有安全防护措施。
- 9.1.2 试体的吊装,加载设备的安装及运输过程,必须遵守国家现行的有关安全规程。
- 9.1.3 试验设备和测试仪器应设置接地装置。

### 9.2 拟静力、拟动力试验中的安全措施

- 9.2.1 安装时试体的固定连接件,螺栓等,应经过验算,以保障安全,试验时试体应采取安全保护措施。
- 9.2.2 试验中应遵守仪器仪表的安全操作使用的规定。
- 9.2.3 试验用的加载设备应具有强度和刚度;在大型的试体试验时,应对所使用的加力架的强度,刚度进行验算。
- 9.2.4 应防止试验用的加载设备的最大加载能力和冲程,小于被试验体的极限荷载和变形。
- 9.2.5 试验中所使用的量测仪表,在试体临近破坏时应采取保护措施。
- 9.2.6 应认真执行电液伺服系统设备的安全操作规定。

### 9.3 模拟地震振动台试验中的安全措施

- 9.3.1 对于脆性破坏的试体,在破坏阶段,一切人员应远离危险区。试验时应采取防止试体倒塌时砸坏台面和加振器,损坏和污染输油管道及其它设备的措施。
- 9.3.2 试验时可利用试验室的起重行车,通过吊钩及钢缆与试体的联系。

- 9.3.3 试验中应防止模型上外加荷重块的移位或者甩出伤人。
- 9.3.4 振动台控制系统应设置各种故障的报警指示装置,台面系统应设有缓冲消能装置。
- 9.3.5 振动台控制系统宜设有加速度、速度和位移三个参量的限位装置,当台面反应超过限位幅值时,应自动停机。
- 9.3.6 振动台数据采集系统宜设有不间断电源。

#### 9.4 原型结构动力试验中的安全措施

- 9.4.1 测试仪器电源宜加稳压装置。
- 9.4.2 初位移法测试中应采取以下措施:
  - 9.4.2.1 拉线与结构物和测力计的连接应可靠,并严防拉线被拉断后反弹伤人。
  - 9.4.2.2 施力用的拉线绞车应设安全措施。
  - 9.4.2.3 非测试工作人员不应靠近测试区。
- 9.4.3 仪器设置部位应有安全保护,测量处应防止围观者干扰。
- 9.4.4 起振机在安装之前应进行检查,在经过试机后方可吊装就位,连接螺栓要埋设牢固。
- 9.4.5 对房屋进行破坏性测试时必须做到对所有测试仪器应进行设防保护。进入试验现场的工作人员必须遵守现场的安全规定。
- 9.4.6 使用火箭激振必须严格遵守火箭激振器的有关操作规定。

## 附录 A 模型试体设计的相似条件

### A.1 结构拟静力与拟动力试验模型

A.1.1 结构模型的设计应满足物理、几何以及边界条件的相似要求,并根据基本方程按结构力学建立相似关系。

A.1.2 混凝土结构模型宜按表 A.1.2 相似系数计算相似关系

A.1.3 砌体结构模型宜按表 A.1.3 相似系数计算相似关系

混凝土结构模型相似系数

附表 A.1.2

类型	物 理 量		量 纲	一般模型	实用模型
材 料 性 能	混凝土应力	$\sigma_c$	$FL^{-2}$	$S_\sigma$	1
	混凝土应变	$\varepsilon_c$	—	1	1
	混凝土弹性模量	$E_c$	$PL^{-2}$	$S_\sigma$	1
	泊松比	$\mu_c$	—	1	1
	质量密度	$\rho_c$	$FL^{-3}$	$S_\sigma/S_L$	$1/S_L$
	钢筋应力	$\sigma_s$	$FL^{-2}$	$S_\sigma$	1
	钢筋应变	$\varepsilon_s$	—	1	1
	钢筋弹性模量	$E_s$	$FL^{-2}$	$S_\sigma$	1
	粘结应力	$u$	$FL^{-2}$	$S_\sigma$	1
几 何 特 性	几何尺寸	$L$	L	$S_L$	$S_L$
	线位移	$\delta$	L	$S_L$	$S_L$
	角位移	$\beta$	—	1	1
	钢筋面积	$A_s$	$L^2$	$S_L^2$	$S_L^2$
荷 载	集中荷载	$P$	F	$S_\sigma S_L^2$	$S_L^2$
	线荷载	$W$	$FL^{-1}$	$S_\sigma S_L$	$S_L$
	面荷载	$q$	$FL^{-2}$	$S_\sigma$	1
	力 矩	$M$	FL	$S_\sigma S_L^2$	$S_L^2$

砌体结构模型相似系数

附表 A. 1. 3

类型	物 理 量		量 纲	一般模型	实用模型
材 料 性 能	砌体应力	$\sigma_m$	$FL^{-2}$	$S_\sigma$	1
	砌体应变	$\varepsilon_m$	—	1	1
	砌体弹性模量	$E_m$	$FL^{-2}$	$S_\sigma$	1
	砌体泊松比	$\mu_m$	—	1	1
	砌体质量密度	$\rho_m$	$FL^{-2}$	$S_\sigma/S_L$	$1/S_L$
几 何 特 性	长 度	$L$	L	$S_L$	$S_L$
	线位移	$\delta$	L	$S_L$	$S_L$
	角位移	$\beta$	—	1	1
	面积	$A$	$L^2$	$S_L^2$	$S_L^2$
荷 载	集中荷载	$p$	F	$S_\sigma S_L^2$	$S_L^2$
	线荷载	$W$	$FL^{-2}$	$S_\sigma S_L$	$S_L$
	面荷载	$q$	$FL^{-2}$	$S_\sigma$	1
	力 矩	$M$	FL	$S_\sigma S_L^2$	$S_L^2$

## A. 2 结构动力试验模型

A. 2. 1 结构动力试验模型按基本方程建立相似关系时,尚应满足质点动力平衡方程式相似和运动的初始条件相似。

A. 2. 2 结构动力试验模型试体设计可采用方程式分析法或量纲分析法,求得模型试体与原型结构之间的相似关系。

A. 2. 3 结构抗震动力试验模型设计应按附表 A. 2. 3 相似系数计算相似关系,并应符合下列规定:

A. 2. 3. 1 当模型与原型结构在具有同样重力加速度效应  $g$  的情况下进行试验时,应按附表 A. 2. 3 中弹塑性模型相似系数计算相似关系。在实际试验时,可采用人工模拟质量的强度模型。

A. 2. 3. 2 采用人工质量模拟的强度模型时,应按附表 A. 2. 3 中人工质量模拟的弹塑性模型的相似系数计算相似关系。



A. 2. 3. 3 对于可忽略重力加速度  $g$  的影响的强度模型和只涉及弹性范围工作的弹性模型,应按附表 A. 2. 3 中忽略重力效应的弹性模型的相似系数计算相似关系。

动力模型的相似系数

附表 A. 2. 3

相似常数 \ 模型类型	弹性模型	用人工质量模拟的 弹性模型	忽略重力效应的 弹性模型
	(1)	(2)	(3)
长度 $S_L$	$S_L$	$S_L$	$S_L$
时间 $S_t$	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{S_L}$	$S_L \sqrt{\frac{S_p}{S_E}}$
频率 $S_f$	$\frac{1}{\sqrt{S_L}}$	$\frac{1}{\sqrt{S_L}}$	$\frac{1}{\sqrt{S_L}} \sqrt{\frac{S_E}{S_p}}$
速度 $S_v$	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{\frac{S_E}{S_p}}$
重力加速度 $S_g$	1	1	忽略
加速度 $S_a$	1	1	$\frac{1}{S_L} \frac{S_E}{S_p}$
位移 $S_\sigma$	$S_L$	$S_L$	$S_L$
弹性模量 $S_E$	$S_E$	$S_E$	$S_E$
应力 $S_\sigma$	$S_E$	$S_E$	$S_E$
应变 $S_\epsilon$	1	1	1
力 $S_F$	$S_E S_L^2$	$S_E S_L^2$	$S_E S_L^2$
质量密度 $S_\rho$	$\frac{S_E}{S_L}$	$S'_\rho$	$S_\rho$
能量 $S_{EN}$	$S_E S_L^3$	$S_E S_L^3$	$S_E S_L^3$

A. 2. 3. 4 模型中各物理量的相似常数应按下列式计算:

$$S_L = L_m / L_{p0} \quad (\text{A. 2. 3. 4})$$

式中  $L_m$ ——模型结构的几何尺寸;

$L_{p0}$ ——原型结构的几何尺寸。

A. 2. 3. 5 人工模拟质量的等效质量密度的相似常数应按下列公式计算：

$$\rho_{1m} = \left( \frac{S_E}{S_L} - S'_{\rho} \right) \rho_{0p} \quad (\text{A. 2. 3. 5-1})$$

$$S'_{\rho} = \frac{\rho_{1m} + \rho_{0m}}{\rho_{0p}} \quad (\text{A. 2. 3. 5-2})$$

式中  $\rho_{1m}$ ——人工模拟质量施加于模型上的附加材料的质量密度；

$\rho_{0m}$ ——模型材料的质量密度；

$\rho_{0p}$ ——原型结构的材料质量密度。

## 附录 B 拟动力试验数值计算方法

**B. 1. 1** 拟动力试验数值计算应按下列步骤进行:

**B. 1. 1. 1** 根据结构试体的特性及其试验数据确定计算初始参数。

**B. 1. 1. 2** 将初始参数代入动力方程,得到结构第一步地震反应位移。

**B. 1. 1. 3** 由试验系统控制伺服作动器使结构产生计算所得的地震反应位移;同时测量各质点的恢复力。

**B. 1. 1. 4** 根据实测的恢复力修正计算参数,应将这些参数代入动力方程,得到下一步地震反应位移,相应地由试验系统控制伺服作动器再将该位移施加到结构上。按此步骤逐步迭代循环直至拟动力试验过程全部结束。

**B. 1. 2** 试验所用地震加速度时程曲线的持时长度,应使实际结构产生的振动周期,不小于基本自振周期的 8 倍。

试验数值计算所取时间步长  $\Delta t$ ,可取  $0.05 \sim 0.1T$  ( $T$  为实际结构的振型影响不可忽略的各周期中最短周期)。

在试验时,地震加速度曲线的持时及时间步长  $\Delta t$  应按相似关系变换。

**B. 1. 3** 采用等效单质点拟动力试验时,结构的动力反应按下式计算:

$$\tilde{m}\ddot{\tilde{X}} + c\dot{\tilde{X}} + \tilde{p} = -\tilde{m}\ddot{z} \quad (\text{B. 1. 3-1})$$

$$\tilde{m} = \sum_{i=1}^n M_i U_i \quad (\text{B. 1. 3-2})$$

$$\tilde{P} = \sum_{i=1}^n P_i U_i \quad (\text{B. 1. 3-3})$$

$$X_i = \tilde{X} \{u_i\} \quad (\text{B. 1. 3-4})$$

- 式中  $\tilde{m}$ ——等效质量;  
 $n$ ——质点数;  
 $M_i$ ——多质点体系中,第  $i$  个质点的质量;  
 $U_i$ ——第一振型曲线中第  $i$  个质点位移与最大位移的比值;  
 $c$ ——试件阻尼比;  
 $\tilde{P}$ ——等效恢复力;  
 $P_i$ ——第  $i$  质点的恢复力;  
 $\ddot{z}$ ——地震加速度;  
 $\dot{\tilde{X}}, \ddot{\tilde{X}}$ ——等效速度和等效加速度。

**B. 1. 4** 试验开始阶段恢复力可不按实测取值;但可采用结构的弹性刚度并按下式计算:

$$\{P\} = (K)\{X\} \quad (\text{B. 1. 4})$$

当结构反应逐渐增大,实测恢复力足够精确后,应及时使用实测值。在使用实测值时,宜采用中心差法进行动力方程计算,由直接量测的恢复力  $P_i$  计算等效恢复力  $\tilde{P}$ 。

**B. 1. 5** 采用多质点体系的拟动力试验时,结构动力反应按下式计算:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + \{P\} = -[M]\{\ddot{Z}_0\} \quad (\text{B. 1. 5})$$

- 式中  $[M]$ 、 $[C]$ ——分别为质量矩阵、阻尼矩阵;  
 $\{X\}$ 、 $\{\dot{X}\}$ 、 $\{\ddot{X}\}$ ——分别为位移向量、速度向量和加速度向量;  
 $\{\ddot{Z}_0\}$ ——地面运动加速度向量。

**B. 1. 6** 质量可集中于各楼层标高处,并按下式组成质量矩阵:

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & & & & \\ & M_2 & & 0 & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & M_n \end{bmatrix} \quad (\text{B. 1. 6})$$

B. 1. 7 阻尼矩阵可按下式计算:

$$[C] = \tau_M [M] + \tau_K [K] \quad (\text{B. 1. 7-1})$$

$$\tau_M = \frac{2(\lambda_i \omega_k - \lambda_k \omega_i) \omega_i \omega_j}{(\omega_j + \omega_i)(\omega_j - \omega_i)} \quad (\text{B. 1. 7-2})$$

$$\tau_K = \frac{2(\lambda_i \omega_k - \lambda_k \omega_i)}{(\omega_j + \omega_i)(\omega_j - \omega_i)} \quad (\text{B. 1. 7-3})$$

式中  $\lambda_i, \lambda_j$  —— 第  $i, j$  振型的阻尼比;

$\omega_i, \omega_j$  —— 第  $i, j$  振型的圆频率;

$[K]$  —— 结构的刚度矩阵。

## 附录 C 本规程用词说明

**C. 0. 1** 本规程条文中,要求严格程度不同的用词说明如下,以便在执行时区别对待。

**C. 0. 1. 1** 表示很严格,非这样做不可的:

正面词采用“必须”;

反面词采用“严禁”。

**C. 0. 1. 2** 表示严格,在正常情况下均应这样做的:

正面词采用“应”;

反面词采用“不应”或“不得”。

**C. 0. 1. 3** 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:

正面词采用“宜”或“可”;

反面词采用“不宜”。

**C. 0. 2** 条文中必须按指定的标准、规范或其他有关规定执行时,写法为“应按……执行”或“应符合……要求”。

## 附加说明

### 本规程主编单位、参加单位和主要起草人名单

主编单位 中国建筑科学研究院

参加单位 国家地震局工程力学研究所

同济大学

水利电力部水电科学研究院

主要起草人名单：

吴世英 董世民 黄浩华

姚振纲 廖兴祥 陈 瑜

夏敬谦 刘丽华 姜志超