T/CECS G XXXX：20XX

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

公路桥梁抗震试验规程

Specification for seismic test of highway bridges

征求意见稿

中国工程建设标准化协会　发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

征求意见稿

中 国 工 程 建 设 标 准 化 协 会 标 准

Standard of China Association for Engineering Construction Standardization

公路桥梁抗震试验规程

Specification for seismic test of highway bridges

征求意见稿

主编单位：北京工业大学

发布机构：中 国 工 程 建 设 标 准 化 协 会

施行日期：20XX 年 XX 月 XX 日

人民交通出版社股份有限公司

20XX 北　京

前　言

根据中国工程建设标准化协会《2019 年第一批中国工程建设标准化协会标准（公路工程）制修订项目》的要求，规程编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考有关国际标准和国外先进标准，并在广泛征求意见的基础上编制了《公路桥梁抗震试验规程》。

在制订过程中，编写组针对公路桥梁结构特点和抗震试验要求，按照“全面、实用”的指导原则，进行了广泛地调查研究，查阅了大量国内外有关公路桥梁抗震试验的文献资料，积极吸纳近年来国内外桥梁抗震试验技术的最新研究成果及相关单位桥梁试验的成熟技术和经验；并调研国内外同类试验技术标准；广泛征求科研院所以及公路桥梁建设、设计企业等有关单位的意见，制定的技术内容充分考虑公路桥梁试验的可行性和可操作性，经反复讨论、修改，最终经审查定稿。

本规程共分 10 个章节，主要技术内容包括：总则、术语和符号、试件的设计与制作、拟静力试验、地震模拟振动台试验、混合试验、结构原位测试、桥梁支座及减隔震装置试验、桥梁抗震试验中的安全措施等。

本规程是基于通用的工程建设理论及原则编制，按照《公路工程标准编写导则》（JTG　A04）的要求编写，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本规程相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由北京工业大学负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本规程日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或北京工业大学（地址：北京市朝阳区平乐园 100 号，邮编：100124，电子邮箱：wlh2016@bjut.edu.cn），以便修订时参考。

主 编 单 位：　　北京工业大学

参 编 单 位：

征求意见稿

主　　编：　　韩强　杜修力

主要参编人员：

主　　审：

参与审查人员：

征求意见稿

目　录

1　总则 - 1 -
2　术语、符号 - 2 -
2.1　术语 - 2 -
2.2　符号 - 4 -
3　试件的设计与制作 - 6 -
3.1　一般规定 - 6 -
3.2　相似关系设计 - 6 -
4　拟静力试验 - 9 -
4.1　一般规定 - 9 -
4.2　试验装置及加载设备 - 9 -
4.3　量测仪表的选择 - 10 -
4.4　加载方法 - 10 -
4.5　试验数据处理 - 12 -
5　地震模拟振动台试验 - 15 -
5.1 一般规定 - 15 -
5.2　试件安装 - 15 -
5.3　测试仪器 - 16 -
5.4　加载系统及加载方法 - 16 -
5.5　试验观测和量测 - 18 -
5.6　试验数据处理 - 19 -
6　混合试验 - 22 -
6.1　一般规定 - 22 -
6.2　混合试验系统基本组成 - 23 -
6.3　混合试验一般流程 - 23 -
6.4　混合试验测量系统 - 24 -
6.5　模型设计 - 25 -
6.6　拟动力混合试验 - 25 -
6.7　实时混合试验 - 28 -
6.8　振动台混合试验 - 30 -
7　结构原位测试 - 34 -
7.1　一般规定 - 34 -

征求意见稿

7.2 测试内容与方法 ..... - 34 -
7.3 测试设备与仪器 ..... - 36 -
7.4 测试要求 ..... - 37 -
7.5 测试数据采集与处理 ..... - 38 -
8 桥梁支座及减震装置试验 ..... **- 41 -**
8.1 一般规定 ..... - 41 -
8.2 桥梁用橡胶支座 ..... - 41 -
8.3 桥梁用盆式支座 ..... - 43 -
8.4 桥梁用球形支座 ..... - 44 -
8.5 桥梁减震装置试验 ..... - 46 -
9 桥梁抗震试验中的安全措施 ..... **- 49 -**
9.1 一般规定 ..... - 49 -
9.2 拟静力试验中的安全措施 ..... - 49 -
9.3 模拟地震振动台试验中的安全措施 ..... - 50 -
9.4 现场结构动力测试中的安全措施 ..... - 50 -
本规程用词说明 ..... **- 52 -**
引用标准名录 ..... - 53 -

征求意见稿

1 总则

1.0.1 为统一公路桥梁抗震试验方法，保证抗震试验质量，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于公路桥梁结构、构件及其附属部件的抗震性能试验，包括但不限于拟静力试验、振动台试验、混合试验等。

1.0.3 公路桥梁抗震试验所采用的仪器设备，应经检定机构检定或校准，且在其有效期内，检定或校准周期不得超过 360 天，关键设备检定证书应在试验报告中存档备查。

1.0.4 公路桥梁抗震试验除符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

征求意见稿

2 术语、符号

2.1 术语

2.1.1 试件 test specimen

抗震试验的对象，是试验构件、模型结构或原型结构的总称。

2.1.2 原型结构 prototype structure

按施工图拟建或已建成的结构。

2.1.3 模型结构 model structure

在原型结构基础上按照一定相似关系设计建成的试件，相似关系应包括几何相似、力学相似和运动相似，具体要求应符合第 3.2 节规定。。

2.1.4 足尺模型 full scale model

尺寸、材料、受力特性与原型结构相同的模型。

2.1.5 缩尺模型 scaled model

在几何尺寸上将原型结构按相似关系缩小的模型。

2.1.6 弹性模型 elastic model

为研究在外界荷载或震动作用下结构或构件的弹性性能，采用均质弹性或试验过程中基本呈现均质弹性性能的材料制作的与原型力学特性相似的模型。

2.1.7 弹塑性模型 elastic-plastic model

为研究在外界荷载或振动作用下结构或构件的弹塑性性能，用于原型结构相似材料制成的与原型结构力学特性相似的模型。

2.1.8 反力装置 reacting equipment

为实现对试体施加荷载而承受反力的装置。

2.1.9 荷载控制 load control

征求意见稿

以控制试体承受荷载量进行的加载模式。

2.1.10 变形控制 deformation control

以控制试体变形量进行的加载模式。

2.1.11 拟静力试验 pseudo-static test

通过荷载控制或变形控制对试体进行低周往复加载，使试体从弹性阶段直至破坏的全过程试验。

2.1.12 拟动力试验 pseudo-dynamic test

由给定地震加速度记录通过计算机进行非线性动力分析，将得到的位移反应作为输入数据，控制加载器对试体进行加载的试验。

2.1.13 模拟地震振动台试验 earthquake simulation 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的抗震试验。

2.1.14 初速度法 initial velocity method

对试体施加初始速度使之振动而测定其动力特性的方法。

2.1.15 初位移法 initial displacement method

对试体施加初始位移然后突然释放使之振动而测定其动力特性的方法。

2.1.16 脉动法 pulsating method

利用周围环境的随机振动激发试体振动而测定其动力特性的方法。

2.1.17 数字图像相关法 digital image correlation method

利用高速相机连续采集试件表面散斑图像，通过图像匹配算法计算试件表面位移场和应变场的非接触式测量方法。

2.1.18 分布式光纤传感法 distributed optical fiber sensing method

利用光纤作为传感介质，通过测量光时域反射或布里渊散射等原理，实现沿光纤全长连续分布应变或温度测量的技术。

征求意见稿

2.1.19 微波雷达干涉测量法 microwave radar interferometry method

利用连续波雷达或步进频率雷达，通过测量目标回波的相位差变化，实现对多个目标点动态位移同步遥测的技术。

2.1.20 三维激光扫描法 three-dimensional laser scanning method

通过激光测距原理，快速获取试件或结构表面三维空间点云数据，用于变形形态测量与残余位移场分析的技术。

2.1.21 无线传感器网络 wireless sensor network

由多个集成传感、计算与无线通信功能的节点组成的分布式数据采集系统，可实现现场测点快速部署与同步触发采集。

2.2 符号

E_l——试样实测的抗压弹性模量计算值；

σ_4——4MPa 级试验荷载下压应力；

ε_4——4MPa 级试验荷载下累积压缩应变值；

σ_{10}——10MPa 级试验荷载下压应力；

ε_{10}——10MPa 级试验荷载下累积压缩应变值；

G_l——试样实测的抗压弹性模量计算值；

μ_f——滑板与不锈钢板表面的摩擦系数；

τ——接触而发生滑动时的平均剪应力；

σ——支座的平均压应力；

H——支座承受的最大水平力，单位为千牛；

R——支座最大承压力，单位为千牛；

A——支座毛面积，单位为平方毫米；

x_i——第 i 个量测值；

征求意见稿

n——量测数量；

y——间接量测结果；

Δx_i——直接量测参量 xi 的基本试验误差；

Δy——间接量测结果 y 的最大绝对误差；

δy——间接量测结果 y 的最大相对误差；

s_y——间接量测结果 y 的标准差；

d_n——合理的误差限值；

m_N——数值子结构的质量矩阵；

c_N——数值子结构的阻尼矩阵；

k_N——数值子结构的刚度矩阵；

a_i——数值子结构第 i 步加速度向量；

v_i——数值子结构第 i 步速度向量；

d_i——数值子结构第 i 步位移向量；

$\tilde{\boldsymbol{d}}_{i+1}$——预测位移向量；

$\tilde{\mathbf{v}}_{i+1}$——预测速度向量；

$\mathbf{K}_{E_L}$——预先假定的试验子结构初始刚度矩阵；

$\boldsymbol{C}_{E_L}$——预先假定的试验子结构初始阻尼矩阵；

t——积分步长。

征求意见稿

3 试件的设计与制作

3.1 一般规定

3.1.1 试件应具有代表性。如为实际工程应按照相似理论进行缩尺设计；如果为一般通用模型，应在材料、构造及力学和边界条件满足设计、施工等相关规范的要求。

3.1.2 试验中考虑不同影响因素的影响时，试件设计可采用正交法设计。

3.1.3 试件的缩尺比例应根据加载设备及运输条件确定，尽可能采用大比尺模型以减小尺寸效应对试验结果的影响。钢筋混凝土试件及模型拟静力和拟动力试验缩尺比例不宜小于 1/10，对于关键受力构件或复杂节点，缩尺比例不宜小于 1/5，振动台试验不宜小于 1/50。 试验试件按照相似理论进行缩尺设计后尺寸过小不宜加工时，可采用等效原则进行材料替代。

3.1.4 桥梁工程中应用的减、隔震装置本身的力学性能试验应为原型试验或者依据减、隔震装置相应规范做缩尺模型试验。在缩尺模型试验中，应考虑减、隔震装置与结构模型的匹配关系。

3.1.5 试验试件设计应充分考虑加工、运输、试验、存放以及报废等各阶段的需求。

3.2 相似关系设计

3.2.1 缩尺试验模型设计应满足相似关系，相似关系可通过力学基本方程或者量纲分析法确定。静力相似关系可参考表 3.2.1 确定。

征求意见稿

表 3.2.1 静力试验模型相似系数

类型	物理量		量纲	一般模型	实用模型
材料性能	应力	σ（N/mm^2）应	FL^{-2}	S_σ	1
	变	ε	—	1	1
	弹性模量	E（N/mm^2）	FL^{-2}	S_σ	1
	泊松比	μ	—	1	1
	质量密度	ρ（kg/m^3）	FL^{-3}	S_σ/S_L	$1/S_L$
几何特性	几何尺寸	L（m）	L	S_L	S_L
	线位移	δ（m）	L	S_L	S_L
	角位移	β（rad）	—	1	1
	面积	A（m^2）	L^2	S_L^2	S_L^2
荷载	集中荷载	p（N）	F	$S_\sigma S_L^2$	S_L^2
	线荷载	w（N/m）	FL^{-1}	$S_\sigma S_L$	S_L
	面荷载	q（N/m^2）	FL^{-2}	S_σ	1
	力矩	M（N·m）	FL	$S_\sigma S_L^3$	S_L^3

3.2.2 缩尺试验模型设计应满足相似关系，相似关系可通过力学基本方程或者量纲分析法确定。动力相似关系可参考表 3.2.2 确定：

表 3.2.2 动力试验模型相似系数

类型	弹塑性模型	用人工质量模拟的弹塑性模型	实用弹塑性模型	忽略重力效应的弹性模型
几何尺寸 S_L	S_L	S_L	S_L	S_L
弹性模量 S_E	S_E	S_E	S_E	S_E
质量密度 S_ρ	$\frac{S_E}{S_L}$	S_ρ'	$\frac{S_\rho'}{S_a}$	S_ρ
时间 S_t	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{\frac{S_L}{S_a}}$	$S_L\sqrt{\frac{S_\rho}{S_E}}$

征求意见稿

频率 S_f	$\frac{1}{\sqrt{S_L}}$	$\frac{1}{\sqrt{S_L}}$	$\sqrt{\frac{S_a}{S_L}}$	$\frac{1}{S_L}\sqrt{\frac{S_E}{S_\rho}}$
重力加速度 S_g	1	1	1	1
位移 S_d	S_L	S_L	S_L	S_L
速度 S_v	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{S_L}$	$\sqrt{S_L S_a}$	$\sqrt{\frac{S_E}{S_\rho}}$
加速度 S_a	1	1	S_a	
应力 S_σ	S_E	S_E	S_E	S_E
应变 S_ε	1	1	1	1
力 S_F	$S_E S_L^2$	$S_E S_L^2$	$S_E S_L^2$	$S_E S_L^2$
能量 S_{EN}	$S_E S_L^3$	$S_E S_L^3$	$S_E S_L^3$	$S_E S_L^3$

征求意见稿

4 拟静力试验

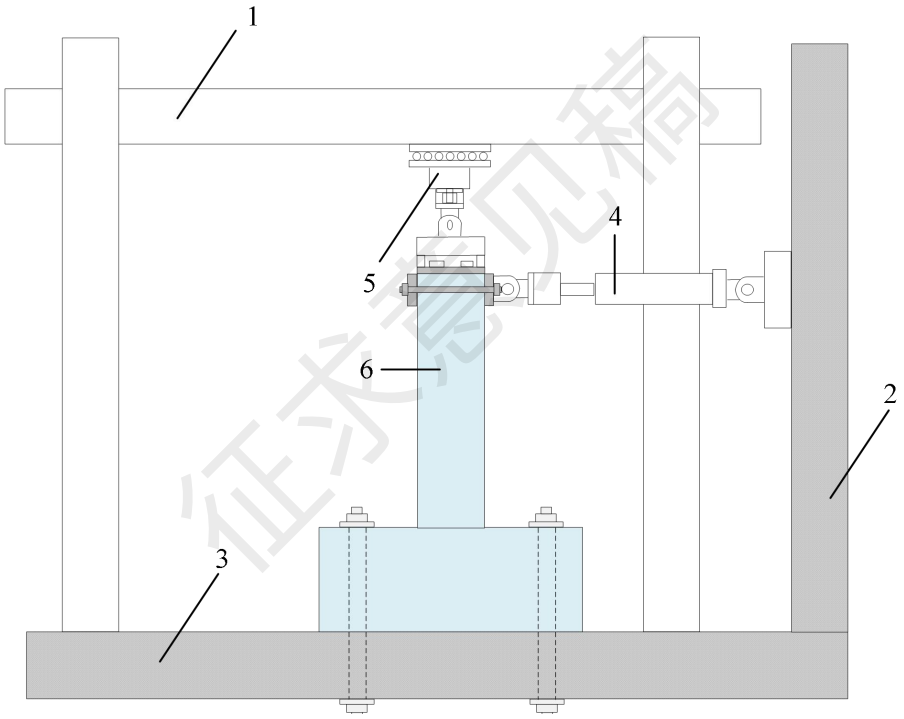
4.1 一般规定

4.1.1 拟静力试验主要是低周往复作用下的桥梁部件抗震性能试验。

4.2 试验装置及加载设备

4.2.1 试验装置及加载设备应满足试件的边界条件。

4.2.2 常规拟静力试验试验装置是由可提供竖向和水平加载功能的反力系统组成，见图 4.1。



1.反力加载架 2.反力墙 3.反力地板 4.水平作动器

5. 竖向千斤顶及水平导轨 6.试件

图 4.1 拟静力试验加载装置示意图

4.2.3 提供反力加载的反力加载架、反力墙和反力地板应具有足够的强度和刚度，确保在加载最大荷载时具有足够的刚度和稳定性。反力系统的刚度应大于试件刚度 10 倍以上。

4.2.4 水平滑板或者导轨摩擦系数应小于 1%；竖向加载千斤顶应具有保载功

征求意见稿

能且在加载过程中竖向力波动不宜超过 10%，确保在试验加载和停止时具有恒定的竖向保载能力。

4.2.5　加载作动器应同时具有力控和位置控制功能，力控精度不应低于±1%FS，位置控制精度不应低于±0.5%FS。

4.2.6　加载设备的精度应满足试验的要求。

4.2.7 在水平双向加载的试验中，水平滑板和导轨应具有双向滑移的功能，且两个方向的摩擦系数应相同。

4.3　量测仪表的选择

4.3.1　试验中的测量设备应选用精度高、稳定性好的设备。最大测量值应大于仪器的最大量程 10%，且小于满量程的 90%。仪器设备应定期校准或计量。

4.3.2　试验中采用的测力传感器和位移传感器精度不宜低于 0.1%FS，且分辨率应满足最小荷载作用下的测量值。应变仪的最小分度值不宜大于 1με。采集设备的 A/D 转换精度不得低于 16 位，采样频率不宜低于 1Hz。

4.4　加载方法

4.4.1　试验正式开始前，应进行预加载。预加载值不宜过大，混凝土构件预加载值不得大于试件开裂荷载，宜小于开裂荷载 50%。钢结构构件预加载值不得大于屈服荷载，宜小于屈服荷载 30%。

4.4.2　加载过程应保持平稳、连续，加载和卸载速率宜保持一致。

4.4.3　拟静力试验加载过程宜采取力-位移混合控制方式，在试件屈服之前采用力控，屈服之后采用位移控制；也可全程采用位移控制。采用力控加载时，在开裂或屈服点附近可减小加载级差。采用力-位移混合控制方式时，位移加宜以试件屈服位移的整数倍进行加载。全程采用位移控制加载时，试件屈服前可采用某一固定数值的整数倍进行加载，所选数值不宜大于屈服值的 50%。

4.4.4　采用分级加载制度进行试验，加载级数不宜小于 10 级。屈服前每级可加载一次，屈服后每级加载不宜低于 2 次。

4.4.5　当试件承载力降为峰值点的 85%或出现不宜继续加载的现象时可停止加载；对于研究性试验，在确保安全的前提下可继续加载，直至承载力降至研究所需值，以获得完整的破坏过程数据。

4.4.6　当采用双向加载时，两个方向可分开单独加载或者实时耦联加载，加载方式可选以下几种加载方式。

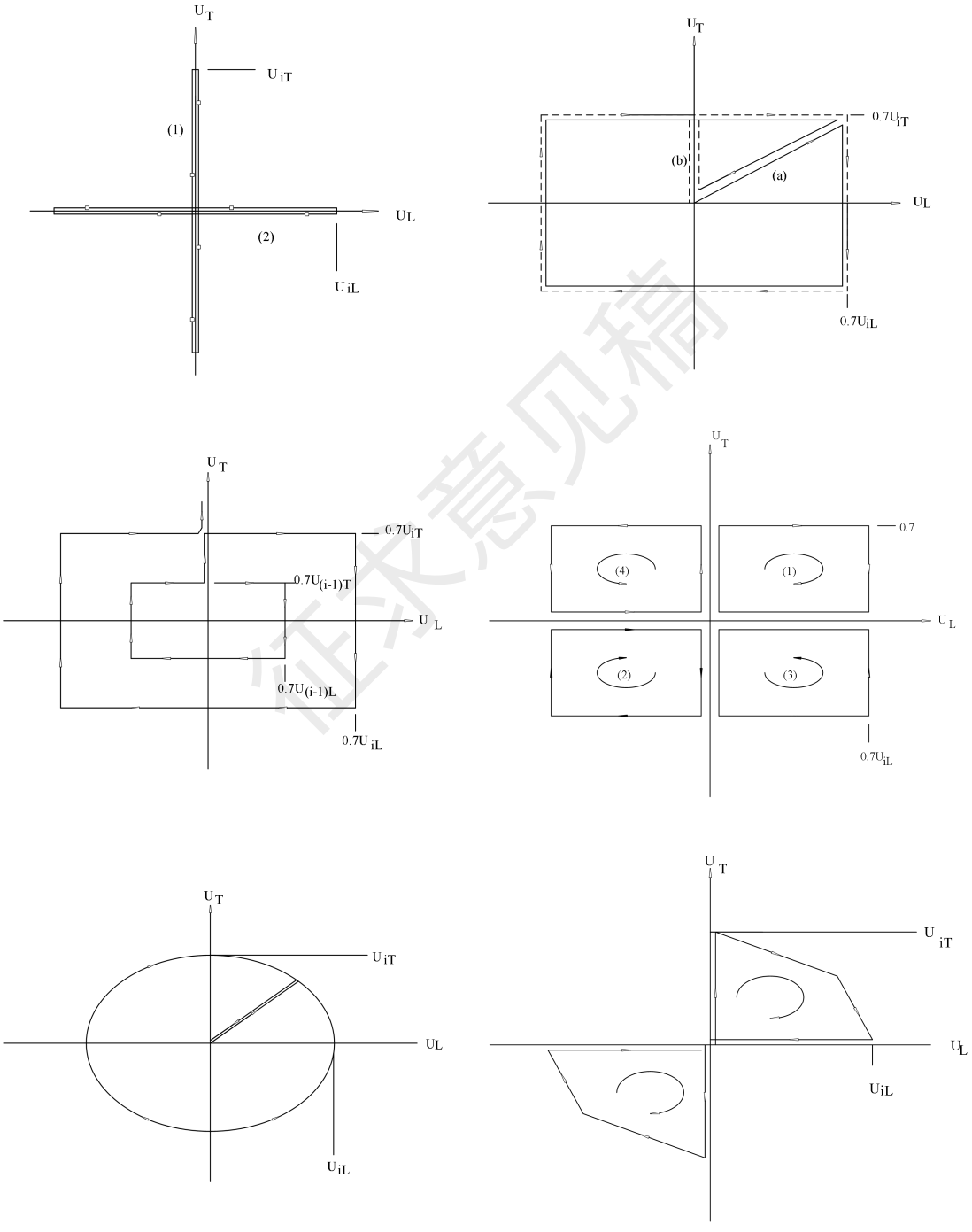


图 4.4.6　双向加载模式

征求意见稿

4.5 试验数据处理

4.5.1 试件的骨架曲线为滞回曲线每级加载第一次循环的峰值点组成的包络线。

4.5.2 试件的破坏荷载和极限变形为荷载值下降至峰值点 85%或不适宜继续加载时对应的荷载和位移。

4.5.3 试件的延性系数 μ 应按下式计算：

$$\mu = \Delta_u/\Delta_y \tag{4.5.3}$$

Δ_u为试件极限位移，Δ_y为试件屈服位移

4.5.4 试件的刚度退化可按下式计算：

$$\lambda_i = F_j^i/F_j^{i-1} \tag{4.5.4}$$

F_j^i为第 j 次加载时，第 i 次循环峰值点荷载；F_j^{i-1}第 j 次加载时，第 i-1 次循环峰值点荷载；

4.5.5 试件的能量耗散值为荷载-位移滞回曲线所包络的面积，通常用能量耗散系数 E 或者等效粘滞阻尼系数ζ_{eq}来表示，分别按下式计算：

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \tag{4.5.5-1}$$

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(OBE+ODF)}} \tag{4.5.5-2}$$

式中：$S_{(ABC+CDA)}$——图 4.5.5 中滞回曲线所包围的面积;

$S_{(OBE+ODF)}$——图 4.5.5 中三角形 OBE 与 ODF 的面积和;

征求意见稿

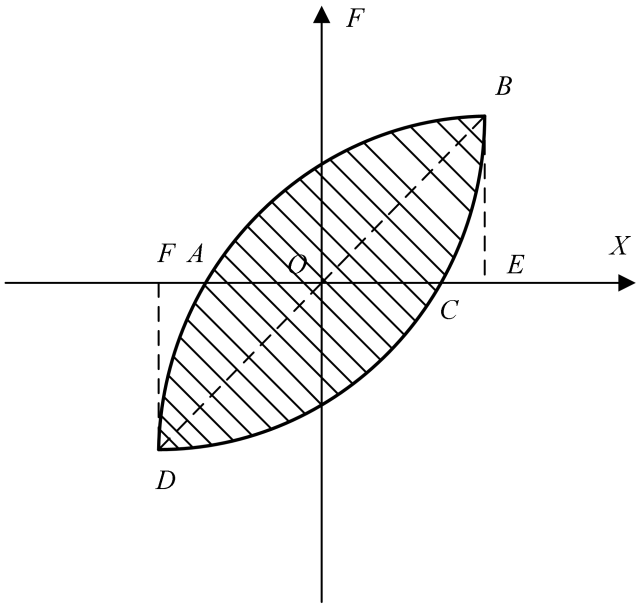


图 4.5.5　能量耗散计算用滞回曲线

4.6　非接触位移与应变测量

4.6.1 在满足精度要求的前提下，拟静力试验可采用数字图像相关法替代或补充传统位移计和应变片进行位移场和应变场测量。

4.6.2 采用数字图像相关法时应符合下列规定：

1　试件表面应制作人工散斑或利用自然纹理，散斑尺寸宜为 3～5 像素，对比度应明显；

2　相机分辨率不宜低于 500 万像素，采样频率不宜低于试验加载速率的 5 倍；

3　相机光轴应垂直于被测平面，测量距离与视野比例宜为 1:2～1:5；

4　试验前应进行标定，标定误差不应大于 0.05 像素对应位移值；

5　光照条件应保持稳定，避免阴影和反光干扰；

6　数据处理时应进行子集大小、步长及形函数阶次的敏感性分析。

4.6.3 当采用数字图像相关法测量应变量时，虚拟应变片标距不宜小于子集尺寸的 10 倍。

征求意见稿

4.6.4 传统位移计和应变片与数字图像相关法可同时使用，并应进行结果比对验证。

征求意见稿

5 地震模拟振动台试验

5.1 一般规定

5.1.1 本章适用于地震模拟振动台对公路桥梁试件进行动力特性和动力反应的试验，以研究试件的破坏机理与破坏模式，评估桥梁结构或试件的抗震能力与抗震性能。

5.1.2 地震模拟振动台试验的加载过程需要符合实际，以更好地模拟天然地震。

5.1.3 地震模拟振动台应根据试验需求、试件尺寸、试件质量并结合振动台的台面尺寸、承载能力、频响特性和动力性能等参数综合选用。

5.1.4 地震模拟振动台试验应符合结构相似理论，采用相应的等效原则选定模型缩尺比例并进行必要修正。

5.1.5 桥梁工程宜优先考虑采取多点激励的多台振动台试验方案，且多点激励试验时各振动台之间的时间同步精度不应大于 1ms。

5.1.6 在每次试验前，都应检查振动台空台的加载控制系统，确保振动台处于正常工作状态。

5.2 试件安装

5.2.1 试件在现场安装前应进行吊点设计及吊装验算，避免试件在吊装运输中发生破坏。

5.2.2 试件高度超过吊车起吊高度，无法采用直接吊装进行运输和安装时，可采取先平移后旋转的方式将模型安放至振动台上。

5.2.3 试件起吊、下降与安装时应防止试件或振动台受损。

5.2.4 试件就位后，应采用高强螺栓穿过试件底梁或地板的预留孔与台面螺栓孔连接，且要事先对试件底梁和螺栓的强度以及刚度进行验算。

5.2.5 对于采用了配重设计的试件，可以采用钢板和配重箱进行配重，两者应用螺栓固定与结构模型上。安放在配重箱内的质量块宜选用砂浆或其他粘结材料

征求意见稿

固定；而在质量块排放密集的区域，不应该涂抹过多砂浆或其他粘结材料，避免粘结材料硬化后会增大模型刚度，影响试验准确性。

5.2.6　对于复杂的大跨度桥梁还需考虑施工工序对模型试件的影响，需要先安装力传感器或布置水准仪，按照实际工程施工顺序安装，实时监测试件的目标索力或塔顶位移等参数。

5.2.7　对于非自平衡体系的大跨度桥梁试件（如地锚式悬索桥、拱桥等基底有水平力的试件），应考虑成桥体系在台面未开启和卸压时与槽道的外部约束装置，防止试件在失去振动台工作状态时产生的平衡力而引起的附加内力和变形。

5.2.8　对于在试验过程中有可能发生倒塌的试件，应在振动台周围布置安全框架等保护系统限制主体结构位移，防止试件在振动过程中失去承载力，同时可在试件周围铺设软垫，软垫厚度不应小于 200mm，用吊车通过绳索或钢丝绳保护，保护钢缆绳的安全系数不应小于 6，防止试件倒塌时损害振动台及周围设施。

5.3　测试仪器

5.3.1　测试仪器应根据试件的动力特性、动力反应、振动台的性能以及所需的测试参数选取。

5.3.2　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频率分量的 1/10，上限应大于最高有用频率分量值。

5.3.3　测试仪器动态范围应大于 60dB。

5.3.4　测量信号分辨率应小于需采集的最小振动幅值的 1/10

5.3.5　测量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。

5.3.6　测试仪器的不确定度应小于 0.5%的全量程，测试仪器的稳定度应达到 0.05%/小时

5.4　加载系统及加载方法

5.4.1　振动台分为电磁振动台和液压振动台。当需要考虑高频、小位移的地震模拟振动时，宜选用电磁振动台系统；当需要进行大功率、大行程或者偏心及较

征求意见稿

大荷载的地震模拟振动时，应选取液压振动台系统。

5.4.2　振动台必须安装在刚度很大的基础上，改善系统的高频特性，并减少周围建筑和其他设备的影响。

5.4.3　液压驱动系统需要在试验前测试确保加载器液压油的流量大小和方向的精准性。

5.4.4　振动台的控制系统应具备数字迭代的补偿技术，以消除台面、试件的非线性引起的波形误差。

5.4.5　振动台试件加载时，地震激励的选择和输入的顺序应按下列步骤确定：

a 对于进行抗震设计验证的桥梁试件，根据试验结构的周期、试件所在场地类型和抗震设防烈度以及振动台的输出能力选择地震波的类型（人工波或者自然波）；

b 对于进行抗震性能研究的桥梁试件，可根据试验研究的目的以及振动台的输出能力选择合适的地震波类型；

2　模拟地震动输入应采取结构主要周期点拟合反应谱的方法，按照《公路桥梁抗震设计细则》或《城市桥梁抗震设计规范》的要求初步选取数条地震波进行分析，并与计算反应谱和设计反应谱绘制在一起；

3　计算结构振型参与质量达到 50%对应周期点处的地震波反应谱值，检查各周期点处的包络值与设计反应谱值相差是否不超过 20%，如不满足，回到第二步重新选取地震波；

4　计算结构振型参与质量达 50%对应各周期点处，选定地震波反应谱值，将各个地震波在主要周期点处各方向上的值，以水平:竖向=1:0.65 的比例加权求和，将该求和值按照从小到大的顺序确定地震动的输入顺序。

5.4.6　地震模拟振动台试验加载前，应采用白噪声激振法测定试件的动力特性。白噪声的频段应能覆盖试件要求测试的自振频率，加速度的幅值宜取 0.5m/s^2~0.8m/s^2，有效持续时间不宜小于 120s 或根据试件基频来确定。

5.4.7　地震模拟振动台试验的加载是一个损伤累计的过程，宜采用多级加载的

方式，应事先按照试件模型理论计算出弹性和非弹性的地震反应，逐级递增输入台面加速度幅值；对于本节 5.4.5 1 a 所述试件，加速度分级宜覆盖《公路桥梁抗震设计细则》或《城市桥梁抗震设计规范》中两级设防水准对应的加速度值，加载阶段可按照以下步骤进行：

1　弹性阶段试验，振动台台面输入运动，应根据试验加载工况，每次输入某一幅值的地震地面运动加速度时程曲线，测量试件的动力反应、加速度放大系数和弹性性能，卸载后试件变形得以恢复；

2　弹性至塑性过渡阶段试验，逐级加大台面输入加速度幅值，使试件开始进入塑性阶段，产生初等程度开裂，停止加载后裂缝不能完全闭合；

3　塑性阶段试验，继续加大台面输入加速度幅值，使试件主要部位发生破坏，受拉钢筋屈服，裂缝贯穿整个截面，但结构仍然有一定的承载能力；

4　破坏阶段试验，继续加大台面输入加速度幅值，或在某一最大的加速度峰值下反复输入，直至模型试件发生整体破坏，成为机动体系，稍加荷载就会发生破坏倒塌，得到试件的极限抗震能力；

5　以上每一级加载试验完毕后，宜采用白噪声激振法测试试件的自振频率变化。

5.5　试验观测和量测

5.5.1　地震模拟振动台试验应按照需求测量试件的加速度、速度、位移、应变等主要参数的动态反应。

5.5.2　试验前应根据试验目的及计算假定在合适的位置布设传感器，量测所用传感器应满足以下要求：

1　所有的传感器必须进过调试标定，确保其正常工作；

2　传感器应具有良好的机械抗冲击性能，连接牢固，便于安装和拆卸；

3　附着于试件上的传感器，其重量和体积不应明显影响试件的动力特性；

4　传感器的连接导线应采用屏蔽电缆。

征求意见稿

5.5.3　加速度传感器的布设数量应根据测量研究需要、可用传感器数量和数据采集通道的情况综合确定，其布设位置宜符合下列规定：

1　优先布设在加速度反应较大的部位；

2　宜在试件的底板、底梁、承台或基础等地方布设，校验试件底部与台面是否发生相对运动；

3　宜在刚度变化区、节点等部位布设，测量关键部位的加速度变化；

4　桥墩及桥塔可根据需要沿试件高度均匀布设，当需要测量桥面等的扭转分量时，应在截面的端部布设测点。

5.5.4　位移传感器的布设宜满足以下几点：

1　当采用非接触式位移计时，宜布设在变形较大的部位；

2　当采用接触式位移计时，固定于台面或试验室地面的仪表架应有足够的刚度，位移计与试件的接触点必须牢固。采用水平向拉线式位移计时，应当保证测量位置与位移计位置处于同一水平面；采用竖向位移计时，应当与测量位置在同一竖平面内；测量曲率时，宜根据构件两端的相对位移测定并计算得出。

3　位移计的布置严禁倾斜，试验时防止人员或器材误触。

5.5.5　应变片应布置在试件中受力复杂、变形较大以及有性能化设计要求的构件或部位上。试件内部应变片的安装应在试件制作阶段贴于受力钢筋上，数量应以能反应应变大小的变化为参考依据。

5.5.6　试验逐级加载的间隙中，应观察试件裂缝的出现和扩展以及试件挠曲等情况，并应按输入地震波工况在试件上描绘并记录。

5.5.7　试验的全过程宜通过录像做好动态记录。对于试件关键部位的开裂、屈曲及破坏的情况，宜及时拍照并记录。

5.6　试验数据处理

5.6.1　试验数据的预处理，将试验过程中采集到的数据尽可能真实地还原成实际试验状况的数据。一般包括以下方面：

1　标定变换，采集得到的数据首先需要进行标定变换，使之还原成具有相应物理单位的数字信号数据。在振动台试验测试中，采集得到的数据，有的是数字电压值，有的是以采集器分辨率为单位的整形数字量。对于数字电压量的数据，直接乘以传感器的标定值，即传感器的物理量与输出电压的比值，标定转换即可完成。对于整形数字量的数据，首先需要乘以采集器的分辨率以转换成电压数据，然后再进行物理单位的标定变换。

2　零点调整，因快速傅立叶变换（FFT）及其逆变换的要求，振动控制信号的长度往往需要是 2 的整数次幂，故振动台控制器在发送地震波时程数据时，会在其前面或后面加上一段接近于零的数据，且长度不一。在进行数据处理时，需要将前导无效数据剔除。可采用定位地震波中最大的一到二个峰值的办法，将地震波时程曲线和各通道采集的数据中的前导无效数据剔除。

3　峰值调整，由于试验模型与振动台台面组成的动力系统本身的非线性，即振动输入与动力输出之间的关系为非线性，虽经振动控制器采用控制算法进行模拟，但试验过程中的控制参数（一般为峰值加速度）仍不能精确达到试验的期望值，两者之间往往有 1%~5%的误差。为了使得到的数据在后续分析时具有良好的可对比性，可以对数据进行峰值调整，计算峰值调整系数（期望 PGA 值/实测 PGA 值），再对所有通道的数据均乘以峰值调整系数，以便使相同 PGA 下不同工况的数据具有可比性。

4　趋势项消除，试验采集到的振动信号数据，由于可能存在零点漂移、传感器低频性能的不稳定以及周围的环境干扰、样本截取长度选择不当等因素，大多都含有一定的趋势项。趋势项的存在，会使时域中的相关分析或频域中的率谱分析产生很大的误差，甚至使低频谱完全失去真实性。在进行微积分转换时，通常先从信号中剔除趋势项后再进行数值积分。振动台试验中消除趋势项的常用方法有交通滤波法和多项式拟合法。

5.6.2　采用白噪声确定试件自振频率和阻尼比时，宜通过自功率谱或传递函数分析求得，试件的振型宜通过互功率谱或传递函数分析确定。

5.6.3　振动参数信号的微积分变换，加速度、速度与位移是振动测量分析的 3 个主要物理量。试验中可以采用直接测量法测量这些物理参数，三者之间又存在

微积分关系，振动参数的转换处理在时域和频域中均可实现，如试件的位移反应可对实测的加速度反应时程进行两次积分求得，但应在积分前进行消除趋势项和进行滤波处理。

5.6.4　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，进一步确定试件的损坏关键点，得出相应结论，与理论分析相比较。

5.7　分布式光纤应变测量

5.7.1 振动台试验可采用分布式光纤传感技术测量试件沿连续路径的应变分布，适用于墩柱、主梁、节点区等关键部位。

5.7.2 分布式光纤测量系统应符合下列规定：

1　光纤类型应根据测量要求选用单模光纤（布里渊散射法）或多模光纤（拉曼散射法）；

2　空间分辨率不宜大于 5cm，应变测量精度不宜低于±20με；

3　动态测量采样频率不宜低于 100Hz，静态测量采样频率不宜低于 1Hz；

4　光纤布设路径应覆盖试件主要受力区域，转折半径不应小于光纤最小弯曲半径；

5　光纤应与试件表面或内部钢筋可靠粘贴，粘结材料应具有与混凝土相近的弹性模量和温度变形系数；

6　应设置温度补偿光纤段，扣除温度引起的应变漂移。

5.7.3 光纤应变测量结果应与电阻应变片测量结果进行交叉验证，测点处偏差不宜大于 15%。

5.7.4 试验报告中应注明光纤类型、空间分辨率、布设路径、粘结材料及温度补偿方法。

征求意见稿

6 混合试验

6.1 一般规定

6.1.1 混合试验对象是能用动力方程描述的结构、非结构构件或设备，混合试验包括拟动力混合试验、实时混合试验和振动台混合试验。

6.1.2 子结构的划分宜综合考虑试验设备条件并满足试验目的，各子结构间的边界应满足变形协调和力平衡条件，宜按下列原则确定：

1 对于有明确反弯点的构件，在反弯点处划分子结构；无明确反弯点的构件在远离塑性区 2~3 倍特征尺寸的位置划分子结构。

2 对于土—结构相互作用等力学性质存在明显差异的对象，在力学性质变化处划分子结构。

6.1.3 混合试验前，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。地震波选择应符合现行规范《公路桥梁抗震设计规范》JTG/T 2231-01 的规定

6.1.4 混合试验所采用的时间积分方法及步长应满足稳定性和精度要求。

6.1.5 拟动力混合试验应符合下列规定：

a）采用闭环控制的加载装置进行加载；

b）采集试体的实测变形或荷载作为反馈值求解动力方程。

6.1.6 实时混合试验、振动台混合试验应符合下列规定：

1 数值子结构求解满足实时性要求；

2 采用高速数据传输方式进行数据交换；

3 实时混合试验的试验子结构采用动态作动器加载，振动台混合试验的试验子结构采用地震模拟振动台加载；

4 采用时滞补偿技术以满足稳定性和精度要求。

征求意见稿

6.1.7 振动台混合试验可应用于包括土-结构相互作用体系、多跨桥梁、车辆-桥梁系统、调谐减震结构等动力响应模拟。

6.1.8 混合试验安全规定应符合本规范第 10 章规定。

6.1.9 在进行混合试验时，加载控制系统应设置超限报警及自动停机功能。

6.1.10 实时混合试验和振动台混合试验相似关系应满足本规范第 3.2.2 节相关规定。

6.2 混合试验系统基本组成

6.2.1 混合试验系统包括数值子结构、试验子结构和协调器，并应符合下列规定：

1 协调器用于保证子结构之间的变形协调和力平衡条件；

2 协调器与子结构之间有明确的参数协调和数据交互模式，协调器为子结构提供目标量，同时接收子结构的响应量；

3 数值子结构求解平台具有自动化的逐步输入和输出接口；

4 试验子结构包括试体、加载与控制系统、测量系统，以及提供支撑的反力装置和保护装置。

6.2.2 协调器宜按照足尺结构进行动力方程求解，缩尺模型的输入和反馈应按照相似律进行调整后反馈给协调器。

6.3 混合试验一般流程

混合试验的一般流程包括：划分子结构、确定协调器和时间积分方法、确定加载控制和测量装置、进行模拟仿真、进行预试验、进行正式试验、试验数据分析，并符合下列规定：

1 划分子结构应符合科学性和合理性的要求，并符合 6.1.2 的规定；

2 合理选择协调方法和时间积分方法，积分步长和参数的选择应符合 6.1.4 的规定，宜选择具有无条件稳定性的时间积分方法；

征求意见稿

3 确定合理的输入输出和加载测量方案，加载控制方法可根据试体刚度选择荷载控制或者变形控制；

4 试验前宜进行混合试验的数值仿真，确认混合试验的精度和系统的稳定性；

5 进行预试验，确认试验系统的正常运行，并分析模型误差、边界误差和加载测量误差对整体响应的影响；

6 进行正式试验；

7 分析试验数据，撰写试验报告。

6.4 混合试验测量系统

6.4.1 拟动力混合试验的测量系统符合下列规定：

1 应采用自动化测量仪器采集试体各测量值，数据采样频率不宜低于 0.5Hz；

2 试体控制、结构响应通过可靠的 D/A 接口、A/D 接口实现控制与数据采集。

6.4.2 实时混合试验的测量系统符合下列规定：

1 应采用自动化测量仪器采集试体各测量值，数据采样频率不宜低于 500Hz；

2 试体控制、结构响应通过可靠的 D/A 接口、A/D 接口实现控制与数据采集。

6.4.3 振动台混合试验的测量系统应符合下列规定：

1 测量仪器根据试体的动力特性、动力反应、振动台的性能以及所需的测试参数来选择；

2 测量仪器的频率范围的下限低于试验用地震记录最低主要频率分量的 1/10，其上限大于最高有效频率分量值的 2 倍；

3 测量仪器动态范围大于 60dB，信噪比应大于 80dB；

4 测量信号幅值分辨率小于需采集的最小振动幅值的 1/10；

5 测量用的传感器具有良好的机械抗冲击性能，且便于安装和拆卸；

6 附着于试体上的传感器的重量不明显影响试体的动力特性。

征求意见稿

6.5 模型设计

混合试验的模型包括数值模型和试验模型，分别用于数值子结构和试验子结构。数值模型和试验模型应满足混合试验的目的要求并综合考虑效率、精度和试验安全等因素。

实时混合试验和振动台混合试验的数值模型和试验模型，应保持加载、测量、识别、更新、模拟和数据传输的实时性，且不应影响系统的稳定性。

6.5.1 数值模型

数值模型应充分表征数值子结构力学特征和对试验子结构的影响，宜采用可靠方法进行求解。当数值模型中包含与试验模型相同力学特性的构件时，宜采用模型在线更新混合试验方法以提高数值模型的计算精度，且宜符合下列规定：

1 在构件、截面或材料层次上开展力学或本构模型在线识别与更新；

2 模型在线更新时间不超过单步试验耗时；

3 数值模型与试验模型间有明确的参数协调和数据交互模式；

4 非完整边界条件的试验模型采用在线数值模拟方法。

6.5.2 试验模型

试验模型应有合理的结构特征、材料、构造措施和边界条件，应满足试验装置与加载设备的额定主参数条件、刚度条件和位移约束条件。试验模型在满足混合试验目标及实验室试验设备加载能力条件下，宜采用足尺或较大缩尺比例 模型，避免尺寸效应的影响，并宜符合本规范 3.1 节要求。

1 振动台混合试验的试验模型缩尺比例不小于 1/15；

2 其他类型混合试验的试验模型缩尺比例不小于 1/4。

6.6 拟动力混合试验

6.6.1 不考虑加载速率对试体力学性能影响的工程结构可采用拟动力混合试验方法。

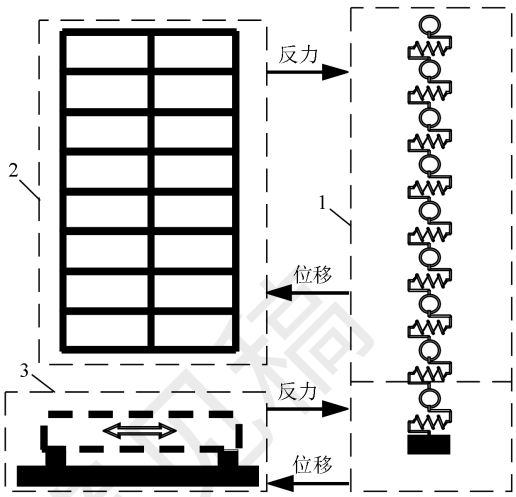
6.6.2 进行拟动力混合试验时，可采用下列架构：

征求意见稿

1 当协调器求解动力平衡方程时，各子结构按照静力过程进行分析或加载，如图 6.1 所示；

2 当协调器为数值子结构时，数值子结构采用逐步积分方法的动力时程分析，如图 6.2 所示；

3 当协调器仅用于协调子结构时，试验子结构避免迭代，如图 6.3 所示。



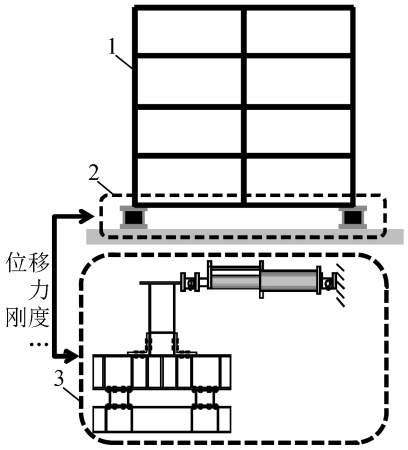
标引序号说明：

1——动力模型（含阻尼）；

2——数值子结构；

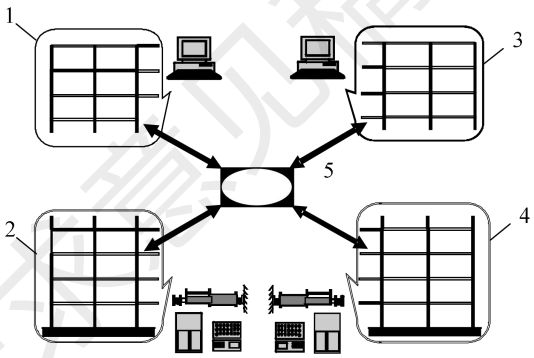
3——试验子结构。

图 6.1 求解动力方程的协调器



标引序号说明：
1——协调器（数值子结构）；
2——试验单元；
3——试验子结构。

图 6.2 作为数值子结构的协调器



标引序号说明：
1——数值子结构A；
2——数值子结构B；
3——数值子结构C；
4——数值子结构D；
5——协调器。

图 6.3 仅用于协调子结构的协调器

6.6.3 各数值子结构可采用不同数值方法求解，各试验子结构可采用不同的试验加载系统。各子结构可分布在不同的实验室开展模拟或试验，形成设备共享的分布式子结构混合试验。

6.6.4 拟动力混合试验应采用试体实测变形或荷载作为控制的反馈信号。

6.6.5 当选择显式时间积分方法时，应检验其稳定性和精度。

6.6.6 拟动力混合试验一般采用作动器进行加载，也可采用具有变形和荷载控制功能的千斤顶进行加载。加载系统变形传感器和荷载传感器的精度及相对误差最大值应满足试验要求。

6.6.7 拟动力混合试验需要满足边界协调，具体实现方法可以参考规范 GB/T 工程结构抗震混合试验方法。

6.6.8 拟动力混合试验误差分析宜考虑时间积分方法误差、模型简化误差、边界协调简化误差、试验加载控制与测量误差的影响。并应对仪表布置、支架刚度、荷载最大输出量、限位等采取减小试验系统误差的措施。

6.7 实时混合试验

6.7.1 加载速率对试体力学性能影响显著的工程结构宜采用实时混合试验以准确反映试体的力学性能。

6.7.2 数值子结构应实时计算，保证与试验子结构加载的同步，可采用简化模型以满足计算效率要求。

6.7.3 实时混合试验中的试验子结构具备下列条件：

1 应采用具备实时反馈控制系统及动态作动器的加载设备对试体进行实时加载；

2 宜采用变形控制加载，荷载控制加载时应设置专门的保护措施；

3 反力系统应具有足够的刚度，其自振频率应大于作动器油柱共振频率的 2 倍。

6.7.4 实时混合试验的加载方法符合下列规定：

1 积分步长大于加载系统采样周期 2 倍时，宜在每个积分时间步内分子步加载，可采用对目标位移线性插值方法；

2 积分步长小于加载系统采样周期 2 倍时，可在每个积分时间步内加载一次。

6.7.5 实时混合试验的动力平衡方程可根据实时加载要求选择显式方法或隐式积分方法进行求解，当选择隐式积分方法时，可采用等效力控制方法求解。具

征求意见稿

体方法可参考《工程结构抗震混合试验方法》（送审稿）中的相关要求。

6.7.6 实时混合试验的设备应满足以下要求：

1 实时混合试验应采用动态作动器进行加载，动态作动器最高工作频率不宜低于 20Hz，系统总时滞不宜超过 30ms，加载速率应满足试验需求。

2 加载系统变形传感器和荷载传感器的相对误差最大值不应超过其示值的±1%。

3 实时混合试验宜采用实时环境求解数值子结构，并满足与控制器实时同步传输数据的要求。

4 加载系统传感器信噪比不小于 30dB，时滞不超过 1ms。

6.7.7 实时混合试验边界协调方法宜简单有效，可采用如重叠领域协调方法避免作动器由于过约束或 相互干涉影响加载系统的稳定性。可参考拟动力混合试验的相关办法。

6.7.8 实时混合试验时滞应满足以下要求：

1 实时混合试验宜考虑时滞的影响，依据系统性能进行时滞补偿，使其满足稳定性和精度要求；

2 系统时滞的确定可采用离线方法估计定常时滞，采用在线方法估计变化时滞；

3 常用的时滞补偿方法可采用多项式外插补偿、逆模型补偿、自适应时间序列时滞补偿，具体要求可参考规范 GB/T 工程结构抗震混合试验方法中的相关要求。

6.7.9 实时混合试验时，应减小试验加载误差的影响，宜考虑时间积分方法、模型简化误差、边界协 调简化误差影响。实时混合试验容许误差应根据结构的重要性、试验子结构的比例、加载设备精度、试验条件等 因素确定，补偿后时滞不宜超过 10ms，均方根误差不宜超过 15%，峰值误差不宜超过 5%。

6.7.10 实时混合试验应根据试验数据评价试验时滞，时滞计算可采用频域评

征求意见稿

价或互相关评价指标。当互相关评价指标为 0 时，应采用频域评价指标进行补充计算。

6.7.11 宜采用均方根误差和峰值误差评价实时混合试验加载准确性。

6.7.12 实时混合试验应按 6.3 进行，并符合下列规定：

1 宜根据子结构力学特征确定边界条件的实现方案；

2 实时混合试验前，应进行数值仿真，根据动力加载装置的实测传递函数确定合适的时滞补偿方法和控制参数，当试体具有强烈非线性时，宜采用自适应控制技术；

3 将数值子结构的计算程序从宿主机编译至目标机，数值模型应在规定时步内完成计算；

4 宜进行预试验，计算试验时滞，并分析时滞影响和边界误差影响；

5 实施过程中，宜根据作动器的输入信号与反馈信号的异常值判断是否立即停止试验。

6.8 振动台混合试验

6.8.1 振动台混合试验采用地震模拟振动台对试验子结构进行实时动力加载，结构其余部分作为数值 子结构进行模拟计算。

6.8.2 振动台混合试验系统由振动台物理加载子系统、数值仿真计算子系统、数据采集与传输子系统 三个子系统组成，如图 6.4 所示。

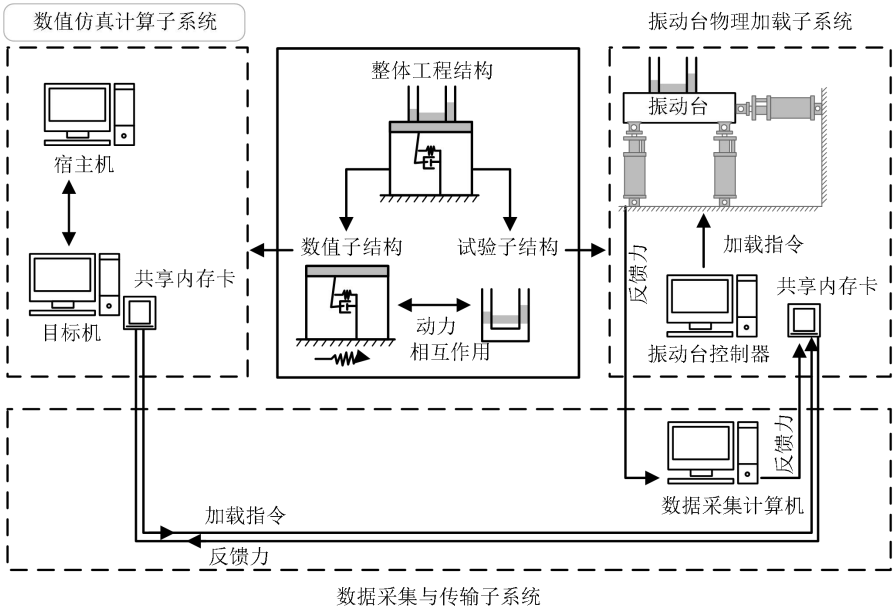


图 6.4　振动台混合试验系统构成

6.8.3 振动台混合试验应保证数值仿真的模拟精度和计算效率、振动台的同步精确加载、试验子结构与数值子结构边界的数据采集与交互的实时性。

6.8.4 振动台混合试验的实时性难以满足时可选用数值子结构与试验子结构迭代加载的离线迭代方法，具体方法见图 6.5：

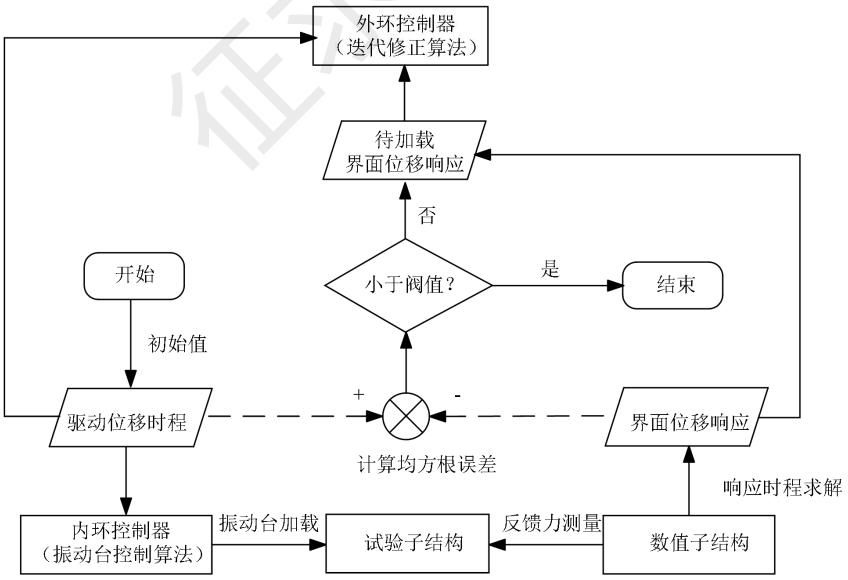


图 6.5 振动台离线迭代混合试验基本流程

6.8.5 振动台混合试验的数值模型除应符合 3.1 的规定，还符合下列规定：

1 不满足实时计算要求的数值模型，宜选用计算任务分解策略、代理模型方法或并行计算，实现数值实时计算；

2 数值模型积分步长大于控制信号采样周期时，得到目标量应采用插值方法生成与控制信号采样周期一致的加载信号；

3 数值子结构的模型参数选取应接近于真实结构参数，宜使用模型在线更新算法对数值模型参数进行更新。

6.8.6 振动台混合试验的动力平衡方程可根据实时加载要求选择显式方法进行求解，时间积分方法应选择计算精度高、稳定性好、计算效率高的算法。

6.8.7 振动台混合试验的设备性能要求应满足以下要求：

1 振动台混合试验中使用的液压振动台、机械振动台、电动振动台应分别满足 GB/T 21116、GB/T 13309、GB/T 13310 中对设备性能的规定。

2 振动台数字控制系统的刷新频率宜大于 1024Hz，时滞宜小于 50ms。

3 振动台混合试验宜采用实时系统求解数值子结构，并实现与控制器的实时数据传输。

6.8.8 振动台混合试验的数值子结构和试验子结构的边界应通过振动台台面实现协调和平衡条件，具体要求可参考规范 GB/T 工程结构抗震混合试验技术规范。

6.8.9 振动台混合试验的时滞补偿应根据振动台试验系统的动力特性，参考 6.7.8 选择合适的补偿方法。

6.8.10 振动台混合试验的误差分析宜考虑时间积分方法误差、振动台控制误差、数值子结构建模误差和子结构之间边界协调误差的影响。误差评价方法参考 6.7.10 和 6.7.11。

6.8.11 振动台混合试验应按 6.3 进行，并符合下列规定：

1 振动台混合试验前，应进行数值仿真，根据动力加载装置的实测传递函数确定合适的时滞补 偿方法和控制参数，当试体具有强非线性时，宜采用自适应

征求意见稿

控制技术；

2 设计边界反馈力测量方案，安装力测量装置；

3 将数值子结构的计算程序从宿主机编译至目标机，数值模型应在规定时步内完成计算；

4 进行预试验，计算试验时滞，并分析时滞影响；

5 按顺序依次启动：数据采集与传输子系统的程序、数值仿真计算子系统的程序、振动台物理 加载子系统的程序；

6 混合试验结束时，按顺序依次停止：振动台物理加载子系统的程序、数值仿真计算子系统的程 序、数据采集与传输子系统的程序；

7 应确保振动台控制面板的超限紧急制动功能处于开启状态，以防止试验过程中因振动台失稳 导致的试验子结构或仪器损坏；

8 实施过程中，应密切监测振动台的输入信号与反馈信号，若出现异常应立即停止试验。

征求意见稿

7 结构原位测试

7.1 一般规定

7.1.1 桥梁原位试验宜分为桥梁原位动力试验和桥梁原位静力试验。

7.1.2 桥梁原位试验测试前，应收集桥梁所在场地的工程地质、地震安评、设计、交竣工、养护、加固等资料，并制定结构原位试验测试方案。

7.1.3 桥梁原位试验测试方案应根据测试目的制定，必要时应进行计算分析。

7.1.4 桥梁原位静力试验测试宜针对结构的内力、应力、位移和裂缝的控制截面进行。

7.1.5 结构原位动力试验测试不应使结构出现裂缝，不应对结构安全造成影响。

7.1.6 动载试验采用的加载车辆应性能良好，无异常振动。

7.1.7 桥梁原位试验测试的设备和仪器应符合下列规定：

1 加速度计、速度计或位移计及相应的配套仪表应根据需测试内容确定。

2 传感器应具备机械强度高，安装调节方便，体积重量小且便于携带，尚应具有防水、防电磁干扰等性能。

3 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。

7.1.8 在满足测试精度和现场条件的前提下，可选用数字图像相关法、微波雷达干涉测量法、三维激光扫描法、分布式光纤传感法或无线传感器网络等新技术进行原位测试。

7.2 测试内容与方法

7.2.1 桥梁原位动力试验测试的内容应包括动力特性测试和动力响应测试，桥梁原位静力试验测试的内容应包括承载力测试和抗震性能测试。

7.2.2 桥梁原位动力试验测试工况应根据具体的测试参数和采用的激振方法

确定。

7.2.3 桥梁原位动力试验测试的方法宜按下列规定确定：

1 测试桥梁的基本振型时，宜选用脉动法、行车激振法或跳车激振法；在满足测试要求条件下，也可选用初位移等其他方法。

2 测试桥梁平面内多个振型时，可采用脉动法，也可采用稳态正弦波激振法。

3 测试桥梁空间振型或扭转振型时，宜选用多振源相位控制同步的稳步正弦波激振法或初速度法。

4 测试桥梁动力响应时，可选用随机波激振法或人工爆破模拟地震法。

7.2.4 桥梁原位静力试验的测试内容应反映桥梁在地震作用下结构内力、应力（应变）、位移及裂缝最不利控制截面的力学特征，试验过程应关注可能出现的异常现象。

7.2.5 桥梁原位静力试验加载方法可采用 4.4 节的拟静力加载方法，并应按桥梁结构在地震作用下的最不利受力原则和代表性原则确定试验工况。

7.2.6 微波雷达干涉测量法可用于桥梁原位动力响应测试，应满足下列要求：

1 雷达系统工作频率宜为 17.0～17.3GHz，测量距离不宜大于 1km；

2 动态位移分辨率不应低于 0.1mm，采样频率不宜低于 100Hz；

3 目标点应分布在主梁跨中、墩顶、塔顶等位移反应较大位置，每个断面不宜少于 3 个测点；

4 应避开树冠、车辆、行人等非目标移动物体产生的干扰回波；

5 雨、雪、大雾天气不宜进行测试。

7.2.7 三维激光扫描法可用于桥梁原位静载试验的变形测量与震后残余变形评估，应满足下列要求：

1 扫描仪测距精度不宜低于 1mm @ 100m，点云密度不宜低于每平方米 100

征求意见稿

点；

2　应设置不少于 4 个固定控制标靶，标靶坐标误差不应大于 2mm；

3　加载前、卸载后及各级荷载下应分别扫描，点云配准误差不应大于 1/3 被测变形值；

4　点云数据处理应采用迭代最近点算法或等效方法进行配准。

7.2.8 无线传感器网络可替代传统有线采集系统用于原位动力测试，应满足下列要求：

1　各节点时间同步精度不应大于±0.1ms；

2　数据丢包率不应大于 1%，缺失数据应采用插值或重测方式补全；

3　节点电池容量应满足持续采集时间不小于试验总时长的 1.5 倍；

4　无线通信距离应根据现场遮挡情况确定，必要时设置中继节点。

7.3　测试设备与仪器

7.3.1 桥梁原位动力试验测试的设备和仪器应按下列规定确定：

1　当采用施加初速度的方法进行测试时，宜采用小火箭作激振源，其作用大小应根据测试对象在弹性阶段动力特性的要求选定，相应的作用时间宜为几毫秒至数十毫秒。

2　当采用稳态正弦波激振的方法进行测试时，宜采用旋转惯性机械起振机，也可采用液压伺服激振器，其使用频率范围宜在 0.5Hz~30Hz，频率分辨率应高于 0.01Hz。

3　测试仪器的频率范围应根据需测试的最低和最高阶频率选择，测试仪器的最大可测幅值应根据试体的类别、振动强烈程度选定，测试仪器的分辨率应根据试体的最小振动幅值选定。

4　传感器的横向灵敏度应小于 0.05。

5 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

征求意见稿

数量级。

7.3.2 桥梁原位静力试验测试可采用第四章规定的设备和仪器。

7.3.3 采用数字图像相关法时，相机系统应符合下列规定：

1 工业相机分辨率不宜低于 200 万像素，动态范围不宜低于 60dB；

2 镜头畸变应进行标定并校正；

3 光照宜采用 LED 恒定光源，照度波动不宜大于 5%。

7.3.4 分布式光纤解调仪应具备动态和静态两种工作模式，动态模式采样频率不应低于 100Hz，静态模式不应低于 1Hz。

7.4 测试要求

7.4.1 现场测试时，应采取措施避免电磁场以及对讲机、手机等对测试结果的影响。

7.4.2 现场采用脉动法测试应符合下列规定：

1 应避免环境及系统干扰。

2 测试记录时间，在测量振型和频率时不应少于 10min，在测量阻尼时不应小于 30min。

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

7.4.3 现场采用机械激振振动测试应满足下列要求：

1 应正确选择激振器的位置，合理选择激振力，防止引起振型畸变。

2 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。

7.4.4 施加初速度自由振动测试应符合下列规定：

1 火箭筒的数目应根据测试目的及试验方案确定。

征求意见稿

2　火箭筒布置的位置宜在桥梁结构主体部分的顶面和侧面，火箭筒宜采用干电池引爆。

3　当采用多个火箭筒激振时，各个火箭筒应同时引爆。

7.4.5 施加初位移的自由振动测试应符合下列规定：

1　应根据测试目的布置拉线点。

2　拉线与结构的连结部分应具有能够使整体传力到主体受力构件上的能力。

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。

7.4.6　对于大型桥梁，动力测试可将结构分成几个单元分别测试，整个试验布置一固定参考点（应避开振型节点），每次测试都应包括固定参考点，并将几个单元的测试数据通过参考点关联，拟合得到全桥结构振型图。

7.4.7　桥梁原位静力试验应变测点的布置应遵循下列原则：

1　应变测点应根据测试截面及测试内容合理布置，并应能反映桥梁结构的受力特征。

2　单向应变测点布置应体现左右对称、上下兼顾、重点突出的原则，并应能充分反映截面高度方向的应变分布特征。单点应变花测点的布置不宜少于两组。测点布置完毕，应准确测量其位置。

3　钢筋混凝土结构的受拉区应变测点宜布置在受拉区主钢筋上。

4　主应变(应力)应采用应变花进行测试。

5　应变测试应设置补偿片，补偿片位置应处于与结构相同材质、相同环境的非受力部位。

7.4.8　桥梁原位静力试验位移测点布置应遵循位移测点的测值应能反映结构的最大变位及其变化规律，墩塔的水平位移测点应布置在顶部，并根据需要设置纵、横向测点。

7.5　测试数据采集与处理

7.5.1 采样频率宜取 10 倍以上的最高有用信号频率，桥梁空载状态下动应变、动位移信号在预定采集时间内的零点漂移不宜超过预计最大值的 5%。

7.5.2 对测试数据应进行检查和评判，并进行剔除异常数据、去趋势项、数字滤波等必要的预处理。全部试验完成后，应在现场对主要的测试数据进行检查和初步分析，确保测试数据的准确性和完整性。

7.5.3 现场测试的时域数据处理应符合下列规定：

1 对记录的测试数据应进行零点漂移、记录波形和记录长度的检验。

2 试体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。

3 试体的阻尼比可按自由衰减曲线求得，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计算确定。

4 试体各测点的幅值，应用记录信号幅值除以测点系统的增益，并应按此求得振型。

7.5.4 现场结构测试的频域数据处理应符合下列规定：

1 频域数据处理时的采样间隔应符合采样定理的要求。

2 频域中的数据应采用滤波、零均值化方法进行处理。

3 试体的自振频率可采用自功率谱分析或傅里叶谱分析方法求得。

4 试体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。

5 试体的振型宜采用自功率谱分析、互功率谱分析或传递函数分析方法确定。

6 对于复杂试体的测试数据，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。

7.5.5 结构自振频率可采用频谱分析法、波形分析法或模态分析法得到。自振频率宜取用多次试验、不同分析方法的结果相互验证。单次试验的实测值与均值的偏差不应超过±3%。

征求意见稿

7.5.6 桥梁结构阻尼可采用波形分析法、半功率带宽法或模态分析法得到。结构阻尼参数宜取用多次试验所得结果的均值，单次试验的实测结果与均值的偏差不应超过+20%。

7.5.7 振型参数宜采用环境激振等方法进行模态参数识别。宜采用专用软件进行分析，可同时得到振型、固有频率及阻尼比等参数。

7.5.8 正式试验过程中，应根据观测和测试结果，实时判断结构状态是否正常，测试数据是否异常，是否需要终止试验，确保试验安全。各工况试验完成后，应对测试数据进行检查和确认。如发现幅值异常或突变、零点严重偏离、异常电磁干扰、噪声过大等，应在排除故障后重新进行试验。

7.5.9 数字图像相关法数据处理时，应选用合适的子集大小（宜为 15～41 像素）和步长（宜为子集尺寸的 1/3～1/2），并报告计算参数。

7.5.10 微波雷达干涉测量数据应进行大气延迟校正和相位解缠，位移时程曲线应经低通滤波去除高频噪声，截止频率不宜低于最高关心频率的 2 倍。

7.5.11 三维激光扫描点云数据应进行去噪、抽稀和配准处理，变形云图宜采用色温图谱表达，并标注变形量程。

征求意见稿

8 桥梁支座及减震装置试验

8.1 一般规定

8.1.1 力学性能试验应采用本体进行，受试验设备能力限制时可采用缩尺模型进行。缩尺模型只允许行程缩短，其他应与本体相同。

8.1.2 开展桥梁支座及减震装置试验前，应保证无机械损伤，无锈蚀、无毛刺，标记清晰。连接部位宜采用螺栓连接或焊接，焊缝为一级，平整。

8.1.3 桥梁支座及减震装置应在压剪试验机、阻尼器试验机或在具有伺服控制装置上进行。

8.1.4 试验后继续在工程中使用的支座和减震装置，应确保试验过程中加载不超出其正常使用范围。试验后应进行外观检查和力学性能复测，确保其满足继续使用的要求。

8.1.5 所有试验开始前，应在标准试验环境中放置 24H 以上。

8.1.6 试验过程应有必要的视频材料。

8.1.7 支座及减震装置试验的变形测量可采用无线位移传感器或数字图像相关法，无线传感器同步精度不应大于 0.5ms。

8.2 桥梁用橡胶支座

8.2.1 本节适用于桥梁用普通橡胶支座、铅芯橡胶支座和高阻尼橡胶支座。

8.2.2 未使用的支座试验前应检查其外观，不应有破损；支座应具有出厂合格证且各种标识正确。

8.2.3 竖向压缩性能试验应满足以下要求：

a）在试样周边对称布置不少于 2 个位移传感器，竖向压缩位移为各传感器测量值的平均值；

b）竖向压缩的加载方式可根据不用支座类型的具体使用要求规范选用，如无特殊要求可采用以下加载方式：

按 0—P_0—P_2—P_0—P_1（第 1 次加载），P_1—P_0—P_2—P_0—P_1（第 2 次加载），P_1—P_0—P_2—P_0—P_1（第 3 次加载）。

P_2 为 1.3 倍 P_0，P_1 为 0.7 倍 P_0，P_0 为设计压力。

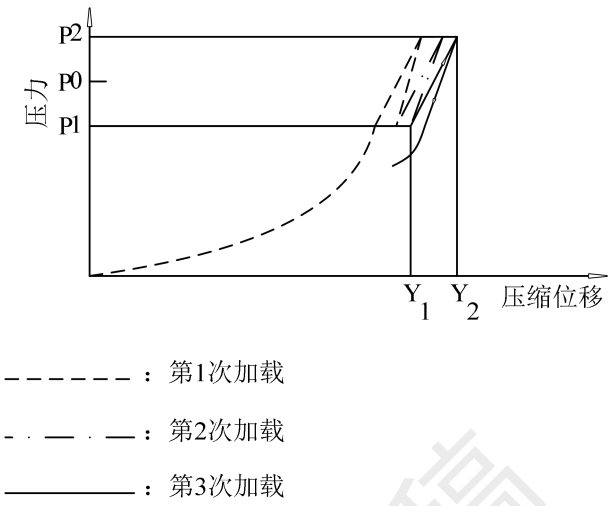
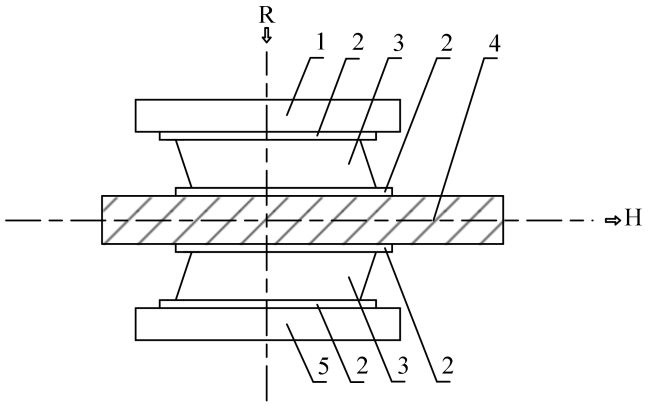


图 8.2.1　竖向压缩试验加载曲线示意

8.2.4　水平力学性能试验应满足以下要求：

a）优先选用单剪试验方式。若采用双剪试验方式应至少选用 3 个试样（A，B，C），所有竖向压缩刚度相差 20%以内的试样，应采用 A+B，B+C，C+A 组成方式计算每个试样的性能。



1——上承载板；2——防滑磨擦板；3——支座试样；4——中间钢拉板；5——下承载板

图 8.2.2　双剪切试验示意

8.3　桥梁用盆式支座

盆式支座试验应采用实体支座进行，若受试验设备加载能力限制，经协商可以采用小型支座进行试验。小型支座的其他力学性能参数应于原型支座保持一致。

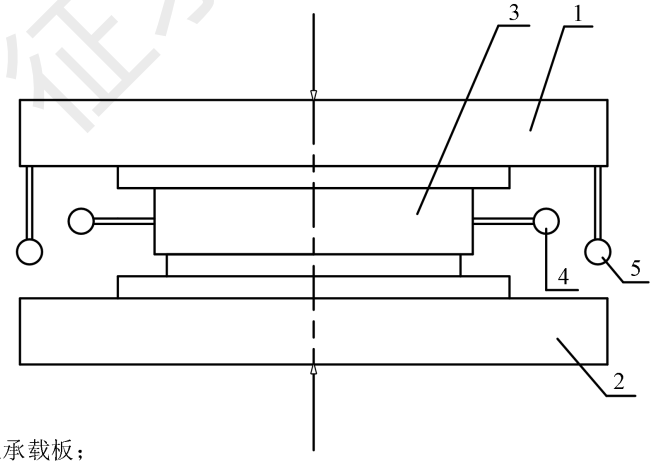
8.3.1 竖向压缩性能试验应满足以下要求：

a）盆式支座竖向压缩性能试验荷载值不小于其设计承载力 1.5 倍，按照 10 级荷载逐级施加。

b）在支座四周对称布置四个竖向位移测量传感器，测量支座压缩变形。在盆环上口相互垂直直径方向安装四个水平向位移测量传感器，测量支座盆径向变形。加载及测量示意图见图 8.3.1。

c）加载前对支座进行预压三次，预压荷载为支座竖向设计承载力。

d）以支座竖向设计承载力 1%为初始压力，逐级加载，每级持荷 2min 后继续加载，加载至建研荷载后持荷 3min 后卸载至初始压力，测量参与变形，为一个加载程序。一个支座需往复加载三次，取三次测量平均值为测试结果。



1——上承载板；
2——下承载板；
3——试样；
4——千分表；
5——位移传感器。

图 8.3.1　竖向压缩性能试验示意

征求意见稿

8.3.2 水平承载力试验应满足以下要求：

a）盆式支座水平力学性能应采用单剪的试验方式。

b）试验开始前应对支座进行预推。对支座竖向施加 50%设计承载力，水平推至设计承载力 20%，反复三次。

c）正式加载将设计水平力的 0.5%至试验荷载分为 10 级。先施加竖向设计承载力 50%，再施加水平设计承载力的 0.5%作为初始推力，然后逐级加载，每级加载持荷 2min 后纪录数据，加载至设计水平承载力 90%后将竖向荷载加至设计承载力，然后将水平荷载加至试验荷载并持荷 3min 后卸载。连续加载 3 次。

9.3.3 支座摩擦系数试验应满足以下要求：

a）试验可用单剪或者双剪的方式。

b）试验前将支座储脂坑涂满 5201-2 硅脂。支座对中后施支座设计竖向承载力 1%，然后加至支座竖向设计承载力后卸载至初始荷载，预压三次。

c）试验开始时施加竖向荷载至支座竖向设计承载力，然后施加水平荷载，支座发生滑移即可停止。重复以上布置三次，计算支座摩擦系数，取三次结果平均值为支座实测摩擦系数。

8.4 桥梁用球形支座

球形支座试验应采用实体支座进行，若受试验设备加载能力限制，经协商可以采用小型支座进行试验。小型支座的其他力学性能参数应于原型支座保持一致。

8.4.1 竖向承载能力试验满足以下要求：

a）进行竖向压缩性能时应在支座四周对称布置四个测量竖向压缩的位移计，取平均值为支座压缩量；盆环径向均匀布置四个千分表，其算数平均值为盆环径向变形值。加载及测量示意图参考图 8.3.1。

b）支座安装完毕后应进行 3 次预压，预压荷载为支座竖向设计承载力。

c）正式加载试验荷载为支座设计荷载 1.5 倍。以设计荷载 0.5%为初始荷载，逐级加载，每级荷载为试验荷载十分之一。每级荷载稳压 2min 后纪录数据，加

至试验荷载后稳压 3min 后卸载。加载过程应连续进行 3 次。

d）支座在设计竖向承载力作用下，竖向压缩变形不应大于支座总高度 1%或 2mm 两者中较大者；在设计竖向承载力 1.5 倍荷载作用下不应有损坏。盆环径向变形不应大于盆环外径的 0.5‰。

8.4.2 水平承载力试验满足以下要求：

a）水平承载力试验应采用单剪试验方法。

b）预加载。将试样置于试验机的承载板上，将自平衡反力架及水平力试验装置组合配置好。试验荷载为支座水平承载力的 1.2 倍。加载至水平承载力的 0.5%后，核对水平方向百分表及水平千斤顶数据，确认无误后进行预加载。将支座竖向承载力加至设计承载力的 50%，用水平承载力的 20%进行预推，反复进行 3 次。

c）正式加载。将试验荷载由零至试验荷载均匀分为 10 级。试验时先将竖向承载力加至 50%后，再以支座设计水平力的 0.5%作为初始推力，然后逐级加载，每级荷载稳压 2min 后，记录百分表数据，待设计水平力达到 90%后，再将竖向承载力加至设计承载力，然后将水平承载力加至试验荷载稳压 3min 后卸载。加载过程连续进行 3 次。

d）水平力作用下变形分别取 2 个位移计的平均值，绘制荷载-水平变形曲线。变形曲线应呈线性关系。

e）固定支座和单向活动支座非滑移方向的水平承载力均不应小于竖向设计承载力的 10%。试验后支座如有不可恢复变形，支座为不合格产品。

8.4.3 支座隔震性能试验

a）支座隔震性能试验应在单剪试验机上进行，试验时应先拆下支座挡块。

b）竖向加至设计荷载，并进行预压 1h，并在试验过程中保持不变。

c）平位移按 $d(t)=A\sin(2\pi f_0 t)$（其中 $f_0=v_0/(2\pi A)$，v_0 为加载峰值速度，A 为加载幅值）进行正弦波加载。加载幅值按试样设计减隔震位移的 25％、50%、75%、100%分别施加。

d）根据试验结果分别计算支座的各个性能参数。

8.4.4　转动性能试验应满足以下要求：

a）将支座按上图要求安装至试验机上。

b）将支座竖向设计荷载以连续均匀的速度加满,并在整个转动试验过程中保持不变。

c）正式加载。用千斤顶以 5kN/min 的速率施加转动力矩，直至支座发生转动后千斤顶卸载，记录支座发生转动瞬间的千斤顶最大荷载。试验过程连续进行 3 次。支座实测转动力矩为 M・P/2,取其 3 次的试验平均值。支座实测转动力矩应小于设计的转动力矩。

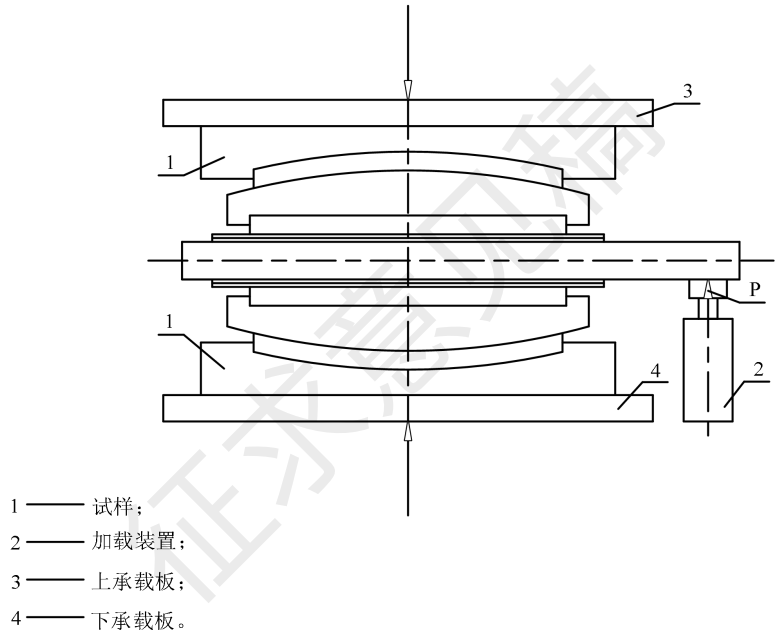


图 8.4.1 支座转动性能加载示意

8.5　桥梁减震装置试验

8.5.1　黏弹性阻尼器

黏弹性阻尼器在标准环境温度（23℃±2℃）条件下，力学性能试验应按表 8.5.1 的规定进行。

表 8.5.1　黏弹性阻尼器力学性能试验方法

项目	试验方法

最大阻尼力表观剪切模量损耗因子	1) 控制位移 $u=u_o\sin(\omega t)$;工作频率取 f_1.在同一加载条件下，作 5 次具有稳定滞回曲线的循环，每次均绘制阻尼力-位移滞回曲线； 2) 取第 3 次循环时滞回曲线的最大阻尼力值作为最大阻尼力的实测值； 3) 取第 3 次循环时滞回曲线长轴的斜率作为表观剪切模量值的实测值； 4) 取第 3 次循环时滞回曲线的最大位移对应的恢复力与零位移对应的恢复力的比值，作为损耗因子的实测值。
表观剪应变极限值	1) 工作频率取 f_1，控制位移 $u=u_i\sin(\omega t)$； 2) u_i 依次按 $1.2u_0$、$1.3u_0$、$1.4u_0$、$1.5u_0$。 做试验的条件是黏弹性材料与约束钢板或约束钢管间不出现剥离现象，如有剥离现象，则认为阻尼器已破坏，试验停止，并取这时的 u_i 值作为确定表观剪应变极限值的依据
注：$\omega=2\pi f_1$，ω为圆频率，f_1 为结构基频，u_0 为阻尼器设计位移。	

8.5.2 黏滞阻尼器

黏滞阻尼器的力学性能试验在伺服加载试验机上进行，试验模拟使用环境。黏滞阻尼器力学性能试验应按表 8.5.2 的规定进行。

表 8.5.2 黏滞阻尼器力学性能试验方法

项目	试验方法
极限位移	采用静力加载试验，控制试验机的加载系銃使阻尼群匀速缓慢运动，记录其伸缩运动的极限位移值。
最大阻尼力	采用正弦激励法，用按照正弦波规律变化的输入位移 $u=u_o\sin(\omega t)$,对阻尼器施加频率为 f_1、位移幅值为 u_0 的正弦力，连续进行 5 个循环，记录第 3 个循环所对应的最大阻尼力作为实测值。
阻尼系数	采用正弦激励法，用按照正弦波规律变化的輸入位移 $u=u_o\sin(\omega t)$来控制

阻尼指数 滞回曲线	试验机的加载系统； 对阻尼器分别施加频率为斤，输入位移幅值为 0.1u_0、0.2u_0、0.5u_0、0.7u_0、1.0u_0、1.2u_0 连续进行 5 个循环，每次均绘制阻尼力-位移滞回曲线，并计算各工况下第 3 个 循环所对应的阻尼系数、阻尼指数作为实测值
注：ω=2πf_1，ω为圆频率，f_1 为结构基频，u_0 为阻尼器设计位移。	

8.5.3 屈曲约束耗能支撑

产品力学性能试验在加载试验机上进行，试验模拟使用环境，屈曲约束耗能支撑力学性能应按表 8.5.3 的规定进行

表 8.5.3 屈曲约束耗能支撑力学性能试验方法

项目	试验方法
屈服承载力	试验采用力-位移混合控制加载制度。试件屈曲前，采用力控制并分级加载，接近屈服荷载前宜减小级差加载，每级荷载反复一次；试件屈服后采用位移控制，每级位移加载幅值取屈服位移的倍数为级差进行，每级加载可反复三次。 屈曲约束耗能支撑力学性能宜通过滞回曲线试验结果确定。
最大承载力	
屈服位移	
极限位移	
弹性刚度	
第二刚度	
滞回曲线	

征求意见稿

9 桥梁抗震试验中的安全措施

9.1 一般规定

9.1.1 建筑抗震试验方案中应有安全防护措施，试验时应按规定设置各种安全防护警示标识。

9.1.2 试验室应制定吊车安全操作规程，试体的吊装、加载设备的安装及运输过程应遵守吊车安全操作规程的规定。

9.1.3 电子试验设备和测试仪器应设置接地装置。

9.1.4 试体的固定、连接应经过验算；试验时试体应采取安全保护措施。

9.1.5 试验中应遵守仪器仪表和设备的安全操作使用的规定。

9.2 拟静力、拟动力试验中的安全措施

9.2.1 试验用加载设备系统：门架、三角反力架、反力墙等应有明确的力和变形刚度的限制，应考虑能承受全部试验荷载可能的冲击，在往复水平加载下不致产生过大的变形。

9.2.2 结构在拟动力推、拉反复试验中，在接近试体最大承载能力时，试体承受的载荷和因此产生的变形都很大，试体随时有产生局部破坏甚至倒塌的可能。因此，设置安全托架、支墩及保护拦网，防止崩落的碎块和倒塌的试体砸伤人员和设备。

9.2.3 试验中出平面外的非试验目的破坏往往容易被人忽视，同时出平面外破坏也是一个非常大的安全隐患，应予以注意。

9.2.4 液压伺服控制系统应有力和位移限位保护，控制和采集装置应配备不间断电源。

9.2.5 在试验安装就绪后开始进行试验前，除检查有关的加力设备的安全之外，还应检查安装测试的所有仪表是否都有保护措施，在接近破坏阶段，试验主持者应进一步检查被保留下来的仪表的有效保护，防止仪表损坏。

征求意见稿

9.3 模拟地震振动台试验中的安全措施

9.3.1 试验时试体外围应挂防止附加荷重移位或甩出伤人的防护网。

9.3.2 试验时宜利用试验室的吊车通过吊钩及钢缆绳与试体相连，也可在试体外围设置防护钢架。

9.3.3 试验过程中，一切人员不得上振动台，破坏试验阶段应远离事先标识的危险区。

9.3.4 振动台控制系统应设有加速度、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，应有自动停机的功能。

9.3.5 振动台控制系统应有各种故障的报警指示装置，试验系统或与振动台基坑可能的碰撞点处应设有缓冲消能装置。

9.3.6 振动台数据采集系统应设有不间断电源。

9.3.7 试件吊下振动台的吊装方案应考虑试体破坏的影响，吊装方案应进行专项设计，考虑试体可能的最大破损状态可能产生的影响，吊装前应进行试吊确认。

9.4 现场结构动力测试中的安全措施

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下列措施:

1 拉线与结构物和测力计的连接应可靠，并应有预防拉线被拉断后反弹伤人的措施;

2 施力用的拉线绞车应设安全措施;

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，试机后方可吊装就位，连接螺栓应埋设牢固。

9.4.5 对结构进行破坏性测试时，应做到对所有测试仪器进行设防保护。进人

试验现场的工作人员应遵守现场的安全规定。

9.4.6 采用无人机进行原位测试时，应符合下列规定：

1 无人机飞行高度、航线应避开架空电缆、塔吊等障碍物，安全距离不应小于 5m；

2 桥梁上空及周边应设置临时禁飞区，禁止非测试人员接近；

3 无人机失控保护装置应处于开启状态，并配备降落伞或缓冲装置。

9.4.7 采用高功率激光扫描仪（I 类以上）时，应设置激光安全警示区，禁止人员进入直射光路。

9.4.8 分布式光纤布设过程中使用的粘结剂、固化剂应符合实验室化学品安全管理规定，并配备通风和防护用品。

征求意见稿

本规程用词说明

执行本规程条文时，对于要求严格程度的用词说明如下，以便在执行中区别对待。

1、表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；

反面词采用“严禁”。

2、表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”；

反面词采用“不应”或“不得”。

3、表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”；

反面词采用“不宜”。

表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

征求意见稿

引用标准名录

1 《公路桥梁抗震设计规范》 JTG/T 2231-01-2020

2 《混凝土物理力学性能试验方法标准》 GB/T50081-2019

3 《金属材料拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》 GB/T 228.1-2021

4 《工程结构抗震混合试验方法》 （送审稿）

5 《橡胶支座第 2 部分：桥梁隔震橡胶支座》 GB/T20688.2-2020

6 《公路桥梁盆式支座》 JT/T 391-2019

7 《桥梁用黏滞流体阻尼器》 JT/T 926-2014

8 《建筑抗震试验规程》 JGJ/T 101-2015

征求意见稿