大型钢筋混凝土结构相似性准则及试验方案研究*

曾 迪

（中国水利水电科学研究院，北京 100048）

摘 要：目前对于大型钢筋混凝土结构的动力分析研究中，结构动力模型试验与破坏试验仍然是了解结构非线形动力响应与地震破坏形态的一种重要手段。原型结构与模型结构之间各种力学和物理量的相似关系至关重要。本文结合三峡升船机抗震试验，首先介绍了原型基本概况，基于原型对模型进行了设计，给出相似性关系。根据需要研究的内容，给出了可实施的具体方案，包括准备阶段、弹性小震阶段、设计地震阶段和超设计地震阶段，并对加载的地震时程进行了设计。期望研究成果对今后开展大型钢筋混凝土结构的破坏试验工作有一定的指导和借鉴作用。

关键词：大型钢筋混凝土结构；相似准则；试验方案

中图分类号：P315.9 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－811X(2010)S0－0095－04

0 引言

目前对于大型钢筋混凝土结构的动力分析研究中，结构动力模型试验与破坏试验仍然是了解结构非线形动力响应与地震破坏形态的一种重要手段。由于振动台设备能力以及实验室空间的限制，大型钢筋混凝土结构只能进行缩尺模型试验。这样，原型结构与模型结构之间各种力学和物理量的相似关系至关重要。

升船机塔柱是典型的强柱弱梁结构，局部动应力较大。目前水工建筑物抗震设计规范[1]和建筑抗震设计规范[2]由于缺乏对升船机塔柱结构的研究和工程实践，因此均没有专门的设计条文。动力模型试验能够比较精确地模拟塔柱结构的动力特性和地震反应，特别是在揭示塔柱结构在地震作用下的薄弱部位以及钢筋混凝土的开裂及其发展情况等非线性工况具有优势。汶川大地震引起的建筑震害警示人们注意建筑物的地震安全性。而且，从这次地震的影响看，地震影响区内的建筑物与构筑物很可能遭遇设防烈度水平甚至远高于设防烈度水平的地震作用，通过模型试验也可以进行超越设计地震的破坏试验，了解塔柱结构的抗震潜力。

1 结构特点及模型设计

1.1 结构特点

三峡升船机过船规模为 3 000 t 级，最大提升高度为 113 m，是目前世界上规模最大的升船机。塔柱结构为现浇钢筋混凝土剪力墙结构。升船机承船厢的外形尺寸为 132 m×23 m×10 m，承船厢通过纵导向、横导向装置，螺母柱系统等设备保持承船厢在塔柱中运行的稳定与安全。场地基本地震烈度为Ⅵ度，按 1 000 年一遇的设计地震设防，其水平方向地震设防加速度峰值为 0.67 m/s^2。塔柱和承船厢模型见图 1 和图 2。

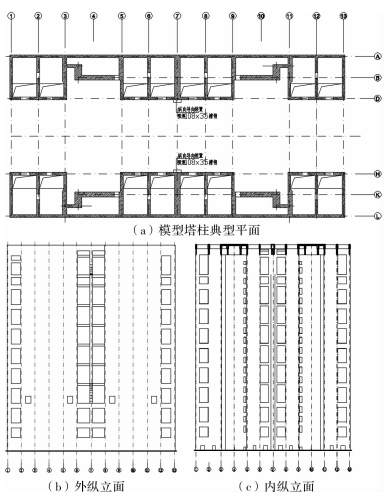
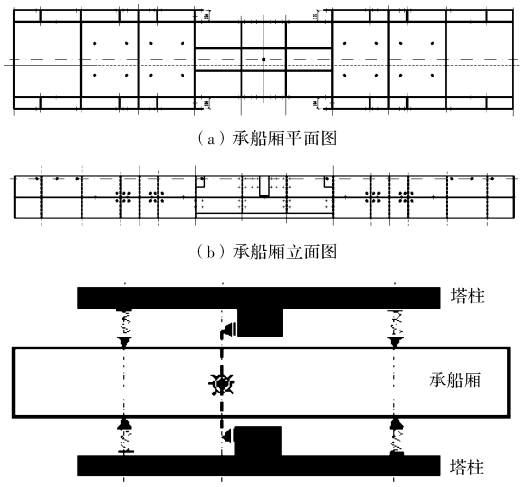


图 1 塔柱模型结构概况

* 收稿日期：2010－09－25
基金项目：中国水利水电科学研究院科研前期专项(抗集 0725)
作者简介：曾迪(1975－)，女，湖南郴州人，工程师，主要从事工程结构抗震研究. E-mail：zengdi@iwhr.com



（a）承船厢平面图

（b）承船厢立面图

（c）塔柱和承船厢的耦合系统

图 2 承船厢模型

1.2 模型的设计

为了尽可能准确模拟原型结构的地震反应及破坏状态，在满足振动台的性能参数限制的条件下(如台面尺寸、振动台承受的最大重量与最大倾覆力矩、最大加速度输出等)，应尽可能采用大比例尺的模型，在最大限度满足结构相似关系的基础上，为模型制作提供便利。在模拟地震振动台试验模型的相似条件中有许多物理量如长度 L、材料的弹性模量 E、材料密度 ρ、线荷载 q、质量 M、时间 t 等等，根据 Buckingham 的 π 定理[3]，选用长度 L、弹性模量 E 与密度 ρ 作为独立的基本量，作量纲分析，得到模型与原型对于物理量的相似比应满足的条件。由于模型与原型结构重力加速度相等，长度比 Sl、材料密度比 $S\rho$、弹性模量比 Se 之间必须满足重力加速度相等的条件，$Sa = Se/(Sl * S\rho) = 1.0$，可以发现材料密度比 $S\rho = Se/Sl$，如果 $Se = 1$，$Sl = 1/25$，则 $S\rho = Se/Sl = 25$，即要求模型材料的密度应为原型材料的 25 倍，这样的模型材料难以实现，同时也受振动台容许最大模型质量的限制。通常，通过在模型上悬挂附加质量的办法，让模型总质量等于模型本身质量 Ms(结构构件的质量和)与附加人工质量 Ma 之和，从而可以同时满足重力与水平惯性力相似关系，但这时模型需要附加的质量较大。

本次设计制作的 1/25 的钢筋混凝土整体模型缩比后塔柱模型总高 5.84 m，共 20 层。模型平面尺寸为 4.76 m × 2.31 m。塔柱用微粒混凝土制作。塔柱中剪力墙的分布钢筋、楼板配筋采用镀锌铁丝焊接的网片模拟，剪力墙边缘构件的纵筋和箍筋、纵向连系梁与横梁中纵筋和箍筋采用镀锌铁丝模拟，所有构件的配筋率与原型对应构件的配筋率相等。

承船厢模型的外形尺寸为 4 760 mm × 940 mm × 400 mm，与原型结构一致。承船厢通过 16 个滑轮系统吊挂在模型中，与实际结构相似。对纵向，采用实腹简支梁的方法模拟，通过纵导向梁的设计，满足纵向等效刚度的要求。对横向，通过设计四套横导向梁装置，让每个横导向装置的刚度满足设计要求，实现横导向装置的模拟。对阻尼器，由于实际空间的限制以及安装方便，保证结构对称，在承船厢与纵导向之间设置了 4 套阻尼器系统，阻尼力大小由力传感器直接得到。

本次试验结构模型尺寸较大，模型本身较重。模型吊装前在模型内预埋了部分铅块，模型吊装总重约 28.21 t。待模型附加配重安装完成后，模型的总重量约为 56.86 t，小于振动台容许重量 60 t。模型附加质量通过在楼板上安放铁块或铅块完成，通过乳胶水泥，将附加配重块牢固地粘接在模型楼板上。

本试验采用的相似关系见表 1。

表 1 结构模型相似关系

物理性能	物理参数	相似常数	备注
几何性能	长度	1/25	控制尺寸
材料性能	应变	1	控制材料
	弹性模量	1	
	应力	1	
	质量密度	1	
荷载性能	集中力	1/625	
动力性能	频率	25	控制试验
	速度	1	
	加速度	25	

2 试验研究的主要内容

大型地震模拟振动台动力模型试验主要研究内容：①塔柱结构动力特性：固有频率、振型、阻尼比。②塔柱结构动力响应：关键部位的动应力、动位移。③揭示塔柱结构抗震薄弱部位，特别是钢筋混凝土结构的开裂部位及开裂情况。④塔柱结构与承船厢的耦合力以及相对动位移。⑤塔柱结构的抗震安全性检验。

3 试验加载方案

结构模型分别沿纵、横两个方向输入设计地

面地震加速度时程，量测塔柱结构与承船厢的地震响应以及船厢与塔柱之间的耦合力大小，同时考虑承船厢阻尼比的变化等，同时，需要量测模型不同试验阶段的动力特性。计划完成如下阶段的试验。

3.1　准备阶段的测量

准备阶段模型试验总体分如下：①模型移上振动台并固定后，重量与基本频率的测试，获得模型的总重量与空模型的基本频率，为相似关系的最后确定做准备。②模型附加配重安装与洞口补强后，重量与基本频率的测试，获得配重完成后模型的总重量与基本频率，为相似关系的最后确定做准备。③承船厢安装完成后，模型重量与基本频率的测试，获得准备就绪后模型的总重量与基本频率。

3.2　弹性小震阶段的试验

弹性小震阶段的试验为试验第一阶段。共完成纵、横两个方向，每个方向3条地震波输入，模拟地震激励以及模型纵横向在本试验前后模型动力特性的实测工作。其中一项关键工作是阻尼器阻尼比的调整。让实测阻尼比较合理。此时承船厢位于上部。

3.3　设计地震的试验

设计地震下的试验是试验第二阶段。水平方向地震设防加速度峰值为0.068g。共完成纵、横两个方向分别单向输入，纵横两向同时输入以及三向同时输入5种工况下的试验。由于纵横向试验时承船厢的动质量不同，首先完成纵向单向分别输入3条地震波激励下的试验，在实测模型的动力特性后，开始双向同时输入但以纵向为主的模拟地震激励试验，实测模型的动力特性后，然后开始安装附加质量，开始横向的动力试验。首先完成沿横向分别输入3条地震波激励下的动力响应。在实测模型的动力特性后，开始双向同时输入的模拟地震激励试验，首先以纵向为主横向为辅，然后以横向为主，纵向为辅，共完成2条地震波四种工况的试验。在实测模型的动力特性后开始三向同时输入下的动力试验。最后量测模型动力特性，比较模型在经历设计地震后的动力响应大小与刚度变化情况。

第三阶段，纵向设计地震作用下，承船厢不同工作位置以及阻尼比变化对承船厢与塔柱间耦合力的影响。

承船厢的附加质量为纵向动力质量值，实测承船厢在中位、低位工作时动力响应的变化；承船厢不同工作高度下的耦合力变化。

3.4　超设计地震的试验

第四阶段，0.1 g峰值加速度地震作用下，模型的动力响应实测。

第五阶段，0.2 g峰值加速度地震作用下，模型的动力响应实测。

模型的拆除。首先拆除配重与承船厢系统，然后将模型抬起，采用辊轴将模型从台面上移到实验室地面，全部拆除，清理场地，试验全部结束。

4　加载时程的设计

模型的相似条件和试验方法将遵循抗震试验规程[4]的规定。动力模型试验，通过调整峰值加速度以满足设防对于小震、中震和大震的要求，模拟地震动力反应所采用的地震波根据模型所要求的动力相似关系对原型地震记录修正后(按照时间与加速度相似比例分别修正时间步长与加速度)，作为模拟地震振动台的激励输入。多遇地震可进行多条地震波的响应比较(koyna波，三峡场地波，规范反应谱人工波)。

设防地震考虑到模型基本处于弹性阶段，可能会有局部发生塑性变形，因此主要采用抗震设计规范反应谱曲线生成人工地震波进行试验。罕遇地震的试验时考虑到模型已进入塑性阶段，因此主要采用反应谱曲线生成人工地震波进行试验，以得到较好的试验结果。

5　结语

本文结合大型钢筋混凝土结构抗震试验，基于原型对模型进行了设计，给出相似性关系。根据需要研究的内容，给出了可实施的具体方案，包括准备阶段、弹性小震阶段、设计地震阶段和超设计地震阶段，并对加载的地震时程进行了设计。期望研究成果对今后开展大型钢筋混凝土结构的破坏试验工作有一定的指导和借鉴作用。

参考文献：

[1]　中华人民共和国建设部. SL203－97 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2001.

[2]　中华人民共和国建设部. GB 50011－2001. 建筑抗震设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2001.

[3] 李国强，李杰. 工程结构动力检测理论与应用[M]. 北京：科学出版社，2002.

[4] 中华人民共和国建设部. JGJ 101 – 96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京：中国建筑工业出版社，1997.

Research on Similarity Criteria and Model Test Program for Large-scale Reinforced Concrete Structures

Zeng Di

(*China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100048, *China*)

Abstract: For the analysis of Large-scale reinforced concrete structures, the structural dynamic model tests and failure tests are important tool to obtain non-linear dynamic response and failure modes of the earthquake. A variety of mechanical and physical relationship between the prototype and model is essential. First, the basic profile of Three Gorges Project ship lift is introduced. The model based on the prototype is design and given the similarity relations. Study of the content as needed, can be implemented given the specific program, such as preparation stage, small earthquake stage, design earthquake phase and beyond design stage, and earthquake loading schedule is designed. Results is hoped to give some guidance and reference for failure test of resemble large-scale reinforced concrete structures.

Key words: large-scale reinforced concrete structures; similarity criteria; model test program