

文章编号:1673-9469(2008)03-0004-04

结构动力模型相似关系研究及验证

杨树标,杜广辉,李荣华,郭金伟,胡光园,白雪娟
(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:结构模型的振动台试验是研究工程结构抗震性能的重要方法,正确处理模型与原型的相似关系以及由模型反应正确推导原型反应是很重要的问题。本文以4层框架结构为例,探讨了原型与人工质量模型和欠质量人工质量模型的相似关系,采用有限元分析程序计算原型与模型的地震反应,由模型地震反应反推原型地震反应,将原型地震反应的计算值和反推值从基本自振周期,加速度,速度,位移,基底剪力方面进行了比较,从而得出在弹性阶段内动力相似关系的正确性。

关键词:振动台试验;相似律;欠质量人工质量;有限元
中图分类号: TU352 **文献标识码:** A

Research of similitude laws for dynamic structural model test

YANG Shu-biao, DU Guang-hui, LI Rong-hua, GUO Jin-wei, HU Guang-yuan, BAI Xue-juan
(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: Vibroplatform test is an important method to study seismic performance of engineering structure. Processing the similarity relation and deducing response of original mold correctly are very important. Taking one four-story frame building as an example, this paper discussed the similarity relation of the original model and enough artificial mass and without enough artificial mass, and earthquake response of the original model and model were calculated by using finite element program; response of original model according to response of the model was deduced; the calculation result from basic natural vibration period, acceleration, velocity, displacement and structural base shear were compared. Finally, the correctness of dynamic similitude law at the elastic stag was validated.

Key words: shaking table test; simulated law; without enough artificial mass; finite element

振动台试验是建筑结构抗震研究的试验方法之一,通常被当作最能直接了解结构在地震激励下反应的可靠方法^[1]。振动台模型试验都采用缩尺模型,通常难以全部满足模型弹性相似关系的要求,国内目前完成的绝大多数建筑结构振动台试验均采用忽略部分重力影响的欠质量人工质量模型,不完全满足模型试验弹性相似关系的要求,大多研究仅仅是根据经验来判断结果的准确性^[2]。本文以4层框架结构为例,探讨了原型与人工质量模型和欠质量人工质量模型的相似关系,采用有限元分析程序计算原型与模型的地震反应,将原型地震反应的计算值和反推值进行了

比较,得出了一些有意义的结论。

1 完全弹性相似关系

一般情况下,结构在线弹性范围内的地震反应可表述为如下函数关系^[3]:

$$\sigma = f(l, E, \rho, t, r, v, a, g, \omega) \quad (1)$$

式中 σ 为构件应力, l 为构件尺寸, E 为材料弹性模量, ρ 为构件材料密度, t 为时间, r 为结构变形反应, v 为结构速度反应, a 为结构加速度反应, g 为重力加速度, ω 为结构自振圆频率。根据 π 定理^[4],则可得到模型与原型对应物理量的相

似比所应满足的条件:

$$t_r = l_r \sqrt{\rho_r / E_r}; a_r = E_r / (\rho_r l_r) = g_r; \omega_r = \sqrt{E_r / \rho_r} / l_r \quad (2)$$

式中 r - 模型与原型对应物理量的比。

考虑到模型与原型受到相同的重力加速度 g , 则有 $g_r = 1.0$ 。即如果考虑自重的影响, 保持加速度相似比为 1, 则 E_r, ρ_r, l_r 不能独立地任意选择。由于几何缩比一般较大(一般小于 1/20), 这要求模型材料的密度是原型材料密度的几倍甚至几十倍或模型材料的弹性模量比原型材料的小很多, 现有模型材料难以满足这样的要求(砂浆的弹性模量是混凝土弹性模量的 0.2 ~ 1.0, 密度比混凝土略小), 这是制约完全相似模型设计的主要因素。对于需要严格模拟重力影响的模型, 常采用铅粉、石膏或其它专用的弹性模量小密度大的材料, 或由离心机来模拟模型的超重力现象。

一般忽略质量分布形式的影响, 通过在楼板上堆放附加质量的方法来模拟质量的影响。根据质量相似比, 从公式(2)可得到模型与原型的质量比为

$$m_r = m_m / m_p = \rho_r \cdot l_r^3 = E_r \cdot l_r^2 \quad (3)$$

式中 m_p 是原型结构总质量, 模型总质量 m_m 等于模型本身的质量 m_s 与附加质量 m_a 之和, 附加质量的大小由式(4)确定。如果不附加质量, 式(3)即为忽略重力模型的相似关系。满足(4)式的模型称为人工质量模型^[5]。

$$m_a = E_r l_r^2 m_p - m_s \quad (4)$$

2 一致相似律

人工质量模型虽能满足水平惯性力的相似条件, 但是, 因振动台的承载能力以及模型实际空间有限, 其人工质量的设置往往难以完全实现。如果定义一个反应人工质量多少的参数来描述人工质量的影响, 可以得到包含人工质量、忽略重力相似律的一致表达式, 这种一致表达式将解决介于人工质量模型和忽略重力模型之间的“欠人工质量模型”的设计问题。文献[6]提出了结构模型的等效质量密度 $\bar{\rho}_m$ 的概念:

$$\bar{\rho}_m = (m_s + m_a) / B_m \quad (5)$$

式中 m_s - 模型构件质量; m_a - 模型中设置的人工质量; B_m - 根据长度相似比 l_r 和原型构件体积计算得出的模型构件体积。

类似地可定义原型结构的等效质量密度 $\bar{\rho}_p$:

$$\bar{\rho}_p = m_p / B_p \quad (6)$$

由方程(5)和(6)得到等效密度比 $\bar{\rho}_r$:

$$\bar{\rho}_r = (m_s + m_a) / [l_r^3 m_p] \quad (7)$$

由此得到人工质量模型, 忽略重力模型, 欠人工质量的相似关系如表 1 所示。

表 1 各物理量的相似关系

Tab. 1 Similitude relation of each physical quantity

物理量	人工质量模型	忽略重力模型	欠人工质量
长度	l_r	l_r	l_r
位移	$r_r = l_r$	$r_r = l_r$	$r_r = l_r$
密度	ρ_r	ρ_r	$\bar{\rho}_r = (m_s + m_a) / l_r^3 m_p$
应力	$\sigma_r = E_r$	$\sigma_r = E_r$	$\sigma_r = E_r$
加速度	$a_r = 1$	$a_r = E_r \rho_r^{-1} l_r^{-1} r$	$v_p = \sqrt{E_p / \bar{\rho}_p}$
重力	$g_r = 1$	g	$a_r = E_r / (l_r \bar{\rho}_r)$
弹性模量	E_r	E_r	E_r
时间	$t_r = \sqrt{l_r}$	$t_r = \rho_r^{0.5} E_r^{-0.5} l_r$	$t = l \sqrt{\bar{\rho}_r / E_r}$
速度	$v_r = \sqrt{l_r}$	$v_r = E_r^{0.5} \rho_r^{-0.5}$	$v_r = \sqrt{E_r / \bar{\rho}_r}$
角速度	$\omega_r = l_r^{-0.5}$	$\omega_r = l_r^{-1} E_r^{0.5} \rho_r^{-0.5}$	$\omega_r = \sqrt{E_r / \bar{\rho}_r} / l_r$

3 模型实例

该实例为框架结构, 原型为 4 层, 层高都为 3.6m, X 方向 4 跨, Y 方向 3 跨, 柱距都为 6m, 柱子尺寸为 500mm × 500mm, 梁尺寸为 300mm × 700mm, 楼板厚为 120mm, 柱子、梁、楼板的混凝土等级都为 C30。工程抗震设防烈度为 8 度, 设计地震分组为第一组, 设计基本地震加速度为 0.2g, 场地类别为 II 类。

4 模型设计

设计分析了六个模型, 模型 1 为人工质量模型, 即为满配重模型, 模型 2, 3, 4, 5, 6 为欠质量人工质量模型, 其中附加质量比分别为理论附加质量的 0%, 20%, 40%, 60%, 80%。

根据以上相似关系推导模型 1, 2, 3, 4, 5, 6 的各物理量的相似比如表 2 所示。

5 有限元时程分析及结果对比

本文对人工质量模型和欠质量人工质量模型

进行弹性阶段的分析。时程分析时所选用的地震波对于结构动力模型相似关系的验证没有影响,所以本论文选用经典的 EL Centro NS 地震波,分析

时需将波的最大幅值调至相当于 8 度基本烈度下的加速度峰值^[7]。

表 2 模型各物理量的相似比

Tab.2 Similitude ratio of each physical quantity from model

模型	几何相似比 l_r	弹性模量比 E_r	频率比 ω_r	等效密度比 $\bar{\rho}_r$	速度比 v_r	加速度比 a_r	时间比 t_r	附加质量比例
1	1/10	1/4	3.1626	2.5	0.3162	1	0.3162	100%
2	1/10	1/4	5	1	0.5	2.5	0.2	0%
3	1/10	1/4	4.386	1.3	0.4385	1.923	0.228	20%
4	1/10	1/4	3.9526	1.6	0.3953	1.563	0.253	40%
5	1/10	1/4	3.6271	1.9	0.3627	1.316	0.2757	60%
6	1/10	1/4	3.3715	2.2	0.3370	1.136	0.2966	80%

表 3 基本自振周期

Tab.3 The basic natural vibration period

振型	原型计算值 T_p	模型计算值 T_m (原型推出值 T)					
		1	2	3	4	5	6
1	0.4597	0.1459	0.0919	0.1050	0.1165	0.1271	0.1368
		(0.4614)	(0.4595)	(0.4605)	(0.4605)	(0.4610)	(0.4612)
2	0.4522	0.1435	0.0904	0.1033	0.1147	0.1250	0.1346
		(0.4538)	(0.4520)	(0.4531)	(0.4534)	(0.4534)	(0.4538)
3	0.4121	0.1268	0.0824	0.0930	0.1025	0.1112	0.1193
		(0.4010)	(0.4120)	(0.4079)	(0.4051)	(0.4033)	(0.4022)

表 4 模型与原型顶层的地震反应

Tab.4 Earthquake response of the top layer from original model and model

地震烈度	基本量	加速度		速度		位移	
		max	min	max	min	max	min
8 度	原型计算值	5.236	-5.845	0.4047	-0.3735	30.95	-26.28
	模型 1 计算值	5.360	-5.872	0.129	-0.120	3.141	-2.667
	(原型推出值)	(5.360)	(-5.872)	(0.4080)	(-0.380)	(31.41)	(-26.67)
	模型 2 计算值	12.80	-14.32	0.1982	-0.1830	3.030	-2.574
	(原型推出值)	(5.120)	(-5.728)	(0.3964)	(-0.366)	(30.30)	(-25.74)
	模型 3 计算值	9.956	-11.04	0.1745	-0.1612	3.047	-2.584
	(原型推出值)	(5.177)	(-5.741)	(0.3979)	(-0.368)	(30.47)	(-25.84)
	模型 4 计算值	8.125	-8.975	0.1575	-0.1457	3.055	-2.593
	(原型推出值)	(5.20)	(-5.744)	(0.3984)	(-0.369)	(30.55)	(-25.93)
	模型 5 计算值	6.870	-7.564	0.1448	-0.1340	3.062	-2.602
	(原型推出值)	(5.221)	(-5.749)	(0.3992)	(-0.367)	(30.62)	(-26.02)
	模型 6 计算值	5.958	-6.536	0.1346	-0.1248	3.072	-2.609
(原型推出值)	(5.243)	(-5.751)	(0.3994)	(-0.370)	(30.72)	(-26.09)	

表5 8度基本烈度下结构基底剪力(kN)
Tab.5 Structural Base shear under 8 basic earthquake intensity

	原型计算值	模型计算值(原型推出值)					
		1	2	3	4	5	6
Max	3853	9.6 (3840)	9.64 (3856)	9.423 (3769)	9.412 (3765)	9.406 (3762)	9.402 (3761)
Min	-4536	-11.36 (-4544)	-11.10 (-4440)	-11.12 (-4448)	-11.13 (-4448)	-11.13 (-4448)	-11.13 (-4448)

由表2,3,4,5可知,原型的计算值与由模型反推出的原型值的误差均小于5%,说明人工质量模型和欠质量人工质量模型都能比较好的反推原型结构的地震响应,但对于欠质量人工质量模型不存在最优设计参数。目前振动台的条件使试验模型大多是缩比的欠质量模型,附加质量不足,大多数模型附加质量低于50%的理论附加质量。虽然忽略重力影响,但因竖向压应力不足产生的问题在试验中难以补救,通常会造造成竖向构件混凝土较早开裂,结构刚度较早退化,而且结构底部构件可能出现受拉状态导致结构破坏模式的改变。随着模型中人工质量的增加,计算的误差逐渐减小,当配重达到人工质量的75%以上时,误差可以忽略。

6 结论

1)人工质量模型满足完全相似关系,其相似关系为 $a_r = g_r = 1, t_r = \sqrt{l_r}, v_r = \sqrt{l_r}, \omega_r = l_r^{-0.5}$; 欠质量人工质量不能完全满足弹性相似关系,其相似关系为 $\bar{\rho}_r = (m_r + m_a)/l_r^3 m_p, a_r = E_r/(l_r \bar{\rho}_r), t_r = l_r \sqrt{\bar{\rho}_r/E_r}, v_r = \sqrt{E_r/\bar{\rho}_r}, \omega_r = \sqrt{E_r/\bar{\rho}_r}/l_r$ 。

2)通过对附加质量为理论附加质量比例的0%,20%,40%,60%,80%的欠质量人工质量的相似关系分析可知:在弹性阶段内,欠质量人工质量模型可以根据附加质量的大小来调整模型的相似

关系,然后根据调整后的相似关系由模型的地震反应和动力特性来反推原型的地震反应和动力特性,从而完成对原型结构的抗震性能的评定。

本文探讨的是结构处于弹性地震反应阶段,模型与原型的动力相似关系;对于结构进入非线性地震反应阶段的情况,尚需进一步的研究。

参考文献:

- [1] 李德寅,王邦楣,林亚超.结构模型实验[M].北京:科学出版社,1996.
- [2] 迟世春,林少书.结构动力模型试验相似理论及其验证[J].世界地震工程,2004,20(4):11-12.
- [3] 杨树标,李荣华,刘建平.振动台试验模型和原型相似关系的理论研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2007,24(1):08-11.
- [4] 胡宝琳,李国强.框架结构层间位移的分析方法比较[J].河北工程大学学报(自然科学版),2007,24(1):17-19.
- [5] 杨树标,杨艳秋,高天宝,等.框架复合隔震结构地震响应分析[J].河北建筑科技学院学报,2006,23(1):23-26.
- [6] 孙武,杨树标,吴斌,等.并联复合隔震结构地震反应时程分析[J].河北建筑科技学院学报,2004,21(1):52-55.
- [7] 庄萌,王宗纲,钱稼茹.CNP1000安全壳1:10模型的模态分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2007,24(3):7-11.
- [8] 张敏政.地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J].地震工程与工程振动,1997,17(2):52-58.

(责任编辑 同纯有)