

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.02.017

层状岩质边坡动力变形破坏特征的试验研究

刘汉东¹, 陈钧龙¹, 牛林峰¹, 王忠福¹, 朱瑞², 姚亮³

(1. 华北水利水电大学 河南省岩土力学与结构工程重点实验室, 河南 郑州 450045;

2. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450016;

3. 河南东龙控股有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 以反倾层状岩质边坡为研究对象, 通过振动台试验对地震作用下反倾层状岩质边坡的变形破坏过程进行了研究, 观察记录了在不同频率、振幅、持时地震波作用下模型边坡的宏观变形破坏特征。在此基础上, 对模型边坡的变形破坏模式进行了分析。试验结果表明: 地震作用下边坡变形破坏特征与地震动参数密切相关; 结构面对边坡的变形破坏有着控制作用; 地震作用下反倾层状岩质边坡的变形破坏模式可概化为: 地震诱发——顶部及浅表部松动变形——坡体裂缝发育、扩展及层间错动加剧——顶部及浅表部破坏加剧——坡脚拉张裂缝扩展及层间错动加剧, 引起边坡大规模崩塌溃坏, 散落岩体堆积坡脚。

关键词: 振动台试验; 反倾岩质边坡; 变形破坏特征; 破坏模式

中图分类号: TU458+.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)02-0090-05

Experiments on Dynamic Deformation and Failure of Layered Rock Slope

LIU Handong¹, CHEN Junlong¹, NIU Linfeng¹, WANG Zhongfu¹, ZHU Rui², YAO Liang³

(1. Henan Key Laboratory of Geomechanics and Structural Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450045, China;

2. Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450016, China;

3. Henan East Dragon Holdings Ltd, Zhengzhou, He'nan 450000, China)

Abstract: Taking an anti-dip layered rock slope as an example, the deformation and failure process of an anti-dip layered rock slope under the earthquake is analyzed by shaking table test. The characteristics of macroscopic deformation and failure of the model slope under the seismic waves with different frequencies, excitation intensities and holding times are observed and recorded. And the deformation and failure modes of the model slope are analyzed as well. The results show that the characteristics of deformation and failure of the slope under the earthquake are closely related to the parameters of earthquake ground motion. The structural plane has a controlling effect on the deformation and failure of the slope. The deformation and failure modes of the anti-dip layered rock slope under the earthquake can be generalized as follows earthquake induction, the top and shallow parts loose deformation, cracks growth and development and interlayer dislocation. The top and shallow parts damage increased; stretch fractures of the slope toe expansion and interlayer dislocation increased; large-scale collapse and scattered rock mass accumulation at the slope toe.

Keywords: a shaking table test; an anti-dip rock slope; characteristics of deformation and failure; failure modes

地震作用下边坡稳定性问题是工程地质研究的重要课题^[1-4]。由地震引发的边坡变形破坏往往会

给人民生命财产和国民经济建设造成严重损害。通过对地震诱发的边坡变形破坏现象的现场调查分

收稿日期: 2017-11-13

修稿日期: 2017-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1704243); 华北水利水电大学研究生教育创新计划项目(YK2016-04)

作者简介: 刘汉东(1963—), 男, 山东菏泽人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学方面的教学与研究工作。E-mail: liuhandong@ncwu.edu.cn

通讯作者: 牛林峰(1992—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为工程地质。E-mail: 2426935127@qq.com

析,发现地震作用下边坡的变形破坏特征与传统重力作用下的变形破坏特征明显不同。地震作用下边坡顶部岩体出现高位临空抛射现象,边坡浅层出现剥皮破坏现象,还有部分边坡出现高速远程碎屑流运动现象^[5-6]。地震作用下边坡变形破坏的危害性和独特性,吸引了大量学者投入到对其的研究之中。Wartman J 等^[7]利用振动台试验研究了黏质边坡在强震作用下的变形破坏模式,认为黏质边坡的变形主要集中在一个或多个高剪切面附近,以深层转动/平动滑移为主。门玉明等^[8]和梁庆国等^[9]采用同样的方法对层状岩质边坡的变形破坏进行了研究,都认为结构面对边坡的变形破坏有着控制性作用。冯文凯等^[10]通过对震区边坡破坏现象的详细调查,分析了双面坡震裂变形的力学机理和变形破坏模式。史石荣等^[11]利用有限元软件 ANSYS 分析了高边坡的动力破坏特性。崔芳鹏等^[12]利用离散元数值模拟技术探讨了地震纵横波对边坡变形破坏的影响。段建等^[13]利用 FLAC 数值模拟技术研究了地震作用下岩土体的破坏特征。

振动台试验具有模型尺寸选择范围大、地震波输入方便、能较真实客观反映边坡渐进破坏过程等优点,是研究地震作用下边坡变形破坏特征的重要手段^[14-15]。本次试验研究采用振动台试验方法,对反倾层状岩质边坡的动力变形破坏特征进行研究。试验仪器采用北京波谱世纪科技发展有限公司开发研制的 WS-Z30-50 精密模拟振动台,振动台台面尺寸为 51.6 cm×38.0 cm,水平最大荷载 35 kg,水平最大位移±8 mm,水平最大加速度 2 g,工作频率为 0.5 Hz~2 500.0 Hz。为了研究模型边坡的变形破坏特征,试验过程中主要输入不同频率、不同振幅和不同持时的正弦波进行激振,促使模型边坡变形破坏,采用笔记、拍照、摄像等手段详细记录试验过程,分析研究模型边坡的动力变形破坏特征及相应破坏机制。

1 试验概况

1.1 相似关系设计

模型试验必须保持模型和实物原型的相似性,进而确保试验结果的可靠性。振动台试验除了应满足静力模型的相似条件外,还要满足动力相关的物理力学参数的相似。在本次试验研究中针对振动台试验的特点,选取部分相关物理力学参数使之相似或接近相似进行试验。根据试验中使用振动台的性能和模型边界条件,选取模型尺寸、密度和弹性模量

作为基本量纲,其相似常数分别取 $S_l = 60$, $S_\rho = 3$, $S_E = 100$,按照 Buckingham π 定理和量纲分析法^[16-17],推导出其余物理量相似常数,模型试验主要相似常数如表 1 所示。

表 1 模型试验主要相似常数

物理量	相似关系	相似常数	备注
长度	S_l	60	控制量
位移	$S_\rho = S_l S_\epsilon$	60	
密度	S_ρ	3	控制量
弹性模量	S_E	100	控制量
黏聚力	$S_c = S_E$	100	
内摩擦角	S_ϕ	1	
应力	$S_\sigma = S_E$	100	
应变	S_ϵ	1	
时间	$S_t = S_\rho^{1/2} S_E^{-1/2}$	10.4	
加速度	$S_a = S_E S_\rho^{-1} S_l^{-1}$	0.6	
速度	$S_v = S_E^{1/2} S_\rho^{-1/2}$	5.8	

1.2 模型边坡的设计与制作

根据野外调查结果和前人总结成果,设计了一个具有反倾层状结构的单面坡(见图 1),设计的反倾层状模型边坡高 0.6 m,长 0.6 m,宽 0.12 m,层面倾角 75°,边坡坡角 60°。模型边坡由尺寸(长×宽×高)为 12 cm×6 cm×2 cm 的模块堆砌而成,模块由石膏比为 1:0.8 的石膏浆液浇筑而成,其基本物理力学参数为:密度为 0.78 g/cm³,抗压强度为 1.06 MPa,抗拉强度为 0.092 MPa,弹性模量为 66.8 MPa,泊松比为 0.22,黏聚力为 172.29 kPa,内摩擦角为 34.9°。模块与模块之间用浓度为 40% 的白乳胶溶液进行粘结,其黏聚力为 115.36 kPa,内摩擦角为 30.6°。在模型边坡与模型箱接触的边界用不加水稀释的白乳胶进行粘结固定,确保在振动过程中模型边坡与模型箱之间不产生相对位移。

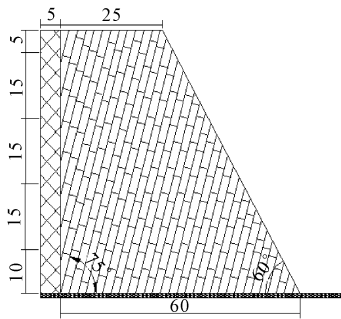


图 1 模型设计(单位:cm)

试验中模型箱采用刚性模型箱,用硬化有机玻璃和钢支架拼接而成,用钢螺栓固定在振动台台面

上。为了减小模型箱的边界效应,在模型箱后壁加衬 5 cm 厚高密度泡沫板,作为吸波材料,减小地震波在边界的反射。同时,在模型箱侧壁涂抹润滑油减小振动过程的侧壁摩擦。

1.3 监测点分布

试验中采用的加速度传感器分为两种类型,一种是振动台系统自带的型号为 YD81D-V 的 ICP 单向加速度传感器,其质量为 25 g,灵敏度为 100 mV/g,频响为 0.5 Hz ~ 10.0 kHz;另一种是 DH8302 动态信号测试分析系统(以下简称动采系统)配套的 IEPE 加速度传感器,其轴向灵敏度约为 100 mV/g,频响为 0.5 Hz ~ 10.0 kHz。考虑到试验条件以及模型完整性等因素,本次试验共布设了 12 个加速度传感器,其中有 5 个属于动采系统加速度传感器,编号为 DC1—DC5;另外 7 个为振动台系统自带加速度传感器,编号为 ZT1—ZT7。各加速度传感器按照图 2 所示,分布在模型边坡的不同部位,监测各部位的动力响应。在模型堆砌过程中,按照监测点的设计分布及各加速度传感器形状大小预留安装孔槽,将加速度传感器安置于相应孔槽,用相同配比的石膏浆液对加速度传感器进行封固,待加速度传感器稳固后进行振动台试验。

1.4 加载方案

试验过程中输入地震波以正弦波为主,输入不同频率、振幅、持时的正弦波,观测边坡模型的动力变形破坏特征。地震波的输入方向为水平方向,试验前先输入加速度峰值为 0.05 g、持时 60 s 的白噪声测试模型边坡初始动力特性,然后输入加速度峰值为 0.10 g 的 5 Hz 正弦波,并依次增加正弦波的加速度峰值和频率进行加载。每次加载完成后,对边坡模型进行白噪声扫描,记录边坡模型的加速度动力响应及频谱特征变化。

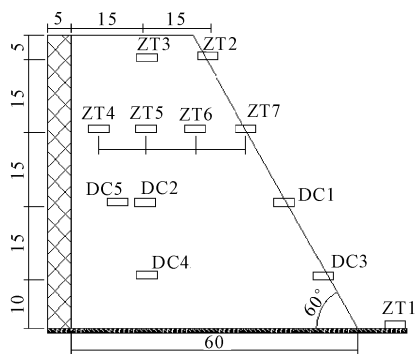


图 2 监测点分布(单位:cm)

2 模型边坡的变形破坏特征

试验加载过程通过笔记、拍照、摄像等形式记录边坡模型宏观变形破坏全过程。对试验过程所得记录资料进行综合分析,发现边坡模型的宏观变形破坏因地震波频率、幅值、持时的不同而有不同的表现形式和表现程度^[8]。现将试验过程中在不同地震动参数地震波作用下边坡模型变形破坏特征总结如下:

(1) 当地震波幅值较小(小于 0.6 g)时,各频率、持时的地震波均不能使模型边坡产生明显变形。当输入地震波频率为 15 Hz,幅值为 0.6 g,持时为 20 s 时,模型边坡顶部及坡肩部位出现明显松动变形,松动范围自坡顶向下延伸 10 cm,如图 3 所示。

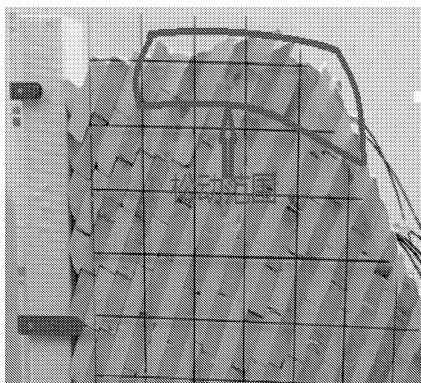


图 3 白噪声加速度时程曲线

(2) 随着振幅的增大和振动次数的增加,模型边坡的松动变形加剧,坡顶及坡肩部位基本呈松散状,松动变形范围向模型边坡下部扩展,在坡体内部向下延伸至距离坡顶 15 cm 处,沿坡表向下延伸至距离坡顶 25 cm 处,如图 4 所示。

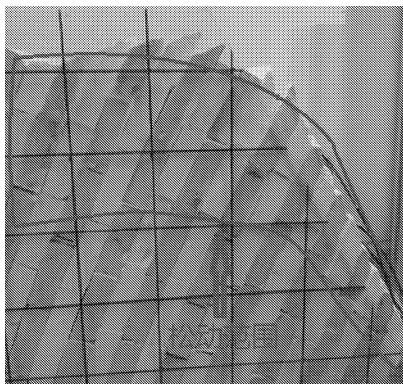


图 4 模型边坡松动变形加剧

(3) 模型边坡松动变形加剧的同时,模型边坡的上部岩体出现倾向临空面的弯曲倾倒变形,在坡肩部位尤为明显,如图 5 所示。

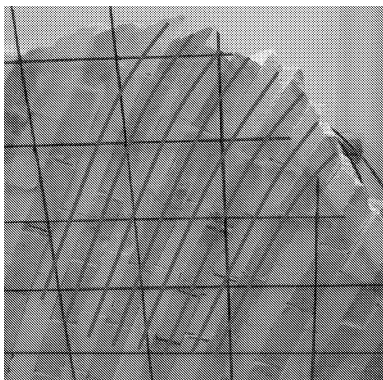


图 5 模型边坡弯曲倾倒变形

(4) 地震波频率小于等于 15 Hz 时,振幅的增加加剧模型边坡的松动破坏,甚至出现顶部块体抛出和浅表部松动掉块的现象,但变形破坏集中在顶部及浅表部并不引起模型边坡的大面积崩塌破坏。

(5) 地震波频率为 20 Hz 时,模型边坡开始出现层间错动现象,形成拉张裂缝,如图 6 所示。随着振幅的增大和振动时间的延长,模型边坡岩块层间错动加剧,拉张裂缝进一步发育,最终引起模型边坡顶部及浅表部岩体的抛起,如图 7 所示。

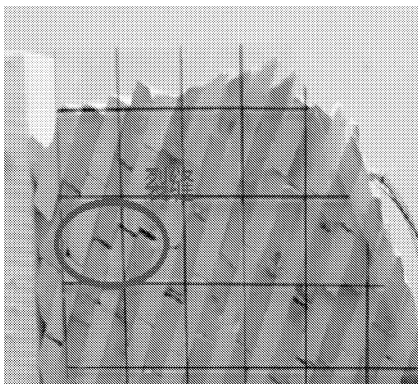


图 6 拉张裂缝发育图

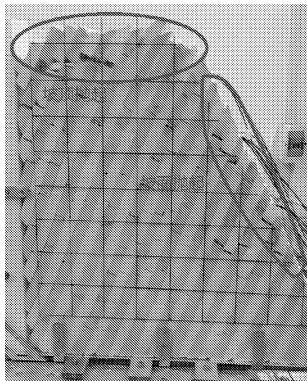


图 7 顶部及浅表部岩体抛起

(6) 坡体中下部接近坡脚处层间错动的进一步加剧,拉张裂缝发育,岩块出现层间脱层现象,向上

顶起脱落,导致坡体大面积的滑动和崩塌(见图 8),出现明显阶梯形破坏面,散落岩体堆积坡脚,模型边坡彻底失稳破坏,如图 9 所示。

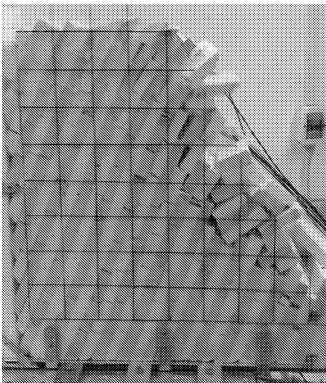


图 8 模型边坡崩塌溃坏

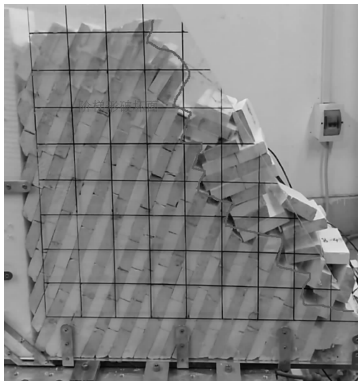


图 9 模型边坡破坏面

3 模型边坡变形破坏机制研究

上节对模型边坡在试验过程中的主要变形破坏特征进行了描述,这些变形破坏特征与冯文凯等^[10]对震区野外调查现象相符。通过对模型边坡变形破坏过程的深入分析,发现其变形演变过程可分为三个阶段:

(1) 顶部及浅表部松动变形破坏阶段。模型边坡的变形破坏首先出现在模型的顶部和浅表部,表现为岩体松动。随着振动的持续,松动范围向下部扩展,坡肩部位产生弯曲倾倒变形,见图 10(b)。振幅的增大会使顶部出现岩体抛出和浅表部掉块的现象,见图 10(c),这与边坡在地震作用下的趋表放大效应和高程放大效应相吻合。但不会引起模型边坡的大面积崩塌溃坏。

(2) 裂缝发育、扩展及层间错动阶段。随着振动的持续和振动强度的增加,在坡体内产生层间相对位移,形成拉张裂缝,见图 10(d),裂缝的产生是地震产生的应力波在结构面相互叠加的结果,造成

局部“拉应力集中效应”，特别是面波效应，是裂缝产生的重要原因。振动持续使得裂缝进一步发育、扩展，层间错动加剧，出现岩体脱层现象，见图 10(e)。

(3) 坡体大面积崩塌溃坏阶段。裂缝的扩展、发育及层间错动的加剧，导致坡脚岩体的脱层掉落，进而快速引发模型边坡的大面积崩塌溃坏，出现阶

梯形破坏面，散落岩体堆积坡脚，见图 10(f)。

从模型边坡的变形破坏演变过程可以看出，结构面对地震作用下的反倾层状岩质边坡变形破坏有着控制作用，这与门玉明等^[8]和梁庆国等^[9]的研究结论相符。地震作用可能造成反倾层状岩质边坡顶部岩体的局部崩塌及浅表部岩体的滑落或大规模的崩塌。

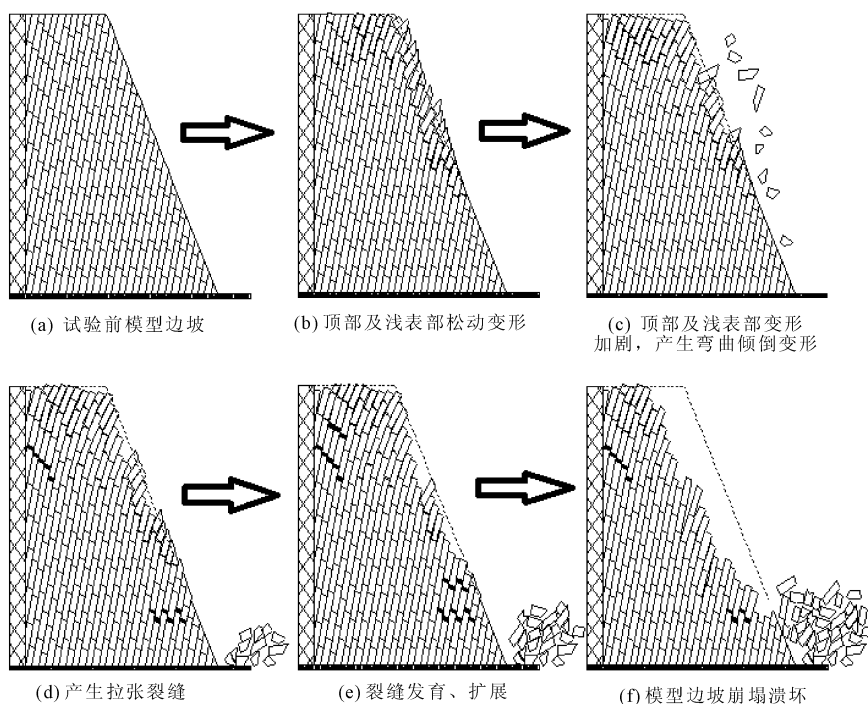


图 10 模型边坡变形破坏示意图

4 结 论

(1) 地震作用下边坡变形破坏特征与地震动参数密切相关，在地震动参数不同的地震波作用下边坡的变形破坏特征有不同表现。结构面对边坡的变形破坏有着控制作用。

(2) 边坡变形破坏首先出现在顶部及浅表部。顶部岩体松动，出现弯曲倾倒变形，有岩体抛出；浅表部岩体松动滑塌。但顶部和浅表部的变形破坏均为局部变形破坏，均未引起边坡的大面积崩塌溃坏。

(3) 随着振动的持续和振幅的增加，坡体出现层间错动现象，拉张裂缝发育，层间错动和拉张裂缝的扩展进一步增加了边坡顶部及浅表部的破坏程度。坡脚拉张裂缝的扩展及岩块的层间错动最终引起边坡大规模崩塌，边坡彻底破坏。

(4) 地震作用下反倾层状岩质边坡的变形破坏过程可概化为：地震诱发——顶部及浅表部的松动变形——坡体裂缝发育、扩展及层间错动加剧——顶部

及浅表部破坏加剧——坡脚拉张裂缝扩展及层间错动加剧，引起边坡大规模崩塌，散落岩体堆积坡脚。

参考文献：

- [1] 姜 彤, 赵彦彦, 王忠福. 边坡动力响应的非线性分析[J]. 世界地震工程, 2010, 26(1): 125-129.
- [2] 刘汉东. 小水电站厂房高边坡岩体稳定性研究[J]. 工程地质学报, 1997, 5(3): 218-223.
- [3] 王衍汇, 倪万魁, 石博溢, 等. 延安新区黄土高填方边坡稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(5): 52-55.
- [4] 朱 庆, 王 浩. 基于 QUAKE/W 的顺层岩质边坡动力响应特征及稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 76-80.
- [5] Nguyen K V, Gatmiri B. Evaluation of seismic ground motion included by topographic irregularity[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2007, 27: 183-188.
- [6] 刘汉香, 许 强, 徐鸿彪, 等. 斜坡动力变形破坏特征的振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 334-339.

(上接第 94 页)

- [7] Wartman J, Seed R B, Bray J D. Shaking table modeling of seismically induced deformations in slopes [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131 (5): 610-622.
- [8] 门玉明,彭建斌,李寻昌,等.层状结构岩质边坡动力稳定性试验研究[J].世界地震工程,2004,20(4):131-136.
- [9] 梁庆国,韩文峰,马润勇,等.强地震动作用下层状岩体破坏的物理模拟研究[J].岩土力学,2005,26(8):1307-1311.
- [10] 冯文凯,黄润秋,许强,等.震裂斜坡形成机理及变形破坏模式研究[J].水文地质工程地质,2009,36(6):42-48.
- [11] 史石荣,陈林杰,余超.基于强度折减法的高烈度地震区边坡稳定性分析[J].重庆交通大学学报,2011,30(2):273-276.
- [12] 崔芳鹏,胡瑞林,殷跃平,等.纵横波时差耦合作用的斜坡崩滑效应离散元分析——以北川唐家山滑坡为例[J].岩石力学与工程学报,2010,29(2):319-327.
- [13] 段建,言志信,郭锐剑,等.地震边坡岩土体破坏特征探讨[J].煤炭学报,2011,36(10):1642-1646.
- [14] 董金玉,杨国香,伍法权,等.地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究[J].岩土力学,2011,32(10):2977-2982.
- [15] 杨国香,叶林海,伍法权,等.反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(11):2214-2221.
- [16] 袁文忠.相似理论与静力学模型试验[M].成都:西南交通大学出版社,1998:15-40.
- [17] 林皋,朱彤,林蓓.结构动力模型试验的相似技巧[J].大连理工大学学报,2000,40(1):1-8.