

文章编号: 1000-7598-(2008) 08-2097-06

桩板结构路基动力模型试验研究

詹永祥^{1, 2}, 蒋关鲁², 牛国辉², 魏永幸³

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400030; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 3. 铁道第二勘察设计院, 成都 610031)

摘 要: 桩板结构路基是高速铁路无碴轨道的一种新的路基结构形式, 基于 Buckingham π 定理, 采用量纲分析方法, 确定了桩板结构路基模型的动力相似常数, 通过室内大比例动态模型试验研究, 分析了在循环加载的条件下浸水前、后桩板结构路基的动态力学特性。试验结果表明, 路基动应力沿深度逐渐衰减, 激振频率对动应力的影响不太明显; 路基边坡浸水后, 在相同加载频率下, 动应力比浸水前略有增大; 桩基加深了路基的动力影响范围, 改善了路基土体部分的受力状态; 桩底持力层受动力影响较大, 是动力设计的关键环节之一。

关 键 词: 高速铁路; 无碴轨道; 桩板结构路基; 动力模型试验; 动应力

中图分类号: U 213.1

文献标识码: A

Model experimental research on dynamic performance of pile-plank embankment

ZHAN Yong-xiang^{1, 2}, JIANG Guan-lu², NIU Guo-hui², WEI Yong-xing³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. The Second Railway Survey and Design Institute, Chengdu 610031, China)

Abstract: The pile-plank embankment is a kind of new-type of ballastless truck in high-speed railway. Based on the theorem of Buckingham π , the dimensional analysis method is applied, and the dynamic model similitude constant of pile-plank embankment is determined. Dynamic characteristics of pile-plank embankment before and after soaking in water are analyzed by the large scale model test under dynamic loading. The test results indicate that dynamic stress of the soil decreases with the increase of vertical depth, and it is less affected by loading frequency. After the roadbed side-ascent soaking in water, at the same loading frequency, dynamic stress is slightly increased compared to embankment before soaking in water. Pile structure expands the depth of the dynamic response of roadbed and improves the stress of the roadbed soil. Bearing stratum at pile-bottom is greatly affected by dynamic loading; and it is one of the key of the dynamic design.

Key words: high-speed railway; ballastless truck; pile-plank embankment; dynamic model test; dynamic stress

1 引 言

桩板结构路基是高速铁路无碴轨道的一种新的结构形式, 它由下部钢筋混凝土桩基与上部钢筋混凝土承载板组成, 承载板直接与轨道结构连接^[1, 2], 综合了板式无碴轨道或双块式轨枕埋入式无碴轨道结构与桩基础各自的特点, 充分利用桩-板-土三者之间的共同作用原理来满足无碴轨道的强度与沉降变形要求。由于土与结构之间的共同作用问题相当复杂, 在数值分析中通常存在设计参数难以准确选取, 计算结果不可靠的问题, 为了进一

步深入探讨桩板结构路基在高速列车荷载下的动力特性, 在理论分析的基础上需要进行试验研究。

本文结合铁道部科技计划发展项目“遂—渝线无碴轨道线下工程关键技术试验研究”专题“遂—渝线高速铁路桩板结构路基”, 率先在国内开展了桩板结构路基的动力模型试验研究, 探讨桩板结构路基在高速列车荷载作用下的动力特性, 为检验桩板结构路基理论分析提供了科学依据。

2 工程概况

模型试验以遂—渝线无碴轨道桩板结构路基

收稿日期: 2006-11-17

基金项目: 铁道部科技研究发展计划项目 (No.2005K004-C (G))。

作者简介: 詹永祥, 男, 1979 年生, 博士、讲师, 从事岩土工程、高速铁路路基工程研究。E-mail: zhanyongxiang@126.com

为工程背景,重庆枢纽遂—渝引入线 Dk132+486~+611 段路基路堤,路堤最大填高 14 m,已按原有碴轨道技术标准采用川东红层泥岩填筑完毕,当设计方案改有碴轨道为无碴轨道后,路基工后沉降量难以达到铺设无碴轨道的要求。经多方案比较,确定采用桩板结构加固,路基边坡率为 1:1.5,路基填料和地基土层的物理力学参数见表 1。

路基纵向分为跨越涵洞段和一般路基段、跨越涵洞段共有 2 处,其纵向桩间距为 10.0 m,一般路基段采用纵向桩间距为 5.0 m。设计的结构尺寸:(1) 轨道结构采用双块式轨枕埋入式无碴轨道^[3],道床板尺寸为:长 4.856 m,宽 2.800 m,厚 0.350 m,采用 C40 混凝土;(2) 钢筋混凝土承载板尺寸为:长 30.00 m,宽 4.40 m,高 0.60 m,采用

表 1 路基填料和地基土层物理力学参数

Table 1 The physical and mechanical parameters of the filling and groundsill

名称	川东红层 填料	流塑软 黏土	粉质 黏土	硬塑粉 质黏土	泥岩夹 砂岩
厚度 /m	6.0~8.0	1.0	1.7	2.3	持力层
密度 /g·cm ⁻³	2.16	1.83	2.00	1.97	2.20
压缩模量 /MPa	70.00	2.51	4.49	5.25	100.00
泊松比	0.20	0.40	0.35	0.35	0.20
黏聚力 /kPa	30.00	7.20	32.07	26.08	20.00
内摩擦角 / (°)	30.00	5.83	11.05	17.49	55.00
摩擦系数	0.4	0.2	0.3	0.3	0.5

C40 混凝土;(3) 桩为挖孔灌注桩,采用 C40 混凝土,桩直径为 1.2 m,路基横向采用 2 排桩,桩间距为 2.5 m,入泥岩夹砂岩层 2.0 m。桩板结构路基布置见图 1。

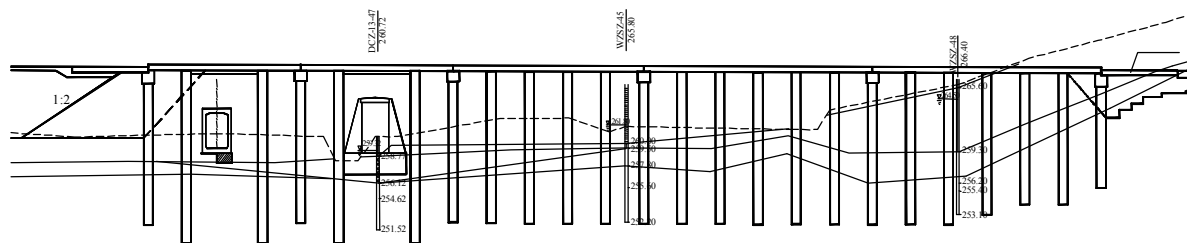


图 1 原型桩板结构图

Fig.1 The plane design of the prototype pile-plank embankment

3 动力模型试验相似设计

本文仅对一般路基段做动力模型试验研究。为验证模型代原型的有效性,二者之间必须满足一定的相似关系。本试验采用缩尺模型,考虑了模型相似和土层边界条件模拟这两个公认的难题,对试验模型进行包括几何形状、材料特性、边界条件、外部荷载和初始动力条件等在内的相似设计^[4-6]。由于室内模型空间的限制,在尽量保证结构的受力机制一致性的情况下,取 2 跨桩板结构路基为研究对象,如图 2 所示。模型原型几何相似比为 1:12,质量密度相似比为 1:1,土体、混凝土板和桩的弹性模量相似比为 1:1,模型的配筋率与原型相同。进

而根据 Buckingham π 定理导出其他物理量的相似常数见表 2。

表 2 桩板结构路基模型试验的动力相似常数

Table 2 The similitude constant of dynamic model test for the pile-plank embankment

物理量	相似常数
几何尺寸 L /m	$C_L = 0.083$
质量密度 C_ρ /kg·m ⁻³	$C_\rho = 1$
弹性模量 C_{E_d} /Pa	$C_{E_d} = 1$
泊松比 μ_d	$C_{\mu_d} = 1$
振动(加载)频率 ω (1/s)	$C_\omega = C_L^{-1/2} = 3.464$
阻尼系数 R	$C_R = C_L^{5/2} = 0.002$
上部路基结构自重 P /N	$C_P = C_L^3 = 0.000\ 58$
有效土压力 σ'_v /Pa	$C_{\sigma'_v} = C_L = 0.083$
重力加速度 g /m·s ⁻²	$C_g = 1$
输入振动加速度 A /m·s ⁻²	$C_A = 1$
输入振动持时 T /s	$C_T = C_L^{1/2} = 0.289\ 1$
动力响应应力 σ_d /Pa	$C_{\sigma_d} = C_L = 0.083$
动力响应角位移 θ	$C_\theta = 1$
动力响应线位移 S_d /m	$C_{S_d} = C_L = 0.083$
动力响应应变 ε_d	$C_{\varepsilon_d} = 1$
动力响应速度 v /m·s ⁻¹	$C_v = C_L^{1/2} = 0.289$
动力响应加速度 a /m·s ⁻²	$C_a = 1$
动力响应孔隙水压力 u /Pa	$C_u = C_L = 0.083$

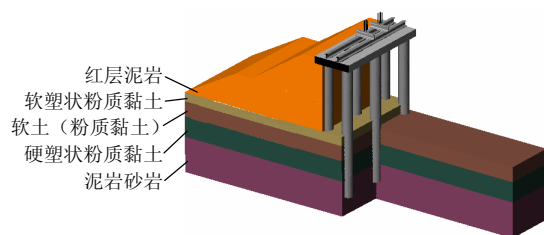


图 2 桩板结构路基模型剖面图

Fig.2 The section plane of pile-plank embankment

4 模型的设计与制作

4.1 地基、路基土填筑方法

模型路基地基均采用现场取土制作，将地基土按 10 cm 分层填土，软塑状粉质黏土厚 8.3 cm，软土（粉质黏土）厚约为 14.2 cm，硬塑状粉质黏土厚约 19.2 cm，泥岩夹砂岩取 75.0 cm，并逐层夯实，使其密度达到天然地基土状态。路基填土为川东红层厚 116.7 cm，按 5 cm 分层填筑夯实，使其密度达到要求。试验中制备及填筑地基土、路基土的基本要求是：控制相对密度，即控制其孔隙比；保证试样内部的均匀性。

4.2 桩、承载板试验模型制作

模型桩采用 C25 原型混凝土预制钢筋混凝土桩，桩径为 10.0 cm，桩长 175.0 cm；桩横向间距为 20.8 cm，桩纵向间距为 41.7 cm，入持力层 16.7 cm。预制过程中在桩顶设置预埋钢筋以便与现浇承载板相连，在中间两根桩的底部预留埋设土压力盒的空间。桩身进行打磨刮毛处理，模拟现场挖孔灌注桩的侧摩阻力，地基土填筑至 58.3 cm 高度时要确立桩位，并保证桩的垂直度，然后利用固定架将其固定，再按填土要求分层填土并夯实。

承载板模型采用 C40 原型混凝土制作，尺寸（长×宽×高）为 94.4 cm×36.7 cm×5.0 cm，将承载板的钢筋骨架布置好并与桩端预留钢筋焊接，支立模板，灌注混凝土。

4.3 轨道结构的模拟

模型轨道板采用 C40 原型混凝土制作，尺寸（长×宽×高）为 94.4 cm×23.3 cm×2.9 cm，与其下承载板整体浇筑，在浇筑时预埋固定螺栓用以固定钢轨。轨道采用 2 根长 110.0 cm 的 8 型小钢轨按间距 12.0 cm、轨下垫橡胶垫、并用预先埋设在混凝土板中的螺栓和扣件连接固定钢轨，以确保满足钢轨的约束条件。

4.4 边界条件的模拟

将桩板结构按平面应变问题考虑，在线路纵向设置钢板挡墙，在线路横向，地基土边界处设置钢板挡墙来模拟边界条件。

5 试 验

用激振器加载法模拟列车荷载，采用人工洒水模拟降雨，研究浸水前后路基在列车循环荷载作用下的动力特性；试验采用的测试仪器元件主

要有 BY-2 型土压力传感器，量程为 0.2 MPa 和 0.3 MPa，非线性小于±0.5 % FS，输出灵敏度为满量程时 1 mV/V，数据采集系统采用南京汽轮高新技术开发公司制造的 QL-116 型随机信号与振动分析系统 CRAS，YE3818 型动态应变仪，江苏扬州无线电二厂的 YE5853、YE5853A 型电荷放大器，丹东市电器仪表厂的 SS-2B 型数字式钢弦频率接收仪。模型试验的激振荷载为正弦波，列车荷载的大小和运行速度通过伺服激振器的荷载输出和频率来反映。试验时激振器分别在桩顶和跨中激振，各激振 20~30 万次，伺服激振器的荷载大小 27.5 kN。激振位置见图 2。在路基中分层埋设了土压力传感器，模型尺寸及测点仪器布置见图 3。试验加载工况见表 3。

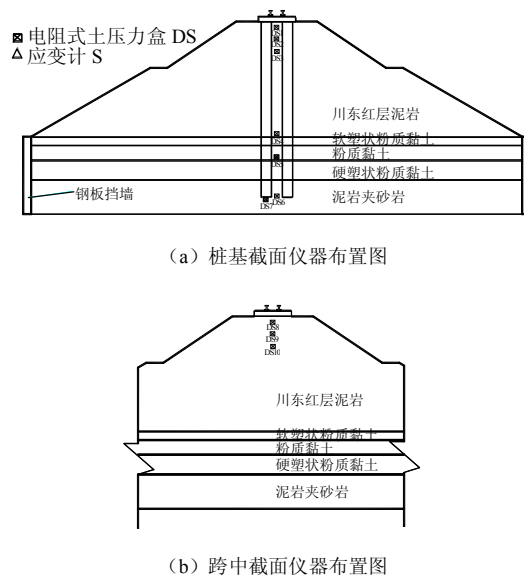


图 3 模型尺寸及测点仪器布置图

Fig.3 The dimension and measured spots of model

表 3 试验加载工况
Table 3 Load case of test

加水前后	工况编号	激振器位置	激振频率 /Hz
浸水前	1	在桩顶激振	5
	2	在跨中激振	5
	3	在桩顶激振	10
	4	在跨中激振	10
浸水后	5	在桩顶激振	5
	6	在跨中激振	5
	7	在桩顶激振	10
	8	在跨中激振	10

路基边坡初始含水率为 6.11 %，边坡浸水后距离坡脚 37，108，158 cm 和 210 cm 处选取 4 点取样，含水率沿垂直边坡方向深度的变化如图 4 所示。

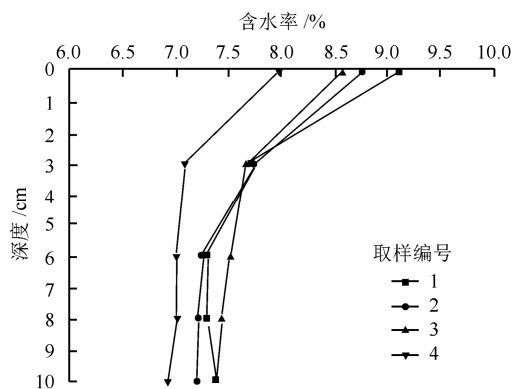


图4 路基边坡含水率沿深度变化

Fig.4 Change of moisture at the bedroad slope

6 试验结果及分析

6.1 承载板应力分析

以路基横向第1排桩所在的桩基截面为坐标起点,在承载板上沿线路纵向每半跨(0.208 m)距离贴一应变片,测得的应变换算为承载板的应力分布如图5所示。由图可见,在跨中激振时承载板跨中的挠曲变形大,应力也大,沿桩顶和其他跨方向迅速衰减;在桩顶激振时,受激振头尺寸效应的影响,在临近激振头的跨中处承载板也产生了变形,而在桩顶处承载板由于受桩的支撑作用,挠曲变形很小。路基边坡浸水及激振频率的改变对板的动

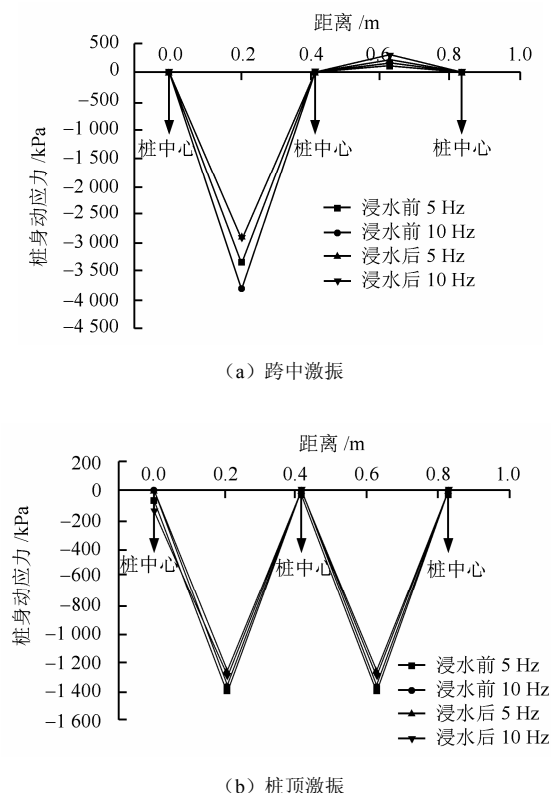


图5 承载板动应力分布规律

Fig.5 Dynamic stress on bearing plank

应力影响较小。

6.2 桩板结构路基动应力分析

如图6所示,同一位置激振时桩间土动应力响应曲线沿深度变化规律趋于一致,桩间土的动应力在路基填土表层较小,一般只有0.5~2 kPa之间,而在靠近桩底处较大,达到2.5~6 kPa,桩底附近桩间土动应力的产生,是由桩的振动引起的,说明桩的存在对桩间土动应力有影响,加大了路基土动应力的传递深度,改善了路基土体部分的受力状态,但动应力的值不大,对路基不会产生不良影响^[7],用川东红层作为桩板结构路基填料不需要做进一步改良处理^[8]。在承载板表面以下0.25 m附近,桩间土动应力由于桩身弯曲变形影响,相对较大。当在桩顶激振时,桩间土动土压力沿深度有增大趋势,桩底处桩间土动压力最大。路基边坡浸水后,桩间土动应力比浸水前略有增大,动应力大小受激振频率的影响较小。

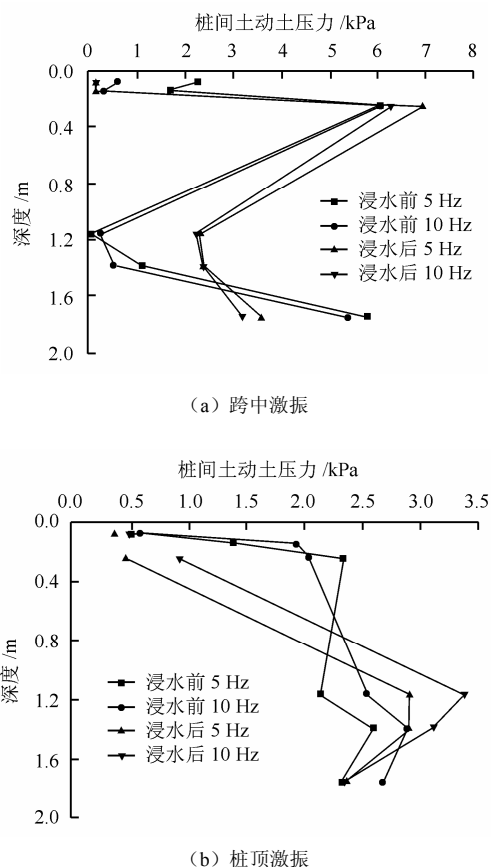


图6 桩间土动应力分布规律

Fig.6 Dynamic stress at soil between of piles

图7反映了跨中板下土体动力分布规律,可见跨中截面板下土体的动压力沿深度呈衰减趋势,但受桩身变形的影响,在承载板表面以下0.25 m附近略有增加,变化规律趋于一致。浸水后跨中承载

板下土体的动应力比浸水前增大，激振频率对动应力的影响不显著。

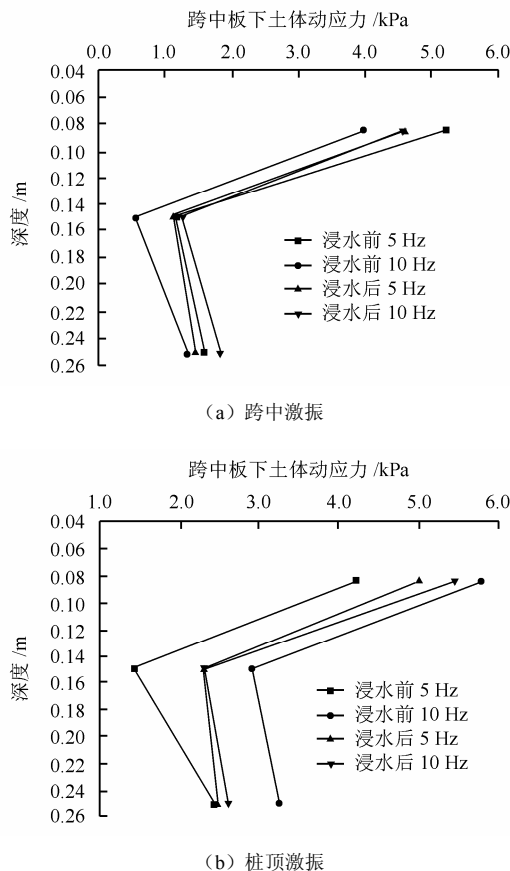


图 7 跨中板下土体动应力分布规律

Fig.7 Dynamic stress at soil under middle-span plank

6.3 桩底应力与桩间土应力比

将测试的动土压力相似至原型，得到桩底土与桩间土之间的动应力比值见表 4。

表 4 桩底应力与桩间土应力比
Table 4 Stress ratio of pile-top and the soil between the pile

状态	激振频率及 激振位置	应力 /kPa		
		DS7	DS6	应力比
浸水前	5 Hz, 跨中	179.430	5.810	30.9
	5 Hz, 桩顶	230.180	2.317	99.3
	10 Hz, 跨中	158.430	5.400	29.3
	10 Hz, 桩顶	251.376	2.680	93.8
浸水后	5 Hz, 跨中	131.611	3.600	36.5
	5 Hz, 桩顶	224.90	2.368	94.8
	10 Hz, 跨中	119.790	3.200	37.4
	10 Hz, 桩顶	228.460	2.335	97.8

从表 4 可以看出，当在跨中激振时桩土应力比在 29.3~37.4 之间；当在桩顶激振时桩土应力比在 93.8~99.3 之间，说明动应力由桩传递到路基深处，桩底持力层受激振位置影响较大，是动力设计的关

键环节之一。

7 结 论

本文结合遂—渝线无碴轨道桩板结构路基，通过大比例动态模型试验，分析了路基边坡浸水前后，在不同加载频率、不同激振位置下桩板结构路基动应力的变化规律，得出以下结论：

(1) 承载板的应力受激振位置的影响较大，说明在列车荷载下承载板的挠曲应力在列车到达改点时响应值最大，在列车离开该点后应力迅速衰减。

(2) 研究的频率范围内加载频率对土体动应力的影响不太明显，说明列车行驶速度的改变对结构的动应力影响较小。路基边坡浸水后，在相同加载频率下动应力比浸水前增大。由于土体的阻尼和扩散作用，土体的动应力响应随着深度的增加而呈衰减趋势，但受桩身变形的影响，会在局部略有增加。桩对土体的动力特性有一定的影响，加深了路基的动力影响范围，但改善了路基土体的受力状况，最大动应力也得到了有效的抑制；桩底持力层受动力影响较大，是动力设计的关键环节之一。

基于模型试验的限制，上述所得到的各项参数如何和现场实际相匹配，是一项十分复杂的研究工作，今后将在遂—渝铁路无碴轨道桩板结构路基现场行车试验结果的基础上，对桩板结构路基的动力特性作更进一步地研究。

参 考 文 献

- [1] 蒋关鲁, 詹永祥, 魏永幸. 无碴轨道桩板结构路基设计理论及计算理论的探讨[C]//铁路客运专线技术交流会论文集. 武汉: 铁道部发展计划司, 2005: 398—401.
- [2] 詹永祥, 蒋关鲁, 魏永幸. 无碴轨道桩板结构路基的设计及计算[C]//第二届中国交通土建工程学术交流会论文集. 成都: 中国铁道学会, 2006: 723—729.
- [3] 日本鉄道総合技術研究所. 基礎構造物——抗土圧構造物[M]. 日本: 丸善株式会社出版, 1997.
- [4] 吕西林, 陈跃庆. 结构-地基动力相互作用体系振动台模拟试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 30—36.
LÜ Xi-lin, CHEN Yue-qing. Study of dynamic similitude theory of soil-structure interaction system[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2000, 20(4): 30—36.
- [5] 凌贤长, 王臣, 王成. 液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用振动台试验模型相似设计方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 450—456.