

# 多年冻土区桥梁桩基础地震响应的模型 振动试验研究

吴志坚<sup>1,2,3</sup>, 王平<sup>1,3</sup>, 霍元坤<sup>1</sup>, 陈拓<sup>1</sup>

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃兰州 730000;

3. 中国地震局地震预测研究所兰州创新基地, 甘肃兰州 730000)

**摘要:**以青藏铁路高温不稳定多年冻土区“以桥代路”工程——清水河特大桥的桩基础为研究目标,在负温条件下对该桥梁桩基础结构的缩尺模型进行了地震荷载作用的模型振动试验,研究了地震荷载作用下桩—冻土相互作用,分析了结构的地震响应特征,明确了桩体动荷载对桩周冻土地温 and 应变的影响规律,最后对地震荷载作用下高温不稳定多年冻土区桥梁桩基础的稳定性作出了评价。

**关键词:** 多年冻土; 桩基础; 地震响应; 振动台试验

**中图分类号:** TU435; P642.14

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0844(2009)04-0319-08

## Study on Shaking Table Test for Seismic Response of Pile Foundation of Bridges at the Permafrost Regions

WU Zhi-jian<sup>1,2,3</sup>, WANG Ping<sup>1,3</sup>, HUO Yuan-kun<sup>1</sup>, CHEN Tuo<sup>1</sup>

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, 730000, China;

2. State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering, Cold and Arid Region Environmental and Engineering Institute, CAS, Lanzhou 730000, China; 3. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou, 730000, China)

**Abstract:** Based on the research project of pile foundation of the Qingshui River Bridge, which is a typical engineering named by "bridge instead of road" and locates at high temperature and instability permafrost region along the Qinghai-Tibet Railway. Under seismic dynamic loading, the shaking table test for the scale model of the piles is carried out when the soil temperature around model piles is below 0°C. The interaction between piles and frozen soil under seismic loading is researched, and the characteristics of seismic response of the pile structure are analyzed. Moreover, that the effect law of dynamic loading response of the piles on temperature and strain around piles is achieved, and the stability of the pile foundation of bridges at high temperature and instability permafrost region is evaluated as well.

**Key words:** Permafrost; Pile foundation; Seismic response; Shaking table test

### 0 引言

纵贯我国青藏高原多年冻土区的代表性工

程——青藏铁路格拉段全长 1 142 km,通过多年冻

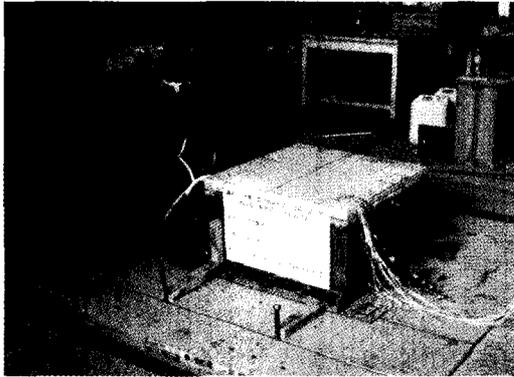
土地段 546.41 km,其中在高温极不稳定多年冻土

收稿日期:2009-10-27

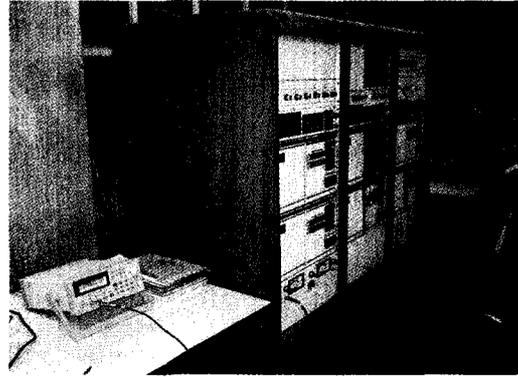
基金项目:中国地震局地震预测研究所基本科研业务费资助项目;中国科学院西部行动计划(二期)项目课题(KZCX2-XB2-10);冻土工程国家重点实验室开放基金课题(SKLFSE200801);中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2009047

作者简介:吴志坚(1974-),男(汉族),安徽太湖人,博士,副研究员,1995年本科毕业于西安地质学院应用地球物理学专业,主要从事岩土工程地震方面的研究工作。

区(多年冻土年平均地温 $-0.5^{\circ}\text{C}$ )铁路大量采用了“以桥代路”的桥梁工程结构形式通过,总长度约120 km。这种“以桥代路”工程桩基础的稳定性对青藏铁路的安全运营至关重要。冻土区桩基础稳定性涉及因素较多,其中最为主要的是桩周温度场及其对桩承载力的影响。在不受外界扰动时,相对于融土,冻土地基是有利于抗震的<sup>[1-2]</sup>。然而在气候变暖和人为工程扰动的情况下,多年冻土会发生退化,冻土的强度会降低,特别是抗压强度和剪切强度将会降低更多<sup>[3-5]</sup>。近年来的室内试验研究发现,动荷载作用下会导致冻土试样温度的上升<sup>[6]</sup>,而冻土温度上升导致的冻土力学特性尤其是其强度的降低将会极大地影响桩基承载性能及其稳定性。在地震荷载作用的叠加效应之下,由于桩身与冻土之间强度的差异以及桩基础上部结构的约束条件,将会导致桩—冻土正常冻结性态、桩周冻土地温场的异化,从而影响桩基础的承载力与其稳定性。



(a)



(b)

图1 振动台台体与恒温模型箱(a)和振动台控制系统(b)

Fig. 1 The shaking table body and thermostated container (a) and control system of shaking table(b).

青藏铁路清水河特大桥全长11.7 km,为8 m跨预制简支梁。桩基为大直径钻孔灌注桩,桩间距3.3 m,直径1 m,桩长25 m,入土深度22 m。由于受到试验条件的制约和要达到对模型土体负温的控制精度,负温条件下的振动台试验很难达到较大的模型缩尺比例。本次试验专门制作了模型恒温箱,箱体外形尺寸 $80\text{ cm}\times 80\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ ,内径为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 35\text{ cm}$ ,箱四周内衬15 cm厚绝热保温材料,箱底和箱盖为内置专供低温酒精循环的盘旋铜管(模型箱外形见图1)。箱内土体温度控制采用恒温冷浴循环系统,各项指标如表1所示。模型振动试验分别对单一冻结土体模型和桩结构的冻结土体模型进行,其中模型一为单纯冻结土体,土体尺寸为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 30\text{ cm}$ ;模型二为缩尺的桩基础结构

基于这一工程和气候背景,本研究以青藏铁路高温极不稳定多年冻土区“以桥代路”工程清水河特大桥的桩基础为研究对象,创新性地开展负温条件下的模型振动台试验,监测该桥梁桩基础结构的1/100缩尺模型结构在地震荷载作用下的桩—冻土相互作用,以及桩体动荷响应对桩周冻土地温场和应变场的变化规律,分析桩—土结构的地震响应特征,并对地震荷载作用下高温极不稳定多年冻土区桥梁桩基础的稳定性作出评价。

## 1 模型振动试验

### 1.1 振动台与模型

振动台模型试验使用西安建筑科技大学的单向电液伺服振动台(日本鹭宫株式会社生产)(图1)。该振动台台面尺寸为 $2\text{ m}\times 2.2\text{ m}$ ,最大载荷4.5 t,最大加速度1.0 g,最大速度100 cm/s,可输入规则波和不规则波,有效频率范围为0.5~20 Hz。

模型,试验模型桩参数为:桩长25 cm;间距3.3 cm;直径3 cm;承台厚1.5 cm。桩体强度按照混凝土C30标配,水泥与砂比例为1:3(模型尺寸见图2)。试验用土取自青藏铁路清水河特大桥钻探现场。土的含水率根据现场试验参数(20%)配制,试验后采用烘干法进行了含水率测试,模型一含水率为21%,模型二含水率为20%。模型一土体未进行压实处理( $\rho=21.5\text{ kN/m}^3$ ),模型二土体进行了夯实处理( $\rho=26.0\text{ kN/m}^3$ )。

### 1.2 测试方法与测点布置

振动模型试验分别对模型一进行了温度和加速度的测试,对模型二进行了温度、加速度和应变的测试。测点布置见图2。

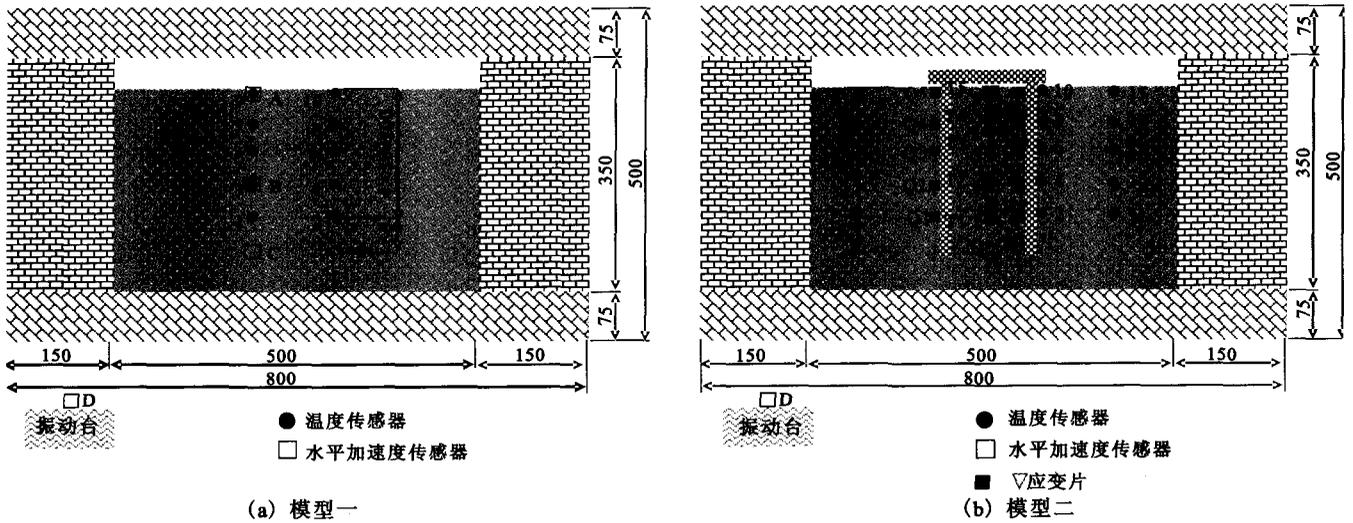


图2 试验模型与传感器布置

Fig.2 Experimental models and layout of transducers.

表1 恒温冷浴循环系统的指标参数

型号	杭州雪中炭 XT5702LT/B-R30
外形尺寸	600(W)×730(D)×980(H) mm
温度范围	-30~+90 °C
温度波动度	±0.1~0.5 °C(依工作介质和应用而异)
加热功率	3500 W
制冷量(20℃室温)	+20 °C, 3000 W; 0 °C, 1900 W; -20 °C, 900 W
循环泵最大压力	1.0 bar
压力循环泵	压力 0.6 bar; 流量 17 L/min
工作方式	连续
电源	AC380 V±10%, 50 Hz

温度传感器使用中国科学院冻土工程国家重点实验室研制的热敏电阻式温度传感器,其最小温度分辨率为0.02 °C;温度数据采集仪使用 datataker DT500,最小采样间隔为1 s;加速度传感器使用 PCB3801 系列单轴电容加速度传感器;应变传感器为日本产防水型 Kyowa KFW 应变片(水下 10 MPa, 100 小时),敏感栅长度 5 mm,测量元件电阻

为 120 欧姆;加速度及应变采集设备为 INV306 智能信号采集处理分析仪。

1.3 加载工况与波形

本次模拟地震试验为单向水平输入模拟地震试验,模型一与模型二分两次单独上台完成振动。两个模型均进行 7 度基本地震(0.10 g)、8 度基本地震(0.20 g)、9 度基本地震(0.40 g)作用下的振动试验。试验工况见表 2<sup>[7]</sup>。在试验前两模型均进行了 72 小时的负温冻结,并且在箱内土体整体温度在 -0.5 °C 至 -1.5 °C 之间稳定 6 小时后方进行加载试验。在振动荷载施加过程中恒温冷浴系统保持工作,以保证加载过程中恒温箱内土体温度不至受到外界环境温度的影响。考虑到避免加载前后不同工况之间温度变化的影响,每种加载工况间隔保持 5 min。

表2 加载工况

序号	工况	台面输入波形	台面输入峰值加速度
1	Ⅶ度基本地震(0.10 g)	青藏人工波	26 gal
2		正弦波(频率范围 0.1~20 Hz)	100 gal
3		正弦波(频率范围 0.1~20 Hz)	200 gal
4	Ⅷ度基本地震(0.20 g)	汶川波	184.9 gal
5		青藏人工波	167 gal
6	Ⅸ度基本地震(0.40 g)	正弦波(频率范围 0.1~20 Hz)	400 gal
7		青藏人工波	326 gal

(1) 正弦波(频率范围 0.1~20 Hz)波形

正弦波的频率分别为 0.5、0.7、0.9、1.0、3.0~20.0 Hz,每个频率 10 个波形(Δt = 0.1 s),三种正弦波的最大加速度幅值分别为 100 gal(图 3)、200 gal、400 gal。

(2) 青藏人工波波形及频谱特征

为青藏铁路安评用 50 年超载概率分别为 2%、10%、63% 的人造地震动时程(李小军教授提供),其对应最大加速度分别为 26 gal、167 gal(图 4(a))、326 gal。图 4(b)为青藏人工波的频谱特征。

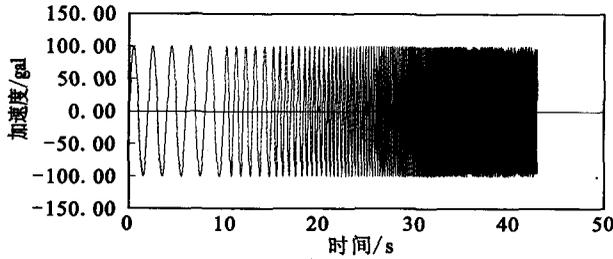
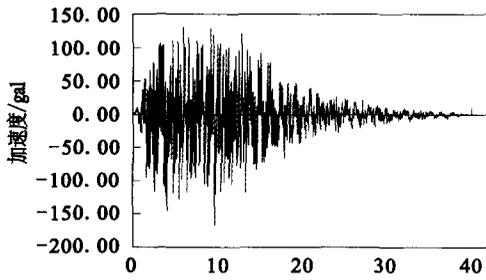
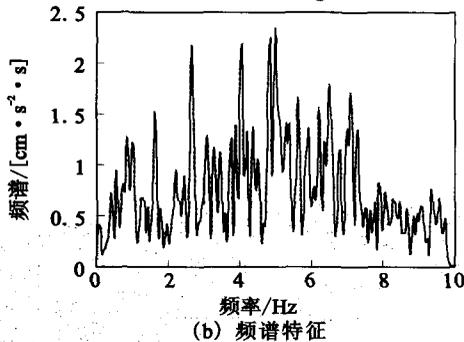


图3 正弦波波形例(100 gal)

Fig.3 Waveform of Sine Wave(100 gal).



(a) 波形 (167 gal)



(b) 频谱特征

图4 青藏人工波波形和频谱特征

Fig.4 Waveform of Qinghai-Tibet artificial wave(162 gal) and spectrum signature analysis.

### (3) 汶川波波形及频谱特征

为汶川地震甘肃省武都地震台记录的EW向加速度记录(图5)。

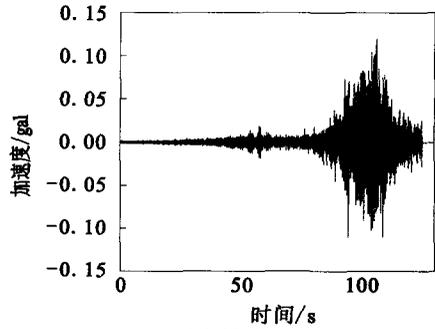
为了监测地震荷载作用下桩基础与地基土体之间的温度变化、地基土体与结构的动态响应,本试验对振动模型的地基、结构的加速度响应,地基土体、地基与结构间的温度响应,地基、结构的应变响应分别进行了观测。

## 2 试验结果

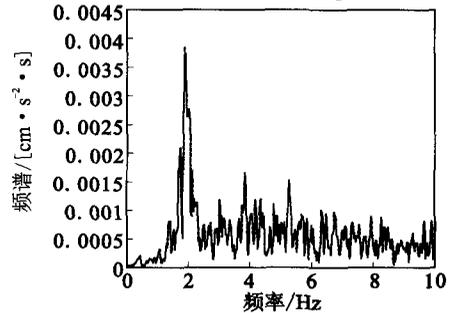
### 2.1 加速度响应

#### 2.1.1 模型的共振特征

为把握地基的固有振动特征,对模型一、模型二分别施加频率变化的(0.5~20 Hz)三种幅值的正弦波荷载(100 gal,200 gal,400 gal),分析地基的加



(a) 波形 (167 gal)



(b) 频谱特征

图5 汶川波波形和频谱特征

Fig.5 Waveform of Wenchuan earthquake(167 gal) and its spectrum signature analysis.

速度响应,得到地基的共振曲线。图6为施加100 gal正弦波荷载时模型底板(输入波)与模型顶部加速度传感器记录的加速度波形。从图中可以看出,模型一在高频域明显增幅,模型二虽有整体增幅,但和频率的关系并不显著。

图7为模型地基内各观测点对应不同幅值正弦波荷载的加速度增幅率与频率的关系(共振曲线)。可以看到模型一地基存在明显的共振特征,地基的卓越频率均在15 Hz以上;模型二在0.5~20 Hz范围未见共振特征,可以认为因地基土体的加固(刚度的提高)其共振特征向高频域偏移。

图8为三种荷载情况下模型顶部加速度观测点的共振曲线,该图显示随着输入地震动的增加,共振频率的降低和增幅倍率的减小均表明模型地基存在着非线性特征。

#### 2.1.2 模型动响应特征

图9为模型一和模型二各加速度传感器在3种正弦波(100 gal,200 gal,400 gal)与青藏人工波、汶川波荷载作用下加速度最大值的分布。从图中可以看出,在水平荷载作用下地基模型呈现剪切变形响应。

### 2.2 温度响应

#### 2.2.1 模型一地基土体温度响应

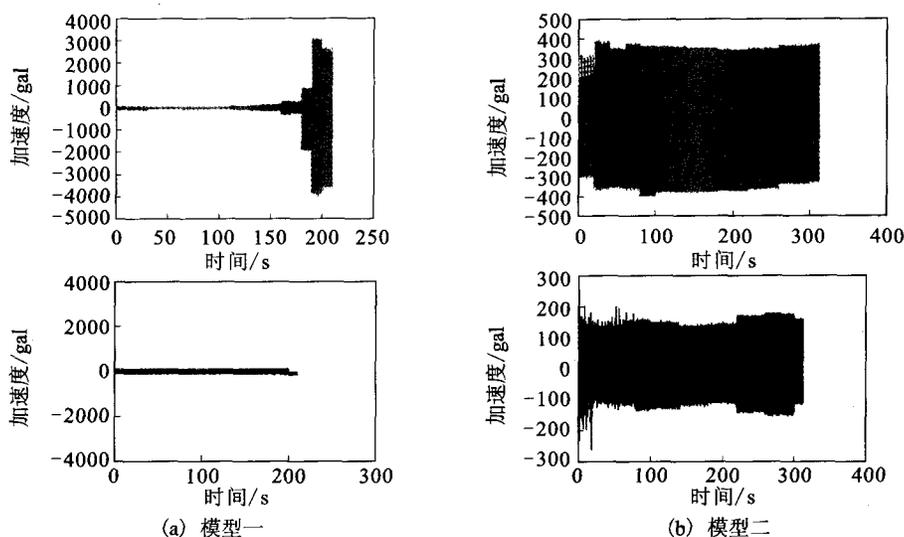


图 6 模型底板输入波(100 gal)(下图)与模型顶部加速度传感器的加速度波形(上图)  
 Fig. 6 Acceleration waveforms of the motherboard input(100 gal)(lower graph) and one of the top acceleration transducer (higher graph).

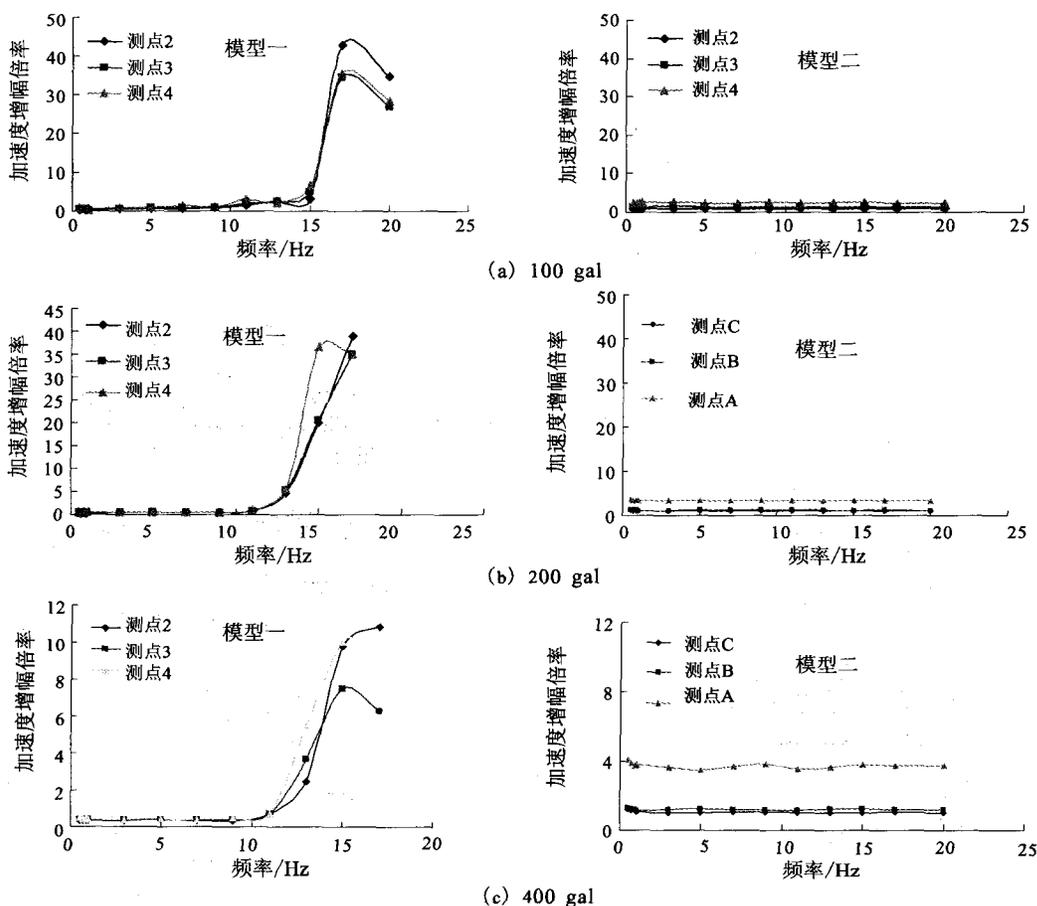


图 7 不同正弦波荷载作用下模型一和模型二地基的共振曲线

Fig. 7 Foundation resonance curves of model one and two under different sine wave load.

图 10 为三种正弦波荷载(振动频率从 0.5 Hz 递增到 20 Hz)、汶川地震波和青藏人工波荷载作用

下,模型地基土体内各热敏传感器对应的温度时程。随着正弦波荷载的施加模型地基土体温度有明显升

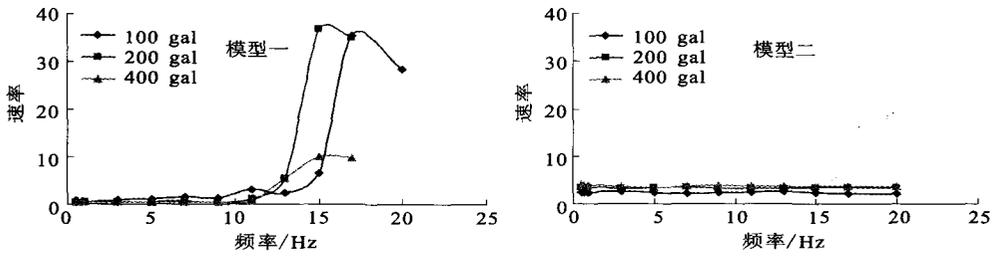


图8 不同正弦波荷载作用下模型一和模型二土体顶部的共振曲线

Fig.8 Top soil resonance curves of model one and two under different sine wave load.

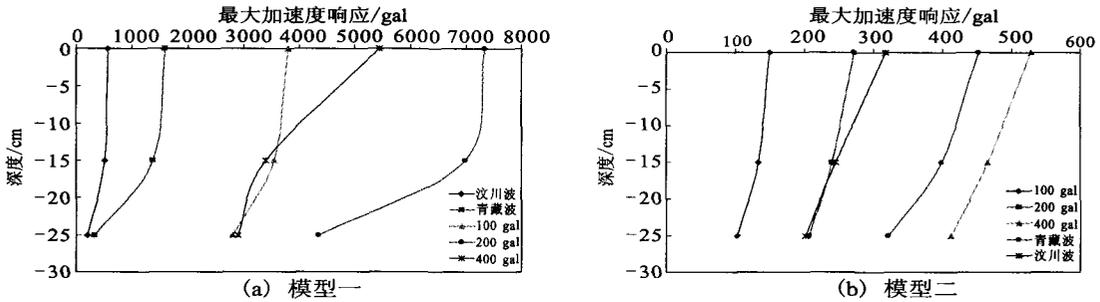


图9 模型各加速度传感器最大值的分布

Fig.9 Maximum acceleration value distribution of various acceleration transducer.

高现象,与加速度共振响应相同,在15 Hz左右的高频段呈现出升温响应显著。在汶川地震波(卓越频率1.4 Hz)和青藏人工波(卓越频率2.1 Hz)荷载作用下,地基土体温度虽存在整体升温响应(除位于土体顶部的探头9外),但是升温幅值小于高频正弦波荷载作用下的温度响应。

图11为不同地震波荷载作用下(正弦波、汶川波、青藏波)模型地基土体升温响应,地基土体的升温与最大加速度并未呈现规律性关系,但是土体中间部(埋深15、25 cm)传感器的升温现象显著。由于模型底部和上部的传感器受周边环境温度影响,热量散发较快,而模型中间部位土体不易受到环境温度影响,加之震动能量集中效应,导致温度升高现象更为显著。

### 2.2.2 模型二地基土体及桩周土体的温度响应

图12为不同荷载作用下模型二地基土体及桩周土体热敏传感器的温度时程响应。从加载整体的温度时程响应中可以看出,模型地基及桩周土体在加载后温度有所升高,最高升温达0.15℃。地基土体及桩周土体的温度没有呈现明显的温度变化,升温效应并不显著,远小于模型一。这一结果可以认为地基土的加固有利于降低震动作用下的温度扰动,但另一方面由于加固后地基共振响应向高频域偏移,低频震动的影响虽然减小了,但是高频域的影响(例如列车振动的影响)还需进一步讨论。

图13为不同地震波荷载作用下模型地基土体及桩周土体的升温响应,位于两桩中心的温度传感器(探头1,3,5,7,9)温度升高最多,其次为桩身的温度传感器(探头2,4,6,8,10),位于右桩和模型箱边界中间位置地基土体内的温度传感器(探头11,12,13,14,15)则基本没有升温效应。由于两桩中间震动能量集中,转化为温度后呈现了相对明显的升温效应,而桩周因结构与土体的摩擦效应亦存在温度的升高,自由地基温度受震动影响不大。

### 2.3 应变响应

在模型二的左右两桩桩体及两桩中间的土体内等间隔帖置了应变传感器,由于负温冻结破坏,导致在试验开始后只有左桩(Q1,Q5测点)和右桩(H3测点)的应变传感器正常工作。然而从施加200 gal正弦波荷载至震动结束,仅有Q1工作正常。图14为各输入地震动荷载下模型二桩体的应变时程,桩体的剪应变在桩体底部最大。图15为各种地震动荷载作用下桩模型的最大剪应变分布,桩体的剪应变范围达约 $6 \times 10^{-4}$ 。桩体下部因存在与土体的刚度变化,相对位移最大,因此剪应变最大,桩体中部及上部因受结构刚度的约束,相对位移较小。

## 3 结论与讨论

通过对青藏铁路高温不稳定多年冻土区“以桥代路”工程——清水河特大桥的桩基础进行模型振

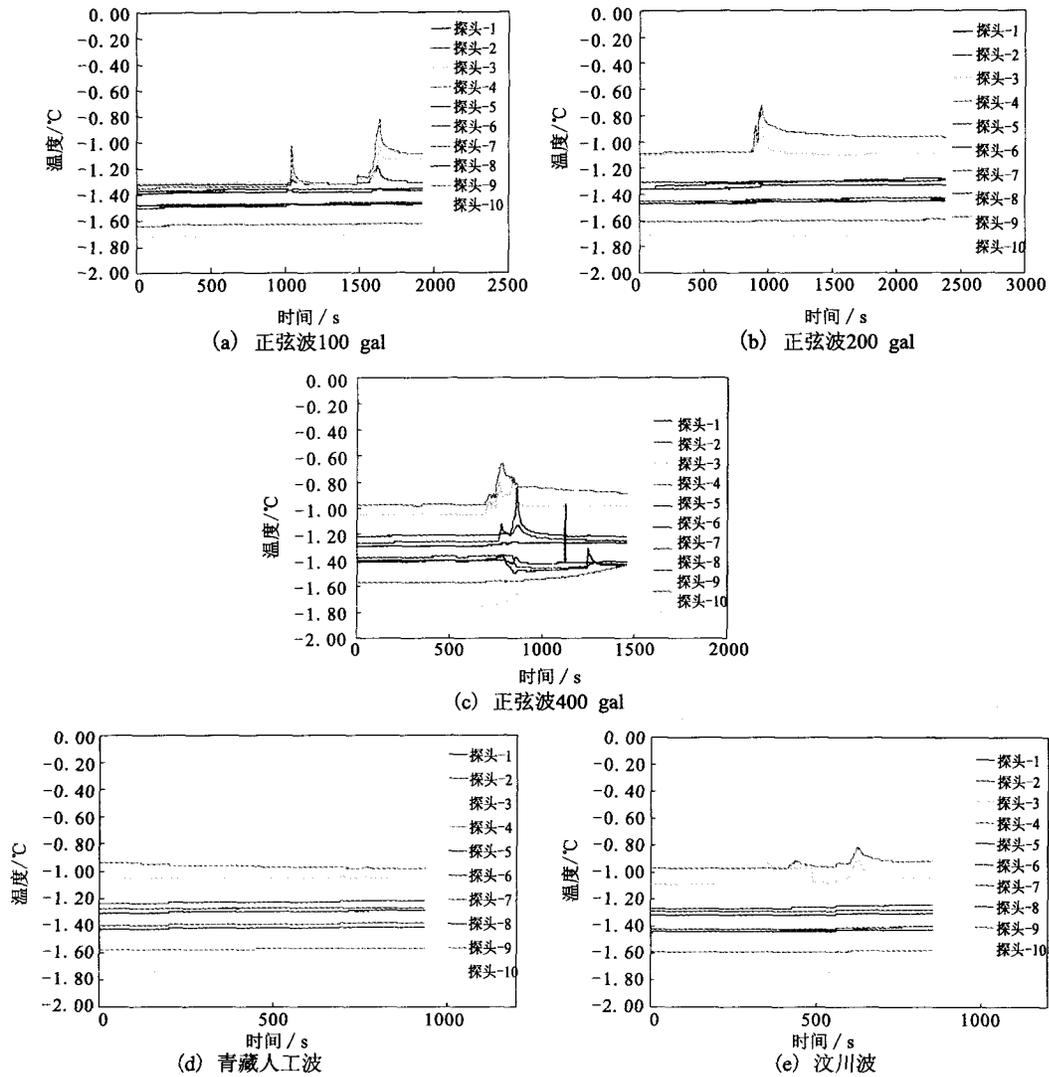


图 10 不同地震波荷载作用下模型一地基土体温度响应

Fig. 10 Foundation soil temperature responses of model one under different seismic wave load.

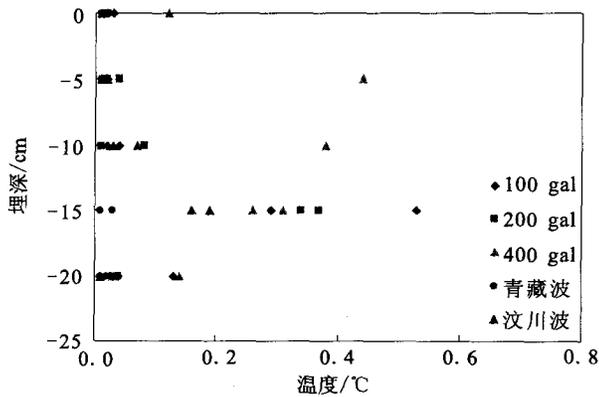


图 11 不同地震波荷载作用下模型一地基土体升温响应

Fig. 11 Foundation soil temperature-rise response of model one under different seismic wave load.

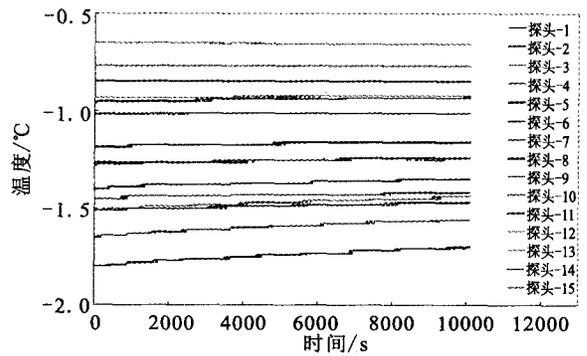


图 12 不同荷载作用下模型二桩周和土体的全程温度响应

Fig. 12 The temperature response of pile around and soil under different load in model two for whole testing process.

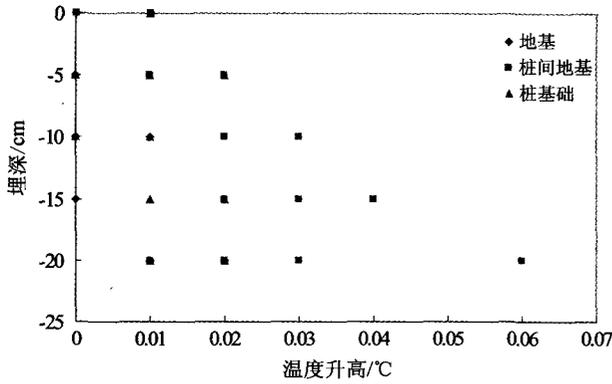


图 13 不同地震波荷载作用下模型二地基及桩周土体升温响应

Fig. 13 The temperature-rise response of pile around and soil under different load in model two.

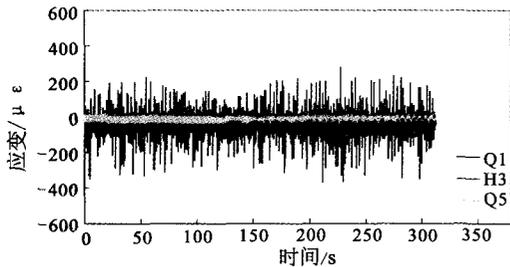


图 14 正弦波 100 gal 时桩身的应变时程

Fig. 14 Strain time interval of pile under sine wave(100 gal).

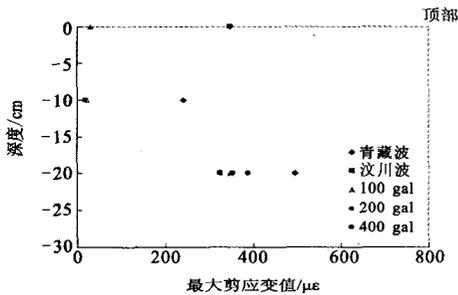


图 15 各种输入地震荷载下桩身最大剪应变

Fig. 15 Maximum shear strain of pile under different seismic wave load.

动试验及分析,可得如下几点结论:

(1) 分别对不同密度的地基土进行了震动响应评价,模型地基在水平地震力作用下主要呈现剪切变形。未加固地基土体在 15 Hz 左右呈现了共振特征,且随着输入波最大加速度的增加地基最大应变约达  $6 \times 10^{-4}$ ,结构周围地基呈现明显的非线性。地基加固后加速度的共振特征未在 20 Hz 前出现,可以认为地基的加固使共振频率向高频域移动。

(2) 在地震荷载作用下,模型地基因震动能量

的积蓄及转化体现为负温冻土的温度升高效应。未加固地基土体升温显著,最高升温可达 0.5℃,地基加固后地基土的升温效应明显改善,可以认为地基土的加固有利于震动作用下的温度扰动。但另一方面由于加固后地基共振响应移向高频域,低频震动的影响虽然减小了,对于高频域的影响(例如列车振动的影 响)还需进一步讨论。

(3) 在 20 Hz 的振动频率范围内,通过对地基加固后的桩基模型温度响应的监测发现两桩中间由于震动能量集中,呈现出了相对明显的温度升高。桩周因结构与土体的摩擦效应,亦存在温度的升高。但是相对两桩中间的升温效应不明显,自由地基温度受震动影响不大。

(4) 桩基础在地震荷载作用下,桩周土体受震动影响产生升温效应,因此会导致多年冻土强度降低、地基承载力减小等问题,从而影响桩基础的稳定性。

致谢:感谢西安建筑科技大学工程结构振动实验室苏明周主任、张兴虎高级工程师、刘煦高级工程师、龚安礼工程师在振动台试验过程中给与的协助;感谢上海交通大学车爱兰教授、日本首都大学(东京)岩盾敞广教授、吉岭充俊副教授在试验方案设计中提供的帮助。

[参考文献]

[1] Wang L, Wu Z, Zhang D, et al. The influence of earth temperature on dynamic characteristics of frozen soil and the parameters of ground motion at the sites of permafrost in the Qinghai - Tibet Plateau [ A ] // Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering [ C ]. Rotterdam Netherlands, Millpress, 2006: 2733-2737.

[2] 吴志坚, 王兰民, 马巍, 等. 地震荷载作用下冻土的动力学参数试验研究 [ J ]. 西北地震学报, 2003, 25(3): 210-214.

[3] 王兰民, 孙军杰. 特殊土动力学的发展战略与展望 [ J ]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 88-93.

[4] 程国栋. 局地因素对多年冻土分布的影响及其对青藏铁路设计的启示 [ J ]. 中国科学 ( D 辑 ), 2003, 33(6): 602-607.

[5] 吴志坚, 张鲁新, 马巍, 等. 青藏铁路冻土区土体冷生过程对路基变形影响分析 [ J ]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1309-1314.

[6] 张淑娟. 静动荷载及冻融作用下冻土力学性质研究 [ D ]. 中国科学院研究生院, 2007.

[7] 刘旭宙, 姚凯, 何新社, 等. 2008 年 5 月 12 日汶川  $M_s 8.0$  地震甘肃强震记录与初步分析 [ J ]. 西北地震学报, 2008, 30(3): 266-269.