



# 第七届全国土动力学 学术会议论文集

中国振动工程学会土动力学专业委员会 主编

清华大学出版社

# 第七届全国土动力学 学术会议论文集

中国振动工程学会土动力学专业委员会 主编

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本论文集共收入 2006 年 11 月 3 日至 6 日在北京召开的“第七届全国土动力学会议”发表的学术论文 110 篇。这些论文涉及到土的动力特性和本构关系、土工动力测试技术及其应用、解析与数值方法、土与结构动力相互作用、土的液化、地基、土工建筑物及生命线工程抗震分析、海洋岩土工程、爆炸及其他高速人工荷载分析、环境振动与减振隔振技术、土工抗震加固技术、工程实录等内容,基本上反映了我国土动力学和岩土地震工程科技工作者近年来的科研成果和主要进展。

本书可供土木、水利等相关专业的教师、学生、科研人员、管理人员参考阅读。

版权所有,翻印必究。举报电话: 010-62782989 13501256678 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

第七届全国土动力学学术会议论文集/中国振动工程学会土动力学专业委员会主编.—北京:清华大学出版社,2006.10  
ISBN 7-302-14073-1

I. 第… II. 中… III. ①土动力学—学术会议—文集 ②岩土工程—学术会议—文集 ③地震工程—学术会议—文集  
IV. TU4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 126701 号

出版者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

责任编辑:汪亚丁 徐晓飞

印装者:三河市春园印刷有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开本:203×283 印张:42.75

版次:2006年10月第1版 2006年10月第1次印刷

书号:ISBN 7-302-14073-1/TU·333

印数:1~900

定价:288.00元

地址:北京清华大学学研大厦

邮编:100084

客户服务:010-62776969

# 第7届全国土动力学学术会议

## The 7<sup>th</sup> National Conference on Soil Dynamics

### 主办单位

中国振动工程学会土动力学专业委员会

### 支持单位（以笔划为序）

中国力学学会岩土力学专业委员会

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会

中国工程建设标准化协会振动专业委员会

中国水利学会岩土力学专业委员会

中国地震学会地震工程专业委员会

中国建筑学会工程勘察分会

中国建筑学会地基基础专业委员会

### 承办单位

清华大学

### 协办单位（以笔划为序）

天津大学

中冶集团建筑研究总院

中国水利水电科学研究院

中国建筑科学研究院

北京航空航天大学

铁道部科学研究院

## 顾问委员会（以姓氏笔划为序）

主 席：汪闻韶

委 员（以姓氏笔划为序）： 王余庆 石兆吉 李焯芬 汪闻韶 张在明  
张楚汉 周神根 周景星 徐攸在 徐志英 常亚屏 谢定义 潘复兰

## 学术委员会

主 席：沈珠江

副主席：徐 建 李鹏程 刘汉龙 周 健 栾茂田 陈云敏

委 员（以姓氏笔划为序）： 于永志 于玉贞 马 晔 孔令伟 孔宪京  
王兰民 王立忠 王建华 王建国 王雪峰 邓安福 叶阳升 任书考 刘万恩  
刘小生 刘汉龙 刘明振 刘金光 刘保健 江静贝 严国兴 何良军 何昌荣  
余湘娟 吴兴序 吴成元 吴丽波 应怀樵 张克绪 张建民 张维全 张鸿儒  
李 磊 李万红 李万明 李世海 李哲生 李鹏程 沈珠江 辛鸿博 宋二祥  
邵生俊 陈 凡 陈 炯 陈云敏 陈正汉 陈生水 陈龙珠 陈国兴 陈存礼  
单志康 周 健 林本海 罗福忠 郑建国 骆亚生 姚仰平 栾茂田 钟 和  
赵合稳 赵剑明 赵滇生 饶锡保 徐 建 袁晓明 贾廷富 郭少华 高广运  
高艳平 黄河清 景立平 路新景

## 组织委员会

主 席：张建民

副主席：辛鸿博 王建华 刘小生 姚仰平 叶阳升 滕延京 于玉贞

委 员：（以姓氏笔划为序） 介玉新 冯士伦 刘华北 吴成元 张其光

张建红 张 嘎 单志康 赵剑明 胡黎明 徐 毅 温庆博

秘书长：胡黎明 张 嘎

## 论文编辑委员会（以姓氏笔划为序）

于玉贞 王建华 叶阳升 刘小生 张建民 张 嘎 辛鸿博 胡黎明 姚仰平  
滕延京

## 前 言

第七届全国土动力学学术会议将在 2006 年 11 月 3 日至 6 日在北京清华园隆重召开。本届会议由中国振动工程学会土动力学专业委员会等相关学会主办,清华大学承办,天津大学、中冶集团建筑研究总院、中国水利水电科学研究院、中国建筑科学研究院、北京航空航天大学与铁道部科学研究院共同协办。每四年举行一次的全国土动力学学术会议是我国土动力学界历史最为悠久、影响最为深远的系列化学术会议。本届会议是继在蚌埠(1982)、西安(1986)、上海(1990)、杭州(1994)、大连(1998)、南京(2002)召开的前六届会议之后土动力学界的又一次学术盛会。

广阔的研究领域,复杂的研究对象,重大的实用价值,已使土动力学成为当今国际岩土工程研究领域的热点和重点课题之一。当前我国已经进入了工程建设飞速发展的黄金时期,各种大型工程的建设规模之宏伟、投资金额之巨大、建设势头之迅猛,可以说是史无前例的,也是世无前例的。这些都极大地推动了以抗震(振)减灾为目的的土动力学在我国的深入研究和快速发展。本次会议自 2005 年 9 月发出征文通知后得到了全国各地和海外的土动力学、岩土地震工程科技工作者的热烈响应和大力支持,共收到论文 130 余篇,经审查,最后收入本论文集的学术论文共有 110 篇。这些论文涉及到土的动力特性和本构关系、土工动力测试技术及其应用、解析与数值方法、土与结构动力相互作用、土的液化、地基、土工建筑物及生命线工程抗震分析、海洋岩土工程、爆炸及其它高速人工荷载分析、环境振动与减振隔振技术、土工抗震加固技术、工程实录等内容,基本上反映了我国土动力学和岩土地震工程科技工作者近年来的科研成果和主要进展。

本次会议得到了有关学会、单位和专家的大力支持,在此谨致谢意。同时向为本次会议撰稿的作者和为本论文集出版而辛勤工作的人员致以深深的谢意。

中国振动工程学会土动力学专业委员会

2006 年 10 月

# 目 录

## 1 大会报告

高速交通引起的振动和沉降 .....	陈云敏 边学成	3
国际岩土工程抗震设计新标准概述 .....	刘汉龙 SUSUMU Iai	14
海洋工程中若干土动力学问题的研究进展 .....	栾茂田 范庆来 王忠涛 郭莹等	26
地铁地下结构与土体系统震动响应的分析理论与方法 .....	张建民 张嘎	39
同济大学在土动力学研究和应用方面的进展 .....	周健 高广运	51

## 2 土的动力特性与本构关系

饱和尾矿砂动变形、强度特性的试验研究 .....	陈存礼 何军芳 胡再强 苏永江等	59
原状和重塑粘土的动强度试验研究 .....	陈颖平 周丽军 黄博 陈云敏	65
黄土震陷性与结构性参数的相关分析 .....	邓津 王兰民 袁中夏	70
天津软粘土的动三轴试验研究 .....	丁金伟 刘海笑 胡黎明	77
城市固体废弃物的动力特性和动强度试验研究 .....	冯世进 陈云敏 孔宪京 高广运	82
室内和现场试验确定土的动力变形特性方法探讨 .....	傅琼华 刘小生 王钟宁 刘启旺等	87
主应力轴持续旋转下饱和疏松粉煤灰孔压 特性的试验研究 .....	郭莹 张吉宏 刘洋 张小玲	95
初始应力条件对密实粉煤灰动模量阻尼比 影响的试验研究 .....	郭莹 张小玲 刘洋 张吉宏	100
循环荷载作用下低掺量水泥土试样变形性状试验研究 .....	贺建清 孙希望	104
粉煤灰稳态强度的试验研究 .....	冀彦卓 郭莹	111
饱和粉土振动液化试验研究 .....	景立平 罗强 崔杰	115
含粘粒量黄土抗震陷性能的试验研究 .....	李兰 王兰民	120
基于临界状态土力学理论的土与结构物接触面反复受载本构模型 .....	刘华北	125
循环荷载下软土的各向异性界面模型 .....	刘明 黄茂松 何斌	132
某核电站护岸吹填砂抗液化试验和分析研究 .....	刘小生 王钟宁 刘启旺 安君	138
循环荷载下松砂双轴试验的 PFC2D 细观数值模拟 .....	刘洋 周健 吴顺川	145
Q <sub>3</sub> 黄土的等效循环荷载特征与动强度研究 .....	龙吉勇 邵生俊 王婷	150
基于统一硬化参数的循环加载模型 .....	路德春 姚仰平	157
动荷作用下非饱和黄土结构变化特性初探 .....	骆亚生 李平 胡仲有	163
循环应力下饱和粘土剪切变形特性与破坏 标准的试验研究 .....	齐剑峰 栾茂田 聂影 马太雷等	169

含风化岩堆石料残余变形特性的试验研究 .....	阮元成 陈宁 常亚屏	176
湿陷性黄土的动力损伤变形特性研究 .....	邵生俊 龙吉勇 申辉	180
加筋土动三轴试验 .....	孙晋 白晓红 曾国红 张卫平	186
特殊土动力学的发展战略与展望 .....	王兰民 孙军杰	189
黄土结构研究的现状及问题 .....	王兰民 袁中夏	196
四川地区饱和砂卵石土动模量和动阻尼比的试验研究 .....	王汝恒 郭文 李强	203
振动频率对饱和砂卵石土动力特性的影响 .....	王汝恒 邓安福 姚勇 王皆伟	208
冻融循环对粉质粘土动力性能损伤的数学模型研究 .....	魏海斌 刘寒冰 高一平	213
小应变范围内动荷载作用对饱和砂砾料液化强度影响的试验研究 .....	徐斌 孔宪京 邹德高 张俊清等	218
尾矿的动力特性探讨 .....	张超 杨春和	223

### 3 土工动力测试技术与物理模拟

土-地铁区间隧道动力相互作用的大型振动台试验研究 ( I ) .....	陈国兴 庄海洋 程绍革	233
旁孔透射波法检测水泥搅拌桩质量的理论试探 .....	陈龙珠 黄大治	244
高频振动沉桩特性的模型试验研究 .....	陈龙珠 陈岱杰	250
地基归一化液化判别及临界击数推导 .....	陈文化	255
基于 ANN 模型和可靠度的液化判别方法 .....	符圣聪 江静贝	259
确定动模量与阻尼比的试验技术研究 .....	郭莹 刘洋 张小玲 张吉宏	266
Case 法波形阐释及承载力公式误差分析 .....	胡海军 魏丽敏	270
某地下工程围岩的声波测试与分析 .....	李建峰 简文彬 李堂磊 胡忠志	276
液化土层中桩基 $p-y$ 曲线三种结果的对比 .....	李雨润 袁晓铭 孟凡超	281
可液化地层中地铁隧道结构动力离心模型试验 .....	刘光磊 龚成林 宋二祥 刘华北	286
基桩完整性低应变动测的定量分析 .....	罗少锋 刘明振 邢心魁	292
依据液化土层残余强度确定弱化 $p-y$ 曲线 .....	王建华 冯士伦	296
波浪-海床-管线相互作用的模型试验研究 .....	王立忠 潘冬子 夏令	301
Matlab 在处理路基动态试验数据中的应用 .....	肖宏	314
莲黄隧道爆破震动测试与分析 .....	阳生权 周健 吕中玉	319
软土地基桶型基础水平循环承载力模型试验 .....	杨海明 王建华 刘振纹 李向东等	324
黄河口浅埋海底管线与周围土体相互作用原位测试研究 .....	远航 贾永刚	328

### 4 土工动力数值模拟方法与应用

分层岩土介质破坏程度与爆炸深度关系的数值模拟 .....	陈亮 刘军	337
TDR 测试系统理论模型及应用 .....	陈仁朋 王进学 陈云敏 孔卫国	343
高速列车运行引起的地基动力响应 .....	陈云敏 边学成 王常晶	350



平原型城市垃圾填埋场的地震响应特性及稳定性评价 .....	邓学晶 孔宪京	360
饱和土动力学问题 Green 函数计算的抽象集成与 OOP 实现 .....	丁伯阳 郑工钦 党改红	365
土体动力有限元分析中网格尺寸对计算结果的 影响研究 .....	丁选明 刘汉龙 王志华 丰土根	371
软基上深埋式大圆筒结构循环承载力分析 .....	范庆来 栾茂田 武科 王志云等	377
桩-土-结构动力相互作用分析方法探讨 .....	甘 杨 傅勤志 肖志毅 李大华	383
分层地基列车运行引起的地面振动分析 .....	高广运 李志毅 冯世进	388
循环荷载作用下软土路基孔压计算方法研究 .....	高广运 时刚 冯世进 顾中华	393
考虑地震作用的一种三维边坡稳定分析方法 .....	顾晓强 陈龙珠	398
集中质量法研究自由场地自振频率 .....	黄进 夏唐代 邓亚虹	405
上游法尾矿坝地震反应简化法的研究 .....	李大东 孔宪京 邹德高 潘建平	409
两相多孔介质弹塑性动力反应分析的显式有限元方法 .....	李亮 杜修力 赵成刚 廖维张	415
饱和土中基桩竖向振动理论新进展 .....	李强 唐志波	424
埋深对矩形地铁地下结构震动剪切变形的影响 .....	李子豪 张建民	429
土-结构相互作用的地表地震反应有限元分析 .....	刘健 廖红建 钱春宇	435
土层非平稳动力响应可靠度分析 .....	潘晓东 王国才 丁伯阳	440
波浪作用下饱和海床-管线动力相互作用的有限元分析 .....	曲鹏 栾茂田 郭莹 杨庆	446
SASW 法探测地下障碍物的数值模拟 .....	任青 黄茂松 何斌	454
海底土层地震液化的数值分析方法 .....	邵广彪 冯启民 王华娟	460
考虑土与结构相互作用的一体化桥的抗震设计 .....	宋波 李伟 杨润林	466
水平层分析法求解超固结土的地震主动土压力 .....	宋飞 张建民	470
液化土层对地震动长周期分量影响初探 .....	孙锐 袁晓铭 李雨润	476
沉管隧道地震响应分析 .....	汤梅芳 张栋樑	481
三维无网格数值方法及其在地震液化分析中的应用 .....	唐小微 佐藤忠信 栾茂田 泽田纯男	487
物元分析在砂土液化评价中的应用 .....	汪明武 朱英明	493
自由场地震输入下某堆石坝的动力响应 .....	王刚 付鹏程 张建民	497
饱和地基上单桩的扭转动力响应 .....	王国才 陈龙珠 潘晓东 孟凡丽	503
吸力式沉箱基础循环承载力分析 .....	王志云 栾茂田 范庆来 武科等	507
Drilled-Shaft Accelerations Compared to Free-Field Seismic Response Determined Using the National Building Code of Canada 2005 .....	WU Guoxi	512
Seismic Analyses of Piles in Soft Soils for a Single Span Bridge near Vancouver Canada .....	WU Guoxi	518
重力式码头等价粘弹性动力反应分析 .....	吴敏敏 张建民 张嘎	523
变值复合加载下吸力式桶形基础承载性能分析 .....	武科 栾茂田 范庆来 王志云	528
深埋圆形衬砌群对平面 SH 波的散射 .....	夏唐代 徐平	534

## 基于快速拉格朗日显式差分方法的加筋土坡稳定

性分析研究.....	邹德高 杨正权 孔宪京	540
宝泉沥青混凝土面板堆石坝地震反应分析.....	于玉贞 刘治龙 李荣建 张丙印	546
动剪切模量比测定精度对反应谱影响初步分析.....	袁晓铭 孙静 孙锐 刘晓健	552
统一描述粗粒土与结构接触面静动力学特性的数值方法.....	张嘎 张建民 侯文峻	557
高心墙堆石坝非线性有限元动力反应分析.....	张连卫 张建民 张丙印 于玉贞	562
精度可控地基阻力的一种时域计算方法.....	赵建锋 杜修力	567
高面板堆石坝面板的地震反应分析与安全评价.....	赵剑明 常亚屏 陈宁	578
深厚覆盖层上土石坝的加速度反应分析.....	赵剑明 陈宁 常亚屏	584
扩建垃圾填埋场的地震响应及稳定性分析.....	朱斌 陈云敏	589

## 5 土体加固技术与工程

关中地区湿陷性黄土地基处理.....	陈广斌	597
关于地震滑坡约束条件的探讨.....	丁彦慧 王余庆	601
某工程防微振基础的设计研究.....	黄秋菊 邹剑强 付桂宏 徐克利等	608
爆破振动安全效应的分析.....	刘春原 许柏山	614
土性参数动态波动对公路边坡可靠度的影响.....	宋云连 赵海芳 焦同战	620
软土越江隧道结构地震失稳易损性衡量.....	苏燕 周健	626
地基抗震加固处理中的二次压浆小桩应用.....	王清标 张峰 王立华 陈炳志等	632
某核电站变压器区和备用柴油发电机厂房场地 设计反应谱的确定.....	谢冠峰 王宏 刘启旺 刘小生等	636
近断层地震动脉冲与设计谱.....	徐龙军 谢礼立	640
环境振动引起的地基与结构动应变及其振损评估.....	杨先健 张翠红	646
三维竖向断层场地对地面运动影响的初步研究.....	杨笑梅	653
黄河三角洲沉积物固结特征与成因研究.....	杨秀娟 贾永刚	657
交通引起的地面振动对精密仪器的影响.....	张鸿儒 栗润德 刘维宁 侯永峰等	664
隧道砂土地基抗液化加固处理方案探讨.....	钟小春 韩月旺 加瑞 寇晓强	669

# 1 大会报告



# 高速交通引起的振动和沉降

陈云敏, 边学成

(浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 高速交通, 特别是高速铁路和高速公路运行引起的地基振动和传播、以及一系列相关的岩土工程问题业已成为土动力学领域中的研究热点。本文着重介绍了高速列车运行产生的轨道-地基振动、振动在铁路沿线地基中的传播和列车循环荷载作用下软土地基或城市地铁长期沉降等实际工程背景, 并对国内外在上述几个方面的研究进展进行了概述。通过具体实例介绍了软土地基上运行高速列车的几个关键方面的研究成果, 包括列车运行产生的轨道-地基耦合振动及共振, 波动在周围地基中的传播, 列车交通荷载产生的地基中动应力分布和主应力轴旋转, 交通循环荷载作用下软粘土动力特性的室内试验成果, 以及交通荷载产生的地基长期沉降等方面, 最后给出了进一步研究的建议。

**关键词:** 交通振动; 列车荷载; 波动传播; 循环荷载; 长期沉降

## 1 背景

随着既有列车的提速, 以及高速交通线路在我国和世界许多国家的不断新建, 特别是在我国东南沿海地区的软土地基上建设高速铁路和高速公路, 会产生大量的土动力学和岩土工程方面的问题。本文以高速铁路为例着重阐述其中的一些与土动力学相关的关键问题, 许多方面的问题和解决方法对于高速公路是共通的。

一个问题是在软土地基上运行高速列车时轨道-地基可能产生共振导致脱轨事故, 危及列车的安全运行。1998年瑞典 X2000 高速列车在 Ledsgard 地区软土地基上运行时产生过大的轨道振动响应是一个广为引用的典型案例<sup>[1]</sup>。另一个问题是城市轨道交通产生的振动传播到线路周围的工业区和居民区, 引起环境振动; 不仅对精密生产设备产生负面影响, 而且给沿线居民区造成振动和噪音污染。例如台湾高速铁路通过台南高科技园区, 该园区内生产计算机微处理器和存储器等硅产品的精密加工厂对于地基振动非常敏感; 如果不进行减振处理必定导致废品率大幅增长, 从而带来重大的经济损失<sup>[2]</sup>。第三个问题是在列车长期和反复的振动作用下地基产生过大的沉降, 影响正常运行。文献[3]报道了重载货车运行引起软土地基上建造的公路产生过大沉降。而上海地铁 1 号线已建隧道的长期沉降监测资料表明在地铁投入运营后沉降速率急剧加大。造成这种现象一个不可忽视的重要原因就是软土地基在长期列车振动作用下产生沉降<sup>[4]</sup>。

‘十一五’期间是我国大规模铁路建设最关键的阶段。大量高速铁路和公路的建设使得高速交通引起的地基振动分析和减振措施开发, 以及在软土地基上高速线路的沉降控制已经成为一个亟待解决的问题。

## 2 轨道交通引起地基振动的研究现状

国内外针对轨道交通引起的轨道振动以及波动在周围地基中传播产生的环境问题的研究主要包括两个方面: (1) 列车运动荷载作用下轨道动力响应的研究。对于 Winkler 地基 (或增加了阻尼的 Kelvin 地基) 上欧拉梁在移动荷载作用下的动响应已经有比较深入的研究<sup>[5-8]</sup>。此后, 王常晶等<sup>[9]</sup>分析了均匀

半空间上 Timoshenko 梁在列车交通荷载作用下的稳态响应。此后又有人研究了多层地基上梁的振动问题<sup>[10,11]</sup>。翟婉明等<sup>[12]</sup>通过理论模拟与试验结合方法研究了铁路道床的振动问题。边学成等<sup>[13]</sup>考虑了枕轨的离散支撑作用来模拟实际的轨道结构和地基系统,更接近实际情况。(2)由此产生的波动在地基中传播的研究。谢伟平<sup>[14]</sup>和蒋建群<sup>[15]</sup>研究了弹性均匀半空间体在移动荷载作用下的稳态响应。边学成<sup>[16, 17]</sup>研究了临界速度移动荷载作用下分层地基的临界响应问题。De Barros<sup>[18]</sup>和 Grundmann<sup>[19]</sup>研究了分层半空间在移动荷载作用下的动响应问题。刘维宁等<sup>[20]</sup>基于 Duhamel 积分得出了半无限均匀地基在移动荷载作用下的动力响应解,考虑了轨枕周期性分布的作用影响。Dieterman<sup>[21]</sup>分析了单一移动简谐荷载作用于地表梁上产生的地基振动问题。Sheng<sup>[22]</sup>和 Kaynia<sup>[23]</sup>研究了多层土体上梁以及周围地基的振动问题。Takemiya 等<sup>[24]</sup>利用准解析的传递矩阵方法考虑了地基的成层性,降低了计算的复杂性。Lars Hall<sup>[25]</sup>尝试着用三维有限元法分析列车引起的地基振动,因为单元数和单元尺寸的限制,难以在计算精度和计算效益之间做合适的平衡;这个也说明直接采用三维有限元方法来求解这个问题有很大的难度。

另外 Chen 等<sup>[26]</sup>和 Metrikine 等<sup>[27]</sup>在研究中指出运动荷载在地基表面梁上运行时存在临界速度,当荷载运动速度接近该值时梁和地基的振动都会急剧增大,也即发生共振现象,这个也曾实际的高速列车运行中发生过<sup>[1]</sup>。Takemiya 等<sup>[24]</sup>提出根据变换领域中的响应谱来判断地基临界速度。但是总的来说,对于共振发生机理和关键控制因素等方面还需要更深入的研究。

### 3 轨道交通的减振研究现状

针对机器动力基础产生的地基振动和相应的减振方法已经做了不少研究工作,但是轨道交通产生的环境振动与动力机器基础产生的地基振动有明显的区别:(1)动力机器基础产生的振动频率一般来说比较固定,振动频率较高;而列车交通荷载引起地基振动的频率范围较宽,振动主要集中于低频区域。(2)轨道交通荷载产生的地基振动具有多普勒效应;随着运行速度的提高还可能产生共振现象,从而带来地基振动的急剧增大。(3)动力机器的运作及其产生的振动是连续不断的,而交通荷载产生的振动是间歇周期性的。正是交通荷载产生的地基振动具有一些特有的性质,因此需要对其传播特性进行更深入的研究;原有针对动力机器基础的减振方法对于轨道交通产生的地基振动不一定再适用,有必要开发出新的更有效的减振对策。

目前提出的减振方法有采用重型钢轨和无缝线路、减振型扣件、弹性基础、屏障隔振等。屏障可分为连续屏障,如隔振沟、膨润土泥浆、混凝土芯墙等;也可以是非连续性屏障,如孔列、混凝土单排桩、多排桩等。这些方法已经在工程中得到了一定的应用,如 Woods<sup>[28]</sup>使用隔振沟作为屏障,Ahmad<sup>[29]</sup>使用填充墙进行隔振。高广运<sup>[30, 31]</sup>对非连续屏障隔振的作用和其中的重要问题做过分析,使用弹性地基板和排桩共同作为屏障隔振,并成功地应用于实际工程。吴世明<sup>[32]</sup>利用粉煤灰做成单排、双排桩和地下连续墙进行了对比试验。但是在实践中也发现了一些问题,其中弹性基础的存在会使得轨道上的最大低频加速度被放大,所以无论是对运行列车的平稳性还是对周围环境的振动来说弹性基础都不是很理想的方法。同时因为存在土体边坡稳定性和地下水水位面的问题,隔振沟一般只能限于小到中的深度,当地基中传播的振动波长较长时,一般的开挖隔振沟就不能有效地隔振。采用桩基隔振可以达到比较大的深度,从而具有较好的减振效果<sup>[33]</sup>。最近 Takemiya<sup>[34]</sup>提出采用水泥搅拌加固方法形成土-桩结合体从而建立蜂窝型 WIB 减振结构来降低轨道交通产生的地基振动。该方法对低频振动有明显效果;而高速列车在软土地基上运行产生和传播的振动频率主要在 8Hz 以下,属于低频振动,因此该方法对于列车荷载引起地基振动的减振具有较好的适用性和应用前景。

## 4 轨道交通引起的地基动应力和软土地基沉降

在交通荷载的长期循环作用下软土地基上的路面和轨道会不断产生沉降, 使得线路的平整性变差, 降低列车乘坐的舒适性, 严重时甚至会危及列车的安全运行。因此有必要对长期交通荷载产生的软土地基沉降预测和控制方面进行深入的研究。至目前为止, 在这方面的研究还鲜见于国内外文献, 但近年来得到越来越多的关注。

软土地基沉降计算方法自 1923 年 Terzaghi 固结理论问世以来, 通过不断改进和完善, 从简单的理论方法到经验公式和图表法到应用计算机的数值分析法, 不一而足。但是对于交通荷载产生的沉降计算理论和方法还处于初步阶段。现有的方法主要包括以下几种: 一是 Hyodo<sup>[35]</sup>等人提出结合土体动三轴实验结果, 采用二维数值动力学分析来预测交通荷载下的地基变形。而地基土体实际的动力响应是三维问题, 其直接模拟实际工程有些困难; 二是 Kutara<sup>[36]</sup>和 Fujikawa<sup>[37]</sup>等人先后提出的采用等效静荷载处理交通荷载。Kutara<sup>[36]</sup>提出采用一维固结理论简化沉降分析过程, 但未考虑交通荷载的实际传递机制和荷载循环产生的沉降; Fujikawa<sup>[37]</sup>在实测的基础上, 假定交通荷载作用产生的应力增量呈倒三角分布, 这种估算土体的固结沉降不够精确; 三是经验公式, 其中以 Monismith<sup>[38]</sup>提出的动力方程应用最广泛, 其采用简单指数模型拟合软粘土的塑性应变与荷载循环次数的关系。该模型计算简单, 但因参数包含的物理含义不够明确, 取值范围较大, 不易进行合理取值。Li 和 Selig<sup>[39]</sup>等人引进静强度参数, 提出对上述参数确定的改进方法, 并间接考虑了土体类型及物理状态等。Li 和 Selig<sup>[39]</sup>利用该理论分析了交通荷载产生软土沉降的多个工程实例。Chai 和 Miura<sup>[3]</sup>在此基础上, 考虑初始偏应力影响, 进一步提出了新的指数模型, 克服了 Li 和 Selig<sup>[39]</sup>参数取值不适用于堆积土的问题, 但确定新引入参数值的确定仍有一定困难。

另外, 在试验基础上, 周建<sup>[40]</sup>提出了动载作用下软粘土残余变形的计算模式, 可确定出长期或短期作用下的附加沉降过程。蒋军<sup>[41]</sup>通过循环加载试验, 分析了不同加载波形作用下粘土的一维沉降特征。李进军<sup>[42]</sup>和黄茂松<sup>[43]</sup>通过不同静偏应力和动应力组合情况下的饱和软粘土不排水循环三轴实验, 引入相对偏应力水平参数, 分析了累积变形特征。

本文在 Li 和 Selig<sup>[39]</sup>的工作基础上, 结合软粘土的室内动静力试验结果, 初步分析和揭示了长期交通荷载作用下软土地基的沉降发生的过程和规律。

## 5 瑞典 X2000 高速列车引起的振动和沉降分析<sup>[1,9,13,24,44,45]</sup>

### 5.1 现场地基条件和模型参数

瑞典国家铁路管理局于 1998 年在 Ledsgard 软土地基上运行 X2000 高速列车时测试了轨道和地基振动<sup>[1]</sup>, 同时在线路所在位置进行了全面的地质勘查。本文利用作者开发的专用于考虑运动荷载作用的 2.5 维动力有限元方法针对该场地的轨道结构和地基条件进行建模, 分析了轨道和沿线地基在列车运动荷载作用下振动的产生和传播, 得出了地基中动应力的分布特征, 然后结合软粘土的室内动静力试验成果, 进一步分析了列车运行荷载作用下地基的长期沉降。

X2000 高速列车由 5 节车厢组成, 车头车尾各为一节动力机车, 图 1 中给出了轮轴荷载分布, 其中轮轴载重对应于一个轮对的总重力荷载。

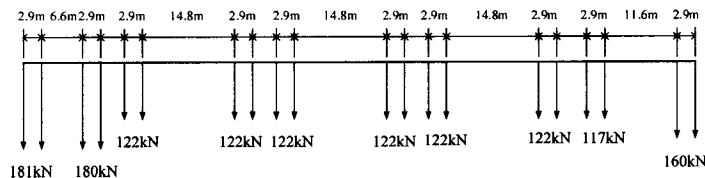


图 1 X2000 列车轮轴荷载分布

在模型中，轨道结构包括了钢轨和枕轨以及下面的道床，具体参数的取值如表 1 所示。轨道下为多层软土地基，图 2 中给出了现场测试得到的地基土层参数。

表 1 轨道参数

轨道宽度 $2B$ (m)	单位长度质量 $M$ (ton/m)	弯曲刚度 $EI$ (MNm <sup>2</sup> )	阻尼比
3.0	10.8	200.0	0.10

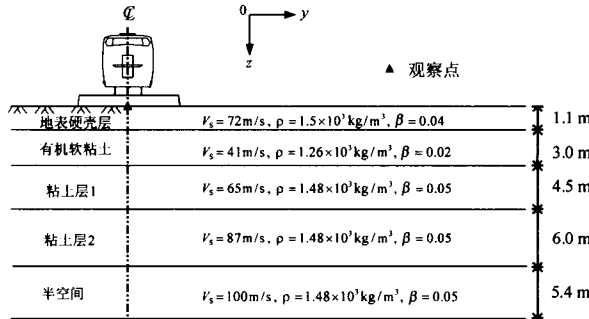


图 2 X2000 地基土层分布

## 5.2 轨道和地基的振动响应

### 5.2.1 单一轮轴荷载情况

图 3 中给出了不同速度的 1.0kN 单一轮轴荷载作用下轨道的振动，在轨道中心的振动主要是竖向运动，两个水平方向的运动分量相对来说很小。在荷载低速运动时 ( $c=70\text{km/h}$ ) 产生的轨道运动为准静态的变形；当列车速度提高到接近或超过地基的临界速度时( $c=200\text{km/h}$ )，轨道的振动会明显增大，并且荷载通过后在观察点处有明显的自由振动产生。

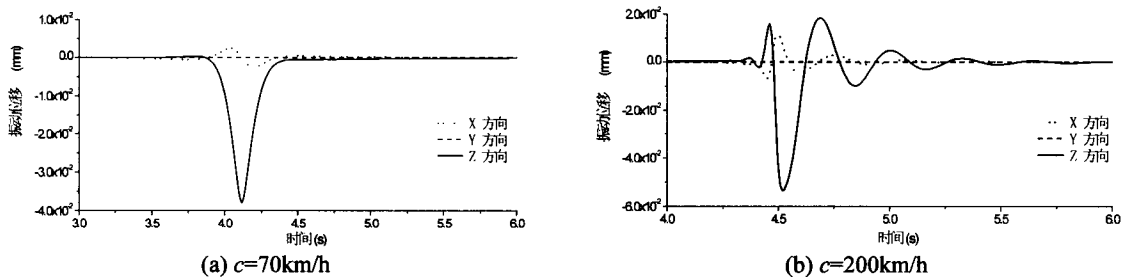


图 3 单一轮轴移动荷载作用下轨道的动力响应时程( $P_0=1.0\text{kN}$ )

### 5.2.2 整列列车轮轴荷载情况

在单一轮轴移动荷载的基础上，通过对一系列轮轴荷载的叠加计算得到整列列车运动荷载作用下的振动响应。图 4 中给出了不同速度的列车荷载作用下轨道的竖向动力响应，在图中还与实际振动的测试数据进行了对比，可以看出两者变形相当一致。低速情况下轨道和地基的变形主要是列车的轴重荷载产生的整体静态位移；而在高速情况下轨道和地基的变形要远大于低速时的情况，而且在荷载经过后，轨道在惯性作用下还有很大的振动。

图 5 中给出了不同速度的列车荷载作用下轨道和周围地基振动的频域解结果。随着速度的提高，钢道和地基的振动响应也向高频区域移动。在运行速度为  $70\text{km/h}$  时，钢轨振动的响应频率集中于接近  $0\text{Hz}$  的低频区域，也即发生的是准静态变形；而当速度为  $200\text{km/h}$  时，除了低频区的响应外，在对应于地基基频的  $2.5\text{Hz}$  附近可以发现共振产生的响应波峰，由此引起轨道振动的明显增大。



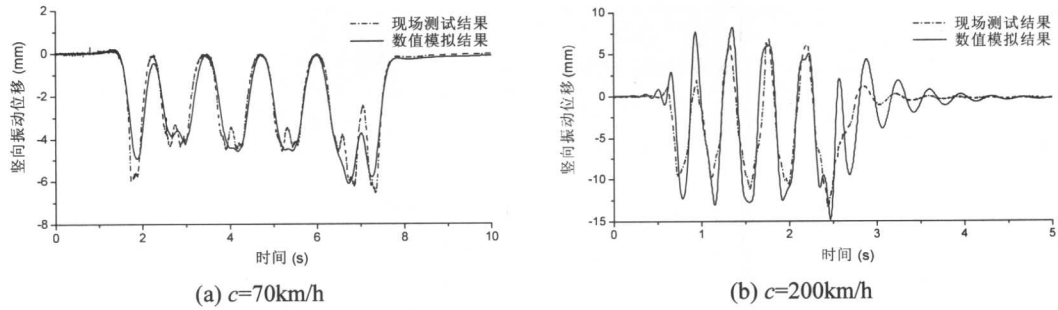


图 4 列车移动荷载产生的轨道竖向振动

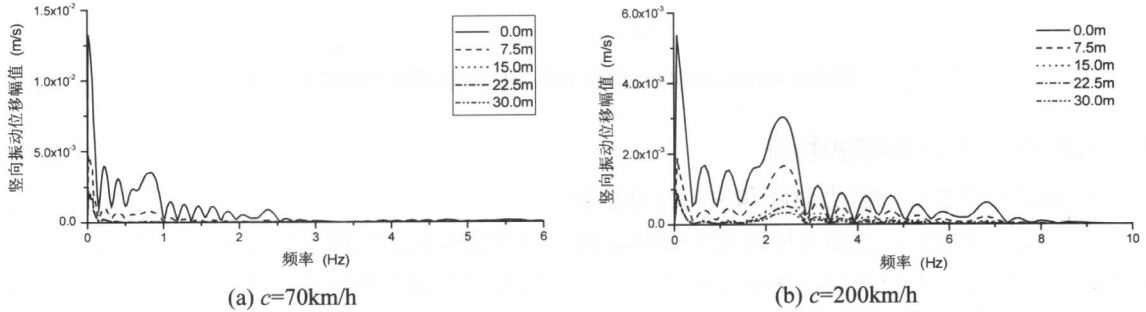


图 5 列车荷载作用下轨道和周围地基竖向振动频谱

### 5.2.3 地表面和地基内部的波动传播

图 6 中给出了不同速度的列车通过时周围地基表面的振动分布, 高速列车荷载作用下地基振动的影响范围比低速运动时大得多。低速列车荷载作用下的振动主要为轴重荷载下产生的局部弹性变形, 地基中波动现象不明显。高速列车荷载作用下振动向周围地基中的传播十分明显; 出现明显的马赫效应, 说明地基中的波动传播慢于列车荷载的前进速度。当列车速度超过场地的临界速度时, 轨道和地基的振动幅值反而有所下降, 但是向周围地基中传播的振动加剧。

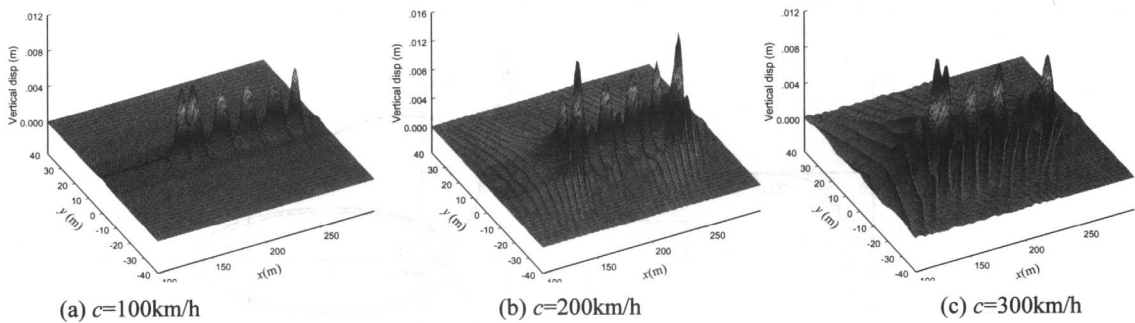


图 6 列车荷载作用下地基的竖向振动场

列车运行引起的地基内部波动传播情况也是值得关注的。图 7 中给出了垂直轨道的某一平面上  $z$  方向振动幅值的等高线分布图。根据对称性, 图中只给出了  $y \geq 0$  的部分。竖向振动的最大幅值出现在轨道中心的地表面上, 沿轨道方向的最大幅值出现在轨道正下方, 而垂直轨道方向的最大幅值出现在轨道两侧的地表面之下。同时可以知道地基的分层对波动传播和振动幅值分布有明显的影响。