



同济大
Tongji



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

钱劲松 凌建明 著

高速公路路基拓宽力学响应 及桩承式加筋路堤应用技术

Mechanical Responses of Subgrade and Pavement
to Expressway-widening on Soft Foundation and
Application of GRPS Embankment



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

钱劲松 凌建明 著

高速公路路基拓宽力学响应 及桩承式加筋路堤应用技术



Mechanical Responses of Subgrade and Pavement
to Expressway-widening on Soft Foundation and
Application of GRPS Embankment



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是遵循“工程性状—损坏机理—工程对策—技术措施—影响因素—优化设计”的研究主线,对软土地区高速公路拓宽工程中路基路面的力学响应和桩承式加筋路基处理措施进行了详细研究,并结合实体工程进行了处理效果的跟踪观测与实践验证。

本书的研究成果对软土地区高速公路拓宽工程的设计具有重要的借鉴意义,可供相关专业人士参与。

图书在版编目(CIP)数据

高速公路路基拓宽力学响应及桩承式加筋路堤应用技术
凌建明,钱劲松,凌建明著. —上海:同济大学出版社,2017.8
(同济博士论丛/伍江总主编)
ISBN 978-7-5608-6843-1

I. ①高… II. ①钱… ②凌… III. ①高速公路—公路路基—道路工程—工程力学—研究②高速公路—桩基础—路堤—研究 IV. ①TU471.8②TU473.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 067602 号

高速公路路基拓宽力学响应及桩承式加筋路堤应用技术

凌建明 审 钱劲松 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 高晓辉 胡晗欣

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 11.5

字 数 230 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6843-1

定 价 57.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

“同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

“同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关佶红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何晶晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城	莫天伟	夏四清	顾 明	顾祥林	钱梦騄
徐 政	徐 鉴	徐立鸿	徐亚伟	凌建明	高乃云
郭忠印	唐子来	閻耀保	黄一如	黄宏伟	黄茂松
戚正武	彭正龙	葛耀君	董德存	蒋昌俊	韩传峰
童小华	曾国荪	楼梦麟	路秉杰	蔡永洁	蔡克峰
薛 雷	霍佳震				

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姍 蒋卓文

总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

论丛前言

承古续今，汇聚东西，百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流，自强不息，追求卓越。特别是近 20 年来，同济大学坚持把论文写在祖国的大地上，各学科都培养了一大批博士优秀人才，发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平，而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来，我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理，分类出版，让更多的读者获得分享。值此同济大学 110 周年校庆之际，在学校的支持下，“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于 2016 年 9 月，计划在同济大学 110 周年校庆之际出版 110 部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中，聚焦于 2005—2016 年十多年间的优秀博士学位论文 430 余篇，经各院系征询，导师和博士积极响应并同意，遴选出近 170 篇，涵盖了同济的大部分学科：土木工程、城乡规划学（含建筑、风景园林）、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端，在校庆之际首批集中出版 110 余部，其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务，把培养高素质人才摆在首位，认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此，“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版 110 余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017 年 5 月

前言

对既有公路进行扩建改造是提高路网技术等级和通行能力最重要的方式之一,路基拓宽则是各级公路扩建工程的关键。在我国,大规模的公路改扩建始于 20 世纪 90 年代末,并将在 21 世纪头 20 年得到继续。然而,我国在公路拓宽方面的技术储备相对不足,由此引起的工程病害普遍存在,严重影响了公路设施的使用性能。软土地地区的高速公路拓宽工程,由于地质条件的复杂性以及路面使用性能的需求,对拓宽工程的地基处理提出了更高的要求。

因此,本书遵循“工程性状—损坏机理—工程对策—技术措施—影响因素—优化设计”的研究主线,对软土地地区高速公路拓宽工程中路基路面的力学响应和桩承式加筋路堤处理措施进行了详细研究,并结合实体工程进行了处理效果的跟踪观测与实践验证。

(1) 针对路基拓宽工程中新老公路修建历史的差异、沉降变形的特点及其对路面结构的显著影响,采用单元生死技术和流固耦合单元,建立了软土地基上高速公路拓宽工程的平面非线性有限元分析模型,并从地基沉降、孔隙水压力、路基变形和路面应力等方面,详细分析了老路地基为天然地基和复合地基两种工况下的工程响应,进而揭示了路基拓宽

工程的特殊损坏模式-基层顶面弯拉开裂。

(2) 针对桩承式加筋路基这一复杂的工作系统,突破传统分析方法难以反映荷载传递耦合作用的局限,采用流固耦合单元 C3D8P 模拟地基土、三维薄膜单元 M3D4 模拟土工格栅,并应用接触单元考虑桩土界面的状态非线性,建立了软土地基高速公路拓宽工程桩承式加筋路堤的三维有限元模型,从而通过土拱效应、土工格栅的拉膜效应,以及桩土间刚度差异引起的应力集中等方面验证了系统的工作机理。

(3) 应用所建立的软土地区高速公路拓宽工程桩承式加筋路堤的三维有限元分析模型,通过桩土应力比、桩土摩擦、地基沉降、桩土差异沉降、格栅应力和路面应力等工程响应,考察了路堤高度、横断面布桩方式、桩长、纵向桩间距等主要设计参数的敏感性,并初步提出了一些设计优化的建议,可为实体工程设计提供参考。

(4) 为进一步检验桩承式加筋路堤的工程适用性,根据现场条件,在沪宁高速公路(上海段)拓宽工程中进行了试验路的设计和施工。为期 7 个月的跟踪观测表明,处理措施合理、有效,同时验证了本文的部分研究成果。

本书的各项研究成果对软土地区高速公路拓宽工程的设计具有重要意义,并为进一步的研究奠定了良好的基础。

目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 我国已有工程实践的总结与分析	3
1.3 公路拓宽工程的国内外研究现状	8
1.3.1 设计、施工工艺的研究	8
1.3.2 理论与研究与数值模拟	11
1.3.3 试验研究	14
1.4 桩网地基的应用与研究现状	16
1.4.1 桩网地基的工程应用	16
1.4.2 桩网地基的设计方法	20
1.5 主要研究内容及关键技术	23
1.5.1 主要研究内容	23
1.5.2 关键技术	24
1.6 技术路线与章节安排	24

第 2 章 软土地区高速公路拓宽有限元分析的原理及其实现	25
2.1 软土地区高速公路拓宽工程的特点	25
2.1.1 地基软弱	25
2.1.2 新老路基产生不协调变形	27
2.1.3 施工沉降对老路结构影响显著	28
2.1.4 地基处理要求高	28
2.2 土体非线性本构模型	29
2.2.1 Mohr-Columb 模型	29
2.2.2 剑桥模型	31
2.3 材料非线性的有限元求解	38
2.3.1 刚度迭代法	38
2.3.2 荷载增量法	40
2.3.3 增量迭代法	42
2.4 接触的有限元模拟	43
2.4.1 接触面单元模型	43
2.4.2 接触模拟在 ABAQUS 中的实现	47
2.5 流固耦合	50
2.5.1 应力平衡方程	50
2.5.2 渗流连续方程	51
2.6 本章小结	52
第 3 章 软土地区高速公路拓宽工程路基路面的力学响应	53
3.1 有限元模型的基本考虑	53
3.1.1 模型考察对象	53
3.1.2 模型分析历程	55
3.2 有限元模型的建立	55
3.2.1 几何模型及边界条件	55
3.2.2 材料模型及参数	56

3.2.3	荷载模型及加载历程	57
3.2.4	单元类型及网格划分	58
3.3	老路为天然地基时的力学响应	59
3.3.1	地基沉降及侧向位移	59
3.3.2	超孔隙水压力	62
3.3.3	路基顶面变形	64
3.3.4	新老路面变形附加应力	66
3.4	老路为复合地基时的力学响应	67
3.4.1	考虑老路地基粉喷桩处理的计算模型	68
3.4.2	老路复合地基对路基路面变形及应力性状的影响	71
3.5	本章小结	76
第4章	高速公路拓宽工程中桩承式加筋路堤的机理与作用	78
4.1	桩承式加筋路堤的应用机理	78
4.1.1	土拱效应	79
4.1.2	土工格栅	80
4.1.3	桩土应力集中	82
4.2	拓宽工程中桩承式加筋路堤三维有限元分析模型	84
4.2.1	几何模型及边界条件	84
4.2.2	材料模型及荷载模型	85
4.2.3	桩土及筋土接触的处理	86
4.2.4	单元类型及网格划分	86
4.3	桩承式加筋路堤的作用	89
4.3.1	桩土作用	89
4.3.2	格栅应力和变形	91
4.3.3	土拱效应	92
4.3.4	地基沉降及超孔隙水压力	93
4.3.5	路基顶面变形	96

4.3.6	路面变形附加应力	98
4.4	本章小结	99
第5章	桩承式加筋路堤设计参数的敏感性及其优化	101
5.1	路基高度	101
5.1.1	桩土应力比	102
5.1.2	地表沉降	102
5.1.3	格栅应力	104
5.1.4	路基顶面变形	105
5.1.5	路面应力	106
5.2	路基横断面布桩方式	107
5.2.1	桩土应力比	108
5.2.2	地表沉降	108
5.2.3	格栅应力	110
5.2.4	路基顶面变形	111
5.2.5	路面应力	112
5.3	桩长	113
5.3.1	桩土摩擦	113
5.3.2	地表沉降	114
5.3.3	路基顶面变形	115
5.3.4	路面应力	117
5.4	路基纵向桩间距	118
5.4.1	地表沉降	119
5.4.2	格栅应力	121
5.4.3	路基顶面变形	122
5.4.4	路面应力	124
5.5	设计优化的建议	124
5.6	本章小结	125

第 6 章 试验路实施与效果评价	127
6.1 试验路概况	127
6.2 试验路处理方案设计	128
6.3 观测方案设计	132
6.3.1 观测断面选择	132
6.3.2 观测项目	132
6.3.3 元件布设	133
6.4 实施效果分析与评价	134
6.4.1 沉降	134
6.4.2 分层沉降	135
6.4.3 侧向位移	138
6.4.4 格栅应变	141
6.4.5 土压力	143
6.4.6 竖向土压力和孔隙水压力	145
6.5 本章小结	146
第 7 章 结论与展望	147
7.1 主要结论	147
7.2 进一步研究的工作方向	150
参考文献	152
后记	163