



同济大学 1907-2017  
Tongji University



同济博士论丛  
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

许德胜 肖汝诚 著

# 非协调板壳元理论研究及 在桥梁分析中的应用

Incompatible Shell Element and Its Application  
In Bridge Analysis



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

许德胜 肖汝诚 著

# 非协调板壳元理论研究及 在桥梁分析中的应用

Incompatible Shell Element and Its Application  
In Bridge Analysis



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

本书共 8 章,主要针对桥梁结构精细化分析的计算精度和求解效率,对桥梁结构分析理论中的数值方法做了研究,并用于实桥的结构分析。具体内容包括绪论、非协调实体退化板单元、非协调实体板单元、非协调壳单元、基于非协调壳元的组合单元、混凝土桥梁徐变分析、桥梁动力特性分析实例以及对未来的展望等。

本书适合土木工程、桥梁与隧道及相关专业的专业人士作为参考资料,也可供对此有兴趣的人士参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

非协调板壳元理论研究及在桥梁分析中的应用 / 许德胜,肖汝诚著. —上海:同济大学出版社,2017.8

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-6827-1

I. ①非… II. ①许…②肖… III. ①桥梁结构—结构分析—数值方法—研究 IV. ①U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 059449 号

---

## 非协调板壳元理论研究及在桥梁分析中的应用

许德胜 肖汝诚 著

出品人 华春荣 责任编辑 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](http://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 10.75

字 数 215 000

版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6827-1

---

定 价 53.00 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	关侏红
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 钱梦騷  
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 卢元姗 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

现代桥梁结构形式日趋复杂,简化分析方法已不能完全满足桥梁结构分析的要求,有必要对全桥结构进行精细分析。本文针对桥梁结构精细化分析的计算精度和求解效率,对桥梁结构分析理论中的数值方法做了研究,并用于实桥的结构分析。

在八节点三维实体等参元基础上,将板理论基本假定引入弹性应力应变矩阵,并为局部坐标系下的挠度位移分量附加非协调位移,构造了非协调实体退化板单元。采用分域积分方法使单元可考虑普通钢筋的加强作用。单元厚薄通用,可用于正交异性钢桥面铺装层分析。

通过对板的法向位移沿板厚方向的二次插值,构造了采用完全三维本构关系,可考虑结构三维应力状态的实体板元,单元可用于混凝土箱梁各构件的法向应力分析。为确保不规则单元通过分片检验,推导了显式表达的高阶非协调位移模式修正项。并且,通过为板元面内位移分量附加非协调位移,构造了适合箱形复杂截面桥梁分析的非协调壳元,使箱梁桥结构分析更加简单、高效。

为提高计算效率,基于非协调板壳元构造了可以大规模缩减计算量的组合单元。通过为组合单元各子域分别附加前文壳元的非协调位移

模式反映单元内各构件的变形,并在子域内确保组合单元通过分片检验。组合单元允许一个单元内含有不同的材料和构件,对钢-混凝土组合结构桥梁分析十分有效。

基于广义 Maxwell 黏弹性模型,对混凝土桥梁长期荷载作用下的徐变效应进行研究,并采用引入广义 Maxwell 黏弹性模型的组合单元研究了钢-混凝土组合截面桥梁的长期受力性能。

最后,将组合单元用于杭州文晖斜拉桥的动力特性分析,并与脉动试验结果进行了比较。

# 目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 桥梁结构分析的数值方法 .....	5
1.2.1 有限单元法研究进展 .....	5
1.2.2 板梁分析理论研究进展 .....	8
1.2.3 组合单元法研究进展 .....	10
1.2.4 混凝土桥梁徐变计算理论研究进展 .....	11
1.3 已有研究中存在的不足 .....	13
1.4 本文研究的主要内容 .....	14
第 2 章 非协调实体退化板单元 .....	17
2.1 概述 .....	17
2.2 非协调元理论与分片检验 .....	18

2.3	非协调实体退化板单元	20
2.3.1	单元几何与坐标系	20
2.3.2	应力-应变本构关系	22
2.3.3	非协调位移模式	25
2.3.4	单元刚度矩阵	27
2.4	单元考核	29
2.4.1	单元基本品质试验	31
2.4.2	其他单元品质试验	37
2.5	本章小结	40
<b>第3章</b>	<b>非协调实体板单元</b>	<b>41</b>
3.1	概述	41
3.2	非协调位移模式	42
3.3	显式表达的非协调位移模式修正项	43
3.4	单元考核	47
3.5	本章小结	53
<b>第4章</b>	<b>非协调壳单元</b>	<b>54</b>
4.1	概述	54
4.2	单元刚度矩阵	56
4.3	单元节点应力	58
4.4	单元质量矩阵	61
4.5	程序实现	62
4.6	单元考核	65
4.6.1	单元基本性能测试	65
4.6.2	桥梁动力特性分析	72

4.6.3	箱梁剪力滞分析	76
4.6.4	箱梁约束扭转分析	79
4.7	本章小结	81
<b>第5章</b>	<b>基于非协调壳元的组合单元</b>	<b>82</b>
5.1	概述	82
5.2	单元几何及等参变换	84
5.3	非协调位移模式	87
5.4	程序实现	89
5.5	单元考核	90
5.6	本章小结	99
<b>第6章</b>	<b>混凝土桥梁徐变分析</b>	<b>100</b>
6.1	概述	100
6.2	基本假定	103
6.3	黏弹性本构关系	104
6.3.1	单轴应力状态下的本构关系	104
6.3.2	空间应力状态下的本构关系	108
6.4	考虑徐变的非协调元有限元列式	109
6.5	程序实现	113
6.6	单元考核	114
6.6.1	单元基本性能测试	114
6.6.2	钢-混凝土组合截面桥梁徐变分析	116
6.7	04 规范混凝土徐变计算	120
6.8	本章小结	122

第 7 章 桥梁动力特性分析实例 .....	123
7.1 概述 .....	123
7.2 文晖大桥概况 .....	124
7.3 有限元模型 .....	127
7.4 文晖大桥动力特性结果 .....	131
7.5 本章小结 .....	133
第 8 章 结论与展望 .....	135
8.1 结论 .....	135
8.2 进一步研究的方向 .....	136
参考文献 .....	138
后记 .....	152



# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 概 述

20 世纪 80 年代以来,我国已建成了多座具有世界影响力的大跨度桥梁。随着交通量的增加和对桥梁美学等因素的重视,宽幅桥梁、曲线桥梁和异型桥梁等复杂结构层出不穷。桥梁跨度的显著提高以及新型结构形式的不断涌现对工程技术人员的分析水平提出了更高要求,传统简化分析方法已不能完全满足现代桥梁结构设计的要求,必须借助模型试验或精细化数值模型来获得桥梁结构的准确受力性能。近 20 多年来,随着计算机技术的进步,桥梁结构分析已经历了从线性计算到非线性计算,从静力计算到动力计算,从平面计算到空间计算,从局部模型计算到全桥模型计算的过渡。相较模型试验而言,数值分析方法以其低廉的成本和便于实现性在现代桥梁结构设计中引起越来越多的关注。

目前,有限单元法已成为土木工程领域中最通用、最有效的数值分析方法。利用有限元法分析桥梁结构有多种离散模型,常用的有空间梁单元法、板壳元法、三维实体元法和梁格法<sup>[1]</sup>。

空间梁单元法采用一维空间梁单元对桥梁结构进行离散。空间梁单元假定横截面尺寸与桥梁跨度相比较小,可将实际结构视为作用在剪