



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

张常光 张庆贺 著

统一强度理论在非饱和土 及隧道收敛约束法中的应用研究

Application of Unified Strength Theory in Unsaturated Soils
and the Convergence-Confinement Method



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



总主编 伍江 副总主编 雷星晖

张常光 张庆贺 著

统一强度理论在非饱和土 及隧道收敛约束法中的应用研究

Application of Unified Strength Theory in Unsaturated Soils
and the Convergence-Confinement Method



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

强度理论包括材料强度理论和结构强度理论,结构强度理论及应用研究具有重要的理论意义和实用价值。本书在连续介质理论和工程应用的框架下,以统一强度理论为基础,对非饱和和土强度理论及工程应用和隧道收敛约束法的应用改进进行了系统的研究,所得结论对岩土工程和隧道工程的结构设计具有重要的指导意义。

图书在版编目(CIP)数据

统一强度理论在非饱和土及隧道收敛约束法中的应用研究/张常光,张庆贺著. —上海:同济大学出版社,2017.8
(同济博士论丛/伍江总主编)
ISBN 978-7-5608-6982-7

I. ①统… II. ①张…②张… III. ①强度理论—应用—非饱和—混凝土强度—研究②强度理论—应用—隧道工程—研究 IV. ①TU528.07②U45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 091051 号

统一强度理论在非饱和土及隧道收敛约束法中的应用研究

张常光 张庆贺 著

出 品 人 华春荣 责任编辑 陆克丽霞 卢元姗
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 13.5
字 数 270 000
版 次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6982-7

定 价 64.00 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	关侗红
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	何品晶
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

强度理论包括材料强度理论和结构强度理论,结构强度理论及应用研究具有重要的理论意义和实用价值。一个合理又恰当的强度理论,不仅可以提高工程的质量和耐久性,而且还能带来巨大的经济效益和社会效益。结构的强度理论效应有时比计算方法改进的影响还大得多,但现有的结构强度理论解析研究进展缓慢,只采用了一两个零散的单一准则,有的甚至是不合理的,并且不能在理论上给出总的变化规律。统一强度理论包括了现有的各种主要强度理论,它可以适合于各类不同特性的工程材料,同时,统一强度理论覆盖了外凸极限面的所有区域,可以给出一系列有序的理论解答,为结构强度理论效应的研究提供了一个有效的手段和理论基础。统一强度理论在非饱和土强度方面的应用还是空白,同时,在隧道收敛约束法中的应用也仅仅是一个开始,缺乏深入的系统研究。本书在连续介质理论和工程应用的框架下,以统一强度理论为基础,对非饱和土强度理论及工程应用和隧道收敛约束法的应用改进进行了系统的研究,所得结论对岩土工程和隧道工程的结构设计具有重要的指导意义。主要研究内容与成果如下:

(1) 将非饱和土抗剪强度公式分为 4 类,分析当前抗剪强度公式的特点及研究不足,指出吸附强度表达式的不同导致了抗剪强度公式的多样性,并总结当前非饱和土真三轴试验的研究现状以及完整真三轴试验的研究内容。

(2) 利用双剪应力概念建立了复杂应力状态的非饱和土统一强度理论,它包括饱和土的统一强度理论和非饱和土的 Mohr-Coulomb 强度准则,而

且还包括很多其他新的强度准则。其极限线覆盖了从内边界的 Mohr - Coulomb 强度准则到外边界的双剪应力强度理论之间的所有区域,可适用于各种不同特性的非饱和土。利用刚性和柔性真三轴仪的试验结果进行了试验验证,同时指出外接圆 Drucker - Prager 准则不能反映非饱和土的真实强度特性,非饱和土统一强度理论可以线性逼近拓展的非线性 SMP 准则。

(3) 拟合了高基质吸力的一个抗剪强度参数,结合非饱和土平面应变抗剪强度统一解,推导了非饱和土主动及被动土压力、地基极限承载力和临界荷载的解析解。所得解析解具有广泛的理论意义,基于 Mohr - Coulomb 强度准则的结果是解析解中参数 $b = 0$ 时的特例,参数 b 取其他值可得到一系列新的解答;当基质吸力为零时,得到饱和土对应解;土体侧压力系数 $k_0 = 1$ 时,得到自重应力场如同静水压力时的地基临界荷载。经与主动土压力及地基极限承载力的试验结果比较,验证了对应解析解的正确性,并探讨了中间主应力、高低基质吸力及分布和侧压力系数的影响特性。

(4) 所得深埋圆形岩石隧道弹-脆-塑性应力和位移的解析新解是真正意义上的理论解析解,综合反映了中间主应力、围岩脆性软化、剪胀特性、塑性区半径相关的弹性模量和不同弹性应变定义等影响,是一系列有序有规律解的集合,能退化为众多已有解答,而且还包含很多其他新的解答,具有广泛的适用性和很好的可比性。经与统一弹-塑性有限元结果以及广义 Hoek - Brown 经验强度准则半解析解的比较,进一步验证了解析新解的正确性。

(5) 通过与其他位移释放系数、支护力系数、弹性数值模拟结果以及工程实测数据等比较,充分说明了 Vlachopoulos 和 Diederichs(2009)以围岩塑性区最大半径 $R_{\max}$ 为基础的位移释放系数的正确性和广泛适用性,并得出:以 Panet(1995)为代表的弹性位移释放系数低估了支护压力,以 Hoek(1999)为代表的塑性位移释放系数仅适用于相对半径 $R_{\max}/r_i = 2$ 的隧道围岩;由支护力系数得到的支护压力偏小,围岩稳定变形偏大。

(6) 结合代表性硬岩和软岩两种岩体,对比分析各影响因素以及因空间

效应差异、不同支护起始位置方法等所造成的收敛约束不同,得出:隧道结构的强度理论效应显著,相应的支护可以减弱或改用轻型支护;理想弹-塑性模型或不考虑围岩剪胀特性低估了隧道塑性区范围和变形,设计偏危险;半径相关的围岩塑性区弹性模量得到的围岩位移和特征曲线处于上、下限之间,能体现隧道开挖卸载受扰程度的距离渐进变化;塑性区弹性应变应优先选用更合理和准确的第三定义,各因素之间存在相互影响;不宜将依据距开挖面较远处得到的支护压力而设计的支护结构随意前移,应依据围岩特性,合理地适时进行支护。

目 录

总序	
论丛前言	
前言	

第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景和研究意义	1
1.2 非饱和土的强度特性	4
1.2.1 非饱和土的基质吸力和抗剪强度	4
1.2.2 非饱和土真三轴试验	6
1.2.3 非饱和土抗剪强度的非线性	8
1.3 岩石的中间主应力效应及强度理论	11
1.3.1 岩石的中间主应力效应试验及规律	11
1.3.2 岩石强度理论	14
1.4 收敛约束法的原理及研究现状	18
1.4.1 收敛约束法的原理	18
1.4.2 围岩特征曲线	20
1.4.3 开挖面的空间效应	22
1.5 主要研究内容、创新点及技术路线	25
1.5.1 主要研究内容	25
1.5.2 主要创新点	26
1.5.3 技术路线	26

第 2 章 统一强度理论简介	28
2.1 统一强度理论的力学模型	28
2.2 统一强度理论的表达式	31
2.2.1 双剪统一屈服准则	31
2.2.2 以拉应力为正的统一强度理论	31
2.2.3 以压应力为正的统一强度理论	33
2.2.4 平面应变状态下的统一强度理论	35
2.3 统一强度理论的极限面	36
2.4 统一强度理论的试验验证及应用发展	38
2.4.1 岩石真三轴试验验证	38
2.4.2 现有广泛应用于岩土体强度理论的缺陷	39
2.4.3 统一强度理论的应用	40
2.5 统一强度理论的意义	42
2.6 本章小结	43
第 3 章 非饱和土统一强度理论及验证	45
3.1 土-水特征曲线	45
3.2 应力状态变量	48
3.3 非饱和土的抗剪强度理论	50
3.3.1 抗剪强度公式分类	50
3.3.2 抗剪强度公式的特点及不足	57
3.4 非饱和土统一强度理论	59
3.5 真三轴试验验证	63
3.5.1 刚性真三轴仪的试验验证	63
3.5.2 柔性真三轴仪的试验验证	66
3.6 本章小结	70
第 4 章 非饱和土平面应变抗剪强度统一解及应用	72
4.1 平面应变抗剪强度统一解	72
4.2 平面应变抗剪强度统一解的应用	76
4.2.1 土压力	77

4.2.2	极限承载力	81
4.2.3	临界荷载	84
4.3	解析解的可比性及验证	88
4.3.1	可比性分析	88
4.3.2	主动土压力实测验证	89
4.3.3	极限承载力模型试验验证	91
4.4	参数影响分析	94
4.4.1	土压力的参数分析	95
4.4.2	极限承载力的参数分析	98
4.4.3	临界荷载的参数分析	102
4.5	本章小结	104
第5章	深埋圆形岩石隧道弹-脆-塑性分析	106
5.1	基本假定	107
5.1.1	轴对称开挖平面应变模型	107
5.1.2	弹-脆-塑性模型及剪胀特性	108
5.2	半径相关的塑性区弹性模量	109
5.3	弹-脆-塑性解析新解	111
5.3.1	应力解析新解	111
5.3.2	位移解析新解	113
5.4	解析新解的可比性分析及验证	116
5.4.1	可比性分析	116
5.4.2	与统一弹-塑性有限元结果比较	117
5.4.3	与广义 Hoek - Brown 经验强度准则解比较	119
5.5	参数影响分析	122
5.5.1	中间主应力影响分析	122
5.5.2	脆性软化影响分析	124
5.5.3	剪胀特性影响分析	125
5.5.4	塑性区弹性模量影响分析	126
5.5.5	塑性区弹性应变影响分析	129
5.6	本章小结	132

第 6 章 隧道开挖面空间效应及支护压力确定	134
6.1 开挖面空间效应机理	135
6.2 支护力系数法	136
6.3 位移释放系数法	138
6.3.1 位移释放系数公式	138
6.3.2 位移释放系数比较	141
6.4 空间效应比较	142
6.4.1 不同位移释放系数比较	142
6.4.2 与支护力系数法比较	147
6.4.3 弹性数值模拟及工程实测数据验证	148
6.5 支护压力确定及对比分析	150
6.5.1 隧道支护设计与空间效应的关系	150
6.5.2 不同的位移释放系数	151
6.5.3 不同的支护施作距离	153
6.5.4 不同的支护起始位置方法	154
6.5.5 与支护力系数法的对比	156
6.6 参数影响分析	158
6.6.1 中间主应力的影响	158
6.6.2 脆性软化的影响	160
6.6.3 剪胀特性的影响	161
6.6.4 塑性区弹性模量的影响	162
6.6.5 塑性区弹性应变的影响	164
6.7 本章小结	166
第 7 章 结论与展望	168
7.1 结论	168
7.2 展望与建议	171
参考文献	172
后记	194