



国家科学技术学术著作出版基金
上海科技专著出版资金
同济大学学术专著（自然科学类）出版基金

资助项目

Theory and Engineering Practice of UNDERGROUND Structure Design

地下结构设计 理论与方法及工程实践

孙 钧 等 著
朱汉华 主 审
许建聪 副主审



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

国家科学技术学术著作出版基金
上海科技专著出版资金 资助项目
同济大学学术专著(自然科学类)出版基金

地下结构设计理论与方法 及工程实践

孙 钧	等 著
朱汉华	主 审
许建聪	副主审



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

地下结构设计理论与方法及工程实践/孙钧等著.

—上海:同济大学出版社,2016.6

ISBN 978-7-5608-6428-0

I. ①地… II. ①孙… III. ①地下工程—结构设计
IV. ①TU93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 146265 号

地下结构设计理论与方法及工程实践

孙 钧 等 著 朱汉华 主 审 许建聪 副主审

出 品 人: 华春荣

策划编辑: 杨宁霞

责任编辑: 季 慧 胡 毅

封面设计: 陈益平

责任校对: 徐春莲

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(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、建筑书店、网络书店
排版制作 南京新翰博图文制作有限公司
印 刷 上海中华商务联合印刷有限公司
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 58.25
字 数 1 454 000
版 次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-6428-0
定 价 199.00 元

版权所有 侵权必究 印装问题 负责调换

内 容 提 要

本书为国家科学技术学术著作出版基金、上海科技专著出版资金、同济大学学术专著(自然科学类)出版基金资助项目。

全书系统总结了孙钧院士学术团队近十年来主持承担各类重大地下工程结构设计理论与方法研究的若干创意性成果,包括:海底隧道制定最小埋深及其衬砌结构设计、软基盾构法越江隧道纵向三维数值计算、水工输水隧洞预应力混凝土复合衬砌相互作用及其深大竖井基坑围护结构静动力分析、地下工程施工变形预测与控制的人工智能方法、地下水封油库围岩块体稳定分析与渗流控制等方面所作的较深入细致的探讨;在一些地下结构设计关键技术与工程应用方面,也体现了多项学术上新的突破,如:桥梁桩基础的群桩效应和工后沉降、桩基三维非线性抗震动力分析与试验台试验、江床浅层砂土局部液化动三轴试验及其对大桥桩基承载力的影响、悬索大桥锚碇结构计入土体流变响应的时效数值分析与相关非常规土工试验以及选用多个根键式小沉井的组合式锚碇方案、飞机跑道软基土纵向差异沉降的固结与蠕变三维黏弹塑性耦合效应,等等;最后,搜集了近年来作者在国内多次专业研讨会、论证会议以及与专业媒体访谈中所提的书面意见,并进行了摘引。

本书可供各类地下工程和隧道业界广大设计科研人员以及高校相关专业的老师与研究生们参考阅读。



学术简历

孙钧,岩土力学与工程、隧道与地下建筑工程专家。1949年春毕业于上海国立交通大学土木工程学系,1956年随苏联专家 СНИТКО 教授攻读钢桥工程副博士学位,1980年美国北卡州立大学从事“博士后”研究。现任同济大学地下建筑工程系资深荣誉一级教授,1991年当选中国科学院(技术科学部)学部委员/院士。历任国际岩石力学学会副主席暨中国国家小组主席、中国土木工程学会副理事长(现学会顾问、名誉理事)、中国岩石力学与工程学会理事长(现名誉理事长);全国“博士后”管委会专家委员会土建学科评审组召集人,国家自然科学奖评委,国内外若干所知名大学和科研院所的名誉教授、客座研究员。1960年起,在同济大学主持兴办了国内外首个“隧道与地下建筑工程学”专业。在隧道与地下结构学科领域建立并开拓了新的学科分支——地下结构工程力学,是国内外该子学科的主要奠基人和开拓者之一。在岩土材料工程流变学、地下结构黏弹塑性理论、地下防护工程抗震抗爆动力学、城市环境土工学和软科学理论与方法在岩土力学与工程中的应用等学科领域有深厚学术造诣并作出了重要贡献。20世纪80年代初叶起,承担并完成了国家重点科技攻关项目,国家自然科学基金重大、重点和面上项目,省、部(上海市)级重大研究项目以及各项重点工程研究课题约70项。参与许多国家重大工程建设项目,诸如:长江三峡工程,南水北调工程,港珠澳大桥岛隧工程,京珠高速、秦岭高速、兰武客运专线等越岭公路、铁路隧道群;厦门、青岛和长江口海底隧道,多座跨越长江/黄浦江/钱塘江水底隧道;北京、上海、南京、广州、深圳、天津、杭州、青岛等诸大城市的地下铁道和城市地下空间的规划与建设;鲁布革、天生桥、天荒坪、拉西瓦、小湾和漫湾等水电地下工程,大亚湾核电站广州从化抽水蓄能电站地下厂房;淮南、淮北大型煤矿山巷洞工程;以及长江中、下游和跨越珠江若干座特大跨悬索大桥和斜拉大桥工程(阳逻、润扬、苏通、泰州、虎门一桥)等等,不一而足。科研成果应用于生产实际,取得了巨大的技术、经济效益。在国内外发表学术论文380余篇,并专著10部、参著3部学术著作。数十年来先后获国家级奖励4项、部委(省、市)级奖励17项,其中一等奖4项;由国外和知名人士颁发的终生荣誉一等奖2项,连同其他各种奖励合共26项。1997年入选英国剑桥传记中心世界名人录;2015年初获国际岩石力学学会会士(ISRM Fellow 2015)荣誉称号。

序

应邀谨为同济大学教授孙钧先生的近作《地下结构设计理论与方法及工程实践》专著,写一点介绍。

孙钧先生,同济大学一级、荣誉教授,中国科学院资深院士,国内外老一辈的岩土力学与工程、隧道与地下工程学者和专家。他结合培养博士研究生和博士后,一生孜孜不倦从事高水平的土木工程有关应用基础与工程技术方面的科学研究,成果丰硕,是国内外“地下结构工程力学”(1963—1965)子学科研究的主要奠基人和开拓者之一。孙先生数十年来笔耕不辍,自20世纪80年代初起已先后在国内外发表学术论文360余篇,科技专著10部。先生在岩土材料工程流变学、地下结构黏弹塑性理论和地下工程抗震抗爆动力学等子学科研究领域均有深厚造诣;近25年来,又致力于城市环境土工学和软科学(侧重智能科学)的理论与方法在岩土力学及工程中的应用方面的学术研究,也已有新的创意和进取。其中,在大变形非线性岩土流变力学、地下工程施工变形的人工智能预测与模糊逻辑控制和隧道结构耐久性设计与服役寿命预测等方面开展原创性研究,据专家鉴定认定:各该方面的学术成果居国际领先地位,成果应用于许多国家重大地下结构与隧道工程建设项目,取得了巨大的技术效益和经济效益。

我读过孙先生的一些论著,这次又粗阅了本书的“前言”和“目录”,深感孙先生写作的特色是在追求学术水平和理论严密的同时,更十分注意学科理论密切联系工程实际。这次他将十多年来从事研究的许多工程项目,择其比较重大的十多项,基本上以每项工程为书中的一章,在以原先已完成的各项《工程研究总结报告》为素材的基础上,重新梳理成学术专著性文稿。作为书中各章研究对象的工程项目主要有:厦门翔安我国首座海底隧道、上海崇明越江隧道、国家特大型战略地下水封储油洞库、南水北调中线穿越黄河输水隧洞、上海市地下铁道、特长大跨城市下立交地道,以及长江中下游阳逻、润扬、泰州和马鞍山等多座大跨悬索大桥的桩基和锚碇工程,以及浦东国际机场跑道软基工程等,不一而足。以上各该工程项目就其规模而言,许多都位列国内外前茅,有的更处于世界第一。所有这些重大国家建设项目的技术成就都为本书内容及其立论基础提供并

奠定了极其丰富的工程技术内涵和生产实践应用上的有力支撑。书中各项研究都已在工程设计中成功采用,深受工程设计界的认可和欢迎。各项研究以国家重大工程项目为对象和依托,研究成果又为工程实际采用提供了理论依据和技术支撑,这是十分难能可贵的。

本书研究工作的另一个特色,是其在内容和研究方法上的创新性。该书的创意特色是能很好利用从以上工程实践中涌现出来的技术难题,使之升华到理性高度上来认识,利用作者及其学术团队扎实的理论功底和技术经验,进一步求得问题的优化解决。书中所着重阐述的,诸如:海底隧道围岩最小覆盖层厚度、不同类别围岩对隧道衬砌变形约束的抗力系数、混凝土衬砌结构限裂和可靠度设计、硬岩块体力学稳定分析与地下水渗流控制、地下深大基坑施工变形的智能预测与控制、有压输水隧洞管片外衬与整筑复合衬砌(环向预施应力)的耦合相互作用分析、大桥墩基的群桩效应与工后沉降及大桥三维非线性抗震动力分析与振动台试验、中等烈度地震条件下江床浅层砂土的局部液化与地基侧向大变形对桩基承载力的影响,以及大跨悬索桥锚碇软土基础的结构时效变形与受力性状以及岩土非常规流变试验、新型组合式锚碇、土体固结与流变的三维耦合相互作用效应,等等,均极具创意性,有的研究内容和方法在国内外尚罕见报道,其原创性的研究特色是十分明显和突出的。

当前,国内基本建设蓬勃发展,其规模也日益恢宏,对高水平工程科学研究的需求更感日益迫切和需要。相信本书的付梓问世,对我国隧道与地下工程界的科技发展定有很大助益,这是可以预期的。我乐以见到本书的早日出版,并知晓已分别喜获国家科学技术学术著作出版基金、上海市科技专著出版资金和同济大学学术专著(自然科学类)出版基金的支持和资助,高兴地写述了以上一点文字,是为序。



2014年11月19日

中国工程院首届院士

中国人民解放军理工大学教授

中国岩石力学与工程学会理事长

我国著名岩土力学与地下工程学者、专家

前 言

自 20 世纪 90 年代中叶始,作者及其团队成员先后承担并完成了十多项国家重大和特大型地下工程、各类隧道和桥梁深水基础方面的科学研究任务,所进行的各项研究均以这些工程项目为背景和技术依托,通过研究使之在学科理论层面得到进一步的升华,运用工程地质、岩土力学、地下结构、计算机技术,乃至软科学(侧重智能科学)的理论与方法等手段,试从问题的本质和机理上为众多技术难题得到其优化解决,此处将所得成果汇撰成这本书作。本书素材多摘取自上述各该工程科学研究项目的成果总结报告,经过精选和提炼并着力深化到理论高度来理解和认识,进而作出较为详细深入的剖析而形成这一专著性文稿。

作者从多年来的科研实践中深切体会到,作为一本为工程技术服务学科理论性专著,其研究内容必须既富学术内涵又有重要的工程实用价值。本书选题源自于近年来两届国家五年计划的科技攻关项目和 863 项目,以及由国家自然科学基金资助的重点和面上项目,部委和省市委托下达的行业攻关与工程研究课题。书中研究成果都已分别通过了查新检索、结题验收和项目鉴定,其中的绝大多数已为工程纳用,成为各该工程项目设计施工中的重要参考,并取得了相当的技术效益和经济效益。

在学术创意性进取方面,本书内容经作者归纳整理后得到以下各项,它们是(按书中所在各章的位次排序):

(1) 在海底隧道设计中,对抗受高水头外水压力下隧道围岩沿纵向的最小覆盖层厚度,大跨曲墙扁拱隧道其周围各类围岩对约束隧道衬砌变形的抗力系数,钢筋混凝土衬砌结构为抗受海水腐蚀和高围压要求的限裂设计、其日后运营期的使用可靠性,以及海床下岩体风化囊区段计入围岩流变时效特性的分析计算等,均是隧道设计施工上的重要技术关键。本书这方面的研究成果不仅富含学术内涵,在工程实用上也极具价值。

(2) 埋置于软黏性地基内的盾构法长大越江水底隧道的结构设计,一般多侧重于其衬砌管片横剖面的内力和变形分析,而对沿隧道轴向纵长的设计计算则常有忽视,这是不够完整的。隧道的纵向受力和变形在管片错缝拼装条件下,要求涉及三维问题;在深埋情况下,还必须改用双面地基梁的理论和方法进行。这些都在一定程度上增加了设计计算上的难度和复杂性。在隧道纵向设计中,为了优化结构纵向受力条件,还要求审慎考虑纵向沉降缝的设置,它的设缝间距问题已成为业界探讨的热点。以上这些问题在本书中均有详尽细致的研究,这在当今的已有文献中尚少见报道。

(3) 对大直径输水有压水工盾构法隧洞设计,在国内首次采用了预制管片外衬与现浇预应力钢筋混凝土内衬构成的复合式衬砌结构,就其内、外衬层间界面设置防排水垫层与否的各种不同工况条件,着重对垫层与衬护新老混凝土间存在的不同粘结强度和摩擦阻力从而形成的界面剪应力传递及其分布情况,进行了细致周详的数值分析,论证了设置上述垫层与否的两种方案在受力上各自的优缺点与存在的问题。上项成果经工程竣工后现场测试,情况良好,成果应用于南水北调中线一期穿黄隧洞工程,研究水平可暂居当今国际领先

前沿。

(4) 有压输水水工圆形大跨隧洞采用盾构法掘进跨越江河,其两岸深大竖井采用地下连续墙作围护结构并逆作二次整筑式内衬,井内还设置有弯管和接头以及出入井口与竖井井筒顶底板构造;此外,盾构进、出井口时要求对口外地基进行各种加固处理。此处详细研讨了在各种不利的施工和运营工况下井筒复杂的三维受力与变形情况,还进行了竖井结构的抗震动力分析。

(5) 采用软科学(侧重智能科学)的理论和方法,主要是 B. P. 人工神经网络法进行软土地铁车站深大基坑和区间隧道以及悬索大桥锚碇基坑结构等施工开挖变形进行的多步滚动智能化预测与模糊逻辑控制。该法被誉为是一项高层次的信息化设计施工方法,采用层次递阶法对诸相关施工参数作调整的敏感性分析,节约了工期和巨额的附加投入,保证了工程安全。成果已为多处现场有效采用,取得了极大成功。

(6) 在传统赤平投影法的基础上,首次提出了采用“赤平投影解析法”及所研制的专用程序软件,应用于某特大型国家战略水封式地下储油洞库的硬岩块体稳定分析,详细论述了防止库内油品外泄和洞外饱水围岩地下水内渗产生交互渗流的有效控制方法。这些研究成果均已在工程中成功实施,为确保地下水封储油的安全提供了理论依据。

(7) 在为长江中下游几座大跨江大桥塔墩桩基础所分别进行的以下三项研究中,本书相应各章分别详细探讨并分析了以下技术关键问题:

① 定量论证并得出了:因“群桩效应”使大桥群桩基础总的承载力要较(单桩承载力 $\times$ 桩数)所得的总承载力为小,而桩基沉降量则较单桩沉降值为大的结论,这有助于维护桩基工程安全、保证设计质量。进而,采用土工流变力学方法分析了大桥主跨合龙后桩基工后沉降的历时发展,为计算悬索大桥因地基不均匀沉降引起上部桥跨结构的附加内力和变形提供了科学依据。

② 从多点、多自由度大型振动台试验(在日本九州大学由中日双方高校人员合作进行),结合大桥桩基进行了三维非线性抗震动力响应分析,研制了相应的计算机专用模块。

③ 首次提出了在中等地震烈度条件下,由土动三轴室内试验,研讨江床浅表部松散砂层产生“局部液化”(指砂土地震时土体仍可保留部分残余抗剪强度)的机理及其相应的土动力学表现,进而得出了地震时和震后因桩基础周边砂土局部液化对其承载力部分丧失所导致的不利影响并作出了定量评价。

(8) 在分别对长江中下游阳逻和润扬悬索大桥两座分别为深大圆形和矩形的重力型锚碇结构的研究中,就当时号称“神州第一锚”的嵌岩地下连续墙围护结构及其整筑式内衬,采用土工流变力学的理论与方法,辅之以土工流变室内试验,按各个不同施工工况,分别就墙体变形位移、坑周地表沉降和坑底地基塑性隆起的历时发展变化,及对工程周近长江大堤的汛期安全维护等众多技术难题逐一进行了剖析,确保了大桥锚碇工程安全实施。成果获 2008 年度国家科学技术进步二等奖。此外,还就由中交集团第二公路工程局创议的、就马鞍山市跨长江悬索大桥从传统采用的庞大巨型单一沉井式锚碇结构改为应用多个根键式小沉井作“化整为零”处理的比选方案,对其优缺点及存在的问题,从土工流变学的观点进行了详细的分析和论证。

(9) 在填海促淤造地,建设浦东机场二期跑道软基土体加固机理方面,深入剖析了软黏土主固结与其颗粒骨架蠕变变形相耦合并相互作用进行的黏弹塑性分析研究,作出了对该跑道纵向差异沉降与工后沉降的有效控制,确保了在地基土性不均匀情况下,约 4 000 m

长跑道在大型宽体 747 波音客机起降时的安全运营。

众所周知,我国近年来陆续蓬勃兴建的许多重大和特大型地下工程建设项目,就其主体尺寸或其在长度、直径和跨度等方面从全球范围而言多位居同类工程的前列。一些在过去中小型工程中不显突出的问题,由于它们在现行设计规范、规程中尚未及时纳入,更未见具体列述和反映,为此,在各该工程的设计中必须以高层次的理论分析和试验、测试为其建设提供科学依据与保障,进而使问题得到切实有效的优化解决。以上这些就为本书研究工作提供了必要的技术依托。另外,在当今众多相关学科间的有机融合与相互渗透,并在其结合点上派生出新的学科分支或边缘学科,则是各门学科发展的趋势和特色,这些在本书中多处涉及的、迄今尚不完全成熟的岩土和地下结构子学科中就反映得尤为突出和明显。本书在许多方面对上述情况均有一定程度的反映,似应看作是为适应现今学术潮流进展的一种体现。

本书与作者早年出版的一本《地下工程设计理论与实践》(上海科学技术出版社,1996年12月出版)和新近出版的一本《隧道结构关键技术研究与应用》(人民交通出版社,2014年12月出版)三书共为姊妹篇,可请读者合并评阅。

本书的成功付梓出版,作者要深深感谢有关研究项目/课题下达部门的大力支持和协助,它们是:国家科委(科技部)有关司、处,国家自然科学基金委,国务院南水北调办公室,江苏省科技厅,福建省交通厅,上海市科委和建交委,中国石油天然气管道工程公司,中国交通建设集团第二航务工程局和第二公路工程局,长江委勘察设计院研究院,润扬、阳逻、马鞍山、泰州等长江公路大桥建设指挥部,上海市地下铁道总公司,上海隧道工程股份有限公司,上海隧道工程与轨道交通设计研究院等政府和地方企业各部门、各单位。

本书承国家科学技术学术著作出版基金、上海市科技专著出版资金和同济大学学术专著(自然科学类)出版基金的支持和资助,谨在此深表谢意。

在本书问世之时,作者还要衷心感谢参与本书各章研究工作和分工助我撰作成稿的同济大学地下工程系和研究所的主要成员,他们是:高大钊、冯紫良、蔡晓鸿(校外)、陆浩亮、张子新、谢楠(校外)、郑永来、赵春风、许建聪等各位教授、副教授、副研究员,以及当时尚在学的各位博士后和博士生:赵其华、李云安、阮文军、李忠、马亢、郭永建等现已结业出站的博士后和刘洪洲、齐明山、赵旭峰、涂忠仁、荣耀、虞兴福、朱忠隆、袁金荣、姜安龙、王余富、廖一雷、吴小建、刘成、杨钊、戚玉亮、王东栋、潘晓明、王艳丽、黄慷、骆艳斌、袁灯平、孙昊、牛富生等已在我处获博士(个别硕士)学位的众多砚弟们。作者要在此深深铭记他们当年为完成上项科研任务或为本书写作付出的汗水与辛劳,作出的宝贵奉献;还要特别铭谢当年作者的助手和文秘、今已光荣退休的颜宝新女士,是她冒严寒、顶酷暑为我打印文稿而全身心地投入和服务。

作者怀着深深的敬意和感激,在此特别要向浙江省公路管理局总工程师、本书的主审朱汉华教授级高工,以及我室副主任、本书副主审许建聪副研究员两位表示真挚的谢忱,是他们夜以继日地为本书的审稿和编排在百忙中付出了大量心血,对本书内容的取舍和更好地组织写作等都提出了许多宝贵的经验、意见和建议。本书的顺利如期出版与朱、许两位的无私奉献是决然分不开的。作者谨在此再一次向二位鞠躬致谢!

我还要在此致意老友钱七虎、梁文灏两院士和我校袁勇教授,承他们慨允费心为拙著出版书写了过奖的推荐;更又承钱老学长百忙中费心为本书撰写序言,为拙著增光添彩。作者在极不敢当的同时,只能在此再说一句:深深拜谢了!

作者还要再三感谢同济大学出版社杨宁霞编审和本书责任编辑胡毅先生、季慧博士等多位在本书编辑完稿全过程中的劳心费力,给了我热忱而又卓有成效的协助和通力合作,谨在此再次深表我的感激之情!

韶华易度,岁月催人。大好青壮时光,转瞬已成追忆。作者现已老迈,而欣逢今朝国家昌盛,喜迎璀璨绚烂的大好时代!耄耋之年所幸拙体尚健,自不敢稍自懈怠,有意将这本能基本反映本人学术理念的点滴成果付梓问世,恭请业界广大同仁、读者和后人们评说、参考与借鉴,也是对自己数十年来笔耕不辍的些许慰藉吧。

孫 鈞

于乙未羊年雪冬佳日

记写于沪滨同济园

编写说明

一、本书参研和参编人员分工说明

本书各章为作者和所在项目组团队人员近年来承担有关各项工程科学研究任务进行探讨的学术成果,由作者负责和指导的团队 members 们集体完成。具体参加各章研究工作的主要人员和此后又参加本书相关各章初稿撰写的执笔人员名单,均一并汇列入以下清单,恭请参考,并志念。

参与本书各章研究与初稿撰写的人员姓名清单

章次	参与各章研究的主要人员	参与各章初稿撰写的人员
1	齐明山、涂忠仁、荣耀、赵旭峰、谢楠、蔡晓鸿	孙钧、许建聪、牛富生
2	李忠	李忠、孙钧
3	杨钊、王余富	郭永建
4	黄慷、郑永来、骆艳斌、袁灯平	郭永建
5	赵其华、李云安、朱忠隆、阮文军、袁金荣、虞兴福、孙昊	郭永建
6	张子新、廖一雷、刘成、王艳丽、许建聪	郭永建
7	王东栋、陆浩亮、冯紫良	马亢
8	戚玉亮、冯紫良	马亢
9	王艳丽、冯紫良	马亢
10	刘洪洲、高大钊、赵春风、姜安龙	郭永建
11	潘晓明	郭永建
12	吴小建	郭永建
13	孙钧	孙钧、郭永建

本书主审:朱汉华;副主审:许建聪。

二、各章研究对象所分别依托的重大工程建设项目说明

第1章 厦门市翔安海底隧道工程

第2章 上海市崇明长江水底隧道工程

第3章 南水北调中线一期穿越黄河盾构法输水隧洞工程

- 第4章 同第3章,穿黄隧洞的北岸深大竖井工程
- 第5章 上海市地下铁道和北虹路下立交地道工程、武汉市阳逻和镇江市润扬两座跨江悬索大桥深大基坑工程(智能反演、预测与控制)
- 第6章 某特大型国家战略水封地下储油洞库工程
- 第7章 江苏省泰州长江大桥主跨边墩桩基础工程(静力分析)
- 第8章 同第7章(抗地震动力分析)
- 第9章 同第7章(地震砂土液化)
- 第10章 润扬、阳逻两座悬索大桥锚碇基础工程(数值分析)
- 第11章 安徽省马鞍山市跨江悬索大桥锚碇基础工程(结构选型方案之一)
- 第12章 上海市浦东国际机场二期跑道地基工程
- 附录 作者近年来在各地若干大型桥、隧工程专家评审会议上的书面发言和受约访谈文稿,经摘引后的汇编

目 录

第 1 章 海底隧道衬砌结构设计若干技术关键研究	1
1.1 引言	1
1.2 抗外水压力海底隧道围岩最小覆盖层厚度研究	1
1.2.1 研究内容和目的	1
1.2.2 最小覆盖层厚度和围岩压力计算	2
1.2.3 海底隧道的最小覆盖层厚度	3
1.2.4 海底隧道围岩压力	12
1.2.5 对海底隧道渗水围岩承载圈的论证	28
1.2.6 本节小结	30
1.3 海底隧道围岩抗力系数的理论分析及其设计应用	31
1.3.1 研究意义和内容	31
1.3.2 围岩抗力系数的理论与方法	33
1.3.3 利用有限环理论的围岩抗力系数计算	34
1.3.4 海底隧道各区段围岩抗力系数计算	39
1.3.5 本节小结	51
1.4 海底隧道钢筋混凝土衬砌结构的限裂设计与分析	52
1.4.1 概述	52
1.4.2 海底隧道钢筋混凝土衬砌结构的限裂设计	55
1.4.3 海底隧道钢筋混凝土衬砌裂缝控制	69
1.4.4 本节小结	78
1.5 海底隧道衬砌结构运营期可靠性研究	80
1.5.1 概述	80
1.5.2 海底隧道运营期可靠性分析	93
1.5.3 对研究方法变更的说明及运营期隧道可靠性监测	111
1.5.4 本节小结	112
1.6 海床下岩体风化囊区段考虑围岩流变时效特性的数值分析	117
1.6.1 概述	117
1.6.2 海底隧道穿越风化囊区段围岩的流变属性	118
1.6.3 海底隧道围岩-衬护系统相互作用的流变时效数值分析	121
1.6.4 本节小结	137
参考文献	138
第 2 章 越江软基盾构法隧道管片衬砌结构纵向三维数值分析	141

2.1 引言	141
2.1.1 问题的提出	141
2.1.2 研究内容与预期成果	142
2.2 盾构法隧道管片衬砌结构纵向分析计算的理论和方法	142
2.3 越江软基盾构法隧道管片衬砌结构的纵向数值分析计算	144
2.3.1 基于双面弹性地基梁法分析的管片结构纵向沉降缝设置计算	144
2.3.2 计入结构与土体相互作用管片衬砌纵向沉降三维数值计算分析	170
2.4 本章主要结论	197
参考文献	202
 第3章 过江盾构法输水隧洞预应力混凝土复合衬砌的相互作用分析	204
3.1 引言	204
3.1.1 问题的提出	204
3.1.2 结构受力特征与复合衬砌力学机理	205
3.1.3 主要研究内容	206
3.2 研究工作的总体考虑和要求	207
3.2.1 管片接头模型的考虑	207
3.2.2 关于管片接头刚度的认识	207
3.2.3 对方案1(不设防水膜),内外衬上下层间的接触单元	208
3.2.4 对加设防水膜方案,考虑内外衬“单独”受力情况	209
3.2.5 按折线多边形双层叠合框架梁模拟计算	209
3.2.6 二次内衬施加预应力的计算	210
3.2.7 温度应力计算时的各项基础资料	210
3.2.8 复合衬砌接触界面的数值模拟	210
3.2.9 其他相关方面的问题	210
3.2.10 内衬施加预应力阶段,内衬与外衬管片的联合受力问题	211
3.2.11 对几处尚待商榷问题的进一步认识	212
3.3 工况1:单层管片圆环独自受力工况	213
3.3.1 计算条件	213
3.3.2 荷载及土层参数	213
3.3.3 管片接头力学性能	214
3.3.4 计算结果分析	214
3.4 工况2:预应力钢绞线有效应力计算	217
3.4.1 概述	217
3.4.2 内衬预应力张拉阶段工况计算	217
3.5 工况3:单层管片的初始状态计算	223
3.5.1 计算条件	223
3.5.2 计算结果分析	223
3.6 工况4:复合衬砌隧洞内全压通水运营工况,结构选型方案1,第一种工作 条件	225

3.6.1 计算条件	225
3.6.2 计算结果分析	226
3.7 工况 4:结构选型方案 1,第二种工作条件	231
3.7.1 计算条件	231
3.7.2 管片接头刚度性能参数和层间界面处理	231
3.7.3 计算结果分析	231
3.8 工况 4:结构选型方案 1,第三种工作条件	237
3.8.1 计算条件	237
3.8.2 计算结果分析	237
3.9 工况 4:结构选型方案 1,第四种工作条件	242
3.9.1 计算条件	242
3.9.2 计算结果分析	243
3.10 工况 4:结构选型方案 2,第一种工作条件	246
3.10.1 计算条件	246
3.10.2 计算结果分析	247
3.11 工况 4:结构选型方案 2,第二种工作条件	251
3.11.1 计算条件	251
3.11.2 管片接头刚度性能参数和层间界面处理	252
3.11.3 计算结果分析	252
3.12 隧洞复合衬砌结构温度应力分析计算	257
3.12.1 概述	257
3.12.2 输水隧洞温度场与热传导问题影响隧洞温度场变化的基本因素	257
3.12.3 隧洞温度场和衬砌结构温度应力计算	258
3.13 本章主要结论	269
附录:对设计方所提问题的回复意见	271
参考文献	273
 第 4 章 过江输水隧道盾构始发深大竖井结构静动力分析	 275
4.1 引言	275
4.2 竖井施工期及充水期三维静力分析	275
4.2.1 工程概况及研究方法	275
4.2.2 三维有限元计算模型	279
4.2.3 三维有限元计算成果及分析	283
4.2.4 计算结果和建议	289
4.3 竖井内弯管结构三维静力分析	291
4.3.1 内水压力作用下弯管应力计算	292
4.3.2 弯管温度应力计算	295
4.3.3 不利荷载组合工况的弯管应力计算	296
4.3.4 弯管结构应力计算成果汇总	298
4.3.5 上弯头截面弯矩计算	301

4.3.6 弯管结构计算分析结果评价	303
4.4 竖井内弯管结构三维抗震动力计算	304
4.4.1 概述	304
4.4.2 竖井内弯管结构的抗震拟静力计算分析	306
4.4.3 竖井内弯管结构的抗震动力计算分析	311
4.5 本章主要结论	315
参考文献	315
第5章 大型地下水封储油洞库硬岩块体稳定分析与渗流控制	316
5.1 引言	316
5.2 水封岩洞储油库工程概述	318
5.2.1 地质构造	318
5.2.2 水文地质条件	318
5.2.3 场区初始地下水渗流场分析	318
5.3 水封岩洞储油库洞室围岩块体稳定性分析	321
5.3.1 概述	321
5.3.2 赤平投影解析法略述	322
5.3.3 硬岩可动块体的稳定性判别	324
5.3.4 隧道围岩稳定性块体分析	329
5.3.5 计算成果	345
5.4 水封岩洞储油库地下水渗流控制研究	345
5.4.1 水封岩洞储油库渗流控制的理论和方法	346
5.4.2 水封岩洞储油库围岩地下水渗流量计算	350
5.4.3 三维洞室围岩渗流场分析	354
5.4.4 水幕系统评价	360
5.4.5 储油洞库水封效果评价	382
5.5 本章主要结论	382
第6章 桥梁桩基群桩效应及其承载力与沉降研究	385
6.1 引言	385
6.2 竖向荷载下桩基工作性状及其影响因素	386
6.2.1 竖向荷载下单桩的荷载传递性状	386
6.2.2 竖向荷载下群桩的工作性状	388
6.2.3 桩基沉降计算理论与方法	389
6.3 考虑群桩效应的桩基竖向承载力研究	398
6.3.1 确定群桩效应系数 η 的方法	398
6.3.2 某大桥群桩基础受力分析	400
6.4 考虑群桩效应的桩基沉降研究	409
6.4.1 竖向荷载作用下桩基沉降随时间的发展	410
6.4.2 考虑加筋效应的群桩沉降计算	417