

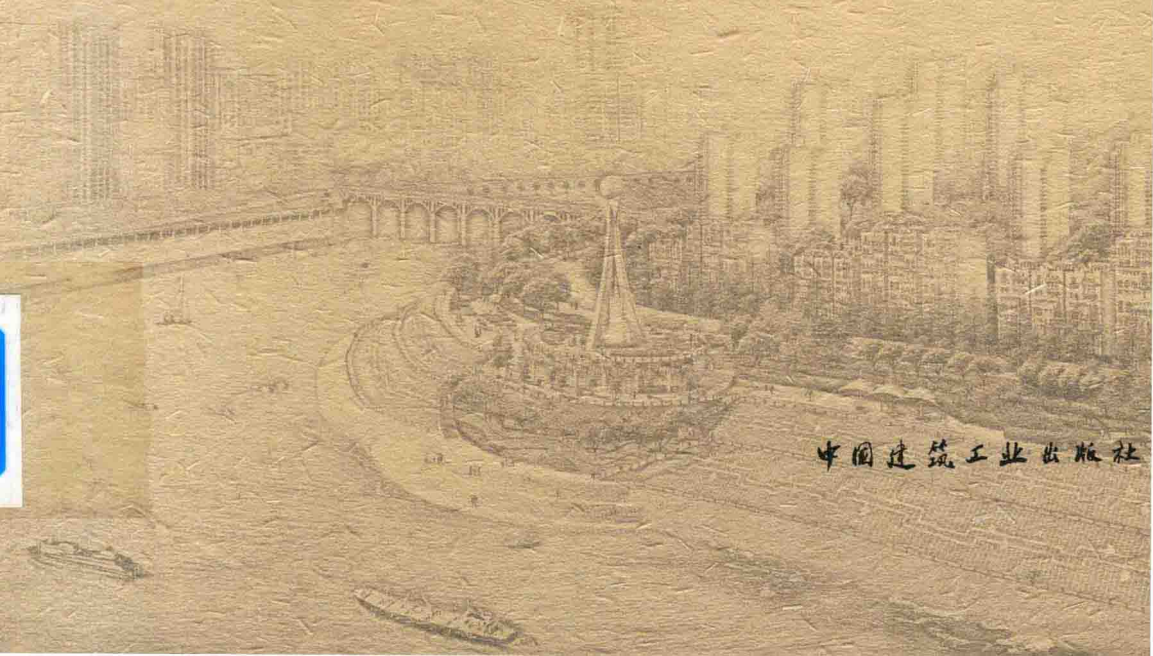


山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

# 山地城镇隧道下穿复杂建筑物（群）

## 施工安全控制研究

靳晓光 李亚勇 朱 玲 著  
王 艳 张 生 张亚鹏



中国建筑工业出版社

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

# 山地城镇隧道下穿复杂建筑物(群)施工安全控制研究

靳晓光 李亚勇 朱 玲 著  
王 艳 张 生 张亚鹏

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

山地城镇隧道下穿复杂建筑物(群)施工安全控制研究/靳晓光等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 9  
(山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列)  
ISBN 978-7-112-20971-2

I. ①山… II. ①靳… III. ①山地-城市隧道-地下建筑物-安全技术-研究 IV. ①U459.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 165989 号

山地城镇隧道建设过程中, 不可避免地要下穿复杂建筑物(群), 由于山地城镇地层的变异性和建筑物特征的多样性, 隧道施工和运营过程中如何保证隧道和上覆(邻近)建筑物的安全是土木工程领域研究的重点和难点。本书在广泛查阅国内外相关领域研究成果的基础上, 结合具体工程实例, 采用理论分析、室内试验、数值模拟、现场监测相结合的方法, 对隧道下穿建筑物围岩应力与位移的理论解、隧道围岩物性参数、隧道施工对地基基础及建筑物的影响、考虑围岩蠕变特性和节理特性的隧道下穿建筑物施工变形控制等问题进行了系统、深入的研究。

本书理论联系实际, 适用性强, 既可供土木工程及相关专业师生使用, 也可作为土木工程领域的技术和科研人员的参考书。

责任编辑: 张伯熙 杨 允

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐 张 颖

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列  
山地城镇隧道下穿复杂建筑物(群)施工安全控制研究

靳晓光 李亚勇 朱 玲 著  
王 艳 张 生 张亚鹏

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

唐山龙达图文制作有限公司制版

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16 $\frac{3}{4}$  字数: 334 千字

2017 年 12 月第一版 2017 年 12 月第一次印刷

定价: 60.00 元

ISBN 978-7-112-20971-2

(30603)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

## 山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

### 编委会名单

主 任：周绪红

副主任：张四平 毛志兵 文安邦 王清勤 刘汉龙

委 员：（按姓氏笔画排序）

卢 峰 申立银 任 宏 刘贵文 杜春兰

李正良 李百战 李英民 李和平 吴艳宏

何 强 陈宁生 单彩杰 胡学斌 高文生

黄世敏 蒋立红

## 总 序

中国是一个多山国家,山地面积约为 666 万  $\text{km}^2$ ,占陆地国土面积的 69%,山地县级行政机构数量约占全国的 2/3,蓄积的人口与耕地分别占全国的 1/3 和 2/5。山地区域是自然、文化资源的巨大宝库,蕴含着丰富的水力、矿产、森林、生物、旅游等自然资源,也因多民族数千年的聚居繁衍而积淀了灿烂多姿的历史遗迹与文化遗产。

然而,受制于山地地形复杂、灾害频发、生态脆弱的地理环境特点,山地城镇建设挑战多、难度大、成本高,导致山地区域城镇化水平低,经济社会发展滞后,存在资源低效开发、人口流失严重、生态环境恶化、文化遗产衰落等众多经济社会问题。截至 2014 年,我国云南、贵州、西藏、甘肃、新疆等山地省区城镇化率不足 40%,距离《国家新型城镇化规划(2014~2020)》提出的常住人口城镇化率达到 60%的发展目标仍有很大差距。因此,采用“开发与保护”并重的方式推进山地城镇建设,促进山地城镇可持续发展,对于推动我国经济结构顺利转型、促进经济社会和谐发展、支撑国家“一带一路”发展战略具有不可替代的重要意义。

为解决山地区域城镇化建设的重大需求,2012 年 3 月重庆大学联合中国建筑股份有限公司、中国建筑科学研究院、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所共同成立了“山地城镇建设协同创新中心”,针对山地城镇建设面临的安全与防灾关键问题开展人才培养、科技研发、学科建设等创新工作。经过三年的建设,中心围绕“规划—设计—建造—管理”的建筑产业链,大力整合政府、企业、高校、科研院所的优势资源,在山地城镇建设安全与防灾领域汇聚了一流科研团队,建设了高水平综合性示范基地,取得了有重大影响的科研理论与技术成果。迄今为止,中心已在山地城镇生态规划、山地城镇防灾减灾、山地城镇环境安全、山地城镇绿色建造、山地城镇建设管理等五大方向取得了一系列重大科研成果,培养和造就了一批高素质建设人才,有力地支撑了山地城镇的重大工程建设,并着力营造出城镇建设主动依靠科技创新、科技创新更加贴近城镇发展需求的良好氛围。

《山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列》集中展示了山地城镇建设协同创新中心在山地城镇生态规划与文化遗产保护、山地灾害形成理论与减灾关键技术、山地环境安全理论与可再生能源利用、山地城镇建设管理与可持续发展等领域的最新科研成果,是山地城镇建设领域科技工作者智慧与汗水的结晶。本套



丛书的出版，力图服务于山地城镇建设领域科学交流与技术转化，促进该领域高层次的学术传播、科技交流、技术推广与人才培养，努力营造出政产学研高效整合的协同创新氛围，为山地城镇的全面、协调与可持续发展做出新的重大贡献。

中国工程院院士  
重庆大学校长

周绪红

## 前 言

随着我国城市交通建设的快速发展,受城市用地的限制,必然要修建大量的隧道。山地城镇隧道工程埋深浅,地质条件差,围岩变化复杂,地表建筑物及地下管线密集。在隧道建设和运营过程中如何保证隧道和上覆(邻近)建筑物的安全是土木工程领域研究的重点和难点。

本书在广泛查阅国内外相关领域研究成果,分析总结隧道地勘和设计资料的基础上,结合具体工程实例,采用理论分析、室内单轴和三轴试验、数值模拟、现场监测相结合的方法,对隧道下穿建筑物围岩应力与位移的理论解、隧道围岩物性参数、隧道施工对地基基础及建筑物的影响、考虑围岩蠕变特性和节理特性的隧道下穿建筑物施工变形控制等问题进行了系统、深入的研究。

由于山地城镇地层的变异性 and 复杂性,以及地基基础和建筑结构的多样性,隧道施工过程中如何保证隧道和上覆(邻近)建筑物的安全还有很多问题需要研究,作者将以此为契机,继续努力,在山地城市复杂地层隧道与地下工程理论研究和工程建设方面贡献自己的力量。

本书是在总结提炼作者主持的科研项目研究成果的基础上完成的,同时吸收了相关论文、著作中的研究成果,本书的出版得到了重庆市山地城镇建设协同创新中心专项资助,作者在此表示最诚挚的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足和疏漏之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 1 绪论 .....                      | 1  |
| 1.1 研究背景及意义 .....               | 1  |
| 1.2 国内外研究现状 .....               | 2  |
| 1.2.1 既有建筑物与新建隧道相互影响解析理论 .....  | 2  |
| 1.2.2 隧道开挖引起地表及建筑物变形的研究 .....   | 4  |
| 1.2.3 隧道施工安全控制研究 .....          | 5  |
| 1.2.4 隧道及沿线建筑物变形控制标准 .....      | 8  |
| 1.3 本书的主要内容 .....               | 13 |
| 参考文献 .....                      | 14 |
| 2 隧道下穿建筑物围岩应力与位移的理论解 .....      | 19 |
| 2.1 概述 .....                    | 19 |
| 2.2 问题描述及理论计算模型 .....           | 20 |
| 2.2.1 第一部分的解答 .....             | 21 |
| 2.2.2 第二部分的解答 .....             | 23 |
| 2.3 地表任意线荷载作用下浅埋圆形隧道解析解 .....   | 29 |
| 2.4 理论计算与数值模拟对比分析 .....         | 33 |
| 2.5 地面荷载作用范围对隧道围岩应力及位移的影响 ..... | 36 |
| 2.5.1 对围岩应力的影响分析 .....          | 36 |
| 2.5.2 对围岩变形的影响分析 .....          | 38 |
| 2.5.3 对地表沉降的影响分析 .....          | 39 |
| 2.6 小结 .....                    | 40 |
| 参考文献 .....                      | 40 |
| 3 隧道围岩物性参数研究 .....              | 42 |
| 3.1 依托工程背景 .....                | 42 |
| 3.1.1 同茂隧道 .....                | 42 |
| 3.1.2 渝中连接隧道 .....              | 45 |
| 3.2 依托工程地勘推荐的岩土力学参数 .....       | 48 |



|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 3.3 隧道围岩岩石力学试验研究                 | 49  |
| 3.3.1 均质围岩岩石力学试验研究               | 49  |
| 3.3.2 节理围岩岩石力学试验研究               | 57  |
| 3.4 隧道围岩各向同性物性参数的确定              | 75  |
| 3.5 隧道节理围岩物性参数的确定                | 76  |
| 3.5.1 节理岩体力学参数的 Hoke-Brown 折减法研究 | 76  |
| 3.5.2 依托工程岩体力学参数计算               | 79  |
| 3.5.3 有限元围岩参数选取                  | 82  |
| 3.5.4 离散元岩体参数取值                  | 83  |
| 3.6 小结                           | 84  |
| 参考文献                             | 84  |
| 4 隧道施工对建筑物地基基础的影响                | 86  |
| 4.1 隧道施工对不同偏移距建筑物基础的影响           | 86  |
| 4.1.1 引言                         | 86  |
| 4.1.2 模型特征                       | 87  |
| 4.1.3 筏板基础                       | 89  |
| 4.1.4 独立基础                       | 91  |
| 4.1.5 独立桩基础                      | 96  |
| 4.2 隧道施工对基础及地基(围岩)的影响            | 101 |
| 4.2.1 模型的建立                      | 101 |
| 4.2.2 筏板基础计算结果及分析                | 102 |
| 4.2.3 独立基础计算结果及分析                | 105 |
| 4.2.4 独立桩基础计算结果及分析               | 107 |
| 4.2.5 不同基础形式的对比分析                | 113 |
| 4.3 同茂隧道施工对上覆9号楼地基及基础的影响         | 113 |
| 4.3.1 分析模型的建立                    | 114 |
| 4.3.2 隧道施工对9号楼地基(围岩)稳定性的影响       | 117 |
| 4.4 小结                           | 121 |
| 参考文献                             | 122 |
| 5 隧道施工对上覆建筑物的影响                  | 123 |
| 5.1 隧道-地层-基础-建筑物相互作用的基本理论        | 123 |
| 5.1.1 隧道开挖对地层变形的影响               | 123 |
| 5.1.2 地层与建筑物基础相互作用的理论            | 125 |

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| 5.1.3 建筑物的主要破坏模式分析 .....                | 127        |
| <b>5.2 隧道施工对上覆框架结构建筑物的影响 .....</b>      | <b>130</b> |
| 5.2.1 材料参数的选取 .....                     | 130        |
| 5.2.2 模型的建立 .....                       | 131        |
| 5.2.3 数值模拟结果分析 .....                    | 135        |
| <b>5.3 隧道施工对上覆砖混结构建筑物的影响 .....</b>      | <b>149</b> |
| 5.3.1 材料参数的选取 .....                     | 149        |
| 5.3.2 模型的建立 .....                       | 149        |
| 5.3.3 数值模拟结果分析 .....                    | 151        |
| <b>5.4 同茂隧道施工对上覆 6 号楼的影响 .....</b>      | <b>160</b> |
| 5.4.1 有限元模型的建立 .....                    | 160        |
| 5.4.2 隧道及建筑物基础变形分析 .....                | 162        |
| 5.4.3 框架结构内力分析 .....                    | 171        |
| 5.4.4 框架变形分析 .....                      | 175        |
| 5.4.5 监测数据与数值模拟结果的对比分析 .....            | 176        |
| <b>5.5 小结 .....</b>                     | <b>177</b> |
| 参考文献 .....                              | 178        |
| <b>6 考虑围岩蠕变特性的隧道下穿建筑物变形控制研究 .....</b>   | <b>179</b> |
| <b>6.1 依托工程隧道围岩蠕变特性 .....</b>           | <b>179</b> |
| 6.1.1 同茂隧道围岩变形特征 .....                  | 179        |
| 6.1.2 隧道围岩蠕变参数反演 .....                  | 181        |
| <b>6.2 考虑隧道围岩蠕变特性的施工过程模拟 .....</b>      | <b>186</b> |
| 6.2.1 模型的建立 .....                       | 187        |
| 6.2.2 桩基础变形特征 .....                     | 189        |
| 6.2.3 隧道围岩位移特征 .....                    | 194        |
| 6.2.4 隧道围岩应力特征 .....                    | 199        |
| 6.2.5 支护结构应力特征 .....                    | 201        |
| 6.2.6 地表沉降位移特征 .....                    | 205        |
| 6.2.7 围岩塑性区分布特征 .....                   | 207        |
| <b>6.3 小结 .....</b>                     | <b>208</b> |
| 参考文献 .....                              | 209        |
| <b>7 考虑围岩节理特性的隧道下穿建筑物施工变形控制研究 .....</b> | <b>210</b> |
| <b>7.1 隧道节理围岩稳定性研究方法 .....</b>          | <b>210</b> |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 7.2 隧道施工过程的离散元分析 .....             | 211 |
| 7.2.1 离散元及离散元软件 UDEC 简介 .....      | 211 |
| 7.2.2 小净距(段)隧道施工变形控制 .....         | 212 |
| 7.2.3 暗挖与六号线交叠段(连拱段)施工变形控制 .....   | 219 |
| 7.3 隧道施工过程的有限元分析 .....             | 229 |
| 7.3.1 有限元及有限元软件 Midas/GTS 简介 ..... | 229 |
| 7.3.2 小净距(段)隧道施工变形控制 .....         | 229 |
| 7.3.3 暗挖与六号线交叠段(连拱段)施工变形控制 .....   | 240 |
| 7.4 小结 .....                       | 254 |
| 参考文献 .....                         | 254 |

# 1 绪 论

## 1.1 研究背景及意义

近年来,山地城市隧道修建突飞猛进,在一定程度上缓解了城市交通压力,但也不可避免地带来了一些问题,其中隧道施工对上覆建筑物以及周围临近建筑结构的影响及损坏尤为明显。在城市暗挖隧道建设过程中,穿越和邻近各种既有结构施工的情况普遍存在,在城区中尤其以穿越地表密集建筑物群的情况最多。虽然国内外很多学者及工程师都对这一问题给予了重视,但是此类事故依然不断地发生。隧道施工引起建筑物沉降、不均匀沉降和各种变形,出现倾斜、开裂破坏,甚至导致失稳倒塌事故的情况仍在不断发生,严重影响人民的生命财产安全,造成很大的经济损失和不良的社会影响。因此在隧道施工过程中,保护既有建筑结构安全具有很重要的理论意义及经济价值,尤其是隧道上覆建筑结构及设施比较密集时,如何减小由于隧道施工对建筑物产生的影响与危害已经引起了学术界和工程界的高度重视,也是城市交通隧道工程中亟待解决的重要课题。

隧道施工方法对围岩稳定和地表变形有重要的影响。目前国内外修建城市隧道的施工方法有盾构法、浅埋暗挖法、明挖法等。暗挖法和盾构法施工虽然对上覆土层扰动较小,但仍不可避免地会对周围岩土体产生扰动,进而引起岩土体变形,引起一系列的环境岩土工程问题。

从我国目前的工程实践和学术研究来看,在隧道下穿建筑物时考虑隧道开挖对上覆建筑物地基及基础影响的隧道施工变形控制标准的研究较少。一般的做法是给定上覆建筑物一个沉降值极限,北京和深圳等城市规定的沉降极限为30mm,认为不超过该极限即可。但该极限值没有系统的研究依据,是专家们根据经验制订出来的,即便是在30mm的范围内,不同建筑结构的力学响应不同,损害程度也不一样,按照这个标准对建(构)筑物采取的加固措施不一定合适,在经济上可能也不适当。对隧道施工主要根据经验和规范上不同级别围岩的隧洞周边允许位移相对值来控制隧道的变形,不考虑相邻上覆建筑物的允许变形,这在一定程度上会造成上覆建筑物的变形过大影响其安全使用甚至破坏。

现有的隧道下穿上部建筑物施工变形控制研究多是仅考虑岩石的弹性和塑性性质,未考虑岩石的变形与时间因素的关系即流变性质,这使得充分考虑岩体流变特性下的隧道施工变形控制研究更少。但是岩石隧道在外力及工程环境影响下

大多呈现出与时间相关的力学特性,且围岩大都表现出很强的非线性和蠕变特性。国内外已有一些隧道由于设计之初没有考虑岩石的蠕变特性,导致在隧道施工完成后几年的运营时间内仍产生较大变形,造成衬砌开裂,围岩失稳,地表沉降,发生安全事故,严重影响人们的生活。因此,在研究岩石隧道工程的施工变形控制和长期稳定性问题时必须考虑岩石蠕变产生的影响。

由于各种地质作用和各种构造力的影响,导致岩体内充满着各种形式的节理面。这些规模不一、产状不同的节理面以及被其切割形成的形状各异、块度不等的岩块的共同存在。节理、裂隙等不连续面的存在对围岩的稳定性及破坏模式有较大的影响。目前国内外关于节理岩体力学性质的研究已有许多,然而关于节理岩体中隧道施工对上覆建筑物影响的研究还比较少。因此,研究节理围岩隧道施工对上覆建筑物的影响及隧道施工变形控制具有重要工程价值和理论意义。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 既有建筑物与新建隧道相互影响解析理论

城市隧道建设过程中,受线路选线、可用地下空间等因素的制约,城市隧道在建设过程中不可避免地要从建筑物下部或者附近穿过<sup>[1,2]</sup>,由于两者的相互作用,往往会对建筑物及隧道建设产生不利的影响。

浅埋隧道下穿或者侧穿既有建(构)筑物时,建(构)筑物与地基之间的原有应力平衡将被打破,隧道开挖将在建(构)筑物中引起附加应力,严重时会引起建(构)筑物开裂甚至破坏,从而造成严重的经济损失<sup>[3,4]</sup>。为控制和减少隧道施工引起的地表沉降,降低他们对邻近建(构)筑物的损害,一些学者已经通过模型试验、数值计算的方法开展浅埋隧道与邻近建筑物相互影响的研究,然而这方面的相关理论研究还比较少。

浅埋隧道开挖与既有建筑物荷载的相互影响主要包括两个方面的内容:一是在既有建筑物荷载作用下,浅埋隧道施工引起的地表沉降及其对既有建筑物变形和受力的影响;二是既有建筑物荷载对隧道围岩应力、位移分布及塑性区范围的影响。

浅埋隧道施工对既有建(构)筑物影响方面,张治国等<sup>[5,6]</sup>采用球形孔和圆柱扩张/收缩理论研究了桩基与隧道的相互作用。基于 Mohr-Coulomb 屈服准则,采用圆柱形孔收缩模型模拟隧道开挖,得到隧道开挖引起的邻近单桩弹塑性水平位移,并提出了隧道开挖对邻近桩基承载能力弹塑性影响的计算方法。黄茂松<sup>[7]</sup>等利用两阶段计算法对浅埋隧道开挖引起的顶部分层土层中桩基的变形及附加应力进行公式推导,提出相应的计算方法。然而上述文献在计算隧道开挖引

起的桩基位移时,没有考虑既有桩基荷载与隧道开挖之间的相互影响,因而会导致计算得到的桩基水平位移有一定误差。

房莹光<sup>[8]</sup>等将建筑物荷载简化为地面均布荷载,将围岩的弹性应力和位移表示为多个局部坐标中级数之和,并由加法公式把它们变换为某个局部坐标系中的双重级数,随后基于对称性原理和 Laplace 逆变换给出了围岩应力和变形的黏弹性解。丁智等<sup>[9,10]</sup>基于土体损失计算理论,推导出浅基础建筑物地基、基础和结构协同作用下的力学模型及解析解,并据此研究了盾构掘进引起的浅基础建筑物的沉降与内力变化规律。欧阳文彪<sup>[11]</sup>等基于均质半无限弹性空间内的 Verruijt 和 Booker 解,通过将地表既有建筑物等效为有一定刚度的土层,推导了单线和双线隧道穿越既有建筑物的地表沉降公式。景路<sup>[12]</sup>等考虑顶管施工过程中的超挖、欠挖情况,将正负地层损失的概念统一起来,提出了负的间隙参数,并基于 Mindlin 解进行改进。然后基于土体扰动的分区方法修正了 Loganathan 公式,并代入改进后的地层损失参数,得到了新的土体动态变化计算公式。

蔚立元等<sup>[13-15]</sup>借助 Verruijt 提出的共形映射函数将含圆孔半无限平面映射为单位圆环,然后将映射平面内复势函数展开为 Laurent 级数,利用 Muskhelishvili 的复变函数解法求得问题的应力场和位移场,并解决了地下任意线荷载作用下围岩的应力场与位移场。张永兴<sup>[16]</sup>、王桂林<sup>[17]</sup>采用共形映射将浅埋岩石洞室地基映射成圆环域问题,由此得到地表建筑物荷重作用下浅埋洞室地基应力位移的解析解。以上文献大都通过共形映射经浅埋圆形隧道映射为单位圆环,并将映射平面内复势函数展开为 Laurent 级数,随后利用地表和隧道洞周应力边界条件求出复势函数的系数。

由上述文献可知,关于既有建筑物荷载与浅埋隧道相互影响方面的研究,大多数学者重点分析探讨了浅埋隧道开挖引起的建筑物变形量预测及建筑物的控制保护措施。与自由地层下隧道开挖不同,当隧道修建于既有建筑物下方或者旁边时,既有建筑物产生的地层荷载会增加围岩变形,改变围岩应力分布,并导致隧道开挖以后围岩应力、位移以及塑性区与自由地层隧道开挖以后的围岩应力、位移及塑性区明显不同。目前关于既有建筑物荷载对浅埋隧道围岩应力、位移及塑性区影响方面的研究还较少。随着我国城市地铁建设的兴起,既有建筑物基础荷载对临近浅埋新建隧道的影响越来越受到诸多学者的关注。既有建筑物荷载对临近新建隧道的影响具体可分为对围岩应力、变形及塑性区分布的影响。

项彦勇等<sup>[18-20]</sup>推导了承载地层隧道开挖引起地层二次应力和塑性区形状和范围的理论公式,并基于桩基荷载的作用特点,提出了一种预测地层自重应力场中邻近桩基隧道开挖塑性区形状和范围的理论计算方法。安建永<sup>[21]</sup>分别通过理论分析、模型试验和数值模拟的方法研究既有建筑物基础荷载与浅埋隧道开挖的相互作用,并研究了桩径、桩长、桩身荷载以及水平相对距离对隧道开挖效应的



影响。Xiang 和 Feng<sup>[22]</sup> 计算出承载地层隧道开挖的围岩应力场, 并基于 Mohr-Coulomb 屈服准则计算出单桩和群桩荷载作用下隧道洞周塑性区分布, 通过与自由地层中围岩塑性区对比分析总结出既有桩基荷载对邻近隧道围岩塑性区分布的影响。

## 1.2.2 隧道开挖引起地表及建筑物变形的研究

### 1. 隧道开挖诱发地表沉降的研究

关于地下洞室开挖引起地表沉降的研究 15 世纪就引起了人们的关注, 17 世纪末, 欧洲形成了很多围绕矿区、煤田的工业中心, 如德国的鲁尔矿区、波兰的西里西亚煤田、苏联的顿巴煤田等, 在煤炭行业最先开展了沉陷理论、地表沉降的研究工作。由于早期岩层土层移动知识的欠缺, 人们多采用实践经验和现场观测相结合的办法来研究能够直接用于工程的经验性的地表变形预计方法。随着矿山岩土工程的实践增多以及矿山岩石力学的发展和现代技术的应用, 开采沉陷在 multidisciplinary 的相互渗透过程中迅速发展, 并在采动区、采空区上修建建筑物的地基基础设计和结构设计等方面获得了一些经验<sup>[23-25]</sup>。

1969 年, Peck 通过对大量实测资料进行研究, 系统地提出了地层损失的概念和估算隧道开挖地表下沉的实用方法<sup>[26]</sup>。Peck 认为, 隧道开挖所形成的地表沉降槽的体积在不排水情况下应等于地层损失的体积, 假定地层损失在隧道长度上均匀分布, 那么隧道施工所引起的地表沉降横向分布近似为一正态分布曲线, 可得到地表沉降分布的预计公式如下:

$$s(X) = s_{\max} \exp\left(-\frac{X^2}{2i^2}\right) \quad (1.2.1)$$

$$s_{\max} = \frac{V_i}{i\sqrt{2\pi}} \approx \frac{V_i}{2.5i} \quad (1.2.2)$$

O'Reilly, New 等针对不同的地层, 研究了不同施工方法所引起的地表沉降问题。在对大量实测资料研究分析的基础上, 提出了地层损失、地表沉降和实际沉降槽宽度的预计公式<sup>[27,28]</sup>。

在现场实测、理论分析的基础上, 为了对隧道施工引起的地表变形特征、影响地表变形的因素等进行探讨, 许多学者还通过模型试验方法对隧道施工引起的地表变形进行研究<sup>[29]</sup>。王明年等<sup>[30]</sup>通过模型试验对广州地区软弱围岩下 3 孔小间距浅埋暗挖隧道的地表沉降控制技术进行了研究。林刚<sup>[31]</sup>结合金丽温高速公路二期工程里东隧道, 将实物相似模型试验作为数值分析的对比和补充, 所得结果与数值分析结果定性一致。刘宝琛<sup>[32]</sup>等应用随机介质理论, 对近地表隧道开挖引起的地表移动及变形问题进行了研究。岳光学等<sup>[33]</sup>根据 70 余座浅埋暗挖法修建的隧道的监测资料, 统计分析影响了地层变形的多个因素, 总结了浅埋暗挖

隧道的最大沉降量计算公式和几点地层变形规律。

## 2. 隧道开挖诱发建筑物变形的研究

城市浅埋暗挖隧道施工不可避免地会对周围土体产生扰动,进而引起土体变形,导致地面建筑物倾斜、开裂乃至坍塌等一系列的环境岩土问题,影响建筑物的安全和正常使用。分析建筑物的变形特点及其变化规律对减小城市隧道施工造成的环境影响具有重要意义。国外学者关于隧道诱发建筑物变形方面做了一些研究并取得一些有益的研究成果。

Skempton<sup>[34]</sup>通过对 98 个工程实例数据的对比总结,确定了地表允许的总沉降和差异沉降,提出地表沉降曲线的曲率半径是造成建筑结构产生裂缝的主要原因。Potts<sup>[35]</sup>深入分析了建筑物的结构刚度对隧道施工引起变形的影响。在 Potts 等人最初的分析中,没有考虑结构自重的作用。Franzius 和 Addenbrooke<sup>[36]</sup>进一步研究了建筑物自重对 Potts 等人提出的方法的影响。Mrouch 等<sup>[37]</sup>采用三维有限元软件模拟了隧道与建筑物的相互作用,隧道施工时考虑建筑物的存在,并与另一种忽略建筑物存在的简化计算方法比较。得出忽略建筑物的自重将导致隧道开挖引起的建筑物沉降值变小。但其并没有模拟隧道施工引起建筑物地基反力变化的规律,同时也没有考虑建筑物底板的存在,使得地表沉降在独立基础处产生明显突变。Jenck 等<sup>[38]</sup>运用 FLAC3D 三维有限差分软件模拟了盾构施工和地表建筑物的相互影响,模拟时对盾构施工工作简化处理,考虑了土体损失,并研究了建筑物的刚度与地表位移的关系。提出:地表沉降在建筑物存在的区域有着明显的变化,应对该区域采取防护措施。

国内工程建设中隧道施工导致建筑物破坏的实例也有不少,国内学者也对这一现象进行了广泛的研究。例如,施成华等<sup>[39]</sup>借鉴随机介质理论,结合规范对建筑物破坏等级的划分,预测了桐油山连拱隧道浅埋段开挖所引起的地表移动与变形,评价了隧道开挖对地表建筑物所造成的破坏。张顶立<sup>[40]</sup>依托厦门机场路隧道下穿地表复杂建筑群的工程实践,综合利用现场监测数据、数值模拟和理论分析方法,揭示隧道施工影响下地表建筑物的变形规律、变形破坏模式,提出以差异沉降和裂缝开展为主的建筑物变形控制标准和“预警、报警及极限”的三级管理办法,建立建筑物开裂和沉降之间的关系。李瑞英<sup>[41]</sup>研究了从风险控制的角度建立隧道穿越施工时地层及建筑物结构的风险控制体系的必要性和重要性。张在明<sup>[36]</sup>针对量大面广的多层砖混结构,研究了隧道施工可能造成的建筑损坏问题。

### 1.2.3 隧道施工安全控制研究

#### 1. 隧道施工控制研究现状

近年来随着城市地铁建设的快速发展,隧道施工过程中引起地面建筑物或其

他结构变形而产生的损坏问题屡见不鲜。城市隧道建设中需要对大量的建筑物开展变形损坏风险评估工作,而科学的建筑物变形及其损坏的评估方法方面的研究尚很不成熟。城市隧道穿越建筑物施工是一个复杂的风险性系统工程,不仅体现在地质勘察的局限性、地质条件的复杂性及其他各种不确定因素的影响上,还体现在隧道施工技术控制、质量控制及管理控制等多个方面。综合国内外研究现状,研究隧道施工控制技术常用的方法通常有三种:

一是通过施工过程中地下洞室围岩位移和应力监测或工程类比经验,采用监测信息反分析的手段,得到岩体的物理力学参数,进而判断围岩的稳定状况。李晓红<sup>[42]</sup>以隧道工程的特点及位移反分析的必要性和研究现状为基础,介绍了隧道位移智能化反分析的特点、神经网络模型及输入输出参数。通过实例验证,证明了隧道位移智能化反分析结果的正确性,对隧道围岩稳定性评价、信息化施工和岩石力学反问题研究具有重要意义。靳晓光<sup>[39]</sup>等采用改进的灰色模型进行了隧道围岩位移预报。于少春<sup>[43]</sup>针对五爱隧道地表变形预测问题,采用BP神经网络方法利用已有观测点变形数据进行网络训练,结果表明BP神经网络的隐层节点数目对预测精度有较大影响,通过分析得出采用BP人工神经网络方法可以较为准确地预测建筑物沉降量,并在一定程度上能够指导施工顺利进行。

二是物理模拟试验。物理模拟也叫相似模拟,最早的相似模拟理论可追溯到1978年B. Stillborg和O. Stepphansson的研究。Kimura和Mair等<sup>[44]</sup>应用离心机进行了软黏土中隧道施工的模型试验。赵瑜等<sup>[45]</sup>为研究深埋隧道围岩的受力变形特点,以重庆市共和隧道为工程背景,自行研制了满足工程围岩抗压强度、弹性模量、抗拉强度、泊松比、内摩擦角等指标要求的相似材料,应用内窥摄影技术,全程跟踪了模型试验破坏的全过程,采用过程分析的方法,研究高应力条件下隧道关键部位的变形特征、裂纹演化特征。刘新荣等<sup>[46]</sup>以重庆两江隧道为研究背景,采用公路隧道结构与围岩综合试验系统对交错隧道进行三维物理模型试验,分析新建隧道施工力学特性,并采用数值模拟对模型试验区域进行对比分析。王汉鹏等<sup>[47]</sup>通过大型地质力学模型对分岔隧道进行了超载试验,模拟了分岔隧道在不同侧压系数下围岩的变形、应力分布和破坏情况。

另一种方法是仿真数值模拟,随着计算机的迅速发展,数值模拟在工程设计和施工方案的优化与比选中起到越来越重要的作用。关于地下洞室施工控制数值模拟计算方面国内外类似的研究已有很多,数值计算方法具有方便操作、费用少等优点,故选用适当的本构模型,特别是包括岩体时效特征的本构模型从数值模拟计算方面对地下洞室施工进行深入细致地研究,提出最优工法,指出最优工法的关键工序及相应的控制对策具有非常重要的意义。王铁男等<sup>[48]</sup>利用FLAC对沈阳地铁青怀区间段进行数值模拟及分析,得出了隧道位移变形、各种应力云图以及相关的等值线等重要工程信息。M. Cai<sup>[49]</sup>针对岩土工程数值计算常使用的