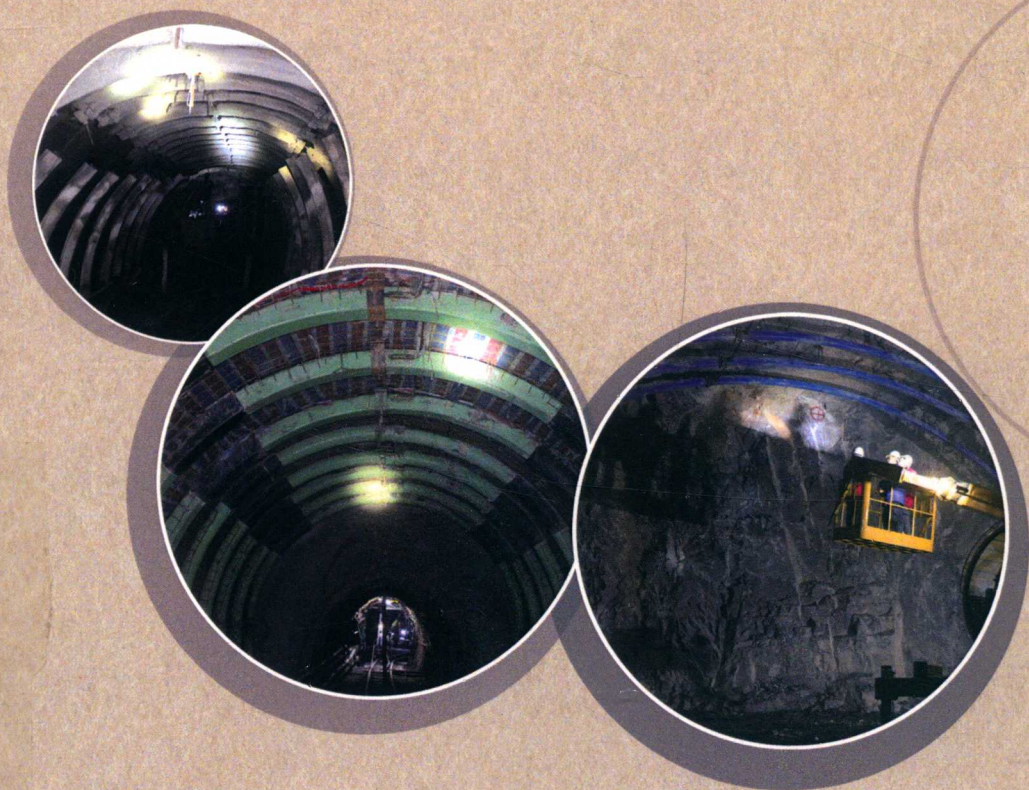


Control Theory and Engineering Practice of
Confined Concrete in Underground Engineering

地下工程约束混凝土 控制理论与工程实践

王琦 江贝 杨军/著



科学出版社

地下工程约束混凝土 控制理论与工程实践

Control Theory and Engineering Practice of Confined
Concrete in Underground Engineering

王 琦 江 贝 杨 军 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统阐述地下工程软弱围岩的变形破坏及高强控制机制,提出约束混凝土高强支护体系,阐明约束混凝土支护体系的承载特性,形成约束混凝土拱架计算理论和设计方法,并详细介绍支护体系在地下工程建设中应用的典型案例。

本书可供岩土工程、矿山工程、隧道工程等相关领域的科研人员及从事设计、施工、监理等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

地下工程约束混凝土控制理论与工程实践 = Control Theory and Engineering Practice of Confined Concrete in Underground Engineering / 王琦, 江贝, 杨军著. —北京: 科学出版社, 2019.1

ISBN 978-7-03-058756-5

I. ①地… II. ①王… ②江… ③杨… III. ①地下工程—混凝土—围岩控制—研究 IV. ①TU94

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第207846号

责任编辑: 李 雪 / 责任校对: 王萌萌
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年1月第一版 开本: 720×1000 1/16

2019年1月第一次印刷 印张: 17

字数: 340 000

定价: 116.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着国民经济的快速发展及能源需求的持续增加,我国已成为世界上交通隧道、矿山巷道等地下工程建设规模和建设速度第一大国。在交通隧道方面,近年来我国公路、铁路隧道建设里程大,增长率迅速提高;在矿山巷道方面,我国是煤炭资源丰富的国家,每年掘进的巷道总长达 1.3 万 km,且在未来相当长的时期内,煤炭作为主体能源的地位不会改变。

随着交通流量的日益增长和浅部煤炭资源的日趋减少,对深部煤矿开采及更大断面隧道的需求更加迫切,可以预见未来几十年内,一大批大断面、长洞线的隧道及巷道工程即将修建在大理深、高应力、极软岩、破碎带等复杂条件地层中。复杂条件对围岩稳定控制及施工安全带来极大挑战,该类条件的地下工程建设成为未来工程建设的重要课题。

近几十年来,国内外学者基于理论分析、数值计算、模型试验和现场监测等手段,对地下工程围岩变形破坏机理及控制技术进行了大量研究,解决了地下工程围岩变形破坏的基本问题,为地下工程安全施工奠定了基础。但在复杂地质条件下,常规支护体系的支护强度难以满足围岩控制要求,出现了支护体系破断失效、围岩大变形、塌方、冒顶等工程事故。

为此,作者围绕复杂条件地下工程围岩破坏机理与控制技术中存在的主要问题,提出适用于交通隧道、矿山巷道的高强约束混凝土支护体系,针对约束混凝土支护体系的力学特性及设计、施工方法进行系统的研究。

本书是作者多年来在地下工程围岩稳定控制方面研究成果的总结。第 1 章阐述当前我国地下工程的发展概况,分析复杂条件地下工程围岩变形破坏机理和稳定控制技术的研究现状。第 2 章基于“高强、让压、完整”耦合支护理念,提出复杂条件地下工程约束混凝土支护体系,研究围岩高强控制机制和约束混凝土支护的必要性。第 3 章系统研究约束混凝土基本构件及节点的轴压、纯弯和压弯力学性能,明确其承载机制,同时研究留设灌浆口的约束混凝土构件补强机制。第 4 章建立约束混凝土拱架“非等刚度、任意节数”内力计算模型,明确不同参数对拱架内力的影响规律,建立约束混凝土承载能力计算理论。第 5 章研发地下工程约束混凝土拱架全比尺力学试验系统,开展不同条件下约束混凝土拱架系列对比试验,明确约束混凝土拱架的承载机制及其影响因素。第 6 章提出约束混凝土支护体系设计方法,建立约束混凝土支护体系成套施工工法,指导约束混凝土支护体系在典型软岩矿山巷道和复杂条件大断面交通隧道工程中成功应用。本书内

容可为约束混凝土支护体系的推广应用提供理论基础及经验借鉴。

在本书编写过程中, 研究团队成员秦乾、许硕、鹿伟、孙会彬、栾英成、高红科、刘博宏、黄玉兵、曾昭楠、周开放、田士景、王雷、寻传林、樊祥福、张涛、许英东、张皓杰、蒋振华、张朋、郭金晖、李为腾、王德超、王洪涛、潘锐、邵行、于恒昌、高松、陈红宾、李智、王帅等做了大量工作, 同时得到了许多专家、学者、现场工程技术人员的支持, 另外, 引用了许多国内外专家的文献资料, 在此对这些专家学者及团队成员表示诚挚的谢意。本书的出版得到了国家自然科学基金项目(编号: 51874188、51674154、51474095、51674265、51704125)、山东省重点研发计划项目(编号: 2017GGX30101、2018GGX109001)、中国博士后科学基金项目(编号: 2017T100116、2017T100491、2016M590150、2016M602144)、山东省自然科学基金项目(编号: ZR2017QEE013)、深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(编号: SKLGDUEK1817、SKLGDUEK1717)、煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放基金项目(编号: SKLCRSM18KF012)、山东大学青年学者未来计划项目(编号: 2018WLJH76)、山东大学齐鲁青年学者计划的资助, 在此一并表示衷心的感谢。

书中不当之处, 恳请广大读者批评指正。

作 者

2018年8月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 地下工程发展概述	1
1.2 地下工程围岩破坏控制理论发展概况	2
1.2.1 复杂条件地下工程围岩变形破坏机理	2
1.2.2 地下工程围岩控制理论	2
1.3 地下工程围岩控制技术发展概况	4
1.3.1 常规围岩控制技术研究现状	4
1.3.2 约束混凝土支护技术研究现状	7
1.4 本书主要内容	9
第 2 章 地下工程约束混凝土高强控制机制	10
2.1 约束混凝土支护体系	10
2.2 地下工程围岩控制机制研究试验方案	11
2.2.1 试验目的	11
2.2.2 数值模型	11
2.2.3 试验方案	12
2.3 采用全断面开挖方法的围岩控制机制研究	15
2.3.1 无支护方案数值试验	15
2.3.2 锚杆支护方案数值试验	21
2.3.3 H 型钢拱架支护方案数值试验	25
2.3.4 方钢约束混凝土拱架支护方案数值试验	32
2.3.5 H 型钢拱架+锚杆支护方案数值试验	38
2.3.6 方钢约束混凝土拱架+锚杆支护方案数值试验	46
2.3.7 试验结果对比分析	53
2.4 采用 CRD 与双侧壁导洞开挖方法的围岩控制机制研究	57
2.4.1 采用 CRD 开挖方法的围岩控制机制研究	57
2.4.2 采用双侧壁导洞开挖方法的围岩控制机制研究	61
2.5 本章小结	64
第 3 章 约束混凝土基本力学性能研究	65
3.1 约束混凝土构件轴压性能研究	65

3.1.1	试验方案及概况	65
3.1.2	试验结果分析	70
3.1.3	小结	74
3.2	约束混凝土构件纯弯性能研究	74
3.2.1	试验方案及概况	74
3.2.2	基本构件试验结果分析	76
3.2.3	节点参数影响机制	81
3.2.4	小结	84
3.3	约束混凝土构件偏压性能研究	85
3.3.1	试验方案及概况	85
3.3.2	试验结果分析	87
3.3.3	小结	94
3.4	灌浆口补强机制研究	94
3.4.1	灌浆口破坏情况	95
3.4.2	灌浆口补强方式研究	97
3.4.3	灌浆口侧弯钢板补强方案优化	100
3.4.4	小结	104
3.5	本章小结	104
第4章	约束混凝土拱架承载特性理论研究	106
4.1	符号说明	106
4.2	拱架力学分析模型	107
4.2.1	研究对象	107
4.2.2	基本计算理论	108
4.2.3	计算模型	108
4.3	拱架内力计算	109
4.3.1	圆形拱架内力计算	109
4.3.2	三心圆拱架内力计算	117
4.4	拱架强度承载力分析	123
4.4.1	方钢约束混凝土和型钢构件的压弯极限承载力	123
4.4.2	圆形和三心圆拱架不同截面形式承载力对比分析	127
4.5	本章小结	141
第5章	约束混凝土拱架承载特性试验研究	143
5.1	约束混凝土拱架试验系统及方法	143
5.1.1	系统组成及主要功能	143
5.1.2	试验方法与步骤	145

5.2 圆形拱架承载特性室内试验	145
5.2.1 试验方案	145
5.2.2 SQCC150×8-C40-P 拱架试验及结果分析	149
5.2.3 CC159×10-C40-P 拱架试验及结果分析	155
5.2.4 I22b-P 拱架试验及结果分析	160
5.2.5 U36-P 拱架试验及结果分析	165
5.2.6 SQCC150×8-C40-J 拱架试验及结果分析	170
5.2.7 CC159×10-C40-J 拱架试验及结果分析	174
5.2.8 圆形拱架试验结果对比分析	179
5.2.9 SQCC 圆形拱架承载特性影响因素及其规律分析	181
5.3 三心拱架承载特性室内试验	184
5.3.1 试验方案	184
5.3.2 SQCC150×8-C40-J 拱架试验及结果分析	189
5.3.3 SQCC150×8-C40-BF-J 拱架试验及结果分析	195
5.3.4 SQCC150×8-C40-BF-P 拱架试验及结果分析	202
5.3.5 I22b-BF-P 拱架试验及结果分析	207
5.3.6 其他拱架试件数值试验结果	210
5.3.7 三心拱架试验结果对比分析	228
5.3.8 SQCC 三心拱架承载特性影响因素及其规律分析	229
5.4 本章小结	234
第 6 章 约束混凝土支护体系工程实践	235
6.1 设计理念与方法	235
6.2 软岩矿山巷道工程实践	236
6.2.1 工程概况	236
6.2.2 原支护方案及监测分析	237
6.2.3 拱架设计理论	238
6.2.4 现场方案设计	240
6.2.5 设计方案评价校核	241
6.2.6 现场实施	242
6.2.7 监测结果分析	244
6.3 大断面交通隧道工程实践	244
6.3.1 工程概况	244
6.3.2 拱架设计理论	245
6.3.3 现场方案设计	247
6.3.4 设计方案评价校核	249
6.3.5 现场实施	252

6.3.6 围岩收敛监测结果·····	252
6.4 本章小结·····	253
参考文献·····	254

第1章 绪 论

1.1 地下工程发展概述

近年来,我国地下工程建设得到了前所未有的发展,我国已成为世界地下工程建设规模和建设速度第一大国。在交通隧道方面,截至2018年底,我国公路隧道约16200处,总长约15285.1km,其中特长隧道(指长度大于3km的公路隧道)约900处,长隧道(指长度大于1km、小于3km的公路隧道)约3800处。在矿山巷道方面,我国是煤炭资源最为丰富的国家,2015年煤炭产量为37.5亿t,占全世界的47%,煤炭产量和煤矿数量均居世界首位,煤炭在一次能源构成中占63%,预计到2030年依然将占55%,在未来相当长时期内,煤炭作为主体能源的地位不会改变。我国矿山数量多、分布广,每年掘进的巷道总长达1.3万km,巷道工程规模巨大。

随着地下工程建设规模和速度的迅猛发展,越来越多的矿山巷道、交通隧道等工程修建在高应力、极软岩、强采动及断层破碎带等复杂地质条件区域。经过长期大规模开发,浅部煤炭资源已趋于枯竭,深部煤炭资源成为我国主体能源的战略保障。目前,我国埋深1000m以下的煤炭资源约占已探明储量的53%,中东部主要矿井开采深度达到800~1000m,埋深1000m以上的矿井超过50座。同时,一大批西部矿井修建在弱胶结地层中,泥化问题严重,自承能力极低,是我国软岩工程治理的新难题。此外,日益增长的交通流量对双向八车道等大断面隧道的需求更加迫切,越来越多的交通隧道修建在崇山峻岭等复杂地质条件中。受上述复杂条件影响,隧(巷)道围岩变形量大、持续时间长,传统支护体系破断失效,复修率高,冒顶、塌方等突发性工程灾害和重大事故频发,严重影响矿井正常生产及交通运营安全。

上述灾害事故难以遏制的重要原因在于复杂条件围岩控制机理不明确,支护设计过多依赖经验类比,锚杆(索)、型钢拱架等传统手段支护强度低。因此,研发高强、经济的支护技术是解决上述问题的关键。

约束混凝土外部结构的约束作用使核心混凝土具有更高的抗压强度,核心混凝土又保证了外部约束不易发生失稳破坏,约束结构与核心混凝土共同承载,使其具有钢材的高强度和延性及混凝土耐压和造价低廉的优点。约束混凝土拱架的承载能力是相同重量传统型钢拱架的2~3倍。近年来约束混凝土支护技术逐渐应用到复杂条件地下工程中,有效控制了围岩大变形,避免了多次复修,具有重要

的推广价值。

1.2 地下工程围岩破坏控制理论发展概况

1.2.1 复杂条件地下工程围岩变形破坏机理

国内外学者基于地质力学模型试验、数值试验、现场监测等手段,对地下工程围岩变形破坏机理进行了大量研究。在地下工程施工过程中,高地应力、软岩、断层破碎带、偏压等复杂地质条件使围岩支护困难,造成变形破坏,严重影响施工安全。

Zhao 和 Zhang^[1]采用大变形的计算方法,结合隧道物理模型试验,探讨了高应力条件下隧道围岩变形局部化与渐进破坏的关系,指出岩体单元的弹性变形和单元屈服后岩体的塑性挤出是隧道开挖后收敛变形的主要原因;田四明^[2]针对隧道施工中出现的炭质页岩大变形、围岩与支护结构扭曲折断和破坏等问题,运用工程地质学和结构力学相关理论,揭示了高地应力炭质页岩变形破坏的力学机制;沙鹏等^[3]通过采用现场实时监测、数值模拟等手段,获取高地应力条件下大断面隧道围岩与支护系统之间的接触压力;刘高和聂德新^[4]论述了高应力软弱围岩的变形破坏特征和类型,从工程岩体围压状态变化和强度变化角度探讨了高应力软弱围岩的变形破坏机理;一些学者^[5-7]利用极限分析方法来研究地下硐室拱顶围岩破裂机制,指出围岩应力水平与支护荷载对顶板围岩破裂机制影响较为显著,增大支护阻力是提高顶板稳定性的有效途径;Yoshinaka 等^[8-10]对泥岩、凝灰岩、砂岩等软弱破碎岩石进行了试验研究,结果表明变形模量在高围压条件下呈非线性增加,随着围压的不断增加,轴向塑性应变及轴向应变随围压的增加倾向屈服;陈建平等^[11]分析了变质软岩变形破坏的特征,研究了隧道变质软岩的塑性流动变形、偏压、物化膨胀、流变、应力扩容等变形破坏机理;谢俊峰和陈建平^[12]研究了十漫高速公路火车岭隧道施工中出现的围岩大变形问题,研究了不同的因素对该隧道大变形机制的影响,结果表明围岩大变形为围岩塑性流动及围岩膨胀变形综合作用的结果;王树仁等^[13]基于现场工程地质调查与大变形力学分析,确认了软岩隧道具有应力扩容型和结构变形型的复合型变形力学机制,提出了复合型变形力学机制向单一型变形力学机制转化的技术。

1.2.2 地下工程围岩控制理论

复杂条件地下工程围岩自稳能力差,如果控制不当极易出现大变形、拱顶塌落、初支衬砌开裂等破坏状况,给地下工程安全施工造成很大隐患。因此,国内外学者在地下工程围岩控制理论方面做了大量研究工作,形成了不同条件下的围岩控制理论。

1. 国外方面

国外学者近百年来对地下工程围岩控制理论的研究, 概括起来形成如下六个主要阶段^[14-24]: 古典压力理论、塌落拱理论、弹塑性理论、新奥法、能量支护理论、应变控制理论, 如表 1.1 所示。近几十年来, 有限元、离散元等数值计算方法日趋成熟, 出现了以 FLAC、UDEC、ABAQUS 为主的数值计算软件, 在地下工程围岩控制方面得到了广泛应用^[25-27]。Pan^[28]回顾了地下结构设计理论的发展, 阐述了基本设计原则, 讨论了影响设计的各项因素和需要测定的参数, 对各种适用的有限单元法依其功能作了分类和简介; Yu 和 Yang^[29]针对 III、IV 级围岩, 采用弹-黏塑性有限单元法分析预测不同类别隧道围岩变形; Ren 等^[30]采用离散单元法, 对节理岩体中的地下洞室在考虑随机节理空间分布的情况下的围岩稳定性进行数值分析; Wang^[31]采用离散单元法, 对节理裂隙岩体中大断面隧洞围岩及支护结构的共同作用及施工过程力学状态进行数值分析, 数值计算结果与实测数据吻合。

表 1.1 国外学者对围岩控制理论的研究

时间	围岩控制理论	代表人物	主要内容
20 世纪 20 年代	古典压力理论	海姆、胡金和金尼克	支护结构的作用在于抵抗上覆岩层的重量
20 世纪 50 年代	塌落拱理论	太沙基、普洛托季雅克诺夫	隧道开挖之后, 如不进行支护, 隧道拱顶塌落形成塌落拱。支护结构受力主要来自塌落拱自重
20 世纪 60 年代	弹塑性理论	卡斯特奈、芬纳	支护结构主要作用在于抵抗围岩变形压力
20 世纪 60 年代	新奥法	Rabcewic	强调地下工程初期支护主要发挥围岩的自承能力, 并及时监控量测, 观察变形
20 世纪 70 年代	能量支护理论	Salamon	根据能量守恒原理, 围岩变形释放的能量由支护结构吸收, 总能量保持不变
20 世纪 70 年代	应变控制理论	山地宏和樱井春辅	隧道围岩支护结构越强, 围岩应变就越小, 容许应变就越大

2. 国内方面

国内许多学者在地下工程围岩控制方面也做了大量研究, 形成了关于地下工程围岩控制的相关理论, 概括起来形成了如下七个主要阶段^[32-55]: 轴变论、岩体动态施工过程力学理论、联合支护理论、软岩工程力学支护理论、锚喷-弧板支护理论、围岩松动圈理论、主次承载区支护理论, 如表 1.2 所示。近年来, 杨双锁^[56]分析了围岩变形、强度特征以及支护力作用机理, 提出了涵盖围岩-支护相互作用全过程的波动性平衡理论, 依据破碎岩体不能承受拉应力但在支护作用下仍具有较强抗压能力的特性以及不同厚宽比条件下板的力学特征, 提出了厚锚固板理论; 闫鑫^[57]在充分调研国内外研究现状的基础上, 综合运用理论分析、数值仿真、现

场试验和数理统计等手段,针对超前应力释放围岩支护理论进行了研究,指出合理的超前应力释放技术可有效减小围岩变形,保证支护体系稳定;Jiang等^[58]基于Hoek-Brown非线性岩体强度破坏准则,考虑地层水压力与锚索支护作用,构造出拱顶围岩破裂机制,利用极限分析上限法,得到了富水硐室拱顶锚索所需长度及预紧力的设计方法。

表 1.2 国内学者对围岩控制理论的研究

时间	围岩控制理论	代表人物	主要内容
20世纪80年代	轴变论	于学馥	围岩破坏是由应力超过岩体强度极限引起的,围岩坍落改变了巷道轴比,导致应力重分布,直到围岩稳定而停止。
20世纪80年代	岩体动态施工过程力学理论	朱维申	工程岩体的稳定与人为的工程因素密切相关。复杂岩体的施工,对围岩是一个非线性的力学加卸载过程,其稳定性是与应力路径及历史相关的
20世纪90年代	联合支护理论	郑雨天等	对于隧道围岩支护,要采取“先柔后刚、先挖后让、柔让适度、稳定支护”的支护方式,不能一味采取高强度支护
20世纪90年代	软岩工程力学支护理论	何满潮	巷道支护破坏大多是由支护体与围岩在强度、刚度、结构等方面存在不耦合造成的
20世纪90年代	锚喷-弧板支护理论	朱效嘉、郑雨天等	对隧道围岩支护不能总是放压,当放压到一定程度时,要采取“钢筋混凝土弧板”刚性支护形式控制围岩变形
20世纪90年代	围岩松动圈理论	董方庭	支护结构的主要作用就是抵抗围岩松动圈形成时的碎胀力,松动圈越大,支护就越困难
20世纪90年代	主次承载区支护理论	方祖烈	承载区分为隧道周围压缩域和用支护加固的张拉域主次两部分。围岩稳定由两部分协调决定

1.3 地下工程围岩控制技术发展概况

1.3.1 常规围岩控制技术研究现状

1. 地下工程常规围岩控制技术

随着地下工程的大规模建设发展,围岩控制技术由过去的单一支护形式发展成现在的多种支护技术联合使用,目前,我国地下工程围岩控制技术主要分为以下四类^[59]。

1) 锚网喷

锚网喷支护是锚杆、金属网、喷射混凝土三者结合的复合支护结构。该支护结构能发挥锚杆及喷射混凝土的优势,并且金属网的铺设使围岩表面完整化,增加其抗弯、抗剪能力。如果围岩稳定程度较好,支护施工则能够通过喷射混凝土或者锚杆进行,如果围岩稳定程度较差,则必须通过支护与锚杆互相结合来进行^[59,60]。通过锚杆对围岩松动圈进行加固,形成锚杆-围岩共同承载的组合拱,并可随围岩

共同移动^[61]。锚杆在隧道围岩支护中并不单独使用,而是结合其他支护形式联合使用,以达到更好的围岩控制效果。但是,锚网喷支护的支护范围仍有局限,对于冲击围岩、大变形软岩,还没有特别好的办法,而且造价高,回收材料不可以再使用,造成浪费。

2) 格栅拱架

格栅拱架也称格构梁或网格栅钢拱架,是地下工程中一种常用的构件支撑。它是随着新奥法的发展而出现的^[62]。格栅拱架支护具有重量轻、便于安装、刚度适中、造价低廉、使用灵活、承载力高以及便于与其他支护技术配合使用等优点,在国内外地下工程施工中被广泛使用^[63]。但其抵抗围岩初始变形的能力还有待提高。

3) 型钢拱架

型钢拱架支护是采用成形后的型钢加固地下工程的支护措施,在地下工程中常用的有U型钢可缩性支架、H型钢、C型钢等拱架形式,可与锚杆、喷射混凝土、钢筋网组成复合支护。它具有即时强度和刚度,初撑力较高、支护强度大,能控制围岩过大变形。多在浅埋、偏压、自稳时间极短的围岩,以及松散、破碎、有涌水、膨胀性岩石的施工中采用此法。其缺点是重量大、不便于安装、成本较高,对开挖断面尺寸精度要求较严格。

4) 联合支护

联合支护是将多种不同性能的支护形式结合在一起,其主要有各种锚杆的结合、锚喷+型钢拱架、锚喷+锚注、型钢拱架+锚杆+锚索、锚注+型钢拱架等支护形式,通过将各单一的支护形式结合在一起,共同发挥各自的作用,控制围岩变形。

2. 复杂条件下围岩控制技术

随着我国地下工程数量的日益增多,所面临的地质条件更加复杂,软弱破碎围岩的控制问题更加突出。对于深部高应力、软弱破碎与大断面等复杂条件地下工程,锚网喷、格栅拱架等支护强度不能满足围岩的控制需求,通常采用以型钢拱架或注浆加固为主的联合支护技术。

1) 型钢拱架联合支护技术

型钢拱架与锚网喷、格栅拱架等相比,支护强度大、初撑力高、具有很好的承载能力。拱架通过对围岩提供径向约束力,平衡来自周围岩石的变形压力,能够很好地控制围岩大变形,是地下工程中常用的支护形式^[64-71]。以它为主的初期联合支护方式已经在复杂条件地下工程建设中得到了广泛应用。

在型钢拱架联合支护技术的理论研究方面, Ping 等^[72]提出了锚网喷主动支护

与钢拱架被动支护相结合的技术。通过理论分析,解决了高应力破碎围岩的支护问题;文竞舟等^[73, 74]通过对以型钢拱架为主的隧道初期支护进行理论分析,深入研究了该联合支护技术的力学承载机制,结果表明以钢架和喷层组成的内层支护拱在软弱破碎围岩中起主要承载作用;王克忠等^[75]在对支护结构进行力学分析的基础上,采用数值计算方法对山西引水工程中施工支洞进行了仿真模拟,分析钢拱架在初期支护中的应力及变形特性,并结合工程实例研究了复合支护中钢拱架、钢筋网以及喷层所分担的围岩压力比例;陈丽俊等^[76]通过建立软岩隧洞锁脚锚杆-钢拱架联合承载的力学计算模型,考虑钢拱架与锁脚锚杆连接处的弯矩、轴力、剪力传递及变形协调,将钢拱架处理为弹性固定无铰拱,采用结构力学法进行求解;徐帮树等^[77]通过对软岩隧道初期支护安全性评价的研究,分析了型钢拱架和混凝土的受力特点,研究发现喷射混凝土达到设计强度后,混凝土起主要支撑作用,型钢间距对提高初期支护安全系数不显著。

在型钢拱架联合支护技术的现场应用研究方面,杜林林等^[78]通过分析 30m 埋深条件下不同预衬砌厚度、不同钢拱架支撑间距及不同混凝土强度下预衬砌安全系数的变化情况,研究了软岩隧道中各种因素对预衬砌支护参数的影响;赵勇等^[79]通过对比分析锚杆、型钢拱架在软弱破碎围岩隧道中的现场应用效果,得出了锚杆的受力特点及拱架的优选方式;杨善胜^[80]通过研究软弱围岩隧道中采用“钢喷”支护形式的可行性,对隧道结构在安全性、稳定性、经济性方面作了综合评价;江玉生等^[81]基于大量监测数据对监测断面型钢拱架受力分布动态变化状况展开研究,得出型钢拱架受力变化规律及支护参数优化措施;曲海锋等^[82]通过分析现场监测数据,得到钢拱架支护形式下的初始释放荷载规律,结合型钢拱架和钢格栅承载力随时间的变化规律,提出该隧道合理的支护形式;沈才华和童立元^[83]通过对柔性支护钢拱架作用特点的研究,在现场钢拱架应变计监控量测数据的基础上,利用力学原理,综合考虑钢拱架初支弯矩与轴力,结合隧道开挖中事故发生的特点,进行安全性分等级判别,提出钢拱架锚喷支护安全性预测判别方法;颜治国和戴俊^[84]结合工程实例分析隧道支护中钢拱架失稳破坏的形式及原因,提出钢拱架因为侧向刚度低而发生弱轴平面内的扭曲失稳,采取增设钢拱架之间的连接、约束,从而提高钢拱架弱轴平面的抗弯刚度,解决了现场必须依靠增加拱架数量提高支护强度的问题。

2) 注浆加固联合支护技术

注浆加固联合支护以注浆技术为主、配以其他支护形式。通过注浆改善围岩的力学性质、封堵裂隙、防止岩体泥化和风化,同时改善锚杆和型钢拱架的受力状态,充分发挥围岩的自承能力,在软弱围岩等不良地质地下工程中得到了广泛应用。

国内外学者对注浆加固技术在地下工程中应用进行了大量研究。Mortazavi 和

Tabatabaei^[85]采用 FLAC3D 程序进行数值模拟研究,比较了三种全长注浆锚杆在动态荷载下的力学行为;Martin 等^[86]从理论和试验两个方面对全长注浆锚杆的锚杆-浆液接触面进行研究,提出了接触面响应的半经验公式;李立新和邹金铨^[87]基于渗流应力耦合本构方程和水力耦合理论,提出破碎岩体隧道涌水量预测及注浆圈厚度的计算分析方法,与现有估算结果及工程实例吻合;雷彦宏^[88]对隧道软弱围岩的支护方式进行了深入研究,指出软弱围岩的支护方式主要有超前锚杆支护、超前小导管注浆支护,并对软弱围岩的加固机理和施工工艺进行了详细论述,对隧道围岩稳定研究和工程施工具有指导意义;黄林伟等^[89]通过对软岩隧道各种支护方法及机理进行分析,提出锚杆注浆喷射混凝土能有效控制拱顶沉降和拱腰收敛,及时回填仰拱能有效控制底板隆起及抑制仰拱和墙脚塑性区开展;高峰等^[90]对单洞隧道进行了隧道注浆加固模型试验,探讨了注浆前后隧道结构及周围围岩的力学稳定性变化。

上述地下工程围岩控制技术的研究表明,以型钢拱架和注浆加固技术为主的初期支护形式,解决了地下工程围岩变形破坏的基本问题,为地下工程安全施工奠定了基础。但在地质条件较差的地下工程中,其支护强度难以满足围岩的支护需求,凸显承载力不足的问题,因此对于复杂条件地下工程来说,迫切需要一种高强度、高刚度兼顾经济性好的支护方式来满足更为严格的控制要求。

1.3.2 约束混凝土支护技术研究现状

1. 约束混凝土结构发展概况

利用外部约束,改善自身原有受压特性,以提高抗压强度及延性的混凝土称为约束混凝土。在工程应用中的钢管混凝土属于典型的约束混凝土结构。约束混凝土充分利用了外部约束与核心混凝土间的相互作用和协同互补,大大提高了抗压强度,使其具有钢材的高强和延性,又具有混凝土耐压和造价低廉的优点^[91-94]。

约束混凝土构件第一次在英国 Severn 施工铁路桥墩中使用,取得了良好的使用效果。20 世纪中后期,我国也对约束混凝土的结构设计与施工开展了大量研究,并制定了相关规程措施。基于上述设计与施工规程,约束混凝土结构已在我国桥梁、建筑、厂房等结构中得到广泛应用^[95,96]。

国内外学者对约束混凝土构件的力学性能进行了深入的研究。韩林海等学者^[97-100]对约束混凝土的力学性能进行了研究。国内对于约束混凝土进行深入研究开始于 20 世纪 60 年代,并取得了较大突破。蔡绍怀^[101]、钟善桐^[102]、韩林海^[103]对约束混凝土的力学性能做了大量研究,并取得了丰硕成果;聂建国等^[104]以约束混凝土核心柱中的约束混凝土及矩形箍筋约束混凝土的应力应变关系为基础,提出了约束混凝土核心柱轴压极限承载力的计算公式;傅学怡等^[94]提出节点内直接

设置分配梁的构造,并对荷载作用于管壁的超大截面矩形约束混凝土柱 1:5 缩尺模型进行轴压承载力试验研究,揭示了两者之间的相互作用关系;刘国磊^[105]通过建立承压环力学模型,对约束混凝土作为承压环一部分进行了研究,揭示了约束混凝土在其中的重要作用。

2. 约束混凝土支护在地下工程中的初步应用

虽然约束混凝土技术已在地上结构中得到广泛应用,但是在地下工程中的应用还很鲜见。在地铁、隧道中约束混凝土作为主要支护方式尚处于起步阶段。青函海底隧道作为连接日本本州和北海道的重要海下隧道,在修建过程中遇到断层带时,隧道围岩难以支护,最终通过约束混凝土代替原有 H 型钢支护,解决了支护强度不足的问题,防止了隧道塌方,克服了膨胀性土压,顺利通过了断层带^[106];南岭隧道在复杂地质条件下通过利用约束混凝土代替原有支护形式,较传统型钢拱架节约钢材 38%~54%,产生了良好的经济社会效益;谷拴成和刘皓东^[107]在地铁隧道中采用约束混凝土拱架代替原有格栅拱架,成本仅为传统支护的 61%。

约束混凝土作为一种重要支护方式,已经在矿山中得到初步应用。王强和臧德胜^[108]通过在矿山中进行现场试验,得出在相同承载力条件下,约束混凝土支护相比传统 U 型钢支护节约钢材 30%左右,大大节约了成本;臧德胜等学者^[109, 110]对约束混凝土拱架的承载特性进行了室内及数值试验,结果表明约束混凝土拱架能很好地满足高围压作用下围岩需要的支护强度;刘国磊^[105]、高延法等^[111]、孟德军^[112]对约束混凝土支护进行了理论分析及试验研究,通过在煤矿中进行现场应用,取得了较好的围岩控制效果;李学彬等学者^[113-115]根据约束混凝土支架灌注孔补强措施,对弹性变形条件下的补强措施进行了分析优化。

根据前人研究成果,王琦等学者^[116-126]提出了适用于隧道、煤矿、硐室等多种断面形状与不同拱架截面形式的高强约束混凝土支护体系,并在兖矿集团、山东能源集团等负责施工的深部复杂条件巷道中得到成功应用,验证了约束混凝土支护技术具有良好的围岩控制效果和经济性。

3. 约束混凝土支护在地下工程中的应用理论与试验研究

目前,针对约束混凝土在地下工程中的应用,许多学者在其试验与应用理论方面开展了大量的研究。刘国磊等学者^[105, 111, 112, 127, 128]根据已有的约束混凝土拱架计算理论,对基本构件的承载力进行理论研究,通过反推得到拱架的极限承载力;臧德胜和韦潞^[129]对弧形构件及约束混凝土拱架进行模型试验,结果表明约束混凝土拱架具有很高的强度承载力,能够满足地下工程的支护要求;高延法等^[111]对约束混凝土拱架进行了整架试验、短柱轴压试验、单节弧形构件抗弯试验等,分