

盾构隧道

内部双层预制结构设计施工关键技术

姜海西 编著



上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

盾构隧道内部双层预制结构设计施工关键技术 / 姜海西编著. — 上海: 上海科学技术出版社, 2021.9
ISBN 978-7-5478-5443-3

I. ①盾… II. ①姜… III. ①城市隧道—隧道工程—预制结构—结构设计②城市隧道—隧道工程—预制结构—工程施工 IV. ①U459.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第152413号

盾构隧道内部双层预制结构设计施工关键技术
姜海西 编著

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路71号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

上海锦佳印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9.75

字数 210千字

2021年9月第1版 2021年9月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-5443-3/U·112

定价: 80.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题, 请向工厂联系调换

内 容 提 要

本书从设计、预制、现场装配、机械设备等方面系统介绍了盾构隧道内部双层预制结构的关键技术和施工难点,提出了盾构隧道内部双层预制装配式车道结构体系,研发了盾构双层结构预制装配技术。该技术应用在上海市周家嘴路越江隧道、银都路越江隧道,并作为工程示范。本书内容有助于推动上海乃至全国地下道路隧道工程装配式技术发展,提升城市隧道建设水平。

本书可供从事隧道与地下工程设计、施工和科研等相关从业人员参考。

本书编委会

(按姓氏笔画排序)

卫张震	王文东	毕常芸	朱学银	任红梅
刘芳	刘念	刘涛	刘博诗	严佳梁
李长学	李逸之	李章林	吴建兵	吴斌暄
邱俊男	宋丽妹	张玉富	郑斌	郑学东
赵程	禹海涛	饶倩	姜海西	袁勇
莫超	贾尚华	徐致远	高卫平	姬瑒贝贝
黄川	韩林	温竹茵	熊子正	

序

盾构法隧道的工程建设,体现了一个国家交通运输和土木建筑的总体水平。进入 21 世纪以来,大直径盾构法隧道正被越来越广泛地应用于我国公路、铁路、城市综合管廊等领域,成为了构建城市地下快速路网最有效的解决方法。地下空间资源极其宝贵,为了充分利用隧道内部空间,双层结构型式的大直径隧道建设越来越多。

由于隧道内部空间狭小、双层结构型式复杂,传统现浇施工方式给内部双层结构施工带来诸多不便。随着装配式建筑技术的不断发展与日趋成熟,这一问题得到了很好的解决。预制装配式结构施工采用构件工厂流水制作与现场机械化装配,具有标准化程度高、控制精度高、施工作业快等一系列优点,并且更有利于实现内部结构与盾构掘进同步施工,可大大节约施工工期。全预制装配式隧道内部结构是当代隧道建设发展的必然趋势。

本书针对上海地区的地质水文条件以及隧道结构型式,从设计、预制、装配等方面详细介绍了大直径盾构法隧道内部双层预制结构的关键技术,提出了隧道内部双层预制装配式车道结构体系,试验分析了构件连接节点形式及其力学特性,形成了预制装配式车道抗震试验方法,研发了隧道内部双层结构的预制与装配技术,并在上海诸光路地道、周家嘴路越江隧道得到了示范应用。

本书引入了较多最新的理论和工程实践成果,由浅入深、图文并茂,可供设计与施工单位的专业技术人员、科研院所的研究人员和其他从事隧道及地下工程相关领域的工作者阅读参考。

期望本书的成功出版,能为我国双层结构型式的盾构法隧道建设提供示范与参考,并推动城市地下空间高效、高质量及可持续发展。

周文波

2021 年 7 月

前 言

交通拥堵是超大型城市的痼疾,严重制约着城市的可持续发展。城市道路隧道作为城市地下空间拓展和城市立体交通网络构筑的“利器”,在解决城市交通拥堵和改善民生方面发挥着关键作用。全预制可以解决作业环境恶劣、安全风险大、质量控制难、施工工期长等诸多问题,因此双层预制结构盾构隧道可节约地下空间、提高建设效率、节省成本。

城市道路隧道建设出现了由小直径向大直径、由单层向双层、由短向长、由现浇到预制的趋势。借助成熟大直径盾构隧道技术及装配式建筑的发展与成熟,盾构隧道内部双层结构的全预制装配式已成为当代隧道建设发展的必然趋势。在以往的隧道建设过程中,工程总体预制化程度不高,基本属于半预制化状态,尚未实现内部结构的全预制装配化,对施工效率的提高和施工工期的缩短并不显著。目前国内尚无书籍对隧道内部双层结构的预制技术开展系统的总结和研究。本书依托实际工程,沿着“调研—研究—设计—施工—总结”的路线,对盾构隧道内部双层车道结构的预制装配技术进行了系统的研究和总结,形成了丰富的研究成果。本书的出版可为道路隧道预制装配式结构建造技术的推广应用提供重要的实践经验与技术基础。

本书主要包含以下内容:第1章介绍了国内外城市隧道的建设现状及发展趋势。第2章介绍了隧道内部板-梁-柱框架结构体系,以及内部结构与管片的连接方式。第3章根据建筑功能、结构安全、施工工艺等诸多因素,介绍了4种合理的拆分方式。第4章通过足尺试验分析了立柱-基座、基座-管片、梁-柱等关键节点的力学性能。第5章介绍了立柱、车道板、盖板、防撞侧石等预制构件的标准化生产关键技术。第6章介绍了立柱、车道板、盖板、防撞侧石吊装、运输、现场装配及设备选型。第7章介绍了全预制装配式烟道设计方案、接缝关键技术和快速化施工技术。

本书涉及的研究成果是在上海市科委项目(项目编号:16DZ1201900)资助下完成的。成果在完成过程中得到了上海城投公路投资(集团)有限公司、上海黄浦江越江设施投资建设发展有限公司、上海隧道工程有限公司、上海市工程设计研究总院(集团)有限公司、同济大学等的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2020年10月

目 录

第 1 章 绪论 / 1

- 1.1 预制装配技术在隧道中应用现状 3
- 1.2 本书主要内容 7

第 2 章 盾构隧道双层预制装配式结构体系 / 9

- 2.1 盾构隧道双层车道内部结构类型及特点 11
 - 2.1.1 “牛腿+筒支板”结构体系 11
 - 2.1.2 “板-梁-柱”结构体系 11
 - 2.1.3 “板-墙”结构体系 14
 - 2.1.4 全预制内部结构的探索 15
- 2.2 内部结构与盾构管片连接选型 16
 - 2.2.1 内部结构与盾构管片的连接类型 16
 - 2.2.2 内部结构与盾构管片不同连接下的受力分析 17

第 3 章 预制装配整体式内部结构拆分设计 / 25

- 3.1 拆分方案一 27
 - 3.1.1 拆分设计 27
 - 3.1.2 预制构件设计 27
 - 3.1.3 施工工序 33
- 3.2 拆分方案二 35
 - 3.2.1 拆分设计 35
 - 3.2.2 预制构件设计 36
 - 3.2.3 施工工序 37
- 3.3 拆分方案三 39

3.3.1	拆分设计	39
3.3.2	预制构件设计	40
3.3.3	施工工序	40
3.4	拆分方案四	42
3.4.1	拆分设计	42
3.4.2	预制构件设计	43
3.4.3	施工工序	44

第 4 章 连接节点形式与力学性能 / 47

4.1	关键节点的连接方式	49
4.1.1	基座与预制立柱的连接方式	49
4.1.2	基座与管片的连接方式	53
4.1.3	梁-柱接头的连接形式	54
4.2	立柱与基座的连接力学试验	54
4.2.1	预制立柱-基座节点数值模拟	54
4.2.2	试验方案	59
4.2.3	材性试验	61
4.2.4	试验现象	61
4.2.5	试验结果分析	67
4.3	基座与管片的连接力学试验	76
4.3.1	试验方案	76
4.3.2	试验现象	76
4.3.3	试验结果分析	79
4.4	梁-柱接头试验研究	81
4.4.1	试验方案	81
4.4.2	试验现象	86
4.4.3	试验结果分析	92

第 5 章 成套预制技术 / 97

5.1	预制立柱的生产	99
5.1.1	质量控制标准	99
5.1.2	现场制作工艺流程	100

5.2	预制车道板的生产	102
5.2.1	质量控制标准	102
5.2.2	构件生产流程	103
5.3	预制盖板及防撞侧石生产工艺	107
5.3.1	质量控制标准	107
5.3.2	构件生产流程	108

第 6 章 成套装配技术 / 111

6.1	预制 π 形件安装	113
6.1.1	预制 π 形件运输	113
6.1.2	π 形件装配	114
6.1.3	π 形件两侧混凝土填充	114
6.2	基座施工	115
6.2.1	管片植筋	115
6.2.2	基座浇筑及预留立柱插筋	117
6.3	立柱装配	118
6.3.1	立柱的运输	118
6.3.2	预制立柱的安装	118
6.3.3	套筒灌浆	120
6.4	车道板安装	122
6.4.1	车道板运输	122
6.4.2	车道板安装	122
6.4.3	后浇接头施工	126
6.5	盖板及防撞侧石安装	127
6.5.1	盖板安装	127
6.5.2	防撞侧石安装	127

第 7 章 盾构隧道全预制装配式烟道设计及施工技术 / 129

7.1	烟道现状技术	131
7.2	全预制装配式烟道设计方案	133
7.2.1	烟道板设计方案	133
7.2.2	接缝关键技术	134

7.3 烟道板快速化施工技术	135
7.3.1 所需设施和设备	136
7.3.2 牛腿施工	137
7.3.3 烟道板的预制	138
7.3.4 烟道板现场装配	139

参考文献 / 141

CHAPTER 1

第 1 章

绪 论

随着我国经济建设的高速发展,城市总体交通需求持续增加,交通运输线路的规划与建设日益迫切。道路隧道埋设于地下,具有不影响自然景观、不影响水域通航、运营受自然气候影响小的优点,已成为大城市解决交通问题的主要途径。

为了充分利用公路隧道的内部空间,目前公路盾构隧道朝着大直径、双层方向发展,内部结构越来越复杂,但是隧道狭长内部空间限制了大型安装设备的进入,给内部结构的施工带来诸多不便。传统的现浇施工工艺已不能满足现代隧道建设的需求,传统工艺主要带来以下问题:① 现场需搭设大量支架和模板,搭设时间长,施工过程安全风险大,监管工作量大、难度高、效率低。② 隧道内部环境相对封闭,空气流动性差,声、光、尘等污染对民工身体危害大。③ 大量的现浇工作施工效率低下、建造工期过长。④ 粗放型的施工模式导致行业整体能耗高,浪费严重。

相比于传统的现浇工艺,预制装配结构施工采用流水作业、机械化施工,具有标准化程度高、精度好的特点,对保证结构质量、提高施工速度起到了重要作用。随着装配式建筑的发展与成熟,内部结构的全预制装配式是当代隧道建设的必然趋势。

本书主要介绍盾构隧道内部双层车道结构的预制装配技术,包括内部双层结构体系的受力分析和选取及合理划分、各部件之间各类接头的力学性能研究及可靠性、各预制构件工厂预制及现场快速装配的成套工艺与设备。

▶ 1.1 预制装配技术在隧道中应用现状

1) 隧道内部单层结构预制现状

盾构隧道主要用于满足社会交通需求,其断面形式主要有两种:单层和双层。前期受制于盾构直径的大小,我国盾构隧道内部结构多为单层,如上海第一条越江隧道打浦桥路隧道,以及后期陆续建设的人民路隧道、新建路隧道、西藏南路隧道、上海长江隧道、龙耀路隧道、虹梅南路隧道等。

目前单层隧道的预制装配模式已经成熟,主要有两种模式:一是口字件+两侧现浇的半预制化技术,二是口字件+预制板+管片植筋制作牛腿的形式。对应于以上两种建造模式,表 1.1 列举了国内部分单层隧道内部结构的预制情况。

表 1.1 国内单层内部结构盾构隧道情况

隧道名称	隧道直径/m	横断面布置	单层结构形式
人民路隧道	外径: 11.36 内径: 10.36	双车道	预制口字件+两侧现浇车道板
新建路隧道			
西藏南路隧道			
龙耀路隧道			
虹梅南路隧道	外径: 14.5 内径: 13.3	三车道	

续表

隧道名称	隧道直径/m	横断面布置	单层结构形式
上海长江隧道	外径: 11.36 内径: 10.36	三车道	预制口字件+两侧现浇车道板
江浦路越江隧道	外径: 11.36 内径: 10.36	双车道	预制口字件+两侧预制车道板

人民路隧道、虹梅南路隧道、上海长江隧道等均采用了预制口字件+现浇车道板相结合的设计方法,其断面形式可参考图 1.1^[1]。口字预制件施工机械既可以采用盾构机自带的安装设备,也可以采用单独吊车,施工灵活方便。口字预制件一般随着盾构推进同步进行安装,安装好的口字件可以作为隧道内的施工便道。两侧现浇车道板采用满堂支架的形式。

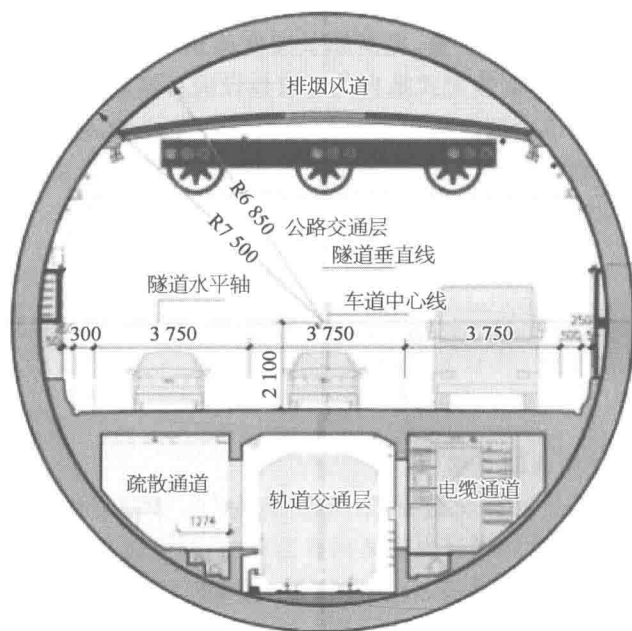


图 1.1 上海长江隧道横断面

江浦路越江隧道实现了内部结构全预制,采用预制口字件+预制车道板的设计,整个隧道预制率高达 96%。两侧车道板采用预制形式,省去了满堂脚手架的搭设,大大节省了劳动力及施工时间。图 1.2 为江浦路越江隧道横断面示意图。图 1.3、图 1.4 为隧道内部预制口字件和预制车道板的施工状态,从中可以看到现场文明施工得到了很好的保证。

2) 隧道内部双层结构预制现状

为了充分利用盾构隧道内部空间、节约城市地下空间资源,双层车道结构在大直径盾构隧道设计中得到了广泛的应用,其结构以现浇为主,如表 1.2 所列的上海军工路隧道、杭州瘦西湖隧道、上海上中路隧道。但是,狭长的隧道空间给现浇施工带来极大困难,为了节省工期和方便施工,不断进行着双层盾构隧道的预制研究。

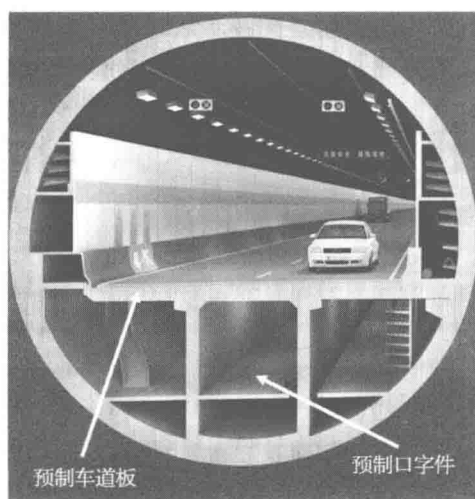


图 1.2 江浦路越江隧道横断面

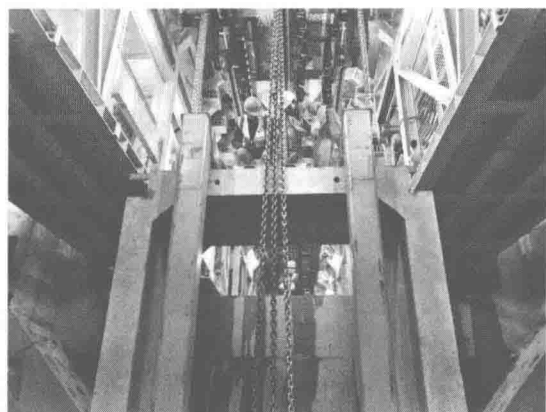


图 1.3 江浦路越江隧道口字件安装



图 1.4 江浦路越江隧道车道板安装

表 1.2 国内双层内部结构盾构隧道情况

隧道名称	直径/m	横断面布置	上层车道结构	下层车道结构
复兴东路隧道	外径: 11 内径: 10	上下四车道	预制牛腿+预制上层车道板	现浇
军工路隧道	外径: 14.5 内径: 13.3	上下四车道	现浇	预制π形件
迎宾三路隧道	外径: 13.9 内径: 12.7	上下四车道	预制π形件	现浇
瘦西湖隧道	外径: 14.5 内径: 13.3	上下四车道	现浇	现浇
纬三路过江通道	外径: 14.5 内径: 13.3	上下四车道	现浇立柱+纵梁+预制上层车道板	预制口字件
上中路隧道	外径: 14.5 内径: 13.3	上下四车道	现浇	预制π形件

目前盾构隧道内部双层结构的预制装配技术取得了一定的研究成果并得到了应用,如复兴东路隧道作为我国第一条内部双层结构盾构隧道建设模式,同时也是预制装配技术在内部双层结构中的第一次尝试。随后在上中路隧道、军工路隧道、外滩通道、迎宾三路隧道中,该技术已经趋于成熟。下面详细介绍一些内部双层预制结构形式。

上海复兴东路隧道管片外径 11 m,内径 10 m,厚 48 cm,环宽 1.5 m。上层车道宽(3+3) m,通行净高 2.6 m,下层车道宽(3.5+2.5) m,通行净高 4 m。上层为小车道,下层为大车道另设紧急停车道^[2-4]。其横断面形式如图 1.5 所示,上层车道板为预制结构。在构件预制过程中,牛腿与管片一次成型,预制车道板搁置在牛腿的球冠橡胶支座之上。上层预制车道板安装及道路施工与隧道掘进同时进行。

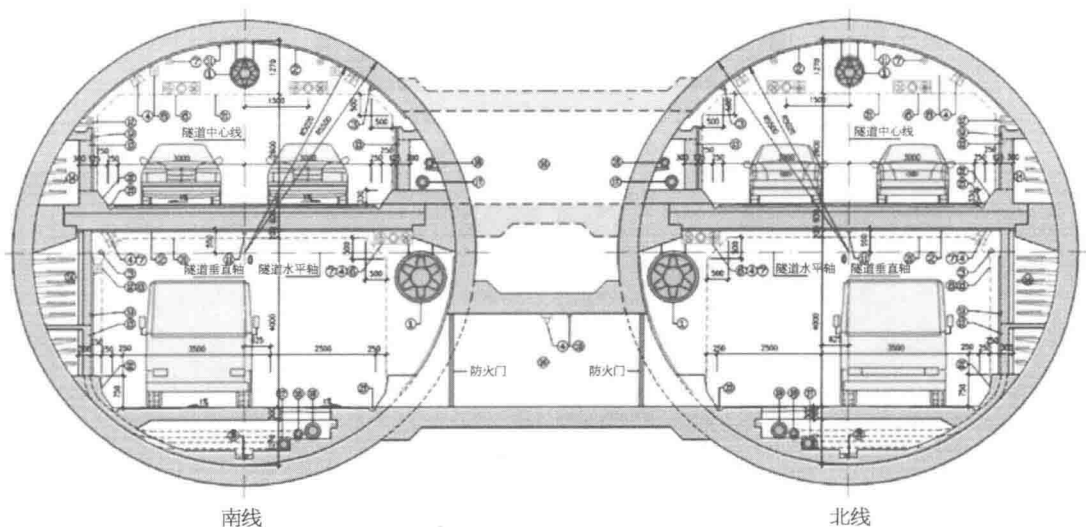


图 1.5 上海复兴东路隧道横断面(圆形隧道)

为了既不影响盾构的正常推进,又能够在狭小的空间内进行上层车道板的安装,专门设计了长 9 m 的超低运输平板车。平板车设前后两组共 4 根轴,为使道路板的受力分散,每组两根轴之间的间距增大了 1.6 m,车道板的安装采用悬臂回转的形式,下层空间则全部让给下层道路施工使用,隧道内形成了立体运输格局。隧道贯通后进行下层道路施工。下层为现浇结构,从底部往上依次为弓形底板、中隔墙、路面板和牛腿、防撞侧石。

此预制方案大大提高了盾构内车道结构的施工速度,达到了当时的先进水平,但是预制的牛腿限制了管片制造及装配施工的灵活性,上层车道的整体性较差,抗震不利。

上海军工路隧道外径 14.5 m,内径 13.3 m,双层,上下四车道。隧道下层采用 π 形预制结构,两层立柱基础、立柱上层车道板均采用现浇结构^[5,6],横断面形式如图 1.6 所示。

南京纬三路隧道采用上层车道板预制+梁板后浇接头形式^[7,8],车道立柱与车道纵梁共同浇筑,如图 1.7 所示,车道板进行预制。车道板安装于车道纵梁侧面牛腿顶面,车道板与车道纵梁通过后浇混凝土及预留钢筋进行连接。

标准车道板尺寸为 3 m \times 10 m,重 30 t,采用 40 t 的双头平板车从上层车道运输。车道板的安装通过架设在纵梁牛腿的架梁机完成,安装过程分为起吊、平移、旋转、平移、下放、定位安装等过程。

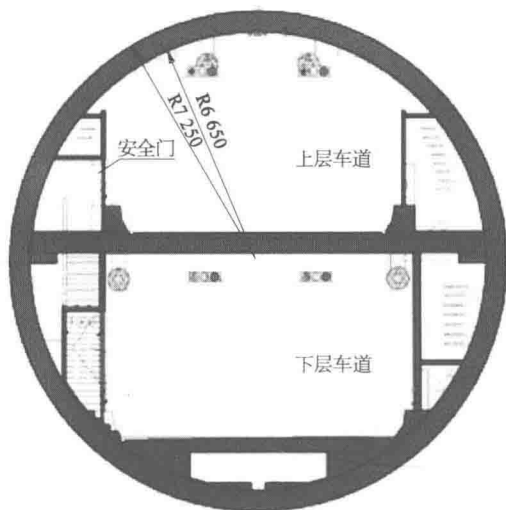


图 1.6 上海军工路隧道横断面

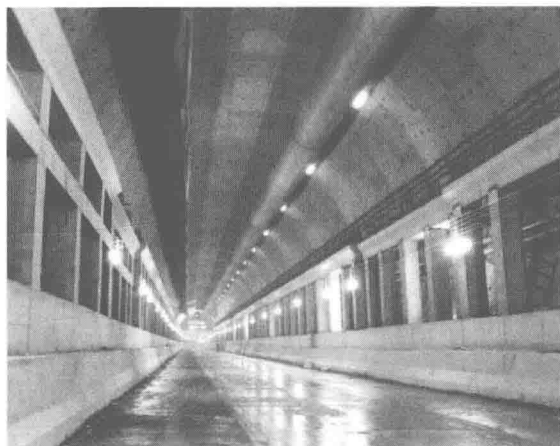


图 1.7 现浇立柱与纵梁

综上所述,目前上层车道预制化程度不高,基本属于半预制化状态,尚未实现内部结构的全预制装配化。

▶ 1.2 本书主要内容

目前我国隧道内部双层结构预制化水平不高,只是实现了 π 形件、口字形构件等下层结构的预制,上层车道结构基本采用现浇法施工。要想实现隧道内部结构的全预制化,还需解决一系列问题。

盾构隧道狭长的内部空间限制了大型安装设备的进入,导致预制构件尺寸受限,使预制构件体系面临“桥梁的荷载、民建的尺寸”“接头细小而繁多”“拼装烦琐”等困难与挑战。同时,预制构件的拆分与现状连接必然会引起受力的改变与设计方法的调整。特别是连接接头“细小”的情况下,接头刚度是否满足要求,亟待解决。本书从双层盾构隧道预制装配式结构体系选型、拆分设计、连接节点形式及力学性能、整体受力特性等方面开展相关研究,形成道路隧道内部双层预制装配式结构设计技术。

道路盾构隧道内部预制结构在运营中承受较大的车辆荷载,因此对预制构件质量、构件间节点连接的精确性与可靠性要求很高。为避免分块过多,预制单个构件尺寸与重量相对较大,而整个结构体系装配施工必须在有限空间内完成,且要确保预制结构与盾构掘进轴线的协调性,因此构件吊装、构件安装基准点的控制难度相当大。为此,本书详细介绍了盾构隧道内部双层结构预制构件成套标准生产、现场装配技术。