

Beijing Ditie Shaluanshi

Liyan Diceng Zonghe Gongcheng Jishu



“十二五”国家重点图书出版规划项目
中国重大隧道及地下工程建设项目技术总结

北京地铁砂卵石砾岩地层 综合工程技术

潘秀明 雷崇红 等著



人民交通出版社
China Communications Press

Beijing Ditie Shaluanshi Liyan Diceng Zonghe Gongcheng Jishu
北京地铁砂卵石砾岩地层综合工程技术

潘秀明 雷崇红 等著

人民交通出版社

内 容 提 要

本书以北京地铁9号线土建工程为案例,系统介绍了砂卵石及砾岩地层土建施工关键技术,全书共分五篇30章,包括砂卵石及砾岩地层勘察技术及成果集成、砂卵石及砾岩地层钻孔灌注桩成孔关键技术、砂卵石砾岩地层盾构施工关键技术、砂卵石及砾岩地层矿山法施工关键技术、大直径环形板半盖挖逆作法修建换乘车站设计施工关键技术等内容。本书内容对于国内外类似地下工程的设计和施工具有非常重要的参考和借鉴意义。

本书可供地铁工程设计、施工技术人员、科研人员以及相关专业高等院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

北京地铁砂卵石砾岩地层综合工程技术/潘秀明,
雷崇红等著. —北京:人民交通出版社,2012.12
ISBN 978-7-114-10273-8
I. ①北… II. ①潘…②雷 III. ①地下铁道—砂
土—地层—工程施工—北京市②地下铁道—卵石—地层—
工程施工—北京市 IV. ①U455.53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 303878 号

书 名: 北京地铁砂卵石砾岩地层综合工程技术

著 作 者: 潘秀明 雷崇红 等

责任编辑: 陈志敏 王 霞

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 中国电影出版社印刷厂

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 27.5

字 数: 630 千

版 次: 2012 年 12 月 第 1 版

印 次: 2012 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10273-8

定 价: 150.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

北京地铁砂卵石砾岩地层综合工程技术

序

北京地铁9号线全线位于永定河冲洪积扇的西部,线路所穿越地层在西客站以南部分以卵石地层为主,西客站以北以第三系砾岩为主。沿线砂卵石地层卵石含量高(粒径大于20mm颗粒含量为50%~80%),级配差,粒径大(揭示卵石直径达1.7m);强度高(卵石最大单轴抗压强度值为205MPa),结构松散(无胶结),对施工扰动反应灵敏,是一种典型的力学结构不稳定地层。砾岩层岩面起伏较大,松散胶结。

以砂卵石砾岩地层为主要特性的9号线工程在北京地铁建设史上创造了诸多第一次:第一次在大粒径、高含量、高强度砂卵石地层中施工地铁车站和区间;第一次穿越大面积水域(玉渊潭东湖及永定河引水渠);第一次穿越铁路编组站(12股道编组);第一次采用环形板半盖挖逆作法施工直径达80m的换乘车站;第一次采用铺盖法体系。

在9号线建设过程中,先后开展了砂卵石及砾岩地层勘察方法研究、砂卵石及砾岩地层空间分布规律研究、砂卵石地层钻孔灌注桩成孔工艺技术研究、砂卵石及砾岩地层矿山法施工关键技术研究、砂卵石及砾岩地层盾构施工关键技术研究、大直径环形板半盖挖逆作法换乘车站设计施工综合技术和砂卵石及砾岩地层变形规律研究。本书作者都是第一线的建设者,技术资料来自现场,真实、可靠,并结合工程实践进行了重大创新,整个工程在周边环境地面沉降的控制方面均有良好成效。对上述研究成果进行了系统总结和提炼,这种精神是十分可贵的,对砂卵石砾岩地层地铁设计、施工技术的发展做出了很大贡献。

本书对地下工程的规划、设计和施工具有很强的指导作用,我愿将此书推荐给大家,特别是地下工程行业的工程技术人员和大中专院校师生。



2012年11月

前 言

北京地铁9号线是贯穿北京市南北方向的交通骨干线路,全线长16.5km,全部为地下线,共设地下车站13座,其中换乘站9座,由南到北纵贯丰台、海淀,经过丰台科技园、六里桥客运交通枢纽、北京西站、中华世纪坛(含玉渊潭公园)以及白石桥等主要区域,沿线周边环境复杂,下穿房屋、道路桥梁和市政管线众多,先后穿越南四环、丰台火车站编组站、西三环、既有地铁1号线和玉渊潭等重大风险点。

全线位于永定河冲洪积扇的中上部,线路所穿越的地层在西客站以南部分以卵石地层为主,西客站以北部分以第三系砾岩和卵石层为主。沿线砂卵石地层卵石含量高、级配差,经常夹杂大粒径的卵石、漂石,结构松散、无胶结、对施工扰动反应灵敏;砾岩为强风化~中风化,岩性主要为花岗岩、石英岩等,松散胶结、岩面起伏较大,局部夹砂岩(泥岩)薄层,易崩解破碎,耐久性和水稳性极差。砾岩之上的卵石层赋存一层潜水,水位埋深随岩层起伏而变化,主要接受大气降水补给和侧向径流补给,含水层渗透系数大,疏、排、堵难度大。

在这种地质及环境条件下采用明挖法、矿山法和盾构法施工难度极大,有许多关键技术需要解决和突破。为此,在9号线建设过程中,开展了砂卵石及砾岩地层土建施工综合技术研究,研究中采用技术调研、理论分析、数值模拟、现场跟踪试验和归纳总结等手段,针对在砂卵石及砾岩地层进行勘察、明挖法、矿山法和盾构法施工的关键技术进行了深入研究,获得了“砂卵石及砾岩地层勘察技术和成果集成”、“砂卵石及砾岩地层钻孔灌注桩成孔关键技术”、“砂卵石地层盾构施工关键技术”、“砂卵石及砾岩地层矿山法施工关键技术”、“大直径环形板半盖挖逆作法修建换乘车站设计、施工关键技术”等一系列技术成果。这些技术成果的研究成功及在施工中的应用,为北京地铁9号线土建工程安全、快速、高效、优质地完成发挥了非常重要的作用,为9号线在北京地铁建设史上创造了诸多第一次:第一次在“大粒径、高含量、高强度”砂卵石地层中施工全线地铁车站和区间、第一次穿越大面积水域(玉渊潭东湖及永定河引水渠)、第一次穿越铁路编组站(12股道编组)、第一次采用环形板半盖挖逆作法施工直径80米换乘车站、第一次采用铺盖法体系;同时,也为国内外类似地铁工程、地下工程的设计与施工

提供了非常有价值的参考和借鉴。

本书以北京地铁9号线土建工程为案例,结合科研和工程实践,系统介绍了砂卵石及砾岩地层土建施工的关键技术,全书主体内容分为五篇30章,力求做到理论与实践结合,突出实用性。北京地铁9号线各参建单位均提供了部分基础资料,在本书的编写过程中还参考了有关单位和学者的技术资料,并引用了其中部分内容、试验数据和图表,在此一并表示感谢!

本书由潘秀明、雷崇红、王贵和、江玉生、贺少辉、刘永勤、高辛财著,其他参与本著作编写的还有:高爱林、吴精义、曹伍富、刘鑫、王毅宏、陆群、艾菁菁、陈浩、杨宇友、韩云哲、赵光泉、范长春、刘魁刚、谢保良、曾根平、韩会民、江华、雷安定、陈南凤、马福利、张建海、金淮、刘瑞、陈鹤、李凤豹、吴江滨、米献芳、刘卫丰、李国保、张云生、杨智勇、王宏斌、刘家平、周友良、叶成诚、刘新建、贾苍琴、邹翠荣、毛立坤、石司然、韩江波、冯振鲁、丛欣江、王文正、张奉超、商啸敏、刘仁柱、靳兆豪。

鉴于作者的水平及认识的局限性,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2012年11月于北京

北京地铁砂卵石砾岩地层综合工程技术

目 录

第一篇 砂卵石及砾岩地层勘察技术及成果集成

第 1 章 砂卵石及砾岩地层勘察技术·····	3
1.1 概述·····	3
1.2 勘察技术的应用·····	3
1.3 室内试验·····	15
1.4 施工过程中的跟踪及验证·····	17
1.5 砂卵石地层勘察技术要求·····	20
第 2 章 砂卵石工程特性及空间分布规律·····	22
2.1 卵石粒径特征·····	22
2.2 大粒径卵石空间分布规律·····	23
2.3 卵石强度·····	28
2.4 卵石地层渗透性·····	30
2.5 卵石地层围岩稳定性·····	30
第 3 章 砾岩工程特性及地层空间分布规律·····	32
3.1 砾岩强度特征·····	32
3.2 砾岩地层空间分布特征·····	33
3.3 砾岩富水性及渗透性·····	33
3.4 砾岩及泥岩的膨胀性·····	34
3.5 砾岩地层围岩稳定性·····	35
第 4 章 砂卵石及砾岩地层地下水富存及运移规律·····	36
4.1 地下水的分布特征·····	37
4.2 地层富水性·····	39

4.3 地下水的动态变化·····	39
4.4 地下水的运移规律(补径排关系)·····	40
4.5 地表水与地下水的水力联系·····	40
参考文献·····	41

第二篇 砂卵石及砾岩地层钻孔灌注桩成孔技术

第1章 概述·····	45
1.1 钻孔灌注桩成孔技术现状·····	45
1.2 9号线明挖基坑工程概况·····	46
1.3 9号线钻孔灌注桩施工的主要技术难题·····	48
1.4 9号线钻孔灌注桩施工方法选型情况·····	50
第2章 砂卵石地层旋挖钻机钻进成孔技术·····	52
2.1 旋挖钻机选型·····	52
2.2 钻具类型及选择·····	56
2.3 旋挖钻进泥浆护壁技术·····	60
2.4 砂卵石地层旋挖钻进工艺·····	66
2.5 砂卵石地层旋挖钻进效率·····	69
第3章 旋挖钻具结构及其设计分析·····	72
3.1 旋挖钻具用切削齿的研究·····	72
3.2 旋挖钻斗的设计·····	75
3.3 短螺旋钻头设计分析·····	80
3.4 筒钻头结构设计分析·····	84
3.5 卵砾石层钻进用新钻具·····	84
第4章 全套管护壁钻进技术·····	87
4.1 概述·····	87
4.2 全套管护壁钻进的特点及适用条件·····	87
4.3 全套管钻机构造·····	88
4.4 全套管灌注桩施工·····	91
4.5 卵石地层全套管钻进施工关键技术·····	92
4.6 砂卵石层全套管钻进效率·····	97
4.7 砂卵石层全套管钻进经济性分析·····	100
4.8 全套管钻进新技术·····	101

第 5 章 砂卵石地层人工挖孔桩施工关键技术	105
5.1 概述	105
5.2 砂卵石地层人工挖孔施工风险分析	105
5.3 护壁结构与混凝土模板设计	106
5.4 砂卵石地层人工成孔关键技术	107
5.5 安全保证措施	109
参考文献	111

第三篇 砂卵石砾岩地层盾构施工关键技术

第 1 章 概述	117
1.1 砂卵石地层盾构施工技术现状	117
1.2 北京地铁 9 号线盾构工程概况	118
1.3 9 号线盾构施工的主要技术难题	122
第 2 章 砂卵石地层特征及地层组段划分	125
2.1 砂卵石地层特性	125
2.2 基于盾构施工特点的砂卵石地层组段划分	134
第 3 章 盾构选型及刀具耐久性分析	147
3.1 基本概述	147
3.2 盾构选型的原则、依据及方法	149
3.3 刀盘结构形式的选择	151
3.4 刀具的选择及耐久性分析	153
3.5 刀盘驱动方式的选择	163
3.6 主要技术参数选择与优化	164
3.7 9 号线各标段盾构选型情况	172
第 4 章 砂卵石地层土体改良技术	181
4.1 基本概述	181
4.2 土体改良剂与土体的匹配关系	183
4.3 土体改良前后的相关评判指标体系	188
4.4 新型泥浆土体改良剂的研制及应用	192
第 5 章 开挖面稳定性及盾构姿态控制技术	201
5.1 盾构施工开挖面稳定性控制技术	201
5.2 砂卵石地层盾构姿态控制技术	204

第 6 章 砂卵石地层盾构施工综合技术	206
6.1 盾构始发与到达	206
6.2 开舱检修、换刀关键技术	224
第 7 章 地层及周边环境变形规律	229
7.1 地表变形规律理论概述	229
7.2 地表变形规律分析	231
第 8 章 施工进度对比分析	238
8.1 不同刀盘结构形式盾构施工进度对比分析	238
8.2 土体改良对盾构施工进度的影响分析	246
第 9 章 9 号线盾构施工典型案例	250
9.1 盾构下穿南四环综合控制技术	250
9.2 盾构下穿万丰桥综合控制技术	261
参考文献	274

第四篇 砂卵石及砾岩地层矿山法施工关键技术

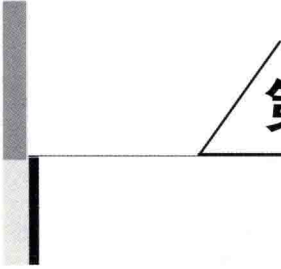
第 1 章 概述	279
1.1 北京地铁 9 号线工程矿山法应用概况	279
1.2 砂卵石及砾岩地层的地质特征及工程特性	287
1.3 北京地铁 9 号线工程矿山法施工的主要技术难题	289
第 2 章 砂卵石及砾岩地层的地下水控制	290
2.1 降水技术	290
2.2 其他地下水控制措施	296
2.3 特殊部位地下水控制技术	303
第 3 章 砂卵石及砾岩地层的超前支护技术	306
3.1 概述	306
3.2 超前管棚支护技术	306
3.3 超前小导管支护现场试验	309
3.4 自进式锚杆超前支护技术	322
第 4 章 砂卵石及砾岩地层的开挖与超挖控制技术	326
4.1 砂卵石地层(超前支护条件下)的开挖与超挖控制技术	326
4.2 砾岩地层(无超前支护条件)的开挖与超挖控制技术	329
第 5 章 军事博物馆站下穿既有线施工技术	336

5.1 工程概况	336
5.2 下穿施工主要技术措施	339
5.3 下穿施工对既有线影响的三维数值模拟与分析	344
5.4 既有线沉降变形情况	350
第6章 军一东区间旁穿中华世纪坛施工技术	351
6.1 工程概况	351
6.2 中华世纪坛现状情况	352
6.3 旁穿中华世纪坛主要技术措施	353
6.4 军一东区间旁穿对中华世纪坛影响的三维数值模拟与分析	355
6.5 中华世纪坛沉降变形情况	359
第7章 丰一丰区间下穿铁路段施工技术	360
7.1 工程概况	360
7.2 下穿铁路段主要技术措施	361
7.3 丰一丰区间下穿施工对铁路影响的三维数值模拟与分析	364
7.4 既有铁路沉降变形情况	368
参考文献	369

第五篇 大直径环形板半盖挖逆作法修建换乘车站设计、施工关键技术

第1章 项目综述	373
1.1 便捷换乘方案	373
1.2 与规划高层的共建预留	375
1.3 大直径卵石地层对工程的影响	376
1.4 多功能综合换乘圆厅结构方案	378
1.5 车站施工工法	380
1.6 设计、施工关键技术	383
第2章 深基坑支护结构计算分析	387
2.1 施工过程的三维数值模拟计算分析	387
2.2 增量法计算分析	398
第3章 多功能综合换乘圆厅结构受力计算分析	409
3.1 计算模型和计算方法	409
3.2 结构计算结果	410

第4章 关键施工技术的改进与提高	414
4.1 施工重点、难点分析	414
4.2 关键施工技术	414
第5章 工程监控量测分析	420
5.1 监控量测方案及实施	420
5.2 监测成果总结	422
参考文献	425
后记	426



第一篇

砂卵石及砾岩地层 勘察技术及成果集成

第1章 砂卵石及砾岩地层勘察技术

1.1 概 述

在北京市区,第四纪沉积地层的厚度由西向东逐渐增大,岩相分布由山地向平原具有明显过渡的特征,即市区西部的第四纪古河流形成的冲洪积扇顶部、中上部的地层以厚层砂土、卵砾石层为主,向东过渡为冲洪积扇的中部和中下部,第四纪地层为黏性土、粉土与砂土、卵砾石交互沉积层。

北京地铁9号线工程场区位于平原区西部,永定河洪冲积扇的中上部,存在大量砂卵石及砾岩层。针对该区地层环境复杂、困难的特点,综合采用钻探、探井、原位测试、微动探测、面波、浅层地震、室内试验等地层勘探技术,对沿线地层进行了详细的勘探。工程勘察结果表明,多种技术手段的应用,很好地掌握了工程沿线砂卵石和砾岩的工程特性和空间分布规律,正确认识了工程沿线的地质风险,为工程设计、施工等后续工作的开展打下了良好的基础。

1.2 勘察技术的应用

1.2.1 钻探

钻探的目的:用于鉴别岩性、划分地层,查明岩土的性质和分布;观测地下水静止水位;采取岩土试样与水样;为原位测试、波速测试等提供条件。

鉴于北京地铁9号线所处特殊的地层条件(存在较厚的砂卵石层和第三系岩层,且卵砾石粒径较大)和复杂的现场条件(钻孔多位于重要的市政道路上和公园内,且部分钻孔位于玉渊潭东湖中),外业钻探时根据钻探深度及钻探地层的不同,主要使用国产SH30型孔内锤击钻机、DPP100型车载回转钻机及XY-100型落地回转钻机。

(1) SH30型孔内锤击钻机

SH30型孔内锤击钻机利用穿心锤冲击钻头将钻孔内的土样取出。其优点是钻机本身轻巧灵活,钻探成本低,适应性强,采用套管护壁,钻探过程中一般不需要提供用水,可较准确地查明地层情况及地下水的分布;缺点是钻探深度较浅,无法取到质量较高的土样,对于较硬岩石则无法钻探,且由于钻孔直径的限制,无法查明大粒径卵砾石的分布情况,因此不适用于大



图 1-1-1 SH30 型钻机钻探现场

粒径卵石及基岩地区钻探。北京地铁 9 号线工程勘察过程中主要使用此种钻机钻探深度较小,孔深范围内没有或仅有很薄的基岩,场地狭小的钻孔。图 1-1-1 是 SH30 型钻机钻探现场。

(2) DPP100 型车载回转钻机

DPP100 型车载回转钻机属重型取样钻机,利用泥浆泵将清水或泥浆通过高压软管及钻杆柱中心孔输送到钻孔内进行钻头冷却和维护孔壁,具有移动方便、适应性强、钻探深度大、钻进速度快、取岩芯较完整的优点。但由于钻进中采用泥浆护壁,若不洗孔则无法在钻孔内准确量测地下水位,需要另外布置水位量测孔进行水位量测。受钻孔直径限制,也无法查明大粒

径卵砾石的分布及粒径情况。此外,DPP100 型车载旋转钻机现场施工场地要求较高,钻探成本也较高。图 1-1-2 是 DPP100 型钻机钻探现场。

(3) XY-100 型回转钻机

XY-100 型回转钻机与 DPP100 型车载回转钻机工作原理及特点相似,但在场地宽敞的情况下,XY-100 型钻机的搬运和就位没有 DPP100 型钻机灵活,且钻进速度相对要慢一些,尤其是对于钻探过程中需较大钻压的卵砾石地层。在场地狭小的位置进行钻探作业相比车载旋转钻机具有一定优势。图 1-1-3 是 XY-100 型钻机钻探现场。



图 1-1-2 DPP100 型钻机钻探现场



图 1-1-3 XY-100 型钻机钻探现场

上述常规钻探手段均无法查明北京地铁 9 号线工程典型的大粒径卵砾石的分布情况,勘察单位根据工程建设的需要,采用了人工开挖探井、既有基坑调查、周边资料搜集整理及施工阶段配合调查等综合手段,基本查清了大粒径卵砾石的分布情况,满足本工程的建设需要。

(4) 水上钻探

对于玉渊潭东湖段,需进行水上钻进,则对钻探手段提出了更高的要求。勘察期间采取 XY-100 型回转钻机和 SH30 型孔内锤击钻机相结合进行东湖段的钻探工作。XY-100 型回转钻机主要用以查明深部地层情况,SH30 型孔内锤击钻机主要用以查明浅部土层及地下水分布情况,此两种钻机均具有自重轻,易于拆卸、搬运的优点,只需要在水面上打设简易平台即可满足施工要求。图 1-1-4 为玉渊潭东湖水上钻探现场。

1.2.2 探井

北京地铁9号线沿线横跨永定河冲积扇,穿越古漯水故道和古金沟河故道,第四系冲洪积卵石、漂石层发育。颗粒物最大粒径、成分、强度等指标对地铁的设计和施工影响较大,而常规钻探方法由于受钻具和工艺的限制无法获得准确资料。因此,北京地铁9号线工程勘察采用了探井的勘探方法,通过现场量测、采取扰动土样进行颗粒筛分、抗压强度试验和矿物分析的方法来获取颗粒物的物理力学指标和矿物成分。



图 1-1-4 玉渊潭东湖水上钻探现场

(1) 探井布置及工作量

①探井布置原则:采用循序渐进的探井布置方法,根据沿线地质调查的情况布置人工探井,如果在沿线地质调查的基础上,一个人工探井能够查明卵石地层分布特性,就不再布置第二个探井。

②探井工作量:共布置 13 个人工探井,探井直径(不包括护壁)为 1.0m,深度 21~27m。

(2) 探井主要技术要求

①土层描述要求:分层描述颗粒级配、颗粒形状、颗粒排列、最大粒径、母岩成分、风化程度、卵漂石颗粒裂面风化壳厚度、充填物的性质和充填程度等。

② 取样要求:

a. 对于上部填土层只进行描述、拍照,不取样。

b. 对于砂卵石土层,统计每一回次的长轴粒径在 100~200mm、200~300mm、300~400mm、400~500mm 和大于 500mm 范围内的颗粒的个数和总质量。

c. 对于颗粒在 200~300mm 的卵石进行现场称重,测量粒径范围和最大粒径,整体编号、拍照,不带回实验室。

d. 对于颗粒大于 300mm 的漂石逐个进行现场称重,测量三轴尺寸,单独编号,拍照,不带回实验室。

e. 每一大层按照四分法取 1 件扰动样,带回实验室做试验。

f. 每一大层取 8 块粒径在 40~100mm 和 1~2 块 300~500mm 的卵石带回实验室,300~500mm 的大粒径卵石至少能够套取 3 个单轴抗压强度试验标准试件。

③ 试验要求:

a. 将扰动试样做筛分试验。

b. 对取回的粒径 40~100mm 的卵石块进行点荷载试验,粒径 300~500mm 的卵石进行单轴抗压强度试验。

(3) 探井施工

具体施工可执行人工挖孔桩施工相关规定,详见本书第二篇关于人工挖孔桩施工关键技术的相关章节,此处不再赘述。

(4) 探井回填

探井验收后应及时回填。回填按取土顺序自下而上依次回填,恢复原来地层,不得人为变