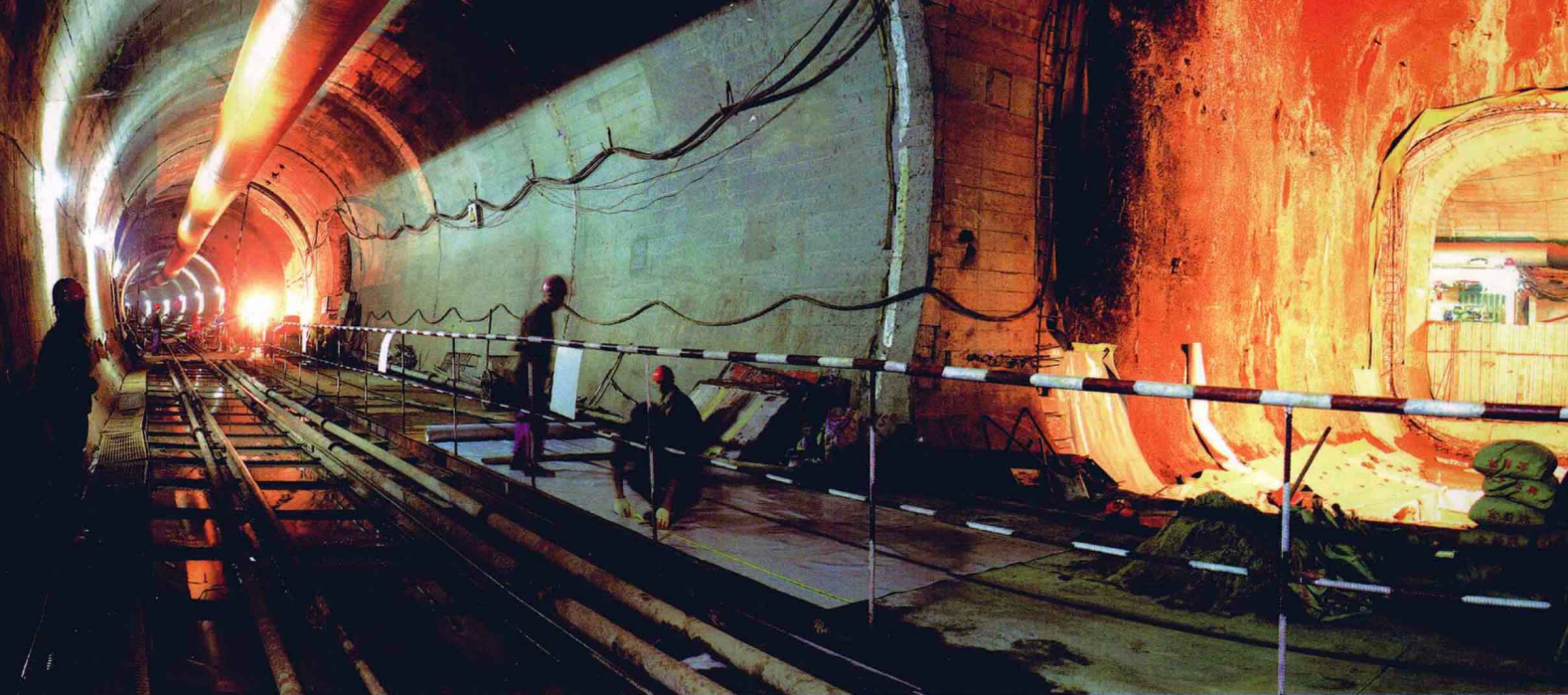




地铁

广州市地下铁道总公司 编

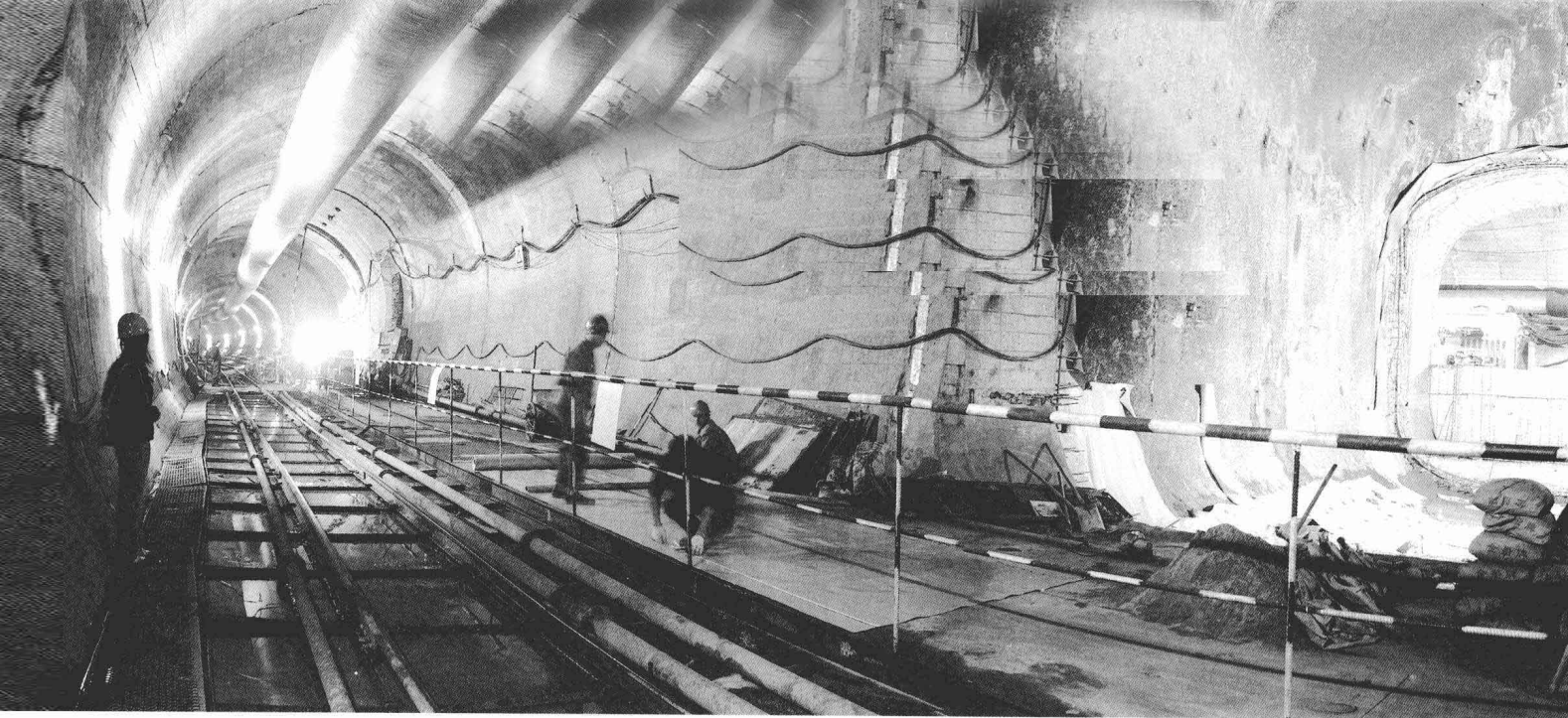
科技文集

METRO SCIENCE AND TECHNOLOGY
COLLECTED THESES

2011



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS



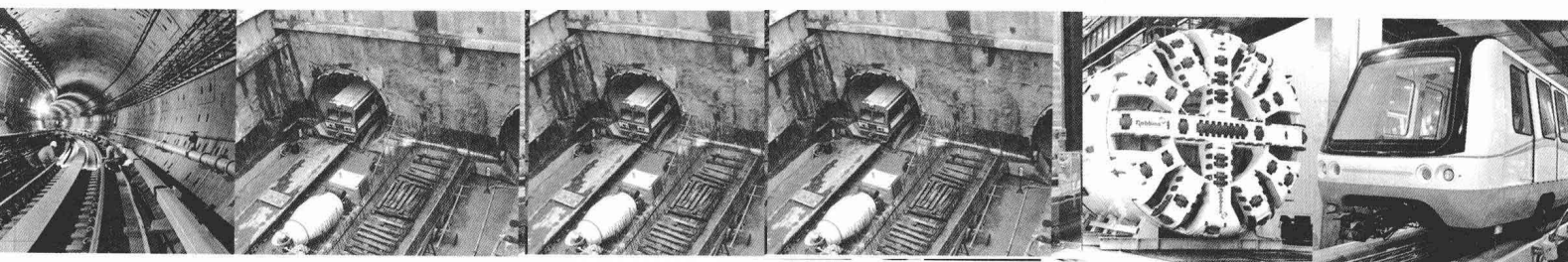
地铁

广州市地下铁道总公司 编

科技文集

METRO SCIENCE AND TECHNOLOGY
COLLECTED THESES

2011



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

地铁科技文集. 2011/广州市地下铁道总公司编. —广州: 华南理工大学出版社, 2012. 2
ISBN 978-7-5623-3538-2

I. ①地… II. ①广… III. ①地下铁道—铁路工程—文集 IV. ①U231-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 216027 号

总 发 行: 华南理工大学出版社 (广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

营销部电话: 020-87113487 87110964 22236386 87111048 (传真)

E-mail: scutcl3@scut.edu.cn <http://www.scutpress.com.cn>

策划编辑: 何丽云

责任编辑: 朱彩翩

印 刷 者: 广州市穗彩彩印厂

开 本: 889mm × 1194mm 1/16 印张: 13.75 字数: 440 千

版 次: 2012 年 2 月第 1 版 2012 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

版权所有 盗版必究

《地铁科技文集 2011》编委会

名誉主任委员 丁建隆

主任委员 刘光武

副主任委员 吴慕佳 梁巧明 何霖 竺维彬 刘应海

邓承山 陈韶章 徐明杰 莫庭斌 钟学军

委员 (按姓氏笔画为序)

史海欧 刘忠诚 刘靖 余哲夫 张志良 李广元

李少璧 李鸿兴 陆缙华 陈穗九 庞绍煌 林志元

欧阳长城 高俊霞 曾耀昌 蔡昌俊 鞠世健

主 编 刘光武

副 主 编 袁敏正 邓先平 李文球

参 编 秦汝君 张继冰 雷明华 万丽君



随着我国城市化进程的加快，资源供需矛盾和环境压力日益突出，有关资料显示，2010年我国全年能源消费总量相当于32.5亿吨标准煤，碳排放量达22亿吨。这组数字表明，发展低碳经济已经成为我国实现经济社会可持续发展和迈向生态文明的必由之路与现实选择，而建设绿色环保、高效节能的城市轨道交通，在减轻城市交通压力、引导城市合理发展的同时，对促进节能减排及发展低碳经济的作用亦愈来愈重要。

近年，国务院颁布实施的《珠江三角洲地区改革发展规划纲要》（2008—2020年）明确了广州作为国家中心城市的定位，广州按照建设国家中心城市和城市总体发展战略的功能要求，系统规划并大力推进轨道交通建设，取得了可喜成绩。目前，广州市轨道交通已开通8条线路、148座车站，运营里程236公里，排列世界前十。据2010年统计，工作日日均客运量达400万人次，占公交出行总量的31%左右。轨道交通，逐渐成为广州市民出行的首选，不但为2010年召开的“亚运”增光，更为广州的发展提速。

“科学技术是第一生产力”，科学的本质在于探索未知，为人类造福。广州地铁的广大科技工作者扎根于美丽的羊城，历经十八载风雨征程，以科学发展观为指导方针，在“科学发展地铁、和谐建设地铁”的过程中不断深入实践，不断创新学习，积累和总结形成了大量丰硕的科研成果，现经编辑人员的努力，《地铁科技文集2011》终于和广大读者见面了，这是继2007年广州地铁连续出版发行的第五部科技论文集。这本文集共收录46篇科技论文，内容主要涉及土建与施工、探讨与研究、设备与国产化、运营与管理、新技术应用等5部分，涵盖轨道交通技术与设计、设备检修与维护、客运服务与运营指挥、安全风险控制等多个专业技术。这本文集从一个侧面反映了广州地铁科技工作者始终坚持理论联系实际，努力从实践中提炼问题并加以研究，敢于理性质疑，勇于提出新观点、探究新方法，构建新理论的治学态度。这些论文针对广州地铁发展中的一些深层次理论和科学技术问题，提出了许多有事实、有观点、可实用、可操作的思路 and 对策。其中，一些论文已经在国内刊物上发表，得到了专家学者的认可，具有较强的现实指导意义和学术参考价值。这本文集的出版，既为从事轨道交通规划、设计、建设、运营和管理的同仁和科技工作者提供了一本相互学习、借鉴交流和取经送宝的好教材，也必将为打造百年广州地铁起到积极的促进作用。

文集出版之际，谨对华南理工大学出版社付出的辛勤劳动致以衷心的感谢。同时，恳请国内外轨道交通行业专家、学者和广大读者提出宝贵意见，共同为提高城市轨道交通科技创新水平作出贡献。

刘光武

广州市地下铁道总公司副总经理

2011年12月于广州

目录

■第1编 土建与施工

广州地铁工程范围岩土层物理力学参数区划/蒲勇 刘成军 程东海 姚江	(3)
二重管无收缩双液注浆在浅埋暗挖隧道中的应用/任伟新	(8)
广州市轨道交通三号线盾构施工技术回顾/王文锋 朱六兵	(14)
盾构施工有害气体“不明”来源的探究/竺维彬 鞠世健 罗淑仪	(19)
广州地铁工程范围岩土层变形模量、地基系数研究/程东海 王典 蒲勇	(26)
盾构法土体及地连墙体系工法在盾构始发施工中的应用/陈令强 赖伟文 王家星 李江	(33)
施工高处坠落事故原因分析/林锐深	(38)
广州地铁施工管理系统安全检测的设计与应用/罗伟庭 唐元兵 陈建忠	(42)
动态饱和含水砂层中旋喷工艺加固方案选取研究/李赞 任伟新	(46)
大坡度小半径重叠盾构隧道修建技术的应用/赵书银 王志才 陈和	(51)
SEW 工法应用中的难点及应对措施/赖伟文 王家星 李江 陈令强	(55)
土压平衡盾构施工污水净化处理技术应用研究/陈乔松 朱六兵	(58)
地铁盾构隧道施工管片漂移控制技术的研究/王志才 赵玉成 陈昊	(62)

■第2编 探讨与研究

轨道交通自动售检票系统抽样检测研究/陈静莎	(67)
自动售检票系统设备性能检测方法探讨/黄旭宁 吴文华 陈静莎	(74)
阿尔卡特 S40 信号系统定位方式的探讨/何平 彭慧 刘婧婧	(78)
降低车辆维修成本的研究与探讨/赵彦峰 陈通武	(83)
广州地铁二号线站台加装间隙踏板对车辆运行影响分析/左亮 吕劲松 巫红波	(88)
基于 EADS TETRA 系统的小区重选优化探讨/关国俊	(92)
广州市轨道交通无线调度系统设计探讨/黄格宁	(95)
地铁隧道区间应急救援条件探讨/李海 陈龙 袁育军	(99)

■第3编 设备与国产化

广州地铁断面客流分析算法及应用/陈权 吕利民	(105)
广州地铁一号线车辆牵引控制单元 A328 板的改进/李晓威	(112)
自动售检票系统检测工具的应用/陈静莎	(115)



目录

地铁车辆轴箱轴承的选配与分析/员 华	(121)
地铁车辆牵引控制器测试装置的研制/李晓威 吴德义	(125)
广州地铁三号线车辆接地故障的分析/陈 斯	(129)
广州地铁自动检票机扇门结构分析与改造/何健标	(132)
地铁专用无线网络覆盖方案与应用探讨/彭 慧	(135)
广州地铁三号线车辆联挂故障分析/杨 光	(138)
广州地铁三号线列车齿形联轴节调整分析/李杭健	(143)
浅谈地铁车辆电器综合试验台的浪涌保护器改造/陈 翔 张伟明	(147)
城市轨道交通系统车辆脱轨事故起复救援方法分析/赵春明	(151)
地铁专用无线通信系统在运营管理中的应用/关国俊	(154)
地铁车务清分系统 IC 卡发行子系统的设计与实施/陈 权	(157)
城市轨道交通信号 ATS 系统与主控系统接口的列车到站功能分析/陈 微 辛 骥 王旭辉	(162)

■第4编 运营与管理

广州地铁三号线车辆环线故障情况下的行车组织方案/陈 微 辛 骥	(169)
广州地铁三号线列车空气干燥器漏气原因分析及运营对策/侯品杨	(173)
广州地铁线网首末班车衔接及换乘节点协调方案研究/梁强升 徐瑞华 卢锦生	(176)
浅谈城市轨道交通大客流的安全风险控制/钟颜开	(181)
提升调度应急处理技能,确保亚运地铁运营安全/宋利明 万宇辉 龙 波 史丰收	(185)
浅谈城际轨道交通规划报建工作管理/吴位坤 钟晓鹰 陈振强	(190)
广州地铁地面风亭现状的分析/陈丽华 曾 瑜 伍家柱 彭昭蔚	(193)

■第5编 新技术应用

票务管理系统在广州地铁中的应用/王镇彬	(199)
车轴滚压强化工艺在地铁车辆轮对加工中的应用/黄海东 梁仲文 罗曦春	(204)
电刷镀技术在地铁车辆维修中的应用/冯鹤腾	(208)



地铁 科技文集

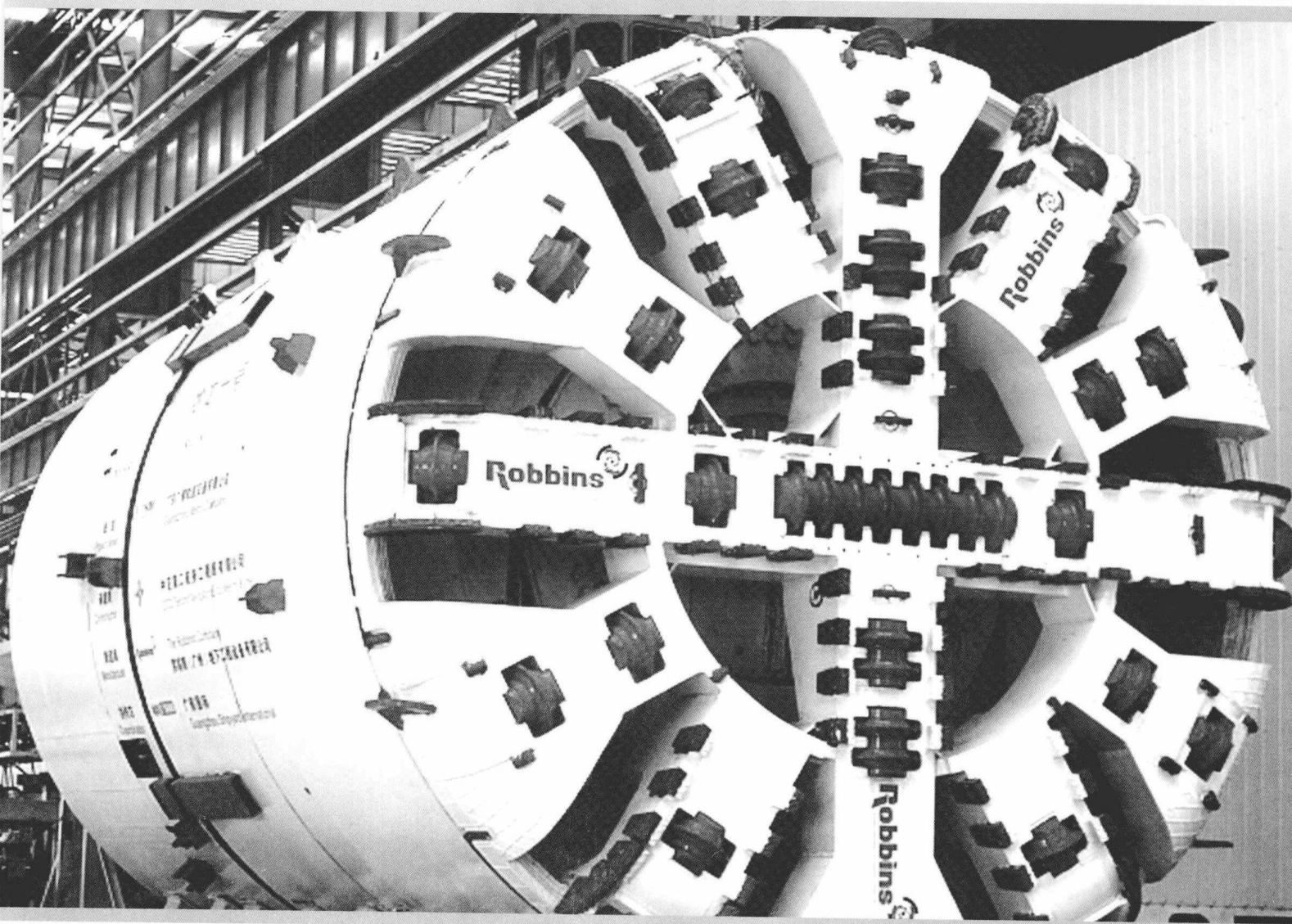
METRO SCIENCE AND TECHNOLOGY
COLLECTED THESES

2011

第1编

土建与施工





广州地铁工程范围岩土层物理力学参数区划*

蒲 勇^① 刘成军^① 程东海^② 姚 江^②

摘 要 通过对广州地区地形地貌、基岩地质、第四系形成年代、构造地质等的研究,以岩土层物理力学参数均一性较好为原则,对广州地区进行岩土层物理力学参数区划,并结合广州地铁工程勘察成果对各分区岩土层物理力学参数进行了分层统计,取得了较好的成果。

关键词 广州地铁 工程范围 岩土层 物理力学 参数 区划

1 前言

岩土参数的选取,对建筑工程的建设、安全和造价影响至关重要。影响岩土工程参数选取的因素很多,有岩土层的类别、成因、特征,工程特点以及地区经验、勘察者水平等。

广州地区地质条件复杂,成因类型和岩土种类众多且变化较大,岩土结构复杂,土质不均匀,岩土层工程特性差异较大,使得勘察中对岩土参数的取值难以把握,取值时往往会出现误差和矛盾。本文在结合现有的地形、地质、前人研究成果等已有资料的基础上,对广州市轨道交通多条线路勘察所积累的大量岩土数据进行了综合分析,尝试通过对广州地区地铁经过区域进行工程地质分区,并对岩土参数进行了分区统计、归纳和研究,以期总结出较为可靠的岩土参数区划,为工程建设中各类岩土参数的选取提供参考,并为广州市轨道交通建设及其他建筑、市政项目的规划选址、工程勘察和设计提供地区经验。

2 岩土层物理力学参数分区

2.1 广州地层

组成广州地区基底地层有元古界、古生界、中生界的地层,其中震旦系、石炭系、白垩系、下第三系分布面积较大,泥盆系、二叠系、三叠系、侏罗系分布面积较少。

据文献介绍,广佛地区地形地貌复杂多变,河网密布,且在中更新世以来经历了6次海进及其间的海退,沉积类型与沉积相十分丰富,要具体划分第四系地层的准确年代非常困难,尤其是更新世与全新世之间的区分。总体上讲广佛地区的第四系盖层除缺少早期上新世(Q_1)的沉积外,更新世(Q_{2-3})与全新世(Q_4)地层分布广泛。

2.2 岩土层物理力学参数区划

利用1:10 000广州市区地形图、1:50 000广州市基岩地质图等结合相关的研究成果和广州市轨道交通各条线勘察成果,对广州地铁工程范围进行地质单元划分(划分依据:地貌、地层与岩性、地质构造、水文地质条件等),编绘了广州地铁工程范围地貌分区图、基岩地质图、构造纲

* 广州市地下铁道总公司科研经费资助项目。

① 广州地铁设计研究院有限公司。

② 广州市地下铁道总公司建设总部。

要图,进而绘制广州地铁工程范围岩土参数区划图。

通过以上分析,将广州地区划分为五个大区,即花岗岩、混合岩丘陵区,石灰岩低丘、残丘区,碎屑岩低丘台地区,丘前、丘间谷地冲洪积、冲积平原区,以及冲积、海积平原区,再进一步结合工程地质条件分成不同的亚区。岩土层参数区划结果见表1,根据表中数据绘制了岩土参数区划图(见图1)。

3 岩土层物理力学参数统计

3.1 岩土参数的统计方法

岩土参数的统计按照先分区再统计的原则进行。

3.1.1 岩土参数的汇总

参数汇总时按层号、岩土类别和状态分别进行汇总,如冲洪积土层〈4-1〉层,分为粘土、粉质粘土、粉土,再按状态细分为硬塑、可塑、

软塑、中密、稍密等分别汇总,岩石则按种类分别汇总,如碎屑岩分别按粗砂岩、中砂岩、细砂岩、泥质粉砂岩、泥岩等分别汇总。

3.1.2 统计指标

如参与统计的样本数不足6个时仅统计样本数、最大值、最小值、平均值 f_m ,如样本数超过6个时还需进一步统计标准差 σ 、变异系数 δ 、标准值(仅对强度指标统计标准值)。

3.1.3 异常值的剔除

样本的筛选,对关键参数进行检查,对每层土的液性指数、含水率、孔隙比等确定土的种类和状态的参数进行检查,如该参数与本层土的定名不一致时,则将这组样的所有参数均按异常值进行剔除。

三倍标准差剔除,对经样品筛选后的数据进行统计后,再按三倍标准差法剔除离散性大的参数。

在进行岩土参数汇总和统计的同时根据岩土层的特征和分布范围修正工程地质分区界线。

表1 岩土层参数区划表

分区编号	地貌	岩土层特征					
		覆盖层			基岩		
		标志性土层	成因	特征	岩性	类别	特征
1	丘陵	砂、砾质粘性土	残、坡积	粗粒土含量高,易崩解	花岗岩、混合岩	侵入岩变质岩	硬质岩、强度高
2	低丘、残丘	红粘土	残、坡积	具膨胀性	灰岩	沉积岩	较硬岩、易溶蚀
3	台地	粉质粘土、粉土	残、坡积		碎屑岩	沉积岩	软岩或极软岩,易软化
4-1-1 4-1-2 4-1-3	冲洪积平原	花斑状粘性土、砂层	陆相冲洪积	Q ₃ 及以前形成,砂层多呈中密-密实状,不液化	花岗岩、混合岩 灰岩 碎屑岩	侵入岩变质岩 沉积岩 沉积岩	硬质岩、强度高 较硬岩、易溶蚀 软岩或极软岩,易软化
4-2-1 4-2-2 4-2-3	冲洪积平原	花斑状粘性土、砂层	陆相冲洪积	Q ₄ 及以前形成,砂层多呈稍密-中密实,不液化-中等液化	花岗岩、混合岩 灰岩 碎屑岩	侵入岩变质岩 沉积岩 沉积岩	硬质岩、强度高 较硬岩、易溶蚀 软岩或极软岩,易软化
5-1 5-2 5-3	海冲积平原	淤泥、淤泥质砂、含蚝壳片砂	海相、海陆交互相沉积	淤泥含水量大,砂层松散,中等-强液化	花岗岩、混合岩 灰岩 碎屑岩	侵入岩变质岩 沉积岩 沉积岩	硬质岩、强度高 较硬岩、易溶蚀 软岩或极软岩,易软化

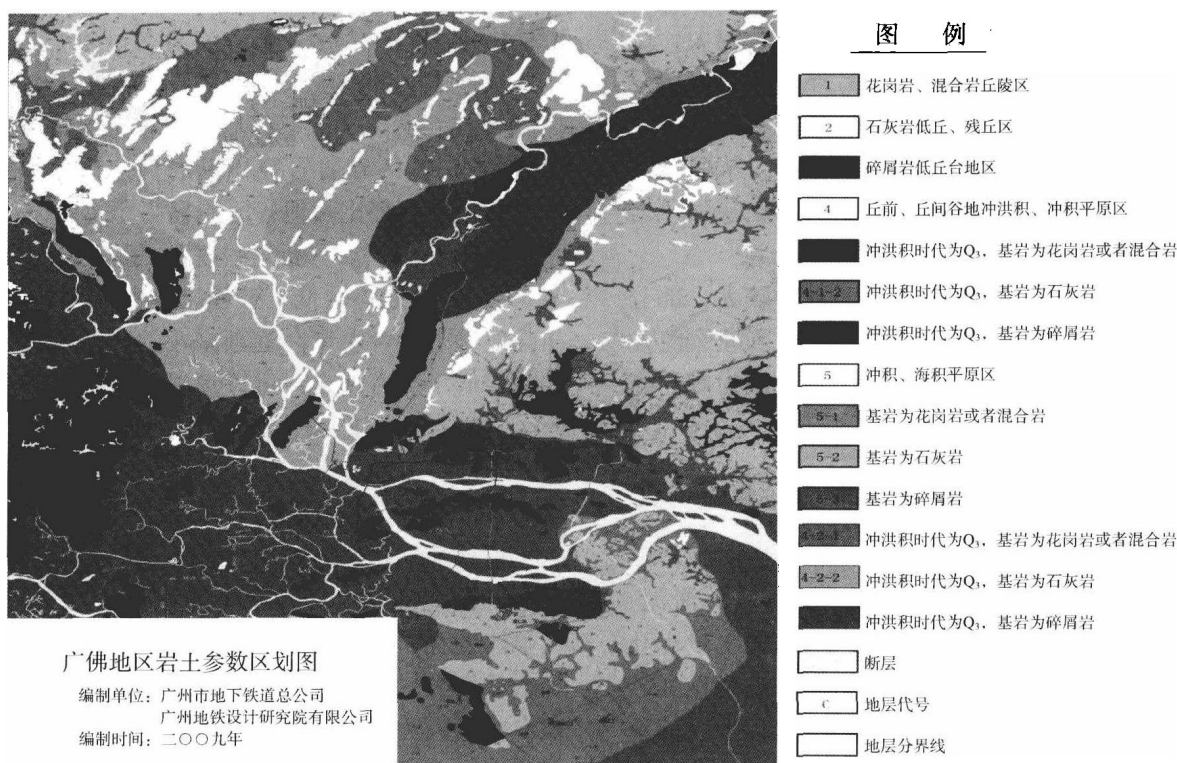


图1 广佛地区岩土参数区划图

3.2 岩土参数统计结果的可靠性

3.2.1 岩土参数的来源

本文中的岩土参数主要来自广州地铁各线、各阶段的岩土工程勘察报告。勘察报告由具备资质的勘察单位完成，试验数据均出自具备资质的土工试验室，保证了岩土参数来源的可靠性和可追溯性。勘察成果包括试验数据经受了实践的检验。

3.2.2 岩土参数的样本数

本项目收集整理的岩土参数样本多达数万个，一般岩土层的试验参数均有几十个、几百个甚至上千个样本，大部分的工程地质分区内，有多条线路穿过，保证了试验数据的代表性和充足性。

部分工程地质区段，土层发育较少，相应试验数据也较少。如花岗岩、混合岩丘陵区（1区），发育的砂层较少，相应样本数也少，冲洪积层粉细砂层〈3-1〉、冲洪积层中粗砂层〈3-2〉的样本数均在10个以内。同样，碎屑岩低丘台地区（3区）的砂层样本数量较少。

部分工程地质区段，分布范围窄，经过的线路少，相应的室内试验的数据也偏少。如石灰岩

低丘、残丘区（2区），仅六号线浔峰岗至横沙、三号线北延段永泰站两段穿过，除微风化灰岩〈9C-2〉的试验样本较多外，其余岩土层的样本数均较少。

3.2.3 岩土层物理指标统计结果的离散性分析

由于样本数量大，并在统计前对样本进行筛选和异常值剔除等工作，从统计结果来看各岩土层的参数的离散性均较小，变异系数一般在0.3以内。具体如下：

（1）土层的稠度指标。土层的稠度指标中，大多数岩土层的变异系数在0.2~0.4，仅花岗岩风化层及残积层的液性指数的离散性较大，变异系数有的甚至超过1.0。原因主要是：风化岩往往呈半岩半土状，I级土样的采取困难，样品的扰动大，使其液性指数变化大；花岗岩风化残积土、风化岩中含有大量石英颗粒，室内稠度试验较困难，导致液性指数试验结果变化大。

（2）土的变形指标。土的变形指标压缩系数、压缩模量的统计变异系数在0.2~0.4内，离散性较小。

（3）力学性质指标。土层的力学性质指标包括粘聚力、内摩擦角（直接快剪、固结快剪、三轴），大部分土层的离散性较小，变异系数一般

小于0.3。但风化岩及花岗岩残积土的离散性较大,主要是因为样品中粗颗粒成分含量较大,试验时易卡住环刀,出现异常。另外强风化岩包含的岩石状态较多,有土状、半岩半土状、碎块状等,能进行试验的仅为土状强风化岩,从而导致了强风化岩层的强度偏低,不能实际反映强风岩的力学性质。

岩石抗压强度指标的变异系数均较大,部分岩性超过0.3,反映了岩层的岩性、节理裂隙发育程度和岩石种类的变化较大,对岩层强度的影响也较大。

3.3 岩土参数分区统计结果的分析与对比

3.3.1 软土

通过对分布广泛的5区的三个亚区的淤泥、淤泥质土进行对比,发现不同区域的含水量和孔隙比有差别,一般在受潮汐影响的河流附近和砂层发育地段的淤泥的含水量和孔隙比较大,其他物理及力学指标相差不大,剪切强度指标(直剪、快剪)相差不大。

3.3.2 冲洪积土层

广州地铁分层系统中〈4-1〉层土的类别、性质、稠度状态复杂,本项目对该层土的土工试验参数进行统计分析时,按照粘土、粉质粘土和粉土三大类并按照稠度状态进行分层统计。通过对比可发现,对于坚硬至硬塑状态的冲洪积土,各区之间土的物理力学性质差别很大,从总体上看,基岩为石灰岩和碎屑岩区(如4-2-2区、4-2-3区、3区等)的坚硬至硬塑状冲洪积土强度最高,基岩为花岗岩和变质岩(如1区、4-2-1区)的坚硬至硬塑状冲洪积土强度最低。对于可塑至软塑状的冲洪积土,各区之间土的强度差异不明显。由此可见,从整体上看,广州地区冲洪积土层〈4-1〉很不均匀,坚硬至硬塑状土层强度差异明显,但可塑至软塑状土层强度差异不明显。

3.3.3 坡积土

对比1区、3区、4-2-2区、5-2区〈4-3〉层残积土试验统计成果,可发现花岗岩、变质岩、石灰岩、碎屑岩坡积土剪切试验的内摩擦角很接近,其中直接快剪内摩擦角均在 19° 左右,固结快剪内摩擦角为 $21.2^{\circ}\sim 24.5^{\circ}$ 。从整体上看,灰岩坡积土粘聚力最大,花岗岩和变质岩坡积土次之,碎屑岩最低,且冲积、海积平原区灰

岩坡积土的粘聚力较冲洪积平原区要高约9kPa。

3.3.4 残积土

从整体上看,从3区到4-1-3区、4-2-3区,最后到5-3区,碎屑岩残积土的抗剪强度逐渐降低。5区碎屑岩残积土的直接快剪和固结快剪的粘聚力都比其他各区明显高5~7kPa,内摩擦角偏高约 2° 。分析这一现象的原因,由3区至5-3区,地势渐低,残积土埋藏深度在降低,相应地,土的含水量会逐渐减小,导致土的力学性质降低。这一观点,可以通过比较各工程地质分区〈5-1〉、〈5-2〉的含水量及剪切试验指标加以印证。由此可见,碎屑岩残积土的抗剪强度与其含水量有直接关系。

根据基岩岩性对各区残积土进行对比,可以发现,无论是可塑状残积土还是硬塑状残积土,从整体上看,灰岩残积土的粘聚力>碎屑岩残积土的粘聚力>变质岩残积土的粘聚力>花岗岩残积土的粘聚力,而内摩擦角的关系则刚好相反,即花岗岩残积土内摩擦角>变质岩残积土内摩擦角>碎屑岩残积土内摩擦角>灰岩残积土内摩擦角,这与土层中粗颗粒含量有关。

4 结语

(1) 本文从地质参数区划的概念出发,统计了各地质分区的岩土参数,包括物理指标、变形指标的平均值、最大值、最小值及变异系数等,力学指标的平均值、标准值、最大值、最小值及变异系数等,其统计样本是充足的,统计过程是规范的,统计结果是真实的。

(2) 通过与有关规范、手册中提供的经验值比较,统计结果平均值、标准值在经验值范围之内,本研究成果可为后续的岩土勘察设计提供参考依据。但广州地区地形、地貌变化大,构造复杂,岩土种类众多,本研究项目不可能囊括所有岩土类别和成因类别的岩土类型,使用时应具体情况具体分析,结合室内试验、原位测试及地区经验对参数的合理性进行综合判断,提供更准确的岩土参数建议值。

(3) 对于砂层,由于较难采到原状土样,所以测试出来的天然含水量、强度指标等均不可靠,测试结果仅供参考,且砂土的颗分试验,由水上、水下坡角系扰动土工试验得出,但砂层的成因类别复杂,受颗粒大小、级配等影响较大,

因此砂层的参数仅作为参考，使用时需谨慎。

(4) 本研究成果主要据广州地铁岩土工程勘察成果统计、分析、归纳得出，对地铁工程沿线可能较准确，与本文题目相对应，其他地区仅供参考。

参考文献

- [1] 广东省地质调查院. 广州市城市地质调查可行性研究报告 [R]. 广州: 广东省地质调查院, 2005.
- [2] 曾耀昌. 广州地区工程地质特征综述 [R]. 广州: 广东省岩土力学与工程学会, 2006.
- [3] 曾耀昌. 广佛地区工程地质区划图 [R]. 广州: 广州市地下铁道总公司, 2006.
- [4] 程东海, 蒋军军. 广州轨道交通工程岩土工程勘察的岩土参数取值方法 [J]. 广州建筑, 2006 (5): 1-5.
- [5] 程东海, 蒲勇. 广州地铁工程范围岩土层物理力学参数区划及岩土地基系数研究报告 [R]. 广州: 广州市地下铁道设计研究院, 2009.

二重管无收缩双液注浆在浅埋暗挖隧道中的应用*

任伟新^①

摘 要 阐述二重管无收缩双液注浆加固饱和动态含水砂层的加固机理,通过广州地铁五号线珠江新城站-猎德站浅埋暗挖区间隧道饱和动态含水砂层段砂层加固止水工程实例,对注浆设计、注浆施工质量控制、注浆后开挖支护及注浆施工过程中常出现的问题进行研究,并提出解决措施。

关键词 二重管 无收缩 双液注浆 浅埋暗挖隧道 加固 止水

随着社会经济的发展,越来越多的城市为缓解地面交通压力而修建地铁,并将其列为提升城市功能、解决城市交通问题的首选。然而,在广州、深圳等沿海城市修建地铁浅埋暗挖隧道时,经常会遇到第四纪饱和动态含水砂层等不良地层。由于该类地层自稳能力差且易发生围岩大变形,施工时又极易发生涌水、涌砂等灾害,因此,该类地层工程施工难度很大。

目前,对该类地层进行加固、止水的方法较多,但均存在一定的局限性:如高压旋喷注浆法,受地下动水的作用,在中粗砂、砾砂层中高压旋喷固结体难以成型;深层搅拌桩在标贯值较高地层中难以搅动,同时还受场地、地下障碍物等因素的影响;普通静压注浆在密实砂层中可灌性较差,注浆范围不易控制,且在饱和动水条件下,甚至无法形成注浆固结体。因此找到一种既不受场地、障碍物、地层及加固深度的限制,又适用于饱和动态含水砂层注浆加固止水的工法,意义重大。

1 二重管无收缩双液注浆概述

1.1 二重管无收缩双液注浆工法

二重管无收缩双液注浆是采用二重管钻机将AB(C)无收缩双液浆材在机械压力的作用下,

通过二重管在端头混合后经滤网从水平方向注入预定地层中,浆液以充填、渗透、扩散、劈裂、挤压等方式将砂土层颗粒间存在的水挤出,使砂土团之间的孔隙、裂隙都充满浆液并使其固结,从而使原来松散、软弱、流动的砂土体形成一种结构紧密、强度较高、抗潜蚀能力较强的浆液凝固体与砂土体两相体,最终改良砂土性状的目的。

1.2 二重管无收缩双液注浆材料

二重管无收缩双液注浆浆材有溶液型浆液(A液、B液组成,简称AB液)和悬浊型浆液(A液、C液组成,简称AC液)。A液为水玻璃;B液为凝胶剂及外加剂;C液为水泥浆,并掺入一定量的外加剂。浆液中的外加剂一方面改良浆液,增强浆液的可注入性,另一方面降低浆液凝固后的收缩性,确保注浆和止水效果。其中,AB液的强度较低,但止(驱)水效果好;AC液的强度较高,起加固作用。

1.3 二重管无收缩双液注浆加固饱和动态含水砂层机理

1.3.1 水泥-水玻璃双液浆的凝胶硬化机理

水泥-水玻璃浆液的化学反应机理:水泥中的硅酸三钙水解,产生氢氧化钙,氢氧化钙与水玻璃发生反应,生成具有一定强度的凝结胶体——水化硅酸钙。

* 广州市地下铁道总公司科研经费资助项目。

① 广州市地下铁道总公司建设总部。

物理作用机理：在砂土体中灌入大量无收缩浆液后，软弱、流动的砂土体遭受挤压，体积缩小，密度增加，自身强度得到提高，从而达到加固的目的。在 AC 浆液凝胶硬化过程中，这两种机理同时存在。

1.3.2 水玻璃化学浆液凝胶机理

水玻璃类浆液由水玻璃和相应的胶凝剂组成。常用的无机胶凝剂有氯化钙、铝酸钠、磷酸，有机胶凝剂有醋酸、醛类（乙二醛）等。

该种浆液的优点是胶凝时间容易调节，粘度低，扩散性能好，止水充填效果好。

1.3.3 复合注浆

在饱和动态含水砂层（尤其是中粗砂、砾砂层）中，受地下水、施工用水及周围环境的影响，水泥-水玻璃浆液中的一部分浆液被稀释，其凝胶时间延长，甚至不凝胶。因此，对饱和动态含水砂层宜采取复合注浆法进行加固，即首先进行限制性注浆（AB 液）驱水，以降低地下水的渗透性，减少地下水对 AC 浆液的稀释作用；其次进行渗透性注浆（AC 液），对地层进行固结。实践证明，将 AB（C）液两种不同注浆机理的浆材在时序上交替使用，可充分发挥各自的优点，并有效克服各自的缺陷，互相弥补，从而在加固饱和动态含水砂层中达到最佳效果。

1.3.4 浆液在砂层中的渗透、劈裂过程

二重管双液注浆在砂层中的注浆过程分为五个阶段：

（1）充填渗透阶段（注 AB 液）。浆液进入渗水通道后驱水胶凝，堵塞渗流通道，并填充砂土体中的空隙。

（2）挤密阶段（注 AC 液）。由于浆液（AC 液）粘性的作用，且初始注浆压力较小，因而浆液还不能劈裂地层，并聚集在注浆管孔附近，从而形成椭圆形泡体挤压土体，减小砂层孔隙比。

（3）劈裂流动阶段（注入 AB、AC 液）。当浆液压力达到一定程度时（启裂压力），浆液在砂层中产生劈裂流动。此阶段主要是加固阶段，主要注 AC 液。

（4）被动土压力阶段（注入 AB、AC 液）。在此阶段，地层中的水平向主应力转化为被动土压力状态，在更大注浆压力（注浆峰值）作用下，地层中的水平向应力大于垂直向应力，致使地层中出现水平向裂缝（即二次劈裂）。被动土压力阶段是劈裂注浆加固砂层的关键阶段，浆液

在砂土体中形成主浆脉，即产生劈裂而形成浆液向外扩展的渗流通道。

（5）再渗透阶段（注入 AB、AC 液）。砂层在经过劈裂注浆后，浆液会沿着主浆脉和裂缝向四周渗透扩散，并大量吸浆，使得浆脉四周的砂土体不断得到加固，这是浆液对砂层的劈裂再渗透过程。

2 二重管无收缩双液注浆应用工程实例

2.1 工程概况及地质条件

2.1.1 设计概况

广州地铁 5 号线某区间暗挖隧道位于广州市某主干道下方，途经花城大道过街人行通道、下沉式广场、电力隧道等地下建（构）筑物，隧道单线长 1468.47 m，采用矿山法进行施工。在隧道左线和右线某段穿越饱和动态含水砂层，该砂层段隧道埋深 8.5 ~ 11.7 m，隧道拱部基本位于饱和动态含水砂层中。原设计对该区间饱和动态含水砂层段砂层采取的加固方法为距桩中心 800 m 相切的地面旋喷桩加固方法。

2.1.2 工程地质及水文地质条件

该区间饱和动态含水砂层段隧道范围内地层剖面为：上覆主要由人工填土层（Q）〈1〉淤泥、淤泥质土层（Q₄）〈2-1B〉、淤泥质砂层（Q₄）〈2-2〉及砂层（Q₄₊₃）〈3-1〉和〈3-2〉组成；下覆为白垩系强风化及微风化泥质粉砂岩。根据隧道与砂层的位置关系可知，对区间隧道施工安全影响较大的不良地层主要为冲积-洪积中粗砂、砾砂层〈3-2〉。该砂层呈灰白、灰黄色，以松散-稍密状为主，夹大量沙砾，含少量粘粒，局部夹粉细砂。根据土样室内试验报告及详勘报告，该砂层的孔隙比 0.55，压缩系数 $\alpha_{1-2} = 0.23 \text{ MPa}^{-1}$ ，渗透系数 $19.87 \sim 41.42 \text{ m/d}$ ，砾（ $\geq 2 \text{ mm}$ ）的含量 21% ~ 40.4%。该砂层段砂层层厚 1.5 ~ 3.5 m 不等，其中〈3-2〉砂层层厚 0.5 ~ 2.6 m。根据隧道实际开挖揭露的地层判定，该砂层段砂层大部分侵入隧道开挖断面内，最大侵入量 1.8 m。

本区间砂层段范围内的地下水主要为孔隙水和基岩裂隙水，透水性较强，且为动水，径流方向由北向南，主要补给来源为大气降水。同时，本区间地下水与隧道南侧的珠江水存在水力联系，且具有动压。

表 1 注浆材料表及配比

浆液种类	水泥品号	水灰比 (W:C)	体积比 (C:S)	注浆用水玻璃浓度
水泥-水玻璃双液浆	P. O 42.5	1.5:1 ~ 2.0:1	1:1	30 ~ 35Be'

表 2 注浆材料表

A 液	B 液	C 液	浆液	凝结时间
水玻璃 浓度 30 ~ 35Be'	冰醋酸 20 kg 外加剂 7 kg	P. O 42.5 水泥 250 kg 外加剂 6.9 kg	AB 液 1000 L AC 液 1000 L	30 s (无注浆压力的情况下) 50 s

2.2 饱和动水砂层加固工法的选择

由于在饱和动水条件下,原设计高压旋喷桩在中粗砂、砾砂层等粗颗粒地层中成桩质量存在较大缺陷,无法达到固结砂层并支撑上部土体的目的,并给工程施工带来较大安全隐患。因此,经专家多次对砂层加固方案的审查,并与其他砂层加固工法对比分析,最终选择采用二重管无收缩双液注浆对该区间饱和动态含水砂层进行注浆加固。

2.3 二重管无收缩双液注浆方案及其效果分析

2.3.1 注浆材料选择

本区间二重管无收缩双液注浆采用的注浆材料为 AB 液、AC 液双液浆。A 液为稀释后的水玻璃;B 液主剂为醋酸,加入一定量的外加剂;C 液为水泥浆,也加入一定量的外加剂。注浆材料及配比见表 1、表 2。

2.3.2 注浆施工设备及注浆参数

① 注浆施工设备。TXU-75A 型二重管钻机可以进行垂直孔、斜孔及水平孔的钻孔及压浆施工;SYB-60/160 型注浆泵;注浆液混合器及测定器;SJY-双层立体式搅拌机。

② 主要注浆参数。注浆压力,0.5 ~ 2.0 MPa,终压 2.0 MPa;浆液初凝时间 (AB 液及 AC 液),10 s ~ 1 min;注入率,40% 左右;注浆管孔径,φ42 mm;注浆量,依据注浆压力或溢浆情况进行控制。

2.3.3 注浆设计

根据该区间饱和动态含水砂层段隧道与砂层的位置关系,为确保隧道开挖安全,需将饱和动

态含水砂层全部予以固结。对此,二重管无收缩双液注浆加固饱和动态含水砂层的设计范围如下所述。

横向加固范围为隧道拱部开挖轮廓线外 3 m,采用 9 排孔进行注浆,相邻孔环向间距 600 mm,其具体位置可根据二重管钻机钻孔过程中出现的涌水涌砂情况及注浆情况进行局部调整。

纵向加固范围为左右线隧道饱和动态含水砂层段。为便于下一段设计与施工时作参考,确定每循环注浆段长度为 10 m,开挖 7 m,留下 3 m 作为下一循环段注浆时的止浆墙。注浆孔位布置及相关参数见图 1、图 2,注浆孔位参考角度见表 3。

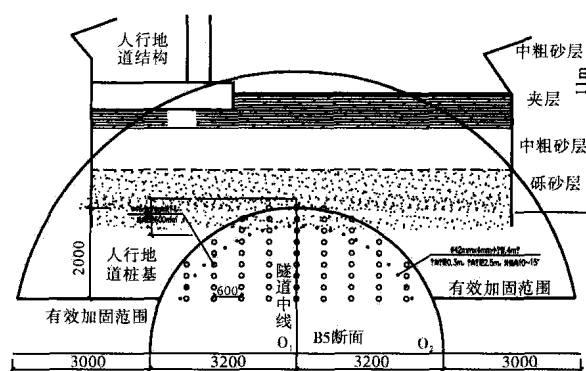


图 1 注浆孔位横剖面布置图

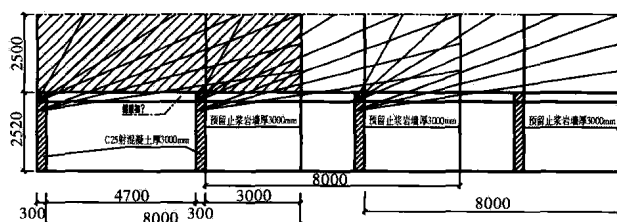


图 2 注浆孔位纵断面布置图