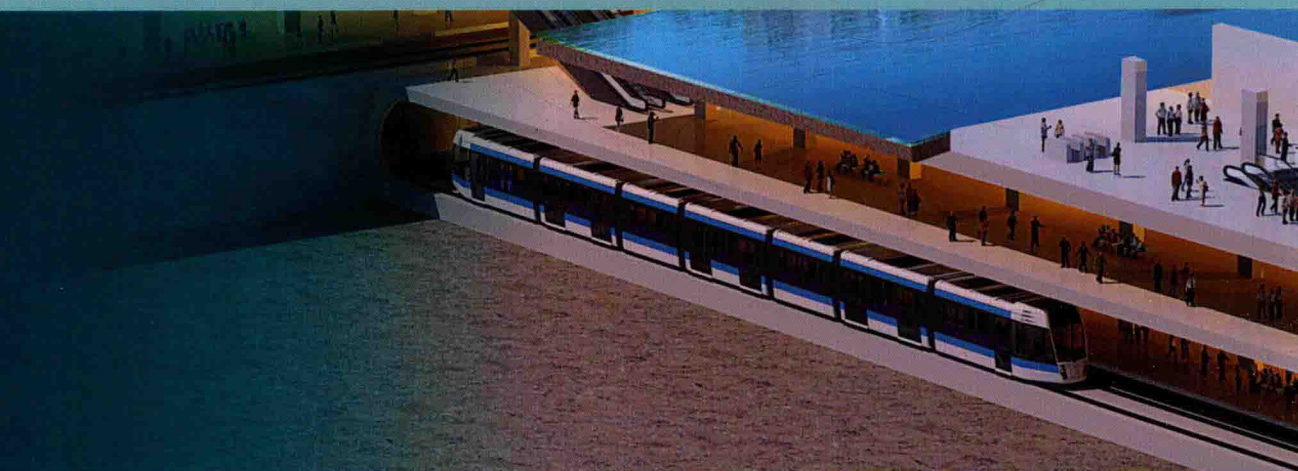


滨海地铁高耐久性地下结构 关键技术研究

刘树亚 蔡跃波 陈湘生 陈迅捷 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

滨海地铁高耐久性地下结构 关键技术研究

刘树亚 蔡跃波 陈湘生 陈迅捷 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书以深圳地铁 11 号线为工程背景,从影响地下结构耐久性因素及国内地铁工程耐久性设计现状着手,对场地环境类别、环境作用等级等进行了详细分析,提出了以耐久性为核心、提高抗裂性、保证工作性的地铁地下现浇钢筋混凝土结构工程混凝土配合比设计理念,研究了混凝土结构内力和腐蚀介质、杂散电流和腐蚀介质共同作用下的结构耐久性规律。

本书可作为地下工程和市政工程相关地下结构耐久性研究、设计、施工、检测技术人员和高校师生参考使用。

图书在版编目 (C I P) 数据

滨海地铁高耐久性地下结构关键技术研究 / 刘树亚等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018.3
ISBN 978-7-5170-6385-8

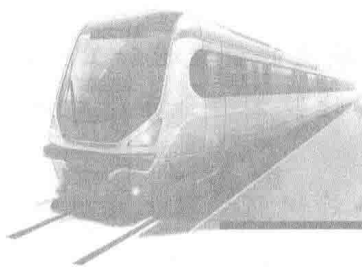
I. ①滨… II. ①刘… III. ①地下铁道—地下工程—耐用性—研究 IV. ①TU92

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第063681号

书 名	滨海地铁高耐久性地下结构关键技术研究 BINHAI DITIE GAO NAIJIUXING DIXIA JIEGOU GUANJIAN JISHU YANJIU
作 者	刘树亚 蔡跃波 陈湘生 陈迅捷 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 14.25 印张 338 千字
版 次	2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷
定 价	58.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



FOREWORD

前言

滨海地铁地下工程多穿越填海区、河流和受工业污染的土壤环境，地下水中存在氯离子、侵蚀性二氧化碳和硫酸根离子等单一腐蚀介质或两种及以上腐蚀介质组合，这些介质可以腐蚀钢筋混凝土地下结构，降低其结构性能，使得地铁结构百年设计使用年限受到挑战。

我国现行《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)规定的保持钢筋混凝土结构耐久性的主要措施是：将环境作用按照对钢筋混凝土结构的腐蚀能力水平分级，按照从低到高的级别采取提高混凝土强度等级、限制最大水胶比和加大混凝土结构保护层厚度等措施。

但采用这些措施也会带来新问题。提高混凝土强度等级、限制最大水胶比都是材料耐久性措施，在满足耐久性材料设计要求的同时，现场施工需要保证混凝土工作性和结构抗裂性。工作性须满足，否则混凝土生产、运输、浇筑振捣整个工艺发生变化；抗裂性不满足要求则会使耐久性设计整体失败，加大混凝土结构保护层厚度也无济于事。

从地铁地下结构耐久性研究角度看，还有需要特别关注的三项问题：一是对两种或两种以上腐蚀介质同时存在的环境作用尚无深入的研究成果和成功的工程经验；二是对钢筋混凝土结构承载和腐蚀介质共同作用下的结构劣化机理研究较少；三是对《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)中“干湿交替环境”和“薄壁混凝土结构”定义尚不明确，影响耐久性分级判断。

为解决上述问题，深圳市地铁集团有限公司以地铁11号线为工程背景，专题立项研究，联合水利部、交通运输部、国家能源局、南京水利科学研究院完成“滨海地铁地下结构高耐久性关键技术研究与应用”专题研究，成果于2016年9月通过中国土木工程学会科技成果鉴定。由缪昌文院士和任辉启院士等7位业内著名学者和专家组成的鉴定委员会认为该成果总体上达到了国际先进水平，其中拉应力与氯盐侵蚀、硫酸盐侵蚀、碳化等共同作用下混凝土腐蚀劣化的破坏形态及规律研究达到国际领先水平。

本书作者提出了以耐久性为核心，提高抗裂性、保障工作性的地铁工程

混凝土配合比设计理念，取得的研究成果主要如下：

(1) 采用先进、合理的综合评定方法，评价了混凝土的抗裂性和工作性，研究了性能优异的高抗裂、高耐久混凝土配合比，为地铁工程地下结构满足百年设计要求提供了技术保障。

(2) 本书揭示了混凝土裂缝宽度和腐蚀环境等级对钢筋混凝土腐蚀破坏的影响机理。在地铁工程渗透压力下，当混凝土贯穿裂缝宽度小于 0.2mm 时，发现低浓度氯盐-硫酸盐腐蚀环境下的高耐久性混凝土裂缝具有自愈合特性；高浓度氯盐-硫酸镁腐蚀环境下和高浓度氯盐-硫酸镁-碳酸腐蚀环境下的混凝土无自愈合特性。

(3) 首次开展拉应力与氯盐和硫酸盐多种腐蚀介质共同作用下构件的腐蚀劣化进程研究，探明了构件在不同极限拉应力状态下腐蚀速率的变化规律；率先开展了拉应力与氯盐侵蚀和碳化腐蚀共同作用下混凝土构件的腐蚀劣化进程研究，构建了碳化、氯离子浓度、拉应力三因素相互影响的关系。

(4) 本书研究发现混凝土内钢筋存在杂散电流时将加剧处于氯盐和硫酸盐腐蚀环境中的混凝土冻融腐蚀破坏。长期杂散电流-氯盐-硫酸盐腐蚀将降低混凝土抗压强度耐蚀系数。

深圳地铁 11 号线结构工程共浇筑混凝土 197.6 万 m^3 ，其中满足各种腐蚀环境等级 100 年的高耐久性混凝土浇筑 55.7 万 m^3 。深圳地铁 11 号线结构工程满足各种腐蚀环境等级 100 年的高耐久性混凝土中采用粉煤灰和矿渣粉部分取代水泥，既确保钢筋混凝土耐久性，又降低混凝土原材料成本，而且循环利用工业废渣资源，降低 CO_2 排放约 10 万 t，社会效益明显；降低原材料成本 2138.7 万元，经济效益显著。

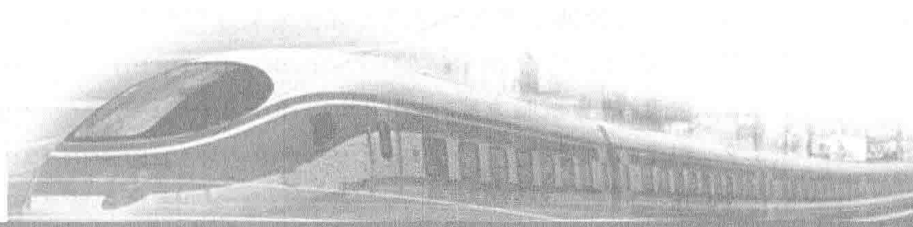
研究团队成员对本书均有贡献。全书 10 章中，钱文勋参与第 1 章研究工作并编写；欧阳幼玲、陈波、欧阳蓉参与第 2 章研究工作并编写；李艳春、何旸参与第 3 章研究工作并编写；钱文勋、李良生参与第 4 章研究工作并编写；韦华参与第 5 章研究工作并编写；欧阳幼玲参与第 6 章研究工作并编写；韦华、周明亮参与第 7 章研究工作并编写；陆俊、游日、张伟参与第 8 章研究工作并编写；张燕迟、白银参与第 9 章研究工作并编写；苟明中、朱斌顺、刘继强参与第 10 章研究工作并编写。

限于著者水平及时间有限，不足之处在所难免，热忱期待读者批评指正。

作者

2017 年 10 月

目录



CONTENTS

前言

第1章 绪论	1
1.1 目的意义	1
1.2 研究方案和技术路线	2
1.3 主要研究内容	3
1.3.1 前期试验结果、施工原材料调研与分析	3
1.3.2 高工作性、抗裂和耐腐蚀混凝土的优化配制	3
1.3.3 钢筋混凝土劣化机理和破坏速率试验分析	3
1.3.4 材料和施工工艺附加措施对钢筋混凝土耐久性的影响	4
1.3.5 混凝土结构施工期温度场和应力场的仿真计算	4
1.3.6 混凝土耐久寿命的综合评估	4
1.3.7 规范性文件的编制	4
1.4 研究成果与创新	4
1.4.1 主要研究成果	4
1.4.2 创新点	8
第2章 高工作性、抗裂和耐腐蚀混凝土的优化配制	9
2.1 原材料及其性能	9
2.1.1 水泥	9
2.1.2 粉煤灰	9
2.1.3 矿渣粉	10
2.1.4 细集料	10
2.1.5 粗集料	11
2.1.6 外加剂	11
2.2 高工作性、抗裂和耐腐蚀混凝土的优化配制试验	13
2.2.1 配合比优化试验	13
2.2.2 混凝土配合比优化性能试验	14

2.2.3	复合侵蚀性碳酸腐蚀环境混凝土耐久性试验研究	38
2.3	混凝土抗裂性综合评价试验	41
2.3.1	温度-应力试验方法	43
2.3.2	温度-应力试验	45
2.3.3	结果分析	52
2.4	不同腐蚀环境作用等级下的不同工段混凝土基本配合比及其性能参数	53
2.4.1	腐蚀环境等级划分和规范允许的最大水胶比	53
2.4.2	氯盐非常严重腐蚀环境下的推荐混凝土参考配合比	54
2.4.3	非常严重氯盐加严重硫酸盐腐蚀环境下推荐混凝土参考配合比	55
2.4.4	中等腐蚀环境下的推荐混凝土参考配合比	57
2.4.5	侵蚀性碳酸腐蚀环境下的推荐混凝土参考配合比	58
2.4.6	C50 结构强度推荐混凝土参考配合比	59
2.4.7	非常严重腐蚀环境下的推荐混凝土原材料成本分析	60
2.4.8	Cl^- 腐蚀 IV-E 级和 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 腐蚀均达到 V-D 级推荐混凝土配合比	61
2.5	小结	61
第 3 章	有压渗透下钢筋混凝土抗腐蚀耐久性	63
3.1	无压毛细渗透作用和有压渗透作用腐蚀试验研究	63
3.1.1	无压毛细渗透作用环境	63
3.1.2	有压渗透作用环境	64
3.2	有压渗透作用下预留裂缝的钢筋混凝土腐蚀劣化机理和破坏速率	66
3.2.1	钢筋阳极电位的检测与锈蚀情况	67
3.2.2	抗渗试件的渗透情况	70
3.3	腐蚀-渗透综合作用下的混凝土结构愈合和破坏机理	71
3.3.1	低浓度氯盐-硫酸盐溶液中	71
3.3.2	高浓度氯盐-硫酸镁溶液中	73
3.3.3	高浓度氯盐-硫酸镁-碳酸溶液中	74
3.4	小结	75
第 4 章	拉应力-氯离子-二氧化碳多重腐蚀环境下钢筋混凝土的劣化规律和机理	76
4.1	试验设计	76
4.1.1	原材料和配合比	76
4.1.2	试验内容和方法	76
4.2	试验结果和分析	78
4.2.1	抗压强度	78
4.2.2	氯离子渗透规律	79
4.2.3	碳化性能	81
4.3	小结	82

第5章 拉应力-氯离子-硫酸镁多重腐蚀环境下钢筋混凝土的劣化规律和机理	84
5.1 试验配合比和试验方法	84
5.2 试验结果与分析	84
5.2.1 干湿循环时间对水溶性氯离子含量影响分析	84
5.2.2 水胶比对水溶性氯离子含量的影响	88
5.2.3 构件承受拉应力条件下水溶性氯离子含量分析	88
5.2.4 加载与非承载条件下水溶性氯离子含量分析	90
5.2.5 氯离子含量分析	91
5.2.6 硫酸根腐蚀分析	92
5.2.7 Mg^{2+} 腐蚀分析	94
5.2.8 抗压强度比试验	95
5.3 小结	97
第6章 杂散电流-氯离子-硫酸镁多重腐蚀环境下钢筋混凝土的劣化规律和机理	98
6.1 试验方案	98
6.2 试验结果与分析	99
6.2.1 掺合料对氯盐环境中混凝土抗杂散电流腐蚀的影响	99
6.2.2 氯盐-硫酸镁-杂散电流多重腐蚀环境作用下钢筋混凝土的性能研究	102
6.2.3 氯盐-硫酸盐-冻融-杂散电流多重因素腐蚀试验研究	110
6.3 耐腐蚀混凝土抗杂散电流侵蚀性能改善机理	112
6.4 小结	113
第7章 混凝土耐久寿命的综合评估	115
7.1 混凝土寿命预测简介	115
7.2 混凝土寿命预测公式	118
7.3 氯盐非常严重环境下推荐配合比寿命预测	119
7.3.1 有效扩散系数 D_e	120
7.3.2 混凝土中的初始氯离子浓度 C_0	120
7.3.3 钢筋混凝土结构使用年限计算 t_e	120
7.4 中等腐蚀环境下推荐配合比寿命预测	121
7.4.1 有效扩散系数 D_e	122
7.4.2 钢筋混凝土结构使用年限 t_e 计算	122
7.5 承受拉力条件下混凝土寿命预测	123
7.5.1 氯盐非常严重条件下 t_e 计算	124
7.5.2 中等腐蚀条件下 t_e 计算	125
7.6 二氧化碳和氯离子复合环境中混凝土寿命预测	125
7.7 杂散电流条件下混凝土锈蚀起始年限预测	127

7.7.1	P38 混凝土锈蚀起始年限预测	127
7.7.2	Y38 混凝土锈蚀起始年限预测	128
7.8	小结	128
第 8 章 混凝土结构施工期温度场和应力场的仿真计算		130
8.1	热传导理论	130
8.1.1	导热基本方程	130
8.1.2	温度场的初始条件及边界条件	132
8.2	仿真计算	133
8.2.1	计算参数	134
8.2.2	后海站仿真计算	136
8.2.3	福桥站仿真计算	145
8.2.4	计算结果分析	153
8.3	地铁站衬砌混凝土施工期监测	154
8.3.1	施工期监测原理及方案布置	154
8.3.2	后海站衬砌混凝土施工期监测	159
8.3.3	福桥站衬砌混凝土施工期监测	163
8.4	考虑分层浇筑的底板大体积混凝土施工仿真	167
8.4.1	有限元模型的调整	167
8.4.2	后海站计算结果	167
8.4.3	福桥站计算结果	173
8.5	小结	179
第 9 章 材料和施工工艺附加措施对钢筋混凝土耐久性的影响		180
9.1	钢筋阻锈剂	180
9.1.1	钢筋在砂浆拌和物中的阳极极化试验	180
9.1.2	钢筋锈蚀	180
9.1.3	混凝土抗硫酸盐侵蚀耐蚀系数	181
9.1.4	砂浆膨胀系数	182
9.1.5	砂浆抗折强度抗蚀系数	183
9.1.6	氯离子扩散系数	183
9.1.7	小结	184
9.2	混凝土内养护剂	184
9.2.1	内养护剂产品和混凝土试验配合比	184
9.2.2	内养护剂对混凝土强度的影响	185
9.2.3	内养护剂对混凝土抗裂性的影响	185
9.2.4	内养护剂对混凝土干缩的影响	186
9.2.5	内养护剂对混凝土耐久性的影响	186
9.3	透水模板衬垫	187

9.3.1	对混凝土表层强度和抗裂性的影响	187
9.3.2	对混凝土抗渗性能的影响	188
9.3.3	混凝土抗碳化耐久性	188
9.3.4	混凝土抗氯盐渗透耐久性	189
9.4	水泥基弹性防护砂浆	190
9.4.1	弹性砂浆配合比	190
9.4.2	弹性砂浆物理力学性能	190
9.4.3	弹性砂浆抗渗试验	191
9.4.4	弹性砂浆弯曲韧性	191
9.5	小结	192
第 10 章	工程应用	194
10.1	工程应用概况	194
10.2	现场施工工艺及存在问题、对策	195
10.2.1	耐久性混凝土施工工艺	195
10.2.2	存在问题	195
10.2.3	采取对策	196
附录 1	深圳地铁 11 号线工程现浇高耐久性混凝土施工技术导则	197
附录 2	深圳地铁 11 号线地下结构在使用期间的结构维护和检测措施 规范性文件	204
参考文献	212



第 1 章

绪论

1.1 目的意义

滨海地铁高耐久性地下结构关键技术研究以深圳市地铁 11 号线作为工程背景。

深圳市地铁 11 号线线路起于深南大道北侧福田枢纽，沿深南大道→穿 1 号线竹子林车辆段→白石路→穿欢乐海岸地块→白石四道→穿沙河高尔夫球场、深圳湾海域→海德三道→穿文心公园→桂庙路→经过前海中心片区→海景路→穿海滨广场→创业路→宝源路→深圳机场 T3 新航站区→规划 T4 航站区→宝安大道→穿沙埔围村→朗碧路，终于碧头站。线路起点预留了向东延伸的条件，终点预留了向北延伸至东莞与东莞轨道交通接驳换乘的条件。

线路总长 51.9km，其中地下线长 39.4km，占线路总长的 75.9%；高架线长 11.1km，占线路总长的 21.4%，含两段高架线路，分别位于碧海湾站—机场站之间（宝源路段），长约 4.2km，以及福永站—后亭站之间（宝安大道段），长约 6.9km；过渡段长 1.4km，占线路总长的 2.7%。

全线共设 18 座车站，其中地下站 14 座，高架站 4 座，换乘站 10 座。

深圳地铁 11 号线线路多处穿越填海区、河流、受工业污染的土壤环境；填海区地表海水较发育，与地下水具有较强的水力联系。沿线已有的 33 个工点水质分析报告显示，水中 Cl^- 浓度 5000mg/L 以上的有 17 个工点，水中 SO_4^{2-} 浓度 1000mg/L 以上的有 11 个工点，水中侵蚀性 CO_2 浓度 30mg/L 以上的有 7 个工点，其中有不少于 5 个工点有两种或三种较严重的腐蚀介质同时存在。

工程设计时，《混凝土结构耐久性设计规范》（GB/T 50476—2008）、《铁路混凝土结构耐久性设计规范》（TB 10005—2010）已经颁布实施。两本规范针对耐久性设计的主要措施是提高混凝土强度等级、限制最大水胶比和加大混凝土保护层厚度。环境作用等级决定设计应采用的措施。我国现阶段对两种或两种以上腐蚀介质同时存在的环境作用尚无深入的研究成果和成功的工程经验，两本规范对于多种介质同时存在时的设计规定不够全面，也不够具体。

设计单位在使用两本规范时对“干湿交替环境”和“薄壁混凝土结构”的定义存在较大疑惑。

地铁地下结构的“干湿交替环境”是指地下车站、隧道外表面接触含盐环境水（土）而内表面处于大气干燥多风环境中的薄壁混凝土结构，临空面的混凝土按遭受盐类结晶破坏环境作用考虑。根据规范规定，处于“干湿交替环境”中的“薄壁混凝土结构”环境作

用等级最高,在单一腐蚀介质环境中的最低混凝土强度等级为C50。但规范对“薄壁混凝土结构”中的最小壁厚规范没有明确的规定。

因此,需要通过模拟深圳地铁11号线所处环境进行一系列试验和理论分析,提出满足耐久性要求的最优的混凝土强度等级和耐久性构造设计要求,以及不显著提高混凝土强度等级的高性能混凝土配合比、外加剂,提出施工过程中工艺、质量控制要求和验收标准,提出可靠的设计和施工最优的耐久性综合措施。同时,也需要提出长期运营时的监测、维修养护技术要求。

然而,传统混凝土配合比设计以强度为目标,确定基准配合比后复验混凝土各项性能并予以优化,但这种设计方法难以满足工程设计使用年限对耐久性的要求。

抗氯离子和盐类腐蚀的高性能混凝土除了必要的控制水胶比外,更重要的是从腐蚀机理出发,以抑制离子扩散为目标添加掺和料并设计配合比,而非一味地强调高强度等级。长期暴露试验结果显示和欧洲海洋工程规程表明,大掺量、粒度较粗的掺和料,当混凝土强度仅在C30左右时,即可满足海洋环境下长期耐久性的要求。相反,过高的设计强度和过低的水胶比,将使混凝土的工作性下降,从而导致施工操作性困难,不可避免地带来施工缺陷,造成构件的实际耐久性下降;高流动度是高性能混凝土必备的技术指标。如何实现高耐久性混凝土的设计目标在很大程度上取决于施工质量,强调混凝土的工作性是保障施工质量的关键。

过高的混凝土设计强度势必将增加胶凝材料用量,导致水化热增加,混凝土产生较大的自收缩,增加温控难度,这对混凝土抗裂性非常不利。混凝土结构一旦出现裂缝,期望实现的耐久性化为泡影。因此,保证混凝土优异的抗裂性是保证混凝土耐久性的重中之重。对于深圳地铁11号线工程环境条件来说,混凝土抗裂已经成为耐久性设计的关键问题。

因此,本书提出以耐久性为核心,保障工作性、提高抗裂性的地铁工程混凝土配合比设计研究方法。

在配合比设计阶段,采用混凝土流变仪法考察不同配比混凝土的工作性;温度-应力试验机法考察不同配比混凝土的开裂温度、温升、开裂应力、应力储备、开裂时间等,运用综合抗裂性指标评价混凝土的抗裂性,筛选抗裂性好的配合比。

同时,通过混凝土原材料调研和成分分析,合理选择并优化配制水泥、矿渣微粉和粉煤灰掺量;通过掺加外加剂,调整混凝土胶凝材料水化产物,优化混凝土配合比。

1.2 研究方案和技术路线

综合深圳地铁11号线的环境特点,以工程耐久性为目标,同步开展结构设计和耐久性设计。基于钢筋混凝土在不同工段的腐蚀环境中的腐蚀速率试验结果,确定相应的腐蚀环境类型和腐蚀等级,提出混凝土配合比设计指标。

混凝土耐久性设计从工程运行环境、混凝土耐久性控制要求、原材料品质、混凝土配制和生产、混凝土施工工艺等角度,建立以抗裂性为混凝土耐久性设计核心,结合混凝土氯离子扩散速度、表面浓度和临界浓度等影响因素建立基于概率分布的耐久性设计方法,考虑工作性、抗裂性和耐久性等因素初步配制高性能混凝土,然后在试验基础上,分析影响耐久性各种因素,调整和优化混凝土配合比,确定施工配合比调整原则和方法。应区分

不同腐蚀环境的结构物的不同工段，以耐久性为核心，突出抗裂性，强调工作性的耐久性混凝土配合比设计研究方法。确定混凝土基准配合比时，在满足耐久性和基本强度要求下，设计一定水胶比范围以及相同水胶比条件下不同掺和料比例的多组配合比，以工作性为前提，突出抗裂性进行优选。

开展混凝土新材料、新工艺试验研究。通过新材料、新工艺在深圳地铁 11 号线工程中的开发应用，以期提高混凝土工程质量，降低混凝土开裂风险，提高钢筋混凝土在腐蚀环境中的安全使用耐久性。

探索钢筋混凝土在开裂或受拉应力状态下多重腐蚀介质作用下的劣化进程和机理，评估钢筋混凝土耐久寿命。

根据深圳地铁工程混凝土前期试验结果和深圳地铁 11 号线工程结构设计，开展混凝土温度应力和干缩应力有限元仿真初步计算。根据混凝土配合比优化试验和混凝土性能试验检测结果进行混凝土温度应力和干缩应力有限元仿真验算，为加强混凝土结构易裂薄弱部位的防护和养护措施提供设计依据。

进行工程施工技术研究。混凝土工程质量是通过实际施工反映出来的。因此，混凝土原材料的质量控制、混凝土配合比的技术交底、混凝土施工工艺措施的技术指导和监督执行、现场检测设施的埋设和检测、现场检测数据的收集与分析整理、混凝土裂缝的密封修补处理均为优质工程的实现提供保障，需要重视。

1.3 主要研究内容

1.3.1 前期试验结果、施工原材料调研与分析

- (1) 收集深圳地铁工程 1 号线、2 号线和 5 号线混凝土性能试验结果。
- (2) 收集深圳地铁工程 11 号线结构设计方案和地质勘探资料。
- (3) 深圳当地施工混凝土主要原材料收集、运输、化学分析及性能检测。

1.3.2 高工作性、抗裂和耐腐蚀混凝土的优化配制

- (1) 水胶比的影响试验研究。
- (2) 水泥品种的影响试验研究。
- (3) 外加剂品种的影响试验研究。
- (4) 掺和料品种及掺量配合比试验研究。
- (5) 混凝土含气量的影响试验研究。
- (6) 混凝土抗裂性指标的综合评价试验。
- (7) 不同腐蚀环境作用等级下的不同工段混凝土基本配合比及其性能指标。

1.3.3 钢筋混凝土劣化机理和破坏速率试验分析

(1) 钢筋混凝土试件在有压渗透状况下，钢筋和混凝土在不同腐蚀介质浓度环境中的劣化机理和破坏速率试验检测。

(2) 室内干湿交替的加速试验条件下,采用电化学无损检测技术、化学分析和微观结构分析技术以及其他物理力学方法,研究氯离子和碳酸根离子双重环境作用和拉应力条件下钢筋混凝土的退化机理和规律。

(3) 室内干湿交替的加速试验条件下,采用电化学无损检测技术、化学分析和微观结构分析技术以及其他物理力学方法,研究氯离子和硫酸镁双重环境作用下钢筋混凝土的退化机理和规律。

(4) 室内干湿交替的加速试验条件下,采用电化学无损检测技术、化学分析和微观结构分析技术以及其他物理力学方法,研究拉应力-氯离子-硫酸镁多重环境作用下钢筋混凝土的退化机理和规律。

(5) 室内干湿交替的加速试验条件下,采用电化学无损检测技术、化学分析和微观结构分析技术以及其他物理力学方法,研究杂散电流-氯离子-硫酸镁多重环境作用下,钢筋混凝土的退化机理和规律。

(6) 根据试验分析结果,最终确定地铁工程钢筋混凝土结构环境作用等级的影响。

1.3.4 材料和施工工艺附加措施对钢筋混凝土耐久性的影响

- (1) 钢筋阻锈剂对混凝土工作性、抗裂性和抗腐蚀耐久性的影响试验。
- (2) 自养护剂对混凝土工作性、抗裂性和抗腐蚀耐久性的影响试验。
- (3) 透水模板衬垫对混凝土抗裂性和抗腐蚀耐久性的影响试验。
- (4) 水泥基弹性防护砂浆试验研究。

1.3.5 混凝土结构施工期温度场和应力场的仿真计算

- (1) 温度控制初步计算。
- (2) 温度和温度应力的仿真计算。
- (3) 混凝土温度应力和干缩应力的现场检测、分析与管理。

1.3.6 混凝土耐久寿命的综合评估

- (1) 多因素、多重环境作用下的钢筋混凝土退化行为及寿命预测模型研究。
- (2) 混凝土耐久寿命的综合评估。

1.3.7 规范性文件的编制

- (1) 《深圳地铁 11 号线工程现浇高耐久混凝土施工技术导则》。
- (2) 采用耐久性设计的《深圳地铁 11 号线地下结构在使用期间的结构维护和检测措施规范性文件》。

1.4 研究成果与创新

1.4.1 主要研究成果

- (1) 通过混凝土水胶比、水泥品种、外加剂、掺和料配合比对混凝土工作性、力学性

能、变形性能、抗氯离子渗透、抗硫酸盐侵蚀、抗碳化耐久性影响试验研究,明确降低混凝土水胶比有利于提高混凝土耐久性,但不利于混凝土工作性和抗裂性。矿渣掺量的增加,有利于提高混凝土耐久性;单掺矿渣,混凝土工作性降低,混凝土干缩增大,抗裂性降低。为满足钢筋混凝土100年耐久性,胶凝材料中矿渣掺量不应小于30%。粉煤灰掺量的增加,有利于提高混凝土工作性和抗裂性,但降低混凝土早期强度。为保证混凝土抗碳化100年耐久性,粉煤灰掺量不宜超过25%。引气混凝土有利于提高混凝土工作性和耐久性。

(2) 采用BML混凝土流变仪检测分析泵送混凝土工作性。根据混凝土流变仪检测,相同混凝土坍落度条件下,混凝土水胶比降低,混凝土塑性黏度明显增加;单掺矿渣,混凝土塑性黏度大;提高胶凝材料中粉煤灰掺量,有利于降低混凝土塑性黏度;引气混凝土较非引气混凝土塑性黏度明显降低。

(3) 采用温度-应力试验机法综合评价混凝土抗裂性。随着水胶比的增大,混凝土的开裂温降有增大的趋势,开裂风险降低;增大掺和料掺量,优化掺和料组合,双掺矿渣和粉煤灰较单掺矿渣有利于减小混凝土的开裂温度,提高混凝土的抗裂性;掺引气剂改善了混凝土的抗裂性能;改变外加剂品种,对混凝土的抗裂性影响不明显。

(4) 根据配合比优化试验结果以及相关规范,推荐了不同腐蚀环境下的混凝土参考配合比和混凝土性能控制指标参数。根据混凝土性能试验,严重和非常严重腐蚀环境作用等级的工段混凝土优先推荐水胶比0.38且掺加15%~25%粉煤灰和30%~40%矿渣的引气混凝土,混凝土含气量4%~5%,标准养护28d混凝土氯离子扩散系数小于 $4 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$,标准养护28d混凝土抗硫酸盐等级不小于KS150,满足钢筋混凝土100年耐久性要求。

(5) 通过毛细渗透和0.3MPa渗透压力试验研究表明,在深圳地铁11号线最严酷腐蚀介质浓度有压渗透下,氯盐腐蚀危害深度远未达到混凝土侧墙外层钢筋保护层厚度,更加影响不到侧墙内层钢筋,因此不存在薄壁结构内侧干湿交替破坏环境。氯离子的存在限制了硫酸盐的渗透,硫酸盐的渗透深度不可能超过氯离子渗透深度,因此也不存在硫酸盐薄壁结构干湿交替结晶腐蚀破坏环境。该项研究成果对明确规范中的“薄壁结构”和“干湿交替”具有重要借鉴意义。

(6) 混凝土抗渗试件预留小于0.2mm宽度裂缝,在0.3MPa渗透压力下,通过不同浓度腐蚀介质循环渗透试验,得到如下结论:①在低浓度氯盐-硫酸盐溶液中,钢筋半电池电位绝对值先升高再降低,最终趋于平缓的状态。在试验初期腐蚀液渗出,后期硫酸盐与水泥凝胶反应,形成石膏等膨胀性的水化产物和钙矾石形成网状结构,与胶凝材料二次水化产物结合堵塞预留裂缝,裂缝自愈合,使得钢筋重新与腐蚀溶液分离,表面的钝化膜重新形成,从而使钢筋不再锈蚀。②在高浓度氯盐-硫酸镁溶液中,钢筋半电池电位绝对值很快升高,然后进入平缓的状态,钢筋腐蚀严重,一直有腐蚀液渗出。镁离子的存在保证了氯离子以及硫酸根离子与水泥水化产物的反应的持续进行,一方面弱化了试件内部的碱度,导致钢筋锈蚀,无法重新形成钝化膜;另一方面破坏了混凝土内部的C-S-H凝胶结构,使得在高浓度氯盐-硫酸镁溶液中循环的试件无法像在低浓度氯盐-硫酸钙溶液的试件那样通过二次水化产物填补预留裂缝,使得试件内部长期循环浸没在腐蚀溶液中,直至完全破坏。③在高浓度氯盐-硫酸镁-碳酸溶液中,钢筋半电池电位绝对值升高最快,钢

筋腐蚀严重，一直有腐蚀液渗出。硫酸镁腐蚀破坏和碳酸腐蚀破坏共同作用下，混凝土中的C-S-H凝胶会转变成质地松散不具有胶凝性的碳硫硅钙石，这种多重因素的循环侵蚀导致混凝土试件完全破坏。

(7) 拉应力-氯离子- CO_2 多重环境作用下钢筋混凝土劣化规律试验研究表明，在氯离子浓度为7000mg/L和15000mg/L盐溶液中浸泡的试件，在碳化环境干湿循环作用下，强度均出现先增加后下降的规律；非碳化环境下的试件浸烘循环12次和24次后，混凝土试件抗压强度值均低于标准养护的同龄期试件值。在氯盐-碳化循环条件下，随着循环次数增加，混凝土各层氯离子浓度逐渐增加，施加40%的极限拉应力后，加速了氯离子的渗透速度，而混凝土表层的碳化明显阻碍了氯离子的渗透；同时考虑碳化和拉应力作用，拉应力和碳化两者对氯离子渗透的促进和阻碍作用互相制约。随着干湿循环次数的增加，混凝土碳化深度不断增加，拉应力和盐溶液浓度均增加混凝土碳化深度；比较而言，浸泡溶液中氯离子浓度对混凝土碳化的影响大于40%的极限拉应力作用。

(8) 拉应力-氯离子-硫酸镁多重环境作用下钢筋混凝土劣化规律试验研究表明，当混凝土构件所承受拉应力为混凝土极限拉应力的40%时，在拉应力-氯离子-硫酸镁多重环境作用下的混凝土腐蚀程度与混凝土不承受拉应力时的腐蚀程度基本相同。但当混凝土构件所承受的拉应力为混凝土所承受的极限拉应力的60%时，在拉应力-氯离子-硫酸镁多重环境作用下的混凝土腐蚀程度较不承受拉应力时的腐蚀程度严重。

(9) 杂散电流-氯离子-硫酸镁多重环境作用试验研究表明，氯盐溶液极大地增强杂散电流对建筑钢筋混凝土结构的腐蚀，对深圳地铁而言，存在含氯盐环境下的杂散电流腐蚀，采用掺加20%粉煤灰和40%矿渣的耐腐蚀混凝土，与普通混凝土相比，耐久年限相对可延长15倍。在氯盐-硫酸盐-杂散电流腐蚀条件下，随着杂散电流的增加和侵蚀龄期的增长，混凝土中氯离子的浓度也随之增加。杂散电流增加了氯离子在混凝土中的扩散系数，特别是对普通混凝土而言，这种趋势更加明显。而耐腐蚀混凝土在试验龄期内，氯离子主要集中在混凝土的表层，扩散至内部的氯离子较少。在含盐以及冻融的环境下，当存在杂散电流时，会加速盐离子向混凝土内扩散的速度以及浓度，并且在冻融的条件下会加速混凝土的冻融破坏。长龄期杂散电流-氯盐-硫酸盐腐蚀会降低混凝土抗压强度。试验分析推断，在杂散电流-氯盐-冻融腐蚀环境中，钢筋混凝土试件中的钢筋通过杂散电流，电磁感应促使混凝土孔隙液中的离子流动，加速了氯盐向混凝土试件内渗透。混凝土内部毛细管吸水饱水度和吸水速度增加，结冰压力增大，混凝土破坏加速。而且，在混凝土内部毛细管溶液冰冻过程中，阻挡了电磁感应促使混凝土孔隙液中的离子流动，由此产生应力，该应力与结冰膨胀应力共同作用，加速了混凝土的损伤破坏。

(10) 混凝土耐久寿命的综合评估表明，在氯盐腐蚀非常严重环境作用等级下，推荐的最大水胶比0.38高耐腐蚀钢筋混凝土预测寿命为156年。随着混凝土构件受拉应力增加，钢筋混凝土预测寿命降低，40%极限拉应力和60%极限拉应力钢筋混凝土构件的钢筋锈蚀起始年限由115年分别降低至109年和96年。在氯盐干湿循环试验条件下，随着混凝土内钢筋中杂散电流密度的增加，水胶比0.38的普通混凝土中钢筋锈蚀起始年限由6年降低至3年；而推荐的最大水胶比0.38高耐腐蚀混凝土中钢筋锈蚀起始年限由74年降低至59年。即高耐腐蚀混凝土中钢筋锈蚀起始年限较同水胶比普通混凝土提高近

20 倍。

(11) 开展了混凝土结构施工期温度场和应力场的仿真计算。通过结构有限元计算分析和工程实际现场检测表明, 车站隧道混凝土表面的最大主拉应力位于底板两端倒角的上表面。由于未考虑保温措施, 导致最大主拉应力超过了相应龄期的轴拉强度。底板两端倒角处、底板施工缝处应加强早期保温养护措施。底板分层施工有利于降低开裂风险。

(12) 试验研究表明, 在硫酸盐和氯盐共同作用环境下, 低水胶比大掺量矿物掺和料混凝土已能满足桩基混凝土的防腐要求, 掺阻锈剂混凝土的抗硫酸盐侵蚀能力、抗氯离子侵蚀能力和抗钢筋锈蚀能力未见改善。混凝土的工作性因掺加阻锈剂后, 会出现坍落度损失较快、不利于施工的情况。综合考虑技术、经济性能, 可以不再掺加钢筋混凝土防腐阻锈剂。但混凝土若采用经淡水冲洗海砂, 且残余氯离子含量超过本研究中的氯离子含量范围, 可考虑掺加钢筋混凝土防腐阻锈剂。钢筋阻锈剂掺量应根据混凝土中氯离子含量, 通过试验确定。

(13) 为了减少混凝土收缩裂缝, 开发了混凝土内养护剂。试验研究结果可见, 在混凝土中掺加胶凝材料总量 10% 内养护剂, 开裂温降明显增加, 开裂温度明显降低, 开裂时间明显延长, 混凝土抗裂性明显提高。混凝土干燥收缩降低约 20%。氯离子扩散系数降低 10%~25%。

(14) 采用透水模板衬垫工艺技术, 在不改变混凝土配合比的前提下, 可有效降低混凝土表层水胶比, 减少混凝土表面气泡和孔隙, 提高混凝土密实性, 大大改善混凝土外观质量。采用透水模板衬垫可消除混凝土塑性裂缝, 并提高混凝土抗裂性。采用透水模板衬垫可使混凝土渗水高度降低 15%, 碳化深度降低 25%, 混凝土表层氯离子浓度降低明显。建议在底板两端倒角和顶板两端倒角混凝土浇筑时采用透水模板衬垫。

(15) 为解决地铁钢筋混凝土通道产生收缩裂缝后封闭阻渗问题, 研制开发了水泥基弹性防护砂浆。与普通水泥砂浆相比, 弹性砂浆具有非常优异的弹性, 能够适应混凝土裂缝的伸缩变形。且弹性砂浆具有较高的黏结强度和更好的抗渗防腐耐久性。弹性砂浆极限拉伸值达 400×10^{-6} 以上。弯曲韧性试验中, 弹性砂浆在未出现裂缝时的最大挠度在 0.40mm 以上, 体现了弹性砂浆具有较好的弹性变形能力。钢筋混凝土结构出现贯穿裂缝时, 推荐采用弹性防护砂浆在混凝土裂缝外表面防护修补。

(16) 以研究成果为基础, 编制了《深圳地铁 11 号线工程高耐久性混凝土施工技术导则》和《深圳地铁 11 号线地下结构在使用期间的结构维护和检测措施规范性文件》。

(17) 满足 100 年耐久性设计要求的高耐久性混凝土在深圳地铁 11 号线车公庙站、南山站、后海站、前海湾站、宝安站、碧海湾站、机场北站、福永站、后亭站和碧头站等站点得以成功应用。深圳地铁 11 号线结构工程共浇筑混凝土 197.6 万 m^3 , 其中满足各种腐蚀环境等级 100 年耐久性的高耐久性混凝土浇筑 55.7 万 m^3 。

在各种腐蚀环境等级条件下能满足 100 年设计使用年限的高耐久性混凝土中采用粉煤灰和矿渣粉部分取代水泥, 既确保钢筋混凝土耐久性, 又降低混凝土原材料成本, 而且循环利用工业废渣资源, 降低 CO_2 排放, 降低环境污染。深圳地铁 11 号线结构工程共节约水泥 10.8 万 t, 利用粉煤灰 3.94 万 t, 矿渣粉 6.9 万 t。根据实验, 生产 1t 水泥大约排放 1t CO_2 进入大气层, 而 CO_2 排放是温室效应和全球性气候变暖的主要原因所在。节约水