



联合聚力 资源共享 龙头带动 抱团发展

城市轨道交通前沿研究

Advanced Research of Urban Rail Transit

The Second Series

(第2辑)

◆ 青岛地铁产业协会 主编

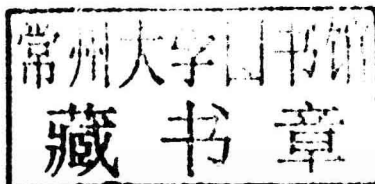


北京交通大学出版社
<http://www.bjtu.com.cn>

城市轨道交通前沿研究

(第2辑)

青岛地铁产业协会 主编



北京交通大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

城市轨道交通有运力强、出行效率高、安全性强、经济环保等优点，因而城市轨道交通逐渐成为我国很多城市公共交通发展的主要方向。

为促进城市轨道交通产业发展，提高城市轨道交通建设与运营水平，提高从业人员的学术研究能力，本书对青岛地铁产业协会评选出的年度优秀获奖论文进行了汇编，文章作者都为青岛地铁产业协会会员单位的管理人员和技术工作者。文章内容涉及面广，从规划设计、土建工程、装备集成、运营管理、资源开发等方面全面地展现了与青岛城市轨道交通相关的一线研究成果。

本书对城市轨道交通行业的从业者、科研人员及研究生具有较大的参考价值。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

城市轨道交通前沿研究. 第2辑 / 青岛地铁产业协会主编. —北京：北京交通大学出版社，2018.5
ISBN 978-7-5121-3508-6

I. ① 城… II. ① 青… III. ① 城市铁路—青岛—文集 IV. ① U239.5-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 028246 号

城市轨道交通前沿研究（第2辑）

CHENGSHI GUIDAO JIAOTONG QIANYAN YANJIU (DI 2 JI)

责任编辑：方元元

出版发行：北京交通大学出版社

电话：010-51686414 <http://www.bjtup.com.cn>

地 址：北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编：100044

印 刷 者：艺堂印刷（天津）有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：210 mm×297 mm 印张：11 字数：326 千字

版 次：2018 年 5 月第 1 版 2018 年 5 月第 1 次印刷

书 号：ISBN 978-7-5121-3508-6/U·305

印 数：1~1 000 册 定价：48.00 元

本书如有质量问题，请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评，我们表示欢迎和感谢。

投诉电话：010-51686043，51686008；传真：010-62225406；E-mail: press@bjtu.edu.cn。

本书编委会

顾问 贾福宁

主任 王永亮

副主任 张 君

编委 马云双 刘保明 于德翔 陈维强

华福才 夏祥聚 郭少泉 徐增森

孔 军 金守华

主 编 张 君

副主编 张明东 刘国平 李晓杰 罗情平

黄兴虎 石 军

目 录

青岛地铁 1 号线 GPS 控制网测量及精度分析	王 智 张洪德	1
浅埋暗挖隧道下穿建筑物的风险控制研究	龚旭东	6
青岛城市轨道交通 AFC 系统界面设计探讨	任 玲	13
轨道交通清分系统数据级灾备向应用级灾备升级方案研究	张守芝 黄问遂	19
内置无线传输在城轨车辆轴颈测量中的应用	宿连霞 管 明 蔡里明	27
互联网金融中的地铁融资创新	徐晓红	33
青岛地铁岩土工程勘察几个重点问题的探讨	闫强刚 何寿迎	37
青岛地铁 11 号线预埋槽道技术经济分析	吴学锋	42
主城区外地铁隧道开挖进尺参数的合理确定	王英杰	46
地铁再生制动能量回馈装置框架保护配置研究	钱耀峰 杨景华	52
浅析球墨铸铁行星架的铸造工艺	毕继旺	57
地铁空调机组冷凝水结霜及排水方式改进刘丙林 马桂财 陈明可 张红江 蓝 天 刘曷丽 庞明潇 管凯凯		63
地铁零件断裂失效的分析方法及典型原因	王 伟 吕会宾	70
阿根廷地铁横梁组成组焊工艺及焊接缺陷分析	陶有朋 赵永州	79
青岛地铁勘察工作浅析	卞立民	87
城市轨道交通工程复杂地质条件下 WSS 超前注浆技术的应用	王凤海	91
三轨供电地铁线路车辆段内转轨方式研究	李忠山 刘丙林 朱 佳 孟英华 许桂红	97
关于山东半岛蓝色经济区一卡通的管理模式探讨	禹鹤林	100
地铁站设备与管理用房全空气一次回风空调通风量的简算方法	张仕杰	104
城市轨道交通商业资源开发实践与发展建议——以青岛地铁 3 号线为例	李晓杰	109
浅谈轨道交通运营成本精益管理	徐晓红 王文菁	115
城市地铁施工安全管理措施探讨	王克华	119
地铁供电迷流腐蚀机理及防护	卢衍伟	122
新型分油环在某地铁电客车齿轮箱高速轴系中的应用	孙春飞	129
浅谈青岛地铁综合仿真培训系统	刘 洋 王宁宁 王成峰 于 洋 刘向宇	133
地铁车辆防火标准结构设计的对比分析	刘玉文 尤维秀 解巧红	139
城市轨道交通控制系统一体化解决方案的分析与探讨	于东磊	144
焊接工作试件在轨道车辆上的应用及制作浅析	但楚臣 徐 波 郭世彬	148
公铁车内装模块化设计及人机工程学分析	展 伟 姜 涛 黄秋霞	153
缅甸内燃机车底架钢结构设计	郝晓明 林 红 尹相波	159

青岛地铁 1 号线 GPS 控制网测量及精度分析

王 智 张洪德

(青岛市勘察测绘研究院)

摘要: 青岛地铁 1 号线全长 59.9 km, 是全国第一条跨海地铁隧道。提出以青岛连续运行参考站 (QDCORS) 作为青岛 1 号线 GPS 控制网的起算基准, 考虑到 1 号线和 R3 线顺接, 工程进度相差不大, 将两条线路 GPS 控制网统一布设并平差计算。为提高长基线解算精度, 选择网中部分点位组成骨架网进行长时间观测, 并用 GAMIT 进行长基线解算。文中介绍了外业观测时的注意事项及数据解算时的流程, 分析说明了用 GAMIT 解算长基线可提高控制网精度, 用连续运行参考站 (CORS) 作为城市地铁控制网的起算数据可以有效保证各条地铁线路空间基准的统一性。

关键词: QDCORS; 青岛地铁; 控制测量; 基线解算

1 概述

青岛地铁 1 号线全长 59.9 km, 穿越黄岛区、市南区、市北区、李沧区、城阳区, 其中约 3.5 km 穿越胶州湾, 将成为全国首条跨海地铁线路, 全线共设车站 40 座, 均为地下站, 平均站间距 1 569 m。全线设置 2 座车辆基地 (安顺车辆段、东郭庄车辆段)、1 座停车场 (瓦屋庄停车场) 和 1 处控制中心。1 号线与 R3 线顺接, 在井冈山路站换乘。全线南北跨度大, 地质情况复杂, 市区建成区建筑密集, 老建筑与新建小区交错, 高层建筑较多, 街道密集, 纵横交错。

为满足工程设计、施工要求, 确保轨道交通线路顺利贯通, 需布设地面控制网, 为整个工程施工提供可靠的测量基准。地面首级平面控制网为 GPS 控制网, 采用 GPS 静态卫星定位技术进行测量, 为了和其他地铁线路的起算基准保持一致, GPS 控制网以 QDCORS 作为起算, 由于 CORS 站点距离测区较远, 为了提高基线解算精度, 选取网中的部分点位与 CORS 站点组成骨架网进行长时间观测, 并采用高精度解算软件 GAMIT 进行基线处理。

2 QDCORS 及应用优势

CORS 系统是卫星定位技术、计算机网络技术、数字通信技术等高科技多方位、深度结晶的产物。它由基准站网、数据处理中心、数据传输系统、定位导航数据播发系统、用户应用系统五个部分组成, 各基准站与监控分析中心间通过数据传输系统连接成一体, 形成专用网络^[1]。2006 年, 青岛市建成了山东省第一个 GPS 连续运行参考站。该 GPS 参考站网综合应用了虚拟参考网站技术 (virtual reference station, VRS)、高精度自动化后处理技术、水准面拟合技术、现代通信技术、多种 GPS 定位技术、Web 网络发布等先进技术, 是一个高标准、高精度、多功能的 GPS 连续运行参考站网系统。

QDCORS 从 2006 年起运行, 是青岛市乃至山东省建立的第一个高标准、高精度、多功能的 GPS 综合服务系统, 是维持青岛市坐标系统的重要手段。系统经过了由院士组成的专家委员会的科技鉴定, 经长期运行验证, 稳定可靠, 广泛应用于勘察、测绘、规划和土地管理等多个行业。

QDCORS 与 IGS 跟踪站和青岛城市坐标系最高等级的控制点均进行了统一联测,各点兼容性良好,各站点既具有青岛城市坐标系的坐标,又具有高精度的 WGS-84 坐标系的坐标,利用基准站点作为平面控制网的起算点,可同时提供地心坐标系和城市坐标系的起算数据,还可保证各期控制网的起算数据的一致性和稳定性。青岛海湾大桥和海底隧道的施工建设,以及其他已建地铁线路采用的基准也是 ODCORS。

城市建设地铁通常是总体规划,分期建设,用 CORS 作为地铁控制网的起算数据可以有效保证各条地铁线路起算数据的一致性和空间基准的统一性。

3 网形设计及作业要点

根据地铁 1 号线设计方案,并结合 QDCORS 的基准站站址分布情况,采用胶南、红石崖、小港、红岛、青银路、田横和金口共 7 个站点作为地铁 GPS 控制网的起算点。由于 CORS 各个站点相距较远,通常为十几公里至几十公里,为了提高基线解算精度,首先选取地铁 GPS 控制网中的若干个点与起算 CORS 站点组成骨架网,进行长时间观测,骨架网设计图见图 1, GPS 外业观测技术参数如表 1 所示。

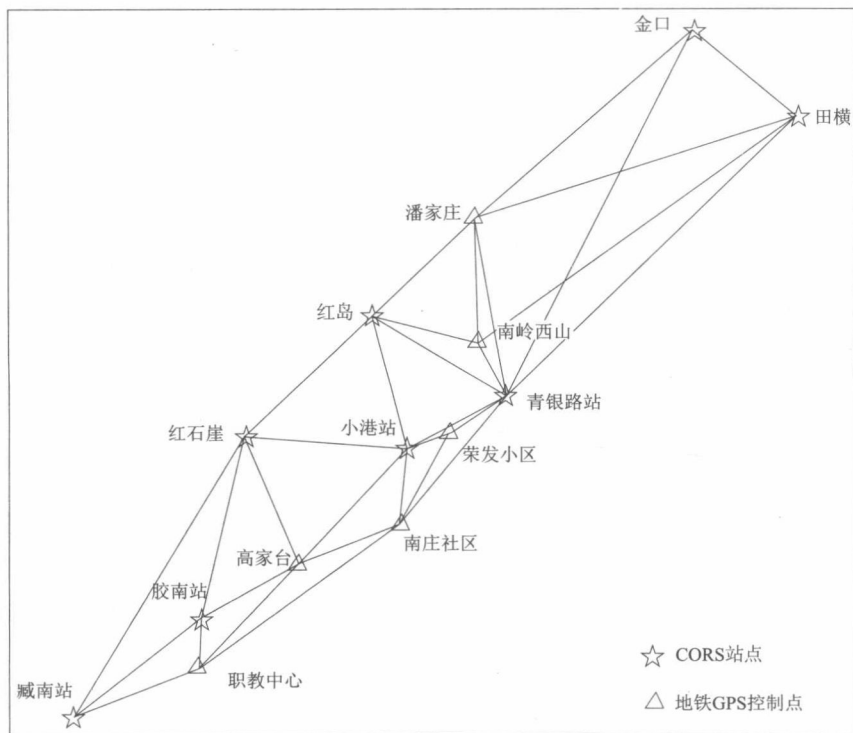


图 1 地铁 1 号线骨架网设计图

表 1 GPS 外业观测技术参数

接收机类型	双 频	
接收机标称精度	5 mm+1 ppm 以上	
卫星高度角/(°)	≥15	
有效观测卫星数/颗	≥4	
平均重复设站数/次	≥2	
有效时段长度/min	骨架网点	240
	其他点	90
位置精度衰减因子 (PDOP)	≤6	

GPS 控制网采用静态作业模式，使用 6 台 Leica GS14 双频接收机进行观测，该接收机的标称精度为 3 mm+0.3 ppm。作业前应对卫星接收机和天线等设备进行常规检查。检查内容包括：仪器检定结果、电池容量、光学对中器和接收机内存容量等。根据接收机数量、控制网设计图形，以及交通情况编制作业计划，观测中根据实际情况进行调整。

在外业观测过程中应按下列要求执行：天线安置的对中误差不应大于 1 mm，天线高量取应精确至 1 mm，在 120° 方向三次量取，较差不大于 2 mm 取中数使用；观测作业应严格按调度表进行，保证同步观测同一组卫星，不得中途关机，改变天线位置、观测参数或进行其他调试等过程中，应避免在接收机附近使用无线电通信工具；观测员在作业期间不得擅自离开观测站，并应防止仪器受震动和被移动，防止人和其他物体靠近天线，遮挡卫星信号；作业时应填好观测手簿，包括控制点点名、接收机序列号、仪器高度、天线类型、开关机时间等相关的测站信息，不得缺项。

4 数据处理及成果评价

4.1 数据处理

为了提高长基线的解算精度，骨架网采用专业高精度软件 GAMIT 进行解算，其余基线采用 LGO 软件进行解算。基线应经重复基线及环闭合差检核，检核不合格时或基线解算精度较差时应对相应的基线做精化处理，主要精化处理方法如下。

- ① 基线起点坐标不准确：使用坐标准确度较高的点作为基线解算的起点，较为准确的起点坐标可以通过进行较长时间的单点定位或通过 WGS-84 坐标较准确的点联测得到^[2]。
- ② 卫星观测时间太短：删除该卫星的观测数据，不让其参加基线解算，从而保证基线解算结果的质量。
- ③ 周跳问题：在发生周跳处增加新的模糊度参数或删除周跳严重的时间段，从而改善基线解算结果的质量^[3]。
- ④ 多路径效应：通过缩小编辑因子的方法来剔除残差较大的观测值，也可以采用删除多路径效应严重的时间段或卫星的方法^[4]。
- ⑤ 对流层或电离层影响：提高截止高度角，剔除易受对流层或电离层影响的低高度角观测数据；分别采用模型对对流层和电离层延迟进行改正；使用无电离层观测值对 GPS 双频观测值进行基线解算^[5]。

平差前，在城市坐标系下，对拟采用的 CORS 站起算点进行兼容性检查分析，另结合点位分布情况，最终选用兼容性好的点位作为二维约束平差的起算数据，考虑到 GAMIT 与 LGO 解算精度相差较大，在平差软件中应分别定权导入相应的基线文件，合并后再进行平差计算，网平差利用武汉大学开发的科傻 GPS 数据处理软件包。考虑到 1 号线、R3 线的衔接，将 1 号线、R3 线的独立基线和骨架网的独立基线进行整体平差计算。数据解算流程如图 2 所示。

4.2 成果评价

GPS 控制网主要技术指标如表 2 所示，根据平差后的结果对 GPS 控制网做出精度评定。

表 2 GPS 控制网主要技术指标

平均边长/km	最弱点的点位中误差/mm	相邻点的相对点位中误差/mm	最弱边的相对中误差	与现有城市控制点的坐标较差/mm	不同线路控制网重合点坐标较差/mm
2	±12	±10	1/100 000	≤50	≤25


```

graph TD
    A["基线解算  
框架网: GAMIT软件解算  
其余时段: LGO等软件解算"] --> B["重复基线、同步环检验"]
    B -- "不合格" --> C["基线细化处理"]
    C --> A
    B -- "合格" --> D["挑选独立基线"]
    D --> E["异步环检验"]
    E -- "不合格" --> C
    E -- "合格" --> F["三维无约束平差"]
    G["起算点兼容性检查"] --> F
    F --> H["二维约束平差"]

```

在青岛城市坐标系下,结合点位分布情况,选用胶南、红石崖、小港、红岛、青银路、田横和金口基准站作为二维约束平差的起算数据。平差后最弱点点位中误差为 0.49 cm,最弱边相对中误差为 1/269 000,各项精度指标均满足规范要求。

点号	1 号线成果		2 号线、3 号线成果		$\Delta X/\text{mm}$	$\Delta Y/\text{mm}$
	X	Y	X	Y		
GPS035	****07.744 8	****71.520 8	****07.747 5	****71.526 2	2.7	5.4
GPS036	****02.287 0	****28.384 4	****02.287 0	****28.384 1	0	-0.3
GPS037	****54.093 3	****90.951 3	****54.095 0	****90.950 3	1.7	-1
GPS001	****09.554 1	****06.830 6	****09.564 9	****06.824 2	10.8	-6.4
GPS002	****79.143 3	****03.975 7	****79.151 5	****03.974 5	8.2	-1.2
GPS026	****07.372 4	****68.766 0	****07.366 4	****68.759 7	-6	-6.3
GPS028	****52.837 7	****62.787 1	****52.828 3	****62.786 1	-9.4	-1
GPS029	****31.015 1	****51.072 2	****31.014 4	****51.067 6	-0.7	-4.6
QD12	****26.784 3	****40.655 4	****26.786 0	****40.659 0	1.7	3.6

从上表可以看出,虽然各条地铁线路在不同时间建设,控制网测量时间也均不相同,但由于都采用稳定可靠的 QDCORS 作为起算数据,使得各条线路重合点的平差结果基本相同,较差均在规范要求的 25 mm 限差之内。

本文介绍了青岛地铁 1 号线 GPS 控制网的测量及精度分析,说明了用 GAMIT 解算长基线,以及用 CORS 作为地铁控制网起算点的优势,根据该方法特点介绍了作业时的技术要点及数据处理过程,通过青岛地铁 1 号线 GPS 控制网解算的应用实例说明了该方法的优势及不同线路数据成果的稳定及相互兼容性。



从文中分析可以得出以下结论:

① 通过选取 GPS 控制网中的部分控制点与 CORS 起算点组成骨架网进行长时间观测, 并采用高精度解算软件 GAMIT 进行基线解算可大大提高数据处理的精度。

② 由于无须建立专门的城市地铁控制网并进行常年的维护, 所以将 CORS 用于地铁控制网解算可以节约建设成本。

③ CORS 用于地铁控制网可以有效保证城市各条地铁线路空间基准的统一性, 避免交叉线路控制点成果不一致带来的施工矛盾。

参考文献

- [1] 汪伟, 史廷玉, 张志全. CORS 系统的应用发展及展望 [J]. 城市勘测, 2010 (3): 45-47.
- [2] 柏铭. QDCORS 网的精度分析与完备性研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2009.
- [3] 生仁军. GPS 载波相位定位中周跳探测方法的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [4] 戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军. GPS 动态变形测量中的多路径效应特征研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28 (1): 65-71.
- [5] 张双成, 张鹏飞, 范鹏飞. GPS 对流层改正模型的最新进展及对比分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32 (2): 91-95.

浅埋暗挖隧道下穿建筑物的风险控制研究

龚旭东

(中铁第一勘察院集团有限公司, 西安)

摘要: 浅埋暗挖隧道下穿建筑物往往引起建筑物沉降变形, 对既有线路和周边建筑物的安全产生威胁。以青岛地铁一期工程某区间隧道下穿高层建筑物为背景, 针对施工中存在的渗漏水及沉降变形过大等问题, 开展数值模拟与现场监测相结合的研究工作。根据有限元计算确定施工对建筑物的影响范围, 进而确定合理的注浆加固方案。研究结果表明: 采用深孔注浆、径向注浆等堵水措施, 结合袖阀管注浆对建筑物变形进行控制, 使在软土地层中开挖隧道能够保证隧道上方建筑物的安全。

关键词: 地铁隧道; 下穿建筑物; 数值模拟; 袖阀管注浆

1 引言

城市地下工程在建设过程中不可避免地要下穿或侧穿已有建筑物, 其中浅埋暗挖隧道下穿工程技术难度更大, 风险性更高^[1-2]。建筑物作为地基基础和上部结构密切联系的整体, 对沉降变形影响敏感。在地下工程施工过程中, 不可避免地会对周围岩土体产生扰动, 使岩土体原有平衡遭到破坏, 特别是在施工过程中存在较差地层的情况下, 会导致地层发生沉降与变形, 进而影响周边建筑物的安全, 造成巨大的经济损失^[3-5]。

青岛地铁某区间隧道左、右线下穿某酒店, 隧道穿越地层主要为中风化花岗岩, 局部含有煌斑岩。因为地下水含水量丰富, 煌斑岩遇水变软, 强度大幅降低, 所以若不采取有效措施, 极有可能导致产生过大沉降, 威胁建筑物的安全。采取何种注浆加固措施, 保证隧道施工过程中的安全, 是隧道施工组织设计的重点。

本文在下穿建筑物沉降风险分析的基础上, 采用三维数值计算软件 ANSYS 对隧道下穿过程变形影像进行分析, 提出合理的注浆加固方案, 进而对施工存在的风险进行控制。

2 工程概况

青岛地铁 3 号线某区间长度约 1 300 m, 采用矿山法施工, 在区间中部设置一座施工竖井 (竖井横通道与联络通道结合设置), 区间在线路最低点处设置一处联络通道及泵房。隧道左右洞均采用 A8 断面, 双排小导管, 钢格栅主筋 $\phi 22$, 骨架高度 $\times$ 长度为 17 cm $\times$ 17 cm。锁脚锚管采用 4 m 长 $\phi 42$ 注浆小导管, 每榀 4 根, 为防止沉降, 钢架底垫 400 mm $\times$ 240 mm $\times$ 10 mm 钢板。

隧道位于香港中路与南京路下方, 地面交通繁忙, 人流、车流量很大, 隧道下穿多个高层办公及商住楼, 特别是假日酒店, 左线正下穿长度 48 m (ZK7+748~ZK7+796), 右线正下穿长度 40 m (YK7+746~YK7+786), 周边环境复杂。

在隧道开挖时, 为减小左右洞同时开挖相互影响的效应, 采用单侧洞先行施工的策略, 本工程左洞率先开挖, 开挖一定进尺后右洞开始开挖。



施工过程中自小里程向大里程方向进行：左线 K7+746~K7+796，施工时间从 2012 年 5 月 2 日至 2012 年 8 月 29 日；右线 K7+748~K7+806，施工时间从 2012 年 6 月 3 日至 2012 年 10 月 6 日。

3 下穿建筑物沉降风险分析

3.1 建筑物概况

区间隧道下穿的假日酒店为地下 4 层，主楼地上 28 层，裙楼地上 4 层的混凝土结构。基础有筏板基础、独立柱基、条形基础，左右线均位于主楼正下方。隧道与假日酒店的位置关系如图 1 所示。建筑物地下室底板底绝对标高-5.6 m，距离隧道拱顶 11.0~12.6 m。基础下设抗浮锚杆，锚杆底端距隧道拱顶最近为 4.3 m。隧道与假日酒店基础空间位置关系如图 2 所示。下穿段位于 R=350 m 曲线上，坡度 3‰，埋深 24.0 m，隧道拱顶距离建筑物底板 11.0 m，左、右线线间距为 21.0 m。

隧道下穿区，左线围岩以中风化花岗岩为主，受煌斑岩岩脉影响，节理、裂隙发育，拱顶以上为强风化下亚带接触带，裂隙水发育，地下水呈滴状-线状出露。右线隧道仰拱至拱顶围岩均为强风化下亚带花岗岩，地下水呈滴状-线状出露。

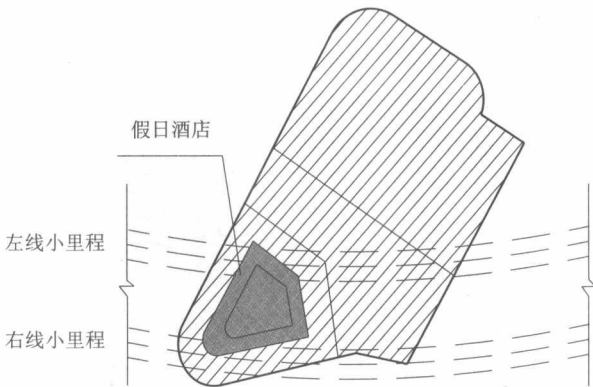


图 1 隧道与假日酒店的位置关系

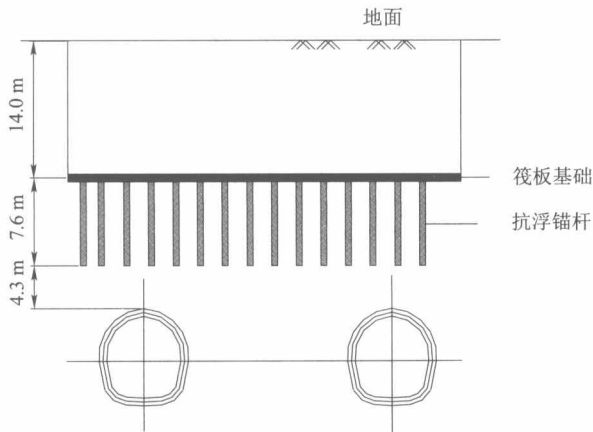


图 2 隧道与假日酒店基础空间位置关系

3.2 建筑物沉降风险分析

在施工过程中对建筑物进行跟踪监测，重点沉降监测点分布见图 3。

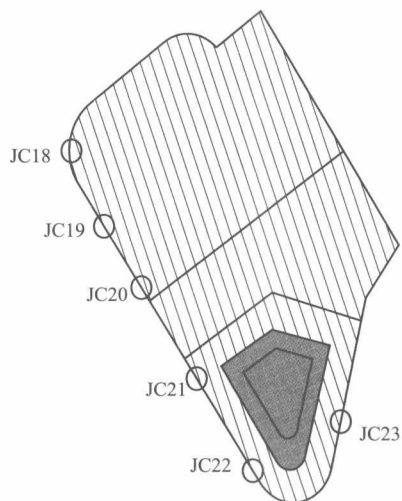


图 3 建筑物重点沉降监测点分布图

工程开挖过程中, 2012 年 5 月 5 日 ZK7+747 处出现涌水, 涌水量达到 $35 \text{ m}^3/\text{h}$, 建筑物的累计沉降为 5.47 mm ; 6 月 1 日右线 YK+746 开始下穿建筑物, 建筑物累计沉降 9.67 mm ; 至 6 月 11 日, 右线施工至 YK+753.75, 建筑物累计沉降达到 15.24 mm , 接近报警值, 建筑物出现裂缝, 见图 4; 6 月 30 日, 建筑物累计沉降 18.52 mm , 为避免变形继续扩大, 暂停施工。注浆前建筑物累计沉降历时曲线图如图 5 所示。



图 4 建筑物裂缝

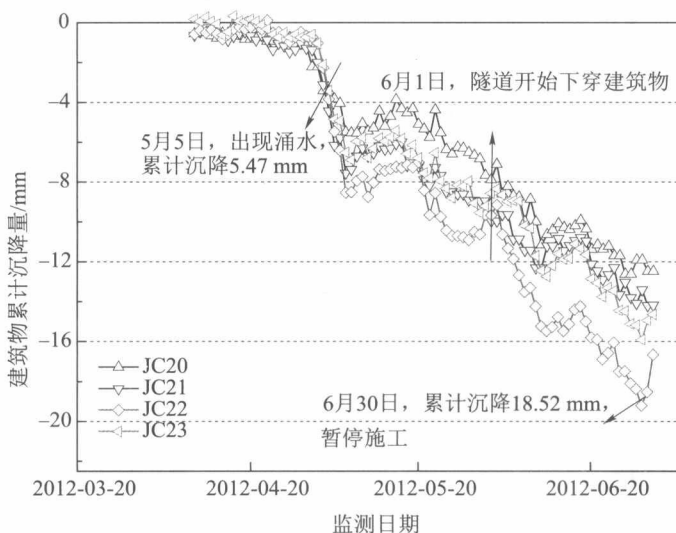


图 5 注浆前建筑物累计沉降历时曲线图

3.3 原因分析

分析沉降的原因主要有：① 围岩以中风化花岗岩为主，受煌斑岩岩脉影响，节理、裂隙发育，裂隙水发育，造成大量地下水流失，而隧道周边土层均为中等压缩性地层，孔隙水流失，导致地层发生渗流固结沉降；② 渗漏水可能带走土层中的部分土粒，使土层产生更大的孔隙，加大了土层的沉降，进而加大了建筑物的沉降；③ 地面爆破振动会直接影响到地表位移，使地面突变^[6]。青岛花岗岩地区采用爆破施工，爆破振动会对隧道本身和建筑物结构产生较大影响。

工程实践表明，地下水渗漏是造成工程周边地层和建筑物沉降的主要原因，在施工中如何控制地下水流失，是控制建筑物沉降的关键。

针对施工过程中存在风险，根据王梦恕等对于隧道工程的研究成果^[7-9]及行业相关标准（JGJ 125—1999 危险房屋鉴定标准、JGJ/T 8—1997 建筑变形测量规程），确定采用现场监测与数值模拟相结合的手段，确定合理的注浆堵水方案，分析隧道施工对建筑物的影响。

4 注浆效果数值计算分析

康寅、孙付峰、程都等运用 ANSYS 将下穿酒店地基软弱层分为三种情况：不注浆、仅软弱层注浆和软弱层及以上 1 m 处注浆^[10]。针对这三种情况进行二维数值计算，对比分析建筑物在这三种情况下的竖向位移，并对加固效果进行探讨。研究结果表明：在煌斑岩处进行注浆可使地层最大沉降值呈减少趋势。特别是对建筑物地基持力层部分注浆后，建筑物地基最大沉降值明显减小。第二种注浆范围，其最大值可控制在 30 mm 以内，沉降曲线较平缓，建筑物倾斜值等于 0.000 057，远小于规范，安全储备较高。

本文在前人研究基础上，运用 ANSYS 仅对隧道下穿酒店软弱地层注浆加固，并通过进行三维数值计算，进一步分析不同加固方案对地层及周边环境影响，为最终确定合理的注浆加固方案提供依据。

4.1 边界条件及平衡条件

隧道左右线间距为 20 m，水平方向各取 55 m，向上取到建筑物基础底板下表面和地表，向下取 25 m。根据地质勘察报告，该处地层自地表以下 0~1.30 m 为杂填土，1.30~4.50 m 为粗砾砂，4.50~21.66 m 为强风化花岗岩，21.66~23.66 m 为煌斑岩，23.66~40.60 m 为中风化花岗岩，40.60 m 以下为微风化花岗岩。

假日酒店模型如图 6 所示，模型两端和建筑物地下车库两侧壁采用水平约束，建筑物以附加应力的方式作用在地基上^[10]，根据调查资料，地上每层取 14 kN/m²，地下每层取 20 kN/m²，建筑物附加应力为 402 kN/m²。

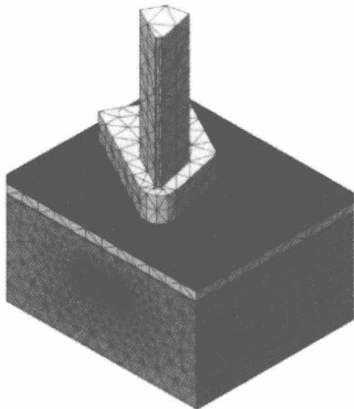


图 6 假日酒店模型

4.2 材料参数

由于岩土体属于颗粒状材料，其受压屈服强度远远大于受拉屈服强度，因此采用 Drucker-Prager 本构模型能得到较为准确的结果。隧道支护结构采用弹性模型，计算过程中通过提高采用物理参数来模拟支护结构和注浆区，隧道各地层参数如表 1 所示，隧道支护结构参数如表 2 所示。

表 1 隧道各地层参数表

岩土名称	天然密度/(kg/m ³)	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	弹性模量/MPa
杂填土	1 900	0.42	38	30	45
粗砾砂	1 950	0.36	36	36	80
煌斑岩	2 000	0.32	34	40	92
中风化花岗岩	2 400	0.27	30	210	650
微风化花岗岩	2 800	0.22	27	450	2000
注浆层	2 100	0.28	31	200	600

表 2 隧道支护结构参数表

项目名称	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
250 mm 厚喷射混凝土	23 000	0.20	2 500
格栅拱架	8 000	0.25	2 200
砂浆锚杆	16 000	0.25	2 500
超前小导管	3000	0.30	1 500

4.3 结果分析

在建立模型的基础上，采用提高岩层强度的方式，将被加固的围岩弹性模量提高 3 倍，进行不同加固方案的数值计算，分析隧道施工对该建筑物的影响，评价注浆效果。

对注浆加固后隧道开挖的过程进行模拟，得到建筑物的应力、应变及沉降云图。在隧道开挖后，建筑物基础部分位于隧道正上方的最大主应力发生变化，左线隧道正上方最大主应力约为 $1.11\times10^2\text{ kN/m}^2$ ，右线隧道正上方的最大主应力约为 $-4.53\times10^2\text{ kN/m}^2$ 。在隧道开挖结束后趋于平衡稳定状态。在隧道开挖时，建筑物最大主应变出现在左线隧道正上方，最大主应变值约为 -1.41×10^{-6} ，并向周围呈减小趋势。在隧道开挖过程中，因开挖使隧道上方土层应力释放，稳定性下降，建筑物基础发生差异沉降。因隧道位于筏板基础的一侧，因此在基础正上方筏板基础发生沉降，另一侧上升。最大沉降量约为 $-2.12\times10^{-3}\text{ m}$ ，出现在右线隧道正上方；最大上升量约为 $6.78\times10^{-4}\text{ m}$ ，出现在远离隧道的一侧。由于隧道拱顶受到上方土体的天然应力和建筑物与基础的附加应力，在开挖后拱顶会有一定的下沉量，整个模拟开挖过程中，建筑物正下方拱顶沉降最大。

通过三维数值模拟可以看出，注浆加固可以将变形控制在有效范围内，其中建筑物最大沉降为 $-2.12\times10^{-3}\text{ m}$ ，小于青岛市地铁土建施工建筑物沉降量观测黄色报警值（30 mm），满足规范和设计

5 施工风险控制措施

鉴于下穿建筑物已经出现较大沉降，在后期施工中，若不采取有效措施，其沉降风险会更大。结

合三维数值计算结果,采取系列措施加强注浆堵水,能够控制地层沉降。同时,应对建筑物采取加固措施,防止出现更大风险。

5.1 隧道内地下水风险控制措施

(1) 深孔注浆

针对 2012 年 5 月 5 日 ZK7+747 出现涌水,采用深孔注浆进行止水,分 6 个循环进行止水。注浆材料为硫铝酸盐水泥。

(2) 径向注浆

ZK7+761~ZK7+791、YK7+761~YK7+781 采用径向注浆,注浆材料为硫铝酸盐水泥。

(3) 超前小导管注浆

超前小导管长度为 3.5 m,每 2 m 设作一循环,拱部 120° 范围设置,单排,每排 23 根,注 1:1 水泥浆,注浆压力 1~2 MPa。

(4) 初支背后注浆

纵向间距 3 m,环向 5 根,长度 0.45 m 以上,注 1:1 水泥浆,注浆压力 0.3~0.5 MPa,每环注浆量为 1.2 m³。及时进行初支背后注浆,确保初支与围岩密贴。

(5) 专业注浆堵水队伍注浆堵水

采用专业复合防水剂、聚氨酯、超细水泥等。

5.2 建筑物沉降风险控制措施

假日酒店为 2010 年竣工的建筑物,施工时基础地质条件差。按照建筑规范,仍处于沉降阶段。因此,采用袖阀管注浆方法对建筑物沉降进行处理。

(1) 设计参数

对假日酒店基础持力层进行补偿注浆,左线 20 m,右线 20 m,共计 40 m。设计钻孔 220 个,梅花形分布,开孔行间距 1 m,排间距 1 m,钻孔深度 8 m。钻孔 90 mm,袖阀管外径 56 mm,内径 40 mm。

(2) 施工工艺

采用后退式注浆,注浆长度 1 m,注浆压力为 1~3 MPa,考虑初支承压能力,控制范围为 1.5~2 MPa。

5.3 采取措施后效果

采取以上措施对隧道进行注浆堵漏,在后续隧道开挖过程中,隧道内渗漏水量明显减少,渗漏水点较少。

在假日酒店周边加密布设了沉降监测点。注浆加固后建筑物的累计沉降曲线如图 7 所示。由监测结果可以看出,在对地层采用新的注浆加固方案之后,从 7 月 1 日开始,建筑物沉降有回弹的趋势,沉降速度下降,达到了加固的目的。

6 结论

结合青岛地铁某区间隧道下穿假日酒店施工中出现的漏水和沉降过大的情况,在分析原因的基础上,进行了三维数值模拟计算分析,模拟计算结果较好地吻合了隧道施工所造成的建筑物变形规律,给出了建筑物变形的最大沉降区,根据计算结果制定注浆加固方案,并布设沉降监测点进行监测。从后期施工的监测数据中可以看出,建筑物沉降量减小,沉降速率下降,注浆加固方案取得了较好的效果。保证了地表建筑物的正常运营,取得了良好的社会效益和经济效益。



图7 注浆加固后建筑物的累计沉降曲线

针对本工程出现的一些问题提出以下建议:

① 隧道施工前,应对沿线隧道上方的地表建筑物及其基础类型、地下管线进行详细调查,并采取有效措施,将施工对其影响降至最低。根据调查结果,对可能引起纠纷的房屋进行必要的鉴定,为隧道顺利施工做好准备。

② 施工过程中,加强超前探测,若发现水量较大应及时超前止水,尽可能减少因失水引起的地面沉降。

参考文献

- [1] 张成平,张顶立,王梦恕.大断面隧道施工引起的上覆地铁隧道结构变形分析[J].岩土工程学报,2009,31(5): 805-810.
- [2] SHARMA J S, HEFNY A M, ZHAO J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. Tunneling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2001, 16(2): 93-98.
- [3] 张顶立,李鹏飞,侯艳娟,等.城市隧道开挖对地表建筑群的影响分析及其对策[J].岩土工程学报,2010,32(2): 296-302.
- [4] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil movements induced by tunneling and their effects on pipelines and structures [M]. New York: [s.n.], 1986: 151-179.
- [5] SHIN H S, KIM C Y, KIM K Y, et al. A new strategy for monitoring of adjacent structures to tunnel construction in urban area [J]. Tunneling and underground space technology, 2006, 21(3-4): 461-462.
- [6] 张惠平.城市地下工程建设中的环境工程地质问题:预防与控制[J].自然灾害学报,2005,14(4): 146-149.
- [7] 王梦恕.地下工程浅埋暗挖技术通论[M].合肥:安徽教育出版社,2005.
- [8] 崔玖江.隧道与地下工程修建技术[M].北京:科学出版社,2005.
- [9] 张民庆,彭峰.地下工程注浆技术[M].北京:地质出版社,2008.
- [10] 康寅,孙付峰,程都,等.注浆加固技术在隧道下穿建筑物过程中的应用[J].青岛理工大学学报,2013,34(2): 21-26.