

文章编号:1673-2049(2008)02-0001-06

城市地下工程建设的事故分析及控制对策

王梦恕,张成平

(北京交通大学 隧道及地下工程教育部工程研究中心,北京 100044)

摘要:基于中国城市地下工程发展迅速、事故频发的现状,结合具体工程事故案例,分析了城市地下工程建设中事故发生的主要原因,并提出了相应的控制对策,主要包括:构建城市地下工程建设安全风险管理体系,实施安全风险管管理;制定科学合理的地表及建(构)筑物的变形控制标准,使安全风险控制有据可依;采用信息化施工技术,并利用变位分配原理实施施工安全的分阶段控制。该控制措施在北京及其他城市地铁建设中得到了应用,并取得了理想的控制效果,对中国城市地下工程安全建设具有重要的参考价值。

关键词:城市地下工程;安全事故;控制对策;风险管理体系;控制标准

中图分类号:TU93 **文献标志码:**A

Analysis of Accident Induced by Urban Underground Project Construction and Its Control Measures

WANG Meng-shu, ZHANG Cheng-ping

(Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education,

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the situation that the urban underground projects were developing quickly and the safety accidents happen frequently at the same time, the main reasons for these accidents were analyzed and the relevant controlling measures were proposed according to the specific cases of the projects accidents. These measures mainly included: establishing the risk management system for the construction of urban underground projects and performing safety risk management; making scientific and reasonable standards for controlling deformations of the ground surface and structures so that the safety risk could be controlled clearly; adopting informational construction techniques and actualizing the stage control of the safety construction by using displacement distribution principle. The control measures mentioned above had been applied in Beijing subway projects and other urban underground projects, and ideal controlling effects had been achieved, which had very important reference value to the safety construction of urban underground projects in China.

Key words: urban underground project; safety accident; control measure; risk management system; control standard

收稿日期:2008-04-06

基金项目:北京市科技计划重点项目(D0604003040221)

作者简介:王梦恕(1938-),男,河南温县人,教授,博士研究生导师,中国工程院院士,E-mail:wms3273@263.net。

0 引言

《2020 年中国工程技术发展研究》报告中将中国的地下空间开发与利用列为极其重要的课题。在未来的 20~30 年中,中国将进入城市地下空间开发的高潮期,城市地下空间的安全建设已成为中国经济、社会和国家安全的重大需求。

城市地下工程具有现场环境条件复杂、施工难度大、技术要求高、工期长、对环境影响控制要求高等特点,是一项相当复杂的高风险性系统工程。城市地下工程所赋存的岩土介质环境复杂,设计施工理论尚不完备,建设过程中带有很强的不确定性,而且,随着地下空间开发进程的推进,新建工程往往要近邻地下或地上的基础设施及建(构)筑物施工,必然会对其造成一定的影响,若控制不力,这种影响将造成重大安全事故。由此可见,城市地下工程建设存在很大的风险,工程建设中一旦发生工程事故,将造成巨大经济损失并引起严重的社会影响。

由于中国城市地下空间开发历史较短,经验不足,在建设中存在一些不容忽视的问题和安全隐患,对潜在的技术风险缺乏必要的分析和论证,以及人们对客观规律的认识不足、管理不到位,北京、上海、南京以及其他城市在地下工程建设过程中都出现过不同程度的安全事故,其中部分事故造成了重大经济损失,严重威胁着城市的生产和生活,甚至造成了恶劣的社会影响,这已引起社会各界的广泛关注^[1-4]。这些工程事故在留给人们惨痛教训的同时,也为我们鸣响了城市地下工程安全建设的警钟。

在这种形势下,有必要对城市地下工程建设中出现的事故原因进行深入的分析,在明确事故原因的基础上,提出相应的控制对策,以有效降低安全事故的发生率。

1 典型事故案例

2003 年 7 月 1 日,上海地铁 4 号线浦西联络通道发生特大涌水事故。大量流砂涌入隧道,引起隧道部分结构损坏,周边地区地面沉降严重,导致黄浦江大堤沉降并断裂,周边建筑物倾斜、倒塌(图 1),对周围环境造成严重破坏。事故造成直接经济损失约 1.5 亿元人民币。

2004 年 9 月 25 日,广州地铁 2 号线延长段琶洲塔至琶洲区间工地基坑旁的地下自来水管被运泥重型工程车压破爆裂,大量自来水注入基坑并引发大面积塌方,塌方面积超过 400 m²,此事故导致琶



图 1 上海地铁 4 号线事故

Fig. 1 Accident of Shanghai Subway Line No. 4

洲村和教师新村数千居民的用水近 8 h 处于停水状态。

2006 年 1 月 3 日,北京东三环路京广桥东南角辅路污水管线发生漏水断裂事故,污水大量灌入地铁 10 号线正在施工的隧道区间内,导致京广桥附近三环路南向北方向部分主辅路坍塌,车辆被迫绕行,虽未有人伤亡,但造成了重大经济损失和恶劣的社会影响。

2007 年 2 月 5 日,江苏南京牌楼巷与汉中路交叉口北侧,南京地铁 2 号线施工造成天然气管道断裂爆炸,导致附近 5 000 多户居民停水、停电、停气,金鹏大厦被爆燃的火苗“袭击”,8 楼以下很多窗户和室外空调机被炸坏(图 2)。



图 2 南京地铁 2 号线事故

Fig. 2 Accident of Nanjing Subway Line No. 2

2007 年 3 月 28 日,位于北京市海淀区南路的地铁 10 号线工程苏州街车站东南出入口发生一起塌方事故,此事故导致地面发生塌陷(图 3),并造成 6 名工人死亡。

2007 年 11 月 29 日,北京西大望路地下通道施工发生塌方,导致西大望路由南向北方向主路 4 条车道全部塌陷,主辅路隔离带和部分辅路也发生塌陷,坍塌面积约 100 m²,此事故虽未造成人员伤亡,



图3 北京地铁10号线事故

Fig. 3 Accident of Beijing Subway Line No. 10

但导致该路段断路,交通严重拥堵。

以上几起事故仅仅是中国城市地下工程建设事故的缩影,实际发生事故的数量是惊人的,其中造成巨大经济损失、引起严重社会影响的例子不胜枚举,这使我们深刻认识到在城市地下工程建设中面临着巨大的挑战。

2 事故原因分析

城市地下工程建设中出现的安全事故,有内在因素也有外在因素^[5-7]。具体而言,造成安全事故的主要因素有以下几个方面。

2.1 工程地质及水文地质条件异常复杂

工程地质及水文地质条件是城市地下工程设计、施工最重要的基础资料,把握好工程地质及水文地质资料是减少安全事故的前提。但由于地下工程的隐蔽性,地质构造、土体结构、节理裂隙特征与组合规律、地下水、地下空洞及其他不良地质体等在开挖揭示之前,很难被精细地判明。此外,城市地下工程埋深一般较浅,而表土层大多具有低强度、高含水率、高压缩性等不良工程特性,甚至有的土层呈流塑状态,不能承受荷载。大量的试验统计结果表明,岩土体的水文地质参数也是十分离散和不确定的,具有很高的空间变异性,这些复杂因素的存在给城市地下工程建设带来了巨大的风险,也蕴含了导致安全事故的根本因素。

2.2 工程结构自身复杂

根据城市发展的需要,城市地下工程建设面临着开挖断面不断增大、结构形式日益复杂、结构埋深越来越浅的技术难题。地铁车站、地下商场、地下停车场和地下仓库等地下工程,其跨度尺寸均达到10 m甚至20 m以上,而且结构复杂,施工中力学转换频繁。随着地下工程埋深的减小,施工对地面的影响越来越大,在超浅埋条件下,开挖影响的控制

与开挖方式、施工工艺、支护方法等众多因素有关,是地下工程施工中极为复杂的问题。

2.3 设计理论不完善

由于地质条件异常复杂,地下结构形式多样,地下结构体与其赋存的地层之间的相互作用关系至今仍不明确,使得目前的城市地下工程的设计规范、设计准则和标准均存在一定程度的不足,导致工程设计中所采用的力学计算模型及分析判断方法与实际施工存在一定的差异,因此,在设计阶段就可能孕育导致工程事故的风险因素。

2.4 工程建设周边环境复杂

城市地下工程所处的地理位置决定了其建设过程中几乎不可能与周围环境完全隔离,往往是在管线密布、建筑物密集、大车流和大人流的环境下进行施工,在这种客观环境条件下,决定了城市地下工程施工的高风险性,一旦发生事故,后果将非常严重。

2.5 工程建设决策及管理难度大

城市地下工程与其他工程项目相比,会遇到很多决策、管理和组织问题。从工程立项规划开始,就会涉及到如何选择合适的工程建设地址和技术方案,如何减少工程施工对周围环境的影响,如何评估工程建设经济效益和社会效益等一系列问题,而每个问题的决策与执行都需要综合各种风险和效益后才能确定。

2.6 施工设备及操作技术水平参差不齐

城市地下工程建设队伍众多,施工设备及技术水平参差不齐。由于工程施工技术方案与工艺流程复杂,不同的施工方法又有不同的适用条件,因此,同一个工程项目,不同单位进行施工可能会达到完全不同的施工效果。施工设备差、操作技术水平低的队伍在施工中更容易发生意外安全事故。

通过以上分析可以看出,由于城市地下工程赋存于高风险的地质环境和城市环境中,其致险因子多而复杂,一旦工程建设中某个环节出了问题,就有可能引发各类事故。

3 事故控制对策

3.1 建立城市地下工程建设的安全风险管理体系

风险管理在大部分行业中已经被广泛接受并引起重视,但目前工程界,尚无具体章法可循。鉴于城市地下工程建设事故的频繁发生且损失惨重,因此风险管理体系的建立是非常迫切的。2004年12月1日,为加强建设工程项目的安全技术管理,防止建筑施工安全事故,保障人身和财产安全,中国建设

部印发了《危险性较大工程安全专项施工方案编制及专家论证审查办法》，这也标志着中国已经逐渐将安全风险管理的意识条例化和制度化。

相对于结构本身而言,城市地下工程建设中,周边环境的安全风险更高,更应引起充分重视。城市地下工程建设的环境安全风险管理体系,应包括以下内容:①岩土工程勘察和环境调查;②环境安全分级;③邻近建(构)筑物的现状评估;④环境影响预测和安全控制标准的制定;⑤环境安全的专项设计;⑥环境安全专项施工方案的编制;⑦风险管理专家决策系统。

在构建科学合理的安全风险体系的基础上,开展安全风险管理工作,最大程度地规避城市地下工程建设所导致的各类安全事故。目前,在北京、上海、广州等地城市地铁工程建设中,已经逐渐引入了风险管理的理念和模式^[8],并取得了良好的效果,但在此方面仍需进一步加强,并逐步扩大到城市地下工程建设的各个方面。

3.2 制定科学合理的安全控制标准

实施城市地下工程的风险控制,避免事故的发生,必须在建设阶段有可依据的安全控制标准。目前,中国对于地表沉降还没有统一的控制标准,但大都遵守一个不成文的规定,即在浅埋暗挖地铁施工过程中,地表沉降值控制在 30 mm 以内。实际上,这种标准从目前来看意义不大。图 4、图 5 分别为北京地铁 12 个浅埋暗挖区间、7 个浅埋暗挖车站地表沉降值的统计分析结果。

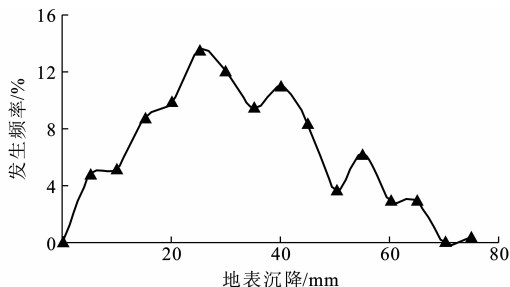


图 4 暗挖地铁区间地表沉降频率统计

Fig. 4 Frequency Statistics of Ground Settlement of Shallow Subway Construction

由图 4、图 5 可以看出:大多数暗挖区间隧道的地表沉降值在 20~60 mm 范围内;58% 以上的地表沉降值均超过了 30 mm 的现行控制标准值。样本均值为 34.3 mm;样本方差为 15.18 mm。大多数暗挖车站的地表沉降值的变动范围为 40~120 mm;地表沉降值小于 40 mm 和大于 120 mm 的地表发生频率均不超过 10%;96.7% 以上的地表沉降

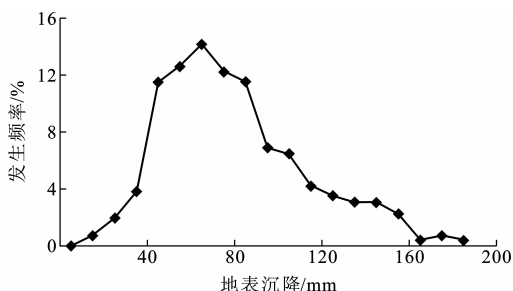


图 5 暗挖地铁车站地表沉降频率统计

Fig. 5 Frequency Statistics of Ground Settlement of Shallow Subway Station Construction

值均超过 30 mm 的现行控制标准。样本均值为 79.76 mm;样本方差为 33.34 mm。

就目前的施工建设情况来看,在所有暗挖车站地表沉降均超过现行控制标准值(30 mm)的情况下,无论是对工程结构自身,还是对周边环境的安全都没有造成明显的影响。由此可见,30 mm 的地表沉降控制标准不但不能为城市地下工程施工提供安全保障,相反,超过 30 mm 的地表沉降控制标准后,施工需要继续进行,而此时却处于无标准可依的状态,这对施工本身及周边环境的安全控制极为不利,因此建立更加合适的控制标准是非常必要的。

根据现有的统计资料分析可以确定:以样本均值为参考点,将 35、80 mm 分别作为一般情况下地铁暗挖区间和车站地表沉降的控制值,在一定程度上反映了目前中国各种工程条件和现有施工能力的平均水平,这较为经济合理,并且不会对施工和周边环境产生较大的影响。值得提出的是,地表沉降控制标准不能一概而论,对于特殊地质条件和特殊工程环境,地表沉降控制标准的制定,应根据地铁或其城市地下工程施工范围内的环境(建筑物、管线等)状态进行分析,并通过必要的仿真分析和理论计算进行综合确定,以防止地表塌陷和周边建(构)筑物破坏。

3.3 采用信息化施工及动态控制

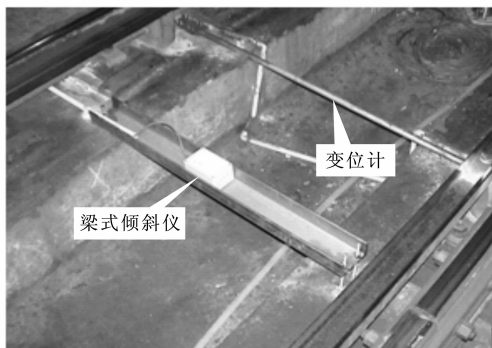
由于地下工程所赋存的介质存在很大的不确定性,是一个时间和空间不断变化的过程,因此,采用信息化施工是非常重要的。通过开挖所揭示的地质条件和现场监测数据,判断围岩、支护结构体系及周边环境的稳定性和安全状态,据此修正设计方案并指导施工。信息化施工的核心是信息的采集、整理和反馈。

为确保监测信息的质量、实效性和可靠性,对风险巨大的城市地下工程,应全面推进第三方监测工

作^[9],并采用先进的监测仪器,如光纤监测技术和远程自动化实时监测系统^[10]。图6为某暗挖地铁车站下穿运营地铁隧道施工中采用的远程自动化实时监测系统,包括监测隧道及轨道结构沉降的静力水准系统、监测轨道两轨水平距离的变位计和监测轨道两轨高差的梁式倾斜仪。



(a) 隧道变形缝处沉降监测



(b) 两轨距离及高差监测

图6 受下穿施工影响的某既有地铁结构变形监测仪器

Fig.6 Instruments for Monitoring Deformations of Existing Subway Structures Induced by Undercrossing Construction

考虑到地下工程特别是大断面城市地下工程分步施工的特点,施工前应采用数值模拟及工程类比等技术手段,对施工引起的地层及周边建(构)筑物的变形进行预测分析,并基于变形的总体控制标准值,给出各阶段施工所允许的阶段变形控制标准值,在施工过程中,依据分阶段控制标准和总体控制标准,对施工进行动态调整,通过变形的分阶段控制,使得施工安全始终处于受控状态,从而最终达到变形控制的总体目标,以确保施工本身及周边环境的安全^[11]。

上述控制措施在北京地铁施工风险极高的5号线崇文门站、4号线宣武门站和西四站、10号线黄庄站以及辽宁大连城市隧道工程、福建厦门机场路隧道工程等工程建设中得到了成功应用,确保了这些高风险城市地下工程建设中工程本体及周边环境的安全,成功避免了安全事故的发生。

4 结语

(1)城市地下工程涉及到众多的不确定性因素,在建设阶段存在着很大风险。各种错综复杂的因素导致的工程事故给国家和人民造成了巨大的经济损失,甚至因此付出了生命的代价,产生了严重的负面社会影响。因此,针对中国城市地下工程建设事故频发的现状,必须及时采取有效措施进行控制,使中国城市地下工程进入安全建设的轨道。

(2)建议国家有关部门尽快建立健全城市地下工程建设的安全风险管理制度,明确参建各方的法律责任,成立多家具有资质等级的专业评估咨询单位,并在工程项目投资预算中单列环境安全风险评估及相关费用,专门用于现状调查、现状评估、工后评估、影响预测、变形控制标准制定以及施工过程中安全风险的控制工作。

(3)在风险管理制度的约束下,充分发挥建设单位、设计单位、施工单位及其他参建单位通力合作的精神,在施工中采用合理的安全控制标准,遵循相应的规范和标准,并通过信息化施工实现安全的动态控制。在这些措施的保障下,相信一定会大大降低中国城市地下工程建设中安全事故的发生率,并从根本上提高中国城市地下工程建设安全风险控制的管理和技术水平。

参考文献:

References:

- [1] 莫若楫,黄南辉. 地铁工程施工事故与风险管理[J]. 都市轨道交通,2007,20(6):7-13.
MO Ruo-ji, HUANG Nan-hui. Construction Failures and Risk Management of Subway Projects[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2007, 20(6): 7-13.
- [2] 朱胜利,王文斌,刘维宁,等. 地铁工程施工的安全风险管理[J]. 都市轨道交通,2008,21(1):56-60.
ZHU Sheng-li, WANG Wen-bin, LIU Wei-ning, et al. Discussion on Risk Management of Subway Projects [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2008, 21(1): 56-60.
- [3] 金 锋. 风险管理在城市轨道交通建设中的应用[J]. 都市轨道交通,2005,18(1):1-4.
JIN Feng. An Application of Risk Management in Urban Rail Transit Construction[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2005, 18(1): 1-4.
- [4] 黄宏伟. 隧道及地下工程建设中的风险管理研究进展[J]. 地下空间与工程学报,2006,2(1):13-20.
HUANG Hong-wei. State-of-the-art of the Research on Risk Management in Construction of Tunnel and

- Underground Works[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 13-20.
- [5] 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, 2004.
- WANG Meng-shu. Theory and Technology of Shallow Tunnel Excavation[M]. Hefei: Anhui Education Press, 2004.
- [6] 彭泽瑞. 北京地铁复八线土建工程施工技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- PENG Ze-rui. Civil Engineering Construction Technology of Fuba Line in Beijing Subway[M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2003.
- [7] 张成平, 张顶立, 王梦恕. 浅埋暗挖隧道施工引起的地表塌陷分析及其控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 3601-3608.
- ZHANG Cheng-ping, ZHANG Ding-li, WANG Meng-shu. Analysis of Ground Subsidence Induced by Shallow-buried Tunnel Construction and Its Control Techniques[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 3601-3608.
- [8] 张成满, 罗富荣. 地铁工程建设中的环境安全风险技术管理体系[J]. 都市快轨交通, 2007, 20(2): 63-65.
- ZHANG Cheng-man, LUO Fu-rong. Technical Management System of Environmental Safety Risk for Metro Construction[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2007, 20(2): 63-65.
- [9] 张成平, 张顶立, 王占生, 等. 地铁工程建设第三方监测管理模式的探讨[J]. 岩土工程学报, 2005, 38(增): 54-60.
- ZHANG Cheng-ping, ZHANG Ding-li, WANG Zhan-sheng, et al. Discussion on the Management Way of Third Party Monitoring in Construction Process of Subway Project[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(S): 54-60.
- [10] 刘 军, 张飞进, 高文学, 等. 远程自动连续监测系统在复杂地铁工程中的应用[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3): 140-144.
- LIU Jun, ZHANG Fei-jin, GAO Wen-xue, et al. Application of Remote Automatic Continuous Monitoring System in Complex Metro Engineering [J]. China Railway Science, 2007, 28(3): 140-144.
- [11] 张顶立. 城市地铁施工的环境安全风险[J]. 土木工程学报, 2005, 38(增): 5-9.
- ZHANG Ding-li. Environmental Safety Risk Management of Urban Subway Construction[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(S): 5-9.

《建筑科学与工程学报》影响力大幅度提高

根据《中国学术期刊综合引证年度报告》(2007)统计,《建筑科学与工程学报》2006 年的影响因子已达到 1.139, 影响力大幅度提高。《中国学术期刊综合引证年度报告》是中国科学文献计量评价研究中心、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社根据《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)》2006 年 6 182 种统计刊源析出的 214 万条中国期刊引文数据及 CNKI“中国期刊网”中心网站 2006 年 1~12 月全文下载记录(1.5 亿篇次)的大样本数据进行统计分析的, 具有一定的权威性。此数据表明,《建筑科学与工程学报》在中国土木建筑领域的影响力已得到大幅提升。

《建筑科学与工程学报》自 2005 年改刊名以来, 加大了约稿力度, 汇集了众多建筑科学领域的名家、大家的稿件, 国家自然科学基金、“八六三”、“九七三”等国家级科研项目产生的学术论文占 70% 以上。《建筑科学与工程学报》荣获“2005、2006 年度陕西省科技期刊审读优秀奖”。2006 年 11 月, 在教育部科学技术司组织开展的“首届中国高校精品·优秀·特色科技期刊奖评比活动”中,《建筑科学与工程学报》荣获首届中国高校特色科技期刊奖。《建筑科学与工程学报》正在不断进步, 不断完善, 已成长为建筑领域的权威性学术期刊。