

密集建筑群下大断面隧道施工反馈分析及安全性控制研究

杨平^{1,2}, 覃卫民³, 杨育⁴, 王涛⁵

(1. 中国地质大学 工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中基发展建设工程有限责任公司, 北京 100022; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 厦门路桥建设集团有限公司, 福建 厦门 361026; 5. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 厦门梧村隧道施工影响区域内建筑物密集, 具有超浅埋、大跨度、工艺复杂、工序繁多、地面建筑物保护要求高等高风险特征, 在隧道施工过程中研究并实施复杂地质情况和周边环境条件下隧道的动态反馈分析方法。现场监测内容有建筑物及地表沉降、建筑物裂缝、建筑物倾斜、隧道拱顶沉降、隧道围岩收敛、土体深部位移、土体分层沉降、爆破震动、地下水位等, 对重要建筑物还采用静力水准仪进行自动化监测。在对梧村隧道进行施工反馈分析过程中, 按照 ISO9001 质量认证体系要求建立一个完善、高效的运作体系, 根据城市隧道工程修建经验以及梧村隧道前期研究成果, 对隧道施工对周边环境以及隧道自身结构的影响进行监测, 除采取常规监测手段外, 以建筑物不均匀沉降自动化监测、监测信息管理和预测预报系统、局域网和广域网进行监测信息反馈、桌面报警系统和电子显示板等预警设施等先进技术来开展施工反馈分析工作, 使梧村隧道施工反馈分析工作具有鲜明的信息化特色。

关键词: 隧道工程; 密集建筑群; 现场监测; 信息反馈; 信息化施工

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)04 - 0795 - 09

STUDY OF FEEDBACK ANALYSIS AND SAFETY CONTROL OF LARGE-SECTION TUNNEL EXCAVATION UNDER INTENSIVE BUILDINGS

YANG Ping^{1,2}, QIN Weimin³, YANG Yu⁴, WANG Tao⁵

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. China Soilbase Engineering Co., Ltd., Beijing 100022, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 4. China Xiamen Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361026, China; 5. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: Wucun tunnel underpasses intensive buildings with high-risk characteristics such as ultra-shallow, large-span, complex construction process, high-protection demand on buildings in Xiamen City, and dynamic feedback analysis method is carried out during tunnel construction process in complex geological and environmental conditions. The monitoring measures for the safe construction of the tunnel mainly include building settlement, surface subsidence, building inclination, the tunnel vault subsidence, tunnel adjacent formation restraining, the soil body depth portion displacement, the soil body lamination subsidence, blasting vibration, subsoil water level and so on, especially static level sensor is applied to the important buildings for automatic monitoring. In accordance with ISO9001 quality certification system, a sound and efficient operation system is established in the feedback analysis process. Based on construction experience of city tunnel and the results of preliminary

收稿日期: 2009 - 10 - 19; 修回日期: 2009 - 12 - 30

基金项目: 长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室开放研究基金资助项目(G07 - 06)

作者简介: 杨平(1973 -), 男, 2005 年于南京大学地质工程专业获硕士学位, 现为博士研究生、高级工程师, 主要从事岩土隧洞及边坡工程方面的设计与研究工作。E-mail: yangping@solibase.com

researches in Wucun tunnel, monitoring is carried out on the surrounding environment as well as on tunnel structure itself. In addition to routine monitoring tools, advanced technology such as automatic monitoring on differential settlement of buildings, monitoring information management and prediction systems, monitoring information feedback by LAN and WAN, early-warning facilities by desktop alarm systems and electronic display boards, are applied to dynamic feedback analysis throughout tunnel construction; so that the feedback analysis work has distinctive informationizing characteristics in Wucun tunnel engineering.

Key words: tunnelling engineering; intensive buildings; field monitoring; information feedback; informationizing construction

1 引言

随着城市建设规模的扩大与日益减少的土地资源之间的矛盾越发突出、地下空间的开发利用问题越来越受到重视以及暗挖隧道等地下工程的出现,为缓解城市交通拥挤状况提供了新思路。城市暗挖隧道一般具有浅埋、大跨的工程特点,浅埋意味着薄覆盖层内填筑土和全、强风化软岩等特殊地层存在的几率较大,大跨度施工则体现了隧道掘进施工存在一定的技术难度。在确保隧道自身结构安全的前提下,如何将隧道施工对周围环境的影响降低到可接受程度,是城市暗挖隧道施工面临的挑战。

关于浅埋暗挖隧道对周围环境的影响研究,国内同行做了大量的工作:施成华等^[1~4]分析了浅埋隧道施工对地表及建筑物的影响;张顶立和黄俊^[5]对地铁隧道施工拱顶沉降问题做了分析,并提出了预测方法;李二兵等^[6]就九华山隧道工程施工对双连拱隧道结构及上方古城墙的影响进行了分析,认为结构变形的时间效应比空间效应明显;易小明等^[7]采用 W-W 破坏准则、屈服接近度模型和 Mazars 损伤模型,对地表建筑物变形开裂进行计算和评估。

暗挖隧道施工对周围环境的影响研究工作,离不开现场监测数据的支持。现场监测方法的合理选择和监测数据的及时反馈,在施工过程中起到重要的指导作用。易小明和张顶立^[8]对浅埋大跨隧道下穿建筑物时的变形控制标准进行了探讨。王浩等^[9, 10]研制了具有分析和预测功能的监测信息管理系统软件。结合厦门市梧村隧道下穿密集建筑群的工程特点,开展复杂地质情况和周边环境条件下隧道施工过程的动态反馈分析方法研究。

2 工程概况

厦门市成功大道梧村隧道为双向六车道隧道,其中暗挖段长 650 m,结构形式复杂,由双连拱隧

道、小净距隧道、初支连拱隧道和分离式隧道组成。该工程有三大难点:

(1) 隧道沿线地质条件复杂,洞身沿线围岩以松散松软残积亚黏土、砂砾状-碎块状全/强风化正长岩和花岗岩为主,地下水埋深为 2~4 m,地层经开挖暴露遇水很快转化为流砂,开挖难度极大。

(2) 隧道上方建筑物密集,隧道施工 50 m 影响范围内有 67 栋楼房,相当一部分建筑物在工程开工前经鉴定为一般损坏房,建筑物本身存在开裂现象,且地下管线纵横交错,工程风险极大。

(3) 暗挖隧道中连拱隧道的开挖跨度约为 34 m,埋深仅为 9~27 m,最大覆跨比为 0.7,即使不考虑上部建筑物其难度已经是国内外少有的。

这三大难点组合起来,形成了超浅埋、大跨度、工艺复杂、工序繁多、地面建筑物保护要求高,危险源高度集中的高风险工程,为国内外罕见。

梧村隧道沿线地质条件复杂(见图 1,图中 20[#]等为楼房编号),根据洞身围岩等级情况,确定在 II~IV 级围岩段采用浅孔弱爆破法开挖,以降低爆破施工对隧道上方建筑物的影响;V, VI 级围岩以人工辅助小型挖机开挖。在施工过程中,防止隧道坍塌、控制地表建筑物沉降和控制建筑物开裂是工程施工关键。V, VI 级围岩段主要采用 CRD 法施工(见图 2),采取了超前预注浆、超前预支护、加强初期支护等多种措施来控制隧道及地表及建筑物的变形。

基于梧村隧道工程的高风险特点,建设单位在工程前期组织国内有实力的科研院所开展了一些科研工作。汪海滨等^[4]采用数值模拟方法,根据现场监测数据进行反分析,对开挖沉降曲线的偏态性及其内在机制进行研究,认为地层性质及主控层跨落是偏态性内因,开挖空间及分块顺序是偏态性外因。侯艳娟和张顶立^[11]对隧道上方受影响建筑物进行统计和分类,采用模糊数学综合评判方法,通过选取不同权重,用模糊语言对建筑物的风险进行等级划分。张顶立等^[12]对隧道下穿试验房的安全性控制

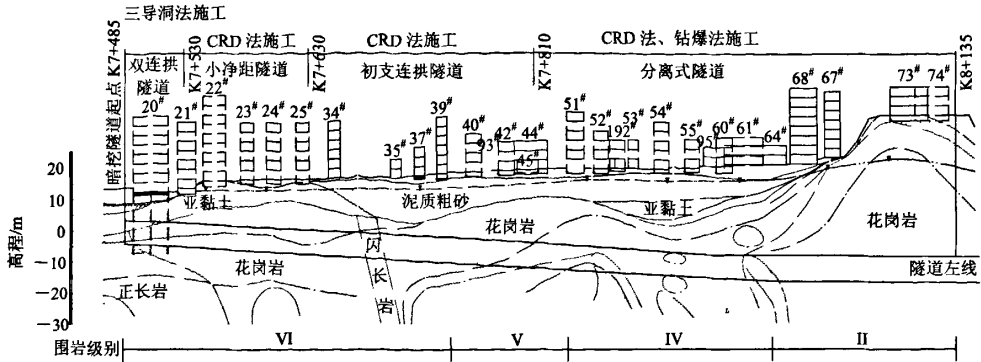


图 1 梧村隧道工程左线地质纵断面图

Fig.1 Geological profile of left lane in Wucun tunnel engineering

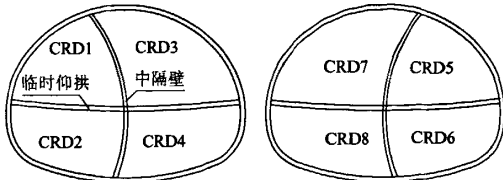


图 2 CRD 工法施工示意图

Fig.2 Scheme of construction sequence with CRD method

进行了分析,认为建筑物基础的差异沉降是裂缝产生和发展的主要原因,差异沉降控制在 20 mm 以内可保障建筑物的安全,地面注浆与洞内注浆相结合可实现对建筑物的可靠抬升,使隧道施工过程中对建筑物结构沉降的过程恢复成为可能。周正明^[13]用 FLAC^{3D} 软件模拟施工过程中的地层位移,结果表明,双连拱隧道上方试验房地表沉降最大值为-58 mm,初支连拱隧道上方 34#楼区域地表沉降最大值为-220 mm。施工单位采用 ANSYS 软件进行的数值模拟^[14]分析认为:相同条件下,小净距隧道初支结构结构受力不利位置较少,主要集中在临时中隔壁与初期支护连接处,拱顶、拱脚与仰拱处也较为不利;双连拱隧道施工过程中,扣拱与中导洞接触的部位、左右隧道临时中隔壁与初期支护接触的部位以及临时中隔壁的中下部受力较大。

3 研究方案

由于梧村隧道工程具有高风险性,且大部分建筑物位于军事管制区内,一旦发生事故较难协调处理。根据城市隧道工程经验以及梧村隧道前期相关研究成果,确定在现场监测中将常规监测与自动化

监测相结合,将隧道施工对周边环境以及隧道自身结构的影响进行监测,研究建筑物及地表的变形规律,评估建筑物的安全,同时采用先进的信息科学技术,研究并实施复杂地质情况和周边环境条件下隧道的动态反馈分析方法。

根据相关标准^[15]、规程^[16、17]和工程经验,现场监测采用整体控制和局部监测相结合、定期监测与连续监测、大地测量与传感器测量相结合的方法,分别开展地表及建筑物沉降、建筑物倾斜、隧道洞口基坑位移、拱顶沉降、围岩收敛、地下水水位、爆破振动等监测工作。对重点建筑物还增加了地层分层沉降、地中水平位移等监测项目(见图 3),以全面了解隧道掘进过程中地层的变化情况。考虑到烈日暴雨等恶劣天气对常规测量作业造成干扰,以及注浆等专项施工工序对建筑物的影响,对重点建筑物开展不均匀沉降自动化监测,以便及时了解建筑物的运行情况。在监测信息反馈方面,建立监测信息管理系统,制定监测项目安全控制标准(见表 1),并取控制标准值的 60%, 80%, 100%分别划分为预警值、报警值和极限值;工程参建各方通过网络能够便捷查阅到工程相关监测信息,及时了解施工当前状况,相应作出工程决策,从而真正达到信息化施工的目的。

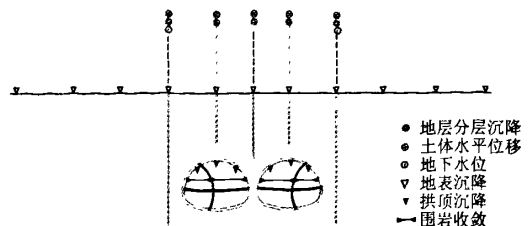


图 3 监测主断面测点布置示意图

Fig.3 Scheme of measuring points embedded at the main section

表 1 主要监测项目安全控制标准值表

Table 1 Safety control standard of main monitoring items

编号	监测项目	控制标准值
1	建筑物沉降	30 mm 或 5 mm/d
2	建筑物不均匀沉降	2‰
3	建筑物倾斜	4‰
4	地表沉降	45 mm 或 5 mm/d
5	隧道拱顶沉降	80 mm 或 10 mm/d
6	隧道围岩收敛	30 mm
7	建筑物爆破震动	砌体结构 0.5 cm/s, 钢筋混凝土结构 2 cm/s

4 现场监测分析

4.1 沉降监测

按照二等水准测量要求，采用高精度水准仪分别对建筑物、管线和地表沉降进行监测。隧道上方沉降横向分布如图 4 所示。

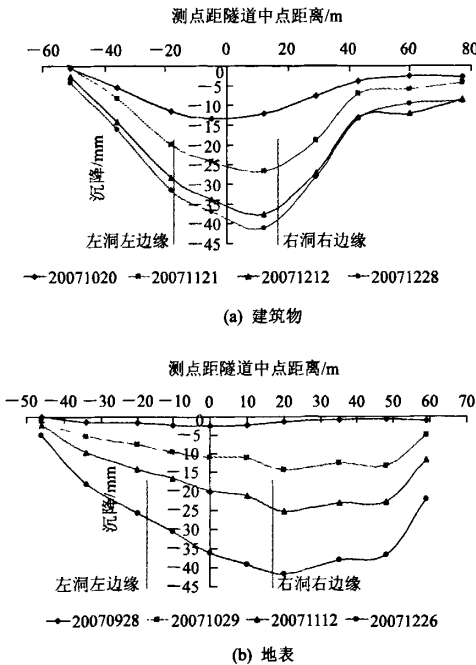


图 4 隧道上方沉降横向分布

Fig.4 Horizontal distribution of settlements in upside of tunnel

从图 4(a)中可以看出：在隧道下穿建筑物初期，左洞区域的沉降大于右洞区域的沉降；随着右洞接近并通过建筑物，右洞区域的沉降最终大于左洞区域的沉降。受到地下水流失和地层应力释放的影响，上方建筑物不可避免出现沉降，由于右洞开挖

滞后于左洞开挖，右洞区域沉降的时空效应较为明显，沉降值相对大一些。

4.2 倾斜监测

对于整体刚性较好的建筑物，可以通过基础的相对沉降值计算出倾斜值，对于不适合上述方法的，采用高精度全站仪根据投点法或坐标法，通过周期观测计算建筑物倾斜值。34#楼倾斜监测成果见图 5。

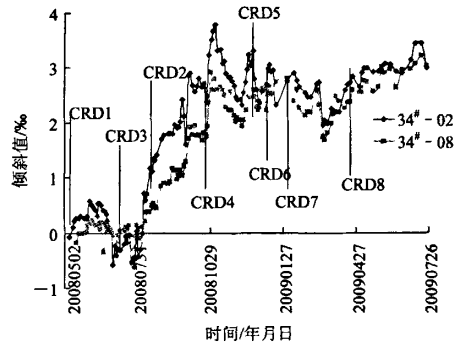


图 5 34#楼倾斜监测成果

Fig.5 Inclination monitoring results of building #34

从图 5 中可以看出：在 CRD1, CRD3 部通过后，随着 CRD2 部的临近及通过，建筑物的倾斜呈不断增大的趋势。2008 年 9 月 25 日 34#-02 测点的倾斜值为 2.42‰，超过 2.4‰的预警值，经过地面注浆抬升调节，测点的倾斜得到一定程度的回调；随着 CRD4 部的通过，测点的倾斜值再一次呈不断增大的趋势，2008 年 11 月 3 日倾斜值为 3.79‰，超过 3.2‰的报警值，接近 4‰的极限值；经过地面注浆抬升调节，测点的倾斜值在 12 月 6 日一度回落至 2.32‰；随着 CRD5 部的临近，测点的倾斜值再一次呈不断增大的趋势；通过对建筑物倾斜进行跟踪监测，在 CRD 各部分别下穿建筑物时，采取补偿注浆措施对建筑物的倾斜状态进行调解，使之在控制标准值以内，最终解除报警状态。由图 5 可见，采用地面注浆抬升措施可对建筑物实现可靠的纠偏，建筑物结构的倾斜在隧道施工过程中过程中可以实现有利的调节。

4.3 围岩位移监测

在 V, VI 级围岩区域，每 5~10 m 设置一个监测断面，分别进行拱顶沉降和围岩收敛监测。

图 6 为隧道左洞 CRD1 部管棚区域拱顶沉降监测成果图。管棚工作室的里程为 K7+630~K7+640，在隧道截面正常尺寸外扩 80 cm 而成，管棚加固范

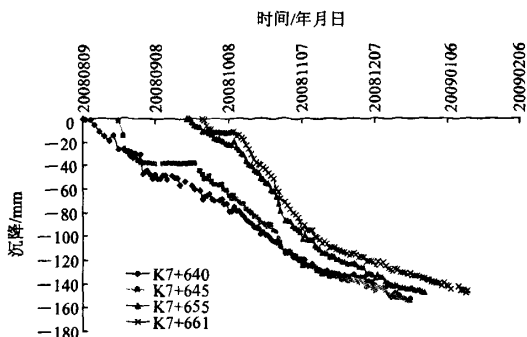


图 6 管棚区域 CRD1 部测点沉降 - 时间曲线

Fig.6 Vault settlement-time curves in pipe roof area(CRD1)

围为 K7+640~K7+670 里程。在隧道开挖过程中, 管棚工作室及管棚两端的拱顶沉降值较大, K7+640, K7+645, K7+655, K7+661 里程的拱顶沉降值都超过 -140 mm, 最大值为 -155 mm, 出现在 K7+645 里程(见图 6)。分析认为原因在于: (1) 地质条件复杂, 隧道洞身围岩为结构松散的砂砾状强风化花岗岩, 洞顶以上 10 m 范围主要由泥质粗砂、残积亚黏土和全风化花岗岩组成, 其中残积亚黏土和全风化花岗岩中的细粒土呈流塑状, 土体易出现流土变形。(2) 隧道上方楼房荷载较大, 管棚上方建筑物为 34#楼, 为一栋 6 层+地下室的楼房, 为隧道上方建筑物中楼层最高者。(3) 管棚自重影响, 管棚具有一定自重, 其两端可能受无牢靠搭出现一定下沉, 从而带动管棚整体下沉。

在吸取左洞施工经验基础上, 该区域进行右洞施工时, 对初期支护封闭成环的各工序衔接提出了严格要求, 并在管棚区域的注浆进行加强, CRD5 部在管棚区域的拱顶沉降值为 -85~-115 mm, 对拱顶沉降的控制取得了一定的效果。

4.4 爆破振动监测

由于隧道上方建筑物大部分结构较差, 抗震性能弱, 在 II~IV 级围岩段采用浅孔弱爆破法开挖, 以降低爆破施工对建筑物的影响。为此在 64#~74#楼区域进行了爆破振动监测, 根据爆破振动监测成果来调整施工参数。

从爆破振动监测成果来看, 该区域的最大振动速度出现在 67#楼, 2007 年 3 月 23 日的测值为 4.56 cm/s(见图 7), 是由隧道左线开挖引起的; 在隧道右线开挖过程中, 66#楼受到影响最大, 2007 年 6 月 28 日的最大测值为 3.43 cm/s。该区域的爆破振动测试数据中, 同一测点几乎都具有垂直向振速大于水

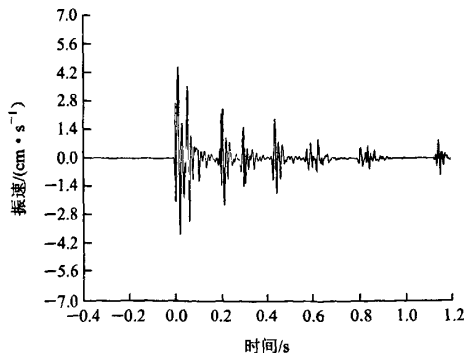


图 7 垂直向爆破振动波形图(67#楼)

Fig.7 Vertical waveform curve of blasting vibration(building #67)

平向振速的特点, 当次爆破振动测试超过 1 cm/s 的最大测值几乎都由掌子面掏槽眼爆破施工引起。位于小山坡上 72#楼等建筑物的 6#, 7#测点的振动速度都在 1 cm/s 以内, 这与隧道埋深较大(超过 45 m)有一定关系。

针对出现超过 2 cm/s 的极限值的爆破振动测值, 要求施工方修改爆破设计参数, 对爆破设计网络进行优化, 并要求在围岩条件变化区域进行爆破试验。由于该区域爆破开挖施工控制得当, 极少连续出现爆破振动测值超过 2 cm/s 的情况, 该区域建筑物在隧道下穿过程中没有发现新裂缝。

4.5 不均匀沉降自动化监测

对安全风险较大的建筑物需要重点对待, 同时考虑到烈日暴雨等恶劣天气对常规测量作业造成干扰, 在隧道下穿重点建筑物过程中采用精度高、可以进行连续测量的静力水准仪进行建筑物不均匀沉降监测, 对应关键的工序按照 10 min/次的频率进行采集, 以便及时掌握被监控建筑物的不均匀沉降状态, 动态掌握建筑物的运行情况。

现场数据采集传输是利用 GPRS 无线公用网络进行, 传感器通过 GPRS 接入 INTERNET 网, 主机只要接入 INTERNET 网就可进行数据自动采集和监控(见图 8)。

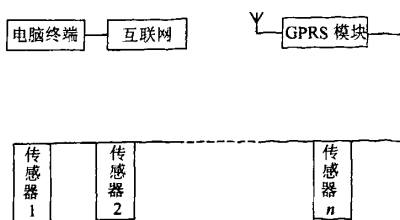


图 8 自动化监测网络示意图

Fig.8 Automatic monitoring network diagram

自动化监测软件系统具有远程控制、在线监测、数据分析等功能(见图 9),可以实现“无人值班,少人值守”方便监测人员在远离现场时能实现远程实时控制,以便及时处理突发性事件。

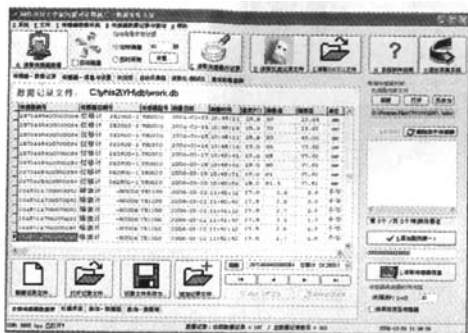


图 9 自动化采集系统软件

Fig.9 Automatic monitoring data acquisition system

4.6 不均匀沉降监测值过大的分析

在隧道施工期间,不时出现监测物理量超过控制标准的情况,主要集中在建筑物不均匀沉降、地表沉降、拱顶沉降和围岩收敛等监测项目中。

建筑物不均匀沉降和建筑物倾斜超过报警值甚至极限值主要受不当施工措施的影响。隧道施工 CRD 法相继穿越使得建筑物沉降出现显著的时间效应,而造成建筑物不均匀沉降累计值超过极限值,而在地表采用注浆措施对建筑物进行控沉和纠偏的过程中,注浆压力的控制不当出现较大的上抬(沉降)速率从而加剧建筑物的倾斜状态,同时注浆范围不够广泛没能达到整体纠偏的效果。

隧道沿线地表沉降和拱顶沉降多次出现超过极限值的情况主要受隧道工程特征和不良地质条件影响。连拱隧道段的浅埋、大垮及大覆跨比特征决定了该隧道工程在沉降控制中存在很大的难度。隧道洞身沿线围岩以全/强风化正长岩和花岗岩为主,地下水埋深为 2~4 m,地层经开挖暴露遇水很快转化为流砂;而隧道上方地层存在较厚的泥质粗砂层,其失水引起的固结沉降问题较为突出。

在隧道围岩收敛监测中,也多次出现监测值超过极限值的情况,这主要与开挖和注浆等现场施工措施有关:CRD 各部相继开挖通过带来的时间效应使累计值超过极限值;而掌子面注浆则影响先行的 CRD 各部出现过大的收敛速率。

隧道内施工还存在局部施工管理不到位的现象,少数现场作业人员有时不按技术要求进行施工,以致出现过大的监测值。如在爆破开挖中,曾经没

有按照设计要求设置雷管段数而导致出现爆破地震波峰值叠加的现象,从而超过控制标准值。

5 监测信息反馈

5.1 监测管理信息系统

由于梧村隧道监测项目多,周期长,为加快监测信息反馈速度,有必要将全部监测资料录入数据库进行统一管理(见图 10),并建立起具有分析和预测功能的监测信息管理系统,工程参建单位通过网络可以实时浏览监测信息,从而提高工程安全监测的信息化技术水平。



图 10 监测信息管理系统

Fig.10 Monitoring information management system

5.2 报警及监测工作三级管理措施与成果提交

为加强施工管理,按照 ISO9001 质量认证体系要求,梧村隧道工程制订了监测工作三级管理制度和预警方案,取监测值达到控制标准值的 60%, 80%, 100%把监测状态分别划分为 I 级预警状态、II 级报警状态和 III 级极限状态(见图 11)。在各监测项目中采用双控指标衡量其监测状态,即把监测值累计值和监测值变化速率作为报警指标,只要其中

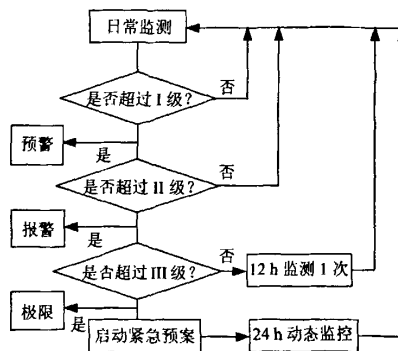


图 11 监测反馈程序框图

Fig.11 Diagram of monitoring feedback process

之一超过报警值就发布安全监测报警信息。

当监测物理量达到报警值得到确认无误后,立即通过电话或短信的方式通报工程参建各方,同时通过桌面报警系统和预警电子显示板(LED)发布报警信息(见图12,13)。

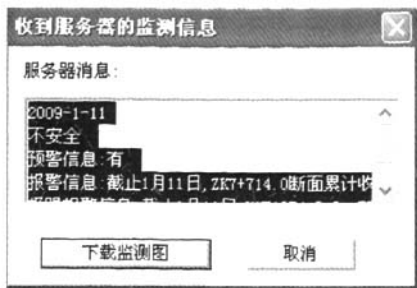


图12 桌面报警信息

Fig.12 Alarm information on desktop



图13 监测信息显示板

Fig.13 Display board for monitoring information

所提交的监测成果具有形象、直观的特点,能反映监测物理量与施工措施和进度的关系。常规监测成果有周报、月报、警报等,在隧道下穿重点建筑物和实施施工关键工序期间提交监测日报,针对某一区域或施工工序还提交监测专题报告。

6 安全性控制措施

6.1 控制沉降的技术措施

在施工中根据需要采用地质雷达对隧道掌子面进行近距离地质预报和超前地质钻探,一是探测前方地质和地下水情况,二是了解注浆效果。

(1) 隧道下穿建筑物前的沉降控制

在隧道下穿重点建筑物之前,采取全断面帷幕注浆加固隧道围岩,增强围岩的力学性能。在建筑物周边地表采取帷幕注浆止水,以减小开挖对地下

水渗漏造成的地层固结影响。

(2) 隧道开挖技术措施

隧道开挖以微台阶、短进尺、及时初喷封闭围岩为原则,在开挖完毕后快速进行初期支护并封闭成环。要保证钢拱架拱脚下土体密实,要及时抽排渗水,以避免拱脚遭受水泡出现软化。对钢拱架设置锁脚锚杆(管)。

(3) 注浆控制沉降措施

在隧道初期支护完成后及时进行初期支护背后回填注浆,防止围岩松动圈进一步扩大引起地层进一步沉降,回填注浆最多滞后掌子面3 m,浆液采用水泥单浆液,注浆压力控制在0.5 MPa以内。

在围岩裂隙水发育地段进行堵水注浆,以减小隧道长期漏水引起上方杂填土层、注浆范围为隧道开挖轮廓线外4.5 m。

在地表重要建筑物周围开阔处布置注浆孔(见图14),通过基底注浆可以提高建筑物地基承载力,并在隧道下穿建筑物期间根据监测资料进行动态跟踪注浆,通过对建筑物的补偿注浆来抵消建筑物的沉降,使其最终沉降和不均匀沉降处于受控范围内。

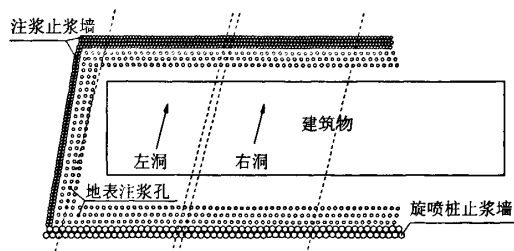


图14 地表注浆控制建筑物沉降

Fig.14 Building settlement controlled by surface grouting

在地表建筑物周边不具备施工注浆孔条件的区域,可采用从洞内施工R51自进式锚杆向上注浆的方式对建筑物进行补偿注浆。

(4) 基底小导管加固措施

若临时仰拱承载力不足,在仰拱施做时,按设计预留 $\phi 42$ mm注浆小导管,在仰拱强度达到设计强度后及时进行地基加固注浆。

(5) 临时支护拆除措施

根据沉降控制要求拆除临时支护,可选择在二次衬砌仰拱施做时将临时支护拆除,保证二次衬砌能及时跟进。

6.2 应急抢险措施

除了依靠现场监测手段和监测工作机制为工程

保驾护航外,工程参建各方还制定了突发事件情况下的紧急预案。

当发生掌子面坍塌、涌水时,采用沙袋封闭掌子面,以防止出现进一步坍塌情况,然后对掌子面进行全断面注浆加固,根据前方探明的围岩情况采取相应的开挖方法。

隧道拱部发生塌方时,用方木搭设井字架,然后对塌方口回填沙袋、方木等,喷浆封闭后立即进行回填注浆,回填注浆浆液采用添加了膨胀剂的水泥-水玻璃双浆液。

隧道边墙发生塌方时,首先进行喷浆封闭,并及时立拱支护。

当隧道内发生较大坍塌,经分析有可能会危及地表建筑物和人身安全时,应根据建筑物和管线调查结果,对塌方地段上方地表进行警戒,根据需要及时对相关人员进行疏散,并及时和管线所属单位联系进行抢修。

7 工程实例

2007年12月7日21:00隧道右线K7+883里程附近掌子面出现塌方事件,坍塌方量约 20 m^3 (见图15)。从地质情况分析,该区域围岩为IV级强风化花岗岩,遇水后强度大大降低,极易崩解为泥沙状,从而出现小范围的坍塌,当初期支护措施不到位时,坍塌范围会进一步扩大。



图15 隧道右线掌子面出现塌方

Fig.15 Collapsing appearing in right line of tunnel

掌子面出现坍塌后,施工方立即用方木搭设井字架,然后对塌方口回填沙袋,防止坍塌土体继续流出来;同时用推土机推土反压掌子面坡脚。在堵塞完成后,及时对塌腔进行回填注浆。

由于坍塌方量约有 20 m^3 ,分析认为有可能会影响到隧道上方房屋及管线的安全,工程指挥部立刻通知事发区域的管理部门并进行警戒,对相关房屋内的人员进行疏散。第三方监测单位对隧道围岩及上方地表及房屋进行变形跟踪监测,同时在工程指挥部办公区开启电子显示板突出事发现场的紧急状态,每12h提交监测简报。从监测资料看,2007年12月8日地表沉降测点沉降速率较前几日有所增大,清晨6:30监测到的最大值出现在K7+885-9测点,7h内的沉降速率约为 -6.7 mm/d ,附近房屋沉降测点的沉降速率最大值约为 -1.9 mm/d ;下午塌方掌子面上方房屋的沉降速率有所减缓,最大值为 -0.80 mm/d ,少数测点出现上抬现象,最大值为 4.53 mm/d ,地表沉降速率有所减缓,最大值为 -1.10 mm/d ,少数测点出现上抬现象,最大值为 4.27 mm/d ,这表明隧道内注浆充填塌腔取得明显效果。房屋裂缝测点测值变化非常小,隧道内收敛测点监测值几乎没有变化,附近地下水位变化很小。2007年12月9日,地表及房屋测点的沉降速率都在 -0.9 mm/d 以内,测点趋于稳定状态,表明隧道出现坍塌后工程参建各方采取的应急抢险措施是有效的,施工风险得到控制。一周后,由隧道塌方引发的工程紧急状态得以解除。

8 结论

在当前城市隧道施工反馈分析工作中,梧村隧道工程前所未有的集成了众多先进技术并应用于现场施工中去,并按照ISO9001质量认证体系要求,建立了一个完善、高效的运作体系,具有鲜明的信息化施工特色。

(1) 采用常规监测与自动化监测相结合的手段,现场监测隧道施工对周边环境以及隧道自身结构的影响。

(2) 建立了监测信息管理和预测预报系统,工程参建各方通过局域网和广域网可以实现监测信息共享,及时了解隧道施工安全状况。

(3) 制订了监测工作三级管理制度和预警方案,通过桌面报警系统和电子显示板等设施进行施工预警,从而有效指导隧道施工。

致谢 感谢厦门市成功大道JC2, JC3标段中国科学院武汉岩土力学研究所第三方监测项目部在资料提供上给予的支持!

参考文献(References):

- [1] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 浅埋隧道开挖对地表建筑物的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 310 - 3 316.(SHI Chenghua, PENG Limin, LIU Baochen. Influence of shallow tunnel excavation on ground surface building[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3 310 - 3 316.(in Chinese))
- [2] 李进军, 王显春, 庄纪栋, 等. 浅埋暗挖隧道穿越楼房基础的三维数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 81 - 85.(LI Jinjun, WANG Xianchun, ZHUANG Jidong, et al. 3D numerical simulating study of excavation of shallow burying tunnel through the building foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(1): 81 - 85.(in Chinese))
- [3] 杨海芹, 李俊才, 陈志宁, 等. 浅埋暗挖隧道施工中纵向地表下沉的规律[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2008, 30(3): 98 - 111.(YANG Haiqin, LI Juncai, CHEN Zhining, et al. Investigation on longitudinal ground subsidence caused by shallow tunnel excavation[J]. Journal of Nanjing University of Technology(Natural Science), 2008, 30(3): 98 - 111.(in Chinese))
- [4] 汪海滨, 李小春, 高波, 等. 城市浅埋大跨连拱隧道非对称开挖地表沉降偏差性研究及其对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 3 203 - 3 209.(WANG Haibin, LI Xiaochun, GAO Bo, et al. Skewness distribution and countermeasure of ground settlement due to asymmetrical excavation in urban shallow large-span double-arch tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Supp.1): 3 203 - 3 209.(in Chinese))
- [5] 张顶立, 黄俊. 地铁隧道施工拱顶下沉值的分析与预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(10): 1 703 - 1 707.(ZHANG Dingli, HUANG Jun. Analysis and prediction of vault crown settlement in metro tunneling at shallow depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1 703 - 1 707.(in Chinese))
- [6] 李二兵, 王镛, 王源, 等. 城市复杂条件下浅埋大跨双连拱隧道施工变形监测与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 833 - 839.(LI Erbing, WANG Di, WANG Yuan, et al. Monitoring and control of construction deformation of urban shallow-buried large-span double-arch tunnel under complex condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 833 - 839.(in Chinese))
- [7] 易小明, 张顶立, 李鹏飞. 隧道下穿时地表建筑物变形开裂的定量评估[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2 288 - 2 294.(YI Xiaoming, ZHANG Dingli, LI Pengfei. Quantitative evaluation of house deformation and cracks caused by tunnel-crossing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 288 - 2 294.(in Chinese))
- [8] 易小明, 张顶立. 浅埋大跨隧道下穿建筑物时的变形控制标准[J]. 都市轨道交通, 2008, 21(6): 46 - 50.(YI Xiaoming, ZHANG Dingli. Study of deformation control criteria for a shallow large-span tunnel under-passing building blocks[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2008, 21(6): 46 - 50.(in Chinese))
- [9] 王浩, 葛修润, 邓建辉. 隧道施工期监测信息管理系统研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增): 1 684 - 1 686.(WANG Hao, GE Xiurun, DENG Jianhui. Study of management system of monitoring data in tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(Supp.): 1 684 - 1 686.(in Chinese))
- [10] 王浩, 吴振君, 汤华, 等. 地下厂房监测信息管理、预测系统的设计与应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 163 - 167.(WANG Hao, WU Zhenjun, TANG Hua, et al. Development and application of monitoring information management and prediction software system for underground power building[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 163 - 167.(in Chinese))
- [11] 侯艳娟, 张顶立. 浅埋大跨隧道穿越复杂建筑物安全风险分析及评估[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 3 718 - 3 726.(HOU Yanjuan, ZHANG Dingli. Safety risk analysis and assessment of complex buildings in shallow-buried large-span tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 3 718 - 3 726.(in Chinese))
- [12] 张顶立, 李鹏飞, 侯艳娟, 等. 浅埋大断面软岩隧道施工影响下建筑物安全性控制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 95 - 103.(ZHANG Dingli, LI Pengfei, HOU Yanjuan, et al. Experimental study of safety control of buildings during construction of shallow-buried soft rock tunnel with large section[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(1): 95 - 103.(in Chinese))
- [13] 周正明. 厦门市机场路一期工程莲前一梧村山隧道段三维数值模拟研究报告[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2007.(ZHOU Zhengming. Three-dimensional numerical analysis of tunnel construction from Lianqian to Wucun-mount in Xiamen airport road project[R]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2007.(in Chinese))
- [14] 中铁隧道集团. 厦门机场路隧道施工过程模拟荷载结构模型分析报告[R]. 厦门: 中铁隧道集团, 2007.(China Railway Tunnel Group. Report of load structural model analysis of construction process in Xiamen Airport Road Project[R]. Xiamen: China Railway Tunnel Group, 2007.(in Chinese))
- [15] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ125 - 99 危险建筑物鉴定标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 10 - 12.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ125 - 99 Standard of dangerous building appraisal[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000: 10 - 12.(in Chinese))
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ/T8 - 97 建筑变形测量规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 3 - 7.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ/T8 - 97 Specifications for building deformation measurements[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998: 3 - 7.(in Chinese))
- [17] 中华人民共和国国家标准编写组. GB6722 - 2003 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004: 42 - 43.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB6722 - 2003. Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004: 42 - 43.(in Chinese))