

隧道掘进综合信息智能监控系统研究

高文学¹, 侯炳晖¹, 孙西蒙², 邓洪亮¹, 周世生², 陈宁宁¹

(1. 北京工业大学 建工学院, 北京 100124; 2. 北京市公路桥梁建设集团有限公司, 北京 1000682)

摘 要: 结合现代遥测技术, 把选测断面传感器 (频率类、电压电流类、开关量类、数字类等) 数据采集、三维激光扫描、地质超前预报、爆破振动监测以及可视化监控融合在一起, 实现隧道施工掌子面可视化实时显示与分析、隧道施工监测自动化数据采集与分析, 形成隧道施工多元信息监测系统 TIS(tunnel intelligentized monitoring system), 确保复杂围岩地质条件下隧道施工安全。该系统测试项目的全面性、实时性和预警性对隧道施工的动态设计、施工管理以及提高施工过程的安全度等具有重要的现实意义。

关 键 词: 隧道工程; 爆破开挖; 综合信息; 智能监测

中图分类号: U 45

文献标识码: A

Research on comprehensive information intelligent monitoring system for tunnel excavation

GAO Wen-xue¹, HOU Bing-hui¹, SUN Xi-meng², DENG Hong-liang¹, ZHOU Shi-sheng², CHEN Ning-ning¹

(1. College of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Roads and Bridges Construction Group Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: This paper introduces key technologies and methods of comprehensive information automatic collection, wireless transmission, forewarning system in tunnel construction. Combining with modern telemetry technology, the system integrates sensor data acquisition (frequency, voltage, current simultaneously, digital etc.) of selected measuring section, three-dimensional laser scanning, advance geological forecast, blasting vibration monitoring and visualization monitoring. It can realize tunnel construction face image real-time display and analysis, certain tunnel construction monitoring data automatic collection and analysis, form the tunnel construction comprehensive information monitoring system, ensure tunnel construction safety in complex geological conditions of surrounding rock. The comprehensive, real-time and warning characteristics of TIS have an important practical meaning for dynamic design, construction management and improving the construction safety degree.

Key words: tunnel engineering; blasting excavation; comprehensive information; intelligent monitoring

1 引 言

隧道智能化监控是目前隧道监控领域研究的前沿课题, 亦是 21 世纪隧道监控系统的重要发展方向。该系统将先进的计算机信息技术、电子控制技术、无线传感技术、无线通信技术以及网络技术等有效结合起来, 综合应用于隧道工程的监控量测。

对隧道等隐蔽工程进行动态监测, 是保证设计合理、施工安全的重要措施, 其目的在于收集施工期间的各种动态信息, 据此判定隧道围岩的稳定

性, 并进一步确定所设计支护结构的安全性和施工方法的合理性。隧道动态反馈设计与信息化施工较之传统新奥法的监控量测反馈修正设计, 信息更丰富、内容更广泛, 特别是融入了先进的量测技术, 使得量测更迅速、数据更准确、结果更全面。本文在分析目前国内外国外自动化监测系统的基础上, 比较详细地探讨了自主研发的隧道远程监测系统, 其目的是结合现代遥测技术, 把选测断面各类传感器数据采集、三维激光扫描、爆破振动监测以及可视化监控融合在一起, 实现隧道施工掌子面可视化实时显示与分析、隧道施工监测自动化数据采集与

分析, 确保复杂围岩地质条件下隧道爆破施工的安全。

2 隧道掘进自动化监测系统研究发展

国外从 20 世纪 60 年代开始研制自动化观测设备, 70 年代进入实用阶段。最早的自动化监测系统出现在大坝安全监测领域, 发达国家研发并实现自动化监测, 主要有两种类型: 一种是资料管理自动化, 另一种是数据采集自动化。较为成熟的技术如瑞士 Solexperts 公司开发研制的 GeoMonitor 岩土工程自动监测系统, 可以满足诸如隧道、桥梁、高边坡以及基础等各类工程自动监测的要求。从隧道自动监测内容方面, 主要分为变形监测、压力监测、影像信息收集、气体监测等。其他自动监测方面如瑞士 Amberg 公司开发的 Tunnelscan 隧道扫描技术, 其核心数据采集硬件是 Profiler5003 超高速相位式 3D 激光扫描仪, 在隧道进行数据采集时激光发生器发射的激光以螺旋线的形式对隧道表面进行全断面扫描, 通过分析发射和接收到激光信号, 可以获得隧道的内表面影像图像以及隧道表面各点隧道中线的距离^[1]。

国内在自动化监测系统研究方面最近几年发展迅速, 并在隧道、桥梁、边坡稳定监测等方面得到了广泛应用, 如中铁西南科学研究院针对青藏铁路建设和运营研发的工程与环境监测, 开发成功 EMM-TF80 自动化监测系统, 集成了 80 路隧道温度、应变自动测量; 北京市市政工程研究院研发的 TMIGS 系统, 采用无线技术把三维激光扫描、人机定位、各种传感器数据采集、通讯视频及安全管理集成在一起, 实现隧道施工掌子面图像实时采集、显示与编录分析、掌子面稳定性监测、掌子面人员与车辆定位管理, 实现选测断面各种传感器的无线数据采集与综合分析^[2]。

目前隧道施工监测技术, 一般能够实现常规项目的自动监测与预警(如拱顶下沉、洞周收敛、地表下降、围岩位移与应力等), 但如何将隧道常规监测、三维激光扫描、可视化监控、爆破振动监测与安全管理等有效融合在一起, 形成岩质隧道施工综合信息自动监控系统, 目前还属空白。

3 隧道掘进综合信息智能监控系统

隧道掘进综合信息智能监控系统(tunnel intelligentized monitoring system, 简称 TIS), 其目的是结合现代遥测(无线)技术, 把选测断面传感器(频率类、电压电流类、开关量类、数字类等)

数据采集、三维激光扫描、爆破振动监测以及可视化(视频)监控融合在一起, 实现隧道施工掌子面可视化实时显示与分析、隧道施工监测(控)自动化数据采集与分析, 形成隧道施工综合信息监测(控)系统, 确保复杂围岩地质条件下隧道施工安全; 通过收集地质条件以及施工相关信息, 并反馈设计、指导施工。

3.1 系统功能设计

TIS 隧道综合信息智能监控系统主要集成了四个主要部分: 视频监控、洞内净空监测、爆破震动速度监测以及应力应变检测, 其中, TIS-01 频率自动监测仪可同时检测任意个测点; TIS-02 爆破震动自动监测仪, 可用于洞内和洞外振动速度或加速度的测量, 每台根据监测要求可布置多个通道; TIS-03 视频采集自动监控仪, 用于采集掌子面施工情况的视频图像信号; TIS-04 三维断面自动监测仪, 用于监测隧道洞顶的沉降、洞周收敛以及隧道超欠挖分析等; TIS-05 无线高速中继站, 用于隧道内中继延伸的菊链型无线局域网(Wi-Fi)的组网和系统数据无线传输。

TIS 隧道综合信息智能监控系统主界面与结构如图 1、2 所示。



图 1 TIS 系统主界面

Fig.1 Main interface of TIS system

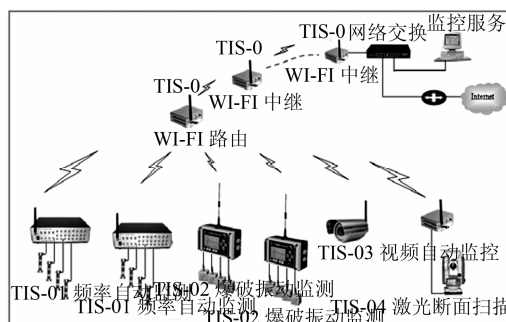


图 2 TIS 系统结构图

Fig.2 TIS system structure

TIS 系统通过在隧道内布置相应传感器和采集设备进行数据自动采集,并通过无线局域网络传输到洞外。考虑到隧道的纵深长度,常规的无线局域网络设备的传输距离一般不超过 300 m,系统设计采用了传输距离为 500 m 的特种无线路由/中继器作为网络节点设备,并按照在传输途径上以 400~500 m 距离设置一台无线路由/中继器的方式实现传输距离的中继延伸,从而构成具有“菊链总线”特征的网络结构。

3.2 系统模块和主要功能

TIS 监控系统中,作为服务器端的上位计算机和作为客户端的带有无线网络通讯功能的数据采集装置(下位机)均分配了一个惟一固定的 IP 地址,从而形成 C/S 构架的无线网络拓扑结构,还可利用反分析的方法获取符合实际的围岩力学参数,并在此基础上进行力学分析计算。

(1) 应力、应变监测

TIS-01 频率自动监测仪是一种岩土原位监测仪器,用于自动采集信号,前端可接振弦式传感器,频率采集范围可从 500~3 500 Hz,精度 ± 0.1 Hz,分辨率为 ± 0.01 Hz,它适用各类振弦式传感器采集频率信号,如表面式应变计、混凝土应变计、钢筋应变计、内埋式裂缝计、表面裂缝计、土压力盒、锚索计等。利用这些传感器可诸如隧道、桥梁以及高边坡等工程的应力、应变、变形、渗流、渗压等进行监测和安全稳定分析,数据接口处设有防雷电保护模块,保证了非电源线引发的瞬间过流疏通,可用于环境恶劣条件的安全监测。该模块通讯接口采用通用传输协议标准,并对数据进行加密处理,防止数据被盗或者丢失。

(2) 爆破振动监测

TIS-02 爆破振动自动监测仪采用 ARM9 为核心板设计,仪器体积小、重量轻、可利用电脑远程控制。软件根据现场需要量身定做的数值分析和处理功能,可以根据观测结果进行数据的拟合分析和回归处理,建立计算机软件远程实时分析,现场将数只速度传感器连接到爆破振动自动监测仪进行数据采集和观测。配套软件能及时有效地对监测数据进行回归分析和处理,建立计算机软件远程实时分析和自动预报与预警系统。

(3) 视频监控

TIS-03 视频采集自动监控仪采用低照度感光器,具有更大的感光面积,在低照度下的成像效果远远高于普通高清红外摄像机,改善了低照度效果、提升画质、信噪比。视频采集仪分为日夜两用型,

白天彩色,晚上红外灯开启,配合超低照度感光器出色的画质,解决高清数字摄像机相对黑暗环境成像效果不清晰的现状。所有图像进行 24 h 的存储,存储周期可达 15 d 的现场摄录数据。

(4) 隧道断面检测

TIS-04 三维断面自动监测仪采用无合作目标激光测距技术和精密测角技术,对隧道施工全方位进行监控,将极坐标测量方法与计算机技术紧密结合,配合专业图形处理软件,可快速获得隧道封闭空间内部轮廓曲线,实时显示超欠挖值,同时可对隧道收敛、超欠挖等进行测量。能实现隧道断面的快速精确检测,施工监测,竣工验收,质量控制等工作。

(5) 数据传输

TIS-05 无线高速中继站支持 SSID 隐藏、无线 MAC 地址过滤、64/128/152 位 WEP 加密及 WPA-PSK/WPA2-PSK、WPA/WPA2 安全机制,保障无线网络不被侵犯或盗用。专用无线路由中继器支持 IP 与 MAC 地址绑定功能,可以将内网电脑的 IP 地址与 MAC 地址进行绑定,有效防止伪造数据包,从而有效遏制内网 ARP 攻击,保证内网数据安全。

(6) 系统软件功能

便携数据采集应用软件:中文操作界面,提供采集控制、前端调理系统控制、多通道波形实时显示、数据存储、数据回放、工程标定、时域统计分析、频域自功率谱分析、测试报告生成等功能。综合信息预警模块:综合信息预警是根据不同测点预设标准值或阈值来实现监测项目自动预警功能及综合分析后的分级警报控制。

4 工程应用研究

4.1 密兴路火郎峪隧道概况

密兴路改建工程火郎峪隧道,设计建筑净宽 10.5 m、限高 5.0 m,隧道全长 618 m,采用复合式衬砌结构。隧道进出口段,表层为 2~2.5 m 厚的粉质黏土,其下为强~中等风化片麻岩,节理裂隙发育。综合评定隧道进口段围岩级别为 V 级。隧道洞身段(K10+332~K10+727),隧道轴线基本沿山脊走向,洞身底板标高 242~245 m,地表露头节理裂隙较发育,地表有第四系粉质黏土覆盖。综合评定该段围岩级别为 IV 级。

火郎峪隧道进出口段埋深较浅,且存在偏压现象。为了确保施工安全,隧道进口段开挖时在其右侧采用反压回填方法进行处理;隧道拱部采用 $\phi 42$ mm $\times$ 4 m 超前小导管支护;初衬采用钢格栅,

纵向间距 50 cm, 两榀格栅间用钢筋焊接相连。隧道施工按照新奥法组织实施, 由于隧道埋深较浅且围岩风化严重, 采用上下台阶法进行施工。

4.2 隧道围岩应力和拱架应力监测

隧道开挖后围岩压力监控采用压力盒, 隧道爆破开挖后, 在未进行喷混支护前先用锚固剂将压力盒固定在裸露岩体上, 再进行喷混等初支, 要求压力盒能够与围岩及支护结构密切接触; 钢拱架应力, 采用弦式应变计监测, 安装时将应变计用铁丝等固定在钢格栅主筋上; 数据采集 TIS-01 频率自动监测仪。传感器布置如图 3 所示。

火郎峪隧道出口围岩压力监测结果如图 4 所示。由图中曲线可以看出, 围岩压力在隧道开挖后的前 7 d (前 14 次观测) 迅速增大, 两侧拱腰围岩压力逐渐趋于稳定; 在隧道下台阶开挖开始后, 围岩压力再一次迅速增大, 之后趋于稳定。

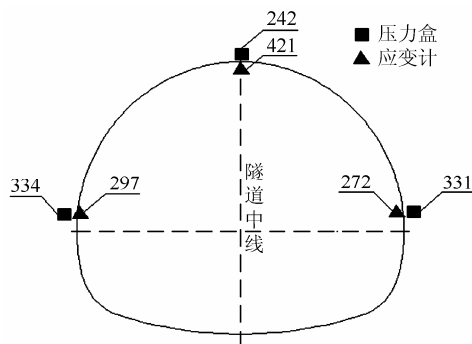


图 3 隧道出口监测传感器布置图

Fig.3 Monitoring sensor arrangement of tunnel exit

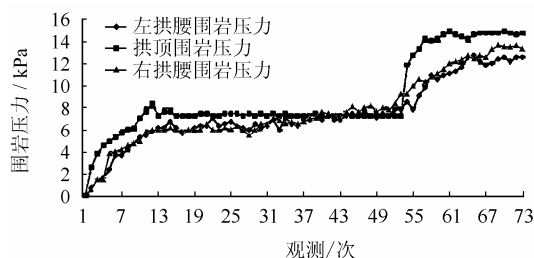


图 4 隧道出口围岩压力监测曲线

Fig.4 Surrounding rock pressure curves of tunnel exit

4.3 隧道断面变形监测

隧道变形监测包括洞顶沉降, 洞身收敛和底鼓等监测内容, 采用隧道激光断面扫描仪进全自动远程实时监测, 实时了解隧道断面变形规律、超挖和欠挖量, 同时自动生成隧道三维空间模型 (见图 5), 分析预测隧道的安全情况、指导工程施工。

4.4 爆破振动监测与分析

隧道掘进爆破振动监测主要集中在隧道进、出口浅埋段, 通过对隧道进、出口段地表、钢混套拱结构、仰拱开挖初衬结构振动速度进行监测, 分析

爆破地震波传播规律, 同时为及时调整隧道开挖施工方案、优化爆破设计参数提供依据。

根据隧道出口段的地形和结构特点, 测点布置在两段区域: 隧道出口开挖段, 重点监测掘进爆破对钢筋混凝土套拱结构的影响, 测点布置在套拱和掌子面上方地表; 距离出口一定距离后, 测点固定布置在重点观测的浅埋段地表, 典型测点布置如图 6 所示。

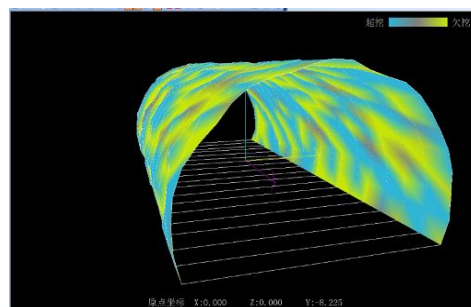


图 5 隧道扫描三维空间拟合图

Fig.5 Fitting map of tunnel 3D scanning

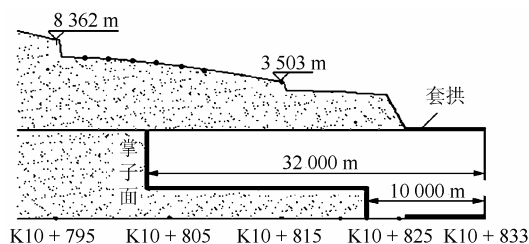
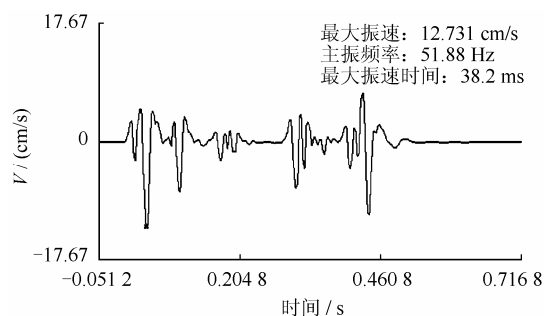


图 6 隧道出口段振速测点纵向布置图(各测点间距 3 m)

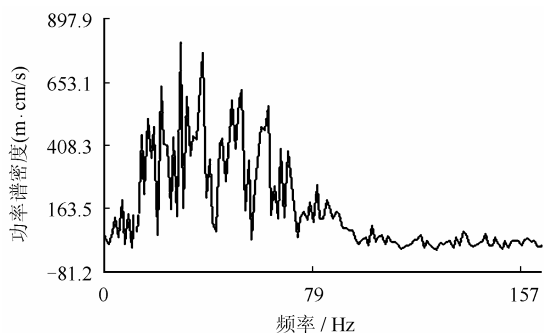
Fig.6 Vibrating velocity measuring point longitudinal arrangement of tunnel exit(each point 3m distance)

隧道出口浅埋段距离洞口一定距离, 各测点固定布置在重点观测的浅埋段地表, 根据掌子面与测点位置的变化, 监测、分析爆破地震波传播规律, 同时为及时调整隧道开挖施工方案、优化爆破设计参数提供依据。典型掌子面 (K10+798) 处 (距离隧道出口 32 m), 隧道埋深 8 m, 上台阶开挖循环进尺 2 m, 最大单响药量控制在 25 kg, 地表部分实测振速波形和频谱分布如图 7 所示, 地表垂直方向最大振速变化规律如图 8 所示。由图 8、9 可以看出, (1) 以掌子面正上方为中心, 沿隧道纵向地表 (自成形隧道区向未开挖区), 各测点振动速度总体呈逐渐降低趋势; (2) 隧道开挖改变了围岩的整体结构, 导致地表振动速度存在明显的区域性变化特点, 成形隧道区地表振速通常大于未开挖区, 即所谓的“空洞效应”, 特别是在掌子面两侧 (见图 5)。同时, 未开挖区越往里振动衰减越快, 测点 F 振速最小; (3) 在掏槽孔、辅助孔或周边孔爆破单响药

量大致相同的条件下,掏槽孔爆破引起的地表振动强度最大,见图 8。因此,掏槽孔爆破的振动控制是降低浅埋隧道开挖振动危害的关键;(4)监测结果表明,浅埋隧道钻爆施工,应重点控制爆破振动对已开挖区隧道上部围岩、初衬结构的影响,特别是当隧道穿越地表重要建筑物时,不能忽视已成形隧道对爆破地震效应的放大作用。



(a) 测点 C 振动波形、频谱图(掌子面后成洞区 0.5 m)



(b) 测点 D 振动波形、频谱图(掌子面前未开挖区 2.5 m)

图 7 地表典型测点垂直方向振速波形与频谱图

Fig.7 Vertical vibrating velocity waveform and spectrum diagram of typical surface measuring point

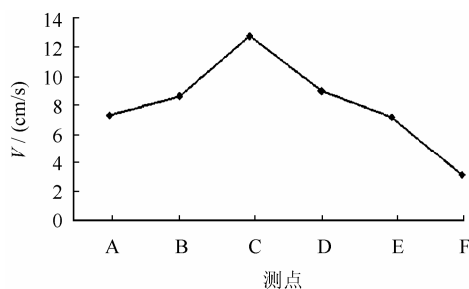


图 8 地表垂直方向最大振速变化规律(测点 C 位于掌子面后 0.5 m)

Fig.8 Change rule of highest surface vibrating velocity

由于监测内容较多,这里仅简要介绍 TIS 系统在密兴路火郎峪隧道应用的部分功能和效果。由此可知,该系统在保障隧道施工安全方面具有重要的现实意义。

5 结 语

通过隧道的监控量测,可以了解隧道围岩是否

稳定、施工方法是否合理、支护结构是否合适等。对隧道施工的全过程监控监测,可以掌握围岩及支护体的工作状态,完善隧道初期设计,指导工程施工,预见和及时发现工程中的事故及隐患,并提出相应的处理措施,防患于未然。

施工监控是“新奥法”施工的重要内容,是保障隧道施工安全、优化设计、指导施工的重要手段,隧道的监测和预警方案要根据隧道工程的特点进行设计,制定合理的方案是保证隧道施工安全的重要保障。TIS 系统实现了隧道开挖掌子面可视化实时显示,隧道开挖监测数据自动采集、无线传输与数据分析,形成了隧道施工综合信息自动、无线监测与预警系统,对确保复杂围岩地质条件和复杂环境条件下隧道施工的安全具有重要意义。

致谢:项目研究得到成都中科测控有限公司支持。

参 考 文 献

- [1] 梅志荣, 马士伟. 隧道工程监测技术与动态设计方法的新进展[C]//中国科协 2004 年学术年会铁道分会论文文集. 北京: [s.n.], 2004: 286—291.
- [2] 叶英, 穆千祥, 张成平. 隧道施工多元信息预警与安全管理系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 900—907.
YE Ying, MU Qian-xiang, ZHANG Cheng-ping. The tunnel construction of information security management and multiple early warning system research[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(5): 900—907.
- [3] 高文学, 孙文龙, 周文旭, 等. 浅埋偏压隧道开挖数值模拟与监测分析[J]. 施工技术, 2011, 40(3): 48—50.
GAO Wen-xue, SUN Wen-long, ZOU Wen-xu, et al. Shallow buried bias tunnel excavation numerical modeling and monitoring analysis[J]. **Construction Technology**, 2011, 40(3): 48—50.
- [4] 邓洪亮, 杨玉杰, 高文学, 等. 隧道施工监控与预警系统应用研究[J]. 施工技术, 2011, 40(3): 54—56.
DENG Hong-liang, YANG Yu-jie, GAO Wen-xue, et al. Tunnel construction monitoring and warning system applied research[J]. **Construction Technology**, 2011, 40(3): 54—56.
- [5] GAO Wen-xue, SUN Wen-long, DENG Hong-liang. Study on blasting vibration effects of shallow tunnel excavation[J]. **Advanced Materials Research**, 2011, 250-253: 2366—2370.
- [6] 李煜龄, 许文贵, 林铭益. 以隧道变形量测资料分析掘进效应与约束损失[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 39—46.
LI Yi-ling, XU Wen-gui, LIN Ming-yi. In a tunnel deformation measurement data analysis tunneling effect and restriction of loss[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(1): 39—46.