

文章编号:1673-2049(2014)03-0064-08

公路隧道穿越采空区的探测与处理技术研究

石刚¹,富志鹏²,谢永利³,杨晓华³,李晓婷¹

(1. 长安大学 理学院,陕西 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710075;
3. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:以某在建高速公路隧道施工过程中遇到的采空区处理为依托,探讨了隧道穿越采空区的探测与处理技术。对探地雷达应用于隧道施工过程中的采空区探测技术进行了系统的总结;利用ANSYS软件对2种预备的支护方案进行数值模拟和分析,推荐了具体的支护方案;分析了采空区对隧道的影响,给出了具体的设计方案和施工原则;将施工过程中监控量测的数据信息和仿真模拟数值进行对比分析,对处理的结果进行了评价。结果表明:在经济上合理、技术方面可行而又满足施工进度要求的情况下采用钢拱架和墩台对采空区进行支护,并用轻型材料填充的处理方法,能较好地控制隧道的变形和位移。

关键词:隧道工程;公路隧道;采空区;探地雷达;处理技术;监控量测

中图分类号:U445.49 文献标志码:A

Research on Detection and Treatment Technology of Exhausted Areas in Highway Tunnel Construction

SHI Gang¹, FU Zhi-peng², XIE Yong-li³, YANG Xiao-hua³, LI Xiao-ting¹

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Based on exhausted area treatment of a highway tunnel under construction, the detection and treatment technology of tunnel through exhausted area was discussed. The theory and method of using ground penetrating radar to detect the exhausted areas during construction were systematically summarized. Numerical simulation and analysis were used on the two types of reinforcement schemes by ANSYS software, and the detailed reinforcement scheme was recommended. The effect of exhausted area on tunnel was analyzed, and the detailed designing scheme and construction principles were given. The measuring values and simulation values in construction were comparatively analyzed, and the treatment result of the exhausted areas was assessed. The results indicate that based on the economical technology being feasible, reasonable and meeting the requirements of construction progress, the use of steel frame and pier to support the exhausted area and filling with lightweight materials can better control the deformation and displacement of the tunnel.

Key words: tunneling engineering; highway tunnel; exhausted area; ground penetrating radar;

收稿日期:2014-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41272285);陕西省科技计划项目(2013K06-27);

广西科学研究与技术开发计划项目(10124006-10);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2010JM7021);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC020)

作者简介:石刚(1972-),男,陕西富平人,副教授,工学博士,E-mail:shigang@chd.edu.cn.

treatment technology; monitoring measurement

0 引言

随着中国公路网向边远山区的进一步延伸,以及公路等级的提高和人们对环境保护意识的增强,隧道工程在公路建设中所占比例日益增大,伴随而来的是隧道穿越特殊地质体的灾害处理。各种形式的采矿在中国具有悠久的历史,长期的私采滥挖及无序性开采,遗留大大小小的不计其数的采空区,而采空区深埋地下,上面又常有较厚的覆盖层,当隧道不可避免要穿越采空区时,若配合施工的探测不及时,会对施工过程造成隐患;若相应的治理技术不当,后期的沉降和不均匀变形会成为运营隧道的严重病害,甚至破坏其主体结构。近年来,关于隧道下伏采空区处理的相关报道较多,对于隧道上部采空区和穿越采空区处理的文献报道较少,煤炭系统工作者在对采空区处理方面积累了较丰富的经验^[1]。目前,公路隧道穿越采空区的处理主要借鉴其他构筑物下伏空洞的处理方法,但是公路隧道工程具有自身的特殊性,如埋置在地层的衬砌结构所承受的荷载比地面结构复杂、对拱顶沉降和周边收敛要求严格以及附属设施较多等,因此,处理方法选取的原则和技术规范也有别于其他建筑物或构筑物^[2-3]。本文中笔者结合某在建公路隧道施工过程中遇到的采空区,本着综合技术可行、经济合理的原则,从理论和实际可行性方面探讨了采空区的探测与处理方案,为隧道工程的设计和施工提供科学的技术依据,该研究成果对其他隧道穿越采空区的处理具有参考意义。

1 采空区探测

1.1 工程概况

根据地质矿产部门提供的资料,隧道所在山体是当地石膏的重要来源地,且具有久远的开采历史。该山体为富存的石膏矿的矿体和中软弱、软弱岩体,采矿方式普遍采用房柱采矿法,即留设矿柱支撑采空区,以合理的采留比使采空区保持足够的长期强度。当地居民长期对该区域的无秩序开采,在山体内留下大量的未塌落的、呈不规则形状、结构不稳定

的采空区,而且采空区的形状、位置以及范围都不确定。

当隧道穿越采空区或采空区距离隧道较近时,采空区对隧道影响比较大。因此,公路设计部门对该隧道所在山体进行了前期地勘,地勘资料表明:该隧道穿越的山体地层地质条件比较复杂,所经山体暗含形状和范围不明确的采空区,在设计图有简单的采空区标定,但是标定的采空区的位置、大小可能和实际有一定的出入。

1.2 雷达探测

1.2.1 探测的依据

该隧道所在地区属于旱、半干旱地带,根据相关地质资料可知,山体内遗留采空区内的充填物主要是空气,空气和周围的围岩介质存在着明显的物性差异,这种物性差异形成的电性分界面是探地雷达进行采空区准确定位的理论基础,探测出电性分界面的情况,即可得出采空区的位置、范围、深度等。

根据雷达探测理论,采空区在雷达剖面图像的特征是界面反射,属于强反射,反射波为高幅、高频、细密波型,出现采空区被侧壁强反射所包围,且常伴有弧形绕射现象;在采空区内,由于电磁波在空气中传播,单道雷达波型呈现长距离大幅震荡状态^[4]。

1.2.2 探测的结果

由于探地雷达探测精度高,并有揭露的掌子面地质资料作为参考,在本次隧道探测中,采用美国GSSI公司研发的SIR-20探地雷达探测仪,探测方式采用线测和点测相结合,主要参数指标见表1,探地雷达可探测出掌子面前方约35 m范围的围岩情况。图1为技术人员在现场采集数据。如果掌子面前方35 m范围内存在采空区,探地雷达波剖面图像上就会出现反射波波幅和反射波组随采空区的变化横向上呈现出一定变化的现象。

在K21+600处掌子面上进行探测时,得到如图2所示的原始雷达波剖面,经过偏移聚焦处理后的雷达波剖面如图3所示。探地雷达波剖面中出现了强反射,雷达波同相轴出现弧形异常,结合具体的地质情况,推测掌子面前方约10~15 m处,即K21+610~K21+615段存在采空区分界面。后经

表1 主要参数指标

Tab.1 Main Parameter Indexes

| 天线频率/MHz | 采样点数 | 采样时窗/ns | 介电常数 | 触发方式 | 垂直高通滤波频率/MHz | 垂直低通滤波频率/MHz |
|----------|-------|---------|------|-------|--------------|--------------|
| 100 | 1 024 | 605 | 6.0 | 手动/连续 | 25 | 300 |

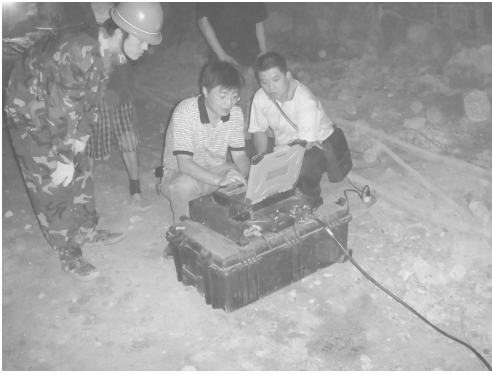


图 1 技术人员在现场采集数据

Fig. 1 Technical Personnel Collecting Data at Scene

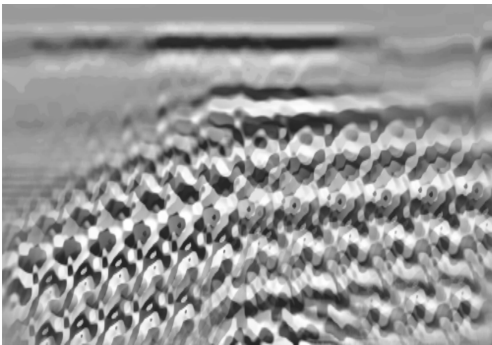


图 2 K21+600 处探测到的原始雷达波剖面

Fig. 2 Detecting Original Radar Wave Profile at K21+600

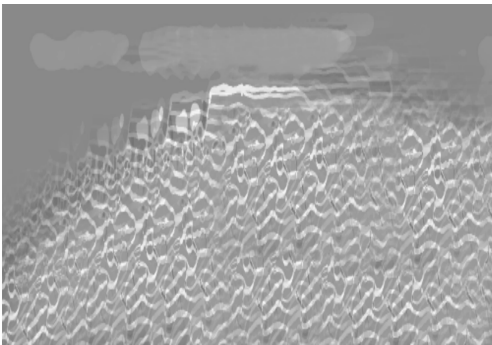


图 3 处理后的雷达波剖面

Fig. 3 Radar Wave Profile After Processing

开挖证实,从 K21+610 处开始为采空区,垂直高度约为 4 m,水平宽度约为 30 m,向掌子面方向延深到 K21+645 处结束,呈现出不规则状的规模较大采空区,见图 4。在对该隧道施工过程进行全线跟踪探测中,还探测到另外异常现象,后经开挖证实,在 K21+511~K21+514 处位于拱顶的位置是原石膏矿开采时遗留的运输巷道,见图 5。

2 采空区处理的数值模拟

在 K21+511~K21+514 处位于拱顶位置的原



图 4 K21+610 处的采空区

Fig. 4 Exhausted Area at K21+610



图 5 K21+511~K21+514 处遗留的运输巷道

Fig. 5 Haulage Roadway at K21+511-K21+514

石膏矿开采遗留的运输巷道相对较小、结构稳定^[5-8],采用了常规的充填封闭处理;而在 K21+610 处的采空区规模较大,需要进行特殊处理。但是针对工程要求,要充分考虑采空区的形状、大小、位置、地质条件以及施工技术等因素,选择一种在经济上合理、技术方面可行而又满足施工进度要求的处理方法。

2.1 采空区支护方案对比

结合当地的实际情况,选用了 2 种支护方案:方案 1,采用钢拱架和墩台对采空区进行支护,并用轻型材料填充;方案 2,采用片石(干砌或浆砌)对采空区进行回填。

2.1.1 计算模型

为了更好地进行对比,2 种支护方案均采用相同尺寸、地层参数以及相同边界约束条件的平面应变弹塑性有限元模型,区别仅在于采空区的材料参数有所不同。根据目前技术研究结果可知,有限元模型所选取的隧道开挖后引起的塑性扰动范围为隧道开挖半径的 3~5 倍^[2]。因此,横向两端各取隧道跨径的 4 倍(跨径为 10.8 m);隧道底部向下取隧道跨径的 4 倍;隧道埋深为实际埋深,即 60 m。有限

元模型边界条件为:在地层左右边界固定其 x 方向位移;底部固定其 y 方向位移,上边界为自由边界。具体建立的有限元模型见图 6。

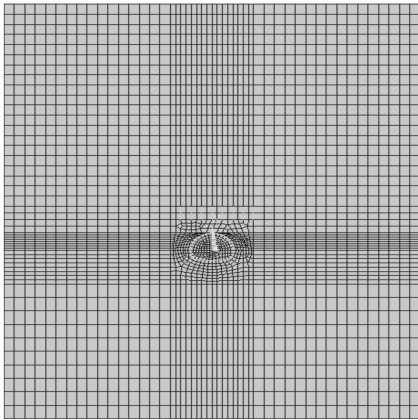


图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite Element Model

2.1.2 计算结果分析

利用 ANSYS 软件,经过有限元计算分析得到第 1 种、第 2 种支护方案下拱顶上方 y 方向应力分别见图 7,8,第 1 种、第 2 种支护方案节点荷载分别见表 2,3。

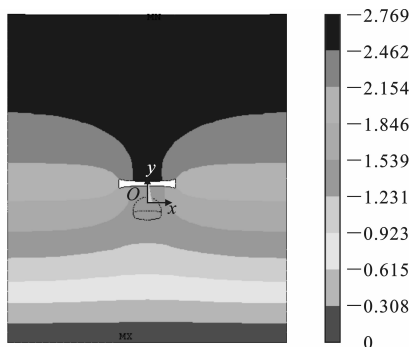


图 7 第 1 种支护方案 y 方向应力(单位:MPa)

Fig. 7 Stress of the First Support Project in y Direction (Unit:MPa)

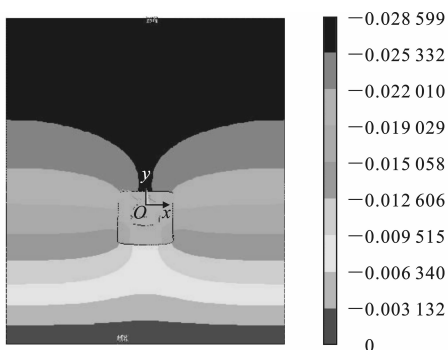


图 8 第 2 种支护方案 y 方向应力(单位:MPa)

Fig. 8 Stress of the Second Support Project in y Direction (Unit:MPa)

通过对比 2 种支护方案相同位置的节点荷载,可知第 1 种支护方案在受力方面整体上小于第 2 种支护方案,并综合考虑节省费用的因素,推荐采用第 1 种支护方案进行设计。

2.2 隧道开挖过程中围岩稳定性分析

为了保证隧道的安全施工,选取上述方法模拟第 1 种支护方案的有限元模型,分析台阶法施工过程中围岩的位移和应力变化。图 9 为上台阶初期支护弯矩,图 10 为上台阶初期支护剪力,图 11 为上台阶初期支护轴力。

从图 9~11 可见,上台阶初期支护后,边墙和仰拱连接处的弯矩和剪力都特别大,出现了应力集中的现象,弯矩最大值为 $228.745 \text{ kN} \cdot \text{m}$,而拱顶和仰拱处的弯矩都比较小,分别只有 $3.614 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 和 $33.908 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。剪力最大值为 350.613 kN ,位于拱脚部位,剪力最小值为 -34.567 kN 。边墙的轴力比较大,而拱顶、仰拱处的轴力均较小,由拱脚分别向拱顶和仰拱处递减,轴力最大值为 -2140 kN ,仰拱处的轴力最小值为 113.193 kN 。图 12 为下台阶开挖后 y 方向位移,图 13 为下台阶开挖后 y 方向应力,图 14 为下台阶开挖后支护剪力,图 15 为下台阶开挖后支护弯矩。

由以上计算结果,综合分析上、下台阶开挖支护后隧道内的稳定性,所得结果见表 4。从表 4 可以看出,上、下台阶开挖支护后隧道的变形量分别减小了 0.85 cm 和 0.75 cm ,表明支护结构的施工对围岩的位移起到限制作用,并且能够使围岩稳定性能有所增加,说明第 1 种支护方案符合开挖要求,可以采用。

3 施工设计与监控

3.1 施工设计

由于采空区底板位于隧道顶板之上 $3 \sim 7 \text{ m}$,且采空区的空洞较大,对隧道的危害严重。在施工设计中除进行砂浆片石砌筑墩柱外,为了提高隧道开挖后所形成的塑性区范围内的支护强度,防止出现大的变形,还增设了 I18 工字型钢拱架进行支护,并在钢拱架间填充聚乙烯轻型材料(或废旧海绵、泡沫塑料等)。

3.1.1 墩台设计

墩台高度为石膏矿采空区底板至石膏矿顶板。对于局部已塌落的区域,要清渣至未风化完整的采空区底板,片石墩台砌至顶板,不留缝隙;片石、块石采用未风化的坚硬砂岩或灰岩,砂浆强度采用 M7.5;

表 2 第 1 种支护方案节点荷载

Tab. 2 Node Loads of the First Support Project

N

| 节点编号 | F_x | F_y | 节点编号 | F_x | F_y |
|------|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------|-----------------------|
| 38 | -0.6512×10^4 | -0.8457×10^4 | 111 | -0.9129×10^5 | -0.6514×10^5 |
| 39 | 0.1257×10^5 | -0.2569×10^5 | 112 | -0.7521×10^5 | -0.1564×10^6 |
| 40 | -0.3621×10^4 | -0.6751×10^4 | 113 | 0.1320×10^6 | 0.2610×10^5 |
| 41 | 0.1263×10^5 | -0.8475×10^4 | 114 | 0.7864×10^5 | -0.4980×10^5 |
| 42 | 0.5123×10^5 | -0.1026×10^4 | 115 | -0.1024×10^5 | -0.8159×10^5 |
| 43 | 0.8931×10^4 | -0.2108×10^5 | 116 | 0.3594×10^6 | 0.8473×10^5 |
| 44 | 0.4129×10^5 | -0.1209×10^5 | 117 | -0.2594×10^6 | -0.7410×10^5 |
| 45 | 0.1430×10^5 | -0.2462×10^5 | 118 | 0.6520×10^5 | -0.6981×10^5 |
| 46 | 0.3210×10^5 | 0.3005×10^5 | 119 | 0.2035×10^6 | -0.4109×10^5 |

注： F_x, F_y 分别为 x 方向和 y 方向的荷载。

表 3 第 2 种支护方案节点荷载

Tab. 3 Node Loads of the Second Support Project

N

| 节点编号 | F_x | F_y | 节点编号 | F_x | F_y |
|------|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------|-----------------------|
| 38 | -0.1944×10^5 | -0.1246×10^5 | 111 | -0.1036×10^6 | -0.2053×10^6 |
| 39 | 0.1312×10^5 | -0.5524×10^5 | 112 | -0.2800×10^6 | -0.5367×10^6 |
| 40 | -0.5590×10^4 | -0.1345×10^5 | 113 | 0.2369×10^6 | 0.1091×10^5 |
| 41 | 0.1060×10^5 | -0.3221×10^5 | 114 | 0.1064×10^6 | -0.8498×10^5 |
| 42 | 0.8745×10^5 | -0.4261×10^4 | 115 | -0.2855×10^5 | -0.2957×10^6 |
| 43 | 0.2128×10^5 | -0.2108×10^5 | 116 | 0.9881×10^6 | 0.1755×10^6 |
| 44 | 0.3212×10^5 | -0.3812×10^5 | 117 | -0.4220×10^6 | -0.1158×10^6 |
| 45 | 0.1551×10^5 | -0.5239×10^5 | 118 | 0.1001×10^6 | -0.1980×10^6 |
| 46 | 0.2856×10^5 | 0.9510×10^5 | 119 | 0.3027×10^6 | -0.9191×10^5 |

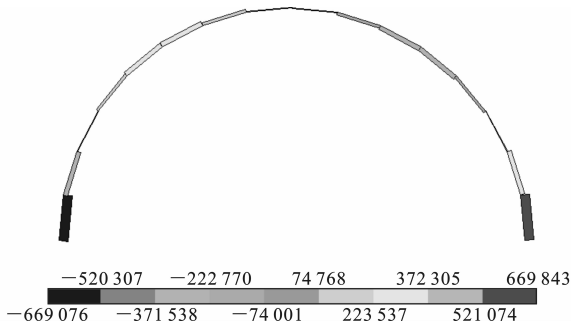
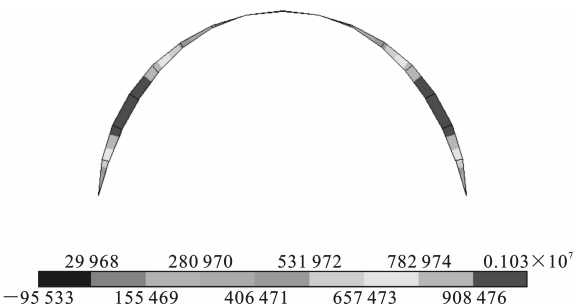
图 9 上台阶初期支护弯矩 (单位: $\text{N} \cdot \text{m}$)Fig. 9 Bending Moments of Upper Bench Primary Support (Unit: $\text{N} \cdot \text{m}$)

图 10 上台阶初期支护剪力 (单位: N)

Fig. 10 Shears of Upper Bench Primary Support (Unit: N)

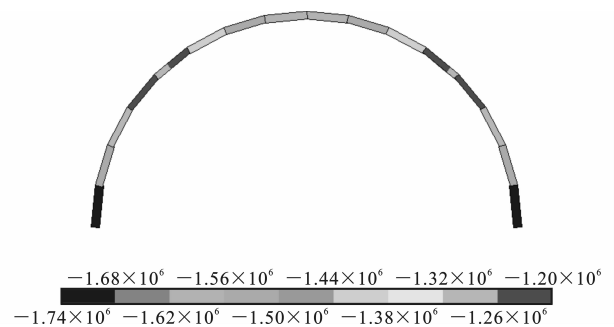


图 11 上台阶初期支护轴力 (单位: N)

Fig. 11 Axial Forces of Upper Bench Primary Support (Unit: N)

墩台沿隧道中轴线两侧布设,墩台间距为 4 m,梅花型布设;墩台为柱式,长度为 2 m,宽度为 1.2 m,高度为采空区底板至顶板,平均高度约为 4 m。

3.1.2 钢拱架和轻型材料设计

采用 I18 工字型钢拱架,其纵向间距为 80 cm,并在纵横上用 $\Phi 22$ 钢筋连接,以增加钢拱架间的强度和稳定性。轻型材料可选用聚乙烯轻型材料或泥灰岩碎块,填充在拱架间,其目的是填充钢拱架的空间,对采空区起到填充作用,以阻止采空区的变形和坍塌。

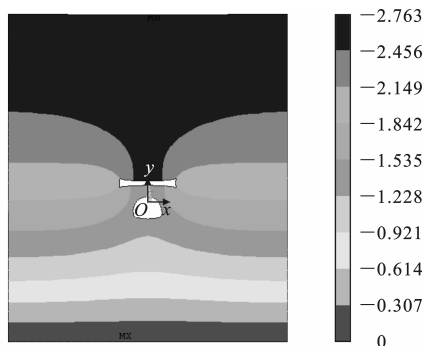


图 12 下台阶开挖后 y 方向位移(单位:cm)
Fig. 12 Displacements in y Direction After Excavating Lower Bench (Unit:cm)

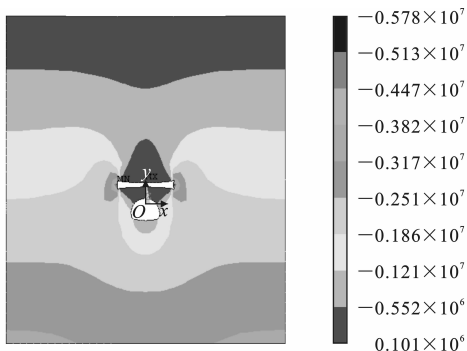


图 13 下台阶开挖后 y 方向应力(单位:Pa)
Fig. 13 Stresses in y Direction After Excavating Lower Bench (Unit:Pa)

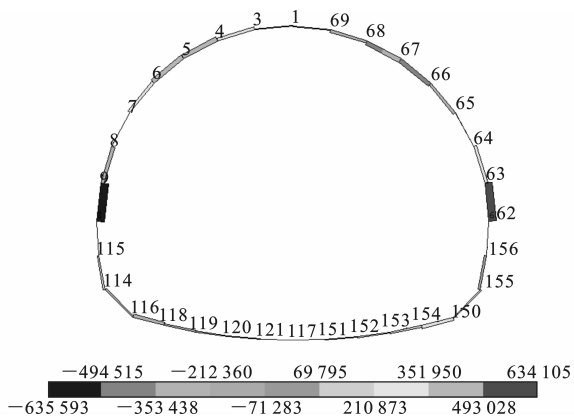


图 14 下台阶开挖后支护剪力(单位:N)
Fig. 14 Shears After Excavating Lower Bench (Unit:N)

3.1.3 施工原则及方案

对受采空区影响的隧道段落,施工应在采空区处理之后进行。施工中应严格遵循新奥法设计理论^[8],坚持“管超前、严注浆、弱爆破、短进尺、强支护、勤量测、早闭合”的原则,当变形严重时需要进行进一步调整结构支护模式与施工方法,以确保衬砌结构安全^[9-14]。由于采空区底板距隧道顶部较近,隧道支护按 V 级浅埋围岩段设计进行施工。隧道初期支

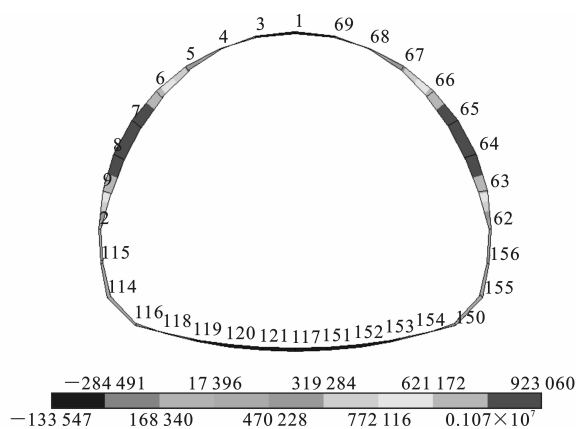


图 15 下台阶开挖后支护弯矩(单位:N·m)
Fig. 15 Bending Moments After Excavating Lower Bench (Unit:N·m)

表 4 隧道变形

Tab. 4 Tunnel Deformation cm

| 工况 | 最大变形 | 支护前后变形改变量 |
|-------|------|-----------|
| 上台阶开挖 | 3.33 | 0.85 |
| 上台阶支护 | 2.48 | |
| 下台阶开挖 | 3.37 | 0.75 |
| 下台阶支护 | 2.62 | |

护包括锚杆、型钢钢架、钢筋网、喷射混凝土。喷锚支护紧跟开挖面及时施作,以减少围岩暴露时间,抑制围岩变形,防护围岩在短时期内松弛剥落。拱部范围及墙角以上 1 m 范围内的超挖,采用同级混凝土回填,其余部位的空隙,可视围岩稳定情况、空隙大小,采用混凝土、片石混凝土回填,拱部局部坍塌严禁采用浆砌片石回填,具体支护衬砌结构如图 16 所示。

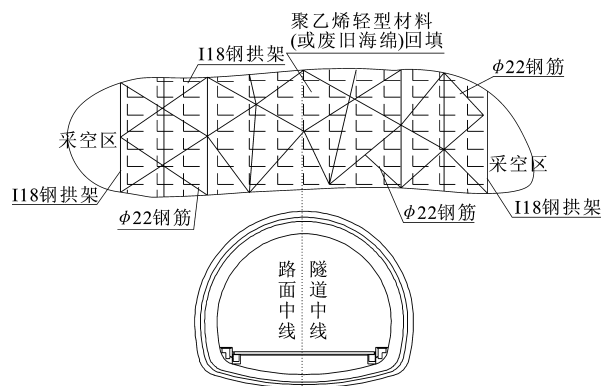


图 16 采空区段隧道处理示意

Fig. 16 Schematic of Tunnel Processing at Goaf Section

3.2 施工监控

隧道的施工监控量测的数据和信息可以反映出对隧道采空区的处理效果,也是判断围岩和支护是否稳定、保证施工安全、进行施工管理的主要手段。

采空区里程为 K21+610~K21+645,采空区最大宽度位于 K21+618 处,根据现场实际情况在 K21+615 和 K21+625 处增设 2 个量测点,以对采空区的处理效果进行评价。将现场量测到的水平收敛值和拱顶下沉值经过温度修正后绘制成位移-时间关系曲线及位移速率-时间关系曲线,并与有限元计算结果进行对比,结果见图 17。

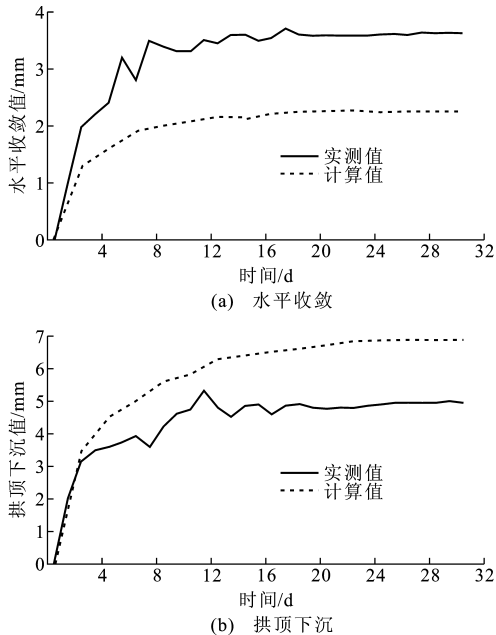


图 17 实测值与计算值对比

Fig. 17 Comparisons of Measured Values and Calculated Values

由于受到施工干扰等客观因素,实际量测结果有一定的波动误差,但是从整体趋势上来看,其变化平稳,未出现较大起伏,20 d 后趋于稳定,变形均在 0.1~0.2 mm 之间。数值模拟计算结果与实测围岩变形规律存在一定误差,这主要是计算模型的简化与岩体材料的各向同性假设以及平面应变模型对隧道施工过程中进行数值模拟分析时,由于无法考虑隧道围岩变形的时空效应,使得计算值不可避免地存在一定误差。围岩的位移变化趋势和变形规律还是与实测值吻合的,这说明使用 ANSYS 进行平面弹塑性数值模拟分析能够得出隧道施工过程中的力学性状变化整体趋势,从而可以指导现场施工。

4 结 语

(1)以实际工程为例,对探地雷达技术应用于隧道施工过程中的采空区探测进行了系统总结,并将探测结果与实际开挖结果进行对比,结果表明,合理应用探地雷达技术对隧道的安全施工具有重要指导

意义。

(2)针对该隧道施工过程中遇到的采空区,应用 ANSYS 软件,采用有限元法对 2 种预备的支护方案进行数值模拟和分析,推荐了具体的支护方案,即采用钢拱架和墩台对采空区进行支护,用轻型材料填充,并给出了具体的设计方案和施工原则。

(3)将具体施工过程中监控量测的数据信息和仿真模拟数值进行对比,说明该支护措施是合理的,且采用的有限元位移场和应力场模拟分析是可行的,该体系对类似工程的设计和施工具有参考意义。

参考文献:

References:

- [1] 黄磊,卢义玉,栗登峰,等.公路隧道穿越急倾斜采空区的治理技术[J].公路交通科技,2012,29(11):80-85.
HUANG Lei, LU Yi-yu, SU Deng-feng, et al. Treatment Technology of Highway Tunnel Through Steep Inclined Goaf[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(11): 80-85.
- [2] 李晓红,姜德义,刘春,等.公路隧道穿越采空区治理技术研究[J].岩土力学,2005,26(6):910-914.
LI Xiao-hong, JIANG De-yi, LIU Chun, et al. Study on Treatment Technology of Highway Tunnel Through Working Out Area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 910-914.
- [3] 汪波,何川,吴德兴.深埋特长公路隧道三维初始应力场的回归分析[J].公路交通科技,2010,27(12):112-117.
WANG Bo, HE Chuan, WU De-xing. Regression Analysis of 3D Initial Geostress Field for Deep and Super-long Highway Tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(12): 112-117.
- [4] 张高青.大运公路介休至霍州段灵石隧道采空区处理技术研究[D].西安:长安大学,2010.
ZHANG Gao-qing. Treatment Technology of the Vacancy in the Dayun Road from Jiexiu to Huozhou[D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [5] 姜岩,雷华阳,郑刚,等.循环荷载下结构性软土变形预测[J].交通运输工程学报,2011,11(1):13-18.
JIANG Yan, LEI Hua-yang, ZHENG Gang, et al. Deformation Prediction of Structured Soft Clay Under Cyclical Load[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(1): 13-18.
- [6] 颜斌,倪万魁,刘海松.公路黄土地基流变模型研究

- [J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 15-19.
YAN Bin, NI Wan-kui, LIU Hai-song. Research on Rheological Model of Highway Loess Subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 15-19.
- [7] 张洪亮, 边祥芹, 王玉兰. 重复荷载作用下路基土粘弹塑性永久变形预估[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(2): 29-33.
ZHANG Hong-liang, BIAN Xian-qin, WANG Yu-lan. Visco-elastic-plastic Model of Permanent Deformation of Subgrade Soils Under Repeated Load[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 29-33.
- [8] JTJ 042—94, 公路隧道施工技术规范[S].
JTJ 042—94, Technical Specifications for Construction of Highway Tunnel[S].
- [9] 刘宏. 隧道下穿重载运煤通道施工技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(8): 82-84.
LIU Hong. Study on Construction Technology of Tunnel Beneath Heavy-loaded Coal-handling Passage-way[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(8): 82-84.
- [10] 陆俊, 游日, 牛志国. 高速地质雷达在公路隧道衬砌质量检测中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(5): 24-27, 37.
LU Jun, YOU Ri, NIU Zhi-guo. Application of High-speed Ground Penetrating Radar in Detecting Quality of Concrete Lining in Highway Tunnel[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(5): 24-27, 37.
- [11] 李兵, 金爱兵, 王宇, 等. 深长隧道断层带施工方案优化[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(6): 66-71.
LI Bing, JIN Ai-bing, WANG Yu, et al. Optimization of Construction of Deep-buried Long Tunnel Through Faults[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(6): 66-71.
- [12] 王华牢, 李宁, 褚方平. 公路隧道衬砌厚度不足对衬砌安全性影响[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(2): 32-38.
WANG Hua-lao, LI Ning, CHU Fang-ping. Effect of Lining Thickness Lack on Lining Safety for Highway Tunnel[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(2): 32-38.
- [13] 潘雪峰, 乔剑. 高速公路以隧道形式下穿明长城的保护方案研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2014, 31(7): 90-92.
PAN Xue-feng, QIAO Fen-jian. Research on Protection Scheme for Ming Great Wall Traversed Underneath by Highway Tunnel[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014, 31(7): 90-92.
- [14] 朱正国, 陈明长, 孙明磊. 双连拱公路隧道围岩压力计算方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(2): 75-79.
ZHU Zheng-guo, CHEN Ming-zhang, SUN Ming-lei. Calculation Method of Pressure of Surrounding Rock on Double-arch Road Tunnel[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 75-79.

《空间结构》2015 年征订通知

《空间结构》是由国家教育部主管、浙江大学主办的全国性专业科技期刊, 1994 年创刊, 面向国内外公开发行, 目前是《中文核心期刊要目总览》建筑类核心期刊, 中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊。《空间结构》主要刊载空间结构的理论研究、分析设计、试验与实测、建筑造型、施工工艺、管理经验、工程实例、信息报道及有特色的空间结构工程照片等方面的内容。读者对象为科研单位、设计院、生产施工单位、质检管理部门的科技人员及大专院校师生。

《空间结构》为季刊, 大 16 开本, 96 页, 每期定价 15 元, 全年共 60 元; 兼营广告, 10 月起征订下一年度广告。《空间结构》自办发行, 请直接汇款至本编辑部订阅, 发行组收到汇款后即寄发票并按期寄给订户, 务请在汇款用途栏或附言栏内注明订购《空间结构》份数及年限。订购款按以下方式汇寄:

开户行: 工商银行杭州市浙大分理处

电话: (0571) 87952414(带传真)

账号: 1202024619914482876

邮编: 310027

账户: 浙江大学《空间结构》杂志编辑部

E-mail: kjjgz@163.com

地址: 杭州玉泉浙江大学空间结构研究中心《空间结构》杂志编辑部