

下伏采空区桥隧工程变形及受力响应特征分析

王树仁¹, 张海清¹, 慎乃齐², 曹海莹¹

(1. 燕山大学 建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 中国地质大学 工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 高速公路桥隧下伏采空区潜在危害性评价及其处治技术的研究, 是目前高速公路建设中急待解决且具有挑战性的技术难题。以青岛—银川高速公路下伏采空区矾水沟大桥—师婆沟隧道工程为背景, 基于 MIDAS/GTS 有限元程序构建 FLAC^{3D} 三维计算模型, 分别对分期采矿形成地下采空区、对双层采空区进行注浆处治、然后进行双线桥隧工程施工过程中地表变形响应、隧道初衬结构、桥梁和墩台的变形及受力特征等进行数值模拟分析, 揭示不同工况条件下的地表变形程度, 确定地表沉陷盆地特征及沉陷盆地中心位置, 对隧道初衬结构和桥梁墩台的变形和受力关键部位进行预测。基于双曲线预测模型和灰色预测模型, 结合大量现场实测数据, 采用误差绝对值加权和最小的准则, 借助 MATLAB 软件计算加权平均数, 建立穿越采空区公路隧道地表沉陷预测模型和分析方法。工程实践表明, 该工程应用效果良好。研究成果对采空区进行注浆补强处治和加固桥隧工程关键部位设计和施工, 具有重要的理论指导意义和工程实用价值。

关键词: 公路工程; 数值分析; 采空区; 变形特征; 预测分析

中图分类号: U 41; O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)06 - 1144 - 08

ANALYSIS OF DEFORMATION AND STRESS CHARACTERISTICS OF HIGHWAY TUNNELS ABOVE MINED-OUT REGIONS

WANG Shuren¹, ZHANG Haiqing¹, SHEN Naiqi², CAO Haiying¹

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: It is of challenge and emergent problems for hazardous assessment and treatment technology for the mined-out regions under the highway with bridges and tunnels. Based on the Fanshuigou bridge—Shipogou tunnel project which is through the mined-out regions in Liulin section of Qingdao—Yinchuan highway, the three-dimensional computation models have been built by using the MIDAS/GTS finite element program; and numerical analyses of the ground deformation response, and tunnel lining and bridge structural deformation as well as their structural forces using FLAC^{3D} are performed. The processes are generated in the step-by-step mining region for treatment after mining coal in Tongde area. And then, the double-layered Shipogou tunnel is excavated and Fanshuigou bridge is constructed. The surface deformations under different working conditions have been revealed; and the ground subsidence basin characteristics and the central subsidence position have been determined. Also, the deformations and forces of key bearing parts of tunnel lining and bridge have also been predicted. Based on the hyperbolic model and grey model, a new combined weighting model of subsidence for highway tunnel through mine-out regions is built with the technique of minimal absolute values of errors, in which the weighting

收稿日期: 2009 - 02 - 18; **修回日期:** 2009 - 03 - 02

基金项目: 燕山大学博士基金项目(B245); 山西省交通厅科技计划项目(06 - 11)

作者简介: 王树仁(1968 -), 男, 博士, 2005年于北京科技大学土木与环境工程学院工程力学专业获博士学位, 现任副教授, 主要从事岩土工程、岩土力学数值计算等方面的教学与研究工作。E-mail: w_sr88@163.com

average is calculated with MATLAB. The engineering measurement results show that the predicted error with combining weighting model is reduced; and the acceptable results are obtained. The above-mentioned results have important theoretical meaning for guiding the practice of grouting mined-out regions and supporting of tunnels and bridges to meet the requirements of strength, stiffness and stability of tunnels and bridge structures.

Key words: road engineering; numerical analysis; mined-out regions; deformation characteristics; prediction and analysis

1 引言

近年来, 随着我国高速公路建设的迅猛发展, 公路网越来越密集, 一些公路桥梁、隧道不可避免地要穿越采空区。由于采空区覆岩的不均匀沉降变形, 很容易造成高速公路的桥隧路面错落起伏、衬砌结构变形、开裂, 桥梁墩台产生大变形等破坏现象, 对高速公路桥隧的正常运营以及养护和维修, 构成严重的安全隐患和潜在危害^[1]。

由前人的研究成果^[2~9]可知, 国内外在高速公路桥隧下伏采空区的治理标准、评价依据、理论计算及处治技术等方面有一定的研究, 但鲜见报道, 且目前的研究尚处于经验摸索阶段、没有系统成熟的理论可供借鉴。目前, 基于技术及经济原因, 高速公路桥隧下伏采空区的治理, 主要借鉴路基处治经验, 以注浆处治技术为主。由于地下采空区具有潜伏性强、空间分布特征规律性差、采空区顶板冒落塌陷情况难以预测等特点, 因此, 高速公路桥隧下伏采空区的潜在危害性评价和处治技术是目前具有挑战性的难题。

结合青岛—银川高速公路中山西柳林段矾水沟大桥—师婆沟隧道下伏同德煤矿采空区处治工程, 作者采用 MIDAS/GTS 构建三维工程模型, 应用 FLAC^{3D} 进行下伏采空区桥隧工程的变形及受力响应特征计算分析, 探讨高速公路下伏采空区桥隧工程危害性评价及有效工程对策; 建立采空区地表沉降加权组合预测模型, 为桥隧地表剩余沉降的预测分析提供新的思路和方法。

2 工程概况

青岛—银川高速公路山西省离石—军渡段(简称“离军线”), 位于山西省柳林县境内, 全长 38.542 km。线路途经的两桥四隧工程分别下伏 4 个煤矿采空区, 受采空区影响左右线累计里程 5.6 km, 工程

难度为国内外罕见。矾水沟大桥—师婆沟隧道下伏同德煤矿采空区示意如图 1 所示(数值为里程号)。

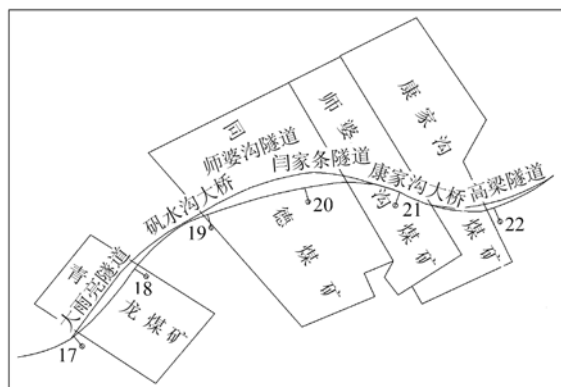


图 1 两桥四隧工程下伏采空区示意图

Fig.1 Schematic diagram of two-bridge and four-tunnel project above mined-out regions

同德煤矿为国营煤矿, 斜井开拓, 1926 年始采, 2006 年停采。开采 4[#], 5[#] 煤层, 采厚均为 2.3 m, 4[#] 煤层与 5[#] 煤层间距为 10~12 m。顶板岩性为灰色砂岩, 底板岩性为黑色泥岩, 煤层产状为 237°∠2°~6°, 煤层埋深为 65~270 m, 煤层底板高程为 700~800 m, 采空区位于桥隧工程设计高程之下 68~180 m, 采深采厚比为 30~78。矿井水量较大, 长壁式回采, 顶板自行垮落, 回采率为 85%, 采空区地面高程为 840~960 m, 地表有大量裂缝和塌陷坑。

同德煤矿采空区分布于离石—军渡段高速公路: 右线为 K18+690~K20+480(长 1 790 m); 而左线为 LK18+715~LK20+550(长 1 835 m)。采空区地貌单元属于晋陕黄土高原丘陵区, 微地貌由黄土梁、峁、塬及黄土冲沟等构成, 顶面较平缓, 地表覆盖 Q₃ 和 Q₂ 黄土, 坡麓局部出露基岩。区内黄土侵蚀冲沟多为 NW 或近 SN 向, 沟壁陡立, 多呈 V 型, 与高速公路大角度相交。地形起伏较大, 岭高谷深, 海拔为 750~1 000 m, 其切割深度为 100~200 m。

该地区地震动峰值加速度为 0.05 g，相应于地震基本烈度 VI 度。

3 三维复杂工程模型构建

3.1 复杂地质体 FLAC^{3D} 前处理的不足

FLAC^{3D} 有限差分程序是目前岩土力学计算中的重要方法之一，自 20 世纪 90 年代初引入我国后，广泛应用于边坡稳定性分析、地下洞室施工与支护设计、河谷演化进程再现、隧道与矿山工程等多个领域，已成为工程技术人员较为理想的三维计算分析工具^[10]。

然而，由于 FLAC^{3D} 对于比较复杂的三维工程建模以及单元网格划分等前处理问题上存在诸多困难^[11~15]，建模工作量大，花费时间长，造成了 FLAC^{3D} 三维模拟计算周期长、应用难度大。

作者拟利用韩国优秀有限元软件 MIDAS/GTS 的前处理功能，进行复杂地质体几何建模和网格划分，然后将三维复杂工程模型直接导入到 FLAC^{3D} 中，从而简化 FLAC^{3D} 前处理的难度，实现下伏采空区桥隧工程复杂三维工程模型的构建。

3.2 MIDAS/GTS 软件前处理功能

MIDAS/GTS 是将通用的有限元分析内核与岩土隧道结构的专业性要求有机结合而开发的岩土与隧道结构有限元分析软件，集合了目前岩土隧道分析软件的优点。MIDAS/GTS 的几何建模和网格划分功能十分强大，主要体现在以下 2 个方面：

(1) 几何建模功能。GTS 有 Windows 窗口式的操作界面，通过点取菜单完成操作，可以方便地建立各种点、线、面、体，并可进行布尔运算、复制、旋转、嵌入以及分割等操作；GTS 可以导入后缀为 .DXF 等格式文件，实现与其他软件的数据交换；其内置的地形数据生成器，可以将导入的 .DXF 格式文件的地形等高线方便地生成复杂曲面。

(2) 网格划分功能。GTS 除了可以较快地划分映射网格和自由网格以外，还可以对网格进行析取、检查、手动分割等操作，对复杂模型网格划分与检查十分方便。

MIDAS/GTS 的“模型”表单具有将节点和单元信息输出到 Excel 表格的功能，为与其他程序进行数据交换提供了方便的接口。

3.3 MIDAS/GTS-FLAC^{3D} 耦合三维建模

(1) MIDAS/GTS 三维工程建模

利用 GTS 读入同德煤矿采空区分布、各岩层界限、隧道轮廓等 .DXF 格式文件，生成各层岩体、采空区轮廓和桥隧实体等；利用 GTS 中的地形数据生成器读入地形等高线数据生成地表曲面，经过对几何体进行分割、嵌入及布尔运算等操作完成下伏采空区桥隧工程的三维几何建模。

由于建模区域地形起伏很大，而且存在桥梁和隧道工程，所以，利用自由网格划分功能生成四面体网格，利用其网格组功能生成多个网格组。

(2) MIDAS/GTS 三维模型数据输出

利用 GTS 的节点、单元表格输出功能，将节点、单元信息直接输出到 Excel 表格，在 Excel 中进行适当处理，生成符合 FLAC^{3D} 数据格式的 FLAC^{3D} 文件，其中包括节点、单元信息和 GROUP 分组信息，供 FLAC^{3D} 调用。

(3) MIDAS/GTS 三维模型导入 FLAC^{3D}

利用 FLAC^{3D} 的 impgrid 命令导入上述 FLAC^{3D} 文件，在 FLAC^{3D} 中生成桥隧工程网格模型；然后，在 FLAC^{3D} 中完成各种材料参数赋值、边界条件施加及各种施工工况模拟计算分析。

4 下伏采空区桥隧工程变形及受力响应特征数值分析

4.1 计算模型

导入 FLAC^{3D} 的下伏采空区矾水沟大桥—师婆沟隧道采空区工程地质模型如图 2 所示；相应的三维计算模型网格划分如图 3 所示。

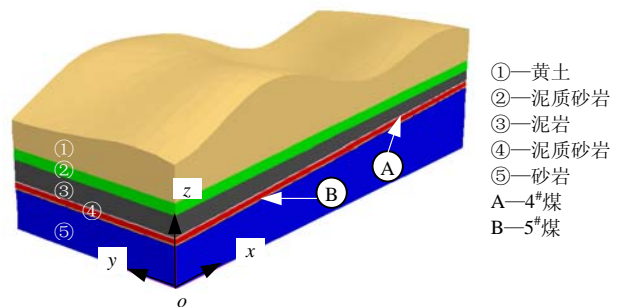


图 2 矾水沟大桥—师婆沟隧道三维工程地质模型

Fig.2 3D engineering geological model of Fanshuigou Bridge—Shipogou tunnel above mined-out regions

计算范围包括矾水沟大桥与师婆沟隧道至下伏双层采空区，具体范围为 830 m×360 m×290 m(长×宽×高)，共划分 149 290 个单元，28 837 个节点。

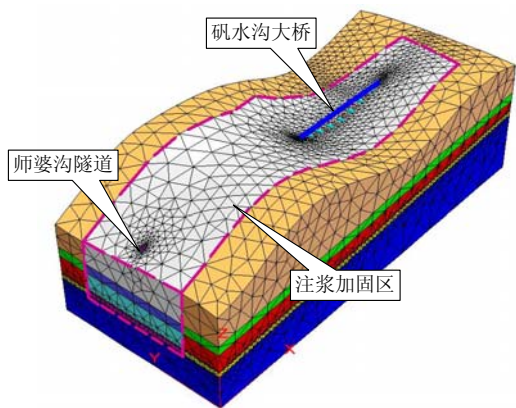


图 3 矾水沟大桥—师婆沟隧道工程三维计算模型网格划分
Fig.3 3D model meshes for calculation of Fanshuigou bridge—Shipogou tunnel above mined-out region

矾水沟大桥—师婆沟隧道工程模型见图 4。计算模型的侧面限制水平移动，底面固定，模型上表面为自由边界。模型全部采用实体单元模拟，假定岩土体材料破坏符合 Mohr-Coulomb 强度准则。隧道初期支护和桥梁墩台采用弹性本构模型。初期支护模拟将锚杆、喷混凝土和格栅钢架等量考虑为 0.45 m 厚的衬砌，桥台建于地表以上。计算选用的岩土体物理力学参数见表 1。

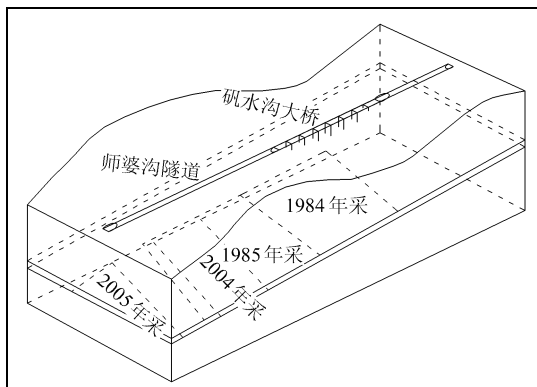


图 4 矾水沟大桥—师婆沟隧道工程模型示意图
Fig.4 Schematic diagram of engineering model of Fanshuigou bridge—Shipogou tunnel above mined-out regions

4.2 模拟分析方案

同德煤矿分期采矿形成地下采空区、停采后进行师婆沟隧道开挖、矾水沟大桥的施工，揭示下伏采空区地表变形的非线性特征及隧道初支和桥梁墩台的变形响应和受力特征，模拟计算分析工况如下：

(1) 依据矾水沟大桥—师婆沟隧道下伏采空区场地的地形地貌特征，进行同德煤矿回采前的初始

表 1 计算选用的岩土体物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of geomaterials for numerical calculation

| 编号 | 岩土体名称 | 密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 弹性模量 /GPa | 泊松比 | 抗拉强度 /MPa | 黏聚力 /MPa | 内摩擦角 / $(^\circ)$ |
|----|-------|--|-----------|------|-----------|----------|-------------------|
| 1 | 黄土 | 1 650 | 0.15 | 0.30 | 0.002 8 | 0.075 | 30 |
| 2 | 泥质砂岩 | 2 650 | 8.50 | 0.20 | 1.400 0 | 7.200 | 42 |
| 3 | 泥岩 | 2 630 | 6.70 | 0.23 | 1.300 0 | 6.700 | 40 |
| 4 | 4# 煤 | 1 450 | 5.30 | 0.26 | 0.560 0 | 3.800 | 36 |
| 5 | 泥质砂岩 | 2 650 | 8.50 | 0.20 | 1.500 0 | 7.400 | 42 |
| 6 | 5#煤 | 1 470 | 5.50 | 0.26 | 0.580 0 | 4.000 | 36 |
| 7 | 砂岩 | 2 680 | 12.00 | 0.16 | 2.800 0 | 8.600 | 46 |
| 8 | 隧道初支 | 2 300 | 18.50 | 0.20 | | | |
| 9 | 桥梁墩台 | 2 500 | 22.00 | 0.16 | | | |

应力场平衡计算，并将位移清零，此处仅考虑岩土体自重引起的初始应力。

(2) 根据现场调查、钻探和物探等资料确定的采空区范围，依回采时间顺序，进行分期采矿造成地表变形的响应特征分析。

(3) 同德煤矿停采后，对采空区进行注浆处治，然后，进行师婆沟隧道开挖，矾水沟大桥施工的地表变形及隧道衬砌结构与桥梁墩台的变形和受力特征分析。

最后，对完成上述施工后的地表进行剩余变形预测分析。

4.3 计算结果分析

4.3.1 采空区地表变形特征分析

(1) 地表沉陷盆地特征及沉陷盆地中心位置

按照煤矿回采、采空区注浆、隧道开挖和桥梁施工的施工顺序模拟计算，得到地表沉陷变形场如图 5 所示。地表沉陷盆地中心位于师婆沟隧道一侧，最大沉陷值为 680.6 mm。

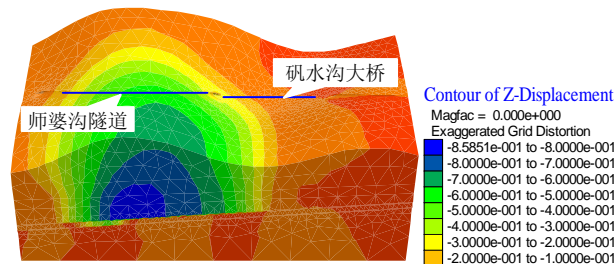


图 5 地表沉陷位移场(单位: m)
Fig.5 Scheme of ground settlement field(unit: m)

由图 5 可知,地表沉陷盆地呈偏态非闭合椭圆形;地表沉陷盆地中心偏于师婆沟隧道一侧稍远的位置,隧道穿越沉陷盆地边缘受采动拉张破坏变形的部位。

(2) 地表沉陷关键部位及预警范围确定

考虑矾水沟大桥与师婆沟隧道下伏采空区的工程实际,以下沉值 100 mm 的等值线作为地表移动盆地边界,并作为施工与变形监测预警边界;以下沉值为 150 mm 的等值线作为危险移动盆地边界。因此,由计算结果圈定地表沉陷变形安全警戒范围如图 6 所示。

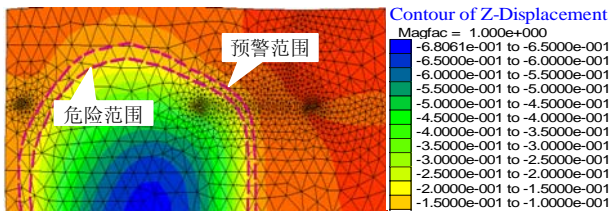


图 6 地表沉陷预警范围(单位: m)

Fig.6 Early-warning range for ground settlement(unit: m)

由图 6 可知,师婆沟隧道处于安全预警范围内,因此,在进行师婆沟隧道下伏采空区注浆处治和师婆沟隧道施工过程中,临近地表预警范围边界时应采取安全防范措施;在地表危险范围内作业时,应采取有效对策对采空区进行重点处治,确保隧道施工期间和后期运营的安全。

4.3.2 桥隧工程变形特征分析

(1) 隧道衬砌结构垂向变形

师婆沟隧道衬砌结构的垂向变形场如图 7 所示,主要变形发生在图 6 圈定的危险范围内,主要变形位置与地表沉陷盆地中心相对应,最大沉陷变形值为 8.3 mm,可见,对同德煤矿双层采空区进行注浆处治效果较好,该采空区对师婆沟隧道造成的沉陷变形影响较小。

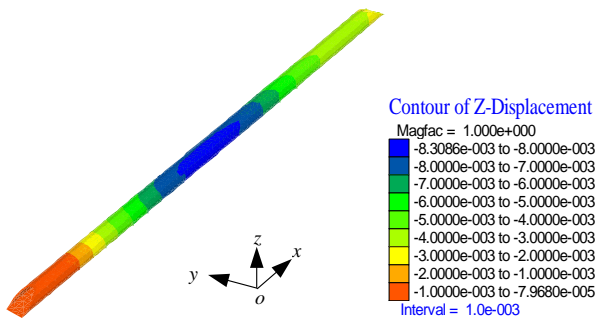


图 7 师婆沟隧道衬砌结构的垂向变形场(单位: m)

Fig.7 Vertical deformation field of lining structure of Shipogou tunnel(unit: m)

(2) 桥梁结构变形分析

桥梁结构由桥面、托梁、桥墩和墩台 4 部分组成。桥梁结构示意图如图 8(a)所示。受地下双层采空区直接影响的墩台及其沉陷变形结果见图 8(b)。

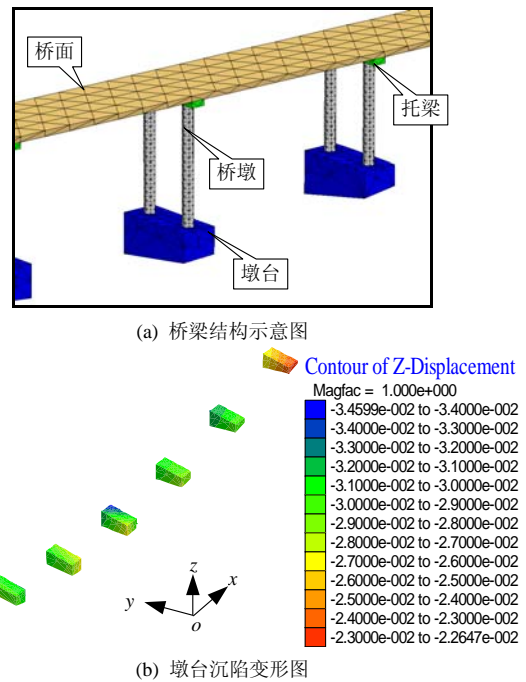


图 8 桥梁结构与墩台沉降变形(单位: m)

Fig.8 Bridge structure and settlement of bridge abutment (unit: m)

由图 8 可知,桥梁墩台最大沉降值为 35 mm。沿 x 轴正方向选取各墩台底部和顶部节点,提取节点位移数据,绘制如表 2 所示的数据,进行矾水沟大桥墩台测点变形验算分析。

表 2 矾水沟大桥沿 x 轴正方向墩台位移统计表
Table 2 Deforming statistics of positive x-direction deformations of abutment foundation

| 墩台节点 | x 方向 | | y 方向 | | z 方向 | |
|------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | 节点变形量/mm | 相邻节点变形量差/mm | 节点变形量/mm | 相邻节点变形量差/mm | 节点变形量/mm | 相邻节点变形量差/mm |
| 1 | 3.90 | | 1.22 | | -32.28 | |
| 2 | 2.26 | 1.64 | 0.82 | 0.40 | -29.04 | 3.24 |
| 3 | 2.80 | 0.54 | -0.89 | 1.71 | -28.25 | 0.79 |
| 4 | 2.60 | 0.20 | 1.65 | 2.50 | -26.24 | 2.01 |
| 5 | -7.10 | 9.70 | -0.79 | 2.44 | -27.68 | 1.44 |
| 6 | -6.00 | 1.10 | 1.24 | 2.03 | -28.94 | 1.26 |
| 7 | -9.70 | 3.70 | 1.08 | 0.16 | -22.97 | 5.97 |

依据我国的《公路桥涵地基与基础设计规范》

(JTGD63 - 2007), 对简支桥梁, 桥墩位移量应满足:

- ① 墩台的均匀沉降量 $\leq 2\sqrt{L}$;
 - ② 相邻墩台均匀沉降量之差 $\leq 1\sqrt{L}$;
 - ③ 墩台测点的水平位移 $\leq 0.5\sqrt{L}$;
- 其中, L 为相邻墩台间最小跨径长度。

矾水沟大桥墩间距为 30 m, 依据上述规定, 墩台均匀沉降量为 110 mm ; 相邻墩台均匀沉降量之差为 55 mm , 墩台测点水平位移为 27 mm。

由表 2 可知, 墩台节点的最大沉降量为 32.28 mm < 110 mm ; 相邻墩台节点沉降量之差最大值为 5.97 mm < 55 mm, 相邻墩台节点横向变形最大值为 9.70 mm < 27 mm, 都符合规范要求。因此, 对下伏采空区进行注浆处治后, 对矾水沟大桥引起的变形影响较小, 能够满足工程要求。

4.3.3 桥隧结构受力特征分析

师婆沟隧道衬砌最大主应力分布如图 9 所示。

由于师婆沟隧道处于采空区边缘受拉位置, 造成衬砌结构相应位置的最大拉应力约为 0.5 MPa, 因此, 应在隧道施工中加强该部位的衬砌支护。

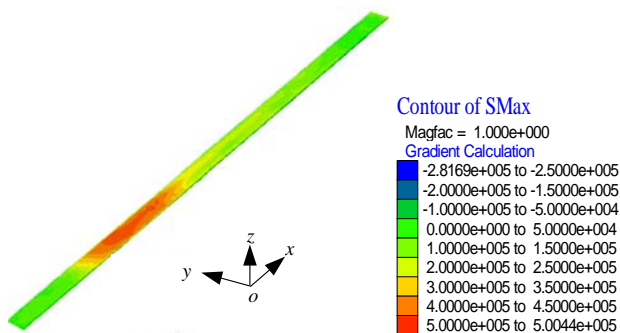


图 9 师婆沟隧道衬砌最大主应力分布(单位: Pa)

Fig.9 Distribution map of maximum principal stresses of the Shipogou tunnel lining(unit: Pa)

由图 10 可知, 位于桥隧接头附近并处于采空区对应范围内的 1[#]墩台, 连接处最大拉应力达到 0.23 MPa; 4[#]墩台连接处最大压应力达 0.41 MPa。因此, 在桥梁设计及施工过程中应对这些受力关键部位, 采取补强措施以保证工程安全。

5 师婆沟隧道地表沉降预测分析

5.1 地表沉陷实测曲线

自 2007 年 1 月 1 日~4 月 8 日, 在师婆沟隧道工程地表设置 2 个监测点, 测得地表沉陷实测曲线如图 11 所示。基于实测数据, 经过计算处理, 分别

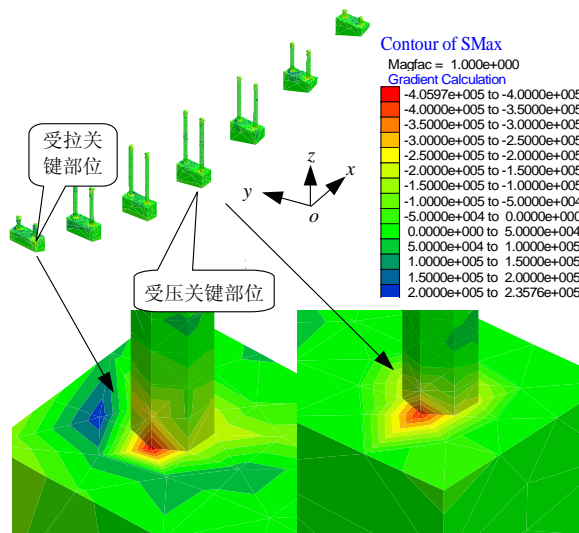


图 10 桥梁墩台最大主应力(单位: Pa)

Fig.10 Map of the maximum principal stresses of the bridge abutment(unit: Pa)

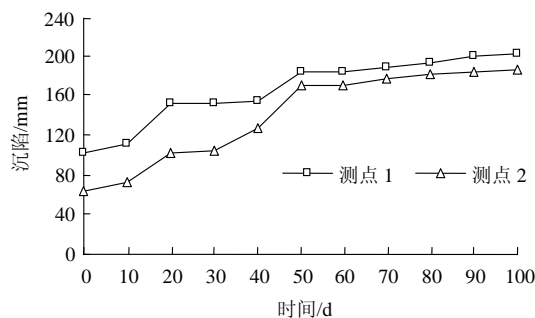


图 11 师婆沟隧道地表沉陷实测曲线图

Fig.11 Ground settlement curves obtained from field measurement of Shipogou tunnel

得到了双曲线模型和灰色模型的表达式。

5.2 组合预测分析模型

(1) 双曲线预测模型

$$s = 12.8 + \frac{t - 30}{0.89 + 0.159(t - 30)} \quad (1)$$

在师婆沟隧道双曲线预测模型中, t 的取值应大于 30 d, 即当 $t = 30$ d 时, $s = 12.8$ cm, 此模型的预测起点时间为 2007 年 2 月 10 日, 双曲线预测模型的最终沉降量为 19.09 cm。

(2) 灰色预测模型

$$s = -18.58e^{-0.14(t-1)} + 24.98 \quad (2)$$

在灰色预测模型中, 对 t 取值应该取为 ≥ 1 的自然数, t 为每次间隔实际代表为 10 d 的时间参数, 如 $t = 5$ 与 $t = 7$ 对应的是间隔 20 d 的两个沉降预测值。应用灰色预测模型的最终沉降量为 24.98 cm。

应用式(1), (2), 对 2007 年 3 月 30 日和 4 月 10

日的师婆沟隧道地表沉降量进行拟合，其拟合结果如表 3 所示。

表 3 两种单项预测法的拟合值及误差表(2007 年)
Table 3 Fitting values and errors created by the two single prediction methods(in 2007)

| 方法 | 3 月 30 日 | | | 4 月 10 日 | | |
|-------|----------|------|-------|----------|------|-------|
| | 拟合值 | 实际值 | 误差 | 拟合值 | 实际值 | 误差 |
| | /cm | /cm | /% | /cm | /cm | /% |
| 双曲线法 | 16.33 | 18.3 | 10.77 | 16.47 | 18.5 | 10.97 |
| 灰色模型法 | 16.02 | 18.3 | 12.46 | 16.93 | 18.5 | 8.49 |

(3) 组合预测模型

令 e_{1t} 为双曲线法 t 时刻拟合值的误差， e_{2t} 为灰色模型法 t 时刻拟合值的误差，分析表 2 和 3 可得： $e_{11} = 0.03$ ， $e_{12} = -0.03$ ， $e_{21} = -0.27$ ， $e_{22} = 0.43$ 。取最优准则的折减系数 $a_t = 0.85^{2-t}$ ($t = 1, 2$)，利用 MATLAB 软件中的命令函数 `linprog(·)` 可以很方便地得到最优解：

$$W = \begin{Bmatrix} 0.614 \\ 0.386 \end{Bmatrix}, \quad u = \begin{Bmatrix} 0.07 \\ 0.00 \end{Bmatrix}, \quad v = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

由此可以得到基于双曲线和灰色预测模型的综合预测模型：

$$s_t = 0.614s_{1t} + 0.386s_{2t} \quad (4)$$

式中： s_{1t} 为双曲线预测模型 t 时刻的预测值， s_{2t} 为灰色预测模型 t 时刻的预测值。利用组合预测模型分析，得到师婆沟隧道地表的最终沉降量为 21.36 cm。

利用组合预测模型，对 2007 年 2 月 10 日~4 月 1 日的地表沉降趋势进行对比，并对 2007 年 4 月 1 日~5 月 1 日的沉降值进行预测分析，计算和分析结果如图 12 所示。

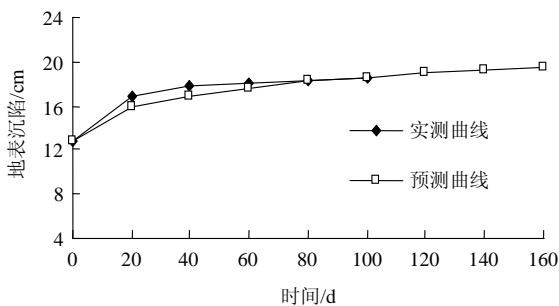


图 12 师婆沟隧道地表沉降实测曲线和预测曲线对比图
Fig.12 Contrast curves of ground settlements obtained from field measurement and forecast of Shipogou tunnel

由图 12 可知，组合预测模型与实测数据的误差为 0.07%~5.98%，基本上消除了单项预测模型带来的系统误差，大大提高了预测的精度，为师婆沟隧道地表沉降的预测提供了可靠的理论依据。

6 结 论

(1) 针对 FLAC^{3D} 构建三维复杂工程模型存在的困难，提出利用 MIDAS/GTS 进行三维几何建模和网格划分，然后利用数据转换得到桥隧工程的 FLAC^{3D} 三维计算模型，为 FLAC^{3D} 构建三维复杂工程模型提供了新的解决途径。

(2) 由数值计算结果，分析了桥隧工程地表沉降盆地的特征和关键部位，对指导注(补)浆孔设计有重要指导意义；圈定了地表沉陷变形的警戒边界，为确保施工设备和作业人员的安全提供了依据。分析了隧道衬砌、桥梁结构以及墩台的变形和应力分布特征，提出在设计和施工过程中，对关键部位应采取控制结构变形和受力的有效措施。

(3) 基于双曲线和灰色预测模型，采用误差绝对值加权和最小的准则，创建了加权组合预测模型，对离军线师婆沟地表实测沉降变形进行了预测分析。该新模型的提出，为采空区地表剩余沉降的预测分析提供了新的思路和方法。

参考文献(References):

[1] 童立元, 刘松玉, 邱 钰, 等. 高速公路下伏采空区问题国内外研究现状及进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7): 1 198 - 1 202.(TONG Liyuan, LIU Songyu, QIU Yu, et al. Current research state of problems associated with mined-out regions under expressway and future development[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1 198 - 1 202.(in Chinese))

[2] 胡海峰, 郝兵元, 康立勋. 高等级公路下煤矿采空区注浆处治效果分析[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(2): 270 - 273.(HU Haifeng, HAO Bingyuan, KANG Lixun. Effect analysis of treatment of mined-out region under the highway[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(2): 270 - 273.(in Chinese))

[3] 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 Xiaohong, JIANG Deyi, LIU Chun, et al. Study on treatment technology of highway

- tunnel through mined-out area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(6): 910 - 914.(in Chinese))
- [4] 文 勇. 高速公路下伏煤矿采空区病害分析及其防治措施[J]. *土工基础*, 2007, 21(1): 35 - 37.(WEN Yong. Hazards analysis of goafs underlying highway and the controlling measurements[J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2007, 21(1): 35 - 37.(in Chinese))
- [5] 余学义. 高等级公路下伏采空区危害程度分析[J]. *西安公路交通大学学报*, 2000, 20(4): 43 - 45.(YU Xueyi. The hazard level of gob under high-grade highway[J]. *Journal of Xi'an Highway University*, 2000, 20(4): 43 - 45.(in Chinese))
- [6] SARGAND S M, HAZEN G A. Highway damage due to subsidence[C]// *Mine Induced Subsidence: Effects on Engineered Structures(GSP 19)*. New York: ASCE, 1988: 18 - 32.
- [7] 慎乃齐, 杨建伟, 郑惜平. 基于神经网络的采空塌陷预测[J]. *煤田地质与勘探*, 2001, 29(3): 42 - 43.(SHEN Naiqi, YANG Jianwei, ZHENG Xiping. Prediction of mined-out area based on neural network[J]. *Coal Geology and Exploration*, 2001, 29(3): 42 - 43.(in Chinese))
- [8] 柴 伟, 饶运章, 黄奔文. 地下大面积采空区失稳研究[J]. *中国矿山工程*, 2008, 37(3): 27 - 30.(CHAI Wei, RAO Yunzhang, HUANG Benwen. Study on underground big gob destabilization[J]. *China Mine Engineering*, 2008, 37(3): 27 - 30.(in Chinese))
- [9] 王树仁, 魏 翔, 宋立志. 采空区三维可视化模型构建及其冒落状况分析[J]. *勘察科学技术*, 2008, (3): 12 - 15.(WANG Shuren, WEI Xiang, SONG Lizhi. Construction of 3D visual model in the mined-out areas and its caving condition analysis[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2008, (3): 12 - 15.(in Chinese))
- [10] 丁秀美, 黄润秋, 刘光士. FLAC^{3D} 前处理程序开发及其工程应用[J]. *地质灾害与环境保护*, 2004, 15(2): 68 - 73.(DING Xiumei, HUANG Runqiu, LIU Guangshi. Development of pre-processing software for FLAC^{3D} and its application to engineering[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2004, 15(2): 68 - 73.(in Chinese))
- [11] 廖秋林, 曾钱帮, 刘 彤, 等. 基于 ANSYS 平台复杂地质体 FLAC^{3D} 模型的自动生成[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(6): 1 010 - 1 013.(LIAO Qiulin, ZENG Qianbang, LIU Tong, et al. Automatic model generation of complex geologic body with FLAC^{3D} based on ANSYS platform[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(6): 1 010 - 1 013.(in Chinese))
- [12] 胡 斌, 张倬元, 黄润秋, 等. FLAC^{3D} 前处理程序的开发及仿真效果检验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(9): 1 387 - 1 391.(HU Bin, ZHANG Zhuoyuan, HUANG Runqiu, et al. Development of pre-processing package for FLAC^{3D} and verification of its simulation effects[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(9): 1 387 - 1 391.(in Chinese))
- [13] 侯恩科, 吴立新, 李建民, 等. 三维地质模拟与数值模拟的耦合方法研究[J]. *煤炭学报*, 2002, 27(4): 388 - 392.(HOU Enke, WU Lixin, LI Jianmin, et al. Study on the coupling of 3D geosciences modeling with numerical simulation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2002, 27(4): 388 - 392.(in Chinese))
- [14] 罗周全, 吴亚斌, 刘晓明, 等. 基于 SURPAC 的复杂地质体 FLAC^{3D} 模型生成技术[J]. *岩土力学*, 2008, 29(5): 1 334 - 1 338.(LUO Zhouquan, WU Yabin, LIU Xiaoming, et al. FLAC^{3D} modeling for complex geologic body based on SURPAC[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1 334 - 1 338.(in Chinese))
- [15] 林 杭, 曹 平, 李江腾, 等. 基于 SURPAC 的 FLAC^{3D} 三维模型自动构建[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(3): 339 - 342.(LIN Hang, CAO Ping, LI Jiangteng, et al. Automatic generation of FLAC^{3D} model based on SURPAC[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 37(3): 339 - 342.(in Chinese))