

# 乌鞘岭隧道三维地应力场多元有限元 回归拓展分析

赵德安<sup>1,2</sup>, 李国良<sup>3</sup>, 陈志敏<sup>1</sup>, 李双洋<sup>4</sup>, 夏文传<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 西北民族大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730030; 3. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043; 4. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 采用三维有限元多元回归分析方法, 基于有限测点的地应力量测结果, 拓展分析隧道区原始宏观地应力场。建立隧道区两个大规模三维计算模型, 通过有限元分析软件 ANSYS 对重力、水平挤压和剪切等 4 种工况的构造应力场分别进行计算。编制三维地应力场多元回归分析计算机软件 MEBA 以及与 ANSYS 的接口程序 MEBAC, 实现地应力场的多元回归拓展分析, 着重分析乌鞘岭隧道岭脊地段的复杂应力状况、应力值的宏观大小和规律, 特别是 F4, F5, F6, F7 断层及其附近的应力状况。宏观地应力场的分析结果表明, 乌鞘岭隧道宏观地应力场的主应力方向为 N21.2°E, 与隧道轴线的夹角为 38.2°, 断层区隧道衬砌具有纵向挤压和横向受力不对称的特点。区段地应力值高, 在隧道轴线位置, 最大垂直地应力为 32.10 MPa, 垂直于隧道轴线方向最大水平地应力为 21.72 MPa。宏观地应力场的分析结果对工程的动态设计与施工具有重要参考价值。

**关键词:** 隧道工程; 乌鞘岭隧道; 岭脊地段; 初始地应力; 回归分析; 有限元

**中图分类号:** U 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)增 1 - 2687 - 08

## THREE-DIMENSIONAL FE REGRESSION ANALYSIS OF MULTIVARIATE GEOSTRESS FIELD OF WUSHAOLING TUNNEL

ZHAO Dean<sup>1,2</sup>, LI Guoliang<sup>3</sup>, CHEN Zhimin<sup>1</sup>, LI Shuangyang<sup>4</sup>, XIA Wenchuan<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. School of Civil Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou, Gansu 730030, China; 3. China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China; 4. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** The initial geostress field of tunnel area is analyzed by 3D multivariate FE regression based on limited points of in-situ geostress measurement. Two large-scale 3D FE computational models are established. Then geostress including gravity, tectonic stress field for horizontal extrusion and shear in four cases are computed by with ANSYS. And the multivariate regression analysis is carried out by MEBA and MEBAC, which is an interface program connecting MEBA and ANSYS. It is emphasized on the analysis of complicated stress condition and macro description of stress field around Wushaoling tunnel, especially the stress condition in and around the faults F4, F5, F6 and F7. The results of macro geostress field indicate that the direction of principle stresses is N21.2°E, which forms separation angle of 38.2° to the tunnel axis. The tunnel lining in faults zone is extruded in

**收稿日期:** 2007 - 09 - 14; **修回日期:** 2008 - 02 - 14

**基金项目:** 铁道部科技开发计划项目(2004G043 - A); 教育部留学回国人员科研启动基金和兰州交通大学青蓝人才工程基金资助项目

**作者简介:** 赵德安(1959 - ), 男, 博士, 2001 年于因斯布鲁克大学岩土工程专业获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土与地下工程的试验、数值分析及岩土锚固技术方面的教学与研究工作。E-mail: zhao\_da@mail.lzjtu.cn

longitudinal direction and stressed asymmetrically in horizontal direction. The values of the geostress are relatively large. The maximal vertical geostress is 32.10 MPa and the maximal geostress perpendicular to tunnel axis is 21.72 MPa. The results of macro geostress field are very important for dynamic design and construction.

**Key words:** tunnelling engineering; Wushaoling tunnel; mountain back section; initial geostress; regression analysis; finite element(FE)

# 1 引言

地下空间在最近几十年得到越来越多的应用<sup>[1]</sup>。在全球范围内的应用有许多地下结构型式，比如交通隧道、地下核废料等的储存室和地铁等。地下结构越来越向更深的埋深发展，如我国的秦岭隧道<sup>[2]</sup>，乌鞘岭隧道<sup>[3]</sup>等，施工或通风竖井的深度达近千米，在煤炭、矿冶、石油等行业竖井深度甚至达数千米。同时初始地应力场是工程边坡，地下洞室或地基岩体稳定性的影响因素之一，也是工程设计需要的基本指标，如隧道中系统锚杆的设计<sup>[4]</sup>及侧压力系数的确定<sup>[5]</sup>，尤其在大型水电工程建设中更为重要。利用的初始地应力场是否可靠，岩体参数选取是否合理将直接影响到工程设计与施工的可靠性与安全性。现场实测地应力是提供地应力场最直接的途径，一些工程在参照了地应力场统计分析资料的基础上<sup>[6]</sup>，可能需要专门考虑地应力场。但在工程现场，由于场地和经费等原因，不可能进行大量的全面量测，而且地应力成因复杂，影响因素很多，多测点的测量成果在很大程度上反映的是当地的局部应力场，且测量成果受到测量误差的影响，地应力测量值有一定程度的离散性<sup>[4]</sup>。因此，根据现场量测信息(如应力，位移和应变等)来反演初始地应力和岩体性态参数的反分析方法，以其实用性，为解决岩土工程计算参数选取开辟了独特途径<sup>[8]</sup>。

随着计算机技术的发展<sup>[9]</sup>，进行大规模三维数值计算在今天已经成为可能。本文正是在此基础上，依据实测地应力结果，结合现场地质构造条件，通过多元回归<sup>[10]</sup>的计算分析方法，对乌鞘岭隧道岭脊地段复杂区域地应力形态进行地应力场的反演分析，以获得更为准确、适用范围较大的地应力场。

## 2 地应力场拓展分析原理与方法

### 2.1 拓展分析原理

地应力场的主要组成成分为自重应力场和地质构造应力场，构造应力场的理论分析，实质上是一

种采用数学 - 物理理论的模拟方法<sup>[11, 12]</sup>。一般要确定某一地区构造应力场的发生、发展及形成过程是十分困难的，直到目前为止还没有十分完善的解决方法。当前所提出的典型构造应力场理论，还仅限于稳定构造应力场，而且多数假定岩性为弹性<sup>[7]</sup>。

根据多元回归法<sup>[10]</sup>原理，将地应力回归计算值作为因变量，把有限元计算求得的自重应力场和构造应力场相应于实测点的应力计算值作为自变量，根据工程所在地区少量地应力实测资料进行回归计算，按照最小二乘法原理，解使得最小二乘法的残差平方和为最小值的法方程，求出对应的待定回归系数。使得计算应力场与实测应力达到最优拟合，以求得工程区域初始应力场。

将地应力回归计算值  $\tilde{\sigma}_k$  作为因变量，把有限元计算求得的自重应力场和构造应力场相应于实测点的应力计算值作为自变量，则回归方程的形式为

$$\tilde{\sigma}_k = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_k^i \tag{1}$$

式中： $k$  为观测点的序号， $\tilde{\sigma}_k$  为第  $k$  个观测点的回归计算值， $L_i$  为相应于自变量的多元回归系数， $\sigma_k^i$  为相应应力分量计算值的单列矩阵， $n$  为工况数。

假定有  $m$  个观测点，则最小二乘法的残差平方和为

$$S_{残} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \left( \sigma_{jk}^* - \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jk}^i \right)^2 \tag{2}$$

式中： $\sigma_{jk}^*$  为观测点  $k$  应力分量  $j$  的观测值。

根据最小二乘法原理，使得  $S_{残}$  为最小值的法方程式为

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^1)^2 & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk}^2 & \cdots & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk}^n \\ & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^2)^2 & \cdots & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^2 \sigma_{jk}^n \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^n)^2 \end{bmatrix}$$

对 称

$$\begin{cases} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{cases} = \begin{cases} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^* \sigma_{jk}^1 \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^* \sigma_{jk}^2 \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^* \sigma_{jk}^n \end{cases} \quad (3)$$

通过求解式(3), 得  $n$  个待定回归系数  $L = \{L_1 L_2 \dots L_n\}^T$ , 则计算域内任一点  $p$  的回归初始应力, 可由该点各工况有限元计算值叠加而得

$$\sigma_{jp} = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jp}^i \quad (j = 1, 2, \dots, 6) \quad (4)$$

### 2.2 拓展效果评价方法

为衡量回归效果, 可通过计算复相关系数  $r$  进行检查; 并通过计算偏相关系数  $V_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 检查每个子构造应力场的显著性。

复相关系数可表示为

$$r = \sqrt{1 - S_{残} / S_T} \quad (5)$$

其中, 复相关系数  $r$  介于  $0 \sim 1$  之间,  $r$  值越接近于 1, 说明回归效果越好。

$$S_T = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^* - \bar{\sigma})^2 \quad (6)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{6m} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^* \quad (7)$$

偏相关系数  $V_i$  可表示为

$$V_i = \sqrt{1 - S_{残} / Q_i} \quad (8)$$

其中,

$$Q_i = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \left( \sigma_{jk}^* - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^n L_l \sigma_{jk}^l \right)^2 \quad (9)$$

由于各子构造应力场之间是相容的, 其中一个因素的引入必将造成其余因素的退化, 因此, 需根据偏相关系数将不显著因素剔除。工况的偏相关系数越小, 说明对实测值的影响越不显著<sup>[10]</sup>。

### 2.3 ANSYS 应用

模拟地应力场包括自重应力场和地质构造应力场, 其中构造应力场包括 2 个侧面水平方向构造应力场和水平面内剪切应力场。在 ANSYS 中建立三维有限元模型进行自重应力场和 3 个边界水平构造应力场的计算。

本文在建立三维数值分析模型时, 编写 ANSYS

APDL 宏文件<sup>[13, 14]</sup>。

### 2.4 软件设计

根据上述原理, 编制了三维地应力场多元回归分析计算机软件 MEBA 以及与 ANSYS 的接口程序 MEBA<sup>[15]</sup>。MEBA 软件程序框图如图 1 所示。

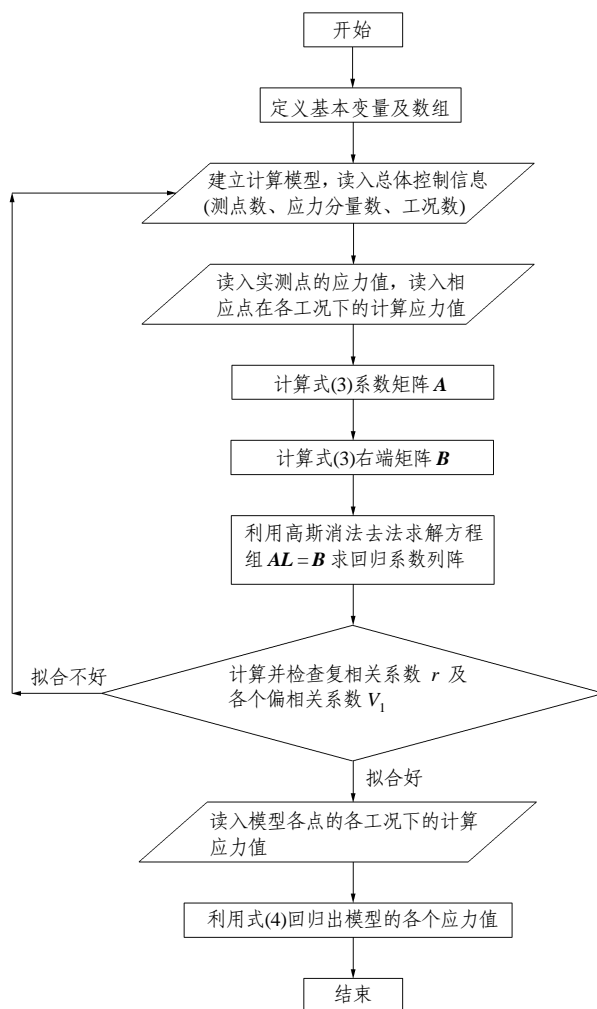


图 1 程序框图

Fig.1 Flow-chart of program

## 3 乌鞘岭隧道地应力场拓展分析

首先, 将实测地应力结果作为因变量, 把在有限元软件 ANSYS 中分别计算所得的自重应力场和 3 个边界水平构造应力场中相应于地应力实测点的计算数据作为自变量, 根据多元回归法原理, 建立自变量和因变量之间的映射关系, 即求得回归系数。

然后, 依据上述映射关系, 将 ANSYS 中分别计算所得的自重应力场和 3 个边界水平构造应力场的所有计算数据与其对应的回归系数相乘并进行叠加, 即可拓展计算出整个区域的地应力场数据。

由于回归计算时自变量考虑采用地应力场的主要构成因素,因此仅选取自重应力场和3个边界水平构造应力场。在有限元 ANSYS 中采用弹性假设。计算自重应力场计算时采用岩体实测密度,计算模型侧面及底面加位移约束,均仅限制其法向方向位移。而在进行构造应力场计算时,在两个侧面分别施加水平方向单位均布位移来模拟水平方向构造作用力,对非加载侧面边界和底部边界的约束条件与自重应力场模拟时相同。对水平面内剪切应力的模拟,则通过施加边界位移来模拟,在长、短边界上也分别施加相应的位移<sup>[16]</sup>。

### 3.1 地应力场分析模型

因为微机的存储和速度均远远不能满足本项目计算要求,因此采用了联想深腾 1800 高性能并行计算机群系统<sup>[9]</sup>。

计算模型取隧道轴线兰州—武威方向为  $x$  轴(约  $N17^\circ W$ ),兰州端隧道进口处为  $x$  轴的起点。坐标系  $z$  轴向上,  $y$  轴符合右手螺旋规则。计算模型总范围为  $12\ 400\text{ m} \times 3\ 000 \times 1\ 430\text{ m}$ 。由于模型非常大,分为 I 段“模型 I”和 II 段“模型 II”进行分析。根据地应力场的弹性假定,采用线弹性材料本构模型计算各子构造应力场。为尽量减小计算量,在 ANSYS 中采用 SOLID45 三维实体单元。其中,模型 I 的单元数为 1 021 262,节点数 177 642;模型 II 单元数为 421 857,节点数 77 725。

隧道区域数字地质模型如图 2 所示,平面尺寸为  $20\ 050\text{ m} \times 3\ 000\text{ m}$ ,起始高程为  $2\ 110\text{ m}$ 。图中按深浅区分了不同岩性及断层信息,并标出了地应力测量的孔位。

模型 I 和模型 II 的三维有限元网格如图 3 所示,其中 F4 断层位于模型 I, F7 断层位于模型 II。模型 I 含有 3 个水压致裂地应力测孔<sup>[17]</sup>: 5<sup>#</sup>, 6<sup>#</sup> 斜井及 LWZ-1。3 个侧孔共提供了 47 个测点的应力,其中 20 个点的应力有方向,可以供回归分析使用。模型 II 含有 3 个水压致裂地应力测孔, 7<sup>#</sup>, 8<sup>#</sup> 斜井及

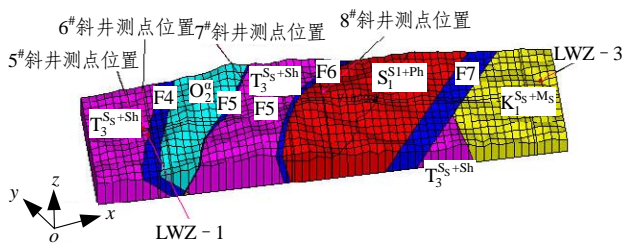


图 2 整体三维模型  
Fig.2 Integrated 3D model

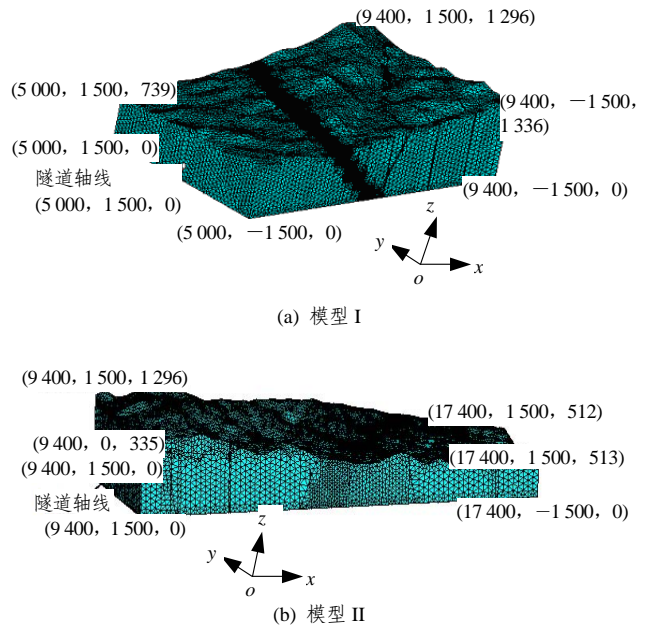


图 3 三维有限元网格(单位: m)  
Fig.3 3D FE meshes(unit: m)

LWZ-3, 共提供了 12 个测点的应力,其中可用于回归分析的有效测点共计 6 个。

根据地质资料<sup>[18]</sup>,在计算区域内考虑的主要的岩性有砂岩夹砾岩及泥岩、砂岩夹页岩及薄层煤、板岩夹千枚岩、安山岩等,主要考虑的断层带为 F4, F5, F6 和 F7。计算采用的岩体力学参数<sup>[19]</sup>如表 1 所示。

表 1 岩体力学参数表  
Table 1 Mechanical parameters of rock mass

介质	围岩级别	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g · cm <sup>-3</sup> )
T <sub>3</sub> <sup>Ss+Sh</sup>	IV	1.8	0.35	2.500
F4 断层	V	1.7	0.45	2.400
O <sub>2</sub> <sup>g</sup>	IV	1.8	0.35	2.500
F5 断层	V	1.7	0.45	2.400
T <sub>3</sub> <sup>Ss+Sh</sup>	IV	1.8	0.35	2.500
F6 断层	V	1.1	0.45	2.479
S <sub>1</sub> <sup>S1+Ph</sup>	V	1.3	0.43	2.401
F7 断层	V	1.1	0.45	2.479
T <sub>3</sub> <sup>Ss+Sh</sup>	IV	1.8	0.35	2.500
K <sub>1</sub> <sup>Ss+Ms</sup>	IV	1.8	0.35	2.500

### 3.2 模型 I 地应力场拓展分析结果

如前所述,利用有限元多元回归分析原理对模

型 I 进行计算, 得到了与 4 个自变量(分别为自重应力、隧道轴线方向构造应力、垂直轴线方向构造应力和水平面内剪切应力)相对应的回归系数  $L_1 = 1.181\ 189$ ,  $L_2 = -45.887\ 846$ ,  $L_3 = -33.191\ 775$ ,  $L_4 = -1\ 252.416\ 754$ 。计算得到复相关系数  $r = 0.951$ , 接近于 1, 说明回归效果较好。偏相关系数  $V_1 = 0.951$ ,  $V_2 = 0.698$ ,  $V_3 = 0.480$ ,  $V_4 = 0.476$ 。第一个偏相关系数很大, 接近于 1, 说明所施加的自重应力场对观测数据的作用非常显著。

求得 4 个自变量的回归系数后, 代入式(4)即求得在实测位置的回归计算值, 实测值与反演结果的比较如表 2 所示。

模型 I 中 5#斜井测点最大水平主应力、最小水

平主应力及自重应力的实测值与反演分析值的对比曲线如图 4~6 所示。可以看出, 由于断层的作用, 水平构造应力较为复杂, 水平应力回归结果与实测结果的比较可以看出这一点。总体上反演回归值较好的反映了地层应力的变化趋势。自重应力的反演分析结果与实测值的差值大约为 2.4%。铅直方向应力以自重应力为主, 这与地应力反演分析的假定相符, 而且可以从自重应力的回归系数接近于 1 得到验证。

模型 I 在隧道轴线方向及垂直于轴线方向的应力云图如图 7 所示, 它们反映了宏观地应力场的形态和特点。特别是反映了 F4 断层对宏观地应力场的影响程度。对设计和施工有着重要的参考价值。

表 2 模型 I 地应力实测值与反演分析值比较

Table2 Comparison of measured and regressive geostresses of model I

钻孔斜井号	序号	埋深/m	实测值				反演分析值			
			$\sigma_H$ /MPa	$\sigma_H$ 与 x 轴夹角/(°)	$\sigma_h$ /MPa	$\sigma_v$ /MPa	$\sigma_H$ /MPa	$\sigma_H$ 与 x 轴夹角/(°)	$\sigma_h$ /MPa	$\sigma_v$ /MPa
	1	517.63	4.50	17.00	2.50	13.98	18.93	31.82	11.29	13.64
	2	520.94	11.50	44.00	6.00	14.07	19.13	31.78	11.48	13.99
	3	522.60	9.59	32.00	6.09	14.11	19.34	31.76	11.69	14.36
	4	524.06	23.00	29.00	12.00	14.15	19.00	31.76	11.35	13.74
5#	5	524.80	17.00	44.00	8.50	14.17	19.05	31.74	11.41	13.83
	6	528.65	21.00	49.00	10.50	14.27	19.10	31.72	11.46	13.92
	7	530.48	16.00	23.00	8.00	14.32	19.00	31.83	11.37	13.76
	8	532.60	11.69	36.00	6.69	14.38	19.06	31.82	11.42	13.85
	9	544.60	19.31	39.00	11.31	14.70	19.19	31.81	11.55	14.07
	10	532.91	14.50	43.00	7.50	14.39	18.95	33.52	11.46	14.36
	11	535.95	20.09	43.00	10.59	14.47	19.18	33.51	11.70	14.78
	12	536.12	22.50	9.00	12.50	14.48	19.31	33.50	11.82	15.00
	13	540.62	24.50	50.00	14.00	14.60	18.90	33.55	11.42	14.30
6#	14	540.62	23.00	14.00	13.00	14.60	19.01	33.54	11.56	14.55
	15	544.48	25.50	10.00	13.50	14.70	19.11	33.57	11.66	14.73
	16	545.76	24.00	42.00	13.50	14.74	18.93	33.60	11.47	14.40
	17	549.95	19.23	44.00	10.23	14.85	18.99	33.62	11.53	14.52
	18	557.95	25.31	48.00	14.31	15.06	19.05	33.62	11.60	14.65
LWZ-1	19	335.52	19.46	29.00	11.41	9.06	16.16	43.19	12.19	11.17
	20	379.62	12.55	53.00	8.35	10.25	17.33	43.42	13.49	12.22

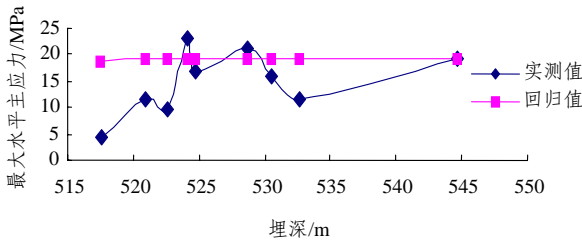


图4 5#斜井测点最大水平主应力实测值与回归值比较  
Fig.4 Comparison of  $\sigma_H$  between measured and regression results in measurement hole No.5

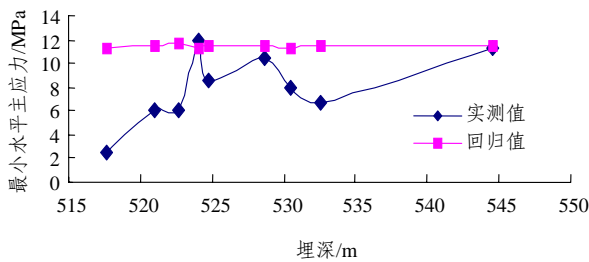


图5 5#斜井测点最小水平主应力实测值与回归值比较  
Fig.5 Comparison of  $\sigma_h$  between measured and regression results in measurement hole No.5

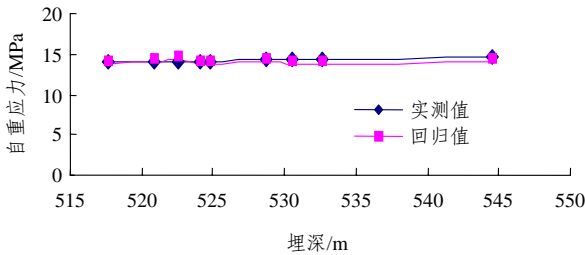
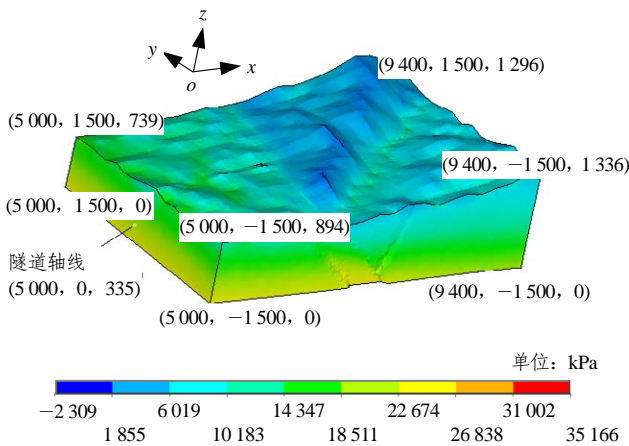
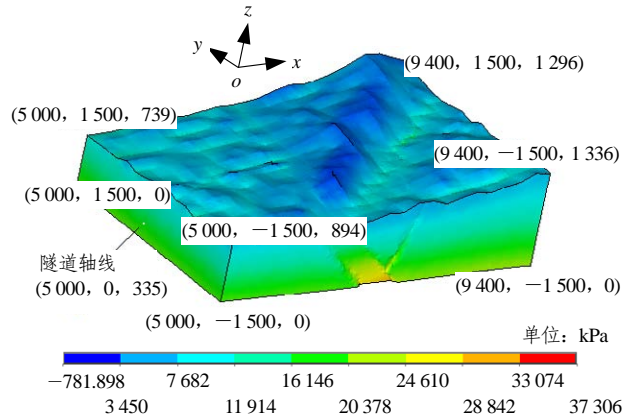


图6 5#斜井测点自重应力实测值与回归值比较  
Fig.6 Comparison of  $\sigma_v$  between measured and regression results in measurement hole No.5



(a) 隧道轴线方向应力  $\sigma_x$  云图



(b) 垂直于隧道轴线水平应力  $\sigma_y$  云图

图7 模型I应力云图(单位: m)  
Fig.7 Stress contours of model I(unit: m)

为了宏观评估断层位置隧道衬砌的横向受力特点,分析了模型 I 在 F5 断层处的横剖面上的  $\sigma_y$  应力云图如图 8 所示,断层中心位置约在 YDK171+315 处(与隧道轴线的交点位置)。可以看出,隧道在 F5 断层处横向受力不对称,在一定的范围内有明显的偏载现象。

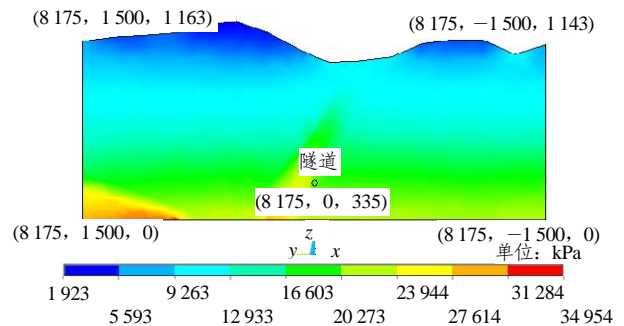


图8 横剖面 YDK171+315 的  $\sigma_y$  应力云图(单位: m)  
Fig.8 Contours of  $\sigma_y$  in the cross section (YDK171+315) (unit: m)

根据模型 I 在  $y = 0$  m(隧道轴线位置)处 3 个纵剖面的  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  随里程变化曲线, F4 和 F5 断层处应力均有挤压的特点。据模型 I 在  $y = 0$  m(隧道轴线位置)处纵剖面的自重应力  $\sigma_v$ 、最大水平主应力  $\sigma_H$  和最小水平主应力  $\sigma_h$  随埋深变化曲线可以明显看出, F4 和 F5 断层处应力升高的特点明显。

模型 I 隧道轴线位置侧压力系数  $K_{y1}$  随里程变化曲线如图 9 所示。可以看出, F4 断层的存在对隧道衬砌的设计提出了特殊的要求。所给地应力以及

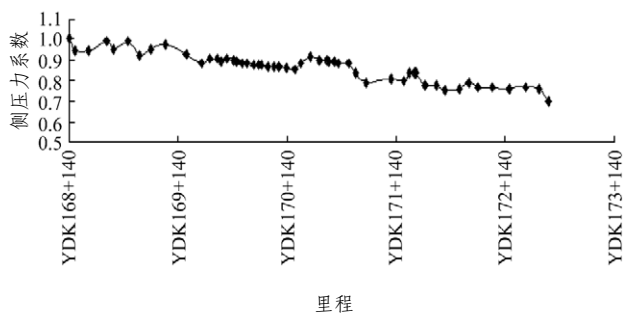


图 9 模型 I 隧道轴线位置侧压力系数随里程变化曲线  
Fig.9 Curve of lateral pressure coefficients along sections in tunnel axis of model I

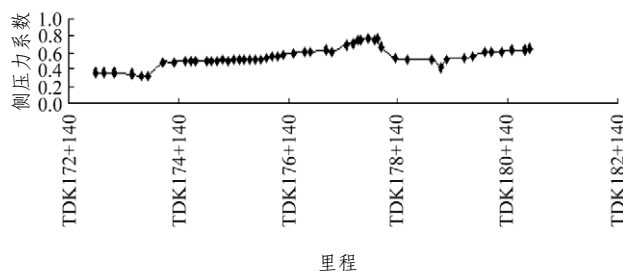


图 11 模型 II 隧道轴线位置侧压力系数随里程变化曲线  
Fig.11 Curve of lateral pressure coefficients along sections in tunnel axis of model II

侧压力系数曲线对设计和施工有一定的参考价值。

### 3.3 模型 II 地应力场拓展分析结果

利用与模型 I 同样方法对模型 II 进行分析, 得到与 4 个自变量相对应的回归系数  $L_1 = 1.228\ 767$ ,  $L_2 = -7.025\ 772$ ,  $L_3 = 36.494\ 544$ ,  $L_4 = 1\ 458.168\ 461$ 。计算得到复相关系数  $r = 0.974$ , 接近于 1, 说明回归效果较好。偏相关系数  $V_1 = 0.975$ ,  $V_2 = 0.075$ ,  $V_3 = 0.516$ ,  $V_4 = 0.440$ 。第一个偏相关系数很大, 接近于 1, 说明所施加的自重应力场对观测数据的作用非常显著。

模型 II 在隧道轴线剖面的  $\sigma_y$  应力云图如图 10 所示。宏观地应力场的形态和特点明显特别是反映了 F7 断层及千枚岩夹板岩地段的宏观地应力场的形态和特点, 对衬砌设计和施工具有重要参考价值。

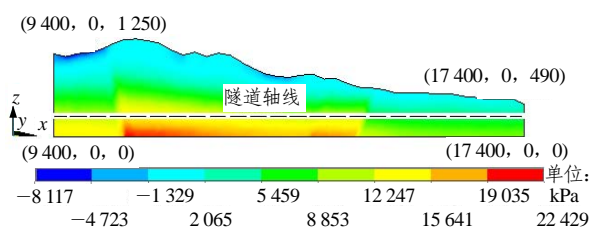


图 10 模型 II 隧道轴线剖面  $\sigma_y$  应力云图(单位: m)  
Fig.10 Contours of  $\sigma_y$  of model II in vertical cross-section along tunnel axis(unit: m)

模型 II 隧道轴线位置侧压力系数  $K_2$  随里程变化曲线如图 11 所示。可以看出, F6, F7 断层以及中间的志留系板岩夹千枚岩地段侧压力系数偏高, 对隧道衬砌的设计提出了特殊要求。所给地应力及侧压力系数曲线对设计和施工有一定的参考价值。

## 4 结 论

本文通过有限元多元线性回归方法对兰武二线乌鞘岭隧道区域岭脊地段地应力场的形态和特点进行了拓展研究, 并与现场变形观测结果进行了比较分析, 得到以下认识:

(1) 采用多元回归分析方法, 依据有限的实测地应力拓展计算隧道区初始地应力场, 能较好地反映地形、地貌和地质条件对初始地应力场的影响。通过对乌鞘岭隧道区原岩应力场的拓展分析, 证明了所采用方法的可行性。乌鞘岭隧道宏观地应力场的主应力方向为  $N21.2^\circ E$ 。与隧道轴线的夹角为  $38.2^\circ$ , 断层区隧道衬砌具有纵向挤压的特点, 这一点可以从三维变形监测成果得到印证。

(2) 根据区段地应力实测、地应力场形态及特点模拟分析以及隧道施工实践, 综合分析乌鞘岭隧道 F4~F7 断层区段地应力场可以看出: 根据岩体强度与水平地应力的比值, 60% 以上区段为高地应力区; 多元回归分析结果表明, 区段地应力值高, 在隧道轴线位置, 最大垂直地应力为 32.10 MPa, 垂直于隧道轴线方向最大水平地应力为 21.72 MPa; 地应力状况受岩性和结构完整程度影响显著, 隧道区地应力无论是量值还是方向变化幅度都比较大, 最大水平地应力方向在  $N10^\circ E \sim N36^\circ E$  范围变化, 规律不明显。因此, 乌鞘岭隧道 F4~F7 断层区段应力状态比较复杂, 属于复杂地应力区段。

(3) 断层位置侧压力系数均反映出增加趋势, 对衬砌的设计和施工有较高要求。

(4) 本文分析结果与《现场测试阶段成果报告》<sup>[20]</sup> 及《三维变形监测阶段成果报告》<sup>[21]</sup> 的测量结果进行比较, 发现在断层地带, 实测围岩压力及围岩变形受断层作用的影响显著, 隧道位置局部存在横向受力不对称现象。

(5) 根据拓展宏观地应力场应力云图, 可以掌握沿隧道轴线方向因岩性(断层)变化而表现出的应力过渡特点, 这对隧道工程动态设计与施工具有一定参考价值。

### 参考文献(References):

- [1] 孔令曦, 沈荣芳. 城市地下空间发展可持续性评价[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(1): 119 - 122.(KONG Lingxi, SHEN Rongfang. Evaluation of sustainability for development of underground space in urban[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(1): 119 - 122.(in Chinese))
- [2] 刘 赫. 秦岭隧道建造关键技术[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(2): 132 - 136.(LIU Cheng. The key technology in constructing the Qinling tunnel[J]. China Railway Science, 2003, 24(2): 132 - 136.(in Chinese))
- [3] 梁文灏, 李国良. 乌鞘岭特长隧道方案设计[J]. 现代隧道技术, 2004, 41(2): 1 - 7.(LIANG Wenhao, LI Guoliang. Tentative project of Wushaoling tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41(2): 1 - 7.(in Chinese))
- [4] 赵德安, 蔡小林, SWOBODA G, 等. 锚杆单元及其在黄土隧道计算中的若干问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4 183 - 4 189. (ZHAO Dean, CAI Xiaolin, SWOBODA G, et al. Some problems associated with analysis of tunnels in loess using bolt elements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4 183 - 4 189.(in Chinese))
- [5] 赵德安, 蔡小林, 陈志敏, 等. 侧压力系数对隧道衬砌力学行为的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增2): 2 857 - 2 860. (ZHAO Dean, CAI Xiaolin, CHEN Zhimin, et al. Influence of side-pressure coefficient on mechanical behavior of tunnel lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Supp.2): 2 857 - 2 860.(in Chinese))
- [6] 赵德安, 陈志敏, 蔡小林, 等. 中国地应力场分布规律统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1 265 - 1 271.(ZHAO Dean, CHEN Zhimin, CAI Xiaolin, et al. Analysis of the distribution rule of geostress in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1 265 - 1 271.(in Chinese))
- [7] 邱祥波, 李术才, 李树忱. 三维地应力回归分析方法与工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1 613 - 1 617.(QIU Xiangbo, LI Shucui, LI Shuchen. 3D geostress regression analysis method and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1 613 - 1 617.(in Chinese))
- [8] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1995.(YANG Linde. Back analysis theory for geotechnical engineering and its engineering application[M]. Beijing: Science Press, 1995.(in Chinese))
- [9] 联想集团有限公司高性能服务器事业部. 联想深腾 1800 机群系统[R]. 北京: 联想集团, 2002.(Legend group Ltd. Legend deep comp. 1800 cluster system[R]. Beijing: Lenovo Group., 2002.(in Chinese))
- [10] 周纪芾. 实用回归分析方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990. (ZHOU Jixiang. Practical regressive analysis method[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1990.(in Chinese))
- [11] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [12] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.(CAI Meifeng. Principle and techniques of in-situ stress measurement[M]. Beijing: Science Press, 2000.(in Chinese))
- [13] ANSYS, Inc. APDL Programmer's guide[R]. [S. l.]: ANSYS, Inc., 2004.
- [14] ANSYS, Inc. Theory reference[R]. [S. l.]: ANSYS, Inc., 2004.
- [15] 彭国伦. Fortran 95 程序设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002. (PENG Guolun. Fortran 95 program design[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.(in Chinese))
- [16] 张奇华, 钟作武, 龚壁新. 施加边界位移产生纯剪应力及反分析应用[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(2): 34 - 36.(ZHANG Qihua, ZHONG Zuowu, GONG Bixin. Method of generating pure shear stress by adding boundary displacement and its application to back analysis for geostress field[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000, 17(2): 34 - 36.(in Chinese))
- [17] 中国地震局地壳应力研究所. 兰武二线乌鞘岭特长铁路隧道水压致裂地应力测量报告[R]. 北京: 中国地震局地壳应力研究所, 2004.(The Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration. Measurement Report of Hydraulic Fracturing of Wushaoling Tunnel[R]. Beijing: The Institute of Crustal Dynamic, China Earthquake Administration, 2004.(in Chinese))
- [18] 李 响, 钱伟平. 乌鞘岭隧道地质条件综述[J]. 铁道勘察, 2005, (4): 57 - 61.(LI Xiang, QIAN Weiping. Summary for the geological conditions of Wushaoling tunnel[J]. Railway Investigation and Surveying, 2005, (4): 57 - 61.(in Chinese))
- [19] 铁道第一勘察设计院. 乌鞘岭隧道岭脊地段复杂应力条件下的变形控制技术研究报告[R]. 兰州: 铁道第一勘察设计院, 2005.(The First Survey and Design Institute of China Railways. Research report of displacement control technique of Wushaoling tunnel under complicated stress[R]. Lanzhou: The First Survey and Design Institute of China Railways, 2005.(in Chinese))
- [20] 石家庄铁道学院. 乌鞘岭隧道岭脊地段复杂应力条件下的变形控制技术研究报告: 现场测试阶段成果报告[R]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2005.(Shijiazhuang Railway Institute. The subject research report of displacement control technique of Wushaoling tunnel under complicated stress: report of in-situ measurement[R]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway Institute, 2005.(in Chinese))
- [21] 中铁西南科学研究院. 乌鞘岭隧道岭脊地段复杂应力条件下的变形控制技术研究报告: 三维变形监测阶段成果报告[R]. 成都: 中铁西南科学研究院, 2005.(Southwest Research Institute of CREC. The subject research report of displacement control technique of Wushaoling tunnel under complicated stress: phase report of 3D deformation monitoring[R]. Chengdu: Southwest Research Institute of CREC, 2005.(in Chinese))