

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0378

基于侧压力系数的岩爆区初始地应力场二次反演分析

蒙 伟, 何 川, 汪 波, 张钧博, 吴枋胤, 夏舞阳

(西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要: 为准确获得桑珠岭隧址区初始地应力场分布规律, 提出在岩爆区初始地应力场的二次反演方法。采用最小二乘法寻优准则对隧址区初始地应力场进行多元线性回归分析, 利用叠加原理得到在一次反演下的初始地应力场; 采用表面应力解除法测量隧道开挖后的洞壁二次应力, 记录发生岩爆的部位并据此判断侧压力系数的大小, 与在一次反演下相应位置的侧压力系数进行对比, 如果两者都大于或者等于或者小于 1, 则以在一次反演下计算得到的侧压力系数为基准, 以其大小不变作为约束条件对初始地应力进行修正, 当采用修正后的初始地应力作为应力边界条件, 计算得到隧道开挖后的洞壁二次应力与实测洞壁二次应力最接近时, 以此时修正后的初始地应力和原位地应力进行回归得到在二次反演下的地应力场。结果表明: 当测量原位地应力的钻孔较少且计算区域较大时, 一次反演回归得到离钻孔较远位置的应力计算值与实测值存在一定的误差; 二次反演在原位地应力的基础上增加实测洞壁二次应力进行修正, 得到离钻孔较远位置的应力计算值与实测值吻合更好, 所提出的二次反演方法可为类似工程的研究提供参考。

关 键 词: 侧压力系数; 岩爆; 地应力场; 反演; 表面应力解除法

中图分类号: TU 32

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)11-4191-11

Two-stage back analysis of initial geostress field in rockburst area based on lateral pressure coefficient

MENG Wei, HE Chuan, WANG Bo, ZHANG Jun-bo, WU Fang-yin, XIA Wu-yang

(Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering of Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031 China)

Abstract: In order to accurately obtain the distribution rule of initial geostress field of Sangzhuling tunnel site, a two-stage back method to calculate initial geostress in rockburst area is presented. Based on the least square method, multiple linear regression is used to analyze the initial geostress field and with superposition principle, the initial geostress field is obtained. The wall stress after tunnel excavation is measured through stress relief method. According to the site of rockburst, the lateral pressure coefficient is acquired and then compared with its equivalent value from the primary inversion in the corresponding position. If both values are larger than or equal to or less than one, then the lateral pressure coefficient is assumed to be the calculated value of primary inversion and the value is taken as the constraint condition to modify the initial geostress. When the calculated secondary wall stress acquired from the modified initial geostress is close to the measured one, the secondary geostress is obtained through the regression analysis with the modified initial geostress and in-situ geostress. The conclusions show that when a small number of boreholes are used for in-situ geostress and with a large computational domain, there are some errors between the measured stress and the calculated stress from the primary inversion in positions far from the boreholes. Furthermore, based on in-situ geostress, the secondary inversion modifies results by using measured secondary wall stress as a complement, and then the calculated stress in positions far from the boreholes shows better agreement with the measured stress, which can be presented as an inversion method to provide reference for similar research projects.

Keywords: lateral pressure coefficient; rockburst; geostress field; back analysis; surface stress relief method

收稿日期: 2018-03-18

基金项目: 国家重点研发计划资助 (No. 2016YFC0802201); 国家自然科学基金资助 (No. 51878571, No. 51578456); 中国铁路总公司科技研究开发计划项目资助 (No. 2017G006-B)。

This work was supported by the National Key R&D Program of China(2016YFC0802201), the National Natural Science Fund(51878571, 51578456) and the Scientific and Technological Research and Development Program of China Railway Corporation(2017G006-B).

第一作者简介: 蒙伟, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事隧道与地下工程方面的研究工作。E-mail: 13028317521@163.com

通讯作者: 汪波, 男, 1975 年生, 博士, 教授, 主要从事隧道与地下工程方面的教学和研究工作。E-mail: ahhbowang@163.com

1 引言

随着西部大开发战略的实施,深埋、长大隧道的数量不断增加,由于西部地区的地质构造运动强烈,导致该地区构造应力场的分布规律较为复杂。由岩体自重和构造作用为主要因素形成的岩体初始地应力场,是隧道开挖后研究岩体力学属性的重要基础^[1]。而初始地应力可通过原位地应力现场测试较为准确地获得,但是大部分的测试因场地、经费等因素不能进行,且测试结果较难反映整个隧址区初始地应力场的分布规律^[2-4]。因此,为获得较为可信的初始地应力场,根据现场原位地应力等相关实测资料,并结合地质构造条件,对初始地应力场进行一次反演被大量采用,但大量的文献表明,一次反演得到的初始地应力场因受原位地应力数据少、反演区域大等因素影响与现场实际情况往往存在一定的误差,为此,为获得更为准确的初始地应力场分布规律,国内外学者依据工程施工过程中的位移、应力等相关信息,以一次反演得到的初始地应力场为基础,采取某种计算模式或者数学理论开展二次地应力场的反演分析。

薛变鸾等^[5]基于复合单元法对初始地应力场进行了二次反演,降低了划分网格的难度,但计算量较大。汪波等^[6]通过改变模型边界上的构造应力来拟合实际岩爆区,以最接近实际破坏范围的计算构造应力对初始地应力场进行反演,得到了实际变化规律的地应力场,但需要通过大量试算才能确定边界构造应力。周华^[7]、秦卫星^[8]等基于子模型思路,建立整体模型和子模型分两步对初始地应力场进行反演,降低了计算的复杂性,但易陷入局部最优解。裴启涛等^[9-10]通过建立小尺度的精细模型并采用非线性边界,利用遗传神经网络法对初始地应力场进行二次反演,提高了反演效果,但不能对较深测点进行二次反演,且荷载边界效应会对精细模型内的地应力分布产生较大影响;后又提出考虑地应力张量分布特征的初始地应力场二次反演方法,改善了精细模型的初始边界条件,进一步提高了计算精度,但同样不能对较深测点进行二次反演。

Zhang^[11]、张社荣^[12]等建立逐步回归-差异进化-支持向量机模型(SR-DE-SVM)的二次反演非线性模型对初始地应力场进行二次反演;后又采取逐步线性回归方法耦合人工神经网络对初始地应力场进行二次反演,两种方法均能够得到较为准确的初始地应力场,但是当测量原位地应力的钻孔较少且计算区域较大时,反演得到的地应力场与现场实际情况会存在一定的误差。

针对以上不足,本文以桑珠岭隧址区为背景,结合圆形隧道开挖后洞周局部围岩的弹性二次应力解析解,通过在修正初始地应力大小时,以在一次反演下计算得到的侧压力系数为基准,以其大小不变作为约束条件对岩爆区的初始地应力依据测得的洞壁二次应力进行修正,提出在岩爆区初始地应力场的二次反演方法,并修正了残差平方和为最小值的方程式。

其中,以在一次反演下计算得到的侧压力系数为基准,以其大小不变作为约束条件,可避免通过大量试算才能确定边界构造应力;依据测得的洞壁二次应力进行二次反演可避免易陷入局部最优解、可避免不能对较深测点进行反演、当测量原位地应力的钻孔较少且计算区域较大时,可减小反演得到的地应力场与现场实际情况之间的误差。通过对桑珠岭隧址区初始地应力场进行二次反演,可验证该二次反演方法对初始地应力场采用表面应力解除法测得的洞壁二次应力进行修正的实用性及有效性。

2 工程概况

桑珠岭隧址区位于我国地壳运动最强烈的地区之一,构造发育,隧道开挖过程中多次发生中等及强烈岩爆;其岩性主要以花岗岩、闪长岩等极硬岩为主;其地面标高为 3 300~5 100 m,高差达 1 800 m,隧道最大埋深为 1 347 m,为典型的高山峡谷地貌;桑珠岭隧道于 DK175+760~DK175+910 先穿越沃卡地堑东缘断裂 F₅₋₂,该断裂全长约 60 km,宽度近 150 m,后穿越呈近南北向展布的巴玉断层 F₃,宽度为 40~80 m;其隧道纵断面地质见图 1。

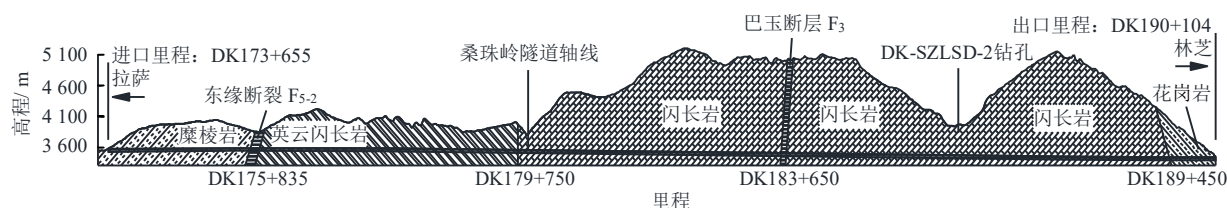


图1 隧道纵断面地质图

Fig.1 Geological map of tunnel longitudinal section

根据桑珠岭隧道地质试验,在里程 DK186+327 轴线附近通过水压致裂法完成了 DK-SZLSD-2 钻孔的原位地应力测试工作^[13],结果见表 1。

表 1 DK-SZLSD-2 钻孔水压致裂法地应力测量结果^[13]
Table 1 Ground stress measurement results from borehole DK-SZLSD-2 water pressure burst^[13]

测段深度 / m	主应力值/ MPa			破裂 方位
	σ_H	σ_h	σ_v	
205.85	9.41	5.61	5.34	N9° W
297.70	10.58	7.70	7.72	/
392.10	11.36	8.61	10.18	N6° W
477.20	12.58	9.70	12.39	/
582.85	17.72	13.10	15.13	N7° E

注: σ_H 为钻孔截面内最大水平主应力; σ_h 为钻孔截面内最小水平主应力; σ_v 为垂直主应力。

由表 1 可知,在 DK-SZLSD-2 钻孔附近区域主应力大小关系基本为 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$, 水平主应力占主导地位,表明 DK-SZLSD-2 钻孔附近区域存在一定的水平构造作用,考虑到一个钻孔原位地应力结果较难反映整个桑珠岭隧址区初始地应力场的分布规律,故有必要研究桑珠岭隧址区的初始地应力场。

3 隧址区初始地应力场一次反演分析

对初始地应力场进行反演的方法很多,而普遍采用的是有限元线性回归^[14-15],本文亦采用此法并以表 1 中的原位地应力为基础对桑珠岭隧址区隧道开挖之前的初始地应力场进行一次反演,其计算流程见图 2。其中岩体物理力学参数见表 2。

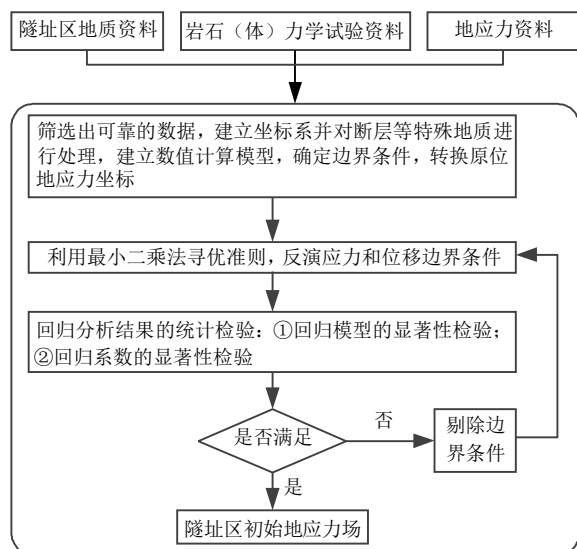


图 2 一次反演流程

Fig.2 Process of primary inversion

表 2 岩体物理力学参数^[13]

Table 2 Physico-mechanical parameters of rock masses^[13]

岩体类型	弹性模量 E	泊松比	重度 γ
	/ GPa		/ (kN/m ³)
糜棱岩带(I)	30	0.36	24.0
英云闪长岩(II)	52	0.21	26.0
闪长岩(III)	55	0.20	26.0
花岗岩(IV)	50	0.22	25.5
东缘断裂(V)	6	0.27	23.5
巴玉断层(VI)	8	0.26	23.5

3.1 数值计算模型的建立

考虑到现有计算机的计算能力以及计算精度等问题,在平面图上选择隧道线路附近 3 000 m × 16 900 m 的长方形区域作为计算区域。该区域包含桑珠岭隧道里程全长: DK173+655~DK190+104, 并且包含两条控制性断层: F_{5-2} 、 F_3 。由于断层形状极不规则,且缺乏三维坐标,故在建立数值计算模型时对其进行近似处理:在隧道轴线附近,断层方向与实际一致;在远离隧道轴线位置进行近似直线处理。在立面图上,模型底面取至隧道设计高程以下 1 000 m,模型顶面取至实际地形高程,实际地形可通过 SURFER 软件把等高线图采用克里金插值法插值得到高精度的三维地形图。为保证计算精度、方便网格划分,三维模型离散化全部采用 10 节点四面体等参单元 SOLID92。建立模型时根据隧道纵断面地质图分别对东缘断裂、巴玉断层取厚度为 150、80 m 的薄层进行模拟,划分网格时在断层破碎带附近对网格进行适当加密,网格剖分见图 3。然后对数值计算模型依据表 2 中的岩体物理力学参数赋予围岩材料属性。

3.2 边界条件的确定

根据有限元线性回归反演方法,假定计算区域的初始地应力场为自重应力场和构造应力场的线性叠加。由于在桑珠岭采用水压致裂法测量原位地应力,受其原理限制,所测的地应力无铅垂面内的剪切应力,因此,剪切应力只考虑水平 XOZ 平面内的应力。计算模型的自重和构造边界见图 4。

数值模拟计算中实现的过程如下:

(1) 自重应力场:依据表 2 中各岩体的重度等参数,对数值计算模型施加 Y 方向的重力加速度,计算在重力作用下产生的自重应力场,计算模型的侧面和底面边界施加法向位移约束。

(2) 构造应力场:在计算模型的两个侧面分别施加水平方向的均布荷载、三角形荷载来模拟水平方向的构造作用,对非加载的侧面和底面边界施加

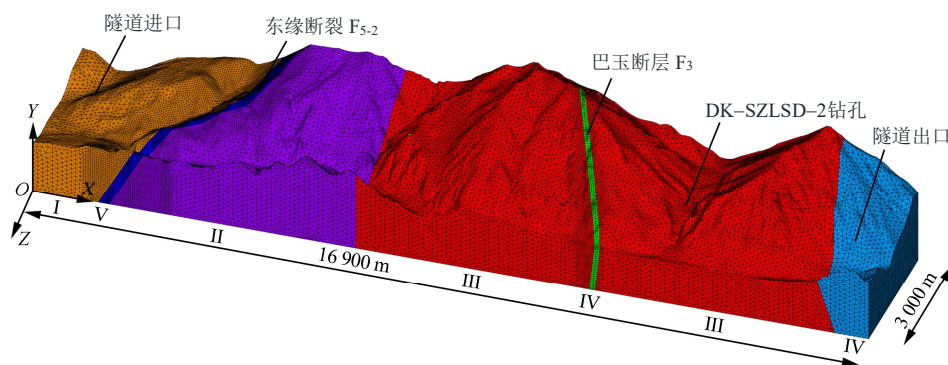


图3 数值计算模型网格剖分图

Fig.3 Grid partition diagram of numerical calculation model

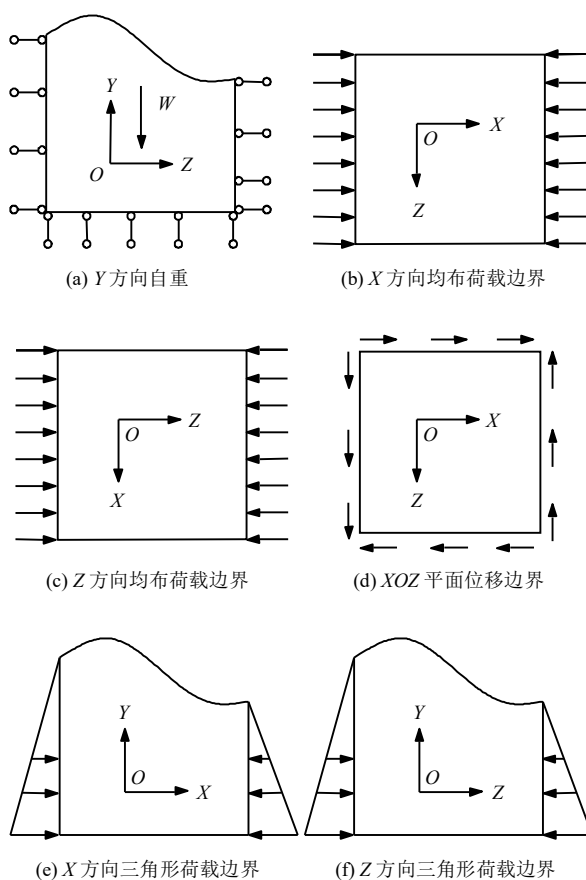


图4 自重和构造边界示意图

Fig.4 Diagram of gravity and tectonic condition

的约束条件与自重应力场相同；对水平面内剪切应力的模拟，依据文献[16]中的式(4)，可通过施加位移边界来模拟：即可以在长边界上施加 3.0 mm、在短边界上施加 16.9 mm 的位移，即可构造出比施加边界荷载更为接近的纯剪应力场。

3.3 转换原位地应力坐标

由于原位地应力是按照主应力平面方位给出的，见表 1，而在初始地应力场回归分析中，以计算坐标系 XYZ 中坐标的应力分量为基本对象，如图 3

所示，即正北方位与 Z 轴负向存在一定的角度，因此需要将测得的原位地应力进行坐标转换。依据弹性力学理论，应力由旧坐标系向新坐标系转换时，应力分量的计算式为

$$\sigma_{ij'} = \alpha_{i'i} \alpha_{j'j} \sigma_{ij} \quad (1)$$

式中： σ_{ij} 、 $\sigma_{ij'}$ 分别为转换前后旧、新坐标系下的应力分量； $\alpha_{i'i}$ 、 $\alpha_{j'j}$ 为转换系数。转换结果见表 3。

3.4 回归反演初始地应力场

将初始地应力回归计算值 $\hat{\sigma}_k$ 作为因变量，把有限元计算得到在自重应力场和构造应力场下相应于钻孔实测点位置的应力计算值 σ_k^i 作为自变量，则回归方程为

$$\hat{\sigma}_k = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \sigma_k^i \quad (2)$$

式中： k 为测点的序号； $\hat{\sigma}_k$ 为第 k 观测点的回归计算值； b_0 为自由项； b_i 为相应自变量的多元回归系数； n 为工况数，本项目 $n=6$ ，具体为图 4 中的 6 种工况； σ_k^i 为第 i 工况、第 k 观测点有限元的应力计算值； $\hat{\sigma}_k$ 、 σ_k^i 分别为相应 6 个应力分量回归值、计算值的单列矩阵。

假定有 m 个原位地应力测点，每个测点有 6 个观测分量，则全部原位地应力实测值与回归方程的偏离程度可以用残差平方和 $S_{\text{残}}$ 来表示：

$$S_{\text{残}} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \left(\sigma_{jk} - b_0 - \sum_{i=1}^n b_i \sigma_{jk}^i \right)^2 \quad (3)$$

式中： σ_{jk} 为第 k 观测点 j 应力分量的实测值； σ_{jk}^i 为 i 工况下 k 观测点 j 应力分量的有限元计算值。

根据最小二乘法原理，使得残差平方和为最小值的方程式为

$$\begin{bmatrix} 6m & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^2 & L & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^n \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^1)^2 & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk}^2 & L & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk}^n \\ \text{对} & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^2)^2 & L & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^2 \sigma_{jk}^n \\ & \text{称} & M & M \\ & & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^n)^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ M \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk} \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk} \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^2 \sigma_{jk} \\ M \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^n \sigma_{jk} \end{bmatrix} \quad (4)$$

解此方程式可得 1 个常数项 b_0 (当采用常数项的反演效果较好时可采用式 (4)) 和 n 个待定回归系数 $\mathbf{b} = (b_1, b_2, L, b_n)^T$, 通过相应显著性检验后利用叠加原理可得初始地应力场为

$$\sigma' = 1.210\ 3 + 1.191\ 7\sigma_{\text{自}} - 16.597\ 1\sigma_{\text{构}1} + 44.753\ 3\sigma_{\text{构}3} + 22.315\ 3\sigma_{\text{构}4} + 34.809\ 4\sigma_{\text{构}5} \quad (5)$$

式中: σ' 为初始地应力场回归值; $\sigma_{\text{自}}$ 、 $\sigma_{\text{构}1}$ 、 $\sigma_{\text{构}3}$ 、 $\sigma_{\text{构}4}$ 、 $\sigma_{\text{构}5}$ 分别为图 4(a)、4(b)、4(e)、4(f)、4(d) 的应力场。

3.5 一次反演结果分析

通过式 (5) 可得到初始地应力的回归值, 通过

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \\ \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{xz}^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: σ_x 、 σ_z 、 τ_{xz} 为一点的应力状态。

可得到主应力, 再通过下式计算:

$$\tan \alpha_1 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_x)}{\tau_{xz}} \quad (7)$$

式中: σ_1 、 σ_2 为相应这点的主应力; α_1 为 σ_1 与 X 轴的夹角。

由此可得到主应力与 X 轴的夹角, 最后可得回归方位角, 结果见表 3。

根据表 3 中的数据, 得到各测点的应力实测值、回归值与测点深度的变化规律, 见图 5。

表 3 原位地应力实测值、回归值及绝对误差

Table 3 Measured values, regression values and absolute errors of in-situ geostress

测段深度 /m	σ_x / MPa			σ_y / MPa			σ_z / MPa			τ_{xz} / MPa			方位角/(°)		
	实测值	回归值	绝对误差	实测值	回归值	绝对误差	实测值	回归值	绝对误差	实测值	回归值	绝对误差	实测值	回归值	绝对误差
205.85	6.04	5.83	0.21	5.34	5.05	0.29	8.98	8.76	0.22	1.20	1.64	0.44	-9.00	-13.50	4.50
297.70	7.98	7.68	0.30	7.72	7.68	0.04	10.30	10.36	0.06	0.85	1.29	0.44	/	/	/
392.10	8.83	9.42	0.59	10.18	10.25	0.07	11.14	12.06	0.92	0.75	0.96	0.21	-6.00	-7.40	1.40
477.20	9.79	10.87	1.08	12.39	12.47	0.08	12.49	13.59	1.10	0.50	0.66	0.16	/	/	/
582.85	13.12	12.55	0.57	15.13	15.17	0.04	17.70	15.46	2.24	0.29	0.32	0.03	7.00	4.41	2.59

注: 方位角为在 XOZ 水平面内最大水平主应力 σ_H 与正北方位的夹角, 以顺时针转为正。

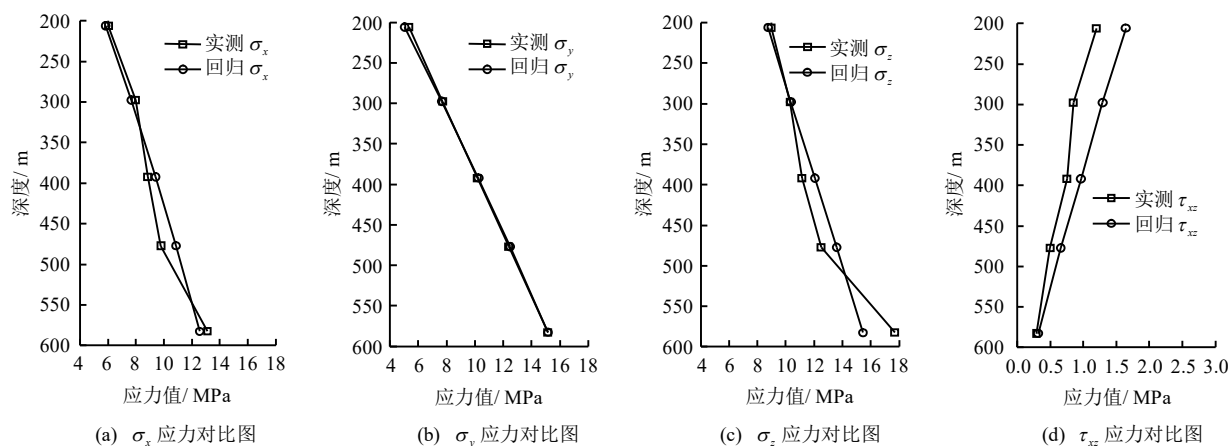


图 5 原位地应力实测值、回归值与测点深度的变化规律

Fig.5 Relationship between measured values/regression values of in-situ geostress and depth of measure points

由表 3、图 5 可知, 原位地应力回归值与实测值的绝对误差较小, 吻合较好; 竖直方向应力的回归值与实测值基本一致, 这与水压致裂法的基本假定有关; 水平方向应力的回归值与实测值大部分点吻合较好, 少数点有较大差异, 最大绝对误差仅为 2.24 MPa; 最大水平主应力方位角的回归值与实测值吻合较好, 最大绝对误差仅为 4.50° , 综合上述分析可知: 在钻孔附近区域原位地应力的回归值与实测值在量值上较为接近, 变化趋势基本相同, 表明一次反演回归得到在测量原位地应力钻孔附近区域的初始地应力场是合理、可信的。

4 一次反演结果的可靠性分析

4.1 现场实测洞壁二次应力

鉴于桑珠岭隧道岩性较好、岩体强度高、完整性好, 隧道开挖后, 在洞周局部围岩处仅产生较小的弹性变形, 故可假定隧道开挖后局部壁面岩体为均质各向同性线弹性体, 据此则可采用表面应力解除法测量 3 个应力分量的洞壁二次应力, 见图 6, 由于测得的洞壁二次应力包含了初始地应力和温度差引起的温度应力, 故本文未分析高地温对初始地应力的影响。运用此方法在桑珠岭隧道里程 DK183+183、DK183+256、DK183+509 测得的洞壁二次应力 σ_y^* 见表 4。



图 6 采用表面应力解除法现场实测洞壁二次应力
Fig.6 Surface stress relief method measuring in-situ secondary wall stress

4.2 应力实测位置处的洞壁二次应力数值计算

以在一次反演下现场洞壁二次应力实测位置 DK183+183、DK183+256、DK183+509 处, 通过式 (5) 计算得到图 7 模型边界中心位置的应力作为应力边界, 建立数值仿真平面应变模型, 长 \times 宽 = 100 m \times 100 m, 地表起伏等因素会导致岩体应力不均匀分布, 由于实测位置的隧道埋深大约为 1 000 m, 本文在 1 000 m 埋深下将长 \times 宽 = 100 m² 区域隧道开

挖前的应力分布假设为均匀分布, 即可用均布应力边界近似代替不均匀应力边界进行数值计算, 其中岩体物理力学参数见表 5, 得到隧道开挖后的洞壁二次应力 σ_y' 见表 4。

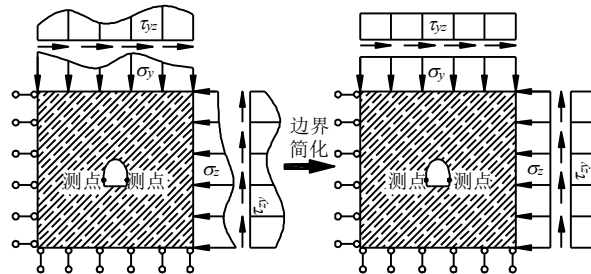


图 7 模型边界简化

Fig.7 Model boundary simplification

表 4 洞壁二次应力实测值 σ_y^* 与在一次反演下洞壁二次应力计算值 σ_y'

Table 4 Measured secondary wall stress σ_y^* and calculated secondary wall stress σ_y' obtained from primary inversion

里程/绝对误差之和	σ_y^* / MPa	σ_y' / MPa	绝对误差
DK183+183	32.71	46.15	13.44
DK183+256	35.70	46.22	10.52
DK183+509	38.23	45.90	7.67
绝对误差之和	/	/	31.63

表 5 里程 DK183+183~DK183+509 的岩体物理力学参数
Table 5 Physico-mechanical parameters of rock masses from DK183+183 to DK183+509

重度 γ / (kN/m ³)	弹性模量 E / GPa	泊松比	黏聚力 c / MPa	内摩擦角 ϕ / (°)
26.0	55.0	0.2	1.8	55.0

由表 4 可知, 采用在一次反演下计算得到的初始地应力作为应力边界条件, 得到里程 DK183+183、DK183+256、DK183+509 隧道开挖后的洞壁二次应力计算值与实测值间最大绝对误差为 13.44 MPa, 绝对误差值之和为 31.63 MPa, 表明当测量原位地应力的钻孔较少且计算区域较大时, 一次反演获得距 DK-SZLSD-2 钻孔里程 DK186+327 较远位置的初始地应力与实测值间存在一定的误差, 故有必要对在一次反演下计算得到这段区域附近的初始地应力进行修正。

考虑到洞壁切向应力是垂直于隧道轴线方向的应力, 是判断岩爆发生的重要指标, 故后续分析采用 Y 方向的实测洞壁二次应力 σ_y^* 对初始地应力进行修正, 可避免不能对较深测点进行反演。

5 侧压力系数分布特征分析

5.1 现场应力实测段的侧压力系数分布特征分析

通过式 (5) 可计算得到在一次反演下现场洞壁二次应力实测位置处的初始地应力 σ_z 、 σ_y ，则可通过 $\lambda = \sigma_z / \sigma_y$ 计算得到相应位置的侧压力系数，结果见表 6。

表 6 洞壁二次应力实测位置的初始地应力及侧压力系数
Table 6 Initial geostress and lateral pressure parameters of measured secondary wall stress position

里程	σ_z / MPa	σ_y / MPa	侧压力系数
DK183+183	21.49	27.42	0.78
DK183+256	21.29	27.41	0.78
DK183+509	20.44	27.07	0.76

由表可知，这 3 个里程位置的侧压力系数都小于 1。

5.2 基于岩爆发生部位的侧压力系数分布规律分析

桑珠岭隧道现场记录发生岩爆的部位见表 7。根据孔口应力集中理论，如岩爆发生在隧道拱顶或底部，则水平初始地应力为最大主应力；如岩爆发生在两侧边墙，则垂直初始地应力为最大主应力^[17]。据此可以判断相应位置侧压力系数的大小。

表 7 现场岩爆记录
Table 7 Records of in-situ rockburst

里程	发生部位		侧压力系数
	拱腰	拱顶	
DK183+163	●	/	<1
DK183+166	●	/	<1
DK183+172	●	/	<1
DK183+178	●	/	<1
DK183+181	●	/	<1
DK183+232	●	/	<1
DK183+484	●	/	<1
DK183+505	●	/	<1

注：“●”表示有岩爆发生；“/”表示无岩爆发生。

虽然在一次反演下计算得到的初始地应力与实测值间存在一定的误差，但由表 7 可知，在洞壁二次应力实测位置附近发生岩爆的部位在拱腰，则相应位置岩体的侧压力系数小于 1，而表 6 中的侧压力系数也小于 1，即表明在一次反演下得到这 3 个里程位置的侧压力系数分布特征大致符合桑珠岭隧道址区岩体实际应力分布规律，则可以用这 3 个侧压力系数对初始地应力场进行二次反演分析。

5.3 侧压力系数假定的可行性探讨

在围岩中开挖半径为 a 的圆形隧道，见图 8，在 σ_z 、 σ_y 的应力边界条件下依据弹性力学理论可求解得到隧道开挖后洞周局部围岩的弹性二次应力。由图 7 可知，在测点位置 Y 方向的洞壁应力与此处的切向应力近似相等，故对切向应力 σ_θ 进行分析。

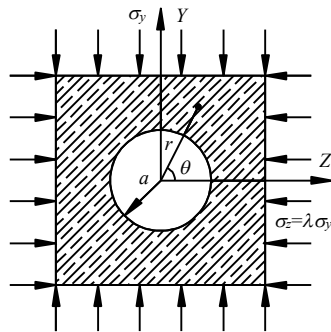


图 8 圆形隧道二次应力的计算简图
Fig.8 Calculation diagram of secondary stress in circular tunnel

在 Z 方向的应力边界条件下可近似求得围岩中某点半径为 r 、与 Z 轴夹角为 θ 的切向应力 σ'_θ ：

$$\sigma'_\theta = -\frac{1}{2}\lambda\sigma_y \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (8)$$

在 Y 方向的应力边界条件下，通过变换坐标系可近似求得围岩中某点半径为 r 、与 Z 轴夹角为 θ 的切向应力 σ''_θ ：

$$\sigma''_\theta = -\frac{1}{2}\sigma_y \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right] \quad (9)$$

式 (8)、(9) 通过叠加原理可得在 Z 、 Y 两个方向应力边界条件下相应位置的切向应力 σ_θ ：

$$\sigma_\theta = -\frac{\sigma_y}{2} \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) (1 + \lambda) + \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} \right) (1 - \lambda) \cos 2\theta \right] \quad (10)$$

式中： σ_θ 为圆形隧道开挖后洞周局部围岩的弹性切向二次应力； σ_y 为 Y 方向的边界应力； $\lambda = \sigma_z / \sigma_y$ ，为侧压力系数。

由式 (10) 可知，在修正 σ_z 、 σ_y 的大小使围岩中一点的二次应力计算值 σ_θ 与洞壁二次应力实测值 σ_y^* 最接近时，当在某一定点，则 r 、 θ 为常数，当隧道开挖半径 a 不变时，则有以下讨论结果：

(1) 无附加条件，在修正 σ_z 、 σ_y 的大小时，则 $\lambda = \sigma_z / \sigma_y$ 不断变化，与 σ_y 是相互独立的自变量，即可把式 (10) 看成求解二元一次方程，故有无限解；

(2) 在修正 σ_z 、 σ_y 的大小时, 假定侧压力系数 λ 为常数, 即可把式 (10) 看成求解一元一次方程, 故只有唯一解, 即可避免大量试算才能确定边界构造应力。对于桑珠岭隧道的马蹄形或其他隧道截面形状, 通过弹性力学的复变函数法可得到唯一解。

对于进入塑性状态的围岩, 假如采用摩尔-库仑直线型强度判据作为进入塑性状态的条件, 当 $\lambda = 1$ 时, 在图 7 中同一测点的切向应力 $\sigma_{\theta p}$ 为

$$\sigma_{\theta p} = \frac{\sigma_c}{\xi - 1} \left[\xi \left(\frac{r}{a} \right)^{\xi - 1} - 1 \right] \quad (11)$$

式中: $\sigma_{\theta p}$ 为圆形隧道开挖后的塑性切向二次应力; $\sigma_c = 2c \cos \varphi / (1 - \sin \varphi)$; $\xi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

由式 (11) 可知, 对于理想弹塑性模型, 当边界应力超过一定大小时, 在隧道开挖后, 部分围岩进入塑性状态, 其应力大小与围岩的位置、黏聚力和内摩擦角有关, 与边界应力不存在对应关系, 故在围岩发生塑性屈服的位置不能假定侧压力系数为常数对 σ_z 、 σ_y 进行修正。

综上所述, 对于均质、连续、各向同性的线弹性体, 在修正两个独立边界构造应力 σ_z 、 σ_y 的大小时, 为避免大量试算才能确定边界构造应力, 假定侧压力系数为常数大小不变对其进行修正可行。

6 隧址区初始地应力场二次反演分析

6.1 二次反演方法

修正在一次反演下初始地应力的大小时, 如果在一次反演下计算得到岩体的侧压力系数与现场通过发生岩爆部位判断的侧压力系数都大于 (或者等

于或者小于) 1, 则可以假定在一次反演下计算得到的侧压力系数为基准, 以其大小不变作为约束条件对初始地应力进行修正, 当采用修正后的初始地应力作为应力边界条件计算得到隧道开挖后的洞壁二次应力与实测洞壁二次应力最接近时, 以此时修正后的初始地应力和原位地应力通过最小二乘法寻优准则, 反演应力和位移边界条件, 并通过显著性检验后即可得到局部隧址区更加准确的二次反演地应力场。计算流程见图 9。

6.2 二次反演结果分析

按照桑珠岭隧道开挖方向, 在原位地应力的基础上增加实测洞壁二次应力对初始地应力场进行二次反演, 可避免易陷入局部最优解, 二次反演的工作为:

根据桑珠岭隧道 3 个实测洞壁二次应力分别对初始地应力进行修正, 以修正后的初始地应力和 DK-SZLSD-2 钻孔原位地应力对初始地应力场进行二次反演。其中, 以 DK183+183 的实测洞壁二次应力做二次反演一次修正、以 DK183+183、DK183+256 的实测洞壁二次应力做二次反演二次修正、以 DK183+183、DK183+256、DK183+509 的实测洞壁二次应力做二次反演三次修正。

通过回归模型和回归系数的显著性检验后, 即可得到隧道里程 DK183+183~DK183+509 附近局部隧址区的 3 个二次反演地应力场。

以在二次反演下, 在现场洞壁二次应力实测位置 DK183+183、DK183+256、DK183+509 处, 通过这 3 个二次反演地应力场同理可分别计算得到 3 组图 7 模型边界中心位置的应力, 并作为应力边界, 即可分别求解得到隧道开挖后的洞壁二次应力 σ_y'' , 结果见表 8。

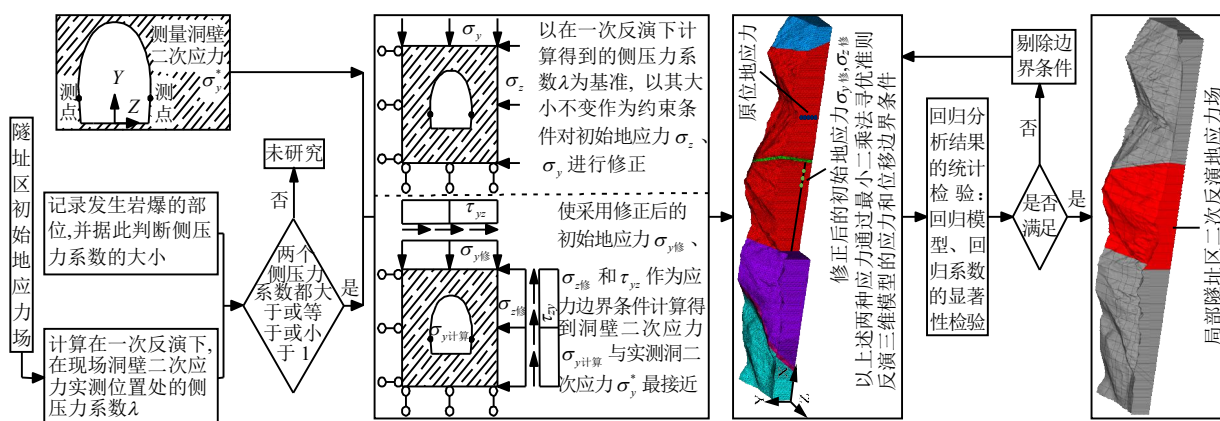


图 9 二次反演流程

Fig.9 Process of secondary inversion

表 8 洞壁二次应力实测值 σ_y^* 与在二次反演下洞壁二次应力计算值 σ_y'' (单位: MPa)Table 8 Measure secondary wall stress σ_y^* and calculated secondary wall stress σ_y'' obtained from secondary inversion (unit: MPa)

里程	实测 σ_y^*	一次反演		二次反演一次修正		二次反演二次修正		二次反演三次修正	
		σ_y'	绝对误差	σ_y''	绝对误差	σ_y'''	绝对误差	σ_y''''	绝对误差
DK183+183	32.71	46.15	13.44	32.64	0.07	33.59	0.88	34.80	2.09
DK183+256	35.70	46.22	10.52	32.64	3.06	33.59	2.11	34.80	0.90
DK183+509	38.23	45.90	7.67	32.34	5.89	33.27	4.96	34.46	3.77
绝对误差之和	/	/	31.63	/	9.02	/	7.95	/	6.76

注：一次反演的绝对误差为 $|\sigma_y^* - \sigma_y'|$ ，二次反演的绝对误差为 $|\sigma_y^* - \sigma_y''|$ ，绝对误差之和为 3 个里程位置绝对误差值的和。

依据表 8 中的数据得到各测点的绝对误差、绝对误差之和与修正次数的变化规律见图 10。图中实心测点表示在原地地应力的基础上增加，该测点的实测洞壁二次应力进行二次反演。

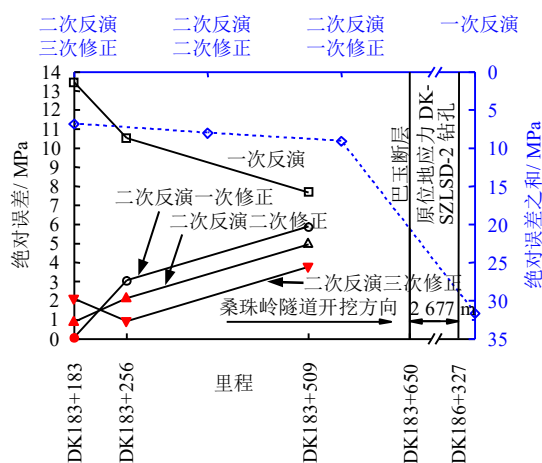


图 10 绝对误差、绝对误差之和与修正次数的变化规律图

Fig.10 Relationships between absolute errors and correction numbers, and relationships between sums of absolute errors and correction numbers

由表 8、图 10 可知：

(1) 在一次反演下得到桑珠岭隧道里程 DK183+183、DK183+256、DK183+509 测点的洞壁二次应力计算值与洞壁二次应力实测值的最大绝对误差达到 13.44 MPa；依据测得的洞壁二次应力进行二次反演后，其最大绝对误差减小到 3.77 MPa，表明此二次反演方法可减小反演得到的地应力场与现场实际情况之间的误差。

(2) 二次反演一次修正，在原地地应力的基础上增加 1 个洞壁二次应力实测点，反演得到隧道掌子面前方里程 DK183+256、DK183+509 二次应力计算预测值与实测值的绝对误差分别为 3.06、5.89 MPa，而一次反演得到的绝对误差分别为 10.52、7.67 MPa，即二次反演一次修正能够减小计算预测值与实测值的误差。

(3) 二次反演二次修正，在原地地应力的基础

上增加 2 个洞壁二次应力实测点，反演得到隧道掌子面前方里程 DK183+509 的二次应力计算预测值与实测值的绝对误差为 4.96 MPa，而一次反演和二次反演一次修正得到的绝对误差分别为 7.67、5.89 MPa，即二次反演二次修正能够进一步减小计算预测值与实测值的误差。

(4) 二次反演三次修正，在原地地应力的基础上增加 3 个洞壁二次应力实测点进行反演，此时，绝对误差之和最小，绝对误差之和由 31.63 MPa 逐渐减小到 6.76 MPa，即应力计算值与实测值的绝对误差之和随着洞壁二次应力实测点的增加而逐渐减小。

7 结 论

(1) 一次反演得到在测量原地地应力钻孔附近区域的初始地应力场是合理、可信的，但是当测量原地地应力的钻孔较少且计算区域较大时，回归得到离钻孔较远位置的应力计算值与实测值存在一定的误差。

(2) 二次反演在一次反演的基础上对局部区域增加实测洞壁二次应力进行修正，计算得到的地应力较一次反演计算得到的地应力更加准确，且应力实测点越多、分布越广，计算得到的地应力精度更高，验证了该二次反演方法对初始地应力场采用表面应力解除法测得的洞壁二次应力进行修正的实用性及有效性。

(3) 采用此方法对初始地应力场进行二次反演，较一次反演能够更准确地预测隧道掌子面前方围岩的应力状态，对后续的岩爆预测等研究可提供参考。

参 考 文 献

- [1] ZHANG L Q, YUE Z Q, YANG Z F, et al. A displacement-based back-analysis method for rock mass modulus and horizontal in-situ stress in tunneling——illustrated with a case study[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21(6): 636—

- 649.
- [2] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- CAI Mei-feng. Principle and techniques of in-situ stress measurement[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [3] 李华, 李崇标, 刘云鹏, 等. 中国西南深切峡谷岸坡地应力场基本特征[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 482—488.
- LI Hua, LI Chong-biao, LIU Yun-peng, et al. Geostress field characteristics of high steep canyon slope in Southwest China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp.1): 482—488.
- [4] 王成虎, 邢博瑞. 原生裂隙水压致裂原地应力测量的理论与实践新进展[J]. 岩土力学, 2017, 38(5): 1289—1297.
- 王 ANG Cheng-hu, XING Bo-rui. A new theory and application progress of the modified hydraulic test on pre-existing fracture to determine in-situ stresses[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(5): 1289—1297.
- [5] 薛变鸾, 陈胜宏. 瀑布沟工程地下厂房区地应力场的二次计算研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1881—1886.
- XUE Luan-luan, CHEN Sheng-hong. Two-stage analysis of geostress field for underground chamber area of Pubugou project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(9): 1881—1886.
- [6] 汪波, 何川, 吴德兴, 等. 基于岩爆破坏形迹修正隧道区地应力及岩爆预测的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 811—817.
- WANG Bo, HE Chuan, WU De-xing, et al. Study on modification of geostress and forecast of rockburst based on destructive size of rockburst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(4): 811—817.
- [7] 周华, 陈胜宏. 高拱坝坝址区初始地应力场的二次计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 767—774.
- ZHOU Hua, CHEN Sheng-hong. Two-stage analysis of initial geostress field at dam site zone of high arch dam[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(4): 767—774.
- [8] 秦卫星, 付成华, 汪卫明, 等. 基于子模型法的初始地应力场精细模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 930—934.
- QIN Wei-xing, FU Cheng-hua, WANG Wei-ming, et al. Refined simulation of initial geostress field based on sub-model method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(6): 930—934.
- [9] 裴启涛, 李海波, 刘亚群, 等. 复杂地质条件下坝区初始地应力场二次反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 1): 2779—2785.
- PEI Qi-tao, LI Hai-bo, LIU Ya-qun, et al. Two-stage back analysis of initial geostress field of dam areas under complex geological conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Supp.1): 2779—2785.
- [10] 裴启涛, 丁秀丽, 卢波, 等. 考虑地应力分布形式的坝址区初始应力场二次反演方法[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2961—2970.
- PEI Qi-tao, DING Xiu-li, LU Bo, et al. Two-stage back analysis method of initial geostress field in dam areas considering distribution characteristics of geostress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(10): 2961—2970.
- [11] ZHANG She-rong, HU An-kui, WANG Chao. Three-dimensional inversion analysis of an in situ stress field based on a two-stage optimization algorithm[J]. **Journal of Zhejiang University Science A(Applied Physics & Engineering)**, 2016, 17(10): 782—802.
- [12] 张社荣, 胡安奎, 王超, 等. 基于 SLR-ANN 的地应力场三维智能反演方法研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2737—2745.
- ZHANG She-rong, HU An-kui, WANG Chao, et al. Three-dimensional intelligent inversion method for in-situ stress field based on SLR-ANN algorithm[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(9): 2737—2745.
- [13] 王庆武, 巨能攀, 黄健, 等. 桑珠岭特长隧道初始地应力场反演分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(25): 137—143.
- WANG Qing-wu, JU Neng-pan, HUANG Jian, et al. Regression analysis of initial geostress field of Sangzhuling super-long tunnel[J]. **Science Technology and Engineering**, 2016, 16(25): 137—143.
- [14] 裴启涛, 李海波, 刘亚群. 南水北调西线工程坝区初始地应力场反演分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 2): 338—344.
- PEI Qi-tao, LI Hai-bo, LIU Ya-qun. Back analysis of initial geostress field of dam site in west route of South-to-North water transfer project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.2): 338—344.