

DOI: 10.11779/CJGE201405012

基于FLAC^{3D}改进的初始地应力场回归方法

郭运华^{1, 2}, 朱维申¹, 李新平², 贾超³, 李勇¹

(1. 山东大学岩土与结构工程中心, 山东 济南 250061; 2. 武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070;

3. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要:为提高地应力反演的精度, 提出了FLAC^{3D}中利用偏最小二乘回归方法拟合地应力场及将地应力场精确加载至计算模型并实现平衡的方法, 首先对各应力分量分别进行回归, 以提高局部异常应力区域的拟合精度。然后依据FLAC^{3D}的计算原理, 分析了单元应力与节点不平衡力的关系, 将回归所得的单元初始地应力加载至模型并计算节点不平衡力, 在节点施加与不平衡力反向的节点荷载, 实现力的平衡, 完成地应力场的加载。当采用弹塑性模型时, 假定平均应力不变, 根据屈服条件修正偏应力大小, 对不满足强度条件的单元地应力进行修正, 以满足弹性假设条件, 修正后的单元地应力满足平衡条件及强度条件, 并能精确满足地应力场回归估计值, 接着介绍了一种将模型单元地应力张量表示成各单元坐标的函数, 通过求取插值函数获得任意坐标的地应力张量的三维超曲面样条插值方法。最后以工程实例证实, 改进方法可以有效提高局部地应力异常区域的拟合精度, 解决了边界应力奇异分布的问题。

关键词: 地应力反演; 偏最小二乘回归; 数值计算; FLAC^{3D}

中图分类号: TU459; P642.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)05-0892-07

作者简介: 郭运华(1974-), 男, 讲师, 主要从事岩土工程数值计算、岩土工程安全监测技术方面的工作。E-mail: guoyunhua888@qq.com。

Improved regression method for initial geostress based on FLAC^{3D}

GUO Yun-hua^{1, 2}, ZHU Wei-shen¹, LI Xin-ping², JIA Chao³, LI Yong¹

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Hubei Key Laboratory of

Roadway Bridge & Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. School of Civil and Hydraulic

Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: A method for back analysis of the initial geostress is discussed. The fitting accuracy is improved remarkably by regressing each stress component respectively and using the partial least squares regression method. By loading the regression results of in-situ stress component to model elements, the relationship between the element stress and node unbalanced force is analyzed on the basis of the principle of FLAC^{3D}. An external force equal to the reverse force of the node unbalance force can be calculated, which can be loaded on the nodes to satisfy the equilibrium conditions. For the elements that dissatisfy the strength conditions, the stress is modified to satisfy the strength conditions by assuming the average stress invariant and reducing the partial stress. This step has also solved the unreasonable distribution of the boundary nodal forces. The modified stress field satisfies the equilibrium conditions and regression value as well. A three-dimensional hypersurface spline interpolation method is developed to calculate the stress tensor at any point. Finally, an engineering example shows that the proposed method improves the fitting precision of local stress at abnormal area.

Key words: back analysis of in-situ stress; partial least squares regression; numerical analysis; FLAC^{3D}

0 引言

早期的地应力反演过程简单地处理为求解侧压力系数, 复杂地质条件下误差较大, 适用性差。目前, 数值计算中地应力场的确定办法主要采用离散的地应力实测数据拟合的方法。郭怀志等^[1]提出, 根据实际工程的地应力实测资料, 运用有限元数学模型回归分

析方法求解出岩体初始应力场。具体做法是依据弹性

基金项目: 国家自然科学基金项目(41072234, 51274157); 国家自然科学基金青年基金项目(51109123); 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室开放基金项目(DQJJ201304); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2012NJ006)

收稿日期: 2013-08-29

*通讯作者

力学应力叠加原理, 将复杂边界应力条件分解为几个简单的边界条件的线性组合, 通过回归方法求解组合系数来实现, 奠定了多元回归方法拟合初始地应力方法的基础。杨林德等^[2]提出了初始地应力反演的有限单元法。2004 年以后, 大量文献引入均匀试验设计及神经网络等优化算法寻优求解初始地应力场^[3-6]。此后, 部分学者尝试通过优化方法直接反演边界条件来逼近实测地应力场, 郭明伟等^[7]等采用优化位移边界条件拟合区域初始地应力场, 但没有解决边界位移不协调问题。闫相祯等^[8]利用阻尼最小二乘法建立了应力场反演的优化约束模型, 提出了一种用于反演地应力场边界力的优化分析方法。但边界应力在垂直方向上的分布一般不是均匀分布, 导致该方法的适用性受到一定限制。姚瑞等^[9]研究了地应力测量中的投影误差, 并提出了相应的解决计算方法。王成虎等^[10]提出的综合分析法, 对减少待反演参数, 避免解的非唯一性非常有意义。由于回归方法基于弹性力学的叠加原理, 需要满足弹性假设, 复杂地质条件下直接将边界条件按回归系数进行叠加后的计算应力值与实测应力值往往有差异。采用优化算法逼近真实边界条件的方法对模型与地质原型的相似性有很高的要求, 复杂地质条件下建模往往不能满足这一要求, 特别是局部地应力异常地区, 上述方法均不理想。为解决以上缺陷, 考虑由实测地应力拟合单元地应力, 根据单元应力与节点力的平衡关系直接求解节点力加载至模型, 强制满足平衡条件, 此方法同时获得满足实测值的地应力场及边界节点力, 充分利用了回归拟合方法及边界条件反演的优点。

本文以大岗山水电站大坝枢纽区边坡工程为背景, 探讨回归方法获得单元应力分量, 对各应力分量分别建立回归方程, 以提高拟合精度, 根据平衡关系求解节点荷载并加载至模型中获得精确地应力场的方法; 对不满足弹性假设的部分单元地应力提出一种修正方法, 使满足弹性假定; 并对采用较少单元的简化模型反演地应力后加载至较多单元的精细模型的地应力映射方法提出了一种解决方案。

1 基本原理

多元回归方法是建立在弹性力学叠加原理基础上, 由于天然应力状态下, 可以假设岩土体处于平衡状态且无持续的塑性变形增加, 将地质体所受的复杂地应力分解为图 1 中 6 种简单的边界应力形式, 通过在边界施加单位荷载获得内部单元的基本初始应力, 然后将基本初始应力当作自变量, 实测地应力当作因变量进行偏最小二乘回归分析求解回归系数。

由于边界应力并不一定均匀分布, 实际加载中一般采用边界位移加载, 即在边界上预加一定的速度计算指定的步骤, 然后将边界上述速度固定为零, 完成边界位移加载, 将实测结果与图 1 中 6 种单独加载方式求得的不同位置的地应力计算结果进行回归分析, 可以求得式 (1) 中的系数, 将实测值表示为几种简单加载方式计算值的组合。为提高复杂条件下的拟合精度, 这里对 σ_{ij}^{xx} , σ_{ij}^{yy} , σ_{ij}^{zz} , σ_{ij}^{yz} , σ_{ij}^{xz} , σ_{ij}^{xy} 分别进行偏最小二乘回归, 选择偏最小二乘回归方法主要是因为此方法能够在自变量存在严重多重相关性的条件下进行回归建模, 回归方程为

$$\sigma_{ij}^{geo} = a_k + b_k \sigma_{ij}^{xx} + b_k \sigma_{ij}^{yy} + b_k \sigma_{ij}^{zz} + b_k \sigma_{ij}^{yz} + b_k \sigma_{ij}^{xz} + b_k \sigma_{ij}^{xy}, \quad (1)$$

式中, $i, j=1, 2, 3, k=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。

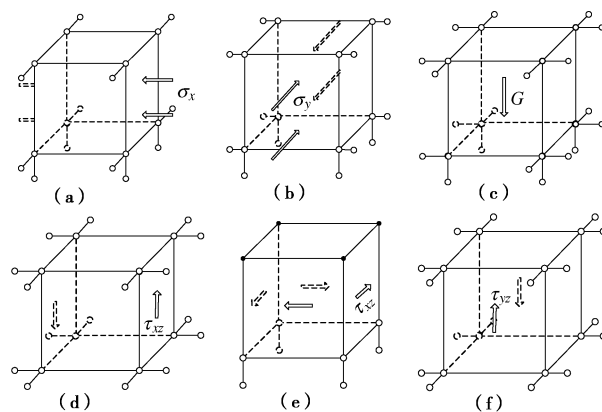


图 1 边界应力分解组合示意图

Fig. 1 Decomposition of boundary stress

2 地应力场加载至模型的方法改进

地应力的加载是指地应力回归后, 地应力场载入模型单元及求解边界节点力实现模型力平衡, 用于下一步开挖计算的过程。已有文献中, 关于地应力回归的报道较多, 而如何将地应力加载至计算模型的报道相对较少。早期研究采用反演侧压力系数的方法, 按侧压力系数加载边界应力; 文献[7, 8]采用直接反演边界位移或边界应力来同时完成地应力场拟合与边界条件的求解; 徐磊^[11]提出一种在有限元中对单元应力进行积分求解节点荷载实现地应力场与外荷载平衡的方法完成地应力场的加载。这里基于 FLAC^{3D} 根据节点不平衡力直接施加节点荷载, 强制满足节点力平衡来完成地应力拟合及边界条件的加载。

FLAC^{3D} 中任一节点应力平衡需满足

$$F_i^{<l>} = \left[\left[\frac{T_i^n}{3} + \frac{\rho b_i V}{4} \right] \right]^{<l>} + P_i^{<l>}, \quad (2)$$

式中, $F_i^{<l>}$ 表示节点 l 的不平衡力, $[[\dots]]^{<l>}$ 表示所有共节点 l 的单元在节点 l 上分配的力的和, $T_i^n/3$ 表示

单元内力, $\rho b_i V/4$ 为体积力, $P_i^{<l>}$ 为与节点 l 关联的其他节点对节点 l 作用的力的和。当达到平衡时 $F_i^{<l>}$ 接近于零。依叠加原理, 由式 (2) 求出各单元的应力分量及各节点不平衡力 $F_i^{<l>}$ 。为使系统平衡, 在每个节点上加上与 $F_i^{<l>}$ 相等且反向外力, 抵消不平衡力, 则系统必然自动满足平衡。

在 FLAC^{3D} 中的具体操作方法如下: ①固定模型 x 方向左边界, 在 x 右边界施加一定的垂直模型边界的速度, 使模型受压, 计算指定的步骤, 并记录监测点的各应力分量。②取消步骤①的操作, 固定模型 y 方向左边界, 在 y 右边界施加一定的垂直模型边界的速度, 同步骤①计算、记录监测点应力分量; 类似地完成切向速度加载、计算。③将以上每种加载条件下获得 σ_{ij}^x 作为回归方程的一个自变量, 实测的 σ_x^{geo} 作为因变量进行偏最小二乘回归。④将各种加载方式获得的基本单元应力分量按回归方程计算各单元地应力分量, 并赋值为模型单元应力变量, 计算一步, 获得单元节点上的不平衡力, 记录节点荷载, 与不平衡力大小相等, 方向相反。⑤固定模型边界速度为零, 对模型赋参数, 并将求得的节荷载及单元应力加载至模型中。获得精确满足实测地应力分布的地应力场及边界应力。整个过程通过接口文件读写操作完成。

以上操作满足了模型的边界应力条件, 所获得的应力场精确满足实测地应力回归估计值。

3 应力场的修正

上述方法获得的地应力能够满足平衡条件, 但由于采用弹性假设, 弹塑性条件下, 可能会出现不能满足强度条件的情况, 需要进行应力修正, 将超出单元强度条件的应力修改为满足其强度条件, 其实质是将应力状态拉回到屈服面上。杨强等^[12]依据相关流动法则, 将回归应力减去转移应力作为单元真实应力, 由于需要计算转移应力, 需要跟周边单元应力状态产生联系, 计算过程稍显复杂。这里假定应力迁移过程中平均应力不变, 修改偏应力大小, 将图 2 中虚线表示的单元回归应力莫尔圆修改为实线所示的极限应力状态。这样处理的目的是, 为了降低计算复杂程度。

单元强度准则采用莫尔-库仑准则, 则单元实际应力判断准则如下:

$$\begin{cases} f^s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}} \\ f^t = \sigma_3 - \sigma^t \end{cases} \quad (3)$$

式中, σ^t 为抗拉强度, φ 为内摩擦角, c 为内聚力, σ_1, σ_3 为主应力。当单元回归应力满足 $f^s < 0$ 时, 表

示单元满足剪切破坏条件, 当 $f^t < 0$ 单元受拉破坏。

由图 2 可知, 以下关系式成立:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_1' + \Delta\sigma \\ \sigma_3 = \sigma_3' + \Delta\sigma \end{cases} \quad (4)$$

σ_1', σ_3' 满足岩体屈服条件, 将式 (4) 代入 (3) 并令 $f^s = 0$, 有

$$\sigma_1 - \Delta\sigma - (\sigma_3 - \Delta\sigma) \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} + 2c \sqrt{\frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}} = 0 \quad (5)$$

求解 $\Delta\sigma$ 即为回归应力的修正应力。由修正过的 σ_1', σ_3' 计算单元 6 个应力分量, 直接回写入单元应力变量可以获得经过修正的地应力场。

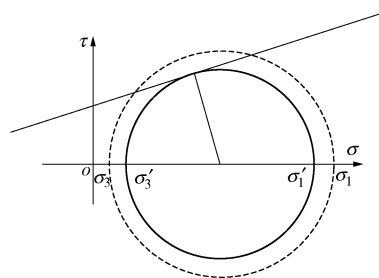


图 2 单元应力修改示意图

Fig. 2 Modification of element stress

4 地应力场映射至任意单元数模型的插值方法

为了反映边坡众多断层、开挖面节理切割块体的稳定性状况, 往往需要建立含断层、节理面的复杂精细模型, 会导致划分单元数较多, 计算机时较长, 地应力反演则需要多次计算, 精细模型会导致反演效率大大降低, 因此在地应力反演过程中, 一般采用单元数较少的简化模型计算, 反演结果通过映射方法加载至精细模型, 达到兼顾反演的计算效率与开挖仿真的精细化的效果。考虑采用三维超曲面样条函数插值的方法, 将简化模型的反分析获得的每个单元应力张量, 表示成各单元中心坐标的函数。精细模型每个单元的应力张量, 都可以通过此函数求得。三维超曲面样条函数的表达式为

$$w(x, y, z) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + \sum_{i=1}^n F_i r_i^2 \ln(r_i^2 + \varepsilon) \quad (6)$$

式中, $w(x, y, z)$ 为任一单元上应力分量, x, y, z 为此单元的坐标; $a_0, a_1, a_2, a_3, F_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为待定系数; $r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2$; x_i, y_i, z_i 为第 i 个单元的坐标, 模型共 $n+1$ 个单元; ε 为调节曲面曲率大小的经验参数, 当曲面曲率变化较大时取小些, 一般平坦曲面取 $1 \sim 10^{-2}$, 对有奇性的曲面取 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 。式 (6) 中的 $n+4$ 个待定系数通过以下

方程组求得

$$\begin{cases} w_j = a_0 + a_1x_j + a_2y_j + a_3z_j + \sum_{i=1}^n F_i r_{ij}^2 \ln(r_{ij}^2 + \varepsilon) \\ \sum_{i=1}^n F_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n x_i F_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n y_i F_i = 0 \\ \sum_{i=1}^n z_i F_i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式 (7) 为线性方程组, 可用矩阵表示为

$$AX = B \quad , \quad (8)$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & r_{12}^2 \ln(r_{12}^2 + \varepsilon) & \cdots & r_{1n}^2 \ln(r_{1n}^2 + \varepsilon) & 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ r_{12}^2 \ln(r_{12}^2 + \varepsilon) & 0 & \cdots & r_{2n}^2 \ln(r_{2n}^2 + \varepsilon) & 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \ddots & r_{n-1,n}^2 \ln(r_{n-1,n}^2 + \varepsilon) & 1 & x_{n-1} & y_{n-1} & z_{n-1} \\ r_{1n}^2 \ln(r_{1n}^2 + \varepsilon) & \cdots & \cdots & 0 & 1 & x_n & y_n & z_n \\ 1 & \cdots & \cdots & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_1 & \cdots & \cdots & x_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ y_1 & \cdots & \cdots & y_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_1 & \cdots & \cdots & z_n & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$X = (F_1, F_2, \cdots, F_n, a_0, a_1, a_2, a_3)^T$; $B = (w_1, w_2, \cdots, w_n, 0, 0, 0, 0)^T$ 。此为对称方程组, 可以使用 Householder 变换法解得, 任意位置点地应力分量均可以求得。

5 工程实例

5.1 工程概况

大岗山水电站坝址区位于川滇南北向构造带北段, 为南北向与北西向、北东向等多组构造的交汇复合部位, 区域构造应力场作用方向表现为 NWW—SEE 向挤压。已有测试结果表明, 大岗山坝区应力场是构造应力和自重应力叠加的应力场, 而构造应力是坝区特别是左岸应力场的主要组成部分。坝区断层多沿辉绿岩岩脉发育 (约 68%), 断层破碎带宽多在 0.1~3 m 之间, 由糜棱岩、角砾岩等组成。勘探调查表明, 右岸边坡发育 SN 向—NNW 向岩脉破碎带 33 条, 规模较大的主要有 β5(F1)、β202(f191)、β4(f5)、β85、β62(f19)、β68(f47) 等 6 条辉绿岩脉, γL5、γL6 等 2 条花岗细晶岩脉。右岸边坡发育 NE 向辉绿岩脉 5 条, NE 向花岗细晶岩脉 2 条, NE 向岩脉破碎带与坝顶以下边坡近平行, 在 1135m 高程以下以 β97、β222 规模较大。右岸边坡发育 NWW 向辉绿岩脉破碎带 9 条, 以 β209、β219、β223 延伸较长,

规模较大。左坝肩及抗力体范围内主要有 f33、f54、f67、f4、f17、f35、f36 等断层和 β8(f7)、β112(f32)、β118(f19)、β41(f46)、β21、β28 等辉绿岩脉破碎带切割。

边坡数值模型范围选取, 左右岸延伸至山脊外侧, 上下游垂直大坝轴线延伸至上游 250 m, 下游 500 m, 左右岸各 800 m, 如图 3 所示。坐标原点取在大坝轴线河谷中间点上, x 正向指向左岸, y 正向指向上游, z 正向垂直向上。成都勘察设计研究院做了大量前期实测工作^[13], 大坝枢纽区地应力特征实测数据转换为模型坐标系统如表 1 所示。

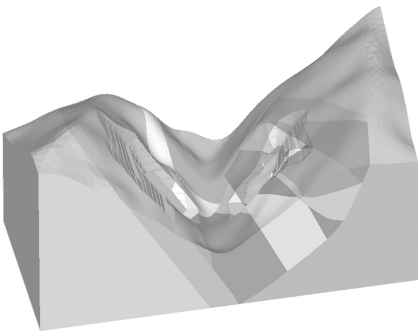


图 3 断层、岩脉切割后的边坡块体组合

Fig. 3 Combination of slope blocks cut by faults and dikes

表 1 地应力实测值统计表

Table 1 Measured values of in-situ stress

坐标/m			应力/MPa					
X	Y	Z	σ _{xx}	σ _{yy}	σ _{zz}	σ _{xy}	σ _{xz}	σ _{yz}
-7.8	-50.7	881.6	13.96	7.72	1.57			-0.44
		804.5	13.14	7.94	3.57			1.05
20.3	100.4	826.9	15.27	9.27	3.07			-0.10
		811.7	18.76	10.58	3.47			-1.17
-19.6	-8.2	797.2	8.60	5.64	3.89			-0.10
		774.8	9.11	6.33	4.47			-0.51
7.1	-4.6	845.3	8.95	6.43	2.63			-0.56
		822.4	9.69	7.08	3.22			-0.69
75.0	-0.4	891.7	6.69	4.87	2.08			-0.41
		824.9	9.84	7.02	3.81			-0.51
-53.7	-12.2	888.1	7.17	5.09	2.18			-0.22
		850.6	6.51	4.39	3.16			-0.47
332.8	-110.1	972.5	10.08	22.32	15.03	0.04	-1.37	0.36
437.3	-246.3	972.5	7.24	21.10	12.63	1.36	-1.01	-2.17
472.8	-306.6	972.5	7.56	15.70	10.01	-0.05	-0.25	5.53
398.5	-138.1	972.5	5.17	9.17	11.20	-0.72	-1.53	4.26
458.6	-28.5	972.5	5.32	9.62	9.29	-1.61	1.90	2.94
504.3	54.8	972.5	7.93	15.99	10.64	0.25	-0.52	6.11

计算模型地质分区分为: 覆盖层, 全、强风化及强卸荷区(V), 弱风化上段强、弱卸荷区及弱风化下

段强卸荷区(IV), 弱风化下段弱卸荷区(III)及微新岩体(II)4 类, 计算参数见表 2。

表 2 计算参数表

Table 2 Mechanical parameters of rock mass and fractures					
岩土体类别	岩土体参数		结构面类别	弹性模量/GPa	
	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa		切向	法向
II 类	26.5	26.00	A3 结构面	3.0	7
III1 类	26.2	16.00	B1 结构面	1.3	5
III2 类	26.2	18.00	B2 结构面	1.0	4
IV 类	25.8	6.00	B3 结构面	0.3	2
V 1 类	24.5	1.30			
V 2 类	22.1	1.00			
块碎石夹土	20.0	0.03			

由于地质条件复杂, 常规回归方法及优化边界应力调整逼近方法均不能获得满意的结果, 按本文中方法处理。地应力回归采用弹性模型, 得到地应力场拟合公式为

$$\begin{cases} \sigma_{xx}^{geo} = -4.4 + 0.61\sigma_{xx}^{xy} - 5.14\sigma_{xx}^{yz} + 2.31\sigma_{xx}^g - 3.65\sigma_{xx}^{yz} + 9.26\sigma_{xx}^{xz} - 0.26\sigma_{xx}^{xy} \\ \sigma_{yy}^{geo} = -18.9 - 40.6\sigma_{xx}^{xy} - 4.8\sigma_{xx}^{yz} + 13.1\sigma_{xx}^g + 4.76\sigma_{xx}^{yz} + 48.5\sigma_{xx}^{xy} - 3.53\sigma_{xx}^{yz} \\ \sigma_{zz}^{geo} = -6.9 - 7.10\sigma_{xx}^{xy} - 11.7\sigma_{xx}^{yz} + 0.89\sigma_{xx}^g + 1.45\sigma_{xx}^{yz} - 8.73\sigma_{xx}^{xy} + 9.26\sigma_{xx}^{yz} \\ \sigma_{yz}^{geo} = 0.07 - 0.39\sigma_{xx}^{xy} - 0.62\sigma_{xx}^{yz} + 0.72\sigma_{xx}^g - 0.39\sigma_{xx}^{yz} + 1.03\sigma_{xx}^{xy} + 0.16\sigma_{xx}^{yz} \\ \sigma_{xz}^{geo} = -0.35 - 1.96\sigma_{xx}^{xy} + 0.77\sigma_{xx}^{yz} - 0.32\sigma_{xx}^g - 0.94\sigma_{xx}^{yz} + 0.86\sigma_{xx}^{xy} + 2.89\sigma_{xx}^{yz} \\ \sigma_{xy}^{geo} = 0.46 - 8.31\sigma_{xx}^{xy} + 0.57\sigma_{xx}^{yz} + 2.84\sigma_{xx}^g + 2.42\sigma_{xx}^{yz} - 7.55\sigma_{xx}^{xy} + 0.75\sigma_{xx}^{yz} \end{cases} \quad (9)$$

式中, 地应力单位为 MPa。

至此, 每个单元的地应力分量均已求出。

5.2 奇异边界节点力的修正

将根据式(9)求得的单元应力变量赋至计算模型中, 采用莫尔-库仑强度条件, 在天然状态下, 模型边界部位出现较大面积的塑性区。提取边界面上应力分量空间分布规律分析如下(以 y 坐标最大的边界面为例)。

从图 4 中可以看出, 在两位移边界的交界线上, 出现节点应力奇异, 产生的原因为同一单元上不同节点施加不同的速率引起。这种边界力的奇异性会带来边界单元产生大量塑性区, 要排除这种奇异性, 需要对部分节点力及单元应力进行改写。杨强等^[12]对有限元回归分析结果提出了弹塑性校正方法。在 FLAC^{3D} 中, 采用如下方法进行修正。①将反演获得的单元应力加载至模型; ②按照第三节方法改写超出强度极限的单元应力; ③模型进行一步计算, 获得单元节点上的不平衡力, 并记录此不平衡力; ④对模型中节点施加与步骤③获得的不平衡力的反作用力作为节点荷载, 以满足平衡关系; ⑤继续步骤③④并完成几个循环逼近最终值。

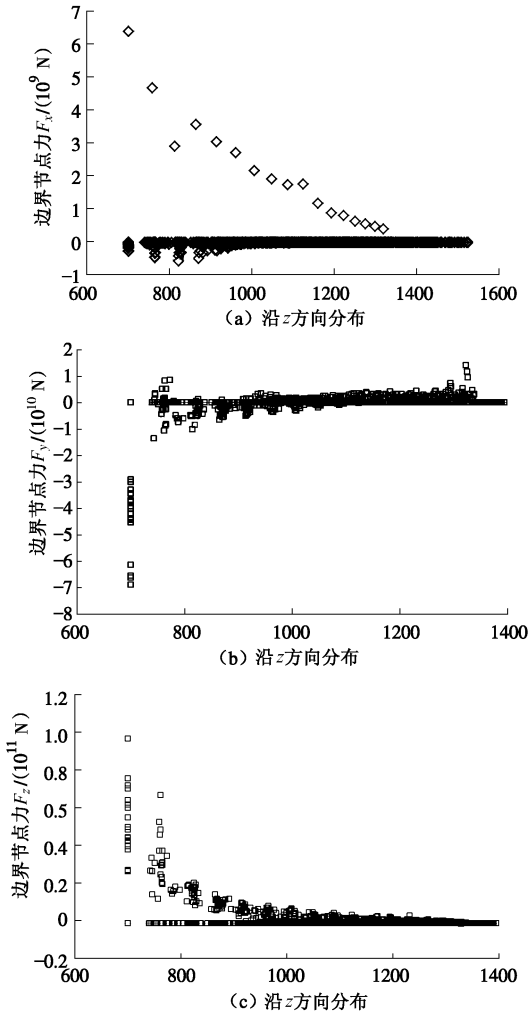
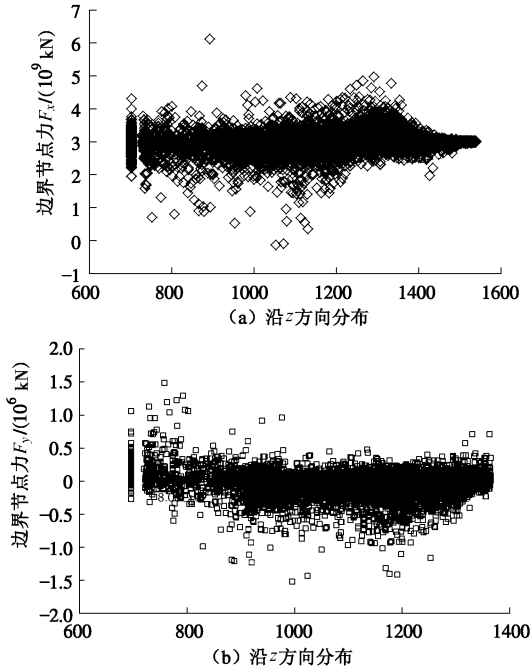


图 4 模型边界奇异节点力分布

Fig. 4 Distribution of boundary node force

5.3 修正结果分析

图 4 中模型边界节点力分布, 修正后结果如图 5 所示。



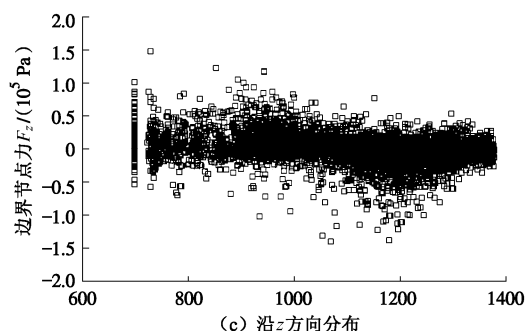


图5 修正后模型边界节点力分布

Fig. 5 Distribution of modified boundary node force

修正后, 边界节点力的奇异性消失。原模型中的大量塑性区消失。

常规回归方法、边界位移调整方法与本文方法求解结果对比如图6所示, 在复杂地质条件下, 本文结果更加接近实测值, 表现在局部应力异常增高地区的吻合程度相对其他方法有明显改善。

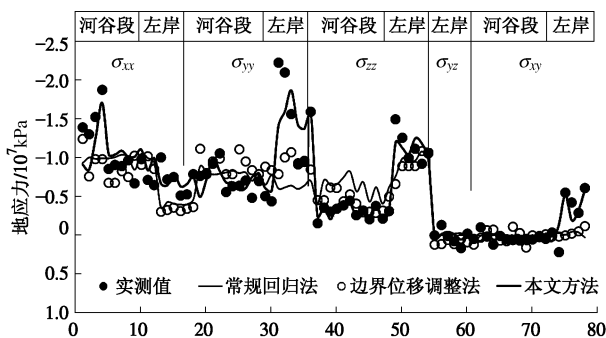


图6 常见地应力求解方法与本文方法的结果对比

Fig. 6 Comparison of results between common methods and proposed method

拟合点与实测点之间仍存在一定的误差, 可能是由于计算模型与实际地质原型之间的差异, 需要通过详尽勘察和细化建模来减小误差。

6 结 语

复杂地质条件下的地应力反演涉及到以下两个问题: 一是由于地质条件的变化, 局部地应力可能存在异常增高或降低区域, 常规基于最小二乘法的回归方法可能丢失部分信息; 二是要反映复杂地质条件的变化, 对建模的精细程度要求过高, 导致建模困难计算机时大量增加。针对以上难题, 本文做了以下改进: ①对6个地应力分量分别建立回归方程, 对局部应力增高区的拟合精度有明显提高。②通过改写单元应力变量和施加与之平衡的节点荷载, 完成地应力的加载, 可以在不降低精度的条件下, 直接完成边界力的加载。③地应力回归建立在弹性力学叠加原理的基础上, 天然状态下认为是合理的。弹塑性条件下, 回归的地应力场可能在局部不满足强度条件, 可以根据强度条件

改写单元应力, 使其满足强度条件, 并改写与之平衡的节点荷载, 解决了边界条件反演方法出现的应力奇异性问题。④三维超曲面样条函数插值的方法可以有效完成简单模型中的应力场向复杂精细模型的映射, 解决地应力回归方法的计算效率问题。

本文提出的地应力加载方法具有通用性, 单元应力的修正方法满足强度准则与平衡条件, 监测点最终计算结果与回归估计值的一致性有较大改善。

参考文献:

- [1] 郭怀志, 马启超, 薛玺成, 等. 岩体初始应力场的分析方法[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(3): 64 - 75. (GUO Huai-zhi, MA Qi-chao, XUE Xi-cheng, et al. The analytical method of the initial stress field for rock masses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 5(3): 64 - 75. (in Chinese))
- [2] 杨林德, 黄伟, 王聿. 初始地应力位移反分析计算的有限单元法[J]. 同济大学学报, 1985(4): 69 - 77. (YANG Lin-de, HUANG Wei, WANG Yu. The finite element method for determining the initial stress by displacements in surrounding rock[J]. Journal of Tongji University, 1985(4): 69 - 76. (in Chinese))
- [3] 梁远文, 林红梅, 潘文彬. 基于BP神经网络的三维地应力场反演分析[J]. 广西水利水电, 2004(4): 5 - 8. (LIANG Yuan-wen, LIN Hong-mei, PAN Wen-bin. Three-dimensional inversion analysis of ground stress field based on bp neural network[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2004(4): 5 - 8. (in Chinese))
- [4] 马震岳, 金长宇, 张运良. 基于FLAC及神经网络的初始地应力场反演[J]. 水电能源科学, 2005, 23(3): 44 - 45. (MA Zhen-yue, JIN Chang-yu, ZHANG Yun-liang. Analytical method of the initial stress field based on flac and neural network[J]. Water Resources and Power, 2005, 23(3): 44 - 45. (in Chinese))
- [5] 杨志双, 潘懋. 基于遗传算法(GA)的地应力有限元反演研究[J]. 水文地质工程地质, 2006(2): 80 - 83. (YANG Zhi-shuang, PAN Mao. Study on back analysis of earth stress by finite element method based on genetic algorithm (GA)[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006(2): 80 - 83. (in Chinese))
- [6] 石敦敦, 傅永华, 朱瞰, 等. 人工神经网络结合遗传算法反演岩体初始地应力的研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(2): 73 - 76. (SHI Dun-dun, FU Yong-hua, ZHU tun, et al. The combination of artificial neural network and genetic algorithm applied to inversion analysis of initial stress fields in rock masses[J]. Engineering Journal of Wuhan University

- 2005, **38**(2): 73 - 76. (in Chinese))
- [7] 郭明伟, 李春光, 王水林, 等. 优化位移边界反演三维初始地应力场的研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(5): 1269 - 1274. (GUO Ming-wei, LI Chun-guang, WANG Shui-lin, et al. Study on inverse analysis of 3-D initial geostress field with optimized displacement boundaries[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(5): 1269 - 1274. (in Chinese))
- [8] 闫相祯, 王保辉, 杨秀娟, 等. 确定地应力场边界载荷的有限元优化方法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1485 - 1490. (YAN Xiang-zhen, WANG Bao-hui, YANG Xiu-juan, et al. Finite element optimization method of boundary load of in-situ stress field[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1485 - 1490. (in Chinese))
- [9] 姚 瑞, 杨树新, 陆远忠, 等. 在地应力测量中准确求解最大、最小水平应力问题的探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(2): 317 - 325. (YAO Rui, YANG Shu-xin, LU Yuan-zhong, et al. Computing maximum and minimum horizontal stresses in in-situ stress measurements[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(2): 317 - 325. (in Chinese))
- [10] 王成虎, 张彦山, 郭啟良, 等. 工程区地应力场的综合分析研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **32**(10): 1562 - 1568. (WANG Cheng-hu, ZHANG Yan-shan, GUO Qi-liang, et al. New integrated analysis method to analyze stress regime of engineering area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **32**(10): 1562 - 1568. (in Chinese))
- [11] 徐 磊. 一种实现复杂初始地应力场精确平衡的通用方法[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2012, **34**(3): 30 - 33. (XU Lei. A general method for the accurate equilibrium of complex initial in-situ stress field[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2012, **34**(3): 30 - 33. (in Chinese))
- [12] 杨 强, 刘福深, 任继承. 三维初始地应力场的多尺度弹塑性校正[J]. 水力发电学报, 2007, **26**(6): 24 - 29. (YANG Qiang, LUI Fu-shen, REN Ji-cheng. Multi-scale elasto-plastic calibration of the regression analysis of 3D initial crustal stress field[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, **26**(6): 24 - 29. (in Chinese))
- [13] 张建国, 张强勇, 杨文东, 等. 大岗山水电站坝区初始地应力场反演分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(10). (ZHANG Jian-guo, ZHANG Qiang-yong, YANG Wen-dong, et al. Regression analysis of initial geostress field in dam zone of dagangshan hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(10): 3071 - 3078. (in Chinese))
- [14] 莫海鸿. 某地下厂房初始地应力场的反演分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1995, **23**(1): 159 - 164. (MO Hai-hong. Back analysis of initial geostress field of an underground workshop[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 1995, **23**(1): 159 - 164. (in Chinese))
- [15] 余成学, 熊文林, 陈胜宏. 边坡初始地应力场的应力函数与有限元联合反演法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, **28**(4): 366 - 371. (SHE Cheng-xue, XIONG Wen-ling, CHEN Sheng-hong. A united inversion of the stress function and the fem methods for initial geostress field in rock slope[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1995, **28**(4): 366 - 371. (in Chinese))
- [16] 付成华, 汪卫明, 陈胜宏. 溪洛渡水电站坝区初始地应力场反演分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(11): 2305 - 2312. (FU Cheng-hua, WANG Wei-ming, CHEN Sheng-hong. Back analysis study on initial geostress field of dam site for Xiluodu hydropower project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(11): 2305 - 2312. (in Chinese))
- [17] 张延新, 宋常胜, 蔡美峰, 等. 深孔水压致裂地应力测量及应力场反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(4): 778 - 786. (ZHANG Yan-xin, SONG Chang-sheng, CAI Mei-feng, et al. Geostress measurements by hydraulic fracturing method at great depth of boreholes and numerical modelling predictions of stress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(4): 778 - 786. (in Chinese))
- [18] 谢红强, 何江达, 肖明砾. 大型水电站厂区三维地应力场回归反演分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2471 - 2476. (XIE Hong-qiang, HE Jiang-da, XIAO Ming-li. Regression analysis of 3D initial geostress in region of underground powerhouse for large hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2471 - 2476. (in Chinese))
- [19] 王成虎, 郭啟良, 侯硯和, 等. 地下水封油库场址地应力场及工程稳定性分析研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(5): 698 - 705. (WANG Cheng-hu, GUO Qi-liang, HOU Yan-he, et al. In-situ stress field and project stability of underground water-sealed oil depots[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(5): 698 - 705. (in Chinese))