

# 多元线性回归法在某隧洞地应力场反演中的应用

史存鹏,王家祥,陈长生,王旺盛,胡巍

(长江三峡勘测研究院有限公司(武汉),湖北武汉430074)

**摘要:**为弥补地应力实测点的不足,有必要通过多元线性回归方法反演地应力场。针对某深埋隧道,以水压致裂法实测地应力为依据,开展了该洞段地应力场的反演分析。在介绍反演基本原理和误差分析的基础上,给出了实例分析结果。研究表明,由多元线性回归计算得到的地应力值与实测结果规律一致,可用于评价工程洞段的地应力场分布;受水平构造应力、断裂构造等影响,该洞段地应力场存在一定空间变异性。

**关键词:**水压致裂法;多元线性回归;地应力场反演;深埋隧洞

中图法分类号:P642

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.14.014

实测地应力是提供区域地应力场最为直接的途径,但受场地和经费等因素限制,不可能进行大规模的测量;再者,地应力场成因复杂,受地形地貌、构造背景等众多因素影响,各测点的测量成果往往只能反映当地的局部应力场;另外,地应力测试结果受测量误差等因素的影响,还存在一定程度的离散性<sup>[1]</sup>。因此,为了更好地满足工程勘察设计和施工的需要,还必须在实测地应力结果的基础上,结合现场地质构造条件,通过有效的数值计算方法,进行地应力场反演分析,以获得更为准确且适用范围较广的地应力场。

本文根据水压致裂法所测得的地应力实测资料,采用多元线性回归法反演分析西南某隧洞深埋洞段的初始地应力场特征,以期获得一些规律性认识,更好地服务于该隧洞勘察设计。

## 1 洞址区地应力实测资料

该隧洞段研究区内仅有一个实测地应力钻孔,钻孔最终孔深950 m。地应力试验分两次进行,孔深600 m时进行了第一次试验,共取得9个测点资料,其中1个为最大水平主应力方向资料,该次试验时水位约在孔深533 m处;终孔后进行了第二次试验,量值测试进行了10次,5次取得结果;印模测试了3次,均有裂缝显示。

因该孔全孔岩芯较破碎,大部分岩芯为块状,仅少数部位有短柱状岩芯。根据岩芯情况,选择岩芯相对完整的深度区间进行水压致裂地应力测试。测试结果见表1。从测试结果看,只有部分测点符合水压致裂法测试的一般规律。

表1 钻孔水压致裂法地应力测试结果

孔深/ m	$P_b$ / MPa	$P_r$ / MPa	$P_s$ / MPa	$P_0$ / MPa	$\sigma_r$ / MPa	$\sigma_H$ / MPa	$\sigma_h$ / MPa	$\sigma_z$ / MPa	$\lambda$	$\sigma_H$ 方位/ (°)
501.5	7.2	5.1	3.8	0.0	2.1	16.3	8.8	13.3		1.2
510.5	8.3	6.7	4.5	0.0	1.6	17.0	9.6	13.5		1.3
524.6	12.9	11.7	7.5	0.0	1.2	21.3	12.7	13.9	1.5	137
540.5	6.4	5.9	3.9	0.1	0.5	16.5	9.3	14.3		1.2
544.0	6.6	5.7	4.5	0.1	0.9	18.6	9.9	14.4		1.3
560.5	3.8	3.6	2.1	0.3	0.2	13.6	7.7	14.9		0.9
574.5	9.7	7.3	4	0.4	2.4	15.8	9.7	15.2		1.0
580.5	-	9.8	8.2	0.5	-	25.9	14.0	15.4		1.7
590.0	10.4	9.4	5.4	0.6	1.0	18.0	11.3	15.6		1.2
636.1	8.1	6.1	4.2	0.0	2.0	19.2	10.6	16.5		1.2
690.4	-	2.7	2.3	0.0	-	18.0	9.2	18.0		1.0
708.5	-	4.2	3.9	0.0	-	21.7	11.0	18.4		1.2
835.2	-	2.0	1.8	0.2	-	20.0	10.2	21.7		0.9
850.0	-	5.2	3.7	0.3	-	22.6	12.2	22.1		1.0
654.2										
799.0										
817.1										
871.4										
886.9										
907.6										

## 2 初始地应力场多元线性回归原理介绍

岩体初始地应力场的形成涉及地形地貌、地层岩性、地质构造、地温以及地下水等众多影响因素<sup>[2-3]</sup>。大量工程实践表明,自重与地质构造作用是岩体地应力场形成的主要因素,地形地貌次之,而地温与地下水作用影响程度最小,且难以量化,可忽略不计。故地应力反演研究中主要考虑如下因素作为地应力回归的基本影响因素<sup>[4]</sup>:① 自重应力;②  $X$  向水平均匀挤压构造运动(图 1(a));③  $Y$  向水平均匀挤压构造运动(图 1(b));④ 水平面内的均匀剪切变形构造运动(图 1(c));⑤  $X$  向垂直平面内的竖向均匀剪切变形构造运动(图 1(d));⑥  $Y$  向垂直平面内的竖向均匀剪切变形构造运动(图 1(e));⑦ 地下水的渗流作用,天然岩体中常含有大量的孔隙和裂隙,这些孔隙和裂隙中常含有各种流体,流体在岩体中的运动对地应力场有较大的影响;⑧ 河流侵蚀下切作用,河流下切形成深切河谷的过程对河谷岸坡地应力场有较大影响。

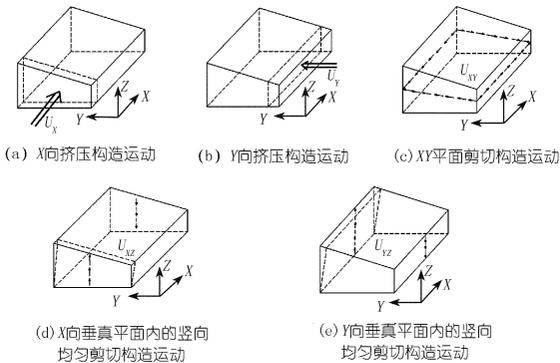


图 1 构造应力模式示意

针对该洞段的地形地貌特征,一般可以认为,洞址区域的实测初始地应力及其所反映的初始地应力场  $\sigma$  是下列变量的函数

$$\sigma = f(X, Y, Z, E, \mu, \gamma, \Delta, U, V, W, T, \dots) \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为初始地应力值,三维上代表 6 个应力分量;  $X, Y, Z$  为地形和地质体空间位置坐标系,可由勘探资料获得;  $E, \mu, \gamma$  为岩体的弹性模量、泊松比和容重,各点不尽相同,但它们不随应力大小及加载过程而变化,可用常规测试方法求得;  $\Delta$  为自重因素;  $U, V, W$  为地质构造作用因素;  $T$  为温度因素。

采用弹性工作状态下的线性叠加原理,写出各点的初始地应力值表达式

$$\sigma = L_1\sigma_\Delta + L_2\sigma_U + L_3\sigma_V + L_4\sigma_W + L_5\sigma_T + \dots + \varepsilon_k \quad (2)$$

式中,  $L_i (i = 1, 2, 3, \dots)$  为回归系数;  $\varepsilon_k$  为观测误差,为随机变量,当有多组观测值时,误差  $\varepsilon_k$  的数学期望

值全为 0,即

$$E(\varepsilon_k) = 0 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

各次观测误差服从正态分布;各次观测值互相独立,并有相同的精度,即  $\varepsilon_k$  之间的协方差可表示为

$$Cov(\varepsilon_k, \varepsilon_h) = \begin{cases} 0 & k \neq h \\ \sigma^2 & k = h \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, n; h = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

该方法以实测地应力值为依据,以山体地形、地貌和地质构造为条件,计算过程可分 5 步进行。

(1) 根据岩体的地质构造、山体地形条件及实测资料,建立有限元计算模型。

(2) 用三维有限元进行如下 6 种初始基本工况计算:自重应力状态;  $X$  向水平均匀挤压构造运动;  $Y$  向水平均匀挤压构造运动;水平面  $XY$  内的均匀剪切构造运动;  $X$  向垂直平面内的竖向均匀剪切构造运动;  $Y$  向垂直平面内的竖向均匀剪切构造运动。获得每个因素作用下测点位置的系统响应,即每个应力测点处的 6 个应力分量值。

(3) 根据各个应力测点的系统响应应力分量值和实测应力点分量值,用最小二乘法进行回归分析,得出各个作用因素对地应力场的影响权重系数,并进行各因素的回归显著性检验,剔除回归效果不显著的因素。

(4) 重新根据显著影响地应力场分布的作用因素进行回归分析,计算得出各个作用因素对地应力场的影响权重系数。

(5) 调整各个因素的作用力大小,重新施加到有限元计算模型上,计算分析得出岩体初始地应力场分布及各测点应力值。

根据多元回归法原理,将地应力回归计算值  $\hat{\sigma}_{jk}$  作为因变量,把数值计算求得的自重应力场和各分项因素下的构造应力场相应于实测点处的应力计算值  $\sigma_{jk}^i$  作为自变量,则回归方程的形式为

$$\hat{\sigma}_{jk} = \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jk}^i \quad (5)$$

式中,  $k$  为观测点的序号;应力分量  $j = 1 \sim n$ , 分别对应于  $n$  个应力分量;  $\sigma_{jk}$  为第  $k$  个观测点的  $j$  应力分量回归计算值;  $L_i$  为相应于自变量的回归系数;  $\sigma_{jk}^i$  为  $i$  分项荷载模式下  $k$  观测点  $j$  应力分量的数值计算值;  $n$  为包括自重和构造应力的分项荷载模式数。

假定有  $m$  个观测点,则最小二乘法的残差平方和为

$$S_{\text{残}} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 [\sigma_{jk}^* - \sum_{i=1}^n L_i \sigma_{jk}^i]^2 \quad (6)$$

式中,  $\sigma_{jk}^*$  为  $k$  观测点  $j$  应力分量的观测值;应力分量  $j$

= 1 ~ 6, 分别对应于 6 个应力分量。

根据最小二乘法原理,使得  $S_{残}$  为最小值的法方程式为

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^1)^2 & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk}^2 & \cdots & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk}^n \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk}^2 & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^2)^2 & \cdots & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^2 \sigma_{jk}^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^1 \sigma_{jk}^n & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^2 \sigma_{jk}^n & \cdots & \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 (\sigma_{jk}^n)^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^* \sigma_{jk}^1 \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^* \sigma_{jk}^2 \\ \vdots \\ \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^6 \sigma_{jk}^* \sigma_{jk}^n \end{bmatrix} \quad (7)$$

解此方程组,得到  $n$  个待定回归系数  $L = (L_1, L_2, \dots, L_n)^T$ , 则计算域内任一点  $p$  的回归地应力可由该点各分项荷载模式下数值计算应力值叠加而得

$$\sigma_{jp} = \sum_{i=1}^6 L_i \sigma_{jk}^i \quad (8)$$

由于各分项子构造应力之间是相容的,其中一个因素的引入必然造成其余因素的退化,因此,还需计算复相关系数和偏相关系数等,并通过回归方程和回归系数进行显著性检验,将不显著因素从回归因子中剔除,重复回归计算。

### 3 地应力场反演分析实例

#### 3.1 研究区地貌特征及构造发育情况

该深埋隧洞段工程地质横剖面如图 2 所示。研究区长 9 000 m,宽 1 000 m,隧洞走向与宽度方向夹角约为 10°。区域地形起伏总体较大,地表高程约 2 775 ~ 3 540 m,但隧洞沿线地形起伏不大,地表高程约 3 050 ~ 3 200 m。该隧洞段埋深较大,约 1 250 ~ 1 325 m。研究区地层总体呈中缓倾角,主要为三叠系中统北衙组上段( $T_2b^2$ )灰岩、白云质灰岩、白云岩,北衙组下段上部( $T_2b^{1-2}$ )条带状灰岩夹泥质灰岩,北衙组下段下部( $T_2b^{1-1}$ )及三叠系下统青天堡组( $T_1q$ )泥质粉砂岩、泥岩夹灰岩等。研究区发育有两个陡倾角断层(F1、F2),其中断层 F2 宽度较大,达 124 m。断层走向与隧

洞走向几近平行,距隧洞轴线千米以上,仅对区域地应力场有影响。

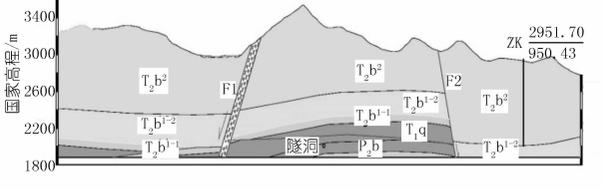


图 2 隧洞深埋洞段工程地质横剖面

#### 3.2 数值模型及物理力学参数

该深埋隧洞段数值模型共划分为 240 914 个单元(见图 3),计算参数如表 2 所示。

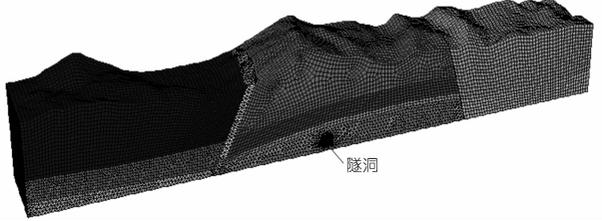


图 3 数值模型

表 2 岩体物理力学参数取值

岩性	岩体密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	凝聚力/ MPa	变形模量/ GPa	泊松比
$T_2b^2$ (灰岩、白云质灰岩、白云岩,Ⅲ类为主,Ⅱ类)	2600	48	1.2	10	0.25
$T_2b^{1-2}$ (条带状灰岩夹泥质灰岩,Ⅲ类)	2550	42	1.0	7.5	0.27
$T_2b^{1-1}$ 、 $T_1q$ (泥质粉砂岩、泥岩夹灰岩等,Ⅳ类)	2450	31	0.45	2.5	0.32
断层破碎带(V类)	2200	27	0.15	1.5	0.35

#### 3.3 位移边界条件

多方案的三维数值试算比较与构造敏感性回归分析表明,  $Z - Y$  面上垂直剪切构造因素和  $Z - X$  面上垂直剪切构造因素不明显,而自重和其它构造因素作用显著,最后确定地应力场形成的构造模式为:自重,  $X$  向挤压构造,  $Y$  向挤压构造,水平  $X$  向剪切构造,水平  $Y$  向剪切构造。

本文根据钻孔地应力实测资料,采用 FLAC 3D 数值分析软件,通过多元线性回归法反演宏观地应力场位移边界条件<sup>[3]</sup>。考虑到各测试结果较为离散,规律一致性较差,根据多次线性回归逐次计算,剔除掉不符合规律的点,并考虑测点分布的代表性,最后选定测点 10,12,14 的测试结果(见表 3)作为多元线性回归的依据。位移边界条件如表 3 所示。

依据各测点输出的 5 个应力分量计算得到 3 个主应力计算结果与实测点地应力分解的 3 个主应力值见表 4。从回归反演的结果可以看出,地应力反演值与

实测值较吻合,在规律上基本保持一致。其中,3个方向的正应力相对误差最大为26.4%。而实际经验表明,实测地应力结果可能存在20%~30%的误差。总体来说,通过多元线性回归法反演得到的位移边界条件是比较合理的。

表3 位移边界条件 (×10<sup>-3</sup> m)

边界条件	数值	边界条件	数值
XX	2.126602	XY	6.716306
YY	0.384007	YX	-1.532783

注:重力修正系数为1.035494。

表4 实测地应力与反演获得的地应力对比 MPa

测点	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\tau_{xy}$	$\tau_{yz}$	$\tau_{xz}$
10 实测	-13.81	-15.94	-16.50	-4.17	0.00	0.00
计算	-13.45	-13.70	-14.95	-3.76	0.18	-0.71
12 实测	-12.13	-20.57	-18.40	-3.29	0.00	0.00
计算	-14.89	-15.14	-17.43	-4.14	0.17	-0.69
14 实测	-18.48	-16.32	-22.10	-5.09	0.00	0.00
计算	-17.73	-18.34	-19.86	-4.88	0.15	-0.57

### 3.4 初始地应力场分布特征

该洞段最大主应力分布如图4所示,洞轴线高程最大最小主应力矢量分布如图5所示。

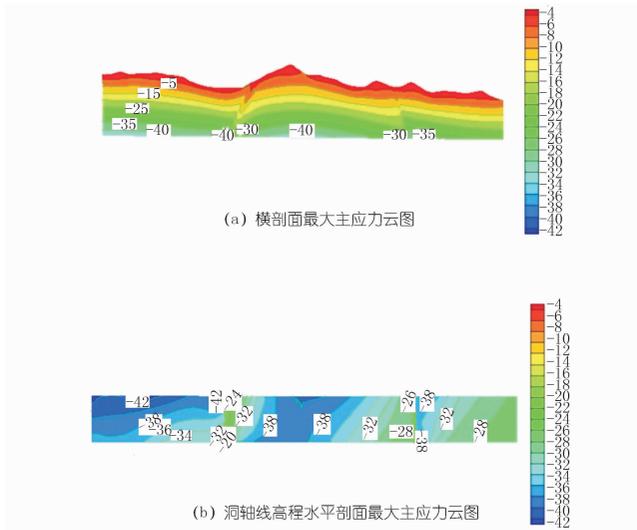


图4 隧洞深埋洞段典型剖面最大主应力  $\sigma_1$  云图(单位:MPa)

从图4(a)可知,洞轴线高程的最大主应力约为38~40 MPa;岩体最大主应力在断层两侧存在较明显的应力集中,在断层位置有陡降现象。从图4(b)可知,岩体最大水平主应力走向主要为北偏东30°~45°,且主要集中于北偏东35°左右;最大最小水平主应力走向在断层带内部有空间转移,最大水平主应力

走向与断层走向接近于正交,交角为70°~80°。

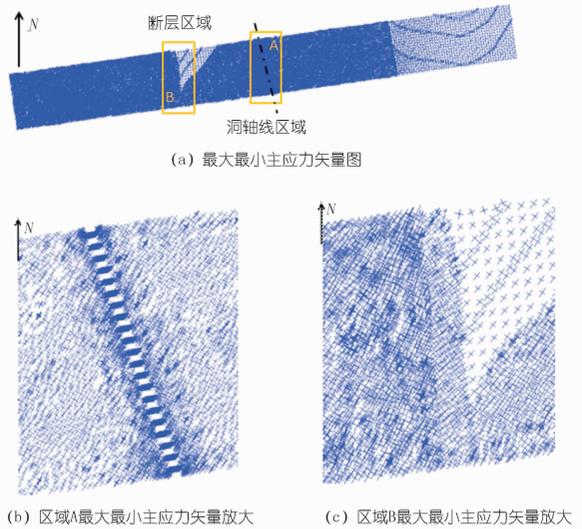


图5 洞轴线高程水平剖面最大最小水平主应力矢量图

### 4 结论

(1) 数值计算结果表明,采用多元线性回归法反演得到的该深埋隧洞段地应力结果与地应力实测结果较一致,可用来综合评价工程洞段所在区域的地应力场分布特征。

(2) 受水平构造应力、断裂构造、岩体物理力学性质等因素的影响,该深埋洞段初始地应力场在量值及方位上存在一定的空间变异性。

#### 参考文献:

- [1] 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):1613-1617.
- [2] 张延新,蔡美峰,王克忠.三维初始地应力场计算方法与工程应用[J].北京科技大学学报,2005,27(5):521-524.
- [3] 马启超.工程岩体应力场的成因分析与分布规律[J].岩石力学与工程学报,1986,5(3):329-343.
- [4] 杨云浩,徐卫亚,聂卫平.糯扎渡水电站厂房区三维地应力场反演分析[J].人民长江,2010,41(7):52-57.

(编辑:郑毅)

(下转第64页)



(4) 通过每平方米的造价比较,含 NS - box 系统的地下连续墙造价与传统的地下连续墙基本相当,NS - box 系统可作为特定环境下城市地下连续墙支护结构的优选方案。

#### 参考文献:

[1] 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会主编. 深基坑支护技术

指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[2] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[3] 赵海丰, 桂树强. H + Hat 组合型钢板桩在基坑工程中的适用性研究[J]. 人民长江, 2012, (5).

[4] GB42/159 - 2004 基坑工程技术规程[S]. (编辑: 赵凤超)

## Study on applicability of NS - box system in supporting structure of foundation pit

ZHAO Haifeng<sup>1,2</sup>, WANG Dahua<sup>2</sup>, JIA Jing<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>

(1. Sanxia Exploration and Survey Co., Wuhan 430074, China; 2 Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Taking a subway foundation pit as an example, the application of NS - box system in underground diaphragm wall supporting structure of foundation pit is calculated and analyzed by means of limit equilibrium and finite element numerical simulation. The underground diaphragm wall support of NS - box system is compared with the traditional support in terms of technology and economy, construction speed, construction complexity, application scope and environmental impacts. The results show that the application of NS - box system in underground diaphragm wall support is safe and feasible with remarkable advantages in construction technology and environmental protection.

**Key words:** underground diaphragm wall; supporting structure; NS - box system; foundation pit

(上接第 50 页)

## Application of multiple linear regression in inversion of tunnel ground stress

SHI Cunpeng, WANG Jiaxiang, CHEN Changsheng, WANG Wangsheng, HU Wei

(Sanxia Exploration and Survey Co., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To overcome the drawbacks of insufficient measuring point of ground stress, it is necessary to invert the ground stress field by multiple linear regression method. Aiming at a deep - buried tunnel, according to the ground stress data measured by hydraulic fracturing method, the inversion of ground stress is carried out. Based on the introduction to the basic inversion theory and error analysis, the inverted results of ground stress are provided. The results show that the calculated results by multiple linear regression is in accordance with the measured data, so it is feasible to be applied in the evaluation of ground stress in the presented tunnel section; due to the influence from horizontal tectonic stress and fracture structure, the ground stress in the presented section reveals some spatial variability.

**Key words:** hydraulic fracturing method; multiple linear regression; inversion of ground stress; deep buried tunnel

(上接第 57 页)

## Estimation method of shear strength of rock mass discontinuity without filling and its application

ZHONG Hua, YANG Huoping, HE Jinming

(Sanxia Exploration and Survey Co., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The shear strength parameters of rock mass discontinuity are basic parameters in anti - sliding stability calculation of structure foundation. In small - scale project, the value of the parameter is taken by the experienced engineer through the analysis and classification of the characteristics of discontinuity; while, in large - type project, it is obtained by test. The former method depends on the experience of engineer, and the latter can not cover all discontinuities because the test can only be performed to partial typical discontinuity. We described how to estimate the shear strength parameters of some specific discontinuities quantitatively, and the method is practical and convenient.

**Key words:** shear strength; rock mass discontinuity; roughness of fracture; rock face strength; Murum Hydropower Station