

块体理论赤平解析法在锦屏二级水电站皮带机隧洞稳定分析中的应用*

梁宁^{①②} 伍法权^① 刘彤^① 刘建友^①

(^①中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

(^②中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 块体理论是适用于分析节理发育破碎刚性岩体稳定性的有效方法。锦屏二级水电站皮带机隧洞岩体不连续面发育,隧洞开挖面是否产生可动块体影响着皮带机隧洞的稳定性。在对皮带机隧洞详细的地质调查和研究基础上,运用块体理论赤平解析法分析皮带机隧洞的稳定性,对可不连续面和开挖面构成的可动块体滑动形式进行判断,得出了块体的失稳形式以单面滑动为主,双面滑动和垂直掉块相对较少的结论;同时得出皮带机隧洞各部分可动块体分布的直观统计结果,即皮带机隧洞左侧墙,左、右顶拱失稳块体较多,右侧墙较少。

关键词 隧洞 不连续面 块体理论赤平解析法 块体稳定分析

中图分类号:U453.2 文献标识码:A

APPLICATION OF BLOCK THEORY BASED STEREO - ANALYTICAL METHOD TO STABILITY ANALYSIS OF CONVEYOR TUNNEL AT JIN-PING II HYDROPOWER STATION

LIANG Ning^{①②} WU Faquan^① LIU Tong^① LIU Jianyou^①

(^①Key Lab of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

(^②Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Block theory is an effective method on stability analysis of fractured rigid rock mass. There are a lot of discontinuous planes developed in rock mass of Jinping II hydropower station conveyor tunnel. So the stability of conveyor tunnel is related with the presence of unstable blocks on excavation planes. This paper deals with the stability of the conveyor tunnel with Block theory based stereo - analytical method on the basis of detailed investigation of rock mass data. It makes judgments on the movable blocks such as sliding types that are induced by all rock discontinuous planes on each excavation plane of the conveyor tunnel. A conclusion is obtained that the sliding type of blocks is mainly single sliding. A relatively few sliding types of double - sided sliding and vertical block falling are also found. Also, the obvious statistical distribution result on the movable blocks in the conveyor tunnel indicates that there are some more instability blocks in the left wall, the left and right arches than the right wall.

Key words Tunnel, Discontinuous plane, Stereo - analytical method, Block theory, Stability analysis, Jinping II hydropower station

* 收稿日期:2008-04-30;收到修改稿日期:2009-03-10.

第一作者简介:梁宁,主要从事岩土工程,工程地质方面的研究工作. Email:liangning@mail.igcas.ac.cn

1 引言

地下工程岩体是指在一定工程范围内的天然地质体。它经历了漫长的地质历史过程,经受了各种地质作用,并在长期地应力作用下,形成了许多永久变形的地质构造形迹,大到断层、层理,小到节理、劈理等。这些构造形迹被统称为结构面。地下工程岩体的开挖扰动了应力场,引起了应力重分布,通常使得岩体沿着结构面滑动或掉落。根据这些客观事实,历年来国内外学者相继对非连续性岩体力学进行研究^[1~3]。1977年,石根华首先利用赤平投影图判断滑落体,并对岩体的稳定性研究引入了矢量代数法分析^[4],并于20世纪80年代初与R. E. Goodman合著《Block Theory And Its Application To Rock Engineering》一书,标志着块体理论作为岩体工程分析的一种有效方法已趋于成熟^[5]。1984年,王思敬等最早应用块体理论的矢量分析法对地下工程围岩块体进行了分析研究。1988年,刘锦华等将块体理论全面介绍到中国,为进一步研究块体理论奠定了基础。后人在此基础上进行了很多改进和研究^[6~9,11~13]。2002年,张子新和孙钧将赤平投影图解析化,提出了块体理论赤平解析法^[10]。该方法结合了图解法和矢量代数法,为工程实践提供了可靠的设计依据。锦屏二级水电站皮带机隧洞节理发育,开挖过程中岩体稳定问题是工程关注的焦点,运用块体理论赤平解析法研究隧洞围岩块体稳定性问题将对工程有积极意义。

2 工程概况和地质背景

雅砻江锦屏二级水电站皮带输送系统主要承担东端引水隧道和排水洞的开挖料至模萨沟弃渣场和东端砂石加工系统的输送任务。皮带输送系统主要由两部分组成:(1)约1.8km长的皮带机隧洞;(2)约4km长的洞外门架基础。本文将对1.8km长的皮带机隧洞进行稳定性分析。

根据工程地质调查,皮带输送隧洞出现的岩性主要为三叠系中统盐塘组灰岩和大理岩,厚层~巨厚层状,岩层总体产状 $120^{\circ} \angle 50^{\circ}$ (表1),主要节理裂隙发育有5组,结合地下厂房开挖面与节理裂隙走向关系,表1给出了主要结构面产状及开挖面几何参数,并对皮带机隧洞开挖面做了平面假设(图1)。

表1 结构面产状与开挖面方位

Table 1 Orientations of discontinuities and excavation planes

面类	编号	面号	倾角/(°)	倾向/(°)	$\tan \varphi$	c /kPa
节理裂隙	2	J1	76	195	0.56	0.20
	3	J2	78	265		
	4	J3	73	349		
	5	J4	61	122		
	6	J5	52	318		
开挖面	7	侧墙	90	100		
	8	左顶拱	40	100		临空面
	9	右顶拱	40	280		

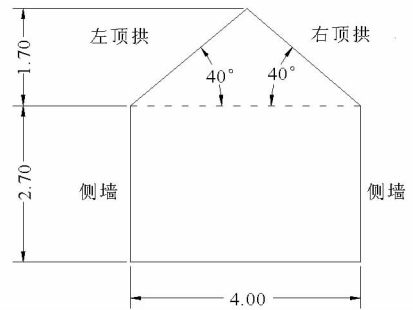


图1 皮带机隧洞开挖面简化图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of excavation planes of conveyor tunnel

3 二维数值模拟计算

皮带机隧洞最大垂直埋深约为130m,以山体自重应力为主。因此首先采用FLAC^{3D}进行二维数值模拟判断开挖状态下隧洞的松动圈范围,为进一步判断可动块体提供依据。数值计算结果显示,皮带机隧洞在自重应力场下产生了明显的应力降低区,应力增高区和原岩应力区(图2)。根据围岩松动圈定义:围岩开挖后,周边岩石产生裂缝并逐渐破坏,出现塑性变形,形成非弹性变形区,即应力降低区,也称围岩松动圈范围。因此,皮带机隧洞左右侧墙的围岩松动圈平均为1.6m;顶拱处约为6m。在松动圈内,岩体的变形破坏受结构面控制,可以采用块体理论赤平解析法进行分析。

4 皮带机隧洞稳定性的块体理论赤平解析法分析

4.1 块体理论赤平解析法的基本假定

块体理论赤平解析法有如下基本假定^[10];

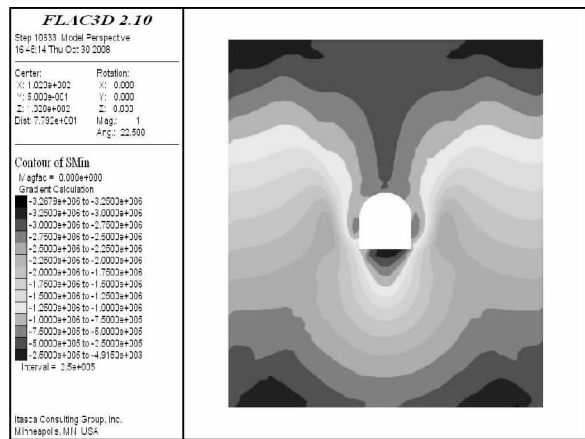


图2 自重下最大主应力图

Fig. 2 Vector of max main stress of gravitation

4.2.1.1 结构面投影圆正交点的判断

已知两结构面 P_i, P_j 的产状为 $(\alpha_i, \beta_i), (\alpha_j, \beta_j)$ (其中 α 为倾角, β 为倾向), 由赤平投影方程, 两结构面的投影面方程分别为:

$$\left. \begin{aligned} P_i: (x - R \tan \alpha_i \sin \beta_i)^2 + (y - R \tan \alpha_i \cos \beta_i)^2 &= \frac{R^2}{\cos^2 \alpha_i} \\ P_j: (x - R \tan \alpha_j \sin \beta_j)^2 + (y - R \tan \alpha_j \cos \beta_j)^2 &= \frac{R^2}{\cos^2 \alpha_j} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

联立求解可得 P_i, P_j 投影圆的交点坐标 $(x_{ij1}, y_{ij1}), (x_{ij2}, y_{ij2})$ 。通常设赤平投影参照圆半径为 1 (R 的取值对结果无影响); 由表 2 的产状, 根据 (1) 式求出各结构面及开挖面两两相交的交点坐标, 并代入下式:

$$(x_{ij}^2 + y_{ij}^2) - R^2 \quad (2)$$

若满足 (2) 式 ≤ 0 , 说明正交点位于参考圆内, 则该点为正交点。利用公式 (1) 得到各投影圆交点坐标见表 3, 对角线右上方均为经过公式 (2) 判断的正交点坐标。

表2 结构面和开挖面产状

Table 2 Orientations of discontinuities and excavation plane

面号	倾角/(°)	倾向/(°)
J ₂	78	265
J ₃	73	349
J ₅	52	318
右拱顶	40	280

表3 结构面投影圆交点坐标

Table 3 Intersections point coordinates of discontinuous projecting circles

面号	J ₂	J ₃	J ₅	右拱顶
J ₂	-	(0.234, 0.516)	(-0.541, 0.598)	(-0.459, 0.614)
J ₃	(-0.729, -1.607)	-	(0.437, -0.580)	(0.320, -0.888)
J ₅	(0.832, -0.920)	(-0.828, 1.100)	-	(-0.469, 0.488)
右拱顶	(0.780, -1.045)	(-0.360, 0.997)	(1.024, -1.066)	-

4.2.1.2 求正交点位置参量矩阵

求解位置参量就是通过公式 (3) 和 (4), 判断结构面 P_i, P_j 的正交点与第三平面 P_k 赤平投影圆的关系 (位于圆上, 圆内或圆外), 进而得出正交点是位于平面 P_k 的上半空间还是下半空间。通过计算, 各正交点的位置参量见表 4。

$$L = (x - R \tan \alpha_k \sin \beta_k)^2 + (y - R \tan \alpha_k \cos \beta_k)^2 - \frac{R^2}{\cos^2 \alpha_k} \quad (3)$$

$$L_{ij}^k = \text{sign}(L) = \begin{cases} -1 & L < 0 \\ 0 & L = 0 \\ +1 & L > 0 \end{cases} \quad (4)$$

表4 正交点位置参量

Table 4 Location parameters of positive intersections

ij	1(J_2)	2(J_3)	3(J_5)	4(右拱顶)
12	0	0	-1	-1
13	0	1	0	-1
14	0	1	-1	0
23	-1	0	0	1
24	-1	0	1	0
34	-1	1	0	0

4.2.1.3 块体有限性判断

结构面 J_2, J_3, J_5 间的位置矩阵为

$$[L] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

为了表征结构面相交的位置相对第三面的上下空间位置关系,同时也为了判断块体是否真实存在,引入了表示半空间与平面的相对位置用空间参量 N_i 。构成的块体可能是各个结构面不同的上盘或者下盘, $[N]$ 就是表示了其中一个组合的编号,实际中会存在好多块体组合,需要计算程序一一辨别。空间参量 N_i 有 3 个取值:1, -1, 0, 分别表征半空间相对于平面的上盘,下盘或与平面无关。

本例中,空间参量矩阵为

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

判断矩阵为

$$[D] = [L] \cdot [N] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

D 为判断矩阵,其中每一行均表示某一正交点与半空间的关系。若矩阵同一行中各项既有 0 又有 1,或既有 0 又有 -1,则说明正交点或负交点在所分析块体的内部,则判断矩阵非空,块体无限;如果同一行中各项既有 -1 又有 1,说明交点不在所分析块体内,则判断矩阵为空集,块体有限。总之,若判断矩阵存在一个交点在分析块体内,则该块体为无限块体,反之为有限块体。算例中矩阵 D 非空,即块体为无限块体。

4.2.1.4 块体可动性判断

通过考虑开挖面与结构面间的组合,判断块体的可动性。加入开挖面后,结构面与开挖面的位置矩阵为

$$[L] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

空间参量矩阵为

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可动性判断矩阵为

$$[D] = [L] \cdot [N] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

算例的可动性判断矩阵结果说明交点不在所分析块体内,为有限块体,考虑到围限块体的组合存在临空面,所以块体为有限可动块体。

4.2.1.5 可动块体滑动形式判断

(x_i, y_i)

$$= \left[\left(R \tan \alpha_i + \frac{R}{\cos \alpha_i} \right) \sin \beta_i, \left(R \tan \alpha_i + \frac{R}{\cos \alpha_i} \right) \cos \beta_i \right] \quad (5)$$

根据(5)式求出各结构面(不包括临空面)最低点的赤平投影坐标,然后代入(3)、(4)式求出相应的位置参量矩阵 $[L]$ 为

$$[L] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

空间参量矩阵在步骤(3)中已求出

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可动块体滑动形式判断矩阵为

$$[D]=[L] \cdot [N] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

根据判断矩阵结果,可动块体的滑动形式为双面滑动,因为每行元素都有-1和1,即所有结构面的最低点均不在块体投影区内。根据赤平投影原理,已知两结构面的正交点 (x_{ij}, y_{ij}) 和两结构面的最低点 (x_i, y_i) ,便可按照公式(6)和(7)求出交线的倾角 α_{ij} 和倾向 β_{ij}

$$\alpha_{ij} = \arccos\left(\frac{2R}{\sqrt{(x_{ij} - x_i)^2 + (y_{ij} - y_i)^2}}\right) \quad (6)$$

$$\beta_{ij} = \arcsin\left(\frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}\right) \quad (7)$$

分别将两结构面的正交点和对应的两个最低点代入(6)式,取 α_{ij} 最大时的那两个结构面为滑动面,并取对应的最低点代入(7)式求出 β_{ij} 。

本算例中,结构面 J_2 和 J_3 构成滑动面,其交线的倾角 α_{ij} 为 80° ,倾向 β_{ij} 为 140° 。

其他有限可动块体的滑动形式判断方法为:若判断矩阵中各行元素都为0或1,表示结构面最低点都在块体投影区内,块体将垂直掉落,滑动角为 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 。若判断矩阵中有元素不全为0或1的行,则块体为单面滑动。若第 i 行中元素都为0或1,则相应的结构面 P_i 的最低点在块体投影区内,块体沿结构面 P_i 滑动。分别比较各可能的滑动面 P_i 倾角 α_i ,取角度最大者为滑动面。

5 皮带机隧洞有限可动块体分布情况分析

锦屏二级水电站皮带机隧洞岩体不连续面发育,主要节理裂隙有5组,相互组合,围岩情况复杂,使隧洞的块体稳定性问题突出,直接影响到隧洞开挖支护和皮带机的安装和正常运行。经过计算分析,皮带机隧洞左侧墙,左、右顶拱有限可动块体较多,右侧墙较少(图3a);块体的失稳形式以单面滑动为主,双面滑动和垂直掉块相对较少(图3b)。

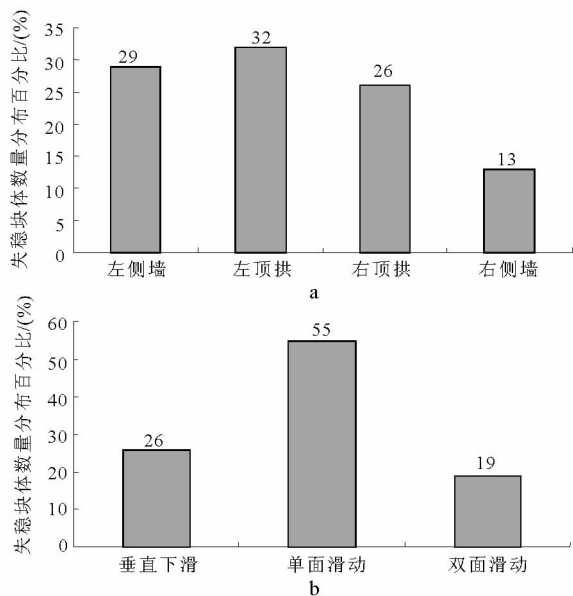


图3 皮带机隧洞有限可动块体分布图和失稳形式图
Fig. 3 Column diagram of distributing and destabilizing pattern of unstable blocks in conveyor tunnel
a. 分布图; b. 失稳形式图

6 结 语

- (1)根据工程地质调查,场区发育的主要节理裂隙有5组;
- (2)皮带机隧洞左侧墙,左、右顶拱失稳块体较多,右侧墙较少;
- (3)块体的失稳形式以单面滑动为主,双面滑动和垂直掉块相对较少。

致 谢 感谢四川二滩国际工程咨询有限责任公司锦屏二级 CIV 标地质工程师魏孝秋在现场的悉心指导和帮助。感谢刘建友博士和海芳博士关于本篇文章的若干次讨论。

参 考 文 献

- [1] Stagg K G, Zienkiewicz D C. Rock mechanics in engineering practice[M]. New York: John Wiley and Sons, 1969.
- [2] Cundall P A. A computer model for simulating systems[A]. In: Prac. Symp. On Rock Fracture (ISRM) [C]. Nancy: [s. n.], 1971.
- [3] Goodman R E. Methods of geological engineering in discontinuous rock[M]. New York: John Wiley & Sons, 1976.
- [4] 石根华. 岩体稳定分析的赤平投影方法[J]. 中国科学, 1977, (3): 269 ~ 271.
Shi Genhua. Stereographic projection method of rock mass stability

- analysis. Science in China, 1977, (3): 269 ~ 271.
- [5] 石根华. 岩体稳定分析的几何方法[J]. 中国科学, 1981, (4): 487 ~ 495.
Shi Genhua. Geometric method of rock mass stability analysis. Science in China, 1981, (4): 487 ~ 495.
- [6] 许强, 黄润秋等. 边坡岩体块体稳定性分析系统的开发与研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 409 ~ 413.
Xu Qiang, Huang Runqiu, et al. Development and study of stability analysis system of slope blocks. Journal of Engineering Geology. 2001, 9(4): 409 ~ 413.
- [7] 王在泉, 华安增. 确定边坡潜在滑面的块体理论方法及稳定性分析[J]. 工程地质学报, 1999, 7(1): 40 ~ 45.
Wang Zaiquan, Hua Anzheng. Block theory and stability analysis to determine potential sliding surfaces of slope. Journal of Engineering Geology. 1999, 7(1): 40 ~ 45.
- [8] 崔银祥, 聂德新, 陈强. 某电站大型地下洞室群主变洞确定性块体稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 212 ~ 217.
Cui Yinxiang, Nie Dexin, Chen Qiang. Stability assessment of deterministic blocks of a main-transformed cavern in a huge underground powerhouse. Journal of Engineering Geology. 2005, 13(2): 212 ~ 217.
- [9] 张子新, P. H. S. W Kulatilake. 三峡永久船闸高边坡关键块体的概率分析[J]. 工程地质学报, 2002, 10(2): 124 ~ 128.
Zhang Zixin, P. H. S. W Kulatilake. Probability analysis of key blocks for high slope of permanent shiplock at the Three-Gorges dam site in China. Journal of Engineering Geology, 2002, 10(2): 124 ~ 128.
- [10] 张子新, 孙均. 块体理论赤平解析法及其在洞室稳定分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1756 ~ 1760.
Zhang Zixin, Sun Jun. Stereanalytic method for block theory and its application in stability analysis of a cave. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1756 ~ 1760.
- [11] 朱杰. 岩质边坡的关键块体稳定性影响因素的敏感性研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(2): 249 ~ 252.
Zhu Jie. Sensitivity study on factors influencing the stability of key block of rock slope. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(2): 249 ~ 252.
- [12] 任爱武, 伍法权, 范永波等. 复杂地质条件下顶拱大型不稳定块体分析与预测[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 788 ~ 792.
Ren Aiwu, Wu Faquan, Fan Yongbo, et al. Analysis and forecast of large rock block instability at top arch under complex geological condition. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 788 ~ 792.
- [13] 王东, 伍法权, 任爱武. 锦屏一级水电站引渠内侧自然边坡的稳定性[J]. 工程地质学报, 16(6): 793 ~ 797.
Wang Dong, Wu Faquan, Ren Aiwu. Stability analysis of the slope inside approach channel at Jinping Hydroelectric Power Station. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 793 ~ 797.

东北地区岩土工程学术研讨会

2009年8月20~22日

会议主题: 岩土工程与振兴东北老工业基地和谐发展

主办单位: 吉林大学

协办单位: 东北电力设计院

会议议题:

东北地区特殊岩土环境问题:

· 人类工程活动与一般性粘性土的环境问题; · 软土、草炭土岩土环境问题; · 黄土类土岩土环境问题; · 黑土岩土环境问题; · 冻土、盐渍土岩土环境问题; · 其他

东北地区工程建设中的岩土工程问题

· 岩土边坡; · 隧道及地下洞室; · 建筑基坑开挖与施工; · 地基与桩基础

东北地区人类活动与土地的保护问题

· 东北地区人类活动与黑土地的保护问题; · 东北西部工程建设与特殊地区的环境保护

岩土工程理论与新技术

· 岩、土力學理论; · 岩土工程设计风险分析; · 地质灾害评估与治理新技术; · 岩土工程测试及监控技术; · 岩土工程钻掘新技术

会议地点: 吉林长春市人民大街4059号吉林大学北苑宾馆

会议时间:

2009年8月20~8月22日, 其中:

2009年8月20日报到注册; 2009年8月21日学术会议; 2009年8月22日会后考察。

会议论文集:

论文摘要截止时间: 2009年4月30日

论文全文截止时间: 2009年6月30日

论文请通过电子邮件发送到: ccgeot09@163.com

会议费用:

正式代表: 200元, 学生代表: 100元

住宿费标准间 240元(所有代表自理)

会议考察路线:

长白山泥石流、滑坡、崩塌等灾害考察, 费用自理

联系方式:

联系地址: 长春市西民主大街6号

邮编: 130026

联系电话: 0431-88502353

传真: 0431-88502337

联系人: 王清, 陈慧娥

wangqing@jlu.edu.cn; chenhe@jlu.edu.cn