

挡土墙主动土压力分布研究

陈兴亮¹, 周光余¹, 熊传祥²

(1. 湖南省勘测设计院, 湖南长沙 410014; 2. 福州大学环境与资源学院, 福建福州 350002)

摘要:基于极限平衡理论,利用单元分层法分别讨论了墙后无开挖回填和有开挖回填不同工况条件下的挡土墙土压力分布形式,推导出不同工况条件下的主动土压力强度及主动土压力系数理论公式。结果表明,墙后无开挖回填工况条件下墙背主动土压力沿墙高成线性分布;墙后有开挖回填工况条件下墙背土压力沿墙高成非线性分布。

关键词:单元分层法;挡土墙;主动土压力;开挖;回填

中图分类号:TU432 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)03-0036-05

Study on Distribution of Active Earth Pressure of Retaining Wall/CHEN Xing-liang¹, ZHOU Guang-yu¹, XIONG Chuan-xiang²(1. Hunan Investigation and Survey Design Institute, Changsha Hunan 410014, China; 2. College of Environment & Resources, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350002, China)

Abstract: Based on the soil critical equilibrium theory, the paper discussed the distribution of earth pressure on retaining wall under the working conditions with or without excavation and backfilling between the wall and ground by thin-layer method, deduced the formulas of active earth pressure strength and coefficient of active earth pressure. The results show that the relation between the earth pressure strength and the depth of wall is linear under the working condition with excavation and backfilling and nonlinear under the working condition without excavation and backfilling between the wall and ground.

Key words: thin-layer method; retaining wall; active earth pressure; excavation; backfilling

0 引言

挡土墙土压力计算一直是工程届和学术界重要研究课题。其中,基于极限平衡理论的土压力计算方法因其推导出的公式简单、物理概念明确、易于掌握等优点在工程中得到广泛应用,这以经典的 Coulomb 和 Rankine 土压力理论最为代表,其挡墙土压力强度沿墙高成线性分布。而与此同时,挡土墙主动土压力的非线性分布已为许多学者所论述,并被一些工程实测结果和室内试验所验证,这以 Karan 解为典型代表,并且我国学者蒋纯秋、赵恒惠、姚代禄、王渭漳、曹振民、蒋忠信、王元战等^[3~9]对挡墙主动土压力非线性研究作了深入研究。总结前人研究成果,不难发现,关于挡土墙土压力强度的分布形式、主动土压力系数、合力作用点及其影响因素仍是当前研究的重点课题。

事实上,挡墙土压力分布不仅仅受墙背填土性质、挡墙形状、墙体位移、破裂面形态等因素影响,挡墙墙后填土工况也是一个重要因素。

例如,浆砌片石的重力式挡墙施工时,往往先将墙后老土挖去一楔体,待挡墙砌筑完毕后,再回填碎

石、中粗砂等滤水层和夯实粘土,由于墙后回填砂土未完成自重固结,压缩性较大,导致回填土与原状土在开挖面上的质点速度、位移不能保持一致,必然影响土体水平应力传递的连续性,这种情况下滑动楔体的滑裂面往往就为开挖面;与此相反,在基坑工程中,水泥土搅拌桩、钻孔灌注排桩、地下连续墙等桩墙围护结构则与上述工况截然不同,墙后土体一般无须先开挖后回填,墙后填土为原状土,未经扰动,可看作地表水平的半空间无限体。

由此可见,对挡墙墙背土压力分析时,有必要区分上述2种不同工况,即墙后无开挖回填和墙后有开挖回填。

1 公式推导

假设墙背土体处于主动极限状态,土体内沿墙背面及过墙底与竖直方向夹角为 θ 的平面为滑裂面,墙体绕基础转动,填土表面水平,墙壁垂直,如图1所示。在滑动楔体内距地表深度为 y 处取一薄层单元体,作用于单元体上的力有单元顶面和底面的垂直反力分别为 p 和 $p + dp$,挡土墙的水平反力为

收稿日期:2008-09-05

基金项目:福建省自然科学基金项目(编号:F0210006)

作者简介:陈兴亮(1982-),男(汉族),江苏句容人,湖南省勘测设计院工程师,岩土工程专业,硕士,从事基坑、滑坡、基桩检测等方面的设计研究工作,湖南省长沙市体育路245号,chenxingliang@foxmail.com。

p_x , 挡墙与墙后填土的摩擦力为 τ_1 、粘聚力 c_1 ; 滑裂面上的反力为 R 、摩擦力为 τ_2 、粘聚力 c_2 , 微元体自重 dw , 如图1所示。

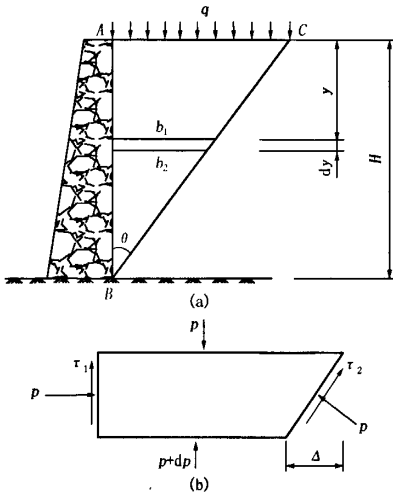


图1 挡土墙分析模型

2.1 第一种工况: 墙后无开挖回填

在基坑工程中, 水泥土搅拌桩、地下连续墙等围护挡墙施工时无需先开挖后回填, 墙后土体都均可看作连续介质, 这与公路中浆砌片石的重力式挡墙先开挖后回填有所区别。图1中的滑裂面 BC 为假想滑裂面, 滑动楔体 ABC 与原状土体 (BC 面下半部分土体) 在滑裂面上质点的速度、位移保持一致, 土体水平应力的传递保持连续性。因此, 微元体上下边界压力 p 和 $p+dp$ 可直接用 $q+\gamma y$ 和 $q+\gamma y+\gamma dy$ 代替。单元体水平力:

$$\sum F_x = 0$$

$$p_x dy + \tau_2 \frac{dy}{\cos\theta} \sin\theta - R \frac{dy}{\cos\theta} \cos\theta = 0 \quad (1)$$

单元体竖向力

$$\sum F_y = 0$$

$$-pb_1 + (p+dp)b_2 + \tau_1 dy + \tau_2 \frac{dy}{\cos\theta} \cos\theta + R \frac{dy}{\cos\theta} \sin\theta - dw = 0 \quad (2)$$

其中, $p_x = K_a p$, $b_1 = (H-y) \tan\theta$, $b_2 = (H-y-dy) \tan\theta$, $\tau_1 = K_a (\gamma y + q) \tan\theta + c_1$, $\tau_2 = R \tan\theta + c_2$, 联立式(1)、(2), 略去二阶无穷小, 整理化简得:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dy} + \frac{1 - (a_1 + a_2) K_a}{y - H} p = \frac{b_1 c_1 + b_2 c_2}{y - H} + \gamma \\ R = \frac{K(\gamma y + q) + c_2 \tan\theta}{1 - \tan\theta \tan\theta} \\ R = \frac{\gamma y + q - K(\gamma y + q) \tan\theta \cot\theta - (c_1 + c_2) \tan\theta}{1 + \tan\theta \tan\theta} \end{cases} \quad (3)$$

求解式(3), 可求得主动土压力系数:

$$K_a = \frac{1}{a_1 + a_2} - \frac{b_1 c_1 + b_2 c_2}{a_1 + a_2} \frac{1}{\gamma y + q} \quad (4)$$

其中, $a_1 = (1 + \tan\theta \cot\theta) / (1 - \tan\theta \tan\theta)$, $a_2 = \tan\theta \cot\theta$, $b_1 = \tan\theta$, $b_2 = (\tan\theta + \cot\theta) / (1 - \tan\theta \tan\theta)$ 。

因此, 墙背水平主动土压力为:

$$p_x = K_a p = \frac{\gamma}{a_1 + a_2} y + \frac{q - (b_1 c_1 + b_2 c_2)}{a_1 + a_2} \quad (5)$$

由式(5)可知, 墙后无开挖回填时, 墙后土压力沿墙高成线性分布。

2.2 第二种工况: 墙后有开挖回填

对于公路中浆砌片石的重力式挡墙而言, 其施工时往往在墙后先开挖一部分土体, 待挡墙砌筑完成后, 再回填碎石土、砂土或透水性较好粘性土。由于墙后回填物质结构较松散, 孔隙大, 粘结力小, 未完成自重固结, 这与原状土层 (或称下伏土层) 有着显著差异, 容易导致沿回填土与原状土接触面成富水带, 软化接触面附近土层, 降低力学性能参数, 墙后填土易沿接触面产生滑移, 墙后填土的滑裂面即为开挖面。

这将导致回填土与原状土体在滑裂面上质点的速度、位移不能保持一致, 土体水平应力传递也将不连续。因此, 微元体上下边界压力 p 和 $p+dp$ 不可直接用 $q+\gamma z$ 和 $q+\gamma z+\gamma dz$ 代替。

对单元体 CD 边中点 E 点取矩, 满足力矩平衡条件 $\sum M_E = 0$, 可得:

$$\tau_1 dy (b_1 - \frac{\Delta}{2}) + (p+dp) b_2 (\frac{b_2}{2} + \frac{\Delta}{2}) - p b_1 (\frac{b_1}{2} - \frac{\Delta}{2}) - dw \frac{b_1 + b_2}{2 \times 2} = 0 \quad (6)$$

代入 b_1 、 b_2 及 Δ , 化简整理得:

$$\frac{dp}{dy} = \gamma - \frac{2\tau_1}{(H-y) \tan\theta} \quad (7)$$

式(3)和式(7)即为本模型的基本方程, 通过求解微分方程, 化简整理得:

$$p = C(y-H)^{(a_1+a_2)K_a-1} + \frac{\gamma}{2-(a_1+a_2)K_a} (y-H) + \frac{b_1 c_1 + b_2 c_2}{1-(a_1+a_2)K_a} \quad (8)$$

上式中 C 为积分常数, 很容易由边界条件确定, 即 $y=0$ 时, $p=q$, 因此:

$$C = \frac{q - \frac{b_1 c_1 + b_2 c_2}{1-(a_1+a_2)K_a} + \frac{\gamma H}{2-(a_1+a_2)K_a}}{-H^{(a_1+a_2)K_a-1}} \quad (9)$$

所以, 挡土墙的水平土压力 p_x 为:

$$p_x = K_a \left[q - \frac{b_1 c_1 + b_2 c_2}{1 - (a_1 + a_2) K_a} + \frac{\gamma H}{2 - (a_1 + a_2) K_a} \right] \times \left(1 - \frac{\gamma}{H} \right)^{(a_1 + a_2) K_a - 1} + \frac{K_a \gamma (y - H)}{2 - (a_1 + a_2) K_a} + \frac{K_a (b_1 c_1 + b_2 c_2)}{2 - (a_1 + a_2) K_a} \quad (10)$$

3 土压力合力及其作用点

作用于挡土墙上的水平土压力合力及其合力作用点可以沿墙高积分求得。

3.1 第一种工况:墙后无开挖回填

$$E(\varphi, \delta, \theta) = \int_0^H p_x dy = \frac{1}{a_1 + a_2} \left[\frac{1}{2} \gamma H^2 + qH - (b_1 c_1 + b_2 c_2) H \right] \quad (11)$$

挡土墙墙背水平土压力合力作用点距墙底距离为:

$$h_p = M/p = \frac{\int_0^H (H - y) p_x dy}{p} = \frac{H}{3} \frac{\gamma H^2 + 3[q - (b_1 c_1 + b_2 c_2)]}{\gamma H^2 + 2[q - (b_1 c_1 + b_2 c_2)]} \quad (12)$$

由式(5)、(11)、(12)可知,对第一种工况墙后无开挖回填而言:一是,挡墙土压力分布沿墙高成线性分布;二是,合力作用点不完全位于距墙底 $H/3$ 处,当地面无超载且为无粘性土时,合力作用点位于距墙底 $H/3$,与库伦土压力合力作用点相当;三是,水平土压力 $E(\varphi, \delta, \theta)$ 是角 θ 的函数,利用微分学求极值的方法 $dE/d\theta = 0$ 可求得最不利滑裂角 θ_{cr} ,从而可求得 E 最大值 E_{max} ,并将此作为主动土压力,其所对应的滑裂面也为最不利滑裂面。其中,在求导运算过程中,将遇到求解超越方程的麻烦,这可以通过采用图解法换元求得,具体求解过程在此不作阐述。

最不利破裂角:

$$\theta_{cr} = \arctg \frac{\cos \varphi \cos \delta \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta)}{\cos \delta \sin \varphi}} - \cos \varphi \sin(\delta + \varphi)}{\cos \delta - \sin \varphi \sin(\delta + \varphi)} \quad (13)$$

主动土压力:

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cos^2 \varphi \cos \delta \left[\frac{\sqrt{\cos \delta} - \sqrt{\sin \varphi \sin(\delta + \varphi)}}{\cos \delta - \sin \varphi \sin(\delta + \varphi)} \right]^2 \quad (14)$$

主动土压力系数:

$$K_a = \cos^2 \varphi \cos \delta \left[\frac{\sqrt{\cos \delta} - \sqrt{\sin \varphi \sin(\delta + \varphi)}}{\cos \delta - \sin \varphi \sin(\delta + \varphi)} \right]^2 \quad (15)$$

3.2 第二种工况:墙后有开挖回填

$$E(\varphi, \delta, \theta) = \int_0^H p_x dy = K_a \left[\frac{q - \frac{b_1 c_1 + b_2 c_2}{1 - (a_1 + a_2) K_a} + \frac{\gamma H}{2 - (a_1 + a_2) K_a}}{K_a (a_1 + a_2)} H + \frac{1}{2 - (a_1 + a_2) K_a} \frac{\gamma H^2}{2} + \frac{b_1 c_1 + b_2 c_2}{1 - (a_1 + a_2) K_a} H \right] = \frac{1}{a_1 + a_2} \left[\frac{1}{2} \gamma H^2 + qH - (b_1 c_1 + b_2 c_2) H \right] \quad (16)$$

主动土压力系数:

$$K_a = \frac{1}{a_1 + a_2} = \frac{\cos(\theta + \varphi) \operatorname{tg} \theta \cos \delta}{\sin(\theta + \varphi + \delta)} \quad (17)$$

挡土墙背水平土压力合力作用点距墙底距离为:

$$h_p = M/p = \frac{\int_0^H (H - y) p_x dy}{p} = \left[\frac{1}{3} + \frac{K(a_1 + a_2) - 1}{3K(a_1 + a_2) + 1} \right] \frac{\gamma H^2 + 3qH - \frac{3}{2}(b_1 c_1 + b_2 c_2) H}{\gamma H^2 + 2qH - 2(b_1 c_1 + b_2 c_2) H} \quad (18)$$

由式(6)、(17)、(18)可见:一是,对第二种工况墙后有开挖回填而言,挡墙土压力分布沿墙高成非线性分布;二是,当地面无超载且为无粘性土时,当 $K(a_1 + a_1) = 1$ 时,土压力合力作用点距墙底等于 $H/3$,当 $K(a_1 + a_1) > 1$ 时,土压力合力作用点距墙底小于 $H/3$,当 $K(a_1 + a_1) < 1$ 时,土压力合力作用点距墙底大于 $H/3$ 。

4 主动土压力系数 K_a

当墙背垂直,填土面水平时,库伦主动土压力系数:

$$K_a = \frac{\cos^2 \varphi}{\cos \delta [1 + \sqrt{\sin(\varphi + \delta) \sin \varphi / \cos \delta}]^2} \quad (19)$$

朗肯主动土压力系数:

$$K_a = \operatorname{tg}^2 [45^\circ - (\varphi/2)] \quad (20)$$

比较式(15)、(17)、(19)和(20)可知,第一种工况墙后无开挖回填时,主动土压力系数仅与 φ 、 δ 有关,与滑裂面 θ 无关;第二种工况墙后有开挖回填时,主动土压力系数则与开挖面夹角 θ 有关。图2是墙背填土内摩擦角 $\delta = 20^\circ$,土内摩擦角 φ 分别取 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° , θ 分别取 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、

50°时土压力系数对比情况。

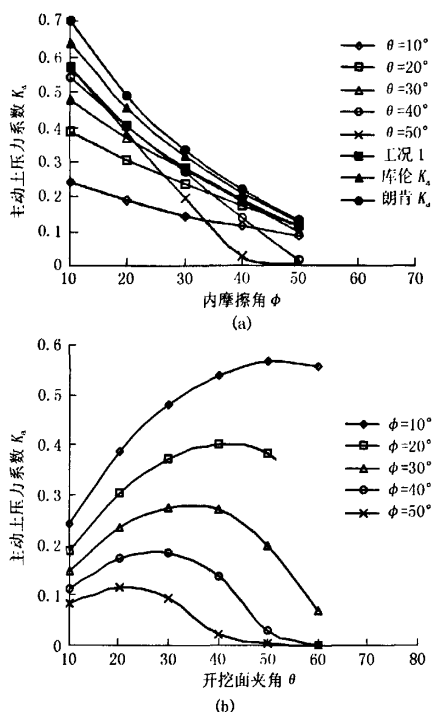


图2 K_a 随 ϕ 和 θ 变化曲线

从图2(a)可知,第一种工况墙后无开挖回填时:(1)保持 δ 一定,随内摩擦角 ϕ 增大,库伦、朗肯及本文主动土压力系数 K_a 都逐渐减小,它与开挖面夹角 θ 无关;(2)相同 δ 、 ϕ 条件下,本文主动土压力系数 K_a 最小,朗肯 K_a 最大,库伦 K_a 居中,并且第一种工况条件下的 K_a 比第二种工况不同 θ 值的 K_a 均要大。

从图2(b)可知,第二种工况墙后有开挖回填时:(1)随内摩擦角 ϕ 增大,本文主动土压力系数 K_a 逐渐减小,并且开挖面夹角 θ 越大, K_a 减小的越快;(2)随开挖面夹角 θ 增大,本文主动土压力系数 K_a 呈现先增大后减小的变化趋势,并且随内摩擦角增大, K_a 的峰值逐渐减小,其所对应的峰值内摩擦角也逐渐减小。

5 工程实例

实例1:陆培毅在砂土的情况下在室内对悬臂桩进行土压力和位移的量测试验^[10]。试验槽长6.1 m,宽2.5 m,深2.2 m,模型板采用三块聚乙烯塑料板,土压力测试采用BW-0.3微型土压力盒量测,试验砂采用平均粒径为0.26 mm的细砂,不均匀系数为1.65,干重度为16.0 kN/m³,内摩擦角取

31°。砂土悬臂支护结构总长160 cm,开挖深度(悬臂段长度)为90 cm,嵌固段70 cm。墙背土压力实测值及理论值如图3所示。

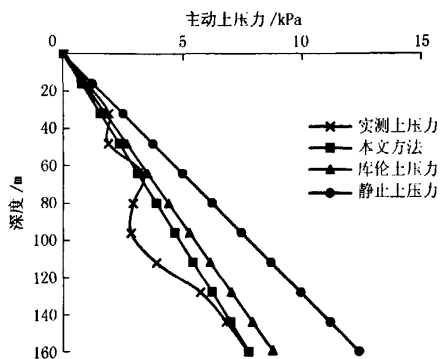


图3 实例1土压力实测值及理论值

实例2:湖南省交通科学研究所1977年在沅江纸厂码头进行了现场观测^[7]。试验墙高度 $H=8.75$ m,回填粘性黄土,墙后回填土开挖角 $\theta=33^\circ$,墙背仰角 $\alpha=0$,填土表面倾角 $\beta=0$,墙背摩擦角 $\delta=13^\circ$,回填土与原状土之间的凝聚力 $c=12.2$ kPa,内摩擦角 $\phi=18.8^\circ$ 。填土表面,当人工加载至 $q=9.8$ kPa时,回填土沿开挖面发生破裂。墙背土压力实测值及理论值如图4所示。

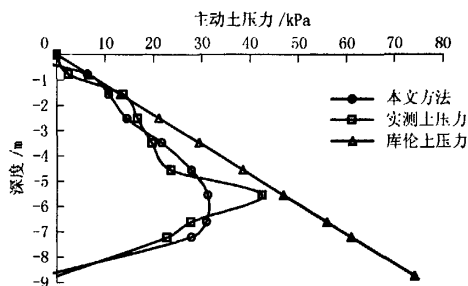


图4 实例2土压力实测值及理论值

工程实例1对应于第一种工况——墙后无开挖回填,工程实例2对应于第二种工况——墙后有开挖回填。由图3及图4可知,本文通过分析不同工况条件下挡墙土压力分布,理论值较好地吻合了土压力实测值,正确区分墙后工况条件,无疑在工程设计中有着较好的指导意义。

6 结论

(1)本文分别对墙后无开挖回填和有开挖回填2种不同工况条件下的挡墙土压力进行了详细分析,推导了不同工况条件下的土压力强度及合力作用点等理论公式。

(2)第一种工况:墙后无开挖回填条件下,墙背土压力沿墙高成线性分布;第二种工况:墙后有开挖回填条件下,墙背土压力沿墙高成非线性分布。

(3)第二种工况墙后有开挖回填条件下,一方面,随内摩擦角 φ 增大,本文主动土压力系数 K_a 逐渐减小,并且开挖面夹角 θ 越大, K_a 减小的越快;另一方面,随开挖面夹角 θ 增大,本文主动土压力系数 K_a 呈现先增大后减小的变化趋势,并且随内摩擦角增大, K_a 的峰值逐渐减小,其所对应的峰值内摩擦角也逐渐减小。

(4)通过与工程实测土压力值比较,正确区分不同工况,无疑在工程设计中具有较好的指导意义。

参考文献:

[1] Γ. 克列因. 散体结构力学[M]. 陈万佳, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1983.

- [2] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001.
- [3] 蒋纯秋. 挡土墙土压力非线性分布解[J]. 土木工程学报, 1964, (1): 56-65.
- [4] 赵恒惠. 挡土墙后粘性填土的土压力计算[J]. 岩土工程学报, 1983, 5(1): 134-145.
- [5] 姚代禄. 挡土墙土压力非线性分布的研究[J]. 重庆交通学院学报, 1984, 10(3): 40-47.
- [6] 王渭漳. 粘性土对挡土墙侧压力的非线性分布[J]. 中国公路工程, 1988, (2): 28-45.
- [7] 王渭漳, 吴亚中. 重力式挡土墙墙背土压力及其分布研究[J]. 中南公路工程, 1992, (1).
- [8] 曹振民. 挡土墙填土曲线破裂面主动土压力分析[J]. 中国公路学报, 1995, 8(1): 8-13.
- [9] 王元战. 挡土墙主动土压力分布与侧压力系数[J]. 岩土力学, 2005, 126(7): 1019-1022.
- [10] 陆培毅. 砂土基于室内模型试验土压力分布形式的研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(10): 84-88.

2009 北京钻探技术国际学术研讨会(第一号通知)

本刊讯 随着我国深部地质勘探工作的逐步深入,国内钻探工程界对新技术、新方法的渴望越来越强烈,同时国际钻探同行对中国近十年来在钻探技术方面的发展与进步也十分感兴趣。为了加强国内外钻探界的学术交流与合作,以提高探矿工程学科在国内外影响力,中国地质学会探矿工程专业委员会、中国地质大学(北京)工程技术学院、地质超深钻探技术国家专业实验室商定,拟在2009年10月中下旬联合组织召开“2009北京钻探技术国际学术研讨会”。

一、会议议题

1. 岩心钻探技术
2. 科学钻探技术
3. 工程勘察与基础工程施工技术
4. 非开挖施工技术
5. 地质灾害防治与地质环境治理技术
6. 煤层气开采技术
7. 地下水及地热资源勘探与开采技术
8. 钻探新设备、新仪器、新材料
9. 工程管理与安全生产

二、会议地点

北京市(具体地点在第二号通知中确定)

三、会议时间

2009年10月中下旬(具体时间在第二号通知确定)

四、会议主办单位

中国地质调查局
中国地质大学(北京)
中国地质学会

五、会议承办单位

中国地质大学(北京)工程技术学院
地质超深钻探技术国家专业实验室
中国地质学会探矿工程专业委员会

六、会议论文征集

论文题目可根据大会主题和议题自由选定。会议论文应是未经发表过的最新成果。学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查,精选一定数量的优秀论文推荐在国内外具有较高影响的刊物上发表,其余通过审查的论文将以论文集和光盘的形式正式出版。论文篇幅应尽量控制在5000字以内,以电子文档(Word格式)提交至大会秘书处,论文版面费将直接通知作者交付。

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

论文请按时通过电子邮件同时提交到 zlx2096827@126.com, huyuanbiao@263.net, 并通过电话或短信通知联系人, 以便确认是否传送成功。

七、会议联系人

1、中国地质大学(北京)工程技术学院
胡远彪:010-82328581(传真)、010-82323273、
13811999982
朱彤:010-82328581(传真)、010-82323273、
13501189650

地址:北京市海淀区学院路29号中国地质大学(北京)工程技术学院

邮编:100083

2、中国地质学会探矿工程专业委员会

张林霞:0316-2096827(传真)、13932678655

地址:河北省廊坊市金光道77号探工学会

邮编:065000

3、大会网站: <http://nlsd.cugb.edu.cn>

大会一般事务联系邮箱: huyuanbiao@263.net

大会论文提交邮箱: zlx2096827@126.com

huyuanbiao@263.net