

文章编号: 1000-7598(2009)04-1063-05

# 煤层开采与1 000 kV特高压输电杆塔地基稳定性影响研究

张 勇<sup>1</sup>, 高文龙<sup>2</sup>, 赵云云<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学, 河北 邯郸 056038; 2. 北京国电华北电力工程有限公司, 北京 100011)

**摘 要:** 晋东南至南阳段1 000 kV特高压输电线路途经山西煤田采空区和规划区, 为评价规划区煤层开采对已建输电杆塔地基稳定性的影响, 根据现场收集的资料、利用FLAC<sup>3D</sup>数值方法对特高压线路N165输电杆塔下部3号煤层进行开采模拟。结果表明, 开采3号煤层将对输电杆塔地基稳定性造成影响, 地表最大沉降为3.7 m, 输电杆塔基础沿线最大倾斜为9.2 ‰, 开采过程中如杆塔基础不采取抗变形措施, 杆塔基础倾斜将会危及到特高压输电线路的稳定。

**关 键 词:** 煤层开采; 1 000 kV特高压; 输电杆塔; 地基稳定性; FLAC<sup>3D</sup>

中图分类号: TO 823

文献标识码: A

## Influence research of coal seam mining and pole foundation stability of 1 000 kV UHV transmission line

ZHANG Yong<sup>1</sup>, GAO Wen-long<sup>2</sup>, ZHAO Yun-yun<sup>1</sup>

(1. Hebei University of Engineering, Handan 056021, China; 2. North China Power Engineering (Beijing) CO., LTD, Beijing 100011, China)

**Abstract:** The 1 000 kV UHV transmission line of Southeast Shanxi to Nanyang passes through the mined out space and layout area of Shanxi coalfield. For the sake of appraise the influence of mining of coalfield layout area to foundation stability of transmission tower, according to the data that collect in locale, by using FLAC<sup>3D</sup> numerical method, mining simulation of the coal seam #3 under N165 tower of 1 000 kV UHV transmission line has been done; the result is that to mine coal seam #3 will bring influence on the stability of foundation of transmission tower; the most subsidence of the ground is 3.7 m and the most incline of the transmission tower foundation along the power line is 9.2 ‰. Without taking anti-deformation measures, the incline of tower foundation will endanger the stability of 1 000 kV UHV transmission line.

**Key words:** coal seam mining; 1 000 kV UHV; transmission tower; stability of foundation; FLAC<sup>3D</sup>

## 1 引 言

我国陕北—晋东南—南阳—荆门1 000 kV特高压输电线路工程已经规划完毕, 即将开始建设。该线路完成后将担负陕、晋两省煤电向华中送电重任。作为国内第一条特高压输电线路, 建成后华中电网将成为国内电力能源战略集散地, 此举将促进电力产业技术升级, 加快“西电东送”和全国联网工程项目的建设进度, 实现跨大区域、跨流域的水火互济, 变输煤为输电, 进行更大范围内的电力资源优化配置, 对提高能源利用有重要意义。

晋城—南阳段1 000 kV线路, 北起山西省长治市长子县晋东南1 000 kV变电所, 南至河南省南阳市方城县南1 000 kV开关站, 路径长约360 km, 其中山西境内(晋东南段)长约120 km。在山西段穿越23 km的大面积采空区、57 km的未来采空区, 而且未来十年或几十年内, 线路沿线区域内都将成为未来的采空区。地下煤炭的大面积开采, 必然引起采空区上方地表的移动和变形, 造成地表的不均匀沉降, 对线路杆塔基础, 轻则可造成基础倾斜、开裂、杆塔变形, 重则造成基础沉陷、杆塔倾倒, 严重威胁输电线路的安全运行。

收稿日期: 2007-12-24

基金项目: 国家电网1 000 kV级交流特高压输变电工程关键技术研究课题(No. SGKJ[2007]57)。

第一作者简介: 张勇, 男, 1962年生, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事岩土工程教学和科研工作。E-mail: zhang\_yong001@163.com

有关采空区沉陷预计的方法主要有概率积分法、典型曲线法和负指数函数法及数值模拟计算,本课题采用数值计算方法对3号煤层进行开采模拟<sup>[1-2]</sup>,研究工作面推进过程中对输电杆塔基础稳定性的影响,这对指导杆塔基础设计及将来线路运行、针对煤层开采损害采取应对措施有现实意义。

## 2 研究区基本地质概况

研究区段线路内出露地层由老到新有:奥陶系中统上马家沟组;石炭中统本溪组、上统太原组;二叠系下统山西组、下石盒子组、上统上石盒子组、石千峰组;三叠系下统陈家庄组、南梁山组、上统延长组;第四系上更新统、全新统。含煤地层主要有:石炭系(C)太原组( $C_3t$ ):岩性主要为砂岩、砂页岩夹5~6层煤或煤线及5~7层灰岩。煤层发育于下部,以5号煤厚度最大,平均厚约12.0 m,总厚80~118 m。二叠系(P)山西组( $P_1s$ ):主要为灰色、灰黑色页岩、粉砂岩及中细粒砂岩,含1~4层煤或煤线,总厚37~87 m。

研究区可采煤层分述:①3号煤层,位于山西组下部,煤层稳定,煤层厚5.04~7.16 m,平均为6.11 m。纯煤厚4.81~6.98 m。下距大部可采煤层9号煤39.89~53.83 m,平均为47 m。顶板主要是泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩,局部为细、中粒砂岩。底板主要是粉砂岩、泥岩,局部为细粒砂岩。②9号煤层,位于太原组三段下部,下部距可采的15号煤层30.45~53.28 m,平均为40.04 m。煤厚0.32~1.90 m,平均为1.00 m。顶板一般为泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩,局部为细、中粒砂岩(主要发育于东南部)或石灰岩。底板一般为泥岩或粉砂岩。③15号煤层,位于太原组一段上部,为主要可采煤层之一。煤层厚0.30~6.17 m,平均为3.21 m,纯煤厚0.80~5.64 m,顶板一般为泥岩或含钙泥岩,底板主要为泥岩。

## 3 N165塔基下部3号煤层模拟开采

### 3.1 塔基下基本开采状况

N165输电杆塔位于晋城寺河矿规划区3303工作面上部,南部分别近期已开采的为3302及3301工作面,N165输电杆塔为直线塔,拟采用大板基础,基础底面积约为 $16\text{ m} \times 16\text{ m}$ 。3号煤层底板标高平均为-450 m,煤层平均开采厚度为6 m,回采率超过80%,开采方式为长壁综采放顶式开采。地面标高为+900~+1100 m,地形坡度约为10%,地势主要为山地。3303、3302、3301工作面以及

N165塔位布置如图1所示。

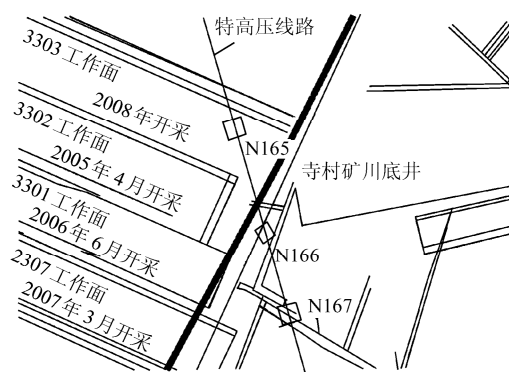


图1 N165塔位及煤层开采工作面布置图

Fig. 1 Figure of N165 tower location and disposal of working surface of coal mining

### 3.2 模型建立及参数赋值

FLAC 软件是美国明尼苏达 ITASCA 软件公司在 1986 年开发研制的,主要用于岩土力学分析,例如煤矿开采沉陷预测<sup>[3]</sup>,矿体滑坡<sup>[4]</sup>岩体稳定性分析和采矿巷道稳定性研究等,现在已逐步应用于地质力学问题的研究。

FLAC 程序中包括反映地质材料力学的特殊计算功能,可以追踪材料的渐进破坏垮落。程序允许输入各种材料类型,可在计算过程中改变某个局部材料参数,有多种材料模型可供选取,本次模拟计算采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。

由图 1 可知,由北向南布置着 3303、3302、3301 工作面,3301 工作面 2006 年 6 月已经采完;3302 工作面 2005 年 4 月已经采完;3303 工作面预计 2008 年开采。特高压线路走向与 3303、3302、3301 工作面斜交,夹角度约为  $45^\circ$ 。由于 2307 工作面 2007 年 3 月已经开采完毕,与 N165 杆塔距离较远,对 N165 号塔基产生的残余沉降影响很小,所以在模型的建立过程中只包括了 3303、3302、3301 工作面和 N165 号塔基。

模型选取工作面走向为 X 方向,开切眼方向为 Y 方向,定义竖直向上为 Z 方向,模型沿工作面走向方向为 2 000 m,沿开切眼方向为 1 000 m,上部边界到地面,下部边界根据底板导水破坏深度的经验公式确定,为 3 号煤层底板下部 150 m。形成了尺寸为  $2\,000\text{ m} \times 1\,000\text{ m} \times 500\text{ m}$  三维计算模型,共划分为 19 022 个六面体网格,15 549 个节点。开采工作面宽度按 200 m 考虑,工作面之间煤柱按 50 m 考虑,开切眼均位于  $x = 500\text{ m}$  处,杆塔基础中心坐标为: (1310, 760, 1070),具体模型见图 2。

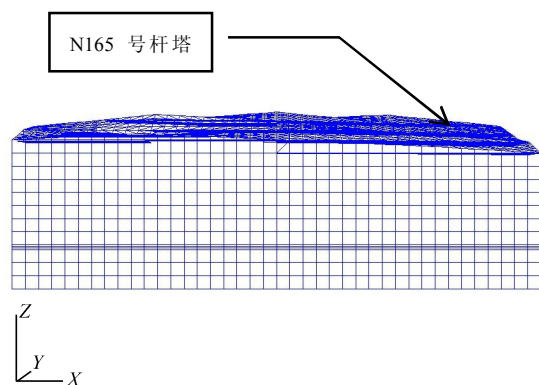


图2 单元网格图

Fig.2 The mesh sketch of sell

根据地层岩性的不同,将杆塔下地层概化为 10 层,具体物理力学参数见表 1。

表1 岩层物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of rocks

| 岩性   | 天然密度<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 弹性模量<br>/MPa | 凝聚力<br>/MPa | 内摩擦角<br>/(°) | 泊松比  | 抗拉度<br>/MPa |
|------|-------------------------------|--------------|-------------|--------------|------|-------------|
| 黄土   | 1.4                           | 16           | 0.30        | 16.3         | 0.35 | 0.08        |
| 泥岩   | 2.47                          | 3 622        | 0.66        | 29.9         | 0.26 | 0.18        |
| 细砂岩  | 2.73                          | 8 025        | 1.4         | 34           | 0.23 | 0.43        |
| 中砂岩  | 2.75                          | 8 470        | 1.26        | 32           | 0.24 | 0.34        |
| 砂质泥岩 | 2.55                          | 8 475        | 1.24        | 30           | 0.22 | 0.25        |
| 砂岩   | 2.57                          | 9 868        | 1.56        | 38           | 0.23 | 0.50        |
| 3 号煤 | 1.52                          | 605          | 0.61        | 29.6         | 0.30 | 0.39        |
| 中粗砂岩 | 2.73                          | 5 000        | 1.08        | 34.5         | 0.36 | 0.52        |
| 砂质泥岩 | 2.70                          | 7 800        | 1.45        | 33.2         | 0.22 | 0.35        |
| 中砂岩  | 2.74                          | 11 000       | 2.7         | 35           | 0.26 | 0.51        |

### 3.3 垮落带、裂隙带参数弱化

冒落带的高度主要取决于采出岩体的厚度和上覆岩石的碎胀系数,实际中可以近似估算冒落带的高度<sup>[5]</sup>:

$$H_m = \frac{M}{(k-1)\cos\alpha} \quad (1)$$

式中:  $H_m$  为冒落带高度;  $M$  为煤层采厚;  $k$  为跨落岩石碎胀系数,  $k=1.3$ ;  $\alpha$  为煤层倾角。

一般情况下软弱岩石形成的冒落、裂隙带高度为采高的 9~12 倍,中硬岩石为采高的 12~18 倍,坚硬岩石为采高的 18~28 倍。寺河煤矿采动区上覆岩性主要为中硬的砂岩、泥岩,则冒落、裂隙带高度可按 16 倍采厚确定。综上所述,冒落带高度取 18 m,裂隙带高度取为 72 m。

考虑覆岩离层等空间关系<sup>[6]</sup>,计算中冒落带、裂隙带的弹性模量分别取原岩弹性模量的 1/80 和 1/20,冒落带、裂隙带的抗剪强度分别取原岩抗剪强度的 1/10 000 和 1/1 000,冒落带、裂隙带的内摩

擦角分别取原岩内摩擦角的 1/100 和 1/10<sup>[7]</sup>。

模型中对杆塔基础设置了监测点,根据监测点记录地表在开采过程中的沉降变化等。

### 3.4 计算过程及结果

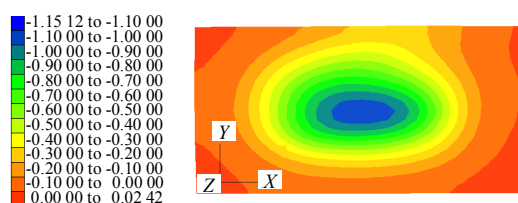
按照工作面开采的时间先后顺序先后进行开挖模拟<sup>[8]</sup>,对冒落带和裂隙带弱化,记录监测点的水平移动和垂直移动,以此来研究煤层开采状态下 N165 塔基的受力与变形情况。表 2 为开采工作面模拟步骤。

表2 工作面开挖顺序

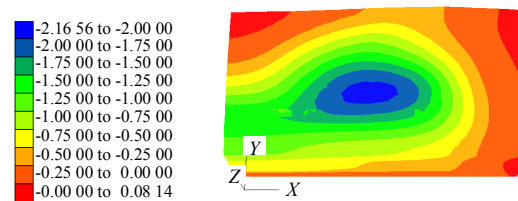
Table 2 Mining sequence of working face

| 模拟开挖工作面 | 开挖顺序 | 开挖截至年限  |
|---------|------|---------|
| 3302    | 1    | 2005年4月 |
| 3301    | 2    | 2006年6月 |
| 3303    | 3    | 2008年底  |

根据上述开采顺序,首先对 3302 及 3301 工作面进行开采模拟,图 3(a)为 3302 工作面开挖完成后地面沉降云图,图 3(b)为随后 3301 工作面开采完成后地面沉降云图。



(a) 3302 工作面



(b) 3301 工作面

图3 开挖后地面沉降云图(单位: m)

Fig.3 Subsidence nephogram of ground after mining work face (unit: m)

根据计算结果分析,3302 工作面开采完成后,地表下沉约 1.15 m,3301 工作面开采完成后,采空区中央上方(约  $Y=500$  m)的地表下沉值最大,达到了 2.16 m,N165 号杆塔基础中心点沉降约为 596 mm。塔基垂直沿线路走向的倾斜为 2.4‰,塔基垂直线路走向的倾斜为 0.64‰。

为重点研究 3303 工作面的开挖对 N165 号塔基造成的影响,在模拟中采用的是分步开挖,并在计算中记录塔基周围地表的位移,研究 3303 工作面

的推进对 N165 号塔基沉降的影响。图 4 为 3303 工作面推进 1 000 m 时地表沉降云图。

3303 工作面东部规划边界时相当于工作面推进到 1 050 m 处。

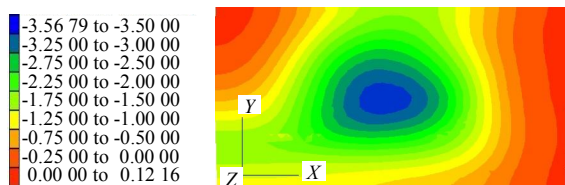


图 4 3303 工作面推进 1 000 m 时地表沉降云图(单位: m)

Fig.4 Ground subsidence nephogram in direction of mining 1000 m of working surface 3303 (unit: m)

图 5~7 为 3303 工作面开采过程中 N165 杆塔的基础沉降、杆塔沿线的走向及倾向方向基础倾斜。

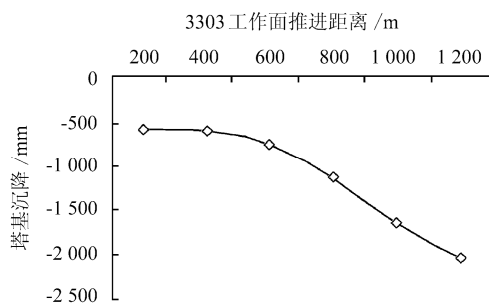


图 5 N165 塔基下沉曲线

Fig.5 Subsidence curve of foundation N165

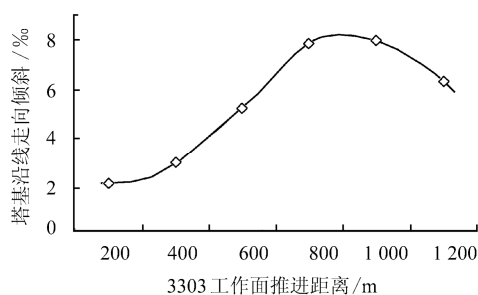


图 6 塔基走向倾斜曲线

Fig.6 Foundation slope curve in direction of line

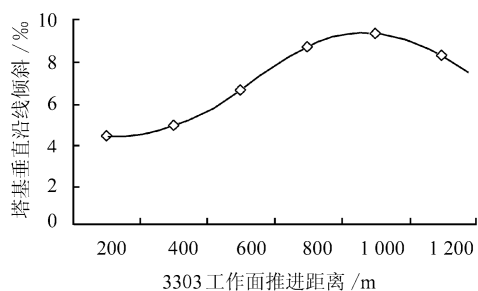


图 7 塔基垂直沿线倾斜曲线

Fig.7 Foundation slope curve in perpendicular direction of line

由计算可知, 3302、3301 及 3303 工作面采掘完成后沉陷盆地地表最大沉陷量约为 3.7 m, 下沉系数为 0.62。由图 6 可知, 3 个工作面采掘完成后, 杆塔基础中心沉降约为 1 600 mm。图 7 显示, 3303 工作面开采过程中, 杆塔基础沿线方向倾斜最大值 8.1 ‰, 最大倾斜位置出现在工作面开采通过杆塔基础约 90 m 处。工作面开采完毕后杆塔基础沿线方向倾斜为 7.6 ‰。

杆塔基础垂直沿线方向最大倾斜为 9.2 ‰。同样, 最大倾斜位置出现在工作面开采通过杆塔基础约 150 m 处, 工作面开采完毕后基础垂直沿线方向倾斜约为 9.1 ‰。

根据国家煤炭工业局制定的《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》<sup>[5]</sup>规定, 当开采引起的地表变形小于 3 mm/m 时, 建筑物下采煤不会影响建筑物的安全, 根据本次模拟分析, 开采造成的杆塔基础的倾斜均超过此标准, 地表也有较大沉陷, 如 N165 输电杆塔基础不采取任何抗变形措施, 开采引起的地表沉陷将对杆塔基础稳定性造成很大影响, 如采用预留安全煤柱的方法, 在经济上对双方都会造成较大损失。

输电杆塔属于特殊高耸构筑物, 杆塔本身具有一定的抗变形能力, 根据目前采空区输电杆塔运行经验, 对于均匀地表下沉、相对较大的倾斜可采取大板基础、预留悬弧高度, 辅助以杆塔底脚螺栓调整等措施即可解决问题。

## 4 结 论

(1) 3301、3302、3303 工作面开采完毕后, 地表最大下沉量可达 3 700 mm, 杆塔基础中心沉降约为 1 600 mm。

(2) 由于 3303 工作面的开采, 杆塔基础将产生倾斜, 沿线方向最大倾斜可达到 9.2 ‰, 远远大于杆塔倾斜变形小于 3 ‰的要求。不采取措施将影响到输电杆塔安全运行。

(3) 3303 工作面开采过程中, N165 输电杆塔基础变形属于可调范围之内, 可协同矿方采取合适的开采方式, 在 3303 工作面开采过程中加强对杆塔基础的观测, 防止出现突然沉陷情况, 随时调整杆塔基础以确保线路安全稳定。

## 参 考 文 献

- [1] 李新强, 高延法, 张庆松. 开采沉陷动态数值仿真研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 86-90.  
LI Xin-qiang, GAO Yan-fa, ZHANG Qing-song. Dynamic numerical simulating research in mining

- subsidence[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(4): 86—90.
- [2] ALEJANO L R. FDM predictive methodology for subsidence due to flat and inclined coal seam mining, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36: 475—491.
- [3] 郭玉龙, 任高峰. 三维有限元数值模拟在采空区稳定性评价中的应用[J]. 西部探矿工程, 2005, (3): 204—206.
- GUOYu-long, REN Gao-feng. An application of numerical simulation of 3D finite element to evaluation of the stability of the minedout area[J]. **WestChina Exploration Engineering**, 2005, (3): 204—206.
- [4] 张雪东, 陈剑平, 黄润秋, 等. 用FLAC-3D分析爬滑坡的变形特征[J]. 岩土力学, 2005, (1): 131—135.
- ZHANG Xue-dong, CHEN Jian-ping, HUANG Run-qiu, et al. A study of deformation features of gapa landslide using FLAC-3D[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, (1): 131—135.
- [5] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2000.
- [6] 张庆松, 高延法, 孙宗军, 等. 开采沉陷数值计算的空间效应和层面效应分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 940—942.
- ZHANG Qing-song, GAO Yan-fa, SUN Zong-jun, et al. Analysis of space and layer face effects on mining subsidence numerical calculation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 940—942.
- [7] 袁灯平, 马金荣, 黄正筑. 利用ANSYS进行开采沉陷模拟分析[J]. 济南大学学报, 2001, 15(4): 336—338.
- YUAN Deng-ping, MA Jin-rong. Using ANSYS to analysis the low of mining subsidence[J]. **Journal of Jinan University (Science & Technology)**, 2001, 15(4): 336—338.
- [8] 谢和平, 周宏伟, 王金安, 等. FLAC3D在煤矿开采沉陷预测中的应用及对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 397—401.
- XIE He-ping, ZHOU Hong-wei, WANG Jin-an, et al. Application and contrasting analysis of FLAC3D in prediction subsidence of coal mining[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(4): 397—401.

### “第四届中国国际隧道工程研讨会”文集《地下工程建设与环境和谐发展》征文

国务院部署进一步促进经济平稳较快增长的战略, 出台扩大内需十大措施, 确定4万亿元投资计划, 继续保持我国城市地下空间开发、城市轨道交通工程建设和长、大、深越江越海隧道的快速发展。为大力促进地下工程施工技术的发展, 提高防范和规避施工风险的能力, 保持隧道工程施工与环境和谐发展, 使城市让生活更美好, 现经上海市人民政府批准, 中国土木工程学会、上海市土木工程学会、上海隧道工程股份有限公司定于2009年10月28日~30日在上海举办“第四届中国国际隧道工程研讨会”。本届大会主题: 地下工程建设与环境和谐发展 副题: 1. 大型隧道工程安全设计与施工技术 2. 地下工程安全和风险控制技术 3. 城市轨道交通工程与环境保护

为了活跃学术气氛, 交流地下工程施工技术、建设安全以及隧道掘进机技术在科研、设计、施工等方面的科技成果, 促进地下工程应用理论和实践的进步与发展, 提高工程应用技术水平, 大会诚挚地邀请您参加“第四届中国国际隧道工程研讨会”会议。为体现大会的高质量、高标准, 还将出版重要文献:《地下工程建设与环境和谐发展》, 还将出版该文集电子书, 现特向您征文邀稿!

文集征稿内容: 1. 隧道工程施工对环境的影响与协调; 2. 地下空间开发与风险防范技术与典型工程; 3. 轨道交通工程的设计、施工技术; 4. 长距离、大直径隧道设计与施工技术; 5. 盾构掘进机设计、制造、施工技术; 6. 工程地质灾害预报和防治措施; 7. 超深基坑设计与施工实践; 8. 地下工程新设备、新材料、新工艺、新理论; 9. 国内外盾构与隧道工程先进技术介绍

有关事项: 1. 大会文献《地下工程建设与环境和谐发展》由同济大学出版社出版。要求征集论文内容真实、技术性强、理论研究方法正确、文字简练(5000~8000字), 突出工程应用技术; 2. 论文刊登不收评审费、版面费, 论文入选后将及时通知作者; 3. 回执请于2009年3月31日前寄到大会筹备组。论文全文打印稿2份附电子文档(光盘)于2009年4月31日前寄到大会筹备组。

通讯地址: 上海市虹漕南路155号5楼 邮编: 200233 “第四届中国国际隧道工程研讨会”筹备组收

论文征文: 021-54646018 传真: 021-54641018 联系人: 徐蓉蓉 电子邮件: forum@tunnelling.cn

大会秘书: 021-54640607 联系人: 楼如岳 曾欢

中国土木工程学会 上海市土木工程学会 上海隧道工程股份有限公司

(信息来源: 河海岩土网)