

隧道开挖不均匀收敛引起地层位移的预测模型

韩 煊^{1, 2}, 李 宁¹

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 北京市勘察设计研究院, 北京 100038)

摘 要: 在隧道施工引起的地层位移预测中, 随机介质理论法是在我国应用较为广泛的实用方法之一。在目前的随机介质理论法中, 均假定地层位移是由于隧道开挖断面的均匀收敛变形引起, 本文认为隧道收敛模式一般为不均匀, 推导了各类断面在不均匀收敛模式下的计算公式, 并补充推导了矩形、马蹄形断面的计算公式。通过算例的比较, 认为均匀与不均匀收敛这两种情况对于埋深越浅的隧道, 计算结果差别越大, 建议在工程中适当考虑隧道断面收敛形式以考虑实际位移情况或隧道施工工法等的影响。

关键词: 隧道; 地铁; 地层位移; 沉降槽; 随机介质理论; 收敛变形

中图分类号: U45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2007)03-0347-06

作者简介: 韩 煊(1972-), 男, 西安理工大学博士研究生, 北京市勘察设计研究院高级工程师, 主要从事岩土工程地基基础变形问题、地下工程城市灾害方面的研究和咨询工作。E-mail: xuanhan2002@163.com。

A predicting model for ground movement induced by non-uniform convergence of tunnel

HAN Xuan^{1,2}, LI Ning¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Beijing Geotechnical Institute, Beijing 100038, China)

Abstract: Stochastic Medium Model (SMM) was widely used for predicting ground movement induced by tunneling in China. A uniform convergence mode was assumed in this model for the transversal section of tunnel after excavation. According to the observed convergence mode of tunnel, a non-uniform convergence mode was introduced to the SMM method to achieve a better prediction of the ground deformation, and the integral limits for various shapes of cross section, such as the circular, elliptical, rectangular and horse-shoe shaped tunnel were deduced. Based on some case studies, it was found that the uniform convergence assumption cause considerable error for shallow tunnels, so it was important to consider a proper convergence mode to take into account the influence of deformation condition and construction techniques of the tunnel.

Key words: tunnel; subway; ground movement; settlement trough; stochastic medium model; convergence

0 引 言

随着城市地铁建设高潮的兴起, 地下隧道开挖引起的地层位移问题成为我国岩土工程领域广泛关注的问题。波兰学者李特威尼申(Litwiniszyn J)于20世纪50年代基于采矿沉陷问题提出的随机介质理论, 经过我国阳军生、刘宝琛^[1-2]等学者的进一步发展和完善, 被引入城市地铁隧道开挖引起的地表沉降的预测当中, 与目前广泛应用的经典的Peck公式一起, 成为目前国内工程中应用广泛的简便实用方法。

在随机介质理论方法中, 假定地层沉降槽均是由于隧道收敛变形引起。通过对隧道收敛变形形式的假定, 积分计算地层位移。阳军生等人推导了圆形和椭圆形两种断面的隧道在均匀收敛假定下的预测模型与公式^[1-2]。后的有关随机介质理论法的研究中, 一般均假定隧道产生均匀收敛, 由此计算地层位移^[3-4]。

根据实测资料的研究^[5], 不同隧道类型(例如盾构、浅埋暗挖等)引起的地层位移有类似的特点, 例如均符合高斯分布的特征。本文认为地层瞬时位移的原因还是由于应力的释放, 因此假定对于有一定的埋深的情况, 隧道的类型、开挖的工法、步序等对地面变形的形态不会有明显的影响, 认为不同的施工方法的影响可以通过计算参数(例如Peck公式中的地层损失率或随机介质理论法中的半径收缩)来反映。本文在此基础上, 将更为接近实际的隧道不均匀收敛形式引入分析模型, 推导了圆形、椭圆形、矩形、马蹄形几种常见隧道断面形式的非均匀收敛变形下的地层位移积分公式, 使随机介质理论方法更加趋于合理, 增

基金项目: 北京市人事局“北京市留学人员科技活动择优资助项目”和北京市科学技术委员会“北京市科技新星”项目(2005B29)

收稿日期: 2006-06-26

强了它的工程实用性。经过对两种收敛形式计算结果的比较,可以看到,对于浅埋隧道,二者之间的误差是很显著的。

1 随机介质理论概述

随机介质理论将岩土体视为一种“随机介质”,将开挖岩土体引起的地表下沉视为一个随机过程。从统计观点,可以将整个隧道开挖看作无限多个无限小的开挖对上部地层影响的总和。如图 1 所示的一个开挖单元,在不排水固结条件下,当开挖单元完全塌落时,上部地层坐标点 (x, y, z) 的下沉(即地表的横向沉降槽)为^[1-2]

$$s_e(x) = \frac{1}{r(z)} \exp\left[-\frac{\pi}{r^2(z)} x^2\right] d\xi d\eta, \quad (1)$$

式中, $r(z)$ 为微单元开挖在深度为 z 的水平面上的主要影响半径。具体取值方法见文献[6, 7]。

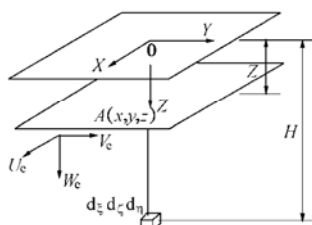


图 1 单元开挖空间坐标图

Fig. 1 Coordinate system for a element excavation analysis

将对预先定义的某种类型的塌陷形式在塌陷面积上进行积分(见图 2), 就可以获得该种情况下隧道上覆地层的位移^[1-2]

$$s(x) = \iint_{\Omega-\omega} \frac{\tan \beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x-\xi)^2\right] d\xi d\eta. \quad (2)$$

若设: $\omega(x, \xi, \eta) = \frac{\tan \beta}{\eta} \exp\left[-\frac{\pi \tan^2 \beta}{\eta^2} (x-\xi)^2\right]$, 则

式(2)可以写为以下形式

$$s(x) = \int_a^b \int_c^d \omega(x, \xi, \eta) d\xi d\eta - \int_e^f \int_g^h \omega(x, \xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (3)$$

其中 a, b, c, d 为变形前隧道断面面积积分界限;
 e, f, g, h 为变形后隧道断面面积积分界限。

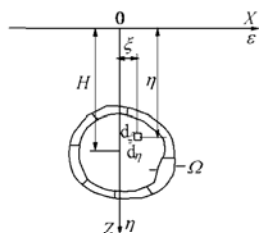


图 2 隧道开挖示意图

Fig. 2 Tunneling excavation

上述地层位移的公式是对变形前后隧道断面上的

二重积分, 而此积分的被积函数不可积, 因此需要采用数值积分的方法, 根据计算公式, 编制计算程序。数值积分的方法可以采用勒让德-高斯 (Legendre-Gauss) 法, 具体参见文献[1, 2]。

2 隧道开挖后收敛变形的形式

在现有的地层位移预测模型中, 均假定隧道开挖后, 地层收敛形式为均匀收敛, 即半径均匀收缩 ΔR , 如图 3 (a) 所示。

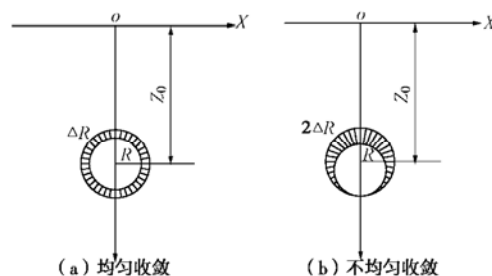


图 3 隧道开挖后的不同收敛形式

Fig. 3 Uniform and non-uniform convergence modes

上述假定的合理性值得进一步探讨。在 Rowe 和 Kack^[8]提出的间隙参数概念中, 将三维的隧道变形(主要包括向开挖面处的弹塑性变形, 盾构机周围的超挖, 以及盾构机和衬砌之间的物理间隙)在平面上等效为一个二维的空隙。上述二维空隙考虑为非均匀的收敛变形(如图 3 (b))。这是一个认为隧道变形是一种不均匀收敛的典型例子。

在理论方法的范畴, 也证明了图 3 (b) 的隧道变形形式比图 3 (a) 要更合理。Verruijt 和 Booker (1996)^[9]在 Sagaseta 方法^[10]的基础上, 考虑地层损失的具体形式为隧道均匀径向收缩(如图 3 (a)), 得到了地层竖向位移公式。但是他们提出的方法得到的变形曲线比实测结果要宽, 且侧向变形要偏大。因此, Loganathan 和 Poulos (1998)^[11]采用了上述间隙参数的概念, 考虑土向隧道内的位移为非均匀分布(图 3 (b)), 得到了修正的竖向位移公式。与 Verruijt 和 Booker 的结果相比较, 他们采用修正后的隧道收敛形式得到的结果更加准确。

为了进一步分析和验证隧道开挖后其横截面变形的特点, 本文采用美国 ITASCA 公司的数值分析软件 FLAC 进行了模拟分析。分析模型为一个轴线埋深 18 m、半径为 3 m 的无衬砌隧道开挖。隧道开挖后不施加衬砌, 模拟本节所关心的瞬时变形情况。土的屈服条件为莫尔-库仑模型, 其强度和变形参数取为北京地区典型地区的典型参数。计算结果如图 4, 5 所示。

图 4 为隧道开挖后整个模拟区域的竖向位移等值线图和位移矢量图。从中可以看到, 由于隧道的开挖

卸荷, 在隧道中心线以下土产生了一定的回弹变形, 但这种回弹变形不是引起地面沉陷的原因。因此隧道以上地层的位移还是来源于隧道上部土体向隧道内部的位移。图 5 中绘出了变形后的网格图, 同时还绘出了隧道变形前的轮廓。从二者的比较可以清晰地看出, 对于隧道开挖后产生的瞬时变形, 断面变形的结果符合图 3 (b) 的形式。

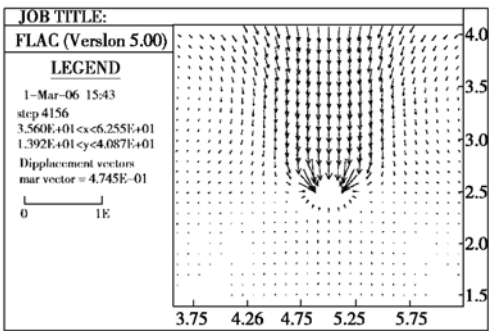


图 4 位移矢量图 (局部)
Fig. 4 Ground displacement vector

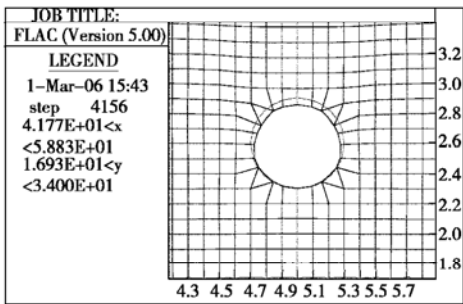


图 5 无支护隧道变形示意图 (局部)
Fig. 5 Convergence of the tunnel section

由此可见, 假定隧道不均匀收敛要比传统的均匀收敛的假定更符合实际情况。诚然如本节下面进行比较后得到的结论那样, 当隧道埋深较深时, 隧道自身的收敛变形情况对结果 (特别是地表沉降计算) 影响不大。但是对浅埋隧道还是会造成明显的误差。此外, 必须指出的是, 隧道断面的收敛形式受多种复杂因素的影响, 例如地应力的分布、地层的均匀性、土的各向异性、施工步骤、衬砌时间和工艺等等, 实际的收敛变形情况也不一而足。图 3 (b) 所给出的也是一种理想状况下的假定, 也不能完美地代表所有情况。但是, 这种假定无疑较之传统的均匀收敛情况是一个更好的选择。

3 本文的地层位移预测模型

根据上面的讨论以及图 5 数值计算结果所揭示的隧道变形基本规律, 本文针对各种隧道断面形式, 假定隧道开挖后发生“不均匀收敛”, 即隧道顶部下沉为 $2\Delta R$, 而隧道底部引起地表位移的隆起为 0 (相当于

将均匀收敛情况下, 变形后的断面向下均匀位移 ΔR)。事实上, 隧道开挖必然存在底部的隆起, 但本文认为这种隆起主要是由于应力释放引起, 而不是引起地层损失的原因。因此在计算地层位移时, 认为隧道底部变形为 0。在上述假定的基础上, 将式 (3) 中 8 个积分界限按新假定下的边界予以确定。对不同断面形式, 式 (3) 中的二重积分界限 $a-g$, 推导结果分别列于表 1~4 中。

表 1 本文模型与当前均匀收敛模型对比 (圆形断面隧道)

Table 1 Comparison of the model suggested in this paper with the uniform convergence model—circular tunnel		
收敛形式	均匀收敛	不均匀收敛
简图		
a	$z_0 - R$	
b	$z_0 + R$	
c	$-\sqrt{R^2 - (z_0 - \eta)^2}$	
d	$-c$	
e	$z_0 - (R - \Delta R)$	$z_0 - (R - 2\Delta R)$
f	$z_0 + (R - \Delta R)$	$z_0 + R$
g	$-\sqrt{(R - \Delta R)^2 - (z_0 - \eta)^2}$	$-\sqrt{(R - \Delta R)^2 - (z_0 - \eta + \Delta R)^2}$
h	$-g$	$-g$

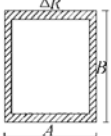
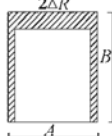
表 2 本文模型与当前均匀收敛模型的对比 (椭圆形断面隧道)

Table 2 Comparison of the model suggested in this paper with the uniform convergence model—elliptical tunnel		
收敛形式	均匀收敛	不均匀收敛
简图		
a	$z_0 - B$	
b	$z_0 + B$	
c	$-A\sqrt{1 - (\frac{z_0 - \eta}{B})^2}$	
d	$-c$	
e	$z_0 - (B - \Delta R)$	$z_0 - (B - 2\Delta R)$
f	$z_0 + (B - \Delta R)$	$z_0 + B$
g	$-(A - \Delta R)\sqrt{1 - (\frac{z_0 - \eta}{B - \Delta R})^2}$	$-(A - \Delta R)\sqrt{1 - (\frac{z_0 - \eta + \Delta R}{B - \Delta R})^2}$
h	$-g$	$-g$

注: B 为椭圆形隧道隧道竖向半径; A 为椭圆形隧道隧道水平向半径。

表3 本文模型与当前均匀收敛模型之对比(矩形断面隧道)

Table 3 Rectangular tunnel

收敛形式	均匀收敛	不均匀收敛
简图		
a		$z_0 - B/2$
b		$z_0 + B/2$
c		$-A/2$
d		$-c$
e	$z_0 - (B/2 - \Delta R)$	$z_0 - (B/2 - 2\Delta R)$
f	$z_0 + (B/2 - \Delta R)$	$z_0 + B/2$
g	$-(A/2 - \Delta R)$	$-(A/2 - \Delta R)$
h	$-g$	$-g$

注: B 为矩形隧道高度; A 为矩形隧道宽度。

本文基于类似的思路, 进一步推导建立了矩形断面隧道(表3), 马蹄形断面隧道的预测模型(表4, 5)。

4 两种预测模型结果的比较

为了比较隧道开挖后, 均匀收敛与不均匀收敛两

种形式对地层位移计算结果的影响, 计算了以下方案: 不同埋深(5~40 m)情况下, 直径为6 m的圆形断面隧道开挖引起的地表沉降。计算参数为: $\Delta R = 0.10$ m, $\beta = 50^\circ$ 。部分计算结果绘于图6中。

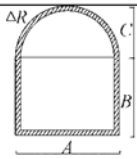
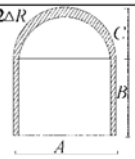
由图6可见, 这两种隧道收敛模式得到的地表沉降计算结果有明显的差异。总的来说, 不均匀收敛形式引起的地表沉降槽要窄而深, 即靠近隧道中心区域, 均匀收敛情况下计算沉降偏小, 而在此区域以外, 则均匀收敛情况下计算沉降偏大。

另外值得注意的是, 在随机介质理论法中, 可能会得出中心点的变形值不是最大值的情况。这主要发生于超浅埋的情况, 如图6中埋深5 m(直径6 m)的隧道在均匀收敛模式下的变形曲线。这主要是由于对收敛模式的假定引起的。相应的本文推荐的不均匀收敛模式的结果就没有出现上述情况。

图7中绘出了不均匀收敛与均匀收敛情况不同的隧道埋深(采用相对埋深 z_0/R 表示)下地表中心点沉降的差异。总体来看, 不均匀收敛计算地表最大沉降均大于均匀收敛情况, 且随着埋深的增加, 二者差异有减小的趋势。当相对埋深为13(深埋)时, 二者之差为4%左右。而当相对埋深为1.3(浅埋)时, 二者差异达到约18%。说明埋深越浅, 隧道自身的变形形式对地面的沉陷特点影响越大。而且这种影响还是比较显著的, 需要在工程应用中引起注意。

表4 本文模型与当前均匀收敛模型对比(马蹄形断面隧道拱形部分)

Table 4 Horse shoe shaped tunnel-arch block

收敛形式	均匀收敛	不均匀收敛
简图		
a		$z_0 - (B + C)/2$
b		$z_0 - (B - C)/2$
c		$-\sqrt{R^2 - \left[z_0 - \eta - \left(\frac{B+C}{2} - R \right) \right]^2}$ (其中, $R = \frac{A^2}{8C} + \frac{C}{2}$)
d		$-c$
e	$z_0 - (B + C)/2 + \Delta R$	$z_0 - (B + C)/2 + 2\Delta R$
f	$z_0 - (B - C)/2$	$z_0 - (B - C)/2 + \Delta R$
g	$-\sqrt{(R - \Delta R)^2 - \left[z_0 - \eta - \left(\frac{B+C}{2} - R \right) \right]^2}$	$-\sqrt{(R - \Delta R)^2 - \left[z_0 - \eta + \Delta R - \left(\frac{B+C}{2} - R \right) \right]^2}$
h	$-g$	$-g$

注: 简单起见, 隧道埋深 z_0 按照 $(B+C)/2$ 处计算; B 为矩形部分高度; A 为矩形部分宽度; C 为拱形部分高度。

表 5 本文模型与当前均匀收敛模型对比 (马蹄形断面隧道矩形部分)

Table 5 Horse shoe shaped tunnel-rectangular part		
收敛形式	均匀收敛	不均匀收敛
简图		
a	$z_0-(B-C)/2$	
b	$z_0+(B+C)/2$	
c	$-A/2$	
d	$-c$	
e	$z_0-(B-C)/2$	$z_0-(B-C)/2+\Delta R$
f	$z_0+(B+C)/2-\Delta R$	$z_0+(B+C)/2$
g	$-(A/2-\Delta R)$	$-(A/2-\Delta R)$
h	$-g$	$-g$

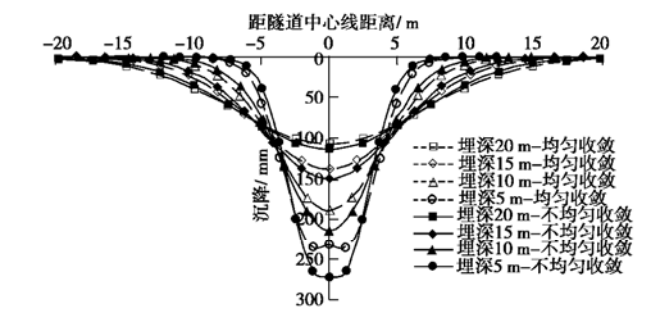


图 6 隧道收敛形式对地表沉降变形的影响

Fig. 6 Influence of the convergence mode to the ground settlement

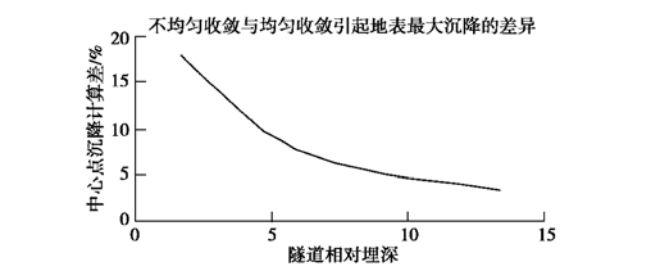


图 7 不均匀收敛与均匀收敛引起地表最大沉降的差异

Fig. 7 Difference of the calculated maximum settlements under the assumption of uniform and non-uniform convergence

5 结 论

基于随机介质理论或Peck公式的地层位移预测模型与方法虽然已在国内外得到广泛认可与应用, 然而长期以来, 在实际应用上还存在一些问题。本文就这些问题进行了相关分析和讨论, 得到以下成果和结论:

(1) 在前人所给出的圆形、椭圆形隧道断面公式的基础上, 推导了矩形、马蹄形断面的积分界限。

(2) 本文在地层位移中考虑隧道的不均匀收敛形式。首次在随机介质理论中引入了不均匀收敛的隧道变形模式, 推导建立了圆形、椭圆形、矩形、马蹄形隧道断面引起的地层预测模型。

通过本文的研究可以看到, 基于随机介质理论的地层位移预测模型可以针对开挖域的形状进行积分, 因此可以考虑开挖断面几何特征、隧道变形特征甚至支护对变形的影响等, 克服了经典的Peck公式无法考虑隧道浅埋或超浅埋, 开挖断面的具体形状、尺寸和开挖支护等具体问题, 具有更大的优势。

参考文献:

[1] 阳军生, 刘宝琛. 挤压式盾构隧道施工引起的地表移动及变形[J]. 岩土力学, 1998,19(3):10 - 13.(YANG Jun-sheng, LIU Bao-chen. Ground surface movement and deformation due to tunnel construction by squeezing shield[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998,19(3):10 - 13.(in Chinese))

[2] 阳军生, 刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.(YANG Jun-sheng, LIU Bao-chen. Ground movement and deformation induced by urban tunnel construction[M]. Beijing: China Railway Publishing House. 2002.(in Chinese))

[3] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 浅埋隧道施工引起的纵向地层移动与变形[J]. 中国铁道科学, 2003,24(4):87 - 91.(SHI Cheng-hua, PENG Li-min, LIU Bao-chen. Longitudinal stratum movement and deformation caused by shallow tunnel construction[J]. China Railway Science, 2003,24(4):87 - 91.(in Chinese))

[4] 施成华, 彭立敏, 刘宝琛. 盾构法施工隧道纵向地层移动与变形预计[J]. 岩土工程学报, 2003,25(5):585 - 588. (SHI Cheng-hua, PENG Li-min, LIU Bao-chen. Prediction of longitudinal movement and deformation of stratum in longitudinal section due to tunnel construction by shield [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5):585 - 588.(in Chinese))

[5] 韩 煊, 李 宁, STANDING J R. Peck 公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007,28(1):23 - 28,35.(HAN Xuan, LI Ning, STANDING J R. An adaptability study of gaussian equation applied in the prediction of ground settlement induced by tunneling in China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1):23 - 28,35.(in Chinese))

[6] 韩 煊. 隧道施工引起的地层位移及建筑物变形预测的实

- 用方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.(HAN Xuan. Ground and building deformations induced by urban underground construction— practical prediction methods [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.(in Chinese))
- [7] 韩 焯, 李 宁. 隧道施工引起地层位移预测模型的对比分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007,待刊.(HAN Xuan, LI Ning. Study on different prediction models for ground movement caused by tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, in press.(in Chinese))
- [8] ROWE R K, LO K Y, KACK G J. A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983,20(8):11 - 22.
- [9] Verruijt Booker. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane[J]. Geotechnique, 1996,46(4): 753 - 756.
- [10] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss[J]. Geotechnique, 1987,37(3): 301 - 320.
- [11] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. Jnl Geot and Geoenv Eng, ASCE, 1998,124(9):846 - 856.

第三届中国岩土工程研讨会

The 3rd Sino-Japan Symposium on Geotechnical Engineering

(第一号征文通知)(2007-01-30)

会议介绍:

第三届中国岩土工程研讨会将于 2007 年 11 月 5~6 日在重庆到宜昌的游轮上召开。每两年举行一次的中日岩土工程研讨会是我国与日本在岩土工程研究方面的重要交流平台, 本届会议是继在北京(2003)和上海(2005)召开的前两届会议之后中日岩土工程领域的又一次学术盛会。本届会议由中国土木工程学会土力学与岩土工程分会和日本地盘工学会联合主办, 旨在交流中日两国在土力学与岩土工程领域的最新研究成就, 展望世界相关学科的最新研究进展, 探讨土力学与岩土工程的发展趋势。为中日两国从事土力学研究和应用的科技工作者提供一个交流新思想、新理论、新技术和新经验、研讨新理念、新进展、新方向和新领域的学术平台。

重要日期: 2007 年 5 月 30 日前: 提交论文全稿;

2007 年 6 月 30 日前: 返回评阅结果和修改意见;

2007 年 7 月 30 日前: 提交修改后论文。

稿件提交及联系邮箱: 3rdsinojapanconf@163.com

联系人: 姚仰平, 张嘎

联系电话: 010-62795679, 13641165835, 13641044721。

征文要求:

(1) 论文语言为英语; 论文内容真实, 不侵犯他人著作权, 征文应没有发表过; 参考文献只限于正式公开出版物, 并在文中标出文献序号。

(2) 论文内容应为土力学与岩土工程领域相关的最新研究成果及重大工程实录。

(3) 题目简洁确切, 内容层次分明; 书写摘要和关键词; 正文标题用阿拉伯数字编号, 不同层次的数字用下圆点隔开, 一律左顶格; 表格简明, 图幅恰当; 使用法定计量单位。

(4) 来稿请附作者简介(姓名、性别、职称或职务、所在单位、通讯地址、邮政编码、联系电话和电子邮箱)。

(清华大学岩土所 供稿)