

文章编号: 1000-7598 (2010) 08-2637-06

浅埋暗挖人行地道开挖进尺的计算方法

王志达^{1, 2}, 龚晓南¹

(1. 浙江大学, 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310027 2. 杭州市市政公用建设开发公司, 杭州 310009)

摘 要 浅埋暗挖人行地下通道修建过程中, 合理确定开挖进尺的大小至关重要, 开挖进尺过小, 工期延长, 临时支护增加; 开挖进尺过大, 易引起上覆土层不稳定, 甚至塌方。针对开挖进尺难以确定的问题, 基于太沙基松散介质理论, 推导了均质土中开挖进尺的计算公式, 并推广到成层土中。通过对某人行地道进行有限差分模拟, 并与文中计算方法进行了对比分析, 得出了一些对人行地下通道具有实践指导意义的结论。

关 键 词: 浅埋暗挖; 人行地下地道; 开挖进尺; 松散介质理论

中图分类号: TU 924

文献标识码: A

Calculation method of digging length in underpass with underground excavation under shallow cover

WANG Zhi-da^{1,2}, GONG Xiao-nan¹

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

2. Hangzhou Municipal Public Construction Development Company, Hangzhou 310009, China)

Abstract: In the construction of the pedestrian underpass of underground excavation with shallow overburden, it is crucial to rationally delimit the size of digging length. If the size of digging length is too small, the construction time will be prolonged and temporary protection will increase. If the size is too large, the earth on the top of the tunnel will be unstable, even collapse. Based on Terzaghi's loose medium theory, a calculating formula of digging length in homogeneous soil is proposed and applied to layered soil. Some valuable conclusions on the shallow underpass construction are proposed through the simulation of finite difference method of Qingchun underpass; and their comparisons are made.

Key words: underground excavation with shallow overburden; pedestrian underpass; digging length; loose medium theory

1 引 言

近年来随着城市建设的迅速发展, 城市交通机动化进程加快, 机动车快速增长, 行路难的问题愈发突出, 特别是随着旧有道路的拓宽, 人行过街设施的建设又相对滞后, 繁华路口人行过街难的问题尤为明显。而修建人行地下通道是解决这一问题的有效手段。

闹市区修建人行地下通道, 目前主要采用浅埋暗挖法, 施工工艺已有大量报道^[1-6]。浅埋暗挖法是针对浅埋隧道施工开发的一种较成熟的施工方法, 是我国城市地下工程专家和技术人员将新奥法的基本原理和开挖隧道的具体实践相结合的产物。

由于施工中对开挖进尺尚没有一个明确的判断标准, 因而施工中易造成一些盲目性。开挖进尺过

小, 会使工期延长, 临时支护增加, 施工成本加大; 开挖进尺过大, 则使拱顶覆土不稳定, 甚至塌方, 这对于隧道掌子面的稳定以及地面建筑物及地下管线的安全极为不利。针对上述情况, 文中给出浅埋暗挖人行地道开挖进尺的计算方法, 通过数值模拟结合工程实例进行了验证。

2 均质土中开挖进尺的计算方法

人行地下通道基本上都是超浅埋地下工程, 通道主体结构上所受土层压力可视为上覆土重, 因此, 可应用 Terzaghi 松散介质平衡理论确定开挖进尺。

2.1 基本假定

(1) 土体服从 Mohr-Coulomb 准则; (2) 通道拱顶围岩压力等于上覆土重; (3) 通道开挖后初衬支护滞后长度为 1 倍开挖进尺; (4) 通道周围土

体不透水, 亦即开挖过程中不考虑渗流的影响;

2.2 围岩压力 σ_v 计算公式

Terzaghi 认为^[7], 岩体为有一定粘结力的松散介质, 当隧道开挖后, 围岩下沉时由于侧压力的作用, 对下沉围岩将产生摩阻力。水平应力与垂直应力之比为侧压力系数 k 。

假设隧道宽度为 $2l$, Terzaghi 认为侧壁不稳定时, 侧壁滑裂面与垂直线成 $45^\circ - \varphi/2$ 。距地表深 z 处取厚度 dz 的水平单元体, 如图 1 所示^[8]。作用在该水平单元体各力, 在垂直线上投影的平衡方程为

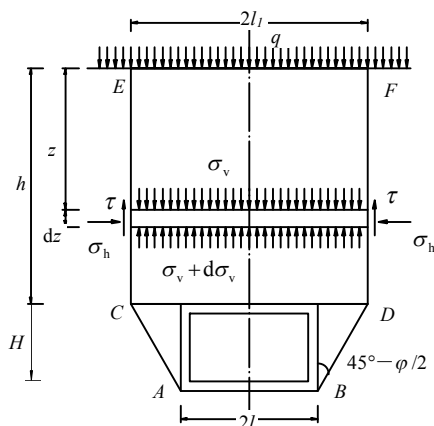


图 1 Terzaghi 法计算简图

Fig.1 Calculation sketch of Terzaghi's method

$$2l_1(\sigma_v + d\sigma_v) - 2l_1\sigma_v - 2l_1\gamma dz + 2\tau dz = 0 \quad (1)$$

化简得:

$$\frac{d\sigma_v}{dz} = \gamma - \frac{\tau}{l_1} \quad (2)$$

由 Mohr—Coulomb 准则^[9], 有

$$\tau = c + \sigma_h \tan \varphi = c + k\sigma_v \tan \varphi \quad (3)$$

将式(2)代入式 3 可得:

$$\frac{d\sigma_v}{dz} = \gamma - \frac{c + k\sigma_v \tan \varphi}{l_1} \quad (4)$$

式中: σ_v 为竖向压应力; γ 为围岩天然重度; k 为侧压力系数; c 为围岩黏聚力; φ 为围岩内摩擦角; l_1 为隧道顶围岩塌落宽度之半。

$$l_1 = l + H \cdot \tan(45^\circ - \varphi/2) \quad (5)$$

将式(4)积分并代入边界条件 $\sigma_v|_{z=0} = q$, 可得:

$$\sigma_v = \frac{\gamma l_1 - c}{k \tan \varphi} \left(1 - e^{-\frac{k \tan \varphi}{l_1} z} \right) + q e^{-\frac{k \tan \varphi}{l_1} z} \quad (6)$$

式中: q 为地表作用的均布荷载 (地表超载)。

2.3 开挖进尺的计算公式

取最不利情况分析: 原有掌子面开挖后初衬滞后 $1d$, 开挖下一进尺 $1d$ 后初衬仍未支护。开挖后隧道上方土体产生松动, 其范围如图 1、2 所示: 隧道上方松动土体高度为 h ; 隧道上方横向松动土体宽度为 $2l_1$; 隧道上方纵向松动土体长度 $s = 2d + b$, 其中 b 为开挖时掌子面前方松动土体长度, $b = H \tan(45^\circ - \varphi/2)/2$, d 为开挖进尺。

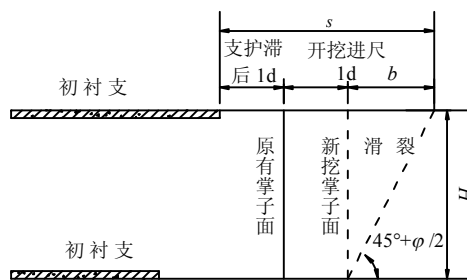


图 2 隧道纵向计算模型 1

Fig.2 Longitudinal calculation model 1 of tunnel

开挖后要使松动范围内隧道顶部围岩不坍塌, 则摩阻力应不小于围岩重量及地面超载, 即满足下述关系式:

$$(\gamma h + q)2l_1 s - 2(2l_1 + s) \int_0^h \tau dz \leq 0 \quad (7)$$

将式(3)、(6)代入式(7)并积分可得:

$$\frac{qs - 2\gamma l_1 h}{2l_1 + s} \leq \left(\frac{\gamma l_1 - c}{k \tan \varphi} - q \right) \left(e^{-\frac{k \tan \varphi}{l_1} h} - 1 \right) \quad (8)$$

由式(8)即可求得 s , 继而得出开挖进尺 d , 在实际工程中为确保施工安全, 引入安全系数 K , 则实际开挖进尺为 d/K 。

2.4 不同情形下开挖进尺的计算方法

2.4.1 不同开挖方法时的计算方法

实际工程由于土质条件较差, 极少用全断面开挖, 常用开挖方式有台阶法、环形开挖留核心土法、导洞法、中隔壁法 (也称 CD 法和 CRD 法) 等。下面主要介绍台阶法和 CRD 法开挖时的开挖进尺求解方法。

(1) 台阶法

台阶法上台阶开挖后松动土体范围如图 3、4 所示。松动土体范围: 隧道上方松动土体高度为 h ; 隧道上方横向松动土体宽度为 $2l_2 = 2l + H \tan(45^\circ - \varphi/2)$; 隧道上方纵向松动土体长度 $s' = 2d + H \tan(45^\circ - \varphi/2)/2$;

开挖后松动范围内土体满足关系式

$$(\gamma h + q)2l_2s' - 2(2l_2 + s') \int_0^h \tau dz \leq 0 \quad (9)$$

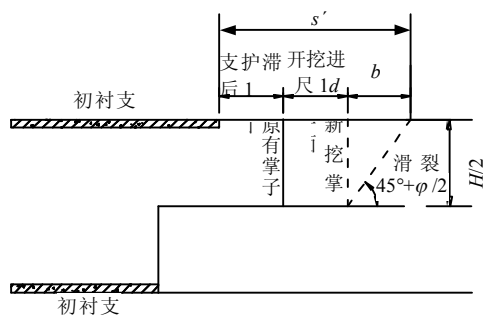


图3 隧道纵向计算模型2

Fig.3 Longitudinal calculation model 2 of tunnel

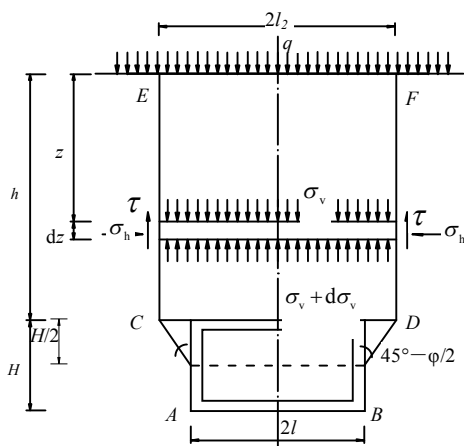


图4 台阶法计算简图

Fig.4 Calculation sketch of step method

将式(3)、(6)代入式(9)并积分可得式(10)。注意此时将式(6)中的 l_1 用 l_2 代替。

$$\frac{qs' - 2\gamma l_2 h}{2l_2 + s'} \leq \left(\frac{\gamma l_2 - c}{k \cdot \tan \varphi} - q \right) \left(e^{-k \cdot \tan \varphi \frac{h}{l_2}} - 1 \right) \quad (10)$$

由式(10)可得台阶法开挖时的开挖进尺。

(2) CRD 法

如图5示, 假设 CRD 法分4部分开挖, 开挖顺序为①→②→③→④。每一部分开挖时前面部分已开挖完成且预支护和临时支撑封闭成环。相对来说, ①部开挖时安全性最低, 下面讨论①部开挖时的进尺求法, 其余部分开挖进尺与①相同。

①部开挖后隧道上方土体产生松动, 松动范围如图3和图5所示: 隧道上方横向松动土体宽度为 $l' = l + H \cdot \tan(45^\circ - \varphi/2)$; 隧道上方纵向松动土体长度 $s' = 2d + H \tan(45^\circ - \varphi/2)/2$; 隧道上方松动土体高度为 h 。

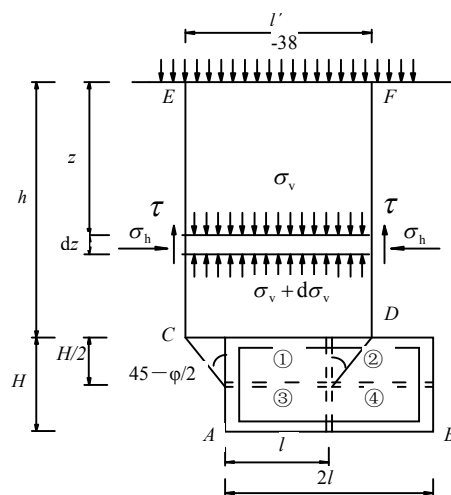


图5 CRD 法计算简图

Fig.5 Calculation sketch of CRD method

开挖后要使松动范围内隧道顶部围岩不坍塌, 则应满足下述关系式:

$$(\gamma h + q)l's' - 2(l' + s') \int_0^h \tau dz \leq 0 \quad (11)$$

将式(3)、(6)代入式(11)并积分可得式(12)。注意此时将式(6)中的 l_1 用 l' 代替。

$$\frac{(q - \gamma h)s' - 2\gamma l'h}{2l' + s'} \leq \left(\frac{\gamma l' - c}{k \cdot \tan \varphi} - q \right) \left(e^{-k \cdot \tan \varphi \frac{h}{l'}} - 1 \right) \quad (12)$$

由式(12)可得 CRD 法开挖时的开挖进尺。

(3) 其他开挖方法

根据具体开挖方法先定出开挖引起松动土体影响范围, 然后由松动范围内土体摩阻力不小于土体重量及地面超载列出关系式求解, 求解过程同台阶法和 CRD 法。

2.4 讨论

由式(8)可知: 开挖进尺 d 与隧顶围岩黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、天然重度 γ 、覆土厚度 h 、地表超载 q 以及隧道断面大小 l_1 、 H 等有关。另由式(8)求偏导可得开挖进尺 d 与各参数关系如下:

- (1) l_1 、 H 、 q 各自增大时, 开挖进尺 d 减小;
- (2) c 、 φ 、 h 各自增大时, 开挖进尺 d 增大。

3 成层土开挖进尺的确定方法

Terzaghi 的松动土压力理论中土层条件为单层均质土, 实际的地下通道施工中, 上覆土层一般为多层, 所以应该将 Terzaghi 理论扩展到上覆土层为多层的地质条件。

3.1 基本假定

假定土层水平分布且土层宽度一致不随土层条件而变; 其余假定同均质土。

3.2 围岩压力 σ_v 计算公式

成层土时围岩压力计算简图如图 6^[10]所示。土层 i 与土层 $i+1$ 之间的相互竖向作用力为 q_i 。土层间应力和应变连续,把上部土层作用力假设为超载考虑加于下部土层上。由隧道顶部土层 1 可知,松动土压力为

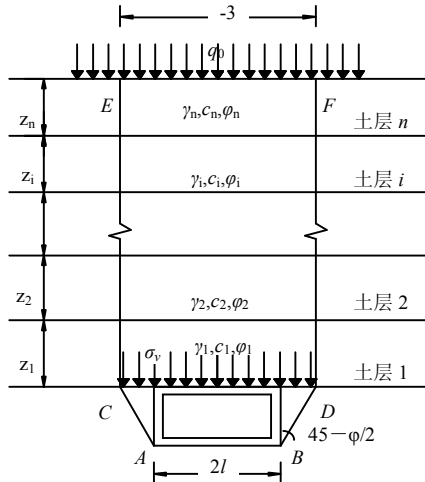


图 6 成层土计算简图

Fig.6 Calculation sketch of layered soil

$$\sigma_v = \frac{\gamma_1 l_1 - c_1}{k \tan \phi_1} \left(1 - e^{-k \tan \phi_1 \frac{z_1}{l_1}} \right) + q_1 e^{-k \tan \phi_1 \frac{z_1}{l_1}} \quad (13)$$

同理可得土层间相互作用力为

$$q_1 = \frac{\gamma_2 l_1 - c_2}{k \tan \phi_2} \left(1 - e^{-k \tan \phi_2 \frac{z_2}{l_1}} \right) + q_2 e^{-k \tan \phi_2 \frac{z_2}{l_1}}$$

$$q_2 = \frac{\gamma_3 l_1 - c_3}{k \tan \phi_3} \left(1 - e^{-k \tan \phi_3 \frac{z_3}{l_1}} \right) + q_3 e^{-k \tan \phi_3 \frac{z_3}{l_1}}$$

$$q_i = \frac{\gamma_{i+1} l_1 - c_{i+1}}{k \tan \phi_{i+1}} \left(1 - e^{-k \tan \phi_{i+1} \frac{z_{i+1}}{l_1}} \right) + q_{i+1} e^{-k \tan \phi_{i+1} \frac{z_{i+1}}{l_1}}$$

$$q_{n-1} = \frac{\gamma_n l_1 - c_n}{k \tan \phi_n} \left(1 - e^{-k \tan \phi_n \frac{z_n}{l_1}} \right) + q_n e^{-k \tan \phi_n \frac{z_n}{l_1}}$$

$$q_n = q_0$$

将上述各式叠加,可得成层土时 Terzaghi 围岩压力 σ_v 计算公式为:

$$\sigma_v = \frac{\gamma_1 l_1 - c_1}{k \tan \phi_1} \left(1 - e^{-k \tan \phi_1 \frac{z_1}{l_1}} \right) + q_0 \prod_{k=1}^n e^{-k \tan \phi_k \frac{z_k}{l_k}} + \sum_{i=2}^n \frac{\gamma_i l_i - c_i}{k \tan \phi_i} \left(1 - e^{-k \tan \phi_i \frac{z_i}{l_i}} \right) \prod_{j=1}^{i-1} e^{-k \tan \phi_j \frac{z_j}{l_j}} \quad (14)$$

3.3 开挖进尺的计算公式

开挖后隧道上方土体处于平衡状态,应满足下述关系式:

$$\left(\sum_{i=1}^n \gamma_i z_i + q_0 \right) l s - 2(l+s) \sum_{i=1}^n \int_{z_{i-1}}^{z_i} \tau_i dz \leq 0 \quad (15)$$

式(15)中当 $i=1$ 时 $z_0 = 0$ 。

将式(3)和式(14)代入式(15)可得开挖进尺。

3.4 围岩加固时的求解方法

城市地下工程浅埋土层中修建人行地下通道前通常都要对地层进行预加固,在计算开挖进尺时,可将预加固范围内土体等效为土体强度参数 (c 、 ϕ) 提高,然后视为成层土中的一层(如图 6 中的土层 1) 利用前面方法求解。

4 工程实例及数值模拟

4.1 工程概况

杭州市庆春路/新华路人行地下通道,主通道宽为 6.7 m、高为 5.4 m、埋深为 4.5 m、长为 36 m,几何模型见图 7。通道采用 108 mm 大管棚预支护、周边超前 TSS 小导管注浆及全断面注浆预加固。初期支护采用 300 mm 的 C25 聚丙烯纤维混凝土、间距为 500 mm 格栅钢架进行联合支护;施工临时支护采用 C25 聚丙烯纤维混凝土、间距 500 mm 型钢支撑进行联合支护。二衬采用 400 mm 厚的 C30 防水钢筋混凝土。采用浅埋暗挖 CRD 工法施工。

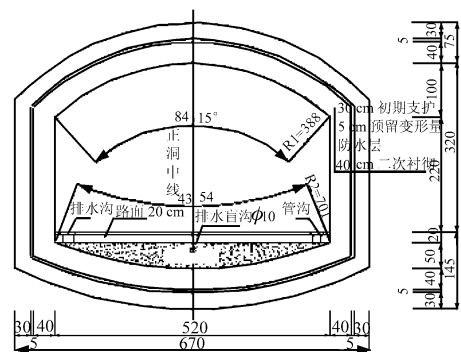


图 7 庆春路人行地道几何模型

Fig.7 Geometric model of Qingchun road underpass

地质概况由上至下依次为

人工填土层($\gamma_1=18.8 \text{ kN/m}^3$, $c_1=0$, $\phi_1=10^\circ$, $z_1=2 \text{ m}$); 砂质粉土层($\gamma_2=19.5 \text{ kN/m}^3$, $c_2=8.5 \text{ kPa}$, $\phi_2=30^\circ$, $z_2=10 \text{ m}$); 粉质黏土层 ($\gamma_3=18.8 \text{ kN/m}^3$, $c_3=26 \text{ kPa}$, $\phi_3=16^\circ$, $z_3=15 \text{ m}$)等。地道主体结构位于砂质粉土层中。

4.2 开挖进尺的计算

由图 7、3、5 可得:

$$2l_1 = 6.7 + 2 \times 5.4 \tan(45^\circ - 30^\circ/2) = 12.94 \text{ m},$$

$$b = 5.4 \tan(45^\circ - 30^\circ/2)/2 = 1.56 \text{ m}, \text{ 带入式(3)、(13)、}$$

(15)可得: 开挖进尺 $d \leq 1.037 \text{ m}$ 。

4.3 数值模拟

本文采用有限差分软件 FLAC3D 进行模拟。

4.3.1 计算模型

左右边界距通道侧壁 36 m ($6D$), 下边界距通道底 15 m ($2.5D$), 通道纵向长 36 m。如图 8 所示。

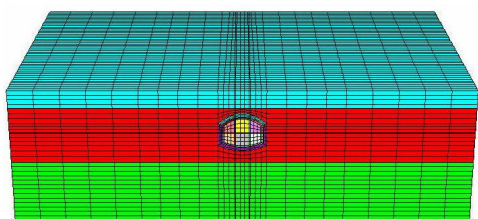


图 8 有限差分计算模型

Fig.8 Calculation model of finite difference method

4.3.2 计算结果

取分部开挖长度为 3 m, 对开挖进尺 $d=0.6$ 、0.75、1、1.2、1.5 和 2.0 m (对应于 $D/10$ 、 $D/8$ 、 $D/6$ 、 $D/5$ 、 $D/4$ 和 $D/3$) 的情况进行计算。取地表最大沉降所在横断面沉降槽作为计算结果如图 9 示。

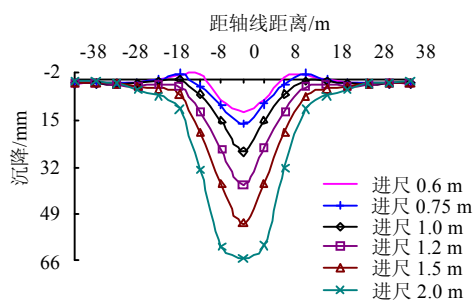


图 9 地表处横向各点沉降曲线 1

Fig.9 Horizontal settlement curve 1 of surface

由图 9 可知: 开挖进尺 d 增加, 地表沉降随之增加。按照当前工程界地表沉降控制标准 30 mm 来看, 合适的开挖进尺应在 0.6~1.0 m, 与本文推导的计算公式相吻合。

4.3.3 实测与有限元结果对比

本工程实际施工中开挖进尺为 1.0m。取地表最大沉降所在断面的地表沉降槽对比工程实测结果和有限元计算结果, 如图 10 所示。

由图 10 可见, 实测地表最大沉降为 31.5 mm 略大于有限元计算结果 28.74 mm, 二者地表沉降槽基本吻合, 由此说明该计算公式的可行性。

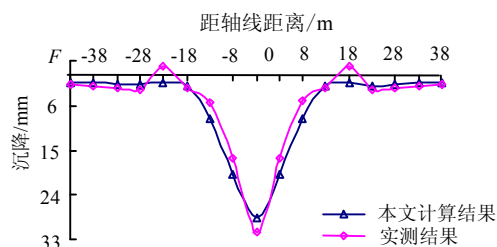


图 10 地表处横向各点沉降曲线 2

Fig.10 Horizontal settlement curves 2 of surface

5 结 论

(1) 基于 Terzaghi 松散介质理论推导了浅埋暗挖人行地道开挖进尺的计算公式。数值模拟与工程实测结果表明, 提出的计算方法是合理的。

(2) 开挖进尺 d 与隧顶围岩黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、天然重度 γ 、覆土厚度 h 、地表超载 q 以及隧道断面大小 L 、 H 等有关。若想加快施工进度, 即加大开挖进尺, 可通过以下方法实现:

① 采用地层加固手段 (如全断面预注浆、小导管注浆超前支护及打设管棚等) 来提高围岩的黏聚力 c 及内摩擦角 φ 。

② 采用合适施工方法 (如 CD 法、CRD 法等) 减小隧道开挖断面尺寸 L 、 H 。

③ 减小地面超载 q 。

(3) Terzaghi 松散介质理论虽然考虑了诸多因素, 但未能考虑渗流影响以及土体开挖后的时空效应, 因而实际工程中为确保施工安全, 引入安全系数 K 考虑一定的折减。

参 考 文 献

- [1] 李端书. 福州大跨浅埋暗挖地下通道的修建[J]. 地下空间, 2001, 21(1): 61—66.
- [2] 吉小明, 张选兵, 白世伟. 浅埋暗挖地铁隧道开挖过程的模拟研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 828—830.
JI Xiao-ming, ZHANG Xuan-bing, BAI Shi-wei. Simulation study of excavation process of shallow embedded tunnel for metro[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(6): 828—830.
- [3] 杨世武. 淤泥质地层浅埋暗挖施工技术措施[J]. 铁道

- 工程学报, 2003, (2): 64—69.
- YANG shi-wu. Construction technical measures for shallow subsurface excavation of slurry stratum[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2003, (2): 64—69.
- [4] 雷震宇, 郭庆海, 周顺华. 大跨度浅埋暗挖隧道拆撑的数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(2): 237—241.
- LEI Zhen-yu, GUO Qing-hai, ZHOU Shun-hua. Numerical simulation for dismantling temporary shoring of large span tunnel with shallow depth excavations[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(2): 237—241.
- [5] 宋玉香, 贾晓云, 朱永全. 地铁隧道竖向土压力荷载的计算研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2240—2244.
- SONG Yu-xiang, JIA Xiao-yun, ZHU Yong-quan. Study on vertical earth pressure calculation of metro tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2240—2244.
- [6] 汪振伟, 傅钢, 黄智强. 城市连拱隧道施工方案研究[J]. 岩土力学, 2007, (增刊): 527—530.
- WANG Zhen-wei, FU Gang, HUANG Zhi-qiang. Study of construction plans above cities double-arch tunnel [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, (Supp.1): 527—530.
- [7] 关宝树, 麦惆曾译. 隧道力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [8] 王毅才. 隧道工程(第二版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [9] 陈仲颐, 周景星. 土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [10] 秦建设. 盾构施工开挖面变形与破坏机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.

关于申请 2010 年度茅以升科学技术奖土力学及岩土工程大奖的通知

为奖励在我国土力学及岩土工程学科做出贡献的科技工作者, 促进我国土力学及岩土工程科学和技术的进步及人才的成长, 中国科学技术发展基金会茅以升科技教育基金委员会设立了“茅以升科学技术奖土力学及岩土工程大奖”和“茅以升科学技术奖土力学及岩土工程青年奖”。此两项奖每两年评选一次。2010 年度土力学及岩土工程大奖和青年奖分别评选获奖人 1~3 名。获奖者由中国科学技术发展基金会茅以升科技教育基金委员会颁发奖牌、证书和奖金。

根据《茅以升科学技术奖—土力学及岩土工程大奖奖励条例》(简称条例, 附件一), 凡具备《条例》中所列条件者, 可申请本奖, 青年奖候选人在 2010 年 10 月 31 日前未满 45 岁。本奖的评审工作是在茅以升科技教育基金委员会的领导下, 根据《茅以升科学技术奖—土力学及岩土工程大奖评审细则》(附件二)开展评审工作。由中国土木工程学会设立的茅以升土力学及岩土工程大奖评审委员会负责。评审委员会的日常工作委托中国土木工程学会土力学及岩土工程分会负责办理。

欢迎在土力学及岩土工程方面的科研、设计和施工建设中取得重大成果和做出突出贡献的优秀科技工作者积极申请。申请者本人应提交的申请材料, 包括: 1) 中国土木工程学会、土力学及岩土工程分会理事提供的推荐意见, 或者申请人所在司(局)一级单位推荐信; 2) 800 字简历(姓名、性别、年龄、学历、工作经历, 身份证号和手机号等); 3) 在土力学及岩土工程领域的突出业绩以及相关的证明材料或者代表性论著。申请材料一式六份, 于 2010 年 10 月 31 日以前送至: 北京市海淀区清华大学新水利馆 113-2。邮编: 100084 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会秘书处。

Tel: 010-62785593; Fax: 010-62785593;

E-mail: cismge@tsinghua.edu.cn。

2010 年 7 月 6 日

中国土木工程学会土力学及岩土工程分会