

# 盾构施工引起的超孔隙水压力解析解

肖立<sup>1,2</sup>, 张庆贺<sup>1,2</sup>, 朱继文<sup>3</sup>, 姚海明<sup>3</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;  
3. 上海市第二市政工程有限公司, 上海 200065)

**摘要:** 基于 Mohr-Coulomb 屈服准则, 在考虑土体的内摩擦角  $\varphi$  的情况下, 推导了盾构通过时引起的超孔隙水压力的公式并与  $\varphi=0$  的情况作了比较, 表明  $\varphi$  值使得塑性区范围和超孔隙水压力值变大. 塑性区的范围和塑性区内超孔隙水压力的主要影响因素是盾构土舱压力, 但弹塑性区交界处的超孔隙水压力值为  $a\sqrt{6}c\cos\varphi$  ( $a$  为 Henkel 系数,  $c$  为土的粘聚力), 与土舱压力无关. 以上海地铁 10 号线同济大学站—国权路站区间隧道为实例, 对此进行现场监测, 结果显示解析解与实测值吻合较好; 提出开孔释放超孔隙水压力对策, 经实践检验非常有效.

**关键词:** 盾构; Mohr-Coulomb 屈服准则; 内摩擦角; 超孔隙水压力; 解析解; 土舱压力

**中图分类号:** U 455.43

**文献标识码:** A

## Analytical Solution of Excess Pore Water Pressure Caused by Shield Tunneling

XIAO Li<sup>1,2</sup>, ZHANG Qinghe<sup>1,2</sup>, ZHU Jiwen<sup>3</sup>, YAO Haiming<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai No. 2 Municipal Engineering Co., Ltd., Shanghai 200065, China)

**Abstract:** Based on Mohr-Coulomb yield criterion, an analytical solution of excess pore water pressure caused by shield tunneling is obtained by taking the friction angle into consideration. The formula is compared with that without considering friction angle. Results show that the yield range and excess pore water pressure will increase when friction angle being considered. The main factor of yield range and excess pore water pressure in the range is earth pressure of soil cabin. However, the maximum excess pore water pressure in elastic zone is  $a\sqrt{6}c\cos\varphi$  ( $a$  is Henkel coefficient,  $c$  is

cohesion of soil), the value is unrelated to earth pressure of soil cabin mentioned above. A case study is made of the tunnel from Tongji Station to Guoquan Station of urban rail transit Line 10 of Shanghai, the analytical solution fits well with the monitoring results. The method of setting holes in the slab is proposed to reduce excess pore water pressure and good results are achieved.

**Key words:** shield tunneling; Mohr-Coulomb yield criterion; friction angle; excess pore water pressure; analytical solutions; earth pressure of soil cabin

早期国内研究盾构推进对地面沉降的影响多集中在开挖面平衡及盾尾间隙注浆充填, 过多关注受扰动土体强度和稳定性, 往往忽视孔隙水压力的变化. 盾构在淤泥质粘土、粉质粘土及砂质粉土中推进时产生的超孔隙水压力以及消散过程对土体扰动很大, 其导致的沉降可占总沉降量的 40%<sup>[1-3]</sup>. Skempton A W<sup>[4]</sup> 推导出了复杂应力下超孔隙压力的表达式, Henkel D J<sup>[5]</sup> 对其进行了修正, 考虑了中主应力的影响. 应用 Henkel 公式, 首先要得到土体受到扰动后产生的附加应力, Fenner 公式<sup>[6-7]</sup>、修正的 Fenner 公式和 Kastner<sup>[8]</sup> 公式给出了第一主应力为径向应力时圆形隧洞屈服范围与材料抗剪强度、初始地应力和洞内周边均布荷载的关系, 任青文、邱颖对其作了修正, 讨论了第一主应力为环向应力的情况<sup>[9]</sup>. 徐方京根据 Mohr-Coulomb 弹塑性理论, 推导了盾构通过时引起的附加应力, 得到内摩擦角  $\varphi=0$  时超孔隙水压力的解析解<sup>[10]</sup>. 目前对于盾构推进超孔隙水压力的研究, 多以现场监测<sup>[11-12]</sup> 和数值模拟<sup>[3,13]</sup> 为主. 现场实测得到的是实际工况下的变化值, 受到现场多种因素的影响, 难以判断引起孔隙水

收稿日期: 2009-10-10

第一作者: 肖立(1986—), 男, 博士生, 主要研究方向为盾构法隧道的理论、设计和施工. E-mail: xiaoliye777@126.com

通讯作者: 张庆贺(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为隧道和地下建筑的理论、设计和施工.

E-mail: zhang\_qh@tongji.edu.cn

压力变化的主要机理;而数值模拟得到的结果受输入参数和计算模型偏差影响,缺乏对其变化规律深刻认识,所以采用理论分析获得一种简单的预测超孔隙水压力的表达式是十分必要的。

## 1 盾构通过引起的附加应力

基本假设:①土体符合 Mindlin 假定<sup>[14]</sup>,可视为各向同性无限体;②土体本构关系采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型;③不考虑时间效应.超孔隙水压力的公式推导同样符合以上假设,后面不再重复说明。

### 1.1 $\varphi=0$

徐方京<sup>[10]</sup>推导了盾构隧道通过时引起的附加应力.对于弹性区

$$\sigma_r = \frac{R_0^2 c}{r^2} \exp\left(\frac{P_i - P_0 - c}{c}\right) \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{R_0^2 c}{r^2} \exp\left(\frac{P_i - P_0 - c}{c}\right) \quad (2)$$

对于塑性区

$$R_p = R_0 \exp[(P_i - P_0 - c)/2c] \quad (3)$$

$$\sigma_{rp} = 2c \ln(R_0/r) + P_i - P_0 \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta p} = 2c \ln(R_0/r) + P_i - P_0 - 2c \quad (5)$$

式中: $\sigma_r$ 为弹性区径向正应力; $R_0$ 为圆孔初始半径; $c$ 为土的粘聚力; $r$ 为一点到孔心的距离; $P_i$ 为盾构推进时土舱压力; $P_0$ 为隧道中心处静止土压力,一般盾构推进时  $P_i > P_0$ ;  $\sigma_\theta$ 为弹性区环向正应力; $R_p$ 为塑性区半径; $\sigma_{rp}$ 为塑性区径向正应力; $\sigma_{\theta p}$ 为塑性区环向正应力,如图1所示,图中  $\theta$  为微分单元的弧长对应的角度。

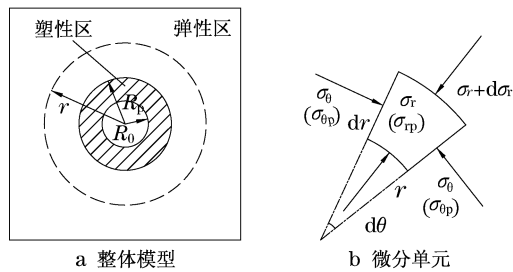


图1 圆孔扩张模型

Fig.1 Cylindrical cavity expansion model

### 1.2 $\varphi \neq 0$

实际上,土体的摩擦角  $\varphi$  不为零,若  $P_i > P_0$ ,第一主应力为环向应力<sup>[9]</sup>,Mohr-Coulomb 屈服准则<sup>[15]</sup>可以表示为

$$\sigma_{\theta p} = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_{rp} + \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (6)$$

根据圆孔扩张<sup>[16]</sup>平衡条件,有

$$r d\sigma_{rp}/dr + \sigma_{rp} - \sigma_{\theta p} = 0 \quad (7)$$

当  $r = R_0$  时,有

$$\sigma_{rp} \big|_{r=R_0} = P_0 - P_i \quad (8)$$

根据式(6)和式(8)解微分方程(7),得到弹性区

$$\sigma_r = -c \cos \varphi (R_p/r)^2 \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = c \cos \varphi (R_p/r)^2 \quad (10)$$

塑性区,令  $M = P_0 - P_i + c \cot \varphi$ ,有

$$\frac{R_p}{R_0} = \left( \frac{c \cot \varphi (1 - \sin \varphi)}{M} \right)^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (11)$$

$$\sigma_{rp} = M \left( \frac{r}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (12)$$

$$\sigma_{\theta p} = M \left( \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \left( \frac{r}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cot \varphi \quad (13)$$

## 2 超孔隙水压力理论

Skempton A W<sup>[4]</sup>超孔隙压力的表达式如下:

$$\Delta u = B[\Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)] \quad (14)$$

式中: $u$ 为孔隙压力; $B$ 为等向应力和偏应力共同作用下孔隙水压力系数,与土体的饱和度有关,对于饱和和软土, $B=1.0$ ;  $\Delta \sigma_3$ 为等向应力; $A$ 为偏应力作用下孔隙水压力系数,与土的应力历史、应力水平、初始应力状态及应变大小等有关; $\Delta \sigma_1$ 为最大主应力; $\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3$ 为偏应力。

Henkel D J<sup>[5]</sup>认为,利用三轴试验确定孔隙压力系数,应考虑中主应力的影响.他引用了应力不变量或八面体应力对饱和土提出了下列表达式:

$$\Delta u = (\Delta \sigma_1 + \Delta \sigma_2 + \Delta \sigma_3)/3 + a \sqrt{(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_2)^2 + (\Delta \sigma_2 - \Delta \sigma_3)^2 + (\Delta \sigma_3 - \Delta \sigma_1)^2} \quad (15)$$

式中: $\Delta \sigma_2$ 为中主应力; $a$ 为 Henkel 系数,反映剪应力改变引起的孔隙水压力变化。

对于三轴压缩试验,有  $\Delta \sigma_2 = \Delta \sigma_3$ ,代入式(15),可得

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + (1/3 + a\sqrt{2})(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (16)$$

与 Skempton A W 公式对比可知

$$A = 1/3 + a\sqrt{2} \quad (17)$$

$A$ 的经验取值以及转换的  $a$  值见表1。

在上述研究的基础上,把推得的盾构通过时引起的附加应力公式代入式(15),可以计算出盾构通过时盾壳正上方产生的超孔隙水压力.按作用于塑性区的土舱压力  $P_i$ (实际工程中,取  $P_i > P_0$ )大小分

成以下 2 种情况讨论.

表 1 A 的经验取值及对应的  $\alpha$  值

Tab.1 Experiential A and  $\alpha$

土的类型	A	$\alpha$
松的细沙	2.00~3.00	1.18~1.89
高灵敏度软粘土	0.75~1.50	0.29~0.82
正常固结粘土	0.50~1.00	0.12~0.47
压实砂质粘土	0.25~0.75	-0.06~0.29
轻微超固结粘土	0.20~0.50	-0.09~0.12
一般超固结粘土	0~0.20	-0.24~-0.09
重超固结粘土	-0.50~0	-0.59~-0.24

2.1  $\varphi=0^{[10]}$

弹性区

$$\Delta u = \alpha \sqrt{6} c \left( \frac{R_0}{r} \right)^2 \exp \left( \frac{P_i - P_0 - c}{c} \right) \quad (18)$$

塑性区

$$\Delta u = P_i - P_0 - c \left( 1 + 2 \ln \frac{r}{R_0} - \alpha \sqrt{6} \right) \quad (19)$$

2.2  $\varphi \neq 0$

式(12)和(13)得到的是拉应力,取负号变为压应力,将附加应力式(12)和(13)代入 Henkel 公式(15),令

$$\sigma_{z(zp)} = (\sigma_{r(rp)} + \sigma_{\theta(\theta p)})/2 \quad (20)$$

有

$$\Delta u = [\sigma_{r(rp)} + \sigma_{\theta(\theta p)} + \sigma_{z(zp)}]/3 + \alpha [(\sigma_{r(rp)} - \sigma_{\theta(\theta p)})^2 + (\sigma_{r(rp)} - \sigma_{z(zp)})^2 + (\sigma_{\theta(\theta p)} - \sigma_{z(zp)})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

弹性区

$$\Delta u = \alpha \sqrt{6} c \cos \varphi \left( \frac{R_0}{r} \right)^2 \left( \frac{c \cot \varphi (1 - \sin \varphi)}{M} \right)^{\frac{1 - \sin \varphi}{\sin \varphi}} \quad (22)$$

塑性区

$$\Delta u = \frac{1}{1 - \sin \varphi} (-M) \left( \frac{r}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} + c \cot \varphi + \alpha \sqrt{6} \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \left| (-M) \left( \frac{r}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \right| \quad (23)$$

由以上的推导结果可以得到以下结论:

(1) 令

$$N = \frac{(P_i - P_0) - c \cos \varphi}{(1 - \sin \varphi) c \cot \varphi} \quad (24)$$

则  $R_p(\varphi \neq 0)$  经变换后得

$$R_p(\varphi \neq 0) = R_0 \left( \frac{1}{1 - N} \right)^{\frac{1}{N} \cdot N \cdot \frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} >$$

$$\begin{aligned} R_0 \exp \left[ \frac{N(1 - \sin \varphi)}{2 \sin \varphi} \right] > \\ R_0 \exp \left( \frac{(P_i - P_0)(1 - \sin \varphi) - c \cos \varphi}{2 c \cos \varphi} \right) > \\ R_0 \exp \left( \frac{P_i - P_0 - c \cos \varphi}{2 c} \right) = \\ R_p(\varphi = 0) \end{aligned} \quad (25)$$

(2) 当  $r = R_p$  时,得

$$\begin{aligned} \Delta u \Big|_{r=R_p(\varphi \neq 0)} &= \alpha \sqrt{6} c \cos \varphi < \\ \Delta u \Big|_{r=R_p(\varphi = 0)} &= \alpha \sqrt{6} c \end{aligned} \quad (26)$$

(3)  $\varphi \neq 0$  时推得的应力以及超孔隙水压力更具有有一般性,  $\varphi = 0$  时的应力以及超孔隙水压力是  $\varphi \neq 0$  时的一个特解.

3 解析解与监测对比

上海市轨道交通 10 号线同济大学站—国权路站区间隧道采用单圆土压平衡盾构施工,盾构在下立交隧道下长距离推进,为掌握盾构推进过程中产生的超孔隙水压力变化规律,在盾构通过前预先埋设了孔隙水压力计,  $a-a$  断面如图 1.  $b-b$ ,  $c-c$  断面与  $a-a$  断面相同,三者沿隧道纵向相互间隔 15 m 布设.

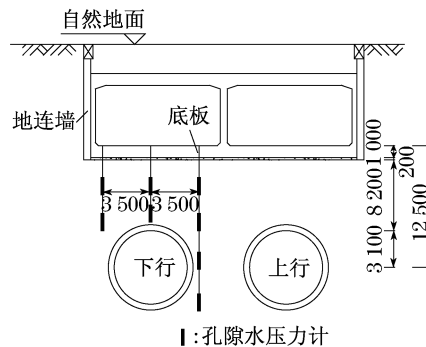


图 2  $a-a$  测点布置立面图(单位:mm)

Fig.2 Elevation of the apparatus at measuring points of  $a-a$  (unit:mm)

下立交底板与盾构中心之间的土层为灰色淤泥质粘土,根据勘察报告和实际施工参数选取的计算参数如表 2 所示.

表 2 计算参数

Tab.2 Calculation parameters

$c$ /MPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )	$P_i$ /MPa	$P_0$ /MPa	$\alpha$
0.010 2	9	0.18	0.153	0.3

计算与实测值如图 3 所示.图中  $K_b$  指位于盾壳正上方的一组孔压测点.

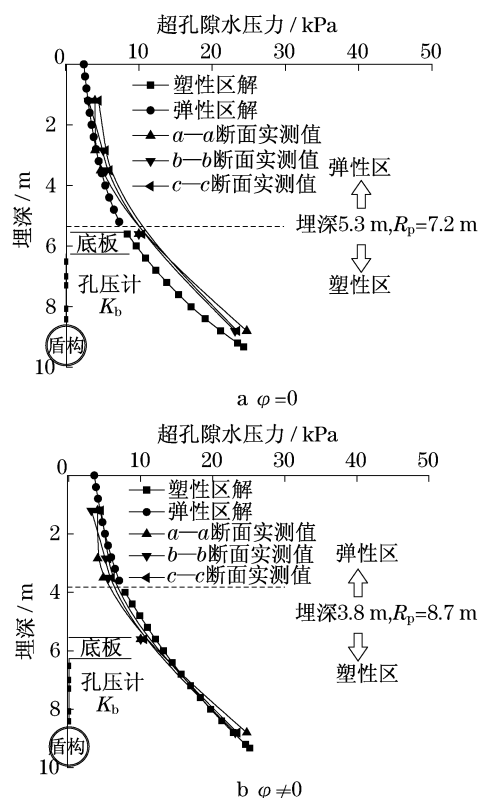


图3 盾壳正上方孔压解析解

Fig.3 Analytical solutions for pore pressure

(1) 从图3a和3b对比可以看出,  $\varphi \neq 0$  时超孔隙水压力的预测值与实测值更吻合。

(2) 从图3b可以看出, 弹性区内, 超孔隙水压力随埋深的增加沿弹性区解增加; 进入塑性区后, 超孔隙水压力随埋深的增加沿塑性区解增加。

(3) 塑性区与弹性区的分界处 ( $r = R_p$ ), 塑性区解与弹性区解相等, 即  $\Delta u = a \sqrt{6} c \cos \varphi$ , 说明此处  $\Delta u$  只与土的性质有关, 而不受土舱压力的影响。在弹性区内, 土舱压力影响超孔隙水压力的变化过程, 但不影响极值。土舱压力改变的是弹性区和塑性区的范围以及塑性区超孔隙水压力的最大值 (仅考虑  $r \geq R_0$  的情况)。

(4) 图3a和3b的预测值差别不大, 原因是  $\varphi$  值较小 ( $\varphi = 9^\circ$ ); 实测值变化趋势与解析解一致, 但是数值上有差异, 这与盾构推进速度等施工参数以及地面的堆载、降水因素有关, 有待进一步研究。

(5) 为降低盾构通过时对下立交底板的扰动, 设置了卸压孔, 如图4所示。现场监测时发现, 在盾构通过时, 卸压孔有水涌出, 说明卸压孔的设置能够有效降低超孔隙水压力和土压力对下立交底板的挤压力。



图4 下立交卸压孔冒水

Fig.4 Groundwater drained from the pressure-reduced hole in underpass slab

## 4 结论

(1) 超孔隙水压力的解析解能够很好地预测盾壳正上方超孔隙水压力的大小及变化, 可以作为盾构机土舱压力等施工参数设定时的参考。

(2) 考虑  $\varphi$  时超孔隙水压力的预测值较为合理,  $\varphi \neq 0$  使得塑性区半径、相同深度时的超孔隙水压力较  $\varphi = 0$  时有所增加, 增加的幅度取决于  $\varphi$  的大小。

(3) 土舱压力大, 造成的塑性区范围大, 并且处于塑性区中的超孔隙水压力值也大, 反之亦然。

(4) 弹性区与塑性区分界处  $\Delta u = a \sqrt{6} c \cos \varphi$ , 与土舱压力无关。超孔隙水压力在塑性区中的变化速率比弹性区慢。

(5) 底板中设置卸压孔, 对降低盾构通过对周围的结构扰动有显著效果, 可以在类似工程中推广应用。

## 参考文献:

- [1] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.  
LIU Jianhang, HOU Xueyuan. Shield tunneling [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991.
- [2] 蒋洪胜, 侯学渊. 盾构掘进对隧道周围土层扰动的理论与实测分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1514.  
JIANG Hongsheng, HOU Xueyuan. Theoretical study and analysis of site observation on the influence of shield excavation on soft clays around tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1514.
- [3] 林志. 盾构隧道施工引起的超孔隙水压力规律研究 [J]. 公路隧道, 2007, 60(4): 46.  
LIN Zhi. Excess pore pressure caused by shield tunneling [J]. Highway Tunnel, 2007, 60(4): 46.
- [4] Skempton A W. The pore pressure coefficients A and B [J].

