

# 盾构隧道管片衬砌荷载模式比较分析

胡志平<sup>1</sup> 罗丽娟<sup>2</sup> 蔡志勇<sup>3</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 石油大学建筑工程系, 东营 257061;

3. 浙江中成建工集团有限公司, 浙江绍兴 312085)

**【摘要】** 地下结构的荷载分布计算是非常复杂的, 针对上海某越江盾构隧道, 采用梁—弹性铰—地基系统计算模型, 就水土压力合算与分算、侧向土压力和水压力的分布形式等设计了几种荷载模式, 并分别计算分析比较了管片衬砌结构在这些荷载模式作用下的内力分布和变形特性, 并从中得出了一些有价值的结论。

**【关键词】** 盾构隧道; 管片衬砌; 荷载模式; 梁弹地基模型

**【中图分类号】** U 45

## Analysis of the Different Load Models in the Lining Segments of Shield Tunnel

(Hu Zhiping<sup>1</sup> Luo Lijuan<sup>2</sup> Cai Zhiyong<sup>3</sup>)

- |   |
|---|
| 1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092             |
| 2. Department of Construction Engineering, Petroleum University, Shandong Dongying 257061 |
| 3. Zhejiang Zhongcheng Construction Group Co. Ltd., Zhejiang Shaoxing 312085, China       |

**【Abstract】** This paper proposes a beam-spring-foundation system model to analyze the respond and deformation of the shield tunnel under different load models. Some load models composed of distribution of soil pressure and water pressure are discussed. Furthermore, based on the example of the shield tunnel through the Yangzi River, the distribution of inner force and deformation difference under different load models are discussed in details, and some valuable results are presented.

**【Key words】** shield tunnel; lining segments; load model; beam spring foundation system

### 0 引言

目前, 地下工程结构的设计方法主要有以下 4 种<sup>[1,2]</sup>: ①经验类比法、②荷载结构法、③地层结构法、④收敛限制法。比较常用的计算方法是荷载结构法和地层结构法。荷载结构法认为地层对结构的作用只产生作用在结构上的荷载, 以此来计算衬砌在荷载作用下产生的内力和变形; 地层结构法认为结构和地层一起构成受力变形的整体, 并按连续介质力学原理来计算衬砌和周边地层的内力和变形。地层结构法尚处于不成熟阶段。因此, 一些重大工程或重要工程的研究和设计计算仍然采用荷载结构法。这主要是考虑到重大工程的安全性要求。对于盾构隧道管片衬砌的设计计算也是这样。地下结构上荷载的作用模式对结构的设计和计算有很大影响, 同一种结构计算模式, 如果荷载模式不同, 计算的内力状态和结果将有很大差异。本文针对上海市某越江通道盾构隧道方案就各种主要荷载模式, 采

用梁—弹性铰—地基系统计算模型进行了结构内力计算分析比较, 得出了一些有参考价值的结论。

### 1 梁—弹性铰—地基系统计算模型

梁—弹性铰—地基系统计算模型将整个盾构隧道管片衬砌结构看成是由刚架性质的管片、弹性铰性质的管片接头<sup>[3]</sup>和弹性地基三种物理单元组成。

#### 1.1 梁单元

梁单元用来模拟管片衬砌, 这种单元考虑了弯矩和轴力对管片变形能的贡献, 可以由纯梁单元和轴力杆单元来叠加得到。

轴力杆单元的单元刚度矩阵为:

$$K_1^{(e)} = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $E$ 、 $A$ 、 $l$  分别为杆单元弹性模量、杆单元截面积和单元长度。

纯梁单元的单元刚度矩阵为:

$$\mathbf{K}_2^{(e)} = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{K}^{(e)} = \mathbf{K}_1^{(e)} + \mathbf{K}_2^{(e)} = \alpha \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 & -\beta & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6l & 0 & -12 & 6l \\ 0 & 6l & 4l^2 & 0 & -6l & 2l^2 \\ -\beta & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6l & 0 & 12 & -6l \\ 0 & 6l & 2l^2 & 0 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\alpha = \frac{EI}{l^3}$ ,  $\beta = \frac{Al^2}{I}$ 。

### 1.2 弹性铰单元<sup>[4]</sup>

由于管片接头能承受一定的弯矩,但接头本身 X、Y 方向受到约束,所以只考虑一个弯曲自由度,弹性铰的抗弯刚度模拟管片接头的抗弯刚度。本弹性铰单元可以考虑在正弯矩、负弯矩作用下具有不同刚度值。

弹性铰单元的单元刚度矩阵

$$\mathbf{K}^{(e)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_r & 0 & 0 & -R_r \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_r & 0 & 0 & k_r \end{bmatrix},$$

其中:  $k_r$  为管片接头的抗弯刚度值。

### 1.3 弹性地基单元

地基系统采用全周弹性地基<sup>[5]</sup>,满足文克勒尔假定,在此计算模型中不计地基剪切变形能。所以,弹性地基变形能对整个体系的贡献为:

$$I_d^{(e)} = \frac{1}{2} \int k_d \cdot \omega^2 \cdot dx \quad (4)$$

式中:  $k_d$  为地基法向刚度系数,  $\omega$  为地基的法向变形。

由于  $\omega = N \cdot \delta$   $\omega^2 = \delta^T N^T N \delta$

所以  $I_d^{(e)} = \frac{1}{2} \int \delta^T N^T k_d \cdot N \delta \cdot dx$ ,取极值后得到地基对整个体系的刚度矩阵的贡献为附加地基刚度<sup>[4]</sup>:

$$\mathbf{K}_D^{(e)} = \int N^T k_d N dx \quad (5)$$

综合以上三部分单元刚度就得到了整个梁—弹性铰—地基系统计算模型的单元刚度矩阵。

## 2 荷载模式

荷载作用在管片衬砌上,而弹性地基抗力是通

式中:  $I$  为杆单元的截面惯性矩。

由(1)、(2)式得到梁单元的单元刚度矩阵为:

过地基土法向位移和土的弹性抗力系数来计算的,作用在管片衬砌上的外荷载有:垂直土压力、垂直水压力;侧向土压力、侧向水压力;结构自重;土体抗力<sup>[1,2]</sup>(在刚度矩阵中已经考虑了,在此不作为外荷载输入)。主要荷载模式有以下几种考虑方式:

①土压力和静水压力合算还是分算?

②作用在上半个拱圈的垂直土压力是近似成均布土压力还是非均布土压力?

③在计算侧向土压力时是采用朗肯主动土压力还是侧压力系数来计算?

④在采用水土分算时是径向水压力还是侧向水平水压力?

从以上四种方式可以得出以下 A、B、C、D、E、F 6 种荷载模式:

表 1 荷载模式分类表

水土分算	水土合算	
A. 径向水压力	拱顶均布土压力	拱顶非均布土压力
B. 侧向水平水压力	C. 侧向土压力系数法	E. 侧向土压力系数法
	D. 朗肯主动土压力法	F. 朗肯主动土压力法

国际隧道协会推荐的《盾构隧道管片衬砌设计指南》<sup>[6]</sup>建议的拱顶均布土压力为  $q_1$ ;拱顶非均布土压力为  $q_1 + q_2$ ;拱底反力为均布力  $P_K$ ,其总和等于结构自重  $g$ 、结构上半拱圈所承受的土压力和上下水压力差之和。侧向土压力可以根据侧向土压力系数和垂直土压力来计算,或者根据我们非常熟悉的朗肯主动土压力计算公式来计算,盾构隧道管片衬砌结构荷载模式见图 1。

根据前述的梁—弹性铰—地基系统计算模型,就此 6 种荷载模式,作者研制了相应的有限元计算程序。针对上海某越江盾构隧道工程,分别计算分析了各种荷载模式作用下管片衬砌的内力和变形。具体计算结果见下述工程实例。

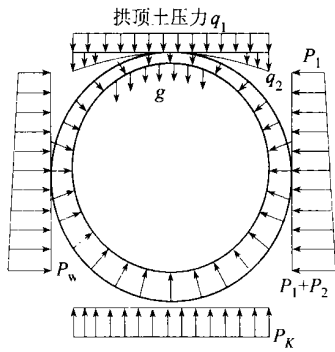


图1 径向水压拱顶非均布土压示意图

表2 土层物理力学性质指标统计表

土层号	土层厚度/m	岩土名称	含水量 w/%	天然密度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	孔隙比 e	压缩模量 E/MPa	粘聚力 c'/kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
①	2.20	填土、淤泥						
②	8.40	灰色砂质粉土	0.294	19.0	0.832	8.08	3.0	35.8
③ <sub>1</sub>	3.90	灰色淤泥质粉质粘土	0.356	18.3	1.024	2.67		
③ <sub>2</sub>	1.80	灰色砂质粉土						
④	8.10	灰色淤泥质粘土	0.462	17.3	1.322	2.57	13.0	9.40
⑤ <sub>1-1</sub>	10.0	灰色粘土	0.408	17.8	1.173	3.06	15.0	13.5
⑤ <sub>1-2</sub>	8.0	灰色淤泥质粉质粘土	0.395	17.9	1.119	3.77	15.0	21.0
⑤ <sub>2</sub>	30.0	灰色粉质粘土	0.407	17.8	1.160	4.41	15.0	22.90

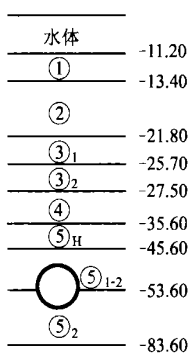


图2 盾构隧道横断面布置图(m)

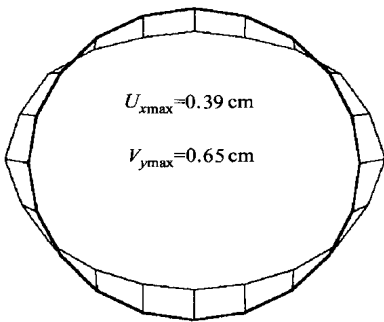


图3 管片衬砌结构变形图

水土合算、拱顶荷载非均匀分布、拱底荷载均匀分布、侧向朗肯主动土压力(荷载模式F),采用梁—弹性铰—地基系统计算模型,由有限元程序计算得到管片衬砌结构变形图见图3,弯矩图见图4。

水土分算、拱顶土压力非均布、拱底荷载均匀分布、侧向土压力系数取0.62,侧向水平水压力(荷载模式B),计算得到管片衬砌结构变形图见图5,弯矩图见图6。

### 3 工程实例

本拟建工程系上海软土地区的某越江盾构隧道,例中计算的横断面位于江中,水深11.20m,管片环由10块管片构成。具体岩土地层的物理力学性质指标<sup>①</sup>见表2。

由勘察资料,通过计算得出⑤层粉质粘土的地基抗力系数为25.2MPa/m、计算采用土的侧压力系数为0.62(综合上海地区的统计结果<sup>⑦</sup>)。盾构隧道管片衬砌结构在土层中的埋置位置见图2。

水土分算、拱顶土压力非均布、拱底荷载均匀分布、侧向朗肯主动土压力、径向水压力(荷载模式A),计算得到管片衬砌结构变形图见图7,弯矩图见图8。

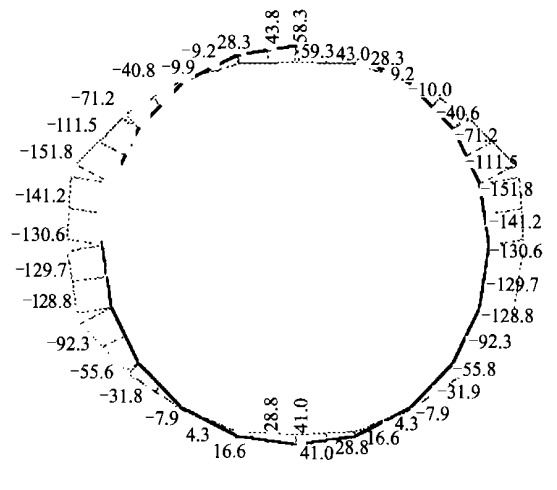


图4 管片衬砌结构弯矩图(kN·m)

① 上海市地质勘察研究院.上海市崇明越江通道工程(东线)工程地质调整报告.2001.3

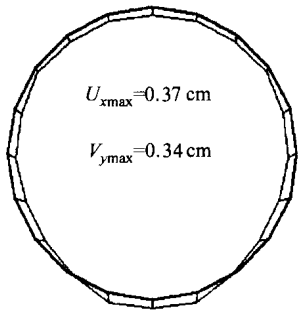


图5 管片衬砌结构变形图

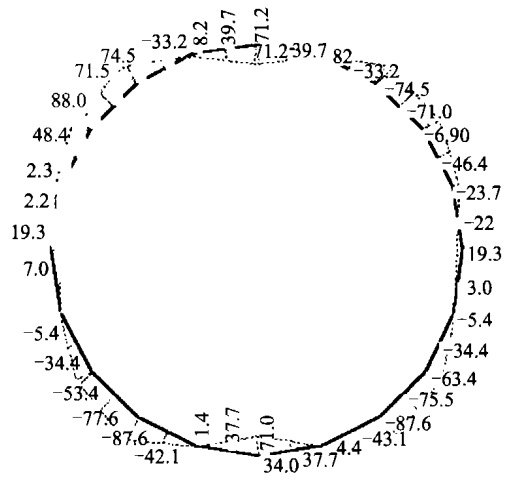


图8 管片衬砌结构弯矩图(kN·m)

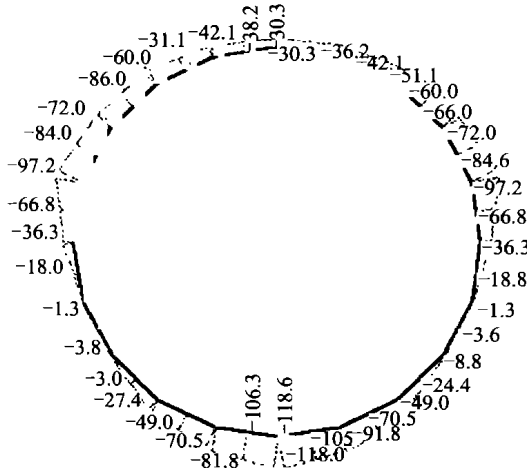


图6 管片衬砌结构弯矩图(kN·m)

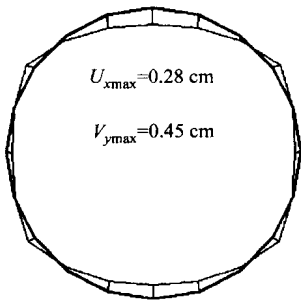


图7 管片衬砌结构变形图

表3 各荷载模式作用下最大正、负弯矩成果统计表

项 目	最大正弯矩/(kN·m)	最大负弯矩/(kN·m)
荷载模式A	71.2	-87.60
荷载模式B	无正弯矩	-118.60
荷载模式C	39.52	-129.40
荷载模式D	75.03	-142.60
荷载模式E	23.11	-128.60
荷载模式F	59.3	-151.80

从图5、图6、图7、图8来看，径向水压力和侧向水平水压力对隧道管片衬砌结构的作用效果是有明显区别的，径向水压力有利于结构的稳定性，最大负弯矩相差达30%，并且变形趋势也相差甚远。

比较图3、图5，图4、图6，我们可以发现水土分算还是合算对结构内力的大小和分布的影响是显著的。水土分算得到的最大负弯矩只有水土合算得到的最大负弯矩的78%，显然按水土合算来设计管片衬砌结构是偏安全的。

比较荷载模式C和E、D和F，可以发现拱顶土压力是均布还是非均布对结果影响不大，而采用朗肯主动土压力计算得到的最大负弯矩要比采用土侧压力系数计算的最大负弯矩大10%，这可能是朗肯主动土压力要小于采用侧压力系数计算得到的侧向土压力的缘故。

#### 4 结 论

通过以上计算分析，可以得出以下几点结论：

1) 水土分算还是合算对管片衬砌结构内力的大小和分布形式的影响是显著的。水土分算得到的最大负弯矩只有水土合算得到的最大负弯矩的78%，显然按水土合算来设计管片衬砌结构是偏安全的。一般来说，粘土层可考虑采用水土合算，砂土层则可考虑采用水土分算。

2) 水土分算法中，径向水压力法还是侧向水平水压力法对隧道管片衬砌结构的作用效果是明显的，径向水压力有利于结构的稳定性，此两种方法最大负弯矩相差达30%，并且变形趋势也相差甚远。用侧向水平水压力法来设计管片衬砌结构是偏安全的。

3) 朗肯主动土压力法和侧向土压力系数法都是常用的侧向土压力计算方法，选取的参数对计算结果有一定的影响，须慎重。

4) 拱顶土压力分布形式是均布还是非均布对计算结果影响不大。

(下转第42页)

的工程性质的影响有个转折百分点。由图1~图3可知,在转折点前面,膨胀量随云母含量的增多而增大。当云母含量超过转折百分点,膨胀量逐渐减小,且趋于不变。回弹模量以相反的规律变化,转折点前随云母含量基本呈线性减小,而转折点后趋于平缓递增。

2)随风化花岗岩路基土的云母含量不同,路基土的CBR值变化很大,基本情况是,随云母含量的增大路基土的CBR值明显减小。在转折百分点左右,CBR值变化渐缓。

### 3 结论

影响风化花岗岩路基土工程性质的因素是多方面的,其中云母含量对其工程性质有重要影响。风化花岗岩路基土中云母的含量对其CBR值、回弹模量、膨胀量等的影响有着一定的规律。

在CBR值和回弹模量试验中,风化花岗岩中的云母含量存在一个转折百分点,低于此百分点时,随云母含量的增多膨胀量基本呈线性增大,膨胀的主要原因是粘性土的吸水。膨胀量随云母含量增多呈线性增大是因为云母是薄片状,遇水后两侧附有的水膜加厚,随着云母含量逐渐增多,吸水量便逐渐增加,使膨胀量明显增大。遇水时花岗岩残积土中矿物颗粒之间的联结受到破坏和片状云母的阻碍,CBR值与回弹模量都基本呈线性降低。当云母含量逐渐增多达到转折百分点后,云母片片重叠压密的机会增多,通过电粘滞作用,对水的吸收有一定的排斥作用。尽管如此,花岗岩残积土颗粒之间的联结因吸水遭到破坏,CBR值仍然减少。从图中可看

出,斜率逐渐变得平缓。回弹模量明显回升,斜率也变得平缓,膨胀量与回弹模量的变化规律大致相反。

本文通过室内试验分析了风化花岗岩中高云母含量是导致其作为填料时CBR值偏低的重要因素。土质改良时可以采取固化方法,在风化花岗岩路基土中加入水泥、石灰等固化材料,降低云母矿物的不利影响,增加土粒之间的结构连结。云母含量的百分转折点,可能与花岗岩残积土的其它矿物成分有关,云母含量对花岗岩路基土工程性质的影响规律还需进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 何杰,邹静蓉.全风化花岗岩工程性质及其路基处理技术研究.湖南交通科技,2001(4):19~20
- 2 张文华.花岗岩残积土的抗剪强度及土质边坡稳定分析.水文地质工程地质,1994(3):41~43
- 3 栾茂田,罗金田等.不排水条件下全风化花岗岩残积土工程特性与本构模型.大连理工大学学报,2002,40(增刊1):83~89
- 4 高大钊等.土质学与土力学(第三版).北京:人民交通出版社,2002.4~32
- 5 张登良.加固土原理.北京:人民交通出版社,1990.6~94
- 6 朱小林,杨桂林编著.土体工程.上海:同济大学出版社,1996.3~28
- 7 D.G费雷德隆德等著.非饱和土土力学.陈仲颐等译.北京:中国建筑工业出版社,1997.10~19

收稿日期:2003-11-07

(上接第22页)

### 参 考 文 献

- 1 刘建航,侯学渊.盾构法隧道.北京:中国铁道出版社,1991.159~303
- 2 夏明耀,曾进伦.地下工程设计施工手册.北京:中国建筑工业出版社,1997.472~510
- 3 朱合华,陶履彬.盾构隧道衬砌结构受力分析的梁-弹簧系统模型.岩土力学,1998,19(2):26~32

- 4 冯紫良,戴仁杰等.杆系结构的计算机分析.上海:同济大学出版社,1991.48~133
- 5 朱合华,崔茂玉,杨金松.盾构衬砌管片的设计模型与荷载分布的研究.岩土工程学报,2000,22(2):190~194
- 6 Working Group No.2 International Tunnelling Association, Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining, Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(3): 303~331
- 7 DGJ 08-11-1999 上海市地基基础设计规范

收稿日期:2003-09-28