

盾构隧道横向受力分析的框架-弹性铰-全周地基系统模型

胡志平

(同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

罗丽娟

(石油大学储建学院建筑工程系, 东营 257062)

【摘要】 盾构隧道衬砌结构由若干管片及其间的连接螺栓组装而成。在横向受力分析的工程设计中, 目前普遍采用的是梁-弹簧系统模型。采用框架-弹性铰-全周地基系统模型来分析管片结构的横向受力响应, 可以考虑接头对弯矩的消散作用和地基对结构的均匀连续的抗力, 并计算了一个实例, 得出了一些有参考价值的结论。

【关键词】 盾构隧道; 荷载模式; 框架-弹性铰-地基模型

【中图分类号】 U 455.7

Study on Frame-Spring-Peripheral Foundation System Model for the Numerical Cross-section Analysis of Segments in Shield Tunnel

【Abstract】 The lining structure of shield tunnel is composed of several segments and joints. In the analysis of the cross-section subjected to a definite external loading, beam-spring model is usually employed. The frame-spring-peripheral foundation system model is proposed to analyze the respond of external loading. This model has some advantages, like continuous ground reaction and impairment of joint stiffness. Furthermore, based on the example of the shield tunnel through Yangzi River, some valuable results are presented.

【Key words】 shield tunnel; load model; frame-spring-peripheral foundation system model

0 引言

随着城市地下空间的大力开发与利用, 盾构隧道衬砌结构已经成为地下结构中的一种重要形式, 其主要部分由管片、管片间连接螺栓和防水材料充填组成。实践表明, 盾构隧道衬砌结构中管片纵向接头和环向接头对衬砌结构的内力和变形, 尤其是对接头部分的内力和变形起着极其重要的影响。在管片衬砌结构设计中, 最关心的是接头部位的强度和变形, 因为接头最容易发生漏水、裂缝。目前, 在横向受力分析中, 使用最多的是梁-弹簧系统模型^[1, 2]。盾构隧道深埋在土层中, 衬砌装配完成后进行化学注浆, 提高土的刚度和强度, 降低渗透性。因此, 土层对衬砌结构的约束和抗

力不容忽视, 有的做法是将周围土层对衬砌的作用用弹簧来模拟, 这是不连续的。考虑到注浆后土的硬化, 刚度增强, 本文采用连续的弹性地基系统模型来模拟加固土层对衬砌结构的约束和抗力。最后对某拟建越江特大型盾构隧道衬砌结构采用框架-弹性铰-全周地基系统模型进行了分析, 并与其它方法结果进行了对比, 并得出了结论。

1 框架-弹性铰-全周地基系统模型描述

框架-弹性铰-全周地基系统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和全周弹性地基三种物理元组成。此计算模型能很方便地计算出管片各截面和接头处的轴力、剪力、弯矩

和转角,这是设计中最需要的。

1.1 刚架单元

刚架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:

$$K_2^{(e)} = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: I 为杆单元的截面惯性矩。

由式(1)、式(2)得到刚架单元的单元刚度矩阵为:

$$K^{(e)} = K_1^{(e)} + K_2^{(e)} = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 & -\beta & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 6l & 0 & -12 & 6l \\ 0 & 6l & 4l^2 & 0 & -6l & 2l^2 \\ -\beta & 0 & 0 & \beta & 0 & 0 \\ 0 & -12 & -6l & 0 & 12 & -6l \\ 0 & 6l & 2l^2 & 0 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

1.2 弹性铰单元

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,所以本模型中只考虑一个弯曲自由度,弹性铰的弹簧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、负弯矩作用下的不同刚度值^[3]。

弹性铰单元的单元刚度矩阵为:

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

式中: k_r 为管片接头的抗弯刚度值。

1.3 弹性地基单元^[4]

地基系统采用全周弹性地基,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变形能的贡献为:

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

式中: k_d 为地基法向刚度系数, ω 为地基的法向变形。

$$\text{由于: } \omega = N \cdot \delta \quad \omega^2 = \delta^T N^T N \delta$$

所以 $I_d^{(e)} = \frac{1}{2} \cdot \int \delta^T N^T k_d \cdot N \delta \cdot dx$, 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:

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

综合以上三部分单元刚度就得到了整个框架-弹性铰-全周地基系统模型的单元刚度矩阵。

2 荷载模式

荷载作用在管片衬砌结构上,而弹性地基抗力是通过地基土法向位移和土的弹性刚度系数来计算的,在刚度矩阵中已经考虑了,在此不作为外荷载输入。根据国际隧道协会推荐的《盾构隧道衬砌设计指南》确定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。具体分布形式见图1。

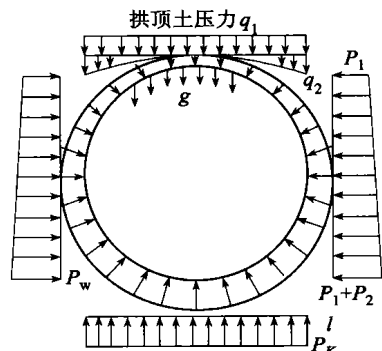


图1 径向水压拱顶非均布土压示意图

国际隧道协会推荐的《盾构隧道管片衬砌设计指南》建议的拱顶均布土压力 q_1 为拱顶

各土层的有效重量;拱顶非均布土压力 q_2 为拱肩处曲边三角形土的有效重量;拱底均布反力 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^[5]。

表 1 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/%	天然重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	孔隙比 e	压缩模量 E_{s1-2}/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 ₁	3.90	灰色淤泥质粉质粘土	0.356	18.3	1.024	2.67		
③ ₂	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 ₁₋₁	10.0	灰色粘土	0.408	17.8	1.173	3.06	15.0	13.5
⑤ ₁₋₂	8.0	灰色淤泥质粉质粘土	0.395	17.9	1.119	3.77	15.0	21.0
⑤ ₂	30.0	灰色粉质粘土	0.407	17.8	1.160	4.41	15.0	22.90

注:该表中无数据的空格是由于某些原因无法测定其指标

由勘察资料,通过计算得出⑤层粉质粘土的基床系数为 25.2 MPa,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)。盾构隧道管片衬砌在土层中的埋置位置见图 2。

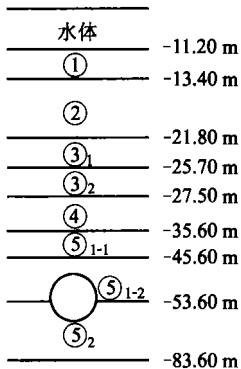


图 2 盾构隧道横断面布置图

据图 1 荷载模式、采用框架-弹性铰-全周地基系统模型,研制了相应的有限元计算程序,计算得到的管片衬砌结构变形图见图 3、结构弯矩图见图 4。采用均匀圆环-全周地基系统模型对同一荷载条件、相同的材料结构进行了比较计算,计算得到的变形图、弯矩图见

3 算例分析

本工程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 11.20 m,拟建管片环内径 13.8 m,管片厚度 0.70 m,管片环由 7 块标准块、2 块邻接块和 1 块封顶块构成。具体岩土地层的物理力学性质指标见表 1。

图 5、图 6,管片衬砌结构的内力、变形比较结果见表 2。

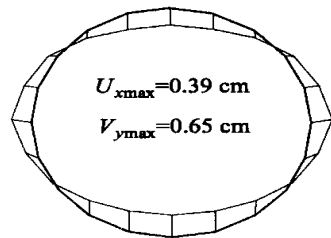


图 3 管片衬砌结构变形图

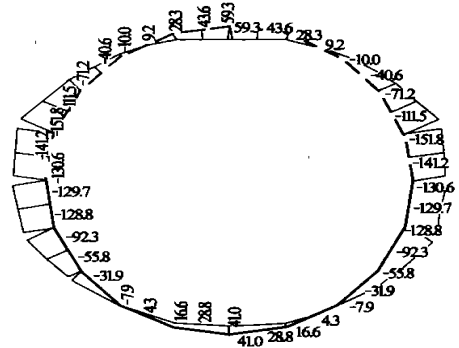


图 4 管片衬砌结构弯矩图(kN·m)

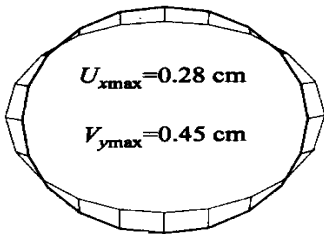


图5 管片衬砌结构变形

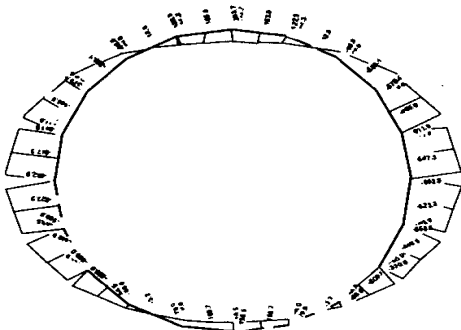


图6 管片衬砌结构弯矩图(kN·m)

由图3、图4、图5、图6和表2可知:框架-弹性铰-全周地基系统模型和均匀圆环-全周地基系统模型计算得到的变形图很相似,弯矩图也很相似。由框架-弹性铰-全周地基系统模型得到的最大正弯矩、最大负弯矩只有均匀圆环-全周地基系统模型得到的四分之一,这主要是管片接头对弯矩的消散作用造成的。实验证明管片接头一般只承受管片弯矩的30%左右。显然在设计接头螺栓时应该充分考虑接头弯矩的消散作用。两种方法得到的轴力和剪力相差无几,框架-弹性铰-全周地基系统模型得到的最大转角是均匀圆环-全周地基系统模型得到的转角的150%,这正是接头转动的结果,与接头刚度的差别是一致的。按框架-弹性铰-全周地基系统模型来设计接缝防水措施是偏于安全的,对盾构隧道防水问题的复杂性来说也是必要的。

表2 各计算模式下结构内力、变形对比表

项 目	最大正弯矩/ kNm	最大负弯矩/ kNm	最大轴力/ kN	最大剪力/ kN	最大转角/ 弧度
框架-弹性铰-全周地基系统模型	52.9	-145.7	4493.0	715.8	2.06E-3
均匀圆环-全周地基系统模型	203.7	-682.8	4550.0	783.0	1.35E-3

4 结 论

1) 框架-弹性铰-全周地基系统模型能够考虑接头的刚度消散作用、地基对结构的抗力的连续均匀性,同时考虑了轴力、弯矩对系统变形能的贡献,是比较合理的一种模型。

2) 框架-弹性铰-全周地基系统模型来设计接缝防水措施是偏于安全的,对盾构隧道防水问题的复杂性来讲也是必要的。

3) 在设计管片接头螺栓时应该充分考虑管片接头刚度的消散作用。

4) 根据框架-弹性铰-全周地基系统模型研制的有限元程序能很方便的计算出各节点的轴力、剪力、弯矩和转角,这对设计人员来说是非常必要的。

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,1991.75~134
- 2 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
- 3 刘学山.考虑接触问题的粘弹性介质盾构隧道的抗震分析:[学位论文].上海:同济大学,1999
- 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,1991.48~121
- 5 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.

收稿日期:2003-03-07