

文章编号: 1002-0268 (2007) 10-0099-05

盾构管片纵向接缝位置对结构内力和变形的影响分析

罗丽娟¹, 胡志平¹, 张志军²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 陕西大秦建设总公司, 陕西 西安 710064)

摘要: 根据盾构隧道管片衬砌之间的连接特性、衬砌结构与土层之间的相互作用性质, 提出了基于弹性地基理论的盾构隧道管片衬砌结构的梁-弹性铰-地基系统模型, 并研制了相应的有限元分析程序 FHEF, 该模型能直接计算出盾构隧道管片衬砌结构的轴力、剪力、弯矩和变形, 将计算结果直接用于工程设计。依据二维计算模型, 就盾构隧道管片衬砌结构纵向接缝不同位置对衬砌结构的内力影响进行了详细计算分析, 计算结果表明, 纵向接缝的不同位置对结构的内力和变形不容忽视, 工程设计时应从结构设计和防水设计等多个角度来确定纵向接缝的设置, 从而指导工程实践。

关键词: 隧道工程; 盾构隧道; 有限元方法; 弹性铰; 接缝位置; 管片衬砌

中图分类号: U455.7

文献标识码: A

Influence of Segments Joint Position on Structural Inner Force and Deformation in Shield Tunnel

LUO Li-juan¹, HU Zhi-ping¹, ZHANG Zhi-jun²

(1. School of civil engineering, Chang 'an University, Shaanxi Xi 'an 710061, China;

2. Shaanxi Daqin Construction Corporation, Shaanxi Xi 'an 710064, China)

Abstract: With the study on the deformation character of longitudinal joint of shield tunnel and the interaction between the segment lining and soil layers, a 2-D structural model of segment lining composed of beam element, hinge element and elastic foundation element is proposed based on the elastic foundation theory. The corresponding FEM program FHEF (Frame Hinge on Elastic Foundation) is developed. The structural axial force, shear force, moment and deformation can be calculated with the model, and can be used for engineering design directly. The influence of longitudinal joint position on the structural inner force and deformation is analyzed in detail. The result denotes that the influence can not be ignored in the engineering design. An example is given to determine the position of the longitudinal joint from the engineering structural design and waterproof design comprehensively.

Key words: tunnel engineering; shield tunnel; FEM elastic joint; longitudinal joint position; segment lining

0 引言

盾构区间隧道管片衬砌结构是由许多管片和螺栓拼装而成的圆柱形壳体, 通常情况下将其简化为平面应变问题来考虑^[1,2]。目前对于盾构隧道管片衬砌结构的计算模型研究比较深入, 在二维计算模型^[2]方面主要有连续介质模型、假定弹性抗力模型、弹性地基铰梁模型^[3]等。由于管片本身和管片间的接头在力学性

能上有很大的差异, 接头在衬砌结构的位置对结构设计和施工有很大的影响, 所以, 接头的位置对结构的内力和变形是不容忽视的。为了研究盾构隧道管片衬砌环中接缝位置的变化对结构内力和变形的影响, 本文采用梁-弹性铰-地基系统模型对接缝在不同位置时结构的内力和变形进行了对比分析, 并得出了一些有用的结论, 对盾构隧道管片衬砌结构的设计和施工具有重要的指导意义。

收稿日期: 2006-07-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40602033); 长安大学科学基金资助项目 (05Q06)

作者简介: 罗丽娟 (1973 -), 女, 山西平遥人, 讲师, 博士研究生, 从事岩土工程研究。(lujuan@chd.edu.cn)

1 梁-弹性铰-地基系统模型

梁-弹性铰-地基系统模型^[4]将整个盾构隧道管片衬砌结构看成是由半刚架性质的管片、弹性铰性质的管片接头和弹性地基等物理元组成。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、弯矩以及转角，这是设计中非常关心的。

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：

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

式中， I 为杆单元的截面惯性矩。

所以，由式(1)、式(2)得到刚架单元的单元刚度矩阵为：

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

式中， $= EI/l^3$ ； $= Al^2/l$ 。

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

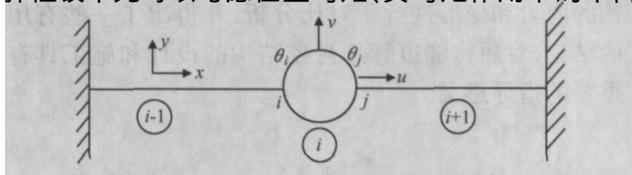


图1 铰单元结构示意图

Fig.1 The sketch of segment joint

转动刚度值^[3]。

弹性铰单元的单元刚度矩阵为：

$$K^{(e)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_r & 0 & 0 & -k_r \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_r & 0 & 0 & k_r \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中， k_r 为管片接头的抗弯刚度，计算参见文献[5]。

1.3 弹性地基单元

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^[6]。所以，弹性地基变形能对整个体系变形能的贡献为：

$$I_d^{(e)} = \frac{1}{2} \int_l k_d \delta^2 dx, \quad (5)$$

式中， k_d 为地基法向刚度系数； δ 为地基的法向变形向量； l 为单元长度。

设梁单元的位移模式为： $\delta = N \delta$ ，则有 $\delta^2 =$

$\delta^T N^T N \delta$ ；所以 $I_d^{(e)} = \frac{1}{2} \int_l \delta^T N^T k_d N \delta dx$ ， N 、 δ 分别为杆单元的形函数和节点位移向量。取极值后得到地基对杆单元的刚度矩阵贡献为：

$$K_d^{(e)} = \int_l N^T k_d N dx. \quad (6)$$

式中， $K_d^{(e)}$ 为弹性地基梁的附加地基刚度矩阵。

综合以上3部分单元刚度就得到了整个梁-弹性铰-地基系统模型的单元刚度矩阵。

根据上述的模型理论公式，编制了相应的有限元程序 FHEF (Frame Hinge in Elastic Foundation)，程序框图见图2。

2 工程概况

某越江隧道工程设计方案拟定为盾构法圆形单层双管双向6车道隧道，衬砌环内径13.80 m，厚度70 cm，环宽2.0 m，错缝拼装为单层装配式钢筋混凝土衬砌结构。初步设计管片混凝土标号C60，其弹性模量为 $E = 3.6 \times 10^4$ MPa；每环由10块管片拼装而成，每块管片对应的圆心角为 $\theta_0 = 36^\circ$ ；每块管片纵向接缝由2组共6个螺栓连接，每个螺栓的横截面积 1017.36 mm^2 ，其弹性模量为 $E_L = 2.0 \times 10^5$ MPa。隧道穿越的地层主要为灰色淤泥质粘土、 μ_{1-1} 灰色粘土、 μ_{1-2} 灰色淤泥质粉质粘土、 μ_2 灰色粉质粘土。

拟建盾构隧道管片衬砌环分块方式如图3所示。

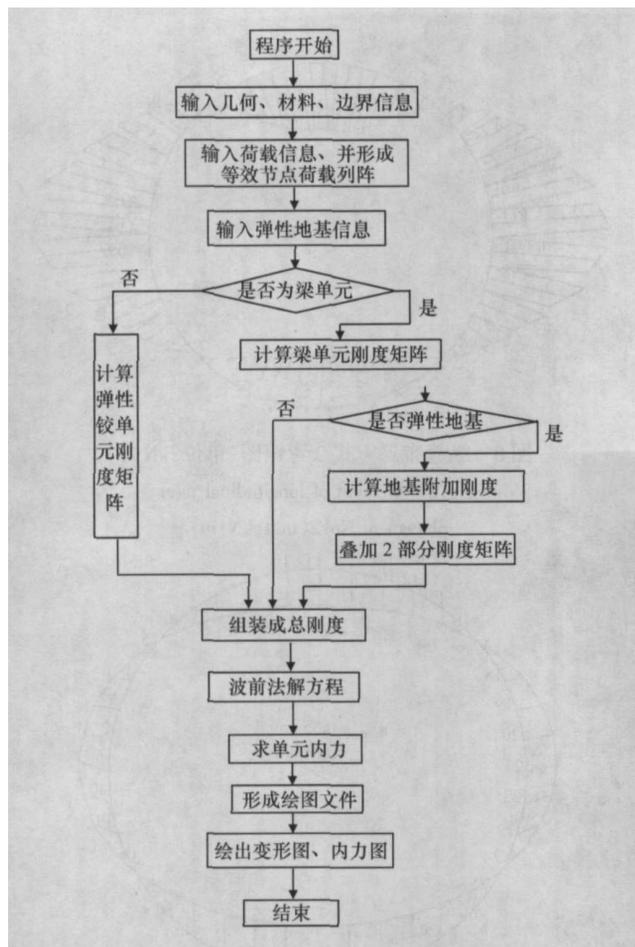


图 2 FHEF 程序框图

Fig. 2 Flow chart of the program FHEF

采用基于梁-弹性铰-地基系统模型的 FHEF 程序, 所采用的荷载计算简图参考国际隧道协会推荐的荷载模式^[5,7], 见图 4。

3 对比分析

为了研究盾构隧道管片衬砌环中接缝位置的变化对结构内力和变形的影响, 以便采用最佳的盾构隧道管片衬砌结构设计方案, 对本拟建工程的典型断面

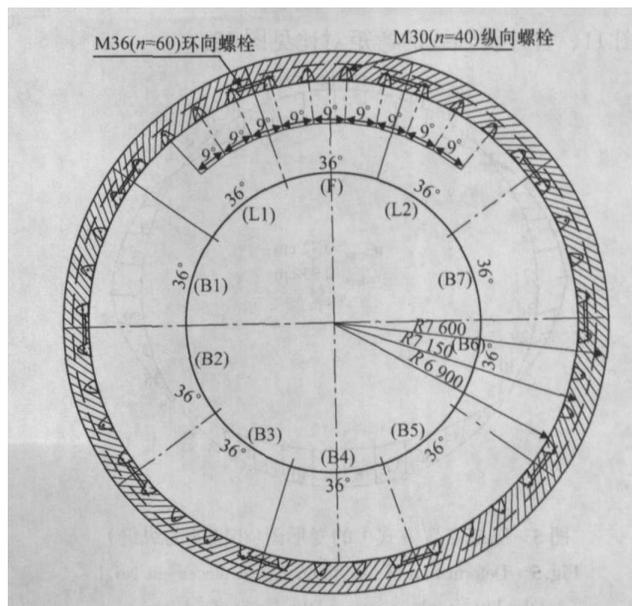


图 3 衬砌环分块图

Fig. 3 Partition mode of segment lining

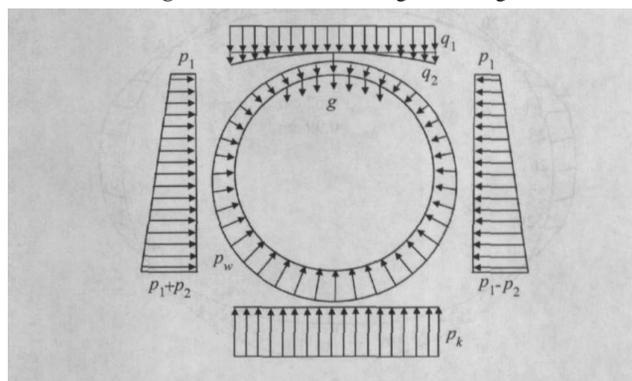


图 4 荷载模式简图

Fig. 4 Load pattern of the segment lining

E2 + 300.00 (埋深最大, 受冲刷最深, 水深最大) 在同一荷载、结构、地层条件下, 就纵向接缝 2 种不同布置方式和均质圆环共 3 种情况进行了计算分析, 典型断面结构计算参数^[8]见表 1。

表 1 典型横断面结构的计算参数

Tab. 1 Calculated parameters of typical transverse section

项目	土重 (/kN·m ⁻³)	拱顶土深/m	拱顶水深/m	摩擦角/rad	内聚力/kPa	地基抗力系数 (/kN·m ⁻¹)	正弯矩抗弯刚度 (/(MN·m/rad ⁻¹))	正弯矩抗弯刚度 (/(MN·m/rad ⁻¹))
里程 E2 + 300.00	18.00	30.45	11.20	0.279 1	15.0	2.55 × 10 ⁴	73.06	50.77

纵向接缝的 3 种布置方式为: 第 1 种纵缝布置方式如图 5 所示, 拱腰处是纵向接缝, 逆时针转动, 每隔 36 设置 1 条纵向接缝, 因此拱腰处有纵向接缝, 拱顶、拱底无纵向接缝; 第 2 种纵缝布置方式如图 6 所示, 将第 1 种方式逆时针转动 18°, 则拱顶、拱底处设置有纵向接缝, 拱腰处无纵向接缝; 第 3 种方式

是不设置纵向接缝, 采用均质圆环。

计算得到纵向接缝 2 种不同布置方式下管片衬砌结构网格与变形图分别如图 5、图 6 所示; 纵向接缝 2 种不同布置方式下衬砌结构的弯矩图如图 7、图 8 所示; 均质圆环的变形图见图 9、弯矩图见图 10; 2 种纵向接缝不同布置方式下纵向接缝张开量的对比见

图 11、管片绕轴线的弯矩对比见图 12。

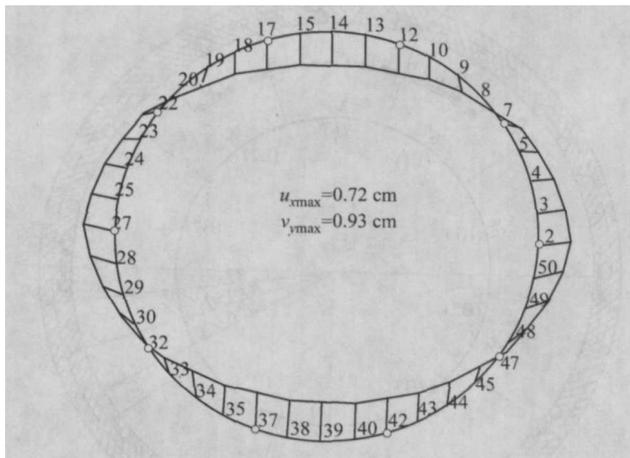


图 5 纵缝布置方式 1 的变形图(小圆圈为纵缝)

Fig. 5 Deformation of longitudinal joint placement No. 1 (the little circle represents the longitudinal joint)

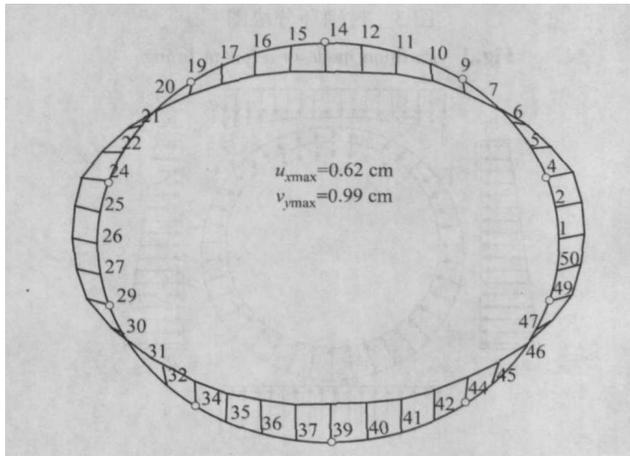


图 6 纵缝布置方式 2 的变形图(小圆圈为纵缝)

Fig. 6 Deformation of longitudinal joint placement No. 2 (the little circle represents the longitudinal joint)

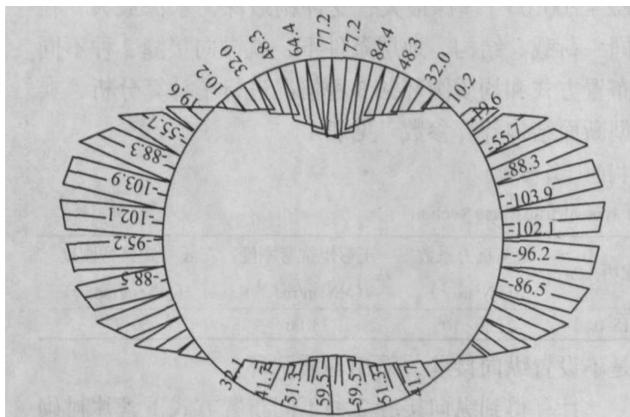


图 7 纵缝布置方式 1 弯矩图(单位 :kN·m)

Fig. 7 Moment of longitudinal joint placement No. 1 (unit :kN·m)

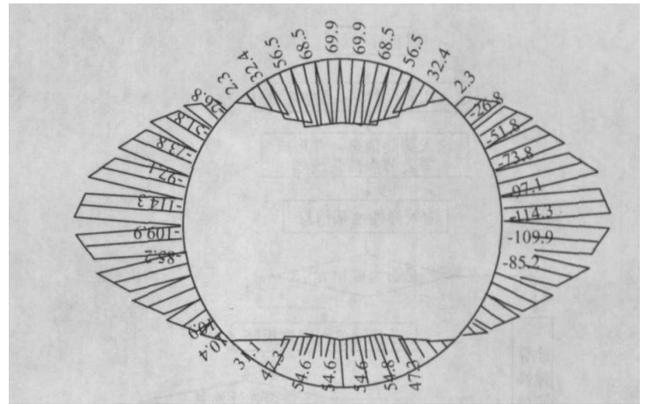


图 8 纵缝布置方式 2 弯矩图(单位 :kN·m)

Fig. 8 Moment of longitudinal joint placement No. 2 (unit :kN·m)

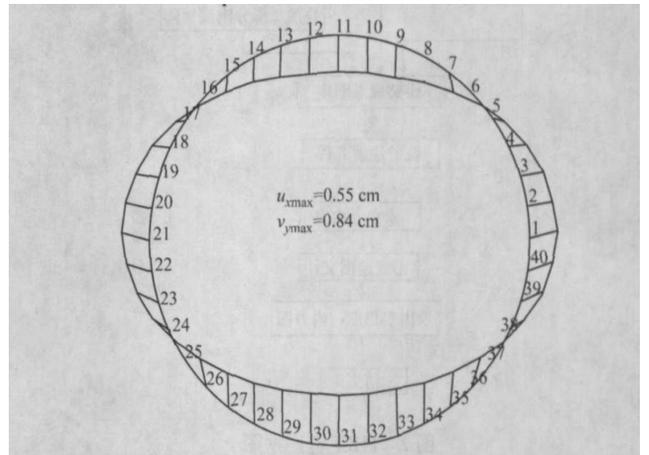


图 9 均质圆环的网格与变形图

Fig. 9 Mesh and deformation of homogeneous circle

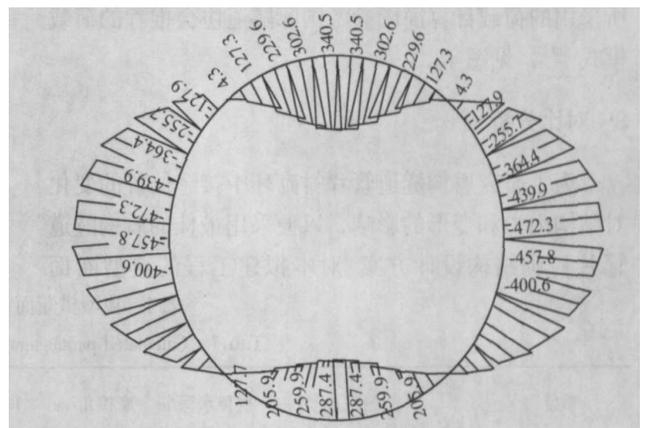


图 10 均质圆环的弯矩图(单位 :kN·m)

Fig. 10 Moment of homogeneous circle (unit :kN·m)

从图 5、图 6、图 9、表 2 可以看出,均质圆环的变形最小、弯矩最大;纵向接缝布置方式 2(拱顶处设置纵缝)下衬砌结构最大水平位移较布置方式 1 的小 13.89%、最大垂直位移较布置方式 1 的大 6.45%。从图 7、图 8、图 10、图 12、表 2 可以看出,纵向接缝布置方

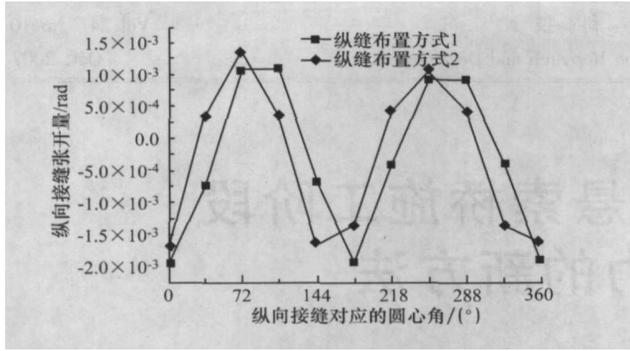


图 11 不同布置方式纵向接缝张开量对比

Fig. 11 Contrast of longitudinal joint relative rotation

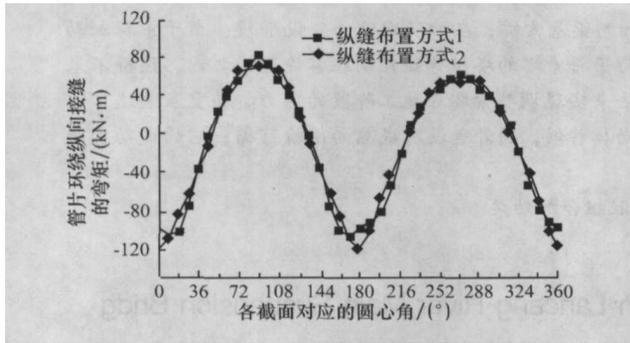


图 12 不同布置方式管片绕轴线的弯矩对比

Fig. 12 Contrast of moment around tunnel axis

式 2 下衬砌结构最大正弯矩较布置方式 1 的小 12.45%、最大负弯矩较布置方式 1 的大 11.66%；均质圆环的最大正、负弯矩要高出布置方式 1 的 3~4 倍。从图 11、表 2 可以看出,纵向接缝布置方式 2 下衬砌结构拱腰处最大接缝张开量较布置方式 1 的小 13.47%、拱顶处最大接缝张开量较布置方式 1 的大 22.7%。

表 2 2 种不同布置方式的纵缝变形与内力对比

Tab. 2 Contrast of deformation and inner force between longitudinal joint position No. 1 and No. 2

项目	水平最大位移 /cm	垂直最大位移 /cm	最大正弯矩 / (kN·m)	最大负弯矩 / (kN·m)	拱腰最大接缝张开量 /rad	拱顶最大接缝张开量 /rad
纵向接缝布置方式 1	0.72	0.93	81.1	-106.3	-1.93×10^{-3}	1.10×10^{-3}
纵向接缝布置方式 2	0.62	0.99	71.0	-118.7	-1.67×10^{-3}	1.35×10^{-3}
均质圆环	0.55	0.84	350.1	-476.8	-	-
方式 2 与方式 1 相比/%	-13.89	6.45	-12.45	11.66	-13.47	22.70
均质圆环与方式 1 相比/%	-23.61	-9.68	332.1	348.5	-	-

从图 5~图 12 可以看出,接缝位置对整个结构内力和变形的影响,接缝是对整个结构刚度的削弱,同一位置,接缝导致变形的增加、弯矩的减小。从表 2 可以看出,在纵向接缝 2 种不同布置方式下,最大

正弯矩的减小幅度和最大负弯矩的增加幅度相近;而水平方向最大位移的减小幅度比垂直方向最大位移的增加幅度要大,拱腰处最大接缝张开量的减小幅度要比拱顶处最大接缝张开量的增加幅度要小。所以在选取纵向接缝布置方式时应综合考虑,扬长避短。

4 结论

(1) 弹性铰单元具有一定的抗弯刚度,能够承担一定的弯矩,较好地反映了管片纵向接缝受力变形的基本特征,计算简单易行,是一种模拟管片接头的较好选择。

(2) FHEF 程序能考虑管片结构与土层的相互作用,可以非常方便地计算出工程设计十分关心的轴力、剪力、弯矩和接缝的相对转角,以便控制结构的变形和防水设计。

(3) 铰单元能模拟接缝对衬砌结构的刚度消散作用,体现在接缝处释放一定位移,弯矩有较大幅度的减小;在纵向接缝 2 种不同布置方式下,位移、弯矩的大小及发生位置有变化,但幅度不大,其弯矩仅为均质圆环算得的 22%~25%,应从结构设计和防水设计多个角度来确定纵向接缝位置。

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: 75 - 134.
- [2] Working Group No. 2 International Tunnelling Association. Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15 (3): 303 - 331
- [3] 胡志平, 罗丽娟. 盾构隧道横向受力分析的框架-弹性铰-全周地基系统模型 [J]. 岩土工程技术, 2003, 17 (3): 147 - 150.
- [4] 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 [J]. 岩土力学, 1998, 19 (2): 26 - 32.
- [5] 胡志平, 冯紫良, 刘学山. 盾构隧道衬砌结构稳定性风险分析研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2004, 32 (5): 596 - 600.
- [6] 冯紫良, 戴仁杰, 等. 杆系结构的计算机分析 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1991: 48 - 121.
- [7] 胡志平, 罗丽娟, 蔡志勇. 盾构隧道管片衬砌荷载模式比较分析 [J]. 岩土工程技术, 2004, 18 (1): 19 - 22.
- [8] 上海市地质勘察研究院. 上海市崇明越江通道工程工程地质调查报告 [R]. 上海: 上海市地质勘察研究院, 2001.
- [9] 胡志平, 罗丽娟, 蔡志勇. 盾构隧道管片衬砌的平板壳-弹性铰-地基系统模型 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (9): 1403 - 1408.
- [10] 伍振志, 王剑军. 浅埋软弱围岩双连拱隧道合理复合衬砌研究 [J]. 公路交通科技, 2007, 24 (2): 94 - 98.