

盾构管片接头模型的改进及管片内力的数值计算

侯公羽¹, 杨悦², 刘波¹

(1. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 2. 黑龙江科技学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要: 管片计算模型的建立主要是考虑接头和土层抗力两种因素对结构的影响。对惯用法模型的接头简化进行改进, 即将管片的各个截面处刚度按 EI 处理, 将其接头部位的刚度按 kEI 处理, 这样的管片接头模型更符合实际情况。结合北京地铁十号线工程的实例资料, 采用通用 ANSYS 程序对荷载结构法的惯用法模型及改进模型和地层结构法的均质圆环模型及改进模型进行详细的管片内力计算分析。数值计算结果表明, 对盾构管片接头模型的改进是有效的、可行的, 而且是必要的; 可以初步确定合理的管片接头刚度折减系数取值为 $1/100 \sim 1/1\ 000$ 。

关键词: 隧道工程; 管片内力; 惯用法模型; 均质圆环模型; 改进接头模型; 刚度折减; 数值计算

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 2 - 4284 - 08

IMPROVED JOINT MODEL OF SHIELD TUNNEL SEGMENTS AND NUMERICAL CALCULATION OF INNER FORCES

HOU Gongyu¹, YANG Yue², LIU Bo¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. Heilongjiang College of Technology, Harbin, Heilongjiang 150027, China)

Abstract: The key issue for establishing calculating model of segments is to consider the influence of the joint and ground resisting force to the structure. The simplification of joint in the routine method model is improved. The calculation model which treats all the cross-section stiffness of segments as EI and the joint stiffness of segments as kEI coincides with the actual situation. Combining with the real data of the project of Beijing Metro Line No.10, the segments inner forces are calculated by the routine method model and its improved model, homogenous ring model and its improved model respectively. According to the numerical calculation results, the improvement of the rotating stiffness of joint in shield tunnel segments are found effective and feasible and also necessary; it can preliminarily determine that the reasonable stiffness reduction factor value of the rotating stiffness of joint in shield tunnel segments is $1/100 - 1/1\ 000$.

Key words: tunneling engineering; segments inner forces; routine method model; homogeneous ring model; improved joint model; stiffness reduction; numerical calculation

1 引言

随着地铁建设的快速发展, 如何准确计算盾构衬砌管片的内力是管片设计的当务之急。

地铁管片采用装配式衬砌时, 衬砌结构是由圆弧形管片拼装成环, 每环之间逐一连接而成。管片与管片之间, 环与环之间通过螺栓连接, 对于如何估计管片接头的力学性态是一大难题^[1~3]。

衬砌结构计算模型的建立, 主要是考虑接头和

收稿日期: 2006 - 11 - 16; **修回日期:** 2006 - 12 - 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50304012, 50674095); 教育部博士点基金项目(20060290014); 北京市优秀人才培养资助项目(2007101600700414)

作者简介: 侯公羽(1965 -), 男, 博士, 1986年毕业于西安矿业学院采矿系矿井建设专业, 现任副教授, 主要从事岩土工程、岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: hgyht@sohu.com, hgyht@sina.com

土层抗力两种因素对结构的影响^[4]。

接头与土层被动抗力的假设各有 3 种^[5], 分别为: (1) 接头和管片的刚度相等; (2) 铰接, 接头转动刚度为 0; (3) 弹簧模拟接头; (4) 将土体被动抗力视为 0; (5) 按照假设分布; (6) 弹簧模拟。

将考虑地层抗力的假设和接头的假设组合即成 6 种模型, 分别是: (1) 自由变形圆环模型——(1), (4)组合; (2) 惯用法模型——(5), (5)组合; (3) 多铰圆环模型——(2), (5)组合; (4) 弹性铰模型——(3), (5)组合; (5) 弹性地基梁模型——(1), (6)组合; (6) 梁—弹簧模型——(3), (6)组合。

在管片设计中, 采用较多的是惯用法模型^[6]。在不考虑整体稳定性时, 这种模型计算的内力偏大、变形偏小^[7]。

管片接头造成的衬砌环整环刚度降低是盾构隧道衬砌设计中必须考虑的控制性因素之一。管片接头抗弯刚度综合反映了盾构隧道接头性能及其在外荷载作用下的变形大小和趋势, 目前主要通过现场试验确定, 尚无现成公式或图表可以遵循^[8]。

尽管管片接头抗弯刚度的确定得到了许多研究者的重视, 并取得了一定的成果^[1, 9~12], 但盾构隧道管片接头力学性能的研究尚处于起步阶段。

本文对现有计算模型的接头刚度简化提出了改进模型, 即对接头部位的刚度进行有效的折减, 以便真实再现盾构管片的工程实况。结合北京地铁十号线亮马河站—农展馆站区间段勘测与设计资料, 用 ANSYS 对荷载结构法的惯用法模型及本文改进模型和地层结构法的均质圆环模型及本文改进模型进行了详细的管片内力和变形计算, 得出了一些对地铁设计和施工有指导意义的结论。

2 荷载结构法的惯用法模型及改进模型的数值计算

2.1 惯用法模型及改进模型的建立

目前, 设计中常用的惯用法模型及其修正模型如图 1 所示。惯用法模型将管片的各个截面处刚度及其接头部位的刚度均按 EI 处理, 修正惯用法模型考虑到接头刚度的降低对管片的影响, 将惯用法模型管片的各个截面处刚度及其接头部位的刚度 EI 均同等程度地降低到 kEI 。本文的改进惯用法模型将管片的各个截面处刚度按 EI 处理, 将其接头

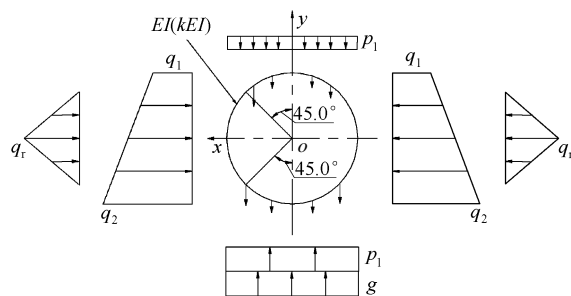


图 1 惯用法模型及其修正模型

Fig.1 Routine method model and its modified model

部位的刚度按 kEI 处理, 这样更符合实际情况, 见图 2。

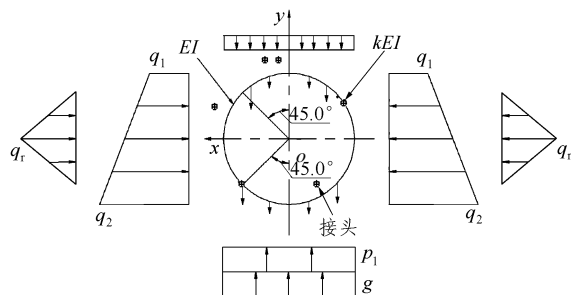


图 2 改进的接头模型

Fig.2 Improved joint model in the context

2.2 工程实例及 ANSYS 计算的实现

2.2.1 工程实例

本文以北京地铁十号线一期工程亮马河站—农展馆站区间(区间里程: K16+959.0~K17+645.3)段隧道为工程背景, 地质参数如表 1 所示。地下水位标高为 10.1 m, 洞的中心距离表面土层 33 m, 洞口直径 6.0 m。管片的拼装形式如图 3 所示。

表 1 北京地铁十号线土层参数

Table 1 Soil parameters of Beijing Metro Line No.10

土层类型	标高/m	重度 /($kN \cdot m^{-3}$)	弹性 模量 /MPa	黏聚力 /kPa	摩擦角 /($^{\circ}$)	泊松比
人工填土	± 0.00	17.0	10	10	8	0.40
粉质黏土	-1.50	20.0	10	38	15	0.30
黄色砂土	-10.10	20.5	30	10	30	0.25
黄色黏土	-13.40	19.5	15	50	20	0.33
黄色砂土	-21.50	20.5	30	10	30	0.25

2.2.2 惯用法模型的 ANSYS 计算实现

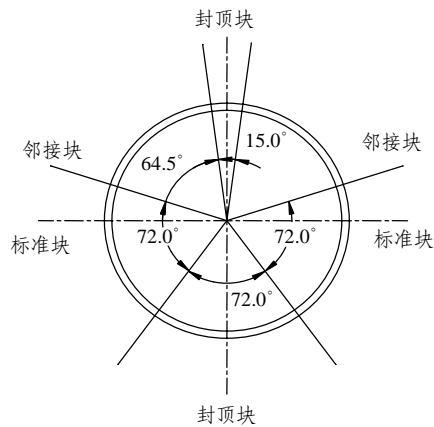


图3 管片拼装图

Fig.3 Segment erection diagram

惯用法模型如图1所示。管片材料为C50混凝土，整个衬砌6块管片看作一个整体圆环，材料类型用弹性材料、单元类型取BEAM3^[13]，材料参数取实际值，见表2。模型所受荷载值经换算后^[7]见表3。

表2 衬砌结构材料参数

Table 2 Material parameters of lining structure

单元类型	弹性模量 /GPa	泊松比	重度 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	面积 / m^2	高度 /m	惯性矩 / m^4
BEAM3	34.5	0.3	2 500	0.3	0.3	0.002 25

表3 衬砌结构承受荷载

Table 3 Load acting on lining structure kPa

土压力	水压力	水平土压力 矩形部分	水平土压力 三角形部分	水平侧向 抗力	自重反力
384	169	297	87	176	23.55

边界条件和加载方法。本文模型取每1°圆心角对应一个管片单元，即管片单元长度为52mm。每个接缝处的连接取为一个单元。在管片衬砌最下端的一个节点处采用固定约束，即ALL DOF。由于在ANSYS中给管片惯用法模型施加荷载是个难点，且与圆环上各点的关系是任意的。试用了ANSYS中几种常见加载方法^[13]，如用函数法和极坐标法加载等，均无法实现在圆上各点加载。为此，本文编制了专用的加载程序来处理加载问题。

2.2.3 本文改进惯用法模型的ANSYS计算实现

改进惯用法模型如图2。接头部位的刚度折减为6种量级的系数，见表4。

表4 接头刚度折减系数

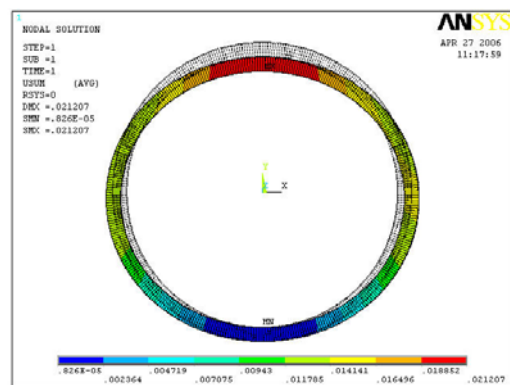
Table 4 Reduction factor of joint stiffness

折减系数	接头刚度值/(10^{-6}m^4)
1/3	750.000
1/10	225.000
1/30	75.000
1/100	22.500
1/1 000	2.250
1/10 000	0.225

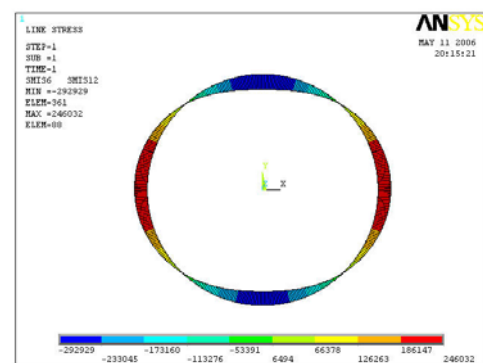
2.3 惯用法模型及本文改进模型的计算结果分析

惯用法模型及本文改进模型的内力分布图规律基本相同，只有数据上的大小差异。惯用法模型的内力分布图见图4，本文改进模型数值计算结果见表5(表中：弯矩以外侧受拉为正，轴力以受拉为正，剪力以使微段顺时针方向转动为正)。

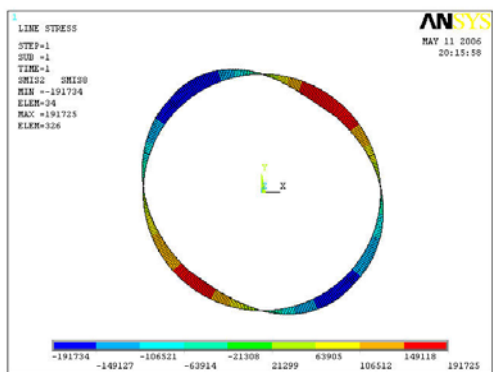
(1) 变形分析。由图4(a)和表5可知，当接头刚度折减系数由1减小到1/10 000时，衬砌竖向收敛变形从21mm增大到59mm，水平收敛变形从-23



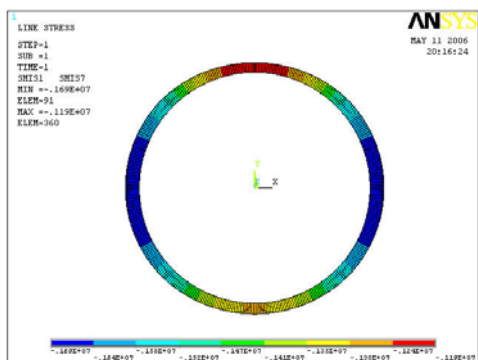
(a) 变形图(单位: mm)



(b) 弯矩图(单位: N·m)



(c) 剪力图(单位: N)



(d) 轴力图(单位: N)

图 4 惯用法模型的内力图

Fig.4 Schemes of inner forces of routine method model

表 5 惯用法模型及其改进模型数值计算结果

Table 5 Numerical calculation results by routine method model and its improved model

折减系数	最大竖向位移/mm	最大弯矩/(kN·m)	最大弯矩/(kN·m)	最大剪力/kN	最大轴力/kN
1	21.2	246	-293	-192	-1 690
1/3	22.9	247	-289	-191	-1 690
1/10	23.4	252	-275	-189	-1 690
1/30	24.2	260	-284	-186	-1 690
1/100	26.3	272	-270	-181	-1 690
1/1 000	34.1	282	-313	-180	-1 690
1/10 000	59.9	284	-315	-180	-1 690

mm 增大到-63 mm(负号表示膨胀变形)。可见, 接头刚度越小, 结构变形越大。

(2) 弯矩分析。由图 4(b)和表 5 可知, 最大正弯矩截面均在两腰稍微偏上处, 接头刚度折减系数从 1 减小到 1/10 000 时, 最大正弯矩截面位置及数

值变化不大。当接头刚度折减系数为 1, 1/3 和 1/10 时, 最大负弯矩截面在拱顶, 当接头刚度折减系数小于等于 1/30 时, 最大负弯矩截面均在拱底, 但数值变化不大。这是一个值得注意的现象。

(3) 剪力分析。由图 4(c)和表 5 可知, 剪力最大值均出现在与竖向夹角 34°处截面上。当接头刚度折减系数从 1 降低到 1/10 000 时, 其值变化不大, 说明设计时可以不考虑接头刚度对剪力的影响。

(4) 轴力分析。由图 4(d)和表 5 可知, 轴力最大值均出现在两腰, 且均为 1 690 kN(压力)。说明设计时可以不考虑接头刚度对轴力的影响。

3 地层结构法的均质圆环模型及本文改进模型的数值计算

3.1 均质圆环模型和改进模型的建立及 ANSYS 计算的实现

3.1.1 结构荷载工况的确定

地层水平方向取 10 倍洞径, 洞口上覆土层边界取其实际深度, 洞口下边界取 2 倍洞径。即所取土层范围为 60 m×48 m(长×宽), 见图 5。衬砌上的荷载主要是土层和衬砌自重及地表活荷载。土层参数见表 1, 土层单元类型取 PLANE42。衬砌结构材料参数见表 2, 衬砌单元类型仍取 BEAM3。

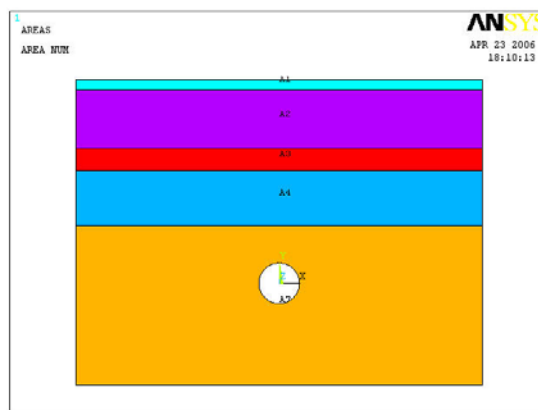


图 5 衬砌结构计算模型

Fig.5 Computing model of lining structure

3.1.2 模型的建立及 ANSYS 实现

采用二维平面单元 PLANE42 模拟土层, 采用 BEAM3 单元模拟管片。单元尺寸: 第 1, 3 层土 50 cm×30 cm, 第 2 层土 50 cm×28.7 cm, 第 4 层土 50 cm×27 cm, 第 5 层土 40 cm×23.5 cm, 衬砌划分 360 个单元, 衬砌及其周围土层的单元网格的局部图形

见图 6。

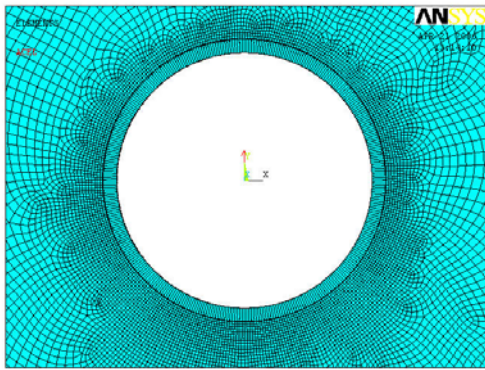


图 6 均质圆环和周围地层模型的网格局部图
Fig.6 Part of mesh picture in the model of homogenous ring and surrounding soil

约束条件：土层的两侧加 $UX = 0$ ，即限制土层两侧水平方向位移，土层下边界加 $UY = 0$ ，即土层下边界限制其竖直方向位移。

荷载：地表超载取 20 kPa，重力加速度为 10 m/s^2 。改进均质圆环模型中，有关参数同均质圆环模型，其接头部位的简化同节 2.2.3。

3.2 均质圆环模型和改进模型的计算结果分析

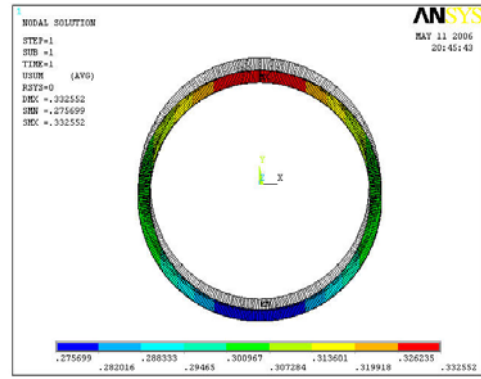
均质圆环模型的内力图见图 7，改进模型的内力图见图 8。改进模型的数值计算结果见表 6(表中弯矩以外侧受拉为正，轴力以受拉为正，剪力以使微段顺时针方向转动为正)。由图 7, 8 和表 6 可以得出以下结论：

(1) 变形分析。衬砌最大位移总是发生在拱顶截面。刚度折减从 1 减小到 1/10 000 时，衬砌结构竖向收敛变形从 57 mm 增大到 102 mm，水平收敛变形从 -52 mm 减小到 -113 mm。变形随着接头刚度折减系数的减小而增大，即接头刚度越小，变形越大。

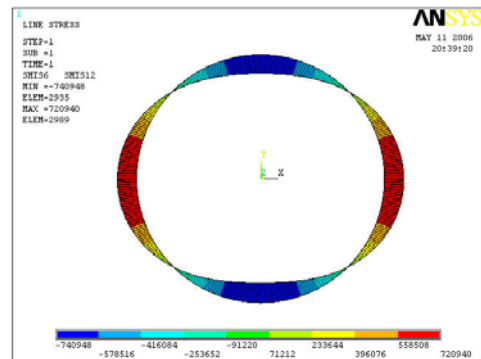
(2) 弯矩分析。随着接头刚度折减系数的减小，最大正弯矩截面位置由两腰上侧逐渐下降。当折减系数从 1 减小到 1/10 000 时，最大正弯矩值降低约 48%，说明接头刚度对管片最大正弯矩影响显著。

最大负弯矩均出现在衬砌底部截面。当折减系数从 1 减小到 1/10 000 时，最大负弯矩绝对值降低约 37%，说明接头刚度对管片最大负弯矩影响显著。

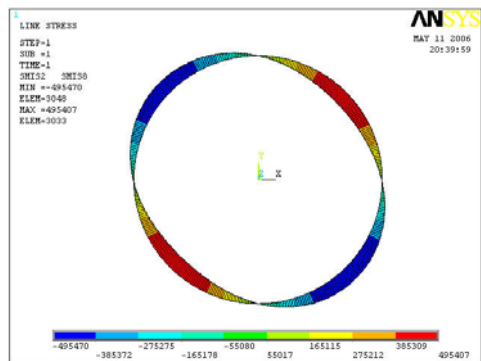
(3) 剪力分析。剪力随接头刚度的变化波动也明显，当折减系数从 1 降低到 1/10 000 时，剪力最大值的绝对值降低约 26%，且剪力控制截面越来越



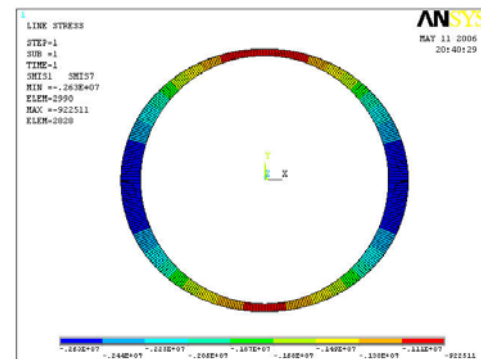
(a) 变形图(单位: mm)



(b) 弯矩图(单位: N·m)

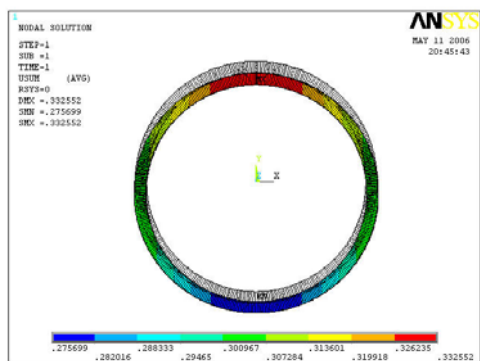


(c) 剪力图(单位: N)

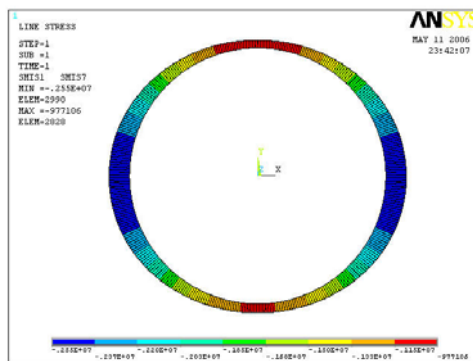


(d) 轴力图(单位: N)

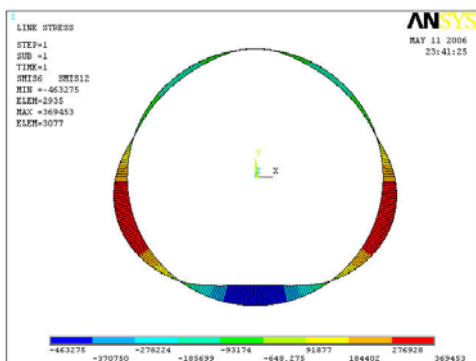
图 7 不考虑接头影响时内力图
Fig.7 Diagrams of inner forces without considering the effect of joint



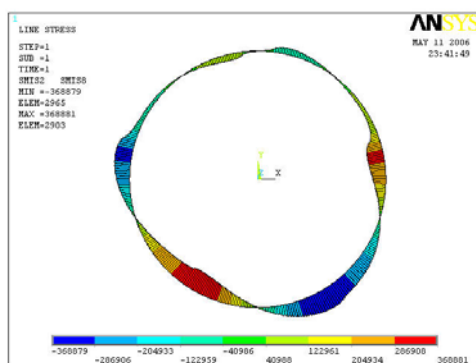
(a) 变形图(单位: mm)



(d) 轴力图(单位: N)



(b) 弯矩图(单位: N · m)



(c) 剪力图(单位: N)

图 8 接头刚度折减为管片的 1/10 000 时的内力图
Fig.8 Diagrams of inner forces with stiffness of joint discounted to one thousandth of stiffness of segments

靠近拱底截面。

(4) 轴力分析。衬砌上各点的轴力都表现为压力, 在衬砌的两腰处截面最大, 顶底处截面最小。轴力随接头刚度的变化波动甚微, 说明可以不考虑接头刚度对轴力的影响。

4 荷载结构法和地层结构法的改进模型的数值计算结果对比分析

(1) 最大弯矩对比分析。由图 9(a), 9(b)知, 地层结构法计算的最大弯矩值绝对值比荷载结构法计算的值大。接头刚度折减系数越大, 二者的最大绝对值相差越大; 折减系数越小, 二者的最大绝对值相差越小。接头刚度折减系数对荷载结构法的影响不显著, 对地层结构法的影响显著。说明, 在地层结构法中更要慎重选取接头的刚度。

(2) 最大剪力对比分析。由图 9(c)知, 地层结

表 6 均质圆环模型及其改进模型数值计算结果

Table 6 Numerical calculation results by homogeneous ring model and its improved model

折减系数	最大变形值/mm	最小变形值/mm	最大正弯矩/(kN · m)	最大负弯矩/(kN · m)	最大剪力值/kN	最大轴力值/kN
1	332.5	275.7	720.9	-740.9	495.4	2 630
1/3	334.5	274.9	713.2	-736.1	490.6	2 610
1/10	337.4	274.4	688.0	-722.0	478.5	2 600
1/30	343.9	273.4	629.8	-686.5	450.6	2 590
1/100	354.5	271.8	522.3	-610.8	418.8	2 580
1/1 000	368.7	269.7	392.3	-490.8	379.5	2 550
1/10 000	371.2	269.2	369.5	-463.3	368.9	2 550

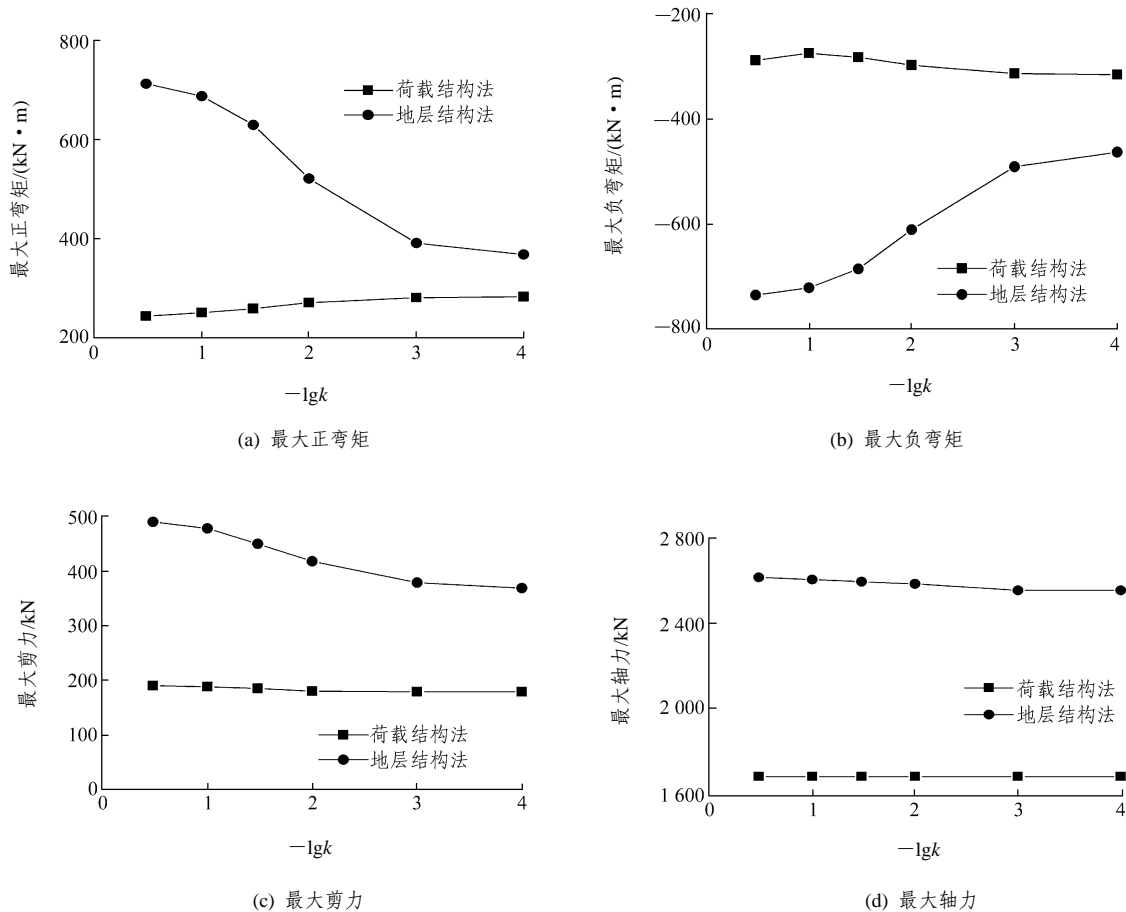


图9 管片内力随接头刚度折减系数 k 变化的关系曲线
 Fig.9 Relation curves between segment inner forces and reduction factor k of joint stiffness

构法计算的最大剪力值比荷载结构法计算的大；地层结构法中接头刚度折减系数对剪力的影响较大，荷载结构法中接头刚度折减系数对剪力的影响不明显。

(3) 最大轴力对比分析。由图 9(d)可知，地层结构法计算的最大轴力值比荷载结构法计算的大；接头刚度折减系数对轴力的影响甚微。

5 结论

通过对荷载结构法的惯用法模型及本文改进模型、地层结构法的均质圆环模型及本文改进模型进行的 ANSYS 数值计算分析，得出主要结论如下：

(1) 工程实例数值计算表明，本文对盾构管片接头模型进行的刚度折减是有效的、可行的，而且是必要的。

(2) 荷载结构法的惯用法模型和地质结构法的均质圆环模型的计算结果存在较大的分歧，说明发展地层结构法是必要的、紧迫的。计算结果表明：

- ① 在荷载结构法的惯用法模型中，接头刚度大小对管片变形的影响较大，对负弯矩的截面位置有很大影响，对弯矩值大小、剪力和轴力的影响不明显；
- ② 在地质结构法的均质圆环模型中，接头刚度大小对管片变形、弯矩和剪力都有很大影响，对轴力几乎无影响；
- ③ 地层结构法计算的内力值均比荷载结构法计算的内力值大。

(3) 综合考虑现场管片接头的连接工艺和工况以及本文的数值计算结果，可以初步确定管片接头刚度折减系数的合理取值为 $1/100 \sim 1/1000$ 。这一结论还有待于进一步地深入研究、验证和完善。

参考文献(References):

[1] 蒋洪胜. 盾构法隧道管片接头的理论研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2000.(JIANG Hongsheng. Theoretical study of rotating stiffness of joint in shield tunnel segments[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2000.(in Chinese))

- [2] 朱世友. 国内地铁盾构区间隧道管片结构设计的现状与发展[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(6): 23 - 28.(ZHU Shiyu. Present status and development of segment design for the shield driven running tunnel of metro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(6): 23 - 28.(in Chinese))
- [3] 朱 伟, 胡如军, 钟小春. 几种盾构隧道管片设计方法的比较[J]. 地下空间, 2003, 23(4): 352 - 356.(ZHU Wei, HU Rujun, ZHONG Xiaochun. Comparative study of several segment design methods for shield tunnels[J]. Underground Space, 2003, 23(4): 352 - 356.(in Chinese))
- [4] 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.(HU Zhiping, LUO Lijuan, CAI Zhiyong. Analysis of the different load models in the lining segments of shield tunnel[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2004, 18(1): 19 - 22.(in Chinese))
- [5] 汤 漩, 黄宏伟. 盾构隧道衬砌设计中几个问题的研究[J]. 地下空间, 2003, 23(2): 210 - 215.(TANG Xuan, HUANG Hongwei. A study on several key topics of shield tunnel lining design[J]. Underground Space, 2003, 23(2): 210 - 215.(in Chinese))
- [6] 夏明耀, 曾进伦. 地下工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.(XIA Mingyao, ZENG Jinlun. Manual of design and construction of underground engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997.(in Chinese))
- [7] 杨 悦. 盾构管片设计的内力计算模型研究[硕士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学, 2006.(YANG Yue. Study on endogenetic force calculation model for shield tunnel segment design[M. S. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2006.(in Chinese))
- [8] 曾东洋, 何 川. 地铁盾构隧道管片接头抗弯刚度的数值计算[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(6): 744 - 748.(ZENG Dongyang, HE Chuan. Numerical simulation of segment joint bending stiffness of metro shield tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(6): 744 - 748.(in Chinese))
- [9] 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[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 190 - 194.(ZHU Hehua, CUI Maoyu, YANG Jinsong. Design model for shield lining segments and distribution of load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 190 - 194.(in Chinese))
- [10] 张厚美. 装配式双层衬砌接头荷载试验与结构计算理论——南水北调中线穿黄隧洞结构计算模型研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2000.(ZHANG Houmei. Research on the loading test and structural models of prefabricated segment reinforced by secondary lining[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2000.(in Chinese))
- [11] 朱 虹, 潘国庆. 装配式圆形衬砌接头刚度计算方法[J]. 中国市政工程, 2004, (5): 32 - 34.(ZHU Hong, PAN Guoqing. Calculation method for the rigidity of assembly circular lining joints[J]. China Municipal Engineering, 2004, (5): 32 - 34.(in Chinese))
- [12] 蒋洪胜, 侯学渊. 盾构法隧道管片接头转动刚度的理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1 574 - 1 577.(JIANG Hongsheng, HOU Xueyuan. Theoretical study of rotating stiffness of joint in shield tunnel segments[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1 574 - 1 577.(in Chinese))
- [13] 李 权. ANSYS在土木工程中的应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.(LI Quan. Application of ANSYS in civil engineering[M]. Beijing: People's Posts and Telecom Press, 2005.(in Chinese))