

文章编号: 1009 - 6582 (2005) 06 - 0020 - 04

# 装配式管片接头受力平面有限元分析

钟小春 朱 伟 郭 涛 韩月旺  
(河海大学土木工程学院, 南京 210098)

**摘 要** 在盾构法隧道设计中, 评价接头刚度对管片内力的影响是隧道设计的一个十分重要的内容。由于管片接头或整环管片试验资料过少, 很难得到普遍性的接头刚度规律。目前工程中大多根据经验将接头刚度确定为某一常数。针对上述问题, 文章通过对广州地铁三号线无传力衬垫的盾构隧道管片接头进行了接触问题的非连续弹塑性有限元分析, 得出了接缝转角与弯矩的关系曲线。这种关系曲线接近双直线形状, 因此可以简化为双直线关系来确定接头刚度。计算的结果反映出管片接头转角与管片内力之间的非线性关系的规律, 为管片设计中的关键参数选择提供了依据, 具有较大的实用和参考价值。

**关键词** 盾构隧道 管片接头 有限元分析 接头刚度

**中图分类号**: U451<sup>+</sup>. 4 **文献标识码**: A

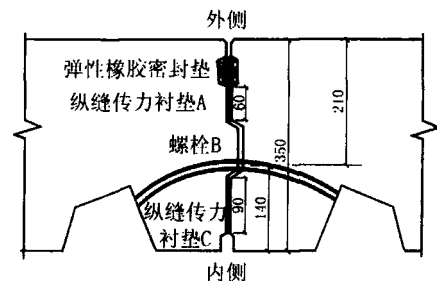
## 1 概 述

管片接头是装配式管片衬砌的最薄弱环节, 在很大程度上控制着衬砌管片环整体的变形和承载力, 因此接头的受力分析及其刚度的确定方法成了管片设计中一个非常重要的问题。目前管片设计大多采用修正惯用法<sup>[1]</sup>, 而其中最为关键的参数就是管片环等效弯曲刚度有效率<sup>[2]</sup>, 其值选择将直接影响管片内力的计算结果<sup>[2]</sup>。目前研究接头刚度大多针对管片四周粘贴传力衬垫的管片接头型式进行受力分析<sup>[3,4]</sup>, 如图 1(a)所示; 但随着盾构施工技术和工艺的发展, 有时也出现省略传力衬垫的管片接头构造, 如广州地铁管片, 管片间并没有粘贴传力衬垫, 如图 1(b)所示。这两种管片构造差异导致其受力的特征将完全不同, 鉴于此, 文章针对后一种管片接头构造的接头刚度开展了以下工作: 一是建立了管片接头受力分析模型, 即接触问题的弹塑性有限元分析法; 二是利用建立的有限元分析法对广州地铁管片接头进行了受力分析, 以提供管片设计所必需的管片接头刚度参数; 三是与粘贴传力衬垫的管片接头刚度进行了比较分析, 找出它们之间的差异, 同时明确其各自的应用场合。

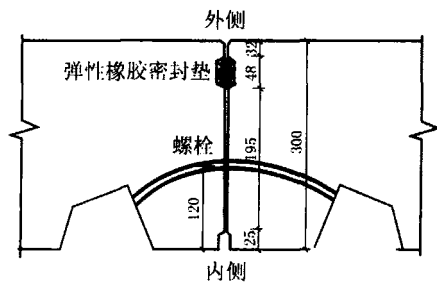
## 2 管片接头有限元分析模型的建立

修改稿返回日期 2005 - 06 - 07

作者简介: 钟小春, 男, 讲师。



(a) 南京地铁粘贴传力衬垫的管片环缝接头



(b) 广州地铁无传力衬垫的管片环缝接头

图 1 管片环缝接头示意 (单位: mm)

Fig 1 Schematic view of the joints of a segment lining

### 2.1 广州盾构隧道管片接缝构造

管片的接缝有设榫槽和不设榫槽两种, 前者在软土地层中能够提高管片的安装精度, 有利于控制

变形;后者便于施工安装,能加快施工进度。因此,目前地铁隧道管片大多采用后者。结合广州地层较硬的特点,若接缝设榫槽,则当施工控制不当时,极易导致接缝处开裂,这种开裂发生在管片背面将是难以发现且无法修补的;另一方面,采用大宽度管片+错缝拼装+榫槽的管片形式,亦将增加施工的难度。采用宽的管片不仅可以提高施工效率,而且可以减少管片环向接缝、增加防水效果。在广州地铁工期较短的情况下,其管片采用宽 1.5 m 的无榫槽管片,可以提高 22% 的施工效率<sup>[5]</sup>。鉴于大塘—客村和大塘—沥 郊区间地层较好、后期变形小的特点,管片环、纵缝均不设榫槽。广州地铁纵向管片接头构造如图 1(b)所示,在管片接头的外侧设有防水的橡胶密封垫,管片内力主要通过接缝两侧光滑的混凝土面接触来传递。

2.2 单元划分

单元的划分应满足计算精度的要求,在管片内力作用下主要变形发生在接缝处,故接缝附近的单元应加密,有限元分析网格如图 2 所示。对钢筋混凝土管片采用 8 结点的平面单元,接缝之间设定面面接触单元,这种面面接触单元可以支持低阶和高阶单元,支持大滑动和摩擦大变形,没有表面形状的限制。同时,设置目标面自动移动到初始接触等建模控制,以最大程度消除接触面的相互浸入对计算的误差。弯曲螺栓采用杆单元模拟。管片内力的加载方法如图 2 所示,管片两端的水平均布荷载模拟接缝轴力,竖向两结点集中力可模拟管片接头承受的弯矩作用。管片接头有限元分析的单元类型及特征如表 1 所示。

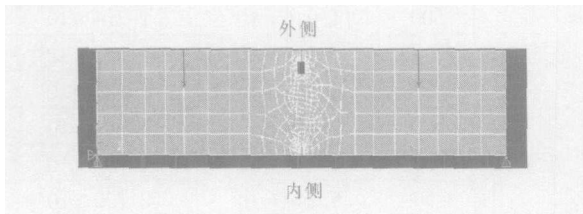


图 2 接头有限元网格及加载方法

Fig 2 Finite element mesh of a joint and method of loading

表 1 有限元分析的单元类型及特征

Table 1 Types of finite elements and their properties

名称	类型	特征
混凝土	2D 平面单元	平面应变单元
螺栓	杆单元	只承受拉力,设定初始应变模拟螺栓预紧力 (100 kN)
接缝	接触单元	支持滑动等大变形分析

2.3 本构模型及主要参数

在计算分析中,混凝土、螺栓采用理想弹塑性本构关系,模型参数的取值如表 2 所示。弹性橡胶密封垫的力学特性表现为明显非线性,如图 3 所示。接缝接触单元的法向刚度取为 10~20 倍的混凝土弹性模量,张开刚度设为 0,同时设定摩擦无穷大,从而使得本管片接头受力问题限定在接头受压紧闭或受拉张开的实际受力状态。

表 2 材料主要参数

Table 2 Main parameters of materials

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	屈服应力 /MPa
C50 混凝土	34.5	0.167	33.1
螺栓	210	0.30	480

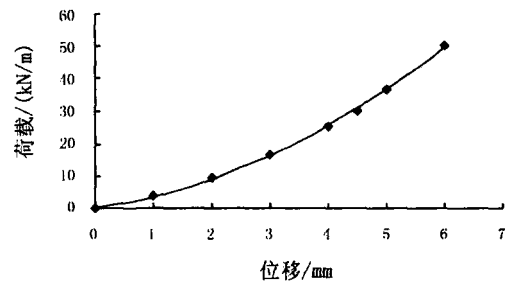


图 3 管片接头弹性橡胶密封垫轴向压缩试验荷载 - 位移关系曲线

Fig 3 Relationship between loadings and displacements in the axial compression test for the elastic gaskets of segment joints

3 计算结果分析

3.1 接缝转角及接头刚度

管片接头是管片环薄弱环节,接头刚度是影响管片环变形与内力的主要参数之一。接缝转角可由接头外缘和内缘的节点位移之差值与管片高度的比值得出。由接头弯矩与接缝转角的比值,可以得出接头刚度。

3.2 计算结果及分析

由于接头面靠近管片外缘一侧设置了止水橡胶带,而止水带的刚度远小于混凝土的刚度,同时为了便于螺栓的安装及减少对管片截面的削弱,螺栓安装的位置偏于内侧,因此,需考虑弯矩方向不同对管片接头刚度的影响。本文中规定:弯矩使管片接头内缘受拉、外缘受压为正,反之为负。

管片接头在正、负弯矩和轴力的作用下,内力与接缝转角的关系曲线见图 4和图 5。在轴力一定的情况下,当弯矩较小时,此时偏心距处于接头断面形心核区域内,接头全断面处于受压状态,螺栓受力有所降低,接缝转角随着弯矩的增加呈线性增长关系;当弯矩增加到一定程度,接头受拉侧开始逐渐张开,整个断面不再是单一的压缩变形,接缝转角的增加随着弯矩呈快速增长趋势,弯矩与接缝转角的关系逐渐表现出了非线性的特征;当弯矩进一步增加时,螺栓的受力将由减少逐渐变为增加的趋势,并成为抑制接缝转角进一步快速增长的主要因素,使得接缝转角随着弯矩的增加又一次保持线性关系,只是此时的曲线斜率(接头转动刚度)有很大的降低。从图中还可以看出,随着接缝轴力的增加,接头承载力有较大提高,轴力从 500 kN 增加到 1 500 kN 时,接头的承载力大约增加了一倍。这主要是由于接头轴力的增加,可以延迟接头受拉侧张开的情况,从而减少其最终接头张开的角度。

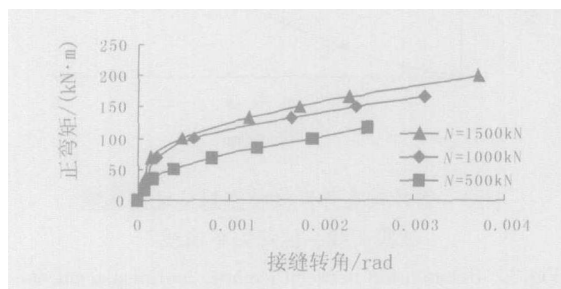


图 4 正弯矩作用下接缝转角与弯矩的关系

Fig 4 Relationship between the angles of joint rotation and moments under the action of positive bending moments

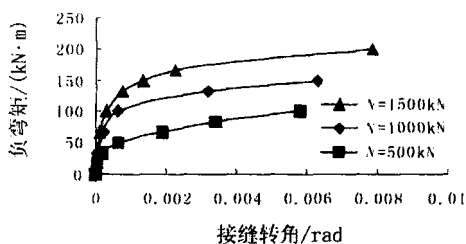


图 5 负弯矩作用下接缝转角与弯矩的关系

Fig 5 Relationship between the angles of joint rotation and moments under the action of negative bending moments

由图 4和图 5还可以看出,弯矩与接缝转角的关系曲线比较接近双直线型,从而可以建立双直线接头刚度模型,如图 6所示;模型包含三个关键参数,即拐点弯矩  $M_1$ 及弯曲刚度  $K_1$ 和  $K_2$ 。三个参数

取值如表 3所示。拐点弯矩表示的是在一定接头轴力的作用下,接头受拉侧开始张开时的临界接头弯矩;弯曲刚度  $K_1$ 表示的是整个接头截面均处于受拉时的接头刚度;弯曲刚度  $K_2$ 表示的是截面受拉侧张开时的接头刚度。

由于接头弹性橡胶密封垫的存在削弱了管片接头外侧受压的承载力,因此正弯矩作用时的接头刚度  $K_1$ 比负弯矩作用时的接头刚度小 5%左右。为了减少螺栓对管片的削弱,一般采用弯曲螺栓并且设置在接头截面中心偏于内缘位置,当螺栓的受拉作用得到较好的发挥时,有利于增加接头刚度,因此正弯矩时的接头刚度  $K_2$ 为负弯矩时的 2~4 倍左右。

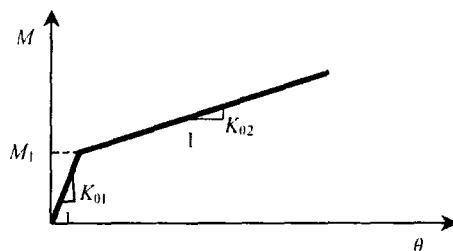


图 6 接缝转角与弯矩的简化双直线关系

Fig 6 Simplified bilinear relationship between the angles of joint rotation and moments

表 3 广州地铁管片接头刚度有限元分析结果

Table 3 Calculated results of joint stiffnesses of Guangzhou metro

类别	轴力 /kN	接头刚度 / (kN · m / rad)	
		$K_1$	$K_2$
正弯矩	500	$1.946 \times 10^5$	$1.314 \times 10^4$
	1 000	$3.091 \times 10^5$	$1.335 \times 10^4$
	1 500	$4.467 \times 10^5$	$1.343 \times 10^4$
负弯矩	500	$1.856 \times 10^5$	$2.540 \times 10^3$
	1 000	$2.991 \times 10^5$	$2.707 \times 10^3$
	1 500	$5.244 \times 10^5$	$2.720 \times 10^3$

以上分析过程也可以从图 7和图 8螺栓的受力全过程中得到验证。当螺栓在管片接头承受较小弯矩时,螺栓的受力不是增加,而是减少,这说明整个断面均处于压缩状态,因此接头接缝转角与弯矩呈线性关系。随着接头弯矩的增加,接头断面出现了受拉侧张开的情况,螺栓受力逐渐线性增加,接缝转角与弯矩的关系由非线性逐渐转化为线性;随着接缝转角持续增加,螺栓的受力不断增加直至屈服。

## 4 广州地铁与南京地铁管片接头刚度的比较分析

根据参考文献 [6], 粘贴传力衬垫的南京地铁隧道管片接头刚度如表 4 所示。

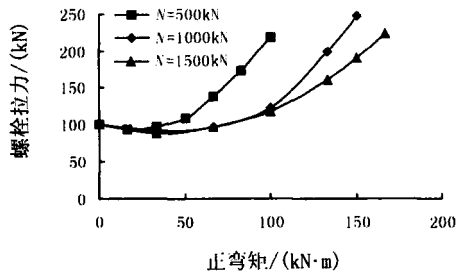


图 7 正弯矩作用下螺栓拉力与弯矩的关系

Fig 7 Relationship between bolt tension and moments under the action of positive moments

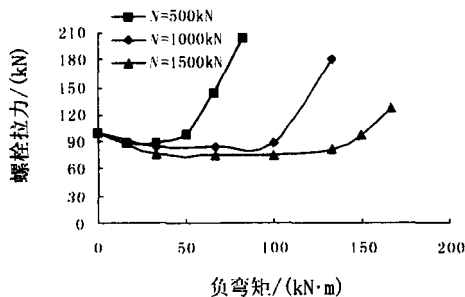


图 8 负弯矩作用下螺栓拉力与弯矩的关系

Fig 8 Relationship between bolt tension and moments under the action of negative moments

表 4 南京地铁管片接头刚度解析结果

Table 4 Analyzed results of the segment joint stiffness of Nanjing metro

类别	轴力 /kN	旋转弹簧刚度 / (kN · m / rad)	
		$K_1$	$K_2$
正弯矩	400	$7.5 \times 10^4$	$3.779 \times 10^3$
	800	$7.5 \times 10^4$	$5.968 \times 10^3$
	1 200	$7.5 \times 10^4$	$9.420 \times 10^3$
	1 500	$7.5 \times 10^4$	$1.311 \times 10^4$
负弯矩	400	$7.283 \times 10^4$	$3.061 \times 10^3$
	800	$1.008 \times 10^5$	$4.712 \times 10^3$
	1 200	$1.191 \times 10^5$	$5.228 \times 10^3$
	1 500	$1.204 \times 10^5$	$5.839 \times 10^3$

由于传力衬垫具有较大的压缩性,可在一定程度上减少因施工质量不稳定产生的错台和盾构千斤顶推力造成管片可能产生的开裂或贯穿裂缝。但是,传力衬垫的存在不仅增加了施工的难度和降低了施工效率,而且大大降低了管片接头刚度,使得管片环整体弯曲刚度有很大降低。根据表 3 和表 4,南京管片接头刚度仅为广州地铁衬砌管片的  $1/3 \sim 1/4$  左右。根据参考文献 [7] 所提供的管片环弯曲刚度有效率与接头刚度的拟合关系式,可降低  $0.2 \sim 0.3$ ,这对于埋置在较硬地层中的隧道影响不大,围岩能够提供足够的地基抗力来保证隧道衬砌的稳定性,这可以从欧洲许多国家一般采用多铰环法(接头刚度接近零)设计盾构隧道得到佐证。但是,必须加强施工控制,以防止管片开裂影响隧道使用寿命;在软弱地层中开挖隧道时,由于软弱地层可期待的地基抗力不大,可能产生较大的隧道变形,影响隧道的整体安全稳定性。因此,接头四周是否粘贴传力衬垫需综合考虑施工经验、盾构机操作水平和周围地层条件等因素。

## 5 结论

本文对广州地铁盾构隧道装配式管片接头进行了二维接触问题的非连续有限元弹塑性模拟,得出了以下结论:

(1) 对于无传力衬垫的管片接头,采用二维非连续有限元弹塑性分析模型能够得到很好的结果,便于工程应用。

(2) 在接头弯矩较小时,管片接缝转角与接头弯矩呈线性关系,此时与无缝构件变形情况相同。随着弯矩的增加,接缝转角增加的速度不断增大,但螺栓受力也逐渐增大,接缝转角与接头弯矩又呈线性关系。因此,在实际应用中可应用双直线接头刚度模型来考虑接头刚度。

(3) 通过与粘贴传力衬垫的南京地铁盾构管片接头刚度的比较分析可以看出,传力衬垫的存在会大大削弱接头的转动刚度,进而减少管片环的整体弯曲刚度。另一方面,传力衬垫的存在有利于管片接头间内力传递,有利于保护管片,并可防止施工中可能出现管片开裂或错台等而影响管片的使用寿命。因此,要根据施工经验和技术水平、周围地层条件以及管片安装精度的要求灵活选择是否需要粘贴传力衬垫。

## Study on the construction technology of Honghuli station on line No 1 of Tianjin subway

Zhao Minghao Jia Liheng Mi JianPing

(Tianjin No. 3 Town Planning and Road Engineering Co., Ltd., Tianjin 300113)

**Abstract** The paper takes Honghuli station on Tianjin subway as an example to introduce the construction techniques including: support of the foundation pit for the open cut method, earthwork, monitoring of the pit, tunnel structure and the fabrication of outside waterproof layer, etc., with relevant techniques and the results of monitoring analyzed and compared

**Key Words** Subway station; Construction technology; Support; Waterproofing; Monitoring

(上接第 23 页)

### 参考文献

- [1] 日本土木学会编,朱伟译. 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001
- [2] 钟小春,朱伟,秦建设. 盾构隧道衬砌管片通缝与错缝的比较分析[J]. 岩土工程学报,2003,25(1):109~112
- [3] 陆同寿,崔铁军. 圆形衬砌接头刚度模型试验与研究[J]. 隧道及地下工程,1987,8(4):21~23
- [4] 张厚美. 圆形隧道装配式衬砌接头刚度模型研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(3):309~313
- [5] 吕剑英. 广州地铁越-三区间盾构隧道的设计[J]. 现代隧道技术,2003,40(6):7~11
- [6] 朱伟,钟小春,秦建设. 盾构衬砌管片接头力学分析及双直线刚度模型研究[J]. 岩土力学,2006(待刊)
- [7] 钟小春,朱伟,季亚平. 盾构衬砌管片环弯曲等效刚度的一种确定方法[J]. 地质与勘探,2003,39(增刊)

## 2D finite element analysis on the behavior of joints of the segment lining of shield tunnels

Zhong Xiaochun Zhu Wei Guo Tao Han Yuewang

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098)

**Abstract** It is very important to evaluate the effect of joint stiffness on the internal forces of lining segments in the design of shield tunnels. Lacking the data of segment ring tests or joint tests, it is very difficult to acquire the general rule of segment joint stiffness. So far, the segment joint stiffness is estimated to be a certain constant according to experience. In view of the above problems, the paper has carried out the elasto-plastic finite element analyses as a contact problem for the joints without force-transmitting gasket in the segment tunnel lining on the No. 3 line of Guangzhou subway and obtained the relationship curve between the angles of joint rotation and bending moments. For the sake of engineering utilization, the analytic curve is simplified as a bilinear curve, which reflects the important nonlinear relationship between joint stiffnesses and joint internal forces and can be taken for reference by practice.

**Key words** Shield tunnel; Segment joint; Finite element analysis; Joint stiffness