

短文

# 盾构隧道衬砌管片通缝与错缝的比较分析

The comparison of shield tunnel with segment seams in sequence and in stagger

钟小春, 朱 伟, 秦建设

(河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

中图分类号: TU 94 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 4548(2003)01 - 0109 - 04

作者简介: 钟小春(1976 - ) , 男, 河海大学岩土工程研究所博士生, 主要从事地铁隧道的设计。

## 0 引 言\*

盾构隧道技术在我国已有将近 40 年的使用历史<sup>[1]</sup>, 在盾构机械方面已从最初的敞开式盾构转入全面使用闭胸式盾构的时代。但是目前我国尚无统一的盾构隧道设计、施工规范, 盾构隧道的设计、施工方法多是参考国外, 尤其是欧洲、日本等盾构机出口国家的方法而形成的。而这些方法是否就最为适合于我国的具体条件尚欠缺系统的研究和证实, 其中一个较为重要的问题就是通缝和错缝的问题。由于通缝具有拼装施工容易、施工效率高的优点为很多施工单位所青睐, 在上海等地区有一些工程采用了这种拼装方式。而最近, 由于直观上错缝方式的结构优越性使得大多数盾构隧道工程均倾向于这一方式。实际上, 自从村上博智、小泉淳<sup>[2]</sup>指出错缝具有添接效应(纵向加强效应)以后, 软弱地基较多的日本就基本上不再使用通缝的拼装型式, 而这一方式的采用基本局限于地层条件较好的欧洲国家。但在我国工程界对如何选择接头型式这一问题的认识并不完全一致。因此, 从理论上区分通缝和错缝的差异, 确定通缝和错缝的适用范围对于盾构隧道的设计、施工具有重要意义。本文主要是通过可以考虑接头效应的梁 - 弹簧结构计算方法, 对于各种条件下通缝与错缝在结构受力、衬砌变形、隧道防水等方面的区别进行了探讨。

## 1 隧道管片结构特征及梁 - 弹簧模型的结构计算方法

盾构隧道衬砌是在盾构机盾尾拼装而成的, 是盾构隧道主要的受力结构, 当省略二次衬砌时, 为隧道的唯一支撑结构。在衬砌隧道的轴向上, 当各环管片间拼装缝不错开而形成纵向通缝, 即为通缝接头型式, 如图 1(b) 所示; 如果各环管片间拼装缝错开使得纵向不能形成通缝, 这样环与环之间存在一定的添接(纵向)加强作用, 此时为错缝接头型式, 如图 1(c) 所示。

由于圆弧梁与直梁单元在划分较细时的刚度矩阵

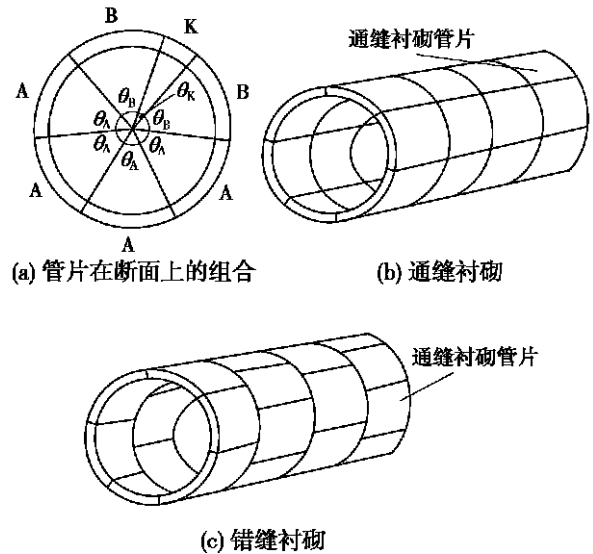


图 1 盾构衬砌管片的组成及接头

Fig. 1 Segment structure and bolt form of shield tunnel

基本上是一致的<sup>[3]</sup>, 因此本文将管片作为计算上较为简单的直梁单元考虑。结构模型如图 2(a) 所示, 采用旋转弹簧和剪切弹簧分别模拟管片间和管片环间螺栓的实际效应。同时将地层与管片之间的相互作用用地基弹簧单元来模拟。相对于将管片环考虑为均匀刚度的其他管片设计方法而言, 梁 - 弹簧模型法较为全面地考虑接头对结构影响, 能够更加接近地反映管片的实际工作情况。管片结构计算时的荷载系统如图 2(b) 所示<sup>[4]</sup>, 与国内地铁隧道中常用的荷载相近。作用于管片上的荷载主要是衬砌自重、上覆荷载、垂直土压力、水平土压力及下部垂直荷载抗力。在结构模型中要特别说明的是弹簧模量的考虑方法。接头弹簧的刚度特性如图 3 所示。基本取值如表 1 所示。

本文计算程序是以日本铁道部门盾构隧道设计规范<sup>[5]</sup>的设计计算方法为基础编制的。在进行计算时对通缝考虑一环为基本单元, 对错缝考虑二环为基本单元。通过将程序计算结果与日本的有关算例<sup>[6]</sup>进行比

\* 收稿日期: 2002 - 08 - 15

较,证明了程序计算结果正确性。

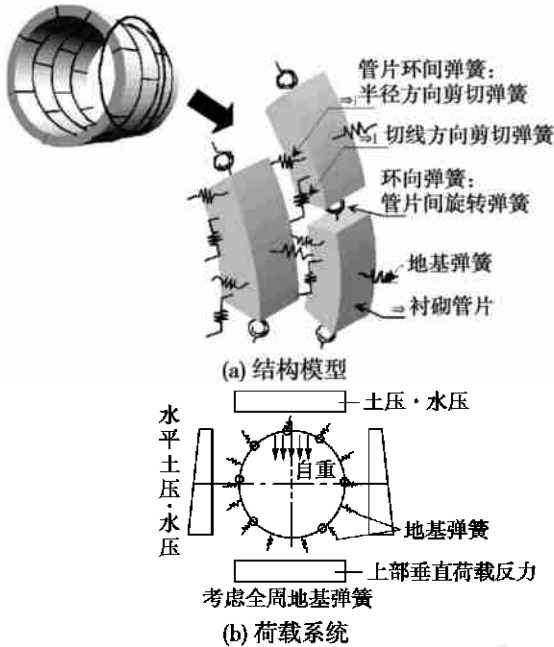


图2 梁-弹簧模型与荷载系

Fig. 2 Beam-spring model and load system of structure

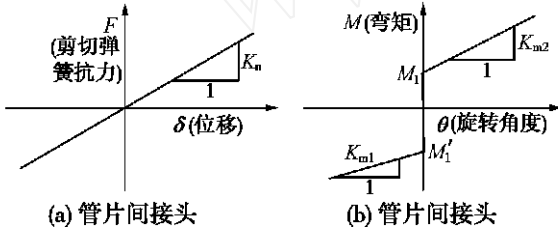


图3 接头弹簧的刚度特性

Fig. 3 Stiffness characteristics of bolt spring

表1 管片接头弹簧的基本参数

Table 1 The parameters of bolt spring

管片环间剪切弹簧模量 $K$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ )		管片间旋转弹簧模量 $K$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ ), $M$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )			
半径方向	切线方向	正方向		负方向	
$K_n$	$K_s$	$K_{m2}$	$M_1$	$K_{m1}$	$M_1$
$1.149 \times 10^5$	$7.86 \times 10^5$	$1.2 \times 10^5$	20	$9 \times 10^4$	- 18

## 2 基本计算条件和结果

### 2.1 基本计算条件和计算参数

本文以上海地铁隧道二号线中的代表性断面<sup>[7]</sup>作为基本地层条件(见图4)。地层主要为第四纪的软

黏土地层,与北京、广州等地的地层相比,上海地区的地层属于比较软弱的地层。计算参数如图4所示,  $P_0$ 为上覆荷载,  $H_w$ 为地下水位,  $H$ 为隧道上部埋深,为土的天然容重,  $c$ 为土的黏聚力,  $\varphi$ 为土的内摩擦角,  $N$ 为标贯击数,  $D_0$ 为盾构管片环的外径。另外, (土的压力系数)和  $k$  (地基抗力系数)均是以土的标贯击数为依据根据文献[4]的经验值查表而得;垂直土压力按照太沙基松弛土压力公式<sup>[4]</sup>,考虑到地层是较为典型的黏土地层采用土水合算进行了计算。

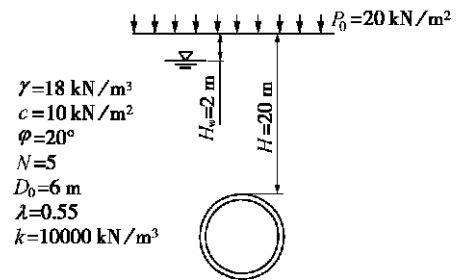


图4 结构计算的地层基本条件

Fig. 4 Basic stratum conditions for calculation of structure

管片的有关结构参数如下:管片环内直径5.4 m,使用C50钢筋混凝土管片,分块采用了国内地铁隧道中的常用方法,即6块分割,小封顶。对于管片接头弹簧参数,本文主要参考国内外地铁盾构隧道设计的一些实例,考虑弧形螺栓的特征选取了表1的经验值。

### 2.2 基本计算条件下的计算结果

以上海地铁二号线为基本计算条件,使用梁-弹簧模型对通缝和错缝之间结构受力和结构变形的差异进行了计算,计算结果见表2。

与通缝型式的衬砌管片相比,错缝型式的衬砌管片存在纵向加强作用,使得管片最大弯矩有所增加。在以上海地铁为原型的基本计算条件下弯矩大约增加13%。这一结果从侧面反映由于接头的加强效应管片整体的刚度有所提升。从变形的角度,错缝条件下的水平位移减少了8%左右,而管片环在接头处的张开角度也有所减少。从中可以看出,在基本计算条件的情况下,通缝和错缝具有一定的差异,错缝在结构受力、变形、防水方面是优于通缝的。但是,这些差异基本上是一个量的问题,还达不到本质上的差异。那么,在什么条件下,两者会有较大差异呢? 下面我们进行进一步的探讨。

表2 通缝与错缝式的衬砌管片比较

Table 2 Comparison of segment with seams in sequence in stagger

衬砌管片型式	管片最大弯矩 /( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )	最大内侧张开角度 /( $^\circ$ )	最大外侧张开角度 /( $^\circ$ )	最大水平位移 /mm	最大轴向螺栓剪力 /kN
通缝型式	174.03	0.0498	- 0.0624	6.3	
错缝型式	196.94	0.0326	- 0.0499	5.8	58.49

### 3 通缝、错缝的差异与接头螺栓的关系

因为通缝、错缝之间的差异主要体现在是否能够发挥轴向螺栓的纵向加强作用。而轴向管片环间螺栓的抗剪刚度对纵向加强作用的强弱有决定性的影响。同时也与环向管片间螺栓的旋转刚度密切相关。因此,如果采用的螺栓不同,通缝、错缝之间的差异也会不同。为了明确螺栓的影响,我们将旋转弹簧和剪切弹簧的刚度在一定的范围内进行变化,探讨两种接头形式的差异。计算时将基本计算条件的旋转弹簧作为  $K_{n20}, M_{10}, K_{m10}, M_{10}$ , 取  $M_1 = M_{10}, M_1 = M_{10}, K_{m1}, K_{n2}$  分别取  $K_{m10}$  和  $K_{n20}$  的 1.67, 1.33, 1.0, 0.67, 0.33, 0.167 倍进行变化。剪切弹簧则使用刚度大、中、小的三种进行了计算,计算时分别取管片环间剪切弹簧模量  $K_n$  为  $2.298 \times 10^5, 1.149 \times 10^5, 5.750 \times 10^4$  kN/m,  $K_s$  为  $1.572 \times 10^6, 7.860 \times 10^5, 3.930 \times 10^5$  kN/m。

#### 3.1 管片间旋转弹簧刚度的影响

从结构受力进行比较,由图 5 可知管片间螺栓的刚度越小,通缝和错缝所发生的弯矩差距越大。错缝所发生的弯矩最大可以达到通缝的两倍左右。这是由于当管片间螺栓的刚度降低时,不受管片环间螺栓约束的通缝管片的最大弯矩减少。而对于错缝来说,管片环的整体刚度降低恰好使管片环间接头的纵向加强作用得到更大程度的发挥,因此使管片主截面的弯矩反而不断增加。

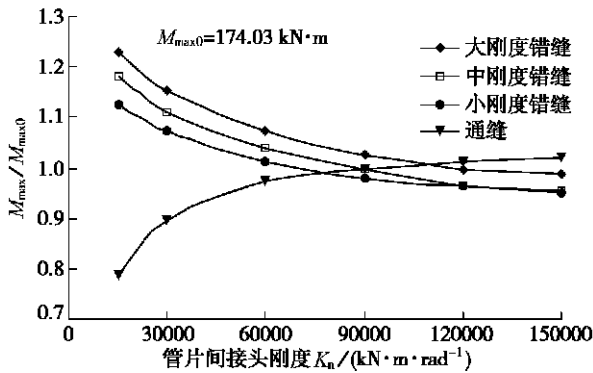


图 5 管片最大弯矩随管片间模量的变化

Fig. 5 The variation of maximum moment of segment with module of bolt between segments

从结构变形进行比较,由图 6 可以看到与发生弯矩相同的结果。对于错缝来说,由于管片环间接头的纵向加强作用,管片间接头刚度的降低虽会引起水平位移的增加,但增加的量较小。但通缝的变形增加非常明显,最大时的水平位移量比错缝增加 50% 左右。由此可知在管片整体刚度较低时错缝对于抑制管片的变形有明显的效果。

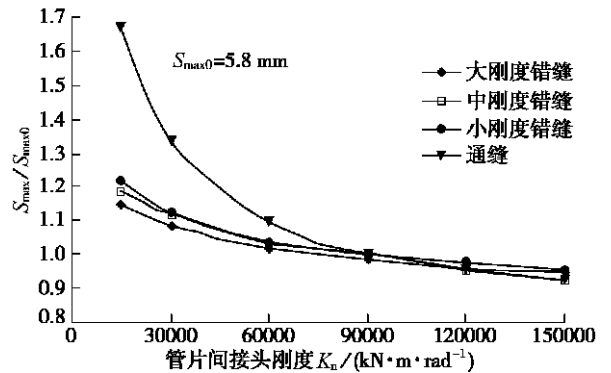


图 6 管片环最大水平位移随管片间模量的变化

Fig. 6 The variation of maximum displacement of segment with module of bolt between segments

对接头处的张开进行比较其结果见图 7。管片间螺栓刚度的降低一般都会使管片间接头的张开角度增大,而对于通缝拼装的管片来说这种张开角度的增加更加明显。这主要是由于通缝的变形大于错缝管片,所以不管是内张开还外张开的角度,都比错缝要大。

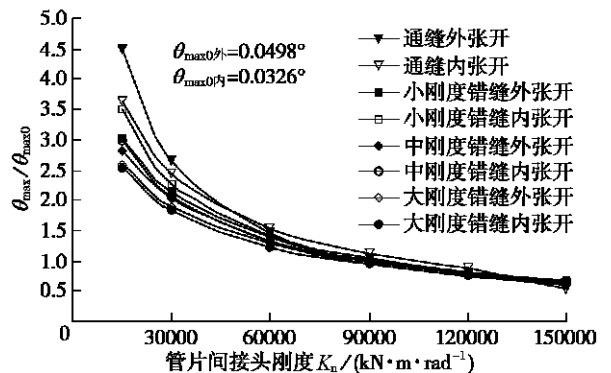


图 7 管片接头最大张开角度随管片间模量的变化

Fig. 7 The variation of maximum open angle of segment with module of bolt between segments

但是,不管从结构内力、结构变形还是接头处的张开进行比较,当旋转弹簧的刚度大于某一值时,通缝和错缝的区别就会变得很小。而当旋转弹簧的刚度小于这一值时,两者的差异会越来越大。对于本文的计算条件而言,这一旋转弹簧的值大约出现在  $K_{n2} = 9.0 \times 10^4$  (kN m/rad),  $K_{m1} = 6.75 \times 10^4$  (kN m/rad)。

#### 3.2 管片环间剪切弹簧刚度的影响

对于通缝来讲,管片环间螺栓刚度的增加对结构受力和变形不发生影响。而对于错缝而言,管片环间螺栓刚度的增加在一定的程度上提高了纵向的加强作用。但是这种加强作用与管片间螺栓的刚度密切相关。如果管片间接头刚度很大,从整体来看接近或达到管片自身的刚度时,环间螺栓的纵向加强作用将明显削弱。相反,如果管片间螺栓的刚度远远小于管片自身刚度的话,环间螺栓的这种纵向加强作用就越强。但是环间螺栓的影响相对于管片间螺栓而言,要小得多。

## 4 通缝、错缝的差异与地层条件的关系

### 4.1 地层条件的设定

在讨论地层条件的影响时仍以基本计算条件为基础,采用不同的地层条件进行计算。地层条件的变化可归结于土的标准贯入击数来综合反映。计算时设定  $N < 2$  为超软黏土,当  $2 < N < 4$  为软黏土,当  $4 < N < 8$  为中硬黏性土,当  $8 < N < 25$  为硬的黏性土,土压力系数和地基抗力系数则参考文献[4]的经验表确定。

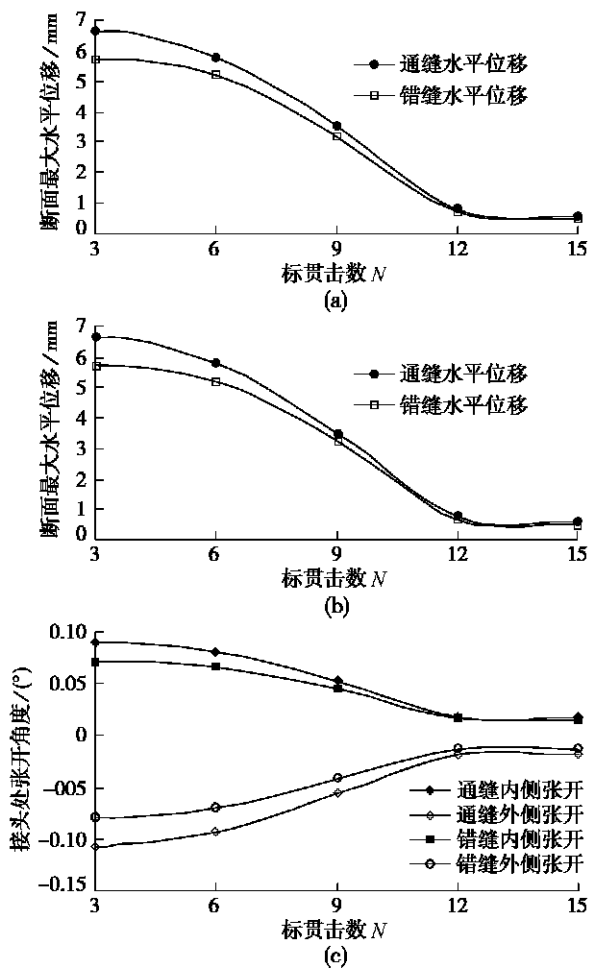


图8 地层条件不同的通缝与错缝比较

Fig. 8 The comparison of seams in sequence and in stagger with different stratum conditions

### 4.2 地层条件对通缝与错缝差异的影响

将计算结果整理为图8。由图8可知,地层  $N$  值越小,结构受力和结构变形以及接头处的张开都将有较大的增加,并且通缝与错缝的差异也就越大。例如弯矩的最大差异超出了24.3%。从机理上讲,地层软弱也就是管片承受的荷载增加。在荷载增加的状况下,刚度较大的错缝管片比刚度相对较小的通缝管片

内力的增加更加明显。

地层的变化中也可以看到一个特征值,即  $N = 12$ 。当大于这一值时,不管结构内力,结构变形还是接头处的张开本身的变化就比较小,通缝和错缝的差异也就会变得很小。而当地层的  $N$  值小于12时,两者的差异会越来越来大。也就是说,地层越软弱通缝和错缝的差异就会越大,而对于地层较为坚硬的地层,接头型式的差异会很小。

## 5 结 论

总结以上工作可以得到以下结论。

(1) 通缝与错缝的差异主要是由管片间接头螺栓刚度和地层软硬决定的。当螺栓刚度很大,地层较为坚硬时,两种接头形式的区别很小。当地层软弱而且管片间接头螺栓的刚度较小时,通缝和错缝的差异较大。在这种条件下,考虑到衬砌结构变形以及防水问题,采用错缝是较为明智的。

(2) 通缝和错缝之间的区别从本质上讲是一个管片环整体刚度上的差异。错缝的存在,使得管片环之间的螺栓可以发挥纵向加强作用,使得管片间接头处的薄弱部位得到加强从而增加了管片环整体的刚度。

(3) 通缝和错缝之间的区别虽然在结构受力、结构变形和防水方面都有所表现。从国内外盾构隧道衬砌发生的问题考虑,管片发生屈服破坏的事例较少,但是发生过大变形、渗漏的事例却比比皆是。因此,慎重采用通缝对于防止管片衬砌发生过大变形和渗漏都是重要的。

### 参考文献:

- [1] 朱伟,陈仁俊. 盾构隧道基本原理及在我国的使用情况[J]. 岩土工程界, 2001, 4(11): 19 - 21.
- [2] 村上博智,小泉淳. シールド・グメントリングの耐荷机构について[J]. 土木学会論文報告集, 第272号, 1978: 221 - 226.
- [3] 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.
- [4] 朱伟,译. 日本土木学会隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001. 38 - 41.
- [5] 日本铁道综合技术研究所. 铁道构造物等设计标准 同解说—シールドトンネル[M]. 日本:丸善发行所, 1997.
- [6] 铃木章. シールドトンネルの新技术[M]. 日本:土木工学社, 1995. 250 - 253.
- [7] 胡如军. 盾构隧道衬砌管片设计理论研究[D]. 南京:河海大学, 2002.