

盾构管片接头刚度衰减系数( ACS)的影响\*

董新平,朱磊,李宗艺,李君普

(郑州大学 交通运输工程系,郑州 450002)

**摘 要:**以盾构隧道衬砌三环原型加载破坏试验为基础,通过严格按照足尺试验尺寸、试验条件建立分析模型并消除环间作用的方法建立了单环加载破坏分析模型,着重就某局部管片接头转动刚度衰减对整环内力(弯矩)的影响进行分析,研究表明:(1)在盾构隧道管片整环破坏历程中,管片接头转动刚度的变化历程可通过转动刚度衰减系数这一特征变量进行追踪;(2)特定位置管片接头转动刚度衰减时,可导致其他位置管片弯矩发生增加或降低,且增减幅度并不一致;(3)在整环外加荷载增量保持不变的条件下,特定位置管片接头转动刚度的衰减(破坏)可导致管片环其它位置的弯矩迅速增加,从而引起或加速整环管片的破坏。

**关键词:**隧道工程;盾构;管片接头;刚度衰减系数

中图分类号:U455.7      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)03-0683-05

The Effects of Attenuation Coefficient of Stiffness( ACS) on Segmented Tunnel Lining

Dong Xinping, Zhu Lei, Li Zhongyi, Li Junpu

(Department of Communication Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, P.R. China)

**Abstract:** One single-ring analysis model was developed on base of the Full-Scale Test of three rings performed in Europe. Except ring interaction, it was kept same as that of the Full-Scale Test for the configuration parameter of the FEM model, such as dimension, material, constraint boundary, load history, etc. The influence of attenuation of rotational stiffness of segment joint on the bending moment of segment was analyzed. It showed that the variation of rotational stiffness of segment joints can be traced by the Attenuation Coefficient of Stiffness (ACS). The bending moment of segment may increase or decrease significantly due to the attenuation of the rotational stiffness of segment joint at specific location. The failure history of whole segment ring can be influenced significantly by the local yielding and attenuation of segment joint.

**Keywords:** tunnel engineering; shield; segment joint; Attenuation Coefficient of Stiffness (ACS)

0 引言

盾构衬砌管片接头(segment joint)的力学性态对衬砌环的变形、内力等有重要影响,该影响一直是盾构管片领域的研究热点。在这些研究中,管片接头刚度多用一个恒定的转动刚度系数( $k$ )表征,

即管片接头转动刚度一般为恒值<sup>[1-10]</sup>。在整环承受荷载水平较低时,这样的处理是合适的。

但在管片整环破坏历程研究中,如果仍然这样处理,显然是不合适的,需要考虑管片接头随着外荷载逐步加大而进入非线性转动阶段后,转动刚度将逐渐衰减的特性<sup>[11]</sup>。本文以整环原型破坏试验

\* 收稿日期:2017-12-20(修改稿)  
作者简介:董新平(1970-),男,河南淇县人,博士,副教授,主要从事隧道及地下空间的研究。  
E-mail: dxp3000@163.com  
基金项目:河南省基础与前沿研究(152300410031)

为基础,构造单环破坏分析模型,并以该模型为依托,着重对局部管片接头转动刚度的衰减对整环内力的影响情况进行研究。

1 接头刚度衰减系数(ACS)

在管片环承受逐渐增大荷载而逐渐破坏的过程中,接头(segment joint)转动刚度随弯矩变化情况如图 1 所示<sup>[11]</sup>。管片接头(segment joint)受破坏历程中,管片接头转动刚度经历线性转动阶段的定值、开裂阶段的迅速衰减,并最终趋于 0。

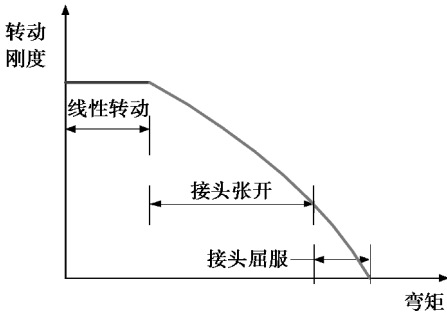


图 1 接头转动刚度变化历程

Fig. 1 Changing course of rotation stiffness of segment joint

逐步加载过程中,管片接头转动刚度的变化情况可用管片接头相对刚度来描述,即相对刚度表示时刻  $t$  的接头转动刚度  $k_t$  与初始线性转动刚度  $k_{linear}$  的比值:

$$\mu = \frac{k_t}{k_{linear}} \tag{1}$$

当接头承受荷载水平较低,小于开裂临界弯矩  $M_i$  时,处于线型转动阶段,此时  $\mu$  为:

$$\mu = 1 \quad M < M_i \tag{2}$$

随着荷载逐步增大,管片接头弯矩大于开裂临界弯矩  $M_i$  后,管片接头开始开裂, $\mu$  为相对柔度  $\eta$  的倒数<sup>[11]</sup>,即:

$$\mu = \frac{1}{\eta} = - \frac{(-3 + \xi)^3}{8} \tag{3}$$

式中: $\eta$  为管片接头相对柔度, $\xi$  为相对荷载。

$$\xi = \frac{M}{M_i} \tag{4}$$

由式(4)可知,当接头承受弯矩等于  $M_i$  时, $\xi$  等于 1,此时,由式(3)得:

$$\mu = 1 \quad M = M_i \tag{5}$$

将式(2)、式(3)和式(5)统一起来,即为:

$$\mu = \begin{cases} 1 & 0 < \xi < 1 \\ 1 & \xi = 1 \\ - \frac{(-3 + \xi)^3}{8} & \xi > 1 \end{cases} \tag{6}$$

由式(6)的前面两式可知,当相对荷载小于或等于 1(接头承受弯矩小于或等于开裂弯矩)时,接头相对刚度等于 1,即接头转动刚度为初始的线性转动刚度。而当相对荷载大于 1 时(接头承受弯矩大于开裂弯矩),随着相对荷载开始增大,接头相对刚度从 1 开始衰减,并在相对荷载等于 3 时(接头承受弯矩是开裂临界弯矩的 3 倍),趋于 0。

相对刚度  $\mu$  变化情况如图 2 所示。

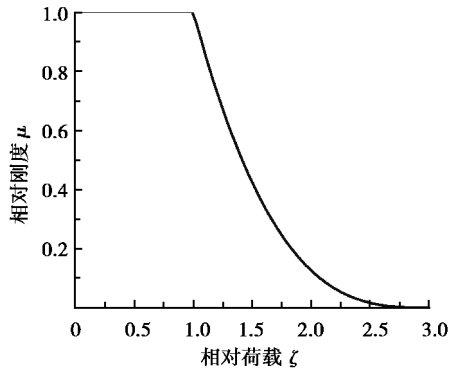


图 2 相对刚度衰减

Fig. 2 Attenuation of relative stiffness

由图 2 可见,管片接头相对刚度实际是反映了接头转动刚度随接头弯矩(外荷载逐渐增大)增加时的衰减情况,因此,也可称相对刚度为管片接头转动刚度衰减系数 ACS。

第  $i$  个接头在任意加载阶段( $t$  时刻)的转动刚度可表示为:

$$k_t^i = ACS \cdot k_{linear} \tag{7}$$

式中: $k_{linear}$  为线性转动阶段的转动刚度。

因此,从 1(线性转动阶段)变化到 0(接头破坏),就可以代表管片接头的整个破坏历程。

2 接头衰减影响分析模型构建

2.1 模型建立原则

2.1.1 可以对模型进行检验和验证

本文研究以欧洲进行的三环足尺试验为背景,严格按照足尺试验和相关试验的数据、尺寸、试验条件等建立的试验模型作为研究对象,如图 3 所示。

以此原型试验为基础来构建本文的分析模型<sup>[12]</sup>,模型主要计算参数为:

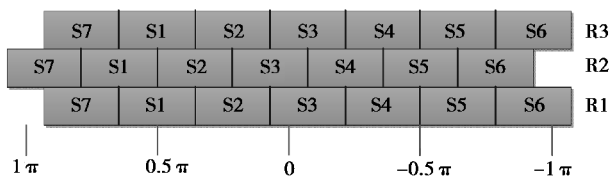


图 3 环、管段编号

Fig. 3 Numbering of the ring and pipe segment

每环宽 1.5 m,管片厚 0.4 m,接头高度为 0.17 m,压缩刚度  $k_c = 230$  GPa,管片混凝土土松比  $\nu = 0.2$ ,弹性模量  $E_c = 36$  GPa,环半径为 4.525 m,

2.1.2 以增量法为基础

整环承受荷载按照原型试验的加载方法,将荷载分解为均匀荷载和椭圆化荷载,均匀荷载产生管片轴力  $N = 1\,002$  kN,如图 4 所示。

椭圆化荷载采用分级加载,直至整环破坏,每级荷载的大小和分布形式为:

$$p = p_0 \cos(2\theta) \tag{8}$$

式中: $p_0 = 0.985 \times 20$  kPa。

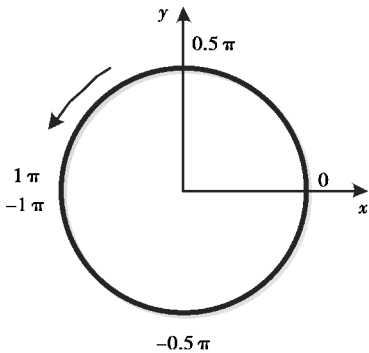


图 4 整环分析模型

Fig. 4 Analysis model of single ring

在考虑管片接头影响时,以增量法为基础,通过对单个椭圆化荷载增量步作为考察基础,以使得分析模型不受荷载变化的影响。

2.1.3 接头影响单一

在三环原型试验中存在 2 种接头,管片接头(segment joint)和环间接头(ring joint)。加载过程中,这 2 种接头之间存在相互作用问题。

为使管片接头的影响更单纯,采用将环间作用消除的方法,从而获得一个单环的破坏过程,这样处理的目的是消除环间接头(ring joint)影响对管片接头(segment joint)作用的叠加作用,从而使得对管片接头(segment joint)的影响分析更单纯和纯粹。

2.2 模型校核

校核工况的管片接头配置如图 5 所示,第 1 个

接头  $\theta = 0$ ,第 2 个接头  $\theta = (2/7)\pi$ ,第 3 个接头  $\theta = (4/7)\pi$ ,第 4 个接头  $\theta = (6/7)\pi$ 。第 2、3、4 管片接头的转动刚度均为  $1.41 \times 10^8$  N·m/rad,第 1 个接头的相对刚度取 1、0.5 和 0 三种工况。

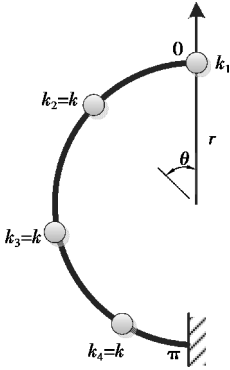


图 5 校核用计算模型

Fig. 5 Calculation model for verification

本文在以下的校核过程中,均取  $\theta = \pi$  位置处的弯矩作为校核指标,以下所说的计算结果均是指该值,不再赘述。

当第 1 个接头取相对刚度为 1 时,本文计算结果为 134.433 kN·m,与理论计算结果(不考虑管片接头的均质自由变形圆环理论解)完全一致,该工况对应的数值解(FEM 解)为 133.91 kN·m,数值解(FEM 解)与理论解的误差为 0.39%。可见,数值解的计算结果是可以接受的,对于接头相对刚度为 0.5 和 0 时的解析解的校核,就采用数值解作为校验依据。

当第 1 个接头取相对刚度为 0.5 时,本文计算结果为 140.047 kN·m,该工况对应的数值解为 139.22 kN,解析解与数值解的误差为 0.59%。

当第 1 个接头取相对刚度为 0 时,本文计算结果为 179.244 kN·m,该工况对应的数值解为 176.79 kN·m,解析解与数值解的误差为 1.37%。

通过以上校核说明,本文应用内力计算是可行的,以下采用解析法进行管片接头刚度衰减影响分析。

2 接头衰减影响分析模型构建

以图 5 中  $\theta = \pi$  位置管片弯矩作为目标变量,来分析管片接头转动刚度对管片内力的影响。需要说明的是,各对比工况的整环管片承受的增量荷载分布形式及量值是完全一样的,且本节探讨某位置管片接头的转动刚度变化时,其他所有位置的管片接头转动刚度均保持不变(均为初始线性转动

刚度)。

第 1 个管片接头(图 5 中  $\theta=0$  位置处)转动刚度衰减时,  $\pi$  位置管片的弯矩变化情况如图 6 所示。

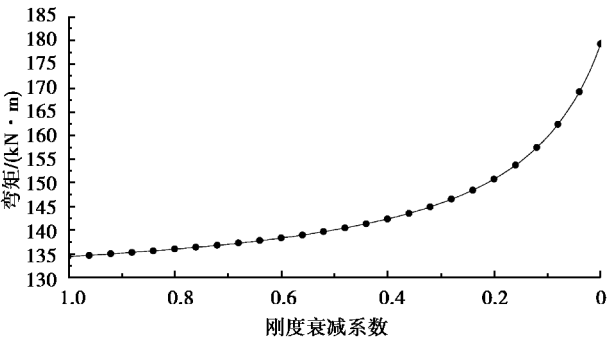


图 6 接头转动刚度衰减对管片弯矩影响

Fig. 6 Effect of ACS on segment

第 2 个管片接头( $\theta=\frac{2\pi}{7}$ )转动刚度发生衰减时,  $\pi$  位置管片弯矩变化情况如图 7 所示。

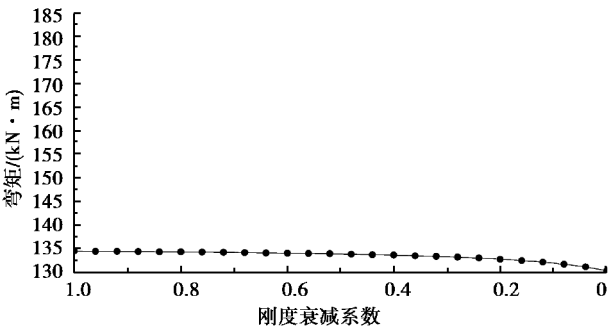


图 7 接头转动刚度衰减对管片弯矩影响

Fig. 7 Effect of ACS on segment

第 3 个接头( $\theta=\frac{4\pi}{7}$ )转动刚度衰减时,  $\pi$  位置管片的弯矩变化情况如图 8 所示。

第 4 个接头( $\theta=\frac{6\pi}{7}$ )转动刚度衰减时,  $\pi$  位置管片的弯矩变化情况如图 9 所示。

从图 6~9 可看出:

(1)在同样管片材料和增量荷载条件下,管片环局部管片接头刚度的降低既有可能导致目标变量( $\pi$  位置的管片弯矩)增大,也有可能导致目标变量减小,且增大或减小的幅度可能相差很大。例如,对于第 3 个管片接头,当相对刚度(转动刚度衰减系数)为 0 时,  $\pi$  位置管片的弯矩与相对刚度为 1 时的值相差 1 倍之多。因此,笼统地下结论说

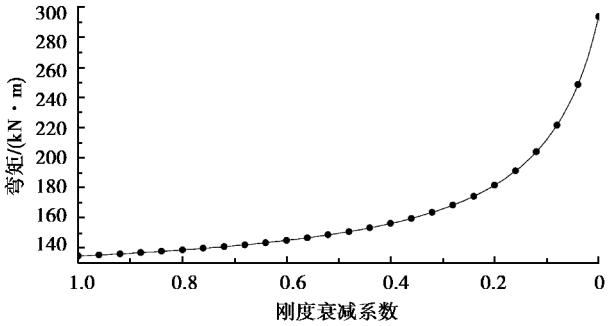


图 8 接头转动刚度衰减对管片弯矩影响

Fig. 8 Influence of rotational attenuation of joint on the bending moment of segments

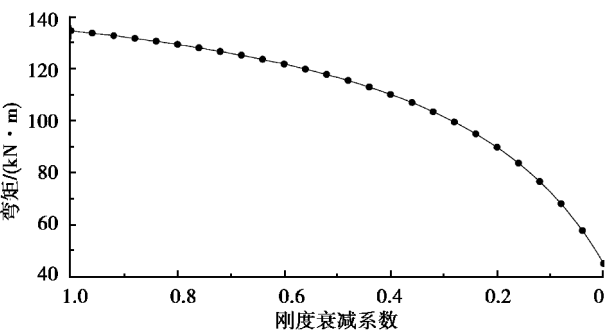


图 9 接头转动刚度衰减对管片弯矩影响

Fig. 9 Influence of rotational attenuation of joint on the bending moment of segments

接头转动刚度对管片内力有影响、或者说没有影响、以及说影响到多大程度等,是不合适的。

(2)在增量荷载保持不变条件下,某特定位置管片接头的转动刚度衰减(破坏)可能导致管片环其他位置的弯矩迅速增加,从而引起或加速管片的破坏,因此,深入分析管片接头转动刚度对管片环内力(弯矩)影响情况,对于管片整环破坏历程的研究是非常有价值的。

(3)通过以上特定工况的分析可以较为清楚地看到,管片接头转动刚度对管片内力(弯矩)的影响比我们的预期要更为复杂些。同时也说明,对于盾构衬砌破坏历程以及实时跟踪盾构整环安全状态方面的研究而言,准确跟踪管片接头的转动刚度变化情况是至关重要的,也是相关问题研究必须要解决的关键问题和核心问题之一。

4 结论

本文对管片接头刚度衰减对管片内力(弯矩)直接影响情况进行了研究,主要结论如下:



(1)在盾构管片整环破坏历程中,管片接头转动刚度的变化可通过转动刚度衰减系数这一特征变量进行刻画和追踪。

(2)增量荷载条件一定时,在局部管片接头转动刚度逐渐衰减过程中,管片接头转动刚度对内力(弯矩)的影响情况受管片接头位置和目标位置控制。

(4)局部管片接头转动刚度衰减可能会引起其他位置管片的内力(弯矩)发生大幅度增或减,并进而影响整环管片破坏历程。因此,准确追踪管片接头刚度衰减系数(ACS),对于整环管片破坏历程和实时跟踪安全状态等方面的研究是至关重要的。

#### 参考文献(References)

- [1] 刘建航,侯学渊. 盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991. (Liu Jianhang, Hou Xueyuan. Shield-driven tunnels[M]. Beijing: China Railway Press, 1991. (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 孙金. 盾构隧道结构刚度不连续性对衬砌内力及变形影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 55-60. (Sun Jin. Analysis of internal force and deformation of lining affected by structure stiffness discontinuity of shield tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1): 55-60. (in Chinese)).
- [4] 朱伟,黄正荣,梁精华. 盾构衬砌管片的壳-弹簧设计模型研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 940-947. (Zhu Wei, Huang Zhengrong, Liang Jinghua. Studies on shell-spring design model for segment of shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 940-947. (in Chinese))
- [5] 柳献,黄晓冬. 通缝拼装盾构隧道衬砌结构抗倒塌性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增2): 3703-3714. (Liu Xian, Huang Xiaodong. Experimental study of collapse capacity of straight joint segmental tunnel lining structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Supp.2): 3703-3714. (in Chinese))
- [6] 孙金. 盾构隧道结构刚度不连续性对衬砌内力及变形影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 55-60. (Sun Jin. Analysis of internal force and deformation of lining affected by structure stiffness discontinuity of shield tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1): 55-60. (in Chinese)).
- [7] 官林星. 错缝拼装下管片宽度对盾构隧道力学行为的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(4): 854-857. (Guan Linxing. Effect of segment width on behavior of shield tunnel assembled in staggered pattern [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4): 854-857. (in Chinese)).
- [8] 晏启祥,程曦,何川,等. 深埋双圆盾构隧道衬砌荷载模式及其接头效应分析[J]. 铁道标准设计, 2010(10): 92-94. (Yan Qixiang, Cheng Xi, He Chuan, et al. Analysis of lining load pattern and joint effect of deeply-buried double-circle shield tunnel [J]. Railway Standard Design, 2010(10): 92-94. (in Chinese))
- [9] 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. (Zhong Xiaochun, Zhu Wei, Qin Jianshe. The comparison of shield tunnel with segment seams in sequence and in stagger [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 109-112. (in Chinese))
- [10] 郭瑞,何川,封坤,等. 大断面水下盾构隧道管片接头抗弯刚度及其对管片内力影响研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(5): 46-52. (Guo Rui, He Chuan, Feng Kun, et al. Bending stiffness of segment joint and its effects on segment internal force for underwater shield tunnel with large cross-section [J]. China Railway Science, 2013, 34(5): 46-52. (in Chinese))
- [11] 董新平. 一类盾构管片接头破坏历程的解析解[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1870-1875. (Dong Xinping. An analytical solution of the segment joint model for segmented tunnel lining [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10): 1870-1875. (in Chinese)).
- [12] 董新平. 盾构衬砌整环破坏机理研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 417-426. (Dong Xinping. Failure mechanism of the full-ring for segmented tunnel lining [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 417-426. (in Chinese))