

修正惯用法中弯曲刚度有效率的影响因素 分析及计算方法

彭益成, 丁文其, 闫治国, 黄星程, 肖冰峰

(同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 修正惯用法作为一种实用的设计计算方法被广泛应用于盾构隧道结构设计领域。其关键参数——弯曲刚度有效率 η 的取值对于计算结果具有至关重要的影响。本文基于荷载结构法, 采用有限元方法建立带接头和不带接头的衬砌管片圆环模型。根据弯曲刚度有效率的定义, 分析了接头数量、接头角度、接头抗弯刚度和地基抗力系数对于弯曲刚度有效率的影响。研究表明当接头数量较少, 接头刚度较大和地基抗力较大时, 弯曲刚度有效率较大。同时, 不同的接头角度对于弯曲刚度有效率也存在明显影响。根据数值模拟结果, 给出了盾构隧道结构的弯曲刚度有效率计算方法。该方法综合考虑接头数量、接头角度、接头抗弯刚度和地基抗力系数对弯曲刚度有效率的影响。一系列计算对比验证了该计算公式具有较广的适用性和较高的准确性。

关键词: 盾构隧道; 修正惯用法; 弯曲刚度有效率; 影响因素; 计算方法

中图分类号: TU451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)S1-0495-06

作者简介: 彭益成(1984-), 男, 浙江杭州人, 博士研究生, 主要从事盾构隧道结构计算方法和数值模拟研究。E-mail: peng_yicheng@163.com。

Analysis and calculation method of effective bending rigidity ratio in modified routine method

PENG Yi-cheng, DING Wen-qi, YAN Zhi-guo, HUANG Xing-cheng, XIAO Bing-feng

(Department of Geotechnical Engineering, Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: As a practical calculation method for the lining structure of shield tunnels, the modified routine method has been widely applied during its design. The key parameter, the effective bending rigidity ratio η , is essential for the calculated results. The numerical models for segmental rings with and without joints are established using the load structure method. Based on the results of the FEM analysis, the influences of number, distribution and bending stiffness of joints and soil resistance coefficient on the effective bending rigidity ratio are examined. The study indicates that the effective bending rigidity ratio increases when the number of joints decreases or the bending stiffness of joints and the soil resistance coefficient increase. In addition, the distribution of joints has appreciable impact on the effective bending rigidity ratio. A method for evaluating the effective bending rigidity ratio of shield tunnel structures is proposed. The effects of number, distribution and bending stiffness of joints and soil resistance coefficient are considered. Through comparisons, the proposed method is proved to be practical and accurate.

Key words: shield tunnel; modified routine method; effective bending rigidity ratio; influence factor; calculation method

0 引言

在盾构法隧道中衬砌管片作为隧道的主体结构, 其设计的合理性直接决定了整个工程的安全性和经济性。在众多盾构衬砌设计模型中, 修正惯用法以其受力明确、计算思路清晰和简单实用等诸多优点而被广泛地应用于盾构衬砌设计计算中^[1]。修正惯用法在惯用法的基础上, 考虑接头弯曲刚度小于管片弯曲刚度

并将其等效于管片结构整体刚度的折减, 而引入了弯曲刚度有效率 η 。弯曲刚度有效率 η 对于管片截面的内力影响较大, 因此对于盾构衬砌设计计算至关重要, 必要时可以通过整环试验确定^[2-3]。关于 η 的取值, 需

基金项目: 教育部创新团队发展计划 (IRT1029); 上海城建集团科研项目 (No. 沪城建科 2010-A-1a 资助)

收稿日期: 2013-03-02

综合考虑管片种类、管片接头的结构特性、管片环之间的联接方法及其结构特性以及周围土层的特性。目前仍然根据大量的使用经验和地上试验结果经验性地进行确定^[4], 如在日本东京湾海底隧道的结构设计中, 弯曲刚度有效率 η 为 0.8^[5]。

国内外一些学者先后对弯曲刚度有效率 η 开展研究, 并且根据各种假定提出了一些实用的经验公式。Muir 等^[6]分析了等分块衬砌环的弯曲刚度有效率, 并建议采用式 (1) 计算。同时认为分块数为 4 或 4 以下的衬砌环整体刚度不受接头影响。

$$I_e = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^2 I \quad (I_e \leq I, n \geq 4) \quad (1)$$

式中, n 为分块数, I_e 为弯曲等效刚度, I_j 为接头弯曲刚度, I 为管片弯曲刚度。

刘建航等^[1]基于椭圆变形假定, 推导了带接头的衬砌环相比于连续圆环的刚度折减系数的计算方法。

$$\eta = \frac{1}{1+b} \quad (2)$$

式中,

$$b = \frac{3EI}{RK_\theta} \sum_{i=1}^m \cos \varphi_i \cos 2\varphi_i \quad (3)$$

式中, EI 为单位长度管片的抗弯刚度, K_θ 为接头弯曲刚度, R 为管片半径, m 为接头数量。但是大多数软土中的浅埋隧道并不满足椭圆变形假定^[7]。

钟小春等^[8]研究了顺接头和错接头两种形式下的弯曲刚度有效率 η 和接头抗弯刚度 K_θ 的关系, 并提出了相应的计算公式。但其研究中采用均布荷载和集中荷载而未采用惯用荷载系统进行计算。此外其提出的弯曲刚度有效率 η 计算公式只考虑了接头弯曲刚度 K_θ 的影响。

黄正荣等^[9]研究了接头刚度 (包括纵向接头弯曲刚度和环向接头剪切刚度) 对于弯曲刚度有效率 η 和弯矩提高率 ζ 的影响, 提出了用环向相对刚度和径向相对刚度来计算 η 和 ζ 的方法。但其研究未考虑接头数量和位置对于弯曲刚度有效率 η 的影响, 并且只给出了 ζ 的拟合公式。

Supot 等^[10]运用有限元方法建立梁-弹簧模型, 在不同接头数量、位置和刚度的情况下, 分析比较了有接头和无接头衬砌最大弯矩的关系, 建立了两者之间弯矩折减系数的计算方法。但该折减系数并非修正惯用法中的弯曲刚度有效率, 因此难以参考使用。

本文在前人研究的基础上, 通过数值方法采用梁-弹簧模型计算得到修正惯用法中弯曲刚度有效率 η 。并研究不同接头数量、位置和刚度以及地基抗力系数对于弯曲刚度有效率 η 的影响, 同时建立了盾构隧道结构的弯曲刚度有效率 η 计算方法, 并通过一系

列的对比验证, 证明了计算方法的准确性和适用性。

1 模型建立与计算参数取值

1.1 数值模型中弯曲刚度有效率 η 确定方法

图 1 所示为修正惯用法的荷载模式。 P 为垂直方向水土压力荷载, q_1 和 q_2 为水平方向的水土压力荷载, πg 为衬砌自重, q_1 为地基抗力。图 2 为相应的数值计算模型, 水土压力作为荷载施加至衬砌管片上, 地基抗力的模拟通过施加地弹簧实现, 而接头通过旋转弹簧进行模拟。

根据修正惯用法中对于弯曲刚度有效率的定义, 在数值模拟计算中通过将无接头衬砌环的刚度 EI 进行折减, 使其在水平方向的变形与相同条件下带接头的衬砌环的变形一致, 则该折减系数即为弯曲刚度有效率 η 。

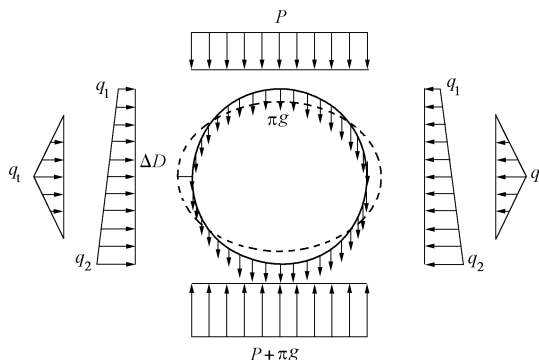


图 1 修正惯用法荷载模式图

Fig. 1 Load diagram of modified routine method

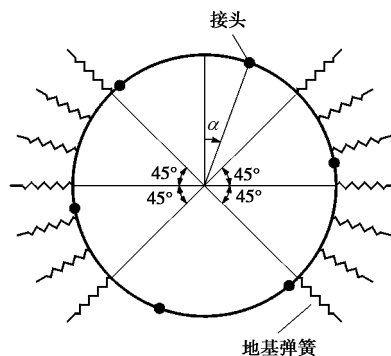


图 2 数值计算中盾构管片衬砌环模型

Fig. 2 Lining structure model in numerical calculation

1.2 参数选取及模型验证

在修正惯用法中, 给出了衬砌环水平直径变化值 ΔD 计算公式^[4]:

$$\Delta D = \frac{(2P + \pi g - q_1 - q_2) \cdot R^4}{24(\eta EI + 0.0454 k_s R^4)} \quad (4)$$

式中, R 为衬砌圆环的计算半径, E 为衬砌弹性模量, I 为衬砌截面惯性矩, k_s 为地基抗力系数, 表 1 给出了

不同性质土层的地基抗力系数取值范围。

表 1 不同土层的地基抗力系数 K_s [11]

Table 1 Soil resistance coefficient K_s for different ground conditions ^[11]		10^3 kN/m^3			
黏土	淤泥	较软	中等	较硬	
	3~15	15~30	30~150	>150	
砂土	非常松散	松散	中等	密实	
	3~15	15~30	30~100	>100	

根据弯曲刚度有效率 η 的定义, 认为隧道外的水土压力荷载对于弯曲刚度有效率 η 没有影响, 因此在所有算例中荷载取值为隧道地面超载 20 kPa, 地面到隧道顶部的距离为 9.0 m, 土的平均重度为 20 kN/m³, 土的侧压力系数取 0.5。计算模型中管片接头的分布、接头数量与转角刚度, 以及地基土抗力系数均为拟分析的参数, 其变化范围如表 2 所示。

表 2 管片与荷载计算参数

Table 2 Calculation parameters of segment and load	
参数	数值
接头数量 n	6~10
计算直径 D/m	6
厚度 t/m	0.3
管片	混凝土弹性模量 E_c/kPa
	34.5×10 ⁶
	混凝土泊松比 ν
接头	混凝土泊松比 ν
	0.2
	接头转角刚度 $K_\theta/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$
衬砌	接头转角刚度 $K_\theta/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1})$
	10 ³ ~10 ⁵
	衬砌重度 $\gamma_c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
荷载	衬砌重度 $\gamma_c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
	25
	垂向荷载 P/kPa
地基	侧向荷载 q_1/kPa
	100
	侧向荷载 q_2/kPa
抗力	侧压力系数
	0.5
	地基抗力系数 $K_s/(10^3 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3})$
	3~100

为验证数值模拟结果的可靠性, 建立了不同地基抗力情况下无接头衬砌圆环数值计算模型, 并将其水平直径变化的结果与式 (4) 的结果进行比较。根据图 3 表示的计算结果对比可知, 数值计算结果比式 (4) 的计算结果略小且两者之间较为接近, 说明了数值模拟结果的可靠性。

2 弯曲刚度有效率影响因素分析

2.1 弯曲刚度有效率与接头位置的关系

接头位置角度 α 表示从管片环顶部沿顺时针方向的第一个接头与管片环顶部所成的角度。以此分析当管片接头处于不同位置时对于管片环整体刚度的影响。图 4 为当管片环接头分别为 6, 7, 8, 9 和 10 时, 弯曲刚度有效率随接头角度变化的规律。从中可以看出, 不同的接头角度对于管片环的刚度存在影响。并

且在接头数量不同情况下, 弯曲刚度有效率 η 的变化规律也不尽相同。如当接头数为 6 和 10 时, η 随着接头角度的增加先减小后增加; 当接头数为 8 时, η 随着接头角度增加先增加后减小; 当接头数量为 7 和 9 时, η 随着接头角度变化的影响不明显。

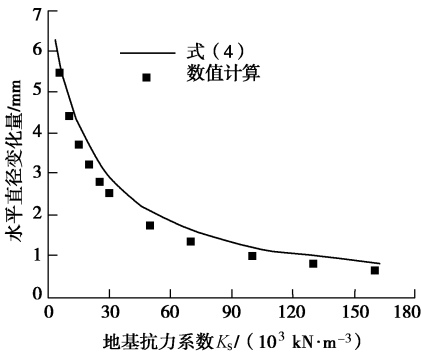


图 3 无接头衬砌环水平直径变化值公式解与数值解的比较
Fig. 3 Comparison of deformation of non-joint lining diameter between Eq. 4 and numerical results

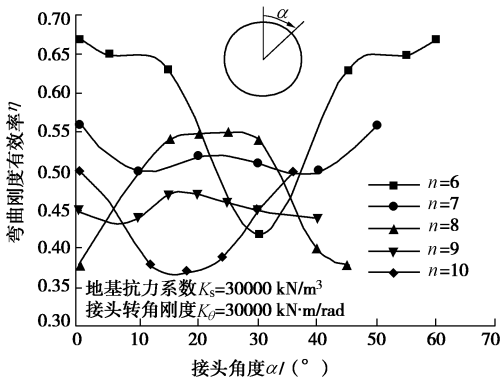


图 4 弯曲刚度有效率与接头角度位置关系
Fig. 4 Variation of effective bending rigidity ratio with joint angle

在图 1 所示的荷载模式下, 拱顶、拱底和两侧拱腰的弯矩值较大。在上述地方存在接头时管片环水平直径的变化量较大。拱顶(拱底)和两侧拱腰相比较而言, 拱腰处存在接头对于整个管片环弯曲刚度的降低更为明显。因此接头数为 6 和 10 的管片环, 当 $\alpha=0^\circ$ 时, 两侧拱腰处均为管片; 而随着 α 增加至某一角度时(6 接头管片环增加至 30° ; 10 接头管片环增加至 18°), 管片环在拱腰处存在接头而拱顶处成为管片, 此时整个管片环的弯曲刚度最低, 即弯曲刚度有效率最小。同理, 当接头数为 8 时, 在 $\alpha=0^\circ$ 的情况下, 拱顶(拱底)和两侧拱腰均由管片承受弯矩, 因此弯曲刚度大大提高。当接头数为偶数时, 由于结构对称的关系, 拱顶(拱底)或两侧拱腰处同时由接头或者由管片承受弯矩, 因此两种情况下弯曲刚度有效率差别较大。当接头数为 7 和 9 时, 由于接头

位置无法形成对称布置,无法出现在拱顶(拱底)或者两侧拱腰部位同时由接头或者管片承担弯矩,因此弯曲刚度有效率随 α 的变化不明显。

2.2 弯曲刚度有效率与接头转角刚度的关系

衬砌圆环的接头刚度提高,有利于衬砌环的整体刚度提高,因此随着接头刚度的增加,衬砌环的弯曲刚度有效率也随之增大,图5表示了当地基抗力系数为 $30 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$ 时,接头数量不同的衬砌圆环弯曲刚度有效率随接头刚度的变化规律。一般认为,接头数较少时整个管片的弯曲刚度较大,即弯曲刚度有效率 η 较高。但图5中显示,当接头数量为8时,衬砌环的弯曲刚度有效率相比于接头数量为9和10时要小。这是由于接头分布位置不同造成。结合图4,可以认为当接头数量为6或者10时,拼装时的接头角度 α 建议为 0° ,因此此时衬砌环的刚度最大;当接头数量为7和9时,接头角度对刚度影响不大;当衬砌环为8个接头时,建议的接头角度 α 为 22.5° 。在工程应用的范围内($K_\theta=1000 \sim 100000 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$),弯曲刚度有效率变化范围为 $0.1 \sim 0.85$ 。

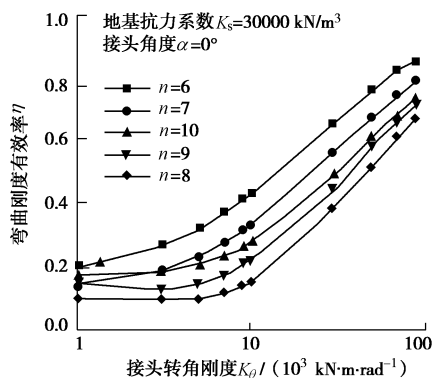


图5 弯曲刚度有效率与接头转角刚度关系

Fig. 5 Variation of effective bending rigidity ratio with joint rotation stiffness

2.3 地基抗力系数对弯曲刚度有效率的影响

盾构隧道衬砌圆环弯曲刚度有效率除了与衬砌环的尺寸构造,接头情况有关外,还与隧道周围地层情况有关。图6表示了计算直径为6 m,管片厚度为0.3 m,接头数量为6个,接头转角 α 为 0° 时,不同接头刚度在不同地基抗力系数情况下的弯曲刚度有效率变化规律。从图中可知,相同的接头刚度情况下,衬砌圆环的弯曲刚度有效率与地基抗力系数基本呈线性变化。且接头刚度越小时,弯曲刚度有效率随地基抗力系数变化越明显。

3 弯曲刚度有效率计算方法

通过前述的分析可知,盾构隧道衬砌管片环的弯

曲刚度有效率与多种因素有关,其中接头角度、接头刚度、接头数量和地基抗力系数对其的影响较为显著。因此建立的弯曲刚度有效率计算方法必须考虑上述所有因素。

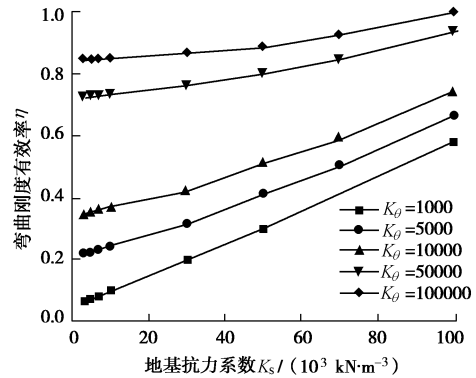


图6 弯曲刚度有效率与地基抗力系数关系

Fig. 6 Variation of effective bending rigidity ratio with soil resistance coefficient

由图4可知,当地基抗力系数和接头刚度一定时,接头角度 α 对弯曲刚度有效率 η 有显著影响,其关系近似可表示为

$$\eta(\alpha) = \begin{cases} \eta(0^\circ) (a_1 \cos n\alpha + a_2) & (n=6,8,10) \\ \eta(0^\circ) & (n=7,9) \end{cases} \quad (5)$$

式中, a_1 为待确定的系数,下同。

根据一系列的数值模拟结果显示,当地基抗力系数和接头角度一定时,弯曲刚度有效率 η 与接头刚度 K_θ 之间的关系可用下式表示:

$$\eta = b_1 (\lg K_\theta)^2 + b_2 \lg K_\theta + b_3 \quad (6)$$

另外,根据图6的显示,当接头刚度和接头角度一定时,弯曲刚度有效率 η 与地基抗力系数 K_s 之间基本呈线性关系,即可表示为

$$\eta = c_1 + c_2 K_s \quad (7)$$

综合考虑接头角度 α 、接头刚度 K_θ 和地基抗力系数 K_s 对于弯曲刚度有效率 η 的影响,可表示为

$$\eta = \begin{cases} [m_1 (\lg K_\theta)^2 + m_2 \lg K_\theta + m_3 K_s (\lg K_\theta)^2 + m_4 K_s \lg K_\theta + m_5 K_s + m_6] \times (m_7 \cos(n\alpha) + m_8) & (n=6,8,10) \\ m_1 (\lg K_\theta)^2 + m_2 \lg K_\theta + m_3 K_s (\lg K_\theta)^2 + m_4 K_s \lg K_\theta + m_5 K_s + m_6 & (n=7,9) \end{cases} \quad (8)$$

在实际的隧道工程中,计算直径约为6 m,厚度约为0.3 m的盾构隧道一般分块数为6。本文首先给出了计算直径为6 m,厚度为0.3 m,接头数量为6时,盾构隧道衬砌结构弯曲刚度有效率 η 的计算公式。

$$\eta = (0.1172 (\lg K_\theta)^2 - 0.5247 \lg K_\theta - 4.935 \times 10^{-7} K_s \cdot (\lg K_\theta)^2 + 1.931 \times 10^{-6} K_s \lg K_\theta + 3.922 \times 10^{-6} K_s +$$

$$0.5623) \times (0.1865 \times \cos(n\alpha) + 0.8135) \text{。} \quad (9)$$

值得指出的是, 计算方法未考虑实际管片中封顶块尺寸小于其他管片块对于衬砌环弯曲刚度有效率的影响, 在计算时均按管片环等分情况考虑。对于不同的衬砌直径与厚度以及分块情况的盾构隧道衬砌圆环弯曲刚度有效率的计算方法可参照本文式 (8) 确定。

为验证计算方法的准确性和适用性, 比较了不同接头刚度、地基抗力系数和接头角度情况下的各种计算方法得到的弯曲刚度有效率与数值模拟结果的比较。图 7 显示了接头角度为 0° 时, 不同接头刚度 ($K_\theta=1000, 10000, 50000 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$) 和不同地基抗力系数下弯曲刚度有效率不同计算方法与数值模拟结果的比较, 其中数据点为数值模拟的结果, 线为各种计算公式得到的结果。从图中可以看出, 文献[1, 6]中提出的计算方法均未考虑地基抗力系数对于弯曲刚度有效率的影响, 因此计算结果与数值模拟结果差别较大。而文献[7]中提出的方法虽考虑了地基抗力系数对于弯曲刚度有效率的影响, 但计算结果仍与数值模拟结果存在一定差距, 而本文提出的计算方法与数值模拟结果较为接近。图 8 为地基抗力系数为 30000 kN/m^3 时, 不同接头刚度和不同接头角度下弯曲刚度有效率不同计算方法与数值模拟结果的比较, 图中符号意义同图 7。由于文献[1]中提出的公式只适用于接头沿水平直径和垂直直径对称的情况, 因此当接头角度不为 0° 时, 该公式不适用。而文献[6, 7]提出的方法均未考虑接头角度对于弯曲刚度有效率的影响, 因此图中均表示为水平直线。根据数值模拟的结果显示, 弯曲刚度有效率随接头角度存在明显变化, 而本文提出的拟合公式计算结果与数值模拟结果较为接近。

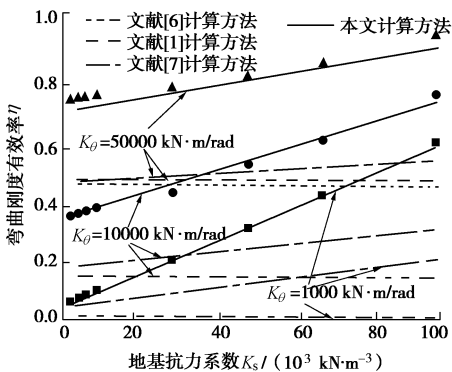


图 7 不同地基抗力系数和接头刚度情况下弯曲刚度有效率计算方法与数值模拟结果比较

Fig. 7 Comparison between analytical and numerical results of effective bending rigidity ratio in various soil resistance coefficients and joint rotation stiffness

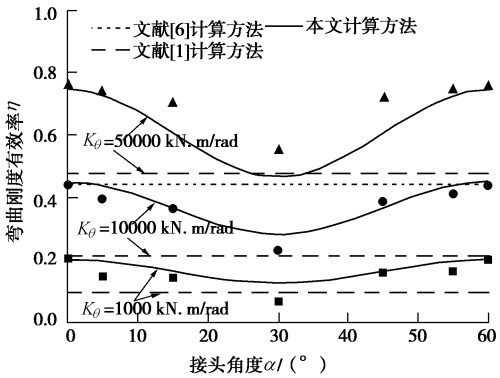


图 8 不同接头角度和接头刚度情况下弯曲刚度有效率计算方法与数值模拟结果比较

Fig. 8 Comparison between analytical and numerical results of effective bending rigidity ratio in various joint distributions and joint rotation stiffness

通过不同接头分布、接头刚度、地基抗力系数情况下, 其他文献的计算方法与本文给出的进行对比, 并给出了相应的数值模拟结果, 表明本文提出的计算方法与数值模拟结果较为接近。

为通过实际工程进一步验证计算方法的准确性与适用性, 本文以上海地铁隧道为例进行分析。上海地铁隧道断面计算半径为 2.925 m , 管片厚度为 0.35 m , 基本符合式 (9) 的计算假定。管片接头的抗弯刚度约为 $55000 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ ^[12-13], 地基抗力系数约为 10000 kN/m^3 (上海地区代表性软弱土层)^[14]。表 3 列出了不同计算方法和试验得到的上海地铁隧道衬砌弯曲刚度有效率的结果。从表中看出, 模型试验结果和经验取值约为 0.7, 本文的计算结果相比于其他方法更为接近实际, 因此证明了本文计算方法具有一定的准确性和适用性。

表 3 上海地铁隧道衬砌弯曲刚度有效率计算结果比较

Table 3 Comparison of effective bending rigidity ratios between model tests and various analytical methods

来源	数值
文献[7]公式	0.54
文献[8]公式	0.49
本文公式	0.64
模型试验 ^[14]	0.67
设计经验取值	0.7

值得指出的是, 本文的计算方法与其他解析方法一样并未考虑管片错缝拼装对于衬砌弯曲刚度有效率的影响, 而有研究^[14-15]表明错缝拼装相比于通缝拼装对衬砌刚度提高幅度约为 10%~20%, 因此在错缝拼装衬砌弯曲刚度有效率可通过提高通缝衬砌弯曲刚度有效率的简化方法计算。

4 结 论

(1) 不同接头角度对管片环弯曲刚度存在影响, 特别当接头数为偶数时, 影响较为明显; 当接头数为奇数时, η 基本保持不变。当接头数量为 6 和 10 个时, 弯曲刚度有效率 η 随着接头角度增加, 先减小后增加; 而接头数量为 8 个时, 弯曲刚度有效率 η 随着接头角度增加, 先增加后减小。

(2) 随着接头抗弯刚度 K_θ 的增加, 弯曲刚度有效率增加较为明显; 在工程应用的接头刚度范围内, 弯曲刚度有效率变化范围为 0.1~0.85。

(3) 相同的接头刚度情况下, 衬砌圆环的弯曲刚度有效率与地基抗力系数基本呈线性变化。且接头刚度越小时, 弯曲刚度有效率随地基抗力系数变化越明显。

(4) 给出了盾构隧道衬砌结构弯曲刚度有效率计算方法。该方法综合考虑接头数量、接头角度、接头抗弯刚度和地基抗力系数对弯曲刚度有效率的影响。通过一系列计算对比, 分析了本文计算方法与其他文献给出的计算方法之间的异同, 并和数值解与实际工程进行了比较。结果表明该计算方法具有较高的适用性和准确性。

参考文献:

- [1] 刘建航, 侯学渊. 盾构隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Shield-driven tunnels[M]. Beijing: China Railway Press, 1991. (in Chinese))
- [2] Japanese Society of Civil Engineers. The design and construction of underground structures[R]. Tokyo: Japanese Society of Civil Engineers, 1977.
- [3] KOYAMA Y, NISHIMURA T. Design of lining segment of shield tunnel using a beam-spring model[J]. Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute, Japan), 1998, **39**(1): 23 - 27.
- [4] 日本土木学会. 日本土木学会隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 朱伟, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. (Japan Society of Civil Engineers. Japanese Standard for Shield Tunneling[M]. ZHU Wei, translator. Beijing: China Construction Industry Press, 2001. (in Chinese))
- [5] UCHIDA K. Design and engineering of large bore slurry shield tunnel lining system for Trans-Tokyo Bay Highway[J]. Civil Engineering in Japan, 1992, **30**: 54 - 67.
- [6] MUIR Wood A M. The circular tunnel in elastic ground[J]. Géotechnique, 1975, **25**(1): 115 - 127.
- [7] LEE K M, GE X W. The equivalence of a jointed shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure[J]. Can Geotech J, 2001, **38**: 461 - 483.
- [8] 钟小春, 朱伟, 季亚平, 等. 盾构衬砌管片环弯曲刚度有效率的一种确定方法[J]. 地质与勘探, 2003, **39**(增刊): 185 - 189. (ZHONG Xiao-chun, ZHU Wei, JI Ya-ping, et al. The method to confirm the effective bending stiffness of shield-driven tunnel lining[J]. Geology and Prospecting, 2003, **39**(S): 185 - 189. (in Chinese))
- [9] 黄正荣, 朱伟, 梁精华. 修正惯用法管片弯曲刚度有效率 η 和弯矩提高率 ξ 的研究[J]. 工业建筑, 2006, **36**(2): 45 - 49. (HUANG Zheng-rong, ZHU Wei, LIANG Jing-hua. Study on effective bending rigidity ratios and moment increasing rates in modified routine method[J]. Industrial Construction, 2006, **36**(2): 45 - 49. (in Chinese))
- [10] SUPOT Teachavorasinskun. Tanan Chub-uppakarn. Influence of segmental joints on tunnel lining[J]. Tunnelling and Underground Space, 2010, **25**: 490 - 494.
- [11] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Excavation engineering handbook[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 1997. (in Chinese))
- [12] 张厚美, 过迟, 付德明. 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(3): 309 - 313. (ZHANG Hou-mei, GUO Chi, FU De-ming. A study on the stiffness model of circular tunnel prefabricated lining[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000(3): 309 - 313. (in Chinese))
- [13] 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(6): 744 - 748. (ZENG Dong-yang, HE Chuan. Numerical simulation of segment joint bending stiffness of metro shield tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004(6): 744 - 748. (in Chinese))
- [14] 徐凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究[D]. 上海: 同济大学, 2005. (XU Ling. Study on longitudinal settlement of shield tunnel in soft soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese))
- [15] 唐志成, 何川, 林刚. 地铁盾构隧道管片结构力学行为模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005(1): 85 - 89. (TANG Zhi-cheng, HE Chuan, LIN Gang. Study on mechanical behavior of segment of shield tunnel of metro with model test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005(1): 85 - 89. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)