

考虑横向性能的盾构隧道纵向等效刚度分析

叶飞^{1,2}, 何川², 朱合华³, 孙海东¹

(1. 长安大学桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 西南交通大学地下工程系, 四川 成都 610031;

3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 盾构隧道作为一个三维问题, 其横向性能与纵向性能是密切联系的, 将其横向和纵向割裂为两个平面问题, 虽然可使问题简单化, 但无法考虑纵横向性能的匹配关系。在横向修正惯用法的基础上, 将横向弯曲刚度有效率引入到纵向等效连续化模型的推导中, 对考虑横向刚度影响的盾构隧道纵向等效抗弯刚度进行理论推导, 得到了考虑横向刚度有效率的纵向等效抗弯刚度计算式, 从而初步将纵向刚度的分析与横向刚度的变化统一起来, 进而也说明了盾构隧道纵、横向抗弯刚度的相关性和匹配性。实例分析表明: 盾构隧道横向抗弯刚度的大小与纵向等效抗弯刚度关系密切, 表现为同方向、近线性关系变化, 即纵向抗弯刚度随横向抗弯刚度的增大而增大。

关键词: 盾构隧道; 横向性能; 修正惯用法; 横向刚度有效率; 纵向等效连续化模型

中图分类号: TU91 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)12-1870-07

作者简介: 叶飞(1977-), 男, 陕西石泉人, 博士, 副教授, 主要从事隧道及地下工程方面的研究与教学工作。E-mail: xianyefei@sohu.com。

Longitudinal equivalent rigidity analysis of shield tunnel considering transverse characteristics

YE Fei^{1,2}, HE Chuan², ZHU He-hua³, SUN Hai-dong¹

(1. Chang'an University, Shaanxi Provincial Major Laboratory for Highway Bridge & Tunnel, Xi'an 710064, China; 2. Department of

Underground Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Key Lab of Geotechnical and Underground

Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: As a three-dimensional structure, the transverse and longitudinal characteristics of a shield tunnel are closely correlative. Although it simplifies the three-dimensional problem by separating it into two plane problems, the relationship between the transverse and longitudinal characteristics cannot be taken into account in the analysis process. On the basis of the amendatory habitual analytical method, the longitudinal equivalent rigidity is deduced by considering the introduced transverse rigidity efficiency in the longitudinal equivalent continuous model. As a result, the formula to calculate longitudinal equivalent rigidity is gotten, which unifies the transverse and longitudinal characteristics of the shield tunnel and also demonstrates their correlation and matching. The practical analysis shows that the longitudinal equivalent rigidity increases with the increase of the transverse rigidity in a nearly linear relation.

Key words: shield tunnel; transverse characteristic; amendatory habitual analytical method; transverse rigidity efficiency; longitudinal equivalent continuous model

0 引言

对于盾构隧道这一细长拼装型地下结构, 人们习惯于将其纵向和横向割裂开来, 分别看成两个平面问题加以研究。尽管隧道的纵向问题是一个三维问题, 但目前大多数纵向分析主要采用将隧道纵向看作纯粹的一维问题, 忽略横向变形的影响, 将隧道简化为一维弹性地基模型进行求解, 需解决的主要问题是模拟纵断面方向上的等效刚度^[1]。现有的大量研究成果和结论也主要集中于“如何充分、完整地将由众多

管片拼装而成的隧道在纵向上等效成一根匀质梁”^[2]。

志波由纪夫等^[3]在盾构隧道纵向性能及计算模型方面做了大量研究工作, 较早提出了纵向等效连续化模型。该模型认为隧道横向为一匀质圆环, 在纵向上以刚度等效的方法把由接头和管片组成的盾构隧道等效为具有相同刚度和结构特性的均匀连续梁。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808020, 51178052); 中央高校基科研业务专项基金项目(CHD2011JC099)

收稿日期: 2010-09-21

随着盾构隧道的大量修建,中国对隧道纵向性能的研究近年来也正受到越来越多的关注。朱合华等^[4]在其提出的梁-接头模型中,对纵向考虑管片环间效应时考虑了相邻两环之间的剪切作用。田敬学等^[5]对“等效连续梁模型”进行了深化,提出了盾构法隧道纵向拉压刚度与弯曲刚度的计算方法,并将其应用于上海市地铁二号线区间隧道的计算。廖少明^[1]对各种地基模型下隧道纵向剪切传递效应进行了研究,结合纵向梁-弹簧模型与志氏模型,在认为纵向接头影响范围有限的前提下,讨论了盾构隧道纵向等效弯曲刚度的计算方法。徐凌^[2]在模型试验的基础上,结合已有研究成果,提出了广义纵向等效连续化模型,推导了考虑隧道环缝影响范围的纵向等效抗弯刚度、纵向轴向刚度的计算式。

在纵向等效连续化模型中,志氏模型是最早提出的模型,廖氏模型和徐氏模型均是在其基础上,作了一定的修正和完善,最大的特点即引入了环缝影响长度(或环缝影响范围)的概念,在考虑管片环纵向受弯变形时,对螺栓接头影响范围内和范围外分别考虑。

1 纵向等效分析方法中的问题探讨

分析已有各种等效连续化模型的纵向等效刚度分析方法,本文认为主要存在以下几点问题尚待进一步研究探讨。

1.1 管片环横向抗弯刚度的影响

盾构隧道横向和纵向均由单块管片拼装而成,横向的结构性能必然对纵向结构性能起着至关重要的影响和制约作用,其横向与纵向抗弯刚度是有着匹配关系的。但是,已有的纵向等效连续化模型几乎全部将隧道横向考虑为匀质圆环,忽略其横向刚度的变化,将隧道纵向问题视为一维问题,基于此而求出的纵向刚度无法考虑因横向刚度的变化对纵向性能的影响。而事实上,管片环的横向性能和纵向性能是相互影响相互制约的,将二者孤立考虑只是为了简化问题,使其容易求解。

1.2 平截面假定的适用性问题

在对盾构隧道纵向抗弯性能进行等效分析的时候,一般都假设横断面满足平截面假定,即隧道横断面上每一处的变形量与离中性轴的距离成正比。对于盾构隧道,其横断面是由数块管片构成的组合结构,由于横向螺栓(轴向接缝)的存在,会使得当隧道纵向发生弯曲变形的时候,横向管片与管片之间可能发生相对滑移,从而造成横断面的变形量不连续分布,即在横缝处出现间断或跳跃,致使平截面假定失效。

事实上,平截面假定是初等梁计算的基本假定,

是对横截面抗压能力较大的截面的一种简化假定,但对于横截面为空心的框架或管道结构,这种假定并不一定成立。

1.3 纵向螺栓的横向平均化问题

在进行纵向等效分析的时候,将纵向螺栓简化为在横向均匀连续分布。认为纵向连接螺栓在横向是连续分布的,由此得到纵向“螺栓环”(即纵向连接螺栓沿横向等效以后形成的“环”)的等效抗拉刚度。这种简化存在两个问题:其一,纵向螺栓在横向本身不是均匀分布的,而且,其分布形式还跟管片的拼装方式有关,如果是错缝拼装,纵向螺栓在横向的分布在各环之间还存在差异;其二,将纵向螺栓在横截面上的点分布简化为线分布,进而按圆环形式进行抗弯刚度等效,经这样等效后求出的变形会与实际有一定差异,而且,这种等效忽略了螺栓与混凝土管片间连接处的局部应力集中效应。

对以上3个问题,本文在后续分析中只对问题1,即横向抗弯刚度的影响进行了分析,并在推导纵向等效抗弯刚度时予以考虑。至于问题2和3,本文未对其进行深入探讨,依然使用了平截面假定,并将纵向螺栓在横向以线性评价化的方式予以分析。

2 纵向等效刚度计算分析

2.1 横向刚度的考虑

在对隧道结构受力分析的时候,最常见的分析模式即荷载结构模型和地层结构模型。其中认为地层对结构的作用只是产生作用在地下结构上的荷载(包括主动地层压力和被动地层抗力),以计算衬砌在荷载作用下产生的内力和变形的的方法称为荷载结构法;认为衬砌与地层一起构成受力变形的整体,并可按连续介质力学原理来计算衬砌和周边地层的计算方法称为地层结构法。

因为荷载结构法计算方法简单,工作量小,具有明确的受力概念及清楚的安全系数评价方法,工程设计人员可以得到结构的轴力、剪力、弯矩,直接用于结构的配筋计算^[6],中国地下铁道及铁路隧道设计规范中均推荐适用^[7]。在荷载结构法中,依据对管片接头力学上的处理方法,可以分为惯用计算法,修正惯用计算法,多较环计算法,梁-弹簧计算模型和梁-接头模型等方法。文献[8,9]都介绍了盾构隧道的主要设计方法,其中修正惯用法是一种常用方法^[10]。

本文对盾构隧道横向刚度讨论的主要目的是借以分析其对纵向刚度有效性的影响,所以直接应用了可以考虑横向刚度有效率的修正惯用计算模型,即 $\eta-\xi$ 法。在修正惯用计算法中,管片环横向抗弯刚度的

有效性是通过引入一横向弯曲刚度有效率 η 来实现的 (概念图如图 1 所示), 则其等效刚度为 ηEI , 即:

$$EI^* = \eta EI \quad (0 < \eta \leq 1) \quad (1)$$

式中 EI 为匀质管片环的抗弯刚度, EI^* 为非匀质环的等效抗弯刚度, η 为管片环横向弯曲刚度有效率。

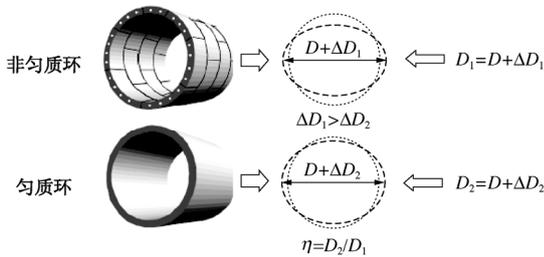


图 1 盾构隧道弯曲刚度有效率概念图^[11]

Fig. 1 Efficiency of transverse bending rigidity of shield tunnel

针对修正惯用法中刚度有效率问题, 现有研究主要集中在其影响因素及取值大小两方面。研究表明, 影响横向刚度有效率的主要因素有: 管片种类、尺寸、形状, 管片接头的结构特性、管片环间接头方式及结构特性等, 同时, 与管片所受荷载, 尤其是周围围岩的影响特别明显^[9, 11-13]。对于 η 的取值, 现场加载试验及室内加载试验的结果固然可信度较高, 但不同隧道尺寸、不同隧道接头、不同土层条件下的隧道横向刚度有效率取值是不同的, 而且进行结构加载试验的过程繁琐、复杂且不经济^[10], 所以, 目前设计计算时通错缝拼装隧道刚度有效率的范围较为广泛, 在确定某一隧道刚度有效率时往往凭经验判断^[14-15]。

本文未对盾构隧道横向刚度有效率问题展开深入研究, 仅借鉴了其对横向刚度问题的分析思路: 横向刚度有效率的取值是与其水平直径及竖直直径的变化是密切相关的。由式 (1) 和图 1 可得

$$EI^* = \frac{D + \Delta D_2}{D + \Delta D_1} EI \Rightarrow EI^* = \frac{1}{1 + \frac{\Delta D_1}{D}} EI \quad (2)$$

令 $\Delta D_2 = 0$, 即有

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Delta D_1}{D}} \quad (3)$$

2.2 考虑横向性能的纵向等效刚度分析

(1) 基本假定

a) 平截面假定, 即隧道横断面上每一处的变形量与离中性轴的距离成正比。

b) 螺栓在横向连续分布, 并认为管片环与“螺栓环”的半径近似相等, 均等于管片环的厚度中心形成的圆的半径。

c) 在纵向弯矩作用下, 管片环单元以中性轴为

界, 一侧受拉, 另一侧受压。受拉侧的拉力由螺栓承担, 受压侧的压力由管片承担。

d) 以两段管片环中心线内的长度 l 为一计算单元, 螺栓的受拉长度为其本身长度 l_b , 管片的受压长度为整个单元长度 l 。

e) 中性轴的位置和管片环内的应力分布沿隧道轴向不变。

f) 管片环上的应力在其厚度方向是等值分布的。

(2) 理论推导

取两段管片环中间线内的长度为分析单元, 其受到弯矩 M 作用后发生弯曲, 在管片环接头处产生转角 θ , 管片环单元受弯变形示意图如图 2 所示。弹性应力状态下管片单元纵向变形及应力图如图 3 (图中包含与横向刚度有效率密切相关的横向变形) 所示。

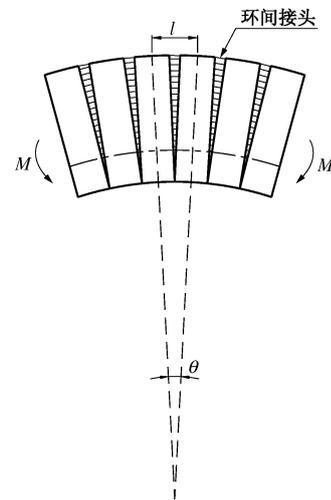


图 2 管片环单元受弯变形示意图

Fig. 2 Bending distortion of segment rings

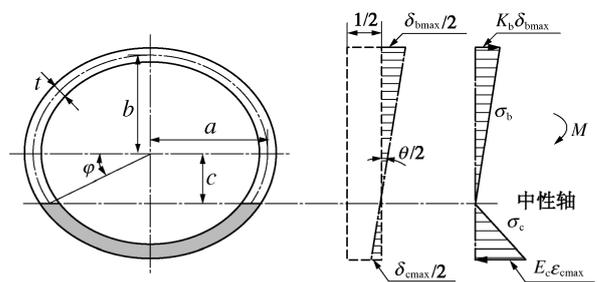


图 3 弹性应力状态下管片单元纵向变形及应力图

Fig. 3 Longitudinal distortion and stress under elastic condition

现取管片环截面进行分析, 如图 4 所示。图 4 中, ds 为管片环上任意取出微分单元, $d\alpha$ 为 dl 对应圆心角, x 为微元 ds 与中性轴的距离, 现假设管片微元 ds 满足式 (4):

中性轴以下 (管片受压侧, 假设隧道纵向向上弯曲):

$$\begin{cases} ds = \frac{a+b}{2} d\alpha \\ x = a \cos \alpha - c - (a-b)(1 - \sin \alpha) \end{cases}; \quad (4a)$$

中性轴以上 (螺栓受拉侧, 假设隧道纵向向上弯曲):

$$\begin{cases} ds = \frac{a+b}{2} d\alpha \\ x = a \cos \alpha + c - (a-b)(1 - \sin \alpha) \end{cases}。 \quad (4b)$$

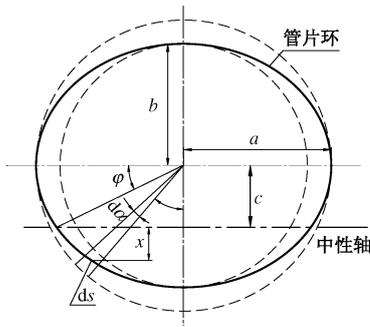


图 4 管片环截面分析图

Fig. 4 Segment ring section of shield tunnel

再根据图 2, 3, 由变形协调条件可得

$$\begin{cases} \delta_{b(\max)} = (b+c)\theta \\ \delta_{c(\max)} = (b-c)\theta \end{cases}。 \quad (5)$$

由力的平衡条件可得

$$\begin{aligned} & 2 \frac{E_c \delta_{c(\max)}}{l \cdot (b-c)} \int_0^{\frac{\pi}{2}-\varphi} [a \cos \alpha - c - (a-b)(1 - \sin \alpha)] \frac{a+b}{2} t d\alpha \\ &= 2 \frac{nE_b A_b}{A_s} \cdot \frac{\delta_{b(\max)}}{l_b \cdot (b+c)} \int_0^{\frac{\pi}{2}+\varphi} [a \cos \alpha + c - (a-b) \cdot \\ & \quad (1 - \sin \alpha)] \cdot \frac{a+b}{2} t \cdot d\alpha \quad , \quad (6) \end{aligned}$$

$$\text{又} \quad c \approx \frac{a+b}{2} \sin \varphi \quad , \quad (7)$$

$$\text{并设} \quad K_b = \frac{E_b A_b}{l_b} \quad , \quad (8)$$

将式 (5)、(7)、(8) 代入式 (6), 有

$$\begin{aligned} & \frac{E_c}{l} \int_0^{\frac{\pi}{2}-\varphi} [a \cos \alpha - c - (a-b)(1 - \sin \alpha)] \cdot \frac{a+b}{2} t \cdot d\alpha = \\ & \frac{nK_b}{A_s} \int_0^{\frac{\pi}{2}+\varphi} [a \cos \alpha + c - (a-b)(1 - \sin \alpha)] \cdot \frac{a+b}{2} t \cdot d\alpha \quad . \quad (9) \end{aligned}$$

由式 (9) 解得中性轴的位置 φ 满足:

$$\frac{nK_b l}{E_c A_s} = \frac{a \cos \varphi + [b-a - \frac{\pi(a+b)}{4}] \sin \varphi + \frac{a+b}{2} \varphi \sin \varphi + (a-b)\varphi + (1 - \frac{\pi}{2})(a-b)}{a \cos \varphi + [a-b + \frac{\pi(a+b)}{4}] \sin \varphi + \frac{a+b}{2} \varphi \sin \varphi - (a-b)\varphi + (1 - \frac{\pi}{2})(a-b)} \quad (10)$$

同理, 由弯矩平衡条件, 有

$$2 \frac{E_c \delta_{c(\max)}}{l \cdot (b-c)} \int_0^{\frac{\pi}{2}-\varphi} [a \cos \alpha - c - (a-b)(1 - \sin \alpha)]^2 \cdot$$

$$\frac{a+b}{2} t \cdot d\alpha + 2 \frac{nE_b A_b}{A_s} \cdot \frac{\delta_{b(\max)}}{l_b \cdot (b+c)} \cdot$$

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}+\varphi} [a \cos \alpha + c - (a-b)(1 - \sin \alpha)]^2 \cdot \frac{a+b}{2} t \cdot d\alpha = M \quad . \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{即: } & 2 \frac{E_c \theta}{l} \int_0^{\frac{\pi}{2}-\varphi} [a \cos \alpha - c - (a-b)(1 - \sin \alpha)]^2 \cdot \frac{a+b}{2} t \cdot \\ & d\alpha + 2 \frac{nK_b \theta}{A_s} \int_0^{\frac{\pi}{2}+\varphi} [a \cos \alpha + c - (a-b)(1 - \sin \alpha)]^2 \frac{a+b}{2} \cdot \\ & t d\alpha = M \quad , \quad (12) \end{aligned}$$

解得

$$\theta = \frac{M}{\frac{E_c \lambda_1}{l} + \frac{nK_b \lambda_2}{A_s}} \quad . \quad (13)$$

其中, $\lambda_1 = (a+b)t (A_1 + A_2 + A_3 - A_4 - A_5 - A_6 - A_7 + A_8 - A_9)$; $\lambda_2 = (a+b)t (A_1 - A_2 + A_3 + A_4 - A_5 + A_6 + A_7 + A_8 - A_9)$; $A_1 = \frac{4a^2 - 6ab + 3b^2}{4} \pi - 2(a-b)^2$; $A_2 = (\frac{a^2 - b^2}{2} \pi + a^2 - 4ab + 3b^2) \cdot \sin \varphi$; $A_3 = [\frac{(a+b)^2}{8} \pi + a^2 - b^2] \cdot \sin^2 \varphi$; $A_4 = (2a^2 - 3ab + \frac{3b^2}{2}) \cdot \varphi$; $A_5 = (a^2 - b^2) \cdot \varphi \sin \varphi$; $A_6 = \frac{(a+b)^2}{4} \cdot \varphi \sin^2 \varphi$; $A_7 = (a^2 + \frac{b^2}{2}) \cdot \sin \varphi \cos \varphi$; $A_8 = (a^2 - ab) \cos^2 \varphi$; $A_9 = 2a(a-b) \cdot \cos \varphi$ 。而等效梁的转角为

$$\theta = \frac{Ml}{(EI)_{eq}} \quad . \quad (14)$$

由式 (13)、(14) 得

$$(EI)_{eq} = E_c \lambda_1 + \frac{nK_b \lambda_2}{A_s} \quad . \quad (15)$$

式 (15) 即为考虑横向刚度变化的纵向等效刚度。

式 (4) ~ (15) 中: a, b 为管片环截面的长轴与短轴 (分别取水平和竖直向的管片环截面中心到管片中心的距离); c, φ 为中性轴的位置; θ 为截面转角; $\delta_{b(\max)}$ 为受拉侧螺栓的最大变形量; $\delta_{c(\max)}$ 为受压侧管片的最大变形量; E_c 为管片弹性模量; t 为管片厚度; K_b 为接头螺栓的平均线刚度; E_b 为螺栓弹性模量; A_b 为螺栓横截面面积; A_s 为隧道横截面面积; l_b 为螺栓长度; n 为纵向螺栓个数; l 为两环管片中心线间的距离, 即一环管片的长度。

由图 1~3, 可得

$$D = a + b \quad , \quad (16)$$

$$\Delta D_1 = a - b \quad . \quad (17)$$

将式 (16)、(17) 代入式 (3) 得

$$\eta = \frac{a+b}{2a}, \quad (18)$$

即

$$\eta = \frac{1+\frac{b}{a}}{2} \quad (19)$$

式(19)中, 令 $\psi = \frac{b}{a}$ ($0 \leq \psi \leq 1$), 本文定义其为横向刚度影响系数, 此时横向刚度有效率为

$$\eta = \frac{1+\psi}{2} \quad (0 \leq \psi \leq 1) \quad (20)$$

3 实例分析

现假定隧道管片设计及材料参数如表1所示, 以下分别用本文提出的理论方法及数值分析方法, 求得在不同横向刚度影响系数, 即不同横向刚度有效率条件下, 盾构隧道的纵向等效刚度。

表1 管片设计及材料参数

Table 1 Design and material parameters of segments

R_o	R_i	n	r_b	l	E_b	E_c	l_b
/m	/m	/根	/m	/m	/10 ⁵ MPa	/10 ⁴ MPa	/m
3.10	2.75	17	0.015	1	2.0	3.45	0.4

3.1 理论分析方法

分别取横向刚度有效率为1, 0.9, 0.8, 0.7, 求得对应纵向等效抗弯刚度及横向刚度影响系数如表2所示。

表2 不同横向刚度有效率条件下的纵向等效抗弯刚度

Table 2 Longitudinal equivalent rigidity values under different transverse rigidity efficiencies

横向刚度有效率 η	a/m	b/m	横向刚度影响系数 ψ	中性轴位置 $\varphi(^{\circ})$	λ_1	λ_2	纵向等效抗弯刚度 $(10^7 \text{ kN}\cdot\text{m}^2)$
1	2.925	2.925	1	55	0.178	64.232	6.614
0.9	3.25	2.6	0.8	51	0.129	58.839	5.941
0.8	3.656	2.194	0.6	47	0.086	54.201	5.360
0.7	4.178	1.672	0.4	43	0.0942	48.157	4.823

图5,6分别为求得纵向等效抗弯刚度与横向刚度有效率, 及纵向等效抗弯刚度与横向刚度影响系数关系曲线。由图5,6可以看出: 盾构隧道横向抗弯刚度大小与纵向等效抗弯刚度关系密切, 表现为同方向、近线性关系变化, 即纵向抗弯刚度随横向抗弯刚度的增大而增大。

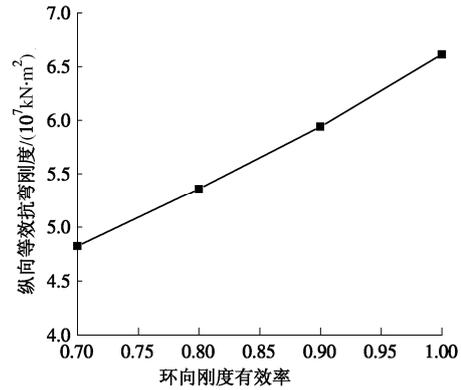


图5 理论分析求得的纵向等效抗弯刚度与横向刚度有效率关系曲线

Fig. 5 Relationship between longitudinal equivalent rigidity and transverse rigidity efficiency from theoretical analysis

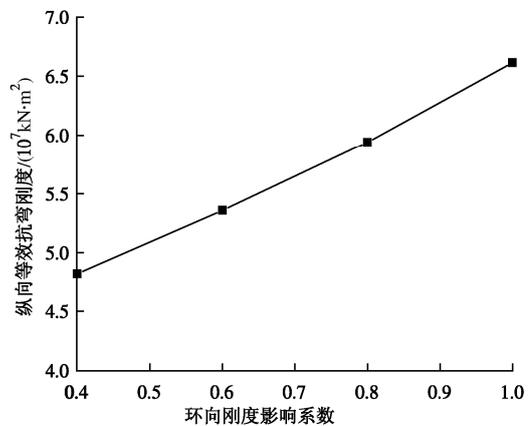


图6 纵向等效抗弯刚度与横向刚度影响系数关系曲线

Fig. 6 Relationship between longitudinal equivalent rigidity and coefficient of transverse rigidity efficiency

3.2 数值分析方法

为验证前述理论分析结果的合理性, 以下利用大型通用软件 Ansys 进行数值分析验证。

为研究问题的方便, 结合本文的研究思路, 把模型考虑成均质连续的, 并借鉴前人的研究成果^[1-2, 16-17], 在连续体模型中考虑环缝的影响, 把横向接缝影响范围的管片体刚度做一个整体折减(其管片环弹性模量取为原始弹性模量的0.4倍, 折算长度依据常用连接螺栓的长度, 取为0.4m), 通过调整横向管片的弹性模量的方式改变横向刚度有效率, 考虑在同样大小荷载作用下的模型纵向挠度, 进而分析其纵向刚度的变化情况。

依据表1, 分析原型盾构隧道管片环内直径为5.5m, 外直径为6.2m, 厚度0.35m, 环宽为1m, 使用C50钢筋混凝土管片, 混凝土弹性模量取 3.45×10^4 MPa, 泊松比取0.17。计算模型纵向取20环管片环长度, 即总长20m。在两端下半断面施加X, Y方向上的位移约束(类似于简支梁), 整体计算模型如图7所示。



图 7 有限元计算模型

Fig. 7 FEM analysis model

在模型中部施加一集中荷载 P (本文取为 100 kN), 当横向刚度有效率为 1.0 时, 算得其纵向最大挠度为 0.260×10^{-3} m, 由材料力学知识, 当集中力作用于简支梁跨中截面时, 其最大挠度为

$$f = \frac{Pl^3}{48EI} \quad (21)$$

式中 f 为挠度; P 为集中荷载; l 为梁长度。可反算得抗弯刚度为 $6.41 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 。

同理, 当横向刚度有效率分别取 0.9, 0.8, 0.7 时, 可分别求得其纵向最大挠度和纵向等效抗弯刚度, 如表 3 所示。

表 3 不同横向刚度有效率时的纵向等效抗弯刚度

Table 3 Longitudinal equivalent rigidity under different transverse rigidity efficiencies

横向刚度有效率	纵向最大挠度 $f/(10^{-3} \text{ m})$	纵向等效抗弯刚度 $EI/(10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2)$
1.0	0.260	6.410
0.9	0.289	5.767
0.8	0.325	5.128
0.7	0.371	4.492

依据表 3 可绘制通过数值分析得到的纵向等效抗弯刚度与横向刚度有效率的关系曲线, 如图 8 所示。

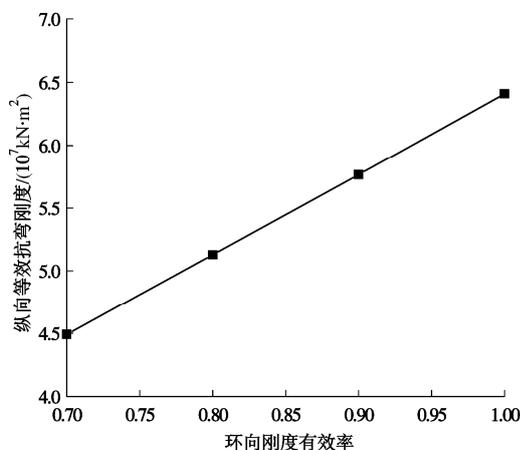


图 8 有限元求得的纵向等效抗弯刚度与横向刚度有效率关系曲线

Fig. 8 Relationship between longitudinal equivalent rigidity and transverse rigidity efficiency from FEM

比较 3.1 及 3.2 节中的理论分析与数值分析结果, 在相同管片参数条件下, 不同横向刚度有效率下的纵向等效抗弯刚度, 不管是从量值大小还是从曲线 (图 5 和图 8) 变化规律上来看, 二者都非常接近, 还可以看出二者呈线性关系的变化规律。

4 结 论

本文在考虑盾构隧道横向性能, 即基于横向修正惯用法的基础上, 对其纵向性能进行了理论推导, 讨论了盾构隧道纵向等效抗弯刚度随横向刚度有效率的变化而变化的规律。为了简化计算, 文中的推导过程进行了相应简化, 得到了以下几点结论。

(1) 通过隧道断面中心到水平截面中心及竖直截面中心的距离 a, b 之间的关系来反应横向刚度的变化, 这是基于修正惯用法中接头对横向刚度影响的分析方法而来, 即文中的图 1, 但该图中 ΔD_2 的值是不一定为零的, 而且是随管片相关参数的变化而变化的, 本文假设其为零也是为了分析过程简便, 事实上, 若取该值不为零, 采用文中的类似过程也可以进行分析。

(2) 图 4 中的微元 ds 及微元与中性轴的距离 x , 本文按照式 (4) 进行了简化, 这完全是为了方便计算求解, 进而反应纵向刚度随横向刚度变化的趋势和规律。

(3) 文中推导过程单纯从隧道结构角度出发, 未考虑实际应用中结构与地层的相互作用。在算例的理论分析中, 取 $a=3.25$ m, $b=2.6$ m; 当 $a=3.656$ m, $b=2.194$ m; $a=4.178$ m, $b=1.672$ m, 这在实际工程中是不可能发生的, 因为地层水平抗力产生的弯矩会抵消一部分荷载产生的环向弯矩, 抑制了隧道的横向变形, 相当于增加了隧道结构的环向抗弯刚度, 提高了环向刚度有效率。

(4) 实例分析表明, 盾构隧道横向抗弯刚度的大小与纵向等效抗弯刚度关系密切, 表现为同方向变化, 即纵向抗弯刚度随横向抗弯刚度的增大而增大。

(5) 进一步分析发现, 在实际工程中, 可以通过量测隧道断面的“横鸭蛋”变形情况, 应用本文的分析结论, 计算不同“横鸭蛋”条件下的纵向等效抗弯刚度值。即, 通过量测管片中心的水平距离 ($2a$) 和垂直距离 ($2b$), 反算其纵向抗弯刚度。

参考文献:

[1] 廖少明. 圆形隧道纵向剪切传递效应研究[D]. 上海: 同济大学, 2002. (LIAO Shao-ming. Research on the effect of longitudinal shear transfer on circular tunnel lining[D].

- Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese))
- [2] 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 the longitudinal settlement of shield tunnel in soft soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese))
- [3] 志波由纪夫, 川島一彦, 大日方尚己, 加納尚史. ツールドトンネルの耐震解析に用いる長手方向覆工剛性の評価法[C]// 土木学会論文集, 1988: 319 - 327. (SHIBA YUKIO, KAWASHIMA KAZUHIKO, OBINATA NAOMI, et al. An evaluation method of longitudinal stiffness of shield tunnel linings for application to seismic response analyses[C]// Proceedings of Japan Society of Civil Engineering, 1988: 319 - 327. (in Japanese))
- [4] 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 He-hua, CUI Mao-yu, YANG Jin-song. Design model for shield lining segments and distribution of load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(2): 190 - 194. (in Chinese))
- [5] 田敬学, 张庆贺. 盾构法隧道的纵向刚度计算方法[J]. 中国市政工程, 2001(3): 35 - 37. (TIAN Jing-xue, ZHANG Qing-he. Calculation of longitudinal rigidity of shield tunnels[J]. China Municipal Engineering, 2001(3): 35 - 37. (in Chinese))
- [6] 官林星. 考虑盾构隧道施工过程的衬砌内力计算方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2004. (GUAN Lin-xing. Research on computational method of internal force of shield lining considering construction process[D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese))
- [7] 张厚美, 吕国梁. 圆形隧道衬砌结构计算模型综述[J]. 世界隧道, 2000(2): 1 - 6. (ZHANG Hou-mei, LÜ Guo-liang. Review on calculating models of lining for circular tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2000(2): 1 - 6. (in Chinese))
- [8] 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 Shi-you. 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))
- [9] 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. (ZHU Wei, translator. Specification and explanation of tunnel (shield tunnel)[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001. (in Chinese))
- [10] 黄宏伟, 徐 凌, 严佳梁, 等. 盾构隧道横向刚度有效率研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(1): 11 - 18. (HUANG Hong-wei, XU Ling, YAN Jia-liang, et al. Study on transverse effective rigidity ratio of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(1): 11 - 18. (in Chinese))
- [11] YUKINORI KOYAMA. Present status and technology of shield tunneling method in Japan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003(18): 145 - 149.
- [12] LEE K M, HOU X Y, GE X W, et al. An analytical solution for a jointed shield-driven tunnel lining[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, **25**(4): 365 - 390.
- [13] LEE K M, GE X W. The equivalence of a jointed shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure[J]. Journal of Canadian Geotechnical Engineering, 2001(38): 461 - 483.
- [14] CHEN Bao, WEN Zhu-yin. Elasto-plastic analysis for the effect of longitudinal uneven settlement[C]// Reclaiming the underground space-Proceedings of the ITA World Tunnelling Congress 2003. Rotterdam: Balkema, 2003.
- [15] 丁春林, 周书明, 周顺华. 盾构施工对隧道围岩内力和地层变形的影响[J]. 中国公路学报, 2002, **15**(4): 62 - 65. (DING Chun-lin, ZHOU Shu-ming, ZHOU Shun-hua. Shield construction's influence on the surrounding rock's inner force for the tunnel and stratum deformation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, **15**(4): 62 - 65. (in Chinese))
- [16] 黄正荣. 基于壳-弹簧模型的盾构衬砌管片受力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (HUANG Zheng-rong. Study on the mechanics character of shield tunnel segment with shell-spring model[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [17] 林永国. 地铁隧道纵向变形结构性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2001. (LIN Yong-guo. Study of longitudinal structural characteristics of metro tunnel in deformation[D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese))