

盾构隧道纵向结构变形模式及理论模型

陈 拴¹ 吴怀娜¹ 沈水龙² 陈仁朋¹

(1. 湖南大学, 湖南长沙 410082; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 盾构隧道在长期运营中极易发生不均匀沉降及纵向结构变形, 因而有必要建立隧道纵向结构计算模型, 分析隧道纵向变形及内力特征。首先探讨隧道纵向变形模式, 将隧道变形归纳为两种模式: ①弯曲变形模式; ②错台变形模式。其次针对现有纵向结构计算模型进行总结并分析其优缺点, 根据模型的简化过程将现有模型归纳为两类: ①纵向管片环-接头模型; ②纵向等效连续化模型。针对隧道实际剪切错台变形的特点, 重点介绍一种基于铁木辛柯梁理论的隧道纵向连续化模型, 并通过实例分析其优越性。

关键词: 盾构隧道; 纵向结构模型; 铁木辛柯梁理论; 错台变形

中图分类号: U451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)S1-0085-08

Longitudinal structural deformation mode and theoretical model of shield tunnel

Chen Shuan¹ Wu Huaina¹ Shen Shuilong² Chen Renpeng¹

(1. Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Shield tunnels are often subjected to differential settlement and longitudinal structural deformation during long-term operation. In order to obtain the additional internal forces and joint deformation induced by longitudinal deformation, it is necessary to establish a longitudinal structural model. This paper investigates the deformation pattern of shield tunnel in longitudinal direction. The deformation patterns are divided into the following two types: a) bend mode; and b) dislocation mode. The existing longitudinal structural models are summarized and divided into the following two categories: a) segmental ring-spring model; and b) equivalent continuous model. The advantages and disadvantages of these models are discussed. An equivalent continuous model based on Timoshenko theory, which is able to consider the shearing dislocation of the tunnel, is highlighted. Based on a case study, the advantages of the Timoshenko simplified model are verified.

Keywords: shield tunnel; longitudinal structural model; Timoshenko theory; dislocation

E-mail: wuhn@hnu.edu.cn

引 言

沿海软土地区地铁隧道多采用盾构法施工, 随着运营时间的增加, 由于区域地面沉降、临近施工、隧道渗漏水、列车动荷载以及隧道工后沉降等影响, 盾构隧道会产生纵向变形和结构老化问题^[1]。严重的差异沉降不仅会影响隧道结构和接头的安全性、耐久性、防水性能, 而且会直接降低列车轨道平顺度、乘坐舒适度, 甚至危及地铁运营安全。

隧道纵向变形控制除了在运营期间控制及排除

可能的影响外, 还应在隧道设计之初考虑对结构纵向变形的适应性和安全性。国际隧道协会 (ITA)^[2] 强调有必要将隧道纵向变形的影响列入特殊荷载加以考虑。日本隧道标准规范 (盾构篇)^[3] 指出需要考虑地基不均匀沉降对隧道纵向结构的影响并应采取相应控制措施。尽管隧道纵向变形已得到了重视, 但当前隧道设计依然是在隧道纵向沿线选择典型剖面进行横向设计, 隧道纵向结构设计尚未得到有效实施。

建立隧道纵向结构模型是纵向变形分析和结构设计的基础。当前隧道纵向变形研究尚处于起步研究阶段。国内外学者从不同角度出发提出了相应的隧道纵向结构变形分析简化模型。本文从隧道变形模式出发, 对现有纵向结构理论模型进行归纳总

基金项目: 国家自然科学基金(51508323, 51878267)

作者简介: 吴怀娜, 博士, 副教授

收稿日期: 2019-02-27

结, 并对其优缺点进行评述。针对盾构隧道在实际中发生的剪切错台变形, 本文着重介绍了一种基于铁木辛柯梁理论的隧道模型, 以为实际隧道纵向结构设计的理论研究提供参考。

1 盾构隧道纵向变形模式

盾构隧道衬砌是由管片拼接成环, 管片与管片之间、环与环之间采用螺栓连接。管片之间的接缝连接处成为了隧道结构受力的薄弱环节。当隧道受到外力时, 接缝的变形远远大于管片自身的变形, 是构成隧道整体变形的的主要因素^[4]。当前针对隧道纵向结构变形模式的观点可分为两类^[5]: (1) 弯曲变形模式; (2) 错台变形模式。图 1 为两种隧道变形模式示意图^[5]。

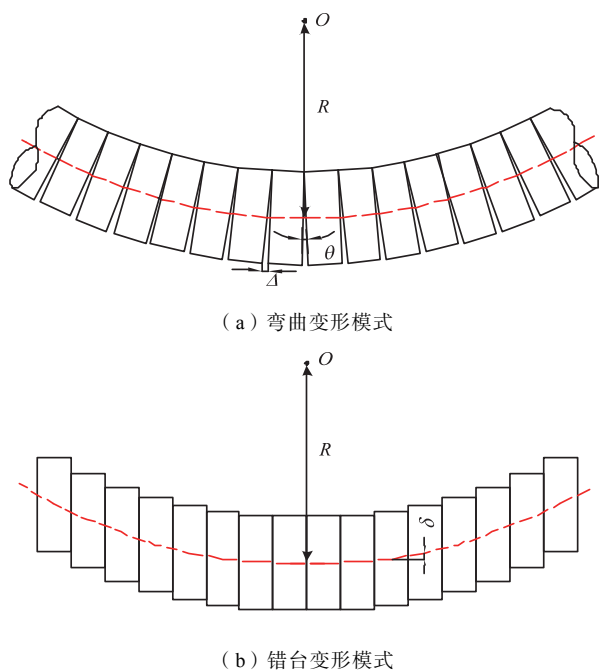


图 1 两种隧道纵向变形模式示意图

Fig.1 Longitudinal deformation modes of tunnel

(1) 弯曲变形模式。

弯曲变形模式中管片环绕隧道变形曲线的中心点刚度旋转, 引起管片环内侧混凝土受压, 外侧螺栓受拉, 环缝张开。环缝张开量的计算公式为:

$$\Delta = \frac{lD}{R} = lD \frac{|f''(x)|}{\sqrt{(1+f'(x)^2)^3}} \quad (1)$$

式中: D 为管片环外径; l 为环宽; $f(x)$ 为隧道变形曲线方程; R 为变形曲线的曲率半径。

(2) 错台变形模式。

错台变形模式中管片环无刚度旋转, 环间螺栓在剪切作用下产生差异沉降, 隧道变形曲线由相邻衬砌环的差异沉降逐环累积而成。环间错台量的计算公式为:

$$\delta = R - \sqrt{R^2 - l^2} = f(x+l) - f(x) \quad (2)$$

以往认为盾构隧道纵向变形主要为弯曲变形模式。郑永来^[6]、叶耀东^[7]等基于弯曲变形模式确定螺栓受拉破坏及密封垫漏水时隧道的临界曲率值。周宁等^[8]基于纵向弯曲变形模式计算越江隧道在不同曲率下的环缝张开量, 并根据密封垫防水控制标准反推环缝变形界限值。王慧等^[9]基于弯曲变形的纵向分析方法对环缝张开量开展可靠度分析。Huang 等^[10]在纵向弯曲变形模式的基础上分析了隧道纵向变形引起的横向压扁变形及附加内力。

另外一些学者对隧道纵向变形模式持有不同的观点。王如路^[11-12]基于隧道渗漏水的现场观测情况, 分别针对两种变形模式下环缝变形量与接头密封垫防水效果的关系进行分析比较, 认为隧道环间变形是以错台变形为主。樊振宇^[13]通过数值模拟认为纵向变形由弯曲变形和错台变形共同组成, 并且通缝拼装的隧道以弯曲变形为主, 错缝拼装则以错台变形为主。

正确认识隧道纵向结构变形模式对建立隧道纵向结构模型、隧道纵向变形分析及结构设计等具有显著意义。

2 传统的盾构隧道纵向计算模型

隧道纵向模型的建立是纵向变形分析和结构设计的基础。现有的隧道纵向结构分析模型主要分为两类, 一类是将接头具体化的纵向管片环-接头模型, 另一类是将接头和管片一体化的纵向等效连续化模型。表 1 为现有盾构隧道纵向计算模型分类及其优缺点。

(1) 纵向管片环-接头模型。

纵向管片环-接头模型又可以分为梁-弹簧模型、梁-接头单元模型、壳-弹簧模型、三维骨架模型, 后者归纳为该类型因为它们是针对衬砌环的横向扩展, 在纵向上还是以管片环-接头为模式。

纵向梁-弹簧模型是西野健三等^[14]、小泉淳等^[15-16]提出的, 是最常用的纵向管片环-接头模型。如图 2 所示, 该模型以梁单元模拟衬砌环的弯曲和剪切效应, 以拉压、剪切和转动弹簧模拟环间接头

表 1 盾构隧道纵向计算模型
Table 1 Calculation model of shield tunnel in longitudinal direction

类型	分类	优缺点	文献
纵向管片环-接头模型	1 维	梁-弹簧模型 一定程度上模拟管片环和接头的变形	西野健三等 ^[14] 小泉淳等 ^[15-16]
		梁-接头单元模型 和力学效应; 计算繁琐, 接头刚度难以	朱合华 ^[17-18]
	3 维	壳-弹簧模型 确定。 三维骨架模型	朱伟等 ^[19] 小泉淳等 ^[15]
纵向等效连续化模型	1 维	等效梁模型 计算简单, 便于应用; 隧道为弯曲变形,	志波由纪夫等 ^[20-22]
	3 维	等效柱壳模型 忽略错台变形	廖少明 ^[23]

对衬砌环的约束效应。其中, 拉压、剪切及转动弹簧的刚度需要通过实验测定。纵向梁-弹簧模型可以在一定程度上模拟衬砌环和接头的变形和力学效应, 可以得到两相邻管片间的不连续变形量, 不足之处在于没有考虑隧道横向刚度对纵向变形的影响, 同时计算较为繁琐, 弹簧刚度也难以确定。

纵向梁-接头单元模型是朱合华等^[17-18]提出的, 该模型从结构的非线性出发, 引入了非线性介质力学数值分析的古德曼单元的思想, 将接头的拉压、剪切及转动效应用一维单元来模拟。对衬砌环径向和切向采用不同的剪切刚度系数以反映错缝拼接对隧道衬砌整体系统的受力加强作用。

朱伟等^[19]将纵向梁-弹簧模型延伸至三维, 环与环之间的接头用弹簧模拟, 提出了壳-弹簧模型, 既能反映隧道衬砌的横向结构性能 (包括管片断面边缘弯曲应力集中), 又能反映衬砌纵向结构性能, 从而更好地反映隧道纵向变形状态。

小泉淳^[15]、Blom^[24]、黄钟暉^[25]、Van Empel^[26]、包鹤立^[27]等对管片的横向及纵向接头均作了具体的建模, 以壳单元或实体单元对管片进行模拟, 以弹簧的拉压、剪切和转动模拟管片间螺栓约束效应, 称为三维骨架模型。这种模型能够比较真实地反映隧道衬砌在通缝拼装或错缝拼装条件下隧道结构的变形状态。但是, 该模型非常复杂, 需要借助于有限元方法进行计算, 且其设计参数众多, 接头各方向弹簧参数难以确定, 实际应用比较困难。

(2) 纵向等效连续化模型。

纵向等效连续化模型首先是由志波由纪夫等^[20-22]提出的。该模型把隧道横向等效为一均质圆环, 在纵向上以刚度等效的方法把由接头和管片组成的隧道等效为具有相同刚度和结构特性的均匀连续梁。分析中纵向等效连续化模型有两种形式: ①三维的等效柱壳模型^[28-29], 如图 3 所示; ②不考虑横向变

形影响的一维简化等效梁模型^[23,30-33], 如图 4 所示。后者计算简单, 目前大多数纵向分析均采用这种模型。

纵向等效弯曲刚度是纵向等效化模型的最为关键性的参数, 影响模型的计算准确度。目前等效弯曲刚度计算方法有多种, 最为典型的包括有如下 3 种: ①由志波由纪夫等^[21]提出的按环缝截面刚度等效的计算方法; ②村上博智等^[34]的纵向接缝管体组合等效法; ③廖少明^[23]考虑环缝影响范围的修正计算方法。

志波由纪夫等^[21]以一环全部管片体与环缝作为一体进行等效, 其结果夸大了接缝的影响, 忽略了接缝影响范围以外管片体的影响。其等效弯曲刚度计算公式如下所示:

$$(EI)_{eq} = \frac{\cos^3 \psi}{\cos \psi + (\pi/2 + \psi) \sin \psi} E_s I_s \quad (3)$$

$$\psi + \cot \psi = \pi \left(\frac{1}{2} + \frac{K_b l_b}{E_s A_s} \right) \quad (4)$$

式中: ψ 为中性轴的位置; E_s 为隧道弹性模量; I_s 为隧道截面惯性矩; A_s 为隧道截面积; l_b 为螺栓长度; K_b 为纵向螺栓的弹性刚度系数, $K_b = nk_b$, 其中 k_b 为单个螺栓弹性刚度系数, n 为纵向螺栓个数。由志波由纪夫的方法得到的上海地铁隧道纵向刚度有效率为 1/15。

村上博智等^[34]将隧道纵向等效为接头与管片的组合体, 但对截面的参数分析不如第一种方法有明确的解析, 在确定环缝转动刚度中, 一些关键参数如局部混凝土压缩刚度等需要试验确定, 其表达式为

$$(EI)_{eq} = \frac{K_{r\theta}}{K_{r\theta} + E_s I_s / l_s} E_s I_s \quad (5)$$

式中: $K_{r\theta}$ 为环缝转动刚度, 需要通过试验确定。

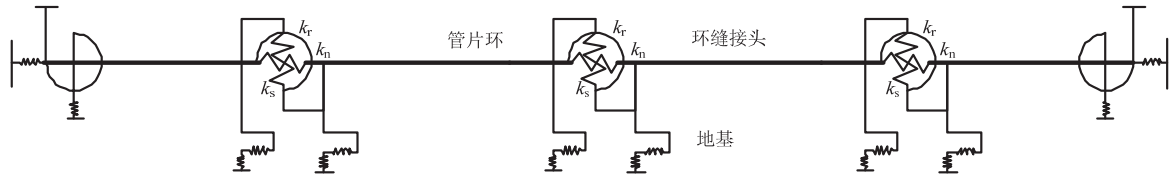


图2 纵向梁-弹簧模型^[30]

Fig.2 Longitudinal beam-spring model^[30]

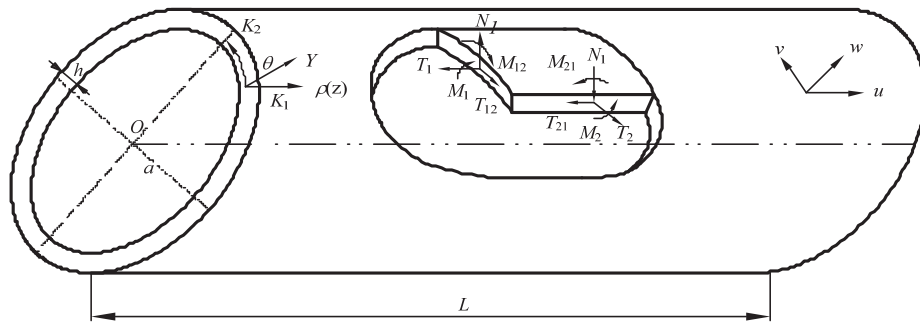
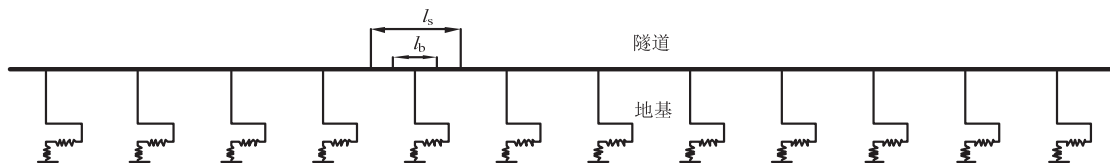


图3 三维等效柱壳模型^[28-29]

Fig.3 Three-dimensional equivalent continuous model^[28-29]



注: l_s =环宽; l_b =接头影响宽度

图4 一维纵向等效连续化模型^[30]

Fig.4 One-dimensional equivalent continuous model^[30]

廖少明^[23]考虑到纵向接头影响范围是有限的,而非整环范围,提出了隧道纵向刚度的修正。廖少明的方法综合了志波由纪夫^[21]和村上博智^[34]等的计算方法,其推导的等效弯曲刚度公式为:

$$(EI)_{eq} = \frac{K_f}{K_f + \alpha_f} E_s I_s \quad (6)$$

$$K_f = \frac{\cos^3 \psi}{\cos \psi + (\pi / 2 + \psi) \sin \psi} \quad (7)$$

式中: K_f 为环缝转动刚度系数; α_f 为环缝影响系数。

廖少明^[23]指出,对于上海地铁隧道,考虑接缝影响的隧道纵向等效刚度约为均质隧道刚度的1/5~1/7。

此外,徐凌^[30]根据环缝影响范围在螺栓长度之内和螺栓长度之外两种情况,给出了等效弯曲刚度的推导过程,并对环缝影响系数的影响进行讨论。张文杰等^[35]考虑了隧道横向变形对中心轴位置的影响,提出了更具有广泛意义的纵向等效连续化模

型。李翔宇等^[36]通过综合考虑横向刚度、环缝作用范围和螺栓预应力的影响,建立了新型的盾构隧道修正纵向等效连续化模型,并提出了弹、塑性状态下隧道纵向等效抗弯刚度。

3 考虑剪切错台的纵向结构计算模型

3.1 隧道纵向的铁木辛柯梁简化模型

地铁隧道在纵向上由混凝土管片环和接头连接而成,外荷载作用下,隧道变形不仅与管片环的刚度有关,也与接头螺栓和凹凸榫的抗变形能力有关。传统的纵向等效化模型采用弯矩刚度折减系数来考虑接头的影响,使受弯时隧道变形计算更加精确,但其忽略了剪力作用下的隧道变形。管片环本身的剪切刚度较大,但接头剪切刚度往往较小,这使得隧道整体剪切刚度较弱,因而隧道的剪切力引起的变形不容忽略。

廖少明等^[23]提出了考虑剪切错台变形的隧道

纵向结构计算模型，把隧道理想化为一个均质的铁木辛柯梁，采用等效弯曲刚度 $(EI)_{eq}$ 和等效剪切刚度 $(\kappa GA)_{eq}$ 综合考虑衬砌环和接头的影响^[5]。图 5 为基于铁木辛柯梁理论的隧道纵向模型示意图。

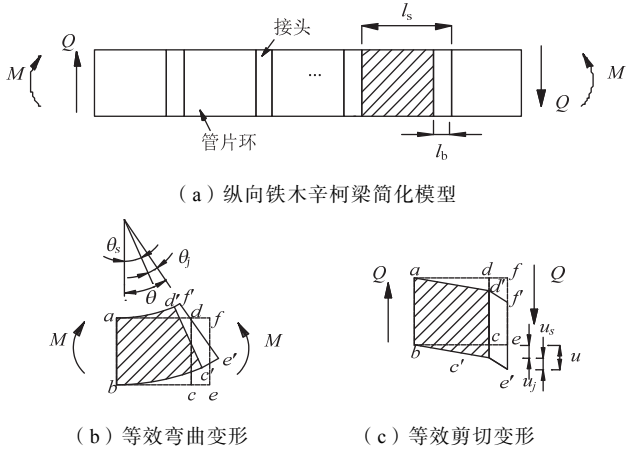


图 5 隧道纵向铁木辛柯梁简化模型示意图^[5]
 Fig.5 Illustration of Timoshenko beam simplified longitudinal model of tunnel^[5]

隧道在纵向上可以简化为管片环单元与接头单元相间连接而成的梁。等效弯曲刚度 $(EI)_{eq}$ 和等效剪切刚度 $(\kappa GA)_{eq}$ 是基于以下两个几何等效原则提出的：

(1) 隧道存在一个等效弯曲刚度 $(EI)_{eq}$ ，使得弯矩 M 作用下隧道转角 θ 为环缝引起的转角 θ_j 和混凝土管片环的转角 θ_s 之和。即以相邻两个管片环单元中心线之间衬砌及接头为分析对象，在弯矩 M 作用下旋转角有以下关系：

$$\theta = \theta_j + \theta_s \quad (8)$$

式中： θ 为计算单元的转角； θ_j 为环缝引起的转角； θ_s 为混凝土管片环的转角。

(2) 隧道存在一个等效剪切刚度 $(\kappa GA)_{eq}$ ，使得剪力 Q 作用下隧道引位移 u 为接头的剪切位移 u_j 和混凝土管片环的剪切位移 u_s 之和。即：

$$u = u_j + u_s \quad (9)$$

式中： u 为剪切引起的单元总位移； u_j 为接头的剪切位移； u_s 为混凝土管片环的剪切位移。

与传统的欧拉梁相比，铁木辛柯梁不仅考虑了梁的弯曲变形，还考虑了剪切变形和转动惯量，因而能很好地表现隧道的弯曲及错台变形特征。铁木辛柯梁力的平衡条件、几何关系及物理方程为：

$$Q = \frac{dM}{dx} = M', \frac{dQ}{dx} - q = M'' - q = 0 \quad (10)$$

$$\varphi = \frac{dw}{dx} - \gamma, k_c = -\frac{d\varphi}{dx} = -\frac{d^2w}{dx^2} + \frac{d\gamma}{dx} \quad (11)$$

$$M = EI k_c, Q = \kappa GA \gamma \quad (12)$$

式中： E 为弹性模量； I 为第二惯性矩； k_c 为中性轴的曲率； G 为剪切模量； A 为横截面积； κ 为铁木辛柯剪切系数，与截面形状相关； γ 为剪切角； φ 为旋转角。

基于式 (8)、式 (9) 的等效原则，吴怀娜等^[5] 提出等效弯曲刚度 $(EI)_{eq}$ 计算公式为：

$$(EI)_{eq} = E_s I_s \frac{\zeta l_s}{\zeta (l_s - \lambda l_b) + \lambda l_b} \quad (13)$$

式中： λ 为环缝影响长度相对系数， l_b 为螺栓长度， l_s 为环宽， ζ 为隧道环缝作用范围内的弹性弯曲刚度等效系数， E_s 为隧道弹性模量； I_s 为隧道截面惯性矩。

隧道等效剪切刚度 $(\kappa GA)_{eq}$ 的计算公式为

$$(\kappa GA)_{eq} = \xi \frac{l_s}{\frac{l_b}{n\kappa_b G_b A_b} + \frac{l_s - l_b}{\kappa_s G_s A_s}} \quad (14)$$

式中： G_b 为螺栓剪切模量； A_b 为螺栓横截面积； κ_b 为螺栓的铁木辛柯剪切系数，对于圆形截面， $\kappa_b=0.9$ ； G_s 为管片环剪切模量； A_s 为管片环横截面积； κ_s 为管片环的铁木辛柯剪切系数，对于圆环截面， $\kappa_s=0.5$ ； ξ 为考虑凹凸榫、混凝土管片摩擦力的剪切刚度修正系数。

基于铁木辛柯梁模型，环缝的最大张开量和环间错台量计算公式为：

$$\Delta = \frac{M \lambda l_b}{E_s I_s} \frac{1}{\zeta} (r + r \sin \psi) \quad (15)$$

$$\delta = l_s \tan \gamma \quad (16)$$

式中： Δ 为最大环缝张开量； r 为管片环外半径； δ 为环间错台量。

3.2 模型计算结果对比

上海地铁某区间隧道受邻近施工影响，局部产生了沉降变形。图 6 为隧道沉降的现场监测值，隧道累计最大沉降量约 9mm，影响范围约为 30m。分别采用铁木辛柯梁模型和欧拉-伯努利梁模型分析隧道内力和变形。分析中取隧道的弯曲刚度有效率 $\eta=1/7$ ；即等效弯曲刚度 $(EI)_{eq}=1.361 \times 10^8 \text{kN} \cdot \text{m}^2$ ，铁木辛柯梁的等效剪切刚度 $(\kappa GA)_{eq}=2.08 \times 10^6 \text{kN}$ ，并考虑不同的剪切刚度修正系数 ($\xi=10, 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.01$)。

图 7 为不同模型计算出的隧道变形图，图 8 为不同模型计算出的隧道内力图。由图可知，欧拉梁

计算的隧道管片环间无错台，铁木辛柯梁的错台量随剪切刚度的减小而增大，最大错台量位于沉降曲线的反弯点外侧 1~7 环处；欧拉梁环缝最大张开量位于沉降槽底部，铁木辛柯梁的环缝张开量小于欧拉梁，且随剪切刚度的减小而减小。用欧拉梁理论

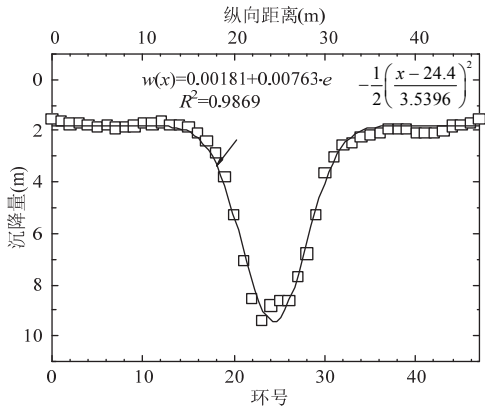


图 6 上海地铁某区间隧道沉降图^[5]
Fig.6 Measured settlement of one metro tunnel in Shanghai^[5]

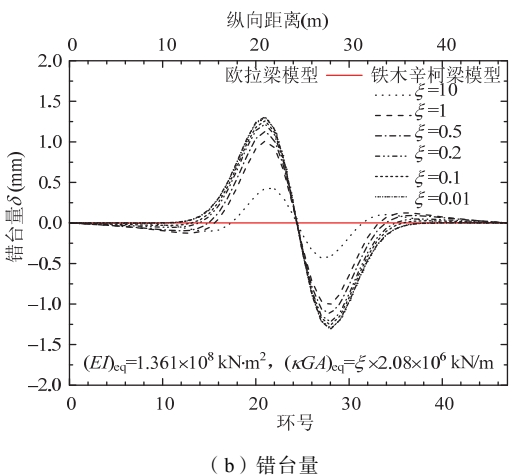
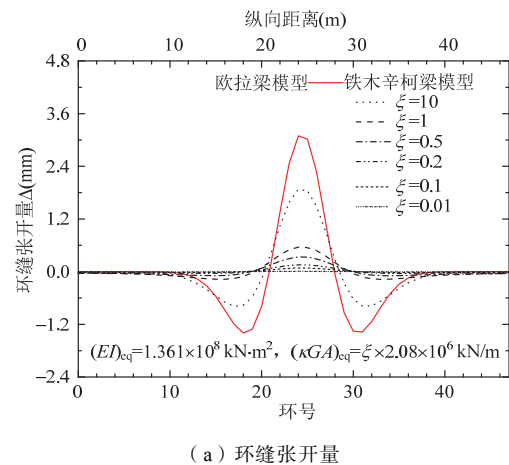


图 7 隧道变形图^[5]
Fig.7 Calculated deformation of tunnel^[5]

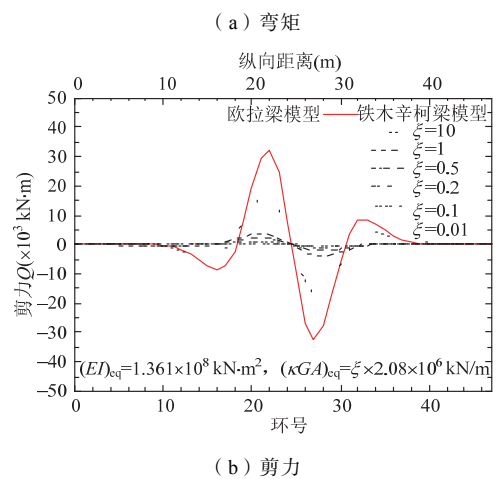
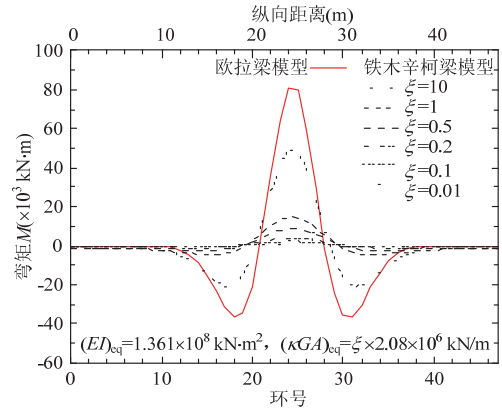


图 8 隧道内力图^[5]
Fig.8 Calculated internal force of tunnel^[5]

计算的弯矩和剪力值大于铁木辛柯梁的计算结果，即在已知隧道沉降曲线时，欧拉梁模型过分估计了隧道的内力。

4 结论

本文针对隧道纵向结构变形模式及其结构计算模型进行总结探讨，得出结论如下。

(1) 隧道在纵向上的变形模式包括：①弯曲变形模式；②剪切变形模式。隧道作为细长形的圆管，其挠曲变形是存在的，而环与环之间连接螺栓的剪切刚度较小，使得隧道的剪切变形同样不可忽视。

(2) 现有的隧道纵向结构分析模型主要有两类：①将接头具体化的纵向管片环-接头模型；②将接头和管片一体化的纵向等效连续化模型。前者理论上与隧道结构最为相似，但由于实际应用中接头刚度难以确定，模拟精度大大降低。该模型计算较为复杂，难以应用于解析分析。相比之下，纵向等效连续化模型概念清晰、计算简单，便于隧道纵向的变形和内力的解析分析。但以往隧道纵向等效连

续化模型以隧道弯曲变形模式为基础,无法描述隧道的剪切变形。

(3) 基于铁木辛柯梁的隧道纵向模型是把隧道理想化为一个均质的铁木辛柯梁,采用综合考虑衬砌环和接头影响的等效弯曲刚度和等效剪切刚度。该模型既考虑了弯曲引起的挠曲变形,也考虑了剪力引起的剪切变形,能很好地表现隧道纵向变形受力特性。

参 考 文 献

- [1] Shen S L, Wu H N, Cui Y J, et al. Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 40(12): 309-323
- [2] Working Group NO 2, ITA. Guidelines for the design of shield tunnel lining [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2000, 15(3): 303-331
- [3] 土木学会编(日). 隧道标准规范(盾构篇)及解说[M]. 宋伟译. 中国建筑工业出版社, 2001
- [4] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 中国铁道出版社, 1991
- [5] Wu H N, Shen S L, Liao S M, et al. Longitudinal structural modelling of shield tunnels considering shearing dislocation between segmental rings [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015, 50: 317-323
- [6] 郑永来, 韩文星, 童琪华, 等. 软土地铁隧道纵向不均匀沉降导致的管片接头环缝开裂研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(24): 4552-4558 (Zheng Yonglai, Han Wenxing, Tong Qihua, et al. Study on longitudinal crack of shield tunnel segment joint due to asymmetric settlement in soft soil [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(24): 4552-4558 (in Chinese))
- [7] 叶耀东. 软土地区运营地铁盾构隧道结构变形及健康诊断方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2007 (Ye Yaodong. Research on deformation and method of health diagnose of operational subway structures in soft soil [D]. Shanghai: Tongji University, 2007 (in Chinese))
- [8] 周宁, 袁勇. 越江盾构隧道纵向变形曲率与管环渗漏的关系[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(11): 1446-1451 (Zhou Ning, Yuan Yong, Correlation of cross-river shield tunnel between longitudinal deformation curvature and segment leakage [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2009, 37(11): 1446-1451 (in Chinese))
- [9] 王慧, 黄宏伟. 软土地铁盾构隧道环缝张开可靠度分析[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(6): 1-6 (Wang Hui, Huang Hongwei. Reliability analysis on metro shield tunnel segment joint in soft soil [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(6): 1-6 (in Chinese))
- [10] Huang X, Huang H, Zhang J. Flattening of jointed shield-driven tunnel induced by longitudinal differential settlements [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 31: 20-32
- [11] 王如路. 上海软土地铁隧道变形影响因素及变形特征分析[J]. *地下工程与隧道*, 2009(1): 1-6, 52 (Wang Rulu. Factors influencing deformation of shanghai soft soil metro tunnel and deformation analysis [J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 2009(1): 1-6, 52 (in Chinese))
- [12] 王如路. 上海地铁盾构隧道纵向变形分析[J]. *地下工程与隧道*, 2009(4): 1-6, 56 (Wang Rulu. Longitudinal deformation analysis for shanghai subway tunnel constructed by shield method [J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 2009(4): 1-6, 56 (in Chinese))
- [13] 樊振宇. 软土盾构隧道衬砌结构计算方法及纵向变形分析[D]. 上海: 同济大学, 2009 (Fan Zhenyu. Calculation method and longitudinal deformation analysis of shield tunnel lining in soft soil [D]. Shanghai: Tongji University, 2009 (in Chinese))
- [14] 西野健三, 吉田和夫, 小泉淳. シールドトンネル縦断方向の現場載荷試験とその考察[J]. *土木学会论文集*, 1986, 1986(376): 131-140 (NISHINO K, YOSHIDA K, KOIZUMI A. In-situ tests and consideration on shield tunnel in the longitudinal direction [J]. *Journal of Japanese Society of Civil Engineers*, 1986, 1986(376): 131-140 (in Japanese))
- [15] 小泉淳, 村上博智, 西野健三. シールドトンネルの軸方向特性のモデル化について[J]. *土木学会论文集*, 1988, 1988(394): 79-88 (Koizumi A, Murakami H, Nishino K. Modelling of longitudinal structure of shield tunnel [J]. *Journal of Japanese Society of Civil Engineers*, 1988, 1988(394): 79-88 (in Japanese))
- [16] 小泉淳, 村上博智, 石田智朗, 等. 急曲線施工用セグメントの設計法について[J]. *土木学会论文集*, 1992, 1992(448):111-120 (Koizumi A, Murakami H, Ishida T, et al. Design method of segments at a sharply curved section [J]. *Journal of Japanese Society of Civil Engineers*, 1992, 1992(448):111-120 (in Japanese))
- [17] 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 for Geotechnical Engineering*, 2000, 22(2): 190-194 (in Chinese))
- [18] 朱合华, 杨林德, 陈清军, 等. 盾构隧道管片接头衬砌系统的两种受力设计模型[J]. *工程力学*, 1996(增): 395-399
- [19] 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-springs design modes for segment of shield tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(8): 940-947 (in Chinese))
- [20] 志波由纪夫, 川島一彦, 大日方尚己, 等. 応答変位法によるシールドトンネルの耐震設計法, 1986, 5: 113 (Shiba Y, Kawashima K, Obinata N, et al. Seismic design method of shield tunnel using response displacement method [J]. *Journal of Japanese Society of Civil Engineers*, 1986, 5: 113 (in Japanese))
- [21] 志波由纪夫, 川島一彦, 大日方尚己, 等. シ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[J]. 土木学会论文集, 1988(398): 319-327 (Shiba Y, Kawashima K, Obinata N, et al. An evaluation method of longitudinal stiffness of shield tunnel linings for application to seismic response analyses [J]. Journal of Japanese Society of Civil Engineers, 1988(398): 319-327 (in Japanese))
- [22] 志波由纪夫, 川島一彦, 大日方尚己, 等. 応答変位法によるシールドトンネルの地震時断面力の算定法[J]. 土木学会论文集. 1989(404): 385-394 (Shiba Y, Kawashima K, Obinata N, et al. Evaluation procedure for seismic stress developed in shield tunnels based on seismic deformation method [J]. Journal of Japanese Society of Civil Engineers, 1989(404): 385-394 (in Japanese))
- [23] 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 Shaoming. Research on the effect longitudinal shear transfer on circular tunnel liningg [D]. Shanghai: Tongji University, 2002 (in Chinese))
- [24] Blom C B M, Horst E J V, Jovanovic P S. Three-dimensional structural analyses of the shield-driven “green heart” tunnel of the high-speed line south [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(2): 217-224
- [25] 黄钟晖. 盾构法隧道错缝拼装衬砌受力机理的研究[D]. 同济大学, 2001 (Huang Zhonghui. Research on stagger-jointed segmental lining behavior of shield-tunnel [D]. Tongji University, 2001 (in Chinese))
- [26] Van E WHNC, De W RGA, Van D V, C. Segmental tunnel lining behaviour in axial direction [C] // International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Tokyo, 1999
- [27] 包鹤立. 衬砌局部渗漏条件下软土盾构隧道的长期性态研究[D]. 上海: 同济大学, 2008 (Bao Heli. Research on the long-term behavior of shield tunnel with Partially sealed linings in soft soil [D]. Shanghai: Tongji University, 2008 (in Chinese))
- [28] 廖少明. 隧道纵向剪切效应的简化弹性地基柱壳理论解析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1486-1493 (Liao Shaoming. Theoretic analysis of simplified cylindrical shell on elastic foundation for tunnel longitudinal shear effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1486-1493 (in Chinese))
- [29] Liao S M, Peng F L, Shen S L. Analysis of shearing effect on tunnel induced by load transfer along longitudinal direction [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(4): 421-430
- [30] 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 behavior of shield tunnels in soft soil [D]. Shanghai: Tongji University, 2005 (in Chinese)) (没查到)
- [31] 叶飞, 朱合华, 丁文其. 基于弹性地基梁的盾构隧道纵向上浮分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(4): 65-69 (Ye Fei, Zhu Hehua, Ding Wenqi. Longitudinal upward movement analysis of shield tunnel based on elastic foundation beam [J]. China Railway Science, 2008, 29(4): 65-69 (in Chinese))
- [32] 王志良, 申林方. 基于弹性地基梁理论的隧道纵向变形分析[J]. 路基工程, 2010, 1, 34-36 (Wang Zhiliang, Shen Linfang. Analysis on tunnel vertical deformation based on the theory of elastic foundation beam [J]. Subgrade Engineering, 2010, 1, 34-36 (in Chinese))
- [33] 姜兆华, 张永兴. 基坑开挖对邻近隧道纵向位移影响的计算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(1): 7-11, 39 (Jiang Zhaohua, Zhang Yongxing. Calculation of influence on longitudinal deformation of adjacent tunnel due to excavation [J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(1): 7-11, 39 (in Chinese))
- [34] 村上博智, 小泉淳. シールドセグメントリングの耐荷機構について[J]. 土木学会論文報告集, 1978(272): 103-115 (Murakami H, Koizumi A. Study on load bearing capacity and mechanics of shield segment ring [J]. Proceedings of JSCE, 1978(272): 103-115 (in Japanese))
- [35] 张文杰, 徐旭, 李向红, 等. 广义的盾构隧道纵向等效连续化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2): 3938-3944 (Zhang Wenjie, Xu Xu, Li Xianghong, et al. Research on generalized longitudinal equivalent continuous model of shield tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3938-3944 (in Chinese))
- [36] 李翔宇, 刘国彬, 杨潇, 等. 基于修正纵向等效连续化模型的隧道变形受力研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 662-670 (Li Xiangyu, Liu Guobin, Yang Xiao, et al. Deformation and stress of tunnel structures based on modified longitudinal equivalent continuous model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 662-670 (in Chinese))

陈 拴 (1994—), 男, 硕士研究生。主要从事隧道结构及地下工程等方面研究。

吴怀娜 (1987—), 女, 博士, 副教授。主要从事盾构隧道变形机理及计算模型、土-隧道相互作用方面研究。

沈水龙 (1964—), 男, 博士, 教授。主要从事软土与结构相互作用、软土地基处理及地下水循环方面研究。

陈仁朋 (1994—), 男, 博士, 教授。主要从事多场耦合下岩土体性状、土与结构静动力相互作用方面研究。