文章编号: 0253-374X(2024)12-1823-11

矩形管片隧道纵向等效抗弯刚度与抗弯性能研究

刘颖彬¹,廖少明¹,李志义²,钟铧炜²,滕政伟² (1. 同济大学土木工程学院,上海200092;2. 上海城建市政工程(集团)有限公司,上海200065)

摘要:基于等效连续化模型,推导了矩形管片隧道在任意压弯 组合状态下的纵向等效抗弯刚度计算方法,并针对矩形管片隧 道的特点,对4种不同中性轴位置的等效抗弯刚度计算方法分 别进行了讨论。在此基础上,进一步分析了压弯比、宽厚比、螺 栓个数以及截面形状等关键设计参数对抗弯刚度的影响,并给 出了4种中性轴位置转变对应的临界压弯比。研究结果表明: 隧道纵向抗弯刚度有效率随着压弯比、螺栓的个数以及环宽厚 比的增大而增大,而随着截面宽厚比和宽高比的增大而减小。 中性轴的位置不仅仅与截面的尺寸以及材料属性相关,还与压 弯比的大小有关。临界压弯比随着截面宽厚比的增大而减小, 且对截面形状变化表现敏感。上述结论对于矩形管片的优化 选型及设计计算具有重要理论参考价值。

关键词: 矩形盾构隧道;等效连续化模型;等效抗弯刚度;纵 向抗弯性能

中图分类号: TU93 文献标志码: A

Longitudinal Equivalent Bending Stiffness and Bending Performance of Rectangular Segmented Tunnel

LIU Yingbin¹, LIAO Shaoming¹, LI Zhiyi², ZHONG Huawei², TENG Zhengwei²

 College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
 Shanghai Urban Construction Municipal Engineering Co., Ltd., Shanghai 200065, China)

Abstract: Based on the equivalent continuous model, this paper deduces the longitudinal equivalent bending stiffness of rectangular shield tunnels under the combination state of compression and bending. Considering the cross-sectional characteristics of rectangular shield tunnels, the closed-form solution of the equivalent bending stiffness under four neutral axis positions is discussed, based on which, a parametric analysis, using the new analytical solution, is conducted

to investigate the effect of key parameters on the longitudinal bending stiffness, including the ratio of compression to bending, the number of bolts, the ratio of width to thickness and so on. The critical value of N-M ratio for different positions of the neutral axis is further obtained. The results show that the longitudinal bending stiffness efficiency increases with the increase of the compression-bending ratio, the number of bolts and the ring width-to-thickness ratio, but decreases with the increase of the sectional width-to-thickness ratio and aspect ratio. The position of the neutral axis is not only related to the size of the cross-section and material properties, but also to the compression-bending ratio. The critical value of N-M ratio decreases with the increase of sectional width-thickness ratio and is sensitive to the change of sectional shape. The conclusion has important theoretical reference for optimal selection and design calculation of rectangular segments.

Key words: rectangular shield tunnel; equivalent continuous model; effective bending stiffness; longitudinal bending performance

盾构隧道是城市轨道交通的主要形式之一。在 盾构发展初期,盾构隧道截面形式主要为圆形。而 圆形盾构隧道存在许多缺点,尤其为空间利用率较 低。为更好的提高空间利用率,矩形盾构隧道应运 而生^[1]。国内于1995年首次开展了矩形掘进机的掘 进试验,并于1999年首次将土压平衡矩形盾构机运 用于地下人形通道的施工中^[2]。矩形盾构隧道因其 具有更好的空间利用率、施工扰动小以及覆土深度 低等优点,逐渐受到越来越多建设者的青睐。因而, 开展矩形盾构隧道力学性能的研究现实意义重大。

矩形盾构隧道是非常规的异型隧道结构,因其结

通信作者:廖少明,教授,工学博士,博士生导师。主要研究方向为地下工程设计与施工控制等。

E-mail: engcent@tongji. edu. cn



收稿日期: 2022-12-14

基金项目:国家自然科学基金项目(52090082);中央高校基本科研业务费专项基金(22120210428)

第一作者:刘颖彬,博士生,主要研究方向为盾构隧道结构力学响应。E-mail: liuvb sd@foxmail.com

构特性,学者对其设计以及施工方法等方面进行了大量的研究^[34]。金跃郎等^[5]通过足尺试验研究了大断面矩形盾构隧道管片接头结构的力学性能及其极限承载能力和极限破坏状态。梁霄等^[6]基于现场监测结果,采用理论分析和数值模拟的方法,建立了基于施工全过程的衬砌结构受力分析方法。目前针对矩形隧道的研究大多还集中于设计与施工方面,对其隧道长期性能的认识仍不足。在隧道长期运营过程中,不可避免会发生纵向不均匀沉降,进而引发环缝张开,渗漏水等病害^[7,8]。隧道纵向抗弯性能是抵御此类病害的关键,其中隧道纵向抗弯刚度决定着其纵向抗弯性能。

盾构隧道是拼接类的结构,其接缝与管片在性 能上具有较大的差异^[9]。为此,Shiba等^[10]提出了等 效连续化模型来计算隧道纵向抗弯刚度,该方法通 过变形等效的原则将隧道沿纵向考虑为刚度折减的 勾质结构。李翔宇等^[11]通过考虑初始椭圆变形和材 料的非线性进一步丰富了该模型。梁荣柱等^[12]将等 效连续化模型的概念从圆形拓展到了类矩形结构的 计算中。而目前,针对矩形盾构隧道抗弯刚度的研 究还相对较少,郑庆坂等^[13]初步给出了矩形盾构隧 道的计算方法,但未能考虑轴力对抗弯性能的影响。 根据廖少明等^[14]对盾构隧道纵向力的长期监测可知 隧道纵向轴力在隧道运营过程中是不可忽略的。而 目前仍缺乏复杂内力条件下的矩形盾构隧道纵向抗 弯刚度的求解方法。

本文旨在推导任意压弯组合内力下的矩形盾构隧 道纵向等效抗弯刚度的解析解。考虑矩形盾构隧道截 面特点,给出了4种中性轴位置下的等效刚度计算方 法及其所对应的临界压弯比。基于所提出的解析解, 进一步分析了压弯比、螺栓个数以及截面形式等关键 设计参数对矩形隧道纵向等效抗弯刚度的影响。

1 矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度推导

1.1 基本假设

盾构隧道发生纵向弯曲变形时,管片和接缝的 变形均视为隧道管片绕中性轴旋转,表现为一侧受 压一侧受拉,如图1所示。





以隧道管片的两半环及其环向接缝为一个计算单 元(如图1),设定钢筋混凝土管片长度为4。,螺栓的长 度为4。则单元变形由环缝的变形和混凝土管片的变 形两部分组成。本文等效连续化模型的基本假定主要 如下:

(1)隧道横截面满足平截面假定,即横截面变形 始终与其距中性轴的距离成正比。

(2)在弯矩作用下,管片单元(*l*,-*l*,区域内)压力、 拉力均由管片承担,表现为以中性轴为界,一侧受 拉,另一侧受压。接缝单元(*l*,区域内),受压侧压力 由管片承担,受拉侧拉力由螺栓和管片共同承担,且 中性轴不变,其中环缝处螺栓拉力视为弹簧作用,其 余受拉由管片承担。

(3)所有单元均处于完全弹性状态。

基于以上假设,弯曲变形的转角α可分解为两 部分,一部分为隧道管片衬砌的转动α_s,另一部分为 接缝的转动α_i,表达式即为

$$\alpha = \alpha_{\rm j} + \alpha_{\rm s} \tag{1}$$

则纵向等效抗弯刚度表(EI)。g达式为

$$(EI)_{eq} = Ml_s / \alpha = \frac{Ml_s}{\alpha_j + \alpha_s} = \eta(EI)_s \qquad (2)$$

式中:M为弯矩;η为等效抗弯刚度有效率。

假定螺栓在环缝截面为均匀分布,则纵向螺栓的 平均面刚度Ka和单位圆周ds螺栓提供的拉力dFi可表 示为

$$K_{\rm rl} = \frac{nK_{\rm s}}{lt} = \frac{nE_{\rm b}A_{\rm b}}{4l_{\rm b}(a+b)}$$
(3)

$$\mathrm{d}F_{\mathrm{l}} = K_{\mathrm{rl}} \Delta \,\mathrm{d}A \tag{4}$$

式中: K_s 为单个纵向螺栓的弹性刚度系数,且有 K_s = E_bA_b/l_b ; E_b 为螺栓弹性模量; A_b 为螺栓面积;l为隧道截面的周长;n为螺栓的个数; Δ 为螺栓的伸长量。

1.2 等效连续化抗弯刚度推导

隧道纵向抗弯刚度是隧道抵御纵向弯曲的重要 指标。由于管片隧道拼装的特性,其纵向抗弯刚度 的确定不仅与隧道的材料以及尺寸有关,更与隧道 结构内力状态有关^[15]。根据廖少明等^[14]现场实测结 果可知隧道在运营期间仍长期受到纵向轴力的作 用。因此本文将对复杂压弯受力状态下的隧道等效 抗弯刚度进行推导。

图 2 为矩形盾构隧道截面示意图,*c* 为中性轴的 竖向坐标。隧道截面的水平向和竖向分别为矩形截 面的长轴方向和短轴方向,长轴和短轴的长度分别 为 2*a*和2*b*,厚度为*t*。点区域为截面受拉区,斜线区 域为受压区。矩形盾构隧道受到压弯组合受力时, 其中性轴位置将发生改变。结合矩形隧道环缝的接 触状态和截面的特点,矩形隧道的纵向弯曲状态可 划分为如下两大类:①中性轴位于截面外(环缝完全 闭合)(c>b);②中性轴位于截面内(-b<c≤b)。 其中中性轴在截面内还可细分为:中性轴在底、中性 轴在腹板和中性轴在顶板。下文将对以上情况分别 讨论之。



Fig. 2 Cross-section of rectangular shield tunnel lining

1.2.1 中性轴位于截面外(环缝完全闭合)(c≥b)
 (1)螺栓区域内

图 3显示了接缝应力及变形分布情况。图中ε_{cl} 和ε_{c2}分别是接缝混凝土的最大压应变和最小压应 变,*E*_c是混凝土的弹性模量。





Fig. 3 Stress and deformation distribution of circumferential joint with the neutral axis located outside the cross-section

根据图3中截面协调变形条件可得:

$$\alpha_{j} = \frac{l_{b}(\boldsymbol{\varepsilon}_{c1} - \boldsymbol{\varepsilon}_{c2})}{2b}$$
(5)

单位面积混凝土压力dF。可用表达如下:

$$dF_{c} = \left[\frac{E_{c}(\varepsilon_{c1} - \varepsilon_{c2})(b - y)}{2b} + E_{c}\varepsilon_{c2}\right]dx dy \quad (6)$$

通过截面轴力平衡条件可得:

$$\iint_{A_{c}} \mathrm{d}F_{c} = N \rightarrow 2E_{c}t(\varepsilon_{c1} + \varepsilon_{c2})(a+b-t) = N \quad (7)$$

式中: $\iint_{A_c} dF_c = \iint_{A_{cl}} dF_c - \iint_{A_{od}} dF_c$ 其中, A_c 代表的是隧道

混凝土受压缩的面积,即为图中标斜线区域;A_{el}代 表的是受压区内隧道外轮廓包围的面积;A_e代表的 是受压区内隧道内轮廓包围的面积;N是纵向轴力。

$$\iint_{A} y \, dF_{c} + M = 0$$

$$M + \frac{2E_{c}(\varepsilon_{c1} - \varepsilon_{c2})}{3} \left[-t^{4} + at^{3} + 3bt^{3} - \frac{(8)}{3} - 3abt^{2} + tb^{3} + 3atb^{2} - 3(bt)^{2} \right] = 0$$

联立公式(5)—(8)可得环缝影响范围内转角的 表达式为

01.01

$$\alpha_{j} = \frac{3Mt_{b}}{4E_{c}(b^{3}t - 3b^{2}t^{2} + 3ab^{2}t + 3bt^{3} - 3abt^{2} - t^{4} + at^{3})}$$
(9)

(2)螺栓区域外

螺栓区域外,隧道内力均由管片单独承担,当中 性轴在截面外时,管片应变和变形分布情况同图3 所示。根据材料力学可得,矩形盾构隧道管片抗弯 刚度(EI)。如下:

$$(EI)_{s} = E_{c} \frac{2a(2b)^{3} - (2a - 2t)(2b - 2t)^{3}}{12}$$

=
$$\frac{4E_{c}(b^{3}t - 3b^{2}t^{2} + 3ab^{2}t + 3bt^{3} - 3abt^{2} - t^{4} + at^{3})}{3}$$
(10)

管片纵向转角为

$$\alpha_{\rm s} = \frac{M(l_{\rm s} - l_{\rm b})}{(EI)_{\rm s}} \tag{11}$$

(3)等效抗弯刚度计算

根据式(9)、式(11)可知环缝闭合时,隧道抗弯 刚度即为混凝土管片抗弯刚度。因此矩形盾构隧道 可以视为匀质结构,则该条件下隧道的等效抗弯刚 度有效率为1。

1.2.2 中性轴位于隧道截面内(-b < c ≤ b)
 (1)螺栓区域内:

图 4 显示了中性轴位于腹板时接缝应力及变形

分布情况。图中, ϵ_i 和 ϵ_c 分别为管片接头的最大拉应 变和最大压应变; Δ_j 为距离中性轴最远处的环缝张 开量。

根据图 4 中截面协调变形条件:

(

$$(b-c)\frac{\alpha_{j}}{2} = \varepsilon_{t}\frac{l_{b}}{2} + \frac{\Delta_{j}}{2}$$
 (12)

$$(b+c)\frac{\alpha_{\rm j}}{2} = \varepsilon_{\rm c}\frac{l_{\rm b}}{2}$$
 (13)

单位面积混凝土压力dF。可用表达如下:

$$dF_{c} = \left[\frac{E_{c}\varepsilon_{c}(c-y)}{b+c}\right] dx dy \qquad (14)$$

单位面积混凝土拉力dF₁和螺栓拉力dF₁可从式 (15)—(16)得到:

$$dF_{t} = \left[\frac{E_{c}\varepsilon_{t}(y-c)}{b-c}\right] dxdy \qquad (15)$$

$$dF_1 = \left[\frac{K_{rl}\Delta_j(y-c)}{b-c}\right] dxdy \qquad (16)$$

通过区域内接缝和管片截面轴力平衡条件可得:

$$\left| \iint_{A_{c}} dF_{c} - \iint_{A_{t}} dF_{t} = N \right| \qquad (17)$$

$$\iint_{A_{c}} dF_{c} - \iint_{A_{t}} dF_{l} = N \right|$$

$$\mathbb{R} \oplus : \iint_{A_{t}} \mathrm{d}F_{1} = \iint_{A_{ti}} \mathrm{d}F_{1} - \iint_{A_{to}} \mathrm{d}F_{1}; \iint_{A_{t}} \mathrm{d}F_{t} = \iint_{A_{ti}} \mathrm{d}F_{t} - \iint_{A_{to}} \mathrm{d}F_{t};$$

A_i代表的是隧道混凝土受拉面积,即为图中标点区域;A_i代表的是受拉区内隧道外轮廓包围的面积; A₀代表的是受拉区内隧道内轮廓包围的面积。

根据区域内管片截面弯矩平衡条件可得:

$$\iint_{A_c} (c-y) \mathrm{d}F_c + \iint_{A_t} (y-c) \mathrm{d}F_t - N \cdot c = M \quad (18)$$

根据中性轴可能存在的位置,对积分计算区域 A_c和A_t说明:





Fig. 4 Stress and deformation distribution of circumferential joint with the neutral axis located at the tunnel web

①中性轴位于隧道顶板范围内($b-t < c \le b$) 图 5显示了中性轴位于顶板时接缝应力及变形 分布情况。该条件下A_{cl}是中性轴与受压区隧道外 轮廓包围的面积,A.。是隧道内轮廓包围的面积;A. 是中性轴与受拉区隧道外轮廓包围的面积, A_{t0} 为 0_{\circ}



图 5 中性轴位于隧道顶板时的接缝应力及变形分布情况

Fig. 5 Stress and deformation distribution of circumferential joint with the neutral axis located at the tunnel roof

则该条件下,式(17)--(18)各积分结果表达为

$$\iint_{A_{t}} dF_{c} = E_{c} \varepsilon_{c} \frac{a(b+c)^{2} - 4c(a-t)(b-t)}{b+c}$$

$$\iint_{A_{t}} dF_{1} = K_{r1} \Delta_{j} a(b-c)$$

$$\iint_{A_{t}} dF_{t} = E_{c} \varepsilon_{t} a(b-c)$$

$$\iint_{A_{t}} (c-y) dF_{c} = \frac{2E_{c} \varepsilon_{c} [a(b+c)^{3} - 2(a-t)(b-t)(b^{2} - 2bt + 3c^{2} + t^{2})]}{3(b+c)}$$
(19)
$$\iint_{A_{t}} (y-c) dF_{t} = \frac{2E_{c} \varepsilon_{t} a(b-c)^{2}}{3}$$

②中性轴位于隧道腹板范围内(-b+t<c≤ 性轴受压区隧道内轮廓包围的面积;A_u是中性轴与 b-t)

接缝应力及变形分布情况见图 4。该条件下A。 是中性轴与受压区隧道外轮廓包围的面积,Aco是中

受拉区隧道外轮廓包围的面积,A.,是中性轴受拉区 隧道内轮廓包围的面积。

则该条件下,式(17)--(18)各积分结果表达为

$$\iint_{A_{c}} dF_{c} = E_{c} \varepsilon_{c} \frac{a(b+c)^{2} - (a-t)(b+c-t)^{2}}{b+c}
\iint_{A_{i}} dF_{i} = K_{rl} \Delta_{j} \frac{a(b-c)^{2} - (a-t)(b-c-t)^{2}}{b-c}
\iint_{A_{i}} dF_{i} = E_{c} \varepsilon_{i} \frac{a(b-c)^{2} - (a-t)(b-c-t)^{2}}{b-c}
\iint_{A_{i}} (c-y) dF_{c} = \frac{2E_{c} \varepsilon_{c} [a(b+c)^{3} - (a-t)(b+c-t)^{3}]}{3(b+c)}
\iint_{A_{i}} (y-c) dF_{i} = \frac{2E_{c} \varepsilon_{i} [a(b-c)^{3} - (a-t)(b-c-t)^{3}]}{3(b-c)}$$
(20)

③中性轴位于隧道底板范围内 $(-b < c \leq -b+t)$

图 6显示了中性轴位于底板时接缝应力及变形 分布情况。该条件下A_{ct}是中性轴与受压区隧道外 轮廓包围的面积,*A*_{co}为0;*A*_u是中性轴与受拉区隧道 外轮廓包围的面积,*A*_v是隧道内轮廓包围的面积。



图 6 中性轴位于隧道底板时的接缝应力及变形分布情况

Fig. 6 Stress and deformation distribution of circumferential joint with the neutral axis located at the tunnel vault

则该条件下,式(17)—(18)各积分结果表达为

$$\iint_{A_{\epsilon}} dF_{c} = E_{c} \varepsilon_{c} a(b+c)
\iint_{A_{\epsilon}} dF_{1} = K_{r1} \Delta_{j} \frac{a(b-c)^{2} + 4c(a-t)(b-t)}{b-c}
\iint_{A_{\epsilon}} dF_{1} = E_{c} \varepsilon_{1} \frac{a(b-c)^{2} + 4c(a-t)(b-t)}{b-c}
\iint_{A_{\epsilon}} (c-y) dF_{c} = \frac{2E_{c} \varepsilon_{c} a(b+c)^{2}}{3}
\iint_{A_{\epsilon}} (y-c) dF_{t} = \frac{2E_{c} \varepsilon_{c} a(b+c)^{2}}{3(b-c)}$$
(21)

联立式(12)—(18)所包含的5个方程式,进而可解得(N, M)作用下5个所需未知量,包括 $\epsilon_{t}, \epsilon_{e}, \Delta_{t}, c$ 以及 α_{t} 的表达式。

(2)螺栓区域外

螺栓区域外,隧道内力均由管片单独承担。矩 形盾构隧道管片抗弯刚度(EI)。和转角可通过式 (10)和(11)得到。

(3)等效抗弯刚度计算

在得到管片转角和环缝转角的基础上,将两计 算转角代入式(2),即可得到环缝张开时矩形盾构隧 道的等效抗弯刚度和有效率。由于求解方程为超越 方程,难以求得各未知量的显式表达式,可通过 Matlab等软件联立各方程对任意内力组合荷载下的 隧道抗弯刚度进行求解。基于提出的纵向刚度解析 方法,下文将对矩形盾构隧道临界压弯比以及关键 设计参数对纵向抗弯刚度的影响进行进一步的 分析。

2 矩形盾构隧道临界压弯比分析

在第1节中,分别对4种不同中性轴位置下的矩 形盾构隧道纵向抗弯刚度进行了推导。根据推导过 程可知中性轴的位置不仅仅与截面的材料属性相 关,还与N和M的相对大小有关。

本章将对4种中性轴位置对应的临界压弯比进 行讨论。

2.1 中性轴位于截面外(环缝完全闭合)(c≥b)

当存在螺栓预紧力或预应力管片等大纵向轴力 作用下,中性轴位置可能会位于截面外。该条件下 环缝闭合,则环缝对纵向刚度的削减作用可忽略,盾 构隧道可视为匀质结构。将*c≥b*代入到1.2.1节的 推导公式中,可以得到环缝闭合的临界压弯比A₁:

$$\frac{N}{M} \ge \frac{\beta_{1}}{\beta_{2} + \beta_{3}} = A_{1}$$

$$\beta_{1} = 3(E_{c}abt + abK_{r1}l_{b}t + b^{2}K_{r1}l_{b}t - bK_{r1}l_{b}t^{2})$$

$$\beta_{2} = E_{c}(at^{3} - 3b^{2}t^{2} - t^{4} + 3bt^{3} + b^{3}t - 3abt^{2} + 3ab^{2}t)$$

$$\beta_{3} = 4K_{r1}l_{b}(-t^{4} + at^{3} + 3bt^{3} + b^{3}t - 3b^{2}t^{2} - 3abt^{2} + 3ab^{2}t)$$
(22)

式中: β_1 、 β_2 和 β_3 为计算参数的简化代表符号,以下 β_4 — β_9 类似。

- -

2.2 中性轴位于截面内($-b < c \leq b$)

张开,环缝对纵向刚度的削减作用不可忽略。中性 轴在截面内位置可分为以下3类:

(1)中性轴位于截面内顶板 $(b-t < c \leq b)$:

当纵向轴力不足以抵消纵向弯矩所产生的拉应力时,中性轴位置将回归到截面内。该条件下环缝

 $A = N = \beta_4$

将 $b-t < c \leq b$ 代入到 1.2.2 节的推导公式 中,可以得到该条件下的临界压弯比范围(A_2, A_1):

$$\begin{array}{l}
 A_{1} \gg \overline{M} > \overline{\beta_{5} + \beta_{6}} - A_{2} \\
 \beta_{4} = 3 \left\{ E_{c} \left[ab^{2} + a(b-t)^{2} - 4(b-t)t^{2} - 2ab(b-t) + 4a(b-t)t + 4b(b-t)t \right] \right\} \\
 -4K_{r1}l_{b} \left[(b-t)t^{2} + acl_{b}t + b(b-t)t \right] \right\} \\
 \beta_{5} = E_{c} \left[4at^{3} - 12b^{2}t^{2} - 2ab^{3} - a(b-t)^{3} - 4t^{4} + 12bt^{3} + 4b^{3}t + 3ab^{2}(b-t) \\
 -12abt^{2} + 12ab^{2}t \right] \\
 \beta_{6} = 4K_{r1}l_{b} \left(-t^{4} + at^{3} + 3bt^{3} + b^{3}t - 3b^{2}t^{2} - 3abt^{2} + 3ab^{2}t \right)
\end{array}$$
(23)

(2)中性轴位于截面腹部 $(t-b < c \le b-t)$: 中,可以得到该条件下的临界压弯比范围 (A_3, A_2) : 将 $t-b < c \le b-t$ 代入到1.2.2节的推导公式

$$A_{2} \ge \frac{N}{M} \ge \frac{\beta_{7}}{\beta_{8} + \beta_{9}} = A_{3}$$

$$\beta_{7} = 3 \left\{ E_{s} [ab^{2} + 2ab(t-b) + a(t-b)^{2}] + 4K_{r1}l_{b} [b(t-b)t - (t-b)t^{2} + a(t-b)t] \right\}$$

$$\beta_{8} = E_{s} [2ab^{3} + 3ab^{2}(t-b) - a(t-b)^{3}]$$

$$\beta_{9} = 4K_{r1}l_{b} (b^{3}t - 3b^{2}t^{2} + 3ab^{2}t + 3bt^{3} - 3abt^{2} - t^{4} + at^{3})$$

$$(24)$$

(3)中性轴位于截面底板($c \leq t-b$):

将 $c \leq t - b$ 代入到1.2.2节的推导公式中,可 以得到该条件下的临界压弯比范围(0, A_3):

$$A_3 \geqslant \frac{N}{M} \ge 0 \tag{25}$$

根据A₁、A₂、A₃的表达式可知,中性轴的位置不 仅仅与截面尺寸(高、宽、厚)、螺栓尺寸(长、宽、个 数)、混凝土以及螺栓材料性质有关,还与压弯比有 密切关系。下一节也将对各设计参数对临界压弯比 的影响进行讨论。

3 参数分析

以上海虹桥地下矩形盾构连接通道为背景,对 影响矩形盾构隧道纵向等效刚度的因素进行分析。 计算采用的盾构隧道衬砌和接头相关参数分别如表 1和表2所示。

3.1 压弯比对纵向等效抗弯刚度分析

从1.2节公式推导中可知,纵向等效刚度和中

表1 矩形盾构隧道衬砌主要设计参数

Tab. 1 Design parameters for rectangular shield tunnel lining

隧道宽度	隧道高度	环宽 <i>l</i> _s /m	管片厚度 t/	弹性模量/
2a/m	2 <i>b</i> /m		m	GPa
9.2	4.4	1.5	0.55	34.5

表2 矩形隧道纵向螺栓主要参数

Tab. 2Parameters for longitudinal bolts of rectangular shield tunnel

纵向螺栓数量n/个	直径/mm	长度/mm	弹性模量/GPa
50	30	160	206

性轴位置与压弯比密切相关。图7显示了压弯比对 纵向等效抗弯刚度以及截面中性轴位置的影响规 律。从图中可以看出,随着压弯比的增大,隧道纵向 等效抗弯刚度随之增大,相关曲线呈现"S"型分布。 压弯比的增大会引起中性轴的位置从隧道底部逐渐 发展到截面外:(1)当压弯比小于临界值A₃(0.31) 时,中性轴位置位于底板范围内,此时刚度有效率随 着压弯比的增大呈快速增大的发展趋势,当压弯比 为0时,隧道等效抗弯刚度为最小,约为28%;(2)当 压弯比大于临界值A₃,小于临界值A₂(0.62)时,中 性轴位置在腹板范围内,此时刚度有效率随着压弯 比的增大呈先快速增大、后缓慢增大的发展趋势; (3)当压弯比大于临界值A₂,小于临界值A₁(0.71) 时,中性轴位置在顶板范围内,此时刚度有效率随着 压弯比的增大变化较小,且刚度有效率基本可视为 1;(4)当压弯比大于临界值A₁,中性轴位置超出了截 面范围,此时刚度有效率不变变形,保持为1,环缝闭 合,隧道可视为均质隧道。由此可得隧道纵向抗弯 刚度对压弯比十分敏感。因此,无论在盾构隧道施 工阶段,还是长期运营阶段,需十分关注隧道纵向轴 力变化,且在抗弯设计中应充分考虑纵向轴力对隧 道抗弯的影响。建议采取螺栓预紧或预应力管片结 构等措施,以减少隧道纵向应力的松弛。

3.2 螺栓个数对纵向等效抗弯刚度影响

图 8显示了螺栓个数对隧道纵向抗弯性能的影响规律。从图 8a中可以看出,随着螺栓数量的增大,隧道纵向等效抗弯刚度随之增大,相关曲线基本 呈线性关系。同时螺栓数量的增大会引起中性轴的 位置的变化,表现为螺栓数量越多,中性轴位置越靠





近隧道中心位置,这进一步印证了螺栓数量增大,隧 道等效抗弯刚度越大。通过极限的思想易证实该变 化规律,有效率为1时中性轴位置即为隧道中心。 从图 8b中可以看出,螺栓数量对压弯临界比例A₁和 A₂影响不大,而临界比例A₃与螺栓个数呈负相关关 系,即螺栓越多,中性轴位于底板的临界比例越小。



图 8 曝性 到外隧道纵间机号性能的影响 (N-0) Fig. 8 Effect of the number of bolts on longitudinal bending performance

3.3 宽厚比对纵向等效抗弯刚度的影响

矩形盾构隧道的不同宽厚比将对其纵向抗弯刚 度产生较大影响。因此,以下针对环宽厚比和截面 宽厚比两个主要宽厚比对纵向刚度的影响展开。

3.3.1 环宽厚比影响

图 9显示了环宽厚比(*l_s/t*)对隧道纵向抗弯性能 的影响规律,其中仅改变管片的长度。从图 9a中可 以看出,随着环宽厚比的增大,隧道纵向等效抗弯刚 度随之增大,整体曲线基本呈现抛物线分布,表现为 隧道管片越宽,隧道整体刚度越大。同样通过极限 的思想可证实该变化规律,当环宽厚比无穷大时,隧 道即为均质结构,刚度最大。

从图 9b中可以得到:环宽厚比不会引起中性轴的位置以及压弯临界比例的变化,说明中性轴的位置和压弯临界比例与纵向尺寸无关,仅与管片截面性质有关。



图 9 环宽厚比对隧道纵向抗弯性能的影响(N=0) Fig. 9 Effect of the ratio of tunnel width to thickness on longitudinal bending performance

3.3.2 截面宽厚比影响

图 10显示了截面宽厚比(a/t)对隧道纵向抗弯 性能的影响规律,其中改变高度和宽度但保持截面 宽高比和厚度不变。从图 10a中可以看出,随着截 面宽厚比的增大,隧道纵向等效抗弯刚度随之减小, 整体曲线基本呈现抛物线分布。隧道截面越大,混 凝土管片刚度越大,而接缝刚度因受螺栓不变的影响,相对提升较小,因此等效刚度越小。同时随着截 面宽厚比的增大,中性轴位置越远离隧道中心,印证 了等效刚度的减小。从图 10b中可以得到:截面宽 厚比的增大会引起压弯临界比例的减小,即隧道环 缝闭合的条件越容易达到。





3.4 截面形状对纵向等效抗弯刚度的影响

图 11给出了宽高比(a/b)对隧道纵向抗弯性能 的影响规律,其中设定截面厚度和高度不变,改变截 面宽度。从图 11a中可以看出,随着宽高比的增大, 即截面的扁平化,隧道的等效抗弯刚度有效率呈现 下降的趋势,而对中性轴位置影响小。当宽高比a/ b为1时,此时隧道截面为正方形,隧道的等效扭转 刚度有效率最大,约为37 %;而当宽高比为3时,隧 道的等效扭转刚度有效率约为25 %。可见矩形隧 道截面越扁平,其等效抗弯刚度有效率越小,则其抵 抗地层变形的能力越差。从图 11b中可以看出,宽 高比对压弯临界比例均有影响,其中A₁和A₂随着宽 高比的增大而减小,而临界比例A₃与宽高比呈正相 关关系。这表现为越扁平的矩形隧道,中性轴超出 截面外所对应的压弯比越小,即环缝越容易闭合。 同时底(顶)板相对抗压能力越大,临界比例A₃ 越大。



图 11 宽厚比对隧道纵向抗弯性能的影响(N=0)

Fig. 11 Effect of the ratio of cross-sectional width to height on the on the longitudinal bending performance

4 结论

本文基于等效连续化模型假设建立了矩形管片 隧道的纵向抗弯刚度计算模型,推导了其解析解,并 对该解析解的关键设计参数进行了敏感性分析,得 到结论如下:

(1)矩形盾构隧道等效抗弯刚度和中性轴的位置与截面的尺寸以及材料属性相关,更与压弯比的大小密切相关。不同压弯比情况下隧道中性轴位置可分为4类:①底板内;②腹板内;③顶板内;④截面外,分别对应了三个临界压弯比,包括:1-2临界值(A₃)为0.31;2-3临界值(A₂)为0.62;3-4临界值(A₁)为0.71。

(2) 隧道纵向等效抗弯刚度随着压弯比增大显 著提升,且伴随着中性轴向截面外发展。无轴力状 态下隧道等效抗弯刚度最小约28 %;当压弯比大于 临界值A₁,环缝闭合隧道纵向等效抗弯有效率达到 上限100 %。

(3) 螺栓数量的增大可使隧道纵向等效抗弯刚 度线性增大,且引起中性轴位置向隧道中心偏移。 同时将导致临界比例A。减小;当螺栓数量增大1倍, A。降低约25%。

(4) 环宽厚比与隧道纵向等效抗弯刚度呈正相 关关系,而对中性轴的位置以及压弯临界比无影响。 截面宽厚比的增大将导致隧道纵向等效抗弯刚度减 小和中性轴位置远离隧道中心,同时引起压弯临界 比例的减小;当截面宽厚比增大1倍,压弯临界比例 减小约50 %。

(5)随着宽高比的增大,即截面的扁平化,隧道 的等效抗弯刚度越小,同时导致压弯临界比显著变 化。其中A₁和A₂随着宽高比的增大而减小,而临界 比例A₃与宽高比呈正相关关系;当宽高比增大2倍 时,A₁和A₂减小约20%,A₃增大近1倍。

作者贡献声明:

刘颖彬:论文构思、写作和修改,理论推导。 廖少明:论文构思、写作和修改,基金获取。 李志义:基金获取、论文修改。 钟铧炜:论文修改,图表制作。 滕政伟:论文修改,图表制作。

参考文献:

[1] NAKAMURA H, KUBOTA T, FURUKAWA M, et al. Unified construction of running track tunnel and crossover tunnel for subway by rectangular shape double track crosssection shield machine [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(2), 253.

[2] 傅德明,张冠军.我国矩形掘进机隧道施工技术发展与应用
[J].上海建设科技,2008(2):4.
FU Deming, ZHANG Guanjun. Development and application of the rectangular tunnel boring machine technology in China
[J]. Shanghai Construction Science and Technology, 2008 (2):4.

 [3] 王全胜.矩形盾构法隧道管片分块案例分析及分块原则[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 23.
 WANG Quansheng. Case study based analysis of segment division principles of rectangular shield tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(4): 23.

[4] 周丰,曹辉林,陈蔚.地铁隧道大断面矩形盾构设计与施工关键技术[J].施工技术,2017,46(20):65.
ZHOU Feng, CAO Huilin, CHEN Wei. Key design and construction technology of large rectangular shield for subway tunnel[J]. Construction Technology, 2017,46(20):65.

[5] 金跃郎,丁文其,姜弘,等.大断面矩形盾构隧道管片接头极

限抗弯承载力试验[J].中国公路学报, 2017, 30(8): 143. JIN Yuelang, DING Wenqi, JIANG Hong, *et al.* Test on ultimate bearing capacity of segment joint in shield tunnel with large rectangular cross-section [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 143.

- [6] 梁霄,官林星,温竹茵,等.基于施工全过程的矩形盾构隧道结构受力分析方法及应用[J].隧道建设,2018,38(7):1172. LIANG Xiao, GUAN Linxing, WEN Zhuyin, et al. A Method for force analysis of rectangular shield tunnel lining structure considering whole construction process: principle and application[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(7): 1172.
- [7] SHEN Shuilong, WU Huaina, CUI Yujun, et al. Long-term settlement behavior of the metro tunnel in the soft deposits of Shanghai [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2014, 40: 309.
- [8] LIU Yingbin, LIAO Shaoming, CHEN Lisheng, et al. Structural responses of DOT tunnel induced by shield undercrossing in close proximity in soft ground. Part I: field measurement [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 40(10): 1462.
- [9] LIU Yingbin, LIAO Shaoming, LIU Mengbo, et al. Investigation on the structural behaviors of segmental tunnel with a new generalized-beam-theory-based model incorporating cross-sectional distortions [J]. Underground Space, 2023, 12: 183.
- [10] SHIBA Y, KAWASHIMA K, OHIKATA M, et al. Evaluation of longitudinal structural stiffness of shield tunnel under earthquake loading [J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, 1988, 404: 385.

- [11] 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.
 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.
- [12] 梁荣桂,王凯超,黄亮,等.类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚 度解析解[J].岩土工程学报,2022,44(2):21.
 LIANG Rongzhu, WANG Kaichao, HUANG Liang, et al. Analytical solution for longitudinal equivalent bending stiffness of quasi-rectangular shield tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2):212.
- [13] 郑庆坂,潘伍,覃永杰,等.大断面矩形盾构隧道等效抗弯刚度研究[J].科学技术与工程,2020,20(23):9590.
 ZHENG Qingban, PAN Wu, QIN Yongjie, *et al.* Study on equivalent bending stiffness of large section rectangular shield tunnel [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20 (23):9590.
- [14] 廖少明,门燕青,肖明清,等.软土盾构法隧道纵向应力松弛规 律的实测分析[J].岩土工程学报,2017,39(5):795.
 LIAO Shaoming, MEN Yanqing, XIAO Mingqing, et al. Field tests on longitudinal stress relaxation along shield tunneling soft ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5):795.
- [15] LI Xiaojun, ZHOU Xiaozhou, HONG Bicheng, et al. Experimental and analytical study on longitudinal bending behavior of shield tunnel subjected to longitudinal axial forces
 [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 86: 128.