

DOI: 10.11779/CJGE201911015

类矩形盾构隧道纵向抗弯刚度分析

黄亮^{1, 2}, 梁荣柱^{*1, 3}, 吴小建^{4, 1}, 孙廉威^{4, 3}, 张莉^{1, 5}, 吴文兵¹

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082; 3. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 4. 上海建工集团股份有限公司, 上海 200080; 5. 清华大学土木水利学院 北京 100084)

摘要: 类矩形盾构隧道的等效抗弯刚度是分析其纵向受力变形的重要参数。基于等效连续化模型的基本原理, 建立类矩形盾构隧道纵向等效连续化模型, 推导得到类矩形盾构隧道的等效抗弯刚度解析解。通过参数分析, 研究螺栓、管片宽度、厚度和截面形状等参数对类矩形盾构隧道纵向抗弯刚度有效率的影响。研究表明, 由于类矩形盾构隧道截面的特殊性, 在建立等效抗弯刚度模型时, 需分别对中性轴在隧道腰部和拱底两种不同的情况进行讨论; 增加螺栓数量和加大管片宽度可提高类矩形盾构隧道的等效抗弯刚度有效率, 中性轴位置随着上移, 环缝受拉张开区域减小; 增加管片厚度可增加隧道绝对等效抗弯刚度, 但是等效抗弯刚度有效率下降, 中性轴位置下移; 中性轴位置随着宽高比增大而快速下移, 当中性轴位置角度与小圆弧圆心角相等时, 中心轴下移曲线发生转折; 当宽高比为 1 时, 所得解析解退化为圆形盾构隧道等效抗弯刚度解。

关键词: 类矩形盾构隧道; 等效抗弯刚度; 等效抗弯刚度有效率; 解析解

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)11-2094-09

作者简介: 黄亮(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事盾构隧道结构保护相关科研工作。E-mail: hl@cug.edu.cn。

Longitudinal bending stiffness of quasi-rectangular shield tunnels

HUANG Liang^{1, 2}, LIANG Rong-zhu^{1, 3}, WU Xiao-jian^{4, 1}, SUN Lian-wei^{4, 3}, ZHANG Li^{1, 5}, WU Wen-bing¹

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200080, China; 5. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The equivalent bending stiffness of the quasi-rectangular shield tunnel is a key parameter for analyzing its longitudinal deformation under external forces. A longitudinal equivalent continuous model for the quasi-rectangular shield tunnel is established, and its analytical solutions to the equivalent bending stiffness are then derived according to the principles of the longitudinal equivalent continuous model. The effects of connected bolts, width and thickness of linings and shape of cross section on the effective equivalent bending stiffness ratio are discussed and analyzed through parametric analyses. It is found that due to the cross section specificity of the quasi-rectangular shield tunnel, two neutral axis position conditions, namely, the neutral axis at tunnel waist and that at tunnel invert, should be considered, respectively, when establishing the equivalent continuous model. Increasing the connected bolt number and widening the lining width will effectively raise the effective equivalent bending stiffness ratios. Subsequently, the neutral axis then moves up and the opening zone of circumferential joint under tension decreases. Increasing the thickness of linings will increase the absolute value of the equivalent bending stiffness, yet the effective equivalent bending stiffness ratio decreases and the position of neutral axis moves down. The position of the neutral axis moves down sharply with an increase in width-height ratio. If the angle of neutral axis position is equal to the central angle of small arc, the turning point in the moving-down curve of the neutral axis occurs. The proposed analytical solutions can be degenerated into the circular shield tunnel condition when the width-to-height ratio is equal to one.

Key words: quasi-rectangular shield tunnel; equivalent bending stiffness; effective equivalent bending stiffness ratio; analytical solution

0 引言

类矩形盾构隧道有着较高的断面使用率、较浅的

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41807262); 湖北省自然科学基金项目(2018CFB179); 中国博士后基金面上项目(2019M653308)

收稿日期: 2018-10-28

*通讯作者(E-mail: liangcug@163.com)

安全埋置深度、较低的地下空间占用率等优点, 且一次掘进成型后可以满足往返列车同时运行, 能适应在城市核心区域地铁隧道建造或地下通道建设需求。特别在施工双线地铁隧道时候, 相比于大直径单圆盾构隧道, 类矩形盾构隧道建筑断面面积远远小于圆形盾构隧道, 如图 1 所示。这意味着采用类矩形隧道代替大直径单圆盾构隧道可节约大量的地下空间资源, 为城市地下空间的开发预留空间。由于类矩形隧道的诸多优点, 在土地资源紧张、人口密度大的日本, 类矩形盾构隧道已有较为广泛的应用^[1-3], 宁波市亦成功把类矩形盾构隧道施工技术应用到了地铁隧道中。可以预见, 随着类矩形盾构施工工法的进一步完善, 类矩形隧道将会成为城市地铁隧道主要选择之一。

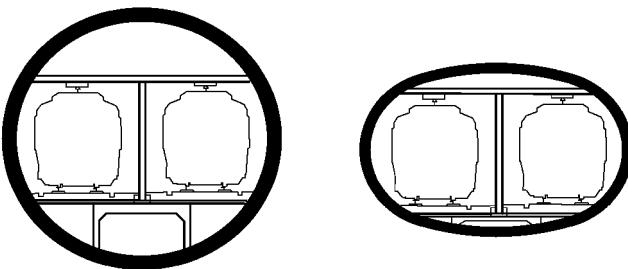


图 1 圆形隧道与类矩形隧道对比

Fig. 1 Comparison between circular and quasi-rectangular shield tunnel

圆形或类矩形盾构隧道都是由环向螺栓和纵向螺栓将管片拼接成型的筒体结构, 接头和管片之间的刚度差异导致衬砌结构整体刚度有所削弱。因此, 在实际的盾构施工和运营过程中, 由于受地质条件变化、外荷载的不均匀性、周边环境的变化等因素的影响, 隧道沿纵向容易发生不均匀沉降。隧道结构纵向的弯矩和剪力在常规设计中难以定量考虑, 但当纵向变形曲率半径小于某一界限值时, 管片将由于环缝张开量过大而造成渗漏水和管片开裂损伤等病害, 严重的会直接威胁隧道的健康和使用寿命。隧道的等效抗弯刚度研究是分析其受邻近施工影响的重要理论基础。因此, 研究盾构隧道的纵向等效抗弯刚度和受力变形特性具有重要现实意义和工程应用价值。

以往关于盾构隧道纵向变形的研究大多集中于圆形隧道, 对圆形盾构隧道的等效抗弯刚度^[4-16]和纵向变形^[17-19]研究已经较为深入, 取得了有益的研究成果, 并应用于实际工程的设计与施工中。

类矩形隧道不同于圆形隧道, 因其截面特点, 在产生纵向变形时会受力不均匀, 在局部产生较大的弯矩与张开变形。因此, 圆形盾构隧道的纵向受力变形规律与等效抗弯刚度理论不能直接套用在类矩形盾构隧道上。

现阶段在中国类矩形隧道技术仍然处于摸索阶

段, 其推广与应用工作任重道远。关于类矩形盾构隧道的相关研究主要集中于结构的横向结构性能^[1, 20]与纵缝变形性能^[21-23]上, 对其纵向力学性能的研究, 特别是抗弯刚度与纵向变形受力问题的研究较少。

本文在前人工作的基础上, 将圆形盾构隧道纵向力学性能的相关研究推广到类矩形盾构隧道, 推导得到类矩形盾构隧道的纵向等效刚度解析解, 并对影响纵向等效刚度的相关因素进行分析。

1 类矩形盾构隧道纵向等效连续模型

1.1 模型的建立及基本假定

取两管片环中心线内的 l_s 长度为一个计算单元, 当管片受到弯矩 M 作用时, 管片单元产生的转角为 q , 如图 2 所示。

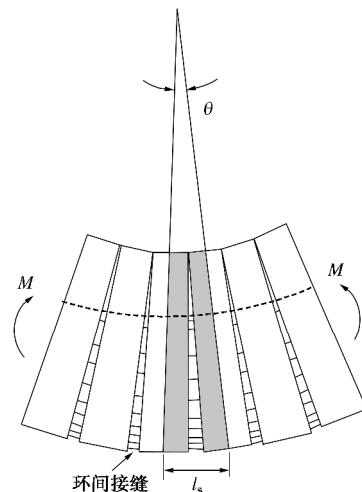


图 2 管片受弯变形示意图

Fig. 2 Deformation of linings under bending

管片环截面示意图如图 3 所示。图 3 中的类矩形截面由腰部和拱部两对不同半径的圆弧组成, 其中: a 为 $1/2$ 小圆弧圆心角; R_1 为小圆弧半径; b 为 $1/2$ 的大圆弧圆心角; R_2 为大圆弧半径; a, b 分别为截面的长半轴和短半轴; t 为管片厚度; b' 为边缘管片中心距类矩形截面长轴的距离; s 为大圆弧圆心相对类矩形截面长轴的偏移量; dg 为管片环上任意微分单元所在圆弧对应的圆心角; x 为中性轴到类矩形截面长轴的距离, 称为中性轴位置; j 为小(大)圆弧对应的圆心到中性轴与管片中心线交点的连线与所对应的圆心所在水平线的夹角, 称为中性轴位置角; g 为微分单元与所在圆弧圆心之间的连线同竖直方向的夹角。

本文采用如下基本假定:

- (1) 平截面假定, 即隧道横断面在变形后仍为平面, 截面上每一处的变形量与离中性轴的距离成正比。
- (2) 螺栓在环向的分布形式等效为连续均匀分布。

则螺栓作用长度为 l_b 时, 螺栓的平均线刚度 k_r 为

$$k_r = \frac{nk_b}{l} = \frac{nE_b A_b}{l_b(4\alpha R_1 + 4bR_2)} \quad . \quad (1)$$

式中 n 为截面纵向螺栓总数; k_b 为单个纵向螺栓的弹性刚度系数; l 为螺栓分布的总长度; E_b 为螺栓弹性模量; l_b 为螺栓长度; A_b 为单个螺栓横截面面积。

此假定忽略了螺栓与管片间的局部应力集中效应, 可能会使得计算螺栓变形量时结果偏小。

(3) 管片环单元以中性轴为界, 一侧受拉, 另一侧受压。受压侧仅管片承担压力, 受拉侧拉力由螺栓和管片共同承担。

(4) 所有螺栓所受拉力均小于弹性极限, 单元处于完全弹性状态。

(5) 在一个管片单元内中性轴的位置沿隧道纵向不变, 且不考虑管片环缝影响范围。

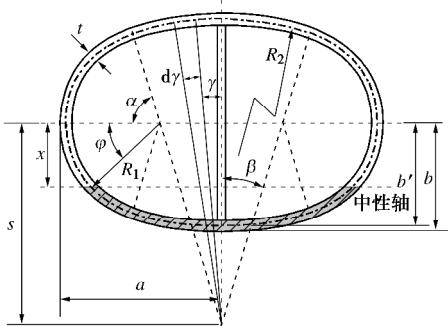


图 3 类矩形管片环截面图

Fig. 3 Sectional view of linings of quasi-rectangular shield tunnel

盾构隧道是通过螺栓拼装管片形成的复合筒状结构物, 在受弯矩作用时, 截面的中性轴位置与结构的形心轴位置并不重合。

中性轴位置有可能位于截面腰部小圆弧范围内, 即 $0 < x \leq R_1 \sin \alpha$, 亦有可能穿过截面下拱部大圆弧即 $x > R_2 \sin(\pi/2 - b)$ 。由于类矩形截面的特殊性, 下文将分上述两种情况分别讨论之。

1.2 中性轴位于截面腰部时 ($0 < x \leq R_1 \sin \alpha$) 的纵向等效抗弯刚度计算

中性轴位于截面腰部时 ($0 < x \leq R_1 \sin \alpha$), 管片纵向变形及应力情况如图 4 所示。

由图 4 可得受压区和受拉区的变形协调方程如下:

$$(b-x)\frac{q}{2} = \frac{e_c l_s}{2} \quad , \quad (2)$$

$$(b'+x)\frac{q}{2} = \frac{d}{2} + \frac{e_t l_s}{2} \cdot \frac{b'+x}{b+x} \quad . \quad (3)$$

式中, e_c 和 e_t 分别是管片接头的最大压应变和最大拉应变, d 为距离中性轴最远处的环缝张开量。

受压区管片所受压力分别与受拉区管片、螺栓所受拉力平衡, 受力平衡方程如下:

$$\begin{aligned} & 2 \frac{E_s e_c}{b-x} \int_0^b (R_2 \cos g - x - s) R_2 t d g + 2 \frac{E_s e_c}{b-x} \cdot \\ & \int_{\pi/2-j}^{\pi/2-a} (R_1 \cos g - x) R_1 t d g \\ & = 2 \frac{E_s e_t}{b+x} \int_{\pi/2-a}^{\pi/2+j} (R_1 \cos g + x) R_1 t d g + 2 \frac{E_s e_t}{b+x} \cdot \\ & \int_0^b (R_2 \cos g - s + x) R_2 t d g \quad , \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} & 2 \frac{E_s e_c}{b-x} \int_0^b (R_2 \cos g - x - s) R_2 t d g + 2 \frac{E_s e_c}{b-x} \cdot \\ & \int_{\pi/2-a}^{\pi/2-j} (R_1 \cos g - x) R_1 t d g \\ & = 2 \frac{k_r d}{b'+x} \int_{\pi/2-a}^{\pi/2+j} (R_1 \cos g + x) R_1 d g + 2 \frac{k_r d}{b'+x} \cdot \\ & \int_0^b (R_2 \cos g - s + x) R_2 d g \quad . \end{aligned} \quad (4b)$$

式中, E_s 为混凝土管片的弹性模量, $x = R_1 \sin j$ 。

受压区压力和受拉区拉力对截面形心轴的合力矩与纵向弯矩平衡, 力矩平衡方程如下:

$$\begin{aligned} & 2 \frac{E_s e_c}{b-x} \int_0^b (R_2 \cos g - x - s)(R_2 \cos g - s) R_2 t d g + \\ & 2 \frac{E_s e_c}{b-x} \int_{\pi/2-a}^{\pi/2-j} (R_1 \cos g - x)(R_1 \cos g) R_1 t d g + \\ & 2 \frac{E_s e_t}{b+x} \int_{\pi/2-a}^{\pi/2+j} (R_1 \cos g + x)(R_1 \cos g) R_1 t d g + \\ & 2 \frac{E_s e_t}{b+x} \int_0^b (R_2 \cos g - s + x)(R_2 \cos g - s) R_2 t d g \\ & = M \quad . \end{aligned} \quad (5)$$

由式 (2), (3), (4a), (4b) 可知道中性轴位置角 j 满足

$$\frac{k_r l_b}{E_s t} = \frac{A_1}{A_2 - A_1} \quad , \quad (6)$$

式中, $A_1 = -2bsR_2 + 2\sin b(R_2^2 - R_1^2) + [2b(R_1^2 - R_1R_2) - \pi R_1^2] \sin j + 2R_1^2 j \sin j + 2R_1^2 \cos j$, $A_2 = -2bsR_2 + 2\sin b(R_2^2 - R_1^2) + [2b(R_1R_2 - R_1^2) + pR_1^2] \sin j + 2R_1^2 \cos j + 2R_1^2 j \sin j$ 。

由式 (2), (3), (4a), (4b), (5) 解得

$$q = \frac{M l_s}{E_s \left[\frac{t(2A_3 + A_4)}{2} + y \frac{t(A_5 + 2A_6)}{2} \right]} \quad , \quad (7)$$

式中, $A_3 = R_2 b(2s^2 + R_2^2) + R_2^2 \sin b(R_2 \cos b - 4s) - 2R_1 R_2 (R_2 \sin b - bs) \sin j$, $A_4 = R_1^3 (\pi - 2b - \sin 2b) - 2R_1^3 j + 4R_1^3 \sin b \sin j - R_1^3 \sin 2j$, $A_5 = R_1^3 (\pi - 2b - \sin 2b) + 2R_1^3 j - 4R_1^3 \sin b \sin j + R_1^3 \sin 2j$, $A_6 = R_2 b(2s^2 + R_2^2) + R_2^2 \sin b(R_2 \cos b - 4s) + 2R_1 R_2 (R_2 \sin b - bs) \sin j$, $y = \frac{k_r l_b}{k_r l_b + E_s t}$ 。

若设 $J_1 = \frac{t(2A_3 + A_4)}{2}$, $J_2 = \frac{t(A_5 + 2A_6)}{2}$, 则式 (7) 可化简为

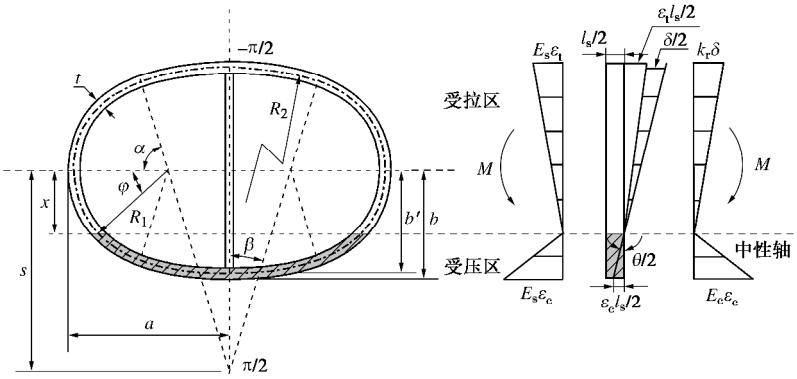
图4 中性轴位于截面腰部时($0 < x \leq R_1 \sin \alpha$)的受力变形分析

Fig. 4 Sectional force and deformation analysis under neutral axis at tunnel waist ($0 < x \leq R_1 \sin \alpha$)

$$q = \frac{Ml_s}{E_s(J_1 + YJ_2)} \quad . \quad (8)$$

等效连续化模型梁的转角为

$$q = \frac{Ml_s}{(EI)_{eq}} \quad , \quad (9)$$

式中, $(EI)_{eq}$ 为等效抗弯刚度。

由式(8), (9)进一步可得到当中性轴位于截面腰部时($0 < x \leq R_1 \sin \alpha$), 等效抗弯刚度($EI)_{eq}$ 表达式为

$$(EI)_{eq} = \frac{Ml_s}{q} = E_s(J_1 + YJ_2) \quad . \quad (10)$$

1.3 中性轴位于截面下仰拱时($R_2 \sin(\pi/2 - b) < x \leq R_2 - s$)的纵向等效抗弯刚度

当中性轴移至类矩形截面下拱部圆弧时, 中性轴位置 $x = R_2 \sin j - s$, 此时中性轴位置在 $R_2 \sin(\pi/2 - b) < x \leq R_2 - s$ 范围内, 管片的截面分析图如图5所示。由于中性轴位置的变化, 受压区和受拉区的范围亦相应变化, 但是受压区和受拉区的变形协调条件没有变化, 仍然可由式(2), (3)求得。

由图5可得受压区和受拉区的受力平衡方程为

$$\begin{aligned} & \frac{E_s e_c}{b-x} \int_0^{\frac{\pi}{2}-j} (R_2 \cos g - x - s) R_2 t dg = 2 \frac{E_s e_t}{b+x} \cdot \\ & \left[\int_{\frac{\pi}{2}-j}^b (s - R_2 \cos g + x) R_2 t dg + \int_{\pi/2-a}^{\pi/2+a} (x - R_1 \cos g) R_1 t dg \right], \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} & 2 \frac{E_s e_c}{b-x} \int_0^{\frac{\pi}{2}-j} (R_2 \cos g - x - s) R_2 t dg = 2 \frac{k_r d}{b'+x} \cdot \\ & \left[\int_{\frac{\pi}{2}-j}^b (s - R_2 \cos g + x) R_2 t dg + \int_{\pi/2-a}^{\pi/2+a} (x - R_1 \cos g) R_1 t dg \right]. \end{aligned} \quad (11b)$$

受压区压力和受拉区拉力对截面形心轴的合力矩与纵向弯矩平衡, 力矩平衡方程如下:

$$\begin{aligned} & 2 \frac{E_s e_c}{b-x} \int_0^{\frac{\pi}{2}-j} (R_2 \cos g - x - s) (R_2 \cos g - s) R_2 t dg + \\ & 2 \frac{E_s e_t}{b+x} \int_{\frac{\pi}{2}-j}^b (s - R_2 \cos g + x) (s - R_2 \cos g) R_2 t dg + \\ & 2 \frac{E_s e_t}{b+x} \int_0^b (R_2 \cos g - s + x) (R_2 \cos g - s) R_2 t dg + \\ & 2 \frac{E_s e_t}{b+x} \int_{\pi/2-a}^{\pi/2+a} (x - R_1 \cos g) (-R_1 \cos g) R_1 t dg \\ & = M \quad . \end{aligned} \quad (12)$$

由式(2), (3), (11)可得中性轴位置角 j 满足图5。

$$\frac{k_r l_b}{E_s t} = \frac{B_1}{B_2 - B_1} \quad , \quad (13)$$

式中, $B_1 = 2R_2^2 \cos j - \pi R_2^2 \sin j + 2R_2^2 j \sin j$, $B_2 = -2s(-2bR_1 + \pi R_1 + 2bR_2) + 2R_2^2 \cos j + 2R_2^2 j \sin j R_2(-4b \cdot R_1 + 2\pi R_1 + 4bR_2 - \pi R_2) \sin j$ 。

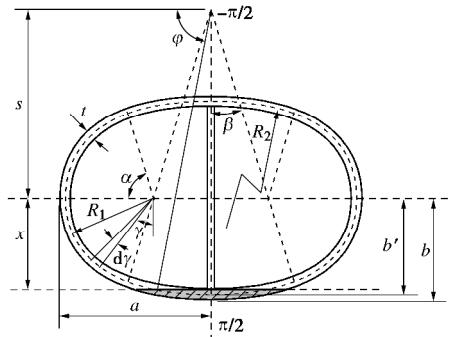
图5 中性轴位于类矩形隧道截面下仰拱时($R_2 \sin(\pi/2 - b) < x \leq R_2 - s$)的截面受力变形分析

Fig. 5 Sectional force and deformation analysis under neutral axis at tunnel invert ($R_2 \sin(\pi/2 - b) < x \leq R_2 - s$)

由式(2), (3), (11), (12)解得中性轴位于类矩形隧道截面下仰拱时, 即 $R_2 \sin(\pi/2 - b) < x \leq R_2 - s$, 类矩形盾构隧道的等效抗弯刚度为

表 1 类矩形盾构隧道衬砌主要设计参数

Table 1 Design parameters for quasi-rectangular shield tunnel lining

隧道宽度 $2a/m$	隧道高度 $2b/m$	半径 R_1/m	半径 R_2/m	偏移 s/m	角 a /($^{\circ}$)	角 b /($^{\circ}$)	环宽 l_s/m	管片厚度 t/m	弹性模量 E_s/MPa
11.50	6.937	2.975	15.225	11.98	78	12	1.2	0.45	3.45×10^4

$(EI)_{eq} = E_s(J'_1 + yJ'_2)$, (14)
 式中, $J'_1 = \frac{tB_3}{2}$, $J'_2 = \frac{t(2B_4 + 2B_5 + B_6)}{2}$, $B_3 = R_2^2(\pi - 2j)(2s \sin j + R_2) - 2R_2^2 \cos j(2s + R_2 \sin j)$,
 $B_4 = -R_1^3(2b + \sin 2b - \pi)$, $B_5 = (4s^2 + R_2^2)R_2 b - (6s - R_2 \cos b)R_2^2 \sin b - 2R_2^2(b s - R_2 \sin b) \sin j$,
 $B_6 = -4sR_2^2 \sin b + R_2^3(-\pi + 2b + \sin 2b) + 2R_2^3 j + (4s b - 2s\pi - 4R_2 \sin b)R_2^2 \sin j + 4sR_2^2 j \sin j + R_2^3 \sin 2j + 4sR_2^2 \cdot \cos j$ 。

类矩形盾构隧道两圆弧半径相等时, 盾构隧道截面退化为圆形。将 $R_1=R_2$ 代入式(6)~(10)或式(13), (14), 可得到与传统圆形盾构隧道纵向抗弯刚度^[4-5]相同的结果, 说明圆形盾构隧道是本文的一种特例。

定义等效抗弯刚度与均质连续隧道弯曲刚度之比为纵向等效刚度有效率 h_L :

$$h_L = \frac{(EI)_{eq}}{E_s I_c} , \quad (15)$$

式中, $E_s I_c$ 为均质隧道的纵向抗弯刚度, 其中 I_c 为盾构隧道横截面的惯性矩, 对于类矩形截面, 其表达式为

$$\begin{aligned} I_c &= 2 \int_{\frac{\pi}{2}-a}^{a+\frac{\pi}{2}} R_1 t (R_1 \cos g)^2 dg + 2 \int_{-b}^b R_2 t (R_2 \cos g - s)^2 dg \\ &= t[(\pi - 2b - \sin 2b)R_1^3 + 4bs^2R_2 - 8s \sin b R_2^2 + (\sin 2b + 2b)R_2^3] . \end{aligned} \quad (16)$$

h_L 是反映等效连续化模型中等效抗弯刚度相较于原始管片的变化情况的参数, 在隧道的设计中有重要的意义。

通过上述分析可知, 等效抗弯刚度是随着中性轴位置变化而变化的。当中性轴位于截面腰部时 ($0 < x \leq R_1 \sin a$), 通过式(10)求得类矩形隧道等效抗弯刚度; 当中性轴移至类矩形截面下拱部圆弧时 ($R_2 \sin(\pi/2 - b) < x \leq R_2 - s$), 类矩形隧道等效抗弯刚度可通过公式(14)求得。

2 算例分析

以宁波轨道交通 3 号线类矩形盾构隧道工程为背景, 对类矩形盾构隧道纵向等效刚度的影响因素进行分析。2015 年宁波轨道交通 3 号线一期出入段采用了类矩形土压平衡盾构施工, 该盾构作业形成的隧道断

面是一个宽 11.83 m, 高 7.27 m 的类矩形, 纵向采用 30 根 6.8 级 M30 螺栓。该技术在国内轨道交通建设中尚属首次应用, 类矩形隧道结构设计、类矩形盾构设计制造、类矩形盾构施工综合技术和组织管理等存在诸多挑战, 因此对该隧道纵向等效刚度进行研究。计算采用的盾构隧道衬砌和接头相关参数分别如表 1, 2 所示^[22]。

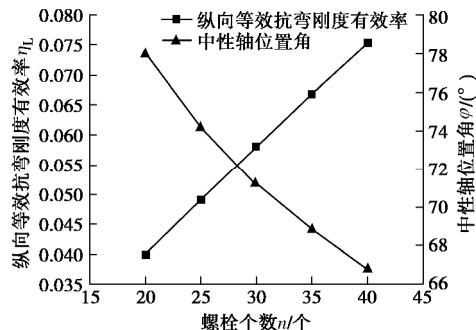
表 2 类矩形隧道纵向接头主要参数
Table 2 Parameters for longitudinal joint of quasi-rectangular shield tunnel

纵向螺栓数 量 $n/个$	直径 $/mm$	长度 l_b/mm	弹性模量 E_p/MPa	抗拉刚度 $/(kN \cdot m^{-1})$
30	30	370	2.06×10^5	3.12×10^5

2.1 螺栓个数对纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 的影响

图 6 为纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 随不同螺栓个数影响曲线图。由图可见, 螺栓个数 n 与纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 基本成线性关系。随着螺栓个数 n 的增多, 纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 显著提高。这是因为, 螺栓主要作用是抵抗弯矩 M 引起的拉应力, 增加螺栓的数量也意味着增加了管片界面上的平均线刚度, 这将有利于减小环间接缝的张开量。

随着螺栓数量的增加, 中性轴位置角 j 迅速减少, 如图 6 所示。也就是, 中性轴位置将随着螺栓数量增加而逐步上移。随着中性轴上移, 受压区增大, 而受拉区减小, 管片的受力更加均匀合理。受拉区减少则意味则管片受力张拉区域变小, 利于管片防水。

图 6 螺栓个数对纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 的影响Fig. 6 Effects of bolt number on effective longitudinal equivalent bending stiffness ratio h_L

但是, 并非螺栓个数越多就越好。因为增加螺栓个数就意味着要增加管片上的开孔数量, 若管片开孔过多将会导致管片横向承载性能下降, 管片在外载作

用下更容易破损。因此, 在实际管片设计时, 不能盲目增加螺栓个数。

2.2 管片厚度对纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 的影响

分别取管片厚度为 0.35, 0.40, 0.45, 0.5, 0.55 m, 计算得出不同管片厚度下纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 的值, 如图 7(a) 所示。由图 7(a) 可知, 隧道的纵向等效抗弯刚度有效率随管片厚度的增加而减小, 两者大致呈线性关系, 厚度每增加 0.05 m, 隧道纵向抗弯刚度有效率减小约 5%。这是由于管片厚度的增加得到的均质隧道弯曲刚度更大, 导致有效率相对减小。虽然隧道纵向抗弯刚度有效率是呈线性下降的, 但是由于管片加厚, 纵向抗弯刚度绝对值是增加的, 如图 7(b) 所示。而随着管片厚度的增加, 中性轴位置角亦迅速增大, 也就是说, 中性轴位置将随着管片厚度增大而下移。当管片厚度从 0.35 m 增加到 0.55 m 时, 中性轴下移约为 0.12 m。这意味着中, 管片受压区相对减少, 而受拉区相对增大, 这增加了环缝张开的可能性, 不利于管片防水密封, 但是可以通过对螺栓施加预紧力来提高环缝的张开开启弯矩。

增加管片厚度可以提高纵向抗弯刚度, 但是增加厚度意味着增加材料成本的投入, 和隧道净空的减少。对比于欧洲国家的地铁管片厚度, 中国管片普遍偏厚, 相对设计较为保守。

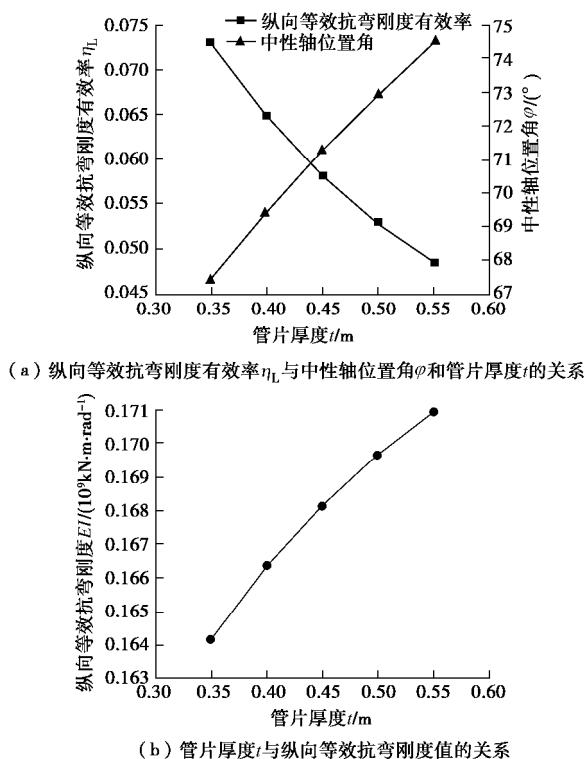


图 7 管片厚度 t 对纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 的影响

Fig. 7 Effects of lining thickness on effective longitudinal equivalent bending stiffness ratio h_L

2.3 管片宽度对纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 的影响

分别取管片环宽度为 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 m, 计算其等效抗弯刚度, 绘制与等效抗弯刚度有效率、中性轴位置关系曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 随着管片环宽度的增加, 隧道纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 呈线性快速增长。管片环宽度每增长 0.2 m, 有效率 h_L 增大 20%; 从 0.8 m 增大到 1.6 m 时, 纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 从 4% 增大到 8%, 有效率增大 1 倍。而与此同时, 由于管片环宽度增大 1 倍, 相同长度的盾构隧道的环间接缝数量将减少一半。这说明增大管片环宽度既能提高等效抗弯刚度有效率, 又能减少环缝的数量。环缝数量的减少将意味着管片间渗漏水的可能性也将大幅度减少, 利于隧道长期运行安全。但由于受到施工条件、拼装条件和运输条件等方面的限制, 目前中国工程常用的管片宽度为 1~2 m。

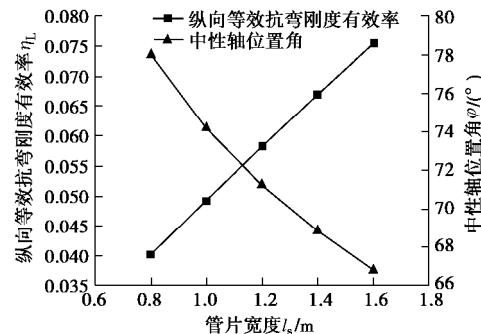


图 8 管片宽度和纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 、中性轴位置角 j 之间的关系

Fig. 8 Relationship among lining width, effective equivalent bending stiffness ratio h_L and neutral axis position

随着管片宽度的增加, 中性轴位置角几乎为线性减小, 也就是中性轴位置随着管片宽度的增加而逐步上移。当管片宽度为 0.8 m 时, 中性轴位置角 j 为 78° , 而当管片宽度为 1.6 m 时, 中性轴位置角 j 为 65° , 就是管片宽度增加一倍时, 中性轴上移了 0.21 m。中性轴上移表示受压区增大, 而受拉区相对减小, 管片环缝张开区域也将减小, 有利于减少隧道环缝张开而导致的渗漏水现象。

2.4 截面形状对纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 的影响

参数 R_1 , R_2 和 a , b 是确定类矩形截面形状尺寸的关键参数(如图 3 所示), 其中 $b = \pi/2 - a$, 所以只要确定了前 3 个参数, 类矩形截面的形状也就相应地确定了。然而, 影响隧道力学性质、正常使用的主要截面尺寸是隧道截面的宽度和高度。下面以截面的宽高比 a/b 分析截面形状对类矩形隧道纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 的影响。

类矩形盾构隧道截面的宽度、高度之比为 a/b ,

其与 R_1 , R_2 , a 之间存在如下关系:

$$\frac{a}{b} = \frac{R_1 + (R_2 - R_1) \cos a}{R_2 - (R_2 - R_1) \sin a} = \frac{1 + (R_2/R_1 - 1) \cos a}{R_2/R_1 - (R_2/R_1 - 1) \sin a} \quad (17)$$

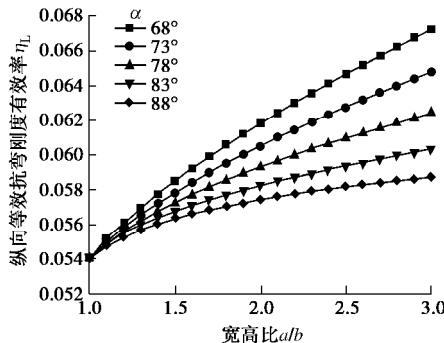


图 9 管片宽高比 a/b 对纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 的影响

Fig. 9 Effect of width height ratio a/b of lining on effective longitudinal equivalent bending stiffness ratio h_L

通过式(17)可以发现, 宽高比 a/b 作为重要的截面参数, 控制类矩形隧道的形状。当宽高比值越大, 那隧道越扁平; 而宽高比越小, 则隧道越趋近于圆形。当 a/b 值为 1 时, 隧道截面为圆形。图 9 为不同的 $1/2$ 小圆弧圆心角 a 条件下宽高比 a/b 与隧道有效率变形关系图。由图可见, 在一定的 a 条件下, 纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 随着宽高比 a/b 增大而增大。在相同宽高比 a/b 条件下, a 角度越小其增大幅度越大。也就是说, 隧道截面越扁平, 纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 越大。观察图 9, 可发现不同宽高比的类矩形隧道的纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 均大于圆形隧道。

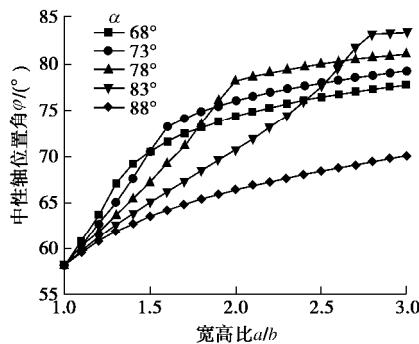


图 10 宽高比 a/b 与中性轴位置角 j 关系

Fig. 10 Relationship between width height ratio a/b and neutral axis position j

图 10 为宽高比 a/b 与中性轴位置角 j 关系曲线图。中性轴位置角 j 随宽高比 a/b 增加而增大, 中性轴下移, 当中性轴位置角 j 与 $1/2$ 小圆弧圆心角 a 相等时, 曲线出现明显转折点, 随后, 中性轴下移速度放缓。以 $1/2$ 小圆弧圆心角 a 等于 73° 为例, 中性轴位置角 j 随着宽高比 a/b 增大而线性增加, 也就是中

性轴位置随着宽高比 a/b 增加而下移; 而当中性轴位置角 j 相等 73° 时, 曲线出现明显的转折点, 中性轴位置角 j 增加缓慢, 这是由于中性轴越过了两个小圆边界连线, 下移至截面仰拱部。观察图中 $1/2$ 小圆弧圆心角 a 等于 88° 时, 发现中性轴位置角曲线并没有出现转折点, 其原因是当 a 等于 88° 时, 小圆的边界范围较大, 中性轴位置角 j 并没有超越两个小圆的边界, 因此不发生中性轴位置的突然变化。由上分析可知, 中性轴的位置与截面形状关系密切。当宽高比为 1 时, 该解可退化为圆形盾构隧道等效抗弯刚度解析解, 因此圆形隧道可视为类矩形盾构隧道中的一种特殊情况。

3 结 论

在传统圆形盾构隧道等效连续化模型的基础上, 建立了类矩形盾构隧道的纵向等效连续化模型, 推导出了类矩形盾构隧道的等效抗弯刚度, 得到以下 6 点结论。

(1) 与圆形盾构隧道存在显著区别的是, 类矩形截面由两对不同半径的圆弧构成, 因此在确定截面中性轴位置时, 需要分两种情况讨论。在实际运用过程中, 需先分两种情况单独计算, 求出中性轴位置角 j 后, 检验所用公式是否正确。

(2) 增加螺栓数量能有效地提高纵向等效抗弯刚度有效率 h_L , 且随着螺栓数量增加, 中性轴位置上移。

(3) 隧道的纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 随管片厚度的增加而减小, 两者大致呈线性关系。但是实际的纵向等效抗弯刚度值随着管片增加而增大。中性轴位置将随着管片厚度增大而下移。

(4) 随着管片环宽度的增加, 隧道纵向等效抗弯刚度有效率呈线性快速增长; 中性轴位置随着管片宽度的增加而逐步上移。

(5) 在给定 $1/2$ 小圆弧圆心角 a 的条件下, 纵向等效抗弯刚度有效率 h_L 随着宽高比增大而增大。 a 角度越小其增大幅度越大。

(6) 中性轴位置角 j 随宽高比 a/b 增加而快速增大, 中性轴下移; 当中性轴位置角 j 与 a 相等时, 曲线出现明显转折点, 随后, 中性轴下移速度放缓。

参考文献:

- [1] 孙 巍, 官林星. 大断面矩形盾构法隧道设计研究与实践 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017. (SUN Wei, GUAN Lin-xing. Research and practice on design of large section rectangular shield tunnel[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese))

- [2] 杨志豪, 沈张勇, 朱雁飞, 等. 类矩形盾构隧道设计方案研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(增刊1): 83–91. (YANG Zhi-hao, SHEN Zhang-yong, ZHU Yan-fei, et al. Research on design scheme of quasi-rectangular shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(S1): 83–91. (in Chinese))
- [3] 朱瑶宏, 朱雁飞, 黄德中, 等. 类矩形盾构法隧道关键技术研究与应用[J]. 隧道建设, 2017, 37(9): 1055–1062. (ZHU Yao-hong, ZHU Yan-fei, HUANG De-zhong, et al. Development and application of key technologies to quasi-rectangular shield tunneling[J]. Tunnel Construction, 2017, 39(9): 1055–1062. (in Chinese))
- [4] 志波由纪夫, 川岛一彦, 大日方尚己, 等. 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[J]. 土木学会論文集, 1988, 398(10): 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]. Proceedings of Japan Society of Civil Engineering, 1988, 398(10): 319–327. (in Japanese))
- [5] 志波由纪夫, 川岛一彦, 大日方尚己, 等. 应答変位法によるツールドトンネルの地震時断面力の算定法[J]. 土木学会論文集, 1989, 404(11): 385–394. (SHIBA Y, KAWASHIMA K, OBINATA N, et al. Evaluation method of longitudinal stiffness of shield tunnel linings for application to seismic response analysis[J]. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 1989, 404(11): 385–394. (in Japanese))
- [6] 何川, 郭瑞, 肖明清, 等. 铁路盾构隧道单、双层衬砌纵向力学性能的模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 40–46. (HE Chuan, GUO Rui, XIAO Ming-qing, et al. Model test on longitudinal mechanical properties of single and double layered linings for railway shield tunnel[J]. China Railway Science, 2013, 34(3): 40–46. (in Chinese))
- [7] 叶飞, 杨鹏博, 毛家骅, 等. 基于模型试验的盾构隧道纵向刚度分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 83–90. (YE Fei, YANG Peng-bo, MAO Jia-hua, et al. Longitudinal rigidity of shield tunnels based on model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 83–90. (in Chinese))
- [8] 钟小春, 张金荣, 秦建设, 等. 盾构隧道纵向等效弯曲刚度的简化计算模型及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 132–136. (ZHONG Xiao-chun, ZHANG Jin-rong, QIAN Jian-she, et al. Simplified calculation model for longitudinal equivalent bending stiffness of shield tunnel and its influence factors' analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 132–136. (in Chinese))
- [9] 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. Research on performance of longitudinal deformation structure of subway tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2001. (in Chinese))
- [10] 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. Study on longitudinal shear transfer effect of circular tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 鲁志鹏. 基于静态量测数据的盾构法地铁隧道建设和运营安全评价研究[D]. 上海: 同济大学, 2008. (LU Zhi-peng. Research on safety evaluation of shield tunneling construction and operation based on static measurement data[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese))
- [13] 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(增刊2): 3938–3944. (ZHANG Wen-jie, XU Xu, LI Xiang-hong, 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))
- [14] 叶飞, 何川, 朱合华, 等. 考虑横向性能的盾构隧道纵向等效刚度分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1870–1876. (YE Fei, HE Chuan, ZHU He-hua, et al. Longitudinal equivalent rigidity analysis of shield tunnel considering transverse characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1870–1876. (in Chinese))
- [15] 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 Xiang-yu, LIU Guo-bin, 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))
- [16] 耿萍, 陈枰良, 张景, 等. 轴力和弯矩共同作用下盾构隧道纵向非线性等效抗弯刚度研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2522–2534. (GENG Ping, CHEN Ping-liang, ZHANG Jing, et al. Nonlinear longitudinal

- equivalent bending stiffness of shield tunnel under the combined effect of axial force and bending moment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(10): 2522 – 2534. (in Chinese))
- [17] 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**(2): 309 – 323.
- [18] 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.
- [19] 梁荣柱, 林存刚, 夏唐代, 等. 考虑剪切效应的基坑开挖对邻近隧道纵向变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(1): 223 – 233. (LIANG Rong-zhu, LIN Cun-gang, XIA Tang-dai, et al. Analysis on the longitudinal deformation of tunnels due to pit excavation considering the tunnel shearing effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(1): 223 – 233. (in Chinese))
- [20] 王东方, 张维熙, 董子博, 等. 类矩形盾构隧道衬砌结构受力的现场试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, **53**(6): 174 – 181. (WANG Dong-fang, ZHAGN Wei-xi, DONG Zi-bo, et al. Experimental field study on the structural behaviors of the linings of quasi-rectangular shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, **53**(6): 174 – 181. (in Chinese))
- [21] 柳 献, 张维熙, 王东方. 矩形盾构隧道纵缝受剪性能试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, **13**(9): 767 – 775. (LIU Xian, ZHANG Wei-xi, WANG Dong-fang. Experimental study on shear performance of longitudinal joint in quasi-rectangular shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, **13**(9): 1767 – 775. (in Chinese))
- [22] 朱瑶宏, 张维熙, 董子博, 等. 类矩形地铁盾构隧道纵向接缝受力性能对比研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, **14**(6): 1278 – 1286. (ZHU Yao-hong, ZHANG Wei-xi, DONG Zi-bo, et al. Comparative study on the mechanical performance of longitudinal joint in quasi-rectangular segmental tunnel lining[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, **14**(6): 1278 – 1286. (in Chinese))
- [23] 张维熙, 董子博, 柳 献, 等. 类矩形盾构隧道错缝管片环间传力性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, **14**(12): 2636 – 2643. (ZHANG Wei-xi, DONG Zi-bo, LIU Xian, et al. Experimental study on the force-transfer property of the circumferential joints in quasi-rectangular shield tunnel under the staggered assembling[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, **14**(12): 2636 – 2643. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学理论和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhr.ac.cn。

《岩土工程学报》编辑部