



(21) 申请号 201811543136.1

G06F 30/20 (2020.01)

(22) 申请日 2018.12.17

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 104537162 A, 2015.04.22

申请公布号 CN 109635454 A

CN 104612700 A, 2015.05.13

(43) 申请公布日 2019.04.16

JP 2005023738 A, 2005.01.27

(73) 专利权人 中国地质大学(武汉)

审查员 吴慧

地址 430000 湖北省武汉市洪山区鲁磨路
388号

(72) 发明人 梁荣柱 吴文兵 黄亮 张莉
方宇翔 康成 万江 霍利朋

(74) 专利代理机构 武汉知产时代知识产权代理
有限公司 42238

专利代理师 金慧君

(51) Int. Cl.

G06F 30/13 (2020.01)

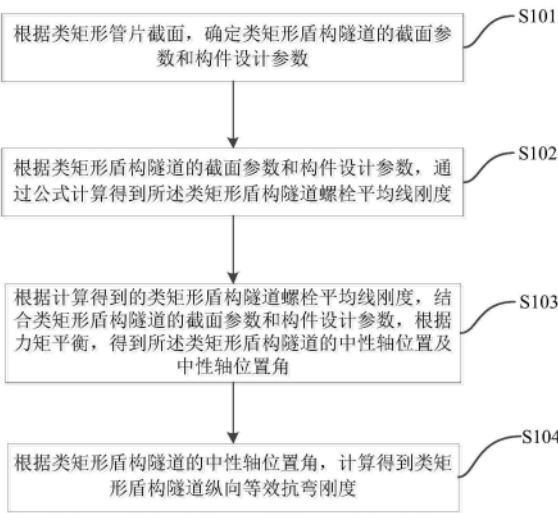
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的
确定方法

(57) 摘要

本发明提供了一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法,类矩形盾构隧道的截面类似为矩形,类矩形盾构隧道是通过螺栓拼接管片形成的筒体结构,截取所述类矩形盾构隧道的管片截面,类矩形管片截面由腰部和拱部两对不同半径的圆弧组成,类矩形盾构隧道左右两侧为腰部,上下两侧为拱部;根据类矩形管片截面,确定类矩形盾构隧道的截面参数和构件设计参数,得到所述类矩形盾构隧道螺栓平均线刚度、中性轴位置及中性轴位置角,最终根据公式计算得到类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度。本发明的有益效果是:方法简单易行,计算方便,得到类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的可靠性高,为类矩形盾构隧道的纵向结构设计提供了帮助。



1. 一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法, 类矩形盾构隧道是通过螺栓拼接管片形成的筒体结构, 截取所述类矩形盾构隧道的管片截面, 类矩形管片截面由腰部和拱部两对不同半径的圆弧组成, 腰部为小圆弧, 拱部为大圆弧; 类矩形盾构隧道左右两侧为腰部, 上下两侧为拱部; 其特征在于: 包括以下步骤:

S101: 根据类矩形管片截面, 确定类矩形盾构隧道的截面参数和构件设计参数; 所述截面参数包括: 截面长半轴、截面短半轴、小圆弧半径、大圆弧半径、1/2小圆弧圆心角、1/2大圆弧圆心角、管片厚度、大圆弧圆心相对长轴的偏移量; 所述构件设计参数包括: 管片弹性模量、截面纵向螺栓个数、单个螺栓横截面面积、螺栓长度和螺栓弹性模量;

S102: 根据类矩形盾构隧道的截面参数和构件设计参数, 通过下面的公式计算得到所述类矩形盾构隧道螺栓平均线刚度 k_r :

$$k_r = \frac{nE_b A_b}{l_b (4\alpha R_1 + 4\beta R_2)};$$

其中: k_r 是螺栓的平均线刚度, n 是截面纵向螺栓总数, E_b 是螺栓弹性模量, l_b 是螺栓长度, A_b 是单个螺栓横截面面积, α 是1/2小圆弧圆心角, β 是1/2大圆弧圆心角;

S103: 根据计算得到的类矩形盾构隧道螺栓平均线刚度, 结合类矩形盾构隧道的截面参数和构件设计参数, 根据力矩平衡, 得到所述类矩形盾构隧道的中性轴位置及中性轴位置角; 所述类矩形盾构隧道模型的中性轴位置是指类矩形盾构隧道的中性轴到截面长轴的距离;

S104: 根据类矩形盾构隧道的中性轴位置角, 计算得到类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度。

2. 如权利要求1所述的一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法, 其特征在于: 所述螺栓平均线刚度是指, 螺栓在类矩形盾构隧道圆周的单位长度上的抵抗拉力的能力。

3. 如权利要求1所述的一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法, 其特征在于: 中性轴位置的分布情况有两种: 位于截面腰部和在中性轴位于截面拱部; 中性轴位置位于截面腰部时, 中性轴位置角 φ 满足 $\varphi \leq \alpha$; 中性轴位置位于截面拱部时, 中性轴位置角 φ 满足 $\alpha < \varphi \leq \pi/2$ 。

4. 如权利要求1所述的一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法, 其特征在于: 在步骤S103中, 在中性轴位于截面腰部时, 中性轴位置为 $x = R_1 \sin \varphi$; 在中性轴位于截面拱部时, 中性轴位置为 $x = R_2 \sin \varphi - s$; R_1 为小圆弧半径, R_2 为大圆弧半径, s 为大圆弧圆心相对类矩形隧道截面长轴的偏移量, φ 为中性轴位置角。

5. 如权利要求4所述的一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法, 其特征在于: 在中性轴位于截面腰部时, 根据公式 $\frac{k_r l_b}{E_s t} = \frac{A_1}{A_2 - A_1}$ 计算得到所述类矩形盾构隧道的中性轴位置角;

在中性轴位于截面拱部时, 根据公式 $\frac{k_r l_b}{E_s t} = \frac{B_1}{B_2 - B_1}$ 计算得到所述类矩形盾构隧道的中性轴位置角;

由得到的中性轴位置角就可以确定中性轴位置；

其中：

$$A_1 = -2\beta s R_2 + 2 \sin \beta (R_2^2 - R_1^2) + [2\beta (R_1^2 - R_1 R_2) - \pi R_1^2] \sin \varphi + 2 R_1^2 \varphi \sin \varphi + 2 R_1^2 \cos \varphi ,$$

$$A_2 = -2\beta s R_2 + 2 \sin \beta (R_2^2 - R_1^2) + [2\beta (R_1 R_2 - R_1^2) + \pi R_1^2] \sin \varphi + 2 R_1^2 \cos \varphi + 2 R_1^2 \varphi \sin \varphi ,$$

$$B_1 = 2 R_2^2 \cos \varphi - \pi R_2^2 \sin \varphi + 2 R_2^2 \varphi \sin \varphi ,$$

$$B_2 = -2s(-2\beta R_1 + \pi R_1 + 2\beta R_2) + R_2(-4\beta R_1 + 2\pi R_1 + 4\beta R_2 - \pi R_2) \sin \varphi + 2 R_2^2 \cos \varphi + 2 R_2^2 \varphi \sin \varphi ,$$

k_r 是螺栓的平均线刚度, l_b 是螺栓长度, E_s 是管片弹性模量, t 为管片厚度, s 是大圆弧圆心相对类矩形截面长轴的偏移量, R_1 为小圆弧半径, R_2 为大圆弧半径, α 为1/2小圆弧圆心角, β 为1/2大圆弧圆心角; φ 为中性轴位置角。

6.如权利要求3所述的一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法,其特征在于:根据中性轴位置角的大小,选择不同的公式计算类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度。

7.如权利要求4所述的一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法,其特征在于:

中性轴位于截面腰部时,中性轴位置角 φ 满足 $\varphi \leq \alpha$,类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度 $(EI)_{eq}$ 为:

$$(EI)_{eq} = E_s (J_1 + \psi_1 J_2)$$

其中,

$$J_1 = \frac{t(2A_4 + A_5)}{2} ,$$

$$J_2 = \frac{t(2A_3 + A_6)}{2} ,$$

$$A_3 = R_2 \beta (2s^2 + R_2^2) + R_2^2 \sin \beta (R_2 \cos \beta - 4s) + 2 R_1 R_2 (R_2 \sin \beta - \beta s) \sin \varphi ,$$

$$A_4 = R_2 \beta (2s^2 + R_2^2) + R_2^2 \sin \beta (R_2 \cos \beta - 4s) - 2 R_1 R_2 (R_2 \sin \beta - \beta s) \sin \varphi ,$$

$$A_5 = R_1^3 (\pi - 2\beta - \sin 2\beta) - 2 R_1^3 \varphi + 4 R_1^3 \sin \beta \sin \varphi - R_1^3 \sin 2\varphi ,$$

$$A_6 = R_1^3 (\pi - 2\beta - \sin 2\beta) + 2 R_1^3 \varphi - 4 R_1^3 \sin \beta \sin \varphi + R_1^3 \sin 2\varphi , \quad \psi_1 = \frac{k_r l_b}{k_r l_b + E_s t} ;$$

中性轴位于截面拱部时,中性轴位置角 φ 满足 $\alpha < \varphi \leq \pi/2$,类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度为:

$$(EI)_{eq} = E_s (J'_1 + \psi_1 J'_2)$$

其中,

$$J'_1 = \frac{t B_4}{2} ,$$

$$J'_2 = \frac{t(2B_3 + 2B_5 + B_6)}{2} ,$$

$$B_3 = -R_1^3(2\beta + \sin 2\beta - \pi),$$

$$B_4 = R_2^2(\pi - 2\varphi)(2s \sin \varphi + R_2) - 2R_2^2 \cos \varphi(2s + R_2 \sin \varphi),$$

$$B_5 = (4s^2 + R_2^2)R_2\beta - (6s - R_2 \cos \beta)R_2^2 \sin \beta - 2R_2^2(\beta s - R_2 \sin \beta) \sin \varphi,$$

$$B_6 = -4sR_2^2 \sin \beta + R_2^3(-\pi + 2\beta + \sin 2\beta) + 2R_2^3\varphi + (4s\beta - 2s\pi - 4R_2 \sin \beta)R_2^2 \sin \varphi \\ + 4sR_2^2\varphi \sin \varphi + R_2^3 \sin 2\varphi + 4sR_2^2 \cos \varphi。$$

一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法

技术领域

[0001] 本发明涉及地下建筑工程技术领域,尤其涉及一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法。

背景技术

[0002] 类矩形盾构隧道有着较高的断面使用率、较浅的安全埋置深度、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。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,杨志豪于2016年在《现代隧道技术》上发表的《类矩形盾构隧道设计方案研究》一文中表示在土地资源紧张、人口密度大的日本,类矩形盾构隧道已有较为广泛的应用,我国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。

[0003] 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 and 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。

[0004] 小泉淳于1988年在《土木学会论文集》发表的《ツールドトネルの轴方向特性のモデルイヒについて》和Shen S L于2014年在《Tunnelling and Underground Space Technology》上发表的《Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai》等文章中对圆形盾构隧道纵向变形的等效抗弯刚度和纵向变形进行了较为深入已经研究,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。但是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。

[0005] 现阶段在我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。王东方于2016年在《现代隧道技术》上发表的《类矩形盾构隧道衬砌结构受力的现场试验研究》一文中研究了类矩形盾构隧道关于结构的横向结构性能,柳献于2016年在《铁道科学与工程学报》上发表的《类矩形盾构隧道纵缝受剪性能试验研究》一文中研究了类矩形盾构隧道关于结构的纵缝变形性能,但是对类矩形盾构隧道的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,无法为类矩形盾构隧道的纵向结构设计提供可靠的依据。

发明内容

[0006] 为了解决上述问题,本发明提供了一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法,类矩形盾构隧道是通过螺栓拼接管片形成的筒体结构,截取所述类矩形盾构隧道的管片截面,类矩形管片截面由腰部和拱部两对不同半径的圆弧组成,类矩形盾构隧道左右两侧为腰部,上下两侧为拱部;其特征在于:包括以下步骤:

[0007] S101:根据类矩形管片截面,确定类矩形盾构隧道的截面参数和构件设计参数;所述截面参数包括:截面长半轴、截面短半轴、小圆弧半径、大圆弧半径、1/2小圆弧圆心角、1/2大圆弧圆心角、管片厚度、大圆弧圆心相对长轴的偏移量;所述构件设计参数包括:管片弹性模量、截面纵向螺栓个数、单个螺栓横截面面积、螺栓长度和螺栓弹性模量;

[0008] S102:根据类矩形盾构隧道的截面参数和构件设计参数,通过下面的公式计算得到所述类矩形盾构隧道螺栓平均线刚度 k_r :

$$[0009] \quad k_r = \frac{nE_b A_b}{l_b (4\alpha R_1 + 4\beta R_2)};$$

[0010] 其中: k_r 是螺栓的平均线刚度, n 是截面纵向螺栓总数, E_b 是螺栓弹性模量, l_b 是螺栓长度, A_b 是单个螺栓横截面面积, α 是1/2小圆弧圆心角, β 是1/2大圆弧圆心角;

[0011] S103:根据计算得到的类矩形盾构隧道螺栓平均线刚度,结合类矩形盾构隧道的截面参数和构件设计参数,计算出所述类矩形盾构隧道的中性轴位置及中性轴位置角;所述类矩形盾构隧道模型的中性轴位置是指类矩形盾构隧道的中性轴到截面长轴的距离;

[0012] S104:根据类矩形盾构隧道的中性轴位置角,计算得到类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度。

[0013] 进一步地,所述螺栓平均线刚度是指,螺栓在类矩形盾构隧道圆周的单位长度上的抵抗拉力的能力。

[0014] 进一步地,中性轴位置的分布情况有两种:位于截面腰部和在中性轴位于截面拱部时;中性轴位置位于截面腰部时,中性轴位置角 φ 满足 $\varphi \leq \alpha$;中性轴位置位于截面拱部时,中性轴位置角 φ 满足 $\alpha < \varphi \leq \pi/2$ 。

[0015] 进一步地,在步骤S103中,在中性轴位于截面腰部时,中性轴位置为 $x = R_1 \sin \varphi$;在中性轴位于截面拱部时,中性轴位置为 $x = R_2 \sin \varphi - s$ 。

[0016] 进一步地,在中性轴位于截面腰部时,根据公式 $\frac{k_r l_b}{E_s t} = \frac{A_1}{A_2 - A_1}$ 计算得到所述类矩形盾构隧道的中性轴位置角;

[0017] 在中性轴位于截面拱部时,根据公式 $\frac{k_r l_b}{E_s t} = \frac{B_1}{B_2 - B_1}$ 计算得到所述类矩形盾构隧道的中性轴位置角;

[0018] 由得到的中性轴位置角就可以确定中性轴位置;

[0019] 其中:

$$[0020] \quad A_1 = -2\beta s R_2 + 2 \sin \beta (R_2^2 - R_1^2) + [2\beta(R_1^2 - R_1 R_2) - \pi R_1^2] \sin \varphi + 2R_1^2 \varphi \sin \varphi + 2R_1^2 \cos \varphi,$$

$$[0021] \quad A_2 = -2\beta s R_2 + 2 \sin \beta (R_2^2 - R_1^2) + [2\beta(R_1 R_2 - R_1^2) + \pi R_1^2] \sin \varphi + 2R_1^2 \cos \varphi + 2R_1^2 \varphi \sin \varphi,$$

$$[0022] \quad B_1 = 2R_2^2 \cos \varphi - \pi R_2^2 \sin \varphi + 2R_2^2 \varphi \sin \varphi,$$

$$[0023] \quad B_2 = -2s(-2\beta R_1 + \pi R_1 + 2\beta R_2) + R_2(-4\beta R_1 + 2\pi R_1 + 4\beta R_2 - \pi R_2) \sin \varphi + 2R_2^2 \cos \varphi + 2R_2^2 \varphi \sin \varphi,$$

[0024] k_r 是螺栓的平均线刚度, l_b 是螺栓长度, E_s 是管片弹性模量, t 为管片厚度, s 是大圆弧圆心相对类矩形截面长轴的偏移量, R_1 为小圆弧半径, R_2 为大圆弧半径, α 为1/2小圆弧圆心角, β 为1/2大圆弧圆心角。

[0025] 进一步地, 根据中性轴位置角的大小, 选择不同的公式计算类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度。

[0026] 进一步地, 中性轴位置角 φ 满足 $\varphi \leq \alpha$ 时, 类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度 $(EI)_{eq}$ 为:

$$[0027] \quad (EI)_{eq} = E_s (J_1 + \psi_1 J_2)$$

[0028] 其中,

$$[0029] \quad J_1 = \frac{t(2A_4 + A_5)}{2},$$

$$[0030] \quad J_2 = \frac{t(2A_3 + A_6)}{2},$$

$$[0031] \quad A_3 = R_2 \beta (2s^2 + R_2^2) + R_2^2 \sin \beta (R_2 \cos \beta - 4s) + 2R_1 R_2 (R_2 \sin \beta - \beta s) \sin \varphi,$$

$$[0032] \quad A_4 = R_2 \beta (2s^2 + R_2^2) + R_2^2 \sin \beta (R_2 \cos \beta - 4s) - 2R_1 R_2 (R_2 \sin \beta - \beta s) \sin \varphi,$$

$$[0033] \quad A_5 = R_1^3 (\pi - 2\beta - \sin 2\beta) - 2R_1^3 \varphi + 4R_1^3 \sin \beta \sin \varphi - R_1^3 \sin 2\varphi,$$

$$[0034] \quad A_6 = R_1^3 (\pi - 2\beta - \sin 2\beta) + 2R_1^3 \varphi - 4R_1^3 \sin \beta \sin \varphi + R_1^3 \sin 2\varphi, \quad \psi_1 = \frac{k_r l_b}{k_r l_b + E_s t};$$

[0035] 中性轴位置角 φ 满足 $\alpha < \varphi \leq \pi/2$ 时, 类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度为:

$$[0036] \quad (EI)_{eq} = E_s (J'_1 + \psi_1 J'_2)$$

[0037] 其中,

$$[0038] \quad J'_1 = \frac{tB_4}{2},$$

$$[0039] \quad J'_2 = \frac{t(2B_3 + 2B_5 + B_6)}{2},$$

$$[0040] \quad B_3 = -R_1^3 (2\beta + \sin 2\beta - \pi),$$

$$[0041] \quad B_4 = R_2^2 (\pi - 2\varphi) (2s \sin \varphi + R_2) - 2R_2^2 \cos \varphi (2s + R_2 \sin \varphi),$$

$$[0042] \quad B_5 = (4s^2 + R_2^2) R_2 \beta - (6s - R_2 \cos \beta) R_2^2 \sin \beta - 2R_2^2 (\beta s - R_2 \sin \beta) \sin \varphi,$$

$$B_6 = -4sR_2^2 \sin \beta + R_2^3 (-\pi + 2\beta + \sin 2\beta) + 2R_2^3 \varphi + (4s\beta - 2s\pi - 4R_2 \sin \beta) R_2^2 \sin \varphi$$

[0043]

$$+ 4sR_2^2 \varphi \sin \varphi + R_2^3 \sin 2\varphi + 4sR_2^2 \cos \varphi。$$

[0044] 本发明提供的技术方案带来的有益效果是：方法简单易行，计算方便，得到类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的可靠性高，为类矩形盾构隧道的纵向结构设计提供了帮助，适用性及实用性强。

附图说明

[0045] 下面将结合附图及实施例对本发明作进一步说明，附图中：

[0046] 图1是本发明实施例中类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法的流程图；

[0047] 图2是本发明实施例中建立的类矩形盾构隧道的示意图；

[0048] 图3是本发明实施例中管片受弯变形示意图；

[0049] 图4是本发明实施例中中性轴位于截面腰部时的示意图；

[0050] 图5是本发明实施例中中性轴位于截面拱部时的示意图。

[0051] 图2中的，1表示类矩形盾构隧道，2表示类矩形盾构隧道界面，3表示轨道，4表示列车。

具体实施方式

[0052] 为了对本发明的技术特征、目的和效果有更加清楚的理解，现对照附图详细说明本发明的具体实施方式。

[0053] 本发明的实施例提供了一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法。

[0054] 请参考图1，图1是本发明实施例中一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法的流程图，类矩形盾构隧道由环向螺栓和纵向螺栓将管片拼接成型的筒体结构，图2为类矩形盾构隧道的示意图，图中1表示类矩形盾构隧道，2表示类矩形盾构隧道界面，3表示轨道，4表示列车；类矩形盾构隧道纵向等效连续模型的建立是以图3所示的管片单元为单位，图3为本发明实施例中管片受弯变形示意图，取两管片环中心线内的长度 l_s 为计算单元，当两管片受到弯矩 M 作用时，管片单元产生的转角为 θ ；最终得到的类矩形盾构隧道纵向等效连续模型的管片截面如图4所示，图4是本发明实施例中类矩形管片截面示意图，本实施例中，假定隧道横断面在变形前后均为平面，且截面上每一处的变形量与离中性轴的距离成正比。如图1所示，一种类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的确定方法，具体包括如下步骤：

[0055] S101：根据建立的类矩形盾构隧道1，确定类矩形盾构隧道1的截面参数和构件设计参数，具体如图4和图5所示；

[0056] 所述截面参数包括：截面长半轴 a 、短半轴 b ，小圆弧半径 R_1 ，大圆弧半径 R_2 ，1/2小圆弧圆心角 α ，1/2大圆弧圆心角 β ，管片厚度 t ，大圆弧圆心相对类矩形隧道截面长轴的偏移量 s ；所述构件设计参数包括：管片弹性模量 E_s ，截面纵向螺栓个数 n ，单个螺栓横截面面积 A_b ，螺栓长度 l_b ，螺栓弹性模量 E_b ；图4和图5中所示的 b' 为边缘管片中心距类矩形隧道截面长轴的距离， $d\gamma$ 为管片环上任意微分单元所在圆弧对应的圆心角， φ 为中性轴位置角，即中性轴与管片中心线的交点和对应弧段圆心之间的连线同圆心所在水平线的夹角， γ 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；

[0057] 请参考图2,图2是本发明实施例中类矩形盾构隧道的示意图,确定类矩形盾构隧道的截面参数和构件设计参数,具体参数如图3和如4所示,在本实施例中,选取截面长半轴为5.75m,短半轴为3.4685m,小圆弧半径为2.975m,大圆弧半径为15.225m,1/2小圆弧圆心角为78°,1/2大圆弧圆心角为12°,管片厚度为0.45m,大圆弧圆心相对长轴的偏移量为11.98m,管片宽度为1.2m。管片弹性模量为 $3.45 \times 10^4 \text{MPa}$,螺栓个数为30个,螺栓直径为30mm,螺栓长度为370mm,螺栓弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$;由螺栓直径可以计算出单个螺栓横截面面积 A_b ;

[0058] S102:根据类矩形盾构隧道的截面参数和构件设计参数,确定类矩形盾构隧道螺栓平均线刚度;假定螺栓在环向的分布形式等效为连续均匀分布,所述螺栓平均线刚度是指,则在类矩形盾构隧道圆周的单位长度上的抵抗拉力的能力;所述类矩形盾构隧道螺栓平均线刚度满足公式(1):

$$[0059] \quad k_r = \frac{nE_b A_b}{l_b (4\alpha R_1 + 4\beta R_2)} \quad (1)$$

[0060] 其中: k_r 是螺栓的平均线刚度, n 是截面纵向螺栓总数, E_b 是螺栓弹性模量, l_b 是螺栓长度, A_b 是单个螺栓横截面面积, α 是1/2小圆弧圆心角, β 是1/2大圆弧圆心角;

[0061] 本实施例中,由图3和图4所示参数的数值,得到类矩形盾构隧道螺栓平均线刚度

$$k_r = \frac{30 \times 2.06 \times 10^5 \times \pi (30/2)^2 \times 10^{-6}}{370 \times 10^{-3} \times (4 \times 78 \pi \times 2.975/180 + 4 \times 12 \pi \times 15.225/180)} = 407.7513 \text{MPa};$$

S103:根据计算得到的类矩形盾构隧道螺栓平均线刚度,结合类矩形盾构隧道的截面参数和构件设计参数,计算出所述类矩形盾构隧道的中性轴位置及中性轴位置角;所述类矩形盾构隧道模型的中性轴位置是指类矩形盾构隧道的中性轴到截面长轴的距离;中性轴位置的分布情况有两种:位于截面腰部和位于截面拱部;中性轴位置位于截面腰部时,中性轴位置角 φ 满足 $\varphi \leq \alpha$;中性轴位置位于截面拱部时,中性轴位置角 φ 满足 $\alpha < \varphi \leq \pi/2$;在中性轴位于截面腰部时,中性轴位置为 $x = R_1 \sin \varphi$;在中性轴位于截面拱部时,中性轴位置为 $x = R_2 \sin \varphi - s$;根据变形协调方程、受力平衡方程和力矩平衡方程,在中性轴位于截面腰部时,根据公式

$$\frac{k_r l_b}{E_s t} = \frac{A_1}{A_2 - A_1}$$

计算得到所述类矩形盾构隧道的中性轴位置角;在中性轴位于截面拱部时,根据公式 $\frac{k_r l_b}{E_s t} = \frac{B_1}{B_2 - B_1}$ 计算得到所述类矩形盾构隧道的中性轴位置角;由得到的中性轴位置角就可以确定中性轴位置;

[0062] 其中:

$$[0063] \quad A_1 = -2\beta s R_2 + 2 \sin \beta (R_2^2 - R_1^2) + [2\beta (R_1^2 - R_1 R_2) - \pi R_1^2] \sin \varphi + 2R_1^2 \varphi \sin \varphi + 2R_1^2 \cos \varphi,$$

$$[0064] \quad A_2 = -2\beta s R_2 + 2 \sin \beta (R_2^2 - R_1^2) + [2\beta (R_1 R_2 - R_1^2) + \pi R_1^2] \sin \varphi + 2R_1^2 \cos \varphi + 2R_1^2 \varphi \sin \varphi,$$

$$[0065] \quad B_1 = 2R_2^2 \cos \varphi - \pi R_2^2 \sin \varphi + 2R_2^2 \varphi \sin \varphi,$$

$$B_2 = -2s(-2\beta R_1 + \pi R_1 + 2\beta R_2) + R_2(-4\beta R_1 + 2\pi R_1 + 4\beta R_2 - \pi R_2) \sin \varphi +$$

[0066]

$$2R_2^2 \cos \varphi + 2R_2^2 \varphi \sin \varphi,$$

[0067] E_s 是管片弹性模量, t 为管片厚度, s 是大圆弧圆心相对类矩形盾构隧道的截面长轴的偏移量, R_1 为小圆弧半径, R_2 为大圆弧半径, α 为 $1/2$ 小圆弧圆心角, β 为 $1/2$ 大圆弧圆心角。如图4和图5所示, 图4是本发明实施例中中性轴位于截面腰部时的示意图; 图5是本发明实施例中中性轴位于截面拱部时的示意图。假定中性轴位置角 $\varphi \leq \alpha = 78^\circ$, 通过求解公式 (2) 得到对应的中性轴位置角:

$$[0068] \quad \frac{407.7473 \times 370 \times 10^{-3}}{3.45 \times 10^4 \times 0.45} = \frac{A_1}{A_2 - A_1} \quad (2)$$

[0069] 其中,

$$[0070] \quad A_1 = -2 \frac{12^\circ \pi}{180^\circ} \times 11.98 \times 15.225 + 2 \sin 12^\circ \times (15.225^2 - 2.975^2) + [2 \frac{12^\circ \pi}{180^\circ} (2.975^2 - 2.975 \times 15.225) - \pi 2.975^2] \sin \varphi + 2 \times 2.975^2 \varphi \sin \varphi + 2 \times 2.975^2 \cos \varphi$$

$$= -75.462 - 43.0463 \sin \varphi + 17.7013 \varphi \sin \varphi + 17.7013 \cos \varphi$$

$$[0071] \quad A_2 = -2 \frac{12^\circ \pi}{180^\circ} \times 11.98 \times 15.225 + 2 \sin 12^\circ \times (15.225^2 - 2.975^2) + [2 \frac{12^\circ \pi}{180^\circ} (2.975 \times 15.225 - 2.975^2) + \pi 2.975^2] \sin \varphi + 2 \times 2.975^2 \varphi \sin \varphi + 2 \times 2.975^2 \cos \varphi$$

$$= -75.462 + 43.0463 \sin \varphi + 17.7013 \varphi \sin \varphi + 17.7013 \cos \varphi$$

[0072] 解得 $\varphi \approx 71.3^\circ < \alpha = 78^\circ$;

[0073] S104: 根据类矩形盾构隧道的中性轴位置角, 确定类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度;

[0074] 中性轴位置角 φ 满足 $\varphi \leq \alpha$ 时, 即中性轴位于截面腰部时, 根据公式 (3) 计算类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度为:

$$[0075] \quad (EI)_{eq} = E_s (J_1 + \psi_1 J_2) \quad (3)$$

[0076] 其中, $(EI)_{eq}$ 为类矩形盾构隧道等效抗弯刚度, $J_1 = \frac{t(2A_4 + A_5)}{2}$, $J_2 = \frac{t(2A_3 + A_6)}{2}$,

$$[0077] \quad A_3 = R_2 \beta (2s^2 + R_2^2) + R_2^2 \sin \beta (R_2 \cos \beta - 4s) + 2R_1 R_2 (R_2 \sin \beta - \beta s) \sin \varphi,$$

$$[0078] \quad A_4 = R_2 \beta (2s^2 + R_2^2) + R_2^2 \sin \beta (R_2 \cos \beta - 4s) - 2R_1 R_2 (R_2 \sin \beta - \beta s) \sin \varphi,$$

$$[0079] \quad A_5 = R_1^3 (\pi - 2\beta - \sin 2\beta) - 2R_1^3 \varphi + 4R_1^3 \sin \beta \sin \varphi - R_1^3 \sin 2\varphi,$$

$$[0080] \quad A_6 = R_1^3 (\pi - 2\beta - \sin 2\beta) + 2R_1^3 \varphi - 4R_1^3 \sin \beta \sin \varphi + R_1^3 \sin 2\varphi, \quad \psi_1 = \frac{k_r l_b}{k_r l_b + E_s t};$$

[0081] 中性轴位置角 φ 满足 $\alpha < \varphi \leq \pi/2$ 时, 即中性轴位于截面拱部时, 根据公式 (4) 计算得到类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度:

$$[0082] \quad (EI)_{eq} = E_s (J'_1 + \psi_1 J'_2) \quad (4)$$

[0083] 其中,

$$[0084] \quad J'_1 = \frac{tB_4}{2},$$

$$[0085] \quad J'_2 = \frac{t(2B_3 + 2B_5 + B_6)}{2},$$

$$[0086] \quad B_3 = -R_1^3(2\beta + \sin 2\beta - \pi),$$

$$[0087] \quad B_4 = R_2^2(\pi - 2\varphi)(2s \sin \varphi + R_2) - 2R_2^2 \cos \varphi(2s + R_2 \sin \varphi),$$

$$[0088] \quad B_5 = (4s^2 + R_2^2)R_2\beta - (6s - R_2 \cos \beta)R_2^2 \sin \beta - 2R_2^2(\beta s - R_2 \sin \beta) \sin \varphi,$$

$$[0089] \quad B_6 = -4sR_2^2 \sin \beta + R_2^3(-\pi + 2\beta + \sin 2\beta) + 2R_2^3\varphi + (4s\beta - 2s\pi - 4R_2 \sin \beta)R_2^2 \sin \varphi \\ + 4sR_2^2\varphi \sin \varphi + R_2^3 \sin 2\varphi + 4sR_2^2 \cos \varphi.$$

[0090] 比如,在本实施例中,中性轴位置角 $\varphi \leq \alpha$ 时,根据相关参数计算得到:

$$[0091] \quad A_3 = 15.225 \times \frac{12^\circ \pi}{180^\circ} (2 \times 11.98^2 + 15.225^2) + 15.225^2 \sin 12^\circ \times (15.225 \cos 12^\circ - \\ 4 \times 11.98) + 2 \times 2.975 \times 15.225 \times (15.225 \sin 12^\circ - \frac{12^\circ \pi}{180^\circ} \times 11.98) \sin 71.3^\circ \approx 118.2905$$

$$[0092] \quad A_4 = 15.225 \times \frac{12^\circ \pi}{180^\circ} (2 \times 11.98^2 + 15.225^2) + 15.225^2 \sin 12^\circ \times (15.225 \cos 12^\circ - \\ 4 \times 11.98) - 2 \times 2.975 \times 15.225 \times (15.225 \sin 12^\circ - \frac{12^\circ \pi}{180^\circ} \times 11.98) \sin 71.3^\circ \approx 5.4304$$

$$[0093] \quad A_5 = 2.975^3 \left(\pi - 2 \frac{12^\circ \pi}{180^\circ} - \sin 2 \times 12^\circ \right) - 2 \times 2.975^3 \frac{71.3^\circ \pi}{180^\circ} + \\ 4 \times 2.975^3 \sin 12^\circ \sin 71.3^\circ - 2.975^3 \sin 2 \times 71.3^\circ \approx 0.1945$$

$$[0094] \quad A_6 = 2.975^3 \left(\pi - 2 \frac{12^\circ \pi}{180^\circ} - \sin 2 \times 12^\circ \right) + 2 \times 2.975^3 \frac{71.3^\circ \pi}{180^\circ} - \\ 4 \times 2.975^3 \sin 12^\circ \sin 71.3^\circ + 2.975^3 \sin 2 \times 71.3^\circ \approx 121.695,$$

$$[0095] \quad \psi_1 = \frac{407.7473 \times 370 \times 10^3}{407.7473 \times 370 \times 10^3 + 3.45 \times 10^4 \times 0.45} = 0.009624;$$

$$[0096] \quad J_1 = \frac{0.45(2A_4 + A_5)}{2} = 2.4874425, \quad J_2 = \frac{0.45(2A_3 + A_6)}{2} = 80.6121$$

[0097] 最后求得的类矩形的等效抗弯刚度为:

$$[0098] \quad (EI)_{eq} = 3.45 \times 10^4 \times (2.4874425 + 0.009624 \times 80.6121) \approx 0.1125 \times 10^9 \text{ kM} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1};$$

[0099] 本发明的有益效果是:方法简单易行,计算方便,得到类矩形盾构隧道纵向等效抗弯刚度的可靠性高,为类矩形盾构隧道的纵向结构设计提供了帮助,适用性及实用性强。

[0100] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

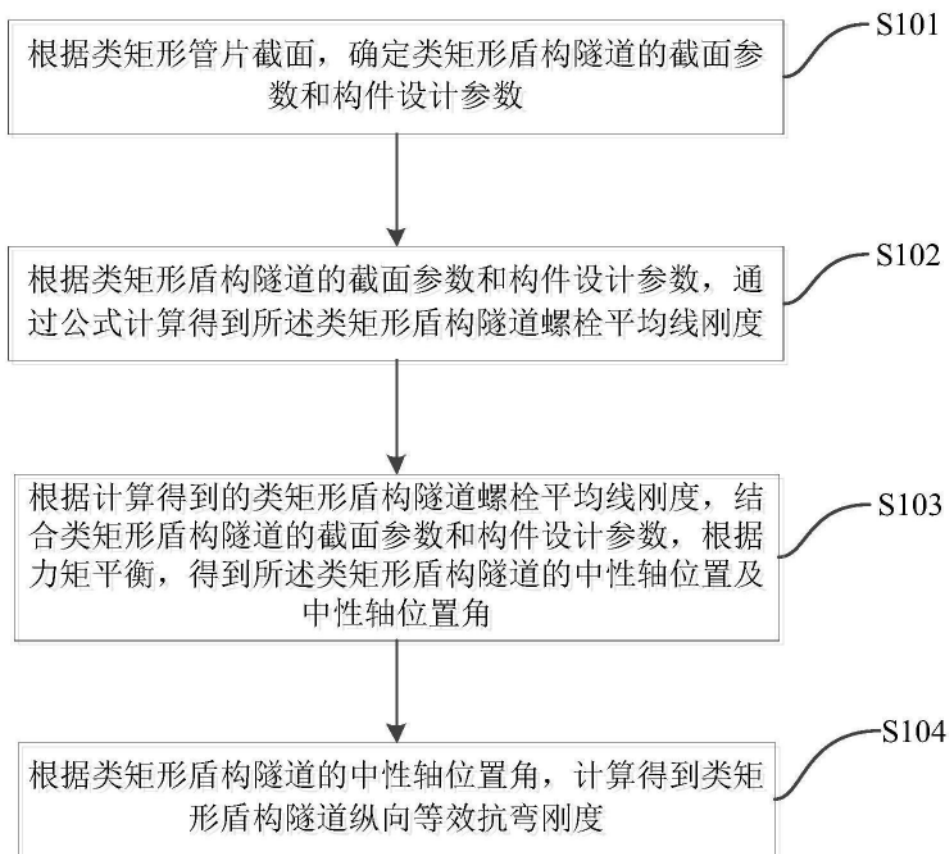


图1

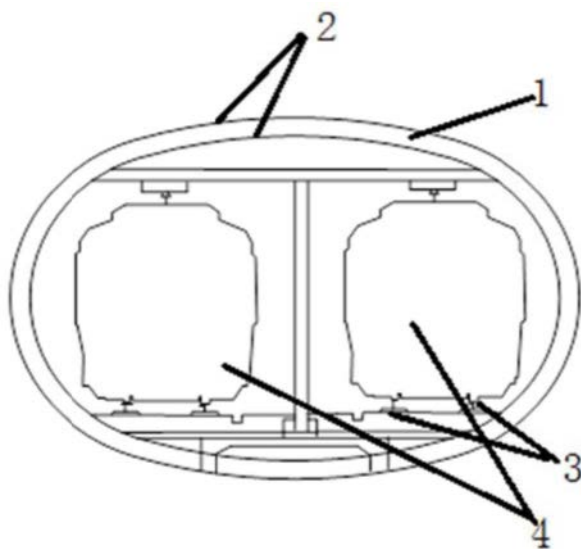


图2

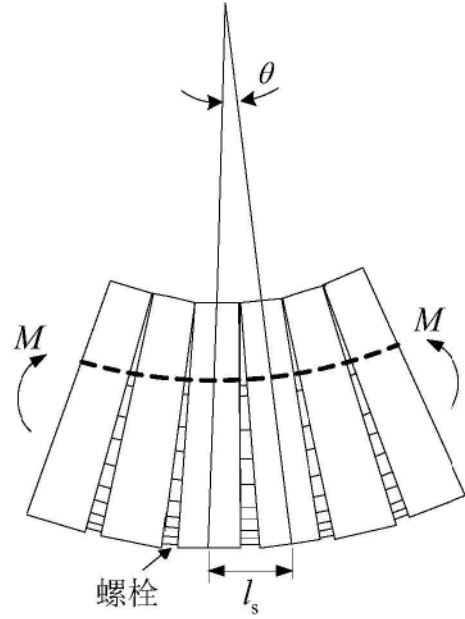


图3

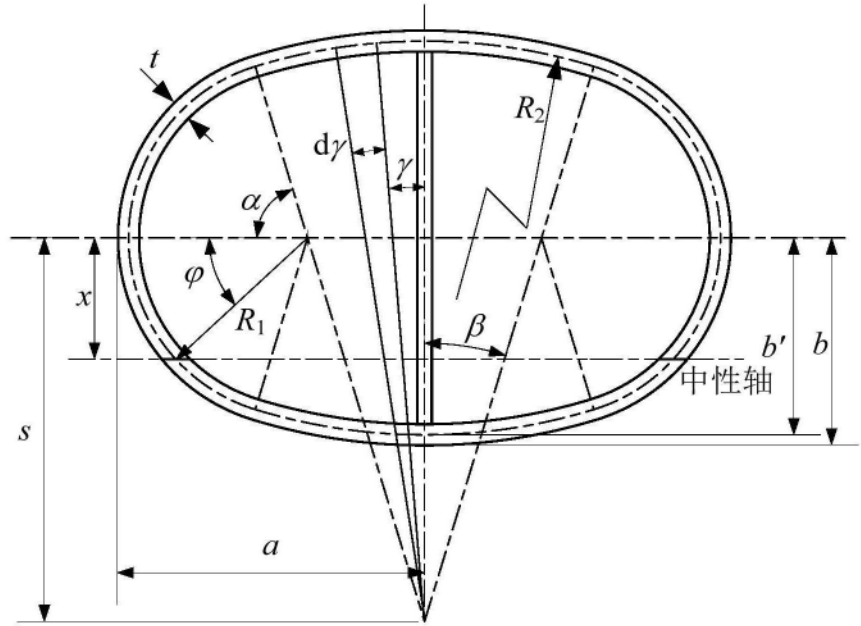


图4

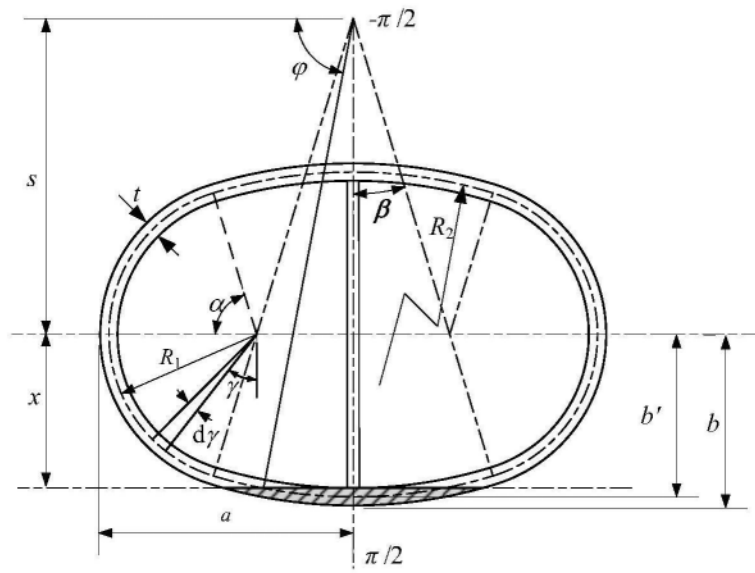


图5