

装配式地铁车站结构接头非线性弯曲模式识别

黄林冲^{1,2}, 张燕丽¹, 梁禹^{1,2}, 林存刚¹, 蒋凯², 王晓良³

(1. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519000; 2. 中山大学·深圳 航空航天学院, 广东 深圳 518107;

3. 中铁十四局集团隧道工程有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 为了探究装配式结构环向接头在弯矩和轴力共同作用下产生的非线性特征, 基于接头处的接触状态、受力特征和变形协调关系, 提出了压弯、纯弯和拉弯受力状态下的力学模型, 分析了弯曲变形发展过程的内部区域分布及其识别方法, 并运用三维数值模型进行验证。研究发现, 接头的主要变形历程可由 4 种弯曲模式进行表征, 将具体构件尺寸和材料参数代入相关转角表达式中即可判断接头处于何种发展过程。通过现场实测弯矩值和轴力值可准确识别环向接头的弯曲模式, 并给出接头随弯矩变化的力学特征及安全状态。

关键词: 装配式结构; 环向接头; 接头张开; 弯曲模式; 状态非线性

中图分类号: U231.4

文献标志码: A

Identification of Nonlinear Bending Modes in Joints of Assembled Subway Stations

HUANG Linchong^{1,2}, ZHANG Yanli¹, LIANG Yu^{1,2},
LIN Cungang¹, JIANG Kai², WANG Xiaoliang³

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519000, China; 2. School of Aeronautics and Astronautics, Shenzhen Campus of Sun Yat-Sen University, Shenzhen 518107, China; 3. China Railway 14th Bureau Group Tunnel Engineering Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: This paper investigated the nonlinear characteristics of the annular joints of assembled structures under the action of bending moment and axial force. Based on the contact state, force characteristics, and deformation coordination relationship at joints, a mechanical model was proposed for the stress states of compression-bending, pure bending, and tension-bending. The distribution of internal force regions in the

development process of bending deformation and its identification method were analyzed. A three-dimensional numerical model was adopted to validate it. It is shown that the main deformation process of the joint can be characterized by four bending modes. The specific dimensions and material parameters of the components can be substituted into the relevant angle expressions to determine the development process of joints. On-site measurement of bending moment and axial force indicates that the bending modes of the annular joint can be accurately identified, and the mechanical characteristics and safety status of the joint can be provided.

Keywords: assembled structure; annular joint; opening of joint; bending modes; nonlinearity of state

装配式结构是我国城市轨道交通工程领域出现的一种新兴结构^[1-2], 此结构的建造方法具有建造效率高^[3-4]等特点。相较于传统现浇结构, 装配式预制构件的质量能够得到有效保证, 但连接不同构件之间的接头成为装配式结构最薄弱的部位^[5-6], 致使接头处的力学行为具有高度非线性特征^[7-9]。

为探究预制构件接头的力学特征, 国内学者 Yang 等^[10-11]开展了注浆式榫槽接头原型加载试验, 分析了接头的弯曲特性及影响因素。杨钊等^[12]、周宇航等^[13]采用缩尺模型试验对盾构管片接头抗弯力学特性进行研究, 得出了接头在承受轴力和弯矩作用下高度非线性的抗弯刚度曲线。杨春山等^[14]基于数值模拟和现场实测提出了环向接头刚度的修正系数。但是通过试验和数值模拟所得到的力学特性结果适用于单类型尺寸的分析, 存在一定的局限性。

在理论研究方面, 朱合华等^[15]、徐平等^[16]总结提

收稿日期: 2023-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(51978677); 广东省基础与应用基础研究基金(2023A1515030258)

第一作者: 黄林冲, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为基础设施运维和地下工程防灾减灾。

E-mail: hlinch@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 梁禹, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为地下工程结构与地层相互力学作用。

E-mail: liangyu25@mail.sysu.edu.cn



论文
拓展
介绍

出了接头弯矩-相对转角关系的线性、双线性模型。晏启祥等^[17]、梁荣柱等^[18]推导了弯矩作用下带有螺栓的接头分离前后的抗弯刚度解析式。朱伟等^[19]根据管片接头构造特征,建立了管片接头弯曲刚度的双直线模型。吴全立等^[20]推导了在特定轴力作用下接头柔度及其有效高度与施加弯矩的关系。

综上所述,已有学者通过理论分析对接头处非线性特征展开了相应的研究,但主要集中在对简化模型的力学特征分析。实际工程中,装配式结构环向接头处的张开量与其所受轴力、弯矩和连接不同构件之间的螺栓均相关,其弯曲变形涉及的变量较多,难以清晰判别接头所处的弯曲模式。本文通过分析接头处弯曲变形随轴力和弯矩的发展规律,提出弯曲模式的判别方法,具有较强实际意义。

1 环向接头弯曲模式理论推导

深圳地铁某装配式地铁车站工程结构如图 1a 所示,选取其预制构件环向接头处部分区域及其螺栓进行研究。根据相关研究发现,榫槽接头受力形式与平接头较为相近,其抗弯刚度与平接头相当^[21]。本文的理论模型以平接头为基础,如图 1b 所示。模型的推导需要作如下假设:①平截面假定,即接头受到弯曲而变形时,其横截面仍保持与中性轴垂直的平面。②构件中螺栓视为理想弹塑性材料,在接头张开后,混凝土构件承受压力,螺栓承受拉力。③不考虑螺栓与混凝土接触界面之间的相互摩擦行为。④构件中混凝土采用基于 Saenz 本构模型的双折线近似模型^[22],其中第一阶段为弹性阶段,弹性模量为 E_1 ,第二阶段为塑性阶段,弹性模量为 E_r ,如图 1c 所示。

1.1 弯曲模式的理论推导

当环向接头共同承受轴力和弯矩的作用时,其接缝面处的接触状态便会随着受力状态的不同而改变。本文以接头处预制构件的接触状态以及螺栓的受力状态作为划分指标,将环向接头的破坏历程划分为 4 个阶段,以表征不同阶段接头处的弯曲模式,如表 1 所示。

表 1 环向接头弯曲模式分类

Tab. 1 Classification of bending modes of annular joints

弯曲模式	接头应变		螺栓应变
	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3
I	$(0, \epsilon_b)$	$(0, +\infty)$	$[-\epsilon_s, 0)$
II	$(0, \epsilon_b)$	0	$[-\epsilon_s, 0)$
III-1	(ϵ_b, ϵ_c)	0	$[-\epsilon_s, 0)$
III-2	$(0, \epsilon_b)$	0	$(-\infty, -\epsilon_s)$

假设使截面产生压缩变形的轴力为压力,方向为正;接头截面弯矩方向靠近螺栓处受拉为正。表 1 中的 ϵ_1 和 ϵ_2 分别为预制构件环向接头处上边缘和下边缘应变, ϵ_b 为接头处上边缘进入塑性状态时产生的应变, ϵ_c 为接头达到破坏时上边缘产生的极限应变, ϵ_s 为螺栓进入塑性状态时所产生的应变。

1.1.1 弯曲模式 I

经过前期对装配式车站结构的数值计算发现,车站接头截面靠近螺栓处受拉^[23],因此本文不考虑负弯矩的工况。当接头处受到的正弯矩较小时,接缝面处的接触状态为全部接触,此时接缝面处的受力状态及其弯曲变形如图 2 所示。

图 2a 中 $E_1\epsilon_1b$ 和 $E_1\epsilon_2b$ 为接缝面处受压区域边缘的压力,图 2b 中 ϵ_1B 和 ϵ_2B 为受压区域边缘的变形量, ϵ_3B 为螺栓处的变形量,由力的平衡条件和接头上下边缘变形协调条件的几何关系可得:

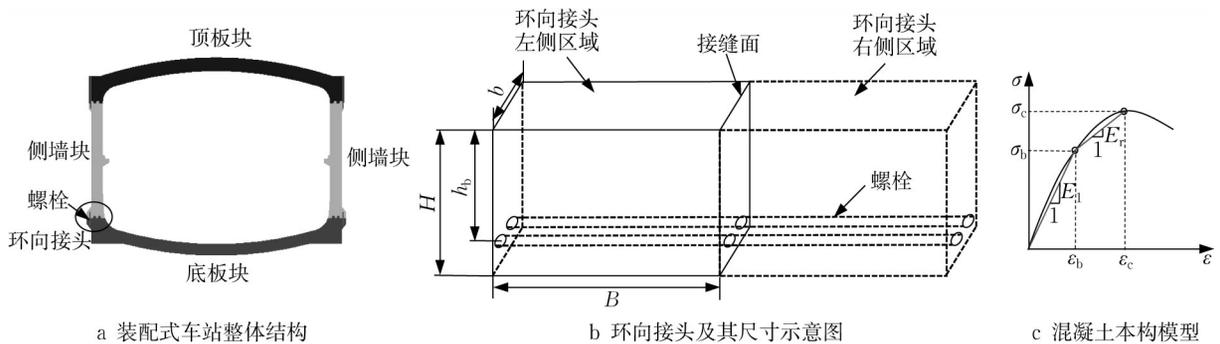


图 1 环向接头分析模型

Fig. 1 Analytical model for annular joints

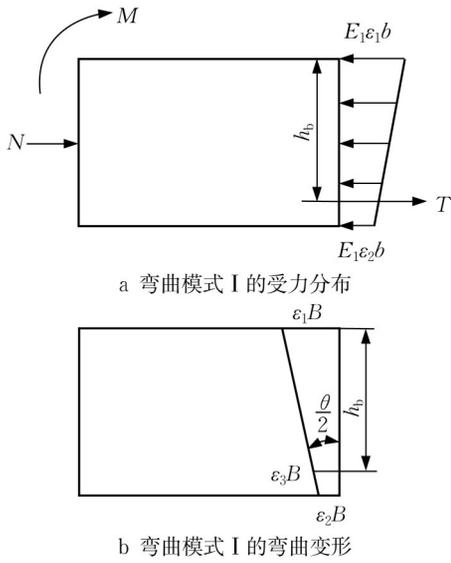


图2 弯曲模式 I 的受力分布与弯曲变形

Fig. 2 Stress distribution and bending deformation of Mode I

$$\begin{cases} N + T = \frac{1}{2} E_1 b H \left[2 \left(\frac{T_0 - T}{K l_b} \right) + \frac{(2h_b - H)\theta}{2B} \right] \\ M + \frac{1}{2} N H + T(H - h_b) = \frac{1}{6} E_1 b H^2 \left[3 \left(\frac{T_0 - T}{K l_b} \right) + \frac{(3h_b - H)\theta}{2B} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: N 和 M 分别为接头处所承受的轴力和弯矩; T 为螺栓承受的拉力; T_0 为罗算预紧力; K 为螺栓抗拉刚度; l_b 为螺栓有效技术长度。通过联立式(1)中的公式可得弯曲模式 I 的弯矩-转角表达式为

$$\begin{cases} M_1 = \frac{E_1 b H^3 \theta}{24B} + T_1 \left(h_b - \frac{H}{2} \right) \\ T_1 = \frac{4T_0 B E_1 b H - 4N B K l_b + K l_b E_1 b H (2h_b - H)\theta}{4B(K l_b + E_1 b H)} \end{cases} \quad (2)$$

由式(4)可知,在弯曲模式 II 中,其弯矩与转角之间为非线性关系。鉴于接头受力的复杂程度,本文将弯曲模式 III 划分为两种情况进行讨论,其中弯曲模式 III-1 为混凝土受压区先进入塑性状态,弯曲模式 III-2 为螺栓先进入塑性状态。针对混凝土受压区先进入塑性的情况,随着弯矩逐渐增大,混凝土受压区的压力随之增大,直至混凝土受压区上边缘开

始进入塑性状态,由此可得混凝土受压区上边缘临界塑性状态时接头的转角 θ_{2-1} 为

由式(2)可知,当环向接头在弯曲模式 I 中,即接头还未张开时,其弯矩与转角之间为线性关系,且此时弯矩与转角之间的关系受到轴力的影响。

$$\theta_1 = \frac{4B(N + T_0)}{E_1 b H^2 + 2K l_b (H - h_b)} \quad (3)$$

1.1.2 弯曲模式 II

随着接头处所承受的弯矩逐渐增大,接缝面处下边缘出现轻微张开,张开部分受力为0,此时接缝面处的受力状态及其弯曲变形如图3所示。

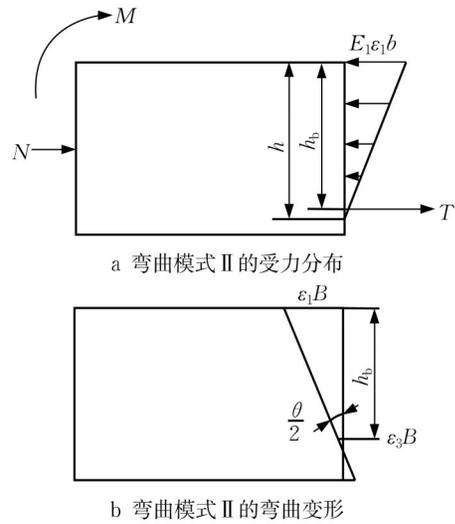


图3 弯曲模式 II 的受力分布与弯曲变形

Fig. 3 Stress distribution and bending deformation of Mode II

图3a中的 h 为接缝面处的受压区高度,同理,联立此弯曲模式下受力平衡条件和接头上边缘与转角的变形协调条件可得其弯矩-转角表达式为

$$\begin{cases} M_2 = \frac{1}{2} N H + T_2 h_b - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{B(N + T_2)^3}{E_1 b \theta}} \\ T_2 = \frac{K l_b (K l_b \theta + E_1 b h_b \theta - \sqrt{K l_b \theta^2 (K l_b + 2E_1 b h_b) + 4B E_1 b (N + T_0)})}{2B E_1 b} + T_0 \end{cases} \quad (4)$$

始进入塑性状态,由此可得混凝土受压区上边缘临界塑性状态时接头的转角 θ_{2-1} 为

$$\theta_{2-1} = \frac{B \sqrt{E_1^2 (N + T_0)^2 - 2E_1 K l_b \sigma_b (N + T_0) + K l_b \sigma_b^2 (2E_1 b h_b + K l_b)}}{E_1 h_b K l_b} - \frac{B(N + T_0)}{K l_b h_b} + \frac{\sigma_b B}{E_1 h_b} \quad (5)$$

针对螺栓先进入塑性的情况,当接头继续张开,螺栓承受的拉力随之增大,直至螺栓开始屈服,此时接头转角 θ_{2-2} 为

$$\theta_{2-2} = \frac{2BE_1b(T_0 - T_b)^2}{Kl_b(A - C - \sqrt{A^2 - 2AC})} \quad (6)$$

$$\begin{cases} A = Kl_b(N + T_b) \\ C = E_1bh_b(T_0 - T_b) \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_b 为螺栓塑性拉力。

1.1.3 弯曲模式Ⅲ-1

根据混凝土材料的本构模型,混凝土受压区在上缘处进入塑性阶段之后,其进入塑性阶段的区域便会随着接头的张开而逐渐向下延伸,且此时螺栓仍处于弹性阶段,此时接缝面处的受力状态及其弯曲变形如图4所示。

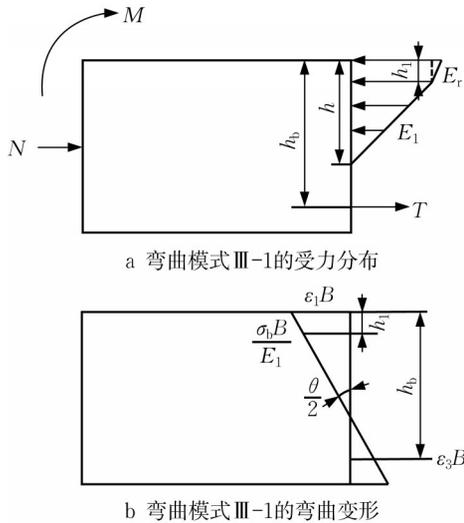


图4 弯曲模式Ⅲ-1的受力分布与弯曲变形

Fig. 4 Stress distribution and bending deformation of Mode III-1

图4a中, h_1 为混凝土进入塑性阶段的区域高度,图4b中, $\sigma_b B/E_1$ 为混凝土受压区中弹性和塑性交界区域的变形量,由力的平衡条件和接头上边缘的变形协调条件的几何关系可得弯曲模式Ⅲ-1的弯矩-转角表达式为

$$\begin{cases} M_{3-1} = \frac{1}{2}NH + T_3h_b - \frac{1}{6}\sigma_b b(h^2 + hh_1 + h_1^2) - \frac{1}{6}E_r\left(\frac{\theta h}{2B} - \frac{\sigma_b}{E_1}\right)bh_1^2 \\ T_3 = T_0 + \frac{Kl_b\theta(h_b - h)}{2B} \end{cases} \quad (8)$$

当接头继续张开,螺栓承受的拉力逐渐增大,直至螺栓开始屈服,由此可得螺栓临界屈服时接头的

转角 θ_{3-1} 为

$$\theta_{3-1} = \frac{2B\sqrt{\left[(AE_1)^2 - 2E_1E_rAC + (Kl_b)^2E_1bh_bD(bh_b\sigma_b - 2N - 2T_b)\right]}}{E_1E_rKl_bbh_b^2} + \frac{2AB}{Kl_bE_rbh_b^2} - \frac{2BD}{E_1E_rh_b} - \frac{2B(T_0 - T_b)}{Kl_bbh_b} \quad (9)$$

$$D = \sigma_b(E_1 - E_r) \quad (10)$$

1.1.4 弯曲模式Ⅲ-2

根据螺栓材料的理想弹塑性假定,螺栓在屈服之后其应力值保持不变,因此此时接缝面处的受力状态及其弯曲变形如图5所示。

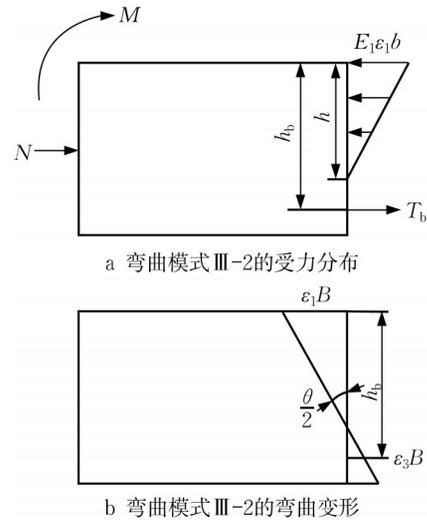


图5 弯曲模式Ⅲ-2的受力分布与弯曲变形

Fig. 5 Stress distribution and bending deformation of Mode III-2

图5a中的 T_b 为此弯曲模式下螺栓所承受的恒定拉力,由此可得弯曲模式Ⅲ-2的弯矩-转角表达式为

$$M_{3-2} = \frac{1}{2}NH + T_bh_b - \frac{2}{3}\sqrt{\frac{B(N + T_b)^3}{E_1b\theta}} \quad (11)$$

当接头继续张开,受压区混凝土承受的压力随之增大,直至混凝土受压区上缘处进入塑性阶段,此时接头的转角 θ_{3-2} 为

$$\theta_{3-2} = \frac{\sigma_b^2 Bb}{E_1(N + T_b)} \quad (12)$$

综上所述,接头弯曲变形发展过程存在两种: $I \rightarrow II \rightarrow III-1 \rightarrow \theta_{3-1}$, $I \rightarrow II \rightarrow III-2 \rightarrow \theta_{3-2}$,其中当轴力一定时,接缝面处的弯矩和转角一定,即可求出相应的抗弯刚度,因此在使用编程绘制4种弯曲模式的弯矩-转角曲线图时可参照以上计算式。

1.2 不同受力状态下的弯曲模式

根据轴力的拉压性,环向接头处在组合内力作用下可存在压弯、纯弯和拉弯3种受力状态。由1.1节中的弯矩-转角表达式可知,接头在承受不同轴力作用下存在两种弯曲变形发展过程,为判断两种弯曲变形发展过程存在的工况,结合实际工程将具体构件尺寸和材料参数代入转角 θ_{2-1} 、 θ_{2-2} 、 θ_{3-1} 、 θ_{3-2} 表达式中并绘制相应的轴力-转角曲线,如图6所示,具体参数取值如表2所示。

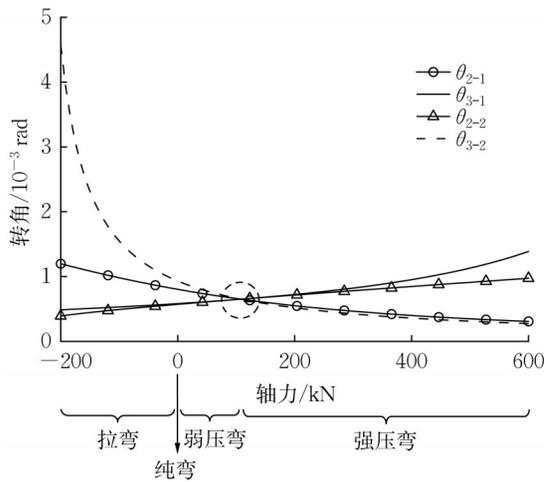


图6 轴力-转角曲线

Fig.6 Axial force and angles

从图6可以看出,轴力-转角曲线存在一个交点,在交点左侧, $\theta_{3-2} > \theta_{2-2}$,接头所处受力状态为拉弯、纯弯和弱压弯,其弯曲变形发展过程为I→II→III-2→ θ_{3-2} ;在交点右侧, $\theta_{3-1} > \theta_{2-1}$,轴力的取值为较大的正值(即为强压弯),其变形发展过程为I→II→III-1→ θ_{3-1} 。

1.2.1 强压弯受力状态分析

当接头处于临界分离状态时,弯曲模式I和弯曲模式II的临界弯矩计算公式为 $M_1 = M_1(\theta_1)$;针对混凝土先进入塑性状态的情况,当接头混凝土受压区上边缘处于临界塑性状态时,弯曲模式II和弯曲模式III-1的临界弯矩计算公式为 $M_{2-1} = M_2(\theta_{2-1})$;

随着接头的张开,当接头螺栓处于临界屈服状态时,接头极限破坏时的弯矩计算公式为 $M_{3-1} = M_{3-1}(\theta_{3-1})$ 。

1.2.2 弱压弯、纯弯、拉弯受力状态分析

针对螺栓先进入塑性的情况,当接头处于螺栓临界屈服状态时,弯曲模式II和弯曲模式III-2的临界弯矩计算公式为 $M_{2-2} = M_2(\theta_{2-2})$;随着接头的张开,当接头处于混凝土受压区上缘处临界塑性阶段,即 $\theta = \theta_{3-2}$ 时,接头极限破坏时的弯矩计算公式为 $M_{3-2} = M_{3-2}(\theta_{3-2})$ 。

2 有限元数值模拟

2.1 有限元软件参数设置

本文采用通用有限元软件ABAQUS建立如图7a所示的三维数值模型,以此作为辅助验证解析推导的正确性。采用1:1实体模型进行建模,并依托实际工程进行修改,其中材料参数和尺寸参数设置与表2一致。

根据模型试验的边界和加载条件的规律^[8],在螺栓的中心截面施加螺栓预紧力;在接头的前后表面进行位移约束;在接头两边施加水平荷载以模拟接头所承受的轴力,其中压弯受力状态中轴力方向为水平荷载指向接头两边内侧,强压弯受力状态取值为500 kN,弱压弯受力状态取值5 kN,拉弯受力状态中轴力方向为水平荷载指向接头两边外侧,取值为50 kN;通过四点弯曲以模拟接头所承受的弯矩,边界与加载示意图如图7b所示。

根据圣维南原理,为避免加载处产生的应力集中对结果提取的影响,本文将弯矩提取面设为加载处和接缝面的中间,如图7c所示。因接头处采用三维实体模型进行建模,接头在轴力和弯矩作用下产生的转角需由线位移计算得出,如图7d所示。

2.2 理论分析与数值模拟对比

结合计算实例的相关数据可通过1.1节中的计算公式绘制其弯曲变形发展过程,如图8所示。将

表2 尺寸和材料参数取值

Tab. 2 Values of dimensions and material parameters

材料参数	取值	尺寸参数	取值
混凝土弹性阶段弹性模量 E_1 /GPa	34.99	接头长度 B /m	0.05
混凝土塑性阶段弹性模量 E_r /GPa	0.16	接头宽度 b /m	0.25
螺栓抗拉刚度 K /($N \cdot m^{-1}$)	8.44×10^8	接头高度 H /m	0.25
混凝土塑性应力 σ_b /MPa	25.6	螺栓距离受压上边缘高度 h_b /m	0.20
螺栓预紧力 T_0 /kN	175.84	螺栓有效计算长度 l_b /m	0.16
螺栓塑性拉力 T_b /kN	251.2		

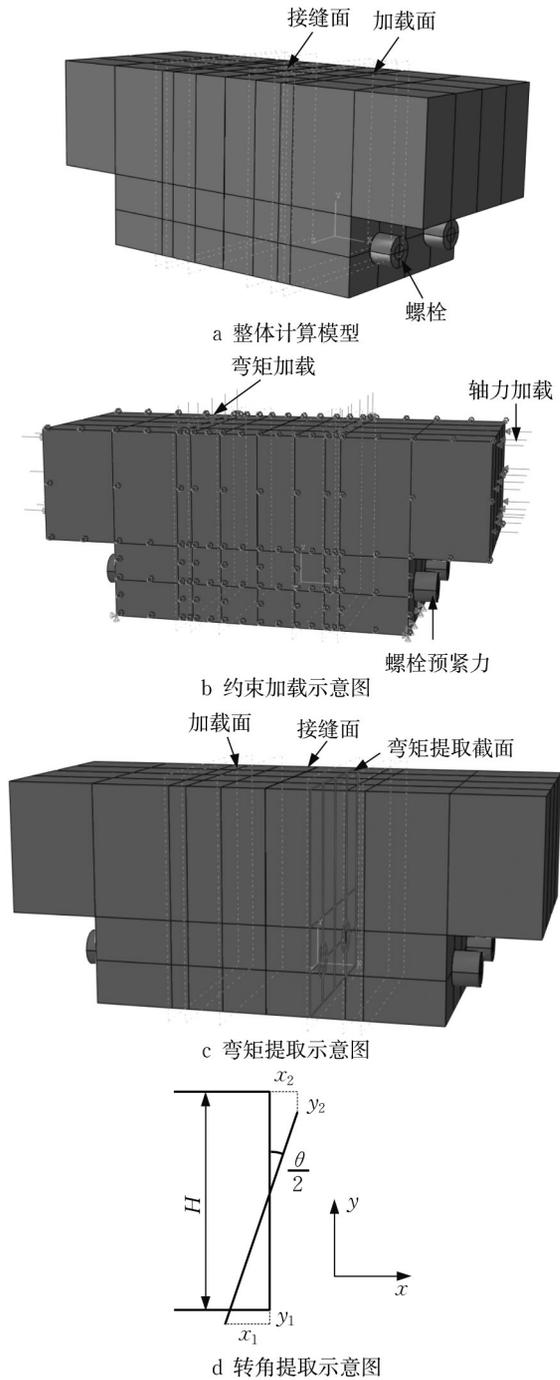


图 7 仿真计算模型

Fig. 7 Simulation calculation model

解析式结果与有限元软件计算结果对比,可以发现两种方法都揭示出了相同规律,当弯矩值增加到一定程度,接头的抗弯刚度都呈现出较强的非线性。在弱压弯、纯弯和拉弯受力状态下,由于有限元的加载分析步是逐级加载,导致接头张开前所提取的起始转角与理论结果之间存在误差。在强压弯受力状态下,其误差来源主要是当轴力值较大时,对所提取截面产生的附加弯矩也较大。

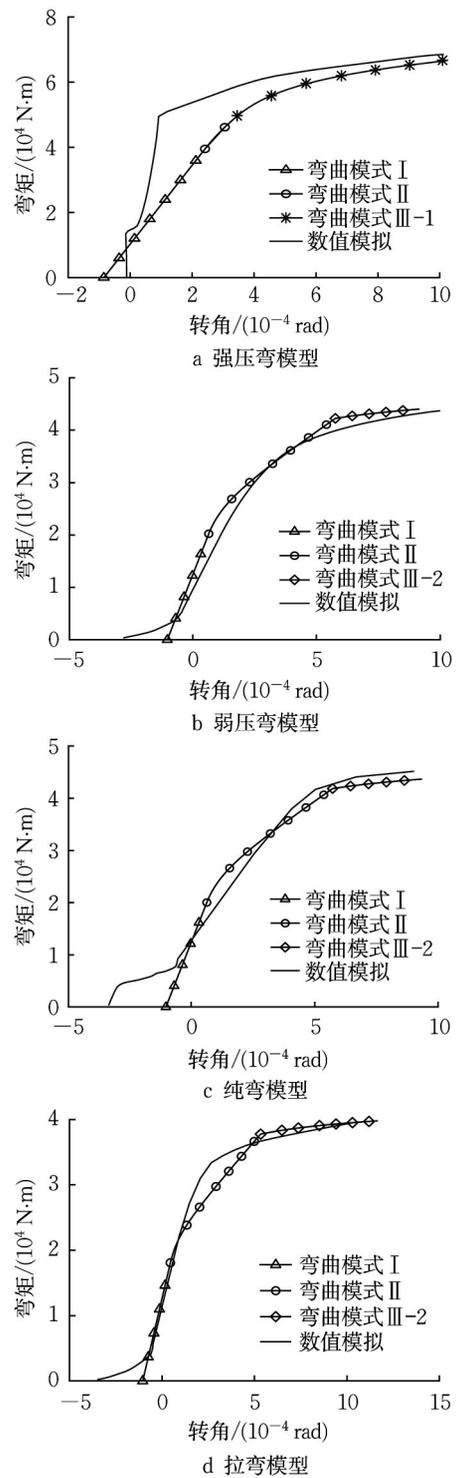


图 8 不同受力状态结果对比

Fig. 8 Comparison of results under different stress conditions

3 弯曲模式识别方法

3.1 弯曲模式识别流程

由 1.2 节可知,当轴力一定时,弯曲模式与弯矩的取值区段一一对应,因此轴力和弯矩的取值范围

可用于环向接头弯曲模式的判别,判别流程如图 9a 所示。首先通过实测轴力的正负判断接头处于压弯、纯弯或拉弯的受力状态;计算相关转角值 θ_{2-1} 、 θ_{2-2} 、 θ_{3-1} 、 θ_{3-2} 以判断接头的弯曲变形处于何种发展过程;最后通过计算各弯曲模式的临界弯矩并与实测弯矩进行比较得到接头所处的弯曲模式。

以装配式地铁车站工程为例,所测得某个环向接头处承受的轴力值为 3×10^5 N,弯矩值为 2×10^4 N·m。由实测轴力值可知接头处于压弯受力状态,将具体构件尺寸、材料参数和所测轴力值代入转角 θ_{2-1} 、 θ_{2-2} 、 θ_{3-1} 、 θ_{3-2} 表达式中并比较其大小,可知接头弯曲变形的发展过程为 I → II → III-1,将接头的材

料参数和尺寸参数代入各临界弯矩计算公式中进行比较,可得 $2 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m} < M_1$,由此可知接头处于弯曲模式 I,若弯矩持续增加,接头的弯曲变形将会历经 II 并发展为弯曲模式 III-1,直至接头完全破坏。综上,图 9a 所示流程可判别接头的弯曲模式和弯曲变形的发展过程,但计算过程较为繁琐,难以应用于目前快速建设的实际工程中。

3.2 内力区域分布

为快速判别接头弯曲模式及其弯曲变形发展过程,本文将具体的材料参数和尺寸参数代入各个受力状态下的临界弯矩表达式中,获得接头处的内力区域分布如图 9b 所示。

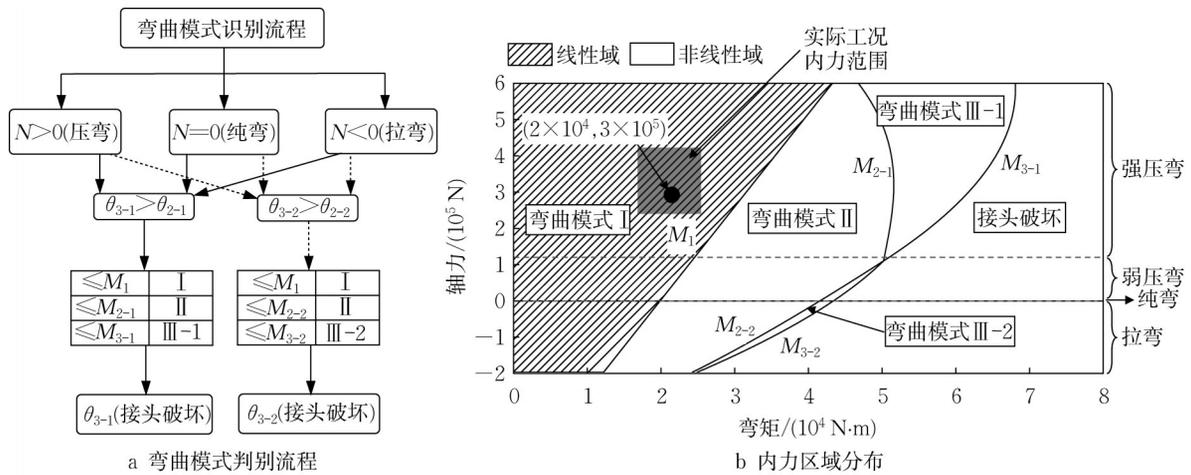


图 9 弯曲模式判别示意图

Fig. 9 Schematic diagram of bending mode discrimination

从图 9b 中可以看出,在压弯受力状态下,其弯曲变形随弯矩的增大存在两种发展过程:当轴力较大,即为强压弯时发展过程为 I → II → III-1,如图中强压弯区域所示;当轴力较小(即为弱压弯)、纯弯和拉弯受力状态,发展过程为 I → II → III-2,如图中弱压弯区域、纯弯区域和拉弯区域所示,与 1.2 节的理论分析一致。结合实测数据,形成弯矩和轴力的坐标点 $(2 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}, 3 \times 10^5 \text{ N})$,将其置于所绘制的内力区域图中,可直接判别出此时接头处于弯曲模式 I,若弯矩持续增加,接头的弯曲变形将会历经弯曲模式 II,最终发展为弯曲模式 III-1,直至接头完全破坏,此结论与弯曲模式流程图的判别结论一致。实际工程中,环向接头所承受的轴力和弯矩与结构本身、周边荷载工况等因素有关,可通过所测得的轴力和弯矩随时间变化的数据集组成实际工况内力范围,并在内力区域分布图中进行框选和识别。

此内力区域分布图可较为清晰地判别接头处抗弯刚度是否为非线性,且将实际测得的弯矩值和轴

力值形成坐标点或内力范围置于此图中即可判别此时接头所处的弯曲模式,并可通过判别所得的弯曲模式给出相应的处置措施。

3.3 相应处置措施

弯曲模式相应的处置措施如表 3 所示。当实测的弯矩值和轴力值形成的内力在图 9b 中的弯曲模式 I 范围内,说明此时环向接头全截面接触,弯矩-转角之间为线性关系,此时接头处于正常受力状态,施工或运营均可照常进行,但在受力不稳定的情况下仍需加强监测;当实测受力在弯曲模式 II 范围内,说明此时接头已有轻微张开,需要根据监测的结果对张开处采用接缝壁后补浆等方式防止接头进一步张开;当实测受力在弯曲模式 III-1 范围内,说明此时受压区处的混凝土已达到屈服,接头承受的轴力和弯矩均过大,应立即停止施工,在结构内部采用钢板衬加固等方式降低接头处的受力并检查修补开裂或剥落的混凝土块;当实测受力在弯曲模式 III-2 范围内,则说明此时连接构件之间的螺栓已达到屈服,应

立即停止施工,降低接头处靠近螺栓位置的受力,并更换螺栓。

表 3 弯曲模式相应的处置措施

Tab. 3 Corresponding disposal measures for bending modes

弯曲模式	对应状态	相应措施
I	全截面试接触	可正常工作,需加强监测
II	接头张开	采用接缝壁后补浆等方式防止接头进一步张开
III-1	混凝土屈服	停止施工,降低受力,修补混凝土
III-2	螺栓屈服	停止施工,降低受力,更换螺栓

4 结论

本文基于在建新型装配式地铁车站工程建立了考虑轴力和弯矩共同作用下通过螺栓连接的预制构件环向接头弯矩-转角计算模型,并通过有限元软件对弯矩-转角表达式进行验证,结论如下:

(1)装配式车站环向接头在轴力和弯矩共同作用下的破坏形式可分为 4 种弯曲模式和 3 种受力状态,通过受力平衡和变形协调条件推导接头承受弯矩与接缝面张开转角之间的表达式,并由此得出接头抗弯性能在不同弯曲模式之下的非线性特性,最终得出 3 种受力状态下弯曲变形随弯矩的发展过程。通过理论分析与数值模拟的结果对比,验证了本文理论推导方法的可行性。

(2)在环向接头变形状态的发展过程中,当接头还未张开时,接头处的弯矩与转角之间为线性关系,当接头张开之后,其弯矩和转角之间均为非线性关系,在螺栓或接头受压区均进入塑性时,所呈现的非线性特性显著。实例分析中,压弯受力状态存在强弱压弯之分,轴力临界值可由相关转角表达式计算。

(3)在实际工程中获取环向接头的实测弯矩值和轴力值可形成坐标点或内力范围,代入通过各弯曲模式临界弯矩计算公式所绘制而成的内力区域分布图,可直接判别工程中环向接头弯曲模式及其抗弯刚度是否为非线性状态,同时在内力区域分布图中可清晰预判若弯矩持续增加,接头的弯曲变形可继续发展为何种弯曲模式,从而能够有效指导工程施工和运营过程中针对环向接头的处置措施。

(4)装配式结构环向接头在不同受力状态下存在不同程度的变刚度特性,此特性可能对接头处传力特性存在一定影响,进而导致整体结构体系的受力调整。后续可结合接头受剪力条件进一步分析装配式结构体系受力的整体调幅特征,根据计算结果

对接头构造进行优化设计,以确保结构受力的合理和稳定。

作者贡献声明:

黄林冲:研究构思,技术指导。
张燕丽:理论推导,撰写初稿。
梁禹:技术支持,稿件修订。
林存刚:数值模拟计算。
蒋凯:计算结果分析。
王晓良:提供项目依托,现场技术指导。

参考文献:

- [1] CHEN J N, XU C S, EL NAGGAR H M, *et al.* Study on seismic performance and index limits quantification for prefabricated subway station structures [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 162: 107460. DOI: 10.1016/j.soildyn.2022.107460.
- [2] TAO L J, SHI C, DING P, *et al.* Shaking table test of the effect of an enclosure structure on the seismic performance of a prefabricated subway station [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 125: 104533. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104533.
- [3] 杨桃. 单拱大跨槽注浆预制装配式地铁车站地震三维动力响应研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
YANG Tao. Research on seismic three-dimensional dynamic response of single-arch and long-span mortise-groove grouting prefabricated metro station [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [4] 陈翔宇. 装配式地下车站结构力学性能试验研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
CHEN Xiangyu. Experimental study on mechanical properties of assembled underground station structures [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [5] HUANG L C, MA J J, LEI M F, *et al.* Soil-water inrush induced shield tunnel lining damage and its stabilization: a case study [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 97: 103290. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103290.
- [6] HUANG L C, HUANG S, LAI Z S, *et al.* The effective flexural stiffness of segment joints in large diameter tunnel under various loading conditions [J]. *Structural Concrete*, 2020, 21(6): 2824. DOI: 10.1002/suco.202000401.
- [7] 武丰豪. 基于槽注浆式接头的全预制装配式地铁车站结构抗震性能研究[D]. 北京:北京交通大学, 2019.
WU Fenghao. Research on seismic performance of fully prefabricated subway station structure based on mortise and groove grouting joint [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [8] HOD TEACHAVORASINSKUN S, CHUB-UPPAKARN T. Influence of segmental joints on tunnel lining [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25 (4): 490.

- DOI: 10.1016/j.tust.2010.02.003.
- [9] YEUNG M R, LEONG L L. Effects of joint attributes on tunnel stability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3/4): 348. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)00286-4.
- [10] YANG X R, SHI Z H, LIN F. Influence of geometrical parameters on performance of mortise and tenon joint with grout for application in prefabricated underground structures[J]. Advances in Civil Engineering, 2019. DOI: 10.1155/2019/3747982.
- [11] SU H F, LIU W N, YANG X R, *et al.* Rapid development and application of prototype test system of prefabricated metro station structure joint[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2015, 9: 751. DOI: 10.2174/1874149501509010751.
- [12] 杨钊,罗会武. 地铁盾构管片接头抗弯刚度模型试验与数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(6): 1542.
YANG Zhao, LUO Huiwu. Model test on the bending stiffness of metro shield segment joint and its numerical analysis [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(6): 1542.
- [13] 周宇航,石钰锋,钟广,等. 考虑环向接头影响的盾构管片受力特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3758. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20220025.
ZHOU Yuhang, SHI Yufeng, ZHONG Guang, *et al.* Experimental study on the force characteristics of shield tube sheets considering the influence of annular joints[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3758. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20220025.
- [14] 杨春山,莫海鸿,魏立新. 盾构隧道环向接头等效刚度修正计算及其影响因素研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(7): 1497. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2017.07.021.
YANG Chunshan, MO Haihong, WEI Lixin. Correction calculation for circumferential equivalent bolt stiffness of shield tunnel and the analysis of its influencing factors[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(7): 1497. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2017.07.021.
- [15] 朱合华,黄伯麒,李晓军,等. 盾构衬砌管片接头内力-变形统一模型及试验分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2153.
ZHU Hehua, HUANG Boqi, LI Xiaojun, *et al.* Unified model for internal force and deformation of shield segment joints and experimental analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2153.
- [16] 徐平,翟攀攀,张天航,等. 盾构隧道衬砌管片接头弯曲刚度类指数模型研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊2): 83. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1532.
XU Ping, ZHAI Panpan, ZHANG Tianhang, *et al.* An exponential-like model of bending stiffness of segment joint for shield tunnel linings [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 83. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1532.
- [17] 晏启祥,陈行,吴聪,等. 盾构隧道管片环向接头刚度的解析分析法[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(2): 52.
YAN Qixiang, CHEN Hang, WU Cong, *et al.* Analytical analysis of stiffness of ring joint of shield tunnel segments [J]. China Railway Science, 2018, 39(2): 52.
- [18] 梁荣柱,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): 212.
LIANG Rongzhu, WANG Kaichao, HUANG Liang, *et al.* Analytical solution for longitudinal equivalent bending stiffness of quasi-rectangular shield tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 212.
- [19] 朱伟,钟小春,秦建设. 盾构衬砌管片接头力学分析及双直线刚度模型研究[J]. 岩土力学, 2006(12): 2154. DOI: 10.16285/j.rsm.2006.12.013.
ZHU Wei, ZHONG Xiaochun, QIN Jianshe. Mechanical analysis of segment joint of shield tunnel and research on bilinear joint stiffness model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(12): 2154. DOI: 10.16285/j.rsm.2006.12.013.
- [20] 吴全立,王梦恕,董新平. 盾构管片接头非线性转动刚度研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(4): 109. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2014.04.005.
WU Quanli, WANG Mengshu, DONG Xiping. Study on nonlinear rotational stiffness of shield segment joint [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(4): 109. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2014.04.005.
- [21] 张胜龙. 铁路隧道预制装配式衬砌接头力学性能及选型研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2020.
ZHANG Shenglong. Mechanical properties and type selection of prefabricated lining joint for railway tunnel [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020.
- [22] 张厚美,张正林,王建华. 盾构隧道装配式管片接头三维有限元分析[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(4): 566. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2003.04.023.
ZHANG Houmei, ZHANG Zhenglin, WANG Jianhua. 3-D FEM analysis on prefabricated segment joints of shield tunnel [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2003, 37(4): 566. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2003.04.023.
- [23] 刘人菩,孟栋,白雪梅,等. 地层环境对单拱大跨装配式车站结构力学性能影响分析[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(2): 82.
LIU Renpu, MENG Dong, BAI Xuemei, *et al.* Influences of stratum environment on the structural mechanical properties of single-arch large-span prefabricated stations [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(2): 82.