

DOI: 10.11779/CJGE202202016

考虑界面效应的内张钢圈加固盾构管片结构力学性能研究

孙雅珍¹, 于 阳², 王金昌^{3*}, 叶友林², 谭清元¹

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 浙江大学交通工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 针对内张钢圈加固后的盾构管片结构, 现有研究中多基于理想界面假设, 忽略了钢-混凝土连接界面非连续变形特性, 无法对结构的承载性能和破坏机制做出精细分析。将内聚力模型与扩展有限元方法相结合, 考虑了加固结构连接界面的非连续变形特性, 建立了可精确描述裂缝扩展过程的内张钢圈加固结构三维实体非线性模型, 并利用足尺试验结果验证了计算的正确性, 实现了钢与混凝土两种不同材料连接界面滑移破坏及开裂等劣化行为的动态模拟, 弥补了试验的不足。在此基础上, 对顶部超载与地层荷载作用下加固结构的力学性能展开分析, 研究结果表明: 顶部超载作用下加固结构受力破坏过程主要分为 4 个阶段, 钢圈与混凝土连接界面处裂缝的扩展与黏结破坏是结构失稳破坏的决定性因素; 地层荷载作用下加固结构受力过程中, 连接界面接头处存在拉-压交替的非协调变形区域, 易发生剪切滑移及剥离破坏。

关键词: 盾构隧道; 内张钢圈加固; 数值计算; 连接界面; 内聚力模型; 扩展有限元

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)02-0343-09

作者简介: 孙雅珍(1969—), 女, 博士, 教授, 主要从事结构损伤机制的研究工作。E-mail: syz16888@126.com。

Mechanical properties of linings of shield tunnel strengthened by steel plates considering interface effects

SUN Ya-zhen¹, YU Yang², WANG Jin-chang³, YE You-lin², TAN Qing-yuan¹

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 3. Institute of Transportation Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To investigate the properties of the structure of segmental tunnel linings reinforced by steel plates, most of the existing studies assume that the interfaces between different materials are perfectly bonded, and thus ignore the discontinuous deformation characteristics of the steel-concrete interface, and then it is impossible to make a detailed analysis of the load-bearing behavior and failure mechanism of a structure. In this work, the cohesive-zone model is combined with the extended finite element method, and the discontinuous deformation characteristics of the connecting interface of the steel-plate-reinforced structure are considered. At the same time, a three-dimensional solid nonlinear model for the steel-plate-reinforced structure that can accurately describe the crack propagation process is established, and is validated through the tests. The dynamic simulation of the sliding failure and cracking of the interface between two different materials of steel and concrete is carried out, which makes up for the shortcomings of the tests. Thus, the mechanical properties of the reinforced structure under surface surcharge are analyzed. The results show that the stress failure process of the reinforced structure under surface surcharge can be divided into four stages. The cracking and bond failure of connecting interface between the steel plates and the concrete are the decisive factors for the failure of the reinforced structure. Under the action of the ground load, at the connecting interface joint of the reinforced structure, there are incompatible deformation areas with alternative tension and compression, which is more prone to shear slip and peel failure.

Key words: shield tunnel; steel-plate reinforcement; numerical calculation; connecting interface; cohesive-zone model; extended FEM

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2015CB057801); 辽宁省自然科学基金项目(2018011666-301)

收稿日期: 2021-06-16

*通信作者(E-mail: wjc501@zju.edu.cn)

0 引言

盾构隧道作为城市轨道交通的主要结构形式,多采用圆形、分段螺栓拼装组成,其受力形式为多较不连续圆拱结构,侧向土压力直接决定着其结构的稳定性^[1],隧道所处地层条件较为复杂时,赋存环境的变化会导致隧道结构出现开裂破损^[2]及错台变形^[3],严重时衬砌结构会处于非线性大位移受力状态^[4],威胁隧道的运营安全^[5]。因此,有必要对已产生病害的盾构隧道进行有效的加固。

为提高盾构隧道结构的承载能力与耐久性,在隧道修建过程中多采用单层管片结合二次衬砌的双层衬砌结构形式,王士民等^[6]建立了盾构隧道双层衬砌结构非连续接触分析模型,该模型中混凝土的非线性通过混凝土塑性损伤模型来表征,并将钢筋嵌入管片结构中,可以准确地分析双层衬砌结构力学行为。对于已发生大变形的盾构隧道,主要采用粘贴纤维布及超高性能混凝土(UHPC)加固法,李宇杰等^[7]依托北京地铁工程背景,通过数值计算方法探讨了纤维布的加固补强效果,陈仁朋等^[8]提出了采用超高性能混凝土(UHPC)材料加固盾构管片的方法,建立了UHPC加固盾构管片的三维非线性模型,阐释了结构的承载机制与破坏模式。

相较于上述加固措施,内张钢圈加固法^[9-10]可以有效控制隧道结构变形,提升结构的整体刚度与极限承载力,在实际工程中应用更为广泛。Zhai等^[11]设计了一系列在1g平面应变条件下进行的物理模型测试,并与未加固的管片结构进行对比分析,以研究钢板对过变形盾构隧道的加固效果。柳献等^[12]提出钢板-混凝土组合结构加固盾构隧的方法,对加固结构进行上方超载作用下的整环足尺试验,探究结构整体的受力性能。相比于较为复杂的试验方法,数值计算可以通过模型参数的调整以开展更深入的分析。翟五洲等^[13]采用数值模拟方法,建立了钢板加固盾构管片环缝的数值分析模型,揭示了粘贴钢板对接缝抗剪性能提升的机理。刘庭金等^[14]建立了考虑橡胶止水垫、手孔、连接螺栓、环氧树脂黏结作用、加固钢板和膨胀螺栓的三维精细有限元模型,讨论了加固结构的受力、变形特性与破坏模式。Zhao等^[15]提出了一种基于弹簧单元的钢板加固盾构管片简化建模方法,该模型具有较高的通用性,并进一步研究了钢板厚度与加固时机对加固效果的影响规律。上述研究多针对内张钢圈加固的有效性 & 二次加固后结构的受力机制,未考虑钢-混凝土连接界面处非连续变形特性,对于连接界面开裂及失效破坏对结构承载性能的影响机制仍有待进一步研究。

步研究。

本文基于内聚力模型,结合扩展有限元方法建立了内张钢圈加固盾构管片的三维实体非线性模型,该模型考虑了管片材料的非线性,连接界面的非连续变形特性,管片与管片间接触的非线性,以及管片内置钢筋对结构抗拉强度的加强,同时考虑螺栓手孔与凹凸榫等细部构造。对顶部超载与地层荷载下加固结构的力学性能展开分析,基于所得规律对盾构隧道内张钢圈加固工程提供指导性意见。

1 考虑界面效应加固结构分析模型

1.1 连接界面内聚力模型

内聚力模型在断裂力学中被广泛应用于描述复合材料结构的连接界面,界面材料的力学特性通过内聚力-张开位移关系来描述,可以准确模拟界面的滑移、失效和剥离,使界面材料分离过程的模拟更加简洁。本文采用双线性内聚力模型表征了内张钢圈与混凝土连接界面间黏结力和张开位移的关系,建立了拉剪共同作用下考虑界面效应的加固结构分析模型,如图1所示。

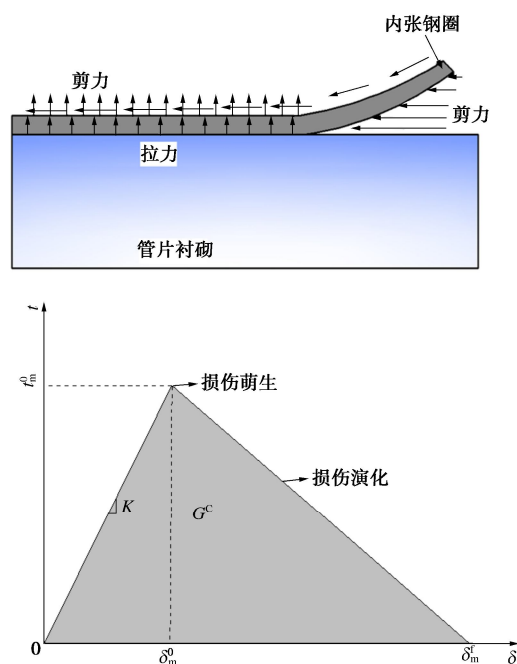


图1 内聚力模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cohesive-zone model

采用双线性内聚力模型,可将钢圈与混凝土连接界面的力学行为分为3个阶段:①线弹性阶段:内聚应力与相对位移呈正相关关系,直至达到损伤的初始条件;②软化阶段:内聚应力达到最大值后,将随相对位移的增大而减小至零;③剥离破坏阶段:相对位移持续增加,内聚应力始终为零。

在牵引-分离法则中, 内聚界面在弹性范围内的本构关系具有以下形式^[16]:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K \delta \quad (1)$$

式中 K_{nn} , K_{ss} , K_{tt} , K_{ns} , K_{nt} , K_{ts} 为内聚界面刚度矩阵; t , t_n , t_s , t_t 为各方向的牵引力; δ , δ_n , δ_s , δ_t 分别为在整体、法向和切向上的相对位移。

界面破坏的损伤判据基于最大名义应力准则, 当名义应力比的最大值达到 1 时损伤破坏, 即^[17]

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (2)$$

式中, t_n^0 , t_s^0 和 t_t^0 分别为抗拉强度和两个切向的抗剪强度, $\langle \rangle$ 为 Macaulay 括号:

$$\langle t_n \rangle = \begin{cases} t_n & (t_n \geq 0) \\ 0 & (t_n < 0) \end{cases} \quad (3)$$

为了更好地描述界面环氧树脂材料的损伤演化, 引入了等效位移 δ_m ^[17]:

$$\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2} \quad (4)$$

在损伤出现后, 荷载持续增加, 通过损伤变量 D 描述环氧树脂材料的损伤程度:

$$D = \frac{\delta_m^f - \delta_m^{\max}}{\delta_m^{\max} - \delta_m^0} \quad (5)$$

式中 $\delta_m^{\max}$ 为指加载过程中的最大相对位移; δ_m^0 为指环氧树脂材料达到抗拉强度时的位移值; δ_m^f 为指环氧树脂材料断裂时的失效位移。

损伤变量 D 初始值为零, 环氧树脂材料无损伤; D 从 0 单调增加至 1, 即环氧树脂材料进入损伤演化阶段; 当 $D=1$ 时, 环氧树脂材料损伤失效。

各方向牵引力分量与损伤变量关系式为^[16]

$$t_n = \begin{cases} ((1-D)K_{nn}\delta_n) & (\delta_n \geq 0) \\ K_{nn}\delta_n & (\delta_n < 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$t_s = (1-D)K_{ss}\delta_s \quad (7)$$

$$t_t = (1-D)K_{tt}\delta_t \quad (8)$$

采用 B-K 断裂准则描述损伤演化, 断裂能 G^C 的函数表达式为^[17]

$$G^C = G_n^C + (G_s^C - G_n^C) \left\{ \frac{G_s + G_t}{G_n + G_s + G_t} \right\}^\eta \quad (9)$$

式中, G_n , G_s , G_t 分别为各方向应力所做的功, G_n^C , G_s^C 分别为 I 型和 II 型断裂模式的临界断裂能, η 为界面材料参数,

$$G_n^C = \frac{1}{2} t_n^0 \delta_n^f \quad (10)$$

$$G_s^C = \frac{1}{2} t_s^0 \delta_s^f \quad (11)$$

1.2 基于扩展有限元法的裂缝分析理论

本文采用内聚力模型来考虑连接界面的非连续变形特性, 需要准确描述界面的张开位移以分析加固结构的力学性能, 使用扩展有限元方法 (XFEM) 解决模型中的非连续性问题, 可以有效避免网格依赖问题, 将非连续场与网格边界的独立化, 在产生裂缝的区域范围内维持原有网格不变, 并且计算迅速, 求解精度较高。其求解思路是基于单位分解法构造一个近似函数, 使任意函数都可由域内的一组局部函数表示。采用上述思路, 将位移的近似解表示为

$$u^h(x) = \sum_{I=1}^N N_I(x) \left(\sum_{a=1}^M \psi_a(x) a_I^a \right) \quad (12)$$

式中, N_I 为形函数, $\psi_a(x)$ 为改进函数。形函数可以形成单位分解:

$$\sum_I N_I(x) = 1 \quad (13)$$

在常有限元方法的基础上, 通过引入跳跃函数 $H(x)$ 及裂尖渐进位移函数 $\phi_\alpha(x)$, 将裂缝面表达为

$$u(x) = \sum_{i \in N} N_i(x) u_i + \sum_{j \in N^{dis}} N_j(x) a_j + \sum_{k \in N^{asy}} N_k \sum_{\alpha=1}^4 \phi_\alpha(x) b_k^\alpha \quad (14)$$

式中, $u(x)$ 为所有结点的集合, N^{dis} 为被裂缝完全贯穿单元的结点集合, N^{asy} 为含有裂尖单元的结点集合, N_i , N_j , N_k 为各自对应结点的形函数, u_i , a_j , b_k^α 为各自对应结点位移。

描述裂缝面位移非连续性跳跃函数 $H(x)$ 表示为

$$H(x) = \begin{cases} +1 & ((\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \cdot \mathbf{n} \geq 0) \\ -1 & (\text{其它}) \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\mathbf{x}^*$ 为裂缝面上距离 x 最近的点, $\mathbf{n}$ 为 $\mathbf{x}^*$ 处裂缝面的单位外法向量。当 $\mathbf{x}$ 位于 $\mathbf{x}^*$ 定义的裂纹上方, $H(x)=1$, 反之 $H(x)=-1$ 。

$\phi_\alpha(x)$ 为反映裂尖应力奇异性的渐近位移场函数:

$$b_k^\alpha = \left(\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (16)$$

2 数值模型

2.1 模型建立

利用 ABAQUS 有限元软件建立了内张钢圈加固结构数值模型, 如图 2 所示。管片衬砌内径 5.5 m, 外径 6.2 m, 管片厚 0.35 m, 环宽 1.2 m, 每环由一块封顶块 F(16°)、两块邻近块 L1-L2(65°)、两块标准块 B1-B2(65°) 以及 1 个拱底块 D(84°) 组成, 内张钢圈幅宽为 850 mm, 厚度为 20 mm。管片接头采用环向螺栓连接, 采用三维实体单元模拟混凝土管片, 内张钢圈采用 S4R 壳单元模拟, 螺栓杆与螺母简化为

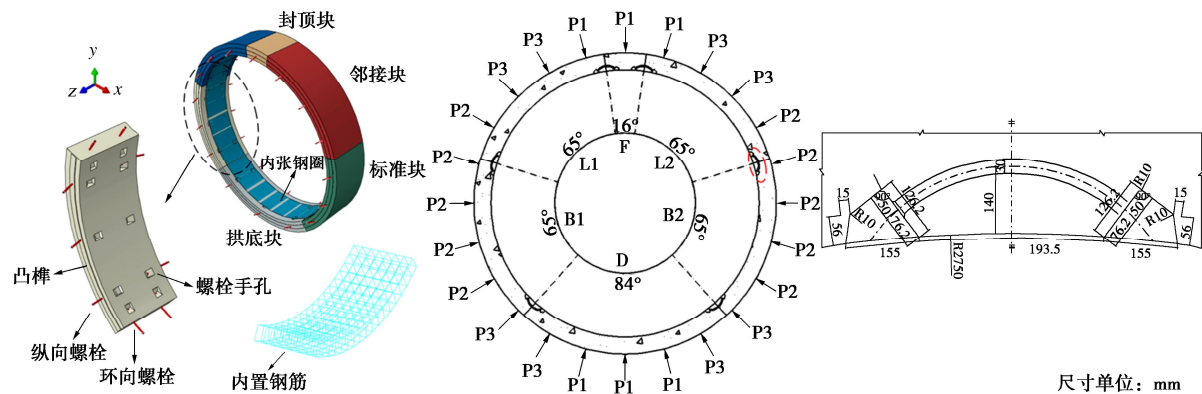


图2 内张钢圈加固结构数值模型与原型结构

Fig. 2 Finite element model for steel-plate-reinforced segmental linings and prototype structure

B31 梁单元与 S4R 壳单元，并将梁单元嵌入约束到混凝土中。

管片之间的接触面法向行为选取“硬接触”，接触面切向行为基于罚函数法的 Cloumb 摩擦模拟，摩擦系数取 0.4，摩擦力可以在接触面闭合时自由传递。数值模型的边界条件为拱腰两侧施加 z ， y 方向的约束，顶底两侧施加 z ， x 方向约束。

2.2 钢-混凝土连接界面的模拟

层间连接界面的处理方式直接决定着加固结构的相互作用受力特性，Zhao 等^[15]研究指出，层间连接界面的剪切应力在 0 到峰值应力之间时，由环氧树脂与膨胀螺栓结合提供，当剪切应力大于峰值应力时，仅由螺栓提供。通过在管片与内张钢圈之间设置 Cohesive Behavior，将黏结行为应用于层间所有从属节点以代替环氧树脂的黏结性能与膨胀螺栓的抗剪性能，使层间能够同时传递拉（压）力与剪力，进而形成共同的加固结构支护体系，钢-混凝土界面参数为： $t_n^0=2.4\text{ MPa}$ ， $\delta_n^f=0.8\text{ mm}$ ， $G_n^c=960\text{ N/m}$ ， $t_s^0=2.5\text{ MPa}$ ， $\delta_s^f=4.5\text{ mm}$ ， $G_s^c=5625\text{ N/m}$ ，界面法向刚度为 144 MPa/mm ，切向刚度为 40 MPa/mm ^[13]。

2.3 材料本构

混凝土基于弹塑性本构模型，应力与应变关系选自《混凝土结构设计规范》^[18]：

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0 \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right] & (\varepsilon < \varepsilon_{c0}) \\ \sigma_0 \left[1 - 0.15 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{c0}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{c0}} \right) \right] & (\varepsilon_{c0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu}) \end{cases}, \quad (17)$$

式中， σ_0 为混凝土的抗压强度， ε_{c0} 为峰值应力对应的应变，而 ε_{cu} 为极限应变。

管片产生裂缝时的断裂能 G_{If} ， G_{IIf} 和 G_{IIIf} 取值为 80 N/m 。选取最大主应力失效准则作为损伤起始判据：

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{\max}^0 \rangle}{\sigma_{\max}^0} \right\}, \quad (18)$$

式中， $\sigma_{\max}^0$ 为混凝土的极限拉应力，当 $\sigma_{\max} \geq 0$ ， $\langle \sigma_{\max} \rangle = \sigma_{\max}$ ， $\sigma_{\max} < 0$ ， $\langle \sigma_{\max} \rangle = 0$ ，当 $f > 1$ 时开裂。

HRB335 具有高强度和良好的可塑性被用作管片衬砌的内置钢筋。外排钢筋由 8 根 $\Phi 22\text{ mm}$ 和 8 根 $\Phi 18\text{ mm}$ 组成，内排钢筋为 16 根 $\Phi 18\text{ mm}$ ，箍筋为 2 根 $\Phi 22\text{ mm}$ 与 22 根 $\Phi 16\text{ mm}$ ，保护层厚度为 50 mm ，采用 T3D2 桁架单元来模拟，通过嵌入约束的方式来建立与混凝土间相互作用关系。纵向螺栓为 5.8 级 M30 高强螺栓，屈服强度为 400 MPa ，内张钢圈加固结构主要部件的设计参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Material properties

材料属性	类型	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
管片衬砌	C55	35.5	0.2	25.3	1.96
钢筋	HRB335	200	0.3	335	—
螺栓	5.8/M30	210	0.3	400	—
内张钢圈	Q235	200	0.3	235	—

3 顶部超载下加固结构力学性能

3.1 加载方式

如图 2 所示，试验的加载方式通过沿管片环均匀布设 24 个点位施加荷载，共 3 组分为 P_1 ， P_2 与 P_3 ，考虑二次受力模式进行内张钢圈加固。图 3 给出了加载全过程的 3 个阶段：

(1) $P_2 = \lambda \times P_1$ ， $P_3 = 0.5 \times (P_1 + P_2)$ ，直到 P_2 等于被动土压力 275 kN 。

(2) P_2 维持被动土压力不变， $P_3 = 0.5 \times (P_1 + P_2)$ ，持续加载至加固点，进行内张钢圈加固。

(3) P_2 继续维持被动土压力， $P_3 = 0.5 \times (P_1 + P_2)$ ，继续增加 P_1 至极限承载力。

其中, λ 为侧向土压力系数, 加固点的选取通过顶底收敛位移 ΔD 为控制指标。

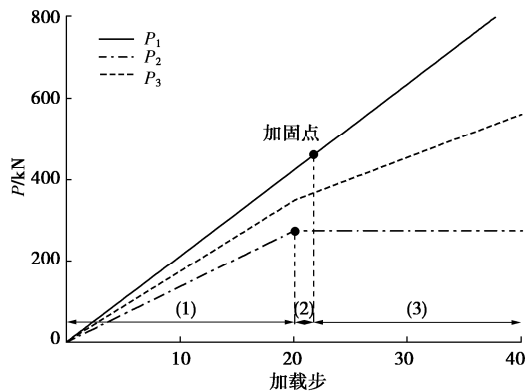


图3 加载过程 ($\lambda=0.65$)

Fig. 3 Loading process for P_1 , P_2 and P_3

加载在有限元实现过程中：第一步持续施加集中荷载 P_1 , P_2 , P_3 ；第二步进行内张钢圈加固是在持续加载的情况下实施的，管片本体的变形已较为严重，钢圈与管片的应变差较高，即存在“应变滞后”的现象。在进行数值计算前，先将钢圈的弹性模量设定趋近于 0，钢圈将会在荷载作用下，随管片变形而变形，而由于弹性模量取值很小，无法对管片的变形造成影响，当需要进行内张钢圈加固时，激活钢圈的原有材料参数，完成数值计算。

3.2 模型验证

将侧压力系数取为 0.65，利用上述加载方式进行数值模拟并与足尺试验[15]中的荷载-位移曲线进行比较分析，结果如图4所示。进行内张钢圈加固后，管片与钢圈共同承载，结构的整体刚度迅速提高，可以观察到数值模拟得到的结构变形计算结果与试验现象基本吻合，验证了该模型的正确性。

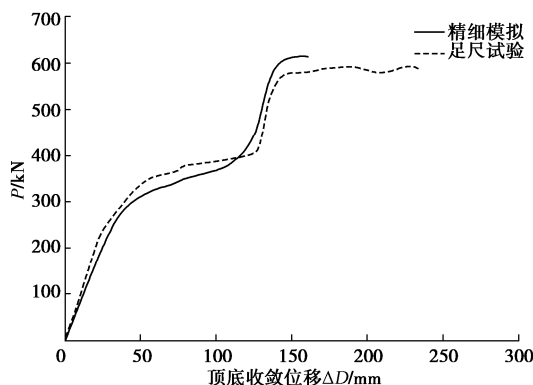


图4 足尺试验结果与数值结果对比

Fig. 4 Comparison between full-scale test and numerical results

3.3 计算结果分析

将侧压力系数取为 0.85，在结构顶底收敛位移约为 100 mm 时进行内张钢圈加固^[10]，加固结构荷载与顶底收敛位移关系曲线如图5所示，其中横坐标取管

片 0° 至 180° 方向直径的变化量(收敛变形)。

由图5~8可知，加固结构破坏过程分为以下7个关键点：管片本体外弧面开裂 (S1)、加固点 (S2)、拱顶 (底) 连接界面开裂 (S3)、接头处螺栓屈服 (S4)、层间连接界面黏结破坏 (S5)、钢圈与内排钢筋屈服 (S6) 和加固结构整体失稳破坏 (S7)。其破坏链为：①在采取内张钢圈加固前，其管片本体拱腰外侧均已开裂，在产生裂缝前直径变化量随荷载呈线性增加；②管片本体开裂后，加固结构刚度受到影响，荷载-位移曲线斜率减小，当顶底收敛位移达到加固点时采取内张钢圈加固；③进行加固后，结构整体刚度显著提升，拱顶 (底) 连接界面发生开裂；④随着荷载的增加，管片本体开裂程度逐渐增加，裂缝扩展贯穿，加固结构整体刚度进一步降低，拱顶 (底) 连接界面处开裂剥离程度也随之加剧，收敛变形有所增加但仍近似随荷载呈线性增加，拱顶接头附近螺栓屈服；⑤随着结构裂缝扩展贯通以及连接界面剥离程度继续加深，钢圈与混凝土之间发生黏结滑移破坏；⑥原作为整体来承载的加固结构已失效，钢圈与管片两者受力模式由协同受力逐渐转变为独自受力，结构刚度迅速降低，钢圈与内排钢筋屈服，结构整体失稳破坏。

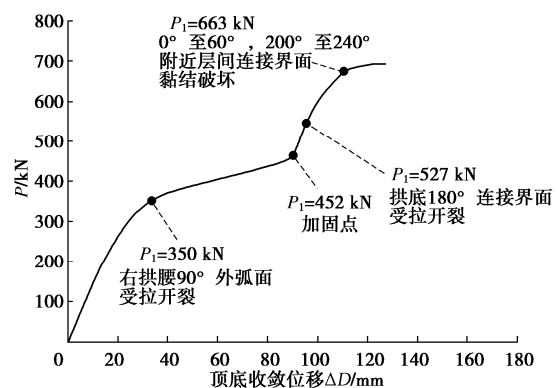


图5 加固结构荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of reinforced structure

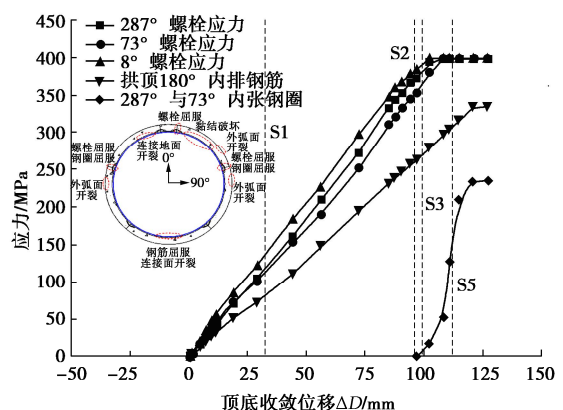


图6 加固结构中部分构件应力-位移曲线

Fig. 6 Stress-displacement curves of structural component in reinforced structure

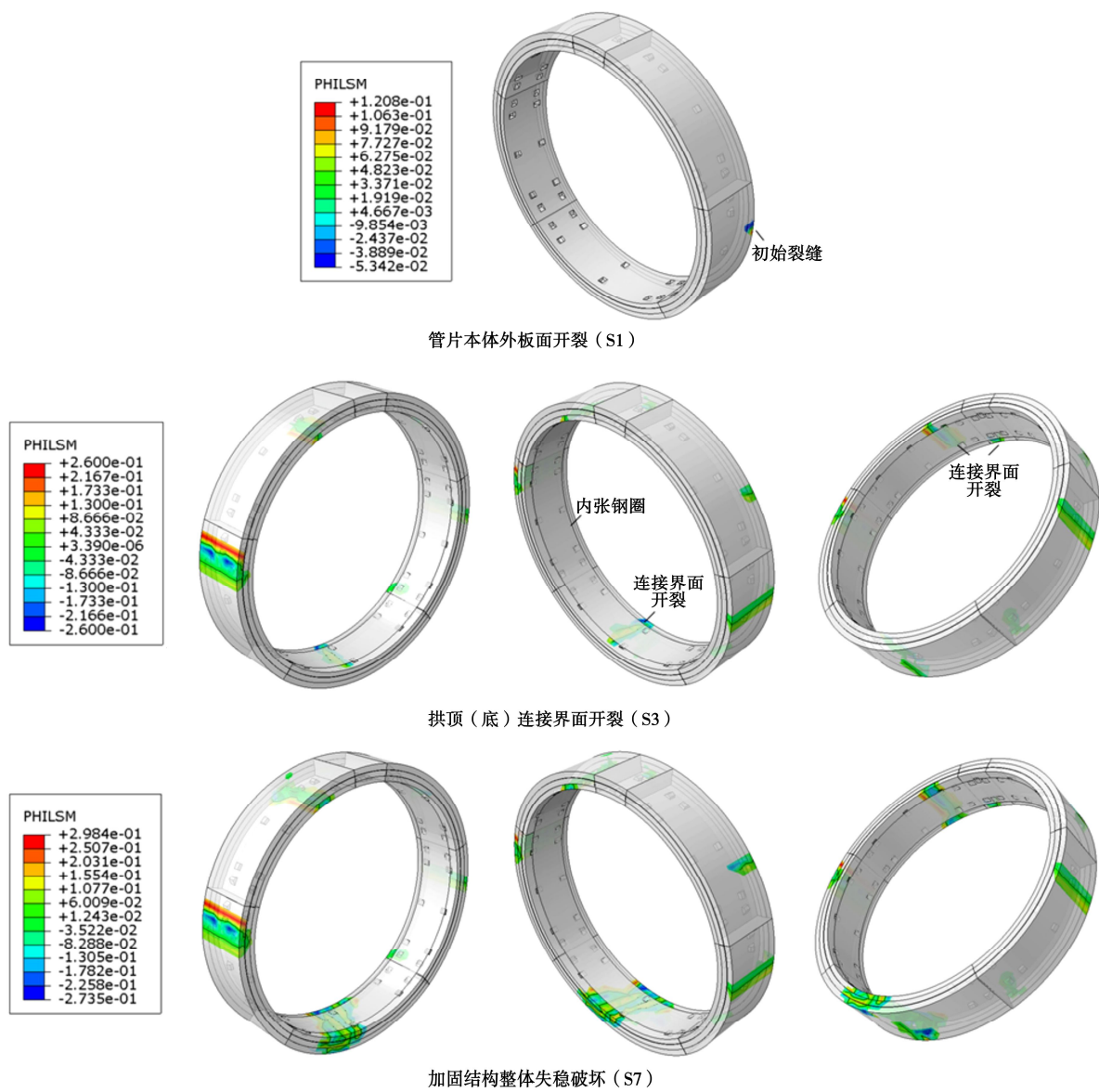


图 7 顶部超载作用下内张钢圈加固结构裂缝扩展过程

Fig. 7 Crack propagation process of steel-plates-reinforced structure under surface surcharge



图 8 数值计算结果与试验界面破坏形态对比

Fig. 8 Comparison of interface failure mode between numerical and test results

加固结构中部分构件应力与位移关系如图 6 所示。由图 6 可知，在进行内张钢圈加固前，连接螺栓与内排钢筋应力均随顶底收敛位移近似呈线性增加。进行加固后，结构刚度提升，连接螺栓应力曲线斜率

减小并在固定区间无显著变化,拱顶(底)连接界面开裂(S3)后,随着连接界面混凝土开裂与剥离程度的加剧,结构整体刚度迅速降低,螺栓应力逐渐增大并进入屈服状态。内排钢筋在管片与内张钢圈连接界面较好时随顶底位移近似呈线性增加,但随着连接界面的开裂与剥离(S3),应力曲线斜率减小,在连接界面混凝土开裂剥离后,拱顶(底)内排钢筋受拉屈服;73°与287°加固钢圈在连接界面的开裂与剥离(S3)后,应力迅速增加,随着连接界面黏结破坏(如图8),钢圈独自受力并进入屈服状态。

3.4 加固结构开裂特性

通过数值模拟,获得了内张钢圈加固结构开裂的过程图,如图7所示。图中PHILSM为指定的位移函数用于描述裂缝面,扩展有限元方法主要通过PHILSM的数值来定位裂缝在一个单元内的路径,裂尖只能在边界上,近似将裂缝视为单元内是的一条直线,采用Python脚本编写程序,在ABAQUS中进行二次开发提取扩展有限元计算得到的裂缝各边上PHILSM零点位置,将所有的零点位置组成的多边形则为裂缝面,通过积分方式计算PHILSM值,进而得到单个破裂单元的面积,累加后则为整个裂缝的面积,加固结构开裂部位裂缝张开总面积(例如F为封顶块上产生裂缝的总面积),如图9所示。

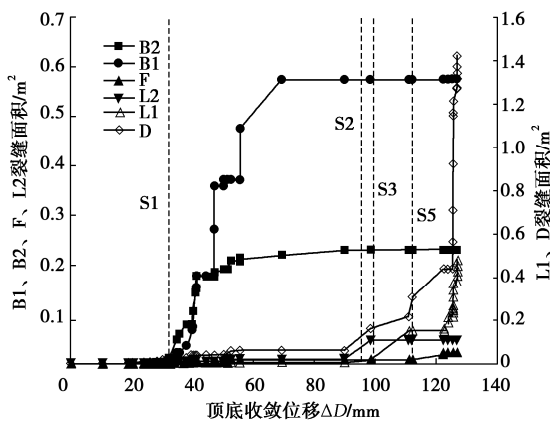


图9 加固结构各节段裂缝张开总面积

Fig. 9 Total area of cracks in each section of reinforced structure

由图7,9可知:加载初期管片在右拱腰90°与左拱腰270°外弧面附近产生纵向裂缝(B2,B1),并逐渐扩展贯通,最终裂缝总面积分别为0.23,0.58 m²,裂缝数量分别为2条和1条;随后管片右拱腰60°外弧面出现1条微小裂缝(L2)并逐渐扩展,最终并未贯通,裂缝总面积为0.05 m²;内张钢圈加固后,拱顶340°与0°内弧面出现3条裂缝(L1,F)并逐渐扩展,340°裂缝扩展贯通,裂缝总面积分别为0.49,0.02 m²;拱底180°连接界面处纵向裂缝扩展连接为

网状裂缝,裂缝总面积为1.42 m²。

裂缝主要集中出现在管片左、右拱腰外侧及拱顶底连接界面处,与管片环最大弯矩所处位置一致,裂损特征为纵向裂缝,在结构失稳破坏阶段,连接界面处的裂缝瞬间大幅度的扩展,说明此处裂缝的扩展贯通是导致结构失稳破坏的决定性因素。

4 地层荷载下加固结构力学性能

4.1 加载方式

为了考虑地层荷载对管片衬砌的约束作用,引入三向非线性地层弹簧(只受压不受拉力)进行模拟,将土弹簧沿环向作用于管片环整个外部,法向弹簧系数 k_n 取为 1×10^4 kN/m²,切向弹簧系数 k_t 为 0.33×10^4 kN/m²。荷载施加为上覆土压力 p_{v1} 与基底反力 p_{y1} ,侧向土压力 p_{x1} 与 p_{x2} ,为上覆土压力乘以侧压力系数求得,侧压力系数 λ 取值为0.65,隧道深度为18.2 m,作用在管片上的载荷为 $p_{v1}=326.6$ kN/m², $p_{y1}=355.2$ kN/m², $p_{x1}=197.6$ kN/m²和 $p_{x2}=266.1$ kN/m²。

4.2 管片纵缝接头处内张钢圈应力分布规律

内张钢圈加固结构在承载过程中,支护体系与单独的管片衬砌存在较大的差异,提取了内张钢圈径向应力与剪应力,更加深入的分析内张钢圈加固机理。

钢圈径向应力分布情况如图10所示,径向应力以受拉为正,受压为负,在管片封顶块位置附近、左右邻接块纵向接头处,以接头位置为分界线,73°,287°接头位置处径向应力从拱腰处沿环向向拱顶方向由拉力过渡为压力,内张钢圈出现拉-压应力交替出现的非协调变形区域。连接界面的径向拉应力会使钢圈与混凝土管片之间产生沿径向剥离破坏的趋势,因此,在实际工程加固时,应采取有效连接措施以提高此处的抗剥离性能。

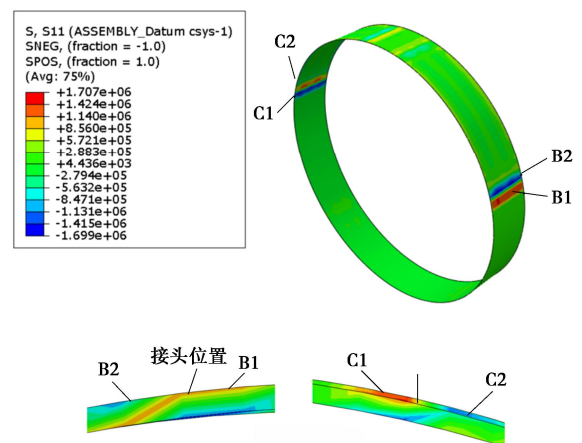


图10 内张钢圈径向应力云图

Fig. 10 Nephogram of radial stress of steel plates

内张钢圈剪应力分布情况如图 11 所示,其中剪应力为负表示应力为逆时针方向,相较于径向应力,内张钢圈连接界面的剪应力分布规律有着明显的差别。钢圈剪应力在接头附近的应力集中现象更加明显,最大剪应力值达到 21.9 MPa,以接头位置为分界线,73°,287° 接头位置处剪应力自拱腰处沿环向向拱顶方向增加,连接界面处的剪应力会使钢圈与管片之间产生相对滑移变形趋势,属于剪切滑移破坏模式。

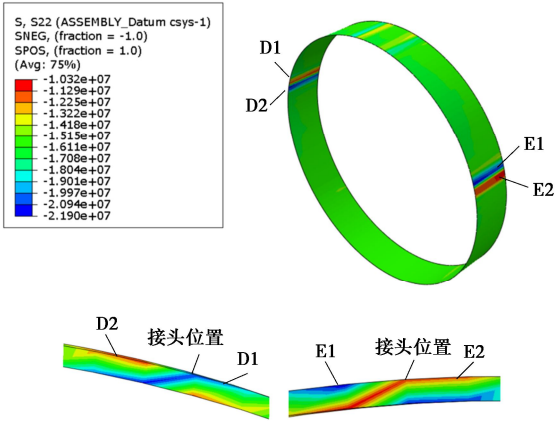


图 11 内张钢圈剪应力云图

Fig. 11 Nephogram of shear stress of steel plates

4.3 加固结构界面效应影响分析

在上述分析的基础上,将钢圈与管片之间设置为“tie 约束”即不考虑加固结构的界面效应,计算得到两种模型应力云图如图 12 所示。

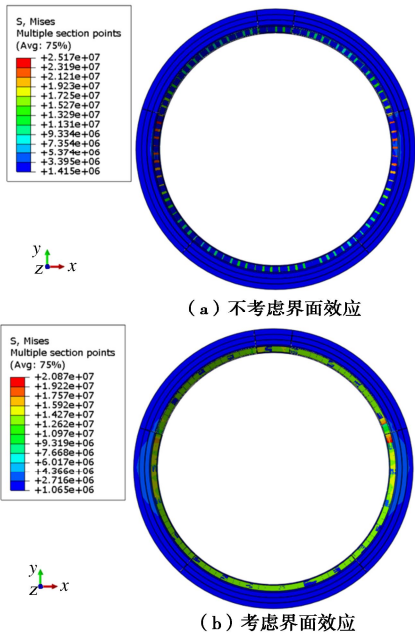


图 12 两种模型应力云图

Fig. 12 Nephogram of stress of two models

对比图 12 (a), (b) 计算结果,考虑界面效应的加固结构应力值较不考虑界面效应的加固结构要小,

钢圈与混凝土管片接触区域应力分布均匀;而不考虑界面效应的加固结构,受到“横椭圆”作用的影响左右拱腰处钢圈的应力值较大,这是因为“tie”约束使得混凝土管片与钢圈之间绑定形成一个整体,未反映出钢圈与管片之间连接界面的协同受力作用,因此,考虑界面效应的加固结构应力变化可较为真实地反映出结构受力变形特点,验证了内聚力模型的合理性。

5 结 论

本文通过数值模拟的方法,对内张钢圈加固盾构管片结构的力学性能展开分析,得到以下 4 点结论。

(1) 基于内聚力模型,结合扩展有限元方法,考虑了内张钢圈加固结构连接界面的非连续变形特性,建立了可精确描述裂缝扩展过程的加固结构三维实体非线性模型,该模型考虑了内置钢筋对结构的加强作用以及螺栓手控与凹凸榫等细部构造,并与足尺试验结果进行对比,二者具有较好的一致性,同时还可以弥补试验的不足,实现钢与混凝土两种不同材料连接界面滑移破坏及材料开裂等劣化行为的动态模拟。

(2) 在顶部超载作用下加固结构受力破坏关键点为:管片本体开裂、加固后连接界面开裂、内部主要构件屈服和连接界面黏结破坏。

(3) 从加固结构的破坏形态上看,开裂特征以纵向裂缝为主,钢板与混凝土连接界面处黏结破坏与裂缝的扩展贯通是结构失稳破坏的决定性因素。

(4) 在地层荷载作用下,内张钢圈加固结构在纵缝接头处存在拉-压交替的非协调变形区域,以接头位置为分界线,73°,287° 接头位置处径向应力从拱腰处沿环向向拱顶方向由拉力过渡为压力,剪应力自拱腰处沿环向向拱顶方向增加。

参考文献:

[1] 王士民, 申兴柱, 彭 博, 等. 侧压力系数对盾构隧道管片衬砌受力及破坏形态的影响研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(7): 102 - 109. (WANG Shi-min, SHEN Xing-zhu, PENG Bo, et al. Analysis of effect of lateral strata pressure coefficient on mechanical characteristics and failure modes of segment lining of shield tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(7): 102 - 109. (in Chinese))

[2] XU G W, HE C, LU D Y, et al. The influence of longitudinal crack on mechanical behavior of shield tunnel lining in soft-hard composite strata[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 144: 106282.

[3] 张冬梅, 刘 杰, 李保军, 等. 大直径盾构隧道斜螺栓环强抗剪特性研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 142 - 153.

- (ZHANG Dong-mei, LIU Jie, LI Bao-jun, et al. Shearing behavior of circumferential joints with oblique bolts in large diameter shield tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, **33**(12): 142 – 153. (in Chinese))
- [4] 柳 献, 张雨蒙, 王如路. 地铁盾构隧道衬砌结构变形及破坏探讨[J]. 土木工程学报, 2020, **53**(5): 118 – 128. (LIU Xian, ZHANG Yu-meng, WANG Ru-lu. Discussion on deformation and failure of segmental metro tunnel linings[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, **53**(5): 118 – 128. (in Chinese))
- [5] 谢家冲, 王金昌, 黄伟明, 等. 软土地区盾构隧道管片开裂特性实测分析及影响因素研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, **40**(增刊 2): 180 – 187. (XIE Jia-chong, WANG Jin-chang, HUANG Wei-ming, et al. Analysis on cracking characteristic of TBM tunnel lining in soft soil area and its influencing factors[J]. Tunnel Construction, 2020, **40**(S2): 180 – 187. (in Chinese))
- [6] 王士民, 于清洋, 彭 博, 等. 基于塑性损伤的盾构隧道双层衬砌三维实体非连续接触模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(2): 303 – 311. (WANG Shi-min, YU Qing-yang, PENG Bo, et al. Three-dimensional discontinuous contact model for shield tunnels with double-layer lining based on plastic-damage model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(2): 303 – 311. (in Chinese))
- [7] 李宇杰, 王梦恕, 徐会杰, 等. 纤维布补强地铁隧道结构的数值分析[J]. 土木工程学报, 2014, **47**(8): 138 – 144. (LI Yu-jie, WANG Meng-shu, XU Hui-jie, et al. Numerical analysis of metro tunnel structure reinforced with fiber cloth material[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, **47**(8): 138 – 144. (in Chinese))
- [8] 陈仁朋, 鲁 立, 张 阳, 等. 盾构管片UHPC加固技术及力学性能分析[J]. 工程力学, 2019, **36**(11): 41 – 49. (CHEN Ren-peng, LU Li, ZHANG Yang, et al. Reinforced technology and mechanical properties of shield tunnel lining with uhpc[J]. Engineering Mechanics, 2019, **36**(11): 41 – 49. (in Chinese))
- [9] 毕湘利, 柳 献, 王秀志, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, **47**(11): 128 – 137. (BI Xiang-li, LIU Xian, WANG Xiu-zhi, et al. Experimental study on the ultimate load-bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by steel plates[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, **47**(11): 128 – 137. (in Chinese))
- [10] 刘学增, 赖浩然, 桑运龙, 等. 不同变形条件下盾构隧道粘钢加固效果的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(11): 2115 – 2123. (LIU Xue-zeng, LAI Hao-ran, SANG Yun-long, et al. Model tests on effect of bonded steel plate reinforcement of shield tunnels under different deformation conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(11): 2115 – 2123. (in Chinese))
- [11] ZHAI W Z, CHAPMAN D, ZHANG D M, et al. Experimental study on the effectiveness of strengthening over-deformed segmental tunnel lining by steel plates[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **104**: 103530.
- [12] 柳 献, 蒋子捷, 刘树亚. 钢板-混凝土组合结构加固盾构隧道衬砌结构极限承载力足尺试验[J]. 中国公路学报, 2020, **33**(1): 128 – 137. (LIU Xian, JIANG Zi-jie, LIU Shu-ya. Experiment of deformed shield tunnels strengthened by steel plate-concrete composite structure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, **33**(1): 128 – 137. (in Chinese))
- [13] 翟五洲, 翟一欣, 张东明, 等. 盾构隧道钢板加固衬砌管片环缝抗剪性能数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(增刊 2): 235 – 239. (ZHAI Wu-zhou, ZHAI Yi-xin, ZHANG Dong-ming, et al. Numerical study on shearing performance of steel plate strengthened circumferential joints of segmental tunnel linings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(S2): 235 – 239. (in Chinese))
- [14] 刘庭金, 黄鸿浩, 许 饶, 等. 粘贴钢板加固地铁盾构隧道承载性能研究[J]. 中国公路学报, 2017, **30**(8): 91 – 99. (LIU Ting-jin, HUANG Hong-hao, XU Rao, et al. Research on load-bearing capacity of metro shield tunnel lining strengthened by bonded steel plates[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, **30**(8): 91 – 99. (in Chinese))
- [15] ZHAO H L, LIU X, BAO Y H, et al. Simplified nonlinear simulation of shield tunnel lining reinforced by epoxy bonded steel plates[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **51**: 362 – 371.
- [16] Dassault Systemes Simulia Corp. Abaqus 2020 Documentation[S]. 2020. Providence, RI, USA.
- [17] BENZEGGAGH M L, KENANE M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus[J]. Composites Science and Technology, 1996, **56**(4): 439 – 449.
- [18] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2002[S]. 2002. (Concrete Structure Design Code: GB 50010—2002[S]. 2002. (in Chinese))