

# 基于颗粒离散元的碳纤维混凝土盾构管片 变形及裂纹扩展特性研究\*

赵立财<sup>1,2</sup>

(1. 中铁十九局集团第三工程有限公司, 110136, 沈阳; 2. 台湾科技大学工程学院, 106335, 台北)

**摘 要** [目的] 南京地铁 7 号线晓庄站—万寿站区间盾构隧道处于岩层破碎、地下水发育处, 该区间地质条件极其复杂, 对预制管片抗裂和抗压强度要求较高, 而普通混凝土管片无法满足结构抗裂要求, 因此提出在混凝土中掺入碳纤维, 并对碳纤维混凝土盾构管片变形及裂纹扩展特性进行深入研究。[方法] 基于颗粒离散元理论, 通过单轴 DEM (离散元方法) 试验的应力-应变曲线确定混凝土材料平行黏结接触模型的细观强度参数, 建立碳纤维混凝土管片抗弯强度试验数值模型, 对碳纤维混凝土管片的强度、破坏特征、裂纹扩展模式及变形等进行了分析。[结果及结论] 抗弯强度试验数值模拟结果表明: 在不同加载工况下, 碳纤维对混凝土管片强度的提高作用有限, 但碳纤维结构具有较大抗拉强度, 显著提高了管片的抗变形和抗断裂能力; 掺入碳纤维的混凝土管片在加载过程中, 其底部先产生 1 条竖向张拉裂纹, 随着加载的继续, 底部产生 3 条竖向张拉裂纹且未出现压溃现象。当加载达到混凝土极限压应力时, 管片出现了压缩裂纹; 随着压缩裂纹与张拉裂纹贯穿, 此时管片将会达到极限强度破坏状态。在加载过程中, 碳纤维混凝土管片中存在变形最小区域, 随着加载的持续, 其变形最小区域从管片接头端部逐渐向压头位置转移。由此可见, 碳纤维混凝土管片能够满足岩层破碎和地下水发育区间隧道的安全性和稳定性要求。

**关键词** 城市轨道交通; 盾构管片; 碳纤维混凝土; 变形特性; 裂纹扩展特性; 颗粒离散元

**中图分类号** TU528.572:U451<sup>+</sup>.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.08.029

## Deformation and Crack Propagation Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Concrete Shield Segments Based on Particle Discrete Element

ZHAO Licai<sup>1,2</sup>

(1. The Third Engineering Co., Ltd., China Railway 19th Bureau Group Co., Ltd., 110136, Shenyang, China; 2. College of Engineering, Taiwan University of Science and Tech-

nology, 106335, Taipei, China)

**Abstract** [Objective] The Xiaozhuang Station – Wanshou Station interval shield tunnel is located in a highly fractured rock layer with developed groundwater, facing extremely complex geological conditions and requiring relatively high crack resistance and compressive strength for prefabricated segments. However, ordinary concrete segments cannot meet structural crack resistance requirements. It is suggested to incorporate carbon fibers into the concrete and carry out in-depth study on the deformation and crack propagation characteristics of carbon fiber reinforced concrete shield segments. [Method] Based on particle discrete element theory, the microscopic strength parameters of the concrete material parallel bond contact model are determined through the stress-strain curve of a uniaxial DEM (discrete element method) test. A numerical model for the bending strength test of carbon fiber reinforced concrete segments is established to analyze the strength, failure characteristics, crack propagation mode, and deformation of the above segments. [Result & Conclusion] Numerical simulation results of the bending strength test show that under different loading conditions, the improvement effect of carbon fibers to concrete segment strength is limited. However, the carbon fiber structure has significant tensile strength, which notably enhances the deformation and fracture resistance of the segments. During the loading process, the carbon fiber reinforced concrete segments initially develop a vertical tensile crack at the bottom. As the loading continues, three vertical tensile cracks are generated at the bottom without crushing collapse phenomenon occurring yet, but when the loading reaches the ultimate compressive stress of the concrete, compressive cracks appear in segments. As the compressive cracks penetrate the tensile cracks, the segments will reach the ultimate strength failure state. Throughout the loading process, there exists a region with minimal deformation within the carbon fiber reinforced concrete segment. As the loading continues, this region gradu-

\* 辽宁省“兴辽英才计划”青年拔尖人才资助项目(XLYC2007146); 中国铁建股份有限公司科技研究开发计划项目(2020-C20)

ally shifts from segment joint end to loading head position. It is observed that carbon fiber reinforced concrete segments can meet the safety and stability requirements of interval tunnels in fractured rock layer with developed groundwater.

**Key words** urban rail transit; shield segment; carbon fiber concrete; deformation characteristics; crack propagation characteristics; particle discrete element

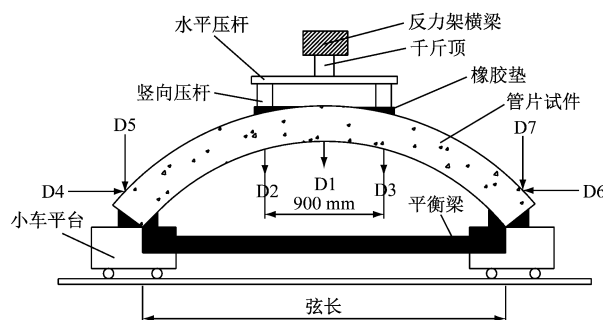
盾构隧道通常使用的是普通混凝土预制管片,由于管片在设计 and 制造过程中需综合考虑其变形强度、抗裂性及抗渗性等因素,而普通混凝土管片由于其抗拉强度较低,在地下土、水的综合作用下易出现张拉裂纹,导致水体易渗透至隧道内部空间。目前,研究发现,通过添加不同种类纤维可有效提高普通混凝土管片的变形强度与抗裂特性。文献[1-2]研究了掺入钢纤维后能有效提高混凝土结构的强度,也能在一定程度上提高混凝土的韧性。文献[3]研究了聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维及混杂纤维均在一定程度上能提高混凝土的抗裂性能,其中聚丙烯纤维和聚乙烯醇纤维与混凝土的包裹性差,易脱落。文献[4-5]从控制城市轨道交通建造成本角度分析了钢纤维盾构管片的优势,发现掺入钢纤维的管片在提高其承载强度的同时,能有效降低运营期间成本。文献[6]通过室内大型缩尺试验研究了钢纤维混凝土管片的变形强度,以及接头处的内力和弯矩,着重分析了钢纤维混凝土的裂纹扩展和接头强度等的特性,提出钢纤维能有效提高管片的抗裂特性。文献[7-8]研究了不同长度碳纤维对混凝土抗弯强度的影响,分析了碳纤维长度对混凝土抗折强度的影响较大,但对抗压强度的提高极其有限。

综上所述,目前国内外较多学者研究了掺入不同种类纤维工况下的管片变形和强度特性。由于管片模型室内试验研究工作量大,同时不易从细观角度观察其破坏情况,本文首次采用颗粒离散元 PFC(颗粒流程程序)理论,基于力-位移准则和运动法则,在管片混凝土中掺入适量碳纤维,建立预制碳纤维混凝土管片抗弯强度试验数值模型,从宏观和细微观等角度揭示不同加载工况下掺入碳纤维的混凝土管片力学变形机制以及裂纹扩展行为。

## 1 盾构管片抗弯强度试验

南京地铁7号线晓庄站一万寿站盾构区间位于

强-中风化泥岩层中,局部坳沟内分布有粉质黏土,局部岩层破碎、裂隙发育处可能存在丰富的地下水,对施工产生不利影响。该盾构区间共需4800环管片(含负环和始发环),目前3850环预制管片已施工完成,每环管片由9块管片组成。由于该区间地质条件极其复杂,对预制管片抗裂和抗压强度要求较高,因此每个单元的预制管片各项力学指标必须达标,以确保后期城市轨道交通运营安全。预制碳纤维混凝土管片(标准块)试件的截面尺寸为200 mm(厚度)×1200 mm(宽度)×1500 mm(长度),弧度为67.5°。预制碳纤维混凝土管片试件室内抗弯强度试验见图1。将预制碳纤维混凝土管片试件平稳地放置在试验架上,采用千斤顶分配梁系统施加荷载,加荷点间距为900 mm。每次施加荷载10 kN,荷载施加完成后静停1 min,记录测试仪显示的数据,包括:管片试件的中心点和加载点的位移,以及管片端头的水平位移。当第一条裂缝出现后,静停10 min 观察裂缝的扩展情况,并取本级荷载值为开裂荷载实测值。最终测得的碳纤维混凝土管片试件的极限抗压强度为845 kN。



注: D1—D3 为竖向位移计; D4—D7 为水平位移计。

图1 预制碳纤维混凝土管片试件室内抗弯强度试验示意图

Fig. 1 Diagram of indoor bending strength test for prefabricated carbon fiber reinforced concrete segment specimen

## 2 颗粒离散元理论与细观强度参数的确定

### 2.1 颗粒离散元理论

颗粒离散元的理论核心包括与运动特性相关的颗粒单元、与颗粒单元所受合力和力矩紧密相关的接触单元,以及控制边界加载条件的墙单元等三部分内容。颗粒单元包括不考虑变形的圆球颗粒,不考虑变形、考虑形状不规则性的刚性簇单元,以及既考虑变形破坏又考虑形状的不规则性的柔性簇单元。颗粒离散元模型可从大变形和细微观角

度揭示该模型的变形和受力特点<sup>[9-10]</sup>。

### 2.1.1 力-位移准则

在颗粒离散元模型中,颗粒之间的相互作用力通过接触模型来描述,作用于接触模型的力由切向接触力和法向接触力组成。结合本构模型,可得到作用于颗粒单元  $i$  上的合力和合力矩:

$$F_i = F_{i,n} + F_{i,s} \quad (1)$$

$$F_{i,n} = k_n U_i \quad (2)$$

$$F_{i,s} = F_{i,s,rot} + \Delta F_{i,s} \quad (3)$$

$$\Delta F_{i,s} = -k_s \Delta U_{i,s} \quad (4)$$

式中:

$F_i$ ——颗粒单元  $i$  的接触力合力;

$F_{i,n}$ ——颗粒单元  $i$  的法向接触力;

$F_{i,s}$ ——颗粒单元  $i$  的切向接触力;

$F_{i,s,rot}$ ——颗粒单元  $i$  旋转破坏时的切向接触力;

$U_i$ ——颗粒单元  $i$  的相对总位移;

$k_n$ ——法向接触刚度;

$k_s$ ——切向接触刚度;

$\Delta F_{i,s}$ ——颗粒单元  $i$  的切向接触力增量;

$\Delta U_{i,s}$ ——颗粒单元  $i$  的切向位移增量。

### 2.1.2 运动法则

通过力-位移准则确定了作用于颗粒单元上的合力和合力矩。根据运动法则,可建立颗粒单元平移和旋转运动方程:

$$\ddot{u}_i(t_0) = \frac{F_i}{m_i} \quad (5)$$

$$\ddot{\omega}_i(t_0) = \frac{M_i}{I_i} \quad (6)$$

式中:

$M_i$ —— $t_0$ 时刻颗粒单元  $i$  的合力矩;

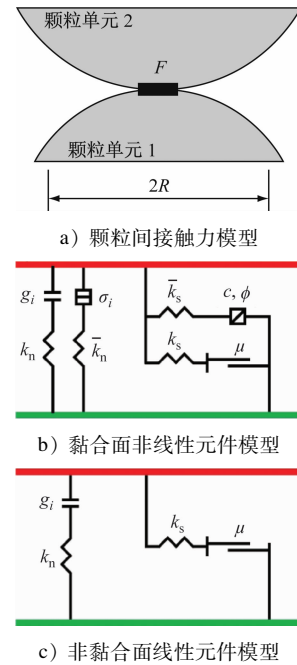
$\ddot{u}_i(t_0)$ 、 $\ddot{\omega}_i(t_0)$ —— $t_0$ 时刻颗粒单元  $i$  的平移加速度和旋转角加速度;

$m_i$ ——颗粒单元  $i$  的质量;

$I_i$ —— $t_0$ 时刻颗粒单元  $i$  的转动惯量。

将通过运动法则计算得到的位置信息,代入力-位移准则,求得作用于颗粒单元上的合力和合力矩,如此反复。颗粒离散元模型针对材料的不同属性需采用不同的接触模型。其中:线性模型能很好地反映砂土摩擦属性;接触模型的细观强度参数、刚度及摩擦系数等与宏观砂土的摩擦角和弹性模量相关;接触黏结模型能很好地反映黏性土等土体

的属性,其不考虑转动影响,考虑土体的抗拉、抗压及摩擦属性;平行黏结接触模型(见图2)综合考虑抗转动和抗拉、抗压强度的影响,能够模拟岩石和混凝土等强度较高的材料,从而揭示材料内部损伤及裂纹发展规律。



注: $F$ 为颗粒单元1、2间的接触力合力; $g_i$ 为颗粒单元  $i$  的自重; $\sigma_i$ 为颗粒单元  $i$  的轴向拉应力; $c$ 、 $\phi$ 为颗粒单元的黏聚力和内摩擦角; $\mu$ 为颗粒单元间的摩擦因数; $\bar{k}_n$ 为荷载作用下的法向接触刚度; $\bar{k}_s$ 为荷载作用下的切向接触刚度; $R$ 为颗粒单元半径。

图2 平行黏结接触模型

Fig.2 Parallel bond contact model

颗粒离散元细观强度参数与材料的宏观强度参数非一一对应,其中平行黏结接触模型能较好地反映混凝土材料的力学和变形特性。平行黏结接触模型见图2。当颗粒单元所受的荷载超过极限荷载时,平行黏结接触模型中的法向接触强度和切向接触强度同时降为0,此时该模型退化为线性接触模型;颗粒单元所受的力矩与转角相关,当达到抗弯极限,胶结破坏,扭矩跌落至0。

### 2.2 细观强度参数的确定

基于颗粒离散元理论,建立细观强度参数与宏观强度参数的对应关系。碳纤维混凝土材料采用平行黏结接触模型,该模型能较好地还原材料抗拉及抗压属性。建立标准的尺寸为50 mm × 100 mm单轴试样以及直径为50 mm的巴西试样,标定峰值强度、弹性模量及抗拉强度等参数,不断调试平行



黏结接触模型的变形模量、法向接触强度及切向接触强度,得到 DEM 试验结果与室内试验结果。混凝土材料宏观强度参数对比见表 1。由表 1 可见:当室内试验和 DEM(离散元方法)试验的误差控制在 5% 以内时,可认为标定结果吻合度较高。

混凝土在 DEM 试验下的单轴应力-应变曲线和破坏特征云图见图 3 和图 4。由图 3 和图 4 可知:混

表 1 混凝土材料宏观强度参数对比

Tab. 1 Comparison of concrete material macroscopic strength parameters

试验	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比
室内试验	34.5	50.0	2.80	0.2
DEM 试验	33.9	50.8	2.86	0.2

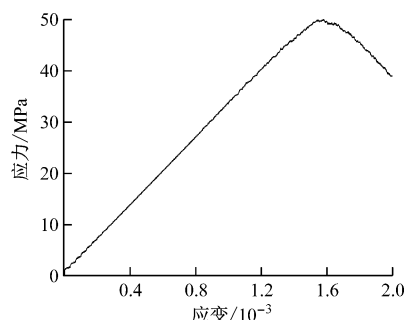


图 3 混凝土在 DEM 试验下的单轴应力-应变曲线

Fig. 3 Concrete uniaxial stress-strain curve in DEM test

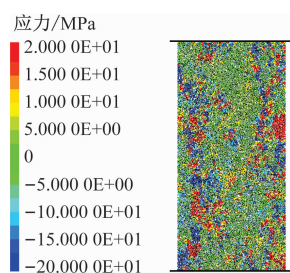


图 4 混凝土在 DEM 试验下的破坏特征云图

Fig. 4 Nephogram of concrete failure characteristics in DEM test

凝土材料的单轴应力-应变曲线经历了明显的弹性变形、塑性变形及残余强度阶段;混凝土破裂面上呈现明显的双剪破坏特点。通过重复 DEM 单轴试验,最终得到混凝土材料的弹性模量为 4.02 GPa,抗压强度为 26.84 MPa,这与室内试验得出的强度参数相差较小,满足标准要求。混凝土材料细观强度参数见表 2 所示。碳纤维与混凝土基体之间的接触参数极其复杂,很难通过试验获取,本文取混凝土与碳纤维界面间的剪切强度比值为 7:1。

基于颗粒离散元理论,数值模型中无法直接考

虑添加的钢筋的作用。本文通过标定得到的钢筋等效强度,以及增强混凝土单元间的接触强度,来模拟添加钢筋的效果。钢筋宏观和细观强度参数见表 3。

表 2 混凝土材料细观强度参数

Tab. 2 Concrete material mesoscopic strength parameters

参数	取值
接触模量/GPa	45.5
法向接触强度/MPa	22.4
刚度比	1.8
摩擦因数	0.55
半径乘子	1.0

表 3 钢筋宏观和细观强度参数

Tab. 3 Macroscopic and mesoscopic parameters of rebar

参数	取值
拉伸模量/GPa	210
抗拉强度/MPa	500
接触模量/MPa	228.8
法向黏结强度/MPa	2 100

### 3 基于颗粒离散元理论的数值模型建立

与传统的普通混凝土结构不同,本文基于颗粒离散元理论,考虑了碳纤维结构,在此基础上结合实际工程建立碳纤维混凝土管片抗弯强度试验数值模型<sup>[11]</sup>。为了方便与室内试验进行对比研究,本文采用与室内试验相同的碳纤维相对体积质量和混凝土配合比。其中碳纤维密度为 15 kg/m<sup>3</sup> 时,可在保证管片较高抗压强度及较好抗裂性的前提下有效降低成本。碳纤维混凝土管片的配合比<sup>[12]</sup>设计如下:水泥 345 kg/m<sup>3</sup>,水 142 kg/m<sup>3</sup>,砂 790 kg/m<sup>3</sup>,石子 1 032 kg/m<sup>3</sup>,粉煤灰 84 kg/m<sup>3</sup>,减水剂 8.45 kg/m<sup>3</sup>,碳纤维 15 kg/m<sup>3</sup>。

#### 3.1 碳纤维结构数值模型的建立

根据实际工程中碳纤维的长度和宽度,结合颗粒离散元理论,确定碳纤维结构数值模型中碳纤维结构的宽度为 1.5 mm,长度为 20.0 mm。通过 Fish 程序确定碳纤维小球坐标,考虑到碳纤维的可变形特性,两个小球正好接触不重叠。基于 Fish 程序中的 Clump template 模板生成固定尺寸的碳纤维小球模板,并确保生成的碳纤维不会重叠;根据该模板,在碳纤维结构数值模型空间内按碳纤维特定掺量(15 kg/m<sup>3</sup>)随机生成碳纤维颗粒簇,并保证碳纤维整体为刚性体;生成碳纤维后,将其与混凝土进行混合。通过遍历所有刚性体碳纤维颗粒簇并获取

其小球坐标和半径,使用此信息将刚性体碳纤维颗粒簇转换为可变形的碳纤维颗粒簇。碳纤维结构数值模型见图 5。

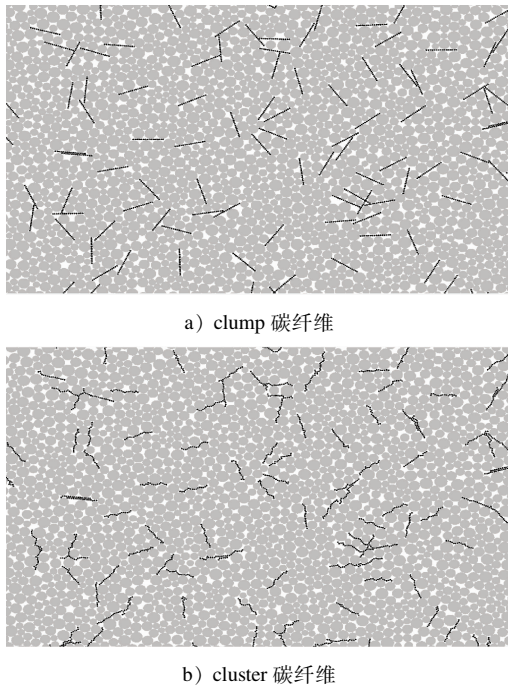
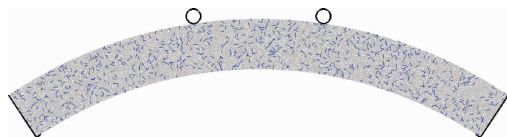


图 5 碳纤维结构数值模型

Fig. 5 Carbon fiber structure numerical model

### 3.2 碳纤维混凝土管片抗弯强度试验数值模型的建立

将上述建立的碳纤维结构嵌入混凝土管片抗弯强度试验数值模型中。掺入碳纤维的混凝土管片抗弯强度试验数值模型见图 6 所示。



注:○为加载点,余类同。

图 6 碳纤维混凝土管片抗弯强度试验数值模型

Fig. 6 Numerical model of carbon fiber reinforced concrete segment bending strength test

预制管片内径为 2.75 m,外径为 3.10 m,管片厚度为 0.35 m,管片角度为 68°,采用双点加载方式,加载点间距为 0.90 m。混凝土结构采用圆球单元模拟,碳纤维长度为 20 mm,直径为 1.5 mm,碳纤维掺入量为 15 kg/m<sup>3</sup>,根据计算得出碳纤维掺入数目为 341 个。碳纤维混凝土管片抗弯强度试验数值模型两端采用墙单元约束其法向边界。在加载过程中,不断监测加载点的荷载和位移。在管片安装

过程中,利用螺栓将纵向和环向管片进行连接,其接头处刚度和接头方式对管片变形与受力影响较大。综合考虑颗粒离散元理论的计算特点,本文采用铰接头结构对管片接头进行模拟,其接头刚度与碳纤维混凝土管片刚度相一致。预制管片两端采用墙单元约束其法向边界,设置墙单元与管片单元间的接触强度参数与碳纤维混凝土管片结构本身的强度参数一致。

$$n = \frac{\rho r}{W} S \quad (7)$$

式中:

$n$ ——碳纤维数目;

$\rho$ ——碳纤维密度,一般取 1 750 ~ 1 800 kg/m<sup>3</sup>;

$W$ ——碳纤维掺入量;

$S$ ——管片面积;

$r$ ——管片内径。

## 4 计算结果分析

### 4.1 碳纤维混凝土管片强度与破坏特征

图 7 为掺入碳纤维与不掺入碳纤维混凝土管片荷载-位移曲线。由图 7 可见:两条曲线均处于弹性变形阶段、弹塑性变形阶段及强度软化阶段;掺入碳纤维的混凝土管片荷载-位移曲线相较不掺入碳纤维的混凝土管片上升缓慢;掺入碳纤维的混凝土管片抗压强度较高,其极限强度为 875 kN,不掺入碳纤维的混凝土管片极限强度为 786 kN,由此可见,碳纤维对混凝土管片强度有一定提高作用,但作用有限;碳纤维混凝土抗压强度数值模拟值与试验值误差在 5% 以内,说明了数值模拟的准确性;掺入碳纤维的混凝土管片峰值位移试验值为 3.1 mm,而不掺入碳纤维的混凝土管片峰值位移试验值为 1.78 mm 左右,由此可见,碳纤维的加入在很大程度上提高了混凝土管片的抗变形能力。

图 8 为掺入碳纤维与不掺入碳纤维混凝土管片在抗弯强度试验下的破坏特征。由图 8 可见:抗弯强度试验中,混凝土管片的主要破坏位置位于接头处,这使得荷载正下方出现张拉裂纹,最终导致管片接头间混凝土压碎;管片接头处存在应力集中现象,在管片拼接过程中需重点关注;掺入碳纤维的混凝土能有效抑制管片接头处裂纹的扩展,从而提高接头处强度和变形;加载后期管片接头中间部分出现横向张拉裂纹;碳纤维的掺入,极大地提高了

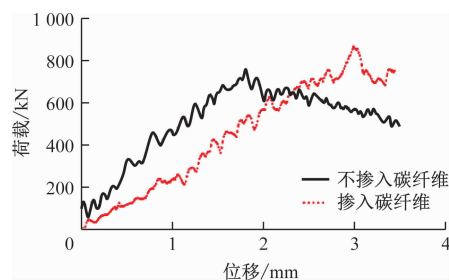


图7 掺入碳纤维及不掺入碳纤维混凝土管片荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curves of concrete segments with and without carbon fiber

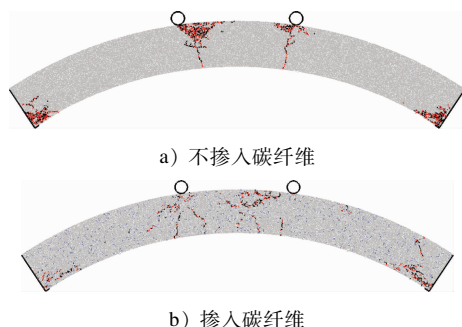


图8 掺入碳纤维及不掺入碳纤维混凝土管片在抗弯强度试验下的破坏特征

Fig. 8 Failure characteristics of concrete segments with and without carbon fiber in bending strength test

混凝土内部的抗拉能力,抑制了混凝土内部的横向裂纹产生,使得裂纹主要沿竖向发展,有效减少了水分的渗入;碳纤维的掺入对混凝土管片强度起到一定提高作用,减少了管片压头位置处裂纹的产生

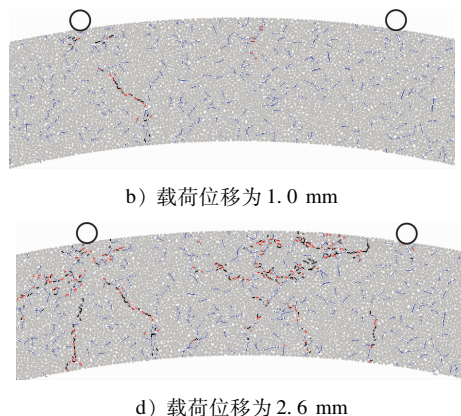
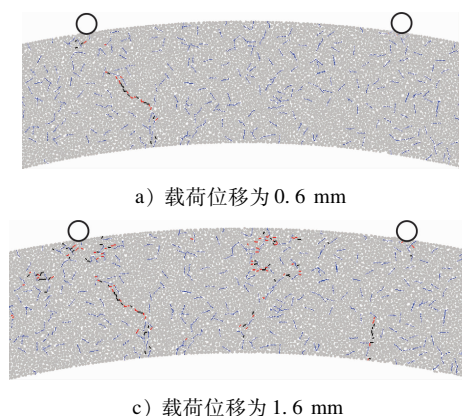


图9 不同荷载位移下碳纤维混凝土管片裂纹扩展特征

Fig. 9 Crack propagation characteristics of carbon fiber reinforced concrete segment crack propagation characteristics under different displacement and loading conditions

#### 4.3 碳纤维混凝土管片变形分析

不同荷载位移下掺入碳纤维的混凝土管片变形分布云图见图10。由图10可见:随着荷载位移

及其扩展贯穿。

#### 4.2 碳纤维混凝土裂纹扩展模式

不同荷载位移下碳纤维混凝土管片裂纹扩展特征见图9。由图9可见:

1) 荷载位移为0.6 mm时,掺入碳纤维的混凝土管片底部先出现1条竖向张拉裂纹;随着位移荷载的增加,碳纤维混凝土管片始终具有较强的支撑能力。

2) 荷载位移为1.6 mm时,混凝土管片裂纹的进一步发展,使得其内部部分纤维产生裂纹。当裂纹发展到碳纤维结构时,由于碳纤维能提高混凝土结构的抗裂性能,使得碳纤维横跨裂纹两侧的管片破坏较小,因此碳纤维结构能有效抑制裂纹扩展。

3) 荷载位移为2.6 mm时,出现3条由管片底部发展的张拉裂纹。随着该裂纹的继续发展,管片接头附近的混凝土强度逐渐达到极限值,张拉裂纹与压缩裂纹逐渐贯穿,碳纤维混凝土强度亦达到极限值。

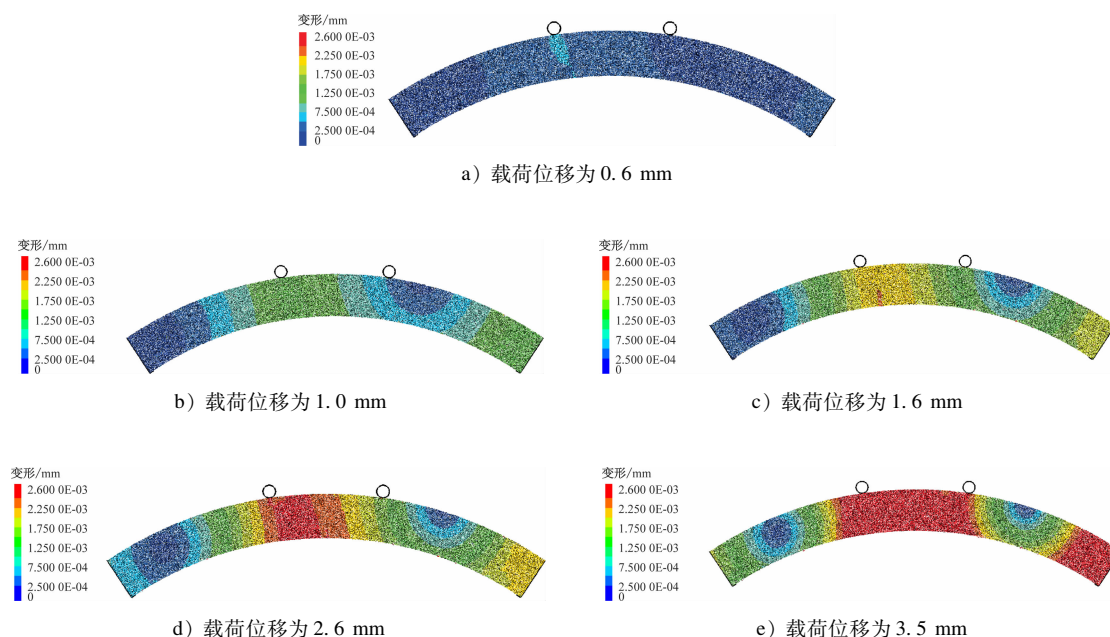
通过上述裂纹扩展模式分析发现:掺入碳纤维的混凝土管片在加载过程中,其底部先产生1条竖向张拉裂纹,随着加载继续产生3条竖向张拉裂纹;碳纤维混凝土能有效抑制裂纹的扩展,随着混凝土达到极限压应力,管片出现压缩裂纹,随着压缩裂纹与张拉裂纹贯穿,混凝土管片达到极限强度破坏状态。

增大,管片加载部位位移逐渐增大;在加载前期,即荷载位移不大于1.0 mm时,管片加载点附近及其中心下部的变形均较大;当荷载位移超过1.0 mm



时,管片接头端部会产生向上翘曲变形且变形值较大,这也是导致端部裂纹产生的主要原因;在管片加载过程中,管片中存在变形最小区域,随着加载

的持续,变形最小区域从管片接头端部逐渐向压头位置转移,导致接头处破损严重,此时管片呈现弯折破坏状态。



注:图中位移均为合位移。

图 10 不同荷载位移下掺入碳纤维的混凝土管片变形分布云图

Fig. 10 Deformation distribution nephogram of carbon fiber reinforced concrete segment under different displacement and loading conditions

## 5 结语

1) 建立了掺入适量碳纤维与不掺入碳纤维的混凝土管片模型,通过研究发现碳纤维对混凝土管片强度的提高作用有限,但由于碳纤维结构具有较大的抗拉强度,极大提高了管片的抗变形能力。

2) 在每立方米混凝土管片中掺入 15 kg 碳纤维,在该管片加载过程中其底部先产生 1 条竖向张拉裂纹,随着加载的继续产生 3 条竖向张拉裂纹。碳纤维混凝土能有效抑制裂纹的扩展,随着混凝土达到极限压应力,管片出现压缩裂纹,随着压缩裂纹与张拉裂纹贯穿,混凝土管片达到极限强度破坏状态。

3) 在掺入碳纤维的混凝土管片加载过程中,管片中存在变形最小区域,随着加载的持续,变形最小区域从管片接头端部逐渐向压头位置转移,导致接头处破损严重,此时管片呈现弯折破坏状态。

## 参考文献

[1] 孙敏. 碳纤维增强混凝土的腐蚀及防护研究[D]. 苏州: 苏

州大学, 2011.

SUN Min. Corrosion and protection of steel fiber reinforced concrete[D]. Suzhou: Soochow University, 2011.

[2] 宁博, 欧阳东, 易宁, 等. 混杂纤维混凝土在地铁管片中的应用[J]. 混凝土与水泥制品, 2011(1): 50.

NING Bo, OUYANG Dong, YI Ning, et al. Applications of hybrid fibers reinforced concrete for subway concrete segment[J]. China Concrete and Cement Products, 2011(1): 50.

[3] 陈润锋, 张国防, 顾国芳. 我国合成纤维混凝土研究与应用现状[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(2): 167.

CHEN Runfeng, ZHANG Guofang, GU Guofang. State of study and application of synthetic fibers reinforced concrete in China[J]. Journal of Building Materials, 2001, 4(2): 167.

[4] 荣建林, 闻毓民, 吴强. 钢纤维混凝土盾构管片可行性分析[J]. 四川建筑, 2006, 26(6): 158.

RONG Jianlin, WEN Yumin, WU Qiang. Feasibility analysis of steel fiber reinforced concrete shield segment[J]. Sichuan Architecture, 2006, 26(6): 158.

[5] 曹玉新. 盾构管片钢纤维混凝土配合比的设计优化[J]. 工业建筑, 2020, 50(8): 101.

CAO Yuxin. Proportion optimization design of steel fiber reinforced concrete mix for tunnel segments[J]. Industrial Construction, 2020, 50(8): 101.

[6] 龚琛杰, 丁文其. 盾构隧道钢纤维混凝土管片接头极限承载

- 力试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 134.
- GONG Chenjie, DING Wenqi. Experimental investigation on ultimate bearing capacity of steel fiber reinforced concrete segment joints in shield tunnels[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 134.
- [7] 彭勃, 陈志源, 王立华. CFRC 中碳纤维长度分布对强度和电阻率的影响[J]. 建筑材料学报, 2002, 5(3): 235.
- PENG Bo, CHEN Zhiyuan, WANG Lihua. Length distribution of carbon fibers in CFRC and its influence on the resistivity and strength[J]. Journal of Building Materials, 2002, 5(3): 235.
- [8] 周乐, 王晓初, 刘洪涛. 碳纤维混凝土应力-应变曲线试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 200.
- ZHOU Le, WANG Xiaochu, LIU Hongtao. Experimental study of stress-strain curve of carbon fiber reinforced concrete[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 200.
- [9] 任传军, 孙家瑛, 施惠生, 等. 纤维增强沥青混凝土路用性能研究[J]. 公路, 2006, 51(2): 148.
- REN Chuanjun, SUN Jiaying, SHI Huisheng, et al. A study on asphalt concrete road service properties improved with polymer fiber[J]. Highway, 2006, 51(2): 148.
- [10] 李德明, 董占武, 温书亿, 等. 基于裂后线性软化模型的钢筋碳纤维混凝土盾构管片应用研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(1): 148.
- LI Deming, DONG Zhanwu, WEN Shuyi, et al. Research on the application of steel fiber reinforced concrete segment in shield tunnelling based on the post-cracking linear softening model[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(1): 148.
- [11] 徐振, 李德明, 王彬, 等. 硬岩隧道纯碳纤维混凝土管片应用[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(5): 44.
- XU Zhen, LI Deming, WANG Bin, et al. Application of pure steel fiber concrete segment in hard rock tunnel[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2020, 50(5): 44.
- [12] 董晓农, 李萌, 孙志恒, 等. 预应力钢筒混凝土管内壁复式碳纤维加固试验与计算分析[J]. 水利学报, 2019, 50(6): 780.
- DONG Xiaonong, LI Meng, SUN Zhiheng, et al. Laboratory testing and calculation analysis of reinforcement for prestressed concrete cylinder pipe with compound carbon fiber[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(6): 780.
- 收稿日期: 2022-03-21 修回日期: 2022-08-26 出版日期: 2024-08-10  
Received: 2022-03-21 Revised: 2022-08-26 Published: 2024-08-10  
· 作者: 赵立财, 正高级工程师, zhaolical1314@foxmail.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

#### (上接第 165 页)

- LUO Zejun, ZHANG Qingzhao, HE Yitao, et al. Calculation of the double-layer lining segment structure of large-diameter shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(5): 79.
- [6] 王伟. 杭州地铁大直径越江隧道总体设计关键技术[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(6): 91.
- WANG Wei. Overall design and construction of the large-diameter cross-river tunnel of Hangzhou Metro[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(6): 91.
- [7] 向亮, 王飞, 靳宝成, 等. 黄土深埋大直径盾构隧道围岩压力研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊1): 112.
- XIANG Liang, WANG Fei, JIN Baocheng, et al. Surrounding rock pressure of loess deep large-diameter shield tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 112.
- [8] 章登精, 龚彦峰, 古常友, 等. 南京夹江隧道不同变形模式下结构受力特性分析与控制标准探讨[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 359.
- ZHANG Dengjing, GONG Yanfeng, GU Changyou, et al. Structural mechanical behaviors analysis and control standards of Nanjing Jiajiang Tunnel under different deformation modes[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 359.
- [9] 封坤, 徐凯, 彭祖昭, 等. 大直径盾构隧道拼装过程管片力学响应研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2243.
- FENG Kun, XU Kai, PENG Zuzhao, et al. Mechanical response of large-diameter shield tunnels during assembly[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(12): 2243.
- [10] 武建力, 高抗. 基于可靠度理论的水下大直径盾构隧道耐久性设计[J]. 低温建筑技术, 2020, 42(10): 125.
- WU Jianli, GAO Kang. The durability design of large shield tunnels based on the reliability theory[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020, 42(10): 125.
- 收稿日期: 2022-03-07 修回日期: 2022-04-25 出版日期: 2024-08-10  
Received: 2022-03-07 Revised: 2022-04-25 Published: 2024-08-10  
· 第一作者: 麻凤海, 教授, xkb@vip.163.com  
通信作者: 郑叶琳, 硕士研究生, 996818969@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: [tougao. umt1998. com](http://tougao. umt1998. com)