

DOI: 10.11779/CJGE201710008

# 软弱围岩隧道钢纤维混凝土衬砌承载特性模型试验研究

崔光耀<sup>1</sup>, 王道远<sup>2,3</sup>, 倪嵩陟<sup>1</sup>, 袁金秀<sup>3</sup>, 马军辉<sup>4</sup>, 朱长安<sup>5</sup>

(1. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144; 2. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050091; 3. 河北交通职业技术学院土木工程系, 河北 石家庄 050091; 4. 中铁七局集团郑州工程有限公司, 河南 郑州 450052; 5. 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 为满足软弱围岩隧道开挖后尽快封闭岩面、适应一定变形及提供足够支护力的要求, 通过素混凝土、钢筋混凝土及钢纤维混凝土衬砌力学行为室内模型试验, 对钢纤维混凝土衬砌的承载特性进行研究。研究表明: 钢纤维混凝土衬砌初裂荷载提高了 20%, 极限荷载得到较大提高; 掺入钢纤维后衬砌结构韧性增强, 初裂后仍能抵抗一定变形并较大降低变形速率, 与素混凝土、钢筋混凝土相比可承受更大的变形; 钢纤维混凝土衬砌初裂后承载特性曲线缓慢上升, 至 2 倍初裂荷载时仍无收敛迹象, 素混凝土快速收敛, 钢筋混凝土在一定缓慢上升后快速趋于收敛, 软弱围岩条件下, 钢纤维混凝土初支在一定变形后可与围岩特征曲线相交, 达到围岩-结构稳定状态, 是一种力学性能良好的快速支护材料。研究成果对软弱围岩隧道的设计与施工都具有重要的意义。

**关键词:** 隧道工程; 软弱围岩; 钢纤维混凝土; 承载特性; 模型试验

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2017)10 - 1807 - 07

**作者简介:** 崔光耀(1983 -), 男, 山东莒南人, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程的教学与研究。E-mail: cyao456@163.com。

## Model tests on bearing characteristics of steel fiber-reinforced concrete lining of weak surrounding rock tunnel

CUI Guang-yao<sup>1</sup>, WANG Dao-yuan<sup>2,3</sup>, NI Song-zhi<sup>1</sup>, YUAN Jin-xiu<sup>3</sup>, MA Jun-hui<sup>4</sup>, ZHU Chang-an<sup>5</sup>

(1. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Department of Civil Engineering, Hebei Jiaotong Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050091, China; 4. Zhengzhou Engineering Co., Ltd., China Railway Tieqiju Civil Engineering Group, Zhengzhou 450052, China; 5. Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Provincial Communications Department, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to meet the requirements of weak surrounding rock tunnel to close rock surface as soon as possible after excavation, to adapt to a certain deformation and to provide sufficient supporting force, through the indoor model tests on the mechanical behaviors of linings of plain concrete, reinforced concrete and steel fiber-reinforced concrete, the bearing characteristics of steel fiber-reinforced concrete lining are studied. The results show that the initial cracking load of the steel fiber-reinforced concrete lining increases by 20%, and the ultimate load is greatly improved. The toughness of lining structure is enhanced after mixing steel fiber, the lining structure can still resist certain deformation and reduce the deformation rate greatly after initial cracking, and it can bear greater deformation as compared with the plain concrete and the reinforced concrete. The bearing characteristic curve of steel fiber-reinforced concrete lining rises slowly after the initial cracking, while that of the plain concrete has a rapid convergence, and that of the reinforced concrete exhibits rapid convergence after slow rise. Owing to the weak surrounding rock, the initial support of steel fiber-reinforced concrete can intersect with the characteristic curve of the surrounding rock after a certain deformation so as to reach the stable state of surrounding rock and structure. The study results are of important significance to the design and construction of weak surrounding rock tunnel.

**Key words:** tunnel engineering; weak surrounding rock; steel fiber-reinforced concrete; bearing characteristic; model test

## 0 引 言

随着中国国民经济的持续快速发展, 交通基础工程蓬勃开展起来, 公路和铁路不断向高海拔、高纬度、

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408008, 51478277); 国家十二五科技支撑项目(2012BAK09B06); 河北省自然科学基金项目(E201619002); 四川省应用基础研究计划项目(2014JY0090, 2015JY0166); 北京市教委青年拔尖人才培养计划项目; 北方工业大学科研创新团队(XN018007)

收稿日期: 2016 - 06 - 20

\*通讯作者(E-mail: wtg-888@163.com)

高地震烈度区延伸, 交通工程隧线比不断提高。随着隧道工程向“长、深、地质条件复杂”方向发展, 对衬砌结构的力学性能提出了越来越高的要求。在软弱围岩条件下, 隧道开挖后要求尽快封闭岩面、适应一定变形及提供足够支护力, 喷射钢纤维混凝土施工便捷、力学性能优异, 是普通初支(钢筋网+喷射混凝土)的有利替代支护材料。

国内外有关专家、学者对软弱围岩隧道变形控制、钢纤维混凝土衬砌受力特性进行了一些研究<sup>[1-15]</sup>, 主要有: 软弱围岩隧道的变形特征、掌子面稳定性及控制技术<sup>[1-3]</sup>; 钢纤维混凝土单层衬砌支护数值模拟及模型试验, 钢纤维混凝土二衬防渗、抗裂性能<sup>[4-9]</sup>; 钢纤维混凝土基本力学性能<sup>[10-13]</sup>; 钢纤维混凝土管片基本力学性能及试验等<sup>[14-15]</sup>。综上, 针对钢纤维混凝土衬砌基本力学性能及其单层衬砌理论研究较多, 钢纤维混凝土衬砌承载特性研究较少。本文依托广甘高速杨家山隧道绢云母千枚岩V级围岩段, 对软弱围岩条件下钢纤维混凝土衬砌的承载特性进行试验研究, 这对软弱围岩隧道的变形控制技术及钢纤维混凝土衬砌的设计与施工都具有重要的意义。

## 1 杨家山隧道绢云母千枚岩段概况

### 1.1 绢云母千枚岩岩性

杨家山隧道部分洞身段穿越志留系绢云母千枚岩段, V级围岩, 岩体为鳞片变晶结构、千枚状构造, 较破碎, 抗压强度5~6.5 MPa, 遇水软化, 如图1所示。



图1 绢云母千枚岩

Fig. 1 Sericite phyllite

### 1.2 隧道结构设计

杨家山隧道为马蹄形断面(五心圆), 跨度12.54 m, 高度9.79 m。绢云母千枚岩V级围岩段结构设计: 初期支护为I18钢架@80、 $\phi 8$ 钢筋网、 $\phi 22$ 药卷锚杆30 cm厚C25喷混凝土; 二衬为40 cm厚C25钢混

凝土。拟采用30 cm厚CF25钢纤维混凝土替代原设计( $\phi 8$ 钢筋网+30 cm厚C25喷混凝土)。

## 2 试验方案设计

### 2.1 相似设计

试验在立式钢板模型试验台架内进行, 试验台架尺寸为4.3 m(长) $\times$ 3.7 m(宽) $\times$ 0.5 m(厚), 隧道模型轴线与试验台架厚度方向一致。为尽量消除试验台架的边界效应, 试验台架长度应大于6倍隧道跨度, 故几何相似比取为20。

实际工程CF25钢纤维混凝土弹性模量为 $(2.5\sim 3.15)\times 10^4$  MPa, 模型初支拟采用石膏混合材料模拟, 弹性模量为 $(1.05\sim 1.7)\times 10^3$  MPa, 故弹模相似比取为20。

根据相似准则推导其他参数相似比, 见表1所示。

表1 试验参数相似比

Table 1 Similarity ratios of test parameters		
项目	参数	相似比
材 料 特 性	应力	20
	应变	1
	抗拉强度	20
	抗压强度	20
	弹性模量	20
	泊松比	1
	内摩擦角	1
	重度	1
	黏聚力	20
	几何	几何长度
特性	线位移	20

### 2.2 试验设备及材料

试验设备和材料包括立式钢板模型试验台架(图2)、隧道衬砌模型(厚1.5 cm, 见图3)、围岩相似材料(V级)、压力盒(DYB-1型微型压力传感器, 见图4(a))、位移计(YHD型位移传感器, 见图4(b))及静态应变采集仪等。



图2 试验台架

Fig. 2 Test bench

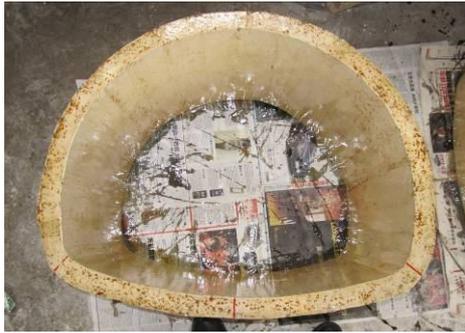


图 3 衬砌模型

Fig. 3 Lining model



(a)微型压力盒

(b)位移计

图 4 测试传感器

Fig. 4 Test sensors

围岩相似材料采用重晶石粉、机油、河砂、石英砂和松香按一定比例配置而成, 围岩物理力学参数经材料性试验测定, 见表 2 所示。

表 2 围岩物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of surrounding rock

材料名称	$E/\text{MPa}$	$\mu$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\text{°})$
原型围岩	1210	0.41	18	120	23
围岩相似材料	58.4	0.43	18.7	5.7	25

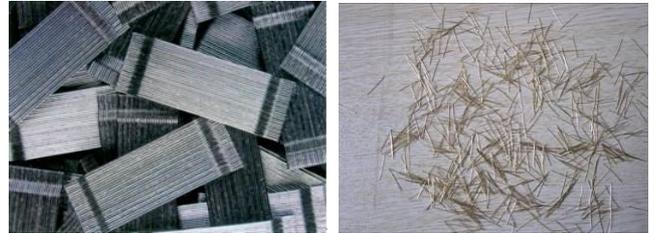
本次试验采用原型钢筋混凝土的强度等级为 C25, 石膏比为 0.686, 钢筋网用双层直径 0.5 mm 成品钢丝网模拟 ( $\phi 0.5$  钢丝可模拟  $\phi 10$  钢筋, 考虑到实际工程中为钢筋骨架, 故本文用于模拟  $\phi 8$  钢筋网), 如图 5 所示。



图 5 双层钢丝网

Fig. 5 Double-wire mesh

本次试验采用原型钢纤维混凝土的强度等级为 CF25, 石膏比为 0.588, 采用特制试验用钢纤维 (水溶性佳密克丝钢纤维) 模拟实际钢纤维, 并适量加入白乳胶用以提高钢纤维与石膏间的黏结力, 如图 6 所示。



(a) 工程用钢纤维

(b) 试验用钢纤维

图 6 钢纤维

Fig. 6 Steel fiber

钢筋混凝土和钢纤维混凝土衬砌物理力学参数经标准试件材料性试验测定, 见表 3 所示。

表 3 衬砌物理力学参数

Table 3 Physico-mechanical parameters of lining

材料名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$E/\text{MPa}$	$\mu$
钢筋混凝土	原型衬砌	25	29500
	相似材料	24.3	1382
钢纤维混凝土	原型衬砌	25	29500
	相似材料	24.6	1360

### 2.3 试验分组及测点布置

试验分为素混凝土衬砌、钢筋混凝土衬砌和钢纤维混凝土衬砌 3 组, 每组 3 个试件。钢纤维掺量根据弯曲韧性试验确定为  $42 \text{ kg/m}^3$ 。

为研究钢纤维混凝土衬砌的受力承载特性, 并考虑到衬砌试件为对称结构、承受对称荷载, 故测点设置于围岩与衬砌结构接触的典型位置 (拱顶、左拱脚、左边墙中及仰拱中)。测点见图 7 所示。

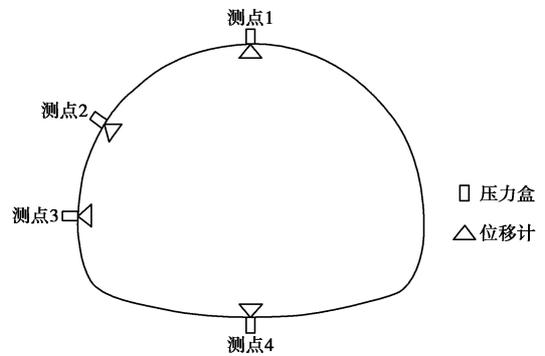


图 7 测点布置

Fig. 7 Arrangement of measuring points

### 2.4 试验过程

(1) 填土至衬砌仰拱底部高度, 每填 20 cm 土进

行夯实，通过控制夯实次数准确的实现围岩相似材料密度的模拟。

(2) 埋设衬砌模型，同时布设微型压力盒和位移计。

(3) 填土至地表指定高度（仰拱以上部分填夯，用碎布塞实衬砌内空间，减小夯实力度、增加夯实次数，夯实至预定刻度线即可进行下一步填夯）。

(4) 通过液压装置将设计好的荷载分级（荷载预估主要根据隧道埋深及围岩重度，2 t级）加置于千斤顶，再通过反力装置和荷载分配梁将荷载均匀的传给围岩。试验台架侧向的大刚度板用以传递被动土压力。

(5) 逐级加载过程至衬砌结构破坏（以裂缝贯通衬砌为标志）为止。

### 3 试验结果及数据分析

#### 3.1 破坏过程

衬砌结构在荷载作用下的破坏规律大致相同：首先，在拱顶或仰拱中部内侧出现第1条纵向裂缝（素混凝土衬砌和钢筋混凝土衬砌初裂荷载均为10 t；钢纤维混凝土衬砌初裂荷载为12 t），随着荷载的增加，裂缝宽度不断增加，并不断向衬砌外侧扩展；接着，衬砌边墙中部或墙脚出现一些细小的纵向裂缝，随着荷载的增加，裂缝宽度和深度也在不断增大；最后，拱顶或仰拱中部纵向裂缝贯穿整个结构，衬砌结构完全破坏。

虽然衬砌结构整体破坏规律相似，但钢纤维混凝土衬砌、钢筋混凝土衬砌及素混凝土衬砌结构破坏的发展过程及结构破坏的最终状态却大不相同。

##### (1) 素混凝土衬砌

素混凝土衬砌在拱顶内侧产生第一条纵向裂缝，随着荷载的增加，在仰拱中部、左右边墙脚出现纵向裂缝，裂缝的宽度和深度迅速扩大，最终拱顶处的第1条裂缝贯穿整个结构，衬砌结构完全破坏，至此衬砌结构裂缝数目为4条。素混凝土衬砌开裂如图8、9所示。

##### (2) 钢筋混凝土衬砌

钢筋混凝土衬砌在仰拱中部内侧产生第一条纵向裂缝，随着荷载的增加，裂缝宽度和深度逐渐增加，随后在拱顶、左右边墙脚出现纵向裂缝；继续增加荷载，在衬砌左右拱腰、边墙、仰拱部位逐渐出现纵向裂缝，至结构破坏时裂缝数目为9条。由于钢筋网的抑制作用，裂缝发展比素混凝土衬砌变的曲折，延缓了衬砌结构的破坏。钢筋混凝土衬砌开裂如图10、11所示。



(a) 第1条裂缝（拱顶） (b) 第2条裂缝（仰拱）



(c) 第3条裂缝（左墙脚）

图8 素混凝土衬砌裂缝

Fig. 8 Lining cracks of plain concrete

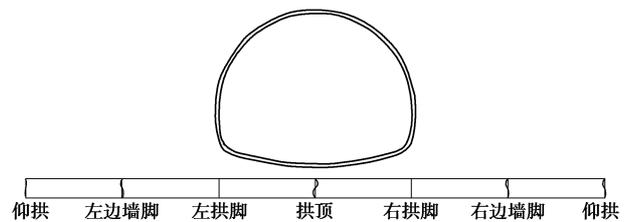


图9 素混凝土衬砌裂缝分布图

Fig. 9 Distribution of lining cracks of plain concrete



(a) 第1条裂缝（仰拱） (b) 第3条裂缝（左墙脚）

图10 钢筋混凝土衬砌裂缝

Fig. 10 Lining cracks of reinforced concrete

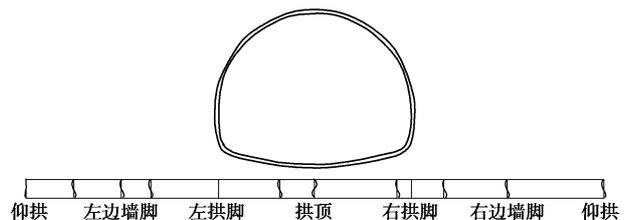


图11 钢筋混凝土衬砌裂缝分布图

Fig. 11 Distribution of lining cracks of reinforced concrete

##### (3) 钢纤维混凝土衬砌

钢纤维混凝土衬砌首先在拱顶出现一条十分细小的纵向裂缝, 随着荷载的增加, 由于钢纤维的抑制作用, 裂缝的深度缓慢增加, 并且裂缝发展的路径也变的曲折, 延缓了结构的破坏, 当达到截面高度的 80% 之后时, 裂缝的深度变化不大而宽度不断增大。荷载继续增加, 在仰拱、拱顶、边墙等部位出现裂缝, 再继续增加荷载, 结构的其它部位也逐渐出现纵向裂缝。最后, 裂缝数目达到 12 条之多, 结构仍没出现贯通裂缝。钢纤维混凝土衬砌开裂如图 12, 13 所示。

钢纤维混凝土衬砌由于钢纤维对结构抗裂性能的贡献, 初裂荷载有所提高 (约 20%)。

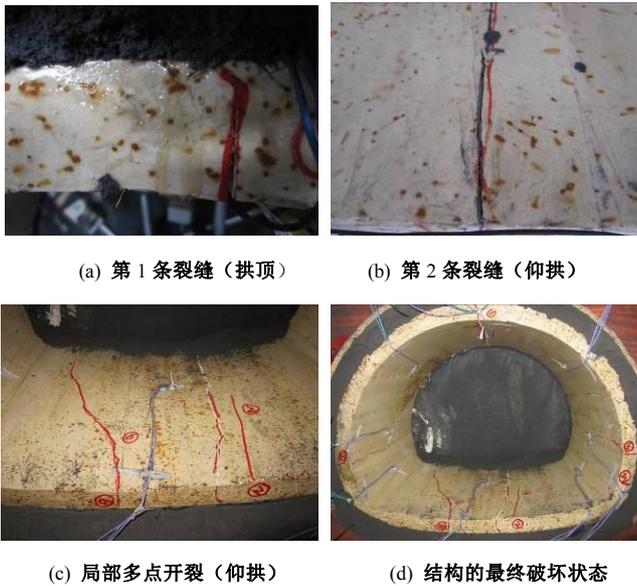


图 12 钢纤维混凝土衬砌裂缝

Fig. 12 Lining cracks of steel fiber-reinforced concrete

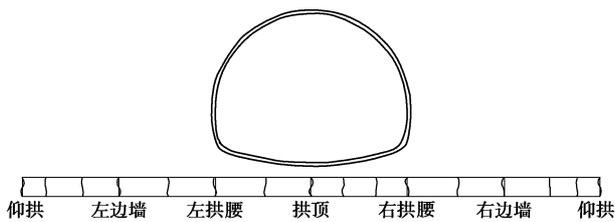


图 13 钢纤维混凝土衬砌裂缝分布图

Fig. 13 Distribution of lining cracks of steel fiber-reinforced concrete

### 3.2 接触压力

提取各测点接触压力 (围岩与衬砌), 绘制接触压力与荷载关系曲线, 如图 14 所示。

由图 13 可知, 实际作用在衬砌结构上的土压力比理论计算值要小 (约为荷载-结构模型理论值的 60%~70%), 荷载由围岩和衬砌结构共同承担。

接触压力随荷载的增加而增加, 当荷载达到初裂荷载时衬砌结构在拱顶或仰拱部位出现裂缝, 接触压

力增长速率放缓。由于钢纤维混凝土具有良好的抗裂性和控制变形能力, 整个衬砌结构受力分布更加均匀, 衬砌开裂后仍可继续承受荷载至 2 倍初裂荷载仍没出现贯通裂缝。

图 14 (c) 中, 素混凝土衬砌和钢筋混凝土衬砌边墙中部接触压力分别在荷载 12 t 和 14 t 时急剧变大, 此时衬砌结构刚出现初裂缝, 断面扁平率突然降低, 边墙部位急剧向围岩方向挤入, 造成此处接触压力急剧变大。

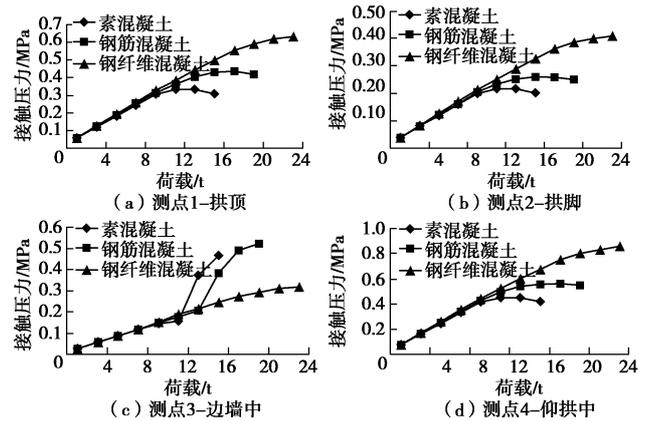


图 14 接触压力与荷载的变化曲线

Fig. 14 Change of contact pressure with load

### 3.3 径向位移

提取各测点径向位移, 绘制径向位移与荷载关系曲线, 如图 15 所示。

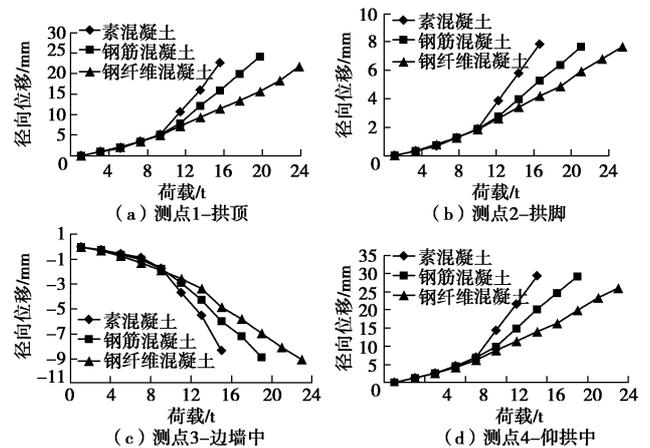


图 15 径向位移与荷载的变化曲线

Fig. 15 Change of radial displacement with load

由图 15 可知, 衬砌结构径向位移随荷载的增加而增加。在初裂荷载前, 径向位移与荷载基本成线性关系; 初裂荷载后, 衬砌结构径向位移增长速率明显增大, 素混凝土大于钢筋混凝土, 钢筋混凝土大于钢纤维混凝土。相同荷载作用下, 素混凝土径向位移大于钢筋混凝土, 钢筋混凝土大于钢纤维混凝土。这说明钢纤维混凝土衬砌韧性、抗裂性以及控制结构变形能

力都明显好于钢筋混凝土和素混凝土衬砌。

### 3.4 承载特性

提取各测点加载过程中的接触压力与径向位移, 绘制衬砌结构承载特性曲线, 如图 16 所示。

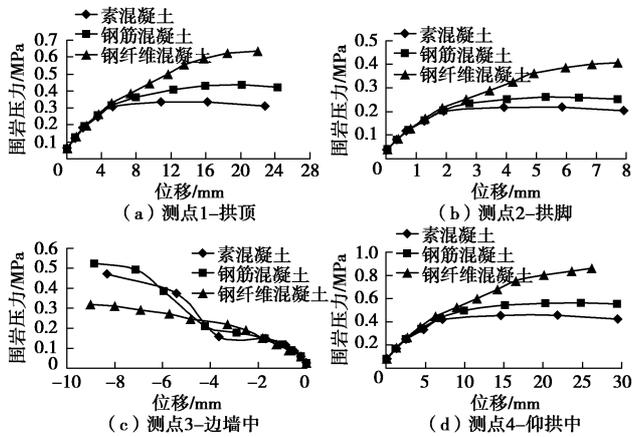


图 16 衬砌结构承载特性曲线

Fig. 16 Bearing characteristic curves of lining structure

由图 16 可知, 加载过程中, 拱顶、拱脚及仰拱中部测点不断向隧道内部方向变形, 3 测点承载特性曲线规律一致; 边墙中部测点不断向围岩方向变形, 其承载特性曲线异于其他 3 测点。下面以拱顶和边墙中部测点为例, 进行衬砌结构承载特性分析。

#### (1) 拱顶

素混凝土和钢筋混凝土衬砌在达到初裂荷载后, 测点径向位移增长速率突增。素混凝土很快达到极限承载能力(与初裂荷载相差无几), 钢筋混凝土极限荷载比初裂荷载提高了约 50%。

钢纤维混凝土衬砌达到初裂荷载后, 测点径向位移增长速率有所增加, 结构仍具有较高的承载能力, 在承受 2 倍初裂荷载时, 结构仍没出现贯通裂缝。这说明掺入钢纤维后明显提高了衬砌结构的承载能力和变形能力。

#### (2) 边墙中部

加载过程中, 边墙部位衬砌向围岩方向变形, 在变形过程中由于受到围岩的约束, 使得作用在衬砌结构上的接触压力不断变大。

由于钢纤维混凝土良好的抗裂性, 使得钢纤维混凝土衬砌初裂荷载后仍可承担较大的弯矩, 边墙中部径向位移远小于素混凝土和钢筋混凝土, 进而也减小了接触压力。

## 4 结 论

本文通过素混凝土、钢筋混凝土及钢纤维混凝土衬砌力学行为室内模型试验, 对钢纤维混凝土衬砌的承载特性进行研究, 得出以下结论:

(1) 素混凝土衬砌初裂后, 裂缝的宽度和深度迅速扩大, 很快达到极限承载能力(与初裂荷载相差无几), 结构破坏, 破坏时裂缝数目为 4 条; 钢筋混凝土衬砌初裂后, 随着荷载的增加, 裂缝宽度和深度逐渐增加, 至结构破坏时裂缝数目为 9 条, 极限荷载比初裂荷载提高了约 1 倍; 钢纤维混凝土衬砌初裂(初裂荷载比素混凝土和钢筋混凝土衬砌提高约 20%)后, 随着荷载的增加, 由于钢纤维的抑制作用, 裂缝的深度缓慢增加, 并且裂缝发展的路径也变的曲折, 延缓了结构的破坏, 至 2 倍初裂荷载时, 裂缝数目为 12 条, 结构仍没出现贯通裂缝。

(2) 实际作用在衬砌结构上的土压力比理论计算值要小(约为荷载-结构模型理论值的 60%~70%), 荷载由围岩和衬砌结构共同承担。由于钢纤维混凝土具有良好的抗裂性和控制变形能力, 初裂荷载后仍可承担较大的弯矩, 开裂的截面刚度降低, 致使结构应力重分布, 至结构破坏时可达多点多点开裂状态。

(3) 掺入钢纤维后衬砌结构韧性增强, 初裂后仍能抵抗一定变形并较大降低变形速率, 与素混凝土、钢筋混凝土相比可承担更大的变形。

(4) 素混凝土衬砌初裂后承载特性曲线快速收敛; 钢筋混凝土衬砌初裂后承载特性曲线在一定缓慢上升后快速趋于收敛; 钢纤维混凝土衬砌初裂后承载特性曲线缓慢上升, 至 2 倍初裂荷载时仍无收敛迹象。因此, 在软弱围岩条件下, 钢纤维混凝土初支在一定变形后可与围岩特征曲线相交, 达到围岩-结构稳定状态, 是一种力学性能良好的快速支护材料。

### 参考文献:

- [1] 李鹏飞, 赵 勇, 刘建友. 隧道软弱围岩变形特征与控制方法[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(5): 55 - 61. (LI Peng-fei, ZHAO Yong, LIU Jian-you. Deformation characteristics and control method of tunnel with weak surrounding rock[J]. China Railway Science, 2014, 35(5): 55 - 61. (in Chinese))
- [2] 朱永全, 李文江, 赵 勇. 软弱围岩隧道稳定性变形控制技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012. (ZHU Yong-quan, LI Wen-jiang, ZHAO Yong. Deformation control technology of weak surrounding rock tunnel stability[M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))
- [3] 徐前卫, 马 静, 朱合华, 等. 软弱破碎隧道围岩开挖面稳定性的拟三维模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 465 - 470. (XU Qian-wei, MA Jing, ZHU He-hua, et al. Pseudo-three-dimensional experimental study on tunnel face stability in weak and fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 465 - 470. (in Chinese))

- [4] 杜国平, 刘新荣, 李晓红, 等. 隧道单层衬砌结构稳定性现场试验及变形控制[J]. 重庆大学学报, 2013, **36**(12): 79 - 85, 91. (DU Guo-ping, LIU Xin-rong, LI Xiao-hong, et al. Field test and deformation controlling for single tunneling lining stability[J]. Journal of Chongqing University, 2013, **36**(12): 79 - 85, 91. (in Chinese))
- [5] 宋艳, 朱珍德, 张慧慧. 深埋隧道喷射钢纤维混凝土支护的数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, **11**(2): 204 - 208. (SONG Yan, ZHU Zhen-de, ZHANG Hui-hui. Numerical simulation for sprayed steel fiber concrete supporting in deep-buried tunnel[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, **11**(2): 204 - 208. (in Chinese))
- [6] 宋战平, 刘京, 吴焕通, 等. 长陡斜井钢纤维喷射混凝土单层衬砌试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, **45**(3): 348 - 355. (SONG Zhang-ping, LIU Jing, WU Huan-tong, et al. Experimental research on single-layer tunnel lining of steel fiber shotcrete and the application in motenlin deviated well[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2013, **45**(3): 348 - 355. (in Chinese))
- [7] 韩涛, 杨维好, 任彦龙, 等. 钢纤维混凝土井壁水平承载特征的计算和试验[J]. 中国矿业大学学报, 2012, **41**(2): 205 - 211. (HAN Tao, YANG Wei-hao, REN Yan-long, et al. Numerical and experimental model studies of the horizontal bearing properties of shaft linings of encased steel or steel fiber reinforced, high strength concrete[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, **41**(2): 205 - 211. (in Chinese))
- [8] 宋卫民. 隧道二衬纤维混凝土防渗抗裂性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013. (SONG Wei-min. Research of impermeability and anti-cracking properties of tunnel secondary lining fiber concrete[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese))
- [9] 刘新荣, 祝云华, 李晓红, 等. 隧道钢纤维喷射混凝土单层衬砌试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2319 - 2323. (LIU Xin-rong, ZHU Yun-hua, LI Xiao-hong, et al. Experimental research on single-layer tunnel lining of steel fiber shotcrete[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2319 - 2323. (in Chinese))
- [10] 丁一宁, 刘思国. 钢纤维自密实混凝土弯曲韧性和剪切韧性试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, **43**(11): 55 - 63. (DING Yin-ning, LIU Si-guo. Study of the flexural and shear toughness of steel fiber reinforced self-compacting concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, **43**(11): 55 - 63. (in Chinese))
- [11] PASSUELLO A, MORICONI G, SHAH S P. Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures and PVA fibers[J]. Cement & Concrete Composites, 2009(39): 699 - 704.
- [12] BOGHOSSIAN E, WEGNER L D. Use of flax fiber to reduce plastic shrinkage cracking in concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2008(30): 929 - 937.
- [13] KIM J H J, PARK C G, LEE S W, et al. Effects of the geometry of recycled PET fiber-reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites[J]. Composites (Part B), 2008(38): 442 - 450.
- [14] 闫治国, 朱合华, 梁利. 火灾高温下隧道衬砌管片力学性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, **40**(6): 823 - 828. (YAN Zhi-guo, ZHU He-hua, LIANG Li. Experimental study on mechanical performance of lining segments in fire accidents[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2012, **40**(6): 823 - 828. (in Chinese))
- [15] 刘赫凯, 丁一宁. 钢纤维自密实混凝土管片力学性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2011, **14**(1): 10 - 13, 21. (LIU He-kai, DING Yi-ning. Experimental study on performance of steel fiber reinforced self-compacting concrete (SCC) tunnel lining[J]. Journal of Building Materials, 2011, **14**(1): 10 - 13, 21. (in Chinese))