

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.096



开放科学(资源服务)标识码OSID:



# 考虑骨料粒径影响的BFRP筋混凝土梁 剪切破坏及尺寸效应

金浏, 陆凯, 宋博, 蒋轩昂, 杜修力

(北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:**粗骨料是混凝土材料的组成之一,其粒径变化会影响混凝土梁中骨料咬合作用对抗剪承载力的贡献。为了系统地考虑最大粗骨料粒径对玄武岩纤维增强聚合物(Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP)筋无腹筋混凝土梁剪切破坏的影响,采用细观尺度数值模拟方法,建立BFRP筋无腹筋混凝土梁数值模型,模拟分析构件尺寸和粗骨料粒径对BFRP筋混凝土梁剪切破坏模式和抗剪强度的影响规律。结果表明:BFRP筋无腹筋混凝土梁的抗剪强度存在尺寸效应,同时,随着最大粗骨料粒径的增大,BFRP筋混凝土梁的抗剪承载力提高,梁的剪切尺寸效应被削弱。根据最大粗骨料粒径的影响机制与规律,结合断裂力学尺寸效应律,建立了BFRP筋混凝土梁抗剪强度尺寸效应理论公式,并与模拟结果和试验数据进行对比,验证了公式的准确性和合理性。

**关键词:**BFRP筋;混凝土梁;粗骨料粒径;抗剪强度;尺寸效应;细观模拟

**中图分类号:**TU377.9 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)03-0034-10

## Shear failure and size effect of BFRP reinforced concrete beams considering aggregate size

JIN Liu, LU Kai, SONG Bo, JIANG Xuan'ang, DU Xiuli

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology,  
Beijing 100124, P. R. China)

**Abstract:** Coarse aggregate is an important proportion of concrete material, and the change of its size will affect the contribution of aggregate interlock behaviour in concrete beams to shear capacity. In order to consider the effect of the coarse aggregate size on the shear failure of Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) beams without stirrup systematically, the meso-scale simulation was selected and a numerical model of BFRP reinforced concrete beams without stirrup was established. The effects of member size and coarse aggregate size on the shear failure mode and shear strength of BFRP reinforced concrete beams were simulated and analyzed.

**收稿日期:**2021-02-25

**基金项目:**国家重点研发计划(2018YFC1504302);国家自然科学基金(51822801、51421005)

**作者简介:**金浏(1985-),男,博士,教授,主要从事混凝土与混凝土结构研究,E-mail:jinliu@bjut.edu.cn。

杜修力(通信作者),男,博士,教授,E-mail:duxili@bjut.edu.cn。

**Received:** 2021-02-25

**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC1504302); National Natural Science Foundation of China (No. 51822801, 51421005)

**Author brief:** JIN Liu (1985-), PhD, professor, main research interests: concrete and concrete structure, E-mail: jinliu@bjut.edu.cn.

DU Xiuli (corresponding author), PhD, professor, E-mail: duxili@bjut.edu.cn.

The results show that the size effect exists in the shear strength of BFRP reinforced concrete beams without stirrup. Meanwhile, the increase of the maximum aggregate size improves the shear capacity of concrete beam, and weakens the size effect of shear strength. According to the influence mechanism and law of maximum coarse aggregate size, theoretical formula of size effect on the shear strength of BFRP reinforced concrete beams was established on the basis of Fracture-SEL, and its accuracy and rationality are verified via experimental data.

**Keywords:** BFRP; concrete beams; coarse aggregate size; shear strength; size effect; meso-scale simulation

钢筋锈蚀问题一直是实际工程中亟需解决的问题<sup>[1]</sup>。纤维增强聚合物(FRP)筋因具有耐腐蚀、抗拉强度高等特点,逐渐代替钢筋应用在各工程实践中,例如桥梁、大坝、电信传输塔等重要建筑设施,其中FRP筋混凝土构件尺寸较大,若不考虑混凝土尺寸效应问题,则可能导致构件承载力预估偏大,造成安全隐患。Syroka-Korol等<sup>[2]</sup>设计了9根无腹筋钢筋混凝土梁(梁高为200~800 mm)及3根无腹筋玄武岩纤维增强聚合物(Basalt Fiber Reinforced Polymer, BFRP)筋混凝土梁(梁高为220~780 mm),并进行剪切试验,研究发现:尺寸效应现象同样存在于BFRP筋混凝土梁中,且比钢筋混凝土梁显著。

目前,材料层次混凝土的尺寸效应研究较成熟。实际工程中的混凝土材料是由砂、石子、水泥及各类添加剂组成的人工复合材料<sup>[3]</sup>,上述组分的占比、性质等会影响混凝土的整体性能。从材料层次出发,众多试验研究表明混凝土材料存在尺寸效应,对此,不同的学者给出了不同的理论解释,其中广为接受的有断裂力学尺寸效应理论<sup>[4]</sup>和多重分形尺寸效应理论<sup>[5]</sup>等,但多局限于材料层次,仅能体现结构尺寸这一因素的大致影响。由混凝土材料组成的结构构件可能也存在尺寸效应,且由于梁的受剪破坏是梁失效模式中最危险的,因此,部分学者对混凝土梁抗剪强度的尺寸效应规律进行研究。Jumaa等<sup>[6]</sup>通过试验研究再次证实了BFRP筋混凝土梁的抗剪强度存在尺寸效应。

混凝土材料的性质会影响构件的性能。研究发现,粗骨料粒径的变化会影响混凝土材料层次的尺寸效应<sup>[7]</sup>,同时,骨料咬合作用是无腹筋混凝土梁抗剪承载能力中重要的组成部分<sup>[8]</sup>。但对于无腹筋梁剪切破坏尺寸效应的产生机理,研究者并未得出统一结论,粗骨料粒径的变化对无腹筋混凝土梁的尺寸效应影响还有待进一步研究。Vecchio等<sup>[9]</sup>基于压力场理论,结合骨料咬合作用,提出了修正压力场理论和裂缝间距尺寸效应模型,认为当尺寸增大时,裂缝宽度会变大,导致骨料咬合力减小,使得

梁的受剪承载力下降。Huber等<sup>[8]</sup>通过试验证实了骨料尺寸对梁剪切承载能力有重要影响。但Bazant等<sup>[10]</sup>认为,裂缝间距与尺寸效应仅仅部分关联,且此前Bazant等<sup>[4]</sup>基于断裂力学方法提出了考虑骨料粒径的尺寸效应公式。因此,关于骨料粒径对无腹筋混凝土梁的抗剪承载能力及其尺寸效应的影响研究还远远不够。此外,在无腹筋混凝土梁的受剪破坏中,纵筋会起到销栓作用,且金浏等<sup>[11]</sup>研究发现,纵筋率对钢筋混凝土梁的尺寸效应影响不显著,但相比于钢筋,BFRP筋弹性模量低,抗拉强度高,纵筋换成BFRP筋后,混凝土梁的剪切问题还需进一步研究。

笔者选择BFRP筋无腹筋混凝土梁作为研究对象,研究粗骨料粒径对梁剪切尺寸效应的影响。对于无腹筋混凝土梁的纵筋采用BFRP筋,主要基于两个方面的考虑:BFRP筋的材性及BFRP筋与混凝土之间的粘结-滑移关系。数值模拟因为其可靠性和方便度成为尺寸效应研究的补充方式,并在众多研究中证明了这个方法的可行性<sup>[12-13]</sup>。为了使骨料周围混凝土的破坏情况更容易被观察到,选择建立混凝土梁的二维细观模型<sup>[14-15]</sup>,设计了15根试验梁,获得了骨料粒径对混凝土梁尺寸效应影响的规律。

## 1 细观数值模型

### 1.1 细观尺度数值分析模型的建立

混凝土的宏观力学性能和破坏模式与混凝土的细观组分及结构密切相关。同时,细观尺度模型可以较好地反映混凝土非均质性(包括骨料粒径、分布、占比等情况),已被证明是研究混凝土组成对宏观性能影响可行和有用的方法<sup>[14-15]</sup>。

根据Meddah等<sup>[16]</sup>的研究,将细骨料和相对较小的粗骨料(约5 mm)简化为同砂浆基质。同时,参考文献[13-15],将混凝土视为由粗骨料、砂浆基质和界面过渡区(ITZ)组成的三相非均质复合材料。参考Jin等<sup>[15]</sup>的研究,将粗骨料设置为圆形,并且选取两个等效粒径(小石粒径为12 mm,中石粒径分

别为 20、30、40 mm)。根据 Walraven 等<sup>[17]</sup>的研究计算不同骨料尺寸的数量,粗骨料体积分数约为 47%。骨料采用“Take and Place”方法<sup>[15]</sup>随机投入砂浆中。

模型中粗骨料形状与实际存在偏差,但为了方便模型建立和控制粒径变化,将粗骨料设置为圆形,研究<sup>[13-15]</sup>表明,采用该方法后数值模拟结果与试验结果接近。关于骨料形状、类型等因素的影响将另文讨论。

粗骨料周围的薄层称为 ITZ,实际厚度约为 20~50  $\mu\text{m}$ ,但在细观尺度下,如果采用实际厚度,计算量将巨大。因此,在大部分数值研究中将 ITZ 的厚度设置为 0.5~2 mm<sup>[18]</sup>。Song 等<sup>[18]</sup>经过研究发现,当 ITZ 的厚度在 0.5~2 mm 之间变化时,仅会影响下降段,而应力增加阶段几乎相同。因此,为保证精度和减少计算量,在后续模拟中,ITZ 的厚度设置为 2 mm。

根据上述要求,建立素混凝土梁模型,并在梁中插入纵筋,建立如图 1 所示的二维混凝土细观随机骨料模型。采用四边形单元对所建立的模型进行网格划分。

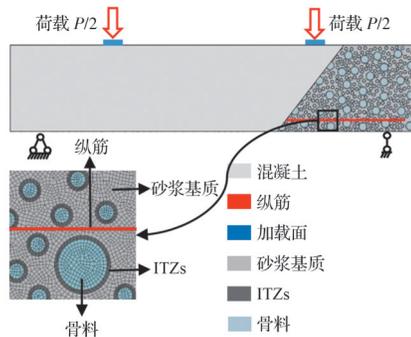


图 1 细观数值分析模型

Fig. 1 Meso-scale numerical analysis model

## 1.2 各细观组分及本构关系

粗骨料强度较高,在一般混凝土构件的加载试验中不容易破坏,因此,设置为弹性体;参考文献[14],对于砂浆基质和 ITZ 力学行为的描述,可采用塑性损伤本构模型;一般钢筋可视为均质材料,其力学性能采用理想弹塑性本构模型描述;根据 Jumaa 等<sup>[12]</sup>的研究,在达到极限抗拉强度前,BFRP 筋的应力-应变曲线可视为线性,因此,将 BFRP 筋设置为可变形的梁单元。

在混凝土塑性损伤模型中,拉、压破坏引起的混凝土刚度退化以各向同性损伤变量为特征,其形式为

$$\sigma = (1 - d) D_0^{\text{el}} : (\epsilon - \epsilon^{\text{pl}}) \quad (1)$$

式中: $D_0^{\text{el}}$ 为初始弹性矩阵; $\epsilon$ 为应变张量; $d$ 为损伤变量; $\epsilon^{\text{pl}}$ 为塑性应变张量。引入了损伤变量 $d$ ( $0 < d < 1$ ),“0”代表无损伤,“1”代表完全失效,将单轴压缩、拉伸损伤变量分别表示为 $d_c$ 和 $d_t$ 。

为有效避免或缓解由于应变软化导致的网格敏感性问题,在材料达到其强度后,采用拉伸应力-位移形式来替代常见的应力-应变关系曲线,从而保证单元破坏时断裂能的唯一性<sup>[19]</sup>。

因为模型验证的需要,同时选取 BFRP 筋混凝土梁和钢筋混凝土梁试验分别进行模型合理性验证。为了描述钢筋与混凝土之间的粘结-滑移关系,在钢筋和混凝土之间建立非线性弹簧单元,采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[20]</sup>推荐的本构关系模型,如图 2(a)所示,参考文献[13]确定图中各关键点。采用同样的方法描述 BFRP 筋与混凝土之间的粘结-滑移行为,即先将 BFRP 筋布置在混凝土中,进而在 BFRP 筋单元与混凝土单元之间设置非线性弹簧单元,采用 Cosenza 等<sup>[21]</sup>提出的改进 BPE 模型判定 BFRP 筋与混凝土间切向粘结应力与滑移量变化的关系,如图 2(b)所示,曲线可用式(2)~式(4)表示。

$$\frac{\tau}{\tau_u} = \left( \frac{S}{S_u} \right)^\alpha, S \leq S_u \quad (2)$$

$$\frac{\tau}{\tau_u} = 1 - \rho \left( \frac{S}{S_u} - 1 \right), S_u \leq S \leq S_r \quad (3)$$

$$\tau = \tau_r, S \geq S_r \quad (4)$$

式中: $\tau_u$ 、 $S_u$ 、 $\tau_r$ 和 $S_r$ 分别是“u”和“r”对应的剪应力和滑移量; $\alpha$ 是曲线拟合参数; $\rho$ 是反映软化的参数。参考文献[21]选取各参数的值。

## 1.3 模型合理性验证

参照张志金<sup>[22]</sup>的 BFRP 筋无腹筋梁试验,选择试

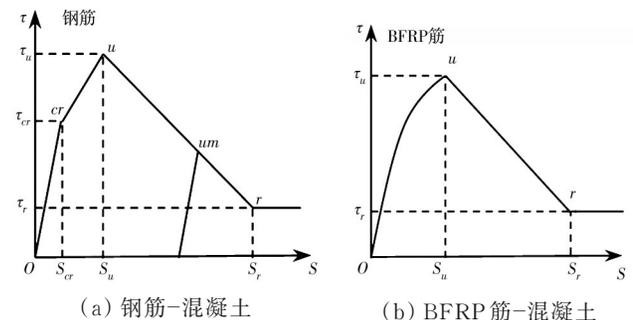


图 2 纵筋-混凝土粘结-滑移关系

Fig. 2 The bond-slip model between longitudinal bar and concrete

验梁BC-1进行数值模拟,其剪跨比为1.57;纵筋率为0.77%;结构尺寸为200 mm×300 mm×1 450 mm。试验测得的标准立方体抗压强度为46.7 MPa。依照图1建立数值模型,考虑BFRP筋与混凝土之间粘结-滑移的试件命名为BC-1-M,其余试件命名为BC-1-W,试件各组分的参数列于表1,其中,砂浆基质的力学参数取自试验<sup>[22]</sup>实测数据,用“\*”表示;ITZ的力学参数通过反演法获得,用“~”表示;因试验<sup>[22]</sup>中未记录BFRP筋的泊松比,因此,参考文献[12]的处理方式,从文献[12]中选取BFRP筋的泊松比,用“#”表示,其值选取的合理性将在后续计算中进一步验证;其他参数取自文献[13]。

表1 混凝土细观组分及BFRP筋的力学参数  
Table 1 Mechanical parameters of the meso components of normal concrete specimens and BFRP bars

组分	抗压强度 $\sigma_c$ /MPa	抗拉强度 $\sigma_t$ /MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 $\nu$	断裂能 $G_c$ /(J·m <sup>-2</sup> )
骨料			70	0.2	
砂浆基质	*47.5	*4.56	*25.89	*0.2	50
界面过渡区	~37.53	~3.65	~19.42	~0.2	30
BFRP筋		*1 298	*62.2	#0.3	

ITZ的力学参数获得的具体方法是:将砂浆基质的力学参数降低至不同程度(75%~85%),作为ITZ参数的试算值,然后使用该组参数进行混凝土标准立方体试块的压缩破坏数值模拟试验。经过反复尝试后选取与试验值最接近时的一组参数,再使用该参数进行与试验同工况的反复模拟验证。使用表1的力学参数获得的标准立方体抗压强度为47.1 MPa,接近实测值。

为验证骨料粒径选取方法的合理性,参照王昱<sup>[23]</sup>的钢筋无腹筋混凝土简支梁试验,选取B22-40-1进行数值模拟,其结构尺寸为200 mm×400 mm×2 000 mm;剪跨比为2.2;纵筋率为1.58%;最大骨料粒径为40 mm。测得的混凝土立方体抗压强度为42.34 MPa。建立数值模型,加载方式为三点弯曲加载,并命名为B22-40-1-M。各组分的参数列于表2。根据表2进行数值模拟计算,测得的混凝土抗压强度为42.52 MPa。

将表1和表2中的力学参数分别应用于各自的数值模型中,其中,参考文献[13]的数值模拟验证方法,基于表2的参数开展了不同网格尺寸(1、2、4 mm)钢筋混凝土梁受剪试验模拟,图3为试验与模拟的破坏模式对比图,图4为P-Δ(荷载-位移)关系曲线

对比图。由图3可知,无论是钢筋混凝土梁还是BFRP钢筋混凝土梁,模拟获得的破坏模式与试验结果吻合良好。由图4可以看出,模拟与试验得到的荷载-位移关系比较接近,证明了材料参数的合理性与准确性,并且网格大小对破坏模式影响不显著,为保证精度和效率,网格尺寸选择2 mm。

表2 混凝土细观组分及钢筋力学参数  
Table 2 Mechanical parameters of the meso components of normal concrete specimens and steel

组分	抗压强度 $\sigma_c$ /MPa	抗拉强度 $\sigma_t$ /MPa	屈服强度 $f_y$ /MPa	弹性模量 E/GPa	泊松比 $\nu$	断裂能 $G_c$ /(J·m <sup>-2</sup> )
骨料				70	0.2	
砂浆基质	**43.1	**3.38		**32.65	**0.2	50
界面过渡区	~34.48	~2.71		~26.12	~0.2	30
钢筋		**688	**470.6	**200	**0.3	

注:\*\*取自文献[23];~为反复试算选值;其他值取自文献[13]。

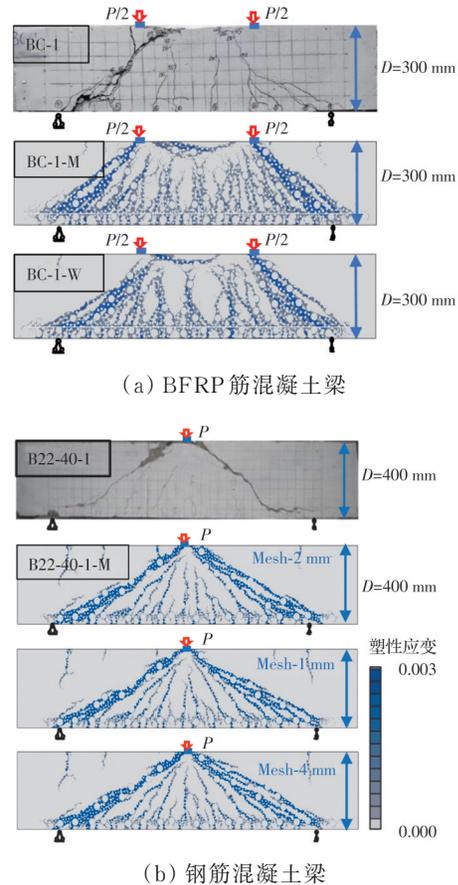


图3 试验与模拟破坏模式的对比

Fig. 3 Comparison of the failure modes obtained by experiment and simulation

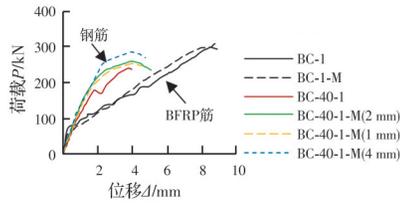


图 4 荷载-位移曲线对比

Fig. 4 Comparison of the  $P-\Delta$  curves

由图 3(a)和图 5 可知,不考虑粘结-滑移会导致破坏模式中裂缝减少,同时抗剪强度提升,跨中位移降低,说明梁的整体刚度提升,考虑粘结-滑移可以使模拟结果更接近试验结果。因此,需要考虑 BFRP 筋与混凝土之间的粘结-滑移。

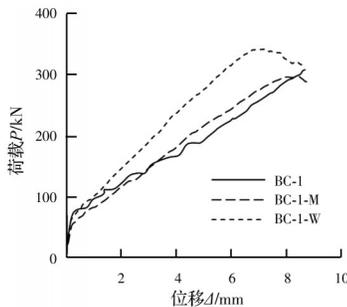


图 5 不同粘结-滑移关系模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of different bond-slip relationships

## 2 骨料粒径对抗剪强度的影响

采用上述数值模拟方法研究骨料粒径对 BFRP 钢筋混凝土梁受剪性能的影响规律,同时设计了不同试件尺寸探究骨料粒径对梁剪切尺寸效应的影响机制。表 3 给出了试件名称、试件几何信息及最大骨料粒径( $D_{agg}$ )。其中,“S、M、L、H、U”分别代表不断增大的截面尺寸,“20、30、40”分别代表不同的最大骨料粒径。为消除偶然性,每个工况模拟 3 次,分析中仅展示部分结果。

表 3 试件几何参数

Table 3 Geometrical dimensions of specimens

试件名称	$b \times h$	$c/mm$	$h_0/mm$	$l/mm$	$D_{agg}/mm$
S-20	100 mm × 200 mm	20	180	800	20
S-30	100 mm × 200 mm	20	180	800	30
S-40	100 mm × 200 mm	20	180	800	40
M-20	200 mm × 400 mm	30	370	1500	20
M-30	200 mm × 400 mm	30	370	1500	30
M-40	200 mm × 400 mm	30	370	1500	40
L-20	300 mm × 600 mm	40	560	2200	20
L-30	300 mm × 600 mm	40	560	2200	30
L-40	300 mm × 600 mm	40	560	2200	40

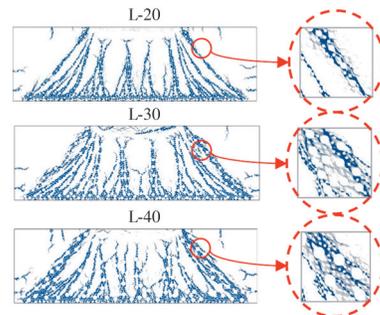
续表 3

试件名称	$b \times h$	$c/mm$	$h_0/mm$	$l/mm$	$D_{agg}/mm$
H-20	400 mm × 800 mm	50	750	2900	20
H-30	400 mm × 800 mm	50	750	2900	30
H-40	400 mm × 800 mm	50	750	2900	40
U-20	600 mm × 1200 mm	60	1140	4200	20
U-30	600 mm × 1200 mm	60	1140	4200	30
U-40	600 mm × 1200 mm	60	1140	4200	40

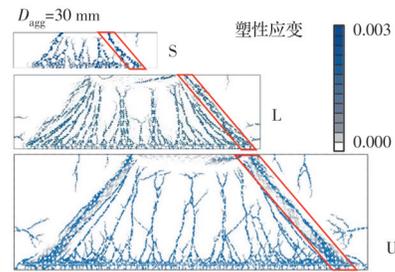
注:梁的剪跨比 $\lambda$ 为 1.0;配箍率 $\rho_{sv}$ 为 0.0%;纵筋率 $\rho$ 为 1.5%;骨料体积分数 $\rho_v$ 为 47%。

### 2.1 破坏模式

BFRP 筋混凝土简支梁剪切试验的最终破坏模式如图 6 所示。在荷载作用下,梁跨中存在一些竖向裂缝和轻微斜裂缝,在加载点和支座之间出现主斜裂缝,主斜裂缝逐渐扩展至贯通导致混凝土梁的最终破坏,为明显的剪切破坏。所有试件的最终破坏模式与图 3(a)所示试验<sup>[22]</sup>中梁“BC-1”的破坏模式接近,说明数值模拟的破坏模式接近试验结果。



(a) 尺寸相同时试件的破坏模式



截面尺寸( $b \times h$ ):  
S: 100 mm × 200 mm L: 300 mm × 600 mm  
U: 600 mm × 1200 mm

(b) 最大骨料粒径相同时的试件破坏模式

图 6 试件破坏模式

Fig. 6 Failure modes of specimens

如图 6(a)所示,当试件截面尺寸相同时(300 mm × 600 mm),将最大骨料粒径不同的混凝土局部破坏图进行对比,发现裂缝在骨料粒径较小的混凝土梁中容易扩展,裂缝扩展路径较少且平滑。但在骨料粒径较大的混凝土梁中,裂缝在扩展至较大骨

料时会选择避开,从而导致裂缝扩展路径更为曲折,使得混凝土断面比较粗糙,导致骨料咬合作用增强,提高了混凝土梁的抗剪承载力。

图6(b)是当骨料粒径相同时( $D_{agg}=30\text{ mm}$ ),不同尺寸下BFRP钢筋混凝土梁的剪切破坏模式。由图可知,随着尺寸的增大,主斜裂缝区域处的混凝土损伤更为严重,如图6(b)中试件S( $D=200\text{ mm}$ )的主斜裂缝形态单一,分布也比较集中,而试件U( $D=1\ 200\text{ mm}$ )的加载点和支座之间裂缝拓展路径较多,分布较广。

## 2.2 荷载-位移( $P-\Delta$ )曲线

图7为不同骨料粒径及不同尺寸的BFRP钢筋混凝土梁细观数值模型在剪切作用下获得的荷载-位移( $P-\Delta$ )曲线,所有试件的荷载-位移曲线形式与图4中试验结果相同。由图可知,简支梁的抗剪承载力随着尺寸的增大而增大;当截面尺寸相同时,最大骨料粒径的变化对梁的抗剪承载能力有显著影响。同样,王昱等<sup>[23]</sup>通过试验研究发现,骨料粒径的增大会增强无腹筋钢筋混凝土梁的抗剪承载力。

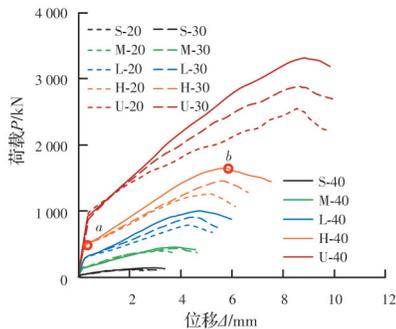


图7 荷载-位移曲线  
Fig. 7  $P-\Delta$  curves

以图7中“H”组试件为例,BFRP钢筋混凝土梁的剪切破坏可分为3个阶段:“0~a”阶段为弹性阶段,加载初期,混凝土梁上没有明显裂缝,不同骨料粒径的混凝土梁之间的差异可以忽略,随着荷载的逐渐增大,梁的承载力增大,达到“a”点时梁上出现明显裂缝;“a~b”阶段为裂缝发展阶段,此时由于裂缝的出现和发展,梁的抗剪承载力不再由全截面混凝土承担,骨料咬合作用逐渐增强,裂缝处的骨料会抑制裂缝两侧混凝土的相对错动,随着裂缝的发展,骨料咬合作用对梁的抗剪承载力贡献越来越大,因此,最大骨料粒径不同导致的差异会越来越显著;“b”点以后为破坏阶段,混凝土梁破坏。

## 3 骨料粒径对尺寸效应的影响

### 3.1 名义抗剪强度分析

为对比不同尺寸梁的抗剪强度,参考文献[13],BFRP钢筋混凝土梁的名义抗剪强度 $\tau_c$ 为

$$\tau_c = P_{\max} / (bh_0) \quad (5)$$

式中: $P_{\max}$ 为极限荷载; $b$ 为梁截面宽度; $h_0$ 为梁截面有效高度。

BFRP筋无腹筋混凝土梁的名义抗剪强度 $\tau_c$ 与结构尺寸 $D$ (这里取梁截面高度 $h$ )的关系如图8所示。当骨料粒径相同时,BFRP筋无腹筋混凝土梁的名义抗剪强度均随梁尺寸的增大而减小,表现出明显的尺寸效应现象;梁的尺寸增大之后,裂缝宽度会不断增大,因此,同一骨料粒径下,骨料之间的咬合作用逐渐减弱,抗剪强度降低。而当尺寸相同时,混凝土梁的名义抗剪强度随最大骨料粒径的增大而增大:梁的尺寸一定时,裂缝宽度相近,但最大骨料粒径增大后,骨料咬合作用增强,抗剪强度提升。同时,从图8可以看出,当最大骨料粒径较小时,梁的名义抗剪强度下降幅度较大,说明当骨料粒径普遍较小时,BFRP钢筋混凝土梁尺寸效应更显著。

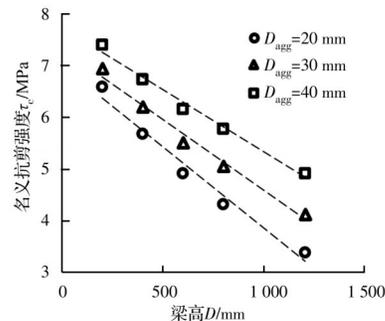


图8 BFRP筋无腹筋混凝土梁名义抗剪强度与尺寸的关系  
Fig. 8 The relationship of nominal shear strength and size of BFRP reinforced concrete beams without stirrups

Bazant等<sup>[4]</sup>提出了混凝土材料的尺寸效应理论公式

$$\tau_c = \frac{v_0}{\sqrt{1 + D/d_0}} \quad (6)$$

式中: $\tau_c$ 为名义抗剪强度; $v_0$ 和 $d_0$ 为经验系数; $D$ 为构件的特征尺寸。

通过对数据进行回归分析,得到混凝土梁的名义抗剪强度随尺寸变化的双对数拟合曲线,如图9所示。当梁为完全脆性材料时,可用线弹性断裂力学理论描述,即斜率为 $-1/2$ 的斜线;当梁为塑性材

料时,可不考虑尺寸效应,即可用水平线描述。将 Bažant 尺寸效应律(SEL)与模拟结果进行对比,相关系数  $R^2$  为 0.91,说明 Bažant 尺寸效应律可以较好地体现无腹筋混凝土简支梁抗剪强度的尺寸效应规律。

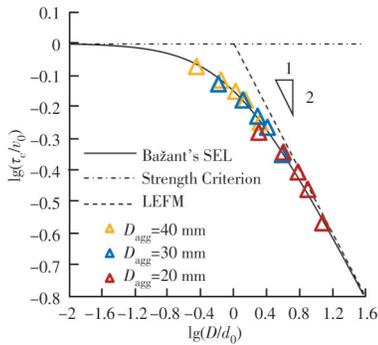


图 9 BFRP 筋混凝土梁名义抗剪强度尺寸效应拟合  
Fig. 9 Size effect fitting of nominal shear strength of BFRP reinforced concrete beams without stirrups

从图 9 可以看出,当最大等效粒径变大时,数据点逐渐向上方水平线靠近,表明随着骨料粒径的增大,一定程度上会削弱 BFRP 筋无腹筋混凝土梁抗剪强度的尺寸效应。同时,不同骨料粒径试件对应的  $\nu_0$  和  $d_0$  的数值不同,说明 Bažant 尺寸效应律不能反映不同骨料粒径对尺寸效应的定量影响。

### 3.2 尺寸效应产生机制分析与讨论

为分析尺寸效应产生机制,选取最大骨料粒径为 20、40 mm,梁高为 200、1 200 mm 的 4 根梁为研究对象进行分析讨论,如图 10 所示。

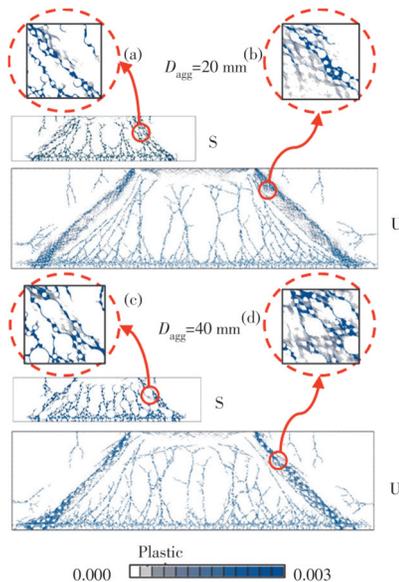


图 10 细观破坏模式对比

Fig. 10 Comparison of the meso-scale failure modes

对比图 10(a)、(c)或图 10(b)、(d)可以发现,当截面尺寸不变、骨料粒径改变时,主斜裂缝处的破坏程度相近,但由于裂缝的产生而形成的两部分混凝土表面粗糙程度不同,粒径为 40 mm 的试件裂缝要曲折得多,因此,当骨料粒径增大后,裂缝处的骨料咬合作用更强,构件的名义抗剪强度提高。

对比图 10(a)、(b)或图 10(c)、(d)还可以发现,当骨料粒径相同时,主斜裂缝的形态相近,但梁高 1 200 mm 的试件主斜裂缝处破坏更为显著,这会导致骨料咬合作用降低,从而构件的名义抗剪强度会降低,表明存在尺寸效应,这与 Huber 等<sup>[8]</sup>及 Vecchio 等<sup>[9]</sup>通过试验得出的结论一致。

## 4 考虑骨料粒径的修正尺寸效应律

### 4.1 与规范的对比和讨论

图 11 所示为抗剪承载力模拟值与中、美、加规范<sup>[24-26]</sup>计算值的对比。当尺寸不同时,规范计算值约为模拟值的一半,表明规范均比较保守。

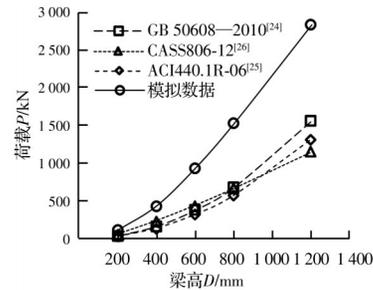


图 11 模拟数据与各国规范抗剪承载力的对比

Fig. 11 Comparison of shear capacity between simulated data and the design value calculated by different codes

图 12 所示为模拟值与规范计算值的名义抗剪强度对比结果。随着尺寸的增大,模拟值的名义抗剪强度逐渐接近中国和美国规范值的名义抗剪强度,加拿大规范中考虑到了尺寸效应的影响。但上述规范中均没有考虑到最大骨料粒径对混凝土梁抗剪强度及其尺寸效应的影响。

### 4.2 名义抗剪强度尺寸效应公式

Bažant 等<sup>[4]</sup>通过研究发现,骨料粒径的增大会削弱尺寸效应,且可以通过在经验参数  $d_0$  和最大骨料粒径  $D_{agg}$  之间建立适当的关系来反映最大骨料粒径对尺寸效应的影响。金浏等<sup>[27]</sup>基于此研究了骨料粒径对混凝土抗拉强度尺寸效应的影响,发现仅通过建立  $d_0$  关于  $D_{agg}$  的函数并不能完全体现骨料粒径对抗拉强度的影响,因此,建立了如式(7)所示的公式。参考该形式,考虑最大骨料粒径的影响,可建

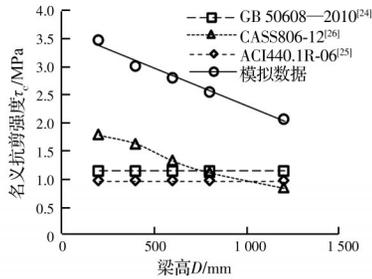


图 12 模拟值与规范计算值名义抗剪强度的对比

Fig. 12 Comparison of nominal shear strength between simulated data and design value calculated by different codes

立构件层次上的BFRP筋无腹筋混凝土梁抗剪强度尺寸效应理论公式

$$\tau_c = \tau_0 + \varphi = \frac{v_0}{\sqrt{1 + D/\delta}} + \varphi \quad (7)$$

式中:参数  $\delta$  和  $\varphi$  为关于最大骨料粒径的函数,  $\delta$  可以反映最大骨料粒径增大后“尺寸效应削弱”,  $\varphi$  为强度调节系数。公式的具体建立过程如下:

4.2.1 尺寸效应削弱系数  $\delta$  的确定 基于模拟数据,结合公式进行回归分析,可获得尺寸效应经验参数  $v_0$  和  $d_0$ ,经验系数  $v_0$  可取 9.34。参考金浏等<sup>[27]</sup>的研究,可以在  $d_0$  和  $D_{agg}$  之间建立适当的关系来反映最大骨料粒径对尺寸效应的影响,如图 13 所示,根据拟合结果,可用式(8)表示。

$$\delta = d_0 = AD_{agg}^B \quad (8)$$

式中:  $A$  和  $B$  为待定系数,对模拟结果进行拟合分析,发现当  $A = 0.05$ 、 $B = 2.5$  时,公式计算值与模拟值吻合较好。需要说明的是,按上述方法确定  $\delta$ ,当试件尺寸不变时,  $\tau_0$  会随着最大骨料粒径的增大而增大,即最大骨料粒径增大对抗剪强度的提高在该部分有所体现,但根据计算结果,  $\tau_0$  与实际名义抗剪强度存在偏差,因此,需要考虑强度调节系数  $\varphi$ 。

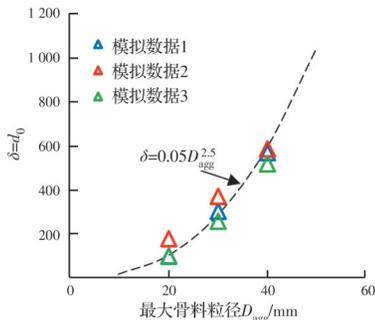


图 13 通过回归分析得到  $D_{agg}$  与  $d_0$  的关系

Fig. 13 Relationship of  $D_{agg}$  and  $d_0$  through regression analysis

4.2.2 强度调节系数  $\varphi$  的确定 如图 14 所示,根据上述分析,需去除尺寸效应削弱系数  $\delta$  的影响,取一组模拟数据,获得如式(9)所示强度调节系数  $\varphi$ ,根据拟合结果,  $\varphi$  与  $D_{agg}$  的关系可用式(10)表示。

$$\varphi = \tau_c - \tau_0 \quad (9)$$

$$\varphi = ke^{m \cdot D_{agg}} \quad (10)$$

式中:  $k$  和  $m$  为待定系数。由图 14 可知,待定系数与尺寸相关,但尺寸在 200~1 200 mm 范围内时,对强度调节系数影响较小。为了简化公式和方便计算,根据总拟合曲线,  $k$  和  $m$  可分别取 10 和 -0.1,取值的合理性与准确性将进一步验证。

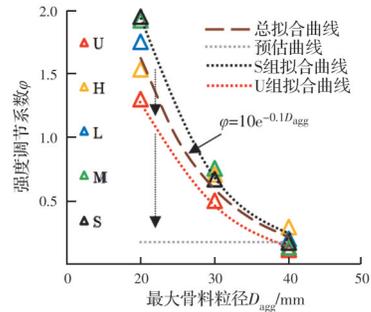


图 14 强度调节系数与骨料粒径的关系

Fig. 14 The relationship between strength regulation coefficient and aggregate size

结合图 14 进行分析,当尺寸逐渐增大时,拟合曲线逐渐趋于平缓,因此可预估,当尺寸趋于无穷大时,拟合曲线可能无限接近水平线,即最大骨料粒径在 20~40 mm 范围内变化时,因骨料粒径均太小,不能满足强度要求,名义抗剪强度几乎没有变化,这与 Bazant 等<sup>[4]</sup>的分析结果一致,对此还需更大构件尺寸及更大骨料粒径的试件的模拟研究来进行验证。水平线可用式(11)表示。

$$\varphi = \varphi_0 \quad (11)$$

式中:  $\varphi_0$  为水平线对应值。

根据所建公式,当尺寸无限大时,  $\tau_0$  也无限接近于 0,但实际试件的抗剪强度不应为 0,基于上述分析,可取  $\varphi_0$ 。

### 4.3 尺寸效应公式验证

结合式(7)、式(8)和式(10)对模拟工况进行计算预测,如图 15 所示。表 4 为理论值与模拟值的数据对比结果,“ $\tau_{sim}/\tau_{cal}$ ”表示模拟值与计算值的比值,其平均值为 1.027,方差为 0.099,说明公式的预测值与模拟值比较接近,该公式可以很好地反映最大骨料粒径的影响。

另外,笔者还搜集了相关试验结果来验证公式

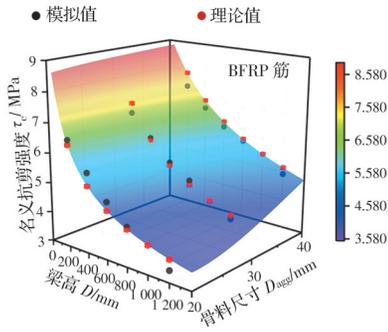


图 15 理论值与模拟值对比

Fig. 15 Comparison between the theoretical values and numerical values

表 4 理论与模拟的数据对比

Table 4 Comparisons between the theoretical values and numerical values

试件名称	模拟值 $\tau_{sim}/$ MPa	计算值 $\tau_{cal}/$ MPa	$\tau_{sim}/\tau_{cal}$
S-20	7.070	6.412	1.102
S-30	7.259	7.306	0.993
S-40	7.519	7.887	0.953
M-20	6.127	5.243	1.168
M-30	6.418	6.116	1.049
M-40	6.736	6.983	0.964
L-20	5.423	4.631	1.171
L-30	5.792	5.408	1.071
L-40	6.164	6.338	0.972
H-20	4.984	4.239	1.175
H-30	5.370	4.914	1.092
H-40	5.772	5.847	0.987
U-20	3.750	4.428	0.847
U-30	4.254	4.838	0.879
U-40	5.139	5.289	0.972
平均值			1.027
方差			0.099

计算的准确性,如图 16 所示,“ $\tau_{exp}/\tau_{cal}$ ”表示试验值与计算值的比值。由图 16 可知,比值均在 0.8~1.2 之间,结果吻合比较良好。需要说明的是,关于骨料还有很多内容需要考虑,例如骨料体积分数、骨料

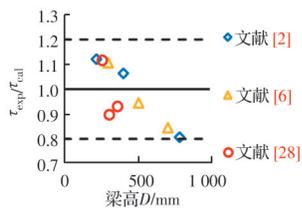


图 16 理论值与试验值的对比

Fig. 16 Comparisons between the theoretical values and the available experimental values

类型等,建立的半经验-半理论公式还要进一步的验证和拓展。

### 5 结论

研究不同最大骨料粒径和尺寸下混凝土梁的剪切破坏及尺寸效应行为,分析最大骨料粒径对梁名义抗剪强度及其尺寸效应的影响机制与规律,提出可反映最大骨料粒径影响的 BFRP 筋混凝土梁剪切强度尺寸效应半经验-半理论公式。主要结论如下:

1)最大骨料粒径对 BFRP 筋混凝土梁的抗剪承载能力有一定影响,表现为混凝土梁的抗剪强度随最大骨料粒径的增大而增大。

2)最大骨料粒径的增大使得裂缝表面粗糙程度明显增加,从而导致骨料咬合作用加强,削弱了尺寸效应的影响。

3)提出考虑最大骨料粒径的尺寸效应律公式,反映构件层次上最大骨料粒径对梁抗剪强度及尺寸效应的影响。

### 参考文献

[1] BISWAS R K, IWANAMI M, CHIJIWA N, et al. Effect of non-uniform rebar corrosion on structural performance of RC structures: A numerical and experimental investigation [J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 116908.

[2] SYROKA-KOROL E, TEJCHMAN J. Experimental investigations of size effect in reinforced concrete beams failing by shear [J]. Engineering Structures, 2014, 58: 63-78.

[3] PERMANOON A, AKHAVEISSY A H. Effects of meso-scale modeling on concrete fracture parameters calculation [J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2019, 63(3): 782-794.

[4] BAZANT Z P, KIM J K. Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams [J]. ACI Journal Proceedings, 1984, 81(5): 456-468.

[5] CARPINTERI A, FERRO G. Size effects on tensile fracture properties: A unified explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure [J]. Materials and Structures, 1994, 27(10): 563-571.

[6] JUMAA G B, YOUSIF A R. Size effect on the shear failure of high-strength concrete beams reinforced with basalt FRP bars and stirrups [J]. Construction and Building Materials, 2019, 209: 77-94.

[7] SIM J I, YANG K H, JEON J K. Influence of

- aggregate size on the compressive size effect according to different concrete types [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 44: 716-725.
- [8] HUBER T, HUBER P, KOLLEGER J. Influence of aggregate interlock on the shear resistance of reinforced concrete beams without stirrups [J]. *Engineering Structures*, 2019, 186: 26-42.
- [9] VECCHIO F J, COLLINS M P. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1986, 83(2): 219-231.
- [10] BAŽANT Z P, YU Q. Designing against size effect on shear strength of reinforced concrete beams without stirrups: I. formulation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(12): 1877-1885.
- [11] 金浏, 王涛, 杜修力. 无腹筋RC悬臂梁抗剪强度及尺寸效应理论研究[J]. *计算力学学报*, 2020, 37(4): 396-404.
- JIN L, WANG T, DU X L. Size effect theory on shear strength of RC cantilever beams without stirrups [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2020, 37(4): 396-404. (in Chinese)
- [12] JUMAA G B, YOUSIF A R. Numerical modeling of size effect in shear strength of FRP-reinforced concrete beams [J]. *Structures*, 2019, 20: 237-254.
- [13] JIN L, WANG T, JIANG X A, et al. Size effect in shear failure of RC beams with stirrups: Simulation and formulation [J]. *Engineering Structures*, 2019, 199: 109573.
- [14] DU X L, JIN L, MA G W. A meso-scale analysis method for the simulation of nonlinear damage and failure behavior of reinforced concrete members [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2013, 22(6): 878-904.
- [15] JIN L, YU W X, DU X L, et al. Meso-scale modelling of the size effect on dynamic compressive failure of concrete under different strain rates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125: 1-12.
- [16] MEDDAH M S, ZITOUNI S, BELÂABES S. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(4): 505-512.
- [17] WALRAVEN J C, REINHARDT H W. Theory and experiments on the mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading [J]. *Heron*, 1991, 26(1A): 26-35.
- [18] SONG Z H, LU Y. Mesoscopic analysis of concrete under excessively high strain rate compression and implications on interpretation of test data [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 46: 41-55.
- [19] GENIKOMSOU A S, POLAK M A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS [J]. *Engineering Structures*, 2015, 98: 38-48.
- [20] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [21] COSENZA E, MANFREDI G, REALFONZO R. Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete [J]. *Journal of Composites for Construction*, 1997, 1(2): 40-51.
- [22] 张志金. 无腹筋BFRP钢筋混凝土深梁抗剪性能研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2019.
- ZHANG Z J. Research on shear behavior of BFRP-reinforced concrete deep beams without stirrups [D]. Jinzhou, China: Liaoning University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [23] 王昱. 骨料粒径对无腹筋梁抗剪性能影响的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- WANG Y. Experimental study on aggregate size role in shear strength of reinforced concrete beams without shear reinforcement [D]. Changsha: Hunan University, 2014. (in Chinese)
- [24] 纤维增强复合材料建设工程应用技术规范: GB 50608—2010 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- Technical code for infrastructure application of FRP composites: GB 50608—2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011. (in Chinese)
- [25] Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars: ACI 440.1R-06 [S]. Farmington Hills: ACI Committee, 2006.
- [26] Design and construction of buildings components with fiber reinforced polymers: CSA S806-12 [S]. Toronto: Canadian Standards Association, 2012.
- [27] 金浏, 李健, 余文轩, 等. 考虑骨料粒径影响的混凝土拉伸强度尺寸效应律[J]. *北京工业大学学报*, 2021, 47(4): 311-320.
- JIN L, LI J, YU W X, et al. Size effect law of concrete tensile strength considering the influence of aggregate size [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2021, 47(4): 311-320. (in Chinese)
- [28] ABED F, REFAI AEL, ABDALLA S. Experimental and finite element investigation of the shear performance of BFRP-RC short beams [J]. *Structures*, 2019, 20: 689-701.