

文章编号: 1006-2467(2021)06-0681-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.094

# 模拟碱骨料反应引起的箍筋端部锚固退化对 钢筋混凝土梁受剪性能的影响

赵朋飞, 薛 昕, 杨 成

(厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

**摘 要:** 采用人工方法模拟碱骨料反应(AAR)引起的箍筋下端锚固退化,通过三点加载实验和数值模拟对钢筋混凝土(RC)梁受剪性能展开研究.结果表明:和完好梁相比,剪跨区内箍筋下端锚固退化降低了 RC 梁的受剪承载力,且降低程度随局部黏结失效范围的增大而趋于明显.端部锚固退化导致的箍筋抗剪作用减小以及斜裂缝间骨料咬合承担剪力降低是承载力下降的主要原因.基于模拟箍筋应变的承载机制定量评价结果表明,箍筋下端锚固退化同时降低了混凝土承担剪力  $V_c$  以及箍筋承担剪力  $V_s$ ,但  $V_s$  降幅较  $V_c$  更为显著.

**关键词:** 钢筋混凝土梁; 碱骨料反应; 箍筋端部锚固退化; 受剪性能; 有限元数值模拟

**中图分类号:** TU 375.1

**文献标志码:** A

## Simulation of Influence of End Anchorage Degradation of Stirrups Caused by Alkali Aggregate Reaction on Shear Performance of Reinforced Concrete Beams

ZHAO Pengfei, XUE Xin, YANG Cheng

(School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

**Abstract:** This paper conducted a three-point loading experiment and analytical investigations on the shear performance of reinforced concrete (RC) beams with anchor defect at the lower end of stirrups. In the experiment, artificial methods were used to simulate the anchor degradation of the lower end of the stirrup caused by the alkali-aggregate reaction (AAR). The results show that, compared with the sound beams, the anchorage degradation of stirrups reduces the shear capacity of RC beams, and the degree of reduction becomes more pronounced with the increase of the local bond degradation area. The decrease in shear capacity is thought to be attributed to the reduction of the shear contribution by the stirrups and the reduction of the shear resistance by interlock action of coarse aggregate between diagonal cracks. The quantitative evaluation of shear contribution based on the computed stirrup strains confirms that the anchorage defect at the lower end of the stirrup reduces both the shear contribution  $V_c$  by concrete and  $V_s$  by stirrups, and the reduction of  $V_s$  is more significant than  $V_c$ .

**Key words:** reinforced concrete beams; alkali aggregate reaction (AAR); end anchorage degradation of stirrups; shear performance; finite element method analysis

**收稿日期:** 2020-04-01

**基金项目:** 福建省自然科学基金面上项目(2018J01086), 厦门市交通基础设施智能管养工程技术研究中心开放基金资助项目(TCIMI201804), 国家重点研发计划(2016YFC0701106)

**作者简介:** 赵朋飞(1996-), 男, 安徽省蚌埠市人, 硕士生, 主要从事环境因子引起的钢筋混凝土结构的材料劣化研究.

**通信作者:** 薛 昕, 男, 副教授, 电话(Tel.): 0592-2186180; E-mail: xuexin@xmu.edu.cn.

近年来,碱骨料反应(AAR)导致的钢筋混凝土(RC)结构劣化现象越来越受到国内外学者的关注<sup>[1-4]</sup>.实验研究与现场调查结果表明<sup>[4-7]</sup>,AAR产生的膨胀力会引起钢筋焊接处以及弯曲处脆性断裂,进而导致断裂处附近局部黏结失效. Uehara<sup>[8]</sup>对发生AAR的桥墩进行了详细调查,发现超过15%的箍筋发生了弯曲端部脆断现象. Miyagawa<sup>[9]</sup>等通过现场调查发现日本30条公路和铁路中均存在由于AAR膨胀力导致箍筋弯曲部断裂的情况,并发现箍筋断裂现象可能随机、广泛地出现在RC结构的各个位置. 箍筋弯曲部断裂必然导致箍筋在承载过程中的锚固性能退化,进而对RC结构的受剪性能产生不利影响. 以往的研究主要关注AAR的发生机理以及胀裂混凝土材料性能的劣化等材料层面,从结构层面关注AAR导致的箍筋端部断裂对受剪性能影响的研究较少. 要对遭受AAR危害的RC结构进行合理的维护管理,首先需要对上述影响进行合理的定量评价.

国外学者<sup>[10-11]</sup>在RC构件中采用U型箍筋代替普通箍筋模拟AAR导致的弯曲部断裂. 除了构件尺度的AAR实验室模拟较为困难以外,剥离箍筋弯曲端部断裂影响并进行单独定量评价是采用人工方法开展研究的主要原因. 上述研究主要基于实验的定性评价,从实验和数值两方面揭示箍筋断裂梁RC梁的承载机制,对受剪承载力进行定量评价的研究还相对欠缺.

鉴于以上背景,本文关注AAR导致的箍筋端部锚固退化对RC构件结构性能的影响,以箍筋下

端弯曲部断裂分布及侧肢断裂处局部黏结失效长度为变量,对RC梁的受剪性能开展实验和数值模拟研究,揭示上述变量对承载机制的影响,为定量评价受剪承载力积累基础研究数据.

## 1 实验

### 1.1 试件设计

实验设计了剪跨比为2.0的4根实验梁. 试件尺寸为160 mm×250 mm×1280 mm,混凝土保护层厚度取15 mm. 纵向受拉钢筋采用2根HRB400级肋纹钢筋2C25,上部架立筋配置2C14,箍筋配置A6@120. 图1表示了实验梁几何尺寸及配筋情况. 28 d立方体混凝土抗压强度为43.5 MPa. 通过配置“∩型”箍筋来模拟箍筋的下端弯曲部断裂,侧肢断裂处的局部黏结失效模拟通过在箍侧肢的设计黏结失效区域包裹玻璃纸并涂抹润滑油来实现. 在剪跨区内所有箍筋侧肢的中间处粘贴应变片以测定加载过程中的应变.

考虑到现场箍筋断裂分布的不规则特性,试件所对应的模拟状况如下:① BC2. 0-0,完好对比梁;② BC2. 0-1,剪跨区内①~⑥箍筋双侧箍肢下端弯曲部断裂;③ BC2. 0-2,①~⑥箍筋双侧箍肢下端弯曲部断裂且侧肢断裂处上方 $5d$ ( $d$ 为箍筋直径)范围黏结失效;④ BC3. 2-3,①~⑥箍筋双侧箍肢下端弯曲部断裂且侧肢断裂处上方 $10d$ 范围黏结失效. BC2. 0-1、BC2. 0-2及BC2. 0-3统称为端部锚固退化梁.

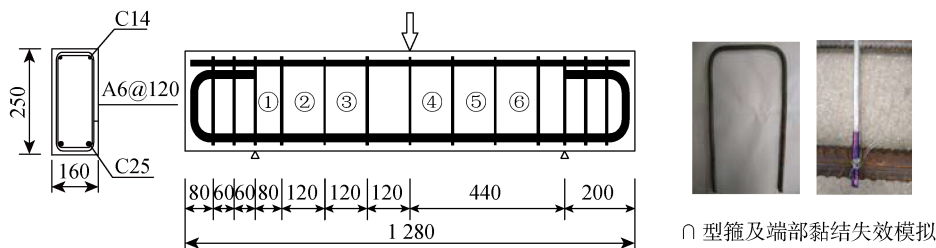


图1 试件几何尺寸及配筋状况(mm)

Fig. 1 Geometry and reinforcement of specimens (mm)

### 1.2 加载实验

采用0.3 mm/min位移控制的跨中单点加载,支座距离为880 mm,加载点和支座处设置钢板以防止局部压坏. 加载设备为单通道电液伺服加载实验系统,在加载过程中通过数据采集器连续采集外部荷载、实验梁的跨中挠度以及箍筋应变,并定期测定主斜裂缝宽度.

## 2 实验结果分析与讨论

表1为加载实验结果,所有实验梁均发生了剪压破坏. 和完好梁相比,所有端部锚固退化梁的承载力均呈不同程度的下降: BC2. 0-1梁降低4%, BC2. 0-2降低了21%, BC2. 0-3梁的降幅达到24%. 图2为荷载挠度曲线,图中 $P$ 为极限荷载, $\delta$

为跨中荷载挠度.受剪开裂之前所有实验梁的初期刚度相差不大,斜裂缝出现后,相比完好梁端部锚固退化梁的刚度呈下降趋势,端部断裂且黏结退化区域为10d的BC2.0-3梁的下降程度最为明显.图3为加载过程主斜裂缝开口进展情况对比,图中 $w$ 为主斜裂缝宽度.所有端部锚固退化梁的主斜裂缝开口进展较完好梁更为迅速,且该倾向随着局部黏结失效长度的增加趋于明显.特别是BC2.0-3梁,主斜裂缝出现最早,在80 kN即已出现,之后随着荷载的增加进展迅速,在临近破坏时的裂缝宽度达到了1.7 mm左右.以上分析表明,箍筋的端部锚固退化减弱了对斜裂缝进展的约束效果,导致主斜裂缝

表1 加载实验结果  
Tab.1 Loading test results

编号	受剪开裂载荷/kN	极限荷载/kN
BC2.0-0	109.3	373.8
BC2.0-1	120.0	358.7
BC2.0-2	102.2	295.1
BC2.0-3	80.3	284.5

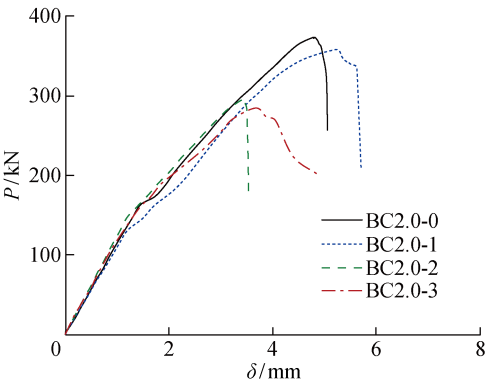


图2 荷载-跨中挠度关系

Fig.2 Load-mid-span deflection relationship

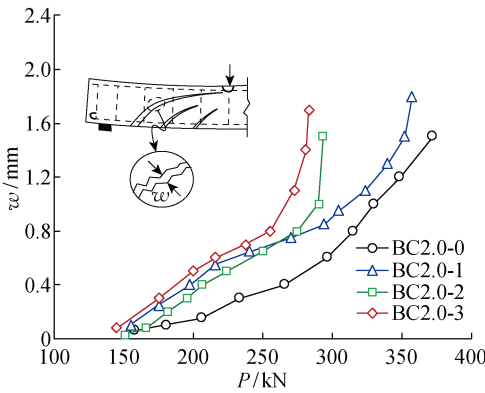


图3 主斜裂缝宽度进展

Fig.3 Opening behavior of critical diagonal cracks

的开口进展加速,进而降低了斜裂缝间通过骨料咬合传递的剪力抵抗,即降低了混凝土承担剪力.断裂处附近的局部黏结失效长度的增加进一步加剧了上述影响.混凝土承担剪力的降低是箍筋端部锚固退化梁受剪承载力下降的原因之一.

图4为实验梁破坏时裂缝分布情况.除BC2.0-1梁主斜裂缝稍靠近加载点以外,其余梁的主斜裂缝发生位置及倾角基本相同.表2为破坏时各箍筋的应变( $\epsilon$ )值,和完好梁②、③号箍筋屈服相比,端部锚固退化梁中除了BC2.0-1梁③号箍筋屈服以外,其余梁大部分箍筋均未屈服,且各箍筋的应变随着黏结失效区域的增加趋于减少.原因如前所述,由于箍筋端部断裂及局部黏结失效减弱了承载过程中的端部锚固效果,使箍筋无法充分发挥抗拉强度.虽然和完好梁相比端部锚固退化梁中和主斜裂缝相交的箍筋数量并无太大变化,但端部锚固退化梁的箍筋应变减小,导致箍筋通过“桁架机制”承担的剪力大幅下降,这是端部锚固退化梁受剪承载力下降的另一主要原因.以上实验结果给出了箍筋端部锚固退化影响的定性评价,为了揭示箍筋端部锚固退化对承载机理的影响,有必要通过数值模拟探究箍筋微观信息,进一步定量评价混凝土承担剪力和箍筋承担剪力的变化状况.

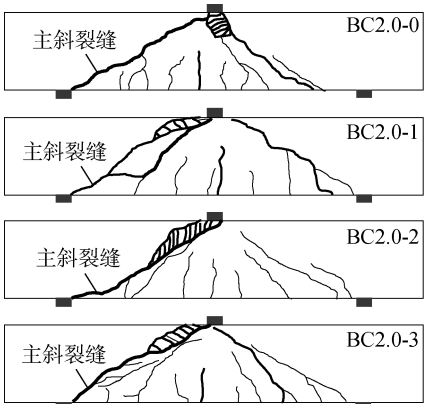


图4 极限状态时裂缝分布

Fig.4 Crack distribution in limit state

表2 极限状态时箍筋应变  
Tab.2 Strain of stirrups in limit state

编号	$\epsilon \times 10^6$		
	箍筋①	箍筋②	箍筋③
BC2.0-0	714	1 792	2 776
BC2.0-1	359	1 400	2 035
BC2.0-2	12	72	295
BC2.0-3	-8	22	233

### 3 有限元数值模拟

#### 3.1 模型

本研究使用商业有限元软件 DIANA 对试件展开二维非线性数值模拟,有限元模型如图 5 所示.由于试件材料属性、几何尺寸的对称性,选择左半跨进行模拟分析.边界条件为跨中截面在  $x$  方向约束,支座在  $y$  方向约束.混凝土、加载及承压板采用 8 节点等参数平面应力单元(CQ16M);钢筋采用三节点桁架单元(CL6TR);钢筋和混凝土之间引入界面单元(CL12I)考虑两者之间黏结滑移举动.对于完好梁,由于闭合型箍筋端部锚固良好,所以将侧肢上、下端部和混凝土之间的界面单元定义为完好黏结,除此之外的界面单元考虑黏结滑移.同理,对于上端锚固良好下端部锚固退化梁的箍筋,将侧肢上端部和混凝土之间的界面单元定义为完好黏结,其余部分的界面单元定义黏结滑移关系.网格尺寸由最大粗骨料粒径来决定.模拟过程采用改进的牛顿-辛普森方法进行迭代计算,以能量准则作为判断是否收敛的基准.

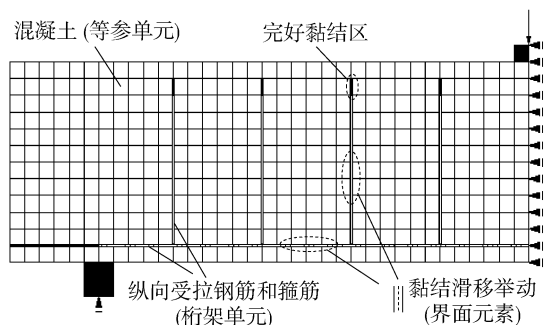


图 5 试件分析模型

Fig. 5 Analytical model for specimens

#### 3.2 本构关系

混凝土的本构关系采用图 6(a)所示,图中  $f_t$  为圆柱形混凝土的受拉强度,  $f_c$  为圆柱形混凝土的受压强度.受压时,应力达到峰值前保持抛物线轨迹上升,峰值点之后随着应变增加应力软化.受拉时,应力达到抗拉强度前保持线性增加,之后按照 Hordijk 提出的抗拉软化模型<sup>[12]</sup>逐渐下降.为了减小网格尺寸对模拟结果的影响,分别引入单位破坏能量  $G_t/l_{cr}$  和  $G_c/l_{cr}$ <sup>[13]</sup>来定义受拉和受压的应力-应变关系中峰值后的应力-应变行为,其中  $G_t$  为受拉断裂能,  $G_c$  为受压断裂能,  $l_{cr}$  为等效单位长度.

由于有腹筋 RC 梁的剪压破坏特征是箍筋屈服后加载板附近混凝土压坏,所以不考虑钢筋的应变硬化,钢筋的应力-应变关系按图 6(b)所示的理想

弹塑性材料考虑,屈服条件符合 Von Mises 屈服准则,图中  $f_y$  为钢筋的屈服强度,  $\sigma$  为应力,  $\epsilon$  为应变.关于钢筋和混凝土之间的黏结,采用 Dörr 提出的黏结-滑移模型<sup>[14]</sup>进行模拟.对于箍筋端部黏结失效区域,采用和健全钢筋相同的黏结滑移关系,但整体强度下降为 5%.

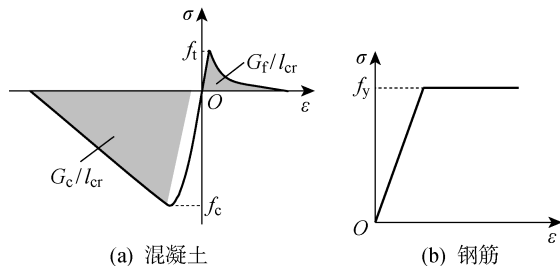


图 6 材料本构关系

Fig. 6 Constitutive relationships of materials

#### 3.3 裂缝模型及裂缝间应力传递模拟

本研究采用 DIANA 提供的弥散裂缝模型中的总应变固定裂缝模型对裂缝进行模拟.在 RC 构件中,通常认为在裂缝出现后,剪应力仍然可以通过骨料内锁机制传递,但该传递能力随着裂缝的开口扩展而减小.对于有腹筋梁,由于箍筋的配置约束了斜裂缝的开口扩展,强化了骨料内锁机制,因此认为开裂斜裂缝间在一段时间内仍然可以传递较大的剪力.因此,本研究采用 DIANA 提供的恒定剪切滞留系数  $\beta$  考虑裂缝间的剪力传递,即将开裂单元刚度矩阵中的剪切刚度由  $G$  折减为  $\beta G$ .斜裂缝间的剪应力传递机制非常复杂,还没有成熟可信赖的定量评价模型,根据以往的研究结果<sup>[15]</sup>,本研究选取  $\beta=0.2$ .

### 4 有限元模拟结果

#### 4.1 完好梁的模拟结果检验

图 7 为完好梁 BC2.0-0 的模拟结果和实验结果对比.图 7(a)为荷载-挠度关系对比.实验极限荷载值为 373.8 kN,对应的模拟结果为 367.0 kN,误差 1.8%,模拟结果与实验结果吻合较好.加载过程中的模拟刚度变化与实验加载观察到的规律较为一致,随着主斜裂缝的出现,刚度突然发生明显下降.需要注意到,由于本次模拟采用弥散裂缝模型,开裂单元和邻近单元发生了“stress locking”效应<sup>[16]</sup>,所以模拟的整体刚度大于加载实验结果.图 7(b)为破坏时裂缝分布对比.由图可知,模拟主斜裂缝分布的位置和倾角与实验结果相近.以上结果表明,数值模拟结果很好地再现了加载实验现象.

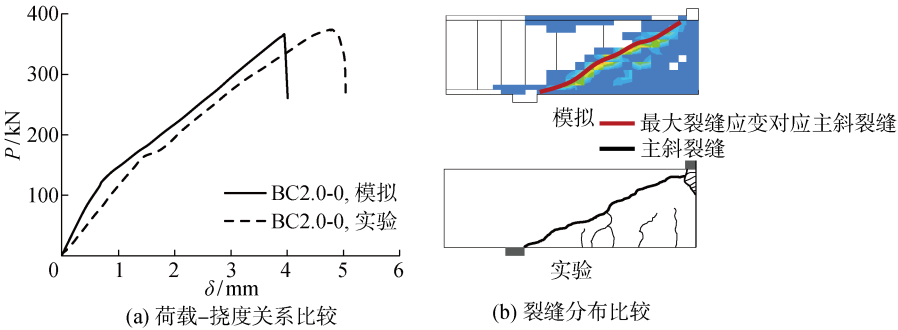


图 7 荷载挠度关系以及裂缝分布比较  
Fig. 7 Comparisons of load deflection and crack distribution

4.2 端部锚固退化梁的模拟结果验证

图 8 为实验梁极限荷载的模拟和实验结果比较,图中  $V_u$  为实验梁受剪承载力. 除了 BC2.0-1 梁,绝大多数试件的模拟极限荷载值与相应的实验荷载值吻合较好,误差均在 2% 以内. 箍筋弯曲端部断裂且侧肢  $10d$  范围内黏结失效的 BC2.0-3 梁的受剪承载力最低,仅为 280.0 kN. 值得注意的是,BC2.0-1 梁实验极限荷载值相比完好梁仅下降 4%,而相应的模拟值下降结果为 9%. 考虑到 BC2.0-1 在剪跨区内箍筋弯曲端部全部断裂,“桁架机制”应该受到明显削弱,所以判断模拟结果应该更为合理.

图 9 为箍筋侧肢中点应变的模拟和实验结果对

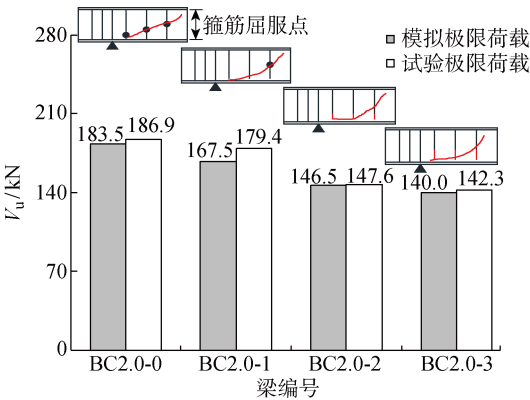


图 8 极限荷载时模拟结果和实验结果比较  
Fig. 8 Comparisons of simulation results and experimental results at ultimate load

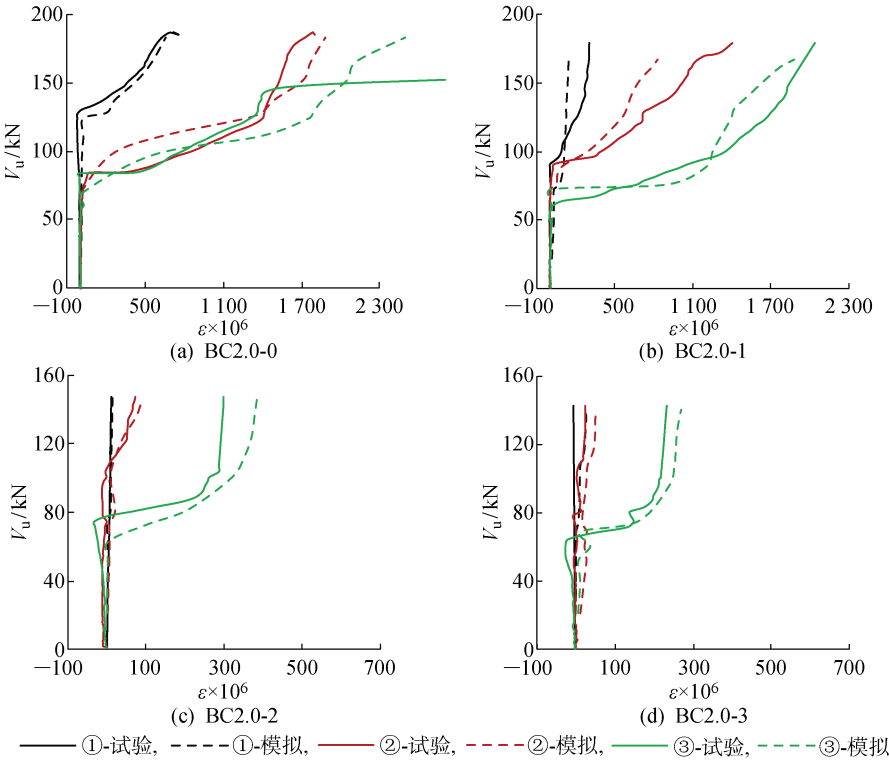


图 9 箍筋应变模拟和实验结果对比  
Fig. 9 Comparisons of stirrup strain simulation and experimental results

比. 由图可知, 箍筋整体应变随着侧肢断裂附近黏结失效范围的增加而趋于减小, 箍筋模拟应变的大小和进展趋势与实验测定结果基本一致, 进一步证明了数值模拟的有效性.

由于承载过程中箍筋发挥的受剪作用取决于和

斜裂缝相交处的应力, 故应关注箍筋处的应变进展. 模拟结果如图 10 所示, 图中还一并表示了模拟裂缝分布图. 由图可知, 完好梁剪跨内箍筋全部屈服, 端部锚固退化梁中 BC2.0-1 仅 ③ 号钢筋屈服, 而 BC2.0-2 和 BC2.0-3 梁剪跨内所有箍筋均未屈服.

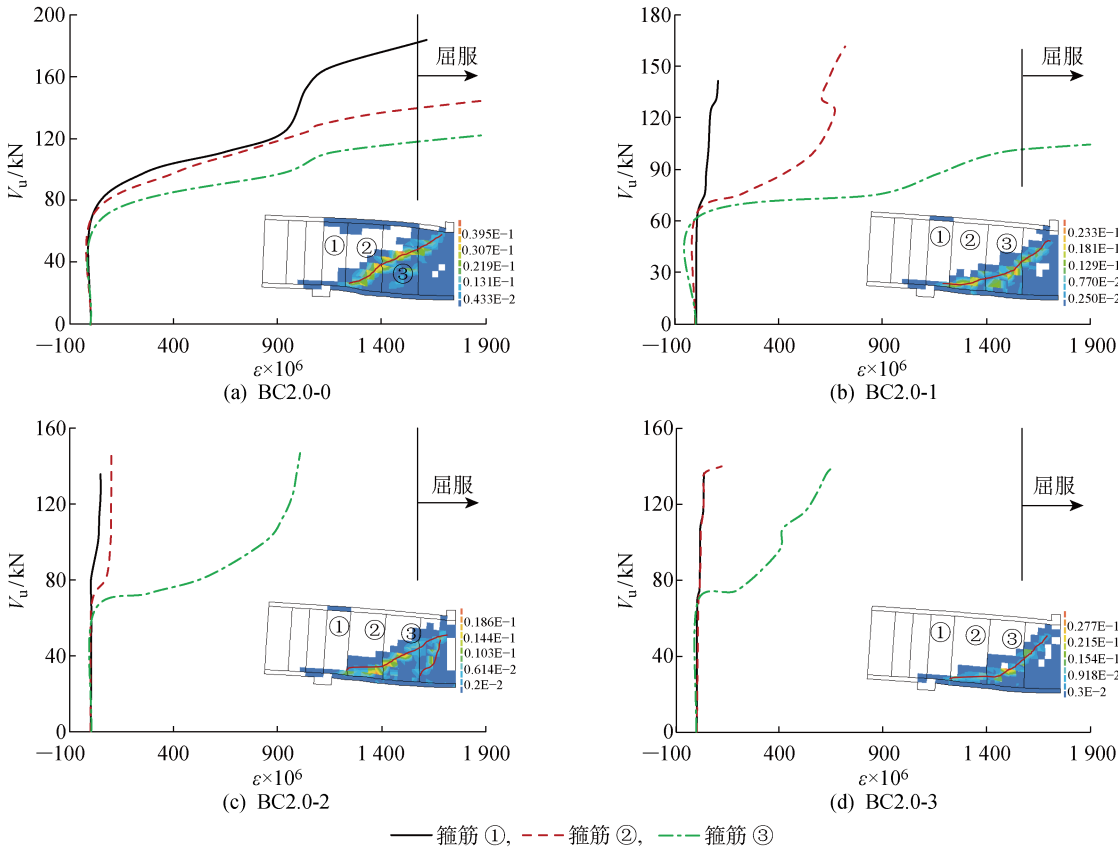


图 10 加载过程中模拟箍筋应变进展

Fig. 10 Development of computed stirrup strain during loading process

4.3 基于模拟结果的承载机制分析

根据“修正桁架机制”<sup>[17]</sup>, RC 梁一旦受剪开裂, 剪力由混凝土和箍筋共同承担, 如下式:

$$V_u = V_c + V_s \tag{1}$$

式中:  $V_c$  为混凝土承担剪力, 由斜裂缝上方剪压区混凝土承担剪力  $V_{cz}$ 、斜裂缝间粗骨料咬合传递剪力  $V_a$  以及纵筋销栓作用传递剪力  $V_d$  三部分构成;  $V_s$  为和主斜裂缝相交的箍筋通过“桁架作用”承担的剪力.  $V_s$  可根据下式计算:

$$V_s = \frac{E_s \bar{\epsilon} A_s h_0}{s} \tag{2}$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \cdots + \epsilon_n}{n} \tag{3}$$

式中:  $E_s$  为箍筋名义弹性模量;  $A_s$  为健全钢筋的截面面积;  $h_0$  为有效截面高度;  $s$  为箍筋间距;  $\bar{\epsilon}$  为箍筋平均应变;  $\epsilon_1, \epsilon_2, \cdots, \epsilon_n$  为各箍筋和主斜裂缝相交处应变, 可利用图 10 结果.

图 11 为模拟加载过程中  $V_c$  和  $V_s$  的变化结果, 嵌入式饼图显示了峰值破坏时的  $V_c$  和  $V_s$  在  $V_u$  中的占比. 在整个承载过程中, 端部锚固退化梁的  $V_s$  较完好梁为小, 且降幅随局部黏结失效长度增加而增大. 与此相比, 受剪开裂后  $V_c$  的增加更为迅速. 峰值时  $V_c$  在  $V_u$  中的占比随箍筋下端部断裂及局部黏结失效长度的增加趋于增大, 而  $V_s$  的占比则趋于减小. 这表明, 对于端部锚固退化梁, 在直至破坏的整个承载过程中混凝土发挥了更重要的抗剪作用.

表 3 为破坏时基于模拟结果的  $V_c$  与  $V_s$  定量评价. 评价结果表明, 随着箍筋下端弯曲部断裂及断裂处局部黏结失效,  $V_c$  与  $V_s$  均有不同程度的下降. 按 BC2.0-0、BC2.0-1、BC2.0-2、BC2.0-3 的顺序,  $V_c$  降比分别为 0.2%、7.3% 及 10.0%, 而对应的  $V_s$  降比分别为 45.4%、75.5% 及 82.5%, 明显大于  $V_c$ . 以上结果表明, 端部锚固退化导致的箍筋承担剪力下降是整体承载力下降的主要原因.

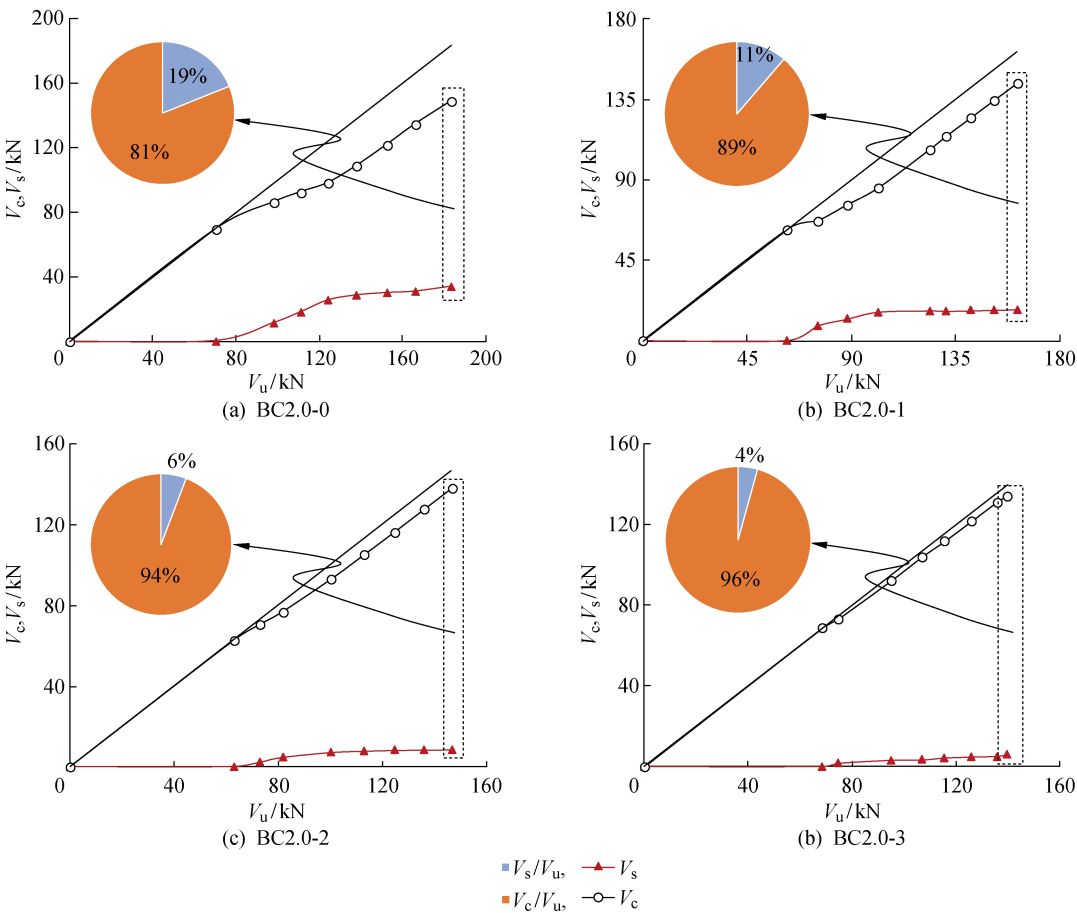


图 11 加载过程的  $V_c$  和  $V_s$  进展以及破坏时的两者贡献占比

Fig. 11 Development of  $V_c$  and  $V_s$  with applied load and propotion of two contributions at time of destruction

表 3 极限状态时  $V_c$  和  $V_s$  比较

Tab. 3 Comparisons of  $V_c$  and  $V_s$  in ultimate state

编号	$V_c$		$V_s$	
	数值/kN	降比/%	数值/kN	降比/%
BC2. 0-0	148. 9	—	34. 6	—
BC2. 0-1	148. 6	0. 2	18. 9	45. 4
BC2. 0-2	138. 0	7. 3	8. 5	75. 5
BC2. 0-3	134. 0	10. 0	6. 0	82. 5

5 结论

本文分析探讨 AAR 导致的箍筋端部锚固退化对 RC 梁受剪承载性能的影响,为量化评价受剪承载力以及后续的补修补强提供理论支撑.得到以下结论:

- (1) 剪跨区内箍筋的端部锚固退化对刚度及裂缝分布等影响不大,但降低了 RC 梁的受剪承载力,且降幅随局部黏结失效范围的增加而增大.
- (2) 箍筋的端部锚固退化诱发了承载过中的锚固失效,使箍筋的整体应变整体下降,最终导致  $V_s$

的显著降低.同时,箍筋的端部锚固退化还减弱了对斜裂缝开口进展的约束效果,进而降低了  $V_c$ .上述现象随黏结失效范围的增加而增大.

(3) 数值模拟结果很好地验证了实验现象,基于模拟箍筋应变的承载机制定量评价结果进一步表明,随箍筋断裂处局部黏结失效长度的增加,相比于  $V_c$ , $V_s$  的降比更为显著.

参考文献:

[ 1 ] 温海锋,张海波. 碱骨料反应及辅助胶凝材料对其抑制机理的研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(6): 1782-1787.  
WEN Haifeng, ZHANG Haibo. Review of alkali-aggregate reaction and supplementary cementious materials (SCMs) on its inhibition mechanism[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(6): 1782-1787.

[ 2 ] 徐小伟,唐红平. 巴基斯坦卡洛特水电工程混凝土碱骨料反应研究[J]. 人民长江, 2018, 49(A02): 154-156.  
XU Xiaowei, TANG Hongping. Study on concrete

- alkali aggregate reaction for Karot Hydropower Station, Pakistan[J]. **Yangtze River**, 2018, 49(A02): 154-156.
- [ 3 ] 宋百姓, 柯国军, 潘坚文. 混凝土碱骨料反应及力学性能细观模拟[J]. **工程力学**, 2017, 34(4): 134-139.  
SONG Baixing, KE Guojun, PAN Jianwen. Meso-scale particle modeling of alkali-silica reaction and mechanical properties of concrete[J]. **Engineering Mechanics**, 2017, 34(4): 134-139.
- [ 4 ] SAOUMA V E, HARIRI-ARDEBILI M A, LE PAPE Y, *et al.* Effect of alkali-silica reaction on the shear strength of reinforced concrete structural members. A numerical and statistical study[J]. **Nuclear Engineering and Design**, 2016, 310: 295-310.
- [ 5 ] WEBB Z D. Experimental investigation of ASR/DEF-induced reinforcing bar fracture[D]. Austin, United States: The University of Texas at Austin, 2011.
- [ 6 ] KARTHIK M M, MANDER J B, HURLEBAUS S. Deterioration data of a large-scale reinforced concrete specimen with severe ASR/DEF deterioration[J]. **Construction and Building Materials**, 2016, 124: 20-30.
- [ 7 ] 王惊旻. 由 ASR 引起的箍筋断裂试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.  
WANG Jingmin. Evaluation of stirrup fractures due to experimental simulations of ASR[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014.
- [ 8 ] UEHARA N. Rebar damage and internal degradation of concrete due to alkali-aggregate reaction[D]. Kyushu, Japan: Kyushu Institute of Technology, 2016.
- [ 9 ] MIYAGAWA T. Fracture of reinforcing steels in concrete damaged by ASR[J]. **Construction and Building Materials**, 2013, 39: 105-112.
- [10] MEGAWA K, NAKAMURA E, SATO Y. Shear behavior of RC beam with unbond regeon and decreased bond strength in stirrups[J]. **Proceedings of the Japan Concrete Institute**, 2004, 26(2): 973-978.
- [11] ABE H, SAITO S, HIGAI T. Investigation on shear failure of RC beams arranging reinforcement with inadequate anchorage[J]. **Proceeding of Japan Concrete Institute**, 2005, 27(2): 337-342.
- [12] HORDIJK D A. Local approach to fatigue of concrete [D]. Doctoral Dissertation: Delft University of Technology, 1991.
- [13] HENDRIKS M, DE BOER A, BELLETTI B. Guidelines for nonlinear finite element analysis of concrete structures[J]. **Rijkswaterstaat Centre for Infrastructure**, 2017, Report RTD: 1016-1: 2017.
- [14] DÖRR K. Ein beitrage zur berechnung von stahlbetonscheiben unter besonderer berücksichtigung des verbundverhaltens[D]. Hesse-Darmstadt: University of Darmstadt, 1980.
- [15] XUE X, SEKI H, SONG Y. Shear behavior of RC beams containing corroded stirrups[J]. **Advances in Structural Engineering**, 2014, 17(2): 165-177.
- [16] ROTS J G, NAUTA P, KUSTER G M A, *et al.* Smeared crack approach and fracture localization in concrete[J]. **Heron**, 1985(1): 1512-1533.
- [17] ACI-ASCE Committee. The shear strength of reinforced concrete members[J]. **Journal of the Structural Division**, 1973, 99(ST6): 1148-1157.

(本文编辑:陈晓燕)