

高温后高强混凝土剪切裂缝与拉剪箍筋销栓作用

李志卫¹, 王 婉¹, 肖建庄^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为研究高温后高强混凝土的剪切裂缝和拉剪箍筋销栓作用, 浇筑了两种强度高强混凝土 Z 形试件. 分别对试件进行了 200, 400, 800 °C 的高温试验, 通过高温后试件的直剪试验, 研究了温度和混凝土强度对剪切裂缝的影响. 基于弹性地基梁理论建立了箍筋销栓作用模型, 结合实测的剪切裂缝宽度和裂缝滑移, 计算得到高温后高强混凝土与箍筋之间的销栓剪应力. 研究表明: 除 200 °C 以外, 高强混凝土的裂缝峰值位移(裂缝峰值宽度和裂缝峰值滑移)随温度的升高而增大; 无论经历多高的温度, 混凝土的强度越高, 裂缝峰值位移越小; 箍筋的销栓剪应力与裂缝滑移呈线性关系, 销栓剪切刚度随温度的升高而降低, 随混凝土强度的增大而增大; 销栓剪应力随温度的升高而增大, 随混凝土强度增大而减小.

关键词: 高强混凝土; 高温; 剪切裂缝; 销栓作用

中图分类号: TU528; TU375

文献标志码: A

Shear Crack and Tensile-shear Stirrup Dowel Action of HSC After Elevated Temperatures

LI Zhiwei¹, WANG Wan¹, XIAO Jianzhuang^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the shear crack and the tensile-shear stirrup dowel action of high-strength concrete (HSC) after elevated temperatures, two Z shaped HSC specimens were cast. After being exposed to 200°C, 400°C and 800°C, the push-off tests of specimens were conducted to study the effect of the elevated temperature and the concrete strength on the shear crack. The dowel action model was developed based on the beam on elastic foundation theory, and the dowel shear stress between HSC and stirrup after elevated temperatures was calculated in combination with the measured crack width and crack slip. The results show that except for an exposed temperature of 200°C, the crack peak deformation

(crack peak width and crack peak slip) increases with the increase of temperature. As the strength of concrete (at any temperature) increases, the peak crack deformation decreases. The dowel shear stress of the stirrup exhibits a linear relationship with the crack slip, and the dowel shear stiffness reduces as the exposed temperature rises and increases as the concrete strength increases. The dowel shear stress increases as the exposed temperature rises and reduces as the concrete strength increases.

Key words: high-strength concrete (HSC); elevated temperature; shear crack; dowel action

由于高强混凝土(HSC)具有强度高、耐久性好等优点, 在土木工程中的应用越来越广泛. 但是研究发现, 与普通混凝土(NSC)相比, HSC 的抗火性较差^[1]. 剪切裂缝会对混凝土结构的安全性、适用性和耐久性等产生很大影响, 因此火灾对混凝土剪切裂缝的影响越来越引起国内外专家的重视, 而且已经取得了一定的研究成果. 肖建庄等^[2]研究发现, 高温后 HSC 剪力墙在低周反复荷载作用下背火面先于受火面出现剪切裂缝. Ellingwood 等^[3]通过试验研究了 6 根足尺 NSC 梁的抗火性能, 结果证明, 火灾发生 90 min 内梁支座处就会出现剪切裂缝. 但是, 文献[2-3]都只是对剪切裂缝进行了简单的定性描述, 未见针对高温后 HSC 剪切裂缝的研究报道.

在实际工程中, 当剪跨比较小(≤ 1)时, 牛腿根部和鱼腹梁端部等部位处于受剪状态, 箍筋垂直于裂缝方向. 此时箍筋的受力与纵筋相似, 承受拉力和剪力的共同作用, 存在一定的销栓力. 一般来说箍筋的直径较小, 混凝土开裂不大, 因此在研究牛腿根部和鱼腹梁端部的混凝土剪切性能时多不考虑拉剪箍筋的销栓作用^[4]. 但是高温后混凝土强度和剪切裂

收稿日期: 2014-04-15

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2012CB719703)

第一作者: 李志卫(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为高强混凝土抗火. E-mail: 1110115@tongji.edu.cn

通讯作者: 肖建庄(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构抗火. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

缝发生了变化,拉剪箍筋的销栓力对混凝土剪切强度的影响随之变化,此时能否忽略箍筋的销栓作用还有待进一步研究.本文在实测剪切裂缝宽度和裂缝滑移的基础上,运用弹性地基梁原理分析了高温后 HSC 中拉剪箍筋销栓作用的变化规律.

1 试验概况

1.1 试件设计

两种强度 HSC,分别用 L 和 H 系列表示.配制 HSC 所用的原材料为:42.5R(L 系列)和 52.5R(H 系列)普通硅酸盐水泥, S95 级矿渣微粉, 900 级硅粉, 5~25 mm(L 系列)和 5~20 mm(H 系列)连续级配硅质石子, 细度模数为 2.7 的中砂, 自来水, 聚羧酸减水剂. 两个系列 HSC 的配合比见表 1.

本文共 22 个 Z 形试件, L 和 H 系列各 11 个, 尺寸都为 150 mm×400 mm×600 mm. 剪切面面积 $A_c=120\text{ mm}\times300\text{ mm}=36\,000\text{ mm}^2$, 试件各部位尺寸如图 1 所示. 试件的箍筋配筋率 $\rho=402/36\,000$

$=1.12\%$, 试件配筋如图 2 所示. 在试件厚度(150 mm)方向距表面 5 mm, 33 mm(纵筋处)和 75 mm(中心处)各放置一个 K 型热电偶. 试件浇筑 24 h 后拆模, 标准养护 28 d.

表 1 HSC 配合比

Tab. 1 Mixture proportion of HSC $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$							
系列	水泥	矿渣微粉	硅粉	石子	砂	水	减水剂
L	413	138	0	1 046	614	182	2.134
H	406	145	29	1 115	655	136	14.500

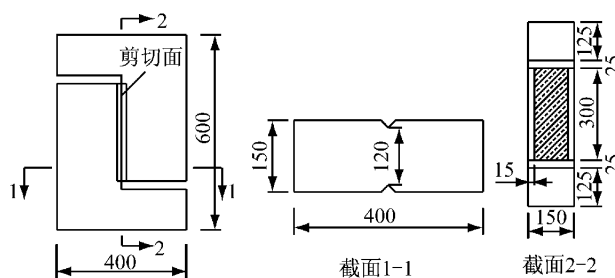


图 1 试件尺寸(单位:mm)

Fig.1 Dimensions of specimen (unit: mm)

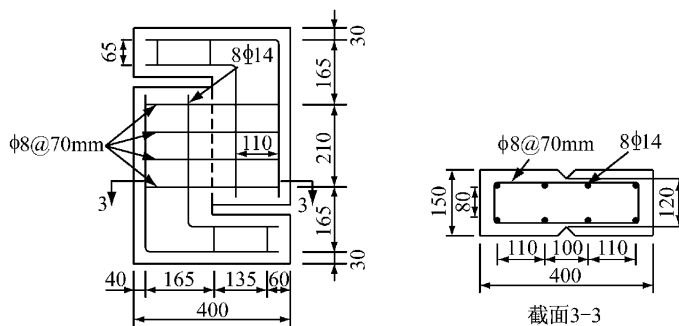


图 2 试件配筋(单位:mm)

Fig.2 Reinforcement arrangement of specimen (unit: mm)

1.2 高温试验

与常温相比,高温后混凝土的抗压强度在 200 °C 时可能有少量降低亦或增大; 400 °C 以前强度降低不多, 温度超过 400 °C 强度迅速降低; 800 °C 时抗压强度仅为常温下的 20%~30%. 根据混凝土强度随温度的变化规律, 本文试验试件经历的最高温度分别为 20, 200, 400, 800 °C, 因此共有 8 种工况. 除了 20 °C 一组有 2 个试件外, 其他温度下都有 3 个试件. 为表述方便, 用系列名称、经历温度和英文字母标记每个试件. 例如, L-200-a 表示 L 系列 HSC, 经历的最高温度为 200 °C, 第 1 个试件.

电炉的升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 达到预定温度(200, 400, 800 °C)后, 保持温度恒定, 直到试件中心与预定温度的温差小于 10% 时停止试验. 加热过程

中, 温度升高到 350 °C 左右时, 有水汽冒出且持续较长时间. 温度达到 485 °C 左右时, H-800 试件发出爆裂声. 这是因为 H 系列的密实性高, 渗透性差, 随着温度的升高, 混凝土内部的蒸汽压迅速增大, 当蒸汽压超过混凝土的抗拉强度时即发生爆裂.

加热完成后观察试件的变化, H-800 工况的 3 个试件发生了表面爆裂, 但由于箍筋的约束作用, 剪切面的混凝土完好, 不会对下一步的 push-off(直剪)试验产生影响. 经历 400 °C 及以上的温度后, 试件表面产生了毛细裂缝. 随着温度的升高, HSC 的颜色变浅, 通过与标准比色卡对比可知, 常温以及 200, 400, 800 °C 后 L 系列的颜色分别为灰白、浅灰、乳白和象牙色, H 系列的颜色分别为墨灰、鼠灰、暗灰和浅灰色.

1.3 Push-off 试验

Push-off 试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行,试验前将 H-800 工况的 3 个试件表面进行修补,试验时 HSC 的立方体抗压强度分别为 64.7 MPa(L 系列)和 94.0 MPa(H 系列). 试验机上部刀口、下部滚轴实现试件的集中力加载. 在试件表面水平设置 3 个位移计测量剪切面的横向裂缝宽度,另一面垂直设置 2 个位移计测量剪切面的竖向裂缝滑移, push-off 试验见图 3.

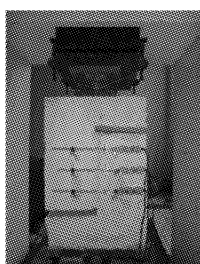


图3 Push-off 试验加载图

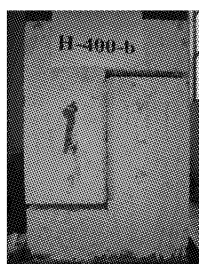


图4 剪切面开裂图

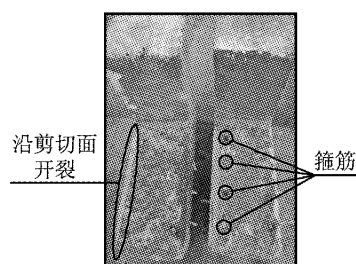


图5 典型的试件剪切面

Fig.3 Sketch of push-off test

Fig.4 Sketch of shear plane cracking

Fig.5 Typical shear plane of specimen

2 销栓作用模型

将 push-off 试件的 HSC 看作弹性地基,假定在远离剪切面的位置,箍筋没有竖向位移,箍筋相当于弹性地基上的半无限梁. HSC 的反力由箍筋的挠曲平衡计算得到,如图 6 所示,其中 V 和 M 分别为销栓力和销栓弯矩. Timoshenko 等^[5]分析了弹性地基梁的受力和变形,推导了梁的挠曲微分方程为

$$E_s I_s \frac{d^4 y}{dx^4} = -\varphi k y \quad (1)$$

式中: E_s 为梁(箍筋)的刚度; I_s 为梁(箍筋)的截面惯性矩; φ 为梁的宽度(箍筋的直径); k 为弹性地基(混凝土)的刚度; y 为梁(箍筋)的挠曲值.

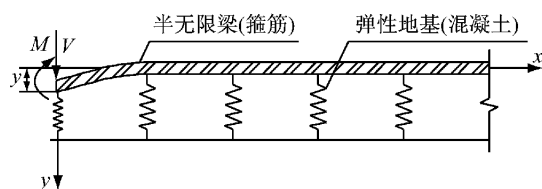


图6 弹性地基上的半无限梁

Fig.6 Semi-infinite beam on an elastic foundation

求解式(1)的微分方程得

$$y = e^{\lambda x} (A \cos \lambda x + B \sin \lambda x) + e^{-\lambda x} (C \cos \lambda x + D \sin \lambda x) \quad (2)$$

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{\varphi k}{4E_s I_s}} \quad (3)$$

首先给压力机设定一个很小的力(如 1 kN),使压力机下部的承压盘缓慢升高,试件顶部与刀口刚好接触. 然后切换为位移加载方式,位移速率为 $0.05 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,同时压力机开始自动记录试件承受的压力,记录频率为 1 Hz. 当压力基本保持恒定时停止试验,加载过程中试件沿剪切面开裂,如图 4 所示. 试验后人工剪断箍筋,将试件沿剪切面劈开,典型的试件剪切面如图 5 所示.

式中: A, B, C, D 为边界条件确定的常数; λ 为与箍筋和混凝土的弹性性质相关的综合参数,反映了箍筋与混凝土的相对刚度,对箍筋的受力特征和变形有重要影响. 此模型的关键是确定弹性地基(混凝土)刚度 k . Soroushian 等^[6]通过试验研究了混凝土作为弹性地基的承载刚度,并建立了相关公式

$$k = \frac{127c_1 \sqrt{f'_c}}{\varphi^{2/3}} \quad (4)$$

式中: c_1 为与箍筋净间距有关的系数,当净间距 $\leq 25.4 \text{ mm}$ 时取 0.6,当净间距 $> 25.4 \text{ mm}$ 时取 1.0; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度.

需要指出的是,当箍筋应力达到屈服强度时,会导致箍筋销栓刚度和抗弯承载力的下降^[7],因此式(4)只适用于箍筋屈服前. 已有研究证明,在 push-off 试验中,当箍筋屈服时混凝土达到峰值剪应力(剪切强度),因此箍筋峰值销栓力与混凝土剪切强度同时发生^[8]. 本文暂不考虑箍筋屈服后的销栓力.

设在裂缝表面,即 $x=0$ 处销栓力和销栓弯矩分别为 V_0 和 M_0 ,则式(2)中 $A=B=0$,求解式(2)得到 HSC 弹性变形产生的箍筋位移为

$$y = \frac{e^{-\lambda x}}{2\lambda^3 E_s I_s} [V_0 \cos \lambda x - \lambda M_0 (\cos \lambda x - \sin \lambda x)] \quad (5)$$

对式(5)求微分,得到箍筋在裂缝表面处的斜率

$$\frac{dy}{dx} = \frac{e^{-\lambda x}}{2\lambda^2 E_s I_s} [(2\lambda M_0 - V_0) \cos \lambda x - V_0 \sin \lambda x] \quad (6)$$

假定在裂缝中间存在箍筋的反弯点,箍筋销栓作用如图 7 所示. 通过剪切裂缝宽度建立 V_0 和 M_0 的关系式

$$M_0 = -(\omega/2)V_0 \quad (7)$$

式中 ω 为裂缝宽度.

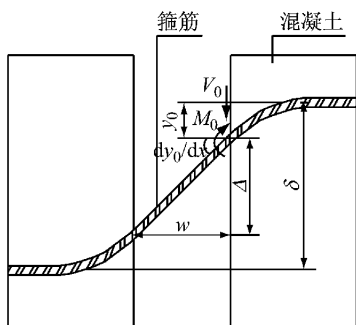


图 7 箍筋销栓作用

Fig. 7 Dowel action of stirrup

在 $x=0$ 处,将式(7)带入式(5)和(6)得

$$y_0 = \frac{\lambda\omega + 2}{4\lambda^3 E_s I_s} V_0 \quad (8)$$

$$\frac{dy_0}{dx} = \frac{\lambda\omega + 1}{2\lambda^2 E_s I_s} V_0 \quad (9)$$

假定在集中荷载下,两个剪切面位移是反对称的,对一个剪切面的分析结果同样适用于另一个剪切面. 由图 7 可知,箍筋的销栓剪切位移为

$$\Delta = \delta - 2y_0 = \delta - \frac{\lambda\omega + 2}{2\lambda^3 E_s I_s} V_0 \quad (10)$$

式中 δ 为裂缝滑移.

由销栓剪切位移 Δ 求销栓力 V_0 [9]

$$V_0 = (\lambda^3 E_s I_s) \Delta = \lambda^3 E_s I_s \delta - \frac{\lambda\omega + 2}{2} V_0 \quad (11)$$

整理式(11)得

$$V_0 = \frac{2\lambda^2 E_s I_s}{\omega + 4/\lambda} \delta \quad (12)$$

裂缝宽度 ω 和裂缝滑移 δ 通过 push-off 试验得到,将式(3)和(4)带入式(12)即可计算销栓力 V_0 .

高温后立方体抗压强度按下式计算 [10]:

$$\frac{f_{cu,T}}{f_{cu,20}} = 0.002 \left(\frac{T}{100} \right)^3 - 0.03 \left(\frac{T}{100} \right)^2 + 0.07 \left(\frac{T}{100} \right) + 0.9737 \quad (13)$$

式中: T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; $f_{cu,T}$ 为经历温度 T 后的混凝土立方体抗压强度; $f_{cu,20}$ 为常温下混凝土立方体抗压强度.

文献[11]建立了常温下混凝土立方体和圆柱体抗压强度的关系式

$$f'_c = \alpha f_{cu} \quad (14)$$

式中: α 为与混凝土强度等级有关的系数,当混凝土强度等级小于 C60 时, α 为 0.79; 当混凝土强度等级为 C60, C70 和 C80 时, α 分别为 0.833, 0.857 和 0.875. 文献[11]未对 C80 以上的 α 值作出规定. 本文假定当混凝土强度等级超过 C80 时, α 仍取为 0.875. 对于高温后混凝土立方体和圆柱体的抗压强度关系仍按式(14)计算,则式(14)变为

$$f'_{c,T} = \alpha f_{cu,T} \quad (15)$$

式中: $f'_{c,T}$ 为高温后圆柱体抗压强度; α 的取值与式(14)相同.

通过试验测得箍筋在常温下的受拉屈服强度和弹性模量分别为 325 MPa 和 192 GPa, 高温后的箍筋屈服强度按下式计算,弹性模量保持不变 [12]:

$$\frac{f_{y,T}}{f_{y,20}} = \begin{cases} 1, & 0 \leq T < 500 \\ (114.95 - 0.0299T) \times 10^{-2}, & 500 \leq T \leq 900 \end{cases} \quad (16)$$

式中: T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; $f_{y,T}$ 为高温后箍筋的屈服强度; $f_{y,20}$ 为常温下箍筋的屈服强度.

对 8 种工况下式(12)中的参数进行计算可知, λ 为 0.048 73~0.054 79 mm^{-1} , $\lambda^2 E_s I_s$ 为 91 622.82~115 827.97 N, ω 为 0~1.96 mm. 可见 ω 远小于 $4/\lambda$, 因此 V_0 可近似看作以 δ 为变量, $2\lambda^2 E_s I_s / (4/\lambda)$ 为斜率的线性函数.

3 剪切裂缝分析

在 push-off 试验中定义 Z 形试件的剪应力为 $\tau = P/A_c$. 其中, P 为试件承受的集中力, τ 包括箍筋销栓力的影响. 峰值剪应力为混凝土的剪切强度 τ_u , 试件达到剪切强度 τ_u 时所对应的裂缝位移(裂缝宽度 ω_u 和滑移 δ_u)为峰值位移. 图 8 给出了不同工况下的剪切裂缝, 图中裂缝宽度和滑移都取同一试件的位移计记录数据的平均值.

由图 8a 和 8e 可知, 常温下两个系列 HSC 在达到剪切强度 τ_u 之前, 几乎没有裂缝滑移, 但是都有一定的裂缝宽度. 达到 τ_u 后, 裂缝滑移迅速增大. 这是因为随着剪应力的增大, 剪切面出现裂缝. 但是 HSC 开裂后, 裂缝并没有贯通整个剪切面, 骨料咬合力仍能够承受一定的剪应力. 另外, HSC 中的水泥凝胶体弹性模量较大, 剪应力作用下基本没有弹性变形, 因此裂缝没有滑移. 直到裂缝贯通整个剪切面, 剪切面两侧完全分离, 骨料咬合作用消失, 裂缝滑移突然增大.

随着温度的升高, 两个系列的裂缝峰值滑移逐

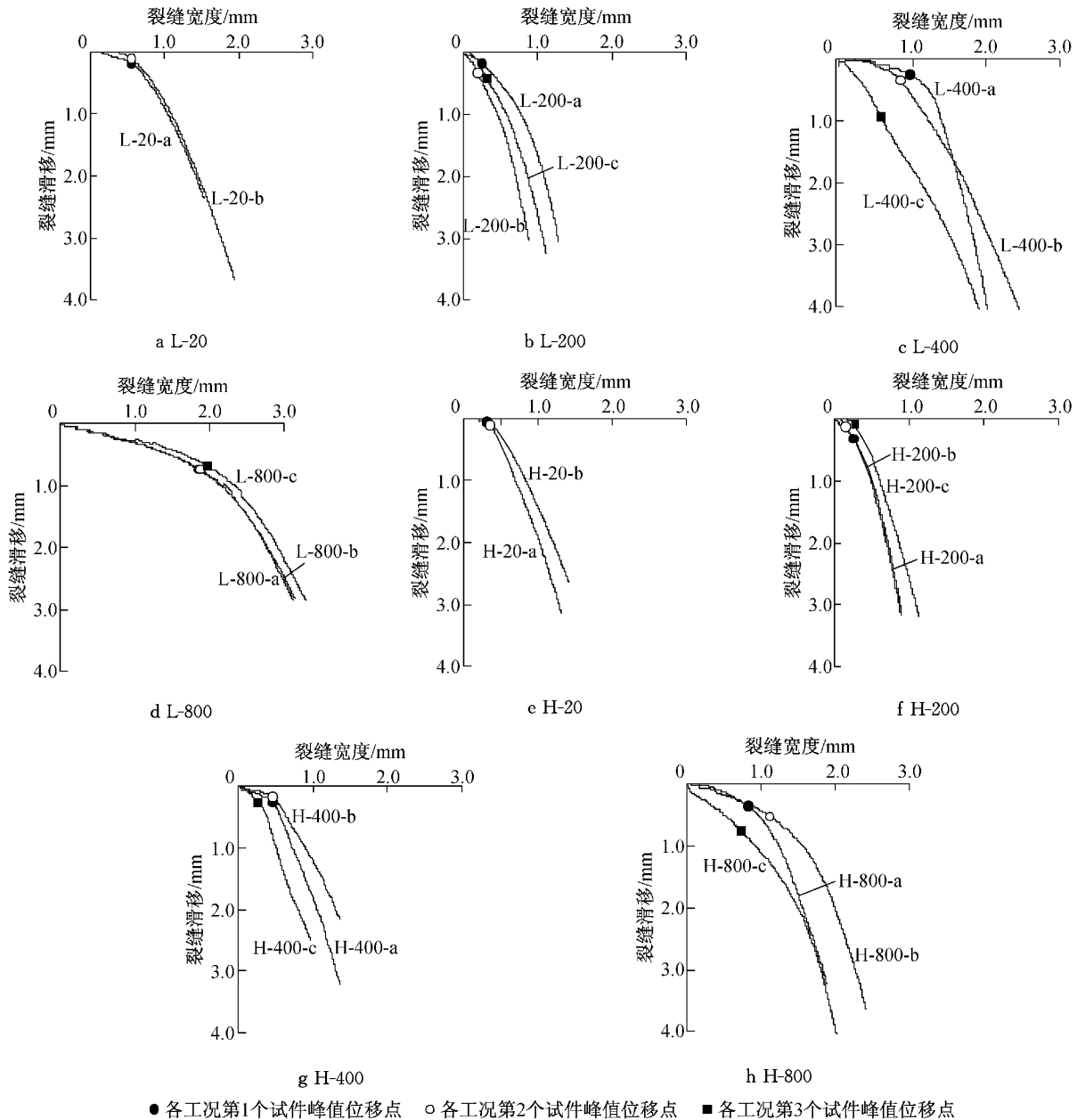


图8 剪切裂缝发展

Fig.8 Development of shear cracks

渐增大. 这与两个方面的原因有关:一方面,虽然在剪切面两侧混凝土完全分离之前骨料咬合力仍然存在,但是由于高温后水泥凝胶体弹性模量的降低,在剪应力作用下剪切面会产生弹性滑移;另一方面,超过 100 °C 时,在骨料和水泥凝胶体的界面上已经产生裂缝^[13]. 同时可以看到,温度越高,剪切强度 τ_u 之后的裂缝滑移越平缓.

无论 HSC 经历多高的温度,在达到 τ_u 以前裂缝宽度都比裂缝滑移发展速度快,而 τ_u 后裂缝滑移超过裂缝宽度的发展速度. 这是因为达到 τ_u 后,虽然箍筋屈服,但仍对剪切面保持不变的横向约束力,限制了裂缝宽度的增长. 而剪切面的竖向摩擦力较

小,剪应力作用下裂缝滑移快速发展.

具体的裂缝峰值宽度 w_u 和裂缝峰值滑移 δ_u 如表 2 所示,随温度的变化趋势在图 9 中示出. 其中, w_{ua} 和 δ_{ua} 分别为同一工况的平均裂缝峰值宽度和平均裂缝峰值滑移. 200 °C 时,两个系列的 w_u 较常温时减小,这可能是由于从 100 °C 到 200 °C, HSC 中凝胶体的结合水逐渐脱出,胶凝体颗粒的表面力增大,使箍筋与混凝土的黏结力提高,给剪切面施加了更大的横向约束力^[14]. 其他工况下, w_u 和 δ_u 都随温度的升高而增大. 两个系列比较可知,无论经历多高的温度, H 系列的 w_u 和 δ_u 都小于 L 系列,说明 HSC 强度的提高可以减缓剪切裂缝的发展.

表 2 裂缝峰值宽度和裂缝峰值滑移

Tab.2 Crack peak width and crack pear slip

试件	w_u	w_{ua}	δ_u	δ_{ua}
L-20-a	0.55	0.55	0.17	0.14
L-20-b	0.55		0.10	
L-200-a	0.24	0.25	0.16	0.30
L-200-b	0.20		0.32	
L-200-c	0.31		0.41	
L-400-a	0.96	0.78	0.25	0.50
L-400-b	0.83		0.33	
L-400-c	0.56		0.91	
L-800-a	1.85	1.89	0.74	0.72
L-800-b	1.87		0.74	
L-800-c	1.96		0.68	
H-20-a	0.30	0.33	0.05	0.08
H-20-b	0.35		0.10	
H-200-a	0.25	0.23	0.32	0.18
H-200-b	0.15		0.13	
H-200-c	0.28		0.08	
H-400-a	0.46	0.39	0.27	0.24
H-400-b	0.46		0.18	
H-400-c	0.26		0.26	
H-800-a	0.81	0.88	0.36	0.55
H-800-b	1.11		0.53	
H-800-c	0.73		0.77	

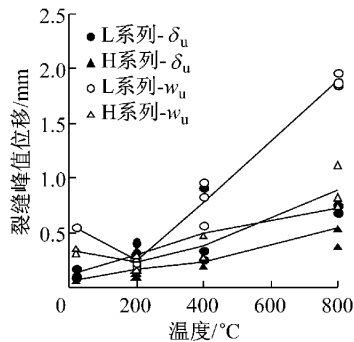


图 9 裂缝峰值位移-温度曲线

Fig.9 Curves of crack peak deformation-temperature

4 销栓作用分析

箍筋的销栓剪应力定义为 $\tau_s = P_s / A_c$, 其中 $P_s = 8V_0$ 为总的箍筋销栓力^[7]. 不同工况下销栓剪应力随裂缝滑移的变化如图 10 所示, 具体的销栓峰值剪应力 τ_{su} 、销栓平均峰值剪应力 τ_{sua} 和混凝土平均剪切强度 τ_{ua} 如表 3 所示. 为了便于分析, τ_{su} 和 τ_{sua} 随温度的变化趋势在图 11 中示出.

前文提到, 箍筋的销栓剪应力随裂缝滑移的增大而线性增大, 将式(12)中 $2\lambda^2 E_s I_s / (w + 4/\lambda)$ 定义为销栓剪切刚度 k_s , k_s 可近似取 $2\lambda^2 E_s I_s / (4/\lambda)$. 由图 10 可知, 当温度小于 200 °C 时, 曲线斜率 k_s 基本不变; 当温度超过 200 °C 时, k_s 随温度升高而降低. L

和 H 系列比较可知, 随着混凝土强度的提高, k_s 逐渐增大.

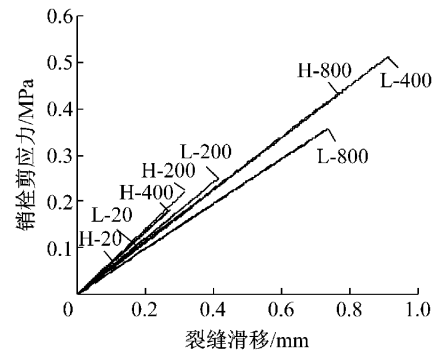


图 10 销栓剪应力-裂缝滑移曲线

Fig.10 Curves of dowel shear stress-crack slip

表 3 销栓峰值剪应力和混凝土剪切强度统计

Tab.3 Statistics of dowel peak shear stress and concrete shear strength

试件	τ_{su}/MPa	τ_{sua}/MPa	τ_{ua}/MPa	$(\tau_{sua}/\tau_{ua})/\%$
L-20-a	0.10	0.08	9.93	0.81
L-20-b	0.06			
L-200-a	0.09	0.18	9.28	1.94
L-200-b	0.19			
L-200-c	0.25			
L-400-a	0.14	0.28	8.04	3.48
L-400-b	0.19			
L-400-c	0.51			
L-800-a	0.36	0.35	4.67	7.49
L-800-b	0.36			
L-800-c	0.33			
H-20-a	0.03	0.05	11.90	0.42
H-20-b	0.07			
H-200-a	0.22	0.12	12.87	0.93
H-200-b	0.09			
H-200-c	0.06			
H-400-a	0.18	0.16	9.22	1.73
H-400-b	0.12			
H-400-c	0.18			
H-800-a	0.20	0.31	5.22	5.94
H-800-b	0.30			
H-800-c	0.43			

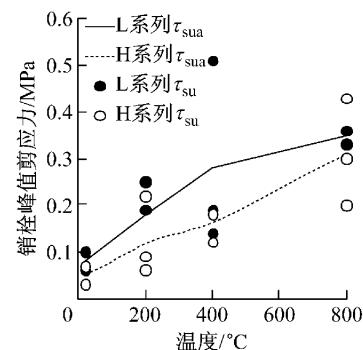


图 11 销栓峰值剪应力-温度曲线

Fig.11 Curves of dowel peak shear stress-temperature

由表3和图11可知,两个系列的 τ_{sua} 都随温度的升高而增大,这主要与高温后混凝土的裂缝峰值滑移 δ_u 增大有关.从两种强度混凝土的 τ_{sua} 比较可以看出,无论经历多高的温度,混凝土强度越高,则销栓峰值剪应力 τ_{su} 越小.常温下, τ_{su} 在 τ_u 中所占的比例不足1%,因此在一般混凝土结构设计时忽略箍筋的销栓作用是合理的.但是随着温度的升高,箍筋销栓作用迅速增大,在800℃时,L和H系列的 τ_{sua}/τ_{ua} 分别达到了7.49%和5.94%.需要指出的是,随着箍筋直径的增大,销栓剪应力会有较大幅度的提高.已有研究证明,在其他条件相同的情况下,当箍筋直径从8 mm增大到12 mm时,销栓峰值剪应力可以提高大约5倍^[7].同时可以看出,在任何温度下,L系列的 τ_{sua}/τ_{ua} 都大于H系列,说明混凝土强度越低,箍筋销栓作用越明显.可以预见,当HSC经历更高的温度(实际火灾环境温度可达到1 200℃以上)或采用更大直径的箍筋时,箍筋销栓作用对混凝土剪切强度 τ_u 的贡献将会更加显著,不能按传统理论那样将其忽略.

5 结论

通过高温后HSC的push-off试验和箍筋销栓作用的分析可知,当HSC强度为60~100 MPa,采用硅质骨料且经历的最高温度不超过800℃时,可以得到以下结论:

(1) 常温下,HSC在达到剪切强度以前裂缝滑移很小,但有一定的裂缝宽度;达到剪切强度以后,裂缝滑移迅速增大.除200℃以外,HSC的裂缝峰值位移(裂缝宽度和滑移)随温度升高而增大.

(2) 在剪切强度以前,HSC裂缝宽度的发展速度比裂缝滑移要快.但是达到剪切强度以后,裂缝滑移的发展速度超过裂缝宽度.从L和H系列比较来看,无论经历多高的温度,HSC强度越高则裂缝峰值位移越小.

(3) HSC的箍筋销栓剪应力与裂缝滑移近似呈线性增大关系.当温度超过200℃时,销栓剪切刚度随温度升高而降低,随HSC强度的增大而增大.

(4) 常温下,箍筋销栓剪切应力在HSC剪切强度中所占比例不足1%.但是温度越高,销栓剪切应力对HSC剪切强度的影响越大.比较不同强度的HSC可知,强度越低,销栓作用越明显.在800℃时,L和H系列的箍筋销栓峰值剪应力与HSC剪切强度的比值分别达到了7.49%和5.94%.当箍筋直

径或用量增大时,此比例会有较大幅度的提高.

参考文献:

- [1] Xiao J Z, König G. Study on concrete at elevated temperatures in China—An overview[J]. *Fire Safety Journal*, 2004, 39(1): 89.
- [2] 肖建庄,李杰,姜峰,等.矿渣高性能混凝土剪力墙高温后抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(4): 35.
XIAO Jianzhuang, LI Jie, JIANG Feng, *et al.* Test on the seismic behavior of BFS-HPC shear walls after high temperature [J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(4): 35.
- [3] Ellingwood B, Lin T D. Flexure and shear behavior of concrete beams during fires [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1991, 117(2): 440.
- [4] Reinhardt H W, Walraven J C. Cracks in concrete subject to shear [J]. *Journal of the Structural Division*, 1982, 108(1): 207.
- [5] Timoshenko S, Lessels J M. *Applied elasticity* [M]. Pennsylvania: Westinghouse Technical Night School Press, 1925.
- [6] Soroushian P, Obaseki K, Rajas M C. Bearing strength and stiffness of concrete under reinforcing bars [J]. *ACI Materials Journal*, 1987, 84(3): 179.
- [7] Millard S G, Johnson R P. Shear transfer across cracks in reinforced concrete due to aggregate interlock and to dowel action [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1984, 36(126): 9.
- [8] Poli S D, Gambarova P G, Karakoc C. Aggregate interlock role in RC thin-webbed beams in shear [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1987, 113(1): 1.
- [9] Chung W, Sotolino E D. Nonlinear finite-element analysis of composite steel girder bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(2): 304.
- [10] Xiao J Z, Falkner H. On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures [J]. *Fire Safety Journal*, 2006, 41(2): 115.
- [11] 顾祥林. 混凝土结构基本原理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2011.
GU Xianglin. *The basic principle of concrete structures* [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011.
- [12] 江见鲸,徐志胜. 防灾减灾工程学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
JIANG Jianjing, XU Zhisheng. *Disaster prevent and mitigation Engineering* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [13] Kim G Y, Kim Y S, Lee T G. Mechanical properties of high-strength concrete subjected to high temperature by stressed test [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, 19: 128.
- [14] Khoury G A, Majorana C E, Pesavento F, *et al.* Modelling of heated concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2002, 54(2): 77.