

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202005031

# 栓钉连接件、锚固及降温方式对高温喷水后型钢再生混凝土界面剪力传递的影响\*

陈宗平<sup>1,2</sup>, 戴上秦<sup>1</sup>, 王成<sup>1</sup>, 周济<sup>1</sup>

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 2. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西南宁 530004)

**摘要:** 为研究降温方式、锚固长度、栓钉连接件(焊接栓钉)及其位置对高温喷水后型钢再生混凝土界面剪力传递的影响, 设计了12个高温喷水后型钢再生混凝土试件和2个高温后型钢再生混凝土试件进行推出试验。试验过程中观察了型钢再生混凝土试件的推出过程及破坏形态, 获取了各试件的荷载滑移曲线及其特征点参数, 分析了变化参数对其特征点参数的影响规律。结果表明, 高温喷水后带栓钉型钢再生混凝土破坏后会在栓钉所在处产生横向裂缝, 其加载端与自由端荷载滑移曲线的差异也很大; 高温喷水后型钢再生混凝土的黏结强度和弹性黏结抗剪刚度均随历经最高温度的上升而下降; 历经最高温度为400℃时, 高温喷水后型钢再生混凝土的黏结强度和弹性黏结抗剪刚度低于高温后型钢再生混凝土,  $l_a=250$  mm的高温喷水后型钢再生混凝土黏结强度和弹性黏结抗剪刚度也低于 $l_a=400$  mm的高温喷水后型钢再生混凝土, 历经最高温度为600℃时则反之; 栓钉连接件对高温喷水后型钢再生混凝土界面剪力传递性能的提高显著, 特别是将其设置在型钢腹板处。

**关键词:** 高温喷水; 型钢再生混凝土; 栓钉连接件; 锚固长度; 降温方式; 界面剪力传递

**中图分类号:** TU521.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0362-10

## Effect of Stud Shear Connector, Anchorage and Cooling Method on Interfacial Shear Transfer of Steel Reinforced Recycled Aggregate Concrete after High Temperature and Water Spraying

CHEN Zongping<sup>1,2</sup>, DAI Shangqin<sup>1</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>, ZHOU Ji<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of the Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In order to study the influence of cooling method, anchorage length, stud connector (welding stud) and its position on the interfacial shear transfer of steel reinforced recycled aggregate concrete after high temperature and water spraying, 12 steel reinforced recycled aggregate concrete specimens after high temperature and water spraying and 2 steel reinforced recycled aggregate con-

\* 收稿日期:2020-05-14;修回日期:2020-07-23

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51578163)、广西重点研发计划项目(2017AB02006)、广西八桂学者专项研究项目([2019]79号)、广西科技基地与人才专项(桂科AD21075031)、中央引导地方科技发展资金项目(桂科ZY21195010)资助

**作者简介:** 陈宗平(1975—),男,教授,博导,博士。主要从事钢与混凝土组合结构、再生混凝土结构、异形柱结构、海洋及近海混凝土结构等方面研究。E-mail: zpchen@gxu.edu.cn

crete specimens after high temperature were designed for push-out test. During the test, the failure process and failure form of the test specimens were observed, the load-slip curve of each specimen and its characteristic parameters were obtained, and the influence law of changing parameters on its characteristic parameters was analyzed. The results show that after the failure of steel reinforced recycled aggregate concrete with stud subjected to high temperature and water spraying, the transverse cracks will occur near the stud, and the load-slip curves of the loading end and the free end are also quite different. The bonding strength and elastic bond shear stiffness of steel reinforced recycled aggregate concrete suffered high temperature and water spraying decreases with the increase of the peak temperature. When the peak temperature reaches 400 °C, the bonding strength and elastic bond shear stiffness of steel reinforced recycled aggregate concrete after high temperature and water spraying is lower than that of steel reinforced recycled aggregate concrete only experienced high temperature, the bonding strength and elastic bond shear stiffness of steel reinforced recycled aggregate concrete with  $l_a=250$  mm is also lower than that of steel reinforced recycled aggregate concrete with  $l_a=400$  mm after high temperature and water spraying, and vice versa when the peak temperature is 600 °C. Stud connector has a great impact on improving the interfacial shear transfer of steel reinforced recycled aggregate concrete went through high temperature and water spraying, especially in the steel web position.

**Keywords:** high temperature water spraying; steel reinforced recycled aggregate concrete; stud shear connector; anchorage length; cooling method; interfacial shear transfer

## 引 言

再生混凝土技术的出现,为减少自然资源的开采、缓解建筑垃圾对自然环境的不良影响提供了一个高效的解决方案,型钢再生混凝土(steel reinforced recycled aggregate concrete, SRRAC)组合结构在应用了再生混凝土技术的同时也继承了型钢混凝土(steel reinforced concrete, SRC)组合结构承载能力高、刚度大、延性和抗震性能好等诸多优点<sup>[1]</sup>,部分学者对其进行单调加载试验<sup>[2-6]</sup>,以期从承载力方面了解其性能表现,从而加速型钢再生混凝土的推广应用。但是,型钢再生混凝土同样也继承了型钢混凝土的缺陷:若无法保证型钢与混凝土之间的有效黏结,其诸多优点亦无法充分发挥。在型钢和混凝土之间增设抗剪连接件,是改善型钢混凝土中型钢与混凝土之间界面剪力传递的有效方式之一。

在型钢混凝土应用较多的城市建筑群中,由于人类的大量聚集,火灾对城市内市民的生命、财产安全存在着巨大的威胁,现代城市建筑均配备了较为完备的消防系统以应对火灾的发生,而当火灾发生后,不仅火灾给工程结构带来了不同程度的损

伤,消防系统大部分情况下采用的喷水灭火方式也势必会对工程结构的性能造成影响,所以,研究高温喷水后型钢再生混凝土组合结构的界面剪力传递性能,对评估其在火灾后的安全性具有重要意义,而已有文献仅对高温(火灾)后型钢再生混凝土界面的黏结滑移进行了研究<sup>[1, 7-11]</sup>,对于高温(火灾)喷水后的型钢再生混凝土黏结滑移及界面剪力传递性能,国内外尚未发现相关报道。

为此,本文设计了14个高温喷水后型钢再生混凝土试件进行静力推出试验,以分析降温方式、锚固长度和抗剪连接件位置对其界面剪力传递性能的影响,为型钢再生混凝土组合结构的深入研究和灾后评估提供参考依据。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

#### (1) 混凝土

试件混凝土所采用的水灰比为0.4,具体质量配合比为水:水泥:细集料:粗集料=185:463:561:1191。其中拌和用水采用城市自来水;水泥采用海螺牌P.O 32.5R级普通硅酸盐水泥;细集料采用级配良好的天然河砂,其细度模数为2.7,表观密度为

2 530 kg/m<sup>3</sup>, 紧密堆积密度为 1 790 kg/m<sup>3</sup>; 粗集料采用为公称直径 5~31.5 mm 连续级配的再生粗集料, 由原设计强度为 C30 的废弃混凝土破碎而成, 其表观密度为 2 630 kg/m<sup>3</sup>, 紧密堆积密度为 1 630 kg/m<sup>3</sup>, 吸水率为 2.78%, 压碎指标为 14.1%。

### (2) 钢材

型钢混凝土试件中使用的型钢为 I14 号工字钢, 其翼缘钢材实测屈服强度为 344.7 MPa, 实测极限强度为 434.4 MPa; 其腹板钢材实测屈服强度为 327.1 MPa, 实测极限强度为 412.1 MPa。试件使用的纵筋为直径 12 mm 的 HRB335 级钢筋, 箍筋为直径 6 mm 的 HPB300 级钢筋。

### (3) 抗剪连接件

抗剪连接件采用符合《电弧螺柱焊用圆柱头焊钉》(GB/T 10433—2002) 标准<sup>[12]</sup>的圆柱头栓钉, 长度为 50 mm, 直径为 13 mm。

## 1.2 试件设计及制作

本次试验以历经最高温度( $T$ )、降温方式、锚固长度( $l_a$ )、栓钉连接件及其位置为变化参数共设计制作了 14 个型钢再生混凝土试件, 不同锚固长度、不同位置栓钉连接件试件的几何尺寸如图 1 所示, 部分(仅在翼缘或腹板)设置栓钉连接件的试件则基于图 1(a)在相应侧面进行删减。其中历经最高温度分别考虑了 20 °C(室温)、400 °C、600 °C 三种情况, 降温方式分别考虑了喷水降温(WC)和自然降温(NC)两种情况, 锚固长度分别考虑了 400 mm 和 250 mm 两种, 栓钉连接件分别考虑了无栓钉、仅翼缘布置栓钉、仅腹板布置栓钉和翼缘腹板均布置栓钉四种情况。各试件具体设计参数安排见表 1。此外, 历经不同最高温度和不同降温方式的型钢混凝土试件均预留了三个再生混凝土标准立方体试件(下文简称为混凝土试块)用于检测混凝土立方体抗压强度。

### 1.3 高温喷水条件

所有制作完成的型钢混凝土试件和混凝土试块均于标准养护条件下养护 28 d, 养护完成后称量不同降温方式和不同锚固长度型钢混凝土试件的质量, 然后再将历经最高温度为 20 °C 以外的型钢全再生混凝土试件与同一温度下的混凝土试块移至 RX3-45-9 型工业电阻炉(额定功率为 45 kW)中经历高温以模拟火灾的发生, 其中型钢混凝土试件的

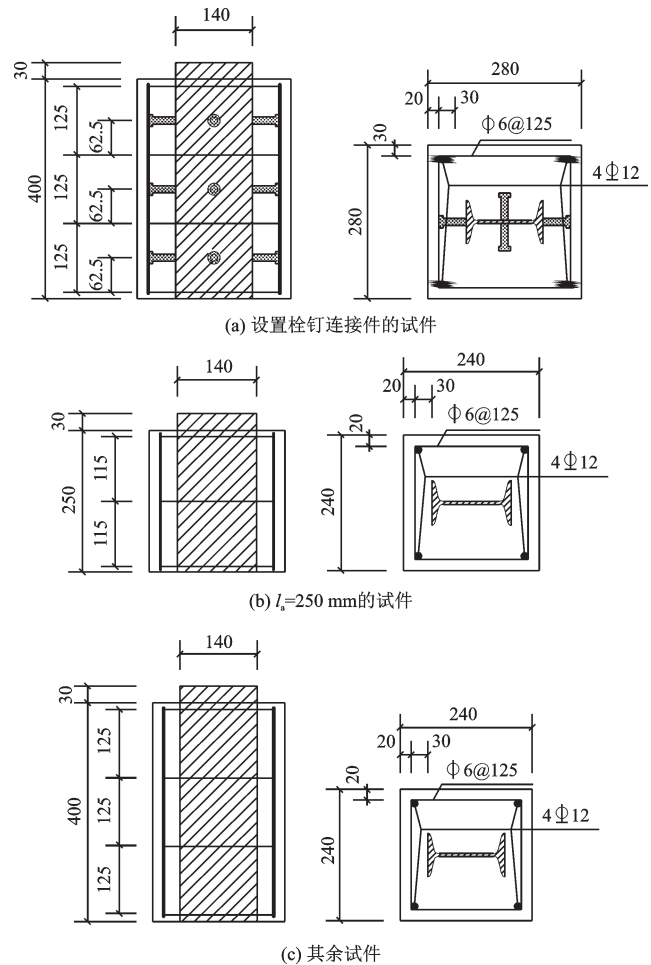


图 1 型钢再生混凝土试件几何构造尺寸

Fig.1 The geometrical dimensions of steel reinforced recycled aggregate concrete specimens

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件编号	$T/^\circ\text{C}$	降温方式	$l_a/\text{mm}$	抗剪件位置
SRRAC-1	20	WC	400	无
SRRAC-2	400	WC	400	无
SRRAC-3	600	WC	400	无
SRRAC-4	400	WC	250	无
SRRAC-5	600	WC	250	无
SRRAC-6	400	NC	400	无
SRRAC-7	600	NC	400	无
SRRAC-8	20	WC	400	翼缘
SRRAC-9	400	WC	400	翼缘
SRRAC-10	600	WC	400	翼缘
SRRAC-11	400	WC	400	腹板
SRRAC-12	600	WC	400	腹板
SRRAC-13	400	WC	400	翼缘+腹板
SRRAC-14	600	WC	400	翼缘+腹板

裸露型钢部分用石棉包裹进行隔热来防止工业电阻炉内的高温直接作用于型钢。待温度按电阻炉额定功率上升至设计温度并继续恒温 60 min ( $t=60$  min) 后, 将其取出并立即以单位面积用水量相等原则使用室外消防栓以及消防水枪进行时长为 25 min 的喷水降温, 具体升温曲线如图 2 所示。

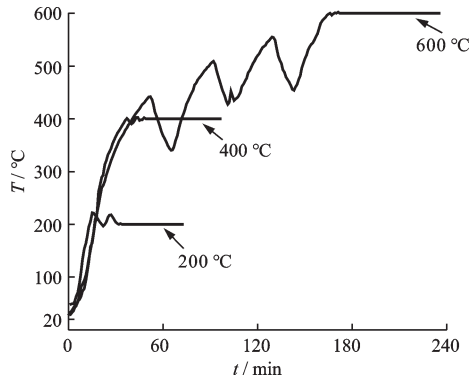


图 2 升温曲线

Fig.2 Heating curves of specimens

#### 1.4 加载与测量方法

待喷水降温试件喷水完成, 统一静置 3 d, 再次对相应型钢再生混凝土试件进行称量, 并记录各试件的表面变化, 接着统一采用微机控制电液伺服液压试验机 (YE-10000F) 进行静力推出试验。为了获取其受力全过程的荷载滑移曲线, 采用速率为 0.2 mm/min 的位移控制加载制度, 直至滑移量为 20 mm 左右或荷载明显出现下降, 加载终止。试验加载装置如图 3 所示。

型钢混凝土试件以型钢超出混凝土表面的一端作为加载端, 另一端作为自由端, 并在自由端垫



图 3 加载装置及位移计布置

Fig.3 Layout of loading device and displacement meter

上一块含有型钢开槽的特制钢垫板, 以利于加载过程中型钢的滑出。如图 3 所示, 加载过程中使用 4 个位移计对位移进行测量: 1#位移计设置于粘贴在作动器顶板的外伸钢片上, 2#位移计设置于粘贴在加载端混凝土表面的长条钢片上, 3#位移计设置于同自由端型钢焊接的长条钢片上, 4#位移计设置于事先粘贴于自由端开槽的硬质木条上。1#位移计和 2#位移计用于获得加载端的滑移值, 3#位移计和 4#位移计用于获得自由端的滑移值。

混凝土试块的加载参考《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)<sup>[13]</sup> 进行立方体抗压强度的测定, 试验结果得到的混凝土立方体抗压强度值见表 2。

表 2 再生混凝土立方体抗压强度

Table 2 The cube compressive strength of recycled aggregate concrete

历经最高温度	$f_{cu}/\text{MPa}$		
	20 °C	400 °C	600 °C
喷水降温		27.2	22.1
自然降温	41.4	25.7	23.9

## 2 试验结果分析

### 2.1 质量损失率

基于前文对不同降温方式和不同锚固长度型钢再生混凝土试件的质量进行的两次称量, 按式 (1) 计算其质量损失率。其质量损失率与历经最高温度的关系如图 4 所示。

$$L = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \quad (1)$$

式中,  $L$  为质量损失率 (%);  $M_1$  为第一次 (养护完成

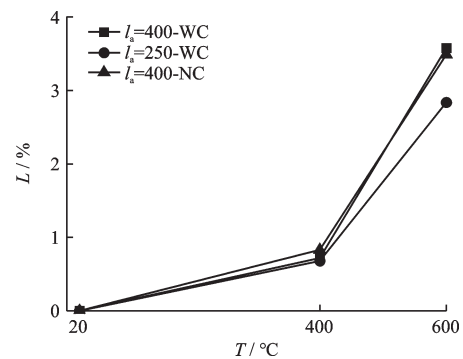


图 4 试件质量损失率

Fig.4 The mass loss rate of specimens

后)称量的质量(kg); $M_2$ 为第二次(加载前)称量的质量(kg)。

由图4可以看出,型钢再生混凝土试件的质量损失率均随着历经最高温度的上升而上升,且以历经最高温度高于400℃后试件的质量损失更显著。对比不同锚固长度试件的质量损失率,可以发现锚固长度较小试件的质量损失率也较低,这种差异随着历经最高温度的上升越来越明显,历经600℃时,锚固长度为250mm试件的质量损失率比锚固长度为400mm试件的质量损失率低0.74%,其中的原因是由于锚固长度较小试件的混凝土体积较小。对比不同降温方式试件的质量损失率,可以发现降温方式对试件质量损失率的影响并不显著,说明即使有限的喷水作用能对型钢再生混凝土在高温作用时损失的水分进行补充,但由于试件在经历喷水作用后温度仍未降至室温状态,试件残余的温度可令混凝土内水分发生二次蒸发,从而试件质量损失率与自然降温时相当。

## 2.2 型钢推出过程

各高温喷水后型钢再生混凝土试件的型钢推出过程最大的差异在于是否设置栓钉连接件。

无栓钉的高温后及高温喷水后型钢再生混凝土试件加载开始后,首先在加载端出现发展缓慢的微小滑移,加载端的混凝土也少量剥落;随着加载位移量的增加,加载端滑移量不断增大,自由端也出现滑移,当荷载增加至峰值荷载的80%左右时,试件自由端的型钢翼缘开始出现裂缝,荷载继续增加,裂缝不断变宽并向加载端迅速发展,直至贯穿整个试件,峰值荷载出现。到达峰值荷载后继续进行加载,试件型钢腹板附近几乎不会出现新裂缝,只有部分试件在型钢翼缘端部附近出现了新裂缝,并且新裂缝的数量随着历经最高温度的上升而降低,这是因为历经最高温度较高的试件在高温作用下试件已经存在较多初始裂缝,试件在加载时从初始裂缝开始发展,导致无明显的新裂缝产生。加载完成后,从新裂缝发展较多的试件可发现其加载端和自由端混凝土新裂缝的发展均呈现了以型钢翼缘端部为中心向其他部位发展的发散状裂缝。

带栓钉的高温喷水后型钢再生混凝土试件破坏过程大部分与无栓钉试件相似,但当裂缝发展至栓钉连接件处时,该位置的混凝土表面会产生垂直

于型钢长度方向的横向裂缝。加载完成后,其横向裂缝的疏密程度和裂缝宽度也同栓钉处的位置有关,翼缘与腹板均设置栓钉的试件横向裂缝多而宽,仅在腹板设置栓钉的试件较之稍少和稍细,而仅在翼缘设置栓钉的试件横向裂缝相对来说就更少和更细了。试验结束后,凿开外层混凝土可以发现其中的栓钉几乎均发生弯曲,说明栓钉有效地在抵抗滑移过程中发挥了作用。

## 2.3 荷载—滑移曲线

根据试验加载设备与位移计的测量,获得了各型钢再生混凝土试件加载端和自由端的荷载滑移曲线( $P-S$ 曲线)如图5所示。由图5可以看出,各试件的 $P-S$ 曲线具有以下特征:

(1)无栓钉试件的加载端 $P-S$ 曲线与自由端 $P-S$ 曲线相似,设置栓钉试件的加载端 $P-S$ 曲线与自由端 $P-S$ 曲线差异较大。所有试件加载过程中滑移均首先出现在加载端,而自由端的滑移会有一些的滞后,这种滞后在设置栓钉的试件上表现得较为明显。历经最高温度对不同试件加载端 $P-S$ 曲线与自由端 $P-S$ 曲线之间滞后程度的影响很小。

(2)腹板设置栓钉的试件在加载端滑移达到预设滑移量时,自由端滑移还相对较小。

(3)对所有试件的 $P-S$ 曲线形状进行阶段划分后,可以大致划分为上升段,下降段和平缓段。无栓钉的试件除了常温试件外,均不存在明显的下降段;仅在翼缘设置栓钉的试件,未出现平缓段便已经破坏,所以未存在明显的平缓段;仅在腹板设置栓钉的试件及翼缘、腹板均设置栓钉的试件在加载端滑移达到预设滑移量附近才达到荷载峰值,所以未存在明显的下降段和平缓段。

(4)大部分试件的 $P-S$ 曲线上升段均表现为二折线式上升,且设置栓钉试件更为明显。

## 2.4 荷载滑移曲线特征点参数

本文中所讨论的荷载滑移曲线特征点参数包括极限荷载 $P_u$ 、残余荷载 $P_r$ 和弹性黏结抗剪刚度 $K$ 。

极限荷载和残余荷载常用于定义钢与混凝土之间的黏结强度,前者被A.Nezamian等<sup>[14]</sup>学者采用,定义为 $P-S$ 曲线上的荷载峰值;后者被陈宗平等<sup>[15]</sup>采用,定义为在发生较大滑移后型钢与混凝土

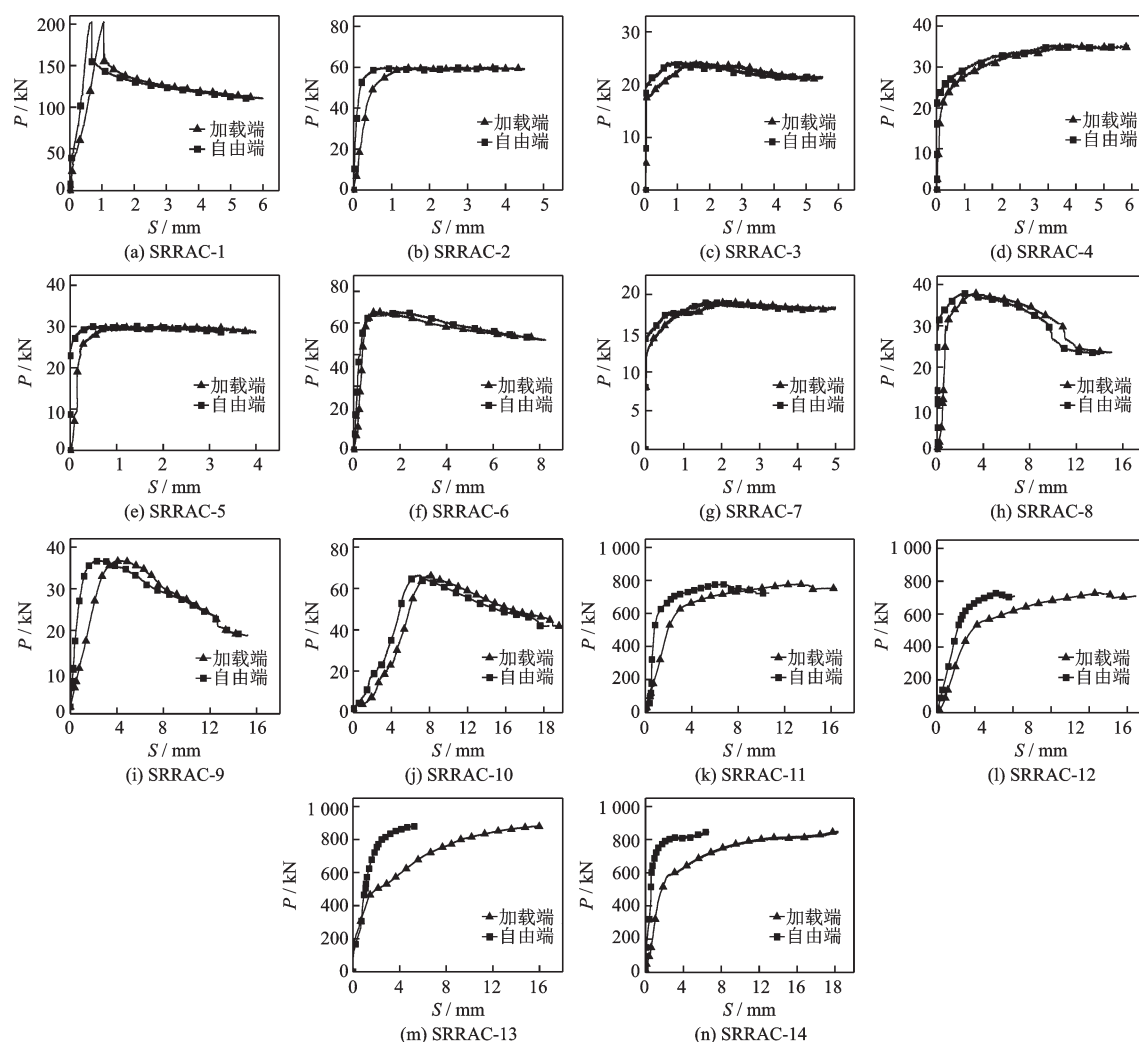


图5 荷载—滑移曲线

Fig.5 Load-slip curves

之间由于仍存在摩阻力而未继续降低的荷载残余值,本文分别对两种定义黏结强度的方式进行计算。统一由  $P-S$  曲线得到极限荷载和残余荷载后,通过式(2)便可以计算其极限黏结强度  $\tau_u$  和残余黏结强度  $\tau_r$  (带栓钉试件同样采用该式将栓钉传递的剪力平均到型钢和混凝土的界面上),计算结果可见表3。

$$\tau = \frac{P}{C_a l_a} \quad (2)$$

式中,  $\tau$  为黏结强度, MPa;  $P$  为荷载值, N;  $C_a$  为接触界面周长, mm;  $l_a$  为型钢锚固长度, mm。

弹性黏结抗剪刚度为推出试验加载初期试件处于弹性阶段的黏结抗剪刚度,是影响型钢混凝土黏结性能的重要指标,本文统一取加载端  $P-S$  曲线上  $0.8P_u$  处与原点连线的斜率作为试件的弹性黏结抗剪刚度,其值见表3。

表3 试件特征点参数

Table 3 Characteristic point parameters of specimens

试件编号	$P_u/kN$	$P_r/kN$	$\tau_u/MPa$	$\tau_r/MPa$	$K_c/(kN \cdot mm^{-1})$
SRRAC-1	202.4	111.9	0.91	0.51	199.4
SRRAC-2	60.1	59.0	0.27	0.27	100.9
SRRAC-3	24.4	21.2	0.11	0.10	60.5
SRRAC-4	35.7	35.0	0.26	0.25	25.2
SRRAC-5	30.3	30.0	0.22	0.21	109.2
SRRAC-6	87.2	71.9	0.39	0.32	157.5
SRRAC-7	19.2	18.6	0.09	0.08	43.0
SRRAC-8	378.5	243.5	1.71	1.10	323.7
SRRAC-9	367.5	207.5	1.66	0.94	127.4
SRRAC-10	331.5	211.0	1.50	0.95	43.6
SRRAC-11	778.6	750.5	3.52	3.39	213.5
SRRAC-12	730.0	704.0	3.30	3.18	92.8
SRRAC-13	882.0	871.5	3.98	3.94	114.2
SRRAC-14	850.0	846.5	3.84	3.82	127.6

注:  $P_u$  为极限荷载;  $P_r$  为残余荷载;  $\tau_u$  为极限黏结强度;  $\tau_r$  为残余黏结强度;  $K_c$  为弹性阶段的黏结抗剪刚度

### 3 影响因素分析

#### 3.1 历经最高温度

历经最高温度对高温喷水后型钢再生混凝土界面剪力传递性能的影响如图6所示。

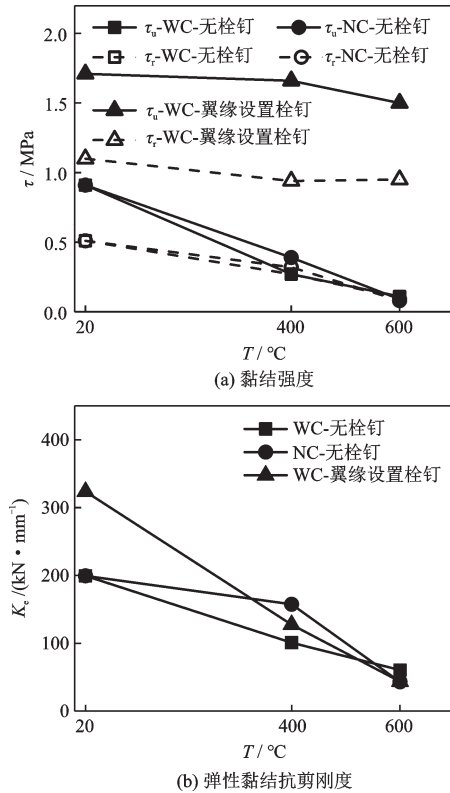


图6 温度对黏结性能的影响

Fig.6 Effect of temperature on bond behavior

由图6可以发现,高温喷水后型钢再生混凝土的极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度均随历经最高温度的上升而下降。其中历经最高温度为400℃时,喷水降温且无栓钉试件的极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度分别是室温20℃状态下的29.7%、52.9%和50.6%,自然降温且无栓钉试件的极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度分别是室温20℃状态下的42.9%、62.7%和79.0%,喷水降温且翼缘设置栓钉试件的极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度分别是室温20℃状态下的97.1%、85.5%和39.4%;而历经最高温度为600℃时,喷水降温且无栓钉试件的极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度分别是室温20℃状态下的12.1%、19.6%和30.3%,自然降温且无栓钉试件的极限黏

结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度分别是室温20℃状态下的9.9%、15.7%和21.6%,喷水降温且翼缘设置栓钉试件的极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度分别是室温20℃状态下的87.7%、86.4%和13.5%。这说明即便是带栓钉的试件,高温作用仍是影响高温喷水后型钢再生混凝土界面剪力传递性能的重要因素,只是栓钉的存在大大增强了型钢再生混凝土的界面剪力传递性能,从而减少了型钢与混凝土之间界面对抵抗型钢滑移的贡献,但高温作用对型钢再生混凝土的影响更多是对型钢与混凝土之间界面的影响,所以带栓钉的试件在受到高温作用后黏结强度的下降幅度比无栓钉试件小。

结合历经不同最高温度对表2中混凝土立方体抗压强度和图6中黏结强度及弹性黏结抗剪刚度的影响可以知道,高温和喷水作用很大程度是通过影响混凝土的性能来影响型钢与混凝土之间界面的剪力传递。

#### 3.2 降温方式

将喷水降温与自然降温进行对比,可以知道高温后型钢再生混凝土界面剪力传递性能和高温喷水后型钢再生混凝土界面剪力传递性能的差异。高温后不同降温方式的型钢再生混凝土界面剪力传递性能如图7所示。

由图7可以看出,喷水作用对高温后型钢再生混凝土极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度的影响在历经不同温度时存在差异:历经最高温度为400℃时,喷水降温试件的极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度均较低,分别是自然降温试件的69.2%、84.4%和64.1%;历经最高温度为600℃时,喷水降温试件的极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度却均比自然降温试件高,分别是自然降温试件的1.22倍、1.25倍和1.41倍。这可以说明喷水作用不利于历经最高温度400℃的高温后型钢再生混凝土界面剪力传递,而当型钢再生混凝土历经最高温度达到600℃时,再生混凝土占比较多的水泥中水化产物氢氧化钙大量脱水,喷水降温中的水分作用在混凝土大面积裸露的型钢混凝土上,让水分能够与表面的部分水化产物重新结合,因此其极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度均有所恢复。

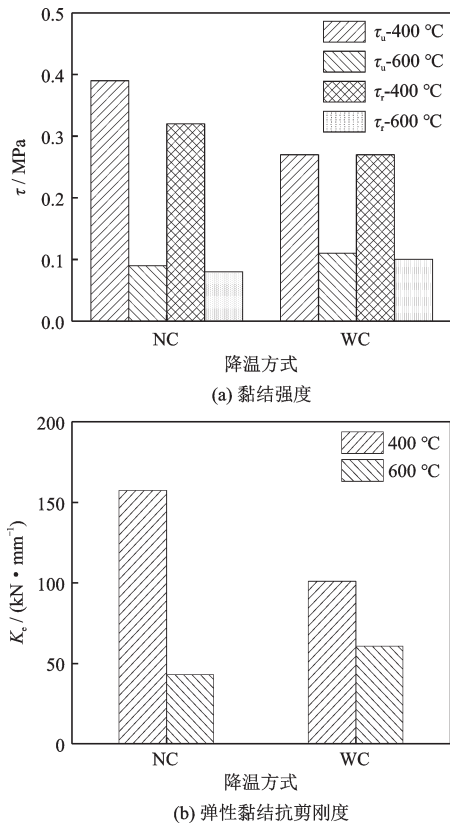


图7 降温方式对黏结性能的影响

Fig.7 Effect of cooling method on bond behavior

### 3.3 锚固长度

锚固长度对高温喷水后型钢再生混凝土界面剪力传递性能的影响如图8所示。

由图8可以看出,试件的极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度随着试件型钢锚固长度变化的规律同试件历经最高温度有关:当历经最高温度为400℃时,均随着锚固长度的增加而上升,而当历经最高温度为600℃时,均随着锚固长度的增加而下降,即 $l_a=250$  mm的试件相对于 $l_a=400$  mm的试件,400℃时其极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度分别下降了3.7%、7.4%和75.0%,600℃时其极限黏结强度、残余黏结强度和弹性黏结抗剪刚度分别上升了100.0%、110.0%和80.5%。出现这种情况的原因与降温方式的影响相似,即当型钢再生混凝土在受到600℃高温左右时,喷水作用虽然可以使损伤有所恢复,但是其中较大锚固长度的试件中未受到喷水作用影响的界面范围更大,因此其界面剪力传递性能更低。

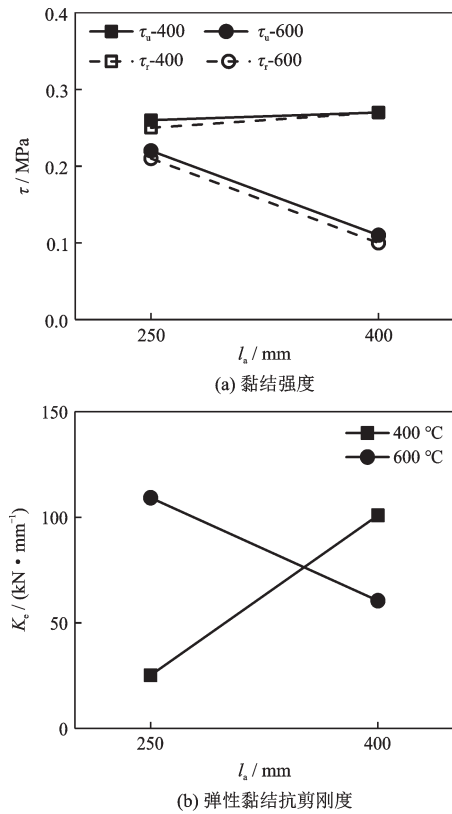


图8 锚固长度对黏结性能的影响

Fig.8 Effect of anchorage length on bond behavior

### 3.4 栓钉连接件及其位置

栓钉连接件及其位置对高温喷水后型钢再生混凝土界面剪力传递性能的影响如图9所示。

由图9(a)、(b)可以看出,栓钉连接件的存在使高温喷水后型钢再生混凝土的极限黏结强度和残余黏结强度均有很大的提升,其中又属翼缘腹板均设置栓钉的试件提升最大,极限黏结强度相对于无栓钉试件提升了3.73 MPa,是无栓钉试件的34.9倍,仅在腹板设置栓钉的试件则相较于翼缘腹板均设置栓钉的试件略低,仅在翼缘设置栓钉的试件的黏结强度只有仅在腹板设置栓钉试件的一半以下,但提升最少的残余黏结强度也为无栓钉试件的5.1倍。此外,根据无栓钉、仅在翼缘设置栓钉、仅在腹板设置栓钉和翼缘腹板均设置栓钉试件黏结强度的绝对关系可以发现,栓钉对高温喷水后型钢再生混凝土黏结强度的贡献并不影响试件其他部分对黏结强度的贡献,即栓钉对高温喷水后型钢再生混凝土黏结强度的提升可以通过叠加法计算。但一部分通过叠加法计算得到的带栓钉试件黏结强度应该考虑对其进行折减,因为有可能出现本文翼缘

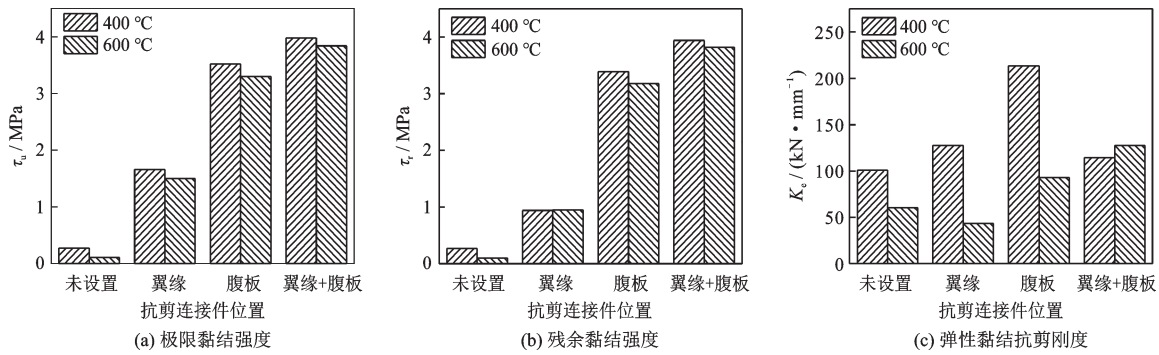


图9 栓钉连接件对黏结性能的影响

Fig.9 Effect of shear stud on bond behavior

腹板均设置栓钉试件相似的滑移量达到设计峰值而黏结强度未达到实际极限黏结强度的情况,在这种情况下如按实际的极限黏结强度进行设计计算,则会高估其黏结性能,使之趋于危险。

而图9(c)中栓钉连接件对高温喷水后型钢再生混凝土弹性黏结抗剪刚度的影响却不如其他三种特征点参数明显,但也总体表现为随着栓钉设置于翼缘、腹板、翼缘和腹板而不断增加的趋势。

总的来说,栓钉连接件的设置对提高高温喷水后型钢再生混凝土的界面剪力传递性能具有很大作用,且在腹板设置栓钉连接件相较于在翼缘设置栓钉连接件对高温喷水后型钢再生混凝土界面剪力传递性能的提高更为有效。

## 4 结 论

(1)高温喷水后型钢再生混凝土的质量损失率均随着历经最高温度的上升而上升,且历经最高温度高于400 °C后的质量损失更显著,而锚固长度对其的影响相对较小,喷水作用的影响可以忽略。

(2)高温喷水后型钢再生混凝土型钢推出过程新裂缝的数量随着历经最高温度的上升而降低。

(3)无栓钉的高温喷水后型钢再生混凝土加载端P—S曲线与自由端P—S曲线相似,带栓钉的高温喷水后型钢再生混凝土加载端P—S曲线与自由端P—S曲线差异很大。

(4)高温和喷水作用主要通过影响其混凝土的性能来影响高温喷水后型钢再生混凝土的界面剪力传递。

(5)历经最高温度为400 °C时,高温喷水后型钢再生混凝土的界面剪力传递性能低于高温后型钢再生混凝土,  $l_a=250$  mm的高温喷水后型钢再生混

凝土界面剪力传递性能也低于  $l_a=400$  mm的高温喷水后型钢再生混凝土,历经最高温度为600 °C时则反之。

(6)栓钉连接件对高温喷水后型钢再生混凝土界面剪力传递性能的提高显著,特别是将其设置在型钢腹板处。

## 参考文献:

- [1] 陈宗平,周文祥,徐金俊. 高温后型钢高强混凝土界面黏结滑移性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(12): 106-115.  
Chen Z P, Zhou W X, Xu J J. Experimental study on bond-slip behavior of steel reinforced high strength concrete after high temperature [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 106-115. (in Chinese)
- [2] 薛建阳,王秀振,马辉,等. 型钢再生混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(7): 69-72.  
Xue J Y, Wang X Z, Ma H, et al. Experimental study on shear performance of steel reinforced recycled aggregate concrete beams [J]. Building Structure, 2013, 43(7): 69-72. (in Chinese)
- [3] 薛建阳,崔卫光,陈宗平,等. 型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(7): 73-76.  
Xue J Y, Cui W G, Chen Z P, et al. Experimental study on axial compressive behaviors of steel reinforced recycled aggregate concrete composite columns [J]. Building Structure, 2013, 43(7): 73-76. (in Chinese)
- [4] 王妮,陈宗平,李启良,等. 型钢再生混凝土组合柱轴压性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(6): 133-141.  
Wang N, Chen Z P, Li Q L, et al. Experimental study on the behavior of steel reinforced recycled aggregate concrete composite columns under axial compression

- loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(6): 133-141. (in Chinese)
- [5] 陈宗平,陈宇良,覃文月,等. 型钢再生混凝土梁受弯性能试验及承载力计算[J]. *工业建筑*, 2013, 43(9): 11-16.  
Chen Z P, Chen Y L, Qin W Y, et al. Test of flexural behavior and ultimate capacity calculation of steel reinforced recycled aggregate concrete beams[J]. *Industrial Construction*, 2013, 43(9): 11-16. (in Chinese)
- [6] 陈宗平,钟铭,陈宇良,等. 型钢再生混凝土偏压柱受力性能试验及承载力计算[J]. *工程力学*, 2014, 31(4): 160-170.  
Chen Z P, Zhong M, Chen Y L, et al. Mechanical behavior and computed bearing capacity of steel reinforced recycled-aggregate-concrete columns under eccentric loading[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(4): 160-170. (in Chinese)
- [7] 李俊华,邱栋梁,俞凯,等. 高温后型钢混凝土粘结滑移性能研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(2): 190-200.  
Li J H, Qiu D L, Yu K, et al. Study on bond-slip behavior between shaped steel and concrete in src structures after exposed to high temperature[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(2): 190-200. (in Chinese)
- [8] 池玉宇,李俊华,余凯,等. 高温后反复荷载下带栓钉连接件型钢混凝土界面力传递性能研究[J]. *工业建筑*, 2015, 45(7): 159-163.  
Chi Y Y, Li J H, Yu K, et al. Study of force transfer behavior for src members with stud shear connectors under cyclic reversed loading after exposure to high temperatures [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45 (7) : 159-163. (in Chinese)
- [9] 吴华宗,李俊华,池玉宇,等. 高温后反复荷载下型钢混凝土黏结滑移性能研究[J]. *工业建筑*, 2015, 45(5): 138-142.  
Wu H Z, Li J H, Chi Y Y, et al. Experimental study of bond-slip behavior of src members under cyclic reversed loading after high temperature [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45(5): 138-142. (in Chinese)
- [10] 李俊华,邱栋梁,俞凯,等. 高温下型钢混凝土黏结滑移性能研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(5): 914-931.  
Li J H, Qiu D L, Yu K, et al. Bond-slip behavior between shaped steel and concrete in src structures at elevated temperature [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(5): 914-931. (in Chinese)
- [11] 王玉镯,王灿灿,祝德彪,等. 高温作用下型钢与混凝土粘结滑移的试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2016, 36(3): 362-366.  
Wang Y Z, Wang C C, Zhu D B, et al. Study on performance of bond-slip between steel shapes and concrete under high temperatures [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2016, 36(3) : 362-366. (in Chinese)
- [12] 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉:GB/T 10433—2002[S]. 北京:中国机械工业联合会,2002.
- [13] 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [14] Nezamian A, Al-Mahaidi R, Grundy P. Bond strength of concrete plugs embedded in tubular steel piles under cyclic loading [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2006, 33(2): 111-125.(in Chinese)
- [15] 陈宗平,刘祥,徐金俊,等. 高温后方钢管高强混凝土界面黏结性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(6): 133-143.  
Chen Z P, Liu X, Xu J J, et al. Study on interface bond behavior of high strength concrete filled square steel tube after high temperatures [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(6): 133-143. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)