

文章编号:1009-3087(2013)04-0027-07

无机胶植筋式后锚固连接的抗火性能研究

王欣¹,姜常玖^{1*},惠守江²,赵考重¹

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东潍坊昌大集团, 山东 潍坊 261031)

摘要:为了研究无机胶植筋式后锚固连接的抗火性能,进行了无机胶与有机胶植筋真实火灾的对比试验。在设计试件时考虑了锚固深度和植筋胶种类2种影响因素。试验时先通过杠杆对试件施加荷载,并在试验中保持恒定不变,然后按照ISO834国际标准升温曲线对试件进行升温,通过植筋梁的挠度来控制试验进程,直至植筋梁试件挠度发展较大而破坏。试验中使用高温应变片、差动式位移传感器以及热电偶来采集试验的关键数据。试验结果表明:锚固深度和植筋胶种类对植筋构件的抗火性能均有较大影响。在火灾作用下有机胶植筋最终将发生锚固破坏,破坏较突然,且耐火极限短。无机胶植筋的受弯构件,在满足一定锚固深度的前提下,在火灾作用下不会发生锚固破坏,破坏形态同一般的钢筋混凝土梁。

关键词:高温;植筋;无机胶;锚固深度

中图分类号:TU317

文献标志码:A

Fire Resistance Behavior of the Inorganically Post-installed Rebar Connection

WANG Xin¹, JIANG Chang-jiu^{1*}, HUI Shou-jiang², ZHAO Kao-zhong¹

(1. School of Civil Eng., Shandong Jianzhu Univ., Jinan 250101, China;

2. Shandong Weifang Changda Group Ltd Co., Weifang 261031, China)

Abstract: A serial of fire tests were conducted to study the fire resistance of the post-installed rebar connection with organic and inorganic adhesive. Two factors of the anchorage depth and types of anchorage glue were considered in the tests. Loads were applied through lever and remained constant throughout the whole process of the tests. The temperatures of connections were elevated following the ISO834 curve and the failure was controlled by excessive deflection of post-installed rebar beams. The test showed that anchorage depth and types of anchorage glue have a great effect to the performance of the reinforced beams under fire. Beams using organic adhesive fails suddenly with obvious rebar slip, and behaves with poor fire endurance, meanwhile using inorganic adhesive, the failure mode of flexural members under fire is the same as that of the general RC beams.

Key words: high temperature; post-installed rebar; inorganic adhesive; anchorage depth

混凝土后锚固技术又称植筋技术,植筋技术能够有效地解决工程中新老混凝土的连接问题、克服使用预埋件产生的问题以及钢筋漏埋错埋等钢筋生根问题,植筋也因此被广泛用于结构加固改造的工程中;植筋技术自身还有很多优点,例如设计灵活、施工工艺简单、性能安全可靠等。所以关于混凝土钢筋后锚固技术的各项研究具有重要的现实意义,

也将产生很好的社会经济效益。

近些年来,关于常温下化学植筋的各项性能指标的研究,国内外的学者们已经做了大量的研究工作^[1],总结了影响植筋锚固性能的各种因素^[2]。然而对于较为恶劣的工况下,化学植筋力学性能的研究还有许多地方值得研究和探讨。例如当植筋构件因火灾或是特定工况而暴露在高温环境中,如何保证植筋构件可靠连接还有待研究^[3-6]。文献[3]介绍了不同植筋深度对植筋试件在火灾(高温)下的力学性能的影响并指出温度对试件承载力有较大的影响;文献[4]主要研究了火灾下植筋试件极限承载力与受火时间的关系;文献[5]提出了高温中单根植筋极限承载力的计算公式;文献[6]主要研究了植筋锚固深度和保护层厚度对植筋构件承载力的

收稿日期:2012-10-31

基金项目:住房和城乡建设部2010年科学技术项目计划(2010-K3-53);山东省教育厅资助项目(J10LE52)

作者简介:王欣(1973—),男,副教授,硕士。研究方向:工程结构安全性诊断与加固改造。E-mail: wangxin@sdjzu.edu.cn

*通信联系人

影响。文献[7]考虑到植筋胶种类对植筋承载力的影响,介绍了所研制的一种新型无机锚固材料。

有关文献表明,有机胶会由于过高温度导致黏结力丧失,从而承载力明显下降,这是非常危险的。有机胶难以承受 200 ℃ 以上的高温,其力学性能指标在升温时逐渐降低^[8]。为了解决有机胶植筋构件耐火极限短,抗火性能差的问题,采用改性硅酸盐无机植筋胶来进行无机胶植筋对比试验。试验表明利用这种无机胶植筋具有很好的锚固性能,在满足一定锚固深度的前提下,能够满足锚固强度的要求。该无机胶具有耐高温的性能,但利用其作为植筋胶,受火灾作用后的锚固性能有待进一步研究。作者通过无机胶与有机胶植筋的对比试验,来探究 2 类植筋胶在高温环境中的可靠性,对比分析 2 种植筋胶在高温下力学性能的差别,并探讨当考虑到植筋构

件受火时,钢筋的最佳埋植深度。

1 有机胶与无机胶植筋试验方案

1.1 试件设计

试件尺寸及配筋如图 1 所示,梁的钢筋植入试件中部的混凝土墩中,梁内箍筋采用 HPB235 级,其余为 HRB335 级,试件混凝土强度等级为 C30。

试件制作时,分 2 个阶段施工,首先制作了 6 个尺寸为 800 mm × 700 mm × 500 mm 的试件,以备两端梁植筋时使用。同批浇筑的构件均留有 150 mm × 150 mm × 150 mm 的立方体试块。试块与构件在同等条件下养护,并留有钢筋试样作拉伸试验,测定钢筋强度指标。养护 28 d 后,在混凝土试件上钻孔植入梁的钢筋,浇注强度等级为 C30 的混凝土。

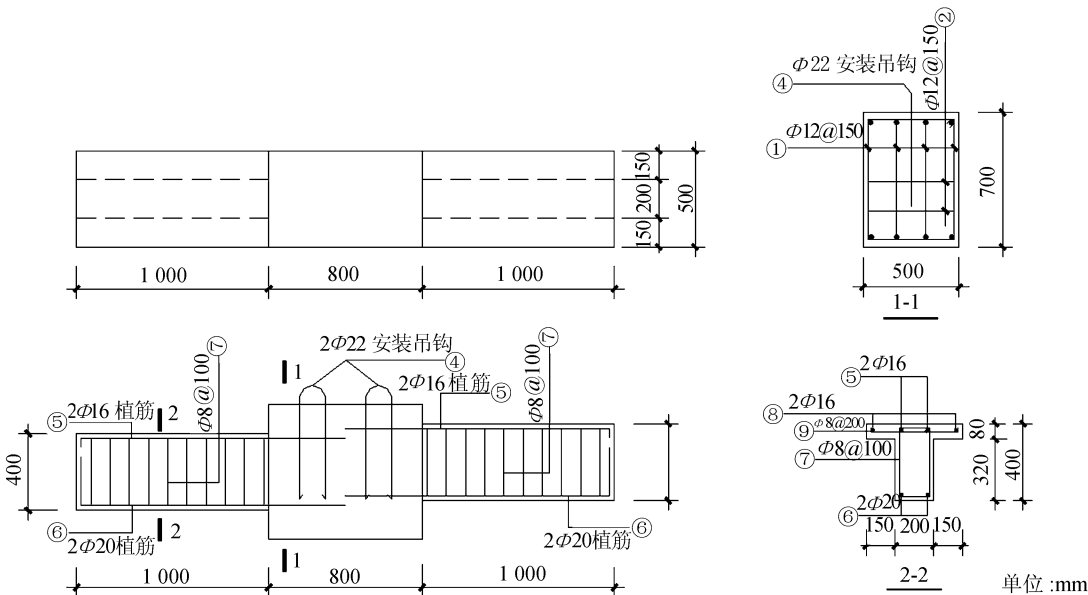


图 1 试件尺寸及配筋

Fig. 1 Specimen dimensions and details

共制作 6 个混凝土植筋试件,每个试件均植有 2 根植筋梁,共 12 根植筋梁。在设计试件时通过控制锚固深度和植筋胶种类 2 种影响因素来进行对比试验。试验中有机胶采用喜利得公司生产的 HILTI - RE500,无机胶采用的是主要成分为氯氧镁水泥 (MOC) 的无机植筋胶。考虑到进行的是高温试验,适当加大了钢筋锚固深度,这样可以使构件不至于过早破坏,便于观察分析试验规律。试件规格及编号见表 1。

1.2 加载方案

火灾试验前,首先对试件施加荷载。由于植筋梁在火灾下可能挠度发展较快,导致出现明显的卸

表 1 构件编号

Tab. 1 Specimen number

构件编号	埋植深度	植筋胶类型	植筋梁编号
S1 - 20d	20d	有机胶	L1, L2
S1 - 25d	25d	有机胶	L3, L4
S1 - 30d	30d	有机胶	L5, L6
S0 - 20d	20d	无机胶	L7, L8
S0 - 25d	25d	无机胶	L9, L10
S0 - 30d	30d	无机胶	L11, L12

载现象,从而使液压千斤顶提供的竖向荷载有滞后的缺点,使竖向荷载不太稳定,所以试验采用重物加载的方案。加载如图 2 所示,根据杠杆原理将重物加载

放大,施加的荷载约为极限荷载的 60%,并在试验中保持恒定不变。按照 ISO834 国际标准升温曲线对试件进行升温;通过植筋梁的挠度来控制试验进程,直至植筋梁试件因挠度发展较大而破坏。

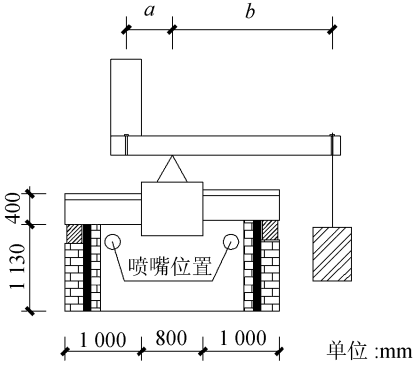


图2 加载示意图

Fig.2 Schematic arrangement for fire test

1.3 升温加热系统

试验在山东建筑大学结构工程抗火试验室进行,采用试验室的水平火灾试验炉施加温度荷载,升温通过试验室的火灾控制系统按照 ISO 国际标准升温曲线的标准进行升温^[9]:

$$T = 345\lg(8t + 1) + T_0 \quad (1)$$

式中: t 为试验所经历的时间, min; T 为升温到 t 时的炉温, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为试验开始时炉温, $^{\circ}\text{C}$ 。

试验时通过安装在炉膛内的多个热电偶管实时监测并记录下炉膛温度的变化,炉温曲线如图 3 所示,对比发现,实测升温曲线基本符合标准升温曲线,试验中植筋构件受火情况如图 4 所示。

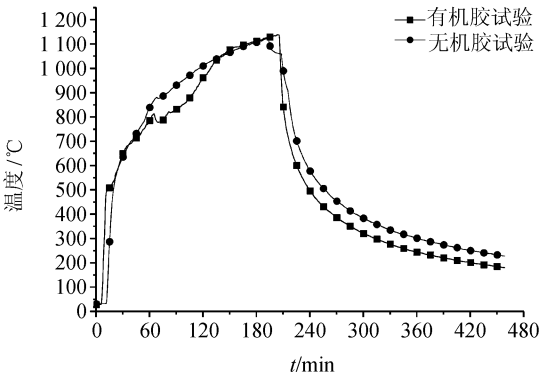


图3 时间-温度曲线

Fig.3 Temperature-time curves

1.4 关键数据的测量采集

植筋梁在火灾下的主要数据包括:试验炉膛的温度、植筋梁中混凝土和钢筋的温度、植筋梁跨中挠度、植筋处的高温应变等。拟采用 E 型和 K 型热电偶测量温度^[10],差动式位移传感器测量挠度,高温应变片测量应变,位移计与热电偶的数据由惠普数



图4 试验现场的加载情况

Fig.4 Loading set-up in test field

据仪(Agilent 34980A)自动采集,高温应变片的数据由应变箱自动采集。高温应变片的测点布置如图 5 所示,图中所示钢筋长度为钢筋植入混凝土的深度,应变片的位置分别距混凝土试件外边缘 50、250、350、450 mm。热电偶的测点布置情况如图 6 所示。

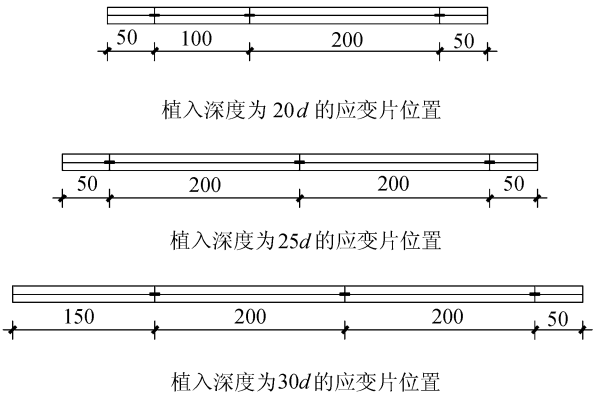


图5 高温应变片布置

Fig.5 Set-up of high temperature strain gauge

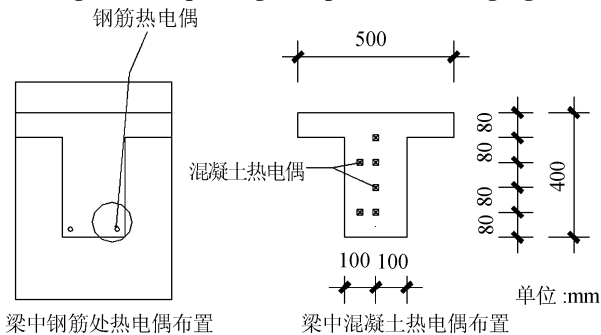


图6 热电偶布置

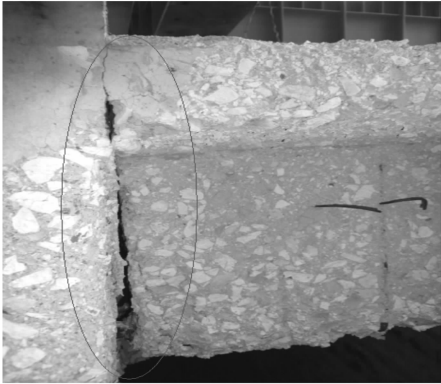
Fig.6 Set-up of thermocouple

2 试验现象及植筋构件的破坏方式

2.1 有机胶植筋构件的试验现象及破坏方式

试验进行到 27 min 时,构件表面开始有水蒸气出现,进行到 40 min,水蒸气大量出现,混凝土的表面也陆续有水痕出现。当试验进行到 72 min 时,植

筋深度为 $20d$ 的植筋构件竖向位移变化速度加快,到 90 min 左右时,植筋深度为 $20d$ 的植筋梁因挠度较大首先发生破坏。待炉温冷却后,观察构件的破坏情况,构件混凝土剥落,编号 S1- $20d$ 构件的破坏方式为钢筋的滑移破坏,如图 7(a)所示。植筋深度为 $25d$ 和 $30d$ 的植筋构件依次后于植筋深度 $20d$ 的构件破坏,发生破坏的时间在 110 、 120 min 左右。其破坏方式基本上也是滑移破坏,较有代表性的如图 7(b)所示。从图中也可以看出有机胶的植筋构件破坏方式均为植筋的滑移破坏,所植入的钢筋被整体拔出,表明在高温下有机胶性能劣化,粘结力损失严重。



(a) 有机胶植筋构件破坏形态



(b) 有机胶植筋构件破坏形态

图 7 有机胶植筋构件破坏形态

Fig. 7 Failure of organic adhesive anchorage

2.2 无机胶植筋构件的试验现象及破坏方式

试验进行到 32 min 时,构件表面开始有水蒸气冒出,进行到 50 多分钟时,水蒸气大量出现,混凝土的表面也出现明显水痕。当试验进行到 121 min 时,植筋深度为 $20d$ 的植筋构件竖向位移变化速度开始加快,到 132 min 时,植筋深度 $20d$ 植筋梁因挠度较大首先发生破坏,最终破坏情况如图 8(a)所示。植筋深度为 $25d$ 和 $30d$ 的植筋构件后于植筋深

度 $20d$ 破坏,发生破坏的时间分别在 145 、 150 min 左右,这两种植筋深度的植筋梁破坏情况类似,破坏情况就不一一给出,较典型的如图 8(b)所示。待炉温冷却后,通过观察构件的破坏情况发现,构件混凝土剥落,所有无机胶植筋构件均未发生滑移破坏。



(a) 无机胶植筋构件破坏形态



(b) 无机胶植筋构件破坏形态

图 8 无机胶植筋构件破坏形态

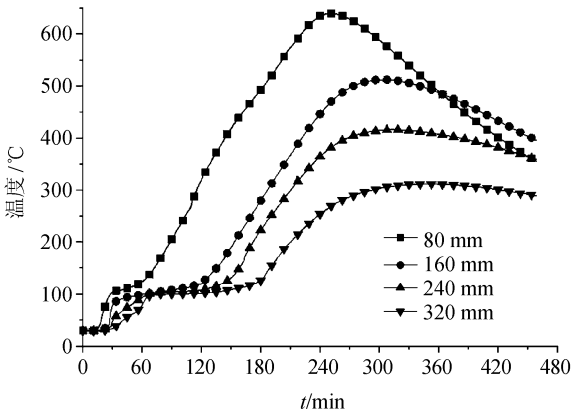
Fig. 8 Failure of inorganic adhesive anchorage

3 主要试验结果与分析

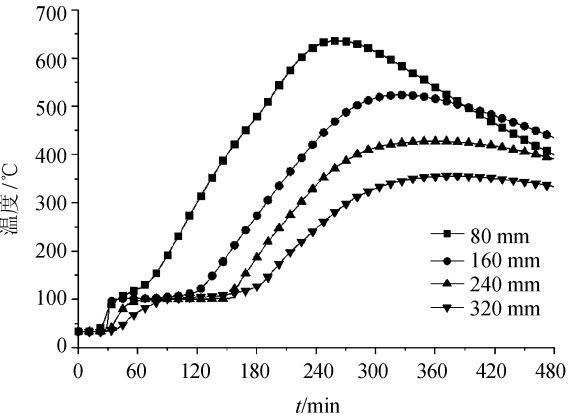
3.1 截面混凝土温度分布

图 9 为试验中植筋梁结合面处温度-时间曲线,每组热电偶的测点位置分别为距植筋梁梁底 80 、 160 、 240 、 320 mm 处,通过观察图 9 发现,在试验进行到半小时左右时,图中各条曲线均有一段平行于 X 轴的水平段,即混凝土的温度不在随时间的增加而升高,而是维持在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右一段时间。这是由于受混凝土中水分的影响:试件中水分的蒸发带走了热量,构件的温度达到了短暂的平衡^[11]。

这与试验中观察到的现象也比较吻合:试验中在 30 min 左右也陆续有水蒸气出现。这一现象恰好可以说明混凝土温度在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右维持一段时间,是因为混凝土中水分的蒸发使试件中的热量保



(a) 有机胶植筋构件混凝土截面温度



(b) 无机胶植筋构件混凝土截面温度

图9 混凝土截面温度-时间关系曲线

Fig.9 Temperature-time curves of the concrete sections

持了短暂的平衡。

通过分析数据发现,在相同受火条件下,同一位置的不同植筋梁构件的测点温度数据相差不大,限于篇幅所有构件的截面混凝土温度分布图就不再一一给出,只绘出使用不同种类植筋胶的植筋构件的温度分布图各1个,如图9所示。从图9中可以看出试验中混凝土的温度随时间的推移越来越高,不同截面混凝土温度随混凝土距外边缘距离的减小而增大,植筋梁的温度场有明显的温度梯度。

3.2 所植入钢筋的实测温度

试验时通过设置在新老混凝土结合面处的热电偶来测量所植入钢筋的温度,因钢筋导热较快,植筋胶温度很短时间内会与钢筋处的温度所差无几。所植入钢筋的温度变化如图10所示,图中有机胶植筋梁编号L1到L6,无机胶植筋梁编号L7到L12,图中为选取的6个植筋梁的测点。通过实测的温度变化发现,在火灾中植筋的温度会超过500℃,植筋胶也将达到500℃左右,所以火灾或高温环境会对有机胶的粘结性能提出严峻的考验。通过整理数据发现,试验中所有植筋在火灾中温度相差不大,具有可比性。

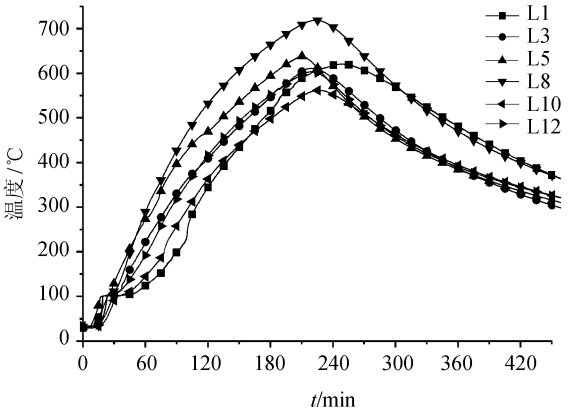


图10 植入的钢筋的实测温度

Fig.10 Temperature of post-installed rebar

3.3 植筋构件的位移

图11为试件受火作用后跨中的位移曲线,从图11中有机胶植筋梁的跨中挠度曲线可以看出,有机胶植筋梁均较早发生破坏,且挠度发展较快,偏于脆性破坏;通过比较图11中使用不同种类植筋胶的试件发现,无机胶植筋梁的挠度随试验的进行发展较有机胶试件缓慢,无机胶植筋梁的耐火极限时间也更长,耐火极限可相差0.5h左右。在试验过程中可以观察到:植筋胶种类相同时,植筋深度较小的构件先于植筋深度较大的构件发生破坏,且植筋深度较大的构件在火灾作用下延性更好一些。

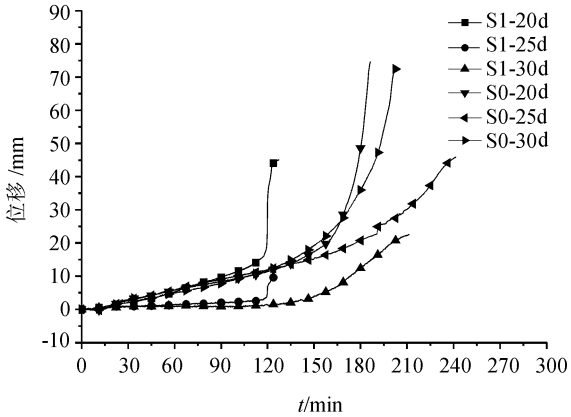


图11 植筋梁的跨中位移

Fig.11 Midspan displacement of the specimens

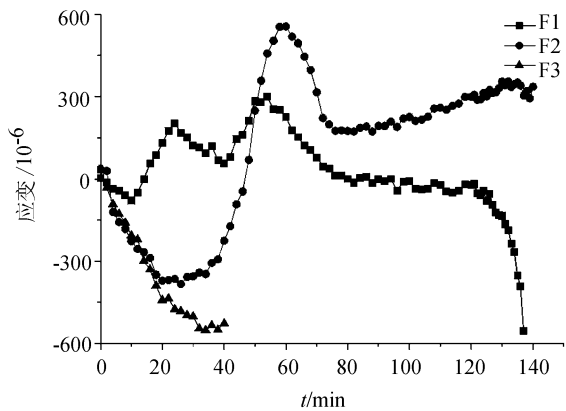
3.4 植筋构件滑移破坏情况分析

试验后待试验炉炉温冷却至室温,观察所有植筋构件的破坏情况,发现在火灾下有机胶植筋构件基本都发生了不同程度的粘结滑移破坏,无机胶构件均未发生滑移破坏。故分析有机胶构件不同位置高温应变片的数值变化情况,对于研究火灾下有机胶植筋构件的滑移破坏机理具有重要的理论意义。

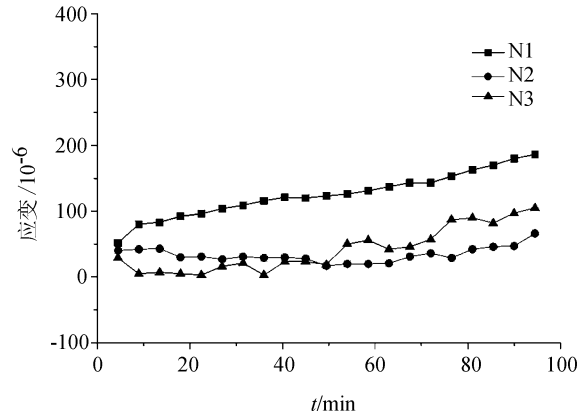
图12(a)反映了高温下采集的有机胶植筋构件S1-30d钢筋受力纵筋应变变化情况。因植筋构件

S1-30d 植筋深度最大,破坏时间较晚,数据具有代表性,故选其加以分析。高温应变片布置在植筋梁下部受力纵筋上,具体位置如图 5 所示。高温应变片的耐高温的极限为 350 ℃ 左右,而大多有机胶无法承受 350 ℃ 高温,因此当应变片失效时,有机胶也将在试验中失效,所以高温应变片虽然只能采集试验初期植筋梁钢筋应变变化的情况,但可通过分析应变变化趋势来探究有机胶植筋构件的破坏机理。

图 12(a)中曲线测点 F1F2F3 的位置分别在距混凝土外边缘(即新老混凝土结合面)450、250、50 mm 处。观察图 12(a)可以发现:曲线前段趋势为下降,应力为压应力;曲线中段出现上升趋势,应力由压应力变为拉应力;当接近曲线末段时,曲线变化趋势稳定,应变片数值不再变化。



(a) 有机胶植筋构件 S1-30d 应变变化情况



(b) 无机胶植筋构件 S0-30d 应变变化情况

图 12 高温下构件应变曲线

Fig. 12 Strain curves of the specimens under fire

曲线首次出现下降段的原因:随着试验的进行,混凝土和钢筋的温度会越来越高,但所植入钢筋的温度上升较快,钢筋与周围混凝土产生了温差,而二者线膨胀系数接近,故混凝土受热膨胀后的变形要小于钢筋的变形,由于钢筋与混凝土之间存在粘

结力,钢筋的变形受到混凝土的约束,而这种约束作用使钢筋产生了压应力,且呈逐渐下降的趋势。

火灾试验进行大约 30 min 后,曲线出现上升趋势,分析原因主要有两个方面:随着温度的升高,钢筋与周围混凝土的温差逐渐减小,二者高温应变趋于相同;在高温下有机胶粘结力逐渐失效,粘结应力产生重分布,钢筋中的应力也随之发生变化。由图 12(a)可以看出,燃烧到一定时间后,钢筋在火灾作用下产生拉应力,而钢筋与混凝土的温差是不可能使钢筋产生拉应力的,所以通过曲线变化趋势的改变可以推断出,此时有机胶粘结力正在失效,应力也发生了重分布。图中各曲线上升段较陡,斜率大,也表明了有机胶在高温环境中,一旦达到失效温度,粘结力丧失很快,耐高温性能较差。

曲线末段变化趋势稳定,表明钢筋与混凝土的粘结力不再有变化,有机胶完全失效。曲线末段未采集到有效数据,表明测点处应变片在高温中已经失效;曲线末段处数值趋于稳定,此时这种应变变化趋势反映了有机胶完全失效后的钢筋应变情况。

图 12(a)中曲线发展趋势逐渐变化而并未突变,这是由于有机胶的温度场同混凝土温度场分布类似,越靠近混凝土外边缘,越靠近火场温度会越高,所以有机胶会随着时间的推移,沿植筋深度方向逐渐失效。当靠近外部的有机胶粘结力失效,钢筋处粘结力减少,但内部植筋胶还未完全失效,承担了外部失效所卸载的应力,故内部钢筋的应变会因为外部的植筋胶失效而增加,应力发生了重分布,所以曲线会出现上升的趋势。

从以上的分析表明:植筋锚固深度对火灾下植筋梁的力学性能有重要影响,适当增加锚固深度会提高火灾下植筋梁的耐火极限,防止过早发生锚固破坏,提供了必要的安全储备。

图 12(b)选取的数据是高温下无机胶植筋构件 S0-30d 钢筋受力纵筋应变变化情况。图 12(b)中曲线测点 N1N2N3 的位置分别在距混凝土外边缘(即新老混凝土结合面)450、250、50 mm 处,具体位置如图 5 所示。从图 12(b)可以看出无机胶植筋构件应变随着试验进行逐渐增大,但应变变化趋势稳定,应变增量也较小,分析原因:在高温作用下混凝土强度逐渐下降,钢筋周围的无机胶与混凝土之间的粘结力有所降低,粘结应力分布发生变化,钢筋应力也随之发生变化,但无机胶并未失效,试件破坏机理与一般的钢筋混凝土梁类似。试验过程中未发生滑移破坏,这与试验数据也基本吻合。

4 结 论

1) 试验表明,植筋梁温度沿截面高度有明显的温度梯度;植筋胶的温度场分布也类似植筋构件,距离高温中构件的外边缘越近,温度越高,上升也更快。

2) 试验中采用有机胶植筋的构件,当植筋处温度过高时,钢筋与混凝土之间的粘结力会出现明显下降,有机胶将会失效。因此,采用有机胶植筋的构件,在荷载和火的耦合作用下,破坏情况比在单独荷载作用(常温)下要严重得多,最终发生粘结滑移破坏,这将对结构产生非常不利的影响。

3) 试验中采用无机胶植筋的构件,在高温作用下没有明显的粘结力失效现象,在火灾作用下,构件的破坏同未植筋的混凝土构件相同。试验表明无机胶在高温下粘结力不会出现明显下降,具有较好的耐高温性能,采用无机胶植筋的构件耐火极限时间比有机胶植筋构件更长,根据观测的试验现象,可相差 30 min 左右。

4) 试验表明,采用有机胶植筋时,植筋锚固深度对构件耐火极限有重要影响,锚固深度越深,耐火极限越长,但即使植筋深度在远超过相关规范对钢筋植筋深度要求的情况下(混凝土强度为 C30 时,锚固深度取 $22d^{[12-14]}$),受火灾作用时,构件也将由于粘结失效发生破坏。而采用无机胶植筋且植筋深度不少于 20 倍钢筋直径时,受火灾作用后,构件不会产生粘结破坏。

5) 试验结果表明:当结构构件长期处于高温环境或存在火灾风险时,结构植筋宜优先采用无机胶植筋技术;当结构采用有机胶植筋技术时,在满足规范中植筋锚固要求后,宜适当增加锚固深度,提供必要的安全储备。

参考文献:

- [1] Zhou Xingang. Anchorage behavior of post-embedded bars in concrete subjected to tension[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(7): 1169 - 117. [周新刚. 混凝土植筋锚固性能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1169 - 1173.]
- [2] Xiao Chengzhi, Tian Wenling, Sun Wenjun, et al. Experimental research on parameters affecting anchorage performance of post-installed bars in concrete[J]. Journal of Building Structures, 2010(S2): 275 - 278. [肖成志, 田稳苓, 孙文君, 等. 影响混凝土植筋锚固性能因素的试验分析[J]. 建筑结构学报, 2010(增2): 275 - 278.]
- [3] Liu Changqing, Lu Zhoudao, Li Zhanhong, et al. Experimental study on the pullout strength of bonded rebar under fire (high temperature)[J]. Journal of Sichuan University: Engineering

- Science Edition, 2010, 42(1): 75 - 79. [刘长青, 陆洲导, 李占鸿, 等. 火灾(高温)下植筋试件拉拔承载力试验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(1): 75 - 79.]
- [4] Liu Changqing, Lu Zhoudao, Zhang Xiuqiu, et al. Experimental study on ultimate strength of post-installed rebar subjected to fire[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(12): 1958 - 1961. [刘长青, 陆洲导, 张秀球, 等. 火灾中植筋试件极限承载力试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(12): 1958 - 1961.]
- [5] Liu Changqin, Wang Kongfan, Lu Zhoudao. Design method of single post-installed rebar exposed to high temperature[J]. Structural Engineers, 2011, 27(5): 85 - 89. [刘长青, 王孔藩, 陆洲导. 高温中单根植筋极限承载力计算方法分析[J]. 结构工程师, 2011, 27(5): 85 - 89.]
- [6] Zou Yong, Lu Zhoudao, Yu Jiangtao. Experimental study on ultimate strength of post-installed rebar connection members in fire[J]. Structural Engineers, 2011, 27(3): 92 - 97. [邹勇, 陆洲导, 余江滔. 火灾中植筋连接构件极限承载力试验研究[J]. 结构工程师, 2011, 27(3): 92 - 97.]
- [7] Peng Xiaoqin, Liu Yanmeng, Zhong Anxin, et al. Experimental research on high-strength inorganic anchoring material[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(2): 113 - 115. [彭小芹, 刘艳萌, 钟安鑫, 等. 高强无机锚固材料的实验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(2): 113 - 115.]
- [8] Yuan Guanglin, Liu Tao, Yan Yuhong. Experimental study of behaviors of RC structure's exterior joints with post-embedded bars under cyclic loading after treatment at high temperature[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 19 - 23. [袁广林, 刘涛, 闫玉红. 高温后 RC 植筋边节点反复荷载的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 19 - 23.]
- [9] 董毓利. 混凝土结构的火安全设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [10] 姜忠良, 陈秀云. 温度的测量与控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [11] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [12] GB 50367—2006 Degin code for strengthening concrete structure[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2006. [GB 50367—2006 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.]
- [13] JGJ 145—2004 Technical specification post-installed fastenings in concrete structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005. [JGJ 145—2004. 混凝土结构后锚固技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.]
- [14] JGJ/T 271—2012 Technical specification for post-anchoring used in concrete structures with inorganic anchoring material[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. [JGJ/T 271—2012 混凝土结构工程无机材料后锚固技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.]