

高温下 FRP 加固钢筋混凝土板非线性分析

高皖扬, 陆洲导, 余江滔

(同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092, gaowanyang20022003@163.com)

摘要: 为了给 FRP 加固钢筋混凝土板的耐火性能研究提供数值计算方法, 实现 FRP 加固板高温下的热 - 力学耦合分析, 在合理选取混凝土、钢筋及 FRP 材料力学性能参数的基础上, 编制了 FRP 加固板高温下的非线性有限元分析程序, 程序的有效性得到了已有试验结果的验证. 基于程序对薄涂型防火涂料厚度、载荷比、混凝土板纵筋配筋率、FRP 加固量、混凝土板厚及钢筋保护层厚度等对影响加固板跨中位移的相关参数进行计算分析. 结果表明: 防火涂料厚度、火灾载荷比以及 FRP 加固量对加固板耐火性能有显著影响; 混凝土板厚及钢筋保护层厚度也对火灾下的加固板挠度产生影响; 而跨中挠度随混凝土板纵筋配筋率的变化不明显.

关键词: 钢筋混凝土板; FRP 加固; 防火保护; 非线性; 热 - 力学耦合

中图分类号: TU375.1; TU352.5 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2010)08-1311-06

Nonlinear analysis of FRP - strengthened reinforced concrete slabs under fire

GAO Wan-yang, LU Zhou-dao, YU Jiang-tao

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University,
Shanghai 200092, China, gaowanyang20022003@163.com)

Abstract: This paper presented a numerical model of FRP - strengthened reinforced concrete (RC) slabs under fire and conducted the coupled thermo - mechanical analysis. Based on the information about the temperature - dependent mechanical properties of concrete, reinforcing steel and FRP materials, this study developed a nonlinear finite element (FE) code to investigate the fire performance of FRP strengthened RC slabs. The FE code was verified through comparisons with existing fire tests. Based on the code, the effects of intumescent coating thickness, fire load ratio, longitudinal steel reinforcement, amount of FRP strengthening, sectional height and concrete cover on the mid - span deflection of FRP - strengthened RC slabs under fire were considered. The parametric studies show that intumescent coating thickness, fire load ratio and amount of FRP strengthening have significant effects on fire performance of strengthened slabs; sectional height and concrete cover only have moderate influences; and mid - span deflection versus longitudinal steel reinforcement is not obvious.

Key words: RC slabs; FRP-strengthening; fire insulation; nonlinearity; coupled thermo-mechanical analysis

在过去的十年里, 纤维增强聚合物 FRP (fiber reinforced polymer) 广泛应用于建筑加固改造行业. 国内外研究者对常温下 FRP 加固混凝土构件的力学及使用性能进行了大量的试验研究与理论分析, 已取得丰硕的研究成果^[1]. 然而, FRP 加固

混凝土结构的耐火性能极差, 一方面由于 FRP 材料所用的胶粘剂多属环氧类有机物, 在温度超过其玻璃化温度 (glass transition temperature, T_g) 时, 胶粘剂分解或软化, 丧失其传递纤维间剪力和与被加固梁共同作用的基础, 造成 FRP 强度和刚度的降低^[1-2]; 另一方面 FRP 材料易燃, 更高的温度下, 达到胶粘剂的燃点, 胶粘剂燃烧, 造成火焰传播和有毒烟气产生.

然而目前关于高温下 FRP 加固混凝土板的研究并不多. Blontrock 等^[3]、William 等^[4]、吴波和

收稿日期: 2008-06-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50578126).

作者简介: 高皖扬 (1982—), 男, 博士研究生;

陆洲导 (1957—), 男, 教授, 博士生导师.

王军丽^[5]等人都先后进行了 FRP 加固混凝土板的火灾试验研究,但是他们的研究工作仅停留在试验阶段和瞬态温度场分析阶段.在世界范围内,目前尚未制定 FRP 加固结构防火设计方面的规范规程^[6-7].一般工业与民用建筑特别是高层建筑都有防火要求,但是在我国现已加固的结构中,多数仅仅在 FRP 表面粉刷一层砂浆,难以保证防火要求和火灾下结构的安全性^[8].本文在现有文献关于混凝土、钢筋以及 FRP 材料高温下力学性能研究的基础上,编制了 FRP 加固混凝土板非线性有限元分析程序 NFAFCS (Nonlinear Finite Analysis of FRP Strengthened Concrete Slabs),比较充分地反映了 FRP 材料和钢筋混凝土的高温力学性能与受力特点,实现了 FRP 加固混凝土板在温度和荷载共同作用下的耦合全过程分析,为该领域的研究提供参考依据.

1 非线性分析过程

非线性有限元分析过程包括温度场分析和热-力学耦合分析.热-力学耦合分析是指在有限元过程中考虑温度和受力的交叉作用和相互影响,可分为 2 种不同的方法:序贯耦合法和直接耦合法.本文热-力学耦合分析是将热分析得到的节点温度作为“体力”载荷施加在后续的力学性能分析中来实现耦合的,属于序贯耦合方法.具体分析过程是在温度场按热传导问题单独计算结束后,将节点某些时刻的温度值存入一个数据文件,在结构性能分析时将截面上该点对应的温度值作为荷载加到节点上.

1.1 温度场分析

基于传热学理论编制了带防火保护的 FRP 加固混凝土板高温下的温度场分析程序,混凝土和钢筋的导热系数、质量热容和容重参照文献^[9]的建议.FRIP 材料的导热系数、质量热容和容重采用文献^[2]中的建议值.薄涂型防火涂料近似取为常数,并具体取膨胀之后的建议值,根据文献^[10]确定.根据大量的计算建议板迎火面和背火面换热系数分别取 $50 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{C})^{-1}$ 和 $25 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{C})^{-1}$.高温炉气与壁面的辐射可视为两个灰体间的辐射换热,建议该辐射换热综合辐射率取为 0.6;板背火面与周围空气间的辐射换热可以视为试件板向半空间的辐射换热,建议该辐射换热综合辐射率取为 0.9.程序的有效性得到了已有试验结果的验证,并可嵌入后续热-力学耦合分析中.

图 1 所示为文献^[5]试验结果与计算结果的

对比,加固板 2 和 3 分别采用 15 mm 厚水泥砂浆和 3 mm 厚薄涂型防火涂料进行防火保护,加固板的配筋及截面尺寸、热电偶的布置如图 2 所示.从图 1 中可以看出,加固板 2 的 3 号测点同试验值有一定偏差,主要是由于试验时防火砂浆局部脱落,在火灾试验后期计算值明显小于试验测量值;但总体上计算值同试验结果吻合较好,足以满足工程精度的要求,说明本程序分析带防火保护的加固板截面温度场分布是可行的,温度场分析结果可进一步代入后续的热-力学耦合分析中.

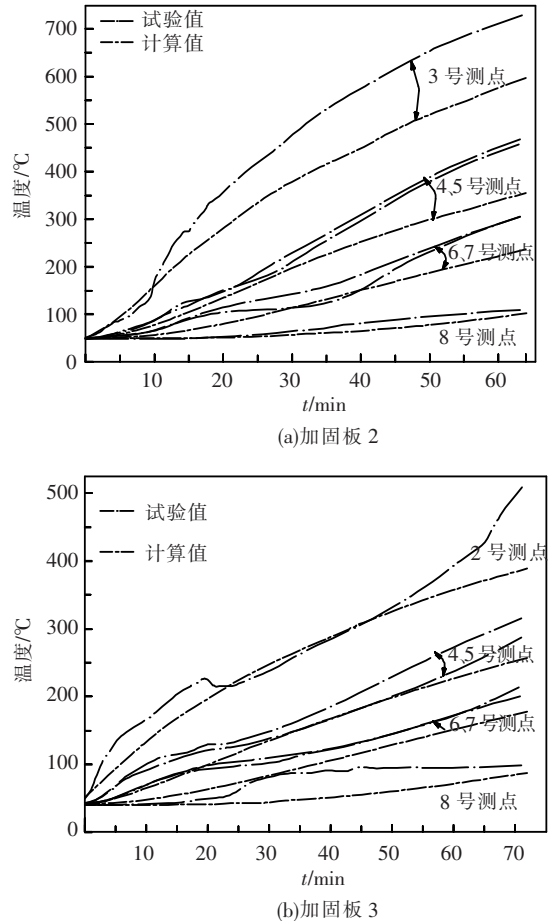


图 1 温度计算值与试验结果对比情况

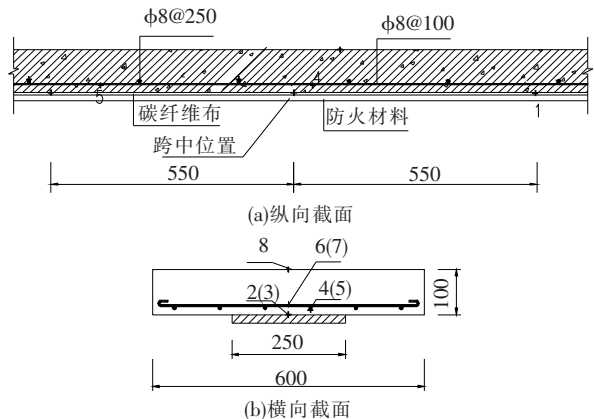


图 2 加固板尺寸及热电偶布置^[5]

1.2 热 - 力学耦合分析

1.2.1 高温下材料本构关系

高温下钢筋受拉、混凝土受压本构参照文献[9]选取. 因为高温下影响 FRP 材料对混凝土板承载力贡献值的因素包含两个方面:一方面是高温下 FRP 材料自身的抗拉强度有所降低;另一方面由于高温下胶粘剂的粘结强度急剧劣化,FRP 布材与混凝土之间产生滑移. 加拿大 Queen's University 的 Bisby^[2]在其博士论文中整理各种 FRP 材料高温下抗拉性能和弹性模量随温度的变化规律,并通过最小二乘回归分析得到一个 S 型函数,可以很好地拟合各种 FRP 材料的高温性能. 高温下 CFRP 抗拉强度模型见式(1).

$$\frac{f_{FR}}{f_F} = 0.45 \tanh[-0.00583 \times (T - 339.54)] + 0.55. \quad (1)$$

式中: f_{FR} 为温度 T 时 CFRP 抗拉强度. f_F 为常温时 CFRP 抗拉强度. Gamage 等^[11]和吴波等^[12]分别通过面内剪切试验研究了胶粘剂在 20 ~ 150 °C 其极限粘结强度随温度的变化规律. 文献[13]给出的拟合关系式为

$$\begin{cases} \frac{f_{bT}}{f_b} = 1 & T \leq 45 \text{ } ^\circ\text{C}, \\ \frac{f_{bT}}{f_b} = 2.0436 - 0.0236T & 45 \text{ } ^\circ\text{C} < T < 75 \text{ } ^\circ\text{C}, \\ \frac{f_{bT}}{f_b} = 0.18 & T \geq 75 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{bT} 和 f_b 分别为温度 T 时和常温下的极限粘结强度. 由于准确测定高温下混凝土试块与 FRP 材料间的相对滑移非常困难,现有试验^[11-12]只采集了构件粘结破坏时的极限荷载,未见高温下 τ - s 关系的相关文献. 因此,就已有资料而言,建立高温下 FRP - 混凝土的界面模型,进行加固板非线性有限元精确分析,是不现实的. 本文在近似考虑上述两个因素的基础上,提出了下述模型近似考虑高温下 FRP 材料的实际承载力抗拉强度,即认为这部分抗拉强度对混凝土板的承载力提供贡献,并将下述模型代入高温下加固板的热 - 力学耦合分析.

$$f_{CFRP(T)} = \phi_{\text{胶粘剂}(T)} \cdot \phi_{CFRP(T)} \cdot f_F. \quad (3)$$

式中: $f_{CFRP(T)}$ 表示温度 T 时 FRP 布的实际承载力抗拉强度; $\phi_{\text{胶粘剂}(T)}$ 表示高温下胶粘剂粘结强度降低系数, $\phi_{\text{胶粘剂}(T)} = f_{bT}/f_b$ 由式(2)确定. $\phi_{CFRP(T)}$ 表示高温下 FRP 材料抗拉强度降低系数, $\phi_{CFRP(T)} = f_{FR}/f_F$ 由式(1)确定.

1.2.2 热 - 力学耦合分析假定及思路

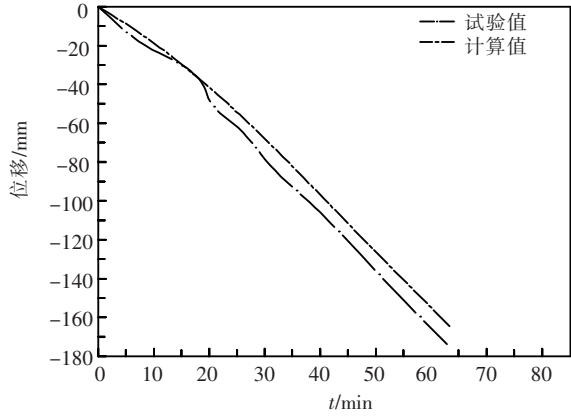
在进行加固板热 - 力学耦合分析时,采用以下基本假定:(1)温度分布与应力水平无关,即在进行温度分析时不考虑构件变形、开裂、应力应变大小等因素对材料的热工性能和构件热传导的影响;(2)无剪切假定,即对于 FRP 加固混凝土板,其构件变形以弯曲变形为主,而忽略剪切变形的影响;(3)热应变只记入膨胀应变,忽略混凝土及钢筋在高温下发生的徐变、蠕变.

除上述基本假定外,还建立了如式(3)所示的 FRP 材料实际承载力抗拉强度模型,近似考虑 FRP 布对钢筋混凝土板的承载力贡献值,并将上述模型代入高温下加固板热 - 力学耦合分析. 钢筋、混凝土和 CFRP 布分别采用杆单元、体单元和膜单元模拟. 采用弥散裂缝(smear)模式考虑了高温下混凝土的开裂. 同时考虑 CFRP 和混凝土单元共用节点的方式来实现 CFRP 与混凝土的协调工作,采用式(3)所述的实际承载力抗拉强度模型代入高温下的耦合计算与变形分析,近似考虑粘结 - 滑移的影响. 火灾下结构的刚度方程为 $K_i \Delta U_i = \Delta F_i$, K_i , ΔU_i 和 ΔF_i 分别为刚度矩阵、位移向量的增量和(广义)荷载向量的增量,而 $\{\Delta F_i\}$ 由外荷载增量和温度变化及混凝土局部开裂或压碎引起的修正向量组成. 求解非线性有限元方程采用的是增量迭代法,在某一时刻温度荷载作用下,首先将该级温度荷载分成若干子步,逐级加载,然后在增量子步内进行迭代计算,迭代使用切线刚度迭代法,该温度作用下计算结束后读入下一时间段温度场,逐级计算.

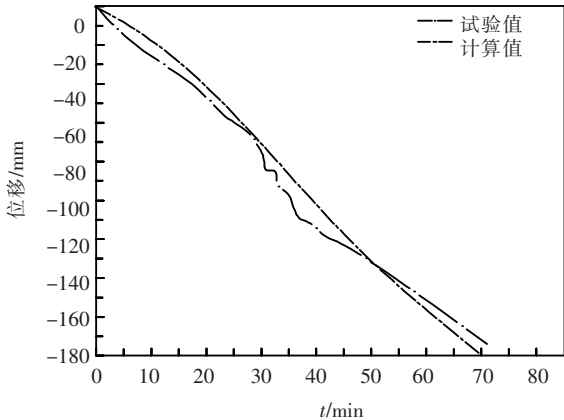
1.2.3 算例验证

基于上述思路,编制了有限元程序实现了 FRP 加固板火灾下响应的热 - 力学耦合分析,程序得到了文献[5]试验结果的验证,对比情况如图3所示. 文献[5]中加固板的截面尺寸见图2所示,实测混凝土立方体抗压强度为 28.9 MPa; 实测钢筋屈服强度为 277 MPa, 极限强度 491.8 MPa; FRP 布厚度 0.111 mm, 抗拉强度为 3 839.9 MPa. 从图3中可以看出,加固板 2 计算值略小于试验值,主要是由于试验中防火砂浆脱落造成防火效果大打折扣;加固板 3 在 5 ~ 15 min 以及 30 ~ 40 min 间计算结果同试验结果有一定偏差,最大差值为 15 mm 左右,主要原因是:一方面在受火 5 ~ 15 min 时,FRP 材料逐步退出工作,由于本文耦合分析时以实际承载力抗拉强度模型近似考虑 FRP 材料的作用,同实际情况有所偏差;另一方面是由于防火涂料的脱落造成 30 ~ 40 min

之间实测值大于计算值. 但总体上计算结果同试验结果吻合较好, 足以满足工程精度的要求.



(a)加固板 2



(b)加固板 3

图3 跨中位移计算值与试验结果对比情况

2 参数分析

针对高温下带防火保护 FRP 加固板的受弯破坏形态, 着重讨论薄型防火涂料厚度、受拉纵筋配筋率、FRP 加固量(指加固板的常温极限承载力中 FRP 材料贡献所占的比例)、火灾下载荷比(指火灾下试件跨中截面所受弯矩与该截面常温极限抗弯承载能力之比)、混凝土板厚以及钢筋保护层厚度等参数对加固板火灾下跨中挠度的影响. 在进行参数分析前, 做如下假定:

1) 加固板静跨为 3.0 m. 升温曲线采用 ISO834 标准升温曲线, 底面受火. 文献[5]的试验结果表明防火砂浆的防火效果并不好, 建议采用薄涂型防火涂料对板底进行防火保护, 其热工性能参数取值如下: 导热系数 $0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$ (发泡膨胀后), 质量热容 $800 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$, 容重 $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ [10]. 常温下混凝土立方体抗压强度为 30 MPa, 常温下纵筋的屈服强度参照笔者以前的实测平均结果选用 375 MPa.

2) 初始参数为: 截面尺寸为 $640 \text{ mm} \times$

100 mm, 混凝土保护层取为 20 mm, 涂料厚度 4 mm, 纵筋配筋率取 0.5%, FRP 加固量取 0.6, 火灾下载荷比取 0.55. 现变化任一参数, 在其他初始参数不变的情况下研究加固板跨中挠度与参数间的关系. 具体各参数变化范围见表 1 所示.

3) 试验过程中, 防火材料保持完好, 不出现开裂或者分层.

2.1 不同防火涂料厚度的影响

图 4 所示为不同厚度的薄涂型防火涂料保护下, 加固板跨中挠度 - 时间变化曲线. 可以看出, 随着防火涂料厚度的增加, 加固板耐火性能越好; 采用 3 mm 厚防火保护后, 2 h 后其跨中挠度仍小于 $L/20$, 满足《建筑设计防火规范》和《高层民用建筑设计防火规范》一级耐火等级的要求. 而采用 5~6 mm 厚防火保护后, 加固梁可以获得大于 3 h 的耐火极限. 现实火灾中防火保护材料厚度越厚, 越易出现开裂与脱落, 防火效果大打折扣, 而本文的分析没有考虑此因素.

表 1 各参数变化范围

参数	变化范围				
防火涂料厚度/mm	2	3	4	5	6
板厚/mm	80	100	120	140	
保护层厚度/mm	15	20	25	30	
纵筋配筋率/%	0.35	0.5	0.65	0.8	
FRP 加固量	0.4	0.6	0.8	1.0	
火灾下载荷比	0.35	0.45	0.55	0.65	

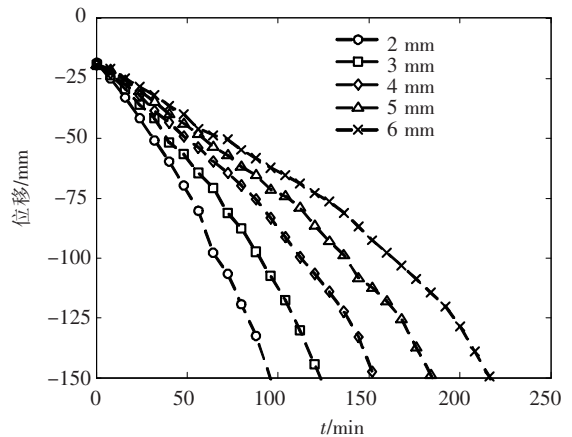


图4 不同防火涂料厚度下跨中挠度 - 时间变化曲线

2.2 不同钢筋保护层厚度的影响

图 5 所示为不同钢筋保护层厚度下, 加固板跨中挠度 - 时间变化曲线. 可以看出, 随着钢筋保护层厚度的增加, 加固板耐火性能越好. 这主要是由于保护层厚度的增加使得相同受火时间下钢筋的温度有所降低, 钢筋材料力学性能的劣化有所减弱.

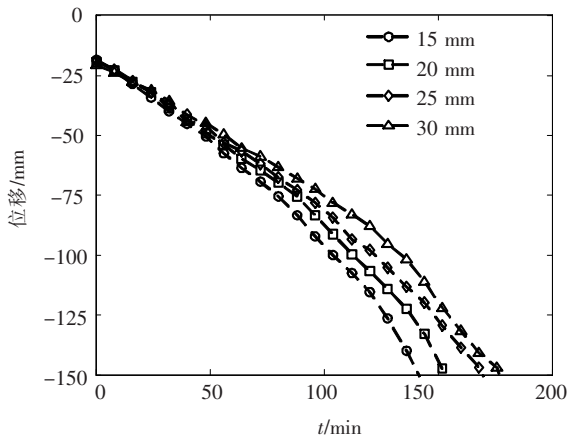


图 5 不同钢筋保护层下跨中挠度 - 时间变化曲线

2.3 不同 FRP 加固量的影响

FRP 加固量反应了加固板实际承载能力的提高幅度. 胶粘剂温度超过 T_g 后, 由玻璃态转变为橡胶态, 剪切强度急剧下降. 温度为 120 °C, 其剪切强度几乎完全丧失^[12], 此即意味着 FRP 布的加固效果基本丧失, 其承担的荷载转由钢筋混凝土板承担, 因此, 加固量越大, 耐火性能越差; 从图 6 可以看出, 随着加固量的增大, 相同的受火时间, 加固板挠度逐渐增加.

但是由于防火材料的保护作用延缓了板内混凝土与钢筋的温度增长, 加固板仍然保持一定的剩余承载力, 对应于 4 mm 防火保护的 FRP 加固板, 上述参数定值时在加固量小于 0.8 时均可以获得大于 2 h 的耐火极限.

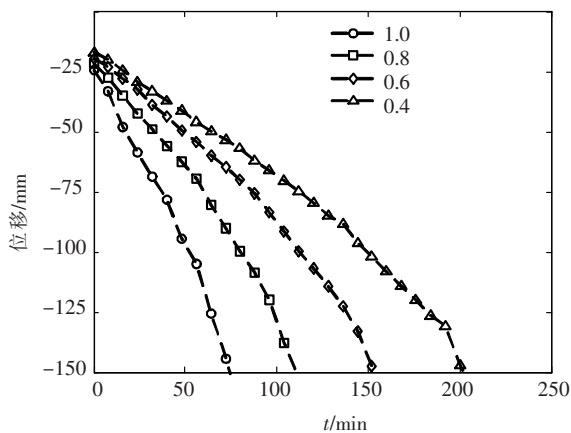


图 6 不同加固量下跨中挠度 - 时间变化曲线

2.4 不同火灾荷载比的影响

图 7 所示为底面防火保护下, 不同火灾荷载比所引起的加固板跨中挠度 - 时间变化曲线. 可以看出, 荷载比是影响加固板耐火性能的主要因素, 特别是荷载比在 0.35 ~ 0.55 之间变化时, 板的挠度增加随荷载比的变化十分显著.

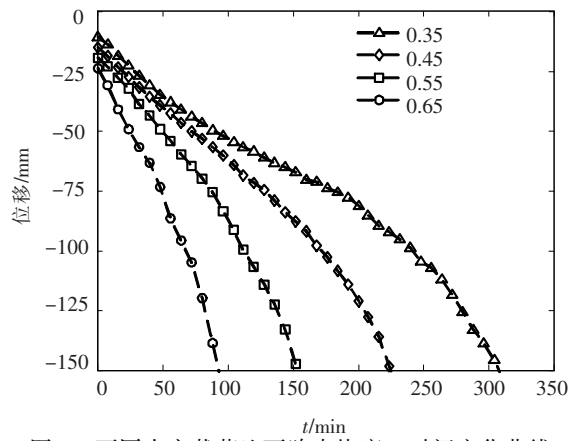


图 7 不同火灾荷载比下跨中挠度 - 时间变化曲线

2.5 不同纵筋配筋率的影响

从图 8 中可以看出, 纵筋配筋率的大小对于加固板的耐火性能基本没有影响, 主要是由于加固量及火灾荷载比为定值时, 即作用于不同配筋率板上的火灾荷载对应力成比例, 因此, 加固板的挠度随配筋率的影响主要来自于不同配筋率造成的截面温度分布的不同. 由于配筋率对截面温度分布的影响本身就不大, 而由温度分布影响造成材料性能的劣化及跨中挠度增长就更加不明显, 因此, 配筋率对加固板的耐火性能影响可以忽略.

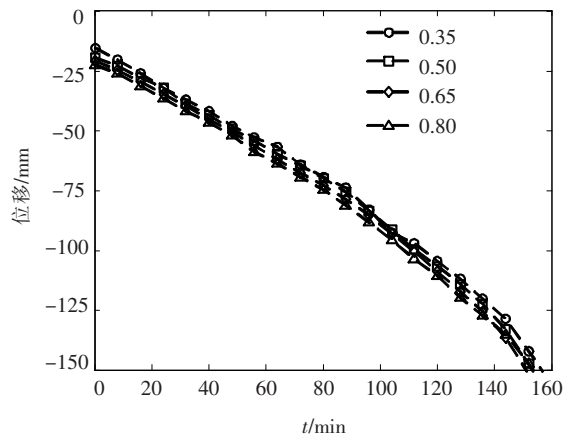


图 8 不同纵筋配筋率下跨中挠度 - 时间变化曲线

2.6 不同板厚的影响

从图 9 中可以看出, 随着加固板厚度的增大,

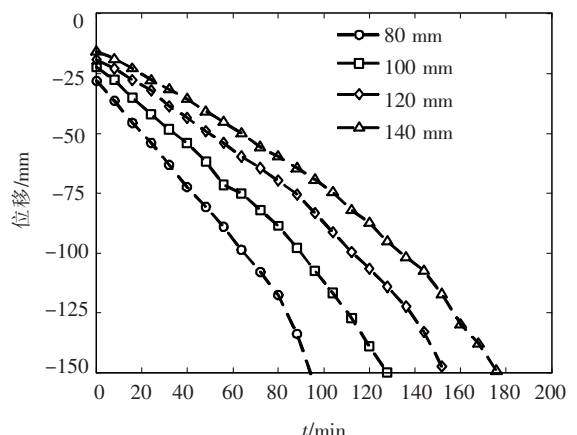


图 9 不同截面高度下跨中挠度 - 时间变化曲线

相同的受火时间,加固板挠度逐渐减小,且减小幅度趋于线性.因此,加固板的厚度对耐火极限的影响近似成线性.

3 结 论

1)提出的 FRP 加固混凝土板高温下数值计算方法是可行的,编制的加固板热 - 力学耦合有限元分析程序 NFAFCS 得到已有试验温度场及跨中位移响应的验证.

2)防火涂料厚度、火灾载荷比以及 FRP 加固量对加固板耐火性能有显著影响,跨中挠度随着防火涂料厚度的减薄、火灾载荷比的增加以及 FRP 加固量的增加而显著增加.截面高度以及钢筋保护层厚度也是影响加固板耐火性能的因素,随着板厚以及钢筋混凝土保护层的增加,加固板的跨中挠度越小.混凝土板纵筋配筋率的变化对加固板的耐火性能影响不明显.

3)本文的研究工作为进一步深入研究 FRP 加固混凝土板的耐火极限创造了条件,同时为相似 FRP 加固板工程的防火设计提供参考.

参 考 文 献:

[1] 高皖扬. 碳纤维加固混凝土梁耐火试验研究与理论分析[D]. 上海:同济大学土木工程学院, 2007.

[2] BISBY L. Fire Behavior of Fiber - reinforced Polymer (FRP) Reinforced or Confined Concrete [D]. Kingston; Queen's University, 2003.

[3] BLONTRUCK H, TAERWE L, VANDEVELDE P. Fire tests on concrete slabs strengthened with fibre composites laminates [C]// Proceeding of the 5th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures. London: Thomas Telford, 2001: 547 - 556.

[4] WILLIAMS B, BISBY L, KODUR V, *et al.* Fire insulation schemes for FRP - strengthened concrete slabs [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(8):1151 - 1160.

[5] 吴波, 王军丽. 碳纤维布加固钢筋混凝土板的耐火性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6):26 - 31,41.

[6] BISBY L, WILLIAMS V, KODUR V, *et al.* Fire Performance of FRP Systems for Infrastructure: A State - of - the - art report[R]. Ottawa; NRC - CNRC Internal Report, RR - 179, 2005.

[7] KODUR V, BISBY L, GREEN M. Preliminary guidance for the design of FRP - strengthened concrete members exposed to fire [J]. Journal of Fire Protection Engineering, 2007, 17(1):5 - 26.

[8] 高皖扬, 胡克旭, 陆洲导. FRP 结构火灾研究趋势与进展[C]// 第四届全国钢结构防火及防腐技术研讨会暨第二届全国结构抗或学术交流会议论文集. 上海:同济大学, 2007:408 - 422.

[9] LIE T T, DENHAM E M A. Factors Affecting the Fire Resistance of Circular Hollow Steel Columns Filled with Bar - reinforced Concrete [R]. Ottawa; NRC - CNRC Internal Report, No. 651, 1993.

[10] 赵宗治, 卿秀英. 国内外钢结构防火涂料现状及比较[J]. 消防技术与产品信息, 1994, 11:27 - 31.

[11] GAMAGE J C P H, AL - MAHAIDI R, WONG M B. Bond characteristics of CFRP plated concrete members under elevated temperatures [J]. Mechanics of Composite Materials, 2001, 37(4): 327 - 338.

[12] 吴波, 万志军. 碳纤维布及胶粘剂的高温强度研究 [C]// 第三届全国钢结构防火及防腐技术研讨会暨第一届全国结构抗或学术交流会议论文集. 福州:福州大学, 2005:386 - 393.

(编辑 刘 彤)