

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220815002

火灾后钢筋混凝土板力学性能评估方法*

李玉梅¹, 王广勇², 戴林³

(1. 山东青年政治学院, 山东 济南 250103; 2. 烟台大学土木工程学院, 山东 烟台 264005;
3. 济南市建设工程勘察设计质量监督站, 山东 济南 250000)

摘要: 钢筋混凝土楼板是火灾中最容易破坏的结构构件, 需要对其火灾后的承载能力进行评估并加固。考虑升温阶段、降温阶段及火灾后阶段材料本构关系的不同, 考虑高温下混凝土保护层的爆裂对温度场及力学性能的影响, 提出了火灾后钢筋混凝土楼板力学性能分析的有限元计算模型。同时, 针对典型的钢筋混凝土板加固方法, 在所述有限元模型的基础上建立了火灾后加固的钢筋混凝土板有限元计算模型, 利用该模型对典型的火灾后加固钢筋混凝土板的承载能力进行了计算分析。模型中采用单元生死技术实现了混凝土高温下的爆裂及火灾后加固的数值模拟, 模型可用于火灾后及加固后钢筋混凝土板力学性能的评估。分析表明, 经历火灾后, 钢筋混凝土板的承载能力降低幅度较大, 板存在明显残余挠度。加固后, 钢筋混凝土板的承载能力得到较大程度的恢复。

关键词: 火灾后; 钢筋混凝土楼板; 承载能力; 升温阶段; 降温阶段; 加固

中图分类号: TU375.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0389-07

Post-Fire Mechanical Performance Evaluation Method of Reinforced Concrete Slabs

LI Yumei¹, WANG Guangyong², DAI Lin³

(1. Shandong Youth University of Political Science, Jinan 250103, China; 2. School of Civil Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China; 3. Jinan Construction Engineering Investigation and Design Quality Supervision Station, Jinan 250000, China)

Abstract: Reinforced concrete (RC) slabs are among the most vulnerable structural components to damage in fires, necessitating the post-fire evaluation of their load-bearing capacity and subsequent reinforcement. A finite element model for analyzing the post-fire mechanical performance of RC slabs was proposed. In this model, the variations in material constitutive relations during heating, cooling, and post-fire stages were considered. The impact of concrete protective layer spalling on temperature distribution and mechanical properties of the slabs under high temperatures was also taken into consideration. Building on this model, another finite element model for evaluating the load-bearing performance of RC slabs reinforced after fire exposure was also proposed. Both models employed element

* 收稿日期:2022-08-15;修回日期:2022-12-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51778595)、山东省自然科学基金项目(ZR2023ME126)、烟台大学博士启动基金项目(TM20B73)资助

作者简介:李玉梅(1979—),女,副教授,硕士。主要从事结构防灾技术方面的研究。E-mail:lym3306@163.com

通讯作者:王广勇(1971—),男,教授,博士。主要从事结构防灾技术方面的研究。E-mail:wanggy0609@163.com

birth-death technology to simulate concrete spalling under high temperatures and post-fire reinforcement. The models could be used to evaluate the post-fire mechanical performance of reinforced RC slabs. The analysis revealed significant reductions in the post-fire load-bearing capacity of RC slabs, with noticeable residual deflection; however, reinforcement was able to substantially restore this capacity.

Keywords: post-fire; reinforced concrete slabs; heating stage; cooling stage; load-bearing capacity; reinforcement

0 引言

遭受火灾后,需要对建筑结构的性能进行评估和修复加固。钢筋混凝土楼板厚度较小,耐火能力差,是结构耐火安全的薄弱构件。例如,在2009年2月9日发生的央视电视文化中心(TVCC)大火中,遭受火灾损伤最多的构件为钢筋混凝土楼板^[1]。因此开展火灾后钢筋混凝土楼板的力学性能评估方法研究有重要的现实意义。

关于板的研究成果主要集中在耐火性能方面:王勇等^[2]、杨志年等^[3]研究表明,整体结构中相邻未受火构件的约束对受火双向板的火灾行为影响显著。王勇等^[4]在试验研究的基础上提出了混凝土双向板耐火性能分析的数值计算模型,计算结果与试验吻合较好。董毓利等^[5]考虑荷载和高温的耦合作用,采用板的大挠度理论推导了高温下钢筋混凝土板的挠度计算公式。在结构火灾后的力学性能方面,吴波^[6]提出了高温后混凝土的应力-应变关系计算模型及混凝土的高温爆裂准则;T.Y.Song等^[7-8]开展了钢管混凝土柱-钢梁节点火灾全过程力学性能的试验,提出了节点火灾全过程力学性能分析的方法;V.Kodur等^[9]提出了火灾后型钢混凝土柱承载能力的计算方法;王勇等^[10]进行了火灾后钢筋混凝土板的力学性能试验,研究了升降温火灾作用后板的温度分布、变形及破坏形态。综上,关于火灾后钢筋混凝土楼板力学性能评估方法研究成果还较少。

以2009年正在建的央视电视文化中心(TVCC)大火中典型受损的楼板为例,提出火灾后钢筋混凝土板力学性能的计算模型,对其火灾后及加固后的性能进行分析。本文方法可为钢筋混凝土楼板火灾后的性能评估和修复加固提供参考依据。

1 建筑结构火灾全过程分析方法

1.1 火灾后评估及加固流程

对于遭受火灾的建筑结构的力学性能进行评估,首先需要对火灾现场进行调查,了解可燃物的性质、数量、构件经历的最高温度等。然后,利用合适的理论计算公式或数值模拟方法重现火灾温度—时间关系。接着,对建筑结构进行传热分析,确定结构的温度—时间过程。最后,对建筑结构升温、降温及火灾后的力学性能进行计算评估。如果火灾后建筑结构的承载能力不满足安全要求,则需要加固设计。上述工作流程如图1所示。

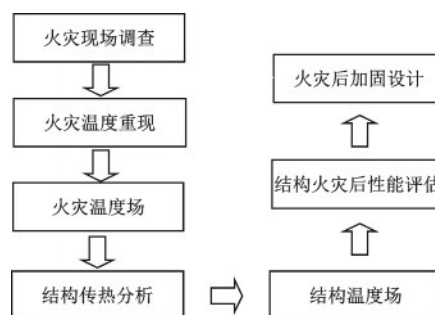


图1 建筑结构火灾后性能评估流程

Fig.1 Procedures of post-fire performance evaluation for building structures

1.2 火灾全过程分析方法

建筑结构在火灾升温、降温和火灾后阶段的性能不同。火灾后阶段,结构当前的温度为室温,但其经历过高温损伤,材料性能与其经历的最高温度有关。同时,由于经历升、降温,结构内部存在残余内力和应力。因此,对火灾后建筑结构构件的力学性能评估时需要考虑升温阶段、降温阶段及火灾后3个阶段材料的本构关系。文献[11]提出了考虑上述因素的建筑结构火灾全过程分析

方法,同时进行了较多的试验验证,本文采用该方法对火灾后的钢筋混凝土板的火灾后力学性能进行分析。

1.3 材料本构关系

(1) 钢材

升温阶段钢材的应力—应变关系采用 T.T.Lie 等^[12]提出的模型,降温阶段钢材的应力—应变关系采用韩林海^[13]提出的模型,火灾后阶段钢材的应力—应变关系采用 T.Y.Song 等^[8]及 Z.Tao 等^[14]提出的模型。

(2) 混凝土

升温阶段混凝土应力—应变关系采用 T.T.Lie 等^[12]提出的模型,火灾后阶段采用陆洲导等^[15]提出的混凝土应力—应变关系模型,降温阶段混凝土本构关系模型采用陆洲导等^[15]提出的火灾后阶段的模型。

1.4 火灾后全过程分析方法试验验证

为了对上述方法进一步验证,对文献[10]中钢筋混凝土板的火灾后力学性能试验进行数值模拟。文献[10]共进行了5块钢筋混凝土板的火灾后的力学性能试验,每块板长4.7 m,宽2.1 m,在长度方向分为3跨。板厚80 mm,配置双层双向HRB400钢筋,钢筋直径6 mm,间距150 mm,混凝土保护层厚度10 mm。混凝土等级为C30。

采用上述方法计算文献[10]中板1-A跨、板2-B跨的荷载 P -跨中挠度 f 关系曲线与试验比较如图2所示。其余板的结果基本接近,不再赘述。可见计算结果与试验结果吻合较好,证明本文方法是可行的。

2 钢筋混凝土板火灾后性能评估

2.1 典型的钢筋混凝土楼板

2009年2月9日,央视电视文化中心(TVCC)发生大火,大火持续6 h,过火面积10余万 m^2 ,钢筋混凝土楼板是损伤比例最高的构件^[1]。这里以10层某标准房间顶部损伤较严重的两块相邻钢筋混凝土楼板为例进行分析,两块板的长宽比不同。火灾后该楼板板底的实际受损情况如图3所示。

该楼板板厚175 mm,混凝土强度等级为C40,配置双层双向钢筋HRB335级钢筋网,钢筋直径

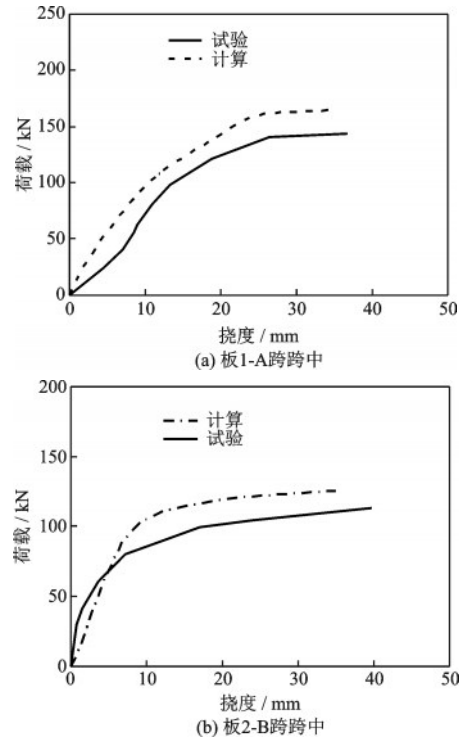


图2 板荷载 P -跨中挠度 f 曲线计算结果与试验结果比较
Fig.2 Comparison of calculated and experimental results for load versus mid-span deflection curves of slabs

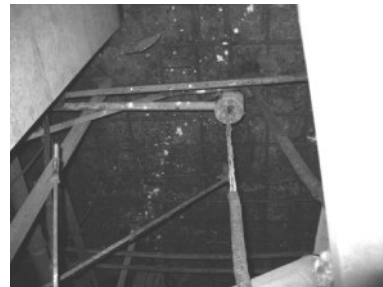


图3 混凝土楼板底部火灾损伤情况
Fig.3 Fire-induced damage at the bottom of reinforced concrete slab

14 mm,间距150 mm,混凝土保护层厚度为15 mm。该房间顶板由一根次梁分为两块板,南侧楼板称为楼板A,北侧称为楼板B。楼板A平面尺寸为5 m×2.65 m,楼板B平面尺寸为5 m×5.375 m。两块楼板损伤程度接近,但板长宽比不同,板B的长宽比较小,受力性能有一定差别。考虑了长宽比对板受力性能的影响,这里选择楼板A、B进行分析。整个楼层的板为连续浇筑,板A和B的边界取固接边界条件。经调查分析,发生火灾时板A、B均承担施工荷载,其承担的总荷载可用均布荷载 $q=9.9 \text{ kN}/m^2$ 等效。

2.2 火灾温度

对遭受火灾的钢筋混凝土楼板进行力学性能分析,首先需要确定楼板板底所在房间的升温过程。根据火灾发生前可燃物分布和数量,确定火灾中烧毁的可燃物数量。然后根据房间建筑布局、开口情况及可燃物分布,用BFD火灾模型^[16]确定房间的火灾温度—时间关系。同时,根据建筑结构构件的颜色及烧损情况,依据《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252: 2009)及其他相关资料^[1],推断板底的过火最高温度。利用推断的板底过火最高温度校准BFD模型的参数,直至用BFD火灾模型计算的板底温度与现场调查的板底过火温度基本吻合。利用BFD火灾计算模型确定的板底处火灾温度—时间关系曲线如图4所示。

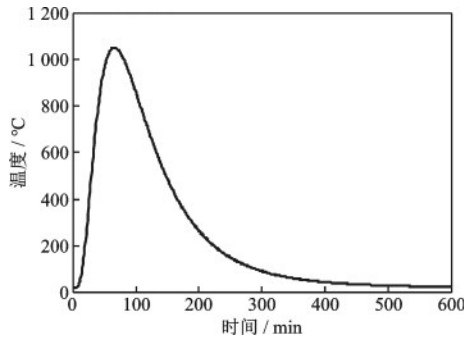


图4 板底火灾温度—时间 t 曲线

Fig.4 Temperature-time curve for the slab bottom during a fire

2.3 温度场及火灾后力学性能计算模型

火灾后需要评估钢筋混凝土板和火灾后加固板的力学性能。因此,需要建立火灾后板力学性能评估计算模型和火灾后加固板的力学性能计算模型。上述两类模型中,温度场分析采用同一模型。

利用软件ABAQUS建立有限元计算模型,采用顺序耦合方式计算楼板火灾下的传热和力学性能。即首先进行传热分析,获得火灾下楼板的瞬时温度场,之后将温度计算结果导入力学模型,进行楼板的力学性能计算,这样就实现了温度与荷载的耦合计算。

在实际受火过程中,混凝土板出现较为严重的爆裂现象,整个混凝土保护层均剥落,称为剥落层。剥落层既影响温度场,也影响板的力学性能。在温度场和力学性能计算模型中,采用单元生死技术模拟混凝土剥落。根据文献[10],楼板混凝土发生爆裂

的标准为该层混凝土温度达到 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在板温度场、火灾后力学性能及加固后力学性能分析模型中,采用上述方法考虑混凝土剥落的影响。

建立温度场分析模型时,混凝土采用三维热传导单元DC3D8划分网格,钢筋采用一维热传导单元DC1D2划分网格。板底火灾温度场采用图4的温度—时间曲线。

在建立板火灾后力学性能评估计算模型时,混凝土采用三维实体单元C3D8R划分网格,钢筋采用三维桁架单元T3D2划分网格,建立的板A火灾后力学性能评估计算模型如图5所示。

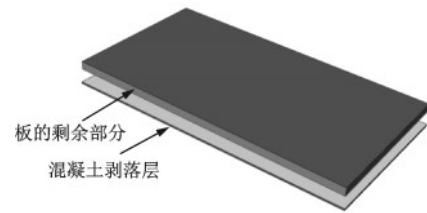


图5 火灾后楼板A力学性能有限元计算模型

Fig.5 Finite element model for mechanical performance of slab A after fire exposure

火灾后通常要对板修复加固,首先去掉剥落层,在板底混凝土剥落部位现浇混凝土灌浆料,混凝土灌浆料厚度 55 mm ,强度等级C60。之后,在混凝土灌浆料下面粘贴 5 mm 厚的Q235钢板以加固楼板。另外,钢板在施工时还可作为现浇混凝土的模板使用,方便施工。

建立火灾后板修复加固有限元计算模型时,将加固后的楼板分为4层:第1层为混凝土保护层剥落后板的剩余部分;第2层为原混凝土板高温下剥落的混凝土保护层;第3层为增加的混凝土灌浆料层,第4层为钢板。在楼板升降温及火灾后的全过程分析中,仍然采用单元生死技术在相应的时刻杀死或激活模型中的相应结构层。在升温阶段当混凝土温度达到 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 将第2层单元杀死,在火灾后加固时激活,激活时将材料性能更换为常温下混凝土灌浆料的材料特性。第3层及第4层在火灾后加固时激活。这样,通过单元生死技术实现了升温过程中混凝土保护层剥落,以及火灾后阶段加固后板的数值模拟,加固板的有限元计算模型如图6所示。在有限元模型中,加固钢板采用S4R单元模拟,其余同板火灾后性能评估计算模型。

首先将荷载施加到楼板顶面,开始升降温条件下结构的力学性能分析,分析过程中保持板顶面荷载不变,这个过程为升降温阶段分析。在火灾后阶

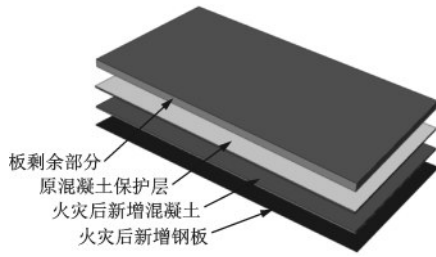


图6 火灾后加固板A有限元计算模型

Fig.6 Finite element model for reinforced slab A after fire exposure

段,按比例增加均布荷载的大小,直至楼板达到极限荷载。在分析过程中,钢材和混凝土的常温强度取其标准值。

3 温度场计算结果分析

传热分析中考虑受火过程中板底层混凝土的爆裂导致的板底受火边界的变化,计算得到的火灾各个时刻 t (时间与图4对应)的板A温度场如图7所示。从图7可见,板混凝土保护层剥落前温度较高。保护层剥落后,新的混凝土板底温度升温加快。降温阶段时混凝土板的温度逐渐降低。

图8中给出了剩余板沿板厚各点的温度—时间关系曲线, h 为距离剩余板底的距离。从图中可见,当混凝土发生剥落后,剩余板底处的温度迅速升高。其余温度随与板底的距离增加而降低,板后方向上部测点的温度升降温较下部测点升温滞后。

4 板力学性能计算结果分析

4.1 破坏形态

火灾后增加板顶均布荷载 q 至板破坏,火灾后未加固板A、B破坏时的竖向位移(U, U_3)分别如图9-10所示。可见,板破坏时的变形较大,可认为板已经到达极限荷载。火灾后板破坏时出现了明显的下凹变形,中间区域变形较大,周围区域变形较小,说明是板挠度过大导致的。火灾后加固板的破坏形态与图9、10相似。

4.2 火灾后板荷载-位移曲线

计算得到了板A、B未受火、火灾后、火灾后加固的荷载与板中央挠度关系曲线,分别如图11、12所示。除未受火板外,板的荷载—挠度关系曲线均

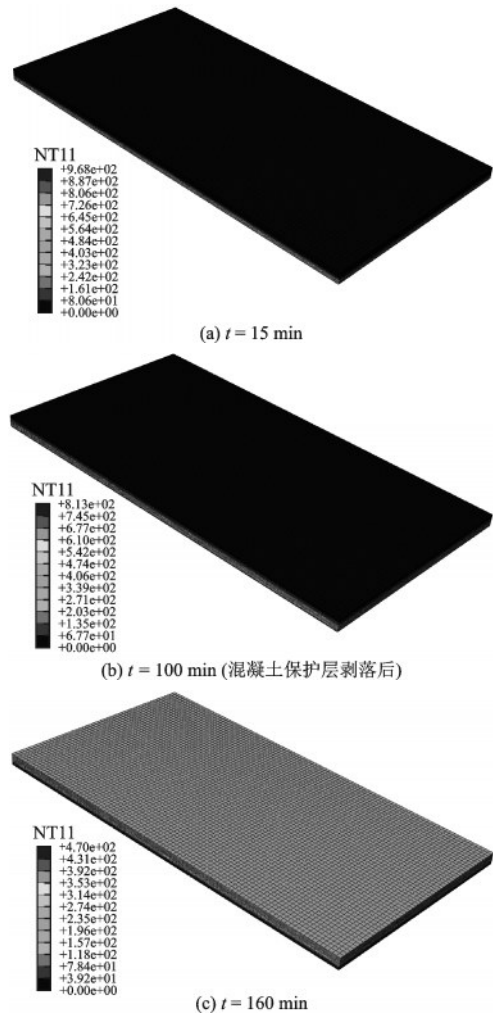


图7 升降温过程中钢筋混凝土板A温度分布云图

Fig.7 Temperature distribution of slab A during heating and cooling stages

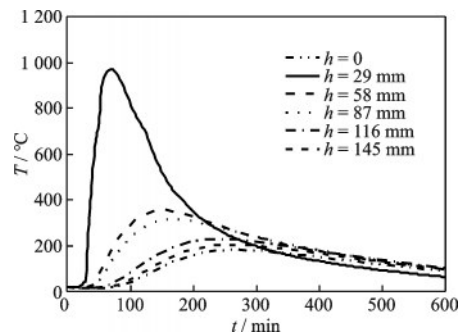


图8 沿板厚各测点的温度—时间关系

Fig.8 Temperature-time curves along the slab depth

包含了升降温过程中的挠度变化。由于板破坏时挠度较大,出现了明显的受拉膜效应,致使其承载能力较大提高,实际应用时,可根据适当的挠度确定极限荷载。

从图11和图12可以看出,经历升降温的火灾后钢筋混凝土板的承载能力发生较大幅度降低。

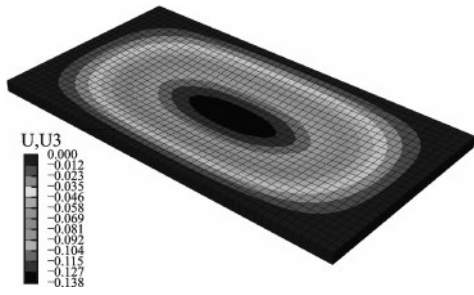


图9 火灾后未加固板A破坏时的变形

Fig.9 Deformation of slab A without reinforcement upon failure after fire exposure

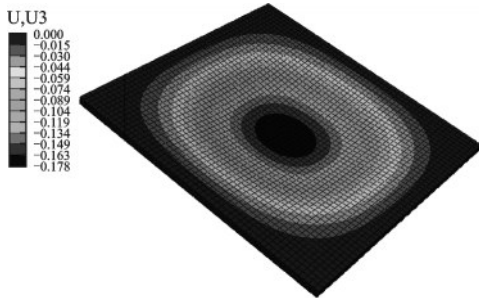


图10 火灾后未加固板B破坏时的变形

Fig.10 Deformation of slab B without reinforcement upon failure after fire exposure

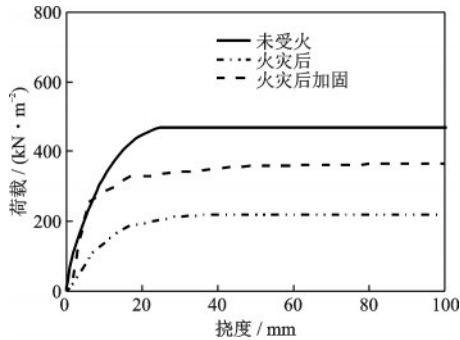


图11 板A的荷载—挠度关系

Fig.11 Load-deflection relations of slab A

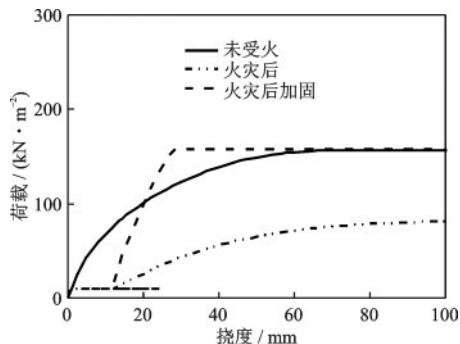


图12 板B的荷载—挠度关系

Fig.12 Load-deflection relations of slab B

火灾后,由于混凝土和钢材经历高温作用,其强度会出现不同程度的降低。混凝土在经历200℃之后

其抗压强度开始降低。钢材经历500℃高温作用后,其屈服强度会降低。材料强度降低,会进一步导致板的承载力降低。另外,由于板底混凝土保护层在高温下脱落,致使板的负弯矩受压区截面高度减小。上述因素共同导致板的承载能力降低,其中板A承载力降低幅度为46%,板B的降低幅度为53%,两块板的承载能力降低幅度均较大。

另外,图中还可看出,升降温过程中,板A、B的挠度经历先增加、后恢复的过程。随着温度升高,材料强度及弹性模量降低,楼板的挠度开始增加。随着楼板温度降低,钢材强度、板的热膨胀变形以及板的挠度都有所恢复。由于混凝土保护层的脱落以及升降温过程中板产生了塑性变形,升降温之后,板的挠度并没有恢复至受火前的水平,而是出现了残余变形。相较板B,板A升降温过程中的挠度变化程度较小。

加固后板A承载能力没有恢复至未受火板的承载能力,但比经历火灾没有加固时的承载能力提高63%,加固后板的承载力满足安全要求。板B加固后承载能力恢复至未受火板的承载能力,且板B加固后到达承载能力时的挠度比未受火板小,表明加固后板B的刚度增加。板的加固方式是将爆裂的混凝土保护层更换,并增加1层新的40mm厚混凝土灌浆料层,该层混凝土抗拉强度较高。同时,在混凝土灌浆料层下面增加一层钢板。上述这些措施使得楼板的承载力进一步增加,起到了较好的加固效果。板B的长宽比较小,接近1,为双向板,双向受力,可以充分发挥加固层的效率,故这里的加固方案对板B的加固效果更好。

5 结 语

针对在建工程典型火灾事故,采用现场调查与理论计算模型相结合的方法确定了钢筋混凝土楼板火灾温度场。考虑升温、降温及火灾后3阶段材料本构关系的基础上,采用单元生死技术,建立了火灾后及火灾后加固的钢筋混凝土楼板力学性能分析有限元计算模型,可用于火灾后及火灾后加固的钢筋混凝土板的力学性能评估。计算结果表明,经历火灾后,钢筋混凝土板的承载能力降低幅度较大。加固后,钢筋混凝土板的承载能力得到一定程度的恢复,相同加固措施条件下短跨较小的板承载能力的恢复程度更大。

参考文献:

- [1] 李引擎,王广勇,李磊,等. 高层建筑结构火灾后性能评估方法及其在央视 TVCC 中的应用研究[J]. 建筑科学,2014,30(11):65-70.
Li Y Q, Wang G Y, Li L, et al. Post-fire performance evaluation method of high-rise buildings and its applications in TVCC[J]. Building Science, 2014, 30(11): 65-70. (in Chinese)
- [2] 王勇,董毓利,彭普维,等. 整体结构中钢筋混凝土双向板火灾试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(8):1-11.
Wang Y, Dong Y L, Peng P W, et al. Fire test on floor of full-scale steel-framed structure[J]. Journal of Building Structures, 2013,34(8): 1-11. (in Chinese)
- [3] 杨志年,董毓利,吕俊利,等. 整体结构中钢筋混凝土双向板火灾试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(9): 96-103.
Yang Z N, Dong Y L, Lyu J L, et al. Experimental study of two-way reinforced concrete slab subjected to fire in a whole structure[J]. Journal of Building Structures. 2012,33(9): 96-103. (in Chinese)
- [4] 王勇,王腾焱,袁广林,等. 基于不同混凝土本构模型的混凝土双向板火灾行为分析[J]. 工程力学,2016,33(11):208-219.
Wang Y, Wang T Y, Yuan G L, et al. Analysis of fire behavior of two-way concrete slabs based on different constitutive models[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(11): 208-219. (in Chinese)
- [5] 董毓利,房圆圆. 火灾作用下混凝土双向简支板的挠度计算[J]. 建筑结构学报,2018,39(5):63-68.
Dong Y L, Fang Y Y. Determination of deflection of two-way simply supported reinforced concrete slabs in fire[J]. Journal of Building Structures. 2018, 39(5): 63-68. (in Chinese)
- [6] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能[M]. 北京: 科学出版社,2003.
Wu B. Post-fire mechanical behaviour of reinforced concrete structures[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [7] Song T Y, Han L H, Brian U. Performance of CFST column to steel beam joints subjected to simulated fire including the cooling phase[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(4): 591-604.
- [8] Song T Y, Han Li H. Post-fire behavior of concrete-filled steel tubular column to axially and rotationally restrained steel beam joint[J]. Fire Safety Journal, 2014, 69: 147-163.
- [9] Kodur V, Raut N K, Mao X Y, et al. Simplified approach for evaluating residual strength of fire-exposed reinforced concrete columns[J]. Materials and Structures, 2013, 46(2): 2059-2075.
- [10] 王勇,姜亚强,张亚军,等. 混凝土连续板火灾后力学性能试验及理论分析[J]. 土木工程学报,2021,54(3): 41-57.
Wang Y, Jiang Y Q, Zhang Y J, et al. Experimental research and theoretical analysis on the post-fire mechanical performance of the continuous concrete slabs[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(3): 41-57. (in Chinese)
- [11] 王广勇,张东明,郑蝉蝉,等. 考虑受火全过程的高温作用后型钢混凝土柱力学性能研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报. 2016,37(3): 44-50.
Wang G Y, Zhang D M, Zheng C C, et al. Post fire performance of steel reinforced concrete columns subjected to fire including cooling phase[J]. Journal of Building Structures. 2016, 37(3): 44-50. (in Chinese)
- [12] Lie T T, Irwin R J. Method to calculate the fire resistance of reinforced concrete columns with rectangular cross section[J]. ACI Structure Journal, 1993, 90(1): 52-56.
- [13] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2007:544-548.
Han L H. Concrete filled steel tube structures—Theory and practice (2nd Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2007:544-548. (in Chinese)
- [14] Tao Z, Wang X Q, Brian U. Stress-strain curves of structural and reinforcing steels after exposure to elevated temperatures[J]. Journal of Materials in Civil Engineer, ASCE,2013, 25(9):1306-1316.
- [15] 陆洲导,朱伯龙,谭玮. 钢筋混凝土梁在火灾后加固修复研究[C]// 土木工程防灾国家重点实验室论文集,上海:同济大学出版社,1993:152-162.
Lu Z D, Zhu B L, Tan W. Study on the retrofit of reinforced concrete beam after fire [C] // Proceedings of State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Shanghai: Tongji University Press, 1993: 152-162. (in Chinese)
- [16] Barnett C R. BFD curve: a new empirical model for fire compartment temperatures [J]. Fire Safety Journal, 2002, 37: 437-463.

(本文编辑:赵霞)