

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2022.03.010

火灾下钢筋混凝土梁极限承载力分析

刘 波, 廖子泗

(广西交通设计集团有限公司, 广西南宁 530000)

摘要:为研究火灾作用下钢筋混凝土梁在不同设计参数下极限承载能力变化特点,对混凝土梁抗火设计提供参考,通过 ABAQUS 有限元软件,建立钢筋混凝土梁瞬态热分析模型计算梁体火灾下温度场分布,并采用顺序耦合分析方法对梁体进行承载力分析。计算结果显示,梁体截面配筋率及保护层厚度增加对梁体抗火性能有提高,但增加幅度有限;通过钢筋混凝土梁在火灾下承载能力设计参数定量分析得出,梁体保护层厚度增加对抗火性能提升比截面配筋率提高更加有效,并从定量分析角度验证了防火设计规范中对结构保护层厚度区间取值的合理性。

关键词:火灾;钢筋混凝土梁;配筋率;保护层厚度;温度场;顺序耦合

中图分类号:TU375.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-1891(2022)03-0052-05

Analysis of the Ultimate Bearing Capacity of Reinforced Concrete Beams Under Fire

LIU Bo, LIAO Zisi

(Guangxi Communications Design Group Co., Ltd, Nanning, Guangxi 530000, China)

Abstract:This paper focuses on the study of the variation characteristics of ultimate bearing capacity of reinforced concrete beams under fire within different design parameters to provide guidance for fire resistance design of concrete beams. The transient thermal analysis model of reinforced concrete beam is established by ABAQUS finite element software to calculate the temperature field distribution under fire, and the bearing capacity of the beam is analyzed by sequential coupling analysis method. The calculation results show that the increase of the reinforcement ratio of the beam section and the thickness of the protective layer can improve the fire resistance performance of the beam, but the increase range is limited. Through the quantitative analysis of the design parameters of the bearing capacity of reinforced concrete beams under fire, it is concluded that the increase of the thickness of the protective layer of the beam can improve the fire resistance performance more effectively than the increase of the reinforcement ratio of the section, and the rationality of the value of the thickness interval of the structural protective layer in the fire protection design code is verified from the perspective of quantitative analysis.

Keywords:fire; reinforced concrete beam; reinforcement ratio; thickness of protective layer; temperature field; sequential coupling

0 引言

随着我国经济的高速发展,城市中写字楼、居民住宅楼、商场等高层建筑不断拔地而起,此类建筑共同点即大部分采用钢筋混凝土梁作为楼面板主要承重结构。国内外众多试验研究指出,普通混凝土在 400 °C 以上,钢材在 300 °C 以上,其力学性能将发生严重退化,这也是钢筋混凝土梁在火灾下承载能力减弱的一个极其重要的因素。为此,国内外

众多学者对火灾下钢筋混凝土梁体受力性能做了大量研究工作。孙劲峰等^[1]通过受热钢筋混凝土梁的荷载试验得出了截面受拉区与受压区在高温时和降温后的主要受力性能;时旭东等^[2]通过对钢筋混凝土简支梁进行高温试验研究,得出适当地加大混凝土保护层厚度能有效地梁体抗火性能;郑永乾等^[3]采用纤维模型法和有限元软件 ABAQUS 分析了型钢混凝土梁在火灾下的变形和梁体耐火极限;郑永乾^[4]利用有限元分析 ABAQUS 软件建立了型

收稿日期:2022-03-25

作者简介:刘波(1986—),男,四川内江人,工程师,硕士,研究方向:桥梁可靠度及防灾减灾。

钢筋混凝土梁和混凝土柱的火灾分析模型,考察了温度分布、侧向挠度、轴向变形、钢与混凝土之间的黏结滑移等,进一步了解火灾下型钢混凝土构件的力学性能。以上研究均是对钢筋混凝土在火灾下的试验研究,对结构设计人员指导作用有限。此外,上述研究均没有对钢筋混凝土梁在设计规范基础上进行设计参数定量分析。

基于上述研究,本文利用通用有限元程序 ABAQUS 对火灾下钢筋混凝土梁承载能力设计参数进行定量分析,研究梁体在不同截面配筋率及保护层厚度下其极限承载能力变化规律,以期对相关结构防火设计和灾后加固提供参考,并从定量分析角度验证防火设计规范中对结构保护层厚度区间取值的合理性。

1 计算模型介绍

本文模型为两端简支结构,计算跨度为 2.5 m,截面尺寸为 0.3 m×0.15 m,截面配筋及箍筋间距和受力如图 1 所示。配筋率和保护层厚度变化如表 1 所示。混凝土材料采用 C35 混凝土,钢筋采用 HRB335 钢材。

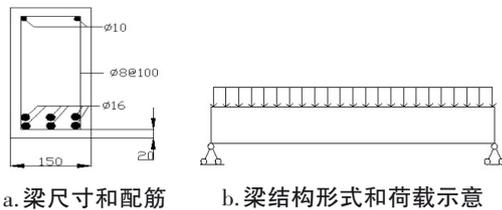


图1 梁尺寸、配筋及结构简图

表1 截面配筋和保护层厚度

| 参数变量 | 参数变量值/mm |
|----------|----------|
| 保护层厚度变化 | 10 |
| | 15 |
| | 20 |
| 底部钢筋直径变化 | 14 |
| | 16 |
| | 18 |

1.1 有限元模型

由于本文采用热、力顺序耦合方法对普通钢筋混凝土梁进行火灾仿真分析,因此计算模型首先对梁体进行火灾下温度场模拟,再基于此模拟温度场进行混凝土的受力分析。大量实验结果表明,钢筋

混凝土结构中钢筋对梁体温度场影响较小,因此在模拟计算梁体火灾温度场时没有考虑钢筋的作用。在火灾温度场分析中混凝土梁采用 DC3D8 实体单元,结构受力分析中混凝土采用 C3D8R 单元,钢筋采用 T3D2 两结点线性三维桁架单元,且在受力分析中不考虑钢筋和混凝土之间的相对滑移,钢筋和混凝土共同受力,结构模型如图 2 所示。

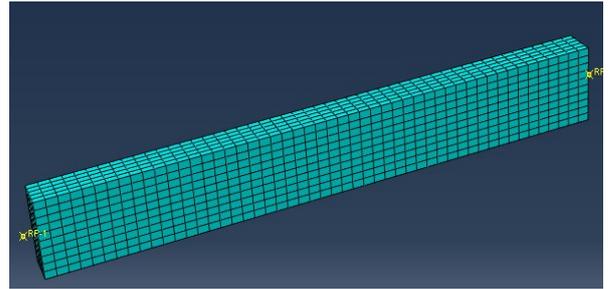


图2 有限元模型

1.2 材料热工参数计算

钢筋混凝土是一种复合材料,在不同温度下其热工参数将发生变化。本文中热工参数主要基于欧洲 EC3 规范^[5],普通钢筋热膨胀系数为 1.4×10^{-5} ($20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C}$, T 为灾时环境平均温度 ($^\circ\text{C}$)), λ_c (普通混凝土热传导系数)、 C_c (普通混凝土比热系数)、 α_c (普通混凝土热膨胀系数) 具体计算公式如式 (1)~(3) 所示:

$$\lambda_c = 2 + 0.012 \left(\frac{T}{120} \right)^2 - 0.24 \left(\frac{T}{120} \right) \quad (1)$$

$$C_c = 80 \left(\frac{T}{120} \right) - 4 \left(\frac{T}{120} \right)^2 + 900 \quad (2)$$

$$\alpha_c = (0.008T + 6) \times 10^{-6} \quad (3)$$

式 (1)~(3) 中: T 为火灾时环境平均温度 ($^\circ\text{C}$), $20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C}$ 。

温度场计算模型为底部和两侧面三面受火,为方便加载,将热流转化为对流换热和热辐射形式,用对流换热系数和综合辐射系数来反映火灾对混凝土温度场的影响。受火面对流系数取 1500,非受火面对流系数取 540,受火面综合辐射系数取 0.5^[6]。升温曲线采用 ISO834 国际火灾标准升温曲线,其公式如式 (4) 所示:

$$T = t_0 + 345 \lg(8t + 1) \quad (4)$$

式中: T 为火灾场温度, $^\circ\text{C}$; t_0 为火灾发生时环境温度, $^\circ\text{C}$; t 为火灾持续时间, min。

本文模型火灾加载时间 t 工况分别为 10、15、20、30 min。

1.3 混凝土和钢筋在高温下的力学性能

由于在高温下混凝土和钢筋的力学性能会发生很大的变化,所以合理的高温本构是进行热应力分析的重要基础。国内学者多年试验研究发现,混凝土抗压强度随温度升高而减小,但在 400 °C 以下抗压强度和弹模削弱较小,甚至在 400 °C 左右时抗压强度因为内部水分减少而有所提升。本文采用的混凝土材料参数如下。

1) 混凝土弹模。

混凝土弹模采用文献[7]建议的表达式。当 $0\text{ °C} < T \leq 200\text{ °C}$ 时, $E_{c,T} = (1 - 0.0015T)E_c$; 当 $200\text{ °C} < T \leq 700\text{ °C}$ 时, $E_{c,T} = (0.87 - 0.00084T)E_c$; 当 $700\text{ °C} < T \leq 800\text{ °C}$ 时, $E_{c,T} = 0.28E_c$ 。其中, $E_{c,T}$ 为火灾下温度 T 时混凝土弹性模量; T 为火灾时环境平均温度, °C; E_c 为常温下混凝土弹性模量。

2) 混凝土屈服强度。

混凝土屈服强度采用文献[1]中建议的表达式。当 $0\text{ °C} < T \leq 400\text{ °C}$ 时, $R_a(T) = R_a$; 当 $400\text{ °C} < T \leq 800\text{ °C}$ 时, $R_a(T) = 1.6 - 0.0015R_a$ 。其中, $R_a(T)$ 为温度 T 时棱柱体抗压强度; R_a 为常温下棱柱体抗压强度。

3) 应力—应变关系。

应力—应变关系采用文献[8]中建议的表达式。当 $x < 1$ 时, $y = 2.2x - 1.4x^2 + 0.2x^3$; 当 $x \geq 1$ 时, $y = \frac{x}{0.8(x-1)^2 + x}$ 。其中, $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p^T}$, $y = \frac{\sigma}{f_\sigma^T}$, ε_p^T 和 f_σ^T 可分别由式(5)和(6)求出:

$$\varepsilon_p^T = (1 + 0.0015T + 5 \times 10^{-6}T^2)\varepsilon_p \quad (5)$$

$$f_\sigma^T = \frac{f_c}{1 + 2.4(T - 20)^6 \times 10^{-17}} \quad (6)$$

式(5)~(6)中: ε_p^T 和 f_σ^T 分别为不同温度下混凝土的峰值应变和棱柱体抗压强度; ε_p 为混凝土常温下受压峰值应变; f_c 为常温下混凝土的棱柱体抗压强度; T 为火灾下混凝土温度, °C。

钢筋材料随着温度的升高屈服强度、弹模也会出现下降趋势,当在 200 °C 以下时力学性能与常温下相比没有明显的变化,当超过 200 °C 后屈服强度开始下降,300 °C 后钢材的屈服点开始消失。本文钢筋采用理想二折线弹塑性模型。钢筋弹模、屈服强度、应力应变关系采用文献[9]中建议的本构关系。

2 计算结果分析

2.1 钢筋混凝土温度场分析

钢筋混凝土结构在火灾中的承载力与其经历的最高温度密切相关,因此混凝土梁的温度场分布规律是研究其火灾下承载能力的基础。本文为分析混凝土梁在不同的受火时间下混凝土内部温度场的分布规律,采用 4 个受火时间工况。通过 ABAQUS 的分析得到如图 3 所示 4 个不同的温度场云图。

通过以上温度场计算结果可以看出,在梁底部和两侧面受火时梁底部及梁侧面 30 mm 高度范围内温度梯度很大,同时随着受火时间的增加这种温度梯度的上升趋势减缓。梁截面内的温度场不是均匀分布,其截面靠近受火侧角部温度明显高于中部核心区域温度。

综上所述,由于混凝土是一种受热惰性材料,火灾发生时构件表面温度能在短时间内快速上升,截面内部温度上升较慢,形成表面温度高而内部核心区域温度相对较低的不均匀温度场。

2.2 高温下钢筋混凝土梁承载性能分析

在进行火灾下钢筋混凝土梁承载能力分析时,选择一个固定的受火时间即相同温度场下通过改变梁截面保护成厚度和截面配筋率计算其极限承载能力,从而研究保护层厚度和截面配筋率对结构抗火性能、极限承载力的影响大小。在有限元模型中施加的荷载有梁体的自重和一个随着分析步时间增加的均布压强荷载,其边界条件为两端铰接,

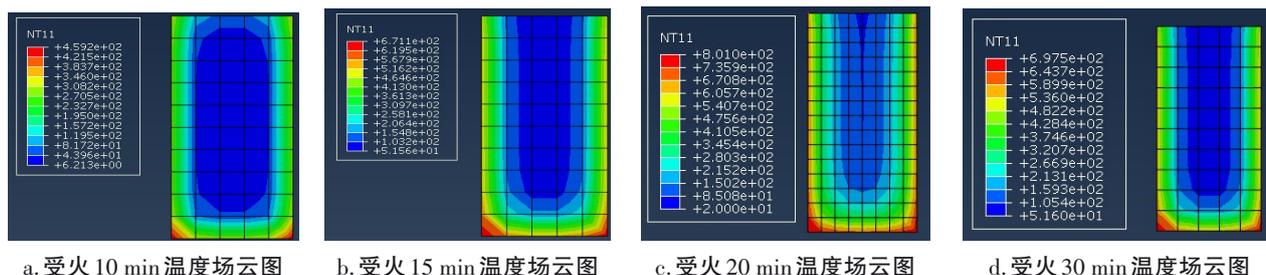


图 3 不同受火时间下梁截面温度场分布

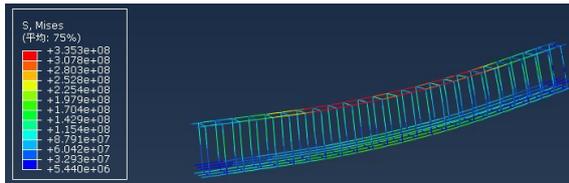
为分析的协调性,本次分析的网格划分和热分析中网格相同。

2.2.1 混凝土保护层厚度影响

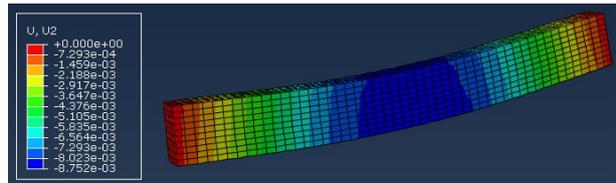
1) Mises 应力和竖向扰度分析。

图 4 为底部钢筋直径 16 mm 时不同保护层厚度达到极限承载力时的钢筋 Mises 应力和竖向扰度云

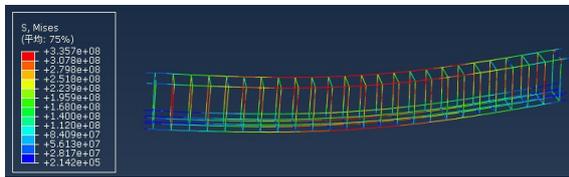
图。通过 Mises 云图得知,在高温下不同保护层厚度的钢筋骨架其跨中部位纵筋和箍筋都已达到 HRB335 钢材的屈服强度,这是由于混凝土与钢筋膨胀系数不一致导致在高温下混凝土膨胀变形量大于钢筋变形量,而此时内部钢筋骨架会限制混凝土膨胀,导致部分钢筋应力增加从而受损严重。



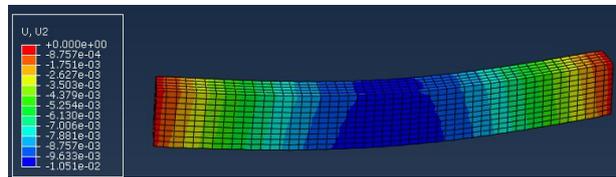
a. 保护层厚度 10 mm 时钢筋骨架 Mises 应力云图



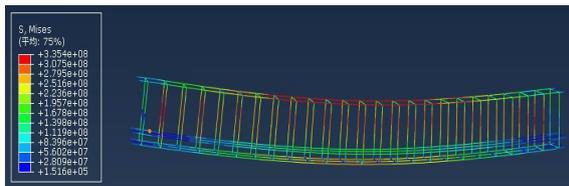
b. 保护层厚度 10 mm 时竖向扰度云图



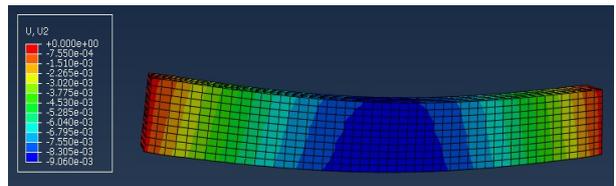
c. 保护层厚度 15 mm 时钢筋骨架 Mises 应力云图



d. 保护层厚度 15 mm 时 竖向扰度云图



e. 保护层厚度 20 mm 时钢筋骨架 Mises 应力云图



f. 保护层厚度 20 mm 时竖向扰度云图

注:底部钢筋直径 16 mm,显示比例为 10 倍。

图 4 不同保护层厚度达到极限承载力时钢筋 Mises 应力和竖向扰度云图

2) 极限承载力分析。

由图 5 得出,增加保护层厚度能有效提高火灾下钢筋混凝土梁的极限承载能力,这是因为增加保护层厚度能有效降低钢筋层的温度从而使火灾对钢筋性能退化作用减弱,所以能有效提高混凝土梁极限承载能力。这也是建筑结构中进行防火设计时必须考虑的。同时从图 6 中发现,当保护层厚度扩大至 20 mm 时,极限承载能力比保护层厚度为 15 mm 时有所降低。这主要是因为通过增加保护层厚度来进行防火,是以降低混凝土截面有效高度为代价。所以在进行建筑结构防火设计时并不是盲目地增加保护层厚度,其厚度应满足相关规范要求。

2.2.2 截面配筋率影响

1) Mises 应力和跨中扰度分析。

图 6 为保护层厚度为 15 mm 不同钢筋直径在火灾下受力的钢筋骨架 Mises 应力和跨中竖向扰度

云图。

图 7 为底部受拉钢筋不同直径下对混凝土梁极限承载能力的影响,由计算结果得出,通过增加截面配筋率能提高火灾下梁的极限承载能力,但提高的幅度不是很大,同时盲目地扩大配筋率将可能引起梁的超筋降低塑性性能。

3 结论

本文利用 ABAQUS 有限元软件,对高温(火灾)下普通混凝土梁进行热、力顺序耦合分析,对混凝土梁进行了火灾温度场仿真模拟,并利用计算的温度场作为初始场通过改变配筋率和保护层厚度进行了梁在火灾下极限承载力分析。根据以上分析可以得出如下结论。

1) 二维的温度场在火灾情况下已不适应,进行火灾下受力分析应尽可能地采用三维温度场。

2) 由于混凝土是一种热惰性材料,火灾下混凝土

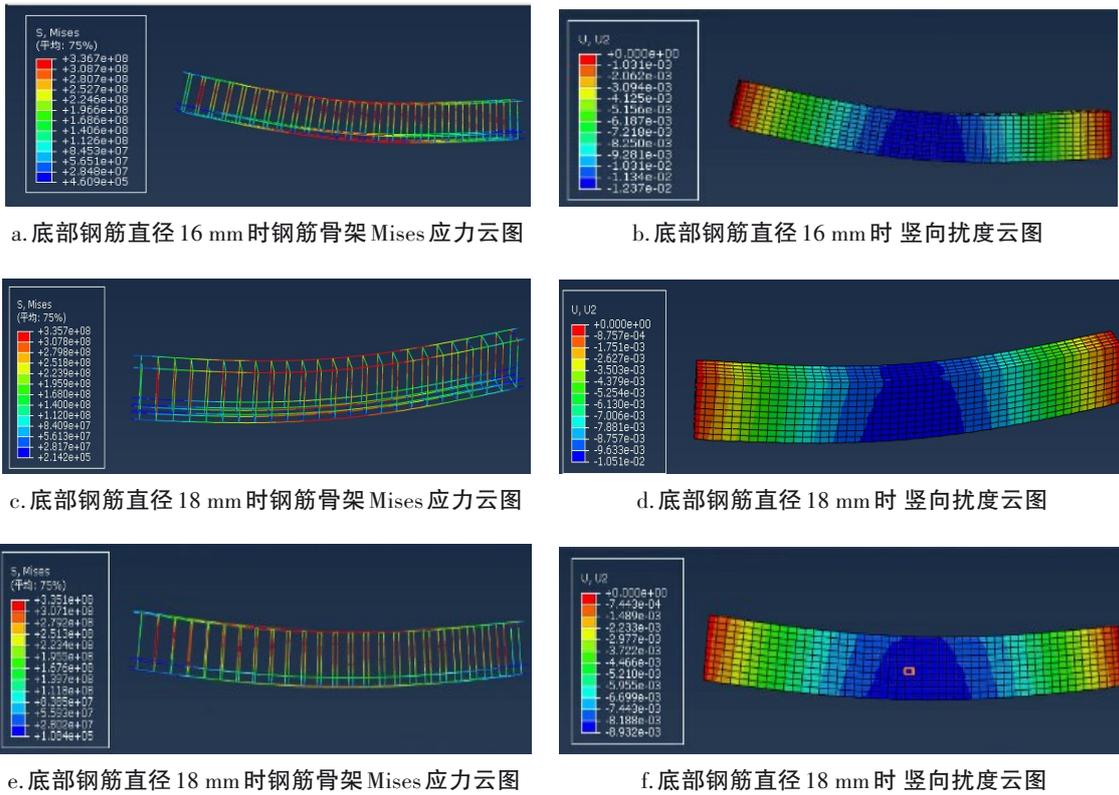


图 6 不同钢筋直径在火灾下受力的钢筋骨架 Mises 应力和跨中竖向挠度云图

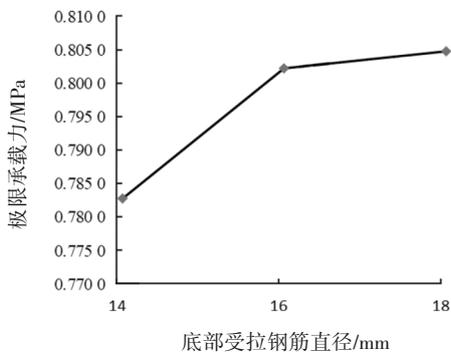


图 7 极限承载能力与底部受拉钢筋直径关系曲线

土表面温度会迅速升高,截面内部温度变化缓慢使得截面的温度场分布不均匀,尤其在底部受火面附近其温度梯度变化大。因此增加保护层厚度能有效降低钢筋层温度从而提高抗火能力,但同时要注意保护层厚度和截面有效高度之间进行合理平衡。

3) 配筋率的改变对结构的抗火极限承载能力提高作用有限,并且增加底部配筋率会使原来合理的混凝土受压区高度发生改变,从而降低结构塑性。所以通过改变配筋率来提高极限承载能力不是一个经济可行的方案。

参考文献:

[1] 孙劲峰,时旭东,过镇海.三面受热钢筋混凝土梁在高温时和降温后受力性能的试验研究[J].建筑结构,2002,32(1):34-36

[2] 时旭东,过镇海.不同混凝土保护层厚度钢筋混凝土梁的耐火性能[J].工业建筑,1996,26(9):12-14+19.

[3] 郑永乾,韩林海,经建生.火灾下型钢混凝土梁力学性能的研究[J].工程力学,2008,25(9):118-148.

[4] 郑永乾,韩林海,经建生.火灾下型钢混凝土梁力学性能的研究[D].福州:福州大学,2007.

[5] European Committee for Standardization. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures-Part1-2: General rules-Structural fire design; DIN EN 1994-1-2/NA [S]. 德国:德国标准化学会(DE-DIN),2010.

[6] 董琳琳.火灾中型钢混凝土梁的力学行为研究[D].济南:山东建筑大学,2011.

[7] 陆州导.钢筋混凝土梁对火灾反应的研究[D].上海:同济大学,1989.

[8] 李卫,过镇海.高温下混凝土强度和变形性能的试验研究[J].建筑结构学报,1993,14(1):8-16.

[9] 朱伯龙,陆洲导,胡克旭.高温(火灾)下混凝土与钢筋的本构关系[J].四川建筑科学研究,1990(1):37-43.