

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211204001

基于不同破坏准则的火灾下钢筋混凝土板 可靠性评估*

林旭华, 董毓利, 房圆圆, 张大山

(华侨大学土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为探究火灾下钢筋混凝土板的可靠性, 计算了基于不同破坏准则下的可靠指标并进行对比评估。提出了一种随机有限元模型, 考虑了火灾荷载与混凝土板设计中的多种随机参数, 对钢筋混凝土板火灾下的热力学反应开展概率分析。首先, 利用ABAQUS有限元软件对混凝土板建立精细化模型, 将数值模拟结果与火灾试验数据进行对比验证。接着, 利用abaqus@python脚本, 结合LHS法抽样处理随机参数并生成随机模型, 循环运算得到随机钢筋温度曲线、背火面温度曲线与跨中挠度曲线。最后, 基于MATLAB蒙特卡洛法计算得到失效概率与可靠指标。结果表明: 提出的随机有限元模型能有效评估火灾下钢筋混凝土板的可靠性; 以挠度变形为依据的破坏准则高估了钢筋混凝土板的临界温度; 正常设计的钢筋混凝土板耐火极限为90 min的可靠指标为1.88, 评估火灾下钢筋混凝土板可靠性时需要考虑火灾发生的频率。

关键词: 火灾荷载; 钢筋混凝土板; 随机有限元; 破坏准则; 可靠指标

中图分类号: TU375.2; TU311.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0403-08

Reliability Assessment of Reinforced Concrete Slab in Fire based on Different Failure Criteria

Lin Xuhua, Dong Yuli, Fang Yuanyuan, Zhang Dashan

(School of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To explore the reliability of reinforced concrete slabs in fire, the reliability index based on different damage criteria were calculated, compared and evaluated. A stochastic finite element model was proposed, considering multiple stochastic parameters in fire load and the design of concrete slab. Probability analysis on the thermodynamic reactions of reinforced concrete slab in fire was carried out. First, a refined model of concrete slab was established in ABAQUS finite element software. The numerical simulation results were verified by the fire test data. Then, abaqus@python script was used to sample random parameters with LHS method and generate random model. Random temperature curve of steel, unexposed surface temperature curve of slab and random deflection curve of mid-span were obtained by cyclic calculation. Finally, the failure probability and reliability index were calculated based on MATLAB Monte Carlo method. The results show that the proposed model can be used to

* 收稿日期: 2021-12-04; 修回日期: 2022-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778250, 51978293)、福建省自然科学基金项目(2019J01051)资助

作者简介: 林旭华(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事钢筋混凝土板抗火概率评估。E-mail: 569087590@qq.com

通讯作者: 房圆圆(1965—), 女, 副教授。研究方向为结构抗火、工程管理等。E-mail: fangyy@hqu.edu.cn

evaluate the thermodynamic response of reinforced concrete slab based on reliability theory. The failure criterion based on deflection overestimates the critical temperature of the reinforced concrete slab. The reliability index of normally designed reinforced concrete slab is 1.88 when exposed to fire for 90 min. The frequency of fire should be considered when evaluating the reliability of reinforced concrete slab in fire.

Keywords: fire load; reinforced concrete slab; random finite element; failure criterion; reliable index

引言

钢筋混凝土板是最主要的水平承重构件,在火灾中也起到隔火的重要作用。在耐火试验的要求中,合格的钢筋混凝土板需具备良好的承载能力、完整性和隔热性^[1]。Y. C. Wang等^[2]的试验表明,钢筋混凝土板的耐火性能对整体结构的影响巨大,必须从防火设计上进行考虑和防范。

目前,国内外学者已经对钢筋混凝土板的耐火性能开展了大量的试验与理论研究。在试验方面,L. Lim等^[3]利用BRANZ耐火试验炉,开展了板角约束混凝土板的防火试验,研究表明板角受平面外约束,其变形与未约束板的变形规律明显不同。王滨等^[4]利用大型防火试验炉针对不同边界条件的钢筋混凝土板进行火灾试验,总结得到了火灾高温下沿板厚方向的温度场分布、板中挠度、板边位移等随受火时间的变化规律以及最终的破坏状态。在理论和数值模拟方面,Z. Huang等^[5]、王勇等^[6-7]建立有限元分析模型,对火灾下钢筋混凝土板开展了大量的参数分析。Y. L. Dong等^[8]基于经典塑性铰线理论提出了火灾下发生大变形时考虑受拉薄膜效应的承载力计算方法。然而,基于试验和基于计算的防火设计方法均是经验性和确定性的方法,是对过去实践经验和火灾教训的总结,忽略了材料固有的和其他因素(如火灾场景和试验条件差异等)的随机性。采用基于概率理论的方法来评估工程结构的安全性,已被工程界广泛接受。对于钢筋混凝土结构的设计,欧洲规范^[9]中描述的半概率设计方法使结构安全性得到了提高。该设计方法考虑了与材料特性的变化、对施加荷载预测的局限性、施工过程、几何形状等和可靠性相关的不确定性。因此,考虑火灾随机性以及结构本身的随机性对钢筋混凝土板防火性能的影响是非常有必要的。

然而,不同的规范在进行防火设计时,判断构件破坏的准则也不相同。ASTM^[10]进行钢筋混

凝土板防火设计时,考虑的是钢筋温度与背火面温度,即在恒载作用下以及温度分布均匀的情况下使构件失效的温度。《建筑构件耐火试验方法》^[1]要求是保证火灾下不发生倒塌,因此以火灾下钢筋混凝土板的变形作为构件的破坏准则。目前国内外对火灾下钢筋混凝土板的失效准则并没有统一标准,临界温度与跨中挠度控制的破坏准则所得到的耐火极限时间并不相同,这使得防火设计时无法充分考虑安全性与经济性。本文基于可靠性理论分析了火灾下钢筋混凝土板的三种不同破坏准则,将不同破坏准则下的钢筋混凝土板可靠指标与失效概率进行了对比分析,并提出了正常设计下钢筋混凝土耐火极限的可靠指标参考。

1 火灾下钢筋混凝土板的破坏准则

火灾下的钢筋混凝土板的材料性能会随着温度的升高而降低。首先,由于板的保护层较薄,对下部受力钢筋的保护较弱,因此钢筋层会因为温度的升高而率先达到屈服。接着,钢筋混凝土板的受火表面积较大,接受热量的速度比梁和柱更快。最后,由于板的跨厚比较大,在火灾中由不均匀膨胀造成的纵向弯曲较为明显。因此,受火试验中通常会关注钢筋温度、背火面温度以及跨中挠度,以判断结构构件是否达到失效。根据《建筑构件耐火试验方法》^[1],作为兼作分隔构件的结构构件,钢筋混凝土板应由失去稳定性(承载力要求变形)、失去完整性(隔火、不透火)或是失去隔热性三个条件之一判断破坏。因此,所遵循的破坏准则有如下三种:

(1)破坏准则1。参照ASTME119(ASTM2002)规范^[10]中规定的受热失效标准对钢筋混凝土板的耐火性进行评估,即钢筋的温度超过了593℃的临界温度则认为钢筋混凝土板达到失效。

(2)破坏准则2。参照ASTME119(ASTM2002)

规范^[10]中的失效标准,考虑到背火面含水率可能不均匀的情况,将钢筋混凝土板的背火面单点温度超过180℃作为板件失效的判断标准。

(3)破坏准则3。根据《建筑构件耐火试验方法》^[11]中的挠度极限状态,最新的挠度极限 $L^2/400d$ 的条件为 $d>L/30$,其中 d 为构件的厚度, L 为构件的跨度。考虑到钢筋混凝土板的实际的 d/L (跨厚比)较小,不适用上述挠度极限。因此,采用钢筋混凝土板净跨度的 $L/20$ 作为挠度极限值更为合适。

2 基本原理

2.1 可靠性分析方法

火灾下钢筋混凝土板的结构反应是一个高度非线性行为,其结果由多种影响因素耦合形成。采用 S 表征火灾下钢筋混凝土板的结构反应, $\chi=[X_1, X_2, \dots, X_n]$ 为所考虑的不确定性因素。则 S 可以表示为随机函数 $g(\chi)$ 的形式:

$$S = g(\chi) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

而 $g(\chi)$ 通常为高度复杂的隐函数,为了探究 S 的概率特性,采用随机有限元法来获取随机变量对结构反应的影响结果。LHS(拉丁超立方体抽样)法是一种分层抽样法,可以在随机空间中对所有维度进行分层并抽样。相比之下,LHS法中的100个样本等同于1000个传统蒙特卡洛法中的样本精度,有效提高效率 and 降低方差^[11]。随机有限元法通过abaqus@python脚本,将随机的LHS抽样技术与确定性的abaqus有限元模型相结合,计算得到不同随机变量耦合作用下的结构反应。

采用随机有限元法计算获得隐式的结构反应,即随机钢筋温度曲线、背火面温度曲线和跨中挠度曲线后,可通过显式方程失效概率计算方法进一步分析火灾下钢筋混凝土板的可靠性。最简单的方法是基于随机有限元的Monte Carlo法。Monte Carlo法计算火灾下钢筋混凝土板的失效概率是利用有限元分析出的随机曲线,计算向量所对应的响应函数值,其失效概率 $P_f = P\{g(x) < 0\}$ 的估计值 P_f 的公式为:

$$P_f = \frac{N_f}{N} \quad (2)$$

式中, N 为随机曲线总样本数, N_f 为落入破坏准则失效域的样本个数。

可靠指标与失效概率在数值上是一一对应的关系,是度量结构可靠性的一种数量指标,它是标准正态分布反函数在可靠概率处的函数值。因此,根据失效概率 P_f 可以进一步计算得到可靠指标 β :

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (3)$$

式中, Φ^{-1} 为标准正态分布的反函数。

2.2 分析步骤

根据上述火灾下钢筋混凝土板的失效概率分析方法,具体分析步骤如下:

(1)选取对火灾下钢筋混凝土板结构反应影响较大的随机参数,并根据现有数据搜集随机参数的概率分布信息;

(2)采用LHS法基于概率分布信息对随机参数进行抽样处理,结合abaqus@python脚本生成若干个随机有限元模型;

(3)批量计算随机有限元模型,后处理提取不同结构反应所对应的随机曲线并分析其概率特性;

(4)基于随机曲线,通过MATLAB蒙特卡洛法计算各破坏准则下钢筋混凝土板的失效概率与可靠指标 β 。

3 有限元模型的建立与验证

基于ABAQUS有限元软件,建立钢筋混凝土板热-力耦合分析模型,即先进行温度场计算,将得到的节点温度代入有限元模型计算板的力学性能。

3.1 温度场分析

温度场分析中,外界的热量首先通过热传递传至钢筋混凝土板的受火表面,再经过物体自身的热传导进行扩散。钢筋混凝土板通过对流和辐射从外界吸收热量,热传递公式为:

$$\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} l_x + \frac{\partial \theta}{\partial y} l_y + \frac{\partial \theta}{\partial z} l_z \right) = h_c (\theta_i - \theta_s) + h_r \sigma (\theta_i^4 - \theta_s^4) \quad (4)$$

式中, h_c 为外界与混凝土板的对流换热系数; h_r 为外界与混凝土板的热辐射系数; θ_i 为外界绝对温度; θ_s 为混凝土板面绝对温度; σ 为Stefan-Boltzmann常数,通常取 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; l_x 、 l_y 和 l_z 为混凝土板面的方向余弦。

热对流系数遵循牛顿冷却方程,主要与火灾类型有关,根据文献[12]建议:ISO-834标准火灾取 $25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、自然火灾模型取 $30\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;综合考虑辐射传热与对流传热,对于构件背火面对流换热系数可取为 $9\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。热辐射系数遵循斯蒂芬-玻耳兹曼定律,火灾下热辐射系数较为复杂,EC4欧洲规范^[12]中建议在无材料相关的消防设计规定时,辐射系数取为0.8。

物体自身的热传导遵循傅里叶定律,热传导系数与材料的热工参数有关。钢筋和混凝土的热工参数主要包括导热系数、比热容和质量密度。温度场模型中,混凝土导热系数和比热容采用T. T. Lie^[13]的硅质混凝土表达式,并对 $60\sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ 的比热进行3%含水率的修正;钢筋导热系数和比热容参考欧洲规范EC4^[12];钢筋和混凝土密度设为常数,钢筋取 $\rho_s=7\,800\text{ kg}/\text{m}^3$;混凝土取 $\rho_c=2\,400\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

温度场分析时,混凝土采用三维热传递单元DC3D8,钢筋采用杆单元DC1D2,钢筋层采用embed(内嵌)方式与混凝土相互作用。划分网格时,采用结构化网格划分。

3.2 力学分析

力学分析时,钢筋和混凝土的力学性能参数主要包括高温下的本构关系和热膨胀系数,均参考EC4欧洲规范^[12]的公式。其中,混凝土本构参数采用ABAQUS塑性损伤模型CDP,具体参数见表1。

表1 CDP模型参数

Table 1 Parameters of CDP model

参数	ψ	ϵ	σ_{t0}/σ_{c0}	κ_c	μ
取值	30	0.1	1.16	2/3	0.000 5

注: ψ 为膨胀角; ϵ 为流动势偏移量; σ_{t0}/σ_{c0} 为双轴受压与单轴受压极限强度比; κ_c 为拉伸与压缩子午线上第二应变不变量之比; μ 为黏度系数

采用ABAQUS/Standard模块隐式算法,考虑到几何非线性与材料非线性,混凝土板采用三维八节点非协调模式单元C3D8I,该单元可以有效克服减缩积分单元中的剪力自锁问题。钢筋层采用三维线性杆单元T3D2,边界约束均为四边简支。

3.3 模型验证

为验证上述模型的准确性,将文献[3]中的661、D147和HD12受火试验板进行对比验证。采

用ISO834国际标准升温曲线,受火时间为180 min,板件具体设计参数可见文献[3]。温度场分析与力学分析结果如图1所示。数值模拟结果与试验结果均吻合较好,说明有限元模型设置较为合理。

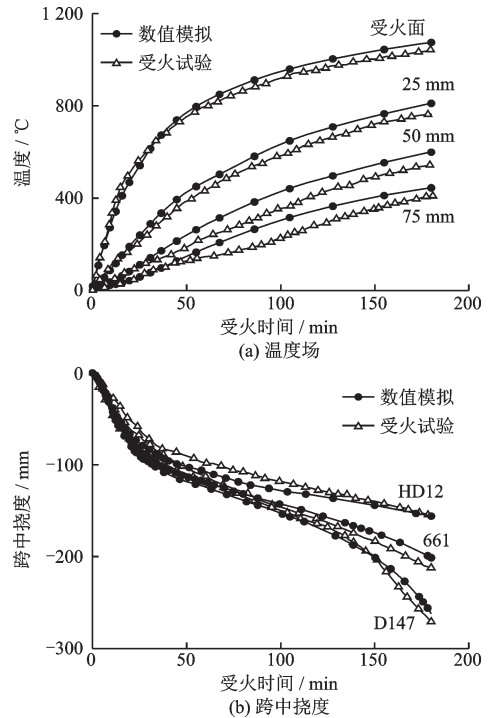


图1 数值模拟与试验结果

Fig.1 Numerical simulation and test results

4 随机模型的建立

随机模型的建立主要分为火灾模型的建立以及钢筋混凝土板的设计,参考抗火试验文献^[3,4,7]与统计参数信息,选取对火灾下钢筋混凝土板影响显著,以及变异系数较大的参数作为随机参数。

4.1 火灾模型的建立

钢筋混凝土结构的耐火等级是基于ISO834标准火灾曲线制定的,采用的是理想化的时间-温度曲线。然而,实际案例中的火灾是较为复杂,应当考虑到火灾荷载密度、受火面积、通风情况以及消防装置等因素的影响。EC1欧洲规范^[14]中建议了更为真实的自然火灾曲线,考虑的因素较为全面:

$$T = 20 + 1\,325(1 - 0.324e^{-0.2t'} - 0.204e^{-1.7t'} - 0.472e^{-19t'}) \quad (5)$$

式中, T 为升温阶段的温度($^{\circ}\text{C}$); $t^* = t \cdot \Gamma$, t 为升温时间(s), $\Gamma = (O/b)^2 / (0.04/1160)^2$, 由通风系数 O 和热惯性量 b 共同决定。该公式中, 升温阶段的总时长 t_{\max} 和火荷载密度 $q_{f,k}$ 、受火面积比 A_f/A_t 和通风系数 O 相关, 具体公式可见文献[14]。

考虑到火灾荷载中的随机性, 采用 EC1 欧洲规范^[14] 建议的温度场参数设置, 结合文献[15]中的统计参数信息, 将温度场分析中的部分参数设置为随机参数, 统计参数信息与出处见表 2。

表 2 温度场中的随机参数

Table 2 Random parameters in temperature field

随机变量	均值	变异系数	分布类型	出处
通风系数 O	0.075 m^2	0.1	正态	文献[15]
热惯性量 b	1 800 $\text{J}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2}\cdot\text{K})$	0.1	正态	文献[15]
受火面积比 A_f/A_t	0.35	0.1	正态	文献[15]
火荷载密度 $q_{f,k}$	780 MJ/m^2	0.2	极值 I 型	文献[14]
热对流系数 h_c	30(9) $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	0.1	正态	文献[14]
热辐射系数 h_r	0.8(0)	0.1	正态	文献[14]

注: 表中热对流与热辐射系数均值为受(背)火面取值

4.2 钢筋混凝土板的设计

钢筋混凝土板在建造和使用时, 会存在一定的误差与随机性, 例如材料强度、几何参数以及板面活荷载等方面的随机性, 这些随机性参数均会对火灾下的钢筋混凝土板产生影响。依据工程中常见的钢筋混凝土板的参数设计, 结合现有的统计参数^[16-17], 从上述三个方面选取随机参数。选用 C30 强度等级的混凝土, 板厚为 120 mm, 保护层厚度为 25 mm, 板底受力钢筋选配 C8@200, 具体配筋情况如图 2 所示, 设计与统计参数见表 3。

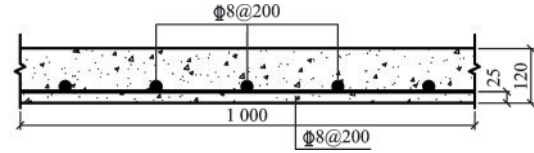


图 2 混凝土板配筋情况

Fig.2 Reinforcement of concrete slab

表 3 混凝土板中的参数

Table 3 Parameters in concrete slab

参数	均值	变异系数	分布类型	出处
尺寸	4 500 × 6 000	—	定值	—
混凝土强度	38.98 MPa	0.14	正态	文献[16]
钢筋强度	443.8 MPa	0.033	正态	文献[16]
保护层厚度	21.25 mm	0.03	正态	文献[16]
板厚	120 mm	0.03	正态	文献[16]
楼面活荷载	1.288 kN/m^2	0.233	极值 I 型	文献[17]
钢筋间距	198 mm	0.07	正态	文献[16]
钢筋直径	8 mm	0.03	正态	文献[16]

注: 根据文献[12, 13], 钢筋和混凝土强度按设计值 95% 保证率取值; 保护层厚度均值系数 $\kappa=0.85$; 钢筋间距均值系数 $\kappa=0.99$; 住宅活荷载效应均值系数 $\kappa=0.644$, 其余参数均值系数 $\kappa=1.0$

5 可靠性分析

基于上述的典型的钢筋混凝土板参数设计与随机参数的概率分布, 采用 LHS 法结合 abaqus 有限元软件与 python 脚本共生成样本容量为 200 的随机有限元模型。经批量计算与后处理得到受火时间 240 min 内的钢筋温度、背火面温度与跨中挠度随机曲线, 如图 3 所示。由图可见, 所考虑的随机参数使结构反应产生了离散, 且图中的离散性在受火后期均有增强的趋势, 说明结构随机性与结构非线性产生了耦合放大效应。

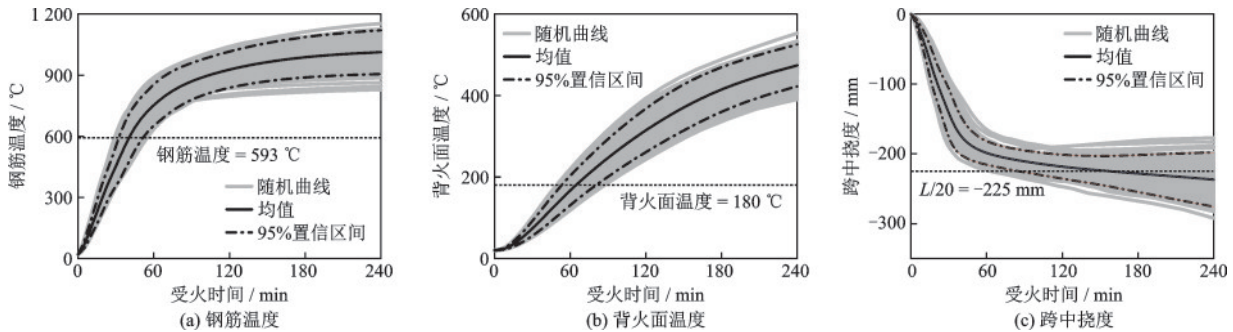


图 3 结构反应随机曲线

Fig.3 Random curves of structural reaction

5.1 不同破坏准则可靠性分析

在统计学中,概率样本的置信区间是对该样本的某个总体参数的区间估计,95%的置信度在工程中被认为是可信的。根据95%置信区间可知,钢筋温度达到破坏准则1(钢筋温度达到593℃)的受火时间区间为32.3 min~50.8 min;背火面温度达到破坏准则2(背火面达到180℃)的受火时间区间为52.4 min~80.9 min;跨中挠度达到破坏准则3(跨中挠度达到L/20)的受火时间区间为84.6 min~240 min。图4为结构反应达到不同破坏准则所对应的受火时间概率密度。由图可见,破坏准则1的耐火时间较短,其均值仅为40.4 min;破坏准则2的耐火时间均值相较破坏准则1延长了24.4 min;而破坏准则3耐火时间均值达到了151 min。由于温度计算时仅考虑了温度场中的随机变量,导致以温度为依据的破坏准则1、2的方差较小。而以挠度为依据的破坏准则3考虑了温度场与板设计中的所有参数,随机变量的变异性产生了耦合放大。由此可见,基于温度和基于挠度的破坏准则计算的耐火时间相差较大,以变形为准则的判断依据存在更大的变异性。

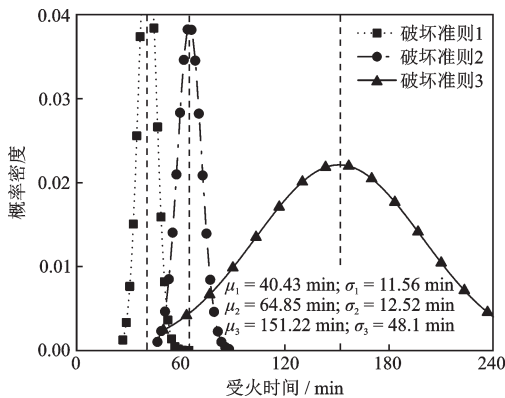


图4 破坏准则概率密度

Fig.4 Probability densities of damage criterion

采用MATLAB蒙特卡洛法,进一步计算不同受火时间下基于三个破坏准则的可靠性,见表4。

当失效概率 P_f 超过50%时,可靠指标 β 失去了意义。由表可见,基于破坏准则1时,钢筋混凝土板在受火仅30 min时可靠指标 β 为2.33,已超过《建筑结构可靠度设计统一标准》^[20]所要求的正常条件下承载能力极限状态 $\beta=3.7$;基于破坏准则2时,火灾下钢筋混凝土板在受火50 min时达到可靠指标 $\beta=2.58$;而基于破坏准则3时,混凝土板在受火80 min

才达到可靠指标 $\beta=2.58$ 。表4中的数据显示了基于可靠性理论下,判断火灾下钢筋混凝土板破坏准则的不统一,这会为工程设计带来危险性或是性能和经济上的浪费。此外,火灾条件下与正常条件下的可靠指标要求应有所不同,根据抗火规范要求的耐火时间制定的可靠指标会更为适用。例如在一级建筑要求的90 min耐火极限时间下,本文设计的钢筋混凝土板可靠指标为1.88。

表4 不同受火时间的可靠性

Table 4 Reliability with different fire times

受火时间/ min	破坏准则1		破坏准则2		破坏准则3	
	$P_n/\%$	β_1	$P_n/\%$	β_2	$P_n/\%$	β_3
30	1	2.33	0	—	0	—
40	47	0.08	0	—	0	—
50	96	—	0.5	2.58	0	—
60	100	—	22	0.77	0	—
70	—	—	77	—	0	—
80	—	—	97	—	0.5	2.58
90	—	—	100	—	3	1.88
100	—	—	—	—	9	1.34

注: P_f 为基于破坏准则的失效概率; β 为失效概率所对应的可靠指标

5.2 正常设计下混凝土板的可靠指标

采用基于概率理论的方法来评估工程结构的安全性,已被工程界广泛接受。火灾是复杂多变的,要实现钢筋混凝土板抗火的概率可靠性设计,需将火灾情况的变异性以及混凝土板设计的随机性纳入考虑。针对不同工况的火灾试验需要耗费巨大的财力物力,因此基于概率理论的抗火可靠性分析将数值模拟作为参考。目前,我国防火规范中建筑物的耐火等级是根据建筑物的功能、规模、层数、重要性以及消防情况等因素来划分的,而构件层次的耐火等级则是仅由构件的类型来划分。楼板作为结构构件中耐火极限要求的基准,也是最主要的承重构件,应以不倒塌作为设防目标。因此,以变形为根据的破坏准则3在不同受火时间下,基于可靠性理论制订的限值具有一定的参考意义。

板厚参数是影响钢筋混凝土板抗火性能的重要参数。利用本文提出的随机有限元法,对板厚参数进行分析,探究不同板厚对火灾下钢筋混凝土板的失效概率与可靠性指标的影响。图5为基于前述设计的钢筋混凝土板采用不同板厚时的失效概率时变图。由图可见,随着板厚的增加,失效概率呈

现增长缓慢的趋势,受火 90 min 时 90 mm 板厚的失效概率高达 68%。根据国家一级建筑对楼板的耐火极限要求,90 min 的受火时间下钢筋混凝土板不能够发生倒塌,因此将 90 min 受火时间下不同板厚的可靠性进行对比,如图 6 所示。图中,随着板厚的增加,受火 90 min 时的平均挠度降低;仅 130 mm 以上的板厚符合正常条件下 $\beta=3.7$ 的可靠指标要求,符合规范最低跨厚比 $L/45$ 要求的 100 mm 板厚可靠指标仅 0.39。

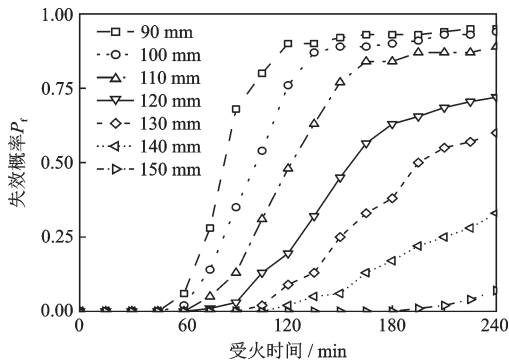


图 5 不同板厚失效概率

Fig.5 Failure probability of different slab thickness

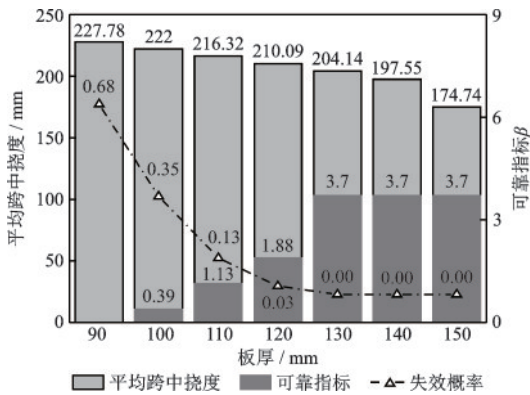


图 6 不同板厚受火 90 min 的可靠性

Fig.6 Reliability of different slab thickness for 90 min fire

然而,低于正常条件下的可靠指标并不能说明该混凝土板在火灾下是不安全的。为准确评估火灾条件下的可靠指标,应考虑火灾发生的概率,而上述的可靠指标是基于火灾荷载存在的情况下计算的。由于现场存在可燃物密度、受火面积和消防装置等因素,在设计时假设结构发生重大火灾的概率为 100% 过于保守。为准确评估火灾下钢筋混凝土板的可靠性,可根据 $\beta = \Phi^{-1}(P_f P_{fire})$ 进行计算,其中 P_{fire} 为发生重大火灾的概率, P_f 为结构失效概率。

6 结论

本文采用随机有限元法,计算了火灾下常见设计的钢筋混凝土板基于不同破坏准则的失效概率与可靠指标。通过对火灾下钢筋混凝土板进行热-力耦合分析,考虑了材料强度、几何尺寸、荷载水平、传热模型和火灾曲线的随机性,并提供了正常设计下钢筋混凝土板的可靠指标。结论如下:

(1) 提出一种火灾下钢筋混凝土板可靠性分析模型,有效地量化了失效概率 P_f 与可靠指标 β 并解释了随机性的来源,可用于评估概率火灾下的结构反应。

(2) 三个破坏准则之间耐火时间相差较大:破坏准则 1 的耐火时间均值为 40.4 min;破坏准则 2 为 64.9 min;破坏准则 3 为 151 min。以变形为准则的判断依据高估了钢筋混凝土板的临界温度。

(3) 正常设计的钢筋混凝土板在受火 90 min 时,可靠指标仅为 1.88,无法满足正常条件下的可靠性要求。评估火灾下钢筋混凝土板的可靠性需要考虑重大火灾发生的概率。

参考文献:

- [1] 建筑构件耐火试验方法: GB/T 9978—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.
- [2] Wang Y C, Kodur V K R. Research toward use of unprotected steel structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(12):1442-1450.
- [3] Lim L, Wade C. Experimental fire tests of two-way concrete slabs[R]. ZealandNew: University of Canterbury and Branz Ltd, 2002.
- [4] 王滨,董毓利. 钢筋混凝土双向板火灾试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(4):53-62.
Wang B, Dong Y L. Experimental study of two-way reinforced concrete slabs under fire[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(4):53-62. (in Chinese)
- [5] Huang Z, Burgess I W, Plank R J. Fire resistance of composite floors subject to compartment fires[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(2): 339-360.
- [6] 王勇,董毓利,袁广林,等. 考虑瞬态热应变的钢筋混凝土板火灾反应分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 63-69.
Wang Y, Dong Y L, Yuan G L, et al. Fire response

