

文章编号:1671-8879(2018)06-0011-09

# 车致火灾作用下预应力混凝土 T 梁 易损性计算方法

张晓栋,马如进,陈艾荣

(同济大学 桥梁工程系,上海 200092)

**摘 要:**为了对车致火灾下预应力混凝土 T 形截面梁桥进行抗火性能评估,利用响应面分析法建立响应面函数(RSM)来模拟结构的非线性有限元分析,用蒙特卡洛抽样(MCS)来模拟参数的随机性,然后建立了基于响应面函数以及蒙特卡洛模拟(RSM-MCS)的车致火灾易损性分析方法。该方法中将桥梁构件的损伤等级划分为轻微损伤、中等损伤、严重损伤、完全损伤 4 个等级,用构件的剩余承载力定义其损伤度,并根据已有的试验和理论成果定义不同损伤状态的界定标准;研究火灾和结构自身参数的随机性问题,并基于中心复合试验设计对参数进行抽样,形成试验样本和检验样本,建立基于 RSM-MCS 的易损性分析方法,并以此开展预应力混凝土 T 形截面梁的易损性分析。研究结果表明:基于构件剩余承载力的易损性指标满足了不同破坏模式的需求,其界定标准反映了不同构件的损伤状态;火焰温度、火灾燃烧时间及火焰距受火面的距离 3 个参数能够很好描述火灾对结构作用的随机性;中心复合试验设计显著减少了复杂的有限元计算;在充分考虑火灾和结构不确定因素的情况下,易损性曲线能较好地反映 T 形截面梁在不同温度及不同损伤状态下的失效概率;车致火灾作用下预应力混凝土 T 梁易损性计算方法研究可为其灾前风险评估及灾后性能评估提供依据。

**关键词:**桥梁工程;火灾;易损性;响应面;蒙特卡洛;混凝土 T 形截面梁

**中图分类号:**U448.21

**文献标志码:**A

## Vulnerability calculation method of prestressed concrete T-shaped girder exposed to vehicles-related fires

ZHANG Xiao-dong, MA Ru-jin, CHEN Ai-rong

(Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To assess the fire-resistance performance of prestressed concrete T-shaped girders exposed to fires caused by vehicles, the response surface method (RSM) was used to establish the response surface function instead of finite element analysis. Furthermore, the randomness of parameters was simulated by the Monte Carlo sampling (MCS), and the vulnerability analysis method based on RSM-MCS was established. In this method, the damage level of bridge members was divided into four types: slight damage, moderate damage, extensive damage, and

收稿日期:2018-08-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51608377)

作者简介:张晓栋(1986-),男,江苏盐城人,工学博士研究生,E-mail:394554680@qq.com。

作者简介:马如进(1978-),男,江苏海安人,副研究员,博士研究生导师,工学博士,E-mail:rjma@tongji.edu.cn。

complete damage. The residual loading capacity was defined as the degree of damage of bridge members, and the partitioned criterion of damage status was specified on the basis of existing experiments and theoretical considerations. The problem of randomness in the parameters of fire hazard and structures was examined, and the central composite design method was used to generate test samples and verification samples. After the vulnerability analysis method based on RSM-MCS was established, the vulnerability analysis of prestressed concrete T-shaped girder was performed. The results show that the vulnerability index based on the residual loading capacity of members can be applied to various failure modes. The partitioned criterion reflects the damage status of different bridge members. The randomness of fire hazard can be simulated by fire temperature, burning time, and distance between the fire and structures. The number of finite element calculations is significantly reduced because of the use of the central composite design method. Under consideration the uncertainties in the simulation of fire and structural response, the failure probability of different temperatures, and the different damage levels that can be estimated from the vulnerability curves. This study is very useful for risk assessment before fire hazards and provide reference of performance assessment after fire hazards. 3 tabs, 6 figs, 39 refs.

**Key words:** bridge engineering; fire; vulnerability; response surface; Monte Carlo; concrete T-shaped girder

## 0 引言

预应力混凝土 T 形截面梁在已建桥梁中所占比例很大,薄腹板是其重要特征也是被广泛应用的重要原因,然而,在受火后薄腹板极易破坏,所以预应力混凝土 T 形截面梁的防火研究意义重大<sup>[1-2]</sup>。国外关于桥梁抗火的研究逐渐起步<sup>[3]</sup>,但目前还没有专门针对火灾的设计及评估方法,只有少数规范有非常简单的涉及<sup>[4]</sup>。例如,美国 NFPA 502:2008 中提到:桥梁以及高速公路的关键结构构件应当避免由于撞击或高温作用引起的性能退化或结构破坏,但规范中并没有具体说明如何避免这类性能退化或结构破坏<sup>[5]</sup>。欧洲规范 Eurcode 1 part 2 中提到桥梁设计时应当考虑车辆火灾的风险,但并没有提出任何关于桥梁防火设计的方法和对策<sup>[6]</sup>。即便是欧洲一些针对消防方面的规范,如 Eurcode 1 part 1-2<sup>[7]</sup>,Eurcode 2 part 1-2<sup>[8]</sup>,Eurcode 3 part 1-2<sup>[9]</sup>以及 Eurcode 4 part 1-2<sup>[10]</sup>也未包含对桥梁火灾设计准则和修复措施等。Garlock 等对美国桥梁火灾进行了统计,在详细调研总结了 1 座受火倒塌的桥梁后给出了桥梁火灾的概念,揭开了桥梁防火研究的序幕<sup>[2]</sup>。Alos-Moya 等采用火灾动力学模拟器(FDS)模拟了美国阿拉巴马州 I-65 高架桥油罐车火灾事故<sup>[11]</sup>。Peris-Sayol 等采用 FDS 模拟油罐车火灾荷载并对美国联邦高速公路管理局设计的典型

简支梁桥进行了分析<sup>[12]</sup>。Bajwa 等采用 FDS 模拟了美国旧金山湾区大桥的引桥油罐车火灾事故<sup>[13]</sup>。Gong 等采用 FDS 模拟了美国纽约皇后区大桥上货车火灾事故<sup>[14]</sup>。Aziz 等对简支钢板梁在火灾下的破坏行为进行了分析,发现其在火灾作用下的破坏时间与钢腹板长细比、加劲肋间距、火灾荷载形式有非常紧密的关系<sup>[15]</sup>。Paya-Zaforteza 等分析了不同梁端约束、钢材类型、活载大小、火灾荷载等因素对简支钢板梁抗火性能的影响<sup>[16]</sup>。Kodur 等分析了不同火灾升温曲线、防火绝热层厚度、钢梁与混凝土桥面板黏结情况对简支钢板梁抗火性能的影响<sup>[17]</sup>。在中国,张岗等较早开展桥梁防火研究<sup>[18-21]</sup>,其研究分析了混凝土连续箱梁支点处钢束在火灾下的预应力损失及衰变规律<sup>[22]</sup>;并采用温度-力耦合的火灾全程数值模拟方法,基于强度损失的虚拟层截面等效计算,分析了预应力箱梁正截面抗弯承载力随火温时间的变化规律<sup>[23]</sup>;同时对火灾下预应力混凝土 T 梁的破坏模式开展研究,给出了不同受火状态下的破坏准则<sup>[3]</sup>。李利军采用 FDS 对无风环境下公路桥梁车辆火灾进行了模拟分析<sup>[24]</sup>。马明雷等采用模糊综合评价方法,建立了车致桥梁火灾的发生概率模型<sup>[25]</sup>。

综上所述,国内外研究主要集中在对个案的数值模拟、力学性能的衰变规律及不同参数对结构抗火性能的影响方面。本文通过对易损性指标的划分

标准及量化方法进行研究,在充分考虑各不确定参数的基础上,进行了将响应面与蒙特卡洛相结合的易损性计算方法研究,以期为抗火性能评估提供基础。

## 1 基于RSM-MCS的易损性分析方法

### 1.1 响应面分析法

响应面分析法(Response surface method, RSM)是一种解决复杂隐式问题的统计方法,该方法通过输入的变量和响应拟合得到一个多项式函数,以代替耗时且复杂的有限元非线性时程分析,可以显著的提高分析效率<sup>[26]</sup>。响应面模型的建立包括2个步骤:①利用中心复合试验设计(Central composite design, CCD)产生输入变量组合;②建立响应面函数(RSM)。

在中心复合试验设计中,试验点有3种,分别为1个中心点,2k个轴向点,2<sup>k</sup>个立方点,共计2<sup>k</sup>+2k+1个,如图1所示。对试验设计得到的样本组中的每个输入参数组进行非线性时程分析,计算桥梁结构的响应,然后用输入参数组和结构响应进行回归分析,拟合响应面函数。响应面函数一般用多项式函数表示,在大多数情况下,二次多项式函数能较好模拟真实的响应面。二次响应面函数可以表示为<sup>[27]</sup>

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>i}^k \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (1)$$

式中:y为响应值;X<sub>i</sub>、X<sub>j</sub>分别为输入变量;β<sub>0</sub>、β<sub>i</sub>、β<sub>ii</sub>、β<sub>ij</sub>分别为拟合系数;ε为偏差项;k为变量总数。

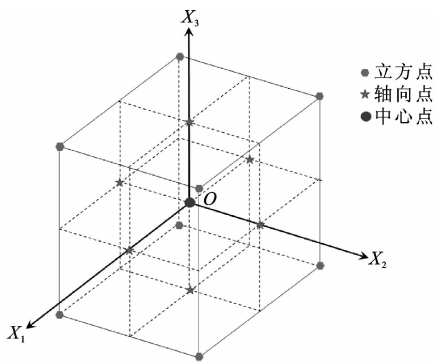


图1 CCD试验点示意

Fig. 1 Sketch of CCD test points

### 1.2 易损性曲线计算步骤

在拟合得到响应面函数后,根据输入参数的概率分布,利用蒙特卡洛模拟(Monte Carlo simula-

tion, MCS)进行抽样,代入响应面函数计算结构响应,并与极限状态比较后进行统计,即可快速得到易损性曲线。基于RSM-MCS方法的易损性计算流程如图2所示。具体计算步骤为:

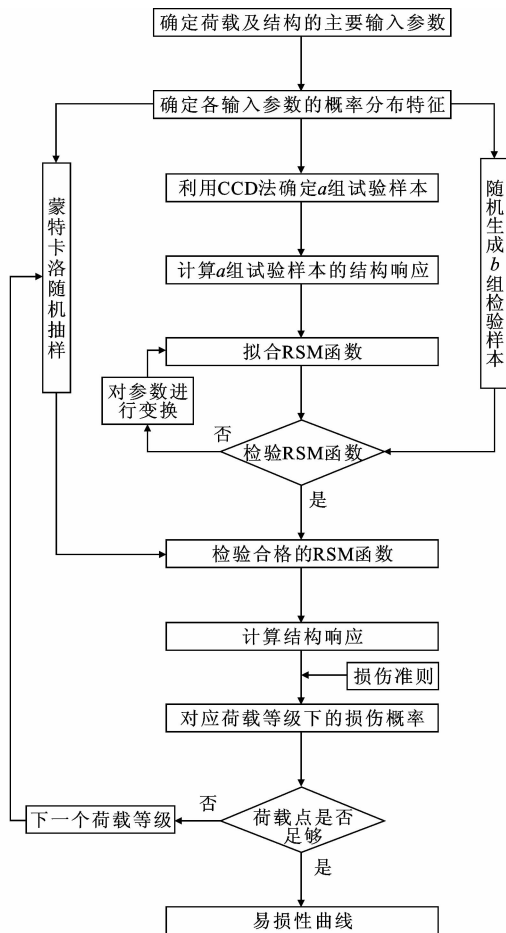


图2 易损性计算流程

Fig. 2 Flows of vulnerability calculation

第1步,确定荷载及结构的主要影响因素及各因素的概率分布特征;

第2步,利用CCD法生成试验样本,同时随机生成检验样本,并计算各样本的结构响应;

第3步,利用试验样本拟合RSM函数;

第4步,利用检验样本对RSM函数进行检验,如精度不够,则对拟合参数进行适当的变换后,重复第3步;

第5步,在确定的荷载等级下,对其他影响因素进行MCS抽样,代入RSM函数计算结构响应;

第6步,将结构响应与损伤准则相比较,得到对应荷载等级下的损伤概率;

第7步,重复第5、6步,计算下个荷载等级的损伤概率;

第8步,根据每个荷载等级下的损伤概率,绘制

易损性曲线。

## 2 易损性指标

### 2.1 指标等级界定标准

上海市地方标准《火灾后混凝土构件评定标准》(DBJ 08-219-96)将构件的评定标准分为 4 个等级: a 级(符合国家现行规范要求)、b 级(略低于国家现行规范,基本安全适用)、c 级(不符合国家现行规范或影响正常使用)、d 级(严重不符合国家现行规范要求,危及安全或不能正常使用)<sup>[28]</sup>。《火灾后建筑结构鉴定标准》(CEDs 252:2009)中对火灾后混凝土结构构件的损伤分为初步鉴定和详细鉴定 2 种情况:初步鉴定主要从过火后结构的外观变化、混凝土损坏、露筋和变形等角度将损伤状态等级分为 II a 级、II b 级、III 级、IV 级 4 个等级,并规定火灾后结构构件损伤状态不评 I 级;详细鉴定将火灾后构件承载能力与作用效应的比值分为 a 级、b 级、c 级、d 级 4 个等级,同时规定火灾后结构构件不评 a 级<sup>[29]</sup>。过镇海在参考国内外有关试验和理论研究的基础上,建议将混凝土结构和构件的火灾损伤程度分为 4 个等级:轻度损伤、中度损伤、重度损伤和严重损坏,并依据延烧时间、混凝土和钢筋的外观损伤状况、结构或构件损伤的总体形态等,给出了各等级的评定标准<sup>[30]</sup>。文献[31]通过过火后混凝土结构的外观、混凝土的损伤和结构变形等宏观特征将构件的损伤分为 5 个等级:0 级、1 级、2 级、3 级、4 级。马明雷从构件损伤和桥梁运营能力 2 个角度将特大跨径桥梁结构抗火性能划分为无损伤、轻度损伤、中度损伤、严重损伤及完全损伤 5 个等级,并从结构变形的角度给出了性能等级划分的定量表达式<sup>[32]</sup>。英国混凝土学会综合考虑受损深度、裂缝宽度和数量、混凝土强度及剩余承载力等因素,将过火后的构件损伤等级分为一级(轻度损伤)、二级(中度损伤)、三级(重度损伤)、四级(严重损伤)<sup>[33]</sup>。Peris-Sayol 等从过火后结构的损伤以及需要采取的维修方法 2 个方面,将构件的损伤等级划分为一级(表面损伤)、二级(轻度损伤)、三级(局部损伤)、四级(严重损伤)及五级(结构倒塌)<sup>[34]</sup>。

从以上研究成果可以看出,目前对火灾后构件性能等级的划分依据包括结构外观、结构破损、裂缝、变形、承载能力和维修方法等方面,各学者和相关规范标准依据其中的一条或几条对火灾后构件的性能等级进行了划分。文献[31]、文献[32]和文献[34]中虽然对各等级的描述不同,但划分的 5 个等

级基本上具有对应关系,分别表示完好、轻微损伤、中度损伤、严重损伤和倒塌;过镇海<sup>[30]</sup>和英国混凝土学会给出的等级划分除了未考虑构件的无损伤状态,其 4 个等级的划分则与文献[31]、文献[32]和文献[34]提出的等级划分相对应,但重度损伤和严重损伤的描述较为接近,不易区分;《火灾后混凝土构件评定标准》(DBJ 08-219-96)和《火灾后建筑结构鉴定标准》(CEDs 252:2009)详细鉴定部分给出的等级划分中则没有考虑结构倒塌这个级别;《火灾后建筑结构鉴定标准》(CEDs 252:2009)中初步鉴定中的 IV 级包含严重损伤和结构倒塌 2 个级别,其他 3 个等级分别对应于无损伤、轻度损伤和中度损伤。

根据以上的文献调研分析,将结构的性能水准等级用破坏状态描述为:轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全破坏 4 个等级是较为通用的做法。因此,本文将构件在车致火灾作用下的性能等级分为轻微破坏、中等破坏、严重破坏和完全损伤 4 个等级,分别对应构件的开裂极限状态、初始屈服极限状态、剥落极限状态和承载力极限状态,各极限状态采用 Priestley<sup>[35]</sup>提出的标准进行划分。

### 2.2 指标的确定

通过第 2.1 节分析可以看出,各文献中对过火后结构构件进行损伤评定最常用的定量指标是构件的承载能力。文献[28]、文献[29]和文献[31]是将火灾后混凝土结构或构件的承载力与考虑结构重要性系数后的结构效应的比值作为损伤评定指标,该指标将结构或构件的承载能力与外部荷载作用下的承载需求进行比较,反映的是火灾后混凝土构件自身承载能力与外部施加荷载需求间的关系;文献[30]、文献[33]是将火灾后与火灾前混凝土构件剩余承载能力的比值作为损伤评定指标,反映的是火灾对混凝土构件自身能力的影响。本文主要是研究火灾对混凝土结构和构件性能的影响,因此从构件剩余承载力的角度出发进行易损性指标的研究更加合理。

考虑到钢筋混凝土梁及柱在火灾作用下会产生多种破坏模式,如弯曲破坏、剪切破坏、弯剪破坏和压弯破坏等,为了将不同破坏模式下构件的损伤统一到 1 个指标下,参考 Shi 等对爆炸荷载作用下钢筋混凝土结构损伤度的定义<sup>[36]</sup>,本文将火灾作用下钢筋混凝土构件的易损性指标  $D$  定义为

$$D = 1 - \frac{P_{N,r}}{P_{N,d}} \quad (2)$$

式中: $P_{N,r}$ 为火灾作用后构件的剩余承载力; $P_{N,d}$ 为

完好构件的承载力。

### 3 易损性计算

#### 3.1 计算模型

本文采用 30 m 跨径的预应力混凝土 T 形截面梁进行易损性分析。T 形梁结构尺寸、普通钢筋布置及预应力钢筋参数参照 08 版通用标准图;混凝土为 C50,主筋采用  $\Phi 25$ HRB335 钢筋,箍筋采用  $\Phi 12$ HRB335 钢筋,钢绞线采用  $\phi 15.2$  mm,抗拉强度标准值  $f_{pk}=1\ 860$  MPa。计算模型示意如图 3 所示。

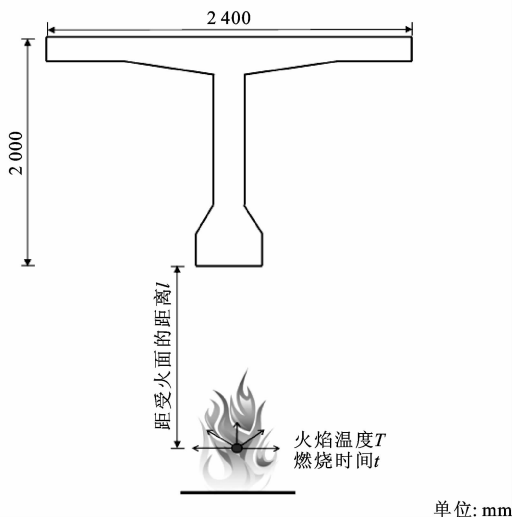


图 3 计算模型示意

Fig. 3 Computational model sketch

已有的试验和分析证明:钢筋混凝土结构的内力和变形状态,一般不影响结构的热传导过程和温度场的变化。因此,温度场的分析可以独立于结构的力学分析,并且大多数情况下可以先进行结构的温度场分析,然后进行高温下的结构性能分析<sup>[37]</sup>。因此,火灾后截面剩余承载力的计算分为:计算截面的温度分布;根据不同温度下材料的力学特性计算截面的承载力。

本文利用 ANSYS 程序建立火灾-桥梁结构传热分析模型,进行结构温度计算。文献[32]中将该分析模型的计算结果与 FDS 软件的计算结果进行了对比,验证该模型的正确性。在 ANSYS 模型中,辐射系数及对流系数的取值参考文献[32],混凝土密度采用常量  $2\ 300\text{ kg/m}^3$ ,热传导系数及比热采用过镇海模型<sup>[30]</sup>。

#### 3.2 火灾后剩余承载力计算

过镇海的试验研究和理论分析表明,钢筋混凝土构件在高温时或降温后的破坏形态、截面极限应

变和应力分布等均与常温构件在高温时或降温后的破坏形态相似,故对常温构件的计算原则和方法都适用于高温构件,只是钢筋和混凝土的强度、弹性模量等力学性能参数较常温时有所降低,需依据截面温度分布做出相应的修正<sup>[30]</sup>。目前主要采用等效截面法计算火灾后钢筋混凝土截面的剩余承载力。等效截面法是根据截面的温度分布,计算各相关等温线的位置,按照截面极限承载力等效,即截面上混凝土压应力的合力值和作用位置等效原则,将各温度区段的截面实际有效宽度按混凝土的计算高温强度的比例进行折减,即可得到相应的等效截面。同时截面上的钢筋保留在原有位置,并将抗压或抗拉强度进行折减后,按照匀质截面计算极限承载力<sup>[30]</sup>。

#### 3.3 易损性指标量化

本文火灾场景设定为在 T 梁跨中位置燃烧,故只对 T 梁在弯曲破坏下的易损性指标进行量化分析。如图 4 所示,利用 ABQUS 有限元分析程序对 T 梁的受力破坏过程进行计算分析,得到不同阶段的承载力,再按照式(2)计算不同损伤状态的损伤度。混凝土为 C50,本构关系采用塑性损伤模型,计算参数参照文献[38]中取值;主筋采用  $\Phi 25$ HRB335 钢筋,箍筋采用  $\Phi 12$ HRB335 钢筋,钢绞线采用  $\phi 15.2$  mm,抗拉强度标准值  $f_{pk}=1\ 860$  MPa,普通钢筋及预应力钢筋的本构模型均为理想弹塑性模型;T 梁边界条件按简支考虑,荷载以均布荷载的形式施加。根据文献[39]中的试验结果,T 梁的损伤状态分为梁底开始开裂、普通钢筋开始屈服、预应力钢筋开始屈服及 3 根预应力钢筋全部进入屈服 4 个状态,同时采用张岗等对火灾下预应力混凝土 T 梁破坏模式的研究成果定义承载力极限状态。根据计算结果,不同损伤状态的划分标准分别为:轻微破坏  $D=0.38$ 、中等破坏  $D=0.68$ 、严重破坏  $D=0.72$ 、完全破坏  $D=0.76$ 。

#### 3.4 随机变量分析

桥梁车致火灾的发生具有很强的随机性,主要包括燃烧时间的不确定性、燃烧位置的不确定性、风环境的不确定性和火焰温度的不确定性。火焰温度的不确定性主要因车辆及燃烧物的不同而不同,同时还受到燃烧时间及风环境的影响。燃烧位置的不确定性主要体现在火焰距受火面的距离。

桥梁火灾的发展过程包括初始增长阶段、稳定燃烧阶段和减弱阶段。在桥梁火灾初始增长阶段又分为慢速、中速、快速和极快速增长 4 种类型。以慢

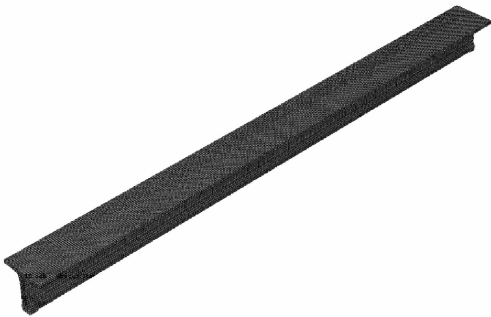


图 4 ABAQUS 计算模型

Fig. 4 ABAQUS computational model

速为例,从有效燃烧发展到稳定燃烧阶段的时间是 600 s,与火灾的整个燃烧时间相比较小,从安全的角度考虑,可以用稳定燃烧阶段代替初始增长阶段;同时,火灾在稳定燃烧阶段温度最高,桥梁在此时性能最弱,而进入减弱阶段后,结构的力学性能则会有所恢复,出于偏安全考虑,不考虑减弱阶段。综上,在整个火灾过程中,可不考虑火灾温度随时间的变化,将其与时间解耦,按稳定燃烧阶段的火灾温度进行考虑。因此,可用火灾温度  $T$ 、燃烧时间  $t$ 、火焰距受火面的距离  $l$  这 3 个参数考虑车致火灾的随机性。

根据马明雷的研究结果,车致火灾温度的取值范围为  $200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,燃烧时间的取值范围为  $45\sim 120\text{ min}$ <sup>[32]</sup>。李利军关于公路火灾大气空间温度场数值分析结果表明,在最不利工况下,高度方向距离火焰中心 23 m 处的大气最高温度为  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,水平方向距离火焰中心 22 m 处的大气最高温度为  $186\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,考虑到  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下的火灾不会对混凝土结构造成影响,可以将火灾距受火面的最大竖向距离和最大水平距离均定为  $20\text{ m}$ <sup>[24]</sup>。

由于受到原材料、制作工艺、应力状态、环境及分析方法等因素的综合影响,结构的材料参数同样存在随机性,反映在结构构件中表现为混凝土及钢筋的实际强度、弹性模量及结构尺寸存在一定的变异性,具体取值如表 1 所示。

表 1 结构参数概率统计特征

Tab. 1 Statistical characteristics of structure parameters

随机变量	分布类型	平均值	变异系数
C50 抗压强度/MPa	正态分布	22.4	0.17
HRB335 屈服强度/MPa	对数正态分布	280.0	0.07
R235 屈服强度/MPa	对数正态分布	195.0	0.07
钢绞线强度/MPa	对数正态分布	1 860.0	0.07
T 梁截面宽度/m	正态分布	2.4	0.01
T 梁截面高度/m	正态分布	2.0	0.01

根据上文分析,在火灾易损性分析中选取了 8 个主要随机变量:火焰温度、燃烧时间、火焰距受火面的距离、混凝土抗压强度、钢筋屈服强度、预应力筋屈服强度、T 梁截面高度和宽度。假定火灾的火焰温度、燃烧时间、火焰距受火面的距离参数服从均匀分布,上下限按上文分析取值;混凝土抗压强度、钢筋及预应力筋屈服强度、T 梁截面高度和宽度的取值考虑 3 倍标准差。

3.5 易损性曲线计算

在火灾作用下,火焰参数的随机性影响比结构本身的随机性对截面剩余承载力的影响要大很多,因此,在分析火灾需求的统计特征时没有考虑结构的随机性。利用 CCD 方法对火焰温度  $T$ 、燃烧时间  $t$ 、火焰距受火面的距离  $l$  这 3 个参数进行试验设计,得到 15 组试验样本,再利用蒙特卡洛法随机产生 10 组检验样本,每个样本的取值如表 2 所示。

表 2 试验样本及检验样本设计方案

Tab. 2 Designing scheme of test and verification samples

样本	编号	$T/^{\circ}\text{C}$	$t/\text{s}$	$l/\text{m}$
试验样本	1	1 200	2 700	20
	2	200	2 700	0
	3	1 200	2 700	0
	4	700	4 950	10
	5	1 200	4 950	10
	6	1 200	7 200	0
	7	700	2 700	10
	8	700	4 950	20
	9	700	4 950	0
	10	700	7 200	10
	11	200	2 700	20
	12	200	7 200	20
	13	200	7 200	0
	14	1 200	7 200	20
	15	200	4 950	10
检验样本	16	349	3 137	8
	17	458	6 406	18
	18	1 041	5 827	2
	19	454	4 127	11
	20	1 014	6 976	6
	21	444	2 855	12
	22	1 129	4 674	4
	23	550	4 417	7
	24	397	6 145	3
	25	451	6 278	9

利用 ANSYS 建立火灾-桥梁结构传热模型分析截面的温度,并根据文献[30]中提出的等效截面

法计算过火后截面的剩余承载力。用二次多项式作为响应面的目标函数,如式(3)所示

$$y=\beta_0+\beta_1 X_1+\beta_2 X_2+\beta_3 X_3+\beta_4 X_1 X_2+\beta_5 X_1 X_3+\beta_6 X_2 X_3+\beta_7 X_1^2+\beta_8 X_2^2+\beta_9 X_3^2$$
 (3)

式中:  $X_1$  为火焰温度  $T$ ;  $X_2$  为燃烧时间  $t$ ;  $X_3$  为火焰距梁底的距离。

利用最小二乘法进行回归分析,拟合系数如表 3 所示。将试验样本和检验样本的截面剩余承载力的理论计算值与响应面拟合公式的计算值进行对比分析,发现其相对误差绝对值均在 5% 以内,如图 5 所示,说明式(3)的拟合结果能够代替理论计算值。

表 3 拟合系数取值

Tab. 3 Values of fitting coefficients

系数	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$
取值	$1.95\times10^7$	$3.99\times10^3$	$3.95\times10^2$	$-2.56\times10^4$	$-6.24\times10^{-1}$
系数	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_7$	$\beta_8$	$\beta_9$
取值	$6.45\times10^1$	$8.97\times10^0$	$-2.33\times10^0$	$-3.04\times10^{-2}$	$-1.86\times10^3$

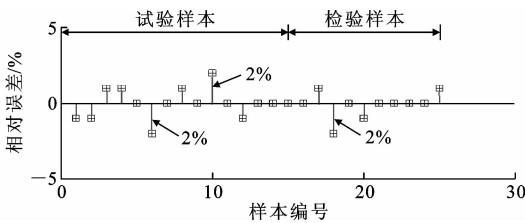


图 5 拟合误差

Fig. 5 Fitting errors

为了计算火灾作用下截面承载能力的易损性曲线,需要分析不同温度下截面剩余承载力的概率统计特征。根据上文分析得到的响应面,以 50 ℃ 为温度的增量值,对温度、燃烧时间和火焰距梁底的距离进行蒙特卡洛抽样,并代入式(3)计算结构响应;同时,对表 1 中的参数也进行蒙特卡洛抽样,计算截面承载能力;将响应与承载能力的比值与不同损伤等级的指标相比较,并统计得到的数量与抽样总量的比值,即为该温度下的失效概率。经过计算分析,30 m 长预应力混凝土 T 形截面梁在车致火灾作用下的易损性曲线如图 6 所示。

4 结 语

(1)建立了基于 RSM-MCS 的桥梁车致火灾易损性分析方法。该方法通过考虑火灾及桥梁自身参数的不确定性,以 CCD 法抽样并建立 RSM 函数,可根据输入参数的概率分布用蒙特卡洛法抽样计算,避免了复杂的有限元分析,显著提高了效率。

(2)提出以构件的剩余承载能力定义其受火后

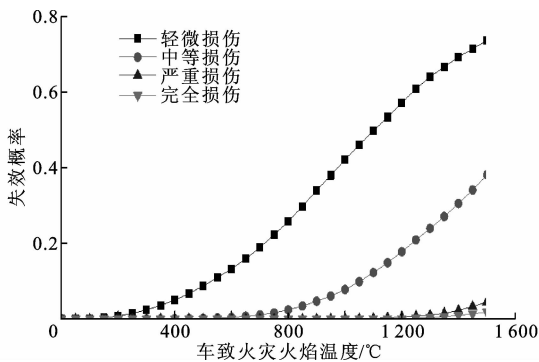


图 6 T 梁易损性曲线

Fig. 6 Vulnerability curves of T girder

的损伤度,并根据已有试验和理论分析成果研究了新指标情况下的损伤等级界定标准,取代传统的统一损伤指标,能够更充分考虑构件类别差异及性能差异。

(3)提出以火灾温度、燃烧时间、火焰距受火面的距离 3 个参数表达车致火灾的随机性指标,并通过研究给出了 3 个指标的取值范围。

(4)本文提出了桥梁构件的易损性计算方法,但研究对象仅为单个构件,不能真实反映桥梁整体的情况。因此,在火灾作用下的桥梁结构体系易损性还需进一步研究。

参考文献:

References:

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. 中国公路学报, 2014, 27(5): 1-96.  
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2014 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(5): 1-96.

[2] GARLOCK M, PAYA-ZAFORTEZA I, KODUR V K, et al. Fire hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies [J]. Engineering Structures, 2012, 35: 89-98.

[3] 张 岗, 朱美春, 贺拴海, 等. 火灾下预应力混凝土 T 形截面梁破坏模式研究[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 77-85.  
ZHANG Gang, ZHU Mei-chun, HE Shuan-hai, et al. Failure model analysis of prestressed concrete T girder exposed to fire[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 77-85.

[4] 马明雷, 马如进, 陈艾荣. 桥面火灾条件下斜拉桥拉索及全桥结构的安全性能[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2014, 42(10): 117-124.  
MA Ming-lei, MA Ru-jin, CHEN Ai-rong. Safety of

- cables and full structure of a cable-stayed bridge exposed to fires on deck[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(10): 117-124.
- [5] NFPA 502: 2008, Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways[S].
- [6] EN 1991-2, Eurocode 1: Actions on structures — Part 2: Traffic loads on bridges[S].
- [7] EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on structures — Part 1-2: General actions — Actions on structures exposed to fire[S].
- [8] EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-2: General rules Structural fire design [S].
- [9] EN 1993-1-1, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings[S].
- [10] EN 1992-1-2, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures — Part 1-2: General rules — Structural fire design[S].
- [11] ALOS-MOYA J, PAYA-ZAFORTEZA I, GARLOCK M E M, et al. Analysis of a bridge failure due to fire using computational fluid dynamics and finite element models[J]. Engineering Structures, 2014, 68: 96-110.
- [12] PERIS-SAYOL G, PAYA-ZAFORTEZA I, ALOS-MOYA J, et al. Analysis of the influence of geometric, modeling and environmental parameters on the fire response of steel bridges subjected to realistic fire scenarios[J]. Computers & Structures, 2015, 158: 333-345.
- [13] BAJWA C S, EASTON E P, ADKINS H E, et al. Effects of the MacArthur Maze fire and roadway collapse on a spent nuclear fuel transportation package [R]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 2011.
- [14] GONG X, AGRAWAL A K. Numerical simulation of fire damage to a long-span truss bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 20(10): 1-16.
- [15] AZIZ E M, KODUR V K, GLASSMAN J D, et al. Behavior of steel bridge girders under fire conditions [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 106: 11-22.
- [16] PAYA-ZAFORTEZA I, GARLOCK M E M. A numerical investigation on the fire response of a steel girder bridge[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 75: 93-103.
- [17] KODUR V K, AZIZ E, DWAIKAT M. Evaluating fire resistance of steel girders in bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 18(7): 633-643.
- [18] 张 岗, 贺拴海, 王翠娟. 焰流效应下混凝土空心薄壁墩火温时变分布[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(1): 26-34.
- ZHANG Gang, HE Shuan-hai, WANG Cui-juan. Time-dependent variation distribution of fire temperature for concrete hollow thin-walled pier affected by flame fluid[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(1): 26-34.
- [19] 张 岗, 刘天龙, 施 颖, 等. 火灾条件下混凝土箱梁梁端预应力衰变规律[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3): 65-71.
- ZHANG Gang, LIU Tian-long, SHI Ying, et al. Decay low of prestress at concrete box girder end under fire condition[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(3): 65-71.
- [20] ZHANG G, KODUR V K, XIE J, et al. Behavior of prestressed concrete box bridge girders under hydrocarbon fire condition[J]. Procedia Engineering, 2017, 210: 449-455.
- [21] ZHANG G, KODUR V K, HOU W, et al. Evaluating fire resistance of prestressed concrete bridge girders [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2017, 62(6): 663-674.
- [22] 张 岗, 施 颖, 宣纪明, 等. 混凝土连续箱梁支点处钢束预应力高温衰变研究[J]. 桥梁建设, 2016, 46(1): 76-80.
- ZHANG Gang, SHI Ying, XUAN Ji-ming, et al. Study of prestress decay of steel strands in PC continuous box beam at support under high temperature [J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 76-80.
- [23] 张 岗, 程海鲲, 王翠娟, 等. 火灾下预应力混凝土箱梁抗弯承载力衰变研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(4): 71-76.
- ZHANG Gang, CHENG Hai-kun, WANG Cui-juan, et al. Flexural capacity of prestressed concrete box girder exposed to fire[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(4): 71-76.
- [24] 李利军. 公路火灾温度场数值模拟及大跨径缆索承重桥梁火灾分析[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- LI Li-jun. Numerical simulation of highway fire temperature field and analysis of long-span cable support bridge fire[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [25] 马明雷, 马如进, 陈艾荣. 车致桥梁火灾发生概率评价模型[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2015, 43(12): 133-140.
- MA Ming-lei, MA Ru-jin, CHEN Ai-rong. Occurrence probability model of bridge fires caused by vehicles [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2015, 43(12): 133-140.



- [26] SIMPSON T W, POPLINSKI J D, KOCH P N, et al. Metamodels for computer-based engineering design: Survey and recommendations[J]. Engineering with Computers, 2001, 17(2): 129-150.
- [27] LENTH R V. Experiments, Planning, analysis, and parameter design optimization[J]. Journal of the American Statistical Association, 2002, 97(458): 654-655.
- [28] DBJ 08-219-96, 火灾后混凝土构件评定标准[S]. DBJ 08-219-96, Criteria of assessment for concrete element after fire[S].
- [29] CECS 252:2009, 火灾后建筑结构鉴定标准[S]. CECS 252:2009, Standard for building structural assessment after fire[S].
- [30] 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, 2002. GUO Zhen-hai, SHI Xu-dong. Performance and calculation of reinforced concrete at elevated temperature[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [31] 侯旭. 混凝土梁式桥火灾后检测评估与维修加固技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2009. HOU Xu. Study on detection, evaluation, maintenance and reinforcement technique for fire damaged concrete beam bridge[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [32] 马明雷. 桥梁车致火灾及基于性能的抗火设计方法[D]. 上海: 同济大学, 2016. MA Ming-lei. Vehicles related fires and performance based fire resistant design method of bridges[D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [33] 李毅, 项贻强, 王建江. 火灾后桥梁结构的损伤检测及安全性评估[J]. 中国市政工程, 2006(5): 26-27. LI Yi, XIANG Yi-qiang, WANG Jian-jiang. Damage detection and safety assessment on bridge structure after fire accident[J]. China Municipal Engineering, 2006(5): 26-27.
- [34] PERIS-SAYOL G, PAYA-ZAFORTEZA I, BALASCH-PARISI S, et al. Detailed analysis of the causes of bridge fires and their associated damage levels[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 31(3): 04016108.
- [35] PRIESTLEY M J N. Performance based seismic design[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2000, 33(3): 325-346.
- [36] SHI Y, HAO H, LI Z X. Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(11): 1213-1227.
- [37] 时旭东, 过镇海. 钢筋混凝土结构的温度场[J]. 工程力学, 1996, 13(1): 35-43. SHI Xu-dong, GUO Zhen-hai. Analysis of the temperature field of reinforced concrete structure[J]. Engineering Mechanics, 1996, 13(1): 35-43.
- [38] 聂建国, 王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 59-67. NIE Jian-guo, WANG Yu-hang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 59-67.
- [39] 方志, 汪建群, 何鑫, 等. 预应力混凝土简支箱梁受力性能足尺模型试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 49-56. FANG Zhi, WANG Jian-qun, HE Xin, et al. Full-scale model test of loading behavior of prestressed concrete simply supported box girders[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(6): 49-56.