

建筑结构地震火灾效应分析方法

陈适才^{a,b}, 田小明^{a,b}, 闫维明^{a,b}, 何浩祥^{a,b}

(北京工业大学 a. 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室;
b. 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要:为在建筑结构设计时考虑地震引发火灾对建筑结构的作用和影响,提出建筑结构地震火灾效应分析计算方法,此方法结合结构地震反应分析与火灾热力反应分析,通过简化的建筑结构地震损伤模型,考虑地震损伤的同时,连接结构的热传导分析与热力分析,从而实现地震火灾效应计算。运用此方法对一单层和一多层混凝土框架分别进行了分析,并与没有考虑地震损伤时框架的高温试验结果进行了对比,分析结果表明,考虑地震作用后的结构在火灾下的破坏形态可发生改变,结构耐火极限随着地震作用的增加而降低。

关键词:地震次生火灾;耐火极限;地震损伤模型;分析方法

中图分类号: TU312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)06-0090-06

A Preliminary Survey on Analysis Method of Building Structures Under Post-Earthquake Fire

CHEN Shi-cai^{a,b}, TIAN Xiao-ming^{a,b}, YAN Wei-ming^{a,b}, HE Hao-xiang^{a,b}

(a. Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit; b. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, P. R. China)

Abstract: Considering the impact of post-earthquake fire on building structures in structure design, an analysis method is proposed to analyze and simulate the response of building structures under post-earthquake fire. Based on the seismic response and thermal stress analysis, this method considers the structure seismic damage through a simplified seismic damage model, and the simulation of the response of building structures under post-earthquake fire was reached by linking the heat transfer analysis and thermal stress analysis to the results of seismic damage. A single-storey concrete frame and a multi-story concrete frame were analyzed with this method and compared with experimental results of the same concrete frame under fire without seismic damage. It is shown that the collapse mode may change for seismic damaged structures and the fire resistance decreases with the increasing of seismic damage degree.

Key words: post-earthquake fire; fire resistance; seismic damage model; analysis method

地震剧烈震动会导致地震火灾的频发,由于地震引发火灾造成的损失有时超出地震直接造成的损失^[1-3],所以研究者们对地震次生火灾起火、火灾蔓延以及火灾扑救等方面进行了理论分析、计算仿真甚至具体实验研究^[4-6],取得了很多重要的研究结论和成果。然而地震次生火灾同时会造成或加剧建筑

结构自身的损伤破坏甚至倒塌^[7-9],如日本福井市的本福井信托银行在地震后因为倾斜,防火窗关不住,未经受住地震火灾的考验而倒塌^[9]。目前的建筑结构抗震设计和抗火设计方法都没有考虑地震火灾对于建筑结构的作用^[10-12],而结构在发生地震后由于构件损伤使得结构耐火性能降低,会影响结构抗倒

收稿日期:2011-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目资助(50908006)

作者简介:陈适才(1979-),男,博士,副教授,主要从事结构非线性分析研究,(E-mail)shicaichen@163.com。

塌能力或者抵抗地震余震的能力^[13],尤其是一些大型重要的钢结构、钢管混凝土结构或新型材料(如高强混凝土、FRP等)结构,由于其自身材料的耐火缺陷,在地震致使结构损伤后以及防火保护或喷淋系统失效时,结构的耐火性能将对此类结构的抗倒塌能力影响更大,甚至起决定性作用,从而影响结构大震不倒的抗震设计目标。

地震次生火灾下的结构反应与一般火灾下的结构破坏也不同,地震次生火灾下的结构一般存在不同程度上的损伤,防火涂料或喷淋系统可能破坏甚至失效^[14-15],结构的损伤影响结构的耐火性能,甚至可改变结构的破坏形式。为考虑地震引发火灾对建筑结构的作用和影响,基于结构地震反应分析与火灾热力反应分析方法,通过运用简化的建筑结构地震损伤模型来考虑地震损伤的同时,连接结构的热传导分析与热力分析,从而建立建筑结构地震火灾效应分析方法,实现地震火灾效应计算。为了证明此分析方法的可行性,通过运用此方法对一单层和多层混凝土框架进行了分析,并与没有考虑地震损伤时框架的高温试验结果进行了对比,分析了结构的反应规律和破坏机制。

1 适于火灾反应的结构地震损伤分析

结构地震损伤是导致结构地震火灾效应与结构一般火灾反应不同的根本原因,由于结构火灾反应时,构件截面存在不均匀温度场,其损伤演化过程可以在受火部位的任何位置、任何截面,较为精确的结构火灾反应计算方法需直接以材料模型为基础,而基于构件层次上的损伤模型得出的构件和结构损伤指标难以直接用于结构地震火灾反应分析,更难以分析损伤程度与结构耐火性能的影响关系。

基于材料损伤模型进行结构地震反应和损伤分析,为了建立简化的适于火灾反应分析的地震损伤模型,将框架结构地震后的损伤分为2部分:第1部分是几何位移损伤,即结构地震作用后的残余变形,如构件的残余挠度、两端的残余转角或侧移或者结构的层间残余位移或转角等;第2部分是力学性能损伤,即构件或结构强度和刚度的降低。对于第1部分几何位移损伤,可以采用基于材料或构件的恢复力模型,采用具体的地震反应分析方法,进行地震反应计算,从而确定结构的变形;对于第2部分构件和结构强度和刚度的损伤,不采用构件层次来反映,而直接通过构件截面积分点的材料损伤来表示。这样整体结构的残余变形以及构件截面积分点的材料损伤将作为火灾反应分析的初始状态。当不考虑力

学性能损伤或力学性能损伤较小时,结构的几何位移损伤占主要部分,如一些钢结构,则可以只考虑几何位移对结构耐火性能的影响,如Cortea^[14]在进行钢结构地震火灾分析时,就只考虑结构水平位移的影响,并且采用直接施加水平荷载的方法来考虑地震作用影响,这种简化分析方法难以考虑地震与火灾作用的先后顺序以及材料与结构的力学性能损伤对结构耐火性能的影响。

为了实现以上基于材料损伤模型的地震损伤分析过程,利用纤维单元模型来建立结构的分析模型,可以同时考虑结构的几何位移损伤和力学性能损伤,并且结合了地震反应谱等效静力分析方法或者弹塑性时程分析方法。当采用静力等效方法时,假设结构的push-over能力谱和地震反应需求谱相交的性能点作为结构地震损伤计算标准(如图1所示),将性能点对应的结构基底剪力作为水平荷载对结构进行周期往复作用后,再去掉水平荷载,从而模拟结构地震后的损伤状态,纤维单元模型高斯截面上的积分点对应每个分析步的材料状态(最大应力、应变、塑性应变、损伤因子等)需要通过单独的数据文件进行记录,尤其是地震作用结束时的节点位移、材料状态,这不仅可以直接定量确定结构的损伤而且将成为火灾结构反应分析的初始状态。

2 建筑结构地震火灾效应分析计算方法

目前结构地震反应计算与火灾反应计算需分开进行,并且需建立各自的分析模型,难以适应地震火灾效应分析。用于地震损伤分析的结构模型和用于火灾反应分析的结构模型可采用同一个纤维模型,也可以分别建立各自的纤维模型,在利用反应谱或弹塑性时程分析方法时,通过数据文件记录地震作用结束时的节点位移、材料状态后,才开始进行火灾的反应分析。是否采用同一个分析模型,这主要决定于要分析结构的哪一部分,但两者都通过相应的数据文件决定所选结构的初始状态。

地震损伤后的结构出现的裂缝以及混凝土脱落会影响火灾下的热传导过程,Kodur^[16]根据试验结果提出高强混凝土剥落的温度,Hang^[17]等为考虑剥落对高强混凝土柱的耐火性能影响,采用了预先设置剥落时间和深度的简化方法,为了简化地震次生火灾反应过程不考虑混凝土裂缝及脱落对构件截面温度的分布影响。另外,火灾热传导分析可采用不同的火灾模型:区域火灾模型或欧洲规范参数化火灾模型,也可以采用实测的温升曲线,分析时假设同一高度部位的空气温度均匀,或进一步简化为同

一房间的烟气温度均匀,再根据各纤维构件所处的位置,采用不同受火方式(不同面受火、或有无防火层)进行热传到分析,并假设纤维单元轴向温度均匀,只有单元截面温度不均匀分布,从而实现各受火单元热传导分析过程。每个单元对应不同时刻的截面温度场仍然采用数据文件记录(每行温度个数对应单元截面纤维数目),为后面的热力分析所采用。为进一步简化结构反应过程,热力反应分析时不考虑火灾发展过程与结构状态改变的相互影响,通过读取相应的状态文件考虑结构地震损伤,再根据分析步读取对应单元的截面温度场数据进行热力分析。材料状态从初始损伤到开始升温以及不同温度之间的转换采用等效残余应变方法进行考虑^[18]:对于某初始状态的材料高斯积分点,假设其按照当前刚度卸载到残余应变点,再从此残余应变点沿着当前温度下考虑地震损伤后的刚度发展,对于不同温度之间材料状态的转换采取同样的方法,从而实现基于结构地震损伤模型的火灾反应分析过程。对于具体的结构其地震火灾效应分析流程如图 2 所示:

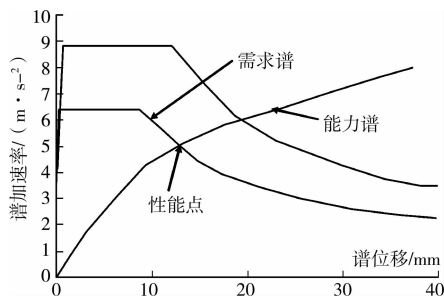


图 1 谱曲线与性能点

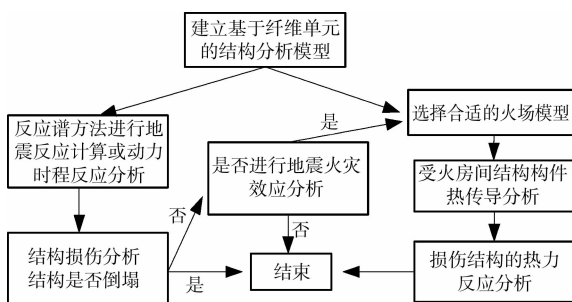


图 2 结构地震火灾效应分析流程

3 算例分析

采用地震火灾效应分析方法对文献[15]进行的火灾试验单层混凝土框架进行分析,其具体几何尺寸以及配筋情况如图 3 所示,钢筋的屈服强度为 270 MPa,混凝土常温下的棱柱体抗压强度为 29.94 MPa。试验中,横梁上预先施加的 2 个对称集中荷载为 13.67 kN,然后通过试验炉进行 3 面加热,试

验中实测的升温曲线如图 4 所示。

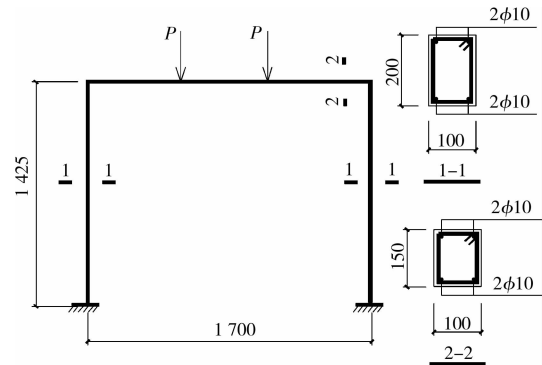


图 3 受火混凝土框架尺寸及配筋

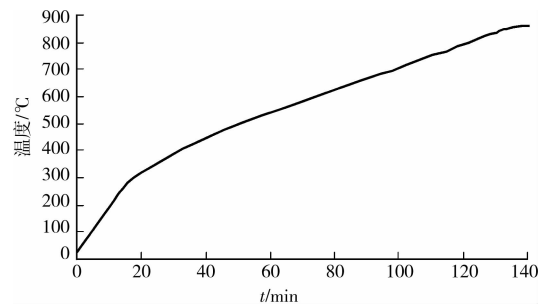


图 4 火灾升温曲线

建立结构地震损伤模型时,整个横梁沿中点以及荷载作用点划分成 4 个纤维梁单元进行分析,每个柱子划分为 2 个纤维梁单元。所有单元截面都划分成 50 个混凝土纤维和 4 个钢筋纤维,这样每个纤维梁单元共 162 个高斯积分点。这里结构地震损伤分析时,采用等效静力分析方法,从能力谱和需求谱迭代求结构性能点的过程不进行赘述,而直接取结构侧向推覆曲线上的任意点(如对应结构 0.7% 的侧向位移处)作为地震损伤分析位置(如图 5 所示),此点对应的侧向水平荷载为 24 kN,再利用此荷载对结构进行单周往复加载,最后残余位移为 2.6 mm,对应的各纤维单元高斯截面各纤维点的应力应变状态采用文本文件保存。

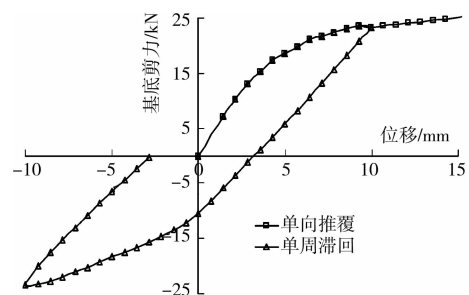


图 5 结构地震损伤分析

为了与试验结果进行比较,火场模型直接采用图 4 中试验所测温升曲线进行模拟分析,并且在地

震火灾反应分析时,不考虑地震损伤对结构构件截面温度场的影响,(地震火灾不考虑喷淋等其他因素的影响,对实际结构需要考虑喷淋、通风等影响时,可以选择合适的火场模型并采用具体的火场模拟软件进行分析),热传导分析时,所采用的混凝土热工参数包括热传导系数以及比热容都根据文献[16]提供的相应公式考虑,另外传热系数 h_c 取为25 W/mK,热辐射率 ϵ_r 取0.1,质量密度取为常值2 400 kg/m³。热传导分析采用前面地震损伤分析同样的纤维单元有限元分析模型,每个纤维单元对应的热传导分析结果对应于一个温度文本文件。根据以上热传导分析结果,再利用本文模型进行框架的热力反应分析。

热力分析时,首先读入各单元节点位移以及各纤维单元高斯截面各纤维点的应力应变状态作为初始状态,再根据分析步骤,读入对应分析步的温度进行分析。经过热力分析计算后,图6是梁跨中相对挠度(跨中相对梁端的竖向位移)的计算值以及不考虑地震损伤时结构的数值计算值和试验值。由计算结果可知,在不考虑地震损伤且火灾温度较低时,挠度变化较小,在600℃后,挠度变化加快,在到700℃时,挠度加剧发展一直到破坏,与试验值较为符合,而在考虑地震损伤后,梁跨中挠度趋势与不考虑损伤时的趋势一样,只是挠度相对稍大,而到约550℃时,程序停止计算,此时梁相对挠度没有剧烈增大,梁跨中没有破坏。

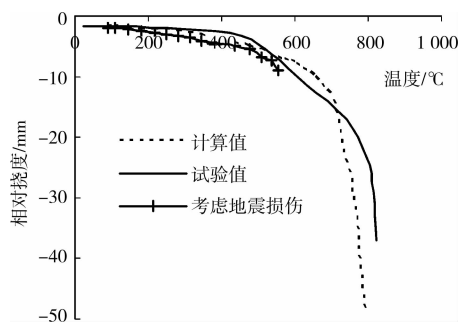


图6 梁跨中相对挠度变化曲线

水平位移变化可以反映2种情况下结构破坏形态的不同,由图7结构的侧向位移变化可以看出:不考虑地震损伤时,框架水平位移先缓慢增大,之后又缓慢减小,一直到跨中梁破坏(图6所示梁的跨中位移急剧增大),此时,柱的侧向位移仍然相对平稳(图7),柱子没有破坏,可见结构破坏主要由梁破坏导致;而考虑一定的地震损伤后,结构的水平位移由地震损伤残余位移开始逐渐增大,增大的速率明显快于不考虑地震损伤时,最后在大约550℃时,柱子的侧移快速增大达到28 mm,位移变化速度过大导致

程序停止计算,结构的柱发生破坏,而此时梁的相对挠度为9 mm,梁没有发生破坏,结构的破坏主要由柱的破坏导致,结构表现为一种整体破坏形态。

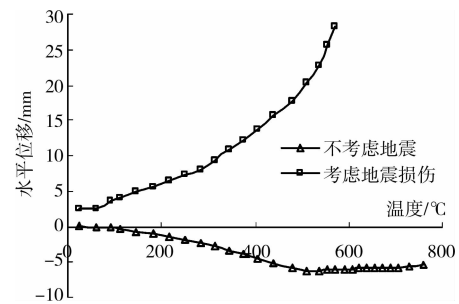


图7 结构水平位移变化

图8进一步比较了不同情形下的柱底弯矩随温度变化情况,不考虑地震损伤时,由试验现象可知^[18],柱子的侧向变形随着温度的升高由凸向内侧之后又转为凸向外侧,其内力也将随之发生变化,甚至发生方向改变。由图可知,不考虑损伤时,柱底弯矩经历了一个减小又增大的变化过程,弯矩发生方向的改变,总体上符合试验现象。而在考虑地震损伤时,柱底弯矩开始时就与不考虑地震损伤时相反,并且随着温度的升高,弯矩快速增大,大约450℃时,弯矩变化缓慢,一直到550℃时,由于柱侧移较大而破坏,在此过程中,弯矩没有发生方向改变现象,可见考虑一定的地震损伤后,结构的内力变化规律会发生改变。

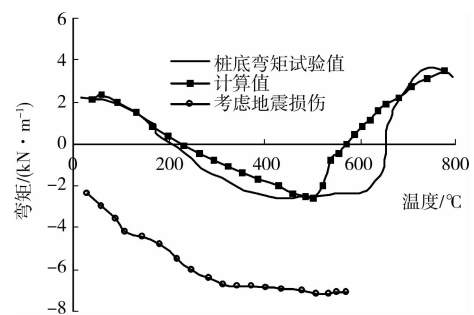


图8 柱底弯矩随温度变化曲线

由以上分析可知:不考虑地震时,梁跨中首先开始发生屈服破坏,由于内力重分布,同时梁端部也开始相继破坏,但柱没有破坏,这与试验中梁跨中出现塑性铰后很快两端也出现塑性铰^[18]的破坏现象相符合(如图9);而考虑地震损伤时,梁跨中没有发生破坏而梁两端和柱都发生破坏,表现出整体破坏形态(图10)。可见,地震损伤不仅会改变结构内力变化规律,甚至改变结构的破坏形态。

3.1 多层框架

采用该文方法进一步对一多层框架结构的地震

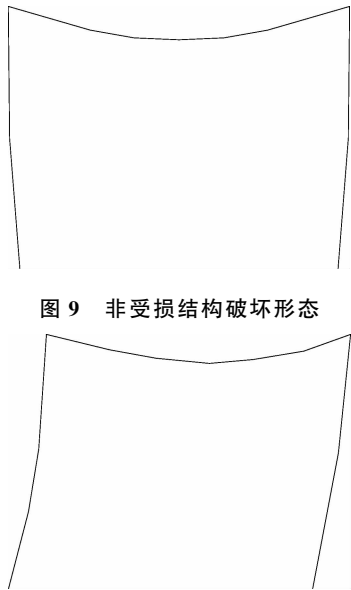


图 9 非受损结构破坏形态

图 10 地震损伤结构破坏形态

火灾反应进行计算分析,该框架的主要参数为:首层层高 3.6 m,其余层高 3 m,进深为 6 m。框架柱截面尺寸 300 mm×300 mm,梁截面都设计为 250 mm×400 mm。混凝土强度均按 $f_c=30 \text{ N/mm}^2$ 计算。楼面与屋面恒载均取为 8.5 kN/m^2 ,活载为 1.5 kN/m^2 。结构配筋计算按照 PKPM 软件进行计算。

不同等级地震导致结构的损伤程度不同,确定地震作用后,结构的地震损伤较为精确的分析可以通过弹塑性动力时程分析获得。为了考虑多层框架结构地震损伤后结构的耐火性能,这里仍然采用等效静力的分析方法,并采用一阶振型的比例荷载对结构进行推覆分析(如按照 7 度设防烈度 III 类场地算得此结构第 1 层剪力为 196 kN、第 2 层剪力为 152 kN、第 3 层剪力为 88 kN,然后以此进行比例加载 λ 推覆)。分析时,采用纤维模型利用基于 Patran 前后处理的自开发程序进行计算,图 11 表示了采用荷载比例 $\lambda=2$ 时的结构推覆变形,此时结构部分梁端处出现了塑性变形,为了考虑双向损伤的影响,将比例荷载循环往复 1 周,最后卸掉比例荷载。此后再进行火灾反应分析,火灾可以发生不同的楼层或不同的房间,这里为了演示地震火灾反应计算过程,只分析 1 种典型的火灾情况下,分析时假设标准火灾发生在底层某中间房间,并且不考虑裂缝以及保护层脱落对结构热传导分析的影响,图 12 表示了地震次生标准火灾下 55 min 时结构的破坏形态。此时受火梁柱部分由于钢筋屈服变形急剧增大而破坏,结构表现为局部的整体破坏形态。而不考虑地震损伤时,结构在标准火灾下 55 min 的变形如图 13 所表示,此时结构的受火梁柱变形都小于考虑地震

损伤后的变形,一直到 105 min 时结构发生破坏(图 14),结构的破坏主要是由于受火梁的变形急速增大而导致的局部破坏。

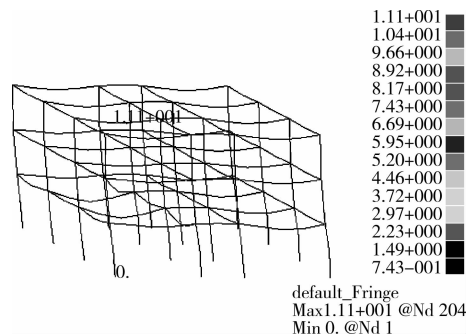
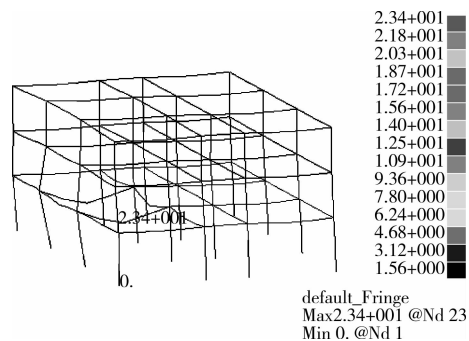
图 11 $\lambda=2$ 时的结构变形

图 12 地震损伤结构破坏形态

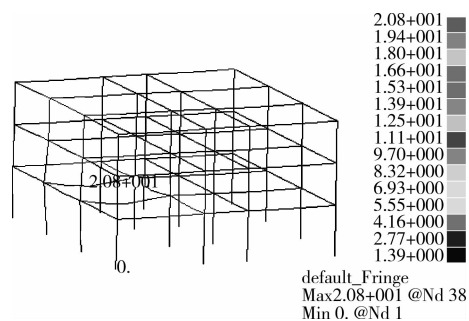


图 13 无损结构 55 min 时的变形图

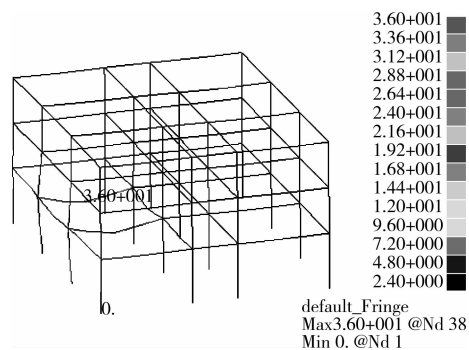


图 14 结构破坏形态

图 14 进一步比较了 2 种情况下结构底层受火柱侧向位移随时间的关系,不考虑地震损伤时,侧向位移逐渐增大,到 105 min 梁破坏时,侧向位移缓慢

增大,柱子没有发生破坏;考虑地震损伤时,受火前结构发生的力学损伤,并且有一定的残余位移,受火后侧向位移也增大,但增大幅度较不考虑地震损伤时要大,到55 min时,侧向位移迅速增大,同时梁的位移也较快增长,故结构表现为局部房间的整体破坏。

为了分析地震损伤程度对结构耐火极限的影响,可以通过改变比例系数来表示不同地震作用的影响,图16表示了结构耐火极限随地震作用比例系数的变化关系,随着比例系数的增大,结构耐火极限减小,比例系数由0增到3时,耐火极限由105 min降到25 min,实际上随着比例系数继续增大表示结构的损伤很大,结构在地震作用下就接近倒塌破坏。

对于框架结构的地震火灾反应,考虑地震损伤后,结构在火灾下的破坏形态可发生改变,单层框架发生整体性破坏,多层框架由于局部受火而发生局部整体破坏;并且与无损伤结构的破坏顺序也发生改变,由梁先破坏变为由柱先破坏,另外,结构耐火极限随着地震损伤程度的增加而降低。

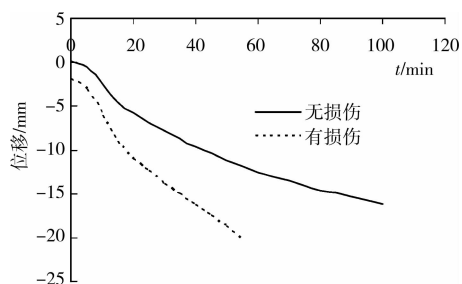


图15 受火柱水平位移变化

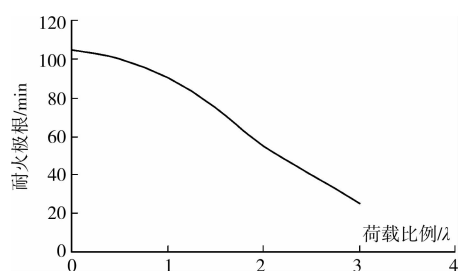


图16 耐火极限随地震作用变化

4 结论

为考虑地震火灾对结构的影响,建立了建筑结构地震火灾效应分析计算方法,通过基于材料的数值模型,考虑了结构地震损伤以及结构火灾反应计算方法。可以用于框架结构地震火灾效应各个阶段的分析,也可以用于不同材料的框架结构。

通过混凝土框架的算例分析表明了该文方法的可行性与合理性,同时分析结果也表明了考虑地震

损伤和不考虑地震损伤的建筑结构火灾反应规律和破坏机制的区别。对于框架结构,不考虑地震损伤时,火灾引起结构的破坏一般来说是局部性破坏;而考虑地震损伤时,火灾引起结构的破坏可变成整体性破坏或者结构局部的整体倒塌,并且随着损伤的增加其耐火极限也降低,因此针对地震区的建筑结构在进行结构抗震或抗火设计分析时,需要考虑此影响。

参考文献:

- [1] SHAHAB M, ASHUTOSH B. Review of post-earthquake fire hazard to building structures [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35(7): 689-698.
- [2] BORDEN F W. The 1994 Northridge earthquake and the fires that followed[C]// Thirteenth Meeting of the UJNR Panel on Fire Research and Safety, 1996, 2: 303-312.
- [3] ZHAO S J, XIONG L Y, REN AIZHU. A spatial-temporal stochastic simulation of fire outbreaks following earthquakes based on GIS[J]. Journal of Fire Sciences, 2006, 24(4): 313-339.
- [4] 李杰, 李国强. 地震次生火灾预测模型研究[J]. 中国地震, 1992, 8(1): 76-82.
LI JIE, LI GUO-QIANG. A Research on the prediction model of earthquake-aroused fire disaster [J]. Earthquake Research in China, 1992, 8(1): 76-82.
- [5] 赵振东, 余世舟, 钟江荣. 建筑物震后火灾发生与蔓延危险性分析的概率模型[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(4): 183-187.
ZHAO Z D, YU S Z, ZHONG J R. Probability model for hazard analysis of post-earthquake fire occurrence and spread among buildings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(4): 183-187.
- [6] 陈素文, 李国强. 地震次生火灾的研究进展[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(5): 120-126.
CHEN S W, LI G Q. Advance in research on secondary fire of earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(5): 120-126.
- [7] 李天祺, 赵振东. 油气储运系统钢结构设备地震火灾效应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(6): 118-121.
LI T Q, ZHAO Z D. Steel structure equipment earthquake fire effect research of oil-gas storage and transportation systems [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(6): 118-121.

(下转第119页)

- Journal of Ningbo University: Natural Science & Engineering Edition, 2004,17(3):332-335.
- [3] KING W S, YEN J Y, YEN Y N. Joint characteristics of traditional Chinese wooden frames [J]. *Engrg. Struct.* 1996, 18(8): 635-644.
- [4] BULLEIT W M, SANDBERG L B, DREWEK M W, et al. Behavior and modeling of wood-pegged timber frames [J]. *Struct. Engrg., ASCE*, 1999, 125(1):3-9.
- [5] 方东平,俞茂宏,宫本裕,等. 木结构古建筑结构特性的实验研究 [J]. *工程力学*, 2000, 17(2): 75-83.
FANG DONG-PING, YU MAO-HONG, MIYAMOTO Y, et al. Experimental studies on structural characteristics of ancient timber architectures [J]. *Engineering Mechanics*, 2000, 17(2): 75-83.
- [6] 高大峰,赵鸿铁,薛建阳. 中国木结构古建筑的结构及其抗震性能研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] SEO J M, CHOI I K, LEE J R. Static and cyclic behavior of wooden frames with tension joints under lateral load [J]. *Struct. Engrg. ASEC*, 1999, 125(3): 344-349.
- [8] SANDBERG L B, BULLEIT W M, REID E H. Strength and stiffness of oak pegs in traditional timber-frame joints [J]. *Struct. Engrg., ASCE*. 2000, 126(6): 717-723.
- [9] 津和佑子,藤田香织,金惠园. 传统木结构建筑构件的动力荷载试验(第一部分)微动测定与自由振动试验 [C]//日本建筑学会. 日本建筑学会大会学术讲演论文集. 2004:23-24.
- [10] 金惠园,藤田香织,津和佑子. 传统木结构建筑构件的动力荷载试验(第二部分)荷载变形关系与变形特征 [C]//日本建筑学会. 日本建筑学会大会学术讲演论文集. 2004:25-26.
- [11] 藤田香织,金惠园,津和佑子. 传统木结构建筑构件的动力荷载试验(第三部分)恢复力特性与刚度的讨论 [C]//日本建筑学会. 日本建筑学会大会学术讲演论文集. 2004, :27-28.
- [12] 阿旺罗丹. 西藏藏式建筑总揽 [M]. 成都:四川美术出版社, 2007.
- [13] 陈耀东. 中国藏族建筑 [M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
- [14] 木结构设计手册编辑委员会. 木结构设计手册 [M]. 3版. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.

(编辑 胡英奎)

(上接第95页)

- [8] 吴波,李惠,马忠诚. 钢筋混凝土结构在火灾和低周反复荷载作用下的损伤分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1997, 30(3): 7-12.
WU B, LI H, MA Z C. Damage analysis of R. C. structures under fire [J]. *Journal of Harbin University of C. E. & Architecture*, 1997, 30(3): 7-12.
- [9] 陈宏德,张宝红. 日本的地震火灾对策 [J]. *国际地震动态*, 1994(10): 22-26.
CHEN H D, ZHANG B H. Earthquake fire countermeasures in Japan [J]. *International Earthquake Research*, 1994(10): 22-26.
- [10] EUROCODE2: Design of composite steel and concrete structures [S]. *Structural Fire Design*, Commission of the European Communities, Brussels, 2002.
- [11] MOSS P J, DHAKAL R P, BONG M W. Design of steel portal frame buildings for fire safety [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65(5): 1216-1224.
- [12] CHI K I, CHAN S L, ZHA X X. Nonlinear pre fire and post fire analysis of steel frames [J]. *Engineering Structures*, 2008, 27(11): 1689-1702.
- [13] YASSIN M H, BAGCHI A, KODUR V. Numerical model for assessing the post-earthquake fire resistance of wood-stud wall [J]. *Annual Conference-Canadian Society for Civil Engineering*, 2009:1520-1529.
- [14] CORTEA G DELLA, LANDOLFO B R, MAZZOLANI F M. Post-earthquake fire resistance of moment resisting steel frames [J]. *Fire Safety Journal*, 2003, 38(7): 593-612.
- [15] CHEN SUWEN, LEEGEORGE C, LI GQ. A study on steel buildings subjected to earthquake and the following fire [C]//PRC-US Earthquake Engineering Forum for Young Researchers Harbin, China, 2006.
- [16] KODUR VKR, WANG T, CHENG F. Predicting the fire resistance behavior of high strength concrete columns [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2004, 26(2): 141-153.
- [17] HUANG Z H, BURGESS I W, PLANK R J. Three-dimensional analysis of reinforced concrete [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(10): 1201-1212.
- [18] 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, 2003.

(编辑 胡玲)