

框架柱抗震抗火设计因素分析^{*}

李耀庄, 尚国龙, 吴小华, 熊 伟

(中南大学 防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 在介绍地震火灾危害基础上, 分析了钢筋混凝土框架柱地震与火灾引起的破坏形式, 论述了同时考虑抗震与抗火的钢筋混凝土框架柱相悖与相符的设计因素及其依据, 给出了相悖设计因素的弥补方法。相关结论对需要同时考虑抗震与抗火的钢筋混凝土框架柱的设计具有一定的指导意义。

关键词: 地震火灾; 抗震; 抗火; 框架柱; 设计因素

中图分类号: TU312⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2011)01-0104-05

供工程技术人员在设计、研究时作参考。

0 引言

地震火灾是地震的次生灾害之一。在城市系统日趋庞大、城市功能日益复杂的今天, 地震次生火灾的危险有增无减。一旦生活区、旅游区、工业区等发生地震后, 建筑物发生火灾, 将更加危及结构的安全, 甚至酿成严重事故, 使人民的生命和财产蒙受重大损失, 所以在保证结构抗震能力的同时又具备良好的抗火能力, 是地震多发地区生命及财产得到保证的手段之一。

柱子是结构中最重要构件之一。在地震火灾中, 一旦柱子丧失了承载力, 结构就会发生局部倒塌, 甚至整体坍塌。因而, 钢筋混凝土柱抗震抗火性能的研究在钢筋混凝土结构抗震抗火性能的研究中具有举足轻重的地位。事实上, 钢筋混凝土柱的抗震抗火性能的研究是钢筋混凝土结构抗震抗火的基础^[1-2]。

现今, 各国分别对钢筋混凝土柱子的抗震设计因素与抗火设计因素进行的研究已经得出了很多成果, 但同时考虑两种灾害对设计因素的影响并对设计因素进行优劣性分析的很少。通过对大量资料的积累与分析, 本文指出了既考虑抗震又考虑抗火钢筋混凝土框架柱相悖与相符的设计因素, 并根据钢筋混凝土框架柱在两种灾害情况下各自的破坏形式, 给出了设计过程中择优相符设计因素的依据以及选择相悖设计因素的弥补方法,

1 地震火灾的危害

地震和火灾是威胁建筑物的两大灾害, 世界上多次大地震发生时和发生后有大规模火灾发生。地震火灾虽然是地震的次生灾害, 但它是对结构安全的再次考验。地震火灾的发生主要由化学药品、工业用炉、民用煤炉、燃爆液体、燃爆气体、燃爆固体、电器火源等引起。由于火灾发生的原因众多, 可谓防不胜防, 并且城市人口密度大幅度提高, 易燃易爆的煤气普及各个民居, 室内易燃物也有所增加, 使地震火灾发生的可能性大大提高^[3]。

目前国内工程中考虑两种灾害的防范措施基本是分别对待, 往往认为地震时只有地震灾害是主要的。地震火灾虽是地震的次生灾害, 但有时却比地震直接造成的危害和损失大得多。20 世纪发生地震火灾的例子屡见不鲜, 表1中列举了几个典型例子。

地震火灾所造成的损失是相当严重的, 震后的消防抢救也比平常的消防抢救困难。尤其是面对地震已经造成了房屋倒塌、交通阻塞、水源中断、人心恐慌、慌乱无章、顾此失彼等情形, 正常情况下容易扑灭的小火也会酿成大灾。另外一方面, 电力系统的恢复, 也会引发震后火灾的发生。

^{*} 收稿日期: 2010-07-12

基金项目: 湖南省科技计划重点项目(06FJ2002)

作者简介: 李耀庄(1970-), 男, 湖南双峰人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构抗火、抗震教学和科研工作。

E-mail: liyz@mail.csu.edu.cn

在地震火灾的情况下, 如果结构在地震中能满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”, 并且具有较

好的抗火特性, 不仅能使地震后部分房屋的修缮费用降低, 而且能保证被困人员有更多的逃生时间。

表 1 典型地震火灾一览表^[4]

日期	地点	震级 M	火灾情况	两灾对比
1906-04-18	美国 旧金山	8.3	连续燃烧 3 d, 烧毁 521 个街区、28 188 幢房屋, 死亡 400 人, 损失达 4 亿美元。	火灾直接造成的损失比地震直接造成的大 10 倍。
1923-09-01	日本 关东	7.9	死亡和下落不明 14 万余人。东京市被火烧毁房屋户数约为当时总户数(44 万户)的 70%。火灾烧毁房屋 447 128 幢。横滨约 60 处起火, 住宅面积约 75% (950 hm ²) 被火烧掉, 烧坏房屋 6 万栋, 占总户数 60%。	房屋倒塌压死者不到总数的 10%, 绝大部分是火灾造成的。火灾本是次生灾害, 但损失远超过地震直接造成的损失。
1948-06-28	日本 福井	7.3	地震时各地发生火灾, 福井市烧坏房屋 2 069 户, 丸冈镇烧坏 1 360 户, 整个灾区烧毁房屋 3 960 户。	地震火灾所造成的人民生命财产损失是日本昭和年代地震灾害最惨重的一次。
1992-12-08	中国云南 永胜	5.4	地震引起一场火灾, 火灾发生在位于震中区的永胜二中, 该校化学实验室化学药品被晃倒在地, 爆炸起火。	总体上, 地震造成的损失大于火灾造成的损失。
1995-01-17	日本淡路岛 北部	6.9	兵库县震央附近的神户、芦屋、西宫、尼崎市, 3d 内共发生 164 件震后火灾。	因震后火灾死亡的人数占全部震灾死亡人数的 10% (约 530 人), 烧毁的户数占震灾所损毁的户数的 5% (约 7 500 户)。
1999-09-21	台湾 同月潭	7.3	以震后 7d 内之起火数而言, 共发生 161 件火灾。就 9 月 21 日而言, 也有 92 件之多。	总体上, 地震造成的损失大于火灾造成的损失。

2 框架柱的破坏形式

2.1 地震作用下框架柱的破坏形式

按照柱子的剪跨比, 可以简单地将柱子的破坏划分成长柱延性弯曲破坏和短柱脆性剪切破坏形式。国内外学者对钢筋混凝土框架柱破坏形式的描述不尽相同, 本文将其划分为 4 种类型^[5-7]。①弯曲破坏, 弯曲型破坏是构件在荷载作用下受拉钢筋屈服之后, 受压区混凝土被压碎及主筋压屈而逐渐丧失承载能力的破坏。破坏过程较缓慢, 具有连续、均匀的延性和良好的耗能特性。②压弯破坏, 这种破坏形式在柱子轴压比过大, 主筋配置不足, 箍筋过稀等情况下常常看到。压弯破坏大多出现在梁底与柱顶的交接处, 混凝土压碎剥落, 主筋压曲成灯笼状。构件在纵向受拉钢筋还未屈服时就破坏, 延性较差, 并且难于修复。③剪切破坏, 在往复的水平地震力作用下, 随着柱子剪跨比和轴压比的大小变化, 存在剪切破坏、剪拉破坏、剪压破坏与高剪压破坏的形式, 延性相对较小; ④粘结开裂破坏, 一般先在柱端部出现弯剪裂缝, 然后在距柱端约一个截面高度处的纵筋附近混凝土上出现第一条粘结开裂裂缝, 随着荷载增加, 该裂缝沿整个柱高度发展, 在反复荷载下形成“X”状的交叉裂缝。当达到最大荷载后, 荷载下降较快, 最后混凝土保护层沿主裂缝

剥落。破坏过程较缓慢, 达最大荷载后构件刚度衰减较快, 延性小。

2.2 火灾作用下框架柱的破坏形式

过镇海、时旭东^[8]等人通过五榀三面受热的钢筋混凝土门式框架的试验, 分析了高温下框架的变形和内力重分布规律、破坏特征以及极限承载力。结果表明, 高温下框架结构的塑性铰出现次序、位置, 以及破坏机构和极限承载力等与常温下显著不同的情况。内力在整个升温过程中经历了剧烈且复杂的重分布过程。

三面受火的混凝土柱, 当轴力的偏心距绝对值较小或轴心受压时, 为混凝土受压破坏特征, 裂缝细而密, 挠度发展小, 为典型的小偏心受压破坏; 偏心距绝对值较大时, 无论轴力偏向受火面或非受火面, 拉区都有深且宽的主裂缝, 钢筋屈服后, 破坏时挠度发展大, 属于大偏心受压破坏^[9-12]。四面受火的混凝土柱, 轴心受压或偏心距较小时, 破坏特征为整个截面压坏; 当偏心距较大时, 将因侧向挠度过大而破坏^[13]。

3 钢筋混凝土框架柱设计因素分析

抗震规范中要求混凝土结构构件应避免剪切破坏先于弯曲破坏, 混凝土的压溃先于钢筋的屈服, 钢筋的锚固粘结破坏先于构件破坏。为了满足抗震规范要求, 通过控制框架柱的设计因素

以及采用 FRP、CFRP 等提高延性的措施,使柱子的破坏形态趋于良好的方向发展,其中主要设计因素有柱子所在位置、荷载类型、预压荷载水平、荷载比、材料强度、截面尺寸、纵向钢筋配筋率、箍筋配筋率、轴压比、剪跨比、长细比、偏心距和约束条件等。

我国在 1989 年成立了火灾研究实验室之后,对混凝土在火灾中的行为进行了大规模研究,取得了丰硕的成果。影响柱耐火极限的因素众多,概括起来有如下几种:受火面、受火位置、升温条件、预压荷载水平、荷载比、材料强度、材料种类、截面尺寸、保护层厚度、纵向配筋率、箍筋配筋率、轴压比、剪跨比、长细比、偏心距和约束条件等。

对抗震与抗火都有影响的设计因素有柱子所在位置、预压荷载水平、荷载比、材料强度、截面尺寸、纵向配筋率、箍筋配筋率、轴压比、剪跨比、长细比、偏心距和约束条件。本文将对抗震与抗火都有利以及对一方有利而对另外一方无害的设计因素归为相符设计因素;对一方面有利对另一方面有害的设计因素归为相悖设计因素。

3.1 相悖设计因素分析

(1) 截面尺寸

增大截面尺寸,可以改变温度分布,提高耐火极限,但剪跨比与长细比减小,延性下降,对抗震不利,同时增加了成本,增加结构自重,可见增大截面尺寸并非是好的提高耐火极限的方法。

(2) 箍筋配筋率

高层建筑荷载大;建筑上要求大柱距,使部分柱子承受的竖向荷载较大;为了节约空间,层高往往控制在 2.7~3.9 m 之间;柱混凝土强度等级偏低;在房屋的抗震加固中,不适当地采用外包钢筋混凝土方法加固,加大了柱截面。在高层建筑设计中不可避免地出现了短柱,为避免短柱发生脆性破坏从而使结构破坏,必须采取适当的措施。由此设计时这些短柱沿全高度配置了加密箍筋,能提高柱的延性和抗剪承载力,降低地震力对柱的破坏程度,约束混凝土的横向变形,并为纵向钢筋提供侧向支承,防止纵筋压屈^[14]。钢筋混凝土构件内的钢筋对截面温度场的温度影响很小,但对温度场的分布影响较大。过量配置箍筋能提高构件内部热量的传导能力,在一定程度上能加重构件材料的劣化^[15]。总体而言,虽然增加箍筋对抗火稍有不,但对提高柱子的承载能力以及提高抗震能力都有显著效果。可以通过在

柱子表面涂刷防火涂料来提高抗火能力,弥补这一缺陷。

(3) FRP(Fiber Reinforced Plastics)

由于楼板对梁的有利作用,使得理论计算上的“强柱弱梁”与实际情况有可能不符。因此,人们开始对如何提高柱子延性进行了研究。由于 FRP(Fiber Reinforced Plastics)具有抗拉强度高、质量轻、耐腐蚀、易于加工、耐久性及抗疲劳性能好等特点,将该材料用于混凝土加固中可以克服传统加固方法中增加构件自重、施工不便、施工周期长等诸多缺点。因此,如果在柱子的表面粘贴 FRP 布,约束核心区混凝土,可以有效提高柱的延性,从而改善框架结构的抗震性能。考虑抗火特性时,以 CFRP 为例,碳纤维材料本身具有良好的耐火性能,在 1 000℃ 惰性气体中强度变化很小,但环氧类树脂存在软化点。通用型环氧树脂在 60℃ 以上,强度有明显下降,只有耐高温树脂才可以在 200~300℃ 的高温下正常工作,所以碳纤维材料的抗火性能主要取决于环氧类树脂的耐高温性能。当温度超限后,CFRP 与混凝土之间的粘结强度会迅速降低,从而影响两者之间的共同工作性能。因此,《碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程》中规定,当被加固结构表面有防火要求时,加固后碳纤维片材表面应根据防火要求涂刷防火涂料或采取其它有效防火隔热措施,以保证加固后建筑物能够达到防火规范规定的防火等级。与 CFRP 材料广泛应用于建筑结构加固修复相比,对 CFRP 加固混凝土结构的防火设计还没得到应有的重视^[16-18]。

(4) 高强混凝土

高强混凝土具有承载力高、耐久性好等优点,在结构中使用可以减小构件截面尺寸,增大建筑物的使用面积,改善建筑物的使用功能和美学效果,同时能起到减轻结构自重和提高剪跨比与长细比的作用,改善柱子的抗震性能。但由于高强混凝土材料本身的延性较差,采用时须慎重或与其他措施配合使用。火灾作用下高强混凝土构件的表面混凝土常常发生普通混凝土极少出现的爆裂(Explosive Spalling)破坏,导致构件截面削弱,截面温度场发生突变,并致使全部或部分钢筋直接暴露于高温环境而迅速软化,构件承载力明显降低。显然,这给高强混凝土结构的火灾安全带来了极大的危害。总体来看,普通混凝土试件表面的高温爆裂情况明显弱于高强混凝土试件。总之,采用高强混凝土在地震火灾的情况下不是一

种理想的抗灾措施, 如若采用, 需研究配合其它措施来实现抗灾目的。

3.2 相符设计因素分析

(1) 柱子所在位置

按同一楼层中的位置不同, 钢筋混凝土柱可以分为角柱、边柱和中柱。角柱一般为两面受火柱, 边柱为单面或三面受火柱, 而中柱则为四面受火柱。结果表明, 钢筋混凝土柱的耐火性能优劣顺序依次为相邻两面受火、三面受火和四面受火。震害的一般规律: 柱的震害重于梁, 角柱的震害重于一般柱, 中柱重于边柱, 柱上端的震害重于下端。所以综合得出中柱更需要做好抗震与抗火设计, 设计时应该考虑合理布置柱子所在位置, 对端部做好特殊处理。

(2) 纵向钢筋配筋率

纵向配筋率对轴压柱的耐火极限影响不大, 但随着配筋率的增大, 偏压柱的耐火极限却呈现出逐渐增长的趋势^[19]。柱的屈服位移角主要受纵向受拉钢筋支配, 并大致随拉筋配筋率的增大呈线性增大。为了避免地震作用下柱过早进入屈服, 并获得较大的屈服变形, 必须使柱的纵向钢筋配置不小于最小配筋率的要求^[14]。保证足够的纵向钢筋配筋率可以防止少筋破坏, 提高柱子的承载能力, 同时对提高抗震与抗火的能力有利。

(3) 混凝土保护层厚度

由于混凝土必须尽可能长时间地保护火灾中钢筋的整体性, 因而保护层的厚度和质量对于维护钢筋温度低于 450℃ 至关重要。保护层所有部分都必须振捣密实, 并在部分保护层进行耐火性能检测。即使是局部很小的裂缝缺陷, 也能危及钢筋混凝土结构的行为^[20]。混凝土保护层厚度增大, 构件内钢筋的温度降低, 强度降低幅度减小, 大偏心受压构件的耐火极限提高。但若保护层过大, 在高温下过早爆裂, 钢筋外露, 使情况更为不利。抗震中对混凝土保护层厚度的要求也是不宜过大与过小。考虑到实际工程中柱的混凝土最小保护层厚度大致为 25 ~ 40 mm, 过大的保护层厚度会使构件受力后产生的裂缝宽度过大。综合以上, 保证适度的保护层厚度对提高抵抗地震与火灾的能力都有利。

(4) 轴压比

轴压比是影响框架柱延性诸因素中最主要的因素。无论混凝土强度等级如何, 随着轴压比的增大, 试件的延性逐步减小, 极限位移角也变得越来越小^[21]。在长柱中, 轴压比越大, 混凝土受

压区高度越大, 压弯构件会从大偏压破坏向小偏压破坏过渡, 小偏压破坏的延性很小或者没有延性; 在短柱中, 轴压比增大也会改变柱的破坏形态, 会从剪压破坏变成脆性的剪拉破坏, 破坏时承载能力突然丧失^[14]。大量实验表明, 随着轴压比的增加, 柱的耐火极限迅速降低^[22]。总之, 控制轴压比在一定合理的范围内, 对抗震与抗火都有利。

4 结论

(1) 由于地震的破坏作用, 恶化了扑灭地震火灾的条件, 工程中应该吸取地震火灾造成巨大损失的教训, 设计时使结构兼顾抗震与抗火的特性。

(2) 通过对钢筋混凝土框架柱分别在地震与火灾作用下的破坏形式的归纳, 进而较全面地分析了分别抵抗两种灾害的设计因素, 得出抵抗两种灾害应该考虑的共同设计因素。

(3) 截面尺寸、箍筋率、FRP、高强混凝土属于相悖设计因素, 不能同时对抵抗两种灾害有利, 只着重考虑抵抗单一灾害的情况或者采用较好的补救措施时还可以采用。综合比较, 增加截面尺寸不是抗震与抗火的理想措施; 适当增加箍筋率与采用 FRP 加固措施对提高柱子的延性很有利, 可以通过在柱子表面涂刷防火涂料, 弥补抗火的不足; 采用高强混凝土对改善柱子抗震效果有限, 并且对抗火不利, 由此采用高强混凝土时要增加弥补措施。

(4) 相符设计因素有柱子所在位置、纵向配筋率、保护层厚度、轴压比、剪跨比、长细比等。这些因素对抵抗两种灾害的效果不一, 其中轴压比、剪跨比、长细比对抵抗两种灾害效果显著; 纵向配筋率仅能在满足承载力要求的基础上稍起辅助作用。由于这些因素都属于相符设计因素, 设计中都可采用, 根据实际要求, 发挥各自的优势。

参考文献:

- [1] Della Corte G, Landolfo R, Mazzolani F M. Post - earthquake fire resistance of moment resisting steel frames [J]. Fire Safety Journal, 2003, 96(38): 593 - 612.
- [2] 李耀庄, 苏玲红, 吴小华. 火灾下工程结构连续性倒塌分析与设计方法探讨[J]. 灾害学, 2010, 25(1): 89 - 92.
- [3] Mohammadiand J, Alyasin S. Analysis of post - earthquake fire hazard [C]//Earthquake Engineering. Tenth World Conference.

- Madrid, 1992.
- [4] 张宝, 陈宏德. 地震火灾事例调查[J]. 自然灾害学报, 1994, 3(4): 39-48.
- [5] 陈家夔. 钢筋混凝土框架柱的抗震性能[J]. 西南交通大学学报, 1990(2): 25-26.
- [6] 夏再海. 钢-混凝土组合结构的特点和应用[J]. 福建建材, 2007(1): 70-72.
- [7] 季倩倩, 杨林德. 地下铁道震害与震后修复措施[J]. 灾害学, 2001, 16(2): 32-33.
- [8] 时旭东, 过镇海. 高温下钢筋混凝土框架的受力性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(1): 38-45.
- [9] 李华东, 时旭东, 过镇海. 火灾下钢筋混凝土轴心受压柱的破坏特征和变形规律研究[J]. 特种结构, 1997, 14(1): 34-37.
- [10] 时旭东, 李华东, 过镇海. 三面受热钢筋混凝土偏心受压柱的试验研究[J]. 福州大学学报, 1996, 24(S0): 138-144.
- [11] 时旭东, 李华东, 过镇海. 三面受火钢筋混凝土轴心受压柱的受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 1997, 18(4): 13-22.
- [12] 时旭东, 李华东, 过镇海. 三面受火钢筋混凝土受压柱的极限承载力研究[J]. 工程力学, 1996(S0): 49-53.
- [13] 苏南, 林铜柱, Lie T T. 钢筋混凝土柱的抗火性能[J]. 土木工程学报, 1992, 25(6): 22-29.
- [14] 罗勇. 钢筋混凝土柱抗震设计要点[J]. 辽宁建材, 2004, 25(3): 36-37.
- [15] 李开江. 火灾作用后钢筋混凝土框架柱抗震性能计算机仿真分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- [16] Saadatmanesh H, Ehsani M R, Jin L. Seismic strengthen of circular bridge pier models with fiber composites [J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(6): 639-647.
- [17] 黄学杰, 童谷生, 梁进修. FRP 加固混凝土柱研究综述[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(5): 12-15.
- [18] 曾志长, 李耀庄, 唐毓, 等. 火灾高温下 CFRP 加固钢筋混凝土梁温度场分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2008, 28(1): 110-116.
- [19] 吴波, 洪洲. 钢筋混凝土柱的耐火极限研究[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(5): 119-126.
- [20] Mario Collepardi. 混凝土新技术[M]. 刘数华, 冷发光, 李丽华, 译. 北京: 中国建筑出版社, 2008: 328-329.
- [21] 张国军, 吕西林, 白国良. 周期反复荷载作用下高轴压比框架柱抗震性能的实验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(6): 70-75.
- [22] 吴波, 唐贵和, 王超. 不同受火方式下混凝土柱耐火性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007(4): 27-31.

Analysis of Factors in Designing Frame Columns for Earthquake and Fire Resistance

Li Yaozhuang, Shang Guolong, Wu Xiaohua and Xiong Wei

(Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: On the basis of introducing the devastating effects imposed by post-earthquake fire on structures, the damage forms of RC frame columns caused by earthquake and fire are analyzed. The inconsistent design factors and consistent ones and their evidences for RC columns when taking simultaneously both earthquake and fire resistance into account are discussed. Remedy methods in selecting in consistent design factors are provided. This conclusion plays an important guiding role in the design of RC frame column when taking simultaneously both earthquake and fire resistance into account.

Key words: post-earthquake fire; earthquake resistance; fire resistance; frame columns; design factors

下期要目

- 一些景观树对灾害天气事件的非对称响应 王 斐, 张继权
- 经常性暴雨内涝区域房屋财产脆弱性研究—以温州市为例 刘耀龙, 陈振楼, 王 军, 等
- 基于 Pushover 方法的中小学砌体结构抗震性能评估 王秋维, 史庆轩, 辛高伟
- 基于 GIS 的华东地区高温灾害危险性分析 张书娟, 尹占娥, 刘耀龙, 等
- 广西冻雨气候及天气形成的机理分析 唐 熠, 周文志, 奚广平
- 农牧交错带农业旱灾适应模式与区域可持续发展 张建松, 王静爱, 李 睿, 等
- 基于洪水演进数值模拟的溃坝危害性快速评估 谢俊举, 李亚琦
- 最优曲线投影动态聚类指标及在洪水分类中的应用 倪长健, 王顺久, 王 杰
- 新疆极端降水概率分布特征的时空演变规律 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 等
- 中国近代灾荒史理论探析 孙语圣, 徐元德
- 城市和农村社区防灾减灾手册和挂图的设计与编制 聂文东, 刘学敏, 张杰平, 等