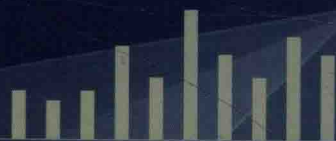


方钢管混凝土 巨型组合框架 地震损伤与倒塌分析

梁炯丰 · 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

方钢管混凝土巨型组合框架 地震损伤与倒塌分析

梁炯丰 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

方钢管混凝土巨型组合框架地震损伤与倒塌分析/梁炯丰著. —
武汉:武汉大学出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-307-17050-6

I. 方… II. 梁… III. 钢管混凝土结构—框架结构—抗震结
构—研究 IV. ①TU37 ②TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 248676 号

责任编辑:余 梦

责任校对:王小倩

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:武汉科源印刷设计有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:6^{*} 字数:80.4 千字

版次:2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-17050-6 定价:48.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系
调换。

前 言

随着我国经济持续高速发展、科技水平日益提高,全国各地的高层和超高层建筑陆续建成,而这些高层和超高层建筑大部分处于地震区,因此一旦其遭受地震作用并发生局部倒塌或整体倒塌,将会造成巨大的经济损失和人员伤亡,给社会带来惨重的伤痛。因此,建筑物在遭受强震作用下的倒塌破坏机理及防止问题成为了广大学者及工程师们密切关注的问题。

到目前为止,国内外学者们对多维强震作用下普通钢筋混凝土结构和钢结构的倒塌机理及其合理的计算方法取得了一些较系统的研究成果,为此类结构的发展作出了重要贡献。而对高层与超高层组合结构体系的抗震理论、倒塌机制和倒塌控制方法的研究却严重滞后于工程实践。在强烈的地震作用下,结构的整体坍塌或整体倾倒,对高层建筑来说是灭顶之灾,若倒塌不可避免,倒塌形式的控制则是高层和超高层建筑减小损失的最后手段。如果在设计时,将整个结构中不太重要的局部构件设计得相对薄弱一些,强烈地震时该局部发生破坏甚至倒塌,以此保全大部分结构不倒,无疑可减少生命和财产损失。因此,开展高层与超高层组合结构体系的倒塌机制与控制理论分析,合理地分析和评估高层与超高层组合结构体系的抗倒塌性能,建立其在强震作用下的损伤累积模型和失效破坏准则,提出相应的倒塌控制方法,对发展和完善我国高层与超高层组合结构体系抗倒塌设计分析理论、提高超高层建筑抵抗地震灾害的能力,以及提升我国土木工程行业科学技术水平具有重要意义。

本书主要内容包括方钢管混凝土柱的地震损伤模型、方钢管混凝土柱考虑损伤累积效应的地震损伤分析、方钢管混凝土框架节点地震损伤模型研究及方钢管混凝土巨型组合框架的地震倒塌分析。

本书的研究工作主要得到中国博士后基金项目(No. 2014M562132)、中南大学博士后基金项目(134381)的资助,同时要感谢国家自然科学基金项目(No. 51368001)、江西省自然科学基金项目(No. 20122BAB216005、

20142BAB216002)、江西省科技支撑计划项目(No. 20151BBG70012)、江西省教育厅基金项目(No. GJJ12393、GJJ13455)、江西省新能源工艺与装备工程技术研究中心开放基金项目(No. JXNE-2014-08)及广西防灾减灾与工程安全重点实验室开放基金项目(No. 2013ZDK01)的大力支持。

在本书的撰写过程中,作者的研究生王长诚、熊政、谢挺挺及本科生王增亮、王佳佳付出了很多努力,在此深表感谢!

同时感谢作者的老师、同事、家人、朋友等的帮助。

由于作者水平有限,书中可能有很多不足甚至错误之处,恳请读者批评指正。

梁炯丰

2015年8月6日

目 录

1 绪论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 建筑结构地震损伤模型	(2)
1.2.1 材料层次的损伤模型	(3)
1.2.2 构件层次的损伤模型	(6)
1.2.3 结构层次的损伤模型	(11)
1.3 建筑结构地震倒塌研究	(12)
1.3.1 建筑结构地震倒塌的研究方法	(12)
1.3.2 建筑结构地震倒塌的试验研究	(13)
1.3.3 建筑结构地震倒塌的仿真模拟研究	(15)
参考文献	(17)
2 方钢管混凝土柱的地震损伤模型	(24)
2.1 引言	(24)
2.2 基于刚度退化和耗能的方钢管混凝土柱地震损伤模型	(25)
2.2.1 方钢管混凝土柱在地震作用下的滞回特性	(25)
2.2.2 损伤模型的建立	(26)
2.2.3 损伤模型参数的确定	(27)
2.2.4 损伤的量化	(28)
2.2.5 损伤对比分析	(30)
2.3 损伤影响因素分析	(32)
2.4 结论	(34)
参考文献	(34)
3 方钢管混凝土柱考虑损伤累积效应的地震损伤分析	(36)
3.1 引言	(36)
3.2 考虑损伤累积效应的材料本构模型	(36)

3.2.1	考虑损伤累积效应的钢材本构关系	(36)
3.2.2	考虑损伤累积效应的混凝土本构关系	(40)
3.3	本构模型的验证	(43)
3.4	损伤累积效对方钢管混凝土柱地震反应的影响分析	(46)
3.5	方钢管混凝土柱损伤演化分析	(47)
3.6	结论	(49)
	参考文献	(49)
4	方钢管混凝土框架节点地震损伤模型研究	(51)
4.1	引言	(51)
4.2	方钢管混凝土柱-钢梁节点损伤模型研究	(51)
4.2.1	试验概况	(52)
4.2.2	试件损伤发展过程	(55)
4.2.3	试件损伤影响因素分析	(56)
4.2.4	损伤参数的确定	(57)
4.2.5	试验结果的损伤量化	(58)
4.2.6	损伤模型的提出	(62)
4.2.7	模型的验证	(62)
4.3	方钢管混凝土柱-钢筋混凝土梁节点损伤模型研究	(63)
4.3.1	试验概况	(65)
4.3.2	试件损伤发展过程	(67)
4.3.3	轴压比对损伤和位移的影响	(68)
4.3.4	损伤参数的确定	(69)
4.3.5	试验结果的损伤量化	(69)
4.3.6	损伤模型的提出	(72)
4.3.7	模型的验证	(72)
4.4	结论	(73)
	参考文献	(74)
5	方钢管混凝土巨型组合框架的地震倒塌分析	(76)
5.1	引言	(76)
5.2	考虑损伤累积效应的地震倒塌分析	(77)

5.2.1 分析模型	(77)
5.2.2 数值分析结果	(78)
5.2.3 倒塌全过程分析	(83)
5.3 结论	(85)
参考文献	(85)
6 结论及展望	(86)
6.1 结论	(86)
6.2 展望	(87)

1 绪 论

1.1 研究背景

地震灾害被认为是威胁人类生存及发展的最大自然灾害之一,其导致的建筑物破坏及倒塌为地震灾害的主要表现形式。历史和现实均表明,建筑结构的倒塌破坏是造成人员伤亡和财产损失的最主要原因。我国地震区域分布广阔,地震频繁而强烈。经有关统计,1902 年至今,我国发生 8 级及 8 级以上的强震就有十多次,21 世纪以来我国发生 7 级以上的地震就占全球大陆的 35%,其中发生在人烟稠密处者,更是损失惨重。1920 年宁夏海原发生 8.5 级巨震,造成 23 万人死亡,14 余万间房屋倒塌;1976 年河北唐山市发生 7.8 级强烈地震,几乎将唐山市夷为平地,造成 24 万余人死亡,530 万间房屋倒塌,经济损失达 100 亿人民币;1999 年台湾集集地震,震级为 7.6 级,死亡 2400 余人,大量建筑物和桥梁倒塌,直接经济损失达 92 亿美元;2008 年 5 月 12 日汶川发生 8.0 级巨震,共 7 万余人遇难,大量房屋倒塌,直接经济损失达 8451 亿元。

随着我国经济持续高速发展、科技水平日益提高,全国各地的高层和超高层建筑陆续建成,而这些高层和超高层建筑大部分均处于地震区,因此一旦其遭受地震作用并发生局部倒塌或整体倒塌,将会造成巨大的经济损失和人员伤亡,给社会带来惨重的伤痛。因此,建筑物在遭受强震作用下的倒塌破坏机理及防止问题成为了广大学者及工程师们密切关注的问题。

到目前为止,国内外学者们对多维强震作用下普通钢筋混凝土结构和钢结构的倒塌机理及其合理的计算方法取得了一些较系统的研究成果,为此类结构的发展作出了重要贡献。而对高层与超高层组合结构体系的抗震理论、倒塌机制和倒塌控制方法的研究却严重滞后于工程实践。在强烈的地震作用下,结构的整体坍塌或整体倾倒,对高层建筑来说是灭顶之灾,若倒塌不可避免,倒塌形式的控制则是高层和超高层建筑减小损失的最后手段。如果在设计时,将整个结构中不太重要的局部构件设计得相对薄弱一些,强烈地震时让该局部发生破坏甚至倒塌,以此保全大部分结构不倒,无疑可减少生命和财产损失。因此,开展高层与超高层组合结构体系的倒塌机制与控制理论分析,合理地分析和评估高层与超高层组合结构体系的抗倒塌性能,建立其在强震作用下的损伤累积模型和失效破坏准则,提出相应的倒塌控制方法,对发展和完善我国高层与超高层组合结构体系抗倒塌设计分析理论、提高超高层建筑抵抗地震灾害的能力,以及提升我国土木工程行业科学技术水平具有重要意义。

1.2 建筑结构地震损伤模型

地震作用是引发建筑结构倒塌破坏的重要原因。对有大量人群生活、聚集的高层建筑结构和跨度建筑进行倒塌分析,采取防止连续性倒塌的措施,正逐步成为结构设计的一项重要内容。结构设计的根本任务就是保证结构安全,防止结构倒塌则是保证结构安全的底线。防止结构倒塌破坏,将结构损伤控制在可接受的范围内,是结构工程理论和实践的重要主题。对建筑结构进行倒塌分析,就要对可反映结构或构件处于不同损伤程度的参数进行确定,从而建立可定量表达建筑结构损伤指标的合理损伤模型。损伤模型可表征材料、构件和结构不同的损伤程度,其可定义为结构或构件反应历程中某一指标累计量与相应指标极限允许

量之比,通常用 D 来表示,并且具有以下特征^[1,2]:

① D 的取值范围为 $0 \sim 1$, 当 $D=0$ 时,表示材料、构件、结构处于完好状态;当 $D=1$ 时,表示材料、构件、结构处于完全破坏状态;当 $0 < D < 1$ 时,表示材料、构件、结构处于不同损伤破坏状态。

② D 为一个单调递增函数,即损伤是不断增大的且不可逆。

目前,国内外将建筑结构的地震损伤模型具体分为:材料层次、构件层次、结构层次。

1.2.1 材料层次的损伤模型

材料损伤研究对象以材料学为基础,指在单调或重复加载作用下,材料本身的缺陷导致其黏聚力进展性减弱,最后导致体积单元破坏。材料损伤按模型尺寸和研究方法,可以分为微观模型、细观模型和宏观模型。微观模型是通过经典或量子统计力学方法来推测宏观上的损伤。而细观模型是通过几何和热力学过程中要考虑不同类型损伤的形状和分布,并可以预测到它们在不同介质中的产生、发展和破坏过程。宏观的损伤模型是建立在宏观尺度上的连续体力学和连续介质热力学,考虑了用物体内连续变化的损伤变量来描述损伤状态。

(1) 钢材的损伤模型

史一剑^[3]运用微观 GTN 损伤模型去研究建筑钢材力学性能。以微观 GTN 损伤本构理论为基础,使用有限元软件 ABAQUS 中的用户材料子程序 UMAT,识别出 Q345 低合金钢和奥氏体 304 不锈钢热轧无缝钢管两种钢材的材料参数和损伤参数。试验结果表明:钢材在单调与循环荷载下的力学性能有很大的区别。

文献[4]提出的低周疲劳和强度退化损伤理论来评估钢纤维的损伤,运用了以下公式:

$$D_{si} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{(2N_f)_j} \quad (1-1)$$

董宝等^[5]运用弹塑性损伤铰概念,提出了一种考虑损伤累积效应的空间钢构件非线性恢复力模型。试验测得的试件位移曲线和利用该模型计算的试件位移曲线进行对比,结果发现:试验位移曲线和计算的位移曲线吻合得较好,这说明考虑损伤累积效应的空间钢构件非线性恢复力模型是正确的。

徐龙河等^[6]提出了一个基于等效塑性应变和比能双控的损伤模型,通过模型对一个9层的 benchmark 结构进行了地震倒塌模拟分析,试验结果表明:基于应变与比能双控的损伤模型能够很好地评估强震下钢结构竖向构件及层的损伤发展过程。

范峰等^[7]编制了考虑损伤和裂纹效应的 ABAQUS 用户子程序对试验进行数值模拟,并且采用最小二乘法拟合得到圆钢管考虑损伤的材料本构模型,试验结果表明:数值曲线和试验曲线吻合良好。

(2) 混凝土的损伤模型

混凝土是由骨料、水泥和水组成的。混凝土养护后成为不均匀的集合体,其内部的微小裂隙导致混凝土损伤发展。混凝土本身就是一种脆性材料,其损伤过程是微裂缝的形成和传播的过程。在变形的初期,微裂缝的进展是非常慢的,弹性变形量大于残余变形,损伤缓慢进行着;随着变形的增大,微裂缝逐渐增多,表面出现新的裂缝,内部的残余变形增长,损伤也增加;又由于钢筋和混凝土之间的黏结滑移裂缝变大,最后损伤不断积累,结构就遭到破坏。

近30年来,出现的混凝土非线性本构模型主要有:非线性弹性模型、弹塑性模型、断裂力学模型、内蕴时间模型及作为断裂力学模型重要补充的损伤力学模型。

文献^[8]提出了 Kachanov 损伤模型,连续介质损伤力学将材料的损

伤描述为有效受力面积的减少,并且增加了有效应力的概念。

文献[9]提出了 Loland 受拉损伤模型,前提是假设材料为各向同性弹性体,损伤也是各向同性。通过假定有效应力和应变的表达式,对比受拉试验应力-应变全曲线得到了材料损伤演化方程。

文献[10]提出了 Mazars 损伤模型,给出了描述下降段曲线的方程,将含损伤变量的应力-应变曲线方程与试验应力-应变曲线方程比较得到了损伤变量的演化方程。

文献[11]提出了 Sidoroff 损伤模型,利用能量等价原理。用有效应力张量来替代柯西应力张量,耦合损伤与弹性,算出受损材料的弹性余能,最后运用热力学框架下的正交法从而得到损伤材料的应力-应变关系式。

文献[12]提出了 Krajcinovic 损伤模型,从自由能理论出发,参考塑性力学方法引入损伤面的概念,并且假定损伤演变速度的方向垂直于损伤面,导出了损伤本构方程及损伤演化方程。

张劲等^[13]为了统一 ABAQUS 混凝土损伤塑性模型与规范提供的混凝土本构模型,在规范提供的混凝土本构关系的基础上引入损伤因子的概念,研究了对混凝土损伤塑性模型本构关系参数的确定方法。用各等级混凝土本构关系参数模拟结果与规范曲线的对比,验证了 CDP 模型参数的正确性。

聂建国等^[14]利用 ABAQUS 中的混凝土弥散裂缝模型和塑性损伤模型,试验结果表明:塑性损伤模型的滞回规律比较符合实际。因此,在合理设置相关参数的情况下,塑性损伤模型可用于混凝土结构或组合结构在往复荷载作用下的受力行为模拟。

文献[15~18]根据不可逆热力学的基本原理,应该采用与损伤变量功共轭的热力学广义力-损伤能释放率建立损伤准则。

李杰等^[19]给定了弹塑性 Helmholtz 自由能和弹塑性损伤能释放率,

建立了符合热动力学基本原理的损伤准则,又采用正交法则得出损伤变量的演化法则,建立了一类完善的混凝土理论弹塑性损伤本构模型。

吴建营等^[20]将经典的混凝土弥散裂缝模型应用到一类基于能量的弹塑性损伤本构模型的统一理论框架中,并推导出剪切模量和剪力保持因子与受剪损伤变量的关系式;在多维应力状态下,应用该经典模型,解决了弥散裂缝模型中的参数经验取值问题;通过一个钢筋混凝土单向板的数值算例,验证了此模型的正确性。

宋玉普等^[21]根据内时理论和损伤力学建立了混凝土内时损伤本构模型。该模型具有以下特点:用内时理论说明混凝土的弹塑性特性,用损伤力学描述微裂缝;运用此概念可以简化非线性计算过程,并且损伤变量可以考虑微裂缝引起的软化、体积膨胀等效应,从而更好地反映混凝土的本质。

沈新普等^[22]提出了一个具有“应力三轴比”依赖的塑性损伤本构模型,在此基础上开发了用于本构局部水平上模型验证的计算机软件。试验结果的比较表明:该模型及相应的软件能有效地模拟混凝土材料的塑性损伤特性。

1.2.2 构件层次的损伤模型

(1)单参数损伤模型

单参数损伤模型是用单一的损伤参数及相应的容许能力来定义的,所以这类损伤模型也称为单参数准则。损伤指数表示单一的损伤参数和相应的极限容许能力的函数:

$$DM = f(\Delta_c, \Delta_k) \quad (1-2)$$

式中 DM ——损伤指数;

Δ_c, Δ_k ——损伤参数的计算值和极限容许值。

单一损伤参数一般选择结构的层间位移、延性系数、强度或割线刚度

等参数。理论上这些参数都存在一阈值,当损伤参数小于这一阈值时,说明结构没有损伤;当损伤参数大于这一阈值,而小于极限容许值时,结构处于任意损伤状态;而当损伤参数大于极限容许值时,结构完全破坏。

Powell 和 Allahabadi^[23]将单参数损伤模型定义为:

$$DM = \left(\frac{\Delta_c - \Delta_o}{\Delta_s - \Delta_o} \right)^\alpha \quad (1-3)$$

式中 α ——试验参数。

对于不同的 α , 损伤指数 DM 与损伤参数 Δ_c 的关系曲线如图 1-1 所示。

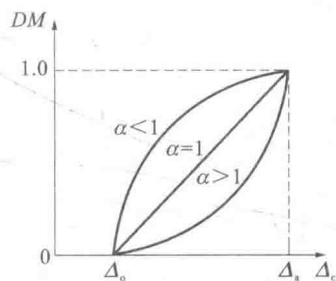


图 1-1 损伤指数 DM 与损伤参数 Δ_c 的关系曲线

文献[24]提出变形损伤模型,将损伤指数 DM 定义为:

$$DM = \frac{X_m - X_y}{X_u - X_y} \quad (1-4)$$

式中 X_y ——屈服变形;

X_m ——体系实际的最大弹塑性变形;

X_u ——体系的极限变形。

该模型无法反映结构在地震作用下的低周疲劳效应,也不能考虑循环变形对损伤的影响。

Newmark 等^[25]为了强调结构延性对结构抗震的有利作用,把损伤指数简化成一个简单的单参数准则:

$$DM = \frac{u_m - 1}{u_a - 1} \quad (1-5)$$

式中 u_m ——最大反应延性；

u_a ——单调加载下的极限延性。

它忽略了地震作用下的低周疲劳现象,不能真正反映出强度和刚度的变化。

Sozen 和 Bigger 等^[26]提出破坏比准则,即结构构件的初始切线刚度与最大变位处一个减小了的割线刚度之比:

$$DR = \frac{K_0}{K_r} \quad (1-6)$$

式中 K_0, K_r ——结构或构件的初始弹性线刚度和最大变位处的割线刚度。

文献[27]提出耗能损伤模型,并假设结构在循环加载下的滞回耗能等于单调加载下的最大耗能。将损伤指数 DM 定义为:

$$DM = \frac{E_h}{F_y(X_u - X_y)} \quad (1-7)$$

式中 E_h ——循环加载时的累积滞回耗能;

F_y ——体系的屈服力。

其余符号的意义同式(1-4)。

该模型的缺陷在于忽略了变形幅值对结构的破坏作用。

周知等^[28]对实际建筑进行了重复地震作用下的弹塑性时程分析,研究表明:单参数损伤指标不能较真实地反映结构在重复地震作用下的累积损伤效应,提出了基于位移和能量组合的 Park-Ang 损伤模型指标能较为合理地反映结构的这种累积效应。

(2) 双参数损伤模型

Ang Wen 和 Park^[29]基于一些美国和日本学者的钢筋混凝土梁柱试验结果,提出了钢筋混凝土结构的双参数地震破坏模型。破坏指标为:

$$DM = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{\int d\epsilon}{Q_y \delta_u} \quad (1-8)$$

式中 δ_m ——地震作用下构件的最大变形。

δ_u ——单调荷载作用下构件的极限变形。

Q_y ——构件屈服强度。

$\int d\epsilon$ ——累积塑性耗能。

β ——组合参数, β 在 0~0.85 变化, 均值在 0.10~0.15 变化, 按下式计算:

$$\beta = \left(-0.447 + 0.073 \frac{1}{d} + 0.24n_o + 0.314\rho_t \right) \times 0.7\rho_w \quad (1-9)$$

式中 $\frac{1}{d}$ ——剪跨比, $\frac{1}{d} < 1.7$ 时取 1.7;

n_o ——轴压比, $n_o < 0.2$ 时取 0.2;

ρ_t ——以百分比表示的纵筋配筋率, $\rho_t < 0.75\%$ 时取 0.75%;

ρ_w ——以百分比表示的体积配筋率。

按该模型虽然在弹性变形阶段可以算得非零的损伤值, 但该模型能很好地描述地震损伤产生的机理, 将其广泛运用于地震工程领域中。

杜修力等^[30]提出了一种更能正确地反映强度退化特性的双参数地震损伤评估表达式, 不同之处是从平均意义上考虑了滞回环累积幅值对累积损伤的影响。

吴轶等^[31]以 64 个圆钢管混凝土试件为试验基础, 提出基于刚度退化与滞回耗能指标的 S-E 双参数损伤模型, 结果表明: 此损伤模型计算曲线与试件实际损伤曲线吻合良好, 能合理评估构件不同阶段的损坏程度。

文献^[32]对于混凝土纤维的损伤变量, 采用了双线性损伤模型。采用 Kent-Scott-Park 本构模型来定义混凝土的各个力学性能参数, 见下式: