

玄武岩纤维布加固震损 砌体结构抗震性能研究

Research on Seismic Performance of
Seismically Damaged Masonry Structures
Retrofitted with External BFRP

雷真 著



云南大学出版社
YUNNAN UNIVERSITY PRESS

本书为云南省科技厅应用基础研究计划青年项目（项目编号：2015FD005）、云南省教育厅科学研究基金理工类重点项目（项目编号：2014Z008）、云南大学“东陆中青年骨干教师”培养计划项目阶段性成果

玄武岩纤维布加固震损砌体结构抗震性能研究

Research on Seismic Performance of
Seismically Damaged Masonry Structures
Retrofitted with External BFRP

雷真 著



云南大学出版社
YUNNAN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

玄武岩纤维布加固震损砌体结构抗震性能研究 / 雷真著. — 昆明 : 云南大学出版社, 2017
ISBN 978-7-5482-3096-0

I. ①玄… II. ①雷… III. ①砌体结构—抗震性能—研究 IV. ①TU209

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第196643号

出品人: 施海涛
策划编辑: 张丽华
责任编辑: 张丽华
封面设计: 郑明娟

玄武岩纤维布加固震损砌体结构抗震性能研究

Research on Seismic Performance of
Seismically Damaged Masonry Structures
Retrofitted with External BFRP

雷真 著

出版发行: 云南大学出版社
印 装: 云南报业传媒(集团)有限责任公司
开 本: 787mm×1092mm 1/16
印 张: 14
字 数: 274千
版 次: 2017年9月第1版
印 次: 2017年9月第1次印刷
书 号: ISBN 978-7-5482-3096-0
定 价: 35.00元

社 址: 昆明市一二一大街182号(云南大学东陆校区英华园内)
邮 编: 650091
电 话: 0871-65033244 65031071
网 址: <http://www.ynup.com>
E-mail: market@ynup.com

本书若发现印装质量问题, 请与印厂联系调换, 联系电话: 0871-64142540。

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 课题的研究背景及意义	(1)
1.2 震后房屋建筑安全性快速评估工作的发展现状	(4)
1.3 震损结构损伤评估与残余承载力评定方法概述	(5)
1.4 砌体结构的常用加固方法概述	(9)
1.5 国内外纤维复合材料加固砌体结构研究进展	(12)
1.5.1 FRP加固砌体结构的研究进展及工程应用	(13)
1.5.1.1 FRP加固未震损砌体结构	(13)
1.5.1.2 FRP加固震损砌体结构	(19)
1.5.2 纤维加固砌体结构研究中存在的问题	(21)
1.6 玄武岩纤维研究现状及其在加固工程中的应用	(24)
1.7 本书研究的主要内容和方法	(26)
第2章 震后砌体结构的损伤检测与鉴定	(28)
2.1 引言	(28)
2.2 震后砌体结构损伤检测和评估流程	(28)
2.3 震后砌体结构损伤应急评估	(28)
2.4 震后砌体结构损伤检测	(32)
2.4.1 震后砌体结构损伤的现场检测	(32)
2.4.2 震后砌体结构损伤程度评定	(33)
2.5 震后砌体结构残余抗震承载力的快速评定	(36)
2.6 基于残余变形的震后砌体结构残余抗震承载力评定	(38)
2.6.1 基于残余变形的常用无量纲及相关影响因素	(39)
2.6.2 基于残余变形的震后砌体结构残余抗震承载力精度修正	(40)
2.7 小 结	(46)

第3章 玄武岩纤维加固震损砌体砖墙抗震性能研究	(47)
3.1 引 言	(47)
3.2 试验设计	(48)
3.2.1 试件制作	(48)
3.2.2 材料强度	(50)
3.2.3 试验装置与加载制度	(52)
3.2.4 测点布置及测试内容	(53)
3.3 预损伤试验	(54)
3.4 试件修复及加固	(55)
3.4.1 砖墙修复	(55)
3.4.2 粘贴玄武岩纤维布	(56)
3.5 试验现象	(57)
3.5.1 主要受力过程	(57)
3.5.2 破坏模式分析	(66)
3.6 试验结果分析	(69)
3.6.1 滞回曲线与骨架曲线	(69)
3.6.2 强度与变形特征值	(74)
3.6.3 延性及变形性能	(77)
3.6.4 变形恢复能力	(79)
3.6.5 刚度退化	(81)
3.6.6 承载力退化	(82)
3.6.7 恢复力模型	(83)
3.6.8 耗能能力	(86)
3.6.9 粘滞阻尼系数	(87)
3.6.10 玄武岩纤维应变分析	(88)
3.7 玄武岩纤维加固震损砌体墙体承载力分析	(93)
3.7.1 国内外 FRP 加固砌体墙体抗剪承载力计算方法	(93)
3.7.2 玄武岩纤维加固墙体抗剪计算	(96)
3.7.2.1 玄武岩纤维加固砌体墙体机理分析	(96)
3.7.2.2 震损(修复)后砌体墙体承载力折减系数	(97)
3.7.2.3 FRP 加固砌体墙体的改进模型	(99)
3.8 计算公式验证	(105)
3.9 小 结	(107)

第4章 玄武岩纤维加固震损砌体结构振动台试验研究	(110)
4.1 引 言	(110)
4.2 试验目的	(112)
4.3 模型设计与制作	(112)
4.3.1 相似常数的确定	(113)
4.3.2 模型结构设计及施工	(114)
4.3.3 模型制作及加固修复材料力学性能指标	(122)
4.4 砌体模型结构预震损振动台试验研究	(125)
4.4.1 测点布置	(125)
4.4.2 地震波选取	(126)
4.4.3 加载制度	(128)
4.4.4 模型结构预震损试验过程	(129)
4.5 砌体模型结构震损后加固振动台试验研究	(132)
4.5.1 模型修复	(132)
4.5.2 玄武岩纤维布加固砌体模型	(134)
4.5.3 测点布置	(137)
4.5.4 地震波选取及加载制度	(137)
4.5.5 模型结构震损后加固试验过程	(138)
4.6 模型结构抗震性能分析	(141)
4.6.1 模型结构的自振频率和阻尼比	(141)
4.6.2 模型结构的振型	(146)
4.6.3 模型结构的加速度反应	(147)
4.6.4 模型结构的惯性力分布	(151)
4.6.5 模型结构的剪力分布	(153)
4.6.6 模型结构的位移反应	(156)
4.6.7 玄武岩纤维布应变值	(161)
4.7 纤维加固(震损)砌体结构构造措施	(170)
4.8 小 结	(171)
第5章 基于 ABAQUS 的 BFRP 加固砌体结构非线性有限元分析	(173)
5.1 引 言	(173)
5.2 玄武岩纤维加固砌体结构模型的建立	(174)
5.2.1 有限元模型及单元选取	(174)
5.2.2 材料本构及相关参数	(175)

5.2.2.1 砌体材料参数 (175)

5.2.2.2 混凝土材料参数 (179)

5.2.2.3 钢筋材料参数 (179)

5.2.2.4 玄武岩纤维材料参数 (179)

5.2.3 接触方式 (180)

5.3 数值模拟结果及试验对比 (182)

5.3.1 动力特性分析 (182)

5.3.2 地震反应分析 (183)

5.3.2.1 受力特性分析 (183)

5.3.2.2 位移反应分析 (185)

5.3.2.3 加速度反应分析 (189)

5.3.2.4 最大基底剪力对比 (191)

5.3.3 模型结构损伤分析 (193)

5.4 小 结 (199)

第6章 结论与展望..... (200)

6.1 主要结论 (200)

6.2 展 望 (202)

参考文献..... (203)

第1章 绪 论

1.1 课题的研究背景及意义

我国地震活动频度高、强度大、震源浅、分布广，是一个震灾严重的国家。1900 年以来，中国死于地震的人数达 55 万之多，占全球地震死亡人数的 53%；1949 年以来，100 多次破坏性地震袭击了 22 个省（自治区、直辖市），其中涉及东部地区 14 个省份，造成 27 万余人丧生，占全国各类灾害死亡人数的 54%，地震成灾面积达 30 多万平方公里，其中房屋倒塌数量高达 700 万间。^[1]在众多建筑结构形式中，砌体结构是应用范围最广的结构形式之一。我国约有 80% 的工业与民用房屋采用砌体结构建造，其中民用房屋则有 90% 以上采用了砌体结构。^[2]目前，我国五六层的房屋多为混合结构，即墙体采用砖砌体、楼屋盖采用钢筋混凝土这种形式。与其他结构形式相比，砌体结构自重大、自振周期短、强度较低、延性较差，导致其在地震作用下的破坏程度往往是最严重的，并在震后损伤建筑中占有较大比重。地震灾害给人们的生存带来了不可估量的危害，同时也造成了巨大的生命财产损失。因此，地震灾害的预警与震后建（构）筑物的检测鉴定、损伤评估和震后灾区建（构）筑物的修复加固组成了我国防灾救灾战略中的关键内容之一，也成了防灾救灾或生命线工程的重点。

建（构）筑物在地震作用下，结构将受到不同程度的损伤或破坏，有时甚至会引起整个结构的失效甚至倒塌，从而带来更严重的生命财产损失。目前国外已经发展了多种方法和技术对震损结构进行检测鉴定、受损程度评估和加固，但对建筑结构受灾后，受损结构系统的检测分析、残余承载能力评定方法以及受损结构加固技术的综合研究在国内还不够成熟。

就地震而言，发生地震时大多数建筑结构均会遭到不同程度的损伤，但有的结构受到的损伤非常轻微，无需修复或加固，而有的结构需要简单修复或需要进行加固后才能继续安全使用，受损非常严重的结构则需要拆除重建。根据我国《建（构）筑地震破坏等级划分标准》^[3]，建（构）筑地震破坏程度划分为五个等级（Ⅰ级：基本完好；Ⅱ级：轻微破坏；Ⅲ级：中等破坏；Ⅳ级：严重破坏；Ⅴ级：毁坏）。然而，由于建筑结构灾害工程学起步较晚，地震后建筑结构的检

测鉴定与震损结构的加固工作尚不成熟,在过去实际灾后恢复重建阶段,对于Ⅲ~Ⅴ级三类震损砌体建筑灾后重建中常用处理方法是推倒重建,这种处理的方式不仅大大增加了重建工作量,而且还造成巨量的难以处理的建筑垃圾。因此,合理评估震后建筑材料、构件和结构的损伤程度,并针对砌体结构不同的损伤程度,提出经济适用而又能满足使用要求的修复加固方法,将产生较大的经济和环境效益。

除了地震灾害,我国现有的砌体结构建筑大多是在2000年以前建造,这些建筑由于年久失修、设计或施工差错、自然灾害、建筑物进行改建和扩建等因素,使结构产生开裂损伤,不能满足现行抗震设防要求,为了减少地震作用带来的损失,均需对其进行损伤评估和加固修复。

对既有或震损结构采用有效、经济、可行的损伤检测方法和残余承载力快速评定方法,能够为既有或震损砌体结构的安全性评估与修复加固提供有效的参考依据。近年来,我国也出台了相关的检测鉴定技术规程或规定,对既有建筑的检测鉴定技术作了相关的介绍和规定,这对于结构检测鉴定技术的推广与应用具有重要的意义,但是这些技术规程或规定主要适用于普通既有建筑的检测鉴定,而不能完全适应震损结构的损伤检测与安全性快速评估的要求。因此,开展震后砌体结构损伤检测与震损砌体结构残余承载能力快速评估的研究,以判断该结构是否安全、是否需要加固或立即拆除重建,可为灾后恢复重建和震损结构的修复加固提供有益的参考。

到目前为止,国内外对于砌体结构加固技术的研究主要集中在未损伤砌体结构,研究对象主要为砌体承重墙体,对于震损砌体结构构件或整体的修复加固研究鲜有报道。历次震害调查表明,地震灾害会导致大量的结构损坏甚至倒塌,因此震后结构的快速损伤评定和结构的加固补强显得尤其重要。目前,很多国家加固规范都未考虑到构件的初始损伤因素,我国现行加固设计规范中也未考虑加固前的损伤状态对加固后承载力、刚度、延性等方面的影响。结构在受到不同程度的初始损伤后,其受损程度对结构的加固效果会有不同程度的影响,而且受损程度对加固效果的影响又因加固方法的不同而异。若结构在地震过程中受到损伤,此时仍然按照规范中的理论和方法进行设计,必然会导致被加固的构件偏于不安全。因此开展震损结构加固技术的理论与试验研究(构件和整体加固),考虑结构的初始损伤对加固效果的影响,建立基于初始损伤的震损结构加固的力学模型和加固设计方法,则具有较强的理论和现实意义。

砌体结构中,墙体为主要承重构件。在外荷载作用下,砌体结构主要震害表现为承重墙体开裂,砌块压碎,导致整个砌体结构承载力下降,甚至发生倒塌。对于砌体结构,常用传统的加固方法有:水泥灌浆法、加大截面法、钢筋网水泥

砂浆（或混凝土）面层、增设抗震墙、外加圈梁、设置构造柱等。这些加固方法的缺点是：施工难度大、周期长、增加结构自重以及加固后影响结构外观。与传统加固方法相比，粘贴纤维复合材料（Fiber Reinforced Polymer/Plastic，简称FRP）作为一种新兴加固技术，具有不增加结构自重及体积、不改变截面形状、最大限度地不影响结构外观、高强高效、施工方便、耐腐蚀以及耐久性好、适用面广等优点，并且在不明显改变结构刚度的情况下，可显著提高构件的抗弯、抗剪承载力，改善结构的延性、抗震性能。^[4] 粘贴纤维复合材料是正在广泛研究试用的一种加固方法，其在混凝土结构中已较广泛应用，并有了相应的技术规程。但是在砌体结构的加固中，最近几年才开始引起工程加固研究人员的关注，仅有一些探索性研究。因此，该加固方法在砌体结构加固中未得到广泛应用，在震损砌体结构加固中的研究仍处于探索研究阶段。

目前，国内外常用于结构修复加固的纤维增强复合材料主要有碳纤维增强复合材料（CFRP）、玻璃纤维增强复合材料（GFRP）、芳纶纤维增强复合材料（AFRP）。与普通钢材相比，FRP材料密度仅为钢材的25%左右，弹性模量约为普通钢筋的25%~70%，而抗拉强度可达到普通钢材的8~10倍。^{[5][6][7]} 由于CFRP具有高抗拉强度、高弹性模量，所以在几种主要FRP材料中应用最为广泛，但CFRP依赖进口，价格贵且原材料受到国外市场波动影响较大，加固构件易发生脆性破坏。GFRP和AFRP价格相对便宜，但抗拉强度和弹性模量略低，而且耐高温、抗碱性能差，在一定程度上制约了其广泛应用。玄武岩纤维增强复合材料（BFRP）作为一种新型的高技术无机纤维，在原料来源、综合延性、耐腐蚀性及抗高温性等方面具有一定的优势，且价格仅为碳纤维的1/5~1/6。^{[8][9][10][11]} 目前BFRP仅在钢筋混凝土结构及木结构加固中有过初步试验研究，在砌体结构修复加固工程中尚未得到推广应用。

以5·12汶川地震为例，此次地震给灾区人民的生命财产带来了巨大损失，从房屋破坏情况和倒塌的现状来看，大多数房屋的平面布置、结构形式和抗震构造措施等都很难以满足目前抗震设计规范的要求，在这次地震中破坏尤为严重。根据清华大学等专家组的统计资料^[12]，汶川地震中应当“停止使用”和“立即拆除”的房屋比例达到42%，加固后才能继续使用的房屋比例高达37%。因此如何对大量震损砌体结构（轻微、中等甚至是严重破坏）通过修复加固使其满足现行规范的技术要求是摆在当前灾后重建工作人员面前的一项迫切任务。

本研究以汶川地震中的震害为工程背景，开展了玄武岩纤维布加固震损砌体砖墙构件及整体模型试验研究，研究玄武岩纤维布加固严重震损砌体结构的抗震性能，为玄武岩纤维布加固砌体结构技术的应用和推广提供一定的试验和理论依据。

1.2 震后房屋建筑安全性快速评估工作的发展现状

在灾后恢复重建阶段,政府的首要工作就是对灾区房屋的受损情况及安全性做快速评估。一般而言,快速评估的结论主要包括:对于严重倒塌或没有加固价值的建筑建议立即拆除;对无损伤或损伤轻微建筑仅需做简单修复或不需要修复处理即可继续安全使用;对损伤比较严重,但是加固后可以安全使用的建筑,还需要做进一步的抗震鉴定,根据鉴定结果提出加固补强方案。灾后快速评估的主要任务就是对受灾区房屋的受损情况做快速分类和排查,避免今后造成更大的人身与财产损失,为下一步修复加固工作提供真实可靠、有效的依据。

目前,日本及欧美一些国家在震后房屋损伤情况的现场快速评估方面制定了相应的工作指南和评估流程,用于指导现场损伤评估工作。^{[13][14][15][16][17][18][19]}我国也制定了有关地震现场工作技术标准和危旧房屋评定标准^{[20][21][22]},但是与国外现有的这些成果比起来仍存在较大的局限性,同时评定程序不清晰、评定标准未细化,这将导致评估人员的主观因素对评估结果影响较大,且评估结果精度较低。

由于影响结构损伤程度的因素相当复杂,国外研究学者对灾后房屋安全性的快速评估,都是基于结构整体或构件的表观破坏现象(裂缝宽度、破坏程度描述等),同时结合个人经验和感官而做出评估判断。^{[23][24][25][26]} Anagnostopoulos^[27]以填表(EDIF – Earthquake Damage Inspection Form)的方式,综合结构构件类型、损伤程度和损伤范围,采用绿、黄、红颜色分别表示安全可用、修复加固后可用、不可继续使用三种不同安全性类型房屋。Thakur^[28]、Nakano^[29]和 Horie^[30]、Kaminosono^[31]对尼泊尔、日本、土耳其的局部地区震后房屋也分别采取了类似的快速评估方法。Dolce^[32]在安全性快速评估中考虑了房屋外部影响因素(相对或相邻是否存在严重损伤房屋、山石坠落等),对安全性等级的划分较精细,等级颜色标记选取也更为丰富。Vidal^[33]为中小城镇震后房屋安全性快速评估提出了 Quick – PEBSA 和 Rapid – PEBSA 两种方法:前者主要用于明确严重损伤和倒塌的房屋数量和位置,为灾后紧急救援、物质输送等提供帮助;后者以传统的评估程序,但采用不同的评定方法将房屋安全性等级划分为四种类型。国内少数研究学者仅对个别灾后现场房屋有过调查,并未对灾后房屋安全性的快速评估做系统的研究。

为了便于更好地开展震后房屋安全性的快速评估工作,本课题在总结和结合国内外地震现场建筑物安全性快速鉴定技术的基础上,制定了震后砌体结构损伤检测与应急评估流程、现场检测的依据及要求、结构综合损伤程度评定标准和震后砌体结构残余抗震承载力的快速评定方法,为震后砌体结构的安全性快速评估提供有益参考。

1.3 震损结构损伤评估与残余承载力评定方法概述

震后房屋建筑安全性的快速评估只能定性地评估结构的受损情况,大致判断受损房屋的现状,而无法定量地评定结构的损伤程度。因此,如何定性定量地评定结构的损伤程度和震损结构的残余抗震承载能力,一直是地震工程领域的一个关键而又难以解决的问题。进行震损结构损伤评估的最终目的是建立对构件甚至整个结构在地震作用下所遭受损伤程度的定量评估标准。因此,客观合理地评估震损结构的损伤系数对建筑物的残余承载力评估、修复和加固具有重要的理论和现实意义。

对在地震作用下的损伤结构进行直接观察并对其损伤统计分析属于经验的损伤评估方法,这种方法比较直观,但是由于其没有考虑到材料在较大的非弹性循环变形下的力学性能,同时未考虑到现代建筑体形复杂、尺寸较大,因此它不能很好地应用到实际结构损伤评估中。国内外的学者在对结构在地震作用下的损伤性能进行了比较深入的研究后,提出了一系列量化的损伤评估模型。采用损伤指数及其数学模型来对结构的损伤程度进行描述,简明扼要。目前对结构损伤的评估可以从建筑材料、单个构件、整体结构三个层次上进行讨论。^[34]在材料层次上建立了材料的损伤本构方程,并由此可得出构件材料损伤的力-变形指标;在构件层次上,主要在极限位移的超越和塑性累积损伤组合效应的基础上建立了构件损伤评估模式;在整体结构的层次上,研究了结构损伤的组合方式和整体损伤指标的确定。

损伤指数是用来描述结构、构件或材料受损程度的变量,一般定义为结构或构件反应历程中某一指标累积量与相应的指标极限允许量之比。其具体有如下性质:损伤指数的范围宜在 $[0, 1]$ 之间,当 $D = 0$ 时,对应于无损状态,当 $D = 1$ 时,意味着结构或构件完全破坏;损伤指数随着结构损伤程度的发展而增大。

由于影响结构损伤程度的因素相当复杂,人们对结构损伤程度采用许多方法进行描述:采用损伤和无损来粗略地对结构的损伤状态进行分析。采用这种方法来对结构的损伤进行评估较为笼统。国内外的损伤状态一般对结构的损伤状态定性分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、完全破坏五类。目前,国内外对损伤指数的常用求解方法有以下几种^[35]:

1. 整体损伤指数对结构进行损伤评估

结构的综合损伤可以从整个结构或构件上考虑,从构件上考虑要比从整个结构上考虑更能获得详细的信息。另外,如果损伤分布不均匀的话,从整个结构水平上得出的损伤指标可能不符合实际。^[36]通过对局部构件的损伤指数进行加权组合而获得整个结构的总体损伤指数,即:

$$D = \sum (W_i D_i) / \sum W_i \tag{1.1}$$

式中 W_i 是构件 i 的损伤权值, 该值是指构件 i 在整个结构中的重要程度。Park 等^[43] 把权值 W_i 取为 $W_i = D_i$, 以表示损伤越严重的构件对结构整体的损伤贡献越大。但是采用这种加权系数方法进行评估, 未考虑到结构局部损伤的集中, 对构件进行评估时没有进行分别考虑, 更重要的是由于权系数选择和所依据震害、试验资料的差异, 最后所得结构损伤等级所对应的结构损伤指标并不统一^[34], 见表 1.1, 也不能完全反映构件损伤指标对结构整体损伤指标的影响。

表 1.1 不同损伤等级的结构损伤指标 D

损伤等级 研究者	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
牛获涛等 ^[37]	0 ~ 0.20	0.20 ~ 0.40	0.40 ~ 0.65	0.65 ~ 0.90	>0.90
刘柏权等 ^[38]	0 ~ 0.10	0.11 ~ 0.30	0.31 ~ 0.60	0.61 ~ 0.85	0.86 ~ 1.00
欧进萍等 ^[39]	0.10	0.25	0.45	0.65	0.90
江近仁等 ^[40]	0.228	0.254	0.420	0.777	1.000
Ghobarah 等 ^[41]	0 ~ 0.15		0.15 ~ 0.30	0.30 ~ 0.80	>0.80
Park 等 ^[43]	0 ~ 0.40 (可修复)			0.40 ~ 1.00 (不可修复)	≥1.00

2. 从结构的累计损伤方面考虑

一般可以通过标准累积转角来对结构损伤进行评估, 这种方法的评估结果取决于地震的强度和持续时间。Banan 等^[44] 对梁柱构件承受循环荷载的统计分析数据表明, 标准累积转角仅取决于结构非弹性变形的累积和能量耗散, 不能对结构损伤累积的复杂过程进行描述。Stephens^[45] 等则以下式对结构损伤性能进行评估:

$$D = \sum \frac{|\Delta \delta_{pt}|}{\Delta \delta_{pf}} \bigg|^{-br} \tag{1.2}$$

式中 $\Delta \delta_{pt}$ 为结构正方向塑性位移的增量; $\Delta \delta_{pf}$ 为结构在单次循环试验失效时的最大正方向塑性位移; b 为变形比值系数, 一般取 0.77; r 为结构正、负方向塑性位移增量的比值。

从累计方面来考虑结构的方法一般只能考虑到引起结构损伤产生的某一因素, 不能考虑到结构损伤的复杂过程。

3. 从结构的变形方面考虑

最简单的是通过层间位移角来对结构的损伤进行评价。层间位移角是结构层

间的相对最大位移与层高的比值,按照 Sozen^[46]的观点,结构的损伤情况可以用下面的公式计算:损失率 = $50 \times (\text{最大层间位移角}) - 25$ 。Sozen 通过试验分析得知,当层间位移角小于 1% 时,建筑物仅仅发生非结构构件的损伤;当层间位移角大于 4% 时,建筑物就会发生不可修复的破坏或倒塌;当层间位移角大于 6% 时,建筑物就会发生倒塌。与基于延性比的损伤分析类似,通过层间位移角来对结构损伤进行评估也没有考虑到由于非弹性变形产生的累积损伤的影响。

基于结构最大永久侧移与结构的塑性变化有关,Stephens 和 Yao^[45]引入了一种较为简单的定性损伤评价方法,把损伤定义为四种情况:(1)当楼层侧移小于 1% 且结构没有永久侧移时,结构是安全的;(2)当结构的永久侧移达到了层高的 0.5% 时,结构轻微损伤;(3)当结构的永久侧移超过了层高的 1% 时,结构产生破坏;(4)当结构的顶层位移与结构的底部剪力的关系不太协调时,结构达到临界破坏状态。

Powell 和 Allahabadi^[36]则认为结构损伤可以通过变形的方法来计算:

$$D = \sqrt{\frac{u - u_y}{u_{\max} - u_y}} \quad (1.3)$$

式中 u_y 、 $u_{\max}$ 分别为结构屈服时和达到极限状态时的顶点位移。由于地震的反复作用,结构的性能是逐步发生退化的,通过变形来对结构损伤进行评估的方法虽然简单,但是没有充分反映地震持续时间对结构弹塑性反应的影响和结构在多次反复荷载作用下的低周疲劳现象。

4. 从结构的变形和累积损伤综合考虑

Park 和 Ang^[43]认为,结构构件的损伤指数与地震作用时构件的最大变形与能量有关,提出了:

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \frac{\beta}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (1.4)$$

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \int \left[\frac{\delta}{\delta_u} \right]^\alpha - \frac{dE}{E_c(\delta)} \quad (1.5)$$

式中 δ_m 为实际荷载作用下最大变形; δ_u 为单调荷载作用下最大变形; Q_y 为屈服强度; α 、 β 为非负参数; dE 为吸收滞回能量; $E_c(\delta)$ 为在每一循环时,结构的变形为 δ 时的滞回能量。式 (1.4) 适用于单调荷载的作用,式 (1.5) 适用于循环荷载的作用。这种方法的缺点是在对结构损伤进行评估时,结构的滞回耗散能力的大小很难计算, δ_u 也不好确定。

Rodriguez^[47]在文中提出:

$$D = \frac{\gamma^2 E_H}{(\omega^* H D_{rd})^2} \quad (1.6)$$

式中 E_H 为结构滞回能量综合; $D_{rd} = \frac{\delta_m}{H}$, 其中 δ_m 为结构顶层的最大位移, H 为结构高度, 可近似取 $D_{rd} = 0.01H$; $\omega^* = 2\pi/T^*$, T^* 为结构的基本周期; γ 是一个参数, 对于规则框架结构取值范围为 1~5。该公式考虑了多层结构在地震作用下的滞回能量耗散情况, 同时也反映出了结构的最大侧移。

5. 从结构刚度退化考虑

在地震的作用下结构的自振周期会增大, 意味着结构的损伤在某种程度上是由于刚度退化而造成的。Roufaei^[48] 等提出修正弹性损伤系数 $MFDR$, 其直接通过结构的刚度退化来对结构构件损伤进行评估:

$$MFDR = \frac{k_f(k_m - k_o)}{k_m(k_f - k_o)} \quad (1.7)$$

式中 k_f 、 k_m 分别为对结构施加荷载后失效时及达到结构最大变形时的割线刚度; k_o 为结构的初始割线刚度。该方法计算简单, 但是忽视了结构的地震破坏要经历一个塑性变形发展的过程, 无法正确分析结构在地震中实际存在的最终破坏状态, 没有考虑到循环反复荷载作用下结构的累计损伤。

Ghobarah^[41] 等通过对结构进行两次推覆分析, 首先在结构承受地震作用以前对结构进行推覆分析, 当结构承受地震作用后, 等结构恢复到无荷载的静力状态时, 再对结构进行一次推覆分析, 这样就得到如下损伤评估公式:

$$D = 1 - \frac{k_{final}}{k_{initial}} \quad (1.8)$$

式中 $k_{initial}$ 、 k_{final} 分别是结构承受地震作用前、后进行推覆分析所得的基底剪力与顶部位移曲线的斜率。该损伤模型具有以下特点: (1) Push-over 分析是采用逐步线弹性静力分析手段来描述结构非线性, 使用简便; (2) 可以计算出结构在不同加载状态下的损伤值, 而不需要估计结构达到最大位移时或结构临近倒塌时的变形; (3) 可以提供识别单元损伤程度的信息以及描述单元损伤直到倒塌的发展过程; (4) 不需要加权平均就可以获得各个构件和整个结构的损伤值。该评估方法需要进行大量计算, 并受到分析技术水平的影响。

为了同时考虑刚度退化及塑性变形, Yazgans^[42] 提出基于残余变形的结构残余抗震承载力评定方法, 该方法类似于 Ghobarah^[41] 提出的式 (1.8), 也认为损伤结构的残余承载力体现在结构刚度退化程度上, 唯一区别在于震损后结构刚度的求解, 损伤评估公式为:

$$D = 1 - \frac{K_r}{K_0} \quad (1.9)$$

式中 K_0 为结构的初始刚度, K_r 为结构损伤后的刚度。在结构构件或整体的滞回骨架曲线或 Pushover 曲线中, 将结构经历的最大位移、现场量测的结构残余位移坐

标点相连直线的斜率即为损伤结构的刚度 K_r ，如图 1.1 所示。

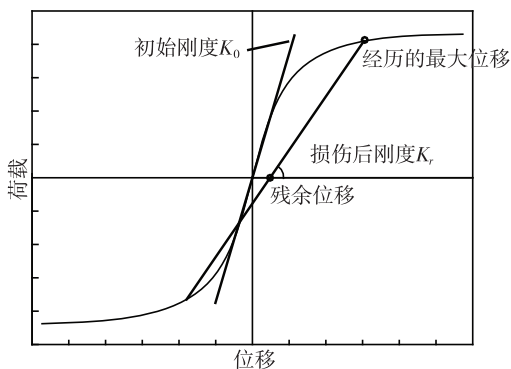


图 1.1 损伤砌体结构的刚度计算

1.4 砌体结构的常用加固方法概述

砌体是把块材（普通粘土砖、空心砖、砌块和石材等）和砌筑砂浆通过砌筑承重材料结合在一起的砌体结构。和混凝土相比，砌体虽有一定的抗压强度，但其抗拉、抗剪、抗弯能力均很低。这就导致砌体结构尤其是无筋砌体结构整体性较差，承载力较低，极易在外荷载作用下出现开裂。

砌体结构一般在下列情况下需要进行修复或加固：地基不均匀沉降、墙体产生沉降裂缝；气温或环境温度温差太大，砌体产生温度裂缝；局部砌体墙、柱承载力不足；墙体错位、变形引起墙体开裂；由于设计构造不当（如沉降缝设计不当、新旧建筑连接不当、留大窗洞的墙体构造不当等）引起墙体开裂；由于块材、砂浆质量不良、施工质量低劣而引起墙体开裂；由于房屋改建加层而使原砌体房屋承载力不足；在抗震设防区经抗震鉴定，房屋抗震设计不满足要求或房屋抗震构造措施不满足要求；在地震发生后，受损房屋的修复和加固。^[49]

在欧美发达国家中，目前用于建筑加固改造的投资已占国家建筑业总投资的一半以上。我国从 20 世纪 50 年代就开始进行混凝土结构的加固处理并积累了丰富的实践经验。近年来，随着相关加固规范相继颁布，大大推动了混凝土加固技术的发展和运用。相对于混凝土结构，砌体结构的加固多采用传统方法，新技术、新材料的应用较少，试验、理论仍存在较大空白。常用加固方法有以下几种^[49]：

1. 注浆修补加固法

灌浆法将胶结材料压入裂缝中，胶结材料硬化后与砌体形成一个整体，从而起到封堵加固的目的。常用的胶结材料有水泥浆、环氧树脂、甲基丙烯酸酯、聚