



山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

山地建筑结构 基本概念与性能

李英民 刘立平 韩 军 著



科学出版社

7613
351

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

山地建筑结构基本概念与性能

李英民 刘立平 韩 军 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

山地建筑结构是指结构底部的嵌固端不在同一水平面上且不能简化为同一水平面的结构,其具有契合边坡地形、减少环境扰动的优点,但其结构先天不规则性、受边坡影响等则又对结构设计提出了新的要求。本书提出山地建筑结构概念,分析了典型山地建筑结构的动力特性、受力特点和变形特征,主要内容有:山地建筑结构的定义、山地建筑结构的分类、山地建筑结构的震害及分析;山地建筑结构设计中的特殊问题;掉层山地建筑结构的动力特性分析、山地建筑结构的弹性力学性能和变形特征、山地建筑结构的弹塑性力学性能和变形特征、山地建筑结构的拟静力试验等。

本书可供从事建筑结构设计的专业技术人员参考,也可供土木工程技术人员、设计人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

山地建筑结构基本概念与性能/李英民,刘立平,韩军著. —北京:科学出版社, 2016

(山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列)

ISBN 978-7-03-043508-8

I. ①山… II. ①李… ②刘… ③韩… III. ①山地-建筑结构-研究 IV. ①TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 039308 号

责任编辑:任加林 / 责任校对:马英菊

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年8月第一版 开本:B5 (720×1000)

2016年8月第一次印刷 印张:9

字数:163 000

定价:50.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列

编委会名单

主 任：周绪红

副主任：张四平 毛志兵 文安邦 王清勤 刘汉龙

委 员：（按姓氏笔画排序）

卢 峰	申立银	任 宏	刘贵文	杜春兰
李正良	李百战	李英民	李和平	吴艳宏
何 强	陈宁生	单彩杰	胡学斌	高文生
黄世敏	蒋立红			

总 序

中国是一个多山国家，山地面积约为 666 万 km^2 ，占陆地国土面积的 69%，山地县级行政机构数量约占全国的 2/3，蓄积的人口与耕地分别占全国的 1/3 和 2/5。山地区域是自然、文化资源的巨大宝库，蕴含着丰富的水力、矿产、森林、生物、旅游等自然资源，也因多民族数千年的聚居繁衍而积淀了灿烂多姿的历史遗迹与文化遗产。

然而，受制于山地地形复杂、灾害频发、生态脆弱的地理环境特点，山地城镇建设挑战多、难度大、成本高，导致山地区域城镇化水平低，经济社会发展滞后，存在资源低效开发、人口流失严重、生态环境恶化、文化遗产衰落等众多经济社会问题。截至 2014 年，我国云南、贵州、西藏、甘肃、新疆等省、自治区的山地城镇化率不足 40%，距离《国家新型城镇化规划（2014~2020）》提出的常住人口城镇化率达到 60% 的发展目标仍有很大差距。因此，采用“开发与保护”并重的方式推进山地城镇建设，促进山地城镇可持续发展，对于推动我国经济结构顺利转型、促进经济社会和谐发展、支撑国家“一带一路”发展战略具有不可替代的重要意义。

为解决山地区域城镇化建设的重大需求，2012 年 3 月重庆大学联合中国建筑股份有限公司、中国建筑科学研究院、中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所等单位共同成立了“山地城镇建设协同创新中心”，针对山地城镇建设面临的安全与防灾关键问题开展人才培养、科技研发、学科建设等创新工作。经过三年的建设，中心围绕“规划—设计—建造—管理”的建筑产业链，大力整合政府、企业、高校、科研院所的优势资源，在山地城镇建设安全与防灾领域汇聚了一流科研团队，建设了高水平综合性示范基地，取得了有重大影响的科研理论与技术成果。迄今为止，中心已在山地城镇生态规划、山地城镇防灾减灾、山地城镇环境安全、山地城镇绿色建造、山地城镇建设管理五大方向取得了一系列重大科研成果，培养和造就了一批高素质建设人才，有力地支撑了山地城镇的重大工程建设，并着力营造出城镇建设主动依靠科技创新、科技创新更加贴近城镇发展需求的良好氛围。

山地城镇建设安全与防灾协同创新专著系列丛书集中展示了山地城镇建设协同创新中心在山地城镇生态规划与文化遗产保护、山地灾害形成理论与减灾关键技术、山地环境安全理论与可再生能源利用、山地城镇建设管理与可持续发展等

领域的最新科研成果，是山地城镇建设领域科技工作者智慧与汗水的结晶。本套丛书的出版，力图服务于山地城镇建设领域科学交流与技术转化，促进该领域高层次的学术传播、科技交流、技术推广与人才培养，努力营造出政产学研高效整合的协同创新氛围，为山地城镇的全面、协调与可持续发展做出新的重大贡献。

中国工程院院士，重庆大学校长

周绪红

2015年12月18日

序

地球陆地面积大部分为山地，世界上很多城镇不得不依山而建，如美国旧金山、中国香港和重庆，形成了错落有致的具有山地特色的建筑群和城市景观。在我国，实施新型城镇化战略是现代化建设的重大历史任务，必将进一步推动山地城镇建设的发展。

随着城镇化建设的发展，更多的山地城镇正在不断崛起。有别于早期依山就势、顺势而造的古建筑或民居，现代山地城镇的建筑结构已突破传统的经验和范式，临崖而立、面坡而建的新型山地建筑结构比比皆是，大有“与天公比高”之势。与常规建筑结构不同，山地建筑结构形式必须与复杂的地形相适应，导致其基础不等高、竖向或平面不规则，使得工程地震动输入、地基基础处理、结构性能和设计方法等方面有着诸多独特的特点，适用于常规建筑结构的设计理论、经验、抗震性能控制指标和抗震措施等在山地建筑结构设计中都难以直接应用。相对于常规建筑结构，山地建筑结构的研究相对滞后和不足，可能说山地建筑结构设计理论的发展还仅处于萌芽状态。因此迫切需要对山地建筑结构的特殊性能和设计计算理论进行系统研究和分析，用于指导山地城镇建设的工程实践。

李英民教授及其研究团队紧密结合西南地区山地城镇快速发展的需要，自2005年开始对山地建筑结构开展了较系统的理论研究和试验研究，并于2008年赴汶川地震灾区实地调研，积累了丰富的震害资料。他们创新性地总结、提炼了山地建筑结构抗震设计中的关键科学问题，提出了山地建筑结构的概念，明确了山地建筑结构的主要特征，从结构设计角度对山地建筑结构进行了科学分类，分析了山地建筑结构的动力特征、地震作用下的弹性和弹塑性内力与变形特征，并对山地建筑结构的地震破坏特征和破坏机理进行了剖析。李英民教授的研究工作适应了国家和地域经济社会发展的重大需求，形成了自己的研究特色。这些研究成果不仅构成了本书的主要内容，还为编制行业标准《山地建筑结构设计规程》提供了重要依据。

《山地建筑结构基本概念与性能》一书，章节安排合理，表述深入浅出，可读性强。该书的出版有利于促进山地建筑结构设计方法和设计理论的发展，将为从事山地建筑结构设计、施工、管理的人员提供参考。

中国工程院院士，重庆大学校长

周绪红

2016年5月

前 言

山地城镇依山而建，形成了具有山地特色的山地建筑群。为了利用坡地，山地建筑基础通常有两类做法，一类为采用高挖方或高填方将坡地改造为等高地基，另一类为结构底部与地基不等高相接。前者对地形环境需要再造，容易出现高边坡等安全隐患；后者利用坡地地形，环境扰动小，但结构底部的不等高嵌固使其具有天生的平面和竖向不规则性，同时结构受到基础变形和岩土压力的影响。

建筑用地的紧张、人与环境协调性需求的提高，使得基础不等高嵌固的山地建筑结构在山地城镇中的应用逐步增加，并有向多层和高层发展的趋势。著者及所在的团队自 2005 年开始，对山地建筑结构开展了系统的研究，明确了山地建筑结构概念，理清了山地建筑结构的主要特征，凝聚了山地建筑结构抗震设计中的关键问题，较为系统地分析了山地建筑结构的弹性和弹塑性力学性能。这些研究成果有利于掌握山地建筑结构的特性，为山地建筑结构设计提供了理论基础。为满足研究人员和工程设计人员的需要，著者在已有研究成果的基础上撰写了本书，主要介绍山地建筑结构的基本概念和力学性能。

本书共 8 章，第 1 章介绍了山地建筑结构的研究背景、国内外研究现状和本书内容；第 2 章分析了山地建筑特点，提出了山地建筑结构概念，划分了山地建筑结构类型，给出了掉层山地建筑结构的约定术语；第 3 章分析了山地建筑结构的震害现象，总结了山地建筑结构的震害特点，给出了相应的设计建议与启示；第 4 章从荷载与作用、分析模型和分析方法、竖向不规则性、平面不规则性、嵌固端和抗震措施等方面分析了山地建筑结构设计所面临的特殊问题；第 5 章分析了掉层框架结构的周期、振型等动力特性及规律；第 6 章以掉层框架结构和吊脚框架结构为研究对象，首先从不等高框架的弹性力学性能分析引出山地建筑结构的等效模型；然后从不同影响因素下的结构弹性力学性能、不同影响因素下的构件弹性力学性能和结构的弹性扭转效应等方面分析了掉层结构在水平荷载作用下的弹性力学性能；最后分析了吊脚结构在水平荷载作用下的结构弹性性能及吊脚部分特殊部位对结构受力性能的影响；第 7 章以掉层框架结构为研究对象，采用试验方法和数值模拟方法研究了山地建筑结构的弹塑性力学性能；第 8 章总结了山地建筑结构的研究成果，给出了下一步的研究方向。

本书第 4 章和第 8 章由李英民教授执笔，第 1、2、3、6 章由刘立平教授执笔，第 5 章和第 7 章由韩军副教授执笔。全书由刘立平教授统稿，李英民教授审定。

徐军、刘流、姜宝龙、唐洋洋、刘烁宇、戴明辉、秦阳等博士生参与了本书的资料整理、文字修改和绘图工作，在此表示感谢。此书的部分研究工作获得了重庆市科技计划项目、重庆市建设科技计划项目的资助，在此表示感谢。

由于著者的水平有限，书中疏漏在所难免，请批评指正。

著 者

2016年1月

于重庆大学

目 录

总序

序

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景	1
1.2	主要内容	5
第 2 章	山地建筑与山地建筑结构	6
2.1	山地建筑	7
2.1.1	山地建筑设计	8
2.1.2	山地建筑类型	9
2.2	山地建筑结构	10
2.2.1	山地建筑结构的定义	10
2.2.2	主要类型及特点	10
2.2.3	掉层结构的术语约定	11
2.3	本章小结	13
第 3 章	山地建筑结构的地震灾害	14
3.1	山地建筑结构的震害现象	14
3.1.1	地质灾害诱发的结构破坏	14
3.1.2	地震作用引起的结构震害	16
3.1.3	其他震害	22
3.2	山地建筑结构的震害特点	22
3.3	山地建筑结构的震害启示	23
3.4	本章小结	24
第 4 章	山地建筑结构设计特殊问题	25
4.1	山地建筑结构的荷载与作用	25
4.1.1	地震作用	25
4.1.2	风荷载	26
4.1.3	岩土压力及边坡变形	26
4.2	山地建筑结构分析模型与分析方法	27
4.2.1	山地建筑结构几何模型	27
4.2.2	山地建筑结构分析方法	28

4.3	山地建筑结构的竖向不规则性	30
4.4	山地建筑结构的扭转问题	31
4.5	山地建筑结构嵌固部位的选择	31
4.6	山地建筑结构的抗震措施	31
4.7	其他问题	32
4.8	本章小结	32
第 5 章	山地建筑结构动力特性	33
5.1	平面结构的动力特性	33
5.1.1	周期特性	33
5.1.2	振型特性	37
5.1.3	典型结构的动力特性	43
5.2	空间结构动力特性	47
5.3	本章小结	50
第 6 章	山地建筑结构弹性性能	51
6.1	不等高框架的弹性性能	51
6.1.1	分析模型	51
6.1.2	侧移计算	52
6.1.3	剪力分配	54
6.2	掉层框架结构的弹性性能	56
6.2.1	典型掉层结构弹性性能	56
6.2.2	接坡方式的影响	59
6.2.3	上接地层基础拉梁的影响	60
6.2.4	上接地柱柱底约束的影响	61
6.2.5	侧向刚度比的影响	67
6.3	掉层框架结构的构件弹性性能	70
6.3.1	上接地层柱的剪力分布特征	71
6.3.2	上接地层基础拉梁及相应楼板内力特性	75
6.4	掉层框架结构的弹性扭转效应	82
6.4.1	典型掉层框架结构弹性扭转效应	82
6.4.2	侧向刚度比的影响	87
6.5	吊脚框架结构弹性性能	92
6.5.1	典型吊脚结构的弹性性能	92
6.5.2	吊脚结构特殊部位对结构受力性能的影响	94
6.6	本章小结	97
第 7 章	山地建筑结构弹塑性性能	99
7.1	山地建筑结构低周反复荷载试验	99

7.1.1	试验介绍	99
7.1.2	试件设计	99
7.1.3	试验装置	101
7.1.4	加载制度	102
7.1.5	测量内容	102
7.1.6	试验现象	102
7.1.7	试验结果与分析	106
7.1.8	结论	112
7.2	山地建筑结构弹塑性数值模拟分析	112
7.2.1	有限元模型基本参数和性能目标	112
7.2.2	底部层刚度比的影响	113
7.2.3	接坡方式的影响	116
7.2.4	支座形式的影响	119
7.3	本章小结	124
第 8 章	结语	125
参考文献		127

第1章 绪论

1.1 研究背景

我们赖以生活的地球表面大部分为海洋所覆盖,陆地面积仅占 30%,其中山地面积约为陆地面积的 15%。而我国更是一个多山地、丘陵和高原的国家。通常我们将山地、丘陵和比较崎岖的高原称为山区,则我国山区面积占全国总面积的 2/3。这样的生存条件,使得我们的很多城镇修建于山区环境,甚至包括很多著名的大都市,如美国旧金山、中国香港和重庆等。山区城镇建筑大多依山而建,形成了错落有致的具有山地特色的建筑群^[1]。

山地建筑与地形环境相协调,充分利用坡地地形,形成了筑填、掉跌、挑悬、架跨、附崖、弯转、入地、分联等不同接地方式的建筑^[2]。从结构角度,山地建筑接地方式可分为两类,一类是结构底部基础为相同标高,采用高切坡或高填方方式来形成地基平台,其优点是可以直接应用现有方法进行结构设计;缺点是需要对环境再造,容易出现高边坡失稳等安全隐患。另一类是多处不同标高的结构部位与地基相连,即采用结构基础不等高接地方式来处理地基,其优点是利用边坡地形、减少环境扰动;但边坡与结构相互作用明显,对结构设计提出了新的要求。我们将前者称之为常规建筑结构,后者称之为山地建筑结构。早期的山地建筑结构主要应用于寺庙建筑或吊脚楼民居,随后在环境要求高的山地别墅建筑中大量出现,近年来已在多层和高层建筑中逐渐应用。

日本的六甲山集合住宅^[3]是有名的山地建筑(图 1.1),其背倚六甲山,俯瞰神戸市区和大阪湾。该建筑由安藤忠雄设计,整个住宅沿山而上呈阶梯状嵌在近 60°的山坡谷地上,其坡底平地为多层建筑,在第四层处与坡地部分建筑相连。坡地部分每两层为一个单元沿山坡呈台阶而上,上面单元部分支撑于下部单元,部分支撑于边坡,形成了一个地上 9 层、地下 1 层共 10 层的住宅社区。随后在一期的旁边建设了类似地的第二期山地建筑。

图 1.2 为四川省攀枝花三线建设博物馆^[4]。该建筑为典型的山地建筑。其根据场地地形标高变化将场地分为上、中、下三个台地,结构主要位于中台地(标高 12.500m),局部范围至下台地(标高 0.000m)作为为停车库和文物库,上台地(标高 22.350m)为室外广场和进入馆区的主入口。结构总高度 44.2m。另外,主体结构在 18.00m 和 23.35m 有两个局部错层。

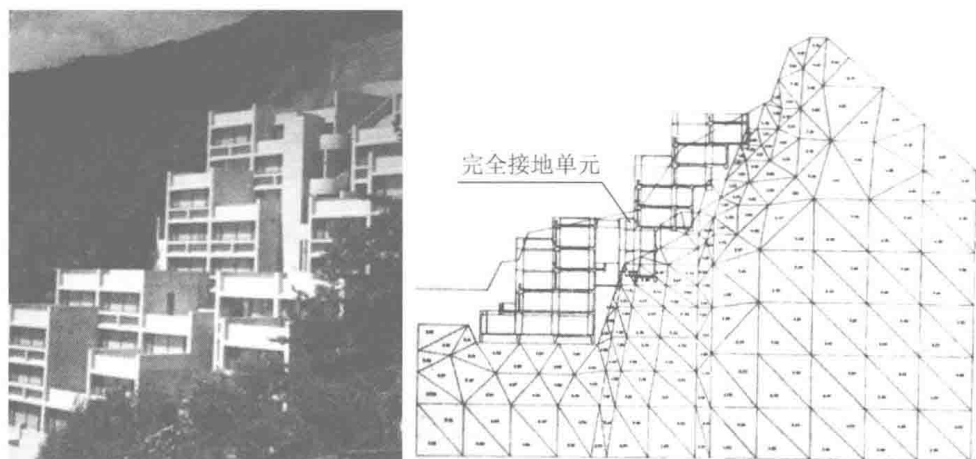


图 1.1 日本六甲山集合住宅一期

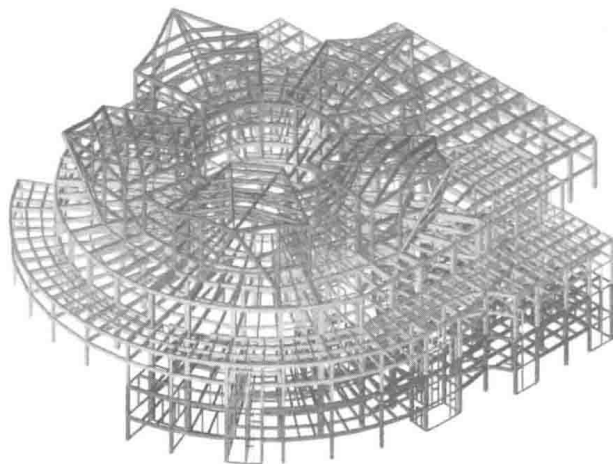


图 1.2 四川省攀枝花三线建设博物馆

图 1.3 为重庆某吊脚楼高层建筑^[5]。该建筑位于丘陵顶部和斜坡之间，顶部地形平坦，斜坡坡角 40° 。建筑 $\pm 0.000\text{m}$ （丘陵顶部）以上 33 层，总高 97.8m；为剪力墙结构， $\pm 0.000\text{m}$ （丘陵顶部）以下为 0~15m 的吊脚，为减少吊脚墙肢的计算长度，设置了 3 层竖向间距均为 5m 的水平拉梁。

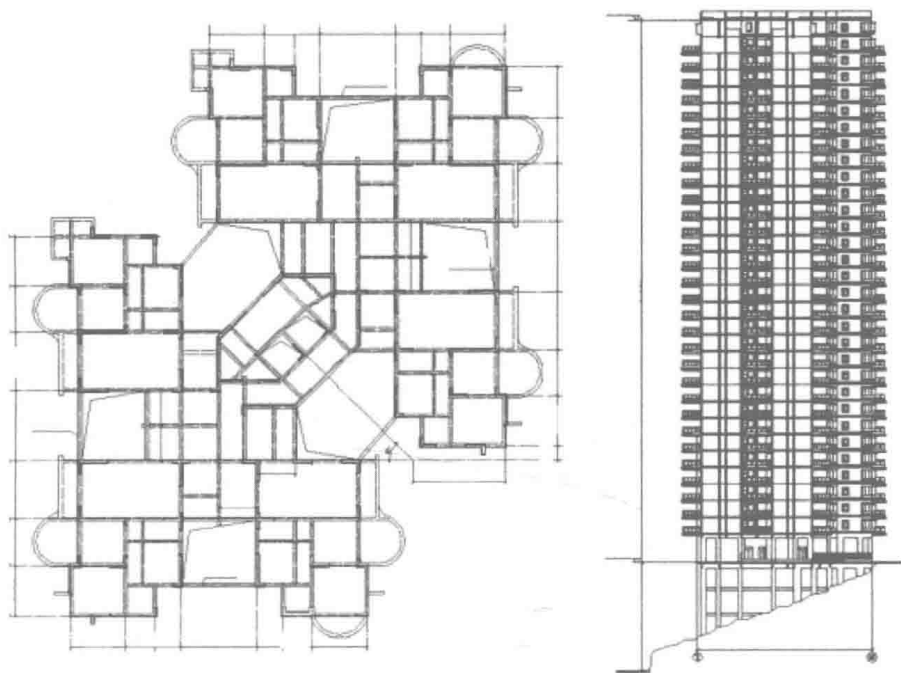


图 1.3 重庆某高层建筑吊脚楼结构

由于地基基础不在同一标高位置，使得山地建筑结构在输入地震动、地基基础处理、结构设计等方面不同于常规建筑结构。

输入地震动的影响体现在两方面，一是坡地场地的地震动参数有别于平地的地震动参数。研究表明^[6~11]，坡（台）地的场地反应复杂，局部场地对地震动的影响显著，坡地不同位置的设计地震动参数存在差异；另一方面是建筑物地基存在高差，不同标高位置的地震动存在一定的差异，这种差异使得不同基础标高处的地震动参数可能不同。其受地基高差、边坡参数、地基土特性等影响。

山地建筑结构底部标高不同，则在地基不等高位置必然有边坡存在。边坡顶的结构基础和边坡底的结构基础受到边坡的影响；而边坡也受到坡顶的结构基础和坡底的结构基础的影响。同时，当地基高差范围内的结构与边坡相连时，这种相互影响更明显。因此以下问题不容忽视：现行地基基础规范中有关边坡顶部的结构基础退让距离的要求可能难以满足；边坡的可靠性是结构安全的前提，设计边坡时应考虑上部结构荷载的影响并具有足够的富余量；上部结构设计时应考虑基础变形的影响，这种变形包括高差地基的竖向变形和边坡变形引起的侧向变形，

其可能导致结构的整体侧移和附加的侧向力,对结构产生不利作用。地震作用时,边坡土体将产生附加作用于上部基础,影响结构内力。

山地建筑结构设计时应考虑结构底部不等高嵌固的影响。首先,底部不等高嵌固使得结构的内力分布和变形特点与常规建筑结构明显不同,想当然的简化为等高约束模型进行设计会造成结构安全隐患^[12]。第二,底部不等高嵌固使得山地建筑结构存在平面不规则和竖向不规则性,且平面不规则伴生竖向不规则,基于常规建筑结构设计建立起来的结构控制指标,如层刚度控制^[13]、层剪力控制、扭转效应控制和变形控制等并不一定能保障山地建筑结构的抗震性能。第三,底部不等高约束使得山地建筑结构的抗震加强部位和抗震加强措施有别于常规建筑结构,直接采用常规建筑结构的抗震加强措施并不一定能保证山地建筑结构的抗震安全^[13]。研究表明^[14,15]:吊脚式和掉层式山地建筑结构,接地措施和场地条件不同时结构的内力和变形相差大,甚至可能出现结构薄弱层发生转移现象。震害调查也表明^[16,17]:山地建筑结构的震害一般重于常规建筑结构,且接地部分的震害重于上部结构,上接地部分震害重于下接地部分。这说明山地建筑结构抗震设计的特殊性和现行山地建筑结构抗震设计存在着不足。

山地建筑结构的特殊性受到国内外学者的关注。Valts 等^[18]申请了一种利用边坡的结构-支护一体式的建筑结构发明专利。Stewart 等^[19]发明了一种地基不等高的多层居住建筑,并给出了与坡地的连接方式。Hassel^[20]以高烈度区山地地形的厌氧污水设施为研究对象,分析了边坡与构筑物间的相互影响,提出了减小边坡变形影响的构筑物基础形式。Paul^[21]、Mizal-Azzmi^[22]、Bernard Langan^[23]等人研究了地震作用下结构对边坡稳定性的影响,并给出了设计建议。但这些研究主要侧重于结构基础接地做法和建筑物对边坡的影响,而对山地建筑结构本身的研究不多。张川等^[24]研究了底层不等高的多层框架在水平作用下采用 D 值法计算内力反应的近似程度,认为该类结构采用 D 值法计算的误差较大,宜进行修正。杨佑发等^[25,26]采用坡土-结构相互作用分析模型研究了台地框架结构和多层接地框架的抗震性能,认为其与常规框架抗震性能存在差异。这些研究仅初步分析了 D 值法的适用性和抗震性能。

著者及所在的团队自 2005 开始,对山地建筑结构开展了系统的研究,提出了山地建筑结构概念^[27],指导完成了多篇硕士和博士论文,发表了相关论文^[28-46]。通过研究,明确了山地建筑结构概念,理清了山地建筑结构的主要特征,凝聚了山地建筑结构抗震设计中的关键问题,较为系统地分析了山地建筑结构的弹性和弹塑性力学性能。这些研究成果有利于掌握山地建筑结构的特性,为山地建筑结构设计提供理论基础。

山地建筑结构的力学模型、结构与边坡的相互作用等有别于常规建筑结构,使得山地建筑结构的动力特性和地震作用下结构的响应与常规建筑结构存在较大的差异,因此宜加强山地建筑结构力学性能的研究。本书是著者及所在的团队多

年研究成果的总结,期望能促进山地建筑结构设计方法和设计理论的发展。

1.2 主要内容

本书主要阐述了山地建筑结构的 basic 概念,总结了山地建筑结构的震害,讨论了山地建筑结构设计中的特殊问题,分析了山地建筑结构的动力特性、动力弹性性能和弹塑性性能,包括 8 章内容。

第 1 章阐述了山地建筑结构的 research 意义,分析了山地建筑结构国内外研究现状,给出了本书的主要内容。

第 2 章论述了山地建筑及山地建筑结构间的关系;基于他人研究成果,总结了山地建筑类型和特点;提出了山地建筑结构概念,明确山地建筑结构类型和特点,给出了掉层山地建筑结构的术语约定。

第 3 章在建筑结构震害调查的基础上,分析了山地建筑结构的震害现象,总结了山地建筑结构的震害特点,提出了山地建筑结构抗震设计建议。

第 4 章讨论了山地建筑结构设计中所面临的特殊问题,包括地震作用、风荷载、边坡效应,山地建筑结构的分析模型和分析方法,山地建筑结构的竖向不规则性,结构扭转效应,结构嵌固端和抗震措施等。

第 5 章以掉层框架结构为研究对象,分析了典型山地建筑结构的周期、振型等动力特性及不同因素对山地建筑结构动力特性的影响。

第 6 章以掉层框架结构和吊脚框架结构为研究对象,首先从不等高框架的弹性力学性能分析引出山地建筑结构的等效模型;然后从不同影响因素下的结构弹性力学性能、不同影响因素下的构件弹性力学性能和结构的弹性扭转效应等方面分析了掉层结构在水平荷载作用下的弹性力学性能;最后分析了吊脚结构在水平荷载作用下的结构弹性性能以及吊脚部分特殊部位对结构受力性能的影响。

第 7 章以掉层框架结构为研究对象,采用低周反复荷载试验研究了山地建筑结构的抗震性能;采用动力弹塑性有限元方法研究了山地建筑结构的弹塑性力学性能。

第 8 章对前面 7 章的内容进行了总结,并分析了后续研究方向。