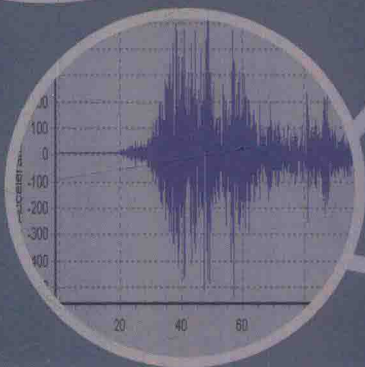
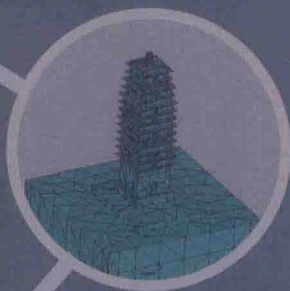


# 古塔抗震性能研究

袁建力 著



科学出版社

# 古塔抗震性能研究

袁建力 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

中国古塔是世界建筑遗产的重要组成部分,具有宝贵的历史、艺术和科学研究价值。本书针对文物保护和科技发展的需要,基于科学研究和工程实践成果,对古塔的抗震性能及鉴定加固方法进行了系统的归纳提炼和运用分析。

全书以砖石古塔的抗震性能为主线,对古塔的地震灾害及损坏规律进行了统计归纳,分析了建筑类型、结构构造和场地对古塔抗震能力的影响,介绍了古塔动力特性的理论分析方法和无损测试技术,探讨了基于动力特性的古塔有限元建模方法以及弹塑性时程分析方法,给出了古塔水平地震作用和竖向地震作用分析方法,提供了古塔抗震鉴定和加固方法以及嵌筋加固塔体的抗震承载力验算方法。书中论述的古塔抗震性能研究成果,既遵循了文物保护和结构安全的原则,也体现了传统工艺和现代科学技术的兼容性,其基本方法和技术可推广至同类砖石、砖木古建筑的抗震研究与保护。

本书内容丰富、资料翔实、示例明晰,注重理论知识与工程实践的结合,具有很好的学习指导和实用价值,可作为城市建设和抗震管理部门、文物管理保护部门和古建园林公司科研与工程技术人员的专业用书,也可作为土木工程、建筑学等专业研究生的参考教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

古塔抗震性能研究/袁建力著. —北京:科学出版社,2018.9

ISBN 978-7-03-058707-7

I. ①古… II. ①袁… III. ①古塔-抗震性能-研究-中国 IV. ①TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 204223 号

责任编辑:惠 雪 曾佳佳/责任校对:彭 涛

责任印制:张克忠/封面设计:许 瑞

**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>

**三河市春园印刷有限公司** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张:17

字数:342 000

定价:159.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前言

中国自汉代开始建造宝塔,目前存世的古塔大多已有数百年甚至上千年历史,具有极高的历史、艺术和科学研究价值,是人类宝贵的文化遗产。屹立在神州大地上的古塔,以其高耸挺拔的造型和精致典雅的结构展示着历史建筑的特有功能,体现了中华优秀传统文化和建筑技术的高度成就。

在两千多年的发展历程中,我国建造的古塔累计不少于万座,但因自然灾害、人为损坏和材料老化,大部分古塔已经消失;据历史资料考证,地震是损毁古塔的主要灾害。古塔是高耸建筑物,且采用密度较大的砖石材料建造,对地震作用较其他古建筑更为敏感;通过文献资料的查阅可以发现,每一次强烈地震,都有一批古塔遭到破坏,甚至倒塌而消失;地震区现今尚存的重要古塔,大部分经历过地震的破坏且经过修复以后才保持了目前的状态。在近代发生的大地震中,调查统计数据更加清晰地证明了地震对古塔的严重危害性,如 1976 年 7 月 28 日的唐山 7.8 级大地震中,位于烈度 VI ~ VIII 度区的 19 座古塔,中度破坏及严重破坏的古塔 8 座,倒塌的古塔 4 座;在 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级大地震中,位于四川省地震烈度 VI ~ X 度区的 61 座古塔,中度破坏及严重破坏的古塔 28 座,完全毁坏的古塔 4 座。

对古塔的地震灾害及损坏规律进行调查统计,归纳古塔在地震中的破坏特征和影响因素,结合理论分析和科学试验开展古塔抗震性能研究,掌握古塔在地震作用下的动力性能和抵抗能力,以有效地对现存古塔进行抗震鉴定和加固,是保护文化遗产的重要基础性工作。

随着我国经济建设和社会文明的发展,政府和社会各界对古塔保护的关注度不断提高,经费的投入在逐步增加;各级文物管理部门、科研院所和高等学校,已积极开展包括古塔在内的古建筑保护研究工作,并取得了较为丰富的成果。进一步提炼完善古塔的抗震保护理论和方法,对古塔实施系统的科学性保护,将有效地提升我国古建筑保护科学的理论和实践水平,并产生相应的经济价值和重要的社会意义。

在国家自然科学基金项目“砖石古塔地震损伤机理与分析模型”、国家自然科学基金国际合作项目“地震损伤对砖石古塔动力特性的影响”、科技部中国-意大利政府间合作项目“Measure Technology and Modeling Method on Dynamical Behavior of Ancient Buildings”、“The Chinese Pagodas and the Italian Middle Age Towers: Monitoring, Models and Structural Analysis of Some Emblematic Cases”、江苏省社会发展基金项目“虎丘塔纠偏加固与监控技术研究”、扬州市自然科学基金项目“砖木古塔修缮加固技术与抗震能力鉴定的系统方法”、江苏省研究生创新工程项

目“古塔抗震加固结合体的耐久性与可更新技术”等支持下,扬州大学古建筑保护课题组通过二十多年的科学研究和工程实践,在古塔抗震性能研究领域获得了系列性成果。结合文物保护和现代科学技术发展的需求,本书作者基于国内外科学研究和工程实践成果,对古塔抗震理论和技术进行了归纳提炼和运用分析,撰写了专著《古塔抗震性能研究》。

本书由8章组成。在第1章中,对砖石古塔的主要建筑类型与结构特征进行了分析,讨论了古塔的空间刚度、质量分布和连接构造对古塔抗震性能的影响。在第2章中,依据历史灾害文献和现代地震灾害调研资料,统计分析了古塔的地震损坏特征和规律。在第3章中,介绍了古塔动力计算模型的构建和动力特性的理论分析方法,结合现代无损测试技术的应用,讨论了古塔动力特性的现场测试方法。在第4章中,结合计算机模拟分析技术的应用,讨论了基于动力特性的古塔有限元建模方法,以及古塔在地震作用下的弹塑性时程分析方法。在第5章中,借鉴我国现行《建筑抗震设计规范》的基本方法,提出了适用于古塔的水平地震作用和竖向地震作用的分析方法。在第6~8章中,通过对我国现有抗震鉴定与加固实践经验的归纳总结,提出了古塔抗震鉴定和加固的规范方法,以及嵌筋加固塔体的抗震承载力验算方法。书中论述的古塔抗震性能研究成果,既遵循了文物保护和结构安全的原则,也体现了传统工艺和现代科学技术的兼容性,其基本方法和技术可推广至同类砖石、砖木古建筑的抗震研究与保护。

本书的成果属于扬州大学古建筑保护课题组集体所有,课题组其他主要成员李胜才教授、樊华副教授、刘殿华副教授、凌代俭副教授、沈达宝总工程师、王仪讲师等以及课题组的众多研究生,在古塔的资料收集、现场测试、模型试验、计算机模拟分析、修缮加固等方面进行了大量细致有效的工作,为本书成果的形成做出了重要的贡献。意大利 University of Rome Tor Vergata 的 Donato Abruzzese 教授、Lorenzo Miccoli 博士和英国 University College London 的 Dina D' Ayala 教授在国际合作项目中也做出了卓越的贡献。江苏省文物局、四川省文物局、山西省文物局等及相关的县市文物管理部门的领导和技术专家,为本书所依据科研项目的实施,提供了有益的支持和帮助。国家强震动台网中心为本书的研究项目提供了汶川 8.0 级地震强震动记录。在此,对本书基础成果的贡献者和支持者致以诚挚的谢意。

由于本书基本资料形成的时间跨度较长,一些应用实例给出的内容和数据尚保留了当时的原始状况,为了保持原真性,并未进行更新替换;此外,现代科学技术的发展日新月异,国内外一些最新的研究成果也未能及时反映在本书中;对于书中存在的问题和不足之处,热忱地希望读者和同行专家给予批评指正。

作 者

2018 年 4 月于扬州大学

# 目 录

## 前言

|       |                       |    |
|-------|-----------------------|----|
| 第 1 章 | 古塔的建筑类型与结构特征          | 1  |
| 1.1   | 古塔的建筑类型               | 1  |
| 1.1.1 | 古塔按建筑造型分类             | 1  |
| 1.1.2 | 古塔按建筑材料分类             | 5  |
| 1.2   | 古塔的结构特征               | 8  |
| 1.2.1 | 古塔的结构组成               | 8  |
| 1.2.2 | 塔身的结构特征               | 11 |
| 1.2.3 | 外伸构件的连接构造             | 17 |
| 1.2.4 | 基础与地基的构造              | 19 |
| 第 2 章 | 古塔的地震灾害与损坏规律          | 25 |
| 2.1   | 古塔的历史震害资料与统计规律        | 25 |
| 2.1.1 | 古塔历史震害资料的分析           | 25 |
| 2.1.2 | 古塔的地震损坏特征与规律          | 33 |
| 2.2   | 汶川地震古塔震害规律研究          | 35 |
| 2.2.1 | 研究概况                  | 35 |
| 2.2.2 | 古塔震害程度与地震烈度的关系        | 36 |
| 2.2.3 | 古塔地基变形震害的规律           | 39 |
| 2.2.4 | 古塔砌体开裂震害的规律           | 42 |
| 2.2.5 | 古塔结构垮塌震害的规律           | 46 |
| 2.2.6 | 结论与建议                 | 49 |
| 第 3 章 | 古塔动力特性分析测试方法          | 50 |
| 3.1   | 古塔动力特性的理论分析方法         | 50 |
| 3.1.1 | 古塔的动力计算模型             | 50 |
| 3.1.2 | 古塔动力特性的分析方法           | 51 |
| 3.1.3 | 古塔动力特性分析的基本参数         | 55 |
| 3.1.4 | 基于 MATLAB 的动力特性参数求解方法 | 57 |
| 3.2   | 古塔动力特性的现场测试方法         | 58 |
| 3.2.1 | 动力特性测试的意义             | 58 |
| 3.2.2 | 动力特性的测试方法             | 59 |

|       |                     |     |
|-------|---------------------|-----|
| 3.2.3 | 脉动法的测试装置和测点布置       | 60  |
| 3.2.4 | 测试影响因素及处理方法         | 63  |
| 3.2.5 | 结构动力特性的分析           | 66  |
| 3.3   | 古塔基本自振周期的简化计算方法     | 67  |
| 3.3.1 | 古塔基本周期的理论分析基础       | 68  |
| 3.3.2 | 古塔基本周期的经验公式         | 69  |
| 3.3.3 | 典型古塔基本自振周期的对比分析     | 73  |
| 3.4   | 虎丘塔动力特性研究           | 74  |
| 3.4.1 | 虎丘塔建筑概况             | 74  |
| 3.4.2 | 虎丘塔动力特性的理论分析        | 75  |
| 3.4.3 | 虎丘塔动力特性的现场测试        | 79  |
| 3.4.4 | 虎丘塔动力特性测试数据分析       | 81  |
| 3.4.5 | 理论分析值、实测值与有限元分析值的比较 | 87  |
| 第 4 章 | 古塔有限元模拟分析方法         | 89  |
| 4.1   | 基于动力特性的古塔建模方法       | 89  |
| 4.1.1 | 基于动力特性的古塔建模流程       | 89  |
| 4.1.2 | 影响古塔动力特性的主要因素       | 90  |
| 4.1.3 | 结构参数识别的模态转换方法       | 91  |
| 4.1.4 | 动力特性对结构参数调整的灵敏度     | 92  |
| 4.2   | 古塔弹塑性动力时程分析         | 93  |
| 4.2.1 | 分析软件与分析方法           | 93  |
| 4.2.2 | 砌体的本构关系和恢复力模型       | 94  |
| 4.2.3 | 地基的本构关系             | 98  |
| 4.2.4 | 地震波的选用和修正           | 99  |
| 4.2.5 | 破坏演化过程的显性动力学分析技术    | 102 |
| 4.3   | 龙护舍利塔的有限元建模和弹塑性动力分析 | 105 |
| 4.3.1 | 基本资料与研究内容           | 105 |
| 4.3.2 | 砌体材性试验与地基勘测         | 108 |
| 4.3.3 | 基于动力特性的有限元模型        | 110 |
| 4.3.4 | 考虑土-结构相互作用的分析模型     | 114 |
| 4.3.5 | 地震波的选用与处理           | 115 |
| 4.3.6 | 古塔地震响应的弹性时程分析       | 120 |
| 4.3.7 | 古塔地震响应的弹塑性时程分析      | 126 |
| 第 5 章 | 古塔地震作用的分析方法         | 132 |
| 5.1   | 古塔水平地震作用分析方法        | 132 |

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 5.1.1 | 计算模型的确定         | 132 |
| 5.1.2 | 振型分解反应谱法的运用     | 133 |
| 5.1.3 | 底部剪力法的运用        | 136 |
| 5.1.4 | 计算示例与地震作用对比分析   | 139 |
| 5.1.5 | 结论与建议           | 144 |
| 5.2   | 古塔竖向地震作用分析方法    | 145 |
| 5.2.1 | 古塔竖向地震作用研究状况    | 145 |
| 5.2.2 | 竖向地震作用基本公式分析    | 146 |
| 5.2.3 | 古塔竖向地震作用的分析方法   | 149 |
| 5.2.4 | 计算示例与竖向地震作用效应分析 | 151 |
| 5.2.5 | 结论与建议           | 158 |
| 第 6 章 | 古塔抗震鉴定方法        | 160 |
| 6.1   | 古塔抗震鉴定的目标和程序    | 160 |
| 6.1.1 | 古塔抗震鉴定目标        | 160 |
| 6.1.2 | 抗震鉴定程序及评价       | 161 |
| 6.2   | 古塔抗震性能的宏观检验     | 161 |
| 6.2.1 | 场地与地基基础检验       | 161 |
| 6.2.2 | 结构体系检验          | 162 |
| 6.2.3 | 历史震害检验          | 164 |
| 6.3   | 古塔抗震能力的定量分析     | 164 |
| 6.3.1 | 结构动力特性与地震作用效应   | 164 |
| 6.3.2 | 结构体系抗震承载力验算     | 165 |
| 6.3.3 | 地基和基础抗震验算       | 167 |
| 6.4   | 扬州文峰塔抗震鉴定研究     | 167 |
| 6.4.1 | 文峰塔抗震鉴定研究方案     | 167 |
| 6.4.2 | 文峰塔抗震性能的宏观检验    | 169 |
| 6.4.3 | 塔体结构抗震承载力的分析评价  | 176 |
| 6.4.4 | 附属结构抗震承载力的分析评价  | 191 |
| 6.4.5 | 文峰塔抗震鉴定结论和加固建议  | 193 |
| 第 7 章 | 古塔抗震加固方法        | 196 |
| 7.1   | 古塔抗震加固的一般规定     | 196 |
| 7.2   | 古塔地基及基础的加固方法    | 197 |
| 7.2.1 | 加固方法的选择和要求      | 197 |
| 7.2.2 | 地基的加固设计及施工      | 198 |
| 7.2.3 | 基础的加固设计及施工      | 199 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 7.3 古塔塔身的加固方法                | 200 |
| 7.3.1 加固方法的选择和要求             | 200 |
| 7.3.2 塔体的加固设计及施工             | 201 |
| 7.4 古塔附属结构的加固方法              | 209 |
| 7.4.1 加固方法的选择和要求             | 209 |
| 7.4.2 附属结构的加固设计及施工           | 210 |
| 7.5 都江堰奎光塔抗震加固方案             | 212 |
| 7.5.1 工程概况                   | 212 |
| 7.5.2 地震造成的塔体损坏状况            | 213 |
| 7.5.3 奎光塔塔身加固方案              | 215 |
| <b>第 8 章 嵌筋加固古砖塔的抗震承载力验算</b> | 220 |
| 8.1 古砖塔嵌筋加固与抗震验算的意义          | 220 |
| 8.2 嵌筋加固塔体偏心受压抗震验算           | 221 |
| 8.2.1 抗震验算的基本依据与假定           | 222 |
| 8.2.2 实心塔体矩形截面偏心受压验算         | 223 |
| 8.2.3 空心塔体矩形截面偏心受压验算         | 224 |
| 8.2.4 古塔环形、圆形截面偏心受压验算        | 225 |
| 8.2.5 六边形或八边形古塔截面的简化处理       | 227 |
| 8.3 嵌筋加固塔体受剪抗震验算             | 229 |
| 8.3.1 配筋砌体受剪性能研究成果的分析        | 229 |
| 8.3.2 钢箍加固砖塔的抗震性能试验          | 231 |
| 8.3.3 试件受剪承载力分析              | 233 |
| 8.3.4 嵌筋加固古砖塔受剪抗震验算公式的建议     | 234 |
| 8.4 古塔嵌筋加固抗震承载力验算示例          | 235 |
| 8.4.1 基本资料                   | 235 |
| 8.4.2 加固方案与施工                | 235 |
| 8.4.3 截面偏心受压抗震验算             | 237 |
| 8.4.4 截面受剪抗震验算               | 241 |
| <b>主要参考文献</b>                | 243 |
| <b>附录 国保单位古塔所在地区的抗震设防依据</b>  | 248 |
| <b>索引</b>                    | 261 |

# 第1章 古塔的建筑类型与结构特征

中国自汉代开始造塔,塔的早期造型受印度佛教墓塔“窣堵波”的影响,为“窣堵波”与中国亭阁、楼阁式建筑的结合。随着社会经济、宗教文化和科学技术的发展,塔的建筑造型、结构和材料在不断地完善,中国塔在近两千年的建造历程中,形成了丰富多样的类型。

现存古塔按建筑造型可分为楼阁式塔、密檐式塔、覆钵式塔、金刚宝座塔等;按建筑材料可分为砖塔、砖木混合塔、石塔等。塔的结构可分为下部结构和上部结构两大部分,自下而上由基础、地宫、基座、塔身、塔顶和塔刹组成,塔的结构特征主要由塔身的构造、外伸构件的连接构造、地基与基础的构造表达。

古塔的建筑类型、用材和结构特征,决定了古塔的空间刚度和质量的分布形式、力学性能和整体稳定性,也决定了古塔的动力特性和抗震性能,是建立古塔动力计算模型、进行抗震分析和鉴定的基本依据。

## 1.1 古塔的建筑类型

### 1.1.1 古塔按建筑造型分类

#### 1. 楼阁式塔

楼阁式塔体型高大、数量众多,是古塔中最具代表性的建筑类型。在佛教传入之前的战国、秦、汉时期,我国木结构技术已经发展到一个相当高的水平,修建了大量的多层、高层楼阁。印度墓式佛塔传入中国后,首先与先进的造楼技术相结合,产生了楼阁式的木塔。唐代以后,随着砖结构技术的发展,砖木结构和砖石仿木构的楼阁式塔成为古塔的主要类型。

楼阁式塔一般具有以下特征:①每一层之间的高度较大,一层塔身相当于一层楼阁的高度;②每层均设有门、窗、柱、枋、斗拱等,与木楼阁相仿;③塔檐大都仿照木结构房檐建造,砖木结构的楼阁式塔在转角处有悬挑较大的飞檐;④塔体大多为中空结构,内部一般都设有楼梯,能够登临眺望。

现存的著名楼阁式砖石古塔有:陕西西安大雁塔、苏州云岩寺塔(虎丘塔)、浙江杭州六和塔、福建泉州开元寺双塔等。修建于唐长安年间(701~704年)的西安大雁塔,为7层方形楼阁式砖塔(图1-1),高64.5m,是我国盛唐时期遗留的佛教胜迹。始建于北宋开宝三年(970年)的杭州六和塔,高59.89m,内部砖石结构7

层,外部木结构八面13层,是我国古代砖木建筑艺术的杰出作品(图1-2)。



图 1-1 西安大雁塔



图 1-2 杭州六和塔

## 2. 密檐式塔

密檐式塔是多层古塔中的一种主要类型,大多建造于辽代,分布在我国北方地区。密檐式塔基本采用砖砌筑,运用“叠涩”工艺构造出密接的塔檐。

密檐式塔的主要特点如下:①第一层塔身特别高大,其上每层之间的距离很小,塔檐紧密相连,形似重檐楼阁的重檐。②第一层塔身开设门窗,其上各层塔身不开门窗或设置假窗。少数密檐式塔为了内部采光的需要,在各层塔檐之间开设了少量的采光小孔。③辽、金时期的密檐式塔大多为实心塔体,不能登临眺望。在此之前建造的一些空心筒壁密檐式塔,如北魏时期的嵩岳寺塔、唐代的小雁塔等,也不适合于登临眺望之用。④仿木建筑的密檐式塔,塔身第一层大多有佛龕、佛像、门窗、柱子、斗拱等装饰。

现存的著名密檐式砖石古塔有:河南登封嵩岳寺塔、陕西西安小雁塔、云南大理崇圣寺千寻塔、北京天宁寺塔等。建于北魏正光元年(520年)的河南登封嵩岳寺塔(图1-3),高15层41m,采用砖砌空心筒体结构,外部造型为十二角尖锥体,是我国年代最久的密檐式塔。建于辽天庆九年(1119年)的天宁寺塔是北京地区年代最久的古建筑(图1-4),塔高57.8m,为八角13层密檐式实心砖塔,塔檐逐层收减,呈现出丰富有力的卷刹。

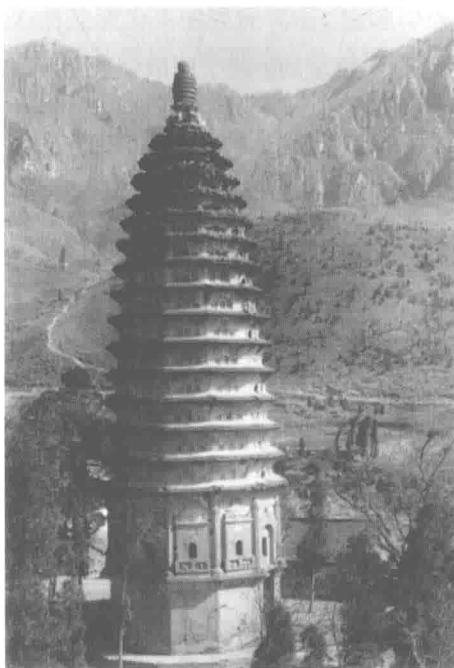


图 1-3 登封嵩岳寺塔



图 1-4 北京天宁寺塔

### 3. 覆钵式塔

覆钵式塔的外形与印度佛塔的形制非常接近，塔的下部为一高大的基座，其上砌筑瓶式或钵式塔身，塔身之上为逐层收缩的相轮，顶上设有华盖和宝刹。由于塔身的造型类似一个倒置的喇嘛教化缘钵，故在造型上称之为“覆钵式”塔。覆钵式塔为砖砌实心体建筑，外表粉刷成白色，以示圣洁、纯净。

元代时期喇嘛教在我国广泛传播，其中尤以西藏最盛，覆钵式塔逐渐成为喇嘛教建塔的基本形式，所以通称为喇嘛塔。覆钵式塔在内地发展的过程中，结合了高层楼阁式塔和密檐式塔的建筑成就，塔的形体更加高大雄伟。现存全国最大的覆钵式喇嘛塔——北京妙应寺白塔(图 1-5)，高 59m，建于元朝至元八年(1271 年)，由尼泊尔工匠阿尼哥主持设计，是我国建造最早的大型覆钵式塔。明清时期喇嘛教继续发展，覆钵式塔修建得更多，而且成为高僧墓塔的主要形式。覆钵式塔有时也被作为园林的点缀，如北京北海琼华岛白塔、江苏扬州瘦西湖白塔等。

### 4. 金刚宝座塔

这种塔在佛教上属于密宗一派，以五方佛为代表，象征须弥山五形。金刚宝座塔在造型上结合了我国古代高层建筑的特点，把台座修建得十分高大，以显示非凡

的气势。

现存金刚宝座塔的实物不多,大都是明清时期建造的。建于明成化九年(1473年)的北京真觉寺金刚宝座塔(图1-6),为五座密檐方形石塔,石造金刚宝座高7.7m,中心宝塔高8m,是我国早期的大型金刚宝座塔。

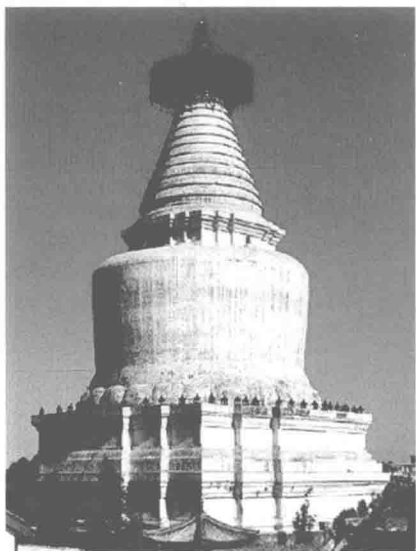


图 1-5 北京妙应寺白塔



图 1-6 北京真觉寺金刚宝座塔

### 5. 亭阁式塔

亭阁式塔的塔身通常为单层的方形、六角形、八角形或圆形的亭子,下建台基,顶部冠以塔刹;也有的在塔顶上加一小阁,上置塔刹。古代高僧墓塔常采用亭阁式塔的造型,山西五台山佛光寺的祖师塔是一种特殊形制的亭阁式塔(图1-7),塔室之上小阁的高度较大、构造精美,也可视为两层的楼阁式塔。

### 6. 花塔

花塔的造型起源于亭阁式塔,即在亭阁式塔的塔顶之上加上几层大型仰莲花瓣为装饰,形似花束。修建于金大定年间(1161~1189年)的河北正定县广惠寺花塔(图1-8)是现存最大的花塔;该塔由主塔和附属小塔组成,高40.5m,造型奇特,结构富于变化,是我国砖塔中造型最为奇异、装饰最为华丽的塔。

### 7. 其他形式的塔

自塔在我国出现以来,古代匠师在传统建筑艺术的基础上,结合地域和民族的特点创造出了多种表现形式和建筑风格的塔。除上述主要建筑类型的塔之外,还有

以石材建造为主的经幢式塔、宝篋印塔、五轮塔等经塔和墓塔,具有特殊造型的圆柱式塔、球形塔、多顶塔,兼具楼阁式、密檐式和覆钵式特征的组合式塔,以及多种类型塔并列组合而成的塔群、塔林等。各具特色、形式多样的塔体造型,既丰富了古塔的建筑类型,也扩大了中国古塔在世界建筑遗产中的整体影响。



图 1-7 五台山佛光寺祖师塔



图 1-8 河北正定县广惠寺花塔

### 1.1.2 古塔按建筑材料分类

#### 1. 砖塔

由于砖取材方便、制作简单,且具有较好的耐久性和防火性,自唐代以来,砖已取代木材成为建塔的主要材料。现存的古塔中砖塔的数量最多,并分布于全国各地。其中宋代建造的河北定州开元寺塔高 84m(图 1-9)、明代建造的陕西泾阳县崇文塔高 87m(图 1-10),均代表了中国古代高层建筑的杰出建造水平。

建造砖塔时砖壁表面的砌砖方式主要有两种:一种是在表皮部位用“长身砌”,称为“层层错缝长身砌法”;第二种为“长身、丁头法”,即“层层一长一顺错缝砌法”。塔壁内部一般采用非规则的填砌方式,这种方式既可以满足塔身尺寸逐层收分的要求,又能将有损坏和断裂的砖都运用到塔上以充分利用材料。

建造砖塔所用砖的尺度不尽相同,有的塔用砖薄而小,有的则厚而大。产生此种情况,既有时代原因,又有地区差异。砌砖塔时用的灰浆,各时代、各地方也不相同;唐代砖塔基本上以黄土为浆,其黏结性稍差;宋、辽、金时期的塔,在泥浆

内掺入了少量的石灰以增加黏结力；明、清两代砌建塔时，则全部改用白灰浆，有效地提高了黏结力。

在工艺方面，用砖材可砌出各种形状的构件以及仿木的造型结构，可以采用叠涩方式砌出楼层以表达楼阁式建筑的特征。砖塔的缺点为自重较大，对地基的变形以及对地震的反应均较为敏感；此外，砖塔上容易生长植物，破坏塔的坚固性。



图 1-9 河北定州开元寺塔



图 1-10 陕西泾阳县崇文塔

## 2. 砖木混合塔

砖木混合塔的塔身仍然用砖砌筑，但具有木结构特征的构件（如斗拱、角梁、平座、栏杆、楼盖、塔檐等）使用木材建造。与纯砖塔相比，砖木混合塔在木构件的制作方面较省工，但需要对木构件涂刷油漆进行长期保护。

砖木混合塔可充分发挥砖、木材料在结构受力和构件造型方面的优势，体现楼阁式塔的特征，这在当时的历史条件下是建筑艺术的发展。然而，砖、木材料的耐久性差异很大，当年代久远后，安插在砖砌体中的木构件先腐烂、毁坏。如若进行维修，需在砖壁上的洞中进行填补、固定，施工较为不便。

砖木混合塔有较强的地域性,大多在长江以南地区采用,以满足南方塔在造型上有较大塔檐和平座的需要。浙江杭州六和塔、上海松江兴圣教寺塔、江苏苏州报恩寺塔和瑞光寺塔都是著名的砖木混合塔,其中,江苏苏州瑞光寺塔是宋代早期南方砖木混合塔的代表作,该塔为7层八面砖木结构楼阁式塔,塔身为砖石砌筑,塔檐和平座栏杆均为木构(图1-11)。砖木混合塔在北方的数量较少,现存的有河北正定县天宁寺塔、甘肃张掖木塔、内蒙古呼和浩特万部华严经塔等;其中,甘肃张掖木塔的1~7层采用砖壁,外檐是木结构,8~9层则是完全的木结构(图1-12)。



图 1-11 苏州瑞光寺塔



图 1-12 甘肃张掖木塔

### 3. 石塔

我国石塔建造历史悠久,数量很多,分布于全国各地;尤其在石质较好的山区,或临近山区的地方,石塔数量更多。石材质地坚硬、耐久性好,建造的石塔易于保存。

石材建造的塔,以小型塔为多,如造像塔、经幢式塔、宝篋印塔、法轮塔、五轮塔、多宝塔等。墓地或塔林中的各式各样墓塔,多数采用石材建造。

福建泉州开元寺东、西两座石塔(图1-13),是大型楼阁式石塔的代表。西塔称仁寿塔,建于南宋嘉熙元年(1237年),高44.06m;东塔称镇国塔,建于南宋淳祐十年(1250年),高48.27m,是我国现存最高的石塔。两座石塔均采用大型石块建造,需吊装到40m以上高的部位,并雕琢拼缝、安装,显示了高超的设计水平与施工技术能力。扬州古木兰院石塔于唐开成三年(838年)建造,南宋嘉熙年间、清康熙年间重修,1979年开筑石塔路将石塔原地保留在路中(图1-14)。塔为5层六面仿楼阁式,通高(塔身高度加上基座高度)10.09m,青石构筑,塔基为须弥座,塔身

嵌小佛像，塔顶六角攒尖，整体造型稳重挺秀。

石塔可做成方形、六角形、八角形或圆形，塔身可采用石块、石条砌筑，石塔上的雕刻图案通常较多，有佛像、佛生故事、佛礼图、佛说法等。



图 1-13 泉州开元寺双塔



图 1-14 扬州古木兰院石塔

#### 4. 砖石混合塔

对非山石产地而言，石材资源较为紧缺，造塔一般较少选用石材；此外，与砖砌体相比，石砌体的制作工艺也较为复杂，仅用于非常重要的古塔；对一些较为重要的古塔，将石材和砖搭配运用，促成了砖石混合式塔的出现。

石材一般用在砖石混合塔的重要部位，以发挥其强度高、耐久性和装饰性强的特点。砖石混合塔的台基、台阶均采用石材砌筑，以达到防潮、防水和提高耐磨性的效果；塔的檐角、斗拱、门窗也常采用石材砌筑，以增强塔的美观性。

## 1.2 古塔的结构特征

### 1.2.1 古塔的结构组成

中国塔因类型和功能的不同，在外形上有很大的差异，但作为多层和高层建筑的一个特定的种类，其结构仍可归纳为下部结构和上部结构两大部分。结合古塔的建筑特征，其主体结构自下而上由基础、地宫、基座、塔身、塔顶和塔刹组成，如图 1-15 所示。