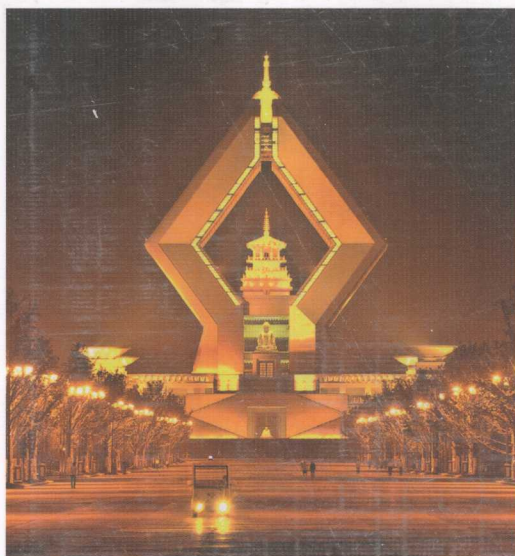


法门寺合十舍利塔建设纪实

(结构设计篇)

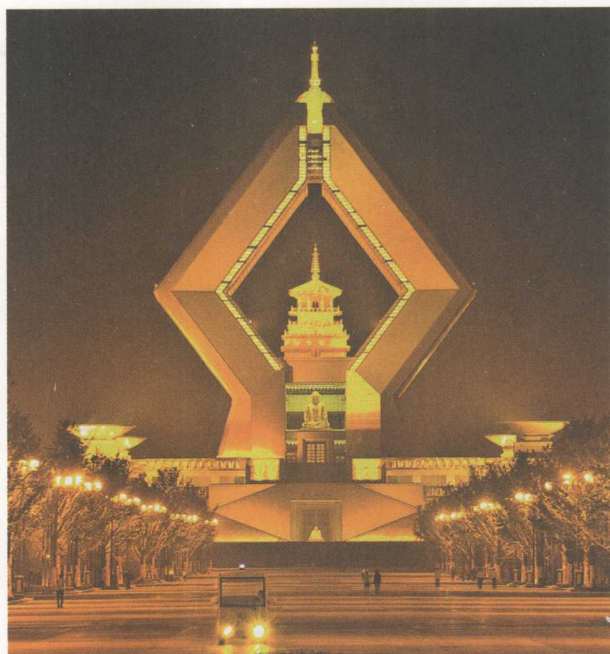
建学建筑与工程设计所有限公司



NLIC2970847831



中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS



法门寺合十舍利塔建设纪实

(结构设计篇)

建学建筑与工程设计所有限公司



NLIC2970847831

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

法门寺合十舍利塔建设纪实(结构设计篇)/建学建筑与工程设计有限公司. —北京:中国建筑工业出版社, 2012.9

ISBN 978-7-112-14722-9

I. ①法… II. ①建… III. ①佛塔—建筑结构—结构—设计—扶风县 IV. ① TU252

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第230104号

责任编辑:王跃杨虹

责任校对:王誉欣 关健

法门寺合十舍利塔建设纪实
(结构设计篇)

建学建筑与工程设计有限公司

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京画中画印刷有限公司印刷

*

开本:850×1168毫米 1/16 印张:8¼ 字数:200千字

2012年10月第一版 2012年10月第一次印刷

定价:37.00元

ISBN 978-7-112-14722-9

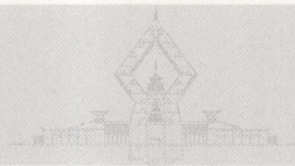
(22609)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序 言

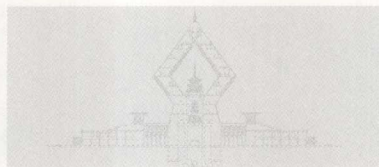


法门寺合十舍利塔是一幢雄伟壮观、造型独特的佛教建筑。该塔总高度 148m, 塔身从 44m 开始分成左、右两塔, 以 36° 角度向外倾斜, 到 74m 处转折, 左、右两塔又以 36° 角度向内倾斜到 109m 由连体结构拉结合拢; 在 54m 处设转换桁架承托 600 吨重的唐塔。该结构形式复杂, 已超出现行结构设计标准的适用范围, 国内外也没有类似的工程经验可供参考, 设计和施工难度很大。该工程的结构设计团队在设计大师孙芳垂先生带领下成功地完成了设计任务, 2009 年 5 月工程投入使用, 获得中国建筑学会优秀建筑结构设计一等奖以及中国土木工程詹天佑奖。

本书以实事求是的文风, 撰写了法门寺合十舍利塔结构设计纪实, 记载了设计中解决诸多技术难题的历程, 很有参考价值。我读完本书后, 在技术上得到许多收益: 本书作者针对该结构的复杂造型提出, 以控制结构变形作为第一要务, 刚度适度从严的原则是结构设计的主体思路, 工程需要采用刚度较大的型钢混凝土多束筒体系, 使其在重力荷载作用下满足使用要求, 在 7 度 ($0.15g$) 设防烈度地震作用下仍处于弹性阶段; 此外, 作者还正确的判断了该结构的关键部位是 74m 的转折处, 54m 的转换桁架以及顶部的连接部位, 对这些部位结构的内力、变形进行详细分析并注重构造设计; 鉴于该结构施工的复杂性, 结构设计还进行了施工模拟和预变形分析, 设置临时连接桁架并注重应力和变形监测。

本工程于 2008 年 2 月结构封顶, 2008 年 5 月 12 日发生汶川大地震。该塔地处陕西扶风县, 汶川地震发生时, 受到比较强烈的地震作用。震后作者对塔体结构作了全面的观察检查, 主体结构未见损坏, 仍处于弹性状态, 宏观上检验了设计预期的“中震弹性”抗震性能指标。这是我国第一幢经受过地震检验的复杂高层结构, 由此也验证了工程设计的主体思路、结构方案、抗震性能目标以及结构关键部位设计的合理性, 本书中介绍的成功设计经验值得工程界借鉴。

徐培福



法门寺合十舍利塔建设纪实法门寺合十舍利塔建设纪实法门寺合十舍利塔建设纪实法门寺合十舍利塔建设纪实法门寺合十舍利塔建设纪实

前言

1987年4月法门寺唐塔地宫在埋设一千一百余年后重新面世，地宫出土的佛指舍利和大量的金银器、珠宝玉石、秘色瓷等是法门寺在一千七八百年发展的历史上形成的丰富的文化积淀，这一丰富的文化积淀是古代中国本土文化与主要经由丝绸之路引进的佛教文化相互结合的产物，因此，它不仅是中国文化，而且也是东方文化艺术宝库中的瑰宝。

法门寺塔始建于唐朝，初时为木结构，至明代重修改为砖石结构（基础为石材），1981年明塔半壁倒塌，1988年重建代之以钢筋混凝土砖塔，无论是唐塔还是明塔，均是将塔与殿分建。

2003年陕西省政府决定重新规划法门寺景区，规划中划分为佛、法、僧三区，佛区由山门经佛光大道、六度台阶上达合十舍利塔。规划及建筑设计是由台湾李祖原大师完成。新建合十舍利塔为塔殿合一，双手合十，塔、窟（万佛龕）合一。建筑设计上体现了中国古代元素与现代技术和材料的结合。应李祖原大师邀请，工程结构大师孙芳垂亲自主持本项目的结构设计，从制定结构方案、设计全过程到主体结构验收孙总均是全力投入。本项目结构体系为现浇钢骨混凝土折线形束筒—连体—转换的复杂高层建筑，性能化抗震设计目标为设防地震下弹性，结构耐久性年限100年。鉴于本项目的重要性、造型的特殊，且无规范可循，在国内众多专家的参与和支持下该项目才得以顺利完成，并经历了2008.5.12汶川大地震的考验。

在此特别感谢建筑抗震超限委员徐培福主任及王亚勇大师为本书作序和担任主审，也特别感谢中国建筑工业出版社的编辑们对此书出版的支持。

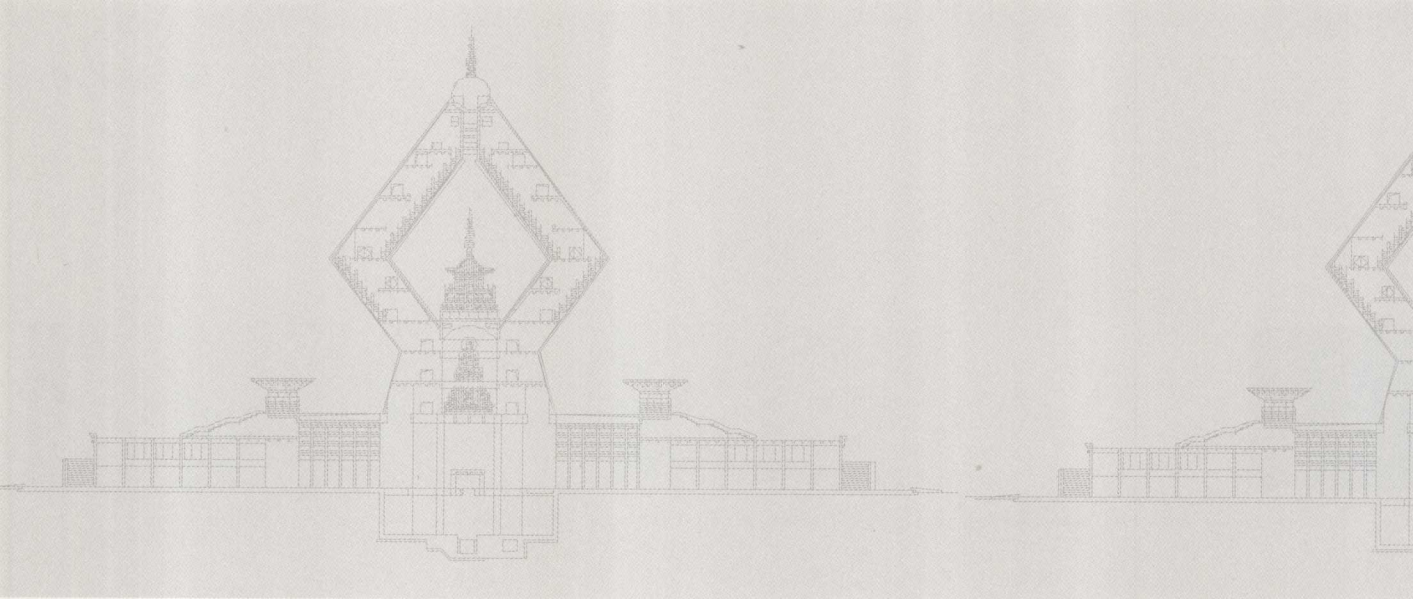


法门寺舍利塔建设纪实 法门寺舍利塔建设纪实 法门寺舍利塔建设纪实 法门寺舍利塔建设纪实 法门寺舍利塔建设纪实 法门寺舍利塔建设纪实 法门寺舍利塔建设纪实 法门寺舍利塔建设纪实 法门寺舍利塔建设纪实 法门寺舍利塔建设纪实

本书“法门寺舍利塔建设纪实”含（一）建筑设计篇、（二）结构设计篇、（三）施工篇、（四）装饰篇、（五）管理篇。结构设计篇介绍了法门寺舍利塔工程结构设计标准和结构体系，包含重力作用分析、地震作用分析、风作用分析、温度效应分析、施工阶段验算等内容，对于施工阶段变形观测、施工临时支撑体系等也作了简要介绍。除具有技术性外还具有趣味性，相信同行们一定感兴趣，并望读后不吝赐教，以共同促进我国建筑事业的发展进步。

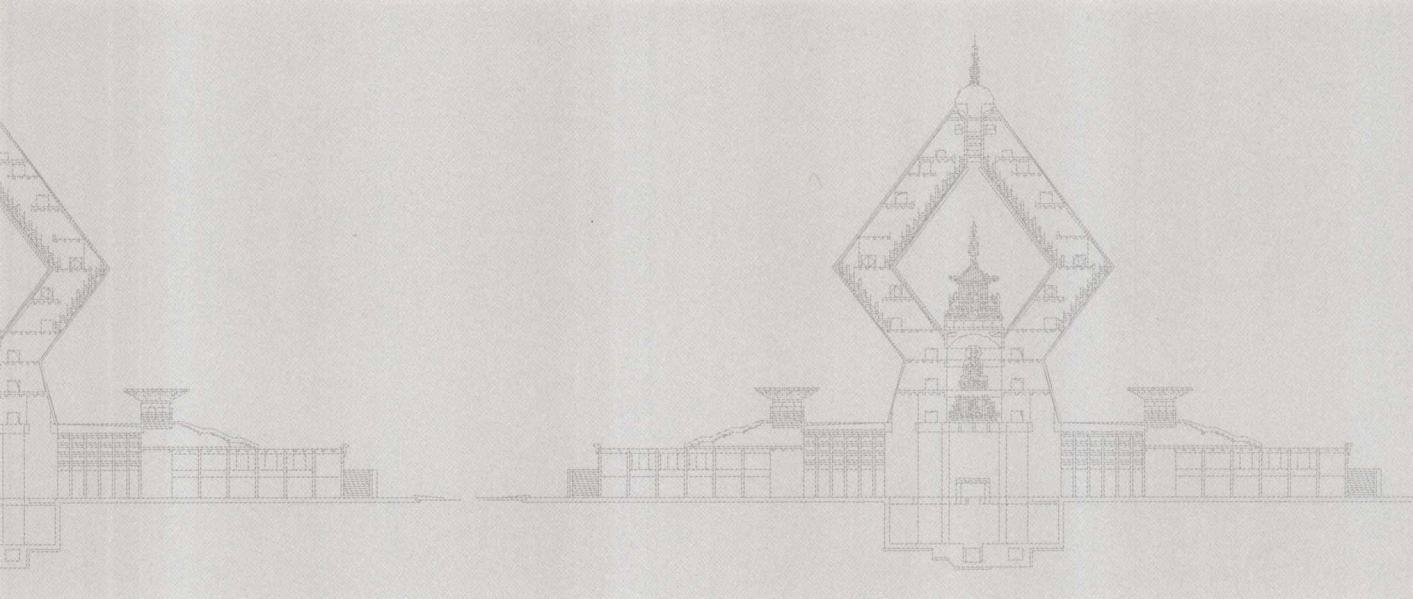
建学建筑与工程设计所有限公司

2012年5月

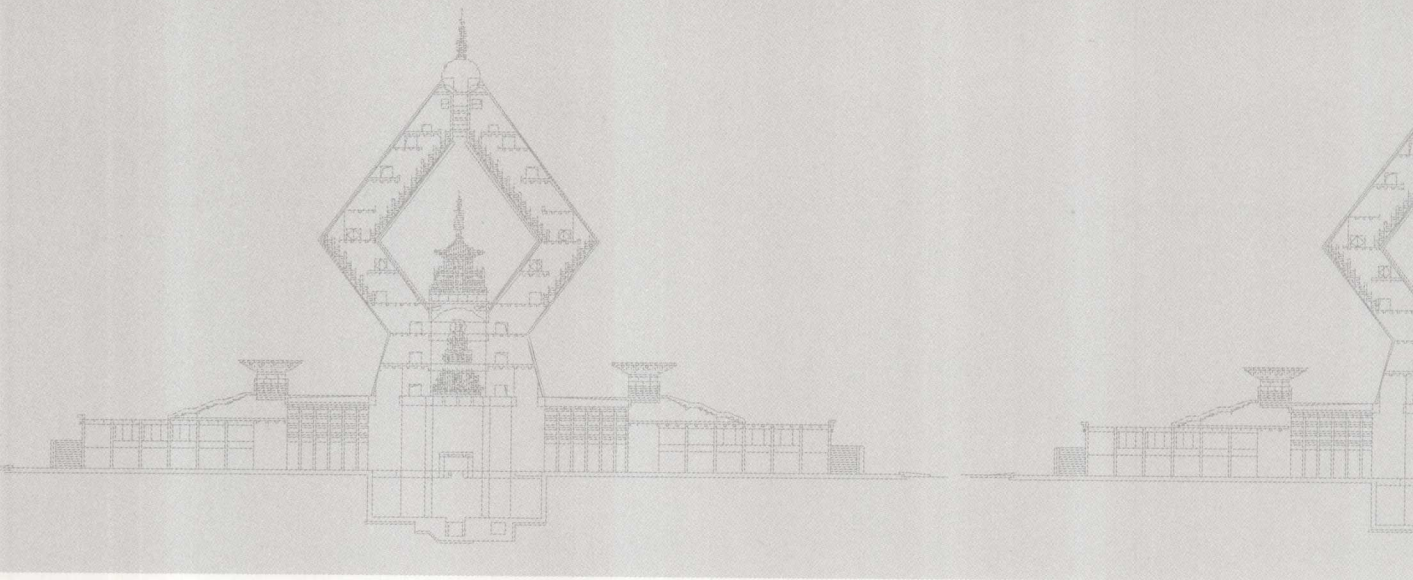


目 录

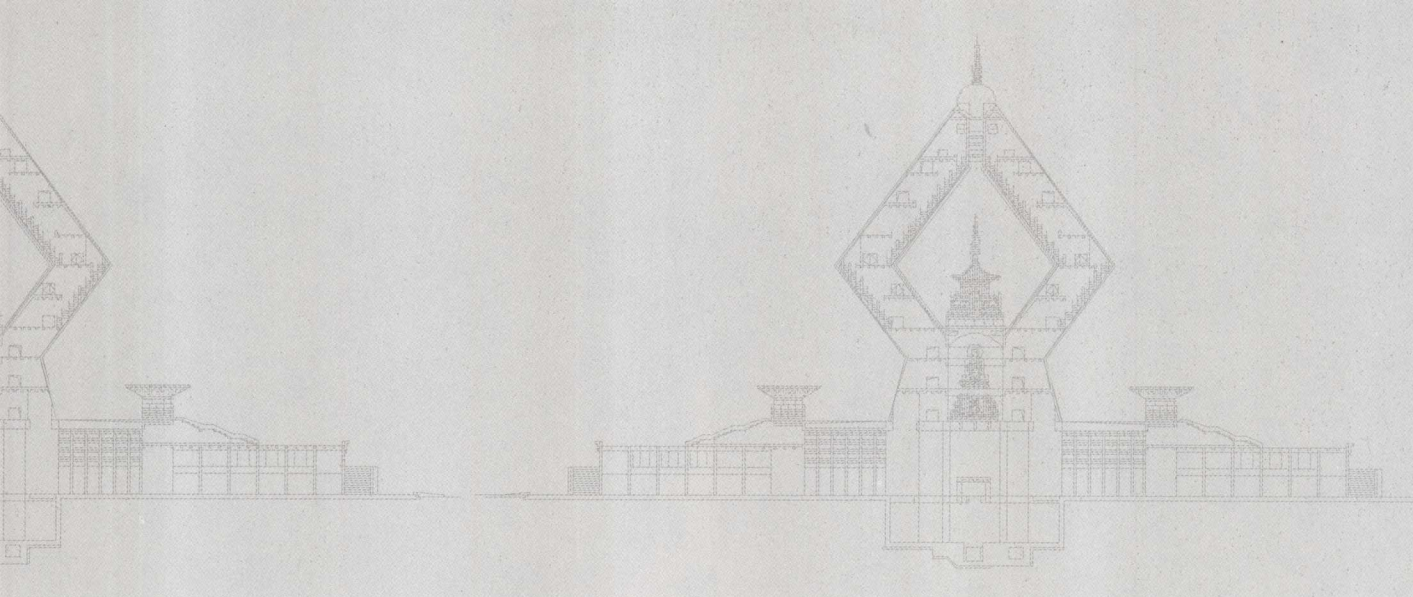
1	概述	002
2	法门寺合十舍利塔的特殊性	006
2.1	主塔结构的特殊性	006
2.2	主塔结构设计的主体思路	006
2.3	结构设计标准	007
3	方案设计	010
3.1	结构选型	010
3.2	结构体系	010
3.3	主塔结构方案	010
4	抗震性能化设计	020
4.1	建筑抗震设防类别	020
4.2	抗震设计地震动参数	020
4.3	安评报告地震参数	020
4.4	抗震性能目标	020
4.5	主要计算结果	021
5	计算分析	024
5.1	概述	024
5.2	重力作用分析	025
5.3	地震作用分析	029



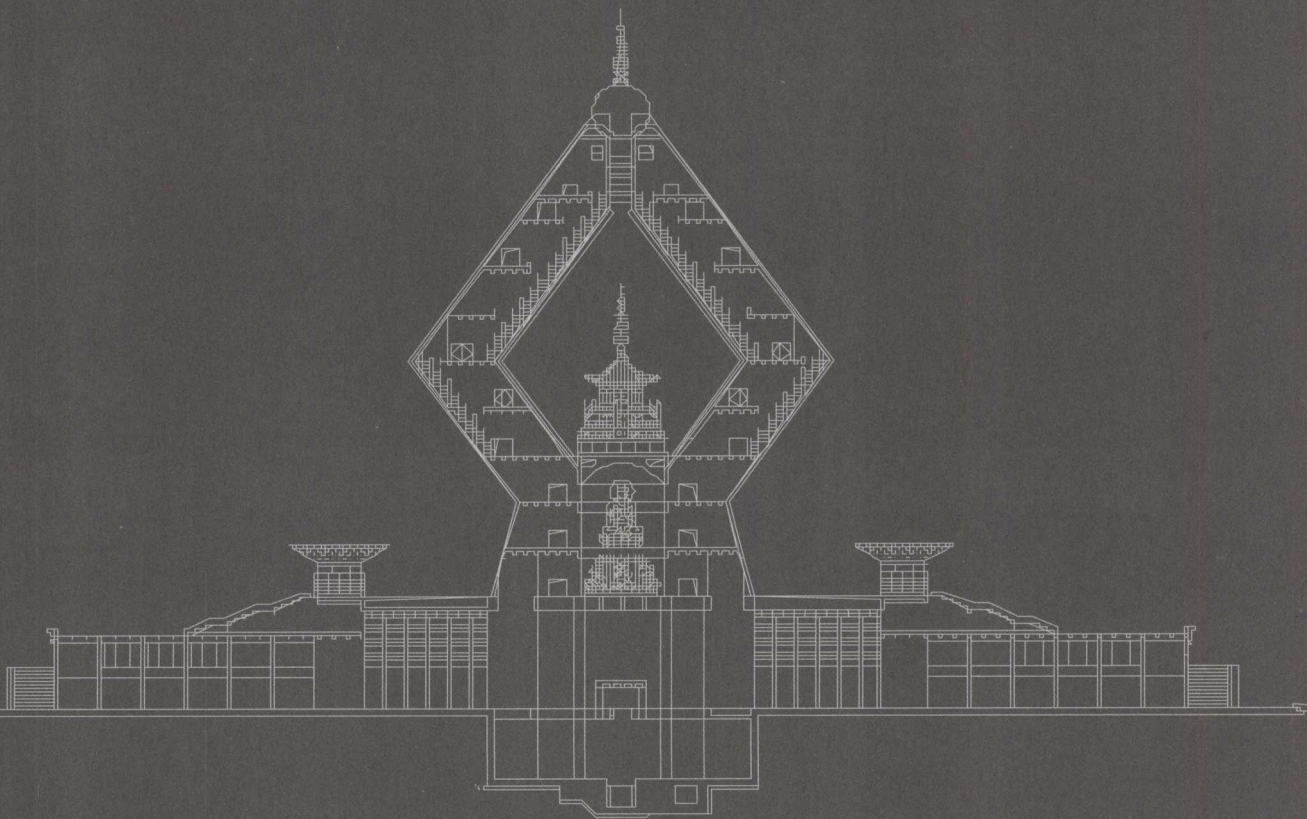
5.4	风作用分析	058
5.5	温度效应分析	058
5.6	施工阶段验算与预变形分析	058
6	各关键部位的内力及设计	062
6.1	54m 穹顶构造	062
6.2	54m 转换桁架内力图	063
6.3	54m 转换桁架构造	064
6.4	74m 拐点构造	065
6.5	天桥桁架内力	065
6.6	天桥桁架构造	066
6.7	牟尼珠构造	067
6.8	朝拜天梯	069
7	74m 拐角变形观测	072
7.1	拐角水平位移含义	072
7.2	拐角水平位移控制	072
7.3	讨论	072
8	基础设计	074
8.1	工程地质条件	074
8.2	荷载	075



8.3	基础设计	076
8.4	大震下整体抗倾覆验算	077
8.5	沉降观测结果	077
9	施工过程验算及配合	084
9.1	结构施工模拟和预变形计算分析	084
9.2	施工临时连接桁架	086
10	裙房井式楼盖边梁抗扭	094
10.1	法会大厅四角 27.0m × 27.0m 井式楼盖结构	096
10.2	问题的提出和解决	096
10.3	对边梁抗扭的再认识	097
11	结构体系的刚与柔	100
11.1	问题提出	100
11.2	层间位移角分析	100
11.3	合理刚度确定	100
11.4	结构刚度贡献率	100
11.5	结构的刚与柔	101
11.6	主塔筒体结构安全裕度评估	101
12	结束语	104
	参考文献	105



后 记	106
答 谢	108
特别致谢	108
获奖证书	109
图表目录	115



1 概述

1987年4月陕西省扶风县法门寺唐塔地宫在埋没1100余年后重新面世，释迦牟尼真身指骨舍利和李唐王朝数千件珍宝的出土面世引起了国内外佛教界、史学界、学术界和文化界的广泛瞩目。

2003年应陕西省宝鸡市法门旅游开发建设总公司委托，台湾李祖原大师主持担当了法门寺合十舍利塔文化景区的总体规划和建筑设计。在『法门寺』作为『二十一世纪世界佛教文化中心』战略定位下，其总体规划与结构布局本着三项基本指导原则：

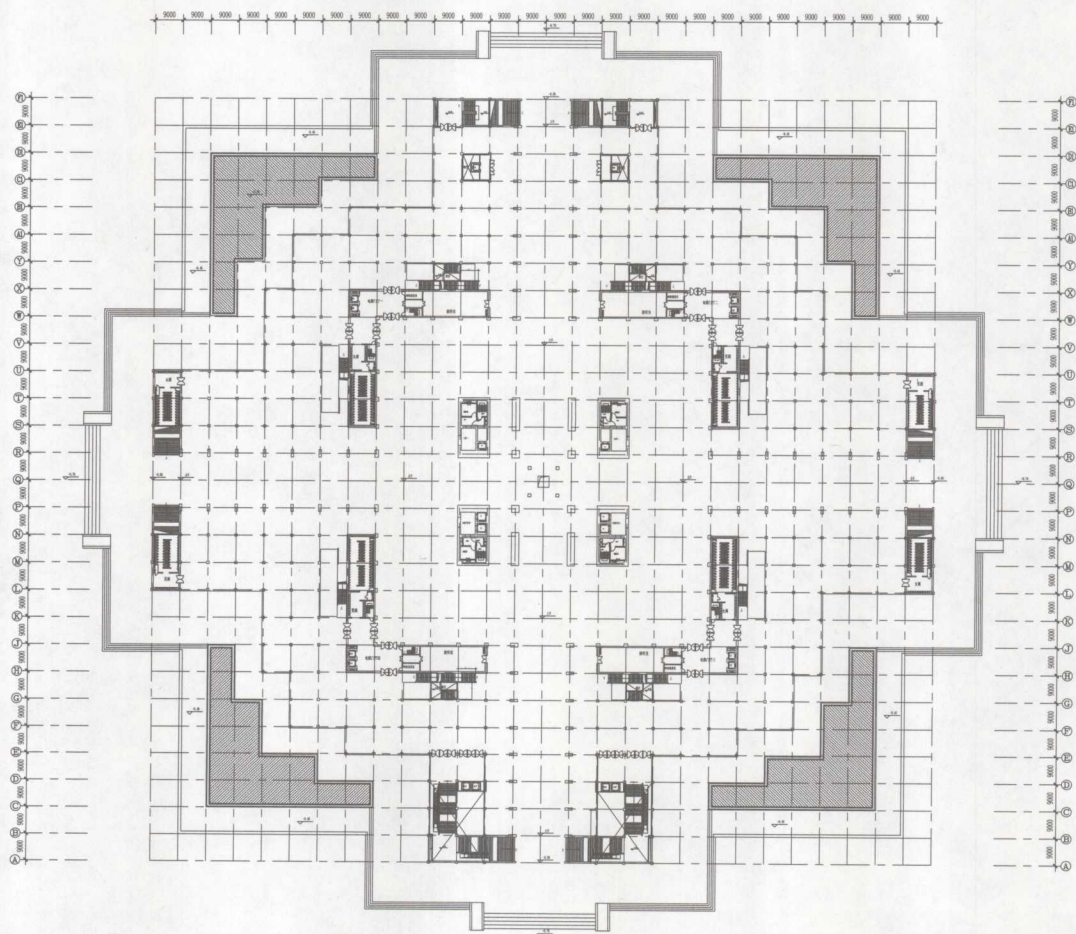


图 1-1 法门寺合十舍利塔平面图

第一，建设功能上，必须达到世界文化交流的目标。

第二，就时代任务而言，必须以提升建设中国精神文明为目标。

第三，就法脉传承上，必须使中华佛文化大发展、大凝聚及大传承。

总平面布局为佛、法、僧三区，总占地面积 3092 亩，佛区东侧为僧区，西侧为法区。合十舍利塔位于佛区最北端，由山门经佛光大道到达合十舍利塔约 1.8km。

合十舍利塔地下一层，裙房一层，主塔十一层：地下一层为地宫，层高 14.80m；首层裙房为法会大殿，层高 24.00m；裙房四周在 8.00m 及 16.00m 标高处两次收进并设设备夹层，二至十一层层高 10.00m。主塔 54m×54m 位于裙房中央，裙房尺寸 180m×180m，法会大殿平面尺寸 108m×108m，整体建筑对称布置，裙房与主塔间设后浇带，塔身从 54.00m 开始分成“左、右手”，呈双手合十状。在 54m 两手间平台上放有 600t 重唐塔，双手升至 109m 由 8m 高“许愿桥”拉接合拢，佛教信徒从 54.00m 沿朝拜天梯一步一拜可到达 109.00m 许愿桥。塔顶为 $D=12m$ 牟尼珠及 15m 高塔刹，总高度 148m。

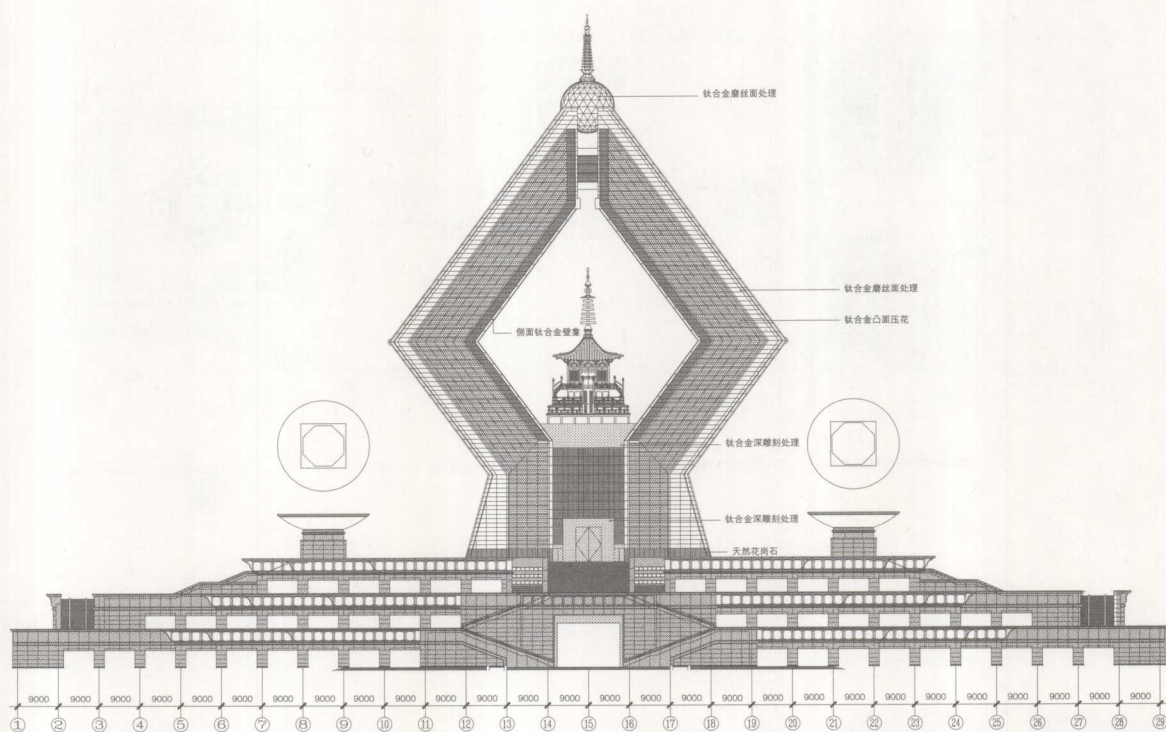


图 1-2 法门寺合十舍利塔立面图

标高 (m)	该标高以上重量 (T)
117	37292
109	102920
104	176900
94	267370
84	378790
74	491620
64	606670
54	727750
44	898750
34	1015800
24	1141100
16	1927800
8	2607600
0	3060200

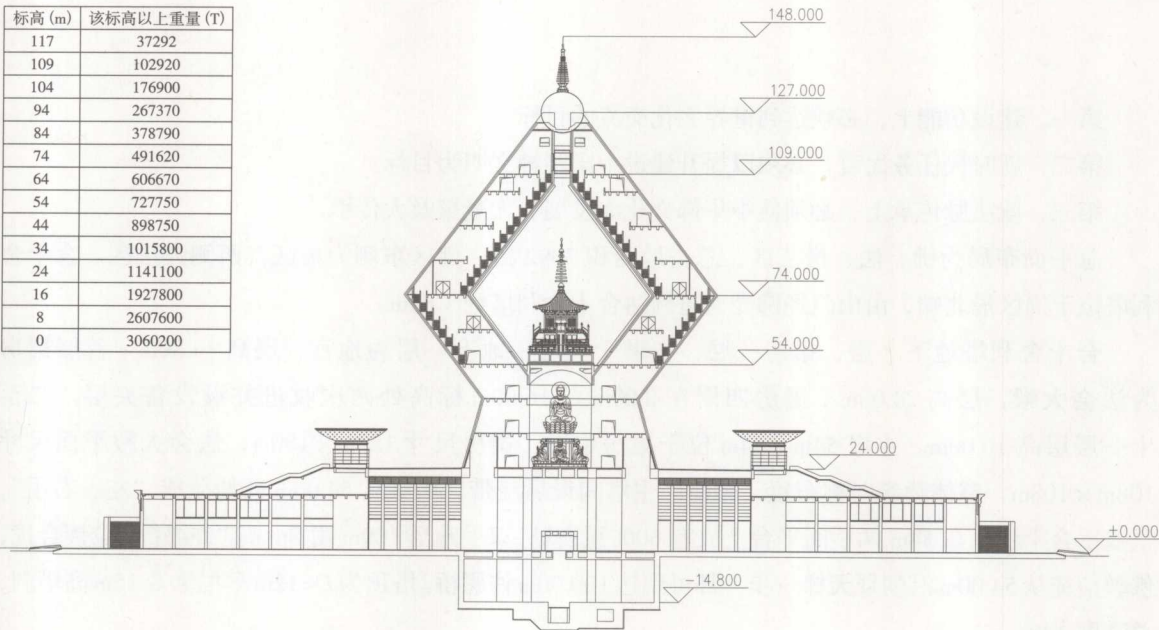


图 1-3 法门寺合十舍利塔东西向剖面图

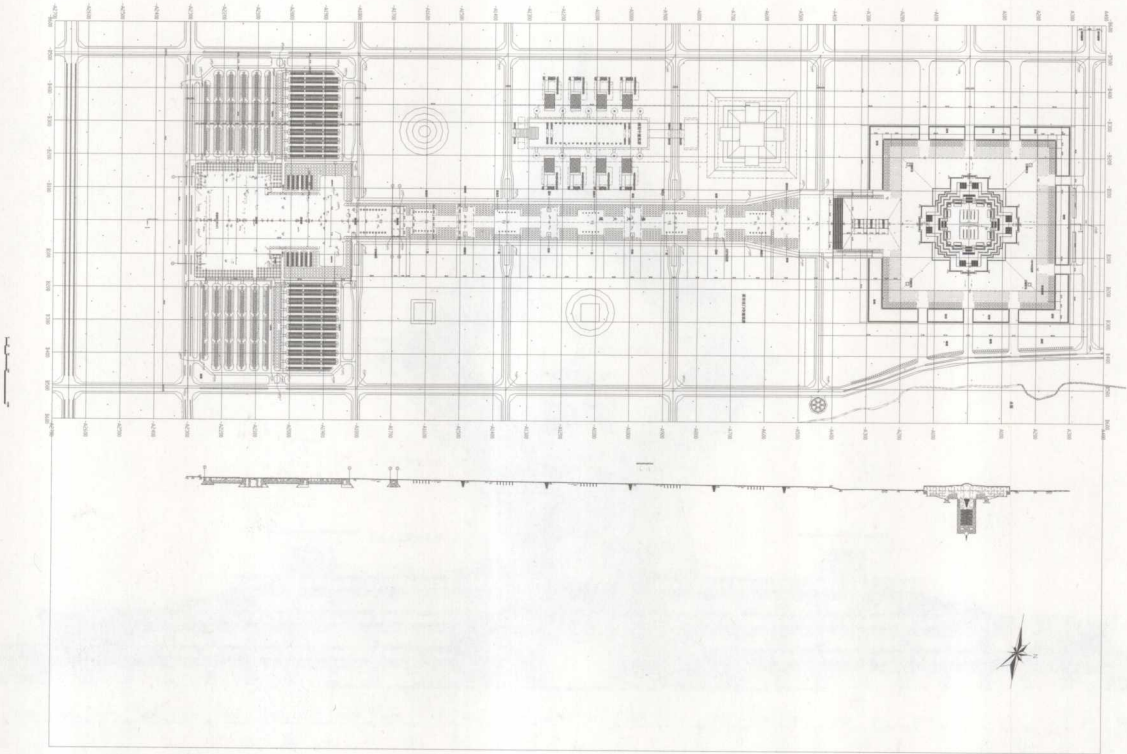
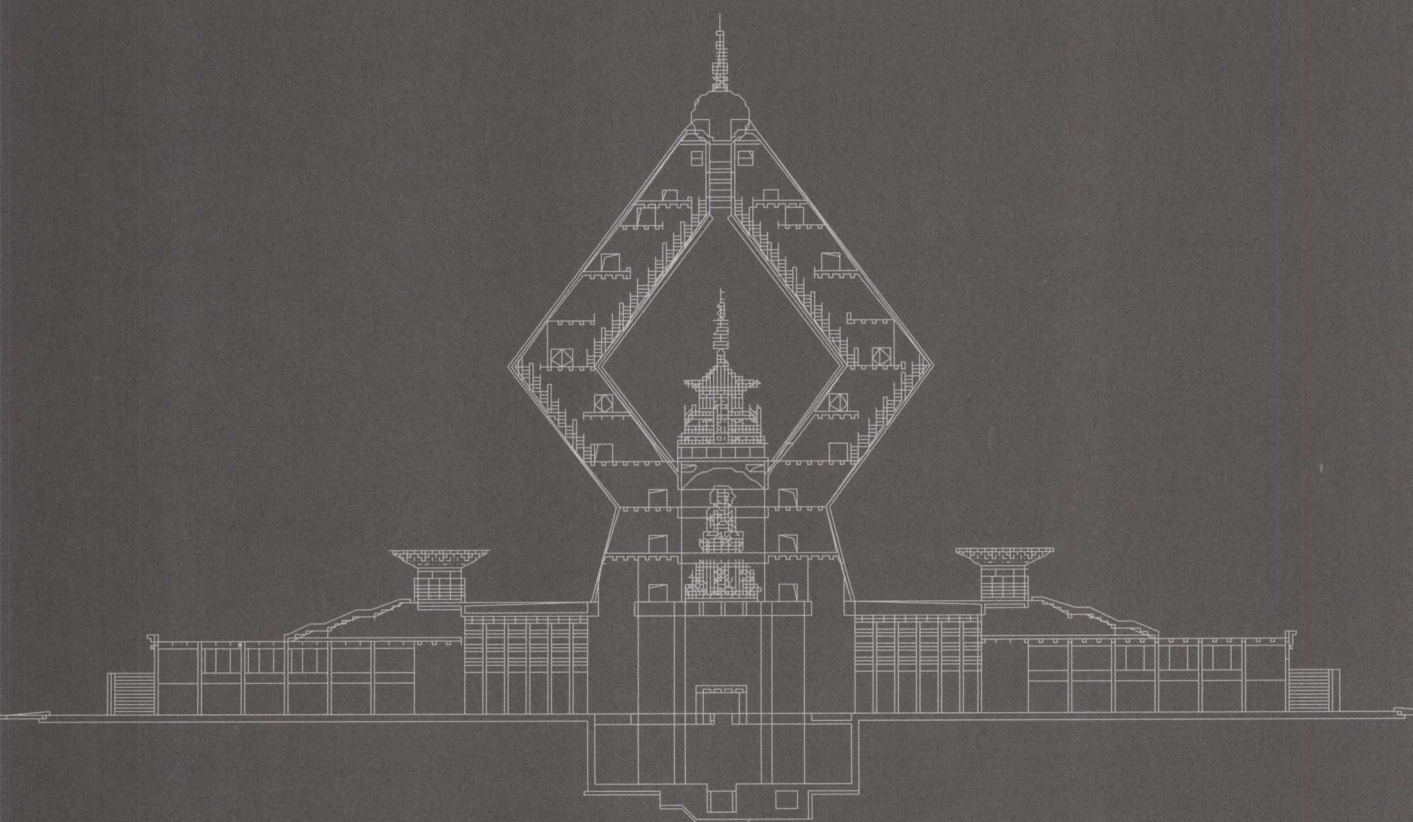


图 1-4 法门寺总平面图



2 法门寺合十舍利塔的特殊性

2.1 主塔结构的特殊性

主塔采用钢骨混凝土折线形束筒+转换的复杂高层建筑结构体系,由四个钢骨混凝土束筒,通过剪力墙和塔顶钢结构桁架组成的连体结构连成一个整体结构体系。该体系既非传统的塔式结构,亦有别于现代的高层建筑框架-筒体结构,其结构形式和多项指标已超出现行建筑结构设计规范的适用范围,属于超限设计的复杂高层建筑工程。具有如下主要特点:

(1)在重力荷载作用下,折线形筒体拐角部位产生了巨大的水平推力,从而使楼板受到很大拉力,并直接影响了整体结构的稳定性。

(2)双手合十形连体结构的竖向传力路线,经过两次的逆向转换后才复归到垂直向传至基础。在传力过程中还伴有水平向的变形和内力。对于如此独特的巨型结构,在无法采用结构模型加载试验对结构变形和内力进行验证的前提下,结构工程师对重力荷载作用下结构内力和变形的复杂性,要有清晰的概念。

(3)主塔结构受三向(双向水平和竖向)地震作用,应建立有限元模型,进行多遇地震作用下的弹性计算分析和罕遇地震作用下的弹塑性计算分析。

(4)鉴于工程的重要性,结构安全等级一级,结构设计使用年限50年、耐久性100年,建筑抗震设防分类为重点设防类(乙类),对抗震性能有更高的要求,应用抗震性能化设计方法,本身就是一个富有挑战性的课题。

(5)结构多项指标超出规范限值,设计须遵循“超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点”的要求,结构抗震性能目标需要由结构工程师与建设方和审查专家共同商定,以取得安全和经济的最合理组合效果。

(6)主塔作为供奉佛教塑像和器物的场所,有特殊的使用功能要求,在地震或其他外加荷载作用下,除保证结构主体的安全性之外,还不应产生过大变形和振动,避免附在塔体的塑像和器物跌落损坏。

2.2 主塔结构设计的主体思路

面对建筑结构的特殊性,无论是在重力荷载或在地震作用下,主塔结构设计的对策,都应将控制结构变形作为第一要务。主塔结构需要刚度较大的结构体系以抗御外力作用,使其既能在重力荷

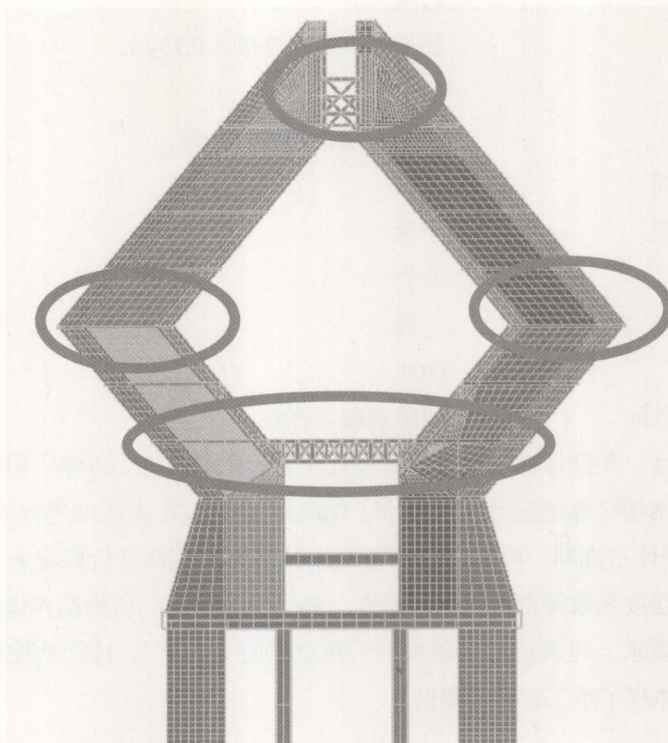


图 2-1 关键部位示意

载作用下满足使用要求，又能在遭遇地震作用后实现抗震性能目标的预期。“刚度适度从严”的原则应是主塔结构设计的主体思路。判别结构刚度的适当性，应以实现以下目标为标准：

(1) 在重力荷载长期作用下“双手”在 74m 标高拐角处的水平位移，应有效控制允许范围内，不使结构丧失整体稳定性。这是主塔结构能否长期保持正常工作状态的关键。

(2) 实现抗震超限审查提出的抗震性能目标，并应满足承载力、变形及构造措施等相关指标的要求。

2.3 结构设计标准

结构重要性系数	:	1.1
结构设计使用年限	:	50 年
设计基准期	:	50 年