

Structural
Design of
Shimao Chasm
Intercontinental Hotel

世茂深坑洲际酒店 结构设计

陆道渊 等著



中国建筑工业出版社

阅 览

Structural
Design of
Shimao Chasm
Intercontinental Hotel

世茂深坑洲际酒店 结构设计

陆道渊 等著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

世茂深坑洲际酒店结构设计/陆道渊等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 9
ISBN 978-7-112-21100-5

I. ①世… II. ①陆… III. ①饭店-室内装饰设计
IV. ①TU247. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 197648 号

世茂深坑洲际酒店地坑内 16 层(包括水下 2 层)是一个上下高度落差巨大极其复杂、浩大的工程, 因其“深度”也将同时带来许多的结构技术难题, 本书主要介绍在深坑酒店结构设计中的一些技术难题及解决办法。主要包括: 工程概况、结构方案设计、荷载与作用、结构多点输入地震作用的分析方法、结构整体计算分析、结构性能化设计、折线形带斜撑钢框架设计研究、楼板的应力分析与设计研究、施工模拟分析、边坡稳定分析研究、坑顶基础设计研究、坑口支座及预应力锚索设计研究、基于三维协同坑底复杂地貌的设计研究、复杂地貌回填混凝土及基础设计研究等。

责任编辑: 杨 杰 范业庶

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐 张 颖

世茂深坑洲际酒店结构设计

陆道渊 等著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15¼ 字数: 376 千字

2017 年 9 月第一版 2017 年 9 月第一次印刷

定价: 69.00 元

ISBN 978-7-112-21100-5
(30746)

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)

前 言

世茂深坑洲际酒店（简称“深坑酒店”）位于上海佘山脚下，由世茂集团投资建设，总建筑面积约6万平方米，共有三百多套客房，其中坑内16层（包括水下2层），坑上3层（±0以上2层，坑上裙房地下室1层）。“深坑酒店”异于常规地上而建的高层建筑，而是反其道行之，向地下建造80余米深，和废弃采石坑的崖壁融为一体，堪称凝聚、体现人类智慧的经典永恒之景。

阿特金斯（ATKINS）设计团队出色地完成了本项目建筑方案、建筑初步设计工作；华东建筑设计研究总院（ECADI）设计团队完成了本项目结构方案设计、结构初步设计和结构施工图设计，建筑专业合作完成建筑初步设计并完成了建筑施工图设计，机电专业完成全过程设计工作。“深坑酒店”项目建设施工过程中，总承包单位中国建筑工程总公司第八工程局，钢结构加工制作单位杭萧钢构股份有限公司等参建单位精诚合作，高水平地完成了复杂坑底基础与折线型立面桁架的施工，圆满地实现了设计意图，有效地确保了主体结构的顺利竣工。

“深坑酒店”在负80米的坑中建造，化腐朽为神奇，创造全球人工海拔最低五星级酒店的世界纪录。本项目遵循自然环境、反向天空而向地表以下开拓建筑空间的建筑理念成为人类建筑设计理念的革命性创举。本项目在设计和建设施工中解决了诸多工程建设难题，使其成为当代新科技与工程技术的结晶。美国国家地理频道《伟大工程巡礼》全程跟踪记录报道，也充分体现了本项目的难度和关注度。作为世界上第一个建在废石坑里的五星级酒店，“深坑酒店”无疑是今日全球独一无二的奇特工程！

“深坑酒店”的建筑造型新颖独特，平面和立面均呈弯曲的弧线型，主体结构采用两点支承结构体系，两点支承高差近80米，水平最大距离近40米。主体结构的复杂建筑体型及支承形式，在国内外建筑工程中没有先例，在很多方面都超越了现行技术标准，其设计与施工的复杂性及难度之大前所未有。面对严峻的挑战，结构设计团队反复推敲、多次求证，进行了大量的技术攻关，在设计和施工中进行了大量的创新实践。对于深坑上下两个支承点复杂的地震影响，通过多点输入的动力分析，选择位移时程计算方法，来研究上下两点支承存在幅值差而不考虑相位差的地震响应，有效地解决了两点支承结构体系的地震响应输入问题。采用数值风洞分析坑内风环境对两点支承建筑结构的影响，并考虑多阶振型对风振系数的影响。对于80余米超级边坡，采用静力与动力分析方法相结合，对天然无支护及锚固支护条件下的各个作用工况进行稳定性分析计算，并采取相应措施，确保整体边坡的稳定性。针对平面及立面不规则的建筑造型要求，“深坑酒店”主体结构采用钢框架支撑结构体系，沿建筑立面采用折线形立面桁架，建筑平面位置合理设置抗震缝，大大地改善了结构的抗震性能。对深坑复杂的坑底地貌环境，运用三维激光扫描技术，逆向建立岩面真实模型，完整地反映岩面同主体建筑的关系，指导坑底基础设计。对无临时支撑的倾斜弯曲结构施工方式，通过施工模拟分析计算，在确保结构安全的前提下，加快了施工进度。

本书共三篇，分14章。第一篇为工程基本概况，主要介绍工程背景情况、建筑结构设计方法和设计荷载的取值研究。第二篇为主体结构分析与设计，包括结构设计方法、整体计算、特殊折线形弯曲框架、抗震性能目标的实现以及施工过程的模拟分析。第三篇为基础设计研究，主要包括边坡设计、坑顶/坑底基础设计，以及基于三维激光扫描技术同建筑和周边环境的协同设计和基础设计研究。

本书编写工作历时一年多的时间，全书由陆道渊负责组稿定稿，各章节分工如下：第1、2、3章陆道渊、唐波、季俊、哈敏强；第4、5章哈敏强、陆道渊；第6、7章陆道渊、季俊、黄良；第8、9章季俊、陆道渊、黄良；第10、11、12章陆道渊、唐波、季俊；第13、14章陆道渊、唐波、黄良。

“深坑酒店”结构设计的相关研究工作得到了上海市城乡建设和交通委员会科学技术委员会、上海现代建筑设计集团的大力支持。在“深坑酒店”结构设计过程中，得到华东建筑设计研究总院各位领导和许多专家与同行的热情关心、指导与帮助，在此谨表示衷心的感谢！同时还要感谢参与过本工程设计的陆益鸣、任涛二位工程师。最后，由衷感谢华东建筑设计研究总院“深坑酒店”设计团队的各位同仁在结构与施工过程中给予的全方位的大力支持和配合。特别感谢全国工程勘察设计大师、华东建筑设计研究总院资深总工程师汪大绥先生以及华东建筑设计研究总院总工程师周建龙先生、姜文伟先生在项目设计和施工过程中的热情关心和指导。

感谢世茂集团对“深坑酒店”结构设计的大力支持以及为本书出版提供的必要的成果资料。本书介绍的内容引用了上海地矿工程勘察有限公司、上海现代建筑设计集团、中国地震局地壳应力研究所、上海申元岩土工程有限公司等单位在结构设计前期所做的杰出工作，在此一并表示感谢。同时，本书的编写过程中也参考了很多国内外同行的相关资料、图片及论著，并尽其所能在参考文献中予以列出，如有疏漏之处，敬请谅解。

陆道渊

2017年7月于上海

目 录

第一篇 工程基本情况

第 1 章 工程概况	1
1.1 项目概况	1
1.2 设计概况	3
1.2.1 建筑设计概况	3
1.2.2 结构设计概况	7
1.3 工程大事记	8
参考文献	13
第 2 章 结构方案设计	14
2.1 主体结构方案设计	14
2.1.1 钢与混凝土方案对比	14
2.1.2 结构方案布置	18
2.2 基础方案设计	21
2.2.1 地质情况概述	21
2.2.2 坑底基础方案	21
2.2.3 坑顶支座的基础方案	22
2.2.4 坑顶裙房基础方案	22
2.3 结构设计十大挑战	23
参考文献	25
第 3 章 荷载与作用	26
3.1 重力荷载	26
3.2 雪荷载	27
3.3 风荷载及风洞数值分析	27
3.3.1 风荷载计算	27
3.3.2 数值风洞分析	28
3.4 地震作用及参数取值研究	34
3.4.1 问题的提出	34
3.4.2 多点地震作用分析	34
3.4.3 工程场地地震作用计算	35
3.4.4 地震参数取值	42
3.5 温度作用	45
3.6 荷载效应组合	45
参考文献	46

第二篇 主体结构设计研究

第4章 结构多点输入地震作用的分析方法	47
4.1 两点支承结构体系的力学性能	47
4.1.1 顶部铰接和顶部滑动两种结构方案的选型	47
4.1.2 底部刚接顶部铰接结构体系的力学性能	48
4.2 结构多点位移时程输入地震作用的原理和分析方法	50
4.2.1 多点输入地震作用分析的理论概述	50
4.2.2 多点位移输入地震作用相对运动的基本原理	50
4.2.3 多点位移时程输入的特殊性和必要性	51
4.2.4 地震安评报告的地震动参数	53
4.3 单榀桁架模型多点位移时程地震作用分析	54
4.4 工程实用的多点位移输入分析方法	60
参考文献	60
第5章 结构整体计算分析	61
5.1 分析模型	61
5.2 模态特性分析	62
5.3 多遇地震反应谱分析	64
5.3.1 层间位移和扭转效应	64
5.3.2 地震楼层剪力和剪重比	66
5.3.3 框架承担的地震剪力调整	67
5.4 多遇地震一致输入弹性动力时程分析	67
5.5 结构整体稳定性非线性分析和人致振动	72
5.5.1 整体稳定性分析	72
5.5.2 人致振动分析	72
5.6 与常规高层地震分析的差异	73
5.7 罕遇地震下的弹塑性时程分析	73
5.7.1 钢管混凝土柱在弹塑性分析中的力学性能模拟	73
5.7.2 输入参数	79
5.7.3 简化单榀模型弹塑性时程初步分析	80
5.7.4 三维整体模型多点位移时程输入弹塑性时程分析结果	82
5.7.5 罕遇地震下弹塑性时程分析结论	86
参考文献	87
第6章 结构性能化设计	88
6.1 结构超限判别	88
6.2 超限设计的措施及对策	89
6.2.1 确定抗震性能目标	89
6.2.2 优化结构体系	89
6.2.3 提高关键构件的安全储备	89

6.3 主框架竖向构件内力分布规律	90
参考文献	92
第7章 折线形带斜撑钢框架设计研究	93
7.1 结构体系的特点	93
7.2 酒店框架柱分类	94
7.2.1 钢管混凝土柱径厚比控制	94
7.2.2 坑内局部异形钢管混凝土柱设计研究	95
7.2.3 坑内钢管混凝土柱受力规律研究	96
7.2.4 坑内钢管混凝土柱应力验算	96
7.2.5 坑内局部异形钢管混凝土柱设计验算	97
7.2.6 坑上圆钢管柱的受力特点研究	102
7.3 柱间支撑分析与设计研究	104
7.3.1 钢支撑设计研究	104
7.3.2 钢支撑结合受力特点的分析与设计研究	105
7.3.3 柱间支撑截面及验算结果	105
7.3.4 柱间支撑典型节点设计	106
7.4 框架梁的计算分析	108
7.4.1 框架梁设计基本原则	108
7.4.2 框架梁受力特点的设计方法研究	108
7.4.3 构件验算	112
7.5 弯折带支撑钢框架的受力特点小结	113
7.5.1 钢框架柱	113
7.5.2 钢支撑	113
7.5.3 钢框架梁	113
7.6 跨越桁架分析与设计研究	113
7.6.1 符合建筑要求的结构构件设计	114
7.6.2 楼板有限刚度的桁架杆件及桁架立钢管柱设计	114
7.6.3 跨越桁架关键节点设计	115
7.6.4 跨越桁架应力复核结果	119
参考文献	121
第8章 楼板的应力分析与设计研究	122
8.1 楼板的受力特点	122
8.1.1 酒店标准层楼板受力特点	122
8.1.2 跨越桁架上下弦杆楼层楼板受力特点	122
8.2 典型酒店层楼板设计及构造	123
8.2.1 典型酒店层楼板应力分析	123
8.2.2 钢筋桁架楼承板介绍及应用	125
8.2.3 B1及坑上首层(跨越桁架层)楼板分析与设计	126
8.2.4 坑上首层楼板局部应力水平较高的结构设计对策	131

参考文献	132
第 9 章 施工模拟分析	133
9.1 不同施工顺序下框架内力变化规律研究	133
9.2 钢结构主框架吊装方案及施工顺序	136
9.3 各施工步骤分析模型及内力变形图	138
9.4 施工模拟分析计算结果	142
9.4.1 结构整体受力变化规律	142
9.4.2 施工模拟计算内力与一次性加载内力对比分析	144
9.4.3 施工模拟计算应力比与一次性加载应力比计算结果对比及规律分析	147
9.5 结论	155
参考文献	155

第三篇 基础设计研究

第 10 章 边坡稳定分析研究	156
10.1 采石坑概况	156
10.2 边坡稳定分析方法	159
10.2.1 极射赤平投影法	159
10.2.2 极限平衡法	160
10.3 边坡稳定分析计算	160
10.3.1 边坡稳定静力分析	160
10.3.2 边坡稳定二维有限元动力分析	163
10.3.3 边坡稳定三维有限元动力分析	165
10.3.4 边坡稳定分析结论	170
参考文献	171
第 11 章 坑顶基础设计研究	172
11.1 工程地质概况	172
11.1.1 区域地质条件概况	172
11.1.2 场地工程地质条件	172
11.2 桩型选择及单桩承载力确定	174
11.3 桩位布置及基础底板设计	175
参考文献	177
第 12 章 坑口支座及预应力锚索设计研究	178
12.1 坑口地质概况	178
12.2 坑口基础设计与构造	178
12.3 坑口基础梁预应力锚索设计	179
12.3.1 预应力锚索布置原则	179
12.3.2 预应力锚索设计	182
12.3.3 预应力锚索试验	185
12.4 坑口基础梁支座节点设计	186

12.4.1 基础梁型钢埋件设计	186
12.4.2 球形支座设计	187
参考文献	189
第 13 章 基于三维协同坑底复杂地貌的设计研究	190
13.1 坑底地质概况	190
13.2 三维激光扫描技术概述	190
13.2.1 三维激光扫描技术概念	190
13.2.2 三维激光扫描仪工作原理	191
13.2.3 三维激光扫描技术的特点	194
13.3 三维激光扫描技术应用	194
13.3.1 点云处理与三维建模	194
13.3.2 深化基础设计	199
13.3.3 指导理论计算	199
13.3.4 局部加强处理	199
13.3.5 工程协同设计	200
13.3.6 快速土方量计算	201
参考文献	202
第 14 章 复杂地貌回填混凝土及基础设计研究	203
14.1 坑底基础与复杂地貌的关系	203
14.2 岩质边坡回填混凝土的原则与要求	203
14.2.1 岩质边坡回填混凝土的基本原则	203
14.2.2 岩质边坡回填混凝土的基本要求	205
14.3 岩质边坡回填混凝土设计	208
14.3.1 回填混凝土岩面抗滑移验算	208
14.3.2 回填混凝土有限元分析	210
14.4 复杂地貌回填混凝土后上部结构基础设计	212
14.4.1 变底标高的多层箱型基础设计	212
14.4.2 高边坡独立承台基础设计	216
14.4.3 特殊部位基础设计	225
14.5 回填混凝土及基础设计最终方案	227
14.6 回填混凝土及基础施工方案	228
14.6.1 施工流程	228
14.6.2 钢筋及模板加工安装	230
14.6.3 混凝土浇筑	230
参考文献	232

第一篇 工程基本情况

第1章 工程概况

1.1 项目概况

上海松江国家风景区，藏匿着一个废弃的深坑。这个深坑是废弃采石场的遗址。2006年，世茂集团决定利用深坑的自然环境，建造一座五星级酒店，整个酒店与深坑融为一体。为了将此项目打造成另外一个世界建筑奇迹，聘请了设计迪拜帆船酒店的世界顶级设计公司阿特金斯担任建筑的方案和初步设计，由华东建筑设计研究总院负责结构、机电的方案和扩初设计以及全部施工图设计，由中国建筑工程总公司第八工程局负责建筑施工总承包。

世茂深坑酒店位于上海西郊古城松江，天马山深坑，原为卢山。位于官塘之东，与钟贾山相对峙，东北远望佘山，嘉庆府志载，可能是以卢姓得名。新中国成立前开始炸山采石，至50年代末，整个山丘已荡然无存，至2000年挖出近80m的深坑（图1.1）。

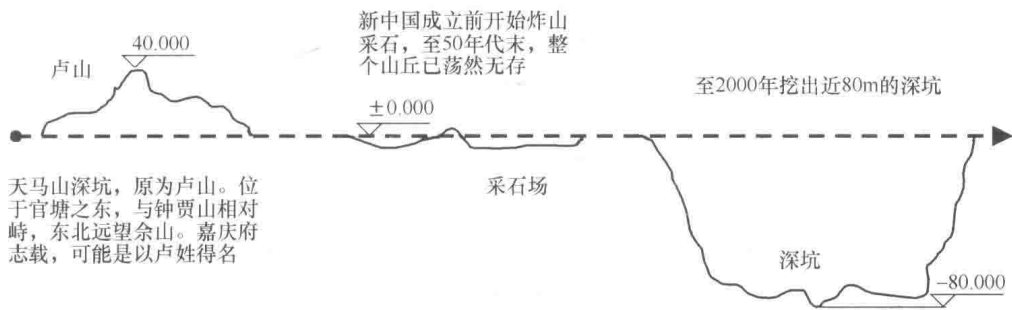


图 1.1 深坑历史演变

深坑近似椭圆形，上宽下窄，面积约 36800m^2 。其周长约 1000m ，东西向长度为 280m 左右，南北向宽度为 220m 左右（如图 1.2 所示），深度最深约 80m ，深坑崖壁陡峭，坡脚约 80° （如图 1.3 所示）。深坑围岩由安山岩组成，收集雨水后成为深潭（如图 1.4、图 1.5 所示）。

深坑内部主要由人工开采的碎石块及弱风化基岩组成。碎石层夹少量杂物，土质松散，具中等压缩性。弱风化基岩属火山熔岩，场地内均有分布，有极少量风化裂隙，具低压缩性，且坑底高差较大。深坑内情况如图 1.6、图 1.7 所示。

根据基地的地形状况，主体建筑依靠东边崖壁建造。由于整体规划限制，与主体建筑相联系的裙房控制限高 10m 以下，尽可能在水平方向延展开，使建筑各个功能部分可以兼顾互相的联系，又可以有各自单独的出入口。深坑酒店平面布局如图 1.8 所示。

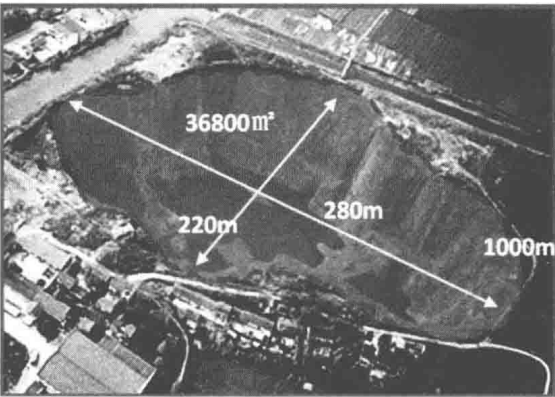


图 1.2 深坑平面示意图

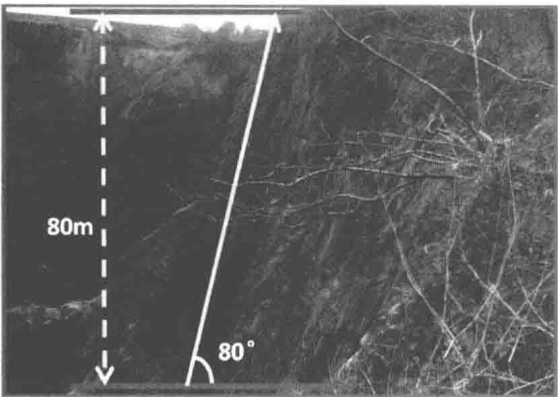


图 1.3 深坑立面示意图



图 1.4 深坑抽水前

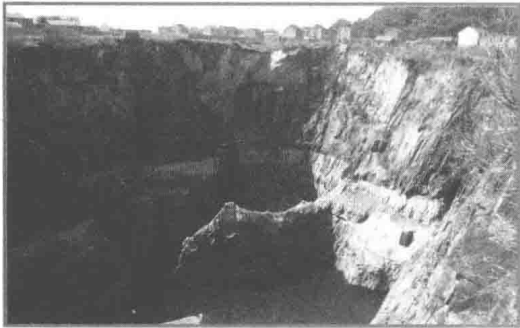


图 1.5 深坑抽水后



图 1.6 深坑内部详图 1



图 1.7 深坑内部详图 2

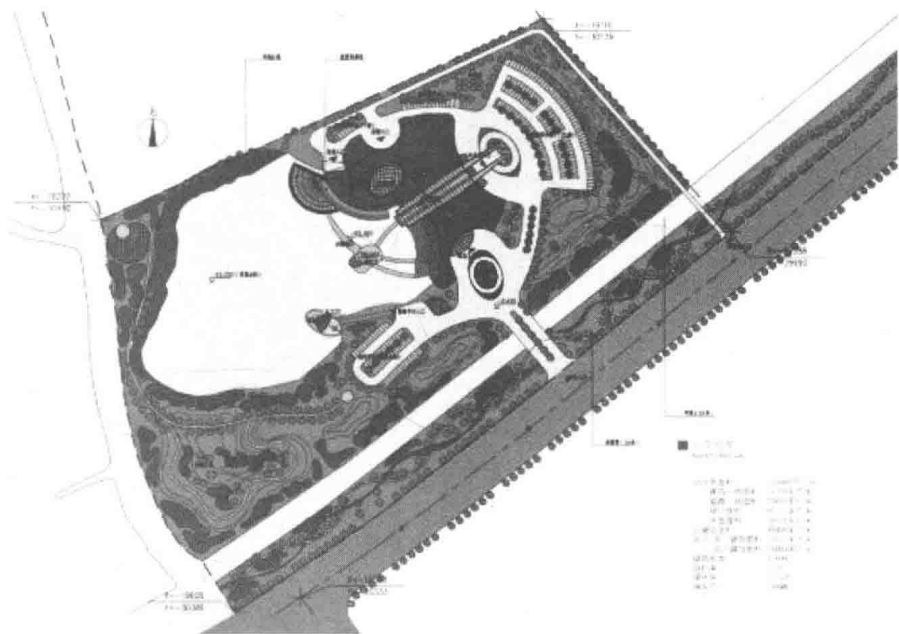


图 1.8 深坑酒店平面布局

1.2 设计概况

作为深层地下空间资源开发利用的引领之作，世茂深坑酒店创新性地将废弃矿坑“化腐朽为神奇”。着眼利用于城市空间的价值最大化，综合运用建筑行业前沿技术与生态环保理念，遵循自然环境规律，巧妙结合矿坑的实际地势结构，突破现有技术的限制，在“向地表下拓展空间”的设计理念变成现实的同时，修复和再利用遭受环境破坏的城市空间区域。

1.2.1 建筑设计概况

世茂深坑酒店是松江辰花路二号地块发展用地的一部分（图 1.9、图 1.10），酒店以

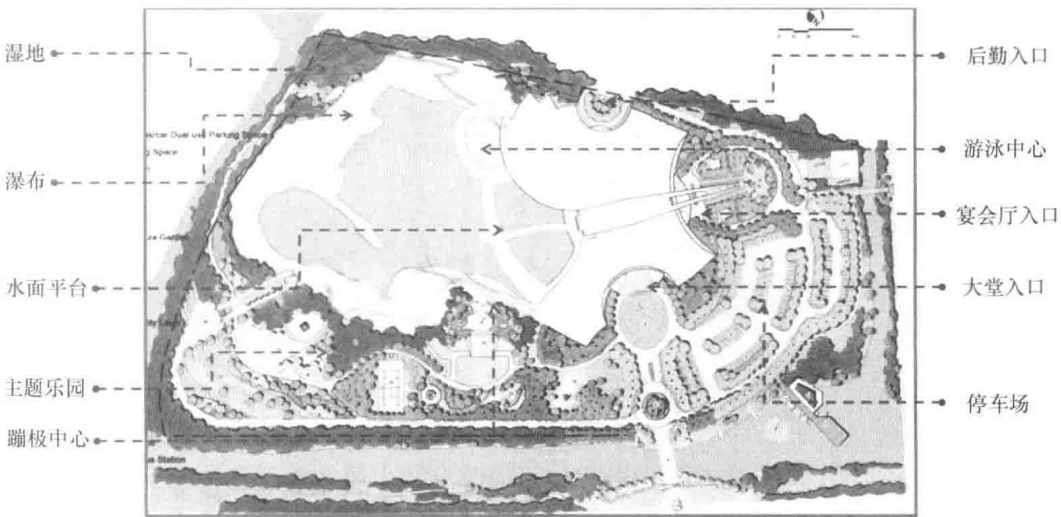


图 1.9 深坑酒店总体平面图

其独特的地形和地貌特点与其他功能建筑结合互补，将辰花路二号地块打造成为会议和度假服务的高档区域。

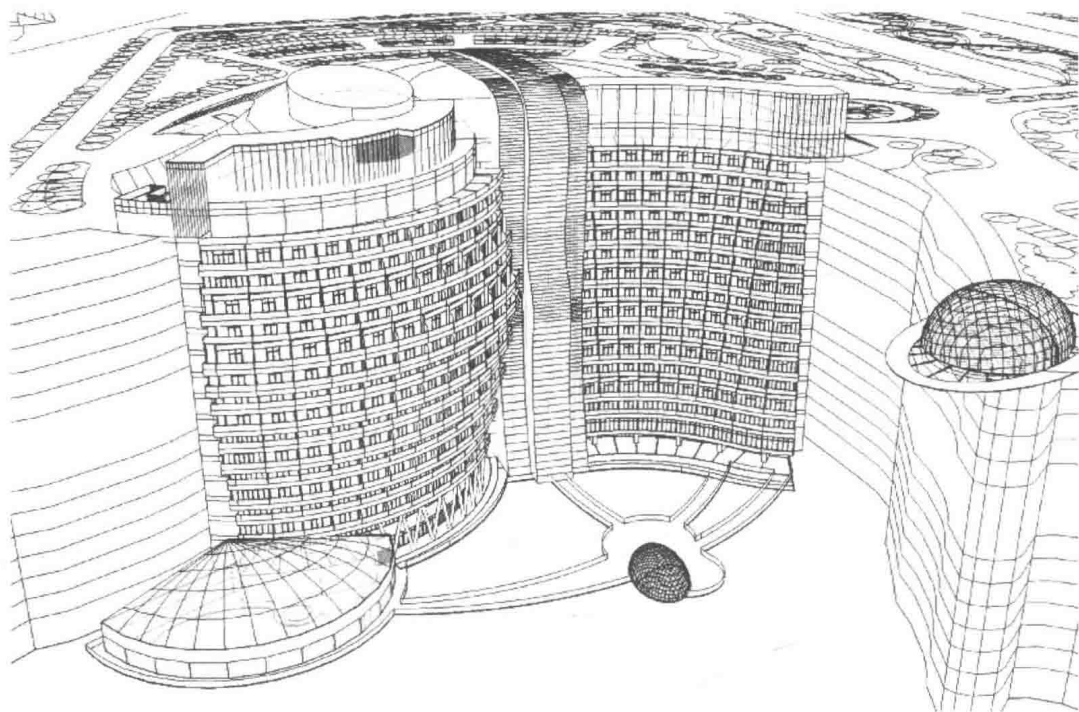


图 1.10 深坑酒店建筑透视图

深坑酒店工程占地面积为 105350m^2 。由一座五星级深坑酒店及相关附属建筑组成，总建筑面积为 62171.9m^2 ，共有三百多套客房，坑内 16 层（包括水下 2 层），坑上 3 层（±0 以上 2 层，坑上裙房地下室 1 层）。深坑典型建筑平面布置图如图 1.11~图 1.14 所示。

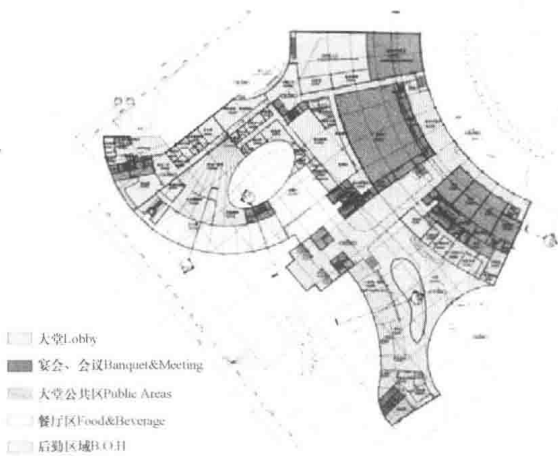


图 1.11 坑上首层建筑平面图



图 1.12 坑上二层建筑平面图

深坑酒店主体建筑主要分为三部分：地上部分、坑下至水面部分、水下部分。
地上部分的裙房平面南边酒店的主入口连接中心大堂，北面为后勤服务区域，东边的宴会会议中心和西边的餐饮娱乐中心。主要的客梯和观光电梯组位于建筑的东西主要轴线上。



图 1.13 标准层建筑平面图

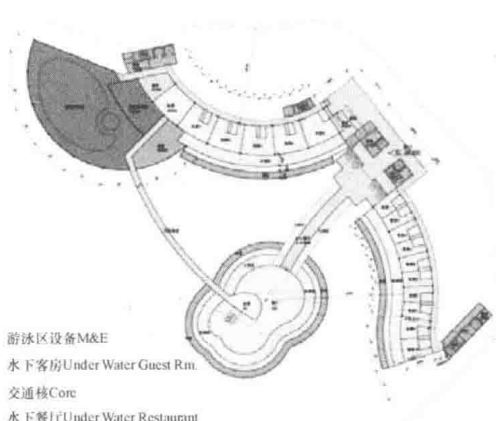


图 1.14 B14 层建筑平面图

坑下至水面部分以建筑的酒店客房为主。各个楼层建筑平面均以曲线单元存在，单侧布置客房，面朝横山景观，向内朝向崖壁为背景设计的天然室外中庭。客房主体各层均设有贯穿南北两端的水平通廊，串连起各个客房。层与层之间以形似瀑布的竖向交通核心筒连接。

水下部分是酒店的特色客房区和特色水下餐厅。建筑平面上延续主楼的曲线形式，客房布置在曲线的外延，满足观看水景的要求。配合客房和餐厅的位置，在外围设置 2m 纵深的水族缸，各种人造主题水族馆。主体建筑立面图如图 1.15～图 1.17 所示

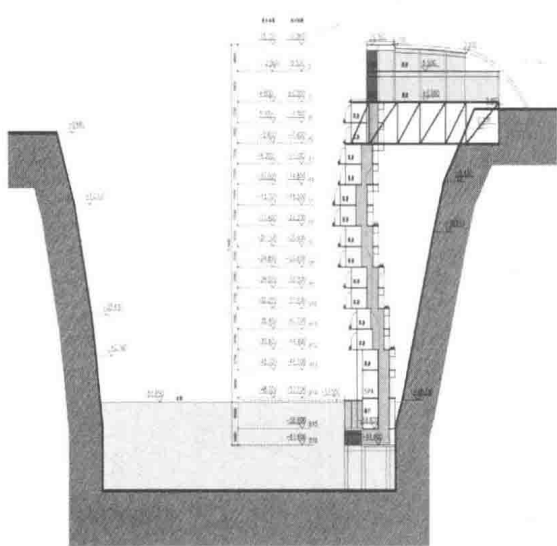


图 1.15 建筑北面立面示意图

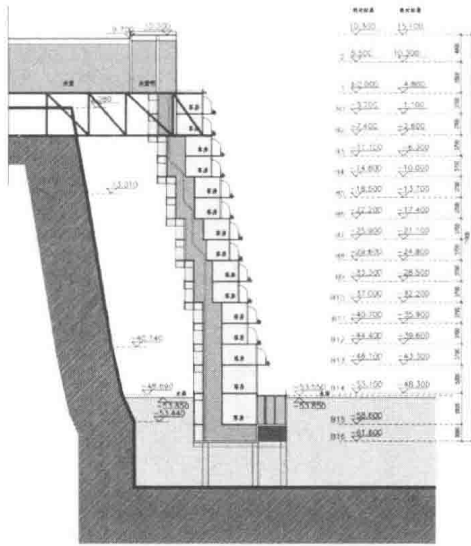


图 1.16 建筑南面立面示意图

深坑酒店立面风格以流线关系为主导，强调立面的细腻和与周边自然环境的协调。该酒店的立面形式源于“瀑布”、“空中花园”、“自然崖壁”和“山”。

酒店的主楼使用玻璃和金属板材，塑造层叠的崖壁和天然生长出的空中花园，住于酒店客房，尽可眺望对面崖壁和横山的宁静的景致。酒店的裙房模拟天然山坡，采用覆土植

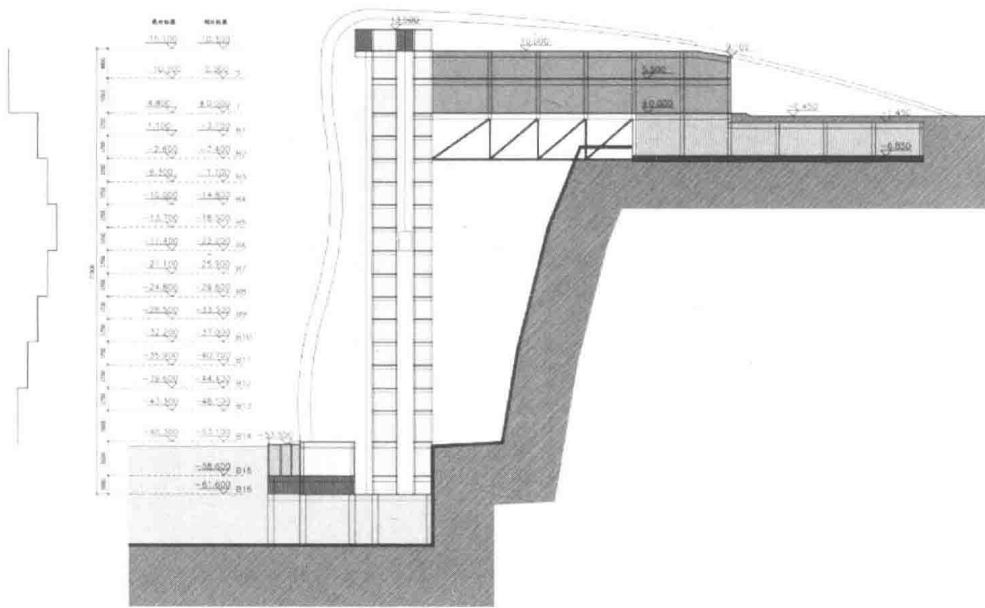


图 1.17 中部观光电梯立面示意图

草屋面，在满足设计的可持续发展理念的同时，以天然生长的形式连接主楼。而贯穿主楼和群房各层楼面的垂直核心筒使用透明绿色玻璃幕墙，形似天然透明的瀑布，从山上沿着崖壁跌落。深坑酒店立面效果图如图 1.18~1.20 所示。

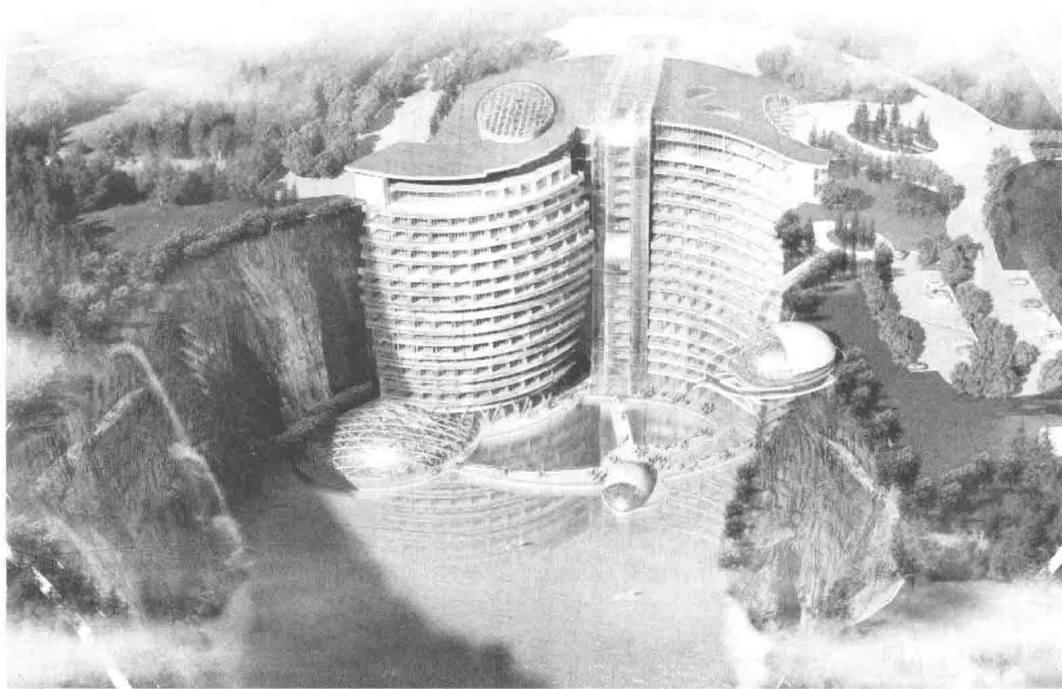


图 1.18 深坑酒店整体立面效果图 1（本图由世茂集团提供）

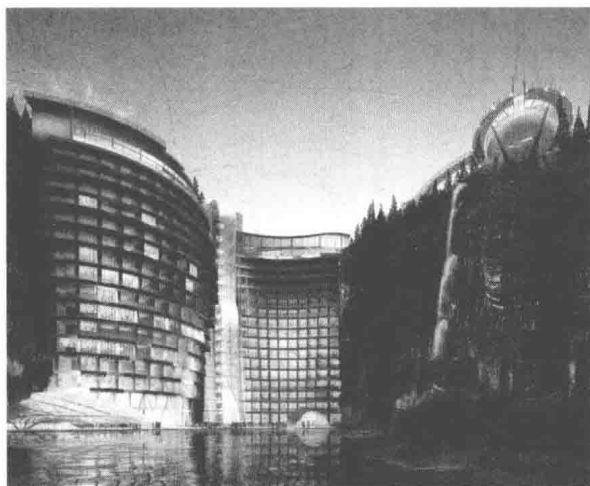


图 1.19 深坑酒店立面效果图 2
(本图由世茂集团提供)

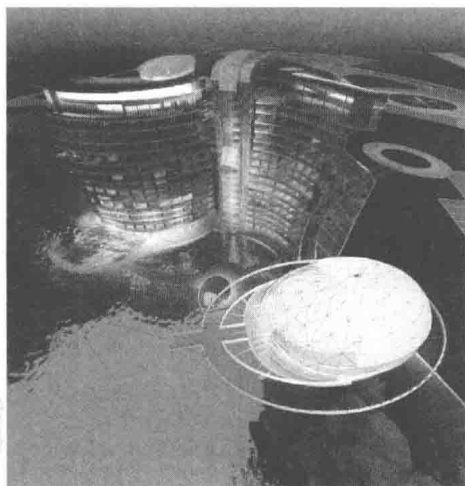


图 1.20 深坑酒店立面效果图 3
(本图由世茂集团提供)

1.2.2 结构设计概况

“深坑酒店”的建筑造型新颖独特，平面和立面均呈弯曲的弧线型，主体结构依靠 80 余米地质深坑，采用两点支承结构体系。坑内主体建筑通过分块箱形基础固结在坑底弱风化基岩上，同时在坑顶 B1 层楼板标高处作为水平铰接支座，对其提供水平方向约束。结构在水平荷载下的受力变形形态不是常见高层的“悬臂梁”特征，而显现出较为特殊的一端刚接另一端铰接的“简支梁”特征（如图 1.21 所示）。结构钢桁架在顶部与坑顶基岩通过铰接支座连接，地震波将分别通过坑底和坑顶基岩传递到主体结构。

主体结构采用两点支承结构体系，两点支承高差近 80m，水平最大距离近 40m。主体结构复杂的建筑体型及支承形式，在国内外建筑工程中没有先例，在很多方面都超越了现行规范和规程的要求，其设计与施工的复杂性及难度之大前所未有。面对严峻的挑战，结构设计团队反复推敲，多次求证，进行了大量的技术攻关，在设计和施工中进行了大量的创新实践。

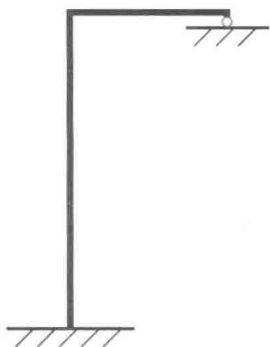


图 1.21 简支梁示意图

对于常规悬臂类高层建筑，地震作用的动力分析，主要以多向单点输入地震波的方式。而本工程为两点支承结构体系，需考虑多点多向地震输入问题。通过多点输入的动力分析，选择位移时程计算方法，来研究上下两点支承存在幅值差而不考虑相位差的地震作用，有效地解决了两点支承结构体系的地震响应输入问题。

对于常规悬臂类高层建筑，地震作用的动力分析，主要以多向单点输入地震波的方式。而本工程为两点支承结构体系，需考虑多点多向地震输入问题。通过多点输入的动力分析，选择位移时程计算方法，来研究上下两点支承存在幅值差而不考虑相位差的地震作用，有效地解决了两点支承结构体系的地震响应输入问题。

现行规范求解风振系数均是只考虑结构第一模态，对于一般悬臂型结构，由于频谱比较稀疏，第一振型起绝对影响，此时可以仅考虑结构的第一振型。本工程为两点支承结构体系，若只考虑第一模态，可能会忽略一些主要贡献模态，设计中考考虑多振型对结构风振系数的影响。区别于常规地面上悬臂类高层建筑，位于深坑内两点支承结构，采用数值风洞分析，模拟坑内风环境对建筑的影响。