

ENGINEERING AESTHETICS OF CONCRETE

混凝土的工程美学

撰文 葛文俊 堂朔空间设计研究室

混凝土技术起源于古罗马，后失传，一直到20世纪初，法国人奥古斯特·佩雷成功地将钢筋混凝土框架结构应用于诸多类型的建筑上，从富兰克林街25号公寓到香榭丽舍剧院，证明了钢筋混凝土框架结构强大的适应性。随后曾经在佩雷设计室工作过的勒·柯布西耶在1914年提出了多米诺体系（一种采用暗梁做法的柱板结构），其作为国际式的原型将钢筋混凝土框架体系推广至世界各地。低廉的造价和相对较低的工艺要求，令钢筋混凝土在经济和人口爆炸式发展的20世纪成为应用最为广泛的结构体系。

框架体系在钢筋混凝土的结构原型中无疑是最具生命力的。力求突破常规的现代主义大师创造性地提出一系列展现混凝土结构特有的“工程美学”：1）在梅里达古罗马艺术博物馆中，莫内欧还原了古罗马时代的混凝土建造逻辑，将两千年前封存的记忆带到此时此地；2）在1970年大阪世博会巴西馆中，巴西建筑师Paulo Mendes da Rocha使用钢筋混凝土密肋结构表达出难以置信的轻盈和优美；3）在朗香教堂中，柯布西耶否定自己早年提出的机械美学，建造出“如听觉器官般柔软”的神性空间，虽然建筑的主结构是钢框架+石材填充墙，但钢和石材无法表达“柔软”的空间，所以柯布西耶选择了在混凝土的表面再现贝壳般的温暖；4）坎德拉的霍奇米尔科水上公园餐厅采用双曲抛物面建造出压力永远沿结构方向传递的薄壳结构，6cm的结构厚度和完全无梁柱的曲面展现如纸片般轻盈；5）在西扎与巴尔蒙德合作完成的1998年里斯本世博会葡萄牙馆中，为营造一张自然悬垂的帐幔，巴尔蒙德选择了内部应力最小的悬链线，这一次混凝土是配重而非受力的主体；6）路易斯·康的金贝尔美术馆使用可以达到极大纵向跨度的拱顶结构，但其最显著的成就是利用漫射的光线戏剧性地消除了混凝土的物质性——“结构在光线中融化了”；7）瑞士人Kerez的一墙宅和Jungling and Hagmann与Conzett合作的奥托广场大楼，则利用钢筋混凝土相对于木材、砖石和钢结构所特有的模糊性建造出迷一样的结构，获得戏剧性的空间。

古罗马艺术博物馆，拉斐尔·莫内欧

古罗马艺术博物馆位于西班牙拥有最多古罗马建筑遗址的城市——梅里达。博物馆处于废墟上，成为项目面临的巨大挑战。莫内欧摒弃了用大跨结构跨越废墟的做法，而是充分考虑原有古罗马建筑材料技术和结构体系，以保证新旧建筑之间的完美共存（图1）。

帕金斯曾说，“对混凝土内在性能的开发和利用是罗马对欧洲建筑史最伟大的单项贡献”，古罗马工匠使用天然火山灰作为原料制作天然混凝土，创造了完美的拱券结构。莫内欧正是从中提炼出古罗马建筑的精髓——将混凝土这种强度较大的填充粘结材料浇筑在两面薄且平的砖墙之间，将两面墙凝结为一体，共同形成了抗压结构（图2）。如欲实现跨度，则用砖砌成双层拱圈，然后在其中浇筑混凝土，最终形成复合结构从而实现较大的跨度。砖墙作为“永久模板”保留在混凝土的外表，在获得高强度的同时也保留了砖建筑细腻的肌理感和清晰的建构逻辑。

现浇混凝土结构的层与层之间一般通过“陶土管”的形式结合：陶土管的一端预埋在下层的混凝土中，当混凝土凝固之后，继续砌筑砖墙，上一层的混凝土将淹没陶土管的另一端，此时陶土管的作用类似于预留钢筋的作用（图3）。

莫内欧通过尺度的对比在建筑中获得绝佳的效果：在通过入口时，低矮的尺度以及在通往展厅的封闭天桥给人以压抑感。但进入大厅后，10m高的尺度让人豁然开朗。对于博物馆光线的处理，展览大厅并没有开窗，光线则是透过高侧窗和天窗照进室内，给人以神秘感和艺术气息（图4）。



图1 博物馆展厅地下室新旧建筑的共存

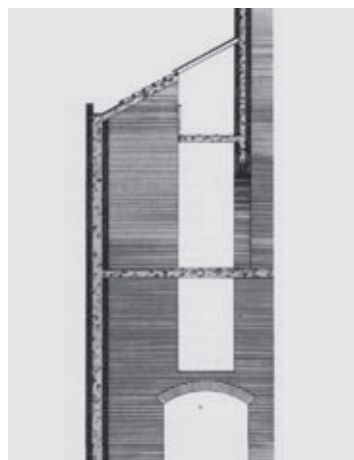


图2 罗马混凝土墙体剖面图

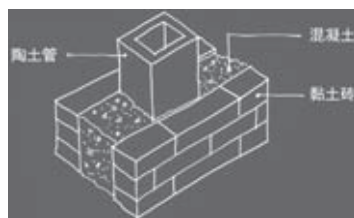


图3 墙身做法图



图4 博物馆正厅巨型拱门

葛文俊

堂朔空间设计研究室主持建筑师，师从著名建筑教育家葛明教授、著名建筑师张永和教授；获东南大学建筑学学士、麻省理工学院理学硕士；曾担任麻省理工学院客座讲师，现担任东南大学客座讲师；曾获2005年北京中国国际建筑艺术双年展学院组金奖，南京321领军型科技人才称号。

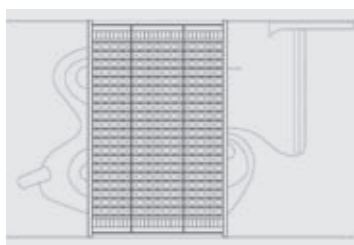


图6 屋顶平面



图7 1970年大阪世博会巴西馆模型

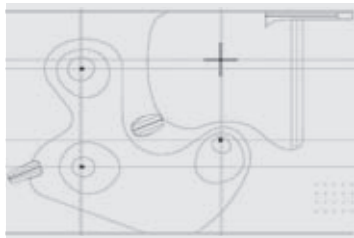


图8 地上层平面显示出隐藏在“山丘”中错动的柱子



图9 地下层平面



图10 两个圆拱垂直相交构成的支撑

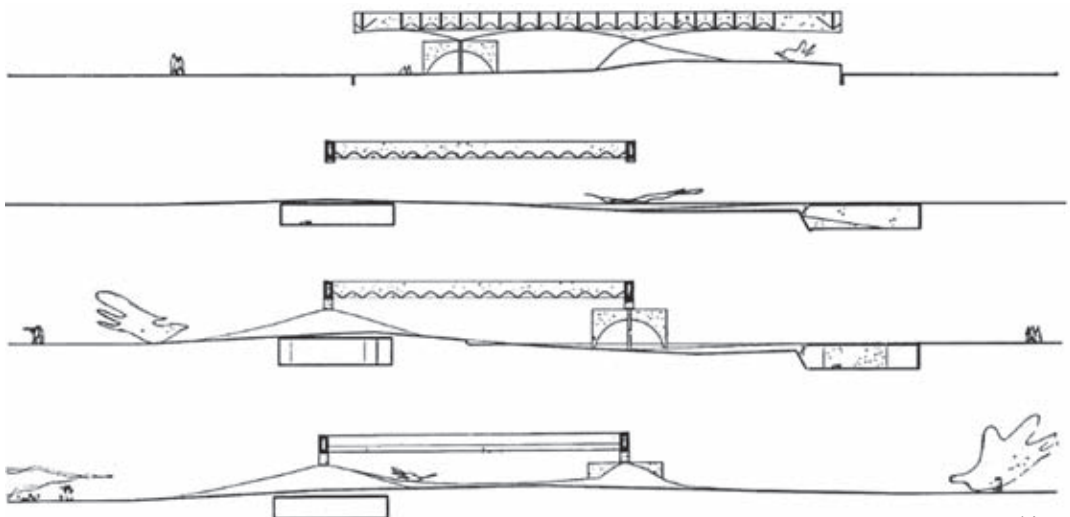


图5 剖面图

1970年大阪世博会巴西馆，Paulo Mendes da Rocha

1970年大阪世博会的巴西馆提出了一种对自然和建造关系的探索。起伏的场地与水平性的屋顶占据了视觉主体，剧院和展览空间被埋入地下。在这里建筑与自然是一种相互依附的关系，二者的建构很难说是以谁为主体。

屋顶使用了预应力混凝土，纵向设两根最低高度为2m的大梁，横向上每2m设高约2m的混凝土梁，梁间以底部边长2m的金字塔体填充，这样便形成了2m×2m的均匀方格网系统。每个小锥体截去顶部，覆以玻璃，以此向下部空间引入了光线（图5，6）。长50m、宽32.5m的巨大屋盖由非正交网格上的4个点支撑在屋顶的边缘处。但它并非用传统的方式支撑，建筑师在平坦的地面上用混凝土修饰出三座“山丘”，其中3根柱子隐藏在“山丘”中（图7~9），从地下的使用空间可以清楚地看到这几根粗大的柱子。建筑师创造了一个假象，仿佛支撑屋顶的不是结构，而是场地。通过对地形的修饰，既反映出了巴西海滩的凸凹形态，展现了巴西特征，同时也是对日本地震频发的一种反映。他说，“这种支撑体系的作用是用来抵御日本频发的地震带来的强大水平压力。”

除了场地内凸起的三座“小山”支撑，建筑师还加入了一个由两个圆拱垂直相交构成的支撑（图10），它成为了场地上唯一的竖直元素，隐喻着城市景观。这也是地表上唯一清晰可见的支撑构件。

巴西馆与其说是建筑，不如说是一个优雅、简洁而不失狂野的大地艺术品。

朗香教堂，勒·柯布西耶

朗香教堂的白色幻象盘旋在孚日山脉最末端的欧圣母院朗香村之上，从13世纪以来，这里就是朝圣的地方。教堂规模不大，仅能容纳200余人。柯布西耶在动笔前说，他要把朗香教堂设计成一个“视觉领

域的听觉器件”，它应该像人的听觉器官一样柔软、微妙、精确和不容改变”。最终，他摒弃了传统教堂的模式和现代建筑的一般手法，把它当作一件混凝土雕塑作品加以塑造（图11）。

柯布的设计关照了教徒仪式进程中的体验与感知需要。斜向南墙与主要人流方向一致，在引导人流的同时也暗示和区分两处室外空间的不同性质：南面为入口空间，东面为室外宗教活动场所。靠西端墙体所增加的厚度在主入口形成由世俗空间进入神圣空间的过渡空间，给人以心理感受上的过渡。沉重的屋顶向上翻卷，与墙体之间留有400mm的带形空隙，屋顶因此悬浮起来，在引入光线的同时又给人以神圣感。

倾斜的墙面与厚重的屋顶的实现得力于外包混凝土的以钢架为主的结构体系。机翼形钢架为屋顶结构主体，下由钢筋混凝土圆柱组成的三角形框架与柱子一同支撑（图12）。为了减轻屋顶自重，建筑师把水泥喷浆换为外铺铝皮。建筑的西、东、北面墙壁都是利用从老教堂废墟上找回的石块填充的，三角形钢架的变化形成了曲率变化丰富的墙体。

朗香教堂虽然使用喷射混凝土的外表皮，但是没有工业技术的冰冷，而是似温暖的“贝壳”融入场地之中。柯布西耶说过，建筑应该着意展示那些赋予我们诗意与快乐的力量，可以说朗香教堂正是用其怪诞的方式诠释了工业制品的“诗意”与“快乐”。

霍奇米尔科水上公园餐厅，费利克斯·坎德拉

霍奇米尔科水上公园餐厅是由费利克斯·坎德拉设计的壳体式建筑，坐落在一条运河岸边，四周环绕的花园提供了良好的自然环境。四个相交的双曲抛物面形成的八角形交叉拱向四周展开，将风景融入建筑，同时又采用无梁柱薄壳结构，轻盈的形体巧妙地融入景物之中（图13）。

通常情况下，壳体拱交叉处的静荷载会使得拱向外弯曲，偏转产生的力垂直于外壳的表面，从而形成由外向内的边缘裂纹。虽然边缘肋骨有助于减轻这些裂纹，但是边缘肋骨会使得建筑边缘厚重，难以达到建筑师所追求的轻薄感。对此，坎德拉认为问题的关键在于解决交叉拱处的受力。餐厅中的每个交叉拱处形成一个V字形梁，混凝土梁中加配钢筋。这些梁提升交叉拱处的刚度，减少拱的弯曲和变形，同时将边缘力拉向交叉拱处后，再传递到地基，从而解放边缘。建筑支撑件是V字形梁倒置于土壤中，独特的基脚处理防止壳体沉没在潮湿的墨西哥土壤；同时为了抵抗侧向推力，相邻地基用Φ1钢筋相连（图14）。

此建筑采用了现浇混凝土结构体系。首先，用木材支撑模板，搭建起建筑的基本形体，然后在模板的表面铺设钢筋，最后在表面浇筑混凝土（图15~17）。建筑内部没有支撑体，空间浑然一体，没有界限。这是一个令人眼花缭乱的薄壳体建筑，其精湛的技艺和敏感性以及美学性质不断影响着结构工程的发展。

1998年里斯本世博会葡萄牙馆，西扎

西扎的建筑总是表现出一种戏剧性的效果，但不同于许多张扬与华丽的建筑，西扎带给人们的是细腻而平静的展现。1998年里斯本世博会的葡萄牙国家馆就是这样的建筑，它体现了西扎所追求的“纯净”概念，同时也是优秀的结构表达。

里斯本是个典型的海洋城市，海风较强，少雨少雪，也是西方最早有记载的大地震发生地，1998年的世博会葡萄牙馆最具吸引力的部分无疑是这一片长65m、宽58m、离地高度最低10m的巨大悬拉结构所遮盖的半开敞公共大厅。从远处看，它就像海洋上一只洁白的横帆，犹如天然悬垂的轻柔帐幔（图18），但诗意的轻柔背后却是建构的沉重。



图11 朗香教堂外观

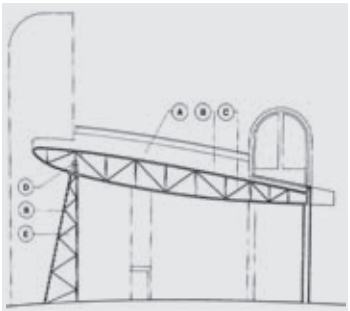


图12 构造图解



图13 水上餐厅外观



图14 构造图解



图15 搭建模板



图16 铺设钢筋



图17 浇筑混凝土

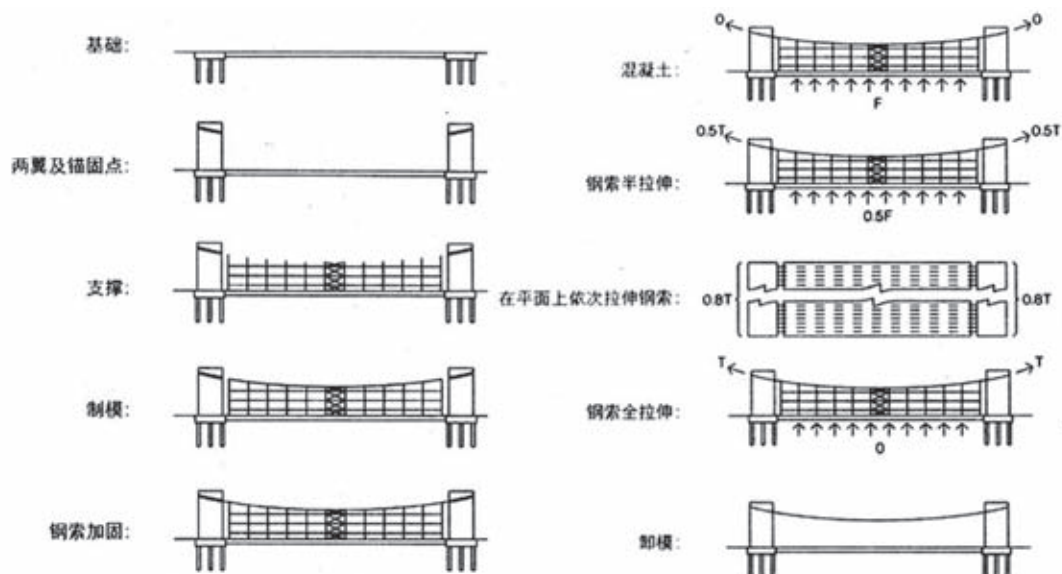


图21 顶棚的施工程序

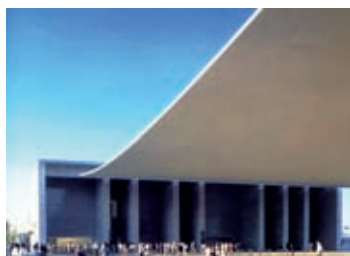


图18 “轻柔”的混凝土顶棚



图19 贯穿顶棚的钢缆细部



图20 顶棚结构的表现形式与计算方法

结构设计过程中最大的困难就在于需要选择自重足够大的材料来平衡风压，但同时又要保持轻柔的视觉效果。作为结构设计师的巴尔蒙德最初考虑用丝网连接轻质的织物面材/金属板或者钢桁架外包皮，但都无法解决这些问题。最终，他选用的却是本来与织物的轻柔感相去甚远的混凝土：以100根预应力钢筋作为结构，200mm厚的混凝土平衡风的上升力（图19）。

为了使这种结构在地震中也能更加稳定，一方面，这条自然悬垂的曲线直接演变为巴尔蒙德在结构形式中的数学模型——悬链线（图20），这种曲线轨迹使得结构内部应力达到最小，曲线内任意一点的应力方向就是曲线在这一点切线方向，因此材料内部没有扭矩；另一方面，将混凝土与结构分离，混凝土并不是紧裹着钢索，钢索表面有一层油性外皮使它从混凝土中穿过，混凝土变成了外部保护，热胀冷缩对于混凝土的影响也就被削弱了，结构减少到只有钢索本身，这也大大控制了混凝土的变形。

然而，使用较重的混凝土之后，对支座的拉力会使其底部产生巨大的倾覆力矩。为了解决这一问题，巴尔蒙德在两端的剪力墙上设置了一系列垂直的鳍状片墙抵抗侧向的拉力，并在地下采用了一系列横穿整个跨度的地梁来连接两端的基础。地梁起到了拉杆的作用，它们把所有的构件连接在一起，形成了一个完整的荷载回路，位于空中的拉力与地下的反推力形成闭合，并与支座相连。

除此之外，混凝土的使用也带来一些建造上的困难。作为一种脆性材料，混凝土并非像绳索一样弯曲自如。这就需要施工时在混凝土受拉之前就形成垂曲线的形态，并且穿越支座的锚固端走向要和曲线一致。在施工过程中，依次提升拉伸钢筋的拉力 $0-0.5T-0.8T-T$ ，直到钢筋可以独立支撑混凝土“羽翼”的时候才拆去模板，以保持混凝土薄壳在整个过程中形态几乎不变（图21）。

1998年里斯本世博会的葡萄牙国家馆至今仍为人称道。地面反射的阳光照亮了悬拉屋顶的外侧，构成了顶棚底面由外向内、由明亮向阴暗的转变，这种光影的变化加强了屋顶在视觉上的悬浮效果；走近建筑后身处巨大的屋顶之下，又能明确感受到它的沉重，但两端接头处暴露出来的悬拉钢索引入的光线打破了屋顶的沉重感。

金贝尔美术馆，路易斯·康

路易斯·康（以下简称“康”）指出建筑就是通过构件的组成关系呈现光与空间的共生性。

金贝尔美术馆采用灰白色的沙岩板填充在混凝土框架中，形成相似的色深和质感，同时又将混凝土框架结构清晰地展现出来，整体显得朴素亲切（图22）。

在金贝尔美术馆设计中，康对光线与空间的掌握已达到精致平衡。“光是结构的给予者”，康的设计是光、结构类型和空间形式的三位一体。金贝尔美术馆对自然光的处理分为顶采光、侧采光和庭院采光。顶采光：康在拱冠的下方设置光线折射板，光线从天窗照射进来，通过打有微小孔洞的金属折射板均匀分散在混凝土拱顶天花上，并多次反射到展品表面，避免光线直射，不仅在室内产生柔和均匀的光线，又将屋顶的结构真实地展现出来，使拱顶仿佛发光体一般，使厚重的混凝土拱顶显得十分轻盈，建



图22 金贝尔美术馆外部材料表现



图23 金贝尔美术馆内部空间



图24 金贝尔美术馆结构表现



图25 金贝尔美术馆单元体的连接体



图26 一墙宅外观

筑的物质性被削减了（图23）。侧采光：每个单元纵向两侧的圆拱形隔板与拱顶之间产生高度不一的弧形光带，在室内形成神秘的光带。庭院采光：康在连续拱顶结构中安插三个布局随意的露天院落，通过不同的院落比例，产生不同的光线效果。

摆线拱顶结构是金贝尔美术馆的重要特征。摆线拱顶为预应力混凝土，在摆线截面上存在类似于普通梁的弯矩，拱形的截面可以有效对抗弯矩，沿摆线拱顶的纵向进行后张拉预应力处理，使得拱顶达到32m的净跨度，并抵消梁身极易产生的弯曲变形。出于结构考虑，在每个拱顶的端头设置厚度达到一定要求的圆拱形隔板，这也就是在每个拱顶端部墙面产生高度不一样的弧形光带的原因（图24）。

金贝尔美术馆的结构设计上，每一个单元体都具有独立完整的摆线拱顶和分布在四角的承重柱，通过重复简单的单元体，为室内空间布局提供最大的灵活性，但是单元各自的拱顶又让空间在感知上保持相对独立。金贝尔美术馆将设备管线与拱顶结构巧妙结合，在拱顶之间的间隔带处利用下挂梁间的空间形成管线桥架，布置灯槽，并安装活动隔断（图25）。

不稳定——一墙宅，Kerez

名为“一墙宅”的这座两户住宅位于瑞士苏黎世东南端一个狭窄的斜坡地段上（图26），建筑仅通过曲折的混凝土墙将两户完全隔开，并限定每户使用空间。为更好地享有户外景观，各户的主要功能沿着折墙在垂直方向展开，从下往上依次为工作室、起居室、厨房、卧室和浴室。

建筑的结构设计沿用着“用一道墙将室内划分为两半”的功能方案，400mm厚的钢筋混凝土墙同时也支撑着宽阔的悬挑楼板。墙的形态在平面上呈折板状，而折角的位置与角度在各层都不一样。与直线的墙体相比，折板墙体具有更好的抗弯性能和稳定作用。各层墙体的交接之处形成“柱点”（图27），顶层墙体通过分段悬挑的形式将荷载交汇于顶层墙体与地面层墙体的“柱点”，再通过预施的拉力将荷载引导至地面层墙体与底层墙体的“柱点”，最终由底层墙体将荷载传入大地。由于墙体和楼板作为一个整体，建筑在剖面上可看成三段堆叠的“工字钢”，增加了建筑的整体性和稳定性。（图28）。

一墙承重的结构使两家住户都获得了三层无柱、可自由分隔的房间。混凝土折墙在每层形态的不确定性也适应了各层功能布置的变化。浴室等辅助功能嵌入到折墙的三角空间中，顺应了墙体的走势和室内空间的收放，给其他房间带来开敞而不受遮挡的空间。同时，立面仅起围护作用，采用落地玻璃窗，让空间沿着视线向室外延伸（图29）。

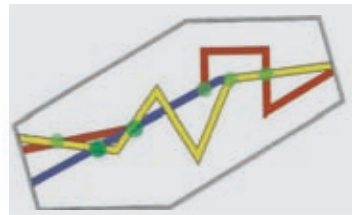


图27 各层墙体交接点



图28 整体结构模型



图29 内部空间



图30 Ottoplatz Building外观

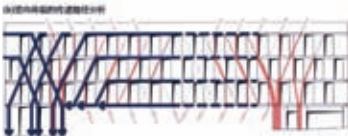


图31 外墙结构受力分析

奥拓广场大楼, Jungling and Hagmann & Conzett

奥拓广场大楼 (Ottoplatz Building) 位于库尔的历史风貌旧城区, 被3道承重实墙分隔开, 形成4个跨度在20~30m之间的盒子 (图30)。建筑功能混合商业、办公室和公寓, 其中办公和公寓这些小空间的功能集中在上部, 由内部走廊串联, 而底层空间功能不确定, 因为设计师希望创造完全不受限制的内部空间。

建筑采用墙板与楼板的实体结构体系, 使得建筑首层得以解放, 成为自由的大空间; 二至四层隔断墙体和外墙墙体采用网状交织的后张法预应力钢筋索解决墙板拉力问题, 最终形成一个三层高的桁架受力体系, 从而实现对上部空间的支撑; 同时, 设计师分别在内外墙体使用现浇混凝土板和抛光预制混凝土板将钢筋隐藏起来。在这些墙板中, 两个对角线方向分别预埋了预应力钢索的套管和两根斜向支架, 这两个预埋的部件都是露出头至上一层楼板, 以便与上一层预制板中预埋的构件对接 (图31)。

这种结构体系使得建筑各层形成大跨度、可自由划分的无柱空间, 适应了各层功能空间性质的变化。建筑上部的桁架受力体系使得开窗能巧妙适应承重墙斜向构件的间隙, 混凝土的使用将结构构件隐藏于墙体中, 从而实现形式和结构的统一, 空间变得纯粹。AT

(参与研究人员: 曹慧、赖雨诗、周星宇、陆娟)

参考文献

- [1] 洛菲尔·莫内欧著, 林芳慧译. 莫内欧论建筑——21个作品评论[M]. 田园城市文化, 2011: 104-134.
- [2] 王南. 古罗马建筑传统的继承与创新——简析梅里达国立古罗马艺术博物馆设计[M]. 北京: 北京大学, 2006.
- [3] 宣营, 王群. 隐藏在光背后的故事——从帕提农神庙与罗马万神庙之比较看光对场所的意义[M]. 南京: 东南大学, 2003.
- [4] 安德烈·德普拉泽斯著, 任铮铨, 袁海贝贝, 李群等译. 建构建筑手册[M]. 大连理工大学出版社, 2007.
- [5] 慎铁刚. 中国古代建筑的力与美探析[M]. 力学与实践, 1996: 18 (3).
- [6] 张永秀. 古罗马拱券建筑技术及对后世的影响[M]. 山东: 潍坊学院, 2009.
- [7] 梁霞, 张玉娥. 路易康的菲利普·艾塞特图书馆[M]. 山西: 山西大学, 2004.
- [8] 杨倩苗, 高辉. 中庭的天然采光设计[M]. 天津: 天津大学, 2007.
- [9] Edward R. Ford. The Details of Modern Architecture, Volume2:1928 to 1988. The MIT Press, 2003.
- [10] J.CARON&J.Katinsky. PAVILHÃO DO BRASIL NA EXPO'70[J/OL]. Available Internet: <http://www.arquiteturabrutalista.com.br/fichas-tecnicas/DW%201969-118/1969-118-fichatecnica.htm>
- [11] The Hyatt Foundation. The Pritzker Architecture Prize 2006 Presented TO Paulo Mendes Da Rocha, 2006.
- [12] Rosa Artigas. Paulo Mendes da Rocha: Bauten und Projekte [M]. Switzerland: Niggli Verlag, 2001: 74-79.
- [13] 孔令楠. 有生命的混凝土——法国朗香教堂[J]. 中国国家地理博物, 2009 (12).
- [14] 勒·柯布西耶等. 勒柯布西耶全集[M]. 中国建筑工业出版社, 1946.
- [15] 方婷. 论非常规建造[J]. 浙江大学建筑工程学院硕士论文, 2010.
- [16] Noah Burger and David P.Billington. FELIX CANDELA, Elegance And Endurance: An Examination of The Xochimilco Shell[J]. 2006 (11).
- [17] Clancy Mears. Concrete[M/OL]. Available Internet: http://architectureinsights.com.au/media/uploads/resources/Clancy_Mears_Report.pdf
- [18] A. Segadães Tavares, Rui R. Vieira. EXPO'98 Portuguese National Pavilion——A Large Use Of Light Weight Structural Concrete[M/OL]. Available Internet: http://www.sta-eng.com/DOCUMENTOS/ARTIGOS/99.05%20USE%20LWC%20EXPO98_ERMCO.pdf
- [19] 向晓峰, 郭志昆, 刘峰, 等. 高强轻骨料混凝土的应用与研究现状[J]. 工业建筑, 2005 (35).
- [20] 塞西尔·巴尔蒙德著, 马卫东, 李寒松译. 异规[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [21] 冯路. 一九九八年世博会葡萄牙馆[J]. 室内设计, 2009 (3): 25-28.
- [22] 肯尼思·弗兰姆普敦著, 王骏阳译. 建构文化研究[M]. 中国建筑工业出版社, 2007: 241-249.
- [23] 王维洁. 路康建筑设计哲学论文集[M]. 田园城市文化事业有限公司, 2010.
- [24] Edward R. Ford. The Details of Modern Architecture, Volume2:1928 to 1988.The MIT Press,2003: 327-334.
- [25] 王志强. 金贝尔美术馆的拱顶建造简析[M]. 南京: 南京大学, 2009.
- [26] 张耀辉. 路易斯·I·康的未建成作品及其思想[M]. 湖南: 湖南大学, 2008.
- [27] 王俐. 基于结构体系思维的建筑设计策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [28] 孟宪川. 形与力的融合: 对建筑师克雷兹和结构师席沃扎三个建筑的介绍与图解静力学分析[J]. 时代建筑, 2013 (5).
- [29] 邓芳. 从结构体系出发对建筑概念性方案进行推敲[J]. 华中建筑, 2012 (12).
- [30] J ü rg Conzett, Mohsen Mostafavi, Bruno Reichlin. Structure as Space[M].London: AA Publication, 2006.