

清水混凝土

施工关键技术应用研究

张桂林 陈庞 著

中国建材工业出版社

清水混凝土 施工关键技术应用研究

张桂林 陈 庞 著

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

清水混凝土施工关键技术应用研究/张桂林, 陈庞
著. --北京: 中国建材工业出版社, 2022. 5
ISBN 978-7-5160-3482-8

I. ①清… II. ①张… ②陈… III. ①混凝土施工—
研究 IV. ①TU755

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 042014 号

清水混凝土施工关键技术应用研究

Qingshui Hunningtu Shigong Guanjian Jishu Yingyong Yanjiu
张桂林 陈 庞 著

出版发行: **中国建材工业出版社**

地 址: 北京市海淀区三里河路 1 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京印刷集团有限责任公司

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 7.25

字 数: 140 千字

版 次: 2022 年 5 月第 1 版

印 次: 2022 年 5 月第 1 次

定 价: **42.00 元**

本社网址: www.jccbs.com, 微信公众号: [zgjcgyCBS](https://www.weixin.com/qzjcgycbs)

请选用正版图书, 采购、销售盗版图书属违法行为

版权专有, 盗版必究。本社法律顾问: 北京天驰君泰律师事务所, 张杰律师

举报信箱: zhangjie@tiantailaw.com 举报电话: (010) 68343948

本书如有印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换, 联系电话: (010) 88386906

前 言

随着我国施工技术的不断提高，清水混凝土（Architectural Concrete）施工技术也得到了一定的优化和完善，被越来越多的结构形式所采用，如新建的雄安新区高铁站。清水混凝土之所以区别于普通混凝土，是因为其在设计、材料、施工和维护管理的过程之中被当做一件艺术品，集精美于一身。在倡导低碳技术的今天，清水混凝土技术是提高混凝土结构外装修低碳技术的有效途径。

但在清水混凝土的施工过程中往往也会遇到一些问题，由于清水混凝土对建筑物外观质量有着很高的要求，因此，养护时，对养护的材料有着较高的要求，例如养护材料的色差不宜过大；在模板养护过程中，清水混凝土不免会出现一些对拉螺栓孔眼，为了使清水混凝土有较好的表观质量，在进行修补的过程中也要有所注意。具体的问题将在书中作进一步详细论述，以供从事清水混凝土工程的技术工作者参考。

本书由国网河北建设公司总经理张桂林主笔，很多内容都是本人结合工程实际情况而撰写，有一定的参考价值。

目前清水混凝土在设计、材料、施工和维修管理上仍存在许多的问题，需要人们去思考解决。由于本人水平有限，本书难免存在许多疏漏与不足，欢迎行业内有关专家和读者的批评指正。

著 者
2022.4

目 录

1 清水混凝土历史	1
1.1 混凝土技术发展历程	1
1.2 清水混凝土	4
1.3 国外清水混凝土发展历程	6
1.4 我国清水混凝土发展历程	11
1.5 我国清水混凝土面临的挑战及应用前景	22
2 清水混凝土制备	24
2.1 原材料	25
2.2 清水混凝土配合比	30
3 清水混凝土钢筋工程	38
3.1 钢筋与混凝土共同工作机理	38
3.2 钢筋材料	39
3.3 钢筋混凝土保护层	42
3.4 钢筋连接	44
3.5 钢筋翻样	50
3.6 钢筋绑扎	51
3.7 钢筋工程质量验收	53
3.8 钢筋成品保护	54
4 清水混凝土模板工程	55
4.1 基本要求	55
4.2 模板材质	56
4.3 模板体系	57
4.4 模板设计	62
4.5 模板制作	67
4.6 模板安装	69

4.7	模板运输和储存	71
4.8	模板拆除与保护	71
5	清水混凝土工程	72
5.1	清水混凝土原材料	72
5.2	原材料用量	77
5.3	清水混凝土搅拌及运输	79
5.4	清水混凝土浇筑	80
5.5	清水混凝土养护	81
6	清水混凝土防护	83
6.1	清水混凝土养护	83
6.2	清水混凝土表面处理	86
6.3	清水混凝土修补	90
7	清水混凝土耐久性	92
7.1	清水混凝土原材料对清水混凝土耐久性影响	92
7.2	风化对清水混凝土耐久性影响	92
7.3	冻害对清水混凝土耐久性影响	93
7.4	碳化对清水混凝土耐久性影响	93
7.5	盐害对清水混凝土耐久性影响	94
7.6	碱-骨料反应对清水混凝土耐久性影响	94
7.7	硫酸盐侵蚀对清水混凝土耐久性影响	94
7.8	清水混凝土耐久性设计	95
7.9	提高清水混凝土耐久性措施	95
7.10	清水混凝土耐久性检测	96
8	清水混凝土工程实例	99
8.1	工程概况	99
8.2	输变电站工程	100
8.3	模板工程	103
8.4	钢筋工程	106
8.5	混凝土工程	107
8.6	养护及成品保护	108
	参考文献	109

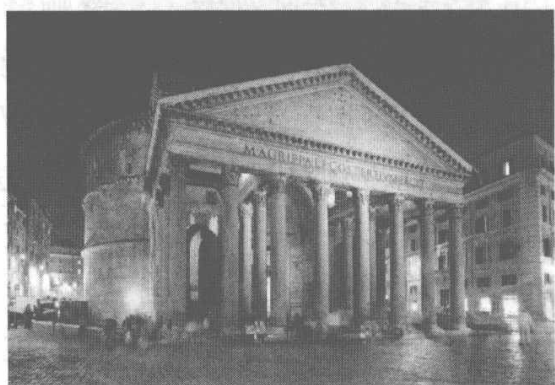
1

清水混凝土历史

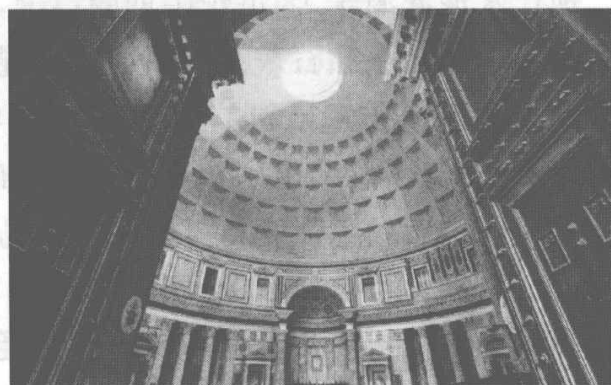
为深入了解清水混凝土历史，首先要回顾混凝土历史，从混凝土技术发展历史中可以窥探清水混凝土技术的发展。

1.1 混凝土技术发展历史

混凝土最早于公元前3世纪由古罗马人发现。古罗马人偶然间发现将天然火山灰、人工碎石及水搅拌在一起，能形成强度较高的石材，可以做墙体及砌体拱顶的填充料。至今我们仍可在古罗马遗迹中看到最初混凝土的影子，其中罗马万神殿及斗兽场是典型代表。图1-1所示为罗马万神殿，坐落于意大利首都罗马圆形广场的北部，是古罗马建筑的代表作，也是罗马最古老的建筑之一。现今所见的万神殿主体建筑建于公元120—124年，横截面呈圆形，穹顶直径达43.3m，建筑高度43.3m，穹顶中央为直径8.9m的大圆洞，阳光透过穹顶照射到神庙内部，呈现宏伟但又神秘的气氛。万神殿的基础、墙和穹顶都是用火山灰制成的混凝土浇筑而成，非常牢固。



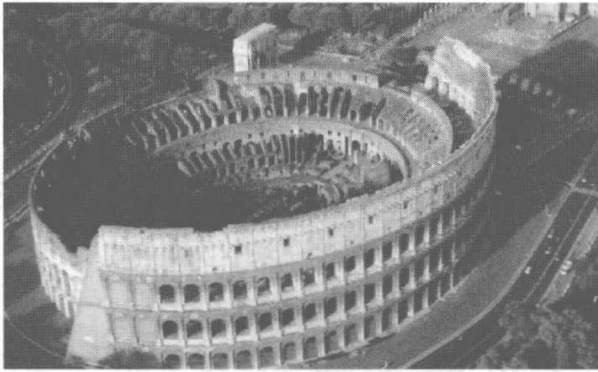
(a) 万神殿外景



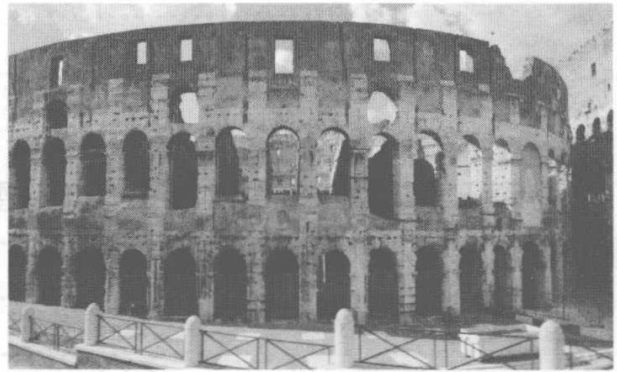
(b) 万神殿内景

图 1-1 罗马万神殿

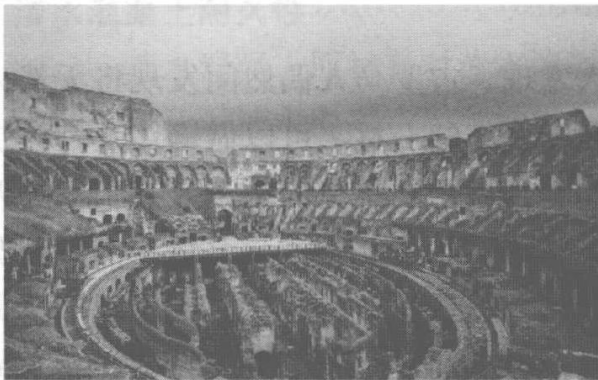
罗马斗兽场如图 1-2 所示，遗址坐落于意大利首都罗马市中心，威尼斯广场的南面，是古罗马帝国专供奴隶主、贵族和自由民观看斗兽或奴隶角斗的地方，也是古罗马帝国文明的象征。罗马斗兽场建于公元 72—80 年，其建筑结构是由混凝土修建的，俯瞰时，呈椭圆形，长轴约 188m，短轴约 156m，圆周长约 527m，围墙高约 57m，占地面积约 2 万 m^2 ，可容纳近 9 万名观众。1980 年，罗马斗兽场作为罗马历史中心的一部分，被联合国教科文组织世界遗产委员会作为文化遗产列入《世界遗产名录》。



(a) 斗兽场全景



(b) 斗兽场外景



(c) 斗兽场内景



(d) 斗兽场内部细部

图 1-2 罗马斗兽场

现代水泥起源于 18 世纪中期的英国，1756 年英国工程师约翰·史密顿修建灯塔时发现将黏土和石灰石以适当比例混合煅烧，可形成具有较高活性的胶凝材料，此方法迅速传遍欧洲。1824—1840 年，英国工程师 Joseph Aspdin 和 William Aspdin 父子总结出用石灰、黏土、矿渣以适当比例煅烧可生成水泥的方法，因该水泥硬结后颜色强度与英国波特兰岛上的天然石材差不多，所以取名为波特兰水泥 (Portland Cement)，并为该发明申请了专利。

混凝土发明初期，工程师就发现混凝土与天然石材相似，均具有很高的抗压强度，但抗拉强度较差，仅为抗压强度的 $1/12\sim 1/8$ 。1867 年巴黎博览会上，法国工程师 Joseph Monier 展示了将钢筋与混凝土结合制作的花盆，如图 1-3 所示，进而解决了混凝土抗拉强度低的问题。此后 Joseph Monier 又陆续将钢筋混凝土结

构应用于管道、水箱及幕墙板中，并于 1875 年设计了世界上第一座钢筋混凝土桥，从此钢筋混凝土开始具有实用价值，进入了快速发展时期。Joseph Monier 也因其突出贡献被称为“钢筋混凝土之父”。

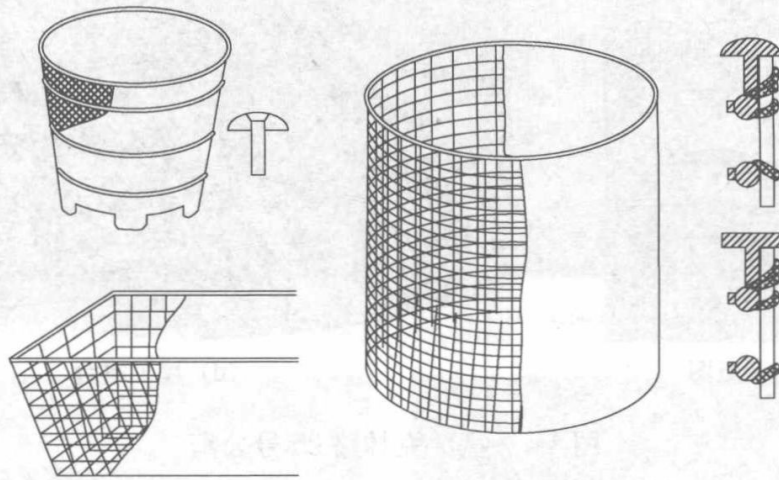
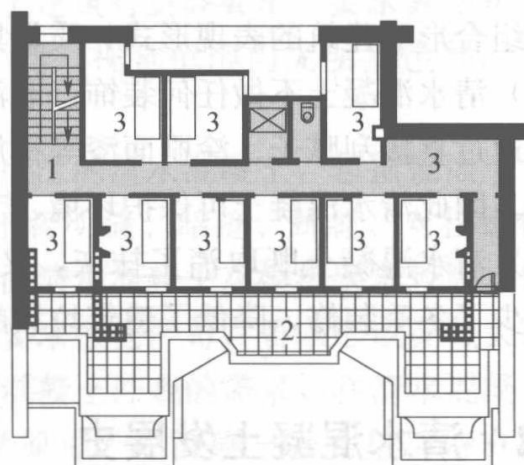


图 1-3 Joseph Monier 制作的钢筋混凝土花盆示意图

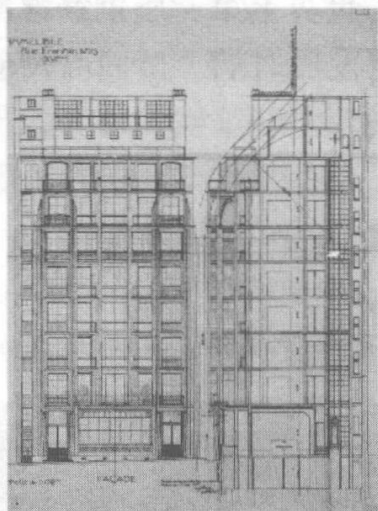
1903 年，Auguste Perret 设计建造了巴黎最早一座钢筋混凝土结构公寓建筑——富兰克林路 25 号公寓，它是第一栋完全用钢筋混凝土盖成的建筑，与麦金托什的格拉斯哥美术学院图书馆侧厅、霍夫曼的斯托克莱府邸、赖特的拉金大厦等作品构成最具影响力的混凝土结构建筑。25 号公寓为 8 层钢筋混凝土框架结构，坐落于巴黎十六区，面向埃菲尔铁塔、塞纳河及巴黎城区，为当时巴黎的一个高档时尚社区。25 号公寓放大了开窗与墙体的比例，将起居空间放在立面中央，进而节约了建筑内部空间，同时提出屋顶退台概念并创造出屋顶露台。Auguste Perret 将钢筋混凝土从粗陋市政建筑材料提炼为建筑学的表现媒介，为 20 世纪及以后的建筑指明了一条新路。富兰克林路 25 号公寓如图 1-4 所示。



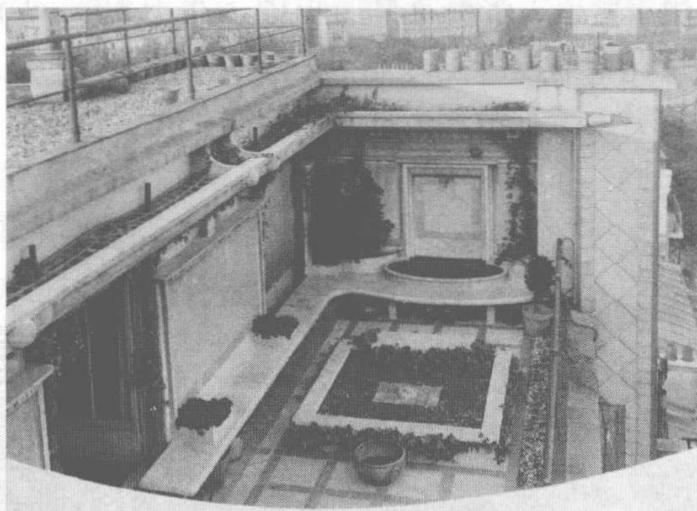
(a) 正立面图



(b) 平面图



(c) 立面示意图



(d) 屋顶露台

图 1-4 富兰克林路 25 号公寓

1.2 清水混凝土

1.2.1 清水混凝土简介

清水混凝土为一次成型，不做任何装饰的混凝土，以其表面效果分为普通清水混凝土、饰面清水混凝土及装饰清水混凝土，广泛应用于民用建筑、公共建筑、市政桥梁及工业建筑中（图 1-5）。清水混凝土具有以下特点：

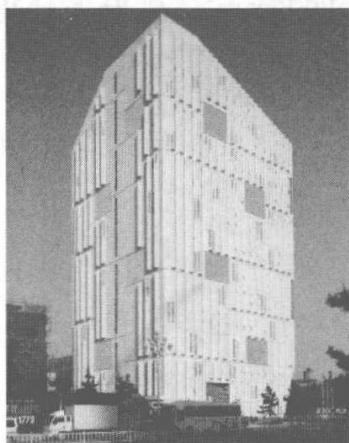
(1) 清水混凝土外观颜色均匀、光滑、美观，截面尺寸准确，不做任何修饰，线条清晰顺畅，层间过渡自然，以其自身的质感与设计的明缝、蝉缝及对拉螺栓孔组合形成建筑的表现形式，质量集“精、细、美”于一体。

(2) 清水混凝土不做任何装饰，取消了抹灰层和面层。民用建筑及公共建筑中一般通过直接刮腻子、涂刷面漆等稍加修饰，工业建筑中一般直接取消抹灰层和面层。因此清水混凝土可保护环境、节约资金、降低工程造价。

(3) 清水混凝土既取消了抹灰，又取消了湿作业，提高了现场文明施工程度，减少了冬季装修，降低了建筑垃圾的产生，提高了环境效益。

1.2.2 清水混凝土发展史

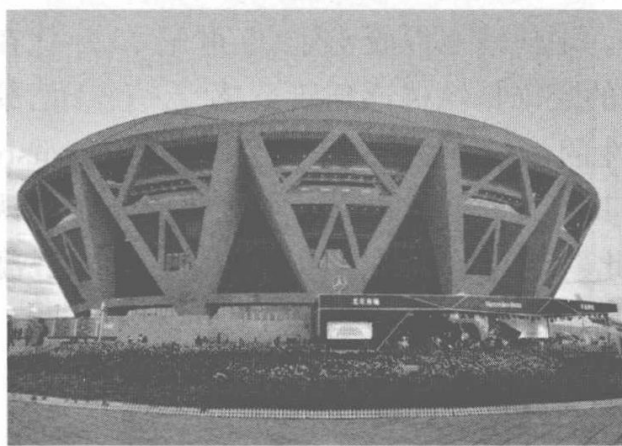
清水混凝土技术发展先后经历了原始清水混凝土时期、普通清水混凝土时期、饰面清水混凝土时期及装饰清水混凝土时期四个阶段^[1]。



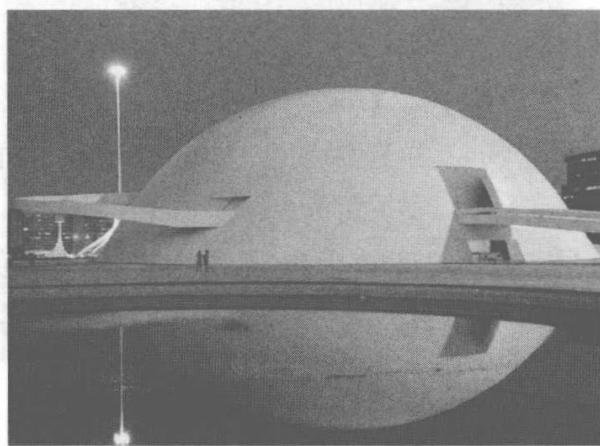
(a) 威海名座



(b) 上海保利大剧院



(c) 国家澳网中心



(d) 巴西国家博物馆

图 1-5 清水混凝土代表性建筑

(1) 原始清水混凝土始于现代混凝土发展初期，工人未对建筑结构表面进行抹灰处理，混凝土表面呈现其原始状态，此类建筑在当时也仅仅作为装饰品，在建筑结构的发展中被慢慢淘汰。

(2) 普通清水混凝土建筑比普通混凝土建筑有更高要求，要求其结构表面无明显麻面、蜂窝、露筋等工程质量缺陷，同一视觉范围内无明显色差，表面整洁，光洁度高。

(3) 饰面清水混凝土为目前应用最为广泛的清水混凝土，包括镜面清水混凝土及彩色清水混凝土^[1-2]。饰面清水混凝土将明缝、暗缝、蝉缝、对拉螺栓孔眼设计并组合，进而形成饰面效果，因此饰面清水混凝土对模板要求较高。镜面清水混凝土对混凝土表面的平整度及光滑度要求极为严苛，要求形成类似大理石表面的“镜面”效果。彩色清水混凝土根据混凝土外观的需求，在清水混凝土中掺入各种颜色填充料，如氧化铁，配合光学原理，使混凝土表面呈现特有的视觉效果。

(4) 装饰清水混凝土又称为艺术清水混凝土，代表着清水混凝土未来的发展方向，如彩绘清水混凝土、浮雕清水混凝土及雕塑清水混凝土等。装饰清水混凝土

土将混凝土建筑艺术与现代工业技术相结合，体现交叉学科的特点，在未来会得到大量推广及应用。

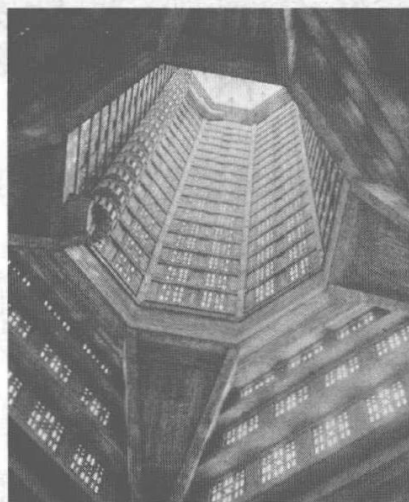
1.3 国外清水混凝土发展历程

1.3.1 20世纪20~50年代

随着混凝土被广泛应用于建筑结构领域，建筑师不再仅满足于混凝土作为建筑材料，而追求混凝土本身质朴的艺术感。现代清水混凝土于20世纪20年代在欧洲出现，设计师开始用混凝土与生俱来的装饰特性传递建筑情感^[3]。位于巴黎附近的勒兰西圣母教堂为此时最具代表性的建筑，由法国著名设计师 Auguste Perret 设计，平面为 56m×19m 的矩形，其外立面非常朴素，被现代建筑师们认为是 20 世纪建筑史最重要的转折点，因此勒兰西圣母教堂也被认定为清水混凝土的萌芽建筑。勒兰西圣母教堂如图 1-6 所示。



(a) 外景



(b) 内景

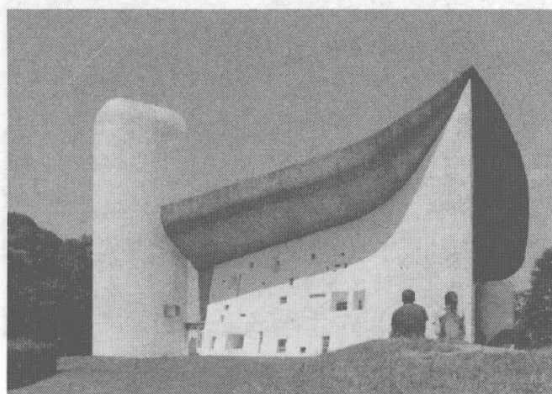
图 1-6 勒兰西圣母教堂

此后受勒兰西圣母教堂清水混凝土设计理念的影响，建筑师们在教堂建筑中不断创新施工技术，对拆模后的混凝土建筑不再抹灰，直接展现混凝土自然外观，清水混凝土建筑日渐普及。其中最具代表性的建筑为法国东部浮日山区的朗香教堂，朗香教堂由法国建筑大师 Le Corbusier 设计，Le Corbusier 是 Auguste Perret 的学生，对推广清水混凝土风格建筑起到极大的引领作用。朗香教堂对现代建筑的发展产生了重要影响，该建筑最抢眼的地方就是朴素的白粉墙上随意分布大小各异的窗口，充分发挥了清水混凝土的特性，因此被誉为 20 世纪最为震

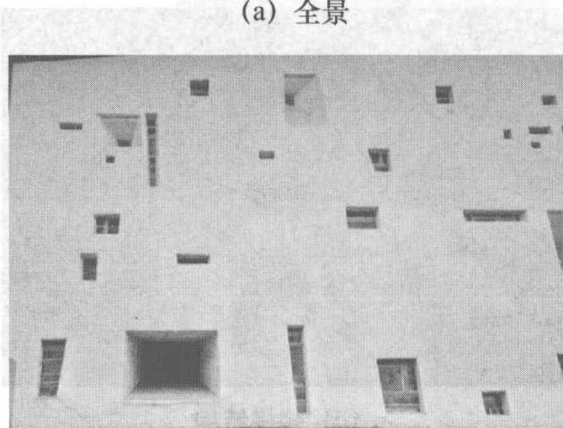
撼、最具有表现力的清水混凝土建筑。朗香教堂如图 1-7 所示。



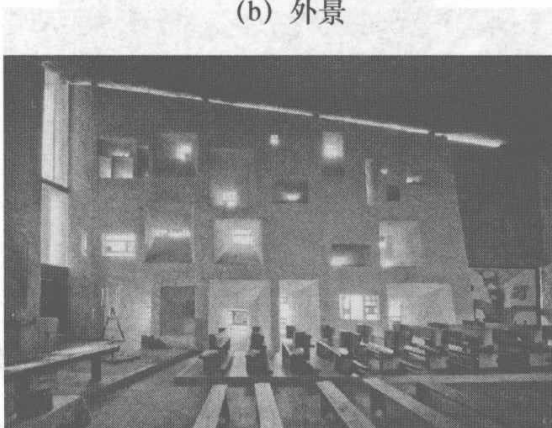
(a) 全景



(b) 外景



(c) 清水混凝土表面开孔



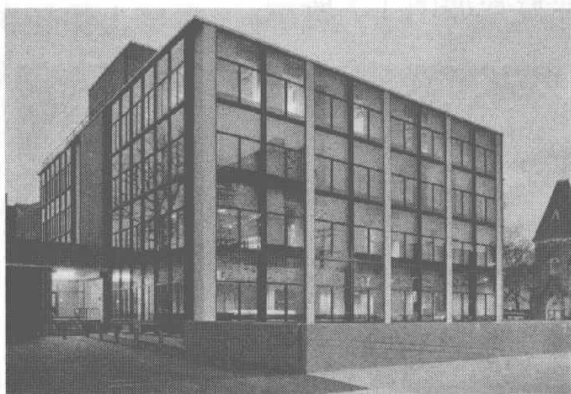
(d) 内景细部结构

图 1-7 朗香教堂

1.3.2 20 世纪 60 年代至今

20 世纪 60 年代，随着混凝土技术发展趋于成熟化，越来越多的清水混凝土建筑出现在欧洲、北美洲等发达国家^[3]，此时最具代表性的清水混凝土建筑为耶鲁大学美术馆和纽约肯尼迪机场第五航站楼。耶鲁大学美术馆由著名建筑师 Louis Isadore Kahn 于 1969 年设计建造，为美国最早的大学艺术馆。在耶鲁大学美术馆中，Louis Isadore Kahn 为突出混凝土墙面的优雅感与质朴感，采用了质地粗糙的砌块及清水混凝土，实现了以建筑物原始面貌来体现建筑美感的初衷。Louis Isadore Kahn 也因耶鲁大学美术馆非凡的设计，实现了他个人职业生涯的突破，使其成为 20 世纪后半叶最受瞩目的建筑师之一。耶鲁大学美术馆如图 1-8 所示。

同时期出现的现代建筑史上清水混凝土风格最突出的代表性建筑作品还有纽约肯尼迪机场第五航站楼。肯尼迪机场第五航站楼由著名建筑师 Eero Saarinen 于 1956 年设计，于 1961 年建设完成，1962 年开放使用。肯尼迪机场第五航站楼以其自然优美的曲线勾勒出一只展翅欲飞的混凝土大鸟，赋予它飞行的寓意。第



(a) 外景



(b) 内景



(c) 内景细部



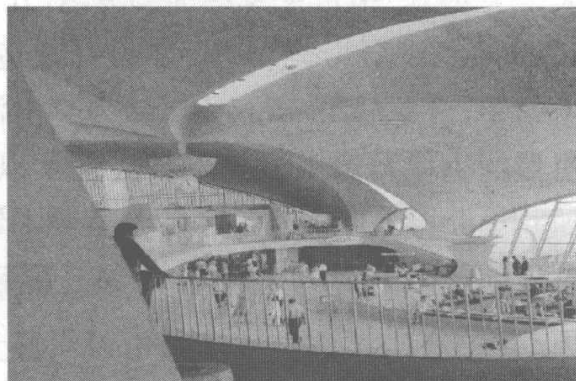
(d) 楼梯结构

图 1-8 耶鲁大学美术馆

五航站楼由四个 Y 字形钢筋混凝土墩柱支撑屋顶的四片薄壳构成，除地基基础外，所有建筑立面均采用玻璃幕墙结构形式。为与整体清水混凝土风格搭配，第五航站楼内部楼梯、台阶栏杆、服务台灯也采用有机的曲线轮廓形式。第五航站楼建筑整体、建筑内部结构及建筑细部结构的配合，使其呈现出统一感、流畅感，突出体现了清水混凝土建筑的优越性，是一次伟大的雕塑试验。纽约肯尼迪机场第五航站楼如图 1-9 所示。



(a) 第五航站楼外景



(b) 第五航站楼内景

图 1-9 纽约肯尼迪机场第五航站楼

在亚洲，日本对于清水混凝土的研究运用走在了世界前列。第二次世界大战以后，百废待兴，出于经济性考虑，部分混凝土建筑省掉了抹灰、装饰的工序而开始直接使用，进而为清水混凝土的推广提供了条件，其中最具代表性的建筑师有丹下健三和安藤忠雄（图 1-10）。



(a) 丹下健三



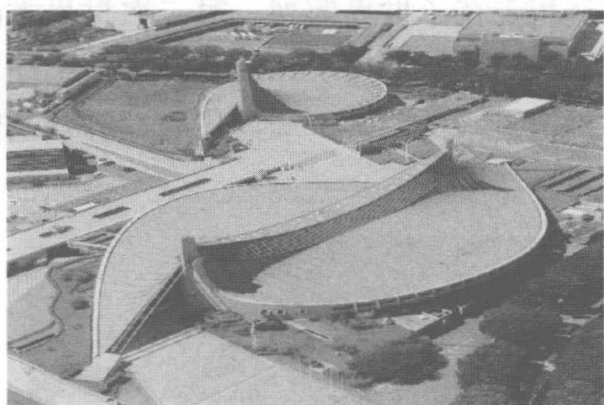
(b) 安藤忠雄

图 1-10 丹下健三与安藤忠雄

东京国立代代木综合竞技场为丹下健三结构表现主义的巅峰之作，作为 1964 年东京奥运会主场馆，达到了材料、功能、结构、比例乃至历史观的高度统一。1964 年的东京奥运会为第一次在非欧美国家举办的奥林匹克运动会，日本政府决定借举办奥运会之机使世界重新认识日本，因此如何在奥运建筑设计中体现东方文化就成了建筑设计关注的焦点，在此背景下，丹下健三被委以重任。东京国立代代木综合竞技场如图 1-11 所示。

综合竞技场占地 91 公顷（91 万 m^2 ），由第一体育馆、第二体育馆及办公与辅助设施组成。第一体育馆建筑面积 25396 m^2 ，跨度 126m \times 120m，拥有 15000 个座席，用于游泳及跳水比赛。屋顶采用悬索结构，将一对主钢索张拉于两根塔柱之间，形成悬索桥状中央结构，并与看台后端的悬吊构件组成曲面结构，既能满足自然采光和人工采光要求，又能创造出带有紧张感、律动感的大型内部空间。第二体育馆在第一体育馆西南面，建筑面积 5591 m^2 ，拥有 4000 个座席，用于举行篮球或拳击比赛。

除丹下健三外，日本另一位清水混凝土建筑大师为安藤忠雄，其于 1995 年获得普利兹克建筑奖，为当今最为活跃、最具影响力的世界建筑大师之一，其设计的建筑作品超过 200 余座，遍布于日本及世界的各个角落，代表作有住吉的长屋和光之教堂，被誉为“清水混凝土诗人”，是将清水混凝土利用到极致的代表性人物之一。安藤忠雄将光与影的艺术应用于抽象简约的建筑内部，体现了一种独特、崭新的建筑风格。



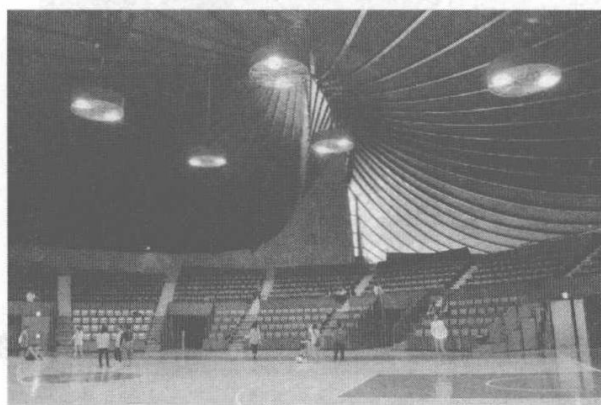
(a) 全景



(b) 第一体育馆



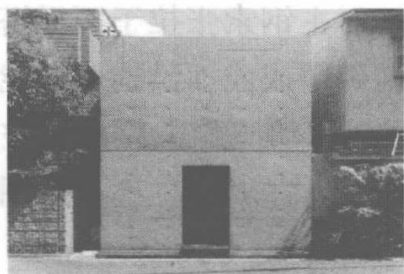
(c) 第一体育馆内景



(d) 第二体育馆内景

图 1-11 东京国立代代木综合竞技场

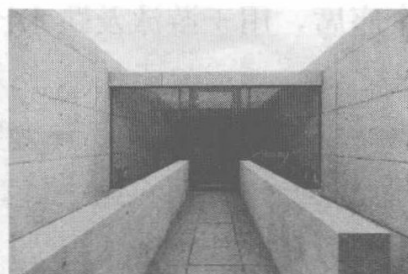
住吉的长屋为安藤忠雄的成名作，于 1976 年建造，1979 年获得日本建筑学会年度大奖。住吉的长屋位于日本大阪住吉区的一条老街上，建筑面积 112.54m^2 ，设计采用了安藤忠雄惯用的清水混凝土、铁玻璃、木材和石条，看似对称的平行中有着曲折的曲线，留设出的室外中庭将四季变化引导至生活空间。住吉的长屋如图 1-12 所示。



(a) 外景



(b) 内庭



(c) 走廊

图 1-12 住吉的长屋

光之教堂是安藤忠雄教堂三部曲——风之教堂、水之教堂、光之教堂中最为著名的一座，也是日本最著名的建筑之一，位于大阪城郊茨木市，建筑面积 113m^2 ，能容纳约 100 人。坚实厚硬的清水混凝土围合，创造出一片黑暗空间，

让进去的人瞬间感觉到与外界的隔绝，而阳光从墙体的水平垂直交错开口里泻进来。光之教堂如图 1-13 所示。

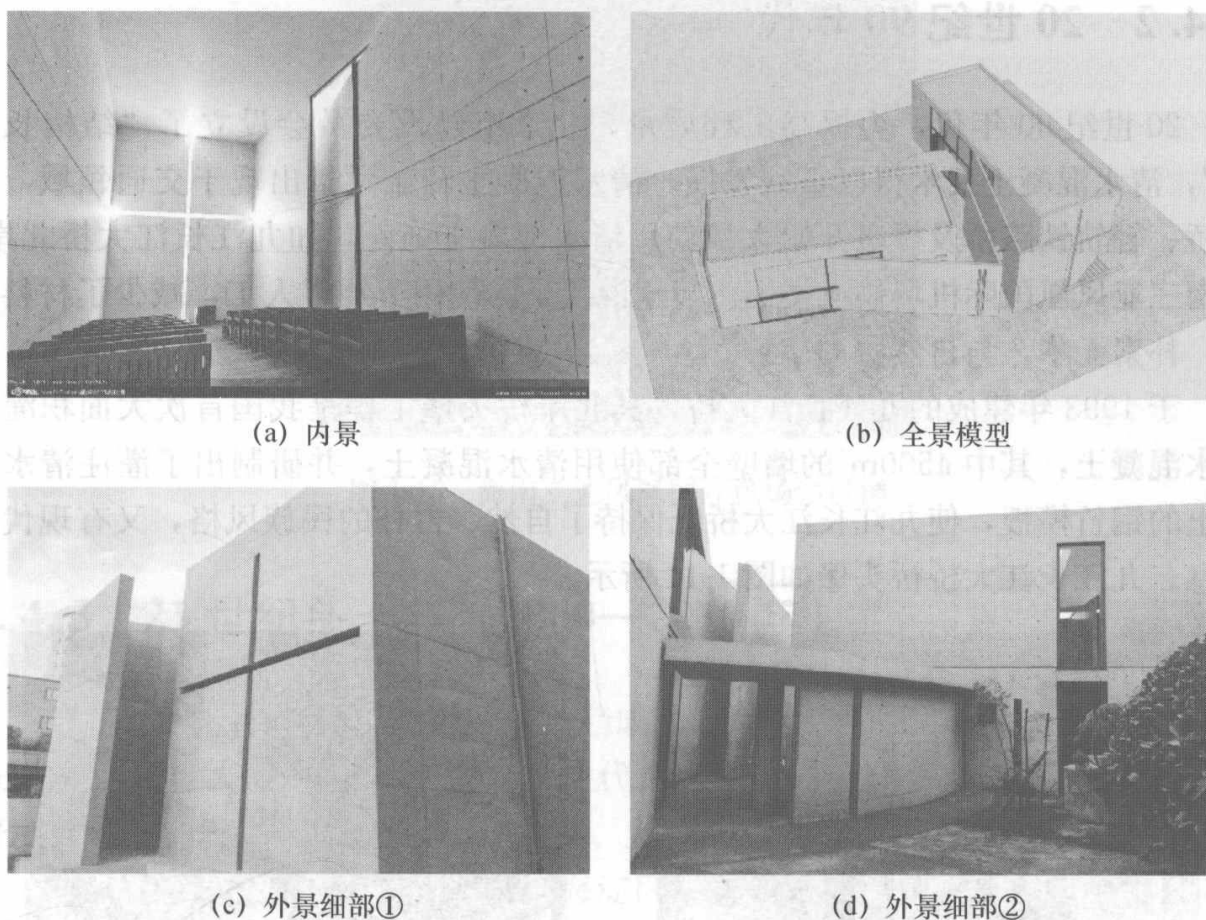


图 1-13 光之教堂

安藤忠雄开创了一套独特、崭新的建筑风格，将厚重的混凝土以及简约的几何图案，构成既巧妙又丰富的设计效果，从而引发了素混凝土设计和应用的二次高潮，使得清水混凝土风格在日本乃至世界上许多国家越来越被人们推崇、接受。如今清水混凝土被认为接近于东方禅学无为而为的思想，充分体现了东方文化色彩，深受大众的喜爱。

1.4 我国清水混凝土发展历程

1.4.1 20 世纪 80 年代

改革开放后，混凝土被广泛应用于土木工程领域。清水混凝土随着混凝土技术的发展也被广泛应用于建设工程。20 世纪 80 年代，清水混凝土技术最初应用于预制混凝土挂板中，挂板要求混凝土表面光滑，一次浇筑完成，随着装饰面砖