

FORMWORK: THE ARCHITECTURAL INSIGHT TO EXPOSED CONCRETE CONSTRUCTION

模板——清水混凝土建筑设计的关键

撰文 孙菲 东南大学建筑设计研究院有限公司

摘要 通过对混凝土建筑建造逻辑的探究，从模数、材料、节点等多方面阐述模板在清水混凝土建筑设计的重要作用，提出了模板的相关设计是清水混凝土建筑设计的关键问题，并结合大量实际案例对相关的技术进行总结。

关键词 浇筑 组合 纯粹

词典中对于混凝土的解释是：“含有水泥的混凝土，会以被称为‘水泥浆’的流动体状态，产生吸收水分而硬化的水合作用来维持其强度，最后形成建筑物的‘结构体’”。这一解释阐述了清水混凝土从液态到固态的变化过程必须借助其他物体、材料，例如木质模板的依托和约束完成固化，而模板的材料特性就会或多或少地反映在混凝土表面。

从工程上来看，模板是清水混凝土结构赖以成形的临时性结构。广义的模板由模板面板、龙骨、支承系统组成，一般分为梁模板体系或框架模板体系（图1）。狭义的模板通常是指模板系统中的模板面板，不同种类的模板面板对清水混凝土建筑最终完成表面的质感影响非常大。

建筑师通常过于关注清水混凝土建筑的空间、表面的质感，却忽视了清水混凝土背后的模板设计与施工方法，而模板本身及相关重要节点的设计恰恰是清水混凝土建筑设计的关键点。

1 模数设计

模板在使用中必须连接与密封，以防止砂浆从模板连接处漏出，这就要求模板必须被非常精确地组装起来，作为模板组装的纸面表现——模数，成为清水混凝土建筑设计的首要问题。

一般使用的梁模板体系允许设计师自由使用单一或多种模板面板的组合，配合部件的安装及螺栓孔的设置。这种组合模式由建筑师主导设计，要求逻辑清晰。如果需要在清水混凝土表面留下螺栓孔，那么在模板的组合中必须考虑到螺栓孔与模板的关系；如果不留螺栓孔，则须考虑对拉螺栓孔洞的填充材料和清水混凝土表面的处理。

框架模板体系可以使用特殊的模板，框架的杆件组合取决于杆件的材料类型和大小。如果说设计师希望得到一定变化，可以考虑保持每一块模板的大小相同，然后将模板横竖方向改变。如果这种横竖方向对齐的模板结合起来使用，组合模式就能得到不规则的效果。大多数的框架模板体系中的模板都可以由工厂批量生产，所以在设计中应当考虑大量的模板重复使用，减少非常规形状模板的数量。在框架模板体系中，模板角部的处理要由模板的不同类型决定，这也是建筑师经常忽略的问题。

1.1 模度与模数

柯布西耶在《模度》（The Modulor）一书中详细介绍了“模度”的概念。“模度”基于“黄金分割”和“直角规线”的比例体系，将人膝高、脐高、身高和举高形成的四种高度化解于比例网格之中，更符合人体尺度（图2）。模度控制下的建筑存在一定的比例关系，这种比例关系可以借由一两个数字因子化解。

在“模度”的控制中，柯布西耶和他的助手选择了有“建筑潜力的板块”，在2.26m（层高）见方的边界内做拼接练习。根据张翼的研究，在柯布西耶早年“模度”实验建筑——马赛公寓中，柱间距和房间隔墙都没有遵循“模度”。“柱间距并不出自‘红蓝尺’，4.19m的尺度，而是3.66m与0.53m两个



图1 威尼斯海关大楼清水混凝土模板系统



图2 柯布西耶的模度人

孙菲

东南大学建筑设计研究院有限公司城市建筑工作室建筑师。主要参与项目：南京市外国语学校河西分校、上饶市三清山旅游换乘服务中心、常州市后稷有机农业园会所及后勤服务用房等。



图3 De la Piedra Chapel小模板

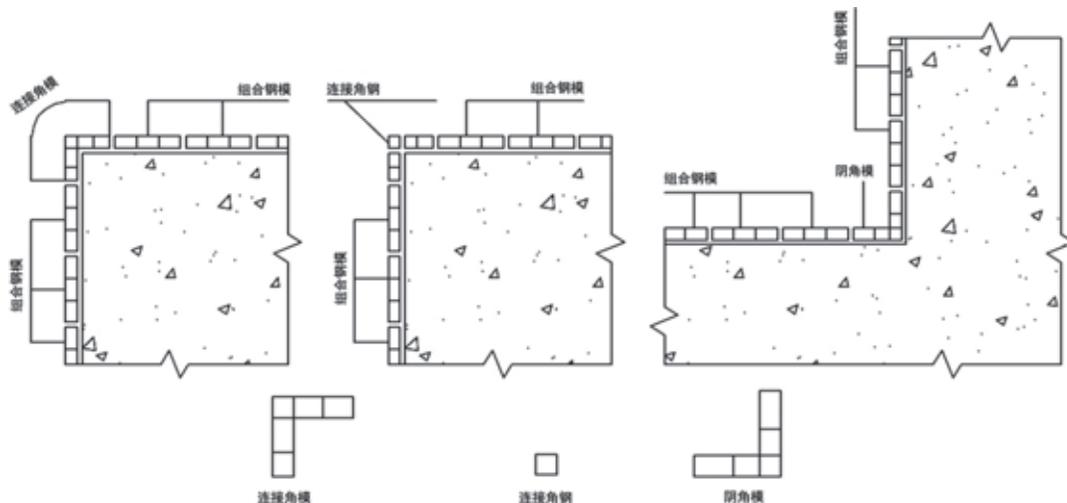


图4 小模板组合示意图



图5 沙尔克研究中心

“蓝尺”数据的加合。没有直接选择“红尺”的4.79m或“蓝尺”的5.92m应该是出自对建筑工程需要的尊重，第二例外是隔墙。由于隔墙选用了1.2m的预制板材，出于经济性的原因，设计者并没有依“模度”的标准切割板材。”^[1]

“模度”是一种工具，当设计师无法对某种尺度定量的时候，可以借由这种基于人体尺度的比例关系，提供度量数据的标准。当数据需要为实际建造服务，“模度”就会自动让步。柯布西耶也认为，“模度”实际上是帮助建筑师摆脱模棱两可的数据间困扰的方法，但“模度”并无法有效地表达模板与模数之间的关系。由此可见，模数在符合人体尺度基本要求的同时，必须符合施工的需要。合理的模数控制对施工过程的便捷和模板标准化是影响巨大的。

1.2 小模板的组合

在现代主义盛行的时期，清水混凝土建筑的模板多用小块板组成，如前川国男设计的东京文化馆采用的是130cm宽×150cm高的小块板，用方木钉成，或者使用小模板拼成的大模板，这会在清水混凝土建筑表面留下小块模板使用的痕迹（图3）。

如今仍有不少建筑利用小块模板，其好处在于施工灵活（图4），建筑除了保持自身的模数关系之外，对模板与建筑模数的关系要求不高。

1.3 大模板的组合

在路易斯·康与安藤忠雄的清水混凝土建筑实践（图5）之后，由于泵送混凝土的普及，模板出现了定尺寸大板，随后出现了复式板和复合板。这种大块模板的出现带来对清水混凝土建筑模数设计的高要求，其背后的原因是由于现场分割的模板无法保证其尺寸的精度而造成的拼缝缺损，导致在光滑的清水混凝土表面留下痕迹。所以清水混凝土建筑的各方面尺寸需要和模板尺寸存在相应的关系，并通过详细的计算、制作模板设计图，才能有效施工。

安藤忠雄的900mm×1800mm模板尺寸来自于日本传统榻榻米一张草席的尺寸（图6）。安藤的模板中，拉接螺栓的分布比例为竖向1:2:1，即225mm，450mm，225mm；横向1:2:2:1，即



图6 安藤忠雄的光之教堂

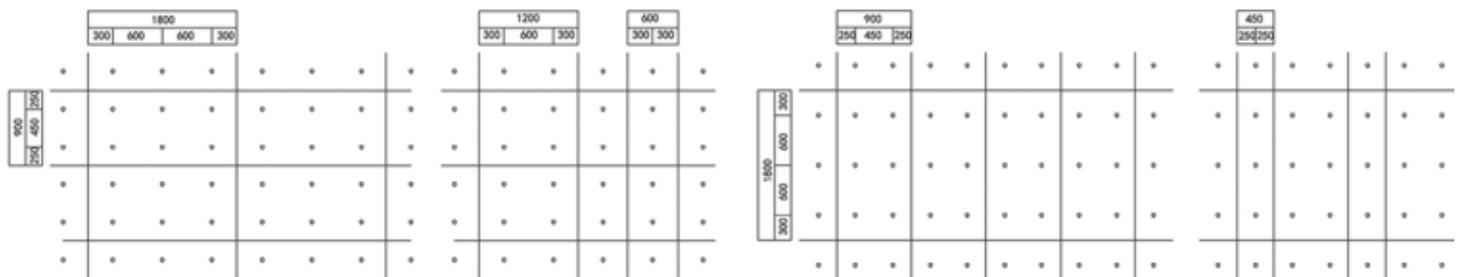


图7 安藤忠雄清水混凝土墙面划分示意图

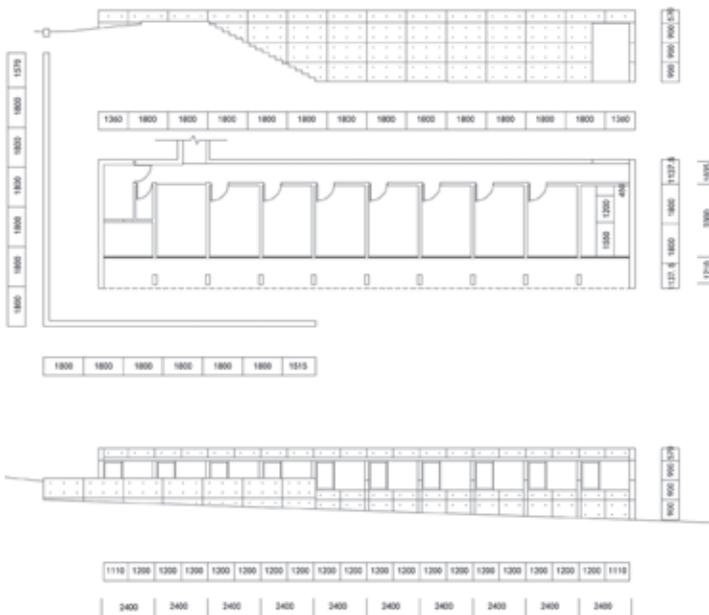


图8 小筱邸客房建筑墙面划分示意图

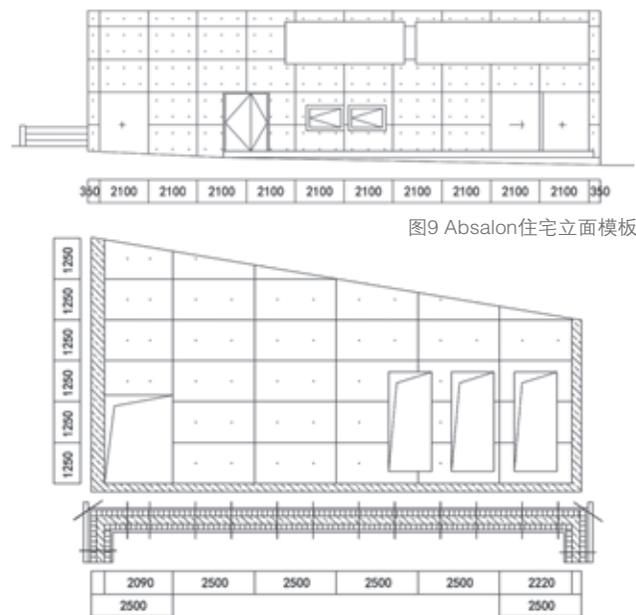


图9 Absalon住宅立面模板划分

图10 建筑内尺寸与模数

300mm, 600mm, 600mm, 300mm。在更小的900mm × 1200mm模板与900mm × 600mm的模板中, 安藤忠雄始终保持竖向225mm与横向300mm的基本尺寸关系(图7)。基于这种模板尺寸的影响, 建筑的柱距一般为6000mm, 4800mm, 5400mm, 4200mm。层高一般为2700mm或3600mm等, 保持竖向900mm的倍数关系(图8)。

从小筱邸的案例分析中可以看到, 安藤忠雄对于建筑整体模数的控制是非常精细的, 柱网2400mm的尺寸与标准模数1800mm之间相对应, 建筑的室内高度上也对应三个模板的尺度。在个别模数的分增量无法消解的情况下, 安藤忠雄以建筑正中轴向两边放模板, 保持边缘的尺寸相同。室内墙壁也考虑到模板的模数, 方便施工。

对于分增量的消解一般都通过末端不同的模板模数的组合与搭配, 达到在特定条件下清水混凝土的优化设计。在Absalon住宅的设计中(图9), 建筑师将角部模板设定为350mm, 与主模板2100mm建立模数关系, 这里的350mm作为消解墙厚等内部尺寸因素带来的分增量。

在德国某杂志的混凝土专刊中, 介绍了一栋建筑采用立面与剖面结合的方法(图10), 展示清水混凝土模板与模数的关系。为了满足建筑外立面2500mm模数的关系, 建筑内部尺寸在角部根据不同墙厚用不同尺寸的模板拼合。

1.4 不规则模板设计

以扎哈·哈迪德为代表的非线性清水混凝土建筑不规则且呈现曲线型的造型, 成为模板设计的最大困难。如果在建造阶段无法采用一定数量的标准化模板, 将延长工期和提高造价。因此, 在菲诺科学中心(图11)的设计建造中, 模板设计工程师和建筑师紧密合作, 力求准确描述哈迪德所设计的形体。他们使用三维软件在电脑里发展出一套毫米级误差的混凝土模板系统解决方案。工程中总共使用了面积达67万m², 足以覆盖9个足球场的模板。其中大部分模板是标准化的, 并能重复使用, 有效降低了工程费用。即使在优化的情况下, 因为建筑形体的复杂, 约有9000m²的模板是专门订制的, 而且只会被使用一次。

在台湾日月潭国家风景管理处(图12)的设计中, 团纪彦的设计团队将台湾杉树制作的模板分成



图11 菲诺科学中心



图12 日月潭国家风景管理处内景



图13 古埃及浮雕



图14 东京大学某建筑木模板



图15 安藤忠雄亚洲艺术大学图书馆木模板

三大类。结合墙壁的形态分别使用平面模板、二次曲面模板、结合二次曲面模板的三次曲面模板，部分地方如建筑主要斜坡的凹陷处部分使用了特殊模板。根据施工日志记述，天花板的平面模板的基本尺寸是1500mm×600mm，其他模板以600mm为基准，按照各墙壁的形态决定尺寸^[2]。建筑的横向尺寸以600mm为基本单位，保持上下模板对齐。虽然在平面图中，室内空间的尺度都是有零头的，但330mm厚的外墙外尺寸保持600mm的模数，纵向尺寸保持500mm的模数，有利于模板的组合。看似整体曲面的外表被设计师划分为直线+曲线+直线，即1:4与2:7的直线斜面和半径2500mm的曲面。

2 模板材料与表面处理

柯布西耶曾经有一段关于模板的记述：在金属模板以及杉木板、硬质纤维板或胶合板制成的木模板中，可以插入根据需求和主题切割好的木板。一旦浇筑完成，拆去模板后，将在混凝土的实体上留出相应的虚空，这类似于五千年前古埃及人制作他们神庙中的凹雕壁画（图13）的情形。^[3]这恰如其分地说明了模板对于清水混凝土的重要作用。

清水混凝土脱模以后是靠混凝土的表面色彩和表面线型的质感对建筑物表面进行装饰的，而这种质感的表现主要依靠清水混凝土的模板来表现。另外，清水混凝土表面的保护剂也可以起到一定的装饰作用。清水混凝土的表面质感也分为不同类型：一类是以脱模后的清水混凝土表面原样作为装饰，另一类是经过对表面加工而成的装饰，还有一类是加入特殊材料做成的衬板。模板的不同也会给清水混凝土的外观带来差异，比如木模板清水混凝土的色彩较深，而塑料或金属模板的清水混凝土色彩浅一些。

2.1 模板的类型

模板的种类对其表面的肌理有至关重要的作用，其选择直接关系到混凝土的色彩和表面质感。常用的模板分为木板、竹木胶合板、钢模板。

木模板仍是现代使用最广泛、历史最悠久的清水混凝土模板，一般用未处理的软木制作，通常使用2~4次就必须更换。最普通的木模板是粗糙的木板，旧的和新的，湿木板和干木板，不同类型的木板混合在一起。虽然木板本身并不能提供很好的密封，但由于夯实的混凝土通常没有液体灰浆的成分，再加上粗糙木头的表面会吸收空气和水泡，因此不会出现渗水或形成小孔。但采用这种粗糙模板不可能形成锐利的边缘或拐角，也没有三角嵌条或类似的边缘设计。另外，刨平的舌槽木板逐渐取代粗糙木板，在建筑和桥梁施工中使用。

在上世纪50年代的日本，有名为UKIZUKURI的模具制作方法，模板被刻上木材的纹理，或由日本柳杉或松木制成的MUKUITA HONZANE实木模具。当时流行的做法是用这些模板创造带有木板纹理的清水混凝土（图14），前川国男、坂仓准三以及吉阪隆正都在其设计的清水混凝土建筑中使用过。但安藤忠雄没有考虑采用这样的方法，他将木模表面处理光滑，这样得到的清水混凝土表面呈镜面的效果。安藤忠雄常用的木模板通常都是日本的木材，在通过马来西亚的加工与日本的化学处理后，表面抛光打磨，并且涂抹模板保护剂，内部呈现平滑细腻的质感（图15）。

另外，以钢模板为代表的光滑模板的设计特点是模板之间的接头以及拉接螺栓的特殊设计，这类模板也是非吸收性模板。利用这种模板可以多次实现标准的表面质量，并且可以重复使用的次数更多，可降低施工成本。除了以建筑师规定的方式接合外，清水混凝土的外观和饰面的质量几乎没有明显变化。

不同类型、不同材质的模板的应用和使用次数均不相同，这些都需要在设计之初进行考虑和设计。除了常用的模板以外，建筑师常常根据需要使用特殊的材料作为清水混凝土建筑模板，达到不同的效果（图16）。

模板类型	模板材料	应用	适当处理后重复使用次数
盖板	含树脂和树脂膜的杉木和云杉	清水混凝土	2~3
光滑板	刨平的杉木和云杉	清水混凝土	达到10
单面板	喷砂或光高面的杉木和云杉	具有木纹的清水混凝土	达到10
木板	杉木和云杉	清水混凝土	达到50
树脂层夹板	由软木制成的胶合板和夹心板，表面涂有树脂膜	清水混凝土	达到30
薄层夹板	由软木制成的胶合板和夹心板，表面涂有钠或粘附牛皮纸	清水混凝土	达到100
树脂层夹板	由软木制成的夹心板，具有树脂层	光面清水混凝土	80~100
高压塑性板	胶合板或夹心板涂有三聚氰胺或环氧树脂	清水混凝土	30~50
多磺化物模板	多磺化物	清水混凝土	达到50
橡胶模板	聚苯乙烯树脂膜	花饰清水混凝土	1~5
聚苯乙烯模板	刚性膨胀聚苯乙烯泡沫	清水混凝土	达到500
钢板	钢材	清水混凝土	1
轧制钢管	带旋转折叠接口的钢管	清水混凝土	1

图16 清水混凝土模板类型及应用



图17 大洋画廊竹模板

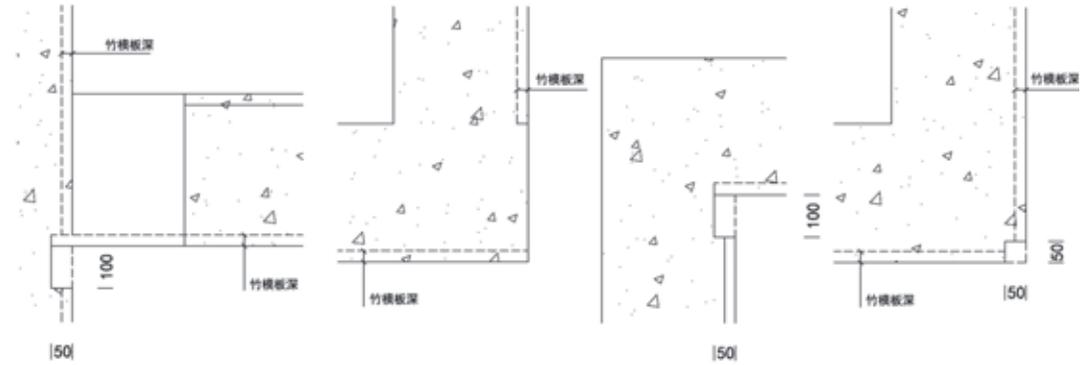


图18 大洋画廊角部竹模板组合示意图



图19 鹿野苑石刻博物馆

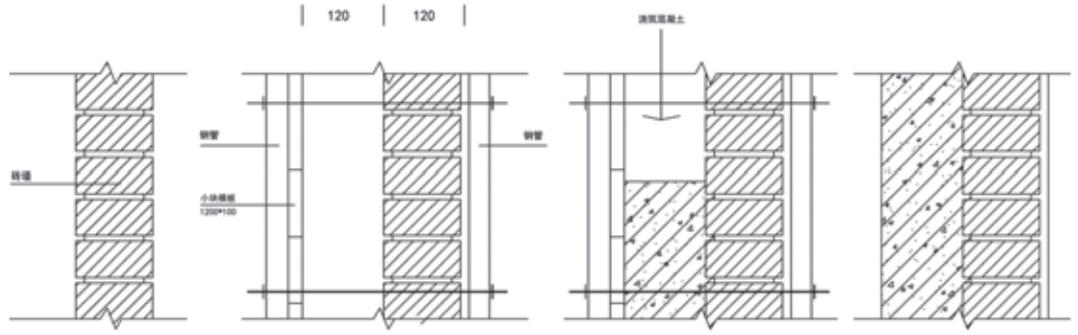


图20 鹿野苑石刻博物馆组合墙施工步骤示意图

斯蒂芬·霍尔在韩国大洋画廊与住宅中尝试了竹模板的清水混凝土表面（图17）。早在2004年设计的南京四方美术馆中，霍尔在美术馆裙楼部分曾使用了竹模板，但清水混凝土表面被覆盖黑漆作为实验。霍尔尝试的竹模板只是简单地将竹子劈成两半，分别用钢龙骨固定，建筑表面呈现出均匀的凹槽效果。在大洋画廊与住宅中，霍尔将竹模板变成表达建筑立面效果的一种工具，同时还考虑转角的模板交接，以及同一平面内平滑混凝土和竹模混凝土的交接问题（图18）。此时模板已经从功能性模板转变成装饰性模板，竹模的作用更多地在于清水混凝土质感的表现。

在中国为数不多的本土清水混凝土建筑尝试中，鹿野苑石刻博物馆成为探索之一。在鹿野苑的设计中，主要使用了木模板，混凝土凝固成形后表面留下了木纹效果（图19），刘家琨称其是一种低技建造理念，意在在中国这种经济能力有限的条件下，用最简单可行的建筑方式寻求一条适合的出路。由于施工技术原始，难以在浇筑过程中保证墙体的垂直度，刘家琨采用一种“框架结构、清水混凝土与页岩砖组合墙”的特殊工艺（图20）。具体做法是：以1.2m高度分段留施工缝，先绑扎好柱子和组合墙混凝土部分的钢筋，再砌1.2m高砖墙。当砖墙达到强度后即成为内模，然后支好木外模，进行整体浇灌，完成柱子、墙体、混凝土墙的组合浇筑，内外一次成型，下次再砌再浇，易于保证垂直度。而整个主体部分的清水混凝土外墙采用凹凸窄条模板，一是为了形成明确的肌理，增加外墙的质感和可读性，同时粗犷而较细小的格可以掩饰由于浇筑工艺生疏带来的瑕疵，也利于分区修补。

在巴黎设计的四川德阳孝泉镇民族小学中，采用了现浇混凝土框架体系，建筑师将外露的梁柱和部分混凝土墙面以清水方式处理，并且在一些公共活动部分大量使用了清水混凝土。一方面，结构构件脱模后不需要更多的装饰，非常好地控制了造价。另一方面，清水混凝土的墙面也非常贴近当地传统青砖建筑的立面质感。

这些都是在当地的环境中寻找合适的模板材料实践案例，非常值得本土建筑师的学习和借鉴。

2.2 模板衬垫及附加材料的设计

模板衬垫是以一致的效果将一种表面结构印在清水混凝土上的衬垫，这种衬垫的材料可以是塑料、木板或其他材料。

普通的塑料衬垫，纹理深度为80mm，但更深的纹理和脊状图案也可以实现。一系列的标准纹理已经出现，也可制作特殊的一次性设计。这种塑料衬垫一般可以产生100次一致的效果。

在乌德勒支大学图书馆中，阅览空间与公共空间分别用黑色印花清水混凝土和原色光滑清水混凝土包裹（图21）。日本的唐木田菖蒲馆也使用了涂锯齿状碳氟树脂的衬垫，达到清水混凝土表面特殊的肌理效果。



图21 乌德勒支大学图书馆黑色印花清水混凝土



图22 丰岛美术馆施工

图23 松露住宅



图24 克劳斯兄弟会教堂内壁仰望



图25 克劳斯兄弟会教堂内芯树干模板

另外，在德国某杂志中介绍了新兴的定向结构刨花板（OSB），这种板通常用作框架模板的附加板。定向结构刨花板具有强烈的吸收性，在接触湿气时会膨胀。这对清水混凝土表面具有相应的影响：材料内的碎片清晰地印在清水混凝土表面上，遮住了诸如浇灌层次、颜色变化等其他表面效果。模板在吸收混凝土中的潮气后会稍微膨胀，造成接头合拢（包括边缘部位），无湿水泥溢出，保持了颜色的连续性。

2.3 特殊模板

传统的清水混凝土建筑在脱模后露出清水混凝土的质感，但同样的浇筑逻辑之下，我们可以看到模板的不同处理方式会带来不同的清水混凝土使用效果。

西泽立卫事务所设计的丰岛美术馆，为了打造出内外无缝式的外形设计，并没有采用通常的模板浇筑，而是采用了在填土之上浇筑混凝土，硬化之后再挖出来的方法（图22）。具体做法是：施工中先将建筑的地坪浇筑完成，然后在地坪上填土，填上的土正好是现场挖出来的土，在填土过程中每30cm用滚压机压实，同时需要对照设计图进行测量，调整填土的形状；在完成填土后，用薄薄的混凝土灰浆制作模板，在灰浆凝固以后，工人完成配筋工作，并浇筑含有膨胀剂的白色混凝土，混凝土硬化后再用挖掘机将填土挖出来。这种完成清水混凝土的方式类似于铸造，虽然在古代人们广泛采用这种方式铸造工具或武器，但现如今西泽立卫事务所借用计算机技术、测量技术和施工技术第一次实现这种全新的施工方法，并且保证了模板的精确度在 $\pm 5\text{mm}$ 以内。

在松露住宅（图23）的设计中，设计师模拟松露在土中的状态，用稻草充当建筑内壁的模板，用周围的泥土充当建筑外壁的模板，然后浇筑混凝土。混凝土凝固后，去除表面的覆土与内部的稻草，切割出窗洞和门洞，安装上玻璃就成为了最简单清水混凝土建筑。设计师在这一建筑中也完成了生态方面的考虑，放弃传统材料的模板，利用了当地的泥土与稻草作为混凝土的模板。

在彼得·卒姆托设计的克劳斯兄弟会教堂里，对模板的去除采用了另一种独特的方法：将木质材料慢慢燃烧，使内部墙面就像碳坑一样（图24）。教堂内部的空间先用树木搭建而成（图25），筑好外墙后用火烧这些树木，留下粗糙的凹坑，不规则五边形外墙使用的是“Rammed Concrete”（版筑混凝土），和我们熟悉的夯土墙类似，版筑混凝土中包括当地的泥土砂石、白水泥。设计师与工人们一起在基地附近的林子里伐了111棵树，创造出类似北美土著印第安人帐篷似的一种高而斜的形式，然后围绕这些竖起来的树干浇混凝土，一层层地把混凝土夯起来，而不使用振荡搅拌设备。这层版筑混凝土由当地人筑造，一次一天向上夯筑50mm，一共24层12m高，每一层代表一天的一小时，显示出来的是一层层不平的肌理。浇筑与夯实完成后，就拆掉了塑形用的木板箱体，在里面放一把火。这种放火的作法就像古

人烧窑制炭的方式一样，因为缺氧，木头不会充分燃烧。木头经过烧制之后就会收缩，把燃烧的黑色痕迹留在了混凝土的表面。树木帐篷被熏烧3周之后移除，留下了凝固着树木味道的内壁。

2.4 清水混凝土表面的特殊处理

影印清水混凝土可以使清水混凝土的表面产生看起来好像一幅照片嵌入其中的感觉。这里将阻滞剂应用于垫箔上，以便与照片的变化一致，然后铺到模板内，当清水混凝土核心凝结后，对表面层进行冲洗，形成一种原始照片的灰度拷贝。不同厚度的阻滞剂会使最后的冲洗表面稍有不同，从而突出照片细节，没有露出大块的骨料。

在埃伯斯瓦尔德森林研究院图书馆（图26）的设计中，赫尔佐格和德梅隆特意将建筑设计为一个立方体，简洁的外表配上特殊的清水混凝土表皮，使得建筑成为一个巨大的波普艺术作品。

通过对饰面进行颜色处理可以改变清水混凝土的外观颜色。在修整过的混凝土表面上，颜色处理可暂停或根据需要而变化。如果所用水泥产生的表面太暗，可通过添加白色颜料而变亮。对于非常亮或白色的表面，则须添加白色颜料并使用白水泥。添加彩色颜料是为了形成彩色饰面。“目前常用修整清水混凝土表面并进行着色处理的选择是彩釉，它将永久性颜料应用于清水混凝土表面。”^[4]釉料在处理不满意的光滑清水混凝土区域也很有用。不同的处理方法使清水混凝土的饰面产生不同的效果，极大地丰富了清水混凝土建筑的立面表现。

3 重要节点设计

3.1 模板交接缝的设计

在沙尔克研究中心的设计中，路易斯·康关注到了模板与模板交接缝的表现。在设计中为了将夹板模具固定到位，并在两层模板之间保持一定的距离以便于混凝土的浇筑，康采用了一种可重复使用的螺纹系扣。每个扣的末端都有一个木栓，在浇筑后的混凝土墙面上留下一系列经过精心设计的洞眼。通常，木栓上涂抹的都是脂肪，但是康却用铅代替脂肪，木栓插入混凝土墙面的深度保持在四分之一英寸。与此同时，由于两块夹板的交接处不可避免会有混凝土泄漏出来，因此无论在水平方向还是在垂直方向，康都要求采用误差很小的V形接缝处理（图27，28），这样泄露的混凝土在墙的表面会形成一种凸起的接缝。中间的垂直接缝是浇筑中刻意留出来的，接缝处涂抹的也是铅。

20mm厚的胶合板每块尺寸为100mm×300mm，呈垂直布置，其边缘都被削成斜面，组成V缝。相邻混凝土表面之间的不连续性将被向外凸起的60mm的三角形凸起打断，楼层之间的明缝（图29）也被保留，这样可以使施工中暴露出来的误差减至最低。凸起的脊、凹陷的锥形孔和浇筑的接缝构成了贯穿整个建筑的秩序，表现出一种很强的持续的节奏感。这种将符合建造逻辑的施工过程与视觉上的清水混凝土

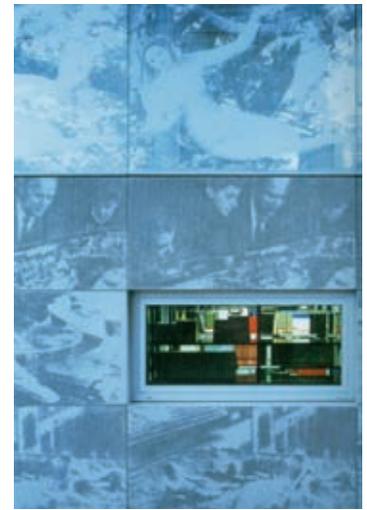


图26 森林研究院图书馆



图27 沙尔克研究中心墙面



图28 沙尔克研究中心禅缝

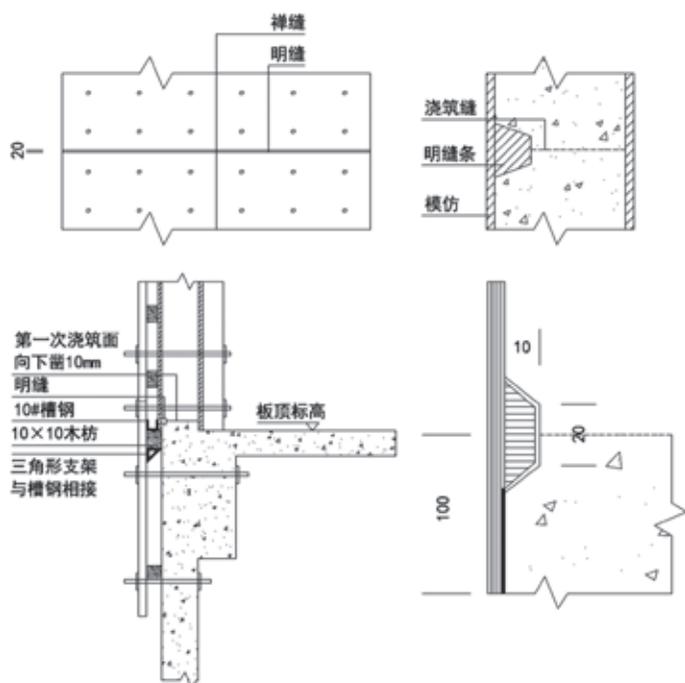


图29 明缝与禅缝示意图

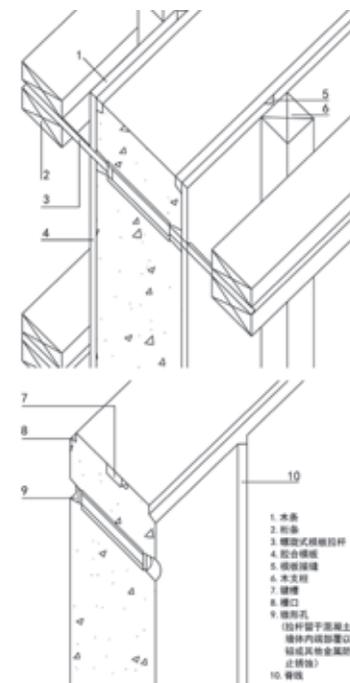


图30 沙尔克研究中心凹凸缝施工示意图



图31 模板的拉杆

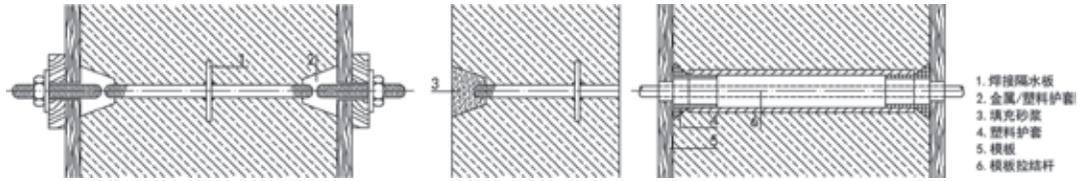


图32 拉接金属线或连杆示意图

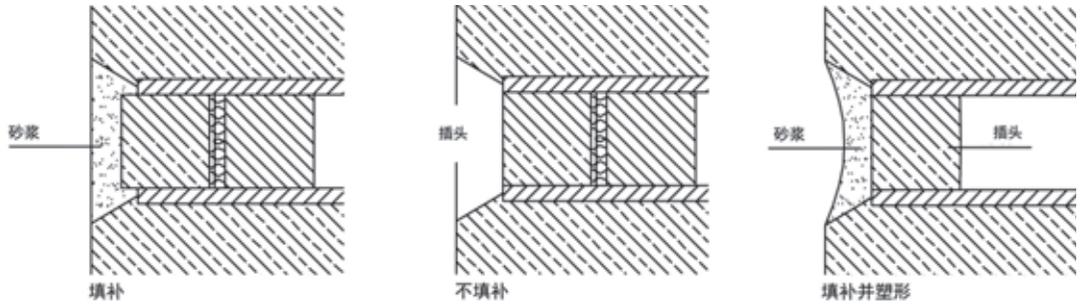


图33 拉接螺栓孔处理示意图



图34 表参道同润会青山公寓拉接螺栓孔

土的装饰结合起来的做法，使得沙尔克研究中心具有最为直接的表现力——整体统一的清水混凝土结构体，通过自身建造过程中留下的凹凸痕迹，显示了建筑的模数，这个模数也是结构与构造的模数（图30）。

3.2 拉接螺栓的设计

模板的拉杆（图31）是在施加混凝土横向载荷时，用来防止模板裂开的金属装置。去除模板之后，金属线或连杆仍保留在清水混凝土墙体内部（图32）。拆除模板拉接部件后留下的拉结螺栓孔洞可以采取填补或者假装拉接螺栓套的方法（图33）。

安藤忠雄在其清水混凝土建筑中采取的方法是将拉接螺栓纳入设计的考虑中，他认为锚固螺栓形成的孔是非常重要的设计元素，并将孔的位置精确到毫米。另外，他将连接模板的钉子所形成的更加细小的孔“抹去”。如今安藤的“六孔”清水混凝土已经广为人知（图34）。

3.3 保温层

清水混凝土建筑保温性能差是被普遍诟病的，特别是在气候寒冷地区与夏热冬冷地区。安藤忠雄的早期建筑因为抗寒性能差而被称作“冷酷”的建筑。在普遍要求保温性能的今天，墙体的保温设计也成为必须。但是清水混凝土建筑如果设计外保温层，将覆盖住清水混凝土墙体，失去其标志性外观。

双层清水混凝土墙中设置保温空腔的清水混凝土建筑对于施工要求较高。在设计中，通常内侧的墙体是承重的钢筋混凝土墙，外侧的是起保护结构免受气候干扰作用的墙体。这样的建筑中，可只在外侧墙体采用要求高的清水混凝土，重点突出清水混凝土表面的肌理，发挥建筑元素的作用（图35，36）。

安藤忠雄设计的德国维特拉会议中心（图37）的双层墙都为现浇清水混凝土墙，两层墙间的空腔与屋顶保温层相连，完全杜绝冷桥的产生。同时，由于两侧都采用了清水混凝土，室内外都保证了清水混凝土的效果（图38）。



图35 瑞士Pesoels学校



图37 维特拉会议中心

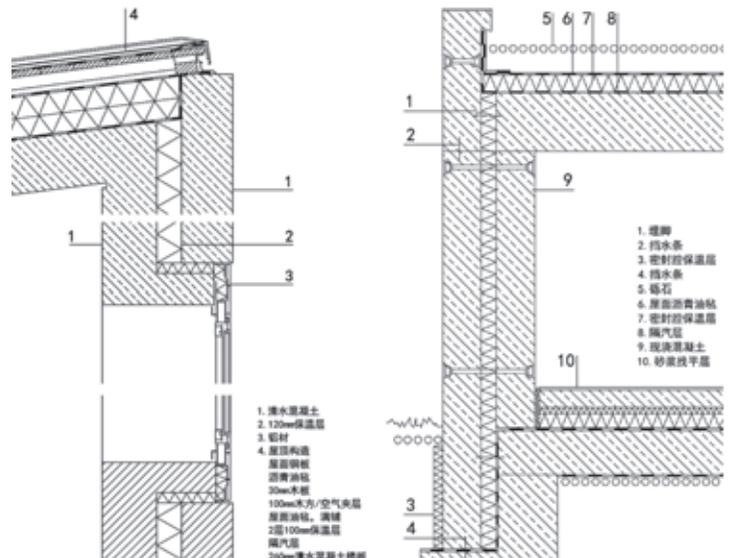


图36 瑞士Pesoels学校双层清水混凝土墙剖面示意图

图38 维特拉会议中心双层清水混凝土墙剖面示意图

苏黎世信号所转换站采用了双层清水混凝土，墙壁的总厚度为500mm，顶层混凝土外层厚250mm，隔热层厚200mm。双层墙的设计会使墙体的厚度超过400mm，甚至达到700mm，材料的用量和对于结构的荷载压力较大，仅适用于低层与多层建筑，同时也会增加了施工时支模与拆模的难度。

比较常规的保温层做法是在清水混凝土建筑的内壁装饰层之后加装保温层，从而保证清水混凝土建筑外立面的完整形象。在Niederhasli的学校项目（图39）中，设计师配合木制窗和门，在楼板两面分别加上保温层，为了使室内清水混凝土的风格统一，保温层被27mm不可燃纤维混凝土板和人造石铺面聚乙烯板覆盖，在视觉上达到近似清水混凝土的目的。同样在埃塞俄比亚的荷兰大使馆的设计中，室内墙面贴敷80mm矿棉达到隔热、吸声的效果，矿棉外再附加隔汽层、10mm石膏板、3mm石膏灰浆。此外，在St.Magadlena的小学设计中，清水混凝土楼板下并不设置保温层，而是配合地板与屋顶构造，在屋顶设置130~210mm厚的PUR硬质泡沫保温层，地板下配合80mm厚的XPS保温层。

在单层清水混凝土墙的设计中还要注意室内外温差的控制，防止结构内产生水汽凝结，使单层混凝土墙外（内部保温）的材料膨胀减至最低。这样的设计下，墙体的厚度达到300mm，核心保温层的厚度为100mm。

最近，材料工程师开发出了新的具有保温性能的清水混凝土，这项技术被应用于库尔市的住宅（图40）建造中。建筑师希望尽量减少其他材料的使用，建成的清水混凝土墙体实际由普通混凝土或有隔热等级的结构混凝土建造而成，住宅因此没有使用更多的附加层，如隔热层、灰浆层、抹灰层，甚至也没有在屋顶铺设任何金属防雨板或砂砾层。值得一提的是，建筑只在屋顶采用了塑性改良的水泥浆弹性涂层，这种永久性的防紫外线涂层可以阻挡水汽渗透。

3.4 管线槽预留与设计

一般建筑中，设备管线的设计可以在建筑结构浇筑完成后安排布。但在清水混凝土建筑中，墙面开孔或开槽都会影响清水混凝土的墙面完整性。在安藤忠雄的建筑中，设备管线槽预埋在墙体与地面中，开关、插座、灯具均在设计中定位。这些暴露在清水混凝土墙表面的物体的形式问题成为重点（图41）。

柳亦春在谈到其完成的龙美术馆西岸馆中曾经说：“现浇混凝土里面有很多预埋管线，漏了错了的还是不少。比如说一些安全出口的预留盒、开关盒、电线过路盒的位置很容易弄错，还有墙里预埋的线管堵住了，电线穿不过去等等，某些区域就必须凿开重新埋，因此就需要重新修补混凝土。”^[5]龙美术馆西岸馆中，通风管、灯具槽、烟雾报警器等设备都设计预留了相应的孔洞（图42，43），成为结构体的一部分，甚至利用拉接栓孔作为画具挂点，彰显出其对于细节的把控。

如果无法很好地控制室内管线槽的位置，可以采用鹿野苑的建造方法，例如清水混凝土与砖石特殊的混合工艺。刘家琨认为：这是一种既满足建筑追求，又解决面临问题的策略——中国的建筑项目通常事前策划不严密，改动随意性极大，组合墙的外层是钢筋混凝土，内层是砖成为“软衬”，可以应对开槽、埋线、装配挂钩支架等事后改动。

3.5 清水混凝土建筑门窗细部设计

在清水混凝土建筑设计中，门窗的高度和宽度宜基于清水混凝土的模数设置，位于巴塞尔的办公楼设计中，窗的高度与模板的高度相同，水平方向上窗的尺寸与模板也相互组合，方便后期建造与施工（图44，45）。

从构造角度来看，清水混凝土建筑浇筑后很难修补的特性决定了需要将门窗框预埋件进行整体考虑。在安藤忠雄的建筑中，强调的是窗框的隐藏，玻璃幕墙框料尺寸被墙体尺寸扣除，视觉上清水混凝土与玻璃之间没有任何连接金属框的直观感受，玻璃似乎直接嵌入墙体，建筑使用的材料仿佛只有玻璃与清水混凝土（图46，47）。虽然框料可以隐藏在清水混凝土的凹口中，但这个部位的滴水线、滴水槽都需要特殊设计。伊东丰雄在多摩大学图书馆钢板清水混凝土建筑设计中，外立面预留了隐框玻璃幕墙框料的凹槽，幕墙安装到位后，同样达到隐藏框料的目的（图48）。无论从室内还是室外，视觉感受消减为单纯的拱形混凝土大梁。

另外，门窗的设计也可以和室内的装饰一起考虑。在Niederhasli的学校项目中，室内的木地板与天花板、门窗一起构成了一个完整的内腔，嵌入在清水混凝土内，同时兼顾保温、防水、通风等基本要素。



图39 Niederhasli学校



图40 库尔市某住宅



图41 Easter Sculpture的通风管



图42 龙美术馆西岸馆设备空腔与灯具槽

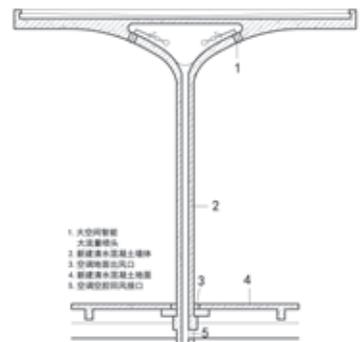


图43 龙美术馆西岸馆单元剖面图

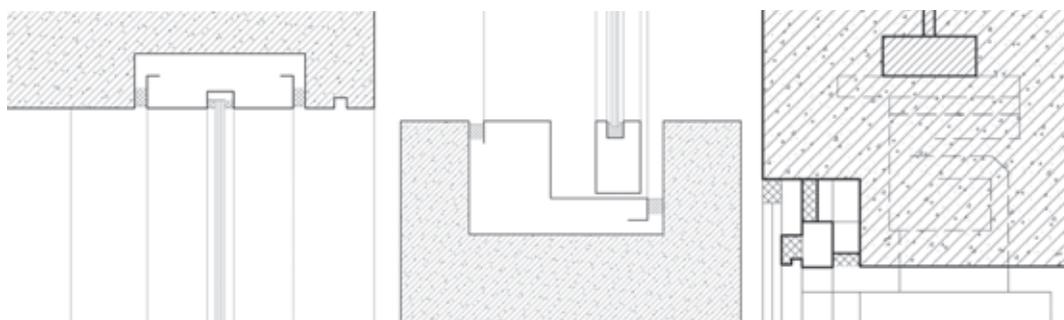


图46 光之教堂玻璃幕墙框料垂直节点示意图

图47 光之教堂玻璃幕墙框料水平节点示意图

图48 多摩大学图书馆玻璃幕墙节点示意图

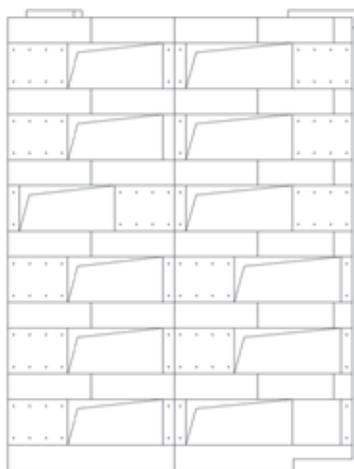


图44 巴塞尔某办公楼立面示意

4 结语

模板作为清水混凝土建筑设计的关键问题，和清水混凝土的建造是密不可分的，这也是清水混凝土材料的建造性的体现。从模板的处理到建筑节点的设计需要在符合建筑基本功能要求的同时，保持清水混凝土建筑特有的整体性和纯粹性。清水混凝土建筑设计也必须在尊重清水混凝土的建造逻辑上，从模板、清水混凝土材料的角度着手设计。设计理念可以通过清水混凝土浇筑的逻辑、清水混凝土材料的特性等方面表达。

清水混凝土建筑的设计初衷并不都是对清水混凝土模板、表面特性的关注，技术对于清水混凝土建筑的发展起了巨大作用，对于材料基本属性的关注有助于拓展清水混凝土建筑的设计思维，如同卒姆托等人的努力，从历史中发掘并创造新的使用方法。

只有将模板系统的相关设计工作纳入到建筑设计的范畴中来，明确了模板的模数设计、模板的材料选择、模板交接与支承系统的设计，才能有效地展开设计和创新，这也是清水混凝土建筑的特殊性所在。正如路易斯·康在沙尔克研究中心设计中所说的，清水混凝土建筑的设计可以让建筑师真正地从笔尖开始，到最后的浇筑、脱模完成。



图45 ClassiCon展厅

图片来源

图1来源于Giovanna Ponciroli. Tadao Ando for Francois Pinault. 2010:195.

图6来源于William J. R. El. Croquis.44+58 Tadao Ando.

图11来源于Birkhauser. Liquid Stone:198.

图12, 22来源于 矢野胜伟. 日本新建筑系列丛书11. 艺术空间.

图13来源于<http://en.wikipedia.org>

图15来源于<http://en.wikipedia.org/亚洲大学艺术馆>

图19来源于<http://douban.com>

图21来源于Martin Peck. Detail, 2008 3/4:175

图23来源于<http://archdaily.com/The Truffle House>

图24, 25来源于<http://archdaily.com/Bruder Klaus Chapel>

图26来源于Birkhauser. Liquid Stone:36.

图31来源于<http://en.wikipedia.org: 亚洲大学艺术馆>

图35, 37来源于Kind-Barkauskas. Concrete Construction Manual.

图39来源于<http://archdaily.com/Niederhasli school>

图40来源于Detail, 2006 No.3.

图45来源于Joachim Jurke. Detail, 2006 No.3.

其余图片为作者自摄或重绘

参考文献

[1] 张翼. “模度” [J]. 建筑师, 2007 (12).

[2] 日本株式会社新建筑社. 日本新建筑系列丛书[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2011: 35.

[3] W·博奥席耶. 勒·柯布西耶全集第6卷[M]. 牛燕芳, 程超, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 180.

[4] Martin Peck. Visual Concrete: Surface Design Techniques [J]. Detail, 2008 (3/4): 178.

[5] 在思考与实践一步步演进——范文斌访谈柳亦春[J]. 室内设计师 (47): 52 - 69.