

干挂石材的 全过程 设计与施工

——中国银行总部大厦干挂凝灰石工程施工实践

Total Design and Installation of Stone Cladding

—— Travertine Cladding Practice of the Bank of China Head Office

中建建筑承包公司 组织编写



干挂石材的全过程设计与施工

——中国银行总部大厦干挂凝灰石工程施工实践

Total Design and Installation of Stone Cladding

——Travertine Cladding Practice of the Bank of China Head Office

中建建筑承包公司 组织编写

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

干挂石材的全过程设计与施工: 中国银行总部大厦干
挂凝灰石工程施工实践/中建建筑承包公司组织编写.
北京: 中国建筑工业出版社, 2001.1

ISBN 7-112-04541-X

I. 干… II. 中… III. ①凝灰岩-干法装修-建
筑设计②凝灰岩-干法装修-工程施工 IV. TU767

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 85475 号

本书详细介绍了干挂石材的设计与施工, 作为一个分项工程, 本书主要从设计(包括材料试验与设计计算、干挂石材施工图设计; 挂件体系设计与计算、施工图设计)、材料(包括防潮、保温与密封材料、泛水材料等)、施工(即安装工艺), 以及计算机辅助施工管理方面综合论述。为了便于读者参考使用, 列出了相关图表索引, 一目了然。由于该工程系中银大厦(设计为外方)的一个分项工程, 更引用了“工程规范”, 使读者了解到我国规范和国际上其他规范的做法差异, 有助于国际工程领域的开拓与合作。

读者对象: 建筑企业施工技术人员

干挂石材的全过程设计与施工

——中国银行总部大厦干挂凝灰石工程施工实践

Total Design and Installation of Stone Cladding

——Travertine Cladding Practice of the Bank of China Head Office

中建建筑承包公司 组织编写

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京云浩印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 9 1/4 插页: 4 字数: 234 千字

2001 年 3 月第一版 2001 年 8 月第二次印刷

印数: 2001—3600 册 定价: 20.00 元

ISBN 7-112-04541-X

TU·4059 (9991)

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

共和国 50 华诞前夕，人们惊喜地发现在长安街西单路口出现了一座气势恢弘、高贵典雅的建筑——中国银行总部大厦。

中银大厦（“中国银行总部大厦”简称，下同）由著名华裔建筑大师贝聿铭先生主持设计，大厦主要立面饰以凝灰石挂板。米黄色调而质感丰富的凝灰石充分体现了大师的设计理念和顶级建筑的艺术风格，也有力地烘托出业主——中国银行稳健、坚实的特点。

凝灰石挂板在中银大厦占有重要位置。凝灰石遍及外墙、四季大厅、银行大厅、地下会议厅和 39 个电梯厅等重要部位墙面。其中，月亮门、斜墙、圆弧墙、半球型石壁灯和石材吊顶等独特干挂造型，无不令人叹为观止。可以说，在中银工程，贝老把凝灰石“发挥”（使用）得淋漓尽致。

本工程属国内首次大规模使用凝灰石，面积巨大、技术复杂。鉴于其在整个工程中的特殊份量，作为工程总承包商，我们（中建建筑承包公司）直接组织实施，在项目经理部内部设立“挂板组”，组内设立组长、现场、技术、质量、材料、图纸、翻译等岗位，负责挂板分项工程具体管理和运作。技术、质量、二次设计、材料采购和施工组织等核心工作均由中建实施或直接控制（安装劳务外包）。

中银挂板工程运作国际化程度比较高，参与工程的国外公司近 10 家，英语为主要工作语言，在实施过程中，中建负责与所有外方联系、商洽，然后将施工指令发到作业层并监督执行；在设计和试验方面，按照美国 ASTM 标准，中建参与完成了二次设计和大量试验和检验工作；在施工管理方面，中建聘请国际咨询公司参与质量管理，国外公司的管理理念、专业知识和丰富经验为最终高质量完成挂板施工奠定了坚实基础。

能够参与中银大厦挂板工程这一宏伟巨作，无疑是幸运的。在与众多业界同行合作过程中，我们学到了许多专业知识并获得些许粗浅体会，现在总结出来供大家参考。

在中银大厦项目挂板工程的实施过程中，中银大厦的设计单位——美国贝氏建筑事务所对我们提供了大量的指导工作和无私的帮助，使我们加深了对国外规范的了解以及较为深入地掌握了国际工程的运作方式。经得美国贝氏建筑事务所的同意，我们将贝氏建筑事务所的中银大厦工程规范（英文原版）中关于干挂石材的部分作为本书附录，以便读者能够更为准确地了解国际工程中对挂板分项工程的要求。在此我们对美国贝氏建筑事务所表示诚挚的感谢，特别是贝氏主管中银大厦挂板设计的建筑师陈国星先生（Mr. Perry Chin）和贝氏中银大厦现场代表莫平先生，他们对我们的指导和帮助以及他们的敬业精神使我们获益匪浅。

中银大厦挂板工程的石材供应商——意大利 Mariotti 公司与我们进行了非常高效的合作，使得如此大量的石材能够供应到位而及时地满足了工程的要求。在此我们对该公司也表示感谢，特别要感谢该公司主管中银大厦挂板石材供应的马里奥帝先生（Mr. Primo Mariotti），对很多挂板技术的探讨使我们双方都得到了提高。

为了使我们的挂板工作更好地满足国际工程的严格要求，我们专门从著名的国际咨询

公司——英国 Sandberg 公司聘请了干挂石材方面的专家，专家罗宾先生（Mr. Robin Lethe）给我们的挂板工作带来了许多非常专业化的思路和方法，也给我们带来了许多启发，在此我们也表示衷心的感谢。

本书的编写是基于中银大厦挂板分项工程的整体工作，在此对没有参加本书编写工作的挂板组其他同事及负责石材运输和仓储的公司物资中心基地的同事们表示感谢，同时也感谢中银大厦项目部其他部门以及公司其他部门对挂板组工作的帮助和支持。

本书顾问——中建建筑承包公司党委书记兼总经理易军先生、中建建筑承包公司副总经理兼中国银行总部大厦项目经理李健先生、中建建筑承包公司副总工程师兼技术中心经理史志强先生对本书编写工作十分关心，给予了大力支持和指导。

中建建筑承包公司原总工程师张永明先生和中建建筑承包公司技术中心总工程师高俊峰先生担任本书的主审，分别审阅了全书各章并对有关章节提出了修改意见，在此我们也对他们表示深深的谢意。

在中银大厦挂板工程技术准备及实施的过程中，我们非常期望得到一些可以参考和借鉴的书籍资料，可是这方面的资料非常少见。现在我们不揣冒昧地推出本书，主要目的是将我们自己的一些工程实践体会介绍给大家，和大家一起探讨。更期望我们的工作能对国内干挂石材分项工程的设计及施工水平的提高起一定的促进作用。由于我们水平有限，知识不足，本书肯定会存在不少缺点和错误，恳切地希望能得到广大读者的批评指正。

编著者

2000 年 10 月

1 概 述

中银大厦位于北京市西单路口西北角，总建筑面积为 17.4 万 m^2 ，地下 4 层，地上西、北侧 15 层，东、南侧 11 层，檐高 57.5m。建筑物平面呈“回”字形布置，由一高（15 层）一低（11 层）两个“L”形写字楼合抱而成，中间是一个 55m 见方、40 余 m 高、自然采光的四季大厅。大厦融合中国传统庭院建筑和西方后现代派建筑之精华，气度非凡。

中银大厦犹如一座凝灰石殿堂，建筑外墙、四季大厅、银行营业厅、会议厅、电梯厅等区域均以淡黄色凝灰石挂板为主要装饰。挂板单元按类似于中国传统砌砖方式交错布置，标准单元模数为 1150mm × 575mm。外立面标准石材厚度为 40mm，内立面标准石材厚度为 30mm。挂件体系采用独立式不锈钢弯板托架加销钉体系。挂板总面积为 50000 余 m^2 ，使用石材约 5500 种 7.7 万块，使用挂件约 300 余种 18 万件。

挂板设计分为建筑设计和施工图设计两个阶段进行。建筑设计由建筑师——美国贝氏建筑事务所完成，主要成果为建筑图和《中银大厦工程规范》（以下简称《工程规范》）。两份文档非常详尽地规定了各建筑系统的功能要求、尺寸、节点构造以及主要材料性能要求和施工做法，是工程实施的纲领性技术文件。在建筑设计基础上，承包商负责完成施工图设计。施工图设计主要是验证建筑设计是否合理并深化建筑设计以满足施工需要，分为干挂石材设计和挂件设计两个部分。主要设计成果包括：石材计算书、挂件计算书、石材安装图、石材加工大样、挂件安装图和挂件加工大样等。

本工程所用材料的档次较高。凝灰石选自意大利罗马城北部 Tivoli 地区；挂件材质为国标 1Cr18Ni9 不锈钢；密封胶采用美国 GE Silpruf SCS 2020 和 Dow Corning 795；锚栓选用 Fisher 和 Hilti 公司的金属胀栓和化学锚栓；保温板采用 Owens Corning 公司的聚苯乙烯泡沫挤塑板；防潮层采用 Sika 公司的 Sikaproof Membrane。在材料选择、生产及使用期间，根据《工程规范》要求，按照 ASTM 标准完成了大量试验和检验工作。

中银大厦挂板施工技术主要体现在“施工工艺”中。“施工工艺”是在建筑师和英国 Sandberg 咨询公司（中建聘请）指导下，参照国外有关“Method - Statement”体系和内容编制的。与国内施工方案不同，该工艺是一本面向操作层的操作手册，对每道工序的做法都作出详尽地描述。在施工过程中，我们要求每位工人都必须按照“施工工艺”操作，而不是“各自的经验做法”。同时，建立以外国专家为首的现场旁站质量监督体系予以核查、监控工人的操作。这样，“施工工艺” + “现场旁站质量监督体系”，就使中银挂板整个施工过程都建立在比较科学地基础上，挂板质量能够始终处于受控状态。

在中银大厦挂板施工实践中，我们与清华大学土木工程系合作开发了“中银大厦挂板工程信息管理系统”。系统以 Autocad、Visual C++、ObjectARX 和 MS Access 等软件为平台，采用自动识别和数图结合技术，具有较高的技术含量。使用该系统对本工程石材进行全过程管理，大大提高了工作效率。

在后面章节中，我们将重点介绍挂板设计、挂件设计、材料试验和选择、施工工艺和计算机信息管理系统等内容。

2 干挂石材设计

2.1 凝灰石介绍

2.1.1 凝灰石的地质组成

中银大厦挂板选用的石材是意大利罗马城北部 Tivoli 区所出产的世界著名的 Travertine 石材。Travertine 石材的中文译名为凝灰石（或石灰华），该石材是一种具有悠久历史的、在国外各地被广泛使用的建筑及装饰材料，早在 1800 年前古罗马人就采用凝灰石建起了著名的、至今还是意大利最能代表古罗马文化的建筑物——角斗场（Colisem）。由于凝灰石色调呈米黄而显温和，质感丰富而纹理清晰，同时具有强烈的历史及文化背景，所以贝氏建筑事务所在过去的一些重要的建筑中曾多次采用该石材。此次在设计中银大厦这一地处重要位置的重要建筑物时，贝氏期望该石材的应用能为古都北京增添更多的历史及文化色彩。

凝灰石是在大气条件下从含碳酸盐的泉水（通常是热泉）中沉淀而成的一种钙质材料。含有二氧化碳的循环地下水带走了溶液中大量的钙质碳酸盐，当地下水到达泉水表面时，一些二氧化碳释放出来就导致了一些钙质碳酸盐沉淀而成为凝灰石（通常在浅池塘的底部）。与在远古的海洋中形成的石灰石不同的是，凝灰石是从河流或池塘里富含石灰的饱和水中通过碳酸盐的快速沉淀而形成的。这一快速沉淀限制了有机物和气体，在凝灰石中产生了孔隙及明显的基床平面特征，这就形成了凝灰石的美丽纹理。与此同时其不利的一面，这些孔隙及基床平面特征使得凝灰石在气候中暴露时会产生内部的裂缝和分层，发生沿基床平面的腐蚀和恶化，进一步降低了石材弱方向的强度。但是如果凝灰石得到很好的加固，它在尺寸稳定性、抗冻融能力、压缩强度等方面的物理性能就可以被认为与大理石类似。而且除了孔隙以外，凝灰石自身通常是密实和不透水的。

根据美国规范 ASTM C119——“规格石材相关的标准术语”，中银大厦所用的凝灰石，被明确划分为石灰石类（Limestone Group）。根据相应的体积密度的试验结果，该凝灰石属于中密度石灰石，其材料特性及物理性能均应该符合美国规范 ASTM C568——“石灰石规格石材标准规范”中对中密度石灰石的要求。

2.1.2 凝灰石与大理石、花岗石的区别

尽管凝灰石是一种真正的石灰石，但它却经常被划分为大理石，这不是因为它的地质构成，而是由于商业上的原因，因为它像大理石那样具有可以抛光的表面。这种按商业用途来划分石材的方法会导致石材结构计算中的某些问题，因为不同地质构成的石材的环境耐久性，经历冻融循环后的强度衰减程度都不一样，其结构计算中采用的安全系数也应该是不一样的。如果将它们划分为同一种石材采用同一个安全系数进行结构计算，则会导致这些石材的结构安全度不一样。

我国规范中对石材的划分比较笼统，仅划分为花岗石和大理石两种。即便是在美国规

范中,这种从商业角度对石材进行的划分,有时也会引起人们的误解。根据美国规范 ASTM C119——“规格石材相关的标准术语”,中银大厦所用的凝灰石石材明确地被划分为石灰石类(Limestone Group),而在美国规范 ASTM C503——“大理石规格石材标准规范(外用)”中另有一类称为 Travertine Marble(凝灰大理石)的石材则被划分为大理石中的第 IV 类。

因此科学的方法应该是根据石材的地质组成来划分其种类。从地质学的角度来看,地壳土层中的岩石分为下列三个种类:

(1) 火成岩

这些岩石从热的融化的材料中形成,花岗石和玄武岩是火成岩中的两种。

(2) 沉积岩

这些岩石起源于其他岩石的碎片和残骸,这些碎片在水、风、重力及冰等各种因素的作用下移动到一个由沉积物形成的盆地中沉积,沉积物压缩和胶结后形成坚硬的沉积岩。沉积岩由其他岩石中丰富的物质所组成,石灰石、沙岩以及凝灰石是沉积岩中的三种类型。

(3) 变质岩

这些岩石形成于其他已经存在的岩石在受热或压力作用下进行了结晶或重结晶。大理石、板页岩和石英岩是变质岩中的三种。

从以上可以看出,凝灰石、花岗石、大理石的区别是明显的,它们分别属于石材的三大种类,凝灰石是沉积岩,花岗石是火成岩,而大理石是变质岩,因此凝灰石不是大理石。根据美国规范 ASTM C119——“规格石材相关的标准术语”,凝灰石是“可通过分层结构来划分的结晶的或微结晶的石灰石的一个变种”。

2.2 凝灰石干挂石材试验

2.2.1 建筑饰面石材试验概述

石材作为一种建筑材料已有上千年的历史,但在古代主要是用实心的大块石材来构筑建筑物。从 20 世纪早期开始,石材被作为一种装饰面板来装饰混凝土、砌体结构及钢结构等背衬结构。这些早期建筑石材饰面板的厚度从 10cm 至 20cm 左右,从 20 世纪 60 年代开始,建筑物上的石材饰面板的厚度开始减少。目前用于干挂的石材饰面板的厚度通常为 3cm 左右,在某些情况下石材饰面板的厚度可以薄到 2cm 左右。在建筑物中使用更薄的石材饰面板的发展趋势,通常并不是由于对石材的研究使得人们对石材材料性能方面的知识有太多的增加,更确切的说是由于石材饰面板的加工和操作技术水平的发展、设计时对石材的受力和材料性能采用合理的分析代替了以往完全根据经验的分析,以及在建筑物石材饰面设计的过程中经济因素被充分了解和重视等原因。

在对石材的性能没有充分了解和控制的情况下使用比较薄的石材板块(厚度小于 5cm)时,石材饰面薄板中可能会出现一些问题,包括裂缝、爆裂、破碎和崩溃等。这些情况通常发生在石材板块连接的地方,这就说明对于石材板块的连接处,非常需要像设计整板弯曲那样来进行详细的设计。要想对石材饰面薄板的性能进行充分了解并将潜在的问题降到最小的程度,一个全面的综合的试验程序将会是非常有用的工具。这一试验程序可

以分为如下的三个阶段:

(1) 选材阶段试验

这一阶段试验的目的是获得那些建筑师拟用于建筑物的特殊石材材料性能的可靠信息。通过本阶段试验来了解拟选用石材的材料性能是否达到规范的要求,以判定该石材是否可用。同时,干挂石材的设计必须建立在一个合理分析的基础上,设计者需要知道拟用石材的相关性能来进行这一合理的分析,而本阶段试验可以提供这些必要的信息。

(2) 设计阶段试验

这一阶段试验的目的是为了进行设计验证,即验证石材设计时采用的设计荷载是否适当,安全系数是否得到保证。

(3) 施工阶段试验

这一阶段试验目的是做进货验证,即检验被用于工程上的石材的性能是否满足设计要求。

中银大厦作为一个非常重要的建筑物,设计单位——贝氏师建筑事务所要求所用石材必须按照美国规范进行严格的试验和分析。因此我们在凝灰石的选用、设计及施工过程中,按照美国 ASTM 标准做了大量的试验,为合理地对石材进行分析、计算和检验提供了大量准确的性能指标。

2.2.2 凝灰石选材阶段试验

在此阶段进行了凝灰石的吸水率和质量密度、抗压强度、弯曲强度、断裂模量和冻融循环等试验。

(1) 吸水率及质量密度

石材的吸水率和质量密度是根据美国规范 ASTM C97——“规格石材吸水率及质量密度标准试验方法”来确定的。在这一试验里,先称石材试件的干重;然后将石材试件浸在水中足够长的时间使其达到饱和,称其在水中的浮重;将其从水中取出在空气中称其饱和时的湿重。通过比较一组石材试件的干重、饱和湿重及其在水中的浮重,可以计算出石材试件吸收的水重及石材试件的质量密度。对每一种准备使用的石材,取 3 个试件为一组进行这一试验,这些石材试件的尺寸一般可以取同石材抗压强度试验的试件一样的尺寸。实际上假如试验材料有限时,做吸水率及质量密度试验用的石材试件稍后可以用于抗压强度试验。吸水率和质量密度同干挂石材的结构设计没有太多直接的联系,但对于温度变化较大的寒冷地区,建筑饰面石材的其吸水率和质量密度也是一个非常重要的性能指标,该指标代表建筑饰面石材的材料结构性能及其强度衰减的速度。因为当某一吸水率较大的石材经历雨雪后吸收了大量的水分,如果此时外界环境温度突然下降,石材体内的水分将会受冻膨胀导致石材出现裂缝、强度受损。因此必须对石材进行吸水率及质量密度的试验以验证其是否满足美国 ASTM 标准指定的物理指标要求,同时,准备在工程中使用的石材至少达到过去已取得证明成功地被使用过的同种石材的质量。

中银大厦选用的凝灰石的供应商——意大利的马里奥帝 (Mariotti) 公司分别于 1997 年 3 月和 1997 年 10 月委托 ASTM 组织的成员——意大利的克瑞韦德 (Corived) 实验室,完成了两组中银大厦所用凝灰石的吸水率及质量密度试验。每组 5 个试件,试件尺寸为 $5.08\text{cm} \times 5.08\text{cm} \times 5.08\text{cm}$,其试验结果分别为:

第一组 C97BCH01 吸水率 0.35%, 质量密度 2533.42kg/m^3 ;

第二组 C97BCH02 吸水率 1.05%，质量密度 2307.02kg/m³。

美国规范 ASTM C568——“石灰石规格石材标准规范”中对中密度石灰石的要求为：最大吸水率不大于 7.5%；最小质量密度不小于 2160kg/m³。

结论：中银大厦选用的凝灰石吸水率及质量密度满足规范要求。

(2) 抗压强度

石材的抗压强度是根据美国规范 ASTM C170——“规格石材抗压强度标准试验方法”来确定的。在这一试验里，对从石材块体中通过锯切取得的立方体试件或通过芯钻取得的圆柱体试件进行抗压强度试验，在一个经过校核的试验机上对试件加载直至破坏。石材试件的抗压强度通过施加的最大荷载除以试件的受荷面积来计算。美国国家标准局对石材（花岗石）进行的广泛的系列试验表明：石材在潮湿状态下的抗压强度较之于在干燥状态下的抗压强度可能强也可能弱，石材受荷方向平行于纹理方向时的抗压强度较之于受荷方向垂直于纹理方向时的抗压强度可能强也可能弱，均取决于石材的种类。从以上可以看出，很难在多大程度上有把握地预测某一石材在何种试验状态下会得到其最小的抗压强度。因此，石材的抗压强度应在所有的四种状态下进行：潮湿或干燥；受荷方向平行于或垂直于石材的纹理方向。虽然石材饰面薄板的结构设计通常不是由抗压强度来控制，但知道准备使用的石材的抗压强度是否满足美国 ASTM 标准指定性能的最小值要求，以及了解准备使用的石材的性能是否同过去得到的数值相一致，仍然是很重要的。根据西方国家通用的设计规则，当设计者对某种石材有非常深刻的认识和足够的信心，并能通过计算表明该石材在使用过程中有足够的安全度，他可以指定使用一种已经知道其性能不满足 ASTM 标准指定的最小强度要求的石材。但在做这一决定时，他应该认真并慎重地考虑这一决定。

中银大厦选用的凝灰石的供应商——意大利的马里奥帝（Mariotti）公司于 1997 年 10 月委托 ASTM 组织的成员——意大利的克瑞韦德（Corived）实验室，完成了四组（每组对应于一种状态，共四种状态）中银大厦所用凝灰石的抗压强度试验。每组 5 个试件，试件尺寸为 5.08cm×5.08cm×5.08cm，其试验结果分别为：

第一组，试件受荷方向垂直于石材纹理方向并处于干燥状态，其抗压强度平均为 36.79MPa；

第二组，试件受荷方向垂直于石材纹理方向并处于潮湿状态，其抗压强度平均为 38.43MPa；

第三组，试件受荷方向平行于石材纹理方向并处于干燥状态，其抗压强度平均为 56.56MPa；

第四组，试件受荷方向平行于石材纹理方向并处于潮湿状态，其抗压强度平均为 54.13MPa。

美国规范 ASTM C568——“石灰石规格石材标准规范”中对中密度石灰石的要求为：最小抗压强度不小于 28MPa。

结论：中银大厦选用的凝灰石抗压强度满足规范要求。

(3) 抗弯强度

干挂石材结构设计所需的一个关键性的性能指标就是抗弯强度。抗弯强度是用于进行石材结构计算的控制性指标，将直接影响干挂石材厚度的选择及其固定体系的确定。石材

的抗弯强度是根据美国规范 ASTM C880——“规格石材抗弯强度标准试验方法”来确定的。这一试验通过对从一块石材大板上切取的石材试件进行四分点加载，逐渐增加荷载直至试件破坏，记录所施加的最大荷载并计算试件破坏时的弯曲应力来进行。对四种试验状态（潮湿或干燥；受荷方向平行于或垂直于石材的纹理方向）中的任何一种，重复 5 次这样的试验。规范 ASTM C880 允许对各种厚度的石材进行试验，目前要求试件的外表面有一个好的研磨完成面，但该规范也允许记录与指定试验程序不同的各种变化。因此可以对切成石材生产厚度的，同时又具有期望的生产完成面的石材进行试验。ASTM C880 抗弯强度的试验结果与整块板材抗弯强度的试验结果之间是非常吻合的，因此 ASTM C880 抗弯强度能很好地代表整块干挂石材板身的抗弯强度。

中银大厦选用的凝灰石的供应商——意大利的马里奥帝（Mariotti）公司分别于 1997 年 3 月和 1997 年 10 月委托 ASTM 组织的成员——意大利的克瑞韦德（Corived）实验室，完成了三组中银大厦所用凝灰石的抗弯强度试验，试验结果如下：

第一组，C880BCH01，试件尺寸为 $45\text{cm} \times 10.16\text{cm} \times 4\text{cm}$ ，分为四种状态，每种状态 5 个试件，试验结果分别为：

- 1) 试件受荷方向垂直于石材纹理方向并处于干燥状态，其抗弯强度平均为 8.10MPa ；
- 2) 试件受荷方向垂直于石材纹理方向并处于潮湿状态，其抗弯强度平均为 9.18MPa ；
- 3) 试件受荷方向平行于石材纹理方向并处于干燥状态，其抗弯强度平均为 5.89MPa ；
- 4) 试件受荷方向平行于石材纹理方向并处于潮湿状态，其抗弯强度平均为 6.95MPa 。

第二组，C880BCH02，试件尺寸为 $35.56\text{cm} \times 7.62\text{cm} \times 3.81\text{cm}$ ，分为两种状态，每种状态 9 个试件，试验结果分别为：

- 1) 试件受荷方向平行于石材纹理方向并处于干燥状态，其抗弯强度平均为 5.43MPa ；
- 2) 试件受荷方向平行于石材纹理方向并处于潮湿状态，其抗弯强度平均为 6.23MPa 。

第三组，C880BCH03，试件尺寸为 $65\text{cm} \times 15\text{cm} \times 3.81\text{cm}$ ，一种状态，9 个试件，试验结果为：

试件受荷方向平行于石材纹理方向并处于干燥状态，其抗弯强度平均为 4.18MPa 。

美国规范 ASTM C568——“石灰石规格石材标准规范”中对抗弯强度这一指标没有要求。但中银大厦的设计单位贝氏建筑事务所根据美国芝加哥 WJE 实验室的专业性意见，给出了中银大厦所用凝灰石抗弯强度所需达到的设计指标，见《工程规范》第 04450 节的补充部分第 04450—01 节，设计指标如下：

对于外立面石材设计，在试件受荷方向平行于石材纹理方向的状态下，ASTM C880 抗弯强度试验的总平均值不小于 3.79MPa ，任意一组 5 个试件的平均值不小于 3.10MPa ；在试件受荷方向垂直于石材纹理方向的状态下，ASTM C880 抗弯强度的总平均值不小于 7.10MPa 。

对于内立面石材设计，在试件受荷方向平行于石材纹理方向的状态下，ASTM C880 抗弯强度试验的任意一组 5 个试件的平均值不小于 2.40MPa 。

结论：中银大厦选用的凝灰石抗弯强度满足设计指定的指标要求。

(4) 断裂模量

美国规范中石材的断裂模量与抗弯强度一样，都是用来度量石材抗弯性能的重要指标。目前我国规范中只有一个指标用来衡量石材的抗弯性能，即抗弯强度。实际上我国规

范中的抗弯强度即相当于美国规范中的断裂模量，它们的试验加载方式、计算公式等均相同，只是用于试验的试件尺寸有所不同。断裂模量是通过美国规范 ASTM C99 ——“规格石材断裂模量标准试验方法”来确定的。ASTM 指定的这一试验的石材试件尺寸为 4 英寸宽乘以 8 英寸长乘以 2.25 英寸厚，即 10.16cm 宽乘以 20.32cm 长乘以 5.72cm 厚，石材试件具有一个良好的研磨完成面，试验荷载通过单点加载施加于试件跨度的中点。ASTM C99 指定在潮湿或干燥；试件受荷方向平行于或垂直于石材的纹理方向等四种状态下都要进行试验。ASTM C99 断裂模量试验同 ASTM C880 抗弯强度试验类似但又有所不同。ASTM C99 指定的试件不考虑建筑物中将要使用的石材实际厚度及外表面完成情况。另外 ASTM C99 的中心点加载系统将典型地使得破坏直接发生在石材试件的加载点处，而 ASTM C880 指定试验荷载施加于试件的两个四分点，这一试验的加载系统允许试件的破坏点发生在两个加载点之间的最薄弱处。从上可以看出 ASTM C880 给出的试验结果比 ASTM C99 更接近于整块板材的抗弯强度试验结果，即石材的 ASTM C880 抗弯强度更能代表石材真正的抗弯性能。尽管如此，ASTM C99 给出的断裂模量指标对于石材板块连接处的验算仍然具有较强的参考意义。因此在进行 ASTM C880 抗弯强度试验的同时，仍然需要进行 ASTM C99 断裂模量试验来表明将要使用的石材符合 ASTM 指定的最低性能要求。

中银大厦选用的凝灰石的供应商——意大利的马里奥帝（Mariotti）公司于 1997 年 10 月委托 ASTM 组织的成员——意大利的克瑞韦德（Corived）实验室，完成了四组（每组对应一种状态，共四种状态）中银大厦所用凝灰石的断裂模量试验。每组 5 个试件，试件尺寸为 20.32cm × 10.16cm × 5.08cm，其试验结果分别为：

第一组，试件受荷方向垂直于石材纹理方向并处于干燥状态，其断裂模量为 9.66MPa；

第二组，试件受荷方向垂直于石材纹理方向并处于潮湿状态，其断裂模量为 11.22MPa；

第三组，试件受荷方向平行于石材纹理方向并处于干燥状态，其断裂模量为 6.20MPa；

第四组，试件受荷方向平行于石材纹理方向并处于潮湿状态，其断裂模量为 6.52MPa。

美国规范 ASTM C568——“石灰石规格石材标准规范”中对中密度石灰石的要求为：最小断裂模量不小于 3.4MPa。

结论：中银大厦选用的凝灰石断裂模量满足规范要求。

(5) 冻融循环

暴露在外环境空间中的建筑物将会经历很大范围的温度变化及多次的冻融循环，根据统计美国芝加哥每年可能达到 80 次冻融循环。因为太阳能的聚集，一个建筑物的外表面可能达到一个比空气温度高得多的温度，同样也可能达到非常低的温度。美国目前还没有进行石材环境耐久性试验的 ASTM 标准。但 ASTM 关于规格石材的 C18 委员会正在考虑在加速老化的基础上模拟石材暴露在环境中所受的影响。这一试验包括将 ASTM C880 大小的石材试件外表面朝下放入一个盛有部分水或轻微酸性的水中，然后将试件和容器一起放进一个密闭空间中，该密闭空间能使石材经历从 -20℃ 到 80℃ 的温度循环。每一循环都模拟石材暴露在真实环境中的复合循环。试件暴露于 300 次这样的加速温度循环需要 3

个月的时间来完成。在直到完成 300 次循环的各种间隔中, 将一些试件移出密闭空间测定其已发生的 ASTM C880 抗弯强度的损失量。显然这样的一次循环不等同于一次简单的普通的环境循环, 人们期望得到的是建筑物一年中实际的气候变化等同于多少次这样的加速循环。

美国芝加哥 WJE 实验室的一些石材专家在美国几个城市的建筑物上做了一个对比试验, 比较石材暴露在自然环境中所受的影响与在实验室加速环境变化试验中所受的影响。其中的一个建筑物坐落在芝加哥地区, 从该建筑物上取下已在自然环境中暴露了约 15 年的石材试样, 从这些试样中切取 ASTM C880 试件并得到这些试件的抗弯强度。然后将这些试样经历 100、200 和 300 次加速环境老化并试验得到其抗弯强度。同时也得到了从存放在室内的该建筑物石材中取出的石材板块, 通过对这些板材进行试验获得了石材的初始 C880 抗弯强度以及经历加速环境循环后的抗弯强度。将从墙上取下的石材试件抗弯强度的递减变化情况绘制成曲线, 同时将从存放在室内的石材中切取出的试件抗弯强度的递减变化情况也绘制成曲线。

通过这两条曲线的匹配吻合建立了等同于一年自然环境变化的加速循环的数量。如果假设石材经历大约 15 次加速循环等同于在芝加哥环境中暴露 1 年, 则在室内受到保护的板块的抗弯强度与暴露在环境中的板块的抗弯强度是部分重叠的, 匹配得很好。这一匹配情况有力地说明了石材经历大约 15 次加速环境循环等同于在芝加哥的环境中暴露 1 年。这些专家还对从其他环境的建筑物上取下来的石材进行了试验, 所做的试验结果也表明了类似的加速环境循环和暴露在空气中年份的校验关系。他们对各类石材所做的环境试验表明了下列在环境暴露中石材强度的损失程度, 同时试验结果还表明在经历了 250~300 次加速冻融循环后石材的强度损失趋于稳定。试验石材的强度损失如下:

- a. 抛光的花岗石: 25%;
- b. 表面灼烧的花岗石: 除热处理的初始强度受损外, 强度损失可达 45%;
- c. 大理石: 可达 70%;
- d. 石灰石: 可达 30%。

从以上可以看出, 石材强度损失量是很大的, 所以应该通过试验来估算建筑物中个体石材潜在的强度损失量。

鉴于中银大厦工程的重要性, 设计单位美国贝氏建筑事务所要求参照美国规范 ASTM C666——“快速冻融循环下混凝土耐久性标准试验方法”, 并按上述 ASTM 关于规格石材的 C18 委员会正在考虑的在加速老化基础上模拟石材暴露在环境中所受影响的试验方法, 来进行中银大厦所用凝灰石的冻融循环试验。

中银大厦选用的凝灰石的供应商——意大利的马里奥帝 (Mariotti) 公司于 1997 年 10 月、11 月、12 月委托 ASTM 组织的成员——意大利的克瑞韦德 (Corived) 实验室, 完成了四组中银大厦所用凝灰石的冻融循环试验。每组 9 个试件, 试件尺寸为 $35.56\text{cm} \times 7.62\text{cm} \times 3.81\text{cm}$, 试验状态均为试件受荷方向平行于石材纹理方向并处于干燥状态, 其试验结果分别为:

第一组, C880BCH04 及 C666BCH01, 0 次冻融循环时抗弯强度为 787 lbf/in^2 (5.43N/mm^2), 弹性模量为 7409380 lbf/in^2 (51477.4N/mm^2)。20 次冻融循环后抗弯强度为 601 lbf/in^2 (4.14N/mm^2), 弹性模量为 5613286 lbf/in^2 (38702.2N/mm^2)。抗弯强度衰减 23.63%、

弹性模量衰减 24.24%。

在经历了 20 次冻融循环后，石材的颜色和表面平整度没有发生变化。

第二组，C880BCH05 及 C666BCH02，0 次冻融循环时抗弯强度为 787 lbf/in^2 (5.43 N/mm^2)，弹性模量为 6849151 lbf/in^2 (47223.2 N/mm^2)。100 次冻融循环后抗弯强度为 525 lbf/in^2 (3.61 N/mm^2)，弹性模量为 4660113 lbf/in^2 (42130 N/mm^2)。抗弯强度衰减 33.29%，弹性模量衰减 31.96%。

在经历了 100 次冻融循环后，石材的颜色略微变浅，其表面与开始时相比有点轻微不平整。

第三组，C880BCH06 及 C666BCH03，0 次冻融循环时抗弯强度为 787 lbf/in^2 (5.43 N/mm^2)，弹性模量为 6968369 lbf/in^2 (48045.2 N/mm^2)。10 次酸性循环以及 20 次冻融循环后抗弯强度为 730 lbf/in^2 (5.03 N/mm^2)，弹性模量为 6406541 lbf/in^2 (44171.5 N/mm^2)。抗弯强度衰减 7.24%，弹性模量衰减 8.06%。此组弹性模量试验状态为试件受荷方向平行于石材试件的长度方向并处于干燥状态。

在经历了 10 次酸性循环以及 20 次冻融循环后，石材的颜色和表面平整度没有发生变化。

第四组，C880BCH07 及 C666BCH04，0 次冻融循环时抗弯强度为 787 lbf/in^2 (5.43 N/mm^2)，弹性模量为 6569334 lbf/in^2 (45294 N/mm^2)。10 次酸性循环以及 100 次冻融循环后抗弯强度为 645 lbf/in^2 (4.45 N/mm^2)，弹性模量为 5389117 lbf/in^2 (37156.7 N/mm^2)。抗弯强度衰减 18.04%，弹性模量衰减 17.97%。此组弹性模量试验状态为试件受荷方向平行于石材试件的长度方向并处于干燥状态。

在经历了 10 次酸性循环以及 100 次冻融循环后，石材的颜色变浅，其表面平整度因孔隙填充物的膨胀而有些轻微的恶化。

结论：中银大厦所用的凝灰石在经历 100 次冻融循环后，抗弯强度比初始抗弯强度降低了 33%，弹性模量比初始值降低了 32%，与以往的试验结果比较接近。根据该石材计算时所采用的安全系数，该石材的冻融循环试验结果满足设计的要求。

2.2.3 凝灰石设计阶段试验

为验证设计计算中采用的安全系数是否得到满足，根据设计单位美国贝氏建筑事务所的要求，在业主、监理等各方参与下，总包商——中建建筑承包公司委托国家建材局石材质量监测中心，参照美国规范 ASTM C1201——“外墙干挂石材系统在均布静态空气压力差作用下的结构性能的标准试验方法”，在中银大厦工地现场对石材板块与不锈钢挂件体系的整体装配单元（模拟挂板实际安装情况）进行了堆沙试验。随机抽取了 3 块外立面标准板进行试验，其安全系数分别为 9.40、9.08、10.92，平均安全系数为 9.8。

根据美国石灰石工业协会的规定，设计单位美国贝氏建筑事务所对中银大厦干挂凝灰石要求的安全系数为 8.0。

结论：中银大厦选用的凝灰石在其安装体系下的结构性能满足设计要求的安全系数。

2.2.4 凝灰石施工阶段试验

中银大厦干挂石材面积非常大，石材板块的数量特别多，为了确保使用于中银大厦的凝灰石的性能都满足设计要求，在施工阶段进行了大量的抽样试验。如上所述，因为石材的抗弯强度是干挂石材物理性能中最关键的指标，因而施工阶段的验证试验主要进行的就

是石材的抗弯强度试验。

对于每一批要用于中银大厦的凝灰石，在石材加工完毕后，由中银大厦选用的凝灰石的供应商——意大利的马里奥帝（Mariotti）公司，按设计要求的抽样比例随机抽样并进行试件的制作，然后委托 ASTM 组织的成员——意大利的克瑞韦德（Corived）实验室进行 ASTM C880 抗弯强度试验，强度达到要求后才能发货。这部分试验结果表明了供应商提供给中银大厦工程的凝灰石的抗弯强度都达到了《工程规范》中的要求。

对于每一批运到北京的凝灰石，由中银大厦工程的总包商——中建建筑承包公司在业主、监理的参与监督下，按设计要求的抽样比例随机抽样并进行试件的制作，然后委托国家建材局石材质量监测中心进行 ASTM C880 抗弯强度试验，强度达到要求后才能接受并用于中银大厦干挂石材的安装。这部分试验结果进一步表明了用于中银大厦工程的凝灰石的抗弯强度都达到了《工程规范》中的要求。

结论：中银大厦所用的凝灰石都满足了设计的要求。

2.3 干挂石材计算

干挂石材的计算主要包括两个方面：一是挂板板块自身的抗弯计算，二是挂板在其与挂件销钉连接处的抗剪计算。

2.3.1 外立面干挂石材计算

外立面干挂石材典型的安装体系是通过上下各两个，共四个挂件将石材固定，其中石材下边的两个挂件起支承石材重量并在垂直于石材平面的方向上约束石材的作用，石材上边的两个挂件只是在垂直于石材平面的方向上约束石材的作用。如图 2-1 所示。

(1) 荷载的确定

由于挂板自重受力方向平行于板材自身平面，故只考虑受力方向垂直于板材平面的风荷载。根据我国《建筑结构荷载规范》（GBJ9—87），风荷载标准值计算如下：

$$w_k = \beta_z \mu_z \mu_s w_0$$

式中 β_z ——风振系数，取 2.25；

μ_z ——高度系数，取 1.48；

μ_s ——体形系数，取 1.50；

w_0 ——基本风压，取 350N/m²。

所以，风荷载标准值为：

$$w_k = 2.25 \times 1.48 \times 1.50 \times 350 = 1750\text{N/m}^2$$

根据《工程规范》第 04450 节第 1.5-B-1 条的要求，中银大厦外立面挂板设计风荷

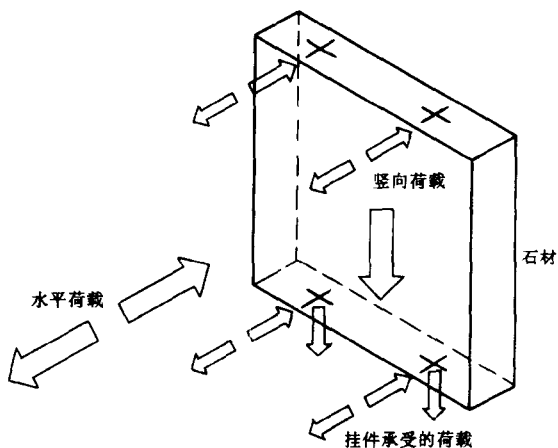


图 2-1 外立面标准石材受力模式

载在任何情况下不小于 30 磅力/平方英尺, 即 1436N/m^2 。由于本计算参照美国石材挂板的计算方法采用总安全系数法, 所以计算中不再按我国规范考虑荷载的分项系数、荷载组合系数及材料强度的分项系数。所以取荷载值 1750N/m^2 作为中银大厦外立面凝灰石挂板的设计荷载。

(2) 荷载在板材中产生的最大应力

外立面标准挂板尺寸为: $1142\text{mm} \times 567\text{mm} \times 40\text{mm}$, 根据通过有限元计算得到的 x 方向及 y 方向的板材弯矩图, 假定沿板面平行于石材纹理的方向为 x 方向, 沿板面垂直于石材纹理的方向为 y 方向, 可以得到:

1) 石材在 x 方向的最大应力

石材在 x 方向的最大应力发生在销钉孔处:

$$(\sigma_{\max})_x = \frac{M_{x\max}}{1 \times 40^2/6} = \frac{182.94}{266.67} = 0.687\text{N/mm}^2$$

同时, 该处在 y 方向上的应力为:

$$\sigma_y = 0$$

2) 石材在 y 方向的最大应力

石材在 y 方向的最大应力发生在石材板块的跨中处:

$$(\sigma_{\max})_y = \frac{M_{y\max}}{1 \times 40^2/6} = \frac{77.56}{266.67} = 0.290\text{N/mm}^2$$

同时, 该处在 x 方向上的应力为:

$$\sigma_x = \frac{M_x}{1 \times 40^2/6} = \frac{-33.51}{266.67} = -0.126\text{N/mm}^2$$

(3) 石材材料强度

正如前面所介绍, 本工程所用的意大利凝灰石石材具有明显的层理性, 因而该材料在不同方向上的强度不一样。假定沿板面平行于石材纹理的方向为 x 方向, 沿板面垂直于石材纹理的方向为 y 方向。根据相应的试验报告, 石材的材料强度如下:

1) 石材的抗弯强度

在石材受弯的弱方向 (y 方向) 上为: 550 lbf/in^2 (3.79MPa);

在石材受弯的强方向 (x 方向) 上为 1030 lbf/in^2 (7.10MPa)。

2) 石材的抗压强度

在 y 方向上为 8207 lbf/in^2 (56.6MPa);

在 x 方向上为 6380 lbf/in^2 (44.0MPa)。

(4) 石材的允许应力

根据美国石灰石行业推荐的设计安全系数值, 石灰石设计安全系数取: $\nu = 8$ 。

1) 石材的允许抗弯拉应力

在石材受弯的弱方向 (y 方向) 上为:

$$(\sigma_{\text{adm}})_y = \frac{3.79}{\nu} = \frac{3.79}{8} = 0.47475\text{N/mm}^2$$

在石材受弯的强方向 (x 方向) 上为:

$$(\sigma_{\text{adm}})_x = \frac{7.10}{\nu} = \frac{7.10}{8} = 0.8875\text{N/mm}^2$$