



现代竹结构

GluBam Structures

肖岩 单波◎著



中国建筑工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

现代竹结构

GluBam Structures

肖 岩 单 波 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代竹结构 / 肖岩, 单波著. —北京: 中国建筑工程
出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-112-15501-9

I. ①现… II. ①肖… ②单… III. ①竹结构—建筑
工程 IV. ①TU759

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 123989 号

责任编辑: 王砾瑶 赵梦梅

责任设计: 董建平

责任校对: 张 颖 王雪竹

现代竹结构

肖 岩 单 波 著

*

中国建筑工程出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

华鲁印联 (北京) 科贸有限公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15½ 字数: 385 千字

2013 年 8 月第一版 2013 年 8 月第一次印刷

定价: 47.00 元

ISBN 978-7-112-15501-9
(24066)

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)

序

竹子可以说是大自然赋予我们中国人的天然礼物。竹对中国人来说十分亲近，它已经融入我们生活的衣食住行，以及我们的文化里。古人苏轼在《于潜僧绿筠轩》中说：“宁可食无肉，不可居无竹。无肉令人瘦，无竹令人俗。”竹又代表一种精神，一种坚韧顽强的精神，在某种意义上讲，这也是中国人性格的特质。

我们的祖先早就知道如何利用竹子建造各种房屋和桥梁。我们先民原始居住的“巢居”就采用了竹子。在南方一些地区，竹建筑一直是重要的建筑形式，甚至于“不瓦而盖，盖以竹；不砖而墙，墙以竹；不板而门，门以竹。其余若椽、若楞、若窗牖、若承壁，莫非竹者”（《粤西琐记》）。我国在20世纪50年代初期，由于钢材的匮乏，也一度在很多现代建筑中采用了竹材，如圆竹屋架和竹筋混凝土等。

人类的历史往往是以一种螺旋式的方式前进。在全世界关注可持续发展的今天，竹子作为一种绿色材料再次进入到建筑师和结构工程师的视野，国内外出现了研究竹材建筑和结构的一股热潮。在这方面，肖岩教授的课题组经过多年努力，在利用现代胶合技术制作和设计现代竹结构方面取得了一系列国际领先的科研和工程应用成果。这本《现代竹结构》专著正是作者的工作总结，涵盖了胶合竹的制造方法、环境影响、材料性能、构件性能和结构设计等方面，是比较完整的体系。笔者也曾参观过肖岩教授课题组设计并建造的竹结构示范建筑，印象深刻。

作为一位北方人，肖岩老师在盛产竹子的湖南做起了竹结构的学问，既是一种机缘，也是作者观察力和行动力的敏捷之处。笔者相信本书的出版会对竹材在现代建筑中的应用以及相关科学研究有非常积极的推动作用。



刘加平

中国工程院院士、西安建筑科技大学教授

以竹子作为基本结构材料的现代竹结构是近年来出现的新型结构体系，已成为土木工程领域的一个新突破。本书是作者多年来有关胶合竹（GluBam）结构的研究以及工程实践的总结。全书共分为 9 章，包括：竹材作为现代建筑材料的前景、胶合竹的生产制造、胶合竹材及其力学性能、胶合竹结构构件的受力性能、胶合竹结构连接节点、胶合竹结构屋架、预制装配式竹结构板房的设计与建造、GluBam 胶合竹轻型框架结构房屋以及胶合竹结构桥梁的设计与建造，并在书后提供了近年来作者完成的胶合竹结构代表性工程。本书是国内外第一部全面系统介绍胶合竹结构研究以及工程应用的图书，希望能够给土木工程界提供一个新的结构体系的大致轮廓，推动竹结构的应用。

本书可供竹木结构设计与施工技术人员、科研人员使用，也可供从事竹材开发与利用的人员学习参考。

A modern structural system adopting bamboo as the basic structural material has become a new breakthrough in civil engineering, attracting more and more attentions in the trend towards the sustainable construction. This book combines the author's several years of research and engineering practice in developing glue laminated bamboo or GluBam. The book has 9 chapters, covering contents of the perspectives of bamboo as a modern building material; manufacture and mechanical properties of GluBam; mechanical behavior of structural components, joints; trusses made of GluBam; design and construction of prefabricated modular GluBam buildings, lightweight GluBam frame houses, and bridges. Several demonstration projects are also exhibited in the appendix. The book is the first of its kind systematically documenting the research development and applications of glue laminated bamboo structures. The author and the publisher hope the book can provide an overall framework of this new structural system for designers and researchers, to promote the applications of bamboo, which is one of the most valuable green materials.

前 言

当今社会，在工业和民用建筑以及交通建设领域，最主要的结构是钢筋混凝土和钢结构或二者的组合。经过一百多年的应用和考验，这些传统的结构形式通过合理的设计能够满足使用功能要求和环境耐久性要求，因而得到广泛应用，成为现代文明社会的基础。

随着社会的进步和经济的持续发展，传统的钢筋混凝土结构和钢结构也逐渐暴露出其固有缺陷，其中，最大的问题是建筑材料本身不环保，不符合当今可持续发展的要求。无论是钢材还是水泥的生产，都属于高能耗、高污染业的产品，生产过程中需要消耗大量能源，同时产生大量的废水、废气和废渣，严重影响了生态环境。在大力提倡可持续发展的今天，对传统建筑业进行节能减排改造的同时，发展“绿色建筑”是必然的选择。开发新型材料、创新结构体系，在建筑领域的一定范围内，逐步取代钢和混凝土作为主要建筑材料和结构形式使用，这成为 21 世纪土木工程领域创新与变革的方向，也是土木工程这一较为传统学科所面临的挑战。

木结构属于绿色建筑，在欧美及工业化国家日本，现代木结构也占据了相当的市场。但中国由于 20 世纪的过多采伐，森林资源变得十分匮乏，尽管木结构在中国的发展极其有限，随着房地产装修需求的增加，中国已经成为世界最大的木材进口国。和木材一样，竹子更是一种可再生绿色材料，竹材利用可以说伴随了人类的发展。中国是世界上最大的竹产国之一，占据了世界竹林资源的约 $1/5 \sim 1/4$ 。将竹材这一自然资源应用于现代土木建筑工程业，作为主要的结构材料使用，发展新型竹结构体系，极有希望成为土木工程领域中变革的新突破点。采用竹材建造房屋，已有相当长的历史。中国在 20 世纪 50 年代也曾进行过一系列采用圆竹的竹结构研究和应用，但竹结构并没有形成一个可以由大多数工程师设计并建造的现代化建筑结构体系，实为遗憾。20 世纪 80 年代以来，中国林业部门在竹材的深加工和利用方面取得了许多国际领先的成果，这些为作者课题组的研究打下了扎实的行业基础。作者决心开展有关胶合竹结构的研究得益于一位湘籍朋友、湖南大学刘克利教授的启迪。

本书是作者课题组近年来有关胶合竹 (GluBam) 结构的研究以及工程实践总结。作者深知，要使竹结构真正成为一个现代结构体系尚需进行大量的研究和工程应用开发，作为抛砖引玉，作者希望本书能够给土木工程界提供一个新的结构体系的大致轮廓。本书所述的研究成果主要是在国家自然科学基金委员会重点项目 (项目批准号: 50938002)，湖南大学“985”计划，教育部建筑安全与节能重点实验室，以及美国南加州大学的资助下完成的。所介绍的工程项目是与长沙凯森竹木新技术有限公司合作实施的。这些项目来自多方面的资助，包括湖南大学，国际竹藤组织 (INBAR)，美国蓝月基金会 (Blue Moon Fund)，中国林业科学研究院等。

课题推进过程中得到了余立永，周泉，陈国，杨瑞珍，李智，沈亚丽，马健，曾静

宜，吕小红，李磊，王睿，陈杰，李佳，张伟亮，冯立和高宛成等同事、研究生们的大力协作。本书的撰写得到了陈国博士，周泉，杨瑞珍，李智，冯立，韩文雅等同学的配合与协助，一并表示感谢。本书的出版还荣幸获得了国家科学技术学术著作出版基金的资助。

书中错误在所难免，作者诚恳地希望广大读者能够给予批评指正。

肖 岩

2013 年晚春于岳麓山下自卑亭

目 录

第 1 章 竹材作为现代建筑材料的前景	1
1.1 竹工业的现状	1
1.2 圆竹建筑	2
1.3 竹筋混凝土结构	5
1.4 现代木结构及现代竹结构的发展方向	5
1.5 胶合竹材的研究现状	9
参考文献	11
第 2 章 胶合竹的生产制造	13
2.1 胶合竹的定义	13
2.2 胶合竹的生产工艺	13
2.2.1 胶合竹板材生产工艺	13
2.2.2 胶合竹材冷压工艺	14
2.3 胶合竹结构构件	17
2.4 胶合竹生产的环保评估	19
2.4.1 生产总能耗分析	19
2.4.2 碳排放分析	21
参考文献	22
第 3 章 胶合竹材及其力学性能	23
3.1 胶合竹材的基本物理指标	23
3.2 胶合竹材力学性能的研究背景	24
3.3 胶合竹材的抗拉性能	25
3.3.1 拉伸试验试件	25
3.3.2 拉伸试验	26
3.3.3 抗拉性能与纤维角度的关系	26
3.4 胶合竹材的抗压性能	28
3.4.1 试件选取	28
3.4.2 抗压试验	29
3.4.3 抗压试验结果分析	30

3.5 胶合竹材的抗弯性能	32
3.5.1 抗弯强度试验试件	32
3.5.2 抗弯试验	32
3.5.3 抗弯性能试验分析	33
3.6 胶合竹材的抗剪性能	34
3.6.1 试件制作	34
3.6.2 抗剪试验	34
3.6.3 抗剪强度	35
3.7 胶合竹材基本力学性能及设计值	35
3.7.1 容许应力设计值	36
3.7.2 极限状态设计法 (MFLSD)	37
3.7.3 荷载抵抗系数法	38
3.8 GluBam 容许设计应力	38
3.9 胶合竹材的长期蠕变性能	39
3.9.1 试验用材	39
3.9.2 胶合竹材长期蠕变性能试验	39
3.9.3 蠕变试验结果	41
3.10 胶合竹材的老化性能	42
3.10.1 概述	42
3.10.2 加速老化试验条件及方法	42
3.10.3 老化试件及处理	43
3.10.4 试件老化后的测试内容	43
3.10.5 试验结果及分析	44
参考文献	47
第 4 章 胶合竹结构构件的受力性能	48
4.1 胶合竹结构柱	48
4.1.1 轴心受压柱试件	48
4.1.2 试验装置与测量方案	49
4.1.3 试验结果与分析	49
4.1.4 长细比—荷载关系	50
4.2 胶合竹梁	51
4.2.1 GluBam 胶合竹梁连接方式对比试验	51
4.2.2 GluBam 非指接梁的叠合方式对比试验	53
4.2.3 GluBam 胶合指接梁试验	58
4.2.4 FRP 增强 GluBam 胶合梁对比试验	63
4.2.5 跨中挠度计算	70

4.2.6 胶合竹梁整体稳定性计算	70
4.3 胶合竹梁的疲劳性能	71
4.3.1 试验概况	71
4.3.2 试验结果分析	72
4.4 胶合竹梁的长期性能试验	77
4.4.1 长期性能模型设计	77
4.4.2 胶合竹桥的长期试验	78
4.4.3 长期荷载作用后的破坏试验	79
4.5 轻型竹木墙体	81
4.5.1 模型墙体及加工	81
4.5.2 试验方法	83
4.5.3 试验结果及讨论	83
4.5.4 墙体破坏形态	87
参考文献	89
第5章 胶合竹结构连接节点	91
5.1 竹木结构的常用连接形式及研究现状	91
5.2 胶合竹材螺栓节点抗压试验	93
5.2.1 试验目的	93
5.2.2 试验方法	93
5.2.3 加载制度	95
5.2.4 试验观测	95
5.2.5 胶合竹材螺栓节点破坏形态分析	95
5.2.6 胶合竹材螺栓节点承载能力分析	99
5.3 胶合竹材螺栓节点抗拉试验	101
5.3.1 胶合竹材	102
5.3.2 试验设计	102
5.3.3 破坏模式	103
5.3.4 承载能力	104
5.4 胶合竹结构节点小结	107
参考文献	107
第6章 胶合竹结构屋架	109
6.1 试验设计及模型制作	109
6.2 竹结构屋架及其屋面板的检验性试验	110
6.3 竹结构屋架全跨破坏性试验	110
6.3.1 加载方案	110

6.3.2 加载过程 112

6.3.3 屋架破坏准则 113

6.3.4 主要试验结果及分析 113

6.4 竹结构屋架结构分析方法 116

6.4.1 节点设置 117

6.4.2 节点分析模型 117

6.4.3 不同节点模型计算结果及分析 121

6.5 屋架承载力简化计算方法 122

6.6 其他形式的竹结构屋架 124

6.7 屋架系统的整体效应 124

参考文献 124

第 7 章 预制装配式竹结构板房的设计与建造 126

7.1 装配式板房类型与功能设计 126

7.2 预制装配式竹结构板房的构造 128

7.2.1 基础处理 128

7.2.2 连接柱 128

7.2.3 连系梁 128

7.2.4 装配式竹结构活动板房屋架 128

7.3 装配式竹结构房屋的维护结构 130

7.3.1 维护结构板块单元 130

7.3.2 板块单元的功能要求 131

7.3.3 板块单元的设计基本步骤 131

7.3.4 板块单元的基本结构和材料 131

7.4 装配式竹结构房屋的拼装 133

7.5 装配式竹结构房屋的防火性能 134

7.5.1 防火试验 135

7.5.2 试验结果 136

7.6 装配式竹结构活动板房的抗侧力试验研究 139

7.6.1 概述 139

7.6.2 试验设计 139

7.7 装配式竹结构房屋的室内空气品质 142

7.7.1 室内空气质量检测 142

7.7.2 室内空气质量检测结果与分析 143

7.8 工程实例 144

参考文献 145

第 8 章 GluBam 胶合竹轻型框架结构房屋	147
8.1 轻型竹结构框架房屋设计	147
8.1.1 剪力墙分析	147
8.1.2 楼(屋)盖分析	152
8.1.3 剪力墙和横隔的变形计算	154
8.1.4 算例分析	154
8.2 轻型竹结构房屋施工	159
8.2.1 基础工程	161
8.2.2 墙体工程	162
8.2.3 楼盖工程	166
8.2.4 屋盖工程	169
8.3 现代竹结构房屋抗震性能试验研究	172
8.3.1 概述	172
8.3.2 模型设计	173
8.3.3 模拟地震振动台试验研究	176
8.3.4 竹结构房屋推覆试验研究	186
8.3.5 竹结构房屋的理论分析	189
8.3.6 抗震性能研究小结	192
8.4 轻型竹结构框架房屋足尺火灾试验	192
8.4.1 概述	192
8.4.2 试验模型	193
8.4.3 火灾荷载方案	195
8.4.4 试验房屋楼面配重方案	196
8.4.5 试验测试内容	197
8.4.6 试验过程与测试结果	199
8.4.7 结果分析	203
8.4.8 竹结构房屋防火性能小结	203
8.5 竹结构住宅室内空气质量品质	204
8.5.1 室内空气的主要污染物及检测方法	204
8.5.2 测试参数及仪器设备	205
8.5.3 检测方法	205
8.5.4 竹别墅室内空气品质检测结果与分析	206
8.5.5 竹别墅与混凝土住宅室内空气品质比较	208
参考文献	208
第 9 章 胶合竹结构桥梁的设计与建造	211
9.1 桥梁工程背景	211

9.2 人行竹桥	212
9.2.1 工程概况	212
9.2.2 设计计算	212
9.2.3 荷载计算	215
9.2.4 其他人行竹桥工程	217
9.3 现代竹结构车行桥梁设计与建造	218
9.3.1 工程概述	218
9.3.2 车行竹桥的设计与施工	219
9.3.3 现代竹结构车行桥梁的成桥试验	222
9.3.4 成桥试验的有限元分析	224
9.4 竹结构桥梁的长期观测	225
参考文献	225
 附录 代表性工程简介	 227

第 1 章

竹材作为现代建筑材料的前景

竹子作为一种天然材料，已经有数千年的使用历史^[1-1]。而以竹子作为基本结构材料的现代竹结构则是近年来才出现的新型结构体系，已成为土木工程领域的一个新突破。竹材用做基本结构材料具有以下几个重要特点：第一，竹材作为一种自然资源在许多国家来源广泛，尤其是在一些发展中国家，如中国、印度及中南美国家。竹子本质上是体形大的草，英文俗称 giant grass，生长速度比大多数树木更快。通常竹子生长约四年就可以砍伐，并且可以再生。第二，竹子具有良好的力学性能，并且加工方便。第三，竹材的加工制造过程对环境无实质性不良影响，基本没有污染，符合可持续发展要求。因此，发展以竹材为主要结构材料的现代竹结构，可以有效提高竹材的附加值，提高竹产区民众的收入，促进建筑业的可持续发展。

在北美以及许多工业化国家，木材已经在建造桥梁和房屋方面得到广泛应用^[1-2~1-5]。尽管北美等地森林覆盖率高，木材资源丰富，但是为后代保留足够的树木仍是社会面临的紧迫任务。开发和利用现代竹质工程材料，可以在国际范围内为桥梁和房屋建设中提供新的材料选择。作为一种直接回报，现代竹结构的发展不仅有益于竹材丰富的发展中国家，也会引导生长快、成材期短的竹林在世界其他地方的种植与发展，并且有利于绿化环境。

但现实是竹材在现代结构中没有被充分利用，作者认为这在很大程度上是因为缺乏以力学、材料科学、结构设计和实验学为基础的理论及研究的支持，缺少现代设计施工规程、规范的实践指南。

本章首先对竹工业的现状做一概述，然后综述竹材在现代结构中的应用。

1.1 竹工业的现状

世界的竹林资源分布极不均匀，主要集中在亚洲，其次是南美，其他国家和地区很少。中国的竹林面积达到 440 万公顷。我国主要的竹材品种为毛竹（也称楠竹）^[1-6]。毛竹学名为 *Phyllostachys edulis*，英文名 Moso Bamboo，为禾本科竹亚科刚竹属，单轴散生型，常绿乔木状竹类植物，秆大型，高可达 20m 以上，胸径达 20cm。主要集中生长在湖南、江西、浙江和福建等长江流域以南的亚热带地区。

作者的课题组通过对我国主要竹产区的湖南省进行实地考察，认为当前的竹资源和竹产业整体情况如下：

(1) 我国竹资源丰富。长江中下游地区独特的地理环境极适于毛竹的生长，竹材生长繁殖快，成才周期短，竹材质量好。以湖南省益阳市的竹子大县桃江县为例，毛竹的种植面积达到了 89 万亩（2006 年），年可伐量为 800 万株以上，以每 3 根竹子 100 斤计算，年产量约为 1.3 亿公斤，产量巨大，且竹材直径粗，壁厚。

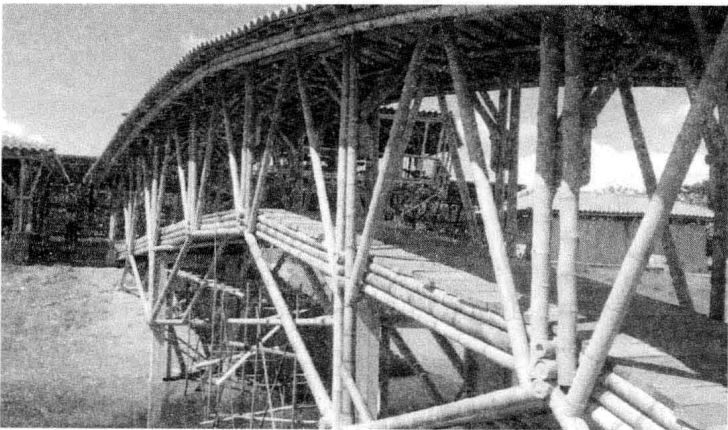
(2) 竹材管理和开发水平不平衡。各竹材主产区的竹资源开发水平差异大，导致了竹资源管理差异也很大。以湖南省桃江县为例，该县以竹加工为支柱产业之一，拥有十多家规模较大的竹加工企业，一般企业都有自己的竹资源基地，对竹材的砍伐有材质和竹龄要求，实现有序管理，当地政府也大力推动竹林种植，年增加竹林约 4 万亩。湖南省耒阳市也拥有较为丰富的毛竹资源，但当地的竹加工产业基本处于空白，因此竹林砍伐基本处于无序状态，主要是出售圆竹，或制作建筑工地的竹跳板等，附加值极低，竹资源浪费严重。

(3) 竹产业发展不平衡，整体水平不高。比如，湖南省较大规模的竹加工企业主要在益阳和邵阳等地，主要竹产品是建筑竹模板、竹地板和竹生活用品。由于产品技术含量相对较低产品竞争力不强，附加值较低。

(4) 竹材除了作为模版、地板以及装饰材在现代建筑上有所利用以及在传统的非工业化的简单建筑上利用外，还没有真正作为能够承受荷载的结构材料进入到现代土木工程的主市场。

1.2 圆竹建筑

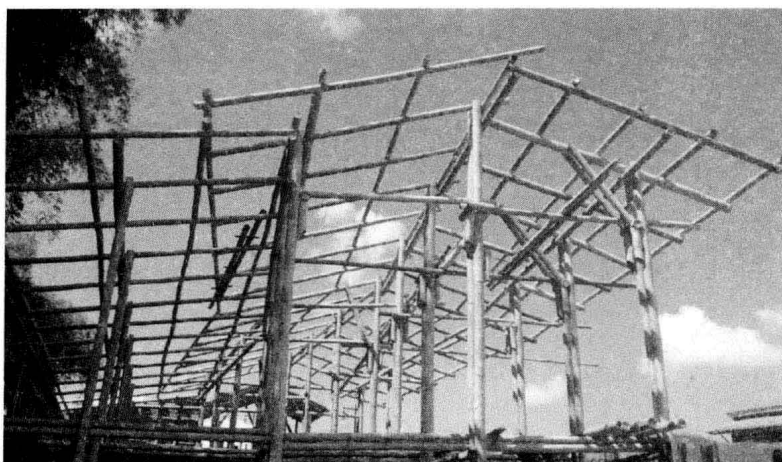
直接采用圆竹作为基本构件建造的竹建筑和桥梁，是最传统的竹结构形式。在我国以西南地区的傣族民居“干阑式”竹楼为代表。昆明市建筑业管理局采用龙竹，在 1984 年和 1988 年分别在瑞士和德国建造了一座 38m 高的全竹楼和 55m 长的全竹桥，充分展示了竹材建筑的魅力。2004 年，英国与印度相关部门合作还对竹材建造的竹屋进行了抗震试验。圆竹在拉美国家被作为“穷人的木头”，在建筑中有比较广泛的应用。图 1-1 给出了作者于 2011 年受邀参加哥伦比亚一个国际会议时收集的部分圆竹结构照片。据作者所知，哥伦比亚可能是世界上目前唯一将圆竹结构正式列入其设计规范的国家^[1-7]。此外，国际标准组织 ISO 也曾出版过圆竹结构的设计标准^[1-8]。



(a)

图 1-1 哥伦比亚的圆竹结构（一）

(a) 廊桥



(b)



(c)

图 1-1 哥伦比亚的圆竹结构 (二)

(b) 正在搭建中的圆竹骨架；(c) 圆竹结构别墅

我国学者在 20 世纪 50 年代也曾进行过一系列圆竹结构的研究和应用^[1-9, 1-10]，但圆竹结构在我国并没有形成一个现代化建筑结构体系。其原因可能有：

(1) 圆竹竿的几何形状单一，造成建筑形式单调，往往显得简陋。

(2) 原材料的不规则性导致浪费和不适合现代施工程序。如采用类似尺寸的竹竿必定造成选材上的麻烦和浪费。

(3) 节点十分复杂（图 1-2），往往造成连接不可靠或连接不牢靠，影响建筑的舒适度，如人走在圆竹造的楼板上常常会发出“嘎吱”声。

(4) 竹材本身的严重各向异性，其中包括横向强度极低，如图 1-3 所示的破坏很难避免。

(5) 尽管自然的选择使得单根竹竿能够非常优异的完成担负其自身重量的自然使命，但毕竟一根原材的直径有限，作为结构材料必须承担复杂荷载作用，这超出了大自然赋予的使命。

(6) 在未经处理的情况下，竹材易虫蛀、腐朽和霉变等。

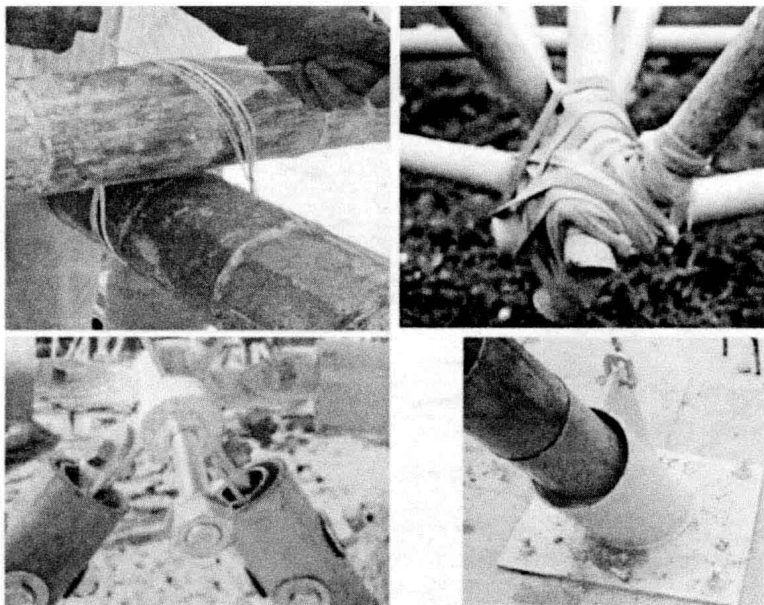


图 1-2 复杂的节点

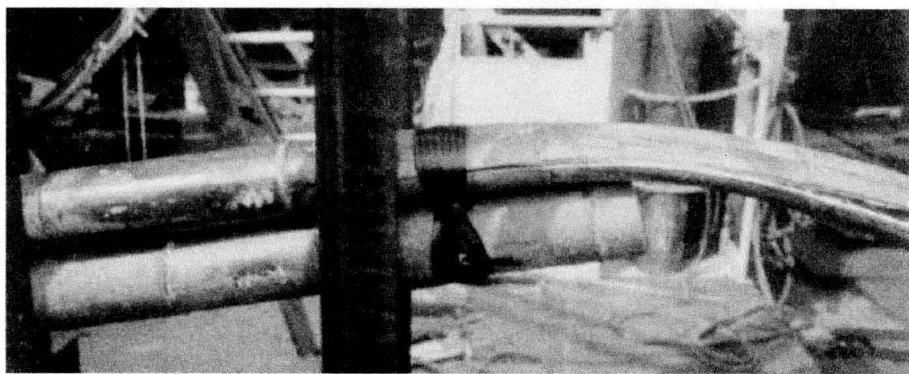


图 1-3 横向压裂

作者认为，现代工业的一个最基本的特点就是其可重复性。根据科学原理和理论进行设计，根据设计进行施工建造，建成的结构满足设计要求，而这个“满足”是可以利用现代科学手段进行实验验证的。由于圆竹本身固有的非规则几何形状，极端各向异性力学性能等，尽管利用圆竹的建筑可以产生一定的艺术和建筑效果，但恐怕难以成为主要的结构材料在现代建筑业中广泛应用。当然，圆竹建筑还是有其相应的市场，特别是在景观建筑及低成本建筑中的应用应当受到足够的重视。