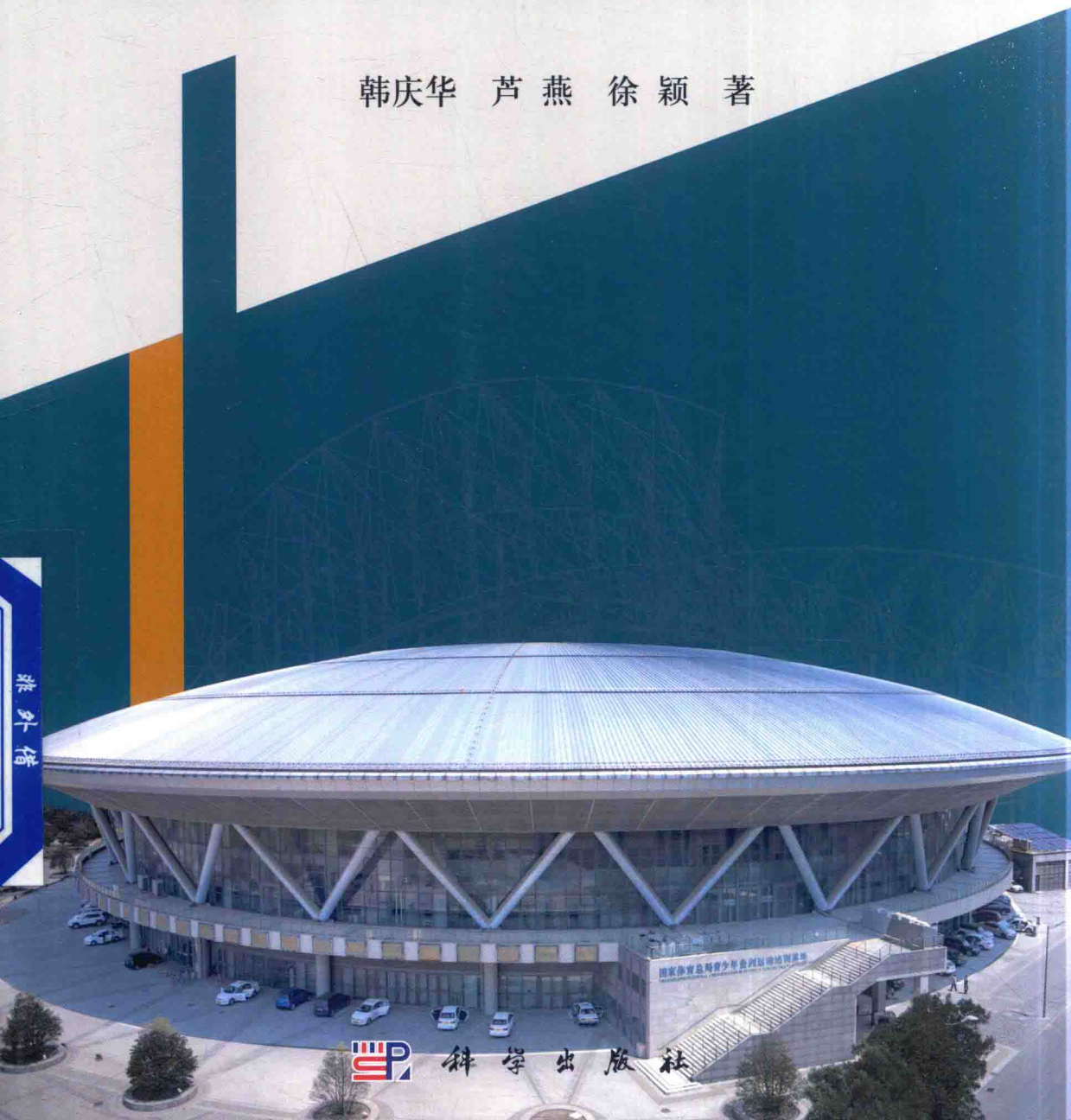


国家杰出青年科学基金项目资助

大跨建筑结构倒塌破坏机理

韩庆华 芦燕 徐颖 著

非对称



科学出版社

国家杰出青年科学基金项目资助

大跨建筑结构倒塌破坏机理

韩庆华 芦 燕 徐 颖 著

科学出版社

内 容 简 介

本书总结了作者十多年来大跨建筑结构倒塌破坏机理相关研究成果。从工程实例出发,对国内外的大跨建筑结构倒塌实例进行汇总并剖析其原因,重点论述了大跨建筑结构的倒塌分析方法。围绕常见大跨建筑结构体系(网架结构、网壳结构、立体桁架结构等)开展增量倒塌分析和连续倒塌分析以阐明其破坏机理,提出相关的大跨建筑结构抗倒塌设计方法。最后对大跨建筑结构中常见非结构构件的抗震性能进行系统阐述。

本书为大跨建筑结构倒塌破坏机理的理论研究和推广应用奠定了基础,为我国相关规范、规程的修订提供重要资料,可为从事大跨建筑结构领域的广大科技工作者和设计人员提供参考和借鉴,亦可作为研究生和本科生的学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

大跨建筑结构倒塌破坏机理/韩庆华,芦燕,徐颖著. —北京:科学出版社, 2017.6

ISBN 978-7-03-053518-4

I. ①大… II. ①韩… ②芦… ③徐… III. ①建筑结构-大跨度结构-坍塌-研究 IV. ①TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 127892 号

责任编辑:任加林 / 责任校对:刘玉靖

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年6月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2017年6月第一次印刷 印张:19 1/2

字数:380 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62139281 (BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

序 言

大跨建筑结构是一个富有生命力的结构领域。近 30 年来,各种类型的大跨建筑结构在美、日、欧、澳等国家发展很快。建筑物的跨度和规模越来越大,采用了许多新材料和新技术,创造了丰富的空间结构形式。许多宏伟而富有特色的大跨建筑结构已成为当地的象征性标志和著名人文景观。从今天来看,大跨建筑结构已成为一个国家建筑科技发展水平的重要标志之一。20 世纪 80 年代以后,我国各种类型的大跨建筑结构进入协调的发展阶段,出现了越来越多的创新设计,形势相当喜人。同时,2008 北京奥运会、2011 深圳世界大学生运动会、2014 南京青奥会等国际赛事的举办,全国交通枢纽的建设与升级,进一步促进了大跨建筑结构的建设,如北京奥运会主体育场“鸟巢”、国家大剧院、深圳宝安国际机场、武汉火车站、北戴河火车站等,这些闻名于世的标志性大跨建筑结构代表了新时期我国建筑领域取得的新成就。自 2013 年提出“一带一路”倡议以来,沿线基建投资已达数万亿。我国相继制定了一系列重大城市和交通基础设施、能源和资源基础设施等的建设规划。未来 20~30 年仍是我国大规模基础设施建设的高峰期,也为大跨建筑结构的发展及应用带来巨大的机遇。

然而,在施工或使用过程中由于荷载或环境改变,遭受地震、风灾、暴雪等自然灾害所导致的大跨建筑结构倒塌事故却时有所闻,像巴黎戴高乐机场候机楼屋盖倒塌、德国巴特赖兴哈尔溜冰场屋盖倒塌、广东奥林匹克中心羽毛球综合馆膜结构坍塌等。这些大跨建筑结构的倒塌破坏造成了不可估量的人员伤亡和财产损失,严重影响了生命财产安全乃至社会稳定。2016 年 7 月 28 日,习近平总书记在唐山抗震救灾和新唐山建设 40 年之际调研考察时指出:努力实现从减少灾害损失向减轻灾害风险转变,全面提升全社会抵御自然灾害的综合防范能力。因此,在保证建筑主体结构本身的安全可靠的同时,需保证建筑结构中非结构构件不损坏和不中断工作,以使灾后人员损伤和财产损失降至最低,已成为结构工程领域研究的热点与难点。

该书开篇精要地对大跨建筑结构的发展及工程应用进行了概述。从工程实例出发,对国内外的大跨建筑结构倒塌实例进行汇总并剖析其原因,重点论述了大跨建筑结构的倒塌分析方法。后续章节围绕常见大跨建筑结构体系(网架结构、网壳结构、立体桁架结构等)开展增量倒塌分析和连续倒塌分析以揭示其破坏机理,并提出大跨建筑结构相关抗倒塌设计方法。最后对大跨建筑结构中常见非结构构件的抗震性能进行系统阐述。全书内容丰富、系统全面、图文并

中常见非结构构件的抗震性能进行系统阐述。全书内容丰富、系统全面、图文并茂，可读性好。

该书系统介绍大跨建筑结构倒塌破坏机理，不仅是作者及科研团队近些年研究成果的总结，也集中展现了我国大跨建筑结构倒塌破坏机理研究的技术水平。相信该书的出版有助于广大科研工作者和技术人员了解和掌握大跨建筑结构倒塌破坏机理的相关知识，为大跨建筑结构的抗倒塌设计提供参考和借鉴。



天津大学

2017年5月

前 言

近年来,大跨建筑结构在世界范围内得到了广泛应用。这不仅能够衡量一个国家的建筑发展水平,同时也可体现一个国家的综合国力。我国大跨建筑结构研究和应用虽起步较晚,但发展速度惊人。在体育场馆、交通枢纽、会展中心、影视剧院、工业建筑等重大工程中,出现了一批规模宏大、形式新颖、技术先进的地标式建筑,大跨建筑结构也迅速地融入了公众生活。这为大跨建筑结构的发展创造了机遇,也提出了全新的挑战。

由于大跨建筑结构主要应用于活动频繁、人员密集的公共建筑中,其在施工或使用过程中由于荷载或环境改变,遭受地震、暴雪等会引起结构的受力模式、传力途径及应力分布发生变化,进而导致整体失效或节点失效直至倒塌破坏,已造成不可估量的人员伤亡和财产损失,严重影响了生命财产安全乃至社会安全。因此,结构安全是大跨建筑结构领域追求和发展的永恒主题。本书首先对大跨建筑结构的倒塌实例进行汇总和分析,重点介绍了开展结构倒塌分析的分析原理及方法,阐述了常见大跨建筑结构体系的倒塌破坏机理与性能分析,便于为同类研究人员和工程设计人员进行大跨建筑结构倒塌破坏机理分析时提供参考。

本书共分十章。第1章讲述了大跨建筑结构的发展、大跨建筑结构倒塌实例及原因分析、结构倒塌破坏基本概念及分类以及结构倒塌判定准则;第2章重点论述了增量倒塌和连续倒塌的分析方法;第3章讲述了网架结构倒塌破坏机理及性能分析;第4章讲述了网壳结构倒塌破坏机理及性能分析;第5章讲述了拱形立体桁架结构倒塌破坏机理及性能分析;第6章讲述了网架结构抗连续倒塌性能分析;第7章讲述了球面网壳结构抗连续倒塌性能分析;第8章讲述了柱面网壳结构抗连续倒塌性能分析;第9章讲述了立体桁架结构抗连续倒塌性能分析;第10章重点讲述了非结构构件抗震性能及破坏机理。

本书第1、2、3、6、7章由韩庆华教授编写,第4、5、10章由芦燕副教授编写,第8、9章由徐颖博士编写。本书由韩庆华教授统稿。研究生黄倩文、吴凡、邓丹丹等参与了部分文字和图表的整理、绘制工作。博士研究生刘一鸣、赵一峰,硕士研究生王晨旭、傅本钊、张学哲、黄倩文等协助完成了部分试验、计算和分析工作。他们均对本书的完成做出了重要贡献,在此表示衷心的感谢。

本书是在作者及其科研团队十多年研究工作的基础上完成的,由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正,以便在今后的研究工作中加以改进。

著 者

2017年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 大跨建筑结构的发展	1
1.2 大跨建筑结构倒塌实例及原因分析	4
1.2.1 国内大跨建筑结构倒塌实例及分析	4
1.2.2 国外大跨建筑结构倒塌实例及分析	7
1.2.3 非结构构件破坏实例及分析	8
1.2.4 结构倒塌原因分析	10
1.3 结构倒塌破坏基本概念及分类	11
1.4 结构倒塌判定准则	13
1.4.1 构件失效准则	13
1.4.2 结构失效准则	13
参考文献	15
第 2 章 结构倒塌分析方法	17
2.1 增量倒塌分析	17
2.1.1 推倒分析方法	17
2.1.2 增量动力分析方法	22
2.2 连续倒塌分析	26
2.2.1 连续倒塌分析方法	26
2.2.2 构件失效模拟方法	33
2.2.3 敏感性分析和结构冗余系数	34
参考文献	38
第 3 章 网架结构倒塌破坏机理及性能分析	41
3.1 网架结构增量动力分析	41
3.1.1 倒塌判别准则	41
3.1.2 分析模型	41
3.1.3 结果及分析	48
3.2 网架结构倒塌概率评定	57
参考文献	62

第 4 章	网壳结构倒塌破坏机理及性能分析	64
4.1	球面网壳结构推倒分析	64
4.1.1	分析模型	64
4.1.2	传统推倒分析（能力谱法）	66
4.1.3	多模态推倒分析方法（MPA 方法）	72
4.1.4	分析结果及对比	80
4.2	球面网壳增量动力分析及倒塌概率评定	84
4.2.1	分析模型及地震记录选取	85
4.2.2	增量动力分析及倒塌概率评定	86
	参考文献	89
第 5 章	拱形立体桁架结构倒塌破坏机理及性能分析	91
5.1	拱形立体桁架结构推倒分析	91
5.1.1	竖向推倒分析	91
5.1.2	横向推倒分析	105
5.2	拱形立体桁架结构增量动力分析	114
5.2.1	基于能量原理的 IDA 方法研究	114
5.2.2	立体桁架结构倒塌性能分析	115
5.3	拱形立体桁架结构振动台试验研究	126
5.3.1	试验概况	127
5.3.2	试验结果及分析	132
	参考文献	138
第 6 章	网架结构抗连续倒塌性能分析	139
6.1	网架结构连续倒塌敏感性分析	139
6.1.1	分析模型	139
6.1.2	敏感构件及关键构件分布规律	142
6.2	网架结构抗连续倒塌性能参数化分析	144
6.2.1	厚跨比	145
6.2.2	跨度	146
6.2.3	支承形式	147
6.2.4	网架形式	149
6.3	网架结构连续倒塌失效模式及性能分析	151
6.3.1	连续倒塌过程模拟	151
6.3.2	连续倒塌破坏模式	153
6.3.3	网架结构连续倒塌破坏极限位移	154

参考文献	162
第 7 章 球面网壳结构抗连续倒塌性能分析	163
7.1 基于结构极限承载力的敏感性分析	163
7.1.1 分析模型	163
7.1.2 模态分析及屈曲分析	164
7.1.3 球面网壳结构高敏感性杆件与节点分析	165
7.1.4 球面网壳结构抗连续倒塌性能分析	170
7.2 基于构件和节点响应的网壳结构敏感性分析	174
7.2.1 凯威特型单层球面网壳	174
7.2.2 K8-联方型单层球面网壳	178
7.2.3 短程线型单层球面网壳	181
7.3 单层球面网壳抗连续倒塌性能试验研究	185
7.3.1 试验设计	185
7.3.2 试验结果与数值分析	192
参考文献	210
第 8 章 柱面网壳结构抗连续倒塌性能分析	211
8.1 柱面网壳结构敏感性分析	211
8.1.1 分析模型	211
8.1.2 四边支承柱面网壳	213
8.1.3 两边纵向支承柱面网壳	217
8.2 单层柱面网壳抗连续倒塌性能参数化分析	220
8.2.1 支承形式	220
8.2.2 矢跨比	221
8.2.3 跨度	222
8.2.4 网格布置形式	224
8.3 单层柱面网壳结构抗连续倒塌工程实例分析	227
8.3.1 天津西站单层柱面网壳结构模型	227
8.3.2 杆件敏感性分析	229
8.3.3 节点敏感性分析	231
参考文献	232
第 9 章 立体桁架结构抗连续倒塌性能分析	233
9.1 立体桁架结构抗连续倒塌性能	233
9.1.1 分析模型	233

9.1.2 整体模型与单榀模型对比分析..... 235

9.1.3 杆件敏感性分析..... 237

9.1.4 关键构件分布位置..... 240

9.2 立体桁架结构抗连续倒塌性能参数化分析 242

9.2.1 高跨比..... 242

9.2.2 跨度..... 244

9.2.3 截面形式..... 244

9.3 立体桁架结构连续倒塌失效模式 246

9.3.1 初始失效为 A 类腹杆 246

9.3.2 初始失效为 B 类腹杆 248

9.3.3 初始失效为上弦杆..... 249

9.4 强震作用下立体桁架结构抗连续倒塌性能 250

9.4.1 立体桁架结构的动力响应分析..... 250

9.4.2 地震作用下立体桁架结构连续倒塌破坏..... 254

参考文献..... 259

第 10 章 非结构构件抗震性能及破坏机理研究 261

10.1 概述 261

10.1.1 非结构构件地震响应和破坏机理研究 261

10.1.2 基于性能的非结构构件抗震性能及易损性分析..... 262

10.1.3 非结构构件抗震设计反应谱分析理论研究 263

10.2 大跨建筑结构中非结构构件动力性能研究 265

10.2.1 传递函数法..... 265

10.2.2 单点连接的非结构构件动力性能研究 268

10.3 大跨建筑结构中吊顶系统抗震性能研究..... 278

10.3.1 吊顶系统模型的设计与制作 279

10.3.2 试验设备..... 284

10.3.3 测量内容与测点布置..... 285

10.3.4 地震波输入与加载制度..... 287

10.3.5 试验结果与分析..... 288

10.4 非结构构件抗震性能发展趋势和展望 297

参考文献..... 299

第1章 绪 论

进入 21 世纪,我国的社会经济得到了飞速发展,人们对建筑的要求也越来越高,大跨建筑结构一直是一种备受瞩目的结构形式,它具有三维空间的结构形体,在荷载作用下为三向受力,呈现空间作用,结构具有明显的空间力学特性。大跨建筑结构已被广泛应用于体育场馆、会展中心、影视剧院、交通枢纽等公共建筑。

1.1 大跨建筑结构的的发展

目前,大跨建筑结构的建设如火如荼,结构形式也越来越多,根据受力特点空间结构可分为刚性、柔性和杂交三种结构体系。

刚性结构体系的特点是结构构件具有很好的刚度,结构的形体由构件的刚度形成,属于这一类体系的结构有薄壳结构、折板结构、网架结构、网壳结构等。

薄壳结构受力合理,其力学原理十分巧妙。薄壳结构充分利用了材料的性能,使曲面内的薄膜产生内力(双向轴向力和剪力),依靠这种内力承担外荷载,薄壳结构的厚度很小,造型美观,但是能承受相当大的荷载。薄壳结构几何形状合理,壳体结构的强度和刚度得到了保证,大部分材料直接受压,材料的潜力得到充分发挥。因此,在建筑工程中,壳体结构得到了广泛的应用。薄壳结构按曲面形成方式进行分类,可以分为圆顶薄壳、双曲扁壳、筒壳、双曲抛物面壳等结构形式。建筑材料大部分采用钢筋或者混凝土。薄壳结构能把材料的强度充分利用,同时又能结合承重结构与围护结构两种功能。在实际工程中,还可充分利用对空间曲面的组合与切削,建造成建筑造型新颖奇特的建筑。薄壳结构的优点在于可以分散压力。著名的悉尼歌剧院就是薄壳结构的成功工程案例之一。

折板结构是由若干狭长的薄板,相交成一定角度,连成折线形的空间薄壁体系。折板结构跨度一般在 30m 以内,在实际工程中适宜于矩形平面的屋盖,两端一般设置通长的圈梁或墙,以此作为折板的支点。常用折板形式有 V 形、梯形等。V 形折板安装方便、制作简单且节省材料,目前我国预应力混凝土 V 形折板得到广泛应用,V 形折板最大跨度一般可以超过 24m。

网架结构大多由钢构件组成,具有多向受力的性能,空间刚度大,整体性强、并有良好的抗震性能、制作安装方便,是我国大跨建筑结构中发展最快、应用最广的一种结构形式。天津科学宫礼堂网架由天津大学设计,建成于 1966 年 6 月,平面尺寸为 14.84m×23.32m,网架高度为 1m,网格形式为斜放四角锥平板网架,

周边简支于外墙的刚性过梁上，材料为 Q235 钢。杆件采用壁厚为 1.5mm 的高频电焊薄壁钢管，节点采用壁厚为 3mm 的焊接空心球。其用钢量为 6.25kg/m^2 ，仅为钢筋混凝土屋盖中的钢筋用量或平面钢屋架用钢量的一半，经济效果极其显著。网架结构在我国已有大量的建设实例，材料除采用 Q235 钢和 Q345 钢外，尚有采用不锈钢及铝合金材料做成的网架。另外，网架上弦采用带肋钢筋混凝土平板，下弦及腹杆采用钢管结构，即钢-混凝土组合网架结构，这种结构也有不少建成的工程实例。

网壳结构是曲面形的网格结构，兼有杆系结构和薄壳结构的固有特性，主要优点是覆盖跨度大、整体刚度好、结构受力合理，既有良好的抗震性能、材料耗量低，又有丰富的文化内涵。早在 20 世纪初，德国工程师施威德勒就发明了一种肋环斜杆型网壳，后来这种以他名字命名的网壳一直在圆形屋顶中流传。而今，日本的名古屋穹顶（图 1-1）是当今世界上跨度最大的单层网壳。该体育馆整个圆形建筑直径为 229.6m，支承在看台框架柱顶的屋盖直径为 187.2m。采用钢管形成三向网格，每个节点上都有 6 根杆件相交，采用直径为 1.45m 的加肋圆环，钢管杆件与圆环焊接，成为能承受轴向力和弯矩的刚性节点。为了 1996 年在哈尔滨召开的冬季亚运会而建造的黑龙江速滑馆（图 1-2 和图 1-3），其平面尺寸为 $190\text{m}\times 85\text{m}$ ，结构用钢量仅为 50kg/m^2 。



图 1-1 日本名古屋穹顶单层网壳

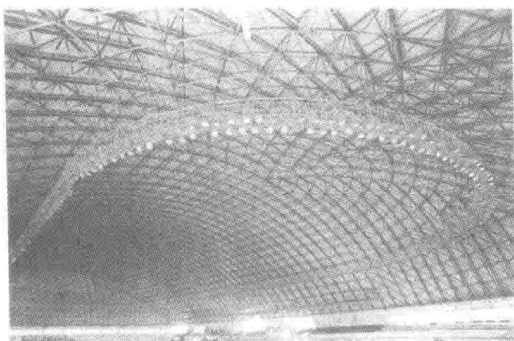


图 1-2 黑龙江速滑馆内景图

柔性结构体系的特点是大多数结构构件为柔性构件，如钢缆、钢索、薄膜等，结构的形体必须由体系内部的预应力形成。目前柔性结构体系有悬索结构、充气膜结构、张拉整体结构等。

悬索结构主要由柔性拉索及其边缘构件组成，两者共同承重。组成索的材料也多种多样，随着材料科学的发展，目前索的材料多采用钢丝绳、钢丝束、链条、钢绞线、圆钢以及其他抗拉性能较好的材料。悬索结构能充分发挥高强度材料的抗拉性能，可以把建筑跨度加大。悬索结构材质轻、自重小、材料省、易施工、受力合理、力学计算模型简单、节约工期，并且便于建筑造型，可以适合各种建造的需要。悬索结构以一系列受拉的索作为主要承重构件，这些索按一定规律组

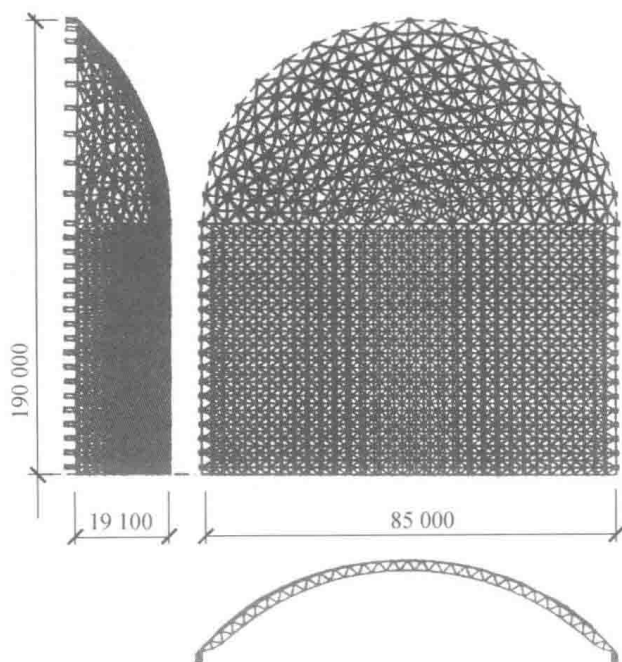


图 1-3 黑龙江速滑馆平面、立面图

成各种不同形式的体系,并悬挂在相应的支承结构上。悬索结构的形式多种多样,按照受力特点一般可将悬索结构分成单层悬索体系、双层悬索体系和索网结构三种类型。

相对于其他结构,膜结构显得比较新颖,膜结构用多种高强薄膜材料为基础,辅以其他材料。膜结构既可以作为覆盖结构,也可以作为建筑物主体。膜结构具有一定的空间强度,所以能够承受一定的外荷载。膜结构不仅形式多样化,而且在满足结构安全、经济的基础上把建造结构的美感表现了出来,体现出丰富的文化内涵。膜结构主要按结构受力特性进行分类,目前常用的结构形式主要有充气式膜结构、张拉式膜结构、骨架式膜结构等形式。张拉膜结构较为常见,主要是通过柱及钢架支承或钢索张拉成形。充气膜结构则是靠室内不断充气,利用产生的压力差,使屋盖膜布上浮,使建筑的跨度增大。骨架式膜结构是目前最新的一种大跨建筑结构体系,适合体育场馆等大中型建筑。气承式膜结构有使用维护费高、漏气等缺点,而骨架式膜结构克服了这些缺点,并且使建筑的净空间加大,更好的满足了使用功能的要求。

杂交结构体系是将刚性和柔性两种结构体系的优点结合起来所组成的结构体系,可以是两种刚性结构体系的组合也可以是刚性和柔性结构体系的组合,如拉索与梁组成的斜拉结构。杂交结构能够同时满足建筑与结构的要求,是建筑师和工程师共同设计的成果。

随着建筑科技的进步, 建筑结构呈现多样化, 大跨建筑结构也得到了飞速发展。各种不同的结构在实际工程中都已得到广泛的应用, 如北京奥运场馆水立方采用膜结构、悉尼歌剧院采用薄壳结构。悬索结构受力合理, 节约工期, 并且便于建筑造型, 可以适合各种建造的需要, 除用于大跨度桥梁工程外, 在展览馆、体育馆、飞机库、仓库等大跨度屋盖结构中都被应用。

1.2 大跨建筑结构倒塌实例及原因分析

大跨建筑结构主要应用于活动频繁、人员密集的公共建筑中, 其在施工或使用过程中由于荷载或环境改变, 遭受地震、风灾、暴雨等会引起结构的受力模式、传力途径及应力分布发生变化, 进而导致整体失效或节点失效直至倒塌破坏, 造成了不可估量的人员伤亡和财产损失, 严重影响了生命财产安全乃至社会安全。

1.2.1 国内大跨建筑结构倒塌实例及分析

1. 深圳国际会展中心网架倒塌

1989 年 5 月建成的深圳国际会展中心 4 号展厅屋盖网架结构 1992 年 9 月 7 日发生整体倒塌 (图 1-4), 事故发生的主要原因是网架在设计过程中对网架实际屋面荷载形式考虑不当, 未考虑天沟及排水坡度的影响, 以致暴雨造成屋面积水过多, 荷载加大。而在屋盖实际荷载作用下, 网架最大支座反力远远大于支座极限承载能力, 与最大支座反力相连的压杆也远远超过其临界荷载而受压屈曲, 致使整体屋盖结构呈两点支撑的近似悬臂状态, 承载力极大降低, 整体侧向失稳而倒塌。

2. 湖南耒阳电厂干煤棚倒塌

2000 年 4 月 14 日, 湖南耒阳一座 70.68m 跨度的干煤棚, 在使用 5 年后发生整体倒塌 (图 1-5)。其结构形式为三心圆柱面网壳, 两边支座不等高, 支承边长为 120m。事故发生的主要原因是该工程在安装基本就位后违反操作规程, 在支座未做固定的情况下拆除临时拉索造成支座水平移动 1.4m, 竖向落差 0.33m, 低端支座向上第 12 列弦杆压屈, 并使局部支座、局部杆件与节点受损。随后虽经检修复位, 但由此而产生的冲击及复位过程对结构施加的强迫位移导致伸入节点的高强螺栓受损断裂。同时, 网壳又长期在非正常的状态下工作, 干煤棚中的钢构件接触硫、磷等介质的机会较多, 极易腐蚀。该工程在使用过程中又将煤长期堆压在支座节点与杆件上, 后经挖掘, 发现不少杆件可早已锈蚀而脱离节点。



图 1-4 深圳市国际展览中心网架倒塌实例



图 1-5 湖南耒阳电厂干煤棚倒塌实例

3. 内蒙古某钢储罐网壳坍塌

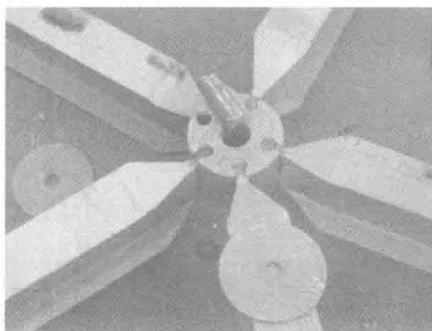
2005 年 10 月内蒙古地区某立式钢储罐的加氢稳定原料罐钢网壳发生整体坍塌。坍塌从西侧开始,顺时针向中心辐射。事故发生时,钢网壳已安装完毕,除边角部位外,大部分蒙皮板已安装就位,在网壳西南侧分三处各堆放蒙皮板 7 张、7 张及 8 张,每张板重约 425kg,共有 8 人在该处进行蒙皮板补角作业。图 1-6 为网壳破坏现场的情况。据现场考察发现,网壳及蒙皮板已经整体塌落,大量节点插件在根部断裂,并有个别插件从壳体中拉出,罐壁及加强槽钢无明显破坏和变形。



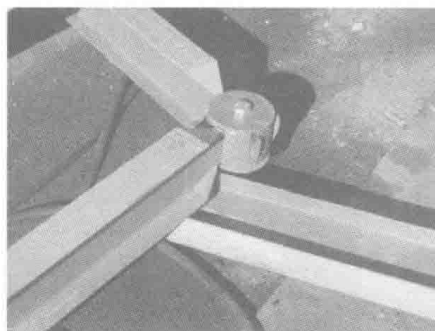
(a) 整体坍塌现场



(b) 坍塌边部情况



(c) 节点破坏情况一

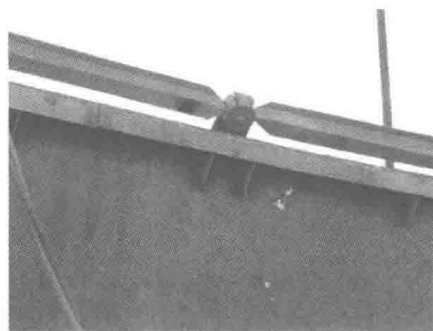


(d) 节点破坏情况二

图 1-6 内蒙古某钢储罐网壳坍塌实例



(e) 支座节点破坏情况一



(f) 支座节点破坏情况二

图 1-6 (续)

2005 年 10 月 14 日, 坍塌事故专家组对事故现场进行了调查, 并就可能的事 故原因与有关人员进行了讨论。经过分析, 专家组初步认为网壳设计中整体稳定 性分析未考虑网壳初始几何缺陷, 施工过程中的局部堆载, 承插式节点的刚度、 强度及延性是网壳整体坍塌的可能原因。

4. 广东奥林匹克中心羽毛球综合馆膜结构坍塌

2015 年 5 月 4 日, 广州市区普遍出现了大雨到暴雨, 其中天河区黄村街奥体 路降雨量达 88.3mm。受暴雨影响, 广东奥林匹克中心羽毛球综合馆顶棚突然坍塌 (图 1-7)。发生坍塌的奥体中心羽毛球馆, 报建时名为充气式帐篷, 馆体周边和顶 棚均使用的是 PPC 塑料。该场馆于 2014 年 8 月建成, 高 13m, 内部还安装有鼓 风机维持帐篷运转。造成场馆坍塌的主要原因是场馆没有固定的桩基, 主体结构 采用充气膜结构形式, 且可拆卸移动, 结构形式的特殊性导致结构在雨荷载作用 下承载力不足而发生整体坍塌破坏。



图 1-7 广州奥体羽毛球综合馆暴雨坍塌

其他部分空间结构倒塌事故见表 1-1。

表 1-1 空间结构倒塌事故

序号	工程名称	事故概况及原因
1	山西某矿区通信楼	该通信楼为棋盘形四角锥焊接球网架结构,平面尺寸为 13m×18m,在大雨后突然倒塌。原因是“设计有严重超载,焊接质量差,腹杆失稳”
2	东胜市东乔玻化厂一车间	该车间为正放四角锥焊接球网架结构,平面尺寸为 20.4m×36m,在暴雨后坍塌。原因是“误用几根 40Mn 钢管,屋顶超载,部分焊接质量差”
3	哈尔滨市自来水三厂净水车间	该车间为正放四角锥焊接球节点网架结构,平面尺寸为 45.6m×45.6m,在整体起吊时网架坠地,导致 3 人死亡。原因是“绞磨主轴扭断,刹车装置失灵”
4	山东淄博某供销大厦	该大厦为两向正交正放网架结构,平面尺寸为 29.7m×33.88m,在铺设屋面板时大量腹板挠曲,一柱端拉裂。原因是“压杆长细比过大,屋面实际做法超载”
5	太原某汽车修理车间	该车间为折板形网架结构,平面尺寸为 24m×54m,在铺设混凝土屋面板过程中大量腹板弯曲。原因是“网架为几何可变体系”
6	咸阳体育馆	该体育馆为螺栓球节点网架结构,平面尺寸为 45m×45m,在屋面板安装完后部分弦杆的连接焊缝开裂。原因是“采用的 CO ₂ 气体保护焊缝未焊透”
7	天津地毯进出口公司地毯厂仓库	该仓库为正放四角锥焊接球节点网架结构,平面尺寸为 48m×72m,1994 年 10 月 31 日竣工,同年 12 月 4 日突然全部倒塌。原因是“设计简化计算错误及施工量差”
8	郑州国际展览中心	该展览中心为正放四角锥焊接球节点网架结构,平面尺寸为 45m×45m,网架在施工时下沉约 6mm,焊接连接严重破坏。原因是“3 根下弦杆在钢管与锥头连接处断裂”

1.2.2 国外大跨建筑结构倒塌实例及分析

1. 美国哈特福特市中心体育馆坍塌

1957 年建成的美国哈特福特市中心体育馆,屋架网架结构平面尺寸为 92m×110m。在建成 21 年后,即 1978 年发生屋盖结构整体倒塌(图 1-8)。经分析,导致此次屋盖网架结构倒塌的主要原因是上弦受压杆件缺乏足够的有效支撑,所受荷载超过屈服极限荷载,稳定承载力不足而发生屈曲。同时,网架中采用的十字形截面受压杆件发生了扭转屈曲。此外,导致网架倒塌的另一重要原因是网架在设计过程中低估了作用在屋盖上的屋面荷载(约 20%),网架整体实际所受屋面荷载超过其本身所能承受的极限荷载。在施工方面,存在着施工质量监督松懈,网架安装过程中存在严重偏差而未及时纠正及重要建筑材料混用等问题。

2. 德国巴特赖兴哈尔溜冰场屋盖倒塌

德国巴特赖兴哈尔溜冰场建于 20 世纪 70 年代,长 60m,宽 30m,四周墙壁