



陈绍蕃论文集

西安建筑科技大学 编

陈绍蕃论文集

西安建筑科技大学 编



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是陈绍蕃教授 20 世纪 50 年代以来从事钢结构研究所发表论文的选集, 涵盖钢构件的稳定、板件的相关屈曲、屈曲后强度的利用、钢结构塑性性能的利用、动力性能和抗震性能、连接和节点设计等方面的内容, 其中相当一部分论文是我国历次修订《钢结构设计规范》有关条文的依据。

本书可供从事钢结构研究和设计的人员及结构工程研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

陈绍蕃论文集/西安建筑科技大学编. —北京: 科学出版社, 2004

ISBN 7-03-012956-3

I. 陈… II. 西… III. ①陈绍蕃-文集 ②钢结构-文集 IV. TU391-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 012023 号

责任编辑: 杨家福 吴伶俐/责任校对: 柏连海/封面设计: 耕者设计工作室

排版制作: 科学出版社编务公司/责任印制: 吕春珉

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 8 月第 1 版 开本: 787×1092 1/16

2004 年 8 月第一次印刷 印张: 36 3/4

印数: 1-1 200 字数: 855 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)



陈绍蕃教授

序

不久前,陈绍蕃教授的弟子登门告诉我,欲将陈教授多年来的论著结集出版,借以颂贺陈先生从事土木工程 60 年,广传其学术心得成就,以励后学,并嘱我为之作序,我亦深感此举甚有意义,实乃土木工程学界一大幸事。

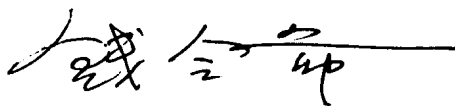
我与陈绍蕃教授是原中法工学院校友,我于 1936 年毕业,他于 1940 年毕业,我长他几岁。中法工学院教学严格,淘汰率很高,入学时 50 人的班级,到毕业时能够按时毕业的只有几个人。陈绍蕃和他的哥哥陈绍彭是学校令人瞩目的一对兄弟,因为他们两位个子高挑、潇洒,学习优秀,所以我对他们兄弟两位印象深刻。今天大家都已高龄,写这些回忆还是很动情的。1951 年冬,在我从浙江大学前往大连工学院的工作途中,路过沈阳,知道他在东北工学院,我冒着大雪去看他,围着炉火,叙旧取暖。20 世纪 50 年代院系调整后,陈绍蕃先生到西安建筑科技大学工作。此后 50 余年,在北京全国人大会上多次相聚。对陈先生数十年如一日,励学耕耘、硕果累累,广施教泽、培育后昆,多有耳闻,我对他现在虽年过耄耋,仍求学不倦的精神深感钦佩。我们都是从一个不知名的大大学毕业的,能有陈先生这样的校友,深以为荣。

陈绍蕃教授广识博学、满腹才华,襟怀坦荡、淡泊名利,专心治学、精于研究,奖掖后学、不吝心血,为我国钢结构领域的科技进步和高等教育事业的发展,尽倾其毕生所学,诚师道之典范。

该书汇集了陈绍蕃教授从 50 年代至今的主要论文,除中文以外,还编辑了一部分外文文章,但这仅是他工作的一个小结,因为他现在还在不停地工作,不断地写着新的文章。从内容上看,论文涉猎面广,许多研究成果被直接采用在设计规范规程当中,并延用至今,实为不可多得的学术文献。

匆匆草就,是以为序。

中国科学院资深院士



2004 年 1 月 15 日

中国钢结构事业的开拓者

——庆贺陈绍蕃教授从事土木工程 60 周年

20 世纪 40 年代的中国,硝烟弥漫,动荡不安。一位 20 多岁的年轻人经过深思熟虑之后,毅然决定留在生他养他的祖国大陆,而不随同父母举家迁移到海外,连他自己也没有想到,他的这个决定对中国的钢结构事业产生了巨大影响。他就是我国著名的钢结构专家陈绍蕃教授。

陈绍蕃教授从事土木工程事业迄今为止已经整整 60 年了。作为现代国内研究钢结构最早的元老之一,他在科研、教学和工程实践等领域都取得的丰硕成果,影响了一代又一代的工程师,并不断推动着我国钢结构事业的发展。陈绍蕃教授在钢结构领域中渊博的学术造诣,孜孜不倦的治学精神,勤奋好学、刻苦钻研、不断创新的科学态度,平易近人、为人师表的风范和对工作一丝不苟的敬业精神,赢得了中国及国际土木工程界同行专家的尊重,他是中国钢结构事业的开拓者,他为中国的钢结构事业做出了巨大的贡献。

陈绍蕃教授于 1919 年 2 月 2 日出生在北京市,原籍浙江省海盐县,1940 年毕业于上海中法工学院土木工程系并获学士学位,1943 年于重庆中央大学研究院结构工程学部毕业并获硕士学位。1941 年,在四川綦江导淮委员会从事水工结构设计工作。1943~1945 年,在重庆中国桥梁公司从事桥梁工程设计。1945~1946 年赴美国芝加哥西北铁路公司实习桥梁工程。1946~1949 年,在上海中国桥梁公司任副工程师,从事铁路桥梁的设计和修复工作。1949~1950 年,任上海铁路局副局长工程师。1950 年,应聘到东北工学院(其前身为沈阳工学院)任副教授和教授并开始从事钢结构教学和科研工作。1956 年,随东北工学院土木建筑系迁校来到西安建筑科技大学(前身为西安建筑工程学院、西安冶金建筑学院)任教授。1981 年,我国高等院校开始实行新的学位制度,同年他被国务院批准为我国首批博士生导师。陈教授还兼任过原冶金工业部建筑研究总院通讯研究员、西安交通大学兼职教授、青岛建筑工程学院名誉教授和烟台大学兼职教授。他是中国土木工程学会第四、五届理事,中国钢结构协会常务理事(一、二届)、理事(三届),钢结构稳定与疲劳协会副理事长(一、二届)、荣誉理事(三届),中国建筑金属结构协会专家组成员,全国钢结构标准技术委员会顾问委员,中国工程建设标准化协会轻型钢结构委员会顾问委员,中国金属学会荣誉会员,陕西省第五届人大代表,第六、七届全国人大代表,中国民主同盟第四届候补中央委员,第五、六届中央委员。

陈绍蕃教授早年在美国进行为期 1 年的桥梁工程实习,在此期间,他接触到了大量的国外钢结构工程实例,尤其是钢桥工程,取得了丰富的实践经验。从那时候开始,他对钢结构萌发了浓厚的兴趣,从此也与钢结构结下了不解之缘。在美期间,他利用业余时间阅读和收集了大量有关钢结构的科研论文和书籍。这些科研资料对他回国后从事钢结构事业起了良好的作用。陈绍蕃教授生性好静,能够静心读书和从事科研工作,于是在 1950 年应聘到高等学校任职,从此开始了他半个多世纪在高等教育战线上从事钢结构教学与研究的生涯。

陈绍蕃教授在国内钢结构的学术领域尤其在钢结构设计规范方面做出了巨大的贡献。1974 年,由中国自行编制出版的第一部《钢结构设计规范》(TJ 17-74),就凝聚了陈绍蕃教授的不少心血。为了这本中国第一部《钢结构设计规范》,他亲自进行试验研究,积累第一手的科学数据。在

编制过程中,他发现了当时规范编制主要参考的蓝本(原苏联《钢结构设计规范》)在分析压弯构件弯矩作用平面外稳定性过程中,对单轴对称构件的计算规定不符合实际,于是他做出了相应的纠正。此后的20多年间,该规范历经了两次修订,于1988年修订为国家标准GBJ 17-88到2003年再次修订为国家标准GB 50017,陈绍蕃教授每次都是该规范修订的主要参与者,并且提出了许多有创造性的新规定,还对旧条文的不合理之处加以修正。例如,在最新修订的GB 50017中,他通过理论分析,创造性地提出了T形截面压杆腹板考虑翼缘对它的约束影响后,可以放宽腹板高厚比限值的观点,后经试验验证,陈教授提出的这一论点是正确的并被该规范采纳列入正式条文。这一条文的制定,将对我国正在推广的H形钢开辟广阔的应用前景。陈绍蕃教授还是我国第一部《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99-98)和《门式刚架轻型房屋钢结构设计规程》(CECS102:98和CECS102:2002)的主要编制人之一。为了使这几本设计规程的编制水平与国际水平接轨,他查阅了世界各国的标准并结合我国实际情况,提出了很多有价值的设计规定。

陈绍蕃教授几十年的科研和教学成果不仅成为制定各项相关钢结构设计规范条款的依据,而且也为他多年来培养我国钢结构后备力量、著书立说打下了坚实的基础。他参与编写了我国第一本统编的《钢结构》(大学本科通用教材)。他为研究生教学编写的《钢结构设计原理》被评为“九五”国家重点教材,并入选国家100本研究生优秀教材;该书又是国内惟一论述钢结构性能和设计原理方面的专著,在广度和深度等许多方面超过国外同类书籍,对提高钢结构从业人员的专业水平起到了十分有益的作用;科学出版社多次再版印刷。陈教授于1988年主编的《钢结构》本科教材被建设部评为优秀教材一等奖,长期以来成为全国众多大学钢结构课程的首选教材,其印数始终保持全国钢结构教材之冠。随着教学改革的深入,陈教授今年又主编了两卷本的新教材,无论在体系和内容上都有革新,被选为“普通高等教育土建学科专业‘十五’规划教材”。他的另一本专著《钢结构稳定设计指南》也深受工程界的欢迎和好评。

陈绍蕃教授把毕生的精力都奉献给了钢结构事业,他的专业基础扎实,思想灵活,能敏锐地发现钢结构工程中问题的关键和症结所在。钢结构的稳定性是钢结构构件设计的关键问题。世界上多次发生钢结构工程的倒塌事故,它们多半是由于钢结构构件稳定性不足造成的。为此,陈教授长期以来对钢结构稳定性问题做了全面、深入的研究。他不仅研究双轴对称截面构件的稳定性,也研究单轴对称截面构件的稳定性;他深入分析了受压钢构件弯矩平面内、外的整体稳定性,也分析了截面板件局部稳定性问题。陈教授认为:从事钢结构工程的人员对保证钢结构稳定的重要性应有充分认识,同时对影响钢结构失稳的各种因素应有明确的概念。他的研究课题如轴压杆和压弯构件的弯扭屈曲,厚壁柱的残余应力和稳定性能,框架柱的计算长度,支撑设计,板件相关屈曲和屈曲后的强度利用等,都和钢结构稳定性能有关。他十分重视试验研究,很多推理计算后的结论,他都要进行试验验证。他的多项有关钢结构构件稳定性方面的科研成果被相关规范、规程所采用。他在国内外发表的百余篇论文和出版的多本著作大部分都是论及钢结构构件稳定性问题的。

他曾负责国家自然科学基金资助的研究项目“钢结构在地震作用下的破坏机理和设计对策”。他在钢结构领域所取得的科研成果,多次获得国家和省、部级奖励,如1992年获冶金工业部科技进步一等奖、1992年获陕西省科技协会科技精英称号、1996年获国家科技进步三等奖等。由于他在教学和科研工作上做出了优异成绩,他于1978年被评为冶金工业部劳动模范,1985年获陕西省优秀教师称号,1986年又被评为全国教育系统劳动模范,1990年起享受国务院政府特殊津贴。

陈绍蕃教授是一位享有很高国际知名度的学者,他在钢结构理论方面的研究和学术水平得到国际学术界和组织的认可。陈教授多次被国际钢结构学术会议推举为会议科学委员会成员。他还

被多种国际钢结构学术杂志如《结构工程进展》邀请为编委。他是于1992年在美国出版的国际钢结构稳定性能巨著《金属结构稳定——世界观点》的中国地区协调人。陈绍蕃教授是我国在美国1944年成立的国际权威性学术组织——结构稳定研究学会(SSRC)中惟一的一位终身会员。在国外出版并发行的国际性学报《结构工程进展》(英文)曾经用两页篇幅介绍他的事迹。他还应香港土木界的邀请,去香港做中国钢结构设计规范的学术讲座。

陈绍蕃教授能享有这样的盛誉与他精深的学术造诣是分不开的。他在1980年代表我国专家团成员参加了“国际标准组织167技术委员会”编写的《钢结构材料与设计》国际标准讨论会,并在会上发现国际标准草案中关于绕弱轴受弯的压杆在弯矩作用平面外的稳定计算采用等同于轴心压杆计算方法的明显错误。实际上,由于存在压力偏心或弯矩效应,在弯矩作用平面外失稳总是伴随扭转变形的,应按弯扭失稳模式计算。他的观点得到了与会国际专家的肯定,从而修改了原国际标准该项条款的错误。他综合研究生科研成果用英文撰写的支撑设计论文,被美国《钢结构设计规范》(AISC-LRFD-1999)列为参考文献。

陈绍蕃教授精通法语和英语,并能阅读俄文和德文的技术资料。他在国内外的重要期刊,国内的如《土木工程学报》、《建筑结构学报》、《建筑结构》、《工程力学》、《钢结构》等,国外的如《英国钢结构研究学报》、《法国钢结构杂志》、《新加坡钢结构杂志》、《美国结构稳定研究会技术年论文集》和《太平洋结构会议论文集》等,发表了大量学术文章。这些论文均对钢结构领域中的某一方面有实质性突破或有重大改进,每篇文章都有针对性地解决一个或若干个规范上没有解决的或人们认识不清的问题,绝非泛泛而谈,这一点是值得广大科研工作者学习的。陈教授治学非常严谨,在钢结构工程界有很高的声望,这种声望是深入人心的。他的同行们在研究中遇到不敢肯定的地方,在陈绍蕃教授那里总会得到满意的答案。在他们心中,陈教授懂得多、理解得透彻,因此尊重是由衷的。

尽管在工程界有巨大影响,但是陈绍蕃教授最大的成就恐怕还是作为一名教师。他擅长采用启发式的教学方法,充分发挥学生的主观能动性和创新性。他在学术研究上对学生要求很严格,但同时他对年轻学生在学术上取得的成绩与进步总是给予充分的肯定和鼓励。每当学生和年轻工程技术人员向他请教问题时,他总是十分耐心并深入浅出地给予解答。他经常为全国各地的研究生和青年学者审阅论文。在评审中,他总是那么认真,甚至对论文中的标点符号、错字漏句都一一提出,有时为了弄清楚论文中提出的观点,他还到图书馆查阅论文中提到的参考文献。陈教授这种实事求是、一丝不苟的科研精神,使曾受教于他的年轻学生和工程技术人员深受感动,他这种言传身教的科研态度深深地烙在年轻学者的心上,成为一批年轻学者在他们今后事业的发展道路上的一种无形精神财富和力量。陈教授是我国高校中结构工程专业房屋钢结构研究方向的第一位博士生导师,为国家培养了一批又一批的研究生,可谓是桃李满天下。他的许多弟子也先后成为博士生导师。

陈教授一直到1999年还在进行博士生的教育工作,并获得陕西省优秀博士生导师的称号。现在陈老先生已84岁高龄,但他仍时刻关注着世界钢结构的最新进展,经常查阅学术资料,并不断著书立说,在杂志上发表文章。值得一提的是,陈老先生80岁开始学习计算机,并很快掌握了计算机的基本操作,而且还利用因特网来加强与国际间的联系,通过网络来收发信息、传输照片。陈教授虽然已是80多岁的高龄,但每天仍坚持工作学习6小时左右,这种孜孜以求、活到老学到老和对钢结构事业的敬业精神是每一位科技工作者学习的榜样与楷模。

陈绍蕃教授性格平和,淡泊名利,一生获得了很多赞誉,多次获劳动模范称号以及各种荣誉证书,科研成果也屡屡获奖,但是在取得了如此巨大成绩之后却谦虚地说:“钢结构涉及的面很

广，我用大半生精力也只是对它的基本性能有所领会。”陈教授为人坦荡，温文儒雅，业余爱好音乐艺术、人文地理。他和夫人钱宇新女士几十年伉俪情深，互相搀扶着走过校园的情景已经成为生活中最感人的一幕。

在将结束本文之前，必须重点强调的是，我们并非试图列出也不可能全部列出陈绍蕃教授所有的成绩和事迹，而只是列出了其中一部分。无论这里谈到什么，这本《陈绍蕃论文集》和那些已经出版的著作和发表的文章以及工程师手中的规范、规程，才是对陈教授一生最真实的评价。

最后，衷心感谢陈绍蕃教授 60 年来为我国钢结构事业的发展做出的杰出贡献。希望陈教授和夫人健康长寿，也希望他的学术之树常青！

西安建筑科技大学

2003 年 7 月

目 录

序	
中国钢结构事业的开拓者——庆贺陈绍蕃教授从事土木工程 60 周年	
4M 撑杆式预应力钢吊车梁模型静力及动力试验报告	陈绍蕃 (1)
预应力撑杆式吊车梁动力系数的分析	陈绍蕃 (14)
圆形双层悬索屋盖设计中的几个问题	陈绍蕃 (25)
开口截面钢偏心压杆在弯矩作用平面外的稳定系数	陈绍蕃 (33)
T 形截面钢偏心压杆在弯矩作用平面外的稳定问题	陈绍蕃 (58)
工字形截面钢偏心压杆有塑性区时的弯扭屈曲	陈绍蕃 (73)
钢压杆绕弱轴受弯时的弯扭屈曲	陈绍蕃 (84)
偏心压杆弯扭屈曲的相关公式	陈绍蕃 (94)
钢压弯构件弯扭屈曲的研究	陈绍蕃 (110)
钢结构在反复动力荷载作用下的塑性设计	童根树 陈绍蕃 (120)
遵义铁合金厂重型桁架模型试验	宋延刚 陈绍蕃 (128)
钢压弯构件空间失稳的几个方面	陈绍蕃 (139)
充分利用钢结构的塑性性能	陈绍蕃 (147)
冷弯薄壁槽钢短柱局部屈曲后相关作用的弹塑性分析	郭彦林 陈绍蕃 (157)
单层空间钢框架模型拟静力循环荷载试验研究	段 炼 陈绍蕃 (169)
关于钢结构塑性设计的强度折减系数	杨应华 陈绍蕃 (176)
建筑钢结构在动力荷载作用下的性态	陈绍蕃 (185)
动力荷载作用下钢结构塑性性能的利用	陈绍蕃 (193)
宽腹板工形截面偏压构件平面内的承载能力	顾 强 陈绍蕃 (198)
弹塑性体的动力安定性(I)——连续体的动力安定定理	童根树 陈绍蕃 (206)
弹塑性体的动力安定性(II)——杆系结构的动力安定定理及其应用	童根树 陈绍蕃 (211)
宽腹板工形截面偏压杆的 $M-P-\Phi$ 曲线	顾 强 陈绍蕃 (216)
厚板焊接箱形截面柱残余应力的试验研究	顾 强 陈绍蕃 (228)
钢结构稳定设计的几个基本概念	陈绍蕃 (233)
冷弯型钢局部屈曲的相关性和卷边板件的有效宽度	陈绍蕃 惠 颖 (240)
循环荷载作用下钢结构滞回性能的数值模型	郝际平 陈绍蕃 (247)
角焊缝在快速荷载作用下的受力性能	于安林 陈绍蕃 申林 (253)
厚板焊接柱残余应力的有限元分析	顾 强 陈绍蕃 (257)
钢结构在循环荷载作用下的局部屈曲和低周疲劳的试验研究	郝际平 陈绍蕃 (267)
桁架受压腹杆的面外稳定和支撑体系	陈绍蕃 (279)
设计规范 GBJ 17-88 第五章修订建议	陈绍蕃 (288)

卷边槽钢梁受压翼缘畸变屈曲时的屈曲系数	苏明周、陈绍蕃 (298)
钢结构设计规范修订工作刍议	陈绍蕃 (304)
试论结构工程设计规范的发展	陈绍蕃 (308)
门式钢框架轻型化的技术措施	陈绍蕃 (314)
轻型钢结构变截面门式刚架的稳定计算	陈绍蕃 (321)
I 形截面钢构件腹板屈曲后强度利用	陈绍蕃 (331)
残余应力对卷边槽钢局部相关屈曲的影响	王海忠 陈绍蕃 (338)
初始缺陷对冷弯薄壁卷边槽钢梁局部相关屈曲的影响	陶 忠 陈绍蕃 (345)
门式刚架端板螺栓连接的强度和刚度	陈绍蕃 (353)
角钢、剖分 T 形钢压杆的弯扭屈曲(1)	陈绍蕃 (361)
角钢、剖分 T 形钢压杆的弯扭屈曲(2)	陈绍蕃 (366)
T 形截面压杆的腹板局部屈曲	陈绍蕃 (370)
卷边槽钢的局部相关屈曲和畸变屈曲	陈绍蕃 (374)
冷弯型钢板件相关屈曲和极限承载力	陈绍蕃 (382)
厂房框架柱平面外稳定计算的几个问题	陈绍蕃 (388)
钢结构设计中的变形问题	陈绍蕃 (395)
Inelastic Torsional-Flexural Buckling of Cold-formed Open Section Under Eccentric Load	Jang Dejin and Chen Shaofan (402)
Analysis of Inelastic Lateral-Torsional Buckling in Continuous Beam-Columns	Cuo Zaitian, Assoc Professor Duan Lian, Formerly G.S. and Chen Shaofan Professor (414)
Buckling of Transversely Loaded I-beam Columns ...	Lu Jingping, Guo Zaitian and Chen Shaofan (420)
Buckling of Laterally and Torsionally Braced Beams	Tong Gengshu and Chen Shaofan (428)
Main Features of the Chinese Specification GBJ 17-88	Chen Shaofan (439)
A Unified Approach for Multiple Lateral Bracing of Columns ...	Tong Gengshu and Chen Shaofan (446)
On the Efficiency of an Eccentric Brace on a Column and the Collapse of the Hartford Coliseum	Tong Gengshu and Chen Shaofan (454)
Elasto-Plastic Interaction Buckling of Cold-Formed Channel Columns	Guo Yanlin and Chen Shaofan (474)
Design for Stability: Some Basic Concepts	Chen Shaofan (492)
Design for Stability: Correct Use of Braces	Chen Shaofan and Tong Gengshu (500)
Concepts and Issues in the Out-of-Plane Buckling of Steel Beam-Columns	Chen Shaofan (515)
Experimental Study on the Slenderness of Plate Elements in Aseismic Structures	Chen Shaofan and Hao Jiping (530)
Research, Code and Design Implementation of Steel Structures in China	Chen Shaofan, Zhao Xiyuan and Hu Siyuan (538)
The In-plane Ultimate Load of I-section Beam-columns with Slender Web ...	Gu Qiang and Chen Shaofan (548)
Out-of-plane Behaviour of I-section Beam-Columns with Slender Web ...	Yang Yinghua and Chen Shaofan (566)

4M 撑杆式预应力钢吊车梁模型静力及动力试验报告

陈绍蕃

(西安冶金建筑学院钢木结构教研组)

一、试验目的

撑杆式预应力钢吊车梁节约钢材的指标很优越(比普通钢吊车梁省钢 28.5% ~ 35.1%)^[1]。为了能够把它推广到实际工程中去应用,必须通过模型试验来了解它的实际工作性能,1958 年年末我们曾经进行跨长 2m 的模型静力试验,试验结果表明模型的实际工作情况基本符合设计理论^[2]。由于吊车梁的荷载具有动力特性,有必要进行模型的动力试验,以观测整个结构及其各部分的工作情况。这次试验是在周期性振动荷载下进行的,在动力试验之前,曾进行静力试验,在张拉钢丝束阶段也对各部分应力和位移进行了观测和分析。

这次试验用的模型是针对动力试验的条件另行设计的,模型跨度等于 4m(图 1)。刚性梁用 16 号工字钢,钢丝只用一束,由 8 根 $\phi 5$ mm 的高强度钢丝组成(极限强度 108.8kg/mm^2),两端用锥形端杆和套筒夹紧,并借螺帽锚固。钢丝束轴线距工字钢轴线 345mm。刚性梁和整个吊车梁的高度都比过去的模型降低,以适应起振器的能力,做静力试验时,在刚性梁上翼缘平面设置了水平支撑体系。因为工字钢高度小,撑杆长度也不大。未设横向支撑。

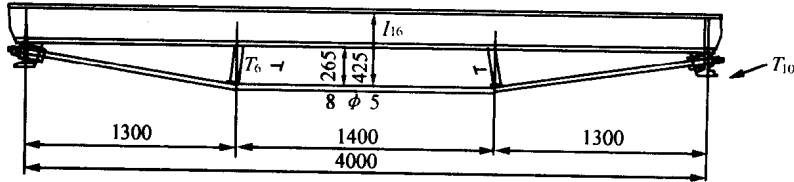


图 1 模型尺寸(单位:mm)

二、张拉钢丝束阶段的试验

由于钢丝束锥形端杆拔紧时各根钢丝的长度控制得不十分严密,存在着钢丝束松紧程度不一的问题,在试验开始时,曾试图测定各根钢丝在张拉时的受力情况,所用仪器为杠杆式引伸仪七具,分别观测张拉时七根钢丝的应变,因为这些仪器借自院内外各单位,用前未经校正,并且钢丝直径小,仪器难于固定得合乎理想,所得读数不够准确,虽然经过把认为准的几个仪器先后放在不同的钢丝上,也只能得到一个概略性的结果,即钢丝 1 号、2 号、4 号、5 号、7 号工作比较正常,其中 1 号、2 号、7 号应力比较接近,大约超过平均应力 10%,4 号钢丝的应力又比 1 号钢丝大 10% ~ 20%,钢丝编号见图 2。

在考察钢丝束工作情况的同时,曾经用千分表现场测量刚性梁各部分和撑杆端部的位移,在反复张拉和放松的过程中,整个结构的工作情况是正常的,竖向挠曲线呈对称的圆滑线,在放松后挠曲线基本恢复原来位置。

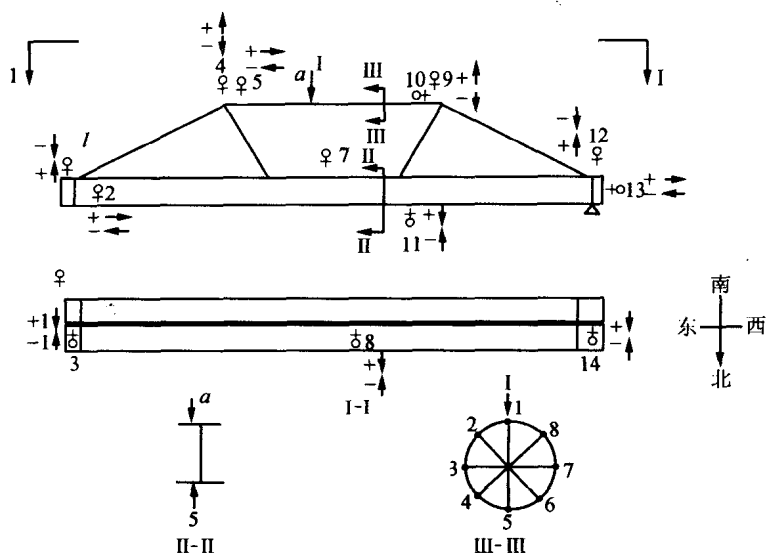


图2 仪表布置图

另外,还曾经在上一根钢丝的三段中安设杠杆式引伸仪,观测钢丝束和撑杆间摩擦的影响,所得读数也不甚准确,但可以得出结论:钢丝各段应力相差不大,最多不超过10%(表1)。在把钢丝应变换算成应力时,弹性模量取 $E = 1.8 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ (供料单位所提资料是 $1.79 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)。

表1 1号钢丝张拉时各段应力比较(单位: kg/cm^2)

次数	东 段	中 段*	西 段*
第一次	1485	1240	1440
第二次	1440	1280	1370

* 中段、西段均由两个仪器测定,表列数字是平均值。

钢丝束张拉设备是50t普通预应力油压千斤顶,我们的钢丝束截面面积很小,预拉力只有3t,需要油压力仅 19.4 kg/cm^2 。油压表指针在加压时跳动很厉害,并且在压力低时表的读数不很精确,根据这些情况,我们决定根据挠度来控制预加压力,并由引伸仪所给的应力和油压表的读数来校核。仪表布置示于图2,张拉时油泵压力缓慢增加,并在达到需要压力的一半时保持压力稳定,记录仪表的读数,锚固螺帽借掣轮扳钳扳紧,然后再记录读数,千斤顶完全松开后,预加的拉力略有损失,图3表示张拉阶段的挠曲线,包括千斤顶松开前后及1/2压力的情况,梁跨度中央的最后挠度是8.02mm,比原设计的7.96mm大1%。从挠度的变化来看(从8.18mm减到8.02mm),预应力损失为2%。根据从引伸仪记录算得的应力来看,预应力值确实比原设计中的计算应力稍大(表2),考虑到1号钢丝应力超过平均值约10%,实际预加的拉力比需要的3t相差不多。油压表指针最大读数和跨中挠度大致成直线关系(图4)。

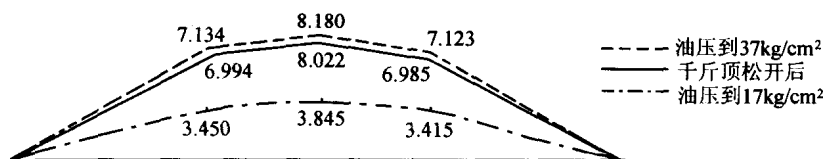


图3 张拉时的挠曲线

表 2 张拉阶段引伸仪记录和应力

项目	仪 1	α	σ
油压 0	1.10	3.97	2.02
油压 (17kg/cm ²)	2.40	3.58	2.35
油压 (37kg/cm ²)	3.50	3.12	2.65
千斤顶松开后	3.50	3.13	2.65
测得应力/(kg/cm ²)	+2160	-893	+661
计算应力/(kg/cm ²)	+1910	-848	+619
实测应力超出计算应力百分数	13	5	8.5

工字钢在预加拉力时还产生少许侧向挠曲,这是制造不够精确,钢丝束锚固中心没有恰好位置在工字钢中心平面的缘故。千斤顶松开后跨中侧向挠度是 0.737mm。

对于预应力损失我们还曾做了专门试验,发现预拉力越大,则损失的百分比越小,仅在预拉力很小(约 1t)时,损失才超过 10%(图 5)。

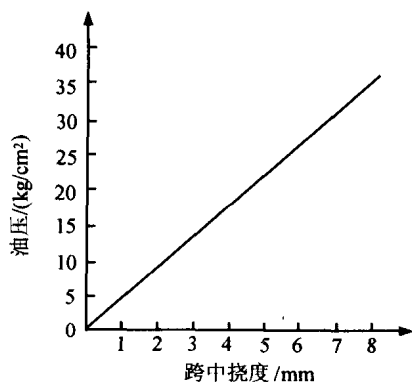


图 4 跨中挠度与油压的关系

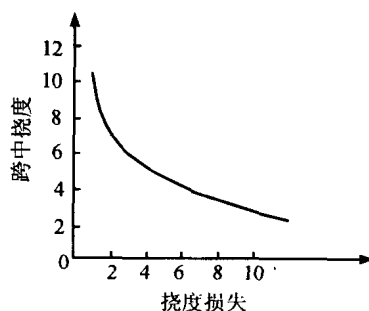


图 5 跨中挠度和它的损失

根据观测的结果和以上的分析,可以肯定梁在张拉阶段的工作是正常的,所以预拉力接近模型设计所需要的数值而稍有超过。梁在制造时精密度没有特别严格控制,张拉设备只是高压油泵和普通预应力千斤顶。模型预应力损失不大,油压表读数和跨中挠度呈直线关系,在实际工程中完全可以由油压表来控制预加拉力。因此,这种结构在实际施工时并不困难。

三、静力荷载试验

静力试验的荷载加在吊车梁跨度中央,共 4.5t,等于模型梁的设计荷载,加载的方式是利用荷重块和重盘,通过杠杆把荷载加在梁上(图 6)。梁支撑于砖墩上,一端有刀口支座,另一端为辊轴支座。工字梁上翼平面内设有水平支撑。试验时加载与卸载都分四个阶段,每次为设计荷载的 1/4,即 1125kg,正式试验共进行两个循环,所用仪器有千分表 16 个和杠杆式引伸仪 9 个,分别测定各部分的位移和应变。仪表布置如图 7。读仪表时间在加载或卸载后 10min(开始时曾经在加载后及加载 20min 后分别读两次,读数差别极小,以后改为 10min 后读一次)。在正式试验前曾经做初步加载观察。

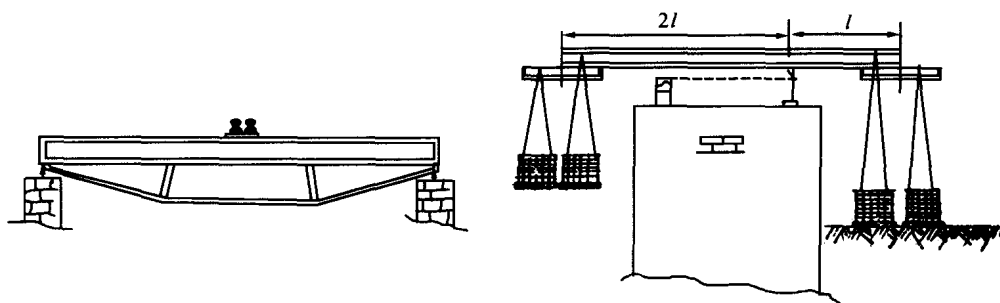


图6 加载方式

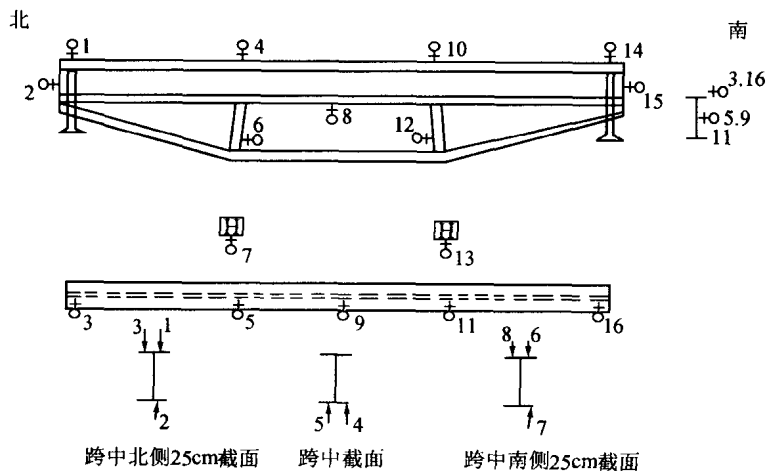


图7 静力试验仪表布置

1. 梁竖向挠度

在初步加载观察时，梁跨中央的挠度是 13.79mm，比理论计算值 13.4mm 稍大，卸载后并有剩余变形 2.35mm，以后两次试验，梁跨中央的挠度减少到 12.92mm 和 13.29mm，比理论计算值小 4% 和 1%，卸载后不仅没有剩余变形，并且发生微小的反向挠曲。这是和支座摩擦力的作用相符合的。梁的挠曲线呈对称的圆滑曲线(图 8)。这些情况都说明梁的工作是正常的。

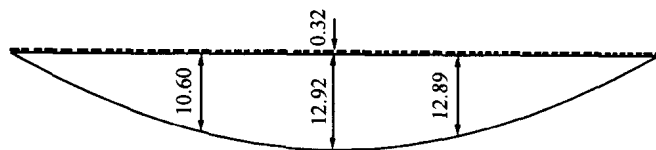


图8 模型的挠曲线

2. 梁侧向挠曲和扭转

因为结构在制造时有少量偏差，模型在荷载作用下产生侧向挠曲和扭转，第一次试验所得梁的出平面挠曲线如图 9，中央最大挠度 1.31mm 相当于跨长的 $\frac{0.33}{1000}$ ，在卸载后基本消失，侧向挠度的数值不大，根据纯弯曲的情况来计算，跨度中央由于侧向挠曲产生的应力为 $\pm 60\text{kg/cm}^2$ ，对梁

的工作影响很小。侧向挠曲产生的原因，估计是钢丝束轴线没有在工字钢的中心平面内，因而对它起侧向偏心的压力作用。

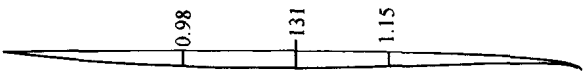


图9 出平面挠曲

从撑杆处梁高度中央的侧移和撑杆下端的侧移来看，北梁截面有小量扭转变形，从北侧撑杆来看，梁扭转角约为 $\frac{1}{200}$ ；从南侧撑杆来看则为 $\frac{1}{500}$ ，两者方向不同(图 10)，约束扭转将使工字钢产生法向应力，同时撑杆还可能受弯。由于变形不大，对梁工作的影响也不大，这种现象估计是由于撑杆轴线在侧向倾斜所造成的。

为了把侧向挠曲和扭转的影响限制在适当范围内，有必要制订关于预应力梁制造精确度的补充规定。同时，在使用时还应注意适当布置支撑体系。

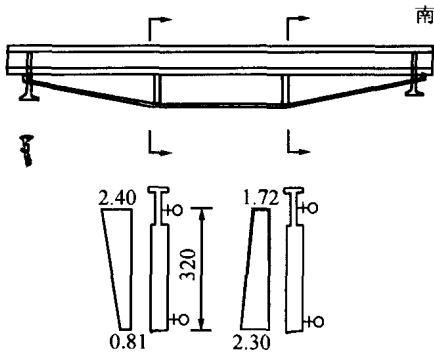


图10 模型扭转变形图

3. 应力

我们分别测读了工字钢三个截面上 8 个点的应变及一根钢丝的应变，这三个截面是：梁跨中央及距离中央 25cm 处。所测钢丝束是中段最下面一根，换算结果，应力一般都接近理论计算值。工字钢的应力都低于理论值，除个别测点外，大都在理论值的 80% 左右，钢丝应力第一次试验为理论值的 99%，第二次为 104%。表 3 给出两次试验加载和卸载时的应力数值及与理论值的比较。表 3 中所依据的理论计算没有包括侧向挠曲的影响。如果把该影响计入，那么百分数还会更趋于一致一些。

表 3 静力荷载下的应力

测点号数 部位 加卸载		工字钢应力/(kg/cm ²)								钢丝应力
		1	2	3	4	5	6	7	8	
第一次	加载	-1620	+1380	-1630	+1560	+1450	+1580	-790	-1420	+2560
		83	85	84	78	72	81	49	73	99
	卸载	-1416	+1360	-1680	+1600	+1510	-1640	+1360	-1730	+2600
		73	84	87	80	75	85	84	89	100
第二次	加载	-1700	+1360	-1730	+1680	+1600	-1700	+1130	-1630	+2700
		87	84	88	84	80	87	70	83	104
	卸载	-1640	+1370	-1740	+1660	+1570	-1700	+1420	-1680	+2600
		85	85	89	83	78	87	88	86	100

注：横线上表示测得应力，横线下表示理论值的百分数。

4. 变位与荷载关系

上面曾经提到过，加载和卸载都分四次进行。两次试验结果，都出现这样一种情况，即加载

时第四阶段增加的挠度比前三个阶段大，而卸载时第一阶段减少的挠度比以后三个阶段也大(图 11)。这种现象并不说明结构在加载的第四阶段进入塑性工作，而是由其他原因造成的。因为从杠杆式引伸仪的读数来看，应力变化也呈现同样规律，如果把梁中央截面上工字钢下翼缘的应力和该截面的位移画成关系曲线，那么所得结果基本上是一直线(图 12)。充分说明梁的工作一直是弹性的。第四阶段挠度大，可能是杠杆力臂发生变化的结果。

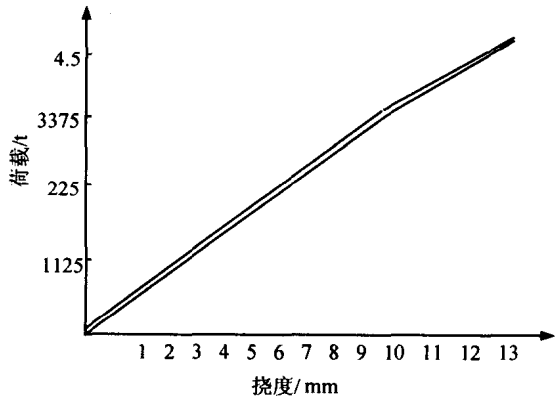


图 11 荷载与挠度关系

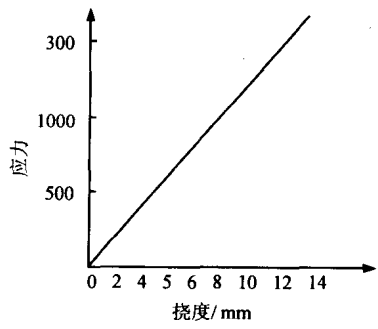


图 12 应力与挠度关系

5. 静力试验小结

从以上试验结果的分析来看，梁在设计荷载下的工作是弹性的，测得的挠度和应力与理论值出入不大，因此静力荷载下结构的工作是可靠的。虽然在荷载作用下呈现侧向挠曲和扭转变形，影响并不严重。不过在实际使用这种新型结构时，对制造精确度应该订出必要的补充规定，同时适当布置支撑来防止这些变形。

四、动力荷载试验

1. 试验情况

模型的动力荷载，是按正弦曲线变化的简谐振动，由专门的起振器产生，起振器安置在模型梁跨度中央，它由两个带有偏心块的圆盘组成，由直流马达带动。转速借电阻箱来调节，最大速度 1120r/min，相应的最大振动力是

$$P = mr\theta^2 = 306\text{kg} \tag{1}$$

式中： m 为偏心块的质量 $(= \frac{2.3}{981} \frac{\text{kg} \cdot \text{s}^2}{\text{cm}})$ ； r 为偏心块的转动半径 $(= 9.5\text{cm})$ ； θ 为偏心块的角速度 $(= 117.2 \text{ 圆周角/s})$ 。

模型梁仍然置于砖墩上，由于砖墩用黄泥砌成，特别在静力试验最大荷载 4.5t 时把锚栓螺帽拧紧，使砖墩在动力试验前预加压力。

试验目的在于分析撑杆式预应力吊车梁在振动荷载下的工作情况，包括整个结构在强迫振动时的频率、振幅、自由振动频率、阻尼系数和钢丝束的局部振动情况。

试验所用记录设备是两台盖格尔(Geiger)式万能振动记录仪。在观测整个结构的振动情况时，一台仪器固定在和结构完全分开的支架上，利用传动杆记录工字钢中央的挠度变化；另一台则直