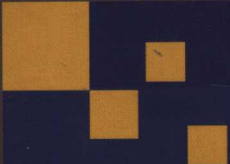


土木工程结构试验与检测技术 暨结构试验课教学 研讨会论文集



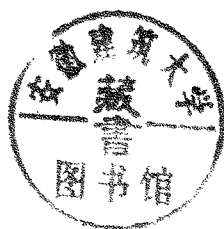
陈志鹏 王宗纲 聂建国 主编



中国建筑工业出版社

土木工程结构试验与检测技术 暨结构试验课教学研讨会 论文集

陈志鹏 王宗纲 聂建国 主编



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程结构试验与检测技术暨结构试验课教学研讨会论文集/陈志鹏,王宗纲,聂建国主编. —北京:中国建筑工业出版社, 2006

ISBN 7-112-08705-8

I. 土... II. ①陈... ②王... ③聂... III. ①土木工程-工程结构-结构试验-学术会议-文集②土木工程-工程结构-检测-学术会议-文集 IV. TU317-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 140428 号

本书收录“土木工程结构试验与检测技术暨结构试验课教学研讨会”论文共 64 篇。分为三个部分:第一部分,结构试验与试验技术;第二部分,结构试验课教学;第三部分,实验室建设与设备研制。

本书可作为从事土木工程结构试验与研究的专业人员,高等学校教师、本科生、研究生,以及有关领导和从事实验室建设与管理人员的工作或学习参考书。

* * *

责任编辑:王 跃 吉万旺

责任设计:赵 力

责任校对:张树梅 王雪竹

土木工程结构试验与检测技术 暨结构试验课教学研讨会论文集 陈志鹏 王宗纲 聂建国 主编

*

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

北京密云红光制版公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:26½ 字数:660千字

2006年12月第一版 2006年12月第一次印刷

印数:1—1000册 定价:88.00元

ISBN 7-112-08705-8

(15369)

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)

本社网址:<http://www.cabp.com.cn>

网上书店:<http://www.china-building.com.cn>

土木工程结构试验与检测技术 暨结构试验课教学研讨会

2006年12月23日—24日

北京 清华大学

主办单位：清华大学土木工程系

结构工程与振动教育部重点实验室

中国土木工程学会教育委员会

土木工程结构试验技术专业委员会筹备组

承办单位：清华大学土木工程系

土木工程结构试验与检测技术 暨结构试验课教学研讨会

学术委员会 (按姓氏笔画排列)

主 任：陈肇元
委 员：卫 军 王 跃 王柏生 田石柱 田仲初 过镇海
江见鲸 孙进忠 闫维明 刘晓光 宋 彧 李 明
何玉珊 何亚柏 张兴虎 吴子燕 余志武 陈忠范
周锡元 周福霖 欧进萍 林松涛 宗周红 范立础
聂建国 曹志坚 董世民 熊立红 薛伟辰 冀德学
濮存亭

组织委员会 (按姓氏笔画排列)

主 任：聂建国
委 员：王宗纲 辛克贵 宋二祥 邱法维 陈志鹏 袁 驷
钱稼茹
秘 书：王宗纲 张 琦

前 言

由清华大学土木工程系、清华大学结构工程与振动教育部重点实验室、中国土木工程学会教育委员会、土木工程结构试验技术专业委员会筹备组等四单位联合主办，清华大学土木工程系承办的“土木工程结构试验与检测技术暨结构试验课教学研讨会”，经过将近一年的酝酿与筹备，即将于2006年12月23日—24日在清华大学召开。根据报名情况，全国各地高等院校、科研院所、工程检测机构、仪器设备生产厂家等单位的百余名专家、教授将聚集在一起，对大家感兴趣的问题进行研讨。参会人数大大超过了原来的计划人数，说明这个会议的主题是受到大家欢迎的。

随着科学研究的深入开展，对结构试验与检测技术提出了更高的要求。交流经验，研讨问题，在已经取得成绩的基础上如何更好地前进与发展？这是专家们需要讨论的内容。与此同时，结构试验又对仪器设备提出了更高的期待。近几年，各高校、科研院所与生产厂家结合，在新仪器设备的开发研制上取得了很大的进展。从本次收到的论文来看，设备的研制又有了新的进展。我们也看到，有的单位充分利用实验室的原有设备，经过挖潜改造，增加功能，满足了科学研究的需要，这是很有意义的一项工作。很重要的一点是：科学研究大部分要在实验室中进行，因此实验室建设也是大家关心的问题。如何建设？如何发展？如何发挥实验室的综合效益？这是很值得思考的问题。除此之外，高等学校的实验室又承担着“结构试验”课程的教学任务，“结构试验”教学的现状及教学改革所面临的新问题是什么？如何培养学生的动手能力与综合能力？如何不断引入新的教学内容？这些也是担任“结构试验”课程教学的教师迫切希望探讨的问题。

本次研讨会，将集中在三个问题上进行研讨，因此论文集也分为三个部分：第一部分，结构试验与试验技术；第二部分，结构试验课教学；第三部分，实验室建设与设备研制。总共收录论文64篇。希望通过研讨会的召开与论文集的公开出版发行，推动上述各项工作的开展，并取得更大的成绩。

为了开好这次研讨会，有关厂家、公司以及中国建筑工业出版社对会议给予了很大的支持与帮助，在此表示衷心的感谢。

预祝会议圆满成功。

编者

2006.11

目 录^①

第一部分 结构试验与试验技术

一、广州国际会议展览中心施工过程中的应力观测	徐忠根	杨泽群	(2)
二、环孔法测试混凝土工作应力试验研究	刘永森	王柏生	沈旭凯 (7)
三、磁致伸缩位移传感器多通道数据采集及其应用	刘 煦	徐 筑	(13)
四、十一层 ZW 住宅子结构 8 度抗震试验方案	王士凤	祝英杰	丁枫斌 曾在平 (20)
五、结构拟动力试验计算方法研究	李 昀	鲁四平	(28)
六、瑞雷波在工程无损检测中的应用	田小甫	孙进忠	陈 祥 (35)
七、薄壁桥台开裂检测与分析		王玉田	(42)
八、混凝土结构裂缝深度的检测	濮存亭	孙刚柱	(48)
九、倒转收进超限高层建筑结构振动台试验模型			
设计与制作	单大卫	韩建平	卢文胜 盛学文 (57)
十、带高位转换层高层建筑的模型振动台试验和			
结构分析	钱稼茹	吴美良	方小丹 闫维明 (68)
十一、带框无砂混凝土墙体低周反复荷载试验研究			方侠敏 (79)
十二、应用 MTS “计算命令控制”的拟动力试验	田石柱	王大鹏	张洪涛 (87)
十三、工程结构现场检测仪器的的发展与应用		常志红	濮存亭 (92)
十四、某超限高层建筑振动台试验模型的			
设计与制作	张洁静	陈 跃	卢文胜 宣伟慧 (97)
十五、探地雷达基本原理及浅层结构探测应用		柳 畅	濮存亭 (105)
十六、深圳市在役建筑物结构质量安全			
状况及检测鉴定方法	林爱莲	甘 翔	遇平静 (113)
十七、热力管道直埋敷设固定墩负荷试验研究	苏 丹	唱锡麟	(120)
十八、雷达无损检测在混凝土结构中的应用	邓思华	何玮珂	(128)
十九、一个体外预应力增强装置在结构试验中的应用案例		唱锡麟	苏 丹 (133)

① 分类目录下的论文以收到的先后顺序排列。

二十、钢筋混凝土结构加速锈蚀试验方法评述	徐 港 卫 军 张克强 李鹏程	(135)
二十一、CNP 1000 安全壳结构动态试验模型的设计与制作	程大业 林松涛 杨 林 谢永金	(140)
二十二、某侧向弯曲预应力混凝土屋架荷载试验	王 龙 罗维刚	(146)
二十三、佛山东平大桥静载试验分析	田仲初 马凤杰 彭 涛 岳建彬	(152)
二十四、应变测试技术在某装配式结构试验楼现场试验中的应用	张季超 秦 亮	(158)
二十五、利用反力墙装置对空间复杂异型节点的加载方案设计	邱志恒 张季超	(164)
二十六、超载铁路桥梁剩余承载力检测与评估	狄生奎 项长生	(171)
二十七、轻型木结构抗震性能试验研究	李翰伯 卢文胜 倪 春	(177)
二十八、某整体平移工程全过程监测	刘建宏 卢文胜 蓝戊己 尹天军	(185)
二十九、混凝土强度现场检测技术若干问题 试验研究	杨文平 杨 勇 陈治平 谢亿平	(193)
三十、填充开缝钢板墙框架模拟地震振动台 试验研究	赵作周 肖 明 柯江华 钱稼茹	(200)
三十一、基于静态高精度数据采集器 IMP 的 DX 应力应变测试系统在土木工程试验中的应用	孙兆威	(208)
三十二、某会展中心大跨交叉钢-混凝土组合楼盖 振动实测与分析	王宗纲 庄 萌 聂建国 陈志鹏	(215)
三十三、独立式管道支架的加固设计	曹芙波 赵根田	(222)

第二部分 结构试验课教学

三十四、如何在建筑结构试验教学中提高学生的学习兴趣 培养学生的综合能力	马立国 李 强	(228)
三十五、结构试验课程教学改革所面临的新问题	李琮琦	(232)
三十六、结构实验教学的现状及思考	杨树标 高天宝 闫亚光 安新正	(236)
三十七、开放实验室 开设跨课程的综合结构技能实验的 尝试与研究	黄博生 彭亚萍	(240)
三十八、提高学生对试验课教学的兴趣和培养动手能力	张玉敏	(245)
三十九、建筑结构试验课教学实验内容改革尝试	冀德学	(251)
四十、建筑结构试验课的多媒体教学实践	石 晶	(255)
四十一、开展教学改革,提高土木工程结构实验教学质量	薛伟辰 黄永嘉	(258)

四十二、有限元软件在结构试验实验教学中的应用	刘清山 孔德志 吴卫华	(263)
四十三、土木工程结构试验课程的教学改革与实践	李保德 张季如 冯仲仁	(268)
四十四、云纹干涉法测试技术在结构实验 课中的应用	李砚波 迟冰 罗至善 刘杰	(275)
四十五、混凝土配合比设计实验教学方法探讨	曹辉	(281)
四十六、结构模型扫频试验课程教学方法探讨	张贵文	(286)
四十七、桥梁结构荷载试验课程教学方法研究	项长生 余孝穷	(292)
四十八、建筑结构试验课程的危机与对策初探	罗维刚	(297)
四十九、结构试验组织程序特点分析	宋 彧	(304)
五十、结构试验课程中几个名词的特点分析	宋 彧	(311)
五十一、结构试验课教学的现状与改革	张志恒 石建军 陈振富	(317)
五十二、土木工程数值模拟教学试验的应用	杨 勇 杨文平 陈治平	(321)
五十三、通过结构试验课的综合试验提高学生的科研能力	王宗纲 张 晶	(328)

第三部分 实验室建设与设备研制

五十四、实验室建设、发展与资质认证	董世民	(334)
五十五、加强建设,深化改革 提高实验室的水平和效益	傅秀芬 闻星火 黄 乐	(339)
五十六、高等学校实验室开展认证与认可的几点体会	张 晶 陈志鹏	(346)
五十七、多功能电液伺服加载试验系统和地震模拟 振动台台阵系统	周锡元 闫维明 黄浩华	(353)
五十八、大型结构多功能空间加载装置的 研制	清华大学结构工程研究所 北京佛力系统公司	(364)
五十九、大型重载板式静(液)压支承二维跟动装置 的研究	吴 勇 王宗纲 金同乐 郭新伟 苏静林	(371)
六十、混凝土双轴徐变仪研制和实验研究	李鹏辉 胡 昱 高 虎 陈凤岐	(377)
六十一、远程网络化拟动力实验系统 研究	邱法维 傅 炳 杜文博 于立成 侯 杰 尹谦钧	(383)
六十二、空间管节点试验装置改装方案的探讨	王 闾 张季超	(396)
六十三、IMPDas 数据采集系统的改进和升级	王际芝 黄 勇	(402)
六十四、一种适用的拟静力实验设备—拟静力伺服 液压加载系统	代云富 黄 勇 陈正华	(411)

第一部分 结构试验与试验技术

一、广州国际会议展览中心施工过程中的应力观测

徐忠根 杨泽群

(广州大学工程抗震研究中心, 广东 广州 510405)

摘要: 大跨度空间结构的施工安全是非常重要的。本文对广州市的标志性工程、首期工程投资近 40 亿元人民币的大跨度空间结构——广州国际会议展览中心的结构施工安全的控制进行了详细的论述。该工程的施工安全控制重点是: 跨度为 126.6m、拉索外径为 16cm 内含 337 根 $\phi 7$ 冷拔低碳钢丝的主馆预应力空间桁架的张拉控制。

关键词: 施工控制; 监测; 预应力; 大跨度空间结构; 应力

1 工程概况

广州国际会议展览中心位于广州国际博览城内, 占地 70 万 m^2 , 总建筑面积约 50 万 m^2 , 东临琶洲塔公园, 西临华南快速路, 南临新港东路和万亩生态果园, 北临珠江, 环境优美, 交通通达, 场地平坦。

本工程钢结构由 8 部分, 即: 展览大厅屋盖钢结构 (包括张弦桁架、支撑、檩条、马道)、珠江散步道屋盖钢结构 (包括钢桁架、支撑、檩条)、东入口钢架、卡车通道屋盖钢架结构 (包括支撑、檩条)、卡车坡道屋盖钢架结构 (包括支撑、檩条)、展览大厅幕墙钢框架、珠江散步道幕墙钢框架、钢天桥。钢结构工程总量达 13131kg。

本工程总高度约为 39m, 南北长 396m, 东西长 525m。展览大厅为 2 层, 层高 15m, 屋顶桁架为张弦桁架, 跨度为 128m, 比上海浦东国际机场航站楼 88m 跨度张弦桁架大了近一半。

本工程施工难度高、工期紧, 自 2001 年 8 月 30 日提供施工图纸起至 2002 年 6 月 30 日全部钢结构、屋盖板系统和玻璃幕墙完成。其中 2001 年 12 月 28 日开始安装, 2002 年 4 月 30 日展览大厅屋盖安装完成。

2 测试方案

2.1 测点布置原则^[1~3]

钢屋架应变测试应在钢屋架制作安装过程中穿插进行。在测点布置过程中既要有重点地

作者简介: 徐忠根 (1965—), 男, 浙江人, 副教授, 博士, 主要从事钢结构、结构隔震研究;

杨泽群 (1957—), 男, 湖北人, 讲师, 主要从事结构试验研究。

选择张弦桁架的关键部位杆件，又要考虑在整个施工过程中的量测施工可行性及测点应变片及其连接导线的引出位置等的保护措施，又不能妨碍钢屋架及其上部屋面结构的施工安装。

由工程概况可见，钢结构部分中张弦桁架钢杆件的应变及张拉索力的测试应是施工监测的重点，同时可以在其他部位布置少量测点。

2.2 测点布置及编号

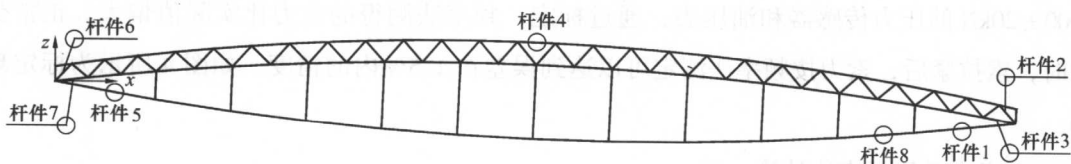


图1 测试杆件



图2 现场测试照片



图3 施工中的钢屋架

施工时桁架对应编号与桁架分区编号，共 387 个应变测点（编号表略）。由西向东分 5 个区，分别记为 A、B、C、D、E，每个区有 6 榀桁架，由西向东记为 1、2、3、4、5、6。

应变测点编号按施工的顺序编桁架的号，截面上的编号按上弦（先东后西）、斜腹杆、下弦、竖杆的顺序进行（截面的编号表略）位置如图 1。图 2 和图 3 为测试现场的照片。

2.3 仪器及测量方法

1) 采用标距为 15mm 电阻应变片。

2) 应变仪采用靖江东华测

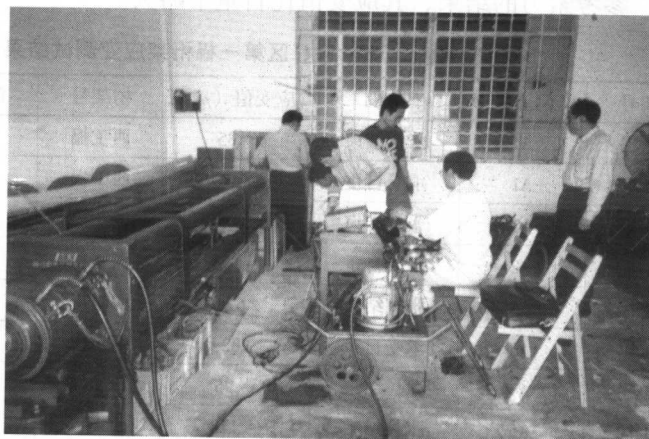


图4 索力测试标定现场

试技术开发有限公司生产的 DH3817 动静态应变测试系统。

3) 采用加速度传感器, 通过测量索的振动频率换算 (计算机自动执行) 求得索拉力。分别采用了靖江东华测试技术开发有限公司生产的 DH5937/5938 动态信号测试系统和北京东方噪声测试技术研究所开发的 DASP 数采系统进行分析。

4) 索力测试标定时采用截面积为 140mm^2 的 $7\phi 5$ 钢筋索, 反力架测力装置采用量程为 $1000 \pm 20\text{kN}$ 的压力传感器和油压表, 通过标定, 频率法测得的索力比实际值偏大。正常受力时, 索拉紧后, 索力按频率法测定可以达到误差在 1.5% 内的精度。如图 4 所示为标定现场。

5) 索力采用频率法计算, 即:

$$F = \frac{4Ml^2 f^2}{n^2} \quad (1)$$

式中 F ——索力;

M ——单位长度索的质量;

l ——索长;

f ——索的第 n 阶振动频率。

3 应变测试结果

预应力张拉完后, 结构承受自重及承受全部荷载后, 典型的 C 区各榀桁架的应变值如表 1 (由于篇幅所限, 表中仅列第一榀数据), 由表可见张拉完成后应变值在 $(-604 \sim 344) \mu\epsilon$ 范围, 结构承受自重时应变值在 $(-951 \sim 637) \mu\epsilon$ 范围 (实际于 2002 年 7 月中旬进行测试)。由于施工过程中导线严重损坏, 结构在全部荷载作用下的应变未能测得, 部分明显不合理, 不在此给出, 参考索力的结果, 其应变值比自重下略大。

C 区第一榀桁架应变测试结果

表 1

桁架号	测点号	阶段	应变值 ($\mu\epsilon$)	桁架号	测点号	阶段	应变值 ($\mu\epsilon$)
西 1 榀	A1	张拉结束	-35	西 1 榀	A6	张拉结束	-43
西 1 榀	A1	承受自重	-470	西 1 榀	A6	承受自重	-500
西 1 榀	A2	张拉结束	3	西 1 榀	B1	张拉结束	290
西 1 榀	A2	承受自重	-413	西 1 榀	B1	承受自重	-300
西 1 榀	A3	张拉结束	67	西 1 榀	B2	张拉结束	-15
西 1 榀	A3	承受自重	282	西 1 榀	B2	承受自重	-479
西 1 榀	A4	张拉结束	-96	西 1 榀	B3	张拉结束	259
西 1 榀	A5	张拉结束	-118	西 1 榀	B3	承受自重	-411
西 1 榀	A5	承受自重	-502	西 1 榀	B4	张拉结束	49

续表

桁架号	测点号	阶段	应变值 ($\mu\epsilon$)	桁架号	测点号	阶段	应变值 ($\mu\epsilon$)
西 1 榀	B4	承受自重	- 119	西 1 榀	B10	承受自重	- 32
西 1 榀	B5	张拉结束	- 39	西 1 榀	B11	张拉结束	120
西 1 榀	B5	承受自重	100	西 1 榀	B11	承受自重	3
西 1 榀	B6	张拉结束	- 113	西 1 榀	B12	张拉结束	- 141
西 1 榀	B6	承受自重	- 118	西 1 榀	B12	承受自重	52
西 1 榀	B7	张拉结束	- 12	西 1 榀	C1	张拉结束	- 124
西 1 榀	B7	承受自重	- 5	西 1 榀	C2	张拉结束	80
西 1 榀	B8	张拉结束	46	西 1 榀	C3	张拉结束	- 142
西 1 榀	B8	承受自重	174	西 1 榀	C4	张拉结束	49
西 1 榀	B9	张拉结束	- 540	西 1 榀	C5	张拉结束	未平衡
西 1 榀	B9	承受自重	- 14	西 1 榀	C6	张拉结束	- 51
西 1 榀	B10	张拉结束	- 219				

4 索力测试结果

索力测试按频率法进行^[4,5], 取每延米质量 101kg, 由测试到的索振动频率计算得到索力。其结果如表 2 所示 (由于篇幅所限, 表中仅列西 1~6 榀的数据)。由表可见, 初张拉的索力为 2081~2389kN; 承受结构自重后的边跨索力为 2968~4026kN, 跨中最大索力为 4307kN; 承受全部荷载后的边跨索力为 3474~3883kN, 由于工作条件所限, 所测跨数较少, 但对应各跨均比承受自重略大, 说明预应力有松弛现象。由设计资料可知, 预应力索的破断力为 20000kN, 且由标定结果可见, 按频率法测到的索力是偏大的, 因而该索是安全的。

索力测试结果

表 2

桁架编号	阶段	索位置	索长 (m)	振动频率 (Hz)	索力 (kN)
西 1 榀	张拉后	北 1 跨	12.95	5.62	2140
西 1 榀	受自重	北 1 跨	11.86	7.83	3484
西 1 榀	受自重	南 1 跨	12.18	7.61	3471
西 2 榀	张拉后	北 1 跨	12.95	5.664	2174
西 2 榀	受自重	北 1 跨	11.91	8.03	3695
西 2 榀	受自重	南 1 跨	12.23	7.8125	3688
西 3 榀	张拉后	北 1 跨	12.96	5.664	2177
西 3 榀	受自重	北 1 跨	11.87	7.81	3472
西 3 榀	受自重	南 1 跨	12.29	7.612	3536
西 4 榀	受自重	北 1 跨	11.95	7.83	3537
西 4 榀	受自重	南 1 跨	12.25	7.83	3717
西 5 榀	张拉后	北 1 跨	12.95	5.68	2186
西 5 榀	受自重	北 1 跨	12.04	8.03	3776
西 5 榀	受自重	南 1 跨	12.18	7.83	3675
西 6 榀	张拉后	北 1 跨	12.96	5.800	2283
西 6 榀	受自重	北 1 跨	11.96	7.83	3543
西 6 榀	受自重	南 1 跨	12.26	7.44	3361

5 结论

通过对广州国际会议展览中心屋盖钢结构的应变和索力观测,可以得到如下结论:

- 1) 结构在张拉阶段的应变值在 $-604 \sim 344 \mu\epsilon$ 范围;
- 2) 结构承受荷载时应变值在 $-951 \sim 637 \mu\epsilon$ 范围 (实际于 2002 年 7 月中旬进行测试);
- 3) 频率法测试到初张拉的索力为 $2081 \sim 2389 \text{kN}$;
- 4) 承受结构自重后的边跨索力为 $2968 \sim 4026 \text{kN}$, 跨中最大索力为 4307kN ;
- 5) 承受全部荷载后的边跨索力为 $3474 \sim 3883 \text{kN}$;
- 6) 由于工作条件所限, 所测跨数较少, 但对应各跨均比承受自重略大, 说明预应力有松弛现象;
- 7) 由设计资料可知, 预应力索的破断力为 20000kN , 且由标定结果可见, 按频率法测到的索力是偏大的, 因而该索是安全的。

参考文献

- [1] 张宇江, 徐忠根, 陈荣毅. 施工支撑拆除对大跨壳形结构影响的研究与分析. 建筑施工, 2001, 23 (4) 230 - 232.
- [2] 徐忠根, 陈荣毅, 肖振宇. 大跨空间结构施工支撑拆除影响的试验研究. 广州建筑, 2001, 29 (6) 2 - 4.
- [3] 王恩宏, 徐忠根, 陈荣毅. 广州国际会议展览中心卡车通道屋面钢结构施工安装质量控制. 广州建筑, 2002, 30 (a) 1 - 4.
- [4] 骆宁安, 王卫锋, 韩大建. 广州体育馆拉索索力测试方法及其应用. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2002, 30 (2) 73 - 75.
- [5] 方志, 张智勇. 斜拉桥的索力测试. 中国公路学报, 1997, 10 (1) 51 - 58.

二、环孔法测试混凝土工作应力试验研究

刘永森 王柏生 沈旭凯

(浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 混凝土结构的实际工作应力是反映其状况的重要的指标之一, 也是建筑物改造加固的重要参数之一。由于混凝土材料本身的特性, 如何准确测量出混凝土的工作应力一直是实际工程中很难解决的问题。本文是在有限元模拟分析的基础上, 制作 5 根混凝土柱, 进行环孔法测试单轴轴心受压下混凝土柱工作应力的试验研究。并分析影响测试结果精度的因素。试验结果表明环孔法测试混凝土工作应力这种方法是可行的, 并且得出这种方法需要的钻孔深度较浅。

关键词: 环孔法; 测试; 混凝土; 工作应力; 试验研究; 钻孔深度

1 引言

由于已有混凝土建筑物的维修和加固既艰难又耗费大量资金, 因此, 通常在维修和加固之前, 应该对现有混凝土

建筑物各个方面的性能进行鉴定和评估, 以了解它各个方面的性能, 为建筑物的鉴定和评估提供最直接和可靠的依据, 以便减小维修和加固的盲目性, 并可大大节省维修和加固费用。而混凝土结构的实际工作应力是反映其状况的重要的指标之一, 也是建筑物改造加固的重要参数之一。

目前混凝土工作应力的测试一般建议采用环孔法, 如图 1 所示。环孔法, 也可以叫刻槽法, 其工作原理是依据局部应力释放的力学原理。为了测试结构构件中某一点的工作应力, 只需要在测试点周围开一定深度的槽, 解除测试点周围的约束使之产生弹性恢复变形, 从而导致构件的应力重新分布, 当槽深达到一定深度时, 即可使测点处局部工作应力完全释放, 通过对测点应变释放的量测, 就可以求出该点的工作应力。

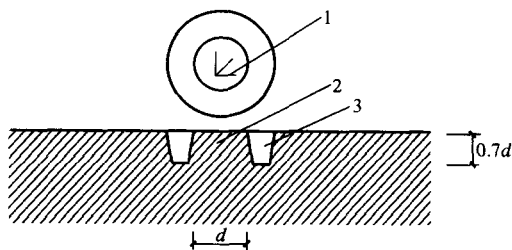


图 1 环孔法测试混凝土工作应力

1—电阻应变片; 2—混凝土测区; 3—环形槽

作者简介: 刘永森 (1979—), 男, 福建人, 硕士, 主要从事结构检测与加固研究;

王柏生 (1965—), 男, 浙江人, 研究员, 博士, 主要从事结构损伤检测与加固、结构抗震与减振等研究。

环孔法测试混凝土工作应力，其最主要的难点在于，确定环孔的深度。一般认为，钻孔深度为 $0.7d$ 时，此时测区的应力降为零，测读电阻应变片的数值变化，并估计材料的弹性模量和泊松比，可计算出测区原先主应力的数值及方向，但是，由于测试混凝土应力的电阻应变片的标距都比较大，因此，环孔的孔径 d 也就比较大，钻孔深度就变得比较深，在这个情况下，这种方法一般只适用体积较大的混凝土构件的测定。文献 [1] 通过有限元程序计算，提出了当钻孔深度为 33mm 时（环孔的内径为 100mm），测区的应力可以降为零，提出若实际混凝土不均匀分布导致未能完全释放的应力时，其最大可能误差约在 10% 左右，并选了两个测点进行试验验证，通过测量点的测试结果认为这种测试应力的方法是可行的。若只需钻孔 33mm，这个深度一般小于混凝土的保护层，对结构的影响就很小，可以大大增大这种方法的应用范围。文献 [2] 曾设计专用机具，切割钢筋混凝土结构的保护层，测量钢筋混凝土桥梁结构的工作应力。

本文是在有限元分析基础上，制作 5 根混凝土柱，进行环孔法测试混凝土工作应力的试验研究。并探讨在试验中可能出现的问题，希望找出一种简便、实用、可靠的检测已有混凝土结构中实际工作应力的方法。

2 有限元分析

2.1 有限元模型

本文采用有限元软件 ANSYS 分析混凝土柱在轴心受压下环孔中心处的应力释放情况，即在不同钻孔深度下环孔中心处的应力值。ANSYS 高级分析中的生死单元分析选项可以用来模拟钻孔过程。计算分析时单元采用 SOLID65 单元，不考虑钢筋。

模型尺寸：500mm × 500mm × 1500mm。在混凝土柱中心钻取一内径为 100mm、外径为 110mm 的环形槽，槽深为 150mm。本文中的有限元模型在计算分析时采用的材料性质与试验试件的材料性质相同，其他计算参数有：混凝土的泊松比 $\nu_c = 0.2$ ，混凝土的弹性模量 $E_c = 3.17 \times 10^4$ MPa。边界条件是在模型的下表面上施加 Y 向位移约束，在上表面施加 $F = 1500$ kN 的荷载值。人为地控制单元大小的划分，混凝土柱的单元模型见图 2。单元的边界条件及荷载见图 3。

2.2 分析结果

把分析结果以应力-钻孔深度关系图表示出来，见图 4，其中 X 轴为钻孔深度，Y 轴为应力相对值，钻孔前的应力值为 6MPa。从图中可以看出，当钻孔深度为 33mm 时，环孔中心处的应力降为零，然后随着钻孔深度的加深，应变值反向增大，达到最大值后逐渐变小，最后趋向于零。最大值对应的钻孔深度为 50mm。