

ISSN1000-4750
CN11 - 2595/ O3
《工程力学》第 20 卷 增刊

第十二届 全国结构工程学术会议 论文集

第Ⅲ册

PROCEEDINGS OF THE TWELFTH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

Vol.III

主编：崔京浩

ISSN 1000-4750



9 771000 475006

清华大学出版社
中国力学学会《工程力学》期刊

第十二届全国结构工程学术会议论文目录

本次会议论文集收录论文 456 篇, 共计 2065 页, 分装成三册, 每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录, 第 II、III 册则只载本册目录。

第 I 册载论文 153 篇 (共 748 页), 包括:

特邀报告; 一、力学分析与计算; 二、钢与钢筋混凝土、材料、构件与结构

第 II 册载论文 153 篇 (共 663 页), 包括:

三、岩土、地基基础与地下工程; 四、特种结构、车辆、飞行器与船舶结构; 五、抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

第 III 册载论文 150 篇 (共 654 页), 包括:

六、路桥、水工、港工; 七、设计、施工、优化与可靠度; 八、试验、监控、鉴定、事故分析与加固; 九、大型结构工程介绍、综述及其他研究成果

第 III 册目录

六、路桥、水工、港工

大佛寺大桥荷载试验控制计算	卜一之 单德山 李 乔 赵 雷 (001)
碳纤维复合材料(CFRP)在桥梁加固工程中的应用	陈尚建 孟吉复 (005)
桥梁砼耐久性分析	陈顺伟 薛 克 (010)
雁盐黄河大桥动力特性及抗震分析	陈兴冲 朱东生 贾军政 马国刚 刘 涛 (013)
在桥梁设计中应用可靠性理论的几个问题	陈英俊 谢 楠 (017)
青铜峡水利枢纽工程河床 3#、4#坝段下软弱地基处理分析	崔晓玲 杨菊生 (022)
薄壁曲箱梁桥有限元建模及分析	单德山 李 乔 史福明 (026)
简支梁旧桥计算模型的研究	杜 青 张献民 李晓会 刘金春 (030)

基于应变模态的连续梁桥损伤识别研究	杜思义 陈 淮 殷学纲 (034)
广州市桥梁使用管理研究	何培勇 杨伟军 郝海霞 (038)
新型桥墩防撞装置受撞过程的数值仿真研究	黄德进 姚小虎 王礼立 陈国虞 (042)
大跨度悬索桥颤振时域分析	黄汉杰 李明水 贺德馨 (046)
水晶塘电站大坝静力分析的有限元无限元方法	黄胜强 龙礼禧 罗月静 姚明华 (050)
基于遗传算法的海洋平台损伤诊断研究	黄维平 刘 娟 (055)
路堑边坡锚固格子梁模型试验	李 明 唐树名 邓安福 (059)
在双面横坡道面上运动飞机的侧向稳定性分析	李光元 于伯毅 (064)
大跨度钢箱梁斜拉桥索梁锚固结构型式的比较研究	李小珍 蔡 婧 强士中 (068)
基于 ANSYS 软件的斜拉桥结构可靠性分析	刘建华 董 聪 张玉玲 (074)
大跨度斜拉桥的参数识别	刘文峰 柳春图 (080)
混凝土路面裂缝分析	卢 玮 许金余 (085)
大体积混凝土温度裂缝的稳定分析	缪 昇 屈俊童 (089)
利用 ABAQUS 程序分析勘探二号海洋平台	任艳荣 刘玉标 王书河 (093)
土的比例系数 m 的取值与修正法	施 颖 马春亨 (097)
李家峡坝后背管外包混凝土裂缝贯通机理分析	石广斌 冯兴中 李 宁 (101)
斜拉桥在地震作用下的反应分析	王胜斌 (105)
40 米双预应力混凝土简支梁试验桥静动载试验研究	王 楠 (112)
双室箱梁桥剪力滞效应分析	王常峰 朱东生 陈兴冲 (116)
太旧高速公路声屏障设计与施工	王俊北 (120)
新型钢箱-混凝土组合截面连续梁桥	王智超 钟新谷 罗迎社 杨 柳 刘 斐 (125)
两种插板式堤坝内力分布及位移的实验研究	杨永春 王爱群 刘德辅 杨素军 (129)
考虑吊索系的几何刚度阵时中(下)承式拱桥有限元模态分析	殷学纲 钟轶峰 杜思义 邓朝荣 (133)
混凝土箱梁水化热温度及裂缝防治的试验研究	袁 娜 季文玉 卢文良 (138)
雁盐黄河大桥拱墩固结点应力研究	朱东生 陈兴冲 贾军政 马国刚 刘 涛 (142)
安庆长江公路大桥主塔墩钢围堰设计	王胜斌 汪学著 张静华 (146)

七、设计、施工、优化与可靠度

高层建筑地下室墙体开裂原因及预防处理措施	鲍育明 赵艳秋 (150)
碳纤维片材加固钢筋混凝土梁正截面受弯承载力计算方法	陈永秀 陆州导 李 刚 (153)
TAT、SATWE 软件在建筑设计中的应用比较	崔钦淑 聂洪达 (158)
模式失效概率计算的理论与方法 I	董 聪 (162)
模式失效概率计算的理论与方法 II	董 聪 (170)
模式失效概率计算的理论与方法 III	董 聪 (175)
强度与刚度约束下大型空间框架截面优化	杜家政 隋允康 郭英乔 (180)
AK-16C 型改性沥青混凝土路面上面层施工质量控制	顾祥峰 朱永泉 (184)
节段施工过程中基于随机分析的参数识别新方法	韩大建 陈太聪 (188)
粘土压实特性分析研究	郝中海 崔江余 (192)

关于碳纤维布加固钢筋混凝土梁正截面受弯计算基本假定的探讨	何幼学 陈永秀 (196)
悬臂支护结构优化设计的遗传算法	黄 艳 唐家祥 (200)
传感器优化配置的改进逐步累积法	黄维平 王晓燕 (203)
旧机场道面盖被构造形式分析	李 媛 智海运 潘炳义 谢永亮 刘宏伟 (207)
小西湖黄河主桥斜拉桥 2#、3#墩围堰施工技术	李恒太 王引仓 (211)
某公寓结构转换层设计施工	林永春 (214)
桁架结构形状优化两层解法	高 峰 隋允康 杜家政 (218)
深基坑施工的侧向位移预报模型及其应用	林跃忠 王铁成 王 来 (222)
地层注浆法加固竖井与实例分析	刘宏伟 陈家强 庄惠平 谢永亮 江晓平 (226)
建筑顶层砖墙温差裂缝分析与控制	刘金铃 (230)
天津外国语学院工程的冬期施工	刘津明 王志民 (234)
基于模糊随机有限元的结构广义可靠性分析	刘昭清 雷震宇 陈 虬 (237)
楼地面、屋面活荷载补充规定	柳士华 宋雅琳 宋志学 (241)
东风 II 型救援小车的有限元分析与优化	尼加提·玉素甫 买买提明·艾尼 居来提·买买提肉孜 (247)
地质勘探井点的优化布局	潘汉森 方有珍 (251)
基于正应变比能的结构损伤位置识别	秦庆华 雷建平 路国运 (256)
桁架结构截面优化满应力设计方法	隋允康 乔志宏 叶宝瑞 (260)
单次张拉预应力立体钢桁架的归并优化分析	王新堂 徐永春 (267)
锚固路堑边坡稳定性计算方法	吴德海 唐树名 邓安福 (271)
打黑渡怒江大桥钢拱支架现浇施工技术与监控	吴国松 徐志刚 王 成 (275)
膜结构的设计及应用	肖亚明 陶广亚 (284)
浅谈高校住宅小区环境设计	辛洪云 杜新胜 (288)
广州国际会议展览中心钢结构设计简介	杨叔庸 孙文波 舒宣武 陈荣毅 (291)
机场水泥混凝土道面冻融耐久性分析	于 萍 胡功笠 赵德辉 许金余 (295)
砖混结构条形基础宽度优化设计	俞铭华 姜朋朋 李庆贞 (298)
结构体系可靠度的仿真分析	远 方 方江生 刁 可 (302)
侧贴 CFRP 加固混凝土受弯构件的承载力实用计算方法	岳丽婕 张继文 (306)
改建机场沥青混凝土道面设计方法	张 超 谭立伟 王 峰 田艳凤 (310)
大体积混凝土施工中的 4MIE 控制	张洪生 孟丽军 陈 伟 (314)
“双向无粘结预应力砼密肋楼盖”施工创优	赵洪先 刘 军 陈文斌 翟国政 (318)
Michell 桁架在离散过程中的一些性质	周克民 李俊峰 (322)
多层砖墙-混凝土墙楼房的抗震性能及设计要点	周献祥 (326)
机场自密实混凝土道面板裂缝原因分析及预防措施	于丰武 许金余 郑福美 (330)

八、试验、监控、鉴定、事故分析与加固

某医院建筑结构加固改造实例分析	毕庆洪 李国荣 李志成 史海兵 乔蓓蓓 (333)
分布式光纤监测三峡工程大块体混凝土水化热过程分析	蔡顺德 蔡德所 何薪基 张存吉 丁 涛 (336)

大面积堆载原料库结构鉴定分析	常好诵 佟晓利 张家启 严华峰 (344)
回弹法检测中回归方程的精度比较	陈海彬 王景利 么立敏 (348)
隔蒲潭大桥工字形截面梁粘、包钢技术方案的确定及施工	陈尚建 (352)
某砖混结构综合楼悬挑部分裂缝原因分析	陈燕华 王 庆 焦孟良 (355)
某工程转换层梁斜裂缝机理分析	成正华 向 晖 (358)
非破损检测中混凝土强度的推定方法	蒋利学 徐子林 (362)
重庆市某大厦转换层大梁裂缝分析和处理	李 帅 邱小宏 敬登虎 杨佑发 (368)
综合工艺复合地基测试与应用	李 伟 王明恕 王凤池 石 刚 (372)
基于非线性有限元的钢筋混凝土轨道梁加固分析	李砚波 林浩华 俞剑勇 (376)
北京饭店消能减振加固的 Pushover 分析	梁继东 董 聪 苗启松 (380)
钢筋混凝土密肋楼盖静载试验及鉴定分析	刘海涛 柳炳康 周 安 (384)
底框结构房屋设计中若干问题的分析	陆浩亮 李思明 金国芳 (388)
某工程碳纤维布加固设计实例	孟丽军 张岩俊 陈 伟 刘 云 (392)
某办公楼框架结构安全鉴定与框架梁裂缝分析	沈天丽 (396)
木结构雀替改善木梁受力性能的试验探讨	宋 彧 冯 翔 孙存海 (399)
轻质高强保温型 SLP 复合构件试验研究	田志敏 杜宁波 范俊奇 (403)
回弹测强曲线三参数幂函数拟合法	佟晓君 马 群 武春亭 陈海彬 王景利 (410)
基于模糊理论的建筑施工安全等级分析	王 飞 马堃飞 李天民 洪建军 毕 征 (414)
铁路混凝土桥梁 U 型螺栓断裂分析	王春芬 陈兴冲 丁明波 (418)
某商场楼盖体系的加固设计	王恒华 康信江 张重阳 (422)
浅谈坡屋面质量问题与质量控制	王利文 陈春银 (426)
异形柱框架顶层角节点试验研究	王文进 薛 敬 王依群 康谷贻 韩建强 (430)
基于应变曲率法的悬臂梁多位置损伤识别实验研究	王志华 张向东 马宏伟 (434)
扩张网水泥砂浆加固砖房抗震性能的试验研究	向 晖 骆万康 成正华 孟凡涛 张 均 (438)
大截面框架柱加固方法及实例分析	殷 洁 史海兵 李志成 (444)
深基坑边坡失稳治理	余承华 邓春阳 刘 刚 (448)
某厂房梭形轻钢屋架事故分析及结构改进	张日向 张清贺 韩冰翰 (451)
炼钢转炉基础事故分析及加固	张文革 (456)
新型组合梁的试验研究	赵风华 杜建明 (460)
CFRP 布约束受压混凝土圆柱受力性能若干问题分析	赵锦红 徐吉恩 杨 勇 (464)
某单层厂房加固纠偏措施的设计计算	郑珍成 苏长吉 林 鹏 刘 立 (468)
异形柱框架顶层中节点试验研究	周树勋 薛 敬 王依群 康谷贻 韩建强 (472)
单层混凝土车库结构温度作用效应分析	朱春明 郑玉庆 李向民 (476)

九、大型结构工程介绍、综述及其他研究成果

建筑中的双气膜结构	常 强 那向谦 (481)
某冶炼厂车间托梁抽柱设计与施工控制	陈再学 (485)
结构损伤探测技术及研究进展	程载斌 王志华 马宏伟 (489)

高层建筑地下车库平战功能转换和战时应急加固技术探讨	邓春梅 许金余 苏 北 (500)
结构智能健康诊断研究与进展	董 聪 江见鲸 (504)
抽油杆疲劳裂纹的超声波检测法	冯 玮 姚红星 石惠宁 柳春图 (512)
新型减震消能格构剪力墙抗剪性能试验研究与理论分析	傅秀岱 谭昆仑 王振永 (517)
结构远程协同计算构想	郭玉荣 肖 岩 (522)
既有结构体系安全性评估方法	何金胜 薛广龙 (526)
高性能纤维增强水泥基复合材料的制备、抗爆性能及发展趋势	江小平 党秀英 谭一鸣 陈太林 (530)
江苏省第三届园艺博览园热带植物温室结构工程介绍与综述	乐 巍 孟肖邦 赵 刚 (533)
全自动智能预应力数字化张拉装置的初探	李 珠 高建全 贾敏智 王显耀 郭全全 (536)
钢筋混凝土框架结构抽柱托换综述	李安起 陆洲导 (540)
天津药业综合楼结构设计	李美东 边 凯 (544)
一个全新的强度理论	李跃军 (547)
我国水资源现状及改善的设想	历阿明 陈定胜 张永生 张禄斌 于 淼 于海山 刘建辉 (551)
新型减震耗能双重抗震结构体系	傅秀岱 王振永 谭昆仑 (557)
考虑太阳辐射的混凝土结构温度效应研究综述	刘文燕 (561)
直升机顶层设计与遗传综合算法	刘夏石 方明云 (566)
目视及 X 射线法检测裂纹概率曲线的测定	刘秀丽 (571)
工程地震保险的研究现状	缪 昇 和 飞 (575)
北京奥运会国家体育场中选方案分析	董 聪 曹 申 (579)
智能结构分析的新方法	秦 荣 秦 俊 谢开仲 (586)
硫化氢腐蚀环境中裂纹扩展速率 da/dt 的研究	陕小平 张亦良 程泳梅 (592)
半挂式槽车罐体应力的有限元分析	沈晓阳 沈晓科 刘后森 (596)
单管通信塔的变形控制	沈之容 潘汉明 (600)
神经网络专家系统在微材料结构力学中的应用	舒思齐 杜 莹 魏悦广 (604)
小波包分析在结构损伤时间识别及结构模态参数识别中的应用	王国兴 李华军 潘新颖 (608)
非地震振动建筑破坏及防护措施	王剑飞 史海兵 李志成 殷 洁 乔蓓蓓 (613)
光纤分布传感检测系统在土木工程中应用的研究	吴红华 李正农 (617)
工程力学课程教学如何体现学科思想	武春廷 彭 震 (621)
玄武岩铸石技术在高炉冲渣沟中的研制与应用	肖国平 李金霞 刁鲁明 (624)
海水环境下碳纤维布增强梁的正截面承载力研究	阎西康 王铁成 毕永清 (627)
绿色建筑综合评估系统分析与探索	杨 宁 董 聪 江见鲸 (631)
基于动力响应测试的海洋平台结构损伤诊断	杨和振 李华军 黄维平 (636)
基于结构时域信号的一种振型测试方法	杨永春 杨素军 王永刚 (643)
几种碳纤维约束混凝土应力—应变计算模型比较	张国伟 肖 岩 黄政宇 (647)
张拉膜结构的找形方法	张宏超 罗永坤 (651)

大佛寺大桥荷载试验控制计算

卜一之, 单德山, 李乔, 赵雷

(西南交通大学土木工程学院桥梁及结构工程系, 四川, 成都, 610031)

摘 要: 本文介绍了重庆渝黔高速公路大佛寺大桥荷载试验控制计算的方法, 得到了荷载试验个工况的理论计算结果, 如桥梁的变形图、内力图, 并与荷载试验结果进行比较, 其吻合程度较好, 达到了控制荷载试验的目的, 计算过程中考虑了结构非线性的影响。计算了该桥的自振频率及其振型, 自振频率与实测的频率吻合相当好。

关键词: 斜拉桥, 荷载试验, 非线性

1 工程概述

重庆长江大佛寺大桥的桥跨布置为: $2\text{m}+3\times 50\text{m}+198\text{m}+450\text{m}+198\text{m}+(3\times 50+20)\text{m}+8\text{m}$, 全长 1176m 。主桥结构形式为双塔双索面双主梁全漂浮体系混凝土斜拉桥, 其跨径布置为: $198\text{m}+450\text{m}+198\text{m}=946\text{m}$ (图 1)。主塔采用倒 H 型劲性骨架混凝土索塔, 总高 206.68m 。主梁采用双边肋矩形混凝土梁, 梁高 2.7m , 梁宽 30.6m , 桥面设双向 1.5% 的横坡, 混凝土桥面板。斜拉索共为 110 对, 全桥 220 根。其支撑体系为: 在 4[#]、5[#]索塔与主梁相交处仅设有横向限位支座, 在 3[#]、6[#]墩顶处主梁的约束分别为竖向、横向限位, 全桥纵向均未约束而形成了全漂浮体系。该桥设计荷载等级为汽-超 20、挂-120, 按 6 车道布置。该桥于 2001 年 12 月竣工, 受业主委托, 西南交通大学结构工程试验中心对该桥进行成桥荷载试验。本文简要介绍该桥荷载试验的控制计算, 通过实测可知, 控制计算的位移和内力与实测值吻合比较好, 达到了控制试验的目的。

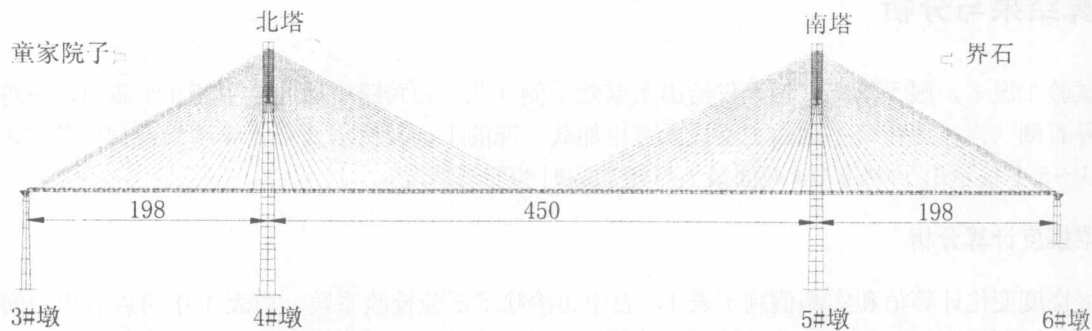


图 1 大佛寺大桥桥型布置图

2 荷载试验控制计算目的及方法

为了保证该桥荷载试验能顺利、有效地进行, 制定了荷载试验的方案和试验工况, 并对每一工况进行控制计算, 以达到控制试验的目的。共计算了 9 种静力试验工况: 分别为北岸边跨跨中、北岸桥塔处 0#

作者简介: 卜一之 (1961.3), 男, 北京人, 工学博士, 副教授, 从事大跨度桥梁结构施工控制研究

单德山 (1969.7), 男, 四川大竹人, 工学博士, 副教授, 从事桥梁结构空间静动力研究

李 乔 (1954.5), 男, 黑龙江哈尔滨人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 院长, 从事桥梁结构空间静动力研究

赵 雷 (1956.11), 男, 四川西充人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 从事桥梁结构空间稳定研究

块中心截面、中跨 1/4 截面、中跨跨中截面、南岸边跨跨中截面共 5 个加载截面包括偏载在内的 9 个工况。配合动载试验, 还计算该桥的自振频率和振型。

为了保证计算结果的正确性和合理性, 在计算中分别建立了平面模型和三维模型。并对两种模型结果进行了比较。平面模型采用西南交通大学编制桥梁结构分析系统 BSAS for Windows 版进行计算。空间模型采用通用有限元软件 ANSYS 进行计算。

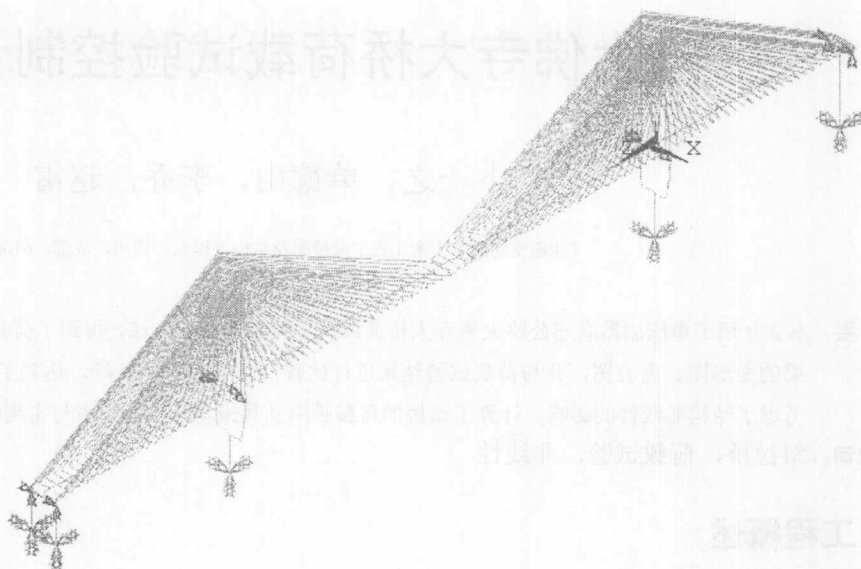


图 2 空间计算模型

平面模型建立的焦点

主要在于索梁、索塔的连接, 由于斜拉索的锚点与主梁、桥塔的形心不重合, 因而不宜将斜拉索单元两端节点直接连在主梁和桥塔节点上, 计算模型中采用带刚臂的单元来模拟索梁、索塔的连接。在计算中, 横隔梁考虑为加在主梁上的集中力, 还考虑了桥面横坡引起的预应力筋竖向位置的变化等。该桥平面模型共划分 544 个单元, 441 个节点, 其中拉索单元 110 个, 并考虑了斜拉索垂度的影响。在空间模型中, 采用脊梁模型, 主梁、桥塔和桥墩采用空间梁单元, 斜拉索采用空间索单元, 共划分单元 776 个, 节点 557 个, 空间模型中考虑了结构非线性的影响。

3 计算结果与分析

因试验工况多, 限于篇幅, 这里仅给出董家院子侧(北)边跨跨中截面, 中跨 1/4 截面, 中跨跨中截面, 及界石侧(南)边跨跨中截面主梁最大弯矩加载工况的主梁及桥塔变形计算结果及相应的实测结果。变形图 3~5 中仅示出了中跨 1/4 截面最大弯矩加载时的变形情况。

3.1 主梁挠度计算分析

主梁挠度变化计算值和实测值列于表 1, 表中还给出了试验校验系数。由表 1 中可以看出空间模型的计算结果与平面模型的计算结果非常接近。这实际上相互验证了平面模型和空间模型的正确性。

表 1 主梁挠度比较表

工况	实测测点位移(mm)			控制计算测点位移(mm)				校验系数	
				空间计算					
	上游测点	下游测点	平均	上游测点	下游测点	平均	平面计算	空间计算	平面计算
北边跨跨中加载	109.5	103	104.5	108.6	106.8	107.7	107.4	0.970	0.973
中跨 1/4 截面加载	52.5	50	51.3	73.8	71.4	72.6	73.5	0.707	0.698
中跨跨中加载	130.6	132	131.3	136.6	136.8	136.7	135.3	0.960	0.970
南边跨跨中加载	115.8	110	112.9	118.6	115.4	117	117.8	0.965	0.958

3.2 桥塔偏位计算分析

各个工况下, 桥塔偏位变化计算值和实测值列于表 2, 表 3, 表中还给出了试验校验系数。其中表 2 示出的为北塔偏位的情况, 表 3 示出的为南塔偏位的情况。

表 2 北桥塔偏位比较表

工况	实测测点位移(mm)			控制计算测点位移(mm)				校验系数	
				空间计算					
	上游测点	下游测点	平均	上游测点	下游测点	平均	平面计算	空间计算	平面计算
北边跨跨中加载	51	49	50	64.6	63.4	64			
中跨 1/4 截面加载	-24.2	-28	-26	-33.8	-34.2	-34	-35.3	0.77	0.74
中跨跨中加载	-37	-33	-35	-38.9	-37.7	-38	-37	0.91	0.95
南边跨跨中加载	26	-	26	28.7	29.7	29	27	0.89	0.96

表 3 南桥塔偏位比较表

工况	实测测点位移(mm)			控制计算测点位移(mm)				校验系数	
				空间计算					
	上游测点	下游测点	平均	上游测点	下游测点	平均	平面计算	空间计算	平面计算
北边跨跨中加载	-14	-12	-13	-18.9	-18.1	-18.5	-17.9	0.70	0.73
中跨 1/4 截面加载	4	5	4.5	8	7	7.5	7.2	0.60	0.63
中跨跨中加载	28	24	26	31.2	30.8	31	30.8	0.84	0.84
南边跨跨中加载	-43	-39	-42	-58	-58.6	-58.3	-66.2	0.72	0.63

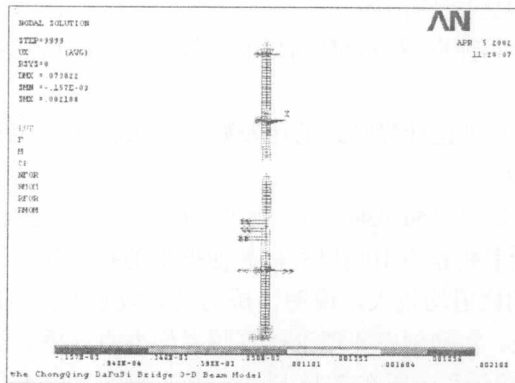


图 3 中跨 1/4 截面加载横向位移图

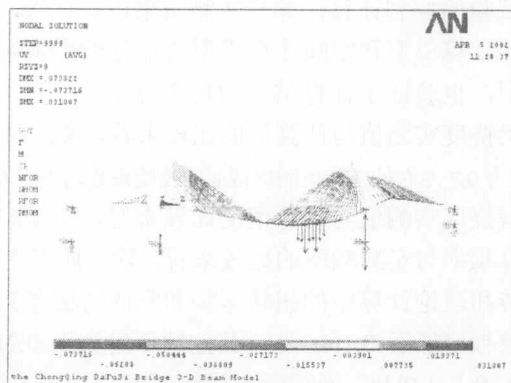


图 4 中跨 1/4 截面加载竖向位移图

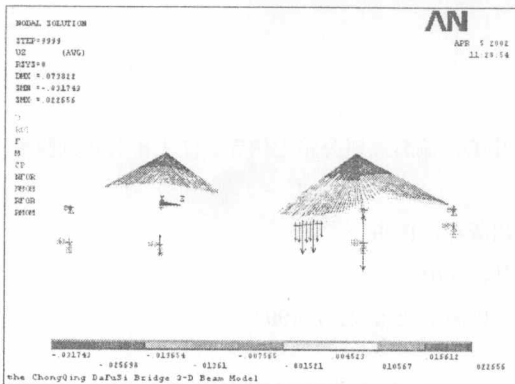


图 5 中跨 1/4 截面加载纵向位移图

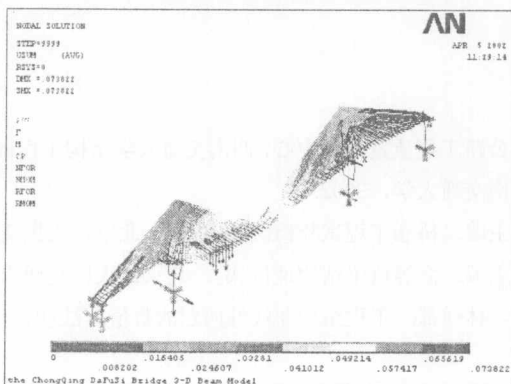


图 6 中跨 1/4 截面加载位移矢量图

3.3 自振特性分析

自振特性计算采用空间有限元模型, 计算结果列于表 4, 实测的频率值也列于表中。从实测结果来看: 主梁的实测频率与计算频率相比较, 主梁竖向一阶振动频率与计算值有一定的差异, (实测值-计算值)/计算值为 10%。其它实测结果与计算值较为接近, 说明计算模型是合理的。

表 3 主梁、主塔实测振型与计算频率的比较

阶数	频率值(赫兹)		振型	阶数	频率值(赫兹)		振型
	计算值	实测			计算值	实测	
1	0.0994	0.096	纵漂+竖弯	11	0.6162		二阶塔偏
2	0.2500	0.275	一阶竖弯	12	0.6509	0.674	四阶竖弯
3	0.3245	0.356	二阶竖弯	13	0.6612		3#墩顶梁的横摆
4	0.3627	0.375	一阶横弯	14	0.7170		五阶竖弯
5	0.4176		2#塔偏	15	0.8039		六阶竖弯
6	0.4487		1#塔偏+扭转	16	0.8531		3 阶扭转
7	0.4615		扭转+塔偏	17	0.8723		塔偏+主梁扭转
8	0.5820	0.595	三阶竖弯	18	0.8726		竖弯
9	0.6010		二阶扭转+塔偏	19	0.9140	0.910	塔偏+主梁扭转
10	0.6162		二阶塔偏	20	0.9173		竖弯

4 结论

通过荷载试验的控制计算, 并与实测结果进行比较, 得到如下结论:

1. 从平面计算模型和空间计算模型的计算结果来看, 两种模型的计算结果非常接近, 这既相互验证了计算模型, 也验证了计算结果的真实可靠。
2. 从主梁挠度实测值与计算值的比较来看, 实测结果与理论计算吻合的比较好, 除中跨 1/4 截面加载时的校验系数为 0.7 左右外, 其他测试截面的校验系数均大于 0.95。
3. 从桥塔挠度实测值与计算值的比较来看, 其校验系数介于 0.56~0.96 之间, 说明该桥得住它具有足够的刚度。
4. 从计算频率与实测频率的比较来看, 除一阶竖弯频率相差为 10% 以外, 其他振型的频率吻合很好。实测扭转和理论计算中的扭转基频和竖向弯曲基频的比值均较大, 说明该桥的具有较强的抗风能力。
5. 除纵漂频率低于 0.1Hz 外, 其他频率均大于 0.2Hz。实测频率和理论计算频率均表明该桥的低阶频率范围在 0.1~1.0Hz, 而运营车辆转向架等悬挂系统的频率一般在 2Hz 以上, 故车辆的频率不会耦合进入低频范围, 也极少会出现受迫振动的现象, 说明该桥具有良好的使用性能。

参考文献

- [1] 重庆市公路工程质量检测中心, 西南交通大学结构工程试验中心. 渝黔高速公路大佛寺长江大桥荷载试验报告[R]. 成都: 西南交通大学, 2002.
- [2] 胡大琳主编. 桥涵工程试验检测技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999
- [3] 项海帆主编. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [4] 何君毅, 林祥都. 工程结构非线性问题的数值解法[M]. 北京国防工业出版社, 1994

碳纤维复合材料 (CFRP) 在桥梁加固工程中的应用

陈尚建¹, 孟吉复²

(武汉大学土木建筑工程学院 武汉长江加固技术有限公司 武汉大学桂园一路一号 430072)

摘 要: 本文介绍了碳纤维复合材料的性能, 碳纤维加固技术的特点及在桥梁加固工程中的应用。

关键词: 碳纤维复合材料; 加固技术; 桥梁

1 前言

现有的很多工业、民用建筑、桥梁、码头、水利、电力工程结构、设施由于历年的老化、施工质量、地震、自然灾害等多方面的原因都亟待进行加固修复。另外, 由于设计、施工造成的问题、结构使用功能改变或为了最大限度利用现有资源、对已建或在建的建筑物进行改造, 翻新, 也都需对已有建筑物进行补强加固, 提高结构构件的抗弯、抗剪、抗拉、抗扭、抗震、抗腐蚀的能力。

采用碳纤维复合材料 (CFRP) 对钢筋混凝土结构或其它结构进行补强加固, 在国际上深受重视并已获得较多的应用和发展。它是将碳纤维片材 (碳纤维布或板) 用树脂类胶结材料粘贴在混凝土表面, 利用碳纤维的高强度 (约为普通碳素钢材抗拉强度的十几倍) 和高弹模 (约为普通钢材的 1—3 倍) 来对混凝土结构进行补强加固, 并改善结构的受力状态。和传统的加固技术相比碳纤维复合材料加固技术具有明显综合优势。近十年来日本和欧美等国家都投入了大量的人力、物力和财力进行研究开发。特别是 1995 年日本阪神大地震以后的快速重建, 交通设施的快速修复中碳纤维加固技术起着重大作用, 并从此以后在工程中得到广泛应用。

20 世纪 90 年代后期, 我国一些科研单位、高等院校对碳纤维复合材料 (CFRP) 在土木工程中的应用进行系统的研究。近 2-3 年来发展迅猛, 不仅取得了大量的科研成果, 而且在工程应用上成绩显著, 在工业民用建筑、桥梁、隧道、港口、水利、电力等工程领域都取得了令人瞩目的成就, 修复加固的工程数量迅速增加。

目前, 在我国碳纤维复合材料 (CFRP) 在公路桥梁修复加固中的应用远不如在工民建房屋结构那样广泛。而在国外, 碳纤维复合材料首先是应用在公路桥梁的补强加固, 特别是在日本 1995 年阪神大地震后对地震毁坏的公路桥梁快速修复中发挥了重大的作用, 充分显示了碳纤维复合材料修复加固混凝土结构的优越性, 因此在桥梁补强加固中广泛应用。

我国大部分公路桥梁建于 20 世纪 50-70 年代, 已经运营数十年。随着国民经济的发展, 对公路交通的要求也越来越高。而大量的仍在运营的老桥已不能适应发展的需要。特别是有些老桥设计荷载偏低和桥跨度偏小, 再加上超载、超速车辆行驶, 以及各种外界因素作用的影响, 导致桥梁结构发生病害, 出现缺陷, 严重影响到桥梁的安全和正常使用。

为了保证交通畅通, 必须对这些危桥进行维修加固, 由于碳纤维复合材料 (CFRP) 修复加固技术比常规的加固技术具有明显的优越性, 因此, 在公路桥梁的维修加固中必然会得到更为广泛的应用。

2 碳纤维复合材料和粘结材料

2.1 碳纤维复合材料

碳纤维复合材料是以碳纤维为增强材料, 以合成树脂为基体复合而成的一种工程材料。用于土木工程

作者简介: 陈尚建 (1955) 男, 湖北·当阳人 副教授 从事结构工程研究

孟吉复 (1936) 男, 辽宁·本溪人 教授 从事结构力学结构加固研究

结构的碳纤维以聚丙烯腈 (PAN) 纤维为原料经高温碳化而成, 碳纤维原丝纤维方向的抗拉强度可达普通碳素钢的十几倍。用于桥梁加固的碳纤维产品主要是碳纤维片材, 即碳纤维布和碳纤维板。按碳纤维丝布置方向又可分为单轴向和双轴向 (0° / 90° 、 45° / -45°) 碳纤维布, 可用于不同受力状态的混凝土构件的补强加固, 如弯曲、剪切、扭转等受力构件。目前, 我国结构加固所用的碳纤维布基本上都是进口的, 现将其性能指标列于表一:

表一 碳纤维布、板的主要性能指标

类别	碳纤维布			碳纤维板	
类别	高强度		高弹模		
品名	UT70-20	UT70-30	UM46-30	TL510	TL515
抗伸强度 (MPa)	3500	3500	2500	2400	2400
弹性模量 (MPa)	2.3×10^5	2.3×10^5	4.36×10^5	1.56×10^5	1.56×10^5
设计厚度 (mm)	0.111	0.167	0.163	1.0	1.5
重量 (g/m^2)	200	300	300	1200	1800

※①、以上产品原材料均为日本 TORAY 生产的 T700 碳纤维丝, 抗拉强度为 4890mpa。

※②、CT70-20, UT70-30, UM46-36, TL510, TL515 为日本东丽 (TORAY) 生产。

※③、L200-C、L300-C 为台湾重亿公司生产。

2.2 粘结材料

粘结材料的性能是保证碳纤维布与混凝土共同工作的关键。粘结材料应有足够的刚度和强度保证碳纤维布与混凝土间剪力的传递, 同时应有足够的韧性, 不会因混凝土开裂而导致粘结脆性破坏。同时还应便于现场施工, 如要求粘结材料应能在常温下固化、固化时间合适、具有适宜的流动性与粘度、固化收缩率小等。

工程上常用的碳纤维布粘结剂主要是环氧树脂类, 具有很高的粘结强度, 收缩率很低 (一般低于 0.2%), 是常用的树脂中最小的。碳纤维布粘结树脂胶包括有基底胶、整平 (修补) 胶和浸渍胶。

(1) 基底胶: 具有渗透性, 将其涂刷在待粘贴碳纤维布的混凝土表面, 可渗透入混凝土表面, 为碳纤维布提供一个坚固的基底, 同时又有利于提高碳纤维布的粘结能力。

(2) 整平 (修补) 胶: 其作用是将混凝土表面凹陷不平整处进行修补、整平。为粘贴碳纤维布提供一个平整的基面, 有利于确保碳纤维布的粘贴质量和良好的受力状态。

(3) 浸渍胶: 是碳纤维布主要的粘结材料, 它将碳纤维布牢固地粘贴在混凝土表面, 并且使胶液浸渍充满碳纤维之间空隙, 将碳纤维粘结在一起, 有利于发挥碳纤维复合材料的优异性能。

目前, 我国市场上使用的碳纤维布粘结胶大多是与进口的碳纤维布配套的树脂胶, 价格较高。近年来, 国内少数单位已研制出粘贴碳纤维布的配套专用树脂胶, 其性能指标与进口粘结材料相当, 但价格便宜 1—2 倍, 已小批量生产。现将武汉长江加固技术有限公司制胶厂生产的碳纤维粘结树脂胶的性能指标列于表二:

表二 长江牌 YZJ-C 碳纤维粘贴专用结构胶性能指标

性能 \ 类型	浸渍胶 (YZJ-CQ)	基底胶 (YZJ-CD)	修补胶 (YZJ-CZ)	备 注
拉伸剪切强度 (MPa)	11.00	11.00	11.00	
拉伸强度 (MPa)	33.51	33.51	33.51	
粘结正拉强度 (MPa) (钢—混凝土)	2.97	2.75	3.42	
耐久性能 (小时)	2000	2000	2000	强度不降低
疲劳 (万次)	200	200	200	不破坏
适用时间 (min)	50	90	50	
指干时间 (小时)	4	4	4	

※ 长江牌 YZJ-C 结构胶与台湾重亿 L200-C (L300-C) 碳纤维布配套使用, 已通过建设部建筑物鉴定与加固规范管理委员会审查, 其性能指标满足规范要求, 已批准为允许使用的产品。

3 碳纤维复合材料 (CFRP) 加固桥梁的功能和特点

3.1 碳纤维布、板补强加固功能

(1)、提高梁体的抗弯承载力

碳纤维布、板对提高受弯构件的抗弯能力特别有效。在梁体底部或受拉部位粘贴碳纤维布 (板), 可以与原结构内的钢筋共同承受拉力, 充分利用碳纤维的高强度, 能有效地提高梁体的抗弯能力, 从而提高旧桥大梁的抗弯承载力。通过合理的设计, 在基本上不改变梁体的截面尺寸和重量情况下, 能提高原梁体承载力 1-2 倍。

(2)、提高梁体的抗剪承载力

在梁体两端的侧面上沿主拉应力方向 (约 45°) 粘碳单向纤维布、板或在梁侧面粘贴两方向 (45° / -45°) 碳纤维布可提高梁两端的抗剪能力。也可仿照箍筋的方式, 在垂直梁轴线方向粘贴 U 形碳纤维箍板, 其作用机理与箍筋类似, 同样可提高梁体的抗剪承载力。

(3)、提高大桥面板的承载力和使用寿命

在桥面板底部粘贴碳纤维布 (板) 可以不增加面板荷载, 能显著提高其承载力。特别是在旧桥桥面板底部混凝土碳化造成钢筋锈蚀情况下, 粘贴碳纤维布不仅可提高板的承载力, 还可防止混凝土碳化, 保护钢筋不锈蚀, 可延长板的使用寿命。

(4)、能有效地提高混凝土构件的抗裂性能和梁板的抗弯刚度

由于桥的梁体和桥面板存在裂缝, 不仅对梁板的耐久性不利, 也会降低其抗弯刚度。在梁、板上粘贴碳纤维布可封闭原有裂缝, 不再继续扩大延伸, 可防止、延缓新的裂缝产生。而且改变新生裂缝的形态, 形成细而密的微细裂缝, 不影响构件的正常使用。粘贴碳纤维布可约束混凝土的变形, 从而可提高梁、板的抗弯刚度。

(5)、提高桥墩的承载能力和抗震性能

在桥墩外周缠绕粘贴碳纤维布, 可约束桥墩混凝土横向变形、改变混凝土的受力性能, 提高混凝土的抗压强度, 增加混凝土桥墩的延性, 有效防止混凝土脆性破坏, 从而提高桥墩的抗震性能。

3.2 碳纤维布 (板) 加固技术特点

(1)、高强、高效

由于碳纤维布 (板) 具有高强度、高弹模、延伸率小、质轻等特性, 可充分利用其优异的力学性能有效地提高旧桥梁桥、墩的承载力、延性、抗裂性能, 达到高强、高效加固修复旧桥的目的。

(2)、不增加旧桥的荷载 (恒载) 及断面尺寸

碳纤维布的重量轻, 一般为 $200\sim 300\text{g/m}^2$, 设计厚度为 $0.111\sim 0.167\text{mm}$, 加上粘贴树脂胶, 其自重和厚度也很小, 对旧桥的梁、板、墩等构件的重量和截面尺寸的影响可忽略不计。

(3)、施工简便、周期短

碳纤维布 (板) 重量轻, 一般采用手工作业, 不需要使用大型施工机具及加压固定装置。施工空间小、施工干扰少, 特别是在箱梁内部作业空间受限制时, 碳纤维布加固方法是最优的方法。

加固周期短, 将碳纤维布 (板) 粘贴在混凝土构件表面, 粘结胶固化, 满足强度要求, 旧桥可投入使用, 一般只需 5~7 天 (常温情况下)

(4)、可适应不同构件形状, 施工质量易保证

碳纤维布与混凝土表面粘贴的密实程度是施工质量好坏的标准。由于碳纤维布是柔性的, 可随结构外形变化任意施工, 不受结构外型形状的限制, 如圆形、复杂曲面, 异形构件, 都能粘贴碳纤维布, 只要混凝土表面处理平整, 碳纤维布与混凝土表面都能紧密粘接, 一般都可保证碳纤维布的有效粘贴面积不小于 95%, 达到碳纤维布加固施工的质量的要求。

粘钢加固方法的施工受结构处型形状的影响,有的情况施工难度很大,甚至无法施工。施工质量也不可能达到碳纤维布施工的效果。

(5)、碳纤维布加固施工对原结构不产生新的损伤

碳纤维加固是用粘结材料将碳纤维布粘贴在混凝土表面,不需设置锚固螺栓等,因而避免在已损伤的混凝土构件表面打孔,凿槽等引起新的破坏。

(6)、超强的防水防腐蚀效果

碳纤维布粘贴固化在混凝土表面,环氧树脂依附在混凝土结构表面,防水效果好,可防止钢筋锈蚀。碳纤维材料和粘接材料都具有极佳的耐腐蚀性能,不必担心建筑物经常遇到的各种外部酸、碱、盐介质对结构的腐蚀。

4 碳纤维加固公路桥工程实例

4.1 广东顺德南沙凌海桥

(1) 基本情况

广东顺德南沙凌海桥为凌海水闸顶公路桥,建于 70 年代,为梁板式公路桥,按汽-8 农桥标准设计。2001 年在邻近凌海水闸附近需修建一座南沙大桥。大桥施工期间,凌海水闸公路桥将成为该工程唯一的一条通道。

根据施工单位的要求,凌海水闸顶公路桥应通过汽-20 重车或 50T 汽车吊,经验算远远超过了原闸顶桥的承载能力。如原闸顶公路桥大梁的抗弯允许承载力 $[MPa]=171.2kN.m$,抗剪承载力 $[Q_{kh}]=63.8kN$ 。现要求大梁抗弯承载力 $M_p=392.6kN.m$,抗剪承载力 $[Q_{kh}]=223.9kN$ 。分别为即有桥大梁允许抗弯承载力的 2.29 倍,允许抗剪承载力的 3.5 倍。由此可见既有桥大梁的现有承载力远远不能满足南沙大桥施工期车辆通行的要求。必须采取有效措施,大幅度提高既有桥的承载能力。

(2) 处理措施的确

由于现有的凌海水闸顶公路桥的承载能力与要求的相差太多,因此,首先考虑的是拆除旧桥,按通过汽-20 重车或 50T 汽车吊的要求重新建造一座新桥。这样可确保安全、可靠,不冒风险。但建造新桥需较长的时间,将推迟南沙桥的施工。这是不可能的。故而决定采用对旧桥补强加固的措施来提高桥的承载能力。由于碳纤维加固比其它加固技术具有许多优点,如技术先进、可靠、施工简便、周期短等,因此最后采用碳纤维加固技术。

(3)、碳纤维加固设计与施工

①、碳纤维加固设计

凌海水闸顶公路桥碳纤维加固设计是按照原有大梁的缺筋量,由相当数量的碳纤维布来承担的原则进行的。碳纤维布采用 L300-C 型,其厚度为 0.167mm,抗拉强度标准值为 3550MPa,抗拉强度设计值为 2366 MPa (即为标准值的 2/3)。

碳纤维布的数量及粘贴方式如下:

a、在梁底面沿梁全长粘贴三层 L300-C 碳纤维布,内部两层尺寸为 300×5000 ,最外一层为 500×5000 ,此层碳纤维布是将梁底面及梁侧面 10cm 范围包复粘贴。梁侧部分碳纤维布除可承担一部分拉力外,还可约束梁下部混凝土的拉伸变形,可限制、延缓受拉区混凝土开裂,这也有利提高梁的承载力。

b、沿梁全长粘一层 L300-C 碳纤维 U 形箍板。

碳纤维布宽 150mm,高度与梁高相同。箍板间距 250mm。

②、碳纤维布加固施工

严格按碳纤维布施工工艺及技术要求进行。对以下几点特别加以重视:

a、混凝土表面的处理:这是影响加固质量的关键之一。必须将混凝土表面松散体、劣质混凝土凿掉露出坚硬的混凝土表面。混凝土表面凸出部分应磨平,凹进部分应用修补胶找平。要求粘贴碳纤维布的混凝土表面清洁、平整。

b、粘贴每一层碳纤维布时都要认真、细致,要确保浸渍胶完全、均匀地浸透碳纤维布。不允许发生

胶体未浸透碳纤维布和碳纤维丝之间有脱胶现象。

C、粘贴碳纤维箍板时,对梁底转角处要倒角,磨成圆弧形,要严格控制圆弧面光滑、平整,不得有棱角,圆弧半径 R 不小于 20mm。

(4)、加固效果检验

为了检验凌海闸顶桥补强加固的效果,在竣工验收时,用 300kN 载重汽车作满载过车试验。按正常车速,在桥上刹车、静止等各种工况进行试验,同时用简易方法测量大梁的挠度。测量结果大梁的最大挠度为 0.1~0.3mm,未发现异常情况,检验质量合格。该桥在南沙大桥一年多的施工期间,使用正常,也未发现异常情况。

(5)、结论

广东顺德南沙凌海水闸闸顶公路桥,由于严重超载,桥的承载力不满足使用要求。采用碳纤维布对大梁进行补强加固,大幅度提高了旧桥的抗弯、抗剪承载能力。加固施工工期短,仅用 5 天时间完成全部加固工程。该工程的成功充分显示了碳纤维布补强加固旧桥的优越性。

4.2 浙江云和县祈丰桥

(1)、基本情况

祈丰桥位于浙江云和县云和镇内。跨黄溪河,为河两岸交通通道。该桥为两跨简支梁板式桥,全长 15.5m,桥面宽 2.8m。该桥建于 1936 年,运行至今已 66 年。桥的主要病害有:

- ①、大梁存在裂缝,最大裂缝宽度 3mm;
- ②、梁、板混凝土碳化,部分混凝土剥落,钢筋外露且锈蚀。
- ③、桥面有下沉现象。

该桥作为云和镇内主要通道及县文物,要求进行保护性修复,满足原通行能力。

(2)、修复加固方案

由于该桥建于 1936 年,至今数十年,有关桥的设计资料已无法寻找,对加固设计造成很大困难。仅从目前使用情况,参考有关工程实例,从确保桥梁安全、可靠,满足强度、刚度要求的原则进行设计。同时还需考虑当地经济、条件,尽可能降低工程造价。

根据以上原则,祈丰桥的补强加固方案如下:

①、大梁采用湿包钢

大梁全断面包钢,钢板厚 6mm,梁两侧面用对穿螺栓,将两钢板锚固,在钢板与混凝土表面之间灌注 YZJ-2 建筑结构胶。加固后可提高大梁的强度和刚度。

②、桥面板粘贴碳纤维布

沿全桥在桥面板底粘贴碳纤维布,碳纤维布采用 L200-C 碳纤维布:碳纤维布宽 200mm,间距 200mm。粘接材料为 YZJ-C 粘贴碳纤维专用胶。

梁底板粘贴碳纤维布后可提高板的承载力,防止混凝土碳化,保护板内钢筋不锈化,可延长板的寿命。

(3)、加固效果

该桥于 2002 年 3 月完成补强加固,竣工验收时经现场过车试验,满足要求,运行至今情况正常未发现异常情况。

(4)、结论

祈丰桥由于使用年久(60 余年),构件发生混凝土碳化、钢筋锈蚀等病害,影响旧桥的强度和刚度。大梁采用湿式包钢可提高构件的强度和刚度,桥面板采用碳纤维布可提高板的抗弯能力和耐久性。

参考文献:

- [1] 第三届全国公路桥梁维修与加固技术研讨会论文集。 2001.11 贵阳

桥梁砼耐久性分析

陈顺伟¹, 薛克²

(1. 河北工业大学, 天津 300132; 2. 天津五市政公路工程有限公司, 天津 300171)

摘 要: 本文在综合论述桥梁砼耐久性的功能要求及其病害分析的基础上, 提出了相应的方法建议, 以利于在实际工程中对可能出现的问题进行较有效的解决

关键词: 砼耐久性 外观品质 氯化物影响 添加剂

1 概述

砼是广泛用于桥隧工程的基本材料, 它对桥梁的耐久性起到至关重要的作用。长期以来一直是设计与施工中的关键因素。

随着高等级公路及城市立体交通的迅速发展, 日益频繁的交通量和重载车辆超速行驶以及环境的变迁等因素对砼的耐久性产生了重大影响, 并对桥梁的安全与寿命产生了极大的危害, 这急需我们加以认识和解决。

2 耐久性良好的砼应满足的功能要求

2.1 外观

现今, 钢筋混凝土桥梁工程, 不仅对强度、几何尺寸等技术指标的要求越来越高, 而且对混凝土的外观质量的要求也越来越严格, 特别是结构外露部分。色泽统一、线型顺适、光洁平整直接影响砼的外观, 而砼的外观又影响桥梁的整体效果。

2.2 内在品质

(1) 强度

硬化后的砼在桥梁结构中受到复杂的动态复合应力, 因此对砼材料提出了多种力学强度指标, 其中包括: 抗拉、抗压、抗剪、抗弯、耐磨、抗冲等技术指标。在规定实验条件下 (温度 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 90% 以上), 经 28 天养护测得抗压强度值作为砼的标号, 其值必须达到或高于设计规范中所采用的砼的标准, 从而借助其较高的强度大大提高砼的耐久性。

(2) 变形

硬化后的砼变形主要包括非荷载作用变形和荷载作用变形。其中非荷载变形受化学收缩、干湿变形、温度变形的影响, 而荷载变形受弹—塑性变形与徐变的影响。在实际中应合理控制各种变形条件, 使其控制在允许范围之内, 产生合理均匀变形。

3 工作病害

2001 年天津市公路管理局组织了公路桥梁全面普查^[1], 主要针对已运营 10~30 年而使用寿命 50 年左右的桥梁。其观测调查表明: 桥梁砼的缺陷及病害现象非常普遍, 且其性状复杂多样, 从外观上主要可归纳为:

(1) 混凝土色泽方面的缺陷: 表现为混凝土色泽不一, 有模板锈迹, 混凝土面有明显的骨架垫块痕迹, 有细小的流沙现象, 特别是一些桥梁的墩柱;

(2) 混凝土线型方面的缺陷: 如混凝土防撞墙线型不顺适、不美观, 主梁外翼缘大没有形成圆滑的线型等;

(3) 混凝土本身表面缺陷：如漏浆、表面气泡、局部有凸凹等；

(4) 混凝土缝方面的缺陷：混凝土表面有错台、混凝土浇筑两个不同层面缝迹明显，混凝土施工缝处理不好等；

(5) 较严重的混凝土外观缺陷：表面呈蜂窝麻面、局部出现剥落、墩台出现网裂等，甚至个别桥梁出现砼的酥裂现象和大量裂缝宽度超过允许范围、露筋等。

以上桥梁砼的病害及缺陷在实际工程中出现的频率可见表—1 及图 1：

表—1 砼病害及缺陷出现频率

缺陷项目	气泡、漏浆	线型不好	接缝不好	色泽不一	剥落、漏洞
频率	54%	20%	15%	15%	5%

4 病害分析

4.1 理因素

(1) 偶然因素

车辆船舶的偶然撞击及地震、洪水等是砼偶然破坏的直接因素。所以对于桥位处地形、地质条件比较复杂的桥梁，需进行特殊处理。

(2) 变形因素

由于河床水位不断变化（导致干湿变形）、气候条件的变迁

（导致干湿变形）、气候条件的变迁（导致温度变形）及砼的徐变使其产生了一定的破坏。比如：混凝土在干湿变形）、气候条件的变迁（导致温度变形）及砼的徐变使其产生了一定的破坏。比如：混凝土在干燥环境中，由于水分蒸发，水泥凝胶体逐渐干燥收缩，使混凝土产生干缩，而干缩变形使混凝土表面产生拉应力，可引起表面裂缝，使混凝土的耐久性能降低。另外由于交通量超负荷运行也加速了砼的破坏。

(3) 施工质量因素

由于模板清除不彻底、支立线型不顺适、固定不牢固、模板接缝不平、导致砼外观不美观；砼级配不合理，粗骨料多，细骨料少，针片状含量多，导致集料密实空隙多、水灰比不当，水泥用量少，混凝土中自由水多、混凝土震捣时间不充分，不均匀等表面易产生气泡；养护不及时不认真使砼内的水份过早挥发，产生砼干缩裂缝，影响结构耐久性。

4.2 化学因素

(1) 酸雨作用影响

目前，酸雨经常会出现，虽然其酸性很小（人们往往忽略了其对砼的影响），但会在砼表面迅速泛滥，逐步破坏砼表面，使其耐久性受到严重影响。（如果不暴露在降水中，酸性会引起更快侵蚀）

(2) 氯化物和硫酸盐对砼影响^[2]

砼主要材料是水泥（ C_3A 、 C_4AF 、 C_2S 、 C_3S ）化学反映呈碱性。而自然界存在大量氯化物，它们可以以各种形式存在于砼中，如：

- ① 自由氯化物离子溶解在砼孔隙溶液中；
- ② 氯化物离子与水合作用的产物表面；
- ③ 氯化物建立在建筑物水合作用产物内部；
- ④ 氯化物与其它物质反应的产物中；

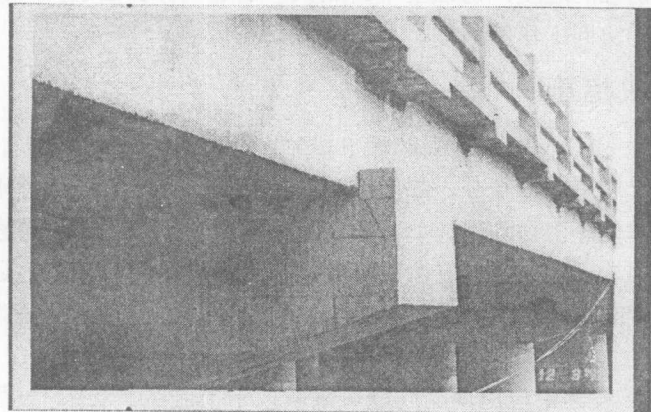


图 1 桥墩盖梁外观缺陷