

北京新闻出版局批准号：京内资准字2006—Ly0077号
《工程力学》刊号：ISSN 1000-4750 CN11-2595/O3

第15届 全国结构工程学术会议 论文集

第Ⅲ册

PROCEEDINGS OF THE FIFTEENTH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. Ⅲ

主编：崔京浩

《工程力学》杂志社

2006.8

序

第 15 届全国结构工程学术会议在焦作市河南理工大学召开。

河南理工大学是一所历史悠久的学校，它可以一直追溯到 1909 年成立的焦作路矿学堂，随着岁月的变迁和形势的发展，今天已经成为一所以理工为主，理、工、文、管、经、法等多学科的综合性大学，再有三年，即将步入我国少数几所百年学府的行列。

历史是一所学校的财富和贡献，近百年来河南理工大学为国家培养了约十万学子，不少人成为各条战线的栋梁之才，他们不无自豪地用“百年沧桑、十万芬芳”来赞誉培育他们的母校。

本次会议出版的论文集是经北京市新闻出版局正式批准的，共收录论文 274 篇，总计 1409 页，分装成三册，内容涵盖了国民经济各行各业与结构工程有关的技术研究成果和工程实践总结，具有重要的参考价值。

焦作市，北依太行，南滨黄河，风景秀丽，交通方便，我国第一批被联合国批准的世界地质公园——云台山就在近郊，为我们结构工程行业的技术人员提供了一个良好的工程地质学习的现场。为此会后将组织云台山考察，欢迎广大与会代表参加。

崔京浩



2006 年 8 月

第 15 届全国结构工程学术会议论文集

本次会议论文集收录论文 274 篇，共计 1409 页，分装成 3 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 册论文 69 篇（共 459 页），包括：特邀报告；1. 力学分析与计算的基本方法

第 II 册论文 99 篇（共 463 页），包括：2. 土木工程学科：2.1 钢与钢筋混凝土材料、构件与结构；2.2 岩土工程与地基基础；2.3 隧道与地下工程；2.4 水工、港工

第 III 册论文 106 篇（共 487 页），包括：2. 土木工程学科：2.5 铁路、公路、道路、桥梁、机场及市政设施 2.6 结构抗震与抗爆；2.7 特种结构如电视塔、大跨、索膜结构、体育场馆、网架、贮液池等；2.8 监控、鉴定、健康监测；2.9 事故分析、维修与加固；2.10 其他；3. 交叉学科及其他

第 15 届全国结构工程学术会议论文集目录

第III册目录

2 土木工程学科

2.5 铁路、公路、道路、桥梁、机场及市政设施

参数识别在赣江特大桥施工控制中的应用	白玉川 任伟新 (001)
碳纤维加固桥梁结构设计计算	方水平 宋固全 (005)
机场盖被施工中的道面板处理方法	冯道德 庄惠平 (009)
碎石预应力混凝土梁在中小桥梁中的简便应用	甘 敏 (013)
五跨钢筋混凝土连拱桥的动力特性	高铭霖 夏樟华 宗周红 (017)
连续梁桥横向影响线的研究	姜震宇 王克海 叶英华 (022)
预应力混凝土连续刚构桥 0# 块空间应力分析	李 俊 朱宏平 郭小川 (026)
高速铁路系杆拱桥结构体系设计参数研究	李小珍 何赓徐 刘德军 陈 列 (030)
车道荷载作用下无伸缩缝桥的受力分析	廖海亮 宋固全 谢莹莹 (035)
基于静动力测试的钢筋混凝土箱拱桥承载力评估	刘蔚晓 林传金 宗周红 (039)
大跨度斜拉拱组合桥非线性分析	吕建根 王连华 周海兵 赵跃宇 (046)
整体式桥台的曲线梁桥汽车荷载弯矩的横向分布研究	罗朝专 林志平 彭人文 (051)
应用改性聚脂纤维混凝土改善机场道面结构品质	罗昭俊 邓毅凌 田艳凤 (056)
边界转动约束面内弹性支承矩形板屈曲分析	毛 佳 蒋志刚 胡 平 易光湘 (060)
预应力混凝土箱梁腹板裂缝成因与防治	施 颖 吴鹤平 姚 君 (065)
西水二桥缆索吊系统布置和检算	苏 举 (071)
服役钢筋混凝土桥梁动态可靠度分析	孙晓燕 王海龙 黄承逵 赵国藩 (076)
强夯法施工中应注意的问题	滕桃居 丁菊芬 余 玲 郑建军 (082)
波形钢腹板 PC 箱梁桥的结构特点与施工	万 水 蒋正国 孟文节 (086)
关于预应力筋张拉控制的探讨	王秋山 吕 虎 (090)
水泥混凝土加铺沥青混凝土面层技术研究	徐永强 陈 亮 高艳青 罗军洪 (094)
大跨径单箱单室刚构桥箱梁的空间有限元分析	饶 舒 王克海 叶英华 (097)
高速铁路下承式系杆拱桥桥面型式的研究	刘德军 李小珍 朱 艳 陈 列 (101)
后张法预应力混凝土空心板张拉施工控制	晏致涛 李正良 王继成 (106)
钢箱梁桥面铺装体系超载敏感性静力学分析	杨建军 周志刚 (110)
几何缺陷对拱桥自振频率的影响	易壮鹏 金怡新 王连华 赵跃宇 (115)

SMA 在山东公路建设中的应用	袁有煌 杨永顺 (121)
带抗弯弹簧铰梁的自由振动分析	詹 豪 蒋志刚 胡 平 易光湘 (125)
斜拉桥拉索风雨振动试验新装置	詹 胜 徐幼麟 沈其民 周海俊 (129)
悬链线无铰拱的挠度计算	张 玥 (135)
连续刚构桥构造形式浅谈	赵树森 朱爱生 (139)
双跨 118m 钢筋砼箱型拱桥缆索吊装施工技术	苏 举 (144)

2.6 结构抗震与抗爆

三控制型核心筒部分悬挂结构振动台试验研究	曹万林 卢智成 常卫华 (148)
考虑竖向荷载时排架柱内力研究	刘 香 马 伟 陈 泽 郝铭科 (154)
土层软化与液化效应的现场测试结果分析	刘利艳 潘 健 (159)
不同地震动对单层框架动力稳定性的影响	刘迎春 张文福 计 静 (165)
锥头弹侵彻金属薄靶板变形功的一种计算方法	卢广州 何 煌 曾首义 (169)
带阻尼器高层方钢管混凝土框架结构振动台试验研究和计算分析	孟春光 吕西林 (174)
风灾及风振控制	尹智勇 熊 博 (180)
大跨度斜拉拱桥抗震性能分析	彭河星 王连华 赵跃宇 康厚军 (185)
PC 机群环境下结构动力响应的并行算法研究	茹忠亮 叶亚齐 李 艳 胡文亮 (189)
带巨柱的钢框架-核心筒结构参数分析	王堂根 李青宁 (193)
钢筋混凝土桥墩的弹塑性地震反应分析	夏修身 陈兴冲 (197)
地震作用下冷弯型钢对角支撑剪力墙非线性分析的探讨	肖启仁 樊 江 (201)
钢-混凝土混合结构板柱-筒模型抗震性能试验研究	阎兴华 苏志宏 朱清峰 马洪旭 (206)
浅液矩形 TLD 制振原理和制振力的研究	尹智勇 熊 博 季 凯 刘永康 (210)
消能减震结构的损伤集中分布研究	赵光伟 裴星洙 李 鹏 刘正伟 (214)

2.7 特种结构如电视塔、大跨、索膜结构、体育场馆、网架、贮液池等

壳体结构的有限元数值计算	米 源 桑宝岩 胡功笠 (219)
大跨索网结构风速时程数值模拟	李杰超 魏德敏 (222)
国际索膜结构设计规范和技术措施与我国规范的比较与展望	唐 钜 吴 清 那向谦 (228)
点式玻璃幕墙组合式柔性支承结构风致响应研究	毛文俊 刘锡良 (233)
佛山世纪莲体育场大跨度索膜结构的风振响应分析	孙文波 王剑文 (238)
双椭圆型弦支穹顶张拉成形模型试验研究	王泽强 陈佳男 李耿伟 里瑞林 武建勋 (244)
结构沉降控制及其自动化实现	张有才 张明军 (248)
ETFE 膜面材料与气袋膜在屋面工程中的应用	吴 清 唐 钜 那向谦 (254)
大跨度张弦梁结构抗震性能研究	朱向前 王跃威 李 栋 林 峰 武建勋 (260)

2.8 监控、鉴定、健康监测

多跨连续梁桥的损伤程度评估	杜 青 李晓会 (264)
混凝土结构火灾损伤检测技术研究进展	杜红秀 (268)
基于脉动数据的结构模态参数识别前处理分析	黄朝俊 秦 权 (273)

斜拉桥主桥的线型监控	李彦武 孙 凯 叶 松 (278)
模糊综合评判法在建筑工程质量评定中的应用	谢永亮 侯治宁 卢玉松 秦晨光 (282)
量测模态数量对结构损伤识别影响数值模拟研究	袁旭东 高 潮 高少霞 (286)
结构模型修正方法的研究与发展	张瑞云 曹双寅 (291)

2.9 事故分析、维修与加固

钢筋混凝土矩形断面双肋拱桥的结构补强	樊增彬 (296)
结构鲁棒性与突发损伤后的风险控制	方召欣 李惠强 (300)
砌体结构裂缝成因与加固措施	顾 辉 程才渊 (304)
刚架拱桥的结构补强	官世平 任维新 (309)
古城墙稳定性分析	李 刚 陈英杰 王 健 刘立权 (313)
CFRP 板加固预应力空心板受弯性能的试验研究 ...	莫测先 张 鹏 於永利 李 冰 韦永乐 韦树英 (317)
混凝土桥梁病害治理及防护	孙国钧 (322)
某车间倾斜事故的检测分析与加固	田瑞华 赵荣欣 赵丽萍 (327)
FRP 加固火灾后钢管混凝土的轴压性能的试验研究	王玲玲 陶 忠 于 清 (331)
CFRP 加固砌体结构的试验研究	韦昌芹 周新刚 (335)
某教学楼条形毛石基础植筋锚固技术的应用	徐建新 刘英利 (340)
搅拌桩-土钉支护结构内部稳定性分析方法	张 凡 夏逸平 华 雪 (343)
洞库塌方常见类型及处理技术研究	张 伟 厉 帅 陈 磊 张海波 (347)
平遥古城墙的损伤与处理建议	张文革 朱丽华 席向东 李永录 (351)
外贴 GFRP 加固 RC 双向板静载受弯性能分析	周布奎 王安宝 杨秀敏 汪忠新 (357)

2.10 其 他

隔震建筑的经济性分析	党 育 杜永峰 毕长松 (362)
点式玻璃幕墙破裂原因分析与控制措施	侯君毅 余晓青 方维凤 (367)
三维数值模拟方法在计算风工程学中的应用	李元齐 晏 琴 王 磊 (371)
《安装工程施工工艺标准》要点解析	王景明 (375)
高层建筑三维气动结构耦合设计优化	王婧超 李立州 岳珠峰 (379)
木桁架齿板连接极限承载力的试验研究	徐建新 王建娥 苏幼坡 (385)
有动质量旋转柔性梁的响应分析	闫安志 滕 军 徐 晖 鲁志雄 (390)
广州既有城市地下空间结构类型的调查研究	张季超 王 阁 陈 燃 许 勇 (394)

3 交叉科学及其他

DD8 单晶合金定向粗化有限元分析	吴文平 郭雅芳 (399)
某重型战机结构损伤的复合材料微波快速抢修	许陆文 董 露 (403)
砂土液化与管土相互作用	任艳荣 (408)
轴力作用下 TT 管节点应力集中系数的参数公式	邵永波 (411)

超高压缸的壁厚设计分析	王 红 (415)
改善某缩套超高压缸应力分布的最佳化设计方法	张于贤 (418)
水中悬浮隧道在均匀来流作用下的动力响应	惠 磊 葛 斐 洪友士 (422)
楔环连接结构静强度可靠性的数值模拟	尹益辉 徐 兵 刘光勇 (427)
弹体侵彻素混凝土靶破坏效应的理论分析	陈 亮 徐永强 王晓晖 何 勇 (431)
对 Bernard 岩体侵彻深度计算公式的讨论	龚白明 方 秦 (436)
防护工程遮弹层研究综述	何江华 王 浩 桑宝岩 陈太林 (445)
应用 ANSYS/LS-DYNA 进行侵彻研究初探	侯治宁 谢永亮 (449)
量纲法在弹丸垂直侵彻介质靶体中的应用	胡功笠 桑宝岩 米 源 (453)
穿甲子弹偏心入射陶瓷复合靶板数值模拟分析	申志强 曾首义 蒋志刚 (457)
常规爆炸荷载下地下浅埋结构毁伤预测	田艳凤 邓毅凌 梁济丰 (462)
柔性防弹材料抗侵彻机理分析	夏逸平 张 凡 (466)
长杆弹在岩石介质材料中侵彻爆炸试验研究	左 魁 曾宪明 李世民 李 林 王晓翠 (469)
冲击载荷作用下混凝土材料的本构关系	桑宝岩 米 源 何江华 梁 雷 胡功笠 (476)
基于 PLC 控制的数字化预应力智能张拉仪	贾敏智 郝志红 (480)
S-P 混杂纤维混凝土抗冲击试验	梁济丰 邓毅凌 王亚军 田艳凤 (484)

参数识别在赣江特大桥施工控制中的应用

白玉川¹，任伟新²

(1. 白玉川 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350002; 2. 任伟新 中南大学土木建筑工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 介绍了悬臂浇筑施工连续梁桥挠度计算方法和最小二乘法在此类大跨度桥梁施工控制中的应用, 结合赣江特大桥的施工, 提出了一种行之有效、简单易行的识别混凝土密度的方法, 并在该桥中得到应用。

关键词: 连续梁桥; 悬臂浇筑施工; 参数识别; 混凝土密度; 最小二乘法

1 前言

在桥梁设计以及施工控制的前期计算中, 使用的结构参数一般采用规范推荐值或国内外工程经验值。但是对于每一座不同的桥梁, 特别是大跨度桥梁, 这些参数与规范值都有一定的差距, 若不进行修正而直接采用各种规范推荐值或国内外工程经验值, 对于分段施工的桥梁, 特别是大跨度的分段施工桥梁, 在桥梁施工过程中以及施工完成后, 无论是在结构几何线形上还是在结构内力状态上, 都会与原设计形成一定的误差, 甚至影响结构的安全和正常使用^[1]。虽然一些反馈控制方法(如灰色理论等)能够通过控制理论, 消除由模型误差和测量噪声所引起的结构状态误差, 但是这种方法只是在施工误差产生后, 用调整措施减小已经造成的结构误差对最终结构状态的影响。而参数识别的方法主动降低模型参数误差, 使系统模型参数的取值趋于精确合理, 模型所反映的规律适应于实际情况。因此必须在桥梁结构施工控制的过程中对计算参数进行适当的修正, 以保证实际控制计算的准确性, 并最优地逼近于结构理想控制目标。

大跨度预应力混凝土连续梁桥施工控制的目的是使施工实际状态最大限度地与理想设计状态(线形和内力)吻合。影响桥梁结构线形和内力的参数主要包括: 结构几何形态参数、截面特性参数、与时间相关的参数、荷载参数、材料特性参数。对于不同的桥梁体系, 不同参数的影响程度不同, 通过灵敏度分析可以发现, 主梁节段重量对主梁标高的影响程度远比混凝土弹性模量、混凝土收缩徐变系数的影响大^[2]。本文以赣江特大桥主桥线形实测数据为依据, 采用最小二乘法对悬臂浇筑混凝土的密度进行识别。

2 参数识别方法

2.1 悬臂箱梁的挠度计算

梁体的变形是由弯矩和剪力所产生, 但两者比起来剪力影响非常小, 可以忽略不计。变截面箱梁的挠度采用共轭梁法^[3]计算, 原梁某截面上由于已知荷载产生的挠度, 应等于共轭梁上在该截面处由于虚荷载(原梁的弯矩值)产生的弯矩除以原梁的刚度。悬臂梁挠度计算简图见图1。

首先计算原梁在荷载作用下各截面上的弯矩 M_i , 以弯矩 M_i 作为共轭梁的荷载, 并计算出各截面上的弹性荷载 $q_i = \frac{M_i}{EI_i}$, 因各截面的 E 值相同, 可将其提出来, 使 $q_i = \frac{M_i}{I_i}$ 。将分布的弹性荷载折算成各截面上的集中荷载 W_i ^[4]。

$$W_i = \frac{l_i}{6}(2q_i + q_{i-1}) + \frac{l_i}{6}(2q_i + q_{i+1}) \quad (1)$$

W_i : 截面 i 处的集中荷载;

q_i : 共轭梁上截面 i 处的分布荷载集度;

作者简介: 白玉川(1978), 流不息男, 河北人, 助理工程师, 硕士研究生, 主要从事大跨度桥梁结构(E-mail: ycbai@fzu.edu.cn)
任伟新(1960), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构稳定与振动

l_l : 截面 i 左侧节段的长度;
 l_r : 截面 i 右侧节段的长度。

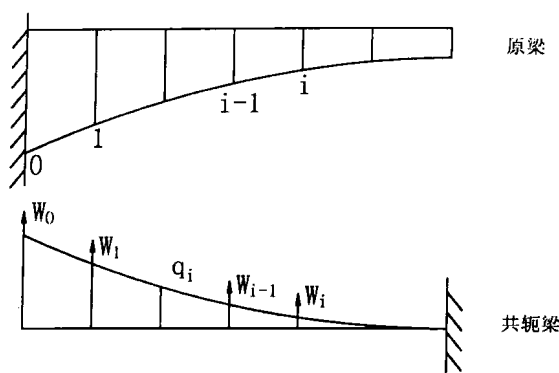


图 1 悬臂梁挠度计算简图

悬臂梁上 K 点的挠度为:

$$\delta_k = \frac{1}{E} \sum (W_i x_i) \quad (2)$$

δ_k : 悬臂梁 K 点的挠度;

E : 混凝土的弹性模量;

W_i : 截面 i 处的集中荷载;

x_i : 集中荷载 W_i 离截面 i 的距离。

2.2 最小二乘法在悬臂浇筑施工控制中的应用^[5]

最小二乘法在桥梁工程中广泛应用于斜拉桥的施工控制中,并取得了较好的成果。以下介绍在悬臂施工的连续梁(刚构)桥中的应用。

实测某一施工阶段主梁悬臂端 m 个节段的挠度为:

$$S = [S(1), S(2), \dots, S(m)]^T$$

该施工阶段理想状态的理论计算挠度为:

$$U = [U(1), U(2), \dots, U(m)]^T$$

则有误差向量:

$$Y = [Y(1), Y(2), \dots, Y(m)]^T$$

$$Y = U - S \quad (3)$$

待识别的参数为:

$$\theta = [\theta(1), \theta(2), \dots, \theta(n)]^T \quad (n \text{ 为参数误差识别的项数})$$

由 θ 引起的各节段挠度误差为:

$$y = [y(1), y(2), \dots, y(m)]^T \quad (4)$$

$$y = \phi \theta \quad (5)$$

式中:

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi(1,1) & \phi(1,2) & \dots & \phi(1,n) \\ \phi(2,1) & \phi(2,2) & \dots & \phi(2,n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \phi(m,1) & \phi(m,2) & \dots & \phi(m,n) \end{bmatrix}$$

ϕ 为参数误差 θ 到 y 的线性变换矩阵,由结构性能给定。

残差 $\varepsilon = Y - y = Y - \phi \theta$, 得 $Y = \phi \theta + \varepsilon$ 。

方差 $J = \varepsilon^T \varepsilon = (Y - \phi\theta)^T (Y - \phi\theta)$, 当 $\frac{\partial J}{\partial \theta} = 0$, 即 $\theta - (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T Y = 0$ 时, J 达到最小, 因此 θ 的最小二乘估计为:

$$\hat{\theta} = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T Y \quad (6)$$

引入加权矩阵:

$$\rho = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \rho_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \rho_n \end{bmatrix}$$

由此可以获得识别结果:

$$\hat{\theta} = (\phi^T \rho \phi)^{-1} \phi^T \rho Y \quad (7)$$

3 工程应用

3.1 工程概述

赣江特大桥为单线铁路大跨度预应力混凝土连续梁结构, 全长 3773.21 米。特大桥主桥采用 1-68m+2-120m+1-68m 预应力混凝土变截面连续箱梁桥, 是丰城电厂的运煤通道, 其 120m 的跨径为国内同类桥梁之最。

特大桥主桥连续梁体为单箱单室变高度变截面箱梁, 梁体全长 377.2m, 中跨跨中梁段和边跨端部梁段为等高梁段, 梁高 4.6m; 中支点处梁高为 9.2m, 梁底下缘按半径 208.926m 圆曲线变化, 底板顶面按半径 233.847m 圆曲线变化。箱梁顶板宽 8.0m, 箱宽 6.0m, 梁体按全预应力设计, 纵向、横向、竖向设预应力。主桥桥墩采用钢筋混凝土圆端形实体桥墩, 基础为钢筋混凝土钻孔桩基础。

赣江特大桥主桥共分 100 个节段, 除 0 号节段和边跨现浇段在支架上浇筑外, 其余梁段均采用挂篮悬臂浇筑方法施工, 悬臂浇筑节段最大重量为 1535kN, 图 2 为赣江特大桥主桥挂篮悬臂浇筑施工。

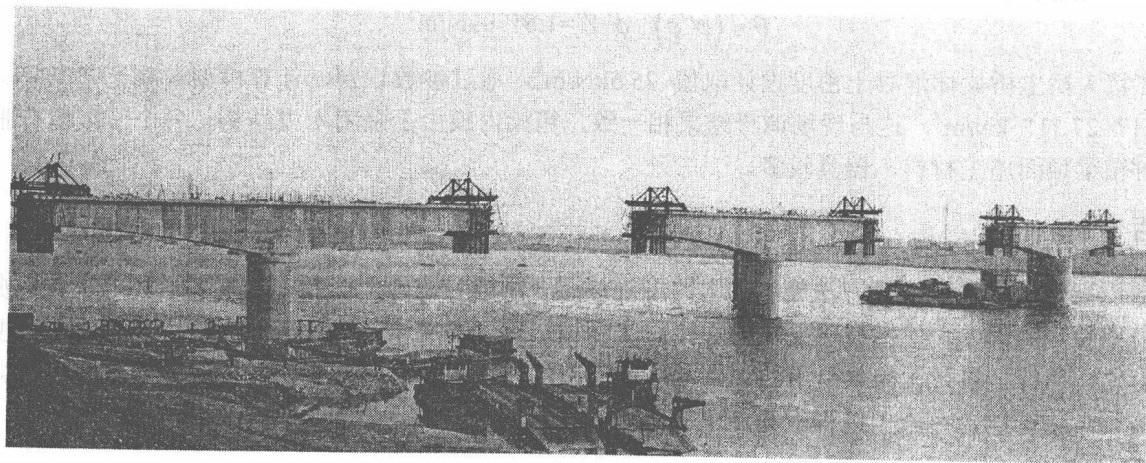


图 2 赣江特大桥主桥挂篮悬臂浇筑施工

3.2 混凝土密度的识别

影响大跨度桥梁线形的因素非常复杂, 由于悬臂浇筑施工中混凝土存在胀模等因素, 难免使节段超重, 节段超重的部分可以通过计算模型中混凝土密度的变化得到反映。赣江特大桥主桥采用 100 号墩河岸一侧 3~9 号节段对混凝土的密度进行识别。

9 号节段施工完成后实测 3~9 号节段的累计变形为:

$$S = [6 \quad 5 \quad 12.5 \quad 11 \quad 5 \quad 13.1 \quad 11.2]^T$$

相应的理论计算值为:

$$U = [4 \quad 5.8 \quad 7.8 \quad 9.4 \quad 10.7 \quad 11.2 \quad 9.6]^T$$

误差向量:

$$Y = S - U = [2 \quad -0.8 \quad 4.7 \quad 1.6 \quad -5.7 \quad 1.9 \quad 1.6]^T$$

误差向量认为是由于密度增量 $\Delta\rho$ 在构件中产生的超重所引起。

以 1 号节段至悬臂根部的节段作为 0 号节段, 悬臂根部截面作为 0 号截面, 梁体 C50 混凝土弹性模量为 3.55e4MPa, 全预应力混凝土截面刚度取 $0.85E_cI$ 。各个节段的长度及体积见表 1, 单位密度在构件中产生的超重在各截面上引起的挠度见表 2。

表 1 各个节段的长度及体积

节段号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
长度(m)	2.6	3	3	3	3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
体积(m ³)	53.642	57.905	54.010	50.484	47.303	49.916	46.503	45.296	42.820	40.756

表 2 单位密度在构件中产生的超重在各截面上引起的挠度

截面号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_i (m ⁴)	239.54	201.75	165.75	136.59	112.92	93.89	68.02	62.96	52.75	45.13	39.58
M_i (kN·m)	8177.75	6596.21	5281.92	4135.51	3145.83	2302.84	1489.49	844.86	375.50	93.87	0.00
q_i (kN/m)	34.14	32.69	31.87	30.28	27.86	24.53	21.90	13.42	7.12	2.08	0.00
W_i (kN)	43.76	91.76	95.22	90.42	83.12	79.85	73.23	48.24	25.65	9.01	1.21
δ_i (mm)	0	0.004	0.0183	0.0427	0.0766	0.1193	0.179	0.2477	0.3223	0.4001	0.4790

取

$$\phi = [0.0766 \quad 0.1193 \quad 0.179 \quad 0.2477 \quad 0.3223 \quad 0.4001 \quad 0.4790]^T$$

对于加权矩阵 ρ , 由于只对浇筑混凝土的密度进行识别, 取 $\rho=1$ 。

由最小二乘法可得密度增量 $\Delta\rho$ 的估计值:

$$\hat{\theta} = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T Y = 1.6170 \text{ kN/m}^3$$

赣江特大桥主桥梁体混凝土密度设计取值 25.5kN/m³, 通过参数识别, 计算模型混凝土密度应调整为 25.5+1.617=27.117 kN/m³, 这与现场调查结果相一致, 箱梁内模由于采用木模结构, 各个节段均有胀膜现象, 同时箱梁顶面施工材料、器具较多。

4 小结

参数识别是采用悬臂浇筑方法施工的大跨度连续梁(刚构)桥施工控制中的重要一环, 参数识别能主动降低模型参数的误差, 使模型所反映的规律与实际相一致。本文通过对赣江特大桥主桥混凝土密度的识别, 提出了一种行之有效、简单易用的识别混凝土密度的方法, 结合闭环反馈控制可以对大跨度桥梁进行有效的控制, 使得结构在施工过程中和施工完成后的线形和内力满足要求。

参考文献:

- [1] 葛耀君. 分段施工桥梁分析与控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [2] 韩大建, 苏成, 王卫锋. 崖门大桥施工监控的技术流程与主要成果[J]. 桥梁建设, 2003 (01), 5-8.
- [3] 龙驭球, 包世华. 结构力学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [4] 河北省交通规划设计院, 河北省交通工程大队第一工程队, 交通部公路规划设计院. 洛河预应力混凝土箱形连续梁公路桥设计施工经验[M]. 北京: 人民交通出版社, 1980.
- [5] 徐君兰. 大跨度桥梁施工控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.

碳纤维加固桥梁结构设计计算

方水平, 宋固全*

(南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330029)

摘要:提出了碳纤维布加固混凝土桥梁结构抗弯和抗剪设计的理论计算方法, 以指导桥梁结构碳纤维加固设计计算。在抗弯设计计算中, 不考虑混凝土的抗拉强度, 破坏形式为混凝土压碎和碳纤维布的拉断; 在抗剪设计计算中, 假定碳纤维布的抗剪作用机理与箍筋抗剪作用机理相同且碳纤维布的拉应变与箍筋拉应变相同。

关键词: 碳纤维; 混凝土桥梁结构; 加固;

1 我国目前桥梁现状及常用加固方法比较

由于我国交通事业的迅猛发展, 各种载重汽车、集装箱车、挂车、平板车及超载车辆频繁出现在公路桥梁和城市道路桥梁中, 部分已建成的桥梁已不能满足上述功能的要求, 所以对已建的不能满足使用功能要求的桥梁进行加固很有必要了。目前常用的加固方法有以下几种:

(1) 外包钢筋混凝土面层加固法: 通过在原桥梁构件外围增设钢筋混凝土面层, 从而增大构件断面来提高构件的承载能力、刚度及动力性能^[1]。其优点为能较大幅度提高构件承载力、刚度、延性、施工简单。其缺点为加固周期长^[2]。

(2) 粘钢加固法: 用粘结剂将钢板与原桥梁构件粘贴在一起来提高桥梁的承载能力及延性。其优点为施工方便、快捷对使用影响小。缺点为使用时对钢板养护费高, 且由于粘结剂的原因其使用环境温度不能大于 60℃^[2]。

(3) 体外植筋法: 在原桥梁的构件上再张拉预应力筋, 从而提高桥梁结构的承载力、延性。其优点为施工方便、周期短、不影响正常使用。缺点为使用养护费高, 对原桥梁的腹板、横隔板要求高。

(4) 碳纤维布加固法: 应用环氧树脂粘贴剂将碳纤维布沿受拉方向或垂直裂缝方向粘贴在桥梁补强结构上形成新的复合体, 使碳纤维与原钢筋混凝土共同受力, 提高结构的抗弯、抗剪能力。其优点为碳纤维材料具有优异的物理力学性能, 抗拉强度约为普通钢筋的十倍。弹性模量约为 $2.3 \times 10^5 \sim 5.8 \times 10^5 \text{MPa}$ 。非常适合钢筋混凝土结构的加固。其材质柔软、适用面广、施工便捷、同时具有良好的耐久性和耐腐蚀性。缺点为使用经验不多、费用较高而且也由于粘结剂原因, 使用环境温度不能大于 60℃。

2 碳纤维布加固设计计算原理

2.1 加固设计计算的基本假定

碳纤维布加固桥梁结构的承载力与原桥梁结构、新旧结构材料的应力—应变关系有关。从理论上讲只要这些因素确定则加固后桥梁结构的承载力就可用分析的方法求解。为使分析计算简化, 我们采用以下的基本假定进行计算分析:

考虑到桥梁结构均属于小变形结构, 故用碳纤维布加固后的梁、板截面采用平截面假定。

由于混凝土的抗拉强度是其抗压强度的 $\frac{1}{10}$ 左右, 所以设计计算时不考虑混凝土的抗拉强度。

在结构设计计算时必须引入混凝土的多轴本构关系。常用混凝土的本构关系模型有线弹性模型、非线性弹性模型、塑性理论模型等。碳纤维加固桥梁结构时混凝土处于二次受力状态、故本文混凝土模型采用欧

*方水平 (1981), 男, 江西人, 研究生, 主要从事桥梁动态检测及加固研究

宋固全 (1964), 男, 安徽人, 教授, 主要从事固体力学和工程力学方面的研究 (Email: gqsong@ncu.edu.cn)

洲混凝土协会提供的混凝土本构关系:

$$\sigma_c = \begin{cases} \sigma_0 \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right] & \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c0} \\ \sigma_0 & \varepsilon_{c0} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_{c0} 为混凝土屈服应变取 $\varepsilon_{c0} = 0.002$, ε_{cu} 为混凝土极限压应变取 $\varepsilon_{cu} = 0.0035$, σ_0 为峰值应力;

CEP-FIP 规范取 $\sigma_0 = 0.85 f_{ck}$, f_{ck} 为混凝土标准圆柱体抗压强度, 0.85 为折减系数。

钢筋采用理想弹塑性模型:

$$\sigma_g = \begin{cases} \varepsilon_g E_g & 0 \leq \varepsilon_g \leq \varepsilon_y \\ \sigma_y & \varepsilon_g > \varepsilon_y \end{cases} \quad (2)$$

式中: ε_g 为钢筋的应变, E_g 为钢筋的弹性模量, ε_y 为钢筋的屈服应变, σ_y 为钢筋的屈服应力。

碳纤维采用线弹性应力应变关系:

$$\sigma_{cf} = \begin{cases} \varepsilon_{cf} E_{cf} & 0 \leq \varepsilon_{cf} \leq \varepsilon_{cfu} \\ \sigma_{cfu} & \varepsilon_{cf} > \varepsilon_{cfu} \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_{cf} 为碳纤维布的应力, ε_{cf} 为碳纤维布的应变, E_{cf} 为碳纤维布的弹性模量, ε_{cfu} 为分碳纤维布的

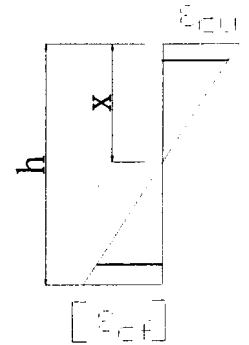
极限拉应变, σ_{cfu} 为碳纤维布的极限拉应力。

2.2 抗弯加固设计方法

碳纤维布加固梁、板抗弯承载力设计计算考虑两种破坏特性: 混凝土压碎、碳纤维布拉断。当碳纤维布达到极限拉应变同时受压区边缘混凝土达到极限压应变被压碎而发生的破坏称为临界破坏。此时混凝土受压高度与截面高度的比值称为相对受压高度临界系数 ξ_{cfb} 。由图 (1) 可得:

$$\xi_{cfb} = \frac{x}{h} = \frac{0.9x_c}{h} = \frac{0.9\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + [\varepsilon_{cf}]} \quad (4)$$

图 1 相对受压高度临界系数计算简图



式中: x 为混凝土等效矩形截面受压高度, h 为计算截面高度, x_c 为混凝土截面实际受压高度; $[\varepsilon_{cf}]$ 为碳纤维布的允许拉应变^[3]:

$$[\varepsilon_{cf}] = 1 - \frac{n_{cf} t_{cf} E_{cf}}{420000} \quad (5)$$

按 (5) 式计算得到的 $[\varepsilon_{cf}]$ 不应大于碳纤维布极限拉应变的 $\frac{2}{3}$ 和 0.01 两者中的较小者。 n_{cf} 为碳纤维布的层数, t_{cf} 碳纤维布为单层厚度 (mm), E_{cf} 碳纤维布的弹性模量 (Mpa), 0.9 为等效矩形截面受压高度系数,

其它符号意义同前面。

由矩形截面正截面受弯承载力计算简图(2)可得：当混凝土受压高度 $x > \xi_{cfb} \bullet h$ 时，发生混凝土受压破坏。此时弯矩设计值按下式计算：(取受拉钢筋合力点为力矩点，由力矩平衡可得)

$$M_j \leq \frac{1}{\gamma_c} R_a b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \frac{1}{\gamma_s} R'_g A'_g (h_0 - a') + \frac{1}{\gamma_f} E_{cf} \varepsilon_{cf} A_{cf} (h - h_0) \quad (6)$$

式中： x 、 ε_{cf} 由下式确定：

$$x = \xi_{cfb} \bullet h \quad (7)$$

$$R_a b x = R'_g A'_g - R_g A_g + E_{cf} \varepsilon_{cf} A_{cf} \quad (8)$$

当混凝土受压高度 $x \leq \xi_{cfb} \bullet h$ 时，发生碳纤维布拉断破坏。此时弯矩设计值按下式计算：(取受压钢筋合力点为力矩点，并假设混凝土合力点与受压钢筋合力点，由力矩平衡可得)

$$M_j \leq \frac{1}{\gamma_s} R_g A_g (h_0 - \frac{1}{2} \xi_{cfb} h) + \frac{1}{\gamma_f} E_{cf} [\varepsilon_{cf}] A_{cf} h (1 - \frac{1}{2} \xi_{cfb}) \quad (9)$$

式中： M_j 为弯矩设计值， R_g 为受拉钢筋抗拉强度设计值， R'_g 为受压钢筋抗压强度设计值， R_a 为混凝土轴心抗压强度设计值， h_0 为计算截面有效高度， a' 为受压区混凝土保护层厚度， A_{cf} 为受拉面粘贴的碳纤维布横截面面积， A_g 为受拉钢筋面积， A'_g 受压钢筋面积， γ_f 为碳纤维布工作条件系数， γ_c 为混凝土工作条件系数， γ_s 为钢筋工作条件系数，取值为 $\gamma_f = \gamma_c = \gamma_s = 1.25^{[4]}$ ，其它符号意义同上。

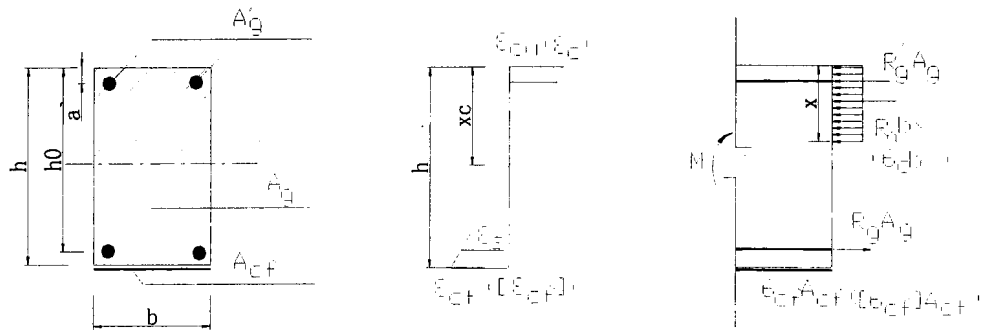


图2 矩形截面正截面受弯承载力计算简图

注：当 $x \leq \xi_{cfb} \bullet h$ 时混凝土、碳纤维应力、应变取括号中的值为设计值，当 $x > \xi_{cfb} \bullet h$ 时混凝土，碳纤维应力、应变取括号外的值为设计值。

2.3 抗剪加固设计方法

碳纤维抗剪加固设计计算时按《结构设计原理》规定弯起钢筋承担 40%的剪力，而箍筋和碳纤维布共同承担 60%的剪力。其计算简图如图(3)。此时剪力设计值按下式计算。计算假定：假定碳纤维布的抗剪作用机理与箍筋抗剪作用机理相同且碳纤维布的拉应变与箍筋拉应变相同。

$$Q_j \leq 0.349bh_0\sqrt{(2+p)\mu_{gk}R_{gk}\sqrt{R}} + 0.349bh\sqrt{(2+p)\mu_{cfk}E_{cfk}\varepsilon_{cfk}\sqrt{R}} + 0.06R_{gw}\sum A_w\sin\alpha \quad (10)$$

式中：\$Q_j\$ 为设计计算剪力，\$R_{gk}\$ 为箍筋设计强度，\$R_{gw}\$ 为弯起钢筋设计强度，\$A_w\$ 为弯起钢筋面积，\$p\$ 为

纵向钢筋配筋率（%），\$R\$ 为混凝土的标号，箍筋配筋率 \$\mu_{gk} = \frac{na_{gk}}{bS_{gk}}\$，\$\mu_{cfk}\$ 为碳纤维布的配筋率

\$\mu_{cfk} = \frac{n_{cfk}t_{cfk}b_{cfk}}{bS_{cfk}}\$，\$E_{cfk}\$、\$\varepsilon_{cfk}\$ 意义同前面 \$E_{cf}\$、\$\varepsilon_{cf}\$，\$n_{cfk}\$ 为碳纤维布层数，\$t_{cfk}\$ 为单层碳纤维布的厚度（cm），

\$b_{cfk}\$ 为碳纤维布的宽度（cm），\$S_{cfk}\$ 为碳纤维布的间距（cm），\$\varepsilon_{cfk}\$ 为碳纤维布的拉应变 \$\varepsilon_{cfk} = \frac{R_{gk}}{E_g}\$（假设碳

纤维布的拉应变与箍筋的拉应变相同），\$h\$ 为截面的高度（cm）。

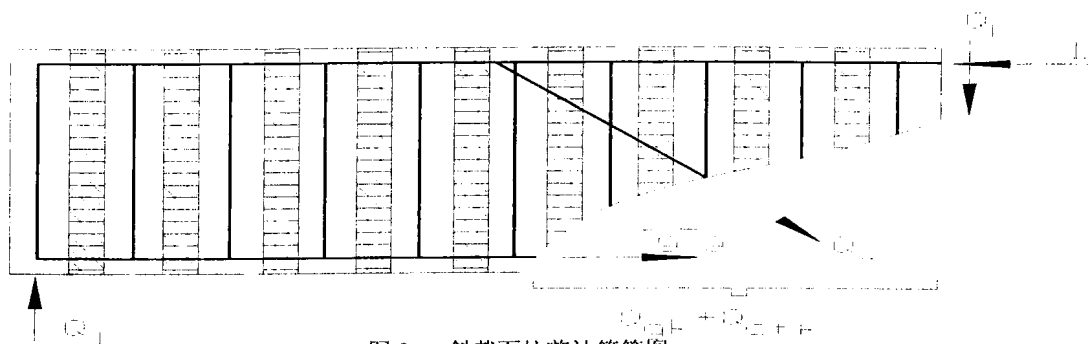


图3 斜截面抗剪计算简图

3 结束语

本文通过对碳纤维布加固混凝土桥梁结构梁、板矩形截面正、斜截面承载力设计计算方法基本原理的研究，给出其计算公式。其基本原理也适合加固其它形式截面如 T 形、箱形，工字形等截面的混凝土梁、板承载力的设计计算。

参考文献：

- [1] M. J. N 普瑞斯特雷, F 塞勃勒, G. M 卡尔维. 桥梁抗震设计与加固[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [2] 良桃, 王济川. 建筑结构加固改造设计与施工[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2002.
- [3] 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程[S]. CECS, 146: 2003.
- [4] 叶见曙. 结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [5] 吴刚, 安琳, 吕志涛. 碳纤维布用于钢筋混凝土抗弯加固试验研究[J]. 建筑结构, 2000. 30 [7].
- [6] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

机场盖被施工中的道面板处理方法

冯道德,*庄惠平

(徐州空军学院机场工程系, 江苏 徐州 221000)

摘要: 使用若干年后的旧水泥混凝土道面必然存在一些损坏和污染现象, 为了使新旧道面更好地粘结在一起, 避免旧道面的损坏及其板缝反射到新道面上, 通常在加铺新道面前应对旧道面进行处理, 并及时进行施工测量。对机场旧道面进行处理可以更好的延长其使用寿命, 而且还可以节省施工造价, 缩短施工工期。

关键词: 放线定位测量; 隔离材料; 加铺新道面; 铣刨; 环境温度;

1 引言

机场作为飞机起飞、降落的重要载体, 其存在的重要性极为关键, 在未来更将会发挥举足轻重的作用。但是, 由于我国一些民用以及军用机场普遍老旧, 加之水泥混凝土过去采用人工浇筑, 机场跑道普遍存在平整度差、摩擦系数不够等问题, 多数道面产生平整度恶化和抗滑性能差等明显的功能性损坏, 已不适应飞机使用要求, 因此, 对于机场旧道面板处理维修问题的研究是摆在我们面前所急需解决的。

2 旧道面板处理方法

2.1 机场旧道面板常见损坏类型

道面上的损坏不仅现象错综多变, 而且原因也很复杂, 各国通常采用主观评分表征道面损坏状况, 且将之与客观量测建立关系。道面损坏状况一般用道面状况指数 I_{pc} 表示。国外一般采用扣分值和扣分值修正曲线计算 I_{pc} , 该计算方法不仅复杂, 而且也不具有通用性。对机场道面的评价, 主要从道面的损坏状况、道面的结构强度、平面度和抗滑性能 4 个方面入手。

平整度可定义为道面表面诱使行驶飞机出现振动的高度变化。道面的不平整给飞机和旅客带来潜在的不安全因素, 并给增加飞机磨损和燃油消耗, 而且对飞机机械性能以及道面损坏速率等产生直接或间接影响。因此平整度成为度量道面使用性能的一项重要指标, 其特性和量测方法便成为机场工程中最关注的问题之一。

道面抗滑性能是道面安全性能的特征, 飞机起飞和着陆的安全性在很大程度上取决于跑道的表面特性。为了保障飞机安全, 必须对跑道的抗滑性能进行周期性调查, 评价当前道面抗滑能力。

国外对于机场道面的评价往往侧重于道面损坏状况, 只有在发现道面存在明显的结构损坏时才测试道面结构。我国在机场道面评价体系和管理系统方面的研究才刚刚开始, 有些机场虽然对跑道也进行一些调查评价, 但是对调查的资料却没有很好的分析, 资料也缺少连续性和规范性, 因此对于机场道面的管理, 依然处于依靠工程经验的基础上。

道面损坏现象是各种因素作用于道面结构的结果, 也是衡量道面服务潜力的最重要因素之一, 在决定道面是否需要维修、安排项目、决定方案时, 这是必须考虑的一个重要因素。因此必须对此作出系统、合理的评价。表 2-1 给出了机场道面板常见的损坏类型。

作者简介: 冯道德 (1973), 陕西人, 硕士生, (E-mail: fengdaode@hotmail.com)

*庄惠平 (1956), 男, 江苏人, 副教授, 主要从事防护工程研究 (E-mail: xzkjzhp1956@126.com)

表 2-1 道面板常见损坏类型

类别	损坏类型	特征描述
裂缝类	线状裂缝	裂缝通底, 将板块分为 2 块或 3 块
	交叉裂缝和破碎板	裂缝相互交叉, 将板块分为 3 块以上
	板角断裂	裂缝垂直通底且与板块两边接缝相交, 从板角到裂缝两端距离分别小于或等于裂缝两端点所在板长的一半裂缝
	持久裂缝	裂缝成细密的月牙形
接缝破坏类	填缝料损坏	填料挤出、硬化和损坏, 缝中长出野草, 填料未与混凝土粘结
	接缝	接缝两侧 60cm 宽度内或板角 60cm 范围内出现碎裂
	边角剥落	
表面损坏类	起皮, 网裂和裂纹	混凝土表面出现裂纹, 这些裂缝一般以 120 度的角度相交, 而且会引起混凝土起皮, 使混凝土板上层 6-13mm 的混凝土质量变差而脱落
		道面板块表层呈坑洞状态, 坑洞直径通常为 2.5-10.0cm, 深度为 1-5cm
	坑洞	道面板块表面呈现孔洞状, 与坑洞不同在于: 后者一般垂直于表面, 而前者一般与板面斜向相交
	表面剥落	
其他类	拱起	在横向裂纹、接缝处, 板块突然出现向上拱起的屈曲失稳现象, 并伴随着板块的横向裂纹
	沉降、错台	在接缝处出现高成差
	修补损坏	在一个区域, 原来的道面以被移去, 取代以填充材料, 且出现损坏
	唧泥	水和细料在轮载的作用下从接缝或裂缝中唧出

2.2 机场旧道面板的处理方法

使用若干年后的旧水泥混凝土道面必然存在一些损坏和污染现象, 为了使新旧道面更好地粘结在一起, 避免旧道面的损坏及其板缝反射到新道面上, 通常在加铺新道面前应对旧道面进行处理, 及时进行施工测量。

(1) 道面板上橡胶轮迹的清除

跑道两端起降地带的橡胶轮迹影响防裂层与道面板、沥青混凝土面层与旧道面板的粘结, 必须予以清除。一般采用高压雾化水进行清理, 控制好水流压力, 防止将混凝土板和填缝料损坏。目前国内有多家从事高压清洗的单位, 选择设备时, 一定要选择可以将废水回收循环利用的机械。进行此道工序施工时, 必须要保护好施工测量成果点标记, 或者选择在施工测量开始前完成。

(2) 施工测量