



卧波如虹

四川省公路学会桥梁专委会2005年技术交流会

论文集

四川省公路学会桥梁专业委员会 编



电子科技大学出版社

卧波如虹

——四川省公路学会桥梁专委会 2005 年技术交流会论文集

四川省公路学会桥梁专业委员会 编

电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

卧波如虹: 四川省公路学会桥梁专委会 2005 年技术交流会论文集/四川省公路学会桥梁专业委员会编.
—成都: 电子科技大学出版社, 2005. 11
ISBN 7-81094-975-6

I. 卧... II. 四... III. 公路桥—桥梁工程—四川省—文集 IV. U448.14-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 123788 号

内容提要

该文集收集了 2005 年四川省桥梁技术交流会交流论文 57 篇, 内容涵盖我省公路桥梁设计、施工、试验研究、理论分析等方面, 这些论文反映了我省桥梁建设的最新动态和技术水平, 可供桥梁专业的科研、设计、施工、管理人员以及高校师生学习、参考。

卧 波 如 虹

——四川省公路学会桥梁专委会 2005 年技术交流会论文集

四川省公路学会桥梁专业委员会 编

出 版: 电子科技大学出版社 (成都建设北路二段四号, 邮编 610054)

责任编辑: 谭 认 张蓉莉

策划编辑: 谢应成

发 行: 新华书店

印 刷: 成都教育印刷厂

开 本: 889mm × 1194mm 1/16 印张 17.5 字数 540 千字

版 次: 2005 年 11 月第一版

印 次: 2005 年 11 月第一次印刷

书 号: ISBN 7-81094-975-6/U · 2

印 数: 1—600 册

定 价: 60.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

编委会成员

(以姓氏笔画为序)

庄卫林	孙 云	张 琪	李 乔
杜秋仙	郑惠萍	罗凤林	谢邦珠
熊国斌	谭 认	臧棣华	

四川省公路学会桥梁专委会

委 员 名 单

(以姓氏笔画为序)

主任委员：张 琪

副主任委员：兰北章 庄卫林 孙 云 李 乔 罗凤林
蒋劲松 熊国斌

秘 书 长：谭 认

委 员：于天才 王福敏 王小平 向中富 刘晓泉
朱良清 刘任彪 伍锡玖 李天斌 陈正贵
陈 列 李明贵 吴宗奇 陈祯友 吴礼刚
李荣杰 李水生 张佐安 杨伯超 杨 平
段 政 唐 柳 唐 英 唐承平 郭科祥
夏玉龙 黄道全 曹 瑞 谢尚英 蒋永林
蒲黔辉 楼卫刚 魏功叙

顾 问：张联燕 李文琪 范文理 胡玉山 徐君默
谢邦珠 崔炳权 强士中 臧棣华

目 录

理 论 分 析

运用内力平衡法确定自锚式悬索桥的恒载吊索力	彭世恩 沈锐利等 (1)
体外预应力高强混凝土三跨变截面连续梁体外预应力筋应力增量分析	杨 莉 赵人达等 (6)
大跨度连续刚构桥的弹塑性动力时程分析	李光辉 蒲黔辉 (11)
钢管混凝土拱桥预拱度设计分析	牟廷敏 郑旭峰等 (22)
宜昌长江大桥梁拱墩结合块构造及空间应力研究	成文佳 蒲黔辉等 (25)
考虑土—结构相互作用的桥墩动力分析	邓晓红 申爱国 (29)
脱空对钢管桩柱工作性能的影响	牟廷敏 范碧琨等 (33)
重庆菜园坝长江大桥主拱静力稳定性分析	奉龙成 刘孝辉等 (38)
湛江海湾大桥主塔墩承台施工控制阶段的分析计算	张庆辉 申爱国 (44)
钢结构人行天桥动力特性探讨	杨 玮 (50)
桩—土相互作用对大跨度桥梁抗震的影响	李光辉 蒲黔辉 (56)
西攀高速公路大桥抗震设计分析报告	邬贵全 (62)
庙子坪岷江大桥抗震分析	申爱国 (65)

设 计 研 究

西攀高速公路白沙沟 1 号大桥的设计及施工技术研究	刘祖胜 熊国斌等 (70)
重庆巫山县巫峡长江大桥设计	郑远鹤 牟廷敏等 (76)
重庆巫山县巫峡长江大桥关键技术及试验研究	牟廷敏 郑远鹤等 (81)
重庆云阳长江公路大桥总体设计	牟廷敏 蒋自强 (88)
重庆云阳长江公路大桥设计计算分析	蒋自强 牟廷敏 (93)
昆明草海大桥参赛方案特点	王应良 蒋自强等 (99)
中国首座体外预应力连续刚构桥梁的设计——重庆新滩碛江大桥	郭晓东 李方元等 (104)
重庆菜园坝长江大桥的计算分析	田 波 牟廷敏等 (109)
佛山市东平大桥关键技术及试验研究	范碧琨 梁 健等 (114)
金江金沙江大桥设计	王 勇 李隆智 (119)

施 工 技 术

白沙沟 1 号桥主拱圈施工方案设计	廖 旭 张佐安等 (122)
悬索桥钢桁架加劲梁施工方法分析	王忠彬 沈锐利等 (126)

张拉锚跨丝股法架设悬索桥及其施工控制	孙玉平 沈锐利等 (131)
城门洞大桥超大竖井基础成孔施工技术	廖 旭 聂 东等 (136)
一种新型的岩孔式锚碇在大跨径拱桥施工的应用	刘祖胜 林小军等 (140)
重庆巫山县巫峡长江大桥施工技术	张佐安 (145)
重庆郁山大桥施工控制	陈 密 黄 东等 (154)
都汶路庙子坪岷江大桥主桥中跨合龙段施工技术	陈明凯 曹 瑞等 (158)
都汶路庙子坪岷江大桥主桥施工监控技术	王庆久 兰北章等 (163)
真空辅助压浆技术在都汶路庙子坪岷江大桥工程中的应用	王庆久 徐德玺等 (168)
西部地区建造预应力混凝土连续刚构桥的技术措施	曹 瑞 (172)
大跨径钢筋砼拱桥悬臂浇注挂篮设计研究	曹 瑞 裴宾嘉等 (175)
山区高速公路桥梁非常规施工技术	刘 静 廖 旭等 (180)
湖北黄陵洞大桥转体施工技术	刘祥国 屠 敏 (184)
预制场龙门架的设计计算方法介绍	裴宾嘉 聂 东等 (188)
浅谈桥梁桩基承台大体积混凝土施工防裂	陈祯友 刘 意等 (195)
宜宾长江大桥主 3 号墩桩基施工技术	程邦兴 李显俊等 (201)
钢筋混凝土箱型拱七节段吊装施工技术	付长江 陈正旭等 (206)
宜宾金沙江戎州大桥拱肋钢管桁架安装的施工技术	冉 钊 姚永喜等 (213)
浙江义乌江连续梁桥长索单端张拉问题探讨	李清培 邓亨长等 (216)
海上超长钻孔灌注桩施工	于志兵 (219)
金沙江大桥大型承台施工中的温度控制	王 俊 (225)
塔索结构内力及塔顶位移分析	付长江 陈正旭等 (229)
山区高速公路横向陡坡地段桥台设计型式的优化	张武先 何 勇等 (233)
钢管砼拱桥预拱度设置分析	付长江 陈正旭 (235)
山区陡坡地段桥墩基础形式探讨	潘 华 王 屹等 (238)
泸州泰安长江大桥索塔桩基承台基坑止水降水施工	楼卫刚 (240)

建 设 管 理

预应力混凝土连续刚构桥建设质量控制方法探讨	陈 斌 (243)
西攀高速公路建设管理探讨	何 勇 潘 华 (246)

加 固 与 维 修

大跨危桥拆除工艺与施工力学分析	王福敏 钟建国等 (250)
宜宾马鸣溪金沙江大桥加固技术	黄 勇 张佐安等 (255)
大悬臂空心板裂缝处治方案探讨	向可明 杨才金 (260)
泸州龙泉大桥非机动车道改机动车道加固提载措施	楼卫刚 叶华荣等 (264)
公路桥梁板式橡胶支座应用状况分析与改进建议	夏玉龙 蒋劲松等 (268)

运用内力平衡法确定自锚式悬索桥的恒载吊索力

彭世恩 沈锐利 唐茂林

(西南交通大学土木工程学院 成都 610031)

【摘要】 与一般悬索桥相比,自锚式悬索桥恒载合理吊索力的确定成为设计和施工中的一个难点。基于内力平衡法,对自锚式悬索桥的成桥吊索力进行研究,首先用最小弯曲能量原理法求出初步的索力,然后利用索力得到恒载弯矩,利用挠度理论求出活载作用下结构的最不利弯矩,将恒载与活载弯矩叠加,获得结构的初步控制弯矩后,采用内力平衡法对弯矩和索力进行调整以得到合理的索力。

【关键词】 悬索桥;索力;自锚式;挠度理论;内力平衡法

【中图分类号】 U442

【文献标识码】 A

自锚式悬索桥的施工方法是先架设加劲梁,然后架设主缆和安装吊索,所以相对于一般地锚式悬索桥,在合理的恒载吊索力的确定方面有很大的差别。在斜拉桥结构设计中,对合理的恒载张力的确定有许多成熟的方法。本文利用斜拉桥中常用的内力平衡法的设计思路,研究自锚式悬索桥合理的成桥吊索力的计算方法。

1 用最小能量原理求恒载作用下初始索力

为了对于恒载作用下的理想的吊索力进行研究,把自锚式悬索桥结构进行计算简化。简化的结构计算模型为:主缆和吊索切断,用力 x_i 来代替($i = 1, 2, 3 \cdots n$),如图1所示。设 $x_i = 1$ 作用的时候,产生的梁弯矩为 m_i ,静载作用下的基本结构的弯矩为 M_p ,那么任意截面的总弯矩^[4]:

$$M = M_p + \sum_{i=1}^n x_i m_i \quad (1-1)$$

n 为吊索的根数。

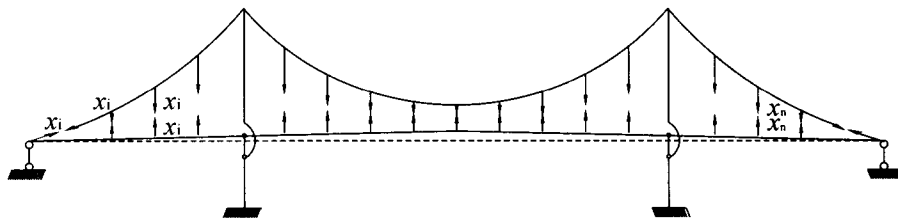


图1 自锚式悬索桥吊索力分析基本结构图

$$\text{所以弯矩产生的能量为: } U = \frac{1}{2} \int \frac{M^2}{EI} ds \quad (1-2)$$

将式(1)代入(2),有:

$$U = \frac{1}{2} \int \frac{1}{EI} [M_p + \sum_{i=1}^n x_i m_i]^2 ds = \frac{1}{2} \int \frac{1}{EI} [M_p^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j m_i m_j + 2M_p \sum_{i=1}^n x_i m_i] ds \quad (1-3)$$

$$\text{令: } \delta_{ij} = \int \frac{m_i m_j}{EI} ds \quad (1-4)$$

$$\Delta_{ip} = \int \frac{m_i M_p}{EI} ds \quad (1-5)$$

$$\text{则有: } U = \frac{1}{2} \left[\int \frac{M_p^2}{EI} ds + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j \delta_{ij} + 2 \sum_{i=1}^n x_i \Delta_{ip} \right] \quad (1-6)$$

由公式知弯矩能量与索力有关系,要使最小,其必要条件为:

$$\frac{\partial U}{\partial x_i} = 0 \quad (1-7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j \delta_{ij} + \Delta_{ip} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-8)$$

由以上具有 n 个方程,因此能解得静载作用下的索力而使弯矩能量最小,从而得到索力 x_i ,已知 x_i 后,就

$$\text{利用主缆来加载均布荷载,如图 2 所示: } q = w + \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{l} \quad (1-9)$$

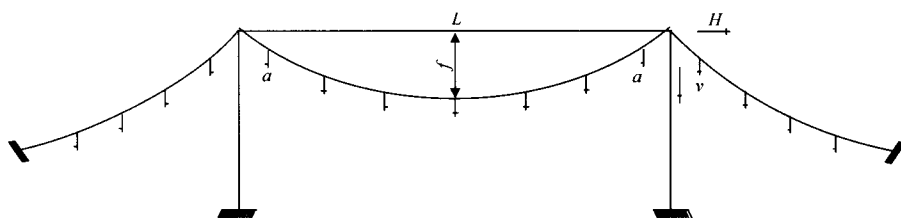


图2 主缆线形分析图

可以得到主缆的水平分力(作近似的抛物线处理),有公式^[1]为:

$$H_g = \frac{ql^2}{8f} \quad (1-10)$$

q ——主缆无应力恒载;

w ——主缆单位长度重量;

l ——主缆的弦长;

f ——主跨主缆的矢高;

H_g ——主跨主缆恒载作用下的水平分力。

2 利用挠度理论求活载弯矩和轴力

由索力 x_i 就可以用基本结构求出加劲梁上任意点的弯矩 M ,以此作为恒载作用下的弯矩 M_g ,主缆的水平力 H_g ,作为加劲梁恒载作用下的轴向力 N_g 。

$$\text{由一般悬索桥的挠度理论有}^{[2]}: M = M_0 - H_p y - (H_g + H_p) \eta \quad (2-1)$$

对于自锚式悬索桥而言,假定主缆的水平力作用于梁端加劲梁形心,由于还有加劲梁竖曲线的影响,则轴向力将在加劲梁中产生附加弯矩 $(H_g + H_p)(\eta - y')$,于是有自锚式悬索桥的挠度理论有:

$$M_p = M_0 - H_p y - (H_g + H_p) y' \quad (2-2)$$

式中: M_0 ——活载弯矩;

H_g, H_p ——分别为恒载和活载引起主缆张力的水平分力;

η ——主缆和加劲梁的竖向挠度;

M_p ——加劲梁弯矩;

y ——主缆恒载下的线形曲线;

y' ——加劲梁恒载作用下的竖曲线。

由于挠度理论中没有考虑恒载作用下的弯矩,所以对于加劲梁任意处的弯矩应该是:

$$M = M_g + M_p \quad (2-3)$$

$$\text{加劲梁所受的轴向力为: } N = H_g + H_p \quad (2-4)$$

3 内力平衡法进行吊索力的调整

利用内力平衡法^[3]能够求出在恒载和活载作用下加劲梁截面的上、下翼缘的应力,则在恒载和活载作用下的最大拉应力 σ_{sl}, σ_{xl} ,有(统一规定应力以拉为正、压为负):

$$\sigma_{sl} = -\frac{N}{A} - \frac{M}{W_s} \leq \frac{[\sigma_l]}{n} \quad (3-1)$$

$$\sigma_{xl} = -\frac{N}{A} - \frac{M}{W_x} \leq \frac{[\sigma_l]}{n} \quad (3-2)$$

恒载和活载作用下的最小压应力 σ_{sa}, σ_{xa} 有:

$$\sigma_{sa} = -\frac{N}{A} - \frac{M}{W_s} \geq \frac{[\sigma_a]}{n} \quad (3-3)$$

$$\sigma_{xa} = -\frac{N}{A} + \frac{M}{W_x} \geq \frac{[\sigma_a]}{n} \quad (3-4)$$

$$\therefore \text{有 } M \geq \left(-\frac{N}{A} - \frac{[\sigma_l]}{n} \right) W_s = m_{dl2} \quad (\text{上翼缘拉应力}) \quad (3-5)$$

$$M \leq \left(\frac{N}{A} - \frac{[\sigma_l]}{n} \right) W_x = m_{dl1} \quad (\text{下翼缘拉应力}) \quad (3-6)$$

$$M \geq \left(\frac{N}{A} - \frac{[\sigma_a]}{n} \right) W_x = m_{da2} \quad (\text{下翼缘压应力}) \quad (3-7)$$

$$M \leq \left(-\frac{N}{A} - \frac{[\sigma_a]}{n} \right) W_s = m_{da1} \quad (\text{上翼缘压应力}) \quad (3-8)$$

由公式(3-5)~(3-8)可以得到:

$$M_{dl} = \text{Min}(m_{dl1}, m_{da1}) \quad \text{控制正弯矩} \quad (3-9)$$

$$M_{dl} = \text{Max}(m_{dl2}, m_{da2}) \quad \text{控制负弯矩} \quad (3-10)$$

$$\text{则有最小的控制条件为: } M_{dl} \leq M \leq M_{dl} \quad (3-11)$$

由此判断是否满足上述条件,满足则成立,否则要进行索力 x_i 的调整,求出轴力 N 和弯矩 M ,再求出 M_{dl} 、 M_{dl} ,最后与 M 比较,检查是否满足条件,由此循环直到满足条件为止。

$[\sigma_a]$ ——材料的容许压应力;

$[\sigma_l]$ ——材料的容许拉应力;

n ——设计的系数。

4 程序框图

采用平面杆系结构程序来进行吊索力的初步计算,按照以下的流程求解恒载状态的合理吊索力值。分析的流程图如图3所示。

5 算例

某大桥主桥的跨径组合为:10×50.5m(连续梁)+732m(自锚钢箱梁悬索桥)+5×50m(连续梁),桥梁全长为1487m;主跨跨径:中跨为328m,东、西边跨分别为132m及70m;矢跨比:中跨为1/5,边跨为1/12.4;吊索型式:上下销接式预制平行索股,每个吊点设2根吊索,吊索间距为12m,吊索钢丝绳直径为45mm;索塔高度:索塔桥面以上为

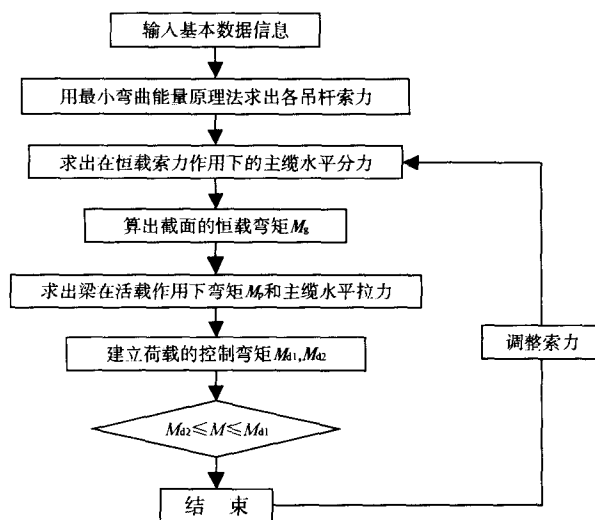


图3 流程图

71.097m, 基顶以上为 108.160m; 主缆中心距离为 25.0m, 主缆由 91 束预制索股构成单缆, 预制索股由 61 丝 $\Phi 5.1\text{mm}$ 镀锌高强钢丝组成; 加劲梁型式为扁平闭口钢箱梁, 正交异性板桥面; 加劲梁高为 3.6m (桥轴中心处), 高跨比为 1/91.1, 加劲梁全宽为 33.0m, 宽跨比为 1/9.9。桥型布置如图 4 所示, 采用的一期恒载计算参数如表 1 所示, 二期恒载 (包括桥面铺装和附属设施) 按 60.5kN/m 考虑。活载按步道人 群 $6 \times 4\text{kN/m} = 24\text{kN/m}$, 汽车超-20 级, 挂车-120 级。

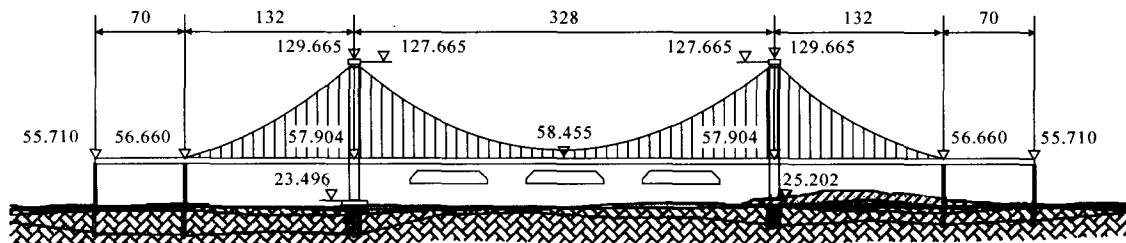


图 4 自锚式悬索桥的桥型布置图 (单位: m)

表 1 一期恒载 (单位: kN/m)

节段类型	A1	A	B	C	D	E	F	G	H
单位长度重量	188.0	179.44	184.33	173.55	184.33	198.89	236.88	183.16	242.57

桥梁的有限元计算模型如图 5 所示。

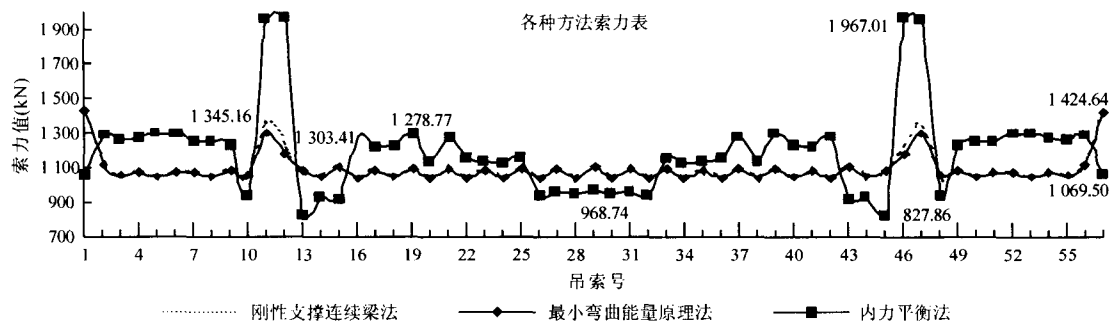


图 5 恒载作用时的索力比较图

通过分析程序, 能够求出在刚性支撑连续梁法、最小弯曲能量原理法和内力平衡法的索力值。在索力优化求值的过程中, 与主缆锚固处相邻的二对吊索出现了负值, 则此吊索退出工作。以下为三种方法求出恒载状态下索力值和弯矩值的比较图如图 6 所示。

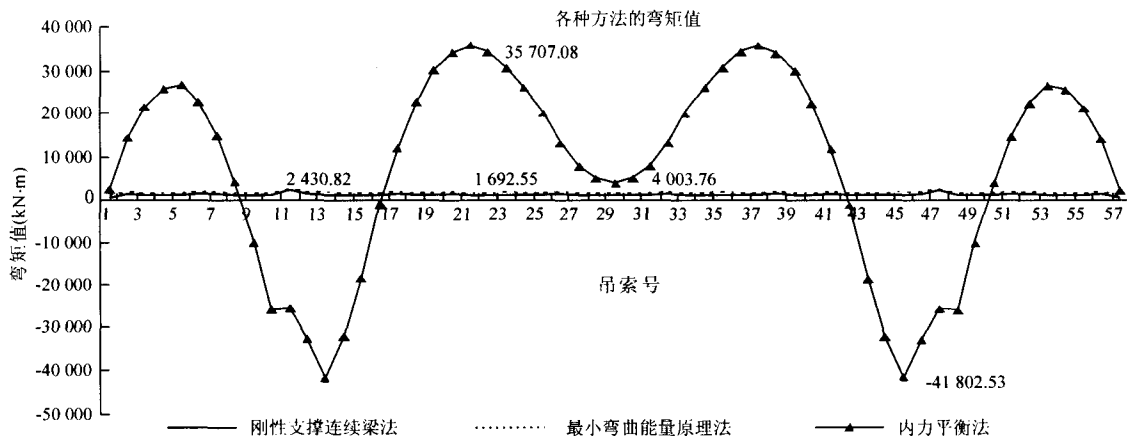


图 6 恒载作用时的弯矩比较图

从图 6 中的索力值比较可以得出:恒载作用下的刚性支撑连续梁法和最小弯曲能量原理法的索力差别不大在 50kN 以内,而内力平衡法则有较大幅度的调整。虽然在跨中的变化不大,但是在靠近桥塔的吊索力与前两种方法相差 700kN 之多。这表明在考虑活载的情况下,对恒载状态的索力影响很大。在图 5 的恒载弯矩值的比较中,从图中看到的刚性支撑连续梁法和最小弯曲能量原理法的弯矩值波动幅度很小,大多在 1 700kN·m 左右,它对梁的应力影响也是在 1MPa 以内。而内力平衡法中的弯矩最大达到了 -41 802.53kN·m,这样对总体荷载下的梁影响就比较大了。

由计算得到,三种方法中的索力值所引起的主缆水平力变化很小,最大相差只有 10kN,相对于单根主缆的水平力是 26 310.5kN,所以与此相比可以忽略不及。这样可以从挠度理论中得到三种方法下的活载引起弯矩和应力值是一样的。而最小弯曲能量原理和刚性支撑连续梁法的恒载应力相差很小,以下只比较最小弯曲能量原理法和内力平衡法索力状态下恒载 + 活载(汽超 - 20 + 人群荷载)组合上下缘的应力包络图如图 7、图 8 所示。

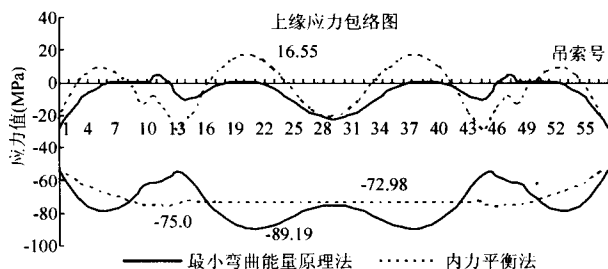


图 7 上缘应力包络图

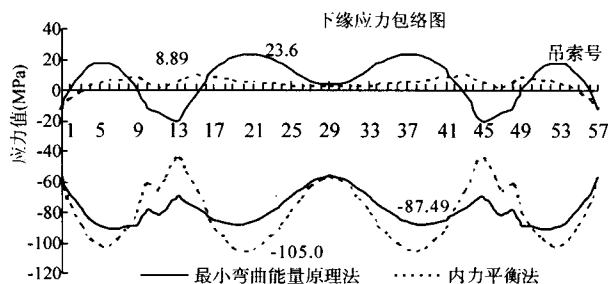


图 8 下缘应力包络图

在活载和恒载的组合作用下,内力平衡法上缘最大拉应力为 16.55MPa,最大压应力为 75.0MPa。下缘的最大拉应力为 8.89MPa,下缘的最大压应力为 105.0MPa。按控制上缘最大应力不超过 75MPa,下缘最大应力不超过 105MPa,能够通过调节来满足要求。此方法证明是可行的,如果作为施工的控制过程,能够利用倒拆法做出相应的索力调整步骤来实现。

6 结 论

本文借用斜拉桥常用的内力平衡法确定自锚式悬索桥进行成桥状态的恒载索力,运用自编程序进行调整,通过算例对三种常用的方法进行比较,证明了在考虑活载的情况下,可以利用内力平衡法进行调节的,能够用于工程实践,对设计和施工有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 铁道部大桥工程局桥梁研究所. 悬索桥[M]. 北京:科学技术文献出版社,1996.
- [2] 钱冬生,陈仁福大跨度悬索桥的设计与施工[M]. 成都:西南交通大学出版社,1999.
- [3] 周孟波. 斜拉桥手册[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [4] 李传习,夏桂云等. 大跨度桥梁结构计算理论[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [5] 唐茂林. 大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发[D]. 成都:西南交通大学博士学位论文,2003.

体外预应力高强混凝土三跨变截面 连续梁体外预应力筋应力增量分析

杨 莉¹ 赵人达¹ 张晓勇²

(1. 西南交通大学土木工程学院 成都 610031; 2. 铁道部大桥局设计院 武汉 430050)

【摘 要】 根据四片不同预应力度及不同普通钢筋配筋率的体外预应力三跨变截面连续梁静力加载试验, 针对体外预应力应力增长规律进行了较为深入的研究, 提出了三折线刚度折减按弹性理论计算预应力筋应力增量的简便方法, 用非线性数值分析方法编制了计算预应力筋应力增量的程序, 验证了本文所得计算方法的正确性。

【关键词】 体外预应力; 连续梁; 应力增量; 简便方法; 非线性数值分析

【中图分类号】 U441

【文献标识码】 A

1 概 述

体外预应力是后张预应力体系的重要分支之一, 近年来正成为预应力技术的热点。体外预应力混凝土结构的优点在于: 预应力筋套管布置简单, 调整容易, 简化了后张法的操作程序, 大大缩短了施工时间; 由于预应力筋布置于腹板外面, 使得浇注混凝土方便; 同时也减少了施工过程中摩擦损失, 且更换预应力筋方便易行。

实际工程中, 体外预应力筋应力增量是计算体外预应力梁极限承载力的难点和关键所在。目前我国规范中尚无体外预应力应力增量的计算方法。相关研究成果表明^[1], 《美国公路桥梁设计规范》(AASHTO 1994) 针对简支梁的试验研究给出的公式计算结果与试验最为接近, 精度最好, 但需要进行反复试算。欧洲国家采用的规范偏于保守, 而 ACI 建筑规范建议公式的计算结果往往偏大。为进一步研究体外预应力连续梁的力学性能, 结合成都市城建科研项目“体外预应力高强混凝土桥梁新技术的开发与应用研究”, 设计、制作了四片不同预应力度取值的体外预应力三跨变截面连续梁, 并对其进行静力加载试验。本文则针对体外预应力应力增长规律进行了较为深入的研究, 提出了三折线刚度折减按弹性理论计算预应力筋应力增量的简便方法, 并编制了程序对其进行验证, 结果证明该方法是正确的。

2 试验简介

2.1 试验梁的设计

本试验设计了 4 片不同预应力度及不同普通钢筋配筋率的体外预应力高强度混凝土变截面连续梁, 根据连续梁的使用特点, 将中支座设计为 PPC A 类, 跨中设计为 PPC B 类。图 1~3 分别表示试验梁配筋图、加载及测试装置示意图及混凝土应变片布置图。

2.2 试验梁的制作

试验梁在西南交通大学结构试验中心制作, 分两次浇筑, 第一次浇筑底板及 1/3 腹板, 第二次浇筑顶板及 2/3 腹板。图 4 及图 5 为试验梁的制作过程, 图 6 为加载及测试全景。

3 试验结果分析

为测量试验梁体外预应力筋的应力增量, 特为每束钢绞线加工了两个传感器。在张拉前, 每束钢绞线的一端均预置一个已标定的传感器。在进行梁的静力测试时, 对传感器进行应变测量, 即可获得相应的应力增量。

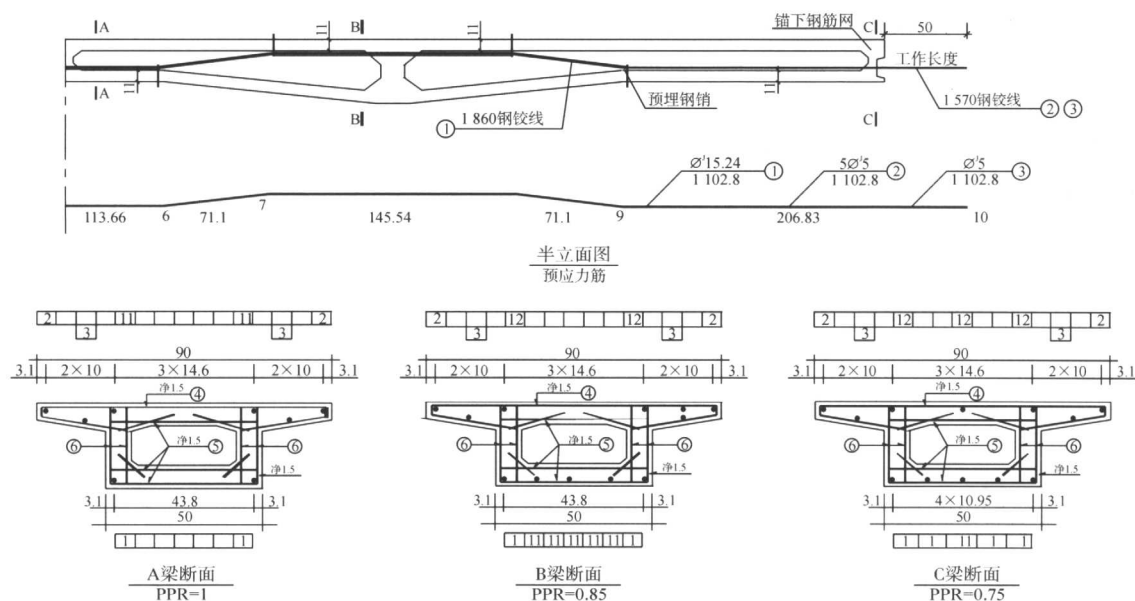


图1 试验梁预应力钢筋及普通钢筋构造图

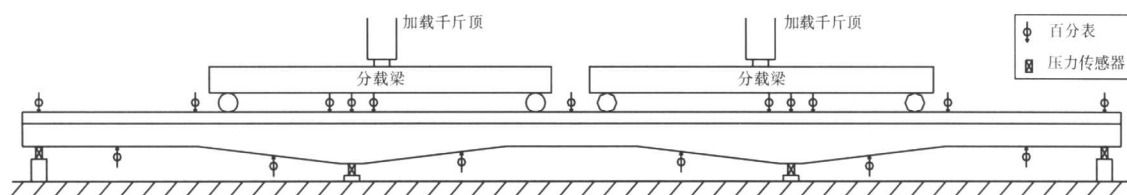


图2 加载及测试装置图

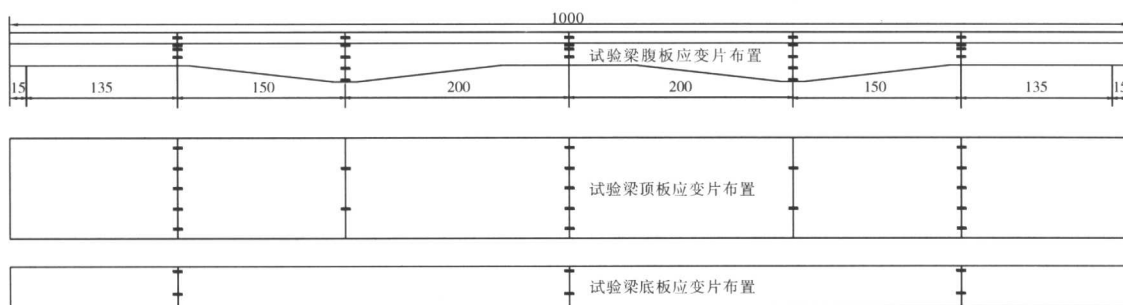


图3 混凝土应变片布置图

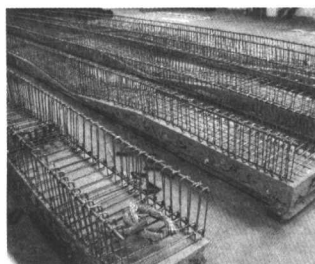


图4 试验梁钢筋制作图

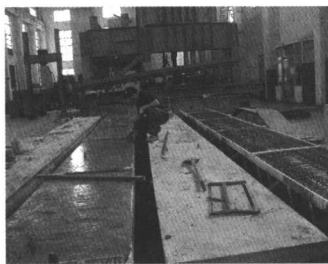


图5 试验梁混凝土浇筑图

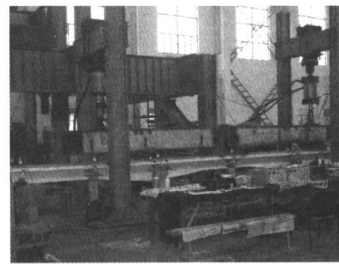


图6 加载及测试全景图

由于除在锚固和转向区外,体外预应力筋与梁体混凝土可产生自由的相对运动,它与混凝土之间的变形不再协调,因此其极限应力不能通过控制截面平面变形分析的方法计算,其应力增量只能通过结构的总

体变形求得。国内外研究成果表明：体外预应力梁跨中挠度与应力增量随荷载曲线形状十分相似，它们具有明显的相关性。将试验梁应力增量、挠度 - P，应力增量 - 挠度关系曲线分别绘于图 7、图 8。从图 7 可以看出，两种曲线的发展规律十分相似，因此可尝试将应力增量的复杂计算转化对梁体控制截面的挠度计算。由图 8 可定性归纳出应力增量与挠度的关系式为：

$$\Delta\sigma = d * f + e \quad (3-1)$$

式中， d 、 e 的取值与 PPR 值一一对应。为得出 d 、 e 与 PPR 的关系式，应用非线性有限元程序对 PPR = 0.7 ~ 1 的数十根梁的应力增量进行非线性数值分析，以弥补试验梁数量的不足。将计算结果的 d 、 e 与 PPR 的关系曲线绘于图 9。用最小二乘法对计算结果进行回归分析，得出系数 d 、 e 与 PPR 的关系式如下（式中用 x 表示 PPR 取值）：

$$d = -50.17x^2 + 92.831x - 40.908 \quad R^2 = 0.9976 \quad (3-2)$$

$$e = 97.317x^2 - 170.57x + 73.99 \quad R^2 = 0.9997 \quad (3-3)$$

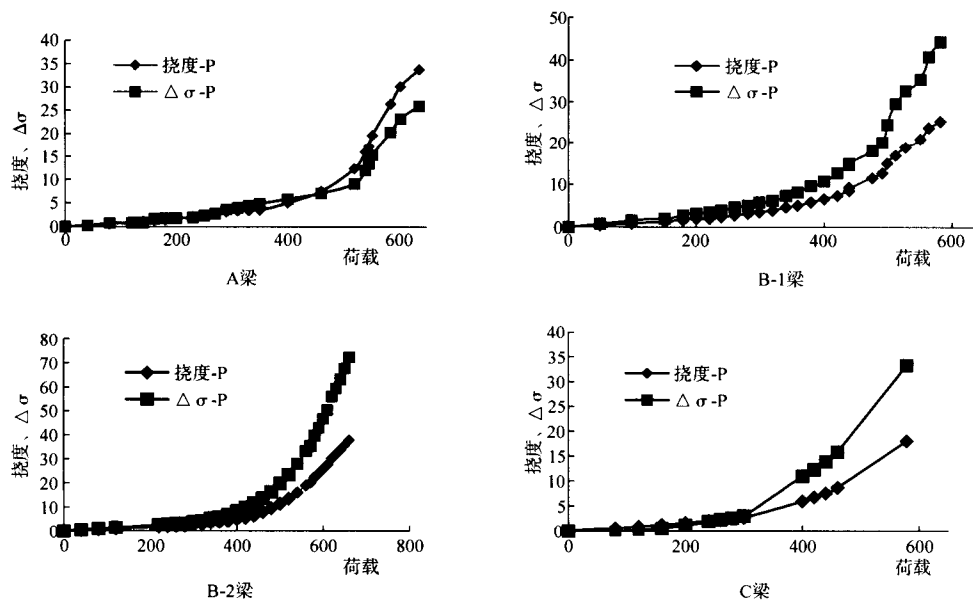


图 7 $\Delta\sigma$ 、挠度 - P 关系曲线图

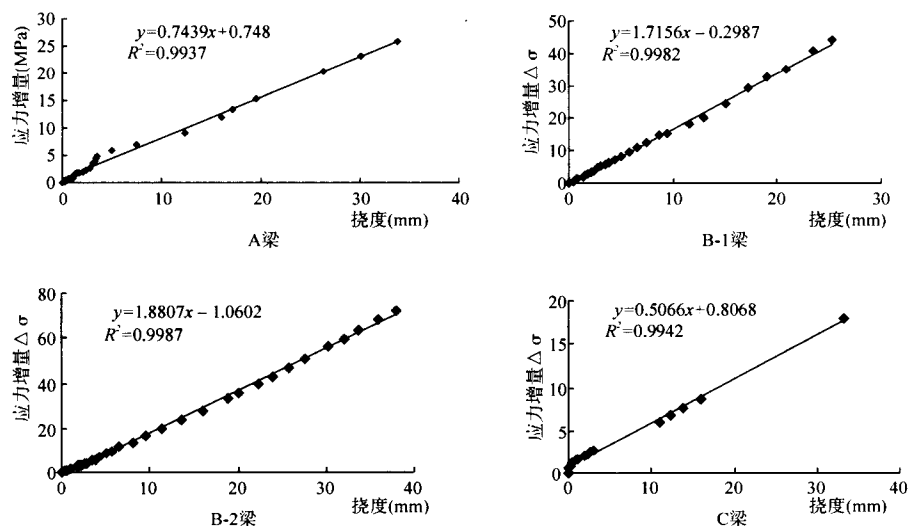


图 8 试验梁应力增量 - 挠度关系图

式 3-1、3-2、3-3 将体外预应力筋应力增量的计算转化为对其控制截面挠度的计算，而挠度计算可采用三折线刚度折减按弹性理论计算模式，即以中跨中、中支座开裂为转折点，将体外预应力三跨连续梁的挠度发展划分为三个阶段，在各个阶段采用不同的刚度折减系数，按弹性理论计算梁体控制截面挠度的理论模式。即对于开裂前的连续梁，其处于弹性工作受力阶段，考虑到截面有部分拉应力作用以及重复荷载的影响，可适当降低截面刚度取 $\alpha = 0.95$ ；对于开裂后的连续梁，采用“局部区段截面刚度折减系数按弹性的方法”来求解挠度（见图 9、10）。折减区段长度及折减系数与 PPR 值的对应关系为：第二阶段 $L_{中2} = aL_0$ 、第三阶段 $L_{中3} = bL_0$ 、 $L_{支3} = cL_0$ 。系数 a 、 b 、 c 及 α 随 PPR 值变化的计算公式为：

$$a = 0.319x^2 - 0.7595x + 0.5415 \quad R^2 = 0.9992 \quad (3-4)$$

$$b = -0.6451x^2 + 0.8305x - 0.0101 \quad R^2 = 0.9993 \quad (3-5)$$

$$c = 0.3333x^2 - 0.7833x + 0.6 \quad R^2 = 0.9998 \quad (3-6)$$

$$\alpha = 0.6714x^2 - 1.5748x + 1.3533 \quad R^2 = 0.999 \quad (3-7)$$

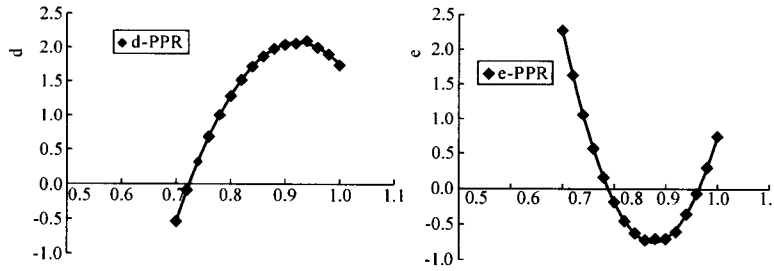


图 9 d、e-PPR 关系图

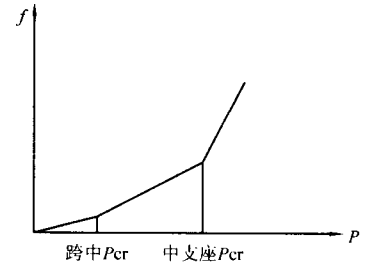


图 10 三折线模式图

由以上分析可以提出一种全新的分析方法，即三跨变截面连续梁的应力增量可采用三折线刚度弹性理论的计算模式。实际工程中，全预应力梁桥仅用到第一阶段，部分预应力则可应用到第二阶段。

4 应力增量非线性数值分析

由以上分析可知，求解体外预应力筋应力增量的正确方法是根据转向块或预应力筋约束点对应点混凝土的受荷载影响后的坐标，求得相邻约束点间的伸长量，累加得到预应力筋的总伸长，即可得到相应的应力增量。这一增量又将对结构产生新的预应力，每一级荷载增量将对预应力的应力增量进行迭代，使得这一应力增量导致的变形前后相差足够小时，才能进行下一步荷载增量的计算（如图 11 所示）。设在第 I 级荷载下，第 m 和 $m+1$ 个约束点的坐标分别为 (x_m^i, y_m^i) 、 (x_{m+1}^i, y_{m+1}^i) ；在第 $I+1$ 级荷载下，其坐标分别成为 $(x_{mm}^{i+1}, y_{mm}^{i+1})$ 、 $(x_{m+1}^{i+1}, y_{m+1}^{i+1})$ ；则可得第 I 级荷载下预应力筋长度为：

$$L_i = \sum_{m=1}^{n-1} \sqrt{(x_{m+1}^i - x_m^i)^2 + (y_{m+1}^i - y_m^i)^2} \quad (\text{设有 } n \text{ 个约束点}) \quad (4-1)$$

在第 $I+1$ 级荷载下预应力筋长度为：

$$L_{i+1} = \sum_{m=1}^{n-1} \sqrt{(x_{m+1}^{i+1} - x_m^{i+1})^2 + (y_{m+1}^{i+1} - y_m^{i+1})^2} \quad (4-2)$$

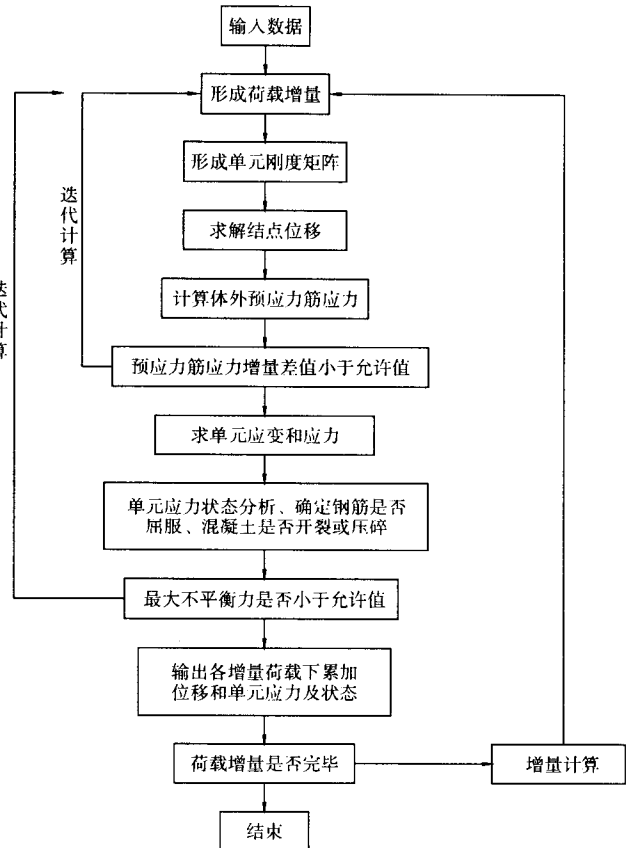


图 11 体外预应力应力增量迭代流程图

$$\text{则有应变增量} \quad \Delta \varepsilon^{i+1} = (L_{I+1} - L_I) / L_i \quad (4-3)$$

$$\text{应力增量为} \quad \Delta \sigma^{i+1} = E_p \Delta \varepsilon^{i+1} \quad (4-4)$$

$$\text{预应力筋在 } I+1 \text{ 级荷载下的实际应力为: } \sigma^{i+1} = \sigma^i + \Delta \sigma^{i+1} \quad (4-5)$$

根据实际应力重新求第 $I+1$ 级荷载时结构的内力和变形,以及相应的约束点坐标 $(x_{mm}^{i+1}, y_{mm}^{i+1}, x_{m+1}^{i+1}, y_{m+1}^{i+1})$, 相应的预应力筋长度为:

$$L'_{i+1} = \sum_{m=1}^{n-1} \sqrt{(x_{m+1}^{i+1} - x_m^{i+1})^2 + (y_{m+1}^{i+1} - y_m^{i+1})^2} \quad (4-6)$$

$$\text{相应的应变增量为} \quad \Delta \varepsilon'^{i+1} = (L'_{I+1} - L_I) / L_i \quad (4-7)$$

$$\text{应力增量为} \quad \Delta \sigma'^{i+1} = E_p \Delta \varepsilon'^{i+1} \quad (4-8)$$

$$\text{重新的预应力筋在 } I+1 \text{ 级荷载下的应力为: } \sigma'^{i+1} = \sigma^i + \Delta \sigma'^{i+1} \quad (4-9)$$

重复式 4-6 ~ 4-9, 当 $\sigma'^{i+1} - \sigma^{i+1} \rightarrow 0$ 时, 进入下一级 ($I+2$) 级荷载的计算, 否则重新进行第 $I+1$ 级荷载的计算。将上述理论编制成计算机程序, 并对试验梁应力增量进行计算, 所的计算结果与实测结果比值的平均值为 0.997, 标准差为 0.064。

5 结 论

(1) 体外预应力筋与梁体混凝土变形不协调, 不能根据体外预应力筋重心处的混凝土变形来计算体外预应力筋的应力增量, 而应通过各转向块 (锚固点) 间的距离计算体外预应力筋的变形, 从而得出体外预应力筋的应力增量。

(2) 试验表明, 体外预应力筋的应力增量与中跨中挠度变化近似成线性关系, 两者之间的比例与预应力筋的布置形式有关; 在最大弯矩截面设置转向块, 可有效地减小体外预应力筋与梁体的变形差距, 提高预应力筋的效率。

(3) 本文提出了三折线刚度折减按弹性理论计算体外预应力筋应力增量的方法, 该方法在国内外相关资料中未曾见到。得出了相关参数随 PPR 变化的计算公式, 与非线性理论相比, 该方法的计算精度大体与其接近, 但计算的工作量却大大减小, 与实际工程更为接近。

(4) 本文所提出的计算方法把三跨变截面连续梁预应力筋应力增量的复杂计算简化为对控制截面挠度的计算, 公式中梁体刚度的取值包含了混凝土强度、高跨比、配筋形式等因素对应力增量的影响。

参 考 文 献

- [1] 牛斌. 体外预应力混凝土梁极限状态分析[J]. 北京: 土木工程学报, 2000, 33(3).
- [2] 赵人达等. 体外预应力加固钢筋混凝土简支梁静载试验报告[R]. 成都: 西南交通大学, 1999. 1.
- [3] 黄侨. 公路钢筋混凝土简支梁桥的体外预应力加固技术[M]. 成都: 人民交通出版社, 1998.
- [4] 孙海等. 体外预应力简支梁受力性能研究与非线性分析[J]. 北京: 土木工程学报, 2000, 33(2): 25-29.
- [5] 王宗林等. 体外预应力简支梁正常使用阶段索应力增量分析[J]. 沈阳: 东北公路, 2000, 23(4): 67-70.