

体外预应力与 碳纤维加固旧桥设计方法

主编 马铁伟 曲肖龙



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

体外预应力与 碳纤维加固旧桥设计方法

主编 马铁伟 曲肖龙



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

体外预应力与碳纤维加固旧桥设计方法/马铁伟,曲肖龙主编.
—武汉:武汉大学出版社,2017.12

ISBN 978-7-307-19662-9

I. 体… II. ①马… ②曲… III. 桥—加固—结构设计
IV. U445.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 216927 号

责任编辑:李 晶

责任校对:邓 瑶

装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:8.5 字数:150千字 插页:2

版次:2017年12月第1版 2017年12月第1次印刷

ISBN 978-7-307-19662-9 定价:68.00元



版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

改革开放以来,随着国民经济的发展,公路基础设施建设突飞猛进,为了满足日益增长的交通需要,我国进行了大量的道路与桥梁等交通基础设施建设。经济的发展使重载交通成为普遍现象,对许多在役桥梁造成了不同程度的损伤。随着桥梁使用时间的增加,危旧桥梁的数量呈现不断增加的趋势,大量危旧桥梁的存在给人们带来了危险。据统计,仅吉林省境内就有大约 1000 座危旧桥梁,这些桥梁大多以梁式桥为主,年久失修,在不同程度上影响了道路的通行。现有旧桥基本上采用钢筋混凝土结构,而且混凝土强度较低。目前旧桥桥梁的加固方法主要有粘贴钢板法、粘贴碳纤维布、设置体外预应力钢束、设置体外预应力碳纤维束等。这些方法均在实际工程中得到不同程度的应用,但通常情况下,对一座桥只应用一种加固方法,这使加固后的效果不是很理想。若单纯采用预应力技术进行加固,则无法充分利用预应力钢筋的高强性能;若单纯采用粘贴碳纤维布的方法加固,对结构刚度的提高有限,影响加固后桥梁的正常使用。

使用预应力筋和碳纤维布同时进行加固,即在混凝土表面适当位置粘贴碳纤维布以协助混凝土受力,可以有效降低混凝土的主拉应力,同时将预应力筋布置在受拉区,以减小裂缝宽度,这样处理后能够较好地提高旧桥的刚度和承载力。旧桥加固后承载过程中,碳纤维布和体外预应力筋先后发挥作用,能更大程度地提高构件的承载力,减小挠度,提高桥梁的使用性能,可节省大量重建资金。

本书以体外预应力和碳纤维联合加固钢筋混凝土简支梁和连续梁为主要对象,围绕联合加固后简支梁和连续梁在竖向荷载作用下,对单梁的静力响应计算方法进行了详细的推导,同时对横向分布系数的求解进行了系统的概括和修正。基于研究成果和多年的实践工作,编写了本书。

本书由马铁伟、曲肖龙、叶增、董书奎和袁铁权共同编写完成,马铁伟、曲肖龙担任主编,第1、9章由马铁伟编写,第2章由曲肖龙编写,第3、7、8章由叶增编写,第4章由袁铁权编写,第5、6章由董书奎编写。本书在编写过程中得到了吉林建筑大学张云龙、钟春玲、王静老师的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,衷心希望广大同行批评指正。

编 者

2017年10月

目 录

1 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 体外预应力和碳纤维材料加固混凝土梁研究及应用现状	(3)
1.3 现有研究中存在的问题	(8)
1.4 主要研究内容	(9)
2 联合加固简支梁试验研究	(10)
2.1 试验梁设计	(10)
2.2 加载及测试设备	(12)
2.3 测试内容及方法	(14)
2.4 静载试验结果分析	(15)
2.5 本章小结	(20)
3 联合加固连续梁试验方法	(21)
3.1 试验目的及内容	(21)
3.2 试验设计	(22)
3.3 试验过程及现象	(30)
3.4 试验结果分析	(32)
3.5 本章小结	(48)
4 考虑剪切滑移效应的碳纤维加固简支梁(板)桥的横向分布系数	(50)
4.1 基本假定	(50)
4.2 加固后形成的复合梁的计算公式推导	(51)
4.3 理论公式的验证	(56)
4.4 粘贴碳纤维布后桥梁的空间受力分析	(57)
4.5 本章小结	(64)

5 复合梁抗弯全过程分析	(65)
5.1 基本假定.....	(66)
5.2 粘贴碳纤维后复合梁有限元解的推导.....	(66)
5.3 理论与试验结果对比分析.....	(70)
5.4 本章小结.....	(72)
6 体外预应力与碳纤维材料加固后复合梁的计算理论	(73)
6.1 层合梁单元刚度方程推导.....	(73)
6.2 计算结果的试验验证.....	(77)
6.3 本章小结.....	(77)
7 联合加固连续梁数值分析	(78)
7.1 有限元数值分析概述.....	(78)
7.2 有限元分析与试验结果对比.....	(85)
7.3 本章小结.....	(91)
8 联合加固连续梁理论研究	(92)
8.1 体外预应力加固混凝土连续梁理论研究.....	(92)
8.2 碳纤维材料加固普通混凝土连续梁理论研究	(100)
8.3 联合加固混凝土连续梁后静力响应的理论推导	(106)
8.4 举实例验证公式推导的合理性	(112)
8.5 本章小结	(118)
9 结论与不足	(119)
参考文献	(122)

1 绪 论

近年来,随着体外预应力技术在梁桥加固、旧桥维修等桥梁工程领域中的广泛应用,它已成为既有混凝土结构最有效的加固方式之一,主要应用于体外预应力混凝土连续梁。

由于体外钢绞线存在防护困难,对锚具性能有较高要求以及自身强度很难充分发挥等缺陷,体外预应力技术的发展受到一定程度的限制。1980 年以后,随着体外预应力技术的不断提高,钢绞线的防护和锚具性能等有了较大的改善。然而,在混凝土结构使用过程中,随着使用时间的增加,混凝土结构性能逐渐退化,承载力逐渐下降,为保证其安全,在体外预应力钢绞线的加固基础上,还采用了碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)粘贴加固。在许多混凝土结构中,通常将这两种加固形式相结合。

1.1 引 言

1.1.1 体外预应力加固混凝土结构的特点

体外预应力加固混凝土结构源于预应力钢索加固桥梁以及斜拉桥所采用的拉索构造。但由于其构造的防护和防腐等问题在当时并没有得到很好的解决,导致在桥梁工程中发展滞后。20 世纪 80 年代后,随着防腐技术得到改善,很多国家采用体外预应力技术加固和建造桥梁。体外预应力混凝土结构可以在不影响正常使用的前提下,调整体外索应力,甚至可以采用更换钢绞线的方式延长结构的使用周期。另外,体外预应力钢绞线布置灵活,可应用到多种形式的桥梁结构中。在加固梁桥时,体外预应力可提高结构承载力,改善梁体线形。其主要优缺点如下所示。

优点:

- ① 预应力钢绞线布置简单,简化“后张法”操作,无制孔、压浆等工序,使用期内容易检查更换钢绞线;
- ② 应力损失可以调整;

③ 体外预应力钢绞线布置在结构截面外,应力变化分布在预应力钢绞线的全长上,应力变化幅度小,起到桥梁结构抗疲劳控制的作用。

缺点:

- ① 钢绞线要求严密的防腐措施,且容易损坏;
- ② 锚具必须可靠安全,耐久性好;
- ③ 不能充分发挥钢绞线的抗拉能力,梁的破坏强度较低。

综上所述,在桥梁领域,体外预应力加固混凝土梁,不仅可以采取整体梁桥加固的方法,而且可以局部加固梁桥,具有良好的加固效果和应用前景。

1.1.2 碳纤维材料加固混凝土结构的特点

粘贴碳纤维布是碳纤维材料加固的方式之一,也是提高混凝土梁承载能力很有效的方法。而且,对原结构不产生损伤,在碳纤维树脂胶的粘贴下,碳纤维布和混凝土很好地咬合在一起,有效地封闭了混凝土裂缝,提高了混凝土结构的整体刚度。因此,碳纤维材料加固混凝土结构的优势可以简要概括为:

- ① 碳纤维布的厚度小,材料轻,加固后基本不增加原有结构的自重和构件的原始尺寸;
- ② 强度高,能够明显提高既有混凝土结构的承载能力和延性,改善受力性能;
- ③ 耐久性和抗腐蚀性能良好,可应用于跨海的桥梁工程等腐蚀性的环境;
- ④ 抗疲劳能力强,在循环荷载下再进行静载强度的挠度试验时,与未经历循环荷载的结构相比,其强度没有明显降低;
- ⑤ 施工快速、方便,不需大型机具,占用场地小;
- ⑥ 在实际使用过程中具有较强的适应性,适用面广。

总之,碳纤维材料加固混凝土结构,在不利环境下,较其他加固方法更显示出其优越性。随着碳纤维材料成本的降低,试验制造技术不断完善,在未来桥梁工程的加固中,碳纤维材料的加固将得到更为广泛的应用。

1.1.3 研究的意义和目的

国民经济的进一步发展对房屋、交通等土木工程提出了更高的要求。我国在 20 世纪 90 年代修建了大量的房屋和桥梁以适应国民经济的发展。随着人们生活水平不断提高、房屋标准不断提升以及交通荷载不断增加,在已有的

土木结构中出现了大量的危旧梁桥,由于设计、施工、使用阶段各种因素的影响对其中一部分梁桥产生了一定程度的损害,降低了其承载能力;另一部分梁桥为了满足现有交通及建筑要求,需要提高其荷载等级。因此,相当一部分梁桥结构均需要进行适当的加固,以提高现有的承载能力。单就梁桥而言,我国有大量的危旧桥亟待加固,仅吉林省境内就有 1000 多座危旧桥。这些梁桥大多以梁式桥为主,年久失修,存在不同程度的安全隐患,影响了道路的通行能力。目前,旧桥梁的加固方法主要有粘贴钢板法、预应力加固法、增加支点加固法等,虽然上述方法取得了较好的社会效益,但也暴露了自重大、对结构使用功能及美观造成影响、施工复杂等问题。随着加固技术的不断更新,其为工程加固提出了新的思路,利用碳纤维材料和体外预应力加固方式结合的形式对旧有梁桥进行加固补强,是一种很有效的方法。碳纤维材料具有绝佳的耐久性,体外预应力连续梁也广泛应用在桥梁工程中,它们的结合,能够充分利用材料性能的特点,越来越引起科研人员和实际工程技术人员的广泛重视。

根据梁桥的不同现状,通过试验研究,采用体外预应力以及从混凝土表面粘贴碳纤维布对现有连续梁进行加固,可以有效地改善连续梁负弯矩区的裂缝和抗弯能力,从而提高梁桥的使用性能与荷载等级,可节省大量重建资金,有利于环境保护和可持续发展,更有利于推动梁桥加固事业的健康发展,具有巨大的市场潜力、经济效益和重要的社会意义。

1.2 体外预应力和碳纤维材料加固混凝土梁研究及应用现状

1.2.1 体外预应力加固混凝土梁研究及应用现状

1. 国外的研究及应用现状

(1) 国外有关体外预应力加固混凝土梁的研究成果。

Mohamed H Harajli(1993)进行了 16 片试验梁的疲劳分析,在普通混凝土梁上加循环荷载,直至破坏;然后在施加体外预应力梁上单调加载,直至破坏。试验对比结果表明:施加体外预应力可以增加梁的抗弯强度,不降低梁的延性,有效地控制裂缝,且变形较小,改善梁在使用荷载下的挠度,增加疲劳寿命等,是一种有效的加固技术。

Kiang-Hwee Tan 和 Chee-Khoon Ng(1997)通过试验分析 T 形截面的体外预应力混凝土梁,进一步研究锚块和体外钢绞线锚固的布置(包括面积、有效张拉控制力和偏心距)对体外预应力梁的变形性能的影响,进一步验证 Naaman 所提出的黏结折减系数理论的可行性。

Gonzalo Ramos 和 Angel C Aparicio(1995)用有限元数值分析模拟体外预应力混凝土梁桥,可分析计算简支、连续、整体式的体外预应力加固混凝土梁桥,并且在任意荷载水平下,得出钢绞线所承受的张拉应力控制值。

Alkhairi 和 Naaman(1993)采用了一种以弯曲曲率为研究的分析程序,主要分析无黏结体外预应力加固梁和体外预应力加固梁,考虑偏心距变化以及材料的非线性的影响,但并没有考虑混凝土与扩大端的摩擦影响。

P Srinivasa Rao 和 George Mathew(1996)研究出一种全面分析预测体外预应力加固混凝土梁荷载全过程的作用效果,考虑材料的非线性、体外钢绞线偏心距的变化、构件产生的摩擦等因素。

KC El-Habr(1988)利用有限元数值分析,推测出一种由预制元件组成的体外预应力梁的弯矩-挠度关系曲线的运算方法。主要研究确定极限状态,即混凝土的开裂、预应力钢绞线的屈服和极限状态。考虑材料的非线性,对体外预应力加固梁进行变形性能分析。

(2) 国外有关体外预应力加固混凝土梁应用现状。

体外预应力技术加固混凝土梁主要应用于桥梁工程,世界上第一座体外预应力桥梁——Saale 桥是 1928 年德国学者 F Dischinger 提出并应用的;1936 年,Saxe 设计建成了西德的 Aue 桥;1939 年又应用到 Warthe 桥上,但因第二次世界大战而终止修建。战争结束后,体外预应力混凝土梁桥的研究工作仍在持续。法国、美国先后修建了体外预应力梁桥,但在 20 世纪 40—60 年代由于体外索防腐问题,主要还是以体内预应力筋结构为主,虽然法国、瑞士和奥地利分别建造了 Villeneuve Saint Georges 桥、Aarwangen 桥和 Wangauer Ache 桥,但体外预应力结构应用却相对很少,直至 70 年代以后,体外预应力和斜拉桥施工技术才进一步发展。此后,几乎在世界各地都有体外预应力梁桥的建造,如美国的 Long Key 桥、加拿大建成的特朗梅尔桥、瑞典的 Massongex 高架桥等。目前,国外体外预应力技术可以应用于各种桥梁工程,与传统的桥梁施工技术相结合,提出了许多新颖的桥梁施工方法,为提高工程质量、经济效益提供了很多参考。

2. 国内的研究及应用现状

(1) 国内有关体外预应力加固混凝土梁的研究成果。

铁道部科学研究院牛斌等(1992)通过 10 片体外预应力简支梁的试验,研究了体外预应力梁受弯条件下基于弯曲曲率关系的全过程非线性分析计算方法和数值分析。计算结果表明,此计算方法有效地反映了受弯构件的规律,为以后的研究提供了依据。

王彤等(2000)通过对体外预应力简支梁截面变形参数沿梁长变化的研究,基于能量变分原理,求解在荷载作用下的体外预应力增量计算方法,确定了截面变形规律,推导出控制截面内力平衡方程及求解方法。

同济大学的项海帆、徐栋等(1999)提出了一种能够对各种预应力混凝土结构进行全过程力学性能分析的计算模型,对体外预应力加固后的结果进行了参数研究,对有无黏结的钢绞线力学性能进行了探讨。

张树仁、黄乔等(1997)试验分析了 12 片试验梁,通过对比静载试验,验证了体外预应力加固体系在正常使用阶段的应力、挠度以及裂缝的计算方法的可靠性,并建立了极限强度计算方法。

单成林(1995)基于无黏结预应力试件原理,提出了体外预应力加固混凝土结构的预应力钢绞线应力增量计算公式,以及截面应力分布的计算方法。

叶见曙、杜世生等(1993)提出体外预应力加固混凝土简支梁抗弯极限强度计算方法,对预应力钢绞线极限应力以及计算结构的极限强度都有进一步的研究。

(2) 国内有关体外预应力加固混凝土梁的应用现状。

20 世纪 80 年代后期我国对体外预应力混凝土梁的应用才渐渐起步,如福建省福州市洪塘大桥,其主跨 120m,体外索采用弗氏锚和镦头锚两种锚具,它是我国首次采用体外预应力技术建造的桥梁;1990 年建成的丹阳云阳大桥,其主跨 70m,属于杆拱桥,吊杆和系杆均采用体外预应力筋;1995 年建成的汕头海湾大桥,其采用单股带 HDPE 防腐防护套的镀锌钢绞线组成的钢束作为体外预应力筋。采用体外预应力加固梁桥的技术应用也很广泛,早在 1983 年上海市公路管理局采用体外预应力技术对钢筋混凝土 T 形梁桥进行加固;福建省南平电机厂专用桥也是通过采用横向并索的方式施加预应力,斜拉杆斜向贴于腹板两侧,进行体外加固;吉林省青山桥的加固是在主梁底面和侧面开裂处,采用体外钢拉杆施加预应力的方式进行体外预应力技术应用。

与国外相比,国内体外预应力加固混凝土梁的应用较晚,在理论和工程实

践上有一定差距,目前国内有相当多的旧桥和其他结构,随着桥梁工程的迅速发展,体外预应力结构形式的应用范围逐渐扩展,前景也相当广阔。

1.2.2 碳纤维材料加固混凝土梁研究及应用现状

1. 国外的研究及应用现状

(1) 国外有关碳纤维材料加固混凝土梁研究成果。

粘贴碳纤维布加固混凝土梁是一种以高性能胶黏剂将碳纤维布粘贴于待加固的梁表面,两者共同工作,发挥碳纤维布抗拉强度高的特点,提高梁的承载能力。从1982年起,国外研究机构开始对碳纤维材料应用于建筑结构加固方向进行了大量研究。最早进行粘贴碳纤维布加固梁的研究是瑞士 EMPA 实验室,德国 IBMB 研究院采用不同的碳纤维材料加固混凝土梁,对梁的弯曲性能进行研究。Wight R G 等(2001)通过试验得出碳纤维材料加固梁开裂荷载远高于普通加固梁,提高约 13.3%,同时,屈服荷载和极限荷载分别提高 40%、45%,裂缝也明显减小,且分布均匀。

U Meier 等(1995)对混凝土梁进行碳纤维布的粘贴,并研究抗弯性能。研究表明:通过碳纤维布的加固,可有效提高混凝土梁的受力性能,与未加固梁相比,加固梁屈服荷载和极限荷载有所改善,开裂荷载变化不明显,这说明碳纤维布加固梁在屈服后才发挥作用。每增加一层碳纤维布,碳纤维布就会分布不均匀,效率便会降低,所以强度计算过程中需要引入折减系数,以保证设计结果的安全性但平截面假定对碳纤维布加固梁仍适用。

Nanni 等(1993)对碳纤维加固混凝土梁的抗弯性能进行研究,对外贴碳纤维板加固梁进行参数分析,影响参数包括碳纤维类型、粘贴胶、碳纤维厚度等。

Shahawy(1999)通过研究分析得出碳纤维布粘贴层数、混凝土强度等级以及加固方式对混凝土梁力学性能影响较大,但只给出了定性研究,并没有进行具体的因素分析。他还对疲劳性能进行了分析,指出碳纤维布加固梁有较好的抗疲劳性。

Tom Norris、Harold Saadatmanesh 和 Mohammed R Ehasanit(1997)进行了 9 片试验梁静载试验,首先预加荷载直至开裂,然后再加载破坏。试验表明:梁的破坏方式与碳纤维布粘贴方向有关,当碳纤维布粘贴方向和裂缝方向不相交时,梁的刚度和强度增加不大,但延性较好。

Wight R G 等(2001)通过理论和试验分析,采用碳纤维布加固混凝土连

续梁的弯矩调幅系数和普通梁进行对比。试验表明:普通梁一般正截面破坏时,钢筋先于混凝土屈服,而钢筋良好的延性保证了较好的内力重分布;加固梁却是在混凝土压破前碳纤维布已经发生剥离。

(2) 国外有关碳纤维加固混凝土梁应用现状。

碳纤维复合材料应用在混凝土梁的加固始于 20 世纪 70—80 年代的德国和美国。1991 年 7 月首次用于桥梁工程,对瑞士伊巴赫桥进行碳纤维板代替钢板加固。由于碳纤维材料强度高,耐腐蚀性好,施工方便,在工程领域应用逐渐受到重视。20 世纪 90 年代初,美国建立了混凝土协会(ACI),并于 1993 年在加拿大温哥华召开了首届碳纤维增强钢筋混凝土结构的会议。同时,将碳纤维材料应用于桥面板补强加固中;日本的众多研究机构和材料厂商也相继进行了碳纤维材料加固混凝土梁的研究,并编制了各种设计手册和规范指南,在实际桥梁工程中处于国际领先地位;在韩国,建筑结构方面也应用了碳纤维布加固修补构件,并得到认可;在欧洲,很多桥梁都采取碳纤维材料加固技术,使这项技术已近成熟,得到了广泛的推广,并形成一套成熟的施工准则。

总之,发达国家利用碳纤维进行混凝土梁的加固做了大量应用,制定了相关标准,使碳纤维加固技术走向产业化。

2. 国内的研究及应用现状

(1) 国内有关碳纤维加固混凝土梁研究成果。

我国科研人员对碳纤维布加固混凝土梁的受弯性能进行了大量试验研究,主要对挠度、承载力、裂缝等方面进行了分析。胡孔国(2000)、贺拴海(2005)等对碳纤维片材加固混凝土梁板受力性能进行了试验研究,对梁的裂缝形状、开展规律、宽度等进行了分析。试验表明:加固前后的开裂荷载基本相同,但随着荷载增加,碳纤维材料的应力水平增大,对裂缝抑制明显。

吕志涛、吴刚等(2000)在碳纤维加固混凝土梁试验基础上,对抗弯加固后的破坏状态、受弯承载力、裂缝分布、刚度效果等进行了研究,对各种参数的加固梁效果影响进行了分析。

吕丽霞、蔡江勇等(2009)通过对碳纤维布加固钢筋混凝土梁挠度计算进行分析,推导出加固梁开裂后到屈服前短期荷载作用下的挠度理论公式,并通过试验对比来验证公式的可行性。

刘沐宇(2004)、李松辉等(2005)对钢筋混凝土二次受力梁和预裂梁粘贴碳纤维片材抗弯加固进行了研究。试验表明:预裂梁加固后,抗弯承载力与二次受力梁加固后的抗弯承载力差别很小,破坏模式相同。

谢剑、赵彤等(2000)对9片碳纤维布加固补强的混凝土梁进行试验研究,分析碳纤维布对梁的影响。试验表明:极限荷载增长相对明显。

叶列平等(2005)通过碳纤维布加固混凝土梁构件受弯性能分析,对加固梁受弯破坏、极限状态和设计理论要求都做了研究,提出了较实用的计算理论。

(2) 国内有关碳纤维材料加固混凝土梁的应用现状。

碳纤维材料加固修补混凝土梁的应用在我国起步较晚,但发展迅速。自20世纪90年代以来,我国提出了《碳纤维片材加固修补结构技术规程》(CECS146—2003),召开了有关碳纤维材料加固技术学术会议,使国内桥梁领域应用碳纤维加固混凝土梁的加固技术有了明显发展,其技术不断改善。采用进口的碳纤维材料在上海、北京等地区完成了粘贴碳纤维的加固工程项目。天津于岭大桥墩柱的加固、徐州某铁路大桥的补强修复、南京机场路高架桥梁板的修复、卢沟新桥的加固等项目对碳纤维加固做了实践。随后,一些高校也开始进行试验研究,使技术进一步深入,为加固技术得到更广泛的应用打下了坚实的基础。

1.3 现有研究中存在的问题

结合国内外学者对于体外预应力和碳纤维材料联合加固混凝土梁的研究和应用,参考大量相关文献,可以看出将这两种加固技术同时应用到桥梁工程中的实际工程甚少,而且有关这方面的研究多数集中在碳纤维材料加固简支梁的力学研究,对于联合加固的连续梁力学性能研究开展的相对较少,因此实际工程以及试验研究方面需要解决的主要问题如下。

(1) 目前对联合加固的混凝土连续梁的方法仍处于试验阶段,在实际加固工程中施工工艺有待进一步研究。为了提高施工工艺,必须以大量的试验研究做理论基础。

(2) 张拉体外预应力钢绞线的混凝土连续梁,在荷载作用下,其荷载-挠度曲线、荷载-应变曲线以及应变值沿梁高截面分布状态和挠度沿梁长方向的分布状态的研究需要探讨。

(3) 需进一步分析联合加固混凝土连续梁在使用过程中的各部分挠度沿梁长方向的分布规律,完善挠度和应力的准确计算理论。

(4) 根据目前国内流行的梁桥设计软件均采用杆系有限元进行核心程序的编制,为了便于和国内的设计软件有效对接,应进一步研究开展加固后的混

凝土梁,能够考虑交界面处的黏结滑移特性的复合梁杆系微分方程,便于研究成果得到广泛应用。

综上所述,开展碳纤维布加固体外预应力混凝土连续梁力学变形性能的研究工作,填补体外预应力和碳纤维联合加固梁研究工作的空白,对实际工程有实际意义。

1.4 主要研究内容

通过体外预应力和高性能的高分子碳纤维材料加固旧有或新建的梁桥,在分析过程中,充分考虑体外预应力和粘贴碳纤维布两种加固方式对应的结构力学性能。以试验研究、数值分析以及理论推导相结合的方式进行,主要创新点和研究内容如下,为解决现有研究中存在的问题提供设计和应用的参考。

(1)为了考查联合加固混凝土连续梁的变形性能,制作了三组试验梁:第一组为普通体外预应力梁,第二组为粘贴碳纤维布的普通梁,第三组为两者联合加固梁。对各试验梁进行力学性能分析,采用两跨等跨连续梁方式,在连续梁每跨加竖向荷载,两个荷载点间距为2m,采集荷载、挠度、应变参数,观察试验梁的变形状态、裂缝位置,对碳纤维布受力变化情况进行分析,在此基础上分析联合加固梁的变形性能,并通过对比分析加固梁的力学效果,形成各数据曲线,为理论推导做可靠性研究。

(2)利用有限元模拟软件 ANSYS 分析体外预应力加固梁和碳纤维布加固梁以及联合加固梁在竖向荷载作用下的受力性能,与试验结果进行对比,证明有限元分析方法的可靠性。

(3)通过建立合理的力学分析模型,分析各组试验梁的结构受力性能,建立竖向荷载作用下复合材料连续梁的解析表达式,分别研究体外预应力加固梁、碳纤维加固梁以及两者联合加固梁的使用性能和承载能力。同时,通过黏结滑移接触理论,以微分方程为基础,计算二次超静定试验梁力法方程中的常系数和载变位,得出正常使用阶段的各部分荷载-挠度曲线图、荷载-应变曲线图以及挠度沿梁长方向的分布规律,给出挠度和应力的准确计算理论。将理论分析结果与试验和数值分析结果进行对比研究,修正理论计算模型。根据修正后的理论公式,运用计算机语言编制应用程序,结合试验研究结果,给出较为完整的加固计算理论,以便于项目研究成果的具体应用和推广,给设计人员提供一定的参考、建议。

2 联合加固简支梁试验研究

采用 CFRP 加固既有混凝土结构技术是将碳纤维布粘贴在混凝土梁受拉区边缘用以提高混凝土梁的抗弯承载能力,以达到改善结构的刚度、控制裂缝开展的目的。但单独采用碳纤维加固既有混凝土结构对承载能力的提高有一定的限度。复合梁中的碳纤维主要是通过碳纤维与混凝土交界面处的剪力来产生加固作用,交界面传递剪力的能力是一定的,碳纤维的层数增多将造成过早产生界面的剥离破坏使碳纤维的材料强度得不到充分的利用。采用体外预应力与碳纤维联合加固旧桥能够很好地解决这一缺陷,施加体外预应力后再粘贴碳纤维布形成了新的受力体系,该体系的抗弯性能和受力机理还有待于进一步系统研究。

目前桥梁加固的设计理论和计算方法主要是按结构设计原理的基本思想,通过求解加固后结构的承载能力来进行设计的。因此,在试验研究的基础上,研究体外预应力与碳纤维联合加固混凝土受弯构件而形成的新结构的受力特性,为结构的加固设计提供切实可行的计算方法势在必行。目前国内外学者对旧桥加固的试验研究大多集中在正常配筋梁方面。我国在 20 世纪 80 年代之前修建的桥梁中存在相当多的低配筋率的梁,目前对这些桥梁的加固研究较少。基于上述情况,通过室内试验来研究采用张拉体外预应力与粘贴碳纤维联合加固低配筋混凝土梁的抗弯性能。

2.1 试验梁设计

2.1.1 试验梁尺寸设计

本书根据现有的试验成果,设计了 2 组钢筋混凝土简支梁作为基本的对比梁,4 组单独采用粘贴碳纤维布方式加固的钢筋混凝土简支梁,4 组单独采用体外预应力方式加固的钢筋混凝土简支梁和 4 组采用体外预应力和粘贴碳纤维布联合加固的钢筋混凝土简支梁,每组试验梁制作 3 片,取 3 片试验梁的平均值作为最终的试验结果。试验梁采用的主要材料为 C20 混凝土、C40 混